

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



---

## 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.....                    | 3   |
| 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 水素に関する技術課題整理.....               | 4   |
| 2.1.1 検討の全体像.....                   | 4   |
| 2.1.2 外部条件の検討 .....                 | 6   |
| 2.1.3 推薬プラント設備の検討.....              | 25  |
| 2.1.4 水資源探査にかかわる検討 .....            | 41  |
| 2.1.5 今後の検討課題 .....                 | 53  |
| 2.2 電力に関する技術課題整理 .....              | 55  |
| 2.2.1 検討の全体像 .....                  | 55  |
| 2.2.2 月面電力供給全体システム.....             | 56  |
| 2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システム .....          | 68  |
| 2.2.4 月面設置発電システム .....              | 123 |
| 2.2.5 月面上での送電システム.....              | 159 |
| 3. 有識者委員会・WG 運営 .....               | 194 |
| 3.1 有識者委員会.....                     | 194 |
| 3.2 水素 WG.....                      | 195 |
| 3.3 電力 WG.....                      | 197 |
| 4. 国内外動向調査.....                     | 199 |
| 4.1 米国における月面開発の検討体制 .....           | 199 |
| 4.1.1 NASA における検討 .....             | 199 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.2 DARPA における検討 .....                                   | 201 |
| 4.2 水素関連技術に関する海外動向調査.....                                  | 203 |
| 4.2.1 米国 .....   | 203 |
| 4.2.2 欧州 .....   | 209 |
| 4.2.3 中国 .....   | 214 |
| 4.3 電力関連技術に関する海外動向調査.....                                  | 217 |
| 4.3.1 米国 .....   | 217 |
| 4.4 ベンチマーク調査 .....   | 226 |
| 4.4.1 TRL(Technology Readiness Level)の定義について .....         | 226 |
| 4.4.2 水素における日米欧の研究開発状況の比較 .....                            | 226 |
| 4.4.3 電力における日米の研究開発状況の比較.....                              | 227 |
| 4.5 海外現地調査.....  | 228 |
| 4.5.1 The Space Resources Roundtable 2023.....             | 228 |
| 4.5.2 74th International Astronautical Congress 2023 ..... | 233 |
| 5. まとめと今後の課題.....  | 240 |
| 5.1 調査結果まとめ .....  | 240 |
| 5.2 今後の課題.....   | 240 |

---

## 図 目次

---

|  |    |
|--|----|
| 図 1-1 実施体制図.....                                 | 3  |
| 図 2-1 バリューチェーン全体像 .....                          | 5  |
| 図 2-2 検討チーム構成図.....                              | 5  |
| 図 2-3 クレータ・PSR の選定基準の概要.....                     | 7  |
| 図 2-4 候補地(2 か所:地図上の赤点) .....                     | 9  |
| 図 2-5 S-①:レゴリス中の水量による比較(俯瞰) .....                | 10 |
| 図 2-6 S-①:レゴリス中の水量による比較(地点詳細).....               | 10 |
| 図 2-7 S-②:露出する水氷の水平分布による比較(俯瞰) .....             | 11 |
| 図 2-8 S-②:露出する水氷の水平分布による比較(地点詳細) .....           | 11 |
| 図 2-9 S-②:露出する水氷の水平分布(LRO-LAMP)による比較(俯瞰) .....   | 12 |
| 図 2-10 S-②:露出する水氷の水平分布(LRO-LAMP)による比較(地点詳細)..... | 12 |
| 図 2-11 S-③:平均温度(10 年間)による比較(俯瞰) .....            | 13 |
| 図 2-12 S-③:平均温度(10 年間)による比較(地点詳細) .....          | 13 |
| 図 2-13 S-③:最高温度(10 年間)による比較(地点詳細) .....          | 14 |
| 図 2-14 S-③:最高温度(10 年間)による比較(地点詳細) .....          | 14 |
| 図 2-15 S-④:PSR の存在とサイズ(俯瞰) .....                 | 15 |
| 図 2-16 S-④:PSR の存在とサイズ(地点詳細).....                | 15 |
| 図 2-17 NASA Artemis 3 の着陸候補地.....                | 16 |
| 図 2-18 選定地点周辺の着陸地点 .....                         | 16 |
| 図 2-19 日照率(俯瞰).....                              | 17 |
| 図 2-20 日照率(地点詳細).....                            | 17 |
| 図 2-21 傾斜度(俯瞰).....                              | 18 |
| 図 2-22 傾斜度(地点詳細).....                            | 18 |
| 図 2-23 垂直方向のレゴリス中の水含有率 .....                     | 19 |
| 図 2-24 地点 1 の各ゾーン間の位置関係(日照率との関係).....            | 21 |
| 図 2-25 地点 1 の各ゾーン間の位置関係(斜度との関係) .....            | 22 |
| 図 2-26 地点 1 の各ゾーンの標高 .....                       | 22 |
| 図 2-27 地点 2 の各ゾーン間の位置関係(日照率との関係) .....           | 23 |
| 図 2-28 地点 2 の各ゾーン間の位置関係(斜度との関係) .....            | 24 |
| 図 2-29 地点 2 の各ゾーンの標高.....                        | 24 |
| 図 2-30 施設の月面上での配置関係イメージ .....                    | 26 |
| 図 2-31 サーマルマイニング技術概要及び採取の際の望ましい水の状態 .....        | 29 |
| 図 2-32 レゴリス抽出水の OLI 計算結果(Hale-Bopp 彗星).....      | 31 |
| 図 2-33 経路①(地点 1)の詳細情報 .....                      | 32 |
| 図 2-34 経路②(地点 1)の詳細情報 .....                      | 33 |
| 図 2-35 経路①(地点 2)の詳細情報.....                       | 34 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 図 2-36 | 水の段階で電解前に高圧化(電気分解=高圧)のシステム構成            | 36 |
| 図 2-37 | ガスの段階で電解後に高圧化(電気分解=低圧)のシステム構成           | 37 |
| 図 2-38 | 通信制御システム一例                              | 40 |
| 図 2-39 | ミッション要求へのフィードバック                        | 44 |
| 図 2-40 | STEP 毎の探査イメージ                           | 47 |
| 図 2-41 | 水探査装置の組み合わせ案                            | 51 |
| 図 2-42 | 実現のタイムライン                               | 51 |
| 図 2-43 | LSW の機器構成                               | 52 |
| 図 2-44 | 各地点における日照量の推移                           | 53 |
| 図 2-45 | 月面での電力供給システム機能ブロック図                     | 56 |
| 図 2-46 | 社会のインフラストラクチャとしての一般的な電力供給システムの機能構成      | 57 |
| 図 2-47 | 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 に基づく月面電力供給全体システム概念 | 59 |
| 図 2-48 | 水素製造システム構成                              | 60 |
| 図 2-49 | 水素からの電力要求に対応する電力供給システム構成(基本システム構成)      | 60 |
| 図 2-50 | 前提とする候補地                                | 61 |
| 図 2-51 | ケース 1 従来のシステムのアップデートのシステム構成             | 63 |
| 図 2-52 | ケース 2 PSR 内は全面的に軌道上からの電力に頼るケースのシステム構成   | 63 |
| 図 2-53 | 月面太陽光発電システムの年間を通じての発生電力プロファイル(候補地1)     | 65 |
| 図 2-54 | 月面太陽光発電システムの年間を通じての発生電力プロファイル(候補地2)     | 65 |
| 図 2-55 | 月軌道発電システムの軌道の例                          | 66 |
| 図 2-56 | 可視時間中の月軌道発電システムの電力プロファイル                | 66 |
| 図 2-57 | 日陰時は水素製造を休止する場合のシステム構成                  | 67 |
| 図 2-58 | 電力システム構成(ケース 1)                         | 69 |
| 図 2-59 | 電力システム構成(ケース 2)                         | 69 |
| 図 2-60 | 電力送電場所と衛星軌道                             | 70 |
| 図 2-61 | Straship の概要                            | 70 |
| 図 2-62 | エネルギーフロー                                | 71 |
| 図 2-63 | 月周回軌道からエネルギーシステムの構成                     | 72 |
| 図 2-64 | エネルギーレベルダイヤグラム                          | 74 |
| 図 2-65 | 大型衛星のケース                                | 76 |
| 図 2-66 | 送電距離と中心電力密度の関係                          | 76 |
| 図 2-67 | 太陽電池パネルの質量特性                            | 78 |
| 図 2-68 | JAXA の大型構造物開発のシナリオ                      | 79 |
| 図 2-69 | 宇宙機群での構成                                | 79 |
| 図 2-70 | 機能分散型システム                               | 80 |
| 図 2-71 | 周波数とアンテナ面積の関係                           | 91 |
| 図 2-72 | 周波数とパネル枚数の関係                            | 91 |
| 図 2-73 | 周波数と PFD の関係                            | 92 |
| 図 2-74 | GaAs GAD を用いる小電力レクテナ用整流器の構成             | 94 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 図 2-75  | 倍電圧整流器の入出力特性(DC 負荷は整合終端)                     | 94  |
| 図 2-76  | 3段スタック倍電圧整流器の入出力特性(DC 負荷は整合終端)               | 95  |
| 図 2-77  | 小電力整流器の特性まとめ                                 | 95  |
| 図 2-78  | 電力増幅器の付加電力効率の現状と将来予測                         | 103 |
| 図 2-79  | 市販電子管の現状(パルス出力は除く)                           | 104 |
| 図 2-80  | きずな(WINDS)                                   | 106 |
| 図 2-81  | EarthCARE/CPR                                | 106 |
| 図 2-82  | SMILES                                       | 107 |
| 図 2-83  | 開口径 1m 扇子型展開アンテナ                             | 107 |
| 図 2-84  | 5m Deployable Reflector                      | 108 |
| 図 2-85  | はるかの展開アンテナ (開口径 8m)                          | 109 |
| 図 2-86  | ETS-VIII/LDR (開口径 13m)                       | 109 |
| 図 2-87  | φ3.6m メッシュ展開アンテナ                             | 110 |
| 図 2-88  | φ2.5m 扇子型展開式高精度反射鏡                           | 110 |
| 図 2-89  | Northrop Grumman の Astromesh                 | 111 |
| 図 2-90  | L3 Harris のリブ型メッシュアンテナ                       | 111 |
| 図 2-91  | L3 Harris のフープ型 (ペリメーターフレーム) メッシュアンテナ        | 112 |
| 図 2-92  | LSS の 7.5m 展開型メッシュ反射鏡                        | 113 |
| 図 2-93  | スロットアレイアンテナ コンセプト                            | 113 |
| 図 2-94  | スロットアレイアンテナ 給電回路                             | 114 |
| 図 2-95  | スロットアレイアンテナ                                  | 114 |
| 図 2-96  | 幅 10m とした時の構想案                               | 116 |
| 図 2-97  | 国際宇宙ステーションの太陽電池アレイウィング (SAW)                 | 116 |
| 図 2-98  | 国内太陽電池パドル実績                                  | 117 |
| 図 2-99  | 構想案(幅 10m の条件削除)                             | 118 |
| 図 2-100 | 既開発宇宙機と本件アレイサイズの比較                           | 119 |
| 図 2-101 | 国際宇宙ステーションの SAW の電氣的性能                       | 121 |
| 図 2-102 | 各種太陽電池                                       | 121 |
| 図 2-103 | 太陽電池の変換効率の変遷                                 | 122 |
| 図 2-104 | IMM3J セル外観と電気特性                              | 124 |
| 図 2-105 | 太陽ユニット形状とその特性                                | 125 |
| 図 2-106 | 候補地点 1(Connecting Ridge)                     | 127 |
| 図 2-107 | 候補地点 2(Nobile Rim 1)                         | 128 |
| 図 2-108 | 24 時間換算時刻の平均ボロメータ温度                          | 129 |
| 図 2-109 | 月極域の日照率                                      | 129 |
| 図 2-110 | Astrobotic 社 VSAT                            | 130 |
| 図 2-111 | Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)    | 131 |
| 図 2-112 | Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)説明図 | 131 |
| 図 2-113 | LUNARSABER                                   | 132 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 図 2-114 | Lockheed Martin 社 VSAT .....                      | 132 |
| 図 2-115 | 10kW の Relocatable Solar Array(RSA) .....         | 133 |
| 図 2-116 | RSA の展開手順 .....                                   | 134 |
| 図 2-117 | Langley Research Center の VSAT .....              | 135 |
| 図 2-118 | 展開・収納機能を持つタワーのブレッド・ボード・モデル .....                  | 135 |
| 図 2-119 | 太陽追尾機能を持つ SAP のブレッド・ボード・モデル .....                 | 136 |
| 図 2-120 | 太陽基準での地球と月の自転と公転角度の関係 .....                       | 137 |
| 図 2-121 | 月南極点からみた太陽の軌跡 .....                               | 137 |
| 図 2-122 | 月南極域の 3D 地形データ(国交省スターダスト計画) .....                 | 138 |
| 図 2-123 | 3D 地形データを用いて投影手法で求めた 360°方向の最高地形角度 .....          | 139 |
| 図 2-124 | 各候補地点における 360°方向の最高地形角度グラフ .....                  | 139 |
| 図 2-125 | 太陽高度と候補地点からみた太陽方位の最高地形高度の比較 .....                 | 140 |
| 図 2-126 | 太陽高度-1.54°時の日照障害地形(対候補地点 2) .....                 | 142 |
| 図 2-127 | 複数の太陽光発電タワーと太陽の相互関係 .....                         | 143 |
| 図 2-128 | タワーの配置 .....                                      | 144 |
| 図 2-129 | タワーの配置パターン .....                                  | 145 |
| 図 2-130 | 発電パターン(直線配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)....     | 146 |
| 図 2-131 | 発電パターン(円環配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m) ....    | 147 |
| 図 2-132 | 発電パターン(三角形配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)        | 148 |
| 図 2-133 | 発電パターン(格子型配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)        | 149 |
| 図 2-134 | 発電パターン(不統一配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)        | 150 |
| 図 2-135 | 各パターンの発電効率の比較(上:間隔 10m、下:間隔 20m) .....            | 151 |
| 図 2-136 | 不統一配置パターンにおける離隔距離と発電効率の関係 .....                   | 152 |
| 図 2-137 | 再生型燃料電池運転パターン .....                               | 153 |
| 図 2-138 | 蓄電池容量の推移(候補地点 1、リチウムイオン電池、発電電力最小とした場合) ...        | 154 |
| 図 2-139 | 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、リチウムイオン電池) .....             | 154 |
| 図 2-140 | 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、リチウムイオン電池) .....             | 155 |
| 図 2-141 | 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、再生型燃料電池) .....               | 156 |
| 図 2-142 | 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、再生型燃料電池) .....               | 156 |
| 図 2-143 | バリューチェーン全体像 .....                                 | 157 |
| 図 2-144 | 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 1、再生型燃料電池)<br>..... | 158 |
| 図 2-145 | 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 2、再生型燃料電池)<br>..... | 158 |
| 図 2-146 | 送電方式選定フロー(令和4年度の検討結果) .....                       | 162 |
| 図 2-147 | 送電システム「ケース1」のイメージ図 .....                          | 163 |
| 図 2-148 | 送電システム「ケース 2」のイメージ図 .....                         | 164 |
| 図 2-149 | 候補地1の伝送経路検討結果(直達) .....                           | 165 |
| 図 2-150 | 候補地 2 の伝送経路検討結果(直達) .....                         | 166 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 図 2-151 | 月面上送受電システムの構成イメージ .....  | 170 |
| 図 2-152 | 送電部の内部構成イメージ .....   | 171 |
| 図 2-153 | 適用想定レクテナ効率 .....   | 172 |
| 図 2-154 | ADMV4821 の内部ブロック図 .....  | 174 |
| 図 2-155 | ADMV4821 を適用した場合の送電部内部構成 .....   | 175 |
| 図 2-156 | 周波数 20GHz から 40GHz までの整流器・レクテナの整流効率 .....                                  | 177 |
| 図 2-157 | GaAs SBD と GaAs GAD(GaN GAD)の比較 .....                                      | 178 |
| 図 2-158 | レクテナの機能ブロック図 .....   | 179 |
| 図 2-159 | 直接整合による 5.8GHz 帯レクテナの構成 .....  | 179 |
| 図 2-160 | ブリッジ整流器のレイアウトと高周波数化に対するダイオード段数とゲート幅のスケール<br>ング .....                       | 180 |
| 図 2-161 | 周波数に対する整流効率と DC 出力電力(既発表と予測値) .....  | 181 |
| 図 2-162 | 24GHz 帯でのブリッジ整流器の入出力特性 .....   | 181 |
| 図 2-163 | レクテナアレイの受電電力密度の予測値 .....   | 182 |
| 図 2-164 | 20~30GHz 帯パワーアンプの既存報告における PAE 傾向 .....                                     | 184 |
| 図 2-165 | 市販電子管デバイスの周波数帯と出力の傾向 .....   | 185 |
| 図 2-166 | 距離 5 km、波長 1,070 nm における送光径 $\omega_0$ と受光径 $\omega$ の関係 .....             | 189 |
| 図 2-167 | 距離 100 km、500 km、及び 1,000 km における送光径 $\omega_0$ と受光径 $\omega$ の関係<br>..... | 189 |
| 図 2-168 | 様々な波長に対する光電変換効率 .....  | 192 |
| 図 3-1   | 有識者委員会と WG の開催 .....   | 194 |
| 図 4-1   | LSII における 6 つの重点領域 .....   | 200 |
| 図 4-2   | LSII の技術実証計画 .....   | 200 |
| 図 4-3   | LSIC の体制 .....   | 201 |
| 図 4-4   | NASA が検討している ISRU の研究開発スケジュール .....  | 204 |
| 図 4-5   | 水素バリューチェーンに関連する NASA の研究開発プロジェクトの全体像 .....                                 | 205 |
| 図 4-6   | NASA が実施する研究開発プログラムの全体像 .....  | 206 |
| 図 4-7   | 掘削プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト .....                                       | 207 |
| 図 4-8   | 水抽出プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト .....                                      | 208 |
| 図 4-9   | 純水処理・水電解・液化プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト .....                              | 209 |
| 図 4-10  | ESA の月面での ISRU に関する取り組みスケジュール .....  | 210 |
| 図 4-11  | ESA における研究開発プログラムの全体像 .....  | 211 |
| 図 4-12  | ESA における研究開発プログラムと今回調査対象の個別プロジェクトとの対応関係 .....                              | 211 |
| 図 4-13  | 掘削・水抽出・熱抽出プロセスに関する ESA の取り組み .....   | 213 |
| 図 4-14  | 純水処理・水電解・液化・貯蔵プロセスに関する ESA の取り組み .....                                     | 214 |
| 図 4-15  | 提案する水・酸素・食料の生成フロー .....  | 215 |
| 図 4-16  | 提案する ISRU のロードマップ .....  | 216 |
| 図 4-17  | NASA による月面電力供給想定(縦軸:供給電力、横軸:伝送距離) .....                                    | 218 |
| 図 4-18  | NASA における電力供給の将来ビジョン(Phase $\alpha$ ) .....                                | 218 |

|   |     |
|---|-----|
| 図 4-19 NASA における電力供給の将来ビジョン(Phase Ω).....                               | 219 |
| 図 4-20 NASA における電力供給に関する研究開発の優先事項.....                                  | 220 |
| 図 4-21 発電(太陽光発電、ヘリオスタット・太陽光反射)に関する NASA の取り組み.....                      | 221 |
| 図 4-22 発電(原子力発電、ラジオアイソトープ電源)に関する NASA の取り組み .....                       | 221 |
| 図 4-23 送電(有線送電・無線送電)に関する NASA の取り組み.....                                | 222 |
| 図 4-24 送電(パワーエレクトロニクス)に関する NASA の取り組み.....                              | 222 |
| 図 4-25 蓄電に関する NASA の取り組み .....  | 223 |
| 図 4-26 NASA 及び ISO 16290(ESA)による TRL の定義.....                           | 226 |
| 図 4-27 水素における日米欧の研究開発状況の比較 .....  | 227 |
| 図 4-28 電力における日米の研究開発状況の比較.....  | 228 |
| 図 4-29 NASA における ISRU の検討状況.....  | 230 |
| 図 4-30 ISRU 技術の領域(左)及び ISRU プラント実証にむけたフェーズのイメージ(右) ..                   | 230 |
| 図 4-31 ISRU パイロットプラントの実証に関する戦略.....                                     | 231 |
| 図 4-32 Lockheed Martin による月面での電力供給イメージ(左)とアーキテクチャ検討(右)<br>.....         | 232 |
| 図 4-33 「Plant optimization」の概要(左)とその手法(左) .....                         | 232 |
| 図 4-34 浄水化／電気分解／乾燥技術(IHOP)(左)及び水抽出／浄水化技術(ICICLE)(右)<br>.....            | 232 |
| 図 4-35 Technical Sessions の題目から作成したワードクラウド(赤字:動詞、青字:名詞、緑<br>字:形容詞)..... | 234 |
| 図 4-36 EURO2MOON が想定するレゴリスから抽出する酸素のバリューチェーン.....                        | 235 |
| 図 4-37 資源のバリューチェーンに対応したロボット(左)及び想定するバリューチェーン(右)                         | 236 |
| 図 4-38 ORACLE の構成.....  | 236 |
| 図 4-39 Helios 社の酸素プラントイメージ .....  | 237 |
| 図 4-40 レゴリスからの水抽出手法の比較検討 .....  | 237 |
| 図 4-41 各プラント・施設の位置関係.....   | 238 |
| 図 4-42 2030 年頃、2035 年以降、2040 年以降の 3 フェーズにおける送電方式の検討                     | 238 |
| 図 4-43 Shielded Zone of the Moon の定義 .....                              | 239 |

---

## 表 目次

---

|   |    |
|---|----|
| 表 2-1 チーム 1 及び 2 における実施計画.....  | 6  |
| 表 2-2 チーム 3 における実施計画 .....  | 6  |
| 表 2-3 理学的条件(Science) .....  | 7  |
| 表 2-4 工学的条件(Engineering) .....  | 8  |
| 表 2-5 選定候補クレータ・PSR の詳細 .....  | 9  |
| 表 2-6 ハレー彗星(1/P)(短周期)の不純物比率.....                                      | 19 |
| 表 2-7 ハール・ボップ彗星(C/1995 O1)(長周期)の不純物比率 .....                           | 20 |
| 表 2-8 サービスゾーン及び発着ゾーン付近の温度範囲.....                                      | 20 |
| 表 2-9 各プラント設備の検討に係る前提条件.....  | 25 |
| 表 2-10 個別プロセスの検討結果概要.....   | 27 |
| 表 2-11 計算の際に使用した物性値 .....   | 28 |
| 表 2-12 彗星の揮発性成分の存在量(Hale-Bopp 彗星).....                                | 30 |
| 表 2-13 OLI 計算結果(278.15 K, 0.1 atm) .....                              | 31 |
| 表 2-14 輸送に係る施工検討のバリエーション.....   | 35 |
| 表 2-15 輸送に係る施工検討の結果 .....   | 35 |
| 表 2-16 高圧化のタイミングによるメリット／デメリット評価.....                                  | 37 |
| 表 2-17 プラントシステム全体にかかわる検討の結果概要.....                                    | 38 |
| 表 2-18 各施設における管理(徐熱)対象の熱.....   | 39 |
| 表 2-19 水資源探査に係るニーズ調査.....   | 41 |
| 表 2-20 設定したミッション要求(初期仮説) .....  | 42 |
| 表 2-21 設定した月面環境条件 .....   | 43 |
| 表 2-22 ミッション要求の見直し.....   | 44 |
| 表 2-23 見直したミッション要求.....   | 45 |
| 表 2-24 設定した探査装置のハードウェア仕様 .....  | 48 |
| 表 2-25 最適な探査方式の比較 .....   | 50 |
| 表 2-26 探査装置の組み合わせ運用 .....   | 51 |
| 表 2-27 ドリル掘削探査装置の比較.....  | 52 |
| 表 2-28 電力 WG 実施体制.....  | 55 |
| 表 2-29 月軌道発電システムの候補案.....   | 66 |
| 表 2-30 周波数、送電距離とアンテナサイズ .....   | 73 |
| 表 2-31 5.5m 角のパネル内のアンテナ素子数 .....                                      | 74 |
| 表 2-32 レクテナの規模 .....  | 75 |
| 表 2-33 送電部の質量特性、面積特性の比較 .....   | 77 |
| 表 2-34 $\tau=1.00$ ( $\eta=63\%$ )、周波数 5.8 GHz、受信電力 10 kW のときの回線..... | 81 |
| 表 2-35 $\tau=1.00$ ( $=63\%$ )、周波数 10 GHz、受信電力 10 kW のときの回線.....      | 82 |
| 表 2-36 $\tau=1.00$ ( $=63\%$ )、周波数 20 GHz、受信電力 10 kW のときの回線.....      | 83 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 表 2-37 | $\tau=1.00(=63\%)$ 、周波数 50 GHz、受信電力 10 kW のときの回線      | 84  |
| 表 2-38 | $\tau=1.00(\eta=63\%)$ 、周波数 100 GHz、受信電力 10 kW のときの回線 | 85  |
| 表 2-39 | $\tau=1.53(\eta=90\%)$ 、周波数 5.8 GHz、受信電力 10 kW のときの回線 | 86  |
| 表 2-40 | $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 10 GHz、受信電力 10 kW のときの回線      | 87  |
| 表 2-41 | $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 20 GHz、受信電力 10 kW のときの回線      | 88  |
| 表 2-42 | $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 50 GHz、受信電力 10 kW のときの回線      | 89  |
| 表 2-43 | $\tau=1.53(\eta=90\%)$ 、周波数 100 GHz、受信電力 10 kW のときの回線 | 90  |
| 表 2-44 | 周波数 20GHz から 100GHz までの入力電力 1mW 以下の整流器・レクテナの感度点       | 92  |
| 表 2-45 | 小電力レクテナ用整流素子の性能                                       | 93  |
| 表 2-46 | V 帯(40-75GHz)電力増幅器の現状                                 | 96  |
| 表 2-47 | W 帯(75-110GHz)電力増幅器の現状                                | 96  |
| 表 2-48 | 110GHz帯以上の電力増幅器現状                                     | 97  |
| 表 2-49 | GaN を用いた電力増幅器開発例(30GHz帯以下)                            | 98  |
| 表 2-50 | GaN を用いた電力増幅器開発例(30GHz 以上)                            | 99  |
| 表 2-51 | GaN HEMT 電力増幅器 (5-6GHz)                               | 100 |
| 表 2-52 | GaN HEMT 電力増幅器 (20-30GHz)                             | 101 |
| 表 2-53 | GaN HEMT 電力増幅器 (90-200GHz)                            | 102 |
| 表 2-54 | InP HEMT 電力増幅器 (90-120GHz)                            | 103 |
| 表 2-55 | 電子管の特性  | 105 |
| 表 2-56 | IMM3J セル温度特性  | 125 |
| 表 2-57 | バス電圧 120V を達成するためのセル直列数                               | 126 |
| 表 2-58 | 架台の方式の比較  | 127 |
| 表 2-59 | 各緯度と太陽照度条件に対する月表面温度の最大最小値                             | 128 |
| 表 2-60 | 各候補補地点の日照率・最長影時間                                      | 140 |
| 表 2-61 | 年間を通じた日照時間比の変化  | 141 |
| 表 2-62 | 発電効率(直線配置パターン)  | 146 |
| 表 2-63 | 発電効率(円環配置パターン)  | 147 |
| 表 2-64 | 発電効率(三角形配置パターン)                                       | 148 |
| 表 2-65 | 発電効率(格子型配置パターン)                                       | 149 |
| 表 2-66 | 発電効率(不統一配置パターン)                                       | 150 |
| 表 2-67 | 電源系候補の構成とそのトレードオフ結果                                   | 153 |
| 表 2-68 | 想定される月面利用と電力システム                                      | 159 |
| 表 2-69 | 送電システム構築に向けた検討内容                                      | 160 |
| 表 2-70 | 送電システム案の概要  | 162 |
| 表 2-71 | 送電システム「ケース1」の建設シナリオ(案)                                | 163 |
| 表 2-72 | 送電システム「ケース2」の建設シナリオ(案)                                | 164 |
| 表 2-73 | 候補地1の伝送方法検討   | 165 |
| 表 2-74 | 候補地2の伝送方法検討   | 166 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 表 2-75 | 送電経路上のレゴリス密度 .....                         | 167 |
| 表 2-76 | 候補地1における送電システムの定格電力／必要重量.....              | 168 |
| 表 2-77 | 候補地 2 における送電システムの定格電力／必要重量.....            | 168 |
| 表 2-78 | 24GHz 送受電部システム仕様抜粋(FY2022 検討) .....        | 172 |
| 表 2-79 | 送電部の必要出力電力に関する検討結果.....                    | 173 |
| 表 2-80 | ADMV4821 の代表的な仕様 .....                     | 174 |
| 表 2-81 | 100kW 受電を想定した場合のレベルダイヤ .....               | 176 |
| 表 2-82 | 10kW 受電を想定した場合のレベルダイヤ.....                 | 176 |
| 表 2-83 | レベルダイヤにて想定した市販品 PA.....                    | 176 |
| 表 2-84 | 既存デバイスでの整流素子の比較 .....                      | 178 |
| 表 2-85 | 次世代整流素子の性能予測.....                          | 180 |
| 表 2-86 | 計算結果まとめ .....                              | 181 |
| 表 2-87 | 既存品をベースとした Beam Forming IC1 台当たりの変換効率..... | 183 |
| 表 2-88 | 既存品をベースとした 24GHz 送受電システムの総合変換効率 .....      | 183 |
| 表 2-89 | 代表的な市販電子管デバイスの諸元.....                      | 185 |
| 表 2-90 | デバイス種別毎の月面上送電への適用性検討結果 .....               | 187 |
| 表 3-1  | 有識者委員会 構成員一覧表(五十音順 敬称略) .....              | 194 |
| 表 3-2  | 有識者委員会の開催履歴およびアジェンダ .....                  | 195 |
| 表 3-3  | 水素 WG 構成員一覧表(五十音順) .....                   | 196 |
| 表 3-4  | 水素 WG の開催履歴およびアジェンダ.....                   | 196 |
| 表 3-5  | 電力 WG 構成員一覧表(五十音順) .....                   | 197 |
| 表 3-6  | 電力 WG の開催履歴およびアジェンダ.....                   | 198 |
| 表 4-1  | NASA における ISRU に関する研究開発方針 .....            | 204 |
| 表 4-2  | ESA における ISRU バリューチェーンの定義.....             | 212 |
| 表 4-3  | NASA における電力供給に関する研究開発要素及び目標.....           | 220 |
| 表 4-4  | 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(1/2).....                 | 224 |
| 表 4-5  | 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(2/2) .....                | 225 |
| 表 4-6  | 宇宙用原子炉調査結果まとめ .....                        | 225 |
| 表 4-7  | 発表セッションの概要.....                            | 229 |

# 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進めていくため、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進めていく」とあるように、月面での有人活動を持続的に進めていくには、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4年度の調査「令和3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、昨年度調査とも呼ぶ)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、水資源の探査から具体的な利用までのバリューチェーン全体を対象に検討し、全般を横断的に行う検討と施設レベルでの検討を組み合わせを行った。令和4年度の成果としては、バリューチェーンの各プロセスにおいて必要となる技術について、新規に追加となったプロセスである純水処理と高圧化を含め、候補技術の選定やメリット・デメリット・課題など利用可能性の評価を行った。さらに、全体アーキテクチャの検討として、水素バリューチェーンの各プロセスの月面上での配置について15パターンを設定し、設定した指標に基づき評価を行い、各パターンを「比較的有利」、「比較的不利」、「現状では技術的に不可能あるいは圧倒的に不利」の3つのグループに分類した。一方、「電力」の検討については、令和3年度、令和4年度に引き続き、全般を横断的に行う検討とシステムレベルでの検討を組み合わせを行った。令和4年度は、発電と送電に注力して検討を行い、月周回軌道上および月面上での発電に必要なシステム・技術の具体化・詳細化やマイクロ波やレーザーによる無線や有線による送電等を実現するために必要となるシステム・技術の検討を行った。加えて、月面電力供給全体システムの検討として、パラメータスタディを行った。具体的には月面上での発電候補地点を設定し、そこから極域基地までの発電・送電の効率について、様々な方式の比較・検討を行った。

国内外の動向調査では、水素については月面での水資源関連技術として、令和3年度に調査した欧米以外の国を対象とした調査結果と、欧米を含めたレゴリスからの酸素抽出技術の調査結果を示した。

電力については、米欧中における関連するプログラム／プロジェクトの調査を行った。

### 1.3 今年度の調査結果の概要

令和5年度も令和4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、令和3年度、令和4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」は水資源の探査から具体的な利用までのバリューチェーン全体を対象に検討した。また、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、具体的な施設設置の検討を行った。「電力」は、主に発電と送電について検討した。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が、その他の供給源についても一部検討した。また、「水素」側にて検討した施設配置に対する電力の供給方法についても検討した。

#### 1.3.2 有識者委員会・WG

電力WGと水素WGの2つのWGを設置し、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。さらに両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、双方のWGメンバに加え、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も参加の上、検討にあたっての前提条件や視点、留意事項等の助言を行うとともにWGの検討結果を確認した。なお、親委員会は3回、WGは各5回開催した。

#### 1.3.3 国内外動向調査

令和4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継続・深掘り調査を行った。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」を組み合わせて行った。

「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、個別技術の動向についても収集・整理し、調査結果を我が国の現状と比較・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関連学会(国際宇宙会議IAC(令和5年10月開催)、Moon Village Association Symposium(令和5年12月開催))に参加し、海外の動向の調査・分析を行った。

国内企業へのヒアリング調査では、WGに関連技術を保有する企業・組織にゲストスピーカーとしてプレゼンテーションを行ってもらい、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。

## 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、両 WG(水素・電力)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。

電力 WG については、宇宙太陽光発電の研究開発を長年実施してき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、企業・大学等のメンバによる WG を組成し、無線電力伝送を中心とした月面での太陽エネルギーの利活用の検討を行える体制を構築した。水素 WG は、水資源の開発・利用に関心を保有する企業群を WG メンバとした検討体制を構築した。

本調査の実施体制を図 1-1 に示す。

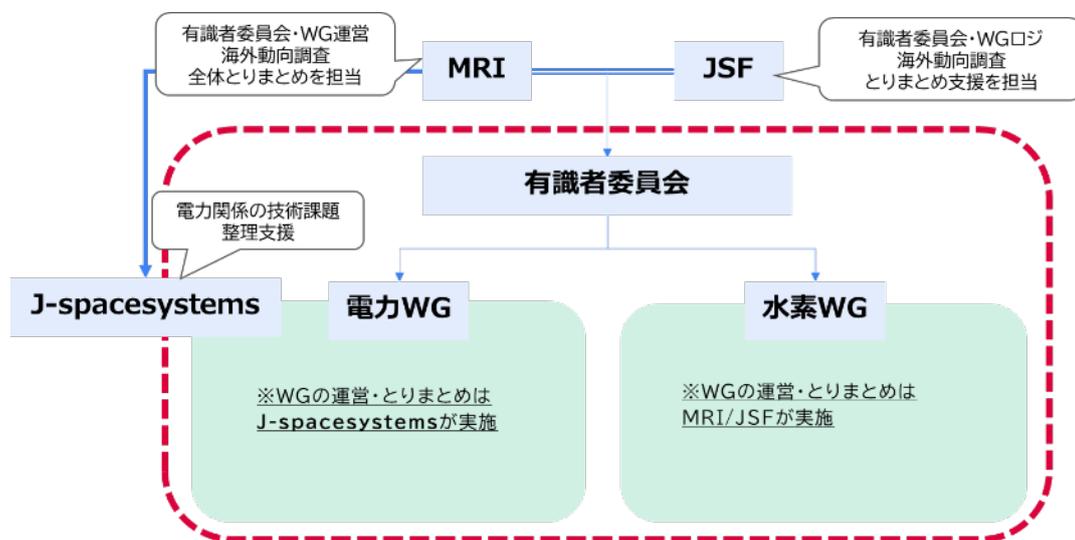


図 1-1 実施体制図

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」と「電力」に分け、並行して検討を進めた。「水素」は水資源の探査から具体的な利用までのバリューチェーン全体を対象に検討した。また、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、具体的な施設設置の検討を行った。「電力」は、主に発電と送電について検討した。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が、その他の供給源についても一部検討した。また、「水素」側にて検討した施設配置に対する電力の供給方法についても検討した。以下、「水素」と「電力」のそれぞれの検討の成果を示す。

### 2.1 水素に関する技術課題整理

#### 2.1.1 検討の全体像

水素に関する技術課題整理は、令和4年度に引き続き、資源の探査から利用までの一連のバリューチェーン全体を対象に行った。バリューチェーン全体像を図2-1に示す。

令和4年度まではバリューチェーン上の主要なプロセスである探査、熱抽出、輸送、水抽出、水質調整、水電解、液化、貯蔵の各プロセスについて、各プロセスで必要となる技術の抽出・整理および比較検討を行うとともに、月面上における推薬プラントシステム全体のアーキテクチャを検討した。しかし、当該検討は一定の仮定の下に行った検討であり、月面上の実際の地形や温度などの環境情報や水の存在量や分布、不純物の賦存量等の水資源にかかわる情報などを十分に考慮できていない点が課題として残っていた。

今年度は、昨年度の検討の結果、有望と考えられた全体アーキテクチャを前提としつつ、月面上の実際のクレータ周辺の環境情報や水資源情報についてより精緻な仮定を設定し、プラントシステムの稼働パターンの更新を行うとともに、それに伴って修正が必要な個別プロセスの詳細化、運転制御や熱マネジメントなどの全体システムの検討を行った。また、推薬プラントの構築の前提として水資源の調査(探査)の情報は必要性が高いことから、プラントシステム側からのニーズのくみ取り、ミッション要求の定義等を通じて水資源探査に関する具体的な探査項目や探査精度等のハードウェアに要求される諸元にかかわる検討を行った。

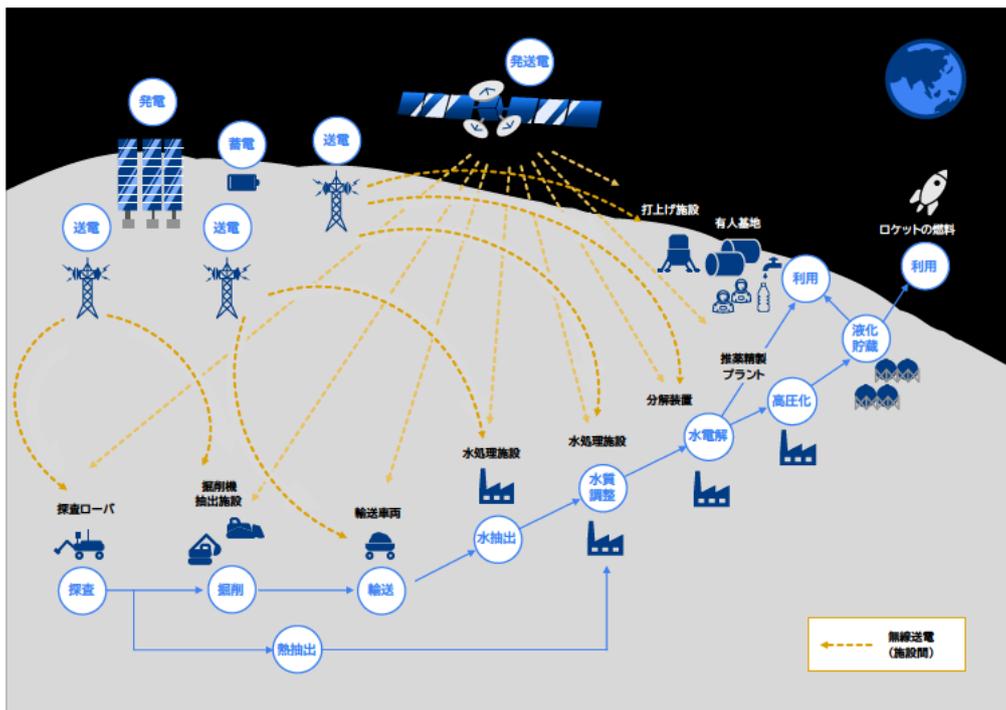


図 2-1 バリューチェーン全体像

出所)三菱総合研究所作成

### (1) 検討体制

令和 5 年度の検討はチーム体制でプロセス横断的な検討を行う方針とした。チーム1、2はプラントシステムを検討するチームであり、当初は工程の前半(チーム 1)と後半(チーム 2)で別チームとして検討する方針であったが、参加企業の重複もあり、一体となって検討する方針に変更した。また、プロセス最上流に位置する水資源探査はチーム 3 として検討を行った。検討チーム構成図を図 2-2 示す。

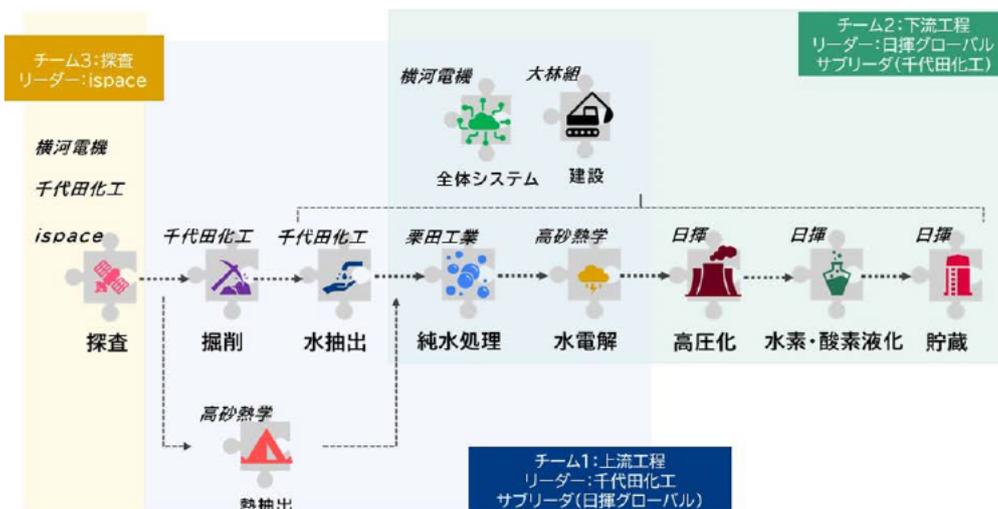


図 2-2 検討チーム構成図

出所)三菱総合研究所作成

## (2) 推奨プラント関連チーム(チーム1及びチーム2)の検討方針

チーム1&2では、表2-1に示す実施計画に従って検討を実施した。具体的には、月面上の特定のクレータを対象として水資源採取を行うと仮定し、水素生成に必要なプラント設備を設置する具体的場所、設置数/規模、施設間の位置関係やプラントシステム全体にかかわる検討を実施した。

表 2-1 チーム1及び2における実施計画

|       |         |   |
|-------|---------|---|
| STEP1 | 前提条件の設定 | 採取対象のクレータに関する外部条件(日照状況、周辺地理状況、水含有率等)を設定する。<br>水素生成プラント検討に関連する設計条件を設定する。                       |
| STEP2 | 必要施設の検討 | 各設備の実証項目を最低限達成するために必要となる施設サイズ・重量・形態(固定設置、移動運用等)、運用環境(稼働温度)や寿命等の検討を行う。また、プラントシステム全体にかかわる検討を行う。 |

出所)三菱総合研究所作成

## (3) 水資源探査関連チーム(チーム3)の検討方針

チーム3ではチーム1及び2における検討内容を実現するために必要となる探査について検討を行った。具体的には、月面上に存在する水資源の探査に係る検討を行った。検討では表2-2に示すように、チーム1及び2における想定を基にした探査ミッションの定義を行い、探査装置の仕様や方式を具体化した。

表 2-2 チーム3における実施計画

|                       |  |
|-----------------------|--|
| ニーズ調査                 | 水資源探査の希望項目や候補地等について、本WGでのチーム1及び2における想定をベースに整理する。                         |
| 探査ミッションの定義            | ニーズ調査を基にミッション要求を設定する。<br>ミッション要求のほか、候補地等の条件を基に月面の環境条件を設定する。              |
| 実現方法の検討、要求事項へのフィードバック | 設定したミッション要求及び環境条件におけるハードウェアの実現性について検討し、技術課題の抽出を行う。                       |
| ミッション要求の確定、装置仕様の定義    | 抽出した技術課題を基に、ミッション要求のアップデートを行う。<br>アップデートしたミッション要求を満たす探査装置のハードウェア仕様を定義する。 |
| 探査装置の実現検討             | ハードウェア仕様を満たす探査方式を抽出する。<br>探査方式の具体事例を示す。                                  |

出所)三菱総合研究所作成

### 2.1.2 外部条件の検討

#### (1) クレータ・PSRの選定基準について

今年度は具体的なクレータ・PSR(Permanently Shadowed Regions:永久影)選定のため、「理学的条件」と「工学的条件」の観点から候補クレータ・PSRを2か所選定し、選定した2地点について、資源ゾーン・サービスゾーン・発着ゾーン間の位置関係や地形プロファイル、周辺の温度環境等を外部条件として整理した。

クレータ・PSRの選定のために検討した理学的条件および工学的条件の概要を図2-3に示す。

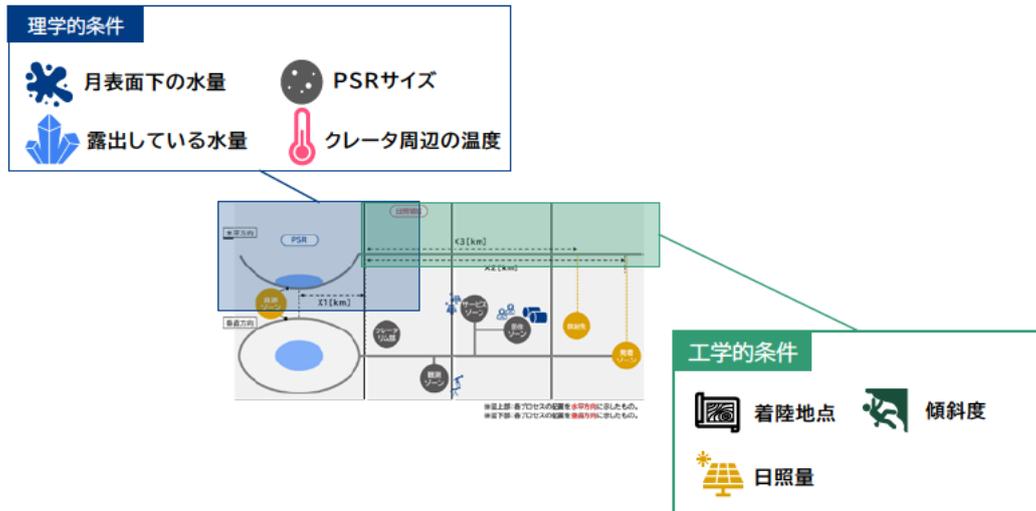


図 2-3 クレータ・PSR の選定基準の概要

出所)三菱総合研究所作成

### 1) 理学的条件(Science)

クレータ・PSRを選定する上で設定した理学的な条件を表 2-3 に示す。なお、各条件の詳細は(3)にて後述する。

表 2-3 理学的条件(Science)

| 項目                  | 詳細条件  | 選定方法  |
|---------------------|---|---|
| S-①:<br>レゴリス中の水量    | 水等価水素(WEH)存在量のマップにおいて、0.3wt%以上の高濃度 WEH が存在するクレータ・PSR を選定する。<br>※100 [ppm]以下は OH の可能性があるので、100 [ppm]以上の WEH が分布する場所 (0.3wt% = 3000[ppm]) | LRO LEND の WEP マップにおいておおよそ 0.3wt%以上のカラーマップの場所を選定する。   |
| S-②:<br>露出する水氷の水平分布 | 各水露出マップでグリッドが確認されているクレータ・PSR を選定する。<br>※水の存在形態が H <sub>2</sub> O の可能性が高い  | Chandrayaan-1 間接光を使った水に対応する赤外吸収スペクトルの波長帯(1.3, 1.5, 2.0 [μm])の強度に基づいて選定する。<br>補足情報として、LRO LAMP の水に対応するスペクトル吸収端(129.57-155.57 及び 155.57-189.57 [nm])の波長帯でのスペクトル強度にかかわる情報も参考とする。 |
| S-③:<br>平均/最大到達温度   | 平均温度/最大到達温度が高い場所が多く、可能であれば 107[K]以下の場所を同時に有するクレータ・PSR を選定する。  | LRO-DIVINER の 10 年間の温度データから平均温度/最高到達温度が水の揮発温度 107[K]以上及び以下を含むクレータを選定する。   |
| S-④:<br>PSR の存在とサイズ | PSR を有し、かつ PSR の面積が 5[km <sup>2</sup> ]程度を有するクレータ・PSR を選定する。<br>※75.1[ton]の水を長期間定常的に採掘し続けるのに十分な PSR サイズ                                 | Mazarico, et al.(2011)が作成した画像から該当する PSR を含むクレータもしくは PSR を選定する。  |

出所)三菱総合研究所作成

## 2) 工学的条件(Engineering)

クレータ・PSRを選定する上で設定した工学的条件を表 2-4 に示す。なお、各条件の詳細は(3)にて後述する。

表 2-4 工学的条件(Engineering)

| 項目           | 詳細条件   | 選定方法   |
|--------------|--|--|
| E-①:<br>着陸地点 | NASA Artemis3 における着陸地点から近傍(10[km]以内)のクレータ・PSR を選定する。<br>※地球との通信可用性や日照量などを考慮すると、着陸地点候補は限られ、国家間での差異は少ないと史料する。                | NASA 着陸地点 13 候補のうち 10[km]以内のクレータ・PSR を選定する。  |
| E-②:<br>日照量  | 着陸地点及び水資源採掘場所までの経路が 1 年を通じて日照量が多いクレータ・PSR を選定する。<br>※検討中のアーキテクチャでは発着ゾーンと資源ゾーンの間で太陽光を用いた発電を想定しており、1 年を通じて十分な日照量を確保できる必要がある。 | LRO LOLA の平均照度の地図(sun visibility 120m)に基づいて、着陸地点と PSR 間に年間 80%以上の日照量が確保可能な地点を含むクレータ・PSR を選定する。 |
| E-③:<br>傾斜度  | 着陸地点及びサービスゾーン周辺までの領域ができる限り平地であるクレータ・PSR を選定する。<br>※施設建設及び運用の観点で現実的な傾斜範囲を確保する必要がある。   | 月面における地形情報より、着陸地点及びサービスゾーン周辺までの領域 10[°]以下程度となるクレータ・PSR を選定する。                                  |

出所)三菱総合研究所作成

### (2) クレータ・PSR の選定地点

設定した理学的条件及び工学的条件を踏まえ、検討対象として選定した地点(2 か所:地図上の赤点)を図 2-4 に示す。

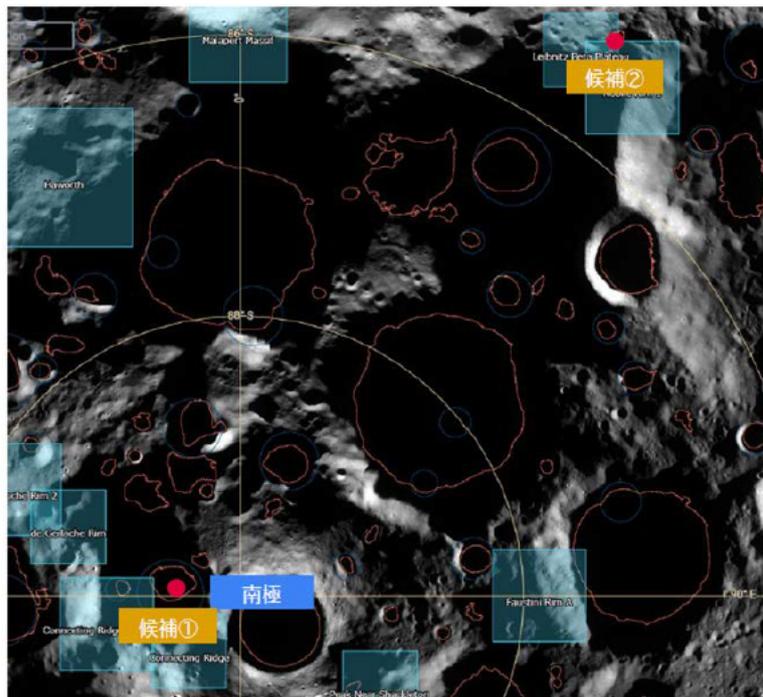
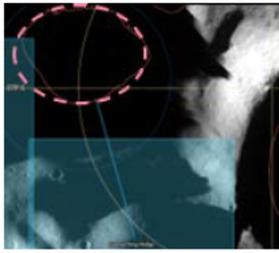
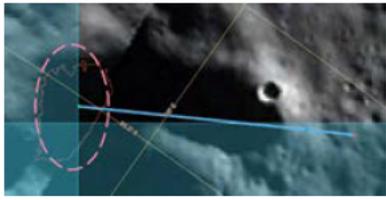


図 2-4 候補地(2 か所:地図上の赤点)

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

また、選定したクレータ・PSR地点の詳細情報として、PSR中心位置、近傍の NASA Artemis 3 着陸地点、クレータサイズを表 2-5 に示す。

表 2-5 選定候補クレータ・PSR の詳細

|                                  | 地点①   | 地点②  |
|----------------------------------|---|--|
| 俯瞰図                              |  |  |
| PSR 中心位置                         | LAT:-89.51<br>LON:280.65  | LAT:-85.21<br>LON:33.83  |
| アクセス可能な NASA Artemis3 における着陸候補地点 | Connecting Ridge  | Nobile Rim 1   |
| クレータサイズ                          | >5[km] かつ <20[km]<br>※クレータ中心部に PSR 存在   | クレータなし   |

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

### (3) クレータ・PSRの選定理由に係る詳細

選定基準として採用した理学的条件及び工学的条件に基づく選定理由の詳細を評価基準ごとに整理した。

#### 1) S-①:レゴリス中の水量

理学的条件の 1 つ目はレゴリス中の水量とし、等価水素(WEH)存在量のマップにおいて、0.3wt% 以上の高濃度 WEH が存在するクレータ・PSR であることを条件とした。具体的には LRO LEND (Lunar Exploration Neutron Detector:月探査中性子検出器)の WEH(Water Equivalent Hydrogen)マップの情報に基づいて地表から 1[m]の深さにおける水素量を評価した。本観測手法の空間分解能は～10[km]程度である。

なお、100 [ppm]以下(0.01wt%)は OH の形態として存在する可能性があるため、0.3wt%以上の場所(深青～紫の場所)を選定した。月面南極近傍のレゴリス中の水量による比較図を図 2-5、各地点における詳細な比較図を図 2-6 に示す。

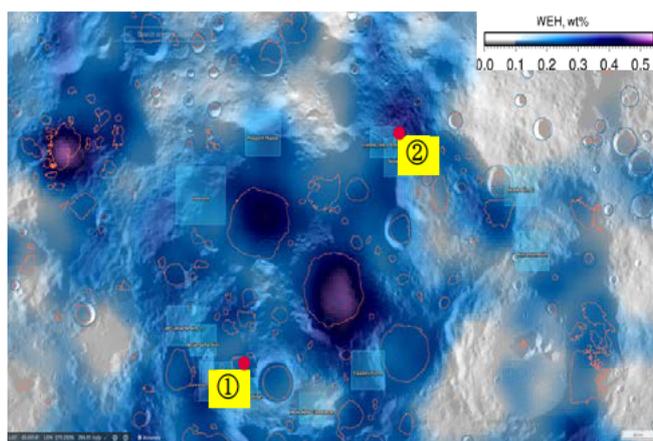


図 2-5 S-①:レゴリス中の水量による比較(俯瞰)

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

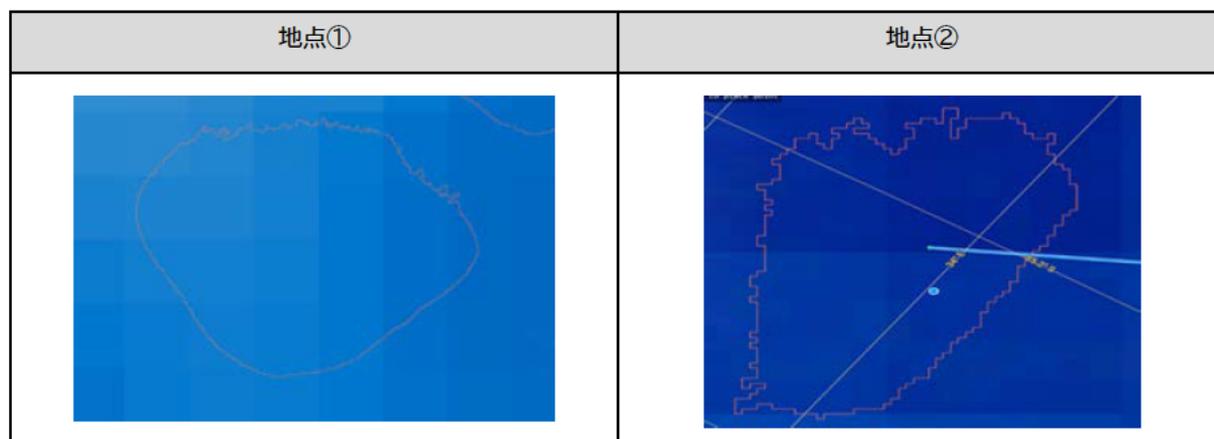


図 2-6 S-①:レゴリス中の水量による比較(地点詳細)

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

## 2) S-②:露出する水氷の水平分布(Chandrayaan-1)

理学的条件の2つ目としては露出する水氷の水平分布とし、各水露出マップでグリッドが確認されているクレータ・PSRを条件とした。

選定の際には、Chandrayaan-1のデータを用い、LRO-LAMPのデータを補足情報として用いた。

Chandrayaan-1のデータでは、間接光を使った水に対応する赤外吸収スペクトルの波長帯(1.3, 1.5, 2.0 [ $\mu\text{m}$ ])を対象としたマップ(Li et al. 2017)に基づいて、水の露出が確認されているか否かを評価した。水量と関連して、形態が $\text{H}_2\text{O}$ として存在する可能性が高まるため、当該波長帯でのスペクトル信号が検出された場所(緑色)を選定した。月面南極近傍の露出する水氷の水平分布(Chandrayaan-1による観測)による比較図を図2-7、各地点における詳細な比較図を図2-8に示す。

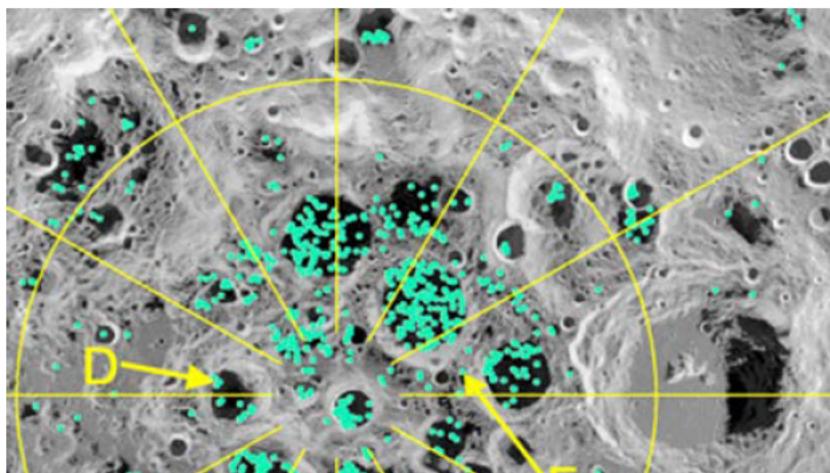


図 2-7 S-②:露出する水氷の水平分布による比較(俯瞰)

出所)Li et al, Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, 2018年7月

| 地点① | 地点② |
|-----|-----|
|     |     |

図 2-8 S-②:露出する水氷の水平分布による比較(地点詳細)

出所)Li et al, Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, 2018年7月

LRO-LAMP のデータでは、水に対応するスペクトル吸収端(129.57-155.57 及び 155.57-189.57 [nm]) の波長帯を対象としたアルベドマップ(Hayne et al. 2015)に基づいて、水の露出が確認されているか否かを評価した。水量と関連して、形態が H<sub>2</sub>O として存在する可能性が高まるため、当該波長帯でのスペクトル信号が検出された場所(青色)を選定した。月面南極近傍の露出する水氷の水平分布(LRO-LAMP による観測)による比較図を図 2-9、各地点における詳細な比較図を図 2-10 に示す。

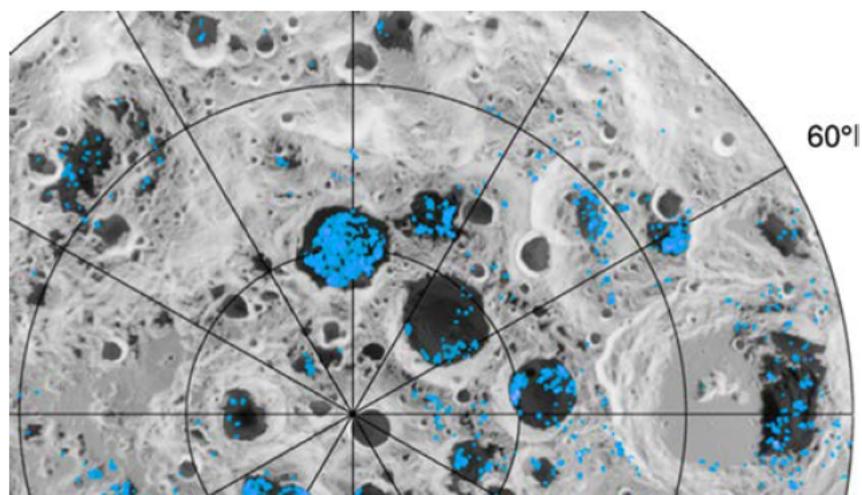


図 2-9 S-②:露出する水氷の水平分布(LRO-LAMP)による比較(俯瞰)

出所) Hayne et al, Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements, 2015 年 7 月

| 地点① | 地点② |
|-----|-----|
|     |     |

図 2-10 S-②:露出する水氷の水平分布(LRO-LAMP)による比較(地点詳細)

出所) Hayne et al, Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements, 2015 年 7 月

### 3) S-③:最高/平均温度(10 年間)

理学的条件の 3 つ目は 10 年間の最高温度/平均温度とした。本条件は平均温度/最大到達温度が高い場所が多く、かつ可能であれば 107[K]以下の場所を同時に有するクレータ・PSR を選定すること

が目的である。LRO DIVINER の極域(南極)の 10 年間の平均気温マップに基づいて、クレータリム部の平均温度が高い場所が多い場所を評価した。特に、平均気温マップ(107[K] 以下の場所はマスク)で PSR 外部において 107[K] 以上が多い場所を選定した(※範囲は揮発温度 107[K]~最大平均温度 207[K] で表示)。また、最高温度については、LRO DIVINER の極域(南極)の 10 年間の最高到達気温マップに基づいて、最高到達温度が高い場所が多い場所を含むクレータとした。

月南極近傍の平均温度(10 年間)による比較を図 2-11、各地点の詳細を図 2-12 に示す。また、月南極近傍の夏季の最高到達気温のマップを図 2-13、各地点の詳細を図 2-14 に示す。

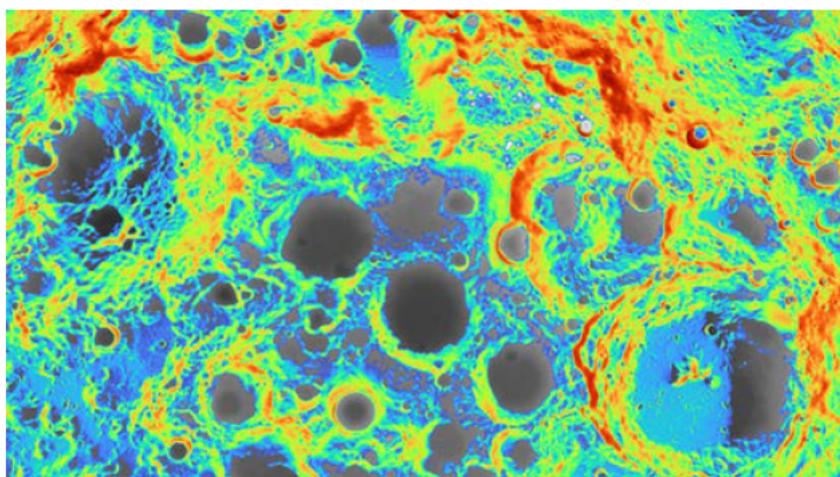


図 2-11 S-③:平均温度(10 年間)による比較(俯瞰)

