

経済産業省 御中

令和 5 年度補正宇宙開発利用推進研究開発  
(月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理))  
報告書

---

**MRI** 三菱総合研究所

**JSF** 一般財団法人  
日本宇宙フォーラム

2025 年 3 月





---

## 目次

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 1. はじめに .....                          | 1   |
| 1.1 調査の目的.....                         | 1   |
| 1.2 昨年度の調査結果の概要.....                   | 1   |
| 1.3 今年度の調査結果の概要.....                   | 2   |
| 1.3.1 技術課題整理.....                      | 2   |
| 1.3.2 有識者委員会・WG .....                  | 2   |
| 1.3.3 国内外動向調査 .....                    | 2   |
| 1.4 調査の実施体制.....                       | 2   |
| 2. 月面エネルギー関連アーキテクチャ整理(技術課題整理) .....    | 4   |
| 2.1 水素パートに関する技術課題整理 .....              | 4   |
| 2.1.1 水素パートの検討の要点.....                 | 4   |
| 2.1.2 月面での推薬プラントの実現に向けた実証候補項目の検討 ..... | 5   |
| 2.1.3 月面での輸送に係る検討.....                 | 39  |
| 2.1.4 熱マネジメントに係る検討 .....               | 47  |
| 2.2 電力パートに関する技術課題整理.....               | 49  |
| 2.2.1 電力パートの検討の要点 .....                | 49  |
| 2.2.2 月面電力供給全体システムに係る検討.....           | 52  |
| 2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システムに係る検討 .....        | 86  |
| 2.2.4 月面設置発電システムに係る検討 .....            | 161 |
| 2.2.5 月面上送電システムに係る検討 .....             | 182 |
| 2.2.6 その他.....                         | 238 |
| 2.2.7 電力における実証候補項目の整理 .....            | 253 |
| 3. 有識者委員会・WG 運営 .....                  | 255 |
| 3.1 有識者委員会 .....                       | 255 |
| 3.1.1 構成員.....                         | 255 |
| 3.1.2 開催履歴.....                        | 256 |
| 3.2 WG.....                            | 257 |
| 3.2.1 構成員 .....                        | 257 |
| 3.2.2 開催履歴.....                        | 258 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 4. 国内外動向調査.....                                         | 259 |
| 4.1 海外動向調査.....                                         | 259 |
| 4.1.1 欧州.....                                           | 259 |
| 4.1.2 中国 .....                                          | 267 |
| 4.1.3 中東 .....                                          | 279 |
| 4.1.4 オーストラリア.....                                      | 281 |
| 4.2 国内動向調査.....                                         | 294 |
| 4.2.1 地上技術の転用可能性 .....                                  | 294 |
| 4.2.2 国内企業ヒアリング .....                                   | 304 |
| 4.3 特定テーマに関する調査 .....                                   | 305 |
| 4.3.1 宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査.....                      | 305 |
| 4.3.2 無線エネルギー伝送技術(WPT)に関する調査 .....                      | 324 |
| 4.3.3 宇宙太陽光発電システム(SSPS)の経済性評価.....                      | 333 |
| 4.4 ベンチマーク調査 .....                                      | 390 |
| 4.4.1 ISECG 国際宇宙探査ロードマップの概要 .....                       | 390 |
| 4.4.2 日本・米国・欧州における研究開発状況の比較 .....                       | 393 |
| 4.4.3 評価軸の設定による具体的な評価手法.....                            | 397 |
| 4.4.4 技術評価結果の分析 .....                                   | 400 |
| 4.5 海外現地調査.....                                         | 404 |
| 4.5.1 8th Global Moon Village Workshop & Symposium..... | 404 |
| 4.5.2 Space For Inspiration.....                        | 412 |
| 5. おわりに .....                                           | 426 |

---

## 図 目次

---

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 図 1-1 実施体制図.....                                        | 3  |
| 図 2-1 純水処理・電気分解・水素・酸素液化に係る低軌道実証パッケージ案 .....             | 14 |
| 図 2-2 水素・酸素漏えい監視技術に係る低軌道実証パッケージ案 .....                  | 17 |
| 図 2-3 想定される月面への輸送コストの変遷.....                            | 20 |
| 図 2-4 フェーズ 0 における月面のイメージ .....                          | 22 |
| 図 2-5 フェーズ 0 における各ゾーンでの活動イメージ.....                      | 22 |
| 図 2-6 フェーズ 1 における月面のイメージ.....                           | 25 |
| 図 2-7 フェーズ 1 における各ゾーンでの活動イメージ .....                     | 25 |
| 図 2-8 フェーズ 2 における月面のイメージ .....                          | 29 |
| 図 2-9 フェーズ 2 における各ゾーンでの活動イメージ.....                      | 29 |
| 図 2-10 フェーズ 3 における月面のイメージ .....                         | 34 |
| 図 2-11 フェーズ 3 における各ゾーンでの活動イメージ .....                    | 34 |
| 図 2-12 月面における輸送システムの全体像イメージ .....                       | 39 |
| 図 2-13 AGV におけるマルチパーパス機能イメージ .....                      | 41 |
| 図 2-14 AGV の運用イメージ .....                                | 41 |
| 図 2-15 自走式ロープウェイの検討事例.....                              | 42 |
| 図 2-16 自走式ロープウェイの運用イメージ .....                           | 42 |
| 図 2-17 フェーズ 0～1 における実証イメージ .....                        | 44 |
| 図 2-18 フェーズ 2 における実証イメージ .....                          | 45 |
| 図 2-19 フェーズ 3 における実証イメージ .....                          | 45 |
| 図 2-20 資源ゾーンでの必要電力とロスを考慮した送電量の関係図 .....                 | 47 |
| 図 2-21 熱抽出プロセスにおける電力ロス排熱利用による合理化検討結果 .....              | 48 |
| 図 2-22 電力パートの実施体制 .....                                 | 50 |
| 図 2-23 月面での電力供給システム機能ブロック図 .....                        | 51 |
| 図 2-24 電力供給全体システム .....                                 | 52 |
| 図 2-25 開発フェーズの概要と必要電力.....                              | 55 |
| 図 2-26 フェーズ0以前（後半）（2028 年から 2029 年 月面調査及び実証）.....       | 57 |
| 図 2-27 フェーズ 0（2030 年頃 本格給電実証） .....                     | 57 |
| 図 2-28 フェーズ 1（2030 年から 2035 年 本格給電、複数方式開始） .....        | 58 |
| 図 2-29 フェーズ 2（2035 年から 2040 年 大電力化、有人常駐対応）.....         | 59 |
| 図 2-30 フェーズ 3（2040 年から 2045 年 移動体給電）.....               | 59 |
| 図 2-31 電力システム機能系統図構成要素のマーク（電力システム側設備） .....             | 60 |
| 図 2-32 電力システム機能系統図構成要素のマーク（水素製造プラント、居住区、観測等設備） .....    | 60 |
| 図 2-33 電力システム機能系統図構成要素のマーク（送電方式）.....                   | 60 |
| 図 2-34 フェーズ 0 以前（後半）（2028 年～2030 年頃まで）の電力システム機能系統図 .... | 62 |
| 図 2-35 フェーズ 0（2030 年頃を想定）の電力システム機能系統図 .....             | 63 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 図 2-36 フェーズ 1(2030 年から 2035 年頃を想定)の電力システム機能系統図 .....                           | 64  |
| 図 2-37 フェーズ 2(2035 年から 2040 年頃を想定)の電力システム機能系統図 .....                           | 65  |
| 図 2-38 フェーズ 3(2040 年から 2045 年頃を想定)の電力システム機能系統図 .....                           | 66  |
| 図 2-39 実証候補項目対応表 .....                                                         | 70  |
| 図 2-40 電力供給システムの基本構成及び具体的な候補地点における拠点レイアウトのイメージ<br>.....                        | 74  |
| 図 2-41 月面実証フェーズ3:2040 年前後に目指すべき電力システム .....                                    | 75  |
| 図 2-42 遠距離送電の質量効率分析結果 .....                                                    | 76  |
| 図 2-43 直流パワーハブの概要 .....                                                        | 76  |
| 図 2-44 通信断や DC/DC コンバータの離脱・合流時の DC バス電圧挙動 .....                                | 77  |
| 図 2-45 月面グリッド構成案(フェーズ 0 以前) .....                                              | 80  |
| 図 2-46 月面グリッド構成案(月面実証フェーズ 0) .....                                             | 81  |
| 図 2-47 月面グリッド構成案(月面実証フェーズ 1) .....                                             | 81  |
| 図 2-48 月面グリッド構成案(月面実証フェーズ 2) .....                                             | 82  |
| 図 2-49 月周回軌道からの太陽発電衛星システム .....                                                | 86  |
| 図 2-50 月軌道発電衛星システム機能ブロック図 .....                                                | 87  |
| 図 2-51 月用 SSPS の主要課題 .....                                                     | 88  |
| 図 2-52 月用 SSPS のための技術レベルの比較 .....                                              | 88  |
| 図 2-53 軌道高度と周期の関係 .....                                                        | 90  |
| 図 2-54 遠月面高度 1,000km の場合の軌道 .....                                              | 91  |
| 図 2-55 遠月面高度 1000km の場合の距離と仰角の関係 .....                                         | 91  |
| 図 2-56 ビーム掃引角度と機体数 .....                                                       | 92  |
| 図 2-57 シャクルトンクレーターとレクテナの配置 .....                                               | 93  |
| 図 2-58 シャクルトン底面および斜面 .....                                                     | 93  |
| 図 2-59 シャクルトンクレーターの直上を通過する軌道 (遠地点高度 1,000km-5,000km) .....                     | 94  |
| 図 2-60 Vanguard I 衛星 .....                                                     | 97  |
| 図 2-61 国際宇宙ステーションとその太陽電池パドル .....                                              | 97  |
| 図 2-62 IKAROS とソーラー電力セイル .....                                                 | 99  |
| 図 2-63 月用 SSPS のブロック図 .....                                                    | 100 |
| 図 2-64 周波数で大別した無線送電システムの特徴 .....                                               | 100 |
| 図 2-65 2024 年における高効率増幅器の現状と課題 .....                                            | 101 |
| 図 2-66 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:100m) .....                                    | 103 |
| 図 2-67 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:1000m) .....                                   | 103 |
| 図 2-68 MMIC の半導体ウエハー構成 .....                                                   | 108 |
| 図 2-69 電気通信大学で試作した無線電力伝送用 5.8GHz 帯 GaAsHEMT ドライバー付<br>GaNHEMT 電力増幅器モジュール ..... | 109 |
| 図 2-70 電気通信大学で開発した電力増幅器モジュールの特性 .....                                          | 110 |
| 図 2-71 オリエンタマイクウエーブ社でモジュールを量産仕様に変更した写真 .....                                   | 110 |
| 図 2-72 京セラのセラミックパッケージ .....                                                    | 111 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 図 2-73 京セラのメタルパッケージ .....                                     | 111 |
| 図 2-74 京セラのパーティションメタルパッケージ .....                              | 111 |
| 図 2-75 米国 NXP 社 5G 通信用 RF モジュールの実装方法 .....                    | 112 |
| 図 2-76 GaNHEMT と GaAspHEMT の長期信頼性予測値 .....                    | 113 |
| 図 2-77 スロットアレイアンテナのコンセプト図 .....                               | 113 |
| 図 2-78 小型 SAR 衛星用展開型アンテナ .....                                | 114 |
| 図 2-79 展開型軽量平面アンテナの軌道上実証 DELIGHT .....                        | 114 |
| 図 2-80 送電距離と電力密度 .....                                        | 115 |
| 図 2-81 送電側・受電側アンテナのサイズの関係 .....                               | 115 |
| 図 2-82 月用太陽発電衛星の概念図 .....                                     | 116 |
| 図 2-83 軽量展開アクチュエータの一例 .....                                   | 117 |
| 図 2-84 ミウラ折りをを用いた展開実験 .....                                   | 118 |
| 図 2-85 月周回軌道の全体図 .....                                        | 121 |
| 図 2-86 近月面高度 100km 遠月面高度 500km の軌道の初期値 .....                  | 121 |
| 図 2-87 近月面高度 100km 遠月面高度 1,000km の軌道の初期値 .....                | 122 |
| 図 2-88 近月面高度 100km 遠月面高度 5,000km の軌道の初期値 .....                | 122 |
| 図 2-89 近月面高度 100km 遠月面高度 10,000km の軌道の初期値 .....               | 122 |
| 図 2-90 50[GHz]帯 GaAs 整流器の整流効率予測 .....                         | 126 |
| 図 2-91 フレネルゾーンプレートレンズ(FZPL)アンテナの原理 .....                      | 127 |
| 図 2-92 斜め入射への対応 .....                                         | 127 |
| 図 2-93 FZPL の設計説明図 .....                                      | 128 |
| 図 2-94 受電レクテナシステムの構成 .....                                    | 129 |
| 図 2-95 FZPL のアレイ化と $f/D$ .....                                | 130 |
| 図 2-96 レクテナ IC の配列法 .....                                     | 131 |
| 図 2-97 金沢工大で開発した 28GHz 帯 GaAs レクテナの概要 .....                   | 133 |
| 図 2-98 低閾値 GaAs GAD の静特性 .....                                | 134 |
| 図 2-99 低閾値 GaAs GAD を用いる 920MHz 帯レクテナ .....                   | 134 |
| 図 2-100 低閾値 GaAs E-pHEMT GAD による GaAs レクテナの整流効率の改善 .....      | 135 |
| 図 2-101 50GHz 帯 GaAs レクテナ IC のアンテナ特性 .....                    | 136 |
| 図 2-102 低閾値 GaAs E-pHEMT GAD による 50GHz 帯 GaAs レクテナの整流効率 ..... | 136 |
| 図 2-103 50GHz 帯 100kW レクテナアレイの構成 .....                        | 138 |
| 図 2-104 フィルム状 CIGS 太陽電池 .....                                 | 141 |
| 図 2-105 地球低軌道上での 100W 無線送電実験 .....                            | 141 |
| 図 2-106 モジュラー型ミリ波送電システム .....                                 | 142 |
| 図 2-107 送電衛星の構成 .....                                         | 143 |
| 図 2-108 受電衛星の構成 .....                                         | 143 |
| 図 2-109 レベルダイヤ(dBm) .....                                     | 144 |
| 図 2-110 実証候補項目【1-①-1】送電電力数十キロワットクラスの LEO 実証衛星システム .....       | 145 |
| 図 2-111 レベルダイヤ(dBm) .....                                     | 147 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 図 2-112 実証候補項目【1-①-2】月軌道上における送電電力キロワットクラスの実証衛星...                 | 148 |
| 図 2-113 レベルダイヤ(dBm) .....                                         | 150 |
| 図 2-114 実証候補項目【1-①-3】月軌道上における衛星 1 機程度による 100kW 程度実証衛星 .....       | 151 |
| 図 2-115 実証候補項目【1-①-4】衛星コンステレーション(7 機程度)による継続的 100kW 程度供給の実証 ..... | 152 |
| 図 2-116 地上受電レクテナシステム用 5GHz 帯レクテナパネル.....                          | 153 |
| 図 2-117 IMM3J セルの外観と電気特性 .....                                    | 162 |
| 図 2-118 候補地点 1(Connecting Ridge) .....                            | 163 |
| 図 2-119 候補地点 2(Nobile Rim 1) .....                                | 164 |
| 図 2-120 再生型燃料電池運転パターン .....                                       | 165 |
| 図 2-121 蓄電量の経時変化 .....                                            | 166 |
| 図 2-122 発電タワーの前後関係(左:イメージ、右:上から見た図) .....                         | 168 |
| 図 2-123 他のタワーによる影のかかり方.....                                       | 168 |
| 図 2-124 候補地点 1 の日照率 .....                                         | 170 |
| 図 2-125 月面実証フェーズ 0 以前(前半)(地上実証)の実証項目 .....                        | 171 |
| 図 2-126 統合制御系ブロックダイアグラム .....                                     | 172 |
| 図 2-127 月面実証フェーズ 0 の実証項目(月面小型実証).....                             | 173 |
| 図 2-128 太陽光発電タワーの直線状配置の例 .....                                    | 173 |
| 図 2-129 月面実証フェーズ 1 の実証項目(月面大型実証) .....                            | 174 |
| 図 2-130 各タワー間の影の影響(イメージ) .....                                    | 174 |
| 図 2-131 各ゾーン・ゾーン間へのタワー設置イメージ .....                                | 175 |
| 図 2-132 給電対象として想定したローバーの仕様 .....                                  | 184 |
| 図 2-133 月面上送電システム プラントモデルイメージ.....                                | 190 |
| 図 2-134 月面上送電システム バス機器イメージ.....                                   | 191 |
| 図 2-135 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 0 以前／月面実証フェーズ 0 対象) .....          | 204 |
| 図 2-136 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 1 対象) .....                        | 204 |
| 図 2-137 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 2 対象) .....                        | 205 |
| 図 2-138 マイクロ波送電の開発シナリオ .....                                      | 206 |
| 図 2-139 金沢工業大学にて開発中のレクテナ .....                                    | 207 |
| 図 2-140 レクテナ DoA 構成と効率 .....                                      | 207 |
| 図 2-141 受電レクテナ構成 .....                                            | 208 |
| 図 2-142 受電レクテナ用 E-pHEMT のベンチマーク .....                             | 208 |
| 図 2-143 受電レクテナ用整流器の予測性能 .....                                     | 209 |
| 図 2-144 探査用ローバー本体への 350W レクテナ取付け図.....                            | 212 |
| 図 2-145 探査用ローバー用 350W レクテナアレイの概要 .....                            | 212 |
| 図 2-146 探査用ローバー本体への 1.5kW レクテナ取付け図.....                           | 215 |
| 図 2-147 探査用ローバー用 1.5kW レクテナアレイの概要 .....                           | 215 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 図 2-148 光ファイバー伝送による各効率 .....                                         | 221 |
| 図 2-149 光ファイバー伝送による波長及びファイバー長に対する各効率.....                            | 222 |
| 図 2-150 短距離・中電力【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】のシステム構成.....                  | 224 |
| 図 2-151 短距離・大電力【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】のシステム構成.....                  | 224 |
| 図 2-152 長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】のシステム構成.....                      | 225 |
| 図 2-153 長距離の中電力化【120W5km 天文用数百 W 級送光】のシステム構成.....                    | 229 |
| 図 2-154 フェーズ 0 スケールダウン【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】のシステム構成<br>.....       | 230 |
| 図 2-155 移動体・超大電力化【30kW100m 輸送ローバー用 100kW 級送光】のシステム構成<br>.....        | 231 |
| 図 2-156 高出力化【400W5km 天文用 kW 級送光】のシステム構成.....                         | 231 |
| 図 2-157 高出力化と長距離化【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】<br>のシステム構成..... | 232 |
| 図 2-158 サービスゾーン候補地での探査イメージ .....                                     | 238 |
| 図 2-159 太陽電池プラントと給電ステーション間の送電.....                                   | 240 |
| 図 2-160 PSR 内での探査と給電のパターン.....                                       | 240 |
| 図 2-161 給電ステーションへのアプローチ .....                                        | 241 |
| 図 2-162 電子線照射試験後の太陽電池出力の変化 .....                                     | 245 |
| 図 2-163 CIGS 太陽電池と 3 接合 GaAs 太陽電池のサイズ比較.....                         | 246 |
| 図 2-164 専用設計した CIGS 太陽電池の入射エネルギーに対する変換効率の変化.....                     | 247 |
| 図 2-165 ペロブスカイト太陽電池と CIGS 太陽電池とのメカニカル 2 端子タンデム太陽電池<br>.....          | 249 |
| 図 2-166 千葉工業大学の 1U 衛星(上面に CIGS 太陽電池が搭載).....                         | 249 |
| 図 3-1 有識者委員会と WG の開催.....                                            | 255 |
| 図 4-1 ESA の新しい宇宙探査ロードマップの月探査シナリオ .....                               | 259 |
| 図 4-2 ESA の技術開発を行っている局の全体像 .....                                     | 260 |
| 図 4-3 ProSEED(左)と ProSPA(右) .....                                    | 262 |
| 図 4-4 Argonaut 構成エレメントイメージ図 .....                                    | 263 |
| 図 4-5 SPACE APPLICATIONS SERV. が検討する月面太陽光発電イメージ.....                 | 265 |
| 図 4-6 Thales Alenia Space Italia が検討する月面太陽光発電イメージ .....              | 265 |
| 図 4-7 University of Leicester の発電機モックアップ .....                       | 266 |
| 図 4-8 ILRS で想定されている開発フェーズ .....                                      | 270 |
| 図 4-9 水資源の探査・採掘・利用に関する一体的な取り組みのイメージ図 .....                           | 272 |
| 図 4-10 ISRU プロセスのイメージ図.....                                          | 273 |
| 図 4-11 ISRU プロセスの温度と圧力の遷移図 .....                                     | 273 |
| 図 4-12 月面電力システム構成.....                                               | 275 |
| 図 4-13 小型原子炉の構成 .....                                                | 278 |
| 図 4-14 Gateway イメージ(左)と Airlock イメージ(右) .....                        | 279 |
| 図 4-15 Intuitive Machines 社の Nova-C ランダーに搭載された LUNA センサーのイメージ        |     |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 図.....                                                                               | 289 |
| 図 4-16 Blue Ghost ランダーから展開された SPIDER のイメージ図.....                                     | 289 |
| 図 4-17 AROSE で検討された小型ローバー.....                                                       | 291 |
| 図 4-18 ELO2 で検討された小型ローバー.....                                                        | 292 |
| 図 4-19 オーストラリアの ISRU 及び基礎サービスのロードマップ.....                                            | 293 |
| 図 4-20 パッシェンの法則.....                                                                 | 300 |
| 図 4-21 電圧と電力グリッド重量の関係に関する評価結果.....                                                   | 302 |
| 図 4-22 UMIC を含む電力グリッドの構成.....                                                        | 302 |
| 図 4-23 LunaGrid-Lite の送電システム図.....                                                   | 303 |
| 図 4-24 MW 級の発電を想定したマイクログリッド構成案.....                                                  | 304 |
| 図 4-25 SBSP エコシステムマップ.....                                                           | 309 |
| 図 4-26 設立年別で示す SSPS 活動エンティティ数.....                                                   | 309 |
| 図 4-27 Aetherflux 社の開発する SSPS 衛星.....                                                | 310 |
| 図 4-28 WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ.....                                                | 313 |
| 図 4-29 Virtus Solis 社の SBSP コンセプト.....                                               | 313 |
| 図 4-30 Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station(GE <sup>+</sup> -LPS)」..... | 314 |
| 図 4-31 Paraloon 社によるインフレータブル展開構造.....                                                | 314 |
| 図 4-32 「16U4SBSP」ミッションのイメージ.....                                                     | 315 |
| 図 4-33 CASSIE プロジェクトの概要と参加組織.....                                                    | 317 |
| 図 4-34 HARRIER の実験装置.....                                                            | 317 |
| 図 4-35 GMI 社による SBSP 市場予測.....                                                       | 321 |
| 図 4-36 SBSP 市場のシェア(2024 年).....                                                      | 322 |
| 図 4-37 SBSP 市場のシェア(2024 年).....                                                      | 323 |
| 図 4-38 ドローンに電力を供給する 4 台のワイヤレス給電トランスミッター.....                                         | 325 |
| 図 4-39 Reach Power 社 CEO の Chris Davlantes 氏のデモの様子.....                              | 326 |
| 図 4-40 DoD の POWER ビーミングソリューションコンセプト.....                                            | 329 |
| 図 4-41 GuRu 社の無線で飛行するドローンの実証.....                                                    | 330 |
| 図 4-42 ワイヤレス電力伝送市場規模の実績と予測(2019 年~2035 年).....                                       | 333 |
| 図 4-43 CASSIOPeiA コンセプトのスケルトンスケッチ.....                                               | 335 |
| 図 4-44 1.44GW の SBSP システムの初号機システムの構築コストと運用コスト.....                                   | 339 |
| 図 4-45 SPS Alpha アーキテクチャ.....                                                        | 343 |
| 図 4-46 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部).....                                 | 350 |
| 図 4-47 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部).....                                 | 351 |
| 図 4-48 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ.....                             | 351 |
| 図 4-49 Thales Alenia Space SPS の打上げ、展開、組立てシナリオ.....                                  | 352 |
| 図 4-50 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2).....                              | 355 |
| 図 4-51 LCOE の計算方法.....                                                               | 358 |
| 図 4-52 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ.....                                         | 360 |
| 図 4-53 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果.....                                  | 361 |



|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 図 4-54 JSS(旧 USEF)マルチテザー型 SSPS の宇宙部.....              | 367 |
| 図 4-55 エネルギーシステムモデルの構造 .....                          | 377 |
| 図 4-56 エネルギー起源 CO <sub>2</sub> 排出量の前提 .....           | 378 |
| 図 4-57 稼働中原子力所発電設備容量の想定(全国計) .....                    | 378 |
| 図 4-58 太陽光・風力発電コスト(LCOE) .....                        | 379 |
| 図 4-59 データセンター・半導体工場の電力需要.....                        | 381 |
| 図 4-60 2022 年度から 2050 年度までの一次エネルギー供給および電源構成の推移 ....   | 382 |
| 図 4-61 2022 年度から 2050 年度までの一次エネルギー供給および電源構成の推移.....   | 383 |
| 図 4-62 SSPS-B24 の総投資額を変化させた際の影響(左:発電量、右:設備導入量) .....  | 384 |
| 図 4-63 SSPS-N24 の総投資額を変化させた際の影響(左:発電量、右:設備導入量).....   | 384 |
| 図 4-64 SSPS 現状のコストモデルでの重量内訳.....                      | 388 |
| 図 4-65 国際宇宙探査ロードマップで提示されるタイムスケール.....                 | 391 |
| 図 4-66 本事業と関連する重要技術リストの例.....                         | 393 |
| 図 4-67 TRL(Technology Readiness Level)の定義 .....       | 394 |
| 図 4-68 ベンチマーク調査の凡例 .....                              | 395 |
| 図 4-69 水素における日米欧の研究開発状況の比較 .....                      | 395 |
| 図 4-70 電力における日米欧の研究開発状況の比較 .....                      | 396 |
| 図 4-71 日本の優位性×技術の重要性の認知度の2軸による整理と各象限の意味 .....         | 400 |
| 図 4-72 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(水素) .....      | 401 |
| 図 4-73 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(電力) .....      | 403 |
| 図 4-74 LaaS: Lab as a Service 事例 .....                | 407 |
| 図 4-75 欧州へ ILRS への参加を呼び掛ける DSEL の発表スライド .....         | 407 |
| 図 4-76 ASI の宇宙探査のアプローチ .....                          | 408 |
| 図 4-77 水資源に基づく 2040 年の月面アーキテクチャの一部に関する俯瞰図 .....       | 409 |
| 図 4-78 エネルギー供給のシステム構成要素.....                          | 410 |
| 図 4-79 ISRU プラント .....                                | 411 |
| 図 4-80 輸送システムの構成要素 .....                              | 411 |
| 図 4-81 ESA の EXPLORE 2040 についての発表 .....               | 414 |
| 図 4-82 欧州の月面開発計画 .....                                | 414 |
| 図 4-83 各国ケイパビリティ比較 .....                              | 415 |
| 図 4-84 LEO、月、火星の包括的な探査戦略の概要 .....                     | 416 |
| 図 4-85 ESA の月面開発計画の概要 .....                           | 416 |
| 図 4-86 月面経済圏に関するパネルディスカッションの様子.....                   | 418 |
| 図 4-87 信頼性と輸送コストに対するアプローチに関する指摘事項.....                | 420 |
| 図 4-88 信頼性と輸送コストの関係 .....                             | 420 |
| 図 4-89 月面でのロケット推進剤製造に関する経済性分析に関する結論 .....             | 421 |
| 図 4-90 Spartan Space が想定する有人月面開発初期のインフラ .....         | 422 |
| 図 4-91 Spartan Space が想定する ISRU を見据えた早期の月面インフラ構成..... | 422 |
| 図 4-92 MAANA Electric が想定する太陽電池製造原料獲得のプロセス .....      | 423 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 図 4-93 MAANA Electric の技術的な強み .....            | 424 |
| 図 4-94 MAANA Electric の事業ロードマップ .....          | 424 |
| 図 4-95 MAANA Electric の LunaBox v1 の数値目標 ..... | 425 |

---

## 表 目次

---

|        |                                         |    |
|--------|-----------------------------------------|----|
| 表 2-1  | 水素パートの検討の要点.....                        | 4  |
| 表 2-2  | 本事業で設定したフェーズ.....                       | 5  |
| 表 2-3  | 地上・低軌道に係る実証候補項目の概観.....                 | 7  |
| 表 2-4  | 水探査技術(水探査装置の開発)に係る地上での実証候補項目.....       | 8  |
| 表 2-5  | 水探査技術(小型水探査ローバーの開発)に係る地上での実証候補項目.....   | 9  |
| 表 2-6  | 輸送技術に係る地上での実証候補項目.....                  | 10 |
| 表 2-7  | 純水処理技術に係る地上での実証候補項目.....                | 11 |
| 表 2-8  | 電気分解技術に係る地上での実証候補項目.....                | 12 |
| 表 2-9  | 水素・酸素液化技術に係る地上での実証候補項目.....             | 12 |
| 表 2-10 | 貯蔵技術に係る地上での実証候補項目.....                  | 13 |
| 表 2-11 | 純水処理技術に係る低軌道での実証候補項目.....               | 14 |
| 表 2-12 | 電気分解技術に係る低軌道での実証候補項目.....               | 15 |
| 表 2-13 | 水素・酸素液化技術に係る低軌道での実証候補項目.....            | 16 |
| 表 2-14 | 水素・酸素の漏えい監視技術に係る低軌道での実証候補項目.....        | 17 |
| 表 2-15 | 低軌道実証可能な施設一覧.....                       | 18 |
| 表 2-16 | 水素に係る実証候補項目における月面実証の位置づけ.....           | 19 |
| 表 2-17 | 各フェーズにおける実証候補項目の詳細.....                 | 21 |
| 表 2-18 | 実証候補項目【探査実証0 STEP1】に係る詳細内容①.....        | 23 |
| 表 2-19 | 実証候補項目【探査実証0 STEP2】に係る詳細内容②.....        | 23 |
| 表 2-20 | 実証候補項目【0-①】(水抽出)に係る詳細内容.....            | 24 |
| 表 2-21 | 実証候補項目【探査実証1】に係る詳細内容.....               | 26 |
| 表 2-22 | 実証候補項目【1-①】(水抽出)に係る詳細内容.....            | 26 |
| 表 2-23 | 実証候補項目【1-②】に係る詳細内容.....                 | 27 |
| 表 2-24 | 実証候補項目【フェーズ1:遠隔運転・制御技術】に係る詳細内容.....     | 27 |
| 表 2-25 | 輸送実証【1】に係る詳細内容.....                     | 28 |
| 表 2-26 | 実証候補項目【2-①a; 資源ゾーン】に係る詳細内容.....         | 30 |
| 表 2-27 | 実証候補項目【2-①b~2-②, サービスゾーン以降】に係る詳細内容..... | 31 |
| 表 2-28 | 実証候補項目【フェーズ2:遠隔運転・制御技術】に係る詳細内容.....     | 32 |
| 表 2-29 | 輸送実証【2】に係る詳細内容.....                     | 32 |
| 表 2-30 | 実証候補項目【1】に係る輸送実証の詳細内容.....              | 33 |
| 表 2-31 | 実証候補項目【3】に係る詳細内容.....                   | 35 |
| 表 2-32 | 実証候補項目【土木・建設分野/技術】に係る詳細内容.....          | 36 |
| 表 2-33 | 月面実証で得られる技術・知見・ノウハウの地上産業への転用の可能性.....   | 37 |
| 表 2-34 | 極限環境における月技術の裨益性.....                    | 38 |
| 表 2-35 | 月面における輸送システムの機能と必要とされる技術及びその課題.....     | 40 |
| 表 2-36 | AGV の諸元.....                            | 41 |

|        |                                                         |     |
|--------|---------------------------------------------------------|-----|
| 表 2-37 | 長距離輸送方式のトレードオフ.....                                     | 43  |
| 表 2-38 | 各フェーズでの実証イメージ.....                                      | 44  |
| 表 2-39 | 抽出された技術課題に対する月面実証・地上実証の識別結果 .....                       | 46  |
| 表 2-40 | 電力パートにおけるフェーズ分類定義.....                                  | 55  |
| 表 2-41 | フェーズ 0 以前(前半)(現在から 2028 年頃まで)の電力システム構成、開発実証課題検討 .....   | 61  |
| 表 2-42 | フェーズ 0 以前(後半)(2028 年～2030 年頃まで)の電力システム構成、開発実証課題検討 ..... | 62  |
| 表 2-43 | フェーズ 0(2030 年頃を想定) の電力システム構成、開発実証課題検討 .....             | 63  |
| 表 2-44 | フェーズ 1(2030 から 2035 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討 .....      | 64  |
| 表 2-45 | フェーズ 2(2035 から 2040 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討 .....      | 65  |
| 表 2-46 | フェーズ 3(2040 から 2045 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討 .....      | 66  |
| 表 2-47 | 実証候補項目の整理のまとめ(1/2).....                                 | 67  |
| 表 2-48 | 実証候補項目の整理のまとめ(2/2) .....                                | 68  |
| 表 2-49 | 電力全体システムの開発実証候補項目.....                                  | 69  |
| 表 2-50 | 実証候補項目【0-①】に係る詳細内容 .....                                | 71  |
| 表 2-51 | 実証候補項目【0-②】に係る詳細内容.....                                 | 71  |
| 表 2-52 | 実証候補項目【0-③】に係る詳細内容 .....                                | 72  |
| 表 2-53 | 実証候補項目【0-④】に係る詳細内容 .....                                | 72  |
| 表 2-54 | 実証候補項目【0-⑤】に係る詳細内容 .....                                | 73  |
| 表 2-55 | フェーズ 3 での必要電力の想定.....                                   | 74  |
| 表 2-56 | 地上電力分配時の電圧電流の実績.....                                    | 77  |
| 表 2-57 | 構成要素の機能単位での課題整理結果.....                                  | 78  |
| 表 2-58 | ライフサイクルと構成要素の単位での課題整理結果.....                            | 79  |
| 表 2-59 | 電力システムの各課題の解決策への対応計画 .....                              | 79  |
| 表 2-60 | 実証候補項目【0-④-4】に係る詳細内容 .....                              | 83  |
| 表 2-61 | 実証候補項目【0-④-5】に係る詳細内容.....                               | 83  |
| 表 2-62 | 実証候補項目【0-④-6】に係る詳細内容 .....                              | 84  |
| 表 2-63 | 実証候補項目【0-④-1】に係る詳細内容.....                               | 84  |
| 表 2-64 | 実証候補項目【0-④-2】に係る詳細内容 .....                              | 85  |
| 表 2-65 | 実証候補項目【0-④-3】に係る詳細内容 .....                              | 85  |
| 表 2-66 | 地球用 SSPS における高難度な課題 .....                               | 89  |
| 表 2-67 | シャクルトンクレーターの直上を通過する軌道の送電時間、機体数 .....                    | 95  |
| 表 2-68 | レクテナの直径が 500m の場合の送電アンテナの直径(ビーム収集効率:90%) .....          | 95  |
| 表 2-69 | レクテナの直径が 1000m の場合の送電アンテナの直径(ビーム収集効率:90%) .....         | 96  |
| 表 2-70 | 国際宇宙ステーションの太陽電池パドルの仕様.....                              | 98  |
| 表 2-71 | 太陽指向展開型パネルの特徴 .....                                     | 98  |
| 表 2-72 | 大型宇宙機の電力と発生電圧.....                                      | 99  |
| 表 2-73 | レクテナの直径を 1km としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$ ) .....  | 104 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 表 2-74 レクテナの直径を 500m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$ ) | 105 |
| 表 2-75 レクテナの直径を 100m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$ ) | 106 |
| 表 2-76 軌道上セグメントの諸元                                       | 118 |
| 表 2-77 太陽電池アレイの質量積算                                      | 119 |
| 表 2-78 候補地1における周期、可視時間及び機体数                              | 124 |
| 表 2-79 候補地2における周期、可視時間及び機体数                              | 124 |
| 表 2-80 シャックルトンクレーターにおける周期、可視時間及び機体数                      | 124 |
| 表 2-81 レクテナ IC 配列法のまとめ                                   | 131 |
| 表 2-82 GaAs E-pHEMT GAD の微細化による性能向上のステップ                 | 135 |
| 表 2-83 検討結果 ( $\tau = 0.014$ , $\eta = 0.019$ [%])       | 144 |
| 表 2-84 検討結果 ( $\tau = 0.025$ , $\eta = 0.063$ [%])       | 147 |
| 表 2-85 検討結果 ( $\tau = 1.14$ , $\eta = 72.8$ [%])         | 149 |
| 表 2-86 実証候補項目【1-①-1】に係る詳細内容                              | 156 |
| 表 2-87 実証候補項目【1-①-2】に係る詳細内容                              | 157 |
| 表 2-88 実証候補項目【1-①-3】に係る詳細内容                              | 158 |
| 表 2-89 実証候補項目【1-①-4】に係る詳細内容                              | 158 |
| 表 2-90 実証候補項目【1-②-1】に係る詳細内容                              | 159 |
| 表 2-91 実証候補項目【1-②-2】に係る詳細内容                              | 159 |
| 表 2-92 実証候補項目【1-②-3】に係る詳細内容                              | 160 |
| 表 2-93 実証候補項目【1-②-4】に係る詳細内容                              | 160 |
| 表 2-94 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 における電源系候補の構成とそのトレードオフ結果      | 165 |
| 表 2-95 運転パターンごとの質量が最小となる発電・蓄電容量                          | 166 |
| 表 2-96 消費電力値に対する太陽電池必要容量の倍数                              | 167 |
| 表 2-97 必要電力と必要タワー基数                                      | 167 |
| 表 2-98 前後の間隔による前方のタワーの影響を受ける時間                           | 168 |
| 表 2-99 実証候補項目の全体像                                        | 170 |
| 表 2-100 実証候補項目【2-①-1】に係る詳細内容                             | 176 |
| 表 2-101 実証候補項目【2-①-2】に係る詳細内容                             | 176 |
| 表 2-102 実証候補項目【2-①-3】に係る詳細内容                             | 177 |
| 表 2-103 実証候補項目【2-①-4】に係る詳細内容                             | 177 |
| 表 2-104 実証候補項目【2-①-5】に係る詳細内容                             | 178 |
| 表 2-105 実証候補項目【2-①-6】に係る詳細内容                             | 178 |
| 表 2-106 実証候補項目【2-①-7】に係る詳細内容                             | 179 |
| 表 2-107 実証候補項目【2-①-8】に係る詳細内容                             | 179 |
| 表 2-108 実証候補項目【2-①-9】に係る詳細内容                             | 180 |
| 表 2-109 実証候補項目【2-①-10】に係る詳細内容                            | 180 |

|         |                                            |     |
|---------|--------------------------------------------|-----|
| 表 2-110 | 実証候補項目【2-①-11】に係る詳細内容 .....                | 181 |
| 表 2-111 | 実証候補項目【2-①-12】に係る詳細内容 .....                | 181 |
| 表 2-112 | 想定される月面利用と電力システム .....                     | 182 |
| 表 2-113 | 今年度の検討内容 .....                             | 183 |
| 表 2-114 | フェーズ 0 以前(後半):月面上送電全体システムの構成と課題 .....      | 185 |
| 表 2-115 | フェーズ 0:月面上送電全体システムの構成と課題 .....             | 186 |
| 表 2-116 | フェーズ 1:月面上送電全体システムの構成と課題 .....             | 187 |
| 表 2-117 | フェーズ2:月面上送電全体システムの構成と課題 .....              | 188 |
| 表 2-118 | フェーズ 3:月面上送電全体システムの構成と課題 .....             | 189 |
| 表 2-119 | 実証候補項目【3-①-1】に係る詳細内容 .....                 | 193 |
| 表 2-120 | 実証候補項目【3-①-2】に係る詳細内容 .....                 | 194 |
| 表 2-121 | 実証候補項目【3-①-3】に係る詳細内容 .....                 | 194 |
| 表 2-122 | フェーズ 0 以前:マイクロ波送電／ローバー給電ステーションの構成と課題 ..... | 196 |
| 表 2-123 | フェーズ 0:マイクロ波送電／推葉プラントの構成と課題 .....          | 197 |
| 表 2-124 | フェーズ 1:マイクロ波送電／輸送ローバー送電の構成と課題 .....        | 198 |
| 表 2-125 | フェーズ 1:マイクロ波送電／推葉プラントの構成と課題 .....          | 199 |
| 表 2-126 | フェーズ 1:マイクロ波送電／資源ゾーン送電の構成と課題 .....         | 200 |
| 表 2-127 | フェーズ 2:マイクロ波送電／居住ユニット送電の構成と課題 .....        | 201 |
| 表 2-128 | フェーズ 2:マイクロ波送電／ローバー直接給電の構成と課題 .....        | 202 |
| 表 2-129 | 新規要素ごとの実証候補項目実施フェーズ .....                  | 210 |
| 表 2-130 | 実証候補項目【3-②-1】に係る詳細内容 .....                 | 216 |
| 表 2-131 | 実証候補項目【3-②-2】に係る詳細内容 .....                 | 216 |
| 表 2-132 | 実証候補項目【3-②-3】に係る詳細内容 .....                 | 217 |
| 表 2-133 | 実証候補項目【3-②-4】に係る詳細内容 .....                 | 217 |
| 表 2-134 | 実証候補項目【3-②-5】に係る詳細内容 .....                 | 218 |
| 表 2-135 | 実証候補項目【3-②-6】に係る詳細内容 .....                 | 218 |
| 表 2-136 | 実証候補項目【3-②-7】に係る詳細内容 .....                 | 219 |
| 表 2-137 | 実証候補項目【3-②-8】に係る詳細内容 .....                 | 219 |
| 表 2-138 | 実証候補項目【3-②-9】に係る詳細内容 .....                 | 220 |
| 表 2-139 | 特定波長の光に対する光電変換効率(セル)の最新データ .....           | 222 |
| 表 2-140 | 短・長距離のレーザー無線伝送の仕様選択 .....                  | 223 |
| 表 2-141 | 実証候補項目【3-③-1】に係る詳細内容 .....                 | 233 |
| 表 2-142 | 実証候補項目【3-③-2】に係る詳細内容 .....                 | 233 |
| 表 2-143 | 実証候補項目【3-③-3】に係る詳細内容 .....                 | 234 |
| 表 2-144 | 実証候補項目【3-③-4】に係る詳細内容 .....                 | 234 |
| 表 2-145 | 実証候補項目【3-③-5】に係る詳細内容 .....                 | 235 |
| 表 2-146 | 実証候補項目【3-③-6】に係る詳細内容 .....                 | 236 |
| 表 2-147 | 実証候補項目【3-③-7】に係る詳細内容 .....                 | 236 |
| 表 2-148 | 実証候補項目【3-③-8】に係る詳細内容 .....                 | 237 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 表 2-149 実証候補項目【0-②-1】に係る詳細内容 .....                       | 239 |
| 表 2-150 各アプローチケースにおける想定される給電方式 .....                     | 241 |
| 表 2-151 実証候補項目【5-①-1】に係る詳細内容 .....                       | 243 |
| 表 2-152 実証候補項目【5-①-2】に係る詳細内容 .....                       | 244 |
| 表 2-153 各フェーズでの実証候補項目.....                               | 250 |
| 表 2-154 実証候補項目【4-①-1】に係る詳細内容.....                        | 251 |
| 表 2-155 実証候補項目【4-①-2】に係る詳細内容 .....                       | 251 |
| 表 2-156 実証候補項目【4-①-3】に係る詳細内容 .....                       | 252 |
| 表 2-157 実証候補項目【4-①-4】に係る詳細内容 .....                       | 252 |
| 表 2-158 電力における各フェーズのサマリ .....                            | 253 |
| 表 2-159 月面実証で得られる技術・知見・ノウハウの地上産業への転用の可能性.....            | 254 |
| 表 3-1 有識者委員会 構成員一覧表(五十音順 敬称略) .....                      | 255 |
| 表 3-2 有識者委員会の開催履歴およびアジェンダ .....                          | 256 |
| 表 3-3 WG 構成員一覧表(五十音順) .....                              | 257 |
| 表 3-4 WG の開催履歴およびアジェンダ .....                             | 258 |
| 表 4-1 ESA における研究開発プログラム.....                             | 261 |
| 表 4-2 欧州が開発する月面関連電源技術①.....                              | 264 |
| 表 4-3 欧州が開発する月面関連電源技術②.....                              | 264 |
| 表 4-4 欧州が開発する月面関連電源技術③.....                              | 264 |
| 表 4-5 ILRS 署名組織(国家除く).....                               | 269 |
| 表 4-6 大型システムの構成 .....                                    | 275 |
| 表 4-7 中型システムの構成 .....                                    | 276 |
| 表 4-8 小型システムの構成 .....                                    | 276 |
| 表 4-9 小型原子炉の仕様 .....                                     | 277 |
| 表 4-10 UAE の月面探査車ミッション .....                             | 280 |
| 表 4-11 Moon to Mars Initiative を構成する各プログラムの概要 .....      | 283 |
| 表 4-12 Moon to Mars Initiative 支出計画.....                 | 283 |
| 表 4-13 Supply Chain プログラムの助成プロジェクト一覧.....                | 285 |
| 表 4-14 Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧 ..... | 287 |
| 表 4-15 Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧 ..... | 290 |
| 表 4-16 Trailblazer (Stage1) プログラムの助成プロジェクト一覧.....        | 291 |
| 表 4-17 電力技術の調査対象領域 .....                                 | 294 |
| 表 4-18 水素技術の調査対象領域 .....                                 | 295 |
| 表 4-19 電力領域の評価結果.....                                    | 296 |
| 表 4-20 水素領域の評価結果 .....                                   | 296 |
| 表 4-21 転用に向けた検討・開発状況の整理 .....                            | 297 |
| 表 4-22 国内企業ヒアリング .....                                   | 304 |
| 表 4-23 1.44GW システムの重量ブレイクダウン .....                       | 335 |
| 表 4-24 FNC 社のコストモデルのコスト要素.....                           | 338 |

|        |                                                               |     |
|--------|---------------------------------------------------------------|-----|
| 表 4-25 | SBSP 各サブシステム要素の効率と価格の参考値 .....                                | 338 |
| 表 4-26 | エネルギー源別の LCOE と VALCOE(単位:2022 年価格、€/MWh).....                | 340 |
| 表 4-27 | SBSP の費用便益分析(2070 年までに 54 基導入の場合) .....                       | 341 |
| 表 4-28 | SPS-Alpha の宇宙セグメントの質量概要(OHB 計算) .....                         | 344 |
| 表 4-29 | OHB のレポートで想定されている打上げ機と能力 .....                                | 345 |
| 表 4-30 | コストモデルによるコスト算出結果 .....                                        | 347 |
| 表 4-31 | 運用に関して使用したパラメータ値 .....                                        | 348 |
| 表 4-32 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのアーキテクチャ・トレードオフ<br>結果..... | 349 |
| 表 4-33 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果                | 353 |
| 表 4-34 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果 .....            | 354 |
| 表 4-35 | 欧米の各 FS におけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方(1/2)<br>.....          | 362 |
| 表 4-36 | 欧米の各 FS におけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方(2/2)<br>.....          | 363 |
| 表 4-37 | 欧米の各 FS におけるコスト算出に係る項目の考え方(1/2) .....                         | 364 |
| 表 4-38 | 欧米の各 FS におけるコスト算出に係る項目の考え方(2/2).....                          | 365 |
| 表 4-39 | JSS コストモデルの入力パラメータ値の見直し(2023 年度).....                         | 368 |
| 表 4-40 | 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルでの CAPEX の算出方法の比較                  | 370 |
| 表 4-41 | 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルでの OPEX の算出方法の比較 ..                | 371 |
| 表 4-42 | 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルに組み込まれている各項目の有無の比<br>較.....        | 371 |
| 表 4-43 | 再検討を行った JSS コストモデルの項目／入力パラメータ値一覧(2024 年版) ...                 | 373 |
| 表 4-44 | JSS モデル(バッテリーあり)ケースのコスト試算(SSPS-B24) .....                     | 374 |
| 表 4-45 | JSS モデル(バッテリーなし)ケースのコスト試算(SSPS-N24) .....                     | 376 |
| 表 4-46 | 太陽光発電・風力発電の導入量上限 .....                                        | 380 |
| 表 4-47 | SSPS の種類.....                                                 | 381 |
| 表 4-48 | ケース設定 .....                                                   | 382 |
| 表 4-49 | 月面探査シナリオにおける 12 の目標.....                                      | 392 |
| 表 4-50 | 評価軸の設定による比較評価の具体的手法 .....                                     | 397 |
| 表 4-51 | ベンチマーク評価結果(水素) .....                                          | 399 |
| 表 4-52 | ベンチマーク評価結果(電力) .....                                          | 399 |
| 表 4-53 | Moon Village Workshop & Symposium プログラム概要 .....               | 405 |
| 表 4-54 | Space for Inspiration1日目のプログラム概要 .....                        | 412 |
| 表 4-55 | Space for Inspiration2日目のプログラム概要.....                         | 413 |
| 表 4-56 | Lunar Economy パネルの登壇パネリスト .....                               | 417 |



# 1. はじめに

---

## 1.1 調査の目的

我が国は2019年に米国提案のアルテミス計画(有人月探査計画)への参画を決定した。当計画への参画に当たっては、宇宙基本計画(令和5年改定)の中でも「月面での有人活動を持続的に行っていくため、民間の参画も得ながら、無人建設等の新技術を開発・活用して電力・通信・測位システムや食料供給システムなどの技術実証と整備を段階的に行っていく」とあるように、月面での有人活動を持続的に行っていくには、電力確保と安定供給が必要となる。

また、月の極域や永久影等のレゴリス土壌には一定量の水氷が存在すると考えられており、地球の資源に依存しない持続的な月面活動を行うには、これらから水を抽出し、月面離着陸機等の燃料(水素・酸素)等として利用することが不可欠と考えられている。

このような状況を踏まえ、将来の月面活動に必要なエネルギー関連技術の開発・高度化において重要となる月面エネルギーシステム全体に関する技術課題整理を行った。

## 1.2 昨年度の調査結果の概要

令和5年度の調査「令和4年度補正宇宙開発利用推進研究開発(月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理))」(以降、昨年度調査と呼ぶ)では、我が国が米国提案のアルテミス計画(有人月探査計画)への参画およびアルテミス計画後も含めた月・月以遠での持続的な活動において必要不可欠な月面での電力確保と安定供給、および月面上での水の抽出とその利用に必要な関連技術について、要素技術の洗い出しおよび課題の整理(技術課題の整理)、有識者委員会・WG運営、そして国内外動向調査を行った。

技術課題の整理では、「水素」と「電力」に分けて並行して検討を進めた。「水素」は令和3年度、令和4年度に引き続き、水資源の探査から利用までのバリューチェーン全体を対象に検討した。令和5年度の成果としては、理学的条件と工学的条件の2つの観点から資源ゾーンの候補として2つのPSRを設定し、資源ゾーン、サービスゾーン、発着ゾーンの各ゾーンにどの施設を置き、どのようにインターフェースを構築するかなど具体的な施設配置の検討を行ったことが挙げられる。具体的なPSRを設定したことで、距離、温度、傾斜、日照、等の条件が明確となり、解像度が高い検討を行うことが可能となった。一方、「電力」は、主に発電と送電について検討するとともに、電力供給グリッドとしての全体システムの方向性についても検討を行った。電力の供給源は月面上および軌道上での太陽光発電とした。加えて、「水素」側にて検討した2つのPSRに紐づく施設配置に対する電力の供給方法についても検討した。

国内外の動向調査では、水素、電力とも欧米、中国等の海外政府及び研究機関の関連動向について調査するとともに、個別技術の動向についての情報の収集・整理を行った。個別技術の動向についてはベンチマーク調査として、我が国の現状と比較を行った。さらに、2つの国際学会に参加し、情報を収集した。

### 1.3 今年度の調査結果の概要

令和 6 年度も令和 5 年度に引き続き、将来の月面活動に必要となるエネルギー関連技術の開発・高度化を進めるにあたっての月面エネルギーシステム全体に関する技術課題整理として、要素技術の洗い出しおよび課題の整理(技術課題整理)、有識者委員会・WG 運営、そして国内外動向調査を行った。

#### 1.3.1 技術課題整理

技術課題の整理は、過年度と同様に「水素」と「電力」に分けて並行して検討を進めた。「水素」、「電力」とも検討の前提条件およびフェーズを設定し、各フェーズで必要となると想定される技術開発について実証候補項目としてとりまとめた。

#### 1.3.2 有識者委員会・WG

令和 6 年度は、電力 WG と水素 WG を 1 つの WG に統合し、技術課題整理の結果について具体的な内容の議論・検討を行った。さらに WG の成果を横断的に把握し助言等を行うための有識者委員会(親委員会)を設置した。親委員会は、月面サイエンス、電力、水素等に知見を保有する数名の有識者から、検討にあたっての前提条件や視点、留意事項等の助言を得るとともに WG の検討結果を確認していただいた。なお、親委員会は 3 回、WG は 5 回開催した。

#### 1.3.3 国内外動向調査

令和 5 年度までの成果を踏まえ、技術課題整理に関係する内容について国内外の関連動向の調査を行った。調査は「ウェブ・文献調査」、「学会等への参加」、「国内企業等へのヒアリング調査」を組み合わせで行った。

「ウェブ・文献調査」では、主に海外政府および企業の動向について調査を行った。欧米、中国等の海外政府及び研究機関の全体動向について引き続き調査するとともに豪州、中東の取り組みについて調査を行った。個別技術の動向についても引き続き収集・整理し、調査結果を我が国の現状や宇宙技術戦略と比較・整理することで個別技術のベンチマーク調査に反映した。

学会等への参加は、本検討に参考となる情報収集を目的として令和 6 年12月に開催された 8th Global Moon Village Workshop & Symposium および Space for Inspiration に参加し、最新動向の調査を行った。

### 1.4 調査の実施体制

調査は三菱総合研究所(MRI)と日本宇宙フォーラム(JSF)のコンソーシアムで実施した。コンソーシアムの下に有識者委員会を設置し、WG での検討にあたっての前提条件や視点、留意事項、等について助言を頂くとともに、WG の結果の確認を頂く体制とした。WG については、昨年度まで分けていた電力 WG と水素 WG を統合し、月面でのエネルギー確保に関する技術課題を一体的に検討する体制を構築した。

加えて、電力パートについては、宇宙太陽光発電の研究開発を長年実施している宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)を請負外注先とし、月面での電力確保方策についての検討を行える体制を構築した。本調査の実施体制を図 1 1 に示す。

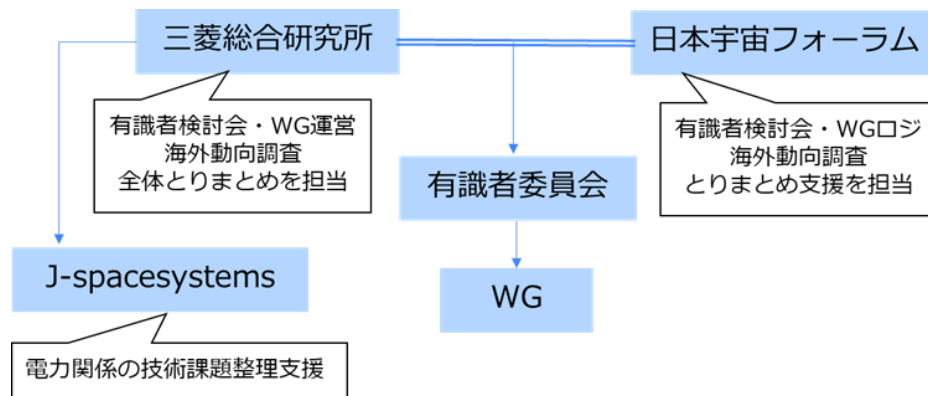


図 1-1 実施体制図

出所)三菱総合研究所作成

## 2. 月面エネルギー関連アーキテクチャ整理(技術課題整理)

技術課題の整理は、「水素」パートと「電力」パートに分け、並行して検討を進めた。「水素」、「電力」とも検討の前提条件およびフェーズを設定し、各フェーズで必要となると想定される技術開発について実証候補項目としてとりまとめた。以下、「水素」パートと「電力」パートのそれぞれの検討の成果を示す。

### 2.1 水素パートに関する技術課題整理

#### 2.1.1 水素パートの検討の要点

月面での水素の継続的な利用に向け、表 2-1 に示す検討を実施した。資源の探査から貯蔵までの推薬プラントに係る一連の各プロセスの検討として月面での推薬プラントの実現に向けた実証候補項目の検討を行った。検討は、【地上／低軌道での実証】と【月面での実証】で大別して整理しており、特に2030年以降に想定される月面での実証では、各年代で必要と想定される各プロセスの具体的な実証項目、月面への装置の輸送重量、装置を稼働させるための必要電力・電力供給形態の整理を行った。また、月面での実証から逆算して直近での地上や低軌道において実証することで合理化が図れる項目については地上／低軌道での実証として取りまとめた。

また、各プロセス単体の検討だけではなく、各プロセスを接続する検討として、月面での資源輸送に係る検討や越夜期間中の熱維持管理に係る検討を実施した。

表 2-1 水素パートの検討の要点

| 検討項目                       | 検討の要点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 月面での推薬プラントの実現に向けた実証候補項目の検討 | <b>【地上／低軌道での実証】</b> <ul style="list-style-type: none"><li>2040年頃の月面推薬プラントの本格稼働の実現に向けて、2020年代後半での実施が望まれる地上・低軌道での実証候補項目を整理した。</li><li>当該地上・低軌道での実証は、月面実証の合理化及び確実性を向上させることを目的としており、月面技術実証に向けた必要最小限の規模とするよう検討した。</li></ul> <b>【月面での実証】</b> <ul style="list-style-type: none"><li>地上・低軌道での実証を踏まえ、2030～2040年での実施が望まれる月面での実証候補項目の検討を実施した。</li><li>月面への輸送費が膨大かつ輸送機会も限定的であることから、地上での実証が困難な月面環境での適用性検証を中心に、初期の個別技術実証から段階的に複数プロセスを統合した技術実証を行う内容とした。</li></ul> |
| 月面での輸送に係る検討                | <ul style="list-style-type: none"><li>推薬プラントの設置場所と資源を確保する場所は一定の距離が離れていることが想定され、長距離かつ大規模な輸送手段の検討が必要である。</li><li>本検討では、月面における各拠点間の経路特性をふまえ、複数の輸送方式を検討した。また、月面における輸送システムの全体像を構築したうえで技術課題の整理と個別の要素技術について検討・整理を行った。</li></ul>                                                                                                                                                                                                                           |
| 熱マネジメントに係る検討               | <ul style="list-style-type: none"><li>推薬プラントに係るシステムの継続的な稼働において、越夜の間は氷結温度以上の熱維持が必要であり、熱の維持管理が重要である。</li><li>本検討では、月面において無線送電を行う際、送電・変換ロスにより多くが熱として排熱されることを踏まえ、熱維持に係る課題を解決する一手段として、電力送電で発生する熱ロスを有効活用し、発電量やシステム規模の合理化の可能性を検討した。</li></ul>                                                                                                                                                                                                             |

出所)三菱総合研究所作成

## 2.1.2 月面での推葉プラントの実現に向けた実証候補項目の検討

### (1) 実証候補項目の全体像

2040年頃の月面推葉プラントの本格稼働を実現に向けて、2030～2040年における月面での段階的な技術実証についての実証候補項目の検討を実施した。ここでの実証候補技術は、地上での実証が困難な月面環境での適用性検証を中心に、初期の個別技術実証から段階的に複数プロセスを統合した技術実証を行う内容としている。

特に月面における実証候補項目の具体内容として、月面での実証目的や意義、検証を行う項目、必要電力、装置のサイズや重量を整理した。また月面プラント計画と実証の前提として、プラントサイト条件・資源条件を明確化するための月面での水探査についてもスコープとした。

また、月面実証のリスクを軽減し、さらに月面実証の規模・内容の合理化を目的として、月面実証の前段階として2020年代からの地上及び低軌道での実証候補項目を策定した。地上・低軌道での実証は必要最小限の規模とするよう検討した。

地上／低軌道における実証候補項目の具体内容も、月面実証と同様に、実証目的や意義、検証を行う項目、必要電力、装置のサイズや重量を整理した。

なお、ここで示す実証候補項目は確定的なものではなく、今後の月面推葉プラントの技術開発の実施に向けた検討の“スタートライン”である。すなわち今後の議論の土台となるものであり、具体化・精緻化されていくものとの位置づけである。

表2-2に本検討で設定した実証フェーズの定義を示す。地上実証フェーズ(フェーズP1)、低軌道実証フェーズ(フェーズP2)のほか月面実証フェーズとして、フェーズ0:単体実証、フェーズ1:部分統合実証、フェーズ2:統合実証／初期稼働、フェーズ3:本格稼働、の計6つのフェーズを設定し、推葉プラント構築において重要な要素技術レベルでの実証を要する項目を対象に実施内容の具体化を行った。

表 2-2 本事業で設定したフェーズ

| フェーズ      | フェーズP1:<br>地上実証                          | フェーズP2:<br>低軌道実証                 | フェーズ0:<br>単体実証                       | フェーズ1:<br>部分統合実証                                | フェーズ2:<br>統合実証/初期稼働            | フェーズ3:<br>本格稼働                  |
|-----------|------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 時期        | 2020年台後半                                 | 2020年台後半                         | 2030年頃                               | 2030～35年頃                                       | 2035～40年頃                      | 2040年頃～                         |
| 目指すもの     | 月面の温度・真空環境模擬試験設備の整備と開発への活用               | 小型1/6G環境での物理現象の試験実施とシミュレーションとの統合 | 水抽出等の特に月面曝露環境で実証が必要な技術、及び単体(要素)技術の実証 | 月面環境で単体(要素)及び個別プロセス機器レベルでの技術実証                  | 実規模相当でプラントシステムの試験稼働(規模は実規模を想定) | プラントシステムの本格稼働(可能な範囲でフェーズ2機器を活用) |
| 主な実証場所・設備 | ・月環境模擬スペースチャンバ等                          | ・ISS「きぼう」人工重力部<br>・ISS「きぼう」曝露部   | ・月面サービスゾーン                           | ・月面サービスゾーン                                      | ・月面サービスゾーン<br>・月面資源ゾーン(一部)     | ・月面サービスゾーン<br>・月面資源ゾーン          |
| 実施事項(例)   | ・月面模擬チャンバの建設<br>・低温・高真空での水状態、熱抽出挙動に関する試験 | ・固液、気液、粒子等の低重力環境下での挙動データ取得       | ・サービスゾーンでの小規模水抽出(精製)<br>・個別要素技術の月面実証 | ・レゴリス環境下での搬送機器動作(耐性)<br>・特に曝露部設置プロセス(搬送・抽出等)の実証 | ・プラント試運転(10日間連続等)<br>・生成物回収、分析 | ・プラント本格運転                       |

出所)三菱総合研究所作成

## (2) 地上・低軌道での実証候補項目案に係る検討

前述のように地上・低軌道での実証については、地上実証フェーズ(フェーズ P1)、低軌道実証フェーズ(フェーズ P2)の 2 つのフェーズを設定し、推葉プラント構築において重要な要素技術レベルでの実証を要する項目を対象に実施内容の具体化を行った

### 1) 検討の前提

検討を行うにあたり、地上実証と低軌道実証のそれぞれについて前提条件を設定した。

#### a. 地上実証を検討するにあたり設定した前提条件:

- 月面環境模擬に関する前提:地上で月面環境を模擬して実証する場合は、「月面特有のどのような環境(1/6 重力、レゴリス、低温、放射線曝露環境等)」を「どのように(地上設備、シミュレーション等)」再現するのかについて整理。

#### b. 低軌道実証を検討するにあたり設定した前提条件:

- 月面環境の模擬に関する前提:低軌道で模擬対象とする月面環境について、「月面特有のどのような環境(1/6 重力、レゴリス、低温、放射線曝露環境等)」を「どのように(ISS 設備等)」再現するのかについて整理。
- 低軌道で利用可能な電力に関する前提:「きぼう」キャビン内では 100[W]程度(1/6G 印加実験では 10W 程度が利用可能と想定)。
- 低軌道で利用可能な装置サイズ・重量に関する前提:「きぼう」では最大で 3U 程度(1/6G を印加する場合、中型キャニスタ(内寸:120×195×71 [mm])に収まるサイズ)程度と想定。

### 2) 各フェーズの実証候補項目のサマリ

フェーズ P1 及びフェーズ P2 において想定される地上／低軌道実証の概観を表 2-3 に示す。

地上実証として対象となるプロセスについては、PSR を想定した低温環境、高真空、1/6 重力及び掘削対象となるレゴリス性情などを模擬可能な設備を活用した要素技術の検証を行う。また、純水処理や電気分解、液化プロセスについては 1/6 重力環境下を模擬したシミュレーションによる解析も実施する。

低軌道実証では、地上実証よりもより実環境に近い放射線曝露や真空状態における装置の検証を実施する。また、純水処理や電気分解、液化プロセスについては国際宇宙ステーション(ISS)・「きぼう」日本実験棟等を活用した 1/6 重力環境下における技術検証を行うとともに、シミュレーション結果との対比・分析を行う。



表 2-3 地上・低軌道に係る実証候補項目の概観

|                       | フェーズ P1:地上実証                                                                                                                                                                                                                                                      | フェーズ P2:低軌道実証                                                                                                              |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | 2020 年台後半                                                                                                                                                                                                                                                         | 2020 年台後半                                                                                                                  |
| 水探査                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>水探査装置の基本性能(掘削能力、レゴリス中揮発成分の分析能力)の確認及び小型水探査ローバーの水探査装置の運搬能力確認</li> </ul>                                                                                                                                                      | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 水抽出                   | 要素技術レベルにおいて特筆すべき地上実証の必要性はない                                                                                                                                                                                                                                       | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 輸送<br>(資源ゾーン⇔サービスゾーン) | <b>【AGV】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>走行性能・寿命 :BBMレベルの検証実施、月面実証モデルの開発への布石</li> <li>施工、輸送物の設置・解除の確認 :EMレベルの検証実施</li> </ul> <b>【長距離輸送インフラ】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>施工方法のための解析や BBM モデルによる検証実施、月面単体実証モデル(データ取得用等)の開発への布石</li> </ul> | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 純水処理                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力下を模擬したシミュレーション解析を通じて、レゴリス微粒子の除去技術及び低重力下における液移送技術の実現性を確認</li> <li>月面の実回収水(サンプルリターン)、または探査情報に基づく同等組成の模擬水を活用して、揮発性成分の除去技術の実現性を確認</li> </ul>                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力環境下における固液分離の挙動をシミュレーション解析結果と比較し、レゴリス微粒子の除去技術及び低重力下における液移送技術の実現性を確認</li> </ul> |
| 電気分解                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力下を模擬したシミュレーション解析、及び 1/6 重力環境下において用水を循環させる機能を実装した電気分解装置実証を通じて、低重力下における気液操作技術の実現性を確認</li> </ul>                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力環境下における固液分離の挙動をシミュレーション解析結果と比較し、低重力下における気液操作技術の実現性を確認</li> </ul>              |
| 高圧化                   | 要素技術レベルにおいて特筆すべき地上実証の必要性はない                                                                                                                                                                                                                                       | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 水素/酸素液化               | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力下を模擬したシミュレーション解析を通じて、低重力下における気液操作技術の実現性を確認</li> </ul>                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>1/6 重力環境下における固液分離の挙動をシミュレーション解析結果と比較し、低重力下における気液操作技術の実現性を確認</li> </ul>              |
| 水素/酸素貯蔵               | <ul style="list-style-type: none"> <li>真空及び放射線曝露状態を模擬した環境における断熱貯槽技術の実現性を確認</li> </ul>                                                                                                                                                                             | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 輸送(サービスゾーン⇔発着ゾーン)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>輸送(資源ゾーン⇔サービスゾーン)の地上実証に包含</li> </ul>                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>輸送(資源ゾーン⇔サービスゾーン)の地上実証に包含</li> </ul>                                                |
| 水素/酸素貯蔵               | <ul style="list-style-type: none"> <li>真空及び放射線曝露状態を模擬した環境における断熱貯槽技術の実現性を確認</li> </ul>                                                                                                                                                                             | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 充填                    | 要素技術レベルにおいて特筆すべき地上実証の必要性はない                                                                                                                                                                                                                                       | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 運転・制御                 | 要素技術レベルにおいて特筆すべき地上実証の必要性はない                                                                                                                                                                                                                                       | 要素技術レベルにおいて特筆すべき低軌道実証の必要性はない                                                                                               |
| 推奨プラント共通              | 要素技術レベルにおいて特筆すべき地上実証の必要性はない                                                                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>真空かつ放射線曝露状態を模擬した環境における水素における酸素漏洩監視技術の実現性を確認</li> </ul>                              |

出所)三菱総合研究所作成

### 3) フェーズ P1(地上実証)における実証候補項目

開発リスクの低減や全体費用の削減等の効果が期待できることから月面での実証の前段階として、推薬プラントに係る各プロセスについて地上実証により要素技術レベルでの実証を先行して実施することが望ましい。

表 2-4 に水探査技術に係る技術開発のうち、水探査装置の開発に係る地上での実証候補項目を示すとともに、表 2-5 に小型水探査ローバーの開発に係る地上での実証候補項目を示す。当該実証では、PSR を想定した低温環境、高真空、1/6 重力及び掘削対象となるレゴリス性情などの月面環境を再現した施設において、実際の運用を模擬したフィールド検証を実施することを目的としており、本実証により得られたデータや課題をもとに月面での実証に向けたフィードバックを行う計画である。

表 2-4 水探査技術(水探査装置の開発)に係る地上での実証候補項目

| 項目            | 詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別          | 地上実証(水探査装置の開発)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証必要性         | <ul style="list-style-type: none"> <li> <b>地上実証の必要性:</b>この開発を通して TRL レベルを 7(=フライトモデルの事前実証)以上に引き上げる。また実際の運用を模擬したフィールド検証(*)を実施することで、実現可能で効果的な月面運用計画の作成に資する経験を得る。         </li> <li> <b>(*)水探査装置の搭載位置/方法はランダー搭載及びローバー搭載を模擬、輸送機との間の通信、運用インターフェースも可能な限り再現する。また実験供試体よりも広いテストフィールドでの実証により、月面運用での課題を識別し最終的な運用計画へのフィードバックを図る。</b> </li> </ul>      |
| 実証期間          | 1 年間(2025 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 模擬対象とする月面環境   | PSR を想定した低温環境、高真空、1/6 重力及び掘削対象となるレゴリス性情<br><b>【(参考)試験環境の想定】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>試験供試体(水探査装置及び搭載模擬治具)よりも広い試験フィールドを想定。</li> <li>掘削検証が含まれることから屋外のフィールドは不適(地中に含有する月面比で多量の水分の影響を懸念)</li> <li>屋内(10x10m以上)でかつシミュラントが最適。次善としてより狭いピット(例:立命館大)や珪砂(例:JAXA)を想定。</li> <li>低温/真空での拳動の検証のためにダスティチャンバでの動作検証もできることが望ましい</li> </ul> |
| 実証可能な場所/選定理由  | <ul style="list-style-type: none"> <li>実証可能な場所:JAXA/宇宙探査実験棟や ESA/LUNA facility</li> <li>選定理由:1/6 重力環境や低温環境を模擬可能であり、広さの条件も満たすため。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                |
| 実証候補項目(実証目標値) | <ul style="list-style-type: none"> <li>水探査装置の基本性能(掘削能力、レゴリス中揮発成分の分析能力)が目標仕様に到達することを検証</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証に必要な電力      | 10[W](月面でのターゲット)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証装置サイズ・重量    | 10[kg](水探査装置), 10[kg]以下目標(付帯する装置類(展開装置やアンカー装置)), TBD[kg](試験用の搭載模擬治具)                                                                                                                                                                                                                                                                      |

出所)三菱総合研究所作成



表 2-5 水探査技術(小型水探査ローバーの開発)に係る地上での実証候補項目

| 項目            | 詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別          | 地上実証(小型水探査ローバーの開発)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証必要性         | <ul style="list-style-type: none"> <li>地上実証の必要性:水探査用のローバーは輸送用ローバーと異なり、多地点で同時運用するために小型で軽量であることが求められる。この開発を通して小型水探査用ローバーのTRLレベルを7(=フライトモデルの事前実証)以上に引き上げる。また実際の運用を模擬したフィールド検証<sup>1</sup>を実施することで、実現可能で効果的な月面運用計画の作成に資する経験を得る。</li> </ul>                                                                                                                                                           |
| 実証期間          | 1年間(2025年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 模擬対象とする月面環境   | <p>高真空、1/6重力及び掘削対象となるレゴリス性情、PSRを想定した低温環境(掘削の検証を同時に行う場合)</p> <p>【(参考)試験環境の想定】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ローバーの走行/水資源探査の検証が可能な広い試験フィールドを想定。</li> <li>掘削検証が含まれることから屋外のフィールドは不適(地中に含有する月面比で多量の水分の影響を懸念)</li> <li>屋内フィールド(10m×10m以上)でかつシミュラントが最適。傾斜の走破性を検証するため地形をある程度作れること。</li> <li>1/6重力の模擬についてはクレーンやバルーンでの重力キャンセルを想定</li> <li>低温/真空での拳動の検証のためにダスティチャンバでの動作検証もできることが望ましい</li> </ul> |
| 実証可能な場所/選定理由  | <ul style="list-style-type: none"> <li>実証可能な場所:JAXA/宇宙探査実験棟やESA/LUNA facility</li> <li>選定理由:1/6重力、走行や搬送実証に必要な広さ、良質で十分な量の月面レゴリス、溶岩チューブを模擬した環境も存在</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証候補項目(実証目標値) | <ul style="list-style-type: none"> <li>水探査装置を運搬してミッションを実施するに足る運搬性や走破性(傾斜地/低温環境)を有することを検証</li> <li>水探査装置との組み合わせで期待される探査性能を発揮できることの検証</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証に必要な電力      | TBD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証装置サイズ・重量    | 10[kg](水探査装置)、20[kg]~30[kg]程度目標(ローバー)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

出所)三菱総合研究所作成

<sup>1</sup> ローバーの運用インターフェースは可能な限り実際の運用を再現する。またローバーが走行可能な広いテストフィールドでの実証により、月面運用での課題を識別し最終的な運用計画へのフィードバックを図る。

表 2-6 に輸送技術に係る地上での実証候補項目を示す。当該実証は月面での実証に向けて、BBM や EM を用いた輸送装置の基本性能の実証・検証を行い、整理した技術課題に対して地上実証で対応可能な項目のこれらを通じて、月面での実証に向けた合理的な検証プロセスを構築し、効率的な技術確立を図ることを目的としている。

表 2-6 輸送技術に係る地上での実証候補項目

| 項目            | 詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別          | 地上実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証必要性         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>地上実証の必要性:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 輸送実証【0,1】の準備として、BBM モデルでの基本性能の実証・検証を行うことで月面での実証の合理化につながる</li> <li>② 地上実証のみでよいと識別された技術課題(AGV の走行機能検証・地質調査以外の大部分)に関して、フェーズ 0/1 の期間も含め、地上での実証・検証を行うことで月面での実証の合理化につながる</li> </ol> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証期間          | <ol style="list-style-type: none"> <li>① 2026～ 1.5 年間(設計～製造:1 年、試験検証:半年)</li> <li>② 2028～ 4 年間 (設計～製造:1 年、試験検証:半年)を <math>2+\alpha</math> サイクル</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証可能な場所/選定理由  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鳥取砂丘月面実証フィールド(ルナテラス)/長距離輸送に必要な平地ゾーン長さ100mであるため/原則無料(原状回復工事に費用発生の可能性有)</li> <li>・ HI-SEAS(ハワイ)/十分に広く、統合的な月面環境であるため。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 実証候補項目(実証目標値) | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1). BBM レベルの AGV による、以下の実証 <ol style="list-style-type: none"> <li>① 想定ワーストの不整地・傾斜地模擬環境※における走破性(30deg、XXcm 障害物、など)</li> <li>② 調査機材の操作</li> <li>③ サービスゾーン⇄資源ゾーンの数往復分の寿命(総走行距離 200km 程度を想定) <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 土壌(不整地、傾斜、段差等) :走破性の観点</li> <li>✓ 熱真空+レゴリス :寿命含む機器動作の観点(帯電などはどのくらい考慮すべきかは不明)</li> <li>✓ 光学条件 :ナビゲーションやハザード検知の為にカメラを使用する場合</li> </ul> </li> </ol> </li> <li>(2). EM レベルの AGV、BBM レベルの長距離インフラ要素の開発による、マルチパーパスオペレーションの実証 <ol style="list-style-type: none"> <li>① 長距離輸送インフラに関する、月面環境特有の影響についての解析検証</li> <li>② EM レベルの AGV による、長距離輸送インフラに関する BBM レベルでの施工試作と動作検証</li> <li>③ EM レベルの AGV と他機器の連携による、以下などのマルチパーパスオペレーションの実証 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ クレーン、ロボットアームとの連携による、荷下ろしなどを含む荷物搬送・設置</li> <li>・ 複数協調制御による大型構造物の輸送</li> <li>・ 水タンク等の荷物の設置／解除の操作の実証(I/F 開発含む)</li> </ul> </li> </ol> </li> </ol> <p>※なお、(2)は実証【1】のフィードバックを行いながら進める。</p> |

出所)三菱総合研究所作成

推葉プラント設備に係るプロセスとして、表 2-7～表 2-10 に純水処理、電気分解、水素・酸素液化に関する地上での実証候補項目を示す。

各プロセスにおける共通の実証候補項目として、1/6 重力環境下において装置内の物質循環がどのような挙動となるのかシミュレーションを通じて確認を行うほか、純水処理については装置開発の上、月面の実回収水(サンプルリターン)、または探査情報に基づく同等組成の模擬水を活用して、揮発性成分の除去技術の実現性を確認する。また、電気分解に関しても、電気分解の系統内の用水を循環させる機能を実装した電気分解装置を開発し、1/6 重力環境下を模擬可能な適切な地上施設のもとで問題なく動作することを確認する。

表 2-7 純水処理技術に係る地上での実証候補項目

| 項目               | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別             | 地上実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証の必要性           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>地上実証の必要性:</b> 水処理システムの長期性能・耐久性、水電解装置への供給制御の安定性を確認する。1/6 重力環境下をシミュレーション上で再現し、後段の低軌道実証、月面実証の合理化を図る。</li> </ul>                                                                                                                                                                                     |
| 実証期間             | 1 年間(2025 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 模擬対象とする月面環境・実施場所 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 月面での実水質データや月面からのレゴリスサンプルを元にした模擬試験が可能な地上設備</li> <li>・ 1/6 重力を模擬したシミュレーション解析</li> </ul>                                                                                                                                                                                                               |
| 実証可能な場所/選定理由     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所: JAXA/宇宙探査実験棟や ESA/LUNA facility</li> <li>・ 選定理由: 1/6 重力環境再現可能であり、良質で十分な量の月面レゴリスが存在するため</li> </ul>                                                                                                                                                                                          |
| 実証候補項目(実証目標値)    | <p>【プラント設備(純水処理)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1/6 重力化を模擬したシミュレーション解析を通じて、レゴリス微粒子の除去技術及び低重力下における液移送技術の実現性を確認</li> <li>・ 月面の実回収水(サンプルリターン)、または探査情報に基づく同等組成の模擬水を活用して、揮発性成分の除去技術の実現性を確認</li> </ul> <p>【実証クライテリア】</p> <p>水電解装置の水質基準(比抵抗率 10 MΩ・cm 以上、TOC(全有機炭素) 50 μg/L 未満)を満たした上での純水の安定供給の確認及び負荷試験(1 年間)における純水処理性能の急激な低下無し。</p> |
| 実証に必要な電力         | 0.4 [kW]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証装置サイズ・重量       | 300 [kg]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-8 電気分解技術に係る地上での実証候補項目

| 項目               | 実証詳細                                                                                                                                                                                                    |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別             | 地上実証                                                                                                                                                                                                    |
| 実証の必要性           | 地上実証の必要性:<br>① 電気分解の系統内の用水を循環させる機能を実装した電気分解装置が、1/6 重力環境下で問題なく動作することを確認する<br>② 1/6 重力環境下において、気液分離がどの様に動作するか確認する<br>③ 後段の月面実証(機械設計上)の合理化に向けて 1/6 重力環境下とシミュレーション(CFD など)との比較検証を行う<br>④ 他サブシステムとの I/F を確認する |
| 実証期間             | 1～2年間(2025 年頃)                                                                                                                                                                                          |
| 模擬対象とする月面環境・実施場所 | ①②1/6 重力下を模擬した試験環境<br>④ アクリル製による気液分離器を製作し、当該製品を活用して気液分離状態の確認を行う<br>④想定した I/F 上に異常がないか検証する(短期運転、連続運転)                                                                                                    |
| 実証可能な場所/選定理由     | ・ 実証可能な場所:JAXA/宇宙探査実験棟や ESA/LUNA facility<br>・ 選定理由:1/6 重力環境再現可能であり、良質で十分な量の月面レゴリスが存在するため                                                                                                               |
| 実証候補項目(実証目標値)    | 【プラント設備(電気分解)】<br>・ 電気分解装置の消費電力量、電圧、循環水量、水素/酸素ガス 圧力(装置系内)<br>・ 1/6 重力化における気液分離の可視化確認                                                                                                                    |
| 実証に必要な電力         | 50[W]程度(装置入力)+数[W](実験による付帯動力)<br>※水素製造量 5[L/日]                                                                                                                                                          |
| 実証装置サイズ・重量       | 10[kg]以下(想定サイズ 300[mm]×300[mm]×300[mmH])—FM 相当品のため重量物となる                                                                                                                                                |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-9 に水素・酸素液化技術に係る地上での実証候補項目を示す。

表 2-9 水素・酸素液化技術に係る地上での実証候補項目

| 項目               | 実証詳細                                                                                                        |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別             | 地上実証                                                                                                        |
| 実証の必要性           | 地上実証の必要性:1/6 重力環境下をシミュレーション上で再現し、後段の月面実証の合理化を図る。                                                            |
| 実証期間             | 1 年間(2025 年頃)                                                                                               |
| 模擬対象とする月面環境・実施場所 | 1/6 重力を模擬したシミュレーション解析                                                                                       |
| 実証可能な場所/選定理由     | ・ 実証可能な場所:JAXA/宇宙探査実験棟や ESA/LUNA facility<br>・ 選定理由:1/6 重力環境再現可能であり、良質で十分な量の月面レゴリスが存在するため                   |
| 実証候補項目(実証目標値)    | 【プラント設備(水素・酸素液化)】<br>・ 1/6 重力化を模擬したシミュレーション解析を通じて、低重力下における気液操作技術の実現性を確認<br><br>【実証クライテリア】<br>気液操作技術の確認、課題抽出 |
| 実証に必要な電力         | N/A(シミュレーションにつき実証装置に係る電力は想定しない)                                                                             |
| 実証装置サイズ・重量       | N/A(シミュレーションにつき実証装置に係る重量は想定しない)                                                                             |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-10 に貯蔵技術に係る地上での実証候補項目を示す。本実証では月面において液化された水素及び酸素の貯蔵技術の検証を目的としており、貯蔵のためのタンクを開発し、地上で真空及び放射線曝露状態における機器動作性や耐久性等を確認する。



表 2-10 貯蔵技術に係る地上での実証候補項目

| 項目               | 実証詳細                                                                                                                                                                          |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別             | 地上実証                                                                                                                                                                          |
| 実証の必要性           | 地上実証の必要性:地上で真空及び放射線曝露状態を再現し、月面実証に先立って機器動作性や耐久性等を確認することで月面実証を合理化。                                                                                                              |
| 実証期間             | 1年間(2025年頃)                                                                                                                                                                   |
| 模擬対象とする月面環境・実施場所 | 真空及び放射線曝露状態                                                                                                                                                                   |
| 実証可能な場所/選定理由     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所:ハルビン工科大学(HIT)SESRI</li> <li>・ 選定理由:地上真空状態+放射線曝露環境の再現が可能のため。</li> </ul>                                                       |
| 実証候補項目(実証目標値)    | <p>【プラント設備(貯蔵)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 真空及び放射線曝露状態を模擬した環境における断熱貯槽技術の実現性を確認</li> </ul> <p>【実証クライテリア】</p> <p>BOG発生レートおよび部材の経年変化の確認</p>                    |
| 実証に必要な電力         | ~0.1[kW]+ $\alpha$ (試験設備に係る電力)                                                                                                                                                |
| 実証装置サイズ・重量       | <p>150[m<sup>3</sup>] / 870[kg]</p> <p>(左記はフルスケールで合計値であるが、試験環境に応じて大幅に小型化可能。月面実証のキャパシティから1/10程度を下限とする必要があるが、電力効率ならびに比サイズ・比重量は単純な比例関係にない他、小型化に伴い著しい悪化が想定されるため、現状正確な算出は現状困難)</p> |

出所)三菱総合研究所作成

#### 4) フェーズ P2(低軌道実証)における実証候補項目

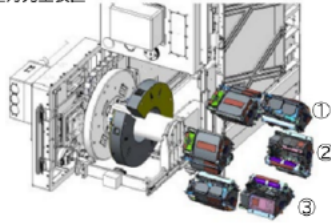
開発リスクの低減や全体費用の削減等の効果が期待できることから、月面での実証の前段階として、地上実証と同様に推薬プラントに係る各プロセスについて低軌道実証により要素技術レベルでの実証を先行して実施することが望ましい。低軌道での実証については、1/6重力環境下での装置の動作確認や曝露環境下における水素・酸素の漏えい監視技術の確認などが主となることが想定されるが、低軌道での実証は実験に利用可能なリソースが限られていることもあり、一括で実証可能な複数プロセスを束ねたパッケージ案を作成した。

1点目の実証候補項目のパッケージ案は、「きぼう」船内実験室の小動物飼育装置(Mouse Habitat Unit: MHU)内部の人工重力発生装置の複数のチャンバー内に純水処理、電気分解、水素・酸素液化装置を格納し、実験を行う計画である。本実験では、1/6重力環境下を模擬した各試験装置内において、装置が正常に動作するか検証を行う計画である。

本実証候補項目のパッケージ案は、今後月面の水資源を利用した推薬プラントや燃料電池などの実証が進められることが想定される中、利用ニーズの高い純水及び水素・酸素の生成に係る技術を実証するものであり、実施する意義は高いと考えられる。以上の内容をまとめた実証のイメージを図 2-1に示す。

また、当該パッケージ案を構成する各個別技術に係る低軌道での実証候補項目を表 2-11 から表 2-13 に示す。純水処理、電気分解、液化技術に係る低軌道での実証候補項目では、1/6重力環境下において、各装置の機能検証を行う計画である。また、当該プロセスは地上実証においてもシミュレーションを用いた挙動の確認も行っていることから、実験結果との比較検証もあわせて実施する。

▼小動物飼育装置(Mouse Habitat Unit: MHU)内部の人工重力発生装置



#### 船内実験室内部

##### チャンバー①



##### 純水処理装置

- ・レゴリス模擬水の1/6重力下における挙動及びフィルタのレゴリス除去可能性等の純水処理装置の性能を確認
- ・重量10[kg]、消費電力10[W]程度

##### チャンバー②



##### 電気分解装置

- ・1/6重力下で電気分解を行い、水中の気液分離(酸素もしくは水素)がどのような挙動を示すのか確認
- ・重量10[kg]、消費電力50～60[W]程度

##### チャンバー③



##### 水素・酸素液化装置

- ・1/6重力下において液化により発生した液体が装置内部でどのような挙動を示すのか確認
- ・重量5[kg]×4、消費電力28[W]程度

図 2-1 純水処理・電気分解・水素・酸素液化に係る低軌道実証パッケージ案

出所)「きぼう」船内実験室利用ハンドブック

<[https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/pm\\_handbook.pdf](https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/pm_handbook.pdf)>, p.35, 最終閲覧日:2025 年 3 月 24 日)を活用し、三菱総合研究所作成

表 2-11 純水処理技術に係る低軌道での実証候補項目

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別              | 低軌道実証                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証の必要性            | <b>低軌道実証の必要性:</b> 1/6 重力環境下を低軌道上で再現、または微小重力環境下にて後段の月面実証の合理化を図る。                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証期間              | 1 年間(2028 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 模擬対象とする月面環境       | 1/6 重力を模擬した実験施設、または微小重力環境下での実験施設                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証可能な場所/選定理由      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所:「きぼう」ISS 日本実験棟や Axiom Hab</li> <li>・ 選定理由:LEO での科学研究、製造、技術実証用プラットフォームであり、安定した微小重力環境が存在するため。</li> </ul>                                                                                                                          |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <b>【プラント設備(純水処理)】</b><br>1/6 重力環境下における固液分離の挙動をシミュレーション解析結果と比較し、レゴリス微粒子の除去技術及び低重力下における液移送技術の実現性を確認<br><b>【実証クライテリア】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1/6 重力環境におけるレゴリス粒子の圧密性の低下影響をシミュレーションに反映できている</li> <li>・ 1/6 重力環境の模擬実験施設が使用不可の場合、微小重力環境下における液移送技術を確認する</li> </ul> |
| 実証に必要な電力          | 10 [W]程度(レゴリス粒子の流動性確認試験における遠心機の電力)                                                                                                                                                                                                                                               |
| 輸送重量              | 10 [kg](レゴリス粒子の流動性確認試験装置)                                                                                                                                                                                                                                                        |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-12 電気分解技術に係る低軌道での実証候補項目

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別              | 低軌道実証                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証の必要性            | <b>低軌道実証の必要性:</b><br>① 電気分解の系統内の用水を循環させる機能を実装した電気分解装置要素部が、1/6 重力環境下で問題なく動作することを確認する<br>② 1/6 重力環境下において、気液分離がどの様に動作するか確認する<br>③ 後段の月面実証(機械設計上)の合理化に向けて 1/6 重力環境下とシミュレーション(CFD など)との比較検証を行う(地上実証検証で確認したことを、低軌道上において同様の動作検証を行い、再現性の確認を行う)<br>④ シミュレーション上との整合確認を行う |
| 実証期間              | 1 年間(2028 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 模擬対象とする月面環境       | 1/6 重力を模擬した実験施設                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証可能な場所/選定理由      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所:「きぼう」ISS 日本実験棟や Axiom Hab</li> <li>・ 選定理由:LEO での科学研究、製造、技術実証用プラットフォームであり、安定した微小重力環境が存在するため。</li> </ul>                                                                                                        |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <b>【プラント設備(電気分解)】</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>・ 装置の消費電力量、電圧、循環水量、水素/酸素ガス 圧力(装置系内)</li> <li>・ 1/6 重力化における気液分離の可視化確認</li> </ul> <b>【実証クライテリア】</b><br>想定した I/F 上に異常がないか検証する(短期運転、連続運転)                                                          |
| 実証に必要な電力          | 50[W]程度(装置入力)+数[W]程度(実験による付帯動力)<br>※水素製造量 5[L/日]                                                                                                                                                                                                               |
| 実証装置サイズ・重量        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 重量:10[kg]以下(FM 相当品のため重量物)</li> <li>・ サイズ:300[mm]×300[mm]×300[mmH](FM 相当品のため重量物)</li> </ul>                                                                                                                            |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-13 に水素・酸素液化技術に係る低軌道での実証候補項目を示す。

表 2-13 水素・酸素液化技術に係る低軌道での実証候補項目

| 項目            | 実証詳細                                                                                                                                                                                         |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別          | 低軌道実証                                                                                                                                                                                        |
| 実証の必要性        | <b>低軌道実証の必要性:</b><br>1/6 重力環境でのラジエータ部での物質流体挙動(凝縮・流動)を低軌道上で小規模実証することで、後段の月面実証の合理化を図る。                                                                                                         |
| 実証期間          | 1 年間(2028 年頃)                                                                                                                                                                                |
| 模擬対象とする月面環境   | 1/6 重力下における固体・気体・液体多相環境での流動等の物理挙動                                                                                                                                                            |
| 実証可能な場所/選定理由  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所:「きぼう」ISS 日本実験棟や Axiom Hab</li> <li>・ 選定理由:LEO での科学研究、製造、技術実証用プラットフォームであり、安定した微小重力環境が存在するため。</li> </ul>                                      |
| 実証候補項目(実証目標値) | <b>【プラント設備(水素・酸素液化)】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1/6 重力環境下における気泡生成(沸騰模擬)、液滴生成(凝縮模擬)現象</li> <li>・ 1/6 重力環境下における気液分離、固液分離現象</li> </ul><br><b>【実証クライテリア】</b><br>気液操作技術の確認、課題抽出 |
| 実証に必要な電力      | 固気液挙動観察ユニット:7[W]×4[台]=28[W]                                                                                                                                                                  |
| 実証装置サイズ・重量    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 重量:5[kg]×4[台](固気液挙動観察ユニット)</li> <li>・ サイズ:210[mm]×80[mm]×130[mm]</li> </ul>                                                                         |

出所)三菱総合研究所作成

2 点目の実証候補項目のパッケージ案は、「きぼう」船外実験プラットフォームにおいて、地球から持参した水素・酸素を液化装置に入力し、液化を実証するとともに、漏洩の監視技術の実証を実施する計画である。

本実証候補項目のパッケージ案は、今後月面プラントの運用において液化技術は必須であり、可燃性の気体である水素・酸素の管理は高いレベルで求められる中、月面での利用が大幅に拡大することが想定される当該気体の漏えい監視技術の実証するものであり、実施する意義は高いと考えられる。以上の内容をまとめた実証のイメージを図 2-2 に示す。

また、当該パッケージ案を構成する個別技術に係る低軌道での実証候補項目を表 2-14 に示す。本実証候補項目では、船外実験プラットフォームに漏えい装置から気体を漏えいさせ、音響センサーや IR カメラを用いて監視する。また、機器の真空化への対応可否や低温維持手法の確認、反応距離や検知限界量の確認などもあわせて実施する計画である。



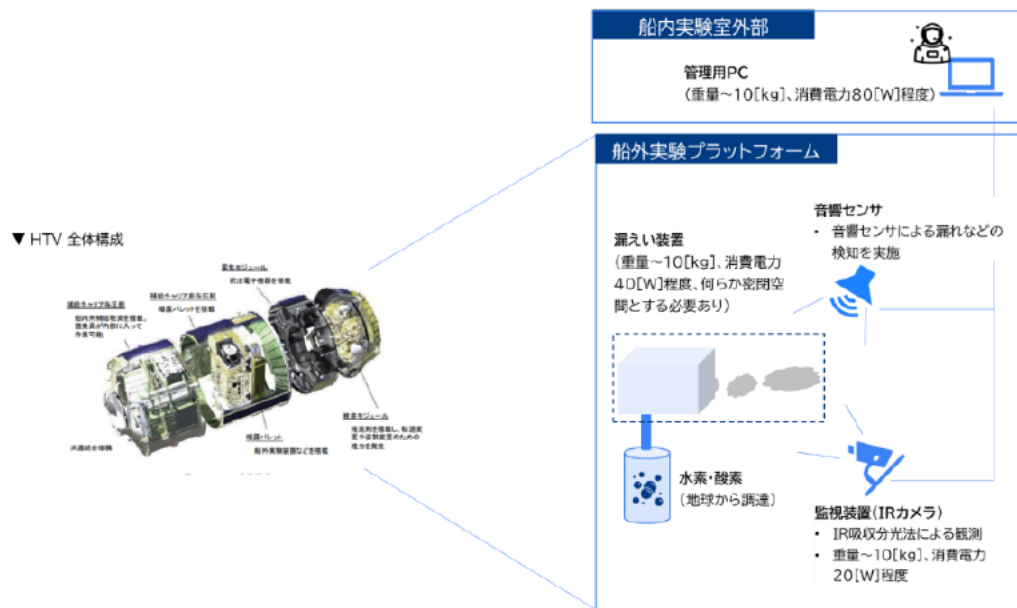


図 2-2 水素・酸素漏えい監視技術に係る低軌道実証パッケージ案

出所) (きぼう船外実験プラットフォーム利用ハンドブック

<[https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/ef\\_handbook.pdf](https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/ef_handbook.pdf)>, p.81, 最終閲覧日: 2025 年 3 月 24 日) を活用し、三菱総合研究所作成

表 2-14 に推奨プラント共通技術のうち、水素・酸素の漏えい監視技術に係る低軌道での実証候補項目の具体内容を示す。

表 2-14 水素・酸素の漏えい監視技術に係る低軌道での実証候補項目

| 項目            | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証種別          | 低軌道実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証の必要性        | <b>低軌道実証の必要性:</b> 低軌道で真空及び放射線曝露状態を再現し、月面実証に先立って機器動作性や耐久性等を確認することで月面実証を合理化。                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証期間          | 1 年間(2028 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 模擬対象とする月面環境   | 真空及び放射線曝露環境                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証可能な場所/選定理由  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証可能な場所: Varda Space Industries/アメリカ</li> <li>・ 選定理由: 真空状態+放射線曝露環境が実現可能なため</li> </ul>                                                                                                                                                                       |
| 実証候補項目(実証目標値) | <p>【プラント設備(共通)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 真空及び放射線曝露状態を模擬した環境における水素および酸素漏洩監視技術の実現性を確認</li> <li>・ 機器の真空化、低温維持手法の確認、反応距離や検知限界量の確認</li> </ul> <p>【実証クライテリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水素、酸素を実際に規定量漏洩させて、漏洩事象の確認ができること。</li> <li>・ 規定量に相関した漏れ量の傾向が取れること。</li> </ul> |
| 実証に必要な電力      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ キャビン内: 100[W] (80[W] (PC) + 20[W] (カメラ 1 台))</li> <li>・ 暴露環境: 60[W] (40[W] (装置部) + 20[W] (カメラ 1 台))</li> </ul>                                                                                                                                              |
| 実証装置サイズ・重量    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 重量: 30[kg] (ノート PC × 1 + カメラ × 2 + 水素/酸素放出装置 + 試験用水素/酸素)</li> <li>・ サイズ: 120[mm] × 190[cm] × 70[mm] (カメラは別途設置)</li> </ul>                                                                                                                                   |

出所) 三菱総合研究所作成

## 5) 低軌道での実証環境に係る調査

低軌道での実証の検討にあたって、現状低軌道での実証が実施可能な施設にどのようなものが存在するか調査を行った。調査結果を表 2-15 に示す。微小重力環境を再現可能とする施設が多く、実験の種別としては製薬や医薬品等の開発目的がメインである。

表 2-15 低軌道実証可能な施設一覧

| 国            | 保有機関            | 施設名・場所                   | 模擬可能な環境       | 施設概要                                                                                                                                          |
|--------------|-----------------|--------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日本           | JAXA            | 「きぼう」日本実験棟               | 微小重力環境        | <ul style="list-style-type: none"> <li>国際宇宙ステーション(ISS)・「きぼう」日本実験棟に搭載された人工重力発生装置を用いて月面おける重力を模擬</li> <li>有人安全要求(火災対策、感電防止等)を遵守する必要あり</li> </ul> |
|              | Digital Blast 社 | AMAZ、TAMAKI など           | 微小重力環境        | 装置の一部を回転させることにより生じる遠心力を用いて、月面と同じ地球の 6 分の 1 の重力を再現                                                                                             |
| イタリア<br>フランス | ESA             | Space Rider              | 微小重力環境        | 微小重力環境下で以下のテーマの研究が可能。<br>・ 製薬、バイオメディカル、生物学、物理科学                                                                                               |
| イギリス         | Space Forge 社   | Forge Star               | 微小重力環境        | 微小重力環境下で以下のテーマの研究が可能。<br>・ 新素材、新医薬品化合物の軌道上検証・実証                                                                                               |
| ドイツ等         | DLR 等           | MASON                    | 微小重力環境        | 微小重力環境下でコンクリートの製造実験が可能                                                                                                                        |
| アメリカ         | Axiom Space 社   | Axiom Hab                | 微小重力環境        | 微小重力環境下で以下のテーマの研究が可能。<br>・ 生物学&生命科学、人間の健康研究、物理学、地球観測                                                                                          |
|              | Varda Space 社   | Winnebago-1 など           | 微小重力環境        | 微小重力環境下で以下のテーマの研究が可能。<br>・ 医薬品の開発                                                                                                             |
| 中国           | CNSA            | 天舟 8 号(宇宙船)・天宮(宇宙ステーション) | 極低温環境・放射線環境など | 模擬レゴリスを用いて作られたレンガの性能評価(機械的特性、断熱性能、耐放射線性能)が可能。                                                                                                 |

出所)公開情報にもとづいて三菱総合研究所作成

### (3) 月面での実証候補項目案に係る検討

#### 1) 検討の前提

水素に係る月面での実証候補項目は、表 2-16 に示すようにフェーズ 0 からフェーズ 3 に該当する部分について、推薬プラント構築において重要な要素技術レベルでの実証を要する項目を対象に実施内容の具体化を行った。月面実証を検討するにあたって設定した前提条件を以下に示す。

- 月面への輸送量: 共通的な利用が可能な与圧設備、バッファタンクは個別実証とは分離した費用計上を前提とし、推薬プラントに係る輸送量に含めない方針とした。また、電力関連設備も本実証項目の輸送量に含めていない。輸送設備については昨年度は共通インフラ項目として除外していたが、本年度は月面プラント実証・操業に必要な重量を積算した。
- プラント設備の稼働時間: 候補地点の地形情報に基づく日照パターンを踏まえ、年間約 6500 時間(約 75%)の稼働時間を前提とした。

- 月面上での輸送: 資源ゾーン→サービスゾーン、サービスゾーン→発着ゾーン間の輸送は、ローバーによることを前提とした。
- 探査:【探査実証】は、主に水資源の商業利用に関する水探査(平面・深度分布、量、不純物※、埋設地盤情報等)を行う。  
 ※ 実際の水資源探査では水以外の物質(揮発性／不揮発性物質、レゴリス粉塵等含む)の種別や量などの詳細情報が必要となる。一方で、水以外の物質(LCROSS データからは硫化水素(H<sub>2</sub>S)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)等が多く含まれる)はロケット推奨とは異なる利活用方法も検討されている。

表 2-16 水素に係る実証候補項目における月面実証の位置づけ

| フェーズ      | フェーズP1:<br>地上実証                          | フェーズP2:<br>低軌道実証                 | フェーズ0:<br>単体実証                       | フェーズ1:<br>部分統合実証                                | フェーズ2:<br>統合実証/初期稼働            | フェーズ3:<br>本格稼働                  |
|-----------|------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 時期        | 2020年台後半                                 | 2020年台後半                         | 2030年頃                               | 2030～35年頃                                       | 2035～40年頃                      | 2040年頃～                         |
| 目指すもの     | 月面の温度・真空環境模擬試験設備の整備と開発への活用               | 小型1/6G環境での物理現象の試験実施とシミュレーションとの統合 | 水抽出等の特に月面曝露環境で実証が必要な技術、及び単体(要素)技術の実証 | 月面環境で単体(要素)及び個別プロセス機器レベルでの技術実証                  | 実規模相当でプラントシステムの試験稼働(規模は実規模を想定) | プラントシステムの本格稼働(可能な範囲でフェーズ2機器を活用) |
| 主な実証場所・設備 | ・月環境模擬スペースチャンバ 等                         | ・ISS「きぼう」人工重力部<br>・ISS「きぼう」曝露部   | ・月面サービスゾーン                           | ・月面サービスゾーン                                      | ・月面サービスゾーン<br>・月面資源ゾーン(一部)     | ・月面サービスゾーン<br>・月面資源ゾーン          |
| 実施事項(例)   | ・月面模擬チャンバの建設<br>・低温・高真空での氷状態、熱抽出挙動に関する試験 | ・固液、気液、粒子等の低重力環境下での挙動データ取得       | ・サービスゾーンでの小規模水抽出(精製)<br>・個別要素技術の月面実証 | ・レゴリス環境下での搬送機器動作(耐性)<br>・特に曝露部設置プロセス(搬送・抽出等)の実証 | ・プラント試運転(10日間連続等)<br>・生成物回収、分析 | ・プラント本格運転                       |

出所)三菱総合研究所作成

本実証候補項目の検討にあたっては各フェーズにおける実証で輸送が必要となる装置の重量についても整理している。

月面での実証に向けて大きな課題となる事項の一つが月面への輸送費であり、現状 NASA における商業月面輸送サービス(Commercial Lunar Payload Services:CLPS)ベースでは\$1 Million/kgが見込まれている。一方で、今後の技術進展等を勘案すると輸送コストは減少することが想定される。今後の検討の参考情報として想定される月面への輸送コストの変遷を図 2-3 に整理した。現状の NASA における商業月面輸送サービスベースの価格から減少するパターンと、Starship 等で月面に大量の輸送が可能となることによる劇的な低下が起こるパターンの2つを想定した。

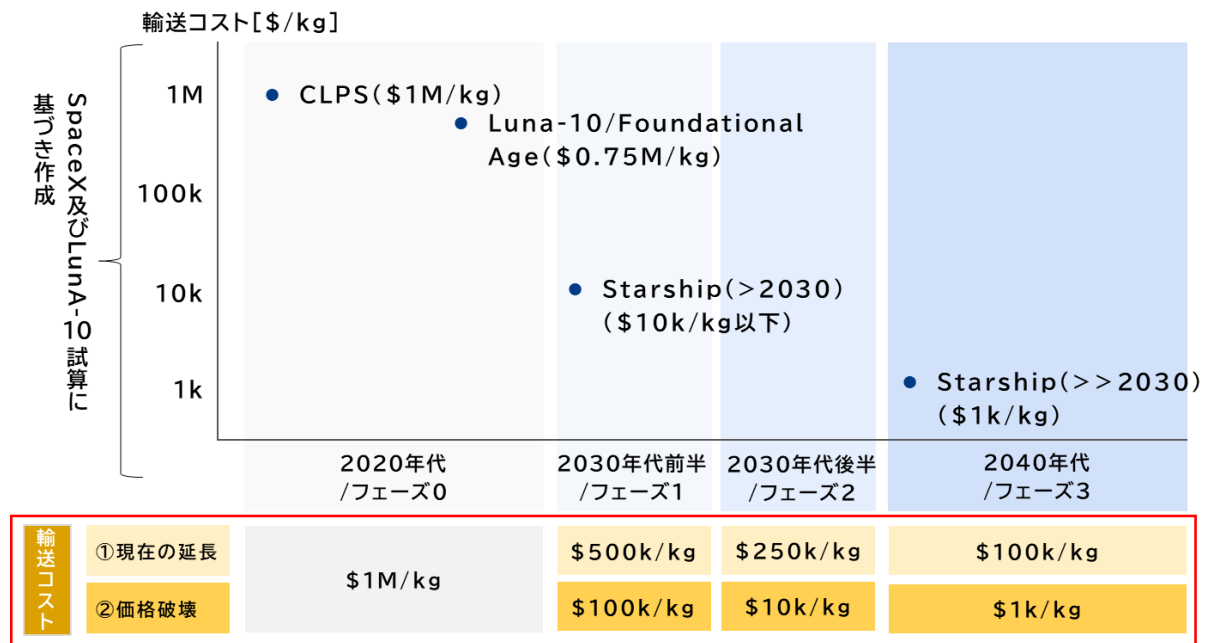


図 2-3 想定される月面への輸送コストの変遷

出所)三菱総合研究所作成

## 2) 各フェーズにおける実証候補項目のサマリ

フェーズ0～3の各フェーズにおける月面での実証候補項目を表2-17に示す。ここでは推薬プラント設備に係る実証のほか、探査に係る探査実証や月面での輸送システムに係る輸送実証、共通的に実証が必要となる統合システムに係る実証も検討した。なお各フェーズと実証候補項目をリンクさせるため、フェーズ0における探査実証は「探査実証【0】」、フェーズ2における推薬プラント設備に係る実証は「実証【2-①a】【2-①b】【2-②】」といった形で以降、表記する。

以降にフェーズ0～3での個別の検討内容について順次、記載する。

表 2-17 各フェーズにおける実証候補項目の詳細

|                   | フェーズ0:単体実証                                                       | フェーズ1:部分統合実証                                                        | フェーズ2:統合実証/初期稼働                                                                        | フェーズ3:本格稼働                                                                                    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | 2030年頃                                                           | 2030年～2035年頃                                                        | 2035年～2040年頃                                                                           | 2040年頃～                                                                                       |
| 水探査               | サービスゾーンでの実証に必要な項目(水の状態・量・分布)の確認<br>【2030年以前に2STEPで実施】            | 資源ゾーンでの実証に必要な項目(水の状態・量・分布などの)の確認<br>【実証(1)】                         |                                                                                        |                                                                                               |
| 水抽出               | サービスゾーンで地表近傍のレゴリスから現地で水を調達(熱抽出)し、タンクへの貯蔵を確認<br>【実証(0-①)】         | ・サービスゾーンで地下レゴリスから現地で水を調達(熱抽出)し、タンクへの貯蔵を確認<br>【実証(1-①)】              | ・資源ゾーンで動作及び保管確認<br>・サービスゾーンでレゴリスから現地で水を調達(フェーズ1より多量処理)<br>【実証(2-①a)】                   | 資源ゾーンでレゴリスから現地で水を調達及び保管確認<br>【実証(3)】                                                          |
| 輸送(資源ゾーン⇄サービスゾーン) | ・AGVIに係る実証:サービスゾーン⇄資源ゾーン間の往復走破<br>・長距離輸送インフラに係る施行FS<br>【輸送実証(1)】 | ・水貯蔵タンク搭載のローバ(複数台)を用いて調達した水をPSR外へ輸送<br>・長距離輸送インフラの部分導入<br>【輸送実証(2)】 |                                                                                        | ・水貯蔵タンク搭載のローバによるサービスゾーンまでの輸送の確認<br>・長距離輸送インフラ構築本格着手                                           |
| 純水処理              |                                                                  | 現地で調達した水を用いて純水処理→水素液化処理の確認(水抽出仮定でタンクに補充したレゴリス水を利用)<br>【実証(1-②)】     |                                                                                        | ・与圧区内で確保した現地水を用いて純水処理→水素液化の確認(処理量の増加)<br>・上記と連結して曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(処理量の増加)        |
| 電気分解              |                                                                  |                                                                     | ・与圧区内で確保した現地水を用いて純水処理→水素液化処理の確認<br>・上記と連結して曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認<br>【実証(2-①b)】 |                                                                                               |
| 高圧化               |                                                                  |                                                                     |                                                                                        |                                                                                               |
| 水素/酸素液化           |                                                                  |                                                                     |                                                                                        |                                                                                               |
| 水素/酸素貯蔵           |                                                                  |                                                                     |                                                                                        |                                                                                               |
| 輸送(サービスゾーン⇄発着ゾーン) |                                                                  |                                                                     | ・液体水素・酸素貯蔵タンク搭載のローバによる物資輸送の確認<br>・発着ゾーンの曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認<br>【実証(2-②)】     | ・液体水素・酸素貯蔵タンク搭載のローバによる輸送の確認(輸送量増加による対応性確認)                                                    |
| 水素/酸素貯蔵           |                                                                  |                                                                     |                                                                                        | 発着ゾーンの曝露環境下において酸素液化処理及び水素/酸素貯蔵過程の確認(貯蔵量増加の対応性確認)                                              |
| 充填                |                                                                  | 【実証共通】<br>情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立<br>・水保管のためのバッファタンク          | 【実証共通】<br>推奨プラント設備関連の運転制御(制御範囲拡大)<br>・水及び液体水素/酸素保管のためのバッファタンク<br>・与圧区画の熱管理設備(範囲拡大)     | 発着ゾーンで着陸船等への充填を確認<br>推奨プラント設備関連の運転制御(制御範囲拡大)<br>・水及び液体水素/酸素保管のためのバッファタンク<br>・与圧区画の熱管理設備(範囲拡大) |
| 統合システム            | 運転制御                                                             |                                                                     |                                                                                        |                                                                                               |
|                   | 付帯設備                                                             |                                                                     |                                                                                        |                                                                                               |

出所)三菱総合研究所作成

### 3) フェーズ 0 における実証候補項目

フェーズ 0 における月面のイメージと、各ゾーンにおける活動のイメージを図 2-4 及び図 2-5 に示す。フェーズ 0 ではサービスゾーン周辺で実証が行われるとし、探査やレゴリスからの水抽出に係る実証が行われると想定した。

探査実証としては表 2-18 及び表 2-19 に示すように 2 段階に分けて行われるものとし、最初の段階ではランダーによる探査装置の実証、次の段階ではローバーによる探査を行うものとした。

推奨プラント設備に係る実証としては表 2-20 に示すように水抽出に係る実証を想定した。水抽出ではサービスゾーンにおける低温環境や 1/6 重力下及びレゴリス粉塵付着環境下での技術実証を行うものとし、熱抽出による 10g/日レゴリス抽出水の獲得を目的とした実証を行うものとした。



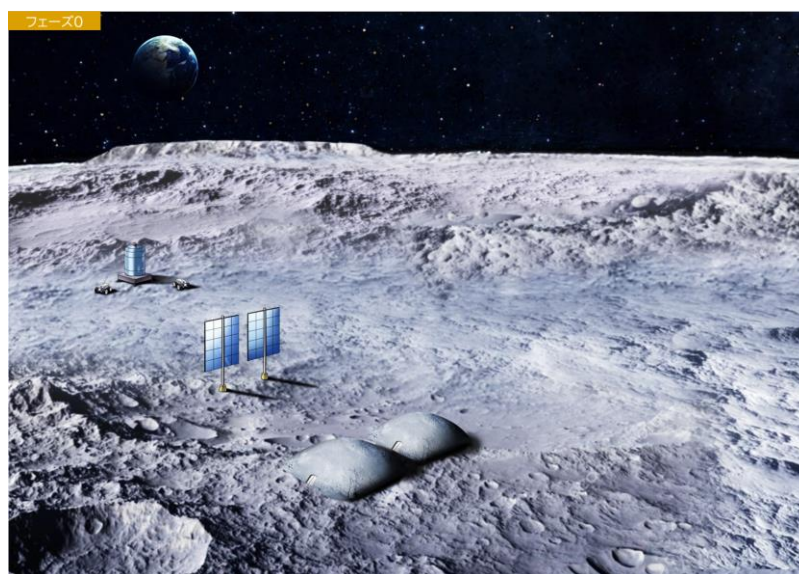


図 2-4 フェーズ 0 における月面のイメージ

出所)三菱総合研究所作成

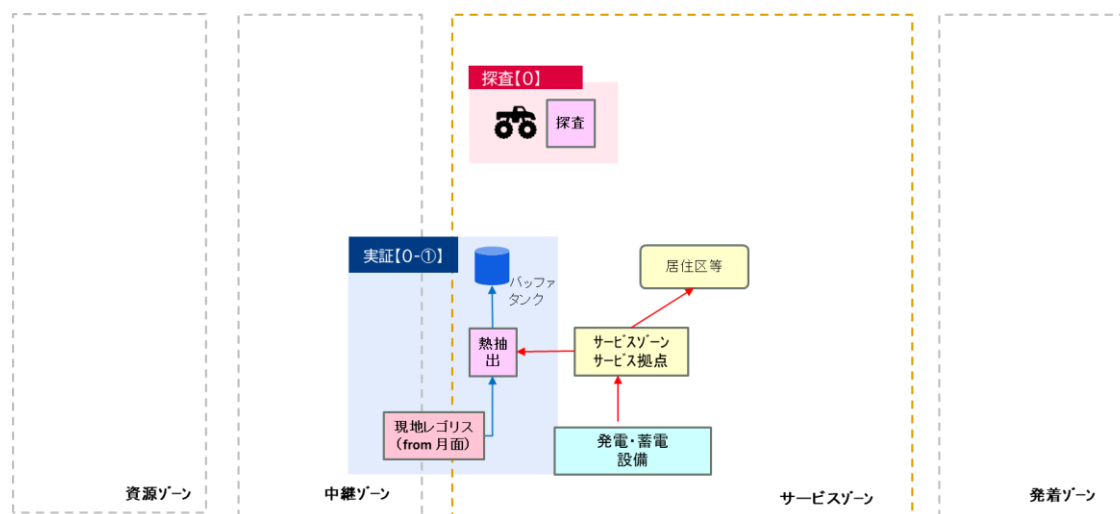


図 2-5 フェーズ 0 における各ゾーンでの活動イメージ

出所)三菱総合研究所作成

表 2-18 実証候補項目【探査実証0 STEP1】に係る詳細内容①

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的:</b> サービスゾーンを中心に探査性能(水の状態・量・分布等)を実証</li> <li>・ <b>月面実証の必要性:</b> 探査装置は月面上で稼働した実績がなく、探査技術の確立が必要</li> </ul>                                                                             |
| 実証期間              | 2027年                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | STEP1:ランダー搭載で1か所を試掘の上、下記項目を確認(探査技術の獲得) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 着月地点: 月の昼間(約14日間)を通して日照が確保できるエリア</li> <li>・ 探査深度: 最大1.0m, 比較的浅い0.5m以内の範囲に注力</li> <li>・ 水の検出能力: 0.1wt%以下の精度</li> <li>・ 水の状態: 水の溶解物質の検出を試行</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | 【サービスゾーンへの電力】⇒計10(TBD) [W](水探査装置への供給電力)                                                                                                                                                                                             |
| 月面への必要輸送量         | 約10[kg](実証用水探査装置のみ)                                                                                                                                                                                                                 |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-19 実証候補項目【探査実証0 STEP2】に係る詳細内容②

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的:</b> サービスゾーンを中心に探査性能(水の状態・量・分布等)を実証し、水資源採掘チームに共有</li> <li>・ <b>月面実証の必要性:</b> サービスゾーンの特定の領域だけではあるが、水資源データを水資源採掘チームに共有可能。</li> </ul>                                                                                                                                                                             |
| 実証期間              | 2028年～2029年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | STEP2:ローバー搭載で複数個所を試掘の上、水資源マップ(初期版)を水資源採掘チームへ提供(初期探査段階) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 着月地点: PSRより温度条件、日照/電力条件を緩和できる地点(日照/日陰の境界域)</li> <li>・ 探査範囲: 6か所(130m×260mのエリア)</li> <li>・ 探査深度: 最大1.0m, 比較的浅い0.5m以内の範囲に注力</li> <li>・ 水の検出能力: 0.1wt%以下の精度</li> <li>・ 水の状態: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S等の水溶解成分を検出</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | 【サービスゾーンへの電力】⇒計10(TBD) [W]<br>*水探査装置への供給電力<br>*ローバーへの電力供給は日照域にて独立した電源確保をする想定                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量         | 約35[kg](実証用水探査装置10[kg]および実証用水探査装置を搭載するローバー質量25[kg])                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

出所)三菱総合研究所作成



表 2-20 実証候補項目【0-①】(水抽出)に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的</b>:レゴリスからの水の抽出(熱抽出)の技術的可能性の確認</li> <li>・ <b>月面実証の必要性</b>:月面上のレゴリスから水を抽出する実証であり地上では不可能。また、曝露環境でのローバーを活用した水抽出であり、低温環境(サービスゾーン)への対応や 1/6 重力下及びレゴリス粉塵付着の環境下における挙動の確認を行う観点で月面実証が必要。</li> </ul>                                                                                                                                             |
| 実証期間              | 1 年間(2030 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <b>【プラント設備】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>熱抽出</b>:10g/日レゴリス抽出水の獲得(下記①～③に示すコンポの動作確認含む) <ul style="list-style-type: none"> <li>① 熱媒体となる気体を昇温する(蒸発器)</li> <li>② 加熱した熱媒体による対流で月面レゴリス内の水氷を気化させる(ブローワー)</li> <li>③ 気化したレゴリス抽出水を凝縮させて水として回収する(凝縮器)</li> </ul> </li> </ul> <b>【その他設備】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>バッファタンク</b>:①レゴリス抽出水の適切な保管</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | <b>【サービスゾーンへの電力】⇒計 6[kW]</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱抽出への供給電力:1[kW](実証用熱抽出装置 1 台を用いた実証と前提)</li> <li>・ バッファタンク(保管):5[kW]</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量         | <b>【プラント設備】</b><br>約 10[kg](実証用熱抽出装置のみ)<br><b>【プラント付帯設備】</b><br>※バッファタンクは既に設置されていると仮定し、個別の実証における必要輸送量には計上しない。                                                                                                                                                                                                                                                                         |

出所)三菱総合研究所作成

#### 4) フェーズ 1 における実証候補項目

フェーズ 1 における月面のイメージと、各ゾーンにおける活動のイメージを図 2-6 及び図 2-7 に示す。フェーズ 1 ではサービスゾーン周辺での実証に加えて資源ゾーンでの探査が行われるとし、探査やレゴリスからの水抽出、純水処理、水電解に係る実証が行われると想定した。

探査実証としては表 2-21 に示すように PSR で複数地点を試掘の上、水資源マップ(アップデート版)を水資源探掘チームへ提供するための多点探査を行うものとした。

推薬プラント設備に係る実証としては表 2-22 及び表 2-23 に示すように水抽出及び純水処理、水電解に係る実証を想定した。水抽出では資源ゾーンで採取したレゴリスからの水抽出のほか、抽出水のバッファタンクまでの輸送を実証するものとした。純水処理及び水電解では、レゴリス抽出水を使用した純水処理設備と水電解設備の利用可能性及び両設備間の I/F 確認のほか、推薬プラント関連設備に係る運転制御の確認を行うものとした。このほか、表 2-24 に示すように遠隔運転・制御技術に係る実証をするものとし、統合 SCADA と情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立等の実証を想定した。

月面での輸送システムに係る実証として表 2-25 に示すような AGV 及び長距離輸送インフラに係る実証を想定した。

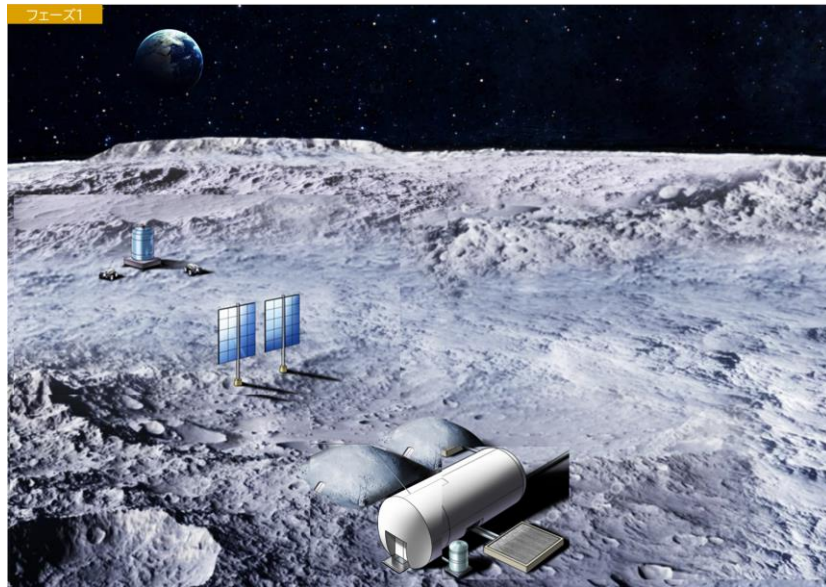


図 2-6 フェーズ 1 における月面のイメージ

出所)三菱総合研究所作成

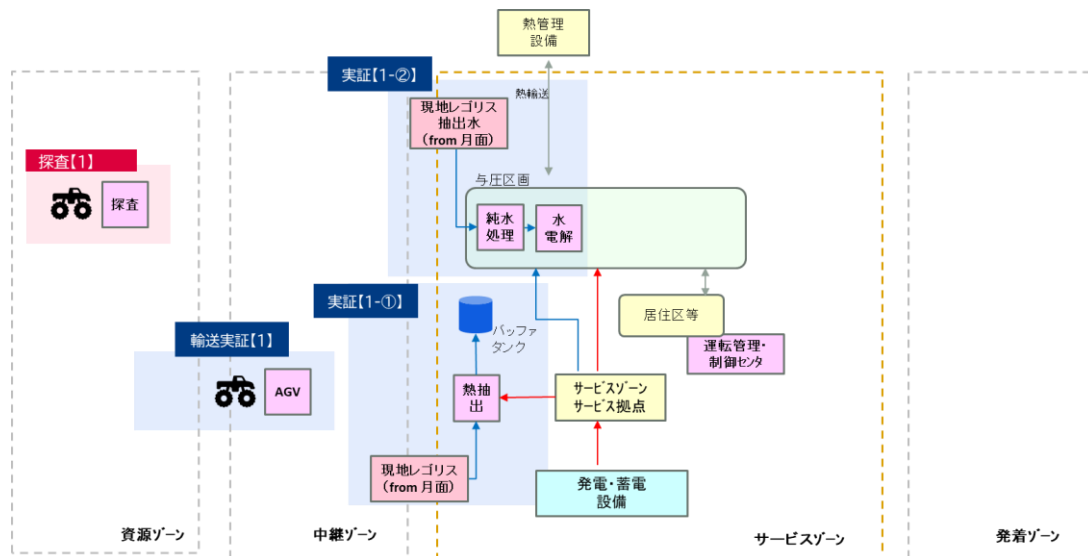


図 2-7 フェーズ 1 における各ゾーンでの活動イメージ

出所)三菱総合研究所作成

表 2-21 実証候補項目【探査実証1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的:</b> 資源ゾーンを中心に探査性能(水の状態・量・分布等)を実証し、水資源探掘チームに共有(商用探査から実用段階への成熟)</li> <li>・ <b>月面実証の必要性:</b> ローパーを駆使した多地点探査の実績を獲得。資源ゾーンでの実用的な水資源データを水資源探掘チームに共有可能。</li> </ul>                                                                                                      |
| 実証期間              | 2029-2030 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | STEP3:PSR で複数地点を試掘の上、水資源マップ(アップデート版)を水資源探掘チームへ提供(実用探査段階) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 探査範囲: 12か所(260m×260m のエリア)</li> <li>・ 探査深度: 最大 1.0m, 比較的浅い 0.5m 以内の範囲に注力</li> <li>・ 水の検出能力: 0.1wt%以下の精度</li> <li>・ 水の状態: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S 等の水溶解成分を検出</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | <b>【資源ゾーンへの電力量】</b> ⇒計 15(TBD) [W]<br>*水探査装置への供給電力<br>*ローパーへの電力供給は、永久影の探査時には充電ステーションからの電力供給を構想                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量         | 約47[kg] (実証用水探査装置10[kg]および実証用水探査装置を搭載するローパー質量37[kg])                                                                                                                                                                                                                                                            |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-22 実証候補項目【1-①】(水抽出)に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① サービスゾーン内部のレゴリスから水の抽出(熱抽出)を行う技術的可能性の確認</li> <li>② レゴリス抽出水をバッファタンクまでの輸送可能性の確認</li> </ol> </li> <li>・ <b>月面実証の必要性:</b> PSR 内部のレゴリスから水を抽出する実証であり、月面で実証する必要性は高いと考えられる。また、曝露環境でローパーを活用した水の抽出であり、低温環境(サービスゾーン)への対応や 1/6 重力下及びレゴリス粉塵付着の環境下における挙動の確認を行う観点で月面実証の必要性が高い。</li> </ul>                                                            |
| 実証期間              | 3 年間程度(～2040 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <b>【プラント設備(現地の水を対象)】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>水抽出(熱抽出):</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 【0-①】での結果も踏まえ「蒸発器」及び「ブロアー」の PSR 内での動作確認(18[kg/日]/台以上抽出@サービスゾーン)</li> <li>② 月面実証機(ローパー型)のプロセス間のインターフェース、及び電気、通信、制御系の確認</li> </ol> </li> <li>・ <b>輸送(ローパー):</b> バッファタンクまで輸送確認</li> </ul> <b>【プラント付帯設備】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>バッファタンク:</b> 熱抽出で調達した水をサービスゾーンで適切に保管</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | <b>【サービスゾーンへの電力】</b> ⇒計 18[kW] <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱抽出への供給電力: 13[kW] (サーマルマイニング装置 1 台を用いた実証と前提)</li> <li>・ ローパーへの電力供給: - [kW] ※輸送実証用ローパーを活用するものとしてここでは計上せず</li> <li>・ ドリルへの電力供給: - [kW] ※熱抽出と同時運転しないため重複計上せず(ドリル運転時の電力は熱抽出時の必要電力を下回るため、熱抽出への供給量を最大値として計上)</li> <li>・ バッファタンク(保管): 5[kW]</li> </ul>                                                                                                          |
| 月面への必要輸送量         | <b>【プラント設備】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 約250 [kg] (熱抽出装置のみ)</li> <li>・ - [kg] (ローパー) ※輸送実証用ローパーを活用するものとしてここでは計上せず</li> <li>・ 30 [kg] (ドリル) ※採取場所の地質情報未定のため仮置き</li> </ul> <b>【プラント付帯設備】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ バッファタンクは既に設置されていると仮定し、個別の実証における必要輸送量には計上しないこととする。</li> </ul>                                                                                                                |

出所)三菱総合研究所作成



表 2-23 実証候補項目【1-②】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>目的:               <ol style="list-style-type: none"> <li>① レゴリス水を使用した純水処理設備と水電解設備の利用可能性、両設備間の I/F 確認</li> <li>② 推進プラント関連設備に係る運転制御の確認</li> </ol> </li> <li>月面実証の必要性: 実際のレゴリス抽出水を純水化する実証であり、月面で実証する必要性は高い。また、与圧区画に設置する各月面設備の操作監視を行うため、設置場所による実証が必要。</li> </ul>                                                                                                                                                     |
| 実証期間              | 1 年間(～2035 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【プラント設備】※表層近辺の水を簡易的に抽出する器具を別途検討の必要あり</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>純水処理:               <ol style="list-style-type: none"> <li>① フィルター洗浄機構や閉塞フィルターの自動切替機能を含むレゴリス粒子除去システムの動作確認</li> <li>② 揮発性物質の除去処理機能の動作確認(処理量 4.8 [L/h]、純水製造量 3.8 [L/h]、電気分解装置に 0.8 [L/h]で供給、装置立上げに使用する模擬レゴリス抽出水量 3～5 [L])</li> </ol> </li> <li>水電解: 曝露環境を含む月面環境でも信頼性がある「純水循環用ポンプ」「純水貯蔵タンク(バッファタンク)」「除湿器」等をスペックインした月面水電解装置の動作確認(処理量として 1Nm<sup>3</sup>/h 製造)</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | <p>【サービスゾーンへの電力】⇒計 43[kW]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>推進プラントへの供給電力: 1(純水処理) + 32(水電解)[kW]</li> <li>運転制御: 0.5 [kW]</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 月面への必要輸送量         | <p>【プラント設備】</p> <p>約 1,100 [kg] (100[kg](純水処理) + 1,000[kg](水電解))</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-24 実証候補項目【フェーズ1:遠隔運転・制御技術】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>各社の設備の操作監視をベースとした月面運転管理・制御端末と地上における操作監視環境の整備。およびインフラ事業者が提供するであろう地球-月面インフラのとの連携。</li> <li>有線及び無線による設備/センサー類と制御機器間の通信確立。(暴露環境設備においては、有線にて確実な通信を実施するとともに、並行して一部センサーとの通信には無線を利用。)</li> <li>保守および運転支援用途としてカメラ等の設備の設置及び利用。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証期間              | (設備搬入に合わせて)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【操作監視端末の整備】</p> <p>目的: 統合 SCADA と情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立を行う。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① フェーズ 3 に対しては 1/2 サイズ。(フェーズ 3 では PC のリプレースを想定)</li> <li>② 必要な運転日数はプロセスを動作している期間に合わせる。</li> <li>③ 必要機材               <ul style="list-style-type: none"> <li>(ア) PC: 19 インチ 1U (約 横 440[mm] 奥 660[mm] 高 430[mm]) × 2 セット 冗長化構成。</li> <li>(イ) ネットワーク: 19 インチ 1U (約 横 440[mm] 奥 660[mm] 高 430[mm]) × 2 セット 冗長化構成。</li> <li>(ウ) I/O 類: 19 インチ 4U (約 横 440[mm] 奥 660[mm] 高 430[mm]) × 2 (すでに 19 インチのラックが存在すると想定。)</li> </ul> </li> <li>④ 保守用機器               <ul style="list-style-type: none"> <li>(ア) . 監視用 屋内カメラ、設備診断機器、環境測定機器(センサー用無線機器含む)</li> </ul> </li> </ol> |
| 各ゾーンへの電力量         | <p>③2000[Wh]</p> <p>④500[Wh]</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量         | <p>③40[kg]</p> <p>④5[kg]</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-25 輸送実証【1】に係る詳細内容

| 項目                       | 詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>目的</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① AGV のプラットフォーム機能の検証(登坂走行・傾斜地での作業性)、地質調査、メンテナンス性や寿命の評価に係る実証</li> <li>② 上記で地質調査したうえで、長距離輸送インフラに係る実証(施工方法フィージビリティ確認を行う)</li> <li>③ サービスゾーンにおける実タスク(他設備の設置・管理)の実施。</li> </ol> </li> <li>・ <b>月面実証の必要性</b> :地質情報が不明確である為、現地での走行技術の獲得とその後の開発に資する地質情報の取得が必要である。</li> </ul>                                                                                         |
| 実証期間                     | 2030 年～2035 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証候補項目<br>(実証目標値)        | <ol style="list-style-type: none"> <li>① AGV の検証と資源ゾーン⇔サービスゾーン間の地質調査 <ol style="list-style-type: none"> <li>(ア) 輸送行程における AGV の走破性とインフラ建設等を含む傾斜地での操作性</li> <li>(イ) AGV の寿命評価とメンテナンスのフィージビリティ確認</li> <li>(ウ) 輸送行程の地質調査(最大傾斜/障害物/施工に必要な地質情報など)</li> </ol> </li> <li>② 上記③を踏まえたうえで、長距離輸送インフラに係る実証を行う <ol style="list-style-type: none"> <li>(ア) 地上検証において検討した月面環境対応案のフィージビリティ確認</li> <li>(イ) 施工に必要なエネルギーや工程(日数)等、本格導入計画に向けた運用実績情報の取得</li> </ol> </li> </ol> |
| AGV 充電時の設備供給電力<br>(※参考値) | 計 630 [W]<br>* 移動中の給電なしで 15km(資源ゾーン中心⇔サービスゾーンの距離)を往復できるケースを想定<br>* 充電はサービスゾーンの給電ステーション(充電は 1 日を想定)で行う想定。(AGV の SAP は緊急時の予備用途のみ)<br>* 越夜は 11 日までなら対応可能                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量<br>(※参考値)      | 約 430[kg](AGV)<br>* LUPEX と米国 UGV※をベースにした重量評価である。<br>※ <a href="https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/">https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/</a>                                                                                                                                                                                                                                         |

出所)三菱総合研究所作成

## 5) フェーズ 2 における実証候補項目

フェーズ 2 における月面のイメージと、各ゾーンにおける活動のイメージを図 2-8 及び図 2-9 に示す。フェーズ 2 ではサービスゾーン及び発着ゾーンを中心に統合実証を実施し、現地の水を使って水抽出から液体水素/酸素の貯蔵まで一気通貫で実施することを想定した。また、発着ゾーンへの輸送も含めて実証を行うことを想定した。

推薬プラント設備に係る実証としては、資源ゾーンにおける実証として表 2-26 に示すような資源ゾーン内部でのレゴリスからの水抽出(熱抽出)及び抽出水の輸送を想定した。またサービスゾーン・発着ゾーンでの実証としては表 2-27 に示すように高圧化や液化を含む、抽出水の受入～液体水素/酸素の貯蔵までの各設備間の I/F 確認を行うものとした。

このほか、推薬プラント設備に関連する実証として表 2-28 に示すように遠隔運転・制御技術に係る実証をするものとし、統合 SCADA と情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立等の実証を想定した。

月面での輸送システムに係る実証として表 2-29 に示すように複数 AGV の運用及び長距離輸送インフラの部分的な運用を想定した。なお表 2-30 に示すように AGV の質量及び運用を基に、AGV 充電時の設備供給電力等の検討もあわせて行った。

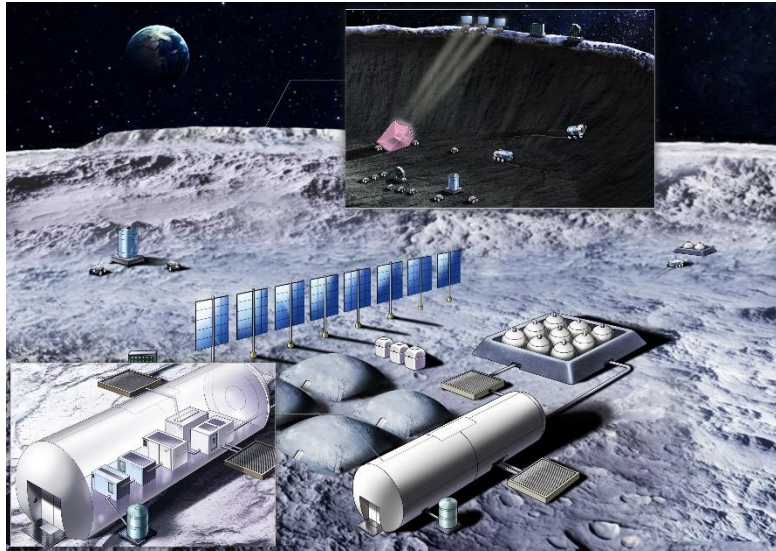


図 2-8 フェーズ 2 における月面のイメージ

出所)三菱総合研究所作成

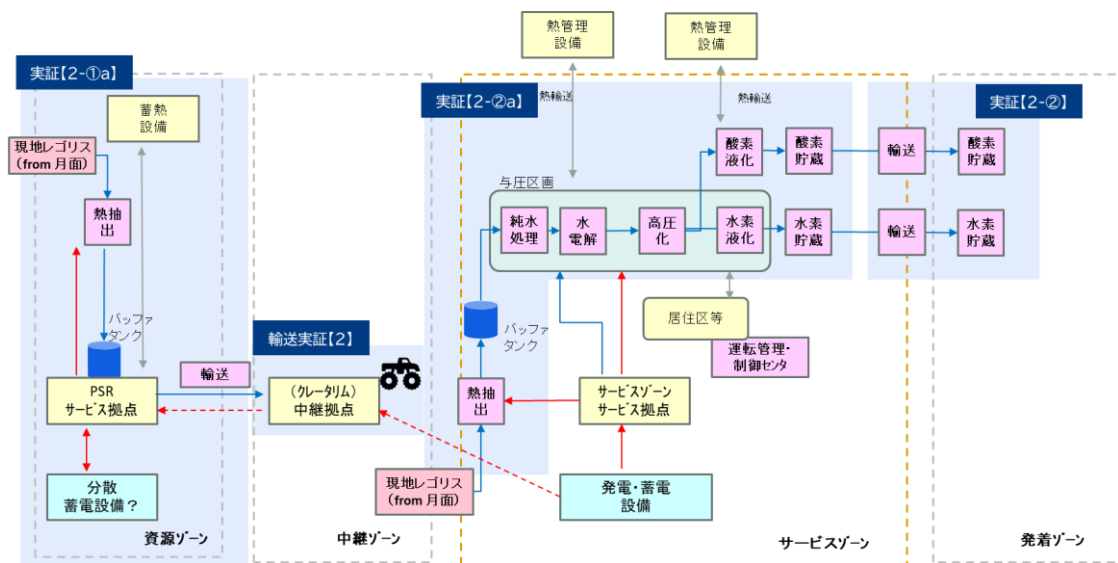


図 2-9 フェーズ 2 における各ゾーンでの活動イメージ

出所)三菱総合研究所作成

表 2-26 実証候補項目【2-①a; 資源ゾーン】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>目的:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① PSR 内部のレゴリスから水の抽出(熱抽出)を行う技術的可能性の確認</li> <li>② レゴリス抽出水を輸送ローバーへ引き渡し</li> </ol> </li> <li>• <b>月面実証の必要性:</b>PSR 内部のレゴリスから水を抽出する実証であり、月面で実証する必要性は高いと考えられる。また、曝露環境でローバーを活用した水の抽出であり、低温環境(サービスゾーンより低温)への対応や 1/6 重力下及びレゴリス粉塵付着の環境下における挙動の確認を行う観点で月面実証の必要性が高い。</li> </ul> |
| 実証期間              | 3 年間程度(～2040 年頃)※資源ゾーンへのアクセスやローバー輸送の環境構築のため                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【プラント設備(現地の水を対象)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>水抽出(熱抽出):</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 【0-①】での結果も踏まえ「蒸発器」及び「プロアー」の PSR 内での動作確認(313kg/日以上抽出@資源ゾーン)</li> <li>② 月面実証機(ローバー型)のプロセス間のインターフェース、及び電気、通信、制御系の確認【プラント付帯設備】</li> </ol> </li> <li>• <b>バッファタンク:</b>熱抽出で調達した水を PSR 内部で適切に保管</li> </ul>                                |
| 各ゾーンへの電力          | <p>【資源ゾーンへの電力量】⇒計 18[kW]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 熱抽出への供給電力:13[kW](サーマルマイニング装置 1 台を用いた実証と前提)</li> <li>• ローバーへの電力供給:— [kW] ※輸送実証用ローバーを活用するものとしてここでは計上せず</li> <li>• ドリルへの電力供給:— [kW] ※熱抽出と同時運転しないため重複計上せず</li> <li>• バッファタンク(保管):5[kW]</li> </ul>                                                                                            |
| 月面への必要輸送量         | <p>【プラント設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 約250[kg](熱抽出装置のみ)</li> <li>• —[kg](ローバー)※輸送実証用ローバーを活用するものとしてここでは計上せず</li> <li>• 30[kg](ドリル)※採取場所の地質情報未定のため仮置き</li> </ul> <p>【プラント付帯設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• バッファタンクは既に設置されていると仮定し、個別の実証における必要輸送量には計上しないこととする。</li> </ul>                                                      |

出所)三菱総合研究所作成



表 2-27 実証候補項目【2-①b～2-②, サービスゾーン以降】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | 目的:抽出水の受入～液体水素／酸素の貯蔵までの各設備間の I/F 確認<br>月面実証の必要性:実際のレゴリス抽出水を用いて液体水素／酸素まで生成する実証であり、月面で実証する必要性は高い。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証期間              | 1 年間程度(～2040 年頃)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【プラント設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>純水処理</b>:実証候補項目【1-①】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(処理量 34.3[L/h]、純水製造量 27.5[L/h]、電気分解装置に 0.8[L/h]で供給)</li> <li>・ <b>水電解</b>:実証候補項目【1-①】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(製造量 1[Nm<sup>3</sup>/h])</li> <li>・ <b>高圧化</b>:実証候補項目【1-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(222[kg(酸素)/日] (酸素ガスを 2～3 MPaA へと昇圧))</li> <li>・ <b>水素液化</b>:実証候補項目【1-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(28[kg/日] 製造, 1～1/10 スケール)</li> <li>・ <b>酸素液化</b>:実証候補項目【1-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(22[kg/日] 製造, 1/10 スケール)</li> <li>・ <b>水素／酸素貯蔵</b>:実証候補項目【1-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(液化水素 830[kg]、液化酸素 6,670[kg], 1/3 スケールの有効貯蔵能力)</li> </ul> <p>【プラント付帯設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>推奨プラント全体の運転制御</b>: <ul style="list-style-type: none"> <li>① 統合操作監視システムの確認</li> <li>② アセットパフォーマンスマネジメントの機能・性能アップの実施(発着ゾーン、資源ゾーン設備の取り込み)</li> <li>③ 無人パトロール等の仕組み構築(カメラ、ローバー保守用途)</li> </ul> </li> <li>・ <b>熱管理設備</b>:与圧区画にて発生するプラント設備からの熱を適切に管理</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | 【サービスゾーンへの電力】⇒計40[kW]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 月面への必要輸送量         | <p>【プラント設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 300[kg](純水処理)</li> <li>・ 1000[kg](電気分解)</li> <li>・ 約 800[kg](高圧化・液化・貯蔵)</li> <li>・ 約 20[kg](運転制御)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-28 実証候補項目【フェーズ2:遠隔運転・制御技術】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>サービスゾーンおよび発着ゾーンを中心に統合実証を実施し、月面における水抽出から液体水素/酸素の貯蔵までを操作監視できる統合操作監視システムを追加する。</li> <li>月面運転管理・制御端末と地上における操作監視環境及び保守環境の整備。およびインフラ事業者が提供するであろう地球-月面インフラのとの連携。</li> </ul>                                                                                                                                                        |
| 実証期間              | (設備搬入に合わせて)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【操作監視端末の整備】</p> <p>目的:統合 SCADA と情報管理システムを月面に構築し、地上設備との操作監視の確立を行う。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① フェーズ 3 に対しては 1/2 サイズ。(フェーズ 3 では PC のリプレースを想定)</li> <li>② 必要な運転日数はプロセスを動作している期間に合わせる。</li> <li>③ 必要機材<br/>(ア) I/O 類:19 インチ 4U (約 横 440mm 奥 660 mm 高 430mm) x 2</li> <li>④ 保守用機器<br/>(ア) 監視用 屋内カメラ、設備診断機器、環境測定機器(センサー用無線機器含む)、与圧区画内ローパー</li> </ol> |
| 各ゾーンへの電力量         | <ol style="list-style-type: none"> <li>③1000[Wh]</li> <li>④800[Wh]</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 月面への必要輸送量         | <ol style="list-style-type: none"> <li>③10[kg]</li> <li>⑤ 10[kg]</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-29 輸送実証【2】に係る詳細内容

| 項目                  | 詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性            | <ul style="list-style-type: none"> <li>目的 <ol style="list-style-type: none"> <li>① 水処理設備等の他設備の設置・管理及び設備間の輸送ができることを示す。</li> <li>② 輸送効率・寿命の向上等の為に、ホイールタイプ等オプション機能を持った AGV が機能することを示す。</li> <li>③ 複数 AGV により、大型物資(ランダー等)を輸送できることを示す。</li> <li>④ 輸送効率・寿命の向上等の為に、長距離輸送インフラが機能することを示す。</li> </ol> </li> </ul>                                                        |
| 実証期間                | 2035 年～2040 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証候補項目<br>(実証目標値)   | <ol style="list-style-type: none"> <li>① 水を資源ゾーン⇄サービスゾーン間で輸送<br/>全行程にわたって水の輸送ができることを確認する。設備の設置・管理ができることを確認する。</li> <li>② サービスゾーン⇄発着ゾーン間の推薬(水素/酸素)輸送<br/>ホイールタイプ等のオプション機能を持った AGV でも輸送できることを確認する。</li> <li>③ 複数 AGV による大型物資の輸送技術の実証<br/>複数 AGV による協調動作により、大型物資の輸送ができることを確認する。</li> <li>④ 長距離輸送インフラの部分的な導入<br/>長距離インフラを部分的な区間において建設し、物資を輸送できることを確認する。</li> </ol> |
| 各設備への供給電力<br>(※参考値) | <p>計 21[kW]程度</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AGV:4[kW/台] ×(建設用 2 台+実タスク用 1 台+実証用 2 台 TBD)<br/>(4[kW]は、フェーズ1AGV の倍×8h 充電を全台同時に実施した場合を想定)</li> <li>長距離輸送インフラ:1[kW](消費電力は AGV 以下を仮定)</li> </ul>                                                                                                                                                       |
| 月面への必要輸送量<br>(※参考値) | <p>TBD[kg]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AGV:860[kg/台](AGV:フェーズ1の最大倍を想定)×(建設用 2 台+実タスク用 1 台+実証用 2 台 TBD)※フェーズ1のモデルは寿命が不足し、フェーズ2の時期には使用できないと仮定</li> <li>長距離輸送インフラ:TBD</li> </ul>                                                                                                                                                                   |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-30 実証候補項目【1】に係る輸送実証の詳細内容

| 項目                 | 詳細                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGV 充電時の<br>設備供給電力 | <p>計 630 [W]</p> <p>*移動中の給電なしで 15km(資源ゾーン中心⇄サービスゾーンの距離)を往復できるケースを想定。</p> <p>*充電はサービスゾーンの給電ステーション(充電は 1 日を想定)で行う想定。(AGV の SAP は緊急時の予備用途のみ)</p> <p>*越夜は 11 日までなら対応可能</p>                                                           |
| 月面への必要<br>輸送量      | <p>約 430[kg](AGV)</p> <p>*LUPEX と米国 UGV※をベースにした重量評価である。</p> <p>※<a href="https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/">https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/</a>を基に試算</p> |

出所)三菱総合研究所作成

## 6) フェーズ 3 における実証候補項目

フェーズ 3 における月面のイメージと、各ゾーンにおける活動のイメージを図 2-10 及び図 2-11 に示す。フェーズ 3 では推薬プラントが本格的に移働する状況を想定し、資源ゾーンからサービスゾーンへの輸送も含めて運用されるものとした。

推薬プラント設備に係る実証としては、資源ゾーンから発着ゾーンまでの一気通貫した運用として表 2-31 に示すような内容を検討した。ここでは資源ゾーンを含む現地の水を使って水抽出から液体水素／酸素の貯蔵及び充填まで、インターフェースを含む一気通貫での実証を行い、全体システムとしての実運用を行うものとした。

なお輸送システムについてはフェーズ 2 での実証を基に長距離輸送システムの全面的な実装及び AGV の数・能力の拡張が行われている実用段階と想定し、実証としては想定をしていない。

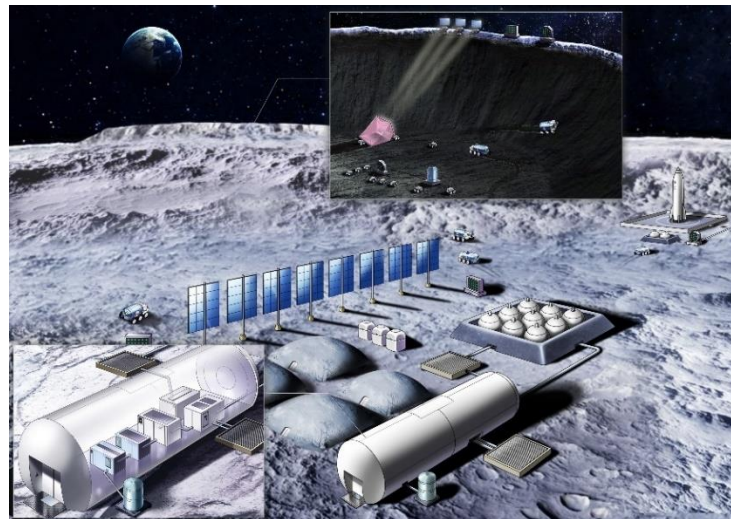


図 2-10 フェーズ 3 における月面のイメージ

出所)三菱総合研究所作成

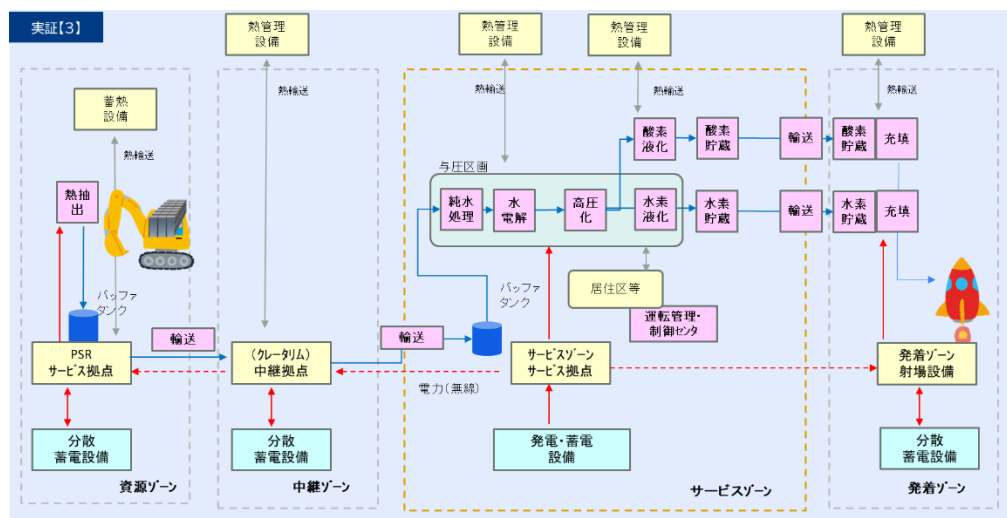


図 2-11 フェーズ 3 における各ゾーンでの活動イメージ

出所)三菱総合研究所作成

表 2-31 実証候補項目【3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>目的: 推薬プラント全体システムの I/F 確認</li> <li>月面実証の必要性: プラント設備の実運用を想定した実証であり、本各稼働に向けた最終確認のための月面上で実証を行う必要性が高い。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 実証期間              | 1 年間程度(2040 年頃～)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【プラント設備(現地の水を対象)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>水抽出(熱抽出): 実証候補項目【2-①】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(313[kg/日]以上抽出@資源ゾーン)</li> <li>純水処理: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(処理量 34.3[L/h]、純水製造量 27.5[L/h]、電気分解装置に 1.1[L/h]で供給)</li> <li>水電解: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(製造量 1[Nm<sup>3</sup>/h])</li> <li>高圧化: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(222[kg(酸素)/日] (酸素ガスを 2～3 [MPaA]へと昇圧))</li> <li>水素/酸素液化: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(水素 28[kg/日]製造、酸素 222[kg/日]製造)</li> <li>水素/酸素貯蔵: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認(液化水素 8,300[kg]、液化酸素 66,700[kg]の有効貯蔵能力)</li> </ul> <p>【プラント付帯設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>輸送: 資源ゾーンで採取した水を 10[km]離れたサービスゾーンに、サービスゾーンで生成した液体水素・酸素を 1[km]程度離れた発着ゾーンに輸送。また、長距離輸送インフラの建設に本格着手し、定常的な輸送に段階的に移行。</li> <li>推薬プラント全体の運転制御: 実証候補項目【2-②】を踏まえた運用システムの改善部分の確認</li> <li>熱管理設備: 与圧区画にて発生するプラント設備からの熱を適切に管理</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | <p>【資源ゾーンへの電力量】 ⇒計 151[kW]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>熱抽出への供給電力: 152[kW](サーマルマイニング装置 14 台を用いた実証と前提)</li> </ul> <p>【サービスゾーンへの電力】 ⇒計 46[kW]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>推薬プラントへの供給電力: 1(純水処理)+32(水電解)+3.7(高圧化)+9.4 程度(液化/貯蔵)[kW]</li> <li>バッファタンク(保管): 5[kW]</li> <li>輸送ローバーへの給電: 3[kW]</li> <li>与圧区画維持: 8.5[kW]</li> <li>熱管理設備: 1[kW]</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月面への必要輸送量         | <p>【プラント設備】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>約 3,920[kg](熱抽出装置のみ)</li> <li>約 4,127 [kg] (300[kg](純水処理)+1,000[kg](水電解)+87[kg](高圧化)+2,740[kg](液化/貯蔵))</li> <li>約 20kg(運転制御)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

出所)三菱総合研究所作成



## 7) 土木・建設分野/技術に係る実証

各フェーズでは表 2-32 に示すような土木・建設分野/技術に係る実証も必要となる。ここでは各機器のインターフェースや状況監視に係る実証を各フェーズで行うものとした。

表 2-32 実証候補項目【土木・建設分野/技術】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証目的・必要性          | <ul style="list-style-type: none"> <li>各機器の組み立てや各機器同士や電力系との接続実証</li> <li>機器設置状況(沈下・傾斜等)・配管配線に対する状態監視・保全技術<br/>基礎工事は行われない可能性があるため、沈下等の遠隔状態監視と必要に応じた保全工事が必要となる可能性がある。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証期間              | (設備搬入に合わせて)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>① 接続実証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>【組立工事】:分割して搬送された場合の機器の組立工事</li> <li>【配管接続工事】:管路敷設工事、各機器間の配管接続実証、特に配管着脱時にレゴリス粉塵環境で漏洩・混入を防止して自動・遠隔着脱可能なカプラ技術を実証(※建設時、及び ORU による交換保全時)</li> <li>【配線工事】:配線敷設、送電システムとの自動・遠隔での配線接続実証</li> </ul> <p>② 状態監視・保全技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>【状態監視】:機器設置状況(沈下・傾き)、配管・配線等の状態計測</li> <li>【保全】:機器側(沈下・傾き等)の許容値を超えた場合の再設置、配管・配線損傷時の繋ぎ変え技術</li> </ul> |
| 各ゾーンへの電力          | -(配管・配線の仕様による)<br>(参考)GITAI ROVER 115-1500[W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 月面への必要輸送量         | -(配管・配線の仕様による)<br>(参考)GITAI ROVER 280[kg]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

出所)三菱総合研究所作成



## 8) 地上産業への転用の可能性

ここまで検討した月面での実証で得られる技術・知見・ノウハウ等について、地上産業への転用可能性の観点で検討を行った。地上産業への転用可能性を検討する観点としては、①ユースケース拡大・社会実装進展と②高度化・効率化の2つの項目を設定して、各フェーズで転用可能な技術を抽出したうえで検討を行った。検討結果を表 2-33 に示す。

さらに、極限環境における月面での技術の裨益性の検討を行った。具体的には、表 2-34 に示すような地上での極限環境や被災地を想定し、各技術がもたらす裨益効果に関するアイデア(一例)を整理した。

表 2-33 月面実証で得られる技術・知見・ノウハウの地上産業への転用の可能性

| フェーズ                                         | 転用技術          | ①ユースケース拡大・社会実装進展                                                                                                                                | ②高度化・効率化                                                                     |
|----------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| フェーズ 0:単体実証<br>月面上で水が抽出できることを確認              | 月面での水抽出技術     | 水抽出装置を搭載したローバーの走行技術が被災地等での救助活動に貢献                                                                                                               | ・過酷・粉塵環境で高信頼性を発揮するメカトロ技術(鉱山、廃棄物処理施設等)<br>自律的に活動するローバー(自動走行車)の群制御技術、走行・位置制御技術 |
| フェーズ 1:部分統合実証<br>推薬プラント稼働に向けた準備              | 純水処理技術        | 地上の水不足地域における懸濁物質や有機物濃度の高い泥水、高汚染水などに活用可能な水処理技術<br>地上でのカーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーに寄与する、電力や交換部材や二次廃棄物を究極まで低減した水処理技術<br>被災地の水供給に、エネルギー効率の高い月面の純水処理装置が貢献 | 純水処理装置のエネルギー効率の向上(電源を太陽光発電・燃料電池に転換)                                          |
|                                              | 推薬プラントの運転制御技術 | 遅延を感じさせない操作監視システムを利用して、地上の遠隔制御の操作性と応答性を実現。(例:AUVの自律航行と手動操作を用いた海底油田資源探査、洋上風力発電の海底部分の保守・点検)                                                       |                                                                              |
| フェーズ 2:統合実証/初期稼働<br>小規模プラントを稼働<br>資源ゾーンの活動開始 | 水抽出技術         | 高粉塵含有流体の清浄化技術への転用                                                                                                                               |                                                                              |
|                                              | 水素液化技術        |                                                                                                                                                 | 地上の液化水素輸送タンクにおける BOG 抑制技術への転用                                                |
|                                              | 推薬プラントの運転制御技術 | 地上の砂漠地帯や隔離環境、原子力施設、高活性医薬品施設、坑道等における遠隔制御、校正、保守への適用                                                                                               | 無人化と自律運転への活用                                                                 |
|                                              | 充填技術          | 地上の高粉塵環境下(通常の機械では故障リスクが高い鉱山等)での配管着脱技術への転用                                                                                                       |                                                                              |
| フェーズ 3:本格稼働<br>実用プラントを稼働                     | 推薬プラントの運転制御技術 |                                                                                                                                                 | 保守機能の完全無人化による地上での人件費などのコストダウンへの寄与                                            |

出所)三菱総合研究所作成

表 2-34 極限環境における月技術の裨益性

| 場所    | 活動シナリオ           | 極限環境による課題                                                                                                                                 | 月面技術の裨益性アイデア(一例)                                                                                                                                 |
|-------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 海底    | 資源探査・採掘とインフラ整備等  | <ul style="list-style-type: none"> <li>海上からの有線通信が必要なため、通信に遅延が発生</li> <li>高圧・低温に耐える構造が必要</li> </ul>                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>通信が難しい海底における資源探掘の遠隔制御に、月面の遠隔プラント制御技術が貢献</li> <li>月面の与圧空間の構築技術が海底へ適用</li> </ul>                            |
| 北極・南極 | 科学研究・観測          | <ul style="list-style-type: none"> <li>極低温・極夜・吹雪への耐性が重要</li> <li>補給に限られるため、物資・燃料の維持効率が重要</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>純水処理装置のエネルギー効率の向上貢献</li> <li>現状使われているディーゼルエンジン発電を、太陽光発電・水電解・燃料電池のプロセスに置き換えることで、外部に依存しないシステムに貢献</li> </ul> |
| 砂漠地帯  | 水資源の確保           | <ul style="list-style-type: none"> <li>限られた水資源の有効利用</li> <li>高温や砂嵐・粉塵への耐性が重要</li> </ul>                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>月面環境に適用される純水処理技術により少量の不純物が混じった水の浄化が可能</li> </ul>                                                          |
| 山岳地帯  | 登山者向けの居住環境提供     | <ul style="list-style-type: none"> <li>高所低酸素・低気温への対応(断熱・加圧設備、空気供給)</li> <li>物資輸送・建設が困難</li> <li>雪崩や落石、急激な気象変化への耐性</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>月面の与圧空間の構築技術が山岳地帯の居住施設に適用され、断熱性、加圧性能、空気供給が高度化</li> </ul>                                                  |
| 鉱山    | 資源採掘             | <ul style="list-style-type: none"> <li>粉塵・崩落リスクへの対策が必要</li> <li>換気・照明設備が必要</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>月面の資源探査・採掘技術が、既存の装置等の粉塵耐性の向上に貢献</li> </ul>                                                                |
| 被災地   | 被災者の生活支援とインフラの修理 | <ul style="list-style-type: none"> <li>道路損壊や瓦礫によるアクセス困難</li> <li>仮設住宅に限られたリソースで構築する必要がある</li> <li>ライフライン(水道・電気・ガス)が使用できない場合がある</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>月面で培われた自動・自律化されたローバー技術が救助活動に貢献</li> <li>電気・ガスのバックアップとして水素をエネルギーとして活用</li> </ul>                           |
| 原子力施設 | 高放射線環境下での活動      | <ul style="list-style-type: none"> <li>高放射線環境への耐性が重要</li> <li>ロボットの遠隔・自立操作が必要</li> </ul>                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>高放射線環境下での工事・解体に必要な機械の耐放射線技術に、月面での耐放射線技術が貢献</li> </ul>                                                     |

出所)三菱総合研究所作成

### 2.1.3 月面での輸送に係る検討

本項では月面におけるゾーン間の輸送に係る検討を行った結果を述べる。具体的には、ゾーン間の特性をふまえたうえで複数の輸送方式を検討し、月面における輸送システムの全体像を構築したうえで技術課題の整理と個別の要素技術について検討・整理を行った。

#### (1) 月面における輸送システムの全体像

地上における物流を想定した場合、距離や作業によって垂直・水平的な役割分担や重量物の AGV による運搬等がなされるが、月面でもこの考え方が適用される可能性がある。一方で月面では特に長距離輸送に関しては地形や表面の特性について不明確な点がある。長距離・広範囲を舗装することは困難であることを念頭に置くと、未舗装路での重量物の輸送を想定する必要があるが、ローバー等で輸送を行う場合は設計寿命が大幅に低下する可能性がある。そこで、本検討では図 2-12 に示すような、AGV と地形・地盤の影響を受けにくいロープウェイ等長距離輸送システムの組み合わせを想定した。具体的には、資源ゾーンで採取・抽出した水タンクを AGV で運搬し、資源ゾーン～サービスゾーンにある傾斜部は自走式ロープウェイで運搬、その後サービスゾーン及び発着ゾーンでは再び AGV で運搬するような方式を検討した。傾斜部では最大 20 度以上の斜度が見込まれるため、傾斜が最も厳しい地点から段階的に自走式ロープウェイを導入する状況を想定した。AGV に関しては水タンク等の授受や緊急時にバックアップ可能なモビリティとしての運用も想定されるため、マルチパーパス機能を搭載する必要があるものとした。

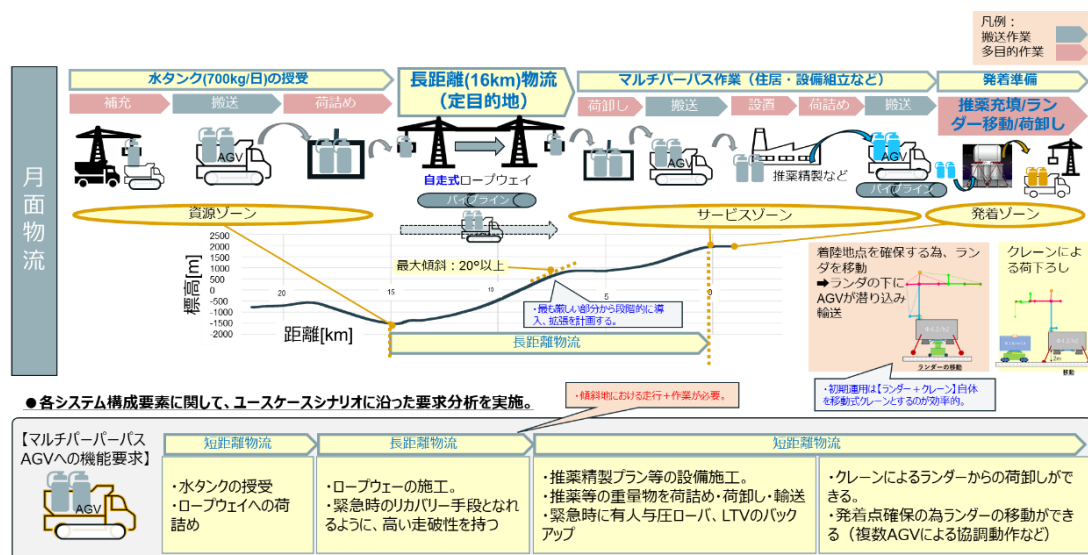


図 2-12 月面における輸送システムの全体像イメージ

出所)三菱重工業作成

#### (2) 要素技術の調査・検討及び技術課題の整理

AGV 及び自走式ロープウェイによる輸送システムについて輸送シナリオ・ユースケースから抽出された機能要件及びそれらを実現するために必要となる技術及びその課題を表 2-35 に示す。ここでは本

格的な月面拠点運用までを見込み、月面開発の初期から対応・発展可能なスケーラブルなシステムを想定している。

これらの整理を基に検討した AGV の諸元を表 2-36 に示す。また AGV に要求されるまでマルチパーパス機能のイメージを図 2-13 に、具体的な運用イメージを図 2-14 に示す。また自走式ロープウェイについても図 2-15 に示すような事例を基に、図 2-16 のような運用をイメージした。なお、長距離輸送システムに関しては過年度の検討結果も考慮して AGV、自走式ロープウェイのほか、パイプライン等についても比較検討を行った。トレードオフの考え方とトレードオフ結果を表 2-37 に示す。長距離輸送システムのトレードオフに関しては初期コスト、運用コスト、スケジュール、リスクの観点から評価を行い、AGV の次に導入の可能性が高い輸送方式としては自走式ロープウェイが有利である結果となった。最終的には AGV と統合してより効率的なシステムを目指すことを想定する。

表 2-35 月面における輸送システムの機能と必要とされる技術及びその課題

| 範囲              | 機能#1                 | 機能#2                                                             | 機能要求（以下の並べの要求は質量表示（1G下重量）とする                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 必要な技術                                                                            | 技術課題                                                                        |
|-----------------|----------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| AGV             | 走行                   |                                                                  | ・傾斜 $\leq \max 30 \text{deg}$ TBD/平均 $20 \text{deg}$ 、段差 $30 \text{cm}$ （TBD）を輸送対象（ $700 \text{kg}$ TBD）を搬載した状態で走破すること。（緊急時のバックアップを想定）<br>・速度：平均 $2.5 \text{km/h}$ 、 $\max 5 \text{km/h}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ・走行系の機構<br>・効率的な動力伝達（モータ/パワートレイン）<br>・駆動防止（制動）                                   | ・走行機構確立と性能実証（月面の地面性状が不明の為、斜面上走行/往復走行時の性能などを予測できない）<br>・重心位置制御などで転倒防止機能を搭載する |
|                 | 水と推葉の輸送              |                                                                  | ・水タンクを前面端から取り出し、自機に搬載できること。<br>・水タンクをロープウェイコンテナに搭載/解載できること<br>・水タンクを推進機設備に設置でき、推進タンクを自機に搬載できること。<br>・推進タンクをランダーに設置できること。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | ・各種機構間のI/F機構（人と機械に類似しI/F構造）<br>・対象物の認識方法/位置合わせ精度<br>・AGVの操作機構の検討（自由度/アーム長さ/出力など） | ・対象物の認識方法/位置合わせ精度および、各種機構間のI/F機構のトレードオフが必要                                  |
|                 | 操作                   | その他作業                                                            | ・ロープウェイ設備<br>・索道の柱を設置する為の地盤整備ができ、柱を設置できること。<br>・索道を運ぶことができること。<br>・サービスゾーンと資源ゾーン間でロープウェイの移動体を受け取り運べること（移動体を地上も自走できるようにする場合は不要）<br>◆現地整備<br>・PSR内の拠点構築作業（電力アンテナとその付帯設備の設置等）<br>・熱抽出装置および水輸送ロープの資源ゾーンへの運搬（TBD）<br>・サービスゾーンにおける推進機設備/発電設備等の設置<br>・充電ゾーンでランダーを移動できること。<br>・地上からの遠隔操作（経路設定）ができること<br>・周辺環境状態を認識し、ながら指示された目的地まで自律走行が可能となること<br>・取得したMAP情報から、最適な移動経路を生成できること。<br>・自律で複数台による協調制御（搬送物のバランを取る等）ができること。<br>・自律充電ができること。<br>・故障時同等のパフォーマンスで動作できること<br>・換所（ランダーの下など）への移動・位置合わせができること                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ・整地機能<br>・柱の設置機構（または操作機構）<br>・索道の取得機構（または操作機構）<br>・各推進機間のI/F機構（人と機械に類似しI/F構造）    | ・柱や索道、その他結露の設置機構<br>（AGVに求める操作性の要求具体化と実証）                                   |
|                 | 制御                   |                                                                  | ①地上との通信機能<br>②MAP生成機能・自己位置推定<br>③障害物検知機能<br>④経路計画<br>⑤経路制御<br>⑥（充電）対象物の認識方法/位置合わせ精度<br>⑦走行系の位置推定機能                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ・複数台協調制御<br>・照明環境に対応した制御機能（③障害物検知機能を経路計画/走行系の位置推定精度）                             |                                                                             |
|                 | 一般要求                 | サイズ・重量                                                           | 2ton級（ウェイト：TBD）<br>走行時のサイズが、幅 $2 \text{m}$ /長さ $1.8 \text{m}$ （TBD）以下とすること。（ランダー等の下部に滑り込み/クランクを想定）<br>・消費電力が $3 \text{kW}$ 以下であること。（重量 $1 \text{ton}$ に対して約 $2 \text{kW}$ を想定）<br>・DO $80\%$ ～ $20\%$ において、平均電力消費で $10 \text{h}$ （TBD）稼働できること。<br>・充電時間：DO $80\%$ ～ $20\%$ において10時間（TBD）で充電できること<br>・動力部はロープウェイにも対応したモジュール設計とすること。<br>・メンテナンス無しで $10,000 \text{km}$ （TBD）走行できること。<br>・フルレールによる搬送と換所が可能なこと。<br>・AGV操作系で交換できる部品を極力多くすること。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ・軽量化<br>・小型化<br>・省エネルギーな設計/運用ロジック<br>・重量効率のよいエネルギー源<br>・排熱機構                     | ・システム成立性<br>・バッテリー/燃料電池等のサイズ/重量/運用性への影響                                     |
|                 |                      | 電力                                                               | ・動力部はロープウェイにも対応したモジュール設計とすること。<br>・メンテナンス無しで $10,000 \text{km}$ （TBD）走行できること。<br>・フルレールによる搬送と換所が可能なこと。<br>・AGV操作系で交換できる部品を極力多くすること。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ・耐用寿命性<br>・メンテナンスが容易な機構<br>・ソフトウェア更新/バグメーク調整                                     | ・寿命予測やメンテナンス計画<br>（月面の地面性状が不明の為、不確実性が高い）                                    |
|                 | メンテ性                 |                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                  |                                                                             |
|                 | オフノミナル               |                                                                  | ・オフノミナル状態（TBD、タンクを地面に落下させた場合など）を検知する機能を持つこと。<br>・オフノミナル状態を検知した時、自律作業を停止し地上からの遠隔指示に切り替えこと<br>・AGVに自律的に充電できること<br>・設置作業（整地作業を含む）を必要としない構造であること<br>・メンテナンス無しで $10$ 年稼働できること<br>・電気的な故障時に上位システムに故障を伝達させない機能を持つこと<br>・水抽出システムと連携して、水タンク受容のタスクに移行する。（AGV/ロープウェイを従来の位置に移動させる指示を生成）<br>・ロープウェイの故障をAGVに伝達し、AGVによるバックアップ指示を生成する                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ・検知用センサ<br>・（充電）対象物の認識方法/位置合わせ精度<br>・設置機構<br>・耐用寿命性（レリタの影響）<br>・電気的な故障検知・診断機能    |                                                                             |
| AGV<br>充電装置     | 一般要求                 |                                                                  | ・水抽出システムと連携して、水タンク受容のタスクに移行する。（AGV/ロープウェイを従来の位置に移動させる指示を生成）<br>・ロープウェイの故障をAGVに伝達し、AGVによるバックアップ指示を生成する                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ・設置箇所の通信<br>・融合制御<br>・同上                                                         | ・（充電）対象物の認識方法/位置合わせ精度<br>・設置機構                                              |
| システム<br>（組合せ）   | 荷物受け渡し<br>オフノミナル時の運用 | （ロープウェイ故障区間の荷物輸送・受け渡し）<br>・ロープウェイの故障をAGVに伝達し、AGVによるバックアップ指示を生成する | ・同上                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                  |                                                                             |
| ロープウェイ<br>（自走式） | 索道（柱含む）              |                                                                  | ・サービスゾーンからPSR乗降部まで敷設できること。<br>・2ton以下の移動体を支持できること。<br>・索道の両端で移動体に対して給電できること。<br>（将来的には、索道から移動体へ給電できること（TBD））<br>・索道は2%傾斜であること（故障時を想定）<br>・索道は2%傾斜であること（故障時を想定）<br>・整地作業を省力必要としない柱構造・柱数であること<br>・制御機能は有すること（AGVとの連携同等に稼働すること想定）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ・柱の設置機構<br>・索道の敷設機構<br>・制御機構<br>・給電機構                                            | ・対象物の認識方法/位置合わせ精度<br>・設置機構、プロセス                                             |
|                 | 移動体                  | 駆動部                                                              | ・2ton以下の移動体を支持できること。<br>・速度：平均 $5 \text{km/h}$ 、 $\max 10 \text{km/h}$ 、 $\max 20 \text{km/h}$ 、 $\max 30 \text{km/h}$ 、 $\max 40 \text{km/h}$ 、 $\max 50 \text{km/h}$ 、 $\max 60 \text{km/h}$ 、 $\max 70 \text{km/h}$ 、 $\max 80 \text{km/h}$ 、 $\max 90 \text{km/h}$ 、 $\max 100 \text{km/h}$ 、 $\max 110 \text{km/h}$ 、 $\max 120 \text{km/h}$ 、 $\max 130 \text{km/h}$ 、 $\max 140 \text{km/h}$ 、 $\max 150 \text{km/h}$ 、 $\max 160 \text{km/h}$ 、 $\max 170 \text{km/h}$ 、 $\max 180 \text{km/h}$ 、 $\max 190 \text{km/h}$ 、 $\max 200 \text{km/h}$ 、 $\max 210 \text{km/h}$ 、 $\max 220 \text{km/h}$ 、 $\max 230 \text{km/h}$ 、 $\max 240 \text{km/h}$ 、 $\max 250 \text{km/h}$ 、 $\max 260 \text{km/h}$ 、 $\max 270 \text{km/h}$ 、 $\max 280 \text{km/h}$ 、 $\max 290 \text{km/h}$ 、 $\max 300 \text{km/h}$ 、 $\max 310 \text{km/h}$ 、 $\max 320 \text{km/h}$ 、 $\max 330 \text{km/h}$ 、 $\max 340 \text{km/h}$ 、 $\max 350 \text{km/h}$ 、 $\max 360 \text{km/h}$ 、 $\max 370 \text{km/h}$ 、 $\max 380 \text{km/h}$ 、 $\max 390 \text{km/h}$ 、 $\max 400 \text{km/h}$ 、 $\max 410 \text{km/h}$ 、 $\max 420 \text{km/h}$ 、 $\max 430 \text{km/h}$ 、 $\max 440 \text{km/h}$ 、 $\max 450 \text{km/h}$ 、 $\max 460 \text{km/h}$ 、 $\max 470 \text{km/h}$ 、 $\max 480 \text{km/h}$ 、 $\max 490 \text{km/h}$ 、 $\max 500 \text{km/h}$ 、 $\max 510 \text{km/h}$ 、 $\max 520 \text{km/h}$ 、 $\max 530 \text{km/h}$ 、 $\max 540 \text{km/h}$ 、 $\max 550 \text{km/h}$ 、 $\max 560 \text{km/h}$ 、 $\max 570 \text{km/h}$ 、 $\max 580 \text{km/h}$ 、 $\max 590 \text{km/h}$ 、 $\max 600 \text{km/h}$ 、 $\max 610 \text{km/h}$ 、 $\max 620 \text{km/h}$ 、 $\max 630 \text{km/h}$ 、 $\max 640 \text{km/h}$ 、 $\max 650 \text{km/h}$ 、 $\max 660 \text{km/h}$ 、 $\max 670 \text{km/h}$ 、 $\max 680 \text{km/h}$ 、 $\max 690 \text{km/h}$ 、 $\max 700 \text{km/h}$ 、 $\max 710 \text{km/h}$ 、 $\max 720 \text{km/h}$ 、 $\max 730 \text{km/h}$ 、 $\max 740 \text{km/h}$ 、 $\max 750 \text{km/h}$ 、 $\max 760 \text{km/h}$ 、 $\max 770 \text{km/h}$ 、 $\max 780 \text{km/h}$ 、 $\max 790 \text{km/h}$ 、 $\max 800 \text{km/h}$ 、 $\max 810 \text{km/h}$ 、 $\max 820 \text{km/h}$ 、 $\max 830 \text{km/h}$ 、 $\max 840 \text{km/h}$ 、 $\max 850 \text{km/h}$ 、 $\max 860 \text{km/h}$ 、 $\max 870 \text{km/h}$ 、 $\max 880 \text{km/h}$ 、 $\max 890 \text{km/h}$ 、 $\max 900 \text{km/h}$ 、 $\max 910 \text{km/h}$ 、 $\max 920 \text{km/h}$ 、 $\max 930 \text{km/h}$ 、 $\max 940 \text{km/h}$ 、 $\max 950 \text{km/h}$ 、 $\max 960 \text{km/h}$ 、 $\max 970 \text{km/h}$ 、 $\max 980 \text{km/h}$ 、 $\max 990 \text{km/h}$ 、 $\max 1000 \text{km/h}$ 、 $\max 1010 \text{km/h}$ 、 $\max 1020 \text{km/h}$ 、 $\max 1030 \text{km/h}$ 、 $\max 1040 \text{km/h}$ 、 $\max 1050 \text{km/h}$ 、 $\max 1060 \text{km/h}$ 、 $\max 1070 \text{km/h}$ 、 $\max 1080 \text{km/h}$ 、 $\max 1090 \text{km/h}$ 、 $\max 1100 \text{km/h}$ 、 $\max 1110 \text{km/h}$ 、 $\max 1120 \text{km/h}$ 、 $\max 1130 \text{km/h}$ 、 $\max 1140 \text{km/h}$ 、 $\max 1150 \text{km/h}$ 、 $\max 1160 \text{km/h}$ 、 $\max 1170 \text{km/h}$ 、 $\max 1180 \text{km/h}$ 、 $\max 1190 \text{km/h}$ 、 $\max 1200 \text{km/h}$ 、 $\max 1210 \text{km/h}$ 、 $\max 1220 \text{km/h}$ 、 $\max 1230 \text{km/h}$ 、 $\max 1240 \text{km/h}$ 、 $\max 1250 \text{km/h}$ 、 $\max 1260 \text{km/h}$ 、 $\max 1270 \text{km/h}$ 、 $\max 1280 \text{km/h}$ 、 $\max 1290 \text{km/h}$ 、 $\max 1300 \text{km/h}$ 、 $\max 1310 \text{km/h}$ 、 $\max 1320 \text{km/h}$ 、 $\max 1330 \text{km/h}$ 、 $\max 1340 \text{km/h}$ 、 $\max 1350 \text{km/h}$ 、 $\max 1360 \text{km/h}$ 、 $\max 1370 \text{km/h}$ 、 $\max 1380 \text{km/h}$ 、 $\max 1390 \text{km/h}$ 、 $\max 1400 \text{km/h}$ 、 $\max 1410 \text{km/h}$ 、 $\max 1420 \text{km/h}$ 、 $\max 1430 \text{km/h}$ 、 $\max 1440 \text{km/h}$ 、 $\max 1450 \text{km/h}$ 、 $\max 1460 \text{km/h}$ 、 $\max 1470 \text{km/h}$ 、 $\max 1480 \text{km/h}$ 、 $\max 1490 \text{km/h}$ 、 $\max 1500 \text{km/h}$ 、 $\max 1510 \text{km/h}$ 、 $\max 1520 \text{km/h}$ 、 $\max 1530 \text{km/h}$ 、 $\max 1540 \text{km/h}$ 、 $\max 1550 \text{km/h}$ 、 $\max 1560 \text{km/h}$ 、 $\max 1570 \text{km/h}$ 、 $\max 1580 \text{km/h}$ 、 $\max 1590 \text{km/h}$ 、 $\max 1600 \text{km/h}$ 、 $\max 1610 \text{km/h}$ 、 $\max 1620 \text{km/h}$ 、 $\max 1630 \text{km/h}$ 、 $\max 1640 \text{km/h}$ 、 $\max 1650 \text{km/h}$ 、 $\max 1660 \text{km/h}$ 、 $\max 1670 \text{km/h}$ 、 $\max 1680 \text{km/h}$ 、 $\max 1690 \text{km/h}$ 、 $\max 1700 \text{km/h}$ 、 $\max 1710 \text{km/h}$ 、 $\max 1720 \text{km/h}$ 、 $\max 1730 \text{km/h}$ 、 $\max 1740 \text{km/h}$ 、 $\max 1750 \text{km/h}$ 、 $\max 1760 \text{km/h}$ 、 $\max 1770 \text{km/h}$ 、 $\max 1780 \text{km/h}$ 、 $\max 1790 \text{km/h}$ 、 $\max 1800 \text{km/h}$ 、 $\max 1810 \text{km/h}$ 、 $\max 1820 \text{km/h}$ 、 $\max 1830 \text{km/h}$ 、 $\max 1840 \text{km/h}$ 、 $\max 1850 \text{km/h}$ 、 $\max 1860 \text{km/h}$ 、 $\max 1870 \text{km/h}$ 、 $\max 1880 \text{km/h}$ 、 $\max 1890 \text{km/h}$ 、 $\max 1900 \text{km/h}$ 、 $\max 1910 \text{km/h}$ 、 $\max 1920 \text{km/h}$ 、 $\max 1930 \text{km/h}$ 、 $\max 1940 \text{km/h}$ 、 $\max 1950 \text{km/h}$ 、 $\max 1960 \text{km/h}$ 、 $\max 1970 \text{km/h}$ 、 $\max 1980 \text{km/h}$ 、 $\max 1990 \text{km/h}$ 、 $\max 2000 \text{km/h}$ 、 $\max 2010 \text{km/h}$ 、 $\max 2020 \text{km/h}$ 、 $\max 2030 \text{km/h}$ 、 $\max 2040 \text{km/h}$ 、 $\max 2050 \text{km/h}$ 、 $\max 2060 \text{km/h}$ 、 $\max 2070 \text{km/h}$ 、 $\max 2080 \text{km/h}$ 、 $\max 2090 \text{km/h}$ 、 $\max 2100 \text{km/h}$ 、 $\max 2110 \text{km/h}$ 、 $\max 2120 \text{km/h}$ 、 $\max 2130 \text{km/h}$ 、 $\max 2140 \text{km/h}$ 、 $\max 2150 \text{km/h}$ 、 $\max 2160 \text{km/h}$ 、 $\max 2170 \text{km/h}$ 、 $\max 2180 \text{km/h}$ 、 $\max 2190 \text{km/h}$ 、 $\max 2200 \text{km/h}$ 、 $\max 2210 \text{km/h}$ 、 $\max 2220 \text{km/h}$ 、 $\max 2230 \text{km/h}$ 、 $\max 2240 \text{km/h}$ 、 $\max 2250 \text{km/h}$ 、 $\max 2260 \text{km/h}$ 、 $\max 2270 \text{km/h}$ 、 $\max 2280 \text{km/h}$ 、 $\max 2290 \text{km/h}$ 、 $\max 2300 \text{km/h}$ 、 $\max 2310 \text{km/h}$ 、 $\max 2320 \text{km/h}$ 、 $\max 2330 \text{km/h}$ 、 $\max 2340 \text{km/h}$ 、 $\max 2350 \text{km/h}$ 、 $\max 2360 \text{km/h}$ 、 $\max 2370 \text{km/h}$ 、 $\max 2380 \text{km/h}$ 、 $\max 2390 \text{km/h}$ 、 $\max 2400 \text{km/h}$ 、 $\max 2410 \text{km/h}$ 、 $\max 2420 \text{km/h}$ 、 $\max 2430 \text{km/h}$ 、 $\max 2440 \text{km/h}$ 、 $\max 2450 \text{km/h}$ 、 $\max 2460 \text{km/h}$ 、 $\max 2470 \text{km/h}$ 、 $\max 2480 \text{km/h}$ 、 $\max 2490 \text{km/h}$ 、 $\max 2500 \text{km/h}$ 、 $\max 2510 \text{km/h}$ 、 $\max 2520 \text{km/h}$ 、 $\max 2530 \text{km/h}$ 、 $\max 2540 \text{km/h}$ 、 $\max 2550 \text{km/h}$ 、 $\max 2560 \text{km/h}$ 、 $\max 2570 \text{km/h}$ 、 $\max 2580 \text{km/h}$ 、 $\max 2590 \text{km/h}$ 、 $\max 2600 \text{km/h}$ 、 $\max 2610 \text{km/h}$ 、 $\max 2620 \text{km/h}$ 、 $\max 2630 \text{km/h}$ 、 $\max 2640 \text{km/h}$ 、 $\max 2650 \text{km/h}$ 、 $\max 2660 \text{km/h}$ 、 $\max 2670 \text{km/h}$ 、 $\max 2680 \text{km/h}$ 、 $\max 2690 \text{km/h}$ 、 $\max 2700 \text{km/h}$ 、 $\max 2710 \text{km/h}$ 、 $\max 2720 \text{km/h}$ 、 $\max 2730 \text{km/h}$ 、 $\max 2740 \text{km/h}$ 、 $\max 2750 \text{km/h}$ 、 $\max 2760 \text{km/h}$ 、 $\max 2770 \text{km/h}$ 、 $\max 2780 \text{km/h}$ 、 $\max 2790 \text{km/h}$ 、 $\max 2800 \text{km/h}$ 、 $\max 2810 \text{km/h}$ 、 $\max 2820 \text{km/h}$ 、 $\max 2830 \text{km/h}$ 、 $\max 2840 \text{km/h}$ 、 $\max 2850 \text{km/h}$ 、 $\max 2860 \text{km/h}$ 、 $\max 2870 \text{km/h}$ 、 $\max 2880 \text{km/h}$ 、 $\max 2890 \text{km/h}$ 、 $\max 2900 \text{km/h}$ 、 $\max 2910 \text{km/h}$ 、 $\max 2920 \text{km/h}$ 、 $\max 2930 \text{km/h}$ 、 $\max 2940 \text{km/h}$ 、 $\max 2950 \text{km/h}$ 、 $\max 2960 \text{km/h}$ 、 $\max 2970 \text{km/h}$ 、 $\max 2980 \text{km/h}$ 、 $\max 2990 \text{km/h}$ 、 $\max 3000 \text{km/h}$ 、 $\max 3010 \text{km/h}$ 、 $\max 3020 \text{km/h}$ 、 $\max 3030 \text{km/h}$ 、 $\max 3040 \text{km/h}$ 、 $\max 3050 \text{km/h}$ 、 $\max 3060 \text{km/h}$ 、 $\max 3070 \text{km/h}$ 、 $\max 3080 \text{km/h}$ 、 $\max 3090 \text{km/h}$ 、 $\max 3100 \text{km/h}$ 、 $\max 3110 \text{km/h}$ 、 $\max 3120 \text{km/h}$ 、 $\max 3130 \text{km/h}$ 、 $\max 3140 \text{km/h}$ 、 $\max 3150 \text{km/h}$ 、 $\max 3160 \text{km/h}$ 、 $\max 3170 \text{km/h}$ 、 $\max 3180 \text{km/h}$ 、 $\max 3190 \text{km/h}$ 、 $\max 3200 \text{km/h}$ 、 $\max 3210 \text{km/h}$ 、 $\max 3220 \text{km/h}$ 、 $\max 3230 \text{km/h}$ 、 $\max 3240 \text{km/h}$ 、 $\max 3250 \text{km/h}$ 、 $\max 3260 \text{km/h}$ 、 $\max 3270 \text{km/h}$ 、 $\max 3280 \text{km/h}$ 、 $\max 3290 \text{km/h}$ 、 $\max 3300 \text{km/h}$ 、 $\max 3310 \text{km/h}$ 、 $\max 3320 \text{km/h}$ 、 $\max 3330 \text{km/h}$ 、 $\max 3340 \text{km/h}$ 、 $\max 3350 \text{km/h}$ 、 $\max 3360 \text{km/h}$ 、 $\max 3370 \text{km/h}$ 、 $\max 3380 \text{km/h}$ 、 $\max 3390 \text{km/h}$ 、 $\max 3400 \text{km/h}$ 、 $\max 3410 \text{km/h}$ 、 $\max 3420 \text{km/h}$ 、 $\max 3430 \text{km/h}$ 、 $\max 3440 \text{km/h}$ 、 $\max 3450 \text{km/h}$ 、 $\max 3460 \text{km/h}$ 、 $\max 3470 \text{km/h}$ 、 $\max 3480 \text{km/h}$ 、 $\max 3490 \text{km/h}$ 、 $\max 3500 \text{km/h}$ 、 $\max 3510 \text{km/h}$ 、 $\max 3520 \text{km/h}$ 、 $\max 3530 \text{km/h}$ 、 $\max 3540 \text{km/h}$ 、 $\max 3550 \text{km/h}$ 、 $\max 3560 \text{km/h}$ 、 $\max 3570 \text{km/h}$ 、 $\max 3580 \text{km/h}$ 、 $\max 3590 \text{km/h}$ 、 $\max 3600 \text{km/h}$ 、 $\max 3610 \text{km/h}$ 、 $\max 3620 \text{km/h}$ 、 $\max 3630 \text{km/h}$ 、 $\max 3640 \text{km/h}$ 、 $\max 3650 \text{km/h}$ 、 $\max 3660 \text{km/h}$ 、 $\max 3670 \text{km/h}$ 、 $\max 3680 \text{km/h}$ 、 $\max 3690 \text{km/h}$ 、 $\max 3700 \text{km/h}$ 、 $\max 3710 \text{km/h}$ 、 $\max 3720 \text{km/h}$ 、 $\max 3730 \text{km/h}$ 、 $\max 3740 \text{km/h}$ 、 $\max 3750 \text{km/h}$ 、 $\max 3760 \text{km/h}$ 、 $\max 3770 \text{km/h}$ 、 $\max 3780 \text{km/h}$ 、 $\max 3790 \text{km/h}$ 、 $\max 3800 \text{km/h}$ 、 $\max 3810 \text{km/h}$ 、 $\max 3820 \text{km/h}$ 、 $\max 3830 \text{km/h}$ 、 $\max 3840 \text{km/h}$ 、 $\max 3850 \text{km/h}$ 、 $\max 3860 \text{km/h}$ 、 $\max 3870 \text{km/h}$ 、 $\max 3880 \text{km/h}$ 、 $\max 3890 \text{km/h}$ 、 $\max 3900 \text{km/h}$ 、 $\max 3910 \text{km/h}$ 、 $\max 3920 \text{km/h}$ 、 $\max 3930 \text{km/h}$ 、 $\max 3940 \text{km/h}$ 、 $\max 3950 \text{km/h}$ 、 $\max 3960 \text{km/h}$ 、 $\max 3970 \text{km/h}$ 、 $\max 3980 \text{km/h}$ 、 $\max 3990 \text{km/h}$ 、 $\max 4000 \text{km/h}$ 、 $\max 4010 \text{km/h}$ 、 $\max 4020 \text{km/h}$ 、 $\max 4030 \text{km/h}$ 、 $\max 4040 \text{km/h}$ 、 $\max 4050 \text{km/h}$ 、 $\max 4060 \text{km/h}$ 、 $\max 4070 \text{km/h}$ 、 $\max 4080 \text{km/h}$ 、 $\max 4090 \text{km/h}$ 、 $\max 4100 \text{km/h}$ 、 $\max 4110 \text{km/h}$ 、 $\max 4120 \text{km/h}$ 、 $\max 4130 \text{km/h}$ 、 $\max 4140 \text{km/h}$ 、 $\max 4150 \text{km/h}$ 、 $\max 4160 \text{km/h}$ 、 $\max 4170 \text{km/h}$ 、 $\max 4180 \text{km/h}$ 、 $\max 4190 \text{km/h}$ 、 $\max 4200 \text{km/h}$ 、 $\max 4210 \text{km/h}$ 、 $\max 4220 \text{km/h}$ 、 $\max 4230 \text{km/h}$ 、 $\max 4240 \text{km/h}$ 、 $\max 4250 \text{km/h}$ 、 $\max 4260 \text{km/h}$ 、 $\max 4270 \text{km/h}$ 、 $\max 4280 \text{km/h}$ 、 $\max 4290 \text{km/h}$ 、 $\max 4300 \text{km/h}$ 、 $\max 4310 \text{km/h}$ 、 $\max 4320 \text{km/h}$ 、 $\max 4330 \text{km/h}$ 、 $\max 4340 \text{km/h}$ 、 $\max 4350 \text{km/h}$ 、 $\max 4360 \text{km/h}$ 、 $\max 4370 \text{km/h}$ 、 $\max 4380 \text{km/h}$ 、 $\max 4390 \text{km/h}$ 、 $\max 4400 \text{km/h}$ 、 $\max 4410 \text{km/h}$ 、 $\max 4420 \text{km/h}$ 、 $\max 4430 \text{km/h}$ 、 $\max 4440 \text{km/h}$ 、 $\max 4450 \text{km/h}$ 、 $\max 4460 \text{km/h}$ 、 $\max 4470 \text{km/h}$ 、 $\max 4480 \text{km/h}$ 、 $\max 4490 \text{km/h}$ 、 $\max 4500 \text{km/h}$ 、 $\max 4510 \text{km/h}$ 、 $\max 4520 \text{km/h}$ 、 $\max 4530 \text{km/h}$ 、 $\max 4540 \text{km/h}$ 、 $\max 4550 \text{km/h}$ 、 $\max 4560 \text{km/h}$ 、 $\max 4570 \text{km/h}$ 、 $\max 4580 \text{km/h}$ 、 $\max 4590 \text{km/h}$ 、 $\max 4600 \text{km/h}$ 、 $\max 4610 \text{km/h}$ 、 $\max 4620 \text{km/h}$ 、 $\max 4630 \text{km/h}$ 、 $\max 4640 \text{km/h}$ 、 $\max 4650 \text{km/h}$ 、 $\max 4660 \text{km/h}$ 、 $\max 4670 \text{km/h}$ 、 $\max 4680 \text{km/h}$ 、 $\max 4690 \text{km/h}$ 、 $\max 4700 \text{km/h}$ 、 $\max 4710 \text{km/h}$ 、 $\max 4720 \text{km/h}$ 、 $\max 4730 \text{km/h}$ 、 $\max 4740 \text{km/h}$ 、 $\max 4750 \text{km/h}$ 、 $\max 4760 \text{km/h}$ 、 $\max 4770 \text{km/h}$ 、 $\max 4780 \text{km/h}$ 、 $\max 4790 \text{km/h}$ 、 $\max 4800 \text{km/h}$ 、 $\max 4810 \text{km/h}$ 、 $\max 4820 \text{km/h}$ 、 $\max 4830 \text{km/h}$ 、 $\max 4840 \text{km/h}$ 、 $\max 4850 \text{km/h}$ 、 $\max 4860 \text{km/h}$ 、 $\max 4870 \text{km/h}$ 、 $\max 4880 \text{km/h}$ 、 $\max 4890 \text{km/h}$ 、 $\max 4900 \text{km/h}$ 、 $\max 4910 \text{km/h}$ 、 $\max 4920 \text{km/h}$ 、 $\max 4930 \text{km/h}$ 、 $\max 4940 \text{km/h}$ 、 $\max 4950 \text{km/h}$ 、 $\max 4960 \text{km/h}$ 、 $\max 4970 \text{km/h}$ 、 $\max 4980 \text{km/h}$ 、 $\max 4990 \text{km/h}$ 、 $\max 5000 \text{km/h}$ 、 $\max 5010 \text{km/h}$ 、 $\max 5020 \text{km/h}$ 、 $\max 5030 \text{km/h}$ 、 $\max 5040 \text{km/h}$ 、 $\max 5050 \text{km/h}$ 、 $\max 5060 \text{km/h}$ 、 $\max 5070 \text{km/h}$ 、 $\max 5080 \text{km/h}$ 、 $\max 5090 \text{km/h}$ 、 $\max 5100 \text{km/h}$ 、 $\max 5110 \text{km/h}$ 、 $\max 512$ |                                                                                  |                                                                             |



表 2-36 AGV の諸元

| 項目         | 諸元                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 積載荷重[t]    | 1                                                                                                                                                                                                                                     |
| 走行速度[km/h] | 0-2                                                                                                                                                                                                                                   |
| 登坂斜度[度]    | 28                                                                                                                                                                                                                                    |
| 蓄電容量[kWh]  | 13.5                                                                                                                                                                                                                                  |
| サイズ[mm]    | 2000×3000×1200                                                                                                                                                                                                                        |
| システム質量[kg] | フェーズ1:430、フェーズ2:860<br>※寿命や輸送物重量増加の影響から大型化するものと推定<br>なお質量は米国 UGV<br>( <a href="https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/">https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/</a> )を参考とした |

出所)三菱重工業作成

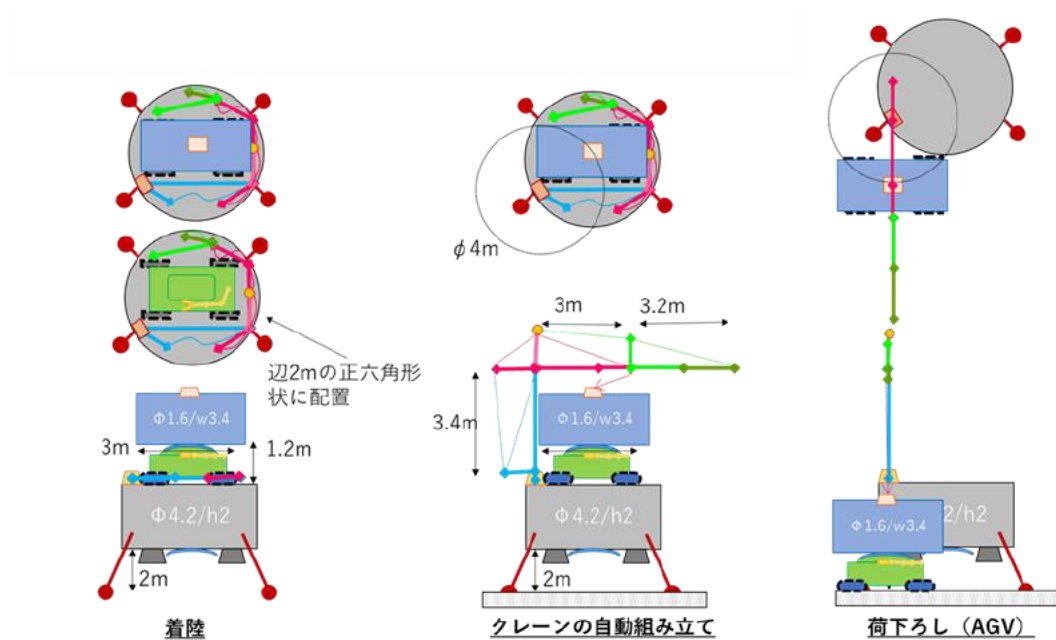


図 2-13 AGV におけるマルチパス機能イメージ

出所)三菱重工業作成

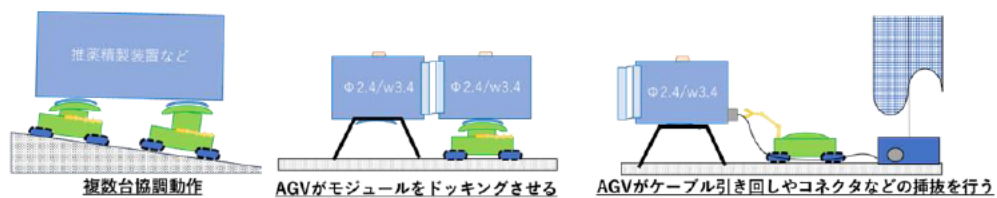


図 2-14 AGV の運用イメージ

出所)三菱重工業作成

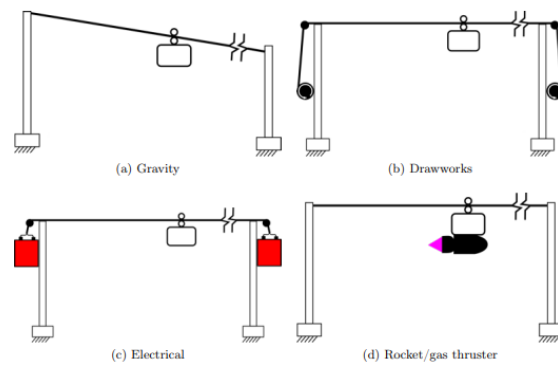


Figure 10: Potential propulsion/drive options for lunar cable-based transportation. Image credit NASA.