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

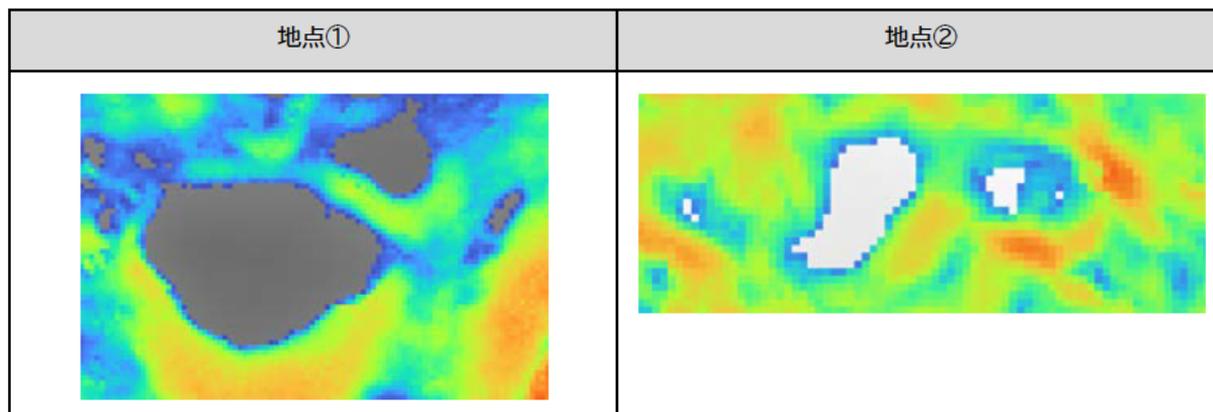


図 2-12 S-③:平均温度(10 年間)による比較(地点詳細)

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

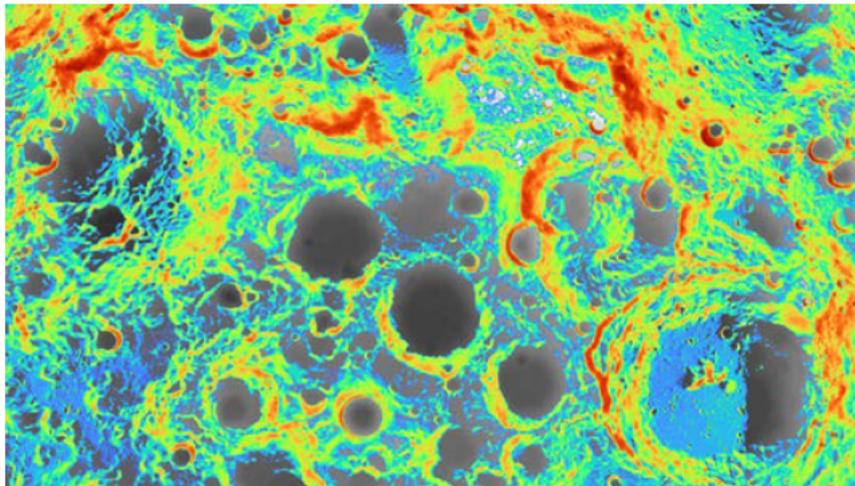


図 2-13 S-③:最高温度(10 年間)による比較(地点詳細)

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

| 地点① | 地点② |
|-----|-----|
|     |     |

図 2-14 S-③:最高温度(10 年間)による比較(地点詳細)

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

#### 4) S-④:PSR の存在とサイズ

理学的条件の 4 つ目は PSR が存在することおよびそのサイズとした。昨年度の検討と同様に年間の水の需要量として 75.1[ton]と仮定すると、JAXA 探査シナリオより、レゴリスの水含有率が 1 [%]の場合、掘削深さは地上重機の掘削能力から十分に余裕のある深さである 250[mm]とすると掘削場の半径は 0.35 [km]必要となり、全体の面積は 0.38[km<sup>2</sup>]と計算される。

これを踏まえ、継続的に年間 75.1[ton]の水を採掘するのに必要な PSR サイズとして、5[km<sup>2</sup>]以上とした。具体的には Mazarico, et al.(2011)が作成した画像を基に 5[km<sup>2</sup>]以上の PSR を選定した。月南極近傍の PSR の分布を図 2-15、今年度検討対象とした地点付近の PSR を図 2-16 に示す。

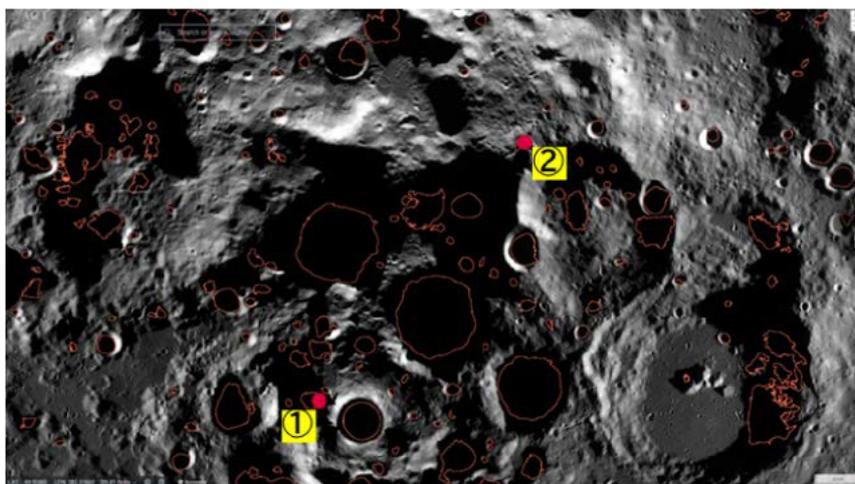


図 2-15 S-④:PSR の存在とサイズ(俯瞰)

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

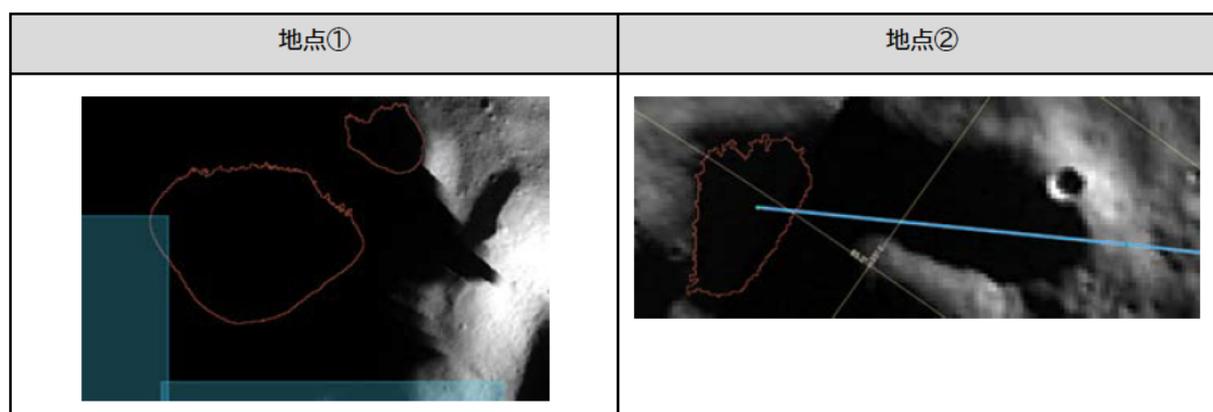


図 2-16 S-④:PSR の存在とサイズ(地点詳細)

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

## 5) E-①:着陸地点

工学的条件の1つ目は着陸地点とした。地球との通信可用性や日照量、地形などを考慮すると、月の南極を活動対象とした場合に適した着陸地点は限られ、国家間での差異は少ないと考えられる。本検討では公表されている NASA Artemis 3 の着陸候補地点周辺のクレータ・PSRを対象とした。具体的には、NASA Artemis3 における着陸候補地点から近傍(10[km]以内)のクレータ・PSR を選定した。NASA Artemis 3 の着陸候補地を図 2-17、選定地点周辺の着陸地点を図 2-18 に示す。

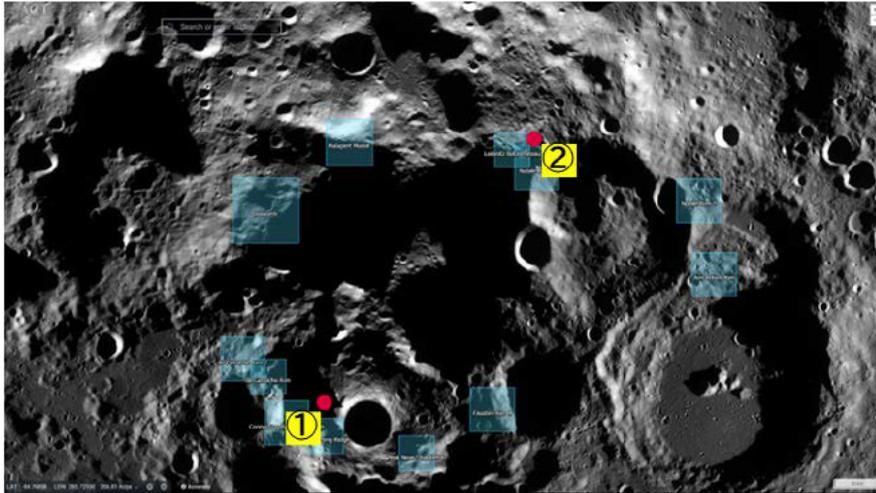


図 2-17 NASA Artemis 3 の着陸候補地

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

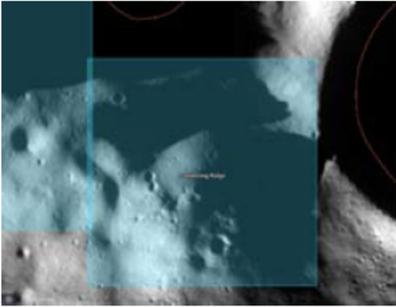
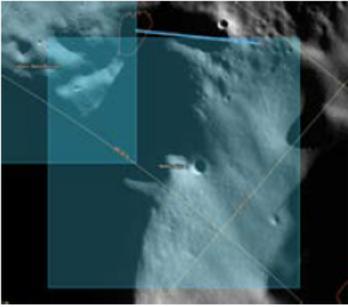
| 地点①  | 地点②   |
|--|---|
| <p data-bbox="371 981 612 1014">Connecting Ridge</p>  | <p data-bbox="1011 981 1185 1014">Nobile Rim 1</p>  |

図 2-18 選定地点周辺の着陸地点

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

## 6) E-②:日照率

工学的条件の2つ目は日照率とした。本条件では、LRO LOLA の平均照度の地図 (sun visibility 120m) (Mazarico, et al.(2011))に基づいて、着陸地点及び水資源採掘場所までの経路が1年を通じて日照量が多いクレータ・PSRであることを条件とした。

各ピクセルで太陽円盤の一部が見えたタイムステップの割合をもとに、着陸地点と PSR 間に年間80%以上の日照量が確保可能な地点を含むクレータ・PSR を選定した。月の南極近傍の日照率の俯瞰図を図 2-19、各選定地点周辺における日照率を図 2-20 に示す。

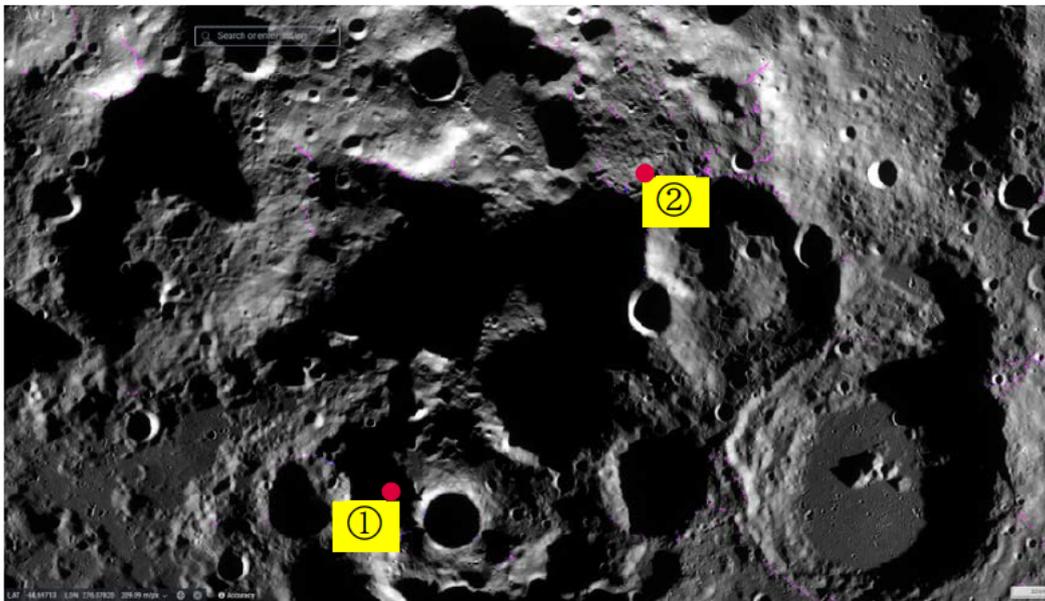


図 2-19 日照率(俯瞰)

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

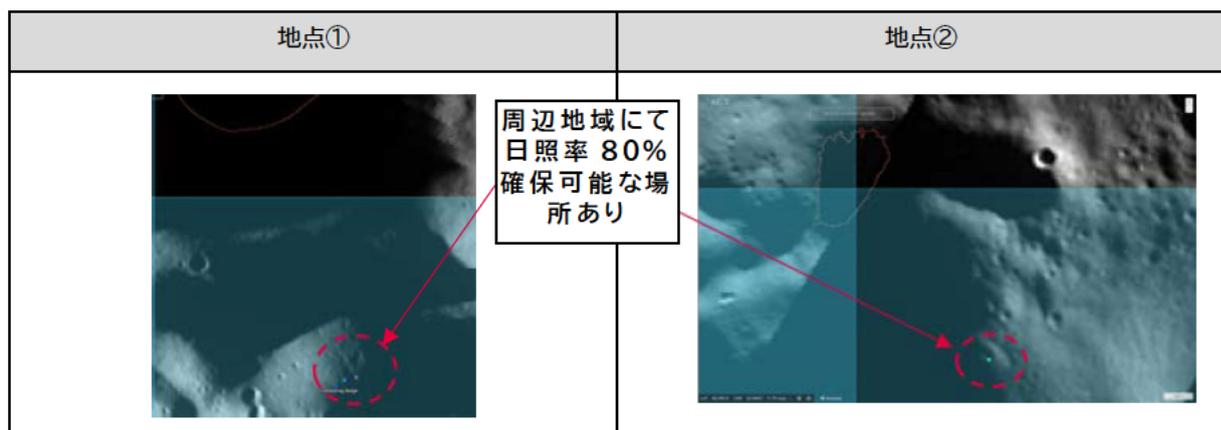


図 2-20 日照率(地点詳細)

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

### 7) E-③:傾斜度

工学的条件の3つ目は傾斜度とした。施設建設及び運用の観点では、極端な傾斜地は避ける必要があることから、着陸地点及びサービスゾーン周辺までの領域が平地であるクレータ・PSRであることを条件とした。

月面における地形情報より、着陸地点及びサービスゾーン周辺までの領域 10[deg]以下程度となるクレータ・PSRを選定した(角度範囲は 0[deg]~11[deg])。月南極近傍の斜度を示した俯瞰図を図 2-21、各地点の詳細を図 2-22 に示す。

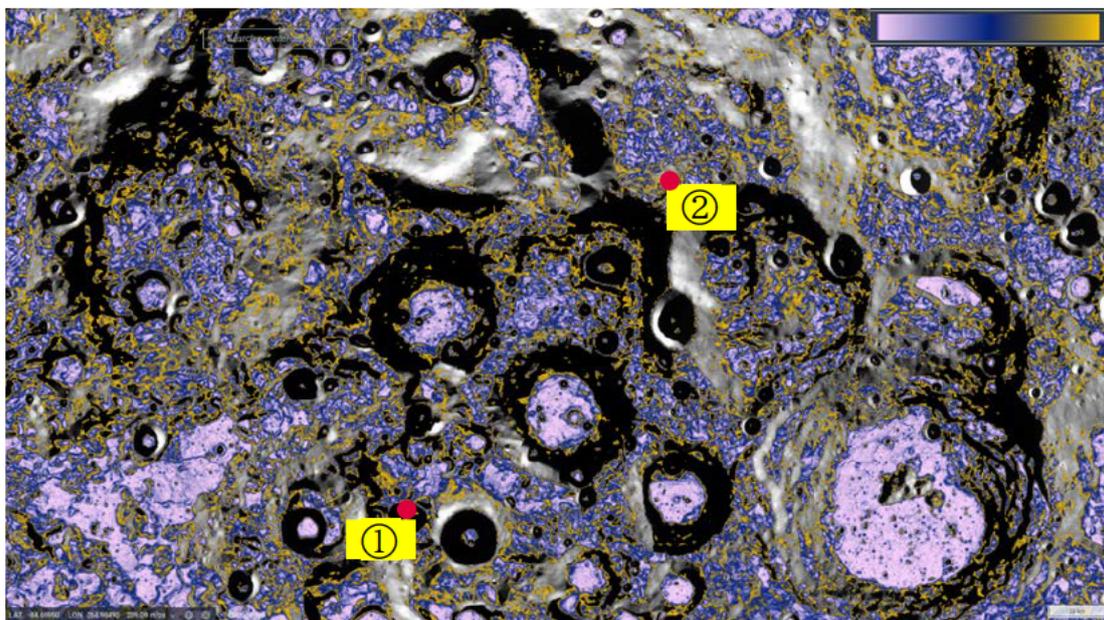


図 2-21 傾斜度(俯瞰)

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

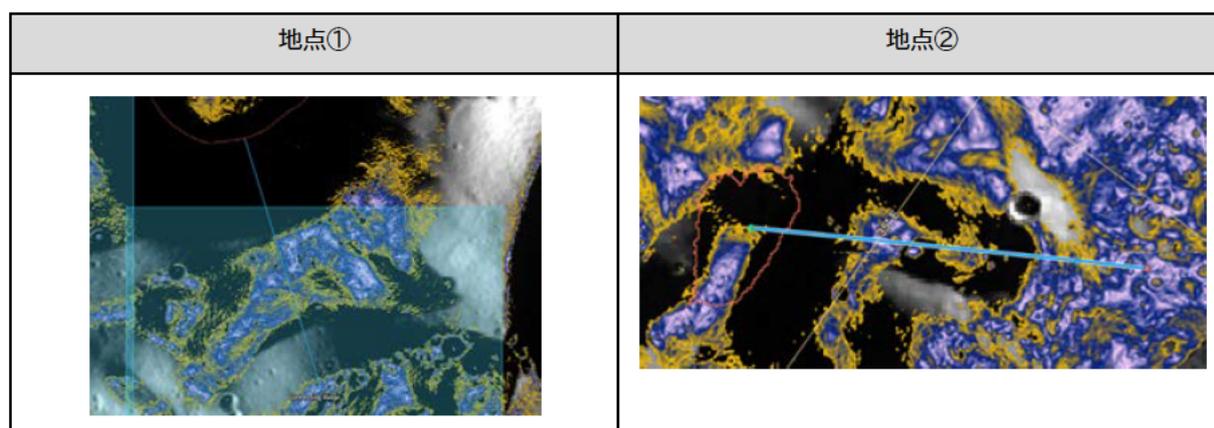


図 2-22 傾斜度(地点詳細)

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

#### (4) その他の外部条件

##### 1) クレータ内部の水資源の垂直分布

クレータ内部の水資源の垂直分布として図 2-23 のような状態を想定し、0.0[m]-0.5[m]において 2.5wt%、0.5[m]-1.0[m]において 5wt%と仮定した。

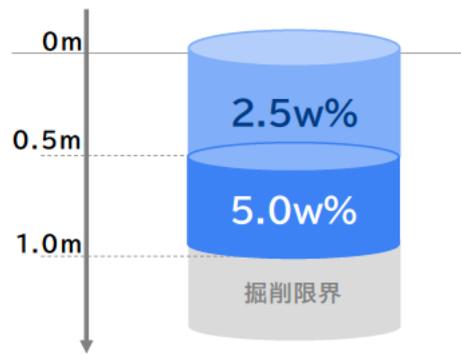


図 2-23 垂直方向のレゴリス中の水含有率

出所)三菱総合研究所作成

## 2) レゴリス中の水以外の不純物(揮発性/不揮発性物質、放射性物質含む)

今年度は、レゴリス中の水以外の不純物の種類及び含有率については彗星の観測データをベースに検討を行った。具体的には具体的な彗星データとしてはハレー彗星(1/P)(短周期)やハール・ボップ彗星(C/1995 O1)(長周期)における水以外の物質の賦存量のデータをもとに試算した。

表 2-6 にハレー彗星(1/P)(短周期)の不純物比率、表 2-7 にハール・ボップ彗星(C/1995 O1)(長周期)の不純物比率を示す。

表 2-6 ハレー彗星(1/P)(短周期)の不純物比率

| Species                       | Source strength | Species measured   | Remarks                                | Reference  |
|-------------------------------|-----------------|--|--|--|
| H <sub>2</sub> O              | 100 %           | Neutrals   |  | Krankowsky <i>et al.</i> ,1986                           |
| CO                            | 17 %            | Neutrals   | extended source related to dust?       | Eberhardt <i>et al.</i> ,1987                            |
| H <sub>2</sub> CO             | 3.8 %           | Ions<br>H <sub>3</sub> CO <sup>+</sup>   | practically no nucleus source          | Geiss <i>et al.</i> ,1991<br>Meier <i>et al.</i> , 1993  |
| CO <sub>2</sub>               | 3.5 %           | Neutrals   |  | Krankowsky <i>et al.</i> , 1986                          |
| NH <sub>3</sub>               | 1.5 %           | Ions NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> ,<br>NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                  | optical values are partly lower (≤1 %) | Allen <i>et al.</i> , 1987<br>Meier <i>et al.</i> , 1994 |
| CH <sub>3</sub> OH            | 1.25%<br>1.7%   | Ions CH <sub>3</sub> OH <sub>2</sub> <sup>+</sup><br>CH <sub>3</sub> OH <sup>+</sup> |  | Altwegg, 1996<br>Eberhardt <i>et al.</i> , 1995          |
| CH <sub>2</sub>               | 0.27%           | Ions<br>CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>   | radical, quasi nucleus source          | Altwegg <i>et al.</i> , 1994                             |
| H <sub>2</sub> S              | .15%<br>.4 %    | Ions H <sub>3</sub> S <sup>+</sup>   |  | Altwegg, 1996<br>Eberhardt <i>et al.</i> , 1995          |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0.3%            | Neutrals   |  | Reber,1997   |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0.3%            | Neutrals   |  | Reber, 1997  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0.4%            | Neutrals   |  | Reber, 1997  |
| HCN,                          | 0.1%            | Ions<br>H <sub>2</sub> CN <sup>+</sup>   |  | Geiss <i>et al.</i> ,1991                                |
| CH <sub>3</sub> CN            | 0.14%           | CH <sub>4</sub> CN <sup>+</sup>  |  | Geiss <i>et al.</i> , 1999                               |

出所)Altwegg *et al.*, COMPOSITION OF THE VOLATILE MATERIAL IN HALLEY' S COMA FROM IN SITU MEASUREMENTS, 1999

表 2-7 ハール・ボップ彗星(C/1995 O1)(長周期)の不純物比率

| Molecule                      | a)       | b)  | C/1996 B2        | C/1995 O1              | remark                 |
|-------------------------------|----------|-----|------------------|------------------------|------------------------|
| H <sub>2</sub> O              | IR       | 5   | 100 [1]          | 100 [2] [3]            |                        |
| CO                            | R IR UV  | > 5 | 6-30 [1] [4] [5] | 20 [2] [6] [7]         | extended <sup>1)</sup> |
| CO <sub>2</sub>               | IR       | 2   |                  | 20 <sup>2)</sup> [8]   |                        |
| CH <sub>4</sub>               | IR       | -   | 0.7 [1]          | 0.6 [2]                |                        |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | IR       | -   | ≈ 0.5 [9]        | 0.1 [2]                |                        |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | IR       | -   | 0.4 [1]          | 0.3 [2]                |                        |
| CH <sub>3</sub> OH            | R IR     | > 5 | 2 [4]            | 2 [6] [10]             |                        |
| H <sub>2</sub> CO             | R IR     | 4   | 0.2-1 [4]        | 1 [6]                  | extended <sup>1)</sup> |
| HCOOH                         | R        | -   | -                | 0.06 [11]              |                        |
| HCOOCH <sub>3</sub>           | R        | -   | -                | 0.06 [11]              |                        |
| NH <sub>3</sub>               | R IR     | 1?  | 0.5 [12]         | 0.7 [13] [14]          |                        |
| HCN                           | R IR     | > 5 | 0.1 [4]          | 0.25 [2] [6]           |                        |
| HNCO                          | R        | -   | 0.07 [4]         | 0.06 [10] [11]         |                        |
| HNC                           | R        | -   | 0.01 [4] [1.5]   | 0.04 [6] [16]          | extended               |
| CH <sub>3</sub> CN            | R        | -   | 0.01 [17]        | 0.02 [6]               |                        |
| HC <sub>3</sub> N             | R        | -   | -                | 0.02 [10] [11]         |                        |
| NH <sub>2</sub> CHO           | R        | -   | -                | 0.01 [10] [11]         |                        |
| H <sub>2</sub> S              | R        | 5   | 0.8 [17]         | 1.5 [6]                |                        |
| OCS                           | R IR     | -   | 0.1 [18]         | 0.3 [10] [19]          | extended?              |
| SO                            | R        | -   | -                | 0.2-0.8 [10] [11] [20] | extended               |
| CS <sub>2</sub>               | (R) (UV) | > 5 | 0.1 [17]         | 0.2 [6]                | from CS <sup>1)</sup>  |
| SO <sub>2</sub>               | R        | -   | -                | 0.1 [11] [20]          |                        |
| H <sub>2</sub> CS             | R        | -   | -                | 0.02 [21]              |                        |
| S <sub>2</sub>                | UV       | 1   | 0.005 [5]        | -                      |                        |

出所) Crovisier and Bockelée-Morvan, REMOTE OBSERVATIONS OF THE COMPOSITION OF COMETARY VOLATILES, 1999

### 3) サービスゾーン及び発着ゾーン付近の温度範囲

選定した2地点について、サービスゾーン及び発着ゾーンにおける温度範囲を設定した。最大温度は夏季における最大温度とし、最低温度は冬季における最低温度を仮定した。サービスゾーン及び発着ゾーン付近の温度範囲を表 2-8 に示す。

表 2-8 サービスゾーン及び発着ゾーン付近の温度範囲

| 場所   | ゾーン     | 最大温度        | 最低温度       |
|------|---------|-------------|------------|
| 地点 1 | 発着ゾーン   | 246.479 [K] | 55.462 [K] |
|      | サービスゾーン | 227.855 [K] | 65.013 [K] |
| 地点 2 | 発着ゾーン   | 258.134 [K] | 68.849 [K] |
|      | サービスゾーン | 222.749 [K] | 49.021 [K] |

出所) 三菱総合研究所作成

### (5) 選定地点における各ゾーン間の関係

推葉プラントを月面上に構築していくうえで、資源ゾーン、サービスゾーン、発着ゾーン間の位置関係は重要であり、外部条件として設定した地点 1、2 について各ゾーンの配置を設定した。また、輸送経路に係る検討を行うためにローバーを用いる場合の経路とパイプラインを敷設する際の経路も合わせて外部条件として設定した。

## 1) 地点 1 に係る各ゾーン間の関係

各ゾーン間の位置関係を考える際に、まずはサービスゾーンを設定可能な日照率が高い場所から絞り込みを行った。日照率 80%以上の地域をプロットした各ゾーン間の位置関係を図 2-24 に示す。当該サービスゾーンを起点として、資源ゾーンまではおよそ 10km 程度、発着ゾーンまでは 1km を前提としつつ、各ゾーン間の輸送の際にできる限り傾斜が厳しくない領域を通過するように資源ゾーンや発着ゾーンを設定した。傾斜 10 度以下の地域をハッチした各ゾーン間の位置関係を図 2-25、地点 1 の各ゾーンの標高を図 2-26 に示す。

なお、発着ゾーン周辺には防塵壁を建設し、離着陸時のプリュームによるサービスゾーン等への影響を緩和することを前提としている。

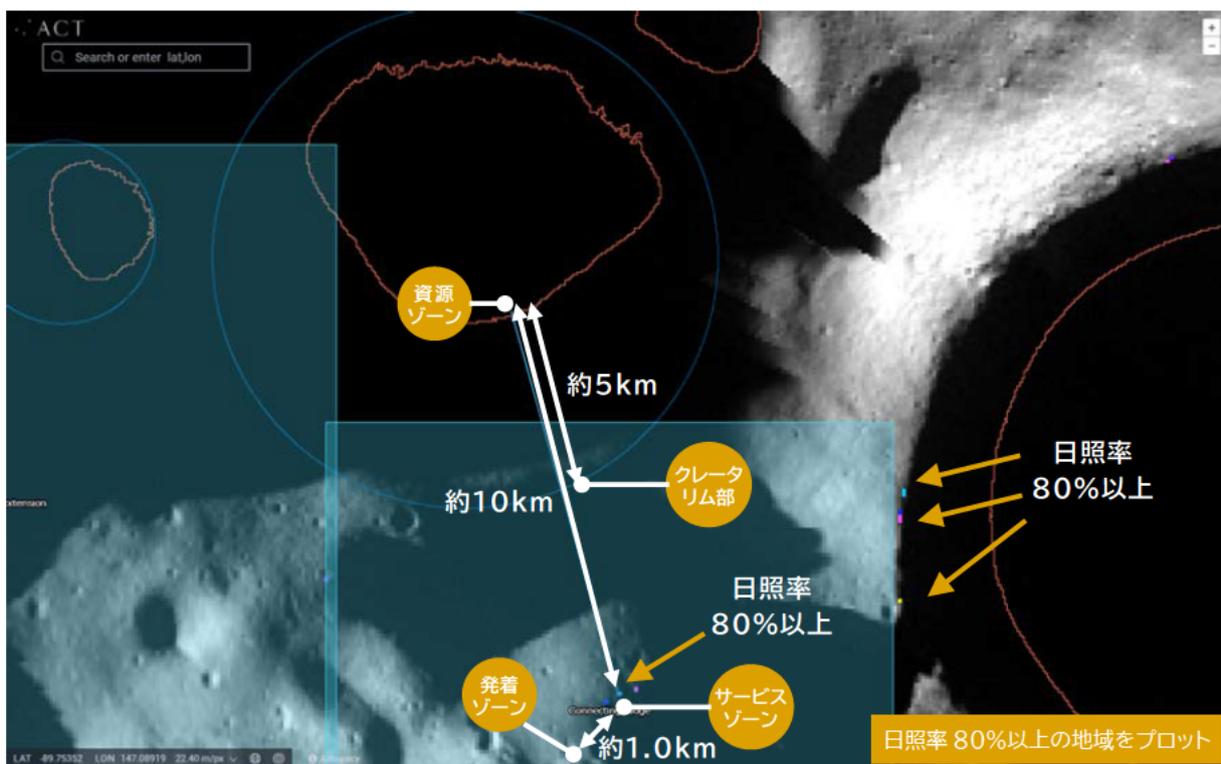


図 2-24 地点 1 の各ゾーン間の位置関係(日照率との関係)

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

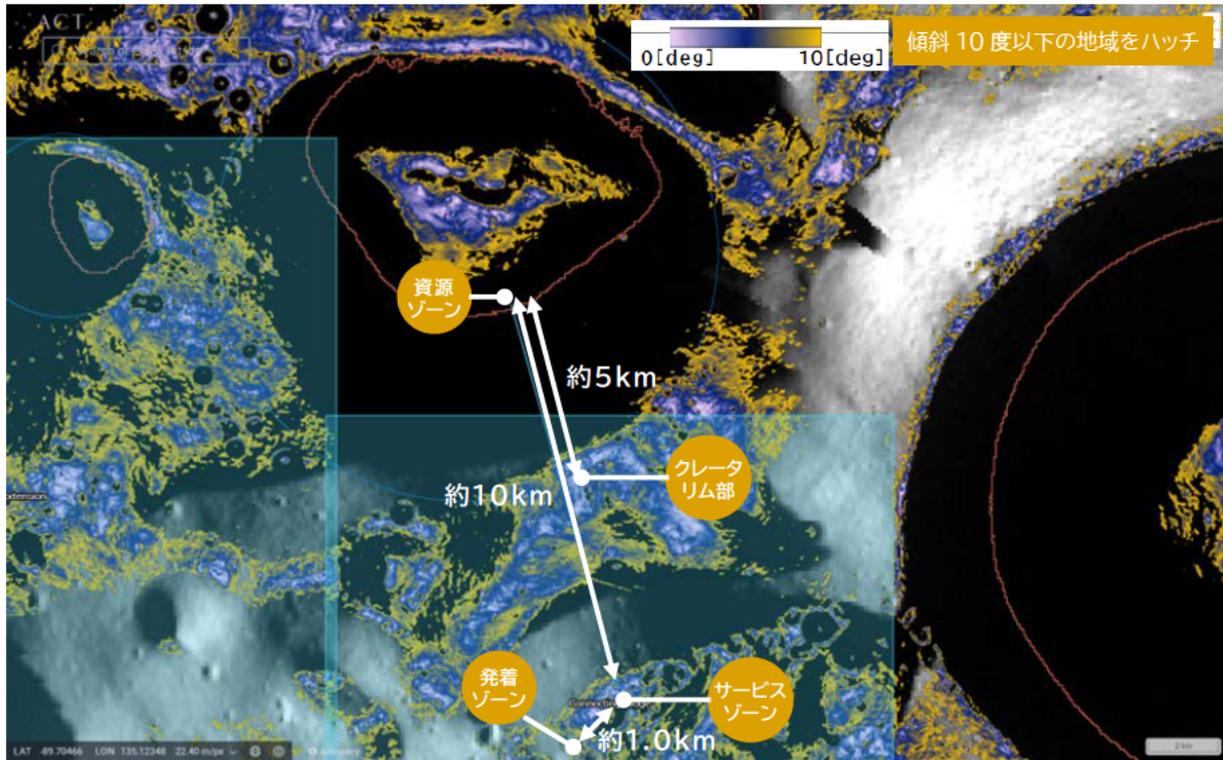


図 2-25 地点 1 の各ゾーン間の位置関係(斜度との関係)

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



図 2-26 地点 1 の各ゾーンの標高

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

## 2) 地点 2 に係る各ゾーン間の関係

地点 1 にて提示した考え方と同様に地点 2 においても各ゾーン間の位置関係を整理した。日照率 80%以上の地域をプロットした各ゾーン間の位置関係を図 2-27、傾斜 10 度以下の地域をハッチした各ゾーン間の位置関係を図 2-28、地点 2 の各ゾーンの標高を図 2-29 に示す。

なお、発着ゾーン周辺には防塵壁を建設し、離着陸時のブリュームによるサービスゾーン等への影響を緩和することを前提としている。

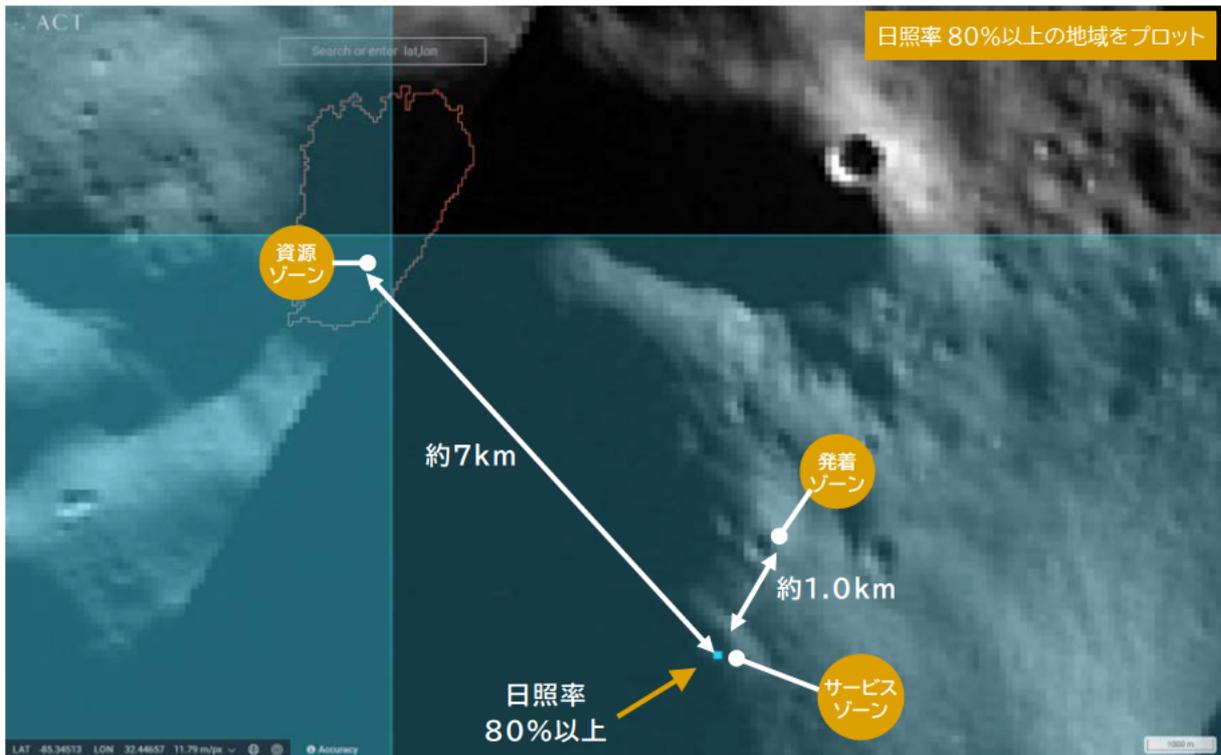


図 2-27 地点 2 の各ゾーン間の位置関係(日照率との関係)

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

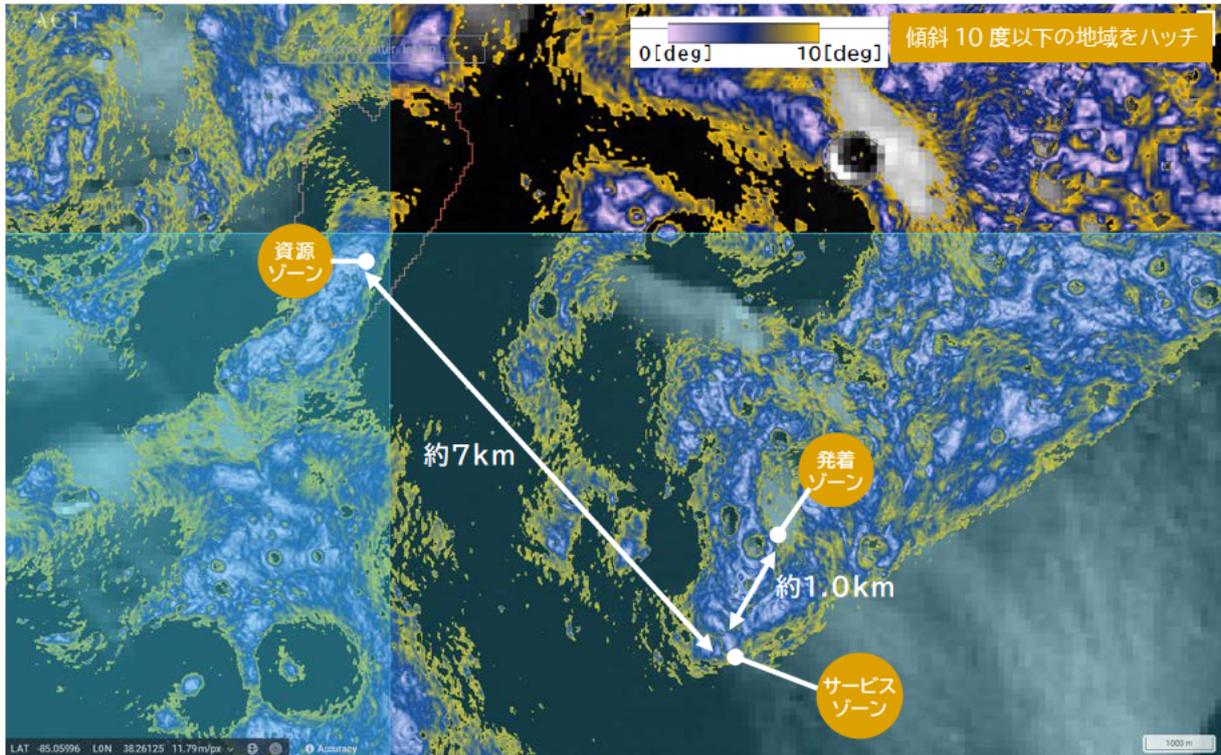


図 2-28 地点2の各ゾーン間の位置関係(斜度との関係)

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

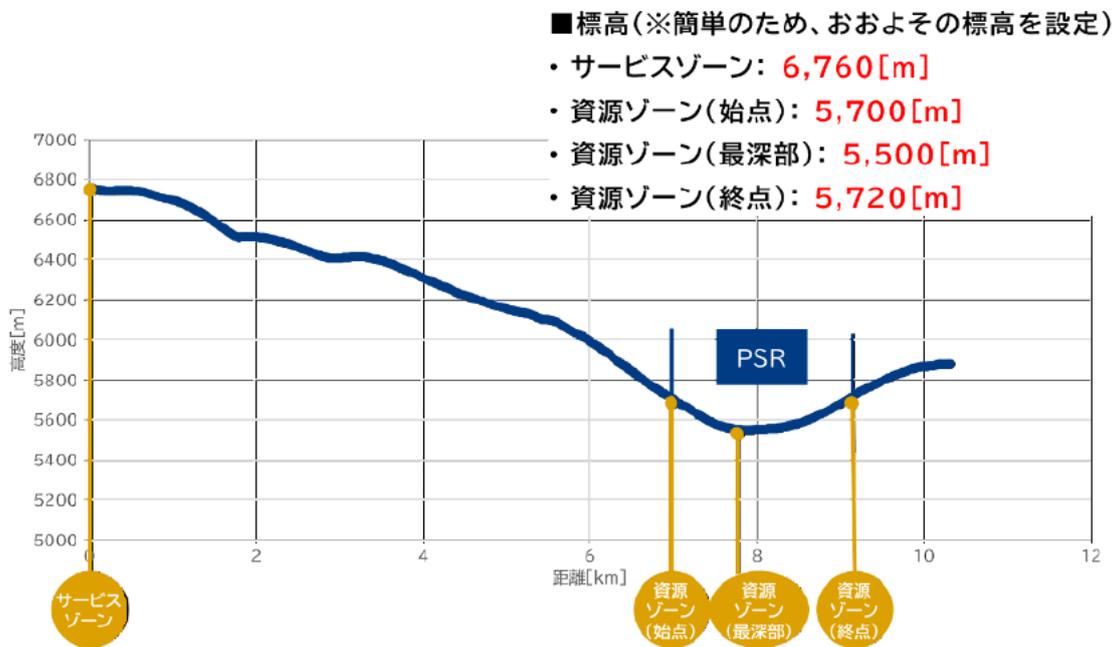


図 2-29 地点 2 の各ゾーンの標高

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

### 2.1.3 推薬プラント設備の検討

2.1.2 において設定した外部条件を踏まえ、推薬プラント設備設置の検討を行った。設定した外部条件からクレータリム部における温度等の周辺環境が厳しいことを踏まえ、昨年度検討において推薬プラント設備の一部を「クレータリム部」へ設置していた方針を変更し、「サービスゾーン」に設備配置を集中することが適切であろうとの結論に達した。

また、設備機能上および運転・保全上、与圧部に設置することが望ましい機器を集中するために、サービスゾーンに与圧区画を設置することが適切であると考えられた。これにより、電力・通信設備等のインフラの集中合理化、安全かつ冗長性が必要な与圧有人設備を居住区等と共用できるメリットがあると考えられた。外部条件を踏まえて再検討した結果である各プラント設備の検討に係る前提条件を表 2-9 に示す。なお、プラントの稼働頻度については、昨年度も検討していた連続稼働パターンに加え、今年度は新たに日照率を考慮した稼働パターンも加えた以下に示す 2 パターンを設定して検討を行った。

- 年間 300 日連続稼働(昼夜問わず)、65 日保全等のサイクルを想定(昨年度から設定)
- 「80%以上日照率」を考慮し、30 日サイクルでの稼働・待機のサイクルを想定(例:1 日稼働準備、22 日稼働、1 日停止準備、6 日停止)(新規追加)

表 2-9 各プラント設備の検討に係る前提条件

| 基本条件                 | 熱抽出             | 純水処理           | 電気分解           | 高圧化            | 水素液化<br>(気体冷凍+JT) | 酸素液化<br>(ラジエータ+JT) | 貯蔵・高圧化          | 充てん               |
|----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 配置                   | PSR             | サービスゾーン        | サービスゾーン        | サービスゾーン        | サービスゾーン           | サービスゾーン            | サービスゾーン/(発着ゾーン) | 発着ゾーン             |
| 機器設置環境               | 曝露              | 与圧区画           | 与圧区画           | 与圧区画           | 与圧区画/<br>曝露       | 曝露                 | 曝露              | 曝露                |
| 稼働頻度・電力量<br>(24hr/日) | 24/30日<br>130KW | 24/30日<br>1KW  | 24/30日<br>70KW | 24/30日<br>15kW | 24/30日<br>15KW    | 24/30日<br>-        | 24/30日<br>-     | 充てん時はプラント設備が止まる前提 |
| 待機頻度・電力量<br>(24hr/日) | 6/30日<br>1kW    | 6/30日<br>0.5kW | 6/30日<br>10kW  | 6/30日<br>-     | 6/30日<br>7.5kW    | 6/30日<br>-         | 6/30日<br>-      | TBD<br>1kW        |

出所)千代田化工建設提供資料に基づき三菱総合研究所作成

各プロセスの配置について、構成要素であるインフラ・周辺設備を含め、関連する設備をもれなく抽出して、各ゾーンに配置したイメージを図 2-30 に示す。

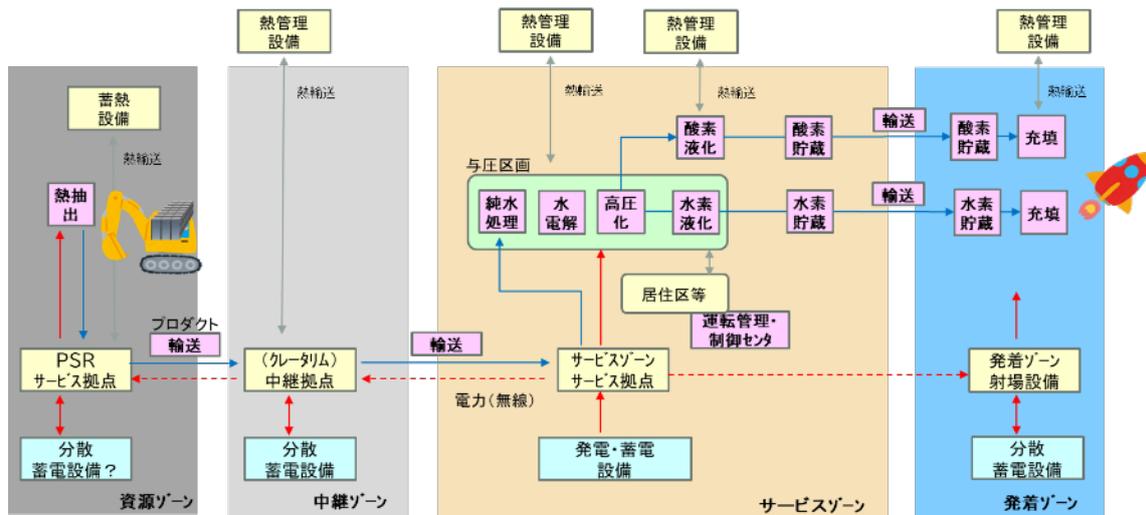


図 2-30 施設の月面上での配置関係イメージ

出所)千代田化工建設提供資料

図 2-30 に示す配置関係を踏まえ、以下に示す 3 点について、今年度詳細化を行った。

(1) 個別プロセスの検討

- 設定した条件に基づき個別プロセスの詳細検討を実施した。
- 今年度は、レゴリスに含まれる水の状態に特に影響する熱抽出や純水処理プロセスについて詳細検討を実施した。
- 昨年度まで十分な検討を実施できていなかったゾーン間の輸送に係るローバー運行のための舗装やパイプライン敷設にかかわる建設工程や昇圧化のタイミングによるメリット/デメリットについて詳細検討を実施した。

(2) プラントシステム情報の更新

- 今年度新たに追加したプラントの稼働パターンの更新及び新しい運用条件を整理した。
- 上記稼働パターンの変更に伴う、設備処理量等の各種想定値を更新した。
- 新しい運用条件(=夜間停止)における課題を整理した。
- 地点 1、2 における実際の発電プロファイルに基づく稼働パターンの実現可能性の初期検討を実施した。

(3) プラントシステム全体にかかわる検討

- 各プロセス間を接合するプラントシステム全体にかかわる検討として、純水処理・水電解装置等を配置予定の与圧空間に係る検討や、熱マネジメント、プラント設備全体を管理する通信制御システムについて詳細検討を実施した。

## (1) 個別プロセスの検討

設定した外部条件を踏まえ、関係するプロセスを中心に具体化のための検討を行った。検討結果の概要を表 2-10 に示す。

表 2-10 個別プロセスの検討結果概要

| 検討項目                      | 検討結果概観   |
|---------------------------|--|
| サーマルマイニングに関する検討           | <ul style="list-style-type: none"> <li>今年度の設定値及び外部条件を踏まえ、1日当たり水を426kg採取するのに必要なサーマルマイニング装置(重量・サイズ)と電力を試算</li> <li>採取水量能力2kg/hrの機器を10台同時利用することで、上記要件を満たすことを確認</li> <li>10台同時利用に必要な電力として10.8kW×10台=108kW程度の電力が必要と試算</li> </ul>  |
| 純水処理に関する検討                | <ul style="list-style-type: none"> <li>レゴリス抽出水の組成として、先行研究等で十分に報告されている長周期彗星の代表例としてHale-Bopp彗星の観測データを仮定し、抽出水の揮発性物質濃度をシミュレーション実施(※熱力学平衡計算ソフトOLI Analyzer 11.0(OLI systems社)を使用)</li> <li>彗星の組成を元にした場合でも、水分凝縮器にて液体の水として回収した抽出水は、水処理が困難な水質と想定</li> <li>一方で、水分凝縮器にて固体の水氷として回収することで揮発性物質の水への溶解量を低減可能</li> </ul> |
| 輸送工程の“インフラ整備”に関する検討       | <ul style="list-style-type: none"> <li>輸送にかかわるインフラ整備の検討として、①ローバー向け道路舗装作業、②パイプライン施工について、施工に必要な日数及び必要電力量を試算</li> <li>ローバー向け道路舗装作業の砕石小割作業は計上していない条件でも、延べ日数、必要電力量の面で、パイプラインの施工が有利であるとの結果</li> <li>実運用ではローバー用の道路施工なく運搬を行う可能性も考えられ、今後実際のローバー及びパイプラインの“運用上”の特性も考慮に入れた検討が必要</li> </ul>                           |
| 高圧化のタイミングに関するメリット/デメリット整理 | <ul style="list-style-type: none"> <li>水電解の前に高圧化(水の段階で高圧化)実施するケースと水電解の後に高圧化(ガスの段階で高圧化)実施するケースのフロー図を整理</li> <li>上記2ケースについて、装置質量や消費電力等の技術的な観点ともに、日本企業の知見の活用や開発期間などの観点でもメリット/デメリットを整理</li> </ul>  |

出所)三菱総合研究所作成

### 1) サーマルマイニングに関する検討

今年度の設定値及び外部条件を踏まえ、1日当たり水を426kg<sup>1</sup>採取するのに必要なサーマルマイニング装置(重量・サイズ)と必要電力の試算を行った。前提として、月地中内に真球型の氷壁が形成可能と仮定し、計算を行った。一方で、「装置の移動に必要なエネルギー」「ドリル削孔による消費電力」「装置の環境に対する維持(温度等)に必要なエネルギー」等の項目は計算時には除外しており、より詳細な検討の際には具体的な数値を設定する必要がある。計算の際に使用した物性値を表 2-11 に示す。

<sup>1</sup> 推葉プラントを30日サイクルでの稼働・待機を行ったと仮定する場合、日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021にもとづいて1年間で推葉を57.6[ton]生成するために必要な1日当たりの水の採取量

表 2-11 計算の際に使用した物性値

| 使用した物性項目                   | 物性値  |
|----------------------------|------|
| 氷密度 [kg/m <sup>3</sup> ]   | 930  |
| ソイル密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 3103 |
| 空隙率                        | 0.42 |
| 氷昇華熱 [kJ/kg]               | 2776 |
| 氷融解熱 [kJ/kg]               | 333  |

出所) 高砂熱学工業提供資料に基づき三菱総合研究所作成

上述したような前提のもと、1日当たり水を426kg採取するのに必要な装置(重量・サイズ)と必要な電力値の計算を行い、以下の結果が得られた。なお、サーマルマイニング装置仕様の検討にあたっては、バッテリー、制御部、車両、装置の環境に対する維持機構を除いているほか、地上機器ベースで概算を行っている点に留意が必要である。

- サーマルマイニング装置仕様
  - サイズ:容積 1m<sup>3</sup>(1m×1m×1m)
  - 重量:250kg
  - 定格電力:10.8kW
  - 採取水量:2kg/hr
  - 水 1kg 採取に必要な電力量:3.9kWh/kg(H<sub>2</sub>O)
- システム構成
  - サーマルマイニング必要台数:10 台
  - 必要電力:10.8kW×10 台=108kW

サーマルマイニング装置により採取した水は液体の状態ですべてタンクに貯蔵することが望ましいため、図 2-31 に示すように三重点の液体側近傍に該当する温度及び圧力である必要がある。具体的には温度が273.2K以上、かつ圧力が0.611kPa以上となることが求められる。なお、不純物分離等のため、変更が必要であれば、この温度・圧力以上ならば、原理的には調整可能と思われる。

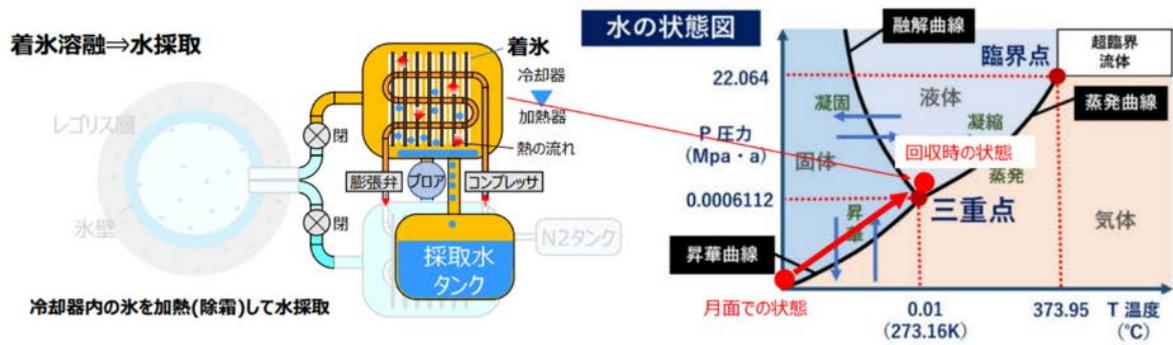


図 2-31 サーマルマイニング技術概要及び採取の際の望ましい水の状態

出所) 高砂熱学工業提供資料

## 2) 純水処理に関する検討

外部条件で設定した条件に基づいて、レゴリス抽出水の性状予測を実施した。検討にあたっての前提条件を以下に示す。

- (1) 抽出方法は、熱抽出を想定する。
- (2) レゴリス中の水は、水和水や水酸化物として存在している可能性はあるが、まずは付着水として存在しているとして試算する。
- (3) レゴリス中の水分量は、月面からの深さ 0~0.5 m で 2.5wt%、0.5~1m で 5wt%とする。
- (4) 年間の水利用量は 75 トン/年と設定する。

彗星の組成データをもとにした場合の予測には、組成が十分に報告されている長周期彗星の代表例として表 2-12 に示す Hale-Bopp 彗星の観測データを使用した。具体的には、熱抽出により組成の蒸気が昇華して、水分凝縮器に送られ、レゴリス抽出水となることを想定した場合の抽出水の揮発性物質濃度を、熱力学平衡計算ソフト OLI Analyzer 11.0 (OLI systems 社) を使用し、シミュレーションを行った。

表 2-12 彗星の揮発性成分の存在量(Hale-Bopp 彗星)

| Molecule |            | C/1995 O1<br>(Hale-Bopp) |                   |
|----------|------------|--------------------------|-------------------|
|          |            | 分子比 <sup>a)</sup>        | 重量% <sup>b)</sup> |
| H2O      | 水          | 100                      | 51.2              |
| CO       | 一酸化炭素      | 20                       | 15.9              |
| CO2      | 二酸化炭素      | 20                       | 25.0              |
| CH4      | メタン        | 0.6                      | 0.27              |
| C2H2     | エチレン       | 0.1                      | 0.07              |
| C2H6     | エタン        | 0.3                      | 0.26              |
| CH3OH    | メタノール      | 2                        | 1.8               |
| H2CO     | ホルムアルデヒド   | 1                        | 0.85              |
| HCOOH    | ギ酸         | 0.06                     | 0.078             |
| HCOOCH3  | ギ酸メチル      | 0.06                     | 0.10              |
| NH3      | アンモニア      | 0.7                      | 0.34              |
| HCN      | シアン化水素     | 0.25                     | 0.19              |
| HNCO     | イソシアン酸     | 0.06                     | 0.073             |
| HNC      | イソシアン化水素   | 0.04                     | 0.031             |
| CH3CN    | アセトニトリル    | 0.02                     | 0.023             |
| HC3N     | シアノアセチレン   | 0.02                     | 0.029             |
| NH2CHO   | ホルムアミド     | 0.01                     | 0.013             |
| H2S      | 硫化水素       | 1.5                      | 1.5               |
| OCS      | 硫化カルボニル    | 0.3                      | 0.51              |
| SO       | 一酸化硫黄      | 0.8                      | 1.1               |
| CS2      | 二硫化炭素      | 0.2                      | 0.43              |
| SO2      | 二酸化硫黄      | 0.1                      | 0.18              |
| H2CS     | チオホルムアルデヒド | 0.02                     | 0.026             |

a) 分子比は文献1 の Table II のデータの最大値を示す

b) 重量%は著者が計算 2)

c) OLI データベースに登録のない HC3N(シアノアセチレン)、SO(一酸化硫黄)、

H2CS(チオホルムアルデヒド)については今回は除外

出所)J. Crovisier, D. Bockelée-Morvan, Space Science Reviews 90, 19-32 (1999)、宮本、松本、「月面におけるレゴリス抽出水の純水化処理」、第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2L11 (2023)

Hale-Bopp 彗星の組成をベースとした場合におけるレゴリス抽出水の OLI 計算結果を図 2-32 に示す。また、水氷が生じず水蒸気分圧ができるだけ小さくなる 278.15 K のデータを抽出した場合の溶存物質の格納度を表 2-13 に示す。なお、0.1 g/L 未満の溶存物質については省略している。

シミュレーションの結果、彗星の組成をもとにした場合でも、水分凝縮器にて液体の水として回収した抽出水は水処理が困難な水質と想定されるが、水分凝縮器にて固体の水氷として回収することで揮発性物質の水への溶解量を低減可能であることが予想される。

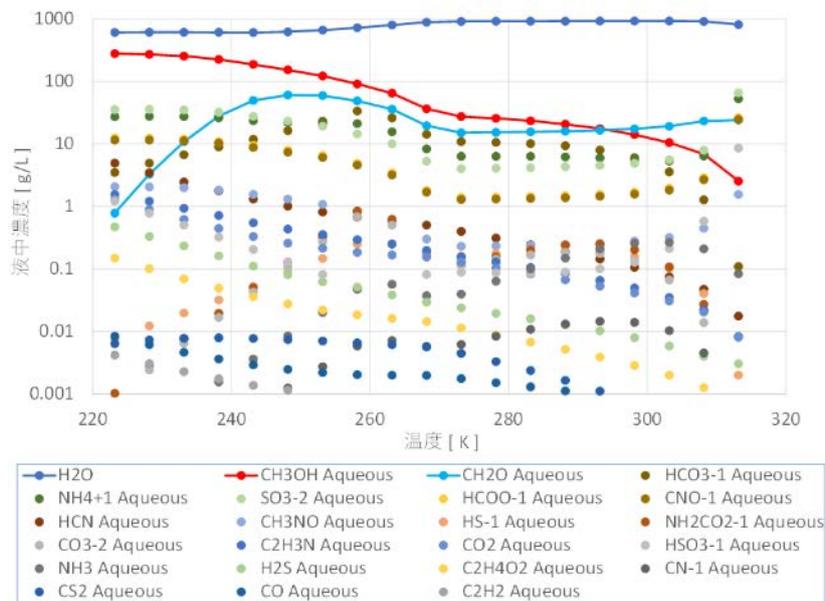


図 2-32 レゴリス抽出水の OLI 計算結果(Hale-Bopp 彗星)

出所)宮本, 松本,「月面におけるレゴリス抽出水の純水処理」, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2L11 (2023)

表 2-13 OLI 計算結果(278.15 K, 0.1 atm)

| 溶存物質     | 濃度 [ g/L ] |
|----------|------------|
| CH3OH    | 25.8       |
| CH2O     | 15.4       |
| HCO3-1   | 10.6       |
| NH4+1    | 6.4        |
| SO3-2    | 4.1        |
| HCOO-1   | 1.4        |
| CNO-1    | 1.3        |
| HCN      | 0.31       |
| CH3NO    | 0.23       |
| HS-1     | 0.18       |
| NH2CO2-1 | 0.16       |
| CO3-2    | 0.14       |
| C2H3N    | 0.13       |
| CO2      | 0.10       |

出所)宮本, 松本,「月面におけるレゴリス抽出水の純水処理」, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2L11 (2023)

### 3) 輸送工程の”インフラ整備”に関する検討

昨年度実施した全体アーキテクチャの検討において、資源ゾーン-サービスゾーン、サービスゾーン-発着ゾーン間での物資の輸送が重要な論点として挙げられた。今年度はローバーとパイプラインの施工性の観点で評価を行った。ただし、月面における施工機械のデータが存在しないことから、地上の小規模の機械のデータ(土木工事積算基準表)をベースにして行った。

## a. 輸送経路の設定(地点 1)

輸送工程のインフラ整備に関する検討を行う上では、輸送経路の設定が重要である。輸送にとってより厳しい条件となることが想定される資源ゾーン⇄サービスゾーン間の輸送経路を設定し、加えてローバーによる輸送およびパイプラインによる輸送で前提となる条件を次の通り、設定した。

### ア) ローバーによる輸送

ローバーの輸送による検討における前提条件を以下に列挙する。

- 経路は 2 種類を想定
  - 経路①: サービスゾーンから資源ゾーンまで直線で結んだ経路である。最短距離であるが途中に傾斜が  $20^{\circ}$  以上の<sup>2</sup>の箇所が存在する。最大傾斜  $27.37^{\circ}$  の領域をたどり、総距離は 1.42km となる。図 2-33 に示す。

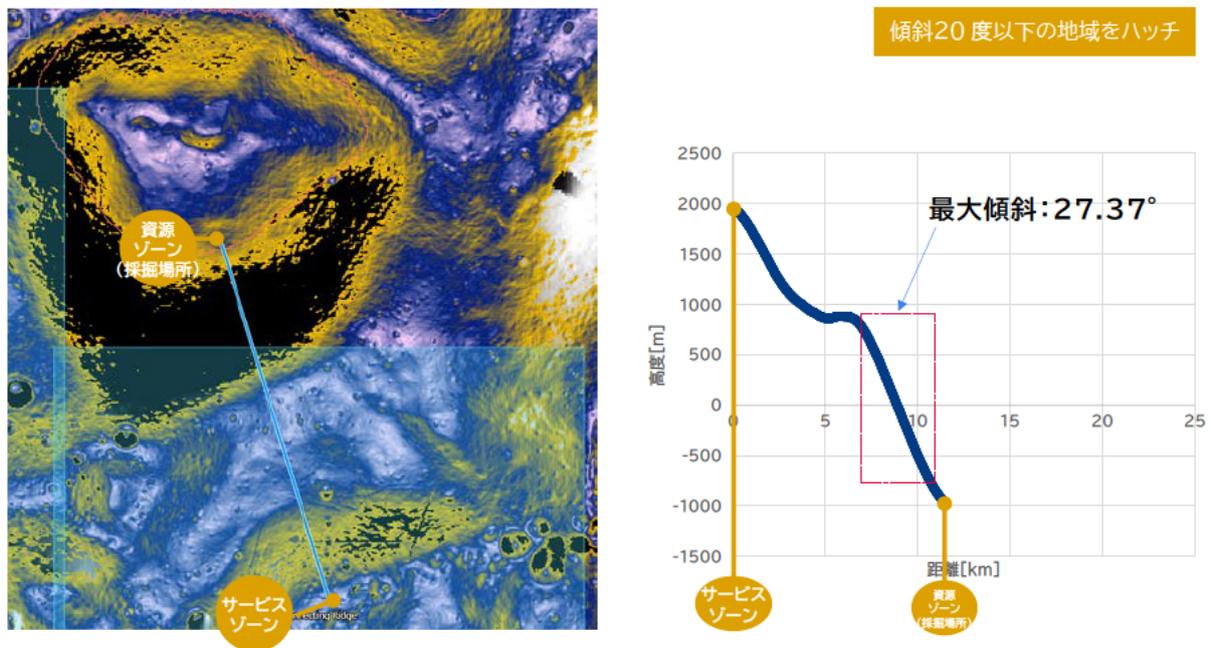


図 2-33 経路①(地点 1)の詳細情報

出所)三菱総合研究所作成

- 経路②: サービスゾーンから資源ゾーンまで傾斜がおよそ  $20^{\circ}$  以下となる領域を結んだ経路である。最大傾斜は  $20^{\circ}$  以下であるが、総距離 23.7km と経路①の 2 倍程度となる。図 2-34 に示す。