### 図 2-15 自走式ロープウェイの検討事例

出所)Gsauti, et al., “LuZip: Lunar Zip-line, Gondola and Cable-based Transportation for Artemis Moon Missions Mobility and Dust Avoidance”, NASA STI Program Report Series, 2024.

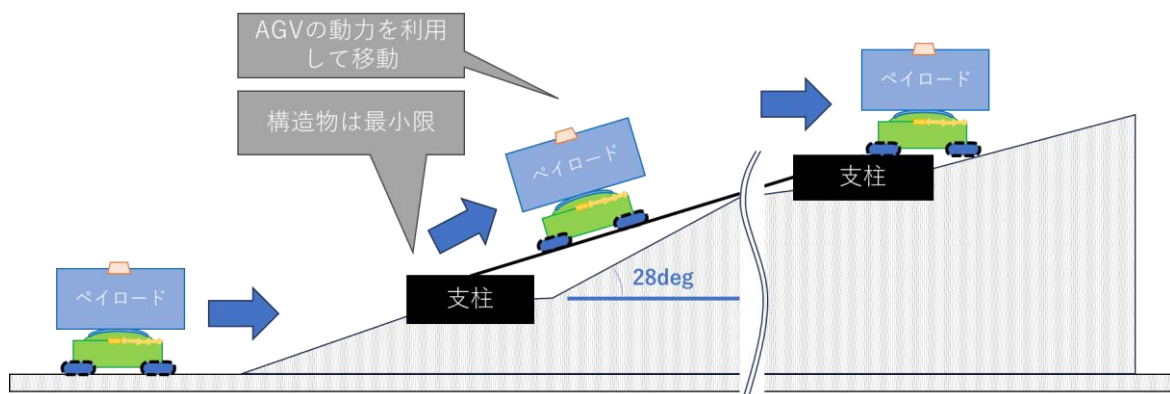


図 2-16 自走式ロープウェイの運用イメージ

出所)三菱重工業作成



表 2-37 長距離輸送方式のトレードオフ

|        |                                          | 評価指標                                        | AGV                               |                                                    | パイプライン                                            |                                                    | ロープウェイ                                    |                                    | 牽引式ソリ                                                | ケーブルカー                                              | 鉄道                                                                   |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|--------|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------|-------------|
|        |                                          |                                             | クローラ                              | ホイール                                               |                                                   |                                                    | 自走                                        | 索道駆動                               |                                                      |                                                     |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
| 評価     | ①初期コスト                                   | 配点：3点                                       | 2.7                               | 1.7                                                | 0.7                                               |                                                    | 1.4                                       | 1                                  | 1.4                                                  | 1                                                   | NA                                                                   |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | ②運用コスト                                   | 配点：3点                                       | 2                                 | 1                                                  | 2                                                 |                                                    | 2                                         | 1.5                                | 1                                                    | 1                                                   |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | ③スケジュール                                  | 配点：3点                                       | 3                                 | 0                                                  | 1                                                 |                                                    | 2                                         | 1                                  | 2                                                    | 0                                                   |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | ④リスク                                     | 配点：3点                                       | 3                                 | 2                                                  | 0                                                 |                                                    | 2                                         | 1                                  | 1                                                    | 1                                                   |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | 合計点                                      | (12点満点)                                     | 10.7                              | 4.7                                                | 3.7                                               |                                                    | 7.4                                       | 4.5                                | 5.4                                                  | 3                                                   |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
| 輸送システム | 走破性                                      | 移動距離（勾配）<br>輸送に必要な電力量<br>システム重量<br>往復時間（速度） | ①初期コスト<br>（開発）                    | 13km/27.4deg<br>1.5kW?<br>0.5ton<br>約10h(max6km/h) | 25km/20deg<br>1.5kW?<br>1.5ton?<br>約4h(max15km/h) | 13km/27.4deg<br>1.5kW<br>1.5ton?<br>約4h(max15km/h) | 13km/27.4deg                              | 地上でも実用されており、制振性を除けば月面環境の影響も小さいと考える | 地面の起伏の影響が？<br>再現性<br>耐久性                             | 施工できれば、地上技術の転用で対応できる。<br>（シュートスバーン@スイス<br>最高勾配110%） | レールと車輪の粘着力だけで走る鉄道では勾配に対応不可※<br>対応する為にはレールを長距離敷設するかケーブルカー方式を採用する必要がある |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | 寿命                                       | ②運用コスト                                      | AGVホイールより短い見込み。（200km程度を想定して開発予定） | △                                                  | 8h/day,10y-more                                   | ○                                                  | ロープウェイよりも長くなる想定                           | ◎                                  | レゴリス影響少ない為、AGVホイールと同等または長くなる想定                       | △                                                   | レゴリス影響少ない為、AGVホイールと同等または長くなる想定                                       | ○                                                  |                                               |        |                                                               |             |
|        | オペレーション                                  |                                             | ノミナル運用は自律制御である為、差異なしの想定           |                                                    |                                                   |                                                    |                                           |                                    |                                                      |                                                     |                                                                      |                                                    |                                               |        |                                                               |             |
|        | 脆弱性<br>(1fail時の評価)                       | ④リスク                                        | 特になし。                             | ◎                                                  | 一部系統が停止。<br>・隕石着弾による道路破壊<br>→クローラによるB/U           | ○                                                  | 全系統が停止。<br>・隕石着弾時<br>・内部凍結<br>→クローラによるB/U | ✕                                  | 一部系統が停止。<br>地上の鉄道架線のように索道を柱間で独立敷設するなどに対応。→クローラによるB/U | △                                                   | 全系統が停止。<br>パイプラインと同種だが隕石着弾面積は小さい為、発生確率低？→クローラによるB/U                  | △                                                  | 一部系統が停止。<br>（隕石着弾によるレールや敷石の破壊）<br>→クローラによるB/U | ○      |                                                               |             |
|        | インフラ建設                                   | 施工日数（日）                                     | ③スケジュール                           | ◎                                                  | 8906                                              | ✕                                                  | 1026                                      | △                                  | ○                                                    | ワイヤーとカウンターウェイトおよびワイヤー駆動設備の設置が必要                     | △                                                                    | ワイヤーとカウンターウェイトおよびワイヤー駆動設備の設置が必要。<br>斜面への施工が不要な見込み。 | ○                                             | ✕      | ✕                                                             |             |
| インフラ建設 | 施工総電力量（kWh）                              | ①初期コスト（電力装置の）                               | ◎                                 | 498000                                             | ✕                                                 | 129000                                             | △                                         | 施工日数に比例                            | ○                                                    | 自走式に加えて、駆動設備の設置が必要                                  | △                                                                    | ○                                                  | ✕                                             | ✕      |                                                               |             |
|        | 施工用重機                                    | ①初期コスト（輸送費）                                 | ◎                                 | バックホウ                                              | ←                                                 | ←                                                  | ←                                         | ←                                  | △                                                    | 左記+駆動設備<br>柱の構造が複雑になるため、重量増の可能性あり                   | △                                                                    | ワイヤと駆動設備<br>（カウンターウェイトはレゴリス活用を想定）                  | △                                             | 左記+レール | レール                                                           | ✕           |
|        | キャリアダンプ                                  |                                             |                                   | ←                                                  | ←                                                 | ←                                                  | ←                                         | △                                  | 柱とワイヤ<br>（カウンターウェイトはレゴリス活用を想定）                       | △                                                   | ワイヤと駆動設備<br>（カウンターウェイトはレゴリス活用を想定）                                    | △                                                  | 左記+レール                                        | レール    | ✕                                                             |             |
|        | 資材                                       | NA                                          | ○                                 | NA                                                 | ✕                                                 | クレーン                                               | △                                         | 柱とワイヤ<br>（カウンターウェイトはレゴリス活用を想定）     | △                                                    | 左記+駆動設備<br>柱の構造が複雑になるため、重量増の可能性あり                   | △                                                                    | ワイヤと駆動設備<br>（カウンターウェイトはレゴリス活用を想定）                  | △                                             | 左記+レール | レール                                                           | ✕           |
|        | オペレーション（建設の運用）                           | ②運用コスト                                      | ◎                                 | 重機操作の遠隔操作（TBD）が必要。施工日数に比例して運用コスト増                  | ✕                                                 | ←                                                  | △                                         | ←                                  | ○                                                    | ←                                                   | ○                                                                    | ←                                                  | ✕                                             | ←      | ✕                                                             |             |
|        | （参考：評価外）他PSRへの移送容易性<br>地点1→地点2（距離約160km） | 寿命がネック                                      | △                                 | 緩斜面を経由すれば○だが、クレータ内のインフラ建設が✕                        | ✕                                                 | インフラの再建設が必要（現地まではローパでの重機輸送を想定）                     | △                                         | ←                                  | ○                                                    | ←                                                   | △                                                                    | ←                                                  | ○                                             | ←      | ✕                                                             | ✕           |
|        | （参考：評価外）オペレーション増設の簡易さ                    | 不要                                          | ◎                                 | 道路延長分毎に増設可能                                        | ○                                                 | 中の輸送物を空にしてから増設する必要がある。                             | ✕                                         | 索道延長分毎に増設が可能                       | ○                                                    | 増設困難<br>全経路のワイヤーを交換する必要がある                          | ✕                                                                    | 増設困難<br>全経路のワイヤーを交換する必要がある（初期から長いワ                 | ✕                                             | ←      | ✕                                                             | 線路延長分毎に増設可能 |
| 備考     |                                          | ・施工機材の機能を付与する（マルチパーパス化等）必要がある。              |                                   | サービスゾーン等の平坦地かつ短距離区域においては効率が良い為、導入メリットあり            |                                                   | ・内部凍結が生じるや復旧困難になる点がネック                             |                                           | カウンターウェイトや制振性などの実現性をラフ検討中。         |                                                      | 自走式より省電力ではあるが、可動部が毎年に存在する点が、デメリットと考える。              |                                                                      | 荷物の安定性等の制御は困難。                                     |                                               |        | ※箱根登山鉄道の80%（8%）が最急勾配。<br>斜度8%程度のレールを敷設する場合、施工日数が膨大するため、候補から外す |             |

出所)三菱重工業作成

### (3) 月面における実証候補項目のサマリ

以上の検討をふまえ、月面での輸送システムに係る実証を行う要素について実証候補項目として整理を行った。各フェーズでの輸送システムに係る実証イメージを表 2-38 に示す。ここではフェーズ 1 までに AGV を中心とした実証を、フェーズ 2 では長距離輸送システムの部分的な実証を、フェーズ 3 では長距離輸送システムの全面的な実証及び AGV の数・能力の拡張を行うことを想定した。各フェーズでの実証イメージを図 2-17、図 2-18、図 2-19 に示す。これらのイメージを基に、実証候補項目として抽出した内容を表 2-39 に示す。なお個別の具体的な実証候補項目については 2.1.2 (3) に示す。

表 2-38 各フェーズでの実証イメージ

|        | フェーズ 0:単体<br>実証<br>2030 年頃                                                         | フェーズ 1:部分統<br>合実証<br>2030 年～2035<br>年頃 | フェーズ 2:統合実証/<br>初期稼働<br>2035 年～2040 年頃  | フェーズ 3:本格稼働<br>2040 年頃～     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
| 全体システム | TBD                                                                                |                                        | ・End to end のサービス実証(初期稼働相当)※            | AGV 数や種類を増やすことでロジスティクス能力を拡充 |
| AGV    | 想定経路を走行することで以下を確認<br>・AGV のプラットフォーム機能の検証(登坂走行・傾斜地での作業性)<br>・地質調査<br>・メンテナンス性や寿命の評価 |                                        | ・AGV のオプション機能(ホイール駆動や操作バリエーションの拡充など)の検証 |                             |
| ロープウェイ | ・索道設置機構の検証<br>・寿命評価                                                                |                                        | ・AGV による索道の建設<br>・ロープウェイの運用             |                             |
| その他    | TBD                                                                                |                                        | (・定常タスクとして、その他検証機器の輸送)                  |                             |

出所)三菱重工業作成

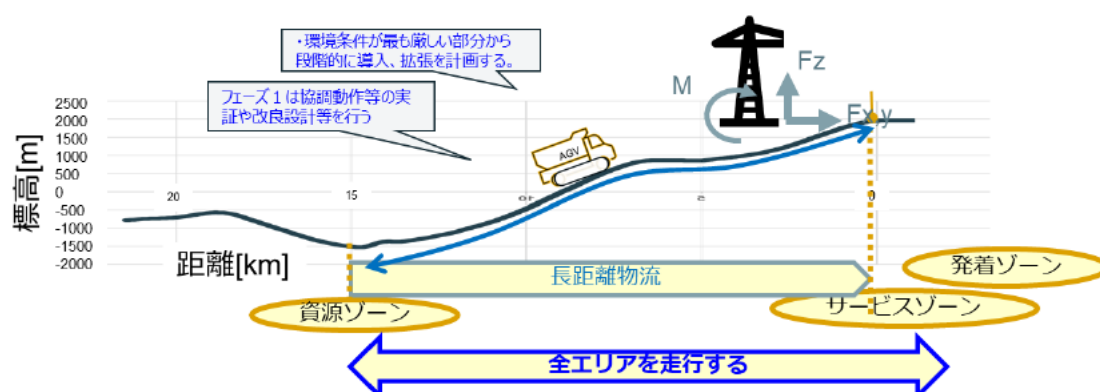


図 2-17 フェーズ 0～1 における実証イメージ

出所)三菱重工業作成

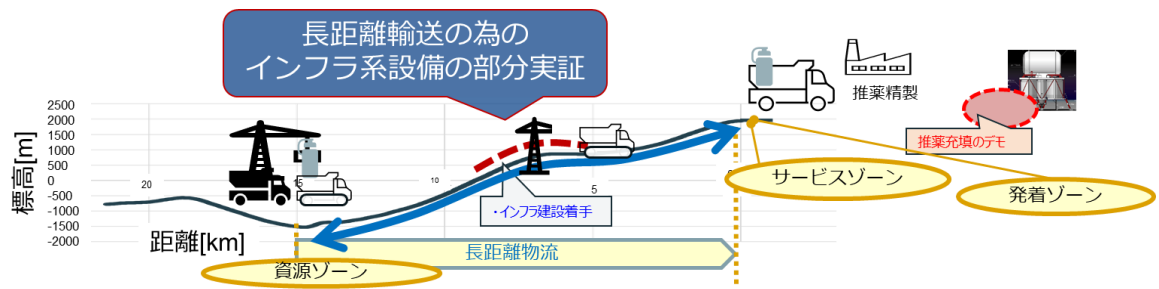


図 2-18 フェーズ 2 における実証イメージ

出所)三菱重工業作成

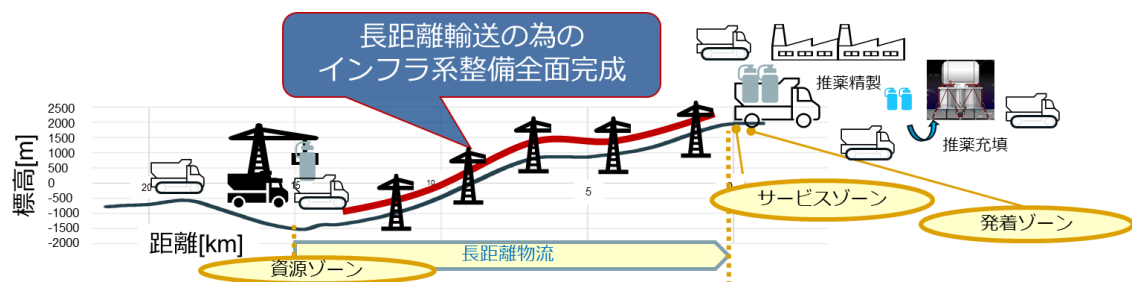


図 2-19 フェーズ 3 における実証イメージ

出所)三菱重工業作成

表 2-39 抽出された技術課題に対する月面実証・地上実証の識別結果

| 装置              | 機能#1       | 機能#2                       | 技術課題                                                                           | 月面実証<br>が必須な<br>項目         | フェーズ<br>～2030                                   | フェーズ0 2030～<br>月面単体実証                                        | フェーズ1 ～2035<br>部分統合実証 | フェーズ2 ～2040<br>統合実証/初期可動                           | フェーズ3 2040～<br>本格稼働                              |
|-----------------|------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| AGV             | 走行         |                            | ・走行機構確立と性能実証（月面の地面性状が不明の為、<br>斜面走行／往復走行時の性能などを予測できない）<br>・重心位置制御などで転倒防止機能を搭載する | ○                          | ○<br>FM開発                                       | 想定経路を走行して実証<br>・AGVのプラットフォーム<br>機能の検証（登坂走<br>行・傾斜路下の作業       | ○<br>要すれば改良開発         | ○<br>EndtoEndのサービスの<br>実証（初期稼働相<br>当）              | ○<br>機能向上モデルの月面<br>利用（機体追加→輸<br>送量や実施タスクを拡<br>大） |
|                 | 操作         | 水と推進の輸送                    | ・対象物の認識方法／位置合わせ精度および・各種機器間の<br>I/F機構のトレードオフが必要                                 | -                          | ○<br>FM開発                                       | ○<br>寿命評価後に実施可能<br>であればトライ。                                  | ○<br>要すれば改良開発         | ○<br>（同上）                                          |                                                  |
|                 |            | その他作業                      | ・柱や索道、その他装置の設置機構<br>（AGVに求める操作性の要求員具体化と実証）                                     | ○<br>設置機構                  | ○<br>FM開発                                       | ○<br>ランダーの移動<br>索道（柱）の設置<br>その他デモは寿命評価<br>後に実施可能であればト<br>ライ。 | ○<br>要すれば改良開発         | ○<br>（同上）<br>○<br>機能向上モデルの開発                       |                                                  |
|                 | 制御         |                            | ・複数台協調制御<br>・照明環境に対応した制御機能（③障害物検知機能<br>④経路計画⑦走行系の位置姿勢精度）                       | -<br>（LUPEXの<br>知見活<br>用？） | ○<br>FM開発                                       | ○<br>AGV単体機能の検証<br>○<br>AGV複数台協調制御<br>（FM化）                  | ○<br>AGV複数台協調制御       | ○<br>（同上）<br>○<br>機能向上モデルの開発                       |                                                  |
|                 | 一般要求       | サイズ・重量                     | ・システム成立性                                                                       | -                          | ○<br>FM開発                                       | ○                                                            |                       | ○<br>（同上）                                          |                                                  |
|                 |            | 電力                         | ・バッテリー燃料電池等のサイズ／重量／運用性への影響                                                     | -                          | ○<br>FM開発                                       | ○                                                            |                       | ○<br>（同上）<br>○<br>機能向上モデルの開発                       |                                                  |
|                 |            | メンテ性                       | ・寿命予測やメンテナンス計画<br>（月面の地面性状が不明の為、不確実性が大きい）                                      | ○                          | ○<br>FM開発<br>寿命試験・メン<br>テナンス性確認                 | ○<br>（寿命データ取得）                                               | ○<br>要すれば改良開発         | N/A<br>（要すれば実証する）<br>○<br>機能向上モデルの開発               |                                                  |
|                 |            | オフノミナル                     |                                                                                | -                          | ○<br>FM開発                                       | ○                                                            |                       | ○<br>（同上）                                          |                                                  |
| AGV<br>充電装置     | 一般要求       |                            | ・（充電）対象物の認識方法／位置合わせ精度<br>・設置機構                                                 | -                          | ○<br>FM開発                                       | ○                                                            |                       | ○<br>（同上）<br>○<br>機能向上モデルの開発                       | ○<br>（同上）                                        |
| システム<br>（組合せ）   | 荷物受け渡し     |                            | -                                                                              | -                          | ○<br>EM                                         | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>EndtoEndのサービスの<br>実証（初期稼働相<br>当）              | ○<br>（同上）                                        |
|                 | オフノミナル時の運用 | （ロープウェイ故障区間の荷<br>物輸送・受け渡し） | -                                                                              | -                          | ○<br>EM                                         | ○<br>FM                                                      |                       | ○                                                  |                                                  |
| ロープウェイ<br>（自走式） | 索道（柱含む）    |                            | ・対象物の認識方法／位置合わせ精度<br>・設置機構、プロセス                                                | ○<br>設置機構                  | ○<br>EM                                         | ○<br>柱の施工に必要なデータ<br>を取得                                      | ○<br>FM               | ○<br>索道を設置                                         | N/A                                              |
|                 | 移動体        | 駆動部                        | ・自走式ロープウェイの駆動部の方式明確化<br>（前例が少ない）                                               | -                          | ○<br>EM<br>重力を補助して<br>くれるクレーンな<br>どを用いた動作<br>実証 | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>EndtoEndのサービスの<br>実証（初期稼働相<br>当）<br>○<br>追加製造 | ○<br>移動体を追加し輸送量<br>を拡大                           |
|                 |            | コンテナ部                      | ・効率的なI/Fの開発<br>（緩やかな固定状態のコンテナへの荷物設置機構の前例が少<br>ない）                              | -                          | ○<br>同上                                         | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>（同上）<br>○<br>追加製造                             |                                                  |
|                 | 制御         |                            | ・（充電）対象物の認識方法／位置合わせ精度<br>・設置機構                                                 | -                          | ○<br>OEM                                        | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>（同上）                                          | N/A                                              |
|                 | 一般要求       | サイズ・重量                     | ・システム成立性                                                                       | -                          | ○<br>OEM                                        | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>（同上）                                          | N/A                                              |
|                 |            | 電力                         | バッテリー燃料電池等のサイズ／重量／運用性への影響                                                      | -                          | ○<br>OEM                                        | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>（同上）                                          | N/A                                              |
|                 |            | メンテ性                       | ・寿命予測やメンテナンス計画<br>（月面の地面性状が不明の為、不確実性が大きい）                                      | ○                          | ○<br>OEM                                        | ○<br>索道設置機構の寿命評<br>価                                         | ○<br>FM               | ○<br>（同上）                                          | ○<br>保守管理                                        |
|                 |            | オフノミナル                     | ・故障伝搬しにくい索道機構                                                                  | -                          | ○<br>OEM                                        | ○<br>FM                                                      |                       | ○<br>（同上）                                          | N/A                                              |

出所)三菱重工業作成

## 2.1.4 熱マネジメントに係る検討

### (1) 検討の背景

推薬プラントに係る実証候補項目に係る検討を行う中で、システムの継続的な稼働において、越夜の間は氷結温度以上の熱の維持が必要であり、熱をどのように維持するかが重要であることが確認された。一方で、月面で発電された電力を月面での消費先へ無線送電する際、送電・変換ロスにより多くが熱として排熱されることを踏まえると、熱維持に係る課題を解決する一手段として、電力送電で発生する熱ロスを有効活用することが想定される。そこで、熱ロスの活用による発電量やシステム規模の合理化の可能性を検討した。

上述の通り、本検討では、無線送電により発生する排熱を利用して推薬プラントの熱維持を行うこととし、駆動電力のうち送電設備で約50%、さらに受電設備で約50%(うち50%が熱回収可能)が熱ロスとなる前提のもと、検討を実施した。

### (2) 検討結果

フェーズ3における実証候補項目を対象として、各給電対象における必要電力を図2-20に示す。また、資源ゾーンでは給電ステーションに30kW、及び熱抽出ユニットに18kWの計48kWが必要電力であり、無線送電の送受間で50%のロスがあると仮定すると、送電側ではおよそ96kWが必要と算出される。

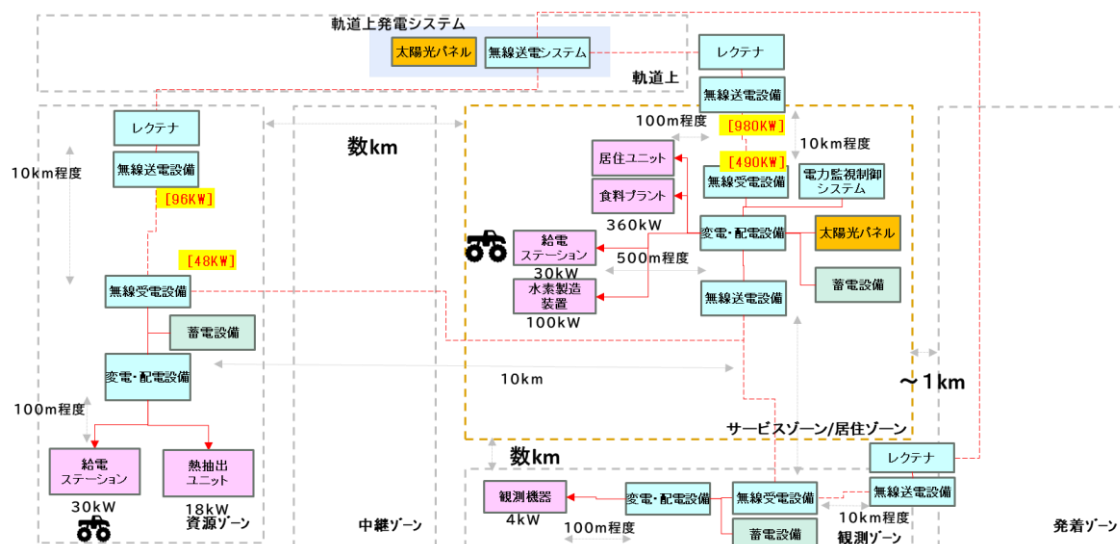


図 2-20 資源ゾーンでの必要電力とロスを考慮した送電量の関係図

出所)三菱総合研究所及び千代田化工建設作成

熱ロスを考慮しない場合、上述のように96kWの送電が必要となるが、受電設備での排熱の有効利用による合理化の可能性を検討した。具体的には、無線受電設備での電力ロスの25%を熱抽出ユニットで利用と仮定(送電ロス50%、このうち受電設備で回収可能な熱はさらにそのうちの50%)すると、熱抽出ユニットで本来必要であった18kWのうち15kW分を排熱利用することが可能となるため、送

電量は約 2/3 に削減できる可能性が示された。熱抽出プロセスを対象とした電力ロス排熱利用による合理化検討結果を図 2-21 に示す。

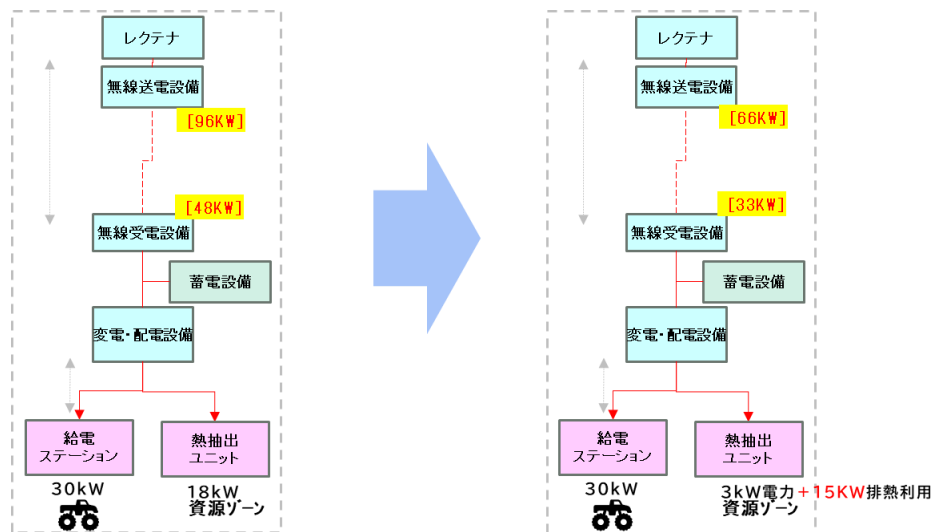


図 2-21 熱抽出プロセスにおける電力ロス排熱利用による合理化検討結果

出所)三菱総合研究所及び千代田化工建設作成

本検討は無線受電設備から熱抽出ユニットへはロスが発生しない想定で熱輸送・利用システムを稼働させる前提であるが、この部分のロスを含めた詳細な検討が今後の課題である。また、月面における熱維持のため、レゴリスを活用した蓄熱技術の開発なども行われている。月面に豊富にあるレゴリスを越夜の間の蓄熱材として活用することで推薬プラントからの余剰熱・熱ロスを有効活用する重要技術のひとつとなりうると考えられる。



## 2.2 電力パートに関する技術課題整理

本業務では、令和5年度に引き続き、月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)のうち、電力部分に関連して、月面や月周辺軌道での発電、送電(無線電力送電等)を含む電力供給システムに必要な要素技術に関する調査・検討を行うことを目的とした。そのため、電力供給システムに関するアーキテクチャを、発電から送電までの一貫した電力ネットワークとして検討した。また、将来の月面上での電力供給システムの構築に向け、現在から本格的な電力供給システムが稼働する年代までの時系列の実証候補項目として、実証目的・必要性、実証期間、実証の目標値、月面への必要輸送量、システム的具体配置をとりまとめた。さらに水素側と協力し、エネルギーシステムとしての全体最適化を志向した検討を行った。なお、電力の供給源は月面および月周辺軌道での太陽光発電を基本としたが、必要に応じて燃料電池等のその他電源の活用についても検討した。

これらの検討においては、日本の国際的プレゼンス向上やデファクトスタンダード確立機会の獲得に向けて、将来の月面活動に必要となるエネルギー関連技術について技術課題の実現可能性を検討し、開発が必要とされる要素技術等について整理した。なお、月面での活動シナリオ及び必要な電力供給アーキテクチャは、JAXA が制定している「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021(EZA-2021001)」をベースとした。

なお、以降で示す実証候補項目は確定的なものではなく、今後の月面電力システムの技術開発の実施に向けた検討の“スタートライン”である。すなわち今後の議論の土台となるものであり、具体化・精緻化されていくものとの位置づけである。

### 2.2.1 電力パートの検討の要点

本年度も、令和5年度に引き続き月面エネルギー関連技術開発(技術課題整理)を実施した。将来の月面活動に必要となるエネルギー関連技術の開発を進めるにあたり、月面エネルギーシステム全体に関する技術課題整理として、要素技術の洗い出しおよび課題の整理を行い、有識者委員会及びワーキンググループ(WG)で報告し議論する形で検討を行った。

#### (1) 調査の実施体制

本年度の電力に係る検討は「電力パート」と呼称し、昨年度と同じく以下の4つの構成システムに分けて検討した。

- ・月面電力供給全体システム
- ・月周辺軌道太陽光発電システム
- ・月面設置発電システム
- ・月面上での送電システム

それぞれ検討チームを構成し分担して検討することとした。電力パートの関係者は全員「月面電力供給全体システム」のメンバーともなり、共通事項や新規の課題についての問題提起及び議論を行うこととした。本年度は昨年度から「月面電力供給全体システム」のメンバーを補強し、また「月面上の送電シ

システム」ではローバーへの送電を追加する等の見直しを行った。これを図 2-22 に示す。本報告書においては、これらの追加分を「その他の項目」として月面環境調査、ローバーへの給電及び CIGS 太陽電池として記載した。

注 \*はリーダーを示す

| チーム体制                                 | 業務                                                                                                     | 電力パート 各システム検討リーダー及びメンバー                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 月面におけるエネルギー関連技術開発<br>(技術課題整理) 全体とりまとめ | 全体とりまとめ                                                                                                | *三菱総合研究所                                                                                                                                                                  |
| プロジェクト管理                              | ・電力パート全体とりまとめ                                                                                          | *宇宙システム開発利用推進機構<br>(J-spacesystems)                                                                                                                                       |
| 月面電力供給全体システム                          | ・電力システム全体のアーキテクチャ<br>・電力システム構成要素共通の事項<br>(月面での設備建設等)<br>・電力供給の対象、供給方法の検討、電力の質、供給対象の場所、月面特有の電力の活用方法、その他 | * J-spacesystems/JAXA宇宙科学研究所<br>(共通課題や新規課題の検討はこのチームにて実施)<br>(電力パート全関係者は全員このチームの構成員となる)<br>・CIGS太陽電池：出光興産<br>・設備内配電及び電力制御：三菱重工業<br>・月面環境調査、ローバーへの給電：ispace<br>(オブザーバ：東京電力) |
| 月周辺軌道太陽光発電システム                        | ・発電衛星軌道等の全体システム検討<br>・軌道上発電衛星システム<br>・月面上発電システム(含レクテナ)                                                 | *JAXA宇宙科学研究所<br>(京都大、電気通信大、早稲田大、東洋大)<br>(金沢工業大)                                                                                                                           |
| 月面設置発電システム                            | ・月面設置の太陽電池による発電<br>・其他方式による発電                                                                          | *大林組<br>太陽電池：シャープ                                                                                                                                                         |
| 月面上での送電システム                           | ・マイクロ波<br>・レーザー、光ファイバ<br>・有線<br>(ローバーへの送電も含む)                                                          | *IHIエアロスペース/京都大<br>・マイクロ波：IHIエアロスペース、金沢工業大<br>・レーザー及び光ファイバ：光産業創成大<br>・有線：J-spacesystems/三菱重工業                                                                             |

図 2-22 電力パートの実施体制

出所)J-spacesystems 作成

本年度は特に、現在から本格的な電力供給システムが稼働する年代までの時系列の実証項目、実証目的・必要性、実証期間、実証の目標値、月面への必要輸送量、システムの具体配置等を含めた実証候補項目のとりまとめと定量化に主眼を置いた。なお、とりまとめた実証候補項目は、前述のように確定的なものではなく、今後の議論により具体化・詳細化されるものである。

## (2) 各構成要素の検討

本年度の電力に関する技術課題の整理にあたっては、月面での将来電力ネットワークのインフラ構築を念頭に置き、供給すべき電力は現在から本格的な電力供給システムが稼働する年代までの各フェーズで想定される供給先及び供給量を前提として検討することとした。

電力を供給するための主要な機能は発電(月面及び月周辺軌道)及び送電(集配電)であるが、これらの性能が電力供給先の要求を満たすためには蓄電システムにより需給調整を行う必要がある。供給先としては水素製造貯蔵利用システム(資源ゾーン及びサービスゾーン)、有人居住区等(居住ゾーン)、観測等その他(観測ゾーン)及び発着ゾーンがある。図 2-23 にこれらの電力供給システムの機能ブロック図を示す。

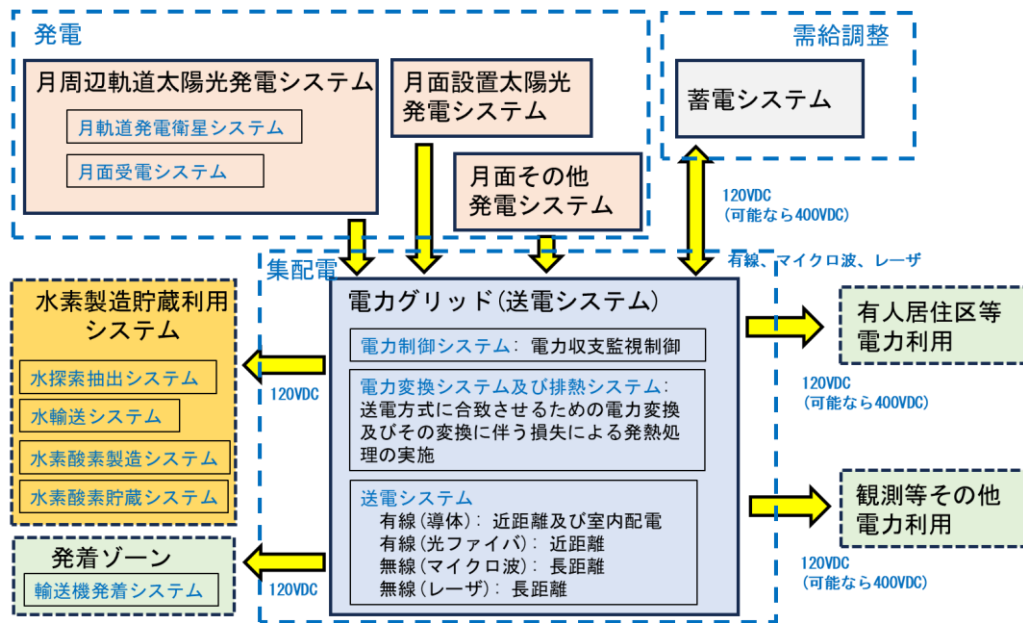


図 2-23 月面での電力供給システム機能ブロック図

出所)J-spacesystems 作成

## 2.2.2 月面電力供給全体システムに係る検討

昨年度までの検討において、電力供給のためのインフラとしての機能要求とその実現のためのシステム構成要素については図 2-23 に示すように整理された。さらに 2045 年頃の実用段階での月面活動における電力の供給先(水探索、水素プラント、有人居住等)を想定した電力供給システムの概念は、図 2-24 に示すように整理された。これにより、電力システムの構成要素とその供給先である水探索、水素プラント、有人居住と電力供給全体システムとの間の機能的な系統について明確化した。

一方、電力システムとして具体的に構築することを検討するためにはその位置関係を含むシステム及び機器構成、さらに具体的な電力規模を明確にする必要がある。また具体的な月面での活動基盤の構築に向けて、段階的に必要な技術の実証と実用に向けての整備を進めるため、フェーズを設定した検討が必要となる。

そのため、今年度は、フェーズの区分および電力供給先の具体的な配置と電力量について設定し、検討を行った。

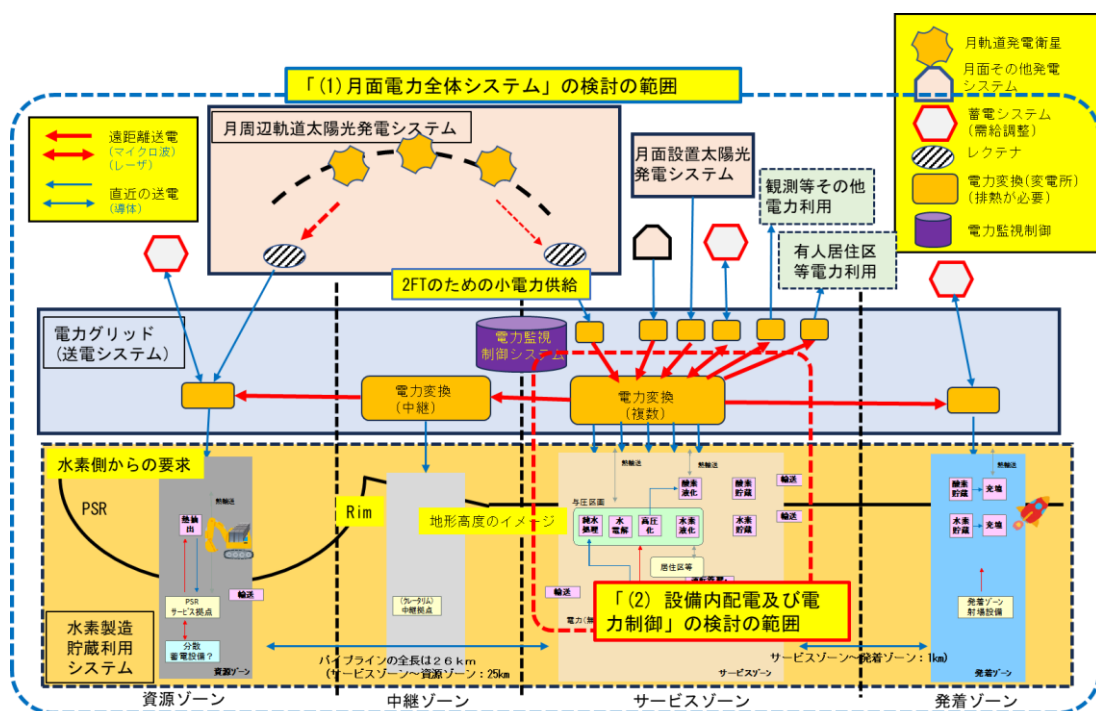


図 2-24 電力供給全体システム

出所)J-spacesystems 作成

また、電力システムの検討を進めるにあたり、地上における電力グリッドに相当する電力システム全体としての構築と、サービスゾーン内の近距離の設備への電力供給や建屋内の電力配電については分けて検討することとした。すなわち、月面全体電力システムは従来の宇宙向けの電力システムの概念の中には存在しないことから地上における電力グリッドをもとに検討を新たに実施するのに対して、サービスゾーン内の近距離の設備への電力供給や建屋内の電力配電は、国際宇宙ステーション(ISS)等の既存の宇宙システムの電源システムの発展形態として検討する形とした。そのため、以降の電力システムの

検討結果の報告については、電力全体システムについてを「(1) 月面電力全体システム」に、後半のサービスゾーン内の近距離の設備への電力供給や建屋内の電力配電については「(2) 設備内配電及び電力制御」として記述している。

なお前述の考察の通り、月面でのインフラとしての機能を果たすためにいわゆる地上における電力グリッドの概念に従ってシステム構成要素並びにそれらの機能性能を展開検討して行くが、地上における電力グリッドとしての要件である以下の点については、今後の課題とする。

- 利用者に合わせた交流か直流かについての考え方
- 利用者のニーズに合わせた冗長構成についての考え方
- 月面の真空中における高電圧対応のケーブルの開発の方策

また、電力システムをインフラとして構築するにあたり、地上の電力インフラの検討に加えて考慮すべき事項や検討の方針については次のとおりである。

#### <月面の特殊性による電力システム構築の基本的な考え方>

月面での電力供給システムとしては、建屋内や近距離に分散した機器への電力供給システムを除き、全体としては地上における電力グリッドの構築と同等という観点にて検討する。ただし、地上と月面における環境・状況の違いとして、以下の点を考慮する。

#### ・真空環境であること

地上はほぼ一気圧の環境であるのに対して、月面はほぼ真空環境である。しかし月面活動を行う場所においては、月面上の機器等からの脱ガスや居住区における空気のリーク等により、プラズマが発生しない高真空環境は常に維持されとは期待できず、パッシェンの法則に基づく放電発生を考慮する必要がある。そのため、基本的にパッシェンの法則における最低放電開始電圧(気体分子のプラズマ化)を超える電圧での送電及び配電は避ける必要がある。

これまで、動作電圧を上げることにより電流を減らし、軽量化を図るため、大型大電力衛星向けに1000V程度で動作する太陽電池パネルの研究等が実施されているが、現時点では確実に放電を防止する技術(分子のプラズマ化の対策)は無いため、月面電力システム構築においても基本的にパッシェンの法則における最低放電開始電圧以下において動作運用することを前提とする。この前提の下では地上で行われているような有線での高圧送電は困難であり、月面での長距離送電時には基本的に無線送電になると想定される。

なお上記の通り有線送電の高電圧化は乗り越えること難しい高いハードルはあるものの、現在確立している120VDCから少なくとも400VDCによる配電が実現出来るように少しでも進展すれば電力システムの重量はその昇圧した電圧の比率の二乗に比例して削減可能であるため、電力全体システム及び送電システムにおける高電圧化ということで今後の開発実証項目の内容に含めることとしている。

#### ・停電は許されないこと

地上の自然環境においては大気存在において、停電に遭遇しても人間の生存に直接的に致命的な事態にはならない。しかし月面の有人拠点においては電力により人間の生存環境を維持していることから

ら、停電は許容することが出来ない。従来の NASA の有人システム構築においては、人間の生存に影響を与える事象の発生を防止の手段として、3 つの独立した原理に基づく手段を用意(Two Fault Tolerant(2FT))することとなっている。その観点に立てば、全員の地球への避難が不可能になるような数百人以上の人間が活動するようなフェーズでは、原理の異なる 3 つの電力供給手段により、人間の生存維持のための電力が供給できるシステムとする必要がある。

#### ・月面設置の太陽光発電以外の手段が必要なこと

月面の特色として、以下のような点が挙げられる。

- 月の極地域を除き、夜が 15 日間程度継続する
- 極地域においても地形の影響により月面設置の太陽光発電システムだけでは断続のない電力供給は出来ない
- 永久影(PSR)における活動では月面設置型の太陽光発電が使用できず、クレーター外から送電する必要がある。

そのため、月周辺軌道において太陽光発電を行い、無線により月面に電力を送電する月周辺軌道太陽光発電システムが有効な発電システム候補となる。これは上記の 2FT の電力システムを実現する観点においてもキーとなる方式である。

#### ・電力インターフェースの標準化及び接続機器の規格等の調整と制定

地上の電力グリッドにおいては既に、電力システムとその電力を使用する機器間、並びに電力を送電する際のインターフェース等についての標準化と規格化なされている。そのため電力を使うための機器や、電力グリッドを構成する発電システムや蓄電システム等の設計開発が広く可能となっている。

月面においても同様にそのインターフェースの標準化と接続機器の規格等についての議論と調整が必要であるが、現段階ではまだその調整作業が開始されていない。月面電力システムにおける国際調整作業として開始する必要がある、今後の喫緊の課題である。

月面環境では前述のとおり、高電圧の送電が難しいためマイクロ波又はレーザーによる無線送電が送電システムの要素として導入される可能性があり、地上における電力グリッドとは異なるインターフェースや、その無線送電に係る機器の規格の標準化も課題となる。

#### <フェーズの設定>

月面電力供給システムの構築を検討するにあたり、段階的な構築を検討するためにフェーズを設定し、そのフェーズ毎にシステム構成、実証候補項目を検討することとした。

電力供給システムとしては、表 2-40 に示すような形でフェーズを設定し、技術開発・実証候補項目の整理・検討を行った。フェーズ毎の月面での電力供給要求と、それに対しての電力システムとしてのフェーズ毎の対応について図 2-25 に示す。



表 2-40 電力パートにおけるフェーズ分類定義

| フェーズ            | 年代         | 対象項目        |
|-----------------|------------|-------------|
| 月面実証フェーズ0以前(前半) | 2025～2028年 | 地上/LEO実証    |
| 月面実証フェーズ0以前(後半) | 2028～2029年 | 月面調査及び実証    |
| 月面実証フェーズ0       | 2030年頃     | 本格給電実証      |
| 月面実証フェーズ1       | 2030～2035年 | 本格給電、複数方式開始 |
| 月面実証フェーズ2       | 2035～2040年 | 大電力化、有人常駐対応 |
| 月面実証フェーズ3       | 2040～2045年 | 移動体給電       |

出所)J-spacesystems 作成

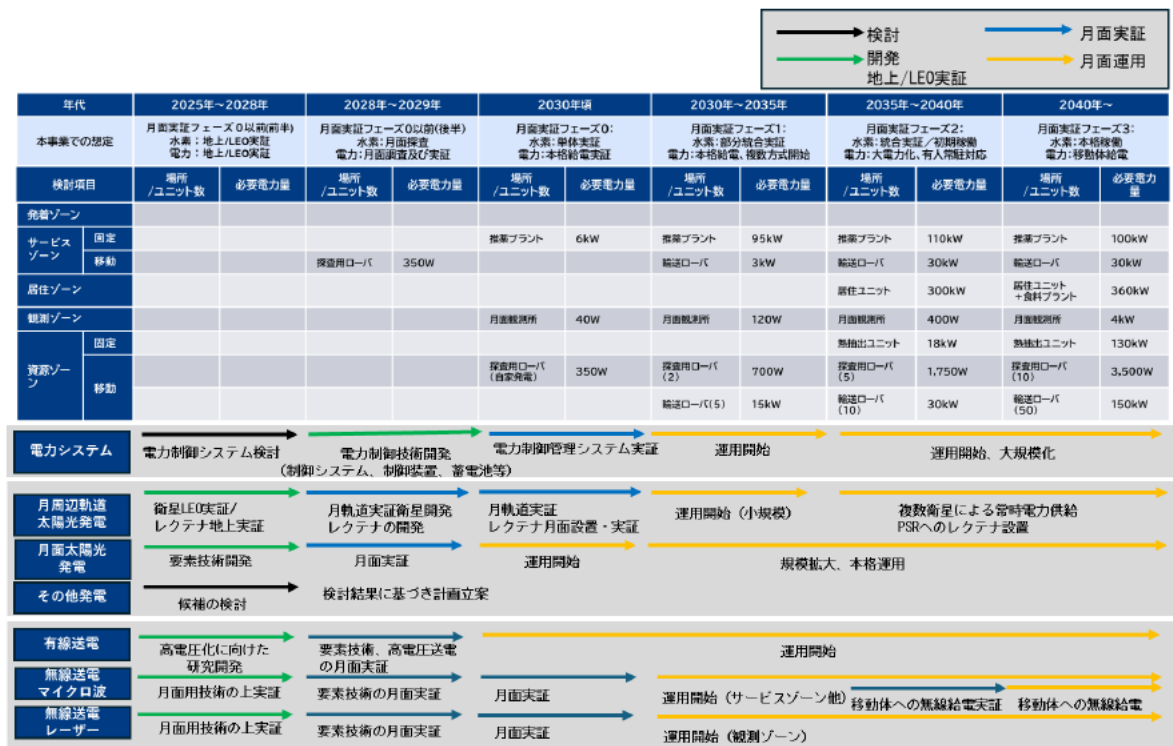


図 2-25 開発フェーズの概要と必要電力

出所)J-spacesystems 作成

## &lt;フェーズ毎の電力供給要求の整理&gt;

電力供給システム側としては、必要な電力量の他に、その電力を必要としている位置の情報が必要となる。需要側の地理的な要求条件と供給側(電力側)の制約等を付き合わせて、整理した前提条件を以下に示す。これらを前提として各需要地へ電力を供給するべく、電力供給全体システム、月周軌道太陽光軌道発電システム、月面設置太陽光発電システム及び月面送電システム(電力グリッド)において、具体的なシステム構成の検討、その実現に向けての実証候補項目のとりまとめを実施した。

月面での活動場所は、JAXA の国際宇宙探査シナリオ(案)の定義に準拠し、次のような区分に従ってシステムを構築することとした。

#### ・サービスゾーン/居住ゾーン

推薬生成プラント及び有人居住区が存在するエリア。

#### ・観測ゾーン

電波望遠鏡等の科学観測システムを設置するエリア。電波干渉等の問題を避けるためにサービスゾーンより数 km 以上離れた場所に設置される。

#### ・発着ゾーン

宇宙機の発着エリア。サービスゾーンとは 1km 程度の場所に設置される。

#### ・資源ゾーン

水資源等を採掘するエリア。太陽光が届かない「永久影(PSR)」の場所となる。

#### ・中継ゾーン

資源ゾーンはクレーター内など、サービスゾーンからは直接見えない場所のため、無線送電等によりサービスゾーンから電力を伝送する場合、資源ゾーンのリム部に電力の中継システムを設置する。

#### ・軌道上

月の周回軌道上。月面への電力供給の一つの方法として、月周辺軌道上に太陽光発電衛星を周回させ、その発電電力を無線にて月面に供給することが想定される。

### 1.月面実証フェーズ 0 以前(前半)

本フェーズは月面電力システム実現に向けての基本構想の設定、それに基づき開発する機器やシステムの技術要求・開発実証計画の立案、さらには設計基準や機器間のインターフェース標準等について地上での検討と設計開発を行う段階である。必要に応じて地球周回軌道上における実証試験を実施することも含まれる。直接的に電力供給のための開発実証を目的として月面に設置する機器等は無いが、後段で必要となる月面環境計測のための一般的な観測機器のデータは機器及びシステムの設計開発に使用される。

### 2.月面実証フェーズ 0 以前(後半)

本フェーズではまず既存の確立された電力システムを使用し、小型のランダー及び近傍にて活動するローバーを月面に着陸させ、将来の電力システム・機器の前提としている月面の環境条件等の調査を実施するとともに、継続的な調査のための計測機器等を設置することを想定する。クルーは短期間の滞在にて地球に帰還することを想定し、そのための電力供給は行わない想定とする。図 2-26 にその電力要求と設置場所の位置を示す。

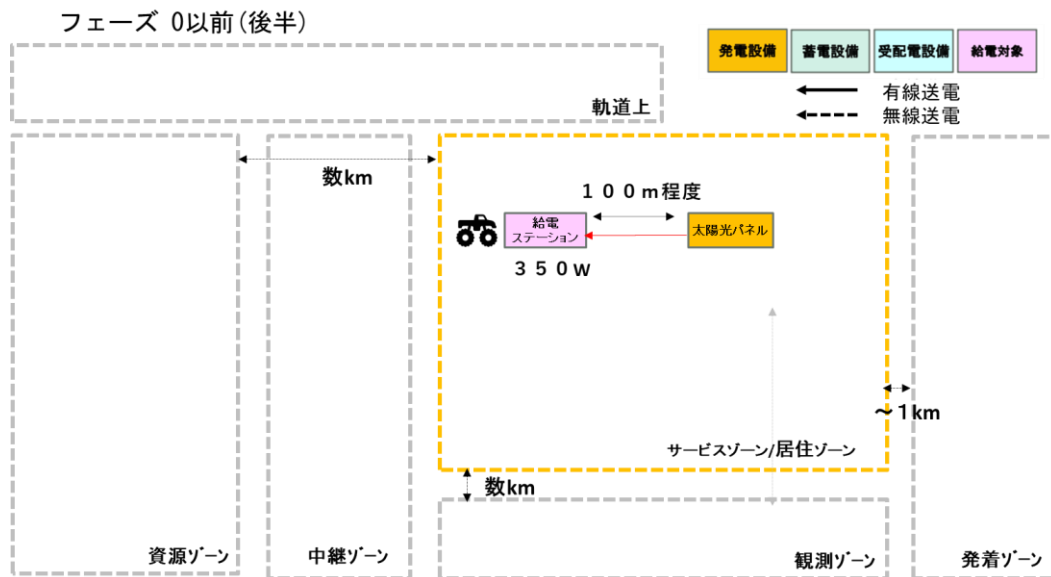


図 2-26 フェーズ0以前（後半）（2028 年から 2029 年 月面調査及び実証）

出所)三菱総合研究所作成

### 3.月面実証フェーズ0

このフェーズでは、サービスゾーンにおいて実用に供する電力システム及び機器の月面での実証を開始することを想定する。取り扱う電力の規模も拡大する。並行して観測ゾーンには観測機器を設置して科学観測が開始されるが、小規模であり電力は観測ゾーン内にて独立して供給される想定とした。サービスゾーンからの送電はこのフェーズでは想定していない。図 2-27 にその概要を示す。

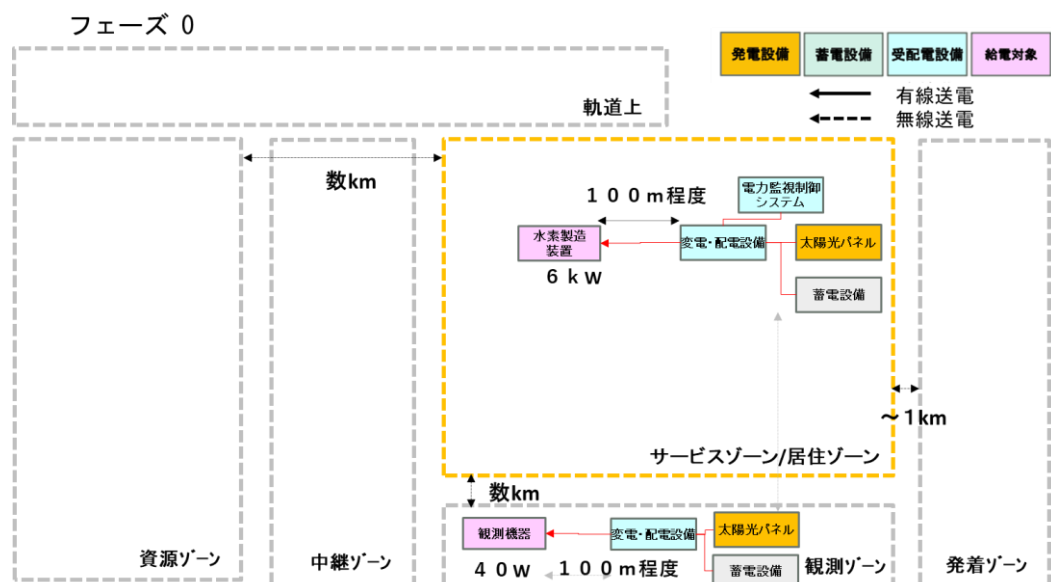


図 2-27 フェーズ0（2030 年頃 本格給電実証）

出所)三菱総合研究所作成

#### 4.月面実証フェーズ 1

このフェーズでは、資源ゾーンにおける水資源の探査と採掘の実証が開始される。また、サービスゾーンにおいては電力システムが実用の段階となり、規模を拡大し、資源ゾーンにて採掘した水から水素・酸素を生成する実証も開始される。軌道上では月周辺軌道太陽光発電システムについて、その電力をサービスゾーンにて受電して供給する実証も開始する想定とした。なお、観測ゾーンの電力需要の増大とともに、サービスゾーンからの無線送電も開始する想定とした。図 2-28 にその概要を示す。

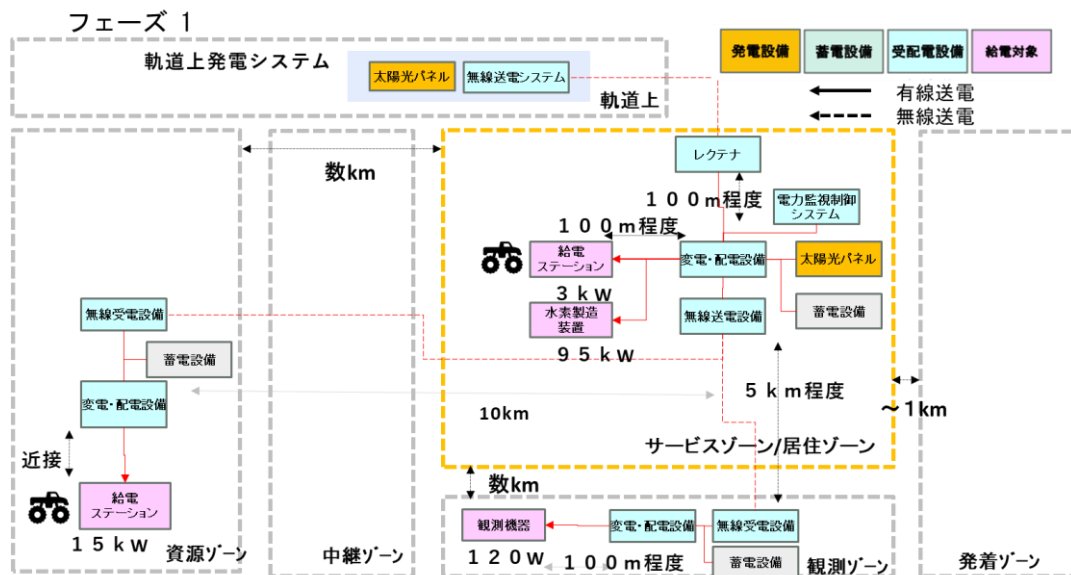


図 2-28 フェーズ 1 (2030 年から 2035 年 本格給電、複数方式開始)

出所)三菱総合研究所作成作成

#### 5.月面実証フェーズ 2

このフェーズでは、サービスゾーンでの規模の拡大とともに、資源ゾーンへの月周辺軌道からの無線送電の実証が開始される想定とした。また、サービスゾーンにおいては居住ユニットへの給電も開始される想定とした。図 2-29 に概要を示す。

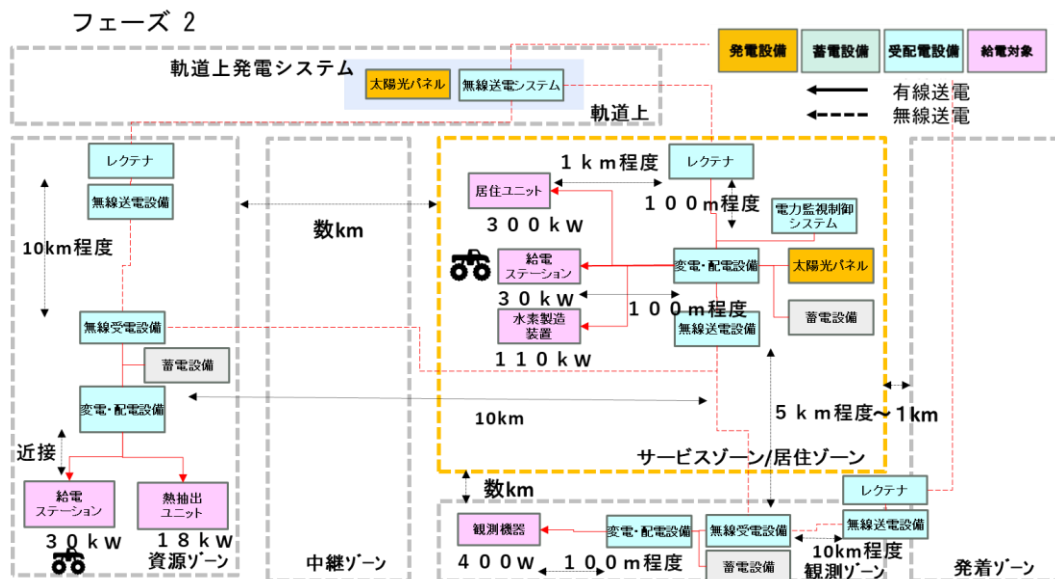


図 2-29 フェーズ 2 (2035 年から 2040 年 大電力化、有人常駐対応)

出所)三菱総合研究所作成

### 6.月面実証フェーズ 3

このフェーズでは、100 人程度が常に滞在して月面活動を行うことを想定した。月周回軌道からの電力供給はサービスゾーンのみならず、資源ゾーン及び観測ゾーンにも直接送電する想定とした。図 2-30 に概要を示す。

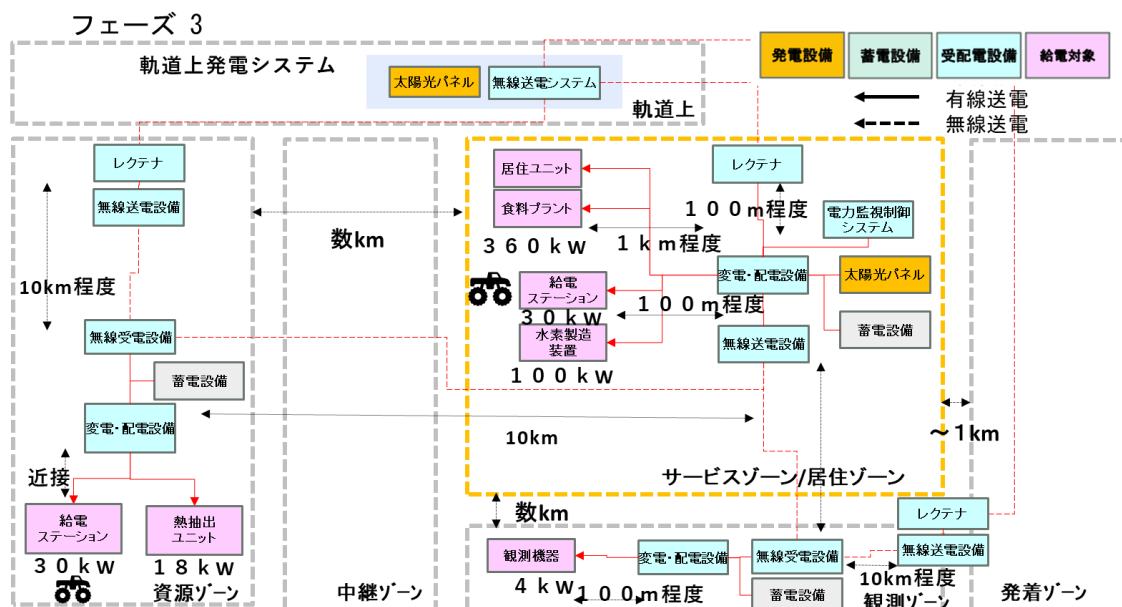


図 2-30 フェーズ 3 (2040 年から 2045 年 移動体給電)

出所)三菱総合研究所作成

## (1) 月面電力全体システム

### 1) 月面電力全体システムに係る検討

月面電力供給システムについて、フェーズ毎のシステム構築とシステム構築における進め方や課題を整理・検討した。前述の需要側からの電力量と設置場所についての要求を起点に検討を行った。電力システム構成図として整理するにあたり、その構成要素を図 2-31、図 2-32、図 2-33 のように定義し、各フェーズにおける電力システム機能系統図を作成した。

また、各フェーズにおける開発課題について、まずそのフェーズを実現するための問題意識を実際の月面での開発課題と地上における開発課題に識別し、表 2-41 から表 2-46 に整理した。そのうえで、各フェーズ・各地点の電力システム機能系統図を図 2-34 から図 2-38 に示す。

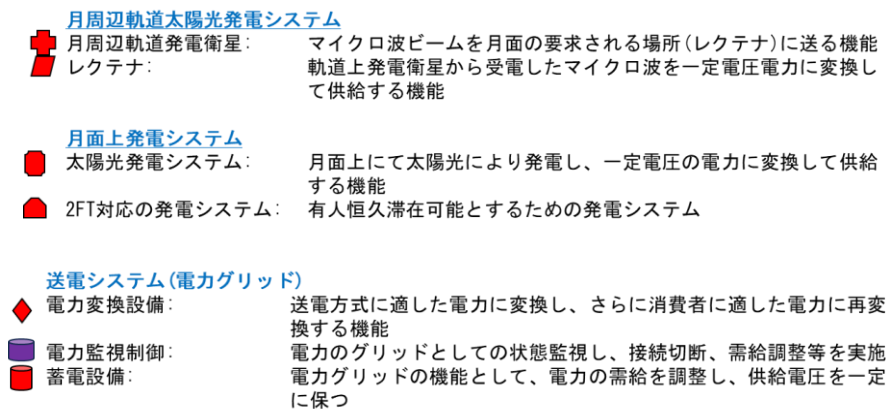


図 2-31 電力システム機能系統図構成要素のマーク(電力システム側設備)

出所)J-spacesystems 作成

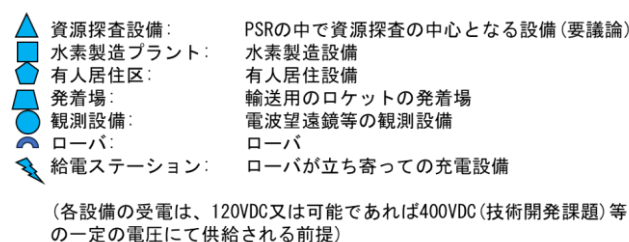


図 2-32 電力システム機能系統図構成要素のマーク(水素製造プラント、居住区、観測等設備)

出所)J-spacesystems 作成

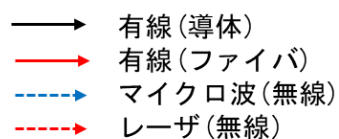


図 2-33 電力システム機能系統図構成要素のマーク(送電方式)

出所)J-spacesystems 作成



表 2-41 フェーズ 0 以前(前半)(現在から 2028 年頃まで)の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(地上/LEO)  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 月面での電力グリッドとしてのマネージメント技術(技術課題の洗出しとシミュレーション)</li> <li>● 太陽電池の軌道上実証による事前評価</li> <li>● 直近の月面活動向電力システムを既存のISS等の技術をベースに設計開発試験実施</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 地球軌道上(LEO)での10-100kW程度の中規模実証衛星の開発と実証(OHISAMAの成果を引き継ぎ月軌道上前の実証)(超大規模薄型展開平面送電アンテナの実証、月面上を目指したレクテナ展開・構成技術の実証、電力密度上昇のための開口面レクテナの実証、<math>\mu</math>W級レクテナの実証)</li> <li>● 月軌道上発電衛星システム(軌道上衛星及び受電レクテナ)の基本設計</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 月面発電システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 太陽光発電タワーと太陽発電パネルの開発、太陽電池候補の選定(展開機構・架台伸張機構・パネル平面展開機構、太陽追尾回転機構、土台・脚部安定機構、材料構造系、統合制御系、電源制御系の各機構の開発)</li> <li>● 既存の技術をベースに直近の月面活動向けの太陽電池発電パネルを設計製造する</li> <li>● 太陽光発電設置場所と建設手順検討</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 月面对応のマイクロ波によるWPT技術開発(固定端間)、送信アンテナの検討、そのビーム制御精度を考慮した適切な空間伝送効率の設定。</li> <li>● 受信側のシステム検討として、DC出力5.6kW/m<sup>2</sup>(平均値)、11kW /m<sup>2</sup>(ピーク)の大電力密度のレクテナアレーの実現、レクテナアレーの機械設計、熱設計、レクテナ面内のRF電力分布により生じる直流電圧のばらつきを吸収し得る直流電力合成回路・DC-DCコンバータの検討、ミリ波W級レクテナMMICの高効率化・高ダイナミックレンジ化</li> <li>● レーザによるWPT技術開発(固定端間)</li> <li>● 月面对応の光ファイバーによる有線送電の基礎的な技術開発</li> <li>● 有線送電電圧の高電圧化の可能性の検討と必要な技術開発</li> <li>● ローバ給電方式の技術開発(パンダグラフ方式、非接触等、移動体へのWPT基礎技術開発)</li> <li>● 電力変換器の開発実証(含む排熱技術開発)</li> <li>● 再生型燃料電池の地上での研究開発と開発実証</li> </ul> |
| 共通課題                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 月面環境条件の調査と想定される環境への対応技術の開発(放射線、温度、レゴリス等)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 規格・標準化               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 規格・標準等の<br>国際/国内調整   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Artemis Accord関係各国による、月面電力システムアーキテクチャ及びその整備の進め方の合意、それに基づく規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格についての調整の実施</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

出所)J-spacesystems 作成

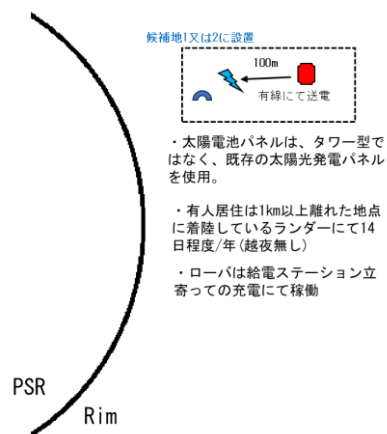


図 2-34 フェーズ 0 以前(後半)(2028 年～2030 年頃まで)の電力システム機能系統図

出所)J-spacesystems 作成

表 2-42 フェーズ 0 以前(後半)(2028 年～2030 年頃まで)の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(月面上)     |                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 既存のISS等の技術ベースの月面電力システムの実証と実用を開始する</li> <li>● 候補となる太陽電池の月面での環境評価</li> </ul>                                                                                                             |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       |                                                                                                                                                                                                                                 |
| 月面発電システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 太陽発電設備設置場所について将来の建設のための調査</li> <li>● 太陽発電システム電力制御システムの月面での実証</li> <li>● 試験用太陽電池サンプルの設置と評価</li> </ul>                                                                                   |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 固定間マイクロ波WPTの試験実施</li> <li>● ローバへのWPT技術課題の調査</li> <li>● ローバ給電実証</li> <li>● ローバへの直接送電予備調査</li> </ul>                                                                                     |
| 共通課題                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● レゴリスを含む月面環境モニターの開始</li> </ul>                                                                                                                                                          |
| 技術開発・実証<br>(地上／LEO)  |                                                                                                                                                                                                                                 |
| 電力全体システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 月面及び軌道上発電システム向けの太陽電池の軌道上評価の継続</li> <li>● 月面での電力システムの実証結果に基づき、大規模化の実証計画の策定と開発</li> </ul>                                                                                                |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 中規模月軌道上発電衛星LEO実証と月軌道向け実用衛星の開発</li> </ul>                                                                                                                                               |
| 月面発電システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 月面太陽発電設備大規模化の検討</li> <li>● 試験用太陽電池サンプルの設置と評価</li> </ul>                                                                                                                                |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 固定対象マイクロ波及びレーザーWPT実用システム製造</li> <li>● 月面での電力グリッドの大規模化のマネージメント技術開発</li> <li>● 標準化大電力変換器の実証、各種デバイスの月面環境適応性(耐レゴリス・温度サイクル等)の確認方法の確立</li> <li>● ローバ向けWPT(レーザー、マイクロ波)の地上モデルの試験と実証</li> </ul> |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                                                                 |
| 規格・標準化               |                                                                                                                                                                                                                                 |
| 規格・標準等の<br>国際／国内調整   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Artemis Accord関係各国による規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格についての調整の継続</li> </ul>                                                                                                         |

出所)J-spacesystems 作成

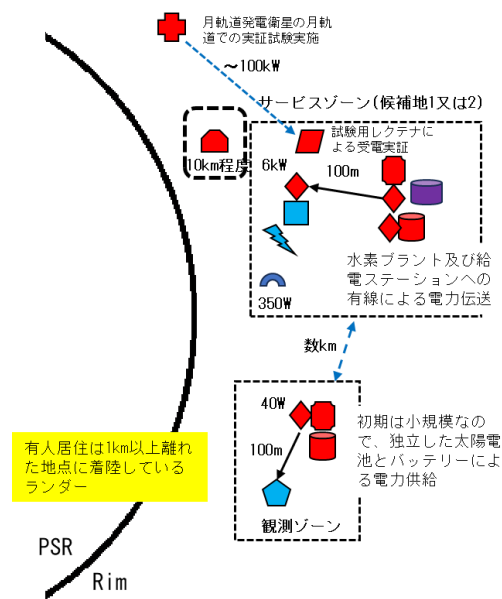


図 2-35 フェーズ 0 (2030 年頃を想定) の電力システム機能系統図

出所)J-spacesystems 作成

表 2-43 フェーズ 0(2030 年頃を想定) の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(月面上)     |                                                                                                                                                                                  |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             | ● 候補となる太陽電池の月面での環境評価の継続                                                                                                                                                          |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | ● 10kW程度の月軌道発電衛星及び受電レクテナについて月軌道及び月面での実証試験実施                                                                                                                                      |
| 月面発電システム             | ● 数m級のタワー型太陽光発電システムの実証を行う                                                                                                                                                        |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● マイクロ波による本格的なWPT技術の実証を実施</li> <li>● 導体有線も併用し、高圧化の可能性の開発試験の実施(400V程度)</li> <li>● 上記に併せて高電圧化電力変換器の試験実証</li> <li>● 小規模再生型燃料電池の実証</li> </ul> |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                  |
| 技術開発・実証 (地上/LEO)     |                                                                                                                                                                                  |
| 電力全体システム             | ● 有人対応の2FT実現のためのシステム検討                                                                                                                                                           |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | ● 100kWクラスの月軌道上発電衛星及び月面受電レクテナシステムの設計                                                                                                                                             |
| 月面発電システム             |                                                                                                                                                                                  |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 大規模に向けた電力制御監視技術、大規模アレイでのビーム方向制御/整形技術の獲得</li> <li>● 月面環境に耐えうる「電力制御・配電装置」及び「蓄電池」の開発</li> </ul>                                            |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                  |
| 規格・標準化               |                                                                                                                                                                                  |
| 規格・標準等の国際/国内調整       | ● Artemis Accord関係各国による調整のもとに設定した規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格の維持管理                                                                                                       |

出所)J-spacesystems 作成

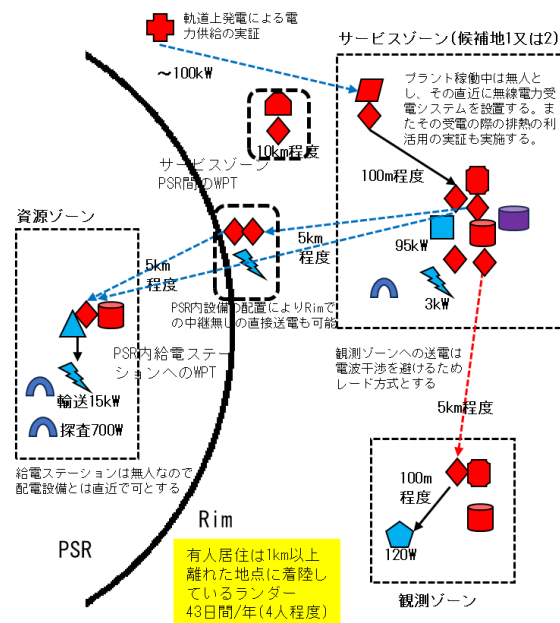


図 2-36 フェーズ 1(2030 年から 2035 年頃を想定)の電力システム機能系統図

出所)J-spacesystems 作成

表 2-44 フェーズ 1(2030 から 2035 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(月面上)     |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             | ● 候補となる太陽電池の月面での環境評価の継続                                                                                                                                                                                                                                  |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | ● 月軌道上からの電力供給の実証                                                                                                                                                                                                                                         |
| 月面発電システム             | ● 10m級EFMモデル及びその複数設置による月面太陽電池発電実用に向けたの大規模化の実証<br>● サービスゾーンでの約100kW対応の複数基設置、並びに影の影響の評価                                                                                                                                                                    |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | ● PSR内ローバ給電ステーションの実証、ローバへの追尾を考慮した、ビーム方向制御技術の精度向上<br>● 大規模WPTの実証、大電力送電(95kW対応)に伴う送受電部のアンテナ口径拡大対応、複数システム協調動作レトロディレクティブへの対応、遠距離送受電のための高精度ビーム方向制御技術の獲得<br>● 大規模化に向けた電力監視制御技術の実証<br>● 大規模電力変換器の実証、大電力送電に伴う熱制御構造の実装<br>● 有人滞在備えた再生型燃料電池の大規模化実証、大規模再生型燃料電池の月面実証 |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 技術開発・実証<br>(地上/LEO)  |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 電力全体システム             | ● 恒久的有人滞在に向けた電力グリッドの2FTの検討                                                                                                                                                                                                                               |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | ● PSR内で軌道上発電衛星から受電するレクテナの建設方法、システム構成の設計検討                                                                                                                                                                                                                |
| 月面発電システム             |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | ● 移動体追尾を考慮した、ビーム方向制御技術の精度向上                                                                                                                                                                                                                              |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 規格・標準化               |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 規格・標準等の<br>国際/国内調整   | ● Artemis Accord関係各国による調整のもとに設定した規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格の維持管理                                                                                                                                                                               |

出所)J-spacesystems 作成

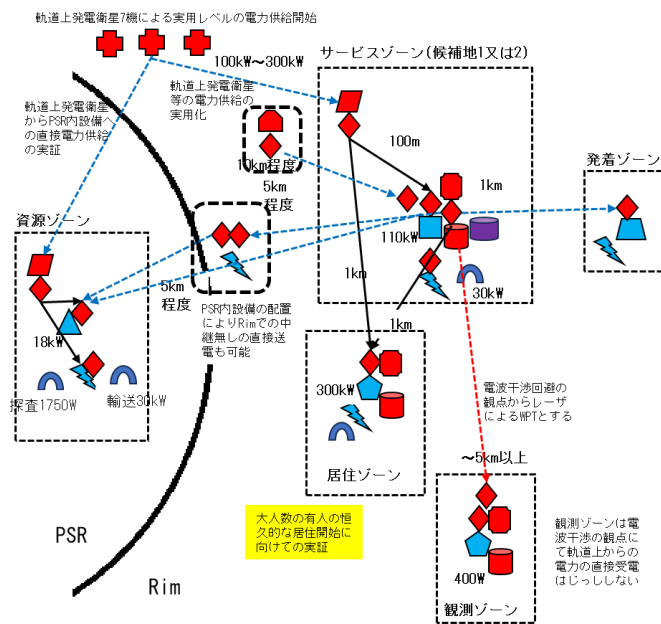


図 2-37 フェーズ 2(2035 年から 2040 年頃を想定)の電力システム機能系統図

出所)J-spacesystems 作成

表 2-45 フェーズ 2(2035 から 2040 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(月面上)     |                                                                                                                                                                                               |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● もう一つ原理の異なる発電方式の実証を開始し、避難用宇宙船無しに100人単位の有人月面常駐対応のための原理の異なる発電方式による2FTを充たす電力グリッドの実証を開始する。</li> <li>● 有人の恒久的な居住開始に向けての実証</li> </ul>                       |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       | <ul style="list-style-type: none"> <li>● PSR内レクテナ配置の検討</li> <li>● 軌道上発電からPSR内資源探査設備への直接送電の実証実施</li> <li>● 軌道上発電衛星等の電力供給の実用化</li> </ul>                                                        |
| 月面発電システム             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● タワー型太陽電池発電の実用化。なお影の影響による設置可能エリアの制約により発電電力に最大値があり、現時点で900kWと想定されるため、フェーズ3以降の電力量増大への対応が課題となる</li> <li>● 日照率不足対応の蓄電池容量の評価、それに基づく発電場所の複数設置の検討</li> </ul> |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | <ul style="list-style-type: none"> <li>● さらに大規模化に向けた電力制御技術の実証</li> <li>● ロボットへの直接WPTの実証</li> <li>● 有線送電の高電圧化の見通しが確認できれば、送配電の高電圧化実証</li> </ul>                                                 |
| 共通課題                 |                                                                                                                                                                                               |
| 技術開発・実証<br>(地上／LEO)  |                                                                                                                                                                                               |
| 電力全体システム             |                                                                                                                                                                                               |
| 月周辺軌道太陽光発電システム       |                                                                                                                                                                                               |
| 月面発電システム             |                                                                                                                                                                                               |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) |                                                                                                                                                                                               |
| 共通課題                 | ● 月面での実用時の課題について、定常的に地上及びLEOにおいての改良活動の実施                                                                                                                                                      |
| 規格・標準化               |                                                                                                                                                                                               |
| 規格・標準等の<br>国際／国内調整   | ● Artemis Accord関係各国による調整のもとに設定した規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格の維持管理                                                                                                                    |

出所)J-spacesystems 作成

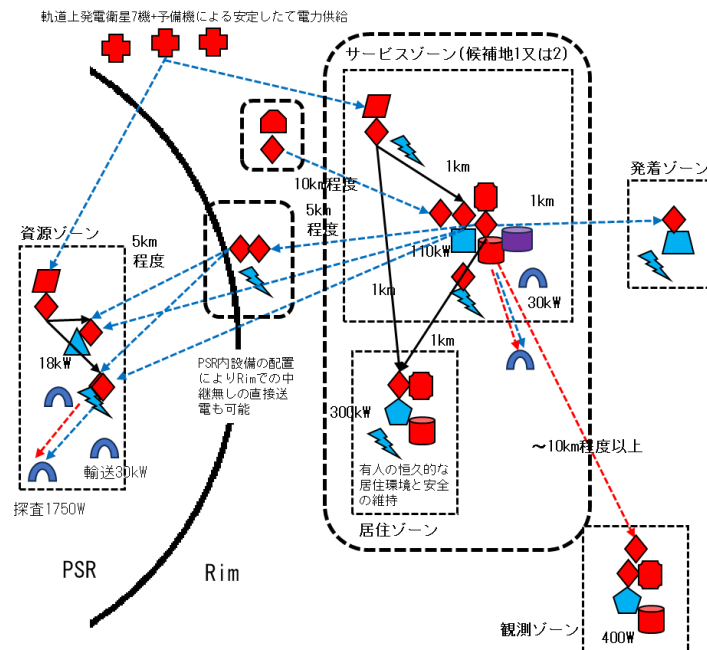


図 2-38 フェーズ 3(2040 年から 2045 年頃を想定)の電力システム機能系統図

出所)J-spacesystems 作成

表 2-46 フェーズ 3(2040 から 2045 年頃を想定)の電力システム構成、開発実証課題検討

| 技術開発・実証<br>(月面上)     |                                                                            |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 電力全体システム             |                                                                            |
| 月周辺軌道太陽光<br>発電システム   |                                                                            |
| 月面発電システム             | ● タワー型発電パネル設置場所の制約による最大発電可能電力                                              |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) | ● ローバへの無線送電の実用化<br>● 電力グリッドの定常的なアップデート                                     |
| 共通課題                 |                                                                            |
| 技術開発・実証<br>(地上／LEO)  |                                                                            |
| 電力全体システム             | ● 月面での実用時の課題について、定常的に地上及びLEOにおける改良活動の実施                                    |
| 月周辺軌道太陽光<br>発電システム   |                                                                            |
| 月面発電システム             |                                                                            |
| 月面送電システム<br>(電力グリッド) |                                                                            |
| 共通課題                 |                                                                            |
| 規格・標準化               |                                                                            |
| 規格・標準等の<br>国際／国内調整   | ● Artemis Accord関係各国による調整のもとに設定した規格、設計標準、機器インターフェース基準、品質管理基準等について国際規格の維持管理 |

出所)J-spacesystems 作成



## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像

前項において検討した各フェーズにおける開発課題を整理した結果を表 2-47 及び表 2-48 に示す。この表は、実証候補項目の全体像を示すために課題のキー項目を整理したものである。この表より電力全体システム及び各構成システムの実証候補項目へ展開され、さらにその詳細を示す実証候補項目詳細へつながる構成としている。

表 2-47 実証候補項目の整理のまとめ(1/2)

| システム                             |                                                                                        | 2025年～2028年頃                                                    | 2028年～2029年頃                                                            | 2030年頃                             | 2030年～2035年                                                   | 2035年～2040年                                  | 2040年～                            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
|                                  |                                                                                        | 月面実証フェーズ0以前<br>(前半)<br>水素：地上/LEO実証<br>電力：地上/LEO実証               | 月面実証フェーズ0以前<br>(後半)<br>水素：月面調査<br>電力：月面調査及び実証                           | 月面実証フェーズ0：<br>水素：単体実証<br>電力：本格給電実証 | 月面実証フェーズ1：<br>水素：部分統合実証<br>電力：本格給電、複数方式開始                     | 月面実証フェーズ2：<br>水素：統合実証/初期稼働<br>電力：大電力化、有人常駐対応 | 月面実証フェーズ3：<br>水素：本格稼働<br>電力：移動体給電 |
| 電力システム<br>(全体及び共通)<br>(JSS)      | 月面電力グリッド設計標準・基準規格の設定【0-①】<br>月面環境【0-②】<br>(JSS)                                        | 関係機関/国にて設計基準及び規格の調整を実施                                          | 国際的恒久的な調整の場の設置と維持管理の開始                                                  | 維持改訂                               |                                                               |                                              |                                   |
|                                  | 電力管理制御方式の開発【0-③】<br>(JSS)<br>近距離及び設備内配電設計【0-④】<br>(MHI)<br>有人対応の電力系2FT実証【0-⑤】<br>(JSS) | 電力管理制御方式の検討<br><br>既存技術による近距離及び設備内配電設計<br><br>有人対応の2FT実現の候補案の検討 | 管理制御方式の設計製造<br><br>既存技術による近距離及び設備内配電システム製造及び実証試験<br><br>有人2FT対応の発電方式の選定 | 管理制御方式の実証<br><br>大規模実証             | 管理制御の実運用開始<br><br>大規模化システム運用                                  | 管理制御及びシステムの大規模実運用開始                          | 管理制御の大規模実運用                       |
| 月周辺軌道太陽光発電システム<br>(ISAS、東洋大、金工大) | 月軌道発電衛星【1-①】<br>(ISAS、東洋大)                                                             | 地球低高度実証衛星による軌道上実証及び月軌道上実証衛星基本設計                                 | 月軌道上実証衛星の設計製造及び試験                                                       | 月軌道発電衛星の月軌道での実証                    | 月軌道発電衛星月軌道実運用開始、大型化と複数機による実証運用開始                              | 月軌道上発電衛星7機による常時電力供給<br>PSR内への試験送電開始          | 月軌道上発電衛星(7機+予備機)による常時電力供給(含むPSR)  |
|                                  | 月面受電レクテナ【1-②】<br>(東洋大、金工大)                                                             | 地上設置のレクテナによる開発実証<br>月面レクテナの基本設計                                 | 月面環境調査<br>レクテナ構成要素(部分モデル)月面での評価<br>月面設置レクテナの製造及び試験                      | 月面設置レクテナの月面での実証                    | 実用規模の月面設置レクテナによる運用開始                                          | PSR内へのレクテナの試験的配置と受電                          | PSR内へのレクテナの実用                     |
| 月面設置発電システム(大林組)                  | 月面太陽電池発電システム【2-①】<br>(大林組)                                                             | 既存技術による月面向け太陽光発電の製造試験                                           | 既存技術による月面太陽光発電システムの運用                                                   | 既存技術による月面太陽光発電システムの運用を継続する         | 数m級のタワー型太陽光発電システムの運用開始<br><br>大電力化に向けてのタワー型太陽電池の大型化及び効率改善等の実証 | 大電力化に向けての影の影響も考慮したタワー型太陽電池複数配置実証             | 複数配置タワー型太陽電池による実用レベル発電            |
|                                  | その他の発電システム【2-②】<br>(大林組)                                                               | 候補の調査検討                                                         | 候補の絞り込み等検討結果に基づき計画立案                                                    | 運用                                 |                                                               |                                              |                                   |

出所)J-spacesystems 作成

表 2-48 実証候補項目の整理のまとめ(2/2)

| システム                            |                              | 2025年～2028年頃                                      | 2028年～2029年頃                                  | 2030年頃                              | 2030年～2035年                               | 2035年～2040年                                  | 2040年～                            |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
|                                 |                              | 月面実証フェーズ0以前<br>(前半)<br>水素：地上/LEO実証<br>電力：地上/LEO実証 | 月面実証フェーズ0以前<br>(後半)<br>水素：月面探査<br>電力：月面調査及び実証 | 月面実証フェーズ0：<br>水素：単体実証<br>電力：本格給電実証  | 月面実証フェーズ1：<br>水素：部分統合実証<br>電力：本格給電、複数方式開始 | 月面実証フェーズ2：<br>水素：統合実証／初期稼働<br>電力：大電力化、有人常駐対応 | 月面実証フェーズ3：<br>水素：本格稼働<br>電力：移動体給電 |
| 月面上での送電システム<br>(電力グリッド)(IA, 京大) | 送電システム【3-①】<br>(IA, 京大, JSS) | 地上シミュレーション検討<br>機器要素技術開発検討<br>送電電圧高電圧化地上試験        | 月面対応要求仕様の設定と機器設計開発<br>高電圧化の地上実証               | 送電システム及び機器<br>月面実証と実用<br>高電圧化月面実証   | 運用                                        |                                              |                                   |
|                                 | マイクロ波(無線)【3-②】<br>(金工大)      | 月面環境対応の設計開発と地上での実証                                | 機器の月面での実証<br>長距離送電向け送電システムの製造及び試験             | 長距離送電の実証                            | 長距離大電力送電の実証                               |                                              |                                   |
|                                 | レーザー(無線)【3-③】<br>(光産業創成大)    | 月面環境対応の設計開発と地上での実証                                | 機器の月面での実証<br>長距離送電向け送電システムの製造及び試験             | 月面観測システム向け送電実証                      | 運用                                        |                                              |                                   |
|                                 | レーザー(有線)【3-④】<br>(光産業創成大)    | 基礎的な技術開発                                          | 適用対象の検討評価                                     | 月面での要素技術評価                          | 適用分野での技術実証                                | 運用                                           |                                   |
|                                 | 蓄電システム                       | 再生型燃料電池による電力需給調整の検討<br>再生型燃料電池の地上実証               | 再生型燃料電池の製造および試験                               | 月面での小規模再生型燃料電池実証                    | 電力グリッドでの評価と実証                             | 運用                                           |                                   |
| その他                             | CIGS太陽電池【4-①】<br>(出光)        | CIGS宇宙実証<br>ペロブスカイトとのタンデム検討                       | CIGSセル単体月面実証<br>ペロブスカイトとのタンデム地上実証             | CIGS太陽電池月面実証<br>ペロブスカイトとのタンデム地上実証継続 | ペロブスカイトとのタンデムセル月面実証                       | ペロブスカイトとのタンデム太陽電池月面実用                        | 運用                                |
|                                 | ローバ給電【5-①】<br>(iSpace)       | 近接給電方式の検討                                         | 近接給電方式月面実証                                    | ローバへの直接長距離無線送電実証                    | ローバへの直接長距離無線送電実用                          | 運用                                           |                                   |

出所)J-spacesystems 作成

## b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

表 2-47 及び表 2-48 に基づき、構成システム毎の各フェーズにおける実証候補項目を設定する。各構成システムの実証候補項目はそれぞれの章にて示すことにするが、ここでは電力全体システムとしての実証候補項目を整理する。電力全体システムにおける実証候補項目を表 2-49 に示す。また、各システムの実証候補項目に対応した番号及びスケジュールを図 2-39 示す。

|                        |                              | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：地上AEO実証<br>電力：地上AEO実証                                                               | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：月面調査<br>電力：月面調査及び実証                                                                   | 月面実証フェーズ0：<br>水素：単体実証<br>電力：本格給電実証                             |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                        |                              | 2025年～2028年                                                                                           | 2028年～2029年頃                                                                                            | 2030年頃                                                         |
| 電力システム<br>(全体及び共通システム) | 月面電力グリッドとしての規格、設計基準等の設定【0-①】 | 関係各国の各機関により、月面電力アーキテクチャについての議論を経て、そのシステムを構築するための設計基準、製品規格及び機器間の標準インターフェース等についての議論を行う                  | 関係各機関の合意がなされた項目より標準化と規格として制定する                                                                          | 規格に構成機器の製造とシステム構築を実施する。なお随時関係各国にて課題や問題が発生した場合の対応策と規格の維持改訂を実施する |
|                        | 月面環境の検討及び調査【0-②】             | ・電力システム構築において考慮すべき月面環境条件の検討<br>・上記環境条件について既存の資料や月面観測データにより調査する<br>・必要な環境条件の調査に必要な機器及びシステムの設計検討及び開発の実施 | ・必要な環境条件を調査するためのセンサーや観測機器を最初に月面に着陸するランダー及びローバに搭載し、データを収集する。<br>・月面で使用する機器について考慮すべき環境条件を設計開発の要求条件として設定する | 月面にて活動を開始した機器に経緯して調査のための機器やセンサーを搭載し、環境条件のアップデートを実施する。          |
|                        | 電力管理制御方式の開発【0-③】             | 月面電力システムとして要求される電力管理制御方式の検討と地上におけるシミュレーション等の設計作業                                                      | 管理制御方式の具体的な実現のための機器の設計と開発                                                                               | 管理制御方式の月面での実証                                                  |
|                        | 確立した既存技術による近距離及び設備内配電設計【0-④】 | ISS電力システム関連の設計基準、規格等の月面電力システムへの適用性の検討                                                                 | ISS電力システム関連設計記述による近距離及び設備内配電システムの機器の設計製造及び月面での実証                                                        | ISS電力システム関連設計基準にて、月面における近距離及び設備内配電システムにおける実用の開始                |
|                        | 有人対応の2FT実現の候補案の検討【0-⑤】       | 電力システムとして有人対応の2FT実現の複数の方式の評価検討、並びに必要なシステム構成の検討                                                        | 2FTシステム実現のための計画の策定と電力システム設計への反映                                                                         | 2FT実現に必要な機器や方式の部分的な実証を月面にて実施                                   |

| 月面実証フェーズ1：<br>水素：部分統合実証<br>電力：本格給電、複数方式開始 | 月面実証フェーズ2：<br>水素：統合実証／初期稼働<br>電力：大電力化、有人常駐対応 | 月面実証フェーズ3：<br>水素：本格稼働<br>電力：移動体給電 |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| 2030年～2035年頃                              | 2035年～2040年頃                                 | 2040年頃～                           |
| 同左                                        | 同左                                           | 同左                                |
| 同左                                        | 同左                                           | 同左                                |
| 管理制御の実運用開始                                | 管理制御及びシステムの大規模実運用開始                          | 管理制御の大規模実運用                       |
| 同左                                        | 同左                                           | 同左                                |
| 2FTシステムとしての月面での実証                         | 小規模な2FTの実用                                   | 大規模な2FTの実用                        |

表 2-49 電力全体システムの開発実証候補項目

出所)J-spacesystems 作成

図 2-39 実証候補項目対応表

|                    |                      |       | 2025年～2028年頃        | 2028年～2029年頃        | 2030年頃      | 2030年～2035年 | 2035年～2040年 | 2040年～      |
|--------------------|----------------------|-------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                    |                      |       | 月面実証フェーズ0以前<br>(前半) | 月面実証フェーズ0以前<br>(後半) | 月面実証フェーズ0 : | 月面実証フェーズ1 : | 月面実証フェーズ2 : | 月面実証フェーズ3 : |
| 電力システム<br>(全体及び共通) | 月面電力グリッド設計標準・基準規格の設定 | [0-①] | [0-①]               |                     |             |             |             |             |
|                    | 月面環境                 | [0-②] | [0-②]               |                     |             |             |             |             |
|                    | 電力管理制御方式の開発          | [0-③] | [0-③]               |                     |             |             |             |             |
|                    | 近距離及び設備内配電設計         | [0-④] | -                   | [0-④]               |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-1]             | [0-④-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-2]             | [0-④-2]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-3]             | [0-④-3]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-4]             | [0-④-4]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-5]             |                     |             | [0-④-5]     |             |             |
|                    |                      |       | [0-④-6]             |                     |             |             | [0-④-6]     |             |
|                    | 有人対応の電力系2FT実現        | [0-⑤] | [0-⑤]               |                     |             |             |             |             |
| 月周辺軌道太陽光発電システム     | 月軌道発電衛星              | [1-①] | [1-①-1]             | [1-①-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [1-①-2]             |                     | [1-①-2]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [1-①-3]             |                     |             | [1-①-3]     |             |             |
|                    |                      |       | [1-①-4]             |                     |             |             | [1-①-4]     |             |
|                    | 月面受電レクテナ             | [1-②] | [1-②-1]             |                     |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [1-②-2]             |                     | [1-②-2]     |             |             |             |
| 月面設置発電システム         | 月面太陽電池発電システム         | [2-①] | [1-②-3]             |                     |             | [1-②-3]     |             |             |
|                    |                      |       | [1-②-4]             |                     |             |             | [1-②-4]     |             |
|                    |                      |       | [2-①-1]             | [2-①-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-2]             | [2-①-2]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-3]             | [2-①-3]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-4]             | [2-①-4]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-5]             |                     | [2-①-5]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-6]             |                     | [2-①-6]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-7]             |                     | [2-①-7]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-8]             |                     |             | [2-①-8]     |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-9]             |                     |             | [2-①-9]     |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-10]            |                     |             | [2-①-10]    |             |             |
|                    |                      |       | [2-①-11]            |                     |             |             | [2-①-11]    |             |
|                    |                      |       | [2-①-12]            |                     |             |             |             | [2-①-12]    |
| 月面上での送電システム        | 送電システム               | [3-①] | [3-①-1]             | [3-①-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-①-2]             | [3-①-2]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-①-3]             |                     | [3-①-3]     |             |             |             |
|                    | マイクロ波(無線)            | [3-②] | [3-②-1]             | [3-②-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-2]             | [3-②-2]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-3]             |                     | [3-②-3]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-4]             |                     | [3-②-4]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-5]             | [3-②-5]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-6]             |                     | [3-②-6]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-7]             |                     |             | [3-②-7]     |             |             |
|                    |                      |       | [3-②-8]             |                     |             |             | [3-②-8]     |             |
|                    |                      |       | [3-②-9]             | [3-②-9]             |             |             |             |             |
|                    | レーザー(無線)             | [3-③] | [3-③-1]             | [3-③-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-2]             | [3-③-2]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-3]             |                     | [3-③-3]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-4]             | [3-③-4]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-5]             | [3-③-5]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-6]             |                     | [3-③-6]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-7]             |                     |             | [3-③-7]     |             |             |
|                    |                      |       | [3-③-8]             |                     |             |             | [3-③-8]     |             |
| その他                | CIGS太陽電池             | [4-①] | [4-①-1]             | [4-①-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [4-①-2]             |                     | [4-①-2]     |             |             |             |
|                    |                      |       | [4-①-3]             |                     |             | [4-①-3]     |             |             |
|                    |                      |       | [4-①-4]             |                     |             |             | [4-①-4]     |             |
|                    | ローバ給電                | [5-①] | [5-①-1]             | [5-①-1]             |             |             |             |             |
|                    |                      |       | [5-①-2]             |                     | [5-①-2]     |             |             |             |

出所)J-spacesystems 作成

### 3) 実証候補項目詳細

電力全体システムの実証候補項目の詳細を表 2-50 から表 2-54 に示す。

表 2-50 実証候補項目【0-①】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術項目：月面電力システムの構築に必要な電力機器の設計基準や規格、機器接続に必要な標準インターフェース等の制定</li> <li>・実証対象：設計基準及び規格等</li> </ul>                                                                                                                                                                |
| 実証目的・必要性  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的：月面で構築される電力システムは Artemis 参加の各国の電力機器が接続されることとなるため、地上と同様にその電力システム、それに接続する電力機器の設計基準、その電力システムを利用するにあたってのインターフェースについて各国間にて調整し、定めておく必要があるため。</li> <li>・（月面実証の場合のみ）月面実証の必要性：フェーズ 0 以前にて月面実証を行うのみならず、フェーズ 0 以降において実際に月面での運用結果を反映し、常時アップデートを実施する必要がある。</li> </ul> |
| 実証期間      | ・2025 年～2030 年（フェーズ 0 迄に確立し、以後は適切に維持管理を実施）                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証候補項目    | 【0-①】                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| （実証目標値）   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・月面電力システム構築における利用者とのインターフェースの標準化</li> <li>・月面電力システムを構成する機器設計基準の設定</li> <li>・地上の電力システムにおける各種設計技術や利用にあたってのインターフェースの標準化に倣い、月の電力システム構築における同様の基準及び標準の設定</li> <li>・設定した記述や標準の妥当性に月面にて実証する</li> <li>・米国をはじめとする関係各国との調整の場の設定と調整と管理の実施</li> </ul>                    |
| 月面への必要輸送量 | ・重量：0[kg]（月面で使用する機器やシステムの製造に含まれているため）                                                                                                                                                                                                                                                              |

出所)J-spacesystems 作成

表 2-51 実証候補項目【0-②】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術項目：月面環境の検討及び調査</li> <li>・実証対象：月面設置の電力システム及び機器の設計検討に必要な月面環境条件</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証目的・必要性  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的：月面設置の機器の設計に必要な月面環境条件を調査し、機器及びシステムの設計要求条件へ反映する</li> <li>・（月面実証の場合のみ）月面実証の必要性：実際に月面環境を計測と実際に機器や部品の月面環境での性能変化を計測し、その結果を評価して上で月面電力機器の設計技術及び要求に反映する必要があるため</li> </ul>                                                                                                                                      |
| 実証期間      | ・2025 年～2030 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目    | 【0-②】月面環境の検討及び調査                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・月面に発電や送電等の電力関連機器を設置するにあたり考慮すべき月面環境条件の検討と調査の実施</li> <li>＝過去の月面環境データの文献調査</li> <li>＝上記文献調査の結果に基づき、フェーズ 0 以前の第一回の月面探査機に環境計測のためのプローブや試験サンプルを搭載する</li> <li>＝上記計測装置による環境データも合わせて評価し、月面設置の電力関連機器への耐環境性要求や試験規格、試験方法を設定する</li> <li>＝太陽電池、設置用構体、アンテナ、レクテナ等が考慮すべき対象となり、月面での重粒子等の放射線、レゴリス環境、太陽光等が計測の対象となる</li> </ul> |
| 月面への必要輸送量 | ・重量：0[kg]（月面で使用する機器やシステムの製造に含まれているため）                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

出所)J-spacesystems 作成

表 2-52 実証候補項目【0-③】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術項目:月面電力システムにおける電力管理制御技術</li> <li>・実証対象: 月面電力システムにおいて、その電力のモニタ、管理及び制御を司る機器及び搭載される SW の実証</li> </ul>                                                                                                                                                     |
| 実証目的・必要性  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的:月面電力システム構築にあたって必要となる電力システム(電力グリッド)の制御管理技術の確立</li> <li>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面の状況に応じた電力システムとするため、地上での設計検討とシミュレーションの後、実際に月面においての部分モデルにての実証、並びにフェーズが進行して月面における電力システムの規模が拡大するとともに、随時アップデートを行う。</li> </ul>                                                 |
| 実証期間      | ・2025 年～2030 年                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目    | 【0-③】                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| (実証目標値)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・地上の電力グリッド管理制御技術を参考とし、月面での電力グリッドに必要となる管理制御システムの技術要求の概念設計と検討</li> <li>・上記基本設計の実施と部分モデルの設計製造(H/W 及び S/W)と地上における実証試験</li> <li>・月面における部分モデルによる実証試験による評価</li> <li>・想定する電力規模対応の管理制御システムの設計製造と月面での実証</li> <li>・フェーズの伴う電力規模の拡大に応じ、管理運用結果を反映し、アップデートする。</li> </ul> |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 20[kg](内訳:管理制御装置(H/W 及び S/W))                                                                                                                                                                                                                                                            |

出所)J-spacesystems 作成

表 2-53 実証候補項目【0-④】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術項目:ISS の技術に基づく 120VDC 系による近距離及び設備内配電技術</li> <li>・実証対象: ISS の技術に基づく 120VDC 系による近距離及び設備内配電システム</li> </ul>                                                                                                                                                                 |
| 実証目的・必要性  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的:月面での活動が開始するにあたり、喫緊に必要となる近距離及び設備内配電システムについて、まず ISS で確立した 120VDC 系統の配電技術を適用するにあたり、初期の段階にて月面において実際に使用し、課題や改良点を洗い出す必要があるため</li> <li>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:フェーズ 0 の段階において、地上における設計検討と実際の機器の開発を行うとともに、それをフェーズ 0 以前の段階にて月面において実際に使用して実証する必要があるため</li> </ul>                    |
| 実証期間      | ・2025 年～2029 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目    | 【0-④】                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| (実証目標値)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・フェーズ 0 までの月面で必要となる電力機器や電力配電システムについて、確立した既存の ISS に適用された 120VDC の電力システムにて機器を開発し、月面にて実証し、フェーズ 0 までの期間で実用ら供し、電力システム機器として採用できるかの実証を行う</li> <li>・その適用についてまず地上での調査検討の実施。</li> <li>・直近のフェーズ 0 までに必要な電力機器の設計開発に適用するための設計基準やインターフェース要求としての展開と、それに基づく機器の月面での実証結果の設計記述への反映</li> </ul> |
| 月面への必要輸送量 | 重量としては個別の必要な電力機器の重量であるため、この技術開発のための輸送重量は不要である                                                                                                                                                                                                                                                                     |

出所)J-spacesystems 作成



表 2-54 実証候補項目【0-⑤】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・技術項目: 有人の生存を維持するための電力システムの Two Fault Tolerant(2FT) 技術の実証と確立</li> <li>・実証対象: 有人の生存を維持するため電力システムの 2FT の技術実証</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的: 人に対して危害を及ぼさず、その生存のためには、その危害を防止手段や、その生存を維持するための手段については、原理の異なる 3 つの方法を用意すること(2FT)が NASA の安全基準に定められている。月面において初期の段階における少人数の滞在期間では電力システムの障害等の危険を回避のための避難手段を用意することでその 2FT を満たすことができるが、100 人を超える有人滞在の時代においては、逆に電力供給側において独立の原理の異なる電力供給手段を用意する必要がある。その独立の原理の異なる電力供給手段をどのように用意し、また電力グリッドとして整備するかが課題となり、設計検討と実証評価を実施する必要がある。</li> <li>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性: 実際に月面で使用可能な電力機器およびシステム構成を実際に月面で構築し、実証を行う必要がある。</li> </ul> |
| 実証期間      | ・2025 年～2035 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証候補項目    | 【0-⑤】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| (実証目標値)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・全員が安全な地球又はゲートウェイへの退避が不可能となるような月面における有人活動が本格化する前に、その有人生存を保証するための電力供給システムの Two Fault Tolerant(2FT)の実現方式の検討とその技術の確立</li> <li>・基本的概念と技術の検討</li> <li>・その基本概念を実現するための必要なシステムの毛概念検討</li> <li>・2FT とのための複数の発電システム及びその供給のための電力グリッドの概念の検討</li> <li>・2FT とのための複数の発電システム方式及びその供給のための電力グリッドの概念の検討</li> <li>・上記システムの基本設計とシミュレーションの実施</li> <li>・上記方式を実現できる電力グリッドの構築と実証</li> </ul>                                             |
| 月面への必要輸送量 | 電力グリッドシステム構築時の機器の重量に含まれるため、このための重量は不要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

出所)J-spacesystems 作成

## (2) 設備内配電及び電力制御

### 1) 設備内配電及び電力制御に係る検討

2023 年度までに検討した電力供給システムの基本構成、具体的な候補地点における拠点レイアウトのイメージ(図 2-40)、ならびに今年度に前提条件として設定した必要電力の想定(表 2-55)に基づき、2040 年前後に目指すべき電力システムのアーキテクチャ、及びそこに至る各年代の電力システム構築の工程を具体化した。月面実証フェーズ3(2040 年～2045年)に目指すべき電力システムとして、月面電力グリッドの全体図と、サービスゾーン近傍の電力システムの構成案を図 2-41 に示す。

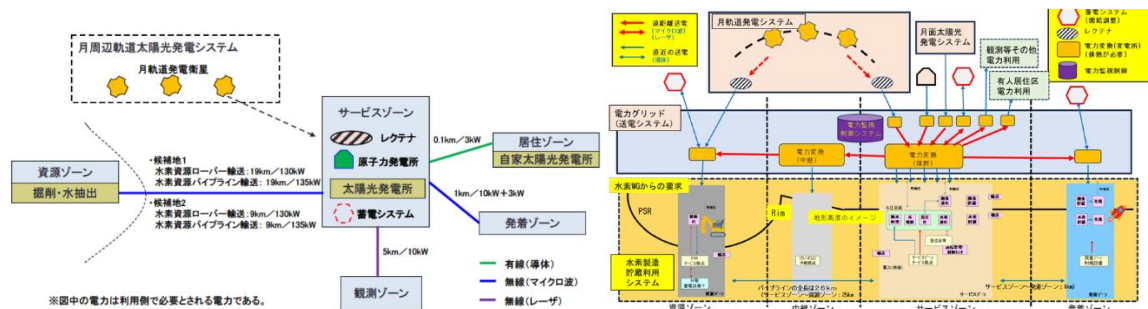


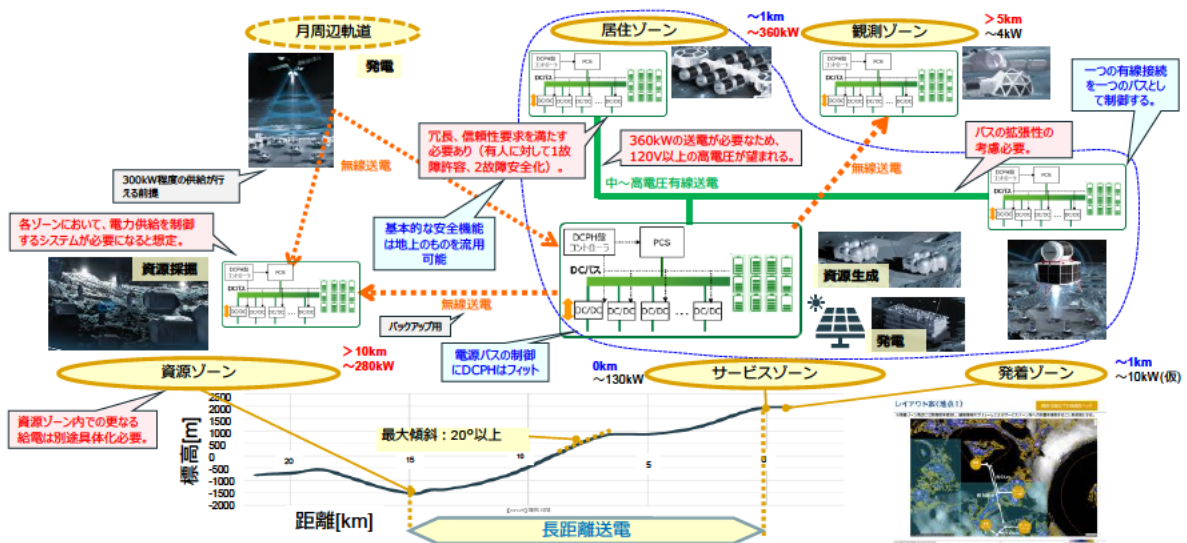
図 2-40 電力供給システムの基本構成及び具体的な候補地点における拠点レイアウトのイメージ

出所) 令和4年度補正宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)）報告書より IHI エアロスペース、J-spacesystems 作成資料を抜粋

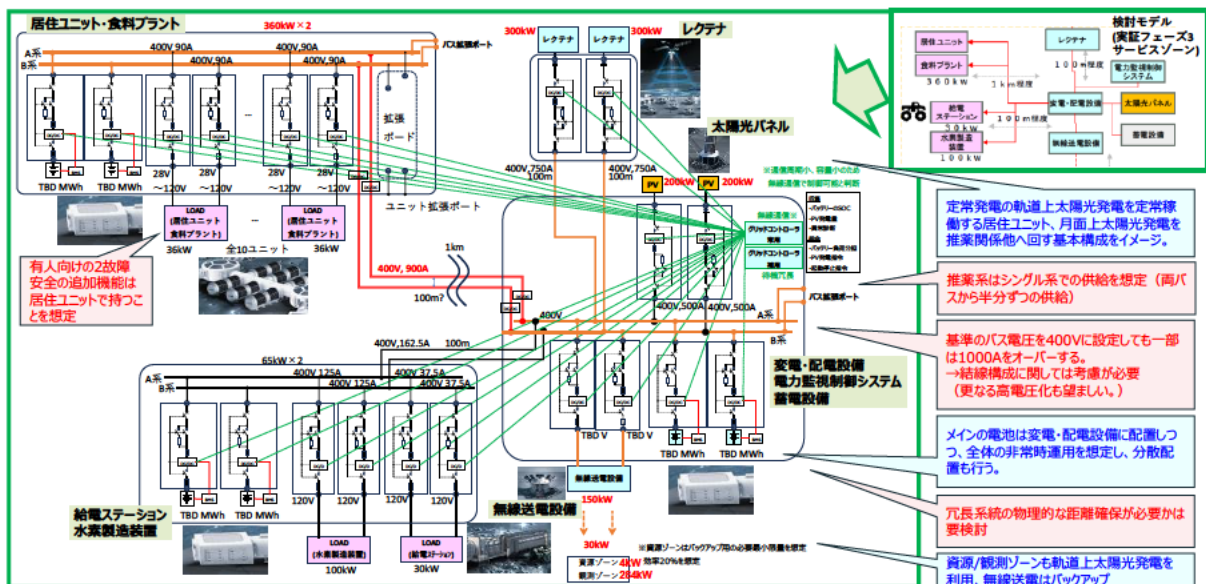
表 2-55 フェーズ 3 での必要電力の想定

| 年代      |    | 2040年～             |        |
|---------|----|--------------------|--------|
| 本事業での想定 |    | 月面実証フェーズ3:<br>本格稼働 |        |
| 検討項目    |    | 場所/ユニット数           | 必要電力量  |
| 発着ゾーン   |    |                    |        |
| サービスゾーン | 固定 | 推奨プラント             | 100kW  |
|         | 移動 | 輸送ローバ              | 30kW   |
| 居住ゾーン   |    | 居住ユニット+食料プラント      | 360kW  |
| 観測ゾーン   |    | 月面天文台              | 4kW    |
| 資源ゾーン   | 固定 | 熱抽出ユニット            | 130kW  |
|         | 移動 | 探査用ローバ(10)         | 3,500W |
|         |    | 輸送ローバ(50)          | 150kW  |

出所)三菱総合研究所作成



(a)月面電力グリッド全体図



(b)サービスゾーン近傍部の電力システム

図 2-41 月面実証フェーズ3:2040 年前後に目指すべき電力システム

出所)三菱重工業作成

建屋、設備内を中心に、有線での給電範囲とすることを想定して電力システムの対象は近距離(1km程度以内)とし、米国などでの先行分析結果(図 2-42)を参考に、現時点の技術成熟度、質量効率の観点で設定した。

米国の検討では、数 kW のレベルでは、数百 V の電圧範囲でも 1km 前後の範囲までは有線送電の方が、質量効率が高くなる分析結果である(但し将来的に詳細なトレードオフ検討は必要である)。

また、この範囲は高電圧の直流(DC)送電でも交流(AC)送電と同等の質量効率が見込まれる。工場や大型船舶で、月面拠点と同等の規模感(~数百 kW)の実績がある直流パワーハブ(DCPH)技術を用いることにより、地上需要で培われた制御・安全技術の共通利用の可能性もあると考えられる。

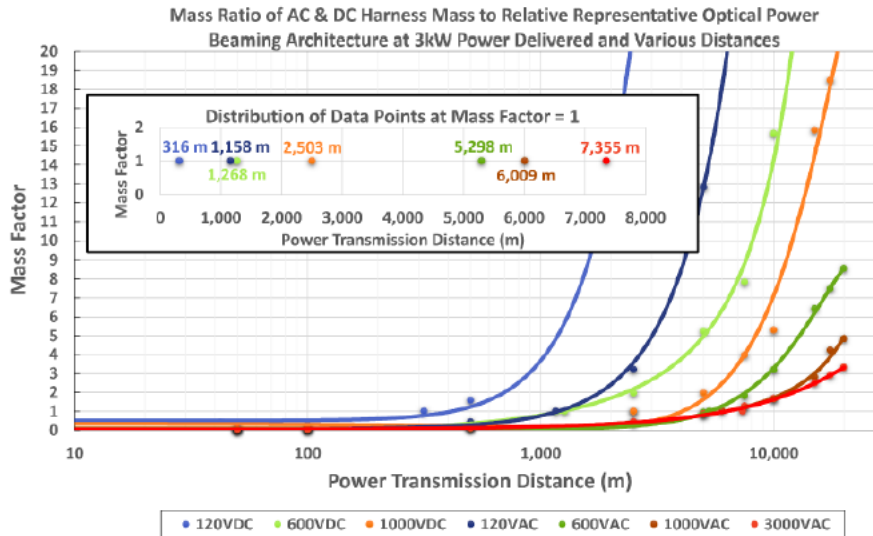


Figure 7. Mass Ratio of AC & DC Harness Mass to Relative Representative Optical Power Beaming Architecture at 3kW Power Delivered Plotted Over Distances from 5m to 20km

図 2-42 遠距離送電の質量効率分析結果

出所)Lockheed Martin, “Lunar Surface Power Architecture Concepts,” 2023 IEEE

DCPHはPV・蓄電池・需要機器を直流ハブで高効率に接続し、売電やピークシフト機能、独自制御による蓄電池量低減により、電力需要家のカーボンニュートラル化、電化を支援する電源システムである(図 2-43)。バッテリーを電源として DC バス電圧を制御しつつ、負荷・発電状況に合わせバッテリーに充放電を行う。各バッテリーが受け持つ負荷比率は統合コントローラからの設定により変更可能で、電圧制御自体は、DC/DC コンバータがそれぞれ行っているため、通信断や個別の DC/DC コンバータの離脱・合流時もシームレスに DC バス電圧を安定に保つことが可能である(図 2-44)。

月面の各拠点に DCPH を設け、拠点間を無線通信により繋ぎ月面全体の電力網を統合的に制御することで、冗長性・拡張性を持った電力グリッドの構成・運用が可能になると考えられる。

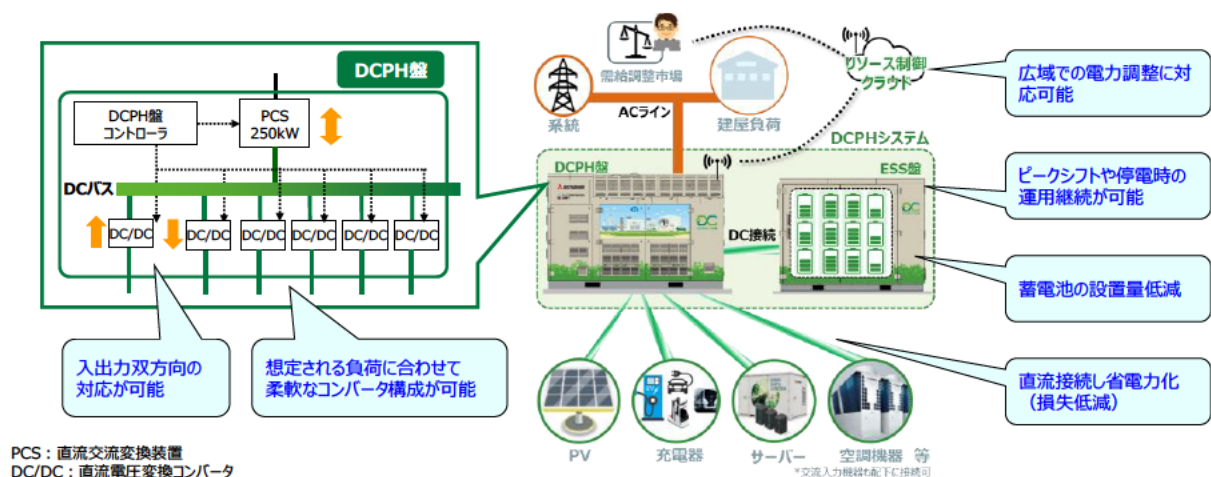


図 2-43 直流パワーハブの概要

出所)三菱重工業作成



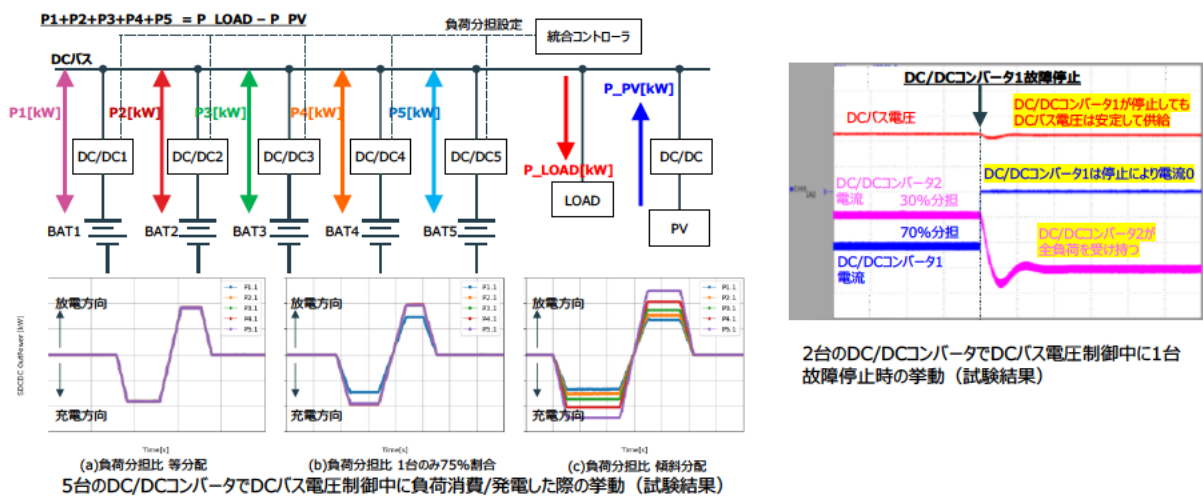


図 2-44 通信断や DC/DC コンバータの離脱・合流時の DC バス電圧挙動

出所)三菱重工業作成

地上における一般的な電力分配でも、ほとんどの場合において電流は数百 A 程度に抑えられている（表 2-56）ことから、電流は 1000A 程度以下になるように設定する方針とした。年代が進み消費電力が増えると、2040 年代には 360kW の電力消費が想定され、電流低減のためには 400V 程度以上の高電圧が望まれる。

また、月面までの輸送や設置、月面特有の環境に適合することが、電力システム全体の課題となると考えられる。

表 2-56 地上電力分配時の電圧電流の実績

| 種別      | 最大電力 [kW] | 供給電圧 [kV] | 実効電流 [Arms] |
|---------|-----------|-----------|-------------|
| 高圧電力:小口 | 500       | 6         | 48          |
| 高圧電力:大口 | 2000      | 6         | 192         |
| 特別高圧電力  | 10000     | 20        | 289         |
| ↑       | 50000     | 60        | 481         |
| ↑       | >50000    | 140       | -           |

出所)三菱重工業作成

## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像

(2)で示した、『月面実証フェーズ3:2040 年前後に目指すべき電力システム』に関して、技術課題を整理し、各フェーズにおけるシステム構成の中で、順次実証することを計画する。

構成要素の機能別に、課題を詳細化したものを表 2-57 に示す。またライフサイクルと構成要素の単位で課題を整理したものを表 2-58 に示す。環境起因の共通項についても記載した。

大電力に加え、レゴリスや放射線といった月面の特殊環境への適応の他、遠隔での制御や、年代ごとの発展や長期運用を想定したメンテナンス性、拡張性、軽量化なども克服すべき課題となる。

表 2-57 構成要素の機能単位での課題整理結果

| 系統                | 機能#1     | 機能#2      | 機能要求                                                            | 月面での実装・運用における課題項目                                                                             |
|-------------------|----------|-----------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 直流/ハブ<br>：制御      | 一般       | 状態管理      | システム全体を統括しシステムの状態に応じたシーケンス処理に従い、機器の接続・解列、機器への運転・停止指令を送出する。      |                                                                                               |
|                   |          | 通信        | 機器との情報・指令のやり取りを定周期にて実施する。                                       | 月面環境・地形等の影響、拡張に伴う通信が地上同様可能か否か。通信断時の取り扱いについて要検討。                                               |
|                   |          | 告知        | システムの稼働状態をユーザに告知する。                                             |                                                                                               |
|                   |          | 状態ログ      | システムの稼働状態・故障前後の状態をログに記録する。                                      |                                                                                               |
|                   |          | 寿命診断      | 機器の稼働時間や温度・使用条件から残寿命を計算する。                                      |                                                                                               |
|                   |          | 機器接続      | プラグアンドプレイで機器の追加・削減に対応できる。                                       | ロボットアームなどによる自動オペレーションで容易に作業可能な機構の確立が必要。(レゴリス影響などの考慮が必要。)                                      |
|                   |          | 熱マネジメント   | 冷媒の循環制御(流量)などを行う。                                               | 大電力による発熱の処理に課題。コジェネレーション的な利用ができると良い。分散配置により熱集中を防ぐなど要検討。電線の発熱の影響について要調査。損失低減のためには高圧化が必要。       |
|                   | 電力制御     | 発電電力制限    | システム状態(バッテリーSOCなど)に応じて、PVの発電電力を制限する。                            |                                                                                               |
|                   |          | バッテリー残量管理 | バッテリーSOC状態に応じて、系統から電力をバッテリーに充電する指令を送出する。                        |                                                                                               |
|                   |          | バッテリー劣化診断 | バッテリーの劣化診断を行うために、対象バッテリーの強制充放電を行う指令を送出する。                       |                                                                                               |
|                   |          | バッテリー劣化抑制 | バッテリー劣化診断を基に、バッテリーの負荷分を変更する指令を送出する。                             |                                                                                               |
|                   | 安全系      | バッテリー電力制限 | バッテリーのSOC、状態診断結果を基に、対象バッテリーの充放電電力を制限する指令を送出する。                  |                                                                                               |
|                   |          | 負荷電力制限    | システム状態(バッテリーSOCやPV発電状況)に応じて、負荷電力を制限する指令を送出する。                   |                                                                                               |
|                   |          | 監視・診断     | システムに接続される機器から発生される異常診断を収集、機器・システムの異常状態の診断を行う。                  |                                                                                               |
|                   |          | 異常告知      | システムの異常状態をユーザに告知する。                                             |                                                                                               |
|                   |          | F/Sアクション  | 異常診断結果を基に、電力制限または機器の切り離し、システムの制限を行う。                            |                                                                                               |
| グリッド接続<br>(=有線送電) | 一般       | 敷設        | ケーブル敷設が実現可能かつ容易なこと。                                             | 月面環境にて敷設(埋設)・接続(特に長距離部)の実現性、ケーブル重量を軽くするためにも高電圧化(電流低減)が必要。                                     |
|                   |          | 機器交換      | 容易に交換可能とする。                                                     | 小型・軽量・脱着容易な構造で月面環境で長期運用に耐える必要がある。                                                             |
|                   |          | 拡張/F      | 容易に拡張(接続機器の増加に対応)可能とする。                                         | 拡張に伴う系のインピーダンスの変化、負荷変化においてもバス電圧安定化が必要。                                                        |
|                   |          | グラウンディング  | 帯電・絶縁劣化による安全への影響なきこと。機器の誤動作なきこと。                                | 月面へのグラウンディング効果(実地検証)、手法について調査・検討が必要。                                                          |
|                   | 機能(電力供給) | 重量        | 輸送可能かつ輸送コストが低いこと。容易に交換作業などが可能なこと。                               | 小型・軽量・脱着容易な構造で月面環境で長期運用に耐える必要がある。                                                             |
|                   |          | プリチャージ機能  | 機器(DCDCコンバータ)をグリッド接続時のインラッシュ電流を抑制する。                            |                                                                                               |
|                   |          | 電圧安定化     | システムの負荷状況・機器の接続状況・インピーダンスの変化においても安定な電圧を供給する。                    | 低電圧・大電流は不安定になりやすいため、高電圧化(電流低減)が必要                                                             |
|                   | 安全系      | 冗長化       | A系・B系の独立分離により冗長性をもつ。                                            | 長期運用・拡張性・堅牢性を目指したアーキテクチャが必要(ISS参考)。                                                           |
|                   |          | 状態監視      | グリッドの電圧・電流・絶縁抵抗等の監視をする。                                         |                                                                                               |
|                   |          | 断線検出      | グリッドとの接続の断線検出を行う。                                               |                                                                                               |
|                   |          | 溶着検出      | グリッドと機器との切り離し機構の溶着を検出する。                                        |                                                                                               |
|                   |          | 異常箇所特定    | 絶縁抵抗の低下箇所など異常箇所の特定を行う。                                          | 月面環境を考慮した接地の仕方、絶縁抵抗の測定方法・異常箇所の特定方法について要検討。                                                    |
|                   |          | 短絡保護      | 短絡時グリッド電圧低下を抑制するため、短絡箇所の高速な遮断を行う。                               | 高速度半導体遮断器が必須だが、発熱・効率悪化するため電流は小さいほどよい。→グリッド電圧の高圧化が必要。現状の半導体スイッチは：1500V、2000A程度。                |
|                   |          | EMC       | 機器の誤動作なきこと。                                                     | 月面環境を考慮した接地などの対策について要検討。                                                                      |
| 直流/ハブ<br>：機器      | 一般       | 状態管理      | 上位コントローラからの指令に基づきシーケンス処理および、運転・停止などの状態を管理する。                    | 月面環境・地形等の影響、拡張に伴う通信が地上同様可能か否か。通信断時の取り扱いについて要検討。                                               |
|                   |          | 通信        | 機器の稼働状態を上位コントローラに告知、また指令を受信する。                                  |                                                                                               |
|                   |          | 機器交換      | 容易に交換可能とする。                                                     | 小型・軽量・脱着容易な構造で月面環境で長期運用に耐える必要がある。                                                             |
|                   |          | OTA       | 通信経路でのソフトウェアアップデート、機能拡張に対応する。                                   | 機器共通化、長期運用を目指したソフトウェア・キータチャ設計が必要。                                                             |
|                   |          | 重量        | 輸送可能かつ輸送コストが低いこと。容易に交換作業などが可能なこと。                               | 小型・軽量・脱着容易な構造で月面環境に耐える必要がある                                                                   |
|                   | 電力変換、供給  | DC/バス電圧制御 | DC/バス電圧を $\pm 0.5V$ 範囲にて電力に対して垂下特性を持たせた電圧制御により負荷分担任をいつつ安定に制御する。 | 低電圧・大電流は不安定になりやすいため、高電圧化(電流低減)が必要となってくる。月面環境における高圧化の実現が要検討課題(アワガス、半導体の耐放射線性、グラウンディングの影響等不明瞭)。 |
|                   |          | DC負荷用電源供給 | DC負荷に対して一定電圧を供給する。                                              |                                                                                               |
|                   | 安全系      | 監視・診断     | 機器のセンサ情報を収集し、過温度やセンサ異常等の故障診断を行う。                                |                                                                                               |
|                   |          | 異常告知      | 機器の異常状態を上位コントローラに告知する。                                          |                                                                                               |
|                   |          | 保護停止      | 過電流・過電圧など機器破損につながる異常検知したら保護停止する。                                |                                                                                               |
|                   |          | 放電機能      | 機器停止・切り離し後に電荷を放電する。                                             |                                                                                               |
|                   |          | 故障ログ      | 機器の故障前後の状態をログに記録する。                                             |                                                                                               |

出所)三菱重工業作成



表 2-58 ライフサイクルと構成要素の単位での課題整理結果

|         |       | 技術分野・コンポーネント                                                                         |                                                    |                                                    |                                       |
|---------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|
|         |       | 共通                                                                                   | 直流ハブ：全般                                            | 直流ハブ：コンバータ                                         | 電力グリッド：送受電                            |
| ライフサイクル | 輸送    | ロケット輸送時の環境への対応<br>(静的加速度、固有振動数、重心位置の検討)                                              | 輸送中の冷却方法<br>(宇宙では空冷方式が採用できないため、ラジエータ等を検討)          | 輸送時の物理的環境に対する強度                                    | 重量制限と対応輸送アーキテクチャ<br>(軽量化 and/or 分割)   |
|         | 組立・設置 | レゴリスへの対応<br>(コンタミ対応、帯電評価)                                                            | 帯電影響<br>月面のグラウンディング効果 (接地の仕方、グリッド内の接地ポイント)         | 帯電影響                                               | 帯電影響 (敷設/接続時の他運用中も含む)                 |
|         |       | MMOD <sup>※</sup> への対応<br>※Micro-Meteoroid and Orbital Debris<br>(地中埋蔵ないしはデブリダバなど検討) | 分散配置での接続/運用性                                       | 冗長構成                                               | 分散配置での接続/運用性                          |
|         | 運用    | 遠隔運用 (地球～月面/月面上数km)                                                                  | 制御オペレーション (配電/遮断/復帰) の自動化、通信遮断時の取り扱い               | 制御オペレーション (監視/判定) 自動化、通信遮断時の取り扱い                   | 接続オペレーションの自動化 (ロボットアーム等)              |
|         |       | 長距離送電 (月面上数km)                                                                       | 通信性                                                | 電力安定性 (高電圧化)                                       | 損失低減 (高電圧化)                           |
|         |       | 温度環境への対応 (熱制御)<br>(日照～日陰による温度差への対応、設置場所の検討)                                          | 大電力発電による発熱の処理<br>(ラジエータや地下放熱等の冷却の他、分散配置による熱集中回避など) | 大電力発電による発熱の処理<br>(ラジエータや地下放熱等の冷却の他、分散配置による熱集中回避など) | 大電力発電による発熱の処理<br>(月中配線とコネクタ部を月面に設置など) |
|         |       | 月震への対応                                                                               | 耐震強度 (免振や耐震での対応)                                   | 耐震強度 (免振や耐震での対応)                                   | 耐震強度 (免振や耐震での対応)                      |
|         |       | 放射線への対応<br>(放射線耐性のある材料、部品の選定、再起動可能な冗長構成などの体系的な対応の検討)                                 | 冗長構成                                               | 耐放射線部品の選定                                          | -                                     |
|         |       | 長寿命・メンテナンスフリーの実現<br>(機器開発、非常時の対応シナリオの具体化)                                            | 機器共通化<br>交換性<br>拡張性                                | 機器共通化<br>交換性<br>拡張性                                | 機器共通化<br>軽量化<br>拡張性                   |

出所)三菱重工業作成

電力システムの各課題の解決策への対応計画を、年代別に整理した結果を表 2-58 に示す。

電力システムは月面活動を支える重要なインフラであり、月面利用に先立った実証と利用増加に伴うシステム拡張を進める必要がある。そのため、月面探査段階で必要最小限の電力ユニットができるよう、その前のフェーズで地上及び月面模擬あるいは月面での実証を進める必要がある。そして、探査段階以降の電力需要の増加に備え、探査段階の実用機器や冗長系等を利用して高電力供給の実証を進め、利用者が増えるのに合わせて実用投入し、更なる需要拡大に対しては拡張型ユニットの実証や運用の検証を地上開発と実運用の中で更に進めていく計画としている。

表 2-59 電力システムの各課題の解決策への対応計画

|                  |                           | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：地上/LEO実証<br>電力：地上/LEO実証 |                                            | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：月面実証<br>電力：月面実証及びLEO実証 | 月面実証フェーズ0：<br>水素：単体実証<br>電力：本給電実証 | 月面実証フェーズ1：<br>水素：部分統合実証<br>電力：本給電/備用方式開始 | 月面実証フェーズ2：<br>水素：統合実証/初期準備<br>電力：大電力化/有人常駐対応 | 月面実証フェーズ3：<br>水素：本給電<br>電力：移動体給電 |
|------------------|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
|                  |                           | 2025年～2030年                               |                                            | 2028年～2029年頃                             | 2030年頃                            | 2030年～2035年頃                             | 2035年～2040年頃                                 | 2040年頃～                          |
| 月面電力供給<br>全体システム | 全体システム<br>【直流ハブ：制御】       | 既存技術での課題抽出                                |                                            | 最小構成単位の動作確認                              | サービスゾーンでの実証に必要な項目の検証<br>実証【0-③-4】 | 資源ゾーンでの実証に必要な項目の検証<br>実証【0-③-5】          | 実証【0-③-6】                                    |                                  |
|                  |                           | センシング/通信/制御<br>全体の検証                      | N/A<br>実証【0-③-1】                           | 地上サブシステム検証<br>(100kW級/1kmスケール)           | 必要最小限のユニットの提供<br>(10kW級/10mスケール)  | 必要最小限のユニットの提供<br>(10kW級/100mスケール)        | 拡張性を考慮したプラットフォームの導入と拡張運用の実証                  | ✓                                |
|                  |                           | 熱マネジメントの<br>成立性検証                         | 伝熱材料実証試験<br>熱真空試験                          | 100kW級での動作実証                             | N/A                               | N/A                                      | ✓                                            | ✓                                |
|                  | 電力配分<br>【直流ハブ：機器(=コンバータ)】 | 標準仕様の設定と<br>拡張性の検証                        | N/A<br>実証【0-③-2】                           | ロボットアームでの作業性の<br>検証                      | N/A                               | N/A                                      | 月面での実運用の検証                                   | ✓                                |
|                  |                           | 軽量化の検証                                    | 軽量化機器の試作                                   |                                          | N/A                               | ✓<br>(軽量化改修)                             | ✓<br>(軽量化改修)                                 | ✓<br>(軽量化改修)                     |
|                  |                           | 高電圧耐性の検証                                  | 宇宙用400V以上対応コンバータの開発と動作実証<br>(ガススイッチングバースト) | 左記の100kW級への拡大                            | N/A                               | 高電圧の長期運用の実証                              | ✓<br>(更なる高電圧の導入)                             | ✓<br>(更なる高電圧の導入)                 |
| 月面上での送<br>電システム  | 電力供給<br>【グリッド接続(=有線送電)】   | グラウンディングを含む安全<br>対応の検証                    | N/A                                        | 月面電線を想定したグラ<br>ウンディングの実証                 | N/A                               | グラウンディング運用の検証                            | ✓                                            | ✓                                |
|                  |                           | 敷設(埋設)と拡張性の<br>検証                         | N/A                                        | N/A                                      | N/A                               | 敷設検証                                     | 長距離実証                                        | ✓                                |

出所)三菱重工業作成

#### b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

各フェーズ、年代における実証候補項目の概要を以下に示す。

## 月面実証フェーズ 0 以前(前半)

2028 年頃から本格化する月面探査のための電力供給に向けた、必要最低限の電力供給ユニットを月面に設置することを目的に、機器レベルの地上検証、及び電力システムとしての月面実証を実施する。

月面実証フェーズ 0 以前(後半))

本フェーズにおける月面電力グリッド構成案を図 2-45 に示す。月面探査を支えながら、月面実証フェーズ 0 以降の電力需要拡大に対応することを目的に、より大電力に対応した機器及びシステムの地上検証を進め、また月面探査のバックアップとして月面での実運用も行うことで月面実証を行う。

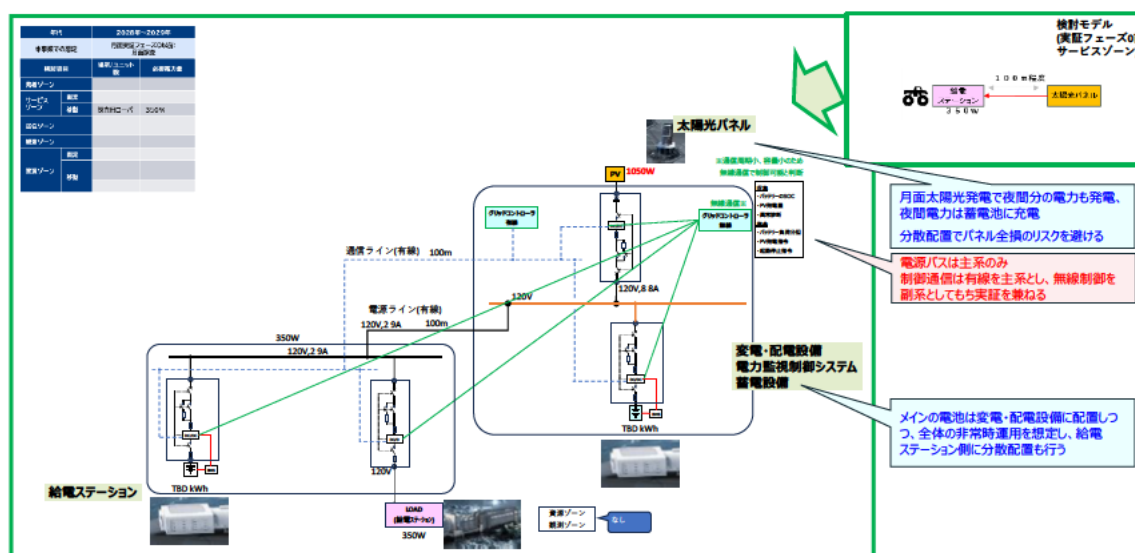


図 2-45 月面グリッド構成案(フェーズ 0 以前)

出所)三菱重工業作成

月面実証フェーズ 0(2030 年頃)

本フェーズにおける月面電力グリッド構成案を図 2-46 に示す。初期の月面施設に電力供給しつつ、月面実証フェーズ 1 以降の更なる電力需要拡大に対応することを目的に、大電力及び大電圧に対応した機器及びシステムの地上検証を進め、また月面電力システムのバックアップとして月面での制御実運用も行うことで月面実証を行う。



## 月面実証フェーズ 2(2035～2040 年頃)

本フェーズにおける月面電力グリッド構成案を図 2-48 に示す。月面施設や少人数の有人ミッションに電力を供給しつつ、月面実証フェーズ 3 以降の民間含めた本格的な月面開発での電力需要に対応することを目的に、更なる大電力・大電圧の機器・システムの検証を地上・月面で行う。

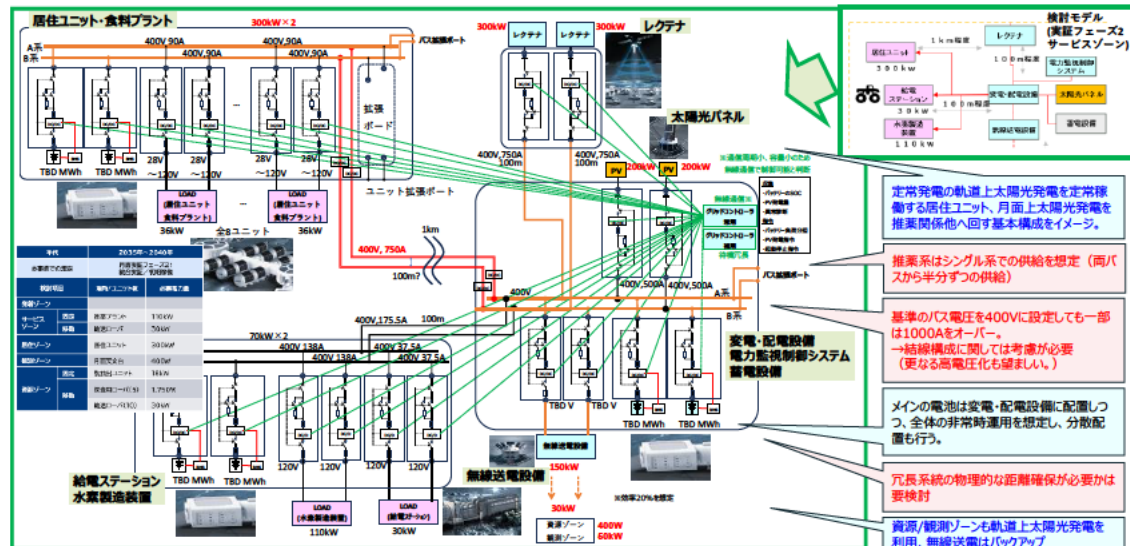


図 2-48 月面グリッド構成案(月面実証フェーズ 2)

出所)三菱重工業作成

## 月面実証フェーズ3(2040 年頃～)

本フェーズにおける月面電力グリッド構成案は図 2-41 に示したものになる。本格的な月面開発を支えるインフラとして機能しつつ、需要・ニーズに合わせた能力向上を継続的に進めていく。



### 3) 実証候補項目詳細

各フェーズの実証候補項目の詳細を表 2-60 から表 2-65 に示す。

表 2-60 実証候補項目【0-④-4】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:全体システム【直流ハブ:制御】、電力配分【直流ハブ:機器(=コンバータ)】及び電力供給【グリッド接続(=有線送電)】<br>・実証対象:センシング/通信/制御全体の検証①②、高電圧の長期間運用の実証③④、グランディング運用の検証⑤ 及び 敷設検証⑥                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 実証目的・必要性  | ・目的:通信制御、標準変換器作動、高電圧安定配電の月面での実証を行う。<br>月面開発の根幹を担う電力グリッドの設置/拡大には、打上重量/敷設作業を軽減できる無線通信による電力制御や、標準変換器の仕様妥当性確認、高電圧化による長距離送電につき、設置～運用の実確認が必要である<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:地上での月面環境(レゴリス、MMOD、温度、グランディング、重力等)の模擬には限界があり、月面での設置～運用実証には実環境での長期運用確認が不可欠である。                                                                                                                                         |
| 実証期間      | ・2028 年～2032 年(後半は月面実証)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証候補項目    | <実施項目>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| (実証目標値)   | ①【無線通信能力の確認】 通信成立性の確認(通信信号電圧減衰量の確認など)<br>②【遠隔監視/運用の実証】 地上で確認された制御ロジックで、月面での運用が成立することの確認<br>③【電力変換器】 軽量化設計、高電圧化の実証、出力容量単位の確認<br>④【有線送電】 接続運用、高電圧化の実証、長時間運用の実証<br>⑤【グランディング運用】 グランディングの実証(システム成立性を検証)<br>⑥【敷設検証】 敷設の実証、敷設環境での通電実証(ロジスティクスとの連携)<br><目標値>(暫定)<br>①送電ロス 10%未満/km、②電流安定±1%、制御遅れ時間 1sec 以内、③④DC 数百 V、数十 kW での長期安定稼働<br>④ロボットアームなどによる自動オペレーション、⑤基底電位上下動 ±1%以下、⑥ EMC IEC 61326-3 |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 300[kg]<br>(内訳:{パワーハブ 40kg+制御コントローラ 10kg+蓄電池(5kW)50kg}×2 + 電線 25[kg]×4 (内訳:100m ケーブル 4 本(電力 2+通信 2)))                                                                                                                                                                                                                                                                           |

出所)三菱重工工業作成

表 2-61 実証候補項目【0-④-5】に係る詳細内容

| 項目       | 実証詳細                                                                                                                                                                                             |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目     | ・技術項目:全体システム【直流ハブ:制御】、電力配分【直流ハブ:機器(=コンバータ)】及び電力供給【グリッド接続(=有線送電)】<br>・実証対象:高電圧の長期間運用の実証①、拡張性の検証②、安全機能の検証③                                                                                         |
| 実証目的・必要性 | ・目的:容量増加に伴う成立性の確認、および拡張運用の検証を行う<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:地上での月面環境(レゴリス、MMOD、温度、グランディング、重力等)の模擬には限界があり、月面での設置～運用実証には実環境での長期運用確認が不可欠である。                                                            |
| 実証期間     | ・2032 年～2035 年                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目   | <実施項目>                                                                                                                                                                                           |
| (実証目標値)  | ①【電力変換器】 容量増加に伴う熱マネジメント成立性の確認<br>②【拡張性検証】 敷設、モジュール追加実証などの実証(ロジスティクスとの連携)<br>③【安全機能検証】 安定した 2FS 機能の成立性の確認<br><目標値>(暫定)<br>①DC 数百 V、数百 kW での長期安定稼働<br>②ロボットアームなどによる自動オペレーション ③安全課処置対応時のスペックを満足すること |

|           |                                                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 1000[kg]<br>(内訳:{パワーハブ 140kg+制御コントローラ 10kg+蓄電池(50kW)250kg}×2<br>+ 電線 25[kg]×8 (内訳:100m ケーブル 8 本(電力 4+通信 4)) ) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

出所)三菱重工業作成

表 2-62 実証候補項目【0-④-6】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                              |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:全体システム【直流ハブ:制御】、電力配分【直流ハブ:機器(=コンバータ)】及び電力供給【グリッド接続(=有線送電)】<br>・実証対象:高電圧の長期間運用の実証①、拡張性の検証②、安全機能の検証③                                                                                          |
| 実証目的・必要性  | ・目的:容量増加に伴う成立性の確認、および拡張運用の検証を行う<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:地上での月面環境(レゴリス、MMOD、温度、グランディング、重力等)の模擬には限界があり、月面での設置～運用実証には実環境での長期運用確認が不可欠である。                                                             |
| 実証期間      | ・2036 年～2040 年                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目    | <実施項目>                                                                                                                                                                                            |
| (実証目標値)   | ①【電力変換器】 容量増加に伴う熱マネジメント成立性の確認<br>②【拡張性検証】 敷設、モジュール追加実証などの実証(ロジスティクスとの連携)<br>③【安全機能検証】 安定した 2FS 機能の成立性の確認<br><目標値> (暫定)<br>①DC~1500V、数 MW での長期安定稼働<br>②ロボットアームなどによる自動オペレーション ③安全課処置対応時のスバックを満足すること |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 2600[kg]<br>(内訳:{パワーハブ 290kg+制御コントローラ 10kg+蓄電池(200kW)500kg}×2<br>+ 電線 250[kg]×4 (内訳:1000m ケーブル 4 本(電力 4)) )                                                                               |

出所)三菱重工業作成

表 2-63 実証候補項目【0-④-1】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                        |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:直流電力ハブシステム<br>・実証対象:月面環境を想定した直流ハブシステムの熱成立性の地上実証                                                                                                                       |
| 実証目的・必要性  | ・目的:月面環境を想定した直流ハブシステムにおける熱成立性確認および課題の洗い出しを行うため、適用が想定される材料の要素検証(含む熱真空試験などの環境条件下)を地上で行う。<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                                                             |
| 実証期間      | ・2025 年～2028 年                                                                                                                                                              |
| 実証候補項目    | 【直流ハブ、機器に適用する伝熱材料】                                                                                                                                                          |
| (実証目標値)   | ・月面を模した環境での伝熱性能確認および耐久性の実証<br>【目標値】<br>・月面を想定した環境( $10^{-9}$ Pa 以下、4K)で、放熱性能(熱抵抗)が 0.002[K/W]以下であること。<br>・月面を想定した環境( $10^{-9}$ Pa 以下、4K～400K の熱サイクル)で、15 年の運用に耐えうる耐久性をもつこと。 |
| 月面への必要輸送量 | N/A                                                                                                                                                                         |

出所)三菱重工業作成



表 2-64 実証候補項目【0-④-2】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:電力変換器(コンバータ)<br>・実証対象:月面を模した環境における高電圧・単位変換器の試作・地上実証                                                                                                                                                                                                     |
| 実証目的・必要性  | ・目的:長距離電力グリッドの構築において、グリッド電圧の高電圧化(>400V)の可否が、グリッド電圧の決定にあたって最重要となる。また拡張性を考えた標準変換器の容量単位の決定についても確認が必要である。また、ロボットアームなどによる自動オペレーションで容易に作業可能かつ小型軽量な標準変換器が望まれる。したがって、標準変換器の試作および月面環境を模した地上での実証を行う。<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                                           |
| 実証期間      | ・2027年～2029年                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証候補項目    | 【電力変換器】                                                                                                                                                                                                                                                       |
| (実証目標値)   | ・高電圧化の実証(月面を模した環境下での耐久試験)<br>・出力容量単位の確認(月面を模した環境下での熱性能・耐久試験)<br>・容易に交換作業可能かつ小型軽量構造の実現性(上記の高圧化・熱成立)確認<br>【目標値】<br>・月面環境を模した条件において、DC1500V(仮値)で、60kW(現状 DCPH の値。仮値)での長期運用条件にて安定稼働可能であること。<br>・ロボットアームなどによる自動オペレーションで容易に作業可能かつ小型軽量(100kg,50m3 以下@100kW 仮値)であること。 |
| 月面への必要輸送量 | N/A                                                                                                                                                                                                                                                           |

出所)三菱重工業作成

表 2-65 実証候補項目【0-④-3】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:直流電力ハブシステム<br>・実証対象:月面での運用を想定したスケールでの直流ハブシステムの構築・地上実証                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証目的・必要性  | ・目的:月面にて想定されるスケールレベルおよび容量帯での直流電力ハブシステムを実際に構築することで、月面での敷設・運用に向けた成立性および課題の抽出を可能とすべく、地上実証を行う。<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                                                                                                                                                                               |
| 実証期間      | ・2025年～2028年                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 実証候補項目    | 【直流ハブ】                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| (実証目標値)   | ・100kW 級/1km スケールにおけるシステム構築・運用の確認(センシング/通信/制御/熱マネ/拡張作業性/EMC 等総合)。<br>・ロボットアームなどを使用したグリッド拡張(機器の追加接続)の容易性の確認。<br>・月面環境を想定したグラウンディング実装確認。<br>【目標値】<br>・100kW 級/1km スケールにて、負荷に対して安定的に電力供給を行うことができる。<br>・ロボットアームなどによる自動オペレーションで容易にグリッドの拡張が可能であること。<br>・月面環境を想定したグラウンディングにて、絶縁・安全面に対する問題や機器の誤動作等発生なきこと。 |
| 月面への必要輸送量 | N/A                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

出所)三菱重工業作成

### 2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システムに係る検討

地球周回軌道で発電を行いマイクロ波で地上へエネルギーを送るコンセプトについては、1968年のピーターグレーザーがサイエンス誌に最初に発表を行った<sup>2</sup>。地球周回軌道から地上への無線送電においては、電離層への影響や大気での伝搬損失等を考慮した使用周波数帯の選択、電離層プラズマ等への環境影響を考慮した電力密度の上限を考慮する必要があった。しかし、月周回軌道から月面への送電においては、地球環境と異なり大気や電離層がないため、異なる条件で仕様の最適化が必要となる。また、軌道の選択も月への応用特有の条件での最適化が必要となる。この最適化においては、軌道高度の選択により送電距離が決まり、周波数と距離が決まると送電側、受電側のサイズが決まる。送電側のサイズは、衛星システム内での電力効率を考慮した発電、送電電圧の最適化が必要となる。また、軌道の選択による一周回中の送電時間の割合等で送電ビームの角度掃引の要求も異なり最適化が必要である。

月周回軌道からの太陽発電衛星のシステム構成を図 2-49 に示す。月周回軌道上の太陽光のエネルギー密度は、地球周回軌道とほぼ同等で約  $1.4\text{kW}/\text{cm}^2$  である。上述のように月環境では大気がないため、送電用に用いる電磁波の大気の透過損失を考慮する必要がない。そのため、マイクロ波からレーザーまで選択範囲が広がる。また、初期に最もエネルギー需要が見込まれる地域が極域であるため、静止軌道の選択が不可であり、1機の太陽発電衛星からの送電は間欠送電とならざるを得ない点も注意が必要である。

月周辺軌道太陽光発電システムのシステム構成は、周回軌道上の月軌道発電衛星システムと月面上セグメントから構成される。本報告では、月軌道発電衛星システムと月面上セグメントの概要及びその実現に向けての実証候補項目に関して述べる。

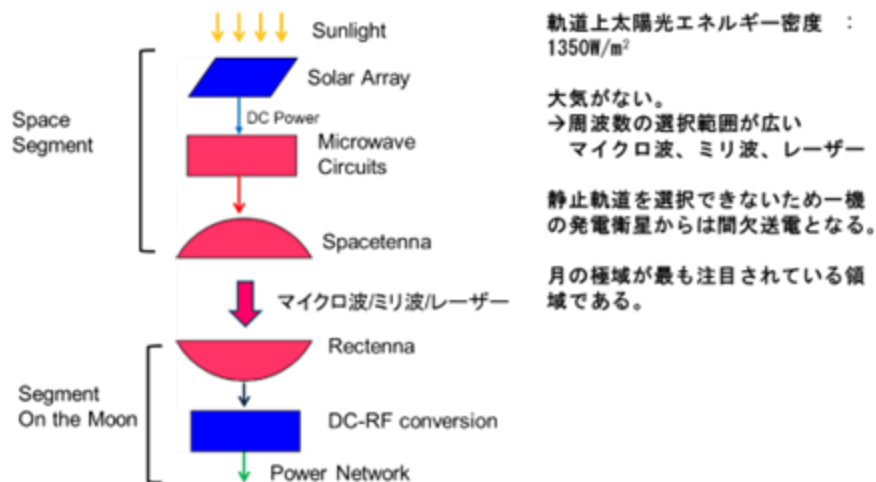


図 2-49 月周回軌道からの太陽発電衛星システム

出所)JAXA/ISAS 作成

<sup>2</sup> PETER E. GLASER, “Power from the Sun: Its Future”, SCIENCE, 22 Nov 1968, Vol 162, Issue 3856, pp. 857-861.

## (1) 月軌道発電衛星システム

### 1) 月軌道発電衛星システムに係る検討

月軌道発電衛星システムの機能ブロック図を図 2-50 に示す。いわゆる衛星バス部といわれるサポートシステムと衛星ミッション部となる無線送電システムから構成される。サポートシステムは、姿勢制御系、CDH 系、電源系、構造、通信系、熱制御系、推進系から構成される。この月用 SSPS (Space Solar Power Systems) の課題を図 2-51 に示す。超軽量で輸送時の収納性の高い大規模発電システムと電力管理システム、太陽発電衛星の固有技術となる無線送電システム、大型宇宙構造、耐宇宙環境性、輸送等が課題として挙げられる。

現在の技術レベルと月用 SSPS の技術レベルの比較を図 2-52 に示す。大電力発電に関しては、現在宇宙における最も大規模な発電システムは国際宇宙ステーションの 100kW クラスのシステムとなる。要求レベルはほぼ実現されているが、軽量化と収納性の格段の向上が必要である。無線送電関連技術に関しては、1kW クラスの送電器はすでに宇宙機に搭載されており、2桁程度の技術のギャップがある。廃熱に関しては、国際宇宙ステーションと同等レベルが要求される。構造は、国際宇宙ステーションと同程度のサイズである。100kW クラスの月用 SSPS に関しては、無線送電システム以外は、同等レベルの技術は既に実現されている。しかし、各要素技術に関しては、劇的なコストダウンと輸送回数の削減が必要である。

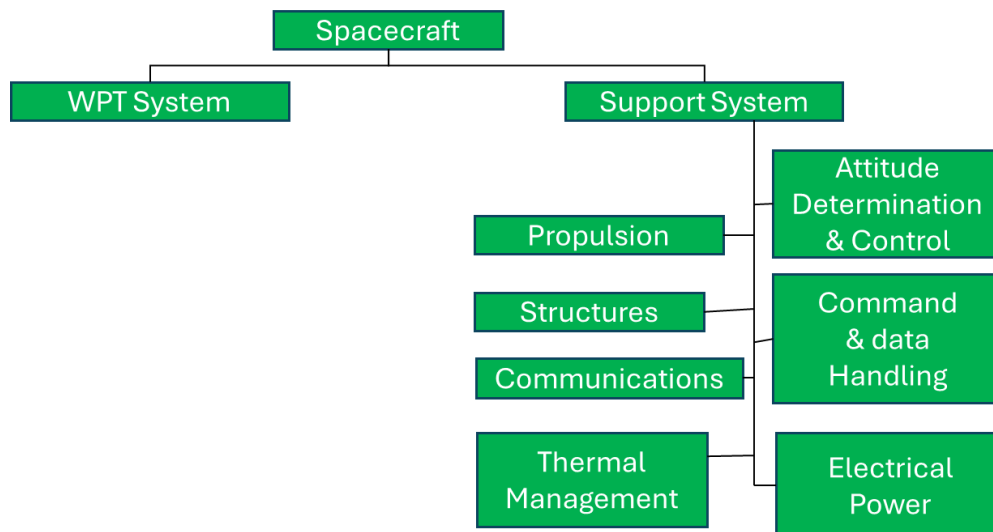


図 2-50 月軌道発電衛星システム機能ブロック図

出所)JAXA/ISAS 作成

- Power generation
- Power management and Control
- Wireless Power transmission
- Power Receiving
- Construction and Control Large Scale structure
- Environmental resistance
- Space Transportation
- Others

図 2-51 月用 SSPS の主要課題

出所)JAXA/ISAS 作成

| Key technology                     | Current level                                  | Targeted level | Factor |
|------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|--------|
| Power generation in space          | 約200kW (ISS)                                   | 数百kW           | 同等     |
| Generated voltage<br>(Bus voltage) | 100~150V                                       | 100V~1kV       | 同等     |
| Microwave power transmission       | Dozens of kW (on the ground)<br>1kW (in space) | 数百kW           | 100    |
| West heat                          | Dozens of kW                                   | 数百kW           | 10     |
| Large structure                    | 100m (ISS)                                     | 100m程度         | 同等     |
| Cost of transportation             | 1~2 million yen/kg                             | NA             | NA     |

図 2-52 月用 SSPS のための技術レベルの比較

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-66 に地球用 SSPS と類似する高難度な技術課題を示す。地球用 SSPS の場合は、サイズと電力要求が桁違いであるため、発送電一体型パネルを採用したテザー型 SSPS 等が提案された。テザー型 SSPS では、他の地球用 SSPS の検討で要求された km サイズの月軌道発電衛星システム内での GW クラスの電力輸送を回避し、高電圧やロータージョイントの要求をなくすことに成功した。しかし、100kW クラスの SSPS では、すでに実現されている技術の延長線上にある課題もあり、表に示された技術の使用も可能であると考えられる。

月用 SSPS 実現のための主要課題は以下となる。

- 超軽量で輸送時の収納性の高い数百kW クラスの発電システム
- ミリ波無線送電システム
  - 電子管を使用したミリ波無線送電システム
  - 軽量大型構造技術と半導体素子を用いたマイクロ波送電システム
- 微小電力対応レクテナ

以降では、月用 SSPS に想定される軌道や各種システムの要件について検討した結果を記載する。

表 2-66 地球用 SSPS における高難度な課題

| problem                                                                               | example                                                                | matter                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotating power transmission mechanism<br>Mirror rotation function                     | NASA Reference System (NASA Sun Tower)<br>NASDA SSPS Model<br>NASA ISC | Lack of the robust design<br>Single point failure                                                                                                       |
| Bus power collection<br>Super conductive cable                                        | NASA Reference System<br>ISAS SPS 2000<br>NASA Sun Tower<br>NASA ISC   | Impractical weight of cable<br>Distant future technology                                                                                                |
| Concentration Mirror                                                                  | NASDA SSPS Model<br>NASA ISC                                           | Heat waste<br>Difficulties of sun tracking system for large thin film structure                                                                         |
| SPS will be operated after all functions are constructed.                             | NASA Reference System<br>NASDA SSPS Model<br>NASA ISC                  | Risk of development and investment.<br>Unacceptable for commercial system                                                                               |
| Construction will be made in low earth orbit and transported to geosynchronous orbit. | NASA Reference System                                                  | Necessary of huge (impractical) transportation between orbit to orbit.<br>Radiation degradation of semiconductor element by passing the radiation belt. |
| Demonstration and commercial SPS have been considered separately.                     |                                                                        | Lack of the consistent road map.                                                                                                                        |

出所)JAXA/ISAS 作成

## a. 軌道

最もエネルギー需要が予想される領域が月の極域であるため、その領域への送電のための検討を行った。図 2-53 に軌道高度と周期の関係を示す。軌道周期は、軌道高度 10,000km で約 31 時間、1,000km で約 3.5 時間、100km で約 2 時間である。

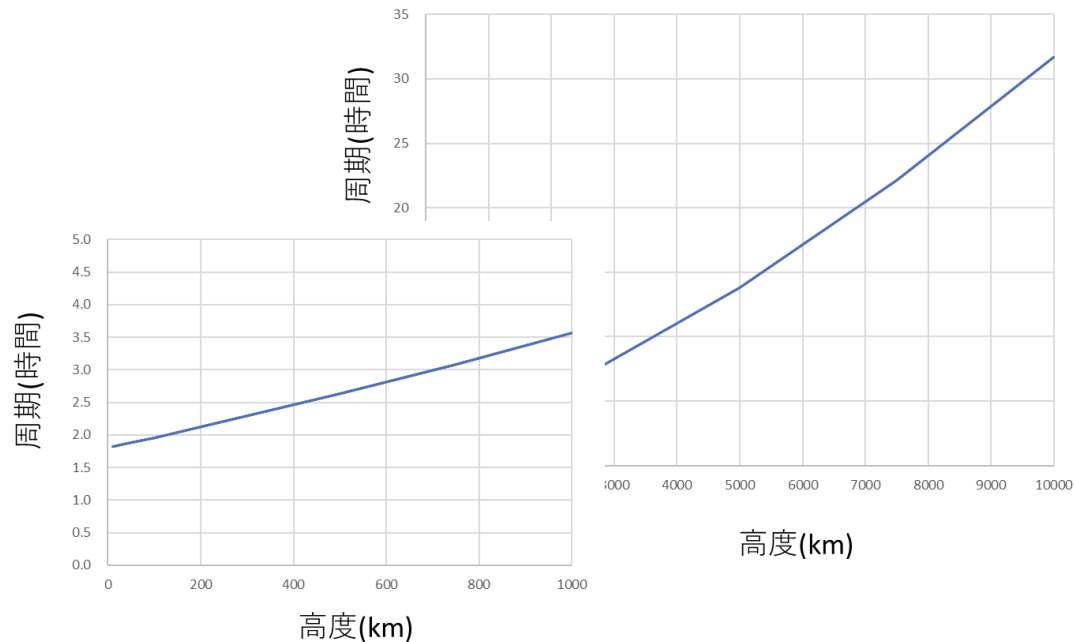


図 2-53 軌道高度と周期の関係

出所)JAXA/ISAS 作成

図 2-54 に遠月面高度 1,000km の場合の軌道を示す。円軌道の場合と近月面高度 100km、10km の場合も示した。高度 1,000km の場合の月面上のある地点上空を通過する際の高度と仰角の関係を図 2-55 に示す。ある地点の直上を通過する時、仰角 90 度の距離は 1,000km であり、仰角が 0 度の時は約 2,100km となる。上空を通過する時に最も送電距離が短くなり、角度が浅くなるとともに距離が増加する。このため、レクテナの形状は距離の増加と角度の変化を考慮しなければならない。また、月面の形状により送電可能な仰角が決まるため、仰角 0 度まで送電ができるわけではない。仰角が変化した場合、送電ビームの方向を目標地点に向ける必要がある。広い仰角範囲で送電するには、広いビーム掃引が必要である。ビーム掃引可能な仰角を通過する時間と軌道周回時間との比から常時ある地点に送電するために必要な衛星機体数を図 2-56 に示す。軌道高度を高くすれば、可視時間の割合が増えるので機体数を減らすことができるが、送電距離が長くなる。軌道高度が低くなると、送電距離は短くなりアンテナサイズを小さくできるが、可視時間の割合が少なくなり必要な機体数が増加する。高度 1,000km でビーム掃引角を±60 度まで可能とすると必要機体数は数機となる。しかし、高度 100km でビーム掃引角度が±15 度までの場合は 200 機以上が必要となる。



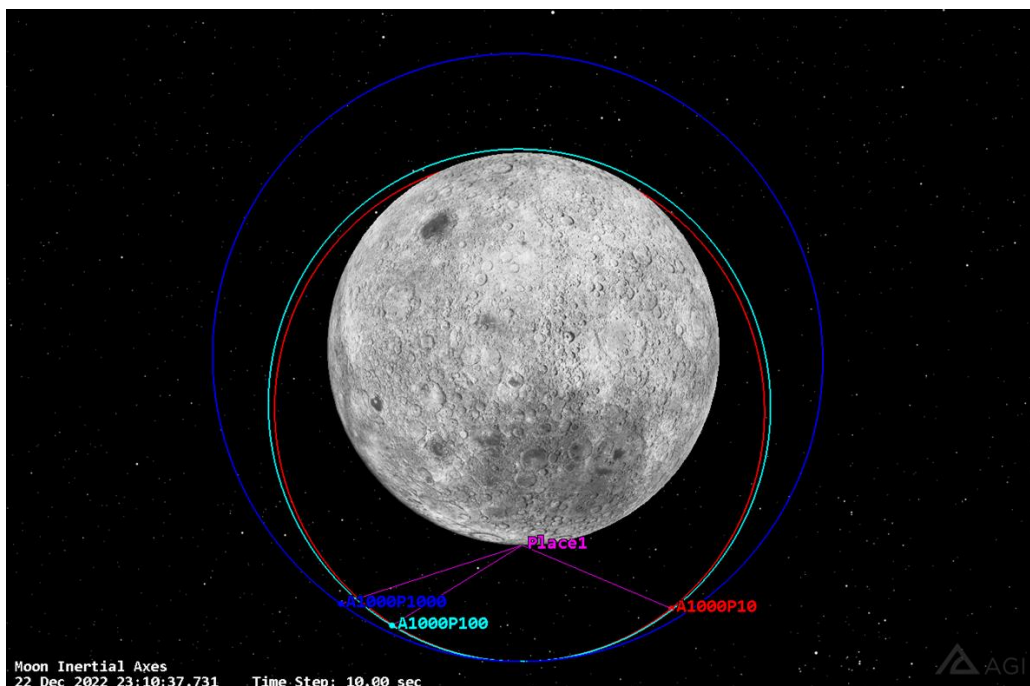


図 2-54 遠月面高度 1,000km の場合の軌道

出所)JAXA/ISAS 作成

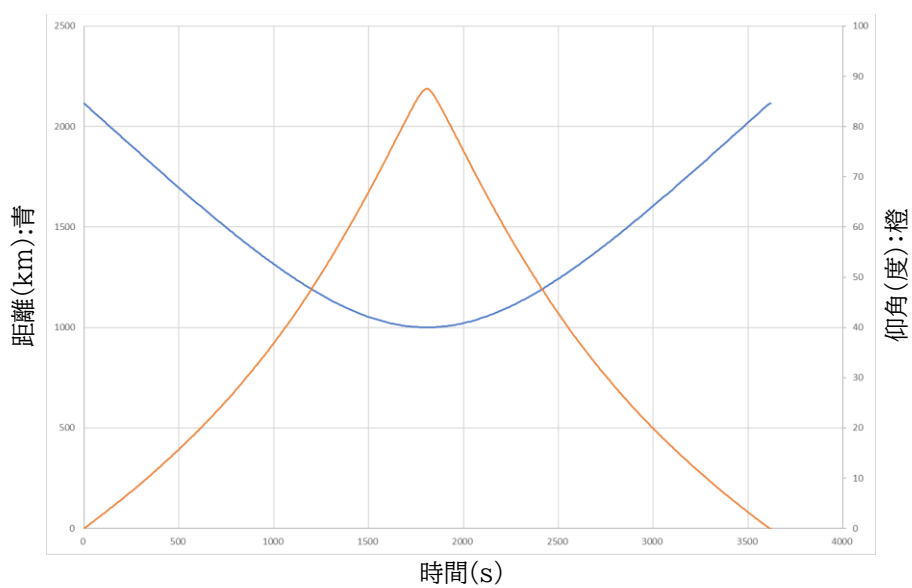


図 2-55 遠月面高度 1000km の場合の距離と仰角の関係

出所)JAXA/ISAS 作成

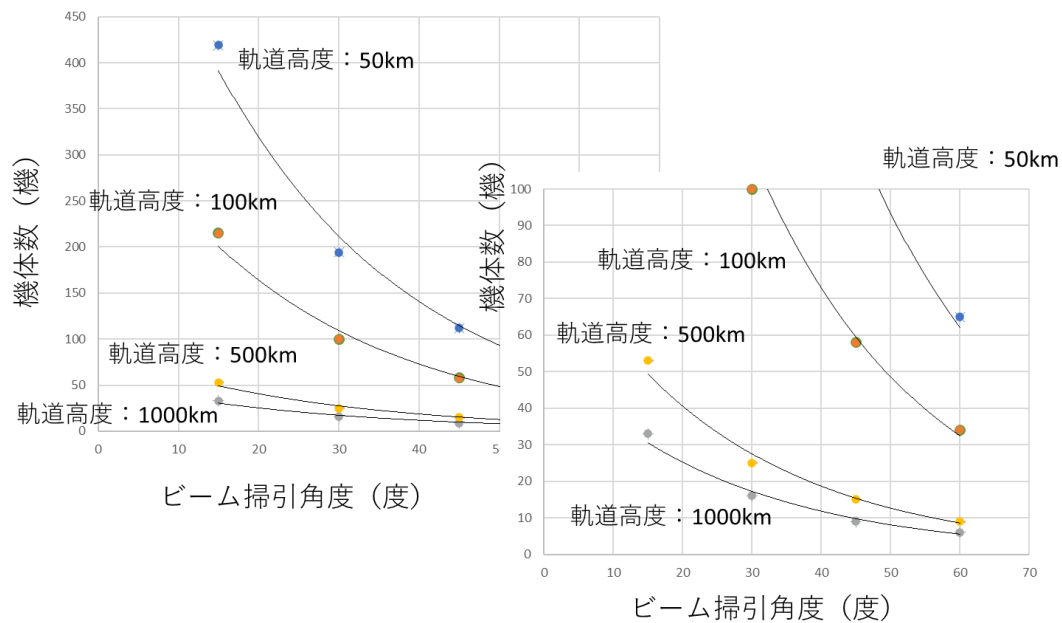


図 2-56 ビーム掃引角度と機体数

出所)JAXA/ISAS 作成

月極域のシャクルトンクレーター内にレクテナを設置すると想定した場合の送電について検討する。シャクルトンクレーターの位置は、南緯 89.9 度、東経 0.0 度である。斜面の角度が 30°、クレーターの深さが 4.2km、直径 6.6km の同心円状の平底があり、中央には 2~300m の小丘がある。

図 2-57 にシャクルトンクレーターとレクテナの配置を示す。また、図 2-58 にシャクルトンクレーターの外形と仰角±45 度での無線送電範囲を示す。クレーターの壁面斜度が 30 度から、中心近くにレクテナを設置した場合、仰角±45度の範囲は送電可能であることが分かる。これより大きな角度でビームを制御した場合はクレーターリム部の干渉が懸念される。以降の検討では、ビーム制御角を±45 度とした。クレーターの底部は直径 6.6km 程度の広さがあるため、レクテナサイズは直径 500m と 1km で比較を行った。シャクルトンクレーターの直上を通過する軌道を図 2-59 に示す。軌道の検討から、遠地点高度 1,000km~5,000km で比較を行った。

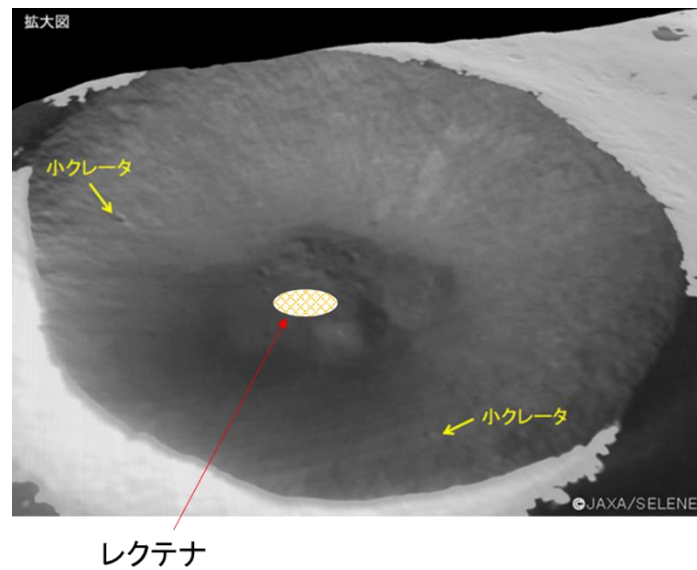


図 2-57 シャクルトンクレーターとレクテナの配置

出所) 以下を元に JASA/ISAS 作成  
[https://www.jaxa.jp/article/special/kaguya/seika02\\_j.html](https://www.jaxa.jp/article/special/kaguya/seika02_j.html)

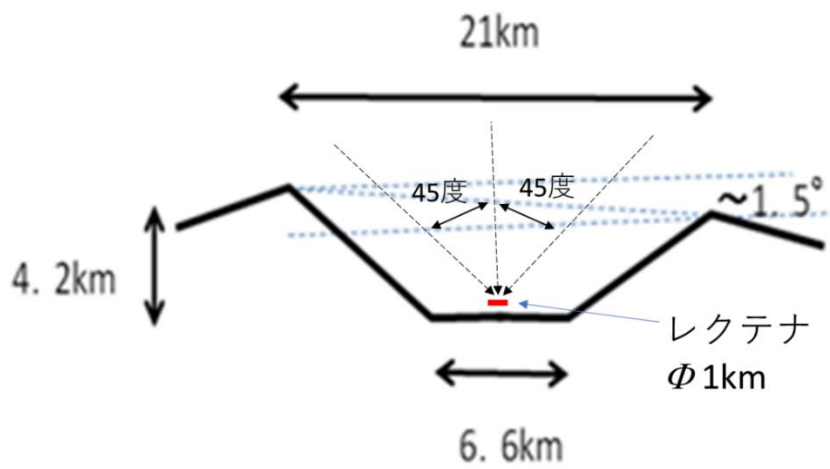


図 2-58 シャクルトン底面および斜面

出所) <https://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2008/1024.shtml>

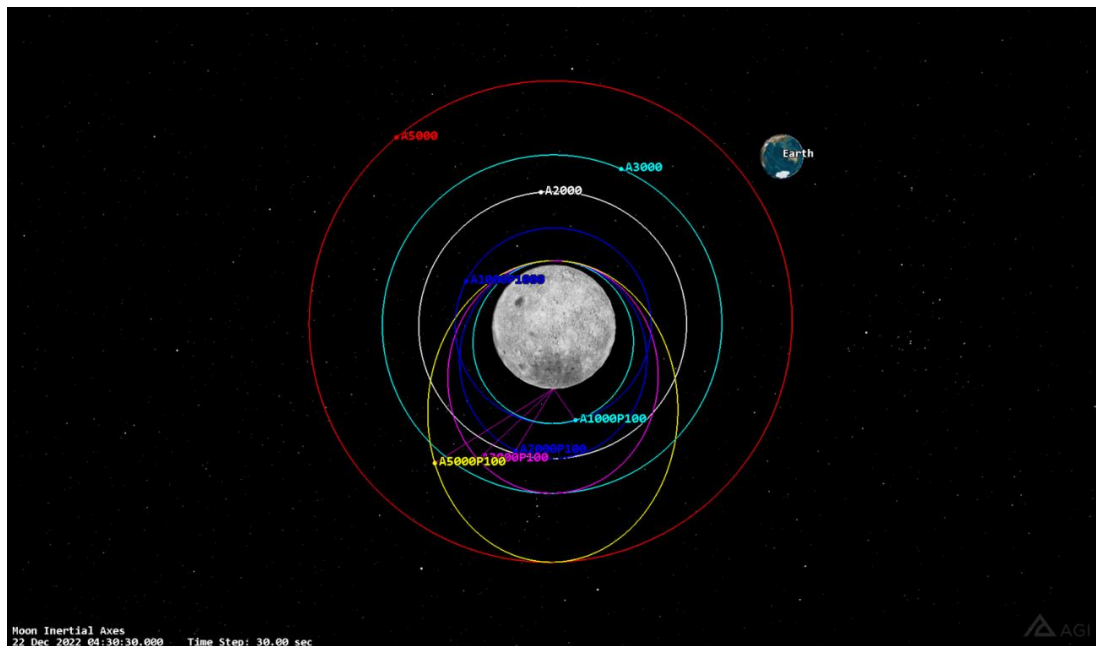


図 2-59 シャクルトンクレーターの直上を通過する軌道（遠地点高度 1,000km-5,000km）

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-67 にシャクルトンクレーターの直上を通過する軌道の送電可能時間と連続送電に必要な機体数を示す。高度 5,000km の場合、円軌道から楕円軌道にすることで周回時間が 13 時間47分から約 7時間となり、そのうちの仰角 $\pm 45$ 度となる時間が2時間38分から3時間20分となる。送電可能な時間の割合が約 19%から約 47%となり、常時送電に必要な機体数は5機から2機へ削減できる。一方、高度 1,000km の楕円軌道の場合は、常時送電には7機必要であり、一機の衛星は周回時間が約 2 時間46分でそのうち24分間送電を行うこととなる。

クレーター内に直径 500m と1,000mのレクテナを設置すると仮定した場合の、送電アンテナのサイズを表 2-68 と表 2-69 に示す。レクテナ直径が 500mの場合、軌道高度 1000km では送電周波数が 5.8GHz の時の送電アンテナの直径は 200m、送電周波数 50GHz の時の直径は 23mとなる。レクテナの直径を 1km まで拡大できれば、周波数 50GHz で送電アンテナの直径は 12m程度となる。アンテナサイズの観点からは、10 から 20mのサイズが可能であれば、一回あるいは数回の輸送で構築できる可能性がある。

表 2-67 シャクルトンクレーターの直上を通過する軌道の送電時間、機体数

| Apogee<br>(km) | Perigee<br>(km) | 周期<br>(分) | 仰角±45<br>の時間<br>(分) | 1周回におけ<br>る送電時間の<br>割合 | 連続送電に必<br>要な機体数<br>(機) |
|----------------|-----------------|-----------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 1000           | 1000            | 214.2     | 22                  | 0.103                  | 10                     |
| 1000           | 100             | 163.6     | 24                  | 0.147                  | 7                      |
| 2000           | 2000            | 341.7     | 48                  | 0.140                  | 7                      |
| 2000           | 100             | 220.1     | 56                  | 0.254                  | 4                      |
| 3000           | 3000            | 487.7     | 80.5                | 0.165                  | 6                      |
| 3000           | 100             | 281.9     | 97                  | 0.344                  | 3                      |
| 5000           | 5000            | 827.1     | 158                 | 0.191                  | 5                      |
| 5000           | 100             | 419.9     | 200                 | 0.476                  | 2                      |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-68 レクテナの直径が 500m の場合の送電アンテナの直径(ビーム収集効率:90%)

| 周波(GHz) | 軌道高度(km) | 送電アンテナの直<br>径(m) |
|---------|----------|------------------|
| 5.8     | 1000     | 200              |
| 10      | 1000     | 116              |
| 50      | 1000     | 23               |
| 100     | 1000     | 12               |
| 5.8     | 2000     | 400              |
| 10      | 2000     | 232              |
| 50      | 2000     | 46               |
| 100     | 2000     | 23               |
| 5.8     | 3000     | 600              |
| 10      | 3000     | 348              |
| 50      | 3000     | 70               |
| 100     | 3000     | 35               |
| 5.8     | 5000     | 999              |
| 10      | 5000     | 580              |
| 50      | 5000     | 116              |
| 100     | 5000     | 58               |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-69 レクテナの直径が 1000m の場合の送電アンテナの直径(ビーム収集効率:90%)

| 周波数(GHz) | 軌道高(km) | 送電アンテナの直径(m) |
|----------|---------|--------------|
| 5.8      | 1000    | 100          |
| 10       | 1000    | 58           |
| 50       | 1000    | 12           |
| 100      | 1000    | 6            |
| 5.8      | 2000    | 200          |
| 10       | 2000    | 116          |
| 50       | 2000    | 23           |
| 100      | 2000    | 12           |
| 5.8      | 3000    | 300          |
| 10       | 3000    | 174          |
| 50       | 3000    | 35           |
| 100      | 3000    | 17           |
| 5.8      | 5000    | 500          |
| 10       | 5000    | 290          |
| 50       | 5000    | 58           |
| 100      | 5000    | 29           |

出所)JAXA/ISAS 作成

## b. 超軽量高収納性発電システム

太陽光発電システムは、1958 年に打ち上げられた Vanguard I 衛星にすでに搭載され、現在では長期間にわたるミッション遂行には欠かせないシステムとなっている。図 2-60 に Vanguard I 衛星を示す。太陽光発電システムが採用された初期においてはボディマウント方式が採用されていたが、より大電力が求められる現在の大電力衛星では、太陽指向の展開型ソーラーアレイが採用されている。その最大規模のシステムである国際宇宙ステーションの発電システムを図 2-61 に、その仕様を表 2-70 に示す。





U.S. Vanguard I NASA

図 2-60 Vanguard I衛星

出所)NASA

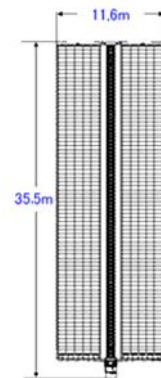


図 2-61 国際宇宙ステーションとその太陽電池パドル

出所)JAXA/NASA

表 2-70 国際宇宙ステーションの太陽電池パドルの仕様

| 項目         | 仕様                                                         |
|------------|------------------------------------------------------------|
| サイズ        | 幅 11.6m(展開時)<br>長さ 35.5m(展開時)                              |
| 重量         | 約 1,089kg                                                  |
| ブランケットの大きさ | 4.57m x 33.5 m                                             |
| 最大発生電力     | パドル 1 基当:32.8kW<br>完成時(パドル8基):計 264kW                      |
| 太陽電池セル     | 枚数:16400 枚/ブランケット<br>面積:8cm <sup>2</sup> /1枚<br>変換効率:約 14% |
| パドルでの発生電圧  | 1 次側:137-173V(直流)<br>2 次側:約 124V(直流)                       |
| 供給電力       | トラス1基(パドル両翼):21-30kW<br>完成時(パドル8基):計 84~120kW              |

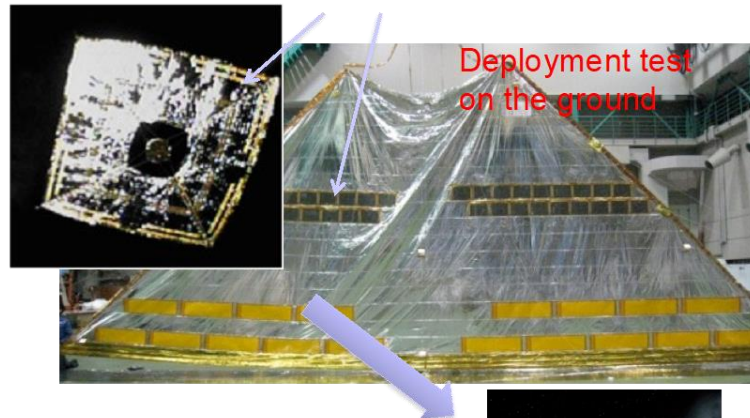
出所)International Space Station Facts and Figures - NASA

太陽指向展開型パネルの特徴を表 2-71 に示す。従来のシステムでは重すぎるため、10 倍以上の軽量化が必要である。その実現方法としては、近年開発が進められているプラスチックフィルム上に形成する薄膜太陽電池の応用が考えられる。図 2-62 に超軽量大電力太陽電池アレイの開発を目指した IKAROS の薄膜太陽電池アレイを示す。IKAROS では、プラスチックフィルム上に形成した a-Si を採用したが、CIGS 太陽電池等も既にプラスチックフィルム上に形成したものが商品化されている。また、ペロブスカイト太陽電池も吸湿性等による寿命の低下が克服されつつある。このような、薄膜柔軟軽量太陽電池を使用することにより、超軽量で収納性の高いシステムの実現が期待できる。

表 2-71 太陽指向展開型パネルの特徴

|                              |
|------------------------------|
| 大電力システムではもっとも利用されている成熟したシステム |
| 大電力供給:数十 kW                  |
| 高い信頼性                        |
| 質量特性:40~100W/kg              |
| コスト: ~数千\$/W                 |

出所)JAXA/ISAS 作成



#### Solar Power Sail

- Area : ~2000m<sup>2</sup>
- Specific Power : ~kW/kg
- Cost : ~1000¥/W
- Power Generation : ~200kW@1AU

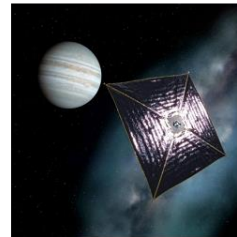


図 2-62 IKAROS とソーラー電力セイル

出所)JAXA 作成

表 2-72 に大型宇宙機の電力と発生電圧を示す。10kW 以上の大電力衛星が商用衛星として既に開発されており、バス電圧も 100V が使用されている。国際宇宙ステーションでは、160V 以上の発電が採用されている。

表 2-72 大型宇宙機の電力と発生電圧

| 名称           | 軌道    | 用途      | 打ち上げ年 | 電力 (kW) | 発電電圧     | 参照                                                                                                                                                        |
|--------------|-------|---------|-------|---------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 国際宇宙ステーション   | 低軌道   | 有人基地    | 2000  | 75-90*  | 137~173V | <a href="https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000182.html">https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000182.html</a>                     |
| Deep Space 1 | 惑星間軌道 | 小惑星探査   | 1998  | 2.5     | 90V      | <a href="https://www.eoportal.org/satellite-missions/deep-space-1#">https://www.eoportal.org/satellite-missions/deep-space-1#</a>                         |
| ETS-VIII     | 静止軌道  | 通信      | 2006  | 8.73    | 100-103V | <a href="https://www.jaxa.jp/press/2010/06/20100602_sac_kiku8.pdf">https://www.jaxa.jp/press/2010/06/20100602_sac_kiku8.pdf</a>                           |
| Boeing 702   | 静止軌道  | 通信衛星用バス | 1999  | 3 to 18 | 100V     | <a href="https://www.boeing.com/space/boeing-satellites#overview">https://www.boeing.com/space/boeing-satellites#overview</a>                             |
| MUSES-C      | 惑星間軌道 | 小惑星探査   | 2003  | 2.6     | 100V以上   | <a href="https://www.istage.ist.go.jp/article/kjss/53/618/53_210/_pdf/-char/ja">https://www.istage.ist.go.jp/article/kjss/53/618/53_210/_pdf/-char/ja</a> |

出所)各種情報より JAXA/ISAS 作成

### c. 無線送電システム

月用 SSPS のブロック図を図 2-63 に示す。無線送電システムの主要機能は放射部、電力増幅部、制御部から構成される。受電側セグメントは、月面上に設置されるレクテナとなる。

また、図 2-64 に無線送電システムに使用する電磁波の周波数で大別した場合の特徴を示す。周波数が高いレーザーやミリ波はサイズを小さくできるメリットがある。

レーザーは効率と高出力化が課題である。100kW クラスの宇宙用途においては、現状技術では使用は困難と考える。

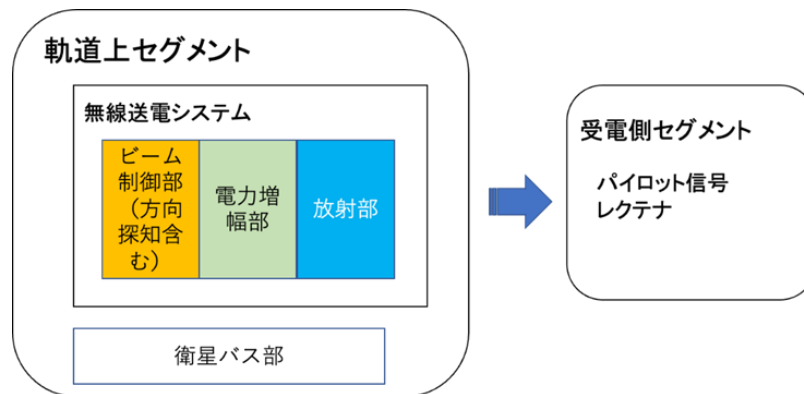


図 2-63 月用 SSPS のブロック図

出所)JAXA/ISAS 作成

|                                 |                                  |                                   |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Laser: 800nm, 1um, 1.5um</b> |                                  |                                   |
| transmitter                     | fiber laser,                     | efficiency 30-35%                 |
|                                 | DDL(Direct Diode Laser)          | efficiency 40%                    |
| receiver                        | Photoelectric conversion device  | 1um band: Target>65%              |
|                                 |                                  | 21.3%(JAXA's demonstration)       |
| <b>mm Wave: ~94GHz</b>          |                                  |                                   |
| Transmission part               | Solid state device               | Low efficiency, low power         |
|                                 | Gyrotron                         | efficiency around 50%             |
| Receiving part                  | Rectenna                         | 94GHzで32.3% @ 94GHz(1.02mW input) |
| <b>Microwave: 2~35GHz</b>       |                                  |                                   |
| Transmission part               | 75% @ 5.8GHz (GaN HEMT, F class) |                                   |
|                                 | 85% @ 2.45GHz (5.9W入力)           |                                   |
| Receiving part                  | Rectenna                         |                                   |
|                                 | 76% @ 5.8GHz(4W input)           |                                   |
|                                 | 47.9% @ 24 GHz(194m input)       |                                   |

図 2-64 周波数で大別した無線送電システムの特徴

出所)JAXA/ISAS 作成

サイズの観点からは、ミリ波領域が大電力無線伝送システムには有力と考える。送電側に関しては、半導体増幅器を使用した場合、周波数が高くなると効率の低下や一素子当たりの電力低下が生じる。

無線電力伝送応用が計れる高効率 RF 増幅器の 2024 年における現状を図 2-65 に示す。富士通研究所より 90GHz で 30% の電力付加効率の GaNHEMT デバイスが発表された点が大きな進展である。このデバイスはチャネル層のバックバリアの改良、選択成長によるオーミック抵抗低減、パッシ

ベーション膜の改良、熱伝導と不要伝搬モードを抑制した実装基板の実現から達成されている(多木、尾崎、MWE2024 TH4B-2)。

Reza Nikandish et al., "GaN Integrated Circuit Power Amplifiers Developments and Prospects,"  
IEEE Journal of Microwave, vol.3, No.1, Jan.2023 および PA survey ver.9をベースに作成

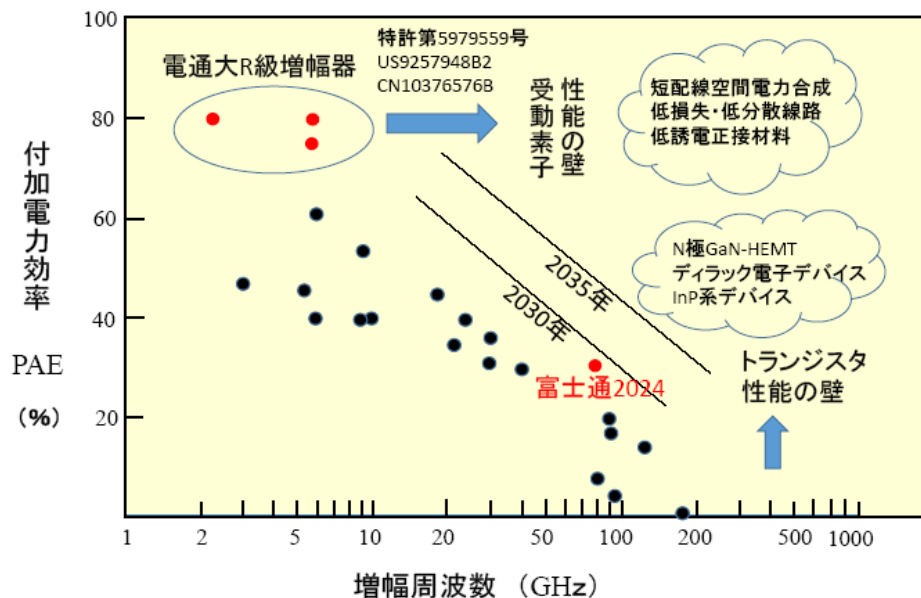


図 2-65 2024 年における高効率増幅器の現状と課題

出所)電気通信大学作成

現在、無線電力伝送は 5.8GHz が主流であるが、現在の電波利用状況を鑑み、ミリ波帯などを検討する動きがある。しかし実現には以下に示すような課題がある。

- ① 点波源から放射される電磁波は周波数に寄らずオムニ指向性で球面状に広がり(表面積 =  $4\pi r^2$ )、受電されるエネルギーは、周波数に依らず受電アンテナの有効開口面積のみ(立体角)により決まる。このため周波数を  $n$  倍に上げると、同一有効開口面積を保つには  $n^2$  倍のアレイ素子が必要となり必要となる部品点数が大幅に増える。これは電磁波の通り抜けを避けるためアレイアンテナ素子間の距離をいずれの周波数の場合も  $0.8\lambda$  以下に保つ必要があるためである。
- ② 送電側のアレイに関しては、送信側増幅器に用いるトランジスタ(真空管を含む)では(出力電力)  $\times$  (周波数) $^2$  = CONSTANT の関係が成立しているため、周波数が  $n$  倍になると出力が  $1/n^2$  倍に減少する。これにより、同一の送信出力を保とうとするとアレイ送信素子数を  $n^2$  倍にしなければならず部品点数、コスト、輸送量が大幅に増える。これは電子デバイスでは取り扱える電力密度は材料定数や構造により一定値  $p_d$  を保ち、これを同位相で取り出すためには集中定数近似が行える  $\lambda/8$  以下の寸法でなければならないためである。つまり面積  $(\lambda/8)^2$  に一定値  $p_d$  を掛けた値が出力電力となるためである。

ただし、送信素子数が増えることによるメリットとしてビーム幅をより狭くできる可能性があるが、位相器の精度やデバイスに AM/PM 歪みのバラつきを考慮した状態で1億素子のアレイ

と 100 億素子のアレイの差が出ることを確認する必要がある。

- ③ 図 2-65 に示したように、周波数を上げていくと出力のみならず電力付加効率が大幅に低下してゆく。このことは電力伝送システムにおける効率を大幅に低下させることにつながるので技術開発の進捗を見極めて半導体素子を選定していくことが重要である。

周波数を上げるとシステムを小型化できると安易に考えがちであるが、無線電力伝送ではそうならず、部品点数、輸送重量、製造コストが急激に増えるという側面がある。マイクロ波とミリ波での宇宙での伝搬特性の差がある場合を除いて、月周回軌道において半導体デバイスを用いる場合は、5.8GHz の使用が妥当と考えられる。なお地球面や地上では電波資源政策上別の結論がでる可能はある。

ミリ波帯の送電システムでは、電子管デバイスを用いることにより高効率かつ大電力システムが実現する可能性が高い。すなわち、開口面アンテナと電子管デバイスの組み合わせが有力と考える。

一方、上述のように、マイクロ波帯は技術も成熟しており高い効率が実現できる。しかし、サイズが大きな課題となる。C 帯を月面 SSPS に応用するためには、軽量化と月軌道発電衛星システム、月面上セグメントの構造と建設方法が重要となる。これが、実現できれば、経済産業省で開発を行っている宇宙太陽光発電衛星の技術開発成果の利用が可能となる。

月軌道発電衛星システムのサイズに大きく影響する要素の一つは放射部となるアンテナであり、以下で評価を行った。

送電距離とアンテナサイズの関係は式(1),(2)であらわされる。<sup>3</sup>

$$\eta = 1 - e^{-\tau^2} \quad (1)$$

$$\tau = \pi d_t d_r / 4\lambda D \quad (2)$$

$\eta$  : 電力伝送効率

レクテナの直径を 100m、1km としたときの送電アンテナの直径を図 2-66、図 2-67 に示し、また、表 2-73～表 2-75 にレクテナ直径を 1km、500m、100m としたときの送電アンテナ直径を示す。この時、式(1)の電力伝送効率を  $\eta = 0.9$  とした。送電距離は 10,000km から 10km で検討し、周波数は 5.8GHz、10GHz、50GHz、100GHz とした。

周波数が高くなれば、アンテナ径は小さくできる。送電距離 10,000km では、レクテナ直径が 1km の時、送電周波数が 5.8GHz では送電アンテナの直径は約 1km、送電周波数が 100GHz では 58m まで小さくできる。送電距離を 10km まで短くできれば、送電アンテナ径は 50GHz で 10cm、100GHz で 6cm まで小さくできる。レクテナ直径を 100m まで小さくすると、送電距離 10km の場合、50GHz で 1.2m、100GHz で 60cm となる。レクテナの直径を 500m とすると、送電距離 1,000km の時、50GHz で 23.2m、100GHz で 11.6m となり、送電距離 100km の時、50GHz

---

<sup>3</sup> 宇野、安達、“伝送効率最大開口面分布によるマイクロ波無線電力伝送の設計”，電子通信学会論文誌，vol.J66-B，no.8，pp.1013-1018，1963.