<sup>2</sup> 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 を参考に、ローバーの走行可能な傾斜度として  $20^{\circ}$  (有人と圧ローバーの仮定値)を仮定し、当該傾斜度を含む経路と含まない経路の 2 種類で検討を行った。

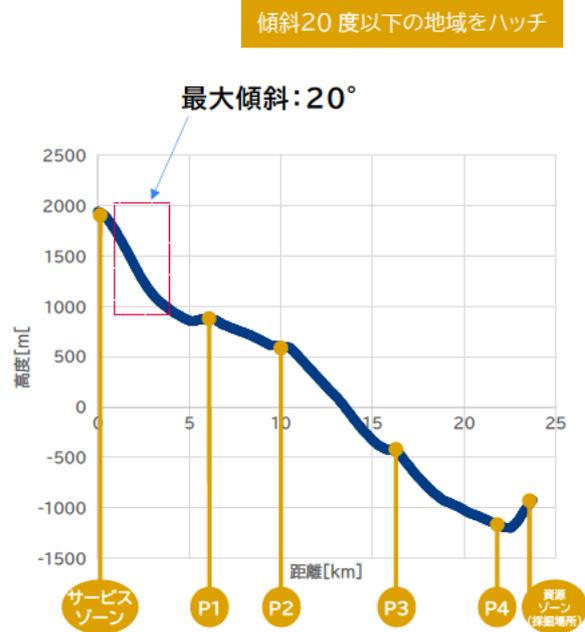
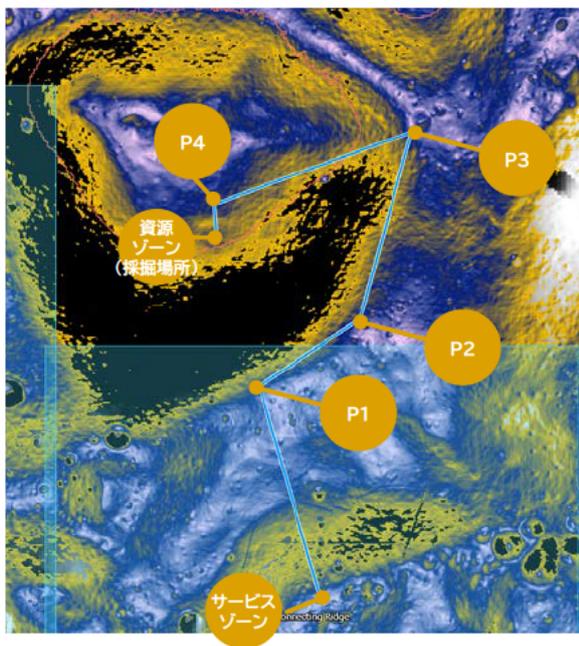


図 2-34 経路②(地点 1)の詳細情報

出所)三菱総合研究所作成

## イ) パイプラインによる輸送

パイプラインの輸送による検討における前提条件を以下に列挙する。

- 経路は 1 種類を想定
  - 経路①: 傾斜は大きな要因とならないことから、サービスゾーンから資源ゾーンまで直線で結んだ経路とする。(図 2-33 参照)
- ステンレス製フレキシブルホースの 8A サイズを参照する<sup>3</sup>。

## b. 輸送経路の設定(地点 2)

### ア) ローバーによる輸送

ローバーの輸送による検討における前提条件を以下に列挙する。

- 経路は 1 種類を想定(資源ゾーンまでの直線において 20°以上の傾斜がないため 1 種類となる)
  - 経路①: サービスゾーンから資源ゾーンまで直線で結んだ経路である。図 2-35 に示す。

<sup>3</sup> <https://www.nfk-jp.com/spec/tube/>(2024 年 3 月 25 日閲覧)

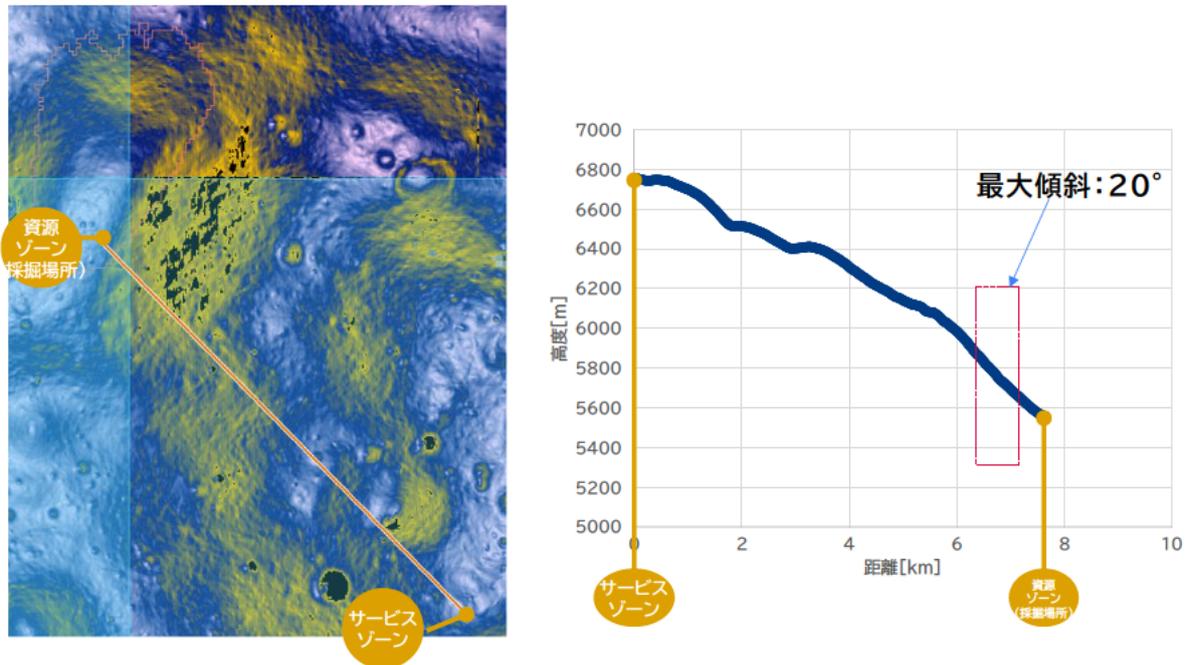


図 2-35 経路①(地点 2)の詳細情報

出所)三菱総合研究所作成

### イ) パイプラインによる輸送

パイプライン輸送による検討における前提条件を以下に列挙する。

- 経路は 1 種類を想定
  - 経路①: サービスゾーンから資源ゾーンまで直線で結んだ経路とする(図 2-35 参照)。
- パイプラインの材質等は地点 1 と同じ数値を仮定した。

検討にあたってはその他の前提条件として、以下の点を考慮した。

- 地上のデータをベースにしているが、自律・遠隔での施工となり施工性がおちるため、地上の作業性のデータの×0.6 とした。
- ローバーによる搬送の場合、タイヤの沈み込み等を考慮して、舗装するものとした。道路舗装は、幅 3.5m×0.2mの碎石舗装とした。
- 碎石掘削できるものとしたが、掘削場所が不明なため一律で計上した(地上の 0.1m<sup>3</sup> のバックホウ、距離 17km 以下のデータを使用)。
- 配管の場合、幅 1.0m、深さ 0.5mの掘削を行うものとした。
- 碎石小割作業について、小型機械のデータが無いため、計上していない。
- 配管敷設・配管接合について、どのような機械を用いて施工するかが不明で、影響も大きくない(後述)ことから、計上していない。
- 施工距離はサービスゾーン～資源ゾーン、サービスゾーン～発着ゾーンの合計とする。

また、検討にあたっては上記の前提条件を基に、以下の候補について検討を実施した。輸送に係る施工検討のバリエーションを表 2-14 に示す。

表 2-14 輸送に係る施工検討のバリエーション

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| 地点① | ローバーによる搬送(最大傾斜 20 度以下)  |
|     | ローバーによる搬送(最大傾斜 27.37 度) |
|     | パイプラインによる輸送             |
| 地点② | ローバーによる搬送(最大傾斜 20 度以下)  |
|     | パイプラインによる輸送             |

出所)三菱総合研究所作成

検討の結果、表 2-15 に示す通り、ローバー向け道路舗装作業の砕石小割作業は計上していない条件でも、施工にかかる延べ日数、必要電力量の面で、パイプラインの施工が有利であるとの結果となった。

ただし、本検討は簡易的かつ一定の条件を設定した検討であり、前提条件や下記注釈の条件が変われば、結果も変わることに注意が必要である。

表 2-15 輸送に係る施工検討の結果

| レイアウト            | 水輸送方法          | 施工距離(km) | 施工数量 <sup>※1</sup> (m <sup>3</sup> ) | 延べ日数 <sup>※2</sup> |     |     |      |      | 必要電力量(kWh)         |                       |        |
|------------------|----------------|----------|--------------------------------------|--------------------|-----|-----|------|------|--------------------|-----------------------|--------|
|                  |                |          |                                      | 掘削積込               | 敷均し | 転圧  | 運搬   | 累計   | バックホ <sup>※3</sup> | キャリアダンプ <sup>※4</sup> | 計      |
| 地点①              | ①ローバー(≦20°)    | 25.04    | 17528                                | 2434               | 183 | 203 | 6086 | 8906 | 354000             | 144000                | 498000 |
|                  | ②ローバー(≦27.37°) | 12.76    | 8932                                 | 1241               | 93  | 103 | 3101 | 4538 | 180000             | 74000                 | 254000 |
|                  | ③パイプライン        | 12.76    | 6380                                 | 886                | 66  | 74  | -    | 1026 | 129000             | -                     | 129000 |
| 地点②              | ①ローバー          | 8.47     | 5929                                 | 823                | 62  | 69  | 2059 | 3013 | 120000             | 49000                 | 169000 |
|                  | ②パイプライン        | 8.47     | 4235                                 | 588                | 44  | 49  | -    | 681  | 86000              | -                     | 86000  |
| 追加 <sup>※5</sup> | ②パイプライン        | 1        | 43                                   | 8                  | -   | -   | -    | 8    | 1000               | -                     | 1000   |

※1: 舗装や埋設のサイズは仮定の値であるため、サイズが変化すれば表の値から変化する。

※2: 延べ日数について機械の台数を増加/機械を大型化させれば、また、同時並行で作業を行えば、その分減少となる。

※3: 0.08m<sup>3</sup> バックホウと仮定

※4: 0.6t キャリアダンプと仮定

※5: サービスゾーン～発着場 1km の 15A~20A 配管設置用に幅 0.43m 深さ 0.1m 掘削(埋め戻し無し、配管設置作業含まず、バックホウ平積 0.06m<sup>3</sup> と仮定)

出所)大林組提供資料に基づき三菱総合研究所作成

検討の結果、ローバーのための道路の敷設やパイプラインの敷設に係る“施工性”の観点ではパイプラインの設置のほうが有利との結果が得られた。一方で、初期には道路施工を必要としないような小規

模の輸送が行われることが想定され、そのような場合には輸送形態としての妥当性の優劣は逆転し、ローバーによる輸送が有利となる可能性がある。なお、運用にあたっては、その他にも以下に示すような課題がある。

- パイプラインの“運用”における課題

- 隕石の被弾面積(敷設距離(長さ距離)[m] x 隕石の被害範囲(幅、直撃せずとも被害は被る)[m])が広い。
- 保温電力&保温手法の検討が必要である。(場所によって温度が変わることも難しさの一因)
- 保温電力だけでは凍結後の解凍は不可能な可能性があり、凍結リスクが大きい。凍結リスクに対する冗長性を確保する場合は複数本必要となり、インフラ整備の優位性が消える。

- ローバーの”運用”における課題

- ローバーを永久影で長時間運用することに現実性があるかは確認を行う必要あり。

#### 4) 高圧化のタイミングに関するメリット/デメリットに関する検討

昨年度までの検討において、昇圧化のタイミングとして、①電解“前”昇圧(純水段階で昇圧)と②電解後昇圧(ガスの段階で昇圧)の2パターンが想定されることが明らかとなっている。今年度はそれぞれのパターンのシステム構成を整理するとともに、それぞれのパターンのメリット/デメリットを整理した。

図 2-36 に電解前の水の状態で高圧化する(電気分解は高圧で行う)システム構成を、図 2-37 に電解後にガスの状態で高圧化する(電気分解は低圧で行う)システム構成を示す。

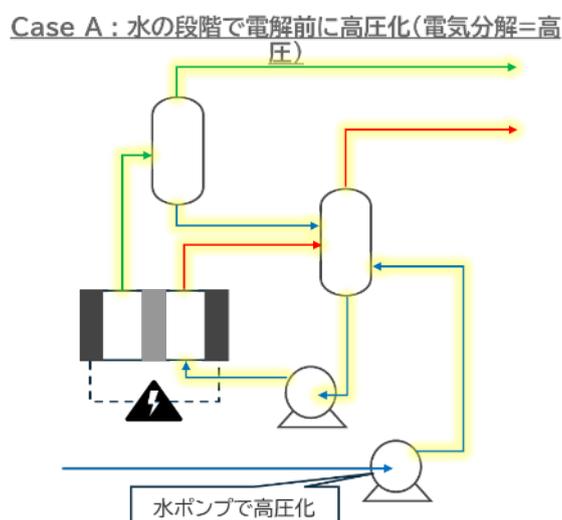


図 2-36 水の段階で電解前に高圧化(電気分解=高圧)のシステム構成

出所)日揮グローバル提供資料

Case B : ガスの段階で電解後に高圧化(電気分解=低圧)

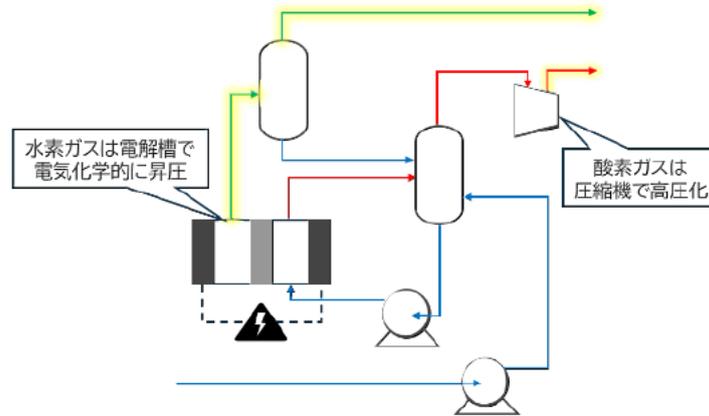


図 2-37 ガスの段階で電解後に高圧化(電気分解=低圧)のシステム構成

出所)日揮グローバル提供資料

昇圧化のタイミングが違う両方のパターンについてメリット/デメリットを表 2-16 のように比較整理した。特に、比較整理の軸として、技術的な評価とともに「日本企業の知見を活かしやすいか否か」や「開発費用や開発期間」などの定量的な評価が難しい観点も設定し、検討を行った。

表 2-16 高圧化のタイミングによるメリット/デメリット評価

|   | Case A : 水の段階<br>(電解前)               | Case B : ガスの段階**<br>(電解後)      |   |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|---|
| 設備質量  | 小                                    | 大                              | 機器数の項を参照  |
| 消費電力の<br>目安*  | 2 桁前半 W                              | 1200W (酸素)                     | ガスは圧縮加熱・冷却操作が発生<br>左記の他、圧縮機自体の徐熱<br>(400W 強)も必要 |
| 流体(水・酸<br>素)の<br>冷却量目安*   | -                                    | 750 W                          |   |
| 機器数   | ポンプ x 1 のみ<br>(ポンプ自体もガス圧縮機<br>より小さい) | 圧縮機 x 2~3(多段)<br>冷却器 x 2~3(多段) | ガスは多段昇圧&熱交換が必要                                  |
| 電解装置の<br>耐圧要求   | 大(2000~3000 kPaA)                    | 小(3 桁前半 kPaA)                  | 電解装置は水段階で高圧化する方<br>が重くなる                        |
| 日本企業の<br>知見を<br>活かしやすい  | No                                   | Yes                            |   |
| 開発費用  | 大                                    | 小                              | 多くの国内メーカーにとって、高圧原<br>料水の水電解は新規開発要素              |
| 開発期間  | 長                                    | 短                              |   |
| *100kPaA/60℃から 2100kPaA/60℃への昇圧(&圧縮熱の徐熱)を想定<br>**水素は電気分解槽にて水素側を高圧制御することで、動機器を用いずに昇圧可能。必要電力は昇圧機に比して<br>十分に小さい。従い、ここでは昇圧機で高圧化する酸素側の昇圧機電力・排熱量のみ計上。 |                                      |                                |   |

出所)日揮グローバル提供資料に基づき三菱総合研究所作成

## (2) プラントシステム情報の更新

昨年度までの検討では、推奨プラントの運用パターンとして、年間 300 日連続稼働(昼夜問わず)、65 日保全等のサイクルを想定していた。今年度は外部条件において日照率 80%以上のサイトを対象としてサービスゾーンを配置することとしたことに伴い、「80%以上日照率」を考慮し、30 日サイクルで

の稼働・待機のサイクルを新たに想定することとし(例:1日稼働準備、22日稼働、1日停止準備、6日停止)、情報を更新した。具体的には、1か月のうちの夜の期間(6日間程度)は発電不可な期間となるため、夜間は運転を停止する運用とし、昨年度までに整理したプラントシステムに係る情報を更新した。特に更新が必要な項目としては、稼働日数の減少(=処理量の増加)に伴う各装置のサイズ・質量・消費電力等であり、加えて夜間停止時の保管方法と課題、起動・停止に要する時間等が挙げられる。

上記のプラントシステムの情報更新について、夜間の稼働停止における課題を以下に整理する。短期間の間に推葉プラントを再起動/停止することに伴い、いくつかの課題が挙げられている。

- (全般) 基本的に設備の起動停止および長期間の停止は機器への悪影響が生じやすい。開発段階においてしっかりと確認・対策を施す必要がある。
- (全般) 稼働時は保温したい部分ほど自己発熱している傾向があるため、夜間停止させない場合は与圧空間に対する保温要求が穏やか(あるいは放冷側)となる。一方で夜間停止するのであれば、与圧空間を維持する装置に対する保温(加熱)要求が厳しくなる。夜間停止するか否かで与圧空間などの周辺機器における思想が180度変わることもある。
- (電気分解) 長時間の停止に際し、地上であれば窒素パージを推奨するが、月面である事を鑑みると水抜きを伴わない装置設計による対応が望ましい。停止状態が長引くと、その後の運転に置いて警報が出やすくなるが、水抜き機構を設けること(及び水抜き操作)により故障リスクが高まる。従いパージ・水抜きは回避すべき。
- (電気分解) 製品劣化防止の観点から水素供給量の速度変化は20%/min以下とすべき。

### (3) プラントシステム全体にかかわる検討

設定した外部条件を踏まえ、推葉プラントシステム全体にかかわる具体化のための検討を行った。検討結果の概要を表 2-17 に示す。

表 2-17 プラントシステム全体にかかわる検討の結果概要

| 検討項目           | 検討結果概観   |
|----------------|--|
| 与圧空間に関する検討     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ サービスゾーン周辺にて利用を想定する与圧区画について、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」での利用実績を参考に、最大12.5kWの70%をシステム使用と仮定</li> <li>・ 月面における与圧区画の維持のために8.5kWの電力が必要と試算</li> </ul>  |
| 熱マネジメントに関する検討  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 与圧区画内で動作する施設「純水処理」「水電解」「高圧化」「液化(水素)」の排熱量について整理</li> <li>・ 共通冷媒で対応するのは、純水処理、電気分解、高圧化(機械損失分)、液化(機械損失分)の計10kW弱と想定</li> <li>・ 生産設備を対象とした熱管理設備の質量は電源込で240kg程度と試算</li> </ul>  |
| 通信制御システムに関する検討 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 共通通信部に求められる性能と規模感把握に必要な項目として、月面上で操作・監視が必要な設備・機器の点数や地球からの操作・監視が必要な設備・機器の点数などの概要を整理</li> <li>・ 運転制御システム本体を与圧部に置いた場合の今後の課題も合わせて整理 <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 各装置・ユーティリティ(特に在暴露域)と、制御システムまでの通信手法</li> <li>➢ 「1日稼働準備」における自己診断</li> <li>➢ 設計寿命(10年)に即したメンテナンスフリー化(消耗、校正問題)、機器交換を可能にする設計 など</li> </ul> </li> </ul> |

出所)三菱総合研究所作成

## 1) 与圧空間に関する検討

今年度の検討において、推薬プラントに係る設備機能上および運転・保全上、与圧環境に設置することが望ましいと考えられ、サービスゾーンに与圧区画を設置することを前提とし、サービスゾーン周辺にて利用を想定する与圧区画の維持に必要な電力の算出を行った。

国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」での利用実績を参考に、最大 12.5kW の 70% をシステム使用と仮定し、月面における与圧区画の維持のために 8.5kW の電力が必要と試算された。

## 2) 熱マネジメントに関する検討

各設備の稼働に伴う排熱処理について検討した。具体的には、与圧区画内で動作する施設「純水処理」「電気分解」「高圧化」「液化(水素)」の排熱量について表 2-18 に整理した。

表 2-18 各施設における管理(徐熱)対象の熱

| 装置     | 排熱温度 °C           | 排熱量 kW           | 共通熱管理             | メモ   |
|--------|-------------------|------------------|-------------------|--|
| 純水処理   | 50                | < 1.0            | Yes               | 動力系消費電力は 2 割程度熱変換(ロス)ありと想定   |
| 電気分解   | <50               | 4                | Yes               |  |
| 高圧化    | 60~170 程度<br><50  | 2 (流体)<br>1 (機械) | No(流体)<br>Yes(機械) | 圧縮熱と、圧縮機の機械損失由来の排熱を想定<br>圧縮熱(流体)の徐熱は熱マネジメントとは別の独立したプロセス用のラジエータを想定(温度域が異なるため) |
| 液化(水素) | -200(仮)~<br>60<50 | 80(流体)<br>4(機械)  | No(流体)<br>Yes(機械) | 流体の徐熱と圧縮機の機会損失由来の熱を想定<br>流体の徐熱は熱マネジメントとは別の独立したプロセスラジエータを想定(温度域が異なるため)        |

出所)日揮グローバル提供資料に基づき三菱総合研究所作成

検討の結果、共通冷媒で熱管理を行うのは、純水処理、電気分解、高圧化(機械損失分)、液化(機械損失分)の計 10 kW 弱と想定との結果が得られた。「Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA/TP-2015-218570/REV2, Feb. 2022」の Table 3-6 Lunar Outpost Mission Infrastructure Costs における 31.6 kg/kWth という数値<sup>4</sup>を参照し、熱管理設備のおおよその重量を試算した。

これより生産設備を対象とした熱管理設備の質量は電源込で 240kg 程度であるとの結論となった。さらに、上記に加えて、電気計装関連・与圧空間の維持・発電関連の排熱も追加する必要がある。

## 3) 通信制御システムに関する検討

与圧空間内を含め、推薬プラントシステム全体の運転制御がシステム統合の観点で重要である。今年度は、共通通信部に求められる性能と規模感把握に必要な項目として、月面上で操作・監視が必要な設備・機器の点数や地球からの操作・監視が必要な設備・機器の点数などの概要を整理した。

<sup>4</sup> 南極点、シャクルトンクレータの北側リム部にて、水平ラジエータを用い、電力(冷媒循環用と思われる)コストを 274.1 kg/kWe と見込んだ場合の Total System Mass(ラジエータ・冷媒・冷媒ポンプ・電源など)として参照

共通通信部に求められる性能と規模感把握に必要な項目として、以下のような項目が挙げられる。

- 操作・監視点数の概要 ・ 地球からの遠隔操作・監視点数の見積もり
- 地球からの監視に求められるデータ更新周期
- データ保存(月面)に求められるデータ収集周期及び期間(月面レコーダ)

また、運転制御システム本体を与圧部に置いた場合の今後の検討として、以下のような項目が挙げられた。

- 各装置・ユーティリティ(特に在暴露域)と、制御システムまでの通信手法
  - 無線、有線、混在の選択肢
  - 無線は切れることを前提にする必要があるため、緊急時はローカルで安全状態遷移やフォールバックさせる必要がある
  - ローバーなどに装置が移動する場合は、必然的に無線になる
- 「1日稼働準備」における自己診断
  - バルブのパーシャルストロークテストなどの、懸案箇所の健全性確認策検討
- 設計寿命(10年)に即したメンテナンスフリー化(消耗、校正問題)、機器交換を可能にする設計
  - センサ、アクチュエータ、パイプ/ジョイント材の共通化を進め、保管/交換/保守の最適化や品質安定化の検討

プラントシステムへの転用を想定可能な通信制御システムとして、既に地上で利用されているシステムの一例を図 2-38 に示す。

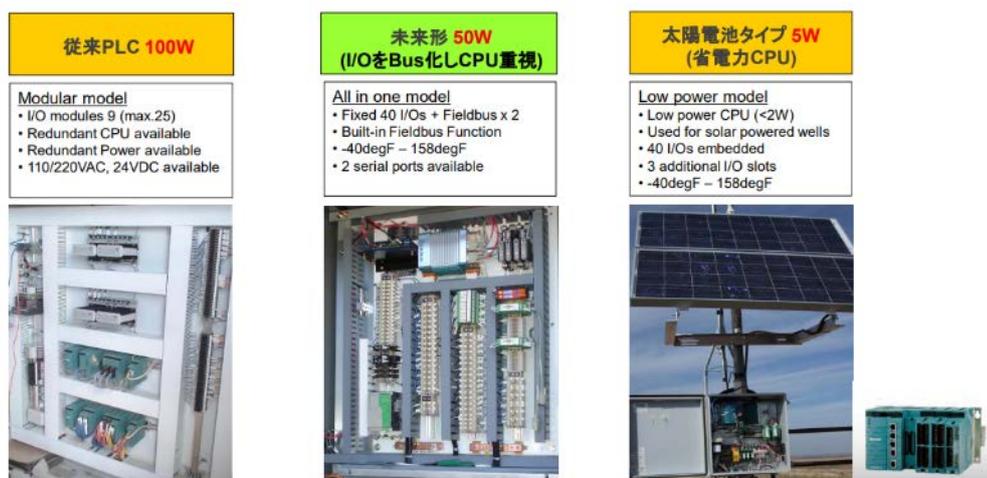


図 2-38 通信制御システム一例

出所)横河電機提供資料

## 2.1.4 水資源探査にかかわる検討

ここでは、推業プラント設備の建設に際して必要となる、月面上に存在する水資源の探査に係る検討を行った結果を述べる。検討では、探査すべき項目や候補地についてニーズ調査を行い、ニーズを基にミッション要求や環境条件を設定した。その後、ミッション要求及び環境条件を元に探査装置のハードウェア仕様をブレークダウンし、ミッション要求や環境条件が探査装置として明らかに困難な項目を抽出した。ミッション要求を確定後、探査装置のハードウェア仕様を設定した。また複数の探査装置について比較検討を行い、探査装置の組み合わせに関する提案を行った。

### (1) ニーズ調査

ニーズ調査では、水資源探査に関するミッション要求を設定するために、表 2-19 に示す観点でチーム 1 及び 2 における検討内容から情報の抽出を行った。その結果、資源を採取する候補地点となるクレータ及び PSR に関する議論やプラントサイトの議論から環境条件を含む複数の条件が抽出された。ここでは「外部条件の検討」で設定された候補地点(図 2-4 及び表 2-5)を参照し、候補地点周辺における状況や探査に求めるニーズを整理した。

表 2-19 水資源探査に係るニーズ調査

| No.                             | ヒアリング項目  | 調査結果   |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
|---------------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|--|--|---------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|---------|--|--------|
| 1                               | 検討対象となるクレータの想定があるか                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.3wt%以上の水資源が存在すること</li> <li>水露出マップでグリッドが確認されていること</li> <li>平均温度/最大到達温度が 107K 以下の場所を有すること</li> <li>PSR(永久影)面積が 5km<sup>2</sup> 程度あること</li> <li>NASA 着陸地点 13 候補から 10km 以内であること</li> <li>着陸地点と PSR(採掘地点)の間に年間 80%以上の日照量が確保できる地点がある</li> <li>着陸地点及びサービスゾーンまで傾斜 10°以下であること</li> </ul> <p>■候補クレータ・PSR</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>候補①</th> <th>候補②</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>位置図</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PSR中心位置</td> <td>LAT:-89.51<br/>LON:280.65</td> <td>LAT:-85.21<br/>LON:33.83</td> </tr> <tr> <td>アクセス可能な NASA Artemis3における着陸候補地点</td> <td>Connecting Ridge</td> <td>Nobile Rim 1</td> </tr> <tr> <td>クレータサイズ</td> <td>&gt;5[km] かつ &lt;20[km]<br/><small>※クレータ中心部にPSR存在</small></td> <td>クレータなし</td> </tr> </tbody> </table> |  | 候補① | 候補② | 位置図 |  |  | PSR中心位置 | LAT:-89.51<br>LON:280.65 | LAT:-85.21<br>LON:33.83 | アクセス可能な NASA Artemis3における着陸候補地点 | Connecting Ridge | Nobile Rim 1 | クレータサイズ | >5[km] かつ <20[km]<br><small>※クレータ中心部にPSR存在</small> | クレータなし |
|                                 | 候補①  | 候補②  |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| 位置図                             |  |  |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| PSR中心位置                         | LAT:-89.51<br>LON:280.65                           | LAT:-85.21<br>LON:33.83  |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| アクセス可能な NASA Artemis3における着陸候補地点 | Connecting Ridge                                   | Nobile Rim 1   |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| クレータサイズ                         | >5[km] かつ <20[km]<br><small>※クレータ中心部にPSR存在</small> | クレータなし   |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| 2                               | プラントサイト選定の外部条件(日照状況、斜度等の周辺地理状況)があるか                | <ul style="list-style-type: none"> <li>サービスエリア(プラントサイト)の場所の想定については#1の通り。</li> <li>この場所の選定は探査装置の稼働の観点では過酷と想定されるので、ミッション要求と環境条件の適正化及び技術課題の抽出を順次進めていく。</li> </ul>   |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |
| 3                               | 探査条件についての希望(クレータ内の探査位置、深さ、その他計測条件等)                | <ul style="list-style-type: none"> <li>第1回WGで共有された他チーム検討から、水資源中の不純物について注目していることの共有があり、「ミッション要求」に取り込む。</li> <li>検討されている採掘方法から、地下深い領域(1m以上)より浅い領域(50cm以下)に集中した探査が実用的。</li> </ul>   |  |     |     |     |  |  |         |                          |                         |                                 |                  |              |         |  |        |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

## (2) 探査ミッションの定義

ニーズ調査を基に設定したミッション要求を表 2-20 に示す。ミッション要求としては「探査対象地域/クレータ」や「深さ方向の温度分布」「水の検出能力」「試掘深さ」「試掘対象範囲」「試掘地点数、有効な間隔」「水以外の溶解成分の有無」の 7 項目について検討を行った。また探査を行う環境についても、表 2-21 に示すように環境条件として「表面重力」「表面温度」「傾斜度」「飛来天体」「宇宙放射線」「大気圧」「熱特性」「太陽の条件」の 8 項目について詳細化を行った。

表 2-20 設定したミッション要求(初期仮説)

| L/N | 項目                     | 要求事項  | 設定根拠  |
|-----|------------------------|---|---|
| 1   | 探査対象地域/クレータ            | <ul style="list-style-type: none"> <li>「ニーズ調査」で抽出したクレータ (LAT:89.51S, LON: 280.65E) の PSR をターゲットとすること。(注)PSR の定義:NASA の QuickMap を基に先行研究の Mazarico et al. 2011 から想定した。</li> </ul>  |   |
| 2   | 深さ方向の水資源量分布 (深さ方向分解能)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>1 か所毎に最大 6 深度の計測を行うこと。なお優先順は以下の通りとすること。               <ol style="list-style-type: none"> <li>表面:0.0m 付近</li> <li>下層:0.5m, 1.0m 深さ付近</li> <li>上層:0~30cm 深さ:10cm 毎 (10,20,30cm 深さ)</li> </ol> </li> <li>深さ毎に隣接する位置を試掘しても良い。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.5m 毎の水資源マップの作製が目標になっていることから、表層, 0.5m, 1.0m の探査を実施</li> <li>0.5m で水の存在が確認できた場合には、産業化の観点からより浅い位置に存在する水資源に注力し、深度 30cm 以下の領域を集中的に試掘</li> </ul>   |
| 3   | 深さ方向の温度分布 (深さ方向分解能、精度) | <ul style="list-style-type: none"> <li>同上</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>水分布と温度分布の関係を取る(温度情報から簡易的に水資源の存在を推定できるようにする)ため</li> </ul>   |
| 4   | 水の検出能力                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.1wt%以下の精度での検出を行うこと</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>LUPEX 等の探査プロジェクトの目標値を当初ターゲットとする</li> </ul>   |
| 5   | 試掘深さ                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>1.0m までの分布を探査する</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>産業活用が可能な上層に注力するため、科学探査プロジェクト(最大 1.5m まで)より浅く設定</li> </ul>  |
| 6   | 試掘対象範囲                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>指定された地点を原点に、半径 150m 円内(=260×260m 矩形)を探査範囲としてできるだけ等間隔で試掘を行うこと。地点数は L/N 7 による。</li> <li>・主要ターゲットは L/N 1 のクレータ/PSR とする。</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>目標とする水資源の面積(5km<sup>2</sup>, 半径約 1.2km)以内で設定</li> <li>産業化として現実的な掘削範囲から絞り込みを想定<br/>年間水生産目標:100,000kg<br/>0-30cm のみを掘削する想定:<br/>約 17,800 m<sup>2</sup>/年 (半径約 75 m の範囲)<br/>0-100cm まで掘削する想定:<br/>約 3,600 m<sup>2</sup>/年 (半径約 34 m の範囲)</li> <li>水資源が探査開始位置とずれた場所にある可能性を考慮して、探査範囲は上記面積の 4 倍(半径では 2 倍範囲)とする</li> <li>MiniRF センサと日照量シミュレーション結果からさらに有力地域を絞り込むことは可能かもしれないが、この場合には十分な余裕を持てる可能性もある</li> </ul> |

| L/N | 項目          | 要求事項   | 設定根拠   |
|-----|-------------|--|--|
| 7   | 試掘地点数、有効な間隔 | <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲を4分割し、それぞれのブロックに対してできるだけ等間隔に3か所ずつ、合計12か所を試掘すること。</li> <li>試掘した位置情報を合わせて取得すること。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>水資源マップの根拠となりうる月表面温度は240×240m程度のメッシュで得られる。これはおおむね「探査対象範囲」で設定した区画面積に近似</li> <li>この1区画について Ground truth を得る(探査する)のに必要な試掘地点数は12箇所(凡そ100×100mの範囲毎に3点程度の目算)と仮定</li> </ul> |
| 8   | 水以外の溶解成分の有無 | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S 等の成分を検出すること。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>LUPEX 等の科学探査プロジェクトと同一目標。</li> <li>産業化の観点でも注目されている探査項目。</li> </ul>   |

出所) ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

表 2-21 設定した月面環境条件

| L/N | 大項目   | 小項目                 | 要求事項(ハードウェア設計のための)   |
|-----|-------|---------------------|--|
| 1   | 表面重力  | N/A                 | 地球表面重力の1/6 (約 1.62 m/s <sup>2</sup> )  |
| 2   | 表面温度  | 極地域(PSR)            | -234°C(Cabeus クレータを想定) ~ -166°C以下  |
|     |       | 極地域(昼日照域, 参考)       | -30°C ~ -70°C  |
|     |       | 中緯度地域(昼間, 参考)       | 106°C以下  |
|     |       | 中緯度地域(夜間, 参考)       | -183°C以上   |
| 3   | 傾斜度   | クレータ・PSR            | 着陸地点及びサービスゾーン周辺までの領域で10度以下   |
| 4   | 飛来天体  | 月面閃光観測レベル           | 100回/2.5年(小型望遠鏡で観測可能なレベル)  |
| 5   | 宇宙放射線 | 陽子                  | 1×10 <sup>4</sup> ~ 8×10 <sup>4</sup> protons/m <sup>2</sup> sec @ ~3keV<br>1×10 <sup>2</sup> protons/m <sup>2</sup> sec @ ~100MeV |
|     |       | 太陽風プラズマ             | H, He の原子核、月大気成分   |
|     |       | 太陽宇宙線               | H, He の原子核主体の高エネルギー粒子  |
|     |       | 銀河宇宙線               | 太陽系外からの高エネルギー荷電粒子  |
| 6   | 大気圧   | N/A                 | 10 <sup>-12</sup> ~ 10 <sup>-15</sup> 気圧   |
| 7   | 熱特性   | 赤外放射率               | 0.95 ~ 0.98  |
|     |       | アルbedo              | 0.16   |
|     |       | レゴリスの熱伝導率           | 1.5×10 <sup>-4</sup> W/cmK   |
|     |       | レゴリスの熱伝導率比熱         | 50K 122J/kgK<br>100K 287J/kgK<br>200K 564J/kgK<br>300K 773J/kgK  |
| 8   | 太陽の条件 | 日照率                 | 50%程度(昼:約14日間、夜:約14日間を想定)  |
|     |       | 太陽定数 P <sub>s</sub> | P <sub>s</sub> = 1315 ~ 1421 W/m <sup>2</sup>  |
|     |       | 太陽高度(極域)            | 平面: 6.5度   |

出所) ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

### (3) 実現方法の検討・要求事項へのフィードバック

設定したミッション要求及び月面環境条件について、図 2-39 に示す手順でハードウェアの実現性検討を行った。ハードウェア実現性検討の結果、「環境温度」「計測回数」「開発の時間軸」の3つの観点について技術課題を抽出した。まず「環境温度」について、極域 PSR の温度環境は-166℃以上(ワーストケースとして Cabeus クレータを想定した場合は-234℃まで低下)の見込みであり、極域でも日照域の環境(-70℃以上)と比べても非常に過酷な環境であることが分かった。この場合、探査方式によらず部品や材料の観点で制約が非常に大きい。「計測回数」については、当初は1基の探査装置で1地点の探査(12 か所×6 深度)を調査できるという前提で100回を最小計測回数の仕様としていたが、当初目標のターゲットとしてはハードルが高く、ローバーの走破性/信頼性の要素もあり、ローバー1台/探査装置1基で全てをカバーするミッション想定には無理があると思われた。「開発の時間軸」に関しては、開発の各段階で一定の達成を確認できるように、段階的な達成目標を設定する必要がある。これらの課題を基にミッション要求を表 2-22 に示す「探査対象地域/クレータ」「探査地点数、有効な間隔」の2つの項目について見直しを行い、「段階的な目標達成」を新たな検討項目として追加した。

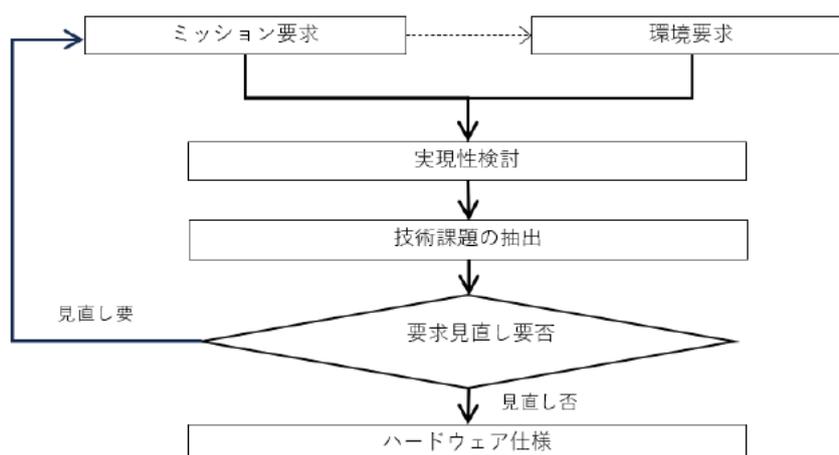


図 2-39 ミッション要求へのフィードバック

出所)ispace 社提供資料

表 2-22 ミッション要求の見直し

| L/N | 項目          | 要求事項  | 見直し根拠  |
|-----|-------------|---|--|
| 1   | 探査対象地域/クレータ | <ul style="list-style-type: none"> <li>「ニーズ調査」で抽出したクレータ(LAT:89.51S, LON: 280.65E)の PSR を最終ターゲットとすること。この最終ターゲットにアクセスするため、技術確立のための中間地点も以下の通り設定する。               <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション 1: 極域に近いが月の昼間(14 日間)を通して日照が十分に確保できるエリア, TBD</li> <li>オプション 2: 最終目標の PSR より温度/日照条件を緩和できる地点(PSR外縁を想定), TBD</li> <li>オプション 3: 最終目標地 LAT:89.51S, LON: 280.65E)の PSR</li> </ul> </li> <li>(注)PSR の定義:NASA の QuickMap を</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>極域 PSR の過酷な条件(日照無し、極低温)は最終目標とするものの、ローバー及び探査装置双方の開発実現性の観点から段階的な環境条件とする。</li> </ul> |

| L/N | 項目          | 要求事項   | 見直し根拠   |
|-----|-------------|--|---|
|     |             | 基に先行研究の Mazarico et al. 2011 から想定した。   |   |
| 7   | 探査地点数、有効な間隔 | <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲を4分割し、それぞれのブロックに対してできるだけ等間隔に3か所ずつ、合計12か所を探査する。この達成のため、以下のオプションを想定する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション1: 複数のランダーで合計12か所を調査する。この場合、探査装置はランダーに搭載し、直下の1か所のみを探査する。</li> <li>オプション2: 2台のローバーに、各2式の探査装置(ローバー及び探査装置とも冗長構成を意図)を搭載し探査を行う。この想定では探査装置毎に3か所を分担する。</li> <li>オプション3: 1組のローバー及び探査装置で12か所のすべての探査を行う。</li> </ul> </li> <li>探査した位置情報を合わせて取得すること。</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>これから月面上実績を蓄積する新規の探査装置であることから、その段階的な開発を想定して、探査可能数/耐久性要求を設定した。</li> <li>1式の探査装置(ローバー1台/探査装置1基)ですべての探査を行うという装置は経済性の観点からは目指すべきだが、ローバーの走破性/信頼性の観点からは不適切。段階的な達成を目指すことにする。</li> </ul> |
| 9   | 段階的な目標達成    | <ul style="list-style-type: none"> <li>上記要求事項について、以下の通り段階的な目標達成をすること。 <ul style="list-style-type: none"> <li>Step1. 探査技術の獲得 <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション1 (ランダー搭載の探査装置1基)</li> <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> </ul> </li> <li>Step2. 初期探査段階 <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション2 (2台のローバーに探査装置各2基を搭載)</li> <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</li> </ul> </li> <li>Step3. 実用探査段階 <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション3 (1台のローバーに探査装置1基を搭載)</li> <li>着月地点: LAT:89.51S, LON: 280.65EのPSR</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>着月地点: ローバー開発実現性の観点から段階的な達成を要求する。(ローバー開発については本WGの検討対象外)</li> <li>探査対象範囲: 探査装置の段階的な開発を想定し、オプション1から順に達成させることを要求する。</li> </ul>   |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

#### (4) ミッション要求の確定・装置仕様の定義

ミッション要求の見直しにより、本検討では最終的に表 2-23 に示す内容を基に検討を進めることとした。また、新たに設定された「段階的な目標達成」についての各段階における探査のイメージを図 2-40 に示す。

以上に述べたミッション要求や環境条件を基に設定した、探査装置のハードウェア仕様を表 2-24 に示す。ハードウェア仕様としては、「探査性能要求」「運用性要求」「熱インタフェース」「機械インタフェース」「電気インタフェース」「月面環境要求」の6項目について詳細化を行った。

表 2-23 見直したミッション要求

| L/N | 項目          | 要求事項  | 設定根拠   |
|-----|-------------|---|--|
| 1   | 探査対象地域/クレータ | <ul style="list-style-type: none"> <li>「ニーズ調査」で抽出したクレータ (LAT:89.51S, LON: 280.65E)のPSRを最終ターゲットとすること。この最終ターゲットにアクセスするため、技術確立のための中間地点も以下の通り設定する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション1: 極域に近いが月の昼間</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>極域 PSR の過酷な条件(日照無し、極低温)は最終目標とするものの、ローバー及び探査装置双方の開発実現性の観点から段階的な環境条件とする。</li> </ul> |

| L/N | 項目                     | 要求事項   | 設定根拠   |
|-----|------------------------|--|--|
|     |                        | <p>(14 日間)を通して日照が十分に確保できるエリア, TBD</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション 2: 最終目標の PSR より温度/日照条件を緩和できる地点(PSR 外縁を想定), TBD</li> <li>オプション 3: 最終目標地<br/>LAT:89.51S, LON: 280.65E)の PSR<br/>(注)PSR の定義:NASA の QuickMap を基に先行研究の Mazarico et al. 2011 から想定した。</li> </ul>   |  |
| 2   | 深さ方向の水資源量分布 (深さ方向分解能)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>1 か所毎に最大 6 深度の計測を行うこと。なお優先順は以下の通りとすること。 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 表面:0.0m 付近</li> <li>2. 下層:0.5m, 1.0m 深さ付近</li> <li>3. 上層:0~30cm 深さ:10cm 毎 (10,20,30cm 深さ)</li> </ol> </li> <li>深さ毎に隣接する位置を試掘しても良い。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.5m 毎の水資源マップの作製が目標になっていることから、表層, 0.5m, 1.0m の探査を実施する。</li> <li>0.5m で水の存在が確認できた場合には、産業化の観点からより浅い位置に存在する水資源に注力し、<u>深度 30cm 以下の領域を集中的に試掘する。</u></li> </ul>   |
| 3   | 深さ方向の温度分布 (深さ方向分解能、精度) | <ul style="list-style-type: none"> <li>同上</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>水分布と温度分布の関係を取る(温度情報から簡易的に水資源の存在を推定できるようにする)ため。</li> </ul>   |
| 4   | 水の検出能力                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.1wt%以下の精度での検出を行うこと</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>LUPEX 等の科学探査プロジェクトの目標値を当初ターゲットとする。</li> </ul>   |
| 5   | 試掘深さ                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>1.0m までの分布を探査する</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>産業活用が可能な上層に注力するため、科学探査プロジェクト(最大 1.5m まで)より浅く設定。</li> </ul>  |
| 6   | 試掘対象範囲                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>指定された地点を原点に、半径 150m 円内(=260×260m 矩形)を探査範囲としてできるだけ等間隔で試掘を行うこと。地点数は L/N 7 による。</li> <li>主要ターゲットは L/N 1 のクレータ/PSR とする。</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>目標とする水資源の面積(5km<sup>2</sup>, 半径約 1.2km)以内で設定。</li> <li>産業化として現実的な掘削範囲(他チームの想定)から絞り込みを想定。<br/>年間水生産目標:100,000kg <ul style="list-style-type: none"> <li>0-30cm のみを掘削する想定:<br/>約 17,800 m<sup>2</sup>/年 (半径約 75 m の範囲)</li> <li>0-100cm まで掘削する想定:<br/>約 3,600 m<sup>2</sup>/年 (半径約 34 m の範囲)</li> </ul> </li> <li>水資源が探査開始位置とずれた場所にある可能性を考慮して、探査範囲は上記面積の 4 倍(半径では 2 倍範囲)とする。</li> <li>MiniRF センサと日照量シミュレーション結果から更に有力地域を絞り込むことは可能かもしれない、この場合には十分な余裕を持てる可能性もある。</li> </ul> |
| 7   | 試掘地点数、有効な間隔            | <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲を4分割し、それぞれのブロックに対してできるだけ等間隔に3か所ずつ、合計 12 か所を探査する。この達成のため、以下のオプションを想定する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション 1: 複数のランダーで合計 12 か所を調査する。この場合、探査装置はランダーに搭載し、直下の 1 か所のみを探査する。</li> <li>オプション 2: 2 台のローバーに、各 2 式の探査装置(ローバー及び探査装置とも冗長構成を意図)を搭載し探査を行う。この想定では探査装置毎に 3 か</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>これから月面上実績を蓄積する新規の探査装置であることから、その段階的な開発を想定して、探査可能数/耐久性要求を設定した。</li> <li>1 式の探査装置(ローバー 1 台/探査装置 1 基)ですべての探査を行うという装置は経済性の観点からは目指すべきだが、ローバーの走破性/信頼性の観点からは不適切。段階的な達成を目指すことにする。</li> </ul>   |

| L/N | 項目          | 要求事項   | 設定根拠  |
|-----|-------------|--|---|
|     |             | 所を分担する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>オプション 3: 1 組のローバー及び探査装置で 12 か所のすべての探査を行う。</li> <li>探査した位置情報を合わせて取得すること。</li> </ul>  |   |
| 8   | 水以外の溶解成分の有無 | <ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S 等の成分を検出すること。</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>LUPEX 等のプロジェクトと同一目標。</li> <li>産業化の観点でも注目されている探査項目。</li> </ul>  |
| 9   | 段階的な目標達成    | 上記要求事項について、以下の通り段階的な目標達成をすること。<br><b>Step1. 探査技術の獲得</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション 1 (ランダー搭載の探査装置 1 基)</li> <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> </ul> <b>Step2. 初期探査段階</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション 2 (2 台のローバーに探査装置各 2 基を搭載)</li> <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</li> </ul> <b>Step3. 実用探査段階</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>探査対象範囲: オプション 3 (1 台のローバーに探査装置 1 基を搭載)</li> <li>着月地点: LAT:89.51S, LON: 280.65E の PSR</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>着月地点: ローバー開発実現性の観点から段階的な達成を要求する。(ローバー開発については本 WG の検討対象外)</li> <li>探査対象範囲: 探査装置の段階的な開発を想定し、オプション 1 から順に達成させることを要求する。</li> </ul> |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

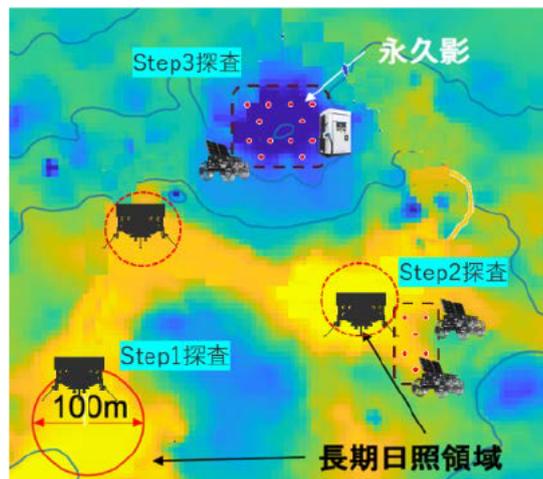


図 2-40 STEP 毎の探査イメージ

出所)ispace 社提供資料

表 2-24 設定した探査装置のハードウェア仕様

| L/N | 大項目             | 項目               | ハードウェア仕様   |
|-----|-----------------|------------------|--|
| 1   | a.探査性能要求        | 探査深度/分解能         | <ul style="list-style-type: none"> <li>最大 1.0m 深さまで探査できること</li> <li>探査する深さは 10cm 精度で設定できること</li> </ul>   |
| 2   |                 | 探査対象             | 探査対象として以下を検出すること <ul style="list-style-type: none"> <li>レゴリス中の水の質量比(wt%)</li> <li>採集深さでのレゴリス温度</li> <li>水以外の成分として CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S の有無を確認</li> </ul> |
| 3   |                 | 水の検出能力           | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.1wt%以下の精度での検出を行うこと</li> </ul>   |
| 4   |                 | 温度の検出能力          | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.1℃以下の精度での検出を行うこと</li> </ul>   |
| 5   |                 | 水以外の成分の検出精度      | <ul style="list-style-type: none"> <li>水の質量比で 1/10 の精度での検出を行うこと<br/>(例: 水が 1wt%存在しているなら、その他成分が 0.1wt%以上存在するか否か検出可能であること)</li> </ul>  |
| 6   | b.運用性要求         | 最少計測可能回数         | <ul style="list-style-type: none"> <li>段階的に計測可能回数を引き上げること</li> <li>1. 探査技術の獲得段階: 8 回</li> <li>2. 初期探査段階: 25 回</li> <li>3. 実用探査段階: 100 回</li> </ul>   |
| 7   |                 | 所要時間             | <ul style="list-style-type: none"> <li>1 回の計測当たり 30 分以内で完了できること</li> </ul>   |
| 8   |                 | 月面上運用期間          | <ul style="list-style-type: none"> <li>14 日間連続動作できること</li> </ul>   |
| 9   | c.熱インタフェース      | 機器表面温度           | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標として-234℃~+107℃の範囲で動作すること</li> <li>前段階の探査では温度条件を緩和する<br/>(着月地点に合わせて設定する。)</li> </ul>   |
| 10  |                 | 熱制御方法            | <ul style="list-style-type: none"> <li>独立熱制御(ローバーとは独立した熱収支で設計)とし、熱制御のためのヒータや放熱面を持つこと</li> </ul>  |
| 11  |                 | 赤外放射率            | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.95~0.98 を想定した設計であること</li> </ul>   |
| 12  |                 | アルベド             | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.16 を想定した設計であること</li> </ul>  |
| 13  |                 | レゴリスの熱伝導率        | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>1.5 \times 10^{-2}</math> W/mK を想定した設計であること</li> </ul>  |
| 14  | c.熱インタフェース(つづき) | レゴリスの熱伝導率比熱      | <ul style="list-style-type: none"> <li>熱伝導率比熱として以下を想定した設計であること</li> <li>50K 122J/kgK</li> <li>100K 287J/kgK</li> <li>200K 564J/kgK</li> <li>300K 773J/kgK</li> </ul>                               |
| 15  | d.機械インタフェース     | 機器サイズ            | <ul style="list-style-type: none"> <li>最大エンベロープ(収納時)幅 400×奥行 300×高さ 600 以下であること</li> <li>月面上で展開が必要な場合は展開機構も含めたサイズとし、展開方式を明確化すること</li> </ul>  |
| 16  |                 | 観測装置質量           | <ul style="list-style-type: none"> <li>10kg 以下とすること</li> </ul>   |
| 17  |                 | 観測装置の月面からの距離     | <ul style="list-style-type: none"> <li>20cm 以下を想定すること</li> </ul>   |
| 18  | e.電気インタフェース     | 機械環境条件(打ち上げ環境条件) | <ul style="list-style-type: none"> <li>NASA GEVS での一般的な耐振動条件とする</li> </ul>   |
| 19  |                 | 電力               | <ul style="list-style-type: none"> <li>10W(TBD) 平均以下とすること。ただし熱制御用ヒータ電力は除く</li> <li>28V/12V/5V 電圧安定電源供給を想定しても良い</li> <li>熱制御用ヒータの電力要求を明確にすること</li> </ul>  |
| 20  |                 | 通信インタフェース        | <ul style="list-style-type: none"> <li>RS422/UART 若しくは Space wire 接続を想定すること</li> </ul>   |
| 21  | f.月面環境要求        | 重力               | <ul style="list-style-type: none"> <li>地球表面重力の 1/6 で正常に動作すること。</li> </ul>  |
| 22  |                 | 傾斜度              | <ul style="list-style-type: none"> <li>計測時 15°以下の重力方向からの傾きを許容できること</li> <li>移動中の 15°を超える傾斜は許容できること</li> </ul>  |
| 23  |                 | 宇宙放射線            | <ul style="list-style-type: none"> <li>20krad 以下の放射線に耐久すること</li> </ul>   |
| 24  |                 | 大気圧              | <ul style="list-style-type: none"> <li>10-12~10-15 気圧(非与圧環境)でも動作すること</li> </ul>  |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

## (5) 探査装置の実現検討

### 1) 探査方式の検討

ここでは探査方式間での比較として、直接掘削(ドリル)方式と間接的なセンシング技術を比較検討した。比較検討結果を表 2-25 に示す。比較対象とする方式については、直接掘削(ドリル)方式以外に、間接的なセンシング技術としてテラヘルツセンサ、マイクロ波レーダ、中性子分光、地震波探査とした。比較項目としては、ハードウェア仕様上の対比として「探査性能要求」「運用性要求」「熱インタフェース」「機械インタフェース」「電気インタフェース」「月面環境要求」の 6 項目とした。またその他評価項目として「実現可能性」「繰り返し測定」「再現性」「正確性」「実績」の 5 項目についても比較検討を行った。その結果、各方式ではいくつかの課題や制約を抱えているものの、全体としてはドリル掘削方式が最適であることが判明した。一方でドリル掘削方式のみの場合は広域を探査することが難しいため、ローバーへの搭載等を念頭に間接的なセンシング技術と組み合わせることが効果的であると考えられた。ドリル掘削方式と組み合わせるべき間接的なセンシング技術については、表 2-26 に示すように「検知対象」「深さ情報対応」「空間分解能」「装置リソース」「技術的課題」の観点からテラヘルツセンサが有望であると考えられた。そこで、図 2-41 に示すように、広域探査としてテラヘルツセンサとの組み合わせを提案する。この場合、衛星搭載型の場合も含め、テラヘルツセンサにて広域探査にて探査箇所を絞り込み、最終的にドリル掘削を行うことが考えられる。また、ドリル掘削して得られた水の存在量を基準(グランドトゥールース)に、衛星からの観測データを組み合わせることで、センサデータの精度を向上させることも期待できる。さらに衛星からの地形情報や表面温度情報と重ね合わせることで、広域の水資源マップを生成でき、水探査の確度を高めることができる。

以上に述べた探査について、実現のタイムラインを図 2-42 に示す。タイムラインとしては大きく3つの段階に分け、それぞれで達成目標を設定した。また各段階で得られた知見を推薬プラント設備の検討にフィードバックすることを想定した。上述した「段階的な目標達成(Step1~3)」については第 2 段階までに完了するとし、最後の段階では確立した技術を基に商用探査を多数の地点で展開する状況を想定した。

表 2-25 最適な探査方式の比較

|              | 大項目         | ドリル掘削方式   | テラヘルツセンサ  | マイクロ波レーダ  | 中性子分光   | 地震波探査   |
|--------------|-------------|---|---|---|---|---|
| ハードウェア仕様上の対比 | a.探査性能要求    | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>今回の要求精度での水の検出は困難、水以外の成分の検出は困難</li> <li>深さ方向 10cm 毎の分布を取得することは困難</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>今回の要求精度での水の検出は困難、水以外の成分の検出は困難</li> <li>深さ方向 10cm 毎の分布を取得することは困難</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>今回の要求精度での水の検出は困難、水以外の成分の検出は困難</li> <li>深さ方向 10cm 毎の分布を取得することは困難</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>今回の要求精度での水の検出は困難、水以外の成分の検出は困難</li> <li>深さ方向 10cm 毎の分布を取得することは困難</li> </ul> |
|              | b.運用性要求     | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
|              | c.熱インタフェース  | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標の広い温度範囲への対応に課題</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標の広い温度範囲への対応に課題</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標の広い温度範囲への対応に課題</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標の広い温度範囲への対応に課題</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終目標の広い温度範囲への対応に課題</li> </ul>  |
|              | d.機械インタフェース | ○   | ○   | ○   | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ランダーに地震発生機要</li> <li>質量超過の可能性大</li> </ul>                                  |
|              | e.電気インタフェース | ○   | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>比較的、大電力が必要</li> </ul>  | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>比較的、大電力が必要</li> </ul>  |
|              | f.月面環境要求    | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| その他評価項目      | G.実現可能性     | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ローバー用の小型モジュールを開発要</li> </ul>   |
|              | H.繰り返し測定    | <ul style="list-style-type: none"> <li>物理的に掘削するため、試掘可能回数には制約あり。</li> </ul>              | ○   | ○   | ○   | ○   |
|              | J:再現性       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
|              | K:正確性       | ○   | <ul style="list-style-type: none"> <li>最も正確に水の存在量を計測可</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>観測データからの間接的な確認のみ</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>観測データからの間接的な確認のみ</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>観測データからの間接的な確認のみ</li> </ul>  |
|              | L:実績        | <ul style="list-style-type: none"> <li>海外では開発実績あり</li> <li>国内でも先行開発あり</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>海外探査衛星に搭載実績</li> <li>Tsukimi 衛星に搭載予定</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>地球観測衛星で実績 (地球表面の水検出)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>海外探査衛星に搭載実績</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>計画段階のみ。地上実験実績あり。</li> </ul>  |
| 総合評価         | 最適の方式       | <ul style="list-style-type: none"> <li>単独では性能に不足</li> <li>ドリル方式とのコンビネーションに強み</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>単独では性能に不足</li> <li>ドリル方式とのコンビネーションに強み</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>単独では性能に不足</li> <li>ドリル方式とのコンビネーションに強み</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>単独では性能に不足</li> <li>ドリル方式とのコンビネーションに強み</li> </ul>                           |   |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

表 2-26 探査装置の組み合わせ運用

| 探査方式   | テラヘルツ           | マイクロ波レーダ<br>(サウンダー)       | 中性子分光                     | 人工地震波                  | 短波長赤外レーザ          | 短波長赤外センサ        |
|--------|-----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|
| 検知対象   | 表面・月中からの輻射エネルギー | マイクロ波を照射し、月中からの反射エネルギー    | 月面から飛来する熱外中性子/熱中性子量       | 人工地震波の速度               | 月表面からのレーザ反射光スペクトル | 月表面からの反射光スペクトル  |
| 深さ情報対応 | 周波数検波により可能      | 数 m 程度の深さまでの情報            | 10cm~1m 程度の深さまで可能         | 時間遅れにより検出可能            | 不可                | 不可              |
| 空間分解能  | 数 cm 程度         | 数 cm 程度                   | 数 m 程度                    | 数 10cm~数 m オーダー        | 数 cm~10cm         | 数 10cm~数 m      |
| 装置リソース | 数 kg 程度         | 数 kg 程度                   | 数 kg~10 数 kg 程度           | 数 kg 程度                | 数 kg 程度           | 数 kg 程度         |
| 技術的課題  | 月中深さ方向の情報精度の検証要 | 氷は直接反射特性を示さないため、水の存在は探査困難 | データベースの整備が必要。水分量の検出精度を検証要 | ハード面ではなく、データベースの整備が必要。 | 日照領域の表面での精度を検証要   | 日陰時には使用できず光源が必要 |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

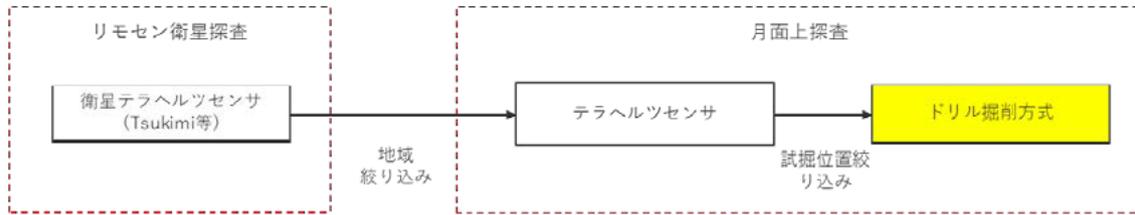


図 2-41 水探査装置の組み合わせ案

出所)ispace 社提供資料

| 探査装置の実証計画 |  | 水資源探掘チームへの情報入力  |
|-----------|--|---|
| 2025年~30年 | <ul style="list-style-type: none"> <li>サービスゾーンを中心に探査性能（水の存在量・分布及び不純物検出等）の実証</li> <li>本WGでのミッション要求のうち、<b>Step1及び2の達成</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Step1. 探査技術の獲得：ランダー搭載で1か所を試掘</li> <li>Step2. 初期探査段階：ローバー搭載で複数個所を試掘</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>レゴリスに含まれる水分量、分布の情報を共有</li> <li>水資源マップ（初期版）の提供</li> </ul> |
| 2030年~35年 | <ul style="list-style-type: none"> <li>資源ゾーンでの商用探査を実用段階に成熟させる</li> <li>本WGでのミッション要求のうち、<b>Step3の達成</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Step3. 実用探査段階：PSRで複数地点を試掘可能にする</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>資源ゾーン(PSR)内の水分分布情報を提供</li> </ul>                         |
| 2035年以降   | <ul style="list-style-type: none"> <li>更に多数の地域での水資源探査を推進</li> <li>水資源マップと合わせて多数の地点にランダー/ローバーを送り込み試掘探査範囲を広げていく</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>商用探掘に適した地域の情報提供</li> <li>水資源マップ（完成版）の提供</li> </ul>       |