で 2.3m、100GHz で 1.2m となる。アンテナサイズのみから考えると、500m 程度のレクテナが実現できれば、20m 程度のアンテナでエネルギー伝送が可能となる。

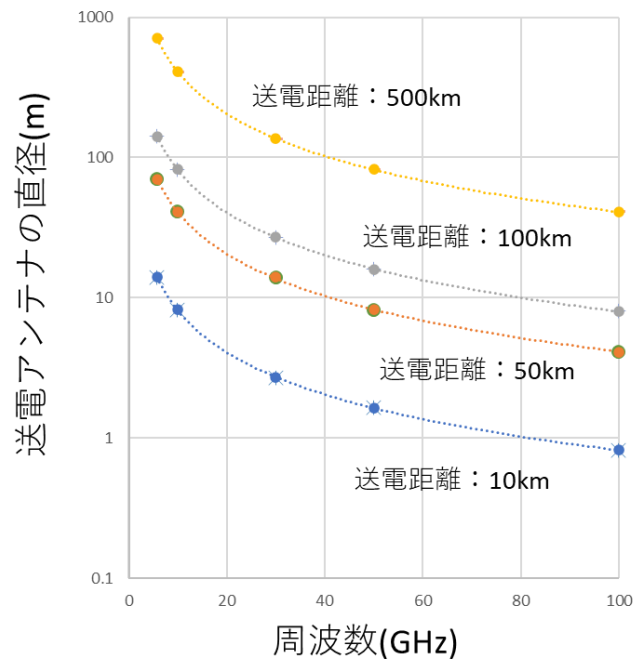


図 2-66 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:100m)

出所)JAXA/ISAS 作成

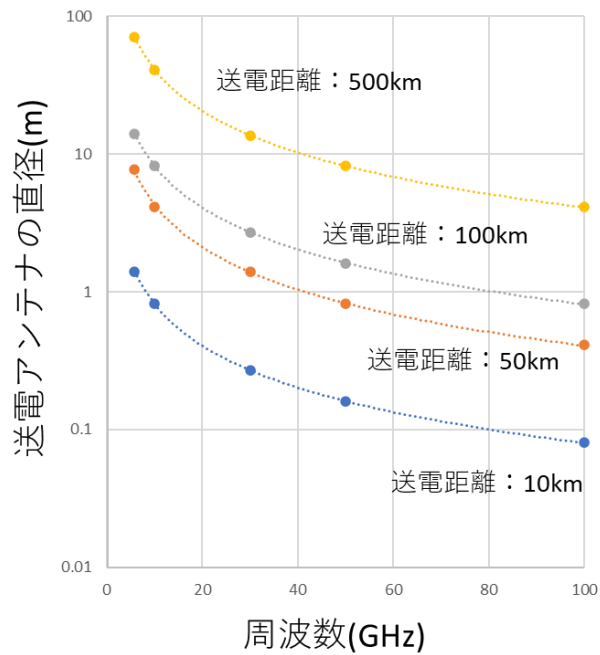


図 2-67 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:1000m)

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-73 レクテナの直径を 1km としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$ )

| 周波数<br>(GHz) | 送電距離<br>(km) | レクテナの直径<br>(m) | 送電アンテナの直径<br>(m) |
|--------------|--------------|----------------|------------------|
| 5.8          | 10000        | 1000           | 999.3            |
| 10           | 10000        | 1000           | 580.0            |
| 50           | 10000        | 1000           | 116.0            |
| 100          | 10000        | 1000           | 58.0             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 5000         | 1000           | 500.0            |
| 10           | 5000         | 1000           | 290.0            |
| 50           | 5000         | 1000           | 58.0             |
| 100          | 5000         | 1000           | 29.0             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 1000         | 1000           | 100.0            |
| 10           | 1000         | 1000           | 58.0             |
| 50           | 1000         | 1000           | 11.6             |
| 100          | 1000         | 1000           | 5.8              |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 100          | 1000           | 10.00            |
| 10           | 100          | 1000           | 5.80             |
| 50           | 100          | 1000           | 1.20             |
| 100          | 100          | 1000           | 0.60             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 10           | 1000           | 1.00             |
| 10           | 10           | 1000           | 0.60             |
| 50           | 10           | 1000           | 0.10             |
| 100          | 10           | 1000           | 0.06             |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-74 レクテナの直径を 500m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率  $\eta=0.9$ )

| 周波数<br>(GHz) | 送電距離<br>(km) | レクテナの直径<br>(m) | 送電アンテナの直径<br>(m) |
|--------------|--------------|----------------|------------------|
| 5.8          | 10000        | 500            | 1998.7           |
| 10           | 10000        | 500            | 1159.2           |
| 50           | 10000        | 500            | 231.8            |
| 100          | 10000        | 500            | 115.9            |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 5000         | 500            | 999.3            |
| 10           | 5000         | 500            | 579.6            |
| 50           | 5000         | 500            | 115.9            |
| 100          | 5000         | 500            | 58.0             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 1000         | 500            | 199.9            |
| 10           | 1000         | 500            | 115.9            |
| 50           | 1000         | 500            | 23.2             |
| 100          | 1000         | 500            | 11.6             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 100          | 500            | 20.00            |
| 10           | 100          | 500            | 11.60            |
| 50           | 100          | 500            | 2.30             |
| 100          | 100          | 500            | 1.20             |
|              |              |                |                  |
| 5.8          | 10           | 500            | 2.00             |
| 10           | 10           | 500            | 1.20             |
| 50           | 10           | 500            | 0.20             |
| 100          | 10           | 500            | 0.10             |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-75 レクテナの直径を 100m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率  $\eta=0.9$ )

| 周波数<br>(GHz) | 送電距離<br>(km) | レクテナの直径<br>(m) | 送電アンテナの直径(m) |
|--------------|--------------|----------------|--------------|
| 5.8          | 10000        | 100            | 9993.4       |
| 10           | 10000        | 100            | 5796.1       |
| 50           | 10000        | 100            | 1159.6       |
| 100          | 10000        | 100            | 597.6        |
|              |              |                |              |
| 5.8          | 5000         | 100            | 4996.7       |
| 10           | 5000         | 100            | 2898.1       |
| 50           | 5000         | 100            | 579.6        |
| 100          | 5000         | 100            | 289.8        |
|              |              |                |              |
| 5.8          | 1000         | 100            | 999.3        |
| 10           | 1000         | 100            | 579.6        |
| 50           | 1000         | 100            | 115.9        |
| 100          | 1000         | 100            | 58.0         |
|              |              |                |              |
| 5.8          | 100          | 100            | 99.90        |
| 10           | 100          | 100            | 58.00        |
| 50           | 100          | 100            | 11.60        |
| 100          | 100          | 100            | 5.80         |
|              |              |                |              |
| 5.8          | 10           | 100            | 10.00        |
| 10           | 10           | 100            | 5.80         |
| 50           | 10           | 100            | 1.20         |
| 100          | 10           | 100            | 0.60         |

出所)JAXA/ISAS 作成

#### d. RF 増幅器、デバイス

電力増幅器に関しては、半導体デバイスと電子管デバイスがある。前述のように半導体デバイスはミリ波領域では効率、出力ともに課題が多い。一方で電子管デバイスは、放送、通信、レーダー、加熱などの分野で研究開発がすすめられ、核融合、加速器などの応用分野で高性能化が進められている。進行波管や後進波管、マグネトロンは、通信衛星やレーダーに使用され、数 GHz から 40GHz までの周波数で、数 10W から数 kW の出力を持つ製品化がなされている。NEC ネットワーク・センサー製の Ka 帯進行波管増幅器(TWTA)は、周波数 27.5GHz~30.0GHz、定格出力 250W(CW)、効率 40%、重量 2.8kg、サイズは 400 x 70 x 64 mm である。また、近年発表された NEC ネットワーク・センサー製の Q 帯 TWTA は周波数 42.5GHz~45.5GHz、定格出力 190W(CW)、効率 37%、重量 4.3kg、サイズは 400 x 70 x 70 mm である。

ジャイロトロンは、電子サイクロトロン共鳴メーザーの原理を利用するマイクロ波発振管である。キャノン電子デバイスの核融合用に開発されたジャイロトロンは、周波数 170GHz、出力 1MW、効率 50%、持続時間 300s(5kHz 繰り返し)で高さ 3m、重量 800kg である。

マグネトロンは、パルスマグネトロンであれば周波数 36GHz~220GHz の範囲においてピーク出力 1kW~120kW、平均出力 0.3W~120W の開発事例があるが、連続波(CW)マグネトロンに関してはミリ波帯以上の周波数での開発実績は他の電子管と比較して乏しい。

以上のように、ミリ波帯電子管の研究開発は TWTA およびジャイロトロンにおいて進んでおり、特に TWTA は人工衛星に搭載される送信管として開発されている観点からも宇宙実績に対する優位性がある。

月用宇宙太陽光発電衛星において、数百mサイズの送電システムの実現が可能であれば、経済産業省事業で開発を行った高効率のRF増幅装置の応用が可能となる。

月周回軌道上の太陽光発電衛星からの無線電力送電を 5.8GHz 帯で行った場合の部品点数・コストの見積りを行ってみる。最小ユニットとして1メートル四方のパネルを考えると、この最小ユニットで受けられる太陽エネルギーの最大値は太陽定数で表され、約1.37kW である。これを電力変換効率 20%の太陽電池で直流エネルギーに変換すると 280W/m<sup>2</sup>の DC 出力が得られる。なお、周波数は 5.8GHz を想定し、0.8λ 間隔(4cm)でアンテナ素子を配置するとアレイ素子数は 625 個/m<sup>2</sup>となり、1アレイ素子当たりの取り扱い電力は 0.5W となる。太陽電池効率 20%は少し低めなのと、現在行われているように4アンテナ素子を1増幅器モジュールで駆動する場合を考慮すると、RF増幅器の出力の守備範囲は 0.5W~2.5W程度となる。

次に 100m四方(最小ユニット 10000 個)を1サブシステムとすると、アレイ素子数は 625 万個/サブシステムとなり太陽光受光パワーは  $1.37 \times 10^7$  W/サブシステムとなる。このとき無線送電効率を 40%(増幅器効率 70%、レクテナ効率 70%、アンテナビーム効率 80%)とすると受電出力は 2.8MW/サブシステムとなる。原子力発電1基分の 100 万キロワット=10<sup>9</sup>Wの受電出力を得るには 360 サブシステムが必要になる。アレイ素子数は 22 億 5 千万個となる。

現状では4アレイ素子を一個の増幅器モジュールで駆動しているが、給電線が長くなり 1dB 以上の余計な損失が発生するばかりでなく、4素子アレイアンテナの入力インピーダンスが 50Ω を保つ帯域が狭くなり、増幅器の安定性で不具合がでる可能性がある。これは高周波電源を始めとして高効率増幅器に用いるトランジスタは条件付き安定領域(MSG 領域)で使用することが前提であり、増幅器の設計

は負荷が全帯域で  $50\Omega$  になることを条件として安定化を計っているからである。すなわち、アンテナ入力インピーダンスが全反射することを想定していないのである。このような場合にはアイソレータを用いるが、重量や寸法の増大につながる。

そこでこの問題を回避するため、1アレイ素子当たりの1RF モジュールとして(5G 移動体通信用基地局はこのようになっている)、GaNHEMT 終段増幅器×1、GaAsMMIC ドライバー増幅器×1を1組として、サブシステム当たり 625 万個の終段増幅器と同数のドライバー増幅器の均一な生産を考える。

MMIC の製造は、回路設計とウエハー委託製造で完全に分業化されている。MMIC の製造では、レチクルと呼ばれる原画に回路パターンを配置するまでが回路設計の分担となる。このレチクルは約 10mm 角の露光原版(映画の投影フィルムに相当)で半導体ウエハー表面にステッパーにより縮小投影露光(5 対 1 或いは 10 対 1)されパターン転写を行う。使用するウエハーは GaAs 基板の場合は直径 6 インチ(面積  $S_w=176\text{ cm}^2$ )のものが標準で、GaN ウエハーの場合は 4 インチ(面積  $S_w=78\text{ cm}^2$ )が現在の標準である。このため回路面積  $S_c$  が 1mm 角( $0.01\text{ cm}^2$ )の場合 GaAsMMIC では最多 17600 個の回路が一枚のウエハーから得られ、GaNMMIC では最多 7800 個の回路が得られる。またレチクルショットの数は、GaAs の場合 176 ショットであり、GaN の場合は 78 ショットとなる。このため、レチクル内の回路を全て別の回路にした場合は、それぞれ同じ回路が GaAs の場合は最少 176 個得られ、GaN では最少 78 個得られることになる。MMIC の半導体ウエハー構成を図 2-68 に示す。

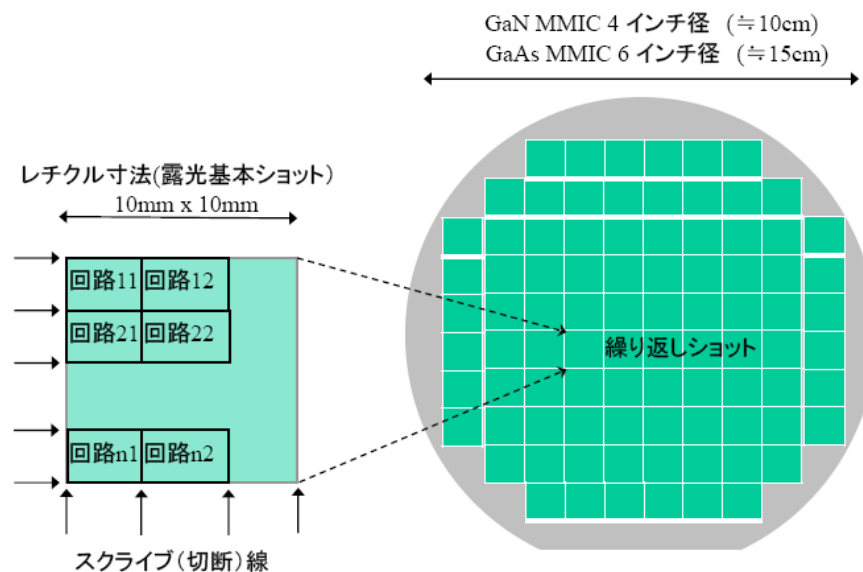


図 2-68 MMIC の半導体ウエハー構成

出所)電気通信大学作成

ウエハー1枚の価格  $C_w$  の目安は、GaAs では 5 万円、GaN では格子整合基板である SiC の価格に引きずられ 50 万円程度と言われている。また半導体プロセス(前工程+後工程)に係るコスト  $C_p$  は工場の減価償却、薬品・ガス購入価格、金属価格等などでケースバイケースであるがウエハー1枚当たり GaAs、GaN とともに概ね 40 万円程度と言われている。



回路1つ当たりの製造原価  $K_C$  は(3)式のようになり、例えば 1mm 角の回路の場合、GaN では 115 円/mm<sup>2</sup> で、GaAs の場合は 25 円/mm<sup>2</sup> となる。これを半導体の土地の値段ともいうが、同じ性能なら GaAs チップの製造原価は、GaN の五分の一である。また同じ性能を小型回路で設計する能力は、利益を生む能力となる。

$$K_C = \frac{C_W + C_P}{S_W/S_C} \quad (3)$$

ファンドリーサービス会社は(3)式の右辺の分子を概ね 10 倍(トランジスタの大信号高精度モデルの提供、プロセス投入基準の審査、設備の維持更新、新規プロセスの更新準備、納期・輸出入管理が必要)にして販売しているので、委託生産を利用する側のコストは GaN で 1150 円/mm<sup>2</sup>、GaAs で 250 円/mm<sup>2</sup> となる。

ドライバー用 GaAsHEMT MMIC のチップサイズを 3mm<sup>2</sup> と仮定した場合(1 ウエハーから 5870 個作れる)、1サブシステム(100m×100m、2800kW 出力)当たりの必要 GaAsHEMT ウエハー枚数は 1064 枚となり、さらに終段 GaNHEMT 増幅チップのサイズを 1mm<sup>2</sup> とすると(1ウエハーから 7800 個作れる)、GaNHEMT の必要ウエハー枚数は 833 枚となり合計で、現時点での単数ウエハー発注ベース価格(GaAs:500 万円/枚、GaN:700 万円/枚)で見積ると合計 112 億円となる。半導体委託生産会社の生産コスト(利益なし)は前述したように、この十分の一程度の 11 億円程度と考えられるが、製造用のレチクル、デザインルールチェック、設計支援などは全て共通であるので、実際の購入価格は 15 億円～30 億円程度と考えるのが妥当であろう。

図 2-69 および図 2-70 は電気通信大学で開発した 5.8GHz 帯無線電力伝送用 3W 出力、38dB 利得、67%PAE 増幅器モジュールの写真および特性で、図 2-71 がこれをオリエントマイクロウェーブ社で量産仕様に変更したモジュール写真である。これらのモジュールでは気密封止されておらず温度サイクル中に空気中の水蒸気による水滴がつき信頼性上の問題がある。

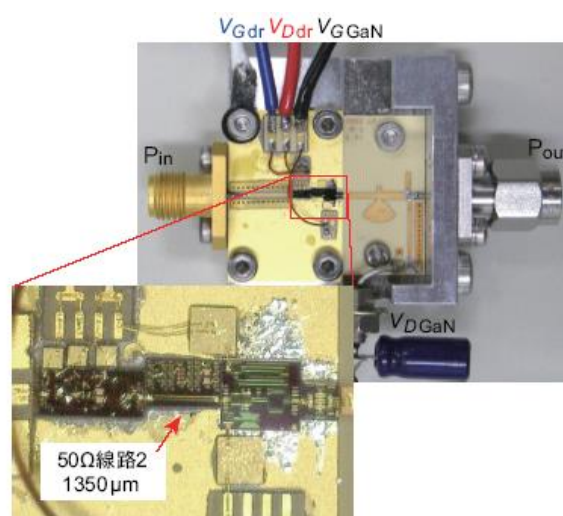


図 2-69 電気通信大学で試作した無線電力伝送用 5.8GHz 帯 GaAsHEMT ドライバー付 GaNHEMT 電力増幅器モジュール

出所)電気通信大学作成

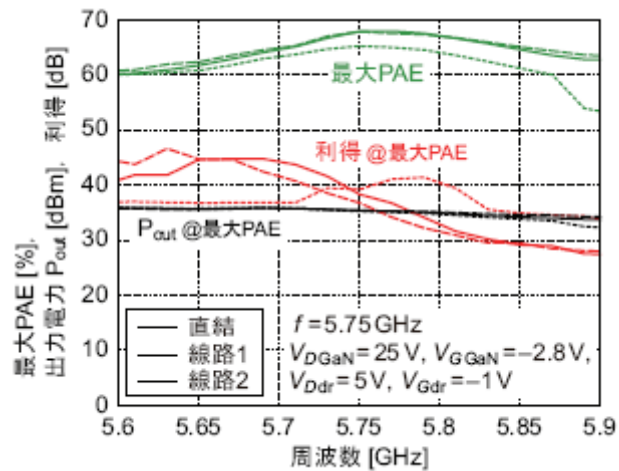


図 2-70 電気通信大学で開発した電力増幅器モジュールの特性

出所)電気通信大学作成

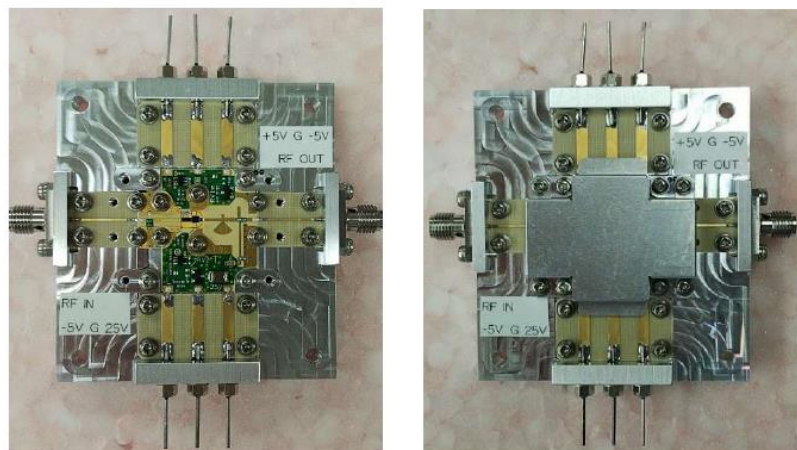


図 2-71 オリентマイクロウェーブ社でモジュールを量産仕様に変更した写真

出所)電気通信大学作成

通常は宇宙用など高信頼度を要求される用途では、図 2-72～図 2-74 で例示するように、パッケージ内に半導体チップを窒素中でろう付けしたのち、蓋を接着し、水蒸気を含まない状態で気密封止する。しかしながら、パッケージをモジュールサイズに合せて特注する必要があり、非常に高価格となる。また、重量も増すため、新たに低価格、軽量の気密封止実装方法を考える必要がある。なお、これまでの宇宙用機器は全てこのような形態をとっている。

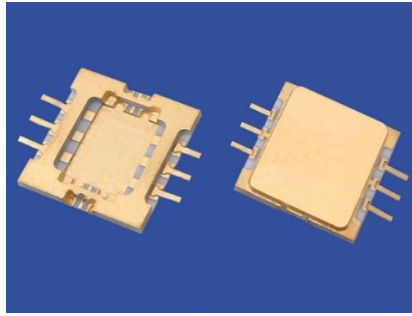


図 2-72 京セラのセラミックパッケージ

出所)電気通信大学作成

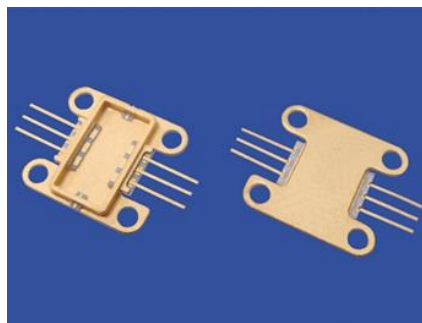


図 2-73 京セラのメタルパッケージ

出所)電気通信大学作成



図 2-74 京セラのパーティションメタルパッケージ

出所)電気通信大学作成

このような状況の中、米国 NXP 社では図 2-75 のような RF モジュール実装を開発している(放熱と気密封止を低価格で実現、1モジュール 10 米ドル程度)。このモジュールはアンテナと高周波モジュールを一体化実装する集積化アンテナの形態をとっており、3.4~4.1GHz 帯で、出力 48dBm、9dB 出力バックオフ効率 45%、利得 30dB、最大出力時効率 60%程度の 5G(第五世代移動体通信)ビームフォーミング用 GaN モジュールで、気密封止はアンテナ素子を含めてプラスチックカバーで保たれ、アレイアンテナと近接して高調波フィルター込みで接続でき(アイソレータ不要)、ヒートシンク直付けで熱抵抗も低い。ドライバーには GaN MMIC を用いている。国内ではスボトンテクノロジー(旧パナソ

ニック、現台湾資本)が同等のモジュール GaN on SiC より低価格な GaN on Si を使用して生産しており、月周回軌道応用に関しても今後このような民生品製造メーカーとの共同開発が必要なレベルに達している。このように月面周回軌道上 SSPS においても、軽量低価格で必要にして十分な性能をもつ実装方法を考案する必要がある。特に調整した RF 性能に影響を与えない実装方法開発が望まれ、アンテナ、給電線、高周波フィルター、増幅器をバラバラに開発するのではなく、一体化した集積化アンテナとしての研究開発を実施する必要がある。

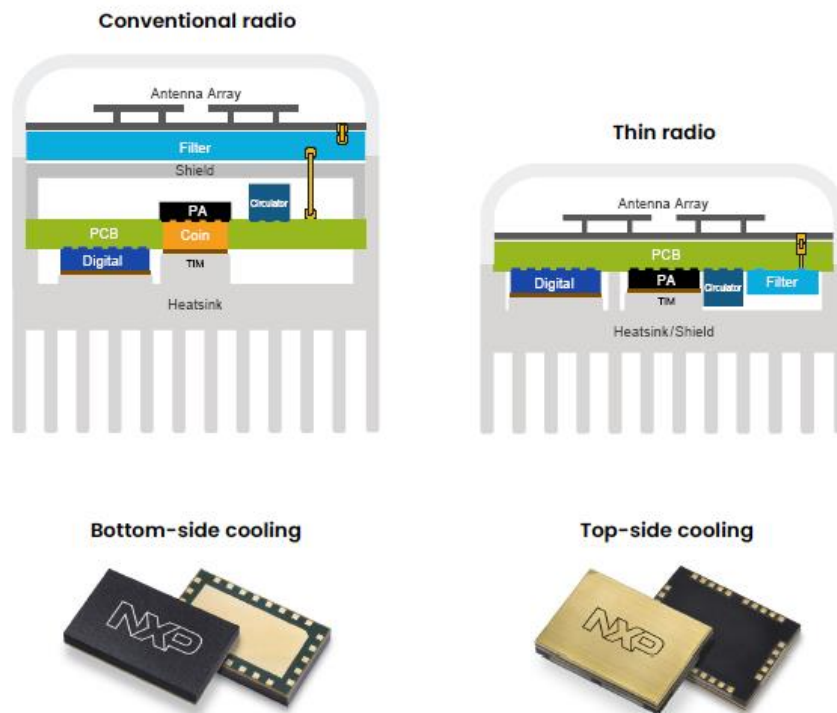


図 2-75 米国 NXP 社5G 通信用 RF モジュールの実装方法

出所)電気通信大学作成

図 2-76 は昨年度報告した GaN デバイス、GaAs デバイスの長期信頼性に関する図表に WIN セミコンダクタ社より入手した GaAsHMET(電気通信大学で使用中)の信頼性データを赤字でプロットしたものである。昨年度は GaAsHEMT の信頼性データに不安が残ったが、今回のデータではチャンネル温度 125℃で MTTF は 108時間、チャンネル温度 321℃で 100 時間となっており GaN デバイスと遜色ない値となっている。

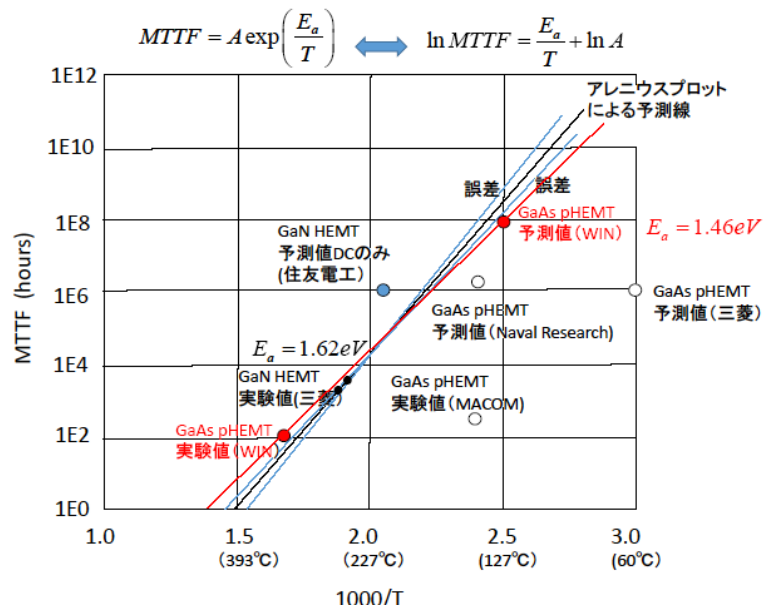


図 2-76 GaNHEMT と GaAspHEMT の長期信頼性予測値

出所)電気通信大学作成

### e. アンテナ

アンテナに関しては、電子管デバイスと組み合わせた場合、スロットアレイアンテナのような開口面アンテナが候補の一つとなる。スロットアレイアンテナのコンセプト図を図 2-77 に示す。また、図 2-78 に小型 SAR 衛星用に開発されたスロットアレイアンテナを示す。

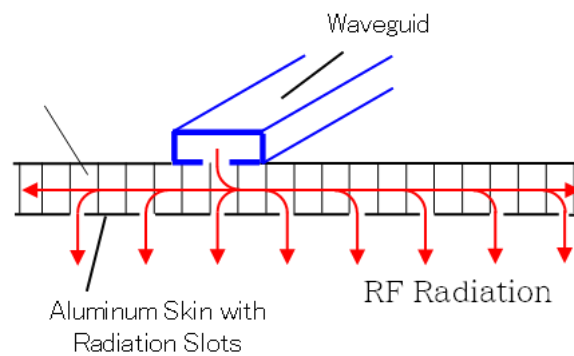


図 2-77 スロットアレイアンテナのコンセプト図

出所)JAXA/ISAS 作成



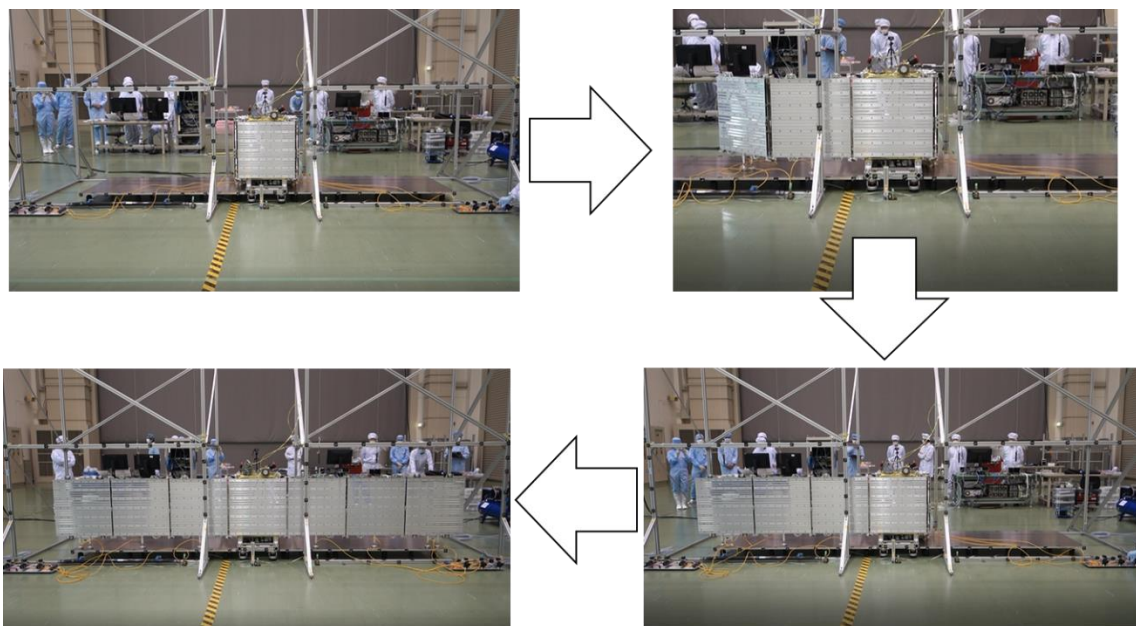


図 2-78 小型 SAR 衛星用展開型アンテナ

出所)JAXA/ISAS 作成

小型 SAR 衛星用展開型アンテナはパネル構造となっており、パネル展開により大面積アンテナを実現している。このアンテナは X 帯用であるため、ミリ波で用いるには高周波数化が必要である。しかし、パネル形状のモジュラー構造が可能であるため、収納性に優れ、軌道上で展開して大面積アンテナを形成することは容易と考える。

JAXA では、30m 級の大型平面アンテナの実現を目指した開発が行われており、HTV-X を用いた DELIGHT プロジェクトが進められている。DELIGHT の概念図を図 2-79 に示す。宇宙空間において、20~50m クラスのパネルモジュールによる平面アンテナ形成技術は、近未来において実現性の高いレベルにある。

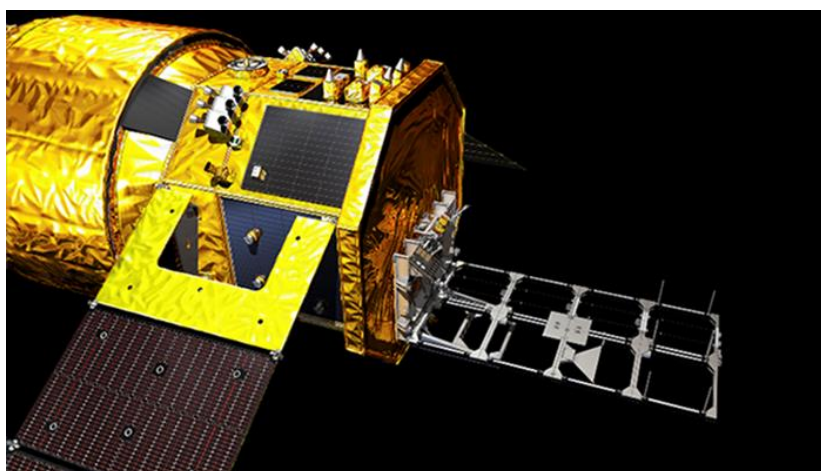


図 2-79 展開型軽量平面アンテナの軌道上実証 DELIGHT

出所)JAXA ホームページ



TWTA に関しては、すでに実用化されている範囲の少し高い領域を目標として 50GHz に設定した場合の、レクテナ部での電力密度を図 2-80 に示す。また、アンテナサイズを図 2-81 に示す。正方形のアンテナを仮定し、横軸に送電側の一边の長さを示した。

送電側が一边 25m のアンテナの場合、レクテナ側は一边400m 程度となる。一方、送電側を一边 100m とするとレクテナは一边約 113m となる。この時、レクテナ部での電力密度は  $0.2\text{mW}/\text{cm}^2 \sim 2\text{mW}/\text{cm}^2$  と微小電力密度となる。

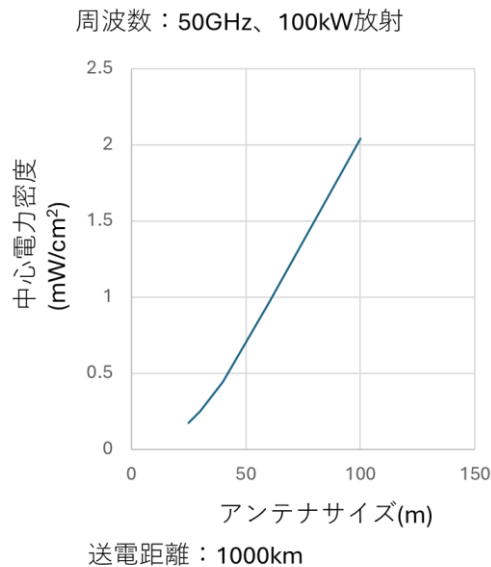


図 2-80 送電距離と電力密度

出所)JAXA/ISAS 作成

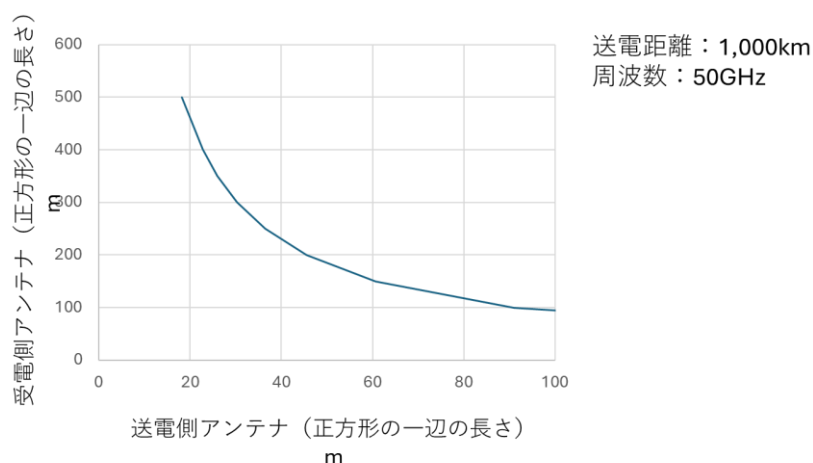


図 2-81 送電側・受電側アンテナのサイズの関係

出所)JAXA/ISAS 作成

## f. 月軌道発電衛星システム概念のまとめ

以上を踏まえた月軌道発電衛星システムの概念図とシステム諸元を図 2-82 と表 2-76 に示す。

送電システムは、25m 角の送電アンテナを仮定した場合、2500 モジュールから構成される。平米当たりの送電電力は約 220W となる。2500 モジュールはアレイ化するが、電気的にはビームの形状補正程度であり、ビームの角度制御は衛星の姿勢制御かアンテナの機械的制御で行う。

遠月面点高度 1,000km、近月面点高度 100km とした場合、ビーム掃引角が $\pm 45$  度とすると一周回約 163 分中 15% 程度の送電時間となる。送電周波数を 50GHz とすると直径 500m と 100m のレクテナへ送電する場合は、送電アンテナ直径は 23m と 116m 程度となる。レクテナ部直径は、斜め入射を考慮すると 700m あるいは 140m 程度となる。5機で 100kW 送電する場合、1 機あたり 136kW 送電する必要がある。エネルギー変換効率を 50% とすると、32m $\times$ 32m の太陽電池パネルが必要となる。太陽電池アレイの質量積算を表 2-77 に示す。超軽量の太陽電池アレイの開発が必要である。展開部の一例を図 2-83 に示す。また、ミウラ折りの展開模擬実験の様子を図 2-84 に示す。太陽電池の変換効率は 35% と仮定した。加えて、衛星には、大型のバッテリーが必要である。DOD50% の運用を考えると、1,268kWh の容量が必要である。日産リーフのバッテリー 40kWh<sup>4</sup> タイプ相当を搭載する場合、32 台必要となり、質量は 9.6 トン程度となる。

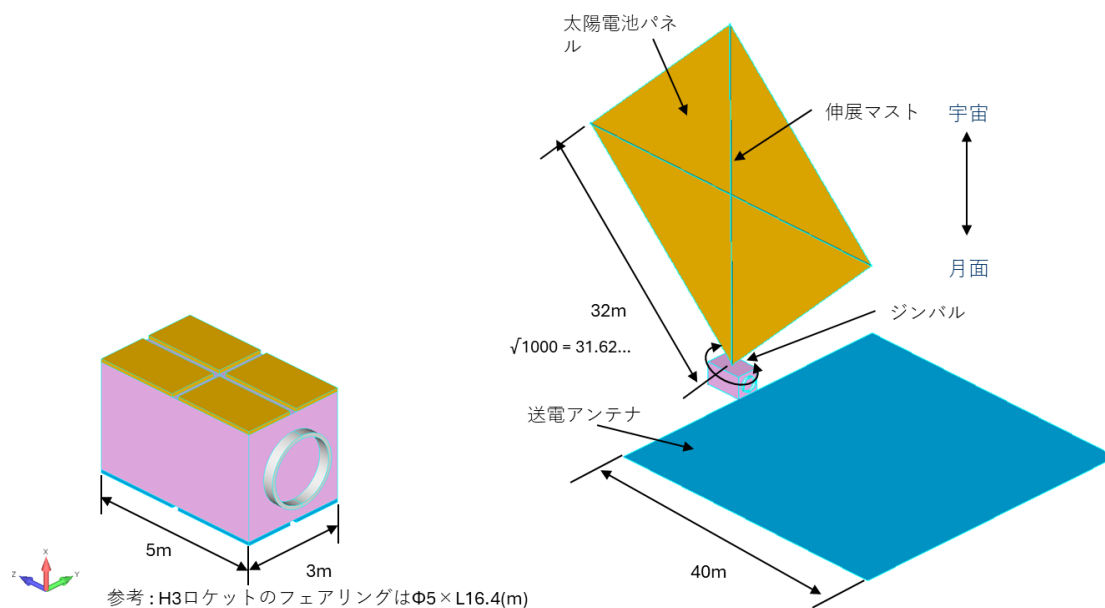
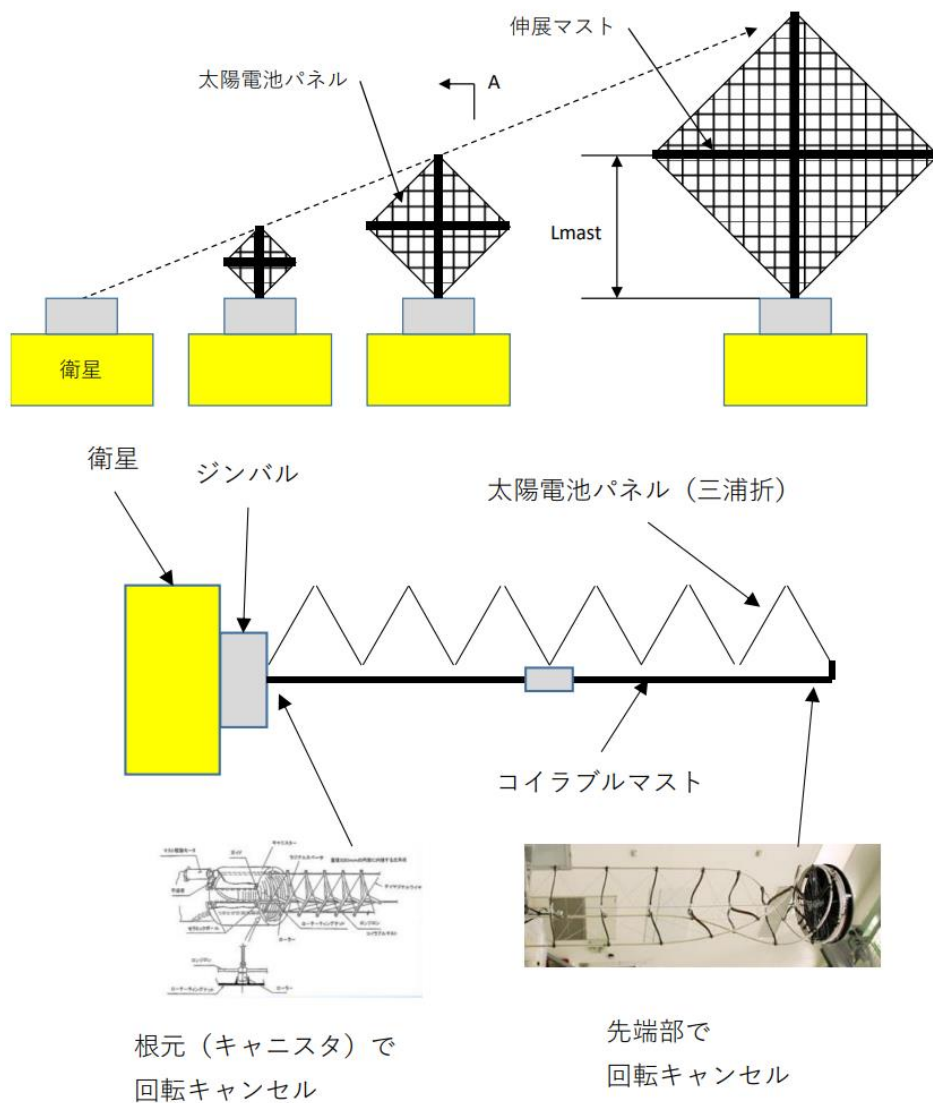


図 2-82 月用太陽発電衛星の概念図

出所)JAXA/ISAS/日本飛行機作成

<sup>4</sup> <https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf/charge/battery.html>



展開アクチュエータは例を示す。宇宙実績を考慮した軽量な一軸展開構造物を選定する。

図 2-83 軽量展開アクチュエータの一例

出所) 日本飛行機作成

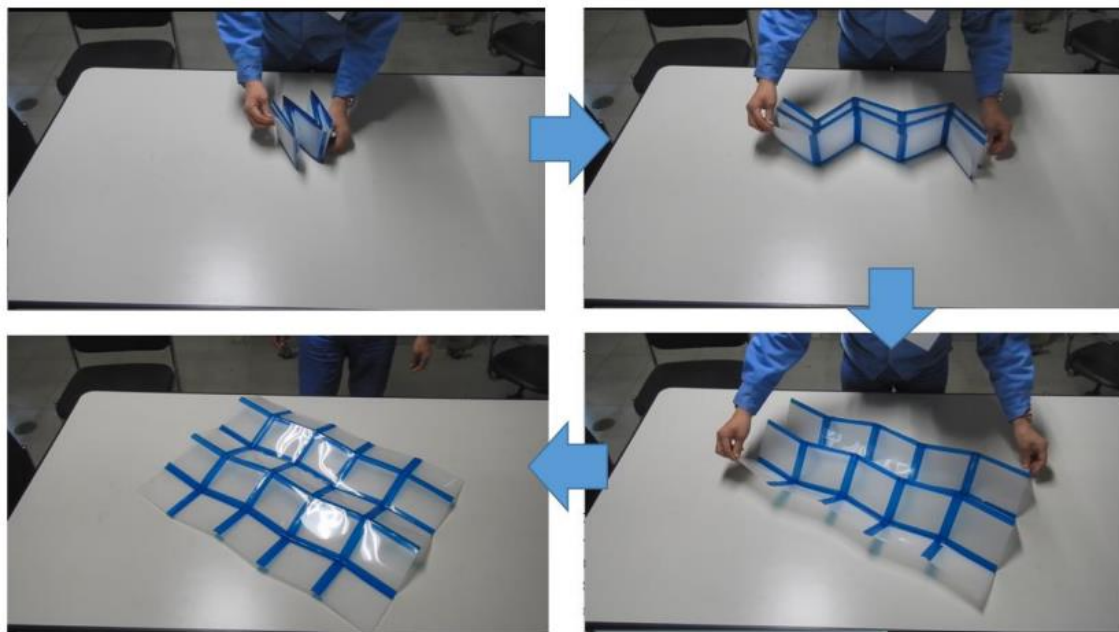


図 2-84 ミウラ折りをを用いた展開実験

出所)日本飛行機作成

表 2-76 軌道上セグメントの諸元

| 項目          | 値                | 単位      | 備考                          |
|-------------|------------------|---------|-----------------------------|
| 送電距離        | 1000             | km      | 遠月面点高度:1000km, 近月面点高度:100km |
| 送電電力量       | 981600           | kJ/周回   |                             |
| 機体数         | 5                | 機       |                             |
| 一機当たりの送電電力  | 136.3            | kW      |                             |
| 送電周波数       | 50               | GHz     |                             |
| 送電アンテナ径     | 23/50            | m       |                             |
| 受電設備の直径     | 500/150          | m       |                             |
| ビーム制御角度     | ±45              | 度       |                             |
| 一機当たりの発電電力  | 200              | kW      | DC-RF 変換効率 50%              |
| 太陽電池アレイのサイズ | 32 x 32<br>約 400 | m<br>kg | 太陽電池の変換効率 35%               |
| バッテリー容量     | 1268             | kWh     | DOD50%                      |
| バッテリー質量     | 9.6              | t       | リーフのバッテリー40kWh-->303kg      |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-77 太陽電池アレイの質量積算

| 項目     |             |          | 記号                  | 単位                | 値     | 重量値        | メモ                                                                                     |
|--------|-------------|----------|---------------------|-------------------|-------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| アレイ    | 寸法特性        | 辺長       | L_SAP               | m                 | 32.0  | -          | $\sim\sqrt{1000\text{m}^2}$                                                            |
|        |             | マスト長さ    | L_MAST              | m                 | 22.6  | -          | $=L_{\text{SAP}}/\sqrt{2}$                                                             |
|        |             | 面積       | A_SAP               | m <sup>2</sup>    | 1024  | -          | $=L_{\text{SAP}}^2$ , 目標1000m <sup>2</sup>                                             |
|        | 太陽電池        | 名称       | Titan-6 Array       |                   | -     | -          | -                                                                                      |
|        |             | 発電量面密度   | p_SC                | W/m <sup>2</sup>  | 159.8 | -          | $=100\text{W}/(1.038*0.603)$                                                           |
|        |             | 電力密度     | m_SC                | kg/100W           | 36.6  | -          |                                                                                        |
|        |             | 電力       | P_SC                | kW                | 163.6 | -          | $=A_{\text{SAP}} \times p_{\text{SC}}$ , 要求は100kW級                                     |
|        |             | 重量       | M_SC                | kg                | -     | <b>60</b>  | $=P_{\text{SC}} \times m_{\text{SC}}/100$                                              |
|        | サブ<br>ストレート | 比重       | $\rho_{\text{sub}}$ | kg/m <sup>3</sup> | 1800  | -          | CFRP                                                                                   |
|        |             | 板厚       | t_sub               | mm                | 0.15  | -          | 過去設計例、クロス材1枚                                                                           |
|        |             | 肉抜き効果    | r_sub               | %                 | 40    | -          | 中央部を抜く                                                                                 |
|        |             | 重量       | M_sub               | kg                | -     | <b>111</b> | $=\rho_{\text{sub}} \times t_{\text{sub}} \times A_{\text{SAP}} \times r_{\text{sub}}$ |
| 展開機構   | 伸展<br>マスト   | SFUマスト重量 | M_SFU               | kg                | 11.2  | -          | 実績値、コイラブルマスト                                                                           |
|        |             | SFUマスト長さ | L_SFU               | m                 | 9.8   | -          |                                                                                        |
|        |             | マスト単体重量  | m_MAST              | kg/本              | 30    | -          | $\sim(M_{\text{SFU}}/L_{\text{SFU}}) \times L_{\text{MAST}}$                           |
|        |             | マスト本数    | N_MAST              | 本                 | 4     | -          | 十文字の配置                                                                                 |
|        |             | マスト合計    | M_MAST              | kg                | -     | <b>120</b> | $=m_{\text{MAST}} \times N_{\text{MAST}}$                                              |
|        | キャニスタ       | キャニスタ重量  | N_CA                | kg                | -     | <b>20</b>  | 暫定値                                                                                    |
|        | 制御系         | 制御ボックス重量 | M_E                 | kg                | -     | <b>10</b>  | 暫定値                                                                                    |
| 保持解放機構 |             |          | M_HRM               | kg                | -     | <b>20</b>  | 暫定値                                                                                    |
| ジンバル   |             |          | M_GIM               | kg                | -     | <b>20</b>  | 暫定値                                                                                    |
| その他    |             |          | M_MICS              | kg                | -     | <b>20</b>  | 暫定値(ハーネスなど)                                                                            |
| 合計     |             |          | M_ARRAY             | kg                |       | <b>381</b> |                                                                                        |

出所)日本飛行機作成

## 2) 月面受電レクテナに係る検討

月面受電レクテナの検討にあたり、月周辺軌道太陽光発電システム及び月面上での送電システムの検討(軌道上・地上受電システム)の検討結果を確認した。まず、月周辺軌道に関する昨年の検討内容を概観し、仮定した軌道の妥当性について述べる。次に、月周辺軌道からの電力伝送に係る検討として、送信アンテナサイズ、受信アンテナサイズから、空間伝送効率を算出する手法に関して述べる。この手法を用いて、(2)以降の実証候補となる各項目について効率、レクテナ整流回路入力電力等を計算し、検討結果を該当箇所に記述した。この検討の中で、整流回路入力電力がマイクロワットクラスとなり、効率的な動作に支障をきたすため、アンテナ部での利得向上を図った、月面上のレクテナアレイに関して新たな構成を考案したので、その部分についても詳しく紹介する。

すなわち、月面上設置レクテナアレイに関する要求としては①運搬の容易性②軽量化を考慮すると同時に、電力密度が1平米あたりマイクロワットクラスであるため、③アンテナ素子の利得を使った大電力化を行う必要がある。アンテナ素子の高利得化を行う場合、素子の方向制御をおこなう必要があるが、月面設置を考慮して、④なるべく簡易な方向制御機構を設ける必要がある。

特に③、④の条件はパラボラアンテナ等の従来のアンテナの利用においては問題となる部分であり、素子数が多く、同時に同じ方向を向かせないと行けない点や、月の極地域に設置する場合は月面上からみた衛星の軌道が30日で360度変化するため、1軸ではなく2軸の制御を行う必要がある点が問題となる。

このことを解決するため、アンテナ素子として平板状に構成できる平面レンズアンテナ(Fresnel Zone Plate Antenna(FZP))の採用を提案する。このアンテナは平面レンズと一次放射器で構成されるが、焦点が2つあるため、レンズの裏側に平面反射板を設置し、レンズの面の前側に一次放射器を設置することで焦点を1つにして、効率を向上できる。また、レンズの中心線と一次放射器の位置をずらしてオフセットさせることで、ビーム方向を変化させることができ、衛星の追尾に有効である。また、パラボラアンテナ等を採用した場合、駆動部はアンテナ1つに対して1個必要であるのに対し、FZPは同一平面上に多数のアンテナを作成し、アンテナアレイを構成することができるため、アンテナが多数となっても駆動機構は1つで済む。さらに、後述するように想定される焦点位置に多数の一次放射器レクテナを作り、スイッチ切り替えを行うことで、駆動機構を完全になくすことも可能である。これらの点は、寸法重量との制限の多い月面への輸送コストを低減させる効果があるため、今後の開発が期待される。

#### **a. 軌道及び発電衛星に関する整理**

ここでは、月面受電レクテナの検討の前提となる月周辺軌道に係る検討結果を確認する。多くの部分は2023年度の検討であるが、軌道の妥当性に関してまとめておく必要があるので掲載する。

シャックルトンクレーター、候補地1、候補地2について、月の極軌道を作成し、必要となるSSPS機体数を計算している。近月面高度100km、遠月面高度500km、1,000km、5,000km、10,000kmとなる極楕円軌道でシミュレーションを行った。(RAANは90度とした)作成した軌道の全体図を図2-85に示す。

上記のシミュレーションを行った軌道についてはSTKを用いて作成した。作成方法は”Orbit Wizard”の”Type”を”Orbit Designer”に変更した。”Orbit Designer”では軌道6要素の初期値を打ち込むことで軌道を作成することができるため、上記の所望の高度を満たす軌道となるよう初期値を設定した。軌道作成の初期値を図2-86から図2-89に示す。



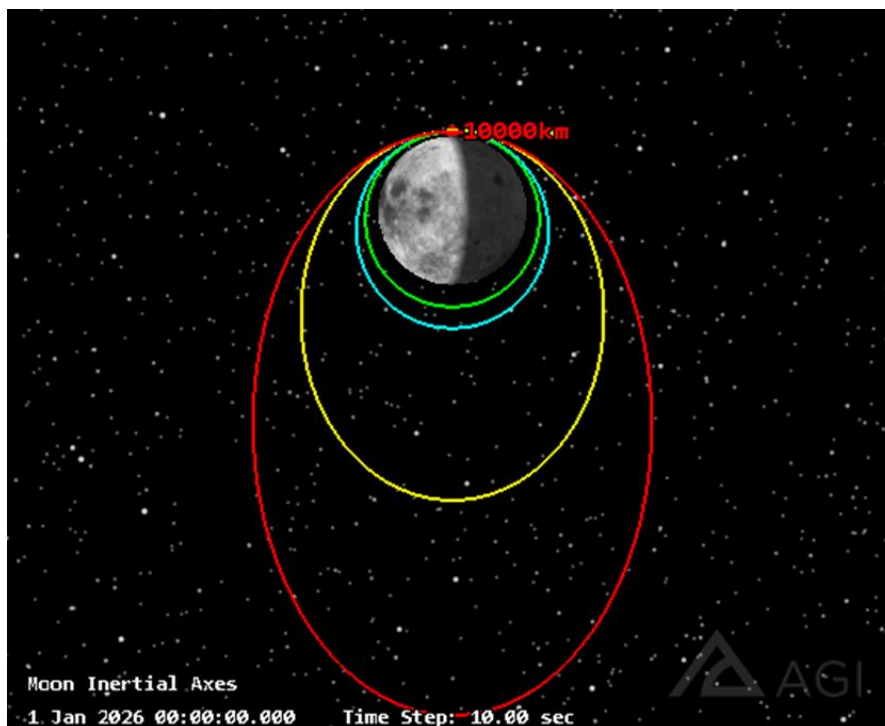


図 2-85 月周回軌道の全体図

出所)東洋大学作成

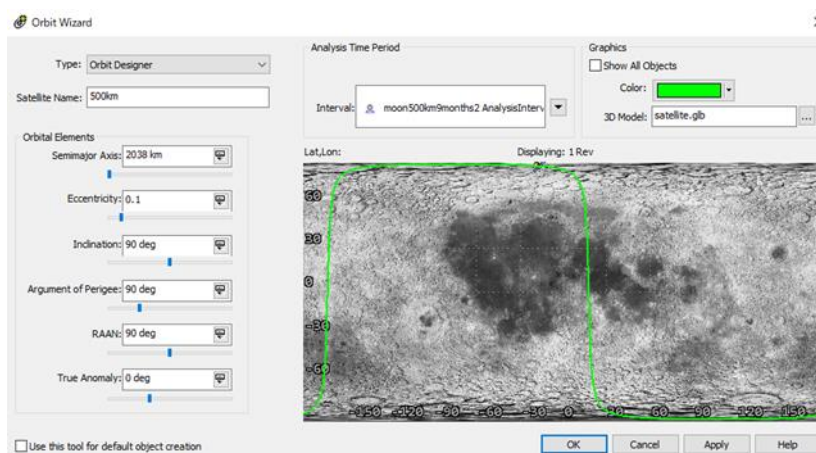


図 2-86 近月面高度 100km 遠月面高度 500km の軌道の初期値

出所)東洋大学作成

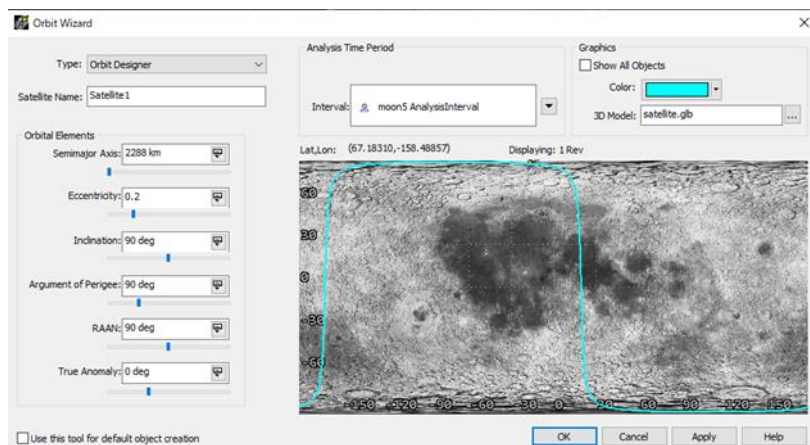


図 2-87 近月面高度 100km 遠月面高度 1,000km の軌道の初期値

出所)東洋大学作成

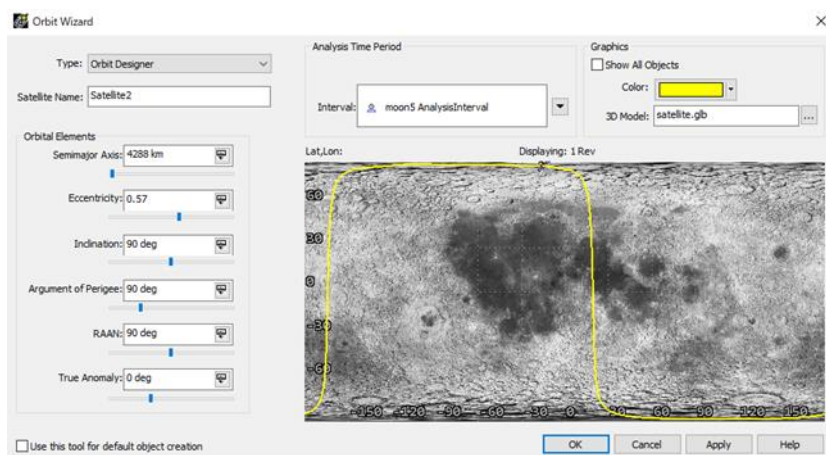


図 2-88 近月面高度 100km 遠月面高度 5,000km の軌道の初期値

出所)東洋大学作成

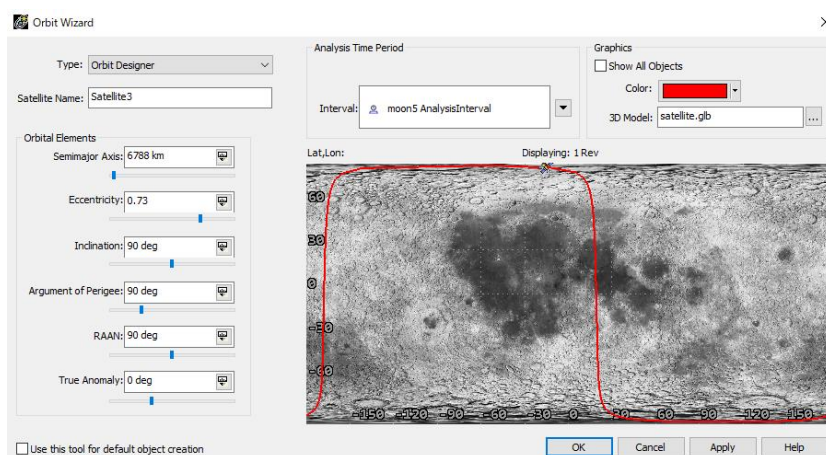


図 2-89 近月面高度 100km 遠月面高度 10,000km の軌道の初期値

出所)東洋大学作成

## ア) 検討内容

各観測地点において、周期と可視時間より常に観測地点電力を送電することができる衛星が1機以上ある状態を保つのに必要な衛星の機体数を求めた。周期及び可視時間については下記に定義する。

- 周期: 最大仰角となる時刻から次に最大仰角となる時刻までの時間
- 可視時間: 各地点における可視範囲を衛星が飛行している時間
- 可視範囲: 各地点から衛星を見たときのある仰角からある仰角までの範囲

また、今回のシミュレーションでは可視範囲を 0 度から 0 度(以下 0 度の可視範囲とする)、45 度から 45 度(以下 45 度の可視範囲とする)として検討を行った。

## イ) 検討結果

上記の検討内容について、遠月面高度 500km、1,000km、5,000km、10,000km の軌道に対し、候補地1、候補地 2、シャックルトンクレーター の 3 つの観測地点について検討した結果を表 2-78 から表 2-80 に示す。

## ウ) 観測地点の座標

各候補地の座標を下記に示す。

- 候補地 1(-89.51, 280.65)
- 候補地 2(-85.21, 33.83)
- シャックルトンクレーター(-89.9, 0)

表 2-78 候補地1における周期、可視時間及び機体数

| 遠月面高度   | 最大 EI  | 周期       | 0 度の可<br>視時間 | 機体数 | 45 度の<br>可視時間 | 機体数  |
|---------|--------|----------|--------------|-----|---------------|------|
| 500km   | 84.735 | 8256.19  | 2061.11      | 4.0 | 646.5         | 12.7 |
| 1000km  | 84.195 | 9820.183 | 3571         | 2.7 | 1426          | 6.9  |
| 5000km  | 87.116 | 25189.72 | 18427        | 1.4 | 11945         | 2.1  |
| 10000km | 87.484 | 50145.45 | 43236        | 1.2 | 33294         | 1.5  |

出所)東洋大学作成

表 2-79 候補地2における周期、可視時間及び機体数

| 遠月面高度   | 最大 EI  | 周期       | 0 度の可<br>視時間 | 機体数 | 45 度の<br>可視時間 | 機体数   |
|---------|--------|----------|--------------|-----|---------------|-------|
| 500km   | 89.972 | 8257.05  | 2060.347     | 4.0 | 648           | 12.74 |
| 1000km  | 88.914 | 9822.056 | 3564         | 2.8 | 1427          | 6.9   |
| 5000km  | 89.569 | 25216.88 | 18389        | 1.4 | 11852         | 2.1   |
| 10000km | 89.764 | 50320.23 | 43183        | 1.2 | 33022         | 1.5   |

出所)東洋大学作成

表 2-80 シャクルトンクレーターにおける周期、可視時間及び機体数

| 遠月面高度   | 最大 EI  | 周期       | 0 度の可<br>視時間 | 機体数 | 45 度の<br>可視時間 | 機体数  |
|---------|--------|----------|--------------|-----|---------------|------|
| 500km   | 82.915 | 9277.956 | 2060.407     | 4.5 | 644           | 14.4 |
| 1000km  | 85.43  | 9820.66  | 3571         | 2.8 | 1429          | 6.9  |
| 5000km  | 87.737 | 25196.19 | 18428        | 1.4 | 11951         | 2.1  |
| 10000km | 88.032 | 50183.31 | 43239        | 1.2 | 33307         | 1.5  |

出所)東洋大学作成

## 工) 評価

遠月面高度 500km であると機体数が多くなりすぎてしまう結果であった。一方、遠月面高度 5000km 以上であると、送信アンテナの大きさの範囲内での現実的な空間伝送効率が取れなくなってしまう結果であった。

以上から、遠月面高度 1000km、近月面高度 100km の軌道で常時送電のために7機体制が望ましいと結論する。このため、月面受電レクテナの検討の前提とする月周辺軌道からの太陽光発電システムにおいては上記の軌道を採用することとした。

## b. 空間伝送効率を算出する手法

次節に実証候補項目を示すが、効率、受電点での電力密度並びにアンテナを仮定した際の電力についての計算手法を本節で述べる。

まず、空間伝送効率の検討は式(1)、(2)を用いて行った。これは、近傍界領域における電力伝送式であり、 $\tau$ は送受電アンテナの大きさと伝送距離、周波数から決まるパラメータである。

$$\tau^2 = \frac{A_t A_r}{\lambda^2 D^2} \quad (1)$$

$$\eta = 1 - e^{-\tau^2} \quad (2)$$

$A_t$ : 送信アンテナの有効開口面積 [m<sup>2</sup>]

$A_r$ : 受信アンテナの有効開口面積 [m<sup>2</sup>]

$D$ : 伝送距離 [m]

$\lambda$ : 波長 [m]

$\eta$ : 伝送効率

受信電力の計算方法は以下の通りである。

$$P_r = P_t \eta \quad (3)$$

$P_r$ : 受信電力 [W]

$P_t$ : 送信電力 [W]

アンテナ利得、開口面アンテナの開口径計算方法は以下の通りである。

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (4)$$

$$G = \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \eta_A \quad (5)$$

$A_e$ : アンテナの有効開口面積 [m<sup>2</sup>]

$G$ : アンテナ利得 [倍]

$d$ : アンテナの開口径 [m]

$\eta_A$ : 開口能率 [%]

月面アンテナの最大電力束密度 [W/m<sup>2</sup>]、パッチアンテナを使用した場合の1素子当たりの最大入力電力の計算方法は、以下の通りである。

$$\text{PFD} = \frac{P_t}{A_e} \quad (6)$$

$$P_{in\_patch} = \frac{P_t}{A_e} \times (0.7\lambda)^2 \quad (7)$$

PFD: 月面アンテナの最大電力束密度 [W/m<sup>2</sup>]

$P_{in\_patch}$ : パッチアンテナを使用した場合の1素子当たりの最大入力電力 [W]

ここで、パッチアンテナの素子間隔を 0.7 波長と仮定している。また、レンズ付きレクテナの入力電力については、(7)式の  $0.7\lambda$  の部分をレンズ付きアンテナの 1 辺の長さに置き換えることにより計算した。計算結果は後述するが、いずれの場合でもマイクロワット級となることは避けられない。

今回は最終目標における 1 素子あたり電力を向上させることが最大の目的であるので、中間段階での 1 素子あたり電力に対応した最適化は実施していない。

### c. 受電用レンズ付きレクテナに係る検討

後述する月面実証フェーズ1のサービスゾーンに対しての 100[kW]程度の供給の実証についての検討結果より、レクテナ IC 1 素子あたりに得られる電力は約  $70[\mu\text{W}]$  = 約  $-11.5[\text{dBm}]$  と推定される。ここで、レクテナ IC に搭載される 50[GHz]帯 GaAs 整流器の整流効率予測(金沢工業大学 伊東健治教授の資料より)について以下の図 2-90 に示す。整流効率の予測は、日清紡マイクロデバイス製低閾値 GaAs 二種類( $0.15[\mu\text{m}]$ 、 $0.25[\mu\text{m}]$ )と WIN 製 GaAs( $0.18[\mu\text{m}]$ )について行われており、より微細化されている日清紡マイクロデバイス製 GaAs  $0.15[\mu\text{m}]$  と WIN 製 GaAs  $0.18[\mu\text{m}]$  が高い整流効率が予測される。図 2-90 より、入力電力が月面実証フェーズ1で 1 素子あたりに得られる電力である  $-11.5[\text{dBm}]$  のとき、整流効率は約 58% となり、最大効率が得られる最適動作範囲とは約 10[dB]程度の差が生じていることが見て取れる。

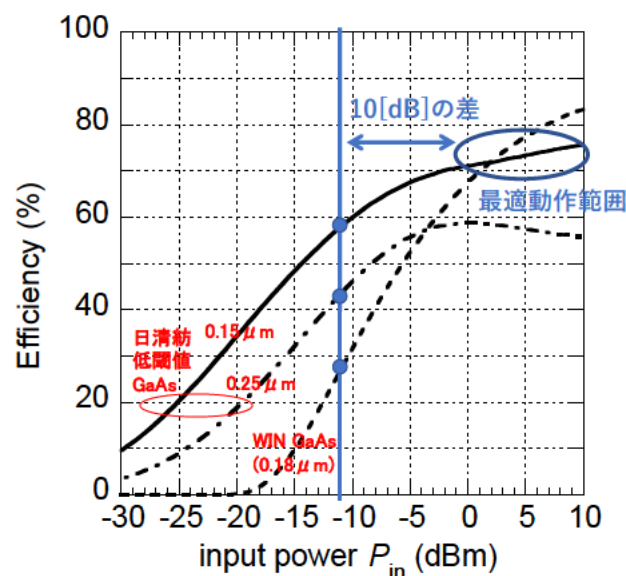


図 2-90 50[GHz]帯 GaAs 整流器の整流効率予測

出所)金沢工業大学作成

### d. フレネルゾーンプレートレンズ(FZPL)アンテナの原理

前節で確認したように、レクテナが良好な動作を行うための動作電力と受電電力に 10[dB]程度の差があるという課題があった。そこで、課題解決のため、レクテナに受電用レンズを装着し、アンテナの指向性を高めることによって利得を向上させ、不足分の電力を補う方式を検討した。



レクテナに装着する受電用レンズとして、フレネルゾーンプレートレンズ(FZPL)を想定し検討を実施した。FZPLの模式図を図 2-91 に示す。FZPL はホイヘンス-フレネルの原理を応用したものであり、電波透過部と遮断部を同心円上に形成することで、同相の電波を集光するものである。特徴として、製作が容易かつ安価で、組み立て分解が簡単という利点が挙げられる。FZPL は焦点が前方と後方に 2 つあるので、FZPL の後方 $1/4$  波長に反射鏡を配置することによって、透過波を反射し、位相を反転させ同相とすることでレクテナの受信電力の増加を図ることができる。

さらに、図 2-92 のように、斜めから入射する電波に対して、一次放射器であるレクテナとレンズの中心位置を平面上でオフセットさせることにより、ビームを振ることができる。

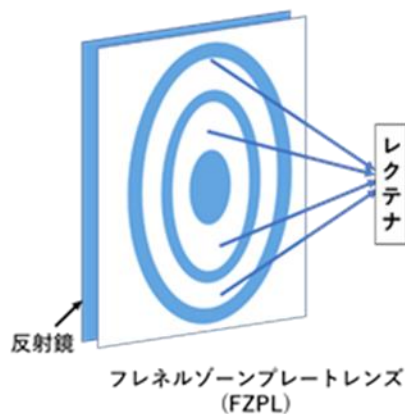


図 2-91 フレネルゾーンプレートレンズ(FZPL)アンテナの原理

出所)東洋大学作成

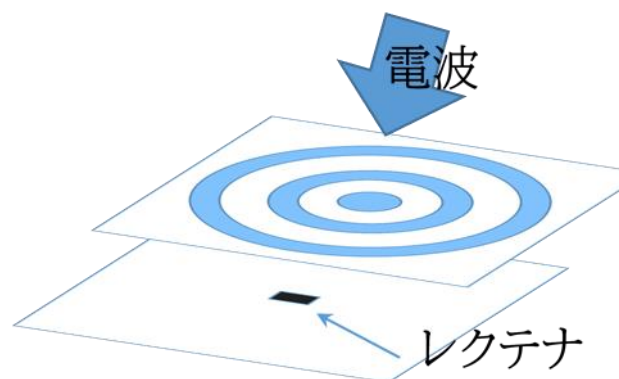


図 2-92 斜め入射への対応

出所)東洋大学作成

FZPL は以下のように設計できる。図 2-93 に示すように、FZPL の中心を原点  $O$  とし、ゾーン番号が  $i$  番目の外径を点  $A$  とし、その半径は  $r_i$  とする。また、焦点を点  $F$  とし、焦点距離は  $L$  とする。焦点では波面は同一な位相であるため、 $i$  番目のゾーンの境界は以下の式で求められる。

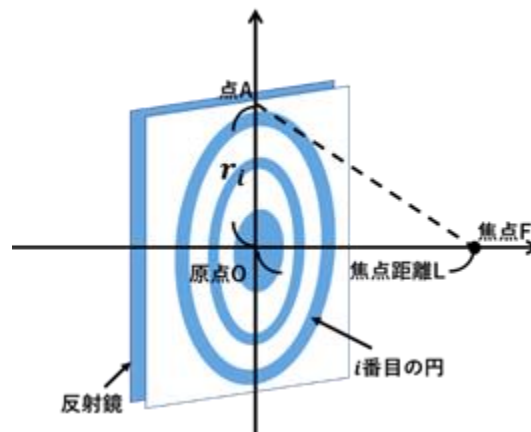


図 2-93 FZPL の設計説明図

出所) 東洋大学作成

$$AF - OF = \frac{\lambda}{2} i \quad (1)$$

半径  $r_i$  については

$$\begin{aligned} r_i^2 + OF^2 &= AF^2 \\ r_i^2 + L^2 &= \left(L + \frac{\lambda}{2} i\right)^2 \\ r_i^2 &= \left(L + \frac{\lambda}{2} i\right)^2 - L^2 \end{aligned} \quad (2)$$

また、式(2)を変形すると、

$$L = \frac{r_i^2}{\lambda i} - \frac{\lambda}{4} i \quad (3)$$

となる。上記の式(3)から、FZPL はゾーン番号  $i$ 、波長  $\lambda$ 、 $i$  番目の円の外径  $r_i$  の 3 つのパラメータより設計が可能であることがわかる。

### e. 受電レクテナシステムの構成

月面で受電レクテナシステムを実現するためには、構成が容易である必要がある。そのため、同一のレクテナパネルを複数枚用いて、図 2-94 の左図のように展開し、構成の容易化を目指す。そして、レクテナパネル 1 枚は図 2-94 の右図のように、レクテナ IC をアレイ上に配置したレクテナとレンズ、反射鏡からなる FZPL 付きレクテナを複数並べて構成する。

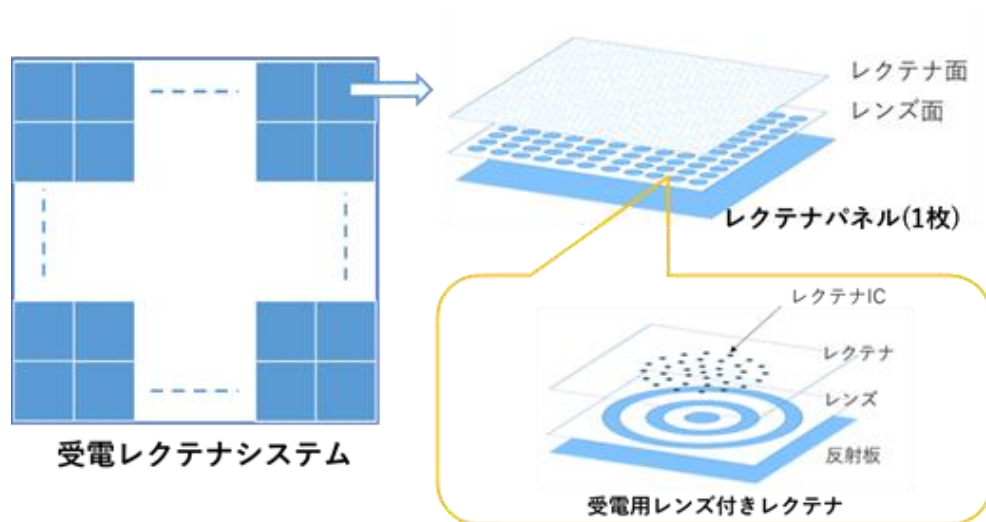
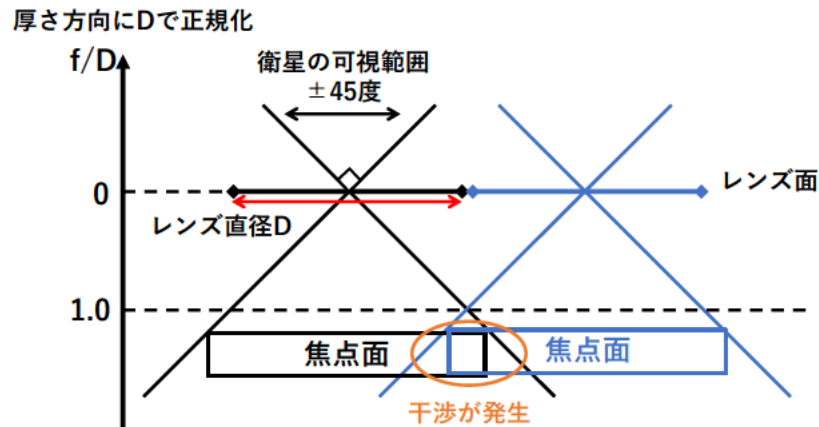


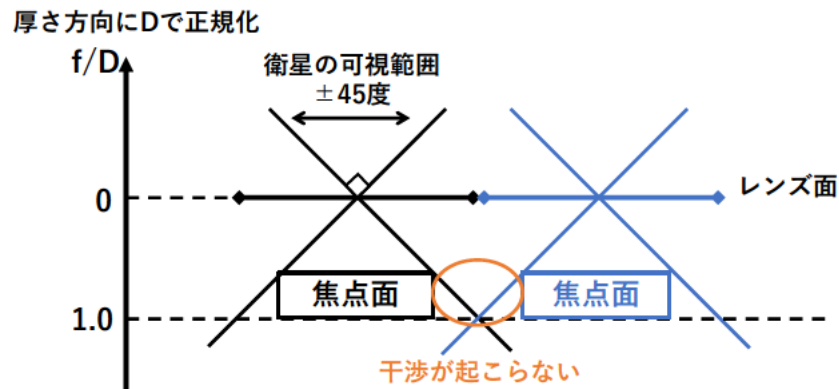
図 2-94 受電レクテナシステムの構成

出所)東洋大学作成

FZPL 付きレクテナを並べる際に、焦点距離対レンズの開口直径比(以下  $f/D$  と省略する。)に注意しなければならない。衛星の可視範囲は $\pm 45$ 度とすると、 $f/D$  が 1.0 を超えると図 2-95 の(a)のように厚さ方向( $f$ )が直径( $D$ )より大きくなる。このとき、アレイ化した場合に隣接するレンズの焦点面と干渉が発生することがわかる。しかし、 $f/D$  が 1.0 以下の時は図 2-95 の(b)のようになり、隣接するレンズの焦点面と干渉が発生しないことがわかる。以上から、 $f/D$  は 1.0 以下にする必要がある。



(a)  $f/D > 1.0$  のとき



(b)  $f/D \leq 1.0$  のとき

図 2-95 FZPL のアレイ化と  $f/D$

出所)東洋大学作成

次に、焦点面に配置するレクテナ IC の並べ方について検討する。レクテナ IC のアンテナ利得を 6[dBi]とし、さらにレンズを用いて利得を 10[dB]上昇させるとすると 16[dBi]のビームが形成される。アンテナのビーム幅は一般的に利得から次の式(1)で概算することができ、今回は 10 度程度であることがわかる。

$$G = \frac{40000}{\theta_H \theta_E} \quad (1)$$

ここで、 $G$  はアンテナ利得、 $\theta_H$  はアンテナの H 面の半値幅、 $\theta_E$  はアンテナの E 面の半値幅である。今回は  $\theta_H$  と  $\theta_E$  は同値であるとした。

そのため、図 2-96 の(a)に示すように、ビーム走査が必要な衛星の可視範囲  $\pm 45$  度内で、3dB ビーム幅である 10 度おきに x 軸方向に 9 個配置することで、レクテナ IC に無駄なく電力を供給する

ことが可能である。y 軸方向にも同様に 9 個直交するように配置すると、合計 80 個程度のレクテナ IC が必要となる。

ここで、レクテナ IC の数を削減し、より簡易的な構成についても検討を行う。先ほどは、3dB ビーム幅かつ直交配列を提案したが、今回は 6dB ビーム幅かつ円形配列について提案する。

図 2-96 の(b)のように 6dB ビーム幅のときは、ビーム走査が必要な衛星の可視範囲 $\pm 45$ 度内で x 軸方向に 7 個程度配置することとなる。そして、円形配列にすると合計 40 個程度のレクテナ IC で構成が可能になる。ほかにも、3dB ビーム幅かつ円形配列、6dB ビーム幅かつ直交配列の場合についても検討を行い、その結果を表 2-81 にまとめる。

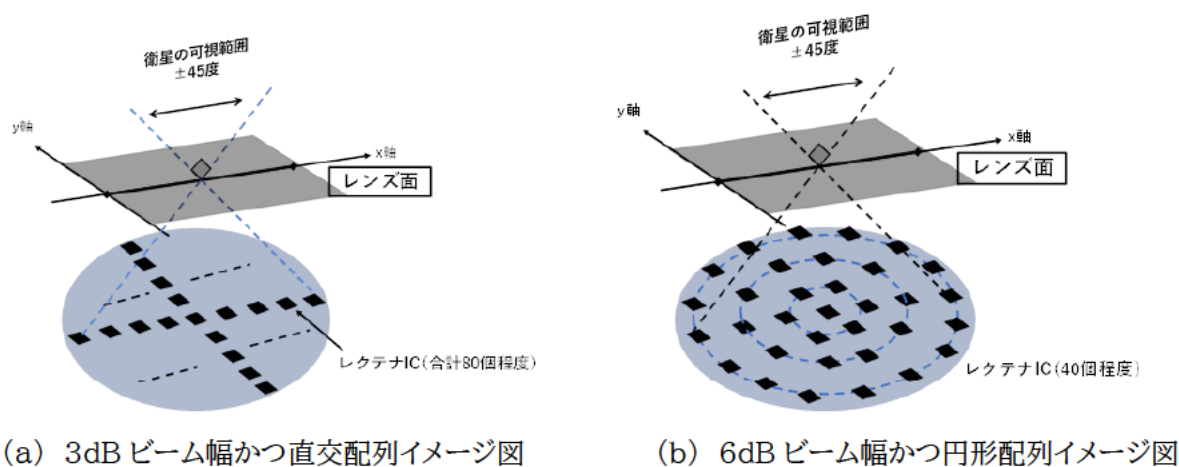


図 2-96 レクテナ IC の配列法

出所) 東洋大学作成

表 2-81 レクテナ IC 配列法のまとめ

| ビーム幅 | 配列 | 素子数    |
|------|----|--------|
| 3dB  | 直交 | 約 80 個 |
| 3dB  | 円形 | 約 64 個 |
| 6dB  | 直交 | 約 50 個 |
| 6dB  | 円形 | 約 40 個 |

出所) 東洋大学作成

## f. 月面での受電機器構成

### ア) ミリ波レクテナ IC(月面実証フェーズ 0 以前)

#### ● 検討条件

- (1) 月面での照射電力より 50GHz 帯での  $41.5 \sim 221.5 \mu\text{W}$  ( $-13.8 \sim -6.5\text{dBm}$ ) の受電を行うレクテナ IC について検討する。
- (2) 本検討でのレクテナが月面設置、アンテナ一体チップであることから、耐放射線とアンテナ性能の観点から化合物半導体(GaAs)で検討を行う。
- (3) GaAs 採用の問題である整流ダイオードの閾値が高く、低電力整流に適さない問題に対し、920MHz 帯において  $\mu\text{W}$  クラスの整流を実現している低閾値 GaAs E-pHEMT Gated anode diode(GAD)の適用を検討する。

#### [Step 1]

- ・ゲート電極を  $0.8 \mu\text{m}$  から  $0.25 \mu\text{m}$  への微細化、ゲート電極の抵抗抑制構造(金属層の積み上げ)による高遮断周波数化を検討。試作チップからパラメータ抽出しモデル化を行う。これをもとに整流性能を高めるよう、閾値を最適化する。

#### [Step 2]

- ・ゲート電極を  $0.15 \mu\text{m}$  へ微細化し、高遮断周波数化する。
  - ・GaAs ウエハのエピ条件の最適化、電極構造の最適化による高電流密度化により、さらなる性能向上を図る。
- (4) 50GHz では Antenna on Chip (AoC)による、高インピーダンス動作( $5\text{k}\Omega$  以上)の実現を行う。
  - (5) 以上の検討を既開発の 28GHz GaAs レクテナでの性能実績から、上記デバイスや AoC 技術の適用による改善効果を明らかにする。それをベースに 50GHz での性能予測を行う。
  - (6) 耐放射線特性の確認も課題である。

#### ● 検討内容

現状では、金沢工大で開発した SOI-CMOS 整流器により、28GHz 帯、 $-10\text{dBm}$  入力において整流効率は 15%である(遁所雄大,角谷直哉,小林章伸,平井司,坂井尚貴,伊東健治,” インピーダンス変成ループアンテナを用いる 28GHz 帯 SOI-CMOS 高感度 レクテナ MMIC,” 信学技報 MW2023-141, 2023)。月面設置であり、アンテナ一体チップであることを考慮し、耐放射線の観点から化合物半導体(GaAs)の効率限界を検討する。

金沢工大で開発した 28GHz 帯 GaAs レクテナの概要を図 2-97 に示す。製造は台湾の GaAs ファンダリイである WIN semiconductor 社である。



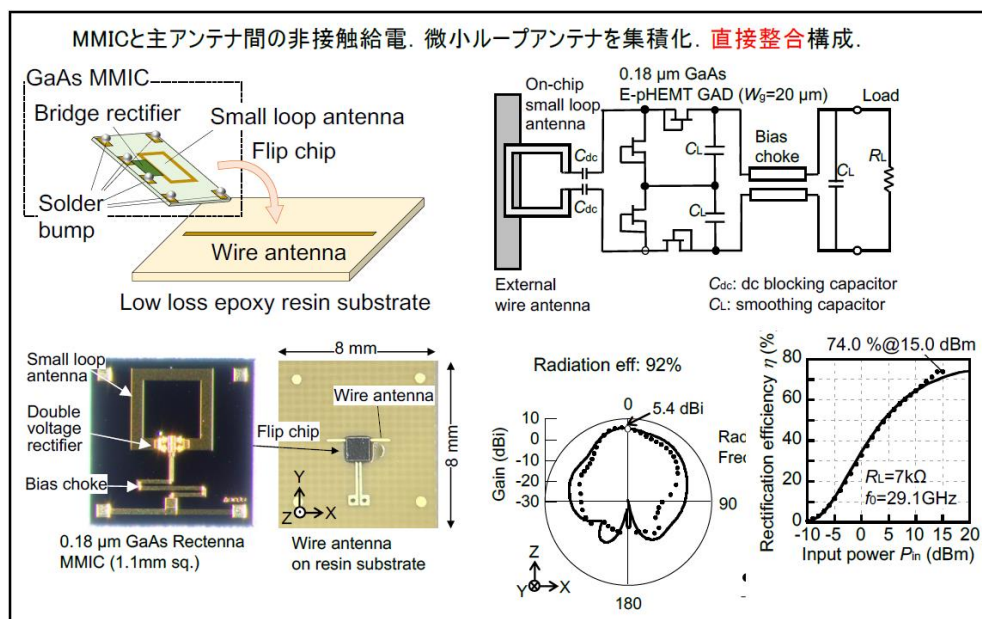


図 2-97 金沢工大で開発した 28GHz 帯 GaAs レクテナの概要

出所)N. Sakai, Y. Tondokoro, A. Kobayashi, K. Noguchi, M. Tsuru and K. Itoh, "A 28 GHz Band Highly Efficient GaAs Rectenna MMIC with EM Coupling Structure for an External Highly Efficient Wire Antenna," 2024 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2024), pp. 122-125, 2024. (金沢工大論文)

受電電力 $-13.8 \sim -6.5$ dBm の領域に対して、整流効率 10% 以下である。これに対し、より低閾値 GaAs プロセス(日清紡マイクロデバイス社)を用い低電力領域での効率を改善する。

ゲート電極の形成条件の変更により低閾値化が可能な GaAs GAD(参考文献: S.Yamaga, et al. "Why and How New Japan Radio Has Continued GaAs RFIC Manufacturing in Japan; Introduction of Unique Proven Technology Based on Hetero-Junction FET Process" IEEE Trans. Semi. Manufac., vol. 31, no. 4, pp.432-439, 2018) を用いる。

低閾値 GaAs GAD の静特性を図 2-98、これを用いた 920MHz 帯レクテナを図 2-99 に示す。図中の低閾値 GaAs GAD(GAD1)は低閾値である Si SBD と同等である。また 920MHz 帯において整流効率  $60\% @ -15$ dBm が得られている。これを GaAs GAD のゲート電極微細化による 50GHz 帯での小電力動作レクテナの実現を検討する。

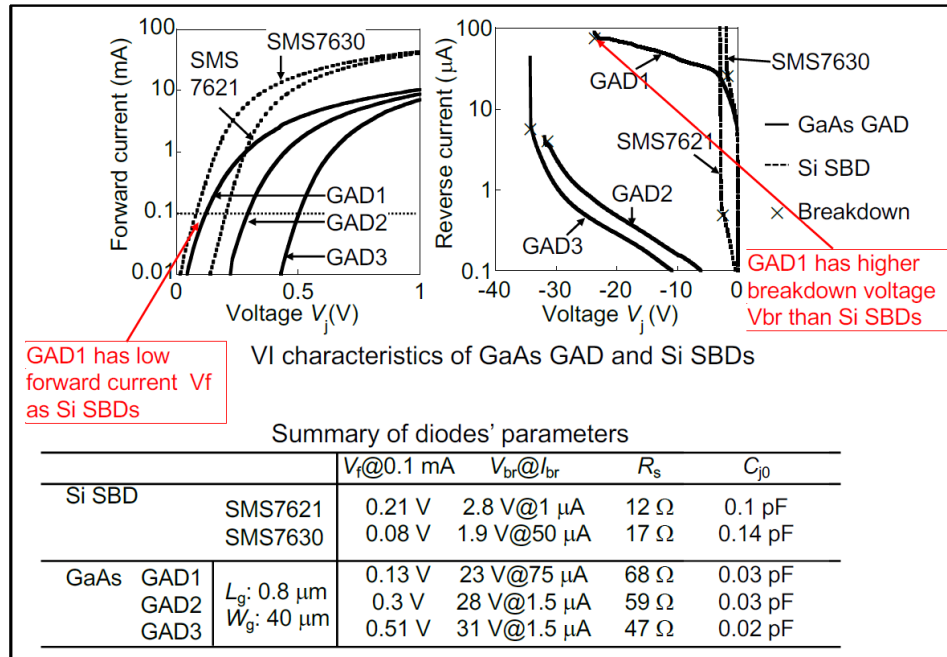


図 2-98 低閾値 GaAs GAD の静特性

出所)N.Sakai, K.Itoh et al., "High Dynamic Range 920 MHz Band Low Power Rectenna With Low Threshold Voltage GaAs GADs," 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE2024), pp. 865-868, 2024. (金沢工大論文)

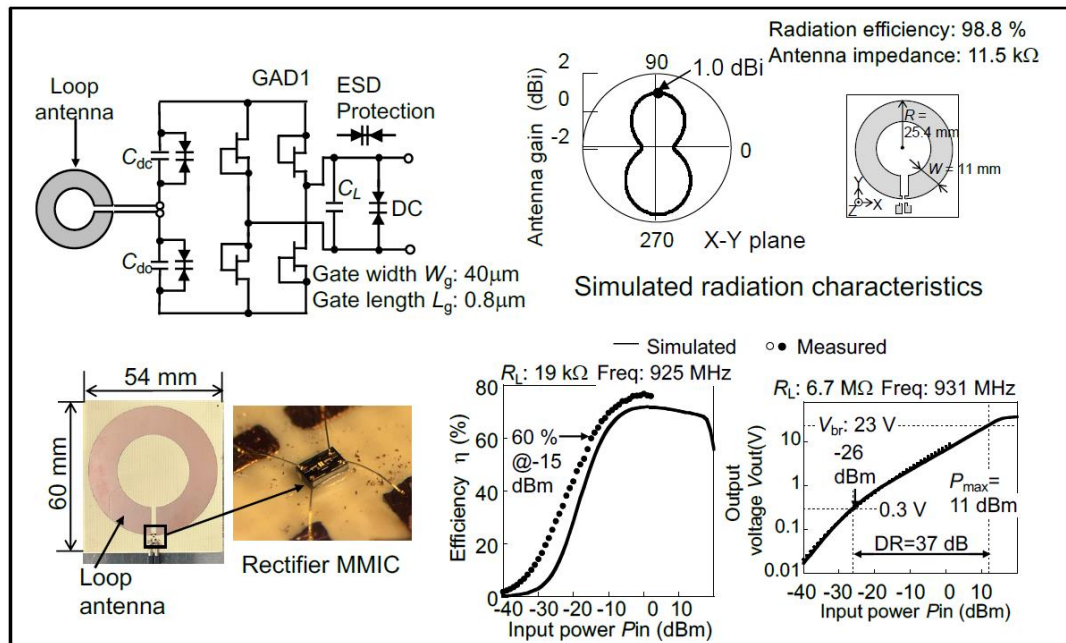


図 2-99 低閾値 GaAs GAD を用いる 920MHz 帯レクテナ

出所)N.Sakai, K.Itoh et al., "High Dynamic Range 920 MHz Band Low Power Rectenna With Low Threshold Voltage GaAs GADs," 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE2024), pp. 865-868, 2024. (金沢工大論文)

つぎに、表 2-82 に今回の検討で用いる GaAs E-pHEMT GAD の微細化による性能向上のステップを示す。ゲート長を現状の  $0.8\mu\text{m}$  から、ステップ 1: $0.25\mu\text{m}$ 、ステップ 2: $0.15\mu\text{m}$  と微細化し、性能向上を図る。

表 2-82 GaAs E-pHEMT GAD の微細化による性能向上のステップ

|                       | 既存技術                               |                                     |                                    | STEP1                               | STEP2                               |
|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                       | $0.5\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | $0.18\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | $0.8\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | $0.25\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | $0.15\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD |
| Manufacturer          | WIN<br>Semcon.                     | WIN<br>Semcon.                      | 日清紡                                | 日清紡                                 | 日清紡                                 |
| Threshold<br>$V_t$    | 0.5V                               | 0.45V                               | 0.31V                              | 0.2V                                | 0.2V                                |
| Breakdown<br>$V_{br}$ | 13.2 V                             | 8.3 V                               | 21V                                | 13V                                 | 13V                                 |
| $f_{c0}$              | 728 GHz                            | 4600GHz                             | -----                              | 940GHz                              | 2800GHz                             |
| $I_{\max}/C_{t0}$     | 731<br>mA/pF                       | 1155<br>mA/pF                       | 500<br>mA/pF                       | 400<br>mA/pF                        | 400<br>mA/pF                        |

出所)金沢工業大学作成

920MHz 帯レクテナと同様の構成で、低閾値 GaAs E-pHEMT の微細化でミリ波帯での高効率動作を図る。図 2-100 の(a)に、前述の 28GHz 帯 GaAs レクテナの測定値をベースに低閾値化の効果をみる。まずアンテナ抵抗を従来の  $1\text{k}\Omega$  から  $5\text{k}\Omega$  へ高めることで、従来の高閾値 GaAs GAD であっても、低電力領域の改善が図れる。さらに微細化により高周波特性を改善した低閾値 GaAs GAD での計算値では $-6.5\text{dBm}$ ~ $-13.8\text{dBm}$  の領域での効率は更に改善される。図 2-100 の(b)の 50GHz 帯においても同様の結果である。

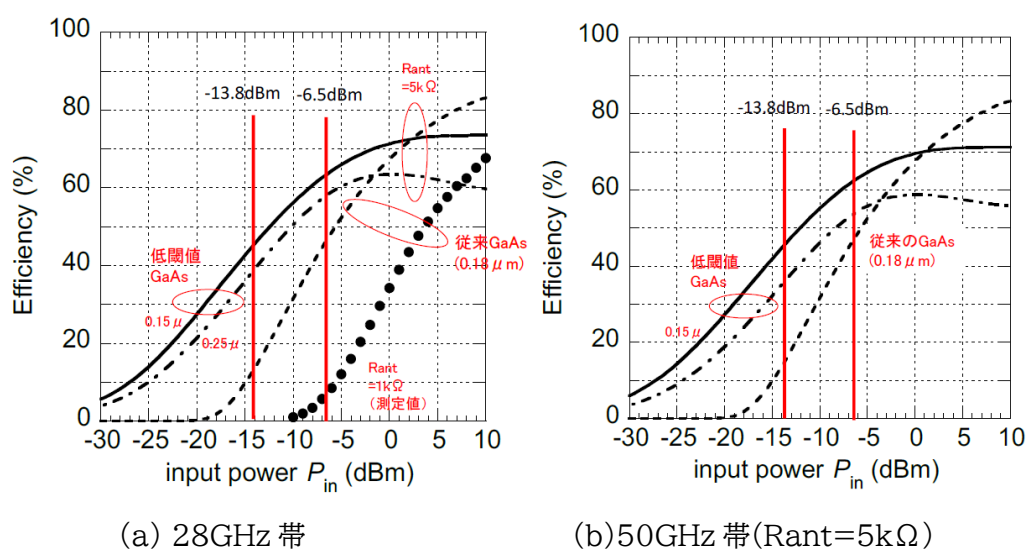


図 2-100 低閾値 GaAs E-pHEMT GAD による GaAs レクテナの整流効率の改善

出所)金沢工業大学作成

また 50GHz 帯 GaAs レクテナ IC のアンテナ特性を図 2-101 に示す。アンテナ抵抗は  $5k\Omega$  となるようループアンテナを設計している。アンテナ効率は 70% であり、その改善が課題である。

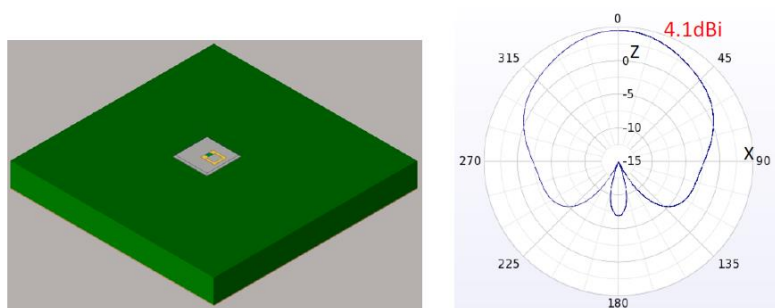


図 2-101 50GHz 帯 GaAs レクテナ IC のアンテナ特性

出所) 金沢工業大学作成

後述のレクテナアレイでは、レンズによる集光の効果、レクテナ用アンテナのさらなる高インピーダンス化( $10k\Omega$ )を見込み、図 2-102 のように効率 70% @ 入力電力 -1.4dBm としている。

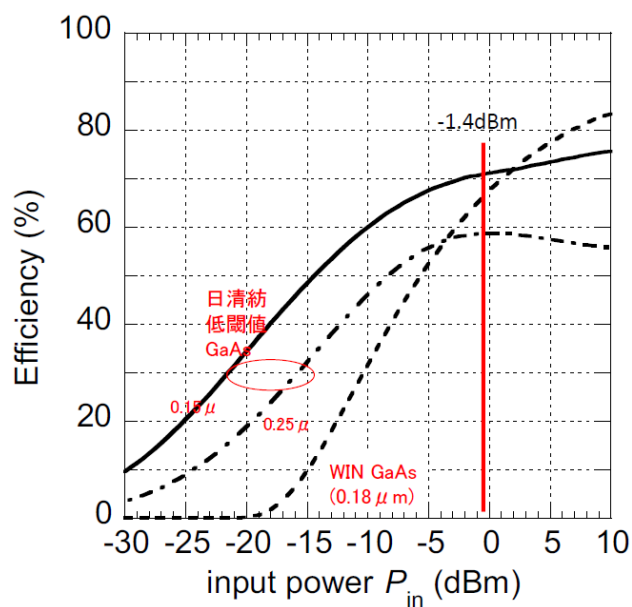


図 2-102 低閾値 GaAs E-pHEMT GAD による 50GHz 帯 GaAs レクテナの整流効率

出所) 金沢工業大学作成

## イ) ミリ波レクテナアレイ(月面実証フェーズ 0 以前)

### ● 検討条件

(1) 月面での照射電力より 50GHz 帯レクテナでは  $41.5 \sim 221.5 \mu\text{W}$  ( $-13.8 \sim -6.5\text{dBm}$ ) の受電が想定される。整流効率を高めるために平面レンズを配置し、集光によるアンテナ利得アップを見込み、整流器の受電電力を  $-1.4\text{dBm}$  とする。

(2) レクテナアレイの軽量化のために、3枚のポリイミドフィルム( $50 \mu\text{m}$  厚)にレクテナアレイ、平面レンズ、レンズ用反射板を実装する。外形フレームで  $1.1\text{m}$  角のレクテナパネルを形成する。

(3) 衛星の軌道上移動に伴う集光点の移動を追尾するため、アレイ状にレクテナ IC を配置し、その DC 出力を集線する。

(4) 重量検討まで行うが、機械強度や熱設計は実施していない。今後の課題である。耐放射線特性の確認も課題である。

### ● 検討内容

図 2-103 に DC100kW を受電するレクテナアレイを示す。31X31 のレクテナパネル( $5.5\text{m}$  角、DC107.4W 出力、重量 37.5kg)で構成され、重量 36t と予想する。

レクテナパネルは 25X25 のサブパネル( $1.1\text{m}$  角、DC4.3W 出力、重量 1.5kg)で構成される。

サブパネルは、92X92 の平面レンズ付きレクテナで構成される。このサブパネルは、厚み  $50 \mu\text{m}$  の誘電体シート3枚で構成され、それぞれレクテナ IC が装着されたレクテナシート、平面レンズが配置されたレンズシート、レンズに相対する反射板シートである。1つのサブパネルにはミリ波 6.2W が入射し、DC 出力 4.3W が出力される。

1つの平面レンズ付きレクテナにはミリ波 0.73mW が入射し、レンズと反射板で集光され、その焦点に GaAs レクテナ IC が配置され、DC0.51mW が出力される。1つの平面レンズ付きレクテナに対しレクテナ IC をアレイ状に配置し、月周回衛星の移動に伴う集光点の移動に対応する。

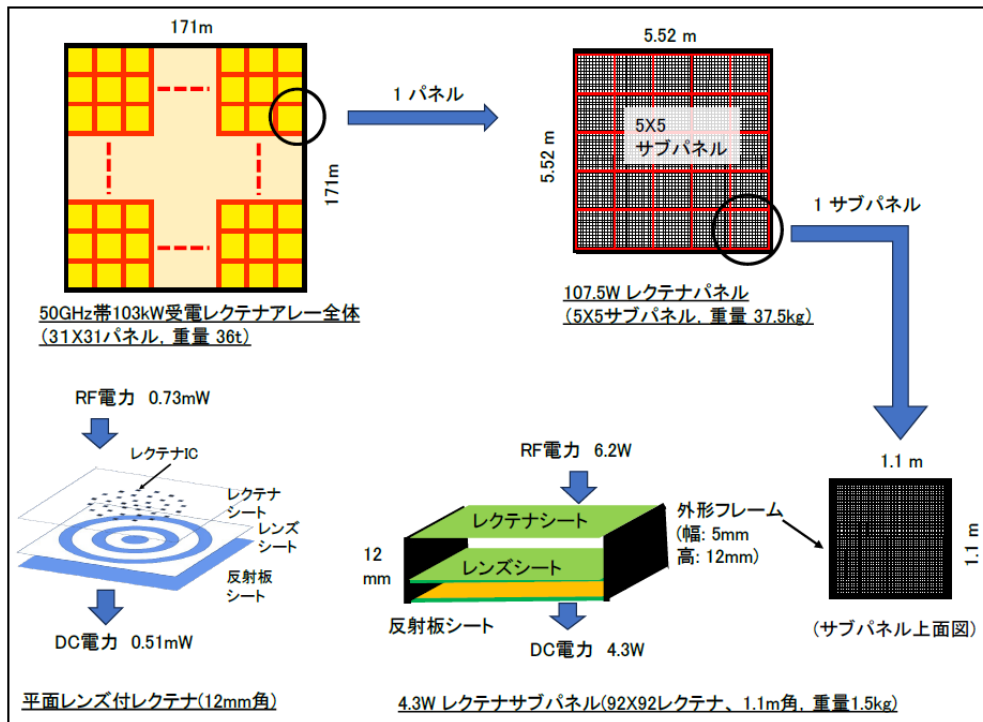


図 2-103 50GHz 帯 100kW レクテナアレイの構成

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

## ウ) 技術課題

月面での受電機器について、今後の技術課題として以下のような点が挙げられる。

(1)装置規模・伝送効率を見据えた送電周波数の最適化。本報告では 50GHz での検討結果を示しているが、今後、伝送周波数を検討・決定する必要がある。

(2)ミリ波  $\mu W$  動作レクテナ MMIC の開発。整流効率 70%を満たし得る低閾値 GaAs E-pHEMT GAD の開発。電極構造、エピ条件の最適化などにより低閾値 GaAs E-pHEMT の高周波特性向上が必要である。さらにインピーダンス  $5k\Omega$  を超える高放射効率の GaAs 集積アンテナの実現も必要である。

(3)平面レンズと反射板による集光機構の実現。平面レンズの設計手法の確立が課題である。また衛星移動に伴うレンズの集光点の移動への追尾のため、GaAs レクテナ MMIC をアレイ状に配置し集電する構成の検討、検証が必要である。早期検証のため月面実証フェーズ 0 以前に 5.8GHz 帯でスケールモデルの検証を行う。

(4)外形フレーム、薄膜3層構造の機構(強度、部品接着強度)検討。また宇宙環境での誘電体薄膜へのレクテナ IC チップの実装法の検討も課題である。

(5)このレクテナ出力を集線し、安定化するパワーコンバーターの検討。



## (2) 実証候補項目

### 1) 月軌道発電衛星

技術開発に関する実証候補項目として以下のステップが考えられる。

主要技術課題は前述のとおり、無線送電システム、軽量高収納型ソーラーアレイ、微小電力用レクテナである。

送電システムの開発には以下の開発過程が必要である。

- ① 40GHz 帯送電モジュールの要素研究
  - 無線送電用スロットアレイアンテナ
  - TWTA のモジュラー構造化
- ② C 帯半導体デバイスの開発
- ③ 宇宙環境における 100W クラスの無線送電実証
- ④ スロットアレイアンテナの高性能化(周波数の向上 ~50GHz)
- ⑤ TWTA の高効率化(目標 50%)
- ⑥ 10kW クラスの実証のための展開型送電モジュール開発
- ⑦ 10kW クラスの実証用送電モジュールの開発
- ⑧ 200kW クラスの月 SPS 用送電システムの開発と実証(月用 SPS1号機)

軽量高収納型太陽電池アレイには以下の開発工程が必要である。

- ① 要素技術研究
  - 折り畳み可能な太陽電池アレイの開発
  - 展開方法の要素検討
- ② 100W クラス宇宙実験による技術実証
- ③ 数百 kW クラスの開発
  - 太陽電池アレイ
  - 展開機構
  - ロータリージョイント
- ④ 200kW クラスの月用 SSPS 用送電システムの開発と実証(月用 SPS1号機)

## a. 実証候補項目【1-①-1】月面実証フェーズ 0 以前(前半) (2025 年～2028 年)

現在の実証衛星を引き継いで月軌道上発電を目指す送電電力数十キロワットクラスの LEO 実証衛星の開発と LEO での実証と要素技術開発を行う。

本フェーズで取り組む内容は以下である。

- 現在の実証衛星を引き継ぐ送電電力数十キロワットクラスの LEO 実証衛星の概念検討  
送信アンテナ 18m 程度、周波数 5GHz 帯、超大規模薄型展開平面送電アンテナによりビーム形成機能の検証
- 要素開発(1):折り畳み可能な太陽電池アレイの開発  
将来数百 W/kg の発電システム開発の要素試作研究  
太陽電池にはロール to ロールで製造可能なフィルム状太陽電池を採用する。本研究には、すでに実用化の域にある CIGS 太陽電池を用いるが、ペロブスカイト太陽電池にも使用可能な技術であり、入手性によりペロブスカイト太陽電池の採用もありうる。  
一例として、図 2-104 に CIGS 太陽電池の概要を示す。
- 要素開発(2):展開方法の要素検討(太陽電池アレイ展開方法の要素検討)  
月用 SSPS の超軽量な太陽電池アレイ展開方法の開発  
将来、1000m<sup>2</sup>程度のソーラーアレイの展開に適用できる方式の検討を行う。目標値は太陽電池アレイを含み数百 W/m<sup>2</sup>である。
- 要素開発(3):高出力ミリ波増幅器のモジュラー構造化  
100W-200W ミリ波増幅器の搭載化検討  
市販 TWTA をベースにパネル内組み込みシステムの開発を行う。周波数は実績のある 40GHz 帯とする。出力は 100-200W の CW である。
- 要素開発(4):スロットアレイアンテナの開発  
ミリ波送電モジュールに使用するスロットアレイアンテナの開発を行う。約 30cm 角程度。
- 要素開発(5):C 帯半導体システムの開発(軽量気密封止集積化アンテナ技術の開発)  
現状の技術では地上での長期保管や宇宙での長期使用に問題がある。さらに不要な配線ロスを除去して電力伝送効率を上昇させる。またアンテナと増幅器モジュールを一对一構造にして、アンテナ入力インピーダンスを広帯域に 50Ω に保ちアイソレータを不要にする。  
金属或いはセラミック気密封止パッケージの 1/5の重量で RF 性能劣化なしでのレドームを必要としない気密封止を実現する。  
集積化アンテナモジュール単体, 高周波性能・信頼度試験クリア
- 100W クラスミリ波宇宙実験の設計  
OHISAMA プロジェクトの成果を基にしたミリ波送電システムの技術実証  
地球周回軌道でフォーメンションフライトによるミリ波の無線送電実験

送電衛星から受電衛星に向けて 100W 程度のミリ波(40GHz 帯)を放射し、数十 W の受電を実施する。

送電距離は 100m 程度(数十～km)

ミリ波送電、超軽量発電システムの技術実証

100kg 級小型衛星2機

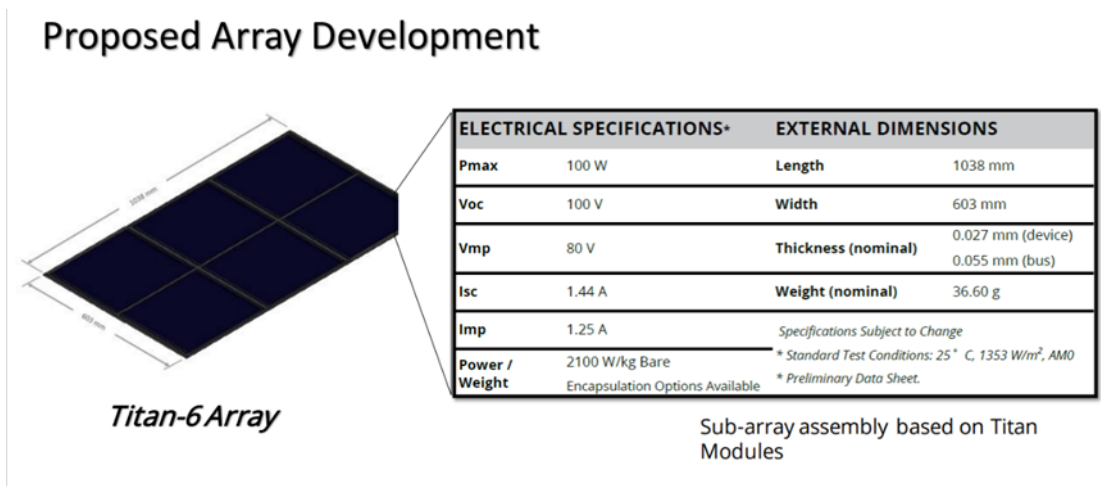


図 2-104 フィルム状 CIGS 太陽電池

出所)JAXA/ISAS 作成

100W クラス宇宙実証実験の概念図を図 2-105 に示す。2機の小型衛星を用い、地球周回軌道上でミリ波により送電実験を行う。また、月面への輸送手段が確立されている場合は、月面での実施も可である。

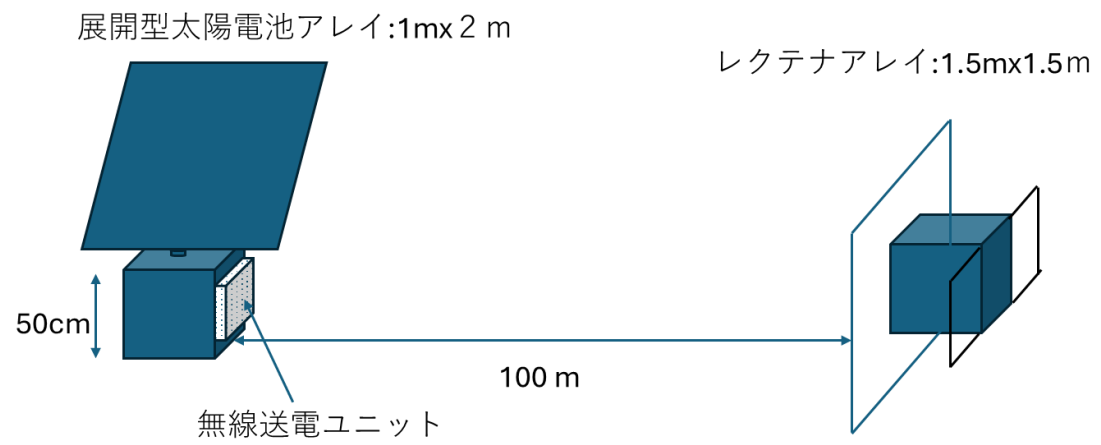


図 2-105 地球低軌道上での 100W 無線送電実験

出所)JAXA/ISAS 作成

将来大型化を目指すモジュラー型ミリ波送電システムのブロック図を図 2-106 に示す。移相器、TWTA を主とする増幅部、スロットアレイアンテナから構成される送電モジュールの連結により将来、数十 m サイズの送電システムの構築を可能とする。

送電衛星に搭載するアンテナは、数十cmサイズ(約 30cm角)で、受電衛星には、30cm～1.4m 角のレクテナモジュールを搭載し、数十 W の送電実験を行う。また、送電衛星には、軽量展開型太陽電池アレイの技術実証モジュールを搭載する。

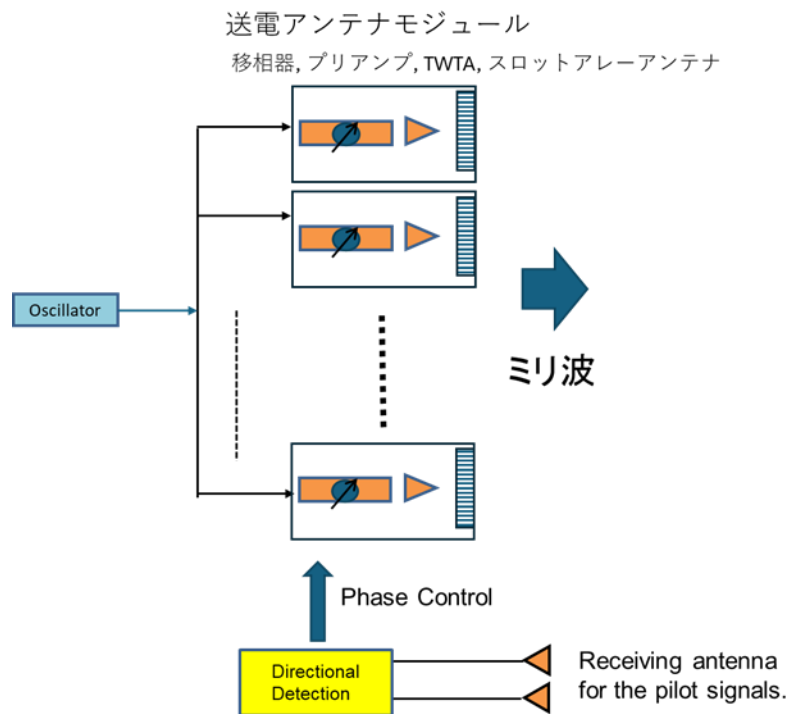


図 2-106 モジュラー型ミリ波送電システム

出所)JAXA/ISAS 作成

送電アンテナのモジュールサイズは 30cm 程度とする。周波数は、40GHz とした。この時、エネルギー収集効率 90% の場合のレクテナのサイズは距離 10m で約 30cm 角、距離 100m で約 1.4m 角となる。中央の電力密度は、距離 10m で約  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 、100m で  $1.6\text{mW}/\text{cm}^2$  程度である。送電電力が 100W であるから、衛星の発電電力は 300W 程度でいわゆる 100kg 級衛星バスで実験が可能である。受電衛星も 100W クラスでピギーバック衛星程度となる。地球周回軌道で実験する場合は、二基の衛星のフォーメンションフライトとなる。送電衛星と受電衛星の機能ブロック図を図 2-107、図 2-108 に示す。

地球周回で実験する場合は、打上げにはイプシロンロケット相当を使用し、相乗りで打上げが可能である。月面上での実験機会が得られれば、月面上での技術実証も可能であり、月面上無線送電システムの技術実証を同時に行うことができる。

投入軌道は、地球周回低軌道であり、衛星バスは OHISAMA プロジェクトでの開発品の使用が可能であり、ビーム制御も OHISAMA プロジェクトの成果を活用できる。

SAR 衛星や光学観測衛星等との組み合わせにより、実験システムの有効活用も考慮できる。

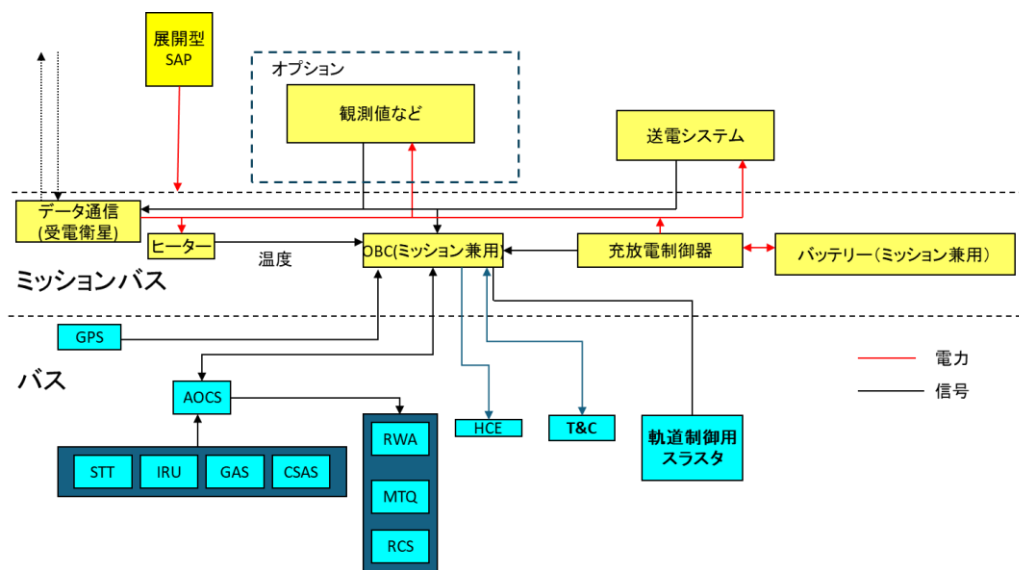


図 2-107 送電衛星の構成

出所)JAXA/ISAS 作成

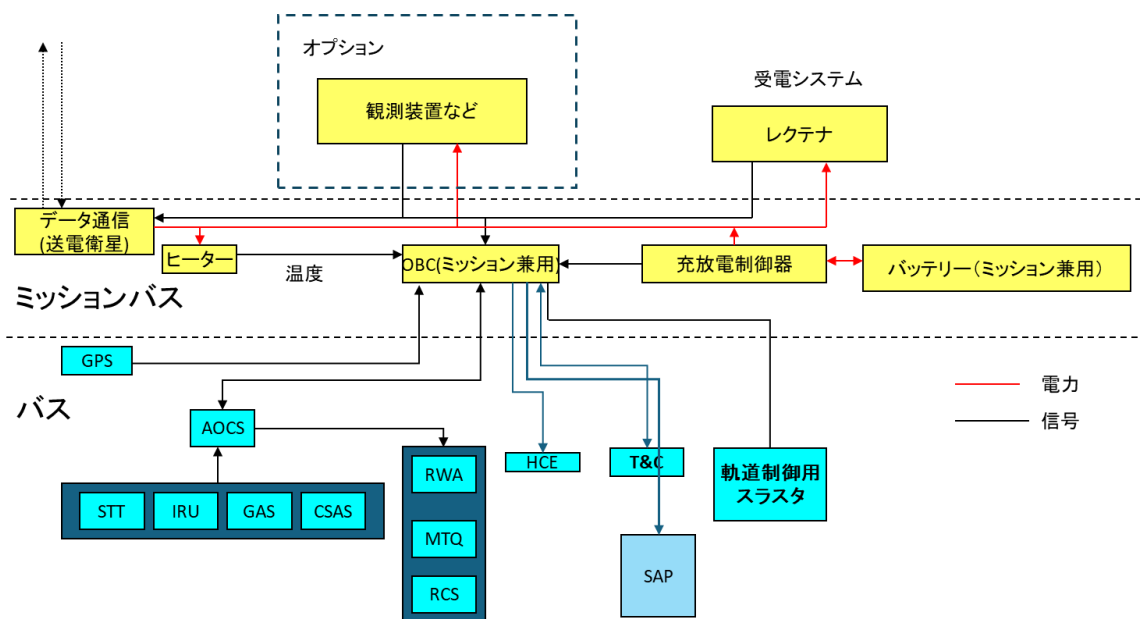


図 2-108 受電衛星の構成

出所)JAXA/ISAS 作成

伝送効率の検討に使用した条件を以下に示し、0(1)2)bにおける式(1)～(7)を用いた計算結果を表 2-83 に、レベルダイヤを図 2-109 に示す。

送信アンテナ:  $18\text{m} \times 18\text{m} = 324\text{ m}^2$

受信レクテナ:  $18\text{m} \times 18\text{m} = 324\text{ m}^2$

周波数: 5.758 GHz

伝送距離: 450 km

表 2-83 検討結果 ( $\tau = 0.014$ ,  $\eta = 0.019$  [%])

| パラメータ                                    | 単位                | 数値    | 備考            |
|------------------------------------------|-------------------|-------|---------------|
| 周波数                                      | GHz               | 5.758 | 波長 52.1 mm    |
| 高度                                       | Km                | 450   |               |
| 衛星出力電力                                   | dBm               | 76.6  | 電力 46 kW      |
| 衛星アンテナ利得                                 | dBi               | 61.8  |               |
| 衛星アンテナ面積                                 | m <sup>2</sup>    | 324   | 開口面効率 100 %   |
| 自由空間損                                    | dB                | 160.7 |               |
| 地上アンテナ利得                                 | dBi               | 61.8  |               |
| 地上アンテナ面積                                 | m <sup>2</sup>    | 324   | 開口面効率 100 %   |
| 地上アンテナ出力                                 | dBm               | 39.4  | 電力 8.80 W     |
| レクテナ出力部最小電力                              | dBm               | 38.5  | レクテナ変換効率 80 % |
| 地上アンテナの最大電力束密度                           | mW/m <sup>2</sup> | 27.1  |               |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子当たりの最大入力電力        | $\mu\text{W}$     | 36.1  |               |
| レンズ付レクテナ(100mm 角) 場合<br>の 1 素子当たりの最大入力電力 | $\mu\text{W}$     | 271   |               |

出所) 東洋大学作成

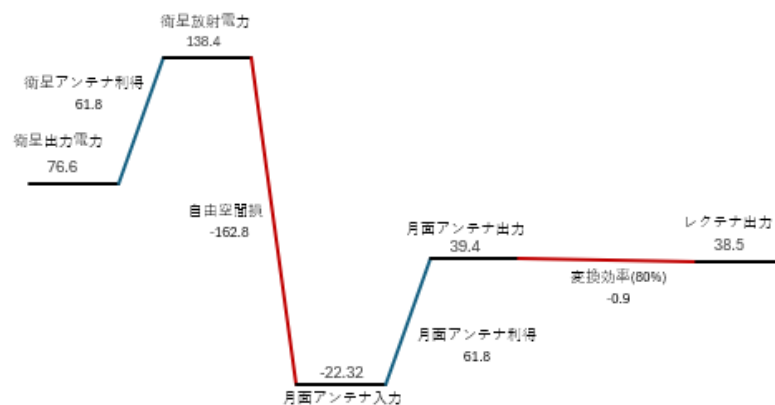


図 2-109 レベルダイヤ(dBm)

出所) 東洋大学作成



この場合のシステム構成イメージを図 2-110 に示す。

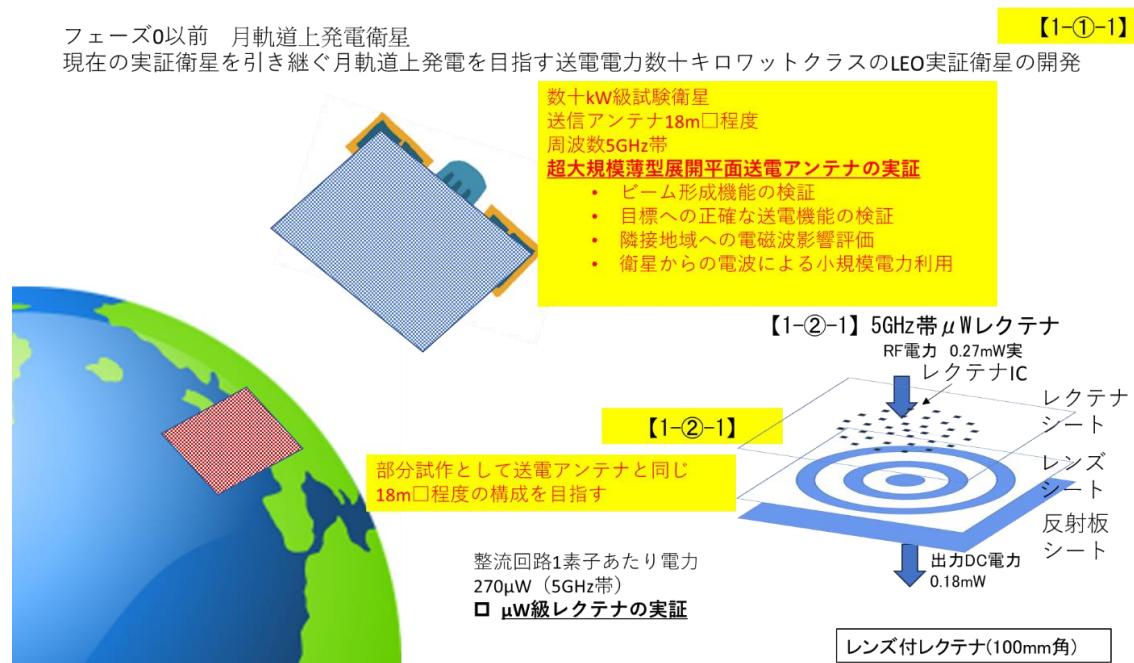


図 2-110 実証候補項目【1-①-1】送電電力数十キロワットクラスの LEO 実証衛星システム

出所)東洋大学作成

## b. 実証候補項目【1-①-2】 月面実証フェーズ 0 以前(後半)及び月面実証フェーズ0(2028年～2030年頃)

無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証のため、月軌道上で発電し、月面への小規模送電による送電実証衛星の設計開発及び小規模なミリ波送電実証を実施する。

本フェーズで取り組む内容は以下である。

- 送信アンテナサイズ、10m×10m、送信電力 10kW 程度、50GHz 程度のミリ波による送電ための衛星設計  
月周回軌道上から月面への送電実験により、ミリ波での軌道上からの無線送電技術の開発。  
送電システムは 10m 四方形程度、発電システムは数kW クラスである。  
高度 100kmの月周回軌道を想定する。
- 10kW クラスの月軌道上からの送電実験のための数十 m クラスの送電システム、数百 W の発電部を有する SPS の技術開発
  - (1)スロットアレイアンテナの高性能化(周波数の向上～50GHz)  
スロットアレイアンテナの高性能化 50GHz
  - (2)高出力ミリ波増幅器の高効率化  
大電力増幅部の高効率化 50GHz, 50%
  - (3)10kW クラスの実証のための展開型送電システム開発
  - (4)数十kW クラスの発電システムの開発 目標値:500W/kg 程度 (太陽電池と構造)
  - (5)半導体システムの高性能化  
軽量気密封止パッケージを前提とした RF モジュールの高性能化・高周波化  
5.8GHz 帯モジュール 効率 70%(現在)→80%へ  
28GHz 帯モジュール 効率 40%(現在)→60%へ  
システム的具体配置 1m×1mユニットパネルで実証.  
100m×100mの基本設計を可能とするレベルを実現
- 100W クラスの宇宙実証実験

システム構成・配置としては、送信アンテナサイズ 10m×10m、送信電力 10kW 程度、受電レクテナ 15m×15m程度をサービスゾーン内に設置する。

伝送効率の検討に使用した条件を以下に示し、式(1)～(7)を用いた計算結果を表 2-84、レベルダイヤを図 2-111 に示す。

送信アンテナ:10m×10m=100 m<sup>2</sup>

受信レクテナ:15m×15m=225 m<sup>2</sup>

周波数:50 GHz

伝送距離:1000 km

表 2-84 検討結果 ( $\tau = 0.025$ ,  $\eta = 0.063$  [%])

| パラメータ                               | 単位                | 数値    | 備考            |
|-------------------------------------|-------------------|-------|---------------|
| 周波数                                 | GHz               | 50    | 波長 6.0 mm     |
| 遠月面高度                               | km                | 1000  |               |
| 衛星出力電力                              | dBm               | 70    | 電力 10 kW      |
| 衛星アンテナ利得                            | dB                | 75.4  |               |
| 衛星アンテナ面積                            | m <sup>2</sup>    | 100   | 開口面効率 100 %   |
| 自由空間損                               | dB                | 186.4 |               |
| 月面アンテナ利得                            | dB                | 79.0  |               |
| 月面アンテナ面積                            | m <sup>2</sup>    | 225   | 開口面効率 100 %   |
| 月面アンテナ出力                            | dBm               | 38.0  | 電力 6.3 W      |
| レクテナ出力部最小電力                         | dBm               | 37.0  | レクテナ変換効率 80 % |
| 月面アンテナの最大電力束密度                      | mW/m <sup>2</sup> | 27.2  |               |
| パッチアンテナを使用した場合の 1 素子当たりの最大入力電力      | $\mu W$           | 0.5   |               |
| レンズ付レクテナ(12mm 角) 場合の 1 素子当たりの最大入力電力 | $\mu W$           | 3.9   |               |

出所)東洋大学作成

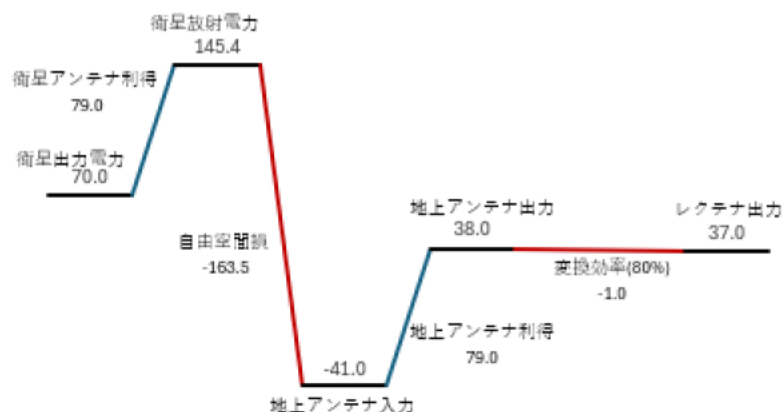


図 2-111 レベルダイヤ(dBm)

出所)東洋大学作成

この場合のシステム構成のイメージを図 2-112 に示す。

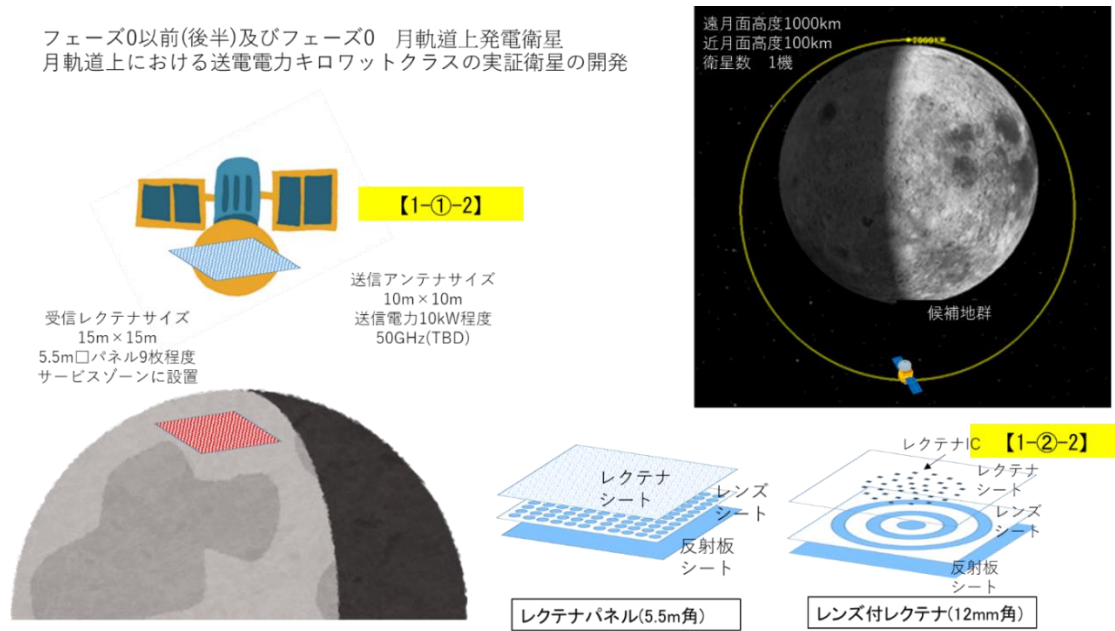


図 2-112 実証候補項目【1-①-2】月軌道上における送電電力キロワットクラスの実証衛星

出所)東洋大学作成

### c. 実証候補項目【1-①-3】 月面実証フェーズ1（2030年～2035年頃）

月軌道上にて発電し、無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証を行う。本フェーズで取り組む内容は以下である。

- サービスゾーンに対して衛星 1 機程度による 100kW 程度を電力供給を行う実証。送信アンテナサイズ 40m×40m、送信電力 200kW(TBD)、50GHz 程度のミリ波による送電の実施。
- 100kW クラスの月軌道上からの送電システムのための要素技術開発
  - (1)50m クラスのミリ波送電システムの開発
    - 25m～50m クラスのミリ波送電システムの開発
    - 周波数 50GHz
    - 送電電力 140kW 程度
    - モジュラー構造による展開型システム
  - (2)数百kWクラスの発電、送電システムの開発
    - 質量特性 500W/kg
- 5.8GHz 帯及び 28GHz 帯半導体システムの高性能化
  - 10m×10m級(28kW 級)送電パネルの試作と地上実験
  - 軌道上での故障修理交換を考慮したプラグイン方式の自律型アレイユニットを試作し地上実験を行う。

システム構成・配置としては、送信アンテナサイズ 40m×40m、送信電力 200kW(TBD)、周波数 50GHz 程度、受電レクテナ受信レクテナサイズ 171m×171m 程度、5.5m□パネル 961 枚、サービスゾーンに設置する。

伝送効率の検討に使用した条件を以下に示し、式(1)～(7)を用いた計算結果を表 2-85、レベルダイヤを図 2-113 に、システム構成のイメージを図 2-114 に示す。

送信アンテナ:  $40\text{m} \times 40\text{m} = 1600\text{m}^2$   
 受信レクテナ:  $171\text{m} \times 171\text{m} = 29241\text{m}^2$   
 周波数: 50 GHz  
 伝送距離: 1000 km

表 2-85 検討結果 ( $\tau = 1.14$ ,  $\eta = 72.8$  [%])

| パラメータ    | 単位             | 数値    | 備考          |
|----------|----------------|-------|-------------|
| 周波数      | GHz            | 50    | 波長 6.0 mm   |
| 遠月面高度    | km             | 1000  |             |
| 衛星出力電力   | dBm            | 83.0  | 電力 200 kW   |
| 衛星アンテナ利得 | dBi            | 87.5  |             |
| 衛星アンテナ面積 | m <sup>2</sup> | 1600  | 開口面効率 100 % |
| 自遊空間損    | dB             | 189.0 |             |

|                                        |                  |       |               |
|----------------------------------------|------------------|-------|---------------|
| 月面アンテナ利得                               | dB <sub>i</sub>  | 100.1 |               |
| 月面アンテナ面積                               | m <sup>2</sup>   | 29241 | 開口面効率 100 %   |
| 月面アンテナ出力                               | dBm              | 81.6  | 電力 144.5 kW   |
| レクテナ出力部最小電力                            | dBm              | 80.7  | レクテナ変換効率 80 % |
| 月面アンテナの最大電力束密度                         | W/m <sup>2</sup> | 4.9   |               |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子当たりの最大入力電力      | μW               | 86.8  |               |
| レンズ付レクテナ(12mm 角) 場合の<br>1 素子当たりの最大入力電力 | μW               | 709.4 |               |

出所) 東洋大学作成

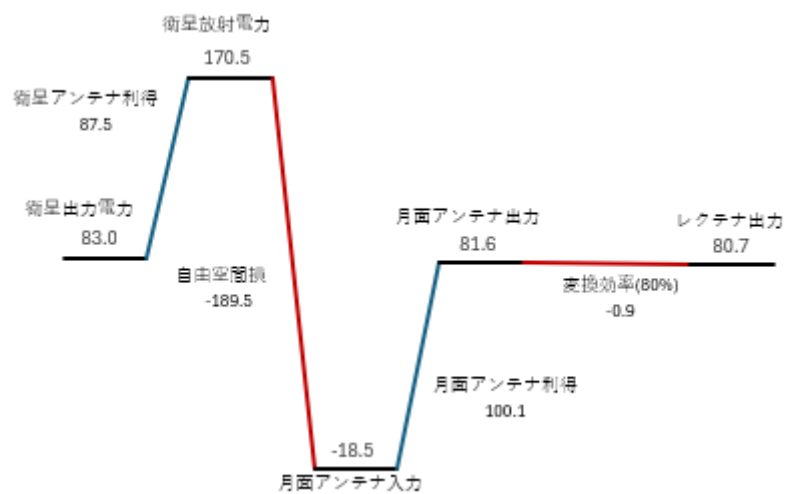


図 2-113 レベルダイヤ(dBm)

出所) 東洋大学作成



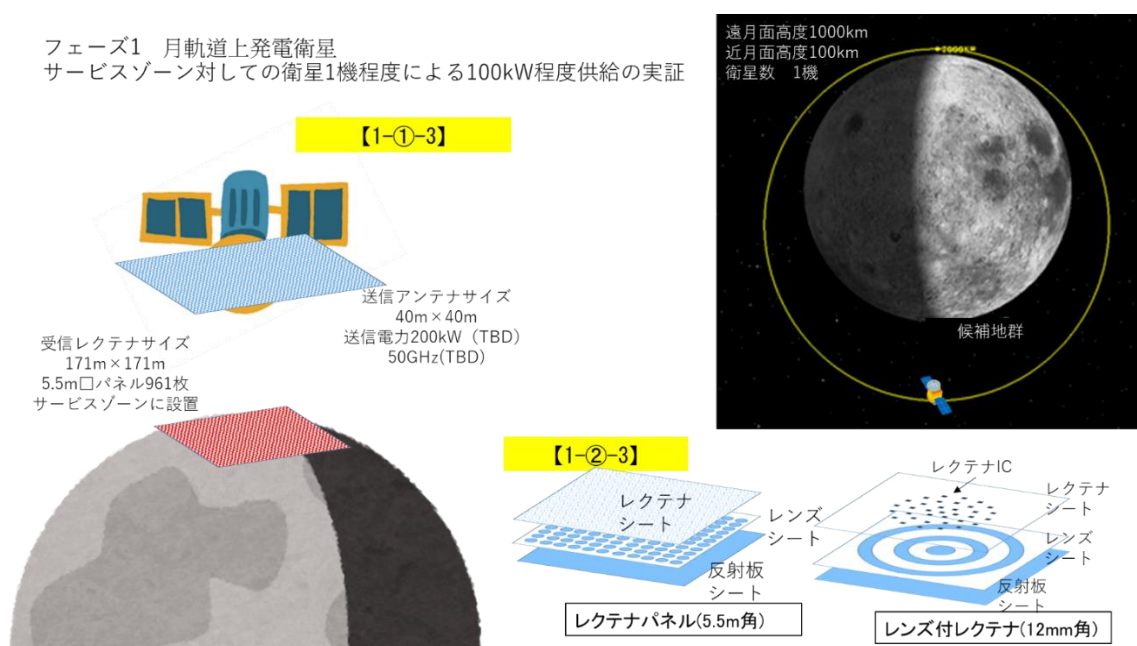


図 2-114 実証候補項目【1-①-3】月軌道上における衛星 1 機程度による 100kW 程度実証衛星

出所)東洋大学作成

#### d. 実証候補項目【1-①-4】月面実証フェーズ2（2035年～2040年頃）

サービスゾーン及び PSR に対しての実用規模衛星 7 機程度による発電と送電による 100kW 常時供給の実証を行う。本フェーズで取り組む内容は以下である。

- 送信アンテナサイズ、40m×40m、送信電力 200kW(TBD)、50GHz 程度のミリ波による送電の実施。
- 複数衛星を協調制御し、継続的電力供給を実施するためのハンドオーバー技術等の制御技術の実装
- 月軌道からの 100kW 送電システムの実証  
25m～50m 四方(TBD)で約 140kW 放射可能な送電システムを有し、数百kW発電可能な超軽量展開型ソーラーアレイを有する月用SPSを月の極軌道に投入し、また、極域に設置するレクテナを用いて、無線電力伝送プラントの実証を行う。

システム構成・配置としては、送信アンテナサイズ 40m×40m、送信電力 200kW(TBD)、周波数 50GHz 程度、受信レクテナサイズ 171m×171m、5.5m□パネル 961 枚、サービスゾーンに加えてさらに PSR にも設置する。

伝送効率の検討に使用した条件および計算結果は、実証候補項目【1-①-3】と同じであり、表 2-85、レベルダイヤが図 2-113 となる。システム構成イメージを図 2-115 に示す。

フェーズ2 月軌道上発電衛星  
サービスゾーン対しての衛星7機程度による100kW程度常時供給の実証

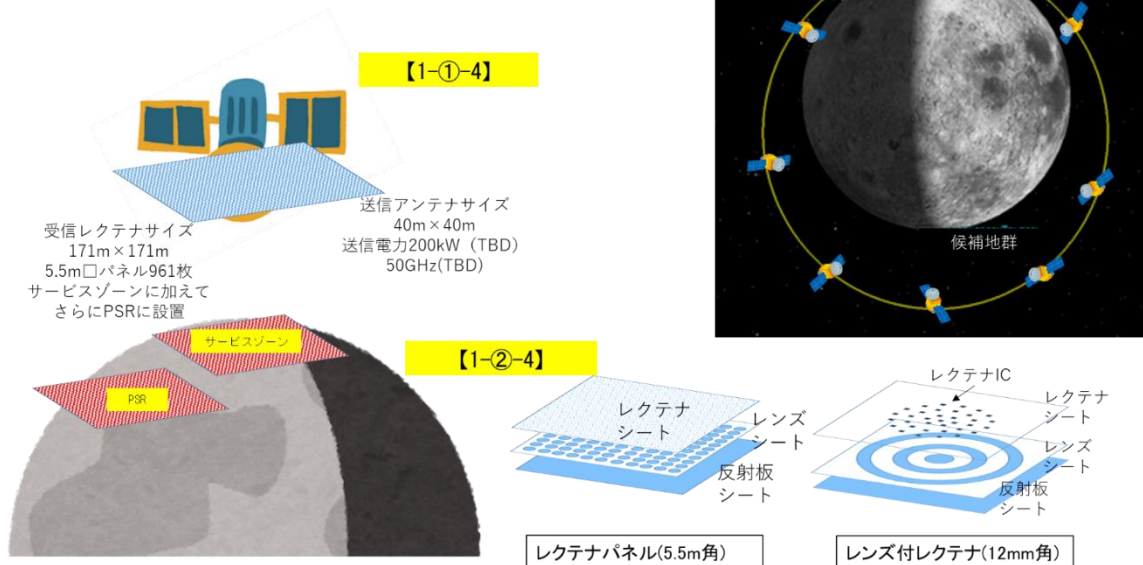


図 2-115 実証候補項目【1-①-4】衛星コンステレーション(7 機程度)による継続的 100kW 程度供給の実証

出所) 東洋大学作成

## 2) 月面受電レクテナ

月面受電レクテナにおいては、月軌道発電衛星コンステレーションより電力を受電し、月面電力グリッドに常に数百 kW 程度の電力を供給できる月面レクテナシステムの実現が目標である。

2025 年からの月面実証フェーズ0以前(前半)においては、前述の地球周回軌道上 LEO において、数十 kW の伝送実験のためのレクテナ技術の開発を行うと共に、月面上で構成が容易なレクテナ構造の構成検討と地上での原理実証実験を実施することとした。次に、2028 年からの月面実証フェーズ0 以前(後半)においては、地上における実証結果を反映し、月面設置レクテナシステムの開発を、月面探査結果による月面環境条件の反映ができればこれを含んで実施することとした。2030 年頃からの月面実証フェーズ0においては、月面電力用レクテナを月面サービスゾーンに建設し、月軌道上発電衛星の電力を月面電力グリッドへの接続を実証することとした。これは、月面で初めてレクテナを構築するための小規模なモデルでの実証を行うことを目的としている。次に、2030 年～2035 年の月面実証フェーズ1においては、フルサイズのモデルを開発し、サービスゾーンに加えて PSR 内にもレクテナを設置することで、衛星からの電力を受電することを目指している。2035 年からの月面実証フェーズ2においては発電衛星コンステレーションにおいて、継続的な受電を実証することや、衛星間の電力ハンドオーバー等を目指している。

以降で、各フェーズ、年代における実証候補項目について述べる。サービスゾーン及び PSR で月軌道発電衛星からの電力を受電して電力の供給を実現するため、月面での電力受電レクテナシステムの実証を行う。実用段階において、サービスゾーン及び PSR に対して軌道上 7 機程度の発電衛星より

100kW から 300kW 程度の電力を継続的に供給するシステムの構築を目標とする。以下の 4 つの実証候補項目に分けて実施することを想定する。

- ・ 実証候補項目【1-②-1】地球低高度発電衛星による実証向け 5.8GHz 帯  $\mu$ W レクテナ(レンズ付レクテナ 100mm 角開発)及び地上受電レクテナシステム開発実証
- ・ 実証候補項目【1-②-2】月軌道発電衛星による月面受電実証向けミリ波レンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによる 15m X 15m レクテナパネル (5.5m 角 9 枚)の開発実証
- ・ 実証候補項目【1-②-3】月面受電実証向けレクテナの大面积化(171m X 171m )
- ・ 実証候補項目【1-②-4】実用時の 7 機体制による 100kW-300kW 程度の電力の継続的電力供給のためのハンドオーバ技術等の制御技術の実証

#### a. 実証候補項目【1-②-1】 月面実証フェーズ 0 以前(前半) (2025 年～2028 年)

- 地球低高度発電衛星による実証向け 5GHz 帯  $\mu$ W レクテナ(レンズ付レクテナ 100mm 角開発)及び地上受電レクテナシステム開発実証

地球低高度発電衛星による実証向け 5GHz 帯  $\mu$ W レクテナ(レンズ付レクテナ 100mm 角開発)及び地上受電レクテナシステム開発実証を実施する。5GHz 帯  $\mu$ W レクテナパネルの概要を図 2-116 に示す。

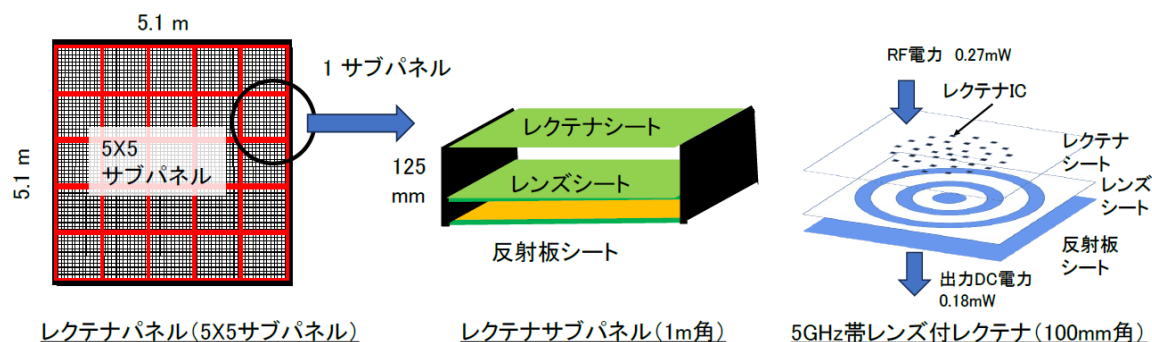


図 2-116 地上受電レクテナシステム用 5GHz 帯レクテナパネル

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

本フェーズでは以下を実施する。

- GaAs  $\mu$ W レクテナ MMIC の開発

日清紡マイクロデバイス GaAs プロセスにて、低閾値 GaAs E-pHEMT による高効率化(効率 70%@-1dBm)を実現。そのために段階的に短ゲート長( $0.25\mu\text{m} \Rightarrow 0.15\mu\text{m}$ )にするともに、エピ条件、電極寸法の最適化を行う。このデバイスを用いて、5GHz 帯レクテナを試作する。

- 平面レンズによる集光機構の設計、追尾機能の早期試作・検証

- レクテナプレート内の RF 電力分布により生じる直流電圧のばらつきを吸収し得る直流電力合成回路・DC-DC コンバータの開発の検討、試作
- 地球低高度軌道からの実証衛星の受電実証のための地上設置レクテナシステムの開発実証  
開発目標は、整流器効率 70%@-6dBm、5.1m 角レクテナパネルの実証である。

#### **b. 実証候補項目【1-②-2】 月面実証フェーズ 0 以前(後半)及び月面実証フェーズ0(2028年～2030年頃)**

月軌道発電衛星による月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによる 15m X 15m レクテナパネル(5.5m 角 9 枚)の開発実証を行う。

本フェーズでは以下を実施する。

- 50GHz(TBD)対応のレンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによるレクテナパネル(5.5m 角)の開発
- 上記レクテナにより受信レクテナサイズ 15m×15m(5.5m□パネル 9 枚程度使用)の開発と月面での実証
- 上記レクテナより月面にて月軌道上の小規模発電衛星からの 1kW 程度の電力受電の実証  
システム構成・配置としては、月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)を素子とする 5.5m 角のレクテナサブアレイパネルを 9 枚程度製作し、サービスゾーンに設置する。

#### **c. 実証候補項目【1-②-3】 月面実証フェーズ1 (2030年～2035年頃)**

月軌道発電衛星による月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによる55m X 55m レクテナパネル(5.5m 角100枚)の開発実証を行う。

本フェーズでは以下を実施する。

- 受信レクテナサイズを 55m×55m(5.5m□パネル 100 枚)に拡張
- 上記レクテナより月面にて月軌道上の実用向けの送信電力 20kW(TBD)50GHz(TBD)の発電衛星 1 機からの電力受電と月面サービスゾーンへの電力供給の実証

システム構成、配置としては、月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)を素子とする 5.5m 角のレクテナサブアレイパネルを 100 枚程度製作し、55m×55m 四方をサービスゾーンに設置する。

#### **d. 実証候補項目【1-②-4】 月面実証フェーズ2 (2035年～2040年頃)**

発電衛星コンステレーション(7 機)によりサービスゾーン及び PSR にて安定した継続的受電が可能なることを実証することなど、衛星間の電力ハンドオーバー技術の開発と実証を行う。

本フェーズでは以下を実施する。

- 受信レクテナサイズを 171m×171m(5.5m□パネル 961 枚)に拡張
- 月軌道上発電衛星 7 機による継続的な電力供給のためのハンドオーバー技術の実証により継続的に 100kW の電力を月面に供給
- 新たに PSR 内への月軌道上からの電力のためのサービスゾーンと同程度のレクテナシステムを PSR 内に設置

システム構成・配置としては、月面実証フェーズ1で設置したサービスゾーン内のレクテナに加え、PSR 内にも設置する。月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)を素子とする 5.5m 角のレクテナサブアレイパネルを 961 枚程度製作し、PSR 内に 171m×171m 四方に設置する。

### (3) 実証候補項目詳細

#### 1) 月軌道発電衛星

月軌道発電衛星関連の実証候補項目の詳細を表 2-86 から表 2-89 に示す。

表 2-86 実証候補項目【1-①-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象: 月軌道上発電衛星                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月軌道上にて発電し、無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面に対し、月周辺軌道から月面への電力送電性能評価を実施した後、実用に供することとなる                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証期間              | ・2025 年～2028 年(フェーズ 0 以前の前半)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【1-①-1】地球低高度軌道(LEO)での送電実証衛星の開発と軌道上実証<br>・現在の実証衛星を引き継ぐ送電電力数十キロワットクラスの LEO 実証衛星の開発<br>・送信アンテナ 18m 程度、周波数 5GHz 帯、超大規模薄型展開平面送電アンテナにより<br>＝ビーム形成機能の検証<br>＝目標への正確な送電機能の検証<br>＝隣接地域への電磁波影響評価<br>を地球低高度軌道より地上設置のレクテナシステムに対して実施する概念設計を行う。<br>・要素開発(1):折り畳み可能な太陽電池アレイの開発<br>将来数百 W/kg の発電システム開発の要素試作研究<br>・要素開発(2):展開方法の要素検討(太陽電池アレイ展開方法の要素検討)<br>月用 SPS の超軽量な太陽電池アレイ展開方法の開発<br>・要素開発(3):高出力ミリ波増幅器のモジュラー構造化<br>100W-200W ミリ波増幅器の搭載化検討<br>・要素開発(4):スロットアレイアンテナの開発<br>ミリ波送電モジュールに使用するスロットアレイアンテナの開発を行う。約 30cm 角程度。<br>・要素開発(5):C 帯半導体システムの開発(軽量気密封止集積化アンテナ技術の開発)<br>現状の技術では地上での長期保管や宇宙での長期使用に問題がある。さらに不要な配線ロス<br>を除去して電力伝送効率を上昇させる。またアンテナと増幅器モジュールを一对一構造にして、<br>アンテナ入力インピーダンスを広帯域に 50Ω に保ちアイソレータを不要にする。<br>金属或いはセラミック気密封止パッケージの 1/5 の重量で RF 性能劣化なしでのレドームを必要<br>としない気密封止を実現<br>集積化アンテナモジュール単体、高周波性能・信頼度試験クリア<br>・100W クラスミリ波宇宙実験の設計 |
| 月面への必要<br>輸送量     | 無し                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

出所)JAXA/ISAS 作成



表 2-87 実証候補項目【1-①-2】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           | ・実証対象: 月軌道上発電衛星                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証目的・必要性  | ・目的:月軌道上にて発電し、無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|           | ・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面に対し、月周辺軌道から月面への電力送電性能評価を実施した後、実用に供することとなる                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証期間      | ・2028 年～2030 (フェーズ 0 以前後半及びフェーズ 0)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 実証候補項目    | 【1-①-2】月軌道上で発電し、月面への小規模送電による開発実証を行う送電実証衛星の設計開発及び実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| (実証目標値)   | ・10kW クラスの月軌道上からの送電実験のための数十 m クラスの送電システム、数百 W の発電部を有する SPS の技術開発<br>(1)スロットアレイアンテナの高性能化(周波数の向上～50GHz)<br>(2)高出力ミリ波増幅器の高効率化<br>大電力増幅部の高効率化 50GHz, 50%<br>(3)10kW クラスの実証のための展開型送電システム開発<br>(4)数十kW クラスの発電システムの開発 目標値:500W/kg 程度(太陽電池と構造)<br>(5)半導体システムの高性能化<br>軽量気密封止パッケージを前提とした RF モジュールの高性能化・高周波化<br>5.8GHz 帯モジュール 効率 70%(現在)→80%へ<br>28GHz 帯モジュール 効率 40%(現在)→60%へ<br>システムの具体配置 1m×1mユニットパネルで実証.<br>100m×100mの基本設計を可能とするレベルを実現 |
|           | ・10kW クラス月軌道上送電技術実証のための衛星設計                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|           | ・100W クラスの宇宙実験:<br>OHISAMA プロジェクトの成果を基にミリ波送電システムの技術実証を行う。<br>地球周回軌道でフォーメンションフライトによるミリ波の無線送電実験<br>送電衛星から受電衛星に向けて 100W 程度のミリ波(40GHz 帯)を放射し、数十 W の受電を行う。<br>送電距離は 100m 程度(数十～km)<br>ミリ波送電、超軽量発電システムの技術実証<br>100kg 級小型衛星2機                                                                                                                                                                                                         |
| 月面への必要輸送量 | ・100W 送電ミッション:重量 300kg<br>(100W 級宇宙実験は地球周回低軌道あるいは月面上でも実施可能)<br><br>→フェーズ 0 以前後半とフェーズ 0 を 50%ずつに案分                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-88 実証候補項目【1-①-3】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象: 月軌道上発電衛星                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証目的・必要性  | ・目的:月軌道上にて発電し、無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面に対し、月周辺軌道から月面への電力送電性能評価を実施した後、実用に供することとなる                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証期間      | ・2030年～2035年(フェーズ1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目    | 【1-①-3】サービスゾーンに対しての月軌道上の実用規模衛星1機による発電と送電による100kW供給実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| (実証目標値)   | <p>・サービスゾーンに対しての衛星1機程度による100kW程度供給の実証するための、送信アンテナサイズ40m×40m、送信電力200kW(TBD)、50GHz程度のミリ波による送電の実施。</p> <p>・100kWクラスの月軌道上からの送電システムのための要素技術開発</p> <p>(1)50mクラスのミリ波送電システムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・周波数 50GHz</li> <li>・送電電力140kW程度</li> <li>・モジュラー構造による展開型システム</li> </ul> <p>(2)数百kWクラスの発電、送電システムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・質量特性 500W/kg</li> </ul> <p>・5.8GHz帯及び28GHz帯半導体システムの高性能化</p> <p>10m×10m級(28kW級)送電パネルの試作と地上実験</p> <p>軌道上での故障修理交換を考慮したプラグイン方式の自律型アレイユニットを試作し地上実験を行う。</p> |
| 月面への必要輸送量 | ・サービスゾーン送電実証衛星一機分 5000kg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

出所)JAXA/ISAS 作成

表 2-89 実証候補項目【1-①-4】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象: 月軌道上発電衛星                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証目的・必要性  | ・目的:月軌道上にて発電し、無線により月面へ送電する月軌道上発電衛星の開発実証<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面に対し、月周辺軌道から月面への電力送電性能評価を実施した後、実用に供することとなる                                                                                                                                                              |
| 実証期間      | ・2035年～2040年(フェーズ2)                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 実証候補項目    | 【1-①-4】サービスゾーン及びPSRに対しての実用規模衛星7機程度による発電と送電による100kW常時供給の実証                                                                                                                                                                                                                |
| (実証目標値)   | <p>・送信アンテナサイズ、40m×40m、送信電力200kW(TBD)、50GHz程度のミリ波による送電の実施。</p> <p>・複数衛星を協調制御し、継続的電力供給を実施するためのハンドオーバ技術等の制御技術の実装</p> <p>・月軌道からの100kW送電システムの実証</p> <p>25m～50m四方(TBD)で約140kW放射可能な送電システムを有し、数百kW発電可能な超軽量展開型ソーラーアレイを有する月用SPSを月の極軌道に投入し、また、極域に設置するレクテナを用いて、無線電力伝送プラントの実証を行う。</p> |
| 月面への必要輸送量 | ・常時電力供給のための7機体制に持つて行くための衛星追加6機分 30000kg                                                                                                                                                                                                                                  |

出所)JAXA/ISAS 作成

## 2) 月面受電レクテナ

月面受電レクテナ関連の実証候補項目の詳細を表 2-90 から表 2-93 に示す。

表 2-90 実証候補項目【1-②-1】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象:月面での電力受電レクテナシステム                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 実証目的・必要性  | ・目的:サービスゾーン及び PSR で月軌道発電衛星からの電力を受電して電力の供給を実現するため<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面での受電性能評価のためには月面にて実施する必要がある                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証期間      | ・2025 年～2028 年(フェーズ 0 以前前半)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目    | 【1-②-1】地球低高度発電衛星による実証向け 5GHz 帯 $\mu$ W レクテナ(レンズ付レクテナ 100mm 角開発)及び地上受電レクテナシステム開発実証                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| (実証目標値)   | 【開発実証内容】<br>・GaAs $\mu$ W レクテナ MMIC(月面上での送電システム用 1W レクテナ用 GaAsc MMIC と相乗り)。日清紡マイクロデバイス GaAs プロセスにて、低閾値 GaAs E-pHEMT による高効率化(効率 70%@-1dBm)を実現。そのために段階的に短ゲート長( $0.25\mu\text{m} \Rightarrow 0.15\mu\text{m}$ )にするとともに、エビ条件、電極寸法の最適化を行う。(【1-②-1】～【1-②-2】共通)<br>・平面レンズによる集光機構の設計。また追尾機能の早期試作・検証<br>・レクテナプレートの RF 電力分布により生じる直流電圧のばらつきを吸収し得る直流電力合成回路・DC-DC コンバータの開発<br>・地球低高度軌道からの実証衛星の受電実証のための地上設置レクテナシステムの開発実証<br><br>【目標値】<br>・整流器効率 70%@-6dBm、5.1m 角レクテナパネル |
| 月面への必要輸送量 | 無し                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

表 2-91 実証候補項目【1-②-2】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象:月面での電力受電レクテナシステム                                                                                                                                 |
| 実証目的・必要性  | ・目的:サービスゾーン及び PSR で月軌道発電衛星からの電力を受電して電力の供給を実現するため<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面での受電性能評価のためには月面にて実施する必要がある                                                                          |
| 実証期間      | ・2028 年～2030 年(フェーズ 0 以後後半及びフェーズ 0)                                                                                                                                            |
| 実証候補項目    | 【1-②-2】月軌道発電衛星による月面受電実証向けレンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによる 15m X 15m レクテナパネル(5.5m 角 9 枚)の開発実証                                                                                            |
| (実証目標値)   | 【開発実証内容】<br>・50GHz(TBD)対応のレンズ付レクテナ(12mm 角)及びそれによるレクテナパネル(5.5m 角)の開発<br>・上記レクテナにより受信レクテナサイズ 15m×15m(5.5m 角パネル 9 枚程度使用)の開発と月面での実証<br>・上記レクテナより月面にて月軌道上の小規模発電衛星からの 1kW 程度の電力受電の実証 |
| 月面への必要輸送量 | 小規模電力受電実証レクテナ重量: 400kg                                                                                                                                                         |

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

表 2-92 実証候補項目【1-②-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                              |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象:月面での電力受電レクテナシステム                                                                                                                                    |
| 実証目的・必要性          | ・目的:サービスゾーン及び PSR で月軌道発電衛星からの電力を受電して電力の供給を実現するため<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面での受電性能評価のためには月面にて実施する必要がある                                                                             |
| 実証期間              | ・2030 年～2035 年(フェーズ 1)                                                                                                                                                            |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【1-②-3】月面受電実証向けレクテナの面積化(55m X 55m )<br>【開発実証内容】<br>・受信レクテナサイズを 55m×55m(5.5m□パネル 100 枚)に拡張する<br>・上記レクテナより月面にて月軌道上の実用向けの送信電力 20kW(TBD)50GHz(TBD)の発電衛星 1 機からの電力受電と月面サービスゾーンへの電力供給の実証 |
| 月面への必要<br>輸送量     | サービスゾーンでの電力受電レクテナの拡張のための重量: 3600kg                                                                                                                                                |

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

表 2-93 実証候補項目【1-②-4】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月周辺軌道太陽光発電システム<br>・実証対象:月面での電力受電レクテナシステム                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証目的・必要性          | ・目的:サービスゾーン及び PSR で月軌道発電衛星からの電力を受電して電力の供給を実現するため<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面での受電性能評価のためには月面にて実施する必要がある                                                                                                                                                                                        |
| 実証期間              | ・2035 年～2040 年(フェーズ 2)                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【1-②-4】実用時の 7 機体制による 100kW 程度の電力の継続的電力供給のためのハンドオーバー技術等の制御技術の実証、並びに PSR への直接送電のための PSR 内へのレクテナの設置<br>【開発実証内容】<br>・受信レクテナサイズを 171m×171m(5.5m□パネル 961 枚)に拡張する<br>・月軌道上発電衛星 7 機による継続的な電力供給のためのハンドオーバー技術の実証により継続的に 100kW の電力を月面に供給する<br>・新たに PSR 内への月軌道上からの電力のためのサービスゾーンと同程度のレクテナシステムを PSR 内に設置する |
| 月面への必要<br>輸送量     | PSR 内の電力受電レクテナの設置のための重量: 36000kg                                                                                                                                                                                                                                                             |

出所)金沢工業大学、東洋大学作成

## 2.2.4 月面設置発電システムに係る検討

### (1) 月面設置発電システムに係る検討

#### 1) 太陽電池セルに係る検討

##### a. 月面設置発電システム用太陽電池セルに求められる特徴

太陽電池は材料、接合数、厚みにより構造が分類される。

##### 材料による分類

下記に大別される。

- ・シリコン系      結晶シリコンとアモルファスシリコンに分類。
- ・化合物系      ガリウム-ヒ素等の III-V 族系(単結晶)、CIS、CdTe に分類。
- ・有機系          色素増感型太陽電池や、ペロブスカイト太陽電池に分類。

##### 接合数・厚みによる分類

半導体としての p-n 接合数によりも分類され、構造が単純な単接合型と、より高効率な多接合型があり、支持基板が無い又は薄い構造を持つ薄膜太陽電池がある。

宇宙用太陽電池に要求される特性としては、 $10^{-9}$  パスカ以下の高真空下で、放射線に曝露され、 $-100^{\circ}\text{C}\sim+100^{\circ}\text{C}$ に近い熱衝撃を受けながら動作することが求められる。地上用太陽電池と宇宙用太陽電池では、材料や構造等の基本設計は同じであるが、宇宙環境においては、下記特性が要求される。

- (1)変換効率      設置面積が限られることによる高い変換効率
- (2)軽量          打上げ、輸送コストの低減のための軽量化
- (3)熱光学特性   高い周囲環境温度でも少ない変換効率ロス
- (4)耐放射線性   長期間放射線に曝露されても少ない発電効率低下
- (5)高信頼性      故障しても容易に交換できないことによる高い信頼性

(1)～(5)の特性をバランスよく満たすのが III-V 族系 3 接合型薄膜太陽電池(IMM3J セル)である。発電層は III-V 族の単結晶で構成されるため、高効率・高信頼性であり、接合数としても(InGaP/GaAs/InGaAs)の 3 つの発電層が積層されているため、より高効率である。構造としても発電層のみであり通常の太陽電池に存在する厚い支持基板が無く、薄膜構造であるため他のセルより軽量となる。月面発電システムを構成するための太陽電池セルとして、高効率で軽量であることは輸送コストに大きく影響するため、IMM3J セルが最適と考えられ、ここでの検討は IMM3J をベースに行った。なお、月面での発電が可能であることも 2024 年 1 月に JAXA の小型月面着陸実証機 SLIM にて確認された。



## b. IMM3J セル太陽電池モジュールの特徴

IMM3J セル一例として、シャープ製 IMM3J セルの特性を図 2-117 に示す。

AM0, 周囲温度 25℃において市販されている宇宙用太陽電池の中ではトップクラスの効率となる 31.0%となっている。前述の通り薄膜構造であるため、セル自体に柔軟性がある。また、重量も約 500mg(セルサイズ 27.4cm<sup>2</sup>)であり、薄膜タイプではない基板付き化合物 3 接合セルの 1/4 以下と非常に軽量となっている。今後3つの積層された各太陽電池の膜厚や構成材料、電極面積、反射防止膜等の構造を最適化することにより 2035 年までに発電効率 40%を目指す想定である。

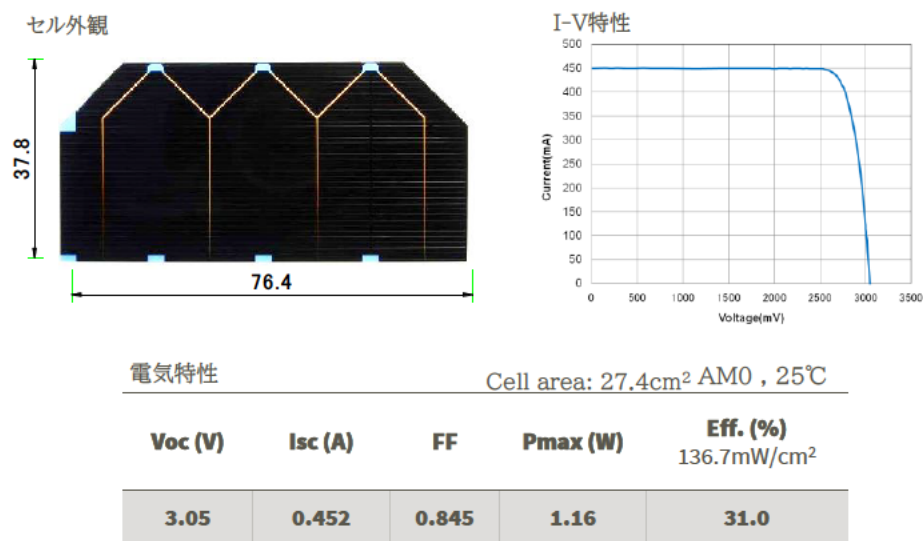


図 2-117 IMM3J セルの外観と電気特性

出所) シャープ㈱作成

IMM3J セルは、放射線からの表面保護材として 0.1mm 程度の薄いカバーガラスを用いてモジュール化される。

月面での発電を想定した場合には、ミッション期間は数年以上と想定されるため、高い放射線耐性、熱衝撃耐性を備えたモジュール構造の開発が必要である。また、月面に存在するレゴリス付着による発電効率低下を防止するために帯電防止機構を備える必要がある。さらに、これらを備えた構造のモジュールが長期間、月面で問題なく使用できるかを実証する必要がある。



## 2) 太陽光発電架台に係る検討

### a. 発電架台検討の前提

発電架台の検討を行うにあたり、下記の前提を置く。

- 月面南極域に設置(詳細な場所はb.設置場所参照)と想定した。太陽光はほぼ水平に入射することから、タワー型太陽光発電システムを前提とした。
- 必要電力を供給するために、必要な同じ仕様のものを複数台設置するとした。発電パターンは、2023 年度に実施した<sup>5</sup>日照シミュレーション結果を用い、各タワー相互の影や場所による日照パターンの違いは無視する想定とした。
- 実証スケジュールは、他の機器への電力供給の時期と合わせる方針とした。

### b. 設置場所

当該月面設置発電システムは「理学的条件」と「工学的条件」の2つの観点から選定された南極点に近い候補地点1(図 2-118)と緯度が 85 度と南極点からやや離れた候補地点2(図 2-119)の、それぞれの日照率が高く得られる地点であるサービスゾーンに設置されるものとした。

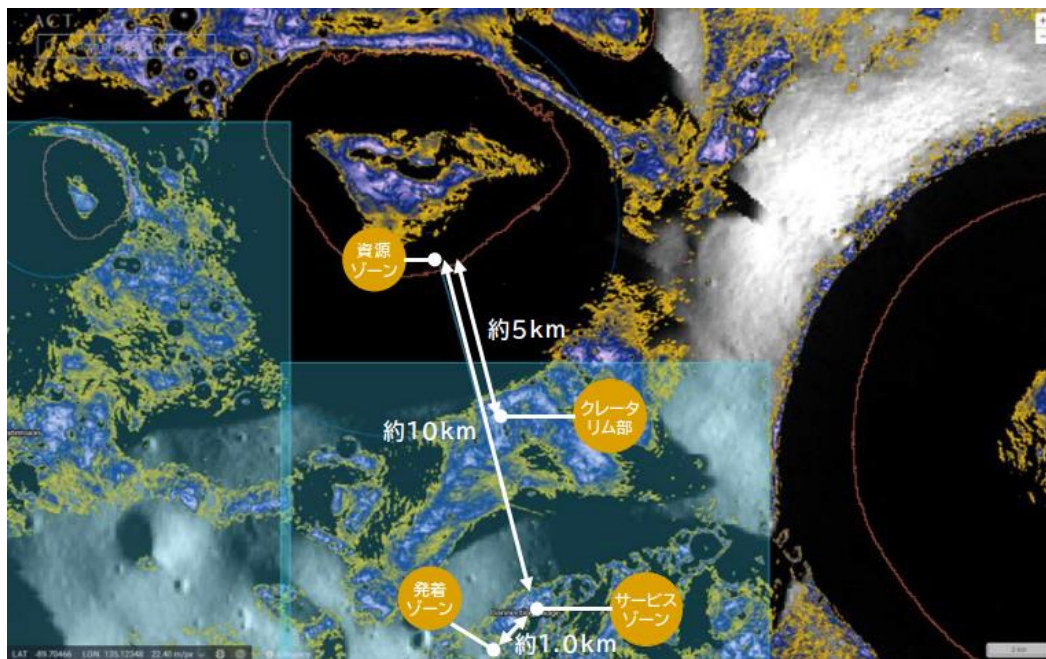


図 2-118 候補地点1(Connecting Ridge)

PSR 中心位置は(LAT:-89.51, LON:280.65),サービスゾーンは(LAT:-89.43, LON: 222.95)

出所) LROC: QuickMap (asu.edu)に基づいて三菱総合研究所作成

<sup>5</sup> 令和4年度補正宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)）報告書、三菱総合研究所、日本宇宙フォーラム、2024 年 3 月

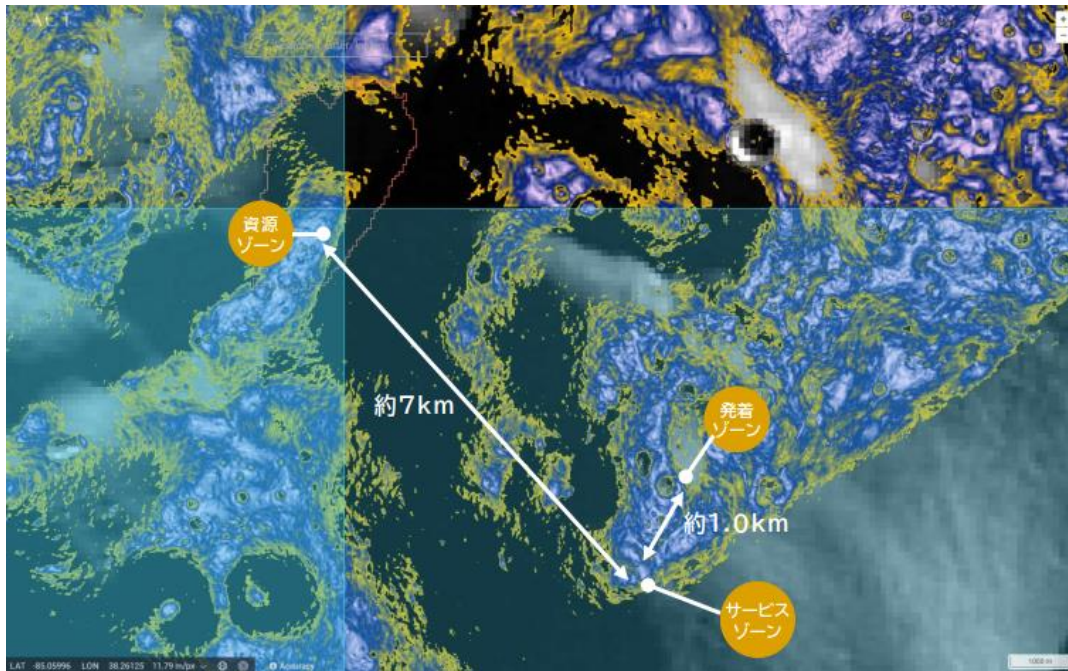


図 2-119 候補地点 2(Nobile Rim 1)

PSR 中心位置は(LAT:-85.21, LON:33.83),サービスゾーンは(LAT:-85.29, LON: 36.91 )

出所) LROC: QuickMap (asu.edu)に基づいて三菱総合研究所作成

### c. 運転パターン変更による容量・質量の変化

昨年度の検討において、上記の設置場所にて日照／影時間のシミュレーションを実施し、発電・蓄電システム全体で質量が最適となる太陽光発電システム発電電力と蓄電池の容量と質量ならびに質量軽減方策について、検討を行った。本年度は、機器の稼働運転パターンを日照時間が100時間継続する場合のみ稼働と変更することにより、発電・蓄電容量と質量がどのように変化するかを検討した。検討結果を以下に示す(質量が最小となる組合せを選択)。

- 年間を通したトータルの水素生成量は同量となるよう、稼働時は影となる時間に稼働停止していた分の水素も生成する。  
稼働時の給電量は、年間を通して同じとなるように行う。(例えば、地点1では、常時運転：100kW、日照時のみ稼働：112kW(日照率89.5%)、日照100時間以上のみ稼働：123kW(稼働率81.4%))。なお、待機電力は10kWとした。
- 日照時に余剰電力を蓄電するが、蓄電池がフルの時は、必要な電力以上は発電しない。
- 影時は蓄電池から放電を行う。
- 太陽電池および蓄電池の比質量は表 2-94 の日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 の値を使用する。(太陽電池：0.1kW/kg、リチウムイオン電池：0.25kWh/kg、燃料電池：0.5kWh/kg)

表 2-94 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 における電源系候補の構成とそのトレードオフ結果

| 項目            |                      | 候補 A                               |       | 候補 B                         |       | 候補 C                                                |     |       |
|---------------|----------------------|------------------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|-----|-------|
| 構成機器の詳細       |                      | 太陽電池 (SAP)<br>+<br>リチウムイオン電池 (LIB) |       | 太陽電池 (SAP)<br>+<br>燃料電池 (FC) |       | 太陽電池 (SAP)<br>+<br>燃料電池 (FC)<br>+<br>原子力エネルギー (RPS) |     |       |
|               |                      | SAP                                | LIB   | SAP                          | FC    | SAP                                                 | FC  | RPS   |
| 太陽電池系         | 太陽電池[kW]             | 6.0                                | -     | 6.0                          | -     | 4.0                                                 | -   | -     |
|               | 太陽電池の比質量[kW/kg]      | 0.1                                | -     | 0.1                          | -     | 0.1                                                 | -   | -     |
|               | 原子力エネルギー [kWE]       | -                                  | -     | -                            | -     | -                                                   | -   | 1.0   |
|               | 原子力エネルギーの比質量[kWE/kg] | -                                  | -     | -                            | -     | -                                                   | -   | 0.005 |
| リチウムイオン電池系    | リチウムイオン電池[kWh]       | -                                  | 750   | -                            | -     | -                                                   | -   | -     |
|               | リチウムイオン電池の比質量[kW/kg] | -                                  | 0.25  | -                            | -     | -                                                   | -   | -     |
|               | 燃料電池[kW]             | -                                  | -     | -                            | 750   | -                                                   | 360 | -     |
|               | 燃料電池の比質量[kW/kg]      | -                                  | -     | -                            | 0.5   | -                                                   | 0.5 | -     |
| 質量内訳 [kg]     |                      | 60                                 | 3,000 | 60                           | 1,500 | 40                                                  | 720 | 200   |
| 合計質量 [kg]     |                      | 3,060                              |       | 1,560                        |       | 960                                                 |     |       |
| 質量によるトレードオフ結果 |                      | ×                                  |       | △                            |       | ○                                                   |     |       |
| 技術的成熟度、実現性    |                      | ○                                  |       | △                            |       | ×                                                   |     |       |
| 総合            |                      | ×                                  |       | ○                            |       | ×                                                   |     |       |

出所)日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021, JAXA, 2022 年 3 月

本年度はリチウムイオン電池と再生型燃料電池の2パターンについて検討を行った。再生型燃料電池については、図 2-120 に示すように、日照時は余剰電力により水を水素と酸素に電気分解し、影時はその水素と酸素を使って燃料電池により発電を行うものとし、燃料電池・電気分解装置、水タンク・酸素タンク・水素タンクから構成されるシステム全体で充電システムとして使用するものとした。

なお、充放電効率はそれぞれ、リチウムイオン電池 95%、再生型燃料電池 50%とした。

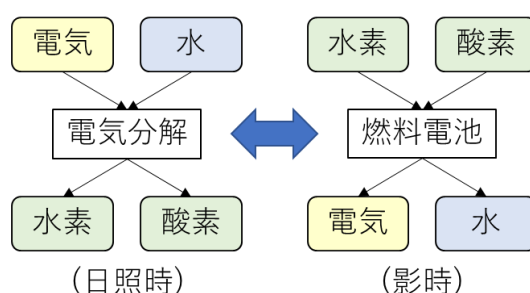


図 2-120 再生型燃料電池運転パターン

出所)大林組作成

検討結果は表 2-95 に示すとおりであり、特に地点 1 では日照 100 時間以上のみ稼働としたものが最も軽くなるとの結果となった。これは、図 2-121 のように短い時間で日照と影を繰り返す時間の影響であり、日照時は常に稼働としているため、蓄電量が大きく復活しないが、日照 100 時間以上のみ稼働とした場合は、短時間の日照時に機器が稼働せず、全て充電に当てられるため、蓄電量が回復したためである。

これらのことから、日照時間 100 時間以上のみ稼働は発電・蓄電システム側にとってメリットのある方法であると考えられる。

表 2-95 運転パターンごとの質量が最小となる発電・蓄電容量

| パターン    |                    | 発電容量<br>(kW) | 蓄電容量<br>(MWh) | 質量(t) |
|---------|--------------------|--------------|---------------|-------|
| 地点<br>1 | 常時100kW給電(Li)      | 522          | 7.38          | 34.7  |
|         | 日照時のみ稼働(Li)        | 153          | 0.742         | 4.50  |
|         | 日照100時間以上のみ稼働(Li)  | 125          | 0.738         | 4.20  |
|         | 常時100kW給電(RFC)     | 333          | 8.64          | 20.6  |
|         | 日照時のみ稼働(RFC)       | 135          | 0.864         | 3.08  |
|         | 日照100時間以上のみ稼働(RFC) | 126          | 0.738         | 2.74  |
| 地点<br>2 | 常時100kW給電(Li)      | 166          | 24.5          | 99.5  |
|         | 日照時のみ稼働(Li)        | 123          | 2.45          | 11.0  |
|         | 日照100時間以上のみ稼働(Li)  | 123          | 2.45          | 11.0  |
|         | 常時100kW給電(RFC)     | 225          | 24.5          | 51.2  |
|         | 日照時のみ稼働(RFC)       | 128          | 2.45          | 6.18  |
|         | 日照100時間以上のみ稼働(RFC) | 126          | 2.45          | 6.15  |

出所)大林組作成

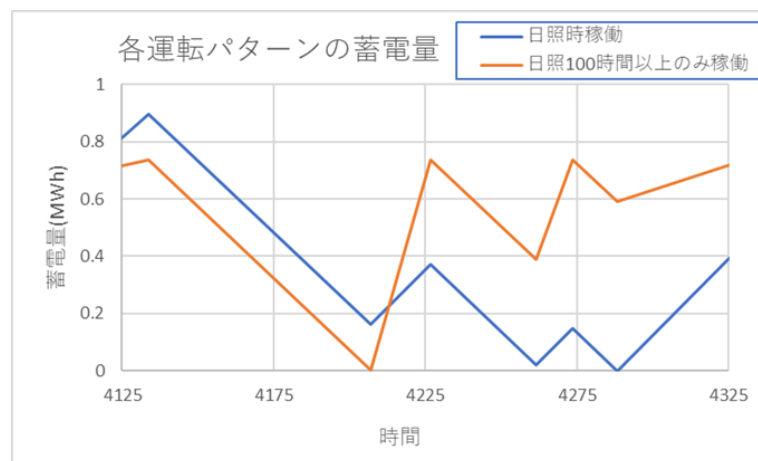


図 2-121 蓄電量の経時変化

出所)大林組作成

#### d. 各フェーズにおける発電タワー台数の想定

各フェーズでの必要電力およびタワーの台数の検討を行った。前提として、有線の送電効率は85%、無線の送電効率は25%、蓄電は再生型燃料電池を想定した。発電・蓄電システムの重量を軽減させるためには太陽電池の発電量にある程度余剰を持たせることが良く、表 2-96 のように必要電力に対して表の右側に示す倍数分の容量の発電タワーを設置とするとした。また、安全率を考慮してさらに1.1倍とした。タワーの発電量は月面実証のフェーズ0では300W/台、月面実証のフェーズ1以降は10kWと仮定した。検討結果を表 2-97 に示す。



表 2-96 消費電力値に対する太陽電池必要容量の倍数

| パターン |    | 設置容量倍数 |
|------|----|--------|
| 地点1  | 常時 | 3.33   |
|      | 間欠 | 1.26   |
| 地点2  | 常時 | 2.25   |
|      | 間欠 | 1.26   |

出所)大林組作成

表 2-97 必要電力と必要タワー基数

| 場所           | 接続 | 運転 | 必要電力(kW) |       |       |       |
|--------------|----|----|----------|-------|-------|-------|
|              |    |    | フェーズ0    | フェーズ1 | フェーズ2 | フェーズ3 |
| サービス         | 有線 | 間欠 | 6        | 98    | 140   | 130   |
| 居住           | 有線 | 常時 | —        | —     | 300   | 360   |
| 観測           | 有線 | 常時 | 0.04     | 0.12  | 0.4   | 4     |
| 資源           | 無線 | 間欠 | 0.35     | 0.715 | 49.75 | 283.5 |
| 必要発電容量(地点1)  |    |    | 10.8     | 224.9 | 1,635 | 3,047 |
| 必要発電容量(地点2)  |    |    | 10.8     | 224.7 | 1,253 | 2,585 |
| 太陽光発電タワー必要基数 |    |    |          |       |       |       |
| 地点1          |    |    | 40基(小型)  | 25基   | 180基  | 336基  |
| 地点2          |    |    | 40基(小型)  | 25基   | 138基  | 285基  |

出所)大林組作成

### e. 発電タワー配置について

発電タワーの配置を検討するため、まず、他のタワーによる影の影響について検討を行った。

図 2-122 のように追尾式発電タワーの回転半径を 1 とした場合、中心距離がその何倍かで他のタワーによって日照に影響を受ける太陽光の方位角の幅がどれくらいになるかを検討した。その結果、表 2-98 のように半径の 8 倍以下だと、1 日以上発電電力が半分以下になる時間が継続することが確認された。半径の 6～8 倍以上の距離があれば発電電力量全体への影響は少ないが、影の影響で出力が半分以下になる継続時間が長くなるため、その影響を考慮して、蓄電池や運転パターンの詳細な検討が必要と考えられる。

多くのタワーが並んだ列が複数ある場合の影の影響を調べると、図 2-123 のように隣の列のタワーの影響が大きいと考えられる結果となった。特に遠くに並んでいるタワーがあると、一つ一つの影の時間は短いですが、複数のタワーが連続して影をつくるため、影の時間が長くなる可能性があることが分かった。

このことから、直線状にならべる場合は隣の列は出来るだけ離れた方が良く、3 列以上並んだ場合は真ん中の列は他のタワーによる日照への影響が全方位で影響を受けることが想定されるため列数は少なくした方が効率的であることが分かった。

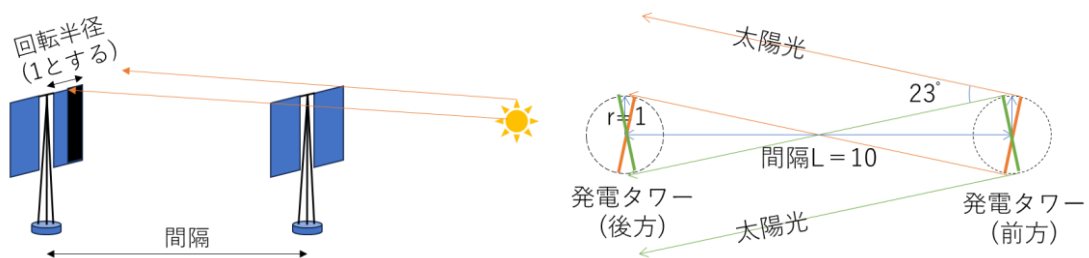


図 2-122 発電タワーの前後関係(左:イメージ、右:上から見た図)

出所)大林組作成

表 2-98 前後の間隔による前方のタワーの影響を受ける時間

| 間隔 | 影響のある方位角幅(度) | 影響を受ける時間 | 発電が半分以下になる時間 |
|----|--------------|----------|--------------|
| 4  | 60           | 118      | 57.0         |
| 6  | 38.9         | 76.7     | 37.8         |
| 8  | 29.0         | 57.0     | 28.3         |
| 10 | 23.1         | 45.2     | 22.6         |
| 15 | 15.3         | 30.2     | 15.1         |
| 20 | 11.5         | 22.6     | 11.3         |
| 25 | 9.2          | 18.1     | 9.0          |
| 30 | 7.6          | 15.1     | 7.5          |

出所)大林組作成

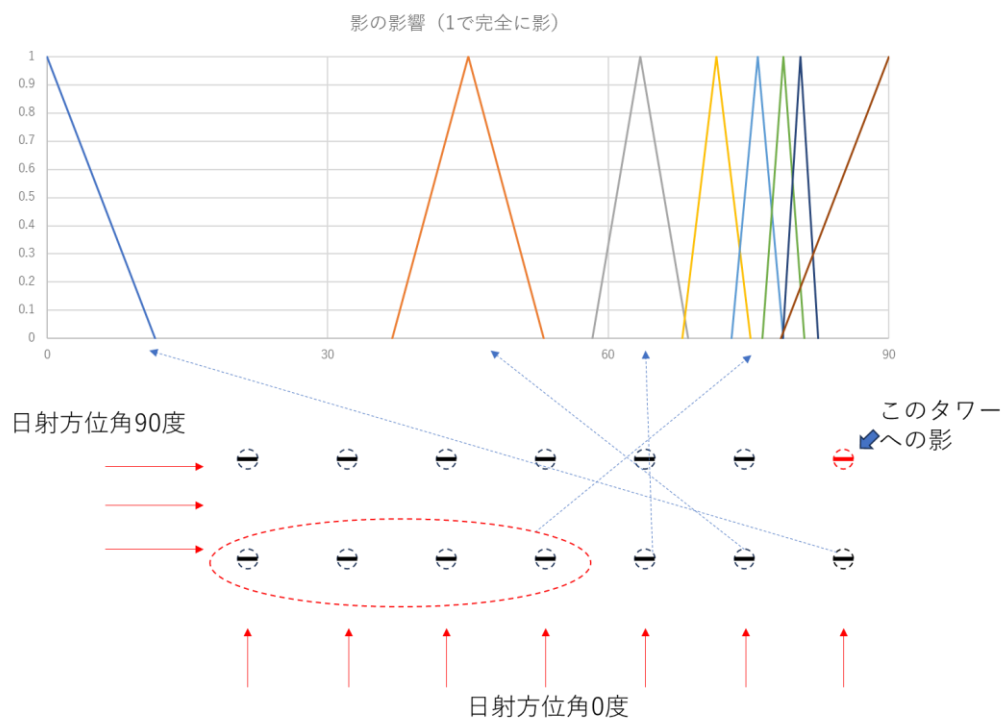


図 2-123 他のタワーによる影のかかり方

出所)大林組作成



## f. 月面設置型太陽光発電システムの設置可能量

NASA の論文(Illumination conditions at the lunar poles: Implications for future exploration)によると、候補地点 1 において日射が 80%以上得られる地点は図 2-124 に示すように限られている。サービスゾーンとして想定される場所は、図 2-124 から大まかに測定すると約 150m×約 200m の場所が日照率 80%以上の場所であった。また、サービスゾーンから発着ゾーンまでの間も日照率が良い場所があり、大まかに測定すると幅 100m×長さ 1km 程度の範囲であった。

図 2-123 に他のタワーの影の影響について示したが、2 列に一定間隔で並んだ状態であると、他の列の影響が大きいことが分かった。これが複数列ならんだとすると、真ん中にある列は、両方向の列の影の影響を受けるため、発電量が大幅に落ちると考えられる。そのため、近距離で複数列のタワーを並べるのは好ましくないと考えられることから、2 列程度の並びを想定した。

10kW 太陽光発電システムのパネルサイズは 3mW×6mH×2 面とし、各タワーの中心間の距離を 20m 離して直線状に配置するとした場合、サービスゾーンで一列 11 基設置できることとなる。フェーズ 1 では 25 基設置が必要であるという前提としているため、16.7m 間隔で 1 列 13 基を両端 2 列で設置することが考えられる。

フェーズ 2 では、それに加えて発着ゾーン方向にも間隔 16.7m で 2 列並べて配置するとした場合、120 基(計 1200kW)の発電が可能となる。サービスゾーンの発電量を加えると、1450kW となるが、必要電力には若干不足するため、図 2-124 のサービスゾーンの左下の部分に設置範囲を広げて対応することが想定される。

実証フェーズ 3 の電力を供給するためには、今回前提とした条件での月面設置型太陽光発電のみでは難しい。そのため、

- (1)軌道上発電衛星やその他の影時間を含めて常時発電可能な発電方法を組み合わせる。
- (2)発電タワーの高さを大幅に高くする。

等の対策を行うことが必要である。特に、上記(1)について、2FT の観点からも検討すべき事項であると考えられる。また、(2)については、米国では高さ 100m の 100kW の発電タワーの検討も行われているように、高さを上げるにより、他のタワーへの影響を押さええて発電容量を大きくできるとともに、地形による影の影響も緩和出来るというメリットが得られる。しかし、高さを上げる分、構造・強度、安定性、運搬、設置・固定方法等の様々な課題がある。もし、フェーズ 3 以降も月面設置型の太陽光発電をメインで考える場合は、フェーズ 2 での開発・実証が必要と考えられる。

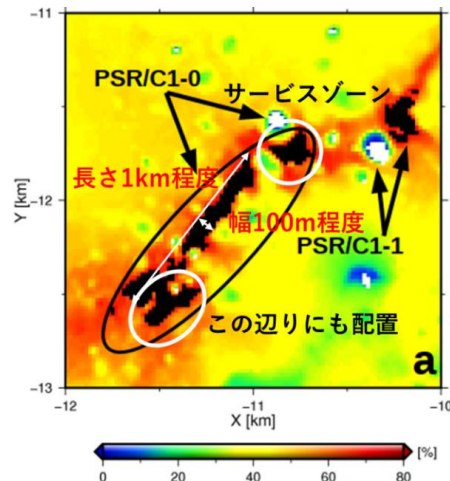


図 2-124 候補地点 1 の日照率

出所) Illumination conditions at the lunar poles: Implications for future exploration より大林組作成

## (2) 実証候補項目

### 1) 実証に関する全体像

実証項目の全体像を表 2-99 に示す。2)で各フェーズの実証候補項目について示す。

表 2-99 実証候補項目の全体像

|            |            | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：地上／LEO実証<br>電力：地上／LEO実証                                                     | 月面実証フェーズ0以前<br>水素：月面調査<br>電力：月面調査及び実証                                                                                    | 月面実証フェーズ0<br>水素：単体実証<br>電力：本格給電実証                                                  | 月面実証フェーズ1<br>水素：部分統合実証<br>電力：本格給電/複数方式開始                                                                                  | 月面実証フェーズ2<br>水素：統合実証/初期稼働<br>電力：大電力化/有人常駐対応                                       | 月面実証フェーズ3<br>水素：本格稼働<br>電力：移動体給電 |
|------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|            |            | 2025年～2028年                                                                                   | 2028年～2029年頃                                                                                                             | 2030年頃                                                                             | 2030年～2035年頃                                                                                                              | 2035年～2040年頃                                                                      | 2040年頃～                          |
| 月面設置発電システム | 太陽電池セル/パネル | 前放射線構造設計<br>放射線透過設計<br>放射線試験<br>温度特性評価<br>実証候補項目 [2-①-1]                                      | 月面実証向け太陽電池設計、<br>調達、製造<br>製品化開発                                                                                          | 6kw級実証<br>実証候補項目 [2-①-5]                                                           | 100kW級実証<br>実証候補項目 [2-①-9]                                                                                                | 実運用<br>500kW級                                                                     | 実運用<br>500kW級                    |
|            |            | 太陽電池パネル構造<br>の軽量・低容積化<br>展開試験<br>振動試験<br>実証候補項目 [2-①-2]                                       | 月面実証向けパネル設計、調<br>達、製造<br>製品化開発                                                                                           | 6kw級実証<br>実証候補項目 [2-①-6]                                                           |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            |            | 太陽電池モジュールの<br>月面環境対応<br>レゴリス付着防止設計<br>熱サイクル耐性設計・試験<br>実証候補項目 [2-①-3]                          | 製品構造での環境試験                                                                                                               | 6kw級実証<br>実証候補項目 [2-①-7]                                                           |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            | 太陽光発電架台等   | 展開機構：架台伸張<br>機構、パネル平面展開<br>機構<br>太陽追尾回転機構<br>(耐塵機構含)<br>土台・脚部安定機構<br>太陽電池パネル結合<br>機構<br>材料構造系 | 地上実証<br>・月面実証向け設計・調達・製<br>造・試験・評価<br>[2-①-4]                                                                             | ・月面実証向け設計・調達・製<br>造・試験・評価                                                          | ・数m級実証・運用 [2-①-8]                                                                                                         | ・規模拡大により、複数のタワー<br>設置における影の影響を考慮し<br>た発電システムの配置の検討<br>・スマート化<br>・本格運用<br>[2-①-11] | ・本格運用<br>[2-①-12]                |
|            |            | 統合制御系                                                                                         | ソフトウェア・コンポーネ<br>ント開発<br>・地上実証（太陽指向、テレメ<br>トリ、ヒーター、スマート化等の機<br>能化、総合実証）[2-①-4]<br>・月面実証向け設計<br>・電源制御系開発(BBM)<br>・月面実証向け設計 | ・詳細地形データ入手による発<br>電量予測高精度化<br>・実証向け設計・調達・製造・試<br>験・評価<br>・月面実証向け設計・調達・製<br>造・試験・評価 |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            |            | 電源系                                                                                           | 電源制御系開発<br>・月面実証向け設計                                                                                                     | ・詳細地形データによる発電量<br>予測高精度化、需要側データと統<br>合した発電シミュレーション<br>・設置場所、必要容量、設置台<br>数、蓄電容量検討   |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            | 計画         | 設置場所・発電量検<br>討                                                                                | ・設置場所周辺の地形データ<br>の入手、3Dモデル作成                                                                                             |                                                                                    | ・数m級のタワー型太陽光発電<br>システムの運用開始<br>・規模拡大<br>・大電力化に向けてのタワー型<br>太陽電池の大型化（10数m<br>級）の実証<br>・複数の発電・需要家をつなぐス<br>マート化実証<br>[2-①-10] |                                                                                   |                                  |
|            |            |                                                                                               |                                                                                                                          |                                                                                    |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            |            |                                                                                               |                                                                                                                          |                                                                                    |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |
|            |            |                                                                                               |                                                                                                                          |                                                                                    |                                                                                                                           |                                                                                   |                                  |

出所) 大林組作成

## 2) 各フェーズ、年代における実証候補項目について

### a. 月面実証フェーズ 0 以前(前半)

月面実証フェーズ 0 以前(前半)においては、地上実証として図 2-125 に上げたような項目の検証が想定される。

太陽電池セルに関しては、設置数低減を目的としたセルの高効率化と長寿命化を目的とした耐放射線化、輸送コスト削減のための軽量化・低容積化、信頼性向上のためのレゴリス付着防止・熱サイクル耐性の開発が必要となる。また、架台に関しては、展開機構・架台伸展機構・パネル平面展開機構、太陽追尾回転機構、土台・脚部安定機構、材料構造系、統合制御系(図 2-126)、電源制御系の各機構の開発が必要となる。

なお、月面実証フェーズ 0 以前に月面で水素発生装置などの機器の実証を行う場合、タワー型発電システムの提供は難しく、既存の太陽光発電システムでの電力供給が想定される。

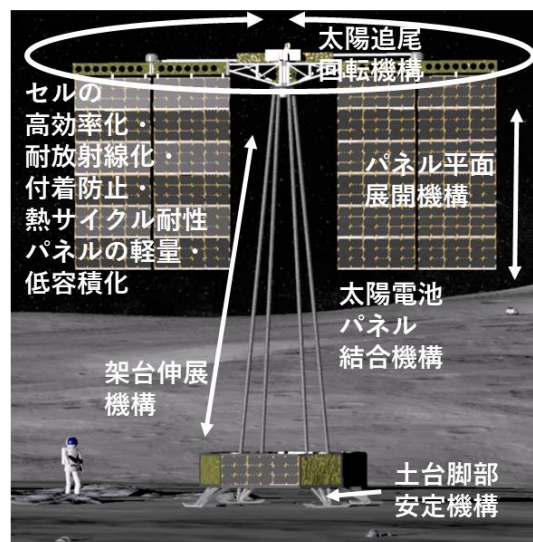


図 2-125 月面実証フェーズ 0 以前(前半)(地上実証)の実証項目

出所)大林組作成

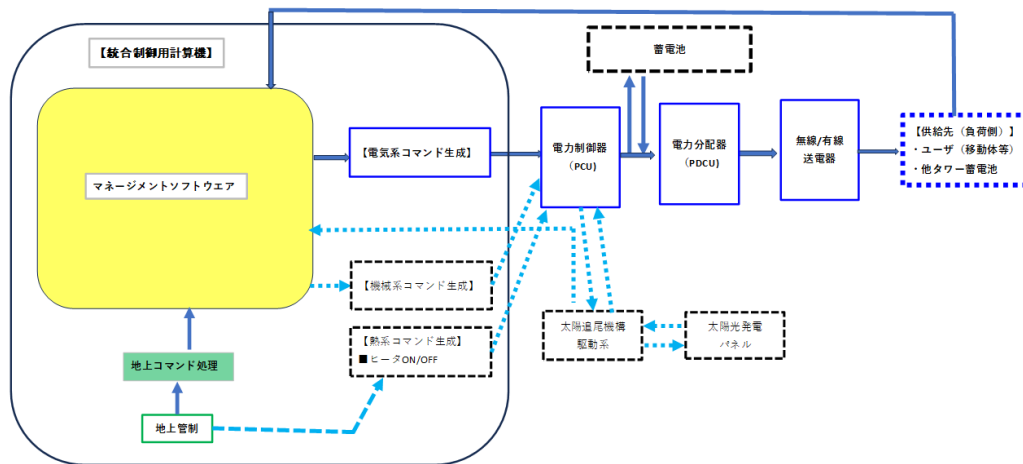


図 2-126 統合制御系ブロックダイアグラム

出所)大林組作成

## b. 月面実証フェーズ 0 以前(後半)

月面実証フェーズ 0 以前(後半)では、月面実証フェーズ 0 以前(前半)で地上実証した項目から、月面での小型実証に向けて設計・機器の製造等を行うことが考えられる。また、月面実証フェーズ 0 以前(前半)で新たな課題が出てきた場合は、追加で開発を行うことが必要となる。

## c. 月面実証フェーズ 0

月面実証フェーズ 0 では、月面実証フェーズ 0 以前(前半)で地上実証した項目の月面での小型実証フェーズとなり、図 2-127 のような実証候補項目が挙げられる。

太陽電池セルに関しては、設置数低減を目的としたセルの高効率化と長寿命化を目的とした耐放射線化、輸送コスト削減のための軽量化・低容積化、信頼性向上のためのレゴリス付着防止・熱サイクル耐性の月面実証が必要となる。また、架台に関しては、展開機構・架台伸展機構・パネル平面展開機構、太陽追尾回転機構、土台・脚部安定機構、材料構造系、統合制御系、電源制御系の各機構の月面実証が必要となる。

月面で小型実証を行う太陽光発電タワーを数 m 級 300W と仮定すると、地点 1、地点 2 とともに 40 基(例えば 20 基(10m 間隔)×2 列、図 2-128 のように列に並んだものを 2 列とする)が必要である。なお、10m 級であれば 1、2 基で供給可能であるので、地上実証の結果によって、大型での実証に変更することも検討が必要であると考えられる。月面実証フェーズ 0 における必要電力は表 2-97 にて算出したように 10.8kW であることより、タワーの発電容量 300W で 40 基と想定する。目標は 0.1kW/kg であるが、実証段階であることと、小型であることから、0.05～0.1kW/kg と想定して、必要となる輸送重量は 120～240kg と想定した。

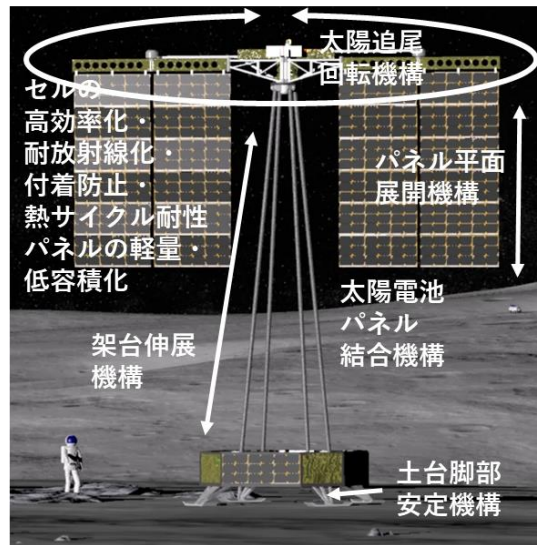


図 2-127 月面実証フェーズ 0 の実証項目(月面小型実証)

出所)大林組作成

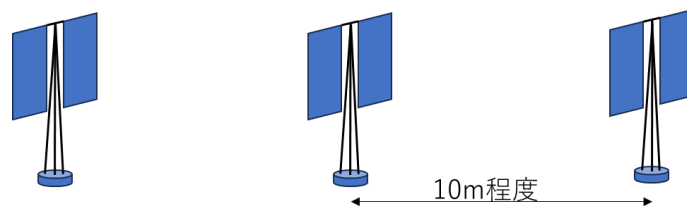


図 2-128 太陽光発電タワーの直線状配置の例

出所)大林組作成

#### d. 月面実証フェーズ 1

月面実証フェーズ 1 では、EFM モデルでの実証を兼ねた大型の発電タワーの実証を行うと想定する。実証と言いつつも他の機器への電力供給の任も担っている。サービスゾーンで約 100kW が必要となることから、蓄電池質量の最適化や送電効率等を考慮すると太陽光による発電量として 225kW 分の設置が必要となる。タワー 1 基当たり 10kW と想定していることから、タワーを複数基設置することが必要となる。ただし、密集状態となるため、影の影響評価、蓄電池設置、複数台の連携制御が必要となる。また、サービスゾーン・観測ゾーン間が 5km、かつ、観測ゾーンの電力が 120W と大きくないことや、無線送電の観測ゾーンへの影響を考慮すると、観測ゾーンへの太陽光発電・充電設備設置が考えられる。

タワーの設置量を 10kW×25 基と想定し、月面実証フェーズ 0 と同様開発途中であることから、0.05～0.1kW/kg と想定して、必要となる輸送重量は 2500～5000kg と想定した。

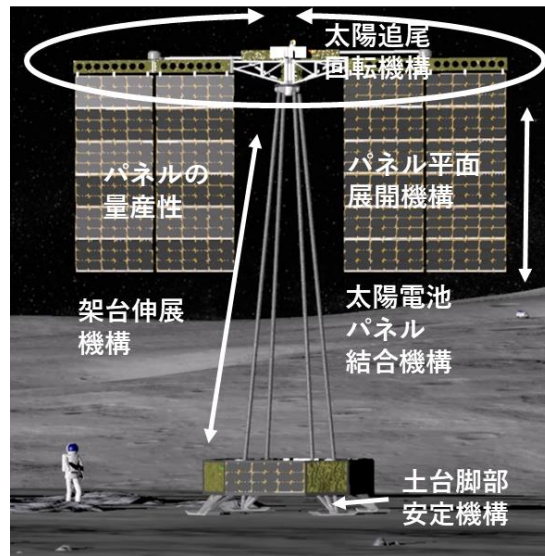


図 2-129 月面実証フェーズ 1 の実証項目(月面大型実証)

出所)大林組作成

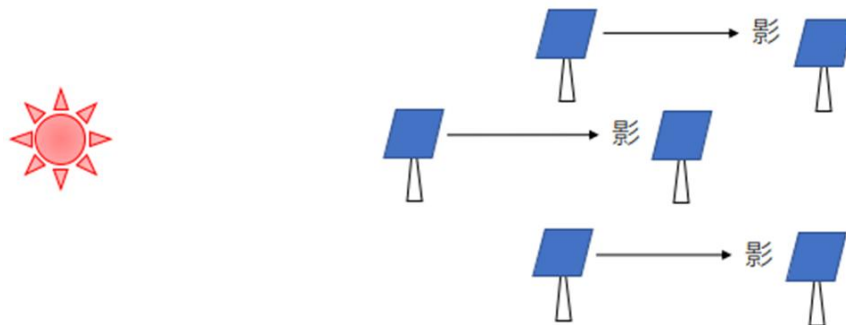


図 2-130 各タワー間の影の影響(イメージ)

出所)大林組作成

### e. 月面実証フェーズ 2 以降

月面実証フェーズ 2、月面実証フェーズ3は月面設置型太陽光発電については、月面実証フェーズ 1 で実証したタワーの実運用、ビジネス化のフェーズであると考えられる。

送電効率が小さい場合や、夜間の供給電力が大きく蓄電量を減らすために発電容量を増加させたい場合には、日照率が良いところでは設置しきれない可能性がある。設置可能な場合でも、基数が多くなるため、制御方法の検討や影の影響の検討が必要となる。図 2-131 に示すようなサービスゾーンから発着ゾーン間の通路部分への太陽光発電設置も必要となると考えられる。10m 級タワー10kW のタワーを仮定すると、地点 1 で 180 基、地点 2 で 138 基必要となり、かなりの基数となるため、互いの影の影響が大きくなることが想定され、地形・各タワーの影響を考慮した詳細なシミュレーションが必要となる。月面実証フェーズ 2 では設置容量を地点 1 で 1800kW、地点 2 で 1380kW より、0.1kW/kg が実現したと想定して、必要となる輸送重量は 1400～1800kg と想定した。月面実証フェーズ 3 では、現状の仕様では設置場所選定が困難であるが設置場所が想定できたと仮定し、2850～3360kW 設置として、同様に必要となる輸送重量を 28500～33600kg と想定した。



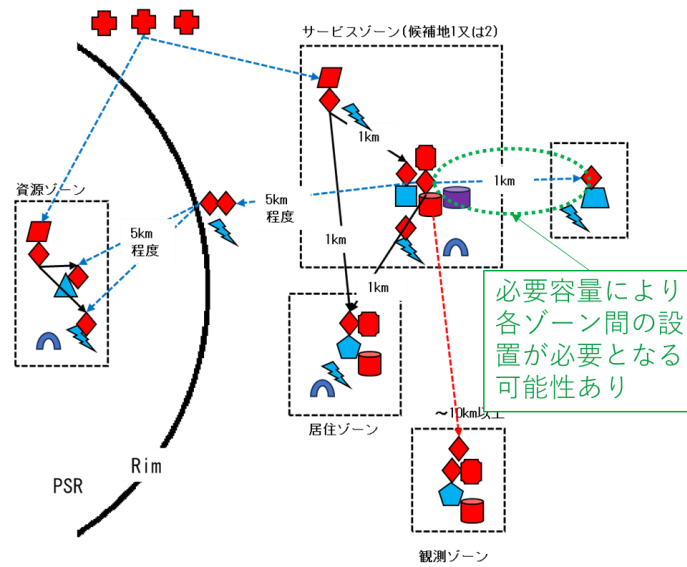


図 2-131 各ゾーン・ゾーン間へのタワー設置イメージ

出所)J-spacesystems 作成に大林組が追記作成

### (3) 実証候補項目詳細

#### a. 月面実証フェーズ 0 以前(前半)

月面実証フェーズ 0 以前(前半)の地上実証項目について、表 2-100～表 2-103 に示す。

表 2-100 実証候補項目【2-①-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                               |
|-------------------|------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セルの高効率化と高耐放射線性化          |
|                   | ・実証対象:耐放射線構造設計、放熱構造設計、放射線試験、温度特性評価 |
| 実証目的・必要性          | ・目的:太陽電池発電効率の向上による設置数低減と長寿命化       |
|                   | ・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:              |
| 実証期間              | ・2025 年～2028 年                     |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セルの高効率化】                      |
|                   | ・太陽電池半導体層の改善、温度特性評価                |
|                   | ・電極構造改善による発電ロス削減                   |
|                   | ・太陽電池表面反射防止膜の改善による太陽光の有効利用         |
|                   | 【太陽電池の高耐放射線性化】                     |
|                   | ・太陽電池半導体層の改善、放射線試験実施による評価          |
|                   | 【目標値】                              |
|                   | ・初期発電効率 35%                        |
|                   | ・月面環境、10 年後の発電効率保存率 90%            |
| 月面への必要輸送量         | —                                  |

出所)大林組作成

表 2-101 実証候補項目【2-①-2】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                   |
|-------------------|----------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池パネル構造の軽量・低容積化                |
|                   | ・実証対象:構造設計、展開試験、振動試験                   |
| 実証目的・必要性          | ・目的:パネル軽量・低容積化による運送コスト低減               |
|                   | ・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                  |
| 実証期間              | ・2025 年～2028 年                         |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池パネル構造の軽量化】                        |
|                   | ・使用材料選定                                |
|                   | ・使用材料の薄膜化検討と物理強度評価、振動試験評価              |
|                   | 【太陽電池パネルの低容積化】                         |
|                   | ・収納方式(巻取または折り畳み)の検討と展開試験実証             |
|                   | ・モジュール連結方法の設計、連結モジュール品の製造、振動試験評価       |
|                   | 【目標値】                                  |
|                   | ・パネルでの出力重量比 (300W/kg)                  |
|                   | ・パネル収納時での出力容積比 (1700W/m <sup>3</sup> ) |
| 月面への必要輸送量         | —                                      |

出所)大林組作成

表 2-102 実証候補項目【2-①-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池モジュールの月面環境対応<br>・実証対象:レゴリス付着防止設計、熱サイクル耐性設計・試験                                                                                                                                               |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面環境での信頼性向上<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                                                                                                                                                              |
| 実証期間              | ・2025 年～2028 年                                                                                                                                                                                        |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面でのレゴリス付着防止対策】<br>・表面導電膜選定、コーティング方法開発<br>・レゴリス付着防止効果の評価<br>【月面での温度環境評価】<br>・高温および低温環境下での太陽電池モジュール健全性評価<br>・熱サイクル試験評価<br>【目標値】<br>・レゴリス付着による電気特性低減 5%以下<br>・月面環境 10 年での温度環境に対する信頼性確保(温度起因の特例劣化 5%以下) |
| 月面への必要輸送量         | —                                                                                                                                                                                                     |

出所)大林組作成

表 2-103 実証候補項目【2-①-4】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | タワー型太陽電池パネルの要素技術開発<br>・技術項目:太陽光発電架台の展開・太陽光追尾・沈み込み量と脚部安定化機構の確認、統合制御系の地上実証、発電量予測技術<br>・実証対象:太陽光発電架台や統合制御系の開発・地上実証、地形データ入手によるシミュレーション技術                                                                       |
| 実証目的・必要性          | ・目的:展開機構、追尾機構、脚部安定化機構、統合制御系の地上実証、より正確な発電量予測                                                                                                                                                                |
| 実証期間              | ・2025 年～2029 年                                                                                                                                                                                             |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【展開機構、太陽光追尾機構、脚部安定化機構】<br>・数百 W 級の太陽光発電システムに関する軽量な機構の開発・実証<br>・動作の安定性の確認<br>・大型化の実証<br>・真空試験<br>・統合制御系の実証<br>・設置場所周辺の地形データの入手、3D モデル作成、発電量シミュレーションの高精度化<br>【目標値】<br>・小型:数百 W<br>・大型:10kW(将来的には数十 kW 級を目指す) |
| 月面への必要輸送量         | —                                                                                                                                                                                                          |

出所)大林組作成

## b. 月面実証フェーズ 0

月面実証フェーズ 0 の月面小型実証項目について、表 2-104～表 2-107 に示す。

表 2-104 実証候補項目【2-①-5】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                  |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セルの高効率化と高耐放射線性化<br>・実証対象:6kW 級実証                                                                                            |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面実環境での発電量確認<br>・月面実証の必要性:月面での実環境における耐放射線性評価を行い、地上試験との差異が無いことを確認する。日射角度や温度特性がどれほど実発電に影響があるか確認する必要がある。                             |
| 実証期間              | ・2030 年頃                                                                                                                              |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セルの高効率化】<br>・6kW 級作成時の太陽電池歩留評価<br>・月面実環境での発電効率確認<br>【太陽電池の高耐放射線性化】<br>・放射線劣化評価<br>【目標値】<br>・初期発電効率 35%<br>・月面環境、1 年後の発電効率保存率 95% |
| 月面への必要輸送量         | 2-①-6 太陽電池パネル輸送量に含む                                                                                                                   |

出所)大林組作成

表 2-105 実証候補項目【2-①-6】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                               |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池パネル構造の軽量・低容積化<br>・実証対象:6kW 級実証                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:輸送時および月面実環境での搭載性と展開実証<br>・月面実証の必要性:大気が無く、重力が 1/6 の月面環境で展開時に軽量かつ低容積化されたパネルが問題なく展開されることを確認する必要がある。                                                                                               |
| 実証期間              | ・2030 年頃                                                                                                                                                                                           |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池パネル構造の軽量化】<br>・月面展開時での発電量確認<br>・月面での外観目視確認(打上および輸送時のダメージ確認)<br>【太陽電池パネルの低容積化】<br>・収納方式と展開方式の実証<br>・モジュール連結方法健全性実証<br>【目標値】<br>・パネルでの出力重量比 (300W/kg)<br>・パネル収納時での出力容積比 (1700W/m <sup>3</sup> ) |
| 月面への必要輸送量         | 太陽電池パネル:20kg、3.5m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                     |

出所)大林組作成

表 2-106 実証候補項目【2-①-7】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                          |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池モジュールの月面環境対応<br>・実証対象:6kW 級実証                                                                                                                       |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面環境での信頼性実証<br>・月面実証の必要性:月面での実環境において、レゴリス付着防止構造について有用であることを確認。月面環境固有の故障事象有無を確認                                                                            |
| 実証期間              | ・2030 年頃                                                                                                                                                      |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面でのレゴリス付着防止対策】<br>・実環境でのレゴリス付着防止評価<br>【月面での温度環境評価】<br>・実環境でのパネル温度測定<br>・実環境での温度-発電量特性取得<br>・故障事象の抽出<br>【目標値】<br>・実環境のレゴリス付着による電気特性低減 5%以下<br>・実環境での温度起因故障ゼロ |
| 月面への必要輸送量         | 2-①-6 太陽電池パネル輸送量に含む                                                                                                                                           |

出所)大林組作成

表 2-107 実証候補項目【2-①-8】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | 数m級のタワー型太陽光発電システムの実証<br>・技術項目:太陽光発電架台の展開・収縮機能の繰り返し、太陽光追尾機構、沈み込み量と脚部安定化機構の確認、発電量の確認、その他月面環境での影響評価、影の影響も考慮した発電システムの具体的配置の検討<br>・実証対象:太陽光発電小型(数 m 級)実証機                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:軽量小型の太陽光発電小型実証機での月面での動作・発電確認<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:1/6 重力下での展開・収縮機能の確認、周辺地形による太陽光追尾機能の影響確認、レゴリスの軟弱地盤での沈み込み量の確認ならびに沈み込みに対する脚部安定化機構の確認、月面環境下で発電可能なことを確認                                                                    |
| 実証期間              | ・2030 年～2035 年程度                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【展開機構】<br>・1/6 重力下でも展開することの確認、展開時の振動が架台に影響を与えないことの確認<br>・繰り返しの展開収縮試験により、レゴリス等が影響しないことの確認<br>【太陽光追尾機構】<br>・周辺の地形やレゴリスがセンサーに付着した状況でも問題無いことを確認<br>【脚部安定化機構の確認】<br>・整地後の沈み込みの特性の把握<br>・脚部安定化機構の動作確認<br>【発電システムの確認】<br>・発電システム全体の確認 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 120～240[kg]/基(内訳: )                                                                                                                                                                                                    |

出所)大林組作成

### c. 月面実証フェーズ 1

月面実証フェーズ 1 の月面大型実証項目について、表 2-108～表 2-109 に示す。

表 2-108 実証候補項目【2-①-9】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                        |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目：太陽電池パネル量産性検証                                          |
|                   | ・実証対象：100kW 級実証                                             |
| 実証目的・必要性          | ・目的：輸送時および月面実環境での搭載性と展開実証                                   |
|                   | ・月面実証の必要性：6kW 級実証で得られた知見を活かし、さらにスケール拡大した際の太陽電池パネルの製造安定性を確認。 |
| 実証期間              | ・2030～2035 年頃                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池量産性検証】                                                 |
|                   | ・月面での発電量検証(100kW レベルでの生産ばらつき)                               |
|                   | 【太陽電池パネル展開成功率検証】                                            |
|                   | ・月面での展開成功率実証                                                |
|                   | 【目標値】                                                       |
|                   | ・生産ばらつき±10%以内<br>・展開成功率 95%以上                               |
| 月面への必要輸送量         | 太陽電池パネル：333kg、58.8m <sup>3</sup>                            |

出所)大林組作成

表 2-109 実証候補項目【2-①-10】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | 大型化実証                                                                |
|                   | ・技術項目：大型太陽光発電システムの展開・収縮機構、太陽光追尾機構、脚部安定化機構の確認、発電量の確認、高電圧化の確認、スマート化の確認 |
|                   | ・実証対象：太陽光発電大型(10m級)実証機                                               |
| 実証目的・必要性          | ・目的：軽量小型の太陽光発電大型実証機での月面での動作・発電確認                                     |
|                   | ・実用に耐えうる発電容量を持つ大型太陽光発電システムの月面での動作確認                                  |
| 実証期間              | ・2032 年～2035 年程度                                                     |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【大型化実証】                                                              |
|                   | ・10m 級の太陽光発電システムの総合実証                                                |
|                   | 【スマート化】                                                              |
|                   | ・複数の発電システムで様々な電力需要に対応できるスマート化の実証を行う。                                 |
|                   | 【高電圧化】                                                               |
|                   | ・発電量の増加に伴い、損失低下のため、高電圧化の実証を行う。                                       |
| 月面への必要輸送量         | ・重量：合計約 2500～5000[kg](内訳： )                                          |

出所)大林組作成



#### d. 月面実証フェーズ2以降

月面実証フェーズ2以降について、月面実証フェーズ1において課題が出てきた場合にその対応に関する実証が必要となる場合も考えられるが、基本的には実用化段階と考えられる。表 2-110 に月面実証フェーズ2の必要輸送量を、表 2-111 に月面実証フェーズ3の必要輸送量を示す。なお、月面実証フェーズ3以降も太陽光発電をメインとして電力供給を行う場合、高高度のタワーの設置が必要となるため、月面実証フェーズ2にて、高高度タワーの実証、月面実証フェーズ3での実運用と言うストーリーも考えられる。

表 2-110 実証候補項目【2-①-11】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                |
|-----------|-------------------------------------|
| 実証項目      | 実証段階でなく本格運用段階                       |
| 実証目的・必要性  |                                     |
| 実証期間      | ・2035年～2040年程度                      |
| 実証候補項目    |                                     |
| (実証目標値)   |                                     |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計 14000～18000[kg](内訳: )太陽光発電のみ |

出所)大林組作成

表 2-111 実証候補項目【2-①-12】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                |
|-----------|-------------------------------------|
| 実証項目      | 実証段階でなく本格運用段階                       |
| 実証目的・必要性  |                                     |
| 実証期間      | ・2040年～                             |
| 実証候補項目    |                                     |
| (実証目標値)   |                                     |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計 28500～33600[kg](内訳: )太陽光発電のみ |

出所)大林組作成

## 2.2.5 月面上送電システムに係る検討

### (1) 送電全体

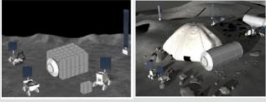
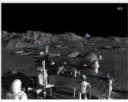
#### 1) 送電全体に係る検討

##### a. 検討内容

今後想定される月面の活動として、EZA-2021001「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」(JAXA 国際宇宙探査センター 宇宙探査システム技術ユニット文書 公開版)を参考に整理したものを表 2-112 に示す。2030 年代後半から長期滞在のための月面上での送電システムを構築するためには、2020 年代後半から小規模の実証を開始する必要があると考えられる。

月面上での送電システム構築に向けて今年度は表 2-113 に示す検討を行った。

表 2-112 想定される月面利用と電力システム

|          | フェーズ                                                                                          | 概要                                                                            | 想定される電力システム                |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 2020年代前半 | 利用可能調査<br>  | 資源利用と拠点建設の根拠となる現地で利用可能な物質や地盤の調査                                               | 個々のローバーの太陽電池、バッテリー         |
| 2020年代後半 | 利用実証                                                                                          | 長期滞在でクリティカルとなるISRU(＝現地資源利用)および建設作業の事前実証                                       | 電力システムの小規模実証               |
| 2030年代前半 | 拠点建設開始<br> | 有人科学探査(年1回)<br>無人による有人拠点建設(作業機械を地球から送り込み、地上から遠隔施工。有人ミッションの機会を利用して、多少の有人作業あり。) | 作業効率化のため、拠点建設のための電力システムが必要 |
| 2030年代後半 | 有人長期滞在<br> | 拠点の拡張、有人滞在(500日)。将来の拡張に向けた作業。                                                 | 電力システムの規模拡大                |

出所)IHI エアロスペース作成

表 2-113 今年度の検討内容

| STEP | 検討内容                                                      | 条件                                | 備考       |
|------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 1    | 月面上での送電システムに対してフェーズ毎に各システムで必要となる電力を定める                    | 全体システムとして整理                       | 検討のインプット |
| 2    | 各システムの位置関係等を考慮し、各フェーズのシステム構成を策定する。今年度はローバーへの電力供給も検討対象とする。 | 水素パートとの結節点 (I/F) を意識した規模・タイミングとする |          |
| 3    | 各フェーズの送電システムを実現するために必要な技術実証項目(技術課題)を識別し、実証候補項目としてとりまとめる   | 実証時期が集中することを可能な限り避ける              |          |

出所) IHI エアロスペース作成

上記の検討を行う前提条件を、電力パート全体に係る前提条件(フェーズや必要電力など)を踏まえ、以下の通り設定した。

- 月面上送電システムに接続される、供給側(月面上太陽光発電、軌道上発電)の出力電力は安定化した後の出力である前提とする(太陽電池やレクテナの制御機能の実装は想定しない)。
- 水素製造プラント側との結節点としては、プラント側で必要な時期に必要な電力を供給できるような送電システムとすることで、I/F することとした。
- ローバーへの無線送電は、以下の 2 ステップで実証を行うこととした。
  - ターゲットを給電ステーションとして、固定局⇒固定局間の送電を行う(実証する)。  
【月面実証フェーズ 0 以前、月面実証フェーズ 1】
  - 給電ステーションへの送電をベースラインとして、技術実証としての位置付けで、これと併用したローバーへの直接送電を実証する。【月面実証フェーズ 2】
- 各フェーズのシステム検討結果は 2.2.2 項に示された内容を前提としており、本項ではそのうち送電システムに関する範囲の詳細を示している。

なお、給電対象のローバーの仕様については、ispace より提示された図 2-132 の情報を前提とし、ローバーに実装する受電装置のサイズの妥当性を検討した。

#### 電力パートフェーズ0以前（2028年～2029年）

\* 水素パート探査実証0 STEP2に相当（次頁以降参照）

- 直近で水探査を始めるための小型ローバー
- ローバー質量：～25kg,
- ペイロード質量：10kg
- 最大走行距離：合計1000m以下想定



##### 【JSS様からの確認事項】

- 概略寸法の上限：0.7x0.7x0.7m（想定最大エンベロープ）
- 重量的な制約：10kg程度
- ローバの各「面」の制約：
  - 側面：太陽電池パネルを搭載
  - 前後：カメラやスコープ/ドリル等を搭載
  - 上面：比較的搭載余地あり
  - 底面：レーザや顕微鏡で部分的に占有されている可能性あり
  - 内部：主なペイロード電気機器は内部に収める想定

#### 電力パートフェーズ0（2030年頃）

\* 水素パート探査実証1 STEP3に相当（次頁以降参照）

- 実証を経て実用探査に向けたサイズアップ版
- ローバー質量：～150kg,
- ペイロード質量：50kg
- 最大走行距離：合計1000m以上目標



##### 【JSS様からの確認事項】

- 概略寸法の上限：1.2x1.2x1.2m（想定最大エンベロープ）
- 重量的な制約：50kg程度
- ローバの各「面」の制約：
  - 左の小型ローバと同じ

図 2-132 給電対象として想定したローバーの仕様

出所)ispace 資料より抜粋

## b. 各フェーズにおける検討条件

以降の検討に関しては、各開発フェーズの検討条件(想定される電力送電先の種類および送受電距離、必要電力)について月面電力全体システムの検討結果に準じた検討を行った。実証候補項目の検討条件として、月面上での送電システムに係る内容をフェーズ毎のブロック図として整理した。またシステム構成における、前フェーズからの追加要素から技術課題が生じるという観点から、ブロック図中で追加要素を特定し、その中から識別した送電システム全体に関する技術課題を併記した。整理結果を表 2-114 から表 2-118 に示す。

なお、「月面実証フェーズ0以前」には、月面上実証が想定されていないため、ここでは記載を省略している。

表 2-114 フェーズ 0 以前(後半):月面上送電全体システムの構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <div data-bbox="735 331 928 365" data-label="Section-Header"> <h2>フェーズ0以前</h2> </div> <div data-bbox="715 412 796 432" data-label="Text"> <p>探査ローバ</p> </div> <div data-bbox="735 441 775 477" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="740 510 770 544" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="799 506 896 544" data-label="Text"> <p>非接触給電等<br/>による送電</p> </div> <div data-bbox="691 566 833 613" data-label="Text"> <p>給電ステーション</p> </div> <div data-bbox="740 645 770 660" data-label="Text"> <p>350 W</p> </div> <div data-bbox="836 584 896 600" data-label="Text"> <p>350 W</p> </div> <div data-bbox="1099 477 1200 515" data-label="Text"> <p>太陽光<br/>発電システム</p> </div> <div data-bbox="994 627 1024 645" data-label="Text"> <p>100 m</p> </div> <div data-bbox="928 730 1029 745" data-label="Text"> <p>無線送電実証</p> </div> <div data-bbox="328 835 406 853" data-label="Text"> <p>資源ゾーン</p> </div> <div data-bbox="1244 828 1355 846" data-label="Text"> <p>サービスゾーン</p> </div> <div data-bbox="309 887 541 1032" data-label="Diagram"> <p>     — 有線送電<br/>     - - - マイクロ波送電<br/>     . . . レーザー送電   </p> </div> <div data-bbox="595 1016 675 1032" data-label="Text"> <p>観測ゾーン</p> </div> <div data-bbox="304 1115 1002 1243" data-label="List-Group"> <ul style="list-style-type: none"> <li>※ 技術課題検討対象のコンポーネントを実線枠で示した。</li> <li>※ 前フェーズに対して、新規要素となるコンポーネントを赤枠で囲い識別した。</li> </ul> </div> <div data-bbox="1147 1111 1372 1265" data-label="Diagram"> <p>     [Blue Box] マイクロ波送電設備<br/>     [Orange Box] マイクロ波受電設備<br/>     [Green Box] レーザー送電設備<br/>     [Yellow Box] レーザー受電設備   </p> </div> |
| 技術課題   | <div data-bbox="799 1594 863 1621" data-label="Text"> <p>N/A</p> </div> <div data-bbox="496 1637 1169 1666" data-label="Text"> <p>(月面上での送電システム全体に関する追加要素はない)</p> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

表 2-115 フェーズ 0:月面上送電全体システムの構成と課題

|        |                                                                                                                                            |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p style="text-align: center;"><b>フェーズ0</b></p> <p>※ 技術課題検討対象のコンポーネントを実線枠で示した。<br/>         ※ 前フェーズに対して、新規要素となるコンポーネントを赤枠で囲い識別した。</p>      |
| 技術課題   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・月面環境に耐える「電力制御・配電装置」及び「蓄電池」の開発</li> <li>・電力使用計画を反映した、「電力制御・配電装置」及び「蓄電池」の仕様及び、装置 I/F の明確化</li> </ul> |



表 2-116 フェーズ 1:月面上送電全体システムの構成と課題

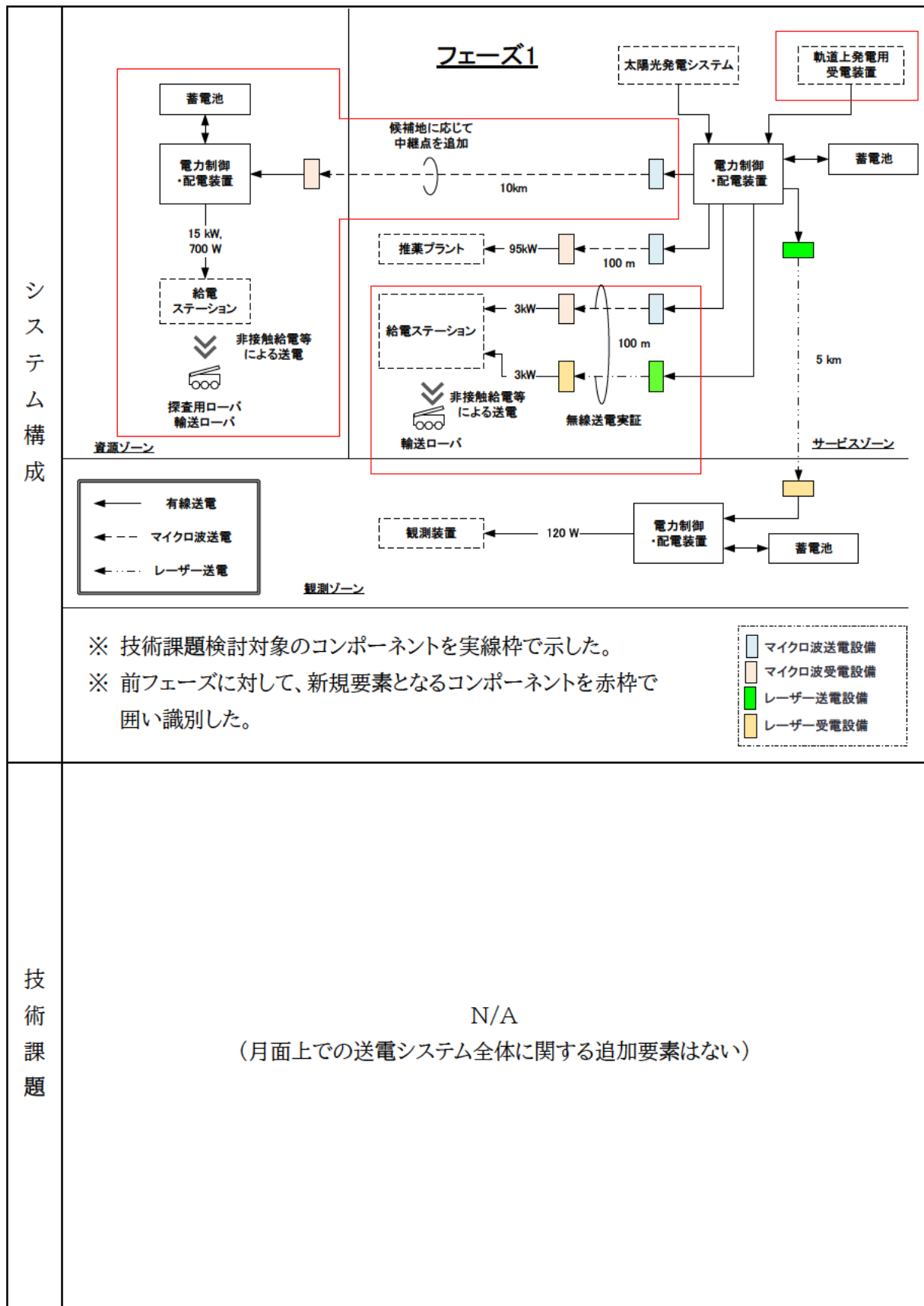


表 2-117 フェーズ2:月面上送電全体システムの構成と課題

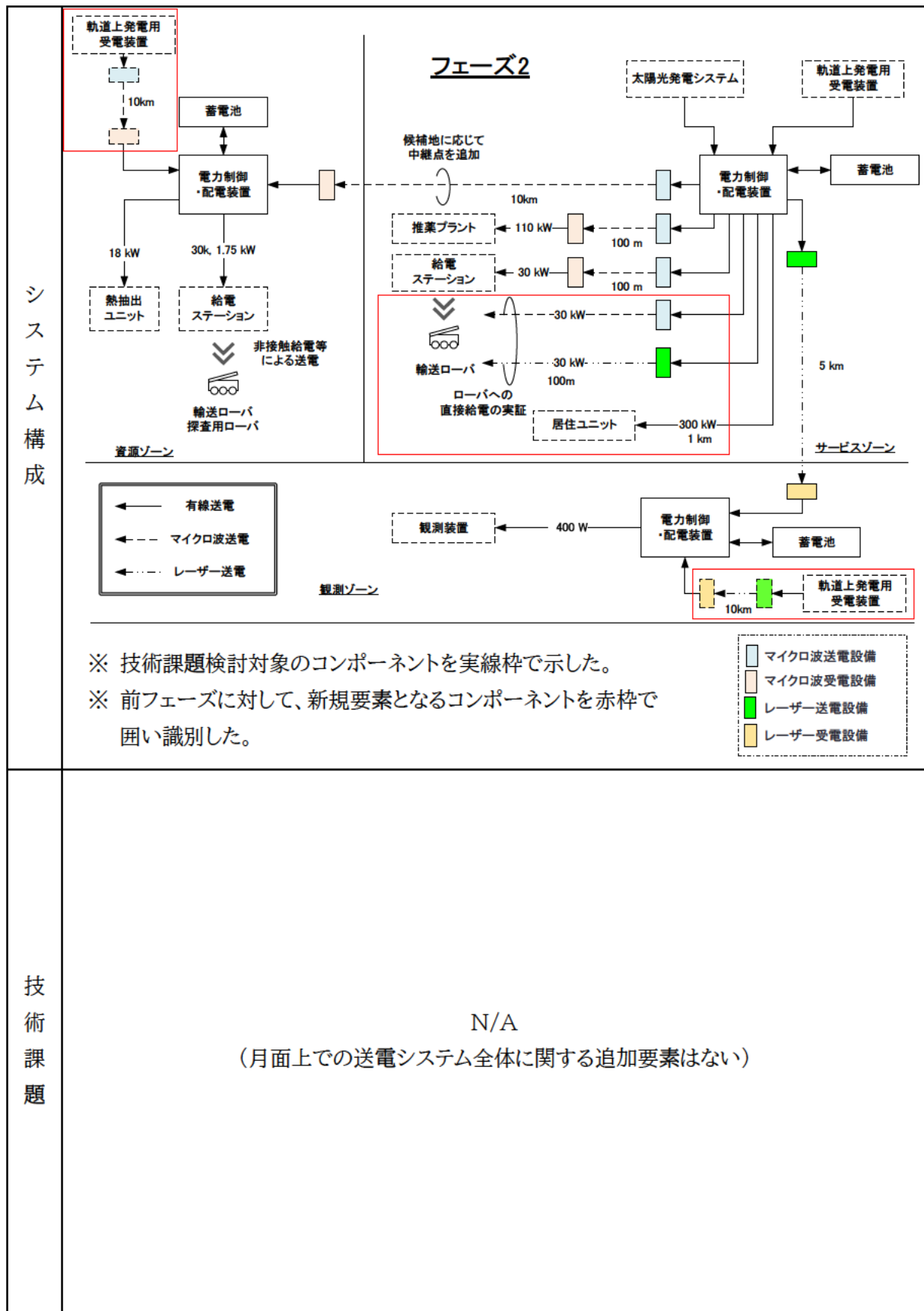
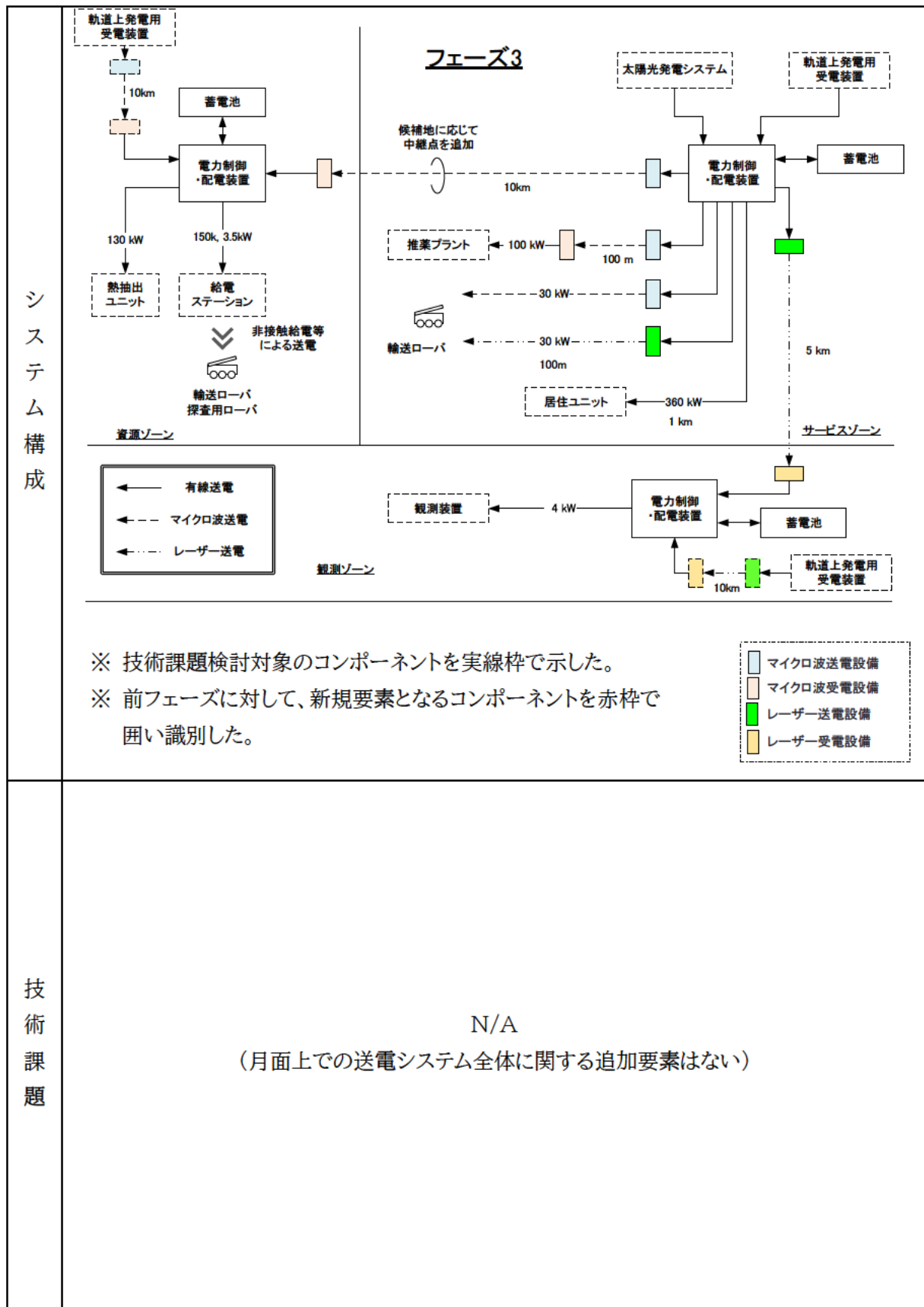


表 2-118 フェーズ 3:月面上送電全体システムの構成と課題



## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像(年代別、期間)

前述のように、月面上での送電システムに関する技術課題として、「電力使用計画に基づく各種装置の仕様決定方法の確立」と「月面で使用する共通コンポーネントの開発」という2つの技術課題を特定した。

前者について、月面送電システムの全体および各コンポーネントの仕様は、水素製造装置や月面上観測装置など、複数の電力需要側の電力使用計画に基づいて決定されと考えられる。一方、供給側も軌道上太陽光発電システムや月面設置発電システムなど、複数の供給源が存在し、輸送コスト削減のため、全体最適な仕様と計画の策定を目指さなければならない。

このため仕様検討に際しては、図 2-133 に示す様な、各供給側や送電網のコンポーネントの特性、月面の昼夜および軌道条件などの運用制約を情報として保持し、電力使用計画を入力条件として電力供給のシミュレーションを行うプラントモデルの開発と、それに基づく各コンポーネント仕様の最適化検討が必要である。したがって、「送電全体システムモデルの開発とコンポーネント仕様の明確化」を1つ目の実証候補項目とした。

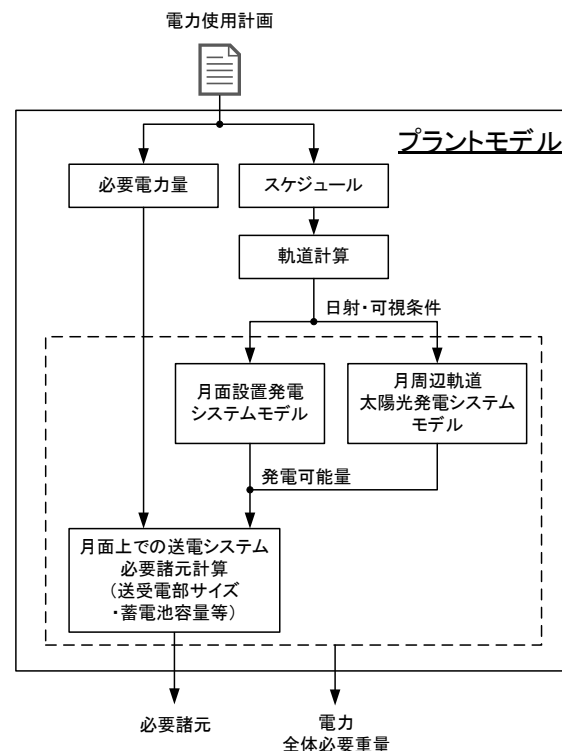


図 2-133 月面上送電システム プラントモデルイメージ

出所) IHI エアロスペース作成

後者の技術課題については、送電システム全体の仕様検討において、需要（電力使用計画）を上回る電力供給が可能のように、余剰電力が発生することを前提とした発電システム仕様を定めることが基本となる。また、月面では昼夜や軌道条件により定常的な発電が困難であるため、こちらでも余剰電力が必ず生じ、その蓄電と（発電ができないタイミングでの）放電のために蓄電池が必須となる。

加えて無線送電装置や有線接続された供給側と、蓄電池を直接接続する事はできない。そのため、直接蓄電池に入力するためのインターフェースとして、「電力制御・配電装置」が必要であり、これについても開発することとした。構成上、月面上送電網において本装置はジャンクションの役割を担うため、蓄電池インターフェースの他にも、無線送電装置に対する機器保全電力の給電や、各種接続系を独立化させることによる装置故障時の故障波及の最小化が求められる。

蓄電池及び電力制御・配電装置はその性質から、送電全体システムのバス機器として総称し、開発品のイメージは図 2-134 の通りである。以上より、「送電全体システムのバス機器の開発」として、蓄電池および電力制御・配電装置の開発と月面実証を 2 つ目の実証候補項目とした。なお、本装置の開発は月面実証フェーズ 0 以前を、月面上実証時期はフェーズ 0 をそれぞれ想定する。なお、フェーズ 0 以降は同等装置の仕様変更・数量増による対応との観点から、前述の開発・月面上実証の 2 点のみを実証候補項目として設定した。

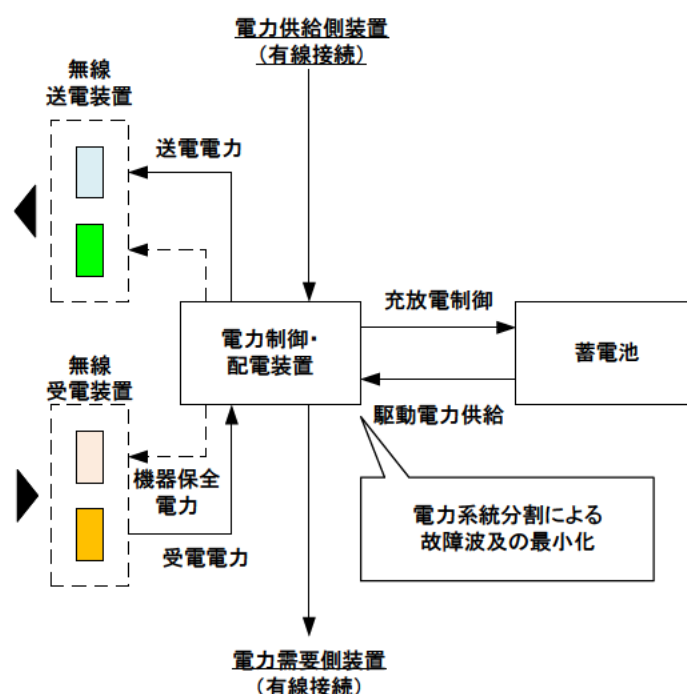


図 2-134 月面上送電システム バス機器イメージ

出所)IHI エアロスペース作成

なお、本項の検討では、2.2.4 項 1) a に示す通り、電力供給側から準安定的な電力が得られることを前提としており、供給側も内部コンポーネントの最適制御や機器保全のため、最低限の蓄電池を有することとなる。これらの蓄電池に分散して余剰電力を蓄電するのも一案であるが、全体の重量低減や冗長性確保のためには、余剰電力はある程度集約して蓄電することが望ましいと考えられるため、本検討では送電全体システム側で需要量と供給量をバランスするための蓄電池を有するとした。

開発の時系列としては、いずれの実証候補項目も他の月面実証の前提となる要素であるため、月面実証フェーズ 0 以前の段階で主な開発・検討を完了するとした。バス機器に関しては、実証後も月面環境での継続的な特性変化の確認が必要であると考えられるが、月面実証フェーズ 0 での実施となることから、これを含めると実証候補項目としては長期化する。したがって、月面環境における特性の確認は、「バス機器の健全性・特性変化の確認」として 3 つ目の実証候補項目に設定した。

## b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

### ア) 月面実証フェーズ 0 以前

#### 実証候補項目【3-③-1】

本実証候補項目の実証対象は「送電全体システムモデル」であり、月面送電システム構築に向けたコンポーネント仕様の確定を目的としている。実施内容として、検討に資するシミュレーションモデルの作成と、本モデルを用いた机上検討を想定しており、月面上での実証は必要としない。本実証結果は、以降の開発フェーズにおける月面上での送電システムの仕様設定に必要となるため、実証期間は月面上での実証開始に先立って、2025 年から 2029 年頃(月面実証フェーズ 0 以前)を想定する。

具体的には「月面実証フェーズ 0 の送電システムの確定」を実証目標として、以下の 2 ステップでの実証を行うこととした。第 1 ステップでは、「システムモデルの開発」として、①月面上送電システム送受電シミュレーションモデルの開発、②運用スケジュール案の検討と、検討内容をもとにした水素／他電力システムとの調整を実施する。第 2 ステップでは、「要求仕様明確化」のため、③月面実証フェーズ 0 以降の各フェーズにおける月面上送電システムの発電／中継／消費量の定量化、④月面探査により得られた情報からシミュレーションモデル(前述①)のアップデート、⑤月面実証フェーズ 0 の送電全体システムの詳細仕様の検討を行う。

先述の通り、月面上での実証は不要であるため、このタイミングでの月面への輸送品はない。

#### 実証候補項目【3-①-2】

本実証候補項目の実証対象は「送電全体システムのバス機器」であり、月面上での送電システム構築に向けたコンポーネント開発を目的としている。バス機器は月面上での送電システムおよび、他の実証機器への電力供給に必要なコンポーネントであるため、月面実証フェーズ 0 開始時に月面上に輸送可能な状態とすることを目指す。よって実証期間は 2025 年から 2029 年頃(月面実証フェーズ 0 以前)として計画する。本実証はコンポーネントの開発完了までを対象とするものであるため、月面への輸送量はなしとし、コンポーネントの重量(輸送量)は後述する月面実証フェーズ 0 での実証候補項目にて計上した。

先述の通り、月面実証フェーズ 0 で必要となるバス機器の開発を目指すことから「6kW 級送受電網に対応したコンポーネントの開発」を実証目標とし、以下の 2 種類のコンポーネント開発を行う。

1 種類目は「月面運用用 大容量蓄電池の開発」であり、月面環境を考慮した送電平滑化、関連機器保全、予備電源用の大容量蓄電池の開発を目指す。開発の進め方としては、①セル単位でのデバイス評価・開発など要素レベルでの開発から開始し、②月面実証フェーズ 0 運用機の開発完了を目指す。

2 種類目は「月面運用用 電力制御・配電装置の開発」であり、蓄電池インターフェース(充放電制御)や月面上での送電システムコンポーネントの結節点の役割を果たす、電力制御・配電装置の開発を目指す。1 種類目と同様に①要素開発(月面実証フェーズ 0 以前:ワースト条件仕様での部分試作等)から開始し、②月面実証フェーズ 0 運用機の開発完了を目指す。なお両コンポーネントともに、月面上環境(放射線環境など)を想定した耐環境性評価試験や、他のコンポーネントとの噛み合わせ試験による統合評価の実施を想定する。



## イ) 月面実証フェーズ 0

### 実証候補項目【3-①-3】

本実証候補項目の実証対象は「送電全体システムのバス機器」であり、実証候補項目【3-①-2】にて開発した「蓄電池」・「電力制御・配電装置」の月面上環境での動作健全性と特性変化の確認を目的とする。月面上での送電システムコンポーネントの中でもバス機器は、その性質上長時間連続で運用される可能性があり、万一故障した場合に他のコンポーネントや実証候補項目に与える影響も大きい。このため、長期運用を経た際にも問題が生じないかを確認することが極めて重要であると整理した。

実証期間は実証候補項目【3-①-2】直後の 2030 年頃(月面実証フェーズ 0:2 年間想定)として計画する。実証目標は「月面上送電全体システムの 2 ヶ年の継続動作」であり、①開発した蓄電池および電力制御・配電装置の月面上環境での運用実証と②月面環境による装置性能の劣化データを取得し、以降の開発にフィードバックする計画である。

月面への輸送品は実証候補項目【3-①-2】での開発コンポーネントであり、必要輸送量として、約 660[kg](内訳:蓄電池 300 kg+電力制御/配電装置 360 kg)を計上した。蓄電池質量はリチウムイオン電池相当のエネルギー密度として 100Wh/kg にて、マイクロ波・レーザーの無線電力伝送が 1 時間維持可能な容量を仮定した。また、電力制御/配電装置は、公開情報から EPS(Electrical Power Subsystem)のハンドリング電力当たりの質量比<sup>6</sup>を基に、月面実証フェーズ 0 の定常電力を維持可能な装置重量を仮定した。

## 3) 実証候補項目詳細

前項で示した各実証候補項目の詳細について、表 2-119 から表 2-121 に示す。

表 2-119 実証候補項目【3-①-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:送電全体システム<br>・実証対象:送電全体システムモデル                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面送電システム構築に向けた、コンポーネント仕様確定のため<br>・月面実証の必要性:本候補は月面実証ではない                                                                                                                                                                                                       |
| 実証期間              | ・2025～2029 年頃(月面実証フェーズ以前・フェーズ 0 以前)                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【システムモデルの開発(前半)】<br>・月面上送電システム送受電量 シミュレーションモデルの開発<br>・運用スケジュール案の検討と、検討内容をもとにした水素/他電力システムとの調整<br>【要求仕様明確化(後半)】<br>・フェーズ 0～の各フェーズにおける月面上送電システムの発電/中継/消費量の定量化<br>・月面探査により得られた情報から、シミュレーションモデルをアップデート<br>・フェーズ 0 の送電全体システムの詳細仕様検討<br>【実証目標】<br>・フェーズ 0 の送電全体システムの仕様確定 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 N/A[kg](内訳:N/A)                                                                                                                                                                                                                                           |

出所)IHI エアロスペース作成

<sup>6</sup> Iwasa, M., Kusawake, H., & Shimada, S. 2013. Lightweight power control units and power distribution control unit for satellites. Journal of the Space Technology and Science (JSTS), 28(1).

表 2-120 実証候補項目【3-①-2】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                   |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:送電全体システム                                         |
|                   | ・実証対象:送電全体システム バス機器                                    |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面送電システム構築に必要な、コンポーネント開発のため                        |
|                   | ・月面実証の必要性:本候補は月面実証ではない                                 |
| 実証期間              | ・2025～2029 年頃(月面実証フェーズ以前・フェーズ 0 以前)                    |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面運用用 大容量蓄電池の開発】                                      |
|                   | ・月面上環境を考慮した、送電平滑化／関連機器保全／予備電源用の大容量蓄電池の開発               |
|                   | ・要素技術開発(単セルの開発等)から実施し、フェーズ 0 での実証機開発完了を目指す             |
|                   | 【月面運用用 電力制御・配電装置の開発】                                   |
|                   | ・月面環境を考慮した、送受電装置間を接続する電力制御・配電装置の開発                     |
|                   | ・要素技術開発(フェーズ 0 ワースト条件の部分開発等)から実施し、フェーズ 0 での実証機開発完了を目指す |
|                   | 【共通実施内容】                                               |
|                   | ・月面上環境(放射線環境等)を想定した、耐性評価試験の実施                          |
|                   | ・無線送電システムと接続しての噛み合わせ評価                                 |
|                   | 【実証目標値】                                                |
|                   | ・6kW 級受電網に対応したコンポーネントの開発                               |
| 月面への必要輸送量         | N/A                                                    |

出所)IHI エアロスペース作成

表 2-121 実証候補項目【3-①-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                               |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:送電全体システム                                     |
|                   | ・実証対象:送電全体システム バス機器                                |
| 実証目的・必要性          | ・目的:送電全体システム バス機器の月面上実環境での健全性・特性変化の確認のため。送受電部運用のため |
|                   | ・月面実証の必要性:月面開発により明確化された情報を用いた検証が必要なため              |
| 実証期間              | ・2030 年頃(2 カ年想定)                                   |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【バス機器の月面上運用】                                       |
|                   | ・開発した蓄電池／電力制御・配電装置を月面に輸送し、月面上環境での運用実証を行う           |
|                   | ・月面環境による装置性能の劣化データを取得し、以降の開発にフィードバックする             |
|                   | 【実証目標値】                                            |
|                   | ・月面上送電全体システムの 2 カ年の継続動作                            |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 660[kg](内訳:蓄電池 300 kg+電力制御／配電装置 360 kg)    |

出所)IHI エアロスペース作成

## (2) マイクロ波送電

### 1) マイクロ波送電に係る検討

#### a. 検討内容

前項で整理した月面上での送電システム全体に対する検討結果を受け、その要素であるマイクロ波送受電設備についての検討を行った。検討の進め方は以下にて詳述するが、フェーズ毎の段階的なシステムの発展を確実にやっていくことを目指したものとした。

#### b. 各月面実証フェーズにおける検討条件

ここでは月面上での送電システム全体にて検討した、表 2-114 から表 2-118 の整理結果をもとに、マイクロ波送受電のフェーズ・送電対象ごとの送受電部ブロック図を示す。合わせて 2.2.5 項(1) 1)bと同様に、前フェーズからの追加技術要素から技術課題が生じるとの整理のもと、追加要素と技術課題の識別を併記した。また一部の技術課題には、補足として設定理由を記載した。整理結果を表 2-122～表 2-128 に示す。

なお月面実証フェーズ 2 の一部送受電部と月面実証フェーズ 3 では追加の技術要素はなく、それ以前に実証した構成をベースに同等設計品の製造、あるいは仕様に合わせたマイナーなカスタマイズにより対応可能と整理したため、表の記載を省略している。

表 2-122 フェーズ 0 以前:マイクロ波送電/ローバー給電ステーションの構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 固定局:350W</b></p> <p>送電側は同相・同振幅<br/>給電がベース(=送電効率:低)</p> <p>開発フェーズが早期のため<br/>既存品として電子管デバイスを想定</p> <p>※ 月面上での初実証となるため、全てが新規(追加)要素</p>                                                                                                                                                                   |
| 技術課題   | <p>① 技術課題 : 既存品デバイスのみを用いた送電部の構成<br/>⇒ 設定理由 : 開発フェーズが早期(～2028 年)であり、新規開発するコンポーネントの適用は間に合わないことが想定されるため</p> <p>② 技術課題 : アンテナ開口径の設計制約(開口径制限のための小口径化)による、送受電効率の低下と、送電電力増加に伴う各部発熱量の増加への対応<br/>⇒ 設定理由 : 月面開発初期であり、輸送制約が厳しいことから、システムサイズ・重量に直結するアンテナ開口径も設計制約を受けると考えられるため</p> <p>③ 技術課題 : 微小重力環境下における、装置固定(敷設・支持)方法の確立</p> |

表 2-123 フェーズ 0:マイクロ波送電/推進プラントの構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 固定局:6kW</b></p> <p>※ F-X:月面実証フェーズ 0 以前の略(以降同様)</p>                                                                                                                                                                                       |
| 技術課題   | <p>① 技術課題 : 半導体増幅器の開発及び送電部適用とそれに伴う高集約化への対応<br/> ⇒ 設定理由 : 送受電効率向上を目的としたビーム制御のためには、サブアレイ当たりの系統数を減らすことが必要であり、デバイス(Beamformer/増幅器)の高集約化を指向する必要があるため</p> <p>② 技術課題 : 大口径フェーズドアレイでのビーム制御による送受電効率向上</p> <p>③ 技術課題 : 微小重力環境下における、(半導体構成)装置固定(敷設・支持)方法の確立</p> |

表 2-124 フェーズ 1:マイクロ波送電／輸送ローバー送電の構成と課題

|        |                                        |
|--------|----------------------------------------|
| システム構成 | <p>月面実証フェーズ 0 6kW 送電部の設計を流用して製造する。</p> |
| 技術課題   | <p>N/A</p>                             |



表 2-125 フェーズ 1:マイクロ波送電／推葉プラントの構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 固定局:95kW</b></p>                                                                                                                                                                                           |
| 技術課題   | <p>① 技術課題：複数の送受電部システムモジュールの協調動作(レトロディレクティブ制御への対応を含む)<br/> ⇒ 設定理由：大電力並びに遠距離送受電の実現のためにはアンテナの大口径化が必要だが、大規模な送受電部を単一構造で構成するのは困難であり、モジュール化が必須と考えられるため</p> <p>② 技術課題：大電力送電に伴う高発熱への対応</p> <p>③ 技術課題：月面上での大型構造体の組立(敷設)技術の確立</p> |

表 2-126 フェーズ 1:マイクロ波送電／資源ゾーン送電の構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 固定局:15、0.7kW</b></p> <p>機能的な方向補正機構</p> <p>10km 程度</p> <p>送電部</p> <p>電子制御によるビーム方向の微調整</p> <p>ビーム整形し送受電効率の向上を狙う</p> <p>受電部</p> <p>ローバ給電ステーション(15, 0.7kW)</p> <p>Beamformer (F-X～開発品)</p> <p>レクテナIC</p> <p>DC/DC (負荷制御用)</p> <p>DC出力</p> <p>パイロット信号受信装置</p> <p>パイロット信号送信装置</p> <p>× 複数協調</p> <p>× 複数協調</p> |
| 技術課題   | <p>① 技術課題：遠距離送受電のための高精度ビームポインティング制御</p> <p>※ 表 2-125 にて先述した課題は省略した。</p>                                                                                                                                                                                                                                             |

表 2-127 フェーズ 2:マイクロ波送電／居住ユニット送電の構成と課題

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 固定局:300 kW</b></p> <p>1km 程度</p> <p>機械的な方向補正機構</p> <p>送電部</p> <p>電子制御によるビーム方向の微調整</p> <p>ビーム整形し送受電効率の向上を狙う</p> <p>有人対応し漏洩電力を減少</p> <p>機械的な方向補正機構</p> <p>受電部</p> <p>居住ユニット(300kW)</p> <p>Beamformer (F-X～開発品)</p> <p>パイロット信号受信装置</p> <p>ビーム方向制御</p> <p>×複数協調</p> <p>レクテナIC</p> <p>DC/DC (負荷制御用)</p> <p>DC出力</p> <p>パイロット信号送信装置</p> <p>×複数協調</p> |
| 技術課題   | <p>① 技術課題：ビーム制御技術による目的外方向への漏洩電力低下</p> <p>⇒ 設定理由：居住ユニット近傍での電力伝送が想定されるため、有人環境との共存性を考慮して、漏洩電力を十分に抑制する必要があるため</p>                                                                                                                                                                                                                                              |

表 2-128 フェーズ 2:マイクロ波送電/ローバー直接給電の構成と課題

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| システム構成 | <p><b>固定局 ⇒ 移動局:30kW</b></p>       |
| 技術課題   | <p>① 技術課題 : 移動体追尾を可能とするビーム方向制御</p> |

## c. 送電部の検討内容

### ア) 技術課題と開発項目の紐づけ

本項では 2.2.5 項(2)1)b での技術課題の識別結果をもとに、実証候補項目に紐づく要素技術開発項目へのフローダウンを行った。フローダウンは月面での運用時期に応じて実施し、「月面実証フェーズ 0 以前」及び「月面実証フェーズ 0」、「月面実証フェーズ 1」、「月面実証フェーズ 2」の 3 つの時期に整理した。それぞれ技術課題と開発項目の紐づけを行ったブロック図を図 2-135 から図 2-137 に示した。

#### 【月面実証フェーズ 0 以前／月面実証フェーズ 0】

本フェーズでは、月面実証フェーズ 0 以前の 350W 送電部と月面実証フェーズ 0 の 6kW 送電部の開発に向けた要素技術開発を並行して進める想定である。前者は開発時期から、既存品デバイスによる送電部構成が必須であるため、昨年度の検討から適用可能性が高い既存の電子管デバイスを前提とした実装技術開発を主として進める。

後者は、以降の送電部と同様に半導体増幅器を前提とした多素子フェーズドアレイの構成を前提としており、構成に必要な「半導体パワーアンプ」・「ビームフォーミングデバイス」の開発を行う計画とした。

#### 【月面実証フェーズ 1】

本フェーズでは、月面実証フェーズ 0 の送電部仕様に対して送電電力の大電力化・長距離化が求められる。これらの実現のためには、送受電部の大口径化が必要となるが、単一装置での構築は輸送・敷設の観点から困難と考えられる。今回の検討では比較的小口径の送電部モジュールを複数組み合わせることにより、大口径システムを構築することとした。

また大電力に伴うデバイス性能の向上や、高発熱への対応、ビーム方向制御の高精度化に取り組むこととした。

#### 【月面実証フェーズ 2】

基本的な技術要素は月面実証フェーズ 1 の実証・運用機に向けた開発にて完了する計画であり、本フェーズでは追加の課題である「有人環境との共存」と「移動体追尾」への対応が主となる。

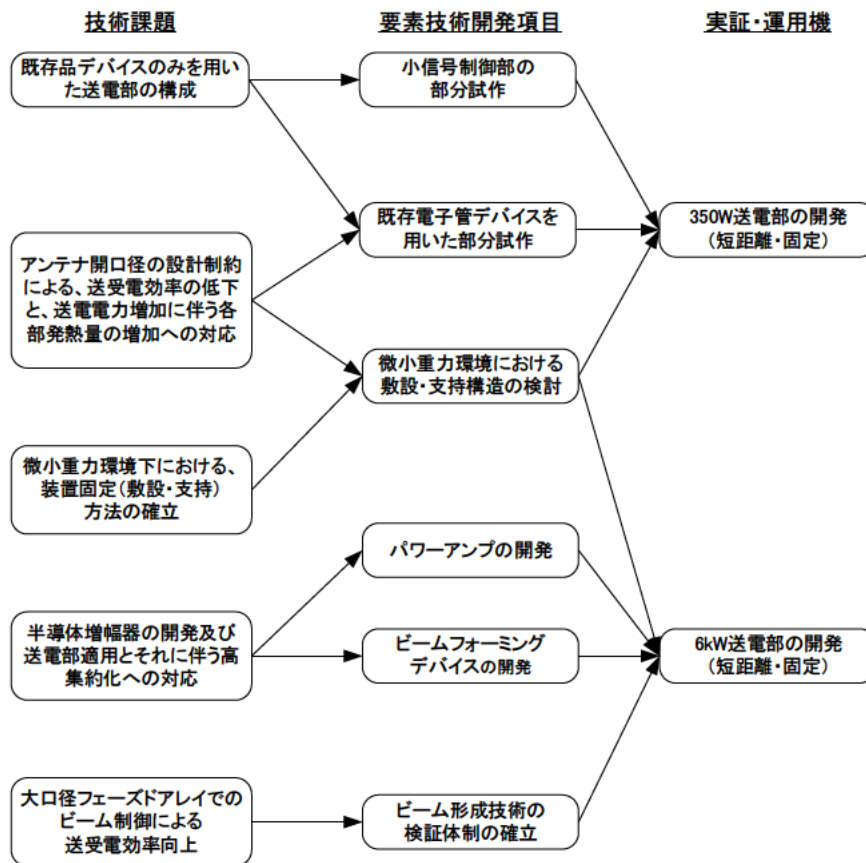


図 2-135 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 0 以前／月面実証フェーズ 0 対象)

出所) IHI エアロスペース作成

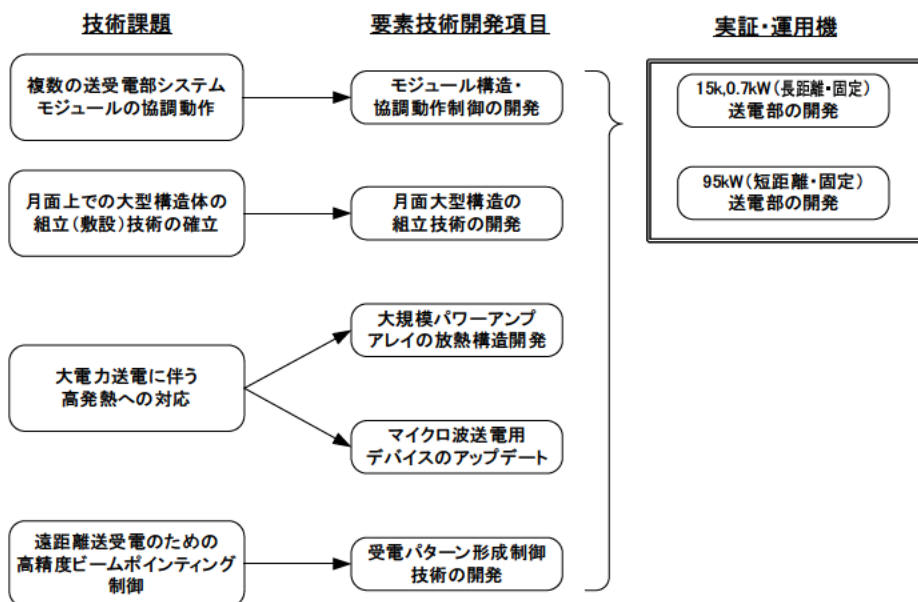


図 2-136 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 1 対象)

出所) IHI エアロスペース作成



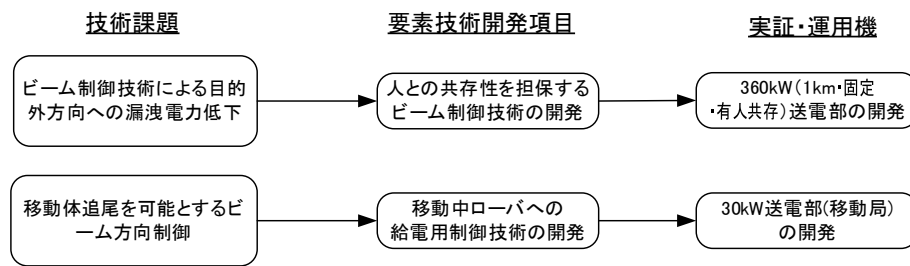


図 2-137 技術課題と開発項目の紐づけ(月面実証フェーズ 2 対象)

出所)IHI エアロスペース作成

## イ) 開発シナリオ検討

前項でのフローダウンの結果を踏まえ、月面実証フェーズ 3 までの月面上での送電システムのマイクロ波送電部における要素技術開発、月面上で運用する送電部実証・運用機(以降「送電部実機」と称する)開発、実機の月面上での運用の 3 つの観点で開発シナリオを整理した。検討したシナリオを図 2-138 に示す。検討に際しては、以下に示す 4 点に留意した。

- ① 「月面実証フェーズ 0」以降の送電部実機は、推薬生成に係る装置への給電を担うことから、月面上での推薬生成実証の前提条件(電力供給が実現できない場合、実証実施が不可)であり、これらの実証に先駆けて動作実証を実施する必要がある。このため当該フェーズの開始時には、実証機の製造・評価が完了しており、打上げが可能な状態を目指すこととした。またこの状態を目指すため、「使用フェーズの 1 つ前のフェーズで製造・評価が完了」かつ「使用フェーズの 2 つ前のフェーズで要素技術開発が完了」する計画とした。
- ② 既存技術(デバイス)のみを用いた開発となる 350W 送電部(月面実証フェーズ 0 以前)は、技術的に独立した実証機開発となるため、以降の開発における直接の技術的なフィードバックは想定しない。
- ③ 「月面実証フェーズ 1」以降の一部送電部実機では、それ以前に開発した送電部実機と同一設計や一部仕様のダウングレードにより適用する機種が生じる。これらの機種に関しては、元となる設計の送電部実機の月面実証が完了した段階で同機の追加製造を行い、これに対する品質試験(QT)を実施することで、以降は効率的に製造を行う計画とした。
- ④ 月面上環境における送電部実機の特性格変動は、実機運用の中で確認する計画とする。合わせて要素評価として、デバイス(半導体パワーアンプ、ビームフォーミングデバイス)開発が完了した月面実証フェーズ 0 にて、デバイス単位で月面上環境による特性格変動の評価を行う。



## d. 受電部の検討内容

ispace 社ローバーの機構条件に基づき、ローバーに装着する受電用レクテナの検討を実施した。現在開発中の 24GHz 帯 1W レクテナをベースに検討を実施した。

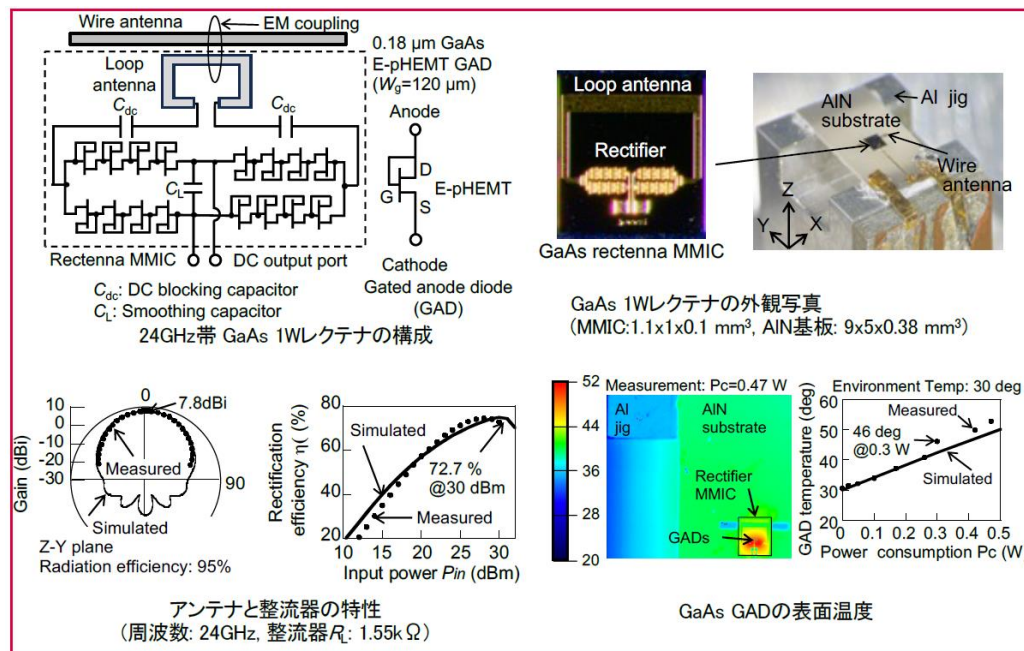


図 2-139 金沢工業大学にて開発中のレクテナ

出所) 佐藤亮輔, 坂井尚貴, 津留正臣, 野口啓介, 伊東健治, "電磁結合を用いる 24GHz 帯 GaAs 1W 高効率レクテナ," 2025 年電子情報通信学会総合大会予稿集(金沢工業大学発表)。

このレクテナは昨年度報告書で詳しく述べた Diode on Antenna (DoA) 構成による回路損失抑制と、大電力化に適した GaAs E-pHEMT Gated anode diode (GAD) を組み合わせている。その結果、整流効率の入力電力( $P_{in}$ )依存性を抑制し、24GHz において整流効率@ $P_{in}=1$ W の向上を実現している(図 2-140 中[2025 発表])。

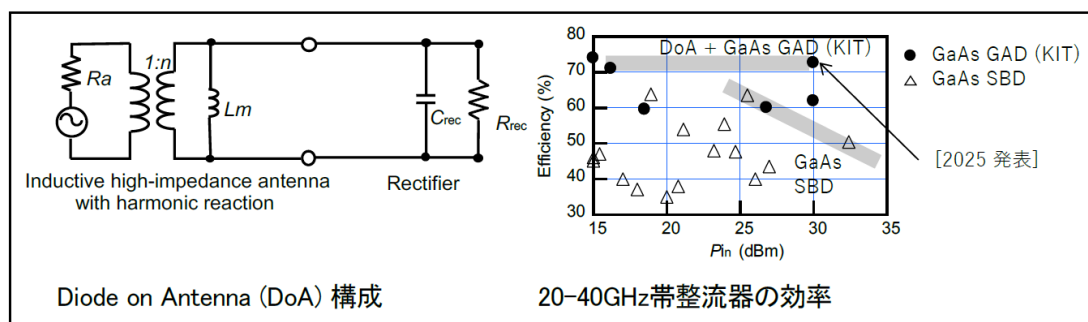


図 2-140 レクテナ DoA 構成と効率

出所) 伊東健治, 坂井尚貴, 野口啓介, "大電力レクテナ技術," 2025 年電子情報通信学会総合大会予稿集(金沢工業大学発表)。

本検討により電気性能面でのフィージビリティを確認できた。送電アンテナを円偏波とし、受電レクテナを垂直偏波レクテナ、水平偏波レクテナで直交させ、受電電力密度を高め、レクテナパネル面積を抑

える方式とした。このレクテナペアでの重量を 0.57g と見積もっている。なお、宇宙空間での熱計算、強度計算、耐放射線特性の確認は今後の課題である。

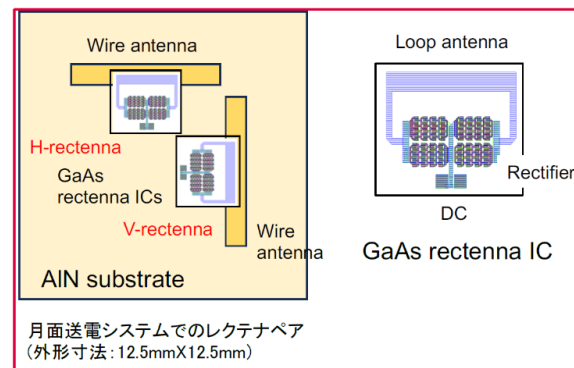


図 2-141 受電レクテナ構成

出所)金沢工業大学作成

上記に加えて、受電用レクテナのさらなる高耐圧化による高効率化、低閾値化による高ダイナミックレンジ化(受電面内の RF 電力の不均一をカバー)のため、日清紡マイクロデバイス社の GaAs pHEMT を適用する。アンテナと半導体素子の協調設計を行い、段階的な性能向上を図る。

[第一段階:2026 年度までに]

現状の  $0.8\mu\text{m}$  から  $0.25\mu\text{m}$  への微細化、ゲート電極の抵抗抑制構造(金属層の積み上げ)による高遮断周波数化。→日清紡試作チップからパラメータ抽出し、モデル化。

上記 GaAs E-pHEMT の閾値を最適化。(この条件で現在試作中)

[第二段階:2027 年度以降]

$0.15\mu\text{m}$  への微細化による高遮断周波数化。

GaAs ウエハのエピ条件の最適化、電極構造の最適化による高電流密度化→短ゲート幅化による整流素子容量抑制。

|                       | 既存技術                                |                                      |                                     | FET-TEG<br>から推定                      | 予測                                   |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                       | 0.5 $\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | 0.18 $\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | 0.8 $\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | 0.25 $\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD | 0.15 $\mu\text{m}$<br>E-pHEMT<br>GAD |
| Manufacturer          | WIN<br>Semcon.                      | WIN<br>Semcon.                       | 日清紡                                 | 日清紡                                  | 日清紡                                  |
| Threshold<br>$V_t$    | 0.5V                                | 0.45V                                | 0.31V                               | 0.3V                                 | 0.3V                                 |
| Breakdown<br>$V_{br}$ | 13.2 V                              | 8.3 V                                | 21V                                 | 13V                                  | 13V                                  |
| $f_{c0}$              | 728 GHz                             | 4600GHz                              | -----                               | 940GHz                               | 2900GHz                              |
| $I_{\max}/C_{t0}$     | 731<br>mA/pF                        | 1155<br>mA/pF                        | 500<br>mA/pF                        | 530<br>mA/pF                         | 973<br>mA/pF                         |

図 2-142 受電レクテナ用 E-pHEMT のベンチマーク

出所)金沢工業大学作成

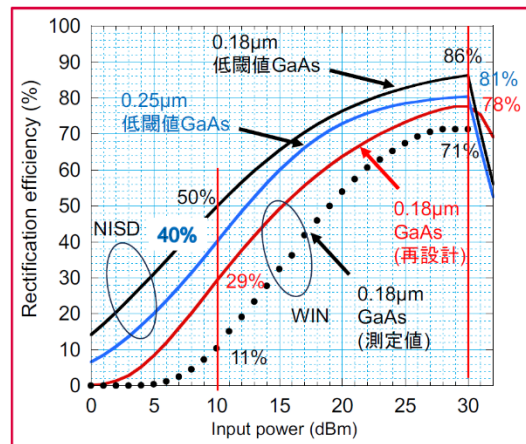


図 2-143 受電レクテナ用整流器の予測性能

出所)金沢工業大学作成

## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像(年代別、期間)

#### ア) マイクロ波全体

マイクロ波を用いた無線電力伝送を実現するためには、相対する送電部と受電部、双方が同時に利用できる状態まで開発実証が済んでいる必要があるが、技術実証の段階では開発のハードルを下げるためにも、個別に検討を進めることが効率的である。

本検討においても、使用するデバイスの違いもあり送電部、受電部に分けて検討を行った。ただし、将来的な月面での実用フェーズを睥んだときに、それぞれの部位がどのような仕様(例:授受する電力密度の値等)で開発しておくべきかなどは、しっかりと決めておくべきであり、今後の具体化・詳細化にあたっては相互に連携を取りながら検討・実証を進めていく必要がある。

#### イ) 送電部全体

マイクロ波送電部では、「要素技術の開発」と「実機開発と月面上での実運用」の2種類の実証候補項目を設定した。それぞれの実施時期として、2.2.5 項(2)1)c.イ)に整理した通り、あるフェーズで(他の実証候補項目を実施するため)運用が必要な送電部実証・運用機(以下「送電部実機」とする)は、1つ前のフェーズで送電部実機の試作を行い、更にその1つ前のフェーズで送電部実機に必要な要素技術を開発する流れとした。また、効率的な開発を目指す観点から、新たな技術要素の無い送電部実機はそれ以前の設計を流用・送電部要素の増減を行うことで製造することとしており、実証候補項目には含めていない。

以上を踏まえ、実証候補項目における新規技術要素ごとの実施年代を表 2-129 に整理した。表に記載の通り、先の整理に従い新規技術要素の導入にはそれぞれ3フェーズを確保するスケジュールとしているが、「電子管デバイスを用いた送電部」に関しては月面上での運用要求時期が早期であり、期



間が確保できていない状況である。このため、本項目に関しては、後述の実証候補項目詳細にて、既存品の適用を前提とすることで短期に開発する計画を提案した。

表 2-129 新規要素ごとの実証候補項目実施フェーズ

| 新規技術要素                 | 実施時期                            |              |           |
|------------------------|---------------------------------|--------------|-----------|
|                        | 要素技術の開発                         | 実機開発         | 月面上での実運用  |
| 電子管デバイスを用いた送電部         | 月面実証フェーズ0以前<br>(部分試作による実現性検証含む) | 月面実証フェーズ0 以前 |           |
| 半導体デバイスを用いた送電部及びその関連技術 | 月面実証フェーズ0以前                     | 月面実証フェーズ0 以前 | 月面実証フェーズ0 |
| 送電部のモジュール化及び大型化        | 月面実証フェーズ0 以前                    | 月面実証フェーズ0    | 月面実証フェーズ1 |
| 有人環境・移動体給電に対応するビーム制御技術 | 月面実証フェーズ0                       | 月面実証フェーズ1    | 月面実証フェーズ2 |

出所)IHI エアロスペース作成

## b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

### ア) 月面実証フェーズ0 以前

#### 実証候補項目【3-②-1】

本実証の対象は「マイクロ波送電部 主要コンポーネント」であり、「マイクロ波送電部主要コンポーネント実現」を目的に、「6kW 送電 送電部開発に向けた必要技術の開発完了」を実証目標として、マイクロ波送電部の主要技術要素の開発と送電部の部分実証モデルの試作を実施する。本実証は地上での技術開発を行う計画であり、月面での実証は想定しない。実証期間は 2025 年～2028 年頃(月面実証フェーズ0以前(前半))とする。

具体的には、要素技術開発として①ビーム形成技術検証用のシミュレータの開発、②月面上送電部用ビームフォーミングデバイスの開発、③月面上送電部用パワーアンプの開発、及び④マイクロ波送電部用月面上敷設／支持構造の開発を行う。また部分試作として、⑤ビームフォーミングデバイス／パワーアンプを用いた部分モデルの試作と、⑥本部分モデルを用いたビーム形成アルゴリズムの実測評価を行う。

先述の通り月面実証は不要な計画のため、この段階での月面への輸送品はない。

#### 実証候補項目【3-②-2】

本実証の対象は「350W 送受電用 マイクロ波送電部」であり、「350W マイクロ波送電の実現性確認」を目的に、「350W 送電 送電部開発に向けた必要技術の開発完了」を実証目標として、350W マイクロ波送電部に係る部分試作と検討を実施する。本実証は地上での技術開発を行う計画であり、月



面での実証は想定しない。実証期間は 2025 年～2028 年頃(月面実証フェーズ0以前(前半))とする。

具体的には、部分試作として①月既存電子管デバイスを用いた部分試作、②既存電子管デバイスを前提とした、RF 系小信号部の試作、及び③これら部分試作を組み合わせた制御精度検証を行う。検討は「350W 送電用 送電部に係る検討」であり、④月面環境下における電子管デバイスを前提とした構造検討を行う。

先述の通り月面実証不要につき、この段階での月面への輸送品はない。

#### 実証候補項目【3-②-3】

本実証の対象は「マイクロ波送電部 主要コンポーネント」であり、「マイクロ波送電部主要コンポーネント実現」を目的に、「95kW 送電及び、15k、0.7kW(10km 送受電)送電部開発に向けた必要技術の開発完了」を実証目標として、ビーム制御技術の高度化と送電用デバイスの更新を実施する。本実証は地上での技術開発を行う計画であり、月面での実証は想定しない。実証期間は 2028 年～2029 年頃(月面実証フェーズ 0 以前(後半))とする。

具体的には、ビーム制御技術の高度化として①長距離あるいは大電力送電に特化した、高効率送電用のビーム制御アルゴリズムの開発、②送電部モジュール構造化に向けた、協調動作技術の開発。送電用デバイスの更新として、③前フェーズでの試作結果及び、6kW 送電部の開発状況を踏まえた、送電用デバイスの性能向上、④送電用デバイスの安定供給に向けた体制の確立を実施する。

先述の通り月面実証は不要な計画のため、この段階での月面への輸送品はない。

#### 実証候補項目【3-②-4】

実証対象は「350W 送受電用 マイクロ波送電部」である。

月面送電システム構築に向けたコンポーネント開発を目的とするもので、月面上環境におけるマイクロ波送受電の実現性確認及びローバー給電のため、月面実証を必要とする。実証期間は 2028 年～2029 年頃(月面実証フェーズ 0 以前)として、計画する。

「月面上環境での 350W マイクロ波送電の実施」を実証目標として、以下の製造及び実証を行う。

製造内容は「350W マイクロ波送電部の製造」である。実証内容は「350W マイクロ波送電部の実証」であり、①350W マイクロ波送電部の月面上運用の実施と②ローバー近傍環境でのマイクロ波送電を実施する。

月面への必要輸送量は、約 300[kg](内訳:進行波管 90kg+構造 180kg+その他 30kg)である。

#### 実証候補項目【3-②-9】

実証対象は「350W 受電レクテナアレイ」である。

本項目の実証目的は、DC 出力 5.6kW/m<sup>2</sup>(平均値)、11kW /m<sup>2</sup>(ピーク)の大電力密度のレクテナアレイの実証(電気性能、機械強度、熱、耐放射線)であり、月面実証の準備開発である。その成果により、ispace 社ローバー(直近で水探査を始めるための小型ローバー: ローバー質量 25kg 以下、ペイロード質量 10kg、最大走行距離合計 1000m 以下)への取り付け 350W 給電を直径 0.3m のレクテナアレイで実現する。

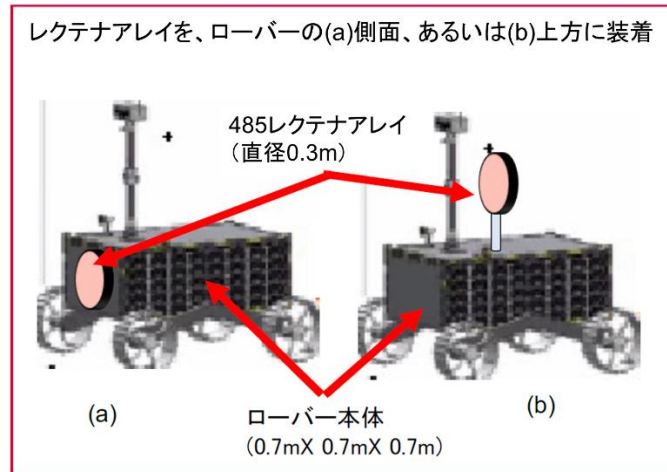


図 2-144 探査用ローバー本体への 350W レクテナ取付け図

出所)金沢工業大学, ispace 作成

ここで送信部は空間伝送効率 50%とした。また、レクテナ面内での電力ばらつき 6dB、平均 27dBm(効率 85%)/偏波で 30-24dBm のばらつきとした。送信部での実現性検討が課題である。

月面への必要輸送量については、現時点での見積もりで、重量合計約 1kg で、内訳はレクテナアレイ 300g, 電源回路・構体他 700g である。

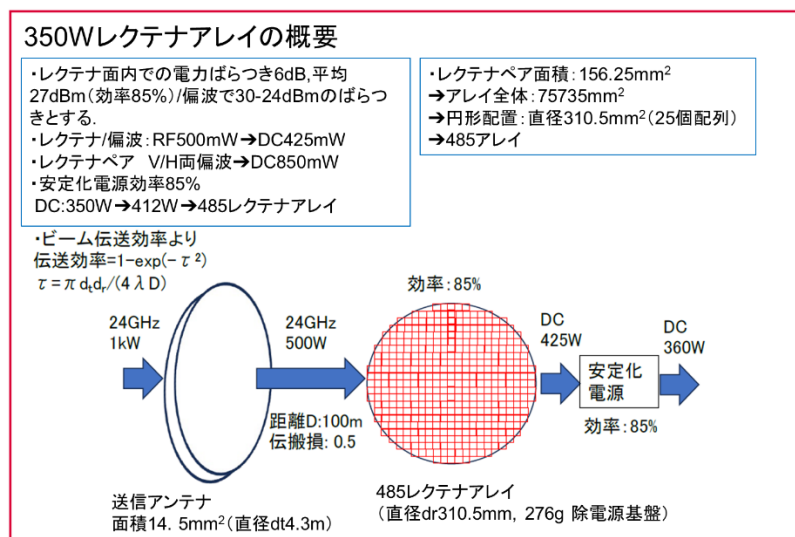


図 2-145 探査用ローバー用 350W レクテナアレイの概要

出所)金沢工業大学作成

レクテナアレイの実現に向けて、以下の実証項目に取り組む必要がある。

#### (1) 高効率・高ダイナミックレンジ GaAs 1W レクテナ MMIC の実証

台湾 WIN semiconductor 社での IC 製造を、日本国内の日清紡マイクロデバイス社川越事業所の GaAs プロセスへ IP の移管を行うとともに、GaAs IC 製造ルールの微細化(0.8μm→0.25μm→0.18μm)を行う。また、製造条件(エピ条件、電極間隔など)の最適化により、整流用半導体デバイスの低閾値・高耐圧化を行う。それにより GaAs E-pHEMT Gated Anode Diode (GAD)による

高効率(ピーク効率 86%@1W 入力)・高ダイナミックレンジ (50%@0.01W 入力)を実現し、レクテナアレイとしての高性能化を実証する。

目標値は GaAs 1W レクテナ MMIC において、ピーク効率 86%@1W 入力、50%@0.01W 入力である。

#### (2) 1kW /m<sup>2</sup> を超える高電力密度レクテナアレイの実証

垂直/水平偏波多重により高電力密度レクテナアレイを実現する。24GHz 帯 1W レクテナ MMIC を用いアレイ配置を行うとともに、垂直/水平偏波多重を行うことにより、DC 出力 5.6kW/m<sup>2</sup>(平均値)、11kW /m<sup>2</sup>(ピーク)を実現する。

目標値はローバー用 350W 給電を直径 0.3m のレクテナアレイで実現することである。

#### (3)レクテナアレイの出力に接続する高効率安定化電源の実証

レクテナアレイ面内の入射電力が不均一であることを考慮した、高効率の DC 合成方式を実現する。具体的にはレクテナアレイを面内で分割し、それぞれを最適負荷条件で安定化し、合成する回路方式を実現する。

目標は効率 85%以上である。

#### (4)月面ローバー搭載に足る機械強度、熱、耐放射線の実証

上記項目については未実施である。目標設定も含め今後の課題である。

### イ) 月面実証フェーズ 0

#### 月面実証フェーズ 0 以前～月面実証フェーズ 0 実証候補項目【3-②-5】

実証対象は「6kW 送受電用 マイクロ波送電部」である。

半導体方式による無線送電部の月面上動作実証を目的とするもので、開発した送電部デバイスの月面上環境での動作確認のため、月面実証を必要とする。実証期間は 2028 年～2030 年頃(月面実証フェーズ 0 以前(後半)～月面実証フェーズ 0/4 ヶ年想定)として、計画する。

「月面上環境での 6kW マイクロ波送電の実施」を実証目標として、以下の 2 ステップでの実証を行う。

第 1 ステップでは、「6kW 送電部の開発(月面実証フェーズ 0 以前)」として、①月面上マイクロ波送電用の 6kW 送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)を行う。第 2 ステップでは、「6kW 送電部の運用(月面実証フェーズ 0)」として、②6kW 送電部の月面上運用、③月面上環境における、送電部特性の劣化データの取得、及び④レゴリス等によるマイクロ波減衰量の取得を行う。

送電部重量は、昨年度の検討にて実施した 10kW/100kW 送電部の質量検討結果をもとに、送電距離に応じて直線補完して算出した。概算の結果、月面への必要輸送量は約 300[kg]である。以降の半導体方式送電部の重量に関しても同様にして算出している。

#### 月面実証フェーズ 0 実証候補項目【3-②-6】

本実証の対象は「マイクロ波送電部 主要コンポーネント」であり、「マイクロ波送電の月面上適用拡大」を目的に、「360kW(有人環境下)及び、30kW(移動体)送電部開発に向けた必要技術の開発完了」を実証目標として、ビーム制御技術の高度化とデバイスの月面環境適応性評価を実施する。本実証では一部月面上での実証を行うが、主には地上での技術開発を行う計画である。実証期間は 2030 年頃(月面実証フェーズ 0)とする。

具体的には、ビーム制御技術の高度化として①月面実証フェーズ 0 で並行実施される、月面運用機の運用情報をもとに、ビーム制御補正アルゴリズムの開発、②有人ゾーン近傍への送電に向けた、極低漏洩電力制御技術の開発、及び③移動中のローバーへの給電を想定した、ビーム方向の移動体トラッキング制御技術の開発を行う。月面環境適応性評価は、④デバイスを月面環境に継続曝露した場合の、特性劣化量の計測と⑤特性劣化を加味した、ビーム制御アルゴリズムの高度化を実施する

④にて月面への機材輸送を想定し、輸送量は、約 30[kg](内訳:曝露用試料箱×3 箱)を想定する。

#### ウ) 月面実証フェーズ 1

##### 月面実証フェーズ 1 実証候補項目【3-②-7】

実証対象は「月面実証フェーズ 1 マイクロ波送電部」である。

長距離・大電力送電部の月面上動作実証を目的とするもので、長距離送電におけるレゴリスの影響を見積、長距離の見通し確保、及び月面上電力網構成のため、月面実証を必要とする。実証期間は 2030～2035 年頃(月面実証フェーズ0・月面実証フェーズ1)として、計画する。

「月面実証フェーズ 1 期間における、5 ヶ年の送電部の運用継続」を実証目標として、以下の 2 ステップでの実証を行う。

第 1 ステップでは、「実証機の開発(月面実証フェーズ 0)」として、①月面上マイクロ波送電用の 15k,0.7kW(長距離・固定)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)と②月面上マイクロ波送電用の 95kW(短距離・固定)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)を行う。第 2 ステップでは、「実証機の運用(月面実証フェーズ 1)」として、③長距離送受電の月面上環境実証、④大電力送受電の月面上環境実証、及び⑤月面実証フェーズ 1 における継続的な送電運用を行う。

月面への必要輸送量は、約 8,000[kg]である。

#### エ) 月面実証フェーズ 2

##### 月面実証フェーズ 2 実証候補項目【3-②-8】

実証対象は「月面実証フェーズ 2 マイクロ波送電部」である。

有人環境・対移動体送電部の月面上動作実証を目的とするもので、居住ユニット建設前の実環境での発生電界確認、及び移動中ローバーへの電力給電のため、月面実証を必要とする。実証期間は 2035 年～2040 年頃(月面実証フェーズ 1・月面実証フェーズ2)として、計画する。

「月面実証フェーズ 2 期間における、5 ヶ年の送電部の運用継続」を実証目標として、以下の 2 ステップでの実証を行う。

第 1 ステップでは、「実証機の開発(月面実証フェーズ 1)」として、①月面上マイクロ波送電用の 300kW(1km・固定・有人共存)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)と②月面上マイクロ波送電用

の 30kW(移動局)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)を行う。第 2 ステップでは、「実証機の運用(月面実証フェーズ 2)」として、③居住ユニットへ給電のための大電力送受電の月面上環境実証、④移動中のローバーに向けた電力伝送の月面上環境実証、及び⑤月面実証フェーズ 2 における継続的な送電運用を行う。

月面への必要輸送量は、約 8,000[kg]である。

### オ) 月面実証フェーズ 3

月面実証フェーズ3では月面実証フェーズ0の実証成果をベースに、年次なりのデバイス性能向上を取り込み、より高効率・高ダイナミックレンジの GaAs 1W レクテナ MMIC を適用する。

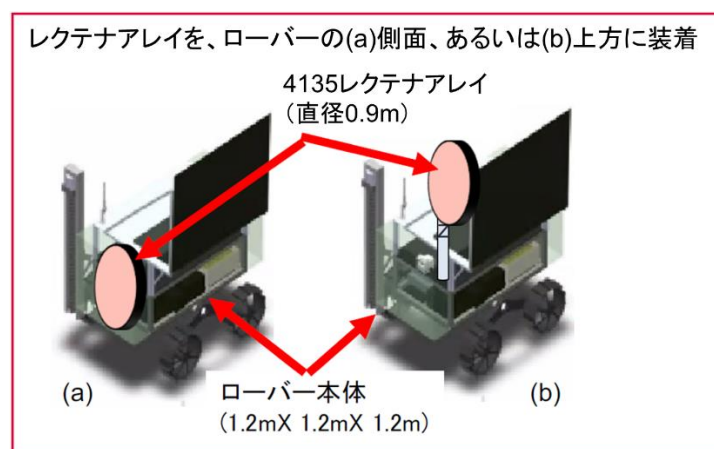


図 2-146 探査用ローバー本体への 1.5kW レクテナ取付け図

出所) 金沢工業大学, ispace 作成

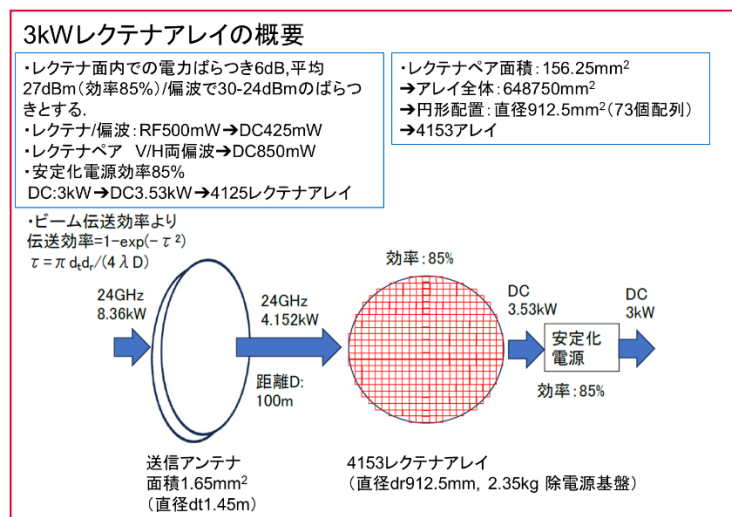


図 2-147 探査用ローバー用 1.5kW レクテナアレイの概要

出所) 金沢工業大学作成

### 3) 実証候補項目詳細

前項で示した各実証候補項目の詳細について、表 2-130 から表 2-138 にまとめた。

表 2-130 実証候補項目【3-②-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:マイクロ波送電部 主要コンポーネント                                                                                                                                                                                                     |
| 実証目的・必要性          | ・目的:マイクロ波送電部主要コンポーネント実現のため<br>・月面実証の必要性:本候補は月面実証ではない                                                                                                                                                                                          |
| 実証期間              | ・2025～2028 年頃(月面実証フェーズ以前)                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【マイクロ波送電部用の要素技術の開発】<br>・ビーム形成技術検証用のシミュレータの開発<br>・月面上送電部用ビームフォーミングデバイスの開発<br>・月面上送電部用パワーアンプの開発<br>・マイクロ波送電部用月面上敷設/支持構造の開発<br>【送電部 部分実証モデルの試作】<br>・ビームフォーミングデバイス/パワーアンプを用いた部分モデルの試作<br>・ビーム形成アルゴリズムの実測評価<br>【目標値】<br>・6kW 送電 送電部開発に向けた必要技術の開発完了 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 N/A[kg](内訳:N/A )                                                                                                                                                                                                                      |

出所) IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-131 実証候補項目【3-②-2】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:350W 送受電用 マイクロ波送電部                                                                                                                                             |
| 実証目的・必要性          | ・目的:350W マイクロ波送電の実現性確認のため<br>・月面実証の必要性:本候補は月面実証ではない                                                                                                                                   |
| 実証期間              | ・2025～2028 年頃(月面実証フェーズ以前)                                                                                                                                                             |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【部分試作】<br>・既存電子管デバイスを用いた部分試作の実施<br>・既存電子管デバイスを前提とした、RF 系小信号部の試作<br>・上記部分試作を組み合わせた制御精度検証<br>【350W 送電用 送電部に係る検討】<br>・月面環境下における電子管デバイスを前提とした構造検討<br>【目標値】<br>・350W 送電 送電部開発に向けた必要技術の開発完了 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 N/A[kg](内訳:N/A )                                                                                                                                                              |

出所) IHI エアロスペース、金沢工業大学作成



表 2-132 実証候補項目【3-②-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:マイクロ波送電部 主要コンポーネント                                                                                                                                                                                                   |
| 実証目的・必要性          | ・目的:マイクロ波送電部主要コンポーネント実現のため<br>・月面実証の必要性:本候補は月面実証ではない                                                                                                                                                                                        |
| 実証期間              | ・2028～2029 年頃(フェーズ 0 以前)                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【ビーム制御技術の高度化】<br>・長距離あるいは大電力送電に特化した、高効率送電用のビーム制御アルゴリズムの開発<br>・送電部モジュール構造化に向けた、協調動作技術の開発<br>【送電用デバイスの更新】<br>・前フェーズでの試作結果及び、6kW 送電部の開発状況を踏まえた、送電用デバイスの性能向上<br>・送電用デバイスの安定供給に向けた体制の確立<br>【目標値】<br>・95kW 送電及び、15k、0.7kW(10km)送電部開発に向けた必要技術の開発完了 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 N/A[kg](内訳:N/A )                                                                                                                                                                                                                    |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-133 実証候補項目【3-②-4】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                   |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:350W 送受電用 マイクロ波送電部                                                                                                              |
| 実証目的・必要性          | ・目的:350W マイクロ波送電の実現性確認のため<br>・月面実証の必要性:月面上環境におけるマイクロ波送受電の実現性確認のため。ローバー給電のため                                                                            |
| 実証期間              | ・2028～2029 年頃(フェーズ 0 以前)                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【350W マイクロ波送電部の製造】<br>・350W マイクロ波送電部の製造<br>【350W マイクロ波送電部の実証】<br>・350W マイクロ波送電部の月面上運用の実施<br>・ローバー近傍環境でのマイクロ波送電の実施<br>【目標値】<br>・月面上環境での 350W マイクロ波送電の実施 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 300[kg](内訳:進行波管 90kg+構造 180kg+その他 30kg )                                                                                                       |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-134 実証候補項目【3-②-5】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:6kW 送受電用 マイクロ波送電部                                                                                                                                                               |
| 実証目的・必要性          | ・目的:半導体方式による無線送電部の月面上動作実証のため<br>・月面実証の必要性:開発した送電部デバイスの月面上環境での動作確認のため                                                                                                                                   |
| 実証期間              | ・2028～2030 年頃(フェーズ 0 以前～フェーズ 0/4 カ年想定)                                                                                                                                                                 |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【6kW 送電部の開発(フェーズ 0 以前)】<br>・月面上マイクロ波送電用の 6kW 送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)<br>【6kW 送電部の運用(フェーズ 0)】<br>・6kW 送電部の月面上運用<br>・月面上環境における、送電部特性の劣化データの取得<br>・レゴリス等によるマイクロ波減衰量の取得<br>【目標値】<br>・月面上環境での 6kW マイクロ波送電の実施 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 300[kg]                                                                                                                                                                                        |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-135 実証候補項目【3-②-6】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:マイクロ波送電部 主要コンポーネント                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:マイクロ波送電部主要コンポーネント実現のため<br>・月面実証の必要性:マイクロ波送電の月面上適用拡大のため                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証期間              | ・2030 年頃(フェーズ 0)                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【ビーム制御技術の高度化(その 2)】<br>・フェーズ 0 で並行実施される、月面運用機の運用情報をもとに、ビーム制御補正アルゴリズムを開発<br>・有人ゾーン近傍への送電に向けた、極低漏洩電力制御技術の開発<br>・移動中のローバーへの給電を想定した、ビーム方向の移動体トラッキング制御技術の開発<br>【デバイスの月面環境適応性評価】<br>・デバイスを月面環境に継続曝露した場合の、特性劣化量の計測<br>・特性劣化を加味した、ビーム制御アルゴリズムの高度化<br>【目標値】<br>・360kW(有人環境下)送電及び、30kW(移動体)送電部開発に向けた必要技術の開発完了 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 30[kg](内訳:曝露用試料箱×3 箱 )                                                                                                                                                                                                                                                                      |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-136 実証候補項目【3-②-7】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:フェーズ 1 マイクロ波送電部                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証目的・必要性          | ・目的:長距離・大電力送電部の月面上動作実証のため<br>・月面実証の必要性:長距離送電におけるレゴリスの影響を見積もるため。長距離の見通し確保のため。月面上電力網構成のため                                                                                                                                                                  |
| 実証期間              | ・2030～2035 年頃(フェーズ 1)                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【実証機の開発(フェーズ 0)】<br>・月面上マイクロ波送電用の 15k,0.7kW(長距離・固定)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)<br>・月面上マイクロ波送電用の 95kW(短距離・固定)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)<br>【実証機の運用(フェーズ 1)】<br>・長距離送受電の月面上環境実証<br>・大電力送受電の月面上環境実証<br>・フェーズ 1 における継続的な送電運用<br>【目標値】<br>・フェーズ 1 期間における、5 カ年の送電部の運用継続 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 8,000[kg]                                                                                                                                                                                                                                        |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-137 実証候補項目【3-②-8】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:マイクロ波送電<br>・実証対象:フェーズ 2 マイクロ波送電部                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証目的・必要性          | ・目的:有人環境・対移動体送電部の月面上動作実証のため<br>・月面実証の必要性:居住ユニット建設前の実環境での発生電界確認のため。移動中ローパーへの電力給電のため                                                                                                                                                                                             |
| 実証期間              | ・2035～2040 年頃(フェーズ 2)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【実証機の開発(フェーズ 1)】<br>・月面上マイクロ波送電用の 300kW(1km・固定・有人共存)送電部の開発(EM×1 台、PFM×1 台)<br>・月面上マイクロ波送電用の 30kW 送電部(移動局)の開発(EM×1 台、PFM×1 台)<br>【実証機の運用(フェーズ 2)】<br>・居住ユニットへ給電のための大電力送受電の月面上環境実証<br>・移動中のローパーに向けた電力伝送の月面上環境実証<br>・フェーズ 2 における継続的な送電運用<br>【目標値】<br>・フェーズ 2 期間における、5 カ年の送電部の運用継続 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 8,000[kg]                                                                                                                                                                                                                                                              |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

表 2-138 実証候補項目【3-②-9】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月面上での送電システム<br>・実証対象 350W 受電レクテナアレイ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 実証目的・必要性          | ・目的:DC 出力 $5.6\text{kW}/\text{m}^2$ (平均値)、 $11\text{kW}/\text{m}^2$ (ピーク)の大電力密度のレクテナアレイの実証(電気性能, 機械強度, 熱, 耐放射線)<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 実証期間              | ・2025 年~2029 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【レクテナアレイ】</p> <p>・GaAs 1W レクテナ MMIC(月周辺軌道太陽光発電システム用微小電力レクテナ用 GaAs MMIC と相乗り)。日清紡マイクロデバイス GaAs プロセスにて、低閾値・高耐圧 GaAs E-pHEMT による高効率(ピーク効率 <math>86\% @ 1\text{W}</math> 入力)・高ダイナミックレンジ(<math>50\% @ 0.01\text{W}</math> 入力)を実現。</p> <p>・垂直/水平偏波多重による高電力密度レクテナアレイ。DC 出力 <math>5.6\text{kW}/\text{m}^2</math>(平均値)、<math>11\text{kW}/\text{m}^2</math>(ピーク)のレクテナアレイ技術により、ローパー用 350W 給電を直径 0.3m のレクテナアレイで実現。</p> <p>・レクテナアレイの出力に接続する安定化電源の開発。効率 <math>85\%</math>以上。</p> <p>・月面ローパー搭載に足る機械強度, 熱, 耐放射線検証</p> <p>【目標値】</p> <p>・GaAs 1W レクテナ MMIC:高効率(ピーク効率 <math>86\% @ 1\text{W}</math> 入力)・高ダイナミックレンジ(<math>50\% @ 0.01\text{W}</math> 入力)</p> <p>・ローパー用 350W 給電を直径 0.3m のレクテナアレイで実現</p> <p>・機械強度, 熱, 耐放射線(TBD)</p> |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 1[kg](内訳:レクテナアレイ 300g, 電源回路・構体他 700g )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

出所)IHI エアロスペース、金沢工業大学作成

### (3) 光ファイバーレーザー送電

#### 1) 光ファイバーレーザー送電に係る検討

##### a. 検討内容

レーザー光を用いたエネルギーの有線(光ファイバー)伝送及び無線伝送について検討した。光ファイバー伝送については昨年度検討した事項を簡易にまとめた。レーザー無線伝送については、前年度までは km 以上の長距離伝送のみが検討対象であったが、今年度新たに数百mと短い伝送距離が検討対象に加わったため、短距離伝送に有利なレーザーの種類を追加検討し、長距離伝送とあわせて各フェーズにおける実証候補項目について検討、整理した。これらを順次示す。

ここでは、光ファイバーに関するまとめと、短距離伝送を含めたレーザー無線伝送の仕様選択に関する考え方について、以降の各検討課題の共通項目として示す。

##### ア) 光ファイバー

本年度の検討において、各フェーズにおける具体的な実証候補項目には挙げられていない光ファイバーではあるが、昨年度検討した事項を簡易にまとめる。図 2-148 に光ファイバー伝送による各効率を示す。図 2-149 の波長及びファイバー調に対する各効率の項目間の構造を図示したものである。以下に課題を列挙する。

- 0.98 $\mu\text{m}$  高出力半導体レーザーが有望だが、電気・光変換効率と光電変換効率（図 2-149 の見積では 50%固定、セルのトップデータは表 2-139 を参照）向上が課題。
- 損失熱の利用は、送光・受光・伝送ファイバー各所で可能性あり。
- ファイバーコアの耐放性について MeV 以下の電子線については金属遮蔽対応、高エネルギー対応は海外産で対応か、遮蔽効果の精査か、検討が必要。

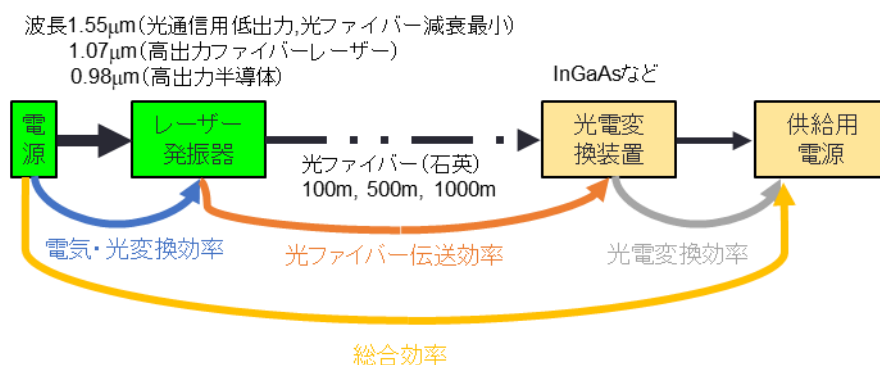


図 2-148 光ファイバー伝送による各効率

出所)光産業創成大学院大学作成

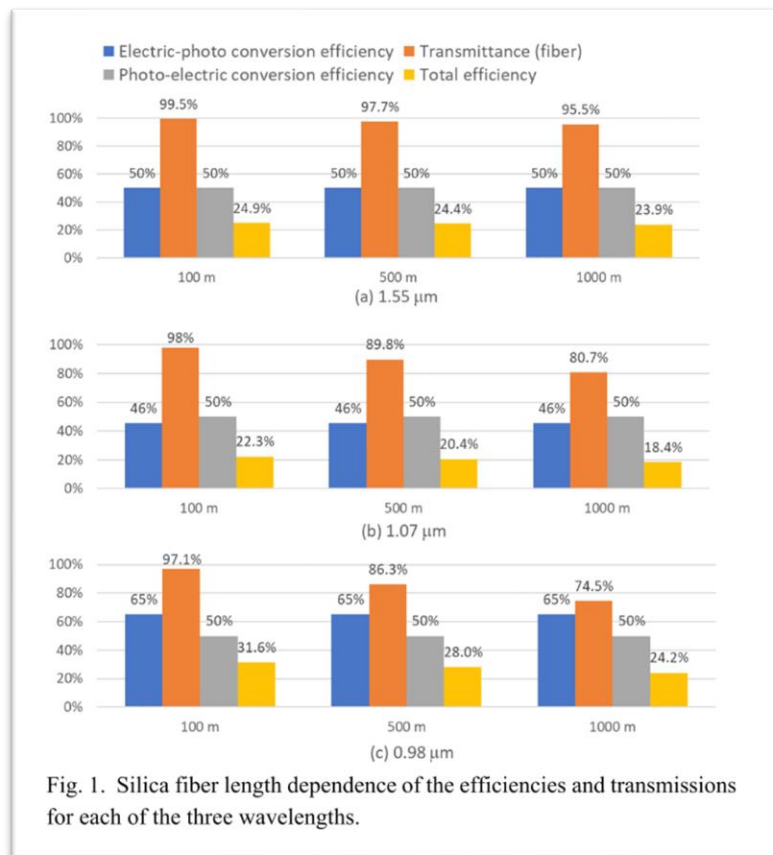


図 2-149 光ファイバー伝送による波長及びファイバー長に対する各効率

出所) FUJITA, K.: Journal of Evolving Space Activities 2: Article No. 174 (2024).

表 2-139 特定波長の光に対する光電変換効率(セル)の最新データ

| 光電変換効率 | 波長           | 文献                                                                                                                                                 |
|--------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 49%    | 1.45-1.65 μm | Fafard, S et al., Photonics, 10 (2023), p. 940.                                                                                                    |
| 52%    | 1.06 μm      | Kalyuzhnyy, N. et al, 16th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (Cpv-16), AIP Conf. Proc. 2298, 030001-1- 030001-6, 2020. |
| 57%    | 0.98 μm      | Fafard, S et al., Photonics, 10 (2023), p. 940.                                                                                                    |
| 69%    | 0.858 μm     | Helmers, H., et al, Phys. Status Solidi RRL, 15 (2021), p. 2100113.                                                                                |

出所) FUJITA, K.: Journal of Evolving Space Activities 2: Article No. 174 (2024)から光産業創成大学院大学作成

#### イ) 短・長距離のレーザー無線伝送の仕様選択に関する考え方

今年度新たに数百mと短い伝送距離が検討対象に加わったため、短距離伝送に有利なレーザーの種類を追加検討することとなった。ここでは、長距離伝送とあわせてレーザー無線伝送の仕様選択に関する考え方について、以降の各検討課題の共通項目としてまとめる。



表 2-140 短・長距離のレーザー無線伝送の仕様選択

| レーザー方式と特徴                                                         | 短距離伝送<br>(km 以下)           | 長距離伝送<br>(km 以上) | レーザー波長                                                                               | レーザー波長に対応する<br>光電変換素子                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| ファイバーレーザー<br>(FL)<br><br>高い指向性。LD 光を<br>変換して生成。故に効<br>率は LD より低め。 | 可<br><br>(ただし効率<br>LD に劣る) | 適<br><br>(高指向性)  | 1.07 $\mu\text{m}$ (自動車組立溶<br>接用途など発展しコモディ<br>ティ化)                                   | InGaAs(宇宙用 3 接合<br>素子の近赤外部相当で禁<br>制帯調整, 52%*)<br>CIGS(太陽光発電併用可<br>能性あり。耐放性良)                 |
| 半導体レーザー(LD)<br><br>低い指向性。FL より高<br>効率。                            | 可<br><br>(従来の伝送<br>実験の領域)  | 不適<br><br>(低指向性) | ① 450nm(青色。LED<br>技術基盤により LD も<br>高出力化)<br>② 860nm(GaAs)<br>③ (980nm(InGaAs)<br>有線用) | ① ペロブスカイト(研究<br>少ない)<br>② GaAs(従来より光電<br>変換効率高い<br>69%*)、ペロブスカ<br>イト可能性?<br>③ (InGaAs, 57%*) |

出所)光産業創成大学院大学作成

## b. 各フェーズにおける検討条件

ここでは月面上での送電システム全体にて検討した、表 2-114 からの整理結果をもとに、レーザー送受電のフェーズ・送電対象ごとの送受電部機能系統を検討している。合わせて 2.2.5 項(1)1)bと同様に、前フェーズからの追加技術要素から技術課題が生じるとの整理のもと、追加要素と技術課題の識別も実施している。整理結果は 2)2.2.5 (3)2)に実証候補項目と合わせて示す。

## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像(年代別、期間)

月面実証フェーズ0以前から月面実証フェーズ 2 まで、パワーや伝送距離が様々のシステムについて、開発から実証までをそれぞれ検討、記載した。

### b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

#### ア) 月面実証フェーズ 0 以前

##### 実証候補項目【3-③-1】

本実証候補項目の目的は以下の短距離・中/大電力、長距離・小電力用の送光仕様策定と試作・評価である。月面実証フェーズ 0 以前もしくは月面実証フェーズ 0 における月面実証に必要な前段階に位置づけられる。月面実証は行わず、地上実証のみである。実施期間は 2025 年～2029 年である。

- 短距離・中電力【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】
- 短距離・大電力【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】
- 長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】

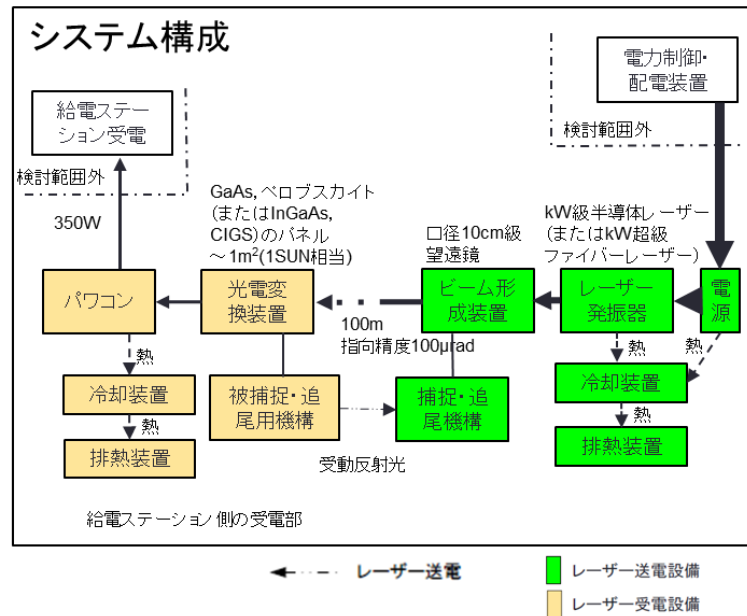


図 2-150 短距離・中電力【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】のシステム構成

出所)光産業創成大学院大学作成

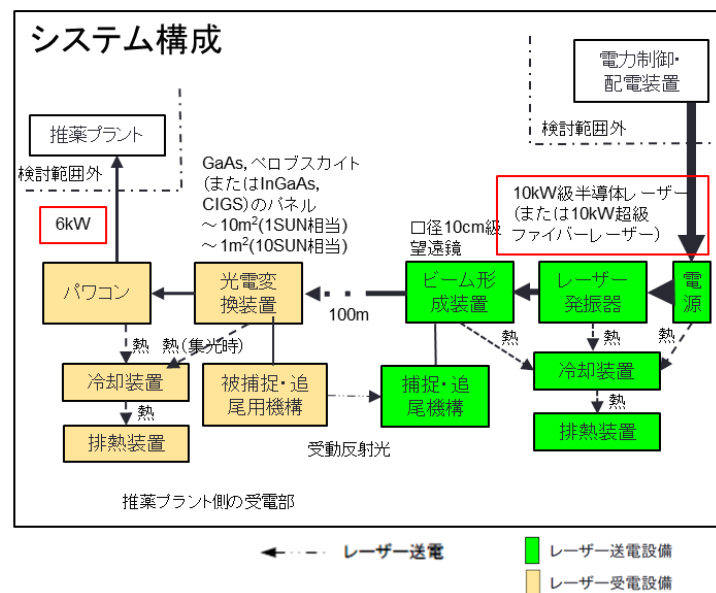


図 2-151 短距離・大電力【6kW100m 推奨プラ用 10kW 級送光】のシステム構成

出所)光産業創成大学院大学作成

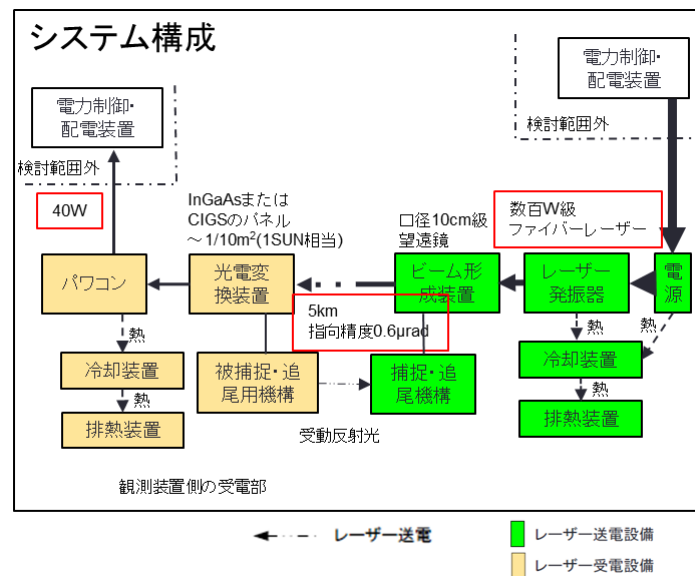


図 2-152 長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】のシステム構成

出所) 光産業創成大学院大学作成

実証内容は、送光仕様検討、耐環境性検討、試作・評価の 3 つである。

送光仕様検討については、上記 3 つの対象システム全てにおいて実施する。短距離(100m)はまず波長選択検討(表 2-140 を参照)として、効率依存の重量が主な判断指標であり、受光仕様検討と連動することになる。次に長距離(5km、波長 1μm ファイバーレーザー使用)仕様も対象に、送光後の受光時における照射不均一性対応、捕捉・追尾機能含め、光学基本設計を実施し基本仕様を確定する。

耐環境性検討については、全てのレーザーシステムにおいて共通であり、耐放射線性、レゴリス対策、熱設計が挙げられる。耐放射線性については、光ファイバー(特に石英にドーパントがあるコア部分)、半導体レーザーをはじめとした電子・光学素子が主な対象となる。レゴリスについては付着回避と除去に関する対策であり、高出力で高パワー密度の光が通過する光学窓への影響が懸念される。本件についての知見は少ないものの、先行して 2025 年にも月面に投入されるローバー運用の最新結果などを利用してリスク低減に努める必要がある。熱設計については、基本的なシステム設計項目の一つであり、次に述べる試作・評価で実施するものではあるが、真空環境下でこれまでの宇宙機において取り扱われているパワー及びパワー密度が高くなる点で留意が必要である。特にレーザー発振部、さらには、より高出力領域における光学素子及び周辺の機構において、過熱による不具合の回避が必要である。これらの耐環境性検討については、実証候補項目【3-③-4】耐環境性の基礎実証と連動して実施することを想定する。これらのうち、耐放性試験及びレゴリス模擬試験はコンポーネントレベルの実施を予定する。

試作・評価については、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】を対象に、先に検討・決定した送光仕様をもとに送光部の製作(受光部との組合せ評価兼用)とその評価を実施する。【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】については、これらの低・中出力の試作・評価結果をもとに、ステップアップする形で高出力版と位置づけ、次の段階で試作・評価を予定する。

目標(値)は、送光仕様の決定(3 種【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】)、試作・評価(2 種【350W100m 給電ステ用

1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】)で設計通りのビーム形成と出力が得られることである。

地上実証のみであることから、本段階では月面への輸送重量は考慮しない。

#### 実証候補項目【3-③-2】

本実証候補項目の目的は、前項の受光版で、以下の短距離・中/大電力、長距離・小電力用の受光仕様策定と試作・評価である。月面実証フェーズ 0 以前もしくは月面実証フェーズ 0 における月面実証に必要な前段階に位置づけられる。月面実証は行わず、地上実証のみである。実施期間は 2025 年～2029 年である。

- 短距離・中電力【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】(図 2-150 参照)
- 短距離・大電力【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】(図 2-151 参照)
- 長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】(図 2-152 参照)

実証内容は、受光仕様検討、耐環境性検討、試作・評価の 3 つである。

受光仕様検討については、上記 3 つの対象システム全てにおいて実施する。短距離(100m)はまず波長選択検討(表 2-140 を参照)として、効率依存の重量が主な判断指標であり、送光仕様検討と連動することになる。次に長距離(5km、波長 1μm ファイバーレーザー使用)仕様における InGaAs または CIGS の比較検討、受光時における照射不均一性対応、被捕捉・追尾機能、受光サイズ等パネル仕様、パワコン仕様の検討を実施し、基本仕様を確定する。

耐環境性検討については、耐放射線性、レゴリス対策が挙げられる。耐放射線性については、セル/モジュールの耐放性試験を実施し、パワコン等の電気機器は従来実績を踏まえた検討を基本とする。レゴリスについては、太陽光程度もしくはそれより高いパワー密度のレーザー光照射下における付着回避と除去に関する対策である。本件についての知見は少ないものの、先行して 2025 年にも月面に投入されるローバー運用の最新結果などを利用してリスク低減に努める必要がある。これらの耐環境性検討については、実証候補項目【3-③-4】耐環境性の基礎実証と連動して実施する。

試作・評価については、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】を対象に、3-③-1 で検討・決定した送光仕様をもとに受光部の製作(送光部との組合せ評価兼用)とその評価を実施する。【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】については、これらの低・中出力の試作・評価結果をもとに、ステップアップする形で高出力版と位置づけ、次の段階で試作・評価を予定する。

目標(値)は、受光仕様の決定(3 種【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】)、試作・評価(2 種【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】)で送光側からのビーム照射に対し、設計どおりの出力が得られることである。

地上実証のみであることから、本段階では月面への輸送重量は考慮しない。

#### 実証候補項目【3-③-3】

本実証候補項目の目的は、以下の短距離・中電力、及び長距離・小電力に対する月面運用機の試作・地上実証、及びそのうちの短距離・中電力の月面運用実証機の月面実証である。月面実証フェーズ

0 以前もしくは月面実証フェーズ 0 における月面実証に必要な前段階に位置づけられる。月面実証は行わず、地上実証のみである。実施期間は 2028 年～2029 年(地上実証が月面実証フェーズ0以前(前半)の最終年)、月面実証がフェーズ 0 以前(後半))である。

- 地上実証&月面実証:短距離・中電力【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】(図 2-150 参照)
- 地上実証:長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】(図 2-152 参照)

月面運用機の試作・地上実証については、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】及び【40W5km 天文用数百 W 級送光】に対して実施する。これまでの送光部・受光部の試作・検証の結果を反映した月面運用機の試作、地上実証、及び改善点の抽出を行い、月面実証に反映させる。

以下に各システムの重量見積を示す。

- 1kW 級送光部重量は電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 40kg/1kW、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 80kg 想定。
- 350W 出力の受光部重量は、光電変換モジュール 0.5kg/1m<sup>2</sup>(SLIM 搭載シャープ薄膜モジュール 500g/m<sup>2</sup> 仮定)、支持材 3kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.6kg、全 4.1kg。
- 数百 W 級は 100W 仮定で送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 4kg/100W、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 8kg 想定。
- 40W 出力の受光部重量は、光電変換モジュール 0.05kg/0.1m<sup>2</sup>(同上仮定)、支持材 1kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.06kg、全 1.1kg。

月面運用実証機の製作・月面実証については、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】を対象とする。上記試作・評価の結果を反映する。

目標値は、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】送光部 80kg、受光部 4.1kg →月面実証【40W5km 天文用数百 W 級送光】送光部 8kg、受光部 1.1kg、指向精度 0.6 $\mu$ rad(目標、実証候補項目【3-③-5】で確実達成)、重量合計約 84.1[kg] (kW 級)(内訳:送光部 80kg、受光部 4.1kg)である。

#### 実証候補項目【3-③-4】

目的は、高パワー密度送光(低パワー小口径ビーム利用)時のレゴリス影響等の基礎的な耐環境性の把握である。高パワー密度送光時のレゴリス影響等が致命的とならないよう、月面実証により基礎知見を獲得する必要がある。月面実証フェーズ 0 以前もしくは月面実証フェーズ 0 における月面実証に必要な前段階に位置づけられる。実施期間は 2025 年～2028 年である。

実証内容は、耐環境性検討とそれに基づく月面実証である。

耐環境性検討では、送光部について、放射線(光ファイバー、半導体レーザー、電子制御、光学素子を対象)、レゴリス(付着回避、除去)について初期検討を行い(実証候補項目【3-③-1】送光部と連動)、月面実証項目を整理する。受光部については、セル/モジュール・パワコン等(実証候補項目【3-③-2】受光部と連動)、月面実証項目を整理する。なお、受光部は太陽電池実績が多く類推しやすいため、実証は送光部が主となることが想定される。

月面実証では、基礎知見獲得のための高パワー密度送光時の耐環境性等課題抽出を行う。主要部品耐放性、最大 10kW を最小  $\phi 5\text{cm}$  で光学窓から出射する条件に相当する  $500\text{W}/\text{cm}^2$  程度を最大パワー密度と想定し、この値を上限とする光学窓レゴリス付着問題の基礎実証、熱設計実証を行う。光学素子に高パワー密度のレーザーを照射する際、光学素子表面上の光電効果による帯電がレゴリス付着を誘引し、実用上のレーザービーム通過性能が損なわれることが危惧される。月面実証がより簡易となるよう、出力 10W 級程度以下とし、ビームを絞ってパワー密度を確保して実施する。送光のみで、遠隔地における受光は想定しない。ただし、セルレベルの受光確認を同実証装置内の近接設置にて実施することをオプションとする。

目標(値)は、月面高パワー密度送光時の課題抽出(レゴリス付着性、熱設計の妥当性、各部品の劣化量、の検証)と要求仕様への反映である。

重量は、合計約 3[kg](10W 級)を想定(内訳:電源・発振器 5W/kg(2022 年度報告書同等出力市販品概算値)、付加的な排熱装置不要、計測系 1kg 付加)。

### 実証候補項目【3-③-5】

目的は、以下の短距離・大電力、長距離・小電力用の試作・地上評価である。月面実証フェーズ 0 における月面実証に必要な前段階に位置づけられる。月面実証は行わず、地上実証のみである。実施期間は 2028-29 年である。

- 短距離・大電力【6kW100m 推葉プラ用 10kW 級送光】(図 2-151 参照)
- 長距離・小電力【40W5km 天文用数百 W 級送光】(図 2-152 参照)

月面運用機の試作・地上実証については、【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】及び【40W5km 天文用数百 W 級送光】に対して実施する。これまでの送光部・受光部の試作・検証の結果を反映した、月面運用機の試作、地上実証、及び改善点の抽出を行い、月面実証に反映させる。

以下に各システムの重量目標値の詳細を示す。

- 10kW 級送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 400kg/1kW、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 800kg 想定。
- 6kW 出力の受光部重量は、光電変換モジュール  $5\text{kg}/10\text{m}^2$ (SLIM 搭載シャープ薄膜モジュール  $500\text{g}/\text{m}^2$  仮定)、支持材 9kg、本パソコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パソコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.9kg、全 14.9kg。
- 数百 W 級は 100W 仮定で送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 4kg/100W、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 8kg 想定。
- 40W 出力の受光部重量は、光電変換モジュール  $0.05\text{kg}/0.1\text{m}^2$ (同上仮定)、支持材 1kg、本パソコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.06kg、全 1.1kg。

目標値は、まとめると以下である。

- 【6kW100m 推葉プラ用 10kW 級送光】送光部 800kg、受光部 14.9kg
- 【40W5km 天文用数百 W 級送光】送光部 8kg、受光部 1.1kg、指向精度  $0.6\mu\text{rad}$
- 前フェーズまでに設定した耐環境性の要求を満たすこと。





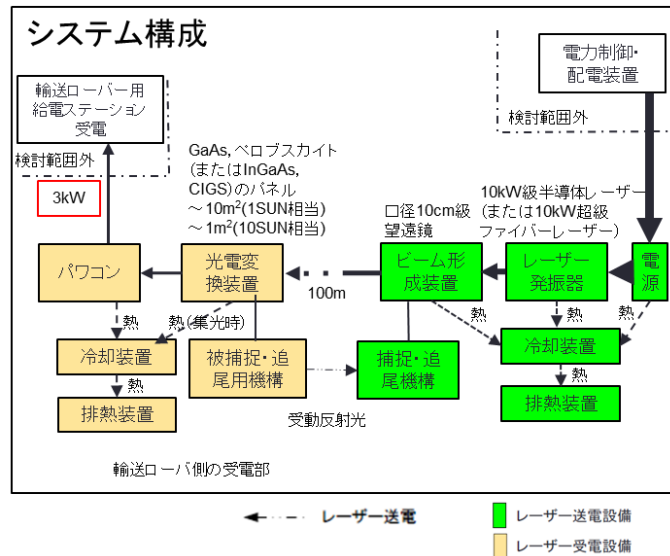


図 2-154 フェーズ 0 スケールダウン【3kW/100m 給電ステ用 10kW 級送光】のシステム構成

出所) 光産業創成大学院大学作成

月面運用機の製作・月面実証を行う。実証候補項目【3-③-5】における地上実証の改良点などを加えて実施する。

以下に各システムの重量目標値の詳細を示す。

- 数百 W 級 300W 仮定で送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 12kg/300W、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 24kg 想定。
- 120W 出力の受光部重量は、光電変換モジュール 0.15kg/0.3m<sup>2</sup>(SLIM 搭載薄膜 500g/m<sup>2</sup> 仮定)、支持材 1kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.2kg、全 1.3kg。
- 10kW 級 7kW 仮定で送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 280kg/7kW、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 560kg 想定。
- 3kW 出力の受光部重量は、光電変換モジュール 5kg/10m<sup>2</sup>(同上仮定)、支持材 9kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.9kg、全 14.9kg。

目標値は、まとめると以下である。

- 【120W5km 天文用数百 W 級送光】 送光部 24kg、受光部 1.3kg、指向精度 $\sim 1\mu\text{rad}$
- 【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】 送光部 560kg、受光部 15kg
- 重量: 合計約 25.3 [kg](120W)、575 [kg](3kW)  
(内訳: 数百 W 送光部 24kg、受光部 1.3kg、10kW 級送光部 560kg、受光部 15kg)

## エ) 月面実証フェーズ 2

### 実証候補項目【3-③-7】

目的は、移動体・超大電力化の月面実証【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】である。実施期間は 2035 年から 40 年頃である。

- 【30kW100m 輸送ローバー用 100kW 級送光】(図 2-155 参照)

以下のシステムは月面実証フェーズ 1【120W5km 天文用数百 W 級送光】の高出力化と長距離化である。

- 【400W5km 天文用 kW 級送光】(図 2-156 参照)
- 【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】(図 2-157 参照)

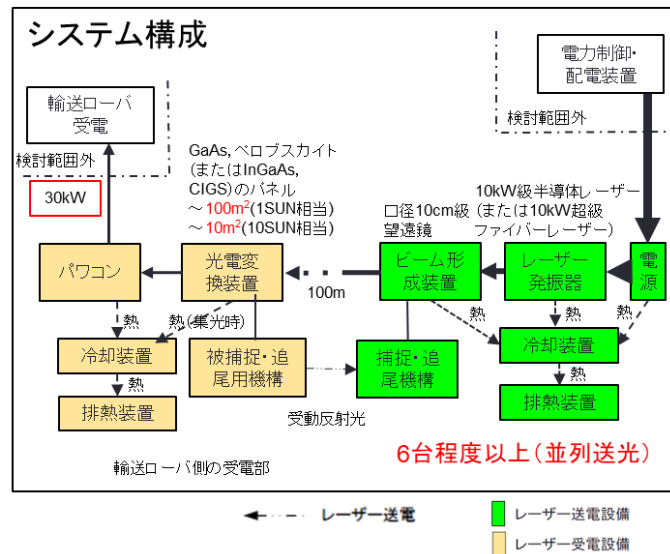


図 2-155 移動体・超大電力化【30kW100m 輸送ローバー用 100kW 級送光】のシステム構成

出所)光産業創成大学院大学作成

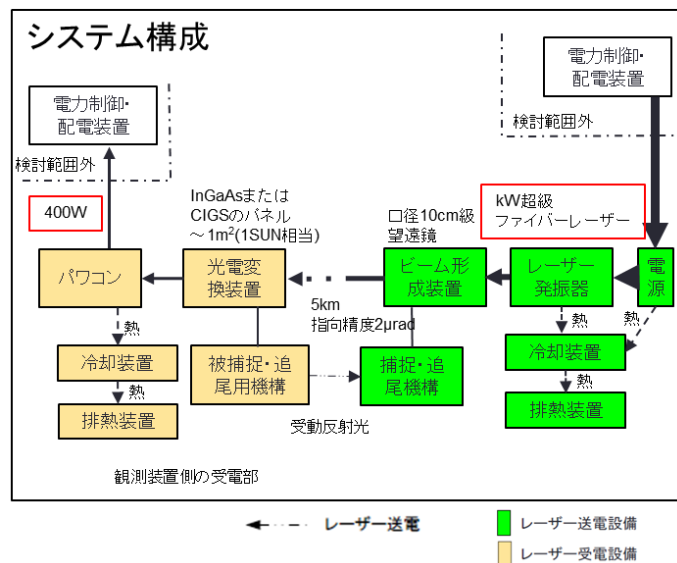


図 2-156 高出力化【400W5km 天文用 kW 級送光】のシステム構成

出所)光産業創成大学院大学作成

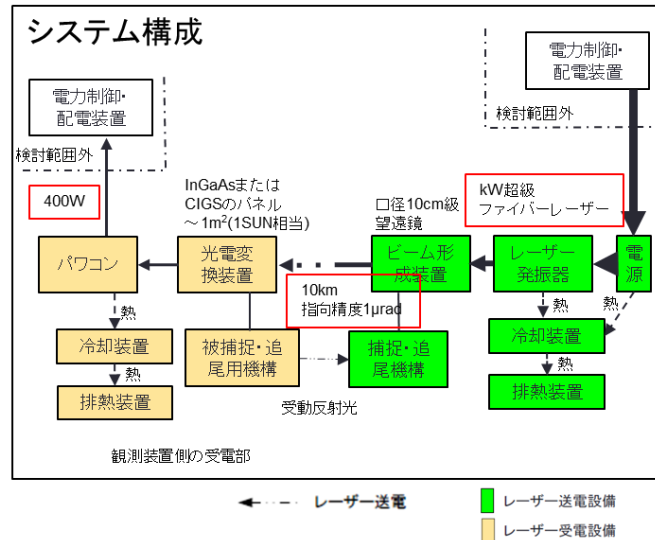


図 2-157 高出力化と長距離化【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】のシステム構成

出所)光産業創成大学院大学作成

月面運用機の製作・月面実証を行う。

以下に各システムの重量目標値の詳細を示す。

- 10kW 級送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 400kg/1kW、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 800kg 想定。これを全 8 台並列設置予定。6,400kg。
- 30kW 出力受光部重量は 70kW 受光仮定で、光電変換モジュール 35kg/70m<sup>2</sup>(SLIM 薄膜 500g/m<sup>2</sup> 仮定)、支持材 30kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 45kg、全 110kg。
- 400W 出力送光部重量は、電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 40kg/1kW、及び冷却・排熱など別途同等(仮設定)、全 80kg 想定。
- 400W 出力受光部重量は、光電変換モジュール 0.5kg/1m<sup>2</sup>(SLIM 搭載シャープ薄膜モジュール 500g/m<sup>2</sup> 仮定)、支持材 3kg、本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.6kg、全 4.1kg。

目標値は、まとめると以下である。

- 【30kW100m 輸送ローバー用 100kW 級送光】 送光部 800kg×8 台、受光部 15kg(ローバー搭載)
- 【400W5km 天文用 kW 級送光】 送光部 80kg、受光部 4.1kg、指向精度 $\sim 2\mu\text{rad}$
- 【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】 送光部 80kg、受光部 4.1kg、指向精度 $\sim 1\mu\text{rad}$
- 重量:合計約 6510[kg](30kW)、84.1[kg](400W5km)、84.1[kg](400W10km)  
(内訳:送光 800[kg]×8 台、ローバー搭載 110[kg](30kW)、送光部 80kg、受光部 4.1kg(400W))

### 3) 実証候補項目詳細

前項までに示した実証候補項目の詳細について、表 2-141 から表 2-148 に示す。

表 2-141 実証候補項目【3-③-1】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:送光仕様 試作性能                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証目的・必要性  | ・目的:短距離・中/大電力, 長距離・小電力用の送光仕様策定と試作・評価<br>【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推葉プラ用 10kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:(地上実証のみ)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証期間      | ・2025 年～2029 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 実証候補項目    | 【送光仕様検討】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| (実証目標値)   | ・短距離(100m)はまず波長選択検討(効率依存の重量が主な判断指標. 受光仕様検討と連動)<br>・長距離(5km. 波長 1 $\mu$ m ファイバーレーザー使用)や照射不均一性対応, 捕捉・追尾機能含め, 光学基本設計で仕様確定.<br>【耐環境性検討】(耐放性試験及びレゴリス模擬試験はコンポーネントレベルで実施)<br>・放射線(光ファイバー, 半導体レーザー, 電子・光学素子), レゴリス(付着回避, 除去), 熱設計(次の試作設計で検討). 【3-③-4 耐環境性の基礎実証】と連動.<br>【試作・評価】【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】. 【40W5km 天文用数百 W 級送光】 いずれも改良評価含む<br>送光部製作(受光部との組合せ評価兼用)【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】<br>【目標値】<br>・送光仕様の決定【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推葉プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】<br>・試作・評価【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】 |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 N/A [kg] (地上実証のみ)<br>(内訳:N/A)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-142 実証候補項目【3-③-2】に係る詳細内容

| 項目       | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目     | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:受光仕様 試作性能                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証目的・必要性 | ・目的:短距離・中/大電力, 長距離・小電力用の受光仕様策定と試作・地上評価<br>【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推葉プラ用 10kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:(地上実証のみ)                                                                                                                                                 |
| 実証期間     | ・2025 年～2029 年                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 実証候補項目   | 【受光仕様検討】                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| (実証目標値)  | ・短距離(100m)はまず波長選択検討(効率依存の重量が主な判断指標. 送光仕様検討と連動)<br>・長距離(5km)波長 1 $\mu$ m 用受光素子として InGaAs または CIGS 比較検討<br>・照射不均一性対応, 被捕捉・追尾機能, 受光サイズ等パネル仕様, パワコン仕様, 各確定.<br>(送光仕様検討と連動)<br>【耐環境性検討】(セル/モジュールの耐放性試験, パワコン等は従来実績踏まえ検討, レゴリス影響調査)<br>【試作・地上評価】【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】. 【40W5km 天文用数百 W 級送光】 いずれも改良評価含む |



|           |                                                                                 |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|
|           | 受光部製作(送光部との組合せ評価兼用)【100m350W 給電ステ用 1kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】             |
|           | 【目標値】                                                                           |
|           | ・送光仕様の決定【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【6kW100m 推葉プラ用<br>10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】 |
|           | ・試作・地上評価【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級<br>送光】                        |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 N/A [kg] (地上実証のみ)                                                       |
|           | (内訳:N/A)                                                                        |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-143 実証候補項目【3-③-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:月面運用機試作 2 種, 月面運用実証機 1 種                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面運用機の試作・地上実証【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】, 及び月面実証【350W100m 給電ステ用 1kW 級送<br>光】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:月面実証【350W100m 給電ステ用 1kW 級<br>送光】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証期間              | ・2028 年～2029 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面運用機の試作・地上実証】【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】【40W5km<br>天文用数百 W 級送光】<br>・これまでの送光部・受光部の試作・検証の結果を反映した, 月面運用機の試作, 地上実証,<br>改善点抽出.<br>・1kW 級送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算<br>値)から 40kg/1kW, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 80kg 想定.<br>・350W 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 0.5kg/1m <sup>2</sup> (SLIM 搭載シャープ<br>薄膜モジュール 500g/m <sup>2</sup> 仮定), 支持材 3kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販<br>太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.6kg, 全 4.1kg.<br>・数百 W 級は 100W 仮定で送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書<br>10kW 市販品概算値)から 4kg/100W, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 8kg<br>想定.<br>・40W 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 0.05kg/0.1m <sup>2</sup> (同上仮定), 支持材<br>1kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.06kg, 全 1.1kg.<br>【月面運用実証機の製作・月面実証】【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】<br>【目標値】<br>【350W100m 給電ステ用 1kW 級送光】送光部 80kg, 受光部 4.1kg →月面実証<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】送光部 8kg, 受光部 1.1kg, 指向精度 0.6μrad<br>(目標.【3-③-5 で確実達成】) |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 84.1[kg] (kW 級)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                   | (内訳:送光部 80kg, 受光部 4.1kg)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-144 実証候補項目【3-③-4】に係る詳細内容

| 項目       | 実証詳細                                                |
|----------|-----------------------------------------------------|
| 実証項目     | ・技術項目:レーザー送電                                        |
|          | ・実証対象:基礎的な耐環境性                                      |
| 実証目的・必要性 | ・目的:高パワー密度送光(低パワー小口径ビーム利用)時のレグリス影響等の基礎的な耐<br>環境性の把握 |



|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | ・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:高パワー密度送光時のレゴリス影響等が致命的とならないような基礎知見の獲得                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証期間              | ・2025 年～2028 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【耐環境性検討】</p> <p>・送光部:放射線(光ファイバー, 半導体レーザー, 電子制御, 光学素子), レゴリス(付着回避, 除去), を初期検討し(【3-③-1 送光部】と連動), 月面実証項目を整理.</p> <p>・受光部:セル/モジュール・パワコン等(【3-③-2 受光部】と連動), 月面実証項目を整理.<br/>(受光部は太陽電池実績が多く類推しやすいため, 実証は送光部が主となるか)</p> <p>【月面実証:基礎知見獲得のための高パワー密度送光時の耐環境性等課題抽出】試作, 実証機</p> <p>・主要部品耐放性, 最大 10kW/最小<math>\phi 5\text{cm}^2</math> 500W/cm<sup>2</sup> 程度前後の最大パワー密度以下(光電効果による帯電危惧)に対する光学窓レゴリス付着問題の基礎実証, 熱設計実証. 出力 10W 級程度以下でパワー密度を確保して実施.</p> <p>・送光のみ, 遠隔地受光は想定しない. ただし, セルレベルの受光確認を同実証装置内の近接設置にて実施をオプション.</p> |
|                   | 【目標値】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                   | ・月面高パワー密度送光時の課題抽出(レゴリス付着性, 熱設計の妥当性, 各部品の劣化量, の検証)と要求仕様への反映                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 3[kg](10W 級)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                   | (内訳:電源・発振器 5W/kg(2022 年度報告書同等出力市販品概算値), 付加的な排熱装置不要, 計測系 1kg 付加)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-145 実証候補項目【3-③-5】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | <p>・技術項目:レーザー送電</p> <p>・実証対象:月面運用機試作(地上実証)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 実証目的・必要性          | <p>・目的:短距離・大電力, 長距離・小電力用の試作・地上評価</p> <p>【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】</p> <p>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:(地上実証のみ)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証期間              | ・2028-29 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <p>【月面運用機の試作・地上実証】【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】改良</p> <p>・これまでの送光部・受光部の試作・検証の結果を反映した, 月面運用機の試作, 地上実証, 改善点抽出. 以下重量目標.</p> <p>・10kW 級送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 400kg/1kW, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 800kg 想定.</p> <p>・6kW 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 5kg/10m<sup>2</sup>(SLIM 搭載シャープ薄膜モジュール 500g/m<sup>2</sup> 仮定), 支持材 9kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.9kg, 全 14.9kg.</p> <p>・数百 W 級は 100W 仮定で送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 4kg/100W, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 8kg 想定.</p> <p>・40W 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 0.05kg/0.1m<sup>2</sup>(同上仮定), 支持材 1kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.06kg, 全 1.1kg.</p> <p>【目標値】</p> <p>・【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】送光部 800kg, 受光部 14.9kg</p> <p>・【40W5km 天文用数百 W 級送光】, 送光部 8kg, 受光部 1.1kg, 指向精度 0.6<math>\mu\text{rad}</math></p> <p>・前フェーズまでに設定した耐環境性の要求を満たすこと.</p> |
| 月面への必要輸送量         | <p>・重量:合計約 N/A [kg] (地上実証のみ)</p> <p>(内訳:N/A)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-146 実証候補項目【3-③-6】に係る詳細内容

| 項目        | 実証詳細                                                                                                                                                  |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目      | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:月面運用機                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性  | ・目的:短距離・大電力, 長距離・小電力の月面実証<br>【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】<br>【40W5km 天文用数百 W 級送光】    |
| 実証期間      | ・2030 頃                                                                                                                                               |
| 実証候補項目    | 【月面運用機の製作・月面実証】【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】【40W5km 天文用数百 W 級送光】                                                                                           |
| (実証目標値)   | 【目標値】<br>・【6kW100m 推薬プラ用 10kW 級送光】送光部 800kg, 受光部 14.9kg<br>・【40W5km 天文用数百 W 級送光】送光部 8kg, 受光部 1.1kg, 指向精度 0.6 $\mu$ rad<br>・前フェーズまでに設定した耐環境性の要求を満たすこと. |
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 815 [kg](6kW), 9.1 [kg](40W)<br>(内訳:10kW 級送光部 800kg, 受光部 14.9kg. 数百 W 級送光部 8kg, 受光部 1.1kg)                                                    |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-147 実証候補項目【3-③-7】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:月面運用試作機, 月面運用機                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証目的・必要性          | ・目的:長距離の中電力化の月面実証<br>【120W5km 天文用数百 W 級送光】【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:【120W5km 天文用数百 W 級送光】<br>【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 実証期間              | ・2030~2035 頃                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面運用機の試作・地上実証】【120W5km 天文用数百 W 級送光】【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】<br>・長距離の中電力化. 以下重量目標.<br>・数百 W 級 300W 仮定で送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 12kg/300W, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 24kg 想定.<br>・120W 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 0.15kg/0.3m <sup>2</sup> (SLIM 搭載薄膜 500g/m <sup>2</sup> 仮定), 支持材 1kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.2kg, 全 1.3kg.<br>・10kW 級 7kW 仮定で送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 280kg/7kW, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 560kg 想定.<br>・3kW 出力の受光部重量は, 光電変換モジュール 5kg/10m <sup>2</sup> (同上仮定), 支持材 9kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(同上参考)として 0.9kg, 全 14.9kg.<br>【月面運用機の製作・月面実証】【120W5km 天文用数百 W 級送光】【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】<br>【目標値】<br>・【120W5km 天文用数百 W 級送光】送光部 24kg, 受光部 1.3kg, 指向精度 $\sim 1\mu$ rad<br>・【3kW100m 給電ステ用 10kW 級送光】送光部 560kg, 受光部 15kg |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 25.3 [kg](120W), 575 [kg](3kW)<br>(内訳:数百 W 送光部 24kg, 受光部 1.3kg. 10kW 級送光部 560kg, 受光部 15kg)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

出所)光産業創成大学院大学作成

表 2-148 実証候補項目【3-③-8】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:レーザー送電<br>・実証対象:月面運用試作機, 月面運用機                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:移動体・超大電力化の月面実証【30kW100m 輸送ローパー用 100kW 級送光】【400W5km 天文用 kW 級送光】【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:【30kW100m 輸送ローパー用 100kW 級送光】【400W5km 天文用 kW 級送光】【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証期間              | ・2035~2040 頃                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【月面運用機の試作・地上実証】【30kW100m 輸送ローパー用 100kW 級送光】10kW 級 1 台【400W5km 天文用 kW 級送光】と【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】<br>・移動体・超大電力化の月面実証, 以下重量目標.<br>・10kW 級送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 40kg/1kW, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 800kg 想定. これを全 8 台並列設置予定. 6,400kg.<br>・30kW 出力受光部重量は 70kW 受光仮定で, 光電変換モジュール 35kg/70m <sup>2</sup> (SLIM 薄膜 500g/m <sup>2</sup> 仮定), 支持材 30kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW(市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 45kg, 全 110kg.<br>・400W 出力送光部重量は, 電源・発振器 25W/kg(2022 年度報告書 10kW 市販品概算値)から 40kg/1kW, 及び冷却・排熱など別途同等(仮設定), 全 80kg 想定.<br>・400W 出力受光部重量は, 光電変換モジュール 0.5kg/1m <sup>2</sup> (SLIM 搭載シャープ薄膜モジュール 500g/m <sup>2</sup> 仮定), 支持材 3kg, 本パワコン(DC-DC)1.5kg/kW (市販太陽光パワコン(DC-AC インバータ)2kg/kW を参考)として 0.6kg, 全 4.1kg.<br>【月面運用機の製作・月面実証】【30kW100m 輸送ローパー用 100kW 級送光】10kW 級 8 台 20 億【400W5km 天文用 kW 級送光】【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】<br>【目標値】<br>・【30kW100m 輸送ローパー用 100kW 級送光】送光部 800kg×8 台, 受光部 15kg(ローパー搭載)<br>・【400W5km 天文用 kW 級送光】送光部 80kg, 受光部 4.1kg, 指向精度~2μrad<br>・【400W10km 天文用 kW 級送光(軌道上受電用受電設備より)】送光部 80kg, 受光部 4.1kg, 指向精度~1μrad |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 6510[kg](30kW), 84.1[kg](400W5km), 84.1[kg](400W10km)<br>(内訳:送光 800[kg]×8 台, ローパー搭載 110[kg](30kW). 送光部 80kg, 受光部 4.1kg(400W))                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

出所)光産業創成大学院大学作成

## 2.2.6 その他

### (1) 月面環境調査

#### 1) 電力システム設計のための月面環境を調査に係る検討

永久影内の資源ゾーンへ電力供給をする為には、長期日照域のサービスゾーンに発電/送電設備を建設する必要がある。その為、サービスゾーン候補地が設備建設の適地であるかの調査を行い、その調査結果を電力システム設計に反映させるべく、候補地に着月後のランダーおよびローバーを用いた月面環境調査の実証を検討した(図 2-158)。

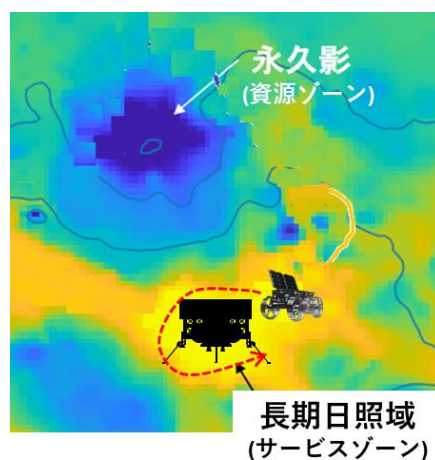


図 2-158 サービスゾーン候補地での探査イメージ

出所)ispace 作成

### 2) 実証候補項目

#### a. 実証に関する全体像(年代別、期間)

候補地に発電/送電設備を建設する際の電力システム設計には、サービスゾーンの地質調査と月面での環境調査によって得られる情報が必要となる。その為、本調査は月面実証フェーズ0以前(2025年～2029年頃)に、サービスゾーン候補地に着陸したランダーおよびローバーを利用して月面実証を行う前提とした。

#### b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

本実証では、サービスゾーン候補地の「1. 地形や土質・地下構造及びレゴリス性状の地質」と「2. 放射線や帯電及び温度環境等の月面・宇宙環境」を計測して、電力システムの設計に反映させることを目的とした。サービスゾーン候補地に発電/送電設備を建設するには、上記の現地調査結果を設計に反映させることが不可欠である為、月面での実証が必要となる。具体的には、月面ランダーに観測装置を搭載



し着陸地点(1点)周辺の環境調査と、月面ローバー(走行車)による周辺多地点での地形/環境調査を計画した。

### b-1. サービスゾーン地質調査

サービスゾーン候補地が発電/送電設備建設の適地であるかは、以下の調査を実施する。

- ①カメラ、LiDARによる地形調査
- ②地中レーダーやマルチバンドカメラによる土質/地下構造調査
- ③ショベルで直接接触することによるレゴリス性状調査

### b-2. 月面・宇宙環境調査

サービスゾーン候補地の環境調査では、放射線、帯電、温度環境の連続モニタを計測し、可能であれば越夜しての長期変化の取得を検討する。

上記実証における月面への必要輸送重量は約60kg。内訳はランダー搭載の観測装置10kg+ローバー約35kg(本体25kg+ペイロード(観測装置含む)10kg)+月面展開機構約15kgを想定している。なお、本実証で使用するローバーは、後述のローバーへの給電の「給電方式選択の為のローバーの自動走行性能検証」に用いるローバーと共用が可能である。

## 3) 実証候補項目詳細

前項で示した実証候補項目の詳細について、表 2-149 に示す。

表 2-149 実証候補項目【0-②-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月面調査<br>・実証対象:電力システム設計のための月面環境                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証目的・必要性          | ・目的:サービスゾーンの地形、環境を計測して電力システムの設計に反映させる<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:発送電拠点を建設する現地調査結果を設計反映させるために必要                                                                                                                                                                                |
| 実証期間              | ・2025年～2029年                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【サービスゾーン地質調査】<br>・発電/送電設備建設の適地であるか、ランダー及びローバーで探査。①カメラ、LiDARによる地形調査②地中レーダーやマルチバンドカメラによる土質/地下構造調査③ショベルで直接接触することによるレゴリス性情調査。<br>【月面・宇宙環境調査】<br>・月面での放射線、帯電、温度環境の連続モニタ。可能であれば越夜しての長期変化の取得を検討。<br>【目標値】<br>・月面ランダーに搭載し着陸地点(1点)周辺環境の調査を行う<br>・月面ローバー(走行車)に搭載して、周辺多地点での地形/環境調査を行う |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約60[kg](内訳:下記参照)→「フェーズ0以前の2」と共用可<br>ランダー搭載:観測装置 10kg<br>ローバー搭載:ローバー35kg(本体25kg+ペイロード(観測装置含む)10kg)+月面展開機構15kg=ペイロードトータル50kg                                                                                                                                           |

出所)ispace 作成

## (2) ローバーへの給電

### 1) 探査ローバーへの近接送電および長距離無線送電に係る検討

永久影内の水資源探査ローバーを持続的に走行させる為には、PSR 内部への送電が必要不可欠となる。送電の方式としては、①固定の給電ステーションまで日照域から送電し、給電ステーションからローバーに近接送電するか、若しくは②日照域から直接 PSR 内部のローバーに長距離送電をするかの2方式が考えうる。これらの実証を目的として、月面実証フェーズ0以前における「給電方式の検証」と、月面実証フェーズ0での「長距離無線送電の検証」及び「ローバーへの近接送電」に係る実証候補項目を検討した。なお前述の2つの送電方式のうち①の給電ステーションを介す方式の前提となる考え方について、更に以下で示す。

このケース①において探査ローバーへの給電は、探査領域を拡大するべく給電ステーションを PSR 内に設置し、太陽電池プラントから受電を行う給電ステーション(図 2-159)より探査ローバーへ送電することを前提とした。また探査ローバーへの給電パターンは、探査と給電を繰り返すことで給電ステーションから等距離円形の範囲を探索することを想定した(図 2-160)。ただし、給電ステーションからの走行可能距離は搭載バッテリー重量＝ローバー総重量に依存し、今後の課題になる。

またケース②においては、送電のための受電モジュール(レクテナ等)の実証が必要となるが、それは別項で計画されていることから、本項では重複を避けるために実証計画としては含めず、モジュールとして提供されることを前提として、その他の観点での実証を計画した。

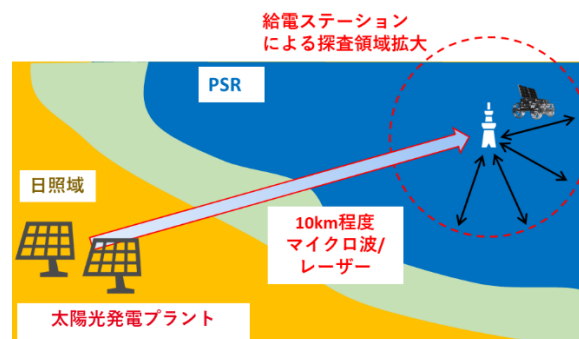


図 2-159 太陽電池プラントと給電ステーション間の送電

出所)ispace 作成

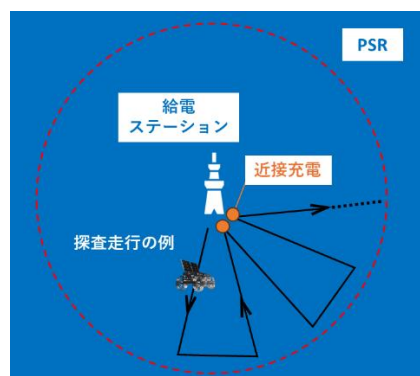


図 2-160 PSR 内での探査と給電のパターン

出所)ispace 作成



## 2) 実証候補項目

### a. 実証に関する全体像(年代別、期間)

まず月面実証フェーズ0以前(2025年～2029年頃)には、給電方式選択の為にローバーの自動走行性能検証の月面実証を行う。その結果を基に月面実証フェーズ0(2030年頃)にて、ローバーへの近接送電および長距離無線送電の月面実証を行うことにより、PSR 内部での探査ローバーへの電力供給方式を確定させることが出来る。

#### a-1. 給電方式選択の為にローバーの自動走行性能検証（月面実証フェーズ0以前）

探査ローバーへの給電方式の選択については、月面上の自動運転で給電ステーションにどこまで安全にアプローチできるかのローバー制御の技術課題の検討が必要であり、現時点での確定は困難である。従って理想的なアプローチができる場合(図 2-161 のケース 1 若しくは 2)だけでなく、ある程度の安全距離を取ることが求められる場合(図 2-161 のケース 3)の計 3 ケースについて、方式とトレードオフの検討を行った(表 2-150)。

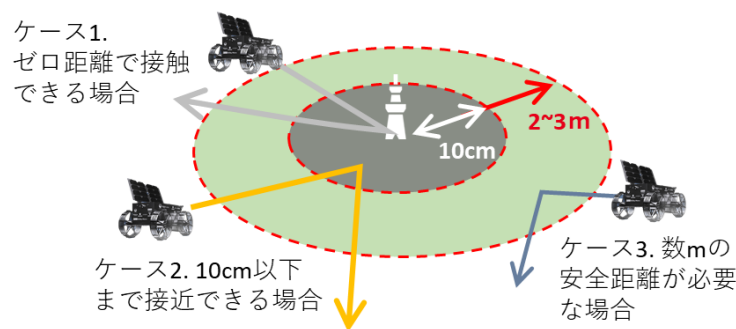


図 2-161 給電ステーションへのアプローチ

出所)ispace 作成

表 2-150 各アプローチケースにおける想定される給電方式

|           | ケース1: ゼロ距離で接触が可能                                                  | ケース2: 10cm以下まで接近可能                                                                   | ケース3: 数mの安全距離が必要                                |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 想定される給電方式 | 接触通電方式<br>・ 電極やパンタグラフに接触させて給電する                                   | 磁気結合方式<br>・ 電磁誘導方式<br>地上でも家電やEVの充電で実用例が多い<br>・ 磁気共振方式<br>共振回路同士の共鳴減少を利用したもので比較的新たな方式 | マイクロ波送電<br>・ 長距離送電でも想定されている方式を小規模/短距離/高効率で実現させる |
| メリット      | ・ 地上での技術レベル達成度が高い<br>・ ロス少なく送電が可能                                 | ・ 地上での技術レベル達成度が高い<br>・ 比較的シンプルな回路構成で実現可能                                             | ・ 数m～10m程度まで安全距離を取ることができる<br>・ 位置ずれにも強い         |
| デメリット     | ・ ゼロ距離までローバーを接近させる必要あり、給電ステーションへの衝突/破損のリスクあり<br>・ レゴリスの電極への影響を評価要 | ・ 送電可能距離が短く(<10cm)、ローバーを比較的近距离までアプローチさせる必要がある                                        | ・ 新規性が高く開発要素が多い<br>・ 送電効率が悪い                    |

出所)ispace 作成

その結果、探査ローバーの自動走行にてターゲットまでの接近距離が10cm 程度のアプローチが可能であれば、パンダグラフ方式もしくは磁気結合方式での給電を選択することができ、接近距離が数m となる場合は、マイクロ波送電による給電を想定する必要がある。

#### **a-2. ローバーへの近接送電と長距離無線送電（月面実証フェーズ0）**

ローバーへの近接送電の実証では、月面実証フェーズ0以前での上記 a-1 の実証で得られた結果に基づく近接送電方式を選択する。送電ユニットを給電ステーション側に提供し、受電ユニットをローバーに搭載して月面実証を行う。

ローバーへの長距離無線送電の実証では、月面ランダーを活用のうえ発電ステーションの近隣に送電ユニットを設置し、ローバー上の受電ユニットへ送電を行う。具体的な実証方法に関しては次項に記載する。

### **b. 各フェーズ、年代における実証候補項目について**

#### **b-1. 給電方式選択の為のローバーの自動走行性能検証（2025 年～2029年、月面実証フェーズ0以前）**

本実証では月面環境で小型無人ローバーが自律的な運転でどこまでターゲット（給電ステーション）に接近できるのかの検証を目的とする。実態不明な月面のレゴリス性状や地形の特殊性を踏まえた実証が求められる為、本実証は月面での実証が必要となる。

自動走行性能の検証に利用するローバーは、Visual SLAM のためのステレオカメラを設置し、必要に応じてエッジコンピューティング用の OBC（オンボードコンピュータ）を追加搭載する。実証目標値としては、ターゲットまでの接近距離 10cm 程度を設定する。目標値のアプローチが可能であれば、以降のフェーズでの近接充電にはパンダグラフ方式もしくは磁気結合方式での給電が選択可能となり、ターゲットまで接近距離が数mとなる場合には、マイクロ波送電もしくは発電ステーションからの長距離送電を想定する必要がある。

本実証における月面への必要輸送重量は約50kg となる。内訳はローバー約 35kg（本体 25kg + ペイロード（カメラ、OBC 含む）10kg）+ 月面展開機構約 15kg を想定している。

#### **b-2. ローバーへの近接送電と長距離無線送電の検証（2030 年頃、月面実証フェーズ0）**

本実証では①月面環境でマイクロ波もしくはレーザーによるピンポイントの長距離送電を可能にする、②給電ステーションからの近接送電を可能にする事を目的とする。地上で実現された送電システムを月面環境での実用性を検証するべく、月面での実証が必要となる。

上記①のローバーへの長距離無線送電の実証には、月面ランダーを活用のうえ発電ステーションの近隣に送電ユニットを設置し、ローバー上の受電ユニット（停車状態→走行中）へ送電を行う。実証方法としては以下の 3 ステップに分け、送電に向けたポインティング誤差や送電距離と送電効率の対比を評価指標とし、目標値は10kmまでの送電距離とする。

Step0. ローバーへの長距離送電を地上実証する。

Step1. ローバーをランダーから月面に分離した後、ランダーから遠ざかる方向に走行させる。その

間、一定距離毎に送電検証する。

Step2. 走行中のローバーをトラッキングして送電する。

上記②のローバーへの近接送電の実証は、月面実証フェーズ0以前のローバーの自動走行性能の検証結果に基づき近接送電方式を選択する。選択した近接送電方式の送受電ユニットを開発/地上検証の後、送電ユニットを給電ステーション側に設置、受電ユニットをローバーに搭載し月面実証を行う。評価指標は、給電ステーションへのアプローチ距離・姿勢、送電効率とする。なお、前述の通り受電ユニット自体の開発と検証は別項にて計画されていることから、本項では開発済の受電ユニットが供給されることを前提とした。

本実証における月面への必要輸送量は約 50kg となる。内訳はローバー約 35kg(本体 25kg+レクテナ等の受電ユニット 10kg を想定)+月面展開機構約 15kg を想定している。

### 3) 実証候補項目詳細

前項で示した実証候補項目の詳細について、表 2-151、表 2-152 に示す。

表 2-151 実証候補項目【5-①-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:給電方式選択の為のローバーの自動走行性能検証<br>・実証対象:月面ローバー自動走行/運用サポート技術                                                                                                                                                                                   |
| 実証目的・必要性          | ・目的:月面環境で小型無人ローバーが自律的な運転でどこまでターゲット(給電ステーション)に接近できるかの検証<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:実態不明な月面のレゴリス性情や地形の特殊性を踏まえた実証が必要                                                                                                                              |
| 実証期間              | ・2025 年～2029 年                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【自動走行性能検証】<br>・利用するローバーは「フェーズ 0 以前の1」と共用可。Visulal SLAM のためのステレオカメラの追加、必要に応じてエッジコンピューティング用の OBC(オンボードコンピュータ)を追加搭載<br>【目標値】<br>1. ターゲットまでの接近距離 10cm 程度: パンダグラフ方式もしくは磁気結合方式での給電を選択<br>2. ターゲットまでの接近距離 数 m 必要:マイクロ波送電、もしくは発電ステーションからの長距離直接給電を想定 |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 50[kg](内訳:下記参照)→「フェーズ 0 以前の1」と共用可<br>ローバー35kg(本体 25kg+ペイロード(カメラ,OBC 含む)10kg)+月面展開機構 15kg =ペイロードトータル 50kg                                                                                                                            |

出所)ispace 作成

表 2-152 実証候補項目【5-①-2】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:月面上でのローバー に対する長距離無線送電<br>・実証対象:無線送電システム(発電ステーション近隣の送電ユニット/月面ローバー上の受電ユニット)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:①月面環境でマイクロ波もしくはレーザーによるピンポイントの長距離送電を可能にする。②給電ステーションからの近距離送電を可能にする。<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:地上で実現された送電システムを月面環境での実用性検証が必要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証期間              | ・2030 年頃                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | <b>【ローバーへの長距離無線送電】</b><br>・発電ステーション(月面ランダー活用)の近隣に送電ユニットを設置、ローバー上の受電ユニット(停車状態→走行中)へ送電を行う。<br>・(実証方法)<br>Step0. ローバーへの長距離送電を地上実証する。<br>Step1. ローバーをランダーから月面に分離した後、ランダーから遠ざかる方向に走行させる。その間、一定距離毎に送電検証する。<br>Step2. 走行中のローバーをトラッキングして送電する。<br>・(評価指標) 送電に向けたポインティング誤差、送電距離 対 送電効率<br><b>【目標値】</b> ・送電距離 ～10km<br><b>【ローバーへの近接送電】</b><br>・「フェーズ 0 以前」での検証で得られた結果から、近接送電方式を選択。送電ユニットを給電ステーション側に提供、受電ユニットをローバーに搭載して月面検証を行う。<br>・(実証方法) 選択した近接送電方式の送受電ユニットを開発/地上検証ののち、月面実証する。給電ステーションまでの送電は別実証項目で実現させる。<br>・(評価指標) 給電ステーションへのアプローチ距離/姿勢、送電効率<br><b>【目標値】</b> ・送電効率 TBD(「フェーズ 0 以前」で選択した方式、開発成果による) |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 50[kg](内訳:下記)<br>ローバー35kg(本体 25kg+受電ユニット(レクテナ等)10kg TBD)+月面展開機構 15kg =ペイロードトータル 50kg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

出所)ispace 作成

### (3) CIGS 太陽電池

銅、インジウム、ガリウム、セレンを主組成とする Cu(InGa)Se<sub>2</sub>(以下、CIGS と略)太陽電池は、旧昭和シェル石油が 1993 年に NEDO と共に量産化技術を開発してきた国産の太陽電池製造技術である。2005 年に CIGS 太陽電池の製造・販売を行うソーラーフロンティア社を設立し、いままでに 6GW を超える CIGS 太陽電池を世界中に出荷してきている。その過程で JAXA 等にサンプル提供しており、CIGS が優れた放射線耐性を有していることについての報告書・論文も多く執筆されているが、当時の宇宙用太陽電池の市場規模を鑑みると地上用途を優先せざるを得なかった。しかし、昨今の宇宙ビジネスの急速な広がりを受け、CIGS が持つ優れた放射線耐性とソーラーフロンティア社が培ってきた技術を掛け合わせることで、従来の宇宙用太陽電池にはない付加価値提供を実現すべく、出光興産では宇宙用 CIGS 太陽電池の事業化を現在進めている。

## 1) CIGSの紹介と月面応用に係る検討

### a. CIGS の特長

CIGS の特長は①優れた放射線耐性、②大きなセルサイズ(最大30cm角)、③軽さである。①について図 2-162 に社内測定した結果を示す。宇宙用太陽電池として広く使われている 3 接合 GaAs が放射線遮蔽機能のカバーガラスを搭載しているのに対して、CIGS はそのカバーガラスなしでも優れた放射線耐性を有していることがわかる。この特性は月面のような、簡単には太陽電池の交換できない環境において、長期間にわたり安定して稼働できる電源として期待できる。

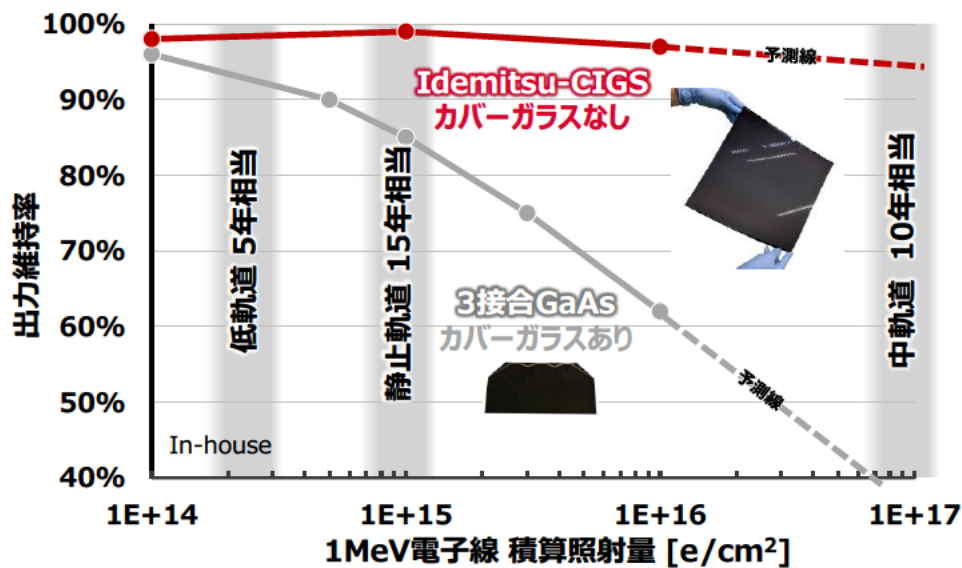


図 2-162 電子線照射試験後の太陽電池出力の変化

出所) 出光興産

②は、パネルレベルでの出力向上に貢献できると考えている。3 接合 GaAs セルは超高効率 (> 30% @BoL) であるが、セルサイズは名刺大程度の歪な六角形をしているため、パネルレベルで見ると、発電に寄与しない部分が多い(セルの充填率が低い)という欠点があった。しかし、CIGS の四角い大きなセルはこの課題を一気に解決できる。また、セルをパネルに貼り付けるレイダウン作業も大幅に簡素化されることで作業費のコストダウン効果も期待できる。



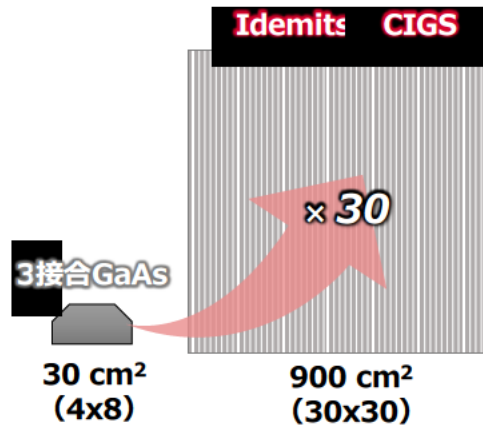


図 2-163 CIGS 太陽電池と 3 接合 GaAs 太陽電池のサイズ比較

出所)出光興産

③は出力重量比に影響する重要なファクターである。放射線遮蔽のカバーガラスは一定の厚みがないと十分な機能を発現できないが、CIGSではカバーガラスそのものを必要としない。一方で CIGS は基板にはガラスを使用するが、その厚みは発電性能には直接関係ないので、スマートフォンで使われているような薄いガラスや、フッ酸によるエッチング処理でスリミング加工を施すことで薄板化を実現できることを確認している。

#### b. CIGS の光照射効果について

太陽電池材料にはそれぞれ固有の特性があり、例えばアモルファスシリコンは光を当て続けると出力が劣化してしまうことが知られている。CIGS の場合、光を当て続けると太陽電池特性がある時定数を持って改善する「光照射効果」がある。一方で暗所に長期間置かれた後に使用する場合、特性が低い状態となっているが、光が当て続けると特性は元のレベルに戻っていく。この現象に起因する時定数は照度と温度に依存することから、月面実証を通じて影響の度合いは理解しておくべき特性である。

#### c. CIGS の発電効率

地上用途から宇宙用途に仕様を変更するにあたり、厳しい温度環境に耐えられるようデバイスを構成する材料の変更などを行い、現在までに小片サイズで 17%@AM0の変換効率を達成している。今後、18%程度まで引き上げる計画はあるが、デバイス構造等の制約を考慮すると、単接合での変換効率の改善余地は限られており、多接合化による超高効率化も検討しているところである。

#### d. レーザー光給電の受光素子としての応用について

無線給電技術の中でも長距離かつ大電力となるとマイクロ波方式かレーザー方式に限定される。レーザー方式は光源と太陽電池という極めてシンプルな構成で実現できるにも関わらず、社会実証の実例は世界的に見ても限られている。その原因として、レーザー自体の危険性(アイセーフティー、反射光など)に目が行きがちであるが、実は実用的な受光素子がないという現状もある。通常の太陽電池は標準光(AM1.5、1,000W/m<sup>2</sup>)下で最大のパフォーマンスが発揮できるよう設計されているため、2 倍に集



光された光をあてても 2 倍の出力は得ることは出来ない。このような状況から、現状は、光ファイバーを経由して遠隔地の受光側に専用設計された GaAs 受光素子を使うことで電力を取り出す光ファイバー給電<sup>7</sup>か、アイセーフティな波長 1.55 $\mu\text{m}$  の波長を利用した低出力の光無線給電<sup>8</sup>に用途展開は限られている。

CIGS は組成比を変えることでそのバンドギャップを制御できる特長を活かして、前述の課題解決のために、光無線給電用の受光素子の開発に取り組んできた。波長を金属加工産業用途(すなわち、ハイパワーかつ安価な光源)で使用されているファイバーレーザーの 1064nm に的を絞り受光素子開発を行い、その性能評価を千葉工業大学や東京科学大学に依頼した。図 2-164 に専用設計した CIGS 太陽電池の入射エネルギーに対する変換効率の変化を示す。

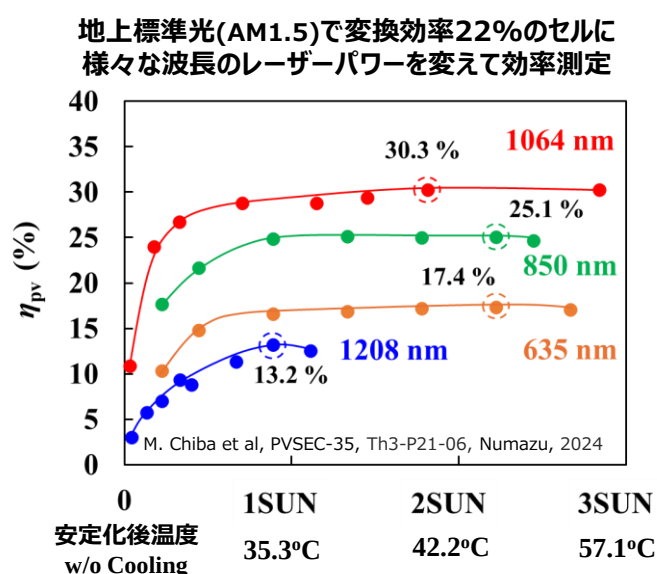


図 2-164 専用設計した CIGS 太陽電池の入射エネルギーに対する変換効率の変化

出所)千葉工業大学・出光興産

1064nm では3SUN(3 倍集光 = 3000W/m<sup>2</sup>)下でも約 30%の変換効率で電力を取り出せていることがわかる。ちなみに 1064nm より短波長の光では熱損失が増える影響で、1064nm より長波長では受光感度が下がる影響で変換効率は下がっている。光無線給電システムにおいては、光源側での電力から光への変換効率 40%、受光側での光から電力への変換効率 40%、あわせて16%程度の伝送効率(本来であれば、伝送路の擾乱の影響も考慮すべきだが、ここでは除いている)が実現できれば実用的な用途展開も可能なレベルであると見られていることから、変換効率 30%という数値は、受光素子として使うには十分な性能だと捉えている。また、伝送電力量は受光面積と比例関係にあることから、CIGS 太陽電池と同じ製造技術でつくることができる CIGS 受光素子の登場により1000W級の無線

<sup>7</sup> 例えば <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/optical-power-components>

<sup>8</sup> 例えば <https://phiontech.com/technology>

給電も現実味が帯びてくる。当然この受光素子は、放射線耐性も有している点を考慮すると、地上よりも宇宙空間での用途展開によりユニークなアプリケーションが多く出てくるのではないかと期待している。

## 2) 実証候補項目

### a. 「信頼性」

出光興産の太陽電池は約 20 年前に地上用 CIGS 太陽電池を JAXA 等にサンプル提供したのを最後に宇宙との関わりは断絶しており、今回改めて宇宙用 CIGS 太陽電池を事業化するにあたり、厳しい宇宙環境に耐えることを証明し、十分な信頼性を確保している状態にすることが喫緊の課題である。現在までに TRL6 相当、すなわち地上試験(放射線、UV、帯電放電、振動など)はほぼ完了しており、今後低軌道で実証していく予定である。

一方で、月面用途となると地球周辺軌道より厳しい環境になるため、太陽電池の観点では動作温度、着陸時の衝撃、レゴレス、越夜などが発電性能に与える影響を理解しておかないと本格給電開始のタイミングに発電システムを月面に構築することはできない。

### b. 「タンデム構造の開発」

月面や深宇宙用途の太陽電池においては、出力重量比は重要なファクターであり、2つのアプローチを検討した。1つ目は重量の大半を占める基板ガラスの薄板化、2つ目は異種太陽電池と組み合わせた多接合化である。

薄板化については、現在市場で入手できるスマートフォン用の最薄ガラスは50umであり、その上に CIGS 太陽電池層を形成する、もしくは汎用品のガラスの上に CIGS 太陽電池層を形成した上でフッ酸等によるガラス裏面のエッチングによるスリミング加工で実現できることは確認出来ている。

多接合化は光学的特性の異なる半導体材料を重ね合わせることで太陽光スペクトルを効率良く電気に変換するアプローチである。CIGS太陽電池のバンドギャップはおおよそ 1.1eV であり、ボトムセルとしては最適な材料である。この上に重ね合わせる材料として今までに JAXA らと共に InGaP/GaAs /CIGS<sup>9</sup>の検討を進めてきた実績がある。加えて近年、地上用途で脚光を浴びているペロブスカイトも高い変換効率を示すことからトップセル材料として有力な候補であり図 2-165 のようなタンデム構造を考案している。但し、ペロブスカイト太陽電池はこれから社会実装が進んでいくフェーズである点を鑑みると宇宙用途にはあと数年は時間を要するであろうと認識している。

---

<sup>9</sup> <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/society5/solarcells.html>



図 2-165 ペロブスカイト太陽電池と CIGS 太陽電池とのメカニカル 2 端子タンデム太陽電池

出所)出光興産

### c. 実証に関する全体像(年代別、期間)

CIGS 太陽電池単体の宇宙空間での実証については、2025 年度はHTV-Xおよび千葉工業大学の1U衛星に CIGS 太陽電池を搭載してデモンストレーションを行っていく計画がある。

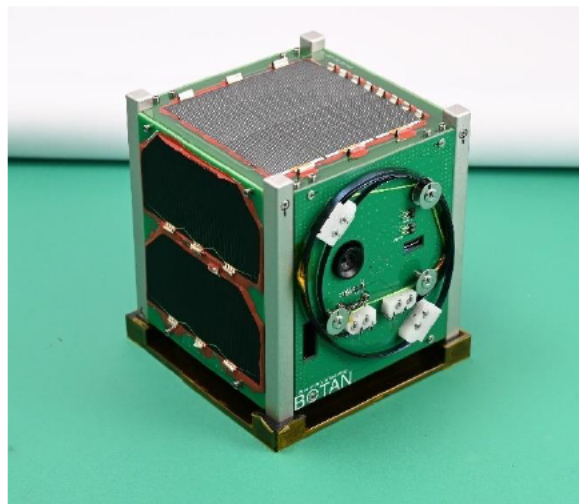


図 2-166 千葉工業大学の 1U 衛星(上面に CIGS 太陽電池が搭載)

出所)千葉工業大学・出光興産

最初の工場が立ち上がる 2027 年以降、当社 CIGS 太陽電池を搭載した顧客が衛星を年間 1,000 基のペースで打上げる計画であることからTRLは 2028 年までに一気にTRL9 まで引き上げる計画である。一方で、月面用途を想定すると、低軌道より厳しい温度環境、日照環境そしてレゴリスの影響を見越した太陽電池セル開発が必要になると認識しており、2028 年以降まずはセルの状態で月面実証を実施し、その後 2030 年頃にはシステム(まとまった電力を負荷側に供給できる状態)で給電実証を月面で行う計画である。

この取り組みと並行して「タンデム構造の開発」は進め、TRL6 まで進めば前述と同じ流れで月面実証を進めていく計画である。

#### d. 各フェーズ、年代における実証候補項目について

表 2-153 各フェーズでの実証候補項目

|                  |         |           | フェーズX<br>地上/LEO実証                       | フェーズ0以前：<br>月面調査及び実証                  | フェーズ0：<br>本格給電実証                  | フェーズ1：<br>本格給電、複数方式<br>開始              | フェーズ2：<br>統合実証/初期稼働                | フェーズ3：<br>移動体給電 |
|------------------|---------|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
|                  |         |           | 2025年～2028年                             | 2028年～2029年頃                          | 2030年頃                            | 2030年～2035年<br>頃                       | 2035年～2040年<br>頃                   | 2040年頃～         |
| 月面電力供給<br>全体システム | 単接合太陽電池 | 信頼性       | CIGS太陽電池の宇宙実証<br>TRL9<br>実証【4-①-1】      | 月面上でCIGS太陽電池実証（セル単体）<br>・レゴリスや越夜の影響確認 | 月面上でCIGS太陽電池実証（システム）<br>実証【4-①-2】 |                                        |                                    |                 |
|                  | 多接合太陽電池 | タンデム構造の開発 | タンデム構造のFS・ペロブスカイト太陽電池の選定<br>・貼り合わせ構造の検討 | タンデム太陽電池で地上試験完了<br>TRL6               |                                   | 月面上でタンデム太陽電池の実証（セル単体）<br>・レゴリスや越夜の影響確認 | 月面上でタンデム太陽電池の実証（システム）<br>実証【4-①-4】 |                 |