図 2-42 実現のタイムライン

出所)ispace 社提供資料

## 2) ドリル掘削方式の具体事例

ここではドリル掘削方式のうち、商用化に向けた具体的な研究が先行している事例として LSW について述べる。LSW は図 2-43 に示すようにドリル、気化器、ガス分析計から構成され、①繰り返し、②再現よく、③高感度(0.1wt%以上)で水分濃度を計測可能な探査機器である。また LSW は商業探査を目的とし、必要最低限の機能実装による軽量化および量産によるコストの低減を目指している。LSW は商用・量産化のための探査機能に集中している点で、表 2-27 に示すように LUPEX/REIWA (JAXA・ISRO)<sup>5</sup>や PRIME-1(NASA)<sup>6</sup>、PROSPECT(ESA)<sup>7</sup>等の先導的探査機器とは志向が異なるものである。

### ● LSW の特徴

- サイズ及び質量:10kg、0.6x0.3x0.3m (計画値、モジュール単体)
- 掘削深度:最大 500 mm、誤差 50mm
- 分析方式:TDLs 微量水分分析計 (揮発ガス水分量)

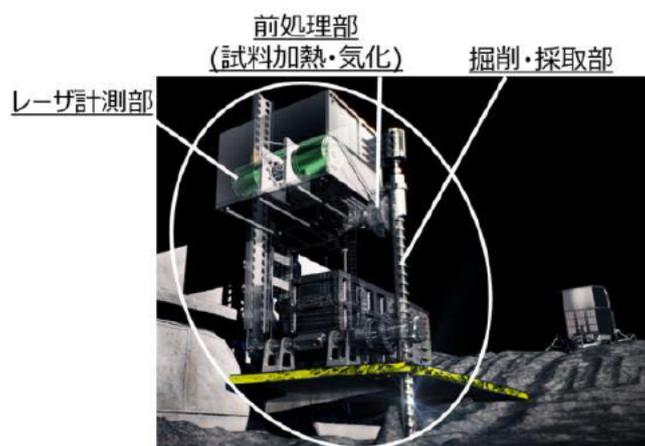


図 2-43 LSW の機器構成

出所)永瀬ほか,「将来の月面水資源利用を想定した試掘・計測技術の要素試験」,第 66 回宇宙科学技術連合講演会,3J11 (2022)

表 2-27 ドリル掘削探査装置の比較

| 比較項目 | LSW(商用・量産型探査装置) | 先導的探査機器                    |
|------|-----------------|----------------------------|
| 性能   | 「水」の検出に特化       | 多機能/高機能を追求                 |
| 量産性  | 小型・低コスト・短期製造可   | 量産を目指していない<br>大型・高価・長期製造期間 |
| 実現性  | 地上で確立技術あり       | 地上で確立技術あり                  |
| 輸送費  | 小型洗練化により低輸送コスト  | 大型であり、輸送コスト高               |

出所)ispace 社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

<sup>5</sup> <https://www.exploration.jaxa.jp/program/lunarpolar/>(2024 年 3 月 25 日閲覧)

<sup>6</sup> <https://www.nasa.gov/mission/polar-resources-ice-mining-experiment-1-prime-1/>(2024 年 3 月 25 日閲覧)

<sup>7</sup> <https://exploration.esa.int/web/moon/-/59102-about-prospect>(2024 年 3 月 25 日閲覧)

## 2.1.5 今後の検討課題

### (1) 推薬プラント関連チーム(チーム 1 及びチーム 2)

今年度までの検討を通じて、水素 WG と電力 WG 間での密な連携が必要であることが明らかになった。次年度は水素 WG と電力 WG で一体となり、月面上でのエネルギーシステムの全体像を検討する予定である。

来年度の検討事項案として、主に電力 WG と検討を深める検討事項が挙げられる。電力供給方法を踏まえた推薬プラントの運用方法の詳細化の方向性を以下に示す。

- 発電量(給電量)の変動を踏まえたプラント起動・停止の稼働パターンの検討
- 運転停止・待機中の保温方法
- プラントシステムの遠隔運転や遠隔保全などの維持・制御方法、等

特に、発電量(給電量)の変動を踏まえたプラント起動・停止の稼働パターンの検討として、外部条件にて設定した地点 1、2 における実際の発電プロファイルの取得を行った。図 2-44 にそれぞれのクレータ地点における日照量の推移を示す。次年度には当該プロファイルに基づいて、必要な供給量を満足しつつ、推薬プラントの最適な稼働パターンについて検討を行う予定である。

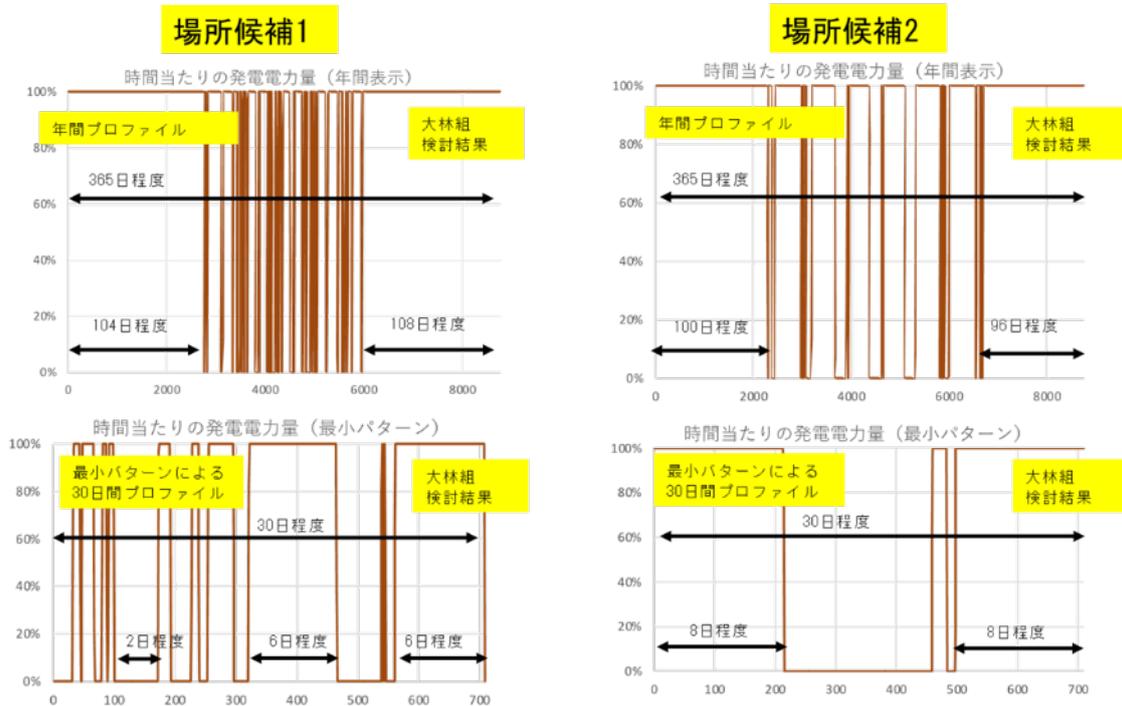


図 2-44 各地点における日照量の推移

出所)大林組提供資料

### (2) 水資源探査関連チーム(チーム 3)

今年度の検討では、水資源の探査に係るニーズを基にミッション要求を設定し、環境条件を考慮しながら探査機器のハードウェア仕様を設定した。また複数の探査方式について比較検討し、本検討におけ

る商用探査としてはドリル掘削方式での直接探査が最適であるとの結論を得た。最後に、今後の検討課題として抽出した6点を以下に示す。

- ① ドリル掘削方式と他センサ探査方式との連携
  - ドリル掘削方式以外のセンサ探査方式は主探査方式にはならないが、より広域を効率よく探査するという得難い長所がありドリル掘削方式との協同探査が更に効果的である。
- ② 探査を実現するためのローバーの仕様作成/開発
  - 広域の直接探査に向けては走破性、長距離走行性を確保したローバーの新規開発が必須である。
- ③ 事前地形探査の実現
  - ローバーの走破性確保、将来的なプラント建設のためにも詳細な地形探査は必要である。また既存の衛星リモセンデータの活用検討から始め、より高解像度なりモセン衛星の導入や、ローバーでの地形探査が必要である。
- ④ PSR での稼働エネルギー確保
  - 新たな送電方法(無線送電や充電ステーション)の確立、若しくは高出力電池の活用が必要である。
- ⑤ 月周回衛星からのデータと、月面上でのグランドトゥルース情報とのコリレーション方法の確立
  - 地形データの詳細化と合わせ、リモセンデータから有望地域の絞り込みを進めていくことが必要である。
- ⑥ 位置情報の高精度化
  - 採掘地の決定のため、探査した場所を高精度で位置決定できることが必要である。

## 2.2 電力に関する技術課題整理

### 2.2.1 検討の全体像

#### (1) 技術課題整理

電力に関する技術課題整理では、発電から送電までの一貫したネットワークとして検討した。電力の供給源は基本的に月面上および月周辺軌道上での太陽光発電とした。最終的な月面エネルギーのアーキテクチャとしては、地上における電力供給グリッドを出発点とし、月面の特殊性を考慮して構築した。加えて水素 WG の検討の進捗に伴う電力要求を電力 WG の検討に反映した。

#### (2) 調査の実施体制

令和 4 年度と同様に、以下の4つの構成システムに分けて実施した。

- 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

各システムにおける検討メンバおよび全体の実施体制について表 2-28 に示す。

表 2-28 電力 WG 実施体制

| チーム体制                                 | 業務  | 電力WG 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                              | ・業務管理<br>・スケジュール管理<br>・電力WG全体とりまとめ  | *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、その他新規アイデア等 | *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WG全関係者は全員このチームの構成員となる)    |
| 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>・月面上受電システム(含レクテナ)  | *JAXA宇宙科学研究所<br>京都大、電通大、早稲田大、東洋大、金沢工業大、テクノソルバ、日本飛行機                                     |
| 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  | *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 |

注 \*はリーダーを示す

出所)J-spacesystems

### (3) 各構成要素の検討

電力を供給するための主要な機能は発電及び送電であるが、これらの性能が電力供給先の要求を満たすためには需給調整を行う必要がある。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、検討を実施した。供給電力は、令和4年度に引き続き代表値として10kWをベースとして検討を実施し、その規模と成立性を確認することとした。なお、月面においては本来の電力の効率だけでなく、地球から設備や機材等を輸送する必要があることから、輸送効率の観点で地上の電力システムとは異なる制約があり、質量も重要なファクターとなることに配慮した。

図2-45に電力供給システムの機能ブロック図を示す。電力WG側における電力供給想定については、月面におけるインフラの構築を目的とすると共に、水素WG側からの水素製造関連プラントにおける電力要求及び施設の設置条件も検討した。

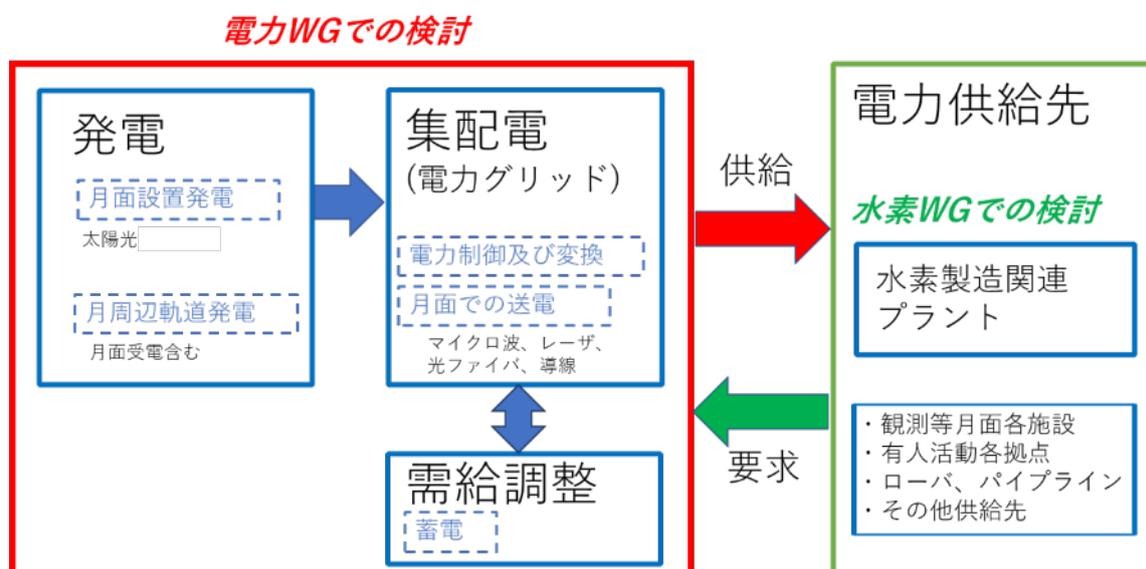


図 2-45 月面での電力供給システム機能ブロック図

出所)J-spacesystems

以降では、月面電力供給全体システム、月周軌道太陽光発電システム、月面設置発電システム及び月面上での送電システムの構成システム毎に検討結果を示したうえで、最後に今後の検討課題をまとめる。

#### 2.2.2 月面電力供給全体システム

##### (1) 月面電力供給システムへの要求及び制約条件の整理

地上におけるインフラストラクチャとしての電力供給システムは、図2-46に示すような形となるのが一般的である。月面での人間の活動を支える電力インフラストラクチャを考える際、地上と同様の構成を基本として検討を実施する必要がある。

現在の宇宙システムにおける「電力系」は、電力システムとして最大規模である国際宇宙ステーション

が代表的なものである。国際宇宙ステーションにおいては太陽電池および蓄電池を建物内に配置するという思想で構築されている。発電と消費が直結しており、さらに日照時は太陽電池で発電して日陰時の電力供給を確保するために再生型燃料電池やリチウムイオン電池等の蓄電池により日照時に電力を蓄電するというものである。

一方、地上における社会活動を支える電力供給インフラストラクチャは、複数の発電方式にて発電された電力を送電し、変電所と送電線から構成される集配電を担う電力グリッドがあり、さらに発電と消費の差を埋めて消費者へ送電する電力の質(電圧及び周波数)を安定させる需給調整を担う機能から構成される。発電所は急激な電力需要の変化に対応した発電量の調整には不向きであるため、需給調整はクイックな対応が可能な揚水発電所や蓄電池等が担っている。また地上における広域での需給調整は地域間の電力の融通によっても実施している。また省エネも兼ねて鉄道会社等ではフライホイールによる調整も実用化されている。

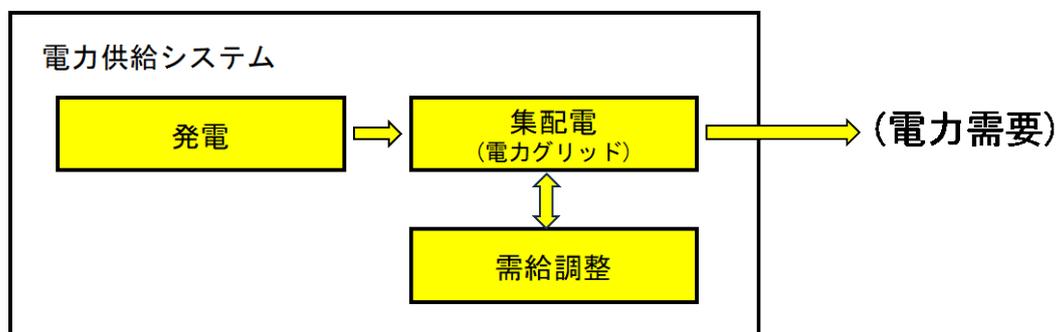


図 2-46 社会のインフラストラクチャとしての一般的な電力供給システムの機能構成

出所)J-spacesystems

月面においては、将来的に多くの人間による社会活動が実施されるという前提で考える必要がある、そこで月面での電力システムは、国際宇宙ステーション等の宇宙システムの電力供給系ではなく、地上における「電力供給グリッド」という観点を出発点とし、月面や宇宙システムとしての特殊性を考慮してどのように実現するかという課題設定をすることとした。

### 1) 出発点とするにあたり留意すべき地上の電力システムの特徴

- 電力グリッドを構成し、さらに発電量と消費電力を一致させるためにその管理を実施している。余剰電力を吸収し、不足した場合の補充電力の供給を行うシステムが整備されている。
- 50Hz 又は 60Hz の交流である。
- 停電の発生を前提とし、停電への短時間対応はローカルな蓄電池による。
- 長距離送電は電圧を高くすることにより損失を減らす対応をしているが、居住エリアの電圧は 100V~240V 程度の低電圧である。

## 2) 月面において考慮すべき要求及び制約条件の整理

- 地球からの輸送コストを考慮し、「重量効率」が重要である。
- 真空中であることから、プラズマに起因する放電が課題である。現在電圧として実用的に確立しているのは120VDCまでであり、400VDC等以上は開発課題である。
- 上記2点の課題により、長距離の送電はマイクロ波又はレーザーによる無線方式が基本となるが、近距離及び屋内は有線方式による国際宇宙ステーションの技術の適用が可能である。
- 地上の1/6の重力及びレゴリスの影響を考慮する必要がある。
- 居住区等、人間の生命維持に関する電力供給については複数で、同じ原因による故障が発生しない、方式の異なる複数の電力供給システムにて供給することが原則となる。米国の有人宇宙システムの安全要求では、Two Fault Tolerant (2FT)<sup>8</sup>が要求されている。例えば国際宇宙ステーション等の少人数の場合は全員地球への退避が可能な宇宙船が常にスタンバイされているが、月面に多くの人間による社会活動がなされる時代となった場合は、全員退避は無理なため、電力供給を2FTとする必要がある。
- 発生した熱は冷却よりも、その熱量を蓄え活用に留意する。またその他の冷却ニーズとの共用が必要である。

## (2) 月面電力供給全体システム構成の概念

### 1) 月面電力供給全体システム構成

月面での活動シナリオとして JAXA が作成した「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」<sup>9</sup>において、月面での有人活動は以下のように記載されている。

- 月面での有人活動は、人類がさらに太陽系における活動の展開を図るための水素エネルギーの製造及び科学観測設備の設営等、さらにそれらの運営に携わる人類の生活である。
- そのため極地方での永久影領域(Permanent Shadow Region;PSR)及びその近辺で、水探査とこれを受けた水素と酸素の製造、並びにそれに携わる人間の生活を維持するための電力の供給が必要である。

上記を前提とした、月面電力供給全体システム構成を図 2-47 に示す。

---

<sup>8</sup> Two Fault Tolerant, 二つの異なる原因による故障が同時に発生したとしても機能停止が生じないように、独立した異なる3つの方式により機能するようにすること

<sup>9</sup> JAXA、日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021、令和4年3月、<https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>

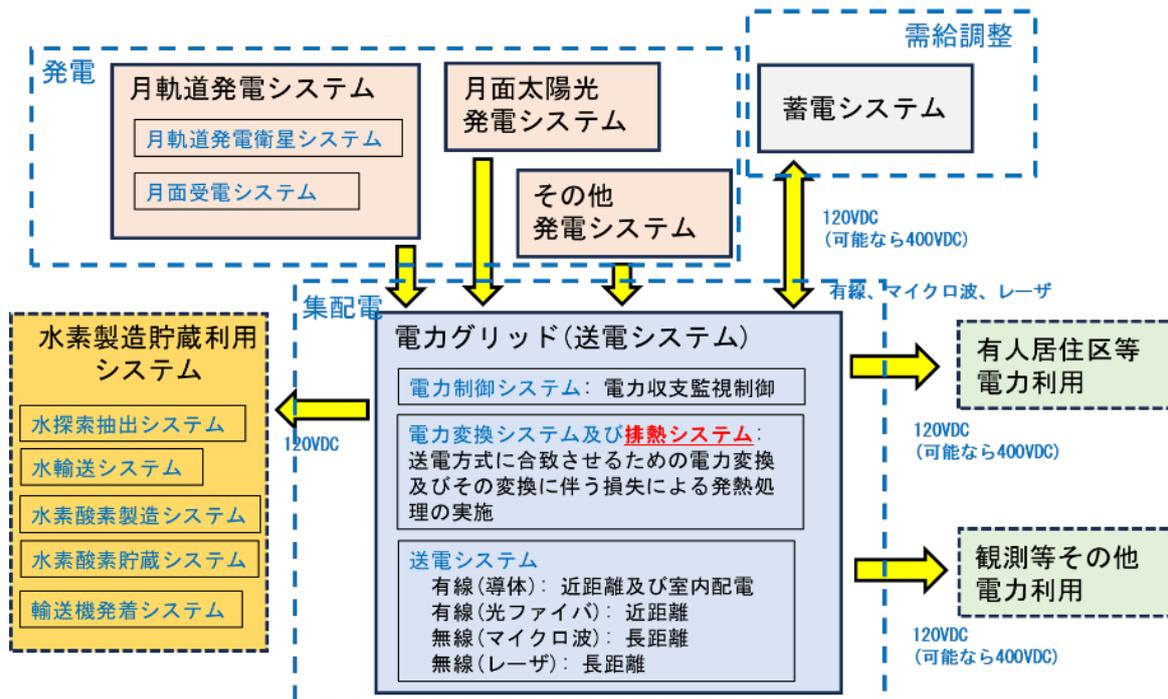


図 2-47 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 に基づく月面電力供給全体システム概念

出所)J-spacesystems

## 2) システム構成を検討するための要件整理

月面で具体的に電力システムを構築するための要件を整理すると次の通りとなる。

- 有人居住区に対しては 2FT の電力供給となるようにシステムを整備する。
- 発電電力量と消費電力量は一致するように電力グリッドの「電力制御システム」により制御する。過不足の電力は蓄電システムにて調整する。
- 送電の方式としては、近距離及び室内配電は導体、長距離は無線とする。
- システム維持用電力断時のバックアップ用蓄電池は随所に設ける。
- 長距離無線伝送はマイクロ波及びレーザー光の中から最適な方式を選択する。
- 各種方法にて送電された電力は、最終的には利用者の直近にて直流電力(120VDC、又は技術開発により 400VDC)に変換し、導体ケーブルにて送電される。
- 施設設備を無停電で維持するために必要な小規模小電力の蓄電は、現状の技術レベルを踏まえ信頼性の観点からリチウムイオン電池による方式とする。
- 電力変換の箇所では、損失があり排熱を必要とするので最適化を図る。

また、水素製造設備としてのシステム構成を図 2-48 に示す。

● 検討のポイント

- インフラ・周辺設備を含め、関連する設備を極力もれなく抽出し各ゾーンに配置した。
- 引き続き電力WGと協議し、特に取合・共通設備の要件を明確化していく。

水素WG所掌設備  
 電力WG所掌設備  
 電力WGとの取合設備、共通インフラ

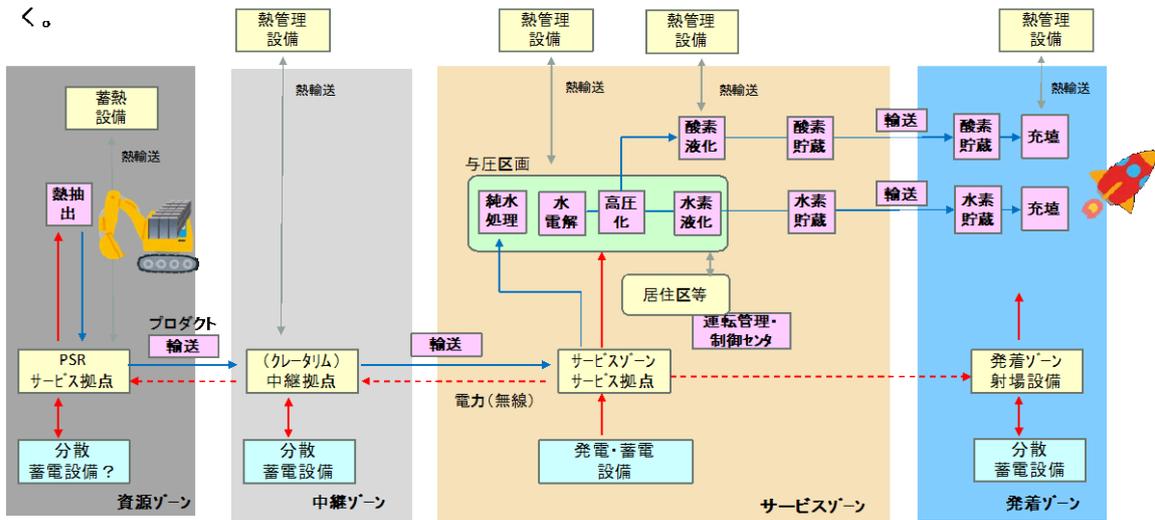


図 2-48 水素製造システム構成

出所)水素 WG

有人居住区からの電力要求は電力システムとして 10kW と想定してシステム検討を進めた。ここまで述べた要求条件に基づき昨年度検討の全体システム構成をアップデートした結果を図 2-49 に示す。この図は、全ての可能性のある構成システムを含めた基本システム構成を示している。

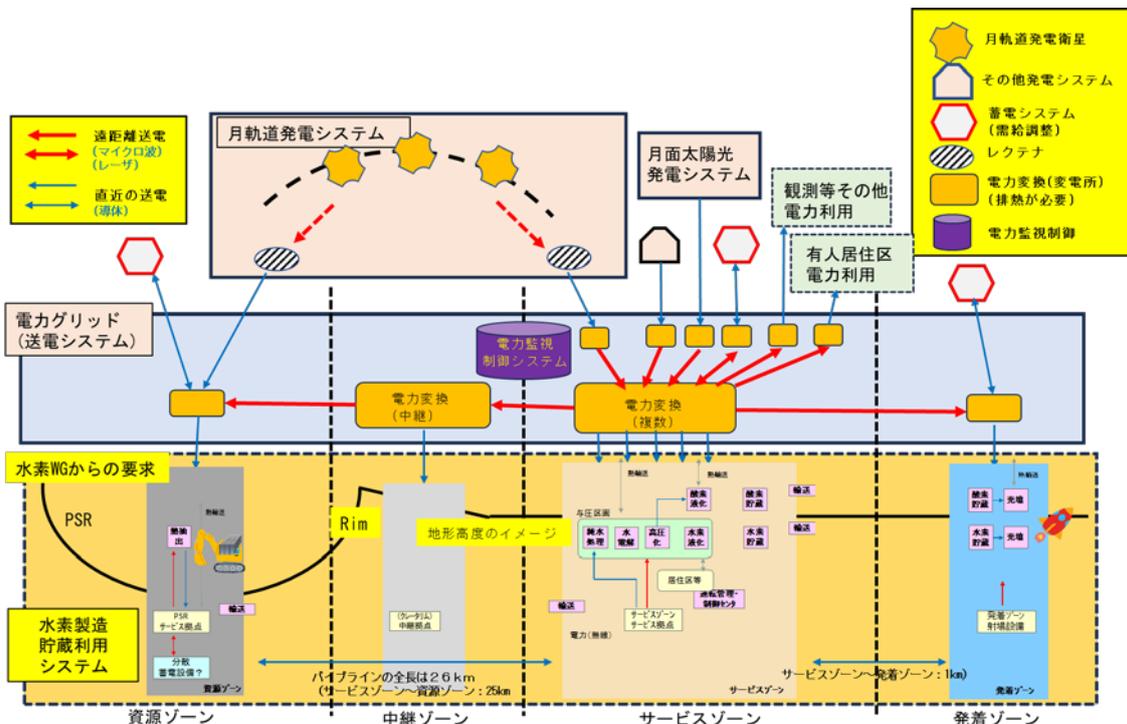


図 2-49 水素からの電力要求に対応する電力供給システム構成(基本システム構成)

出所)J-spacesystems

また、月周辺軌道における太陽光発電システム(以下、本項では「月軌道発電システム」と呼ぶ)の受電レクテナのサイトとしては、水素製造設備や有人居住区の有るサービスゾーン近辺のみならず、PSRの中にも設置し、月軌道発電システムの特徴である送電ビームの制御により送電先を選択可能であることの利点を活用出来るようにした。

### (3) 水素側の電力供給要求

水資源採掘場所の候補については、水素 WG での検討結果に従いシャクルトンクレータ近傍の Connecting Ridge(候補①)と、Nobile Rim1(候補②)の2か所(図 2-50 参照)とし、月面設置発電システム建設場所はその候補地点付近で日当たりの良い場所に設定されるサービスゾーンとした。水の処理を行う水素製造システムのアーキテクチャについては図 2-48 に示す通りである。

なお、水素製造側のシナリオにおいては、電力システムについて、サービスゾーン、居住ゾーン及び観測ゾーンについての設置場所についての設定は特に無いことから、送電方式も含め昨年度の検討結果をベースとして検討を始めることとした。

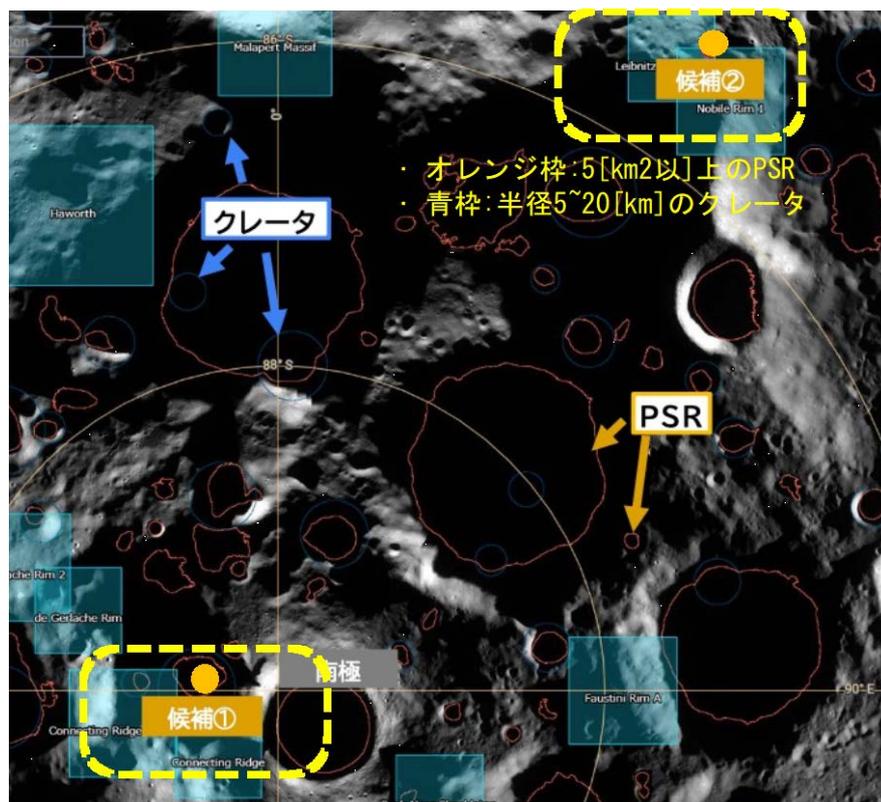


図 2-50 前提とする候補地

出所)水素 WG

#### (4) 電力供給全体システムの構成検討

昨年度は月軌道発電システムが直接電力グリッドには組み入れられていなかったため、今年度はそちらも組み入れた電力供給システムを検討した。具体的には次の 2 ケースについて電力供給全体システムを設定し、それに基づいて個々の構成システムの検討に展開した。なお、有人居住区における 2FT 実現のためには、月面太陽光発電システム、月軌道発電システムの他にもう一系統の電力供給源が必要であり、今後の検討課題となる。

##### ケース 1: 従来のシステム構成のアップデート

- 昨年度と同様に月面太陽光発電システムと、その日陰時の電力をカバーする蓄電池により水素を製造する。
- 月軌道発電システムは有人居住区の電力の 2FT を実現するためだけに使用するものとする。

##### ケース 2: PSR 内は月軌道上からの電力に頼るシステム

- 資源ゾーンの電力は全て月軌道発電システムの電力にて賄い、サービスゾーンと発着ゾーンの水素製造向けの電力は月面太陽光発電システムと、その日陰時の電力をカバーする蓄電池により賄う。
- 有人居住区の電力の 2FT の一部を実現するために、月軌道発電システムの発電電力を充てることとする。月軌道発電システムはビームの制御により複数の受電レクテナに切り替えて送電可能なため、大規模なレクテナは PSR にて水素探査に利用する他に、小規模なレクテナをサービスゾーンにて有人の電力供給のため設置することとする。

検討項目は次の通りとした。

- 電力システム構成
- 発電システムの規模(重量と電力)
- 電力グリッド(送電システム)の送電電力と重量
  - 単独で存在する「電力変換器」の重量について、昨年度はカウントしていなかったため、今年度は考慮事項に追加(国際宇宙ステーション等での電力制御向け大電力 DC/DC コンバータ等の実績の質量を目安とする)
  - 昨年度の電力グリッドでは軌道上発電システムが明確に取り込まれていなかったため、今年度は追加
- 上記の検討結果に基づきそれぞれのケースの特質の比較検討を実施

なお、有人居住区の必要電力は 10kW を想定する。またケース 2 はあくまでも議論を開始するための問題提起であり、規模感を示し課題を整理することを目的とした。図 2-51 にケース 1、図 2-52 にケース 2 の検討結果を示す。

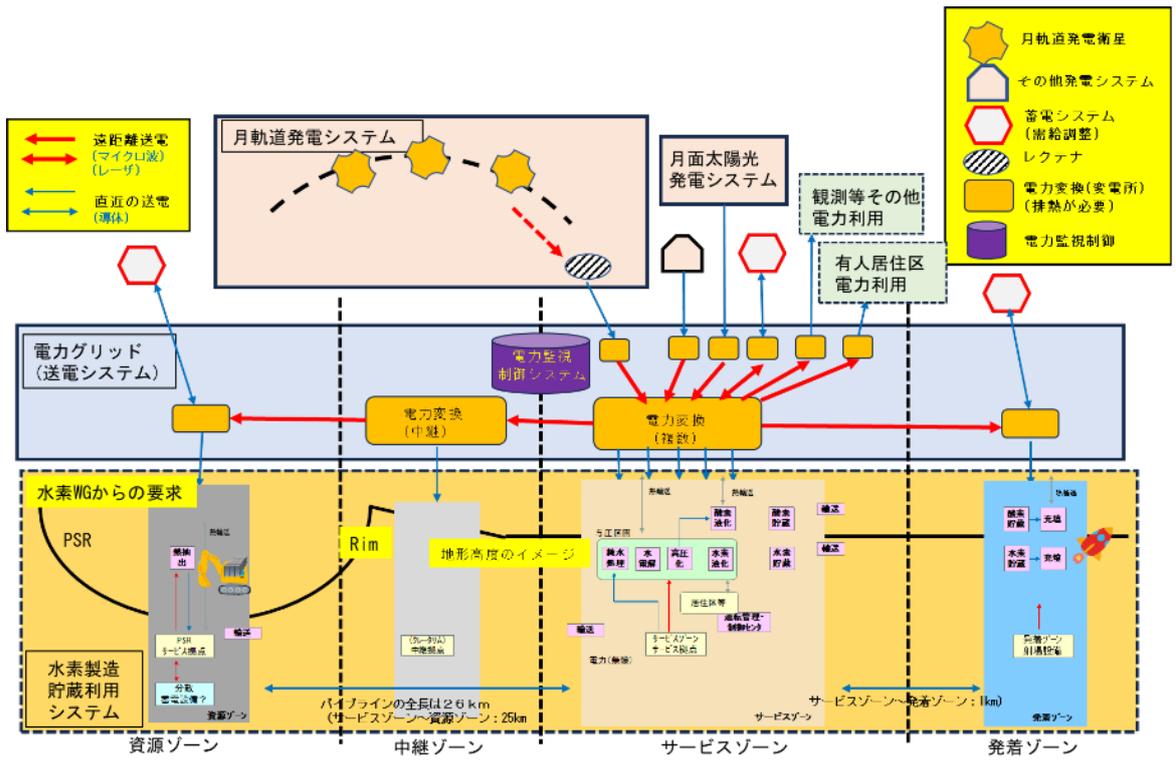


図 2-51 ケース 1 従来のシステムのアップデートのシステム構成

出所)J-spacesystems

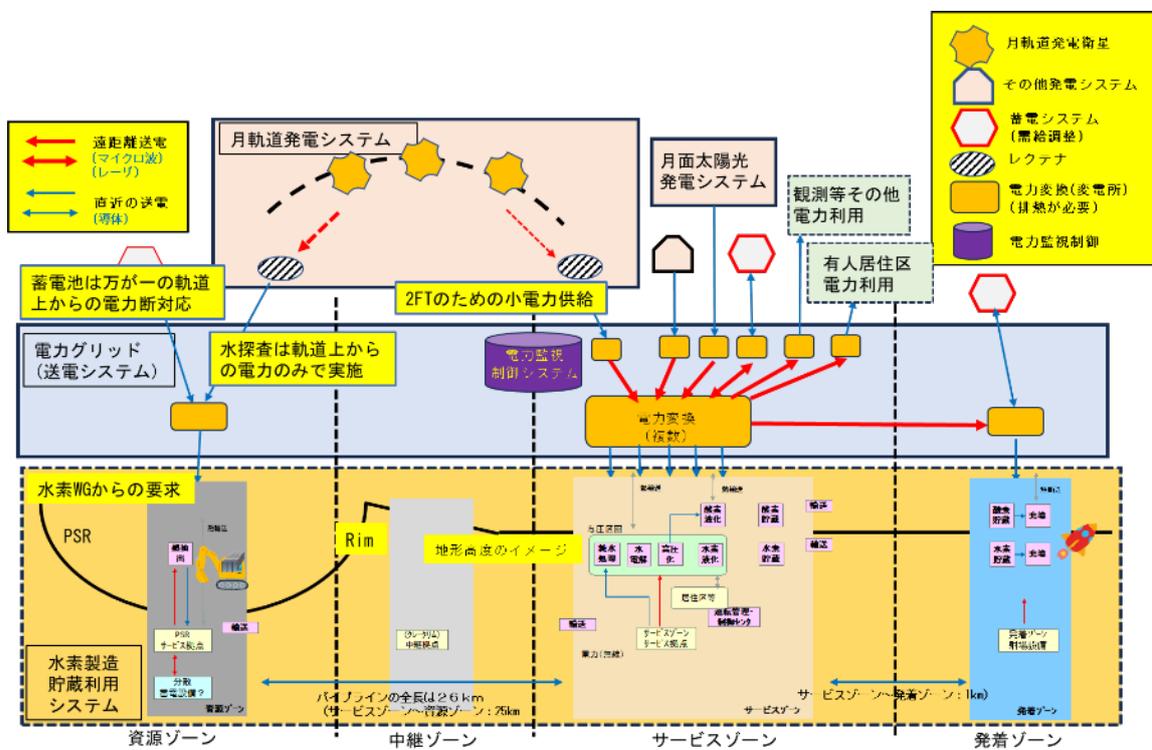


図 2-52 ケース 2 PSR 内は全面的に軌道上からの電力に頼るケースのシステム構成

出所)J-spacesystems

ケース 1 において、技術の確立を考慮した段階的整備となることを考慮すると、月軌道発電システムの規模は、月面上太陽光発電の規模が 100kW 程度可能となった時期においても 10kW 程度の電力供給の規模となることが想定される。そのため、まずその電力規模にて賄える有人居住区への、月面太陽光発電に加えての生存確保の電力として利用することを想定する。

ケース 2 は、さらに技術開発実証が進み、月軌道発電システムの電力供給が常に 100kW を超えるとなった段階を想定する。その段階においては 100kW の電力を直接資源探査ゾーン(PSR)に送電し、直接資源探査の電力として利用可能となると想定した。このことによりサービスゾーンにて受電し、さらに資源探査ゾーンへ送電するということによる電力の損失を半減させることが可能となる。サービスゾーンと資源探査ゾーンの送電距離を考慮すると送電は無線方式となるため、効率はせいぜい 25%から 50%程度となり、大きな電力の損失が発生してしまうためである。なお、このケース 2 においてもサービスゾーンの有人居住区の近傍には 10kW 程度の月軌道発電の電力を受電するレクテナを設置し、月面太陽光発電に加えて有人居住区への生存確保の電力とすることを想定した。

なお、ケース 1、ケース 2 いずれにおいても、地上での変電所に相当する電力変換設備における損失が発熱の原因であり、排熱が課題となる箇所である。水素側への受け渡しの箇所の近辺であれば、水素製造時の排熱の課題とともに協力して対処方法について検討が可能となる。さらに、運用モードを考慮し、水素側の保温要求との相互補完も可能と考えられる。

## (5) 各発電方式特色の整理

発電方式としては、下記の2方式を候補として検討した。

- ・月面設置太陽光発電システム
- ・月軌道発電システム

水素製造において、電力供給全体システム側から常に一定の電力供給を求められた場合、発電出来ない期間(たとえば太陽光発電の場合の日陰時)は燃料電池等により供給を継続する必要がある。しかし蓄電池は重量が嵩むため、重量効率を考慮すると、電力プロファイルを考慮し、需要者側である水素製造の必要な電力パターンや制約等を総合的に検討することにより、最適化を図ることが可能と想定される。そのため、以降では各方式について、電力プロファイルの特色を整理した。

### 1) 月面設置太陽光発電システム

極地方である場所候補 1 及び 2 について、その年間を通じた発電プロファイルを図 2-53、図 2-54 に示す。

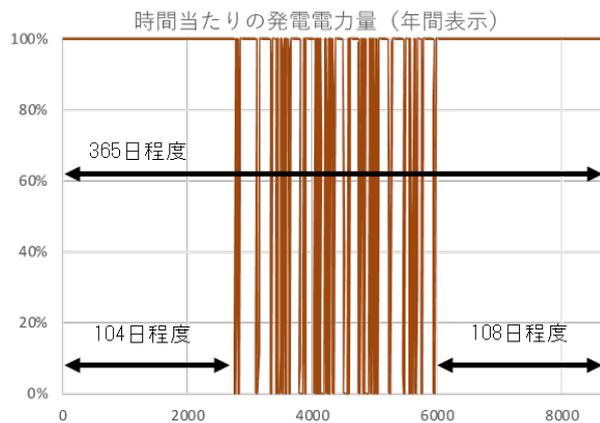


図 2-53 月面太陽光発電システムの年間を通じての発生電力プロフィール(候補地1)

出所)大林組作成

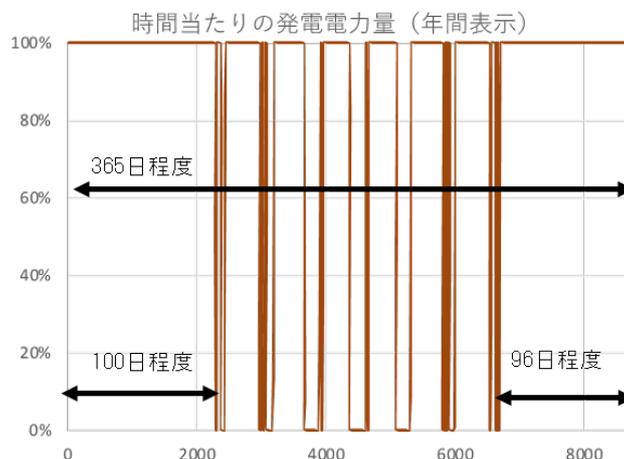


図 2-54 月面太陽光発電システムの年間を通じての発生電力プロフィール(候補地2)

出所)大林組作成

月面太陽光発電システムの特色の分析は次の通りである。

- 月面太陽光発電システムは、南極地域であればほぼ月面水平線方向から照らされるため、太陽光を遮蔽する地形から太陽が顔を出すと100%の発電が可能となる。
- 太陽と月の動きについての時刻は正確に予測できるため、太陽電池にいつ太陽光が照射されるかについては正確に予測が可能となる。このため、発電プロフィールは正確に予測でき、計画通りに電力使用が可能となる。

## 2) 月軌道発電システム

月極域への送電のための軌道として、遠月面高度 1,000km、5,000km、10,000km の 3 ケースを検討した。各軌道の概要と必要な機体数について表 2-29 に示し、その軌道を図 2-55 に示す。なお、送電対象は候補地1、候補地2とするが、候補地間での差はほぼ無い。

表 2-29 月軌道発電システムの候補案

| 遠月面高度   | 最大EI   | 周期           |      | 45度の可視時間 |      | 機体数 |
|---------|--------|--------------|------|----------|------|-----|
|         |        | (s)          | (h)  | (s)      | (h)  |     |
| 1000km  | 84.195 | 9820.1<br>83 | 2.7  | 1426     | 0.39 | 6.9 |
| 5000km  | 87.116 | 25189.<br>72 | 7.0  | 11945    | 3.3  | 2.1 |
| 10000km | 87.484 | 50145.<br>45 | 14.0 | 33294    | 9.2  | 1.5 |

出所) JAXA/ISAS

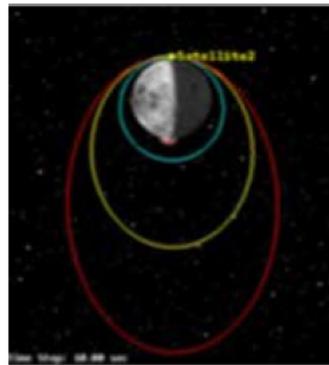


図 2-55 月軌道発電システムの軌道の例

出所) JAXA/ISAS

10kW 送電を想定した場合の電力プロファイルは図 2-56 のようになる。なおこの電力プロファイルの動作は、 $\tau=1(=63\%)$ 、周波数 50 GHz、受信電力 10 kW 時の時間-受信電力変化を示す。

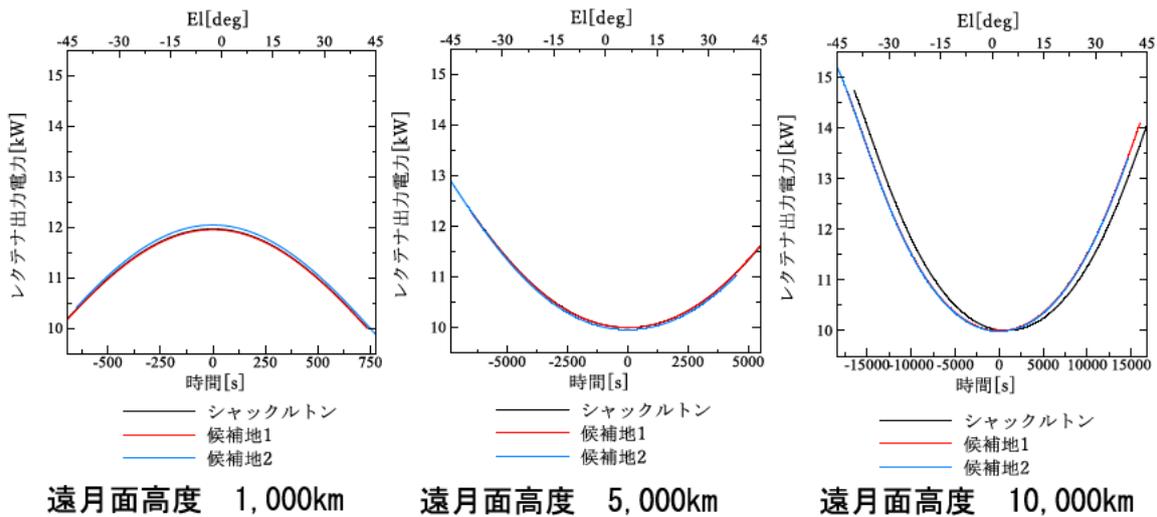


図 2-56 可視時間中の月軌道発電システムの電力プロファイル

出所)JAXA/ISAS

どのケースも変化はあるものの、ほぼ一定の 10kW 程度の電力を供給している。表 2-29 に示す基数を軌道上に設置すれば、常にほぼ一定の電力が供給可能である。そのため、100kW が供給可能な電力レベルを供給可能となれば、現在想定される PSR 内の電力全てを賄えることとなる。

## (6) 発電方式の特色を生かした電力供給システム構成の事例

一つの事例として、月面太陽光発電システムによる水素製造に関し、太陽光による発電期間のみ製造するとした場合の電力供給システムの構成を図 2-57 に示す。

この場合、月面太陽光発電システムに装備されていた蓄電池は不要となる。また、蓄電池を全て省略出来なくとも、その規模を削減することが可能であり、重量削減に貢献可能である。

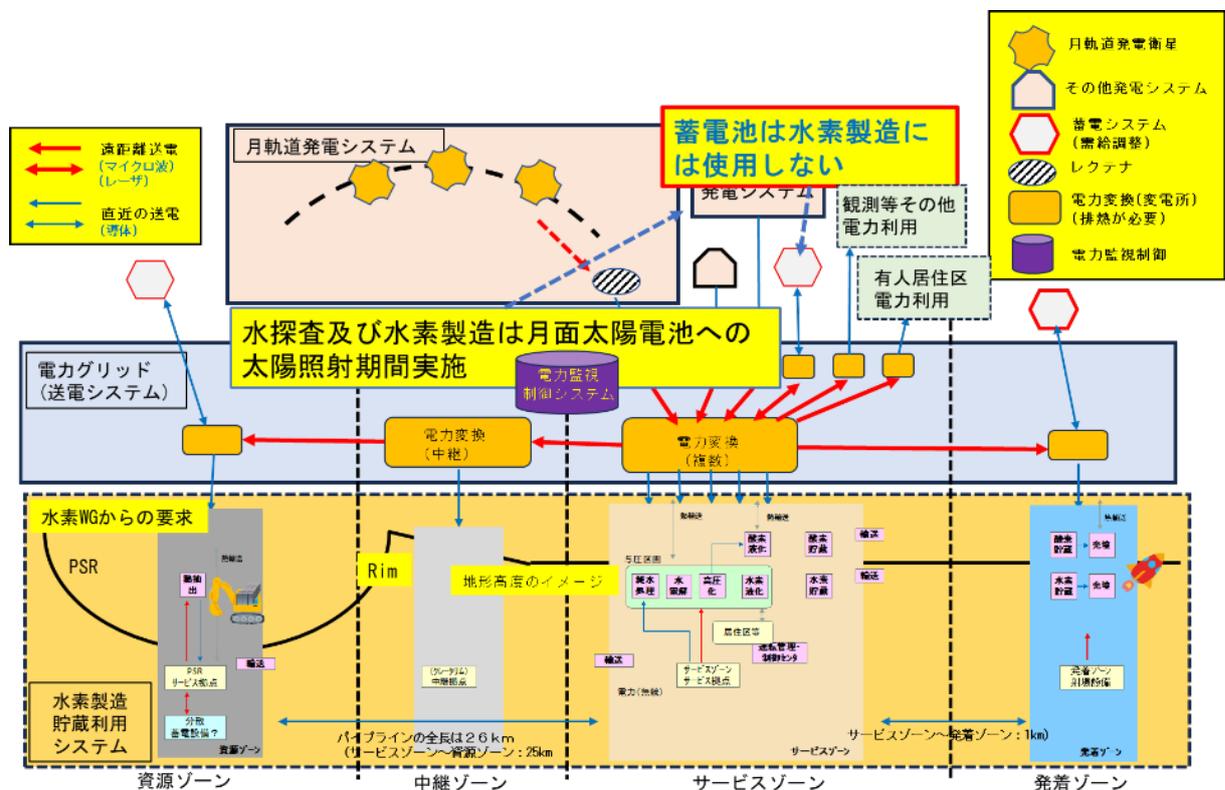


図 2-57 日陰時は水素製造を休止する場合のシステム構成

出所)J-spacesystems

## (7) 今後の電力供給全体システムとしての課題の整理

今年度の検討結果を踏まえた今後の電力システムとしての課題は次の通りである。

- 水素製造システム側の要求に対応する電力供給システムの検討を実施した。全体システムとして各発電システムや電力グリッドを構成するシステムの特徴を生かした最適なシステム構成を目指して検討したが、まだ最終的な形態とはなっておらず、それについて水素 WG 側と相互調整の上、さらに検討を実施して最適化を図ることが必要である。
- 特に月面上太陽光発電システムの電力プロファイルを考慮し、月面での「水素」及び「電力」の全体としての最適化を図る。

- さらに月面における開発段階に応じた技術開発、技術実証計画、及び整備計画の策定が必要である。
- 月面環境での「熱制御」の観点で、水素及び電力システムにおける排熱問題について協力して取り組む必要がある。

## 2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システム

### (1) システム検討

今年度、月面における電力供給システムとして提示されたシステム構成を図 2-58 と図 2-59 に示す。図 2-58 のケース1では、月周辺軌道太陽光発電システム(月軌道発電システム)についても、発電システムの一つとして月面上の電力グリッドに接続される。図 2-59 のケース2では、ケース1の場合と同様に月軌道発電システムが月面上の電力グリッドに接続されるとともに、月軌道発電システムの特徴である異なる受電地点への切り替え送電の機能を用い、電力グリッドネットワーク構成が困難な極域クレータ内の永久影の領域の探査や水素製造への電力供給を行う。令和4年度の検討では、シャクルトンクレータ内部に設置した受電設備への送電を検討したが、今年度は、図 2-60 に示すシャクルトンクレータ近傍の二地点を候補地として検討した。候補地1の座標は(-89.51, 280.65)、候補地2の座標は(-85.21, 33.83)である。

システム検討における前提は、図 2-60 に示す通り、候補地1と2に設置する受電システム(レクテナ)に送電し、かつ切り替え運用が可能なこととし、送電電力を 10kW とした。また、輸送手段については NASA のアルテミス計画の月着陸船としても選定されているスペース X 社の Starship を前提に検討した。図 2-61 に示すように、Starship のフェアリングサイズは直胴部の直径は $\phi$ 8m、直胴部の長さは 8m である。輸送可能な質量は、LEO まで 100 トン、GTO まで 21 トンであるが、地球軌道上での燃料補給も計画されており、燃料補給により 100 トンの資材を月面に輸送可能となる<sup>10</sup>。

---

<sup>10</sup> [https://www.spacex.com/media/starship\\_users\\_guide\\_v1.pdf](https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf)

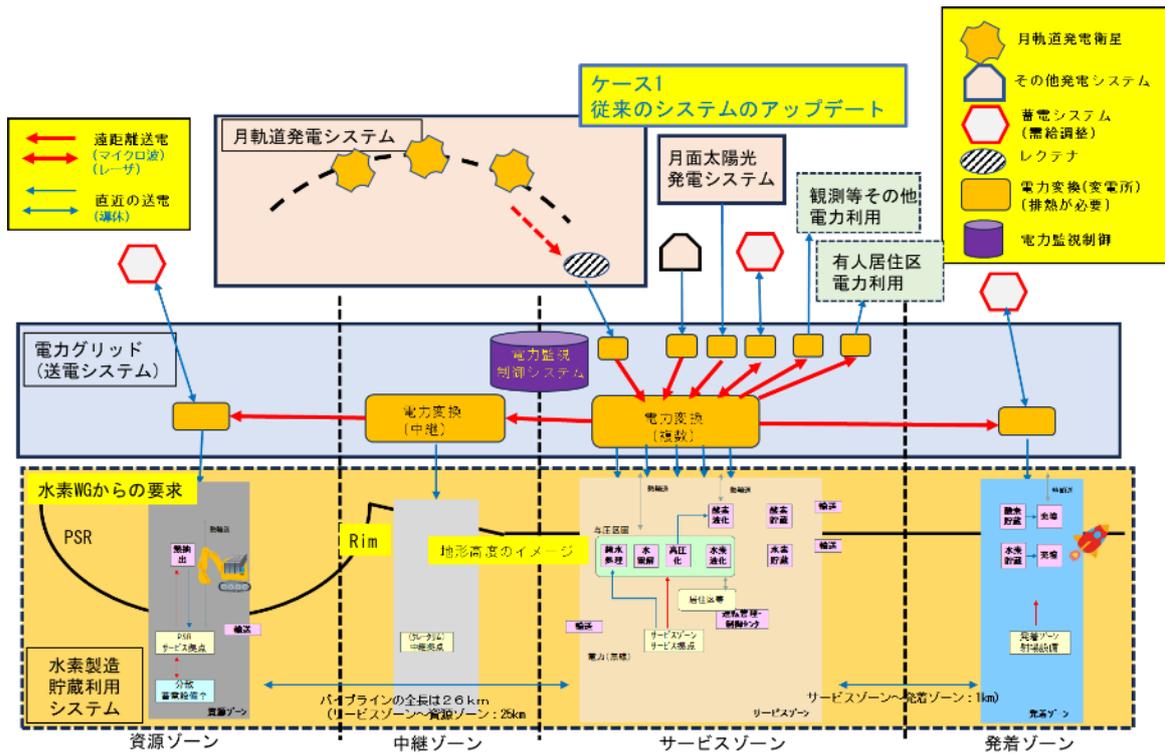


図 2-58 電力システム構成(ケース1)

出所)J-spacesystems

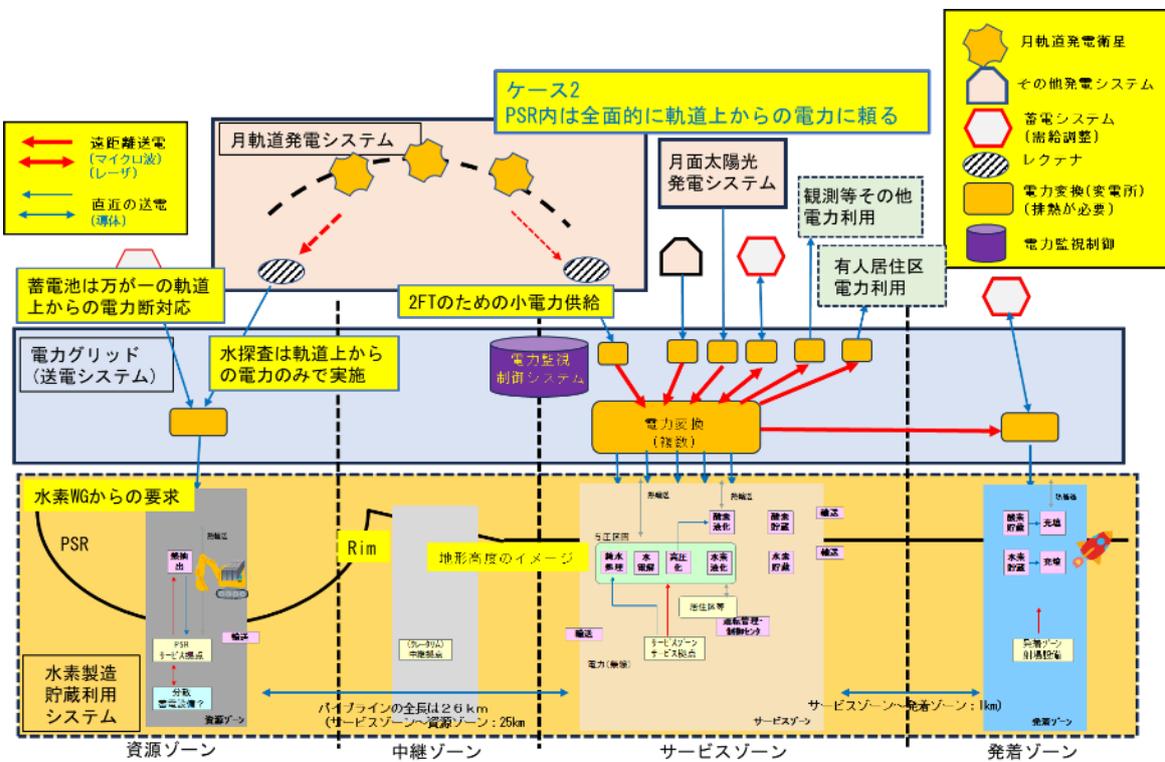


図 2-59 電力システム構成(ケース2)

出所)J-spacesystems

- 送電場所 極域（南極に二カ所指定あり）
- 二カ所に切り替え運用あり
- 送電電力 10kW程度

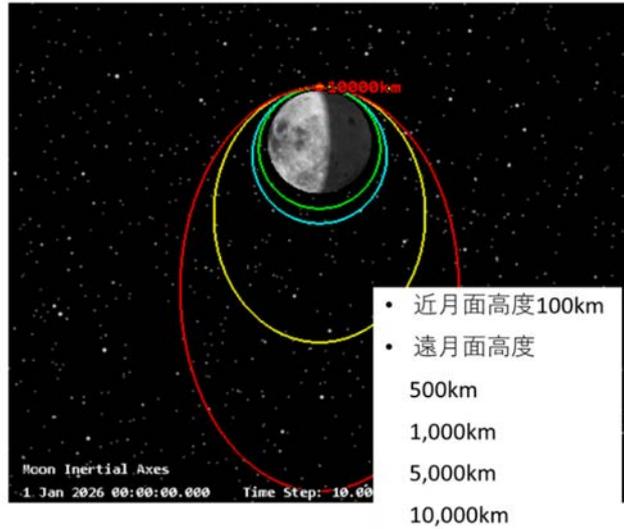
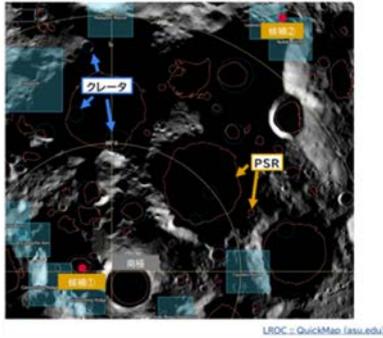


図 2-60 電力送電場所と衛星軌道

出所)J-spacesystems、JAXA/ISAS、東洋大



Figure 2: Starship crew (left) and uncrewed (right) configurations

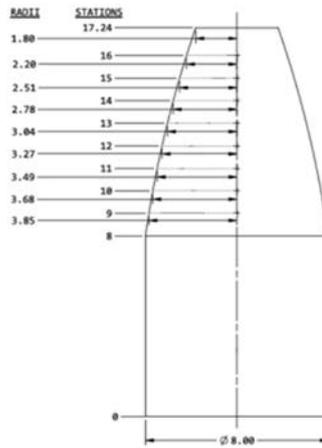


Figure 4: Starship payload volume (dimensions in m)

| Orbit            | Mass-to-Orbit Single Launch | Mass-to-Orbit Prop Transfer (t) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| LEO <sup>1</sup> | 100+                        | 100+                            |
| GTO <sup>2</sup> | 21                          | 100+                            |
| Lunar Surface    | N/A                         | 100+                            |
| Mars Surface     | N/A                         | 100+                            |

<sup>1</sup>Up to 500-km circular orbit at up to 98.9-deg inclination  
<sup>2</sup>Assumes 185 x 35,786 km orbit at 27-deg inclination with 1800 m/s ΔV to go

Table 3: Expected Starship Performance

図 2-61 Straship の概要

出所)[https://www.spacex.com/media/starship\\_users\\_guide\\_v1.pdf](https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf)

システム検討にあたり、月周回軌道を利用したエネルギーシステムのエネルギーフローを図 2-62 に示す。月周回軌道上で太陽光発電を行い、発電した電気エネルギーを電磁波に変換して月面上の受電システムに送電する。受電システムでは電磁波を直流電力に変換し、月面上の電力グリッドに供給する。月軌道上のシステムは、いわゆる太陽発電衛星(SPS)であるが、地球周回軌道で建設する太陽発電衛星との違いは以下となる。

- 月には大気がないため、大気による影響を考慮する必要がない。例えば、地球用の SPS では、送電用マイクロ波の周波数として大気の通過損失が少ない S 帯や C 帯を用いたシステムの研究開発が行われているが、月環境ではミリ波やレーザーも候補のシステムとなる。
- 地球用の SPS では、静止軌道に建設した場合、地上の受信設備との相対位置はほとんど変化しないため、エネルギー送電用ビーム掃引角は小さくてもよいが、月の極域へのエネルギー送電の場合は、大きな角度範囲のビーム制御が要求される。