出所)出光興産

#### 月面実証フェーズ0以前(後半)(28～29年)

- ・月面上での CIGS セル実証(セル単体)とガラス基板の薄板化(実証候補項目【4-①-1】)

目的:太陽電池セルの月面上での挙動の把握

必要性:レゴリスなど月面環境を踏まえた太陽電池セルの開発と月面着陸時の衝撃がガラス基板に与える影響の確認

目標値:①変換効率 17%、②レゴリスの影響が、3 接合 GaAs と比べ 10%程度少ないこと、③越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること、④薄いガラス基板が割れないこと

#### 月面実証フェーズ0(2030年頃)

- ・月面上で CIGS 太陽電池実証(システム)(実証候補項目【4-①-2】)

目的:太陽光発電システムの月面上での挙動の把握

必要性:レゴリスの影響などを踏まえた太陽電池システムの開発

目標値:①変換効率 18%、②レゴリスの影響が、3 接合 GaAs と比べ 10%程度少ないこと、③越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること、④薄いガラス基板が割れないこと

#### 月面実証フェーズ1(2030～2035年頃)

- ・月面上でのタンデム太陽電池の実証(セル単体)とガラス基板の薄板化(実証候補項目【4-①-3】)

目的:太陽電池セルの月面上での挙動の把握

必要性:レゴリスなど月面環境を踏まえた太陽電池セルの開発と月面着陸時の衝撃がガラス基板に与える影響の確認

目標値:①変換効率20%、②レゴリスの影響が、3 接合 GaAs と比べ 10%程度少ないこと、③越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること、④薄いガラス基板が割れないこと

#### 月面実証フェーズ2(2035～2040年頃)

- ・月面上でタンデム太陽電池の実証(システム)(実証候補項目【4-①-4】)

目的:太陽光発電システムの月面上での挙動の把握

必要性:レゴリスの影響などを踏まえた太陽電池システムの開発

目標値:①変換効率25%、②レゴリスの影響が、3 接合 GaAs と比べ 10%程度少ないこと、③越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること、④薄いガラス基板が割れないこと

### 3) 実証候補項目詳細

表 2-154 実証候補項目【4-①-1】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セル<br>・実証対象:月面上での CIGS セル実証(セル単体)とガラス基板の薄板化                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 実証目的・必要性          | ・目的:太陽電池セルの月面上での挙動の把握<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:レゴリスなど月面環境を踏まえた太陽電池セルの開発と月面着陸時の衝撃がガラス基板に与える影響の確認                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証期間              | ・28 年～29 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セル】<br>CIGS 太陽電池の特性として、①3 接合 GaAs とは異なり、影に強い集積構造である点と、②暗状態に長期間晒されると発電特性が低下(光がしばらく当たるとまた元のレベルに戻る)するので、月面に本格的なシステムを展開するにあたり、その程度の確認が必要。<br>・レゴリスの太陽電池パネル上への付着具合と発電量との相関関係を確認。パネル表面材は導電性を持たせたものなど、数パターン用意予定。<br>・越夜から復帰するときの発電特性に与える影響(照度、温度、発電量)確認<br>【目標値】<br>・変換効率 17%<br>・レゴリスの影響が、GaAs と比べ 10%程度少ないこと<br>・越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること<br>・薄いガラス基板が割れないこと |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 2[kg](内訳:CIGS セル 70g(14W)、その他(パネル化部材、測定機器) 1930g ※地球とのデータ通信機器は含まず)                                                                                                                                                                                                                                                                               |

出所)出光興産

表 2-155 実証候補項目【4-①-2】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セル<br>・実証対象:月面上で CIGS 太陽電池実証(システム)                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証目的・必要性          | ・目的:太陽光発電システムの月面上での挙動の把握<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:レゴリスの影響などを踏まえた太陽電池システムの開発                                                                                                                                                                                                                                |
| 実証期間              | ・30 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セル】<br>1-①の結果を踏まえ、CIGS 太陽電池セルを改良。活動期間中に想定発電量になることをシステムレベルで確認。<br>・レゴリスの太陽電池パネル上への付着具合と発電量との相関関係を確認。パネル表面材は4-①-1の結果を反映。<br>・越夜から復帰するときの発電特性に与える影響(照度、温度、発電量)をシステムレベルでも確認するとともに、4-①-1を踏まえて発電量予測を試みる<br>【目標値】<br>・変換効率 18%<br>・レゴリスの影響が、GaAs と比べ 10%程度少ないこと<br>・越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること<br>・薄いガラス基板が割れないこと |



|           |                                                                                                  |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 月面への必要輸送量 | ・重量:合計約 10[kg](1000W のシステムを前提とすると、内訳:CIGS セル 72 枚 5040g、その他(パネル化部材、測定機器) 4960g ※地球とのデータ通信機器は含まず) |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|

出所)出光興産

表 2-156 実証候補項目【4-①-3】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セル<br>・実証対象:月面上でのタンデム太陽電池の実証(セル単体)とガラス基板の薄板化                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 実証目的・必要性          | ・目的:太陽電池セルの月面上での挙動の把握<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:レゴリスなど月面環境を踏まえた太陽電池セルの開発と月面着陸時の衝撃がガラス基板に与える影響の確認                                                                                                                                                                                                                                   |
| 実証期間              | ・30 年～35 年                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セル】<br>トップセルのペロブスカイト太陽電池および CIGS とのタンデム構造にしたときの月面環境における挙動の把握必要。<br>・レゴリスの太陽電池パネル上への付着具合と発電量との相関関係を確認。パネル表面材は4-①-1の知見を踏襲しつつも、トップセルが CIGS からペロブスカイトに変更になるため再検討予定。<br>・越夜から復帰するときの発電特性に与える影響(照度、温度、トップセル・ボトムセルそれぞれの発電量)確認<br>【目標値】<br>・変換効率 20%以上<br>・レゴリスの影響が、GaAs と比べ 10%程度少ないこと<br>・越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること<br>・薄いガラス基板が割れないこと |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 2[kg](内訳:ペロブスカイト/CIGS タンデムセル 200g(20W)、その他(パネル化部材、測定機器) 1930g ※地球とのデータ通信機器は含まず)                                                                                                                                                                                                                                          |

出所)出光興産

表 2-157 実証候補項目【4-①-4】に係る詳細内容

| 項目                | 実証詳細                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実証項目              | ・技術項目:太陽電池セル<br>・実証対象:月面上でタンデム太陽電池の実証(システム)                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 実証目的・必要性          | ・目的:太陽光発電システムの月面上での挙動の把握<br>・(月面実証の場合のみ)月面実証の必要性:レゴリスの影響などを踏まえた太陽電池システムの開発                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証期間              | ・35 年～40 年                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 実証候補項目<br>(実証目標値) | 【太陽電池セル】<br>2-①の結果を踏まえ、タンデム太陽電池を改良。活動期間中に想定発電量になることをシステムレベルで確認。<br>・レゴリスの太陽電池パネル上への付着具合と発電量との相関関係を確認。パネル表面材は4-①-3の結果を反映。<br>・越夜から復帰するときの発電特性に与える影響(照度、温度、発電量)をシステムレベルでも確認するとともに、4-①-3を踏まえて発電量予測を試みる<br>【目標値】<br>・変換効率 25%以上<br>・レゴリスの影響が、GaAs と比べ 10%程度少ないこと<br>・越夜後に数分以内に越夜前の出力に戻ること<br>・薄いガラス基板が割れないこと |
| 月面への必要輸送量         | ・重量:合計約 15[kg](1000W のシステムを前提とすると、内訳:タンデムセル 50 枚 10000g、その他(パネル化部材、測定機器) 4960g ※地球とのデータ通信機器は含まず)                                                                                                                                                                                                         |

出所)出光興産



## 2.2.7 電力における実証候補項目の整理

### (1) 各フェーズの実証候補項目のサマリ

前節までにおいて検討した各システムにおける実証候補項目について、そのサマリを表 2-158 に示す。表に記載のように、まずはフェーズ 0 までの段階において、月面太陽光発電による電力供給を行えるように地上・低軌道や月面での実証を行っていく。その後、フェーズ 1 以降にて月周辺軌道発電やさらに規模を拡大した月面太陽光発電を含めた月面における電力グリッドとして、電力供給の規模を拡大していくことを想定している。

表 2-158 電力における各フェーズのサマリ

|             | 地上・低軌道実証            | 月面実証                                            |                                              | 規模拡大・大電力化                          |                                         |                                 |
|-------------|---------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| フェーズ        | フェーズP1:<br>地上/LEO実証 | フェーズP2:<br>月面調査・実証                              | フェーズ0:<br>本格給電実証                             | フェーズ1:<br>本格給電・複数方式給電開始            | フェーズ2:<br>大電力化、有人常駐対応                   | フェーズ3:<br>移動体給電開始               |
| 時期          | 2020年台後半            | 2020年台後半                                        | 2030年頃                                       | 2030～35年頃                          | 2035～40年頃                               | 2040年頃～                         |
| 目指すもの(実証)   | ・ 各技術の地上/LEO実証      | ・ 月面太陽光発電(既存技術)の実証<br>・ 電力配電システム実証<br>・ 高電圧送電実証 | ・ 月面太陽光発電(タワー型)実証<br>・ 月周辺軌道発電実証<br>・ 無線送電実証 | ・ 電力グリッド実証                         | ・ 月周辺軌道発電PSR給電実証<br>・ 移動体向け無線送電実証       |                                 |
| 目指すもの(実用化)  |                     | ・ 月面太陽光発電(既存技術)の実用化                             | ・ 電力配電システム実用化<br>・ 高電圧送電実用化                  | ・ 月面太陽光発電(タワー型)実用化<br>・ 月周辺軌道発電実用化 |                                         | ・ 月周辺軌道発電PSR給電実用化<br>・ 電力グリッド構築 |
| 目指すもの(規模拡大) |                     |                                                 |                                              |                                    | ・ 月面太陽光発電(タワー型)大電力化<br>・ 複数衛星による月周辺軌道発電 |                                 |

出所)三菱総合研究所作成

### (2) 地上産業への転用の可能性

ここまで検討した月面での実証で得られる技術・知見・ノウハウ等について、水素パートと同様に地上産業への転用可能性の観点で検討を行った。地上産業への転用可能性を検討する観点としても同様に、①ユースケース拡大・社会実装進展と②高度化・効率化の2つの項目を設定して、各フェーズで転用可能な技術を抽出したうえで検討を行った。検討結果を表 2-159 に示す。

太陽光発電や有線送電、電力変換機器については既に地上において技術が確立されているが、月面向けに耐環境性能が高い機器が開発されることにより、極限環境・災害地への適用拡大や長寿命化・高耐久化による機器の高度化やコスト削減への寄与が想定される。

無線送電やそれを含む月周辺軌道太陽光発電について、地上における電力伝送・供給への適用や小型端末に対する給電技術への応用など、主に社会実装進展の観点での寄与が見込まれる。

表 2-159 月面実証で得られる技術・知見・ノウハウの地上産業への転用の可能性

| 大項目 | 小項目        | システム          | 主な構成要素       | ①ユースケース拡大・社会実装進展                                                                                  | ②高度化・効率化                                                                                                                                          |
|-----|------------|---------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 発送電 | 月周辺軌道太陽光発電 | 衛星発電システム      | 太陽電池         |                                                                                                   | ✓ 太陽電池パネルの高性能化、低コスト化、長寿命化                                                                                                                         |
|     |            |               | 衛星バスシステム     | ✓ 放射線環境（廃炉現場等）への適用                                                                                | ✓ 小型高性能化、AI化                                                                                                                                      |
|     |            | 送受電システム       | 衛星送電システム     | ✓ ミリ波衛星または航空機等搭載超大規模薄型展開平面アンテナによる衛星通信・地球観測目的利用                                                    | ✓ ミリ波通信等における平面アンテナとしての利用                                                                                                                          |
|     |            |               | 受電システム（レクテナ） | ✓ ミリ波を用いたバッテリーレスIoT端末への電源供給システムの実現<br>✓ 軽量レクテナによる災害地向け電力伝送<br>✓ Q帯、V帯などにおける簡易追尾型通信用アンテナ（アンテナ部の応用） | ✓ 移動通信(6G以降)における通信と無線電力伝送の融合システムのサービスエリア拡大。<br>✓ 高周波化した小型軽量レクテナによる閉管路等向け電力伝送                                                                      |
| 発電  | 月面設置発電     | 月面設置太陽光発電システム | 太陽電池         | ✓ 太陽電池パネル軽量化・小型化による災害地への適用<br>✓ 展開架台としての活用（通信・点検用装置等）                                             | ✓ 地上太陽光発電システムにおけるメンテナンスフリーによるコストダウン<br>✓ 傾斜地での設置可能な汎用性向上<br>✓ 粉塵化等の過酷な環境での活用<br>✓ 自律制御・モジュール化による設置作業合理化<br>✓ セルの長寿命化<br>✓ セルの高効率化、放熱・温度低下による発電量増加 |
| 送電  | 無線送電       | マイクロ波送受電システム  | 送電アンテナ       | ✓ 海洋における遠隔電力ニーズ（船舶、海洋基地等）への適用<br>✓ 既存の超長距離送電システムの無線送電代替（低送電コスト化）<br>✓ 災害地への給電としての適用               | ✓ 小型軽量化および排熱機能の高効率化による他システムへの応用<br>✓ 大量/高品質製造技術の高度化による、類似デバイスの低コスト化                                                                               |
|     |            |               | 受電アンテナ       | ✓ スマートホンへの遠隔給電<br>✓ 既存の超長距離送電システムの無線送電代替（低送電コスト化）<br>✓ 災害地への給電としての適用                              | ✓ 小型軽量化および排熱機能の高効率化による他システムへの応用<br>✓ 大量/高品質製造技術の高度化による、類似デバイスの低コスト化                                                                               |
|     |            | レーザー送受電システム   | 送電アンテナ       | ✓ 既存の超長距離送電システムの無線送電代替（低送電コスト化）<br>✓ 災害地への給電としての適用                                                | ✓ 小型軽量化および排熱機能の高効率化による他システムへの応用<br>✓ 大量/高品質製造技術の高度化による、類似デバイスの低コスト化                                                                               |
|     |            |               | 受電アンテナ       | ✓ 既存の超長距離送電システムの無線送電代替（低送電コスト化）<br>✓ 災害地への給電としての適用                                                | ✓ 小型軽量化および排熱機能の高効率化による他システムへの応用<br>✓ 大量/高品質製造技術の高度化による、類似デバイスの低コスト化                                                                               |
|     | 有線送電       | 送電線           | 光ファイバ導体      |                                                                                                   | ✓ 地上送電網における軽量化による送電線輸送・設置コストダウン                                                                                                                   |
|     |            | 交流送電システム      | 交流送電         |                                                                                                   |                                                                                                                                                   |
|     |            | 直流送電システム      | 直流送電         | ✓ 地上電力グリッド向けの高電圧交流送電への展開                                                                          |                                                                                                                                                   |
| 蓄電  | 月面蓄電システム   | 月面蓄電システム      | リチウムイオン電池    | ✓ 極低温環境への適用                                                                                       | ✓ 低温化での効率向上・劣化対策                                                                                                                                  |
|     |            |               | 燃料電池         | ✓ 航空機・飛行船への適用<br>✓ 水素燃料電池車への適用                                                                    | ✓ Wh当たりの重量軽量化による移動体の重量軽減<br>✓ リチウム等の希少資源を利用しないため蓄電システムのコストダウン                                                                                     |
| その他 | 共通システム     | 電力変換          | コンバータ        | ✓ 放射線環境（廃炉現場等）への適用                                                                                |                                                                                                                                                   |
|     |            |               | インバータ        | ✓ 放射線環境（廃炉現場等）への適用                                                                                |                                                                                                                                                   |

出所)三菱総合研究所作成

### 3. 有識者委員会・WG 運営

今年度は水素 WG と電力 WG を統合する形で 1 つの WG を設置し、2 章で述べた技術課題整理について具体的な内容の議論・検討を行った。さらに WG の成果を横断的にみるための有識者委員会を設置した。有識者委員会は、数名の有識者に、検討にあたっての前提条件や視点、留意事項等の助言をもらうとともに、WG の検討結果の確認を行っていただいた。なお、今年度は有識者委員会は 3 回、WG は 5 回開催した(図 3-1 参照)。

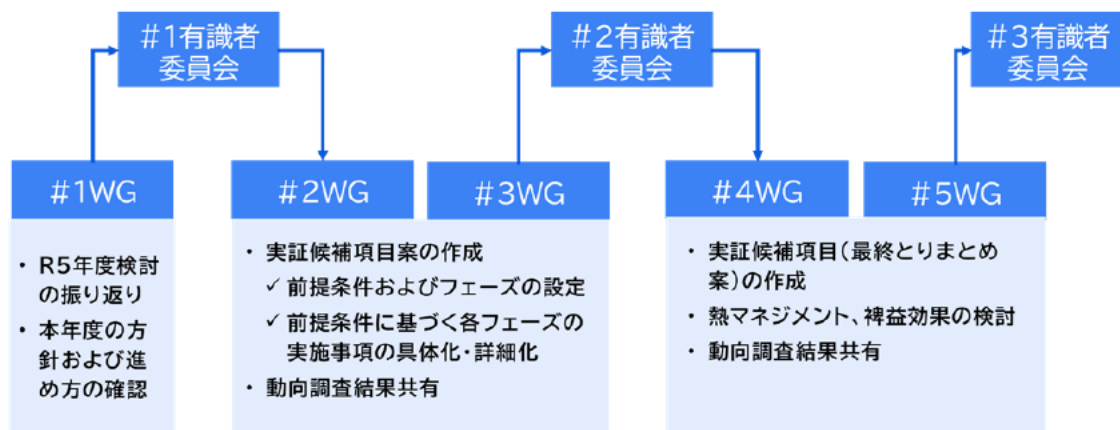


図 3-1 有識者委員会と WG の開催

出所)三菱総合研究所および日本宇宙フォーラム作成

#### 3.1 有識者委員会

後述の WG の成果を横断的に確認し、助言を行うために設置された有識者委員会の構成員及び開催状況を示す。

##### 3.1.1 構成員

有識者委員会の構成員を表 3-1 に示す。

表 3-1 有識者委員会 構成員一覧表(五十音順 敬称略)

| 有識者委員                      |       |
|----------------------------|-------|
| 一般財団法人電力中央研究所<br>特任役員 工学博士 | 池谷 知彦 |
| 一般社団法人宇宙旅客輸送推進協議会<br>代表理事  | 稲谷 芳文 |

|                                                        |       |
|--------------------------------------------------------|-------|
| 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構<br>宇宙科学研究所 学際科学研究系 教授               | 稲富 裕光 |
| 立命館大学 理工学部<br>環境都市工学科 教授                               | 小林 泰三 |
| 京都大学 生存圏研究所 生存圏開発創成研究系<br>生存圏電波応用分野 教授                 | 篠原 真毅 |
| 東京科学大学 地球生命研究所<br>所長 教授                                | 関根 康人 |
| 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門<br>月極域探査機プロジェクトチーム サブマネージャ | 星野 健  |

### 3.1.2 開催履歴

有識者委員会の開催履歴および各回のアジェンダを表 3-2 に示す。

表 3-2 有識者委員会の開催履歴およびアジェンダ

| 回次    | 日時                                 | 議事                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第 1 回 | 2024 年 8 月 23 日(金)<br>15:00-17:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 令和 6 年度方針<br/>全体方針、水素パート方針、電力パート方針</li> <li>・ 動向調査報告</li> <li>・ ベンチマーク調査</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                                                 |
| 第 2 回 | 2024 年 11 月 15 日(金)<br>10:00-12:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 令和 6 年度全体方針と第 1 回振り返り</li> <li>・ 豪州動向調査および地上技術の転用可能性調査</li> <li>・ ベンチマーク調査</li> <li>・ 電力パート検討状況報告</li> <li>・ 水素パート検討状況報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul> |
| 第 3 回 | 2025 年 2 月 20 日(木)<br>13:00-15:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 第 1 回、第 2 回委員会の振り返り</li> <li>・ ベンチマーク調査結果報告</li> <li>・ 水素パート検討結果報告</li> <li>・ 電力パート検討結果報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ 閉会(閉会挨拶等)</li> </ul>                                  |

## 3.2 WG

技術課題について検討するために設置された WG の構成員及び開催状況を示す。

### 3.2.1 構成員

WG の構成員を表 3-3 に示す。

表 3-3 WG 構成員一覧表(五十音順)

| 水素パート構成員 |                      |
|----------|----------------------|
| 企業       | 株式会社 ispace          |
|          | 株式会社大林組              |
|          | 栗田工業株式会社             |
|          | 高砂熱学工業株式会社           |
|          | 千代田化工建設株式会社          |
|          | 日揮グローバル株式会社          |
|          | 三菱重工業株式会社            |
|          | 横河電機株式会社             |
| 大学       | 東京科学大学               |
| 電力パート構成員 |                      |
| 企業       | 株式会社 IHI エアロスペース     |
|          | 出光興産株式会社             |
|          | 株式会社大林組              |
|          | シャープエネルギーソリューション株式会社 |
| 大学       | 金沢工業大学               |
|          | 京都大学                 |
|          | 電気通信大学               |
|          | 東洋大学                 |
|          | 光産業創成大学院大学           |
|          | 早稲田大学                |
| 国研等      | 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 |
|          | 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  |

### 3.2.2 開催履歴

WG の開催履歴および各回のアジェンダを表 3-4 に示す。

表 3-4 WG の開催履歴およびアジェンダ

| 回次    | 日時                                 | 議事                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第 1 回 | 2024 年 8 月 7 日(水)<br>13:00-15:00   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 令和6年度方針<br/>全体方針、水素パート方針、電力パート方針</li> <li>・ ベンチマーク調査方針</li> <li>・ 動向調査報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                                                                                                                                             |
| 第 2 回 | 2024 年 10 月 2 日(水)<br>10:00-12:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 全体方針</li> <li>・ 水素パート検討状況報告<br/>水素パート全体、月面での輸送に係る検討状況</li> <li>・ 電力パート検討状況報告<br/>電力パート全体、月周辺軌道発電システム、月面設置発電システム、月面上送電システム</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                                                                                            |
| 第3回   | 2024 年 11 月 1 日(金)<br>16:00-18:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 全体方針およびスケジュール</li> <li>・ 豪州動向調査および地上技術の転用可能性調査</li> <li>・ ベンチマーク調査報告</li> <li>・ 電力パート検討状況報告<br/>電力全体システム、月周辺軌道発電システム、月面設置発電システム、月面上送電システム</li> <li>・ 水素パート検討状況報告<br/>月面での実証候補項目案に係る検討状況<br/>地上・低軌道での実証候補項目案に係る検討状況<br/>月面での輸送に係る検討状況</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul> |
| 第 4 回 | 2024 年 12 月 24 日<br>(火)15:00-17:30 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 全体方針およびスケジュール</li> <li>・ 欧州・中東動向調査</li> <li>・ ルクセンブルク出張報告</li> <li>・ 電力パート検討状況報告<br/>電力全体システム、月周辺軌道発電システム、月面設置発電システム、月面上送電システム</li> <li>・ 水素パート検討状況報告<br/>月面及び地上・低軌道における実証候補項目案に係る検討状況</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                                               |
| 第 5 回 | 2025 年 2 月 18 日(火)<br>10:00-12:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 水素パート検討結果報告</li> <li>・ 電力パート検討結果報告</li> <li>・ 全体報告、月周辺軌道発電システム</li> <li>・ オブザーバーからのプレゼンテーション</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                                                                                                                                         |



## 4. 国内外動向調査

### 4.1 海外動向調査

#### 4.1.1 欧州

##### (1) 欧州の宇宙探査ロードマップ

欧州では欧州宇宙機関(ESA)を中心に月探査を含めた宇宙探査活動を行っており、2024 年には新しい宇宙探査ロードマップである「Explore2040」を発表した。欧州では、月と火星探査を並行して実施する長期計画を有しており、将来の欧州の宇宙飛行士による有人探査まで含めて計画に含まれている。

月探査においては、米国を中心とする国際協調で建設が進められている Gateway 計画に参画しており、同計画を通じて 2020 年代に欧州の宇宙飛行士を Gateway に送る計画となっている。また、欧州による自立した月面への物資輸送を確保するため、月面着陸機「Argonaut(旧 EL3)」の開発を進めており、2031 年に「Argonaut」の初号機を打ち上げて、ISRU 実証ミッションを開始する予定となっている。その後、2030 年代に 4～5 回の「Argonaut」の打上げおよび月面着陸を行い、月面での様々な技術実証を計画している。ESA による新しい宇宙探査ロードマップにおける月探査部分を図 4-1 に示す。

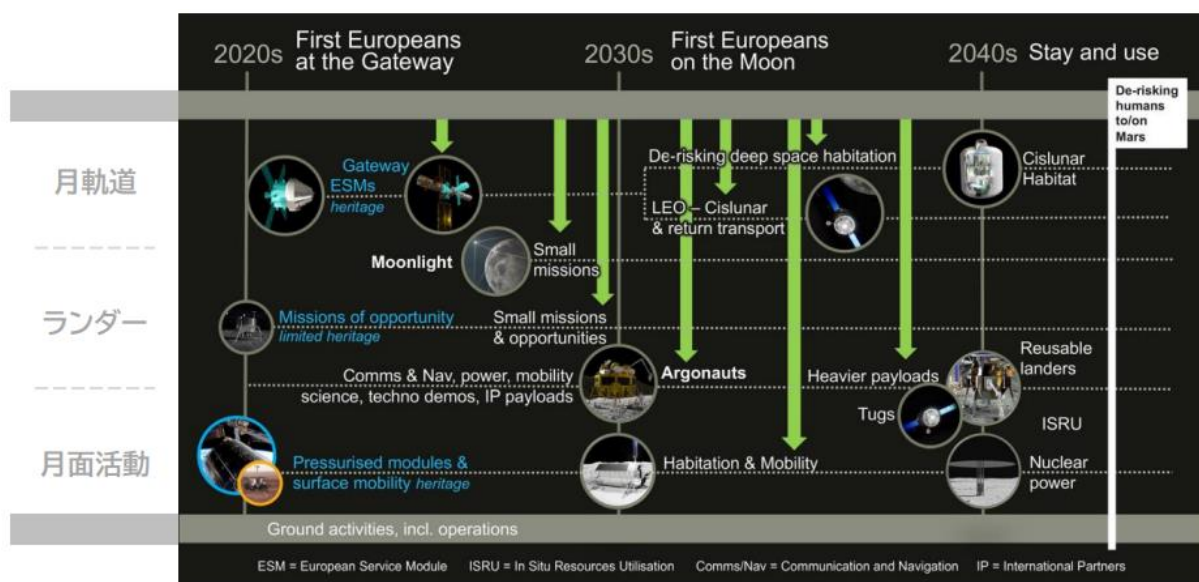


図 4-1 ESA の新しい宇宙探査ロードマップの月探査シナリオ

出所) [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore\\_2040.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore_2040.pdf)

## (2) 欧州の宇宙探査に関する技術開発

ESA における技術開発は複数の局にまたがって実施されており、各局がそれぞれの目的に応じて予算を配分し、アーリーステージや基礎技術の開発から TRL の高い技術の開発まで実施している。月関連の技術の開発は、主に Technology, Engineering and Quality(TEC)局が「Discovery」、「TDE」、「Preparation」、「GSTP」といったプログラムで、アーリーステージの技術、要素技術、共通技術を開発しており、また、Human and Robotic Exploration(HRE)局が「European Exploration Envelope Programme(E3P)」プログラムで月面での実証ミッションを含めた探査技術を開発している。ESA の技術開発を行っている局の全体像を図 4-2 に示す。

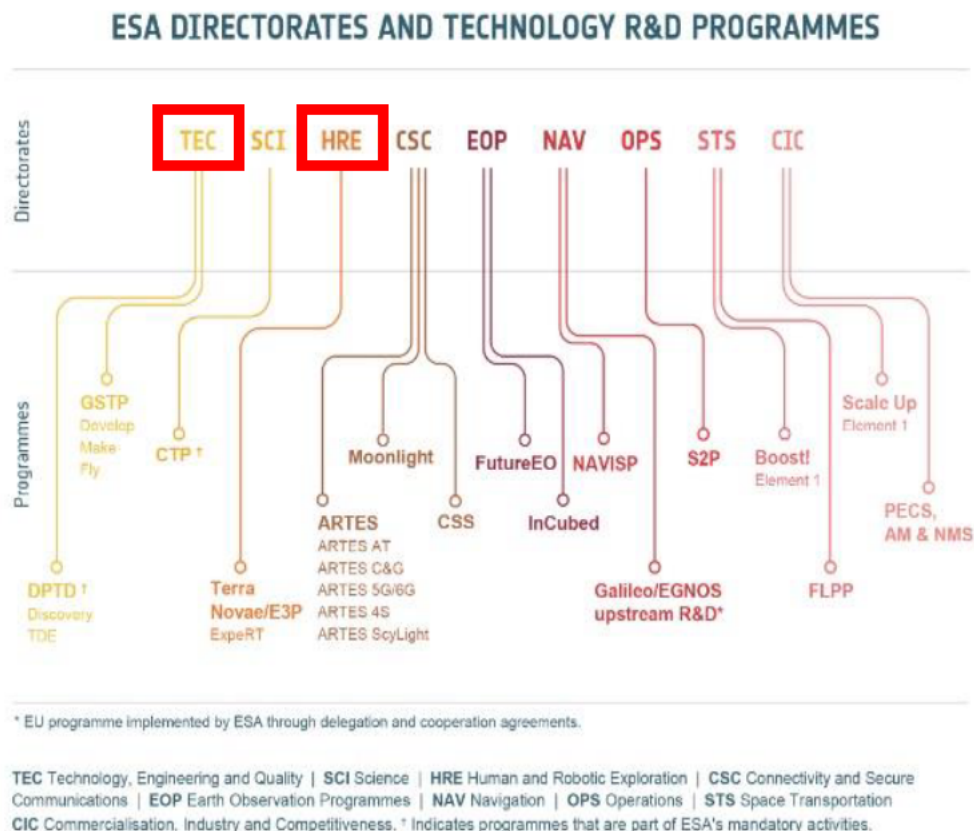


図 4-2 ESA の技術開発を行っている局の全体像

出所) <https://technology.esa.int/program/technology-programmes>(2025 年 2 月 6 日閲覧)

ESA の TEC 局と HRE 局が実施している研究開発プログラムの一覧を表 4-1 に示す。両局は TRL の低い技術開発から高い技術開発まで幅広く実施しており、TRL4 までの低 TRL の技術開発は「DPTD」の各プログラムで実施し、TRL9までの比較的高い TRL の技術開発は「GSTP」、月面実証ミッションは「E3P」で実施している。

表 4-1 ESA における研究開発プログラム

| プログラム                                                              |                                                            | TRL |                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| Discovery, Preparation and Technology Development (DPTD) Programme | Discovery (20-175Kユーロ程度/件)                                 | 1-3 | 成熟度の低い技術を含む破壊的アイデアから成る初期的な研究・開発を対象とする。                                             |
|                                                                    | Preparation (～500Kユーロ程度/件)                                 |     | 将来ミッションのためのプレフェーズA、フェーズAの検討。                                                       |
|                                                                    | Technology Development Element (TDE) (～500Kユーロ程度/件)        | 1-4 | 主にESAが追求する将来の宇宙ミッションやアプリケーションのための、個別技術の開発を対象とする。                                   |
| General Support Technology Programme (GSTP) (～500Kユーロ程度/件)         |                                                            | 3-9 | TRL3～9の全ての宇宙技術領域を対象とする。特定のアプリケーションに特化したものではなく、製品指向の活動を対象とする。                       |
| European Exploration Envelope Programme (E3P)                      | Exploration, Preparation, Research and Technology (ExPeRT) | 3-6 | 横断的なプログラムであり、ESAの探査目的地の準備として、システム定義の研究・技術開発活動を計画・実施することを対象とする。                     |
|                                                                    | Spaceships (Spaceship-EAC)                                 | 1-4 | 若手研究者が低コストで新しい運用コンセプトや新技術を迅速に調査することを可能にする機敏なイノベーション環境を構築することを目的とする。                |
|                                                                    | Science in Space Environment (SciSpace)                    | 3-9 | 横断的なプログラムであり、地上の施設やすべての探査先で科学研究を行うことを目的とする。また、多様な分野で欧州のアカデミアの科学研究を調和させることも目的としている。 |
|                                                                    | Cornerstone 3 (CS3)                                        | 5-9 | 月での商業的パートナーシップと月でのミッションの機会の両方を含む、月口ボット探査の全ミッションの実施段階までを対象とする。                      |

出所) 公開資料に基づき MRI および JSF 作成

### (3) 欧州の月面 ISRU 関連技術動向

ESA において既に開発が承認され、進められている月面 ISRU (in situ resource utilization) 関連のミッションとして E3P で開発されている「PROSPECT」と「Argonaut (旧 European Large Logistics Lander : EL3)」がある。「PROSPECT」は月面に掘削ドリルを運搬し、レゴリスを掘削、レゴリスサンプルを収集の上、現地でレゴリスに含まれる化学物質を分析するミッションである。また、「Argonaut」は欧州が開発する大型の月着陸機であり、2t を超える搭載物を月面に運搬し、ミッションを実施することが可能となる。

#### 1) 「PROSPECT」の概要

E3P で開発されている科学機器ペイロードの月面での実証ミッションであり、現在開発のフェーズ B2/C/D が実施されている。2020 年代に月面に打ち上げられる予定だが、同年代には ESA として月面着陸機を保有していないため、米国 NASA が民間から調達して実施する商業月面輸送サービス Commercial Lunar Payload Services (CLPS) で 2027 年に月の南極付近に輸送される予定となっている。同ミッションでは、レゴリスからの化学物質・水分子の抽出、水素還元等による酸素抽出を目的としており、約 10 日間で、月面でのドリル掘削、酸素・化学物質抽出、抽出物の組成・特性評価等を実施する計画である。本ミッションで搭載されるペイロードを図 4-3 に示す。

< 搭載機器 >

- ・重量合計約 45kg
- ・ProSEED (TRL6)
- ・約 1m のドリルにより月面を掘削し、サンプルを採取
- ・ProSPA (TRL5)
- ・採取サンプルを格納、分析、化学物質を熱抽出

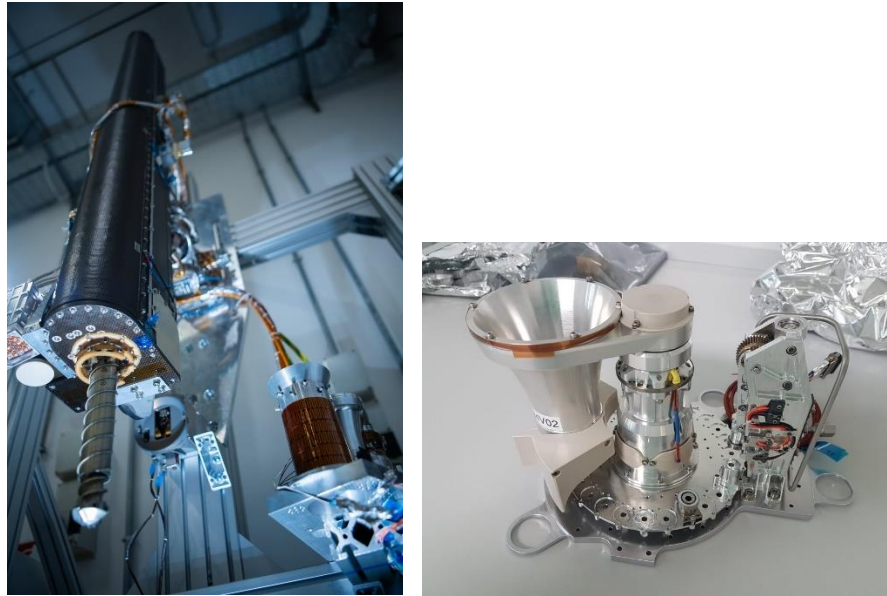


図 4-3 ProSEED(左)と ProSPA(右)

出所)

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Prospect\\_searching\\_for\\_water\\_at\\_the\\_lunar\\_poles](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Prospect_searching_for_water_at_the_lunar_poles)(2025 年 2 月 6 日閲覧)

## 2) 「Argonaut(旧 European Large Logistics Lander :EL3)」の概要

ESA のフラッグシップとなる月面着陸機の開発ミッションで、2031 年に最初の着陸機 M1 の打上げを計画している。2030 年代に 4～5 回の打上げ・月面着陸を計画しており、欧州のアリアン 6 ロケットで打ち上げられる予定である。2t 以上の搭載物を月面に運搬可能であり、着陸候補地点から 50-100m の精度での着陸を目指している。「Argonaut」で運搬され、実施されるミッションとしては M1 で運搬される月面 ISRU 実証ペイロード「ISRU-DM」及び 2035 年以降に月面に輸送される小型月面プラント「ISRU Pilot Plant」がある。「Argonaut」の構成エレメントのイメージ図を図 4-4 に示す。

「ISRU-DM」では、DPTD で開発されている水素還元、メタン還元、熔融塩電解法などによる酸素抽出技術など、多くの実証候補要素技術がペイロードへの搭載候補となっている。また、「ISRU Pilot Plant」では、月面での小型プラント実証(越夜でのエネルギー供給技術、掘削ローバーによるレゴリス収集、酸素・金属抽出技術)などが実施される計画である。

### <実施予定ミッション>

- ・M1 で月面 ISRU 実証ペイロード「ISRU-DM」を運搬
- ・2035 年以降に小型月面プラント「ISRU Pilot Plant」を運搬

### <構成要素>

- ・搭載可能ペイロード重量:約 2,100kg
- ・サイズ:直径 4.5x高さ6m
- ・上段のペイロード部、中段のカーゴプラットフォーム、下段の月面降下エレメントで構成



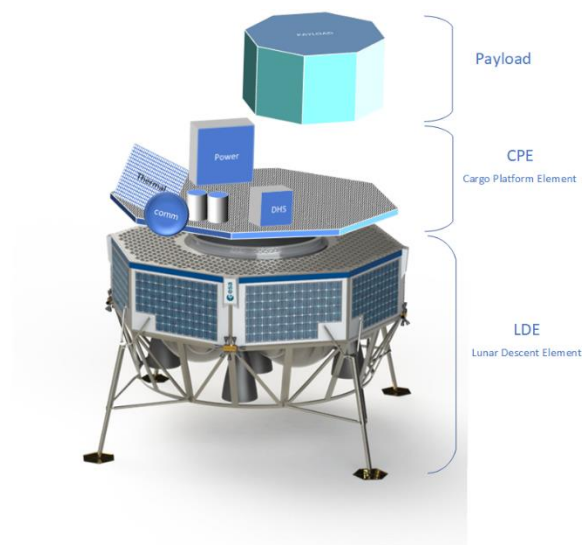


図 4-4 Argonaut 構成エレメントイメージ図

出所) [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Exploration/Argonaut](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Argonaut) (2025 年 2 月 6 日閲覧)

#### (4) 欧州の月面に関連した電源技術動向

前述のように、ESA では月での発電、蓄電、送電技術について、様々なプログラムで要素技術開発を実施している。月での発電技術については、「Preparation」プログラムの中で将来の「Argonaut」月着陸ミッション(2031年に1号機打上げ、同年代に4、5機打上げ予定)での月面実証を想定した技術開発を実施している。

また、軌道上での発電技術の開発について、2022年11月のESA閣僚級理事会において、軌道上太陽光発電(主に地球への送電)の開発準備プログラム「SOLARIS」の実施が承認された。主に地球への送電技術の開発準備になってはいるが、その中で開発されているいくつかの要素技術は月への送電も想定されている。

さらに、上述のESA閣僚級理事会において、月・火星探査を含めた将来探査に利用できる放射線同位体熱電源の開発プログラム「ENDURE(European Devices Using Radioisotope Energy)」の実施も承認された。2030年代初頭のローバーやロボットでの電力供給を目指しており、欧州の月着陸機により月面に輸送され、実証される予定である。月面を含む宇宙探査での原子力電池や小型原子炉の開発においては、ESAの「ENDURE」からの拠出、及び英国宇宙庁(UKSA)からの予算を通じて、英国が積極的に技術開発に注力していることが特徴である。

欧州で開発されている月に関連した電源技術開発の概要を表4-2から表4-4に示す。表4-3の赤で示した技術は欧州が開発中の月着陸機「Argonaut」でミッションとして月面に輸送され、実証される可能性の高い技術であり、次項でそれらの概要を紹介する。

表 4-2 欧州が開発する月面関連電源技術①

|                | 研究                                                                                  | 概要                                                                                        | 実施者                                                           | 期間             | プログラム             |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
| 全体アーキテクチャ検討    | Lunar ISRU Energy Storage and Electricity Generation (LIESEG)                       | 様々な月面でのミッションの電力要求(数十～数千W)に対する、発電と蓄電に焦点を当てたトレードオフ研究                                        | Univ Pol. De Catalunya                                        | 2018-2020      | Discovery         |
| 発電<br>(軌道上太陽光) | GE® Lunar Power Station                                                             | 電力を軌道上(地球-月第1ラグランジュ点)からマイクロ波で月面に伝送(初期の運用で1.5MW供給)する他、月と地球のGatewayとして居住できる宇宙太陽光発電ステーションの研究 | Astrostrom GmbH                                               | 2021-2023      | Discovery (100K€) |
|                | Epitaxial Layer and Lift-Off Approach (ELLA)                                        | 太陽電池の基盤であるゲルマニウムウエハについて、月面利用を想定して薄くすることによる重量及びコスト削減技術の開発(TRL6)                            | UMICORE NV                                                    | 2020-2023      | GSTP              |
|                | Power sail disruptive PV power array technology to enable economic viability of SPS | 高コストのIII-V族化合物半導体を用いたトリプル接合型太陽電池セルではなく、アモルファスシリコン(a-Si)を用いたSPSコスト削減のための太陽電池パネルの研究         | CSEM SA, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA | 2021-2023      | Discovery (175K€) |
|                | Tiled Energy Focus with Solar Concentrators                                         | 将来の軌道上太陽光発電システムに適用できる大型構造物に拡張可能なタイル型太陽光集光装置の初期技術開発                                        | Instituto de Telecomunicacoes – University of Aveiro          | 2021-2023?     | Discovery (172K€) |
|                | Concept Studies for Commercial-Scale Space-Based Solar Power Plants                 | SOLARISプログラムで実施されている将来の商用軌道上太陽光発電のコンセプトスタディの実施                                            | Thales Alenia Space Italy<br>Arthur D Little                  | 2023-<br>2023- | GSTP<br>GSTP      |

出所) 公開資料に基づき JSF 作成

表 4-3 欧州が開発する月面関連電源技術②

|                   | 研究                                                                                  | 概要                                                                                                                                   | 実施者                                                                    | 期間                     | プログラム                                              |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|
| 発電<br>(月面太陽光)     | Novel Lunar Surface Power Plant - European Charging Station pre-phase A             | <b>Argonaut</b> 着陸機に搭載される可能性のある月面太陽光発電ステーションの要件定義とトレードオフ検討。月の夜に最大約260W、月の昼に7kW以上の電力を継続的に供給する太陽光発電システムの検討                             | SPACE APPLICATIONS SERV. S.A./N.V.<br>Thales Alenia Space Italia S.p.A | 2022-2023<br>2022-2023 | Preparation<br>Preparation                         |
|                   | VERY LARGE SOLAR ARRAY (VLSA) DEVELOPMENT                                           | 上記のEuropean Charging Stationに将来適応される可能性のある大型太陽電池アレイ(出力60kW級)の技術開発                                                                    | 未定<br>(提案要請中)                                                          | NA                     | TDE (200-500K€)                                    |
|                   | Laboratory in Cumbria equipped with next-generation equipment and technology of RPS | ENDUREプログラムで実施されている地上の放射性廃棄物からの放射性同位体241Amを利用した原子力電池システム(RPS)の開発。月や火星を含めた宇宙探査で2030年頃の実用を目指して開発。 <b>Argonaut</b> 着陸機に搭載される可能性(TRL5以上) | National Nuclear Laboratory (NNL)                                      | 2022-                  | GSTP/UKSA (約1900£)                                 |
| 発電<br>(原子力電池・原子炉) | Radioisotope Thermoelectric Generator                                               | ENDUREプログラムで実施されている地上の放射性廃棄物からの放射性同位体241Amを利用した原子力電池RTGの研究開発。月や火星を含めた宇宙探査で2030年頃の実用を目指して開発。 <b>Argonaut</b> 着陸機に搭載される可能性             | University of Leicester<br>(iSpaceの将来ミッションにも電源として活用を想定して合意締結)          | 2022-                  | GSTP/IBF(英)<br>※IBF: International Bi-Lateral Fund |
|                   | UK Lunar Modular Nuclear Micro-Reactor                                              | 将来の月面基地に利用される可能性のある小型・軽量型原子炉の研究。今後、2030年代初頭に月面実証を目指す                                                                                 | Rolls Royce                                                            | 2023-                  | UKSA (IBF Ph1, 2 /NSIP) (約290, 118/約480 £)         |

出所) 公開資料に基づき JSF 作成

表 4-4 欧州が開発する月面関連電源技術③

|    | 研究                                                                                                | 概要                                                                                  | 実施者                      | 期間         | プログラム                  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|------------------------|
| 蓄電 | Novel thermal energy storage and electricity generation for Moon exploration                      | 太陽光発電エネルギーを熱として模擬レゴリスに蓄熱し、電力変換する技術の研究と地上模擬実験結果(地上実験では40mWの電力変換)                     | Sonaca Space             | 2017-2019  | Discovery (200-500K€)  |
|    | Development of a Closed Loop Regenerative HT PEM Fuel Cell System                                 | 高圧PEM型水電解装置と組み合わせた宇宙用高温プロトン交換膜(HT-PEM)燃料電池スタックの研究。3回の昼夜を想定した地上実験(TRL4)              | Advent Technologies SA   | 2022-2022  | TDE (1000K€)           |
|    | Fuel Cell Applications for Future Missions                                                        | COTSを活用したプロトン交換膜(PEM)燃料電池スタックの研究。昼夜を模擬した10サイクルの地上実験(TRL4)                           | ENERGIE TECHNOLOGIE GMBH | 2021-2023  | GSTP                   |
| 送電 | Powering rovers by High Intensity Laser Induction on Planets (PHILIP)                             | クレータリム部からPSR内で活動するローバへの赤外線レーザー無線給電の研究。500Wの出力で最大で15km離れたローバへのワイヤレス給電するための概念検討(TRL2) | Leonardo                 | 2017-2018  | Discovery (100-200 K€) |
|    | Development of Millimetre Waves Wireless Power Transfer (WPT) System for Lunar Rover Explorations | 軌道上から月面で送電するための24GHzもしくは35 GHz帯でのミリ波ワイヤレス電力伝送システム(WPT)の研究(TRL4)                     | Sirin Orbital Systems    | 2021-2023? | Discovery (175K€)      |

出所) 公開資料に基づき JSF 作成



## 1) 「Novel Lunar Surface Power Plant - European Charging Station pre-phase A」の概要

「Argonaut」着陸機に搭載される可能性のある月面太陽光発電ステーションの要件定義とトレードオフ検討プログラムである。月の夜に最大約 260W、月の昼に 7kW 以上の電力を継続的に供給する太陽光発電システムが検討されている。ESA の本プログラムの中で、2022～2023 年にかけて SPACE APPLICATIONS SERV. S.A./N.V 社と Thales Alenia Space Italia S.p.A 社の 2 社がプレフェーズ A 検討を実施した。2030 年初頭の打上げを目指した月面太陽光システムの初期概念検討(コスト試算、システム設計検討、開発スケジュール検討)が行われた。両社の検討する月面太陽光発電ステーションのイメージ図をそれぞれ図 4-5 と図 4-6 に示す。

今後も開発が順調に進められれば 2030 年代に「Argonaut」に搭載され、月面での実証が行われる可能性があり、月面で 2 年間の稼働が想定されている。

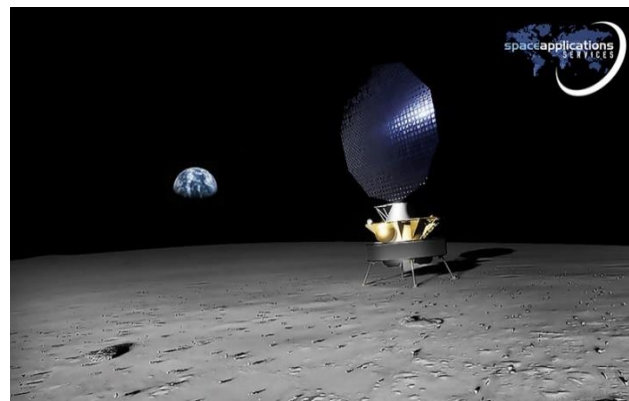


図 4-5 SPACE APPLICATIONS SERV. が検討する月面太陽光発電イメージ

出所)<https://www.spaceapplications.com/news/powering-the-future-of-lunar-exploration-the-european-charging-station-for-the-moon>(2025 年 2 月 6 日閲覧)



図 4-6 Thales Alenia Space Italia が検討する月面太陽光発電イメージ

出所)<https://nebula.esa.int/content/novel-lunar-surface-power-plant-european-charging-station-pre-phase>(2025 年 2 月 6 日閲覧)

## 2) $^{241}\text{Am}$ を利用した原子力電池システム(RPS)の概要

米国やロシアなどが保有する放射線同位体に依存しない放射線同位体電池の開発プログラムである。欧州で生産可能な放射性廃棄物「アメリシウム」を用いた放射線同位体電池であり、英国国立原子力研究所が 2009 年に発見したアメリシウム  $^{241}\text{Am}$  を用いた電力変換技術について、4 年以内の実用化(TRL4 から実用化レベルまでの引き上げ)を目指している。University of Leicester が開発している発電機のモックアップを図 4-7 に示す。

2030 年頃の実用を目指して開発しており、今後 ESA により承認されれば、「Argonaut」着陸機に搭載され実証される可能性がある。

日本においても宇宙技術戦略で放射性同位元素を用いた発電デバイスの重要性が記載されており、同様に我が国で生産可能なアメリシウムを用いた宇宙用電源の開発が宇宙戦略基金(文部科学省所管)で開始されている。

### <開発体制>

- ・英国と ESA による予算拠出により開発
- ・英国国立原子力研究所が全体の製造施設を開発
- ・University of Leicester が放射線同位体発電のコア技術を研究開発

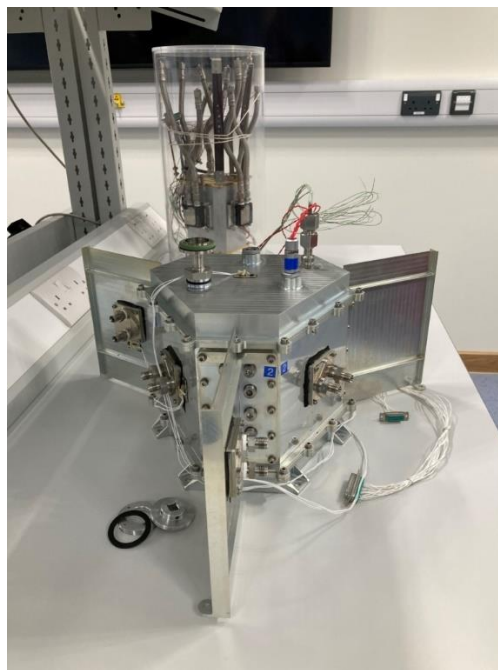


図 4-7 University of Leicester の発電機モックアップ

出所)<https://uknnl.com/customer-solutions/space-exploration/how-a-space-battery-works/>(2025 年 2 月 6 日閲覧)

## (5) まとめ

ここまでの欧州動向の整理結果を踏まえた分析概要を以下に示す。

- 欧州では米国ほどの規模での予算は確保できないものの、アーリーステージの技術、要素技術、共通技術など様々な TRL の技術について、中小企業、大学を含めて幅広い層への支援を行っている。
- 2022 年 11 月の ESA 閣僚級理事会において、月面着陸機「Argonaut」の開発が承認され、欧州として自立した月着陸機の実現が前進した。
- 欧州は、月探査と火星探査を並行して推進しており、2030 年代前半においては月面におけるレゴリスからの酸素と金属の抽出 (Oxygen/Metal Extraction) を想定した実証計画が多い。ただし、水抽出も月・火星探査の重要技術のスコップには入っており、長期的に火星での実証を想定した要素技術開発が見られる。
- ESA では、月での発電、蓄電、送電技術については、アーリーステージである低 TRL の要素技術の開発ほとんどであるが、2030 年代の月面での実証を想定した研究がいくつか見られる。また、月面設置太陽光発電技術については、将来の大型ミッションでの月面実証を見据えた、大型の発電システムの技術検討がいくつか見られる。
- 2022 年 11 月の ESA 閣僚級理事会において、「軌道上での宇宙太陽光発電システムの開発プログラム」や将来宇宙探査での利用を想定した「放射線同位体熱電源の開発プログラム」を承認しており、その中のいくつかの技術は将来月面での実証が行われる可能性が高い。
- 英国では自国の予算の他、ESA からの拠出による予算も使った、宇宙原子力電源、月面小型原子炉技術に注力している。

### 4.1.2 中国

ここでは、中国の月面開発の概観と水素と電力に関する主な動向について整理を行う。

#### (1) 宇宙開発の体制

##### 1) CNSA

中国国家航天局 (CNSA) は、宇宙探査計画を策定および実行する中国の行政機関である。同局は、中国政府の直轄下にあり、国内外の宇宙関連活動を総合的に管理している<sup>10</sup>。CNSA は、月探査計画である“嫦娥計画”および国際月面研究ステーション (ILRS) プロジェクトを主導し、これらの計画の全体的な方向性を決定する役割を果たしている。

---

<sup>10</sup> 国家航天局, 机构简介, [https://www.cnsa.gov.cn/n6758821/index.html#w\\_two](https://www.cnsa.gov.cn/n6758821/index.html#w_two) (2025 年 1 月 31 日閲覧)

## 2) DSEL

深宇宙探査研究所(DSEL)は、CNSA、安徽省政府、中国科学技術大学(USTC)の三者により2022年に設立された。DSELは、深宇宙探査における戦略的研究を推進するために設立された機関であり、中国の深宇宙探査技術の発展において中心的な役割を果たしている<sup>11</sup>。

DSELは、中国の月探査ミッションおよびILRSプロジェクトの主担当機関として活動しており、技術開発から国際協力に至るまで幅広い分野を担当している。同研究所は、月面探査技術や資源利用技術の基礎研究を進めるとともに、これらの技術の実用化にも取り組んでいる。また、DSELは、国際的な協力関係を重視しており、他国の研究機関や企業との連携を強化しながらプロジェクトを推進している。

### (2) 嫦娥計画とILRSによる月探査計画

#### 1) 嫦娥計画

嫦娥計画は、中国が独自に進めている長期的な月探査計画であり、科学的知見の拡大と技術開発の促進を目的としている<sup>12</sup>。この計画では、月面の詳細な地質調査や資源探査の実施や、月資源の現地利用に関する技術実証をすることなどを目標としている。

## 2) ILRS

ILRS計画は、中国とロシアが共同で提唱する国際協力型の計画で、月面研究ステーションの構築および科学研究を行う構想である。この計画は、2035年までに月面に研究施設を設置することを目標としており、中国が主要な技術開発とプロジェクト管理を担い、複数の国や国際機関との協力を通じて進めている。2024年9月5日時点の参加国は以下の通りであり、中国やロシアをはじめとした13カ国が含まれる<sup>1314</sup>。また、国家以外にもさまざまな組織が参画しており、その詳細は表4-5にまとめている。

参加国：

- 中国
- ロシア
- ベラルーシ

---

<sup>11</sup> DSEL, ILRS,  
[https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2023/TPs/ILRS\\_presentation20230529\\_.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2023/TPs/ILRS_presentation20230529_.pdf)  
(2025年1月31日閲覧)

<sup>12</sup> SiencePortalChina, 月科学研究ステーション建設など中国の深宇宙探査計画が明らかに,  
[https://spc.jst.go.jp/news/241004/topic\\_1\\_02.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://spc.jst.go.jp/news/241004/topic_1_02.html?utm_source=chatgpt.com) (2025年2月5日閲覧)

<sup>13</sup> Spacenews, Kazakhstan joins China's ILRS moon base program,  
<https://spacenews.com/kazakhstan-joins-chinas-ilrs-moon-base-program/> (2025年2月5日閲覧)

<sup>14</sup> Spacenews, Senegal among new members of China's ILRS moon base project  
<https://spacenews.com/senegal-among-new-members-of-chinas-ilrs-moon-base-project/>  
(2025年2月5日閲覧)

- パキスタン
- アゼルバイジャン
- ベネズエラ
- 南アフリカ
- エジプト
- ニカラグア
- タイ
- セルビア
- カザフスタン
- セネガル

表 4-5 ILRS 署名組織(国家除く)

| ILRS 署名組織                              | 所在国     | 種別    |
|----------------------------------------|---------|-------|
| アジア太平洋宇宙協力機構(APSCO)                    | 多国籍     | 政府間組織 |
| nanoSPACE AG                           | スイス     | 企業    |
| 国際月面天文台協会(ILOA)                        | ハワイ(米国) | 団体    |
| タイ国立天文学研究所(NARIT)                      | タイ      | 研究所   |
| シャルジャ大学                                | UAE     | 大学    |
| アドリアティック宇宙協会(A3)                       | クロアチア   | 団体    |
| コロンビア天文学協会(ASASAC)                     | コロンビア   | 団体    |
| アラバエフ・キルギス国立大学                         | キルギス    | 大学    |
| PT Universal Satelit Indonesia(UniSat) | インドネシア  | 企業    |
| ケニア先端科学技術研究所(KAIST)                    | ケニア     | 研究所   |
| 宇宙科学・地理空間研究所                           | エチオピア   | 研究所   |
| アラブ天文学・宇宙科学連合                          | 多国籍     | 団体    |
| Supreme Deep Space                     | スリランカ   | 企業    |

出所)Spacenews “Kazakhstan joins China’s ILRS moon base program,” , <https://spacenews.com/kazakhstan-joins-chinas-ilrs-moon-base-program/> , “Senegal among new members of China’s ILRS moon base project”, <https://spacenews.com/senegal-among-new-members-of-chinas-ilrs-moon-base-project/> の情報に基づき三菱総合研究所作成

### 3) 各フェーズの活動内容

嫦娥計画と ILRS は Reconnaissance(探査)、Construction(建設)、Utilization(活用)の 3 つのフェーズに分かれて進める計画となっている。探査フェーズ(～2025 年)では、月面での基礎的なデータ収集と技術実証が行われる<sup>15</sup>。次の建設フェーズ(2025～2035 年)では、月面基地の構築に必要なインフラ整備と技術検証が進められ、活用フェーズ(2035 年～)では、月面基地を拠点とした科

<sup>15</sup> CNSA, International Lunar Research Station (ILRS) Guide for Partnership, <https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6812150/content.html> (2025 年 2 月 5 日閲覧)

学研究や有人探査が実施される。ILRS の開発フェーズを図 4-8 に示す。また、各フェーズの活動の詳細を順次述べる。

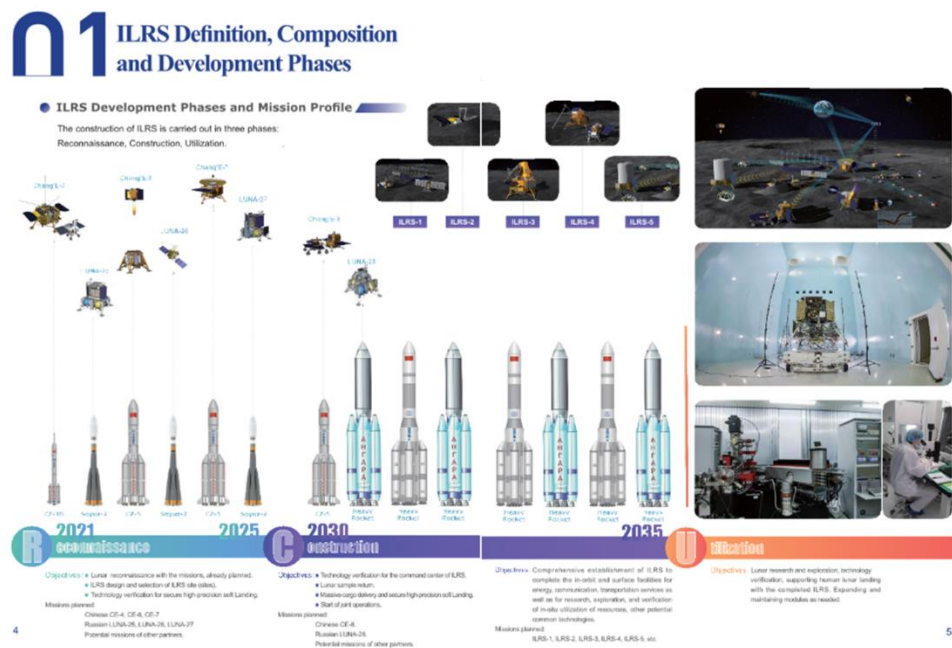


図 4-8 ILRS で想定されている開発フェーズ

出所) CNSA, International Lunar Research Station (ILRS) Guide for Partnership,  
<https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6812150/content.html> (2025 年 2 月 5 日閲覧)

## 1. Reconnaissance(探査)フェーズ(～2025 年)

探査フェーズでは、月面探査に必要な月面データと基礎的な技術の獲得を目的として、月面での地形や地質データの収集と、着陸技術の実証などが実施される。主要なミッションとして、嫦娥 5 号、嫦娥 6 号が挙げられる。

- 嫦娥 5 号: 月面サンプルリターンミッションとして、月表面から約 2kg の試料を持ち帰り成功を収めた。
- 嫦娥 6 号: 月の裏側からサンプルの回収を世界で初めて成功させた。

## 2. Construction(建設)フェーズ(2025～2035 年)

建設フェーズでは、月面での長期的な活動を支えるインフラ構築が実施される。主要なミッションとして、嫦娥 7 号、嫦娥 8 号、ILRS-1、ILRS-2、ILRS-3、ILRS-4、ILRS-5 がある。

- 嫦娥 7 号: 月周回軌道への中継衛星の投入と月面環境・資源の調査を行う計画。
- 嫦娥 8 号: ISRU 技術や 3D プリンターを用いて建材を製造する技術、ロボットによる科学技術実験の補助に関する技術などの実証。
- ILRS-1: エネルギー供給モジュールや通信施設等の長期的な無人探査を実現するためのインフラの構築。
- ILRS-2: 地質調査及び溶岩チューブの探査、探査用機器の設置。
- ILRS-3: ISRU 技術の検証用施設の建設。



- ILRS-4:月面バイオメディカル実験や収集したサンプルのリターンのための技術実証。
- ILRS-5:月面天文学及び地球観測能力の確立。

### 3. Utilization(活用)フェーズ(2035～年)

活用フェーズでは、有人着陸支援施設の設置や月面科学基地の拡大を通じて、月面での研究活動をさらに拡大する。ほかにも、月面での長期滞在技術の実証や、有人火星探査に向けた基盤技術の実証なども行われるとされているが、具体的なミッションについては本調査時点では公表されていない。

### (3) 中国の月探査に関する研究動向

中国の月探査に関連する研究の調査として、国際的な査読付きジャーナルである JDSE(Journal of Deep Space Exploration)に掲載されている、月開発計画(特に水素と電力)に関連性の高い4つの論文を対象として調査・整理を行った。JDSE は、深宇宙探査を専門としたジャーナルであり、編集長の Weiren Wu 氏は中国の月探査プログラムの主任設計者である<sup>16</sup>。紹介する4つの論文タイトルと、論文を執筆した研究機関の紹介を以下に示す。

#### 月水資源の探査・抽出・利活用に関する研究

1. WANG Chao et al., Conceptual Design of Lunar Surface In-Situ Resource Supply Station, 2022, (CAST:中国空間技術研究院)
2. WANG Qinggong et al., Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith, 2022, (Qian Lab)

#### 月面電力システムに関する研究

3. Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific (ISSE:宇宙機システム研究所)
4. XIA Yan, et al. (2022) A High-reliability and Scalable Lunar Surface Power Distribution Network Frame Vision Based on Micro-nuclear Reactor (ISSE)

#### 主要研究機関

- CAST<sup>17</sup>:主に宇宙システムの設計・開発を担当する中国の主要研究機関であり、以下の ISSE や Qian Lab などの多くの研究所を傘下に持つ。
- Qian Lab<sup>18</sup>:宇宙情報処理や In-Situ 資源利用などの複数の分野を専門とする CAST の傘下の研究所。
- ISSE<sup>19</sup>:宇宙船の設計とシステム統合を専門とする CAST の傘下の研究所。

<sup>16</sup> Journal of Deep Space Exploration, Description, <https://journal.hep.com.cn/jdse/EN/column/column29330.shtml>, (2025 年 2 月 14 日閲覧)

<sup>17</sup> CAST, Profile, <https://www.cast.cn/english/channel/1665>, (2025 年 02 月 14 日閲覧)

<sup>18</sup> CAST, Qian Lab, <https://www.cast.cn/english/channel/1833>, (2025 年 2 月 14 日閲覧)

<sup>19</sup> CAST, ISSE, <https://www.cast.cn/english/channel/1803>, (2025 年 2 月 14 日閲覧)

## 1) 水資源の探査・採掘・利用に関する一体的な取り組みに関する研究<sup>20</sup>

本論文では、月面水氷資源の効率的な利用を目指し、「探査・採掘・利用」を統合的に実施する一体的な方式を提案している。この方式は、広域調査と局所的な調査を組み合わせることで、月面の水氷資源の存在を正確に特定し、採掘し、現地で利用可能な形に変換するプロセスを包括的に扱うものである。包括的な構成のイメージを図 4-9 に示す。

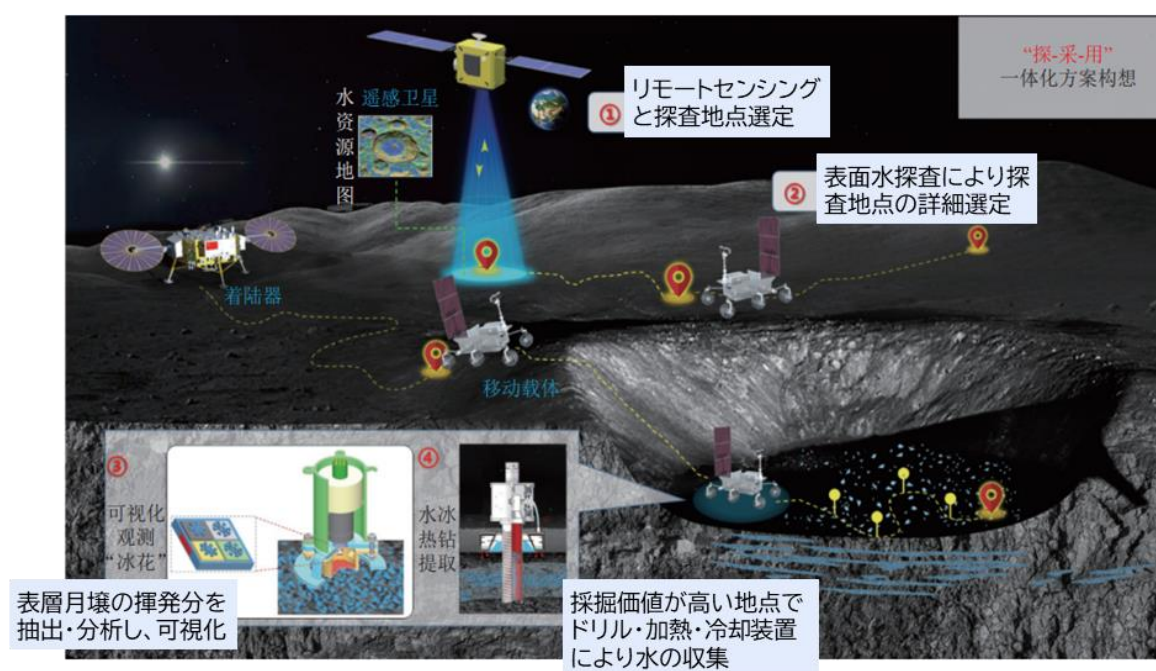


図 4-9 水資源の探査・採掘・利用に関する一体的な取り組みのイメージ図

出所)WANG Chao et al., Conceptual Design of Lunar Surface In-Situ Resource Supply Station, 2022, CAST  
の図に三菱総合研究所追記

月面水資源の探査は、複数の技術を組み合わせて実施される。まず、リモートセンシング技術を用いたマクロレベルでの水資源の分布予測が行われる。月周回軌道上の衛星による分光分析を活用し、月表面の鉱物組成や氷の存在を推定する。

次に、ローバーに搭載された探査装置による水資源分布分析が実施される。地表および浅部の水資源の有無を検出し、分布状況を詳細に把握する。ローバーは月表面を加熱しながら移動し、水資源が存在する場合は水が加熱抽出され、得られた水蒸気を凝固し、揮発分の詳細な組成情報を得るために、顕微鏡により観察がなされる。

さらに、採掘価値が高い箇所ではドリルを用いた水資源の採掘が提案されている。この方法では、円筒形のドリルを使用して月の土壌を掘削し、内側の加熱モジュールで月の土壌中の水分を揮発させる仕組みとなっている。揮発した水蒸気は、専用の移送管路を通じて冷却装置に送られ、効率的に収集さ

<sup>20</sup> WANG Chao et al., Conceptual Design of Lunar Surface In-Situ Resource Supply Station, 2022, (CAST)

れる。冷却装置は、月面環境の低温条件を活用して水蒸気を水に変換する仕組みが採用されている。この一体化システムにより、エネルギー消費を抑えつつ高効率な水資源の抽出が可能となっている。

## 2) 水資源の ISRU プロセスに関する研究<sup>21</sup>

本研究では、月面の水資源を採取し、利用するための統合型 ISRU プロセスを提案し、その有効性を実験により評価した。このプロセスは、掘削による水氷の採取、加熱による水の揮発、水蒸気の冷却・凝縮、水の電気分解による水素・酸素の生成という一連の工程から構成されている。プロセスの工程を図 4-10 に、熱力学的な変化を伴う各工程での温度と圧力の遷移図を図 4-11 に示す。

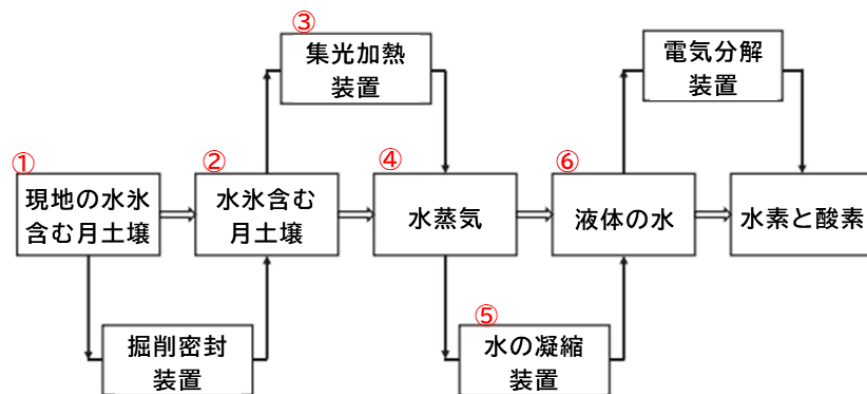


図 4-10 ISRU プロセスのイメージ図

出所)WANG Qinggong et al., Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith, 2022, Qian Lab の図について三菱総合研究所が和訳追記

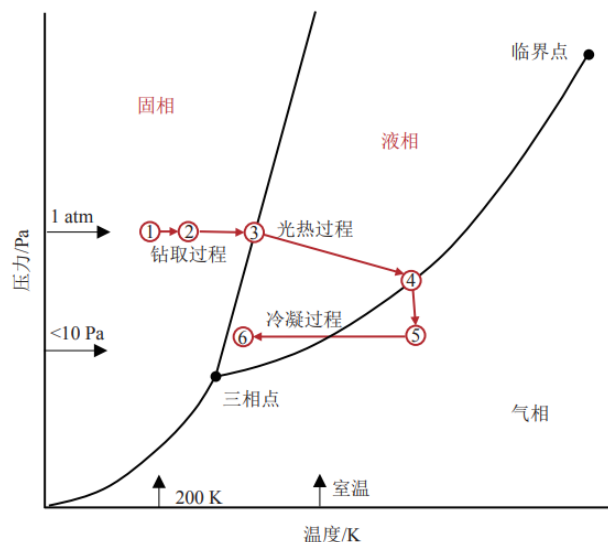


図 4-11 ISRU プロセスの温度と圧力の遷移図

出所)WANG Qinggong et al., Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith, 2022, Qian Lab

<sup>21</sup> WANG Qinggong et al., Study of Drilling-Based Water Extraction Technology from Icy Lunar Regolith, 2022, (Qian Lab)

#### 掘削による水氷の採取

水氷を含む月の土壌を採取するために、専用のドリルを用いた掘削技術が開発されている。このドリルは、全長が 50cm で、回転機構と振動機構が組み合わさっている。掘削された月の土壌は、ドリル内部に密封され、後続の加熱抽出プロセスで利用される。

#### 加熱による水の抽出

採取された月の土壌の水分を蒸発させるために、集光加熱装置が使用される。この装置は、太陽光を多段に構成されたレンズによって集光し、ドリル内部を効率的に加熱する仕組みとなっている。加熱によって発生した水蒸気は、専用の管路を通じて次の冷却・凝縮プロセスへと送られる。

#### 水蒸気の冷却・凝縮

加熱によって発生した水蒸気は、移送管路を通じて凝縮装置へと送られる。この装置には、液冷方式で約 0℃で冷却され、蒸気を凝縮し収集する。また、凝縮装置には非凝縮性ガスを排出するための排気口を設置している。

#### 電気分解による水素・酸素の生成

凝縮器で得られた液体の水は、電気分解装置に送られ、水素と酸素に分解される。電極の陽極には 10%の炭素担持イリジウム(Ir/C)、陰極には 10%の炭素担持プラチナ(Pt/C)が使用されている。隔膜材料にはプロトン交換膜(Nafion/PTFE)を採用している。

#### 評価結果

本論文では、掘削、加熱抽出、凝縮、電気分解の各工程を統合した試験装置を用いた結果の性能評価がなされている。模擬月土壌を使用し、含水率を 2%、4%、6%の 3 種類に設定し、各プロセスの処理速度やエネルギー消費の特性を検証している。

掘削工程では、含水率が 2%から 6%の範囲であっても、掘削に要する消費電力は 100W 以下に抑えることができたとされている。また、掘削深度が 30cm に達した際の土壌の輸送速度は 1.8～2.0kg/h であることが確認されている。水抽出の効率については、含水率が 6%の模擬月土壌では取水速度が平均 26.6 g/h に達し、比較的高い抽出効率が示されている。しかし、含水率が 4%および 2%の場合は、取水速度は著しく低下する傾向が観察されたと報告されている。さらに、回収した水を用いた電気分解の試験を実施した結果は、水素の生成速度は電流 30A の条件下で 260ml/min、総ガス生成率は 12.6 g/h を記録したと報告されている。

### 3) 月面電力システム構成に関する研究<sup>22</sup>

本研究は、月面における高信頼性かつ拡張可能な電力配電ネットワークの設計について提案したものである。提案されている電力システムの構成図を図 4-12 に示す。本研究では、原子力発電と太陽

---

<sup>22</sup> Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific(ISSE)

光発電を主電源とし、異なる規模のシステムを無線送電により接続した分散型電力ネットワークの構造を提案している。電力システムは発電システムのハブを担う大型システムと、月面設備への電力供給を担う中型システム、特定のタスク向けにポータブルな給電を実現する小型システムから構成されている。

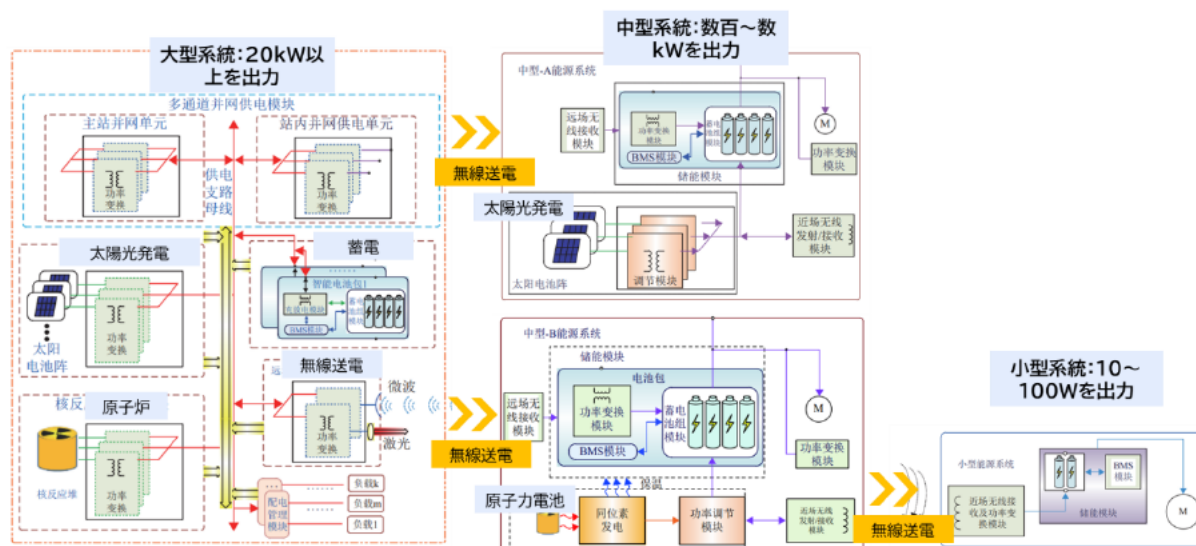


図 4-12 月面電力システム構成

出所) Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific, ISSE の図に三菱総合研究所が追記

#### 大型システムの構成

大型システムは発電システムのハブを担う。大型システムに含まれるコンポーネントとその機能と出力・効率の目標値を表 4-6 に示す通りである。電源は原子力発電と太陽光発電により構成され、それぞれ 10kW 以上の発電が目標として設計されている。さらに、大型システムには蓄電モジュールがあり、夜間や緊急時の電力供給を担い、300Ah の容量が目標として設定されている。配電モジュールは、システム内の電力変換と配電を担い、給電モジュールは外部システムへの電力供給のための電力の管理を担っている。無線送電モジュールは中型システムへ、1km 級の遠距離無線送電を担い、送電出力 400W、送受電効率 30% 以上が目標として設計されている。

表 4-6 大型システムの構成

| コンポーネント   | 機能                      | 出力・効率                       |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|
| 原子力発電     | 主な電力供給源                 | 10kW 以上                     |
| 太陽光発電     | 太陽光を利用した電力供給            | 10kW 以上                     |
| 蓄電モジュール   | 夜間や緊急時の電力供給             | 容量 300Ah 以上                 |
| 配電モジュール   | システム内の電力変換と供給           | 複数の負荷に対して電力を供給              |
| 給電モジュール   | 外部システムへの電力供給            | 5kW 以上                      |
| 無線送電モジュール | 中型システムへの 1 km 級の遠距離無線送電 | 送電出力: 400W<br>送受電効率: 30% 以上 |

出所) Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific, ISSE の情報に基づき三菱総合研究所作成



### 中規模システムの構成

中型システムは月面設備への電力供給を担い、中型システム内にある太陽光発電モジュールと原子力電池を電源とし、大型システムから無線送電された電力を探査施設等の月面施設に給電する役割とされている。中型システムに含まれるコンポーネントとその機能と出力・効率の目標値は表 4-7 に示す通りである。原子力電池は夜間や太陽光が届かない地域において、主電源の役割が期待されており、400W の発電が目標として設計されている。太陽光発電は昼間や太陽光が届く地域での主電源の役割が期待され、1kW の発電が目標設計されている。蓄電モジュールは夜間や緊急時のバックアップを担い、50Ah の容量が目標として設計されている。無線受電モジュールは大型システムから 1km 級の遠距離無線送電された 400W の電力を受け取る想定となっている。加えて、無線送電モジュールは小型システムへ数十メートル級の近距離無線送電を実施し、10～100W 程度の電力を 90%以上の効率で無線送電することが計画されている。

表 4-7 中型システムの構成

| コンポーネント   | 機能                      | 出力・効率                        |
|-----------|-------------------------|------------------------------|
| 原子力電池     | 太陽光が届かない地域での電力供給        | 400W 級                       |
| 太陽光発電     | 太陽光が届く地域での電力供給          | 1kW 級                        |
| 蓄電モジュール   | 補助エネルギー                 | 容量 50Ah 以上                   |
| 無線受電モジュール | 大型システムからの 1km 級の遠距離無線受電 | 受電電力:400W<br>送受電効率:30%以上     |
| 無線送電モジュール | 小型システムへの数十メートル級の近距離無線送電 | 送電電力:10W～100W<br>送受電効率 90%以上 |

出所) Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific, ISSE の情報に基づき三菱総合研究所作成

### 小規模システムの構成

小型システムは中型の宇宙船や探査機等の機器に搭載され、受電・蓄電した電力を供給する役割を担う。小型システムに含まれるコンポーネントと機能、出力・効率は表 4-8 に示す通りである。無線受電モジュールは中型システムから無線送電された電力を受け取り、蓄電モジュールに蓄電する。蓄電されたエネルギーは小型システムに接続された機器に供給される。

表 4-8 小型システムの構成

| コンポーネント   | 機能                       | 出力・効率                        |
|-----------|--------------------------|------------------------------|
| 無線受電モジュール | 中型システムからの数十メートル級の近距離無線受電 | 受電電力:10W～100W<br>送受電効率 90%以上 |
| 蓄電モジュール   | 主な電力源                    | 小規模タスクに対応                    |

出所) Liu Y, et al. (2022) Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific, ISSE の情報に基づき三菱総合研究所作成



#### 4) 電力システムの原子力発電モジュールと蓄電モジュールについて<sup>23</sup>

本研究では、月面科学研究基地に長期的かつ安定した電力を供給するための基盤である電力ネットワークを提案し、さらに大規模かつ高信頼性のある給電を実現するための、原子力発電技術と蓄電技術について述べられている。

##### 小型原子炉の構成

本論文ではスターリングエンジンが一体化されているマイクロ炉原子力発電の活用が提案されている。マイクロ炉は 5.0MPa の与圧がされている前提で、表 4-9 にある仕様が設定されている。

表 4-9 小型原子炉の仕様

| 項目        | 仕様                  |
|-----------|---------------------|
| 発電容量      | 5 kW                |
| 総重量       | 650 kg              |
| 寸法        | 直径 0.5 m × 高さ 0.7 m |
| 散熱板面積     | 24 m <sup>2</sup>   |
| 設計寿命      | 2 年                 |
| 出力電圧      | 直流(DC)100V～300V     |
| エネルギー変換効率 | 27%                 |
| 与圧        | 5.0 MPa             |

出所)XIA Yan, et al. (2022) A High-reliability and Scalable Lunar Sur face Power Distribution Network Frame Vision Based on Micro-nuclear Reactor(ISSE)の情報に基づき三菱総合研究所作成

また、マイクロ炉のシステム構成を図 4-13 に示す。本論文で提案されている小型核反応炉は、炉心に核燃料が設置され、圧力容器内で熱エネルギーを発生させる。発生した熱は熱管を介してスターリングエンジンへ効率的に伝達され、スターリングエンジンはその熱エネルギーを機械エネルギーに変換した後、電気エネルギーへ変換し、直流電力として出力する。また、システム全体は放射線防護のために内外部の遮蔽構造を備えており、安全性が確保されている。

---

<sup>23</sup> XIA Yan, et al. (2022) A High-reliability and Scalable Lunar Sur face Power Distribution Network Frame Vision Based on Micro-nuclear Reactor(ISSE)

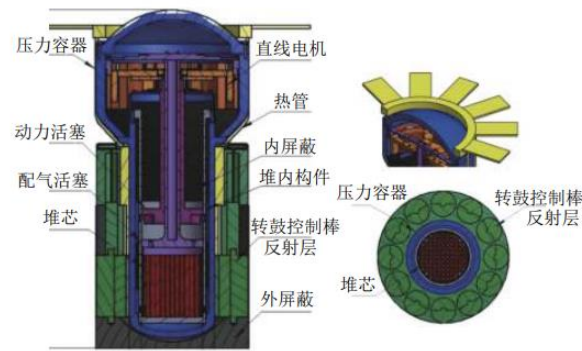


図 4-13 小型原子炉の構成

出所)XIA Yan, et al. (2022) A High-reliability and Scalable Lunar Sur face Power Distribution Network Frame Vision Based on Micro-nuclear Reactor(ISSE)

### バッテリーの構成

本論文では、バッテリーモジュールは、短期での高出力給電、長時間のエネルギー貯蔵、エネルギー管理の 3 つの機能要素で構成されている。短時間での高出力供給にはスーパーキャパシタやフライホイールによるエネルギー貯蔵を用い、急激な負荷変動に対応しながら電圧の安定化を図る。長時間エネルギー貯蔵には水素ニッケル電池を採用し、原子力発電モジュールの余剰電力を蓄えることで、電力供給が途絶えた際のバックアップ電源として機能する。さらに、エネルギー管理にはエネルギールーターを導入し、各モジュール間の電力配分を最適化しつつ、直流電圧を 100V～300V に調整し、異なる電力需要に対応できるよう設計されている。

### 4.1.3 中東

#### (1) 中東の月面探査動向

中東においては、アラブ首長国連邦(UAE)が精力的に月面探査を含む宇宙探査の分野での活動を行っている。UAE は世界で 3 番目に資源探査法を成立させた国であり、2020 年には米国主導のアルテミス・アコードに署名するなど、中東の中では抜きんでて月面探査に注力している。

2024 年 1 月、UAE は、米国、日本、カナダ、欧州(ESA)に次いで、5 番目のパートナーとして Gateway 計画に参画することを発表した。UAE の Mohammed Bin Rashid Space Centre (MBRSC)は、15 年にわたり、Gateway の Airlock モジュール(与圧モジュールと曝露部との連結部)、Gateway 滞在運行クルーを提供する計画である。Gateway のイメージ図と UAE が提供予定の Airlock のイメージズを図 4-14 に示す。Airlock モジュールは 2030 年までに打上げ予定となっている。他方、米国 NASA はアルテミス計画の中で、UAE の宇宙飛行士を Gateway まで運搬することになっており、UAE の宇宙飛行士が Gateway に滞在する計画である。



図 4-14 Gateway イメージ(左)と Airlock イメージ(右)

出所)<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-united-arab-emirates-announce-artemis-lunar-gateway-airlock/>(2025 年 2 月 6 日閲覧)

UAE 政府としてはアルテミス計画にコミットしているが、月を取り巻く別の動きとして UAE シャルジャ大学が 2023 年に中国の月面基地計画「International Lunar Research Station(ILRS)」への参加を発表しており、中国主導の月面開発に UAE が今後どのようにかかわっていくのか注目される。

#### (2) UAE の月面探査ミッション

UAE は、月探査、小惑星探査、火星探査を含めた宇宙探査計画を有しており、小惑星探査機「Mohammed Bin Rashid Explorer(MBR Explorer)」を三菱重工業の H3 ロケットで 2028 年に打上げ予定(2024 年 10 月契約署名)である。日本の UAE 打上げ受注は、地球観測衛星 KhalifaSat、火星探査機 Hope に続き 3 機目となる。

UAE では、Mohammed Bin Rashid Space Centre(MBRSC)を中心に主に、探査車(ローバー)と搭載観測装置を開発中であり、一連の月探査ミッションでは、「Rashid-1～3」の3つの探査車を月に送ることを計画している。表 4-10 に UAE の月面探査車ミッション概要を示す。「Rashid-1」は、日本の ispace 社との契約により、「HAKUTO-R」プロジェクトの最初の着陸機「M1」に搭載され、月面に運搬されたがソフトランディングに失敗した。「Rashid-1」のバックアップ機が地上に存在しており、今後、同バックアップ機を打ち上げる計画がある。「Rashid-2」は、MBRSC と中国航天局(CNSA)との合意により、中国が月の南極への着陸を目指す「嫦娥7号」で打ち上げられる計画であったが、報道によると、米国の ITAR 規制の問題でキャンセルされた模様である。現在、「Rashid-2」を搭載する着陸船の選定含め、実現可能性検討が行われている。

表 4-10 UAE の月面探査車ミッション

|                           | 重量    | サイズ                  | ペイロード                                    | 備考                                                        |
|---------------------------|-------|----------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Rashid-1<br>(探査車)<br>着陸失敗 | 約10kg | 全長と幅54cm、<br>高さ8.5cm | ・高解像度カメラ<br>・赤外線カメラ<br>・顕微鏡装置<br>・帯電測定装置 | ・4輪の車輪によるローパーで、太陽電池による稼働時間は約1日<br>・Rashid-1バックアップ機の打ち上げ計画 |
| Rashid-2<br>(探査車)         | (不明)  | (不明)                 | (不明)                                     | ・Rashid-1をベースに開発？<br>・2025年頃打ち上げ予定                        |
| Rashid-3<br>(探査車)         | (不明)  | (不明)                 | (不明)                                     | 2027年頃打ち上げ予定                                              |

出所) 公開資料に基づき JSF 作成

### (3) まとめ

以下に UAE の月面探査動向の分析概要を示す。

- UAE は Gateway 計画に正式に参画し、同国の長期火星探査計画に向けたステッピングストーンとしての月面探査の道筋をつけた。
- 大学レベルでは中国の ILRS にも参加しており、今後の UAE の月をめぐる国際協力の動向を注視する必要がある。
- UAE を含めて中東では、産学官における米国とのコンポーネント、部品レベルでの連携は多数あり、輸送機選定に制約がかかる ITAR 規制等についても注目していくべき。

#### 4.1.4 オーストラリア

本項では、オーストラリアの月面開発の主要動向について整理を行う。

##### (1) 宇宙開発の体制

オーストラリア宇宙庁(Australian Space Agency: ASA)、CSIRO、州政府を対象としてオーストラリアの宇宙開発の取り組みについて概要を調査した。

##### 1) オーストラリア宇宙庁(ASA)<sup>24</sup>

同国の宇宙開発の中核を担うのは、2018年に設立されたオーストラリア宇宙庁(ASA)であり、オーストラリア産業・科学・資源省の専門部局として位置づけられている。

2030年までに最大2万人の雇用創出と市場規模120億豪ドル(約1.2兆円<sup>25</sup>)へ拡大することを目標に掲げ、取り組みが進められている。目標が設定された当初の雇用数は約1万人、市場規模は約39億豪ドルであり、雇用は追加で2万人増加させ、市場規模は約3倍へと拡大することになる。2023年10月時点で雇用数は1.7万人に増加<sup>26</sup>し、2024年5月時点で市場規模は年間約64億豪ドル(約6444.8億円)規模に到達している<sup>27</sup>。

ASAは、同国が競争力、戦略的利益を有する以下の7分野を優先分野に指定している。

- PNT
- 地球観測
- 通信技術・サービス
- SSA 及びデブリ監視
- 応用宇宙医学と生命科学
- 地上及び宇宙におけるロボット工学・自動化
- 宇宙へのアクセス

##### 2) CSIRO<sup>28</sup>

CSIROは、オーストラリアを代表する科学研究機関である。電波天文学、衛星(宇宙機)の通信と追跡、地球観測データの収集を目的とした世界クラスの施設を運営している。

キャンベラ深宇宙通信施設(Canberra Deep Space Communication Complex: CDSCC)は、CSIROが運営するNASAの施設で、NASAの深宇宙網(Deep Space Network: DSN)を構成する3つの局の1つである(他の2局は米国とスペインに所在)。24時間体制で30以上の宇宙機と通信を行っている。

---

<sup>24</sup> Australian Space Agency, <https://www.space.gov.au/>, (2024年10月25日閲覧)

<sup>25</sup> 1豪ドル=100.7円(2024/10/25時点)で計算。以降、4.1.5項の円換算は1豪ドル=100.7円で計算。

<sup>26</sup> Australian Space Agency, <https://www.space.gov.au/about-agency/publications/agency-heads-address-2023-siaa-southern-space-event>, (2024年10月28日閲覧)

<sup>27</sup> オーストラリア大使館商務部, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000049.000010691.html> (2024年10月28日閲覧)

<sup>28</sup> CSIRO, <https://www.csiro.au/> (2024年10月25日閲覧)

西オーストラリア州パースに位置するニューノルチャ地上局は、ESA の追跡局網内の 3 つの深宇宙局の 1 つとなっており、ESA や NASA、JAXA 等の宇宙ミッションの支援を行っている(他の 2 局はスペインとアルゼンチンに所在)。

CSIRO の宇宙関連の研究分野としては、衛星および宇宙通信技術、地球観測データ分析、ロボット工学と遠隔操作、宇宙生命科学等が挙げられる。ASA が主導する地球観測衛星プロジェクト(National Space Mission for Earth Observation: NSMEO)にも参加しており、衛星の設計・技術仕様の支援、地上衛星校正・検証施設の国内ネットワークの構築を担当している。

### 3) 州政府

オーストラリアでは、各州政府による宇宙開発支援も行われている。例えば、南オーストラリア州では最大 32 万豪ドル(約 3,200 万円)を提供する宇宙協カイノベーション基金を設立し、ニューサウスウェールズ(NSW)州では、NSW 宇宙産業開発戦略が策定されている。月関連に特化した支援としては、月面ローバーを開発する企業コンソーシアム AROSE の設立に西オーストラリア州が 400 万豪ドル(約 4 億円)を投資している。

## (2) 月関連の主要動向

オーストラリアは、米国の M2M に沿って取り組みを進めることを表明しており、月関連開発は米国との協力プロジェクトを中心に推進されている。

2019 年 9 月に、オーストラリア政府は NASA とアルテミス計画への協力合意を締結し、その際、5 年間で 1 億 5,000 万豪ドル(約 151 億円)の予算を投じることを発表した。これが後述する Moon to Mars Initiative の施策に繋がっている。その翌年、2020 年 10 月にはアルテミス合意に署名し、2021 年 10 月には NASA との協定の一環として、商業月面ランダーへの小型ローバーの提供に合意している。この小型ローバーは、早ければ 2026 年に月面(南極域の予定)に到達する予定である。オーストラリアは現在、NASA の M2M の活動を支援するフラッグシップ・ミッションとして、この小型ローバーの開発を Moon to Mars Initiative の下で進めている。2024 年 3 月には、Advanced Navigation 社のセンサーが搭載された Nova-C 着陸機が打上げられ、オーストラリアの技術が初めて月面に到達した。

また、インドのチャンドラヤーン 3 号のミッションでは、地上局支援を実施しており、今後、ガガヤーンミッションでの支援も予定されている<sup>29</sup>。

## (3) Moon to Mars Initiative

Moon to Mars Initiative は、国際的な宇宙サプライチェーンへのアクセス、国内の雇用創出、宇宙技術の開発と応用を通じた経済全体にわたる産業成長の支援を目的として、オーストラリアの企業や研究者に 5 年間(2021~2026 年)で 1 億 5,000 万豪ドル(約 151 億円)を投じる施策である。

---

<sup>29</sup> THE TIMES OF INDIA, <https://timesofindia.indiatimes.com/science/australia-looks-beyond-gaganyaan-moon-for-space-collaboration-with-india/articleshow/113430732.cms>, (2024 年 11 月 12 日閲覧)



Moon to Mars Initiative は Supply Chain、Demonstrator、Trailblazer の 3 つのプログラムで構成されている。表 4-11 に各プログラムの概要を、表 4-12 に各プログラムの支出計画をそれぞれ示す。なお、Supply Chain プログラム及び Demonstrator プログラムは最終的に Trailblazer を支援するものとして位置づけられている。

表 4-11 Moon to Mars Initiative を構成する各プログラムの概要

| プログラム名       | 概要                                                                                                                                                                         | 助成企業数            | 助成金額合計                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Supply Chain | 助成金と促進事業の両方からなるプログラム。オーストラリアの宇宙産業における能力を確立し、オーストラリアの産業が国内外の宇宙サプライチェーンに製品やサービスを提供することを支援するプロジェクトや活動を対象とする。                                                                  | 31               | 21,697,153 豪ドル<br>(約 21.8 億円) |
| Demonstrator | オーストラリアの強みを世界にアピールするデモンストレーターおよびパイロット・プロジェクトを支援するプログラム。オーストラリアの産業界や研究者が、新たな能力を生み出し、新たな事業や収益源、新市場の創出を可能にする製品やプロジェクトを、宇宙を含めて迅速に開発・実証するための道筋を提供する。フィージビリティ助成金と、ミッション助成金に分かれる。 | フィージビリティ助成<br>20 | 3,474,512 豪ドル<br>(約 3.5 億円)   |
|              |                                                                                                                                                                            | ミッション助成<br>11    | 41,474,742 豪ドル<br>(約 41.8 億円) |
| Trailblazer  | NASA の M2M(Moon to Mars)の活動を支援するオーストラリアのフラッグシップ・ミッションで、オーストラリアの長所、創意工夫、能力を実証・発展させ、国民を鼓舞するプログラム。                                                                            | 2                | 7,999,908 豪ドル<br>(約 8.1 億円)   |

出所)各種資料に基づき三菱総合研究所作成

表 4-12 Moon to Mars Initiative 支出計画

|              | 2020-21<br>(百万豪ドル) | 2021-22<br>(百万豪ドル) | 2022-23<br>(百万豪ドル) | 2023-24<br>(百万豪ドル) | 2024-25<br>(百万豪ドル) | 総額<br>(百万豪ドル) |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| Supply Chain | 1.7                | 6.5                | 13.0               | 13.0               | 13.0               | 47.2          |
| Demonstrator | 1.7                | 2.0                | 8.5                | 18.0               | 15.0               | 45.2          |
| Trailblazer  | 0.0                | 0.0                | 12.0               | 18.0               | 20.0               | 50.0          |

出所)Moon to Mars initiative Consultation paper に基づき三菱総合研究所作成

2020 年 2 月に発行された Moon to Mars Initiative の説明資料の中で、月及び火星を目指すにあたり、オーストラリアが競争優位性をもつ分野として、以下の 6 つが挙げられている<sup>30</sup>。

- ロボット工学、自動化、人工知能(AI)、機械学習
- 次世代通信(例:光通信、量子暗号)
- 科学的調査(例:水資源、月や他の天体からの塵や岩石、鉱物、その他の物質のサンプル)
- 医療と遠隔医療
- 天体のデジタルマッピング
- 米国等、国際宇宙サプライチェーンを支えるサブコンポーネントの製造

<sup>30</sup> Moon to Mars initiative Consultation paper, 10 February 2020, オーストラリア宇宙庁

さらに、開発された宇宙技術の地上への裨益の例として、以下の4点が挙げられている。

- 宇宙探査のための高度で安全な通信の開発は、地上の通信を改善する(地域社会の支援を含む)。
- オーストラリアの鉱業・資源分野で培った自動化技術を将来の月面インフラを含む分野に活用することで、宇宙でのロボットやその他のアセットの自律制御を可能にする。開発された技術は、オーストラリアの資源部門などにおける自動化のさらなる進展をサポートする。
- 高度なセンシング技術で月ミッションを支援することで、地球観測ミッションに利用可能な技術が開発される。これは、農地管理や災害管理など、オーストラリア経済の他の分野を支援することとなる。
- 宇宙向けの遠隔医療技術の開発は、例えばオーストラリアの農村部や遠隔地など、地上での遠隔医療アプリケーションをサポートする可能性がある。

## 1) Moon to Mars Initiative: Supply Chain プログラム

オーストラリアの宇宙産業における能力を確立し、オーストラリアの産業が国内外の宇宙サプライチェーンに製品やサービスを提供することを支援するプロジェクトや活動に助成するプログラムである。これまでに31件のプロジェクトに総額21,697,153豪ドル(約21.8億円)を助成している。1プロジェクトあたりの助成実績は、25万豪ドル(約2,500万円)~100万豪ドル(約1億円)となっているが、経費75%が上限となっており、助成を受ける側も経費の25%以上を負担している。同プログラムは段階的に実施されており、現在は11巡目(Intake11)となっているが、11巡目の助成企業の詳細は公開されていない。

水素・電力関連プロジェクトとしては、以下の4点が挙げられる。

- Gilmour Space Technologies 社  
宇宙用 COPV(Carbon Overwrapped Pressure Vessel)<sup>31</sup>の製造能力向上  
助成金額:1,000,000 豪ドル(約1億円)
- Reach Robotics 社(旧名:Blueprint Lab 社)  
先進的なロボット・マニピュレータ技術<sup>32</sup>の宇宙領域への転用。  
助成金額:317,844 豪ドル(約3,200万円))
- Extraterrestrial Power Ltd.  
薄型シリコン太陽電池<sup>33</sup>の製造拡大  
助成金額:607,117 豪ドル(約6,000万円)
- P.W.R. Performance Products 社  
宇宙用マイクロマトリックス熱交換器(MMX)の開発・製造  
助成金額:985,000 豪ドル(約9,900万円)

---

<sup>31</sup> 圧力下で液体を保持できる圧力容器

<sup>32</sup> このマニピュレータは、ローバ基礎サービスの技術を必要とする国際宇宙サプライチェーンに高性能ソリューションを提供する。

<sup>33</sup> 市販されている宇宙用太陽電池よりもコスト効率が10倍高いとされている。

表 4-13 に Supply Chain プログラムの助成プロジェクト一覧を示す。

表 4-13 Supply Chain プログラムの助成プロジェクト一覧

| No. | 助成企業                                              | プロジェクト名                                                                      | 助成金額                        |
|-----|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1   | Spiral Blue Pty Ltd                               | Supporting Infrastructure for Space Edge Computing                           | 416,250豪ドル<br>(約 4,200 万円)  |
| 2   | Advanced Navigation Pty. Ltd.                     | Inertial navigation in space by software-enabled quantum-classical sensing   | 690,892 豪ドル<br>(約 7,000 万円) |
| 3   | Crystalaid Manufacture Pty Ltd                    | Enabling Space Capability                                                    | 461,118豪ドル<br>(約 4,600 万円)  |
| 4   | Fleet Space Technologies Pty Ltd                  | Space Supply Chain Opportunities Using Low Power Wide Area Networks          | 386,770 豪ドル<br>(約 3,900 万円) |
| 5   | Gilmour Space Technologies Pty Ltd                | Manufacturing COPVs for Space Applications                                   | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |
| 6   | Crystalaid Manufacture Pty Ltd                    | Enabling Manufacturing for Space                                             | 538,882 豪ドル<br>(約 5,400 万円) |
| 7   | Black Sky Aerospace Pty Ltd                       | Responsive Common Use Booster using Solid Rocket Fuel                        | 678,487 豪ドル<br>(約 6,800 万円) |
| 8   | Inovor Technologies Pty Ltd                       | Australian Rapid, High-Reliability Satellite Manufacture Capability          | 750,000 豪ドル<br>(約 7,500 万円) |
| 9   | Stamen Engineering Pty Ltd                        | Toolkit for Risk Assessment & UnCERTainty Quantification for Space Missions  | 442,320 豪ドル<br>(約 4,500 万円) |
| 10  | Infinity Avionics Pty Ltd                         | Modular Imaging Unit (MIU) for Space Applications                            | 456,323 豪ドル<br>(約 4,600 万円) |
| 11  | Reach Robotics Pty Ltd.(旧名:Blueprint Lab Pty Ltd) | Space-optimised manipulator for in-orbit and rover foundation services       | 317,844 豪ドル<br>(約 3,200 万円) |
| 12  | NextAero Pty Ltd                                  | Enhanced high-pressure cryogenic enabled test stands for liquid rockets      | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |
| 13  | Conflux Technology Pty Ltd                        | RHXP (Rocket Heat Exchanger Production)                                      | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |
| 14  | Skykraft Pty Ltd                                  | Upgrading advanced attitude determination and control systems (ADCS)         | 978,000 豪ドル<br>(約 9,800 万円) |
| 15  | SouthernLaunch.space Pty Ltd                      | Design, Construction & Commissioning of a Mobile Launch Rail                 | 986,568 豪ドル<br>(約 9,900 万円) |
| 16  | Valiant Space Pty Ltd                             | Delivering a Sovereign In-Space Propulsion Capability                        | 750,000 豪ドル<br>(約 7,600 万円) |
| 17  | EvokeEdge Pty Ltd                                 | TinySpaceML Platform for Edge Computing in Space                             | 750,000 豪ドル<br>(約 7,600 万円) |
| 18  | VXB Aerospace Pty Ltd                             | Commercialisation of the EXB500 and EXB1200 Hall Effect propulsion systems   | 471,022 豪ドル<br>(約 4,700 万円) |
| 19  | Extraterrestrial Power Ltd.                       | Scaling up extraterrestrial thin silicon solar cell manufacturing            | 607,117 豪ドル<br>(約 6,100 万円) |
| 20  | High Earth Orbit Robotics Pty Ltd                 | Next Generation, Australian Space Based Telescopic Camera Production         | 742,164 豪ドル<br>(約 7,500 万円) |
| 21  | Neumann Space Pty Ltd                             | Australian Spacecraft Electric Propulsion Manufacturing Capability           | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |
| 22  | Arlula Pty Ltd                                    | Automated Data Normalisation and Processing for Satellite Imaging Programmes | 427,500 豪ドル<br>(約 4,300 万円) |
| 23  | Quickstep Technologies Pty Ltd                    | Spacecraft Structural Panel Manufacturing Capability                         | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |

| No. | 助成企業                                | プロジェクト名                                                                   | 助成金額                        |
|-----|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 24  | Human Aerospace Pty Ltd             | Compression Garment and 3D Body Scanning Technology for Human Spaceflight | 493,799 豪ドル<br>(約 5,000 万円) |
| 25  | P.W.R. Performance Products Pty Ltd | Micro Matrix Heat Exchangers for Space (MMX-S)                            | 985,000 豪ドル<br>(約 9,900 万円) |
| 26  | Nextaero Pty Ltd                    | Cryogenic Hydrogen and Methane R&D Capability for Spacecraft              | 1,000,000 豪ドル<br>(約 1 億円)   |
| 27  | Valiant Space Pty Ltd               | Enabling Production of Sovereign Solenoid Valves for Space                | 841,875 豪ドル<br>(約 8,500 万円) |
| 28  | QuantX Labs Pty Ltd                 | Manufacturing facility for space-based, photonic technologies             | 532,222 豪ドル<br>(約 5,400 万円) |
| 29  | Vyom Tech Pty Ltd                   | Kosmosuit: Integrated Commercial Spacesuit Platform (ICSP)                | 250,000 豪ドル<br>(約 2,500 万円) |
| 30  | Gilmour Space Technologies Pty Ltd  | Sovereign Space Avionics: GNSS Receiver                                   | 808,500 豪ドル<br>(約 8,100 万円) |
| 31  | Valiant Space Pty Ltd               | Expanding Australia's Sovereign In-space Propulsion Capability            | 934,500 豪ドル<br>(約 9,400 万円) |

出所)各種情報に基づき三菱総合研究所作成

## 2) Moon to Mars Initiative: Demonstrator(実証)プログラム

オーストラリアの強みを世界にアピールする実証およびパイロット・プロジェクトを支援するプログラムで、フィージビリティ助成金とミッション助成金の 2 種類に分かれている。

### a. フィージビリティ助成金

フィージビリティ助成金には、コンセプトの研究開発、技術開発、予備設計、技術開発、技術実装、事業計画策定が含まれる。これまで 20 件のプロジェクトに総額 3,474,512 豪ドル(約 3.5 億円)を助成している。1 プロジェクトあたりの助成実績は 9 万豪ドル(約 900 万円)～20 万豪ドル(約 2,000 万円)となっているが、助成を受ける側も最低 5 万豪ドル(約 500 万円)の現金拠出が必要となる。

水素・電力関連プロジェクトとしては、以下の 6 件が挙げられる。

- カーテン大学  
月の資源探査をターゲットとした月周回衛星ミッション「Binar Prospector」の詳細検討  
助成金額:20 万豪ドル(約 2,000 万円)
- CD3D PTY 社  
月や火星の地質を表面から深部まで探査可能な宇宙用超広帯域小型レーダーの実現可能性検証  
助成金額:197,487 豪ドル(約 2,000 万円)
- シドニー大学  
資源マッピングと土壌サンプリングロボットの自律化(ロボットがリアルタイムで経路と位置を調整する能力を提供)のための AI 機械学習アルゴリズム及びサンプリングツールの設計と試験  
助成金額:20 万豪ドル(約 2,000 万円)
- Australian Remote Operations for Space and Earth Ltd (AROSE)  
月面建設ローバーの FS(事業化・商業化計画の策定)  
助成金額:20 万豪ドル(約 2,000 万円)



- アデレード大学  
NF センサーモジュール<sup>34</sup>の設計と建設のためのロードマップの作成(宇宙環境での試験計画も含む)  
助成金額:198,404 豪ドル(約 2,000万円)
- entX Limited 社  
ラジオアイソトープ・ヒーター・ユニット(Radioisotope Heater Unit: RHU)の設計  
助成金額:9 万豪ドル(約900万円))

表 4-14 に Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧を示す。

表 4-14 Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧

| No. | 助成企業                                                 | プロジェクト名                                                                     | 助成金額                        |
|-----|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1   | Curtin University                                    | Binar Prospector – low altitude exploration of the Moon for accessible ISRU | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 2   | Australian Remote Operations for Space and Earth Ltd | Lunar Construction Rover Feasibility Study                                  | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 3   | The University Of Adelaide                           | Remote Sensing using Optically enabled formation flying of CubeSats         | 199,506 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 4   | University Of Western Australia                      | Australian optical communications support for NASA Artemis and beyond       | 199,634 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 5   | Australian National University                       | Laser Technology for the next GRACE Mission                                 | 106,591 豪ドル<br>(約 1,100 万円) |
| 6   | Thales Australia Limited                             | Feasibility of Event Based Vision Sensors servicing the Artemis Spacecraft  | 199,756 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 7   | Australian National University                       | Australian Deep Space Optical Communications Ground Station                 | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 8   | University Of New South Wales                        | Feasibility of a reconfigurable intelligent hyperspectral satellite mission | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 9   | Queensland University Of Technology                  | Remote Operations for Internal Logistics Handling                           | 199,500 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 10  | CD3D PTY Limited                                     | Breakthrough subsurface water-ice detection and geological mapping radars   | 197,487 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 11  | Valiant Space Pty Ltd                                | Fast Acting Space Transportation (FAST) Demonstrator Mission                | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 12  | Abyss Solutions Pty. Ltd.                            | Spaceborne robotic inspection and intervention                              | 109,690 豪ドル<br>(約 1,100 万円) |
| 13  | Sperospace Pty Ltd                                   | Multifunction Arm Robot for Space feasibility study and demonstration       | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 14  | The University Of Adelaide                           | Novel fluorescence sensing of materials for Moon to Mars ISRU               | 198,404 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 15  | University Of Sydney                                 | Drilling, Inference, and Navigation for Geological Operations (DINGO)       | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 16  | Enable Aerospace Pty. Ltd.                           | The Australian Universal Payload Solution for International Space Missions  | 174,179 豪ドル<br>(約 1,800 万円) |

<sup>34</sup> ISRU に重要な鉱物や化合物から新規蛍光(Novel Fluorescence: NF)を発見し、その特徴を明らかにするもの

| No. | 助成企業                                    | プロジェクト名                                                                    | 助成金額                        |
|-----|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 17  | entX Limited<br>(旧名:Phosenergy Limited) | Australian Radioisotope Heater Unit for Lunar Night Survival               | 90,000 豪ドル<br>(約 900 万円)    |
| 18  | Raytracer Pty Ltd                       | Optimising computing interfaces for Human to Machine lunar operations.     | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 19  | University Of Southern Queensland       | Early plant stress detection using machine vision for food safety in space | 200,000 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |
| 20  | The University Of Adelaide              | Next Generation Phased Arrays for Deep Space Network                       | 199,765 豪ドル<br>(約 2,000 万円) |

出所)各種情報に基づき三菱総合研究所作成

## b. ミッション助成金

ミッション助成金では、最終設計、製作、システム組立、統合、適格性確認、打上げ及び運用が対象となる。これまでに 11 件のプロジェクトに総額 41,474,742 豪ドル(約 41.8 億円)を助成している。1 プロジェクトあたりの助成実績は、150 万豪ドル(約 1.5 億円)～620 万豪ドル(約 6.2 億円)となっているが、経費 75%が上限となっており、助成を受ける側も経費の 25%以上を負担している。

水素・電力に関連したプロジェクトは確認されていないが、注目すべきプロジェクトとして、Advanced Navigation 社と Fleet Space Technologies 社の月面実証プロジェクトの詳細を以下にまとめる。

### ア) Advanced Navigation 社(助成金:5,272,805 豪ドル(約 5.3 億円)<sup>35</sup>

Advanced Navigation 社が開発した LUNA センサー(ナビゲーションセンサー)が、NASA の CLPS プログラムの一環として、米国 Intuitive Machines 社の Nova-C 着陸機に搭載され、2024 年 3 月に打上げられた。月面への最終降下中に同センサー実証が行われた。

LUNA センサーは、同社が開発した画期的な LiDAV(Light Detection Altimetry and Velocimetry: 光検出高度計測及び速度計測)技術で、月面に対する正確な 3 次元の速度と高度の情報を提供する。光が足りない、ほこり、カメラの故障等により視覚的情報が使用できない場合に、主要なナビゲーション情報として機能する。2025 年から 26 年にかけて Intuitive Machines 社のランダー(月面着陸機)に搭載するため、商業提供が開始される予定である。

<sup>35</sup> Advanced Navigation 社, <https://www.advancednavigation.com/news/advanced-navigation-awarded-5-2m-in-funding-from-australian-space-agency-for-future-lunar-exploration/>  
(2024 年 10 月 25 日閲覧)



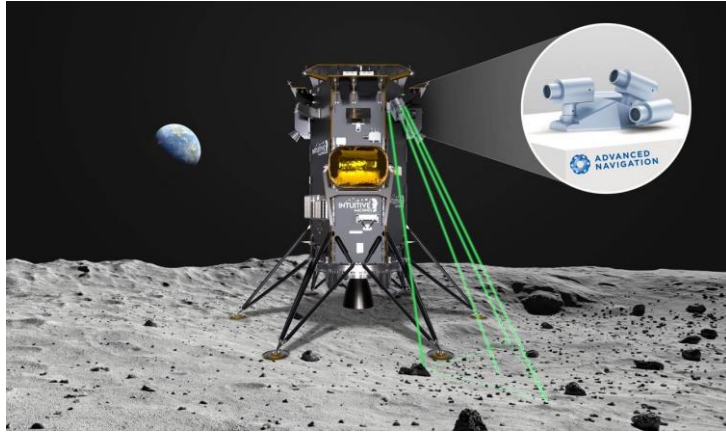


図 4-15 Intuitive Machines 社の Nova-C ランダーに搭載された LUNA センサーのイメージ図

出所) Advanced Navigation 社, <https://www.advancednavigation.com/news/advanced-navigation-awarded-5-2m-in-funding-from-australian-space-agency-for-future-lunar-exploration/> (2024 年 10 月 25 日閲覧)

#### イ) Fleet Space Technologies 社(助成金:3,916,490 豪ドル(約 3.9 億円)<sup>36</sup>

同社が開発する地震ペイロード SPIDER(Seismic Payload for Interplanetary Discovery, Exploration and Research)は、NASA の CLPS プログラムの一環で、Firefly Aerospace 社の Blue Ghost ランダー(月面着陸機)の 2 回目のミッションで 2026 年に打上げが予定されている。月の裏側(南極域)に運ばれ、14 日間連続で自然の地震波を記録し、月の地下についてより深く理解することを目指している。SPIDER はランダーに繋がれたまま活動を行い、電力・通信の機能はランダーが提供する。同社の地上技術である ExoSphere<sup>37</sup>が転用される。

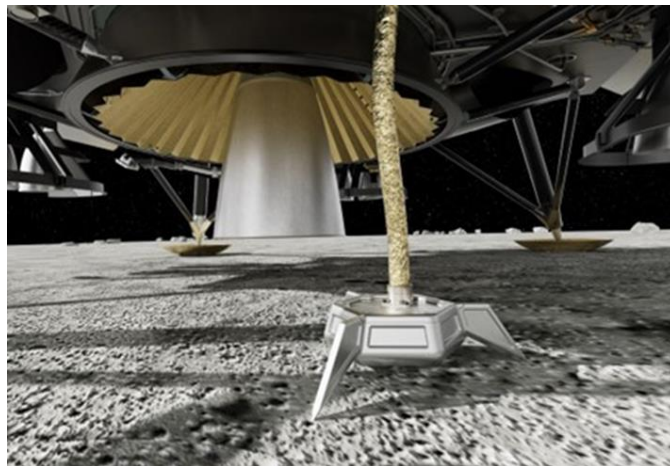


図 4-16 Blue Ghost ランダーから展開された SPIDER のイメージ図

出所) Fleet Space Technologies 社, <https://fireflyspace.com/news/firefly-announces-agreement-with-fleet-space-to-deliver-payload-to-the-moon/> (2024 年 10 月 29 日閲覧)

<sup>36</sup> Fleet Space Technologies 社, <https://www.fleetspace.com/space-exploration> (2024 年 10 月 29 日閲覧)

<sup>37</sup> 地球の自然の地震波から調査エリアの 3D 地下モデルを数日で作成することができる技術。環境への影響もほぼないとされる。

表 4-15 に Demonstrator (Mission) プログラムの助成プロジェクト一覧を示す。

表 4-15 Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧

| No. | 助成企業                             | プロジェクト名                                                                       | 助成金額                        |
|-----|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1   | Advanced Navigation Pty. Ltd.    | Project LUNA – Navigation and Guidance Technology for Lunar Exploration       | 5,272,805 豪ドル<br>(約 5.3 億円) |
| 2   | Australian National University   | Laser Technology for the next GRACE mission                                   | 6,205,670 豪ドル<br>(約 6.2 億円) |
| 3   | Australian National University   | Australian Deep Space Optical Ground Station Network                          | 4,504,007 豪ドル<br>(約 4.5 億円) |
| 4   | Enable Aerospace Pty. Ltd.       | Universal Payload Racking System Flight Qualification and Demonstration       | 2,777,423 豪ドル<br>(約 2.8 億円) |
| 5   | Fleet Space Technologies Pty Ltd | Seismic Payload for Interplanetary Discovery, Exploration and Research        | 3,916,490 豪ドル<br>(約 3.9 億円) |
| 6   | Lunaria One Pty Ltd              | Australian Lunar Experiment Promoting Horticulture (ALEPH)                    | 3,617,564 豪ドル<br>(約 3.6 億円) |
| 7   | Myriota Pty. Ltd                 | Communications Payload for Off-world Internet of Things                       | 1,506,690 豪ドル<br>(約 1.5 億円) |
| 8   | QuantX Labs Pty Ltd              | KAIROS-1: Space Clock Technology Demonstrator                                 | 3,725,160 豪ドル<br>(約 3.8 億円) |
| 9   | Raytracer Pty Ltd                | Command and Control for On-orbit Servicing, Assembly & Manufacturing Vehicles | 2,888,655 豪ドル<br>(約 2.9 億円) |
| 10  | University of Melbourne          | SpIRIT satellite operations: An Australian path to exploration beyond Earth   | 2,656,305 豪ドル<br>(約 2.7 億円) |
| 11  | University of Western Australia  | Establishing a Commercial Optical Communications Ground Station Network       | 4,403,973 豪ドル<br>(約 4.4 億円) |

出所)各種情報に基づき三菱総合研究所作成

### 3) Moon to Mars Initiative: Trailblazer プログラム<sup>38</sup>

Trailblazer プログラムは、NASA の M2M の活動を支援するオーストラリアのフラッグシップ・ミッションである。月のレゴリスを採取し、NASA の ISRU 施設に届ける基礎サービス(foundation service)を提供する月面ローバーを開発し、国際的な任務を支援するオーストラリアの能力を示し、オーストラリア国民を鼓舞することを目的としている。

基礎サービス(foundation service)とは、宇宙での持続的な存在(プレゼンス)を確立するために探査ミッションを支援するサービスで、最終的には恒久的な前哨基地(outpost)を支援することとなる。オーストラリアは月面でこの基礎サービスを担っていくことを想定している。基礎サービスの需要は、

<sup>38</sup> AROSE, <https://www.arose.org.au/>、ELO2, <https://www.elo2.au/the-mission>  
EPE, <https://www.epequip.com/>  
EPE co-led consortium chosen for Australia's first Moon mission, ADM, <https://www.australiandefence.com.au/>  
Grant Opportunity Guidelines / Moon to Mars Initiative:Trailblazer Stage 2  
(2024 年 10 月 25 日閲覧)

反復的、継続的、永続的なものとされているが、電力・通信・生命維持といったミッションクリティカルなサービスとは異なり、補完的な位置づけとなる。基礎サービスには、監視・検査、プランニングとロジスティクス、土木建築、資材輸送と貨物ハンドリング、遠隔保守、コンポーネントの製造と組み立てが挙げられる。

同プログラムの Stage1 では、2 つのコンソーシアム AROSE と ELO2 がコンセプト設計を実施した。総額 7,999,908 豪ドル(約 8.1 億円)が助成され、1 件あたりの助成金額は約 400 万豪ドル(約 4 億円)で、助成を受ける側も 100 万豪ドル(約 1 億円)の現金拠出が必要とされた。

Stage 2 には、ELO2 のみに絞りこまれ、4200 万豪ドル(約 42.3 億円)が助成されることになるが、ELO2 側も最低 1,000 万豪ドル(約 10 億円)の現金拠出が必要となる。

表 4-16 に Trailblazer (Stage1) プログラムの助成プロジェクト一覧を示す。

表 4-16 Trailblazer (Stage1) プログラムの助成プロジェクト一覧

| No. | 助成企業                                                | プロジェクト名                                       | 助成金額                      |
|-----|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|
| 1   | Australian Remote Operations for Space and Earth Lt | AROSE Lunar Foundation Services Rover         | 4,000,000 豪ドル<br>(約 4 億円) |
| 2   | Zangold Pty Ltd                                     | Foundational Australian Moon-to-Mars Services | 3,999,908 豪ドル<br>(約 4 億円) |

出所)各種情報に基づき三菱総合研究所作成

#### a. AROSE(Australian Remote Operations for Space and Earth)

AROSE(Australian Remote Operations for Space and Earth)は、産業界主導の非営利団体であり、設立にあたっては、西オーストラリア州雇用・観光・科学・イノベーション省の支援を受け、400 万豪ドル(約 4 億円)が投じられた。Trailblazer プログラムでは、ジオデータのスペシャリストである Fugro 社と国営のエンジニアリング・技術ソリューション企業である Nova Systems 社が主導し、Woodside Energy 社と Rio Tinto 社が地上ロボットと自動化技術を提供し、その他にも企業・大学が多数参加した。

AROSE にて検討された小型ローバーを図 4-17 に示す。

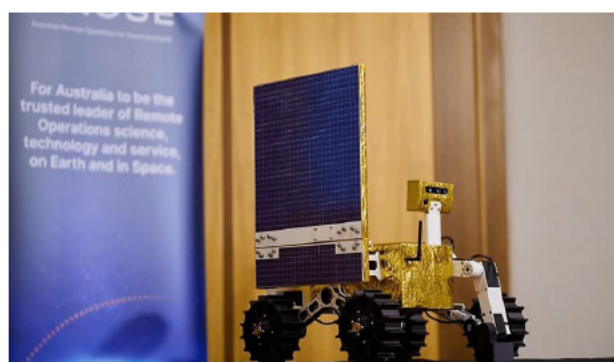


図 4-17 AROSE で検討された小型ローバー

出所)Australian Remote Operations for Space and Earth (AROSE), <https://www.rose.org.au/news/rose-lunar-rover-destined-for-the-moon/> (2024 年 10 月 29 日閲覧)

## b. ELO2(EPE & Lunar Outpost Oceania Consortium)

EPE と Lunar Outpost Oceania が共同で主導するコンソーシアムである。EPE は、ロボット工学、自律システム、システム統合を専門とするメルボルン拠点の企業である。Lunar Outpost Oceania は、米国拠点の商業用惑星モビリティ開発企業である Lunar Outpost 社の完全子会社である。コンソーシアム・パートナーとして、BHP、ノースロップ・グラマン・オーストラリア、RMIT 大学の宇宙産業ハブ、メルボルン大学の宇宙研究所が参加し、その他にも多数の大学・組織が協力している。

ELO2 で検討された小型ローバーを図 4-18 に示す。

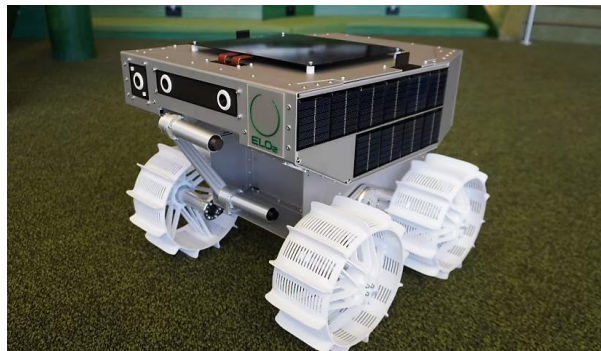


図 4-18 ELO2 で検討された小型ローバー

出所)Business News Australia, <https://www.businessnewsaustralia.com/articles/australia-s-first-moon-rover-prototype-revealed.html> (2024 年 10 月 29 日閲覧)

## (4) ロードマップ

2022 年にオーストラリア宇宙庁が発行した Robotics and Automation on Earth and in Space Roadmap 2021-2030<sup>39</sup>に掲載されているオーストラリアの ISRU 及び基礎サービスのロードマップを図 4-19 に示す。ISRU も基礎サービスも 2026 年から月面活動が本格化し、2030 年以降に月面に施設等が整備される計画となっている。

---

<sup>39</sup> <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2024-02/robotics-and-automation-on-earth-and-in-space-roadmap-2021-2030.pdf>



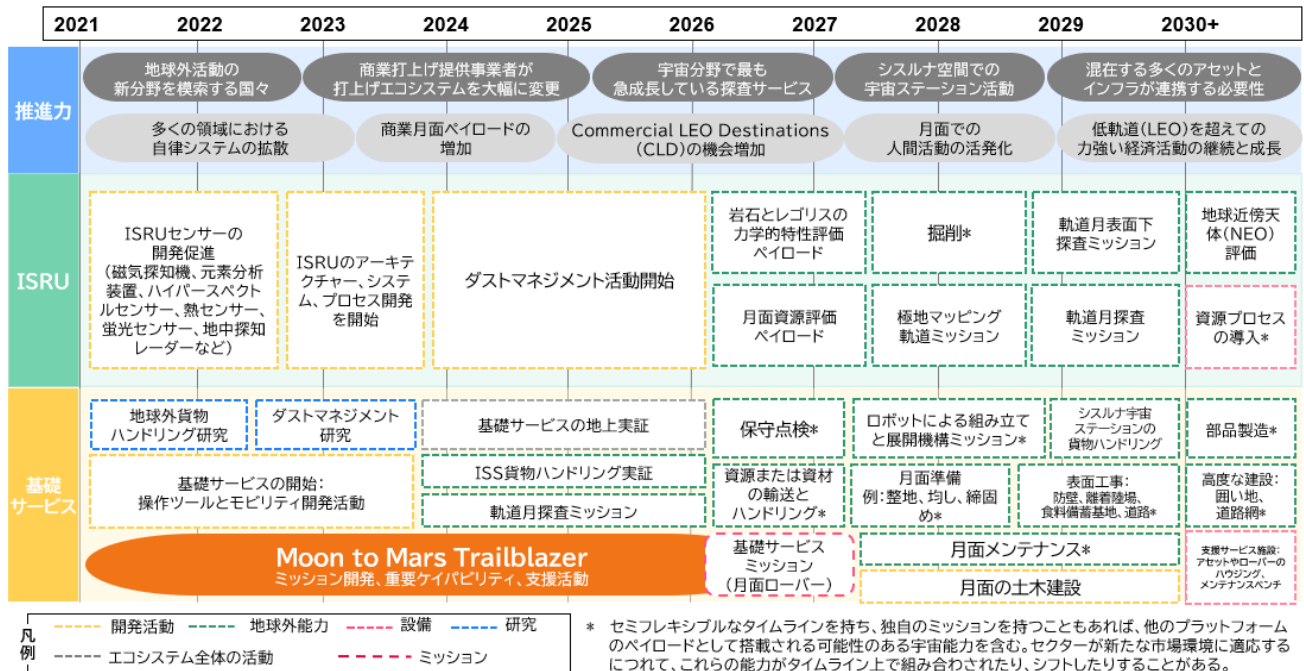


図 4-19 オーストラリアの ISRU 及び基礎サービスのロードマップ

出所)Robotics and Automation on Earth and in Space Roadmap 2021-2030 に基づき三菱総合研究所作成

## 4.2 国内動向調査

### 4.2.1 地上技術の転用可能性

本項では、日本の民間企業が強みを保有する地上技術のうち、月面に適用できる可能性がある技術領域を明らかにし、転用に向けた開発・検討の状況と転用に向けた課題を整理する。

#### (1) 調査対象となる技術領域

地上技術の転用可能性の調査対象となる技術領域について、電力技術の対象領域を表 4-17 に、水素技術の対象領域を表 4-18 に示す。それぞれの対象領域は、月面での構築を検討しているシステムと同様の技術領域としている。

表 4-17 電力技術の調査対象領域

| 大項目 | 小項目            | システム             | 主な構成要素                   |
|-----|----------------|------------------|--------------------------|
| 送電  | 月周辺軌道<br>太陽光発電 | 衛星発電システム         | 太陽光発電パネル                 |
|     |                | 衛星バスシステム         | 衛星バスシステム                 |
|     |                | 送受電システム          | 衛星送電システム<br>受電システム(レクテナ) |
| 発電  | 月面設置発電         | 月面設置太陽光発電システム    | 太陽電池                     |
|     |                | 月面設置原子力発電システム    | 原子炉                      |
| 送電  | 無線送電           | マイクロ波送受電システム     | 送電アンテナ<br>受電アンテナ         |
|     |                | レーザー送受電システム      | 送電アンテナ<br>受電アンテナ         |
|     |                | 送電線              | 光ファイバ<br>導体              |
|     | 有線送電           | 高圧交流送電(HVAC)システム | 高圧交流送電(HVAC)             |
|     |                | 高圧直流送電(HVDC)システム | 高圧直流送電(HVDC)             |
| 蓄電  | 月面蓄電システム       | 月面蓄電システム         | リチウムイオン電池<br>燃料電池        |
| その他 | 共通システム         | 電力変換             | コンバータ<br>インバータ           |

出所)三菱総合研究所作成



表 4-18 水素技術の調査対象領域

| 大項目    | システム    | 主な構成要素                       |
|--------|---------|------------------------------|
| 掘削・水抽出 | 熱抽出     | ドリルユニット                      |
|        |         | 水採取ユニット                      |
|        | 掘削～水電解  | 掘削機構                         |
|        |         | ヘリオスタット<br>加熱ドーム<br>コールドトラップ |
| 純水処理   | 前処理システム | 前処理・ろ過ユニット<br>揮発性物質除去ユニット    |
|        | 純水システム  | 脱イオン純水処理ユニット                 |
|        |         | 純水貯留タンク                      |
| 水電解    | 水電解システム | 水電気分解装置                      |
| 高圧化    | 高圧化システム | 高圧化ユニット                      |
| 液化     | 水素液化    | 水素液化ユニット                     |
|        | 酸素液化    | 酸素液化ユニット                     |
| 貯蔵     | 貯蔵システム  | 水素貯蔵タンク                      |
|        |         | 酸素貯蔵タンク                      |
| 輸送     | 輸送車     | 無人・電気走行車(AGV)                |
| その他    | 制御システム  | プラント制御コントローラ                 |
|        |         | 遠隔通信操作管理システム                 |
|        | 共通システム  | 放熱ユニット<br>電気回路ユニット<br>筐体ユニット |

出所)三菱総合研究所作成

## (2) 転用可能性の評価方法

日本の民間企業が強みを持ち、かつ月への転用可能性がある技術領域を見極めるため、以下のステップで対象を選定する方針とした。

- 第1ステップ:地上製品で日本に強みがあるかの評価の視点
  - 宇宙船用ではなく、地上で製品化されている
  - 国内外のマーケットで販売されている
- 第2ステップ:月面環境への適用可能性があるかの評価の視点
  - 打上げ条件(振動、加重等)への耐性を持たせることが可能である
  - 月面環境(温度、放射線、1/6G 等)への耐性を持たせることが可能である

## (3) 転用可能性の評価結果

前述の評価方法に従って評価を行った結果を表 4-19、表 4-20 に示す。青枠で囲まれた領域は、第1ステップの地上製品で日本に強みがある技術領域を示しており、そのうち、赤く塗りつぶされた領域は月面環境への転用可能性が有望と想定される技術領域を示している。電力領域では太陽電池、直流送電、リチウムイオン電池、燃料電池、インバータ、コンバータに転用の可能性があり、水素領域では純水処理、水電解、高圧化、水素液化、輸送車、遠隔通信制御技術に転用の可能性があるとの結果となった。

表 4-19 電力領域の評価結果

| 大項目 | 小項目            | システム          | 主な構成要素                   |
|-----|----------------|---------------|--------------------------|
| 発送電 | 月周辺軌道<br>太陽光発電 | 衛星発電システム      | 太陽電池                     |
|     |                |               | 衛星バスシステム                 |
|     |                | 送受電システム       | 衛星送電システム<br>受電システム(レクテナ) |
| 発電  | 月面設置発電         | 月面設置太陽光発電システム | 太陽電池                     |
|     |                | 月面設置原子力発電システム | 原子炉                      |
| 送電  | 無線送電           | マイクロ波送受電システム  | 送電アンテナ<br>受電アンテナ         |
|     |                | レーザー送受電システム   | 送電アンテナ<br>受電アンテナ         |
|     |                | 送電線           | 光ファイバ<br>導体              |
|     | 有線送電           | 交流送電システム      | 交流送電                     |
|     |                | 直流送電システム      | 直流送電                     |
| 蓄電  | 月面蓄電システム       | 月面蓄電システム      | リチウムイオン電池<br>燃料電池        |
| その他 | 共通システム         | 電力変換          | コンバータ<br>インバータ           |

出所)三菱総合研究所作成

表 4-20 水素領域の評価結果

| 大項目    | システム    | 主な構成要素                       |
|--------|---------|------------------------------|
| 掘削・水抽出 | 熱抽出     | ドリルユニット                      |
|        |         | 水採取ユニット                      |
|        | 掘削～水電解  | 掘削機構                         |
|        |         | ヘリオスタット                      |
|        |         | 加熱ドーム<br>コールドトラップ            |
| 純水処理   | 前処理システム | 前処理・ろ過ユニット<br>揮発性物質除去ユニット    |
|        | 純水システム  | 脱イオン純水処理ユニット<br>純水貯留タンク      |
| 水電解    | 水電解システム | 水電気分解装置                      |
| 高圧化    | 高圧化システム | 高圧化ユニット                      |
| 液化     | 水素液化    | 水素液化ユニット                     |
|        | 酸素液化    | 酸素液化ユニット                     |
| 貯蔵     | 貯蔵システム  | 水素貯蔵タンク                      |
|        |         | 酸素貯蔵タンク                      |
| 輸送     | 輸送車     | 無人・電気走行車(AGV)                |
| その他    | 制御システム  | プラント制御コントローラ<br>遠隔通信操作管理システム |
|        |         | 放熱ユニット                       |
|        | 共通システム  | 電気回路ユニット<br>筐体ユニット           |

|  |                              |
|--|------------------------------|
|  | 地上製品で日本に強みがある技術領域            |
|  | 月面環境への転用可能性が有望と<br>想定される技術領域 |

出所)三菱総合研究所作成

#### (4) 転用可能性が高い技術領域の転用に向けた検討・開発状況の整理

月面への転用可能性が高い技術領域のうち、実際に転用に向けた検討が行われているかどうかの状況を整理する。各技術の転用に向けて状況は以下の3グループに分類する方針とした。

1. 月面転用に向けた開発予算を獲得している
2. 月面への転用に向けた机上検討が進んでいる
3. 月面への転用がまだ検討されていない

分類の結果を表 4-21 に示す。分類の結果、月面への転用が未検討ではあるものの、今後転用が進むポテンシャルを持つ可能性がある領域として直流高圧送電(HVDC)とコンバータ・インバータがあることが判明した。

表 4-21 転用に向けた検討・開発状況の整理

| 技術領域              | ①月面への転用に向けた開発の予算の獲得状況        | ②月面への転用に向けた机上検討状況               | ③月面への転用がまだ検討されていない |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 太陽電池              | (JAXA SLIM:シャープ)*            | —                               | —                  |
| 直流送電(高圧直流送電 HVDC) | なし                           | なし                              | 国際的な競争力を持つ日本企業あり   |
| リチウムイオン電池         | (JAXA SLIM:古河電池)*            | —                               | —                  |
| 燃料電池              | JAXA有人圧ローバー:トヨタ<br>宇宙戦略基金テーマ | JAXA共同研究:ホンダ                    | —                  |
| コンバータ・インバータ       | なし                           | なし                              | 国際的な競争力を持つ日本企業あり   |
| 水処理               | なし                           | 本事業:栗田工業                        | —                  |
| 水電解               | 経産省スターダスト:高砂熱学工業             | JAXA共同研究:ホンダ                    | —                  |
| 高圧化               | なし                           | 本事業:日揮グローバル                     | —                  |
| 水素液化              | なし                           | 本事業:日揮グローバル                     | —                  |
| 輸送車(AGV)          | なし                           | 本事業:MHI                         | —                  |
| プラント遠隔制御          | なし                           | 本事業:横河電機<br>共同開発契約:横河電機・日揮グローバル | —                  |

出所)三菱総合研究所作成

#### (5) 月面転用が検討されていない地上技術の概要と転用に向けた課題の整理

ここでは、前述のように月面転用のポテンシャルがあると判定された直流高圧送電(HVDC)とコンバータ・インバータについて概要と転用に向けた課題の整理を行う。

## 1) 直流高圧送電(HVDC)

### 地上での活用方法

HVDC は、従来の交流送電に比べて、一定の距離以上で送電ロスが少ない特徴を持つ<sup>40</sup>。この特性を生かし、HVDC は海底ケーブルや山岳地帯など地形的に困難なルートでの長距離送電においてその優位性が特に発揮される。また、HVDC は発電場所が都市から離れた遠隔地に設置される再生可能エネルギー発電所からの電力を、効率的かつ経済的に送電する手段としても注目されている。

### 日本企業の強み

日本の企業は、HVDC 技術において国際的にも高い評価を受ける実績を有している<sup>41</sup>。例えば、日立エナジー、三菱電機、東芝など、世界市場で実績を重ねる企業が HVDC 技術の開発・供給に取り組んでいる。その中でも日立エナジーは、世界最大級の洋上風力発電所であるドッガーバンクウィンドファームから英国本土への約 130km の HVDC 送電プロジェクトにおいて採択されている実績を持つ<sup>42</sup>。

### 宇宙・月への転用可能性と課題

地上で実績を積んだ HVDC 技術は、宇宙や月面への転用の可能性がある一方で、実現にはいくつかの技術的課題が存在する。現状、国際宇宙ステーションでは約 120V の直流送電が用いられており、1000V を超える高圧直流送電の運用実績はない。また真空空間で高電圧を利用する場合、低圧でも放電現象が生じやすい。したがって、月面で有線送電を実現する際には、放電防止技術の革新が必要となる。また、他にも導体ケーブルの輸送コスト低減や、極端な温度変化および高レベルの放射線に耐える設計の開発が求められる。

## 2) コンバータ・インバータ

### 地上での活用方法

インバータは DC(直流)を AC(交流)に変換する機器である。例えば、再生可能エネルギーで発電された電力の DC/AC 変換や、電気自動車(EV)のバッテリーから出力される DC を AC に変換する用途で広く使用されている。また、コンバータは電力の AC/DC 変換や電圧変換に用いられる。例えば、家庭用コンセントから供給される AC を、家庭用電気機器が使用する際の DC に変換する際に活用される。

---

<sup>40</sup> NEDO, 直流送電の基本事項,

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/chokuyori\\_kaitei/pdf/001\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokuyori_kaitei/pdf/001_05_00.pdf)

<sup>41</sup> Fortune Business Insights, HVDC Transmission System Market Size, Share & Industry Analysis, <https://www.fortunebusinessinsights.com/hvdc-transmission-system-market-107544>

<sup>42</sup> 日立エナジー, 日立エナジーが HVDC 変換所を提供した世界最大のドッガーバンク洋上風力発電所が初送電を達成, <https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2023/10/1011d.html>

## 日本企業の強み

パナソニックの EVERVOLT<sup>®</sup>ハイブリッドインバータは、インバータとバッテリーを組み合わせたシステムであり、最大 98.6%の変換効率を達成している<sup>43</sup>。この技術により、ソーラーパネルから得られる電力を家庭用電力として安定的に供給することが可能となっている。

また、デンソーは、2018 年の車載インバータ世界市場において 32%のシェアを占め、最大シェアを持つ<sup>44</sup>。特に、SiC(シリコンカーバイド)半導体を活用した技術は電力損失を大幅に削減し、EV の走行距離延長に大きく貢献している。

## 宇宙・月面への転用可能性と課題

人工衛星や宇宙ステーションでは、電力変換装置としてインバータ・コンバータが活用されている。特に、太陽光発電によって得られる電力を適切に変換し、各種システムへ供給する用途で不可欠な技術となっている。月面では、太陽光発電設備や蓄電池から電力を取り出す際の変電や、居住施設・推薬プラントなどの施設への給電時の電圧調整にインバータ・コンバータが必要となる。将来的な月面電力グリッドの構築においても、これらの技術は重要な役割を果たすと考えられる。

しかし、月面環境に適用するためには、いくつかの技術的課題を克服する必要がある。まず、温度耐性の強化が求められる。極端な温度変動に対し、機器の動作安定性を確保するための耐熱・耐寒設計が不可欠である。次に、放射線耐性の向上が必要となる。高エネルギー粒子による劣化を防ぐため、半導体素子や回路の耐放射線性を高める設計と材料選定が求められる。また、ダスト耐性の確保も重要である。レゴリスの侵入による電気接点の劣化や機器の動作不良を防ぐため、適切な密閉構造や防塵技術の導入が不可欠である。これらの課題を解決することで、インバータ・コンバータの月面適用が現実的なものとなる。

## (6) 米国の月面有線送電に関する動向調査

前項では、日本が強みを持ち、月面への転用可能性がある地上の技術領域のうち、高圧直流送電とコンバータ・インバータがあることと、転用に向けて課題があることを述べた。ここでは、関連する動向として、米国の月面の有線送電に関する取り組みの調査結果を述べる。

### 1) 有線送電の技術的な課題

月面における有線送電システムの高電圧化には、技術的な利点とともにいくつかの重要な制約が存在する。その中でも、パッシェンの法則による影響は無視できない。パッシェンの法則は、2 つの電極間で放電(絶縁破壊)が発生する際の絶縁破壊電圧が電極間距離と気体圧力の積の関数で表せることを

---

<sup>43</sup> Panasonic EVERVOLT<sup>®</sup> Hybrid Inverter, <https://solar.na.panasonic.com/inverters/evervolt-hybrid-inverter> (2024/10/20 最終閲覧)

<sup>44</sup> デンソー DRIVEN BASE 世界シェア No/1 を誇る、デンソーの「インバーター」開発 [https://www.denso.com/jp/ja/driven-base/tech-design/techlinks\\_electrification\\_2/](https://www.denso.com/jp/ja/driven-base/tech-design/techlinks_electrification_2/) (2024/10/20 最終閲覧)

示す法則である(図 4-20 参照)<sup>45</sup>。月面のような超低圧環境では、絶縁破壊電圧の最小点近くに該当する可能性があり、電極間での放電リスクが高まる。そのため、高電圧送電システムでは、この放電を抑制するための高度な絶縁技術が求められる。

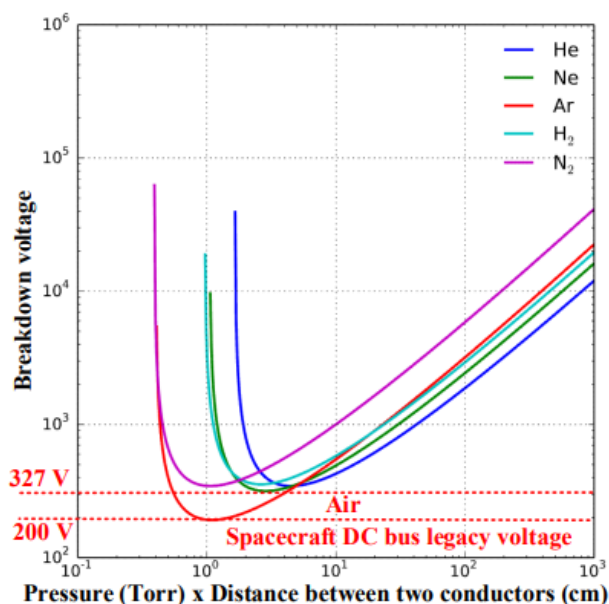


図 4-20 パッシェンの法則

出所) Lunar Surface Microgrid: MW-Scale High-Voltage Systems, Omid Beik, Colorado School of Mines, [https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik\\_LSIC%20Telecom\\_Oct-24-2024.pptx](https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik_LSIC%20Telecom_Oct-24-2024.pptx) (2024 年 1 月 22 日閲覧)

さらに、SEE(Single Event Effect)効果による影響も重要な技術的課題の一つである。宇宙空間では、宇宙線や高エネルギー粒子が電子機器に直接作用し、半導体デバイスに誤作動や損傷を引き起こす。この影響は、特に高電圧化デバイスのトランジスタに顕著であり、高電圧を扱う電力変換装置やスイッチングデバイスの信頼性を低下させる要因となる。これにより、長期間の安定運用が求められる月面の電力グリッドでは、耐放射線性を持つ電力変換技術の開発が不可欠となる。

こうした課題に対処するため、NASA は 600V まで対応可能な耐放射線 GaN(窒化ガリウム)変電デバイスを開発した<sup>46</sup>。このデバイスは、従来のシリコンデバイスと比較して高耐圧性を持ち、月面環境での高電圧送電を可能にする。しかし、さらなる高電圧化を進めるためには、耐放射線性能の向上に加え、絶縁技術の革新が不可欠である。特に、絶縁破壊のリスクを低減するための新しい材料開発や、放電を抑制する高度な電場制御技術の導入が求められる。

<sup>45</sup> Lunar Surface Microgrid: MW-Scale High-Voltage Systems, Omid Beik, Colorado School of Mines, [https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik\\_LSIC%20Telecom\\_Oct-24-2024.pptx](https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik_LSIC%20Telecom_Oct-24-2024.pptx) (2024 年 1 月 22 日閲覧)

<sup>46</sup> Barth, Christopher, and David Pike. "Lunar power transmission for fission surface power." Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2022) (2022).



## 2) NASA Glenn Research Center での検討<sup>4748</sup>

NASA Glenn Research Center では、月面における有線送電グリッドの構築に向けた技術的検討を進めている。これは、将来的な月面基地の電力供給を安定化し、持続可能なインフラを確立するためのものである。具体的には、FSP(Fission Surface Power, 40kW)で発電した電力を、居住施設や ISRU 施設に送電する電力グリッドの設計・評価を行っている。

検討では、以下の電源と負荷を想定している。

- 発電電力
  - FSP(原子力発電):40kW
  - 居住施設の太陽光発電:20kW
  - ISRU 施設の太陽光発電:80kW
- 必要電力
  - 居住施設:20kW
  - ISRU 施設:68kW

この検討では Electrical Power System—Sizing and Analysis Tool(EPS-SAT)<sup>49</sup>を用いて、月面の送電システムのモデル化と評価を行っている。送電方式としては、DC と AC(600V～6kV)の電圧レベル、および AC の場合は 60Hz～1kHz の周波数を変化させ、送電ケーブルとコンバータの総質量を算出している。

本研究の評価結果を図 4-21 に示す。横軸は送電電圧で、縦軸がグリッドの総重量である。本結果から、3kV までの高電圧化を行うことで、送電システム全体の軽量化が期待できる一方で、DC 送電に関しては高電圧化の技術的制約が大きく、実用上の限界は 1.2～1.5kV とされた。特に、高耐放射線スイッチ(rad-hard switch)の電圧制約により、それ以上の電圧で運用する場合、複数のコンバータを直列接続する必要があり、実現可能性に課題があるとされた。一方で、AC 送電は変圧器を用いた電圧変換が容易であるため、送電網としてより適していると判断された。最終的に、本研究では送電方式として 3kV AC(1000Hz)が最適であると結論付けられている。

---

<sup>47</sup> NASA Glenn Research Center, NASA Lunar Operations & Power Grid, [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002896/downloads/Csank\\_CP\\_20230002896\\_CUREN\\_T\\_Knoxville\\_TN\\_2023\\_04\\_18.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002896/downloads/Csank_CP_20230002896_CUREN_T_Knoxville_TN_2023_04_18.pdf), (2024 年 1 月 22 日閲覧)

<sup>48</sup> NASA Glenn Research Center, Creating a Lunar Surface Power Grid, [https://spw.aerospace.org/files/2024/07/2\\_AC\\_J.-Csank\\_Presentation.pdf](https://spw.aerospace.org/files/2024/07/2_AC_J.-Csank_Presentation.pdf), (2024 年 1 月 22 日閲覧)

<sup>49</sup> Electrical Power System - Sizing and Analysis Tool (EPS-SAT), Electrical Power System - Sizing and Analysis Tool (EPS-SAT)(LEW-20017-1) | NASA Software Catalog

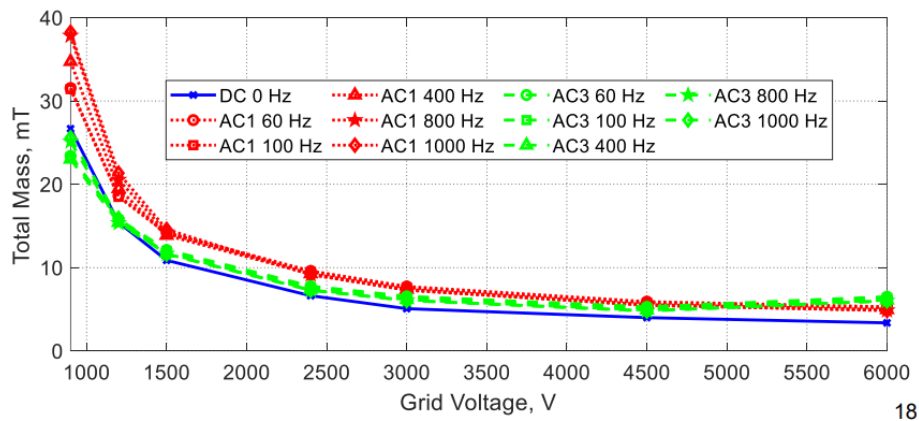


図 4-21 電圧と電力グリッド重量の関係に関する評価結果

出所)NASA Glenn Research Center, NASA Lunar Operations & Power Grid,  
[https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002896/downloads/Csank\\_CP\\_20230002896\\_CURRENT\\_Knoxville\\_TN\\_2023\\_04\\_18.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002896/downloads/Csank_CP_20230002896_CURRENT_Knoxville_TN_2023_04_18.pdf), (2024 年 1 月 22 日閲覧)

また、NASA Glenn Research Center では、月面電力グリッドにおける柔軟性と拡張性を確保するため、Universal Modular Interface Converter(UMIC)の開発を進めている。UMIC は、発電側と需要側のすべての機器を共通のインターフェースでグリッドに接続することを可能にし、グリッド側と機器側を分離した構成を採用することで、長期的な電力インフラの適応性を向上させる。UMIC を含むグリッドの構成図を図 4-22 に示す。

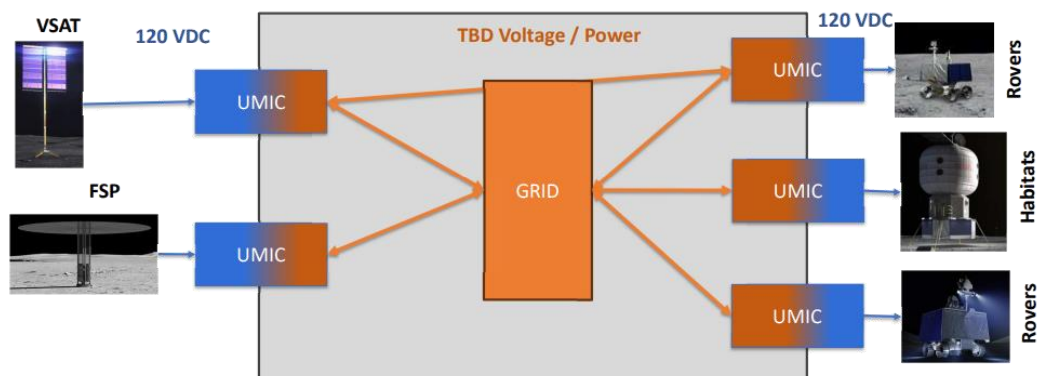


図 4-22 UMIC を含む電力グリッドの構成

出所)NASA Glenn Research Center, Creating a Lunar Surface Power Grid,  
[https://spw.aerospace.org/files/2024/07/2\\_AC\\_J.-Csank\\_Presentation.pdf](https://spw.aerospace.org/files/2024/07/2_AC_J.-Csank_Presentation.pdf), (2024 年 1 月 22 日閲覧)

本システムにおける送電方式は、高効率な長距離送電を実現するためにグリッド側は 3,000V AC (1000Hz)を採用し、機器側は標準化が進み、技術的に成熟している 120V DC を採用している。この設計により、異なる電圧規格を持つ機器を統一的にグリッドへ接続できるため、システムの運用効率と互換性が向上することを狙っている。

UMIC のブレッドボード検証においては、電力密度は 350W/kg、変電効率は 95%、最大提供電力は 12kW に達している。さらに、UMIC はモジュール構造を採用しており、複数のモジュールを並列接続することで、より大きな電力需要にも対応可能となるとしている。

### 3) Astrobotic の計画<sup>50</sup>

Astrobotic 社は、月面における有線送電技術の確立を目指し、ランダーで発電した電力をローバーに交流送電する実証ミッション LUNAGRID を計画している。本ミッションの主な目的は、DC/AC コンバータの動作検証および高電圧交流送電技術の実証である。

LUNAGRID の小型版の実証ミッションである LunaGrid-Lite の送電システムの構成を図 4-23 に示す。ランダー上に設置された太陽光発電システムで 1kW の電力を生成し、DC/AC 変換を経て 1kV の交流電力としてローバーへ供給する計画である。送電には 500m のケーブルを使用し、長距離にわたる有線送電の実証を行うことを目指している。

#### SYSTEM ARCHITECTURE OVERVIEW

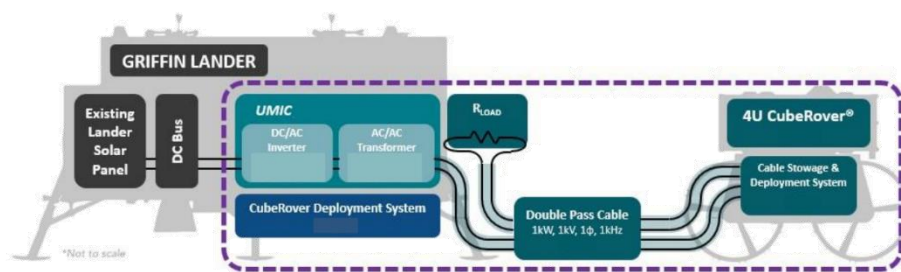


図 4-23 LunaGrid-Lite の送電システム図

出所) Astrobotic, LUNAGRID-LITE, <https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2531-2024-06-27%20-%20LunaGrid-Lite%20Overview%20LSIC%20Presentation%20-%20TO%20LSIC.pdf> (2024 年 1 月 22 日閲覧)

### 4) コロラド鉱山大学の研究<sup>51</sup>

コロラド鉱山大学の Omid Beik 博士 は、原子力発電による MW 級の発電を想定したマイクログリッドの設計に関する研究をしている。マイクログリッドの構成案を図 4-24 に示す。本研究では電力グリッドの送電方法として、3kV での高圧直流送電が想定されているが、月面環境での 3kV での実現可能性に関する言及はなされていなかった。

<sup>50</sup> Astrobotic, LUNAGRID-LITE, <https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2531-2024-06-27%20-%20LunaGrid-Lite%20Overview%20LSIC%20Presentation%20-%20TO%20LSIC.pdf> (2024 年 1 月 22 日閲覧)

<sup>51</sup> Lunar Surface Microgrid: MW-Scale High-Voltage Systems, Omid Beik, Colorado School of Mines, [https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik\\_LSIC%20Telecom\\_Oct-24-2024.pptx](https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik_LSIC%20Telecom_Oct-24-2024.pptx)

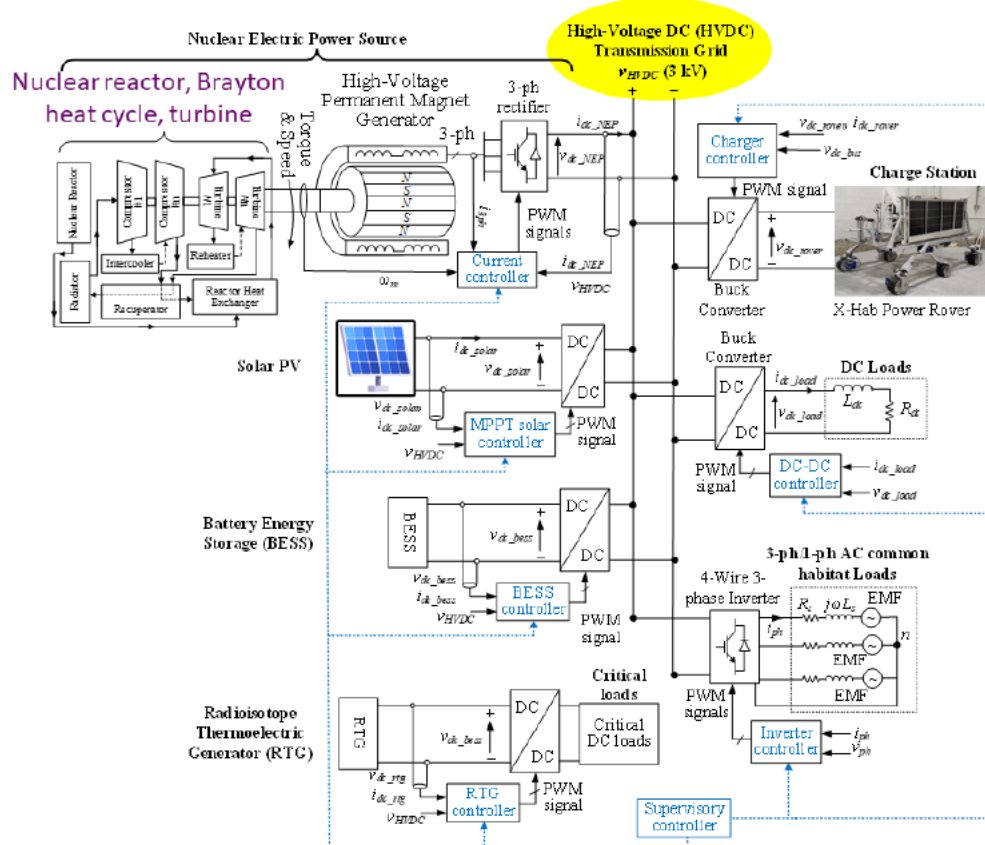


図 4-24 MW 級の発電を想定したマイクログリッド構成案

出所) Lunar Surface Microgrid: MW-Scale High-Voltage Systems, Omid Beik, Colorado School of Mines, [https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik.LSIC%20Telecom\\_Oct-24-2024.pptx](https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/2686-Omid%20Beik.LSIC%20Telecom_Oct-24-2024.pptx)

#### 4.2.2 国内企業ヒアリング

令和 6 年度の検討において新たに検討が必要になった施設や構成要素、あるいは関連する技術を保有する企業に対してヒアリング調査を実施し、同企業が保有する要素技術、現在の研究開発の現状、今後の計画等について情報収集を行った。表 4-22 に国内企業ヒアリングの実施状況を示す。

表 4-22 国内企業ヒアリング

| 企業名   | ヒアリング実施日時          |
|-------|--------------------|
| レゾナック | 2024 年 11 月 5 日(火) |

### 4.3 特定テーマに関する調査

ここでは、特定テーマの調査として、月面上での電力確保の手段として電力パートで検討した宇宙太陽光発電システムや無線エネルギー伝送(WPT)に関する調査結果を述べる。

#### 4.3.1 宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査

##### (1) 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査

米国、欧州、中国、その他を対象地域として、近年の宇宙太陽光発電システム(SSPS:Space Solar Power Systems)の実現に向けて主に政府機関が行っている研究開発およびFS(Feasibility Study)について調査を行った。ここでは今年度の動向を中心にまとめているが、過去の動向も含めた詳細版を付録としてまとめている。

以下では諸外国における近年の SSPS の実現に向けた研究開発動向について国ごとに整理する。

なお、宇宙太陽光発電システムの呼称については、研究実施機関ごとにシステムの呼称が異なっているものの、ここ数年は欧米の多くの機関で SBSP(Space-Based Solar Power)の略称が用いられてきている。本報告書では、実施機関ごとに通常用いられている略称を使用することとするが、特に定まっていない一般的な宇宙太陽光発電システムを指す場合は SSPS (Space Solar Power Systems)という略称を用いることとする。

##### 1) 米国

米国では、現在の SBSP 研究開発の主流は米空軍研究所(AFRL:U.S. Air Force Research Laboratory)と米海軍研究所(NRL:U.S. Naval Research Laboratory)であり、それぞれ要素技術の軌道上実証を進めている。NRL は 2019~2020 年にかけて地上、ISS 内、X-37B による軌道上で関連実験を行っている。(X-37B は 2022 年 11 月に帰還)また AFRL は 2025 年に「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験を計画しており、1 億ドル以上の予算を確保し開発を進めている。なお米国はこれとは別にカリフォルニア工科大学(Caltech)が 1 億ドル以上の寄付を得て Space Solar Power Initiative(SSPI)と呼ばれるプロジェクトを開始しており、軌道上実証機 SSPD(Space-based Solar Power Demonstrator)を 2023 年 1 月に打上げ、主要な重要要素技術の軌道上試験に成功している。AFRL および Caltech とともに Northrop Grumman 社が共同で開発を行っている。さらに、2022 年からは NASA の技術・政策・戦略室(OTPS)による SSPS に関する再評価が実施され、2024 年 1 月に報告書が公開されている。

2024 年の新しい動きとしては、宇宙フロンティア財団(SFF:Space Frontier Foundation)<sup>52</sup>による SBSP 商業化促進に関する活動が挙げられる。SFF では、米国における SBSP の商業化を促進し、持続可能な技術として確立することを目指して、ステークホルダーの教育と連携構築、議会との連

---

<sup>52</sup> SFF は 1988 年に設立された非営利組織であり、宇宙を人類の定住地として開拓することを使命とした活動を行っている。宇宙活動家、科学者、エンジニア、メディアや政治の専門家、起業家および一般市民など、多様なメンバーで構成されている。

携、情報のハブとしての役割等に関する活動を継続的に行っており<sup>53</sup>、2024 年 5 月には、ワシントン D.C.で Special Competitive Studies Project と共同で開催した「AI Expo for National Competitiveness」において、SBSP に関するワークショップを実施した。ワークショップでは、防衛、ハイテク、ベンチャーキャピタル、人道支援といった幅広い業界の代表者が参加し、それぞれの分野でこの技術をどのように開発・利用できるかを議論した。議論の中では、データセンターや人道支援、国防分野など多様な業界で SBSP の活用が期待されていることが示されるとともに、国際協力の必要性が指摘され、OPEC のような SBSP 管理組織の設立が提案された。また技術競争を促進するため、米国内で複数の開発拠点を形成するべきとの意見もあった。さらに投資家は規制整備や短期目標の設定が資金調達を加速させると考えていることも示された<sup>54</sup>。

## 2) 欧州

欧州では、ESA が欧州の温室効果ガス排出 Net Zero とエネルギー自給を達成することを目的に、2022 年 12 月、SOLARIS と呼ばれる欧州向け SBSP 準備プログラムを正式に開始した。SOLARIS は SBSP に関連する技術的な問題を解決するための 3 年間の研究であり、欧州産業界の協力の下、技術的妥当性、メリット、導入オプション、商用利用の可能性、新興技術としてのリスク評価を行うとしている。またスタディ結果は 2025 年の次の閣僚会議において本格的な SBSP 開発の推進を決定するための検討材料とされる予定となっている。欧州における SBSP 導入の最終的な目標は、欧州が 2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成することの支援であるとし、2040 年に商用スケールの実用プラントを構築することを目標にロードマップを描いている。他のエネルギー源との関係については、SBSP は再生可能エネルギーでありながらベースロード電力となるという特性を有しているため、地上太陽光や風力などの断続的な供給源と競合するものではないとし、SBSP は今後数十年の間に、欧州のエネルギー部門の脱炭素化に大きく貢献することができるものであることを示している。またプログラムの遂行に当たっては、ESA はエネルギー分野の主要なステークホルダーと積極的に係ることを重視している。ESA ではまた、SBSP 開発において達成されるブレークスルー技術の進歩は非常に貴重であり、他の多くの宇宙活動の取り組みに適用できることも主張している。

## 3) 英国

英国では、2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero を達成することを目標としており、クリーンで安価、安全で信頼性の高いエネルギー源としての SBSP の可能性について注目を始め、2020 年よりUKSAおよび BEIS による本格的な実現可能性についてのスタディを開始した。スタディの結果、SBSP は技術的に実現可能であり温室効果ガス排出 Net Zero を実現する新しい選択肢の一つとなり得ることが分かり、英国政府の優先順位に沿った開発であること、先進的なコンセプトではコスト的にも競争力があり、英国に広範な経済的利益をもたらすものであることが示されている。また、これらの検討結果を受けて、BEIS は 2020 年 7 月には最大 600 万ポンド相当の助成金コンペティションである「Space Based Solar Power Innovation Competition」をスタートさせている。本コンペティ

---

<sup>53</sup> <https://spacefrontier.org/space-based-solar-power/> (2025 年 2 月 3 日閲覧)

<sup>54</sup> <https://www.powermag.com/space-based-solar-power-for-u-s-energy-independence/> (2025 年 2 月 3 日閲覧)



ションで選定されたプロジェクト “CASSIOPeiA design iteration (CASSiDI)” を進めている Space Solar 社は、2024 年 4 月以降、HARRIER(Horizontal Array for Receiving RadioEnergy Retrodirectively)と呼ばれる CASSIOPeiA アーキテクチャに基づく SBSP の基本モジュールのプロトタイプを用いた無線電力伝送実験を行っている。同社はさらに 2024 年 10 月には、アイスランドの Reykjavik Energy 社に SBSP から電力供給することで合意しており、2030 年までに初期容量 30MW で供給し、2036 年までに大規模なシステムにスケールアップする計画となっている。なお Space Solar 社については 4.3.1 (2)2d 項で詳述している。

さらに英国は SBSP への共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について協議も始めている。英国では 2040 年までに運用可能な GW 級の SBSP を設立することを目指す、としており、現在は ESA の SOLARIS プログラムへの参加を並行して進めながら、SBSP の開発への取組みを行う形となっている。

なお、英国では宇宙とエネルギー部門間が協力して SBSP への取組みを促進しており、その一つの動きとして、2024 年 4 月、英国エネルギー安全保障・ネットゼロ省(Department for Energy Security and Net Zero)、王立航空協会(Royal Aeronautical Society:RAeS)、英国宇宙庁(UK Space Agency)、欧州宇宙機関(ESA)の主催(上述の SEI も支援)で、ロンドンの Royal Aeronautical Society Headquarters において “International Conference on Energy from Space 2024” が開催された。宇宙とエネルギー部門間のネットワーキングと新たなパートナーシップ構築を目指して、3 日間にわたり、200 名以上の参加者を集めて各種の講演が行われた。

#### 4) 中国

中国における SSPS 研究は 2010 年より前から CAST を中心に行われてきていたが、2018 年頃から重慶市璧山区や西安電子科技大学に大規模な地上実験設備を建設するなどの動きが出てきており活発化している。2022 年 6 月には、西安電子科技大学のキャンパス内の「OMEGA-SSPS 地上試験検証システム」と呼ばれる地上実験施設が完成している。本施設は世界初となる full-link and full-system であり、75m の鉄骨構造の大規模な施設となっている。中国における SSPS への取組み活動は、2020 年 9 月には、中国政府が 2060 年までのカーボンニュートラル達成の目標を掲げたことも追い風となり、軍事用と民生用のデュアルユース戦略で中国は SSPS の世界的なリーダーになることを意図して、研究開発を加速させている。2028 年に LEO で 10kW 級の規模の実証を行い、早ければ 2030 年に GEO で実験衛星による実証を行うというロードマップも公表しており、これらの実証実験は、2050 年に GEO 上で 2GW 級のエネルギーを生成するシステムを実現するための長期的な取り組みの一部と位置付けられている。なお、中国の SSPS 開発に関する進捗状況が積極的に公表されていたのは 1 年ほど前までで、2023 年以降の進捗状況はあまり明らかにされていない。

なお、2024 年 11 月には、新型ロケット「長征 9 号」の最新設計が公開されたが、それによると第 1 段には 30 基の YF-215 メタンエンジンを搭載し、LEO までの打上能力は 150ton、2040 年までに完全再使用型 2 段式ロケットの実現を目指している<sup>55</sup>。なお長征 9 号の計画は単なるロケット開発の

---

<sup>55</sup> <https://www.wired.com/story/china-heavy-lift-rocket-spacex-starship/> (2024 年 2 月 10 日閲覧)

枠を超えて、国際月面研究ステーション(ILRS)計画や SSPS の建設など、より広範な宇宙開発戦略の一部として位置づけられている。

## 5) その他の国による取組み

上項で取り上げた国以外でも、海外で SSPS の研究開発に取り組んでいる国としてはロシア、インド、韓国、オーストラリア等が挙げられる。韓国では KARI(Korea Aerospace Research Institute) が主導する形で SSPS 開発に向けて動き始めている。韓国は国土が狭く、再生可能エネルギーでの発電には不向きな国であるため、2050 年までの温室効果ガス排出 Net Zero を達成するためには、SSPS による再生エネルギーの確保が目標を達成するためのブレークスルーになり得るというのが一つの理由となっている。無線電力伝送に関しては、KARI と KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)の 2 機関が共同で実証の計画等を進めている。

また、国際的なグループとして 2021~2022 年からは IAA(International Academy of Astronautics)の Permanent Committee on SSP も立ち上がっている。

## (2) 民間企業やスタートアップによる取組み

近年では、政府関係機関のみならず、民間企業やスタートアップによる SSPS の取組みも活発化している。

新興の宇宙産業分野における商業エンティティの最大のオンラインデータベースを提供している Factories in Space<sup>56</sup>によると、2024 年 4 月現在、同データベースで把握している SSPS 関連の活動を行っている企業数は 71 に及ぶ(コンセプトベースのもの、休止したものも含む)。同データベースが関連企業の活動を“Power Beaming”、“Solar Cells”、“Solar Mirrors”、“Space Solar Power”に分類し、さらに設立年数別にグラフにした図を図 4-26 に示す。図より 2018 年以降に設立されたスタートアップによる活動数が多くなっていることが分かる。しかし、これらの企業による取組はまだ黎明期であり、コンセプト／研究段階のものが一般的である。また民間からの資金提供は、核融合やロケット、さらにはカリフォルニア工科大学の SBSP 寄付と比べると非常に限定的なものとなっている。

以降では、SSPS 関連の活動を行っている代表的なスタートアップについて、その概要と活動内容を整理する。なお、SSPS 関連の活動および次章で示す無線給電技術(WPT)に関する活動が一体で行っているスタートアップも存在するが、本章では最終的に宇宙から地上への大出力でのエネルギー伝送を目標としている企業を取り上げ、次章では地上間、あるいは地上と上空間、宇宙間(衛星間)を目標としている企業について示すこととする。

---

<sup>56</sup> 2018 年より新しい宇宙経済分野で活動している、あるいは活動を目指している商業的なエンティティのデータベース。2024 年 4 月時点で 920 社のエントリーがある。[www.factoriesinspace.com](http://www.factoriesinspace.com)



## 1) 米国

### a. Aetherflux 社

2024 年 10 月、米国のスタートアップ企業 Aetherflux 社は、赤外線レーザーで地上へ送電する低軌道衛星コンステレーションによる SSPS の開発を発表した。米スタートアップ企業 Apex 社が提供する衛星バスを使用する予定で、スポットサイズが 10m の赤外線レーザーを地上に送信して kW 級の電力を生成する計画である。2026 年初頭までに小型技術実証衛星を打上げるとしている<sup>57</sup>。

Aetherflux 社の創業者は Robinhood 創業者の Baiju Bhatt 氏で、最初のデモミッションを遂行するのに十分と考えられる“the ten-millionish range”の自己資金を提供している。2024 年 10 月時点での同社の現在の従業員数は 10 名弱と言われている。

図 4-27 に同社の示す衛星のイメージ図を示す。ユーザーとしては、「サプライチェーンや燃料の調達が難しい」前進作戦基地などの防衛用途をターゲットにしており、遠隔地での採掘作業や軍事基地など、従来の電力インフラを構築するのが困難な地域を想定している。また長期的には商業用および民生用のベースロードおよび再生可能エネルギーとしての利用を目指している<sup>58</sup>。

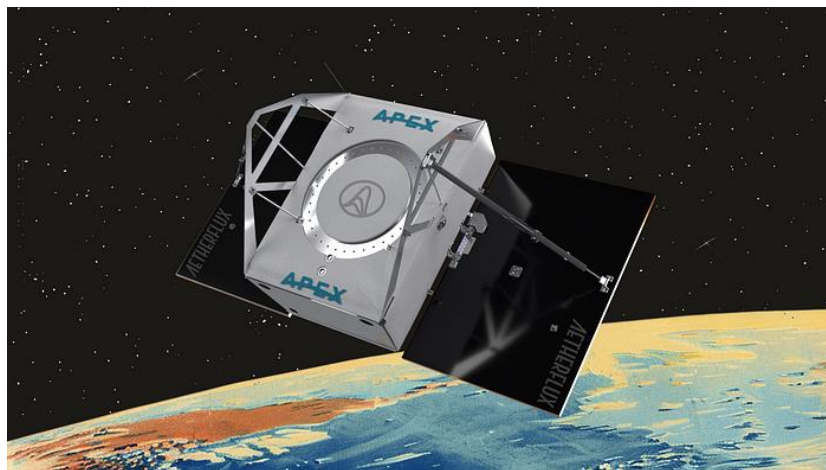


図 4-27 Aetherflux 社の開発する SSPS 衛星

出所)<https://aetherflux.medium.com/allow-me-to-re-introduce-myself-3fb63b633d33> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

### b. Orbital Composites 社

Orbital Composites 社は、2014 年に設立された米国カリフォルニア州のスタートアップである。多様な素材を扱える積層造形技術と積層造形向けのロボティクス技術に強みを有しており Small

---

<sup>57</sup> <https://www.killerstartups.com/billionaire-backs-aetherflux-space-laser-startup/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

<sup>58</sup> <https://spacenews.com/aetherflux-joins-commercial-spaceflight-federation-csf/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

Business Innovation Research (SBIR)契約により、宇宙でのサービス、組立て、製造開発技術の開発を行っている<sup>59</sup>。

2023 年 7 月には米国宇宙軍(USSF)と軌道上で 3D プリンターによるブロードバンド通信用アンテナ製造実証実験に関する契約を締結した<sup>6</sup>。最終的には、この 10 年後に Axiom Space 社の民間宇宙ステーションの外にサービス、組立、製造研究所を設立することが目標となっている。

さらに 4.3.1 (2)1)d で示している Virtus Solis 社と協力して SBSP 関連の技術開発にも取り組んでおり、2027 年に SBSP の実証実験を行うとしている。

### c. Solaren 社

2001 年に設立されたカリフォルニア州の Solaren Corp.社は、エネルギーと航空宇宙を組み合わせた企業であり、SBSP の設計、開発、展開、運用に係る事業を手掛けている。同社が SBSP を所有・運用し、電力会社や政府顧客にベースロード電力を販売するビジネスモデルを検討している。

実際に 2009 年には、カリフォルニア州の電力会社の Pacific Gas & Electric 社と SBSP による電力供給(20 万 kW)の買電契約を締結した実績を持つ。ただし、当初は 2016 年からシステムを稼働させる予定であったが、結局実現せずに終わっている。

なお 2023 年 6 月には、シリーズ D の初回資金調達ラウンドで 250 万ドルを調達した<sup>60</sup>。

### d. Virtus Solis Technologies 社

Virtus Solis Technologies 社は、2019 年に米国のミシガン州トロイに設立されたスタートアップ企業であり、SSPS と WPT に関する技術の開発を行っている。

同社は、NASA の宇宙技術ミッション局(STMD)が主催する賞金付きコンテスト「Centennial Challenges<sup>61</sup>」の一つである「Watts on the Moon Challenge<sup>62</sup>」に参加した実績を持つ<sup>63</sup>。本コンテストは二つのフェーズから構成され、うち第二フェーズは実証が含まれるより実践的なフェーズであり、3 段階のゲートを設け事業者の成果を評価することとなっているが、2022 年 8 月、同社は第二フェーズのレベル 1 の優勝 7 事業者の 1 事業者として 20 万ドルを獲得している。なお本チャレンジは、既存の電源から電力を取り出し、月面環境下で 3km にわたってエネルギーを供給するコンセプトを提出するというものであった。

---

<sup>59</sup> <https://www.orbitalcomposites.com/blog/orbital-composites-secures-sbir-grant-from-us-space-force-to-develop-quantum-antennas-for-secure-communications>(2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>60</sup> <https://www.solarenspace.com/2023/06/05/solaren-raises-2-5m-in-series-d-financing/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

<sup>61</sup> NASA の STMD 内のチャレンジ・プログラムの一つであり、宇宙開発に応用できる基礎研究、応用研究、技術開発等におけるイノベーション促進のため開催される賞金付きコンテスト。民間企業が政府資金に頼らず技術開発を推進し、達成された場合のみ賞金が授与される。2005 年から開催。

<sup>62</sup> NASA の技術ギャップに対応し、宇宙飛行や将来の月面での運用に向けてさらに開発する必要のあるエネルギー分配・管理・貯蔵のためのソリューションを求めるコンテストである。2020 年 9 月から開始され、NASA の Glenn Research Center と Marshall Space Flight Center にある Centennial Challenges の一部により運営されている。本コンテストで発見された斬新なソリューションは、月や宇宙の探査に変化をもたらすだけでなく、地球上での新しい電力供給手段を促進するのに役立つ可能性がある、としている。第一フェーズおよび第二フェーズより構成されるが、2021 年 5 月からの第一フェーズでは総額 500 万ドルの資金を提供している。

<sup>63</sup> <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/glenn/seven-teams-advance-in-nasas-5m-watts-on-the-moon-challenge/> (2023 年 10 月 4 日閲覧)

また 2023 年 3 月には、インディアナ州ウェストフィールドのグランドパークにて、投資家や関係者の前で WPT 電力伝送に関するシステム実証を行った。アンテナ素子 6,400 個からなる送電アンテナよりアンテナ素子 1,944 個からなる 1.32m×1.62m の受信アンテナ(レクテナ)を用いて、送信機の向きを固定して、複数のターゲットにワイヤレス・パワービーム・ステアリングを行い、100m の距離に渡って 68W の電力の送信を行った。(図 4-28 参照)

また 2023 年 6 月には、Orbital Composites 社と商用の世界初となる MW 級規模の SBSP を建造するための提携 MOU を締結している<sup>64</sup>。さらに 2024 年 2 月に、両社は SBSP の実証実験を 2027 年に行うことを発表した<sup>65</sup>。中軌道(MEO)において、太陽光パネルを宇宙空間で組み立てて、1kW 以上の地球への送電などの実証を行う計画となっている。両社は本ミッションを「MW 級の大規模な商業用太陽光発電設備を宇宙に設置するための先駆け」と位置づけている。

なお、同社の SBSP コンセプトはモルニア楕円軌道にコンステレーションを展開するというもので、2 基の衛星アレイコンステレーションによりある地点で 90%の電力を供給することができ、3 基あれば 100%の電力を冗長的に供給することができるという。16 基の衛星アレイからなるコンステレーションがあれば、地球上のどこでも 24 時間 365 日の電力を供給することができる。衛星アレイは 100MW から 20GW まで拡張可能であり、フェーズドアレイアンテナを使用することで、複数の地上局が同時に電力を受け取ることができる。必要に応じてコンステレーションにアレイを追加し、システム容量を年間ギガワット単位で拡張できる。衛星アレイを構成するタイルは 1.65m の六角形で、片面が太陽電池、片面が送電アンテナとなっている可動部のない一体型構造となっている。また六角形の各面には、他のタイルとの相互接続を可能にする機能がある(図 4-29 参照)。

同社は SBSP の輸送に Starship を利用すれば、LEO で 1kg あたり 200 ドル以下での打上げが可能になり、地上での原子力発電や火力発電よりも安価になると発言している<sup>66</sup>。2024 年 2 月には、“Survey of Space Based Solar Power (SBSP)” という SBSP のリファレンスデザインと経済性に関するレポートを発行しているが<sup>67</sup>、それによると同社は SBSP システムの LCOE(均等化発電原価)を 25 ドル/MWh と見積もっている。

---

<sup>64</sup> <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-enters-into-manufacturing-agreement-with-orbital-composites> (2023 年 10 月 5 日閲覧)

<sup>65</sup> <https://spacenews.com/orbital-composites-and-virtus-solis-announce-space-based-solar-power-demonstration/> (2024 年 2 月 9 日閲覧)

<sup>66</sup> <https://www.space.com/spacex-starship-solar-power-beaming-virtus-solis> (2024 年 11 月 20 日閲覧)

<sup>67</sup> <https://space.nss.org/wp-content/uploads/2024-Survey-of-Space-Based-Solar-Power-Virtus-Solis.pdf> (2024 年 11 月 20 日閲覧)





図 4-28 WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>、  
(2023 年 10 月 5 日閲覧)

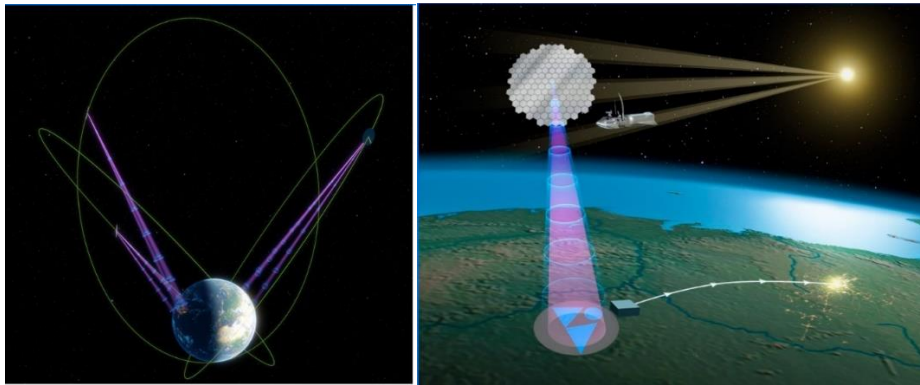


図 4-29 Virtus Solis 社の SBSP コンセプト

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>、  
(2024 年 10 月 5 日閲覧)

## 2) 欧州

### a. Astromstrom 社(スイス)

1998 年に設立されたスイスの Astromstrom 社は宇宙からのクリーンで無尽蔵なエネルギーを開発し、欧州と世界に提供するための開発を行っている。2023 年 7 月、同社は ESA の OSIP (Open Space Innovation Platform) キャンペーンによる「Greater Earth Lunar Power Station (GE<sup>®</sup>-LPS)」の概念設計について、最初の研究結果を発表した。

本研究は、主に月の資源を用いて建造され、地球と月のラグランジュ点に展開される SSPS が、メガワットのマイクロ波電力を月面の受信機に供給し、将来の有人基地を含む月面活動のニーズに応えることを想定している。V 字型の太陽パネルと一体型のアンテナを備え、端から端まで 1km<sup>2</sup> 以上にわたるヘリックス構造で展開される。月で生産される黄鉄鉱(パイライト)の単粒子層太陽電池で構成されるソーラーパネルは、連続で 23MW のエネルギーを生成する。

このコンセプトの実現可能性を技術面および経済面から調査した結果、月面での採掘、選鉱、製造作業の中核技術のほとんどは、地球上ですでに使用されているか開発中であり、技術のブレークスルーが

なくても GE<sup>⊕</sup>-LPS を実現できることがわかった。それらの技術を月の環境に適応させてモジュール形式で提供し、月面で遠隔操作型ロボットを通して管理できるとしている。さらに、月で製造される SSPS は、地球で開発される同等の SSPS よりも安価であることも検討結果として出されている。



図 4-30 Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station(GE<sup>⊕</sup>-LPS)」

出所)<https://nebula.esa.int/content/ge%E2%8A%95-lunar-power-station> (2024 年 9 月 25 日閲覧)

## b. Paraloon 社（ベルギー）

Paraloon 社は 2023 年にベルギーのエッセンに設立された、インフレータブルな”parabolic balloon” 集光型太陽電池(CPV)構造を利用して、宇宙と地上の両方で SSPS を利用しようとする宇宙スタートアップである。「European Institute of Innovation for Sustainability」が主催するチャレンジ・ベースのコース「Space entrepreneurship」により繋がった宇宙愛好家のチームで構成されている<sup>68</sup>。現在は、軽量で膨張・展開可能なパラボラ構造と、光と熱の両方を電気エネルギーに効率的に変換する熱光起電力(TPV)技術を組み合わせた Paraloon システムの開発を行っている。宇宙での用途としては人工衛星、宇宙ステーション、居住施設、ミッションビークルなどが考えられ、地上では遠隔地、レクリエーション、防衛、難民キャンプ場、緊急事態、移動用途等での使用を想定している。



図 4-31 Paraloon 社によるインフレータブル展開構造

出所)<https://www.paraloon.space/s-projects-side-by-side> (2024 年 11 月 22 日閲覧)

---

<sup>68</sup> <https://spacesolutions.be/portfolio/paraloon/> (2024 年 1 月 25 日閲覧)

### c. Sirin Orbital Systems 社(スイス)

2019 年に設立されたスイスの Sirin Orbital Systems AG は、特に SBSP/WPT アプリケーション、革新的な推進システム、衛星の軌道上サービス、現地資源利用(ISRU)、および将来の持続可能な宇宙探査のための高度な革新的技術の開発に重点を置いているスタートアップである。京都大学生存圏研究所とも協力関係を築き、2022 年より毎年 11 月に Japan-Swiss SBSP Workshop を東京で開催している。

同社が検討している「16U4SBSP」は、16U キューブサット群を SBSP の実現に利用するための実証ミッションである。本ミッションコンセプトでは、16U キューブサット群が飛行し、宇宙空間で kW 級の太陽エネルギーを集め、それを地球上のクライアントや宇宙空間の他の衛星にワイヤレスで伝送する。これは、(GW 規模の)SBSP の実現に向けた基本的な技術実証のステップとなっている。本件は 2023 年初め、キューブサット群によって可能になる新しいミッションコンセプトの革新的なアイデアを OSIP キャンペーン “Innovative Mission Concepts Enabled by Swarms of CubeSats” により公募していたもので、74 件の応募の中から選ばれた 7 件のうちの 1 つとして、2023 年 10 月から 2024 年 4 月に ESA から 10 万ユーロの資金を受けて実施された<sup>69</sup>。

その他、小型衛星用の推進システム、マイクロ波及びミリ波無線電力伝送技術(月面探査ローバー用の 35GHz 無線電力伝送を含む)、小型分光計用の量子ベースの先進技術、アクティブ・デブリ除去(ADR)および近接作業用の姿勢推定と自律ビジョン技術等の開発を行っている。このようなポートフォリオが宇宙技術を活用した環境問題の取組に対する功績として評価され、2024 年 10 月に World Space Week Association<sup>70</sup>が主催する“Leading Innovation in Space” 賞<sup>71</sup>を受賞している。

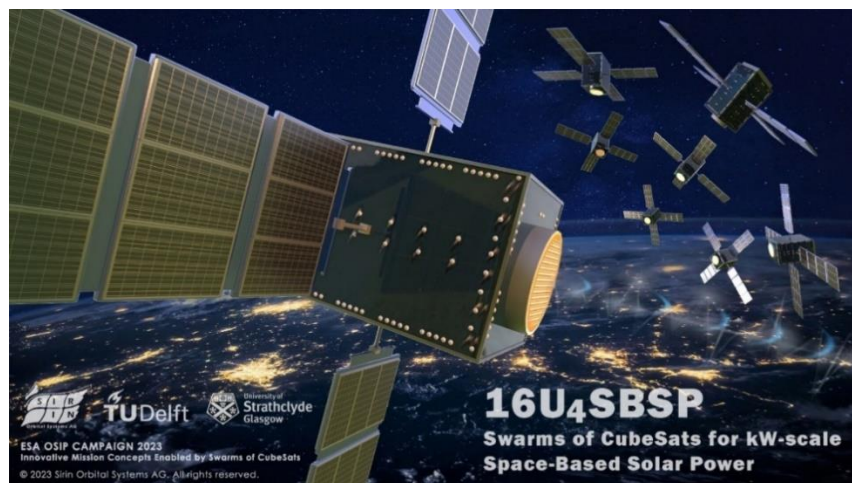


図 4-32 「16U4SBSP」ミッションのイメージ

出所) [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2023/10/A\\_CubeSat\\_swarm\\_beaming\\_down\\_solar\\_power](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/10/A_CubeSat_swarm_beaming_down_solar_power)  
(2024 年 10 月 20 日閲覧)

<sup>69</sup> <https://nebula.esa.int/4000142405> (2024 年 11 月 22 日閲覧)

<sup>70</sup> 宇宙教育と普及活動を行う国際的な非営利組織であり、国際宇宙航行連盟(IAF)のメンバーである。毎年 10 月に World Space Week の企画・運営を行っている。

<sup>71</sup> 最終候補の 25 社には、Airbus、Arianespace、Thales Alenia Space、三菱商事等が含まれていた。

#### d. Space Solar 社(英)

英国の Space Solar Engineering Ltd.は、2022 年 4 月、英国の衛星利用推進センター (SAC: Satellite Applications Catapult)からスピナウトする形で設立された。SBSP の開発を促進するための商業組織という位置づけであり、Space Energy Initiative(SEI)<sup>72</sup>のメンバーにより構成されている。最初の無線電力実証機の完成を含め、2029 年までに宇宙から MW 規模の電力を送電する大規模な実証実験も計画している。

2023 年 10 月には Thales Alenia Space(TAS)社と最初の商業 SBSP システムに関して協力するパートナーシップを締結した。

さらに英国の SBSP Innovation Competition<sup>73</sup>の中で、CASSIOPeiA の電子ステアリング技術とビーム品質を検証するプロジェクト(CASSIE:The CASSIOPeiA Antenna with Steering Scaled Indoor Experiment)に 100 万ポンド、ベースロード電力の商業的かつ持続可能な SBSP のコンセプト設計を進めるプロジェクト(C3P0/A)に 42 万 5000 ポンドを獲得した。CASSIE プロジェクトでは、レトロディレクティブ方式による 360°方向のビームステアラブルアレイの屋内無線電力伝送実験(200W/m<sup>2</sup>の強度のマイクロ波を 6.5m にわたり伝送)を実施している。(図 4-33 参照)

2024 年 4 月には、CASSiDI(Cassiopeia Design Iteration)プロジェクトとして 120 万ポンドを獲得した。CASSiDI プロジェクトは SAC、Thales Alenia Space および Oxford Space Systems 社と共に実施した先行研究を基に、CASSIOPeiA アーキテクチャに基づく SBSP の基本モジュール概念設計を行うプロジェクトである。

また 2024 年 4 月以降は、HARRIER(Horizontal Array for Receiving RadIoEnergy Retrodirectively)プロトタイプを用いたワイヤレス電力伝送テストキャンペーン等も実施している。(図 4-34 参照) 2025 年 2 月現在、HARRIER Prototype 4 がクイーンズ大学 Belfast のチャンバー内で試験中である。

さらに 2024 年 10 月には、アイスランドの Reykjavik Energy 社に SBSP から電力供給することで合意した<sup>74</sup>。2030 年までに初期容量 30MW で供給し、2036 年までに大規模なシステムにスケールアップする計画となっている。本計画については、アイスランドの民間気候変動イニシアチブである Transition Labs が戦略的計画、資金調達および事業開発を支援している。現在、地上の受信ステーションの候補地を検討しているが、アイスランド、カナダ、日本の北部は、コンステレーションが発展するにつれて、追加の受信ステーションが設置される可能性のある場所である、としている。

---

<sup>72</sup> 2021 年 8 月に設立された SBSP の可能性とビジョンを共有する、英国の政府機関、大学、企業等、80 以上の団体により組織された連合体。2040 年までに運用可能な SBSP システムの開発を支援する目的を有する。

<sup>73</sup> SBSP Innovation Competition は BEIS が実施している、最大 600 万ポンド(約 9 億 8 千万円:300 万ポンド~さらに最大 300 万ポンドまで)相当の助成金コンペティション

<sup>74</sup> <https://spacewatch.global/2024/10/space-solar-announces-space-based-solar-power-plant/> (2024年 10 月 29 日閲覧)



# CASSIE Project

**CWI** CENTRE FOR WIRELESS INNOVATION

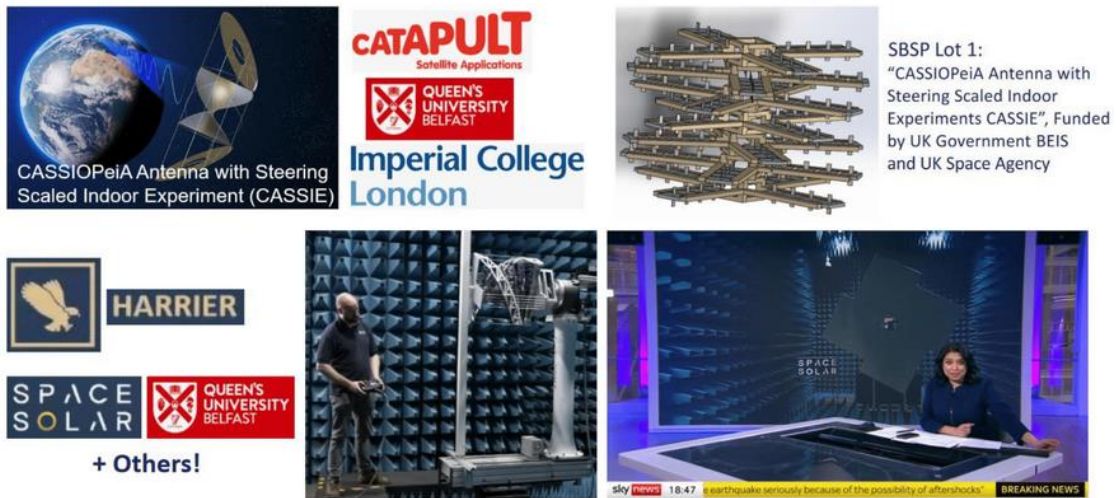


図 4-33 CASSIE プロジェクトの概要と参加組織

出所) <https://www.aerosociety.com/media/23646/efs-day-3-neil-buchanan.pdf> (2024 年 11 月 25 日閲覧)



図 4-34 HARRIER の実験装置

出所)

[https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2024/ListTechnicalPresentations/2024\\_STSC\\_technical\\_presentations\\_slides/9\\_20--Item\\_11\\_UK\\_Technical\\_Presentation\\_SBSP\\_M\\_Maheshwarappa.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2024/ListTechnicalPresentations/2024_STSC_technical_presentations_slides/9_20--Item_11_UK_Technical_Presentation_SBSP_M_Maheshwarappa.pdf) (2024 年9月 9 日閲覧)

## 3) その他

### a. Space Solar Technologies 社(オーストラリア)

Space Solar Technologies 社は 2019 年にオーストラリアのビクトリア州に設立されたスタートアップ企業である。SSPS を開発・展開し、最終的にはオーストラリアの電力市場およびオーストラリア

から他国へのエネルギー輸出のために、少なくとも合計 18GW の発電容量のシステムを開発する計画である。2027 年にオーストラリアの電力網にベースロード電力を供給することを目指している。米国の John C. Mankins 氏とも協力関係を築いている。

#### **b. NTT 宇宙環境エネルギー研究所(日本)**

NTT 宇宙環境エネルギー研究所では、レーザー伝送型の SSPS の研究を進めている<sup>75</sup>。レーザーエネルギー伝送技術として大気中のビーム伝搬シミュレーションや関連実験を行うと共に、太陽光励起レーザー発振実験や高強度ビームエネルギー変換技術の開発も行っている。

### **4) 宇宙太陽光発電システム(SSPS)の市場規模に関する情報の整理**

ここでは、SSPS の市場規模に関する情報に関してその概要を調査・整理する。

近年では、世界各国の多くのリサーチ機関が SBSP(大半レポートで “Space-Based Solar Power” と呼称されている)の市場に関連するレポートを発行している。以下では、一例として 2024 年に発行された下に示す 5 種類のレポートの中で公表されている内容／数値等を整理する。

- [1] “Space-Based Solar Power Market Forecasts to 2030 - Global Analysis By Satellite Type, End User and By Geography” , Statistics Market Research Consulting , 2024 年 6 月
- [2] “Space-Based Solar Power Market by Satellite Type (Laser Transmitting Solar Satellite, Microwave Transmitting Solar Satellite), Application (Electricity Generation, Space Applications), End-User - Global Forecast 2025-2030” , 360iResearch, 2024 年 10 月
- [3] Space-Based Solar Power Market Size - By Beam Type, By Application, By End Use and Forecast, 2025 - 2034, GMI (Global Market Insights) , 2024 年 12 月
- [4] “Space-Based Solar Power Market Report (2030 - 2035) - Size and Share Analysis, Industry Trends, and Growth Forecasts” , Prescient & Strategic Intelligence , 2024 年 4 月
- [5] “Space-Based Solar Power Market by Beam Type (Laser Beam Power Transmission, Microwave Power Transmission), End Users (Government and Defense, Commercial), Application (Terrestrial, Space) and Region - Global Forecast to 2040” , MarketsandMarkets, 2024 年 2 月

---

<sup>75</sup> [https://www.rd.ntt/se/technology/space\\_solar\\_power.html](https://www.rd.ntt/se/technology/space_solar_power.html) (2025 年 2 月 13 日閲覧)



### a. 2030 年までの市場予測(Statistics MRC 社)

2024 年 6 月に Statistics MRC 社 (Statistics Market Research Consulting)<sup>76</sup>が発行した“Space-Based Solar Power Market Forecasts to 2030 - Global Analysis By Satellite Type, End User and By Geography”によると、世界の SBSP 市場は 2023 年に 5 億 7,780 万米ドルを占め、2030 年には 12 億 2,240 万米ドルに達すると予測されている。2030 年までの年平均成長率(CAGR:Compound Annual Growth Rate)は 11.3%である。

2030 年までの予測期間中、地域別ではアジア太平洋地域が市場で最大のシェアを占めると予測されている。高度なロボット工学と自動化技術の活用による効率的な展開、維持、修理により、運用コストの削減、信頼性の向上、宇宙ミッションにおける人的介入の最小化を図ることができ、SBSP 市場における同地域の競争力を高める、としている。一方 CAGR でみると欧州地域が最も高く、予測期間中、収益性の高い成長を維持すると予測されている。同地域の政府は SBSP のような再生可能エネルギー技術を促進するための政策と政策を実施しているため、SBSP 技術の研究開発にインセンティブ、補助金、資金提供の機会を提供し、技術革新と市場拡大を促進することが大きな要因となっている。

またセグメント別では、商業セグメントが最も高い CAGR を達成すると見込んでいる。商業ベンチャーは政府機関よりも機敏で柔軟な運営を行うことが多く、SBSP コンセプトの迅速な検証等を可能にし、民間企業と政府機関のパートナーシップがさらに市場の成長を促進する、としている<sup>77</sup>。

### b. 2030 年までの市場予測(360iResearch 社)

2024 年 10 月に 360iResearch 社<sup>78</sup>が発行した“Space-Based Solar Power Market by Satellite Type (Laser Transmitting Solar Satellite, Microwave Transmitting Solar Satellite), Application (Electricity Generation, Space Applications), End-User - Global Forecast 2025-2030”では、SBSP 市場は 2023 年に 5 億 9,975 万米ドルと評価され、2024 年には 6 億 6,926 万米ドルに達すると予測され、CAGR 12.08%で成長し、2030 年には 13 億 3,272 万米ドルに達すると予測されている。

SBSP の用途は、地上の太陽エネルギーや風力エネルギーを補完するものから、再生可能資源が限られている地域にエネルギーソリューションを提供する可能性のあるものまで多岐にわたるが、最終用途の範囲は、主にエネルギー公共事業、政府・防衛部門、そして大規模で安定した電力投入を必要とする大規模な産業事業を対象としている。

SBSP 市場は、世界のエネルギー枠組みに変革的な影響を与える大きな可能性を秘めた、黎明期でありながら急速に進化していることを特徴とし、宇宙環境に適した軽量で耐久性のある太陽光発電材料の開発、無線エネルギー伝送の効率改善、打上げシステムのコスト削減などの技術革新と研究開発分

---

<sup>76</sup> Statistics Market Research Consulting(米国メリーランド州)はさまざまな業界に関する市場調査とコンサルティングサービスを提供する企業である。

<sup>77</sup> <https://www.gii.co.jp/report/smrc1489345-space-based-solar-power-market-forecasts-global.html> (2025 年 1 月 10 日閲覧)

<sup>78</sup> 360iResearch(インド、2017 年)は多岐にわたる産業分野における市場調査およびビジネスコンサルティング会社。

野に対して、企業は、これらの課題に取り組むための共同作業の促進、官民パートナーシップの強化、衛星システムの予測分析と保守のための AI の統合に注力すべきである、としている<sup>79</sup>。

### c. 2025-2034 年の市場規模推計(GMI 社)

2024 年 12 月に GMI 社(Global Market Insights)<sup>80</sup>が発行した“ Space-Based Solar Power Market Size - By Beam Type, By Application, By End Use and Forecast, 2025 - 2034” では、持続可能で信頼性の高いクリーンエネルギーソリューションへの需要の高まりにより SBSP への関心が世界的に高まっており、近年の宇宙探査とエネルギー伝送技術の進展と相まって、再生可能エネルギー市場の成長を支える現実的な選択肢としての実現可能性を高めていることが示されている。

本レポートで示されている市場規模等については、以下のようにまとめることができる(図 4-35 参照)。

- 市場規模と成長予測
  - 2024 年の SBSP 市場は 31 億米ドル
  - 2034 年までの年平均成長率(CAGR:Compound Annual Growth Rate)は 7.9% であり、2034 年には 66 億ドルの規模に達する。
- ビームタイプ別市場分析
  - マイクロ波送電: 2024 年時点で市場シェアの 70%以上を占めており、今後も高い成長が予測されている。
  - レーザー送電: 技術的課題は残るものの、特定の用途向けに研究が進められている。
- 用途別市場分析
  - 地上での電力供給を目的とした SBSP の利用は 2024 年時点で市場シェアの 70%以上を占めており、2034 年までに CAGR8.5%以上の成長が見込まれている。
  - 宇宙用途: 宇宙探査ミッションや衛星への電力供給など、宇宙空間での利用も検討されている。
- エンドユーザー別市場分析
  - 政府・防衛: エネルギー安全保障や持続可能なエネルギー供給の観点から、各国政府や防衛機関が SBSP 技術への投資を強化している。
  - 商業セクター: 再生可能エネルギーへの需要増加に伴い、民間企業も SBSP 技術の導入を検討している。
- 地域別市場予測
  - 北米:SBSP 市場を牽引しており、2034 年までに 25 億米ドルを超える市場規模が予測されている。

---

<sup>79</sup> <https://www.gii.co.jp/report/ires1621429-space-based-solar-power-market-by-satellite-type.html> (2025 年 1 月 10 日閲覧)

<sup>80</sup> Global Market Insights Inc.(米国デラウェア州、2016 年設立)は、大手企業、非営利団体、大学、政府機関に対し、世界の市場に関する調査と経営コンサルティングサービスを提供している。

- 欧州: 欧州連合の再生可能エネルギー目標や脱炭素化政策により、SBSP 技術への関心が高まっている。
- アジア太平洋: 中国や日本などの国々が SBSP 技術の研究開発を積極的に進めており、エネルギー需要の増加に対応するための新たなソリューションとして注目されている。

主要プレイヤーとしては Northrop Grumman 社、JAXA、Airbus 等が挙げられており、2024 年時点の市場シェアが図 4-36 のように示されている。

レポートではまた、SBSP は地上の太陽光発電や風力発電など、他の再生可能エネルギーシステムと統合されることが増えており、地上の再生可能エネルギーとの連携により、より強固で効率的なエネルギーインフラを構築する可能性を秘めていることが示されている。また高コストや技術的問題、宇宙デブリ問題など、SBSP の実現には多くの課題が存在するものの、持続可能なエネルギー供給手段としての潜在的な利点から、今後の技術革新や国際協力により、これらの課題が克服されることが期待されているとの展望が示されており、全体としては SBSP 市場は今後 10 年間で着実な成長が予測されており、技術革新や政策的支援により、その実現可能性と商業的展開が進むと考えられる、と結論付けられている。

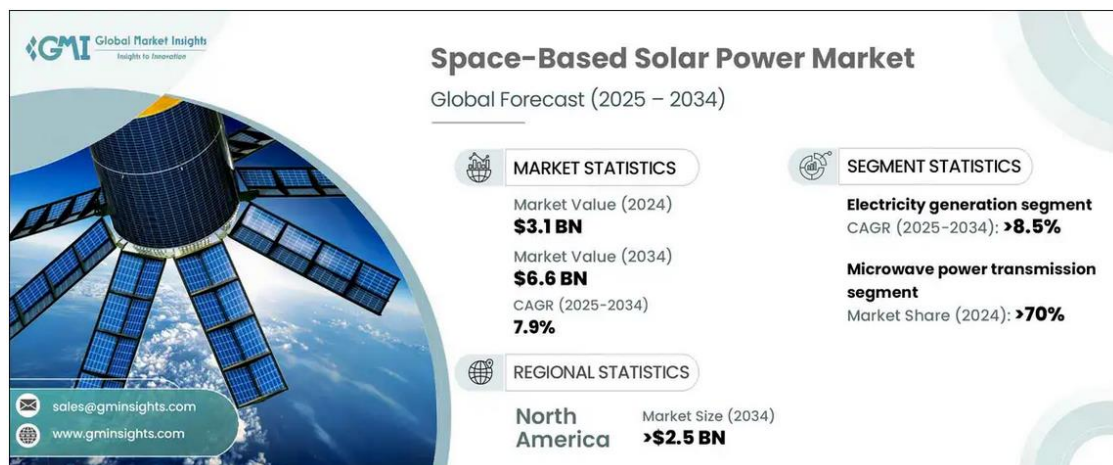


図 4-35 GMI 社による SBSP 市場予測

出所) <https://www.gminsights.com/industry-analysis/space-based-solar-power-market> (2025 年 1 月 10 日閲覧)

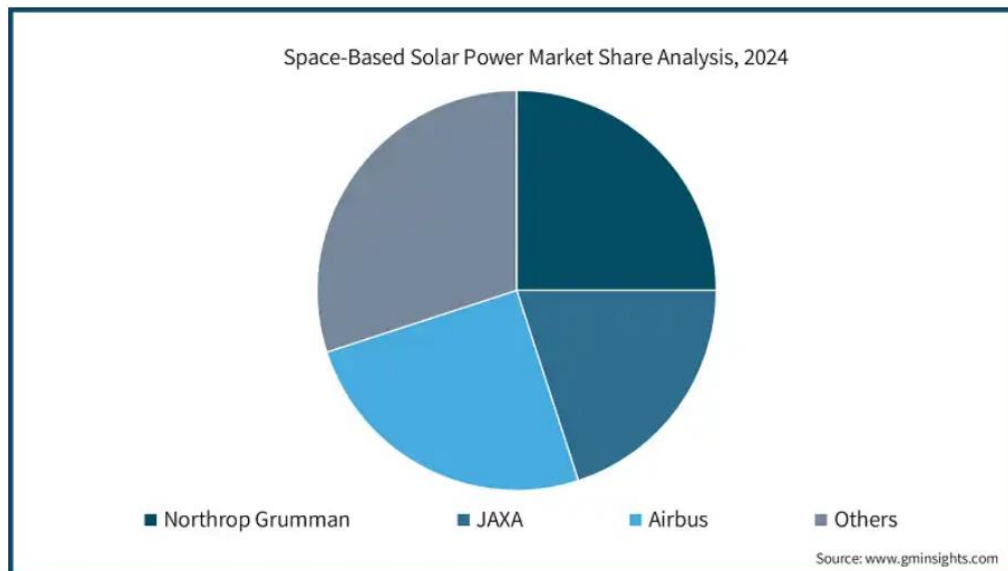


図 4-36 SBSP 市場のシェア(2024 年)

出所) <https://www.gminsights.com/industry-analysis/space-based-solar-power-market> (2025 年 1 月 10 日閲覧)

#### d. 2030-2035 年の市場予測(P&S Intelligence 社)

2024 年 4 月に発行された Prescient & Strategic Intelligence(P&S Intelligence)社<sup>81</sup>の“Space-Based Solar Power Market Report (2030 - 2035) - Size and Share Analysis, Industry Trends, and Growth Forecasts”によると、SBSP の市場規模は、2030 年に 41 億 5,120 万米ドルに達し、その後はさらに 4.5%の CAGR で拡大し、2035 年には 51 億 6,640 万米ドルに達すると予測されている。

#### ア) 2040 年までの市場予測(MarketsandMarkets 社)

2024 年 2 月に発行された MarketsandMarkets 社<sup>82</sup>の“Space-Based Solar Power Market by Beam Type (Laser Beam Power Transmission, Microwave Power Transmission), End Users (Government and Defense, Commercial), Application (Terrestrial, Space) and Region - Global Forecast to 2040”によると、世界の SBSP の市場は 2030 年の 47 億米ドルから CAGR 3.3%で成長を続け、2040 年には 68 億ドルの規模に到達すると見込まれている。

<sup>81</sup> Prescient & Strategic Intelligence 社(インド、2014 年設立)は市場調査およびコンサルティングサービスを提供する企業。

<sup>82</sup> MarketsandMarkets(インド、2009 年設立)は、約 800 名のアナリストが在籍する市場調査およびコンサルティングサービスを提供する企業である。

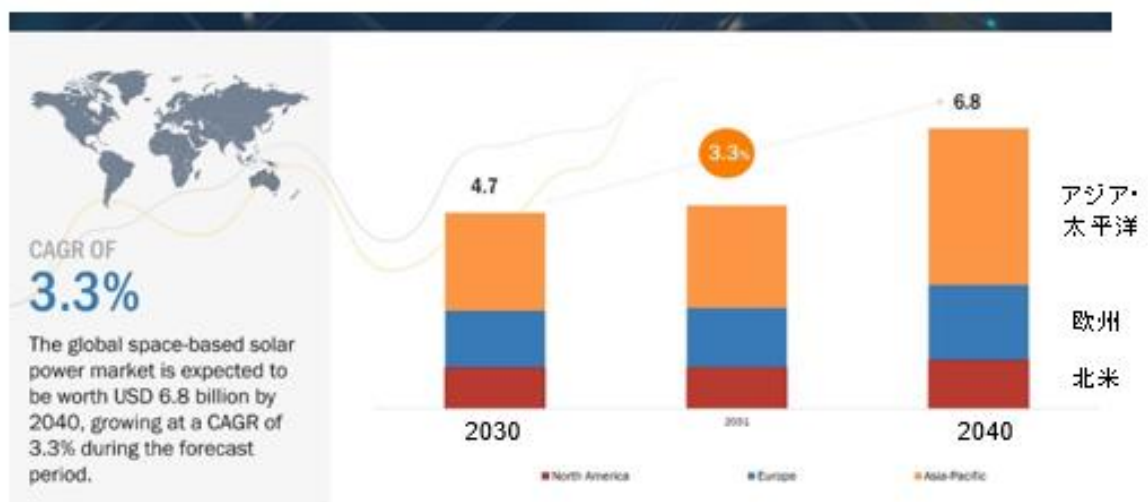


図 4-37 SBSP 市場のシェア(2024 年)

出所) <https://www.gminsights.com/industry-analysis/space-based-solar-power-market> (2025 年 1 月 10 日閲覧)

## e. まとめ

上項で参照したレポートの公になっている部分のみの情報では、SSPS 市場の定義や対象範囲が明確でないが、レポートによって示される市場規模や成長率の数値には差異がみられている。これは、各調査機関が異なる仮定や分析手法を採用していること、また市場の成長要因や課題に対する視点が異なることに起因していると考えられるが、包括的な市場全体の動向としては、以下のように整理することができる。

### <各レポートで示された市場規模と成長予測>

- 2030 年までの市場規模:
  - Statistics MRC 社: 2023 年に 5.8 億ドル、2030 年には 12.2 億ドル(CAGR 11.3%)。
  - 360iResearch 社: 2023 年に 6 億ドル、2030 年には 13.3 億ドル(CAGR 12.08%)。
- 2034 年までの市場規模:
  - GMI 社: 2024 年に 31 億ドル、2034 年には 66 億ドル(CAGR 7.9%)。
- 2035 年および 2040 年の市場規模:
  - P&S Intelligence 社: 2030 年に 41.5 億ドル、2035 年に 51.7 億ドル(CAGR 4.5%)。
  - MarketsandMarkets 社: 2030 年に 47 億ドル、2040 年に 68 億ドル(CAGR 3.3%)

上記のようにレポートごとに差異はあるものの、全てのレポートで 2030 年までおよび 2030 年以降も着実な市場規模の拡大を見込んでいる。地域別の市場シェア予測ではアジア・太平洋地域が最も高

いシェアを占め、欧州が高い成長率を示すというものが多かった。実現に向けた課題としては、高コスト、技術的制約、宇宙デブリ問題、国際規制等が挙げられているが、無線電力伝送の効率改善、打上げコスト削減、再生可能エネルギー需要の増加が成長要因となり、商業ベンチャーと政府の協力が技術革新を加速し、市場成長を促進することが期待されている。また、地上の再生可能エネルギーシステムとの統合が市場拡大を支援することを見込んでいる予測もあった。

#### 4.3.2 無線エネルギー伝送技術(WPT)に関する調査

米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、ここ数年内に実施されているパワービーミング及び空間伝送型 WPT(Wireless Power Transfer)について、電波(主にマイクロ波)およびレーザー方式の実現を目指した研究開発または実用化に向けた動きに関する調査を行った。

##### (1) パワービーミング WPT の開発動向

本項では近年(2020 年頃以降)に行われた主に高強度長距離(数十 m 程度以上)の伝送距離を対象とするパワービーミング WPT の開発動向を示す。本文では今年度の動向を中心にまとめているが、詳細については付録としてまとめている。

#### 1) 電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

##### a. 米国

米海軍研究所(NRL)では 1kW の電力を 1km 伝送するマイクロ波送電研究プロジェクトである SCOPE-M(Safe and COntinuous Power bEaming – Microwave)プロジェクトが進められており、2022 年にメリーランド州ブロッサムポイントの米国陸軍研究施設において、直径 5.4m の X 帯送信機から 1046m のスタンドオフ距離で 1.6kW の電力を供給するデモンストレーションを実施した。

また、米国防高等研究計画局(DARPA)では、2022 年 10 月より、主に光エネルギーリレー技術の開発を行い、空中での光エネルギーリレーシステムを設計・実証し、地上のレーザーと高高度長距離伝送技術を結び付けることを目指す POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムを実施しているが、マイクロ波送電に関しても、小型無人航空機システムにおける RF 電力ビームとリレーの機能等の検討を行っている。

スタートアップ企業としては、米国シアトルに拠点を置く Electric Sky 社は、地上の送信機から電波を高度 20km 程度まで送信し、受信機で電波を電気に変換する Whisper Beam 技術の開発を行っている。

また 2014 年に米国のカリフォルニア州に設立された Reach Power 社(設立当初の社名は Reach Labs)は、2024 年 5 月、電波による WPT 給電システムを開発し、UAV に給電を行う実証に成功したことを発表した。米 DARPA の BAA(Broad Agency Announcements:広域機関公示)資金提供プロジェクトに基づいて実施されたもので、NASA の Ames 研究センターで、飛行中のドローンに向けて電波でエネルギーを伝送する実証試験を行った。実証では 4 台の送電装置がメッシュネットワークを構築して協調することで、約 6m の距離で飛行中のドローンに 50W の電力を給電した



(図 4-38 参照)。個々の電源のフェイルオーバーを可能にするフォールト・トレラント・ネットワーキングを構築し、電力が低下しても、残りの電源がドローンに電力を供給することができることも実証した。このメッシュネットワークを構成するコンポーネントはモジュール式で追加と削除ができる構造となっており、柔軟性と高い拡張性を備えている。カバー範囲内にある機器に途切れることなく給電することができるため、工場で稼働するロボットへの給電、建設現場での工具の充電、災害時の一時的な電力網の確立など、多様な用途があるという<sup>83</sup>。

さらに、2024 年 11 月には本社において 40 を超える政府機関や業界パートナーの前で、WPT リレー実証(パッシブ WPT リレーとアクティブ WPT リレーの 2 部構成)に関するライブ・デモンストレーションを行った(図 4-39 参照)。送信機はリレーに向けて RF 電力ビームを放射し、リレーを介して複数のセグメントに RF 電力ビームをルーティングするというもので、送信機単独よりも遠方までビームを拡張することができる。本システムの主な特長は、ビームを直流(DC)に変換して再び RF に戻すことなく、距離に応じてビームを再フォーカスして方向転換し、システム効率を大幅に向上できることだという。

パッシブ WPT リレー(Passive Wireless Power Relay)のデモでは、Reach のパッシブ電力リレーノードを用いてライト ボードを点灯させた。リレーノードは、メタ・サーフェス回路基板の独自の構成を使用することで、追加の電子機器なしで送信機の範囲を拡張し、安価で容易に構築できるものとなっている。アクティブ WPT リレー(Active Wireless Power Relay)のデモでは、アクティブ電力リレーノードがソフトウェアによって制御される方向に、入力電力ビームをアクティブに反射した。アクティブ電力リレーノードは反射と整流の 2 つのモードで動作し、選択した量の電力ビームを動的に反射および吸収する。この機能によりノードは可動部品なしで、ネットワーク要件に基づいて電力ビームを再構成およびリダイレクトできる。なお本デモは米 AFRL の未来戦力エネルギーキャンペーン(Future Force Energy Campaign)契約に基づいて実施されており、WPT 電力ビームの拡張性と範囲を強化し、障害物を回避してより長距離に電力を拡張するためのリレー技術の確立を目指したものである<sup>84</sup>。



図 4-38 ドローンに電力を供給する 4 台のワイヤレス給電トランスミッター

出所)<https://reachpower.com/reach-enables-wireless-power-mesh-networking-for-drones/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

<sup>83</sup> <https://reachpower.com/reach-enables-wireless-power-mesh-networking-for-drones/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

<sup>84</sup> <https://reachpower.com/reach-completes-phase-ii-of-future-force-energy-campaign-with-u-s-air-force-demonstrating-worlds-first-wireless-power-relays/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)



図 4-39 Reach Power 社 CEO の Chris Davlantes 氏のデモの様子

出所) <https://reachpower.com/reach-completes-phase-ii-of-future-force-energy-campaign-with-u-s-air-force-demonstrating-worlds-first-wireless-power-relays/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

## b. その他

2019 年に設立されたニュージーランドの Emrod 社は、同国第 2 位の電力会社 Powerco の資金提供を受けて、ワイヤレスかつ長距離のエネルギー伝送を効率的に行う技術の試験を開始している。また 2022 年 9 月には、ESA、Airbus 社、TechnoCarbon 社(仏)とのパートナーシップを締結し、Airbus 社の Munich Area Site(Airbus Innovation Facilities)屋内デモンストレーションを実施した。同社は欧州と協力関係を築いており、2024 年 4 月には、ドイツ政府機関である SPRIND<sup>85</sup> から世界最先端の電力ビーミング装置開発のための資金を獲得している。同社は資金を世界最高の変換効率を目指した技術開発に充てるとしている<sup>86</sup>。

マレーシアでは、スタートアップ企業である Aphelia 社は宇宙空間におけるマイクロ波無線電力伝送技術の開発に注力している。人工衛星や月面上のハードウェアにマイクロ波無線電力伝送技術を活用することにより、宇宙ミッションのバッテリー依存度を低減させ、ミッションの寿命を延長させることを目指している。現在は、エネルギーコストを 50～80%削減し、月探査をより効率的で持続可能なものにするとして、月の日照側から日陰の領域への無線エネルギー伝送技術の開発を行っており、GaN で作られた RF MMIC 回路への取組みを進めている。

中国では SSPS の研究開発を主導している宇宙技術研究院(CAST)の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave が SSPS 実証用のマイクロ波 WPT 技術の研究開発を行っている。

韓国では KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)が国家科学技術会議(NST)の BIG Issue Group プロジェクトとして 2017 年から 2025 年までの長期研究を実施している。2024 年 1 月には、KARI と KERI が共同で、1.81km にわたる距離のワイヤレス電力伝送試験

<sup>85</sup> SPRIND(FEDERAL AGENCY FOR DISRUPTIVE INNOVATION:飛躍的イノベーション機構)は、2019 年 12 月にドイツ連邦教育研究省(BMBF)と連邦経済エネルギー省(BMWi)により設立された。画期的に市場を変えるイノベーションのアイデアが、さらに効果的にブレークスルーを達成できるよう支援することを目的としている。

<sup>86</sup> <https://emrod.energy/blog/sprind-grant-award-announcement/> (2024 年 11 月 25 日閲覧)

に成功し、続く 2024 年 11 月には、KARI が無人ヘリコプターを利用した無線電力伝送実証に成功した<sup>87</sup>。

## 2) レーザー方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

### a. 米国

#### ア) 政府機関

4.3.2 (1)1a 項で示したように、米国防高等研究計画局(DARPA)では、2022 年 10 月より、主に光エネルギーリレー技術の開発を行い、空中での光エネルギーリレーシステムを設計・実証し、地上のレーザーと高高度長距離伝送技術を結び付けることを目指す POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムを実施している。2023 年 9 月、DARPA は POWER プログラムの第一フェーズを開始することを明らかにしており、RTX Corporation(旧 Raytheon)、Draper、BEAM Co.が率いる 3 チームが無線光電力リレーシステムの設計・開発を行うとしている<sup>88</sup>。第 2 フェーズでは、2025 年初頭に公募が行われ、低電力で空中実証を行うための既存プラットフォームへのリレー技術の統合に重点がおかれ、既存の航空機に搭載されるポッドで実証される予定となっている。プログラムの最終段階である第 3 フェーズでは、10kW の光エネルギーを地上レーザー光源から 200km 離れた地上レシーバーに供給することを目的とした空中光路を通して、リレーの実証が行われる。最終的には、高エネルギー・レーザーシステム試験施設(HELSTF)を使用して、ホワイトサンズ・ミサイル発射場(N.M.)の地上受信機に電力を中継する 3 つの空中ノードと、空中中継機として RQ-4 グローバルホーク大型無人航空機を使用することを想定している。

PRAD(POWER Receiver Array Demonstration)は、本 POWER プロジェクトの一環として電力ビームの実現技術の実証を目指しているプログラムである。上空にある軍用機や無人航空機からレーザービームを照射し、10kW の電力を軍事用に分配することを目指したものであり、レーザーパワービーム受信機の開発と実証を行う計画となっている。レーザーエネルギーを電力に変換できる光起電力(PV)レシーバアレイの性能、信頼性、効率を検証することが重要であるとし、2024 年 9 月、関連プログラムの募集(DARPA-PS-24-25)を開始した(Other Transaction (OT) for Prototype 契約:履行期間 6 か月間、資金総額 35 万ドル)<sup>89</sup>。

DARPA では他にも、2023 年より月面および月周辺の経済活動を促進するための「10-Year Lunar Architecture(LunA-10)」計画を進めている。例えば、月面での通信やエネルギー供給の最適化を目指し、無線での電力供給と同時に通信やナビゲーションのサポートを行う電源ステーションの構築等が考えられている。

---

<sup>87</sup>

[https://www.drone.jp/news/20241201112801105018.html?utm\\_source=chatgpt.com#google\\_vignette](https://www.drone.jp/news/20241201112801105018.html?utm_source=chatgpt.com#google_vignette) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

<sup>88</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2023-09-07a/> (2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>89</sup> <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/power-receiver-array-demonstration-prad-ps-darpaps2425> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

また、米海軍研究所(NRL)では 2019 年 5 月、メリーランド州にある U.S. Naval Surface Warfare Center において長距離空間パワービーミングの初のデモンストレーションを行い、325m の距離にわたって 400W(受光部)のレーザー伝送を成功させた。

さらに NASA も月面でのエネルギー供給に適用できるレーザー WPT 技術の開発も行っている。

## イ) 民間企業

米カリフォルニア州に拠点を置く Gateway Spaceport LLC が 2018 年に設立したスタートアップである Above:Space Development 社(旧 Orbital Assembly Development Corp.)は、2023 年 11 月、米 Electric Sky 社と協力して、軌道上プラットフォーム「Archimedes」への無線電力伝送技術を開発しており、その実証となる地上試験に成功したと発表した<sup>90</sup>。

軍事領域での開発としては、2022 年 8 月に Lockheed Martin 社が米海軍に 60kW 超級のレーザー兵器システム HELIOS(high energy laser with integrated optical-dazzler and surveillance)を納入した<sup>91</sup>。

高出力・高輝度の産業用青色レーザーの開発および製造業者である NUBURU,Inc. は、同社独自のブルーレーザー技術を使用した宇宙でのパワービームの実現可能性を実証するために、2023 年 8 月に NASA より SBIR(Small Business Innovation Research)資金(第 1 フェーズ)を獲得し<sup>92</sup>、青色レーザーパワービーム技術の科学的、技術的、商業的実現可能性の実証を行った。2024 年 5 月には、続く第 2 フェーズとして青色レーザーパワービーム技術の出力、範囲、性能のスケールアップを目指し 85 万ドルの契約を獲得した。本プログラムでは km スケールの範囲で数百 W の電力を供給する技術を実証する計画で、同社はさらに月面で数十 km まで技術範囲を拡張できる次世代技術で高輝度レーザー光源を進化させていくという<sup>93</sup>

米国の PowerLight Technologies 社はレーザーによるワイヤレス給電技術の開発を行っているが、2024 年 12 月には、米中央軍(CENTCOM:Central Command)および国防総省のオペレーション・エネルギー・イノベーション本部と協力し、PTROL-UAS(Power TRansmitted Over Laser to UAS )プログラムの一環として、高度 5,000 フィート上空の Group 2 無人航空機システム(UAS)に WPT 給電を行い、飛行中に急速充電を行うことで着陸せずに任務を遂行できることを実証する計画を発表した。本実証に当たって、現在米海軍と米陸軍に超長距離耐久型 UAS (KL1000ULE)を提供している Kraus Hamdani Aerospace 社と提携し、2025 年秋に予定されている統合ワイヤレス・パワービーム飛行デモンストレーションで披露される予定となっている<sup>94</sup>。

また 2024 年 11 月、米国防総省は、米陸軍向けに指向性エネルギー無線電力技術を開発する契約を RTX Corporation 社に発注した(上述した DARPA の POWER プログラムの下で促進されたも

---

<sup>90</sup> <https://news.abovespace.com/2023/archimedes-orbital-system-showcases-successful-applications-of-directed-energy/>(2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>91</sup> <https://news.lockheedmartin.com/2022-08-18-Lockheed-Martin-Delivers-Integrated-Multi-Mission-Laser-Weapon-System-to-the-Navy> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

<sup>92</sup> <https://ir.nuburu.net/news/news-details/2023/NUBURU-Announces-Contract-With-NASA-for-Next-generation-Blue-Laser-Space-Technology/default.aspx> (2024 年 1 月 31 日閲覧)

<sup>93</sup> <https://ex-press.jp/lfwj/lfwj-news/lfwj-biz-market/56218/> (2024 年 12 月 20 日閲覧)

<sup>94</sup> <https://powerlighttech.com/press-release-centcom-uas-solution/>(2024 年 12 月 20 日閲覧)

の)。陸軍の有人・無人システム要件に沿った長距離テストを可能にする送信機と受信機の製造を対象としている(図 4-40 参照)。

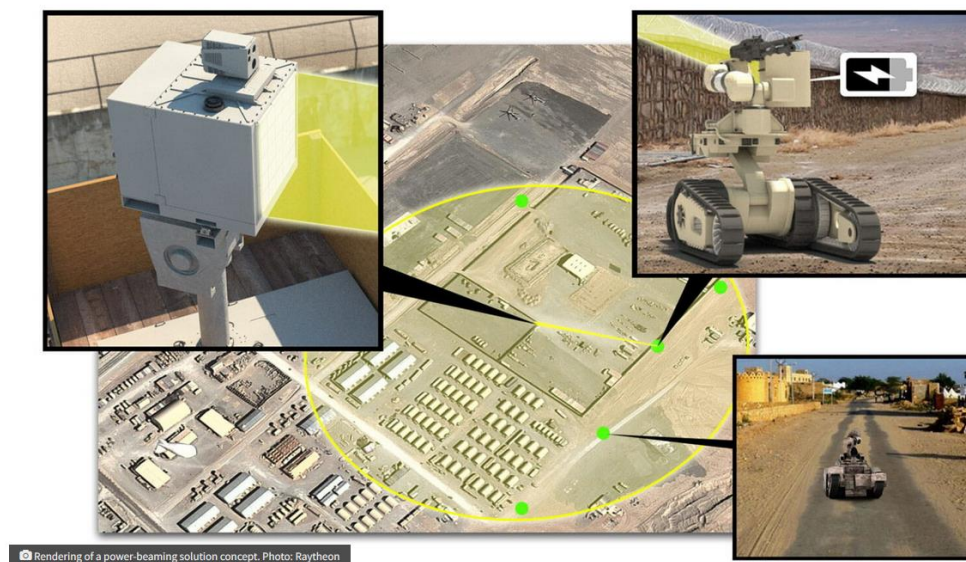


図 4-40 DoD の POWER ビーミングソリューションコンセプト

出所)<https://thedefensepost.com/2024/11/15/us-power-beaming-raytheon/>(2024 年 12 月 18 日閲覧)

## b. その他

米国以外では、英国で 2022 年 1 月、サリー大学とスタートアップ企業である Space Power 社が国家プロジェクト「SPRINT(SPACE Research and Innovation Network for Technology)」の一部として、LEO 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発を開始すると発表している。

中国では、2023 年 1 月、西北工業大学(NPU:Northwestern Polytechnical University)が光学駆動型ドローン(ODD:Optics-driven Drone)を開発したと報じられた<sup>95</sup>。

## (2) 空間伝送型 WPT の実用化動向

### 1) 電波方式 WPT の実用化取り組み事例

米国では、屋内・近距離・小電力システムについては、すでに一部製品化が行われており、915MHz、2.4GHz、5.8GHz のシステムが実用化されている。また、24GHz やミリ波のものも商品化に向けて開発が行われている。

米国の Energos 社では「WattUp®」Near Field 充電技術の製品化を行い、913MHz/2.4GHz 帯/5.8GHz 帯を用いた製品販売を行っている。

---

<sup>95</sup> <https://blog.euroavia.eu/2024/01/15/is-laser-power-beaming-the-future-of-the-drone-industry/> (2024 年 1 月 31 日閲覧)



カリフォルニア工科大学(Caltech)からのスピンオフとして設立された米国の GuRu Wireless 社は、ミリ波(24GHz 帯)による中距離充電技術(GuRu RF Lensing 技術)によるワイヤレス OTA (Over The Air)電力伝送向けシステム開発を行っている。2024 年 12 月には、業界最小の 24GHz RF システムオンパッケージ(SoP)モジュールを基盤とし、同社独自の RFIC を使用したモジュールを「タイル」として組み立て、同期型フェーズドアレイアンテナネットワークのノードとして機能させる WPT システムを発表した。ラボ内での実演では、送信機構成が完全にワイヤレスのドローンを 30 フィートの距離で直接電力供給する様子を示した。(図 4-41 参照)

米国の Ossia 社は 2.4GHz 帯や 5.7GHz 帯の電波を使用した「Cota<sup>®</sup>」の技術開発およびライセンス提供を行っている。2024 年 12 月、Cota のオリジナル評価キット「Marubun PRx Building and Evaluation Kit」において DC1W の受電電力を実現したことを発表した<sup>96</sup>。

米国の Powercast 社は 915MHz 帯域を利用した「Powercast<sup>®</sup>」、「Powerharvester<sup>®</sup>」等の製品販売を米国内で行っており、2024 年現在、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有し、2000 万個以上の製品の出荷を実現している<sup>97</sup>。

この他、2021 年 1 月には、中国の Xiaomi Corporation がミリ波を用いた近距離無線充電技術「Mi Air Charge Technology」(最大 5W)の開発を行うことを発表している(ただし 2025 年 2 月現在、本技術が使用された商業製品については確認できていない)。

一方、国内では 2022 年 5 月、マイクロ波給電の規制緩和第一ステップとして、総務省より「電波法施行規則等の一部を改正する省令」が公布され、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯において WPT 用周波数割り当てが行われ、無線電力伝送用構内無線局が開設された。これにより、国内の要件を満たす工場や倉庫などの屋内で空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムを用いた無線給電が可能となっている。エイターリンク株式会社、Space Power Technologies 社、パナソニック、京セラ、日本ガイシ、東芝、日本アンテナ等が製品化や実用化に向けた開発を進めているところである。

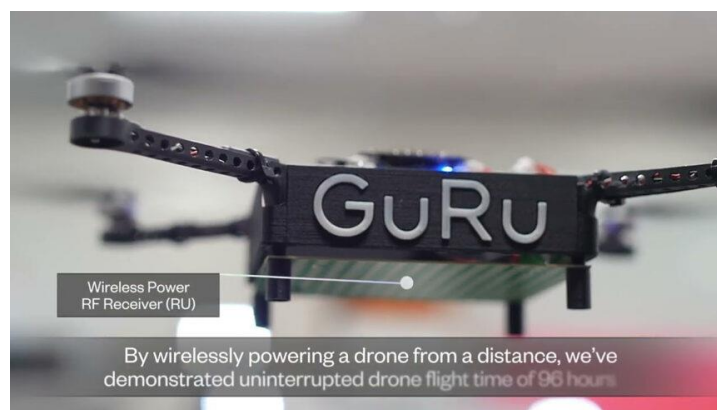


図 4-41 GuRu 社の無線で飛行するドローンの実証

出所)[https://www.drone.jp/news/20241220184806106744.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.drone.jp/news/20241220184806106744.html?utm_source=chatgpt.com) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

<sup>96</sup> [https://www.marubun.co.jp/wp-content/uploads/2024/12/20241217\\_pressrelease.pdf](https://www.marubun.co.jp/wp-content/uploads/2024/12/20241217_pressrelease.pdf) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

<sup>97</sup> <https://www.powercastco.com/> (2024 年 12 月 20 日閲覧)



## 2) レーザー方式 WPT の実用化取り組み事例

レーザー方式の WPT としては、イスラエルの Wi-Charge 社が赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術(AirCord™)の製品開発を行っている。2023 年 9 月には、日本の産業機器メーカーである東朋テクノロジー社と提携し、Wi-Charge の製品を国内の顧客工場で機器の稼働を実証したうえで納入することを発表した。

また米国の PHION Technologies 社も同様に赤外線を用いたワイヤレス給電技術の開発を行っており、2022 年 1 月に三菱地所株式会社が出資を行っている<sup>98</sup>。第 1 世代のモデルは、モバイル端末に 5W の電力を供給する予定で、将来的には 10m を超える距離において 20W で PC を充電することができ、送信機を天井に設置することにより、45～200 m<sup>2</sup>をカバーすることが想定されている。当初は 2022 年内に三菱地所が出資するインキュベーションセンターInspired.Labにおいて、モバイルデバイス向け充電の実証実験を行うとしていたが、2025 年 2 月現在、本実験に関する新たな情報は発信されていない。

## (3) WPT の市場規模に関する情報の整理

多くのリサーチ機関が無線給電市場に関するレポートを発行している。以下では、一例として 2024 年に発行された下に示す 2 種類のレポートの中で公表されている内容／数値等を整理する。

- [1] “2024 年版 ワイヤレス給電市場の現状と将来展望 ～非放射型と空間伝送型を中心に～”，矢野経済研究所，2024 年 1 月
- [2] “Wireless Power Transmission Market , Till 2035: Industry Trends and Global Forecasts” , Roots Analysis, 2024 年

### 1) 国内を含むワイヤレス伝送市場の現状と将来展望(矢野経済研究所)

2024 年 1 月に矢野経済研究所<sup>99</sup>が発行した“2024 年版 ワイヤレス給電市場の現状と将来展望 ～非放射型と空間伝送型を中心に～”によると、現在、小型電子機器向けを中心に成長している非放射型ワイヤレス給電世界市場は、今後は製造現場の自動化による産業機器向けモジュールの成長や、EV におけるワイヤレス給電システムの搭載によって順調に成長していき、2033 年の非放射型ワイヤレス給電(送電・受電モジュール)世界市場は 1 兆 824 億円規模に達するものと予測されている。

また、空間伝送型ワイヤレス給電ビジネスは FA・物流機器でのさらなる拡大の他、ビルマネジメント分野や介護・見守り機器などの多様なアプリケーションへの展開などで 2030 年の国内空間伝送型ワイヤレス給電(送電・受電モジュール)市場は 1,685 億円、2040 年には 8,418 億円規模に達するものと予測されている<sup>100</sup>。

---

<sup>98</sup> <https://www.presscube.jp/press-release/detail/53b170f2-5149-4e39-9a48-8a0407970942> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

2022 年春には同社の無線給電システムを設置し、携帯電話等のモバイルデバイスに給電を行う実証実験を実施する予定とされていた。

<sup>99</sup>株式会社矢野経済研究所は市場調査・世論調査・社会調査業を営む東京都の企業である。

<sup>100</sup> [https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/3466](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3466), (2025 年 1 月 14 日閲覧)

## 2) 2035 年までの市場予測(Roots Analysis)

2024 年に Roots Analysis 社<sup>101</sup>が発行した“Wireless Power Transmission Market , Till 2035: Industry Trends and Global Forecasts”によると、ワイヤレス電力伝送市場規模は、2024 年の 122 億 2 千万米ドルから 2035 年には 838 億米ドルに成長すると予測され、2035 年までの予測期間中の CAGR は 19.12%とされている(図 4-42 参照)。

世界のワイヤレス給電市場の成長トレンドは、新興国における需要の高まり、ワイヤレス技術の進歩、電気自動車に対する自動車需要の増加によって後押しされており、家電、自動車、産業分野など、産業全般にわたる大幅な技術進歩と利用により、予測期間中に大きく成長すると予想される。主な推進要因としては、家電製品、ウェアラブルの採用増加、効率的な充電ソリューションに対する需要の高まりなどが挙げられる。また、ワイヤレス電力伝送の技術進歩、電気自動車インフラとスマート技術を促進する政府の支援イニシアチブが市場成長をさらに促進している。

ワイヤレス電力伝送市場はレシーバーの種類によって、ノートブック、スマートフォン、タブレット、ウェアラブルエレクトロニクス、その他に分類されるが、スマートフォン分野は 2024 年には市場シェアの 35%以上を占めており、今後もこの分野を支配すると予測されている。

またワイヤレス電力伝送市場は、伝送距離の種類によって、長距離、中距離、短距離に分類されるが、短距離セグメントは、2024 年には市場シェアの 40%以上を占めており、さらに 2035 年までに比較的大きな成長率で成長すると予測されている。これは、利便性と効率性が最優先される家電製品、特にスマートフォンやウェアラブル製品に広く採用されていることに起因している。

さらにエンドユーザー産業ベースでみると、自動車、家電、防衛、ヘルスケア、発電、その他に分類されるが、民生用電子機器分野が 2024 年には市場シェアの 60%以上を占め、この分野を支配すると予想されている。これはスマートフォン、スマートウォッチ、ワイヤレスイヤホンなどの日常的な機器にワイヤレス充電技術が急速に採用されているためと考えられる。

地域別では、北米、欧州、アジア、中南米、中東、北アフリカ、その他の地域など、さまざまな地理的地域における市場が存在するが、アジアは 45%以上のシェアで市場の優位性を示している。さらに北米は予測期間中に比較的高い CAGR(20.86%)で成長すると予測されている。この成長の主な理由には、ワイヤレス充電技術の進歩を推進する大手テクノロジー企業や革新的新興企業の存在感が強いことが挙げられる。さらに家電製品の普及率が高く、スマートフォンユーザーやスマートウェアラブルの早期導入者が多いため、便利な充電ソリューションの需要が高まっていることも挙げられる。アジアは現在、ワイヤレス電力伝送市場の機会において約 45%という大きなシェアを占めているが、これは民生用電子機器の強力な製造基盤、電気自動車インフラへの大規模な投資、インドや中国のような国々における様々な分野でのワイヤレス充電ソリューションの急速な需要拡大など、いくつかの要因によるものである。特に優れたワイヤレス電力技術の創造につながる研究開発への多額の投資は、この地域の成長の主な支配的理由の 1 つとなっている。

このような市場の力強い成長予測にもかかわらず、ワイヤレス電力伝送市場はまた多くの課題に直面している。最も一般的な課題は、多額の研究開発投資による初期コストの高さ、距離によるエネルギー損失による効率の問題、現行技術の範囲の狭さである。さらに相互運用性の問題、電磁界伝達に関す

---

<sup>101</sup> Roots Analysis は 2013 年にインドで設立された医薬品・医療機器を中心とした様々な分野における市場調査およびコンサルティングを提供している企業である。

る安全性の懸念、規制上のハードル等の問題が採用をさらに複雑にしている。その他の課題として、消費者の認識が限定的であることや、有線電力ソリューションの確立されたシステムによる強い競争があること等も挙げられる。

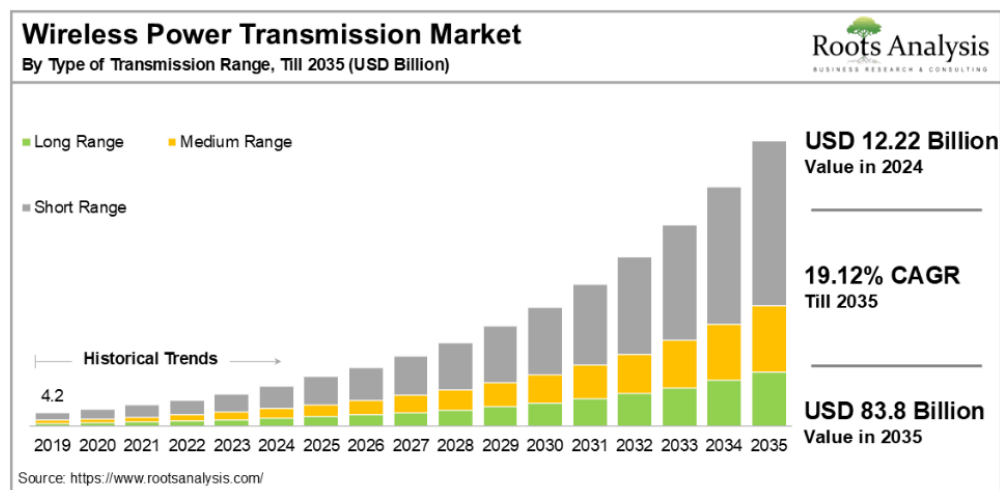


図 4-42 ワイヤレス電力伝送市場規模の実績と予測(2019 年～2035 年)

出所) <https://www.rootsanalysis.com/wireless-power-transmission-market#overview> (2025 年 1 月 15 日閲覧)

### 4.3.3 宇宙太陽光発電システム(SSPS)の経済性評価

#### (1) 欧米での代表的な FS におけるコストモデルやコスト算出方法の調査

2021 年以降、欧州を中心として、いくつかの代表的な SBSP のリファレンスシステムに対して経済性に関するフィージビリティスタディ(FS:Feasibility Study)や費用便益分析が複数実施されてきている。ここでは、以下に示す 4 種類の FS の中で行われている経済性に係る検討内容を調査し、用いられているコストモデルやコスト算出方法について整理を行った。

[RD1] “Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs”, Frazer-Nash Consultancy for ESA-funded study (Aug 2022)

[RD2] “Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power Generation for Terrestrial Energy Needs”, Roland Berger for ESA-funded study (July 2022)

[RD3] “Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”, Thales Alenia Space Italy (Dec 2023)

[RD4] “Space-Based Solar Power ”, NASA Office of Technology, Policy, and Strategy (Jan 2024)

## 1) Frazer-Nash Consultancy の費用便益分析

### a. 概要

2022 年 2～7 月、Frazer-Nash Consultancy(FNC)社は London Economics 社と共同で ESA からの委託により SBSP プログラムの包括的な費用便益分析を行った。具体的には、2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成するために、SBSP を欧州のエネルギーミックスの一つのエネルギー源に加える際に必要な投資、関連コストとリスク、期待される戦略、環境、経済、社会的利益に関する総合的な評価を行っている。英国の International Electric Company(IECL)社が設計した CASSIOPeiA のアーキテクチャを本スタディのリファレンスデザインとして想定し、SBSP のシステム構成ごとに技術成熟度と開発難易度を評価し、遅くとも 2040 年までに運用システムを導入するための課題も抽出している。また FNC 社によって作成されたコストモデルを用い、運転維持費(OPEX:OPerational EXpense)と初期投資費(CAPEX:CApital EXpenditure)の見積もりを行い、均等化発電原価(LCOE: Levelised Cost of Electricity)<sup>102</sup>の値を算出している。

### b. リファレンスシステム

図 4-43 に本スタディのリファレンスシステムとして用いた CASSIOPeiA システムを示す。英国 IECL 社の Ian Cash 氏によって提案され、現在は欧州および英国で検討されている SBSP の代表的なリファレンスシステムとなっている。

静止軌道または楕円軌道で運用される CASSIOPeiA では、ヘリカル太陽電池コレクターと統合した新しい 3 次元フェーズドアレイアンテナを使用している。ヘリカルアレイの軸の両端には太陽指向のミラーが設置され、高集光型太陽電池に太陽光を入射させる。RF、電気、熱、光学部品がすべて基板上に組み込まれており、機械的な要素が不要であるため、システム全体の質量を小さくすることが可能となっている。

システムの中心部は 61,000 のレイヤーからなる直径 2km のヘリカルアレイである。図 4-43 にレイヤーの簡略図を示す。CASSIOPeiA のアーキテクチャは、使用する太陽電池の種類を制限するものではないが、ここではフレネル一次光学系とケーラー二次光学系を備えた三接合の高集光型太陽電池の使用を想定している。マイクロ波ビームは、ヘリカルアレイの垂直壁に設置された 3 対のダイポールアンテナによって生成される。これらのアンテナは 2.45GHz で動作し、レクテナから受信したパイロットビームを基準として使用する。地上のレクテナの中心におけるマイクロ波ビームのピーク強度は  $245\text{W}/\text{m}^2$  である。地上のグリッドに供給される電力は 1.44GW となる。(宇宙で収集する太陽光は 8.8GW)本システムの主要要素の典型的な質量内訳を表 4-23 に示す。

地上のレクテナは長軸を南北方向とする楕円型となり、その長さは設置場所(緯度)により異なるが、1.44GW のシステムでは短軸は 6.3km と算出されている。レクテナの構造は比較的単純で、適切な構造物に支持された約 100mm 間隔で配置された相互接続された整流アンテナのグリッドである。レクテナは陸上にも海上にも設置できる。レクテナのグリッドは比較的オープンなので、レクテナでカバーされ

---

<sup>102</sup> 発電にかかる費用を総合的に評価する指標。施設建設費など初期費用、燃料費・保守管理費などのランニングコスト、解体・廃棄費用などを合計し、運用期間中に得る発電量で割って算出する。

る土地の領域は、マイクロ波フィールドの局所的な影響を認識した上で、他の目的にも使用できる可能性がある。なお発電所内の電力制御システムは、地上の太陽光発電所と類似したシステムが想定される。

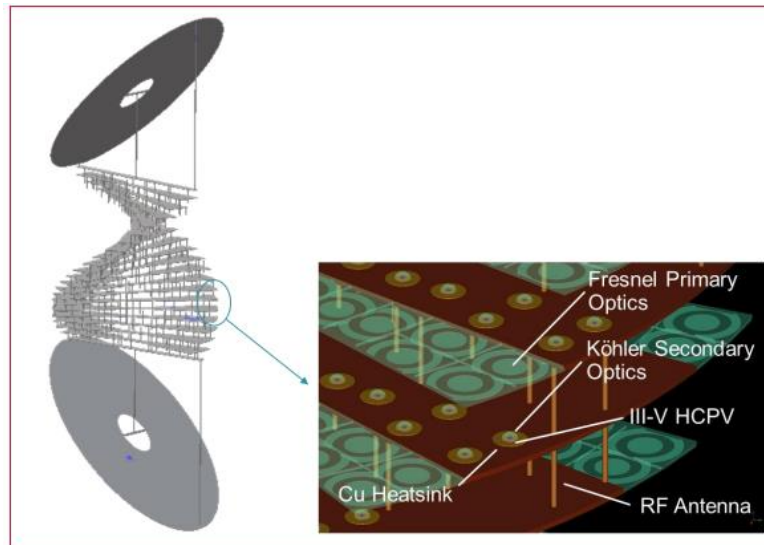


図 4-43 CASSIOPeiA コンセプトのスケルトンスケッチ

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility, Frazer-Nash Consultancy

表 4-23 1.44GW システムの重量ブレイクダウン

| Satellite Sub System        | Mass (kg)        |
|-----------------------------|------------------|
| PV                          | 1,349,200        |
| Reflector                   | 158,600          |
| Wireless Power Transmission | 358,400          |
| Thrusters                   | 2,100            |
| Communications and Control  | 9,500            |
| Structure                   | 186,400          |
| <b>Total</b>                | <b>2,064,200</b> |

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility, Frazer-Nash Consultancy

### c. 輸送／運用コンセプト

#### ア) 打上げ／輸送

SBSP の宇宙システムのモジュールは、選択されたロケットのペイロードに効率よく収納され、その後軌道上で自律的に展開・組立が行われるように設計されている。宇宙システムを最終軌道(静止軌道)に輸送するためには複数の方法が提案されているが、まずは再使用型のロケットが適切なトランスファ軌道(低軌道)まで輸送し、その後、軌道変換ビークルがペイロードを最終軌道まで上昇させるこ

とが想定されている。再使用型ロケットはすでに商業的に利用可能な状態にあるが、軌道変換ビークルは SBSP のための特注システムとなる可能性が高い。

宇宙システムの組立としてはいくつかの方法が考えられる。例えば、初期組立を低軌道等で行った後、最終組立が行われる最終軌道まで上昇させる方法、あるいは全ての組立を最終軌道で行う方法などがある。搬入軌道、組立軌道、トランスファー軌道の選択は、最終軌道の位置、ロケット性能、バン・アレン帯の放射線からペイロードを保護する必要性など、多くの要因に左右される。

軌道変換ビークルは市場に出始めているが、超小型および小型衛星市場向けであり、SBSP に必要なサイズのペイロードを提供する能力はないため、上述したように特注の軌道変換ビークルが必要になる可能性が高い。提案されている戦略の一つに、軌道上昇のための推力を提供するために、組立てられた宇宙システムの一部である軌道維持用スラスタを使用することが考えられている。しかし、これらは高効率で低推力の電気推進システムである可能性が高いため、軌道変換には数ヶ月を要する可能性が高く、システムの運用開始時期を遅らせることになるため、システムの経済性に大きな影響を与える可能性があり、収益を得る機会も遅れることになる。代替案としては、より高価ではあるが、化学エンジンを搭載した専用の軌道変換機を使用する方法がある。適切な軌道変換機はまだ存在しないため、コストを算出する際はいくつかの仮定を設定することとなるが、軌道変換機がスターシップと同様の技術をベースとすると仮定すると、ペイロードと推進剤の質量比はスターシップと同様となる。スターシップは地上からの打上げと大気圏再突入に耐えられるように設計されているため、この場合は保守的な見積りとなる可能性が高くなっている。

#### イ) 軌道上組立／保守

宇宙システムの建設は、軌道上での自律的な組立に依存し、多数のモジュールを連結して作られる。モジュールはロボット組立用に設計されており、その種類は多くない。組立用ロボットはモジュールと同程度の大きさで、衛星構造物の上を移動して組立てることが想定されている。ロボットは組立てられた構造物の上に残り、故障したモジュールを取り外したり交換したりと、その後の衛星の保守に利用されるシナリオが想定されている。

#### ウ) 廃棄

静止軌道のような高い軌道にある衛星の現在のトレンドは、寿命が来たら墓場軌道に上げることであり、SBSP の現在の想定シナリオも主に同様となっている。しかし SBSP が運用を開始する 2040 年までには、より優れたシステムや方法が利用できるようになっている可能性は高い。故障したモジュールの継続的な交換や、故障したモジュールから材料を回収して再利用する方法によって、システムの寿命を大幅に延ばすことも期待できる。

#### d. 主要技術課題

検討の結果、技術的な課題を克服し技術準備レベルを向上させるために、実質的な研究開発を必要とする重要なシステム要素が少数存在することが分かった。最も重要な課題は以下の通りである。



- Wireless power transmission (WPT):地上では現在までに km レベルの伝送距離でしか実績がない。超長距離の電力伝送の実証が必要である。高高度プラットフォーム(HAPS)もしくは軌道上からの実証が必要である。
- In-orbit assembly and maintenance:現在、軌道上サービスおよび製造(IOSM)において重要な開発が行われているが、これらは主に別の市場に焦点を当てたものであり、サービスを提供する衛星と同等の大きさで、さまざまな種類の衛星に対応することができる。SBSP の軌道上組立ロボットは、衛星システムから電力を得て、衛星システムを支持構造として使用する、衛星システムの特注品になる可能性がある。
- Structural design of satellite :SBSP は、現在軌道上にあるどの構造物よりも桁違いに大きくなる。そのため、必要な構造設計の要件が理解されていない。システムの質量を最小限に抑えつつ、主要なシステムの機能性能を維持するために十分な剛性を確保する必要がある。
- Decommissioning strategy:運用軌道上での環境影響、損傷に対する耐性、継続的な保守とアップグレードを考慮し、衛星コンポーネントの耐用年数を最大化する方法を検討する必要がある。
- Spacelift strategy:宇宙輸送戦略には、トランスファー軌道への輸送と、軌道変換機による軌道上昇の 2 つの要素がある。軌道変換の方法も設計に影響を与えるため、SBSP の開発者と打上げ輸送業者の間で緊密な協力が必要である。

## e. コスト評価

### ア) 各サブシステム要素の効率と価格の見積り

本費用便益スタディでは、FNC 社によって作成されたコストモデルを用い、CAPEX と初期費 OPEX の見積もりを行い、そこから均等化発電原価(LCOE)の値を算出している。CAPEX は主に「Ground Stations」「Satellite」「Enabling Systems(打上げ、軌道上システムおよび地上システムをサポートするもの等)」とから構成され、OPEX は主に「Connection & Use」「Operations」「Insurance」から成る。CAPEX および OPEX に寄与する具体的なコスト要素を表 4-24 に示す。

コストモデルではまた、各サブシステム要素の変換効率や回折物理学などの物理的な関係に基づいて、システム要素の寸法を推定している。さらに、単位面積当たりのコストや単位質量当たりのコストなどに基づき、システム要素のコストを見積もっている。さらに大量生産に伴うコスト削減についても考慮している。

表 4-25 では、このコストモデルを使用するために用いた各サブシステム要素の効率と価格の値を示す。ただし、価格についてはサブシステム要素ごとに面積当たりあるいは kg 当たりの単価となっており、その根拠については明らかではない。

なお本来、軌道上では継続的な保守や補給が行われることが期待されるが、本コストモデルでは、全耐用年数に渡り必要となる全てのハードウェアと推進剤が初期段階に納入されると仮定し、そのうえで年数に伴う性能劣化を表す係数を適用している。

表 4-24 FNC 社のコストモデルのコスト要素

| Cost Area | Cost Element                                |
|-----------|---------------------------------------------|
| Opex      | Connection                                  |
|           | Operation                                   |
|           | Insurance                                   |
| Capex     | Satellite                                   |
|           | Rectenna                                    |
|           | Land                                        |
|           | Control                                     |
|           | Balance of Plant                            |
|           | Launch Insurance                            |
|           | Spacelift                                   |
|           | Assembly                                    |
|           | Ground Station Construction Pre-development |
|           | Infrastructure                              |
|           | Engineering Team                            |

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs Final Report, July 2022, Frazer-Nash Consultancy

表 4-25 SBSP 各サブシステム要素の効率と価格の参考値

| 全体             | 効率    |      |       | 面質量                    |                         |                         | 価格                     |                        |                        |
|----------------|-------|------|-------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                | 上限値   | 平均値  | 下限値   | 上限値                    | 平均値                     | 下限値                     | 上限値                    | 平均値                    | 下限値                    |
| 集光             |       |      |       |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| リフレクタ効率        | 0.96  |      | 0.94  | 0.027kg/m <sup>2</sup> | 0.0266kg/m <sup>2</sup> | 0.0204kg/m <sup>2</sup> | 311.08€/kg             |                        | 289.5€/kg              |
| DC変換           |       |      |       |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| HCPV効率         | 0.36  |      | 0.27  | 0.25kg/m <sup>2</sup>  | 0.21kg/m <sup>2</sup>   | 0.17kg/m <sup>2</sup>   | 292.04€/m <sup>2</sup> | 126.97€/m <sup>2</sup> | 114.28€/m <sup>2</sup> |
| ハウスキーピング効率     | 0.97  |      | 0.95  |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| DC to RF (WPT) | 0.87  | 0.85 | 0.78  | 0.15kg/m <sup>2</sup>  |                         | 0.12kg/m <sup>2</sup>   | 3301.30€/kg            |                        | 1269.73€/kg            |
| 大気透過率          | 1     |      | 0.988 |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| 受電             |       |      |       |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| ビーム収集効率        | 0.84  |      | 0.84  |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| 配電&接続          |       |      |       |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| RF to DC       | 0.88  |      | 0.82  |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| DC to AC       | 0.985 |      | 0.95  |                        |                         |                         |                        |                        |                        |
| AC to Grid     | 1     |      | 0.999 |                        |                         |                         |                        |                        |                        |

出所) <https://www.fnc.co.uk/media/fi4pvbgy/space-based-solar-power-final-report.pdf> を基に作成

## イ) システムコストの見積り

本コストモデルは、SBSP システム設計コンセプトの要素間の基本的な関係を記述して、主要なパラメータに対する感度を調べることができるようにしたものとなっている。ただし CASSIOPeiA リファレンスデザインは、コンセプトデザインの初期段階にあり、基盤技術も開発の初期段階にある側面もあるため、将来のシステムに期待される性能とコストにはかなりの不確実性が存在する。この不確実性を反映させるために、確率的パラメトリックコストモデルが使用されており、低確率(p10)、中確率(p50)、高確率(p90)の3通りのケースでコスト見積りを行っている。なお p10 予測とは、正しい値が予測値よりも低くなる確率が10%であると予想されるものであることを示している。

その結果、図 4-44 に示すように 1.44GW の電力をグリッドに供給する SBSP システムの検討では、現在(2022 年)の価格での初号機 SBSP システムの CAPEX は 48 億ユーロ(p10)~98 億ユーロ(p90)であると試算された。30 年の耐用年数における OPEX は、25 億ユーロ(p10)から 35 億ユーロ(p90)と推定される。この結果、2022 年の価格で、欧州の SBSP 初号機システムの総コスト

は 73 億ユーロ(p10)～133 億ユーロ(p90)となる。LCOE 見積もりでは、106 ユーロ/MWh(p10)～206 ユーロ/MWh(p90)の範囲となる。なお LCOE の計算には 20%の割引率を用いているが、この割引率はプロジェクトの基本コストとリスクを考慮し、機関投資家が要求する予想ハードル・レート<sup>103</sup>に基づいている。

また、規模の経済性から第 10 基目の SBSP の CAPEX は 76 億ユーロに抑えることが可能であり、OPEX も 13 億ユーロに低減させることができるとしている。LCOE 見積もり(ハードル・レート 20%)では 156 ユーロ/MWh と見込まれ、すべての主要な低炭素エネルギー発電源と競争できる可能性がある数字となる。さらに、SBSP の技術的リスクが軽減されれば、投資家はベースロードの代替エネルギーと同程度のハードル・レートを設定することができ、ハードル・レートが 10%の場合、最初の SBSP システムの LCOE は 109 ユーロ/MWh となり、原子力の新規建設計画と同等となる。ハードル・レートが 5%の場合では、LCOE は 69 ユーロ/MWh であり、すべての代替エネルギー源よりもコスト競争力を持つことが想定される。表 4-26 に各エネルギー源の LCOE と価格調整済み LCOE(VALCOE:Value-adjusted LCOE)<sup>104</sup>の値を示す。

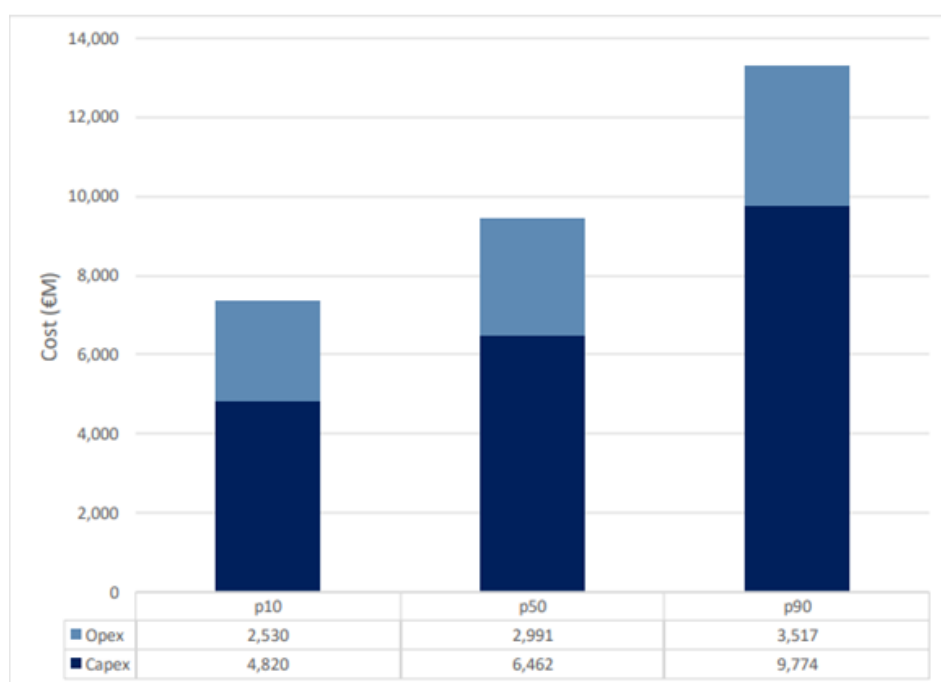


図 4-44 1.44GW の SBSP システムの初号機システムの構築コストと運用コスト

出所)Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs Final Report, July 2022, Frazer-Nash Consultancy

<sup>103</sup> 必要利回り、投資判断における必要最低限の収益率。投資の条件や目的によって異なる。

<sup>104</sup> 再生可能エネルギーの大量導入等に伴う電力市場の変化を経済性評価に取り入れるために国際エネルギー機関(IEA:International Energy Agency)が考案した指標。あるエネルギーミックス内で、各電源の①電力量価値、②容量価値、及び③柔軟性価値を計測。「価値が低い電源」を「相対的にコストが高い」電源と見做し、市場の平均価値から当該電源の価値を引いた値を LCOE に加算することで、価値によるコストの補正を行う。

表 4-26 エネルギー源別の LCOE と VALCOE(単位:2022 年価格、€/MWh)

| Macrogroup             | Subgroup             | Generation technology                                   | LCOE  | VALCOE |
|------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|-------|--------|
| Fossil fuels           | Oil <sup>[B]</sup>   | Oil                                                     | 365.7 | 339.0  |
|                        |                      | Oil with CCS                                            | 363.2 | 336.5  |
|                        | Coal <sup>[I]</sup>  | Coal                                                    | 154.7 | 128.1  |
|                        |                      | Coal with CCS                                           | 152.2 | 125.6  |
|                        | Gas <sup>[I]</sup>   | Gas CCGT                                                | 133.2 | 105.5  |
|                        |                      | Gas CCGT with CCS                                       | 143.2 | 115.5  |
| Nuclear <sup>[I]</sup> |                      | New Nuclear                                             | 107.9 | 107.9  |
|                        |                      | Lifetime Extension                                      | 43.1  | 43.1   |
| Renewable              |                      | Biomass <sup>[F]</sup>                                  | 132.5 | 104.7  |
|                        | Solar <sup>[I]</sup> | Solar PV                                                | 83.9  | 101.9  |
|                        |                      | Solar PV + Storage                                      | 93.2  | 87.8   |
|                        | Wind <sup>[I]</sup>  | Wind onshore                                            | 88.3  | 102.5  |
|                        |                      | Wind offshore                                           | 88.3  | 102.5  |
|                        |                      | Wind + storage                                          | 97.6  | 88.3   |
|                        |                      | Hydro (reservoir) <sup>[T]</sup>                        | 74.7  | 61.1   |
|                        |                      | Geothermal <sup>[T]</sup>                               | 67.1  | 67.1   |
| SBSP                   | NOAK                 | 10 <sup>th</sup> of a kind, 90 <sup>th</sup> percentile | 155.5 | 155.5  |

Sources: [I]: International Energy Agency (2020), *European Union 2020 Energy Policy Review*;

[F]: Fraunhofer ISE (2021), *Levelised Cost of Electricity of Renewable Energy Technologies*;

[T]: Trinomics (2020), *Final Report Cost of Energy (LCOE), EC DG Energy*

[B]: BEIS. (2020). *Electricity Generation Costs 2020*

Notes: 'CCS' = 'carbon capture and storage', 'SBSP' = 'Space Based Solar Power'. The value adjustments to SBSP are considered to be broadly similar to Nuclear, and therefore the total value adjustment assumed for SBSP is 0.

出所)Cost-Benefit Analysis of Space-based solar power (SBSP) for terrestrial energy needs, TN 4 , June 2022, London Economics

## ウ) 開発プログラムとコスト

本研究では、SBSP システムに必要な技術を成熟させるための 4 段階のプログラムを導入し、大型で複雑なプロトタイプの開発を通じてシステムの設計を開発し、本格的な量産前の運用プロトタイプにつなげようとするロードマップを描いている。

- Phase1:地上の WPT 試験
- Phase2:40MW 級の実証機(極軌道)
- Phase3:500MW 級の実証機(運用軌道)
- Phase4:本格的なプロトタイプ(運用軌道)

コストについては、完全に動作するプロトタイプまで 18 年かかると仮定すると、80 億ユーロから 160 億ユーロの開発コストが見込まれる。

ただし、CAPEX および OPEX および LCOE の計算では、必要な研究、開発、試験、評価がシステム生産前に完了していることを前提としているため、これらの開発コストは含まれていない。

## エ) 費用便益分析

ベースケースシナリオ(パリ協定で欧州諸国が約束した法的拘束力のある Net Zero を達成するシナリオ)の場合、2022 年から 2070 年の間で 54 基の SBSP が必要となり、開発・運用に必要なコス

トが4,180 億ユーロに達するが、トータル便益は 6,010 億ユーロとなると見込まれる。便益として計算されている項目は、SBSP を導入することで回避される地上エネルギー発電のコストの正味現在価値、抑制される CO2 の社会的コスト、研究開発活動からの波及効果、土地の機会費用である。差し引きトータルの利益の現在価値は 1,830 億ユーロと推定される(表 4-27 参照)。

なお費用便益分析では、ESA 加盟国または EU 加盟国(あるいはその両方)である 30 カ国に焦点を当て、Net Zero のケーススタディーを行っている。さらに分析期間中に最もエネルギーを消費すると予測される 5 カ国(フランス、ドイツ、イタリア、ポーランド、イギリス)を対象に、国別のシナリオ等も検討している。

表 4-27 SBSP の費用便益分析(2070 年までに 54 基導入の場合)

Table 4 NPV of SBSP benefits: Summary

| Value driver                                                  | NPV (€ billions) |
|---------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>(1) SBSP total cost</b>                                    | <b>(417.9)</b>   |
| CAPEX (SBSP)                                                  | (382.5)          |
| R&D (SBSP)                                                    | (10.4)           |
| O&M (SBSP)                                                    | (24.9)           |
| <b>(2) Avoided cost of terrestrial electricity generation</b> | <b>302.4</b>     |
| <b>(3) Externalities total</b>                                | <b>298.1</b>     |
| CO2 emissions saved                                           | 233.2            |
| R&D spillovers                                                | 64.5             |
| Opportunity cost of land                                      | 0.3              |
| <b>SBSP total benefits (total of (2)+(3))</b>                 | <b>600.5</b>     |
| <b>Total Net Benefits (2+3-1)</b>                             | <b>182.6</b>     |

Source: London Economics analysis

出所)Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs Final Report, July 2022, Frazer-Nash Consultancy

## f. その他／結論等

本研究の結果、SBSP は欧州のエネルギー需要の拡大と欧州の 2050 年までの Net Zero 達成への対応に大きな変化をもたらす可能性があることが分かった。また、SBSP は大規模な開発を必要とするものであるが、再生可能エネルギーでありながら常時発電が可能であるという特長を有するため、石油、石炭、ガス等の発電の直接の代替エネルギーとなり得るものであり、2040 年までには、石油、石炭、ガスと比較してコスト競争力のあるシステムを構築することも可能である。

また SBSP を実現することにより欧州が受けるメリットとしては、以下に示す項目が挙げられる。

### <SBSP の実現によるメリット>

- エネルギー源の多様化の促進
- 欧州のエネルギー独立と安全保障への寄与:世界的なエネルギーの純輸出国になる可能性

- 間欠的な自然エネルギーの割合が高い将来のエネルギーシステムにおいて、SBSP を系統連携させることによる安定性の向上
- 他の自然エネルギーより高い土地利用効率による、土地利用の有効性の向上
- 電力料金の安定化
- R&D スピルオーバーと技術進化の促進
- 新輸出機会の創出
- CO2 排出量およびその他の汚染物質の排出量の削減

また、打上げ能力は SBSP の展開のタイミングとスピードにとって重要な制約となるため、SBSP の打上げ需要に対応するためには打上げ能力の増強が必要である。将来のシナリオにもよるが、SBSP を実現するためには、年間数百から数千回の打上げ需要が発生するため、低コストで再利用可能な打上げロケットの商業的に持続可能な市場を欧州で支えることも可能である。欧州の宇宙港と再利用可能な大型ロケット 1 基があれば、年間約 77 回の SBSP 打上げに対応でき、1 年で SBSP1 基を追加で打上げることが可能である。

## 2) Roland Berger の費用便益分析

### a. 概要

2022 年 2～7 月、Roland Berger 社は OHB Systems AG 社と共同で ESA からの委託により SBSP プログラムの包括的な費用便益調査分析を行った<sup>105</sup>。本スタディでは、元 NASA の John C. Mankins 氏が設計した SPS-ALPHA のアーキテクチャをリファレンスデザインとして想定し、2040 年までの GW 規模(グリッド電力:2GW)の SBSP の技術的な実現可能性の評価を行い、OHB Systems 社の独自の計算とデータシートに基づいて費用便益分析を行っている。

スタディではまた、2040 年には航空機のようなサービス(打上げ、着陸、燃料補給、再度の打上げ)を提供する再使用型打上げシステムが市場に出てくるというのが、宇宙専門家の共通認識となっており、これに基づき SBSP が実現できる可能性があるとし、軌道に展開する SBSP システムに必要な主要要素と開発期間の概要を検討している。

結論としては、SBSP は太陽光発電を再生可能なベースロード容量に変える可能性を持っているため、今後数十年の間に欧州のエネルギー部門の脱炭素化に大きく貢献することができ、欧州各国(フランス、ドイツ、イタリア、英国、ポーランド)はエネルギー部門の弾力性と独立性を高めるためにも、複数の SBSP システムを早期に立ち上げ、電力網に統合することができれば、その貢献度は高くなることが見込まれる、としている。

---

<sup>105</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/Cost\\_vs.\\_benefits\\_studies](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Cost_vs._benefits_studies) (2024 年 8 月 15 日閲覧)



## b. リファレンスシステム

SPS ALPHA は大規模なヘリオスタットのアレイを使用するアーキテクチャとなっている(図 4-45 参照)。ヘリオスタットは太陽光を追尾し、エネルギー変換アレイ(PV アレイ/無線電力伝送アレイ)に 3 倍の集光度で太陽光を集光する。軌道維持は重力勾配により行われるため、推進剤、ジャイロ스코ープ、リアクション・ホイールなどを使った能動的な要素は使用されていない。またモジュール化コンセプトにより設計されており、すべての要素や部品を簡単に交換することができる。同じモジュール・セグメントを 1000 個単位で大量に生産し、軌道上で組み立てるシナリオが想定されている。これは何千もの衛星を生産ラインで製造するメガコンステレーションのアプローチと同様である。大量生産によってハードウェアのコストが大幅に削減される見込みとなっている。

最終グリッド電力が 2GW のシステムについて、Mankins 氏は重量、寸法、およびコスト等を算出しているが(総重量:7,496ton、SPS H/W コスト:58.9 億ドル、発電コスト:~6¢/kWh)、本レポートでは OHB チームが独自の計算により新たにこれらの見積りを Optimistic および Pessimistic の 2 通りのケースについて行っている。

無線電力伝送システムとしては、周波数は 2.45 あるいは 5.8GHz、発振器としてはマグネトロン、SSPA およびクライストロンの可能性について言及しており、一つに選択することはしていない。End to End WP 効率(宇宙での DC から地上でのグリッド接続電力までの効率)は Optimistic のケースで 0.71、Pessimistic のケースで 0.42 としている。発電部については高効率マルチバンドギャップ PV 太陽電池を想定しており、効率は Optimistic のケースで 0.4、Pessimistic のケースで 0.27 としている。基本的な構造要素は Hexbus と Hexframes であり、Hexframes は Hexbus で接続された展開可能なブームとなっている。表 4-28 に、これらの仮定に基づき計算した SPS-ALPHA の宇宙セグメントの質量の概要を示す。

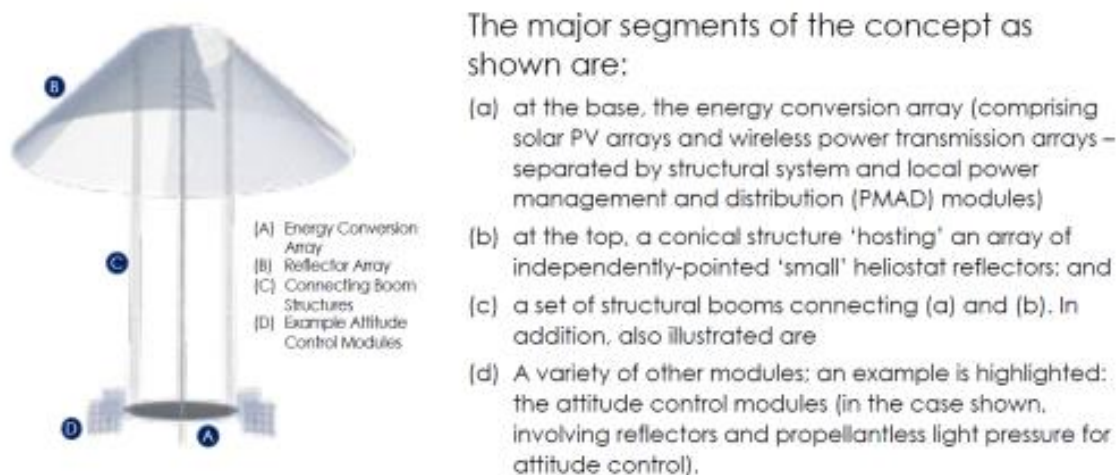


図 4-45 SPS Alpha アーキテクチャ

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility of a SPS, OHB

表 4-28 SPS-Alpha の宇宙セグメントの質量概要(OHB 計算)

| Power Generation SPS BoL  | Optimistic  | Pessimistic  | Comment                                                                                                                       |
|---------------------------|-------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PV Mass [t]               | 1303        | 4346         | Pessimistic: WPT efficiency 42%<br>Optimistic: WPT efficiency 71%                                                             |
| SPS Reflector Mass [t]    | 54          | 212          | Pessimistic: WPT efficiency 42%<br>Optimistic: WPT efficiency 71%                                                             |
| Transmitter Mass [t]      | 857         | 6391         | Optimistic: Caltec Mass 0,5 kg/m <sup>2</sup> ; 71% WPT efficiency<br>Pessimistic: 1,5 kg/m <sup>2</sup> ; 42% WPT efficiency |
| Structure Mass [t]        | 3883        | 5557         | Based on Pessimistic and Optimistic PV area                                                                                   |
| <b>Total SPS Mass [t]</b> | <b>6097</b> | <b>16507</b> |                                                                                                                               |

出所)Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility of a SPS, OHB

### c. 輸送／運用コンセプト

#### ア) 打上げ／輸送

SBSP を GEO に輸送するには、完全再使用型ロケットシステムによる LEO への打上げが最も有望であり、LEO から GEO への輸送は強力な電気推進力を持つ再使用可能なスペーススタグか、化学推進システムのどちらかを使用する必要がある。さらに、それらはコストを削減するために、GEO への輸送のたびに軌道上で燃料を補給し再使用することが求められるため、スペーススタグの推進剤を補充するための燃料補給ステーションが LEO に必要とされる。スペーススタグについては、電気推進は効率が高いため、化学推進に比べて必要な推進剤が少なく済むが、推力は化学推進に比べてはるかに低いため、LEO から GEO の目標軌道までの輸送時間は、化学推進システムに比して長期間を要することとなり、その分、ハードウェアの劣化も伴うこととなる。また安価で効率的な軌道上輸送を可能にするためには、大規模に入手可能な推進剤を使用する電気推進システムを開発する必要がある。

LEO までの輸送に関しては、SpaceX 社が Falcon 9 ロケットを市場に導入して以来、商業打上げ価格は大幅に低下したが、再使用型ロケットが複数登場すれば、さらなるコストダウンが期待できる。

表 4-29 に本レポートで想定されている SBSP システムの LEO までの打上げロケットの打上げ能力、打上げコスト等を示す。Falcon 9 および Falcon Heavy 以外は予定の数字となっている。これらの数字を考慮し、2040 年の SBSP の打上げ機を以下のように仮定する。

<想定する 2040 年の LEO までの打上げ機>

- 複数の宇宙機関や企業が、最大 100t の打上げ能力を持つ再使用型打上げシステムの開発を行っており、航空機のような運用が可能な再使用型打上げシステムが複数登場している。
- SBSP が実現すれば、打上げ市場はさらに拡大し、商業ベースで競争状態となる。
- その場合、LEO までの打上げ価格は 50-100\$/kg の範囲となる可能性がある。

OHB のレポートでは、LEO へのスターシップの打上げコストを 50-100\$/kg とし、SBSP セグメントを 1 バッチで最大 10 回(燃料補給を含む)打上げると仮定すると、スターシップを使った GEO への打上げコストは 500-1000\$/kg と見込むことができる、とされている。

表 4-29 OHB のレポートで想定されている打上げ機と能力

| 打上げ機              | 打上げ能力 (t) |       | 想定再利用回数 | 打上げコスト                        | 初打上げ              |
|-------------------|-----------|-------|---------|-------------------------------|-------------------|
|                   | LEO       | GTO   |         |                               |                   |
| Falcon 9          | 22.8      | 8.3   |         | 67百万ドル／回<br>2,940\$/kg (LEO)  | 2013年             |
| Falcon Heavy      | 63.8      | 26.7  |         | 90百万ドル／回<br>1,410\$/kg (LEO)  | 2018年             |
| SpaceX's Starship | 100       | 21-40 | 100回    | 10百万ドル／回<br>100 \$ /1kg (LEO) | 2023年             |
| Ariane 6          | 21.6      | 12    |         | Ariane 5から半減                  | 2023年10～12<br>月予定 |
| New Glenn         | 45        | 13.6  |         |                               | 2023年             |
| Terran R          | 20        |       |         |                               | 2024年             |
| Skylon            | 17        | 7.3   |         |                               |                   |
| Neutron           | 8         |       |         |                               | 2024年             |

出所)“System breakdown, costs and technical feasibility of a SPS”, SBSP-OHB-TN-003, July 2022 を基に作成  
※初打上げの予定年はレポートの数字ではなく、独自調査

## イ) 軌道上組立

SBSP の個々のモジュールと構造体は、軌道上の自律型ロボットアームにより組立ておよびメンテナンスが行われる。SPS-Alpha では、約 5000 本のロボットアームが必要であることが想定されている。さらにシステムの各要素やモジュールをつなぐインターコネクタも約 90 万個の数が必要とされている。

## ウ) 宇宙デブリの軽減

SBSP は超大型構造物であるため、デブリ衝突の回避操作を行うことはできないが、モジュール化構造でもあるため、デブリ衝突の影響を最小にするような運用を行うことが可能である。デブリにより損傷したモジュールはメンテナンス時に交換することが可能である。

一方で、このような衝突によって生じたデブリは、長期的には他の宇宙システムに脅威を与える可能性があるため、SBSP システムから放出されるデブリを軽減するための対策を講じる必要がある。一例として、自己修復材料の導入等が挙げられる。

## d. 重要要素技術

SBSP を実現させる重要要素技術として、以下の課題が挙げられている。

- 無線電力伝送システム  
SBSP で想定されているような電力レベル(GW スケール)と伝送距離に対しての実証は過去に一度も行われていない。
- 発電部  
世界中の研究機関が、タンデムセル/マルチジャンクションセルを用いた高効率な太陽電池の開発を行っているが、高効率な光電変換を行うためには、太陽電池セルを適切な温度に保つ必要があるため、合わせて熱管理技術を適用することが重要となる。さらに SBSP では EOL 時の効率も重要なパラメータとなっている。
- リフレクタ  
大型の薄型反射鏡については、技術成熟度はすでに高いものとなっている。今後は低コスト化を達成するために、生産規模を拡大することが期待される。
- 電力伝送部(送信アンテナ)  
電力伝送部(送信アンテナ)に関しては、ほとんどの主要部品が市販されており、量産が可能であるが、電力伝送に適した高効率の増幅器の開発が今後は必要となる。
- バックボーン構造体  
SBSP のバックボーンとなる重要な技術としては大型モジュール構造とビーム展開技術が挙げられる。大型モジュール構造に関しては、数平方 km に及ぶ接合型モジュール構造物の建設と挙動は、地上でも宇宙でも経験がないため、今後特化した開発プログラムが必要となる。ビーム展開技術に関しては、宇宙での展開型構造物は実証済みであるものの、SBSP のビームは、数 km に及ぶ巨大なバックボーン構造を接続・統合するための適切な機械的インターフェースを提供する必要がある、接続後の構造物の挙動についてもさらなる研究開発を要する。
- 受電部  
レクテナに必要な基本材料は鉄かアルミニウムであり、主な部品はダイオードで、すでに大量生産されており、非常に安価に入手可能である。技術的な開発要素は特にないが、経済性の問題が重要となり、安価に建設および運用できることが求められる。

## e. コスト評価

上記の SPS Alpha をリファレンスモデルとして、OHB の計算とデータシートに基づいて費用便益分析を行った。

SPS ALPHA は、モジュール化コンセプトにより設計されており、同じモジュール・セグメントを大量に生産し、軌道上で組み立てるというものである。これは何千もの衛星を生産ラインで製造するメガコンステレーションのアプローチと同様である。大量生産によってハードウェアのコストが大幅に削減される見込みとなっている。SPS-ALPHA の場合、Mankins 氏の計算では、量産工程で数百万個のモジュールを製造すると仮定した場合、ハードウェアコストは 775 \$/kg と見積もられている。

本コスト評価では、SBSP の宇宙システム部は Optimistic のケースで 775€/kg、Pessimistic のケースで 1,000€/kg を使用して、これらの単価に SBSP 宇宙システム部の重量の値を乗じて見積もっている。輸送システムは、LEO へのスターシップの打上げコストを 50-100\$/kg とし、スターシップを使った GEO への打上げコストは 500-1000€/kg と見込んで、GEO までの輸送コストの計算を行っている。また、地上システムについては、100\$/m<sup>2</sup> で計算すると、総コストは非常に高価になるが、

ここでも規模の経済、自動生産、学習曲線の要素により 10 倍から 20 倍までコストを下げるができる。ハードウェアのコストについては必要な基本材料はスチールかアルミニウム、主な部品はダイオードで、非常に低コストで入手できることを考慮すると、総じて地上システム 1 基のコストは約 3 億～4 億€になると予想している。

以上の結果主要技術の大幅な進歩を前提として、単一の SBSP システムの建設費用は 81 億€、そのような進歩がない悲観的なシナリオでは、同じ設計の建設に 334 億€要すると見積もられている(表 4-30 参照)。

さらに、これらの数字を CAPEX として、運用に関するパラメータを表 4-31 のように設定して、均等化発電原価(LCOE)の計算を行った。2GW の容量を持つシステムの稼働率を 90%と想定して(メンテナンスによるダウンタイムを想定)年間発電量を 15.8TWh とした。また耐用年数を 30 年とし、O&M コストは他の大規模インフラプロジェクトと同様、CAPEX の 3%と見積もった。なお研究開発費(2.3～3.45€と試算)と廃炉費用は LCOE の計算には含まれていない。

表 4-30 コストモデルによるコスト算出結果

| Segment                            | Optimistic<br>(71 % WPT<br>efficiency) | Pessimistic<br>(42 % WPT<br>efficiency) | Comment                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Space Hardware Cost<br>[Billion €] | 4,73                                   | 16,51                                   | Optimistic: 6100t Hardware @775 €/kg<br>Pessimistic: 16500t Hardware @1000 €/kg<br>50% of the mass are structure elements.<br>Those are not rare materials. This justifies<br>the low price per kg compared to today S/C<br>H/W prices. |
| Ground Segment Cost<br>[Billion €] | 0,3                                    | 0,4                                     | Cost estimate from Section 6                                                                                                                                                                                                            |
| Launch Segment Cost<br>[Billion €] | 3,05                                   | 16,51                                   | Optimistic: 6100t @ 500€/kg<br>Pessimistic: 16500t @ 1000€/kg<br>As reference scenario the in-orbit refuelling<br>of the launcher upper stage has been<br>assumed to transfer from LEO to GEO                                           |
| SPS Cost estimate<br>[Billion €]   | 8,07                                   | 33,41                                   |                                                                                                                                                                                                                                         |

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN3 - System Breakdown, Costs and Technical Feasibility of a SPS, OHB

表 4-31 運用に関して使用したパラメータ値

| Category                      | Unit       | Value  |
|-------------------------------|------------|--------|
| Total capacity                | GW         | 2      |
| Electricity generation        | GWh p.a.   | 15,779 |
| Hours per day                 | hours      | 24     |
| Nr. of days per year          | days       | 365.25 |
| Downtime due to maintenance   | %          | 10%    |
| Economic lifetime             | years      | 30     |
| O&M cost                      | % of CAPEX | 3%     |
| Cost of money (discount rate) | %          | 10%    |

出所) Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs / TN4 – Roland Berger / OHB

## f. SBSP の競争力と可能性

SBSP のコスト仮定に基づくと、価値調整済み LCOE (VALCOE: Value-adjusted LCOE) は最初のシステムで 69 ユーロ/MWh となることが想定される<sup>106</sup>。最初の 10 基の SBSP 展開では、コスト削減の効果が見込め 49 ユーロ/MWh と推定される。IEA の政策シナリオ (STEPS) によると、他の再生可能技術の VALCOE は、2040 年に 40～58 ユーロ/MWh、2050 年に 37～58 ユーロ/MWh の範囲になるという。したがって SBSP はベースロード発電能力を提供しながら、コスト競争力のある再生可能エネルギーになる可能性を有しているといえる。

## 3) Thales Alenia Space Italy のスタディ

### a. 概要

2023 年 4 月、ESA は商用規模の SBSP に関する 2 件のコンセプト・スタディ“ Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”の契約を締結した。うち 1 件を Thales Alenia Space Italy 社 (以下 TAS 社) が受託し、2023 年末までスタディ<sup>107</sup>が行われた。

本スタディでは、SBSP の利点は風力や地上の太陽エネルギーと比較した場合、一年中、昼夜を問わず、天候に左右されずにエネルギーを供給できることであるとし、SBSP リファレンスシステムとして最大 1GW±TBD% の 24 時間 365 日利用可能な定常ベースロード電力を供給可能であるものを想定

<sup>106</sup> SBSP の場合、信頼性が高いがグリーンなベースロード容量を提供できる原子力発電と同様で発電量が安定しているため、LCoE と VALCoE の計算値は同値となる、としている。

<sup>107</sup> <https://nebula.esa.int/content/pre-phase-system-study-commercial-scale-space-based-solar-power-sbsp-system-terrestrial-0> (2024 年 8 月 1 日閲覧)



し、GEO 上の SPS(Solar Power Satellite)からスペインにある地上ステーション GPS(Ground Power Station)にエネルギー供給するシステムを想定している<sup>108</sup>。

レポートの結論としては、技術的、経済的、プログラムの側面から総合的に判断すると SBSP は持続可能な変革の可能性を秘めたエネルギーソリューションとして有望であるとし、今後はさらなる研究開発と国際協力が鍵となる、としている。

## b. リファレンスシステム

表 4-32 に、リファレンスシステム(以下 TAS-SPS)の検討に当たり行ったアーキテクチャ・トレードオフの結果を、また図 4-46～図 4-47 に TAS-SPS の形状と寸法等を示す。周波数としては 5.8GHz、太陽電池はフレキシブル・ロールアウト型のペロブスカイト(効率 29%を想定)を使用することが想定されている。2 つの太陽電池アレイ翼と円形のフェーズドアレイアンテナから構成されるが、全体がモジュール構造となっており、AOCS(Attitude and Orbit Control Subsystem)が太陽電池パネルを太陽の方向に向ける役割を果たし、アンテナは常に地球方向を指向するようになっている。このアンテナの回転はモーター駆動のロータリージョイントが基本として考えられているが、本システムの大きな技術課題の一つとなっている。太陽電池セルの総面積は 6.2km<sup>2</sup>、フェーズドアレイアンテナの面積は 0.44km<sup>2</sup>(直径 0.75km の円形)、宇宙システムの総重量は 6,640ton と見積もられている。スペインに設置される GPS の面積は 34km<sup>2</sup>となっている。レクテナパネル(メッシュ)は緯度に合わせた傾斜をつけて設置する必要があるが、パネル間の空き領域は作物生産などの目的に利用できる、としている。

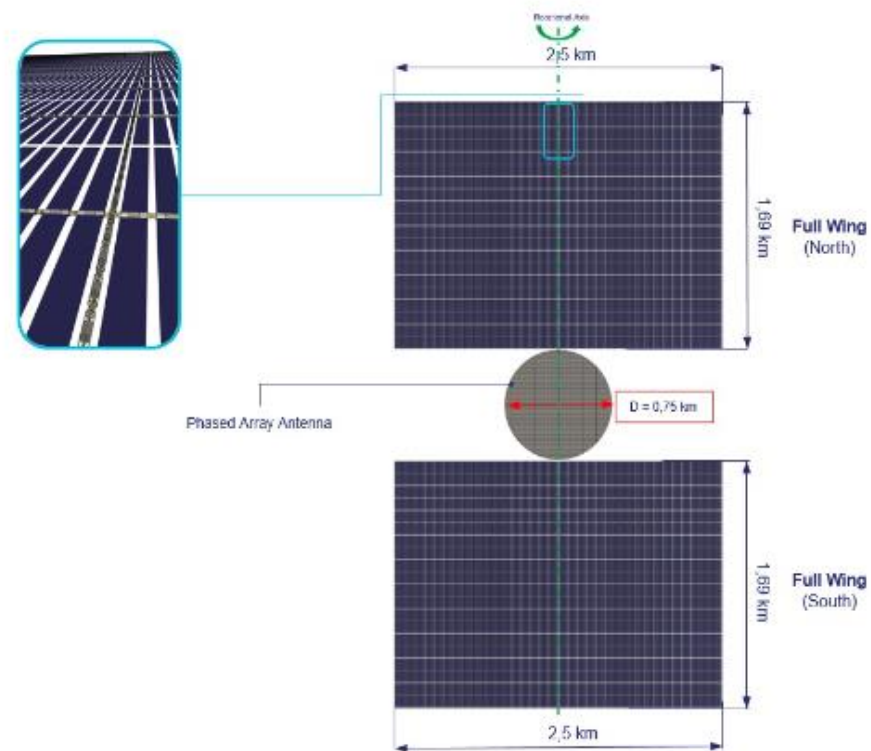
システムの各部で想定されているエネルギーの流れ(変換効率)を図 4-48 に示す。地上で 1GW の電力を得るために、宇宙で集める必要のある太陽エネルギーは 8.593GW となっている。

表 4-32 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのアーキテクチャ・トレードオフ結果

| Performed Trade-off |                                                            | Selected option              |
|---------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Space Segment       | Orbit trade-off                                            | Geostationary orbit          |
|                     | Operating frequency trade-off                              | 5.8GHz                       |
|                     | Cells technology selection                                 | Perovskite cells             |
|                     | DC to RF power conversion trade-off                        | SSPA                         |
|                     | Structures and materials for solar array modules trade-off | Flexible Roll-out Structures |
|                     | In-space transportation and infrastructure trade-off       | Injection in LEO             |
| Ground Segment      | GPS location trade-off                                     | On-shore                     |
|                     | GPS location (country) trade-off                           | Spain                        |
|                     | Energy storage system trade-off                            | Supercapacitors              |

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13th 2023

<sup>108</sup> システム規模と地上ステーションの位置については、2023 年 4 月に ESA 開催したエネルギー部門関係者 (Schellhas Engineering, Microsoft, EDF, TransnetBW, EirGrid Group / ENTSO-E and Shell)との協議会におけるヒアリングの結果を基に決められた。



| Item                 | Mass [tons] |
|----------------------|-------------|
| PVA                  | 1870        |
| Phased Array Antenna | 250         |
| Structure            | 3370        |
| AOCS                 | 100         |
| EPS                  | 1018        |
| Mechanisms           | 30          |
| <b>TOTAL</b>         | <b>6640</b> |

図 4-46 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

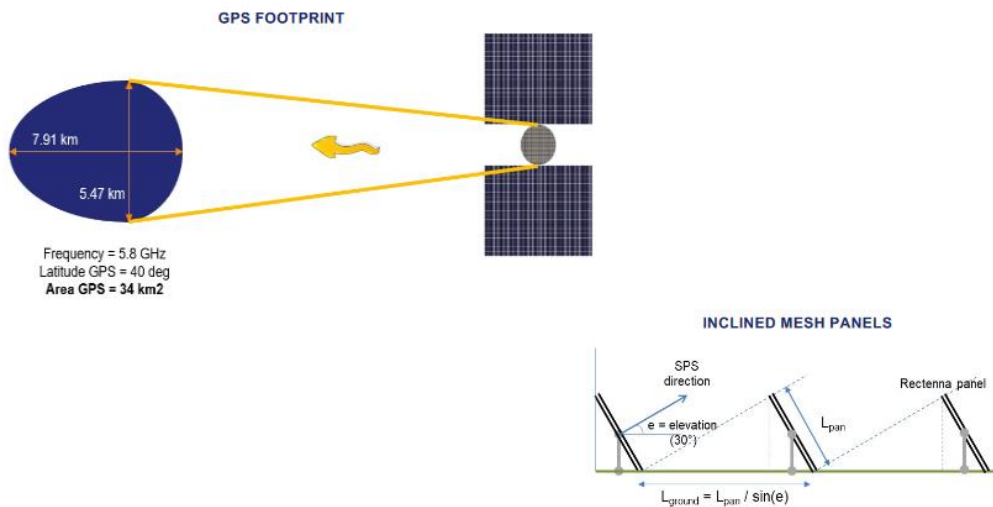


図 4-47 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

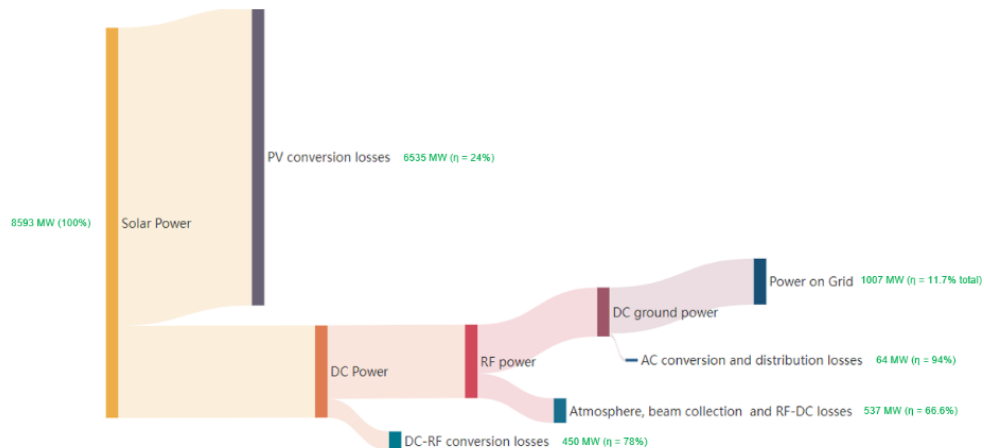


図 4-48 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

### c. 輸送／運用コンセプト

輸送シナリオとしては、一度 LEO まで SPS を輸送してから軌道上タグ(Orbital Tugs)により SPS を GEO まで輸送し、GEO でロボットによる組立を行うシナリオを選択している。軌道上タグは GEO から LEO の間を往復するが(往復約 60 日)ミッション中に燃料補給が必要であるため、軌道上には推進剤の補給基地も必要である。図 4-49 に SPS の打上げ、展開、組立てに関するシナリオを示す。SPS の組立て期間は 2 年間を想定しているが、組立てが完了する前のミッションの初期段階や軌道上での軌道上試験においても、電力を抑えたモードで作動させることができる、としている。

運用終了後の廃棄については、SPS はロボットにより分解され、1) 月面でのリサイクル、あるいは 2) その場でのリサイクル、のどちらかが選択される。1)の場合、分解された SPS 部品は燃料補給された

軌道上タグにより月面に輸送され、月面でリサイクルされる。GEO から月面への往復に必要な速度増分( $\Delta v$ )は LEO~GEO の移送に必要な速度増分と同等であるため、軌道上タグによる月面の往復は十分に可能である。2)の場合、分解された SPS は軌道上製造の工程を経て、GEO でリサイクルされる。軌道上製造が可能となれば、地上からの打上げの際にはモジュールの構成部品を密にフェアリング内に積み込むことが可能となるため、軌道上製造は効率的な輸送を行うためにも重要な技術となっている。

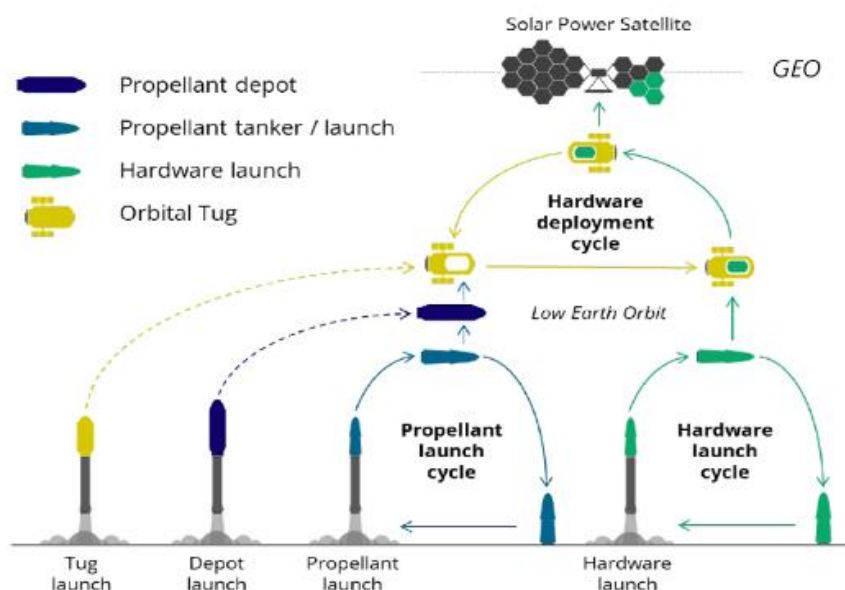


図 4-49 Thales Alenia Space SPS の打上げ、展開、組立てシナリオ

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

#### d. コスト計算の手法と結果

スタディでは、上記のリファレンスシステムに対して CO<sub>2</sub> 排出量、エネルギー収支およびコスト評価を行っている。コスト評価は、研究のインプットとして ESA から提供された費用便益分析研究 (Frazer-Nash Consultancy 社および Roland Berger 社)の研究結果(RD1 および RD2)を含む関連文献から得られた仮定に基づいているものであり、コスト計算においては、1) SPS コスト、2) 打上げ及び軌道間輸送コスト、3) 地上セグメントコスト、4) その他(運用コスト、開発コスト、保険等)の 4 つの領域に分けてコスト算出を行っている。

表 4-33 に TAS-SPS 初号機のコストと運用コストを含む総ミッションコストを示す。また表 4-34 に、30 年間運用を想定したときの均等化発電原価(LCOE: Levelised Cost of Electricity)を示す。LCOE は、(耐用年数に渡って必要となるコストの合計)と(耐用年数に渡って生産できる電力)より算出することができるが、本評価では、SBSP プロジェクトの複雑さと不確実性を考慮し、15%の割引率を用いて計算されている。また耐用年数に渡って生産できる電力量については、24 時間 365 日(ごく短い日食期間を除く)、1GW の BOL(運転開始時)電力が生産され、30 年の寿命期間に生産される

電力の推移をもっともらしく見積もるために、年間の性能劣化率を 1%と見積もって、30 年間で 224TWh の電力が生産できるとした。

これらの結果、LCOE は初号機で 0.158 \$ /kwh、10 機目で 0.143 \$ /kwh と計算された。この結果は、現在利用可能な他のエネルギー源と比較しても十分競争力を持つものであると言える。なお FOAK (first-of-a-kind) システムに対する NOAK (n-of-a-kind) システムのコストに関しては、学習曲線<sup>109</sup>のアプローチを採用し、10 機目までの場合は曲線の勾配を 0.95、10 機目以降を 0.90 とし、SPS のハードウェアコストのみが学習曲線に従い低減していくことを想定した。

表 4-33 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果

| Parameter               |                                                   | Composition and value               |           |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| CAPEX                   | SPS costs                                         | Truss module costs                  | 0.01 B\$  |
|                         |                                                   | Roll-out modules (with PVA) costs   | 0.18 B\$  |
|                         |                                                   | Node modules costs                  | 0.002 B\$ |
|                         |                                                   | WPT system costs                    | 0.50 B\$  |
|                         |                                                   | AOCS costs                          | 1.43 B\$  |
|                         | Launch and in-orbit transportation/assembly costs | Launch costs                        | 3.31 B\$  |
|                         |                                                   | In-orbit transportation costs       | 1.65 B\$  |
|                         |                                                   | Robotic hardware costs for assembly | 0.004 B\$ |
|                         | GPS costs                                         | Land occupation costs               | 0.06 B\$  |
|                         |                                                   | Rectenna mesh costs                 | 0.17 B\$  |
|                         |                                                   | GPS power control costs             | 0.36 B\$  |
| OPEX                    | Insurance costs                                   |                                     | 1.7 B\$   |
|                         | OM costs                                          |                                     | 1.6 B\$   |
|                         | AOCS thrusters refueling costs                    |                                     | 0.36 B\$  |
| TOTAL SBSP MISSION COST |                                                   | 11.4 B\$                            |           |

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

<sup>109</sup> 学習曲線は、生産ユニット数が多いほど生産性が向上することを考慮した数学的手法である。これはユニット数が増加するにつれて、規模の経済、セットアップ時間、人間の学習によるコスト削減を考慮するものである。

表 4-34 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果

| Parameter                                          | Value                      |           |
|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Expected energy generated over the system lifetime | Lifetime = 30 years        | 223.4 TWh |
|                                                    | 1 %/year degradation rate  |           |
|                                                    | 1 GW 24h 365 days BOL      |           |
| LCOE                                               | 158 \$/MWh ( ≈ 15.8 ¢/kWh) |           |
| LCOE for the 10th of a kind SBSP system            | 143 \$/MWh ( ≈ 14.3 ¢/kWh) |           |

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

#### 4) NASA のフィージビリティスタディ

##### a. 概要

2022 年から、NASA の技術・政策・戦略室(OTPS:NASA’s Office of Technology, Policy and Strategy)は、政策アナリストである Nikolai Joseph 氏が中心となり“EVALUATING PROSPECTS FOR SPACE-BASED SOLAR POWER”というタイトルのスタディを開始した<sup>110</sup>。温室効果ガス排出 Net Zero を達成するための SBSP の費用便益分析を行うこと、および便益がコストを上回ると評価された場合は、NASA がどの程度 SBSP の開発を支援すべきかについて検討を行うことがスタディの目的とされた。スタディ結果は、当初の計画より遅延し、2024 年 1 月に”Space-Based Solar Power ”という題の報告書として、NASA が本研究分野の開発の支援方法を決定するために必要な情報を提供することを目的とするものとして公表された<sup>111</sup>。

報告書では、2050 年に運用開始が可能である 2 つの SBSP アーキテクチャ(RD1:革新的なヘリオスタット群型、RD2:技術的に成熟した平面アレイ型)について(図 4-50 参照)それぞれライフサイクルコストと温室効果ガス排出削減の可能性が検討されている。また他の持続可能な解決策と比較して、SBSP システムが温室効果ガス排出量実質ゼロを達成するための選択肢となる条件と、NASA の役割についても検討されている。

##### b. リファレンスシステム

図 4-50 に本スタディに用いられた 2 つの SBSP システム(RD1:革新的なヘリオスタット群型、RD2:技術的に成熟した平面アレイ型)を示す。RD1 は Mankins 氏の SPS-Alpha Mark-III<sup>112</sup>から派生したものであり、太陽光を集光するために反射鏡と集光装置を使用している。RD2 は JAXA の

<sup>110</sup> <https://www.ag2link.com/wp-content/uploads/2023/05/annual-report.pdf> (2023 年 9 月 11 日閲覧)

<sup>111</sup> <https://www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/> (2024 年 1 月 19 日閲覧)

<sup>112</sup> Mankins, SPS-Alpha Mark-III and an achievable roadmap to space solar power, 2021



テザー型 SPS<sup>113</sup>と Caltech の SSPP 設計<sup>114</sup>から派生したものであり、太陽電池は地球の反対側を指向し、マイクロ波送電部は地球方向を使用するフラットパネルが使用される。本設計では、フラットパネルの向きを変える機能が制限されているため、容量係数(capacity factor)は低くなる。両システムとも GEO 上で運用され、地上で 2GW を発電できるシステムを検討対象としている。

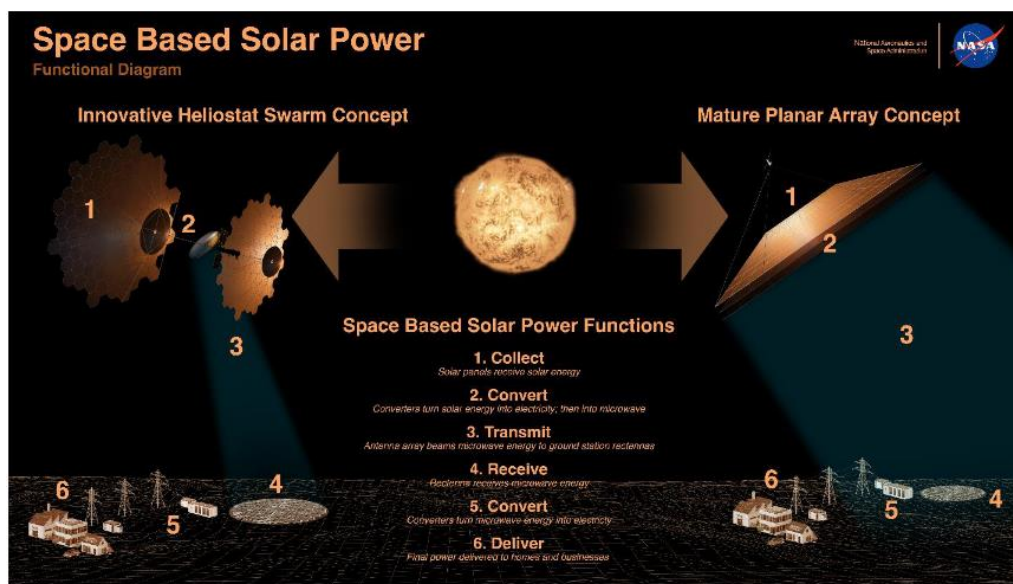


図 4-50 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2)

出所)“ Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

### c. ライフサイクルシナリオ

各リファレンスシステムのライフサイクルは開発、組立、運用、保守、廃棄の 5 つのフェーズに分けられる。

- 開発  
研究開発、SBSP モジュールの製造、プロジェクト管理、システムエンジニアリング、ミッション保証の実施
- 組立  
製造サービス、SBSP モジュールとサービサーの LEO までの打上げ、GEO への軌道移動のため LEO でのランチャーへの燃料補給、サービサーによる SBSP モジュールの GEO での組立、ミッション運用とデータ解析
- 運用  
地上施設の建設、耐用期間中のミッション運用とデータ分析
- 保守

<sup>113</sup> Sasaki, A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS, 2006

<sup>114</sup> Pellegrino, 2022

交換用 SBSP モジュールおよびサービサーの製造、交換用 SBSP モジュールとサービサーの LEO への打上げ、GEO への軌道移動のため LEO でのランチャーへの燃料補給、交換用 SBSP モジュールと交換用サービサーの GEO での組立て、保守のためのミッション運用とデータ分析

- 廃棄

アクティブ・デブリ除去宇宙機の製造、アクティブ・デブリ除去宇宙機の LEO までの打上げ、GEO への軌道移動のため LEO でのランチャーへの燃料補給、アクティブ・デブリ除去宇宙機によるすべての SBSP モジュールの GEO から墓地軌道への移送、廃棄のためのミッション運用とデータ解析の実施

#### <SBSP のライフサイクルシナリオ>

- ・ SBSP は、2030 年代に地上で開発され、LEO に打上げられ、2040 年代に GEO で組立てられる。
- ・ SBSP は 2050 年から 2080 年にかけて GEO で運用される。地上の 1 つまたは複数のステーションにエネルギーを送信する。
- ・ 新しい SBSP モジュールの開発、打上げ、組立てを伴う保守は 2060 年から 2080 年に行われる。(ハードウェア寿命:10 年)
- ・ SBSP 廃棄は、デブリ除去宇宙機の開発、それらの GEO への打上げ、SBSP モジュールの墓地軌道への移動を行う作業であるが、2060 年から 2085 年の間に行われる。

SBSP のライフサイクルシナリオによると、SBSP モジュールの他に、組立てを行うサービサー、廃棄を行うデブリ除去宇宙機も必要となる。これらの打上げに当たっては、SpaceX 社の Starship(ペイロード 100 ton)が想定されている。ただし打上げ回数が非常に多くなるため、15%のブロック買い割引を適用するとしている。また、LEO に運ばれた SBSP ハードウェア 1 ペイロードにつき、GEO に移送するために 12 機の Starship 推進剤タンカーによる燃料補給を必要とすることが見込まれている。なお燃料補給に使用される Starship の再使用回数は 100 回とされている。

## d. コスト評価

### ア) 方法

以上のシナリオに基づき、2050 年から 2GW の電力を電力グリッドに供給する SBSP システムについて、NASA では SBSP の開発、組立、運用、保守および廃棄の全ライフサイクルにわたるすべてのコストと温室効果ガス排出量を計算するモデルを開発した。

各サイクルにおいてコストを算出した項目をいかに列挙する。システム寿命は 30 年、ハードウェア寿命は 10 年なので、ライフサイクルを通じてハードウェアを 2 回交換することが想定されている。

<コスト算出項目>

- ・ 開発フェーズ
  - 宇宙機ハードウェア製造
  - 技術開発
  - プログラムマネジメント、システムエンジニアリングおよびミッション保証
- ・ 組立フェーズ
  - 運用&データ解析(組立時)
  - プログラムマネジメント、システムエンジニアリングおよびミッション保証
  - サービサー製造
  - オリジナル・ハードウェア(SBSP モジュールとサービサー)の打上げ
  - LEO までの燃料の打上げ(GEO までの移送用)
- ・ 運用フェーズ
  - 宇宙機シーリング
  - プログラムマネジメント、システムエンジニアリングおよびミッション保証
  - 地上システムの建設
  - 運用&データ解析
- ・ 保守フェーズ
  - GEO における交換用サービサーによる SBSP モジュールの交換
  - 運用&データ解析(保守時)
  - 保守用ハードウェアの打上げ
  - プログラムマネジメント、システムエンジニアリングおよびミッション保証
  - 保守ハードウェア(SBSP モジュールとサービサーの交換部)製造
- ・ 廃棄フェーズ
  - デブリ除去機の打上げ
  - デブリ除去マネジメント&運用
  - デブリ除去機製造

これらのうち、開発と組立のフェーズのコストを「発電所の商業運転を達成するために必要な資本支出」である初期投資(CAPEX)額とした。また、運用、保守および廃棄のフェーズのコストを「単位エネルギー当たりとしては発生しない、設備の運転と保守のために必要な年間支出」である固定運転保守費用(FOM)とした。

さらに他の発電システムとの比較を行えるように均等化発電原価(LCOE)も求めた。LCOE は(耐用年数に渡って必要となるコストの合計)を(耐用年数に渡って生産できる電力)で割ることによって算出することができる。図 4-51 にLCOEの計算手法を示す。ここでは米国の国立再生可能エネルギー研究所(NREL:National Renewable Energy Laboratory)が公表した2022年のデータを使用し、LCOEの計算式を適用している。なお資本回収係数(CRF)とは年経費率とも呼ばれ、 $n$ 年間(=ここでは30年間)にわたる均等な投資額の割引率を $r$ とする場合の現在価値が、設備投資額に等しくなるような $n$ 年間にわたる均等な投資額を、設備投資額から求めるための変換係数である。

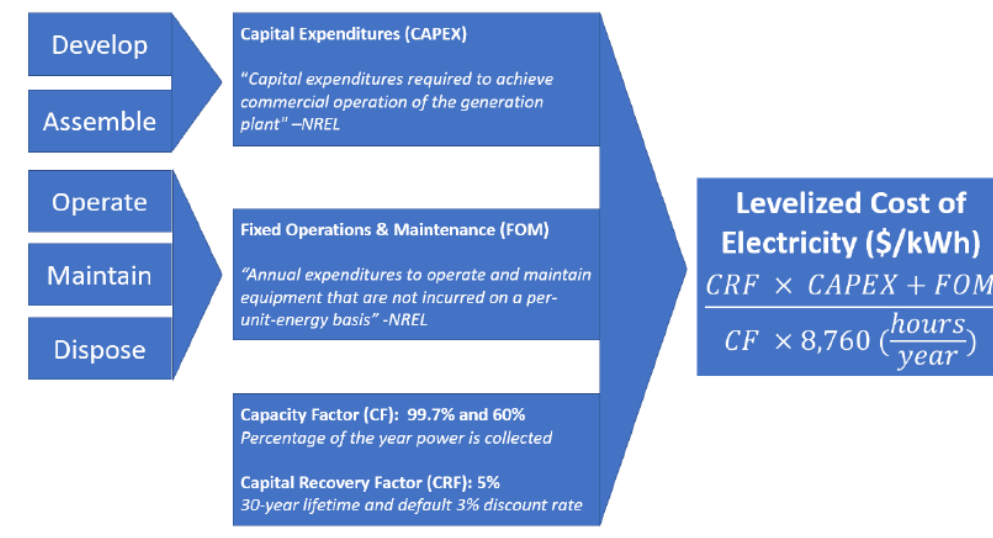


図 4-51 LCOE の計算方法

出所)“ Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

## イ) 算出結果

計算の結果、RD1 および RD2 のベースラインのケースのライフサイクルコストについては以下のように見積もられた。

### <ベースラインケースのライフサイクルコスト分析の結果>

- ・ ベースライン分析では、RD1 のライフサイクルコストは 2,760 億ドル、RD2 については 4,340 億ドルと見積もられた。
  - 両システムとも、保守コストが総コストの 50%以上を占め、組立てコストが 25%を占める。
  - 最も影響の大きいコスト要素は打上げ費用である。(RD1 の 71%、RD2 の 77%)これらの打上げの大部分は、GEO に移送するために LEO で補給を行う燃料の打上げ費が占めている。
  - 製造は 2 番目に大きなコスト要因であり(RD1 で 22%、RD2 で 18%)初期の宇宙機ハードウェア開発と製造が含まれる。ラーニングカーブにより RD1 では 150 万個、RD2 では 200 万個の宇宙機モジュールを製造することでコストは減少する。
- ・ LCOE は RD1 の場合 0.61\$/kWh、RD2 は 1.59\$/kWh となった。
  - 2050 年の地上の他の持続可能な解決策(再生可能エネルギー発電システム)の発電コストの予測値は 0.02~0.05\$/kWh 程度であるため、それらと比べると RD1 均等化発電原価(LCOE)と RD2 LCOE は、それぞれ 12~31 倍、32~80 倍高い結果となっている。

また、感度分析により、ベースラインのケースに対して入力パラメータを変化させ、RD1 と RD2 がどのような条件でコスト競争力を持つかの評価を行った。具体的には、打上げコスト、初号機製造コスト、

ラーニングカーブ、ハードウェア寿命、太陽電池効率、軌道移送方法のパラメータを1つずつ変化させ、コストに与える影響の把握を行った。具体的な入力パラメータについては図 4-52 に示す。

- ・ 打上げコストの低減あるいは LEO から GEO への軌道移送に電気推進を使用することで LCOE はそれぞれ最も大幅に低下した。RD1 で約 0.20\$/kWh、RD2 で約 0.50\$/kWh となった。→コスト競争力という点では、まだ不十分である。
- ・ 複数のパラメータを同時に変化させることで、コスト競争力を持たせることができる。この有利な組み合わせにより、LCOE は RD1 で 0.03\$/kWh、RD2 で 0.08\$/kWh となる。この数値は、地上の他の代替エネルギーと競合可能な数値である。

さらに、ライフサイクルの温室効果ガスの排出原単位については以下のように算出された。

#### <ライフサイクル温室効果ガス排出原単位の分析結果>

- ・ RD1 のライフサイクル温室効果ガス排出原単位は 26gCO<sub>2</sub>eq./kWh、RD2 は 40gCO<sub>2</sub>eq./kWh となった。
  - これらは地上の再生可能エネルギー発電技術の排出原単位の範囲内(13~43g CO<sub>2</sub>eq./kWh)の数値となっている。
- ・ 上述の複数のパラメータを同時に変化させ、コスト競争力を持たせた前提条件における温室効果ガス排出原単位は、RD1 では 3.78gCO<sub>2</sub>eq./kWh、RD2 では 4.33gCO<sub>2</sub>eq./kWh)となり、原子力や風力発電を下回る。

以上より SBSP システムは、ベースラインのシナリオでは地上の持続可能な代替案よりもコスト高であるが、技術の進歩と宇宙へのアクセス性の向上によって、コストと CO<sub>2</sub> 排出量の両方が大幅に削減可能であることが示された。具体的には、以下の条件が達成できるのであれば、温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP ソリューションが得られることが分かった。

#### <温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP の条件>

- ・ 打上げコストの低減:1 回当たり 5,000 万ドル、または 1kg 当たり 500 ドル
- ・ 電気推進による LEO から GEO への軌道移動
- ・ ハードウェア寿命の延長:15 年
- ・ より安価なサービサーとデブリ除去機: それぞれ 1 億ドルと 5,000 万ドル
- ・ 規模に応じた効率的な製造:85%以下のラーニングカーブ

さらに感度分析の結果として、コスト低減のためには、ハードウェアの製造および打上げの効率化により輸送や製造にかかるコストを大幅に低減すること、所望の軌道への移送のために電気推進(EP)を使

用すること、太陽電池の効率を向上させること等が課題であることが示された。また合わせて、本スタディではまた、SBSP を可能にする技術は、月面での電力供給、科学や有人探査のための自律的な運用、軽量材料など、将来の NASA ミッションのニーズに幅広く適用可能であることも示されている。

なお、John Mankins 氏を始めとする SSPS の研究者や全米宇宙協会(NSS:National Space Society)等は、本報告書のコスト評価に使用された仮定について批判をしている。特に、ベースライン分析の打上げコスト、GEO までの SBSP の輸送の方法、コンポーネントの寿命の設定等について懐疑的であり、SBSP 技術に関する最近の研究があまり取り入れられていないとの主張を行っている<sup>115</sup>。

|                                                                  | Baseline                                                                                                                                                                                                                                                                        | Multi-Variable Sensitivity                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Launch Cost<br>(+15% block buy discount)                         | <br>\$1,000/kg (\$850/kg)                                                                                                                                                                      | <br>\$500/kg (\$425/kg)                                                                                   |
| Orbital Transfer Method                                          | <br>12 refuel launches                                                                                                                                                                         | <br>Electric Propulsion<br>(+17.2% mass, mfg cost)                                                        |
| Reuses of each launch vehicle                                    | <br>100                                                                                                                                                                                        | <br>100                                                                                                   |
| Solar Cell Efficiency                                            | <br>35%                                                                                                                                                                                        | <br>50%                                                                                                   |
| Operations Costs                                                 | <br>1.2M / month                                                                                                                                                                              | <br>1.2M / month                                                                                         |
| Hardware Lifetime                                                | <br>10 years                                                                                                                                                                                 | <br>15 years                                                                                            |
| Initial Hardware Costs<br>(Module, Servicer, Debris)             |  1 M<br> 1 B<br> 500 M | <br>1M, 100M, 50M                                                                                       |
| Manufacturing Learning Curves<br>(Module, Servicer, Debris)      |  75%<br> 85%<br> 90%   |  70%, 80%,<br> 85% |
| <b>Results</b>                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                              |
| LCOE \$/kWh<br>Renewables studied: .02 - .05                     | 0.61 and 1.59                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.04 and 0.08                                                                                                                                                                                |
| Emissions (gCO <sub>2</sub> e/kWh)<br>Renewables studied: 8 - 43 | 26 and 40                                                                                                                                                                                                                                                                       | 3 and 4                                                                                                                                                                                      |

図 4-52 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ

出所) “Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

※上向きの緑の三角形は、現在までに達成された以上の性能を想定したもの、黄色のバーは現在達成可能なもの、下向きの赤い三角形は、現在の能力を下回るものである(これらは、SBSP システムの研究が世界初であることを考慮した仮定である)

<sup>115</sup> <https://spacenews.com/nasa-report-offers-pessimistic-take-on-space-based-solar-power/>  
(2024 年 2 月 2 日閲覧)



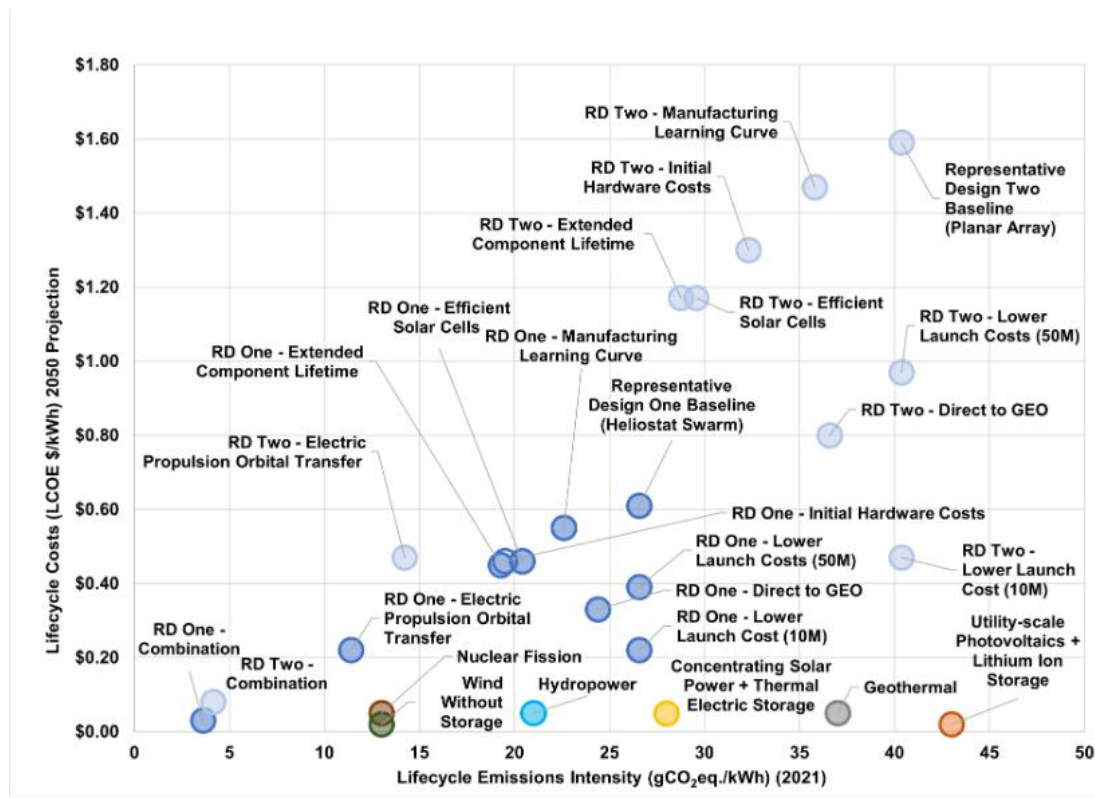


図 4-53 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果

出所) “Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

なお、各 FS におけるリファレンスシステムや運用コンセプトおよびコスト評価に使用している項目や数字の詳細については表 4-35～表 4-38 に整理した。

表 4-35 欧米の各 FS におけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方(1/2)

|                      | Frazer-Nash Consultancy<br>CASSIOPeiA | RB/OHB<br>SPS-ALPHA Mk III                                                                         |                                                                                                     | TAS-SPS                                                                            | NASA OTPS<br>Baseline                                        |                                                             |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| リファレンスシステム           | EU Average                            | Optimistic                                                                                         | Pessimistic                                                                                         |                                                                                    | RD-1<br>SPS-ALPHA Mk III                                     | RD-2<br>JAXA Tetherd                                        |
| システム規模<br>(地上グリッド電力) | 1.44GW                                | 2GW                                                                                                |                                                                                                     | 最大1GW± TBD %                                                                       | 2GW<br>※RD-2は5基構成                                            |                                                             |
| 宇宙システム               |                                       |                                                                                                    |                                                                                                     |                                                                                    |                                                              |                                                             |
| 集光倍率                 | 1 (コア部で高集光)                           | 3                                                                                                  |                                                                                                     | 1                                                                                  | 2～3                                                          | 1                                                           |
| 周波数                  | 2.45GHz                               | 2.45GHzまたは5.8GHz                                                                                   |                                                                                                     | 5.8GHz                                                                             | 2.45                                                         | 5.8                                                         |
| 太陽電池                 | 三接合の高集光型太陽電池                          | 高効率マルチバンドギャップ PV 太陽電池                                                                              |                                                                                                     | フレキシブル・ロールアウト型<br>ペロブスカイト                                                          | —                                                            | —                                                           |
| マイクロ波発振器             | —                                     | マグネトロン、SSPAまたはクライストロン                                                                              |                                                                                                     | SSPA                                                                               | —                                                            | —                                                           |
| 寸法／重量                | ヘリカルアレイ：直径2km<br>総重量：2,064 ton        | ヘリオスタット：5.14km <sup>2</sup> 、太陽<br>電池（送電アンテナ）面積：<br>1.71km <sup>2</sup> 、ビーム長：5km<br>総重量：6,097 ton | ヘリオスタット：13.5km <sup>2</sup> 、太陽<br>電池（送電アンテナ）面積：<br>4.26km <sup>2</sup> 、ビーム長：5km<br>総重量：16,507 ton | 太陽電池：6.2km <sup>2</sup><br>アンテナ：0.44km <sup>2</sup> （直径<br>0.75km）<br>総重量：6,640ton | 太陽電池：11.5km <sup>2</sup><br><br>総重量：5,900ton<br>総モジュール数：146万 | 太陽電池：19km <sup>2</sup><br><br>総重量：10,000ton<br>総モジュール数：200万 |
| 輸送システム               |                                       |                                                                                                    |                                                                                                     |                                                                                    |                                                              |                                                             |
| 地上-LEO               | 再使用型ロケット                              | 再使用型ロケット（ペイロード最大100 ton程度）                                                                         |                                                                                                     | 再使用型ロケット                                                                           | Starshipを想定<br>LEOに12回の燃料打上げ、1ヶ月の燃料補給<br>GEOへの2ヶ月の輸送         |                                                             |
| LEO-GEO              | 軌道変換機（化学推進）                           | 電気または化学推進を用いた再使用型推進システム（SpaceTug）                                                                  |                                                                                                     | 6機の軌道上タグ                                                                           |                                                              |                                                             |
| 組立軌道                 | LEO/GEOなど                             | GEO                                                                                                |                                                                                                     | GEO                                                                                | GEO                                                          |                                                             |
| その他のインフラ             | 組立用ロボット                               | LEOに推進システム（SpaceTug）に推進剤を補給する基地<br>GEOで組立てを行う自律型ロボットアーム                                            |                                                                                                     | LEOに軌道上タグに推進剤を補給<br>する基地<br>軌道上組立用の24機のロボットシ<br>ステム                                | GEOでの組立てを行うサービサー(2,800kg)<br>アクティブ・デブリ除去機                    |                                                             |
| 地上システム               |                                       |                                                                                                    |                                                                                                     |                                                                                    |                                                              |                                                             |
| 陸上／海上                | 陸上／海上                                 | —                                                                                                  | —                                                                                                   | 陸上                                                                                 | —                                                            | —                                                           |
| 位置                   | イタリア、ドイツ、フランス、<br>ポーランド、UKなど          | —                                                                                                  | —                                                                                                   | スペイン（緯度40度）                                                                        | —                                                            | —                                                           |
| 寸法                   | 短径：6.3km<br>(最大強度：250W/m2)            | 直径：4.46km (2.45GHz)、<br>1.71km (5.8GHz)                                                            | 直径：2.21km (2.45GHz)、<br>1.08km (5.8GHz)                                                             | レクテナ面積：34km <sup>2</sup>                                                           | 直径：6km                                                       | 直径：4km<br>5サイト                                              |
|                      |                                       | ※UKの場合、～6.7km x 13km                                                                               |                                                                                                     |                                                                                    |                                                              |                                                             |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

表 4-36 欧米の各 FS におけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方(2/2)

|            | Frazer-Nash Consultancy<br>CASSIOPeiA           | RB/OHB<br>SPS-ALPHA Mk III |             | TAS-SPS                                                      | NASA OTPS<br>Baseline    |                          |
|------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| リファレンスシステム | EU Average                                      | Optimistic                 | Pessimistic |                                                              | RD-1<br>SPS-ALPHA Mk III | RD-2<br>JAXA Tetherd     |
| 運用パラメータ    |                                                 |                            |             |                                                              |                          |                          |
| 実現時期       | 2040年                                           | 2040年                      | 2040年       | 2040年                                                        | 2050年                    | 2050年                    |
| 建設年数       | 2年                                              | —                          | —           | 2年                                                           | 7.4年                     | 12.6年                    |
| 寿命         | 30年                                             | 30年                        | 30年         | 30年                                                          | ハードウェア：10年<br>システム寿命：30年 | ハードウェア：10年<br>システム寿命：30年 |
| 年間性能劣化率    | 0～0.0025                                        | —                          | —           | 1%                                                           | —                        | —                        |
| 設備利用率（負荷率） | 95%                                             | 90%                        | 90%         | —                                                            | 0.997                    | 0.6                      |
| その他        |                                                 |                            |             |                                                              |                          |                          |
| 廃棄シナリオ     | 墓場軌道へ移動（管理期間＝1年）<br>故障モジュールの継続的な交換や<br>材料の再利用等も |                            |             | SPSはロボットにより分解され、<br>1) 月面でのリサイクル、あるいは<br>2) その場でのリサイクルが行われる。 | アクティブ・デブリ除去機による廃棄が行われる。  |                          |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

表 4-37 欧米の各 FS におけるコスト算出に係る項目の考え方(1/2)

|                | Frazer-Nash Consultancy<br>CASSIOPeiA |              | RB/OHB<br>SPS-ALPHA Mk III |                          | TAS-SPS                                  | NASA OTPS Baseline                                 |                               |
|----------------|---------------------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
|                | p10                                   | p90          | Optimistic                 | Pessimistic              |                                          | RD-1<br>SPS-ALPHA Mk III                           | RD-2<br>JAXA Tetherd          |
|                | (B€)                                  | (B€)         | (B€)                       | (B€)                     | (B\$)                                    | (B\$)                                              | (B\$)                         |
| CAPEX (初期投資費)  |                                       |              |                            |                          |                                          |                                                    |                               |
| 宇宙システム         |                                       |              | 4.73                       | 16.51                    | 2.122                                    | 6.9                                                | 8.3                           |
|                | 太陽電池、反射鏡、WPT、スラスタ、通信制御、構造部ごとに計算       |              | Hardware @775 €/kg         | Hardware @1,000 €/kg     | トラスモジュール、太陽電池、ノードモジュール、WPTシステム、AOCSごとに計算 | モジュール初期コストを100万ドルとし、クロフォード・モデルの学習曲線を初期コストとユニット数に適用 |                               |
| 輸送システム         | 1.24                                  | 6.08         | 3.05<br>~GEO@ 500€/kg      | 16.51<br>~GEO@ 1,000€/kg | 4.964                                    | 78.9<br>1000\$/kg→15%割引                            | 124.1<br>1000\$/kg→15%割引      |
| LEOまでの打上げコスト   | (454.6€/kg)                           | (3301.3€/kg) |                            |                          | 3.31<br>(200 \$ /kg)                     | 65.2<br>LEOからGEOへのStarship1機                       | 111.6<br>LEOからGEOへのStarship1機 |
| 軌道上輸送          | OTV機体価格 + 燃料                          | OTV機体価格 + 燃料 |                            |                          | 1.65<br>(100 \$ /kg)                     | の燃料補給に12機のStarshipが必要                              | の燃料補給に12機のStarshipが必要         |
| ロボットハードウェア     | (76184€/kg)                           | (634865€/kg) |                            |                          | 0.004                                    | 10.9<br>初号機：1B \$ →17機                             | 9.8<br>初号機：1B \$ →15機         |
| 組立コスト          | —                                     | —            |                            |                          | —                                        | 2.806                                              | 2.682                         |
| 打上げ保険          | 総価格の2%                                | 総価格の2%       |                            |                          | —                                        | —                                                  | —                             |
| 地上システム         |                                       |              | 0.3                        | 0.4                      | 0.59                                     | 3.1                                                | 8.27<br>5サイト                  |
| 土地取得           | 地価より                                  |              |                            |                          | 0.06                                     |                                                    |                               |
| レクテナメッシュ       | 鉄骨工事とダイオードの価格に基づく                     |              |                            |                          | 0.17                                     |                                                    |                               |
| 電力制御施設         | ミッション制御施設も含む                          |              |                            |                          | 0.36                                     |                                                    |                               |
| バランスオブプラント設備   | 陸上太陽光発電の見積より                          |              |                            |                          |                                          |                                                    |                               |
| 電気設備インフラ       | 3.3GWの原子力発電所の見積より                     |              |                            |                          |                                          |                                                    |                               |
| 建設に関する開発前費用    | 陸上風力発電の見積より                           |              |                            |                          |                                          |                                                    |                               |
| レクテナ本体建設費      |                                       |              |                            |                          |                                          |                                                    |                               |
| CAPEX 合計 (初号機) | 4.8                                   | 9.8          | 8.07                       | 33.41                    | 7.71                                     | 93.6                                               | 145.34                        |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

表 4-38 欧米の各 FS におけるコスト算出に係る項目の考え方(2/2)

|                        | Frazer-Nash Consultancy<br>CASSIOPeIA |               | RB/OHB<br>SPS-ALPHA Mk III  |             | TAS-SPS                           | NASA OTPS Baseline                       |                                          |
|------------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|                        | p10                                   | p90           | Optimistic                  | Pessimistic |                                   | RD-1<br>SPS-ALPHA Mk III                 | RD-2<br>JAXA Tetherd                     |
|                        | (B€)                                  | (B€)          | (B€)                        | (B€)        | (B\$)                             | (B\$)                                    | (B\$)                                    |
| OPEX (運転維持費)           |                                       |               | CAPEXの3%                    |             |                                   |                                          |                                          |
| 保険                     | 初年度7%、次年度2%<br>リスクレベルと10%のマージンから導出    |               |                             |             | 1.7                               |                                          |                                          |
| OM                     | CAPEXの0.8%                            | CAPEXの4.7%    |                             |             | 1.6                               |                                          |                                          |
| 接続および送電                | 原子力発電の数値より                            | 大規模太陽光発電の数値より |                             |             |                                   |                                          |                                          |
| AOCSスラスタ燃料補給           |                                       |               |                             |             | 0.36                              |                                          |                                          |
| 運用                     |                                       |               |                             |             |                                   | 0.6782                                   | 1.09825                                  |
| 宇宙機シールドリング             |                                       |               |                             |             |                                   | 0.2462                                   | 0.66625                                  |
| ミッション運用 & データ解析 (運用時)  |                                       |               |                             |             |                                   | 0.432<br>1.2M/月                          | 0.432<br>1.2M/月                          |
| 保守                     |                                       |               |                             |             |                                   | 157.15                                   | 248.85                                   |
| 保守用SBSPモジュール           |                                       |               |                             |             |                                   | 6.2                                      | 7.47                                     |
| 保守用サーバー                |                                       |               |                             |             |                                   | 15                                       | 13.6                                     |
| 保守用ハードウェアの打上げ          |                                       |               |                             |             |                                   | 130.4                                    | 222.1                                    |
| プログラムマネジメント & 運用 (保守時) |                                       |               |                             |             |                                   | 5.5136                                   | 5.6348                                   |
| OPEX 合計                | 2.5                                   | 3.5           | 7.5                         | 31.1        | 3.66                              | 182.5282                                 | 288.84825                                |
| その他                    |                                       |               |                             |             |                                   |                                          |                                          |
| 実現時期                   | 2040年                                 | 2040年         | 2040年                       | 2040年       | 2040年                             | 2050年                                    | 2050年                                    |
| 建設年数                   | 2年                                    | 2年            | —                           | —           | 2年                                | 7.4年                                     | 12.6年                                    |
| 寿命                     | 30年                                   | 30年           | 30年                         | 30年         | 30年                               | ハードウェア：10年<br>システム寿命：30年                 | ハードウェア：10年<br>システム寿命：30年                 |
| 年間性能劣化率                | 0                                     | 0.0025        | —                           | —           | 1%                                | —                                        | —                                        |
| 設備利用率                  | 95%                                   | 95%           | 90%                         | 90%         | —                                 | 0.997                                    | 0.6                                      |
| 割引率                    | 20%                                   | 20%           | 10%                         | 10%         | 15%                               | 3%<br>Capital Recovery<br>Factor(CRF)：5% | 3%<br>Capital Recovery<br>Factor(CRF)：5% |
| 学習曲線の勾配                | 60%                                   | 85%           | 90%                         | 90%         | 10機目まで：0.95<br>10機目以降：0.90        | 75%<br>サーバー：85%<br>デブリ除去機：90%            | 75%<br>サーバー：85%<br>デブリ除去機：90%            |
| 開発コスト                  | 8                                     | 16            | 2.3                         | 3.45        | —                                 | 4.7                                      | 4.67                                     |
| 廃棄コスト                  | 墓場軌道への移動コスト                           | 墓場軌道への移動コスト   | —                           | —           | —                                 | 24.7                                     | 38.9                                     |
| デブリ除去機コスト              |                                       |               |                             |             |                                   | 18.5                                     | 29                                       |
| ADR地上コスト               |                                       |               |                             |             |                                   | 1.85                                     | 2.9                                      |
| ADR打上げコスト              |                                       |               |                             |             |                                   | 1.5                                      | 2.55                                     |
| ADRマネジメント & 運用コスト      |                                       |               |                             |             |                                   | 2.824                                    | 4.354                                    |
| LCOE                   | 106€/MWh                              | 206€/MWh      | 1基目：69€/MWh<br>10基目：49€/MWh |             | 1基目：15.8 ¢/kWh<br>10基目：14.3 ¢/kWh | 0.61 \$/kwh                              | 1.59 \$/kWh                              |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

## (2) JSS コストモデルの見直し

### 1) JSS コストモデルおよびマルチテザー(マルチバス)型 SSPS の概要

JSS(一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(Japan Space Systems))が作成した JSS コストモデルは、2007 年に検討を始めた SSPS 発電コスト試算用のツールとして整備されたものである<sup>116</sup>。当時検討されていたマルチテザー(マルチバス)型 SSPS をリファレンスとして、SSPS(宇宙部)の建設費、宇宙部の低軌道への打上げ費と静止軌道までの軌道間輸送費(軌道間輸送機の製造を含む)、地上部の建設費およびメンテナンス(宇宙部、地上部)のコストを求め、そこから商用稼働期間の平均値として発電コストを計算するコストモデルとなっている。マルチテザー(マルチバス)型 SSPS の詳細については本報告書では省略するが、概要は以下のようにになっている。

SSPS はモジュール構造を持ち(図 4-45 参照)、1 モジュールは 0.5m×0.5m の発送電部モジュールとなっている。さらに、200×190 個のモジュールで 1 グループを形成し、1 グループごとにバスシステムと発送電部パネルがテザーによって結ばれている。1 グループの寸法は 100m×95m、厚さ 20mm、テザーの長さは 5km 程度(2~10km)が想定されている。さらに、グループが 25×25 (=625)個で SSPS 1 機が構築される。SSPS 1 機のパネルの大きさは 2.5km×2.375km、総モジュール数は  $200 \times 190 \times 625 = 23,750,000$  個となる。なお、地上での発電パターンを平滑化するために本体に蓄電池が搭載されている。

地上部については、送受電マイクロ波の周波数は 5.8GHz、レクテナ直径が 3.5km、レクテナでの最終出力(DC)が 1GW(出力一定型)となっている。

建設シナリオとしては、1 ユニット(約 45 ton)を単位として、折り畳んだ貨物を再使用型輸送機(RLV)を用いて高度約 500km の LEO へ輸送し、そこで軌道間輸送機(OTV)に積み替えて GEO まで輸送する。GEO にて展開および最終組み立てが行われる。

---

<sup>116</sup> 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構:「平成 19 年度太陽光発電利用促進技術調査」(平成 20 年 3 月)



## マルチテザー型 SSPS の宇宙部

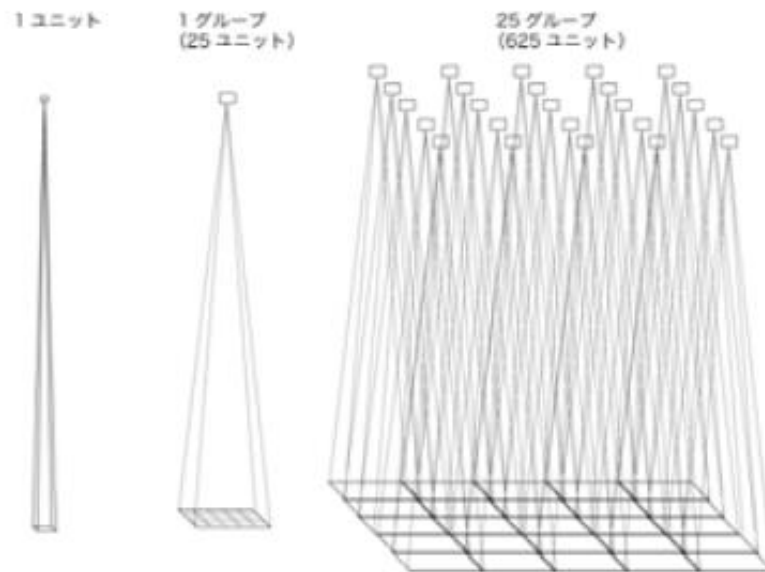


図 4-54 JSS(旧 USEF)マルチテザー型 SSPS の宇宙部

出所)財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構:「平成 19 年度 太陽光発電利用促進技術調査」(平成 20 年 3 月)

## 2) JSS コストモデルにおける入力項目の再検討

### a. 2023 年度の検討での入力パラメータ値の見直し

上述の 2007 年の JSS コストモデルでの計算に使用した重量／コスト単価等の設定値は、将来（2030 年頃）の値を仮定していた。その中でも当時の JAXA での設定値に極力合わせた「共通ケース」とさらに低コストとなる「目標ケース」を設定した複数のパターンで計算を行っていた。

2023 年度は、「令和 5 年度重要技術管理体制強化事業（宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集）調査報告書」（三菱総合研究所、2024 年 3 月）において、欧米での SBSP 検討結果および IEEJ（一般財団法人日本エネルギー経済研究所）の検討結果を基に、超軽量化が進んだケースを想定した入力パラメータ値の見直しを行い、それを「SSPS-23B」モデル（SSPS 宇宙システムの総重量：15,021 ton）とした。これらの見直したパラメータ値を表 4-39 に示す<sup>117</sup>。

<sup>117</sup> 本モデルの詳細は「令和 5 年度重要技術管理体制強化事業（宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集）調査報告書」（三菱総合研究所、2024 年 3 月）の中の「3. 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査・検討」を参照のこと。

表 4-39 JSS コストモデルの入力パラメータ値の見直し(2023 年度)

| 項目           | JSS2007年<br>目標ケース | SSPS-23B | 単位                | 備考                                                       |
|--------------|-------------------|----------|-------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>宇宙部重量</b> |                   |          |                   |                                                          |
| 太陽電池         | 0.5               | 0.258    | g/W               | 薄膜太陽電池を想定                                                |
| マイクロ波回路      | 10                | 2.2      | g/W               |                                                          |
| 構造部          | 0.028             | 0.028    | g/cm <sup>3</sup> |                                                          |
| 蓄電部          | 0.667             | 0.667    | g/Wh              |                                                          |
| <b>宇宙部単価</b> |                   |          |                   |                                                          |
| 太陽電池         | 30                | 66       | 円/W               | IEEJ検討（第5回基本政策分<br>科会発表資料に準じる）<br>※ESAでは0.5～1€/W         |
| マイクロ波回路      | 180               | 180      | 円/W               |                                                          |
| 構造部          | 5000              | 5000     | 円/kg              |                                                          |
| 蓄電部          | 10                | 13       | 円/Wh              | IEEJ検討（第5回基本政策分<br>科会発表資料に準じる）                           |
| <b>輸送部</b>   |                   |          |                   |                                                          |
| RLV打上げ単価     | 0.054             | 0.071    | 億円/ton            | 50\$/kg, 1\$ = 142円で換算<br>※Roland Bergerは50～<br>100\$/kg |
| OTV製造単価      | 0.35              | 0.35     | 億円/ton            |                                                          |
| OTV太陽電池単価    | 30                | 66       | 円/W               | IEEJ検討（第5回基本政策分<br>科会発表資料に準じる）                           |
| OTV推進剤燃料単価   | 400               | 400      | 円/kg              |                                                          |

出所) 令和 5 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)調査報告書(三菱総合研究所、2024 年 3 月)

## b. 欧米での代表的な FS における各種コストモデルとの比較

今年度は、上記の入力パラメータ値の見直しに加えて、4.3.3 (1)項で示した欧米での代表的な FS (下記リスト)が使用しているコストモデルにおける SSPS コスト評価の手法を整理し、現状の JSS コストモデルとの比較を行うことで、JSS コストモデルにおける入力項目の再検討を行った。

[RD1] “Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs”, Frazer-Nash Consultancy for ESA-funded study (Aug 2022)

[RD2] “Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power Generation for Terrestrial Energy Needs”, Roland Berger for ESA-funded study (July 2022)

[RD3] “Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”, Thales Alenia Space Italy (Dec 2023)

[RD4] “Space-Based Solar Power ”, NASA Office of Technology, Policy, and Strategy (Jan 2024)

以降では CAPEX(初期投資費:Capital Expenditure)と OPEX(運転維持費:Operating Expenditure)およびその他別に、各 FS モデルでの算出方法の概要を示す。

#### ア) 各 FS モデルの CAPEX の算出方法

CAPEX を算出する際の項目に多少の差異はあるが、どの FS モデルおよび JSS コストモデルとも「宇宙システム」「輸送システム(軌道間輸送、軌道上での組立・展開も含む)」「地上システム」の構築費の和を CAPEX としている。

「宇宙システム」に関しては、各モデルでリファレンスとしているシステム形状が異なり、どのような構成要素に分解しているかもそれぞれ違いがあるため単純な比較は困難であるが、各モデルでの宇宙システム部のコスト算出方法は概ね表 4-40 のようにまとめることができる。

「輸送システム」に関しては、基本的にはどのモデルも、地上から LEO に再使用型ロケットにより宇宙システムを輸送した後に、LEO から GEO への移送に再使用型 OTV を使用することを想定している。ただし OTV としては Starship、化学推進 OTV、電気推進 OTV を使用するシナリオが混在しており、モデルにより異なっている。また OTV ハードウェアのコストや組立ロボット等のハードウェアのコストも含めるものが多くなっている。

「地上システム」に関しては、土地取得代、施設・設備費、その他の費用を合算して求めているものが多いが、地上設備であるため、他の発電所の見積等を参照するなどそれぞれのモデルで項目等の設定が異なっている。欧州の FS モデルでは具体的な設置国を定めて、緯度からレクテナの大きさの設定を行っているのが特徴となっている。

上記の内容をまとめたものを表 4-40 に示す。

表 4-40 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルでの CAPEX の算出方法の比較

| FS 名       | 算出方法                                                                                                                     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 宇宙システム     |                                                                                                                          |
| FNC (RD1)  | 構成要素ごとに重量当たり単価等から価格を算出。それらの和を宇宙システムの総コストとする。                                                                             |
| RB (RD2)   | ハードウェア式の重量当たりの単価を設定。その値に重量を乗じることで算出。                                                                                     |
| TAS (RD3)  | 構成要素ごとに重量当たり単価等から価格を算出。それらの和を宇宙システムの総コストとする。                                                                             |
| NASA (RD4) | モジュール初期コストを 100 万ドルとし、クロフォード習熟曲線を初期コストとユニット数に適用                                                                          |
| JSS        | 構成要素ごとに重量当たり単価等から価格を算出。それらの和を宇宙システムの総コストとする。                                                                             |
| 輸送システム     |                                                                                                                          |
| FNC (RD1)  | <LEO から GEO への移送> 化学推進 OTV<br><輸送コスト> ①LEO までの打上げ費(ペイロード重量当たり単価) + ②OTV(機体 + 燃料)価格 + ③ロボットハードウェア価格 + ④打上げ保険              |
| RB (RD2)   | <LEO から GEO への移送> 電気または化学推進 OTV<br><輸送コスト> GEO までの打上げ費(ペイロード重量当たり単価)として、LEO までの打上げ費の 10 倍を設定                             |
| TAS (RD3)  | <LEO から GEO への移送> 電気推進 OTV<br><輸送コスト> ①LEO までの打上げ費(ペイロード重量当たりの単価) + ②LEO ~ GEO までの打上げ費(ペイロード重量当たり単価) + ③ロボットハードウェア価格     |
| NASA (RD4) | <LEO から GEO への移送> Starship<br><輸送コスト> ①Starship による打上げ費(SSPS ペイロード当たりの単価 + LEO ~ GEO に必要な燃料輸送分) + ②ロボットハードウェア価格 + ③組立コスト |
| JSS        | <LEO から GEO への移送> 電気推進 OTV<br><輸送コスト> ①LEO までの打上げ費(ペイロード重量当たり単価) + ②OTV(機体 + 燃料)価格                                       |
| 地上システム     |                                                                                                                          |
| FNC (RD1)  | 土地取得代 + 施設・設備費(レクテナメッシュ、制御施設、バランスオブプラント設備費、電気設備インフラ費) + その他(建設に関する開発前費用)                                                 |
| RB (RD2)   | 不明                                                                                                                       |
| TAS (RD3)  | 土地取得代 + 施設・設備費(レクテナメッシュ + 電力制御施設)                                                                                        |
| NASA (RD4) | 米国を拠点とする 12 の太陽電池アレイファームの例に基づいて、土地利用や地上の大型アンテナアレイに基づくコストを見積り                                                             |
| JSS        | 土地取得代 + 施設・設備費(レクテナメッシュ + 商用電力網接続費) + その他(建設費)                                                                           |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

#### イ) 各 FS モデルの OPEX の算出方法

各 FS モデルでは、OPEX として運用保守費(O&M 費)、保険、接続および送電費、宇宙機運用のための燃料補給費等を算出している。O&M 費としては、上項で算出した CAPEX に一定の割合を乗じているものが多くなっている。各 FS モデルの OPEX の算出方法を表 4-41 に示す。

表 4-41 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルでの OPEX の算出方法の比較

| FS 名       | 算出方法                                                                         |
|------------|------------------------------------------------------------------------------|
| FNC (RD1)  | OPEX として、保険+OM 費+接続および送電費を算出。OM 費は CAPEX に一定の割合を乗じる。                         |
| RB (RD2)   | CAPEX に一定の割合を乗じたものを OPEX とする。                                                |
| TAS (RD3)  | OPEX として、保険+OM 費+宇宙機運用用燃料補給費を算出。                                             |
| NASA (RD4) | OPEX として、宇宙機シールドリング費+保守用宇宙機モジュール費+保守用サービサー費+保守用 HW の打上げ費+運用マネジメント&データ解析費を算出。 |
| JSS        | CAPEX に一定の割合を乗じたものを OPEX とする。                                                |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

## ウ) その他

その他として、各 FS モデルのコスト計算に出てくる項目として、開発コスト、廃棄コスト、年間性能劣化率、設備利用率、習熟曲線がある。各コストモデルに組み込まれている項目の有無を表 4-42 に示す。

表 4-42 欧米の FS における各コストモデルと JSS モデルに組み込まれている各項目の有無の比較

| FS 名       | 開発コスト | 廃棄コスト | 年間性能劣化率 | 設備利用率 | 習熟曲線 |
|------------|-------|-------|---------|-------|------|
| FNC (RD1)  | ×     | ×     | ○       | ○     | ○    |
| RB (RD2)   | ×     | ×     | ×       | ○     | ○    |
| TAS (RD3)  | ×     | ×     | ○       | ×     | ○    |
| NASA (RD4) | ○     | ○     | ×       | ○     | ○    |
| JSS        | ×     | ×     | ×       | ×     | ×    |

出所)各種情報より CSP ジャパン作成

※JSS の項目の有無は 2007 年度時点。2023 年度に検討を行った JSS コストモデルでは、発電パターンに応じた設備利用率および地上システムの廃棄コストは考慮されている。

## c. JSS コストモデル改修点一覧

4.3.3 (2)2)項で比較および検討を行った結果、今年度の JSS コストモデルに対して以下の改修を行った。各改修点について以下に示す。

## <JSS コストモデル-2024 年度の改修点>

### ◎新規導入項目

- (組立・運用等に使用する)軌道上インフラ

SSPS 宇宙システムの組立て／運用(メンテナンスを含む)に際して、宇宙システム本体以外にロボット等のハードウェアが必要であるため、宇宙システムの重量およびコストに一定の比率を乗じるものとする。宇宙システムの重量を付加することで、本ハードウェアの輸送費も考慮されることとなる。なお、廃棄時の措置については、いくつかのシナリオが考えられ、廃棄時にも SSPS を解体するロボットや墓場軌道まで輸送する推進システム等が必要となる可能性が高いが、ここで導入する「(組立・運用等に使用する)軌道上インフラ」が廃棄時に用いるインフラと兼用できると考えることも可能である。一定の比率として導入する入力パラメータ値としては 5%を使用する。

- 習熟曲線

表 4-42 表 4-42 に示すように、欧米の他の FS モデルでは、大量生産による SSPS 宇宙システムの製造コスト低減を想定し習熟曲線を適用している。実際 SSPS は無人による量産体制での製造が想定されており、機数が増えるほどコストが低減することが見込まれる。そのため JSS コストモデルにおいても、SSPS 宇宙システムに習熟曲線を導入する。ただし本来、SSPS の構成要素ごとに習熟率は異なるはずだが、その適切な値を推定することは困難である。そこで本モデルでは一律の習熟率を仮定し、地上の太陽電池で一般的に用いられる 80%を入力パラメータの値として採用する。なお、輸送システムや地上システムのハードウェアについては、他の分野でも利用が進み、すでに十分にコストが低減したものを使用前を想定しているため、習熟曲線の適用は行わない。

### ◎数字の見直し

- 地上システム／RF-DC 変換部のコスト

欧米の他の FS モデルでは、レクテナの設置場所(緯度)による面積の違いなどを考慮しているケースもある。しかし JSS コストモデルでは、その特性上、レクテナ面積に依存するコストの割合が少ないため、レクテナ面積や土地代が異なる場合でも、地上システム全体のコストにはほとんど影響を与えない。一方で、他の FS モデルと比較すると、JSS コストモデルでは地上システム部の全体コストの割合が高い傾向が見られる。そのため、RF-DC 変換部の単価を見直し、[RD3]TAS の FS で使用されている「レクテナメッシュ単価:0.17(\$/W)」を採用することとした。これを 1\$=140 円で換算し、RF-DC 変換部の単価を 24 円/W と設定する。

- 寿命

欧米の他の FS モデルでは、すべてのケースで寿命を 30 年と想定している。本来 SSPS はメンテナンスを継続しながら長期的に運用されることを前提としており、一般的な「寿命」や「廃棄」といった概念とは異なる運用が想定されている。しかし発電コストを算出する際には、この「寿命」として設定する年数が重要な要素となるため、本モデルでは他のシステムと統一し、30 年を採用する。

その他、他の FS での考え方を参考に建設期間、設備利用率、メンテナンス率等の値についても再検討を行ったが、これらの数値については昨年度までの値を変更せず使用することとした。以上をまとめて、今年度の見直し点一覧(見直しの結果変更なしの点も含む)を表 4-43 に示す。



表 4-43 再検討を行った JSS コストモデルの項目／入力パラメータ値一覧(2024 年版)

| 項目名                       | 考え方                                                                        | 検討結果                        | 備考                                                        |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 新規導入項目                    |                                                                            |                             |                                                           |
| (組立・運用等に使用する)軌道上インフラ      | 宇宙システムの重量およびコストに一定の比率を乗じる<br>※廃棄のためのインフラも含める。                              | 重量およびコストマージン：5%             |                                                           |
| 習熟曲線                      | 他の FS モデルでは全て導入されているため、本モデルでも新規に導入する。                                      | 習熟率：80%                     | 地上の太陽電池で通常使用している数字。本来は部分ごとに数値が変わるはずであるが、今回は一律 80%とする。     |
| 数字の見直し(再検討の結果、変更なしのものも含む) |                                                                            |                             |                                                           |
| 建設年数                      | 他の FS モデルでは 2 年のものが多いが、JSS モデルは規模も小さく(=1GW)、モジュール化されている単純形状なので、変更の必要はなしと判断 | 1 年                         | 売電期間は「寿命-建設年数」                                            |
| 地上システム<br>(RF-DC 変換部のコスト) | JSS コストモデルでは面積依存のパラメータが少なく、レクテナの「円/W」のパラメータが効いているので、この数値を見直す               | RF-DC 変換部の単価：100 円/W⇒24 円/W | TAS モデルでの「レクテナメッシュ」の値を採用。                                 |
| 設備利用率                     | 蝕の影響を入れた発電パターンを考慮しているため変更なし。                                               |                             | 商用電力網接続効率として 95%を想定                                       |
| メンテナンス率                   | 初期投資費用に一定の比率を乗じる。変更なし。                                                     | 宇宙部：3%<br>地上部：1%            |                                                           |
| 廃棄コスト                     | 宇宙部はメンテナンスをしながら長期的に利用を継続することを想定しているため廃棄コストは想定せず。地上部のみ廃棄率を想定。               | 廃棄費比率<br>宇宙部：0%<br>地上部：5%   |                                                           |
| 寿命                        | 他の FS モデルでは全て 30 年                                                         | 40 年⇒30 年に変更                | そもそも SSPS はメンテナンスしながら、ずっと使用するという考え方であり、一般的な「寿命」の考え方とは異なる。 |

出所)CSP ジャパン作成

### 3) 再検討した JSS コストモデルによる SSPS コストの試算

4.3.3 (2)2)c 項で示した内容に従って、JSS コストモデルの改修を行い SSPS コストの再試算を行った。なお本項で計算した SSPS コストとは、SSPS の宇宙システム部のコスト、輸送システム部のコスト、地上システム部のコストであり、それらの総和が初期投資費(CAPEX)となっている。運転維持費(OPEX)に関するコストは 4.3.3 (3)項で計算している。

#### a. JSS モデル(バッテリーあり)ケースのコスト試算

JSS\_SSPS のバッテリーありのケース(本ケースを「SSPS-B24 モデル」とする)についてコスト試算を行った。各入力パラメータは昨年度の超軽量化を行った「SSPS-23B」に 4.3.3 (2)2)c 項で示した改修を加えたものとなっている。

SSPS の宇宙システムの総重量は、基本的には昨年度の超軽量型 SSPS-23B と同じであるが、今年度は「(組立・運用等に使用する)軌道上インフラ」を加えた分だけ重量増となっている。また、コストについても同様であるが、2 号機目以降は習熟曲線に沿ってコストが低減することとなる(表中には一例で 2 号機、10 号機、30 号機および 60 号機の値を示している)。輸送コストについては、初号機では LEO から GEO に移送するための OTV 機自体を SSPS 本体と同時に打上げるため、2 号機以降よりコスト高となっている(2 号機以降は OTV の燃料と再使用できない改修部分のみを打ち上げる)。地上部は、RF-DC 変換部の単価を見直したため、これまでの試算結果より低コストとなっている。結果をまとめて表 4-44 に示す。

表 4-44 JSS モデル(バッテリーあり)ケースのコスト試算(SSPS-B24)

|              | SSPS-B24（バッテリーあり） |                                                                  | 単位  |
|--------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----|
|              | 初号機               | 2号機以降                                                            |     |
| ◎宇宙部（重量／コスト） |                   |                                                                  |     |
| SSPS総重量      | 15,771            | 15,771                                                           | ton |
| SSPS総コスト     | 8,368             | 習熟率80%で低減<br>2号機：6,694<br>10号機：3,987<br>30号機：2,800<br>60号機：2,240 | 億円  |
| ◎輸送部         |                   |                                                                  |     |
| 総輸送コスト       | 2,853             | 2,133                                                            | 億円  |
| ◎地上部         |                   |                                                                  |     |
| 総地上部分コスト     | 1,526             | 1,526                                                            | 億円  |
|              |                   |                                                                  |     |
| 総構築コスト       | 12,747            | 2号機：10,354<br>10号機：7,647<br>30号機：6,459<br>60号機：5,899             | 億円  |

出所)CSP ジャパン作成

## b. JSS モデル(バッテリーなし)ケースのコスト試算

上記の発送電部の重量を軽量化したケースである SSPS-B24 モデルでも、地上での出力が同規模(=1GW)である TAS モデル(RD3)(=6,640ton)と比較すると、まだ重量の値が大きくなっている。重量の内訳をみると、蓄電部の重量が大きいため、さらなる軽量化を図るためには、蓄電部の軽量化を図る、あるいは蓄電池を搭載しないモデルについても検討する必要がある可能性が高い。

そこで、本項では「SSPS-N24 モデル」として、蓄電池を搭載しないタイプのシステムの重量およびコストの見積を行った。ただし本モデルについては、十分なシステム検討が進んでいないため、元の JSS コストモデルに以下の改良を加え、概算コストの目安を得ることを目的としている。技術的に成立しない条件が含まれている可能性もあるため、あくまで今後の検討の必要性を評価するための参考資料として扱うべきであることに留意が必要である。

### <バッテリーなしのケース(SSPS-N24)のコスト試算に当たり改良した点等>

- SSPS-B24 は地上で受電する電力は最大 1.6GW であるが、SSPS-N24 は最大 1GW の仕様とした。そのため、宇宙部の太陽電池の重量およびコストを 1/1.6 に削減した。
- マイクロ波回路部:変更なし。SSPS-B24 と同じものを使用
- 蓄電部:なし(=0)に変更
- 蓄電部がないことから、構造部の厚みを蓄電部ありの SSPS-B24 モデルの半分(=1cm)とし、バスのダミー分の重量も発送電部の重量減の分に比例させて減少させた。
- テザー部:変更なし。SSPS-B24 と同じものを使用
- 地上部:変更なし。SSPS-B24 と同じものを使用

上記の点を JSS コストモデル(SSPS-B24 の計算に用いたもの)に反映し、JSS\_SSPS のバッテリーなしのケース(SSPS-N24)についてコスト試算を行った。

SSPS の宇宙システムの総重量は、太陽電池のシステム規模が 1/1.6 になった上に、蓄電部がないことから 6,066 ton まで軽量化が進んだ。コスト試算の結果をまとめて表 4-45 に示す。なお、地上での出力パターンは 1 日の中で大きく変動するため、設備利用率が大きく下がることとなる。

表 4-45 JSS モデル(バッテリーなし)ケースのコスト試算(SSPS-N24)

|              | SSPS-N24（バッテリーなし） |                                                                  | 単位  |
|--------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----|
|              | 初号機               | 2号機以降                                                            |     |
| ◎宇宙部（重量／コスト） |                   |                                                                  |     |
| SSPS総重量      | 6,066             | 6,066                                                            | ton |
| SSPS総コスト     | 5,601             | 習熟率80%で低減<br>2号機：4,481<br>10号機：2,669<br>30号機：1,874<br>60号機：1,499 | 億円  |
| ◎輸送部         |                   |                                                                  |     |
| 総輸送コスト       | 1,099             | 825                                                              | 億円  |
| ◎地上部         |                   |                                                                  |     |
| 総地上部分コスト     | 1,526             | 1,526                                                            | 億円  |
|              |                   |                                                                  |     |
| 総構築コスト       | 8,227             | 2号機：6,832<br>10号機：5,020<br>30号機：4,225<br>60号機：3,850              | 億円  |

出所)CSP ジャパン作成

### (3) エネルギーシステムモデルによる SSPS の経済性評価

コストモデルによって得られた宇宙太陽光発電システム(SSPS)のコストの諸元や出力変動曲線などを前提条件とし、エネルギーシステムモデルを用いることにより、2050 年度の脱炭素化を想定した日本のエネルギーシステム全体の中での SSPS の経済性を評価する。

#### 1) モデルの概要

高解像度エネルギーシステムモデルである「IEEJ-NE Japan」モデルを用いて SSPS の経済性評価を実施する。本モデルは、エネルギー需給バランス制約や CO<sub>2</sub> 制約等の各種制約条件の下、費用最小となるエネルギー・技術の導入量を推計する線形計画モデルである。2050 年度までの日本(全国を 5 地域に分割)を対象とし、一次エネルギー供給から最終エネルギー需要(産業、運輸、民生他)に至るエネルギーシステム全体を模擬するものである。特に発電部門では 1 時間刻みのモデル化を行うことにより、地上太陽光発電や風力発電が大量導入された際の出力の時間変動を模擬し、その中での各電源の経済性を正確に評価することが可能である。

図 4-55 にモデルの構造を示す。想定するエネルギー技術(需要側・供給側)の性能・効率やコストを前提条件として入れ、与えられたエネルギーサービス需要(産業、民生、運輸それぞれの部門で計 39 区分)を満たすように、最適(コスト最小)な技術の導入が計算される。中でも、発電部門については 1 年間で 1 時間刻みでモデル化することにより、変動性再生可能エネルギー(Variable Renewable Energy:VRE)の出力変動を模擬している。変動性対策としては火力発電の出力調整、VRE の出力制御、エネルギー貯蔵(揚水式水力、ナトリウム硫黄電池、リチウムイオン電池、レドックスフロー電池、水

電解と圧縮水素貯蔵)、デマンドレスポンス(電気自動車:EV やプラグインハイブリッド車:PHEV への充電、EV からの放電、民生用ヒートポンプ給湯機の運転制御)が考慮されている。

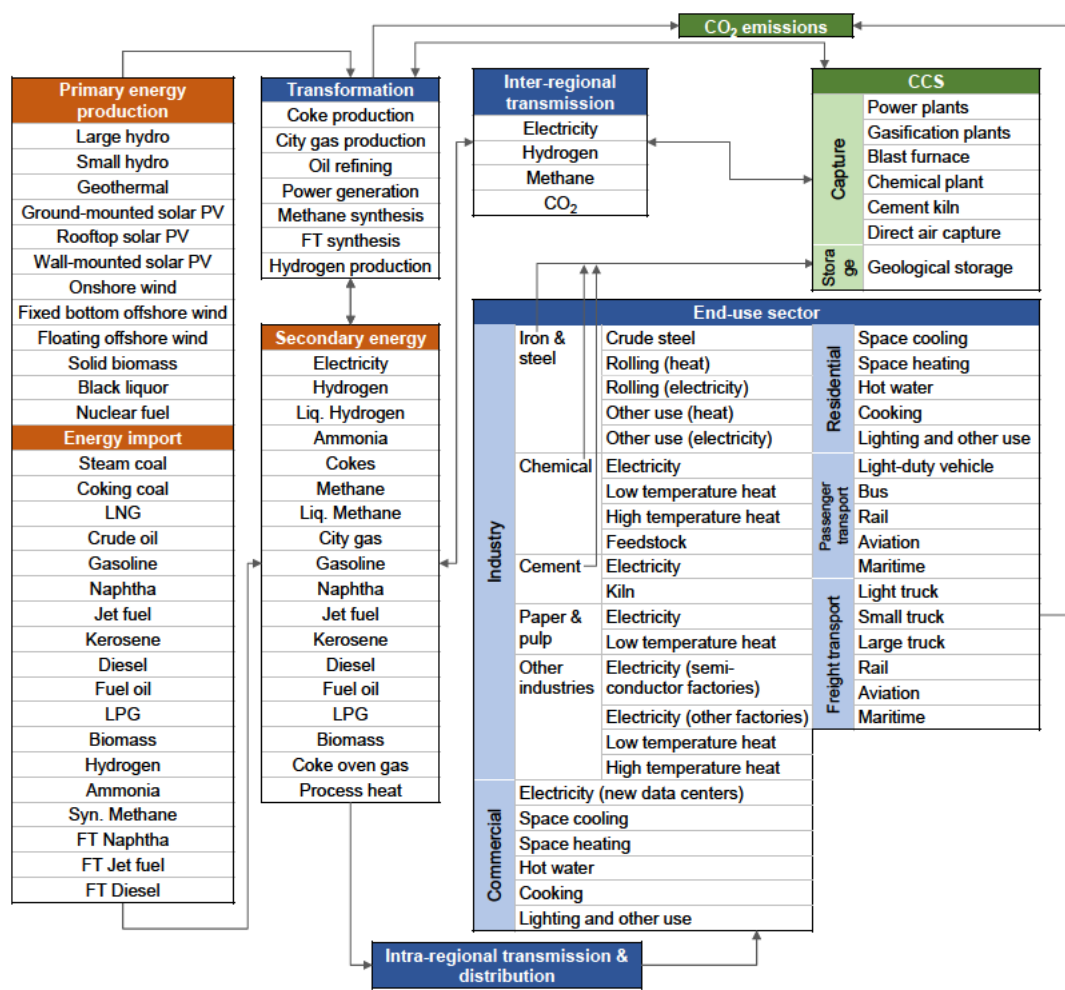


図 4-55 エネルギーシステムモデルの構造

出所) IEEJ 作成

## 2) 主要な前提条件

エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量が現状(2022 年度)の 964 百万トンから、2040 年度に 365 百万トン、2050 年度に正味でゼロとなることを想定し(図 4-56)、それを達成する状況下<sup>118)</sup>での SSPS の経済性についてモデル分析を行う。

海外からのクレジット購入は明示的に扱わない。ただし、本分析で扱う大気からの二酸化炭素直接回収(Direct Air Capture of CO<sub>2</sub>:DAC)などの技術を海外で実施した場合には、制度設計次第ではクレジット分として扱われることもあり得る。

<sup>118)</sup> 2024 年 12 月の総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会(第 66 回)で発表された試算

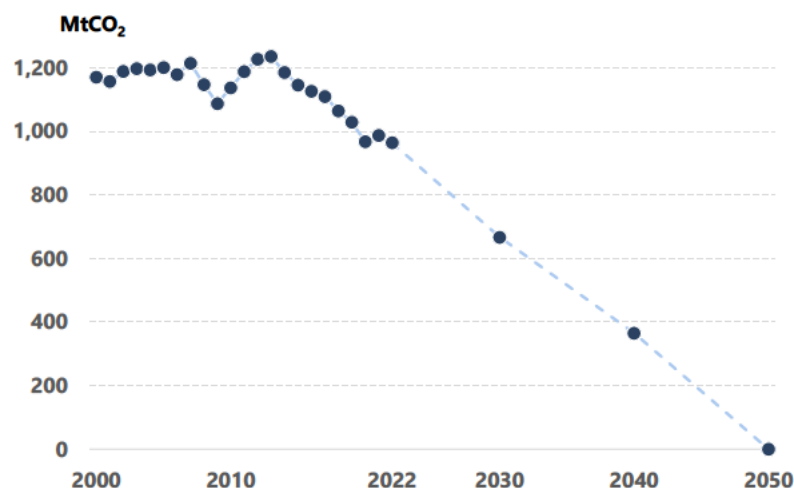


図 4-56 エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の前提

出所) IEEJ 作成

原子力は今後、建設中 3 基が運転開始し、複数の原子炉が廃止となると想定する。他方で廃止とならなかったものは 2030 年度前後までに再稼働し、運転期間を 60 年間まで延長する。「他律的な要素による稼働停止」分の運転期間へのカウント除外も考慮しており、全国で 2040 年度に 35GW、2050 年度に 32GW が稼働する(図 4-57)。

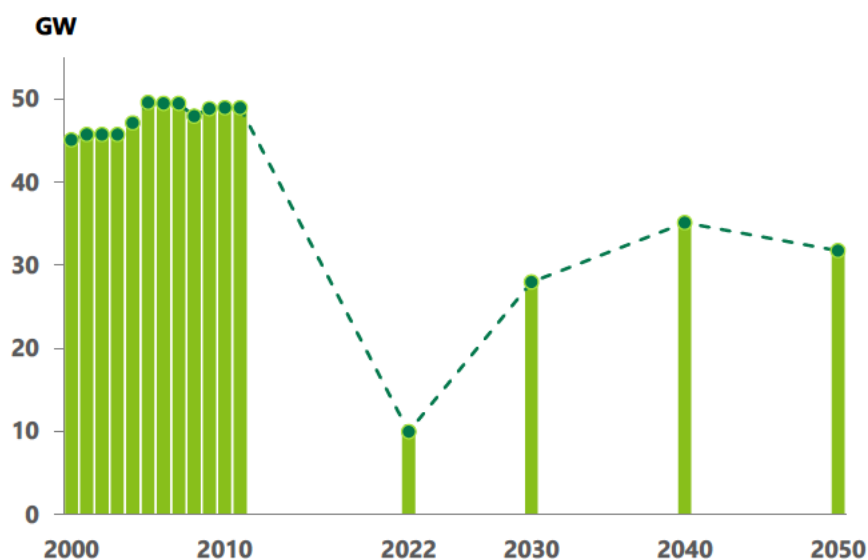


図 4-57 稼働中原子力所発電設備容量の想定(全国計)

出所) IEEJ 作成

各電源の発電コストについては、発電コスト検証 WG の公開資料に準じて想定する。太陽光、風力において割引率を同 WG で用いられている 3% で換算した均等化発電原価(LCOE)は図 4-58 のとおりである。立地条件や設備利用率に応じて幅をもって設定しており、導入が進むにつれて LCOE が上



昇する。さらに再エネ比率が高まるにつれていわゆる統合費用がかかり、VRE の LCOE は更に上昇する。

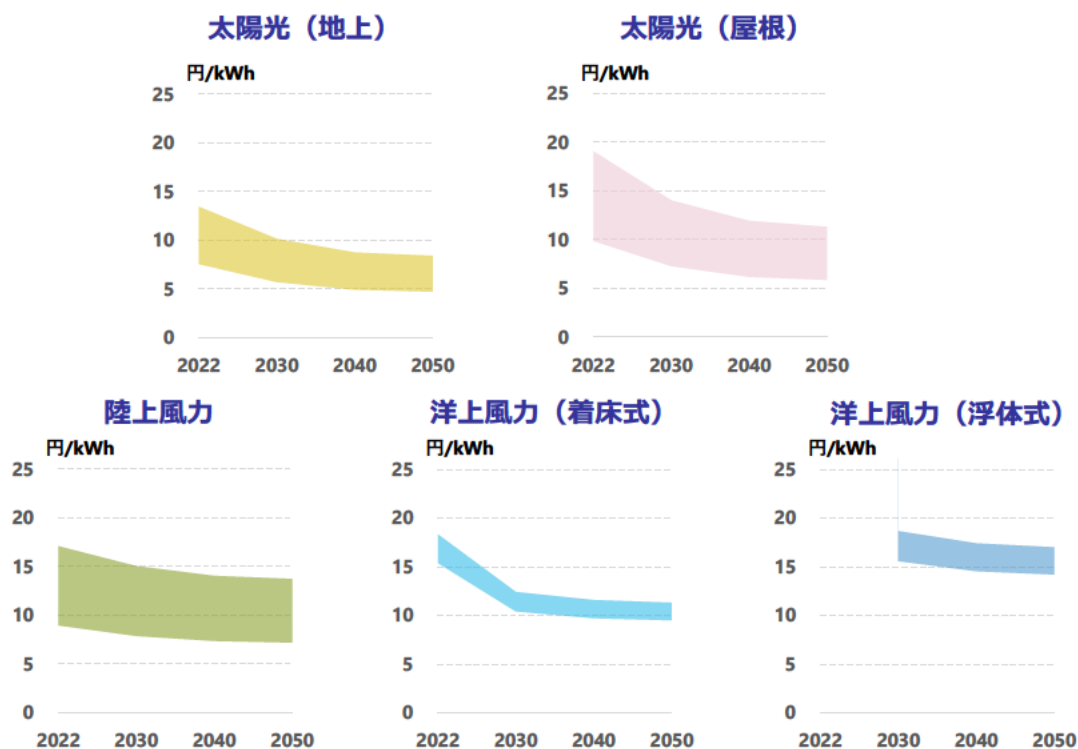


図 4-58 太陽光・風力発電コスト(LCOE)

出所) IEEJ 作成

太陽光発電・風力発電の導入量上限は、尾羽他<sup>119</sup>を基に基準想定を設定した(表 4-46 参照)。

<sup>119</sup> 尾羽秀晃, 笹川亜紀子, 森本壮一, 柴田善朗, 大槻貴司, 地域条例・建物特性を考慮した太陽光発電の導入ポテンシャル評価, JST 社会シナリオ研究事業「地域特性を活かし価値を創造する再エネ基盤社会への道筋」研究報告 No. R6-01, 2024 年 8 月。DOI: 10.5281/zenodo.13328721  
[http://www.hondo.ynu.ac.jp/JST/assets/docs/obane\\_et\\_al\\_2024.pdf](http://www.hondo.ynu.ac.jp/JST/assets/docs/obane_et_al_2024.pdf)

表 4-46 太陽光発電・風力発電の導入量上限

|                          | 考え方                                                                            |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 屋根設置型太陽光(戸建住宅)           | 南・東西向き屋根に設置。                                                                   |
| 屋根設置型太陽光<br>(非公共系・公共系建物) | 全屋根面積のうち建物の種類に応じて 7.9%-38.8%の面積(太陽光発電の設置実績に基づく)に太陽光発電を設置                       |
| 地上設置型太陽光                 | 条例によって規制される全ての種類の区域を除外。                                                        |
| 陸上風力                     |                                                                                |
| 営農型太陽光                   | 2023 年の全農業経営体(84 万経営体)が電気主任技術者の選任が不要の範囲である 50kW の太陽光発電を設置する想定 <sup>120</sup> 。 |
| 洋上風力                     | 景観影響や系統接続の制約を考慮し、離岸距離 10-100km の海域に設置                                          |

出所)IEEJ 作成

再生可能エネルギーと原子力で供給しきれない分はゼロ・エミッション火力(CCS 付火力やアンモニア火力)で供給される。そのため、SSPS は、ゼロ・エミッション火力と競合する。

将来の半導体工場による電力消費増加分は既存計画や世界の半導体市場予測等をもとに、データセンターによる電力消費増加分は電力中央研究所<sup>121</sup>をもとに想定した。現在から 2040 年度にかけて合計で 100TWh、2050 年度にかけて 214TWh 増加する(図 4-59 参照)。

<sup>120</sup> 朝野賢司, 永井雄宇, 尾羽秀晃, ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討, 経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第 34 回会合)

[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/034/034\\_007.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/034/034_007.pdf)

<sup>121</sup> 間瀬貴之, 中野一慶, 稗貫峻一, 坂本将吾, 2050 年度までの全国の長期電力需要想定－基礎的需要・追加的要素(省エネ・電化)の暫定試算結果－, 2024 年 1 月 24 日, 電力広域的運営推進機関・将来の電力需給シナリオに関する検討会・第 3 回検討会。

[https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai\\_jukyu/2023/files/shoraijukyu\\_03\\_02\\_01.pdf](https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/files/shoraijukyu_03_02_01.pdf)

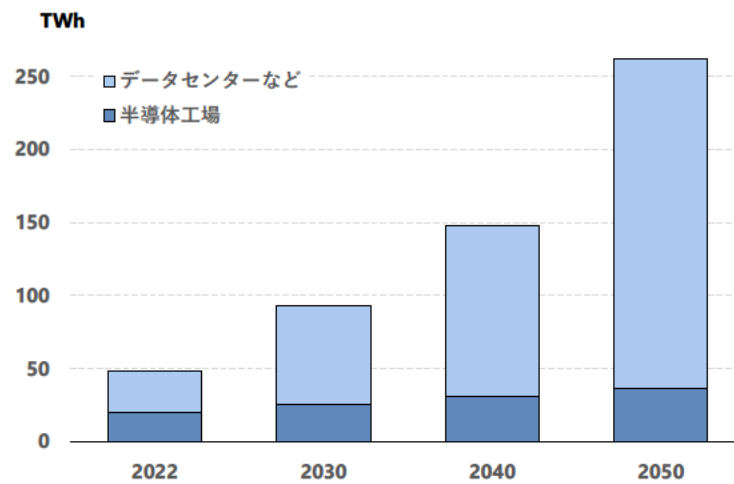


図 4-59 データセンター・半導体工場の電力需要

出所) IEEJ 作成

SSPS においては、バッテリーあり、なしの 2 つを想定する(表 4-47 参照)。

表 4-47 SSPS の種類

|          |                      |
|----------|----------------------|
| SSPS-B24 | 超軽量(ふろしき衛星並)でバッテリーあり |
| SSPS-N24 | 超軽量(ふろしき衛星並)でバッテリーなし |

出所) IEEJ 作成

### 3) ケース設定

今回は 2 種類の SSPS の設置可能な面積が広い北海道電力管内、電力需要が大きい東京電力管内のいずれかで 2050 年度に導入可能になることを想定して推計する。今回設定した 5 ケースを表 4-48 に示す。

表 4-48 ケース設定

|                |                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| ① 導入なし         | SSPSが2050年度までに導入されない                                        |
| ② 上限ありSSPS-B24 | SSPS-B24が2040年度打上げ開始、2041年度初号機稼働開始し、以降は投資制約等の制限で1機/年のペースで建設 |
| ③ 上限ありSSPS-N24 | SSPS-N24が2040年度打上げ開始、2041年度初号機稼働開始、以降は投資制約等の制限で1機/年のペースで建設  |
| ④ 上限なしSSPS-B24 | SSPS-B24が2040年度打上げ開始以降投資制約等制限なしとして、60GWを上限に計算               |
| ⑤ 上限なしSSPS-N24 | SSPS-N24が2040年度打上げ開始以降投資制約等制限なしに60GWを上限に計算                  |

出所) IEEJ 作成

#### 4) 結果

SSPS が導入されない場合の 2022 年度から 2050 年度の一次エネルギー供給、電源構成の推移を示す(図 4-60、図 4-61)。

今後化石燃料(石炭・石油・天然ガス)の利用量は急速に減少するものの、一次エネルギーに占めるその比率は 2050 年度に 34%となる。これは石油化学原料として石油等が使われる他、発電部門において CCS 付きの火力発電が用いられること、また最終消費部門において電化しきれない化石燃料消費(都市ガスなど)が残り、その CO<sub>2</sub> 排出分を負の排出技術によってオフセットする解が選ばれていることによる。再生可能エネルギーの比率は 2050 年度に 26%に達する他、水素・アンモニアの輸入量が 2040 年度以降急速に増加し、2050 年度には全体の 17%を占めるに至る。

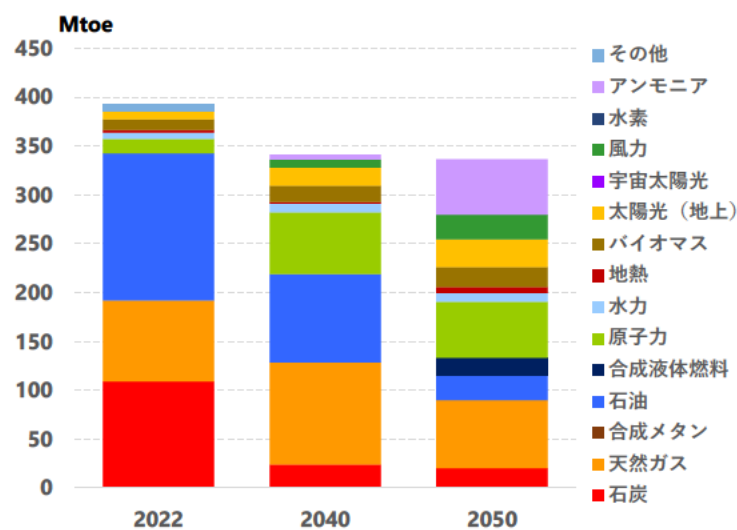


図 4-60 2022 年度から 2050 年度までの一次エネルギー供給および電源構成の推移

出所) IEEJ 作成

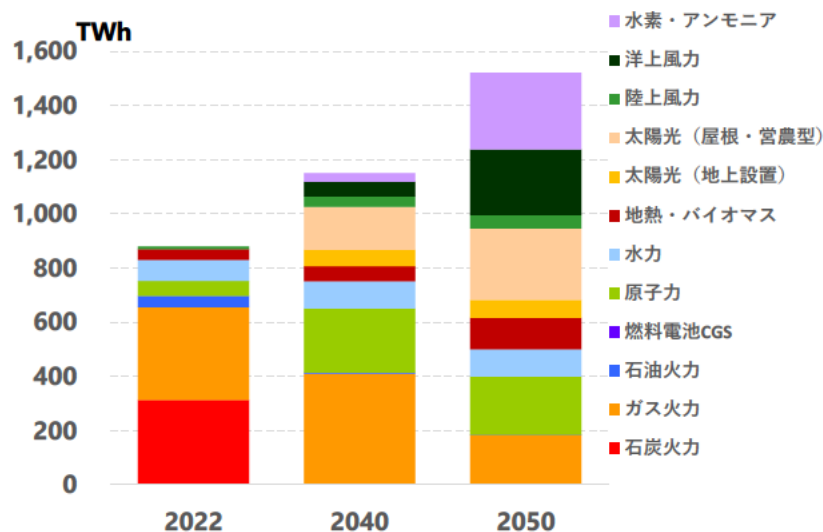


図 4-61 2022 年度から 2050 年度までの一次エネルギー供給および電源構成の推移

出所) IEEJ 作成

ここでは 2040 年度に暫定的に政府目標として示されている CO<sub>2</sub> 排出量 70% 減程度 (2013 年度比) を達成するために、発電電力量 1.1 兆 kWh、火力 39%、原子力 21%、再生可能エネルギー (太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等) 41% となる結果を示しており、この電源構成は政府の 2040 年度におけるエネルギー需給見通しの幅を持たせた見通しになっている。2050 年度には、VRE の LCOE が火力発電よりも低くなると想定をしているものの、非常に高い VRE 比率の条件下では統合コストが追加的にかかることから、最適解では 2050 年度に再生可能エネルギーや原子力のみでなく、火力発電も使われることとなる。具体的には、CCS の上限制約が許すところまで CCS 付きガス火力発電が行われ、それを上回る分についてはアンモニア火力が導入される。後者はエネルギーシステムの脱炭素化が進む最終の局面、即ち 2040 年度から 2050 年度の間に急速に導入され、2050 年度には発電電力量の 19% を占めるに至る。

投資制約等の上限がある場合、上限の 9GW まで導入される。このことから、今回の分析のコスト想定であれば、2050 年度までに投資制約等がある状態でも SSPS はその上限まで導入される。仮に、投資制約等がなく 2050 年度まで最大 60GW まで導入されたとした場合、東京では SSPS-N24、SSPS-B24 のいずれも 60GW まで導入される。一方、北海道は SSPS-B24 は 45GW、SSPS-N24 は 20W まで導入される。

## 5) 感度分析

SSPS の導入は総投資額のコストに大きく影響を受ける。ここでは総投資額のコストを変化させて感度分析する (図 4-62、図 4-63 参照)。

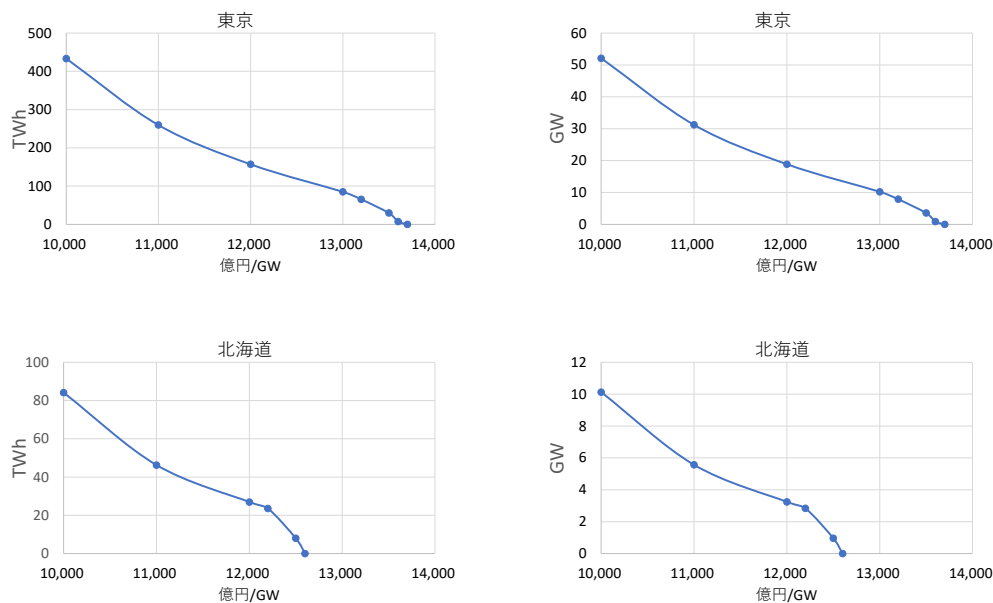


図 4-62 SSPS-B24 の総投資額を変化させた際の影響(左:発電量、右:設備導入量)

出所)IEEJ 作成

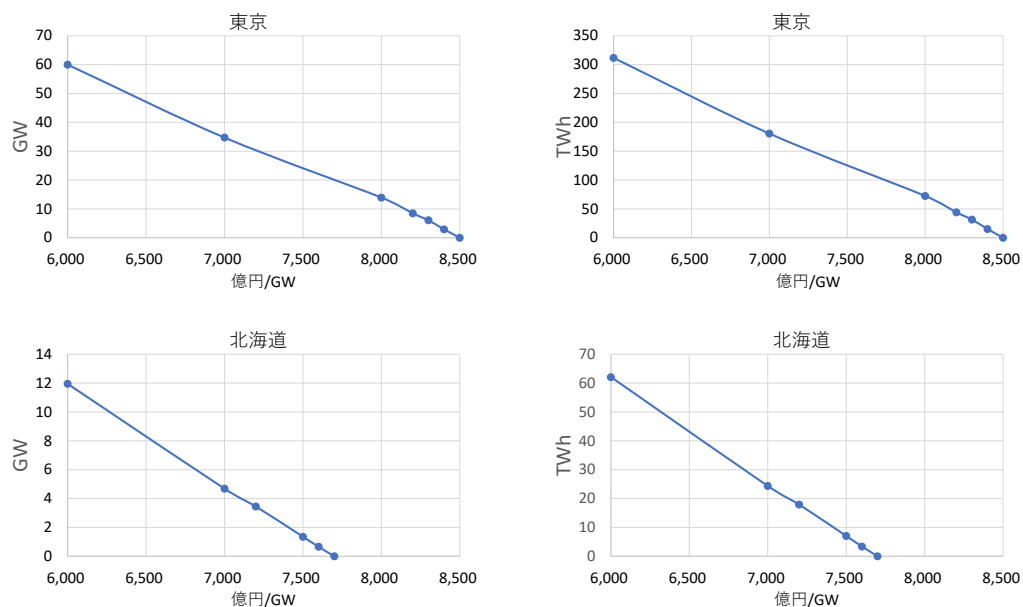


図 4-63 SSPS-N24 の総投資額を変化させた際の影響 (左:発電量、右:設備導入量)

出所)IEEJ 作成

SSPS-B24 の総投資額を変化させた結果、東京では 1 兆 3,600 億円/GW(14.6 円/kWh)、北海道では 1 兆 2,500 億円/GW(13.5 円/kWh)以下で導入が進む。SSPS-N24 は東京では 8,400 億円/GW(14.5 円/kWh)、北海道では 7,600 億円/GW(13.1 円/kWh)以下で導入が進む。



## 6) モデル分析からの示唆

今回のコスト想定では投資制約等があった場合でも、バッテリーありなしにかかわらず LCOE が低いことから、SSPS はバッテリーありなしともに大幅に導入される。また、仮に SSPS に対して投資制約等がなければ、より導入されることになる。地域別では北海道よりも東京のほうが電力需要が大きいことから導入量は大きく、仮に SSPS へ投資制約等がなければ東京は想定した 60GW 以上でも導入されるが、北海道では 60GW までは導入されない。今回のコスト想定ではバッテリーありが安価であることから、北海道ではバッテリーなしがより導入される。また、感度分析から、バッテリーありは 1 兆 3,600 億円/GW、バッテリーなしは 8,400 億円/GW のコストを下回ることが導入の条件となる。

## 7) 今後の課題

本分析には以下に述べる課題があることには留意が必要である。

1 つ目は本分析で設定した前提についてさらに精査する必要がある点である。本分析ではバッテリーありの経済性が高いという評価結果になったが、今後 SSPS のコストモデルを見直した場合、同じ結論になるのかの検証が必要である。また、学習曲線によって宇宙システムの価格が低減することを想定したが、導入量に伴う低減率についても精査が必要である。さらに、今回の分析では北海道と東京でレクテナ面積や場所を変化させても全体に占めるコストが少ないため、コストに変化はないとしているが、発電パターンにおいて、北海道と東京で緯度や気温による差については含まれていないことから、導入地域での発電パターンの違いを検討する必要がある。

2 つ目は経済性以外の上限を設定する必要がある点である。今回は上限がある場合は投資制約等の制限で 1 機/年のペースとしたが、導入量を担保する投資可能性や地上での敷地面積等の環境、社会的制約を精査する必要がある。

3 つ目はさらなる分析の可能性である。SSPS の経済性は他技術のコストや化石燃料価格等、様々な条件に依存すると考えられ、それらの幅のある設定の中での検討が重要である。さらに、今回は東京と北海道のみを検討したが、九州等の他地域でも検討していく必要がある。