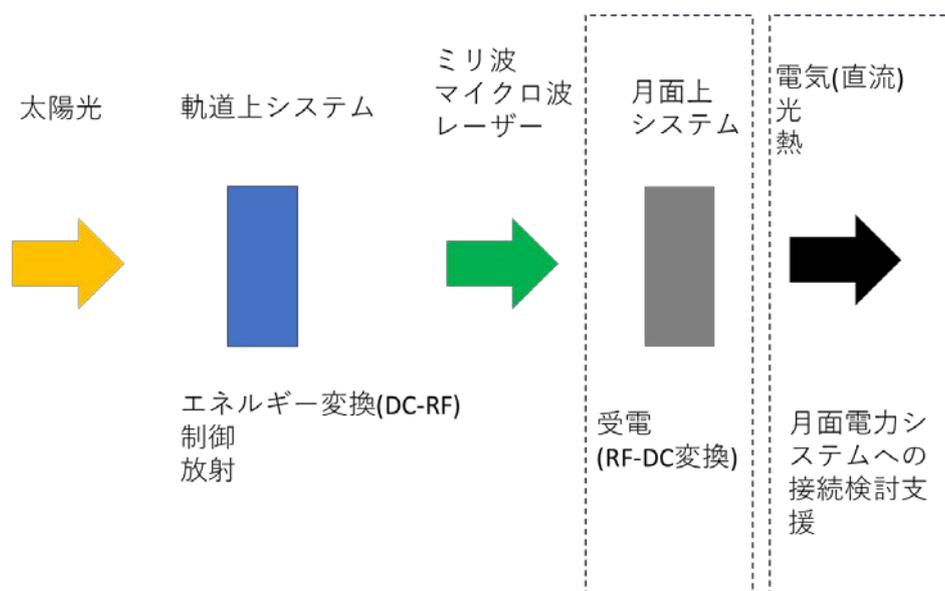


図 2-62 エネルギーフロー

出所)JAXA/ISAS

図 2-63 に月周回軌道からのエネルギーシステムの構成を示す。軌道上セグメントは、無線送電システムと衛星バス部から構成される。無線送電システムは、ビーム制御部、電力増幅部、放射部から構成され、ビーム制御部に関しては、太陽発電衛星等で開発が進められているレトロディレクティブ方式等が考えられる。しかし、上述のように月面用の SPS ではビーム掃引角度要求が地球用と大きく異なる。月軌道からのビームの場合は、 $\pm 45$  度程度のビーム掃引でシステム検討を実施する。この場合、フルフェーズドアレイアンテナ、もしくは衛星の姿勢制御によるビーム掃引が必要である。衛星の姿勢制御によるビーム掃引を行う場合は、アレイアンテナを必要としない。ミリ波送電の場合、開口面の大きなパラボラアンテナやスロットアレイアンテナ等で構成することができる。レーザー送電の場合は、衛星姿勢制御が必要となる。

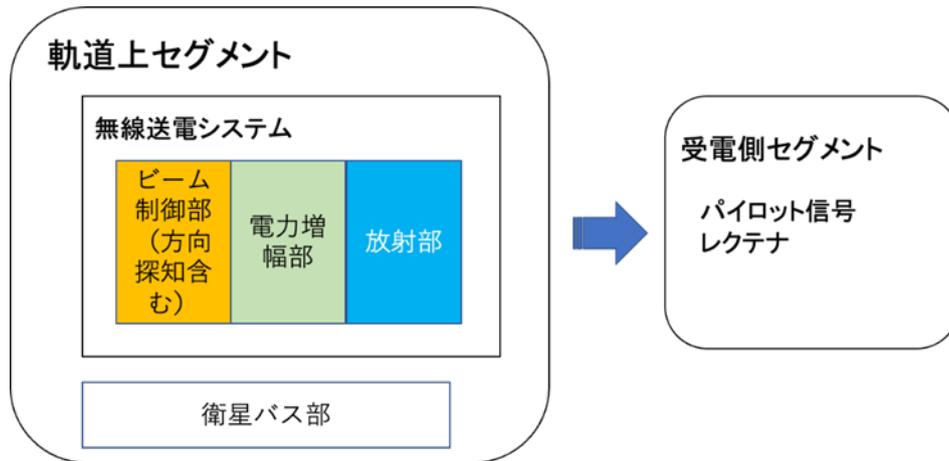


図 2-63 月周回軌道からエネルギーシステムの構成

出所)JAXA/ISAS

ミリ波を使用する場合の周波数、送電距離、アンテナサイズを表 2-30 に示す。周波数を高くできれば、アンテナサイズを小さくすることができる。軌道と受電量に関しては次項で詳述するが、表 2-30 に示すように送電距離が 1000km から5000kmの場合、レクテナサイズを数百m規模にできれば、衛星側のアンテナサイズは数十mとなる。

Starsip一機での輸送を考慮する場合、直径 8mの円内には一辺 5.5mの正方形のパネルを搭載することができる。パネルの厚さを 8cm 程度で実現できれば、Starship の直胴部に 100 枚程度のパネルを搭載できることになり、約 50m 角分のパネルを1機で輸送可能である。したがって、送電パネルが 5.5m 角、厚さ 8cm 程度で実現でき、二次元展開が可能であれば、1機の Starship で 50m 角のアンテナを有するシステムを運ぶことができる。

表 2-30 周波数、送電距離とアンテナサイズ

| 周波数<br>(GHz) | レクテナ直径<br>(m) | 送電距離<br>(km) | 送電アンテナ直径<br>(m) | 機体数<br>(機)<br>(±45deg) |
|--------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------|
| 50           | 500           | 5000         | 116             | 2                      |
| 50           | 500           | 3000         | 70              | 3                      |
| 50           | 500           | 1000         | 23.2            | 7                      |
| 100          | 500           | 5000         | 58              | 2                      |
| 100          | 500           | 3000         | 35              | 3                      |
| 100          | 500           | 1000         | 11.6            | 7                      |
| 50           | 100           | 5000         | 579             | 2                      |
| 50           | 100           | 3000         | 347             | 3                      |
| 50           | 100           | 1000         | 115             | 3                      |
| 100          | 100           | 5000         | 289             | 2                      |
| 100          | 100           | 3000         | 174             | 3                      |
| 100          | 100           | 1000         | 58              | 7                      |
| 20           | 500           | 1000         | 58              | 7                      |
| 20           | 500           | 3000         | 174             | 3                      |
| 20           | 500           | 5000         | 289             | 2                      |
| 50           | 200           | 5000         | 290             | 2                      |
| 50           | 200           | 3000         | 174             | 3                      |
| 50           | 200           | 1000         | 58              | 7                      |
| 100          | 200           | 5000         | 145             | 2                      |
| 100          | 200           | 3000         | 87              | 3                      |
| 100          | 200           | 1000         | 29              | 7                      |

出所)JAXA/ISAS

図 2-64 に軌道上から月面へのエネルギーダイヤグラムを示す。各サブシステムの効率は目標値である。月面上で 10kW 出力を仮定した。太陽電池について、ロケットへの搭載性の高さ、軽量性を重視し、変換効率は低いが高単位質量当たりの出力の高い太陽電池を選定しており、変換効率は 10%とし、DC/RF 変換部の効率は 50%とした。図 2-64 のように仮定すると、太陽電池の出力が約 47kW であれば、電源システムの出力は約 42kW、DC/RF 変換部の出力は約 21.1kW となり、アンテナ出力が 20kW、RF/DC 変換出力は 10kW になると想定される。

アンテナから 20kW 放射されるとき、各アンテナ素子からの放射電力を推定した。表 2-31 に 5.5m 角のアンテナパネル内に搭載するアンテナエレメント数を示す。アンテナ素子間隔を 0.65λとした場合、20GHz では約 31 万個、50GHz では約 200 万個、100GHz では約 800 万個の素子が搭載される。フェーズドアレイアンテナで大角度掃引を行うためには、フルフェーズドアレイアンテナが必要となり、50m 角のアンテナの場合は、上記の数値を 81 倍したアンテナ素子の制御が必要となる。ミリ波用のアレイアンテナの開発とともに、多数のアンテナ素子から放射される電磁波の位相・振幅制御も課題となる。一方で、多数のアンテナ素子から放射されるため、一素子当たりの放射電力は低くなる。20GHz の場合、一素子からは 0.7mW、50GHz の場合は 0.12mW、100GHz の場合は 31μW となる。各アンテナ素子に給電する増幅器は小電力で小さなサイズで構成する必要があるため、半導体増幅器が使用されると考えられる。

一方、電子管を使用する場合は、単管出力が大きいため、フルフェーズドアレイアンテナへの応用が困難と考える。5.5m 角のアンテナパネルに 20W 出力の電子管増幅器が 12 機搭載されることになる。この場合は、大きな開口面を有するアンテナと組み合わせたシステムとなり、ビーム制御は衛星姿勢が

ジンバル制御で行うこととなる。

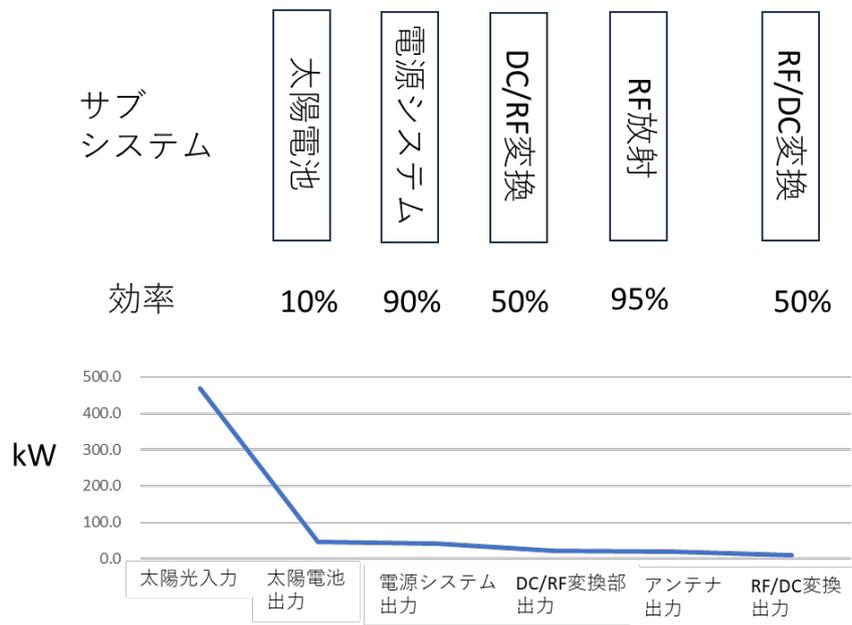


図 2-64 エネルギーレベルダイヤグラム

出所)JAXA/ISAS

表 2-31 5.5m 角のパネル内のアンテナ素子数

| 周波数 (GHz) | 波長 (m) | 送電電力 (W) | アンテナ素子間隔 $0.65\lambda$ (m) | アンテナパネル面積 (m <sup>2</sup> ) | アンテナエレメント数 (個) | 放射電力/アンテナ素子 (mW) |
|-----------|--------|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|
| 20        | 0.015  | 247      | 0.00975                    | 30.25                       | 318212         | 0.7762           |
| 50        | 0.006  | 247      | 0.0039                     | 30.25                       | 1988823        | 0.1242           |
| 100       | 0.003  | 247      | 0.00195                    | 30.25                       | 7955293        | 0.0310           |

出所)JAXA/ISAS

レクテナサイズについて、Starship での輸送を仮定するため、5.5m 角のパネル構成、1cm のパネル厚さを仮定する。表 2-32 に Starship で輸送できるレクテナの規模を示す。厚さ1cm の時、直径 8m の直胴部に 800 枚パネルを搭載できるため、1機では約 150m 四方、2機では 220m 四方、3機では約 380m 四方のレクテナ資材の輸送が可能である。

表 2-32 レクテナの規模

| レクテナパネル | 面積     | 厚さ (m)   | フェアリング(直胴部)(m) | レクテナ (m) | レクテナ面積 (m <sup>2</sup> ) | 枚数/機 (枚) |
|---------|--------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------|
| 5.5     | 30.25  | 0.01     | 8              | 200      | 31415.92654              | 800      |
| 機体数     | レクテナ面積 | 一辺 (m)   |                |          |                          |          |
| 1       | 24200  | 155.5635 |                |          |                          |          |
| 2       | 48400  | 220      |                |          |                          |          |
| 3       | 145200 | 381.0512 |                |          |                          |          |

出所)JAXA/ISAS

レーザに関しては、近年、ファイバレーザの高出力化により CW で1kW~100kW 出力をカバーするまでに至っており、変換効率は50%程度に達している<sup>11</sup>。本システムでは、10kW 程度のエネルギー伝送を仮定しているため、ファイバレーザも選択肢となる。ただし、衛星搭載のためには、光学系の開発、搭載用電源の開発、熱構造設計が必要である。また、波長は1 $\mu$ m 程度であり、その波長で高効率動作を行う光電変換素子の開発が必要である。

図 2-65 に 50mクラスの宇宙機を用いた場合のコンセプト図を示す。送電アンテナは約 50m 角で厚さは 8cm 程度を仮定し、そこから 20kW 放射することを想定している。月面上レクテナの一素子当たりの受電電力を推定するため、図 2-66 に送電距離と中心電力密度の関係を示す。レクテナ素子において波長程度の面積で受電すると仮定した場合、一素子当たり数 $\mu$ W から数十 $\mu$ W 程度の RF 電力を受電し、変換する必要がある。10kW クラスの月周回 SPS の場合、アンテナサイズが 50m 規模では $\mu$ W クラスで高効率に動作するレクテナデバイス、及び多数のミリメートルサイズのデバイスで構成される受電パネル製造技術が必要となる。

宇宙機の質量推定のため、表 2-33 に送電システムの比較を示す。2006 年に検討されたテザー型 SPS の目標値は、2040 年ごろの目標性能として、質量特性で約 50W/kg、面積特性で 220W/m<sup>2</sup> となっている。2021 年から3年間の研究開発で取り組まれた経済産業省事業における発送電一体型パネルの目標値は、質量特性で 6.1W/kg である。現在、開発が進められている“OHISAMA<sup>12</sup>”衛星の送電パネルの質量特性は 13.5W/kg である。また、大電力マイクロ波を放射する SAR 衛星では、推定で 20W/kg 以上の送電パネルが開発されている。質量推定において、発送電一体型パネル(2023)の値を使用すると、50m 角の送電システムの質量は約 10 トンとなる。面積特性について、発送電一体型パネル(2023)の値 220.0 W/m<sup>2</sup> と比較すると、10kW 月面用 SPS システムは約8W/m<sup>2</sup>、100kW システムは約 81W/m<sup>2</sup> であるので、熱設計の観点からは、10kW システムはかなりマージンのある設計が可能であると考えられる。

<sup>11</sup> John Wallace, "High-power Fiber Lasers: Kilowatt-level fiber lasers mature", Laser Focus World, copyright 2016 by Pennwell Corporation.

<sup>12</sup> OHISAMA: On-orbit experiment of HIgh-precision beam control using small SAteellite for MicrowAve power transmission

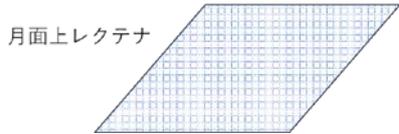
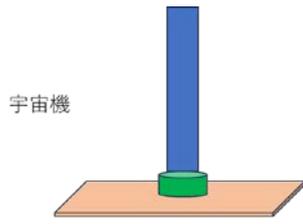


図 2-65 大型衛星のケース

出所)JAXA/ISAS

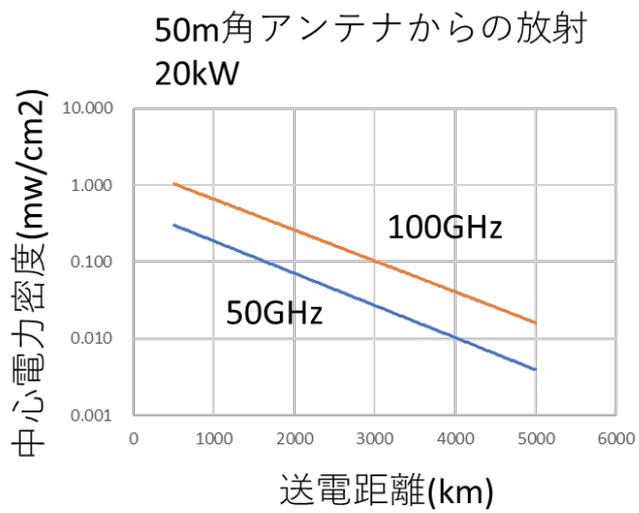


図 2-66 送電距離と中心電力密度の関係

出所)JAXA/ISAS

表 2-33 送電部の質量特性、面積特性の比較

|                 | 1 モジュール<br>サイズ<br>(m) | 周波数<br>(GHz) | 放射電力<br>(W) | 質量<br>(kg) | 質量特性<br>W/kg | 面積特性<br>W/m <sup>2</sup> |
|-----------------|-----------------------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------------------|
| テザー型 SPS        | 0.5x0.5               | 5.8          | 55          | 1.06       | 51.8         | 220.0                    |
| 発送電一体型パネル(2023) | 0.5x0.5               | 5.8          | 55          | 9.00       | 6.1          | 220.0                    |
| 実験衛星(OHISAMA)*  | 0.74x0.74             | 5.8          | 270         | 20.00      | 13.5         | 493.1                    |
| SAR 衛星**        | 0.7x5                 | 9.5          | 1000        |            |              | 291.5                    |
| 月 SPS(10kW)     | 5.5                   | 50-100       | 247         |            |              | 8.2                      |
| 月 SPS(100kW)    | 5.5                   | 50-100       | 2470        |            |              | 81.7                     |

\*放射時間 数分間

\*\*放射時間 数分間、パルス状放射

出所)JAXA/ISAS

太陽電池アレイについて、太陽電池パネルの質量特性の比較を図 2-67 に示す。従来の太陽電池パネルは数十 W/kg であるため、太陽電池パネルの質量としては1トン程度となると想定される。ただし、近年開発が進められている太陽電池アレイとして、Sharp が開発したソーラーアレイシートは、薄膜多接合太陽電池で構成され優れた質量特性を有している。また、近年、商用化が進められている CIGS 等の薄膜太陽電池をプラスチックフィルム上に形成した場合、1kW/kg 程度の質量特性が見込まれる。このプラスチック上の太陽電池は安価であり、収納性に優れる折り畳みも実現できる可能性がある。

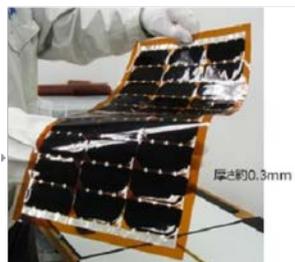
その他、バッテリーを搭載する場合は、電気自動車搭載のバッテリーの性能からの推定で5トン程度の質量バジェットが必要となる。バス機器を含めると 1 機 20 トン程度の宇宙機になると推定され、Starship で GTO に投入できる程度の質量であると想定される。

従来の太陽電池パネル



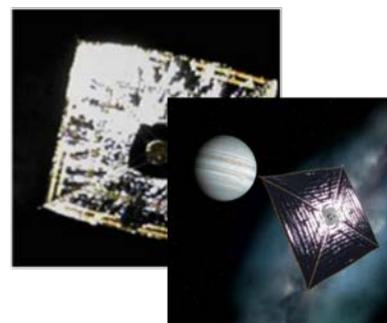
Conventional:  
several 10 W/m<sup>2</sup>  
ISS: around 50W/kg

Solar Array Sheet  
(SHARP)



Solar Array Sheet (SHARP)  
: several 100 W/m<sup>2</sup>

ソーラー電力セイル



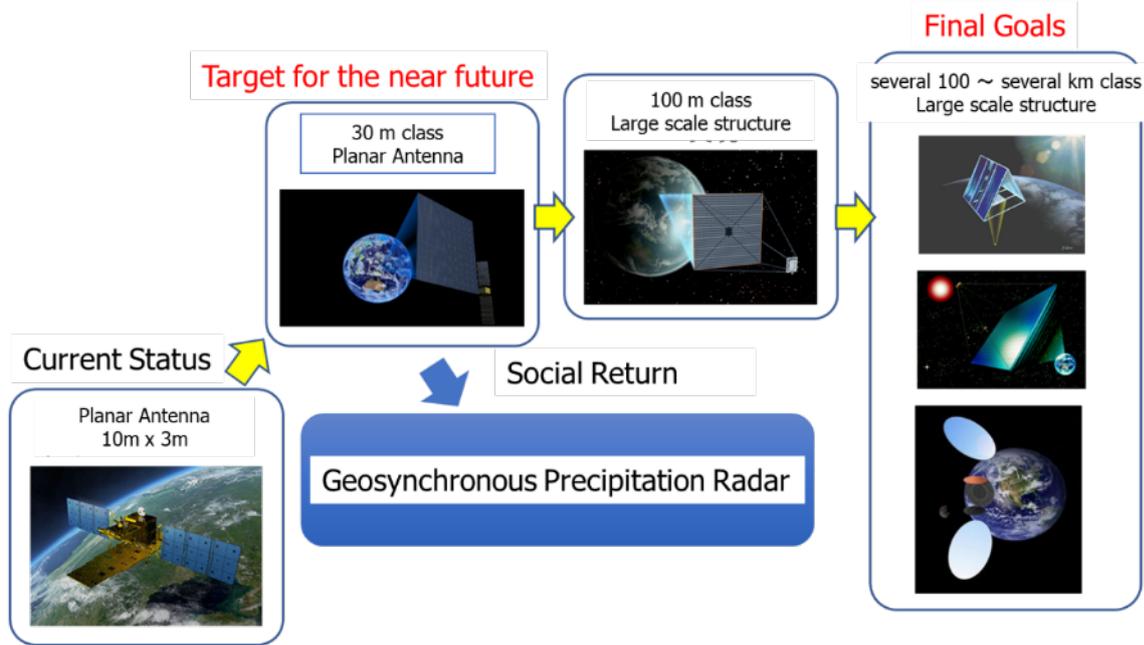
Target of Solar Power Sail:  
more than 1 kW/m<sup>2</sup>

図 2-67 太陽電池パネルの質量特性

出所) JAXA/ISAS

以上述べたシステムでは 50mクラスの宇宙構造物の建設が必要である。国際宇宙ステーションは、100m クラスの宇宙構造物ではあるが、多数回の輸送で建設されており、50m クラスの宇宙機を一回で構築するためには追加の技術開発が必要である。現在、JAXA では、図 2-68 に示すシナリオで大型宇宙構造物に関する研究を行っている。特に、現在宇宙実験の準備が進められている「DELIGHT」プロジェクトでは、50m クラスのアンテナ構築に近い技術開発が行われている。さらに大型のシステム構築に向けては、宇宙空間での製造、組み立てといった方策をとることになる。近年では、米国の Made In Space による軌道上での Additive Manufacturing 技術など、宇宙空間での製造技術の研究開発が進められている。

一方で図 2-69 に示すように、50m サイズの大きなアンテナではなく、数 m サイズのアンテナパネルでのフォーメーションフライトも考えられる。5.5m サイズのアンテナを有する宇宙機群で構成する場合、機体数は約 80 機、一機当たりの放射電力は約 250W、太陽電池の出力は約 600W となる。太陽電池アレイの面積も 2m 四方程度であり、衛星技術はほぼ既存のサブシステムで構成できるという利点がある。図 2-70 に機能分散型システムによる効率的システム構成の可能性を示す。

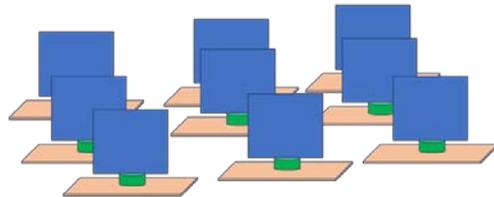


上土井他,「展開型軽量平面アンテナ軌道上実証システム(DELIGHT)の開発状況」,第65回宇宙科学技術連合講演会, 3110, 2021, 山形.

図 2-68 JAXA の大型構造物開発のシナリオ

出所)JAXA/ISAS

宇宙機群



月面上レクテナ

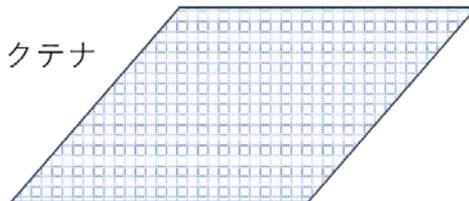


図 2-69 宇宙機群での構成

出所)JAXA/ISAS

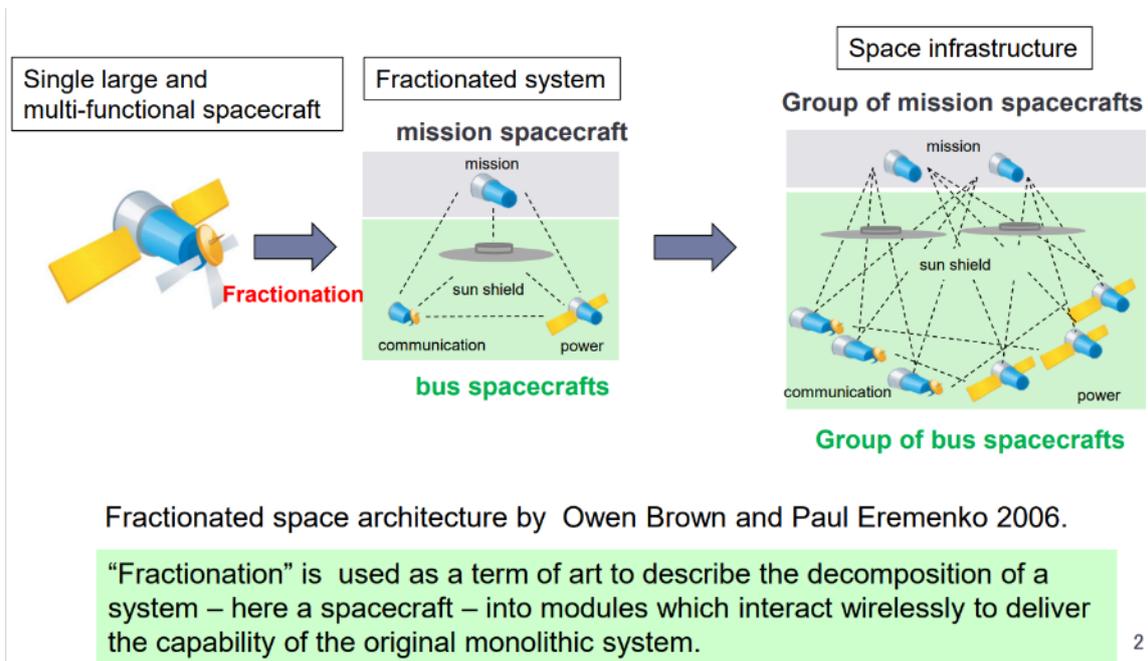


図 2-70 機能分散型システム

出所)K. Ishimura, et.al., “Artificial Lagrange Points for Spacecrafts with Tethered Anchor”, SYSTEM F6 DARPA, [http://www.darpa.mil/Our\\_Work/TTO/Programs/System\\_F6.aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/System_F6.aspx)

## (2) 電力伝送の評価

前項で示したシステム構成について、その送電システムにおける回線計算とレクテナへの最大入力電力、最大電力束密度を示す。以降の計算においては、以下を仮定した。

- 受電電力:10kW
- 送信アンテナ寸法:50m×50m、開口能率 70%
- $\tau = 1$  と 1.5 の両方とるように、受電アンテナの大きさを設定
- 受電レクテナは 5.5m 角(厚さ 1cm)のパネルを組み合わせて構成
- 周波数は 50GHz をノミナルとする。従来の周波数に加え、20GHz を追加(5.8, 10, 20, 50, 100)

また、各種計算式は以下の通りである。

- 受信電力導出法

$$\begin{aligned} \tau^2 &= \frac{A_t A_r}{\lambda^2 d^2} \\ \eta &= 1 - e^{-\tau^2} \\ P_r &= P_t \eta \end{aligned} \quad (1)$$

(  $A_t$ :送信アンテナ有効開口面積 [m<sup>2</sup>]、 $A_r$ :受信アンテナ有効開口面積 [m<sup>2</sup>]  
 $\lambda$ :波長 [m]、 $d$ :送電距離 [m]、 $\eta$ :伝送効率、 $P_r$ :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法

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

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \eta_A \quad (3)$$

$$\left( \begin{array}{l} A_e: \text{アンテナの有効開口面積 [m}^2\text{], } G: \text{アンテナ利得 [倍]} \\ D: \text{アンテナの開口径 [m], } \eta_A: \text{開口能率 [\%]} \end{array} \right)$$

- 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 素子あたりの最大入力電力の導出法

$$\text{PFD} = \frac{P_t}{A_e} \quad (4)$$

$$P_{\text{in\_patch}} = \frac{P_t}{A_e} \times (0.7\lambda)^2 \quad (5)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{PFD: 月面アンテナの最大電力束密度 [W/m}^2\text{]} \\ P_{\text{in\_patch}}: \text{パッチアンテナを使用した場合の 1 素子あたりの最大入力電力 [W]} \end{array} \right)$$

実数:  $A_t = 1750\text{m}^2$

なお近傍界における自由空間損の値は、下式のように逆算によって算出している。

$$\text{自由空間損失 } L_f(\text{近傍}) = P_t + G_t + G_r - P_r$$

回線計算の結果を以下の表 2-34 から表 2-43 に示す。送電側のアンテナが 50m クラス、送電電力 10kW と、地球周回 SPS と比較して値が大きくないため、レクテナデバイスにパッチアンテナを使用した場合、一アンテナ素子当たりの受電電力は 10  $\mu$ W 程度と少なくなっている。そのため、小電力対応のレクテナの開発が必要である。

表 2-34  $\tau = 1.00$  ( $\eta = 63\%$ )、周波数 5.8 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ              | 単位             | 数値                      |                          | 備考                            |
|--------------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 周波数 f              | GHz            | 5.8                     | 5.8                      | 波長 51.7 mm                    |
| 遠月面高度              | Km             | 1000                    | 5000                     |                               |
| 衛星—受信局間距離 d        | Km             | 1199                    | 4999                     |                               |
| 衛星出力電力 $P_t$       | dBm            | 73.0                    | 73.0                     | 電力 19.8 kW                    |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$ | m <sup>2</sup> | 1750                    | 1750                     | 50m×50m<br>開口面効率 70%          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$     | dB             | 69.2                    | 69.2                     |                               |
| 自由空間損 $L_f$        | dB             | 171.3                   | 183.7                    | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$ |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$ | m <sup>2</sup> | 2.2<br>×10 <sup>6</sup> | 38.0<br>×10 <sup>6</sup> |                               |

|   |                       |                          |                            |                                |
|---|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 月面アンテナ利得 Gr   | dBi                   | 100.1                    | 112.5                      |                                |
| 必要なパネル  | 枚                     | 72.1<br>×10 <sup>3</sup> | 1253.9<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル         |
| 月面アンテナ出力 Pr   | dBm                   | 71.0                     | 71.0                       |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>Pout                                     | dBm                   | 70.0                     | 70.0                       | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                                   | mW/<br>m <sup>2</sup> | 7.3                      | 0.4                        |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 P <sub>in_patch</sub> | μW                    | 9.5                      | 0.5                        |                                |

出所)東洋大学

表 2-35  $\tau=1.00(=63\%)$ 、周波数 10 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位                | 数値                       |                           | 備考                             |
|---|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 周波数 f   | GHz               | 10                       | 10                        | 波長 30.0 mm                     |
| 遠月面高度 d   | Km                | 1000                     | 5000                      |                                |
| 衛星—受信局間距離 d   | Km                | 1199                     | 4999                      |                                |
| 衛星出力電力 Pt   | dBm               | 73.0                     | 73.0                      | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 At   | m <sup>2</sup>    | 1750                     | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 Gt   | dBi               | 73.9                     | 73.9                      |                                |
| 自由空間損 Lf  | dB                | 176.0                    | 176.0                     | Lf = Pt + Gt + Gr - Pr         |
| 月面アンテナ有効開口面積 Ar   | m <sup>2</sup>    | 0.7<br>×10 <sup>6</sup>  | 12.8<br>×10 <sup>6</sup>  |                                |
| 月面アンテナ利得 Gr   | dBi               | 100.1                    | 112.5                     |                                |
| 必要なパネル  | 枚                 | 24.2<br>×10 <sup>3</sup> | 421.8<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル         |
| 月面アンテナ出力 Pr   | dBm               | 71.0                     | 71.0                      |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>Pout                                     | dBm               | 70.0                     | 70.0                      | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                                   | mW/m <sup>2</sup> | 21.6                     | 1.2                       |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 P <sub>in_patch</sub> | μW                | 9.5                      | 0.5                       |                                |

出所)東洋大学

表 2-36  $\tau=1.00(=63\%)$ 、周波数 20 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ  | 単位                | 数値                      |                           | 備考                             |
|--|-------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$  | GHz               | 20                      | 20                        | 波長 15.0 mm                     |
| 遠月面高度 $d$  | Km                | 1000                    | 5000                      |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$  | Km                | 1199                    | 4999                      | 最大距離                           |
| 衛星出力電力 $P_t$   | dBm               | 73.0                    | 73.0                      | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                   | m <sup>2</sup>    | 1750                    | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                       | dBi               | 79.9                    | 79.9                      |                                |
| 自由空間損 $L_f$  | dB                | 182.0                   | 194.4                     | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$                                   | m <sup>2</sup>    | 0.2<br>×10 <sup>6</sup> | 3.2<br>×10 <sup>6</sup>   |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                       | dBi               | 100.1                   | 112.5                     | 開口面積に相当する等価的な利得(素子利得ではない)      |
| 必要なパネル   | 枚                 | 6.1<br>×10 <sup>3</sup> | 105.5<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)のパネル             |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                       | dBm               | 71.0                    | 71.0                      |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                             | dBm               | 70.0                    | 70.0                      | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                                | mW/m <sup>2</sup> | 86.6                    | 5                         |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の<br>1 素子あたりの最大入力電力<br>$P_{in\_patch}$ | μW                | 9.5                     | 0.5                       |                                |

出所) 東洋大学

表 2-37  $\tau=1.00(=63\%)$ 、周波数 50 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位               | 数値                       |                           | 備考                             |
|---|------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$   | GHz              | 50                       | 50                        | 波長 6.0 mm                      |
| 遠月面高度 $d$   | Km               | 1000                     | 5000                      |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                     | Km               | 1199                     | 4999                      | 最大距離                           |
| 衛星出力電力 $P_t$                                      | dBm              | 73.0                     | 73.0                      | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>   | 1750                     | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                    | dBi              | 87.9                     | 87.9                      |                                |
| 自由空間損 $L_f$                                       | dB               | 190.0                    | 202.4                     | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$                                | m <sup>2</sup>   | 29.3<br>×10 <sup>3</sup> | 510.3<br>×10 <sup>3</sup> |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                    | dBi              | 100.1                    | 112.5                     |                                |
| 必要なパネル  | 枚                | 970.0                    | 16.9<br>×10 <sup>3</sup>  | 5.5m 角(厚さ 1cm)のパネル             |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                    | dBm              | 71.0                     | 71.0                      |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                          | dBm              | 70.0                     | 70.0                      | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                             | W/m <sup>2</sup> | 541.0                    | 31.1                      |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW               | 9.5                      | 0.5                       |                                |

出所)東洋大学

表 2-38  $\tau=1.00(\eta=63\%)$ 、周波数 100 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ  | 単位               | 数値                      |                           | 備考                             |
|--|------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$  | GHz              | 100                     | 100                       | 波長 3.0 mm                      |
| 遠月面高度 $d$  | Km               | 1000                    | 5000                      |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                      | Km               | 1199                    | 4999                      |                                |
| 衛星出力電力 $P_t$                                       | dBm              | 73.0                    | 73.0                      | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                 | m <sup>2</sup>   | 1750                    | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                     | dBi              | 93.9                    | 93.9                      |                                |
| 自由空間損 $L_f$  | dB               | 196.0                   | 208.4                     | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_t$                                 | m <sup>2</sup>   | 2.0<br>×10 <sup>6</sup> | 35.0<br>×10 <sup>6</sup>  |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                     | dBi              | 100.1                   | 112.5                     |                                |
| 必要なパネル   | 枚                | 7.3<br>×10 <sup>3</sup> | 127.6<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)のパ<br>ネル         |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                     | dBm              | 71.0                    | 71.0                      |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                           | dBm              | 70.0                    | 70.0                      | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                              | W/m <sup>2</sup> | 2157.8                  | 124.4                     |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1 素<br>子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW               | 9.5                     | 0.5                       |                                |

出所)東洋大学

表 2-39  $\tau=1.53(\eta=90\%)$ 、周波数 5.8 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位       | 数値                     |                         | 備考                             |
|---|----------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$   | GHz      | 5.8                    | 5.8                     | 波長 51.7 mm                     |
| 遠月面高度   | Km       | 1000                   | 5000                    |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                     | Km       | 1199                   | 4999                    |                                |
| 衛星出力電力 $P_t$                                      | dBm      | 71.4                   | 71.4                    | 電力 13.9 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | $m^2$    | 1750                   | 1750                    | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                    | dBi      | 69.2                   | 69.2                    |                                |
| 自由空間損 $L_f$                                       | dB       | 173.4                  | 183.7                   | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$                                | $m^2$    | 5.0<br>$\times 10^6$   | 87.8<br>$\times 10^6$   |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                    | dBi      | 103.8                  | 116.2                   |                                |
| 必要なパネル  | 枚        | 166.9<br>$\times 10^3$ | 2903.8<br>$\times 10^3$ | 5.5m 角(厚さ 1cm)のパ<br>ネル         |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                    | dBm      | 71.0                   | 71.0                    |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                          | dBm      | 70.0                   | 70.0                    | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>$PFD$                           | $mW/m^2$ | 2.2                    | 0.1                     |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | $\mu W$  | 2.9                    | 0.2                     |                                |

出所)東洋大学

表 2-40  $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 10 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ  | 単位                    | 数値                       |                           | 備考                                |
|--|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 周波数 $f$  | GHz                   | 10                       | 10                        | 波長 30.0 mm                        |
| 遠月面高度 $d$  | Km                    | 1000                     | 5000                      |                                   |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                      | Km                    | 1199                     | 4999                      |                                   |
| 衛星出力電力 $P_t$                                       | dBm                   | 73.0                     | 73.0                      | 電力 19.8 kW                        |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                 | m <sup>2</sup>        | 1750                     | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %             |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                     | dBi                   | 73.9                     | 73.9                      |                                   |
| 自由空間損 $L_f$  | dB                    | 178.1                    | 190.5                     | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$     |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$                                 | m <sup>2</sup>        | 1.7<br>×10 <sup>6</sup>  | 29.5<br>×10 <sup>6</sup>  |                                   |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                     | dBi                   | 103.8                    | 116.2                     |                                   |
| 必要なパネル   | 枚                     | 56.2<br>×10 <sup>3</sup> | 976.8<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル            |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                     | dBm                   | 71.0                     | 71.0                      |                                   |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                           | dBm                   | 70.0                     | 70.0                      | レクテナ変換効率<br>80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                              | mW/<br>m <sup>2</sup> | 6.5                      | 0.4                       |                                   |
| パッチアンテナを使用した場合の 1 素<br>子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW                    | 2.9                      | 0.2                       |                                   |

出所)東洋大学

表 2-41  $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 20 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位                   | 数値                       |                           | 備考                             |
|---|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$   | GHz                  | 20                       | 20                        | 波長 15.0 mm                     |
| 遠月面高度 $d$   | Km                   | 1000                     | 5000                      |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                     | Km                   | 1199                     | 4999                      |                                |
| 衛星出力電力 $P_t$                                      | dBm                  | 73.0                     | 73.0                      | 電力 13.9 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>       | 1750                     | 1750                      | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                    | dBi                  | 79.9                     | 79.9                      |                                |
| 自由空間損 $L_f$                                       | dB                   | 184.1                    | 196.5                     | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_r$                                | m <sup>2</sup>       | 0.4<br>×10 <sup>6</sup>  | 7.4<br>×10 <sup>6</sup>   |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                    | dBi                  | 103.8                    | 116.2                     |                                |
| 必要なパネル  | 枚                    | 14.0<br>×10 <sup>3</sup> | 244.2<br>×10 <sup>3</sup> | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル         |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                    | dBm                  | 71.0                     | 71.0                      |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                          | dBm                  | 70.0                     | 70.0                      | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>$PFD$                           | W/<br>m <sup>2</sup> | 26.2                     | 1.5                       |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW                   | 2.9                      | 0.2                       |                                |

出所)東洋大学

表 2-42  $\tau=1.53(=90\%)$ 、周波数 50 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位                   | 数値                       |                            | 備考                             |
|---|----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$   | GHz                  | 50                       | 50                         | 波長 6.0 mm                      |
| 遠月面高度 $d$   | Km                   | 1000                     | 5000                       |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                     | Km                   | 1199                     | 4999                       |                                |
| 衛星出力電力 $P_t$                                      | dBm                  | 73.0                     | 73.0                       | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>       | 1750                     | 1750                       | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                    | dBi                  | 87.9                     | 87.9                       |                                |
| 自由空間損 $L_f$                                       | dB                   | 192.1                    | 204.5                      | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>       | 68.0<br>×10 <sup>3</sup> | 1182.0<br>×10 <sup>3</sup> |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                    | dBi                  | 100.1                    | 112.5                      |                                |
| 必要なパネル  | 枚                    | 2.2<br>×10 <sup>3</sup>  | 39.1<br>×10 <sup>3</sup>   | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル         |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                    | dBm                  | 71.0                     | 71.0                       |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                          | dBm                  | 70.0                     | 70.0                       | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                             | W/<br>m <sup>2</sup> | 163.5                    | 9.4                        |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW                   | 2.9                      | 0.2                        |                                |

出所)東洋大学

表 2-43  $\tau=1.53(\eta=90\%)$ 、周波数 100 GHz、受信電力 10 kW のときの回線

| パラメータ   | 単位                   | 数値                      |                          | 備考                             |
|---|----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 周波数 $f$   | GHz                  | 100                     | 100                      | 波長 3.0 mm                      |
| 遠月面高度 $d$   | km                   | 1000                    | 5000                     |                                |
| 衛星—受信局間距離 $d$                                     | km                   | 1199                    | 4999                     |                                |
| 衛星出力電力 $P_t$                                      | dBm                  | 73.0                    | 73.0                     | 電力 19.8 kW                     |
| 衛星アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>       | 1750                    | 1750                     | 50m×50m<br>開口面効率 70 %          |
| 衛星アンテナ利得 $G_t$                                    | dBi                  | 93.9                    | 93.9                     |                                |
| 自由空間損 $L_f$                                       | dB                   | 198.1                   | 210.5                    | $L_f = P_t + G_t + G_r - P_r$  |
| 月面アンテナ有効開口面積 $A_t$                                | m <sup>2</sup>       | 1.7<br>×10 <sup>3</sup> | 35.0<br>×10 <sup>6</sup> |                                |
| 月面アンテナ利得 $G_r$                                    | dBi                  | 100.1                   | 112.5                    |                                |
| 必要なパネル  | 枚                    | 0.6<br>×10 <sup>3</sup> | 9.8<br>×10 <sup>3</sup>  | 5.5m 角(厚さ 1cm)の<br>パネル         |
| 月面アンテナ出力 $P_r$                                    | dBm                  | 71.0                    | 71.0                     |                                |
| レクテナ出力部最小電力<br>$P_{out}$                          | dBm                  | 70.0                    | 70.0                     | レクテナ変換効率 80 %<br>(2040 年台の推定値) |
| 月面アンテナの最大電力束密度<br>PFD                             | W/<br>m <sup>2</sup> | 654.1                   | 37.6                     |                                |
| パッチアンテナを使用した場合の 1<br>素子あたりの最大入力電力 $P_{in\_patch}$ | μW                   | 2.9                     | 0.2                      |                                |

出所)東洋大学

図 2-71 から図 2-73 に周波数とアンテナ面積の関係、周波数とパネル枚数の関係、及び周波数と PFD の関係をそれぞれ示す。ミリ波を使うことでレクテナサイズと必要なパネル枚数を減らすことができる。また、ミリ波を使用し、周波数を高くすると、PFD は上昇するが、アンテナサイズが小さくなるため、レクテナデバイス当たりの入力電力は変化しない。

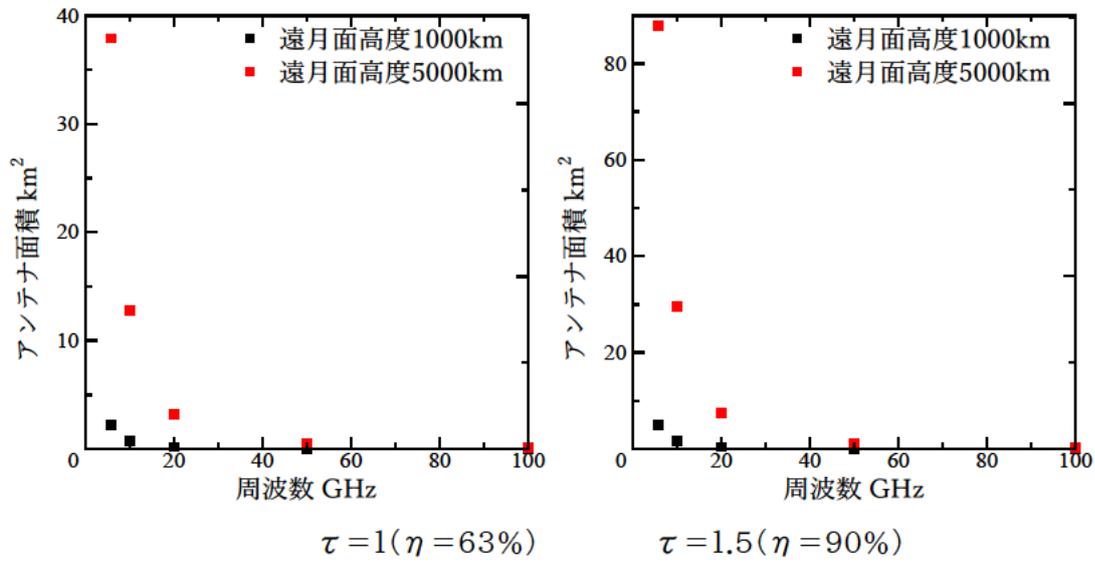


図 2-71 周波数とアンテナ面積の関係

出所)東洋大学

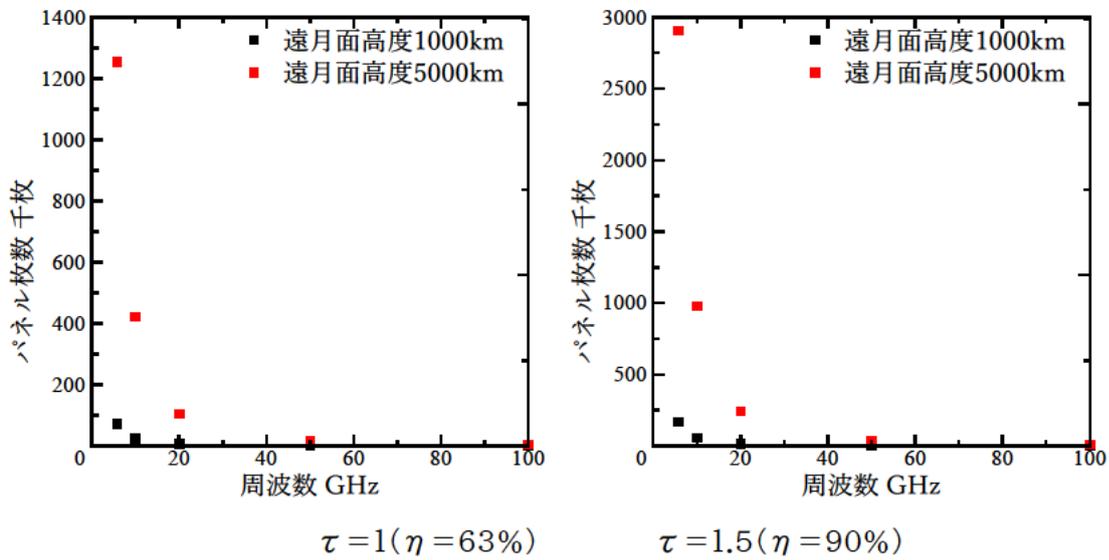


図 2-72 周波数とパネル枚数の関係

出所)東洋大学

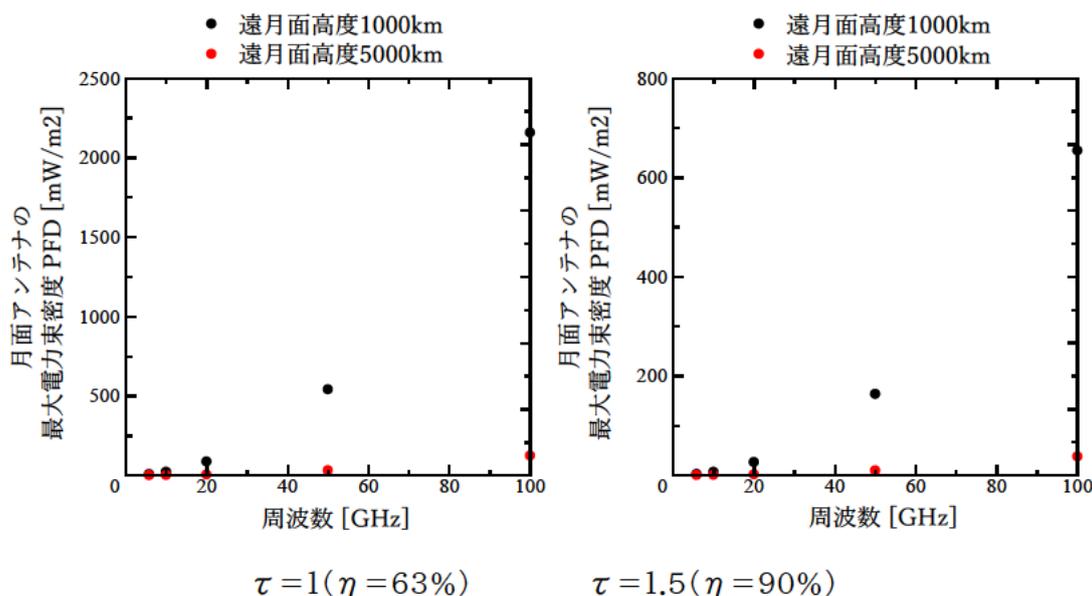


図 2-73 周波数と PFD の関係

出所) 東洋大学

### (3) 小電力レクテナの検討結果

ここではミリ波領域における 1mW 以下の受電電力で動作するレクテナについての検討結果を示す。表 2-44 に周波数 20GHz から 100GHz までの入力電力 1mW 以下の整流器・レクテナの感度点を示す。ここでの感度点は、出力負荷開放時に出力 DC 電圧が 0.5V となる入力電力である。整合 DC 負荷を接続したときの整流効率、一般に 10% を大きく下回るため、実用上の動作下限であると想定する。

表 2-44 周波数 20GHz から 100GHz までの入力電力 1mW 以下の整流器・レクテナの感度点

|               | [1]         | [2]          | [3]         | [4]       | 金沢工大              | 金沢工大          |
|---------------|-------------|--------------|-------------|-----------|-------------------|---------------|
| Technology    | 65nm CMOS   | 65nm CMOS    | 65nm CMOS   | GaAs SBD  | 0.18 $\mu$ m GaAs | 45nm SOI CMOS |
|               | Rectenna IC | Rectifier IC | Rectenna IC | MA4E 1317 | Rectenna IC       | Rectenna IC   |
| Frequency     | 60GHz       | 52GHz        | 24GHz       | 24GHz     | 28GHz             | 28GHz         |
| Sensitivity S | -8dBm       | -11dBm       | -13dBm      | -3dBm     | -12dBm            | -15dBm        |

- [1] H. Gao, et al., "A 60-GHz energy harvesting module with on-chip antenna and switch for co-integration with ULP radios in 65-nm CMOS with fully wireless mm-wave power transfer measurement," IEEE ISCAS2014, pp. 1640-1643, 2014.  
 [2] H. Gao, et al., "A 50 – 60 GHz rectifier with -7dBm sensitivity for 1 V DC output voltage and 8% efficiency in 65-nm CMOS," IEEE IMS2014, 2014.  
 [3] M. Tabesh, et al., "A power-harvesting pad-less millimeter-sized radio," IEEE JSSC, vol. 50, no. 4, pp. 962-977, 2015  
 [4] S. Ladan, Ajay Babu Guntupalli, Ke Wu, "A High-Efficiency 24 GHz Rectenna Development Towards Millimeter-Wave Energy Harvesting and Wireless Power Transmission," IEEE Trans. CAS-I, vol. 61, no 12, pp.3358-3366, 2014.

出所) 金沢工業大学

表 2-44 より感度点は-3dBm~-15dBm(500 $\mu$ W~32 $\mu$ W)である。金沢工業大学で開発した 28GHz 帯における 0.18 $\mu$ m GaAs GAD によるレクテナ IC では感度点-12dBm<sup>13</sup>、45nm SOI-COMS によるレクテナ IC では感度点-15dBm<sup>14</sup>であり、いずれも 10 $\mu$ W 程度の受電の可能性のあるシステムでの適用は困難である。0.18 $\mu$ m GaAs GAD では閾値が 0.5V 程度と高いため、そして 45nm SOI-COMS では Si 基板の損失に起因する端子間の抵抗のため、より低電力での動作が困難である。

ここでは、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<sup>15</sup>の適用による小電力整流器の高感度化を検討する。金沢工業大学では Si SBD と同等の低閾値化を実現した 0.8 $\mu$ m GaAs GAD を用い 920MHz 帯において感度点-36dBm(250nW)の整流器を得ている<sup>16</sup>。これを微細化した 0.25 $\mu$ m GaAs GAD の特性を予測し、小電力での整流特性の改善を図る。表 2-45 に小電力レクテナ用整流素子の性能をまとめる。ここで示した 0.25 $\mu$ m GaAs GAD を用い、図 2-74 に示す小電力レクテナ用整流器の構成での整流特性を求める。誘導性の高インピーダンス 10k $\Omega$ のアンテナを整流器に直接接続する構成である。

表 2-45 小電力レクテナ用整流素子の性能

|              | Si-SBD<br>SMS7630  | 0.18 $\mu$ m<br>GaAs<br>GAD | 0.8 $\mu$ m<br>GaAs<br>GAD | 0.25 $\mu$ m<br>GaAs<br>GAD |
|--------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Manufacturer | Skyworks           | WIN<br>Semcon.              | Nisshinbo<br>MD            | Nisshinbo<br>MD             |
| Vf           | 0.08 V             | 0.37 V                      | 0.13 V                     | 0.13 V                      |
| fc0          | 66 GHz             | 810 GHz                     | 92 GHz                     | 654 GHz                     |
| Vbr          | 1.9 V              | 8.3 V                       | 26 V                       | 5 V                         |
| Status       | Mass<br>production | Mass<br>production          | Mass<br>production         | Prediction                  |

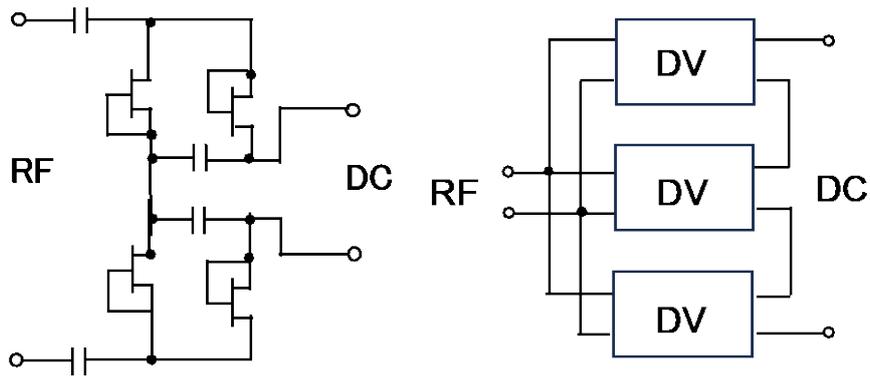
出所)金沢工業大学

<sup>13</sup> 小林章伸,平井司,廣瀬裕也,坂井尚貴,伊東健治, "インピーダンス変成微小ループアンテナを用いる 28GHz 帯 GaAs 高効率レクテナ MMIC," 信学技報 MW2023-86, 2023

<sup>14</sup> 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

<sup>15</sup> 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

<sup>16</sup> 平瀬大暉,廣瀬裕也,平井司,加藤岳,河野孝昌,坂井尚貴,伊東健治, 低閾値 GaAs GAD を用いる 920MHz 帯高ダイナミックレンジ微弱電力レクテナ," 信学技報 MW2023-179, 2023



(a)平衡入力の倍電圧整流器(DV) (b)DC 出力電圧を3倍する3段スタック倍電圧整流器

図 2-74 GaAs GAD を用いる小電力レクテナ用整流器の構成

出所)金沢工業大学

図 2-75 に倍電圧整流器、図 2-76 に3段スタック倍電圧整流器の入出力特性をそれぞれ示す。いずれも DC 負荷は整合終端なので、感度点を 0.25V で定義すると、-20dBm(10 $\mu$ W)以下であり、表 2-44 に示す過去の発表より大幅に改善されている。図 2-77 に小電力整流器の特性をまとめる。倍電圧整流器と3段スタック倍電圧整流器の整流効率は 60GHz では同等で 50%程度である。60GHz 以下では3段スタック倍電圧整流器のほうが高効率である。従来の 45nm SOI-COMS によるレクテナ IC では、-10dBm(100 $\mu$ W)入力時に整流効率 20%程度なので、大幅に効率が改善されている。前述のアンテナインピーダンス 10k $\Omega$ の実現、微細化による GaAs GAD の高遮断周波数化が課題である。

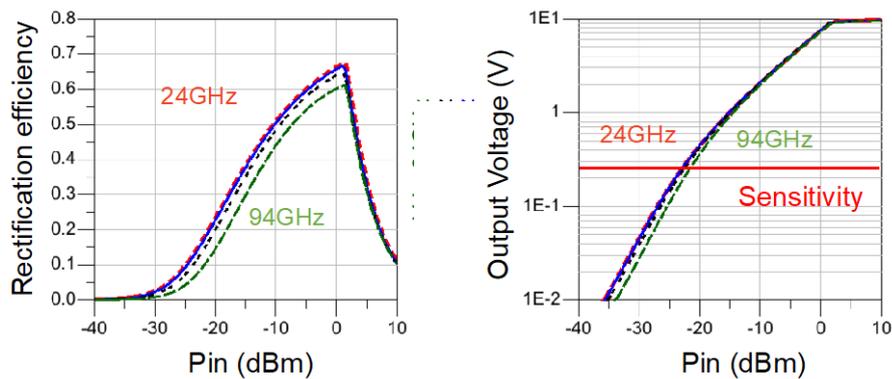


図 2-75 倍電圧整流器の入出力特性(DC 負荷は整合終端)

出所)金沢工業大学

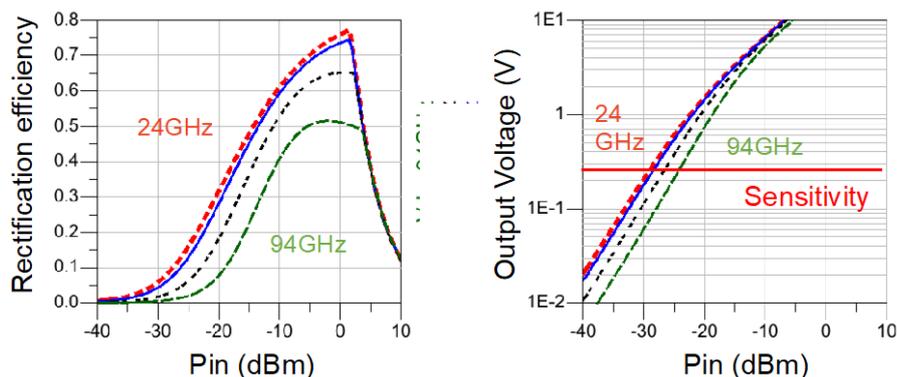


図 2-76 3段スタック倍電圧整流器の入出力特性(DC 負荷は整合終端)

出所)金沢工業大学

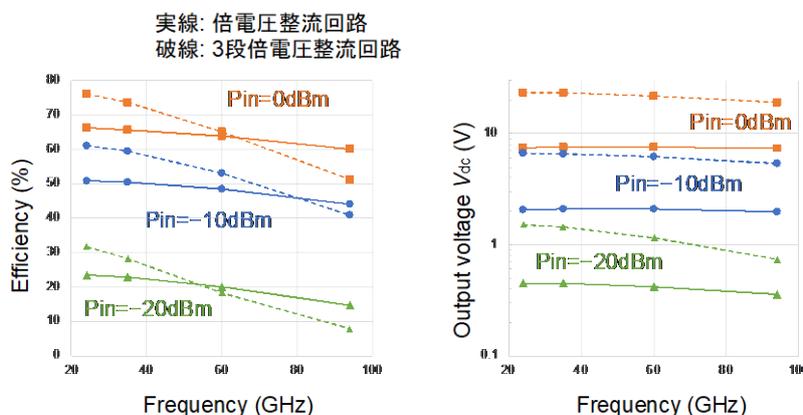


図 2-77 小電力整流器の特性まとめ

出所)金沢工業大学

#### (4) 送電デバイスの検討

地球周回 SPS では、S 帯または C 帯のマイクロ波の使用が検討されているが、月周回 SPS では、アンテナサイズを小さくするためにミリ波の利用が考えられる。各周波数帯での送電システムにおいて、電力増幅器の効率は全体システム効率向上のために重要である。電力増幅器の開発状況に関して、表 2-46 から表 2-48 に示す。

V 帯(40-75GHz)から 110GHz 以上の周波数にわたり、電力増幅器においては GaAs、GaN、Si、InP のトランジスタが使われていることが分かる。微細加工技術の進展により、半導体材料によらず同程度の  $f_T$  や  $f_{max}$  が得られていることが理由である。このため要求出力電力レベル、要求消費電力、コスト、および PAE を考慮してプロセスが選ばれている。

5G 通信応用では、基地局のマイクロセル化およびマッシブ MIMO 化(デジタルビームフォーミング)が進み、要求される増幅器出力電力レベルが小さくなっている。現状の 5G 基地局では、帯域 3.5-3.9GHz で飽和出力 48dBm、9dB 出力バックオフ時効率 50%程度の RF 電力モジュールが使われている。この一方で1基地局当たりが必要とされる電力増幅器の数は 64 個~256 個と、4G-LTE 基地局での 1 個と比較して格段に増えている。このため、モジュールの小型化と発熱防止のための高効率化が進んでいる。さらに B5G (Beyond 5th Generation)から 10 年後の 6G においては、RoF

(Radio over Fiber)化により、無線ネットワークのマイクロセル化からピコセル化へ進み、基地局出力は現在の10分の1以下となることが想定され、CMOSのミリ波帯での応用が無視できない。この時点での飽和出力は5W程度と見込まれる。

表 2-46 V 帯(40-75GHz)電力増幅器の現状

| Year | Technology          | Freq. (GHz) | Topology             | N. of stages   | $P_{SAT}$ (dBm) | $PAE_{SAT}$ (%) | SS Gain (dB) |
|------|---------------------|-------------|----------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 2003 | 100 nm GaAs mHEMT   | 32          | combined             | 2              | 35              | 40              | 24           |
| 2004 | 150 nm GaAs mHEMT   | 18-40       | single-ended         | 2              | 9.5             | -               | 20           |
| 2010 | 300 nm GaAs pHEMT   | 40          | combined             | 2              | 37.9            | 17              | 9            |
| 2012 | 150 nm GaAs pHEMT   | 17-35       | combined             | 1              | 22.5            | 30              | 10           |
| 2007 | 500 nm InP DHBT     | 38          | cascode combined     | 2              | 30.6            | 28.6            | 15           |
| 2008 | InP DHBT            | 20          | combined             | 2              | 32              | 37.8            | 17           |
| 2007 | 130 nm SiGe BiCMOS  | 25-40       | balanced             | 2              | 17              | 5               | 10           |
| 2016 | 180 nm SiGe HBT     | 20-28       | combined             | 2              | 29.5            | 13              | -            |
| 2018 | 130 nm SiGe BiCMOS  | 12-40       | distributed          | 4 <sup>a</sup> | 19              | 8               | -            |
| 2014 | 100 nm GaN HEMT     | 6-37        | distributed          | 5 <sup>b</sup> | 30              | 7               | 10           |
| 2015 | 200 nm GaN/SiC HEMT | 26-30       | combined             | 2              | 45.5            | 32              | 22           |
| 2018 | 100 nm GaN/Si HEMT  | 37-43       | combined             | 3              | 40              | 23              | 18           |
| 2019 | 100 nm GaN/SiC HEMT | 26-35       | combined             | 3              | 37.8            | -               | 22           |
| 2016 | 28 nm bulk CMOS     | 28          | stacked              | 2              | 19.8            | 43              | 13.6         |
| 2018 | 90 nm CMOS          | 22-30       | cascode combined     | 1              | 25              | 27              | 15           |
| 2020 | 45 nm CMOS SOI      | 24-40       | differential cascode | 2              | 19              | 36.6            | 12           |

出所)R.Nikandish, "GaN Integrated Circuit Power Amplifiers:Developments and Prospects," IEEE Journal of Microwaves, vol.3,No.1,pp/441-452, Jan. 2023

表 2-47 W 帯(75-110GHz)電力増幅器の現状

| Year | Technology         | Freq. (GHz) | Topology             | N. of stages | $P_{SAT}$ (dBm) | $PAE_{SAT}$ (%) | SS Gain (dB) |
|------|--------------------|-------------|----------------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 2005 | 150 nm GaAs pHEMT  | 45          | 4-way combined       | 2            | 34.5            | 25              | 13           |
| 2005 | 150 nm GaAs pHEMT  | 60          | 8-way combined       | 2            | 32.5            | -               | 25           |
| 2015 | 100 nm GaAs pHEMT  | 71-76       | 8-way combined       | 4            | 28              | 13              | 26           |
| 2018 | 70 nm GaN HEMT     | 70-86       | 8-way combined       | 4            | 30              | 8               | 16           |
| 1994 | 150 nm InP HEMT    | 44.5        | single-stage         | 1            | 28              | 31              | 7            |
| 2015 | 150 nm InP HEMT    | 71-76       | 4-way combined       | 2            | 26              | 23              | 10           |
| 2016 | 90 nm SiGe         | 68-91       | 16-way combined      | 3            | 27.3            | 12.4            | 19.3         |
| 2014 | 28 nm bulk CMOS LP | 40-67       | differential         | 2            | 13              | 16              | 13           |
| 2019 | 45 nm CMOS SOI     | 56-63       | 24-way combined      | 3            | 28.5            | 15              | 24           |
| 2019 | 45 nm CMOS SOI     | 60          | differential Doherty | 3            | 20.1            | 26 <sup>a</sup> | 13           |

出所)R.Nikandish, "GaN Integrated Circuit Power Amplifiers:Developments and Prospects," IEEE Journal of Microwaves, vol.3,No.1,pp/441-452, Jan. 2023

表 2-48 110GHz帯以上の電力増幅器現状

| Year | Technology         | Freq. (GHz) | Topology        | N. of stages | $P_{SAT}$ (dBm) | $PAE_{SAT}$ (%) | SS Gain (dB) |
|------|--------------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 2018 | 150 nm GaN HEMT    | 102–118     | 8-way combined  | 5            | 29.5            | 13              | 20           |
| 2018 | 100 nm GaN HEMT    | 115         | cascode         | 4            | 20.3            | 2.6             | 34.8         |
| 2017 | 250 nm InP HBT     | 200–255     | 16-way combined | 3            | 17–24           | 4.1             | 24           |
| 2015 | 35 nm GaAs mHEMT   | 250         | 4-way combined  | 3            | 10              | 2.9             | 32.8         |
| 2018 | 35 nm GaAs mHEMT   | 240         | 3-stacked       | 2            | 10.8            | 5               | 21.5         |
| 2017 | 130 nm SiGe BiCMOS | 160         | differential    | 5            | 15.5            | 7.2             | 30           |
| 2012 | 65 nm CMOS         | 140         | 8-way combined  | 4            | 13.2            | 14.6            | 16           |
| 2018 | 40 nm CMOS         | 140         | 2-way combined  | 3            | 14.8            | 8.9             | 20.3         |
| 2018 | 65 nm CMOS         | 114–131     | differential    | 4            | 14.5            | 10.2            | 22.3         |

出所)R.Nikandish, “GaN Integrated Circuit Power Amplifiers: Developments and Prospects,” IEEE Journal of Microwaves, vol.3, No.1, pp/441–452, Jan. 2023

次に GaN デバイスについて整理する。30GHz 帯以上と以下に分けて GaN を用いた電力増幅器の開発例をそれぞれ表 2-49、表 2-50 に示す。いずれも高調波処理を前提に設計されたもので PAE の最大化を目指したものであるが、6GHz 帯においても PAE は 40～60%と低調であり、企業・研究機関間での回路設計技術力が大きいことが見て取れる。また 90GHz 帯では PAE は 20%程度と無線電力伝送への応用レベルには遠く達していないことが分かる。

また、表 2-51 から表 2-54 には無線電力伝送用帯域として有望な、5.8GHz 帯、24GHz 帯、90GHz 帯以上で GaN HEMT 電力増幅器と InP HEMT 電力増幅器に関して学術誌に公表された出力/PAE に関するデータを示す。電気通信大学では C 帯マイクロ波を用いた SPS 用の R 級(高調波リアクタンス終端)増幅器を開発しているが、その特性を併せてプロットすると図 2-78 のようになる。この図から分かるように 20GHz を越えると効率が大きく低下している。これは回路的損失と能動デバイスの制約の両方が関係している。回路的損失には、マイクロストリップ線路などの受動素子の損失の問題があり、高調波処理を実施しても処理回路の損失でかえって熱にされてしまうという問題がある。これを回避するためには、低損失の受動部品を開発する必要がある。一般にミリ波帯など周波数が高くなった場合、回路基板厚を薄くして不要伝搬モードを抑制する必要がある。基板厚が薄くなると 50Ω 特性インピーダンスを保つためのマイクロストリップ導体幅も狭める必要がある。宿命的に導体損失が増大するという問題が生ずる。これを回避するためには、基板誘電率を小さくする、ストリップ線路構造を避けマイクロストリップ構造にして原理的に導体幅を広げる工夫をする、表皮効果を考慮して導体材料・導体接着金属を選ぶ、回路合成を極力避け空間電力合成するなどの工夫が必要である。能動デバイスの制約としては、トランジスタの性能そのものが低下していることが挙げられる。トランジスタの効率は高調波を含めたロードプル測定により見積もられるが、ロードプル装置自体の損失が数 dB 以上と大きく高精度での測定キャリブレーションが難しいという問題がある。したがって表に示した増幅器モジュール効率から推定するが、GaN デバイスでいうと 30GHz 帯までは 60%程度の効率が期待できるが、60GHz では 30%程度、100GHz では 10%程度である。

これに対して 2023 年 4 月に下記のブレイクスルー技術が発表された。一般にはゲート電圧により 2 次元電子ガスが生ずる GaN チャネルのポテンシャルを制御して電流を制御するのが HEMT の原理と説明されているが、高電圧動作の場合はあまり正しい説明といえない。現実には二次元電子ガスは基

板側に大きく漏れて電子速度が低下して、HEMT とは言えない動作状態になる。この基板電流の抑制はかつて GaAs HEMT でも問題でありこのため当初は普及しなかったが、イリノイ大学で InGaAs の歪み格子層を設けたダブルヘテロ構造 GaAs HEMT(pHEMT)が発明され実用化して世界に普及した経緯がある。GaN においてもこの点に着目してバックバリア(基板側界面に電子障壁を設ける)研究が一部で行われていたが、U. Mishra らのグループによりピエゾ電界を利用した N 極 GaN を基板界面に備えることにより簡易にバックバリアを構成でき、94GHz で 42%の電力効率(ロードプル測定推定値)が得られることが報告された<sup>17</sup>。この方法に関しては他機関で追試の確認が未だされていないようであるが、U. Mishra らはこれまで低雑音 HEMT など先駆的な研究成果を挙げており、信頼性の高いデータの可能性が高い。

N 極 GaN による GaN HEMT の基板界面処理技術と低損失受動回路技術の進展により、今後 60GHz程度までは 70%の電力効率を得られる可能性が出てきたと言える。

表 2-49 GaN を用いた電力増幅器開発例(30GHz帯以下)

| Frequency     | V <sub>DD</sub> | P <sub>out</sub> | PAE | GaN Process       |
|---------------|-----------------|------------------|-----|-------------------|
| 2.8–3.5 GHz   | 40 V            | 135 W            | 47% | 250-nm GaN-on-SiC |
| 5.0–5.8 GHz   | 30 V            | 40 W             | 45% | 250-nm GaN-on-SiC |
| 5.6–6.3 GHz   | 28 V            | 35 W             | 61% | 250-nm GaN-on-SiC |
| 5.0–6.0 GHz   | 28 V            | 60 W             | 40% | 250-nm GaN-on-SiC |
| 8.0–12.0 GHz  | 28 V            | 74 W             | 40% | 250-nm GaN-on-SiC |
| 8.5–10.5 GHz  | 35 V            | 74 W             | 54% | 150-nm GaN-on-SiC |
| 17.3–20.2 GHz | 9 V             | 10 W             | 45% | 100-nm GaN-on-Si  |
| 21.5 GHz      | 20 V            | 8.9 W            | 35% | 150-nm GaN-on-SiC |
| 18.5–24.0 GHz | 20 V            | 4 W              | 40% | 150-nm GaN-on-SiC |
| 27.0–30.0 GHz | 20 V            | 9 W              | 31% | 150-nm GaN-on-SiC |
| 26.0–30.0 GHz | 28 V            | 40 W             | 37% | 200-nm GaN-on-SiC |

(参考文献) R.Nikandish, “GaN Integrated Circuit Power Amplifiers: Developments and Prospects,” IEEE Journal of Microwaves, vol.3, No.1, pp/441-452, Jan. 2023

出所)電気通信大学

<sup>17</sup> Weiyi Li, et al., ”Record RF Power Performance at 94GHz From Millimeter-Wave N-Polar GaN-on-Sapphire Deep-Recess HEMTs,” IEEE Trans. ED, vol.70, No.4, April 2023.