本分析は一定の仮定を設定して行ったものであるが、上記の通り本分析においては考慮されていない事象も多く存在することから、これらをより正確に評価することは今後の大きな課題である。

## (4) SSPS の導入が進む条件に係る検討

### 1) SSPS の初期投資費(CAPEX)の目標値の検討

4.3.3 (3)6 項で感度分析結果を示したように、2050 年における日本のエネルギーシステム全体の中で SSPS の導入が進むためには、バッテリーありのケースでは 1 兆 3,600 億円、バッテリーなしのケースでは 8,400 億円のコストを下回ることが条件となることが分かった。

一方で、再検討した JSS コストモデルを用いた SSPS コストの試算では、バッテリーあり(SSPS-B24 モデル)の場合、CAPEX は 1 兆 2,747 億円、バッテリーなし(SSPS-N24 モデル)の場合は 8,227 億円となる。そのため、導入のための上限値を下回っており、SSPS は経済的に成立する可能性が十分に高いことが分かった。

しかし、これらの数値は上限値に近い値となっており、条件の厳しい北海道では導入が見込めない可能性も高い。そこで条件の緩い東京で 30GW 程度導入される条件を満たすことを考えると、図 4-62 よりバッテリーありのケースで 1 兆 1,000 億円、図 4-63 よりバッテリーなしのケースで 7,000 億円程度に抑えることが求められる。以降では、これらの条件を満たすための各パラメータの目標値について検討する。

## 2) SSPS の導入が大幅に進むための主要パラメータの目標値についての検討

### a. バッテリーありのケースの主要パラメータの目標値

SSPS-B24 のケースにおいて、CAPEX を 1 兆 1,000 億円以下にするための条件について考察する。 $(\text{総構築コスト}) = (\text{宇宙部の総コスト}) + (\text{地上部の総コスト}) + (\text{輸送部の総コスト})$ で算出されるが、各部を同じ削減比率( $=11,000/12,747$ )で減少させ、総額 1 兆 1,000 億円を達成すると仮定した場合、各部の目標コストは以下のようになる。

#### <各部の総コストの目標値>

- ・ 宇宙部の総コストの目標値:7,221 億円
- ・ 地上部の総コストの目標値:1,317 億円
- ・ 輸送部の総コストの目標値:2,462 億円

これらの各部の総コストの目標値を、1 つの主要パラメータのみを変更して達成させるとすると、各主要パラメータの目標値は以下のようになる。

#### <各主要パラメータの目標値の一例>

- ・ 宇宙部の総コストの目標値:7,221 億円を達成するための条件
  - マイクロ波回路の単価:99 円/W(現状のコストモデルでの値:180 円/W)、あるいは
  - 太陽電池の単価:46 円/W(現状のコストモデルでの値:66 円/W)、あるいは
  - 蓄電部の単価:0.8 円/Wh(現状のコストモデルでの値:13 円/Wh)
- ・ 地上部の総コストの目標値:1,317 億円を達成するための条件
  - マイクロ波/DC 変換素子の単価:3 円/W(現状のコストモデルでの値:24 円/W)、あるいは
  - 商用電源網への接続費用:241 億円/GW(現状のコストモデルでの値:450 億円/GW)
- ・ 輸送部の総コストの目標値:2,462 億円
  - 打上げ単価(LEO まで):5,900 円/kg(現状のコストモデルでの値:7,100 円/kg)、あるいは
  - SSPS 宇宙部の重量:13,615ton(現状のコストモデルでの値:15,771ton)

実際には 1 つのパラメータ値だけを目標値に到達させるのではなく、複数のパラメータ値を目標値に近づけることで、全体の目標を達成する手法が現実的である。しかし主要なパラメータ値の目標例を把

握しておくことは、今後の開発の指針を検討する上で参考情報の一つとして活用することが考えられる。

## b. バッテリーなしのケースの主要パラメータの目標値

SSPS-N24 のケースにおいて、CAPEX を 7,000 億円以下にするための条件について考察する。  
(総構築コスト) = (宇宙部の総コスト) + (地上部の総コスト) + (輸送部の総コスト) で算出されるが、各部を同じ削減比率 (=7,000/8,227) で減少させ、総額 7,000 億円を達成すると仮定した場合、各部の目標コストは以下のようになる。

＜各部の総コストの目標値＞

- ・ 宇宙部の総コストの目標値: 4,766 億円
- ・ 地上部の総コストの目標値: 1,298 億円
- ・ 輸送部の総コストの目標値: 935 億円

これらの各部の総コストの目標値を、1 つの主要パラメータのみを変更して達成させるとすると、各主要パラメータの目標値は以下のようになる。

＜各主要パラメータの目標値の一例＞

- ・ 宇宙部の総コストの目標値: 4,766 億円を達成するための条件
  - マイクロ波回路の単価: 119 円/W (現状のコストモデルでの値: 180 円/W)、あるいは
  - 太陽電池の単価: 43 円/W (現状のコストモデルでの値: 66 円/W)、あるいは
- ・ 地上部の総コストの目標値: 1,298 億円を達成するための条件
  - マイクロ波/DC 変換素子の単価: 1 円/W (現状のコストモデルでの値: 24 円/W)、あるいは
  - 商用電源網への接続費用: 222 億円/GW (現状のコストモデルでの値: 450 億円/GW)
- ・ 輸送部の総コストの目標値: 935 億円
  - 打上げ単価 (LEO まで): 5,700 円/kg (現状のコストモデルでの値: 7,100 円/kg)、あるいは
  - SSPS 宇宙部の重量: 5,166ton (現状のコストモデルでの値: 6,066ton)

上項と同様、実際には 1 つのパラメータ値だけを目標値に到達させるのではなく、複数のパラメータ値を目標値に近づけることで、全体の目標を達成する手法が現実的である。

## c. 打上げコストに係る検討

4.3.3 (4)2a および b のケースでは LEO までの打上げコストを 5,700 円～5,900 円/kg 程度にまで低減させることが目標となっている。打上げコストの将来の見通しについては、いくつかの数字が

出されているところであるが、例えば Citi GPS (Global Perspectives & Solutions) Report (May 2022)によると、「打上げコストは 2040 年までにベースケースで 1kg あたり 100 ドル、強気のシナリオでは 33 ドルまで低下する可能性がある」とされている<sup>122</sup>。

仮に、本レポートの通り打上げコストが 1kg あたり 100 ドル(1ドル=150 円で換算)であったとすると、バッテリーありの SSPS-B24 モデルで 4.3.3 (4)2)a4.3.3 (4)2)a で掲げた輸送部総コスト 2,462 億円を達成するためには、SSPS の総重量を現在のコストモデルでの計算値 15,771ton から 7,145ton まで減少させる必要があり、これは比率で示すと 45.3%に相当する。参考までに SSPS-B24 モデルの重量(15,771ton)内訳を図 4-64 に示す。

同様に、バッテリーなしの SSPS-N24 モデルで輸送部総コスト 935 億円を達成するためには、SSPS の総重量を現在のコストモデルでの計算値 6,066ton から 2,703ton まで減少させる必要があり、これは比率で示すと 44.6%に相当する。

以上のように LEO までの打上げコストが、ベースケースで想定されている 1kg あたり 100 ドルという条件下では、バッテリーあり／なし両モデルとも現状の 1/2 以下の軽量化が必要となる。マイクロ波回路部、太陽電池、構造部ともに大幅な軽量化が求められると共に、バッテリーありのケースでは蓄電部も同様に軽量化が進まないと条件を達成することはできない。逆に、強気のシナリオとして示されている程度にまで打上げコストの低減が進めば、現状のコストモデルで想定されている程度の重量で、輸送コストの目標値を達成できる可能性が高くなっている。

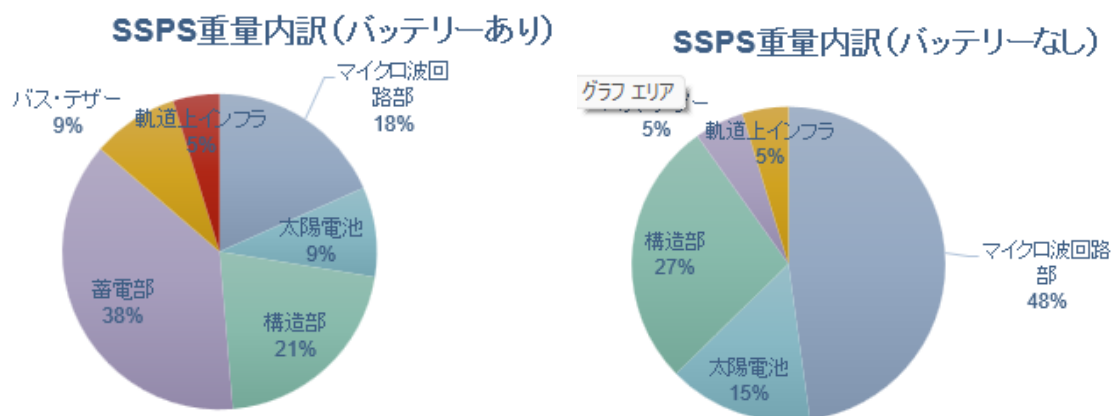


図 4-64 SSPS 現状のコストモデルでの重量内訳

出所)CSP ジャパン作成

## (5) まとめ

近年行われた欧米の FS におけるコスト算出の考え方や数字等を参考に、JSS コストモデルにおける入力項目および入力パラメータ値の見直しを行った。さらに 2007 年に検討した JSS モデルは宇宙機にバッテリーを搭載しレクテナでの出力値が一定となるようなモデルであったが、重量が大きくなりすぎることから、バッテリーなしのモデルについても簡易的にコストモデルを作成し検討を行った。

<sup>122</sup> <https://spacenews.com/citi-gps-report-space-launch-costs-to-fall-to-100kg-by-2040-driving-new-industries-and-facilitating-monitoring-of-ghg-emissions-deforestation-an/> (2025年1月27日閲覧)

バッテリーあり／なし両モデルとも CAPEX(初期投資費)および OPEX(運転維持費)を見積り、高解像度エネルギーシステムモデルである「IEEJ-NE\_Japan」モデルを用いて、SSPS が 2050 年度に導入可能になることを想定して、北海道および東京における 2050 年度の電源構成の計算を行った。その結果、LCOE(均等化発電原価)が低いことから SSPS はバッテリーあり／なしともに導入が進むことが示された。コストモデルでは、昨年度までの検討に比べて寿命を短くし、重量・コストマージン等を付加したにもかかわらず、習熟曲線を導入した効果が大きく出て、日本のエネルギーシステムの中での導入可能性が十分に期待できることが分かった。

さらに今回の計算条件では、バッテリーありのモデルが東京において導入されるときに最も導入が進むことも分かった。バッテリーなしの方が軽量であり、全体の CAPEX は低いが、宇宙システムおよび地上システムが最大出力時に合わせた仕様であるため、それ以外の時間帯にはシステムに余剰が生じる状態であるため、LCOE の計算では不利な状態となったため、バッテリーありの方がコスト的には有利な結果となった。

ただし、今回のバッテリーなしモデルの検討については、もともとシステム検討が十分ではない状態での重量、コスト試算であるため、概算コストの目安を把握するための参考としての情報提供に留まっている。いずれにしろ両モデルを比較する上では、蓄電システムの軽量化がキーとなるため、今後は、蓄電システムの技術進展を見据えながら、バッテリーなしモデルについてもシステムの検討を深めた上で、精度の高いコストモデルを作成し、引続き経済性に係る検討を深めることが求められる。

## 4.4 ベンチマーク調査

本節では、昨年度より継続して調査しているベンチマーク調査の結果について述べる。

ベンチマーク調査は、月面での水素・電力の利活用に関する個別技術について、国内外の技術・研究開発レベルが比較できるような整理を行い、日本の強みとなりうる技術分野や研究開発で重視すべき技術課題を明確化することを目的とする。

具体的な実施内容としては、まず日本・米国(NASA)・欧州(ESA)の水素・電力に係る研究開発について、プロセスごとに比較整理を実施した。日本における取組みは、JAXA の探査イノベーションハブ殿および探査センター殿にて実施されている取組み及び、経済産業省／国土交通省スターダストの取組み(含む本事業)を対象とした。

また、「日本の強みとなりうる技術分野」、「研究開発で重視すべき技術課題」の明確化のために行う比較・評価の評価軸として、①技術的優位性、②市場獲得可能性、③宇宙技術戦略での言及、④ISECG 国際宇宙探査ロードマップでの言及、の4つを設定し、各プロセスの技術について評価した。

最後に、比較結果を「技術の重要性の認知度」と「日本の優位性」の2軸のマトリックス図に整理の上、今後取りうるべきアクションを明確化した。

以降では、まず、4.4.1 において評価軸として用いる ISECG の国際宇宙探査ロードマップの概要を述べ、4.4.2 で日米欧の研究開発状況の整理結果を述べる。続いて 4.4.3 で4つの評価軸の定義および各プロセスの技術の評価結果を述べ、4.4.4 でマトリックス図を用いた整理結果を踏まえた最終的な結論を述べる。

### 4.4.1 ISECG 国際宇宙探査ロードマップの概要

#### (1) 国際宇宙探査ロードマップ第4版の概要

2024年8月に ISECG より、国際宇宙探査ロードマップ(Global Exploration Roadmap<sup>123</sup>)の改定版(第4版)が公表された。

国際宇宙探査ロードマップの目的は、近年、ISECG に参加している多くの機関が、宇宙戦略、政策、アーキテクチャ、ロードマップを独自に策定、発表していることを踏まえ、具体的なステップや活動を各機関に強制するものではないが、最終的に各機関が連携し共に探査するために、2050 年までの宇宙探査の共通認識を示すことである。

上記趣旨から、個別の技術の方針に関してあまり詳細な記載はされていない点には留意が必要である。

今回の改定では、主に以下の点がアップデートされた。

- より多くの宇宙機関が含まれるよう考慮
- 新興宇宙機関の貢献と将来の宇宙探査活動への参加をより強調
- 宇宙探査がもたらす恩恵の例を更新

---

<sup>123</sup> Global Exploration Roadmap 2024

Global Exploration Roadmap advanced technologies – the International Space Exploration Coordination Group



- 民間セクターの関心と活動が継続的に成長していることを考慮
- 探査計画について、持続的な探査に重点を置き、2050 年まで延長して検討
- ロボット探査と有人探査の相乗効果に重点を置き、月と火星以遠の探査活動を更新
- 人類が月面で生活し、長期にわたって探査を行うことを可能にする技術を含む、最新の重要技術リストの更新

## (2) 国際宇宙探査ロードマップの前提

国際宇宙探査ロードマップにおいては、図 4-65 に示す通り、LEO(2020 年代)⇒月(2030年代)⇒火星(2040 年代)⇒その先(2050 年代)という大まかなタイムスケールが示されている。

同文書内では、LEO・月・火星それぞれに対して、表面探査(surface)と軌道上(orbit)に分けて、各国の取り組みやミッションが整理されている。

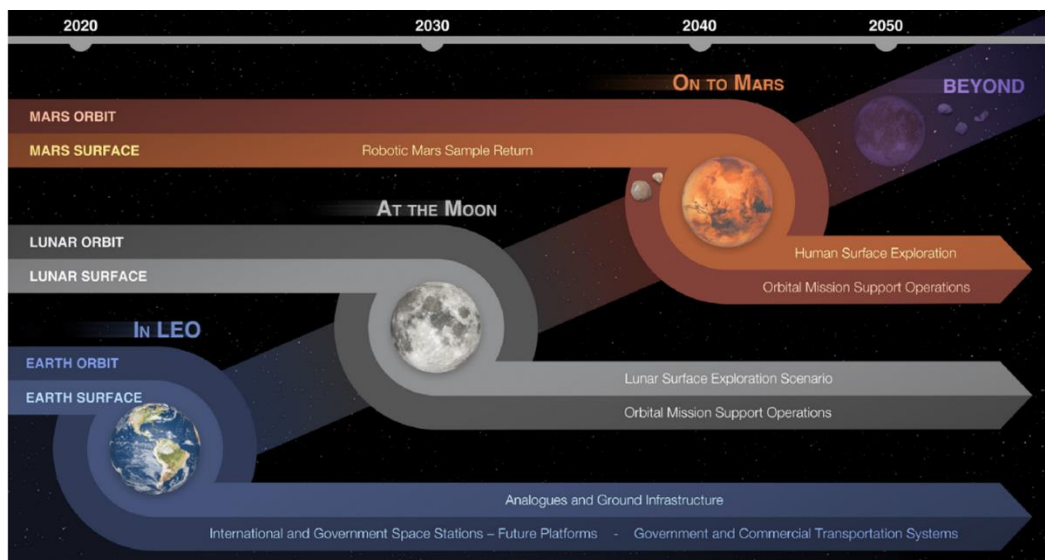


図 4-65 国際宇宙探査ロードマップで提示されるタイムスケール

出所)ISECG 国際宇宙探査ロードマップ(第4版)

## (3) 国際宇宙探査ロードマップで示される月面探査シナリオにおける 12 の目標

同文書において、月面探査シナリオにおける12の定量的な目標が表 4-49 の通り示されている。

表 4-49 月面探査シナリオにおける 12 の目標

| No         | 目的                                                                            | 定量的な目標値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|--------|-------------|---------|------|---------|----|------------|-------|---------|----|-----------|-------|---------|-------|
| 1          | 有人の着陸・降下能力を実証し、月面への定期的な往來を確立する。                                               | 2030-2040 年の期間において、5 年間に少なくとも 3 回の頻度で、宇宙飛行士 4 人でのミッションを実施する。                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 2          | 月面に大量に存在する要素やロジスティクスのために、月面上でさまざまな貨物輸送能力を実証する。                                | <ul style="list-style-type: none"><li>● 月面に大量に存在する要素に対して 9 トン以上の輸送</li><li>● ロジスティクスで 1 トン以上の輸送</li></ul> (※いずれも月面上での輸送)                                                                                                                                                                                                                      |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 3          | 月面での船外活動能力を実証する。                                                              | 最小限のメンテナンスで再利用可能な船外活動システム(現場でのダスト管理/軽減、科学サンプリング/キュレーション技術を含む)を実証する。                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 4          | 月面で有人長距離移動能力を実証する。                                                            | 10,000km(累積)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 5          | 月面における有人長期滞在能力と運用手順の信頼性を実証する。                                                 | 500日(累積)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 6          | 火星表面ミッションの検証に十分な期間、月面で生活し、作業するため宇宙飛行士の健康と性能の持続可能性を実証する。                       | 下記ミッションを行う。(それぞれ約 10 人の被験者を対象とする) <table><tr><th>ミッション名</th><th>月面到達前微小重力期間</th><th>月面滞在期間</th><th>月面離脱後微小重力環境</th></tr><tr><td>研究ミッション</td><td>90 日</td><td>30～60 日</td><td>なし</td></tr><tr><td>リスク低減ミッション</td><td>180 日</td><td>30～60 日</td><td>なし</td></tr><tr><td>火星検証ミッション</td><td>360 日</td><td>30～60 日</td><td>270 日</td></tr></table> | ミッション名      | 月面到達前微小重力期間 | 月面滞在期間 | 月面離脱後微小重力環境 | 研究ミッション | 90 日 | 30～60 日 | なし | リスク低減ミッション | 180 日 | 30～60 日 | なし | 火星検証ミッション | 360 日 | 30～60 日 | 270 日 |
| ミッション名     | 月面到達前微小重力期間                                                                   | 月面滞在期間                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 月面離脱後微小重力環境 |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 研究ミッション    | 90 日                                                                          | 30～60 日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | なし          |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| リスク低減ミッション | 180 日                                                                         | 30～60 日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | なし          |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 火星検証ミッション  | 360 日                                                                         | 30～60 日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 270 日       |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 7          | 月面とゲートウェイ間の宇宙飛行士の輸送と、月面の利用に必要な現地での資源生産・利用能力(ISRU)を実証する。                       | 年間 50 トンの推進剤を生産する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 8          | 画期的なサイエンスを実施するために、人間とロボットの効果的なグローバル共同探査を行う。                                   | サイエンスの価値を見極めるために包括的な評価を行う。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 9          | 持続的な探査と継続的な有人滞在の目標を達成するために必要な、可用性の高いインフラ(電力、通信、航行システムなど)を開発する。                | <ul style="list-style-type: none"><li>● 電力:300kW の発電量</li><li>● 通信:<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 月→地球のデータレートは 1Gbps(月全域をカバー)</li><li>➢ 地球→月のデータレートは 100Mbps 以上</li></ul></li><li>● 測位:月面の基準局と数 m の精度</li></ul>                                                                                                                      |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 10         | 最先端技術と新しい通信手段を駆使し、多くの聴衆に月探査のアクションを見せることで、一般の人々(特に青少年に)人間とロボットによる月面探査に参加してもらう。 | 可能な限り、調査、ウェブサイトへのアクセス数、ソーシャルメディアへの影響などを通じて、月表面探査に対する国民の前向きな姿勢を国家レベルで測定する。                                                                                                                                                                                                                                                                     |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 11         | 経済成長や商機を促すような、新たな商業的取り決めを実行する。                                                | 月サービスを提供する商業パートナーや利害関係者の数が年々増加する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |
| 12         | 国際的なパートナーが月面のシナリオに貢献できるよう、多くの協力の機会を提供する。                                      | 100 カ国以上が月面シナリオに参加する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |             |        |             |         |      |         |    |            |       |         |    |           |       |         |       |

出所)ISECG 国際宇宙探査ロードマップ(第4版)を基に MRI 作成

#### (4) Critical Technologies List

国際宇宙探査ロードマップでは、重要な技術リスト(Critical Technologies List)が公開されており、それぞれの重要技術に対する ISS(現在)、月(近い将来)、火星(将来)での目標が記載されている。重要な技術リストの内、本事業と関連する事項を図 4-66 に示す。

国際宇宙探査ロードマップでは、月探査だけでなく、火星探査も見据えて重要な技術を検討しているという前提があるため、注意が必要である。

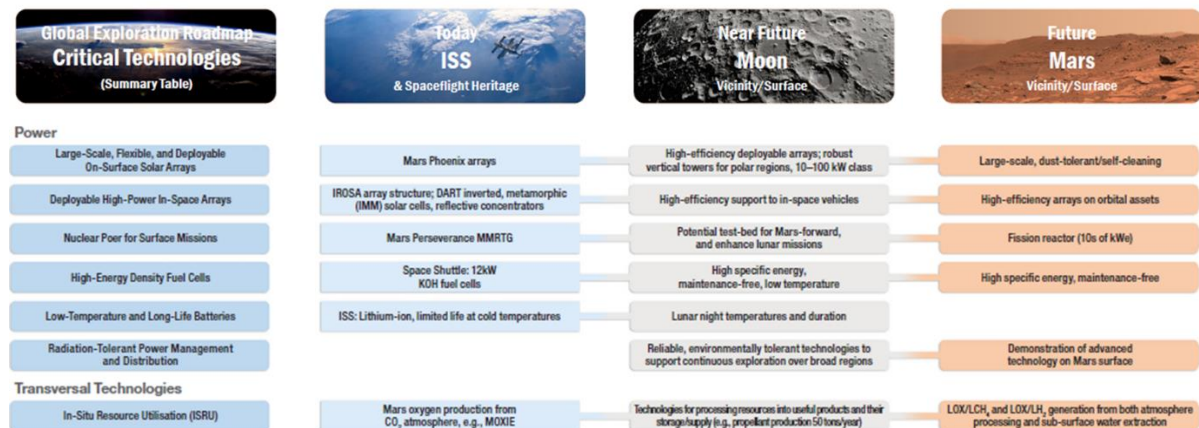


図 4-66 本事業と関連する重要技術リストの例

出所)ISECG 国際宇宙探査ロードマップ(第4版)

#### 4.4.2 日本・米国・欧州における研究開発状況の比較

日本・欧州・米国における水素・電力に係る研究開発について、プロセスごとに比較整理を実施した。なお、日本における取り組みは、JAXA 探査イノベーションハブ殿と探査センター殿、そして経済産業省および国土交通省のスターダストプログラムの取り組みを対象としていること、そして JAXA 探査ハブ殿の取り組みについては、探査ハブ共同研究に関する取り組みの内、公開できる取り組みのみをピックアップしているため、日本の取り組みが全て網羅されているわけではない点に注意が必要である。

## (1) TRL(Technology Readiness Level)の定義について

NASA 及び ESA における TRL の定義を図 4-67 に示す。NASA の TRL の定義<sup>124</sup>に対し、ESA では ISO 規格16290<sup>125</sup>に準拠する形で TRL を定義しており<sup>126</sup>、NASA と ESA では TRL5～7 の定義が若干異なっている。

|       | Mankins 95 reference                                                                                                 |            | ISO 16290 standard                                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| TRL 1 | Basic principles observed and reported                                                                               | Equivalent | Basic principles observed and reported                                                      |
| TRL 2 | Technology concept and/or application formulated                                                                     | Equivalent | Technology concept and/or application formulated                                            |
| TRL 3 | Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept                                 | Equivalent | Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept        |
| TRL 4 | Component and/or breadboard <u>validation</u> in laboratory environment                                              | Equivalent | Component and/or breadboard <u>functional verification</u> in laboratory environment        |
| TRL 5 | Component and/or breadboard <u>validation</u> in relevant environment                                                | Split      | Component and/or breadboard <u>critical function verification</u> in a relevant environment |
| TRL 6 | <u>System/subsystem</u> model <u>or prototype</u> demonstration in a relevant environment ( <u>ground or space</u> ) | Shifted    | Model <u>demonstrating the critical functions of the element</u> in a relevant environment  |
| TRL 7 | <u>System prototype demonstration in a space</u> environment                                                         | Removed    | Model <u>demonstrating the element performance for the operational</u> environment          |
| TRL 8 | Actual system completed and <u>"flight qualified" through test and demonstration (ground or space)</u>               | Equivalent | Actual system completed and <u>accepted for flight ("flight qualified")</u>                 |
| TRL 9 | Actual system "flight proven" through successful mission operations                                                  | Equivalent | Actual system "flight proven" through successful mission operations                         |

図 4-67 TRL(Technology Readiness Level)の定義

出所) <https://connectivity.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf> (2025年 2 月 5 日閲覧)

## (2) 水素における日米欧の研究開発状況の比較

水素分野における日米欧の研究開発プロジェクトの比較結果を図 4-69 に示す。結論としては、水電解プロセス、液化貯蔵プロセスにおいて、日本はある程度の優位性があると評価できる。以下、各プロセスの評価結果の詳細を示す。

掘削プロセスについては、日本では LUPEX ミッションにおけるドリルの開発が TRL7と最も高くなっている。一方で、米国では、ドリルそのものの開発に加え、アブレイティブ・アーク採掘手法等の新たな掘削手法も含めて幅広いプロジェクトが存在しており、日本よりも優位性がある状況となっている。

水抽出プロセスについては、日本ではサーマルマイニングの研究開発が存在するが、TRL は 3～4 と欧米と比較して低くなっている状況である。米国では、サーマルマイニングの技術に加え、レゴリス中に含まれる氷を氷の状態のまま収集する技術も研究開発がされており、日本よりも優位性がある状況となっている。

<sup>124</sup> <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigationprogram/technology-readiness-levels/> (2025年 2 月 5 日閲覧)

<sup>125</sup> TRL については各国ごとに定義が異なるといった問題があったが、最近では ISO16290規格への準拠等を通じて、国際的に統一した基準となりつつある。詳細は以下の文献等が参考になる。

<https://connectivity.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf> (2025年 2 月 5 日閲覧)

<sup>126</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Shaping\\_the\\_Future/Technology\\_Readiness\\_Levels\\_TRL](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Technology_Readiness_Levels_TRL) (2025年 2 月 5 日閲覧)



純水処理プロセスについては、TRL やプロジェクトの内容面においても、日本と欧米でそこまで大きな差はない状況である。

水電解プロセスについては、日本は既に月面での実証(TRL7)を目指している取り組みが存在し、欧米と比較して技術的優位性がある見込みである。一方で、米国では TRL は 4～5 程度であるが、幅広い研究開発が行われている状況であるため、今後の動向に注視が必要である。

液化・貯蔵プロセスについては、日本は欧米と比較して、TRL3 であるものの幅広い研究開発を実施できており、ある程度の優位性がある状況となっている。一方で、米国では TRL6 のプロジェクトも存在するため、引き続き注視が必要である。

なお、各凡例(図 4-68 参照)の意味は以下の通りである。

- 上行:プロジェクト開始年～終了年
- 下行:予算額(総額)。米国は 1 ドル=150 円、欧州は1ユーロ=170 円と仮定し、端数は四捨五入して計算。
- 色:プロジェクト開始時点の TRL(左上)、終了時点での目標 TRL(右下)
- 例えば、上記凡例の場合は、2019年開始(TRL3)、2023 年終了(TRL6)で、予算が1億円のプロジェクトが1つあることを示している。

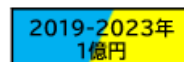


図 4-68 ベンチマーク調査の凡例

出所)MRI 作成

| TRL   |                                                  | 1                  | 2                  | 3               | 4                  | 5                     | 6                 | 7 | 8 | 9                                      |
|-------|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|---|---|----------------------------------------|
| プロセス  | 技術領域                                             | 米国(NASA)           |                    |                 |                    | 欧州(ESA)               |                   |   |   | 日本(JAXA、経産省)                           |
| 掘削    | ドリルの開発<br>(より深くまで掘るための技術)                        | 2019-25年<br>N/A    | 2015-19年<br>N/A    | 2018-22年<br>N/A |                    | 2014-16年<br>3.4億円     | 2021-23年<br>1.9億円 |   |   | 2022-26年<br>N/A<br>(※ドリルを含む総開発費は248億円) |
|       | より効率的に掘るための技術<br>(新たな掘削手法の開発、サーマルマイニング含む)        | 2020-21年<br>1900万円 | 2020-22年<br>9000万円 | 2021-23年<br>3億円 | 2021-22年<br>1900万円 | 2016-17年(*1)<br>1.2億円 | 2021-24年<br>1億円   |   |   | 2007-19年<br>N/A                        |
|       | その他(掘削ローバーの熱管理システム、アースオーガ掘削情報による地盤推定等)           |                    | 2020-24年<br>1.3億円  |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 2017-21年<br>5500万円                     |
|       |                                                  |                    |                    |                 |                    |                       |                   |   |   | 2017-18年<br>500万円                      |
| 水抽出   | 氷→水蒸気への相変化により、水を捕獲する技術                           | 2020-23年<br>1.3億円  | 2021-22年<br>1900万円 | 2020-24年<br>N/A |                    | 2012-14年<br>5100万円    | 2020-21年<br>N/A   |   |   | 2021-25年<br>N/A                        |
|       | 氷のまま収集する技術                                       |                    | 2020-21年<br>2600万円 |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 経産省スターダスト                              |
|       | その他(基礎的技術)                                       |                    | 2020-23年<br>N/A    |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 2016-18年<br>5000万円                     |
|       |                                                  |                    |                    |                 |                    |                       |                   |   |   |                                        |
| 純水処理  |                                                  |                    | 2021年<br>1900万円    |                 |                    | 未定<br>8500万円          |                   |   |   | 2021-25年<br>N/A                        |
| 水電解   | 月面環境に適したシステムにするための技術<br>(システムの簡素化、他システムとの統合を含む)  |                    | 2019-22年<br>N/A    |                 |                    | 2019-22年<br>8500万円    |                   |   |   | 2021-25年<br>3.2億円                      |
|       | 電解効率を上げるための技術                                    |                    | 2020-21年<br>N/A    |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 2020-22年<br>500万円                      |
|       | 前処理を簡単にするための技術<br>(不純物を含んだ水でも水電解可能等)             |                    | 2019-22年<br>N/A    |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | N/A                                    |
|       | 燃料電池としての利用も可能とするための技術                            |                    | 2021-22年<br>N/A    | 2021-24年<br>N/A |                    | N/A                   |                   |   |   | N/A                                    |
|       | その他(電力を用いない水分解)<br>注:厳密には水電解ではないが、水電解プロセスに含めている。 | N/A                |                    |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 2023-25年<br>3750万円                     |
|       |                                                  |                    |                    |                 |                    |                       |                   |   |   |                                        |
| 液化・貯蔵 | 液化<br>(冷却技術、冷却システム等)                             |                    | 2022-24年<br>N/A    |                 |                    | N/A                   |                   |   |   | 2021-22年<br>500万円                      |
|       | 貯蔵<br>(推進剤貯蔵用のタンクの開発、断熱材の開発等)                    | 2020-21年<br>N/A    | 2020-21年<br>N/A    |                 |                    | 未定<br>7700万円          |                   |   |   | 2020-21年<br>500万円                      |
|       |                                                  |                    |                    |                 |                    |                       |                   |   |   | 2021-25年<br>N/A                        |
|       | その他<br>(継続的研究等)                                  |                    | 2022-24年<br>N/A    |                 |                    | 2020-23年<br>5100万円    | 未定<br>7700万円      |   |   | 2016-17年<br>500万円(2件)                  |

図 4-69 水素における日米欧の研究開発状況の比較

出所)各種資料に基づき MRI 作成

### (3) 電力における日米欧の研究開発状況の比較

電力分野における日米欧の研究開発プロジェクトの比較結果を図 4-70 に示す。結論としては、蓄電プロセス/リチウムイオン電池、送電プロセス/無線送電において、日本はある程度の優位性があると評価できる。以下、各プロセスの評価結果の詳細を示す。

発電プロセスにおいては、太陽光発電と原子力電池について、日本が比較的優位性がある状況となっている。太陽光発電では、TRL では米国に劣るものの、先進的な研究開発を実施できており、ある程度の優位性がある状況となっている。原子力電池については、TRL では米国に劣るものの、宇宙戦略基金で大型の予算がついたこともあり、今後技術的優位性が向上する可能性がある。

送電プロセスにおいては、有線送電では日本に代表的な研究開発が見つかっておらず、優位性が低い状況となっている。一方で、無線送電では、TRL7 のプロジェクトが存在しており、また欧米と比較して先進的な研究開発も実施できており、優位性が高い状況である。パワーエレクトロニクスデバイスについては、米国が TRL の高さ・研究開発の先進性ともに優位性がある状況となっている。

蓄電プロセスにおいては、再生型燃料電池が現時点では米国に比べて TRL が低くなっている状況であるが、宇宙戦略基金で 230 億円もの予算がついているため、今後 TRL の向上ができる。リチウムイオン電池については、欧米と比較して TRL が高いプロジェクトがあるだけでなく、幅広い多様な研究開発を実施できており、優位性が高い状況となっている。

| プロセス | 技術領域            | 米国(NASA)                                                                                                | 欧州(ESA)                                                  | 日本(JAXA、経産省、国交省)                                                                                                     |
|------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 発電   | 太陽光発電           | 2021年<br>2600万円<br>2022-25年<br>1.6億円<br>2019-22年<br>N/A<br>2020-23年<br>11.2億円                           | 2020-23年<br>N/A<br>2017-19年<br>3400万円<br>2018-20年<br>N/A | 2017-24年<br>2500万円<br>2024-27年<br>7000万円<br>2022-24年<br>500万円<br>2023-24年<br>500万円<br>国交省スターダスト<br>2021-25年<br>1.2億円 |
|      | 原子力発電           | 2019-28年<br>N/A                                                                                         | N/A                                                      | N/A                                                                                                                  |
|      | 原子力電池           | 2026年<br>N/A<br>2023-27年<br>N/A                                                                         | 2019-21年<br>N/A                                          | 2025-2028年<br>15億円                                                                                                   |
|      | エネルギーハーベスティング   | 2024-25年<br>N/A                                                                                         | 2021-24年(※TRLの情報無し)<br>1500万円                            | 2018-19年<br>500万円<br>2024-25年<br>500万円<br>2024-25年<br>1000万円                                                         |
| 送電   | 有線送電            | 2019-24年<br>6100万円<br>2023-24年<br>2200万円<br>2023-26年<br>5.2億円                                           | N/A                                                      | N/A                                                                                                                  |
|      | 無線送電            | 2023-24年<br>2200万円<br>2021-24年<br>1.1億円                                                                 | 2017-18年<br>N/A                                          | 2024-25年<br>500万円<br>2024-25年<br>4000万円<br>2020-21年<br>500万円<br>経産省スターダスト<br>2021-25年<br>15.5億円                      |
|      | パワーエレクトロニクスデバイス | 2023-24年<br>2200万円<br>2021-23年<br>1.1億円<br>2023-24年<br>2300万円<br>2022-25年<br>1.5億円<br>2021-23年<br>1.1億円 | N/A                                                      | 2023-25年<br>5000万円                                                                                                   |
| 蓄電   | 再生燃料電池          | 2021-22年<br>N/A<br>2021-23年<br>N/A<br>2021-24年<br>N/A<br>2020-22年<br>N/A                                | 2021-23年<br>1億円<br>2022年<br>1.7億円<br>2019年<br>1億円        | 2019-21年<br>7500万円<br>2016-23年<br>4000万円<br>2025-28年<br>230億円                                                        |
|      | リチウムイオン電池       | 2022-25年<br>9000万円<br>2022-25年<br>9000万円                                                                | N/A                                                      | 2016-23年<br>3000万円<br>2022-23年<br>500万円<br>2022-23年<br>500万円<br>2023-24年<br>500万円                                    |

図 4-70 電力における日米欧の研究開発状況の比較

出所)各種資料に基づき MRI 作成



#### 4.4.3 評価軸の設定による具体的な評価手法

前節で述べた結果を適切に評価するために、以下の4つの評価軸を設定の上、それぞれ0～2点で評価を行った。

##### (1) 評価軸の設定

各評価軸の定義、評価の観点、評価方法を表 4-50 に示す。

「①：技術的優位性」については、欧米と比較して日本に技術優位性があるかどうかを評価する。評価の観点では、日本が欧米よりも、TRL の高さの実現時期の観点から優位性があるかを評価する。例えば、日本の方が欧米よりも、TRL が高く、実現時期も早い研究開発プロジェクトがあれば、2点と評価する。

「②：市場獲得可能性」については、欧米と比較して日本に内容面での優位性があるかを評価する。例えば、日本の方が、欧米の研究開発プロジェクトよりも、先進的な内容があれば2点と評価する。

技術的優位性の評価軸だけでは、実現が容易な技術であれば、実現時期が早く、TRL も高い状況を達成できてしまい、評価が高くなってしまうため、優位性を評価するには技術的優位性＋市場獲得可能性の2軸で評価する必要がある。

「③：宇宙技術戦略での言及」については、日本政府の戦略方針を記載している宇宙技術戦略において、当該技術がどの程度重要視されているかという観点で評価する。宇宙技術戦略では、技術評価を「非常に重要である」、「重要である」、「検討が必要である、等のその他の表現」の3段階で評価しているため、それに対応させる形で評価点を設定する。

「④：ISECG 国際宇宙探査ロードマップでの言及」については、国際的な機関である ISECG において、当該技術がどの程度重要視されているかという観点で評価する。ISECG が発行する国際宇宙探査ロードマップでは、Critical Technology List が公開されており、そのリストに含まれているかどうかで評価点を設定する。

表 4-50 評価軸の設定による比較評価の具体的な手法

| 評価軸     | 定義                         | 評価の観点             | 評価方法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |         |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |
|---------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--|--------|--|--|--|--|---------|----------|---------|------|---------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| ①技術的優位性 | 現時点で、諸外国と比較して日本に技術的優位性があるか | ・TRL の高さ<br>・実現時期 | 実現時期、TRL の高さに応じて下表の通り評価<br><table><tr><th colspan="2"></th><th colspan="3">TRLの高さ</th></tr><tr><th colspan="2"></th><th>日本の方が高い</th><th>日本と海外で同じ</th><th>日本の方が低い</th></tr><tr><th rowspan="3">実現時期</th><th>日本の方が早い</th><td>○(2点)</td><td>○(2点)</td><td>△(1点)</td></tr><tr><th>日本と海外で同じ</th><td>○(2点)</td><td>△(1点)</td><td>×(0点)</td></tr><tr><th>日本の方が遅い</th><td>△(1点)</td><td>×(0点)</td><td>×(0点)</td></tr></table> |         |  | TRLの高さ |  |  |  |  | 日本の方が高い | 日本と海外で同じ | 日本の方が低い | 実現時期 | 日本の方が早い | ○(2点) | ○(2点) | △(1点) | 日本と海外で同じ | ○(2点) | △(1点) | ×(0点) | 日本の方が遅い | △(1点) | ×(0点) | ×(0点) |
|         |                            | TRLの高さ            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |         |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |
|         |                            | 日本の方が高い           | 日本と海外で同じ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 日本の方が低い |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |
| 実現時期    | 日本の方が早い                    | ○(2点)             | ○(2点)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | △(1点)   |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |
|         | 日本と海外で同じ                   | ○(2点)             | △(1点)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ×(0点)   |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |
|         | 日本の方が遅い                    | △(1点)             | ×(0点)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ×(0点)   |  |        |  |  |  |  |         |          |         |      |         |       |       |       |          |       |       |       |         |       |       |       |

127。

<sup>127</sup> 同一プロセスに複数プロジェクトがある場合には、最も TRL が高いプロジェクトで評価する。

|                         |                                              |                                          |                                                                                                                                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ②市場獲得可能性                | 将来的に、当該技術に係る市場やユースケースの拡大が見込まれ、日本企業が市場を獲得できるか | PJの内容面(日本に先進性があるか)<br>≡日本がどの程度市場を獲得できるか? | ○(2点):日本に先進的な取り組みがある <sup>128</sup><br>△(1点):日本と諸外国に取り組みが類似している<br>×(0点):日本に先進的な取り組みがない                                                            |
| ③宇宙技術戦略での言及             | 我が国が保有すべき(海外依存すべきではない)技術であるか                 | システム構築上のコア技術であるか<br>≡重要な技術であるから保有すべき     | ○(2点):宇宙技術戦略において「非常に重要な技術である」との記載がある<br>△(1点):宇宙技術戦略において「重要な技術である」との記載がある<br>×(0点):上記以外の表現である                                                      |
| ④ISECG 国際宇宙探査ロードマップでの言及 | 国際的に重要な技術だと認知されているか                          | 重要な技術だと国際的に認知されているか<br>≡重要な技術であるから保有すべき  | ○(2点):Critical Technology List に記載がある<br>△(1点):原文が曖昧な表現となっているが、Critical Technology List に含まれている可能性が有る。<br>×(0点):Critical Technology List に含まれていない。 |

出所)MRI 作成

## (2) 水素関連技術に関するベンチマーク評価結果

水素関連の技術について4つの評価軸で評価した結果を表 4-51 に示す。

国際宇宙探査ロードマップでは、月を火星探査のための中継地点と考えていることから、月の ISRU では推進剤を生成することにフォーカスした記載となっており、水生成(水抽出・純水処理・水電解)に関する明示的な言及がない<sup>129</sup>(そのため水抽出・純水処理・水電解は④が1点となっている。)。一方で、推進剤の極低温化での液化・貯蔵技術に関しては明確な言及があった<sup>130</sup>ため、これが水抽出・純水処理・水電解、液化・貯蔵を並列に言及している宇宙技術戦略との差異となっている。

<sup>128</sup> 現時点で収集できているプロジェクトの範囲内での先進性の評価となる。

<sup>129</sup> ISRU について、最終目標の火星では water extraction の言及があるものの、月面では propellant production との記載のみであり、月面で水を生産する技術が含まれているかあいまいな記載となっている。

<sup>130</sup> :液化・貯蔵プロセスについては、推進剤の生成に関する言及、および極低温化でのメカニズム、サーマルマネジメント、In-Space Cryogenic Propellant Storage(Zero Boil Off LO2; Reduced/Zero Boil Off LH2)の言及がある。

表 4-51 ベンチマーク評価結果(水素)

| プロセス  | 技術領域                                             | ①技術的優位性 | ②市場獲得可能性 | ③宇宙技術戦略 | ④ISECG国際宇宙<br>探査ロードマップ | 合計点数 |
|-------|--------------------------------------------------|---------|----------|---------|------------------------|------|
| 掘削    | ドリルの開発<br>(より深くまで掘るための技術)                        | 1       | 0        | 2       | 2                      | 5    |
|       | より効率的に掘るための技術<br>(新たな掘削手法の開発、サーマルマイニング含む)        | 0       | 0        | 2       | 2                      | 4    |
|       | その他(掘削ローバーの熱管理システム、アースオーガ掘削情報による地盤推定等)           | 1       | 2        | 2       | 2                      | 7    |
| 水抽出   | 水→水蒸気への相変化により、水を捕獲する技術                           | 1       | 1        | 1       | 1                      | 4    |
|       | 水のまま収集する技術                                       | 0       | 0        | 1       | 1                      | 2    |
|       | その他(基礎的技術)                                       | 1       | 2        | 1       | 1                      | 5    |
| 純水処理  |                                                  | 0       | 2        | 1       | 1                      | 4    |
| 水電解   | 月面環境に適したシステムにするための技術<br>(システムの簡素化、他システムとの統合を含む)  | 1       | 2        | 1       | 1                      | 5    |
|       | 電解効率を上げるための技術                                    | 0       | 2        | 1       | 1                      | 4    |
|       | 前処理を簡単にするための技術<br>(不純物を含んだ水でも水電解可能等)             | 0       | 0        | 1       | 1                      | 2    |
|       | 燃料電池としての利用も可能とするための技術                            | 0       | 0        | 1       | 1                      | 2    |
|       | その他(電力を用いない水分解)<br>注:厳密には水電解ではないが、水電解プロセスに含めている。 | 2       | 2        | 1       | 1                      | 6    |
| 液化・貯蔵 | 液化<br>(冷却技術、冷却システム等)                             | 1       | 2        | 1       | 2                      | 6    |
|       | 貯蔵<br>(推進剤貯蔵用のタンクの開発、断熱材の開発等)                    | 1       | 2        | 1       | 2                      | 6    |
|       | その他<br>(横断的研究等)                                  | 1       | 2        | 1       | 2                      | 6    |

出所)MRI 作成

### (3) 電力関連技術に関するベンチマーク評価結果

電力関係の技術について4つの評価軸で評価した結果を表 4-52 に示す。

宇宙技術戦略と国際宇宙探査ロードマップでは、原子力発電について差異が生じている。国際宇宙探査ロードマップでは、原子力発電について「太陽光発電、原子力発電、燃料電池、バッテリーなどの技術を利用した、堅牢で安全な地表電力インフラは、月面で人間とロボットが持続的に存在するために不可欠である」との記載がある。原子力発電が言及されている理由としては、NASA が開発している核分裂電力(FSP)システムが背景にあると考えられる<sup>131</sup>。

表 4-52 ベンチマーク評価結果(電力)

| プロセス | 技術領域            | ①技術的優位性 | ②市場獲得可能性 | ③宇宙技術戦略 | ④ISECG<br>国際宇宙探査<br>ロードマップ | 合計点数 |
|------|-----------------|---------|----------|---------|----------------------------|------|
| 発電   | 太陽光発電           | 0       | 2        | 2       | 2                          | 6    |
|      | 原子力発電           | 0       | 0        | 0       | 2                          | 2    |
|      | 原子力電池           | 0       | 2        | 2       | 2                          | 6    |
|      | エネルギーハーベスティング   | 1       | 1        | 0       | 0                          | 2    |
| 送電   | 有線送電            | 0       | 0        | 0       | 0                          | 0    |
|      | 無線送電            | 1       | 2        | 0       | 0                          | 3    |
|      | パワーエレクトロニクスデバイス | 0       | 1        | 0       | 0                          | 1    |
| 蓄電   | 再生燃料電池          | 0       | 2        | 2       | 2                          | 6    |
|      | リチウムイオン電池       | 2       | 2        | 2       | 2                          | 8    |

出所)MRI 作成

<sup>131</sup> 国際宇宙探査ロードマップの P55 において、Fission surface power systems に関する言及がある。

#### 4.4.4 技術評価結果の分析

##### (1) マトリックス表による整理

日本として今後取るべきアクションを明確化するため、「日本の優位性」と「技術の重要性の認知度」の2軸によるマトリックス表で技術評価結果の整理・分析する方針とした。日本の優位性は①技術的優位性と②市場獲得可能性の2つの結果から、技術の重要性の認知度は③宇宙技術戦略での言及と④ISECG 国際宇宙探査ロードマップでの言及の2つの結果を合わせた評点を用いる方針とした。両軸の評価結果の評点により4つの象限を設定し、各象限における日本がとるべきアクションを設定した。各省減の定義と日本がとるべきアクション(打ち手)を図 4-71 に示す。

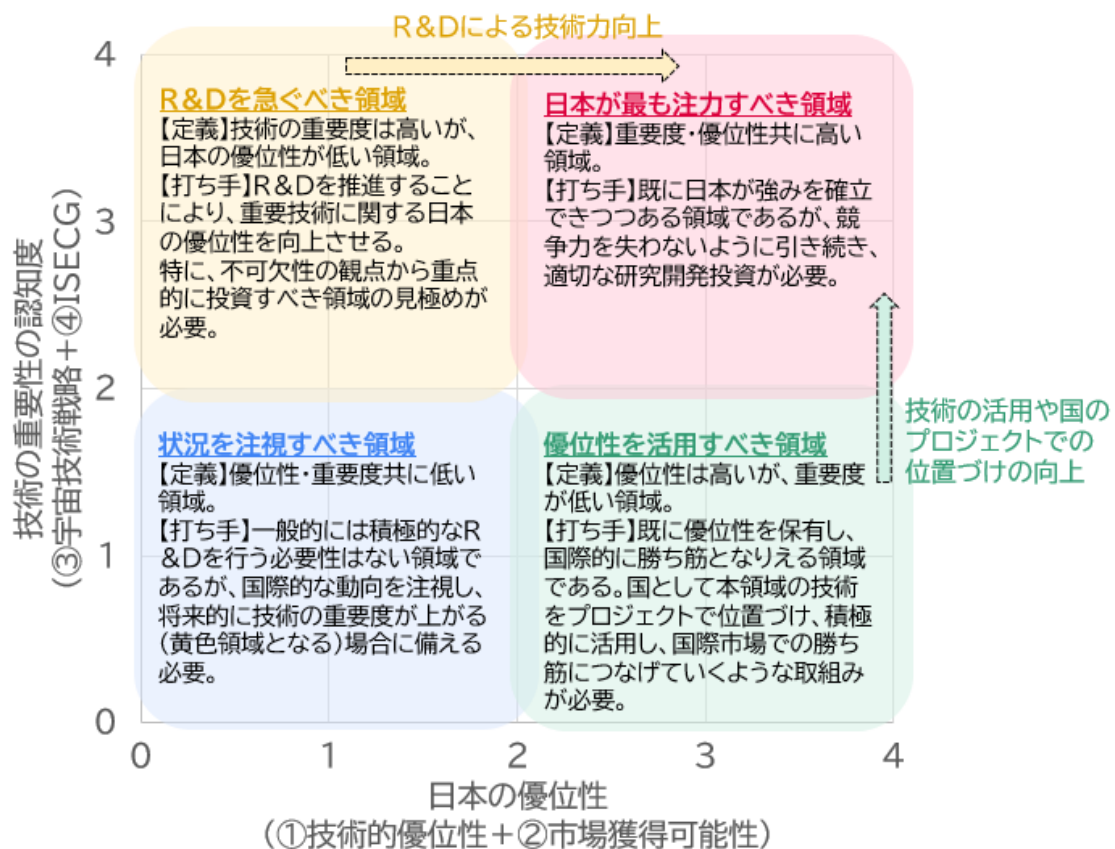


図 4-71 日本の優位性×技術の重要性の認知度の2軸による整理と各象限の意味

出所)MRI 作成

##### (2) 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(水素)

水素関連技術のマトリックスによる整理結果を図 4-72 に示す。

掘削プロセスは、重要な技術と位置づけられているが(4点)、現状では日本の優位性が低いため(探査に関する技術は1点、ISRUに関する技術は0点)、R&Dを急ぐ必要がある。ただし、R&Dを行う際には総花的に行うのではなく、不可欠性の観点から重要な分野に集中的に投資し、優位性を高める方策等の検討が必要である。なお、掘削プロセスについては、科学や探査を目的とした掘削技術(サン



プルを得るために少量のレゴリスを掘削する技術」と、ISRU 利活用のための掘削技術(大量のレゴリスを掘削する技術)は、別の技術であるため、区別して記載している<sup>132</sup>。

純水処理、水抽出プロセスは、重要度が比較的高い技術であり、研究開発予算を活用した優位性の向上に向けた R&D の実施が期待される。特に現状の R&D は TRL が 3～4 となっており、優位性の確保に向け、TRL5 以上に引き上げる R&D が求められる。

液化・貯蔵、水電解プロセスは、既にある程度の競争力を有していると考えられ、競争力を失わないよう、引き続き適切な R&D が必要となる。特に水電解プロセスは、世界に先行しており、本技術を積極的に活用するための取り組みを検討する必要がある。一方、液化・貯蔵プロセスでは多様な R&D を行っているが、TRL4 以上の R&D がない。優位性を一層確立するため、TRL を引き上げる R&D が求められる。

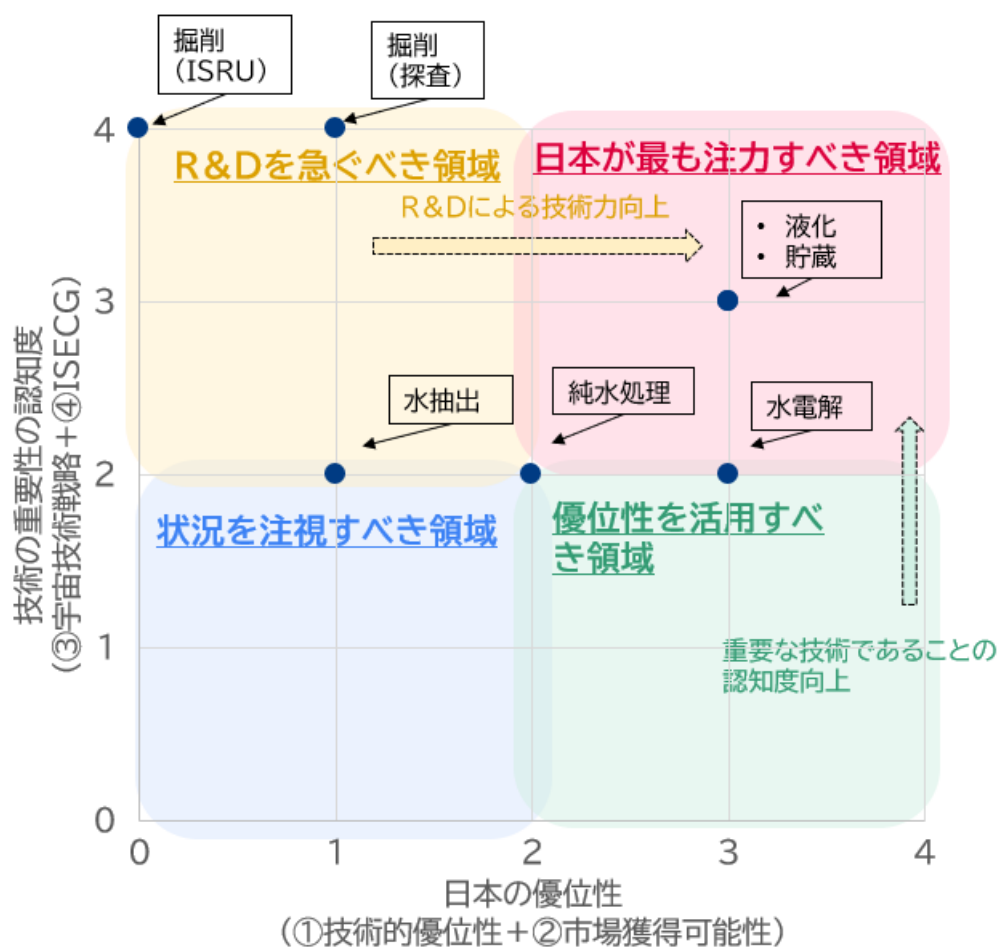


図 4-72 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(水素)

出所)MRI 作成

<sup>132</sup> 大量のレゴリスを掘削する技術については、日本では永久影からプラントまでの運搬の効率化を目指した研究開発はいくつか存在するものの、効率的な掘り出しの観点をもととした大規模な研究開発は存在していない。一方で、米国においては、加熱によりレゴリスを溶かしつつ掘削する「熱アシスト切断技術」等の、効率的な掘り出しの観点をもととした研究開発が存在していることから、評価点は0点としている。

### (3) 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(電力)

電力関連技術のマトリックスによる整理結果を図 4-73 に示す。

リチウムイオン電池は、優位性・重要度共に高く、「日本が最も注力すべき領域」に位置づけられる技術である。競争力を失わないよう引き続き適切な R&D を行うとともに、米国や欧州と協力する際には、日本が優位性を持って貢献できる分野としてアピールしていくことが必要となる。

太陽光発電は、我が国も一定規模の投資を行い R&D を行っているが、米国では 10 億円規模の大型案件も存在することから、優位性を確保するためにも、研究開発資金等を活用した R&D の大型化もしくは米国との差別化戦略を促進することが必要である。

原子力電池、再生型燃料電池は、宇宙戦略基金(文部科学省所管)により大型予算がついたことから、今後優位性が向上し、日本の勝ち筋となりえる可能性がある。大型予算より技術力が向上すれば、「日本が最も注力すべき領域」に含まれることになるため、動向を注視する必要がある。

無線送電は、我が国に優位性がある技術であるが、重要度が 0 点となっており、本技術の活用や国のプロジェクトでの位置づけの向上が必要である。無線送電は有線送電より重量面での優位性があることを考慮すると、月面開発に必須の技術と考えられる。そのため、国の戦略文書である宇宙技術戦略に「無線送電は月面開発に重要な技術である」旨の追記等を通じて我が国の月面開発において重要な技術であることの認識を向上させていく取り組みを行うとともに、早期の宇宙(月面)実証の立案などを行っていくことが期待される。

有線送電は、現状、日本は ISS の 120V 系やそれに近い直流電圧の検討が全てであるのに対し、米国が高圧交流送電を検討しており、ギャップが存在する。将来的に日本の検討がガラパゴス化しないために、諸外国動向を注視していく必要がある。また、無線送電と有線送電はそれぞれメリット・デメリットがあることから、現時点でどちらかのみに研究開発を集中することはせず、両者ともに可能性がある技術として注視していくことが必要である。

原子力発電は、世界的に重要な技術と位置づけられているが(2点)、関連の R&D が存在せず日本の優位性が低い(0 点)ことから、TRL を引き上げる R&D の実施が期待される。ただし、R&D を行う際には総花的に行うのではなく、不可欠性の観点から重要な分野に集中的に投資し、優位性を高める方策等の検討が必要である。



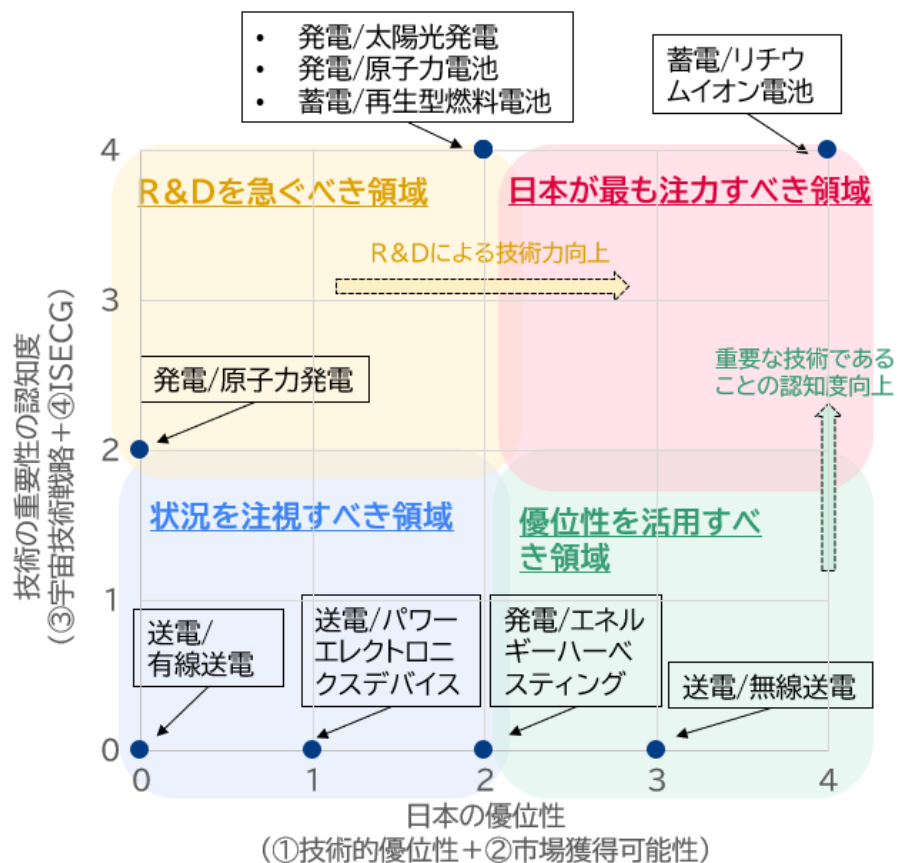


図 4-73 日本の優位性×技術の重要性の認知度のマトリックスによる整理結果(電力)

出所)MRI 作成

## 4.5 海外現地調査

本節では、海外で開催されたシンポジウム&ワークショップ等のイベントに参加し、収集した内容について整理する。具体的には、2024年12月にルクセンブルクで開催された以下の2つのイベントについて述べる。

- 「8th Global Moon Village Workshop & Symposium」(主催者: Moon Village Association)
- 「Space For Inspiration Annual Conference on Commercial Space Exploration」(主催者: ESA)

### 4.5.1 8th Global Moon Village Workshop & Symposium

#### (1) 開催概要

The 8th Global Moon Village Workshop & Symposium は、2024年12月2日から3日にかけて、ルクセンブルクの European Convention Center で開催された、Moon Village Association (MVA) が主催するワークショップ&シンポジウムである。政府機関や民間企業の専門家が集まり、最新の研究やプロジェクトについて議論が行われた。会議は口頭発表とパネルディスカッションの2つの形式で進められ、200名以上が参加していた。

このイベントには、ESA(欧州宇宙機関)、LSA(ルクセンブルク宇宙庁)、NASA(アメリカ航空宇宙局)、JAXA(宇宙航空研究開発機構)、ASI(イタリア宇宙機関)、KARI(韓国航空宇宙研究院)、DSEL(中国の深宇宙探査研究所)、ESRIC(欧州宇宙資源イノベーションセンター)といった、月面開発に関連する主要な宇宙機関のほか、月面探査や掘削、資源利用に係る民間企業も多数参加していた。会議では、月探査の進展や月への輸送手段、月面インフラの構築、資源の利用方法、法的枠組みやガバナンスの課題、さらには月探査が文化や社会、教育に与える影響など幅広い話題について議論された。

本イベントのプログラムの概要を表 4-53 に示す。

表 4-53 Moon Village Workshop & Symposium プログラム概要

月面水素技術・電力技術が関連するセッション

|     | Session                                                                                    |               | Time                                                        |             |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------|-------------|
| 1日目 | 開会の挨拶と各国宇宙機関のキーノート<br>・LSA/ JAXA/ DSEL/ ASI/ ESRIC/ KARI                                   |               | 09:00 – 12:00                                               |             |
|     | パネルディスカッション: 月面のガバナンスと国連関連の活動<br>・NASA/ DSEL/ LSA                                          |               | 12:00 – 13:00                                               |             |
|     | 民間企業による月面活動に関する発表<br>・MRI/ ispace/ ESA/ ロッキードマーチン                                          |               | 14:00 – 15:00                                               |             |
|     | パネルディスカッション: 月面産業は創出されているのか?<br>・横河電機/ ispace/ Technoport/ Lightigo Space/ 大成建設/ ロッキードマーチン |               | 15:00 – 16:00                                               |             |
|     | MVAの活動に関する発表                                                                               |               | 16:00 – 18:00                                               |             |
|     | Session                                                                                    | Time          | Parallel Session                                            | Time        |
| 2日目 | パネルディスカッション: 月面活動に関連する地上設備について<br>・ESRIC/ ESA/ DLR                                         | 09:00 – 10:15 | 月面ガバナンスと経済に関する法的側面<br>・Space Law Center(米国)/北京大/ KARI/ etc. | 9:00-10:30  |
|     | inspaceのマイクロローバーについて                                                                       | 10:15 – 10:30 |                                                             |             |
|     | パネルディスカッション: 月面資源について<br>・ESRIC/ ispace/ Spacebackend                                      | 11:00 – 12:00 | 月探査に関するインフラ<br>・ISAE-SUPAERO/Power in Space/ルクセンブルク大/ etc.  | 11:00-13:00 |
|     | ISRUに関する研究発表<br>・ESRIC/ NSW大学/ルクセンブルク科学技術大学                                                | 12:00 – 13:00 |                                                             |             |
|     | プレゼンテーション: Moon Village Architectural Concepts                                             | 14:00 – 16:00 |                                                             |             |
|     | プレゼンテーション: Culture, Society, Outreach, and Education                                       | 16:30 – 18:00 |                                                             |             |

出所) 8th Moon Village Workshop & Symposium の情報をもとに三菱総合研究所作成

## (2) MVA(ムーンビレッジ協会)概要

ムーンビレッジ協会(MVA)は、2017年6月に設立された国際的な非政府組織(NGO)であり、月面開発に関する国際協力の促進を目的としている。MVAは、国連宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)および経済社会理事会(ECOSOC)の常設オブザーバーであり、月面開発に関心を持つ多様なステークホルダー間の情報交換や協力を促進するための国際的なプラットフォームの役割を果たしている。

MVAの活動は、宇宙機関、政府、企業、学術機関、一般市民を巻き込み、月面開発に向けた投資や技術開発を促進することを目的としている。会員は、60か国以上から500名以上の個人会員と、25か国30の機関、15か国16のパートナー組織から構成されている。特に若手専門家や学生の参加が多く、今後の月面開発を担う次世代の育成にも力を入れている。

## (3) ESRIC(欧州宇宙資源イノベーションセンター)

ESRICは、2020年にルクセンブルクに設立された宇宙資源活用に関する研究機関であり、ルクセンブルク宇宙局(LSA)、欧州宇宙機関(ESA)、ルクセンブルク科学技術研究所(LIST)のイニシアチブにより運営されている。2024年時点で22名の専門家が在籍し、ISRU(現地資源利用)技術の開発を中心とした20以上のプロジェクトを進めている。

ESRICは、単なる研究機関にとどまらず、ISRU技術の発展を推進するクラスター的な組織を目指している。その目的は、技術開発だけでなく、産業界、学術界、政府機関、資金提供者を結びつけ、持続可能な宇宙経済の実現を支援することにある。

以下に ESRIC の取り組みの中で重要な活動である、ISRU 技術の研究開発、スタートアップ支援、研究施設の提供(LaaS: Lab as a Service)の3点について紹介する。

#### ISRU 技術の研究開発

ESRIC は企業や ESA との協業や金融機関による支援を受けながら ISRU 技術に関する研究開発を実施している。研究開発を実施している ISRU 関連技術を以下に示す。

- レゴリスから金属資源および酸素を生成する技術(ESA, AIRBUS 社より支援)
- 純水化処理技術(Air Liquide より支援)
- 月面のごみのリサイクル技術(Luxembourg national research fund より支援)
- 鉱物選別技術(Luxembourg national research fund より支援)
- 建材の製造技術
- 居住施設のレゴリス除去技術
- イルミナイトや水氷の探査技術

#### スタートアップ支援

ESRIC Start-up Support Program(SSP)は宇宙探査及び、宇宙資源活用事業に特化したインキュベーションプログラムである。初期段階のスタートアップ企業に資金およびメンタリング等の支援を実施している。支援企業例を以下に示す。

- Four Point Space:複数協調ロボット技術開発を実施している企業
- Lightigo Space:月面地表の組成分析が可能な光学科学測定器を搭載したローバーを開発
- Spacebackend:月-地球圏の衛星通信技術を開発している企業

#### 研究施設の提供(LaaS: Lab as a Service)

ESRIC は ISRU 技術を研究開発するために必要な研究施設を、企業や大学にサービス提供している。既に整備された設備として、鉱物加工のための設備や酸素抽出のための設備、純化処理に係る設備がある。また、今後整備予定の設備として、レゴリス存在下の真空環境を再現する試験設備や、プラントプロセスを実験するための設備がある。LaaS に関する概要説明スライドを図 4-74 に示す。



図 4-74 LaaS: Lab as a Service 事例

出所)ESRIC 発表スライドを三菱総合研究所撮影

#### (4) DSEL(中国深宇宙探査研究所)と ILRS(国際月研究ステーション)

中国国家航天局(CNSA)傘下の DSEL(深宇宙探査研究所)は、中国の深宇宙探査プロジェクトを統括する組織である。本ワークショップでは、DSEL が推進する ILRS(International Lunar Research Station, 国際月研究ステーション)についての発表があった。

ILRS は、中国が主導する国際協力プロジェクトであり、月面に持続可能な研究インフラを構築することを目的としている。ILRS の主要機能には、電力供給、通信・ナビゲーション、地球-月間輸送、月面科学研究が含まれる。DSEL は本 WS での発表の際に、欧州各国に対し、過去の嫦娥(Chang'e)計画における協力実績を強調し、ILRS への参画を呼びかけていた。国際協力に関する説明スライドを図 4-75 に示す。



図 4-75 欧州へ ILRS への参加を呼び掛ける DSEL の発表スライド

出所)DSEL 発表スライドを三菱総合研究所撮影

また、DSEL は 2030 年までに安徽省合肥市に ILRS の国際本部を建設する計画を発表した。この施設は、ILRS 参加国の研究機関に貸し出される予定とされている。



## (5) ASI(イタリア宇宙機関)

ASI(イタリア宇宙機関)は、欧州宇宙機関(ESA)および NASA との協力関係を活かし、月面探査に積極的に関与している。ASI の宇宙探査のアプローチに関するスライドを図 4-76 に示す。



図 4-76 ASI の宇宙探査のアプローチ

出所)ASI 発表スライドを三菱総合研究所撮影

ASI は ESA の月探査プログラムにおいて、複数の主要プロジェクトに貢献している。

- Gateway 計画:月周回軌道に建設される宇宙ステーション「Gateway」において、ESA と共同で居住施設モジュールや通信・測位モジュール、サービスモジュールの開発に参画している。
- Argonaut 計画:欧州が開発する月面輸送システムの一環として、大型月着陸船の降下を担う要素(Descent Element)などを開発している。
- Moonlight 計画:月面通信・ナビゲーション機能を提供する月衛星群の開発について、ESA と契約しているイタリアの民間企業の Telespazio を支援している。
- PROSPECT:月南極の水氷や揮発性物質を探査する際の 1m 程度のドリルを含むサンプル取得システムの設計・開発している。

また、ASI(イタリア宇宙機関)は、NASA のアルテミス計画および月探査ミッションにおいて、以下の主要プロジェクトに貢献している。

- 多目的居住モジュール(Multipurpose Habitation Module, MPH):ASI と NASA 共同で開発しており、2024 年 9 月に NASA のミッションコンセプトレビュー(MCR)を通過した。
- LUGRE(月面 GNSS 受信機実証実験):ASI と NASA が共同で開発している GNSS(全球測位システム)技術の実証。この実験では、NASA と ASI が開発した測位受信機を Firefly Aerospace の「Blue Ghost Mission 1」に搭載し、GPS と Galileo 衛星信号を利用した月面での測位・ナビゲーションの可能性を検証予定である。2025 年 1 月に打ち上げられ、月面到達後は地表での測位精度の向上や長期間のデータ収集が計画されている。



加えて ASI は、イタリアの民間企業が国際的な宇宙探査市場に参入し、月面開発に関する B2B(企業間取引)ビジネスを展開できるよう支援している。以下に ASI が支援している 2 つの事例を示す。

- Thales Alenia Space Italy は、Northrop Grumman のサブコントラクターとして、Gateway の一部である HALO(Habitation and Logistics Outpost)の加圧モジュールの開発を担当している。
- イタリアの高級ブランド Prada は、Axiom Space と協力し、NASA の EVA(船外活動)用宇宙服の共同開発を行っている。特に、Artemis III ミッションに向けて、Prada の持つ高性能素材の開発技術と精密な縫製技術を活用し、耐久性と快適性を兼ね備えた宇宙服の設計が進められている。

## (6) ロッキード・マーチンの月面アーキテクチャ

ロッキード・マーチンは、2040 年を想定した水資源に基づく月面の包括的なアーキテクチャ(Water-Based Lunar Architecture)に関する発表をした。アーキテクチャの構成を図 4-77 に示す。このアーキテクチャは全ての国や企業、パートナーが共有可能な、月面活動を持続可能にするためのレファレンスモデルとなることを目的として公表されており、社外のパートナーとの連携により実現されることが前提となっている。

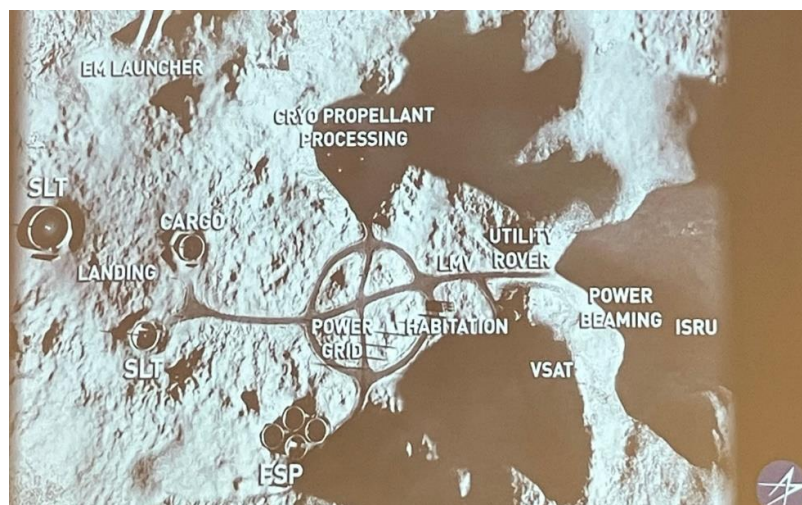


図 4-77 水資源に基づく 2040 年の月面アーキテクチャの一部に関する俯瞰図

出所)ロッキード・マーチン発表スライドを三菱総合研究所撮影

アーキテクチャの発表に含まれていた月面のエネルギー供給、資源利用(ISRU)、輸送システムの3つの構成要素の概要について以下に紹介する。

### 1) エネルギー供給

ロッキード・マーチンの月面アーキテクチャにおいて、エネルギー供給は極めて重要な要素であり、安定的かつ持続可能な電力インフラの確立を目指している。アーキテクチャに含まれる、エネルギー供給システムを図 4-78 に示す。その中核を担うのが、小型の核分裂炉による原子力発電施設(Fission

Surface Power)である。このシステムは、1基あたり150kWの発電能力を持ち、年間を通じて安定した電力供給を実現する。さらに、HALEU燃料(高濃縮低濃度ウラン)を使用することで、安全性を確保しつつ、高出力の発電能力を維持する構想となっている。

この発電施設で生み出された電力は、電力グリッドを通じて月面の各施設に供給される。グリッドは発電施設、エネルギー貯蔵施設、電力需要設備を統合する仕組みを持ち、電力の安定供給とバランス調整を担う。発電された電力は地表に敷設されたケーブルを通じて各施設へ分配され、各システムの稼働を支える。

さらに、無線送電(Optical Power Beaming)の導入も提案されている。これにより日照のあるクレーターの縁から、永久影領域(PSR)へ電力を送信することを可能になる。最大10kWの電力をクレーター底部で利用可能とし、ロボットや移動式機器への電力供給を支援する。

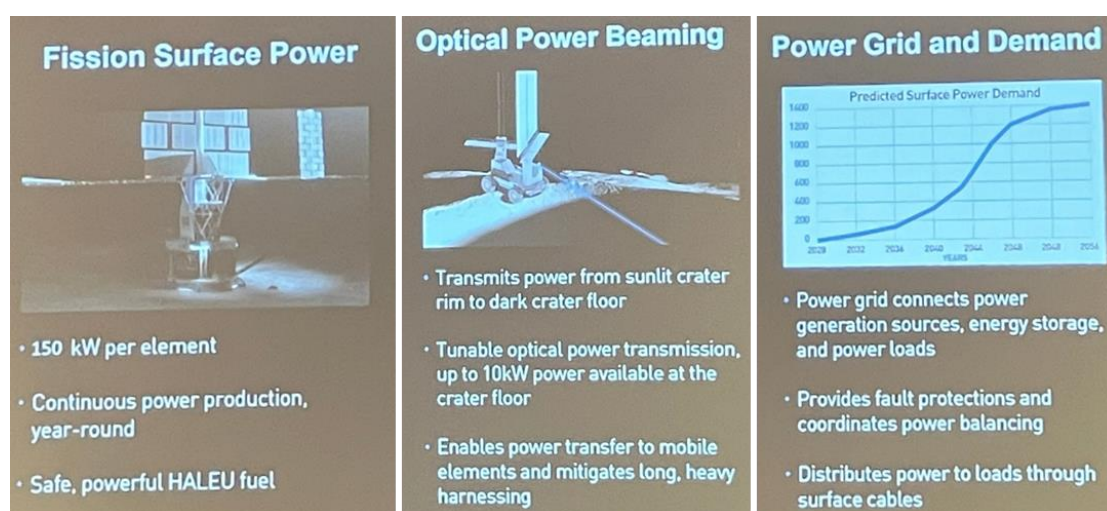


図 4-78 エネルギー供給のシステム構成要素

出所)ロッキード・マーチン発表スライドを三菱総合研究所撮影

## 2) 資源利用(ISRU)

ロッキード・マーチンの月面アーキテクチャでは、水資源のISRUにより、持続可能な探査活動を支える計画が組み込まれている。ISRUプラントに関するイメージ図を図4-79に示す。PSRにおいて、ロボットが無線送電による電力供給を受け、氷を含むレゴリス(砂や岩石)を採掘する。採掘されたレゴリスから水が抽出・濾過される。生成された水はPSR外の極低温推進剤処理プラントに輸送され、電気分解により水素と酸素に変換される。水素は液化燃料として、酸素は推進剤や呼吸用の酸素として活用される構想である。

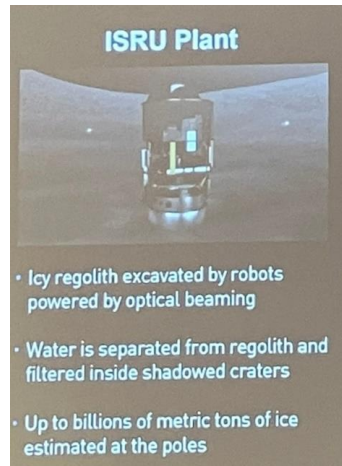


図 4-79 ISRU プラント

出所) ロッキード・マーチン発表スライドを三菱総合研究所撮影

### 3) 輸送システム

月面での移動と資材の運搬を効率的に行うために、移動式ローバーとユーティリティビークルの 2 種類の輸送システムが構想されている。2 種類の輸送システムのイメージを図 4-80 に示す。

移動式ローバーは、月面での探索活動や資材運搬を目的とした車両であり、2 人の乗員が搭乗でき、最大 1,000kg の貨物を運搬可能な設計となっている。さらに、6 軸自由度のロボットアームを搭載しており、最大 70kg の物体を持ち上げることが可能である。このローバーは、最高速度 15k/h を超える機動力を備えており、月面の起伏の激しい地形でもスムーズに移動できる性能とされている。

一方、ユーティリティビークルは、大型のインフラ設備を運搬・設置するために設計された自律型貨物ローバーである。この車両は、最大 6,000kg のインフラ機材を運搬・再配置する能力を持ち、月面基地の建設や維持に不可欠な役割を果たす。さらに、ISRU モジュールとの接続性も高く、掘削、整備、修理作業にも対応する柔軟性を持つことが提案されている。このような多目的機能により、ユーティリティビークルは月面基地の拡張や資源採掘の効率化に大きく貢献することが期待されている。

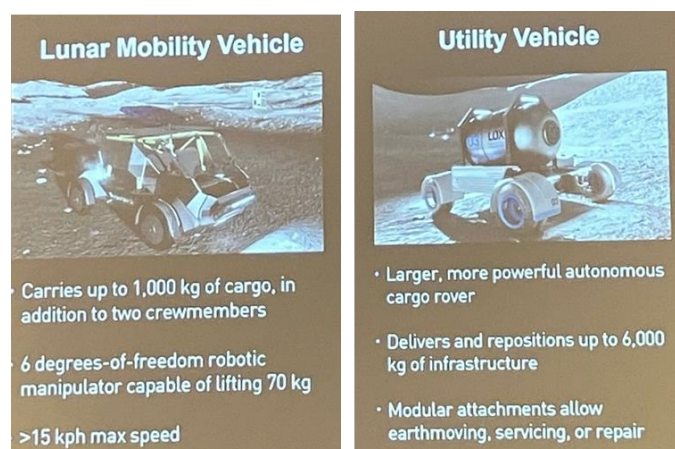


図 4-80 輸送システムの構成要素

出所) ロッキード・マーチン発表スライドを三菱総合研究所撮影



#### 4.5.2 Space For Inspiration

Space for Inspiration (Edition 5)は、2024 年 12 月 4 日から 5 日にかけてルクセンブルクの European Convention Center で開催された国際会議である。本イベントには、ESA(欧州宇宙機関)、LSA(ルクセンブルク宇宙庁)、NASA(アメリカ航空宇宙局)、JAXA(宇宙航空研究開発機構)、ESRIC(欧州宇宙資源イノベーションセンター)などの政府機関に加え、商業宇宙ステーション事業者や月面開発関連の企業が欧州、米国、日本などから参加していた。

会議は口頭発表とパネルディスカッションの形式で進められ、初日は低軌道(LEO)をテーマに、LEO 経済圏の形成状況や商業宇宙ステーション、ロジスティクス、軌道上での燃料補給技術について議論が行われた。2 日目は月面開発がテーマとなり、月面経済圏の構築、月面ロジスティクス、通信測位システム、インフラ整備に関する最新の技術動向が紹介された。

本イベントの 1 日目のプログラムの概要を表 4-54 に、2 日目のプログラムの概要を表 4-55 に示す。

表 4-54 Space for Inspiration1日目のプログラム概要

|       |                                            | 月面水素技術・電力技術が関連するセッション                                                                          |                                   |                                                                                                                           |
|-------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TIME  | 本会議                                        | パラレルセッション                                                                                      |                                   |                                                                                                                           |
| 9:00  | 歓迎スピーチおよびオープニングセッション                       | LSA, ESA                                                                                       |                                   |                                                                                                                           |
| 9:45  | パネルディスカッション<br>LEO経済の現状と機関・市場の視点からの考察      | ESA, ESPI, EIB, Promus Venture, Space Commerce Matters, Prometheus Life Technologies           |                                   |                                                                                                                           |
| 11:00 | プレゼンテーション/パネル<br>商業ステーションと物流:LEOでのビジネス計画加速 | ESA, VAST, Blue Origin, Axiom Space, Airbus, The Exploration Company, Thales, Northrop Grumman |                                   |                                                                                                                           |
| 昼休憩   |                                            |                                                                                                |                                   |                                                                                                                           |
| 14:00 | プレゼンテーション<br>宇宙アクセラレーター: BSGNの経験と展望        | MEDES, Catapult, Space Cooperative Europe, ESRIC, ESA, EIC                                     | プレゼンテーションおよびパネル<br>軌道上燃料補給インフラ    | ESA, OHB, The Exploration Company, Dawn Aerospace                                                                         |
| 15:15 | プレゼンテーションおよびパネル<br>再生医療と長寿分野の宇宙利用          | ESA, Space Pharma, L' Oreal, Quentin Coral Investment, USI                                     | プレゼンテーション<br>BSGN産業アクセラレータープロジェクト | ESA, Prometheus Life Technologies, French Institute of Health and Medical Research, OneTreck, Roche, Dcubed, Photocentric |
| 16:45 | プレゼンテーション<br>宇宙での製造技術                      | Catapult, Flawless Photonics, ArcSpace, Photocentric, Dcubed, ESA                              | ファイヤーサイドチャット<br>重力を超えた健康          | University of British Columbia, Schlegel-UW Research Institute for Aging, Invenk Solutions                                |

出所) ESA Space for Inspiration の情報をもとに三菱総合研究所作成

表 4-55 Space for Inspiration2日目のプログラム概要

月面水素技術・電力技術に関連するセッション

| 時間    | メインセッション概要                             | 登壇者(組織名)                                                                                                                       | 並行セッション概要                                                              | 登壇者(組織名)                                                                                                                      |
|-------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9:00  | パネルディスカッション<br>月経済                     | Arthur D. Little, ispace<br>Europe, CSA, NASA                                                                                  | プレゼンテーションおよびパネル<br>将来のLEO商業多目的施設                                       | ESA, ALATYR, Orbital<br>Paradigm, Flawless<br>Photonics, Yuri, Space<br>Forge, Kayser Space                                   |
| 10:00 | プレゼンテーション<br>月の物流                      | NASA, Intuitive Machines,<br>Firefly Aerospace, ispace                                                                         |                                                                        |                                                                                                                               |
| 11:30 | プレゼンテーション<br>月面通信およびナビゲーション            | ESA, JAXA, SSTL,<br>Telespazio                                                                                                 | プレゼンテーションおよびパネル<br>宇宙法                                                 | DGFL, De Gaulle Fleurance,<br>Heuking, LOONTS-QUELEN,<br>Bull & Co, ESA, KU Leuven<br>Centre for Global<br>Governance Studies |
| 昼休憩   |                                        |                                                                                                                                |                                                                        |                                                                                                                               |
| 14:00 | パネルディスカッション<br>月面インフラ                  | University of Florida,<br>LIQUIFER, DFKI, Spartan<br>Space, Monash University,<br>Maana Electric, Future<br>Space Architecture | パネルディスカッション<br>LEOの進化する動態: 商業施設と供給<br>需要の分析<br>パネルディスカッション<br>商業化からの教訓 | Yuri Lux, ATMOS Space<br>Cargo, Space Cooperative<br>Europe, Roche, VAST, ASI<br>ESA                                          |
| 16:00 | パネルディスカッション<br>新興宇宙プレイヤーとLEOおよび月経済への影響 | Brazil Space Agency,<br>Singapore Space Agency,<br>Luxembourg Space Agency,<br>UNOOSA, UNOOSA, ESA                             | ワークショップ<br>ポストISS: LEO探査の新時代とヨーロッパの役割                                  | The Exploration Company,<br>COMAT, Kayser Space,<br>Spartan, Space Applications<br>Services                                   |

出所) ESA Space for Inspiration の情報をもとに三菱総合研究所作成

本イベントで発表された内容のうち、月面の電力と水素資源活用との関連性が高い以下の項目について述べる。

1. ESA 宇宙探査戦略
2. 月面の経済
  - パネルディスカッション: 月面経済圏を作るには
  - 月面で製造されたロケット推進剤の経済性分析に関する研究
3. 月面インフラ事業に取り組む企業
  - Spartan Space
  - Manna Electric

### (1) ESA 宇宙探査戦略

ESA は 2040 年 10 月に公表した、2040 年までの LEO、月、火星を含む包括的な宇宙探査戦略 (EXPLORE 2040) についての発表をした。探査戦略の発表に使用したスライドを図 4-81 に示す。探査戦略の基本となるマインドセットについて、以下の3点が強調された。

- 野心 (Ambition): 自立的なリーダーシップと意思決定を重視
- 独自性 (Uniqueness): 模倣ではなく、先進的な技術開発で飛躍
- 実現可能性 (Achievable): 多様な選択肢と目的地のシナジーを活用



図 4-81 ESA の EXPLORE 2040 についての発表

出所)ESA 発表スライドを三菱総合研究所撮影

また、2030 年代のヨーロッパ人の月着陸を含む、月面開発計画が示された(図 4-82 参照)。各ミッションを以下に示す。

- ESM(European Service Module):オリオン宇宙船(NASA アルテミス計画の宇宙船)の推進・電力・熱制御・生命維持を担う欧州製サービスモジュール
- Luna Pathfinder : 月周回軌道上での通信・測位を提供する初のヨーロッパの商業ミッション
- Gateway(ESA の貢献部分) : 月周回軌道上の宇宙ステーションの構築支援
- Moonlight : 月面での通信・測位ネットワークを構築し、将来の探査や持続的な活動を支援
- PROSPECT : 月の極域における資源探査を目的としたミッションで、氷や揮発性物質の調査を実施
- Argonaut : 2031 年に予定されている欧州主導の大型月面ランダー計画で、物資輸送やインフラ設置を担当
- ヨーロッパ人の月着陸 : 2030 年代を目標に、ESA の宇宙飛行士が月面に降り立つことを想定した長期計画

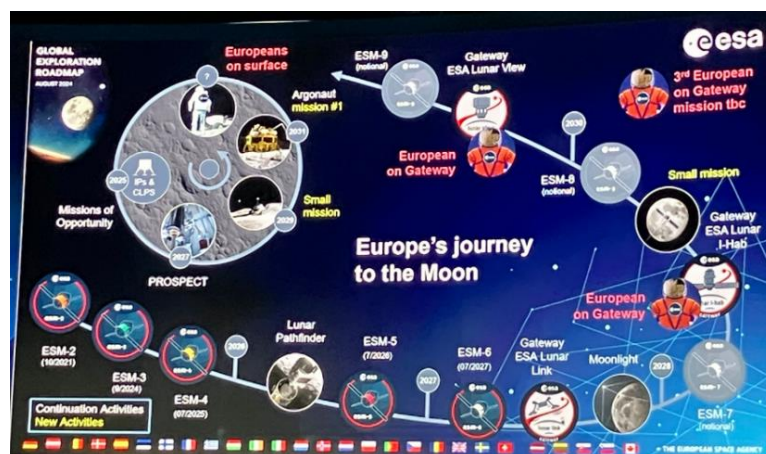


図 4-82 欧州の月面開発計画

出所)ESA 発表スライドを三菱総合研究所撮影



## 各国ケイパビリティ比較

EXPLORE 2040 のレポートの中には、宇宙探査をリードする各国機関とのケイパビリティの比較が図 4-83 のように示されている<sup>133</sup>。比較されている国として、アメリカ、中国、インド、ロシア、日本があり、基本的な打上げ能力に加えて LEO、月、火星における主要なケイパビリティについての整理がなされている。

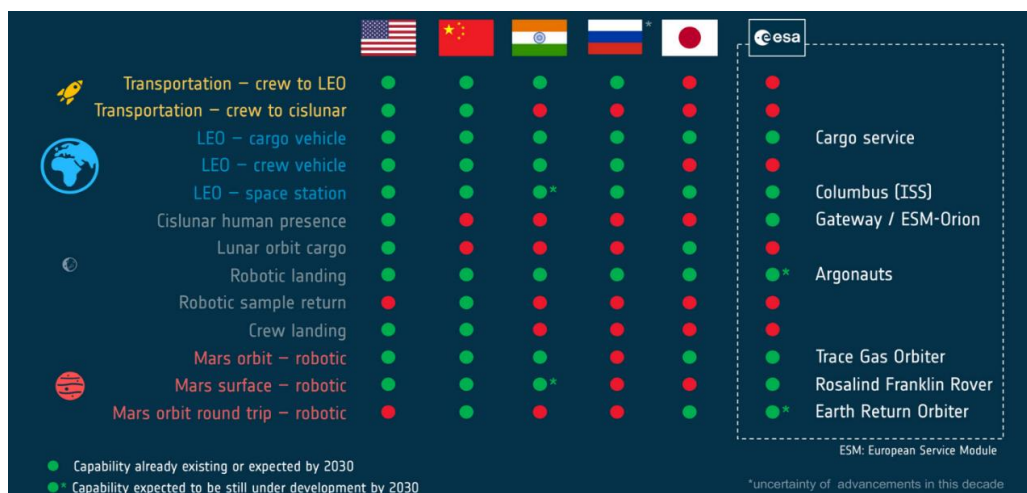


図 4-83 各国ケイパビリティ比較

出所)ESA, Explore 2040, [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore\\_2040.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore_2040.pdf)(2025 年 1 月 31 日閲覧)

## LEO、月、火星の包括的な探査戦略

ESA が LEO、月、火星の包括的な探査戦略を設計する中での重要なコンセプトとして「MULTIPLE DESTINATIONS, ONE STRATEGY」がある。このコンセプトは図 4-84 のように示されているが、これは、LEO、月、火星というそれぞれ別の目的地ごとの科学的目標や技術開発の要求を個別に満たしつつ、それらを全体として連携させることで、宇宙探査全体での成果を最大化することを目指す考えである。

<sup>133</sup> ESA, Explore 2040, [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore\\_2040.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore_2040.pdf)(2025 年 1 月 31 日閲覧)

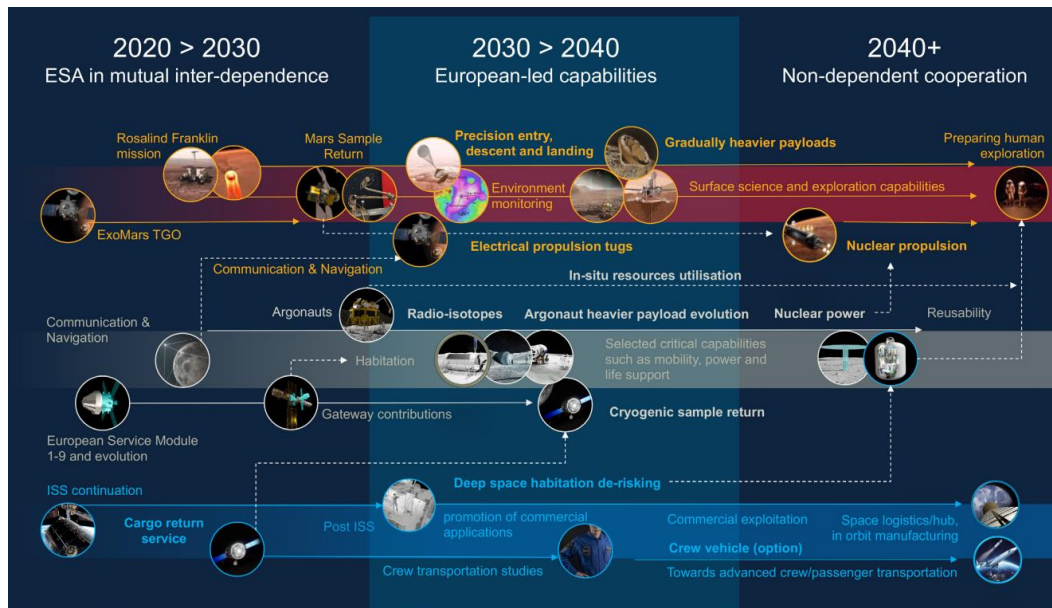


図 4-84 LEO、月、火星の包括的な探査戦略の概要

出所)ESA, Explore 2040, [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore\\_2040.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore_2040.pdf)(2025 年 1 月 31 日閲覧)

#### ESA の月面開発計画

EXPLORE 2040 では月面探査計画についても整理されている。月面探査の重要な目的として、主に科学の発展への貢献と火星探査の準備があげられている。これを実現するために、月周回軌道からランダーを含む月面までの領域で様々なミッションが計画されている。ESA の月面開発計画の概要は図 4-85 のように示されている。

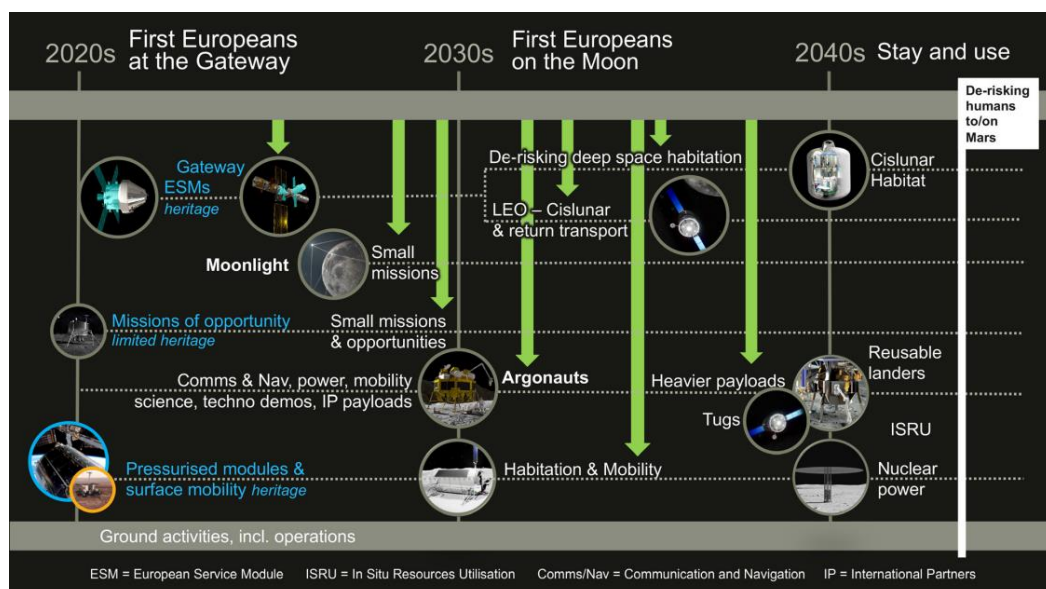


図 4-85 ESA の月面開発計画の概要

出所)ESA, Explore 2040, [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore\\_2040.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Explore_2040.pdf)(2025 年 1 月 31 日閲覧)

月軌道では、ゲートウェイが月軌道における科学調査や深宇宙での居住技術の試験を行う拠点として機能する。また、ゲートウェイは将来的に火星探査のための中継基地としての役割も果たすことが期待されている。ESA はゲートウェイに対し、欧州サービスモジュール(ESM)を提供し、輸送、電力供給、推進システムの面で重要な貢献を果たしている。

月面ランダーとしては、月面での研究活動や貨物輸送を支える基盤として、Argonaut が開発されている。これは科学探査のための機器輸送だけでなく、有人ミッションに必要なロジスティクスを支援し、長期的な月面探査の実現に貢献する。

月面での活動領域では、居住施設の建設計画や ISRU 技術の開発が検討されている。また、安定した電力供給を確保するために、原子力発電システムの導入も視野に入れられている。加えて、月面での移動性向上のためのモビリティ技術や、長距離通信・測位システムの整備も行われ、科学調査や有人探査の効率を大幅に向上させることが期待されている。

ESA は、このような多層的なアプローチを通じて、2030 年代におけるヨーロッパ人宇宙飛行士の月面着陸と、2040 年代以降の持続可能な月面探査の確立を目指している。

## (2) 月面の経済

### 1) パネルディスカッション:月面経済圏(Lunar Economy)を作るには

#### テーマと登壇者

月面経済圏をどのようにして作るのかについて議論がなされたパネルディスカッションについて紹介する。パネラーとして表 4-56、図 4-86 に示す4名が登壇した。

表 4-56 Lunar Economy パネルの登壇パネリスト

| 名前                | 役職                                                  | 組織                    |
|-------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| Ahmed Fadi        | CLPS Integration Manager                            | NASA                  |
| Arnaud Siraudin   | Director                                            | Arthur D. Little      |
| Héloïse Vertadier | Legal Counsel                                       | ispace Europe         |
| Stephanie Loiseau | Manager,<br>Planning, Engagement, and<br>Innovation | Canadian Space Agency |



図 4-86 月面経済圏に関するパネルディスカッションの様子

出所)ESA Space for Inspiration のパネルディスカッションを三菱総合研究所撮影

以下にパネルディスカッションでの4名の主張の要点を整理する。

Ahmed Fadl 氏(NASA)

Ahmed 氏は、2018 年に CLPS(Commercial Lunar Payload Services)計画が発表されて以来、多くのペイロードサービスが開発され、輸送能力も向上してきたと述べた。また、月に行く目的は単なる探査ではなく、月面経済圏の形成にあるとし、以下の 4 つの需要がその基盤を支えると指摘した。

- 科学探査
- 現地資源の利用
- 現地環境の利用
- 観光

また、月面経済圏を確立するためには、次の 3 つの要素が重要であると述べた。

- 人類の永住
- 現地資源の利用
- エネルギーの効率的な利用

月面経済圏を成立させる一環として、CLPS ではこれまで 14 のベンダーと契約を結んでおり、2028 年には次のフェーズとして CLPS の 2 期目を実現し、月面経済圏の実現のために、月面への輸送能力のさらなる強化を実現したいと述べた。

Stephanie Loiseau 氏(Canadian Space Agency)

Stephanie 氏は、カナダが月面の移動手段と探査車の開発に取り組んでいることを強調した。また、同氏は「地球で達成したい技術的ブレークスルーを、月で先に実現することが大きな利点になる」と

述べた。これは、月面環境が地球とは異なる厳しい条件を提供するため、地上の先進的な技術の実証や革新を加速する機会となるという考え方に基いている。その一環として、宇宙関連のサプライヤーや地上のエネルギー関連企業を招き、技術開発のプロセスにおける制約や実現可能な技術について協議を行っている」と述べた。

Héloïse Vertadier 氏(ispace Europe)

Héloïse 氏は、民間企業の立場から宇宙機関に対して求める支援について言及した。特に、企業の創業初期における投資と参入支援の重要性を強調し、これらが新興企業の成長を促し、宇宙経済全体の発展につながると主張した。また、民間企業はイノベーションを通じて、より効率的な月面関連技術を提供することが可能であり、官民の協力関係が月面経済の発展に不可欠であると述べた。

Arnaud Siraudin 氏(Arthur D. Little)

Arnaud 氏は、NASA がアンカーテナンシーを果たし、投資を確実にすることが、月面経済の発展において重要であると述べた。さらに、将来的には週 1 回の頻度で低コストの輸送能力を確立することが、月面経済の持続的な発展に重要であると指摘した。その上で、月面経済を成立させるためには越夜が重要であると述べ、長期間の月面活動を可能にする技術の開発が求められるとした。また、エネルギーや通信などのインターフェースの標準化も必要であり、これにより異なる企業や機関が効率的に連携できる環境を整えることができると主張した。

## 2) 月面で製造されたロケット推進剤の経済性分析に関する研究

### 研究概要

フロリダ中央大学(University of Central Florida)の Philip T. Metzger 博士から、月面で製造されるロケット推進剤(液体酸素・液体水素)の経済性分析に関する研究について発表があった。本研究は、月面で採掘・製造されるロケット推進剤が、地球から打ち上げられる推進剤と比べて商業的に競争力を持ち得るかを分析したものである。これまでの技術経済評価では、月由来の推進剤の経済性に関して異なる結論が導かれており、一部の研究は「地球から輸送した方が安価」とする一方で、他の研究では「月で生産した方が有利」とされていた。本研究は、これらの議論に対し、新たな経済的視点から整理し、長期的な視野で月面推進剤の競争力を評価することを目的としている。

### 分析手法

本研究では、月面推進剤の経済性を統計的手法によりモデル化した。経済性を決定する主要要素として特に以下の 2 つの指標が重要であると結論付けた。

- 資本輸送の「コストにおけるギア比 (G)」
  - 地球から月へ資本(機材など)を輸送する際のコスト効率を示す指標。
- 資本の生産質量比 ( $\phi$ )
  - 月面に運んだ資本(採掘・製造設備など)が、どの程度の推進剤を生産できるかを示す指標。



これらの指標をもとに、過去の技術経済評価を精査し、一部の研究が高すぎる  $G$  を前提にしていたこと、 $\phi$  を最適化するための選択を適切に考慮していなかったことを指摘した。

さらに考慮されていない点として、図 4-87 にあるように、宇宙システムの信頼性とコストに対するアプローチが国の宇宙機関と民間企業において異なることを指摘している。NASA をはじめとした国の宇宙機関は信頼性に関する高い要件がある一方で、民間企業はある程度リスクを許容してコストを削減するアプローチを取る。また本研究は、信頼性の確保と必要コストは指数関数的な関係にあると主張している(図 4-88)。そのため、特に開発における最後の 10% の信頼性の向上が全体の開発コストの 80% を占めることになっている。

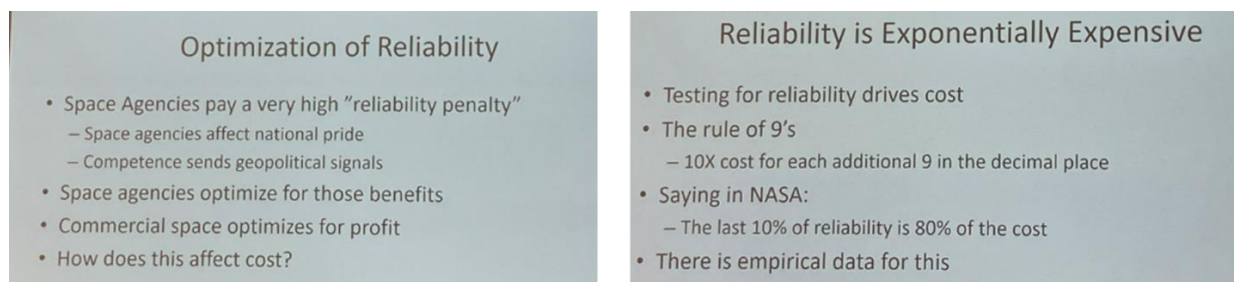


図 4-87 信頼性と輸送コストに対するアプローチに関する指摘事項

出所)Philip T. Metzger 博士発表スライドを三菱総合研究所撮影

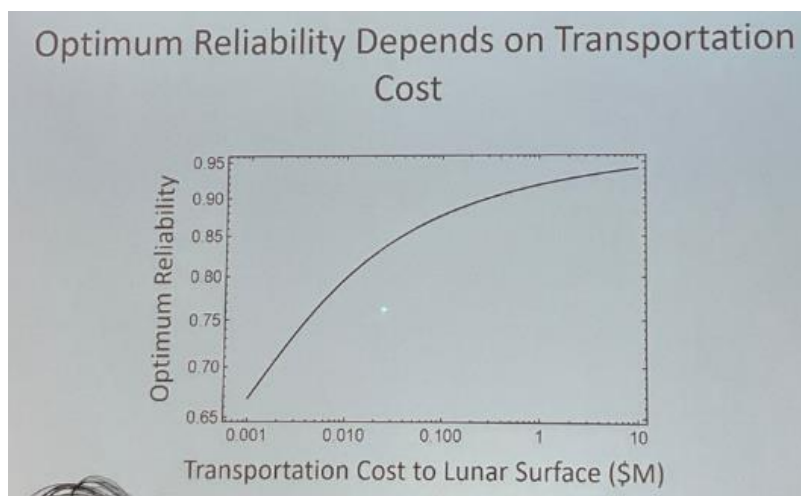


図 4-88 信頼性と輸送コストの関係

出所)Philip T. Metzger 博士発表スライドを三菱総合研究所撮影

## 分析結果と結論

本研究は、民間企業の宇宙機の信頼性とコストに関するアプローチなどの新たな観点を導入して経済性分析を行ったところ、月面で製造されるロケット推進剤が商業的に成立する可能性が高いことを示した。月面推進剤の製造技術は、生産効率の向上と学習曲線・規模の経済によるコスト低下により、長期的には地球由来の推進剤を上回る可能性があると主張している。また月面で製造された推進剤により、Cis-Lunar 圏や火星探査などを含んだ長期的な宇宙計画全体にも戦略的な利点をもたらすと述べている。



Philip 博士はこの研究結果・結論について、図 4-89 に示すように以下の主張をしている。

- 本分析は、多くの経済学者やビジネスリーダーによってレビューされ、懐疑的な立場の専門家も含めて、分析の妥当性が確認されている。
- 月面でのロケット推進剤製造事業の主な懸念点として、信頼性と自律運用の確保が指摘されており、これらの課題を克服することが商業的成功の鍵となる。
- 特に、政府主導の取り組みが信頼性と自律性の向上を支え、PPP(官民連携)を活用した資金支援が実現すれば、月面資源の活用は革新的な進展を遂げ、世界にとって大きな利益をもたらす可能性がある。

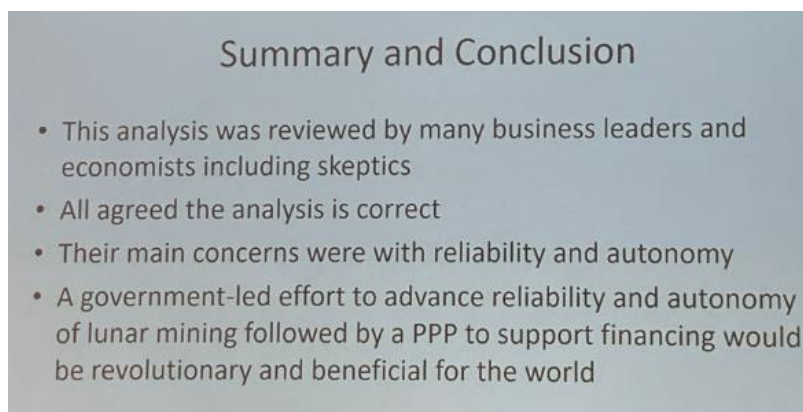


図 4-89 月面でのロケット推進剤製造に関する経済性分析に関する結論

出所)Philip T. Metzger 博士発表スライドを三菱総合研究所撮影

### (3) 月面インフラに関するパネルディスカッション

#### 1) SPARTAN SPACE

##### 事業概要

Spartan Space は、2021 年にフランスで設立されたスタートアップ企業で、特に月面を中心とした極限環境における人間活動を支援する技術を開発している。月面事業として、膨張式居住モジュール EUROHAB を中心に、探査・移動手段、通信・ナビゲーション、エネルギー供給、現地資源利用(ISRU)といった幅広い領域をカバーしている。これにより、有人月面探査ミッションの安全性と継続性を高めることを目指している。

##### 第二居住モジュール

Spartan Space から、有人月面開発の初期のインフラとして、第二の居住施設(Secondary Habitat)の重要性を主張している(図 4-90)。宇宙飛行士の長期滞在や探査活動を広げるには、メインの居住モジュールや与圧・非与圧ローバーに加えて、移動先の居住施設が重要であると考えており、膨張式で展開可能な EUROHAB を開発している。EUROHAB は ESA の Argonaut のようなランダーに搭載され、月面の安全で探査活動の価値があるエリアに輸送されることが想定されている。

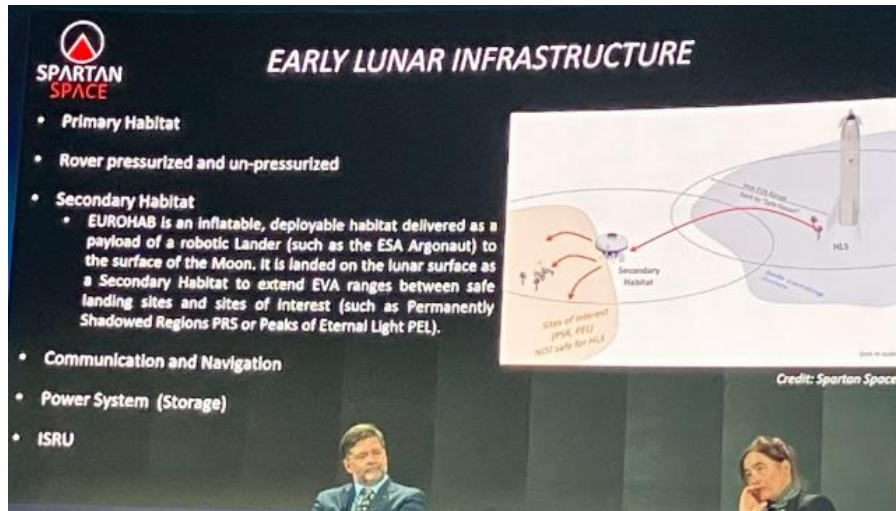


図 4-90 Spartan Space が想定する有人月面開発初期のインフラ

出所)Spartan Space 発表スライドを三菱総合研究所撮影

ISRU を見据えたインフラ

Spartan Space は第二の居住施設に加えて、ISRU を見据えて様々なインフラ施設を合わせて提供することを考えている(図 4-91)。EUROHAB を中心として、ESA Argonaut に搭載された太陽電池を用いた発電、探査・採掘ローバー、資源抽出・貯蔵プラントが含まれている。

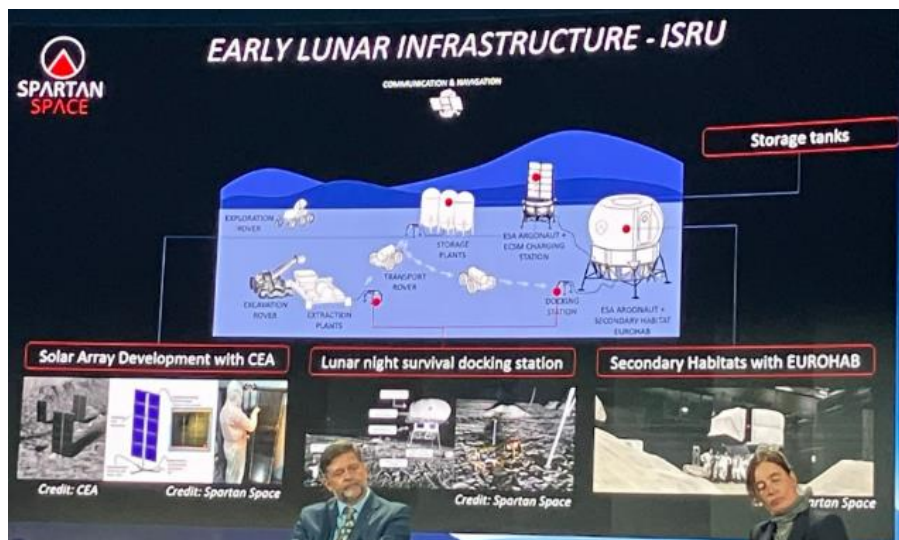


図 4-91 Spartan Space が想定する ISRU を見据えた早期の月面インフラ構成

出所)Spartan Space 発表スライドを三菱総合研究所撮影

## 2) MAANA Electric

事業概要

MANA Electric は、オランダを拠点とする企業であり、宇宙空間での持続可能なエネルギーインフラの構築を目的としている。特に、ISRU 技術を活用し、月面のレゴリスを原料として太陽電池を製造する LUNABOX という製造プラントを月面で開発することを目指している。

#### ISRU 技術を活用した太陽電池製造方法

太陽電池の現地製造方法の基本的な原理として、レゴリスを電気分解することで、レゴリス中に含まれる酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ )からシリコンと酸素を得る(図 4-92 参照)。ただし、レゴリスには様々な組成を含む混合物であるため、鉱物の選別・純化处理などが大きな技術的な課題となる。同社は以下の技術的な強みを活用して、世界で初めて太陽電池の ISRU 技術の実証をしたと主張する。

技術的な強み:(図 4-93 参照)。

- 鉱物の選別(Beneficiation)
- 金属抽出(Metal Extraction)
- 金属精製(Metal Purification)
- ウエハー製造(Wafering)
- 太陽電池セル製造(Solar Cell Fabrication)
- ガラス製造(Glass Manufacturing)

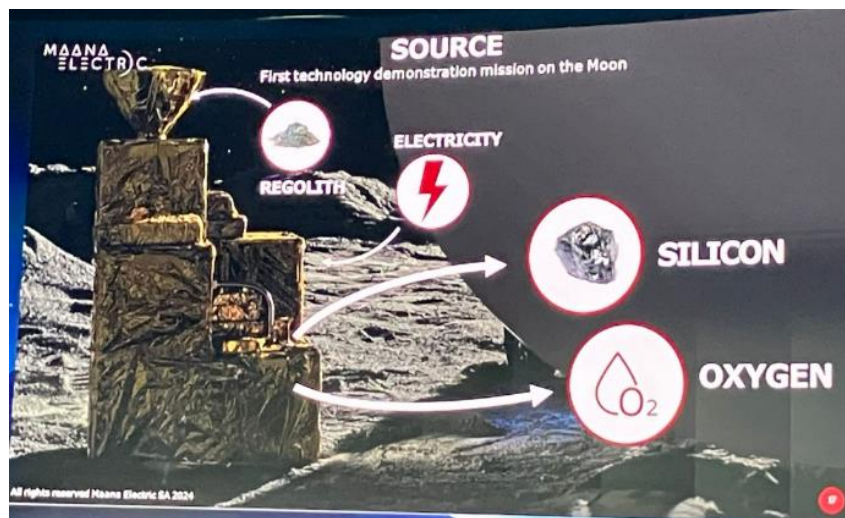


図 4-92 MAANA Electric が想定する太陽電池製造原料獲得のプロセス

出所)MAANA Electric 発表スライドを三菱総合研究所撮影



図 4-93 MAANA Electric の技術的な強み

出所)MAANA Electric 発表スライドを三菱総合研究所撮影

#### 事業ロードマップ

同社は将来的な事業展開として図 4-94 に示すロードマップを掲げている。

- 月面でのシリコンと酸素の生成技術に関する実証
- 月面での太陽電池の製造技術の実証
- 太陽電池製造プラント(LunaBox)の構築

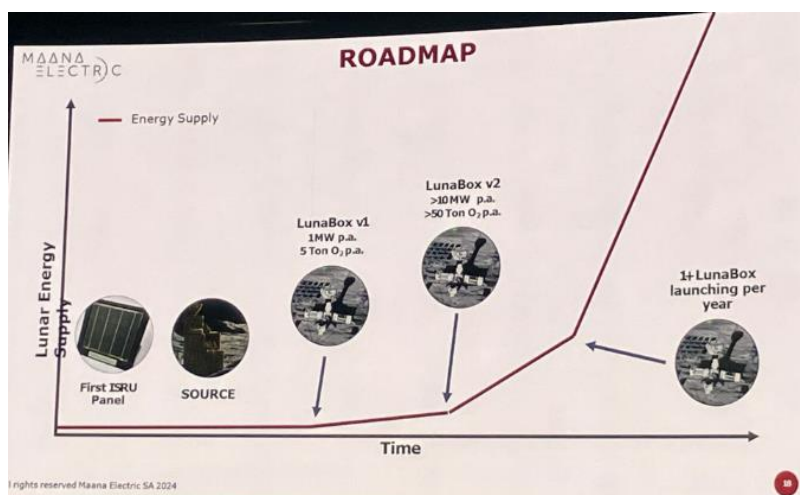


図 4-94 MAANA Electric の事業ロードマップ

出所)MAANA Electric 発表スライドを三菱総合研究所撮影

また最初に月面で構築する太陽電池製造プラントの LunaBox v1 では、以下の数値目標を掲げている(図 4-95 参照)。

#### LunaBox v1 の数値目標

- 年間 1MW の発電能力相当の太陽電池を製造
- 年間 5 トンの酸素を副産物として生成



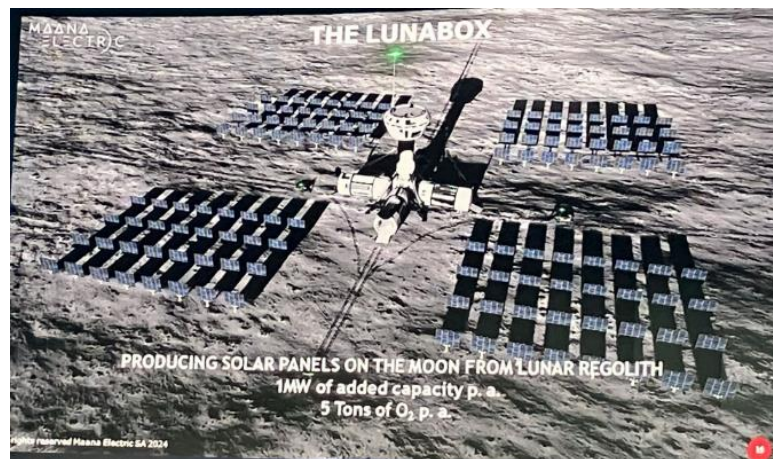


図 4-95 MAANA Electric の LunaBox v1 の数値目標

出所)MAANA Electric 発表スライドを三菱総合研究所撮影

## 5. おわりに

---

本調査では、我が国が米国提案のアルテミス計画（有人月探査計画）への参画およびアルテミス計画後も含めた月・月以遠での持続的な活動において必要不可欠な月面での電力確保と安定供給、および月面上での水の抽出とその利用に必要となる関連技術について、要素技術の洗い出しおよび課題の整理（技術課題の整理）、有識者委員会・WG 運営、そして国内外動向調査を行った。

2 章では、「水素」と「電力」についての関連技術の技術課題の整理結果を述べた。本年度は「水素」、「電力」とともにこれまでの検討結果を踏まえ、JAXA の国際宇宙探査シナリオ（案）2021 などを基に前提条件とフェーズを設定し、各フェーズでの技術開発課題を明確にするとともに、実証候補項目をとりまとめた。とりまとめた実証候補項目は確定的なものではなく、今後のエネルギー関連技術の開発に向けた検討の“スタートライン”であり、今後の議論の土台として具体化・精緻化されていくものとの位置づけである。

3 章では、7 名の有識者により構成された有識者委員会と具体的な技術課題の検討を行った WG について述べた。有識者委員会は計 3 回、WG は 5 回開催した。

4 章では国内外の動向調査の結果を述べた。欧州、中国、中東、オーストラリア等の海外政府、研究機関、民間企業等の関連動向について調査するとともに、個別技術の動向についての情報の収集・整理を行った。また、ルクセンブルクで開催された 2 つの国際カンファレンスに参加し、最新情報の収集も行った。個別技術の動向についてはベンチマーク調査として、欧米と我が国の現状との比較を行うとともに、「日本の優位性」と「技術の重要性の認知度」の 2 軸によるマトリックス表で技術評価結果の分析を行った。2 軸の評価結果に 4 つの象限を設定し、各象限における日本がとるべきアクションを設定した。

本事業は令和 3 年度にスタートし、4 年度をかけて月面でのエネルギー関連技術として、「水素」と「電力」についての技術課題の整理を進めてきた。この間、我が国においては宇宙基本計画の改定、宇宙技術戦略の策定、そして宇宙戦略基金の設置など、月面開発を含む宇宙開発を取り巻く状況は大きく変化した。また、海外でも米国が主導するアルテミス計画や中露が主導する ILRS 計画が着実に進展し、それぞれの計画への参加国・機関も増加した。さらに、欧州は新たな宇宙探査戦略を公表し、豪州や UAE も月面探査に関する政策に力を入れ、そして、米国の民間企業が相次いで月面への軟着陸を成功させるなど、多くの国において民間企業も含め、「月」への注目度は高まっている状況となってきている。

このような状況の中、月面開発について我が国が採るべき戦略についての議論が、官民の協力のもとで今後も行われていくと想定される。本事業による将来の月面開発に必要なエネルギー関連技術の課題整理結果は、この議論に大いに資するものと考えられ、また月面での実証、そして実装を検討していくベースラインとなりえるものである。我が国は、月面開発や月面ビジネスに関心を有し、熱量をもって自社のビジネスとして検討を行っている企業が、諸外国と比しても多数存在する国である。エネルギーは月面開発に不可欠な要素であることから、本事業の成果や本事業に協力した企業を含むこの多数の民間企業の熱量が活用され、我が国が月面開発において不可欠なポジションを獲得し、市場を獲得できる未来が訪れることを強く期待したい。



## 付録:宇宙太陽光発電および無線給電技術に関する調査

---

## 目次

---

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1. 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査.....                         | 1  |
| 1.1 米国 .....                                               | 1  |
| 1.1.1 NASA のフィージビリティスタディ .....                             | 1  |
| 1.1.2 米海軍研究所(NRL)の X-37B および ISS 上による軌道上実証 .....           | 6  |
| 1.1.3 米空軍研究所(AFRL)の SSPIDR.....                            | 8  |
| 1.1.4 カリフォルニア工科大学(Caltech)の実証衛星打上げ .....                   | 8  |
| 1.1.5 米国における近年のその他の動き .....                                | 10 |
| 1.2 欧州 .....                                               | 12 |
| 1.2.1 ESA SOLARIS プログラム .....                              | 12 |
| 1.2.2 ESA の OSIP キャンペーン .....                              | 25 |
| 1.2.3 欧州宇宙政策ビジョン ESPI2040.....                             | 27 |
| 1.2.4 COP28 におけるパネルディスカッション .....                          | 28 |
| 1.3 英国 .....                                               | 28 |
| 1.3.1 BEIS の Space Based Solar Power Innovation プログラム..... | 29 |
| 1.3.2 Space Energy Initiative(SEI) .....                   | 32 |
| 1.3.3 Catapult(SAC)による SBSP 研究開発プロジェクトの開始 .....            | 34 |
| 1.3.4 サウジアラビア王国との協力関係の構築に関する協議 .....                       | 34 |
| 1.3.5 宇宙とエネルギー部門間のパートナーシップ .....                           | 34 |
| 1.4 中国 .....                                               | 35 |
| 1.4.1 CAST が示すロードマップ .....                                 | 35 |
| 1.4.2 重慶大学の研究施設の建設 .....                                   | 39 |
| 1.4.3 西安電子科技大学の SBSP 実証実験.....                             | 39 |
| 1.4.4 中国宇宙航行学会のSSP 委員会の設立.....                             | 41 |
| 1.5 その他の国による取り組み.....                                      | 41 |
| 1.5.1 ロシア .....                                            | 41 |
| 1.5.2 インド.....                                             | 42 |
| 1.5.3 韓国 .....                                             | 42 |
| 1.5.4 オーストラリア.....                                         | 44 |
| 1.5.5 IAA Permanent Committee on SSP.....                  | 44 |
| 1.6 民間企業やスタートアップによる取り組み .....                              | 45 |
| 1.6.1 米国 .....                                             | 47 |
| 1.6.2 欧州 .....                                             | 50 |
| 1.6.3 その他 .....                                            | 55 |
| 1.7 まとめ .....                                              | 55 |
| 2. 各国の無線給電技術(WPT)に関する調査 .....                              | 58 |

|           |                                 |    |
|-----------|---------------------------------|----|
| 2.1       | パワービーミング WPT の開発動向 .....        | 58 |
| 2.1.1     | 電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向 .....   | 58 |
| 2.1.2     | レーザー方式 WPT(パワービーミング)の開発動向 ..... | 69 |
| 2.1.3     | まとめ.....                        | 75 |
| 2.2       | 空間伝送型 WPT の実用化動向 .....          | 76 |
| 2.2.1     | 電波方式 WPT の実用化取組み事例 .....        | 76 |
| 2.2.2     | レーザー方式 WPT の実用化取組み事例.....       | 79 |
| 参考文献..... |                                 | 81 |

---

## 図 目次

---

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 図 1-1 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2) .....                                                                       | 5  |
| 図 1-2 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ .....                                                                                  | 5  |
| 図 1-3 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果 .....                                                                           | 6  |
| 図 1-4 NRL の PRAM-FX 装置 .....                                                                                                  | 7  |
| 図 1-5 NRL の SWELL 装置 .....                                                                                                    | 7  |
| 図 1-6 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL) .....                                                                              | 8  |
| 図 1-7 SSPD 実証機と構成要素(左)／DOLCE の展開実験イメージ(右上)／MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート(右中央)／SSPD を VIGORIDE に結合する様子(右下)(Credit : Caltech) ..... | 10 |
| 図 1-8 MAPLE の内部の写真。右側:送信アレイ、左側:受信機(Credit : Caltech SSPP) .....                                                               | 10 |
| 図 1-9 欧州 SBSP の想定ロードマップ .....                                                                                                 | 15 |
| 図 1-10 ESA SOLARIS の Youtube 紹介ページ(Credit : ESA) .....                                                                        | 15 |
| 図 1-11 SOLARIS プログラムで想定されている活動 .....                                                                                          | 16 |
| 図 1-12 ESA SOLARIS の技術開発目標 .....                                                                                              | 17 |
| 図 1-13 2023-2025 年の間に提案されている活動内容 .....                                                                                        | 18 |
| 図 1-14 SOLARIS で提案されている Technology Development Activities .....                                                               | 19 |
| 図 1-15 Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)コンセプト .....                                                              | 21 |
| 図 1-16 Arthur D Little 社が提案する 2 種類のアーキテクチャ .....                                                                              | 21 |
| 図 1-17 DSR アーキテクチャの説明 .....                                                                                                   | 21 |
| 図 1-18 SCL アーキテクチャの説明 .....                                                                                                   | 22 |
| 図 1-19 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部) .....                                                                         | 23 |
| 図 1-20 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部) .....                                                                         | 23 |
| 図 1-21 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ .....                                                                     | 24 |
| 図 1-22 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果 .....                                                                   | 24 |
| 図 1-23 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果 .....                                                                     | 25 |
| 図 1-24 資金提供が決定した 13 のプロジェクト(Credit:ESA) .....                                                                                 | 27 |
| 図 1-25 「ESPI2040:Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ .....                                              | 28 |
| 図 1-26 英国における SBSP 活動の内訳 .....                                                                                                | 29 |
| 図 1-27 英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative) .....                                                       | 30 |
| 図 1-28 英国の SBSP 開発計画(Credit:BEIS) .....                                                                                       | 30 |
| 図 1-29 SEI の参加機関 .....                                                                                                        | 33 |
| 図 1-30 SEI の組織構造 .....                                                                                                        | 33 |
| 図 1-31 CAST による SSPS ロードマップ .....                                                                                             | 36 |
| 図 1-32 SSPS 開発のフェーズごとのミッション .....                                                                                             | 37 |
| 図 1-33 中国が提案する SSPS システムコンセプト .....                                                                                           | 37 |
| 図 1-34 中国が提案する技術実証衛星案 .....                                                                                                   | 38 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 図 1-35 中国が提案する月面軌道上での LPT ミッション .....                                                    | 39 |
| 図 1-36 西安電子科技大学の実証実験施設 .....                                                             | 40 |
| 図 1-37 K-SSPS の概要 .....                                                                  | 44 |
| 図 1-38 SBSP エコシステムマップ .....                                                              | 46 |
| 図 1-39 設立年別で示す SSPS 活動エンティティ数 .....                                                      | 46 |
| 図 1-40 Aetherflux 社の開発する SSPS 衛星 .....                                                   | 47 |
| 図 1-41 WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ .....                                                   | 50 |
| 図 1-42 Virtus Solis 社の SBSP コンセプト .....                                                  | 50 |
| 図 1-43 Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station (GE <sup>®</sup> -LPS)」 .....   | 51 |
| 図 1-44 Paraloon 社によるインフレータブル展開構造 .....                                                   | 52 |
| 図 1-45 「16U4SBSP」ミッションのイメージ .....                                                        | 53 |
| 図 1-46 CASSIE プロジェクトの概要と参加組織 .....                                                       | 54 |
| 図 1-47 HARRIER の実験装置 .....                                                               | 55 |
| 図 2-1 ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ(左上)とレクテナ(右上と下)(Credit : NRL) .....                 | 59 |
| 図 2-2 MIT の HUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電による LED 点灯実験(Credit : NRL) .....                    | 59 |
| 図 2-3 Whisper Beam トランスミッタ(下部の金属リング)から上空 3m の照明への無線電力伝送実証 .....                          | 61 |
| 図 2-4 ドローンに電力を供給する 4 台のワイヤレス給電トランスミッター .....                                             | 62 |
| 図 2-5 Reach Power 社 CEO の Chris Davlantes 氏のデモの様子 .....                                  | 63 |
| 図 2-6 2022 年 9 月に Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証 .....                    | 64 |
| 図 2-7 2021 年 5 月に実施した屋内試験のプロトタイプアンテナ(左)／2022 年 6 月に実施したフィールド試験の建屋(右)(Credit:Emrod) ..... | 65 |
| 図 2-8 Airbus' Munich Area Site での実証実験システム(Credit:Emrod) .....                            | 66 |
| 図 2-9 KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験 .....                                                  | 68 |
| 図 2-10 KERI における研究開発目標と内容 .....                                                          | 68 |
| 図 2-11 KARI/KERI におけるエアロスタットへの無線電力伝送実験(1.81km) .....                                     | 69 |
| 図 2-12 POWER プログラムの開発内容(Credit : DARPA) .....                                            | 71 |
| 図 2-13 アラバマ州にある Above: Space Development 社の施設において行われたラボ・ベンチテスト .....                     | 72 |
| 図 2-14 DoD の POWER ビーミングソリューションコンセプト .....                                               | 74 |
| 図 2-15 中国西北工業大学が開発した ODD (Optics-driven Drone)と飛行試験の様子 .....                             | 75 |
| 図 2-16 近い将来のアプリケーションと SBSP に向けたパワービーミングのロードマップ .....                                     | 76 |
| 図 2-17 GuRu 社の無線で飛行するドローンの実証 .....                                                       | 78 |
| 図 2-18 東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証 .....                                            | 79 |

---

## 表 目次

---

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 表 1-1 Space Based Solar Power Innovation Competition で実施されているプロジェクト ..... | 32 |
| 表 1-2 各国の SSPS に関するロードマップの比較.....                                         | 57 |



## 1. 各国の宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査

---

本章では、米国、欧州、中国、その他を対象地域として、近年の宇宙太陽光発電システム(SSPS: Space Solar Power Systems)の実現に向けた研究開発およびFS(Feasibility Study)について調査を行う。以下では諸外国における近年のSSPSの実現に向けた研究開発動向について国ごとに整理する。

なお、宇宙太陽光発電システムの呼称については、研究実施機関ごとにシステムの呼称が異なっているものの、ここ数年は欧米の多くの機関でSBSP(Space-Based Solar Power)の略称が用いられてきている。本報告書では、実施機関ごとに通常用いられている略称を使用することとするが、特に定まっていない一般的な宇宙太陽光発電システムを指す場合はSSPS(Space Solar Power Systems)という略称を用いることとする。

### 1.1 米国

米国では、SSPSに関する研究開発を進めるための国家戦略は存在していないが、現在の関連研究開発は主に米空軍研究所(AFRL:U.S. Air Force Research Laboratory)と米海軍研究所(NRL:U.S. Naval Research Laboratory)で行われている。また、教育機関としてはカリフォルニア工科大学(Caltech)も多額の寄付を受けて、個別にプロジェクトを実施中である。さらに近年は20年近くにわたりスタディを中断していたNASAによる再評価検討も行われた。以下に米国の各機関の近年の関連動向を示す。

#### 1.1.1 NASAのフィージビリティスタディ

米国では、1970年代の終わりに実施された米国エネルギー省(DOE:Department of Energy)／NASAとの共同研究である「SATELLITE POWER SYSTEM(SPS) CONCEPT DEVELOPMENT AND EVALUATION PROGRAM PLAN」から20年ほどの休止期間の後、1995年に実施されたNASAの「Fresh Look Study」によりSSPSの検討が復活した。その後「SSP Concept Definition Study」、「SSP Exploratory Research & Technology Program」、「SSP Concept & Technology Maturation Program」が実施されたが、2003年頃からは明確なSSPS関連予算の拠出は見られず<sup>1</sup>、2022年に至るまでNASAにおけるSSPS研究は事実上ストップした状況になっていた。

その後2022年から、NASAの技術・政策・戦略室(OTPS:NASA's Office of Technology, Policy and Strategy)は、政策アナリストであるNikolai Joseph氏が中心となり“EVALUATING PROSPECTS FOR SPACE-BASED SOLAR POWER”というタイトルのスタディを開始した<sup>2</sup>。温室効果ガス排出Net Zeroを達成するためのSBSPの費用便益分析を行うこ

---

<sup>1</sup> 2011-12年にJohn Mankins氏(NASAでSSPS研究の指揮を執っていたが、民間企業に移籍)のSPS-ALPHAのコンセプト研究がNASAのNIAC研究(NASA Innovative Advanced Concepts)のテーマの一つに採択されている。

<sup>2</sup> <https://www.ag2link.com/wp-content/uploads/2023/05/annual-report.pdf> (2023年9月11日閲覧)

と、および便益がコストを上回ると評価された場合は、NASA がどの程度 SBSP の開発を支援すべきかについて検討を行うことがスタディの目的とされた。SBSP の新しいアーキテクチャを検討するのではなく、打上げコストの低減、技術(熱システム、エレクトロニクス、材料、太陽電池パネルなどの分野)の進歩、クリーンなエネルギー源への関心の高まりを背景として、宇宙で太陽エネルギーを収集し、それを電気からマイクロ波に変換し、地上に送信するための過去の概念を再検討することで、最新のシステムについて、地上の発電システムとの比較を行い、それらが直面する政策や実施上の課題を評価する予定でスタディは行われたが、Joseph 氏は、仮に SBSP が実現不可能であると結論づけたとしても、本スタディは有意義なものになる可能性があるということにも言及していた。

スタディ結果の報告は、当初の計画より遅延し、2024 年 1 月に”Space-Based Solar Power ”という題名の報告書として公表された<sup>3</sup>。本報告書の要点を以下に示す。

報告書では、2050 年に運用開始が可能である 2 つの SBSP アーキテクチャ(RD1:革新的なヘリオスタット群型、RD2:技術的に成熟した平面アレイ型)について(図 1-1 参照)、以下のシナリオに基づいてそれぞれライフサイクルコストと温室効果ガス排出削減の可能性が検討されている。

#### <SBSP のライフサイクルシナリオ>

- ・ SBSP システムは、2030 年代に地上で開発され、2040 年代に GEO で組立てられる。
- ・ SBSP システムは GEO で運用される。地上の 1 つまたは複数のステーションにエネルギーを送信する。
- ・ 新しい宇宙機モジュールの開発、打上げ、組立てを伴うメンテナンスは 2060 年から 2080 年にかけて行われる。
- ・ SBSP システム廃棄作業は、デブリ除去宇宙機の開発、それらの GEO への打上げ、宇宙機モジュールの墓場軌道への移動を行う作業であるが、2060 年から 2085 年の間に行われる。

以上のシナリオに基づき、2050 年から 2GW の電力を電力グリッドに供給する SBSP システムについて、NASA では SBSP の開発、組立、運用、保守および廃棄の全ライフサイクルにわたるすべてのコストと温室効果ガス排出量を計算するモデルを開発した。計算の結果、ライフサイクルコストについては以下の値が示された。(計算に用いた主要入力パラメータ値は図 1-2)

#### <ライフサイクルコスト分析の結果>

- ・ ベースライン分析では、RD1 のライフサイクルコストは 0.61\$/kWh、RD2 は 1.59\$/kWh となった。
  - 打上げ費用が最大のコスト要因となっている。(RD1 の 71%、RD2 の 77%)これらの打上げの大部分は、GEO に移送するために LEO にあるペイロードに燃料を補給するためのものである。

---

<sup>3</sup> <https://www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/> (2024 年 1 月 19 日閲覧)

- 製造は 2 番目に大きなコスト要因であり(RD1 で 22%、RD2 で 18%)初期の宇宙機ハードウェア開発と製造が含まれる。ラーニングカーブにより RD1 では 150 万個、RD2 では 200 万個の宇宙機モジュールを製造することでコストは減少する。
- 2050 年の地上の他の持続可能な解決策(再生可能エネルギー発電システム)の発電コストの予測値は 0.02~0.05\$/kWh 程度であるため、それらと比べると RD1 均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)と RD2 LCOE は、それぞれ 12~31 倍、32~80 倍高い結果となっている。
- ・ 感度分析により、入力パラメータを変化させ、RD1 と RD2 がどのような条件でコスト競争力を持つかの評価を行った。具体的には、打上げコスト、初号機製造コスト、ラーニングカーブ、ハードウェア寿命、太陽電池効率、軌道移送方法のパラメータを 1 つずつ変化させ、コストに与える影響の把握を行った。
  - 打上げコストの低減あるいは LEO から GEO への軌道移送に電気推進を使用することで LCOE はそれぞれ最も大幅に低下した。RD1 で約 0.20\$/kWh、RD2 で約 0.50\$/kWh となった。→コスト競争力という点では、まだ不十分である。
  - 複数のパラメータを同時に変化させることで、コスト競争力を持たせることができる。この有利な組み合わせにより、LCOE は RD1 で 0.03\$/kWh、RD2 で 0.08\$/kWh となる。この数値は、地上の他の代替エネルギーと競合可能な数値である。

#### <ライフサイクル温室効果ガス排出原単位の分析結果>

- ・ RD1 のライフサイクル温室効果ガス排出原単位は 26gCO<sub>2</sub>eq./kWh、RD2 は 40gCO<sub>2</sub>eq./kWh となった。
  - これらは地上の再生可能エネルギー発電技術の排出原単位の範囲内(13~43g CO<sub>2</sub>eq./kWh)の数値となっている。
- ・ 上述の複数のパラメータを同時に変化させ、コスト競争力を持たせた前提条件における温室効果ガス排出原単位は、RD1 では 3.78gCO<sub>2</sub>eq./kWh、RD2 では 4.33gCO<sub>2</sub>eq./kWh)となり、原子力や風力発電を下回る。

以上より、以下の条件が達成できるのであれば、温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP ソリューションが得られることが分かった。

#### <温室効果ガス排出量が少なく、コスト競争力のある SBSP の条件>

- ・ 打上げコストの低減:1 回当たり 5,000 万ドル、または 1kg 当たり 500 ドル
- ・ 電気推進による LEO から GEO への軌道移動
- ・ ハードウェア寿命の延長:15 年
- ・ より安価なサービサーとデブリ除去機:それぞれ 1 億ドルと 5,000 万ドル
- ・ 規模に応じた効率的な製造:85%以下のラーニングカーブ

本スタディではまた、SBSP を可能にする技術は、月面での電力供給、科学や有人探査のための自律的な運用、軽量材料など、将来の NASA ミッションのニーズに幅広く適用可能であることも示している。NASA は現在、これらの各分野の研究開発活動に資金を提供しており、宇宙でのサービス、組立、製造には 22 年度で～2 億 8,000 万ドル、自律性には 22 年度で～2 億 4,400 万ドルの資金が投入されている。一方、無線電力伝送への資金提供は現在、コンセプト・スタディ(100 万ドル未満)に限られている。

NASA の今後の選択肢としては、以下の 2 種類が考えられる。一つは、NASA は現行 SBSP のほぼすべての基礎技術に取り組んでいるため、今後 SBSP を予算の別項目として出さずに、NASA の現行あるいは計画されているミッションのニーズのみに焦点を当てていくことで開発していくことである。もう一つは、SBSP を推進するためのパートナーシップの機会を追求することである。自律運用から無線電力伝送に至るまで、SBSP に必要な技術は NASA のミッション以外にも多くのユースケースを有しており、多くの用途について官民によって追求されているため、外部(米国および国際的なパートナー)の SBSP 開発との協調を強化することで、相互に有益な見返りを期待することが可能である。

また NASA が今後どのような選択肢をとろうとも、厳密なライフサイクルコストと温暖化ガス排出量評価を行い、最先端の SBSP システムを研究すること、および NASA のミッションアプリケーション、特に月面エネルギーインフラなどのための SBSP 技術の技術的な設計トレード評価を実施することの必要性が示されている。さらに今後も NASA は世界の SBSP 開発の定期的なレビューを行い、NASA の基幹ミッションの実現をする可能性のある SBSP 設計の重点的な分析を行っていくことが推奨されている。

なお、John Mankins 氏を始めとする SSPS の研究者や全米宇宙協会(NSS:National Space Society)は、本報告書のコスト評価に使用された仮定について批判をしている。特に、ベースライン分析の打上げコストとして想定された「1,000 ドル/kg、さらに 15%のブロック買い割引」と GEO までの SBSP の輸送の方法について懐疑的であり、SBSP 技術に関する最近の研究があまり取り入れられていないとの主張を行っている<sup>4</sup>。

---

<sup>4</sup> <https://spacenews.com/nasa-report-offers-pessimistic-take-on-space-based-solar-power/> (2024 年 2 月 2 日閲覧)

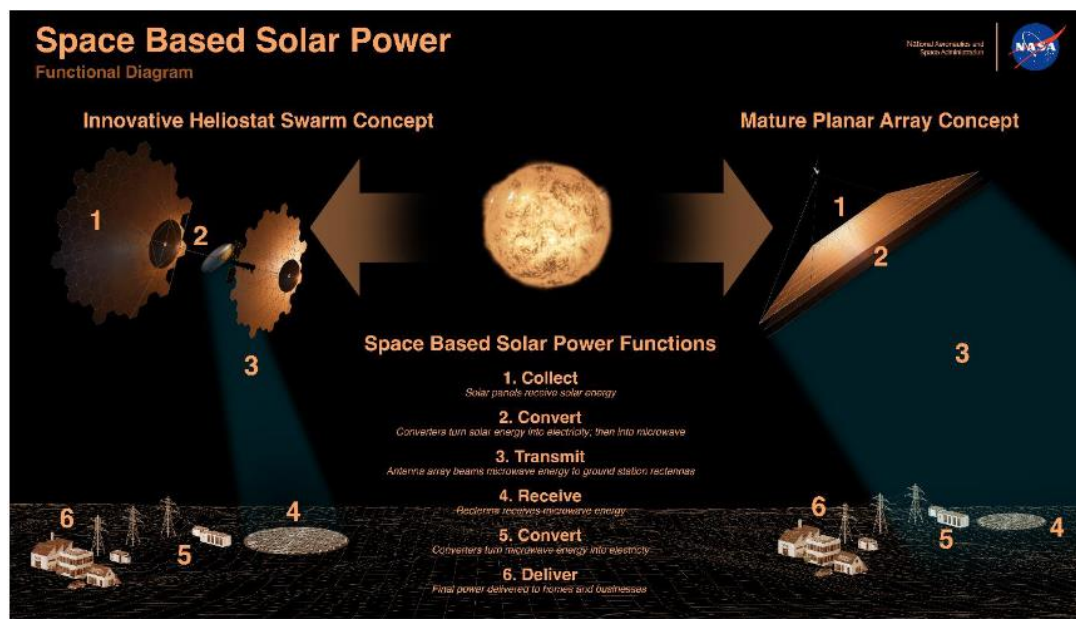


図 1-1 NASA スタディにおける SBSP のリファレンスデザイン(左:RD1、右:RD2)  
出所)“ Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

|                                                                         | Baseline                   | Multi-Variable Sensitivity                          |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Launch Cost</b><br>(+15% block buy discount)                         | ▲<br>\$1,000/kg (\$850/kg) | ▲<br>\$500/kg (\$425/kg)                            |
| <b>Orbital Transfer Method</b>                                          | ■<br>12 refuel launches    | ▲<br>Electric Propulsion<br>(+17.2% mass, mtg cost) |
| <b>Reuses of each launch vehicle</b>                                    | ▲<br>100                   | ▲<br>100                                            |
| <b>Solar Cell Efficiency</b>                                            | ■<br>35%                   | ▲<br>50%                                            |
| <b>Operations Costs</b>                                                 | ▲<br>1.2M / month          | ▲<br>1.2M / month                                   |
| <b>Hardware Lifetime</b>                                                | ▼<br>10 years              | ■<br>15 years                                       |
| <b>Initial Hardware Costs</b><br>(Module, Servicer, Debris)             | ▲ 1 M   ▼ 1 B   ■ 500 M    | ▲<br>1M, 100M, 50M                                  |
| <b>Manufacturing Learning Curves</b><br>(Module, Servicer, Debris)      | ▲ 75%   ■ 85%   ▼ 90%      | ▲ 70%, 80%, 85%                                     |
| <b>Results</b>                                                          |                            |                                                     |
| <b>LCOE \$/kWh</b><br>Renewables studied: .02 - .05                     | 0.61 and 1.59              | 0.04 and 0.08                                       |
| <b>Emissions (gCO<sub>2</sub>eq./kWh)</b><br>Renewables studied: 8 - 43 | 26 and 40                  | 3 and 4                                             |

図 1-2 ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ  
※ 上向きの緑の三角形は、現在までに達成された以上の性能を想定したもの、黄色のバーは現在達成可能なもの、下向きの赤い三角形は、現在の能力を下回るものである(これらは、SBSP システムの研究が世界初であることを考慮した仮定である)

出所)“ Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

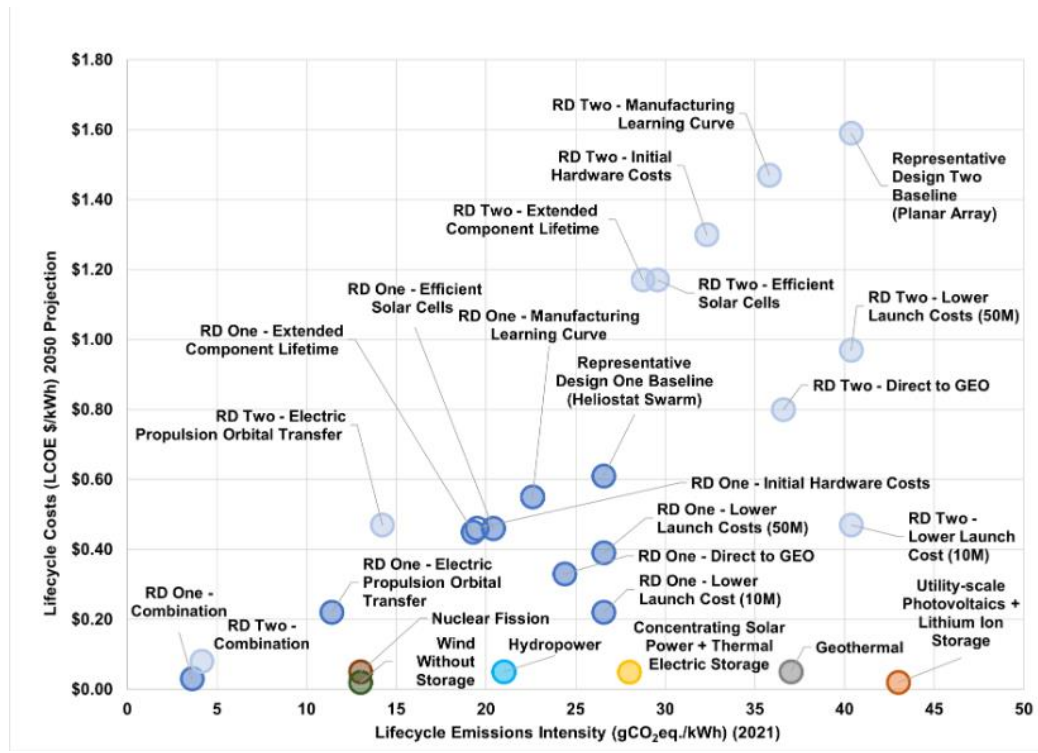


図 1-3 SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果

出所) “Space-Based Solar Power”, NASA OTPS, Report ID 20230018600, Jan 2024

### 1.1.2 米海軍研究所(NRL)の X-37B および ISS 上による軌道上実証

NASA による SSPS 研究開発が 2000 年代前半以降に停滞し、近年の米国の SSPS 研究開発の中心は米空軍研究所(AFRL:USAF Air Force Research Laboratory)と米海軍研究所(NRL:U.S. Naval Research Laboratory)となっている。2007 年 10 月、国家宇宙安全保障局(NSSO:National Security Space Office)が SBSP フィージビリティスタディの中間評価レポート「Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security」を公表して以降、Paul Jaffe 氏を代表とする NRL の研究者たちが本分野の調査や無線電力伝送に関わる要素試作試験等を実施してきている。

2020 年 5 月、NRL は PRAM-FX(Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment)(図 1-4)と呼ばれる約 30cm 四方のモジュールを試作し、空軍の X-37B 軌道試験機(OTV)に搭載して打上げ、軌道上実証試験を実施、軌道上飛行試験のデータを取得した。ただし本実験においては、モジュールのエネルギー生成効率と温度特性のデータ取得が目的であるため、マイクロ波送電実験は行っていない。なお同ミッションは X-37B の 6 度目のミッション(OTV-6)であり、PRAM-FX を搭載した X-37B は、2022 年 11 月に 908 日間の飛行を終えてケネディ宇宙センターに帰還している<sup>5</sup>。

<sup>5</sup> <https://www.spaceforce.mil/News/Article/3217077/x-37b-orbital-test-vehicle-concludes-sixth-successful-mission/> (2022 年 12 月 9 日閲覧)



NRL はまた、DoD の STP (Space Test Program) の H9 ミッションの一環として、2023 年 3 月に SWELL (Space Wireless Energy Laser Link) と呼ばれるレーザー電力ビーム実験ペイロード(図 1-5)を ISS に打上げた。SWELL は、2023 年 6 月 29 日時点で 100 日間の稼働記録を達成しているが、NRL は本実験を「宇宙でのレーザー電力ビーム実験の初の成功例」としている。SWELL は、1.45m の距離のレーザー電力伝送を行い、レーザー受信機より約 1.5W の出力を得ることに成功している。レーザー電力伝送のエンドツーエンドの効率としては、約 11% を達成し、当初の効率目標を 10 倍以上上回ったとしている。SWELL のプロジェクトマネージャーは Chris DePuma 氏であるが、上述の Paul Jeff 氏も本研究を主導する立場となっている。本実験は 1 年間の継続が予定されており、調達および維持担当国防次官室(OUSD (A&S): Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment)が資金を提供し、運用エネルギー性能向上基金(OECIF: Operational Energy Capability Improvement Fund)が支援を行っている<sup>6</sup>。

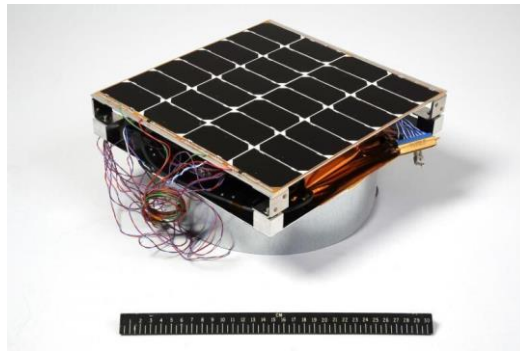


図 1-4 NRL の PRAM-FX 装置

出所) <https://www.cbc.ca/radio/quirks/a-secret-military-space-plane-is-carrying-an-experiment-to-harvest-power-from-space-1.5590837> (2022 年 2 月 2 日閲覧)

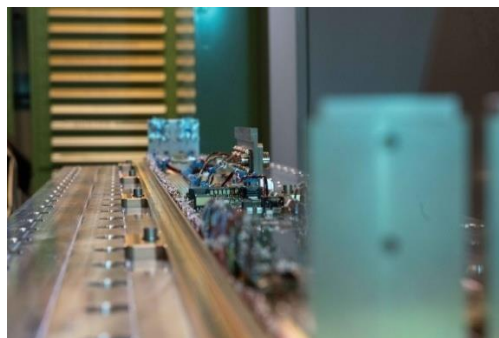


図 1-5 NRL の SWELL 装置

出所) <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3328656/nrl-to-launch-first-in-space-laser-power-beaming-experiment/> (2023 年 9 月 14 日閲覧)

<sup>6</sup> <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/3457305/first-in-space-laser-power-beaming-experiment-surpasses-100-days-of-successful/> (2023 年 9 月 14 日閲覧)

### 1.1.3 米空軍研究所(AFRL)の SSPIDR

2019 年夏に、AFRL の Space Vehicles Directorate において SSPIDR(Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research)プロジェクトが始動した。世界中の遠征部隊に低コストおよび低リスクで常に安定したロジスティックに優れた電力を供給するために、革新的な SSPS 技術とハードウェアを開発することを目的とする。本プロジェクトは SSPS のプロトタイプに必要な要素技術を段階的に開発するプロジェクトであり、現在、地上実験を含む 3 つの実験を計画し一部遂行中である。中でも図 1-6 に示す「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験は革新的なサンドイッチ・タイルを使用して、太陽エネルギーを高周波(RF)電力に変換する新たな技術を実証するとともに、そのエネルギーを地上に伝送して使用可能な電力に変換する可能性を示すもので、2025 年に打上げ予定となっている。バスとなる Helios ESPA リングとペイロードとなる SSPRITE(Space Solar Power RF Integrated Tile Experiment)を Northrop Grumman 社が製造しており、その契約金額は 1 億ドル以上となっている。2021 年 12 月には、AFRL と Northrop Grumman 社とで、サンドイッチ・タイルによる太陽光(ソーラーシミュレータ)から RF エネルギー変換を行う地上実験に成功している。

これらの米軍関係の機関で取組まれている SSPS は、軍のロジスティクスの課題に対応することが主目的となっており、電力インフラがない(もしくは破壊された)戦場の部隊に対して必要なときにいつでも電力を供給することを想定している。一方で商業的に非常に価値のある資産となる可能性や気候変動に対処するための新たな解決策になる可能性についても言及されており、さらにはシスルナ空間を移動する衛星への電力供給や、要素技術の民生への展開も視野に入れるところとなっている。



図 1-6 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL)

出所)<https://afresearchlab.com/technology/arachne/> (2023 年 1 月 16 日閲覧)

### 1.1.4 カリフォルニア工科大学(Caltech)の実証衛星打上げ

カリフォルニア工科大学(Caltech:California Institute of Technology)は 2013 年に Donarld Bren 氏による 1 億ドルの寄付を受けて SSPS 関連の研究開発を本格的に開始した。(寄付の内容(人名、金額)は当初は秘匿されていた。)2015 年には Northrop Grumman 社から 3 年間で 1750 万ドルの受託研究契約を締結し、50 名以上のチームを組み、両機関による Space Solar Power Initiative(SSPI)を開始した。

2017 年からは超軽量・高効率の太陽電池と RF 送信機を統合させたモジュールや折り畳み可能な柔軟超軽量構造体のプロトタイプを試作試験を行い、軌道上実証機 SSPD(Space-based Solar Power Demonstrator)の開発を行ってきた。約 35 名のチームによって構想から設計、製造、テストまでが実施されている。研究代表者は 3 名の教授(Professor Harry Atwater, Professor Ali Hajimiri, Professor Sergio Pellegrino)が務めている。

当初は SSPD-1 は VIGORIDE 軌道上サービス機(Momentus 社製)に結合され、2021 年 12 月に打上げられる予定となっていたが、VIGORIDE の製造の遅延等によりスケジュールが遅れ、実際には 2023 年 1 月、Falcon 9 による打上げ(Transporter-6)で軌道に投入されている<sup>7</sup>。

具体的には、SSPD-1 は 3 つの主要な重要要素技術の試験(DOLCE、ALBA、MAPLE)を行うことを目的とする質量 42.5kg の実証機である。(図 1-7 参照)VIGORIDE に結合され、所定の軌道まで輸送されたが、3 つの構成要素の概要は以下のようになっている。

#### <SSPD の 3 つの主要な構成要素>

- DOLCE (Deployable on-Orbit ultraLight Composite Experiment):1720mm×1720mm×34mm、質量 300g の構造体。モジュール式宇宙機のアーキテクチャ、収納方式、展開機構等の実証を行う。
- ALBA:宇宙という過酷な環境下においての最適な効率と耐久性の高い太陽電池の種類を評価できるように 32 種類の異なる太陽電池(PV)セルを集めたもの。初期の機能検証から、異なる環境下での性能の経時的評価まで、一連の実験が行われる。最長 6 カ月の実験が計画されている。
- MAPLE (Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment):マイクロ波送信を行う柔軟軽量アレイ。精密なタイミング制御により、2 つの異なる受信機に選択的に電力を集中させ、宇宙空間における無線電力伝送を実証する。

上述したように、SSPD 実証機の打上げは 2023 年 1 月であったが、同年 6 月には実験の成果が公表された。実験では、上記の MAPLE で、マイクロ波送信アレイから約 1 フィート(約 30cm)の距離にある 2 つの独立した受信アレイでエネルギーを受信し、直流(DC)電力に変換して、それを使って 1 対の LED を点灯させた。(図 1-8 参照)さらに MAPLE では、地上に向けてマイクロ波信号を送信する実験も行われ、カリフォルニア工科大学のパサデナ・キャンパス内の建物の屋上にある受信機でその信号の受信にも成功した。なお MAPLE の装置は密閉環境にはないため、今回の実験により、極端な温度変化やその他の厳しい宇宙環境下でも、マイクロ波による無線送電が可能であることの実証もなされたことが示されている。

---

<sup>7</sup> <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2023 年 1 月 16 日閲覧)



図 1-7 SSPD 実証機と構成要素(左)／DOLCE の展開実験イメージ(右上)／MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート(右中央)／SSPD を VIGORIDE に結合する様子(右下)(Credit : Caltech)

出所)<https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-launch-space-solar-power-technology-demo-into-orbit-in-january> (2023 年 1 月 16 日閲覧)



図 1-8 MAPLE の内部の写真。右側:送信アレイ、左側:受信機(Credit : Caltech SSPP)

出所)<https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space> (2023 年 9 月 14 日閲覧)

### 1.1.5 米国における近年のその他の動き

#### (1) IEEE による提言

2023 年 4 月、米国電気電子技術者協会(IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers)は SBSP に関する提言を発表した<sup>8</sup>。本提言では、この構想への賛否両方の意見を整理している。推進派は、実用化にはまだ数十年かかるかもしれないが、いくつかのメリットがあると主張し、

<sup>8</sup> <https://transmitter.ieee.org/space-based-solar-power-a-future-source-of-energy/> (2024 年 1 月 22 日閲覧)

地上では不可能な夜間や曇りの日でも太陽光発電が利用できるほか、宇宙空間の太陽光は無尽蔵のため地上とは比較にならない規模の発電が可能としている。一方、反対派は克服しなければならない膨大な数の技術的障害があると指摘する。例えば、宇宙で太陽光パネルアレイを組立てる技術や、地球にエネルギーを送電する技術、費用対効果とエネルギー効率の良い方法で資材を軌道に打ち上げる技術などの困難さを挙げている。また、2023 年の IEEE 次期会長で終身フェローの Thomas Coughlin 博士は、「SBSP は、技術的な課題はあるものの、将来人類にとって重要なエネルギー源になる」「宇宙空間での資源開発や産業発展を支える電力として利用されることになる」と確信している」と述べている。

## (2) 米下院における SBSP に関する法案の可決

2023 年 6 月、Kevin Mullin 下院議員(民主党、カリフォルニア州選出)が H.R.2988 に対する修正案を提出し、修正案は、超党派の委員会投票により圧倒的多数で可決された。H.R.2988 法案は、NASA と米エネルギー省に対し、推進力、人工知能、天体物理学、地球科学、量子コンピューティングなどの主要な研究開発分野で協力するよう指示するものであったが、本修正案<sup>9</sup>では、そのリストに宇宙を利用した太陽光発電を加えたものとなっている。

(修正案原文:ground- and space-based technology necessary for the transmission to the Earth's surface of solar energy collected in space;)

本法案は、直ちに予算が提供されることを約束するものではないが、米議会が SBSP の可能性を探ることに関心を持っていることを示すものであるとして、SBSP のコミュニティからは大きな支持を得られている<sup>10</sup>。

## (3) Space Frontier Foundation による SBSP 商業化促進に関する活動

宇宙フロンティア財団(SFF:Space Frontier Foundation)<sup>11</sup>では、米国における SBSP の商業化を促進し、持続可能な技術として確立することを目指して、ステークホルダーの教育と連携構築、議会との連携、情報のハブとしての役割等に関する活動を継続的に行っている<sup>12</sup>。

2024 年 5 月には、ワシントン D.C.で Special Competitive Studies Project と共同で開催した「AI Expo for National Competitiveness」において、SBSP に関するワークショップを実施した。ワークショップでは、防衛、ハイテク、ベンチャーキャピタル、人道支援といった幅広い業界の代表者が参加し、それぞれの分野でこの技術をどのように開発・利用できるかを議論した。議論の中では、データセンターや人道支援、国防分野など多様な業界で SBSP の活用が期待されていることが示されるとともに、国際協力の必要性が指摘され、OPEC のような SBSP 管理組織の設立が提案された。また技

<sup>9</sup> <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-117hr2988rh/pdf/BILLS-117hr2988rh.pdf> (2023 年 9 月 22 日閲覧)

<sup>10</sup> <https://www.theweek.in/news/sci-tech/2023/06/16/space-based-solar-power-a-promising-source-of-clean-energy.html> (2023 年 9 月 22 日閲覧)

<sup>11</sup> SFF は 1988 年に設立された非営利組織であり、宇宙を人類の定住地として開拓することを使命とした活動を行っている。宇宙活動家、科学者、エンジニア、メディアや政治の専門家、起業家および一般市民など、多様なメンバーで構成されている。

<sup>12</sup> <https://spacefrontier.org/space-based-solar-power/> (2025 年 2 月 3 日閲覧)

術競争を促進するため、米国内で複数の開発拠点を形成するべきとの意見もあった。さらに投資家は規制整備や短期目標の設定が資金調達を加速させると考えていることも示された<sup>13</sup>。

## 1.2 欧州

近年では、SpaceX 社の Starship のような輸送機によって可能になる打上げコストの大幅な削減の見通しと、温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成するためのクリーンエネルギー源の需要の増加が、欧州の SBSP に対する新たな関心を呼び起こしている。2020 年には ESA が SBSP への取組みに関するアイデアを公募し、その後 2022 年 11 月からは、SOLARIS と呼ばれる SBSP 準備プログラムを開始している。SOLARIS では、SBSP の技術・経済的な側面からの実現可能性や安全性、環境性への影響などの評価を 2025 年末までに実施する予定となっている。以下では、それらの取組みの具体的な内容について示す。

### 1.2.1 ESA SOLARIS プログラム

#### (1) 背景とプログラムの概要

2002 年頃、ESA では SSPS 研究に関する欧州ネットワークを設立し、Advanced Concept Team を結成して、Leopold Summerer 氏を中心とした欧州 SSPS プログラムを進めてきた。2003 年には、総合研究プログラム(General Studies Programme)の中の事例検討フェーズで、2020/30 年を想定して地上でのソリューションとの比較検討を行ったが、この段階で SSPS は技術的には可能であるが、数十 GW を超えない限り地上プラントより優位には立てないとの結論に至り、その後は予算がつくような SSPS 研究は行われてこなかった。

しかし、長期間の活動休止の後、ESA は 2020 年 9 月に Discovery and Preparation 部門の OSIP(Open Space Innovation Platform)を利用して SBSP(Space-based solar power)の技術やコンセプトに関するアイデア・コンセプト募集のオンライン・キャンペーンを開始した。(1.21.2.2 で詳述)

また 2021 年 3 月 31 日に発行された「ESA Agenda 2025 Make Space for Europe」の中で、5 つの緊急的な優先事項の中の 1 つである「BOOSTING COMMERCIALISATION FOR A GREEN AND DIGITAL EUROPE」において、エネルギー転換をサポートする宇宙ベースのサービス space-based solar power generation の可能性について、調査を進める必要があると言及された。

このように ESA では 2020 年頃から SSPS に関する取組みが再開されたが、2022 年 8 月中旬、ESA の Josef Aschbacher 事務局長は SBSP は欧州のカーボンニュートラル<sup>14</sup>とエネルギー自立を達成する上での重要な一歩となるとした上で、SOLARIS と呼ばれる欧州向け SBSP 準備プログラ

<sup>13</sup> <https://www.powermag.com/space-based-solar-power-for-u-s-energy-independence/> (2025 年 2 月 3 日閲覧)

<sup>14</sup> 欧州は「2050 年までの気候中立」の達成を、EU 域内で拘束力のある目標として法制化している。



ムを立ち上げるべく、2022 年 11 月に開催予定の閣僚級理事会<sup>15</sup>において各国に資金提供を要請すると発表した<sup>16</sup>。

実際に 2022 年 11 月 22 日～23 日に行われた ESA 閣僚級会議では、ESA 予算を 2019 年の前回の閣僚級会議時と比較して 17%増、すなわち今後 5 年間で合計 169 億€増額することが決定されている。このうち 2 億 4400 万€は、SOLARIS プログラムが該当する ESA の一般支援技術プログラム(GSTP:General Support Technology Programme)のために確保されたとのことであるが、具体的な SOLARIS への予算額については本会議時には決定されておらず、12 月初旬にメンバーで議論する予定とされていた<sup>17</sup>。

このような動きとなった背景には、2022 年 2 月～7 月に行った ESA から並行して発注された<sup>18</sup>2 つの独立した費用便益分析研究(Frazer-Nash Consultancy 社および Roland Berger 社)の研究結果がある。両レポートは欧州における SBSP のビジネスケースを評価したものであり、分析の結果、拡大するエネルギー危機に対処するために必要な SBSP 技術を発展させるための投資を強く推奨しているものとなっている。

SOLARIS は SBSP に関連する技術的な問題を解決するための 3 年間の研究であり、そのスタディ結果は、2025 年の次の閣僚会議において本格的な SBSP 開発の推進を決定するための検討材料とされる。2040 年に商用スケールのプラントを構築することを目標にロードマップを描き、ロードマップの最初のステップとしてサブスケールの軌道上実証機を想定しているが、その計画については 2023 年から 2025 年にかけての準備プログラムの結果を受けて、2025 年に決定する予定となっている。(図 1-9 参照)プロジェクトマネージャーは S.Vijendran 氏が務めている。研究予算は 100 億円程度とみられている<sup>19</sup>。

なお ESA が発表した SOLARIS の YouTube([https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/SOLARIS2](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS2)、2022 年 8 月 16 日公開)(図 1-10 参照)においては、この取り組みは将来のクリーンなエネルギー源を見つけるための欧州の動きの一部であると説明されている。

今後 SOLARIS では技術的、政治的、プログラムの基礎を確立するために必要な主要な開発領域を中心に引き上げ、技術的実現可能性を成熟させ、SBSP の利点、実施オプション、商業的機会、コスト、リスクを評価するために、欧州産業界と協力してシステムレベルの研究および技術開発に取り組むことが想定されている。また潜在的な環境・健康・安全問題、規制、国際宇宙政策の調整に関連する課題についても検討を行う。さらに SBSP が経済的、技術的、その他の面で実現できないと判明した場合に

<sup>15</sup> 2～3 年に 1 度開催される。前回は 2019 年 11 月に開催されている。

<sup>16</sup> Josef Aschbacher の公式 Twitter:2022 年 8 月 16 日版、  
<https://twitter.com/AschbacherJosef/status/1559553713466970119>  
<https://spacenews.com/esa-to-request-funding-for-space-based-solar-power-study/> (2022 年 10 月 5 日閲覧)

<sup>17</sup> <https://buildindigital.com/space-based-solar-farms-could-power-up-within-a-decade/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

<sup>18</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/ESA\\_reignites\\_space-based\\_solar\\_power\\_research](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/ESA_reignites_space-based_solar_power_research) (2022 年 12 月 14 日閲覧)

<sup>19</sup> [https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02438/122200034/\(2024年1月15日閲覧\)](https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02438/122200034/(2024年1月15日閲覧))

備えて、SBSP に必要とされるかもしれないが、他の用途(軌道上での製造／サービスなど)にも有用な技術を調査・開発することにも焦点を当てる、とされている<sup>20</sup>。SBSP の実現に必要な技術分野(宇宙製造・組立、宇宙ロボット、再使用ロケット、高効率太陽光発電、ISRU、マイクロ波電力ビームなど)はすべて、他の複数の宇宙アプリケーションに応用され、利益をもたらすため、後に SBSP を続行しないことが決定されたとしても、研究開発技術の開発から得られる利益は、欧州の宇宙分野にとって貴重なものとなる、ことも示されている<sup>21</sup>。

以下に SOLARIS プログラムの具体的な目的を示す。

#### <SOLARIS プログラムの目的>

1. 2050 年までの欧州の温室効果ガス排出 Net Zero に貢献するクリーンエネルギーとして、SBSP の利点、技術的实现可能性、コスト、リスクを見極める。
2. SBSP の技術とシステムの開発および商業化において、欧州を国際協力に前向きなプレイヤーとして位置づける。
3. 欧州のエネルギー供給者、各国政府、欧州委員会の間で、SBSP がクリーンエネルギーの解決策となり得るという認識を高める。
4. 他国との国際協力の機会を確立する。
5. CM(Council Meeting)25 での決定を目指し、欧州の SBSP 開発プログラムに関する提案の技術的およびプログラムの基礎を準備する。

SOLARIS の本格始動に先駆けて、2022 年 7 月には、ESA は SBSP のための最先端技術と課題に関する RFI(Request For Information)を発出した。本 RFI はまた、ESA 加盟国全体の大・中・小の企業や団体が、SBSP に関連する将来の技術開発活動やシステム研究に参加することにどの程度関心があるかを調査することも目的としている。(本 RFI の締め切りは 2022 年 9 月であった)また RFI 発出と同時に SOLARIS プログラムで想定されている活動についても示された。(図 1-11 参照)

---

<sup>20</sup> <https://twitter.com/AschbacherJosef/status/1561730075938246658> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

<sup>21</sup> <https://spacewatch.global/2022/08/solaris-a-step-toward-making-space-based-solar-power-a-european-reality/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

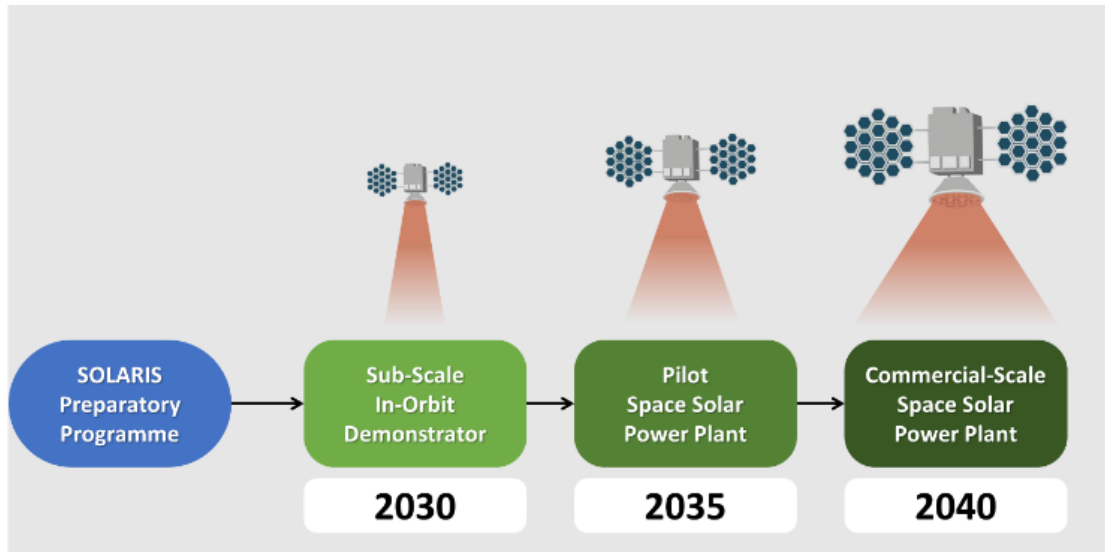


図 1-9 欧州 SBSP の想定ロードマップ

出所)“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA (Dec 2022)

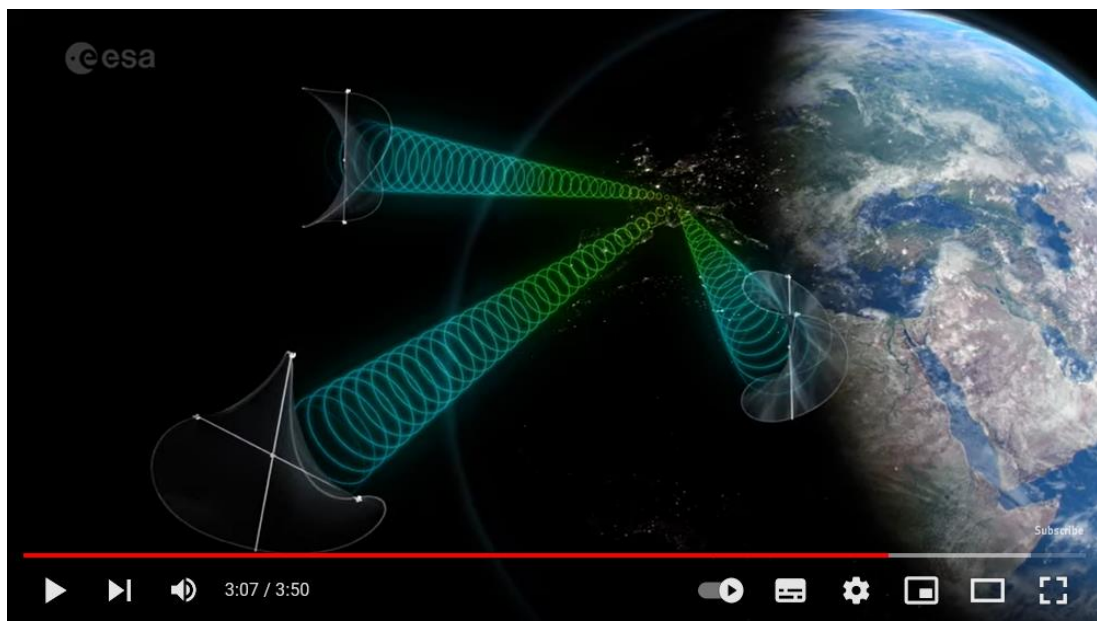


図 1-10 ESA SOLARIS の Youtube 紹介ページ (Credit : ESA)

出所) <https://www.youtube.com/watch?v=8ScTbb-43A4> (2022 年 10 月 5 日閲覧)

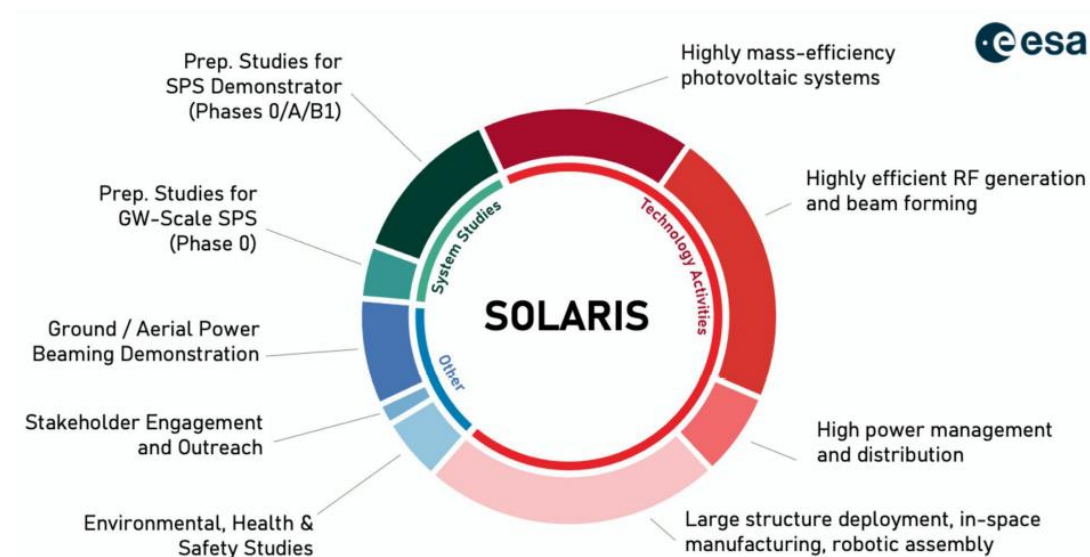


図 1-11 SOLARIS プログラムで想定されている活動

出所) “Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”, ESA The SOLARIS Team, 18/10/2022

## (2) SOLARIS の技術開発目標

2022 年 10 月 18 日、ESA は“SOLARIS Industry Day”を開催した。オランダの ESTEC (European Space Research and Technology Centre)によりバーチャル形式で、午前中は SOLARIS プログラムの概要に関する ESA のプレゼンテーションと関連企業等 (Airbus、Thales Alenia Space、OHb、Dassault Aviation、Equinor)によるシステムレベルのビジョン、午後は ESA と参加企業との二者面談が行われた。当日は、宇宙およびエネルギーの両分野から 30 社を含む 150 名以上が参加した<sup>22</sup>。ESA のプレゼンテーション“Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”の中では、SOLARIS プログラムの具体的な技術課題と図 1-12 に示す技術開発目標が示された。

### <SOLARIS プログラムにおける技術課題>

- ・ 高効率・軽量・低コストの太陽光発電システム
- ・ 高効率 DC-RF 変換
- ・ 高電圧電源管理・分配
- ・ 高精度なビーム形成
- ・ 大規模構造物展開、軌道上製造、ロボットによる組立、メンテナンス
- ・ 大型構造物の AOCS (Attitude and Orbit Control Systems) / GNC (Guidance, Navigation and Control)
- ・ 高エネルギー熱管理

<sup>22</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/Presentations\\_from\\_SOLARIS\\_Industry\\_Day](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Presentations_from_SOLARIS_Industry_Day) (2022 年 12 月 14 日閲覧)

- ・ 軌道上組立構造物のための宇宙機 AIT(Assembly, Integration and Test)
- ・ 軌道上デブリの軽減
- ・ システム寿命後の管理

なお、SOLARIS の技術活動と他の宇宙分野とのシナジーについては、以下のように示されている。

#### <SOLARIS の技術と他の宇宙分野とのシナジー>

- ・ 宇宙用太陽光発電システムの高効率・軽量・低コスト化⇒あらゆる宇宙用途でメリットあり
- ・ 高電圧電源管理アーキテクチャとコンポーネント⇒通信衛星と探査機へ直接応用が可能
- ・ 最先端大型アンテナ⇒通信衛星へ直接応用が可能
- ・ 大型構造物の軌道上での組立て、製造、モデリング⇒大型宇宙構造物(太陽電池アレイ、アンテナ構造、ラジエータ、望遠鏡、干渉計など)への適用可能

| Solar power conversion                                 | Minimum                 | Goal                    |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| End-of-Life Cell efficiency @ RT                       | 36%                     | 40%                     |
| Cells cost                                             | 1 €/W                   | 0.5 €/W                 |
| Cells + 100 um cover glass areal density               | 0.6 kg/m <sup>2</sup>   | 0.5 kg/m <sup>2</sup>   |
| Cell production capacity by 2035                       | 2 km <sup>2</sup> /year | 5 km <sup>2</sup> /year |
| Power management & distribution                        |                         |                         |
| Transmission voltage                                   | 300 V                   | 1000+ V                 |
| DC-RF conversion                                       |                         |                         |
| Conversion efficiency                                  | 75%                     | 90%                     |
| Wireless power transmission                            |                         |                         |
| Phased-array efficiency                                | 90%                     | 95%                     |
| Total antenna size (modular)                           | 1 km                    | 2 km                    |
| Total antenna size (monolithic)                        | 50 m                    | 100 m                   |
| Robotic in-orbit assembly and manufacturing            |                         |                         |
| Dimension of on-orbit manufactured/assembled structure | 1 km                    | 2 km                    |

図 1-12 ESA SOLARIS の技術開発目標

出所)“ Space-Based Solar Power Technology Challenges and Development Needs”, ESA The SOLARIS Team, 18/10/2022

### (3) SOLARIS Activity Plan

2022 年 12 月、“SOLARIS Activity Plan 2023-2025” が公表された<sup>23</sup>。本計画では SOLARIS の目標を達成するために、2023-2025 年の期間に実施すべき活動の概要を示している。本計画の内容は、2021 年から 2022 年の間に ESA が実施した準備活動の成果に基づいており、ESA の専門家との協議のもと、SBSP に関する近年の ESA および国際的な研究からのインプットを利用し、特に ESA の宇宙輸送システム局(D/STS:Directorate of Space Transportation

<sup>23</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/SOLARIS\\_activity\\_plan](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS_activity_plan) (2023 年 1 月 19 日閲覧)

Systems)など他の局で計画中の活動とも連携しながら策定されたものとなっている。図 1-13 に SOLARIS Activity Plan における主要活動分野を示す。

本計画ではまた、ESA はエネルギー分野の主要なステークホルダーと積極的に関わり、要件、ニーズ、エネルギー分野の境界条件をすべての開発の中心に据えることを目指していることが示されている。

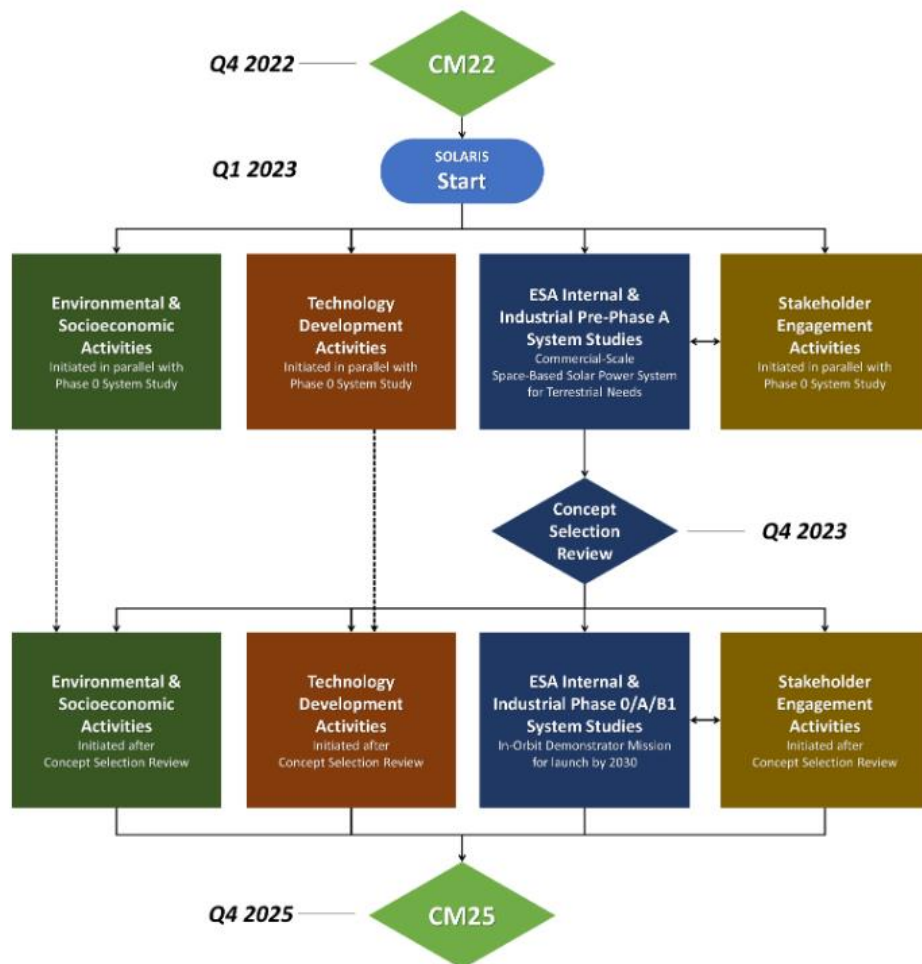


図 1-13 2023-2025 年の間に提案されている活動内容

出所)“SOLARIS Activity Plan 2023-2025”, ESA (Dec 2022)

## 1) Environmental & Socioeconomic Activities の内容

「Environmental & Socioeconomic Activities」に関する検討項目として、以下が示された。

### 1) Infrastructure and Interference

- SBSP システムの高周波干渉リスク評価と軽減(10 万€、30 万€)
- SBSP システムの外部干渉に対する感受性と、レジリエンス力向上のためのメカニズムの特定(20 万€)



## 2) Environment and Deployment

- SBSP を展開することによる環境影響評価(30 万€)

## 3) Human Health

- 人体への曝露データのレビューおよび様々なビーム特性に適用可能なリスク因子の評価(10 万€)
- SBSP 地上局に関連する公共および職業的な露出制限のモデルベースと実験による評価(50 万€)

## 4) Impact on the Terrestrial Ecosystem

- 高リスク種の特定と SBSP システムの特性に依存した影響評価(15 万€)
- SBSP が関連する動物に与える影響の実験的評価(40 万€)
- SBSP の二重土地利用を対象とした実験的評価(30 万€)

## 5) Impact on the Atmosphere

- SBSP の大気と電離層の相互作用の同定とモデリング(20 万€)
- SBSP の大気と電離層の相互作用の可能性をターゲットとした実験的研究(40 万€)

## 2) Technology Development Activities の内容

「Technology Development Activities」については、「Solar Generation」「Power Management and Distribution, and RF Generation and Accurate Beam Forming」「In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing and Maintenance」のタイトルごとに提案されている研究内容が示された。

| Activity Title          |                                                                                                                                   | Budget (k€)  |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Solar Generation</b> |                                                                                                                                   |              |
|                         | Development of low cost, high efficiency multi-junction space solar cells                                                         | 2,500        |
|                         | Development of large scale, lightweight, compact, efficient, cost effective, space compatible solar generators                    | 1,000        |
|                         | Preliminary development of very large (square kilometre scale) modular solar arrays with solar concentrators                      | 500          |
|                         | Adaptation of terrestrial-based cell technologies for use in SBSP applications                                                    | 500          |
|                         | Study of strategies to develop multiple scalable sources of solar cells and solar arrays                                          | 250          |
| To be updated further   | Novel Architecture and components for high-voltage, high power management and distribution for Space-Based Solar Power satellites | 4,000        |
| <b>Total</b>            |                                                                                                                                   | <b>8,750</b> |

Correction

| Activity Title                                 |                                                                            | Budget (k€)   |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>RF generation and accurate beam forming</b> |                                                                            |               |
|                                                | Antenna for MW demonstrator of Wireless Power Transmission                 | 15,000        |
| To be updated further                          | Antenna for GW Wireless Power Transmission                                 | 10,000        |
| To be updated further                          | High efficiency Solid State DC to microwave converting device demonstrator | 2,500         |
| To be updated further                          | Vacuum technology-based DC to microwave converting device demonstrator     | 2,500         |
| <b>Total</b>                                   |                                                                            | <b>30,000</b> |

[POTENTIAL ACTIVITIES FOR THE SPACE BASED SOLAR POWER SPECIFIC AREA IN GSTP ELEMENT 1. ESA-TECSF-IL-2022-004007, 19 Dec 2022](#)

For ESA Official Use Only – ESA Unclassified

| Activity Title                                                                             |                                                                                      | Budget (k€)   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing &amp; Maintenance of Very Large Structures</b> |                                                                                      |               |
|                                                                                            | Robotics Interfaces and tooling for SBSP Engineering (RISE)                          | 4,000         |
|                                                                                            | End to End Humanoid for Automation Non Compliances and Exceptions in SBSP (ENHANCES) | 6,000         |
|                                                                                            | Classes of Robotics Expert Workers for SBSP (CREWS)                                  | 5,000         |
| <b>Total</b>                                                                               |                                                                                      | <b>15,000</b> |

| Activity Title                                                                             |                                                                                                                                             | Budget (k€)   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>In-orbit Robotic Assembly, Manufacturing &amp; Maintenance of Very Large Structures</b> |                                                                                                                                             |               |
| To be updated further                                                                      | Development of on-orbit manufacturing technologies for very large SBSP spacecraft structures                                                | 7,000         |
| To be updated further                                                                      | Development of process verification and part validation approaches for on-orbit manufactured parts in very large SBSP spacecraft structures | 3,000         |
| To be updated further                                                                      | Development of enabling technologies for on-orbit servicing of solar power satellites                                                       | 5,000         |
| To be updated further                                                                      | Simulation software for modelling structure/AOCS coupling                                                                                   | 300           |
| To be updated further                                                                      | Structural modelling of very large space structures                                                                                         | 500           |
| To be updated further                                                                      | High load capacity coupling mechanisms                                                                                                      | 1,500         |
| <b>Total</b>                                                                               |                                                                                                                                             | <b>17,300</b> |

図 1-14 SOLARIS で提案されている Technology Development Activities

出所)“SOLARIS Technology Plan”, ESA, SOLARIS Research & Technology Day

## (4) SOLARIS Technology and Research Day

2023 年 3 月、1)項で示した SOLARIS の RFI の結果を示し、SBSP に関連する主要な研究の優先事項や課題について議論する場として、“SOLARIS Technology and Research Day”が開催された。学术界や産業界から 110 名を超える参加者があり、その中には国の宇宙機関からの参加者も含まれていた。

## (5) 2件のコンセプト・スタディ契約

2023 年 4 月、ESA は商用規模の SBSP に関する 2 件のコンセプト・スタディの契約を締結した<sup>24</sup>。タイトルは“Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”で、契約先は Arthur D Little (Belgium)社と Thales Alenia Space Italy 社となっている。2023 年末までに 2 件のスタディが並行して行われた。

### 1) Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR)スタディ

本スタディ<sup>25</sup>は、既存の太陽光発電インフラの利用を最適化し、その収益を最大化することを目的として、宇宙での太陽エネルギーを活用しグリーンエネルギーを生産する革新的なソリューションを検討するものである。2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero を達成するという欧州の公約の達成に貢献するものとして、グリーンエネルギーを最も早く市場に投入し、最も競争力のあるコストで生産することを目指す。具体的には、宇宙での太陽光を地上ステーションに直接反射するパッシブなリフレクタのコンステレーションを提案するもので、地上ではグリッド上で発電したり、水素を生成したりすることを想定している。年間エネルギー生産目標は 750TWh または 10 億トンとしている。図 1-15 に本システムのコンセプト図を示す。

本スタディでは上記のコンセプトをベースとして、コンセプト自体の SWOT 分析、システムのアーキテクチャ、システムの詳細、経済性および環境パフォーマンス、開発ロードマップ、主なリスクの評価等を行っている。

具体的なアーキテクチャとしては、図 1-16 に示すように 2 種類(DSR:DIRECT-SUN-REFLECTION および SCL:Space Coherent Light)のものを有望であるとして提案している。DSR(図 1-17 参照)は地上の太陽発電インフラに向けて直接太陽光を反射させるものであり、SCL は集光された太陽光から直接コヒーレントな光を発生させ、その後望遠鏡を設置し、パワーを拡散させるシステムとなっている。(図 1-18 参照)バックアップソリューションとして、GEO 上での SCL システムが提案されている。

<sup>24</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/ESA\\_developing\\_Space-Based\\_Solar\\_Power\\_plant\\_plans](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/ESA_developing_Space-Based_Solar_Power_plant_plans) (2023 年 9 月 19 日閲覧)

<sup>25</sup> <https://nebula.esa.int/content/pre-phase-system-study-commercial-scale-space-based-solar-power-sbsp-system-terrestrial> (2024 年 1 月 5 日閲覧)

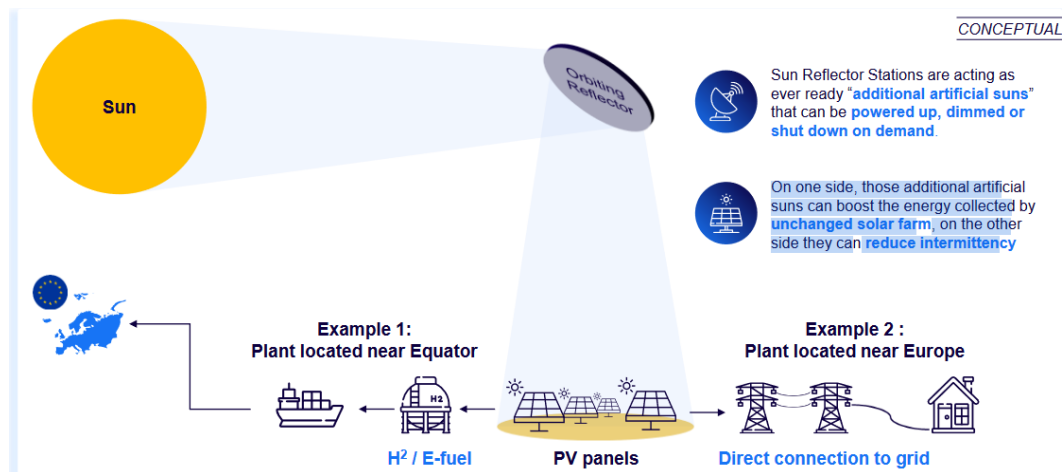


図 1-15 Arthur D Little 社の DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) コンセプト

出所) "DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY", Arther D Little, Dec 13<sup>th</sup> 2023

| Parameter                 | Architecture DSR                                                   | Architecture SCL                                             |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Orbit altitude            | 890 km (LEO)                                                       | 36 000km (GEO)                                               |
| Orbit inclination         | 1°                                                                 | 0°                                                           |
| Payload technology        | Direct Sun Reflecting with Multi Large mirrors                     | Space Coherent Light with multiple payloads                  |
| Final Output              | Solar Molecules and / or PV in Europe (tbd)                        | Electricity mainly but could be deployed for solar molecules |
| Location of the GPS plant | Near the equator in desert or off shore<br>Europe + outside Europe | Mainly Europe but possible elsewhere                         |
| Power range / GPS         | 5GW ideally and no more than 1GW on-grid                           | < 1GW ideally for electricity                                |
| Illumination period       | Extended day (depending on the LCOE and the environmental impact)  | 24/7                                                         |

図 1-16 Arthur D Little 社が提案する 2 種類のアーキテクチャ

出所) "DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY", Arther D Little, Dec 13<sup>th</sup> 2023

| Scenario variables                    |                           | System and hypothesis explanations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |
|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                       | Hypothesis                | <ul style="list-style-type: none"> <li>For ground stations, <b>satellites go over twice a day for 2 hours</b></li> <li>890km SSO<sup>2</sup> orbit allows for same local solar time and <b>orbital period multiple of 12 hours</b></li> <li>Located <b>above 800km</b> to avoid drag force</li> <li>Higher orbit would imply larger spot size on Earth (proportional)</li> </ul> |  |
| Orbit                                 | SSO <sup>2</sup> at 890km |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Number of reflectors                  | 3,987 (parabolic)         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Diameter of reflectors                | 1km                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Reflectors in visibility <sup>1</sup> | 252                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Spot on Earth diameter                | 8.3km                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| Irradiance on Earth                   | 1,000W/m <sup>2</sup>     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |

図 1-17 DSR アーキテクチャの説明

出所) "DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY", Arther D Little, Dec 13<sup>th</sup> 2023

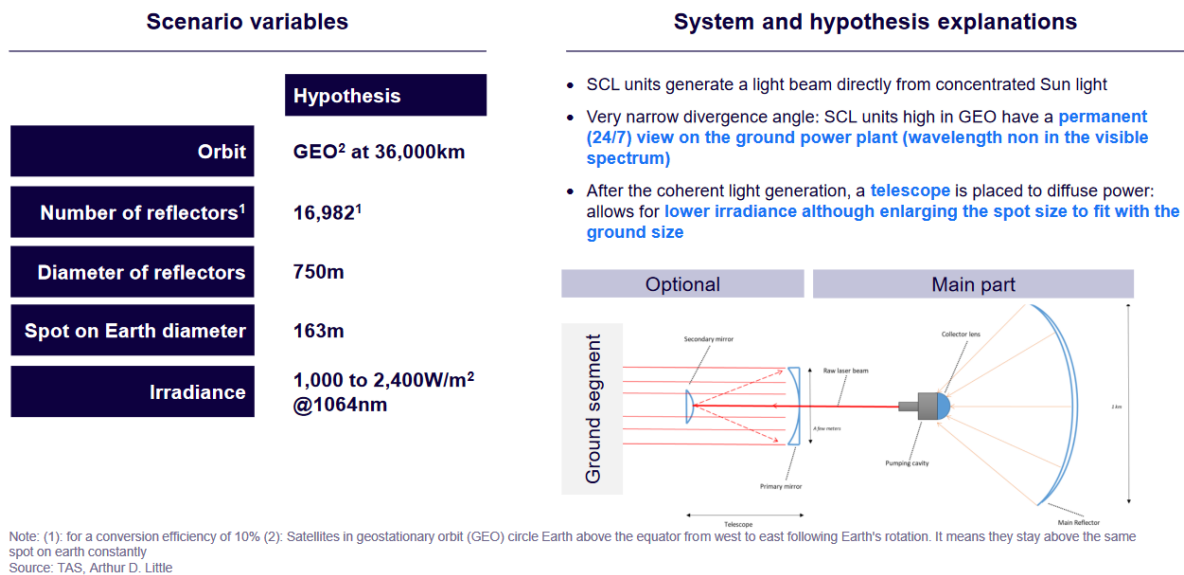


図 1-18 SCL アーキテクチャの説明

出所)“DIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) PRE STUDY”, Arther D Little, Dec 13<sup>th</sup> 2023

## 2) Thales Alenia Space Italy 社のスタディ

本スタディ<sup>26</sup>では、SBSP の利点は風力や地上の太陽エネルギーと比較した場合、一年中、昼夜を問わず、天候に左右されずにエネルギーを供給できることであるとし、SBSP リファレンスシステムとして最大 1GW±TBD%の 24 時間 365 日利用可能な定常ベースロード電力を供給可能であるものを想定し、GEO 上の SPS(Solar Power Satellite)からスペインにある地上ステーション(GPS:Ground Power Station)にエネルギー供給するシステムを想定した。

図 1-19～図 1-20 に本スタディにおけるリファレンスシステムの形状と寸法等を示す。周波数としては 5.8GHz、太陽電池はペロブスカイトを使用することが想定されている。また輸送シナリオとしては、一度 LEO まで SPS カーゴを輸送してから Orbital Tugs により SPS を GEO まで輸送し、GEO でロボットによる組立を行うシナリオを選択している。組立て期間は 2 年間を想定しているが、組立てが完了する前のミッションの初期段階や軌道上での軌道上試験においても、電力を抑えたモードで作動させることができる、としている。システムの各部で想定されているエネルギーの流れ(変換効率)を図 1-21 に示す。

スタディでは、上記のリファレンスシステムに対して CO2 排出量およびコスト計算も行っている。コスト計算においては、1) SPS コスト、2) 打上げ及び軌道間輸送コスト、3) 地上セグメントコスト、4) その他(運用コスト、開発コスト、保険等)の 4 つに分けてコスト算出を行っている。図 1-22 に SPS 初号機のコストと運用コストを含む総ミッションコストを示す。また図 1-23 に、30 年間運用を想定したときの発電コストを示す。(初号機:0.158 \$ /kwh、10 機目:0.143 \$ /kwh)

<sup>26</sup> <https://nebula.esa.int/content/pre-phase-system-study-commercial-scale-space-based-solar-power-sbsp-system-terrestrial-0> (2024 年 1 月 5 日閲覧)

最後に、本スタディの結論として、技術的、経済的、プログラムの側面から総合的に判断すると SBSP は持続可能な変革の可能性を秘めたエネルギーソリューションとして有望であるとし、今後はさらなる研究開発と国際協力が鍵となる、としている。

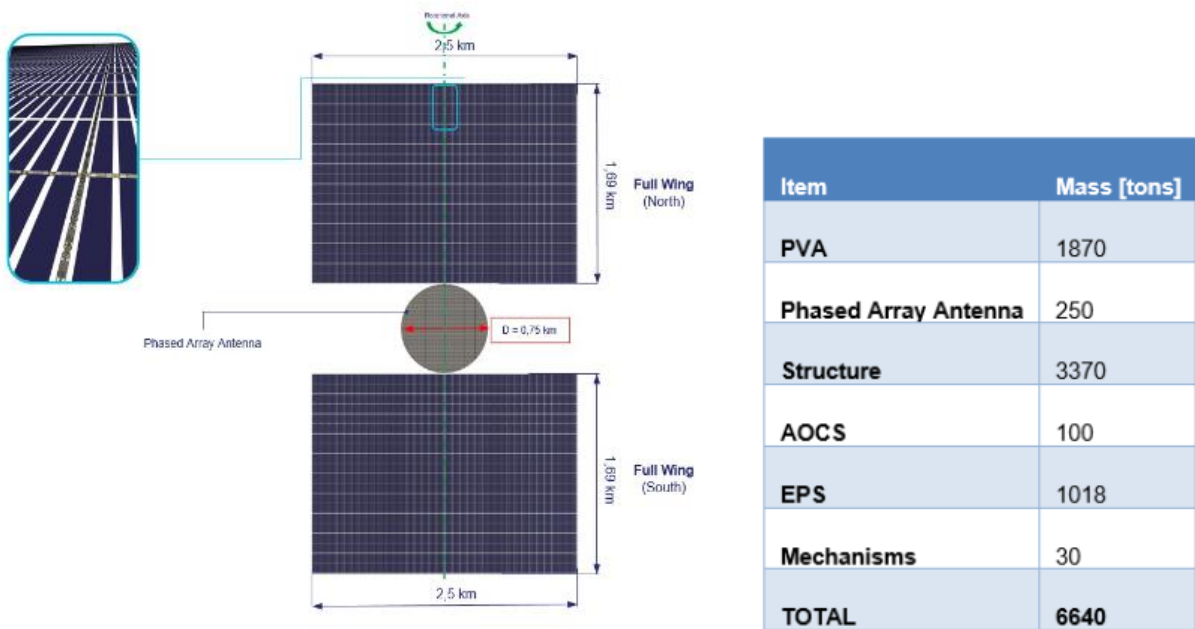


図 1-19 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(宇宙部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

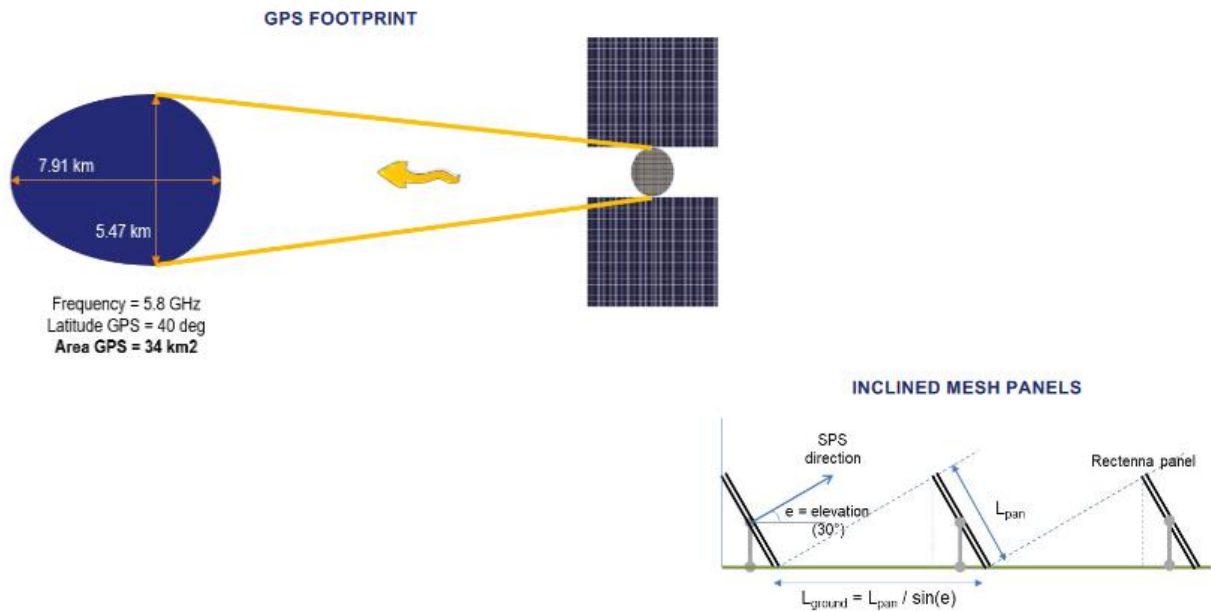


図 1-20 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム(地上部)

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

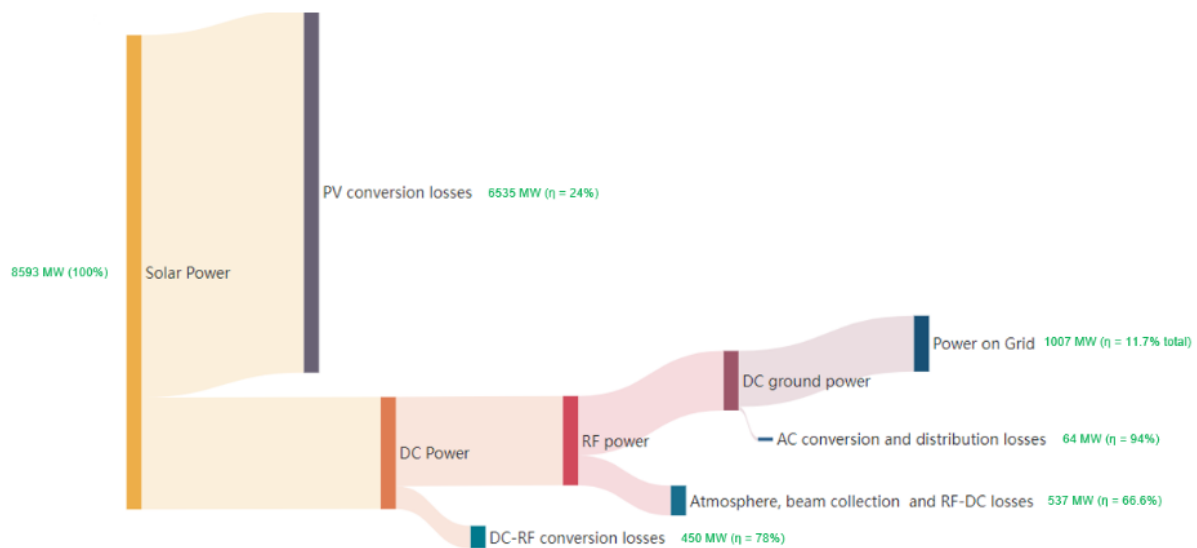


図 1-21 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

| Parameter               |                                                   | Composition and value               |           |          |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------|----------|
| CAPEX                   | SPS costs                                         | Truss module costs                  | 0.01 B\$  | 7.71 B\$ |
|                         |                                                   | Roll-out modules (with PVA) costs   | 0.18 B\$  |          |
|                         |                                                   | Node modules costs                  | 0.002 B\$ |          |
|                         |                                                   | WPT system costs                    | 0.50 B\$  |          |
|                         | Launch and in-orbit transportation/assembly costs | AOCS costs                          | 1.43 B\$  |          |
|                         |                                                   | Launch costs                        | 3.31 B\$  |          |
|                         |                                                   | In-orbit transportation costs       | 1.65 B\$  |          |
|                         |                                                   | Robotic hardware costs for assembly | 0.004 B\$ |          |
|                         | GPS costs                                         | Land occupation costs               | 0.06 B\$  |          |
|                         |                                                   | Rectenna mesh costs                 | 0.17 B\$  |          |
|                         |                                                   | GPS power control costs             | 0.36 B\$  |          |
| OPEX                    | Insurance costs                                   |                                     | 1.7 B\$   | 3.88 B\$ |
|                         | OM costs                                          |                                     | 1.6 B\$   |          |
|                         | AOCS thrusters refueling costs                    |                                     | 0.36 B\$  |          |
| TOTAL SBSP MISSION COST |                                                   | 11.4 B\$                            |           |          |

図 1-22 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023



| Parameter                                          | Value                      |           |
|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Expected energy generated over the system lifetime | Lifetime = 30 years        | 223.4 TWh |
|                                                    | 1 %/year degradation rate  |           |
|                                                    | 1 GW 24h 365 days BOL      |           |
| LCOE                                               | 158 \$/MWh ( ≈ 15.8 ¢/kWh) |           |
| LCOE for the 10th of a kind SBSP system            | 143 \$/MWh ( ≈ 14.3 ¢/kWh) |           |

図 1-23 Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果

出所)“Space-Based Solar Power Delivers solar energy from space to Earth”, Thales Alenia Space, Dec 13<sup>th</sup> 2023

## 1.2.2 ESA の OSIP キャンペーン

2020 年 9 月～2021 年 1 月の間、ESA は Discovery and Preparation 部門の OSIP (Open Space Innovation Platform)を通じて、宇宙で SBSP を実現するためのソリューションに関する幅広いアイデアの募集を行った<sup>27</sup>。募集に当たっては、特に以下のカテゴリーに関する新しいアイデアを期待する、ことが示された。

<ESA の SBSP 実現のためのアイデア募集に当たり示された重点カテゴリー>

- ・ 地球、月、火星での使用を目的とした、SBSP の新しいシステムコンセプト
- ・ SBSP の技術的・経済的な実現性を大幅に向上させる可能性のある新規のサブシステム・コンセプトや技術
- ・ SBSP をスケールアップし、エネルギーグリッドに統合するための新しい方法
- ・ 宇宙建設の機会を利用した斬新なアイデア(宇宙資源の利用、質量・サイズ・構造要件・体積などの打上げ制約の解消など)
- ・ 先行的な宇宙実証のための新しいコンセプト

本キャンペーンにおいて、大学、ベンチャー、民間企業、宇宙機関等から 85 の提案がなされ、うち 16 件が新規性を評価され、フォローアップステップに進んだ。16 件の内訳は、システム研究 7 件、初期技術開発 5 件、共同研究提案 4 件であった。

2022 年以降は、以下に示す 13 件(図 1-24 参照)が資金提供の対象として選ばれ、現在も研究開発が進められている<sup>28</sup>。ただし、その後の進捗状況に関する情報は限定的に公開されている。

<sup>27</sup> <https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087127246233263&userAction=Browse&templateName=&documentId=514a8db636ea637f6e27069183966350> (2023 年 1 月 19 日閲覧)

<sup>28</sup> [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/The\\_Discovery\\_Campaign\\_on\\_Solar\\_Power\\_from\\_Space](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_Solar_Power_from_Space) (2023 年 1 月 19 日閲覧)

<OSIP キャンペーンで実施されたプロジェクト一覧> ( )内は主実施機関

- ①. SPS Station Keeping Using Solar Radiation Pressure for Propulsion (Emerald Telecommunications)
- ②. The interaction of structural dynamics with the orbital mechanics of Solar Power Satellites (Frazer Nash)
- ③. GE® Lunar Power Station (Astrostrom)
- ④. An End-of-Life Strategy for Solar Power Satellites (Frazer Nash)
- ⑤. Skybeam: Assembly of a Space Solar Power system with European Technologies (Space Applications Services)
- ⑥. Receiv’Air – Bypassing of atmospheric attenuation for SPS with airborne receiver (Thales Alenia Space)
- ⑦. Tiled Energy Focus with Solar Concentrators (Instituto de Telecomunicacoes – University of Aveiro)
- ⑧. Development of Millimetre Waves Wireless Power Transfer (WPT) System for Lunar Rover Explorations (Sirin Orbital Systems)
- ⑨. Disruptive PV power array technology to enable economic viability of SPS (CSEM)
- ⑩. Photo-irradiation annealing of radiation-induced degradation of multijunction solar cells for space-based power plants (Photonicity)
- ⑪. In-Space manufacturing of large structures by direct extrusion of UV-curing polymer (Munich University of Applied Sciences)
- ⑫. CORES – Collaborative Recycling of End-of-life Sps (University of Strathclyde)
- ⑬. Solar Array to High Voltage Power Bus: Power Conversion Techniques (University of Elche)

上記の⑧に関しては、スイスの Sirin Orbital Systems 社は京都大学生存圏研究所の篠原教授とも協力関係を築き、研究を進めている。2022 年、2023 年および 2024 年 11 月に、京都大学東京事務所において研究関連者による“Japan-Switzerland SBSP/WPT Workshop”が開催されている<sup>29</sup>。なお、この Sirin Orbital Systems 社と③の Astrostrom 社の活動等については 1.6.2 項で詳細を示す。

---

<sup>29</sup> <https://swissnex.org/news/a-japanese%E2%80%92swiss-workshop-to-shape-the-future-of-clean-energy-from-space> (2022 年 12 月 17 日閲覧)

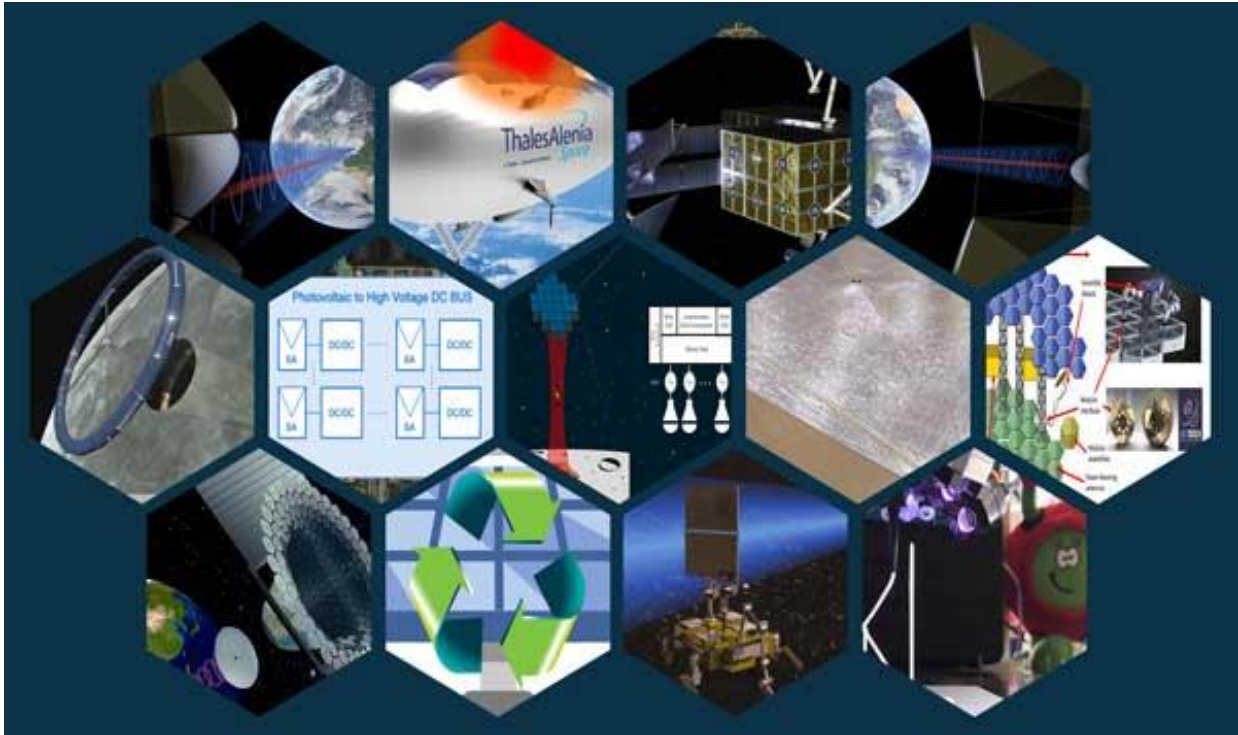


図 1-24 資金提供が決定した 13 のプロジェクト (Credit:ESA)

出所) <https://parabolicarc.com/2022/01/10/esa-reignites-space-based-solar-power-research/> (2023 年 1 月 19 日閲覧)

### 1.2.3 欧州宇宙政策ビジョン ESPI2040

2023 年 9 月、欧州宇宙政策研究所(ESPI:European Space Policy Institute)は、今後数十年間の欧州の宇宙における政策ビジョン「ESPI2040:Space for Prosperity, Peace and Future Generations」を公開した<sup>30</sup>。

ESPI2040 は、欧州と世界が直面している前例のない課題に取り組むために、宇宙利用がどのように解決策を提示できるかについて概説しており、欧州の 2040 年に向けた目標を「宇宙が経済全体にもたらすと推定される全世界的価値の 25%を獲得する」「未来を形作るイノベーション、インフラ、政策、戦略と宇宙を連携する」としている。

本ビジョンの中で、ESPI が “Green and Sustainable Societies” アジェンダの一部として促進する項目の一つとして、「温室効果ガス排出 Net Zero 目標の達成を加速できるような破壊的な未来技術やインフラの開発」が掲げられており、その例として SBSP が示されている。さらに最終ページ「Beyond 2040」にも、経済や社会全体に新たな変革をもたらすものとして SBSP が紹介されている。

<sup>30</sup> <https://www.espi.or.at/espi-2040/> (2023 年 9 月 29 日閲覧)



図 1-25 「ESPI2040: Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ  
 出所) [https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2023/09/ESPI2040\\_FINAL-Copy.pdf](https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2023/09/ESPI2040_FINAL-Copy.pdf) (2023 年 9 月 29 日閲覧)

#### 1.2.4 COP28 におけるパネルディスカッション

2023 年 11 月～12 月にかけて、アラブ首長国連邦(UAE)のドバイで開催された第 28 回国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP28)において、UAE 宇宙庁は”Space for Sustainability ”パビリオンで”Space Solar Power: Lighting a Path to Net Zero”と題するパネルディスカッションを開催した。本パネルディスカッションにおいては、ESA が Avance Labs、Space Solar および OneWeb NEOM JV と共に登壇した。

### 1.3 英国

英国における SBSP 活動は、ESA による取組みに先んじて政府レベルでの取組みが始まったが、ESA の SOLARIS プログラムが始動してからは、SOLARIS への参加を並行して進める形となっている。英国における SBSP 活動は図 1-26 のように示すことができる。以下では、それらの取組みの具体的な内容について示す。



図 1-26 英国における SBSP 活動の内訳

出所)“UKSA Introduction”, C.Brown, UKSA, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

### 1.3.1 BEIS の Space Based Solar Power Innovation プログラム

#### (1) 背景とプログラムの概要

英国では、ここ数年で SBSP に関する取組みが大きく進展した。英国宇宙庁(UKSA:UK Space Agency)とビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS:Department for Business, Energy & Industrial Strategy)が 2020 年 9 月から 1 年間をかけて SBSP(Space-Based Solar Power)の実現可能性と経済性の調査検討を実施した。具体的な調査内容としては、1) 米国(SPS-ALPHA)、英国(CASSIOPeiA)、中国(MR-SPS)の 3 つのコンセプト調査、2) 脱炭素経済に向けて SBSP の実用化と低価格化の実現性、3) 2050 年までに国際的なパートナーと協力して SBSP 運用を開始するためのエンジニアリングプランの策定、4) 将来のクリーンエネルギー技術の組合せの中で SBSP が果たす役割、等であり、Frazer-Nash Consultancy 社に委託して調査を行った。調査結果では、SBSP は英国の 2050 年までの温室効果ガス排出 Net Zero の目標達成を可能にすること、開発に当たっては段階的な技術開発と実証プログラムを実施し、国際的なパートナーと検討を重ねることが推奨されること、等を示した。BEIS は、本報告書の内容を受けて、SBSP に関連する技術開発を目的とする SBSP イノベーション・プログラム(Space Based Solar Power Innovation Programme)をスタートさせている。

なお、英国では International Electric Company (IECL)社の Ian Cash氏が提案している SBSP システムである「CASSIOPeiA」(図 1-27 参照)が実行可能なコンセプトとして認められており、2040 年までに運用可能な GW 級の SBSP を建設することを目指す、としている。英国が描いている SBSP の開発計画を図 1-28 に示す。



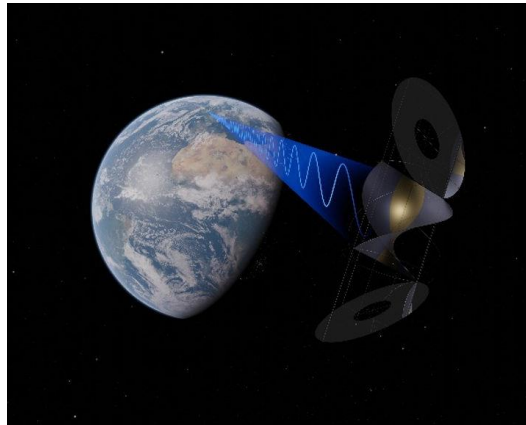
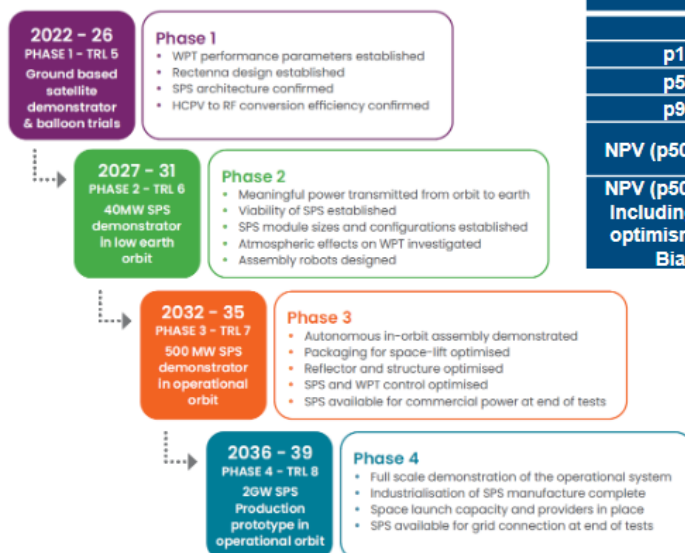


図 1-27 英国の SBSP システム案「CASSIOPeiA」(Credit:Space Energy Initiative)  
出所)https://www.internationalelectric.com/ (2023 年 1 月 19 日閲覧)

## Costed Development Plan



|                                   | Phase 1<br>TRL 5 | Phase 2<br>TRL 6 | Phase 3<br>TRL 7 | Phase 4<br>TRL 8 | Totals   |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|
|                                   | 5 years          | 5 years          | 4 years          | 4 years          |          |
| p10                               | £125M            | £530M            | £2,410M          | £7,925M          |          |
| p50                               | £135M            | £575M            | £2,675M          | £9,965M          |          |
| p90                               | £145M            | £620M            | £2,930M          | £12,610M         |          |
| NPV (p50)                         | £120M            | £435M            | £1,740M          | £5,655M          | £7,539M  |
| NPV (p50) Including optimism Bias | £350M            | £1,180M          | £3,950M          | £10,800M         | £16,280M |

図 1-28 英国の SBSP 開発計画(Credit:BEIS)

出所)“Space Based Solar Power(SBSP) Innovation Programme”, Stakeholder Engagement, BEIS (Mar 2022)

## (2) Space Based Solar Power Innovation Competition

上記の SBSP イノベーション・プログラムの一環として、2022 年 7 月、BEIS は、最大 600 万ポンド(約 9 億 8 千万円)相当の助成金コンペティションである「Space Based Solar Power Innovation Competition」のガイダンス文書を発表した<sup>31</sup>。

<sup>31</sup> <https://www.gov.uk/government/publications/space-based-solar-power-innovation-competition>  
(2023 年 1 月 25 日閲覧)



SBSPに必要な技術、エネルギーシステム、ミッションアーキテクチャを開発するプロジェクトに助成金(300万ポンド(約4億9千万円)～さらに最大300万ポンドまで)を提供するというものとなっている。プロジェクト開始時点で技術成熟度(TRL)レベル1～6の技術を支援するとし、プロジェクトは以下の4つの分野に分けて募集されている。

- ・ ワイヤレス電力伝送(nominally £1.25m budget)
- ・ 高集光太陽光発電(nominally £1.25m budget)
- ・ SBSP エネルギーシステムエンジニアリング(nominally £500k budget)
- ・ SBSP 宇宙ミッションアーキテクチャのフィージビリティスタディ(up to £3m budget)

本コンペティションは BEIS Net Zero Innovation Portfolio (NZIP)の Energy Research および Disruptive Technologies テーマと英国宇宙庁(UKSA)の共同出資により行われている。なお募集期間は2022年9月27日までであり、その後、以下に示す8つのプロジェクトが総計430万ポンド(7億90万円、1ポンド=163円で換算)の資金提供を受け、研究を進めている。(表1-1 参照)

さらに、2024年4月からは、SAC (Satellite Applications Catapult Ltd )の “CASSIOPeiA Commercial and Concept Phase 0/A” に続くフェーズの研究として、Space Solar Engineering Ltd.が£1,198,802を得て、CASSIOPeiA design iteration (CASSiDI)プロジェクトを進めている。CASSiDI プロジェクトは SAC、Thales Alenia Space および Oxford Space Systems 社と共に実施した先行研究を基に、CASSIOPeiA アーキテクチャに基づくSBSPの基本モジュール概念設計を行うプロジェクトである。なお、CASSiDI プロジェクトおよび Space Solar Engineering Ltd.社等の活動内容等については1.6.2(4)項で詳細を示す。

表 1-1 Space Based Solar Power Innovation Competition で実施されているプロジェクト

| 機関                                     | タイトル                                                                                                                   | 金額       |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Queen Mary<br>University of London     | A high-efficient wireless power transmission system using vector phased array transmitter and reflector array rectenna | £960,607 |
| University of Bristol                  | SCOPES: SCalable OPen Electromagnetics for Solar power                                                                 | £353,398 |
| Satellite Applications<br>Catapult Ltd | CASSIOPeiA Antenna with Steering Scaled Indoor Experiment (CASSIE)                                                     | £999,513 |
| University of<br>Cambridge             | Concentrator solar cells to deliver space based solar power                                                            | £770,666 |
| MicroLink Devices<br>UK Ltd            | Novel concentrator PV for SBSP                                                                                         | £449,955 |
| Imperial College<br>London             | Whole-Energy System Integration of Space-Based Solar Power in the UK                                                   | £295,194 |
| EDF Energy R&D UK<br>Centre Ltd        | Space Based Energy Application Management (Space BEAM)                                                                 | £25,855  |
| Satellite Applications<br>Catapult Ltd | CASSIOPeiA Commercial and Concept Phase 0/A (C3P0/A)                                                                   | £424,989 |

※上表に追加して、2024 年 4 月に Space Solar Engineering Ltd が CASSIOPeiA design iteration (CASSiDI)のタイトルで£1,198,802 を獲得

出所) <https://www.gov.uk/government/news/uk-shoots-for-the-stars-as-space-based-solar-power-prepares-for-lift-off> (2023 年 9 月 27 日閲覧)

### 1.3.2 Space Energy Initiative(SEI)

上記の Frazer-Nash Consultancy の検討結果を受けて、2021 年 8 月、2040 年までに運用可能な SBSP システムの開発を支援する目的で、Space Energy Initiative(SEI)と呼ばれる英国の政府機関、大学、企業による非公式な連合体が組織された。SEI の目的としては、以下に示す項目が掲げられている。

- ・ SBSP 開発のための国際的なパートナーシップの構築
- ・ 技術的、倫理的、商業的、政策的な指導と助言のための学際的な諮問委員会の設立
- ・ 研究、開発および活動プログラムを提供するための資金の確保
- ・ SBSP に関する意識向上と能力開発の推進
- ・ SBSP の実現可能性とシステム設計に関する研究の拡大と優先順位付け

- ・ 2030 年までに行う最初の SBSP システムの設計・開発・運用

SEI のメンバーは 2024 年 9 月現在、80 以上の機関に及んでいる。多くの分野を扱う作業部会 (WG) が組織されており、定期的に活動内容を報告するようになっている。



図 1-29 SEI の参加機関

出所) “The Space Energy Initiative The UK approach to developing Space Based Solar Power”, David A. Homfray, ISDC 2022

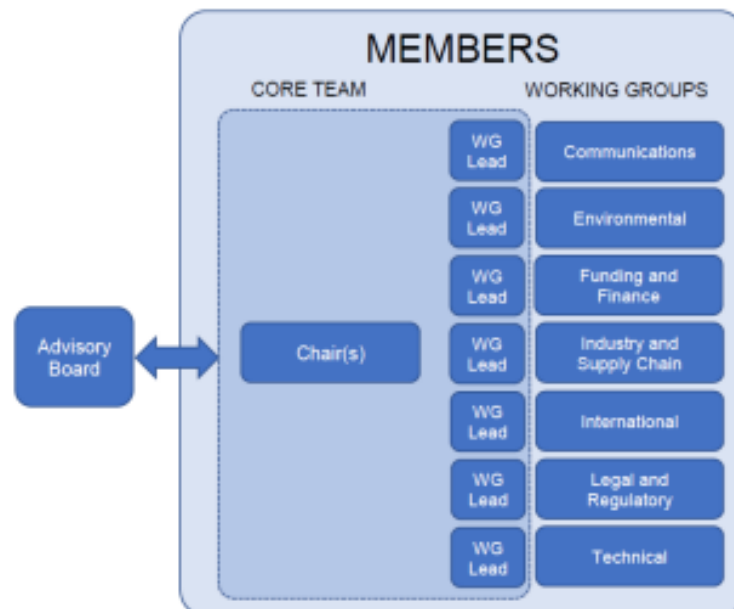


図 1-30 SEI の組織構造

出所) “The UK Space Energy Initiative – Towards a Practical Space Based Power System for the Net Zero Era”, Martin Soltana et.al, IAC-22-C3.1.3, Sept. 2022

### 1.3.3 Catapult(SAC)による SBSP 研究開発プロジェクトの開始

2023 年 1 月、衛星利用推進センター(SAC:Satellite Applications Catapult)は、英国宇宙庁(UKSA)から資金を獲得し、将来の SBSP システムの研究開発プロジェクトを開始したと発表した<sup>32</sup>。プロジェクトの総額は 62 万ポンドで、UKSA からの 46 万 5000 ポンドの助成金と、SAC の 15 万 5000 ポンドの資金により実施される。本プロジェクトでは、2023 年 3 月までに以下の 3 つの作業を実施した。

- 宇宙からの無線電力伝送を高高度でデモンストレーションする方法を調査し、衛星や航空機に対する SBSP の電力密度効果をシミュレートする。
- 軌道上でのサービスや組立に必要な標準治具インターフェースを開発するため、モジュール構造の取扱い・サービス・組み立てに必要なツールを研究し、標準化に向けたプロトタイプを作成する。
- 複雑なエネルギープログラムのための最適な技術計画を検討し、SBSP 関連技術の現在の基準と課題を特定し、技術の規制ロードマップを作成する。

なお、2022 年 4 月、SAC からのスピンアウト組織として Space Solar 社が結成されている。Space Solar 社については 1.6.2(4)項で詳述している。

### 1.3.4 サウジアラビア王国との協力関係の構築に関する協議

2023 年 1 月、英国の Grant Shapps 商務長官とサウジ宇宙委員会会長兼通信・情報技術大臣 Abdullah Al-Swaha 氏が会談し、SBSP への共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について議論を行った<sup>33</sup>。サウジアラビアのタブーク州に建設中の新都市 NEOM(スマートシティ・イノベーション、世界レベルの技術、データインテリジェンスを取り入れた都市)と英国の Catapult からスピンアウトした組織である Space Solar Ltd との連携により、今後数年間、各国が宇宙太陽光発電(SBSP)の開発に多額の投資を行うことが期待される、としている<sup>34</sup>。

### 1.3.5 宇宙とエネルギー部門間のパートナーシップ

2024 年 4 月、英国エネルギー安全保障・ネットゼロ省(Department for Energy Security and Net Zero)、王立航空協会(Royal Aeronautical Society:RAeS)、英国宇宙庁(UK Space Agency)、欧州宇宙機関(ESA)の主催(上述の SEI も支援)で、ロンドンの Royal Aeronautical Society Headquarters において “ International Conference on Energy

<sup>32</sup> <https://sa.catapult.org.uk/news/uk-space-based-solar-power-project-secures-government-funding/> (2023 年 1 月 23 日閲覧)

<sup>33</sup> 英国とサウジアラビアは、貿易、投資、防衛、安全保障、エネルギーに基づく長年の二国間関係を構築している。

<sup>34</sup> <https://www.gov.uk/government/news/business-secretary-in-talks-with-saudi-arabia-to-advance-commercial-collaboration-in-uk-space-based-solar> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

from Space 2024”が開催された。宇宙とエネルギー部門間のネットワーキングと新たなパートナーシップ構築を目指して、3 日間にわたり、200 名以上の参加者を集めて各種の講演が行われた。

## 1.4 中国

中国は、2045 年までに世界の宇宙開発をリードする「宇宙強国」になり、2049 年までに世界をリードする大国となり、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するという戦略を掲げている<sup>35</sup>。化石燃料への依存を減らし、カーボンニュートラルを達成し、中国国民と軍にエネルギー安全保障を提供し、他国への影響力を高め、世界経済と軍事的支配という国家の長期的・戦略的目標を支えるために、長期的な SSPS プログラムを実行している。

2024 年 11 月には、新型ロケット「長征 9 号」の最新設計が公開されたが、それによると第 1 段には 30 基の YF-215 メタンエンジンを搭載し、LEO までの打上能力は 150ton、2040 年までに完全再使用型 2 段式ロケットの実現を目指している<sup>36</sup>。なお長征 9 号の計画は単なるロケット開発の枠を超えて、国際月面研究ステーション(ILRS)計画や SSPS の建設など、より広範な宇宙開発戦略の一部として位置づけられている。

### 1.4.1 CAST が示すロードマップ

#### (1) 全体ロードマップ

中国では宇宙技術研究院(CAST:Chinese Academy of Space Technology)が中心となって SSPS 研究を進めている。2000 年代になって、CAST が中国政府に”Necessity and Feasibility Study Report of SPS”と題したレポートを提出し、これをきっかけに研究が本格的に始まったとされている。CAST の Qian Xuesen Laboratory の Xinbin HOU 氏と Ming Li 氏が中国における SSPS 技術のリーダーとなり、SSPS 研究プロジェクトを主導しているが、マルチロータリージョイント SPS(MR-SPS)等のコンセプトの提案等を行っている。さらに 2015 年には 2050 年までのロードマップを示し、2050 年には商用システムの運用を開始とする目標を掲げている。その後の 2022 年 6 月には、SPS の必須技術である無線電力伝送の技術実証を 2028 年に LEO で行い(高度 400km の軌道上で 10kW 級の規模の実証)、早ければ 2030 年に GEO で 100kW 級の実験衛星による実証を行うと発表した<sup>37</sup>。これらの実験は、2050 年に GEO 上で 2GW 級のエネルギーを生成するシステムを実現するための長期的な取り組みの一部と位置付けられている。2035 年には、マイクロ波送信アンテナを約 100m に拡大し、さらに 10MW の発電を行う予定となっている。(図 1-31～図 1-32 参照)

<sup>35</sup> <https://www.wri.org/news/statement-chinas-14th-five-year-plan-sets-foundation-climate-action-important-details-are> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

<sup>36</sup> <https://www.wired.com/story/china-heavy-lift-rocket-spacex-starship/> (2024 年 2 月 10 日閲覧)

<sup>37</sup> ”Retro-directive microwave power beam steering technology of space solar power station,” the journal China Space Science and Technology (June 2, 2022)

なお CAST が提唱する SSPS システムはロードマップ中に示されるように複数の回転ジョイントを持つリニア太陽電池アレイを多数搭載したマルチロータリー型(MR-SPS)となっている。この他、後述する西安電子科技大学は SSPS-OMEGA と呼ぶシステムを提案している。(図 1-33 参照)

この他の動きとしては、2022 年 11 月に開催された中国宇宙会議においては、完成したばかりの天宮宇宙ステーションを利用して SBSP に必要な主要技術を試験する予定があることが発表され、天宮の外側ですでに稼働しているロボットアームが SBSP のモジュールの軌道上での組立てテストに使用されると述べられた。この試験システムは、その後独立して軌道上で、太陽電池アレイやその他のシステムを展開し、発電、変換、送電などの機能を実証する計画となっている<sup>38</sup>。

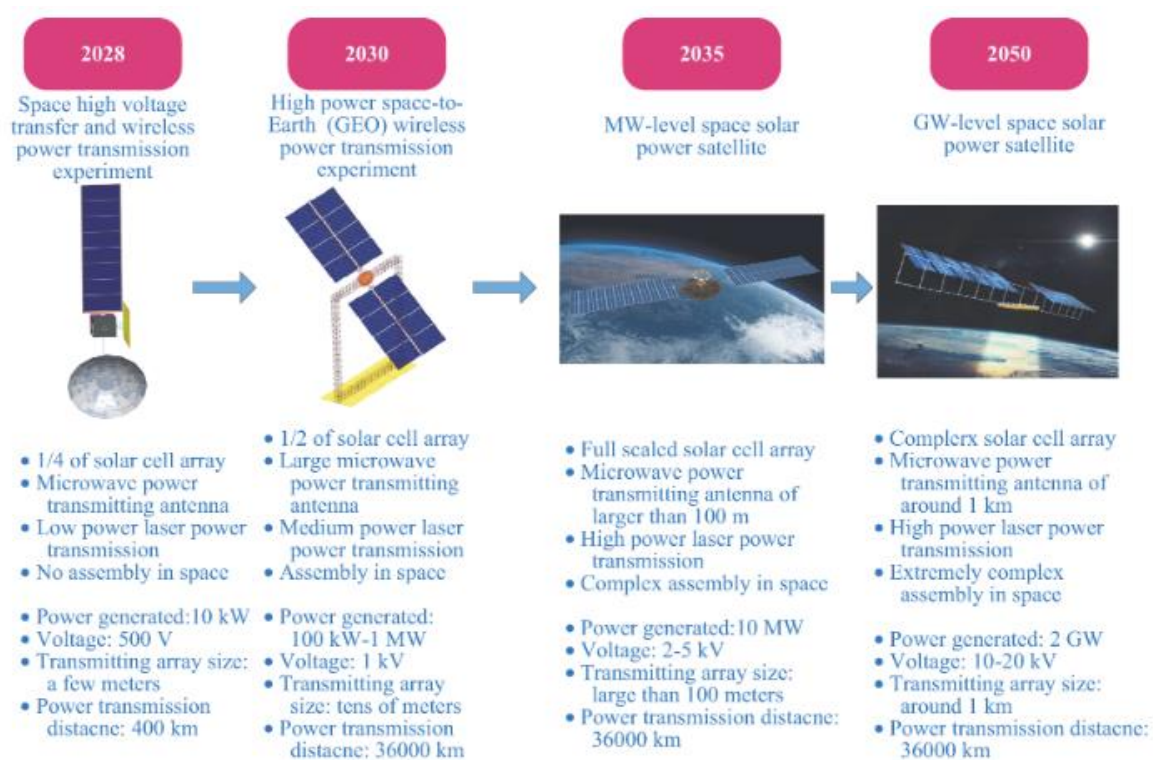


図 1-31 CAST による SSPS ロードマップ

出所)“Retro-directive microwave power beam steering technology for space solar power station”, HOU Xinbin, WANG Xi (CAST), Chinese Space Science and Technology, (Oct.25 2022 Vol.42 No.5 91-102)

<sup>38</sup> <https://spacenews.com/china-to-use-space-station-to-test-space-based-solar-power/> (2022 年 12 月 20 日閲覧)



表 1 各阶段微波能量传输系统参数演进  
Table 1 Evaluation of MPT systems of each phases

| Item                                            | Phase 1               | Phase 2               | Phase 3               | Phase 4               |
|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Transmitting distance                           | 400 km                | 36 000 km             | 36 000 km             | 36 000 km             |
| Operating frequency                             | 5.8 GHz               | 5.8 GHz               | 5.8 GHz               | 5.8 GHz               |
| Transmitting array dimension                    | 2 m×2 m               | 10 m×30 m             | Φ150 m                | Φ1 000 m              |
| Structural module dimension                     | 0.5 m×0.5 m           | 5 m×5 m               | 5 m×5 m               | 5 m×5 m               |
| Transmitting array architecture                 | 4×4                   | 2×6                   | 30×30                 | 200×30                |
| Transmitted power                               | 5 kW                  | 250 kW                | 14.5 MW               | 1.6 GW                |
| Beam steering accuracy                          | Better than 0.1°      | Better than 0.03°     | Better than 0.0036°   | Better than 0.0005°   |
| Rectifying array dimension                      | ≥10 m×10 m            | ≥10 m×10 m            | 4.5 km×6.5 km         | 4.5 km×6.5 km         |
| Power density at the center of rectifying array | ~30 μW/m <sup>2</sup> | ~40 μW/m <sup>2</sup> | ~70 mW/m <sup>2</sup> | ~230 W/m <sup>2</sup> |

図 1-32 SSPS 開発のフェーズごとのミッション

出所)“Retro-directive microwave power beam steering technology for space solar power station”, HOU Xinbin, WANG Xi (CAST), Chinese Space Science and Technology, (Oct.25 2022 Vol.42 No.5 91-102)

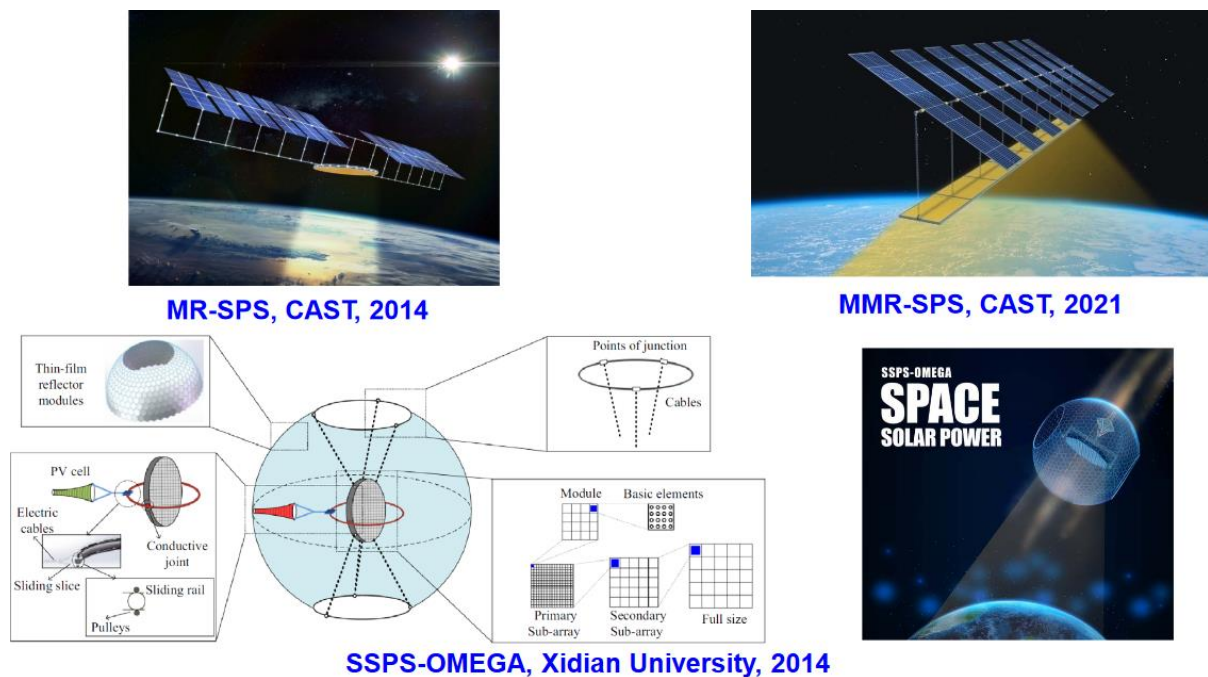


図 1-33 中国が提案する SSPS システムコンセプト

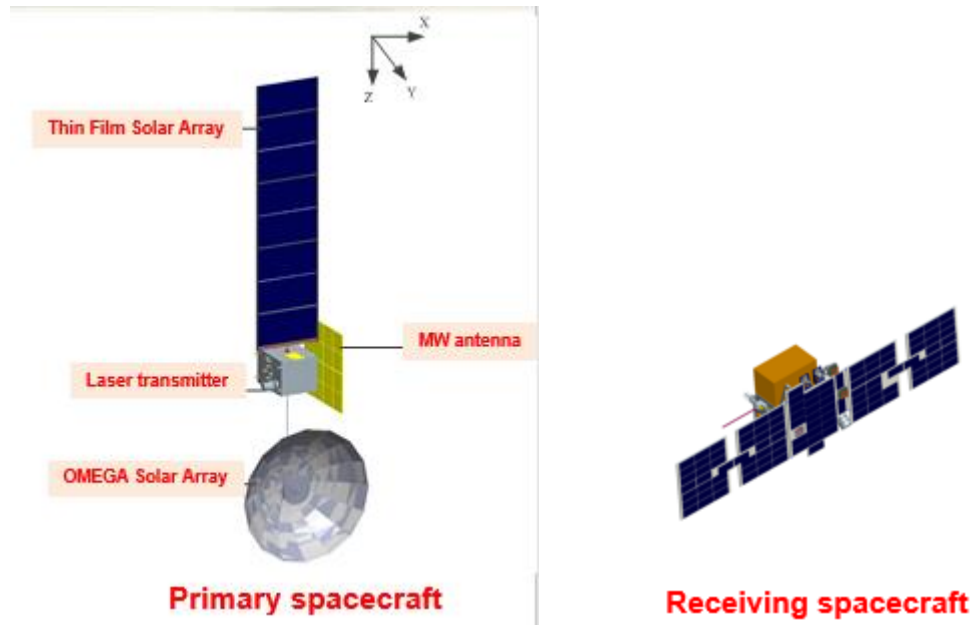
出所)“Development Status of SPS in China”, Xinbin Hou (CAST), Space Solar Power Session , ISDC 2022

## (2) 技術実証衛星案

### 1) LEO における技術実証

ロードマップの第一段階となる技術実証ミッションとして、LEO における 2 機の宇宙機と地上の受電システムを用いた高出力発電(10kW 級)と WPT 技術実証が提案されている。理論的なエネルギーチェーンと長距離ビーム制御精度を検証することを主目的とし、2 機の宇宙機間(Primary

spacecraft/Receiving Spacecraft)でレーザーの送受電実証を行い、1機の宇宙機と地上受電システム間(Primary spacecraft/Receiver on ground)でマイクロ波およびレーザーの送受電実証を行う計画となっている。図 1-34 に実証衛星のイメージ図と仕様を示す。



## ■ Mission specifications(draft)

### 1) Primary spacecraft

- MPT system
  - Frequency: 5.8GHz
  - RF Power: 4kW
  - Efficiency: 50%
  - Beam precision: 0.2°
- LPT system
  - Wavelength: 1064nm
  - Laser Power: 1kW
  - Efficiency : 35%
  - Beam precision : 5urad
- Thin film solar array
  - Output DC power: 10kW
  - Voltage: 500V
- Concentrator solar array
  - Output DC power: 10kW
  - Concentration ratio: 4

### 2) Receiving spacecraft

- Laser receiving
  - Distance: 10km-50km
  - Laser density: 1-3 sunlight
  - Laser cell efficiency (high) : 35%

### 3) Receiver on ground

- MPT receiving
  - Distance : 400km
  - Microwave density : 30μW/m<sup>2</sup>
  - Rectenna efficiency : 6%
- LPT receiving
  - Distance : 400km
  - Laser cell efficiency (low) : 20%

図 1-34 中国が提案する技術実証衛星案

出所)“Status of the Activities in China and Several Considerations on SPS Development”, Xinbin Hou, CAST, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

## 2) 月面軌道での LPT ミッション

上記の実証ミッションの他に、月面極軌道上でレーザー無線電力伝送プラットフォームを搭載した月周回機を運用し、月の極域にいる月表面探査ミッション用に非連続的に電力を供給するミッションも提案されている。図 1-34 に衛星の仕様を示す。

### ➤ Specifications:

#### ■ Lunar Orbiter:

- Orbital Altitude : 500km;
- Output Power of Solar Array: 5kW
- Input Power of Laser: 12kW;
- Laser Wavelength: 1064nm;
- DC-Laser Efficiency: 38%;
- Laser Power: 4.4kW;
- Diameter of Emitter: 0.5m.

#### ■ Lunar Surface Explorer:

- Laser PV: InGaAs;
- Laser-DC Efficiency : 38%;
- Diameter of receiver : 2.8m;
- Output Power: 1.2kW;
- Average Power: 200W.

図 1-35 中国が提案する月面軌道上での LPT ミッション

出所)“Status of the Activities in China and Several Considerations on SPS Development ”, Xinbin Hou, CAST, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023

### 1.4.2 重慶大学の研究施設の建設

近年の CAST の大きな動きとしては、2018 年 12 月から行っている重慶(碧山区和平村)での高出力無線エネルギー伝送研究施設の建設が挙げられる。重慶市璧山区人民政府、重慶大学と共同で実施しているものであり、一時は建設中断等の状況にも陥ったが、現在は完成に向けて建設が進められている。コア実験建設エリアがあり、その他、実験科学総合ビルと実験プラットフォームが建設される。コア実験エリアにはリフトオフテストサイト、気球プラットフォームデバッグホール、その他の施設が含まれる。基地建設費用として 1 億元(約 1500 万ドル)の初期投資が行われている。

完成時期は発表のたびに遅延している<sup>39</sup>が、さらなる実験設備の新設の検討も行われている。

中国政府は 2060 年までのカーボンニュートラル目標を掲げており、本研究はエネルギー部門からの強い支持を得られているとのことである。

### 1.4.3 西安電子科技大学の SBSP 実証実験

西安電子科技大学(Xidian University)では SSPS OMEGA(Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array)コンセプトの検討を行うと共に、2018 年から SSPS(Space Solar Power Station)デモンストレーション・実証実験システムの建設に着手している。大学のキャンパス内に、75m の試験塔を設置し、塔の中央には、地上から 55m の高さに、直径約 6.7m の半球状の集光

<sup>39</sup> 2023 年 10 月に開催された International (On-line) Conference on Energy from Space における CAST の発表では、2023 年に完了予定となっている。

器が4つ設置されている。球状の反射面に太陽光が当たると、一定の集光部に収束し、太陽電池で直流を発生させた後、マイクロ波に変換して送信アンテナから地上に送信するというシステムである。

2022年6月には、上記のSBSPデモンストレーション・実証実験施設を完成させた<sup>40</sup>。本施設は世界初となるfull-link and full-systemであり、「OMEGA-SSPS 地上試験検証システム」とも呼ばれている。試験システムは75mの鉄骨構造であり、太陽エネルギーを集め、直流電気に変換するように設計されている。本システムでは、集光レンズの中心に送信アンテナと連動した太陽電池アレイが設置されており、太陽エネルギーを集め、直流電気に変換、さらにマイクロ波に変換した後アンテナから55m離れた場所に送信する。(RF出力:2kW、DC-DC伝送効率:15%)集光・光電変換、マイクロ波へのエネルギー変換、マイクロ波伝送・波形最適化、マイクロ波ビーム照準計測・制御、マイクロ波受信・整流などの技術が実証可能なシステムとなっている。(図1-36参照)

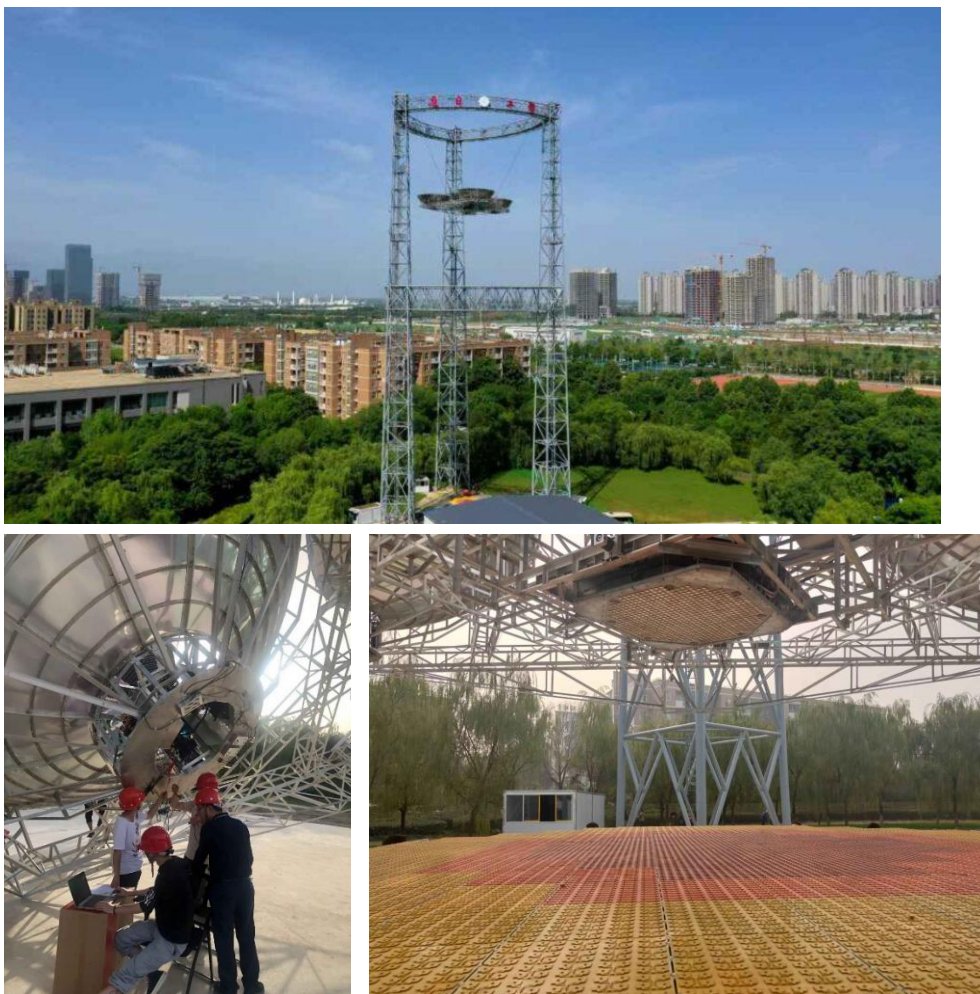


図 1-36 西安電子科技大学の実証実験施設

出所)<https://news.cgtn.com/news/2022-06-22/China-aims-to-construct-first-Space-Solar-Power-Station-in-2028-1b49ktMx5W8/index.html> (2022年10月11日閲覧)

<sup>40</sup> <https://spacenews.com/chinese-university-completes-space-based-solar-power-ground-test-facility/> (2022年10月7日閲覧)



#### 1.4.4 中国宇宙航行学会のSSP 委員会の設立

2020 年 9 月、中国宇宙航行学会(Chinese Society of Astronautics)が SSP 委員会の設立を承認したことを発表し、2021 年 3 月に SSP 委員会設立式(CSSP-CSA:Committee of Space Solar Power, Chinese Society of Astronautics )が北京にて開催された。SSPS の分野における学術交流と技術協力を強化し、学術的なアイデアの発展、SSPS のための高度な人材育成、SSPS の分野における新技術、アイデア、成果の交換、SSPS キーテクノロジーの開発、キーマテリアルやデバイスのブレークスルー、重要な科学的課題の研究の促進を目的としている。7 名の学識経験者を顧問として招聘し、68 名の委員を選出している。

2022 年 8 月にも重慶にて委員会(中国航天科技院宇宙太陽発電所専門委員会学術交流会、第 4 回全国宇宙太陽発電所技術開発セミナー、第 3 回中国宇宙太陽発電所推進委員会会議)を開催している。専門委員会のメンバー 20 数名、30 余りの大学、研究機関、企業から 160 余りの専門家が出席した模様である<sup>41</sup>。

さらに 2023 年にもオンライン公開講座を開催したり(参加者は 15,000 名以上)、中国 SSP 青少年大会を開催したり(40 チーム以上が参加)等の活動も行っている。

### 1.5 その他の国による取り組み

上項で取り上げた国以外でも、海外で SSPS の研究開発に取り組んでいる国としてはロシア、インド、韓国、オーストラリア等が挙げられる。ここ数年の動きに関する情報がない国もあるが、以下にこれらの国の取組みを簡潔に整理する。さらに、国際的なグループとして 2021~2022 年に立ち上がった IAA(International Academy of Astronautics)の Permanent Committee on SSP についても示す。

#### 1.5.1 ロシア

2022 年 1 月、ロシア宇宙庁(Roscosmos)は、従来のエネルギー源への依存を減らす目的で、宇宙空間に設置する SSPS のアイデアを提案した。その際に、Roscosmos の一部である Russian Space Systems Holding(RKS)が、地球の遠隔地で電力の無停電供給を行うための太陽宇宙発電所プロジェクトに関する作業を完了したことを述べた<sup>42</sup>。

RKS は、solar space power plant (SCES)の開発を 2012 年より行っている。島嶼部、山岳部、北方部といった到達困難な地域への電力供給や、宇宙船の定時・緊急充電のために設計されているものである。SCES は 2 つのセグメントから構成されている。1 つ目の送信モジュールは、面積 70m<sup>2</sup> の無人宇宙システムで、太陽エネルギーを蓄積し地上に送信する。2 つ目の受信モジュールは、

<sup>41</sup> <http://www.csa.spacechina.com/n2489262/n2489292/c3593576/content.html> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

<sup>42</sup> <https://www.republicworld.com/science/space/roscomos-pitches-solar-space-power-plant-idea-for-electricity-supply-to-earth-articleshow.html> (2023 年 1 月 23 日閲覧)

バッテリーを備えた地上のレクテナ(移動式アンテナ)システムで、宇宙システムからの太陽エネルギーをレーザーで受光し、電力に変換して消費者に配給する。送信モジュールは軌道上充電ステーションとしても機能し、蓄積されたエネルギーを軌道上の衛星に伝送して充電を行うことができる、というコンセプトになっている<sup>43</sup>。

宇宙システムは傾斜角 82°、90°、98°の太陽同期軌道で運用されるが、地上の移動式レクテナに正確に当てるには、同期を取るソフトウェアが必要である。

SCES は火力発電所、水力発電所、原子力発電所といった従来のエネルギー生成方法と競合することは困難であるとされ、小規模なシステムで長期間に渡り宇宙空間で充電を行って運用されることが想定されている。(600MW の充電に 1 カ月半を要する)

### 1.5.2 インド

インドでは、過去に Abdul Kalam 元大統領(第 11 代。任期 2002 年～2007 年)が SSPS 研究に熱心であり、米国宇宙協会 NSS(National Space Society)との関係を強化し、2010 年には Kalam-NSS Energy Initiative を発表するなどの活動を行っていたが、2015 年に死去し、その後のインドの動きについての情報はなかった。その後 2018 年頃から ISRO(Indian Space Research Organisation)の Chariman の Sivan 氏が、国のエネルギー資源の枯渇問題に対応するために SSPS の構築の必要性を説き始めている。その流れを受けて、2021 年 11 月に開催された ISRO DTDI(Directorate of Technology Development and Innovation)部門の宇宙分野の潜在的な技術を開放する破壊的な将来技術(Disruptive Future Tech)サミット「DTDI-Technology-Conclave-2021」では、未来型技術開発プロジェクトの策定に着手していることが言及され、その破壊的な将来技術の一つとして Space-Based-Solar-Power が含まれており、今後の関連技術開発の促進が期待されるところとなっている。

### 1.5.3 韓国

韓国は SBSP 分野への参入が遅かったものの、現在は 2050 年までの温室効果ガス排出 Net Zero を国家ビジョンとして掲げ、実行シナリオを発表している。もともと国土が狭く、再生可能エネルギーでの発電には不向きな国であるため、SSPS による再生エネルギーの確保が目標を達成するためのブレイクスルーになり得る、として SSPS 開発に向けて動き始めている。

韓国の SSPS 研究を主導している KARI(Korea Aerospace Research Institute)は、2017 年 11 月および 2019 年 2 月の 2 回、韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップ(International Workshop for Space Based Solar Power)を開催した。SSPS 検討のために KARI を中心として 7 組織 20 名程度の組織が立ち上がったとの報告がなされた。その後、K-SSPS(Korean Space Solar Power Satellite)等のコンセプト検討が実施されており、現在提案されている K-SSPS システム(図 1-37)は以下のような特徴を有している。

---

<sup>43</sup> <http://www.parabolicarc.com/2022/02/02/russian-space-systems-developing-space-based-solar-power-satellite/> (2023 年 1 月 23 日閲覧)



#### <K-SSPS の特徴>

- 2050 年: 完全な GEO SSPS システムの運用開始
- 発電規模: 2GW の電力を地上に供給(総重量 10,000 ton)
- 打上げ手法: 再利用可能なロケットを使用し、LEO でロボットによる組立てと試験を実施後、ソーラー電気推進によって GEO へ移行。
- レクテナの配置: 非武装地帯に直径 4km のレクテナを設置。最大 60 基設置可能で、総発電量 120GW を想定。
- 運用寿命: 約 30 年
- GEO での「墓場軌道」移動は衝突リスクが高いため、月面衝突処分を提案。月の裏側の安全なゾーンに制御衝突させ、月面資源として再利用を想定。
- 2040 年: LEO での試験システムの展開

2021 年頃からは、予算と国内の技術的な準備状況を考慮し、KARI と KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)の 2 機関が共同で、宇宙での電力伝送を実証するための宇宙実験プラットフォームとして 2 機の小型衛星(質量約 120kg)システムを提案している。1 機は送電衛星、もう 1 機は受電衛星であるが、地上 WPT モジュールの宇宙用モジュールにアップグレードするために、軽量設計、展開型アンテナ設計、性能向上手法の実装等を行っている<sup>44</sup>。ただし太陽電池パネルの大きさには限界があるため、太陽エネルギーを送電衛星の電池に蓄電した後、受電衛星に送電するというシステムになっている。本システムの検討結果は、将来的に 2020 年代にパイロットシステムが実現する際に、設計や運用のガイドラインとして活用されることが期待されている。

なお、KARI と KERI による WPT の取組については 2.1.1(6)項でも示している。

---

<sup>44</sup> <https://iafastro.directory/iac/paper/id/69960/abstract-pdf/IAC-22,C3,1,5,x69960.brief.pdf> (2022 年 11 月 17 日閲覧)

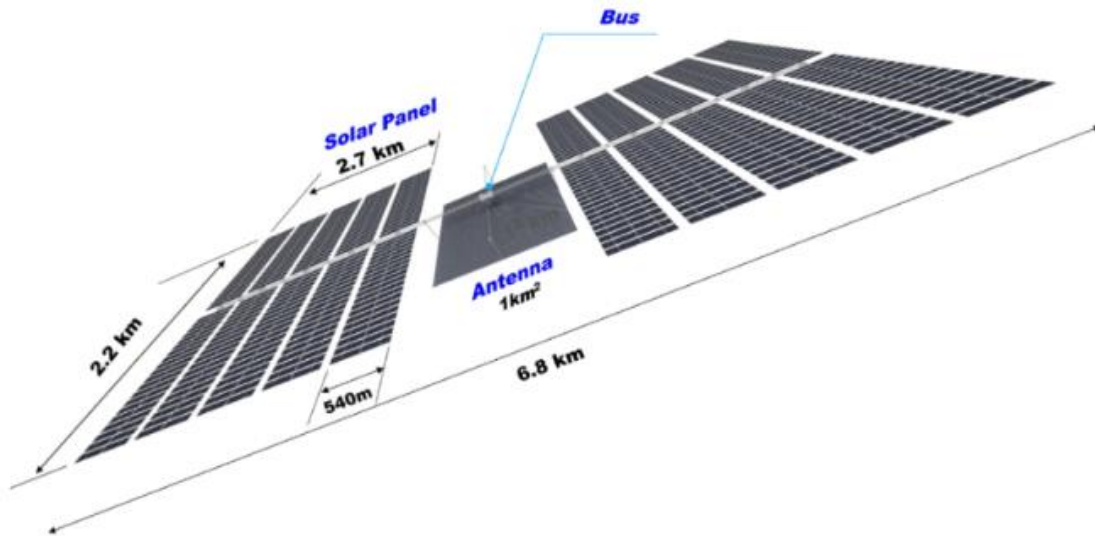


図 1-37 K-SSPS の概要

出所) “ Case studies on space solar power in Korea”, Joon-Min Choi, Su-Jin Choi (KARI), Sang-Hwa Yi (KERI), Space Solar Power and Wireless Transmission, Volume 1, Issue 1, June 2024, Pages 27-36

#### 1.5.4 オーストラリア

2021 年 12 月に発表されたオーストラリア下院産業・イノベーション・科学・資源常任委員会の宇宙産業報告書「The now frontier: developing Australia’s space industry」では、SSPS 技術のような革新的な宇宙に関する提案を特定し、開発メカニズムを検討するよう提言した。

#### 1.5.5 IAA Permanent Committee on SSP

2021 年 12 月、IAA(International Academy of Astronautics)は、主に SSP (Space Solar Power)に取り組む国際的な活動の枠組みを構築し、調整することを目的として、新たな常任委員会を設置することを決定した<sup>45</sup>(主査:Mankins 氏、副主査:田中孝治准教授)。1) IAA 会員に年次報告書を提出する、2) このテーマに関する定期的なワークショップを実施する、3) SSP の分野における技術的研究(‘cosmic study’を含む)に参加し(適切な場合には)主導を行う、4) 適宜、委員会の活動を遂行するための小委員会を組織する、等を活動の目標として掲げている。現在、以下の小委員会が設置されている。

<SSP Permanent Committee 下に設置される Sub-Committee>

- ・ Sub-Committee 1: Oversight and Integration
- ・ Sub-Committee 2: Implementation Coordination & Cooperation
- ・ Sub-Committee 3: Legal & Regulatory Considerations
- ・ Sub-Committee 4: Wireless Power Transmission

<sup>45</sup> <https://iaaspace.org/about/permanent-committees/#1658152483135-da4f166b-7716> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

- ・ Sub-Committee 5: SPS Systems & Technologies (Identification and Assessment)
- ・ Sub-Committee 6: Concept of Operations (CONOPS) for SSP
- ・ Sub-Committee 7: Markets and Financials
- ・ Sub-Committee 8: Education and Outreach for SSP

## 1.6 民間企業やスタートアップによる取組み

近年では、政府関係機関のみならず、民間企業やスタートアップによる SSPS の取組みも活発化している。

新興の宇宙産業分野における商業エンティティの最大のオンラインデータベースを提供している Factories in Space<sup>46</sup>によると、2024 年 4 月現在、同データベースで把握している SSPS 関連の活動を行っている企業数は 71 に及ぶ(コンセプトベースのもの、休止したものも含む)。同データベースが関連企業の活動を“Power Beaming”、“Solar Cells”、“Solar Mirrors”、“Space Solar Power”に分類し、さらに設立年数別にグラフにした図を図 1-39 に示す。図より 2018 年以降に設立されたスタートアップによる活動数が多くなっていることが分かる。しかし、これらの企業による取組はまだ黎明期であり、コンセプト／研究段階のものが一般的である。また民間からの資金提供は、核融合やロケット、さらにはカリフォルニア工科大学の SBSP 寄付と比べると非常に限定的なものとなっている。

以降では、SSPS 関連の活動を行っている代表的なスタートアップについて、その概要と活動内容を整理する。なお、SSPS 関連の活動および次章で示す無線給電技術(WPT)に関する活動が一体で行っているスタートアップも存在するが、本章では最終的に宇宙から地上への大出力でのエネルギー伝送を目標としている企業を取り上げ、次章では地上間、あるいは地上と上空間、宇宙間(衛星間)を目標としている企業について示すこととする。

---

<sup>46</sup> 2018 年より新しい宇宙経済分野で活動している、あるいは活動を目指している商業的なエンティティのデータベース。2024 年 4 月時点で 920 社のエントリーがある。[www.factoriesinspace.com](http://www.factoriesinspace.com)

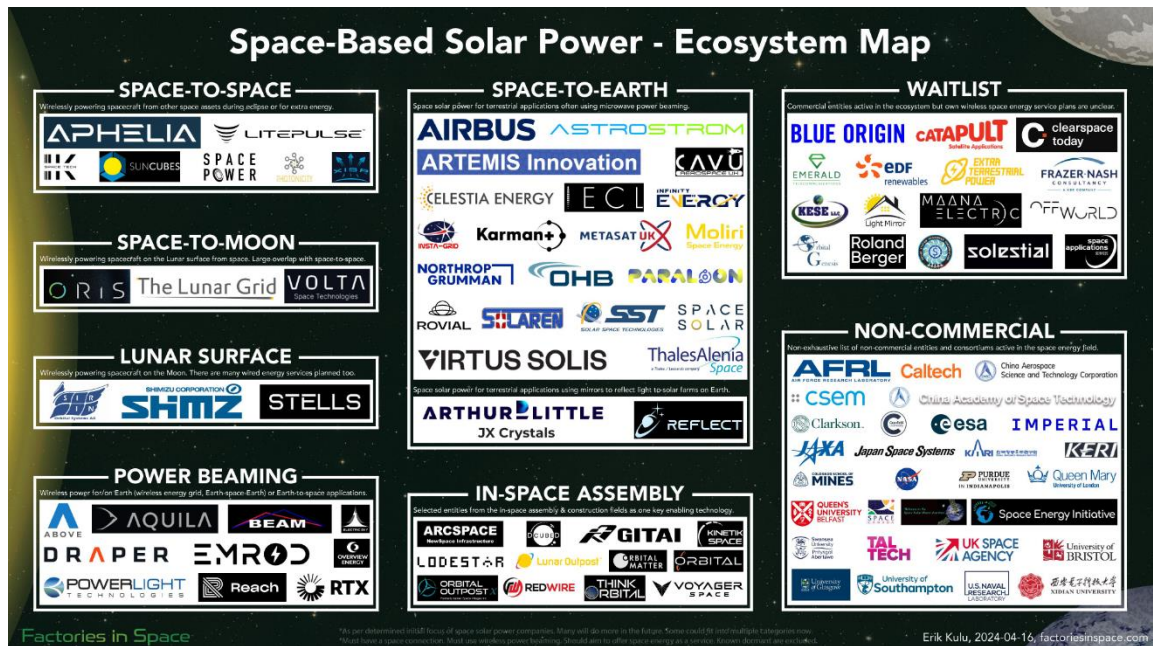


図 1-38 SBSP エコシステムマップ

出所) "Space Solar Power : Updated Survey of Private Initiatives" Erik Kulu (Factories in Space), International Conference on Energy from Space 2024

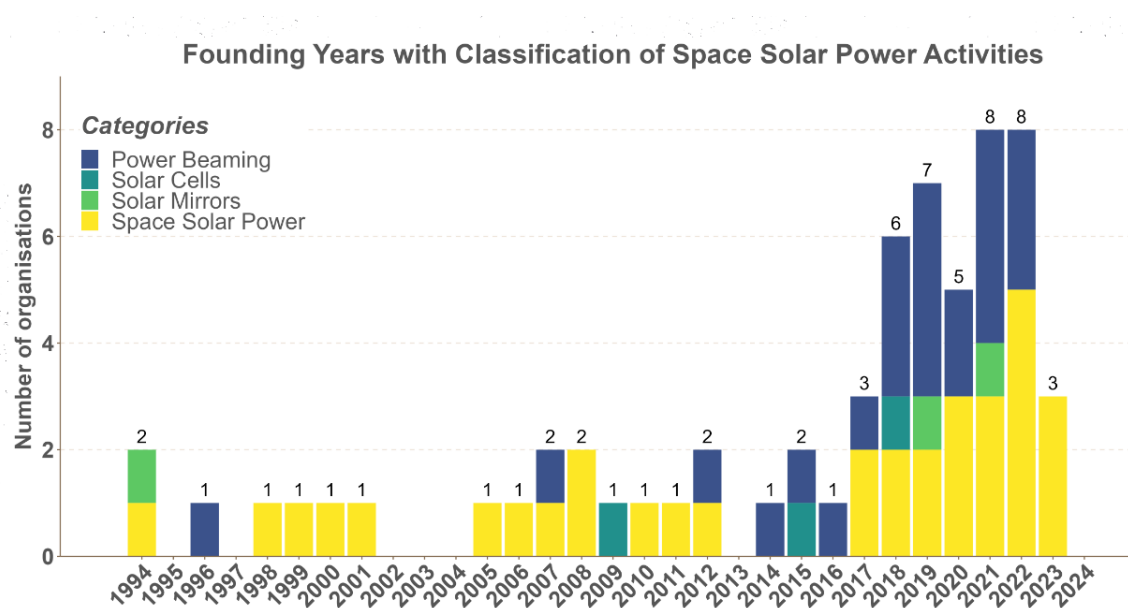


図 1-39 設立年別で示す SSPS 活動エンティティ数

出所) "Space Solar Power : Updated Survey of Private Initiatives" Erik Kulu (Factories in Space), International Conference on Energy from Space 2024

## 1.6.1 米国

### (1) Aetherflux 社

2024 年 10 月、米国のスタートアップ企業 Aetherflux 社は、赤外線レーザーで地上へ送電する低軌道衛星コンステレーションによる SSPS の開発を発表した。米スタートアップ企業 Apex 社が提供する衛星バスを使用する予定で、スポットサイズが 10m の赤外線レーザーを地上に送信して kW 級の電力を生成する計画である。2026 年初頭までに小型技術実証衛星を打上げるとしている<sup>47</sup>。

Aetherflux 社の創業者は Robinhood 創業者の Baiju Bhatt 氏で、最初のデモミッションを遂行するのに十分と考えられる“the ten-millionish range”の自己資金を提供している。2024 年 10 月時点での同社の現在の従業員数は 10 名弱と言われている。

図 1-40 に同社の示す衛星のイメージ図を示す。ユーザーとしては、「サプライチェーンや燃料の調達が難しい」前進作戦基地などの防衛用途をターゲットにしており、遠隔地での採掘作業や軍事基地など、従来の電力インフラを構築するのが困難な地域を想定している。また長期的には商業用および民生用のベースロードおよび再生可能エネルギーとしての利用を目指している<sup>48</sup>。

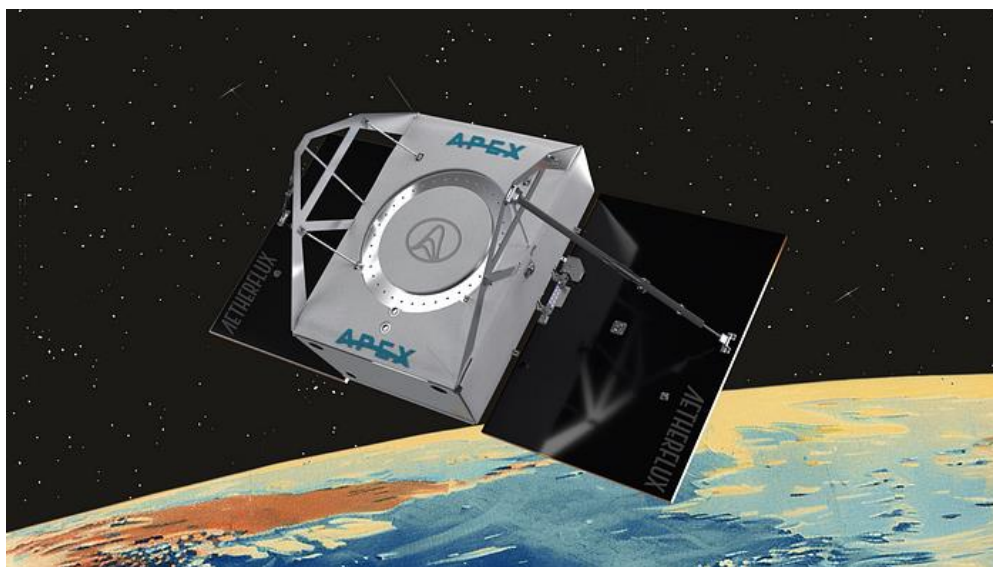


図 1-40 Aetherflux 社の開発する SSPS 衛星

出所) <https://aetherflux.medium.com/allow-me-to-re-introduce-myself-3fb63b633d33> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

### (1) Orbital Composites 社

Orbital Composites 社は、2014 年に設立された米国カリフォルニア州のスタートアップである。多様な素材を扱える積層造形技術と積層造形向けのロボティクス技術に強みを有しており Small

<sup>47</sup> <https://www.killerstartups.com/billionaire-backs-aetherflux-space-laser-startup/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

<sup>48</sup> <https://spacenews.com/aetherflux-joins-commercial-spaceflight-federation-csf/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

Business Innovation Research (SBIR)契約により、宇宙でのサービス、組立て、製造開発技術の開発を行っている<sup>49</sup>。

2023 年 7 月には米国宇宙軍(USSF)と軌道上で 3D プリンターによるブロードバンド通信用アンテナ製造実証実験に関する契約を締結した<sup>6</sup>。最終的には、この 10 年後に Axiom Space 社の民間宇宙ステーションの外にサービス、組立、製造研究所を設立することが目標となっている。

1.6.1(3)項で示す Virtus Solis 社と協力して SBSP 関連の技術開発にも取り組んでおり、2027 年に SBSP の実証実験を行うとしている。

## (2) Solaren 社

2001 年に設立されたカリフォルニア州の Solaren Corp.社は、エネルギーと航空宇宙を組合わせた企業であり、SBSP の設計、開発、展開、運用に関わる事業を手掛けている。同社が SBSP を所有・運用し、電力会社や政府顧客にベースロード電力を販売するビジネスモデルを検討している。

実際に 2009 年には、カリフォルニア州の電力会社の Pacific Gas & Electric 社と SBSP による電力供給(20 万 kW)の買電契約を締結した実績を持つ。ただし、当初は 2016 年からシステムを稼働させる予定であったが、結局実現せずに終わっている。

なお 2023 年 6 月には、シリーズ D の初回資金調達ラウンドで 250 万ドルを調達した<sup>50</sup>。

## (3) Virtus Solis Technologies 社

Virtus Solis Technologies 社は、2019 年に米国のミシガン州トロイに設立されたスタートアップ企業であり、SSPS と WPT に関する技術の開発を行っている。

同社は、NASA の宇宙技術ミッション局(STMD)が主催する賞金付きコンテスト「Centennial Challenges<sup>51</sup>」の一つである「Watts on the Moon Challenge<sup>52</sup>」に参加した実績を持つ<sup>53</sup>。本コンテストは二つのフェーズから構成され、うち第二フェーズは実証が含まれるより実践的なフェーズであり、3 段階のゲートを設け事業者の成果を評価することとなっているが、2022 年 8 月、同社は第二フェーズのレベル 1 の優勝 7 事業者の 1 事業者として 20 万ドルを獲得している。なお本チャレンジ

---

<sup>49</sup> <https://www.orbitalcomposites.com/blog/orbital-composites-secures-sbir-grant-from-us-space-force-to-develop-quantum-antennas-for-secure-communications>(2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>50</sup> <https://www.solarenspace.com/2023/06/05/solaren-raises-2-5m-in-series-d-financing/> (2024 年 11 月 19 日閲覧)

<sup>51</sup> NASA の STMD 内のチャレンジ・プログラムの一つであり、宇宙開発に应用できる基礎研究、応用研究、技術開発等におけるイノベーション促進のため開催される賞金付きコンテスト。民間企業が政府資金に頼らず技術開発を推進し、達成された場合のみ賞金が授与される。2005 年から開催。

<sup>52</sup> NASA の技術ギャップに対応し、宇宙飛行や将来の月面での運用に向けてさらに開発する必要のあるエネルギー分配・管理・貯蔵のためのソリューションを求めるコンテストである。2020 年 9 月から開始され、NASA の Glenn Research Center と Marshall Space Flight Center にある Centennial Challenges の一部により運営されている。本コンテストで発見された斬新なソリューションは、月や宇宙の探査に変化をもたらすだけでなく、地球上での新しい電力供給手段を促進するのに役立つ可能性がある、としている。第一フェーズおよび第二フェーズより構成されるが、2021 年 5 月からの第一フェーズでは総額 500 万ドルの資金を提供している。

<sup>53</sup> <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/glenn/seven-teams-advance-in-nasas-5m-watts-on-the-moon-challenge/> (2023 年 10 月 4 日閲覧)



は、既存の電源から電力を取り出し、月面環境下で 3km にわたってエネルギーを供給するコンセプトを提出するというものであった。

また 2023 年 3 月には、インディアナ州ウェストフィールドのグランドパークにて、投資家や関係者の前で WPT 電力伝送に関するシステム実証を行った。アンテナ素子 6,400 個からなる送電アンテナよりアンテナ素子 1,944 個からなる 1.32m×1.62m の受信アンテナ(レクテナ)を用いて、送信機の向きを固定して、複数のターゲットにワイヤレス・パワービーム・ステアリングを行い、100m の距離に渡って 68W の電力の送信を行った。(図 1-41 参照)

また 2023 年 6 月には、Orbital Composites 社と商用の世界初となる MW 級規模の SBSP を建造するための提携 MOU を締結している<sup>54</sup>。さらに 2024 年 2 月に、両社は SBSP の実証実験を 2027 年に行うことを発表した<sup>55</sup>。中軌道(MEO)において、太陽光パネルを宇宙空間で組み立てて、1kW 以上の地球への送電などの実証を行う計画となっている。両社は本ミッションを「MW 級の大規模な商業用太陽光発電設備を宇宙に設置するための先駆け」と位置づけている。

なお、同社の SBSP コンセプトはモルニア楕円軌道にコンステレーションを展開するというもので、2 基の衛星アレイコンステレーションによりある地点で 90%の電力を供給することができ、3 基あれば 100%の電力を冗長的に供給することができるという。16 基の衛星アレイからなるコンステレーションがあれば、地球上のどこでも 24 時間 365 日の電力を供給することができる。衛星アレイは 100MW から 20GW まで拡張可能であり、フェーズドアレイアンテナを使用することで、複数の地上局が同時に電力を受け取ることができる。必要に応じてコンステレーションにアレイを追加し、システム容量を年間ギガワット単位で拡張できる。衛星アレイを構成するタイルは 1.65m の六角形で、片面が太陽電池、片面が送電アンテナとなっている可動部のない一体型構造となっている。また六角形の各面には、他のタイルとの相互接続を可能にする機能がある。(図 1-42 参照)

同社は SBSP の輸送に Starship を利用すれば、LEO で 1kg あたり 200 ドル以下での打上げが可能になり、地上での原子力発電や火力発電よりも安価になると発言している<sup>56</sup>。2024 年 2 月には、“Survey of Space Based Solar Power (SBSP)” という SBSP のリファレンスデザインと経済性に関するレポートを発行しているが<sup>57</sup>、それによると同社は SBSP システムの LCOE(均等化発電原価)を 25 ドル/MWh と見積もっている。

<sup>54</sup> <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-enters-into-manufacturing-agreement-with-orbital-composites> (2023 年 10 月 5 日閲覧)

<sup>55</sup> <https://spacenews.com/orbital-composites-and-virtus-solis-announce-space-based-solar-power-demonstration/> (2024 年 2 月 9 日閲覧)

<sup>56</sup> <https://www.space.com/spacex-starship-solar-power-beaming-virtus-solis> (2024 年 11 月 20 日閲覧)

<sup>57</sup> <https://space.nss.org/wp-content/uploads/2024-Survey-of-Space-Based-Solar-Power-Virtus-Solis.pdf> (2024 年 11 月 20 日閲覧)



図 1-41 WPT 実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>、  
2023 年 10 月 5 日閲覧

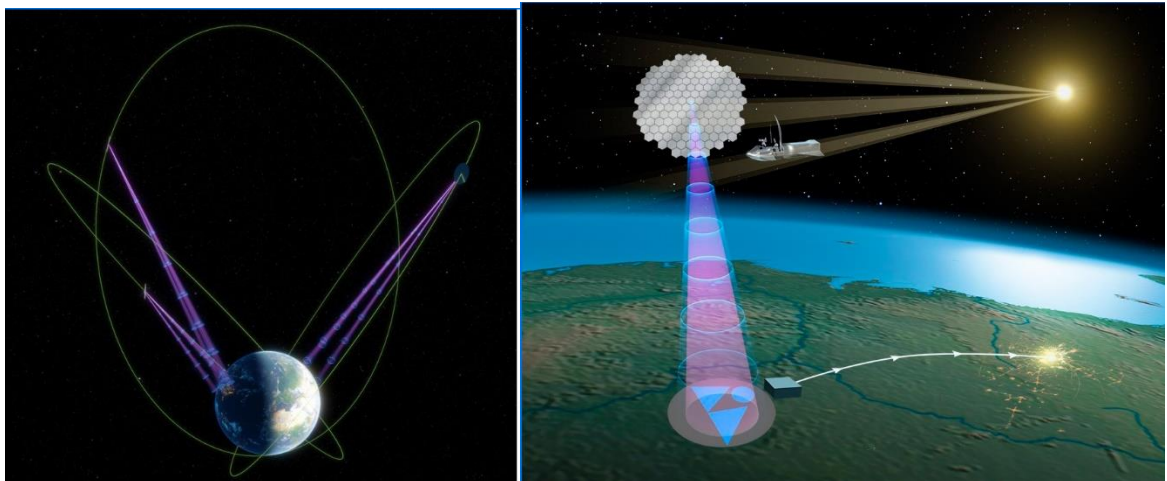


図 1-42 Virtus Solis 社の SBSP コンセプト

出所) <https://virtussolis.space/blog/virtus-solis-space-based-solar-and-power-beaming-white-paper-2023>、  
2023 年 10 月 5 日閲覧

## 1.6.2 欧州

### (1) Astrometris 社(スイス)

1998 年に設立されたスイスの Astrometris 社は宇宙からのクリーンで無尽蔵なエネルギーを開発し、欧州と世界に提供するための開発を行っている。

2023 年 7 月、同社は ESA の OSIP (Open Space Innovation Platform) キャンペーンによる「Greater Earth Lunar Power Station (GE<sup>2</sup>-LPS)」の概念設計について、最初の研究結果を発表した。

本研究は、主に月の資源を用いて建造され、地球と月のラグランジュ点に展開される SSPS が、メガワットのマイクロ波電力を月面の受信機に供給し、将来の有人基地を含む月面活動のニーズに応えることを想定している。V 字型の太陽パネルと一体型のアンテナを備え、端から端まで  $1\text{km}^2$  以上にわたるヘリックス構造で展開される。月で生産される黄鉄鉱(パイライト)の単粒子層太陽電池で構成されるソーラーパネルは、連続で 23MW のエネルギーを生成する。

このコンセプトの実現可能性を技術面および経済面から調査した結果、月面での採掘、選鉱、製造作業の中核技術のほとんどは、地球上ですでに使用されているか開発中であり、技術のブレークスルーがなくても GE<sup>®</sup>-LPS を実現できることがわかった。それらの技術を月の環境に適応させてモジュール形式で提供し、月面で遠隔操作型ロボットを通して管理できるとしている。さらに、月で製造される SSPS は、地球で開発される同等の SSPS よりも安価であることも検討結果として出されている。



図 1-43 Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station (GE<sup>®</sup>-LPS)」

出所)<https://nebula.esa.int/content/ge%E2%8A%95-lunar-power-station> (2023 年 9 月 25 日閲覧)

## (2) Paraloon (ベルギー)

Paraloon 社は 2023 年にベルギーのエッセンに設立された、インフレータブルな”parabolic balloon” 集光型太陽電池(CPV)構造を利用して、宇宙と地上の両方で SSPS を利用しようとする宇宙スタートアップである。「European Institute of Innovation for Sustainability」が主催するチャレンジ・ベースのコース「Space entrepreneurship」により繋がった宇宙愛好家のチームで構成されている<sup>58</sup>。現在は、軽量で膨張・展開可能なパラボラ構造と、光と熱の両方を電気エネルギーに効率的に変換する熱光起電力(TPV)技術を組み合わせた Paraloon システムの開発を行っている。宇宙での用途としては人工衛星、宇宙ステーション、居住施設、ミッションビークルなどが考えられ、地上では遠隔地、レクリエーション、防衛、難民キャンプ場、緊急事態、移動用途等での使用を想定している。

<sup>58</sup> <https://spacesolutions.be/portfolio/paraloon/> (2024 年 1 月 25 日閲覧)



図 1-44 Paraloon 社によるインフレータブル展開構造

出所) <https://www.paraloon.space/s-projects-side-by-side> (2024 年 11 月 22 日閲覧)

### (3) Sirin Orbital Systems 社(スイス)

2019 年に設立されたスイスの Sirin Orbital Systems AG は、特に SBSP/WPT アプリケーション、革新的な推進システム、衛星の軌道上サービス、現地資源利用(ISRU)、および将来の持続可能な宇宙探査のための高度な革新的技術の開発に重点を置いているスタートアップである。京都大学生存圏研究所とも協力関係を築き、2022 年より毎年 11 月に Japan-Swiss SBSP Workshop を東京で開催している。

同社が検討している「16U4SBSP」は、16U キューブサット群を SBSP の実現に利用するための実証ミッションである。本ミッションコンセプトでは、16U キューブサット群が飛行し、宇宙空間で kW 級の太陽エネルギーを集め、それを地球上のクライアントや宇宙空間の他の衛星にワイヤレスで伝送する。これは、(GW 規模の)SBSP の実現に向けた基本的な技術実証のステップとなっている。本件は 2023 年初め、キューブサット群によって可能になる新しいミッションコンセプトの革新的なアイデアを OSIP キャンペーン”Innovative Mission Concepts Enabled by Swarms of CubeSats ”により公募していたもので、74 件の応募の中から選ばれた 7 件のうちの 1 つとして、2023 年 10 月から 2024 年 4 月に ESA から 10 万ユーロの資金を受けて実施された<sup>59</sup>。

その他、小型衛星用の推進システム、マイクロ波及びミリ波無線電力伝送技術(月面探査ローバ用の 35GHz 無線電力伝送を含む)、小型分光計用の量子ベースの先進技術、アクティブデブリ除去(ADR)および近接作業用の姿勢推定と自律ビジョン技術等の開発を行っている。このようなポートフォリオが宇宙技術を活用した環境問題の取組に対する功績として評価され、2024 年 10 月に World Space Week Association<sup>60</sup>が主催する “Leading Innovation in Space” 賞<sup>61</sup>を受賞している。

<sup>59</sup> <https://nebula.esa.int/4000142405> (2024年 11 月 22 日閲覧)

<sup>60</sup> 宇宙教育と普及活動を行う国際的な非営利組織であり、国際宇宙航行連盟(IAF)のメンバーである。毎年 10 月に World Space Week の企画・運営を行っている。

<sup>61</sup> 最終候補の 25 社には、Airbus、Arianespace、Thales Alenia Space、三菱商事等が含まれていた。



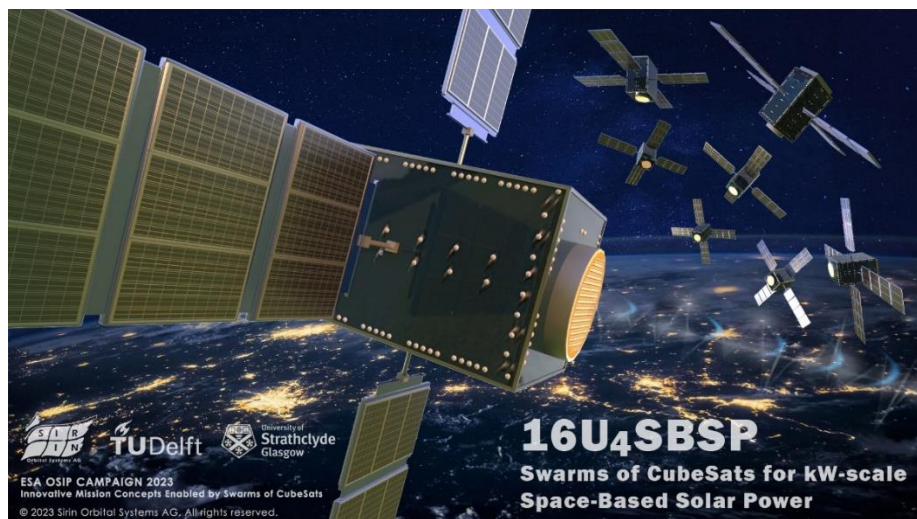


図 1-45 「16U4SBSP」ミッションのイメージ

出所) [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2023/10/A\\_CubeSat\\_swarm\\_beaming\\_down\\_solar\\_power](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/10/A_CubeSat_swarm_beaming_down_solar_power)  
(2023 年 10 月 20 日閲覧)

#### (4) Space Solar 社(英)

英国の Space Solar Engineering Ltd.は、2022 年 4 月、英国の衛星利用推進センター (SAC: Satellite Applications Catapult)からスピンアウトする形で設立された。SBSP の開発を促進するための商業組織という位置づけであり、Space Energy Initiative (SEI)<sup>62</sup>のメンバーにより構成されている。最初の無線電力実証機の完成を含め、2029 年までに宇宙から MW 規模の電力を送電する大規模な実証実験も計画している。

2023 年 10 月には Thales Alenia Space (TAS) 社と最初の商業 SBSP システムに関して協力するパートナーシップを締結した。

さらに英国の SBSP Innovation Competition<sup>63</sup>の中で、CASSIOPeiA の電子ステアリング技術とビーム品質を検証するプロジェクト (CASSIE: The CASSIOPeiA Antenna with Steering Scaled Indoor Experiment) に 100 万ポンド、ベースロード電力の商業的かつ持続可能な SBSP のコンセプト設計を進めるプロジェクト (C3P0/A) に 42 万 5000 ポンドを獲得した。CASSIE プロジェクトでは、レトロディレクティブ方式による 360° 方向のビームステアラブルアレイの屋内無線電力伝送実験 (200W/m<sup>2</sup> の強度のマイクロ波を 6.5m にわたり伝送) を実施している。(図 1-46 参照)

2024 年 4 月には、CASSiDI (Cassiopeia Design Iteration) プロジェクトとして 120 万ポンドを獲得した。CASSiDI プロジェクトは SAC、Thales Alenia Space および Oxford Space Systems 社と共に実施した先行研究を基に、CASSIOPeiA アーキテクチャに基づく SBSP の基本モジュール概念設計を行うプロジェクトである。

<sup>62</sup> 2021 年 8 月に設立された SBSP の可能性とビジョンを共有する、英国の政府機関、大学、企業等、80 以上の団体により組織された連合体。2040 年までに運用可能な SBSP システムの開発を支援する目的を有する。

<sup>63</sup> SBSP Innovation Competition は BEIS が実施している、最大 600 万ポンド (約 9 億 8 千万円: 300 万ポンド~さらに最大 300 万ポンドまで) 相当の助成金コンペティション

また 2024 年 4 月以降は、HARRIER(Horizontal Array for Receiving RadIoEnergy Retrodirectively)プロトタイプを用いたワイヤレス電力伝送テストキャンペーン等も実施している。(図 1-47 参照) 2025 年 2 月現在、HARRIER Prototype 4 がクイーンズ大学 Belfast のチャンパー内で試験中である。

さらに 2024 年 10 月には、アイスランドの Reykjavik Energy 社に SBSP から電力供給することで合意した<sup>64</sup>。2030 年までに初期容量 30MW で供給し、2036 年までに大規模なシステムにスケールアップする計画となっている。本計画については、アイスランドの民間気候変動イニシアチブである Transition Labs が戦略的計画、資金調達および事業開発を支援している。現在、地上の受信ステーションの候補地を検討しているが、アイスランド、カナダ、日本の北部は、コンステレーションが発展するにつれて、追加の受信ステーションが設置される可能性のある場所である、としている。

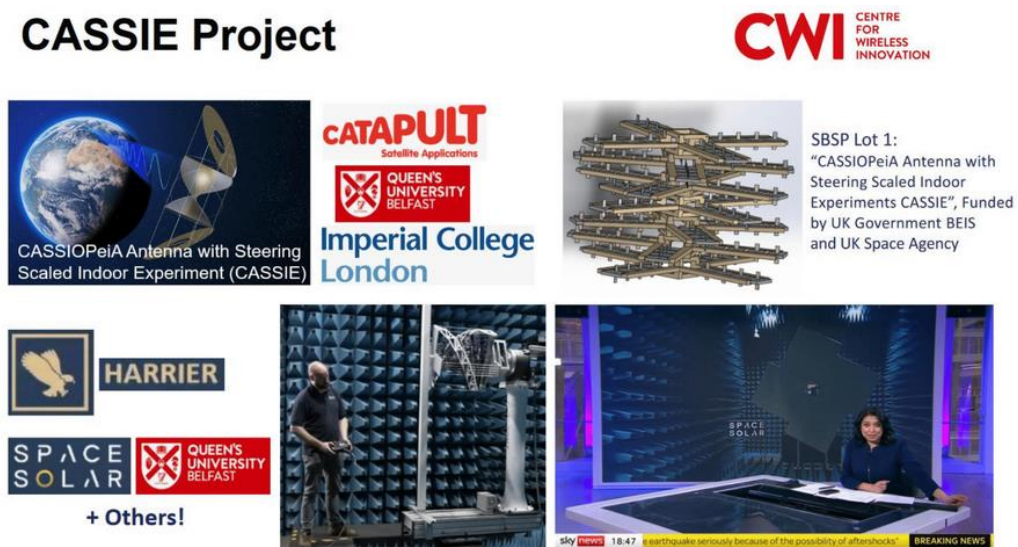


図 1-46 CASSIE プロジェクトの概要と参加組織

出所)<https://www.aerosociety.com/media/23646/efs-day-3-neil-buchanan.pdf> (2024 年 11 月 25 日閲覧)

<sup>64</sup> <https://spacewatch.global/2024/10/space-solar-announces-space-based-solar-power-plant/> (2024 年 10 月 29 日閲覧)





図 1-47 HARRIER の実験装置

出所) [https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2024/ListTechnicalPresentations/2024\\_STSC\\_technical\\_presentations\\_slides/9\\_20--Item\\_11\\_UK\\_Technical\\_Presentation\\_SBSP\\_M\\_Maheshwarappa.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2024/ListTechnicalPresentations/2024_STSC_technical_presentations_slides/9_20--Item_11_UK_Technical_Presentation_SBSP_M_Maheshwarappa.pdf) (2024 年9月 9 日閲覧)

### 1.6.3 その他

#### (1) Space Solar Technologies 社(オーストラリア)

Space Solar Technologies 社は 2019 年にオーストラリアのビクトリア州に設立されたスタートアップ企業である。SSPS を開発・展開し、最終的にはオーストラリアの電力市場およびオーストラリアから他国へのエネルギー輸出のために、少なくとも合計 18GW の発電容量のシステムを開発する計画である。2027 年にオーストラリアの電力網にベースロード電力を供給することを目標としている。米国の John C. Mankins 氏とも協力関係を築いている。

#### (2) NTT 宇宙環境エネルギー研究所(日本)

NTT 宇宙環境エネルギー研究所では、レーザー伝送型の SSPS の研究を進めている<sup>65</sup>。レーザーエネルギー伝送技術として大気中のビーム伝搬シミュレーションや関連実験を行うと共に、太陽光励起レーザー発振実験や高強度ビームエネルギー変換技術の開発も行っている。

## 1.7 まとめ

近年、米国、欧州、中国等を中心として、世界の各国における SSPS 実現へ向けた検討や開発への取組みが積極的に行われている。主な背景としては、①軌道上への輸送コストが大幅に低減したこと、②環境目標として掲げる温室効果ガス排出 Net Zero に向けて、世界の多くの国・地域が積極的な取組みを始めていること、③月面や宇宙空間へのエネルギー供給など技術の派生展開(スピンオフ)のニーズが顕在化してきていること、等が挙げられる。

<sup>65</sup> [https://www.rd.ntt/se/technology/space\\_solar\\_power.html](https://www.rd.ntt/se/technology/space_solar_power.html) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

米国では、現在の SBSP 研究開発の主流は米空軍研究所(AFRL)と米海軍研究所(NRL)であり、それぞれ要素技術の軌道上実証を進めている。NRL は 2019～2020 年にかけて地上、ISS 内、X-37B による軌道上で関連実験を行っている。(X-37B は 2022 年 11 月に帰還)また AFRL は 2025 年に「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験を計画しており、1 億ドル以上の予算を確保し開発を進めている。なお米国はこれとは別にカリフォルニア工科大学(Caltech)が 1 億ドル以上の寄付を得て Space Solar Power Initiative(SSPI)と呼ばれるプロジェクトを開始しており、軌道上実証機 SSPD(Space-based Solar Power Demonstrator)を 2023 年 1 月に打上げ、主要な重要要素技術の軌道上試験に成功している。AFRL および Caltech とともに Northrop Grumman 社が共同で開発を行っている。さらに、2022 年からは NASA の技術・政策・戦略室(OTPS)による SSPS に関する再評価が実施され、2024 年 1 月に報告書が公開されている。

欧州では、ESA が欧州の温室効果ガス排出 Net Zero とエネルギー自給を達成することを目的に、2022 年 12 月、SOLARIS と呼ばれる欧州向け SBSP 準備プログラムを正式に開始した。SOLARIS は SBSP に関連する技術的な問題を解決するための 3 年間の研究であり、欧州産業界の協力の下、技術的妥当性、メリット、導入オプション、商用利用の可能性、新興技術としてのリスク評価を行うとしている。またスタディ結果は 2025 年の次の閣僚会議において本格的な SBSP 開発の推進を決定するための検討材料とされる予定となっている。欧州における SBSP 導入の最終的な目標は、欧州が 2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero の目標を達成することの支援であるとし、2040 年に商用スケールの実用プラントを構築することを目標にロードマップを描いている。他のエネルギー源との関係については、SBSP は再生可能エネルギーでありながらベースロード電力となるという特性を有しているため、地上太陽光や風力などの断続的な供給源と競合するものではないとし、SBSP は今後数十年の間に、欧州のエネルギー部門の脱炭素化に大きく貢献することができるものであることを示している。またプログラムの遂行に当たっては、ESA はエネルギー分野の主要なステークホルダーと積極的に関わることを重視している。ESA ではまた、SBSP 開発において達成されるブレークスルー技術の進歩は非常に貴重であり、他の多くの宇宙活動の取り組みに適用できることも主張している。

英国では、2050 年までに温室効果ガス排出 Net Zero を達成することを目標としており、クリーンで安価、安全で信頼性の高いエネルギー源としての SBSP の可能性について注目を始め、2020 年より UKSA および BEIS による本格的な実現可能性についてのスタディを開始した。スタディの結果、SBSP は技術的に実現可能であり温室効果ガス排出 Net Zero を実現する新しい選択肢の一つとなり得ることが分かり、英国政府の優先順位に沿った開発であること、先進的なコンセプトではコスト的にも競争力があり、英国に広範な経済的利益をもたらすものであることが示されている。また、これらの検討結果を受けて、BEIS は 2020 年 7 月には最大 600 万ポンド相当の助成金コンペティションである「Space Based Solar Power Innovation Competition」をスタートさせている。本コンペティションで選定されたプロジェクト「CASSIOPeiA design iteration (CASSiDI)」を進めている Space Solar 社は、2024 年 4 月以降、HARRIER(Horizontal Array for Receiving RadioEnergy Retrodirectively)と呼ばれる CASSIOPeiA アーキテクチャに基づく SBSP の基本モジュールのプロトタイプを用いた無線電力伝送実験を行っている。同社はさらに 2024 年 10 月には、アイスランドの Reykjavik Energy 社に SBSP から電力供給することで合意しており、2030 年

までに初期容量 30MW で供給し、2036 年までに大規模なシステムにスケールアップする計画となっている。さらに英国は SBSP への共同投資の可能性を含む、宇宙における英国とサウジアラビアの協力関係について協議も始めている。英国では 2040 年までに運用可能な GW 級の SBSP を設立することを目指す、としており、現在は ESA の SOLARIS プログラムへの参加を並行して進めながら、SBSP の開発への取組みを行う形となっている。

中国における SSPS 研究は 2010 年より前から CAST を中心に行われてきていたが、2018 年頃から重慶市璧山区や西安電子科技大学に大規模な地上実験設備を建設するなどの動きが出ており活発化している。2022 年 6 月には、西安電子科技大学のキャンパス内の「OMEGA-SSPS 地上試験検証システム」と呼ばれる地上実験施設が完成している。本施設は世界初となる full-link and full-system であり、75m の鉄骨構造の大規模な施設となっている。中国における SSPS への取組み活動は、2020 年 9 月には、中国政府が 2060 年までのカーボンニュートラル達成の目標を掲げたことも追い風となり、軍事用と民生用のデュアルユース戦略で中国は SSPS の世界的なリーダーになることを意図して、研究開発を加速させている。2028 年に LEO で 10kW 級の規模の実証を行い、早ければ 2030 年に GEO で実験衛星による実証を行うというロードマップも公表しており、これらの実証実験は、2050 年に GEO 上で 2GW 級のエネルギーを生成するシステムを実現するための長期的な取り組みの一部と位置付けられている。なお、中国の SSPS 開発に関する進捗状況が積極的に公表されていたのは 1 年ほど前までで、2023 年以降の進捗状況はあまり明らかにされていない。

この他、韓国でも KARI(Korea Aerospace Research Institute)が主導する形で SSPS 開発に向けて動き始めている。韓国は国土が狭く、再生可能エネルギーでの発電には不向きな国であるため、2050 年までの温室効果ガス排出 Net Zero を達成するためには、SSPS による再生エネルギーの確保が目標を達成するためのブレークスルーになり得るとするのが一つの理由となっている。無線電力伝送に関しては、KARI と KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)の 2 機関が共同で実証の計画等を進めている。

表 1-2 に日本を含む各国のロードマップの比較を示す。

表 1-2 各国の SSPS に関するロードマップの比較

|                         | 地上実証   | 軌道上実証   | 軌道上電力伝送実証 |             |         |         |
|-------------------------|--------|---------|-----------|-------------|---------|---------|
|                         |        |         | ～100kW級   | ～1MW級       | 100MW級  | GW級     |
| 米国                      | Active | Active  | 2025      | —           | —       | —       |
| 欧州                      | —      | —       | —         | 2030        | 2035    | 2040    |
| 英国                      | ～2026  | 2027～31 | 2027～31   | 2027～31     | 2032～35 | 2036～39 |
| 中国                      | Active | — (*1)  | 2028      | 2030<br>GEO | 2035    | 2050    |
| 日本                      | Active | — (*2)  | FY2025    | 2030s       | 2030s   | 2040s   |
| *1 天宮宇宙ステーションを利用した計画はあり |        |         |           |             |         |         |
| *2 HTV-X1号機による実証計画あり    |        |         |           |             |         |         |

“Space Policy Review The Promise of Space-Based Solar Power”, American Foreign Policy Council (Sept 2022)等の各種資料を基に作成

## 2. 各国の無線給電技術(WPT)に関する調査

---

米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、ここ数年内に実施されているパワービーミング及び空間伝送型 WPT(Wireless Power Transfer)について、電波(主にマイクロ波)およびレーザー方式の実現を目指した研究開発または実用化に向けた動きに関する調査を行った。

### 2.1 パワービーミング WPT の開発動向

本項では近年(2020 年頃以降)に行われた主に高強度長距離(数十 m 程度以上)の伝送距離を対象とするパワービーミング WPT の開発動向を示す。

#### 2.1.1 電波方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

##### (1) 米国

##### 1) 米海軍研究所(NRL)の SCOPE-M プロジェクト

SCOPE-M(Safe and Continuous Power bEaming – Microwave)プロジェクトは 1kW の電力を 1km 伝送するマイクロ波送電研究プロジェクトであり、国防総省研究技術担当次官室(Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering)の運用エネルギー性能向上基金(OECIF:Operational Energy Capability Improvement Fund)から資金提供を受け、米海軍研究所(NRL)の Christopher Rodenbeck 博士の主導の下で進められている。SSPS 研究のキーパーソンである NRL の Paul Jaffe 氏も関与している。

2022 年にメリーランド州ブロッサムポイントの米国陸軍研究施設において、直径 5.4m の X 帯送信機から 1046m のスタンドオフ距離で 1.6kW の電力を供給するデモンストレーションを実施した。(図 2-1 参照)また、マサチューセッツ州ウェストフォードの MIT ヘイスタック天文台にある HUSIR(Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar)を用いて、ブロッサムポイントでのレクテナを HUSIR 用に設計変更し、70.6m の高さ、HUSIR 送信機から 1141m の距離に設置し、下部に LED ディスプレイを設置、1.2kW の電力を送信し、LED ライトを点灯させた。(図 2-2 参照)ブロッサムポイントでは目標の 60%を上回る効率を達成し、MIT では同じピークパワーはブロッサムポイントより小さかったものの、平均パワーレベルが高く、より多くのエネルギーが供給された。

10GHz の X 帯を使用した理由としては安価で成熟した技術であることと、大雨等による電力損失が 5%未満であることが挙げられている。Paul Jaffe 氏は「今回の実証実験により、地上、宇宙、そして宇宙から地球への電力伝送において、国際標準化団体が定めた安全基準値内の電力密度を実現する道が開かれた」と述べている。

SCOPE-M プロジェクトの電子技術者である Brian Tierney 博士によると、米国防総省は、攻撃を受けやすい状態になる可能性がある部隊の燃料供給への依存を低減できるようになるため、宇宙からの無線電力ビーム転送の実現性に関心を寄せているという。



図 2-1 ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ(左上)とレクテナ(右上と下)  
(Credit : NRL)

出所)<https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3004608/nrl-conducts-successful-terrestrial-microwave-power-beaming-demonstration/>(2022 年 12 月 26 日閲覧)



図 2-2 MIT の HUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電による LED 点灯実験(Credit : NRL)

出所)<https://dsiac.org/articles/nrl-conducts-successful-terrestrial-microwave-power-beaming-demonstration-2/>  
(2022 年 12 月 26 日閲覧)

## 2) 米国防高等研究計画局(DARPA)

米国防高等研究計画局(DARPA)では、2022 年 10 月より、主に光エネルギーリレー技術の開発を行い、空中での光エネルギーリレーシステムを設計・実証し、地上のレーザーと高高度長距離伝送技術を結び付けることを目指す POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムを実施しているが、マイクロ波送電に関しては、2022 年 12 月、POWER プログラムの一部として、DARPA TTO(Tactical Technology Office)は小型無人航空機システムにおける RF 電力ビームとリレーの機能を検討するための RFI(Request For Information)を発行した<sup>66</sup>。特定の環境とシナリオでは、RF 電力ビームは光電力ビームの伝送方式よりも大きな利点を提供するとし、無線 RF 電力伝送の実現により、小型無人航空機システム(SUAS:small unmanned aerial systems)は搭載するエネルギー貯蔵装置の重量を減らし、ペイロードの電力密度を高め、航続距離、性能、運用を拡大し、従来は大型の有人システムを必要としていた任務を代替できるようになる、ことを示している。さらに SUAS に RF 電力のリレー機能を持たせれば、ネットワーク範囲内のセンサ、デバイス、車両にエネルギーを供給することが可能となる、としている。

そのため DARPA は、複数の移動地上ノードから直径 1m までの開口を持つ複数の SUAS への RF 電力ビームを可能にする技術の特定に関心を持っているが、より小型の送信機で遠距離に電力を供給するための 1 つの解決策として、分散型コヒーレント送信機の検討を試みている。1 台または多数の飛行体に対するコヒーレントビーム形成の重要な要素技術である送信アパーチャと受信アパーチャの相対位置を動的に追跡する技術を開発し、さらに RF を有用な電気エネルギーに変換する技術の向上も目指す。さらに効果的で選択的な RF 電力リレーをサポートする技術の開発にも取り組む。本 RFI は、そのために必要な 100m から 1km の距離で RF 電力を照射するための技術や革新的なソリューションに関する情報を求めるものであり、そのためには、モバイル分散アパーチャによるコヒーレントビームフォーミング、RF 電力リレー、送受信機間の協調的追跡、自律リソースとミッション管理、RF から電気エネルギー変換の向上等の技術が含まれる、としている。

## 3) 民間企業の動向

### a. Electric Sky 社

米国シアトルに拠点を置く Electric Sky 社は、地上の送信機から電波を高度 20km 程度まで送信し、受信機で電波を電気に変換する Whisper Beam 技術の開発を行っている。Whisper Beam 技術は弱電波で発信しても、電波は受信機側で自己集束し、受信機に近づけば電波強度が高くなるという技術であり、UAV への給電等に利用すれば、UAV は天候に関わらず kW レベルの電力を得られるという。DARPA の SBIR プログラムにより開発を行っており(契約金額は 22 万 5 千ドル)、2021 年 12 月には、同技術を搭載した送信機の製造を開始している。

---

<sup>66</sup> Tactical Wireless Power Beaming Technologies for Energy Web Dominance Request for Information (Notice ID:DARPA-SN-23-22)



将来的には、地上の送信機から低電力で低層大気中を電力伝送し、高高度で電波を自己収束させて高電力を宇宙プラットフォームに供給するというコンセプトを描いている。2.1.2(1)3)a 項で示す Above:Space Development 社が計画している軌道上で迅速に展開可能なプラットフォーム「Archimedes」との組み合わせで、大電力電気推進、アクティブセンサー、エッジコンピューティング、指向性エネルギー、宇宙空間への電力中継、宇宙空間での建設、その他の用途に MW 級の電力が利用可能になることを目指している。

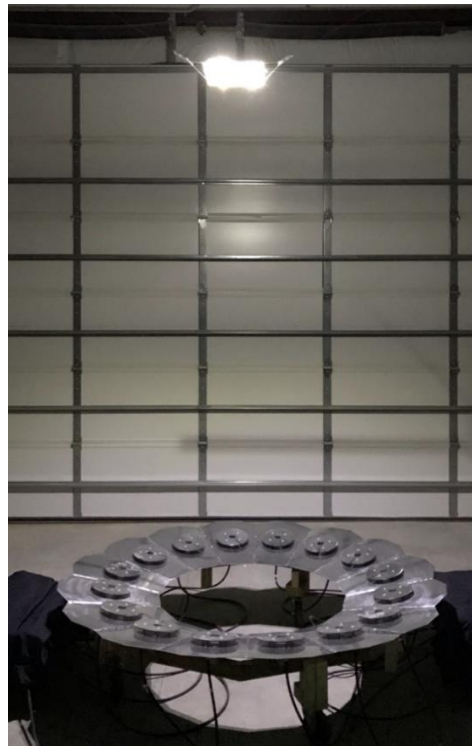


図 2-3 Whisper Beam トランスミッタ(下部の金属リング)から上空 3m の照明への無線電力伝送実証

出所)<https://www.uasvision.com/2023/02/02/electric-skys-wireless-power-transmitter-completes-initial-tests/> (2024 年 2 月 14 日閲覧)

## b. Reach Power 社

2014 年に米国のカリフォルニア州に設立された Reach Power 社(設立当初の社名は Reach Labs)は、2024 年 5 月、電波による WPT 給電システムを開発し、UAV に給電を行う実証に成功したことを発表した。米 DARPA の BAA(Broad Agency Announcements:広域機関公示)資金提供プロジェクトに基づいて実施されたもので、NASA の Ames 研究センターで、飛行中のドローンに向けて電波でエネルギーを伝送する実証試験を行った。実証では 4 台の送電装置がメッシュネットワークを構築して協調することで、約 6m の距離で飛行中のドローンに 50W の電力を給電した。(図 2-4 参照)個々の電源のフェイルオーバーを可能にするフォールト・トレラント・ネットワーキングを構築し、電力が低下しても、残りの電源がドローンに電力を供給することができることも実証した。このメッシュネットワークを構成するコンポーネントはモジュール式で追加と削除ができる構造となっており、柔軟性と高い拡張性を備えている。カバー範囲内にある機器に途切れることなく給電することができるた

め、工場で稼働するロボットへの給電、建設現場での工具の充電、災害時の一時的な電力網の確立など、多様な用途があるという<sup>67</sup>。

さらに、2024 年 11 月には本社において 40 を超える政府機関や業界パートナーの前で、WPT リレー実証(パッシブ WPT リレーとアクティブ WPT リレーの 2 部構成)に関するライブ・デモンストレーションを行った。(図 2-5 参照)送信機はリレーに向けて RF 電力ビームを放射し、リレーを介して複数のセグメントに RF 電力ビームをルーティングするというもので、送信機単独よりも遠方までビームを拡張することができる。本システムの主な特長は、ビームを直流(DC)に変換して再び RF に戻すことなく、距離に応じてビームを再フォーカスして方向転換し、システム効率を大幅に向上できることだという。

パッシブ WPT リレー(Passive Wireless Power Relay)のデモでは、Reach のパッシブ電力リレーノードを用いてライト ボードを点灯させた。リレーノードは、メタ・サーフェス回路基板の独自の構成を使用することで、追加の電子機器なしで送信機の範囲を拡張し、安価で容易に構築できるものとなっている。アクティブ WPT リレー(Active Wireless Power Relay)のデモでは、アクティブ電力リレーノードがソフトウェアによって制御される方向に、入力電力ビームをアクティブに反射した。アクティブ電力リレーノードは反射と整流の 2 つのモードで動作し、選択した量の電力ビームを動的に反射および吸収する。この機能によりノードは可動部品なしで、ネットワーク要件に基づいて電力ビームを再構成およびリダイレクトできる。なお本デモは米 AFRL の未来戦力エネルギーキャンペーン(Future Force Energy Campaign)契約に基づいて実施されており、WPT 電力ビームの拡張性と範囲を強化し、障害物を回避してより長距離に電力を拡張するためのリレー技術の確立を目指したものである<sup>68</sup>。

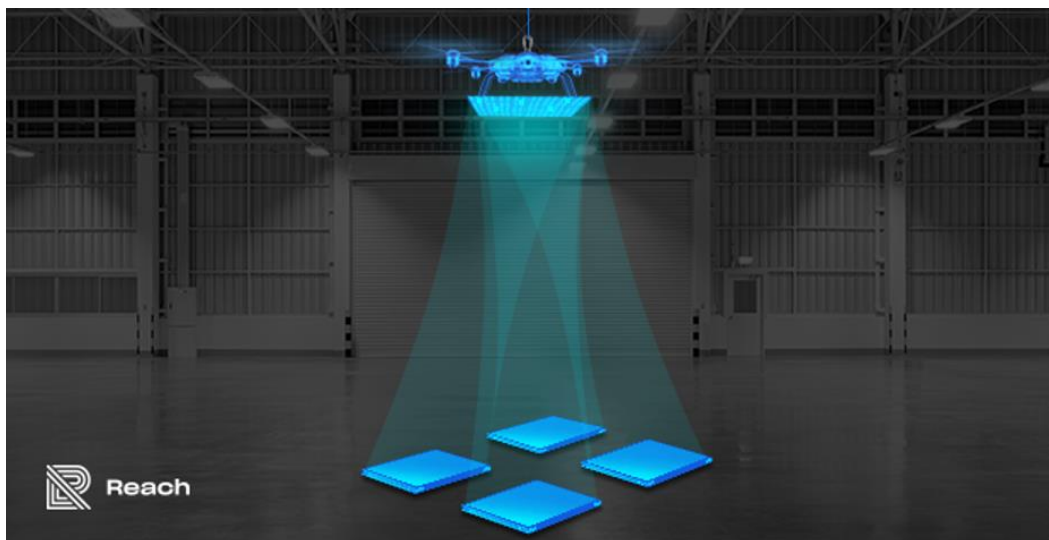


図 2-4 ドローンに電力を供給する 4 台のワイヤレス給電トランスミッター

出所)<https://reachpower.com/reach-enables-wireless-power-mesh-networking-for-drones/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

<sup>67</sup> <https://reachpower.com/reach-enables-wireless-power-mesh-networking-for-drones/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

<sup>68</sup> <https://reachpower.com/reach-completes-phase-ii-of-future-force-energy-campaign-with-u-s-air-force-demonstrating-worlds-first-wireless-power-relays/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

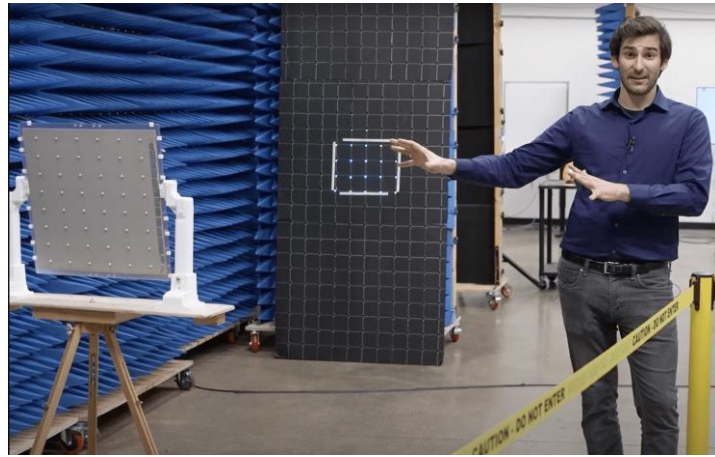


図 2-5 Reach Power 社 CEO の Chris Davlantes 氏のデモの様子

出所) <https://reachpower.com/reach-completes-phase-ii-of-future-force-energy-campaign-with-u-s-air-force-demonstrating-worlds-first-wireless-power-relays/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

## (2) 欧州(ESA、Airbus および Emrod 社との共同研究)

欧州では 2014 年にコンソーシアム WIPE(Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics) (<http://www.cost-ic1301.org/>) が設立されているが、ハーベスティングと RF-ID の研究が多く、放射型 WPT に関する研究開発は少なくなっている。

2022 年 9 月、ニュージーランドの Emrod 社は ESA、Airbus 社、TechnoCarbon 社(仏)との共同研究により、SBSP 用途の技術である電力伝送の実証に成功したと発表した。Airbus 社の Munich Area Site(Airbus Innovation Facilities)で行われた Emrod 社の屋内デモンストラーションでは、直径 1.92m の正方形のフェーズドアレイ送信アンテナと同サイズの受信アンテナを用いて、周波数 5.8GHz で 36m の距離を無線電力伝送した(図 2-6 参照)。Emrod 社の本技術は ESA が必要とする WPT 変換効率の達成に貢献する可能性があるものであり、本実験は欧州初の SBSP 用長距離無線エネルギー伝送の実証実験として、1.2.1 に示した SOLARIS プログラムを支えるものとなっている。なお本実験に際しては、Emrod 社は Airbus Defence and Space 社より資金提供を受けているが、Emrod 社の取組については 2.1.1(3)項で示している。



図 2-6 2022 年 9 月に Airbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証  
出所)<https://www.bbc.com/news/science-environment-62982113/> (2022 年 12 月 14 日閲覧)

### (3) ニュージーランド(Emrod 社)

2019 年に設立されたニュージーランドの Emrod 社は、同国第 2 位の電力会社 Powerco の資金提供を受けて、ワイヤレスかつ長距離のエネルギー伝送を効率的に行う技術の試験を開始している。

同社はもともとニュージーランド政府やニュージーランドのイノベーション支援団体 Callaghan Innovation の助成金により、マイクロ波を効率的に電力に変換するメタマテリアルを用いたプロトタイプの開発を行っていたが、2020 年より第 2 のプロトタイプを開発し、Powerco の資金提供を受けて、無線長距離エネルギー伝送を効率的に行う技術の試験に着手した。

2021 年 5 月には、最初の屋内での送電試験に成功した。検査・検証・試験・認証の大手企業である SGS が機器の試験に独立した第三者機関として立ち会い、規定の目標に対する性能を検証した。(図 2-7 左参照)ただし ISM バンドを利用していることは示されているものの、出力や効率等の結果については発表されていない。

その後は屋外でのフィールドテストを計画し、2022 年 4 月から 6 月にかけて、ニュージーランドのタラナキでパワービームプロトタイプシステムによる実験を行った(図 2-7 右参照)。200m の距離に渡る伝送を行い、ビーム整形、ビームステアリング技術、電力密度レベル、安全システム、アンテナ性能の測定と試験に利用する技術の主要コンポーネントの試験を行った。本試験はニュージーランドの国立新エネルギー開発センター Ara Ake と Powerco の協力の下、行われた。

また 2022 年 9 月には、前項で示したように、ESA、Airbus 社、TechnoCarbon 社(仏)とのパートナーシップを締結し、Airbus 社の Munich Area Site(Airbus Innovation Facilities)屋内デモンストレーションを実施した(図 2-8 参照)。これらの動きを受けて、2022 年 12 月には、ESA



のビジネスインキュベーションプログラムである ESA BIC に採択された。同社は ESA BIC Bavaria<sup>69</sup>に参加し、ドイツ・ミュンヘンの AZO HQ にオフィスを構える準備を行う、としている。

さらに 2023 年 10 月には、ESA と Airbus 社等との Munich Area Site でのデモンストレーションと同様のライブ・デモンストレーションを、オークランドの自社施設内においてブラジルや南アフリカなどの政府関係者や業界リーダーに披露している<sup>70</sup>。

このように同社は欧州と協力関係を築いており、2024 年 4 月には、ドイツ政府機関である SPRIND<sup>71</sup>から世界最先端の電力ビーミング装置開発のための資金を獲得している。同社は資金を世界最高の変換効率を目指した技術開発に充てるとしている<sup>72</sup>。

なお同社は 2023 年 10 月に、2024 年と 2025 年に大規模パイロット・プロジェクトを計画していることを示している<sup>73</sup>が、その後本プロジェクトに関する発表は行われていない。



図 2-7 2021 年 5 月に実施した屋内試験のプロトタイプアンテナ(左)／2022 年 6 月に実施したフィールド試験の建屋(右) (Credit:Emrod)

出所) <https://emrod.energy/emrod-successfully-demonstrates-indoor-prototype-to-powerco/> / <https://emrod.energy/emrod-taranaki-power-beaming-taranaki-field-deployment-update-video/> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

<sup>69</sup> 宇宙イノベーションの世界的リーダーである AZO が運営しており、資金、技術、専門家、施設の利用を含む 2 年間のプログラムを提供している。

<sup>70</sup> <https://emrod.energy/blog/international-delegation-witness-emrod-wireless-power-beaming-technology/> (2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>71</sup> SPRIND(FEDERAL AGENCY FOR DISRUPTIVE INNOVATION: 飛躍的イノベーション機構)は、2019 年 12 月にドイツ連邦教育研究省(BMBF)と連邦経済エネルギー省(BMWi)により設立された。画期的に市場を変えるイノベーションのアイデアが、さらに効果的にブレークスルーを達成できるよう支援することを目的としている。

<sup>72</sup> <https://emrod.energy/blog/sprind-grant-award-announcement/> (2024 年 11 月 25 日閲覧)

<sup>73</sup> <https://emrod.energy/blog/international-delegation-witness-emrod-wireless-power-beaming-technology/> (2024 年 11 月 25 日閲覧)



図 2-8 Airbus' Munich Area Site での実証実験システム (Credit: Emrod)

出所) <https://emrod.energy/press-release-emrod-successfully-demonstrates-power-beaming-technology-to-unlock-space-based-solar-power/> (2023 年 1 月 20 日閲覧)

#### (4) マレーシア(Aphelia 社)

Aphelia 社はマレーシアに拠点を置くスタートアップ企業であり、宇宙空間におけるマイクロ波無線電力伝送技術の開発に注力している。人工衛星や月面上のハードウェアにマイクロ波無線電力伝送技術を活用することにより、宇宙ミッションのバッテリー依存度を低減させ、ミッションの寿命を延長させることを目指している。

現在は、エネルギーコストを 50～80%削減し、月探査をより効率的で持続可能なものにするとして、月の日照側から日陰の領域への無線エネルギー伝送技術の開発を行っており、GaN で作られた RF MMIC 回路への取組みを進めている。

#### (5) 中国

中国では SSPS の研究開発を主導している宇宙技術研究院(CAST)の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave が SSPS 実証用のマイクロ波 WPT 技術の研究開発を行っている。大学としては、同じく SSPS 研究を主導している重慶大学、四川大学、西安電子科技大学等がマイクロ波送電実証実験を行っている。また、レーザーWPT 技術の研究開発も CAST、北京工科大学等で行われている。整流効率は 5.8GHz RF で 90%以上、レーザーDC 効率は 808nm レーザーで 70%以上の結果を出している。

2021 年 8 月には、CAST の協力のもと、China's Aerospace Info Research Institute が東シナ海において、高高度気球を浮遊プラットフォームとした研究船による高度 300m のマイクロ波伝送実験を行った。実験は、緊急通信実験ネットワークプロジェクト「スマートオーシャン」の一環として行われたものであり、30kg のペイロードを搭載して、搭載された AIS データ受信、SOS データ受信、LTE 信号のカバー率、マイクロ波伝送の機能と性能指標のテストを行った。

CAST では、その他電波暗室内において送信アンテナ 1.2m×1.2m、レクテナアレイ 2m×2m、伝送距離 30m において、送信出力 900W、ビーム制御精度 0.44°以上、MW-DC 変換効率 49%以上を達成した。また重慶大学では 2020 年、屋外において 5.8GHz、448W マイクロ波の 60m の距離の伝送実験を実施した。



## (6) 韓国

韓国では仁荷大学校(Inha University)が2018-2019年頃にXバンドの無線伝送により駆動する、ヘリウムを充填したマイクロ波駆動の飛行船(microwave-powered airship drone)実験機の開発と実証を行った。

またKERI(Korea Electrotechnology Research Institute)が国家科学技術会議(NST)のBIG Issue Group プロジェクトとして2017年から2025年までの長期研究を実施している。宇宙での中距離、大電力伝送システムを実現することを最終的な目標に掲げ、地上での要素技術研究や無線電力伝送実験に取り組んでいる。2021年には、DC-DCコンバータと組み合わせたショットキーダイオードをDC出力ポートに設置することで、DC電力合成レベルを向上させた拡張可能なアレイ型レクテナを開発し、屋外実験も行った。また、1284×8のレクテナに基づく大型のレクテナアレイを用いて、送受信機間の距離が長くなると、地上からの反射が大きくなるため、距離を50mに設定し、屋外実験を行った。(図2-9参照)KERIにおける2025年までの研究開発ゴールを図2-10に示す。

2024年1月には、KARIとKERIが共同で、1.81kmにわたる距離のワイヤレス電力伝送試験に成功した。エアロスタット(Aerostat)と呼ばれる浮力ガスを動力源とする空気より軽い航空機の機体にアンテナと受電用の発光ダイオード(LED)を装備し、韓国深宇宙アンテナ(KDSA)から2kWの電力を伝送した。実験では、エアロスタット上のアンテナは信号を直流に変換し、LEDが点灯して発電したことを示した。1975年にNASAが1.5kmの距離で34kWの電気エネルギーの伝送に成功した長距離ワイヤレス電力伝送のデモンストレーション以来、最長距離の記録を更新したという。(図2-11参照)続く2024年11月には、KARIが無人ヘリコプターを利用した無線電力伝送実証に成功した<sup>74</sup>。

この他、韓国ではKorean Wireless Power Forumが組織され、産業界や大学によりマイクロ波WPT実験等への取り組みが行われている。

---

74

[https://www.drone.jp/news/20241201112801105018.html?utm\\_source=chatgpt.com#google\\_vignette](https://www.drone.jp/news/20241201112801105018.html?utm_source=chatgpt.com#google_vignette)  
(2025年2月13日閲覧)

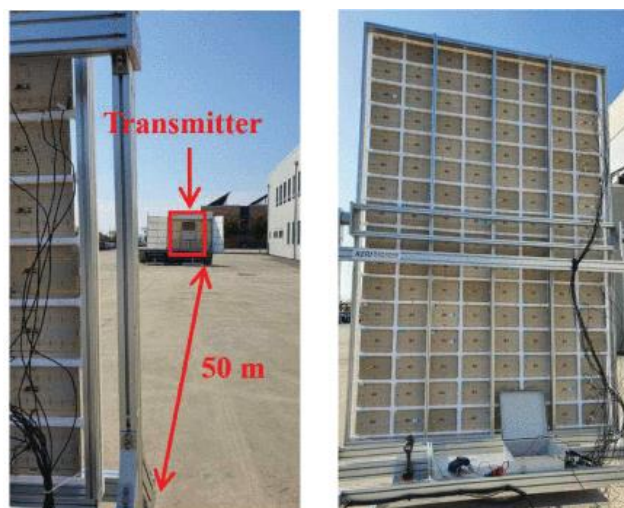


図 2-9 KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験

出所)J.M. Woo, et al., "Extendable Array Rectenna for a Microwave Wireless Power Transfer System," in IEEE Access, Vol. 9, 2021, pp. 98348-98360

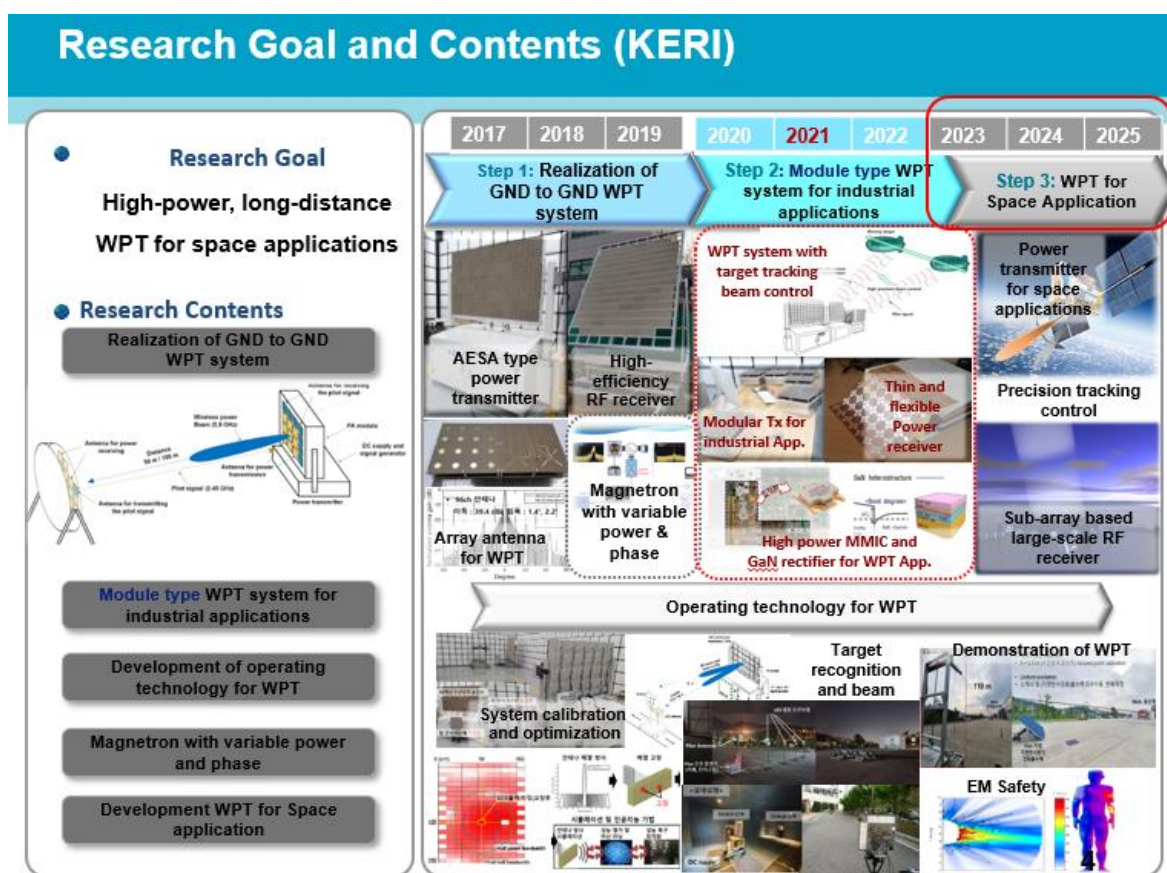


図 2-10 KERI における研究開発目標と内容

出所)“Introduction of Research on Space Solar Power in Korea”, Dr. Joon-Min Choi, KARI, International (On-line) Conference on Energy from Space, Oct 2023



図 2-11 KARI/KERI におけるエアロスタットへの無線電力伝送実験(1.81km)

出所) <https://pulsenews.co.kr/view.php?year=2024&no=57487> (2024 年 2 月 9 日閲覧)

## 2.1.2 レーザー方式 WPT(パワービーミング)の開発動向

### (1) 米国における取組み

レーザー方式 WPT の実用化は、マイクロ波 WPT より遅れて進んできているが、近年では NRL や DARPA が長距離伝送の可能性に注目しており、取組みが進められている。NASA でも月面探査におけるレーザーエネルギー伝送に関する研究開発等が行われている。また民間企業による

#### 1) 米国防高等研究計画局(DARPA)の POWER プログラム

2021 年 10 月、米国防高等研究計画局(DARPA:Defense Advanced Research Projects Agency)の戦術技術局(TTO:Tactical Technology Office)は「Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance」プロジェクトのための SBIR(Small Business Innovation Research)/STTR(Small Business Technology Transfer) Opportunity (SBO)を発出し、革新的コンセプトの提案を受付けた。Energy Web ネットワークとは、地上のレーザー光源から空中のノードに電力を供給し、ノードはその電力を変換して自船の要求に応じて使用し、変換せずに残った電力を他の Energy Web ノードに中継するというものである。本プロジェクトは 2022 年 10 月より POWER(Persistent Optical Wireless Energy Relay)プログラムとして継続されている。POWER プログラムは、「無線電力ビームを活用して、動的で適応性のある光速の無線エネルギー網を構築することにより<sup>75)</sup>」、革新的なエアボーン・エネルギー分配プラットフォームを開発することを目的としており、主に光エネルギーリレー技術の開発を行い、空中での光エネルギーリレーシステムを設計・実証し、地上のレーザーと高高度長距離伝送技術を結び付けることを目指している。光エネルギーを転送しながら、途中の各ポイントでビーム品質を最大化し、必要に応じてエネルギーを選択的に収集する効率的なパワーリレーを開発することが重要となる。

<sup>75)</sup> 原文は“by leveraging wireless power beaming to create a dynamic, adaptive, speed of light wireless energy web.”

プログラムのマネージャーである Paul Calhoun 大佐によると、軍隊は、特に深刻なエネルギー問題に直面しており、それがこの技術革新の原動力となっている。

2023 年 9 月、DARPA は POWER プログラムの第一フェーズを開始することを明らかにしており、RTX Corporation(旧 Raytheon)、Draper、BEAM Co.が率いる 3 チームが無線光電力リレーシステムの設計・開発を行うとしている<sup>76</sup>。プログラムの目標には、弾力性のある光速エネルギーネットワークに必要な主要コンポーネントの実証が含まれる。例えば、Draper はエネルギー伝送の精度と安定性を高めるための先進的な制御システムを、BEAM Co.は小型で高効率なエネルギー収集装置の開発を行っている。第 1 フェーズは、20 ヶ月で重要技術のベンチトップ実証を行う計画となっている。2023 年 12 月には、RTX Corporation 社が DARPA より紛争環境にエネルギーを供給する無線空中中継システムの設計開発として、2 年間で 1,000 万ドルの契約を受注している<sup>77</sup>。

第 2 フェーズでは、2025 年初頭に公募が行われ、低電力で空中実証を行うための既存プラットフォームへのリレー技術の統合に重点がおかれ、既存の航空機に搭載されるポッドで実証される予定となっている。プログラムの最終段階である第 3 フェーズでは、10kW の光エネルギーを地上レーザー光源から 200km 離れた地上レシーバーに供給することを目的とした空中光路を通して、リレーの実証が行われる。最終的には、高エネルギー・レーザー・システム試験施設(HELSTF)を使用して、ホワイトサンズ・ミサイル発射場(N.M.)の地上受信機に電力を中継する 3 つの空中ノードと、空中中継機として RQ-4 グローバルホーク大型無人航空機を使用することを想定している。

PRAD(POWER Receiver Array Demonstration)は、本 POWER プロジェクトの一環として電力ビームの実現技術の実証を目指しているプログラムである。上空にある軍用機や無人航空機からレーザービームを照射し、10kW の電力を軍事用に分配することを目指したものであり、レーザーパワービーム受信機の開発と実証を行う計画となっている。レーザーエネルギーを電力に変換できる光起電力(PV)レシーバアレイの性能、信頼性、効率を検証することが重要であるとし、2024 年 9 月、関連プログラムの募集(DARPA-PS-24-25)を開始した。(Other Transaction (OT) for Prototype 契約:履行期間 6 か月間、資金総額 35 万ドル)<sup>78</sup>

DARPA では他にも、2023 年より月面および月周辺の経済活動を促進するための「10-Year Lunar Architecture(LunA-10)」計画を進めている。例えば、月面での通信やエネルギー供給の最適化を目指し、無線での電力供給と同時に通信やナビゲーションのサポートを行う電源ステーションの構築等が考えられている。

---

<sup>76</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2023-09-07a/>(2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>77</sup> <https://raytheon.mediaroom.com/2023-12-12-RTX-to-create-network-of-energy-webs-for-DARPA>(2024 年 1 月 25 日閲覧)

<sup>78</sup> <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/power-receiver-array-demonstration-prad-ps-darpaps2425> (2024 年 12 月 18 日閲覧)



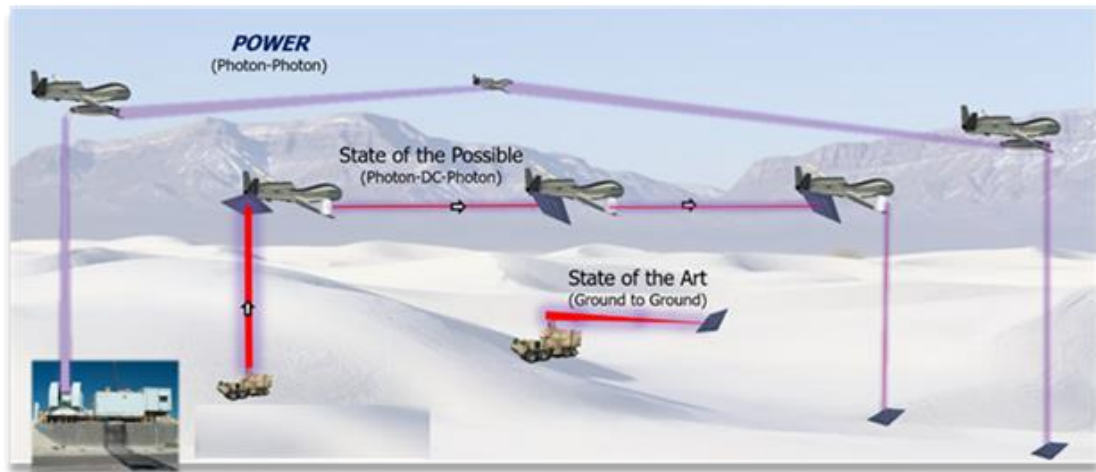


図 2-12 POWER プログラムの開発内容(Credit : DARPA)

出所)<https://www.darpa.mil/news-events/2022-10-05b>(2023 年 1 月 16 日閲覧)

## 2) NRL および NASA

NRL では SSPS 研究の中心人物である Paul Jaffe 氏が 2019 年 5 月、メリーランド州にある U.S. Naval Surface Warfare Center において長距離空間パワービーミングの初のデモンストレーションを行い、325m の距離にわたって 400W(受光部)のレーザー伝送を成功させた。

NASA においてはアルテミス計画に関連して月面での永久影領域における電力の確保が重要課題となっており、その解決策として月面探査におけるレーザーエネルギー伝送の可能性についての取り組みがみられるところとなっている。月探査機への電力供給が可能なレベルのレーザー電力ビーム伝送技術のフライト実証システムについての概念設計や近赤外領域(808nm)でのレーザーパワー伝送を行い、GaAs と InGaAs LPC(laser power converters)の性能評価試験等を行っている。さらに賞金付きコンテスト等により、産官学より様々なアイデアを募る取り組みも行っている。

## 3) 民間企業

### a. Above:Space Development 社

Above:Space Development 社(旧 Orbital Assembly Development Corp.)は、米カリフォルニア州に拠点を置く Gateway Spaceport LLC が 2018 年に設立したスタートアップである。民間の旅行客が宿泊できる 2 つの宇宙ホテル「Voyager Station」「Pioneer Station」の建設を計画している。2023 年 3 月には、米国宇宙軍(USSF)から軌道上サービス市場を活性化する商用技術開発資金提供プログラム「Orbital Prime」を通じて、軌道上でのサービス提供や製造に必要な、迅速に展開できる構造技術を実証する SBIR(Small Business Innovation Research)プログラムの

第2フェーズ契約(契約金額は170万ドル)を受注している。また1.1.3項で示したAFRLのSSPIDRプログラムにおいてもエネルギービーム受信機のプロトタイプ的设计・開発を行っている<sup>79</sup>。

2023年11月には、米Electric Sky社と協力して、軌道上プラットフォーム「Archimedes」への無線電力伝送技術を開発しており、その実証となる地上試験に成功したと発表した<sup>80</sup>。既存の技術を応用することで、ある場所から別の場所へ電気エネルギーをレーザーにより伝送できることが示されたという。(図2-13参照)本プロジェクトはUSSFから一部資金援助を受けている。「Archimedes」とは、同社が開発中の軌道上で迅速に展開可能なプラットフォームであり、太陽電池パネル、ビーム電力、通信・監視用の電子制御式アンテナアレイ等の宇宙インフラとして機能する軌道上システムとして設計されている。軌道上製造、高データレート通信、高精度の宇宙状況認識、軌道上アセットの軌道離脱・無効化、敵対者のアクセス阻止等に資することが想定されている。

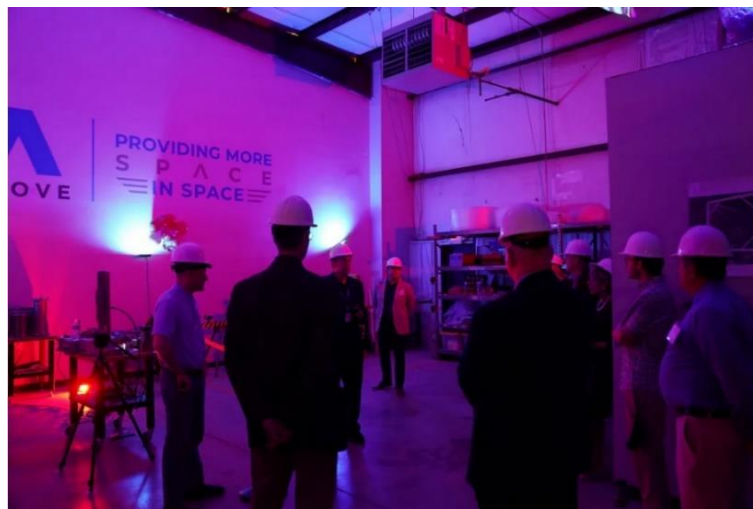


図2-13 アラバマ州にあるAbove: Space Development社の施設において行われたラボ・ベンチテスト

出所)<https://news.abovespace.com/2023/archimedes-orbital-system-showcases-successful-applications-of-directed-energy/>(2024年1月25日閲覧)

## b. Lockheed Martin 社

軍事領域での開発としては、2022年8月にLockheed Martin社が米海軍に60kW超級のレーザー兵器システムHELIOS(high energy laser with integrated optical-dazzler and surveillance)を納入した<sup>81</sup>。レーザー兵器に関してはNorthrop Grumman社も開発を進めており、2021年12月にはアデン湾において100-150kWの高エネルギーレーザ兵器システムの試験を行っている。

<sup>79</sup> <https://spacenews.com/above-orbital-develops-energy-for-spacecraft-under-recent-awards/>(2024年1月25日閲覧)

<sup>80</sup> <https://news.abovespace.com/2023/archimedes-orbital-system-showcases-successful-applications-of-directed-energy/>(2024年1月25日閲覧)

<sup>81</sup> <https://news.lockheedmartin.com/2022-08-18-Lockheed-Martin-Delivers-Integrated-Multi-Mission-Laser-Weapon-System-to-the-Navy> (2023年1月26日閲覧)



### c. NUBURU 社

高出力・高輝度の産業用青色レーザーの開発および製造業者である NUBURU, Inc. は、同社独自のブルーレーザー技術を使用した宇宙でのパワービームの実現可能性を実証するために、2023 年 8 月に NASA より SBIR (Small Business Innovation Research) 資金 (第 1 フェーズ) を獲得し<sup>82</sup>、青色レーザーパワービーム技術の科学的、技術的、商業的実現可能性の実証を行った。

2024 年 5 月には、続く第 2 フェーズとして青色レーザーパワービーム技術の出力、範囲、性能のスケールアップを目指し 85 万ドルの契約を獲得した。本プログラムでは km スケールの範囲で数百 W の電力を供給する技術を実証する計画で、同社はさらに月面で数十 km まで技術範囲を拡張できる次世代技術で高輝度レーザー光源を進化させていくという<sup>83</sup>。

### d. PowerLight Technology 社

米国の PowerLight Technologies 社はレーザーによるワイヤレス給電技術の開発を行っているが、前身である LaserMotive 社は 2009 年の NASA Centennial Challenges の Power Beaming Challenge で 1 位を獲得し、2019 年には上述の NRL の地上実証試験に参加している。また 2021 年 10 月には Ericsson の 5G 基地局「Streetmacro 6701」(最大消費電力 300W) に対し、同社のレーザー送電システムを使って、数百メートル離れた距離から数百ワットの電力を伝送する実証実験に成功した。さらに 2024 年 1 月には DARPA の LunA-10 プログラムで、Blue Origin 社が率いるチームに参加し、月面で製造された太陽電池を使用して月面で発電し、その電力をレーザー光で遠隔地に伝送するシステムの設計を行った<sup>84</sup>。

2024 年 12 月には、米中央軍 (CENTCOM: Central Command) および国防総省のオペレーション・エネルギー・イノベーション本部と協力し、PTROL-UAS (Power TRansmitted Over Laser to UAS) プログラムの一環として、高度 5,000 フィート上空の Group 2 無人航空機システム (UAS) に WPT 給電を行い、飛行中に急速充電を行うことで着陸せずに任務を遂行できることを実証する計画を発表した。本実証に当たって、現在米海軍と米陸軍に超長距離耐久型 UAS (KL1000ULE) を提供している Kraus Hamdani Aerospace 社と提携し、2025 年秋に予定されている統合ワイヤレス・パワービーム飛行デモンストレーションで披露される予定となっている<sup>85</sup>。

### e. RTX Corporation (Raytheon) 社

2024 年 11 月、米国防総省は、米陸軍向けに指向性エネルギー無線電力技術を開発する契約を RTX Corporation 社に発注した。陸軍の有人・無人システム要件に沿った長距離テストを可能にする送信機と受信機の製造を対象としている。

<sup>82</sup> <https://ir.nuburu.net/news/news-details/2023/NUBURU-Announces-Contract-With-NASA-for-Next-generation-Blue-Laser-Space-Technology/default.aspx> (2024 年 1 月 31 日閲覧)

<sup>83</sup> <https://ex-press.jp/lfwj/lfwj-news/lfwj-biz-market/56218/> (2024 年 12 月 20 日閲覧)

<sup>84</sup> <https://www.geekwire.com/2024/powerlight-blue-origin-power-beaming-moon/> (2024 年 1 月 31 日閲覧)

<sup>85</sup> <https://powerlighttech.com/press-release-centcom-uas-solution/> (2024 年 12 月 20 日閲覧)

今回の受注は上述した DARPA の POWER プログラムの下で促進されたものである。

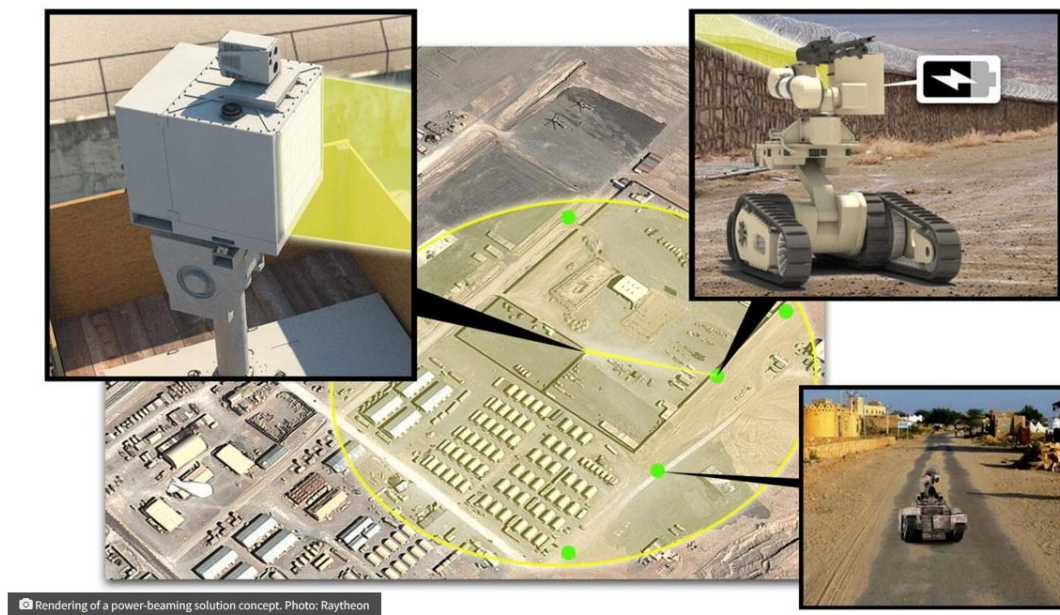


図 2-14 DoD の POWER ビーミングソリューションコンセプト

出所) <https://thedefensepost.com/2024/11/15/us-power-beaming-raytheon/> (2024 年 12 月 18 日閲覧)

## (2) 米国以外の国における取組み

米国以外では、英国で 2022 年 1 月、サリー大学とスタートアップ企業である Space Power 社が国家プロジェクト「SPRINT(SPACE Research and Innovation Network for Technology)」の一部として、LEO 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発を開始すると発表している。Space Power 社は 2023 年までに軌道上実証機を開発し、2025 年までに完全に商業化するという計画を立てている。昼間の屋内および屋外、夜間屋外の 3 つの状況でフィールドテストを実施し、長距離でもビームを照射する強度と密度を維持すべく、自律的にそれらを調整する「適応型ビーム整形技術」を使用している。しかし、2023 年以降の進捗状況に関する報道はなされていない。

中国では、2023 年 1 月、西北工業大学(NPU:Northwestern Polytechnical University)が光学駆動型ドローン(ODD:Optics-driven Drone)を開発したと報じられた。下面に受光モジュールを搭載しており、その部分に受けた高エネルギーのレーザー光を電力に変換して、恒久的に飛び続けることが可能であることが示されている。(図 2-15 参照)NPU は、ドローンを追跡しビームを意図した目的地に向け続けるために、インテリジェントな視覚追跡アルゴリズムと、無線伝送の距離を伸ばすためにビームの強度を自律的に調整する適応ビーム整形システムを開発している。また障害物を識別し、

レーザービームのパワーを安全なレベルに迅速に調整する保護アルゴリズムも設計した。フィールドテストは、夜間と昼間の両方、屋内 1 回、屋外 2 回行われ、成功している<sup>86</sup>。



図 2-15 中国西北工業大学が開発した ODD (Optics-driven Drone)と飛行試験の様子

出所)<https://shx.chinadaily.com.cn/a/202212/30/WS63ae4443a3102ada8b22907e.html>,

<https://asiatimes.com/2023/01/china-claims-to-have-mastered-laser-powered-drones> (2023 年 1 月 26 日閲覧)

### 2.1.3 まとめ

高強度のエネルギーを長距離にわたって伝送させるパワービーミング WPT については、近年、研究開発が積極的に取組まれるところとなっている。米国では NRL、DARPA、NASA 等が開発を進めており、DARPA では POWER プログラムへの取組みが本格化しつつある。また NASA も月面でのエネルギー供給に適用できるレーザー WPT 技術の開発も行っており、これらの関連プログラムからいくつかのスタートアップ企業がマイクロ波やレーザーを長距離伝送する WPT への取組みをみせている。中国や韓国でも、宇宙機関や研究機関、大学等が連携して関連技術開発を進めている。技術的には、いまだ研究開発の領域であり実用化には至っていないものの、kW および km レベルの WPT に向かった取組みも進められており、今後の SSPS の実現に向けて不可欠な技術の開発が期待される。

図 2-16 に過去に世界で行われたパワービーミングに関する技術実証と、今後の無線電力伝送のアプリケーションとして目指すべき電力の大きさと伝送距離が整理された図を示す。

<sup>86</sup> <https://blog.euroavia.eu/2024/01/15/is-laser-power-beaming-the-future-of-the-drone-industry/> (2024 年 1 月 31 日閲覧)

## Roadmap for Power Beaming for Near-term Applications and Space Solar

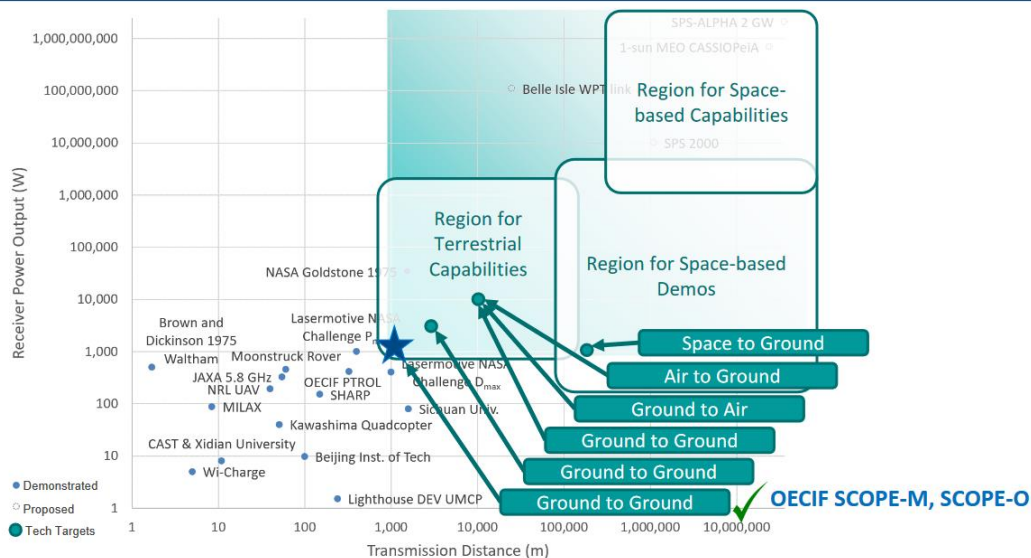


図 2-16 近い将来のアプリケーションと SBSP に向けたパワービーミングのロードマップ

出所) “Results from the First Test of a Conversion Module for Space Solar in Orbit” Pail Jaffe, NRL, IAC-23,C3,2,1,x78339, Oct 2023

## 2.2 空間伝送型 WPT の実用化動向

WPT 技術は、非放射型 WPT 技術の実用化が先行して進んだが、放射型 WPT についても近年ではマイクロ波方式 WPT を中心に、様々な実用化の検討が始まり、米国や日本、中国、イスラエルなどのベンチャー企業を中心に商品化の動きも進んできている。まずは屋内・近距離での無線電力伝送について製品化を想定した機器の研究開発・実用化活動が活発に行われている。オフィスや物流、家庭、商業施設、工場、医療など様々な利用シーンでの IoT 機器やスマートフォンなどへの給電を目標とし、その先として屋外での利用が提案されている。

本項では、高強度長距離の伝送距離を対象とする WPT(パワービーミング)までは達しないレベルの、低強度短距離の無線電力伝送となる空間伝送型 WPT の実用化動向について示す。

### 2.2.1 電波方式 WPT の実用化取組み事例

#### (1) 海外の事例

米国では、屋内・近距離・小電力システムについては、すでに一部製品化が行われており、915MHz、2.4GHz、5.8GHz のシステムが実用化されている。また、24GHz やミリ波のものも商品化に向けて開発が行われている。

米国の Energos 社では「WattUp®」Near Field 充電技術の製品化を行い、913MHz/2.4GHz 帯/5.8GHz 帯を用いた製品販売を行っている。1W および 2W の「WattUp® PowerBridge」トラン

スミッターは、IoT デバイスやセンサー向けに無線で電力を供給するために設計されている製品であるが、送信機の出力は最大 8W と大きいのも特徴となっている。すでに米国、欧州、英国、中国、インド、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、韓国および日本等で認可を取得し、世界的な販売体制を築いている。2022 年 8 月には新しい高出力 WattUp PowerBridge トランスミッタ(15W)が FCC Part 18 の認可を受けている<sup>87</sup>。

カリフォルニア工科大学(Caltech)からのスピンオフとして設立された米国の GuRu Wireless 社は、ミリ波(24GHz 帯)による中距離充電技術(GuRu RF Lensing 技術)によるワイヤレス OTA (Over The Air)電力伝送向けシステム開発を行っており、2021 年 5 月には Motorola 社との提携を発表している。2024 年 12 月には、業界最小の 24GHz RF システムオンパッケージ(SoP)モジュールを基盤とし、同社独自の RFIC を使用したモジュールを「タイル」として組み立て、同期型フェーズドアレイアンテナネットワークのノードとして機能させる WPT システムを発表した。ラボ内での実演では、送信機構成が完全にワイヤレスのドローンを 30 フィートの距離で直接電力供給する様子を示した。(図 2-17 参照)

米国の Ossia 社は 2.4GHz 帯や 5.7GHz 帯の電波を使用した「Cota<sup>®</sup>」の技術開発およびライセンス提供を行っている。製品販売は行わないが、多くの企業が Cota 技術のライセンスを受け、出資、製品開発、製品販売、ブランド提携を含む様々な役割を担っている。ビームフォーミングを応用して、室内に置かれた 1~2m 先の電子機器に約 1W の給電ができる。2022 年 3 月には、同技術は FCC から伝送距離の制限を設けることなく米国で利用できる認可を受けている<sup>88</sup>。戦略的パートナーシップを締結している日本の丸文株式会社は、2024 年 12 月、Cota のオリジナル評価キット「Marubun PRx Building and Evaluation Kit」において DC1W の受電電力を実現したことを発表した<sup>89</sup>。

米国の Powercast 社は 915MHz 帯域を利用した「Powercast<sup>®</sup>」、「Powerharvester<sup>®</sup>」等の製品販売を米国内で行っており、2024 年現在、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有し、2000 万個以上の製品の出荷を実現している<sup>90</sup>。

この他、2021 年 1 月には、中国の Xiaomi Corporation がミリ波を用いた近距離無線充電技術「Mi Air Charge Technology」(最大 5W)の開発を行うことを発表している。(ただし 2025 年 2 月現在、本技術が使用された商業製品については確認できていない。)

<sup>87</sup> [https://ir.energous.com/news-releases/news-release-details/energous-breakthrough-fcc-approval-15w-wattup-powerbridge?utm\\_source=chatgpt.com](https://ir.energous.com/news-releases/news-release-details/energous-breakthrough-fcc-approval-15w-wattup-powerbridge?utm_source=chatgpt.com) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

<sup>88</sup> <https://blog.ossia.com/news/fcc-issues-first-approval-of-wireless-power-transfer-with-no-distance-limits-to-ossias-cota-technology> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

<sup>89</sup> [https://www.marubun.co.jp/wp-content/uploads/2024/12/20241217\\_pressrelease.pdf](https://www.marubun.co.jp/wp-content/uploads/2024/12/20241217_pressrelease.pdf) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

<sup>90</sup> <https://www.powercastco.com/> (2024 年 12 月 20 日閲覧)



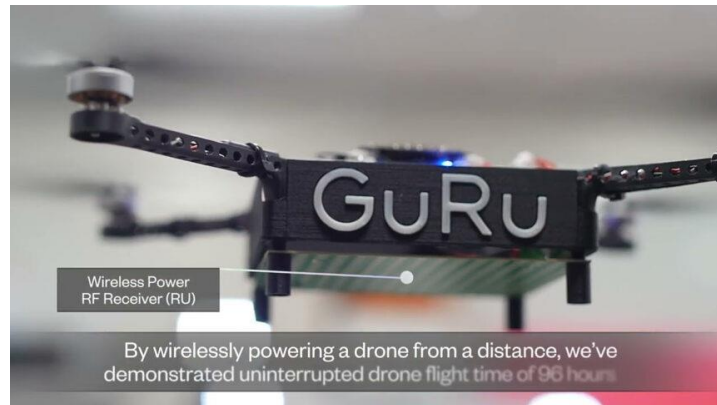


図 2-17 GuRu 社の無線で飛行するドローンの実証

出所) [https://www.drone.jp/news/20241220184806106744.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.drone.jp/news/20241220184806106744.html?utm_source=chatgpt.com) (2025 年 2 月 13 日閲覧)

## (2) 国内の事例

国内では 2022 年 5 月、マイクロ波給電の規制緩和第一ステップとして、総務省より「電波法施行規則等の一部を改正する省令」が公布され、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯において WPT 用周波数割り当てが行われ、無線電力伝送用構内無線局が開設された。これにより、国内の要件を満たす工場や倉庫などの屋内で空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムを用いた無線給電が可能となっている。

米国スタンフォード大学発のベンチャーであるエイターリンク株式会社は、2020 年には竹中工務店と実証実験を実施し、15m 先の空調機に数 mW 給電できる結果を発表している<sup>91</sup>。さらに 2022 年 5 月には、上記省令の交付を受けて、同社は WPT 機器「AirPlug®」の販売開始の決定を発表した。さらに 2022 年 9 月には、竹中工務店の静岡営業所で国内初となる「無線電力伝送用構内無線局」としての運用を開始し、床下数カ所に、数 m 離れた距離から無線給電できる機器を導入した。その他、2019 年創業の Space Power Technologies 社も最大伝送距離 10m 程度のユースケースを想定し、マイクロ波方式による WPT 市場への参入を目指している。

パナソニックは京都大学と共同で、920MHz 帯の電波を活用した送電機と受電機からなるマイクロ波電力伝送システム「Enesphere」を開発し、2022 年 3 月よりサンプル提供を開始するとともに、様々な用途・シーンでの試験的活用を進めている。Enesphere は 920MHz 1W を出力する送電機と、送電機から発射された電力をエネルギー源として動作する受電端末で構成されている。

京セラは電波(マイクロ波)の放射を集中させるビームフォーミング技術と、電波の伝搬環境に応じてリアルタイムに電波放射を追従制御する技術(アダプティブアレー技術)を融合し、5.7GHz 帯における「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」を実現する基礎技術を開発している。通信基地局事業で長年培ってきた電波の制御技術を活用し、高速追従する電波制御と高精度な電波制御を同時に両立させて電波をコントロールすることが特長となっている。本技術の適用によりスマートフォンやドローンなどの移動体にも安定した電力を伝送することを目指している<sup>92</sup>。

<sup>91</sup> <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/0000000003.000071264.html> (2023 年 1 月 27 日閲覧)

<sup>92</sup> <https://www.kyocera.co.jp/newsroom/news/2023/002277.html> (2024 年 2 月 9 日閲覧)



日本ガイシは上項で示した米国の Energous 社と超低消費電力の電源 IC 技術を持つベルギーの e-peas 社と、空間伝送型 WPT システムの普及に向けた協業を開始した。日本ガイシのリチウムイオン二次電池「EnerCera(エナセラ)」と Energous、e-peas の技術を組み合わせた IoT デバイスの開発や提供を通じて、WPT システムに取り組むデバイスメーカーなどの開発を支援する計画である。WPT 駆動の温湿度センサーデバイスを開発しており、ほかにも物流などで使用される位置トラッキングデバイスや、電子棚札などの各種 IoT デバイスの WPT 化に向けて、WPT システムの提案を行う<sup>93</sup>。なお日本ガイシは Ossia 社とも 5.8GHz 帯 WPT の普及に向け協業している。

東芝ではマイクロ波遠隔給電システムにおいて、世界で初めて、周辺の無線 LAN(Wi-Fi)通信に干渉することなく、干渉回避機能を搭載した給電技術と、受電アンテナの向きにかかわらず高効率に電力を受け取ることができる受電技術の開発を行っている。開発した一体型給電機で、検出が難しい無線 LAN 信号を広い周波数帯(5.5GHz から 5.72GHz)で検出したり、受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証を行ったりした。(図 2-18 参照) 今後は工場、倉庫など実際の現場での実証を進める、整備の動向も踏まえながら 2025 年以降の事業化を目指すという<sup>94</sup>。

日本アンテナは、金沢工業大学と共同で、WPT 用のレクテナの開発を進めている。5.75GHz 帯の高効率なレクテナ(サイズ 48mm×48mm)を開発し、入力電力 37.6dBm(約 5.7W)で 88.5%の整流効率と 38.9V の出力電圧を得ることに成功した<sup>95</sup>。今後はスマートファクトリーなどでの応用が期待されている。

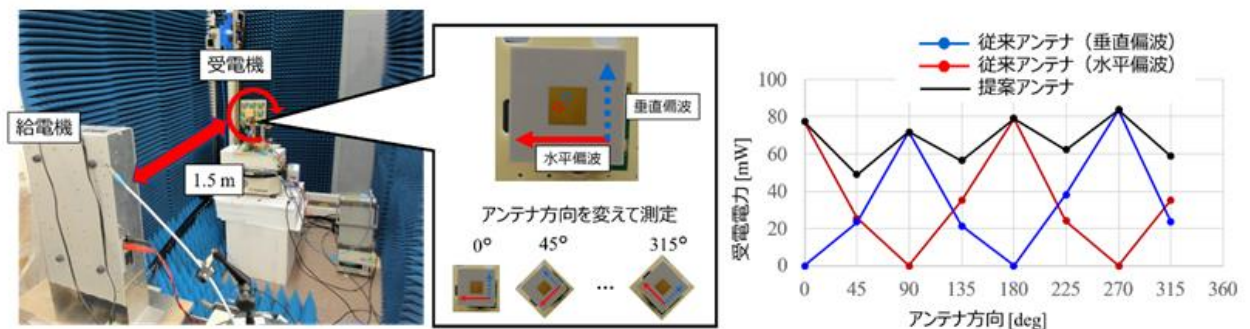


図 2-18 東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証

出所) <https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/23/2312-01.html> (2024 年 2 月 9 日閲覧)

## 2.2.2 レーザー方式 WPT の実用化取組み事例

レーザー方式の WPT としては、イスラエルの Wi-Charge 社が赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術(AirCord™)の製品開発を行っている。2023 年 9 月には、日本の産業機器メーカーである東朋テクノロジー社と提携し、Wi-Charge の製品を国内の顧客工場では機器の稼働を実証したうえで納入することを発表した。送電機と受電機が最大 10m 離れていても電力効率を落とさずに、最大

<sup>93</sup> [https://www.ngk.co.jp/news/20230309\\_1.html](https://www.ngk.co.jp/news/20230309_1.html) (2024 年 2 月 9 日閲覧)

<sup>94</sup> <https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/23/2312-01.html> (2024 年 2 月 9 日閲覧)

<sup>95</sup> <https://www.nippon-antenna.co.jp/ja/news/news/news-2024052401.html> (2025 年 2 月 14 日閲覧)

300mW の電力を無線給電できる。指定の範囲内にあれば複数の受電機に順番に給電できる。価格は 1 セットあたり 20 万～30 万円程度という<sup>96</sup>。

また米国の PHION Technologies 社も同様に赤外線を用いたワイヤレス給電技術の開発を行っており、2022 年 1 月に三菱地所株式会社が出資を行っている<sup>97</sup>。第 1 世代のモデルは、モバイル端末に 5W の電力を供給する予定で、将来的には 10m を超える距離において 20W で PC を充電することができ、送信機を天井に設置することにより、45～200 m<sup>2</sup>をカバーすることが想定されている。当初は 2022 年内に三菱地所が出資するインキュベーションセンターInspired.Labにおいて、モバイルデバイス向け充電の実証実験を行うとしていたが、2025 年 2 月現在、本実験に関する新たな情報は発信されていない。

---

<sup>96</sup> <https://www.toho-tec.co.jp/news/20230908-01/>（2024 年 2 月 9 日閲覧）

<sup>97</sup> <https://www.presscube.jp/press-release/detail/53b170f2-5149-4e39-9a48-8a0407970942>（2023 年 1 月 27 日閲覧）

2022 年春には同社の無線給電システムを設置し、携帯電話等のモバイルデバイスに給電を行う実証実験を実施する予定とされていた。

## 参考文献

---

- (1) 令和 4 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)調査報告書、2023 年 2 月、株式会社三菱総合研究所
- (2) 令和 5 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)調査報告書、2024 年 3 月、株式会社三菱総合研究所
- (3) Frazer-Nash Consultancy / London Economics, “Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs”, August 2022
- (4) Roland Berger / OHB Systems, “Study on Cost-Benefit Analysis of Space-Based Solar Power (SBSP) Generation for Terrestrial Energy Needs”, July 2022
- (5) “Space-Based Solar Power”, NASA Office of Technology, Policy, and Strategy, Report ID 20230018600, Jan 2024
- (6) “ Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”, Arthur D Little, Dec 2023
- (7) “ Pre-Phase A System Study of a Commercial-Scale Space-Based Solar Power (SBSP) System for Terrestrial Needs”, THALES ALENIA SPACE ITALY, Dec 2023

令和 5 年度補正宇宙開発利用推進研究開発(月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理))

2025 年 3 月

株式会社三菱総合研究所  
先進技術・セキュリティ事業本部  
TEL (03)6858-3568

一般財団法人日本宇宙フォーラム  
事業創造部  
TEL (03)6206-4901

## 二次利用未承諾リスト

令和5年度補正宇宙開発利用推進研究  
開発（月面におけるエネルギー関連技  
術開発（技術課題整理））  
報告書

株式会社三菱総合研究所

| 頁   | 図表番号   | タイトル                                       |
|-----|--------|--------------------------------------------|
| 14  | 図2-1   | 純水処理・電気分解・水素・酸素液化にかかわる低軌道実証パッケージ案          |
| 17  | 図2-2   | 水素・酸素漏えい監視技術にかかわる低軌道実証パッケージ案               |
| 42  | 図2-15  | 自走式ローブウェイの検討事例                             |
| 74  | 図2-40  | 電力供給システムの基本構成及び具体的な候補地点における拠点レイアウトのイメージ    |
| 76  | 図2-42  | 遠距離送電の質量効率分析結果                             |
| 93  | 図2-57  | シャクルトンクレーターとレクテナの配置                        |
| 93  | 図2-58  | シャクルトン底面および斜面                              |
| 97  | 図2-60  | Vanguard I衛星                               |
| 97  | 図2-61  | 国際宇宙ステーションとその太陽電池パドル                       |
| 99  | 図2-62  | IKAROSとソーラー電力セイル                           |
| 114 | 図2-79  | 展開型軽量平面アンテナの軌道上実証DELIGHT                   |
| 116 | 図2-82  | 月用太陽発電衛星の概念図                               |
| 117 | 図2-83  | 軽量展開アクチュエータの一例                             |
| 118 | 図2-84  | ミウラ折りを用いた展開実験                              |
| 133 | 図2-97  | 金沢工大で開発した28GHz帯GaAsレクテナの概要                 |
| 134 | 図2-98  | 低閾値GaAs GADの静特性                            |
| 134 | 図2-99  | 低閾値GaAs GADを用いる920Mz帯レクテナ                  |
| 162 | 図2-117 | IMM3Jセルの外観と電気特性                            |
| 163 | 図2-118 | 候補地点1(Connecting Ridge)                    |
| 164 | 図2-119 | 候補地点2(Nobile Rim 1)                        |
| 207 | 図2-139 | 金沢工業大学にて開発中のレクテナ                           |
| 207 | 図2-140 | レクテナ DoA構成と効率                              |
| 222 | 図2-149 | 光ファイバー伝送による波長及びファイバー長に対する各効率               |
| 259 | 図4-1   | ESAの新しい宇宙探査ロードマップの月探査シナ                    |
| 260 | 図4-2   | ESAの技術開発を行っている局の全体像                        |
| 262 | 図4-3   | ProSEED（左）とProSPA（右）                       |
| 263 | 図4-4   | Argonaut構成エレメントイメージ図                       |
| 265 | 図4-5   | SPACE APPLICATIONS SERV. が検討する月面太陽光発電イメージ  |
| 265 | 図4-6   | Thales Alenia Space Italiaが検討する月面太陽光発電イメージ |
| 266 | 図4-7   | University of Leicesterの発電機モックアップ          |
| 270 | 図4-8   | ILRSで想定されている開発フェーズ                         |

(様式2)

|     |       |                                                                      |
|-----|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 272 | 図4-9  | 水資源の探査・採掘・利用に関する一体的な取り組みのイメージ図                                       |
| 273 | 図4-10 | ISRUプロセスのイメージ図                                                       |
| 273 | 図4-11 | ISRUプロセスの温度と圧力の遷移図                                                   |
| 275 | 図4-12 | 月面電力システム構成                                                           |
| 278 | 図4-13 | 小型原子炉の構成                                                             |
| 279 | 図4-14 | Gatewayイメージ（左）とAirlockイメージ（右）                                        |
| 289 | 図4-15 | Intuitive Machines社のNova-Cランダーに搭載されたLUNAセンサーのイメージ図                   |
| 289 | 図4-16 | Blue Ghostランダーから展開されたSPIDERのイメージ図                                    |
| 291 | 図4-17 | AROSEで検討された小型ローバー                                                    |
| 292 | 図4-18 | EL02で検討された小型ローバー                                                     |
| 293 | 図4-19 | オーストラリアのISRU及び基礎サービスのロードマップ                                          |
| 300 | 図4-20 | パッシェンの法則                                                             |
| 302 | 図4-21 | 電圧と電力グリッド重量の関係に関する評価結果                                               |
| 302 | 図4-22 | UMICを含む電力グリッドの構成                                                     |
| 303 | 図4-23 | LunaGrid-Liteの送電システム図                                                |
| 304 | 図4-24 | MW級の発電を想定したマイクログリッド構成案                                               |
| 309 | 図4-25 | SBSPエコシステムマップ                                                        |
| 309 | 図4-26 | 設立年別で示すSSPS活動エンティティ数                                                 |
| 310 | 図4-27 | Aetherflux社の開発するSSPS衛星                                               |
| 313 | 図4-28 | WPT実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ                                             |
| 313 | 図4-29 | Virtus Solis社のSBSPコンセプト                                              |
| 314 | 図4-30 | Astrostrom社による「Greater Earth Lunar Power Station (GE $\oplus$ -LPS)」 |
| 314 | 図4-31 | Paraloon社によるインフレータブル展開構造                                             |
| 315 | 図4-32 | 「16U4SBSP」ミッションのイメージ                                                 |
| 317 | 図4-33 | CASSIEプロジェクトの概要と参加組織                                                 |
| 317 | 図4-34 | HARRIERの実験装置                                                         |
| 321 | 図4-35 | GMI社によるSBSP市場予測                                                      |
| 322 | 図4-36 | SBSP市場のシェア（2024年）                                                    |
| 232 | 図4-37 | SBSP市場のシェア（2024年）                                                    |
| 325 | 図4-38 | ドローンに電力を供給する4台のワイヤレス給電トランスミッター                                       |
| 326 | 図4-39 | Reach Power社CEOのChris Davlantes氏のデモの様子                               |
| 329 | 図4-40 | DoDのPOWERビーミングソリューションコンセプト                                           |
| 330 | 図4-41 | GuRu社の無線で飛行するドローンの実証                                                 |
| 333 | 図4-42 | ワイヤレス電力伝送市場規模の実績と予測（2019年～2035年）                                     |
| 335 | 図4-43 | CASSIOPeiAコンセプトのスケルトンスケッチ                                            |
| 339 | 図4-44 | 1.44GWのSBSPシステムの初号機システムの構築コ                                          |
| 343 | 図4-45 | SPS Alphaアーキテクチャ                                                     |
| 350 | 図4-46 | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステム（宇宙部）                              |
| 351 | 図4-47 | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステム（地上部）                              |



(様式2)

|     |       |                                             |
|-----|-------|---------------------------------------------|
| 351 | 図4-48 | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ |
| 352 | 図4-49 | Thales Alenia Space SPSの打上げ、展開、組立てシナリオ      |
| 355 | 図4-50 | NASAスタディにおけるSBSPのリファレンスデザイン（左：RD1、右：RD2）    |
| 358 | 図4-51 | LCOEの計算方法                                   |
| 360 | 図4-52 | ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ            |
| 361 | 図4-53 | SBSPシステムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果      |
| 367 | 図4-54 | JSS（旧USEF）マルチテザー型SSPSの宇宙部                   |
| 377 | 図4-55 | エネルギーシステムモデルの構造                             |
| 378 | 図4-56 | エネルギー起源CO2排出量の前提                            |
| 378 | 図4-57 | 稼働中原子力所発電設備容量の想定（全国計）                       |
| 379 | 図4-58 | 太陽光・風力発電コスト（LCOE）                           |
| 381 | 図4-59 | データセンター・半導体工場の電力需要                          |
| 382 | 図4-60 | 2022年度から2050年度までの一次エネルギー供給の推移               |
| 383 | 図4-61 | 2022年度から2050年度までの一次エネルギー供給の推移               |
| 384 | 図4-62 | SSPS-B24の総投資額を変化させた際の影響（左：発電量、右：設備導入量）      |
| 384 | 図4-63 | SSPS-N24の総投資額を変化させた際の影響（左：発電量、右：設備導入量）      |
| 388 | 図4-64 | SSPS現状のコストモデルでの重量内訳                         |
| 391 | 図4-65 | 国際宇宙探査ロードマップで提示されるタイムスケール                   |
| 393 | 図4-66 | 本事業と関連する重要技術リストの例                           |
| 394 | 図4-67 | TRL(Technology Readiness Level) の定義         |
| 395 | 図4-69 | 水素における日米欧の研究開発状況の比較                         |
| 396 | 図4-70 | 電力における日米欧の研究開発状況の比較                         |
| 407 | 図4-74 | LaaS: Lab as a Service 事例                   |
| 407 | 図4-75 | 欧州へILRSへの参加を呼び掛けるDSELの発表スラ                  |
| 408 | 図4-76 | ASIの宇宙探査のアプローチ                              |
| 409 | 図4-77 | 水資源に基づく2040年の月面アーキテクチャの一部に関する俯瞰図            |
| 410 | 図-78  | エネルギー供給のシステム構成要素                            |
| 411 | 図4-79 | ISRUプラント                                    |
| 411 | 図4-80 | 輸送システムの構成要素                                 |
| 414 | 図4-81 | ESAのEXPLORE 2040についての発表                     |
| 414 | 図4-82 | 欧州の月面開発計画                                   |
| 415 | 図4-83 | 各国ケイパビリティ比較                                 |
| 416 | 図4-84 | LEO、月、火星の包括的な探査戦略の概要                        |
| 416 | 図4-85 | ESAの月面開発計画の概要                               |
| 418 | 図4-86 | 月面経済圏に関するパネルディスカッションの様                      |
| 420 | 図4-87 | 信頼性と輸送コストに対するアプローチに関する指摘事項                  |
| 420 | 図4-88 | 信頼性と輸送コストの関係                                |

(様式2)

|     |        |                                             |
|-----|--------|---------------------------------------------|
| 421 | 図4-89  | 月面でのロケット推進剤製造に関する経済性分析に関する結論                |
| 422 | 図4-90  | Spartan Spaceが想定する有人月面開発初期のインフラ             |
| 422 | 図4-91  | Spartan Spaceが想定するISRUを見据えた早期の月面インフラ構成      |
| 423 | 図4-92  | MAANA Electricが想定する太陽電池製造原料獲得のプロセス          |
| 424 | 図4-93  | MAANA Electricの技術的な強み                       |
| 424 | 図4-94  | MAANA Electricの事業ロードマップ                     |
| 425 | 図4-95  | MAANA ElectricのLunaBox v1の数値目標              |
| 18  | 表2-15  | 低軌道実証可能な施設一覧                                |
| 98  | 表2-70  | 国際宇宙ステーションの太陽電池パドルの仕様                       |
| 99  | 表2-72  | 大型宇宙機の電力と発生電圧                               |
| 119 | 表2-77  | 太陽電池アレイの質量積算                                |
| 165 | 表2-94  | 日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2021における電源系候補の構成とそのトレードオフ結果 |
| 222 | 表2-139 | 特定波長の光に対する光電変換効率（セル）の最                      |
| 223 | 表2-140 | 短・長距離のレーザー無線伝送の仕様選択                         |
| 261 | 表4-1   | ESAにおける研究開発プログラム                            |
| 264 | 表4-2   | 欧州が開発する月面関連電源技術①                            |
| 264 | 表4-3   | 欧州が開発する月面関連電源技術②                            |
| 264 | 表4-4   | 欧州が開発する月面関連電源技術③                            |
| 269 | 表4-5   | ILRS署名組織(国家除く)                              |
| 275 | 表4-6   | 大型システムの構成                                   |
| 276 | 表4-7   | 中型システムの構成                                   |
| 276 | 表4-8   | 小型システムの構成                                   |
| 277 | 表4-9   | 小型原子炉の仕様                                    |
| 280 | 表4-10  | UAEの月面探査車ミッション                              |
| 283 | 表4-11  | Moon to Mars Initiativeを構成する各プログラムの概要       |
| 283 | 表4-12  | Moon to Mars Initiative支出計画                 |
| 285 | 表4-13  | Supply Chainプログラムの助成プロジェクト一覧                |
| 287 | 表4-14  | Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧 |
| 290 | 表4-15  | Demonstrator (Feasibility) プログラムの助成プロジェクト一覧 |
| 291 | 表4-16  | Trailblazer (Stage1) プログラムの助成プロジェクト一覧       |
| 335 | 表4-23  | 1.44GWシステムの重量ブレイクダウン                        |
| 338 | 表4-24  | FNC社のコストモデルのコスト要素                           |
| 338 | 表4-25  | SBSP各サブシステム要素の効率と価格の参考値                     |
| 340 | 表4-26  | エネルギー源別のLCOEとVALCOE                         |
| 341 | 表4-27  | SBSPの費用便益分析（2070年までに54基導入の場合）               |
| 344 | 表4-28  | SPS-Alpha の宇宙セグメントの質量概要（OHB計算）              |
| 345 | 表4-29  | OHBのレポートで想定されている打上げ機と能力                     |
| 347 | 表4-30  | コストモデルによるコスト算出結果                            |
| 348 | 表4-31  | 運用に関して使用したパラメータ値                            |

(様式2)

|      |        |                                                                                                       |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 349  | 表4-32  | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステムのアーキテクチャ・トレードオフ結果                                                   |
| 353  | 表4-33  | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果                                                         |
| 354  | 表4-34  | Thales Alenia Spaceスタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果                                                           |
| 362  | 表4-35  | 欧米の各FSにおけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方 (1/2)                                                            |
| 363  | 表4-36  | 欧米の各FSにおけるリファレンスシステムの仕様と運用コンセプト等の考え方 (2/2)                                                            |
| 364  | 表4-37  | 欧米の各FSにおけるコスト算出に関わる項目の考え方 (1/2)                                                                       |
| 365  | 表4-38  | 欧米の各FSにおけるコスト算出に関わる項目の考え方 (2/2)                                                                       |
| 368  | 表4-39  | JSSコストモデルの入力パラメータ値の見直し (2023年度)                                                                       |
| 370  | 表4-40  | 欧米のFSにおける各コストモデルとJSSモデルでのCAPEXの算出方法の比較                                                                |
| 371  | 表4-41  | 欧米のFSにおける各コストモデルとJSSモデルでのOPEXの算出方法の比較                                                                 |
| 371  | 表4-42  | 欧米のFSにおける各コストモデルとJSSモデルに組み込まれている各項目の有無の比較                                                             |
| 373  | 表4-43  | 再検討を行ったJSSコストモデルの項目／入力パラメータ値一覧 (2024年版)                                                               |
| 374  | 表4-44  | JSSモデル (バッテリーあり) ケースのコスト試                                                                             |
| 376  | 表4-45  | JSSモデル (バッテリーなし) ケースのコスト試                                                                             |
| 380  | 表4-46  | 太陽光発電・風力発電の導入量上限                                                                                      |
| 381  | 表4-47  | SSPSの種類                                                                                               |
| 382  | 表4-48  | ケース設定                                                                                                 |
| 392  | 表4-49  | 月面探査シナリオにおける12の目標                                                                                     |
| 405  | 表4-53  | Moon Village Workshop & Symposiumプログラム概要                                                              |
| 412  | 表4-54  | Space for Inspiration1日目のプログラム概要                                                                      |
| 413  | 表4-55  | Space for Inspiration2日目のプログラム概要                                                                      |
| 417  | 表4-56  | Lunar Economyパネルの登壇パネリスト                                                                              |
| 付録5  | 付録図1-1 | NASA スタディにおけるSBSP のリファレンスデザイン (左: RD1、右: RD2)                                                         |
| 付録5  | 付録図1-2 | ベースライン分析と複数の変数の感度分析のための主要入力パラメータ                                                                      |
| 付録6  | 付録図1-3 | SBSP システムのライフサイクルコストと温暖化ガス排出削減効果の感度分析結果                                                               |
| 付録7  | 付録図1-4 | NRLのPRAM-FX装置                                                                                         |
| 付録7  | 付録図1-5 | NRLのSWELL装置                                                                                           |
| 付録8  | 付録図1-6 | 軌道上でのArachne の実験イメージ                                                                                  |
| 付録10 | 付録図1-7 | SSPD 実証機と構成要素 (左) /DOLCE の展開実験イメージ (右上) /MAPLE のマイクロ波送電アレイのアンテナシート (右中央) /SSPD をVIGORIDE に結合する様子 (右下) |
| 付録10 | 付録図1-8 | MAPLE の内部の写真。右側: 送信アレイ、左側: 受信機                                                                        |

(様式2)

|      |         |                                                                            |
|------|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| 付録15 | 付録図1-9  | 欧州SBSP の想定ロードマップ                                                           |
| 付録15 | 付録図1-10 | ESA SOLARIS のYoutube 紹介ページ                                                 |
| 付録16 | 付録図1-11 | SOLARIS プログラムで想定されている活動                                                    |
| 付録17 | 付録図1-12 | ESA SOLARIS の技術開発目標                                                        |
| 付録18 | 付録図1-13 | 2023-2025 年の間に提案されている活動内容                                                  |
| 付録19 | 付録図1-14 | SOLARIS で提案されているTechnology Development Activities                          |
| 付録21 | 付録図1-15 | Arthur D Little 社のDIRECT-SUN-REFLECTION (DSR) コンセプト                        |
| 付録21 | 付録図1-16 | Arthur D Little 社が提案する2 種類のアーキテクチャ                                         |
| 付録21 | 付録図1-17 | DSR アーキテクチャの説明                                                             |
| 付録22 | 付録図1-18 | SCL アーキテクチャの説明                                                             |
| 付録23 | 付録図1-19 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム (宇宙部) ..                               |
| 付録23 | 付録図1-20 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム (地上部)                                  |
| 付録24 | 付録図1-21 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムのエネルギーの流れ                               |
| 付録24 | 付録図1-22 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステム初号機のコスト計算結果                             |
| 付録25 | 付録図1-23 | Thales Alenia Space スタディのリファレンスシステムの発電単価計算結果                               |
| 付録27 | 付録図1-24 | 資金提供が決定した13 のプロジェクト                                                        |
| 付録28 | 付録図1-25 | 「ESPI2040 : Space for Prosperity, Peace and Future Generations」の最終ページ      |
| 付録29 | 付録図1-26 | 英国におけるSBSP 活動の内訳                                                           |
| 付録30 | 付録図1-27 | 英国のSBSP システム案「CASSIOPeiA」                                                  |
| 付録30 | 付録図1-28 | 英国のSBSP 開発計画                                                               |
| 付録33 | 付録図1-29 | SEIの参加機関                                                                   |
| 付録33 | 付録図1-30 | SEIの組織構造                                                                   |
| 付録36 | 付録図1-31 | CASTによるSSPSロードマップ                                                          |
| 付録37 | 付録図1-32 | SSPS開発のフェーズごとのミッション                                                        |
| 付録37 | 付録図1-33 | 中国が提案するSSPS システムコンセプト                                                      |
| 付録38 | 付録図1-34 | 中国が提案する技術実証衛星案                                                             |
| 付録39 | 付録図1-35 | 中国が提案する月面軌道上でのLPTミッション                                                     |
| 付録40 | 付録図1-36 | 西安電子科技大学の実証実験施設                                                            |
| 付録44 | 付録図1-37 | K-SSPSの概要                                                                  |
| 付録46 | 付録図1-38 | SBSPエコシステムマップ                                                              |
| 付録46 | 付録図1-39 | 設立年別で示すSSPS活動エンティティ数                                                       |
| 付録47 | 付録図1-40 | Aetherflux 社の開発するSSPS衛星                                                    |
| 付録50 | 付録図1-41 | WPT実験に用いられた送信アンテナのプロトタイプ                                                   |
| 付録50 | 付録図1-42 | Virtus Solis社のSBSPコンセプト                                                    |
| 付録51 | 付録図1-43 | Astrostrom 社による「Greater Earth Lunar Power Station (GE <sup>®</sup> -LPS) 」 |
| 付録52 | 付録図1-44 | Paraloon 社によるインフレータブル展開構造                                                  |
| 付録53 | 付録図1-45 | 「16U4SBSP」 ミッションのイメージ                                                      |
| 付録54 | 付録図1-46 | CASSIE プロジェクトの概要と参加組織                                                      |

(様式 2)

|      |         |                                                              |
|------|---------|--------------------------------------------------------------|
| 付録55 | 付録図1-47 | HARRIER の実験装置                                                |
| 付録59 | 付録図2-1  | ブロッサムポイントで実施されたマイクロ波送電実験の送電アンテナ（左上）とレクテナ（右上と下）               |
| 付録59 | 付録図2-2  | MIT のHUSIR 送信機を用いて実施されたマイクロ波送電によるLED 点灯実験                    |
| 付録61 | 付録図2-3  | Whisper Beamトランスミッター（下部の金属リング）から上空3m の照明への無線電力伝送実証           |
| 付録62 | 付録図2-4  | ドローンに電力を供給する4台のワイヤレス給電トランスミッター                               |
| 付録63 | 付録図2-5  | Reach Power社CEOのChris Davlantes氏のデモの様子                       |
| 付録64 | 付録図2-6  | 2022年9月にAirbus Innovation Facilities において行われた無線電力伝送実証        |
| 付録65 | 付録図2-7  | 2021年5月に実施した屋内試験のプロトタイプアンテナ（左）／2022年6月に実施したフィールド             |
| 付録66 | 付録図2-8  | Airbus' Munich Area Siteでの実証実験システム                           |
| 付録68 | 付録図2-9  | KERI における拡張可能なアレイ型レクテナの屋外実験                                  |
| 付録68 | 付録図2-10 | KERI における研究開発目標と内容                                           |
| 付録69 | 付録図2-11 | KARI/KERIにおけるエアロスタットへの無線電力伝送実験                               |
| 付録71 | 付録図2-12 | POWERプログラムの開発内容                                              |
| 付録72 | 付録図2-13 | アラバマ州にあるAbove: Space Development社の施設において行われたラボ・ベンチテスト        |
| 付録74 | 付録図2-14 | DoDのPOWER ビーミングソリューションコンセプト                                  |
| 付録75 | 付録図2-15 | 中国西北工業大学が開発したODD (Optics-driven Drone) と飛行試験の様子              |
| 付録76 | 付録図2-16 | 近い将来のアプリケーションとSBSPに向けたパワービーミングのロードマップ                        |
| 付録78 | 付録図2-17 | GuRu社の無線で飛行するドローンの実証                                         |
| 付録79 | 付録図1-65 | 東芝の受電アンテナの向きに依存せず高効率な受電を行う受電機の実証                             |
| 付録32 | 付録表1-1  | Space Based Solar Power Innovation Competitionで実施されているプロジェクト |
| 付録57 | 付録表1-2  | 各国のSSPS に関するロードマップの比較                                        |