表 2-50 GaNを用いた電力増幅器開発例(30GHz 以上)

| Frequency | V <sub>DD</sub> | P <sub>out</sub> | PAE | GaN Process       |
|-----------|-----------------|------------------|-----|-------------------|
| 40 GHz    | 12 V            | 12 W             | 30% | 100-nm GaN-on-Si  |
| 80 GHz    | 15 V            | 720 mW           | 9%  | 100-nm GaN-on-SiC |
| 84 GHz    | 12 V            | 3 W              | N/A | 100-nm GaN-on-SiC |
| 93 GHz    | 15 V            | 2.6 W            | 21% | 100-nm GaN-on-SiC |
| 95 GHz    | 15 V            | 6 W              | 18% | 100-nm GaN-on-SiC |
| 120 GHz   | 15 V            | 430 W            | 16% | 100-nm GaN-on-SiC |
| 180 GHz   | 15 V            | 38 mW            | 2%  | 100-nm GaN-on-SiC |
| 205 GHz   | 15 V            | 70 mW            | 1%  | 70-nm GaN-on-SiC  |

(参考文献) R.Nikandish, "GaN Integrated Circuit Power Amplifiers: Developments and Prospects," IEEE Journal of Microwaves, vol.3, No.1, pp/441-452, Jan. 2023

出所)電気通信大学

表 2-51 GaN HEMT 電力増幅器 (5-6GHz)

| 出版誌   | 年    | デバイス          | 周波数 (GHz) | 飽和出力 (dBm) | PAE (%)  | 利得 (dB) | プロセス                     |     |
|-------|------|---------------|-----------|------------|----------|---------|--------------------------|-----|
| MWCL  | 2001 | GaN           | 5         | 31         | 25       | 7       | GaN HEMT                 |     |
| JSSC  | 2009 | GaN           | 5         | 41.8       | 38       | 9       | GaN(250nm)               |     |
| EuMIC | 2018 | GaN           | 5         | 39.5       | 28       | 36      | 0.15um                   |     |
| EuMC  | 2018 | GaN           | 5         | 40         | 55       | 15      |                          |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5         | 37         | 46       | 30      |                          |     |
| EuMIC | 2019 | GaN           | 5         | 36         | 48       | 13.5    | 0.25- $\mu$ m GaN-on-SiC |     |
| EuMIC | 2019 | GaN           | 5         | 36.1       | 48       | 12.2    | 250nm GaN on SiC         |     |
| JSSC  | 2020 | GaN           | 5         | 31.9       | 35       | 11      | 250-nm GaN-on-SiC        |     |
| JSSC  | 2020 | GaN           | 5         | 31.9       | 35       | 11      | 250-nm GaN-on-SiC        |     |
| TMTT  | 2003 | GaN           | 5.2       | 35.5       | 42       | 9       | GaN HEMT                 |     |
| TMTT  | 2013 | GaN           | 5.4       | 46         | 44       | 21      | AlGaN/GaN (250nm)        |     |
| IMS   | 2013 | GaN           | 5.4       | 46         | 40       | 21      | AlGaN/GaN (250nm)        |     |
| MWCL  | 2017 | GaN           | 5.4       | 35.2       | 75 (DE)  |         | 0.25- $\mu$ m GaN-on-SiC |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.4       | 44         | 55       | 9.5     | CGH40025F GaN            |     |
| EuMC  | 2018 | GaN           | 5.4       | 48.5       | 46       | 7.5     | 0.25um                   |     |
| EuMIC | 2018 | GaN           | 5.4       | 48.5       | 46       | 8       | 0.25um                   |     |
| MWCL  | 2018 | GaN CGH40025F | 5.4       | 43.5       | 55       | 9.5     |                          |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.4       | 27         | 58       | 16      |                          |     |
| ICMMT | 2018 | GaN           | 5.4       | 52         | 35       | 27      | 0.25um GaN HEMT          |     |
| MIKON | 2018 | GaN           | 5.4       | 46.5       | 42       | 36      | 0.25um GaN               |     |
| TMTT  | 2006 | GaN           | 5.5       | 34         | 45       | 7.5     | GaN HEMT                 |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.5       | 37.68      | 54.6     | 45      | 0.25- $\mu$ m GaN-on-SiC |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.5       | 37.5       | 55       | 32      |                          |     |
| TMTT  | 2019 | GaN           | 5.5       | 37.1       | 39.9     | 6.4     |                          |     |
| TMTT  | 2019 | GaN           | 5.5       | 37.1       | 39.9     | 6.4     |                          |     |
| TMTT  | 2019 | GaN           | 5.5       | 37.1       | 39.9     | 6.4     | GaN                      |     |
| JSSC  | 2020 | GaN           | 5.5       | 32         | 40 (DE)  | 10.2    | 250-nm GaN-on-SiC        |     |
| MWCL  | 2012 | GaN           | 5.65      | 33.3       | 79       | 10      | GaN                      | 電通大 |
| IMS   | 2015 | GaN           | 5.7       | 36.88      | 44.03    |         | GaN                      |     |
| MWCL  | 2013 | GaN           | 5.72      |            |          |         | GaN                      |     |
| MWCL  | 2011 | GaN           | 5.8       | 33         | 20       | 8.3     | GaN                      |     |
| MWCL  | 2017 | GaN           | 5.8       | 47.2       | 63.5     | 10.2    | GaN                      |     |
| MWCL  | 2017 | GaN           | 5.8       | 47.2       | 63.5     | 10.2    |                          |     |
| MWCL  | 2019 | GaN           | 5.8       | 41         | 55       | 10.5    | 0.25um                   |     |
| MWCL  | 2019 | GaN           | 5.8       | 41         | 55(DE)   |         | 0.25um GaN               |     |
| TMTT  | 2015 | GaN           | 5.9       | 33.9       | 48.5(DE) |         | GaN HEMT (250nm)         |     |
| IMS   | 2018 | GaN           | 5.9       | 38.7       | 47.3     | 14.4    | GaN (250nm)              |     |
| TMTT  | 2018 | GaN           | 5.9       | 38.7       | 47.3     | 14.4    | 0.25um                   |     |
| IMS   | 2018 | GaN           | 5.9       | 38.7       | 48.8     | 14.4    |                          |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.9       | 34.5       | 38       | 12      |                          |     |
| MWCL  | 2018 | GaN           | 5.9       | 37         | 42       | 28      |                          |     |
| PAWR  | 2018 | GaN           | 5.9       | 50.8       | 40(DE)   | 14      | 0.25um GaN               |     |
| PAWR  | 2018 | GaN           | 5.9       | 34.6       | 32       |         | GaN                      |     |
| IMS   | 2004 | GaN           | 6         | 30         |          | 10      | AMCOM PHEMT              |     |
| IMS   | 2010 | GaN           | 6         | 40         | 38       | 24.5    | GaN (250nm)              |     |
| MWCL  | 2015 | GaN           | 6         | 46.2       | 51.5     | 22      | 0.25um BiCMOS            |     |
| MWCL  | 2015 | GaN           | 6         | 37.4       | 38       |         |                          |     |
| MWCL  | 2016 | GaN           | 6         | 38         | 42(DE)   | 10      | GaN HEMT TGF2023-01      |     |
| EuMIC | 2018 | GaN           | 6         | 40         | 24.5     | 20      | 0.25um                   |     |
| EuMIC | 2018 | GaN           | 6         | 36         | 26       | 24      | 250nm                    |     |
| EuMC  | 2018 | GaN           | 6         | 37         | 22       | 10      |                          |     |
| WMCS  | 2018 | GaN           | 6         | 35         | 34       | 31      | 0.25umGaN                |     |
| TMTT  | 2020 | GaN           | 6         | 41         | 29       | 20.1    | 0.1um GaN                |     |
| TMTT  | 2020 | GaN           | 6         | 43.7       | 23.7     | 10.8    | 0.25um GaN HEMT          |     |
| TMTT  | 2020 | GaN           | 6         | 33.8       | 33.8     | 8       | 0.25um GaN HEMT          |     |

出所)電気通信大学

表 2-52 GaN HEMT 電力増幅器 (20-30GHz)

| 出版誌         | 年    | デバイス      | 周波数  | 飽和出力 (dBm) | PAE (%) | 利得 (dB) | プロセス                      |
|-------------|------|-----------|------|------------|---------|---------|---------------------------|
| MIKON       | 2014 | GaN 100nm | 19   | 31.7       | 38      | 8.4     | 100nm AlGaIn/GaN HEMT     |
| TMTT        | 2018 | GaN 150nm | 19   | 37.4       | 24      | 20.5    | 100nm GaN                 |
| EuMIC       | 2018 | GaN       | 19   | 37.4       | 18      | 33      | 0.15um                    |
| BCICTS      | 2018 | GaN       | 19   | 36.5       | 40      | 25      | 150nm                     |
| EuMC        | 2019 | GaN       | 19.8 | 35         | 33      | 30      | GaN                       |
| IMS         | 2013 | GaN       | 20   | 36.5       | 17.5    | 17      | AlGaIn/GaN HEMT           |
| IMS         | 2016 | GaN       | 20   | 38.5       | 18.5    |         | GaN                       |
| PAWR        | 2018 | GaN       | 20   | 35         | 37      | 25      | 100nm GaN                 |
| IMS         | 2017 | GaN       | 20.2 | 41         | 35      | 19      |                           |
| IMS         | 2017 | GaN       | 20.2 | 37.5       | 50      | 9       |                           |
| BCICTS      | 2018 | GaN       | 21   | 36.5       | 40      | 25      | 150nm                     |
| JSSCC       | 2019 | GaN       | 21   | 36.5       | 40      | 25      | 150nm GaN                 |
| GeMiC       | 2018 | GaN       | 23   | 33.8       | 35      | 10      |                           |
| BCICTS      | 2018 | GaN       | 23   | 36.5       | 40      | 25      | 150nm                     |
| GeMiC       | 2018 | GaN       | 24   | 30.8       | 26      | 6.2     |                           |
| IMS         | 2020 | GaN       | 25   | 28         | 20      | 8       | GaN                       |
| IMS         | 2011 | GaN       | 26   | 43         | 18.5    | 6.7     |                           |
| PAWR        | 2017 | GaN       | 26   | 33.8       | 42      | 9.5     |                           |
| GeMiC       | 2018 | GaN       | 26   | 37.2       | 32      | 15      |                           |
| IWS         | 2018 | GaN       | 26   | 32         | 21.7    | 18      | 0.15um GaN HEMT           |
| CSICS       | 2006 | GaN       | 26.5 | 37         | 20      | 13      |                           |
| CSICS       | 2017 | GaN       | 26.5 | 43.4       | 19.8    | 11.5    |                           |
| tron Device | 2018 | GaN       | 26.5 | 29         | 14.5    | 17      | 0.15um GaN HEMT           |
| GAAS        | 2005 | GaN       | 27   | 34.1       | 7       | 10.7    |                           |
| EuMIC       | 2006 | GaN       | 27   | 34.1       | 6       | 10      |                           |
| IMS         | 2015 | GaN       | 27   | 46.3       | 36      |         |                           |
| APMC        | 2018 | GaN       | 27   | 35.6       | 25.5    |         |                           |
| APMC        | 2018 | GaN       | 27.7 | 25         | 11.2    | 8.7     | 0.25um                    |
| CSICS       | 2005 | GaN       | 28   | 36         | 23.8    | 15      |                           |
| APCAP       | 2015 | GaN       | 28   | 39         | 26.6    | 23.5    | 150nm AlGaIn/GaN HEMT     |
| APMC        | 2018 | GaN       | 28   | 33         | 36.2    | 13.7    | 100nm                     |
| BCICTS      | 2018 | GaN       | 28   | 46.2       | 25.9    | 30      | 150nm                     |
| EuMC        | 2018 | GaN       | 28   | 33.5       | 24      | 36      | 0.15um                    |
| APMC        | 2018 | GaN       | 28   | 36.33      | 22      |         |                           |
| TMTT        | 2020 | GaN       | 28   | 23         | 30      | 8       | GaN                       |
| AMS         | 2020 | GaN       | 28   | 33         | 31      | 22.4    | 0.15um GaN                |
| IMS         | 2012 | GaN       | 28.5 | 39.4       | 26      | 24      |                           |
| IMWS-5G     | 2018 | GaN       | 28.5 | 25.6       | 25.5    | 15.8    | GaN HEMT                  |
| IMS         | 2020 | GaN       | 28.5 | 36.5       | 26      |         | GaN HEMT                  |
| IMS         | 2012 | GaN       | 29   | 37         | 30      | 25      |                           |
| EuMIC       | 2013 | GaN       | 29   | 36.7       | 28      | 14      |                           |
| EuMIC       | 2013 | GaN       | 29   | 33.8       | 33      | 14      |                           |
| EuMIC       | 2013 | GaN       | 29   | 31.5       | 41      | 14      |                           |
| APCAP       | 2014 |           | 29   | 40.5       | 20      | 18.5    | 150nm AlGaIn/GaN HEMT     |
| INMMIC      | 2018 | GaN       | 29   | 40         | 25      | 24      | GaN                       |
| IMS         | 2020 | GaN       | 29   | 52         | 23      | 24      | GaN                       |
| COMCAS      | 2013 | GaN       | 29.5 | 37.8       | 34      | 28      |                           |
| IMS         | 2003 | GaN       | 30   | 32         |         |         |                           |
| COMCAS      | 2013 | GaN       | 30   | 40.4       | 30      | 28      |                           |
| CSICS       | 2014 | GaN       | 30   | 37.8       |         | 24      | GaN                       |
| EuMC        | 2014 | GaN       | 30   | 21.4       | 16      | 10      |                           |
| CSICS       | 2014 | GaN       | 30   | 34.5       |         | 24      |                           |
| EuMIC       | 2015 | GaN       | 30   | 39.1       | 30      | 18      |                           |
| EuMIC       | 2015 | GaN       | 30   | 36.5       | 33      | 24      |                           |
| IMS         | 2015 | GaN       | 30   | 45.5       | 35      |         |                           |
| APMC        | 2018 | GaN       | 30   | 35.44      | 18      |         |                           |
| EuMIC       | 2019 | GaN       | 30   | 42.5       | 42      | 22      |                           |
| EuMIC       | 2018 | GaN       | 30.5 | 40.5       | 34.5    | 25      | 0.15 μm AlGaIn/GaN on SiC |
| IMS         | 2011 | GaN       | 31   | 42.7       | 21.9    | 7.1     |                           |
| CSICS       | 2015 | GaN       | 31   | 41.9       | 17.4    | 10.1    |                           |
| CSICS       | 2015 | GaN       | 31   | 42.6       | 17.4    | 10.7    |                           |
| CSICS       | 2016 | GaN       | 31   | 37.5       | 32      | 24      |                           |
| CSICS       | 2017 | GaN       | 31   | 37.5       | 35      | 25      |                           |
| EuMIC       | 2019 | GaN       | 31   | 40         | 45      | 16.5    | 0.15 μm GaN               |
| EuMC        | 2019 | GaN       | 31   | 40         | 45      | 19.7    | 0.15um GaN                |
| IMS         | 2020 | GaN       | 31   | 41.9       | 16.1    | 13      | GaN HEMT                  |
| IMS         | 2020 | GaN       | 31   | 41.9       | 16.1    |         | GaN HEMT                  |
| IMS         | 2020 | GaN       | 31   | 51.7       | 21      | 24      | GaN                       |
| IMS         | 2011 | GaN       | 31.5 | 31.7       | 25      | 7.5     |                           |
| APMC        | 2018 | GaN       | 32   | 35.68      | 18      |         |                           |
| IMS         | 2019 | 100nm GaN | 32   | 39.63      | 25      |         |                           |

出所)電気通信大学

表 2-53 GaN HEMT 電力増幅器 (90-200GHz)

| 出版誌         | 年    | デバイス | 周波数 (GHz) | 飽和出力 (dBm) | PAE (%) | 利得 (dB) | プロセス                    |
|-------------|------|------|-----------|------------|---------|---------|-------------------------|
| IMS         | 2011 | GaN  | 91        | 32.3       | 11      | 15      |                         |
| IMS         | 2011 | GaN  | 91        | 30.8       | 20      | 16      |                         |
| L.China: IF | 2017 | GaN  | 91        | 34.9       | 13      | 20      |                         |
| EDSSC       | 2016 | GaN  | 92        | 29         | 14      | 8.7     |                         |
| ISSCC       | 2020 | GaN  | 92        | 37.8       | 18.3    | 15.3    | 100nm AlGaIn/GaN HEMT   |
| IMS         | 2016 | GaN  | 93        | 30         | 20      | 15      |                         |
| TED         | 2016 | GaN  | 93        | 32.2       | 21      | 16.7    |                         |
| IMS         | 2012 | GaN  | 93.5      | 33.3       | 19      | 16.3    |                         |
| IMS         | 2012 | GaN  | 93.5      | 32.6       | 20.5    |         |                         |
| IMS         | 2012 | GaN  | 94        | 29.7       | 19.4    | 17.6    |                         |
| IMS         | 2012 | GaN  | 94        | 24.3       | 21      |         |                         |
| IMS         | 2012 | GaN  | 94        | 23.1       | 24.7    |         |                         |
| EuMC        | 2018 | GaN  | 94        | 33         | 15      | 9       | 0.15um                  |
| EuMC        | 2018 | GaN  | 94        | 30         | 15      | 9       | 0.15um                  |
| CSICS       | 2008 | GaN  | 95        | 26         | 9       | 14.4    |                         |
| IMS         | 2011 | GaN  | 95        | 31.1       | 10      | 21      |                         |
| IEDM        | 2011 | GaN  | 95        | 30.5       | 18.5    | 17.6    |                         |
| IEDM        | 2011 | GaN  | 95        | 30.1       | 19.1    | 17.6    |                         |
| IEDM        | 2011 | GaN  | 95        | 28.3       | 20.8    | 17.6    |                         |
| IMS         | 2018 | GaN  | 95        | 27.7       | 5.2     | 12      |                         |
| IMS         | 2018 | GaN  | 102       | 27         | 14      | 20      | 0.14um                  |
| IMS         | 2018 | GaN  | 114       | 29         | 13      | 20      | 0.14um                  |
| IMS         | 2018 | GaN  | 115       | 20.3       |         | 30      | 100nm                   |
| RWS         | 2018 | GaN  | 120       | 17.4       | 4.3     | 18      |                         |
| TMTT        | 2019 | GaN  | 120       | 26.4       | 16.5    | 26      | 100nm GaN               |
| RWS         | 2018 | GaN  | 147       | 18.2       | 1.7     | 17      |                         |
| IMS         | 2020 | GaN  | 155       |            |         | 30      | deep submicron GaN HEMT |
| CSICS       | 2014 | GaN  | 180       | 13.74      | 3.5     | 4.5     |                         |
| TMTT        | 2019 | GaN  | 181       | 15.8       | 2.4     | 11.8    | 100nm GaN               |
| IMS         | 2019 | GaN  | 190       | 14.1       | 1.2     | 12      | 50nm GaN HEMT           |
| IMS         | 2020 | GaN  | 195       | 16.9       | 1.7     | 19      | deep submicron GaN HEMT |
| IMS         | 2020 | GaN  | 205       | 15         | 1.1     | 13      | deep submicron GaN HEMT |

出所)電気通信大学

表 2-54 InP HEMT 電力増幅器 (90-120GHz)

| 出版誌   | 年    | デバイス | 周波数 (GHz) | 飽和出力 (dBm) | PAE (%)       | 利得 (dB) | プロセス                         |
|-------|------|------|-----------|------------|---------------|---------|------------------------------|
| CSICS | 2016 | InP  | 90        | 22         | 14.7          |         |                              |
| MWCL  | 2019 | InP  | 90        | 19.7       | 6.9           |         | InP HBT                      |
| IMS   | 2019 | InP  | 90        | 16         |               | 19      |                              |
| IMS   | 2019 | InP  | 90        | 21.37      | 8.7           | 14      |                              |
| IMS   | 2021 | InP  | 90        | 19         | 19            | 15.1    | 250nm InP HBT                |
| MWCL  | 2021 | InP  | 90        | 19.6       | 34            | 6       | 250nm InP HBT                |
| MWCL  | 2021 | InP  | 90        | 18.7       | 33            | 11.8    | 250nm InP HBT                |
| EuMIC | 2021 | InP  | 90        | 16         | 18            | 10      | 0.8 μm InP-DHBT              |
| MWCL  | 2020 | InP  | 92        | 20.1       | 22.2          |         |                              |
| MWCL  | 2017 | InP  | 93        | 12         | 41.7          |         |                              |
| EDL   | 2014 | InP  | 94        | 11         | 27.7          |         |                              |
| EDL   | 2014 | InP  | 94        | 12.8       | 25.2          |         |                              |
| IMS   | 2016 | InP  | 94        | 20.2       | 28.6          |         |                              |
| EuMIC | 2016 | InP  | 95        | 14.4       | 31            | 5.6     |                              |
| IMS   | 2020 | InP  | 95        | 21         | 24            | 13      | 250 nm InP                   |
| MWCL  | 2020 | InP  | 96        | 20.3       | 21.2          | 20      |                              |
| IMS   | 2016 | InP  | 97        | 20.2       | 21.6          | 15      |                              |
| MWCL  | 2021 | InP  | 98        | 20         | 33            | 5.3     | 250nm InP HBT                |
| MWCL  | 2021 | InP  | 98        | 18.75      | 31.6          | 9.2     | 250nm InP HBT                |
| MWCL  | 2019 | InP  | 100       | 20         | 7.2           | 21      | InP HBT                      |
| IMS   | 2019 | InP  | 100       | 21.79      | 3.9           | 12.5    |                              |
| IMS   | 2019 | InP  | 100       | 21.07      | 8.2           | 14.5    |                              |
| MWCL  | 2020 | InP  | 100       | 20.3       | 22            | 28      |                              |
| IMS   | 2021 | InP  | 100       | 19         | 14.9          | 14.9    | 250nm InP HBT                |
| APMC  | 2020 | InP  | 100       | 15.4       | 10            |         | InP HBT                      |
| MWCL  | 2020 | InP  | 104       | 19.6       | 19.6          | 30      |                              |
| IMS   | 2016 | InP  | 110       | 20.2       | 22.5          | 18      |                              |
| MWCL  | 2018 | InP  | 110       | 11         | 8             | 13      | InP DHBT                     |
| MWCL  | 2019 | InP  | 110       | 20.6       | 8.7           | 25      | InP HBT                      |
| IMS   | 2019 | InP  | 110       | 23.24      | 5.8           | 14.25   |                              |
| IMS   | 2019 | InP  | 110       | 20.93      | 8.2           | 14.5    |                              |
| EuMIC | 2019 | InP  | 110       | 18.3       | 4.2           | 11      |                              |
| TMTT  | 2020 | InP  | 110       | 20.9       | 19.2          | 10.5    | InP HBT                      |
| IMS   | 2020 | InP  | 110       | 13.5       | 7             | 12      | 0.5 μm emitter size InP DHBT |
| MWCL  | 2020 | InP  | 110       | 16.5       | 12.5          | 10      |                              |
| TMTT  | 2020 | InP  | 110       | 20.2       | 19.2          | 6.5     |                              |
| MWCL  | 2020 | InP  | 110       | 16-18      | 2.5 @ 110 GHz | 10.5    | InP HBT                      |
| APMC  | 2020 | InP  | 110       | 16.7       |               |         | InP HBT                      |
| MWCL  | 2019 | InP  | 115       | 21         | 10.5          | 28      | InP HBT                      |
| IMS   | 2019 | InP  | 115       | 20.9       | 8             | 14.5    |                              |
| EuMIC | 2019 | InP  | 115       | 19.24      | 5.6           | 13      |                              |
| IMS   | 2016 | InP  | 118       | 19.3       | 18.9          |         |                              |

出所)電気通信大学

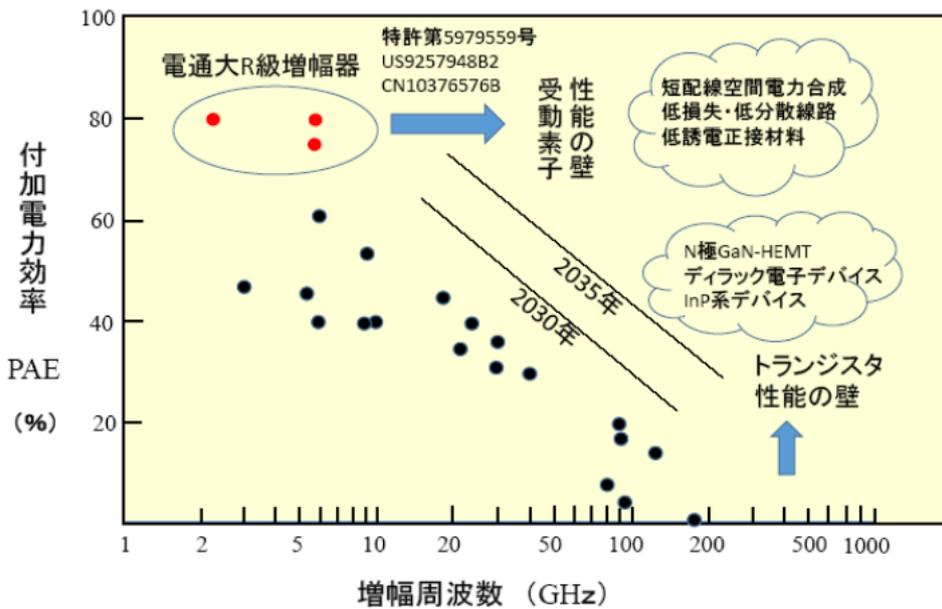


図 2-78 電力増幅器の付加電力効率の現状と将来予測

出所)電気通信大学

電子管デバイスに関しては、大出力化は今後も重要な研究開発項目である。図 2-79 に市販電子管の現状、表 2-55 に市販電子管の特性を示す。大出力は電子管デバイスの特徴であるが、CW 開発は用途次第(レーダー等、パルス用途も多い)である。高周波化に関しては、THz をターゲットとした研究開発が進められているが、寿命に関する研究開発の議論はみられない。陰極材料の研究開発が、実質的には大出力化、長寿命化の議論と繋がる。基本的には、現状の諸元例に示した効率値で頭打ちであり、効率向上が見込まれたとしても以下の理由により数ポイント程度と考えられる。

10GHz 以下の市販品に関しては、開発終了品がほとんどであり今後の大幅な改善は見込めない。10GHz 以上の市販品および将来の開発品に関しては、高周波化に伴う作用空間の縮小により真空管内の電子運動に対して、より精密な電磁界制御が必要となる。電磁波エネルギーに変換されない電子運動エネルギーの残存はエネルギー損失となるため、高周波ほど高効率化が困難である。

諸元例の通り、大電力デバイスになるほど質量は増加する。電子管本体の質量のみならず、駆動電源の質量も加味する必要がある。一般論としては、電力増とともに電源質量も増加するが、月面や衛星で使用する高電圧駆動電源に関しては今後の検討が必要である。既存の高電圧駆動電源は、三相交流商用電源が入力源であるが、月面や衛星で三相交流を作ることは現状考えにくく、DC-DC コンバータでの高電圧駆動の研究開発が必要と考える。クライストロン、ジャイロトロンは、駆動電源に加えて高磁場発生用の電磁石電源も必要であり、その分の質量が追加される。

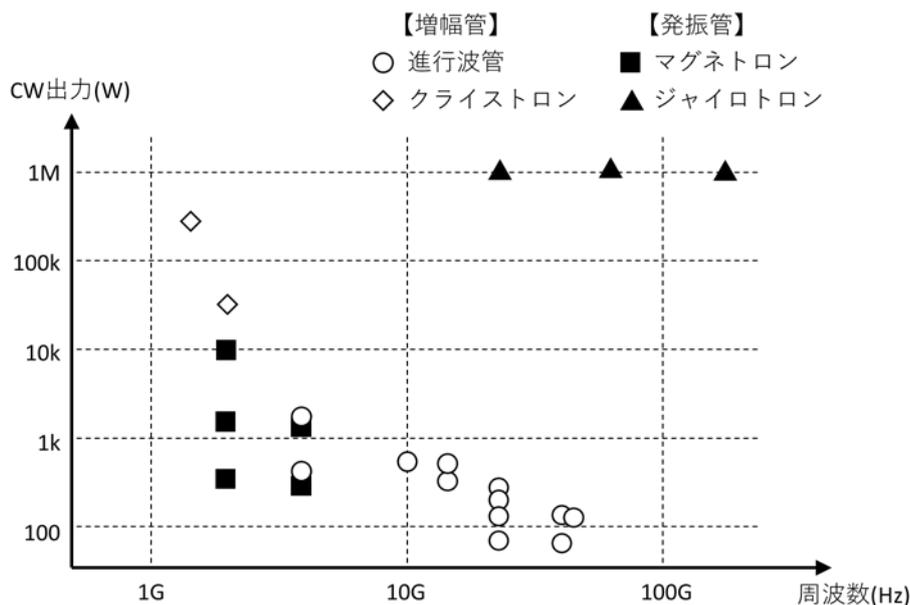


図 2-79 市販電子管の現状(パルス出力は除く)

出所) 京都大学

表 2-55 電子管の特性

| 種別      | 型番                    | メーカー              | 周波数<br>(GHz) | CW 出力<br>(W) | 質量<br>(kg) | 効率<br>(%)         |
|---------|-----------------------|-------------------|--------------|--------------|------------|-------------------|
| 進行波管    | LD7360 <sup>[1]</sup> | NEC ネット<br>ワークセンサ | 27.5-31.0    | 500          | 3.6        | 45                |
|         | LD7727 <sup>[2]</sup> | NEC ネット<br>ワークセンサ | 47.2-51.4    | 150          | 4.2        | 30                |
| クライストロン | E37750 <sup>[3]</sup> | キャノン電子<br>管デバイス   | 1.3          | 300k         | 180        | 63                |
|         | E3739B <sup>[3]</sup> | キャノン電子<br>管デバイス   | 2.45         | 30k          | 30         | 58                |
| マグネトロン  | H0915 <sup>[4]</sup>  | 日立                | 2.46         | 10.0         | 5.0        | 62.5              |
|         | M5803 <sup>[5]</sup>  | パナソニック            | 5.8          | 1.5          | 2.3        | 58.5              |
| ジャイロトロン | E39200 <sup>[6]</sup> | キャノン電子<br>管デバイス   | 28           | 1M           | 750        | -                 |
|         | E39104 <sup>[6]</sup> | キャノン電子<br>管デバイス   | 170          | 1M           | 820        | 50 <sup>[7]</sup> |

出所) [1]: LD7360 カタログより

[2]: NEC ネットワークセンサ PRODUCT LINE-UP カタログより

[3]: <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/klystron.html>

[4]: <https://www.hitachi-power-solutions.com/product/magnetron/magnetron/products/h0915/index.html>

[5]: M5803 データシートより

[6]: <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/gyrotron.html>

[7]: 文献からの推定値 Y. Oda, et. al, "Development of the first ITER gyrotron in QST", Nuclear Fusion, vol. 59, paper no. 086014, 2019.

## (5) 宇宙用高周波アンテナの検討

宇宙用のパラボラアンテナとしては固定鏡面か展開鏡面型かで技術は大きく異なる。基本的に展開鏡面型はロケットフェアリングに適合するために開口径 3m 以上の大型アンテナに多い。固定鏡面型は逆に開口径 3m 以下の比較的小きなアンテナに多い。ここでは固定鏡面型と展開鏡面型に分けて、現状の技術と将来技術について記載する。

### 1) 固定鏡面型パラボラアンテナ

固定鏡面型のパラボラアンテナは比較的高周波まで対応可能なものが開発されてきている。大型の物では CFRP スキンのハニカムパネルを鏡面としたものが多い。近年は通信用のパラボラアンテナも Ka 帯まで使用可能なものは多く、フライト実績も豊富である。例えば、きずな(WINDS)には Ka 帯の 2.4m サイズのパラボラアンテナが 2 式搭載されていた。図 2-80 にきずなの外観を示す。



図 2-80 きずな(WINDS)

出所) [https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/wp-content/uploads/sites/3/2021/07/top\\_image-10.png](https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/wp-content/uploads/sites/3/2021/07/top_image-10.png)

特に高周波帯まで対応可能としたものでは EarthCARE (Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer) に搭載される CPR (Cloud Profiling Radar) のパラボラ鏡面がある。帯域は 94GHz である。ただし、このような高周波数対応のパラボラ鏡面では熱変形の影響が大きく、CPR でもそれなりの対策を講じている。CPR の鏡面は開口径約 2.5m である。EarthCARE/CPR の外観を図 2-81 に示す。



図 2-81 EarthCARE/CPR

出所) [https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/wp-content/uploads/sites/3/2021/07/top\\_image-13.png](https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/wp-content/uploads/sites/3/2021/07/top_image-13.png)

一方、小型のサイズの鏡面の場合にはより高周波まで対応可能としたパラボラアンテナも多い。過去に実績がある物としては国際宇宙ステーションに搭載された SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder) のサブミリ波アンテナの鏡面部がある。これは 650GHz 帯での観測を目的としたもので、サイズは 20~30cm、材質はアルミである。従来はこのよう

な高周波数帯のパラボラアンテナは比較的サイズが小さくて済むこともあり、アルミ製のものが多い。図 2-82 に SMILES の概要を示す。

また、固定鏡面型的一种として後述する扇子型展開アンテナを固定鏡面としたものの構想がある。これはメッシュアンテナの一種であるが鏡面バックアップストラクチャを展開型とせずメッシュを張架して反射鏡としたもので、ソリッド鏡面のものと比較して軽量化が見込まれる。搭載性を考えると最大径は 1m 程度であるが Ka 帯までは現状の技術で開発可能である。それ以上の周波数帯域となると反射面のメッシュや鏡面精度の達成の観点で開発要素がある。図 2-83 に開口径 1m の扇子型展開アンテナを示す。

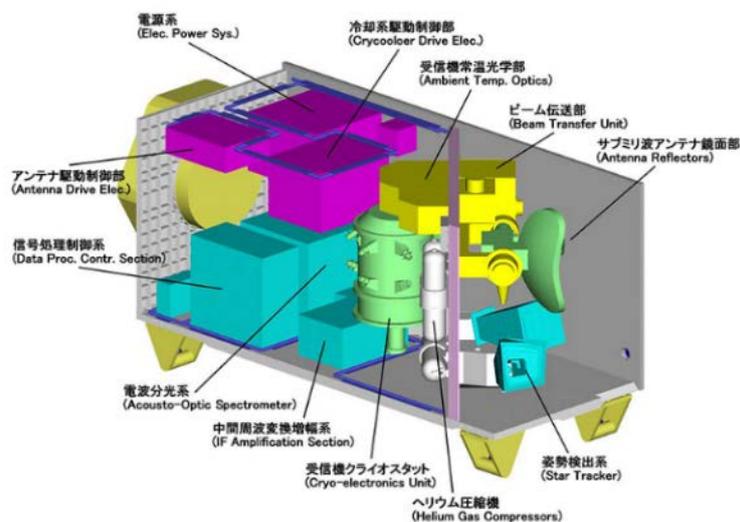


図 2-82 SMILES

出所) [https://smiles.tksc.jaxa.jp/about/img/img2\\_b.png](https://smiles.tksc.jaxa.jp/about/img/img2_b.png)

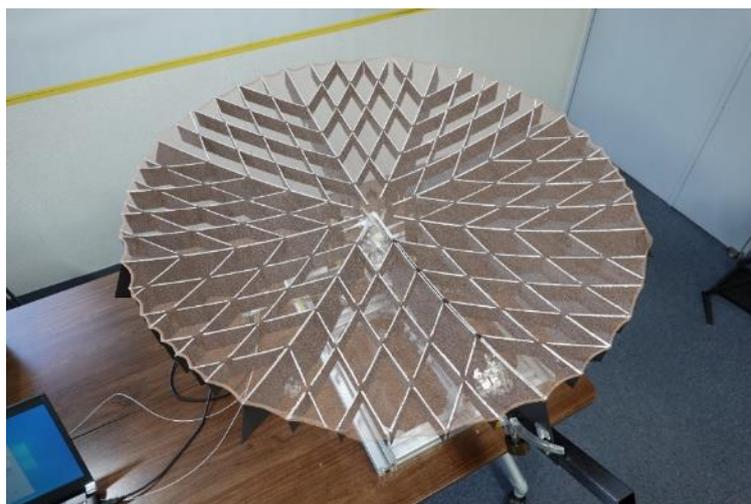


図 2-83 開口径 1m 扇子型展開アンテナ

出所)テクノソルバ

## 2) 展開鏡面型パラボラアンテナ

展開鏡面型とは鏡面そのものが展開(形状が変化)するという意味である。打上時に衛星構体側面に保持していたパラボラアンテナを単に「展開」するものは固定鏡面型に含めている。

展開鏡面型は比較的大型の物が多く、開口径は 3m 以上のものが大半である。展開鏡面型は 2 分割や 3 分割もしくは多数に分割した鏡面を展開するものと、反射鏡面を金属メッシュなどのフレキシブルな素材として展開型のバックアップストラクチャによりメッシュを展開し、パラボラ面を形作るものがある。

国産の展開型アンテナとしては、古くは ETS-VI(1994年)のような CFRP 製の観音開きのタイプがある。展開タイプについて、近年ではジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)の鏡面でも同様に観音開きに近い展開方法を採用している。

多分割のパラボラアンテナは主に花卉型と呼ばれるもので、過去に国内でも開発の例がある。近年 Tales Alenia、Airbus Defence & Space などでも開発例がある。図 2-84 に Airbus Defence & Space の 5m 展開アンテナを示す。同アンテナは SAR 観測用で開口径は 5m、反射面は CFRP の薄板を使用しており、2023 年 4 月に打上げられた。また、Thales Alenia は 5m のハニカムパネル展開アンテナを開発している。

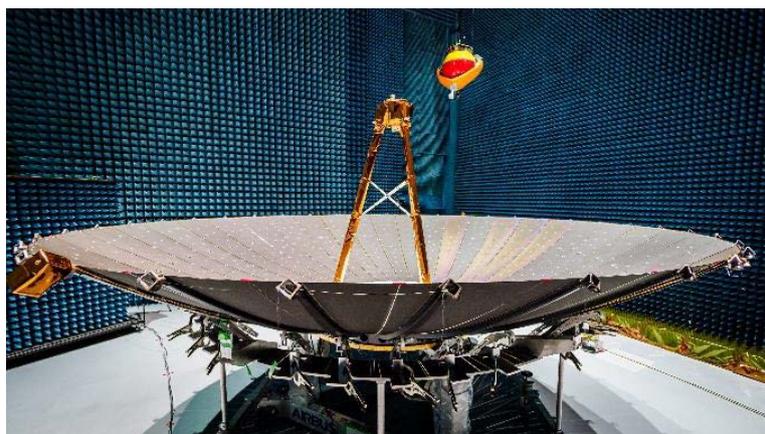


図 2-84 5m Deployable Reflector

出所)[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSjgdEfvxiYmdPhsoRJEE18\\_bxDkZw6G3iaZSG0OWuBQ&s](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSjgdEfvxiYmdPhsoRJEE18_bxDkZw6G3iaZSG0OWuBQ&s)

一方、メッシュ鏡面の展開アンテナは国内外で開発例が多数ある。国内でははるか(三菱電機、図 2-85)、ETS-VIII(東芝、図 2-86)などがあり、前者は 22GHz、後者は S 帯の周波数に対応している。ただし、どちらも技術の継承が無く、製作する場合には新規開発に近い状態となると考えられる。

また近年では QPS 研究所の X 帯 SAR 用の開口径 3.6m のメッシュ展開アンテナ(図 2-87)を開発し、既に SAR としての運用を行っている。また、JAXA とテクノソルバで開発中の扇子型展開式高精度反射鏡は最大開口径 5m で、Ka 帯まで対応可能である。現在、開口径 1m と 2.5m のものを試作し、評価中である(図 2-88)。



図 2-85 はるかの展開アンテナ (開口径 8m)

出所)[https://www.isas.jaxa.jp/j/japan\\_s\\_history/chapter09/02/img/pct07\\_large.jpg](https://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter09/02/img/pct07_large.jpg)



図 2-86 ETS-VIII/LDR (開口径 13m)

出所)<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/ets8/>

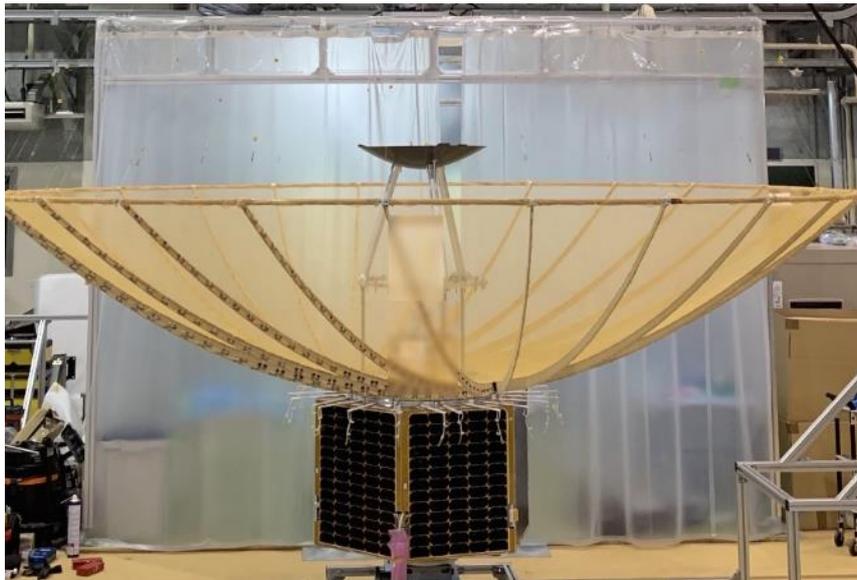


図 2-87  $\phi 3.6\text{m}$  メッシュ展開アンテナ

出所)<https://i-qps.net/news/176/>



図 2-88  $\phi 2.5\text{m}$  扇子型展開式高精度反射鏡

出所)テクノソルバ

これに対して海外でも多くの開発、フライト実績がある。米国では Northrop Grumman の Astro Mesh と L3 Harris の展開アンテナがある。Northrop Grumman は従来からフープ型のメッシュアンテナを製造しており、打上実績も豊富である。図 2-89 に Astromesh を示す。Astromesh は Ka 帯まで対応可能とされている。一方、L3 Harris は従来リブ型の展開アンテナを開発し、打上実績も豊富であるが、近年フープ型の展開アンテナを開発している。L3 Harris の展開アンテナも Ka 帯まで適用可能とされている。図 2-90 に L3 Harris のリブ型展開アンテナ、図 2-91 に L3 Harris のフープ

型展開アンテナを示す。



図 2-89 Northrop Grumman の Astromesh

出所) <https://spacenews.com/northrop-unit-delivers-alphasat-1-xl-reflector/>

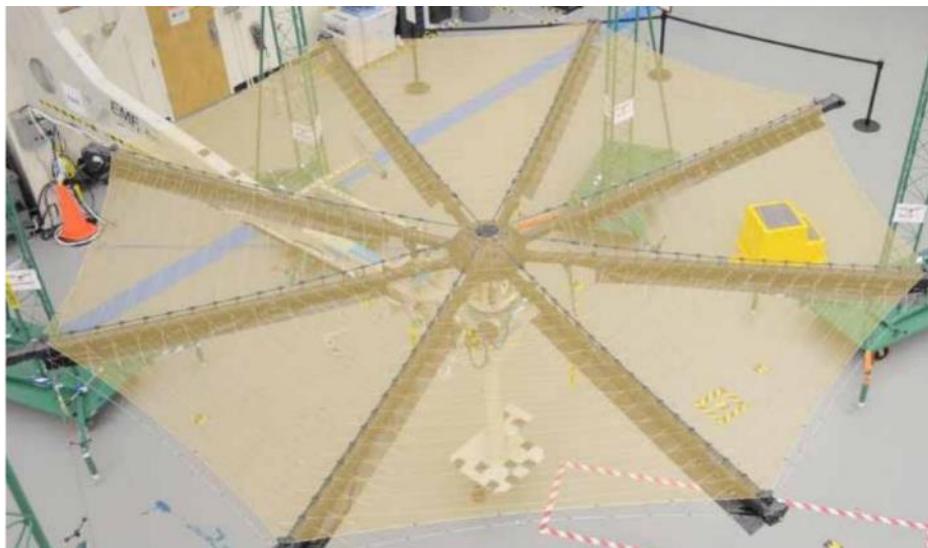


図 2-90 L3 Harris のリブ型メッシュアンテナ

出所) <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2021-04/l3harris-5m-unfurlable-ka-band-reflectors-spec-sheet-sas.pdf>



図 2-91 L3 Harris のフープ型 (ペリメーターフレーム) メッシュアンテナ

出所)<https://www.l3harris.com/all-capabilities/perimeter-truss-reflector>

また、近年ヨーロッパでも ESA が中心となって展開型メッシュ反射鏡の開発が進んでいる。ドイツの LSS (Large Space Structures) はフープ型のメッシュ反射鏡を開発しており CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) に開口径 7m の Ka 帯まで対応する反射鏡を提供している。図 2-92 に LSS の展開型メッシュ反射鏡を示す。

イギリスの OSS (Oxford Space Systems) も展開型メッシュ反射鏡の開発を進めており、Wrapped Rib (3~5m、X 帯)、hoop (3.5~12m、帯域不明)、Hinged Rib (超小型衛星用 Ku、Ka 帯) の 3 種類が存在する。

その他にはジョージア(T.S. Georgia)とウクライナ(EOS Ukraine)が共同で 3m の X 帯 SAR 用のフープタイプのメッシュ反射鏡を試作している。



図 2-92 LSS の 7.5m 展開型メッシュ反射鏡

出所) <https://www.hptex.de/heritage/>

### 3) スロットアレイアンテナ(平面アンテナ)

平面アンテナの一種であるスロットアレイアンテナは導波管で給電した電波をハニカムパネルなどの平面内に導き、電波の放射位置を調整することで位相をそろえて電波を放射するものである。図 2-93 にコンセプトを示す。アンテナ面にアクティブな給電素子は持たず、いわゆる合成開口レーダなどの給電素子を平面上に並べたものとは原理が異なる。このため、アンテナとしては単純で軽量にすることが可能である。一方で、電波の放射口では位相が揃うように電波の導波路の長さを調整する必要があることから、複数パネルに給電する場合には図 2-94 に示すようにトーナメント回路を組んで各アンテナへの RF の位相を揃える必要がある。このタイプのアンテナは図 2-95 に示す X 帯 SAR 用のものが既に実用化されており、1 枚約 70cm のものを 7 枚接続し、全体として約 5m×0.7m のアンテナとなっている。

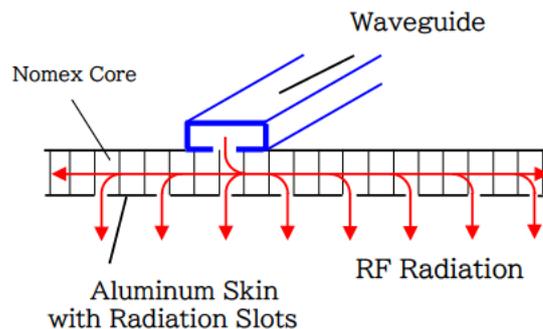


図 2-93 スロットアレイアンテナ コンセプト

出所)テクノソルバ

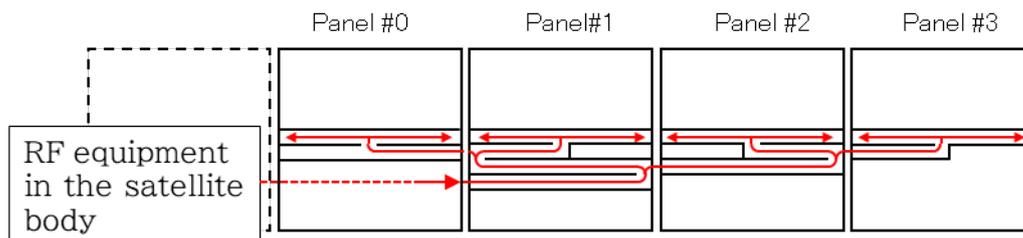


図 2-94 スロットアレイアンテナ 給電回路

出所)テクノソルバ



図 2-95 スロットアレイアンテナ

出所)テクノソルバ

このアンテナの場合には図 2-94 に示す給電回路で各パネルに給電しているため、周波数が高くなるとパネル間の位置精度に対する要求が厳しくなる。また給電導波管の長さ管理も厳しくなり、調整の必要性が生じる。ただし、パネル毎に TWTA を備える場合には給電回路は不要となり、アンテナの機械設計はし易くなる。この場合、RF の観点からどのような要求になるかにもよるが、パネル間の機械的なアライメント精度要求のみになると考えられる。その場合においても、0.1~0.2mmRMS の要求精度となると達成は容易ではない。機械的な組立精度や展開再現性については、X 帯 SAR 用のアンテナの経験からある程度、達成の見込みはあると考えられる。しかしながら熱変形については少なくともアルミ製のアンテナとした場合には面精度の達成は困難と考えられる。解決策としてはアンテナを CFRP 製とすることであるが、その場合には CFRP 表面にメッキなどによる導体膜を形成する必要がある。アルミコー

ティングは導波管のような管路の内面などには適用できない。CFRP へのメッキについては別プロジェクトにおいて開発段階にあり、今後 1~2 年で宇宙用として実用化される可能性がある。なお、海外では既に Airbus が CFRP に銅メッキしたアンテナを試作している。

以上をまとめるとスロットアレイタイプの平面アンテナの場合には要素技術として下記の開発が必要になると想定される。

- ① CFRP へのメッキ
- ② ①を前提とした CFRP 製スロットアンテナ
- ③ 要求面精度を達成するための展開機構

## (6) 軽量太陽電池アレイの展開方法の検討

(1)のシステム検討で述べたように、50m クラス、20kW 放射システムでは幅 10m、長さ数十 m の展開型軽量太陽電池アレイが必要である。フィルム上の太陽電池アレイを用いた展開機構の検討を行った。前提条件は以下の通りである。

- a) 展開物の面積  
セルの実効面積を考慮して、600m<sup>2</sup> とする。
- b) システム構成  
人工衛星システムとし、システム構造体に搭載する。人工衛星は H-3 に代表されるようなロケットに搭載されることを想定するが、本検討段階ではフェアリング搭載域等の制限を厳密に採用することはしない。
- c) 展開運用  
展開物の軌道上での自立、自律的な運用とし、EVA 等は想定しない。

以下に、構想実現案と、それに適用可能あるいは適用が相応しい要素技術について整理する。

### ● 実現案その1

幅 10m を基本とした構成案を図 2-96 に示す。幅 10m は国際宇宙ステーションの SAW(Solar Array Wing:幅 11.3m)に相当する。SAW は図 2-97 に示すように、約 5m 幅のベローズ状に畳まれるアレイを中央のマストの両側に 2 セット配置している。収納状態のアレイは収納箱で保持される。

国内では、図 2-98 に示す SFU、COMETS、ADEOS で同様な形式が採用されている。アレイは 1 セットで展開軸中央背面にマストが配置されている。COMETS では 13m のコイラブルマスト、ADEOS では 23m の高剛性マスト(HIMAT)が採用され、収納状態のアレイはプレッシャーボードに挟まれる形で保持される。ベローズ状のアレイの折畳みと一次元展開物(伸展マスト)といった要素技術に関しては、小規模な形ではフライトプルーブンであるが、大型化・長大化については成立性の検討が必要である。また、収納時の幅 10m については、通常運用されるロケットでは搭載が困難なことが予想され、図 2-96 に示すように収納状態の 5m 幅のサブアレイをさらに折り畳む必要がある。これにより機構の複雑化、質量の増大が懸念される。

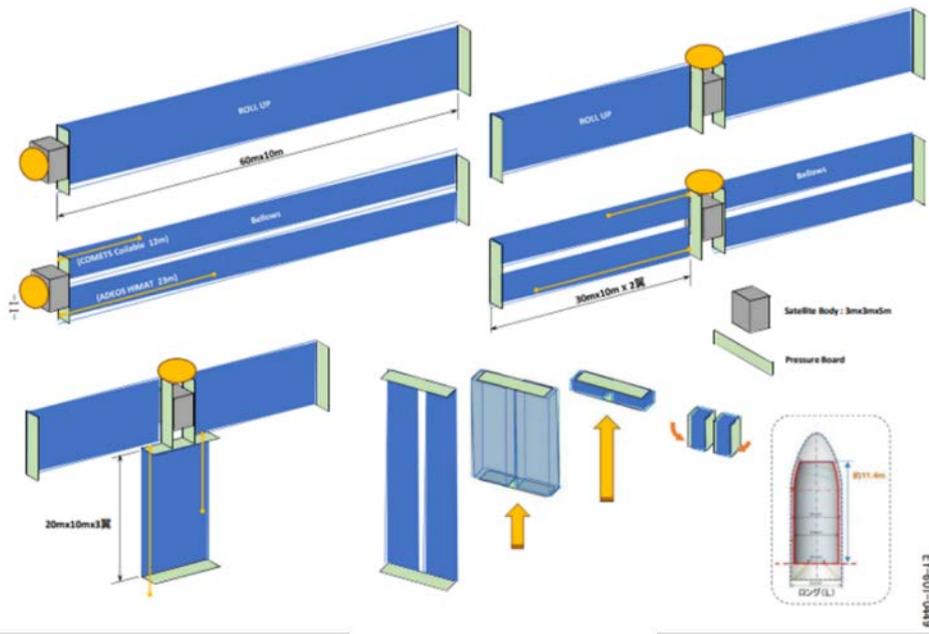


図 2-96 幅 10m とした時の構想案

出所)日本飛行機

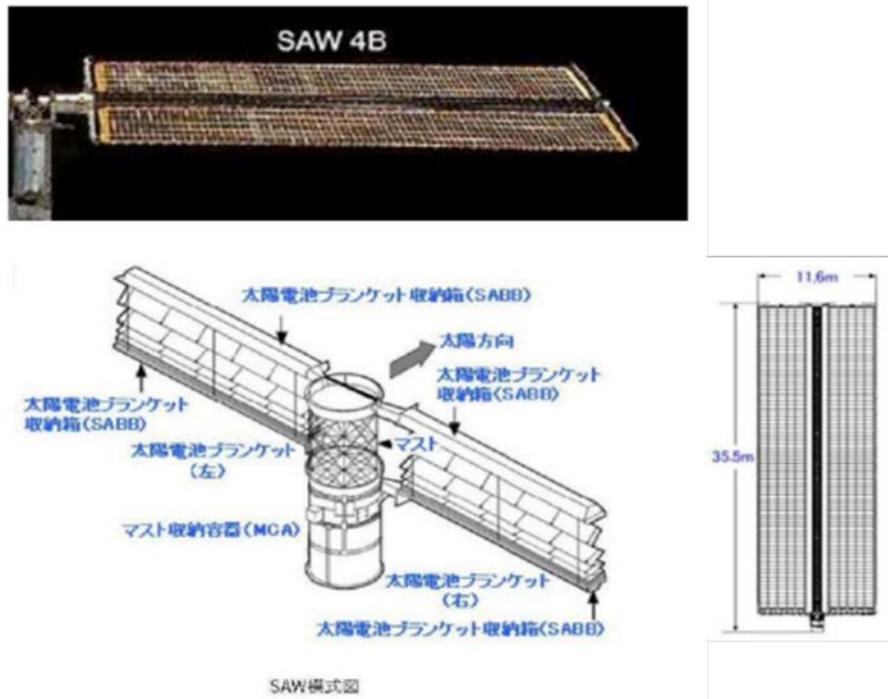
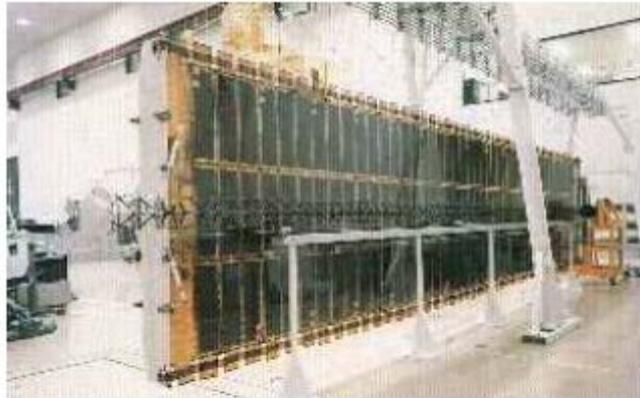
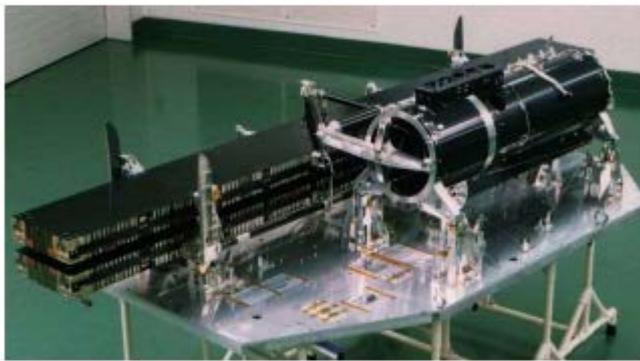


図 2-97 国際宇宙ステーションの太陽電池アレイウィング (SAW)

出所) <https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000182.html>



SFU/SAP伸展状態（裏面から見る）



COMETS/SAP収納状態（板状の構造がプレッシャーボード）



図 2-98 国内太陽電池パドル実績

出所)日本飛行機

● 実現案その2

一次元の展開では、ロケットによる輸送を想定した場合、複数翼式でも収納時の形状の大きさ、あるいはそれを解決するための機構の質量などにより、搭載性の達成が困難な可能性がある。そのため、幅10mの条件を外した場合について検討を実施した。幅10mの条件を外した場合の実現案を図 2-99 に示す。

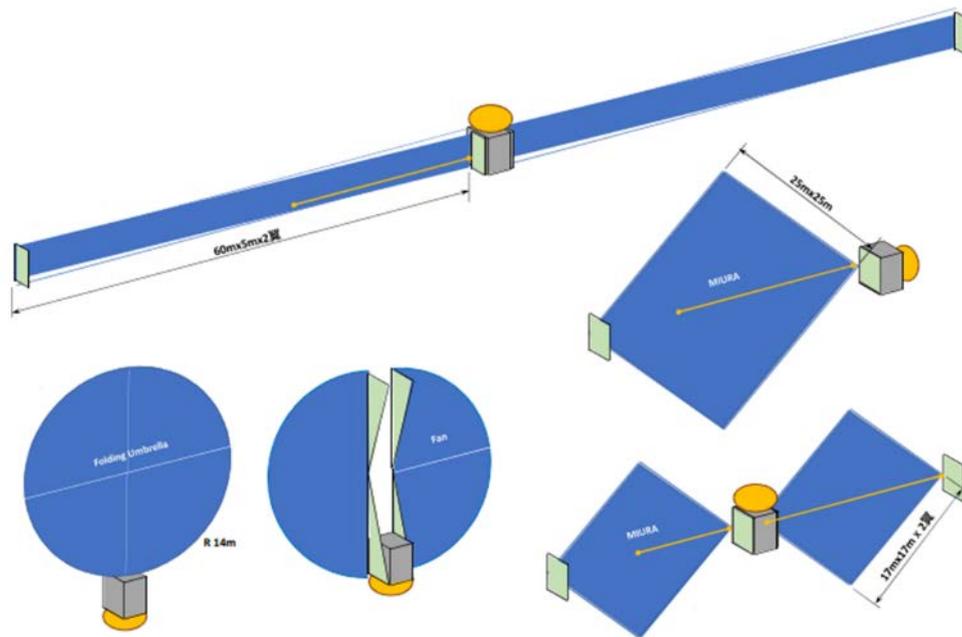


図 2-99 構想案(幅 10m の条件削除)

出所)日本飛行機

以下に、幅10m の条件を削除した場合の案を示す。

a) 幅5m のアレイ(5m x 50m)

アレイの幅を 5m として 2 翼搭載する場合、現実的なサイズになると想定される。海外では、SRTM ミッションで用いられた 60m の伸展マスト(ADAM mast)などの実績もある。

b) ミウラ折り

大面積であるので、当然であるが二次元展開の方が収納効率が高い。折り目がほぼ矩形(平行四辺形)の繰り返しであり、セルのレイアウト効率も悪くない。一翼でも二翼でも成立する可能性がある。1 ユニットの平行四辺形のサイズも衛星やロケットに合わせて最適化が可能であると考えられる。ミウラ折りの展開の基本は、対角の一軸展開であるが、従属の対角となる方向への展開力の伝達が実際には不十分になる可能性があるため、展開力の付与については検討の余地がある。伸展マストがアクチュエータの候補にはなるが、質量リソースの点で不利が大きい。従来の STEM は軽量ではあるが剛性の観点で課題がある。Roll-Out Solar Array も含めた新規の展開方式を課題としたい。

c) 半円扇

折畳みは単純にすることが可能であるが、一方で翼数を多くできないため、面積を半径で稼ぐことしかできず半径が 10m を超えるため、搭載性に問題がある。高効率セルを適用し展開面積を

縮小すれば可能になってくる可能性がある。

d) 全円扇

NASA の LUCY(トロヤ群小惑星探査機)や CYGNUS(無人宇宙補給機)に適用されているタイプである。既存の太陽電池アレイと本件の比較を図 2-100 に示す。

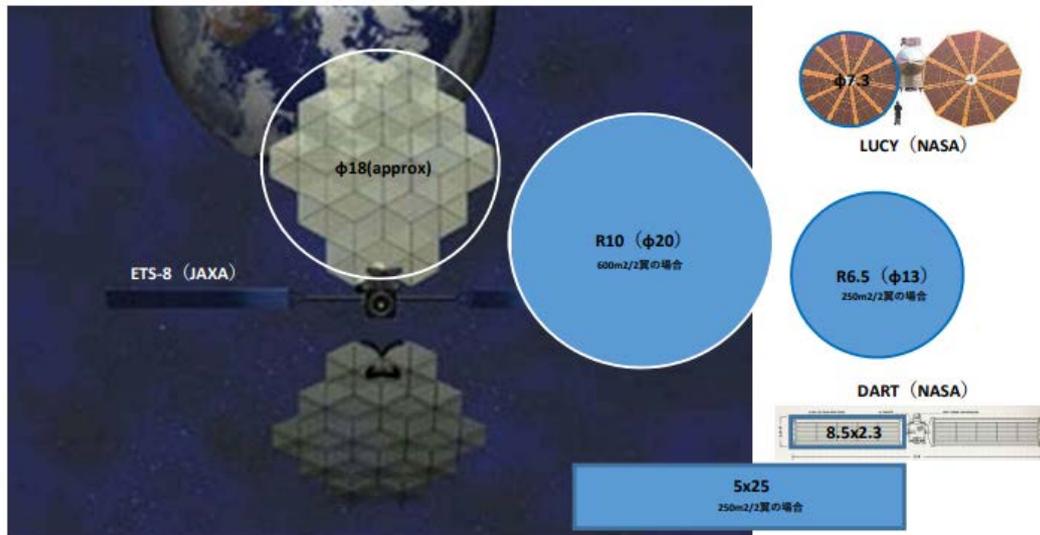


図 2-100 既開発宇宙機と本件アレイサイズの比較

出所)日本飛行機

● 実現案その3

上記以外の案として、以下に記載する。

a) 複数の宇宙機の利用

その他の方法の一つとして、発電衛星と送電衛星に分けて輸送し、宇宙空間でドッキングする方法があり得る。この場合、ドッキング機構のリソースが余計に発生するという欠点がある。

また複数宇宙機を利用する他の方法として、小規模な発電機能を有する衛星複数機のフォーメーションフライトによる方法があり得る。単機の仕様設定にもよるが、発電部(本検討部位)及び送電部については TRL の高いもので構成できる可能性がある。予備機、代替機の準備も容易かつ、標準的なロケットへの搭載性も改善する可能性がある。一方で、フォーメーションフライト技術に開発要素がある。

b) 展開用アクチュエータを使用しない方式

展開用のアクチュエータを用いない方式としては、IKAROS のようなスピン衛星の様式が想定できる。アクチュエータのリソースが省略できる反面、膜面に遠心力を発生させ太陽指向させる機構、もしくは衛星をスピンさせる必要があり、送信アンテナの衛星への搭載位置との位相によってはデスピンが必要になる。また、発電面と送電方向が異なることがあり本方式の採用が難しい可能性がある。なお、インフレーション構造による展開などの可能性もある。

太陽光発電アレイの展開方法について、以下に検討が必要な要素を記載する。

- フレキシブルアレイ
  - 折り・曲げの特性
  - ハンドリングが可能(薄すぎない)で、かつ折畳み性の良い(厚すぎない)アレイ、もしくはサブストレート
  - 意図的に折り目を残した場合の展開後の剛性への寄与
- 展開・支持用構造
  - 既存マストの長大化、軽量化
  - 研究中(一部実証済み)の STEM に関する大径化、および長大化に加えた軽量化
  - 膜自体に展開力を実装する場合の具体的なデバイスの検討
  - コンベックス(弾性)ヒンジ、インフレーションチューブなどを折り目またはアレイの外周に配置するなどの検討、及びその際の展開挙動の把握(粒子法などによる展開シミュレーション)

また、これまでの検討を踏まえ、上述の実現構想案の中では、以下の理由から 2 翼式のみウラ折りもしくは扇型(半円扇、全円扇)が現実的であると考えられる。

- 収納効率が高く、収納時の寸法が現実的な範囲に収まる。
- アレイ面の折り筋が適当で、セルの実効面積を確保しやすい。

みウラ折りについては、対角一軸の駆動のみで膜面がどこまで理想的な平面になるかは、折り筋の抵抗が未知なため推定が難しい。また一軸駆動であってもマスト上の構造が長大になるため、座屈の懸念があり、また展張後不要になるコンポーネントなので、極力これに割くりソースは小さくしたい。そこで、膜面の外周に、自己展張部材(コンベックス、気柱など)を配した際の成立性、ならびに展開中および展開後の挙動の把握などが課題として設定できる。

## (7) 軽量フレキシブル太陽電池アレイ

今回検討している太陽電池アレイの性能は、前項でも述べたように、ほぼ国際宇宙ステーションのSAWの電气的性能と同等である。図 2-101 に国際宇宙ステーションにおける電气的諸元を示す。単一SAW当たり、16400個シリコン太陽電池で構成され、発生電圧は最大173V、発生電力は32.8kW、サイズは4.57m x 33.5mである。軽量化と高収納性を実現するためのフレキシビリティが今後の課題である。

## Solar Paddles for ISS

| Items              | Specifications   |
|--------------------|--|
| Size               | Width 11.6m  |
|                    | Length 35.5m   |
| Weight             | Around 1,089kg   |
| Size of Blanket    | 4.57m x 33.5 m   |
| Power Generation   | 32.8kW/Paddle<br>264kW/8Paddle   |
| Photovoltaic Cell  | 16400pieces/Blanket<br>area : 8cm <sup>2</sup> / 1 piece<br>Efficiency : around14% |
| Generation Voltage | Primary side : 137-173V(DC)<br>Secondary side : 124V(DC)                           |
| Power Supply       | 21-30kW/2 paddles  |

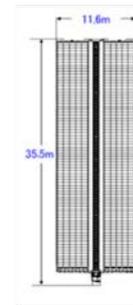


図 2-101 国際宇宙ステーションの SAW の電気的性能

出所) <https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000182.html>

図 2-102 に各種太陽電池を示す。大きく分けて、厚さが数十 $\mu\text{m}$  以上のバルク型と厚さが  $10\mu\text{m}$  以下の薄膜型に分類できる。今回の目的に採用できると考える太陽電池は薄膜型となる。薄膜太陽電池もロール to ロールで生産できるタイプとインゴットから一枚一枚製作するタイプに分類できる。プラスチックフィルム上に形成するロール to ロールタイプの太陽電池は柔軟性と軽量性に優れている。図 2-103 に各種太陽電池の変換効率の変遷を示す。III-V 族多接合化合物半導体太陽電池は変換効率に優れるが、セルのコスト、アレイ製作におけるコストが課題である。軽量、フレキシビリティ、低コストの観点からは、CIGS やペロブスカイト太陽電池が適している。ペロブスカイト太陽電池は、近年注目を集めている太陽電池であるが、研究開発段階にある。

軌道上での大規模太陽電池アレイには、前項で示した展開技術と親和性の高い太陽電池を選定し、アレイ化技術の開発、耐宇宙環境性の付加、必要により高電圧化を行っていくことが課題となる。

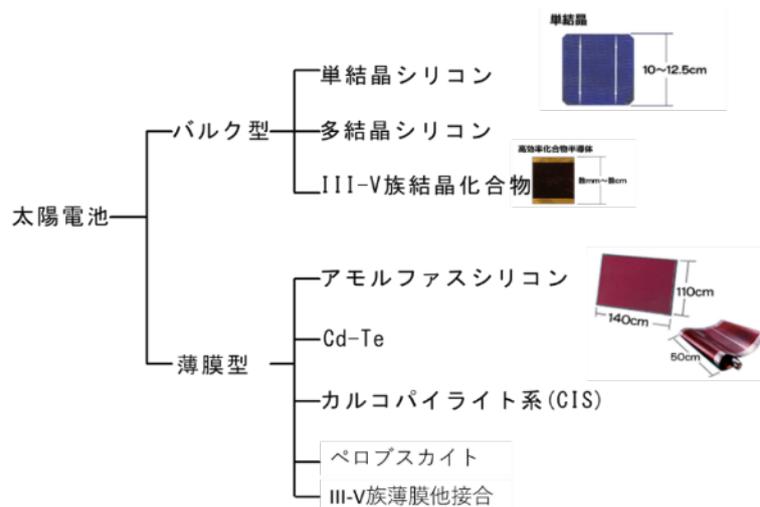


図 2-102 各種太陽電池

出所)JAXA/ISAS

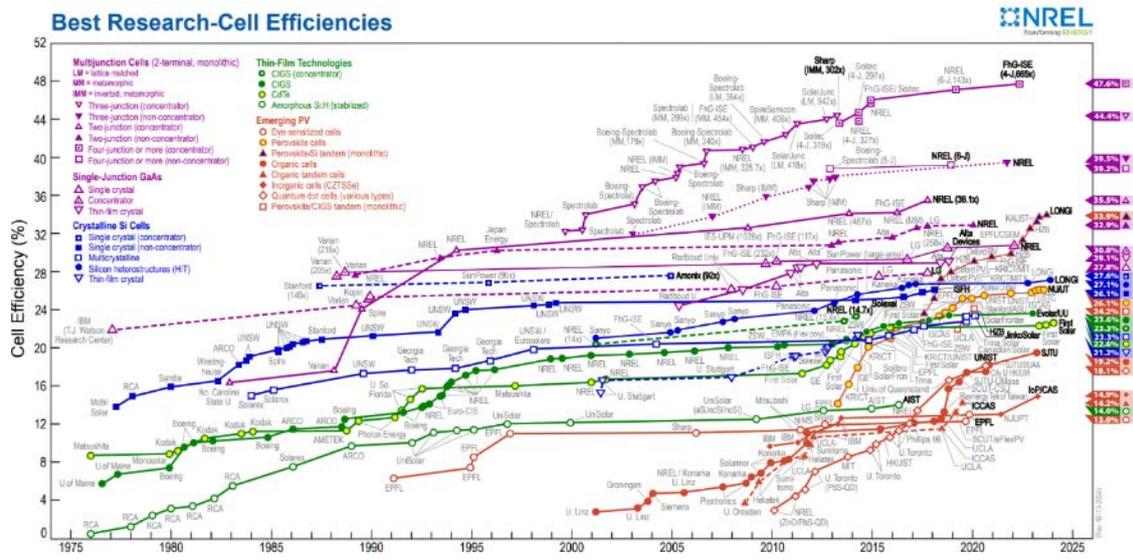


図 2-103 太陽電池の変換効率の変遷

出所) <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

## 2.2.4 月面設置発電システム

ここでは月面上に設置する発電システムについて取りまとめる。月面設置発電システムとして、太陽光発電について検討を行った。

検討を行うにあたり、前提とした条件は下記の通りである。

- 月面基地の建設場所は、シャクルトンクレータ近傍の Connecting Ridge(候補①)と、Nobile Rim(候補②)の2か所を想定する。
- 月面設置発電システム建設場所はその候補地点のなかで日当たりの良い場所に設置されるサービスゾーンとする。
- 高緯度地域であるため、日射はほぼ水平方向から入射する。
- 月面基地全体計画として、発着ゾーン、サービスゾーン、居住ゾーン、観測ゾーン、資源ゾーンに分けられる。
- 電力は水素生成システム(資源ゾーン、クレータリム部、発着ゾーン)に供給される。
- 送電側の直流・交流、電圧等が未定のため、それらの変換については取り扱わない。
- 蓄電システムは日照時の太陽光発電システム容量に大きく影響するため、合わせて検討する。
- 発電・蓄電システムから送電する電力について、太陽光発電システムはスケールメリットがほとんど無いため、必要な電力に合わせて設置する台数・容量を決めれば良いため、ここでの検討は常時100kW送電として検討を行うこととした。

### (1) 太陽電池セル

#### 1) 月面設置発電システムに適した太陽電池セル

太陽光を電力に変換する光電変換素子について、材料、接合数、厚みにより構造が分類される。

材料による分類はシリコン系、化合物系、有機系に大別され、シリコン系は結晶シリコンとアモルファスシリコンに分類される。化合物系はガリウム-ヒ素等のIII-V族系(単結晶)、CIS、CdTeに分類される。有機系では色素増感型太陽電池や、ペロブスカイト太陽電池がある。また、半導体としてのp-n接合数によっても分類され、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、 $10^{-9}$ パスカル以下の高真空下で、放射線に暴露され、 $-100^{\circ}\text{C}\sim+100^{\circ}\text{C}$ に近い熱衝撃を受けながら動作することが求められる。材料や構造等の基本設計は地上用太陽電池と同じであるが、宇宙環境で使用するために、下記特性が要求される。

(1)変換効率 (2)軽量 (3)熱光学特性 (4)耐放射線性 (5)高信頼性

(1)~(5)の特性をバランスよく満たすものとして、III-V族系3接合型薄膜太陽電池(以下IMM3Jセルとする)が挙げられる。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る。

## 2) 太陽電池セル仕様

宇宙用 IMM3Jセルの一例として、シャープ製 IMM3Jセル特性を図 2-104 に示す。典型値として、AM0、周囲温度 25℃における効率は 31.0%であり、市販されている宇宙用太陽電池の中ではトップクラスとなっている。前述の通り薄膜構造であるため、セル自体に柔軟性があり、重量も約 500mg(セルサイズ 27.4cm<sup>2</sup>)と薄膜タイプではない基板付き化合物 3 接合セルの 1/4 以下であり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。

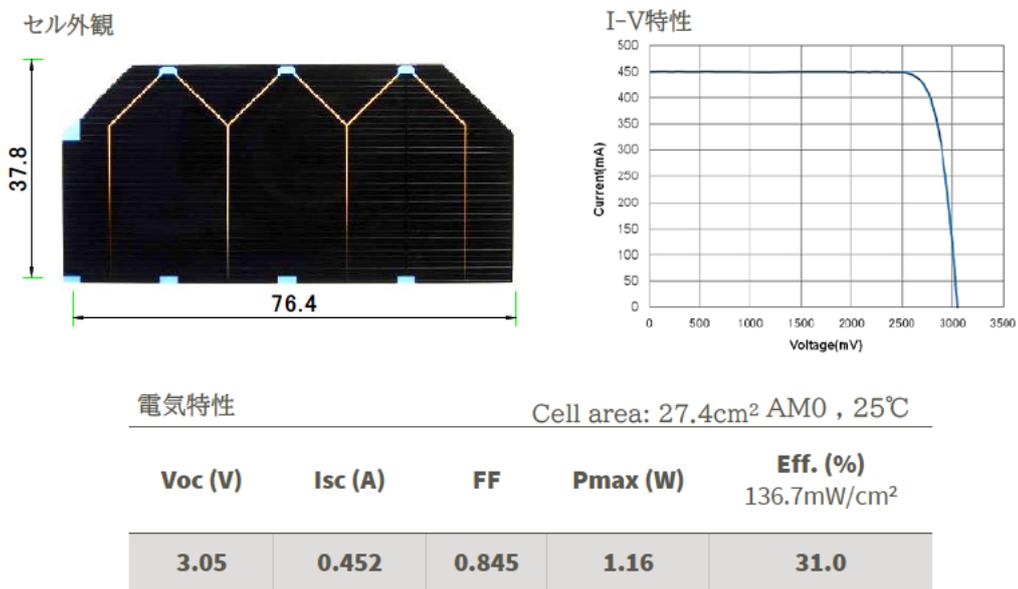
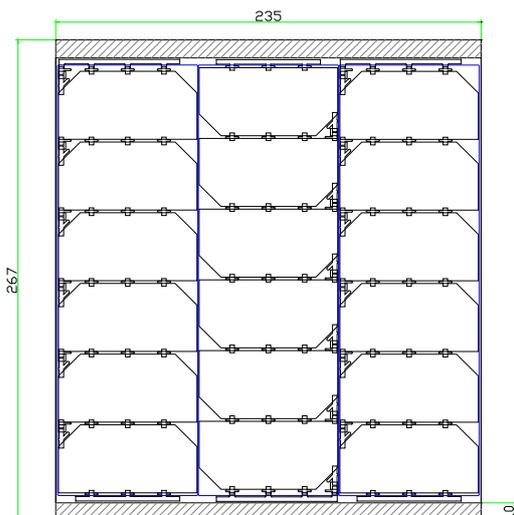


図 2-104 IMM3Jセル外観と電気特性

出所) シャープ㈱

IMM3Jセルを用いた太陽電池モジュールは表面保護材に樹脂フィルムを用いたフィルムタイプシートとガラスを用いたガラスタイプシートがある。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、ガラスシートが適していると考えられる。

月面での発電ステーションに用いられるモジュールユニット形状についても検討を実施した。ユニット形状図面とその特性について図 2-105 に示す。シートサイズは 267×235mm であり、シート間接合のためにシート上下に 10mm の余白部を設ける。この余白部を用いてシート間接続を行う。シート間の接続方法は、今後の検討課題となるが、軽量でシンプルな接続が望まれる。また打上コスト低減の観点から、接続部を起点としてシート複数枚を折りたたんで収納できることが望ましい。



|           | 特性値(1シート)            | 備考         |
|-----------|----------------------|------------|
| 出力(typ.値) | 20.8 W               | 18セル分合計    |
| 重量        | 46.5 g               | ガラス厚み100um |
| 出力重量比     | 2.2 g/W<br>0.447 W/g |            |
| サイズ       | 267×235 mm           |            |
| 厚み        | 約0.4 mm              |            |

図 2-105 太陽ユニット形状とその特性

出所) シャープ(株)

1 シートにおいて 18 セル搭載し、モジュール温度が 25℃のとき、シートとしての出力値は 20.8Wとなる。重量について表面保護ガラス 100μm を使用した場合、1 シートあたりの重量は 46.5g となる。その際の出力重量比は 2.2g/W である。温度特性および放射線を考慮して、最適なセル直列数を検討するための一例として、図 2-104 に示した太陽電池セルの放射線照射前後の温度特性を表 2-56 に示す。周囲温度が 110℃の場合、放射線照射後の Vmp は 1.81V となるため、67 直列かで 120V の確保が可能となる。ガラスシートは 6 直列単位でストリング形成されているため、冗長設計をふくめて 72 直列単位(6 直ストリングが 12 本)の電氣的接続が望ましいと考えられる。

表 2-56 IMM3J セル温度特性

(a)放射線照射前

(b)放射線照射後(静止軌道 15 年分相当)

|          | 25℃   | 80℃   | 110℃  |
|----------|-------|-------|-------|
| Voc(mV)  | 3050  | 2720  | 2540  |
| Isc(mA)  | 455   | 468   | 475   |
| Pmax(mW) | 1164  | 1010  | 925   |
| Vmp(mV)  | 2626  | 2260  | 2060  |
| Imp(mA)  | 442   | 445   | 446   |
| FF       | 0.839 | 0.793 | 0.767 |

|          | 25℃   | 80℃   | 110℃  |
|----------|-------|-------|-------|
| Voc(mV)  | 2722  | 2356  | 2157  |
| Isc(mA)  | 455   | 471   | 480   |
| Pmax(mW) | 1030  | 882   | 801   |
| Vmp(mV)  | 2410  | 2022  | 1811  |
| Imp(mA)  | 428   | 438   | 444   |
| FF       | 0.832 | 0.794 | 0.774 |

出所) シャープ(株)

表 2-57 バス電圧 120V を達成するためのセル直列数

| セル温度  |               | 初期セル | 放射線照射後セル |
|-------|---------------|------|----------|
| 80°C  | 単セルVmp        | 2.26 | 2.02     |
|       | 120Vのためのセル直列数 | 54   | 60       |
| 110°C | 単セルVmp        | 2.06 | 1.81     |
|       | 120Vのためのセル直列数 | 59   | 67       |

出所) シャープ(株)

## (2) 太陽光発電架台(タワー)に関する検討

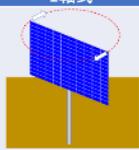
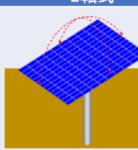
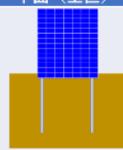
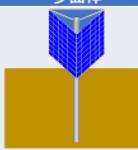
### 1) 架台の方式

太陽光発電架台は大きく分けて、太陽追尾型と固定型に分類される。架台の方式(太陽追尾型と固定型)についての比較を表 2-58 に示す。

太陽追尾型は太陽の向きに合わせて太陽電池アレイも回転させることで、ほぼ垂直で入射し日射量を大きくすることが出来るため、多くの発電量を得られる。高緯度地域の場合、常にほぼ水平方向から太陽光が入射するため、1軸追尾型の架台でも垂直軸周りに太陽電池アレイを回転させることにより、ほぼ垂直に太陽光を入射することが可能となる。また、機構も2軸追尾型に比べて簡易であるため、有利になると考えられる。

固定型架台は地上のメガソーラーで多く使用されている方式であり、太陽電池アレイは常に一定方向を向いている。設置面積に対して、多くの容量を設置できるが、固定型は太陽の方位角により発電量が変化する。今回のような極域設置の場合、太陽光は常にほぼ横から入射することから、発電量の変動を緩和するため、エラー! 参照元が見つかりません。の右のような多面体、あるいは円筒状の形状で太陽電池アレイを設置する方法も考えられる。多面体の形状で、追尾型と同じ発電電力を得るためには、3倍以上の太陽電池アレイを設置することが必要である。そのため、重量当たりの発電量を多く得るためには追尾型が適していると考えられる。しかし、追尾型はレゴリス等によって回転機構が故障して安定した電力供給が行えないリスクがあることから、月面開発の初期では多面体形状で太陽電池アレイを設置する多面体型で運用し、実証等で耐久性・耐塵性に問題無いことを確認した上で、1軸追尾式としていくことも考えられる。

表 2-58 架台の方式の比較

| 型式                  | 追尾型   |   | 固定   |   |
|---------------------|---|---|--|---|
|                     | 1軸式   | 2軸式   | 平面(垂直)   | 多面体   |
| 図                   |  |  |  |  |
| 概要                  | 太陽の方角角に向けて太陽光パネルを回転させる  | 太陽光の入射に対して垂直となるよう太陽光パネルを向ける   | 地上でよく用いられている形式で、平面で固定する。   | 多角柱に太陽光パネルを配置する   |
| 面積当たりの受光量比(1軸を1として) | 1   | 1   | 片面0.32<br>両面0.64   | 0.32  |
| 長所                  | 2軸式より簡易な機構で発電量を増加出来る  | 太陽を追尾するので、常に最大の発電が可能  | 可動部がないため故障が少ない。両面発電を用いることで裏面での発電も可能構造が簡易   | 昼では太陽位置によらず平面より安定した発電が可能可動部が無いため故障が少ない  |
| 短所                  | 1軸の可動部が必要で、若干の電力消費と故障リスクあり。複数設置時に後方に影   | 2軸の可動部が必要で、若干の電力消費と故障リスクあり。複数設置時に後方に影   | 時間による変動があるため、蓄電池等が必要となる  | 角数が少ないと出力やや変動展開・建設方法がやや複雑複数設置時に後方に影   |

出所)大林組

## 2) 設置場所

月面設置発電システムは、水素 WG の検討にて「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①(図 2-106)と緯度が 85 度と南極点からやや離れた候補②(図 2-107)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。

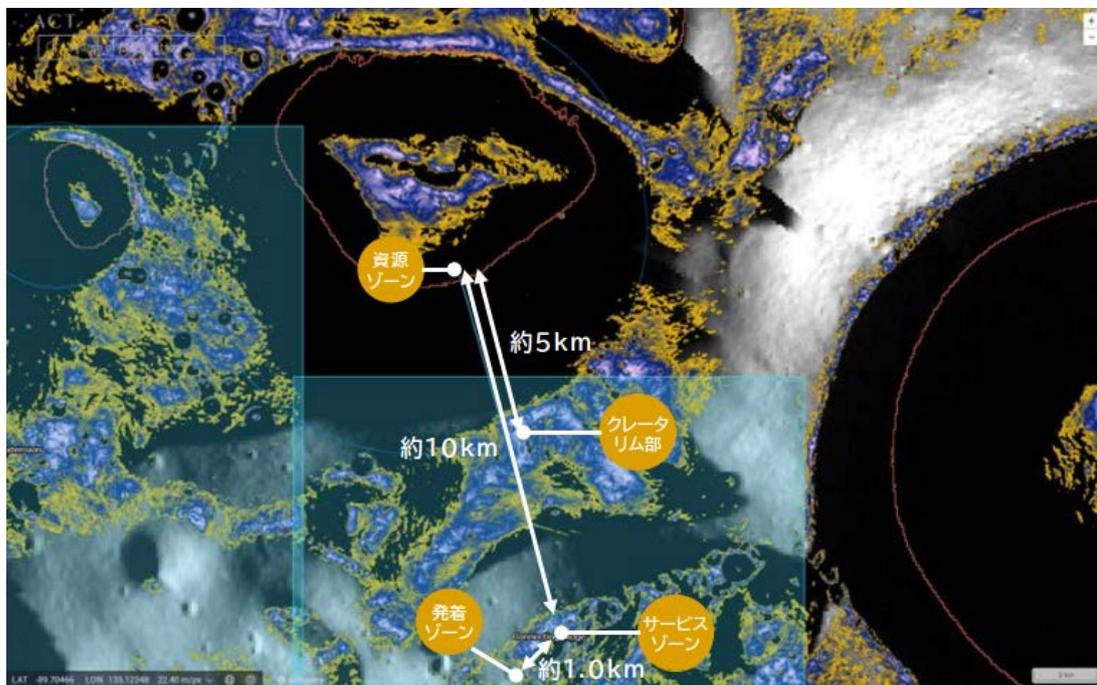


図 2-106 候補地点1(Connecting Ridge)

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)三菱総合研究所作成

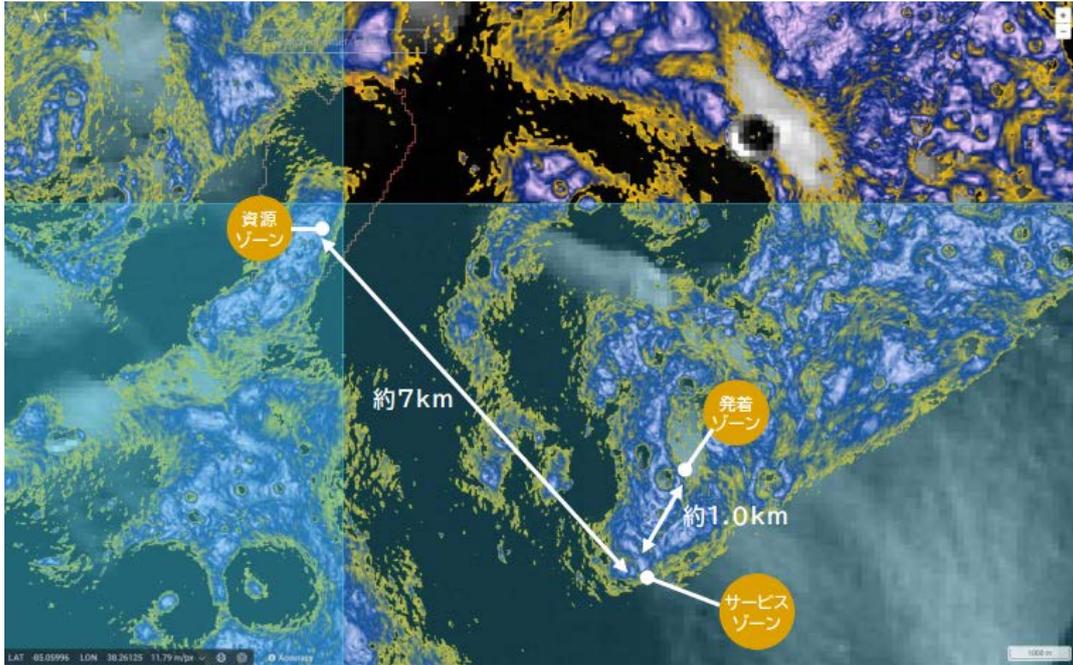


図 2-107 候補地点 2(Nobile Rim 1)

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)三菱総合研究所作成

### 3) 環境条件

建設が想定される極域での温度条件について、表 2-59、図 2-108 のように、緯度 85 度で平均 61~182K となっており、厳しい低温条件下であることが分かる。機器には、低温に対する対策、特に夜間での極低温対策が必要である。

表 2-59 各緯度と太陽照度条件に対する月表面温度の最大最小値

| Location                            | Mean Temperature K | 1 Sigma Max or Min Temp K | Solar conditions       |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|
| Equatorial maximum                  | 391                | 394                       | Local noon             |
| Equatorial minimum                  | 96                 | 94                        | Before sunrise         |
| 45 degree latitude maximum          | 350                | 357                       | Local noon             |
| 45 degree latitude minimum          | 89                 | 83                        | Before sunrise         |
| 85 degree latitude maximum          | 182                | 224                       | Local noon             |
| 85 degree latitude minimum          | 61                 | 41                        | Approx. 3am equivalent |
| Coldest permanently shadowed crater | 18                 |                           |                        |

出所)CROSS-PROGRAM DESIGN SPECIFICATION FOR NATURAL ENVIRONMENTS (DSNE)

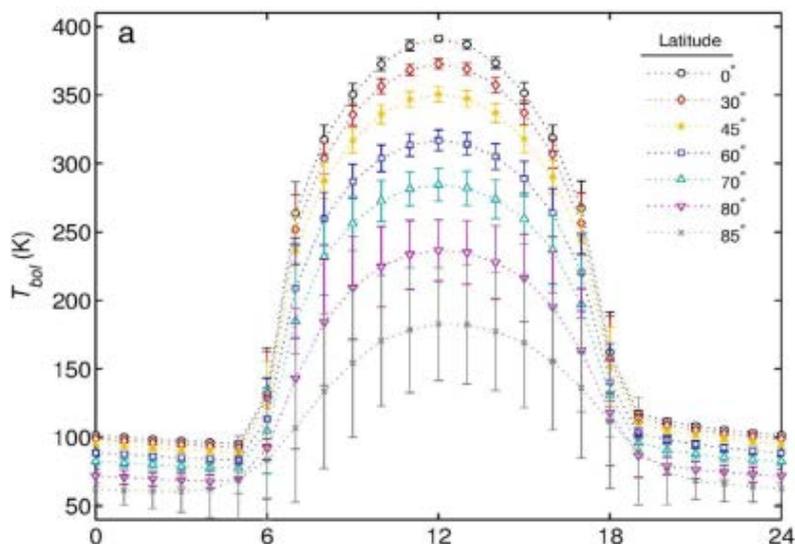


図 2-108 24 時間換算時刻の平均ボロメータ温度

出所) CROSS-PROGRAM DESIGN SPECIFICATION FOR NATURAL ENVIRONMENTS (DSNE)

次に日照の条件についてであるが、月周回衛星「かぐや」のレーザ高度計による地形データからの日照率の計算結果は図 2-109 のようになっており、月面で最大の日照率は南極域で 86% であることが分かる。平均的には日照率が悪いが、適正な位置を選択すれば、多くの日照が得られることが分かる。また、太陽光発電システムを地上から高いところに設置することで、より多く日照が得られることが確認出来ていることから、月面設置発電システムとして、タワー型太陽発電システムとすることが適していると考えられる。

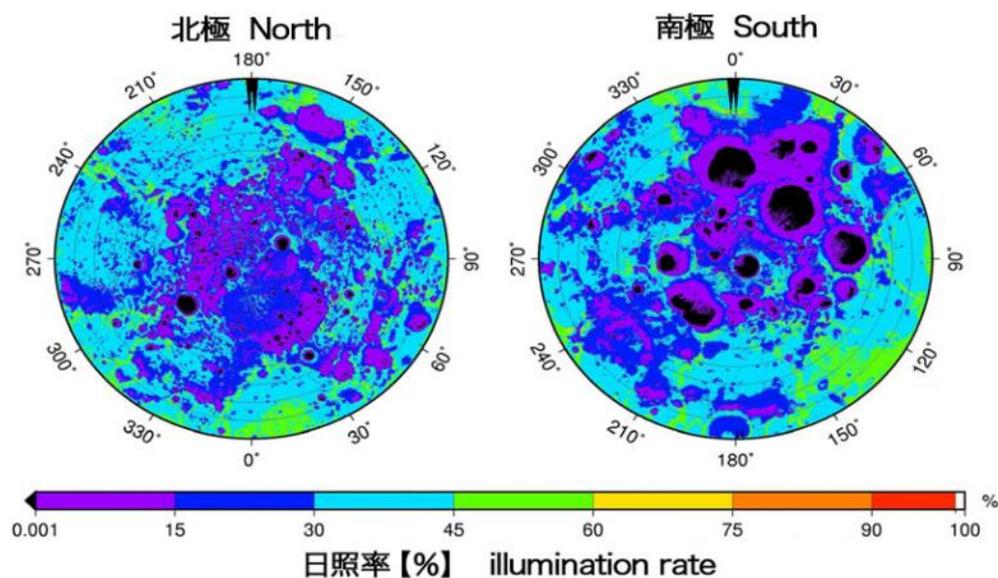


図 2-109 月極域の日照率

出所) <https://www.jaxa.jp/article/special/kaguya/seika01.j.html>

#### 4) 既存の検討事例

月面に設置するタワー型太陽発電システムの既存の検討事例についての調査結果を下記に示す。

NASA の LSII(Lunar Surface Innovation Initiative)は、2021 年に垂直展開型太陽電池アレイのシステム設計・開発に 5 つの企業 (Astrobotic、Honeybee Robotics、Maxar、Northrop Grumman、Lockheed Martin)を選定し、2022 年に Astrobotic、Honeybee Robotics、Lockheed Martin の 3 社をプロトタイプ作成と環境試験実施者として選定した。下記にそれら 3 社のシステムの事例を示す。

また、日本でのタワー型の検討事例として、国土交通省から大林組、JAXA、室蘭工業大学、サカセ・アドテックが委託を受けて実施した「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」における太陽光発電タワーの事例を示す。

##### a. Astrobotic

Astrobotic 社は NASA と共同開発している垂直太陽電池アレイ技術(VSAT)を利用した Luna Grid という月面向け商用電力サービスを早ければ 2026 年に展開する計画である。Luna Grid からの電力は、ワイヤレス充電器とテザーキューブローバーを介して分配され、VSAT で生成された電力が供給される。各 VSAT には、電力を本格的な電力網に拡張するために必要な変圧器と電力管理システムが含まれる。Luna Grid は最初 10KW から始めて、スケールアップされる予定である。また、Astrobotic 社は NASA から委託を受けて、月面での高電圧電力の実証を行うことも計画している。

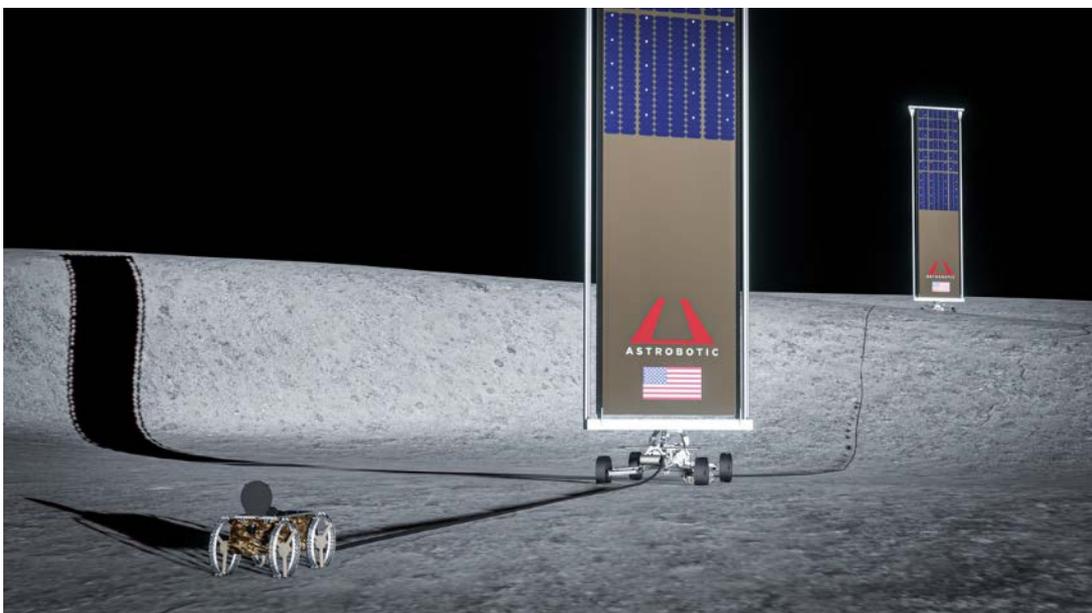


図 2-110 Astrobotic 社 VSAT

出所) <https://www.astrobotic.com/lunar-delivery/lunar-surface-power/>  
<https://spacenews.com/astrobotic-announces-plans-for-lunar-power-service/>

## b. Honeybee Robotics

Blue Origin の子会社である Honeybee Robotics は、Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)というシステムでシリコン太陽電池モジュールを使用することを計画している。冷蔵庫サイズ(0.45m×0.45m×1.5mH)に折りたたんで移動し、設置・展開される。

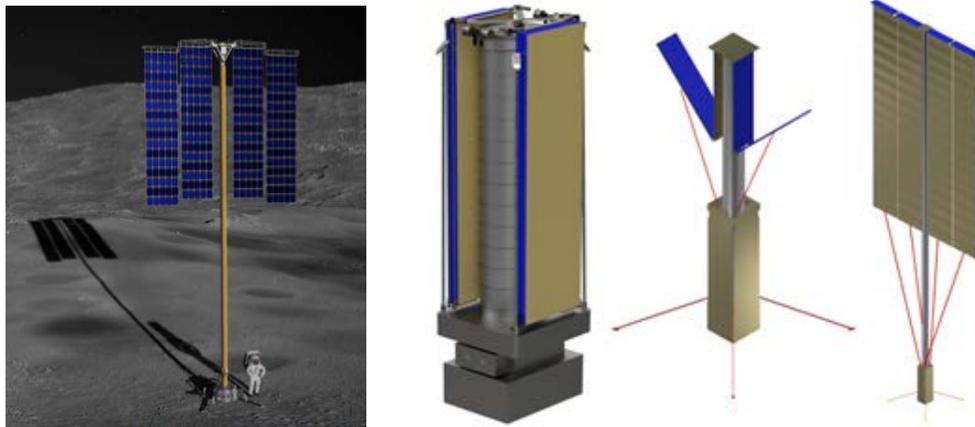


図 2-111 Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)

出所)<https://www.honeybeerobotics.com/news-events/honeybee-robotics-and-mpower-technology-chosen-to-design-lunar-charging-station-for-nasa/>  
<https://www.honeybeerobotics.com/news-events/honeybee-robotics-and-mpower-technology-selected-as-lunar-power-grid-provider-for-artemis-exploration/>

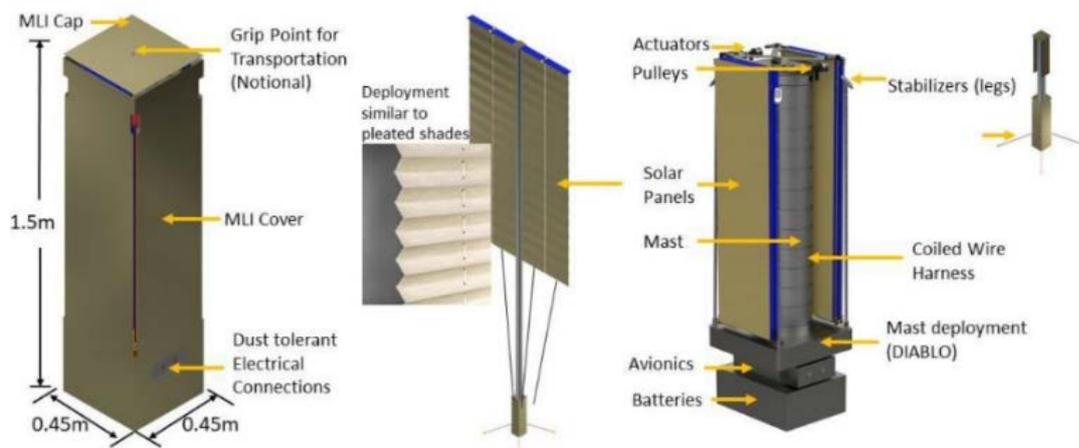


図 2-112 Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)説明図

出所)<https://www.abqjournal.com/2395939/nmpowered-solar-charging-station-could-land-on-the-moon.html>

また HONEYBEE ROBOTICS では、LUNARSABER(図 2-113)という、通信や発電、送電など様々な用途に用いられる、高さ 100m 以上の展開可能な構造物の開発等も実施している。

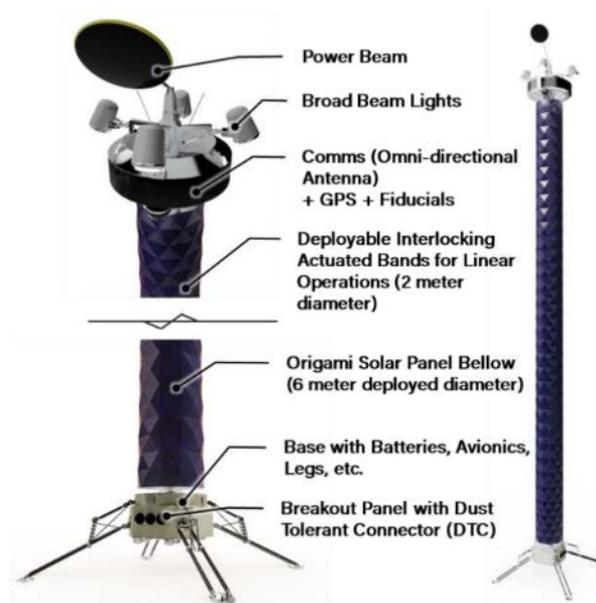


図 2-113 LUNARSABER

出所) <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/pdf/2535.pdf>

### c. Lockheed Martin

ロッキードマーチンは開発してきた Multimission Modular Solar Array を用いて VSAT を開発している。サイズについては、スクールバス 2 台分の長さとなる。

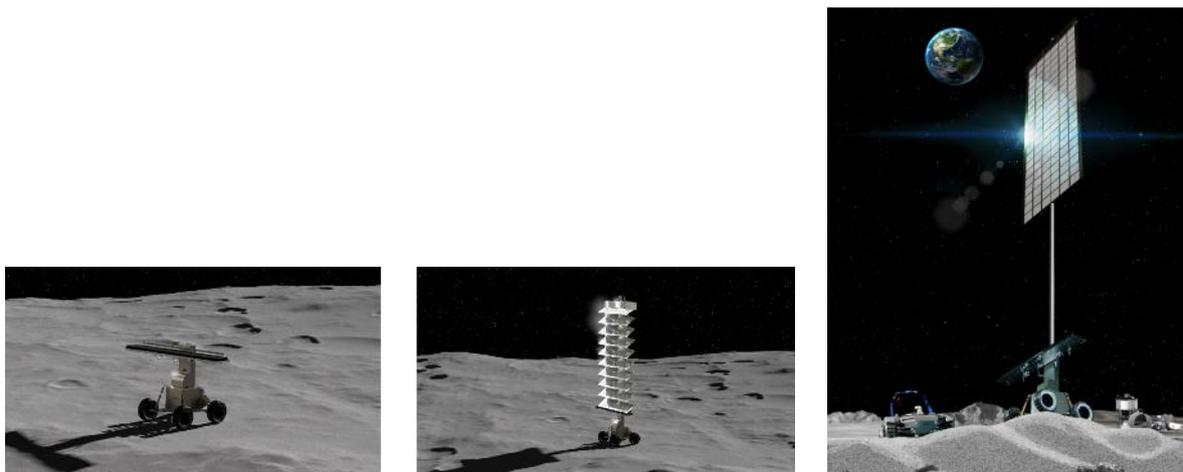


図 2-114 Lockheed Martin 社 VSAT

出所) <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2022/humanity-s-future-on-the-moon-is-looking-bright.html>

#### d. Relocatable Solar Array(RSA)

Langley Research Center 他により、10kW の再配置可能な展開・収納型太陽電池アレイが提案されている。水平のクロスアームとそこから両側にぶら下がる形で配置される太陽電池、垂直のマスト、三脚のベースで構成されている。整地していない 15°の傾斜にも自動でレベリングし対応可能な機構が考えられている。体積当たりの出力は 20kW/m<sup>3</sup>と考えられており、全体質量は 120kg と想定されている。

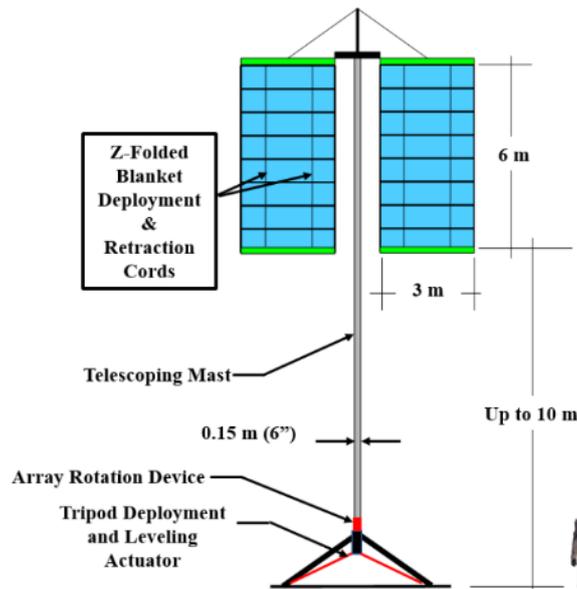


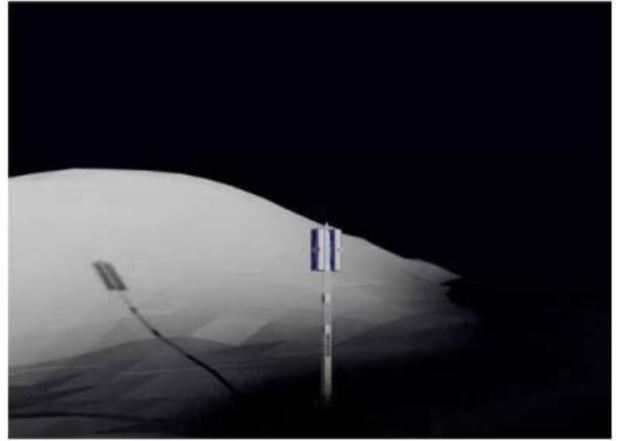
図 2-115 10kW の Relocatable Solar Array(RSA)

出所)Relocatable 10 kW Solar Array for Lunar South Pole Missions

設置方法は、図 2-116 のように3脚の展開、レベリング、マストの展開、パネルの展開、最高位置までのマストの展開の流れで設置となっている。なお、3脚の展開までの施工として、完全に同一のシステムではないが、図 2-117 に示す 2020 年の Langley Research Center の資料のように、ランダーからのクレーンによる荷下ろし、搬送、設置の工程が考えられている。



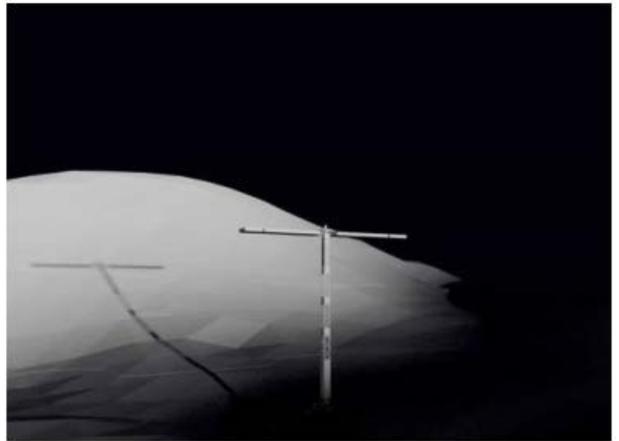
**1. - Deploy Legs and Level**



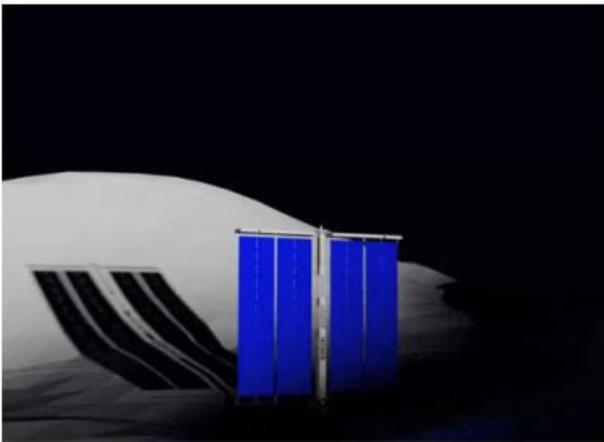
**2. - Deploy Telescoping Mast to Minimum Height**



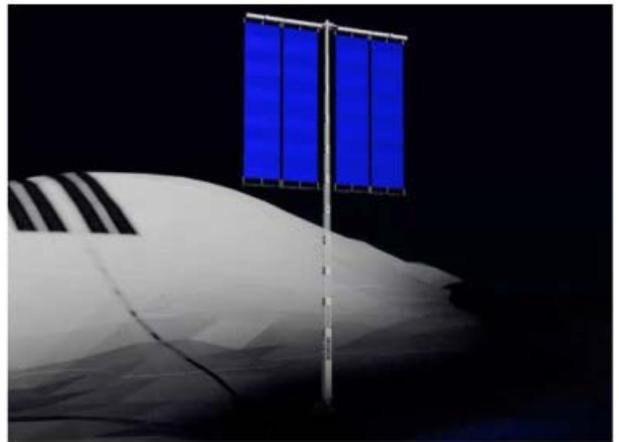
**3. - Partially Rotated Blanket Panels**



**4. - Fully Rotated Blanket Panels**



**5. - Drop stowed blankets**



**6. - Deploy Telescoping Mast to Maximum Height**

図 2-116 RSAの展開手順

出所)Relocatable 10 kW Solar Array for Lunar South Pole Missions

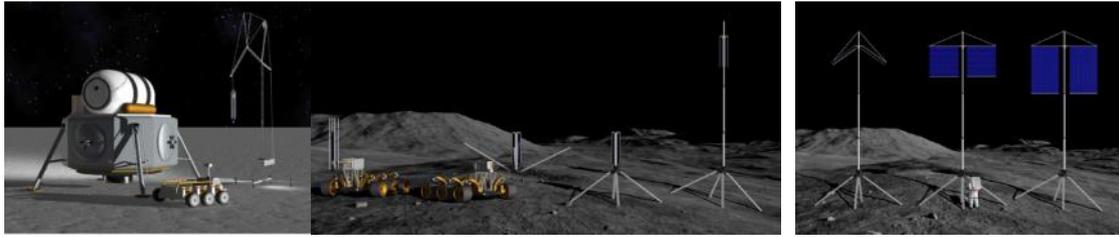


図 2-117 Langley Research Center の VSAT

出所) [https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/presentations/587-Taylor\\_LSSI%20Talk.pdf](https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/presentations/587-Taylor_LSSI%20Talk.pdf)

### e. 大林組、JAXA、室蘭工業大学、サカセ・アドテックのタワー

日本でのタワー型太陽光発電の検討事例として、国交省から大林組、JAXA、室蘭工業大学、サカセ・アドテックが委託を受けて実施した「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」がある。同検討において、2022年度に高さ2m(1/6G下では12m相当)のタワーのブレッド・ボード・モデル(BBM)が製作されており、2023年度ではそのBBMにパネルの展開機構、太陽追尾機構を取り付け、実験が行われている。展開機構、太陽光追尾機構については、展開・収納試験により問題なく機能していることが確認されている。



図 2-118 展開・収納機能を持つタワーのブレッド・ボード・モデル

出所)「令和五年度 月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」報告書、国土交通省「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」

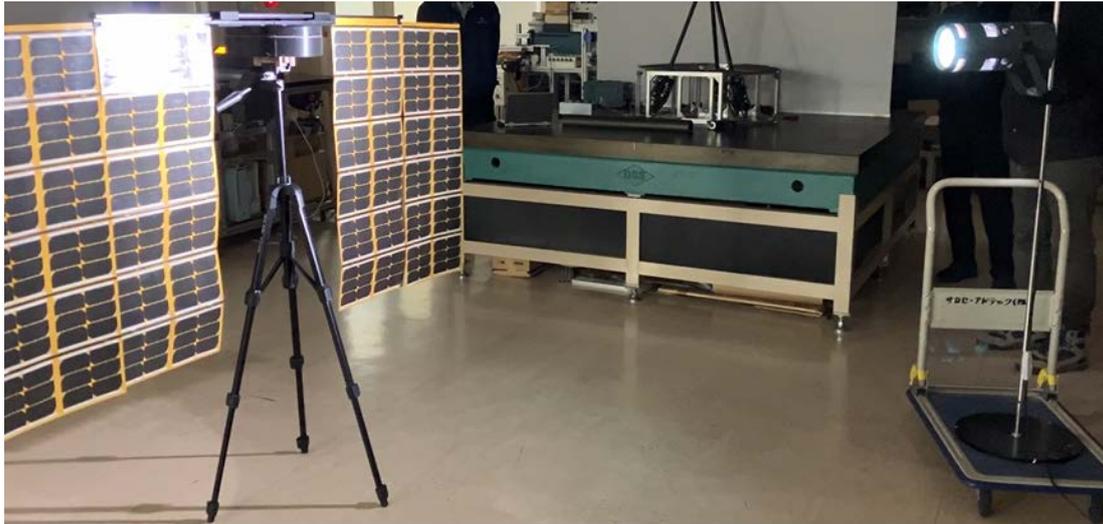


図 2-119 太陽追尾機能を持つ SAP のブレッド・ボード・モデル

出所)「令和五年度 月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」報告書、国土交通省「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」

### (3) 日照シミュレーション

月南極域での月面設置太陽光発電所に向けた太陽光発電環境の検討では、太陽の動きと南極域の地形情報をもとに想定立地地点における日照時間の経緯を把握することが重要である。この日照シミュレーションは以下の手順で行った。

- ① 公開情報を基に月南極域における年間を通しての太陽光の動きをモデル化
- ② 国交省スターダスト計画の太陽光発電タワーの情報を引用して月南極域の2つの想定する太陽光発電タワー設置地点(以下、候補地点)を設定、また国交省スターダスト計画で使用した月南極域の 3D 地形データを下記計算のため引用
- ③ 上記のモデル化された太陽の動きと 3D 地形データを用いて月南極域における日照領域と影領域の年間変化を求め、2つの候補地点での日照時間と影時間の経時変化を算出

#### 1) 太陽光の動き

図 2-120 に太陽に対する地球および月の自転軸と公転軸の角度関係を示す。月は潮汐ロックにより公転周期と自転周期が一致している。その上で地球とともに太陽の周りを公転している。月の自転周期(=公転周期)は平均 27.32 日であるが、その間に太陽赤経が変化するため、月の 1 昼夜の長さは平均 29.53 日となる。

地球の赤道傾斜角  $23.44^\circ$  に対して、月の地球の赤道傾斜角は  $1.54^\circ$  とかなり小さい。そのため月の両極域では地球の極域のような著しい白夜や極夜は起きず、ほぼ水極域での地平面に沿って太陽は周回する。但し、少ないとはいえ赤道傾斜角は存在するので月南極点からみた太陽の軌跡は図 2-121 に

示すような螺旋状になる。なお、この検討では摂動や均時差<sup>18</sup>といった複雑だが影響が小さい項目は無視した。

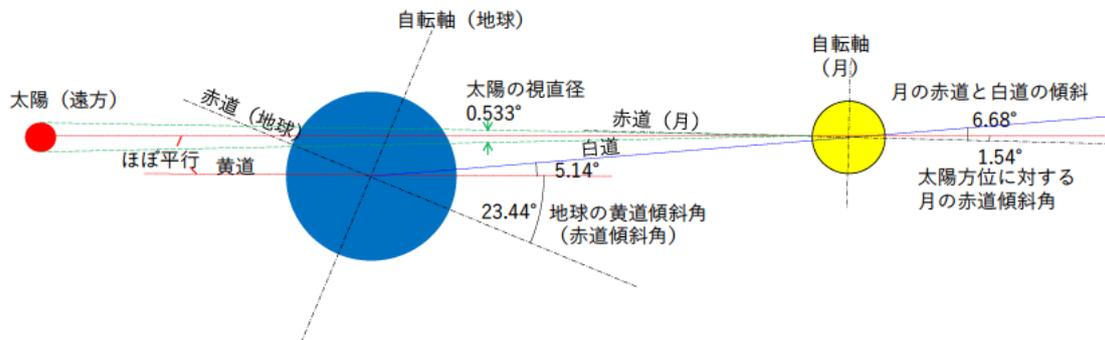


図 2-120 太陽基準での地球と月の自転と公転角度の関係

出所)大林組

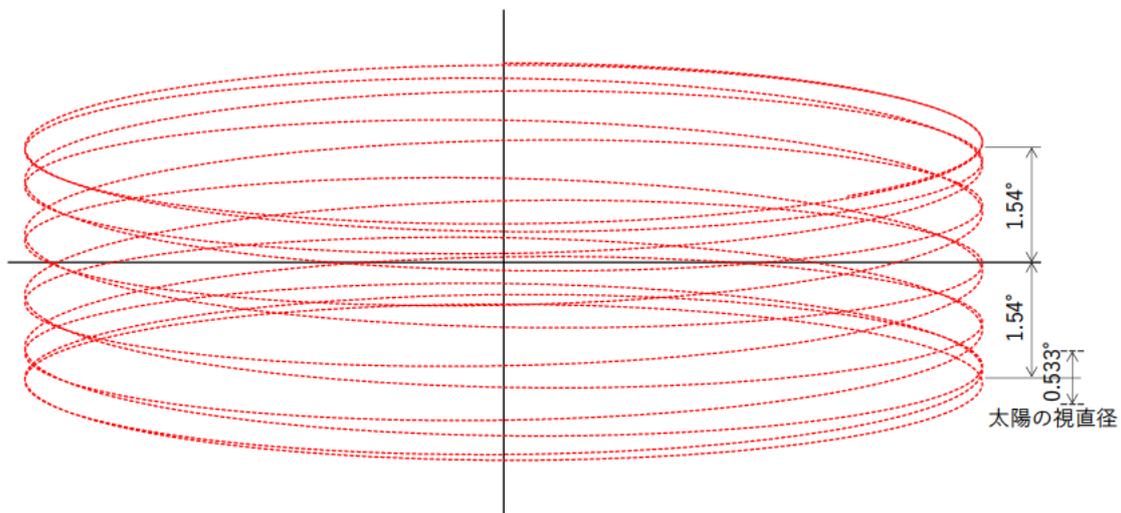


図 2-121 月南極点からみた太陽の軌跡

出所)大林組

## 2) 月南極域の地形

国交省スターダスト計画の「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」において展開構造方式の多目的月面タワーの計画を行っており、その際に月南極域の 3D 地形データを作成している。このデータは月面タワーの高さを決める際に用いたもので、最も厳しい冬至期の日照条件を求めることに使用したものであるが、太陽の軌跡と組み合わせることで候補地点における詳細な日照状況を求めることが可能となる。

<sup>18</sup> 摂動とは主星(月の場合には地球)以外の天体重力により軌道が乱されることを示す。均時差とは軌道の楕円性により視太陽の赤経増加率が変動することを示す。

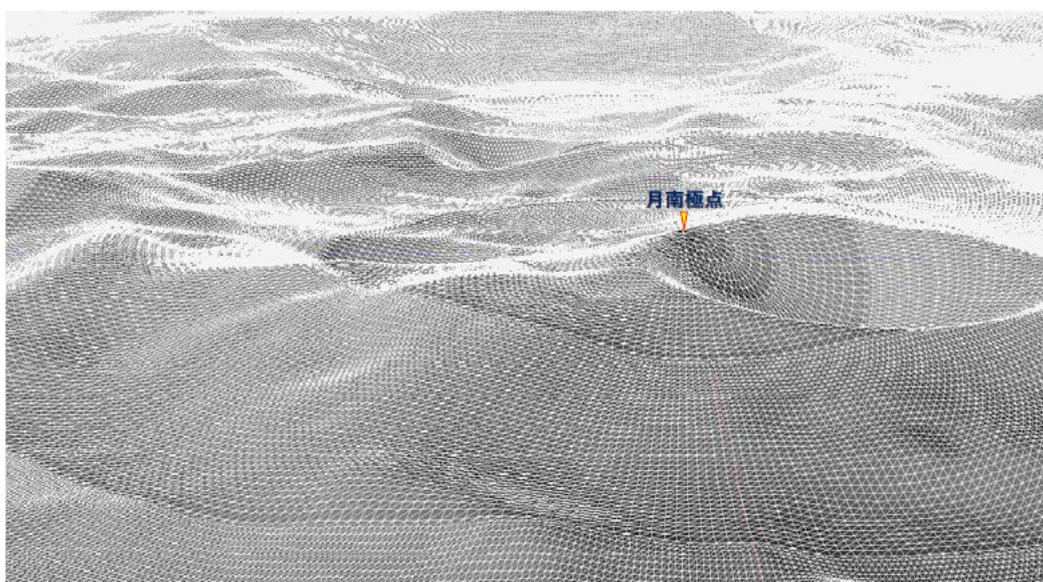


図 2-122 月南極域の 3D 地形データ(国交省スターダスト計画)

出所)国土交通省「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト 令和四年度 月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」成果を基に大林組作成

### 3) 候補地点における日照時間と影時間の経時変化計算方法

日照検討ではこの 3D 地形データを用いて月南極域における日照領域と影領域の年間変化を求め、候補地点での日照時間と影時間の経時変化を求める。対象地点の日照/影の状態は以下の式で判断する。

- 日照状態 : 太陽高度 > 候補地点からみた太陽方位の最高地形高度
- 影状態 : 太陽高度 ≤ 候補地点からみた太陽方位の最高地形高度

ここで、太陽の方位と高度は図 2-121 に示す値とする。一方、候補地点からみた太陽方位の最高地形高度は月南極域の 3D 地形データを用いて、それぞれの候補地点の地表面から国交省スターダスト計画のタワー必要高さとして決められた特定の高さ(候補地点1、2とも 10m)の位置において、360°方位の視野に入る地形から各方位で太陽日射の境界となる高度(角度)を求めた。この 3D 地形データは南緯 90°(南極点)を中心とした南緯 85°までの範囲を対象としており、この地形データ上の候補地点から周囲 360°の最高地形を図 2-123 に示す投影手法によりグラフ化した。グラフ化したものを図 2-124 に示す。

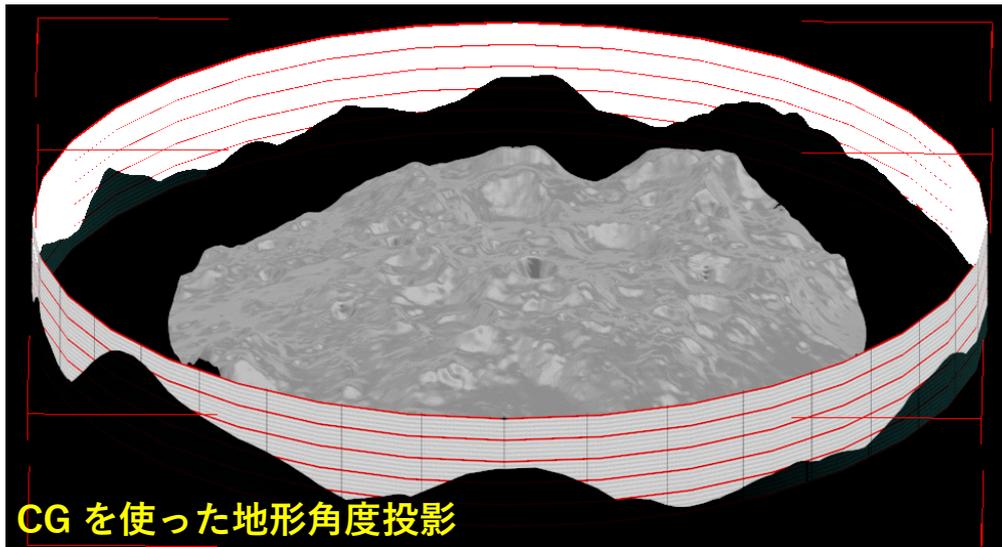


図 2-123 3D 地形データを用いて投影手法で求めた 360°方向の最高地形角度

出所)大林組

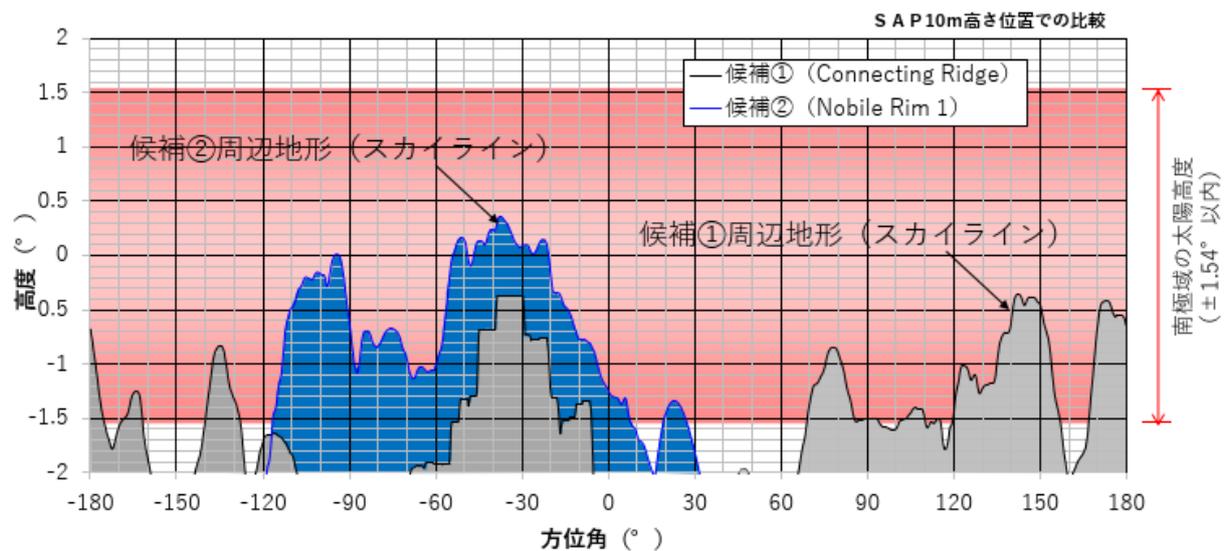


図 2-124 各候補地点における 360°方向の最高地形角度グラフ

出所)大林組

#### 4) 候補地点における日照時間と影時間の経時変化計算結果

月の太陽に対する公転周期は地球と同様の 1 年間(365.24 日)でその間で南極域の太陽高度は±1.54°の範囲で変化する。一方、太陽方位は月の1昼夜の長さである 29.53 日であり、この周期で図 2-124 に示す高度変化が繰り返される。これら太陽高度と候補地点からみた太陽方位の最高地形高度の年間変化を図 2-125 に示す。この図で太陽高度(赤線)が最高地形高度(青線もしくは紫線)を越えている時間は日照状態、それ以外を影状態と判断する。なお、この太陽高度は太陽の中心位置である。詳細には太陽の視直径分、日照と影の境界は曖昧になるが、ここでは簡易的に中心位置角度が地形角度の上か下かの 2 値で判断した。

図 2-125 を基に計算を行った結果について、表 2-60 に確報補地点の日照率・最長影時間を、表

2-61 に日照時間と影時間の長さ履歴を示す。候補地点 1 はシャクルトンクレータリム部にあつて「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」の想定基地に近いが、太陽高度が低い時期は日照時間が50%程度まで低下する(年間平均は84%程度)。候補地点 2 はこの想定基地から10km 強離れているが、太陽高度が低い時期でも日照時間が80%程度確保できる(年間平均は95%程度)。なお、候補地点 1 でもこれ以外の地点に比べると日照条件は良い。

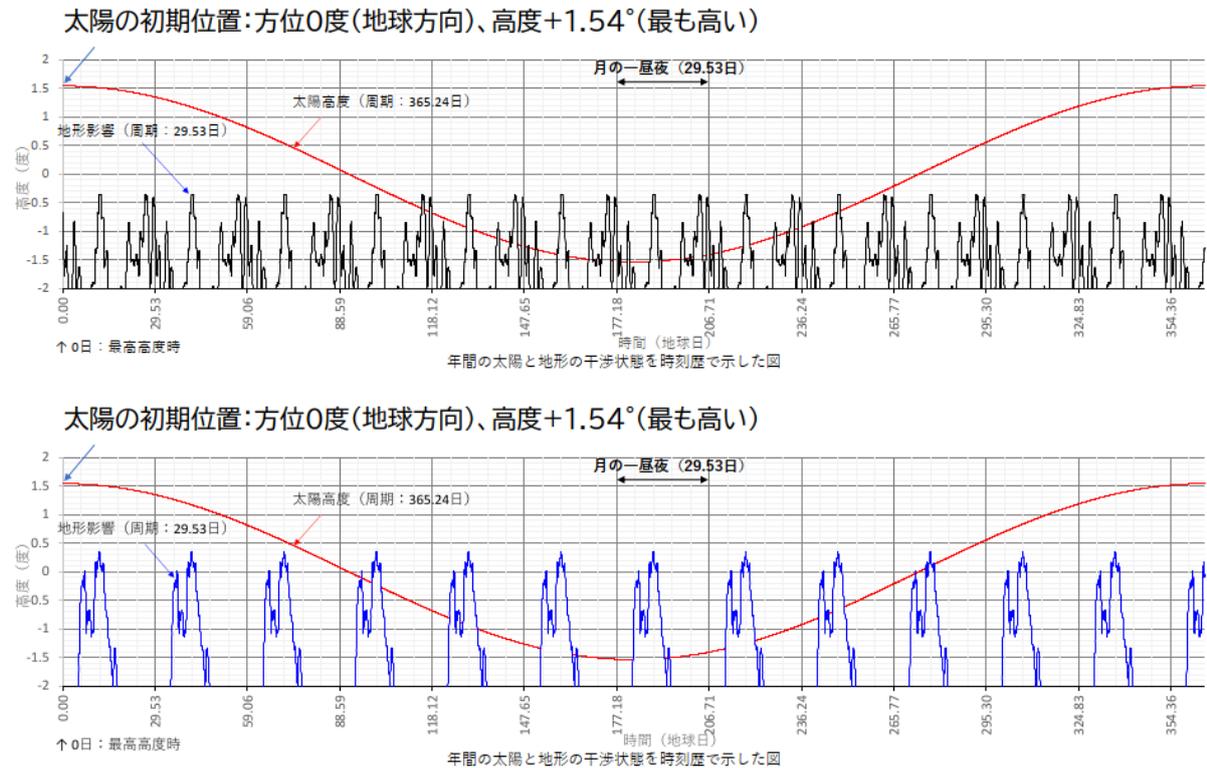


図 2-125 太陽高度と候補地点からみた太陽方位の最高地形高度の比較  
(上:候補地点 1、下:候補地点 2)

出所)大林組

表 2-60 各候補補地点の日照率・最長影時間

|              | 候補地①           | 候補地②            |
|--------------|----------------|-----------------|
| 最大           | 90.56%         | 86.85%          |
| 平均           | 89.52%         | 86.15%          |
| 最小           | 89.02%         | 85.47%          |
| 標準偏差         | 0.32%          | 0.30%           |
| <b>最長影時間</b> | <b>73.82時間</b> | <b>244.61時間</b> |

出所)大林組

表 2-61 年間を通した日照時間比の変化  
(各日照時間と影時間の長さ履歴、左:候補地点 1、右:候補地点 2)

| 候補地点 1  |       |         |       | 候補地点 2  |        |
|---------|-------|---------|-------|---------|--------|
| 日照時間    | 影時間   | 日照時間    | 影時間   | 日照時間    | 影時間    |
| 2756.13 | 22.64 | 42.33   | 24.61 | 2290.54 | 8.37   |
| 36.42   | 20.18 | 144.2   | 73.82 | 72.84   | 70.38  |
| 264.79  | 48.72 | 1.97    | 1.97  | 525.14  | 46.76  |
| 185.55  | 16.73 | 2.46    | 15.75 | 5.91    | 30.02  |
| 77.27   | 13.29 | 147.65  | 31.5  | 23.62   | 108.28 |
| 4.43    | 47.74 | 37.9    | 10.34 | 489.21  | 240.67 |
| 26.08   | 29.53 | 20.18   | 71.36 | 25.59   | 12.3   |
| 23.13   | 4.43  | 21.66   | 32.48 | 427.2   | 244.61 |
| 47.25   | 17.72 | 19.19   | 8.37  | 23.62   | 14.76  |
| 154.05  | 67.92 | 45.28   | 19.19 | 428.68  | 225.41 |
| 11.32   | 10.83 | 164.88  | 50.69 | 488.23  | 46.26  |
| 148.14  | 31.99 | 185.05  | 15.75 | 7.38    | 5.91   |
| 12.3    | 2.95  | 80.22   | 2.95  | 8.37    | 10.83  |
| 19.69   | 13.29 | 21.16   | 37.4  | 30.51   | 88.59  |
| 7.87    | 2.46  | 29.53   | 24.61 | 544.34  | 5.41   |
| 8.86    | 73.33 | 83.67   | 3.94  | 78.25   | 7.87   |
| 19.69   | 34.94 | 186.53  | 20.18 | 5.91    | 28.05  |
| 11.81   | 14.76 | 2798.73 |       | 16.24   | 3.94   |
|         |       |         |       | 2075.74 |        |

※ ここでの日照時間は図 2-125 における太陽高度>地形高度の時間長、影時間は太陽高度 ≤地形高度の時間長の繰り返しを、年間を通して計算したものである。

出所)大林組

太陽の初期位置によりその軌道は変化するため、ここではそれぞれの候補地で太陽の初期位置を変えた 360 ケースの計算を行い、統計的に日照効率(全時間日照状態を 100%とする)の計算を行った。その結果、両候補地とも太陽方位のばらつきを考慮しても 85%以上の年間日照率を得られることが分かった。両候補地を比較すると、候補地点 1の方が、若干日照量が多いがそれほど大きな違いはなかった。但し、連続する影時間の最長値は候補地点 1の 73.82 時間に対し、候補地点 2は 244.61 時間と 3 倍程度長くなる。これは影を生じる周辺地形の特徴が異なるためで、候補地点 1ではそれが全方位に分散して個々の影時間が短くなるのに対し、候補地点 2では一方向に集中するため個々の影時間が長くなることによる。具体的には、候補地点 2が南緯 85°付近にあることで、月の球形状により南緯 85°以南にある多くの部分が(特に太陽高度が低い時期に)影を生じる原因になっているためと考えられる。

太陽高度が最も低い時期(-1.54°)に候補地点 2に影を生じる地形を月南極域地形の 3次元モデルを使って計算を行った。その結果、南極点を中心とした広い範囲の影になり、連続で最長 244.61 時間

の影時間が生じる。これは候補地点 2 が南緯 85°付近にあるため、月自体の「丸み」による影響を受けたためと思われる。

候補地点 2 はかなり標高が高い地点にあるため、太陽高度が 0°以上であればこれらの地形影響はほぼ無いことから、冬季のみに出現する現象である。なお、使用している月の地形データが南緯 85°以南のため、より低緯度側の地形影響は評価できていないが、候補地点 2 はこの地域のほぼ最高標高なので、より低緯度の地形がここに影を生じる可能性はかなり低いと考えられる。

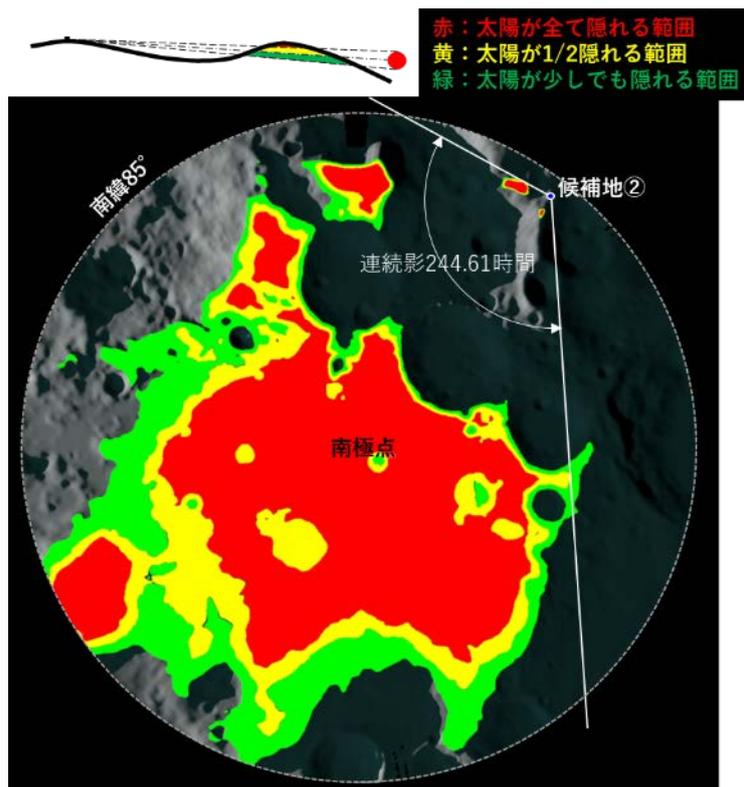


図 2-126 太陽高度-1.54°時の日照障害地形(対候補地点 2)

出所)大林組

## 5) 太陽光発電タワーの相互影の影響に関する検討

必要電力量が一基の太陽光発電タワーで賄えない場合、これを複数基設置することになる可能性が高いと考えられる。極域では太陽光がほぼ水平方向から照射するため、特定の太陽光方位に対する位置関係次第で SAP 同士の影が影響することが考えられる。ここでは複数基の同じ高さの太陽光発電タワーが平坦地にある場合を想定し、その平面配置パターンによる相互影の影響が全体としての発電量にどの様に影響するかを試算した。

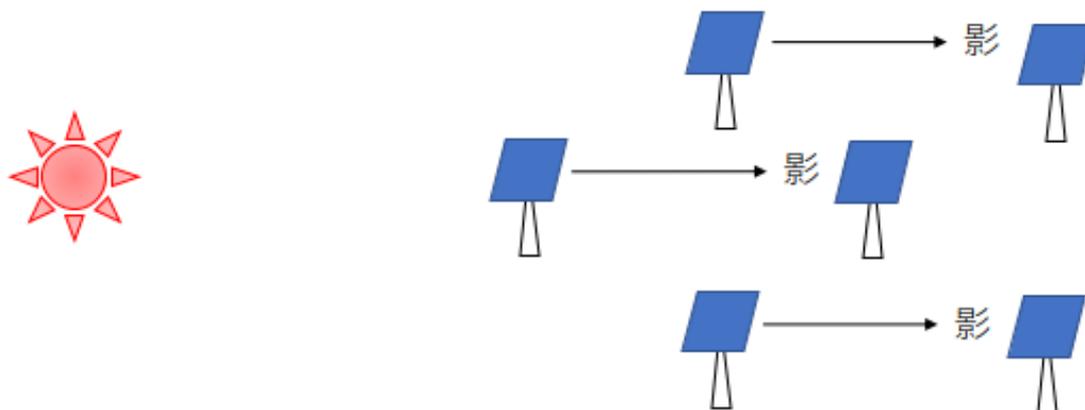


図 2-127 複数の太陽光発電タワーと太陽の相互関係

出所)大林組

設定した仮定条件は以下のとおり。

- タワー数は 12 基(各配置パターンの割切が良い数)
- タワー高さは 12m、SAP の展開時サイズは 6m×6m の正方形で太陽を追尾とすると想定
- 平坦地設置で太陽光は 360°全方位で水平に照射することを想定

簡易的に以下の配置パターンを想定した。タワーの配置パターンを図 2-128、図 2-129 に示す。

- ① 直線配置で隣接タワー間隔は 10m と 20m の 2 パターン
- ② 円環配置で隣接タワー間隔は 10m と 20m の 2 パターン
- ③ 三角形配置で隣接タワー間隔は 10m と 20m の 2 パターン
- ④ 格子型配置で格子間の距離は 10m と 20m の 2 パターン
- ⑤ 不統一配置(但し相互影の影響が低い例)で最小タワー間隔は 10m と 20m の 2 パターン

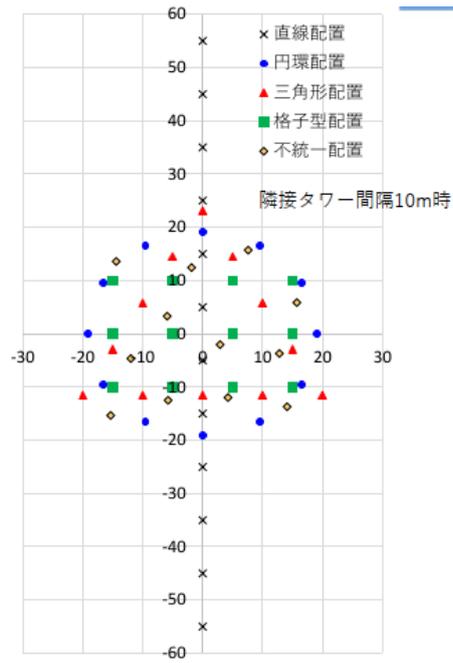


図 2-128 タワーの配置

出所)大林組

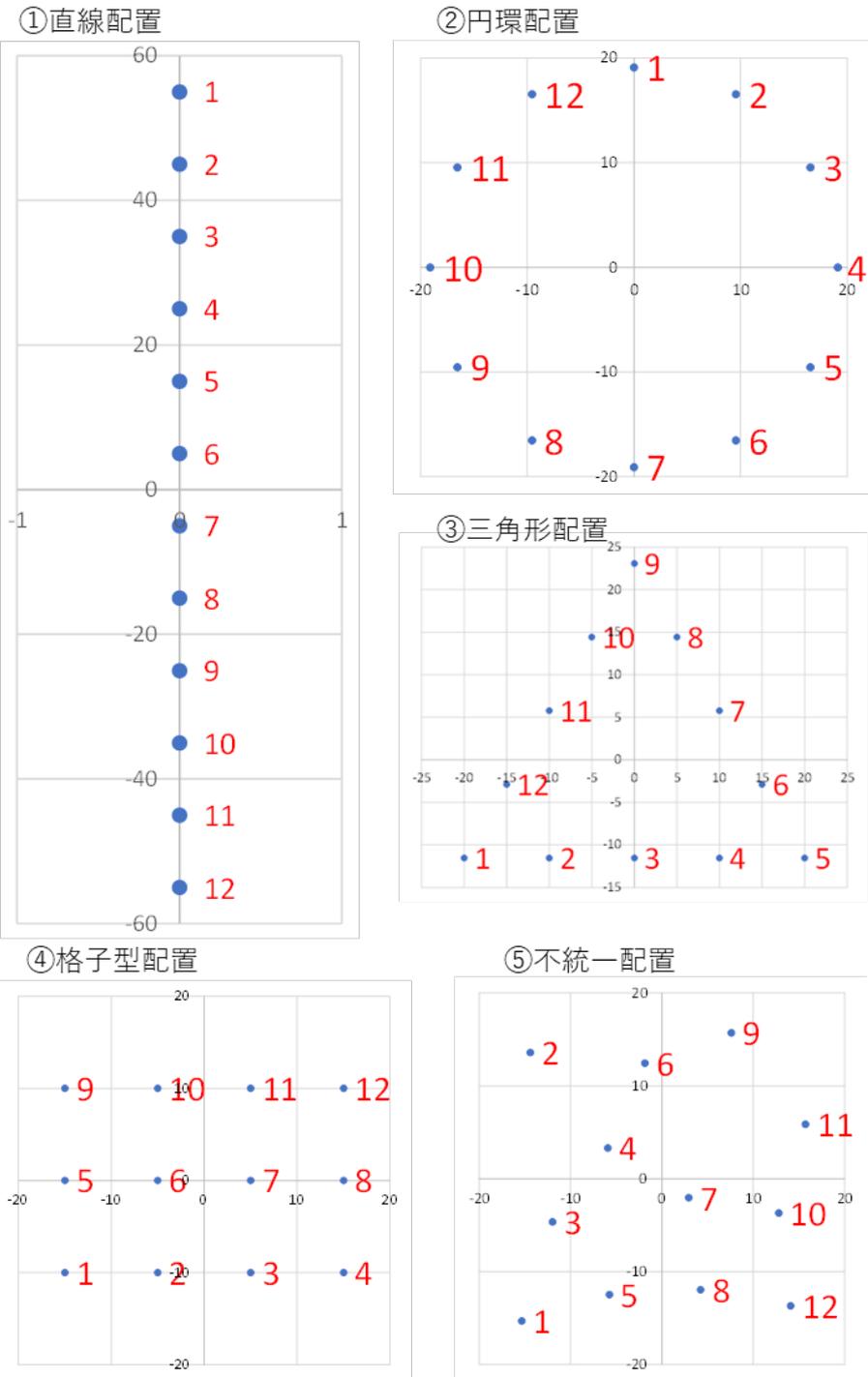


図 2-129 タワーの配置パターン

出所)大林組

### a. 直線配置パターン

直線配置では SAP が一列に並ぶため、その並びの方向に太陽がある 2 つの方位(ここでは 0°と 180°)で著しく発電効率が下がるが、その他の大半の時間は全 SAP が稼働する。直線配置における発電効率、発電パターンを表 2-62、図 2-130 に示す。

表 2-62 発電効率(直線配置パターン)

| SAP基番 | 発電効率   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 間隔10m  | 間隔20m  |
| 1     | 95.36% | 97.62% |
| 2     | 90.72% | 95.24% |
| 3     | 90.72% | 95.24% |
| 4     | 90.72% | 95.24% |
| 5     | 90.72% | 95.24% |
| 6     | 90.72% | 95.24% |
| 7     | 90.72% | 95.24% |
| 8     | 90.72% | 95.24% |
| 9     | 90.72% | 95.24% |
| 10    | 90.72% | 95.24% |
| 11    | 90.72% | 95.24% |
| 12    | 95.36% | 97.62% |
| 全体    | 91.49% | 95.64% |

出所)大林組

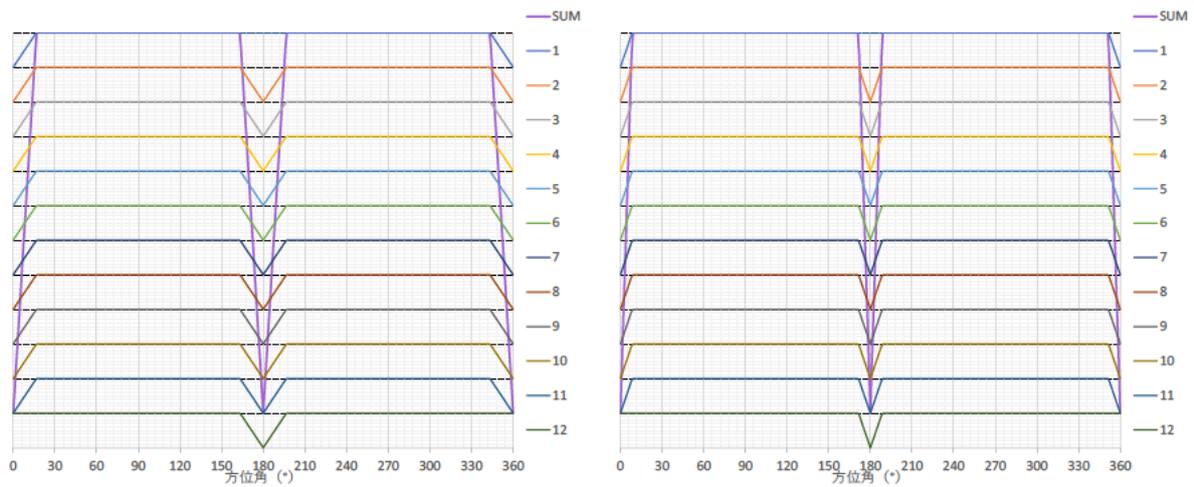


図 2-130 発電パターン(直線配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)

出所)大林組

## b. 円環配置パターン

円環配置では SAP が円状に並ぶため、太陽方位への依存性が小さいが、周期的に反対方位にある SAP の影を受けるため発電効率は周期的な変化を起こす結果となった。円環配置における発電効率、発電パターンを表 2-63、図 2-131 に示す。

表 2-63 発電効率(円環配置パターン)

| SAP基番 | 発電効率   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 間隔10m  | 間隔20m  |
| 1     | 76.60% | 87.39% |
| 2     | 76.60% | 87.39% |
| 3     | 76.60% | 87.39% |
| 4     | 76.60% | 87.39% |
| 5     | 76.60% | 87.39% |
| 6     | 76.60% | 87.39% |
| 7     | 76.60% | 87.39% |
| 8     | 76.60% | 87.39% |
| 9     | 76.60% | 87.39% |
| 10    | 76.60% | 87.39% |
| 11    | 76.60% | 87.39% |
| 12    | 76.60% | 87.39% |
| 全体    | 76.60% | 87.39% |

出所)大林組

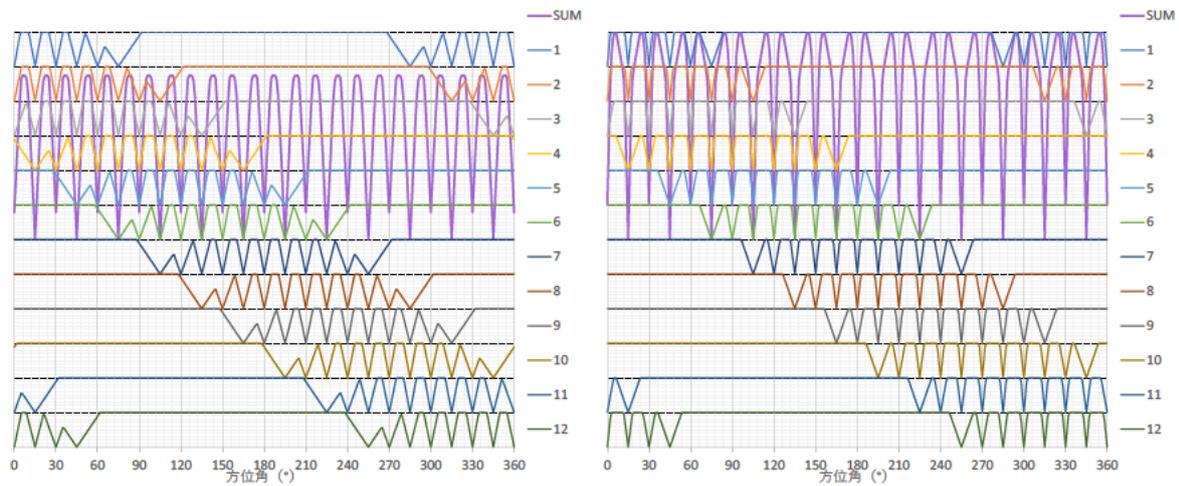


図 2-131 発電パターン(円環配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)

出所)大林組

### c. 三角形配置パターン

三角形配置では SAP が 1/3 が線上に並ぶため、その並びの方向に太陽がある 6 つの方位(ここでは 30°、90°、150°およびその反対方向)で大きく発電効率が下がるが、その他の大半の時間は比較的発電効率が良い結果となった。三角形配置における発電効率、発電パターンを表 2-64、図 2-132 発電パターン(三角形配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)に示す。

表 2-64 発電効率(三角形配置パターン)

| SAP基番 | 発電効率   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 間隔10m  | 間隔20m  |
| 1     | 87.42% | 93.17% |
| 2     | 75.81% | 87.29% |
| 3     | 75.51% | 87.55% |
| 4     | 75.81% | 87.29% |
| 5     | 87.42% | 93.17% |
| 6     | 75.81% | 87.29% |
| 7     | 75.51% | 87.55% |
| 8     | 75.81% | 87.29% |
| 9     | 87.42% | 93.17% |
| 10    | 75.81% | 87.29% |
| 11    | 75.51% | 87.55% |
| 12    | 75.81% | 87.29% |
| 全体    | 78.64% | 88.83% |

出所)大林組

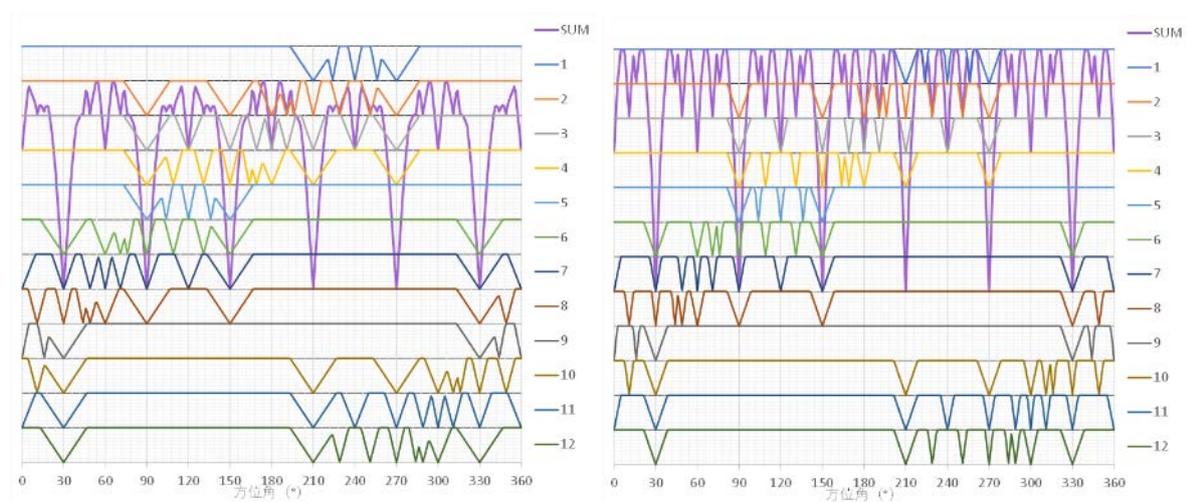


図 2-132 発電パターン(三角形配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)

出所)大林組

#### d. 格子型配置パターン

格子型配置は直線配置の変動特性をマイルドにした性状となり、直線配置以外の配置に比べて変動量が大きくなる。格子型配置における発電効率、発電パターンを表 2-65、図 2-133 に示す。

表 2-65 発電効率(格子型配置パターン)

| SAP基番 | 発電効率   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 間隔10m  | 間隔20m  |
| 1     | 81.25% | 90.03% |
| 2     | 73.09% | 86.31% |
| 3     | 73.09% | 86.31% |
| 4     | 81.25% | 90.03% |
| 5     | 72.89% | 85.88% |
| 6     | 63.90% | 81.62% |
| 7     | 63.90% | 81.62% |
| 8     | 72.89% | 85.88% |
| 9     | 81.25% | 90.03% |
| 10    | 73.09% | 86.31% |
| 11    | 73.09% | 86.31% |
| 12    | 81.25% | 90.03% |
| 全体    | 74.24% | 86.70% |

出所)大林組

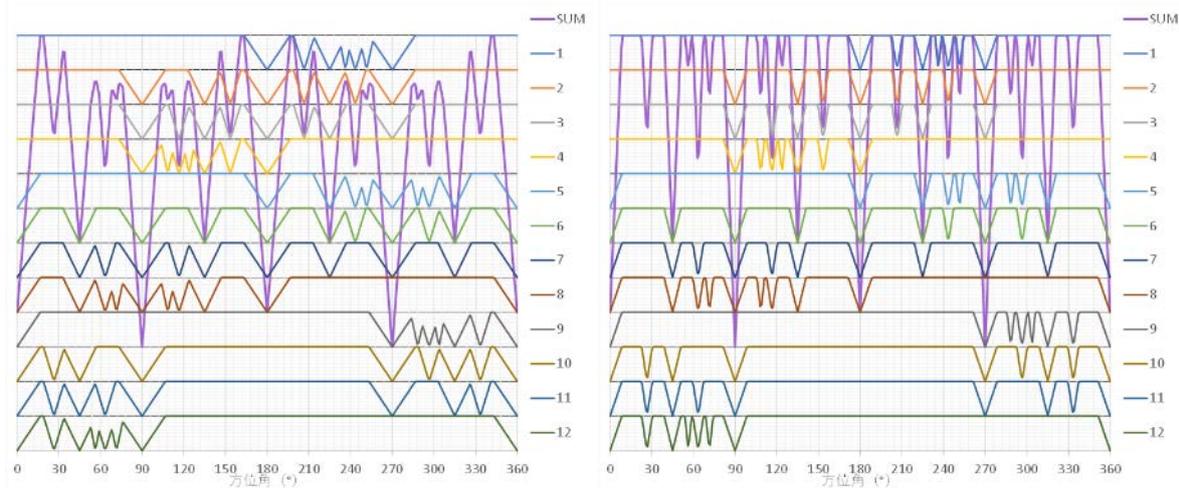


図 2-133 発電パターン(格子型配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)

出所)大林組

### e. 不統一配置パターン(相互影の影響が低い例)

不統一配置は同じ方位での重なりが小さくなる様に意図的に配置しており、その結果方位による発電効率のばらつきが小さくなるが、平均的にはやや低い結果となった。不統一配置における発電効率、発電パターンを表 2-66、図 2-134 に示す。

表 2-66 発電効率(不統一配置パターン)

| SAP基番 | 発電効率   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 間隔10m  | 間隔20m  |
| 1     | 83.52% | 89.51% |
| 2     | 83.95% | 91.19% |
| 3     | 75.00% | 85.47% |
| 4     | 70.28% | 83.39% |
| 5     | 71.26% | 84.47% |
| 6     | 75.93% | 86.53% |
| 7     | 64.74% | 81.95% |
| 8     | 73.71% | 84.86% |
| 9     | 78.10% | 87.94% |
| 10    | 71.89% | 84.43% |
| 11    | 79.58% | 88.18% |
| 12    | 81.16% | 88.28% |
| 全体    | 75.76% | 86.35% |

出所)大林組

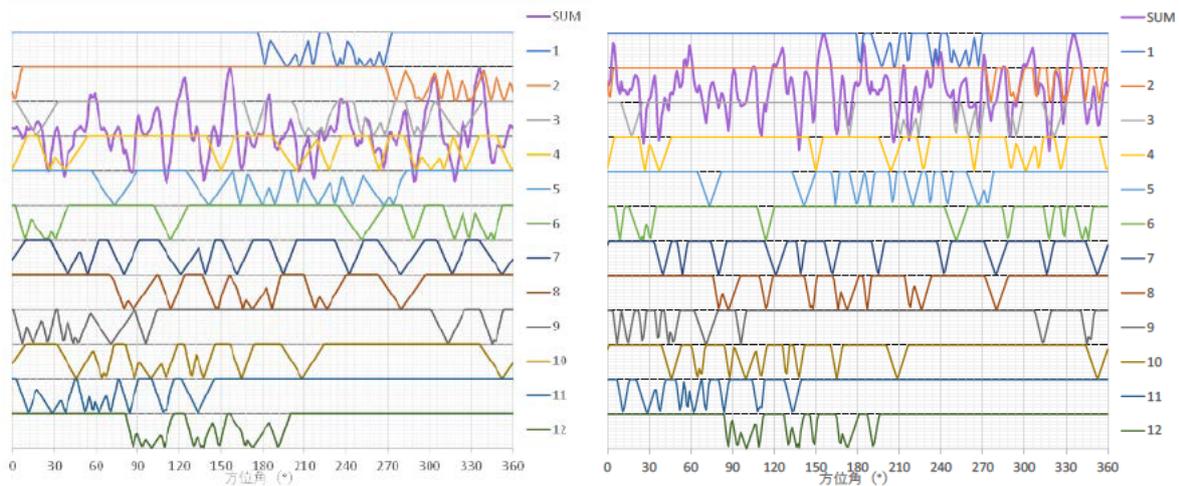


図 2-134 発電パターン(不統一配置パターン)(左:タワー間隔 10m、右:タワー間隔 20m)

出所)大林組

## f. 各パターンの比較

各パターンの発電効率を比較した結果を図 2-135 に示す。総発電効率においては直線配置が一番高いが、一時的に発電効率が著しく低下する。発電効率の低下を避けたい場合には不統一配置が向いているが、平均発電効率は少し低い。なお、これらの結果は他の影を考慮しない平坦地における評価結果であり、実際の立地条件を組み合わせると評価が変わる可能性がある。

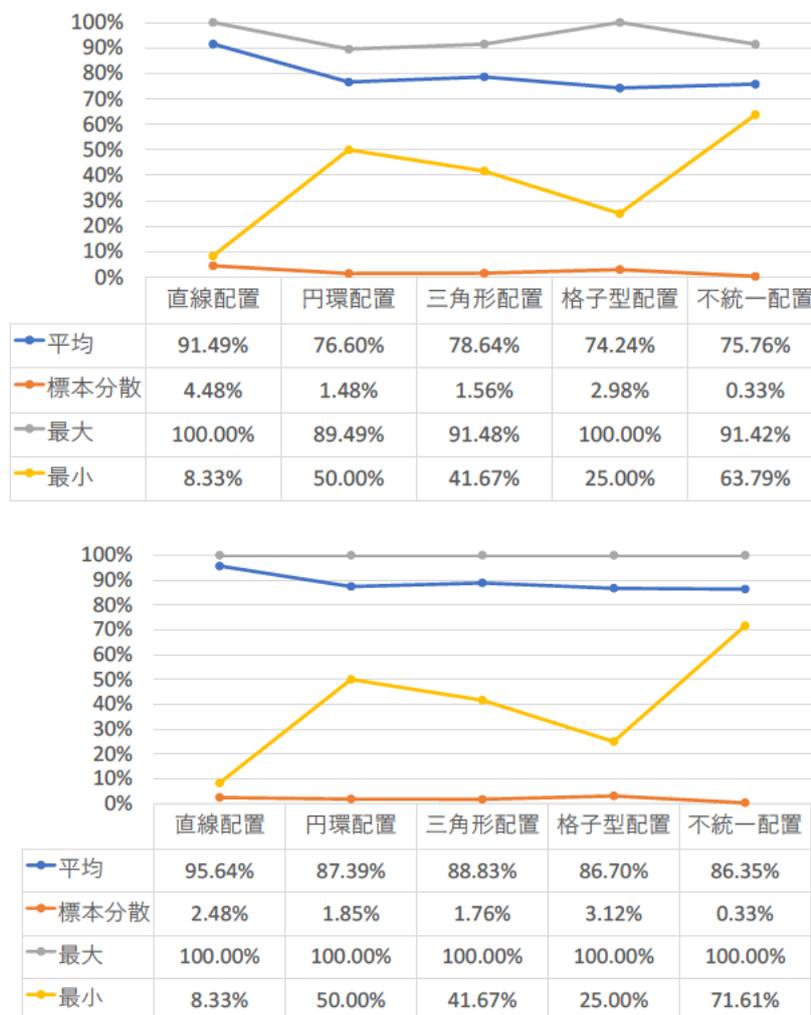


図 2-135 各パターンの発電効率の比較(上:間隔 10m、下:間隔 20m)

出所)大林組

## g. 不統一配置パターンにおける離隔距離と発電効率の関係

不統一配置における離隔距離と発電効率の関係を図 2-136 に示す。離隔距離を上げると互いの影に入る時間が短くなるため、発電効率は上昇する。但し、その場合、設置範囲が広がる(離隔距離 10m の場合で 12 基の設置範囲は約 35m 四方で、これは離隔距離に比例して大きくなる)。



図 2-136 不統一配置パターンにおける離隔距離と発電効率の関係

出所)大林組

## h. 推奨パターンに関する考察

直線配置は特定の方角で著しく発電効率が下がるが、もしその方角において周辺地形の影響による影も同時に生じる場合にはそのデメリットが大きく解消される。例えば候補①地点では $-30^{\circ}$ から  $150^{\circ}$  に向かう方角に直線配置をした場合がそれに該当する。

この方角に直線配置することを前提にすると候補①では直線配置が推奨できる。候補②では $-30^{\circ}$ 付近の一方角しかこのメリットはないが、もともと影時間が長く相応の蓄電池が用意されていれば短時間の低下は対応できる。

なお、当該候補地の詳細な地形情報(m単位の地形情報)が不明な現時点では、平坦地を仮定した今回の条件がどこまで満足できるか不明であり、もし無視できない凹凸がある場合にはその詳細地形に応じた調整や最適配置の検討を行うことが必要になると考えられる。

## (4) 発電システム容量・質量の検討

上記で検討した日照時間、影時間を用いて、必要な太陽光発電システム発電電力と蓄電池の容量と質量について、検討を行った。計算の前提は下記の通りである。

- 日照時・影時とも発電・蓄電システムから送る電力は 100kW とする。
- 日照時に余剰電力を蓄電するが、フル充電状態時は、必要な 100kW 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 2-67 の「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」<sup>19</sup>の値を使用する。(表 2-67 より太陽電池:0.1kW/kg、リチウムイオン電池:0.25kWh/kg、燃料電池:0.5kWh/kg)
- 日照時間と影時間の設定は、(5)で検討を行った表 2-61 の日照時間・影時間の結果を使用する。
- 設定した発電電力容量に対して、必要最低限の蓄電池容量を求める。(蓄電池のマージンは今回考慮しない。)

<sup>19</sup> <https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>

表 2-67 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   |
| 電力発生要求        | 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 |
| 電力容量各電池       | 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

### 1) 発電システム容量・質量

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 2-137 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。

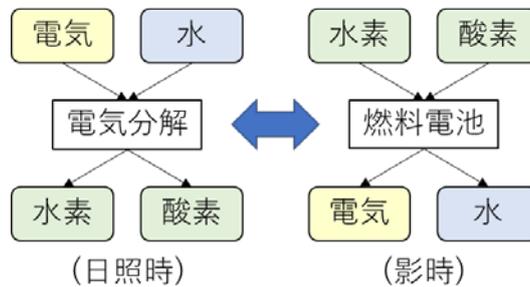


図 2-137 再生型燃料電池運転パターン

出所)大林組

#### a. リチウムイオン電池の場合

リチウムイオン電池を用いた場合の容量・質量について試算を行った。図 2-138 に示すように、日照

時は充電することにより、蓄電池の充電量が増加し、夜間になると放電を行う運転パターンとなる。図からも分かるように、日照時は夜間のための蓄電を行うために送電する 100kW 以上の容量が必要となり、余剰電力を蓄電池への充電に用いている。

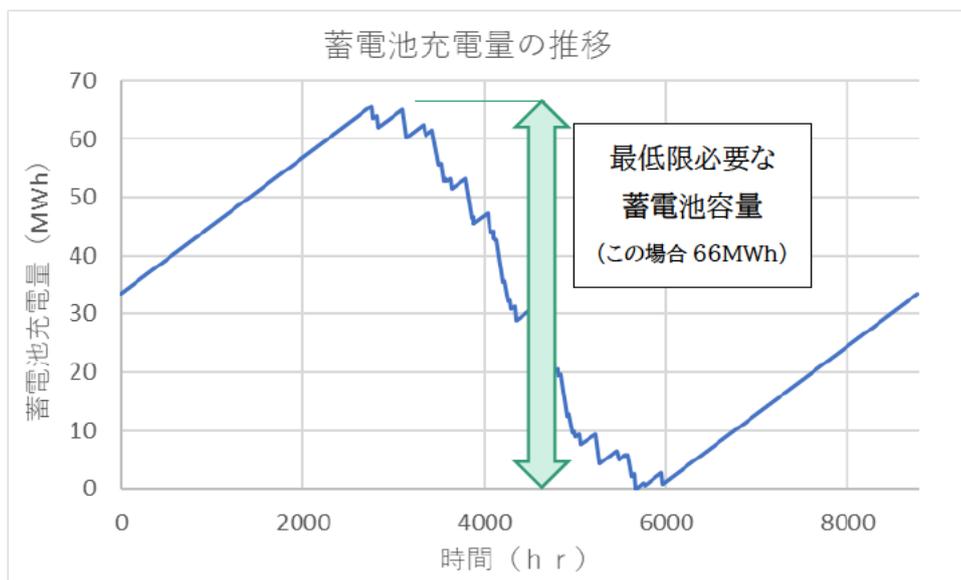


図 2-138 蓄電池容量の推移(候補地点 1、リチウムイオン電池、発電電力最小とした場合)

出所)大林組

発電電力容量の変化による蓄電池容量及び発電・蓄電システムの全体質量のグラフを図 2-139、図 2-140 に示す。今回は発電電力を設定し、それに必要最低限の蓄電池容量を求める形で計算を行った。

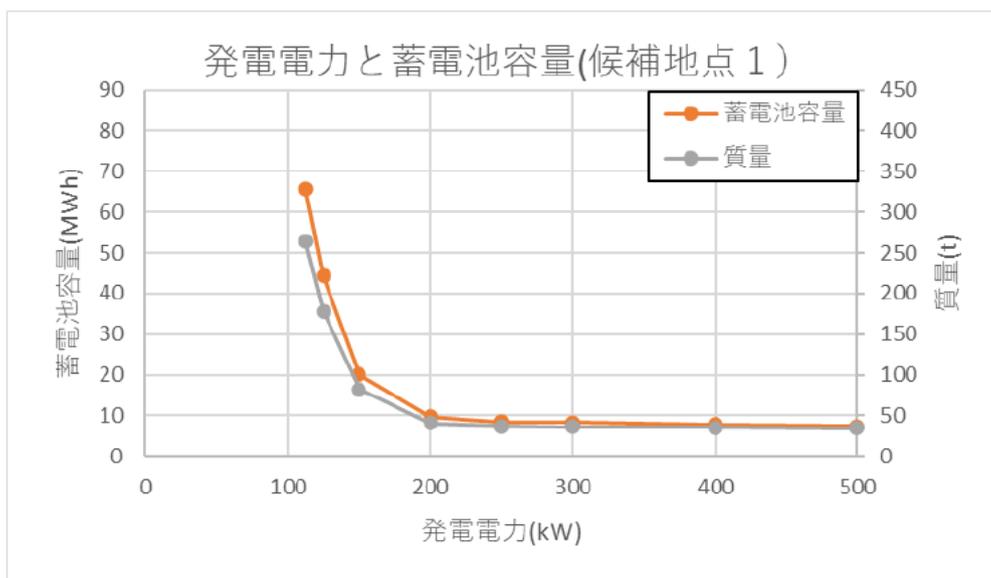


図 2-139 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、リチウムイオン電池)

出所)大林組

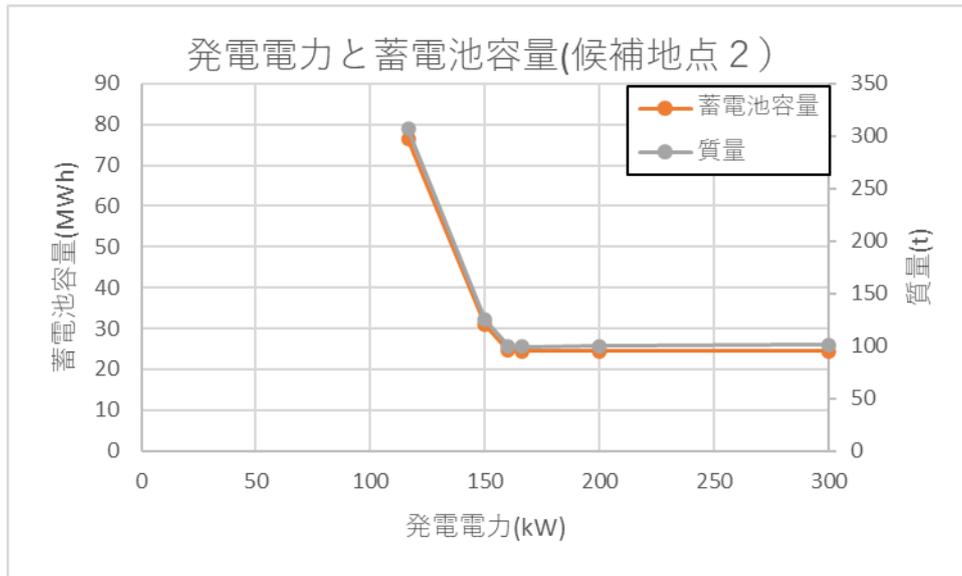


図 2-140 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、リチウムイオン電池)

出所)大林組

上図のように、発電電力容量を上げていくに従い、蓄電池容量が減少していくが、あるところで下げ止まりになっている。システムの質量も発電電力容量を上げるに従って減少していくが、蓄電池容量が下げ止まったところからは、システムの質量は増加に転じている。

候補地点1では、発電電力容量 520kW、蓄電池容量 7.4MWh で最も軽い結果となっており、この時、発電システムは 5t、蓄電池は 30t となっている。候補地点2では、発電電力量 170kW(2t)、蓄電池容量 24MWh(98t)、全体 100t となっており、いずれの場合でも蓄電池の重量が支配的であることが分かる。

### b. 再生型燃料電池の場合

再生型燃料電池を充電システムに用いた場合の容量・質量について試算を行った。図 2-141、図 2-142 に示すように同じ傾向であるが、発電電力容量がリチウムイオン電池よりも大きくなっている一方で全体として軽量であることが分かる。これは、充放電効率が悪いいため、充電のための必要な電力が大きくなっているが、必要な蓄電池容量は変わらず比質量がリチウムイオン電池 0.25kWh/kg に対して、燃料電池 0.5kWh/kg と大きいことから、全体として軽量となっているためである。

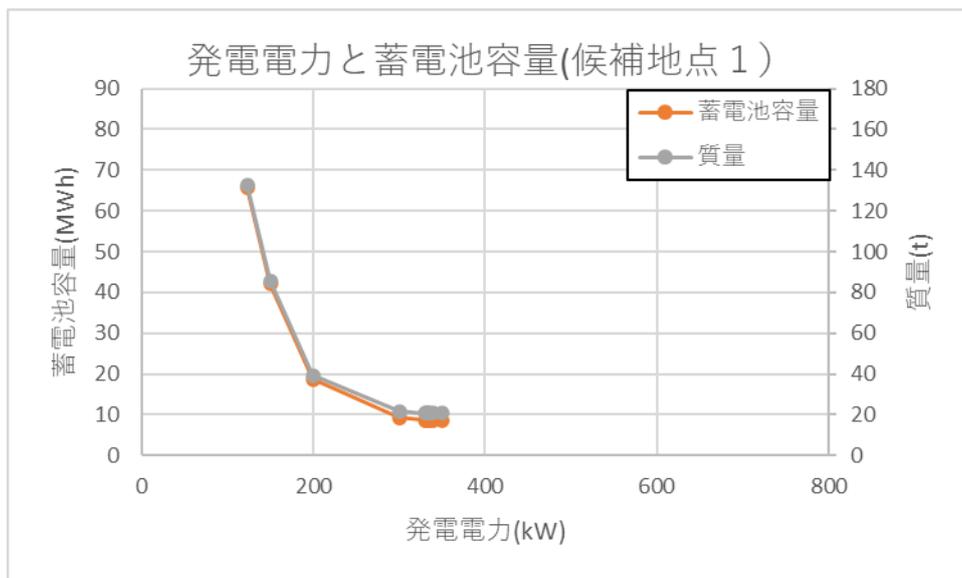


図 2-141 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、再生型燃料電池)

出所)大林組

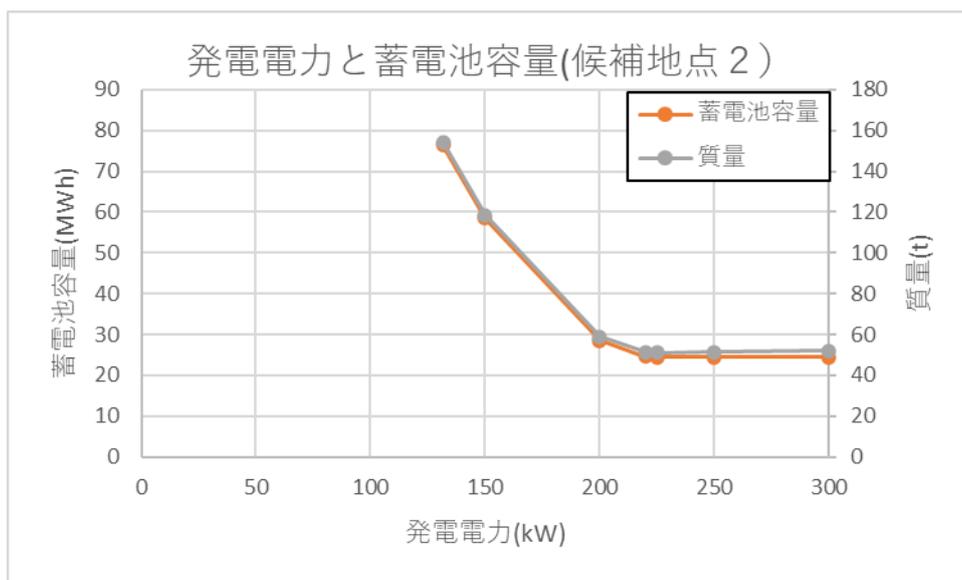


図 2-142 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、再生型燃料電池)

出所)大林組

燃料電池の試算結果で質量が最小となるのは、候補地点1においては発電電力 330kW、蓄電池容量 8.6MWh、全体質量 21t、候補地点2においては発電電力 230kW、蓄電池容量 24MWh、全体質量 51tという結果となった。

## 2) 質量軽減策

ここまでの検討から発電・蓄電システムの質量は蓄電池質量が支配的であり、全体質量を減らすためには蓄電池容量を減らすことが効果的であることが明らかである。図 2-143 のように、水素生成システム全体(掘削～推薬精製)に送電する前提であるが、必ずしも常時運転する必要が無く、影時は保温

等の必要最低限の電力を供給する運用方法とすることで、発電・蓄電システムは軽量となり、水素生成システムも加えたシステム全体の質量が軽減化される可能性があると考えられる。

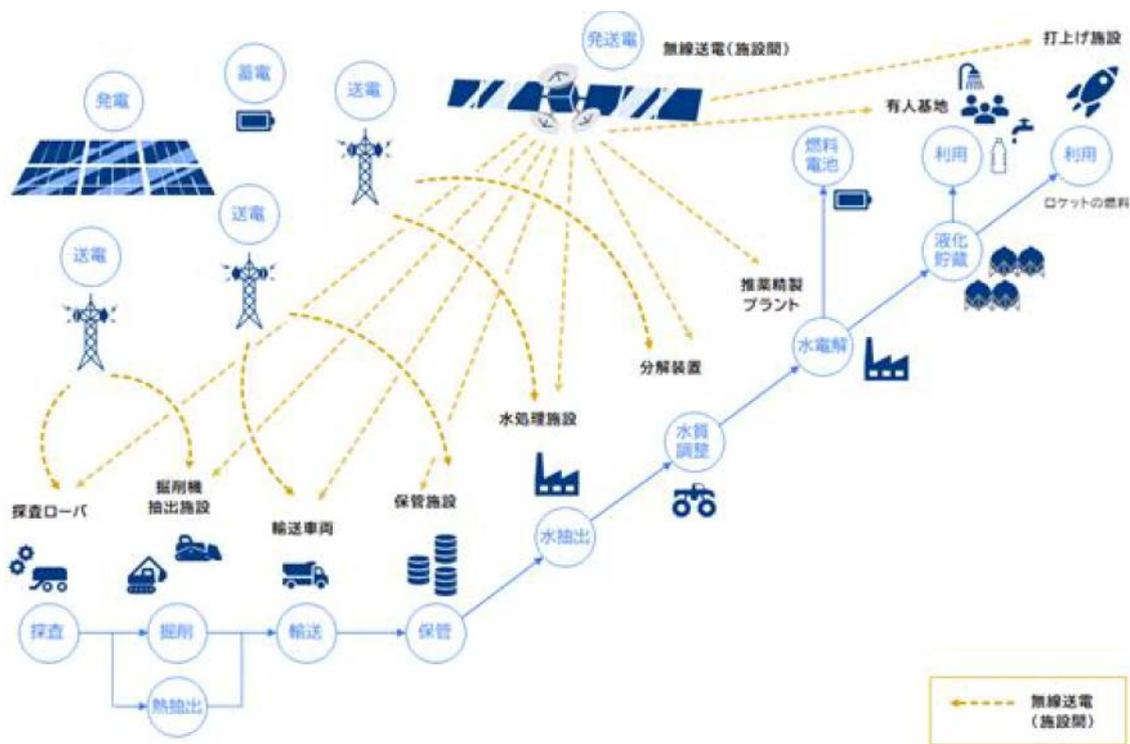


図 2-143 バリューチェーン全体像

出所)令和3年度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

例えば、日照時のみに水素生成とした場合の質量の計算を実施する。

計算の前提として、以下を設定した。

- 日照時のみ水素を生成し、影時は水素生成を行わず保温等の必要最低限の電力のみ供給する。
- 年間を通したトータルの水素生成量は同量となるよう、日照時は影時間の分も生成する。
- 稼働日 22 日、立上立下 2 日、待機日 6 日で、パイプラインケースの定格電力稼働時 255kW (資源ゾーン 135kW、サービスゾーン 120kW)、待機時 38kW(資源ゾーン 6kW、サービスゾーン 31kW、発着ゾーン 1kW)の値を用いる。
- 稼働時の動力のみが水素生成に貢献するとすると、平均して  $187\text{kW}(=255\text{kW}\times 22/30)$  が常時運転した場合の動力とする。他の検討と合わせるため、常時 100kW 供給とした場合と同じ量だけ水素を発生するためには、稼働時には  $255\text{kW}\times 100/187=136\text{kW}$ 、待機時(影時)には  $38\text{kW}\times 100/187=20\text{kW}$  供給相当が供給されるとした。
- 候補地点 1、候補地点2に、再生型燃料電池により電力を供給するとした。

シミュレーションの結果、常時 100kW 給電するのと同様の水素発生量のためには、候補地点1では太陽光 184kW、蓄電池 1.8MWh、必要質量 5.3t、候補地点 2 では、太陽光 155kW、蓄電池 6.5MWh、必要質量 14.6t との結果となった。常時 100kW 給電することと比較して、候補地点1では約 1/4 の質量に、候補地点 2 では約 1/3.5 になるとの結果となった。

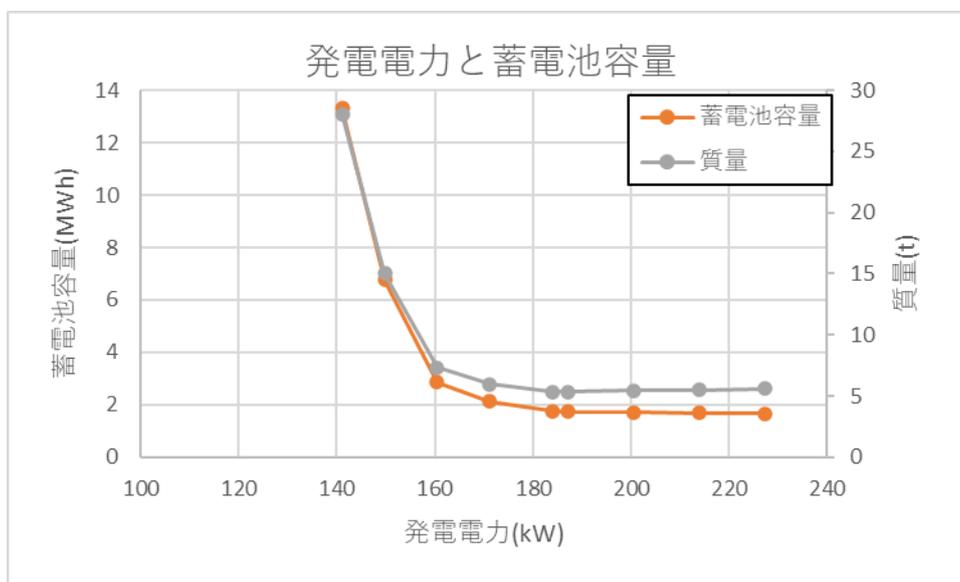


図 2-144 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 1、再生型燃料電池)

出所)大林組

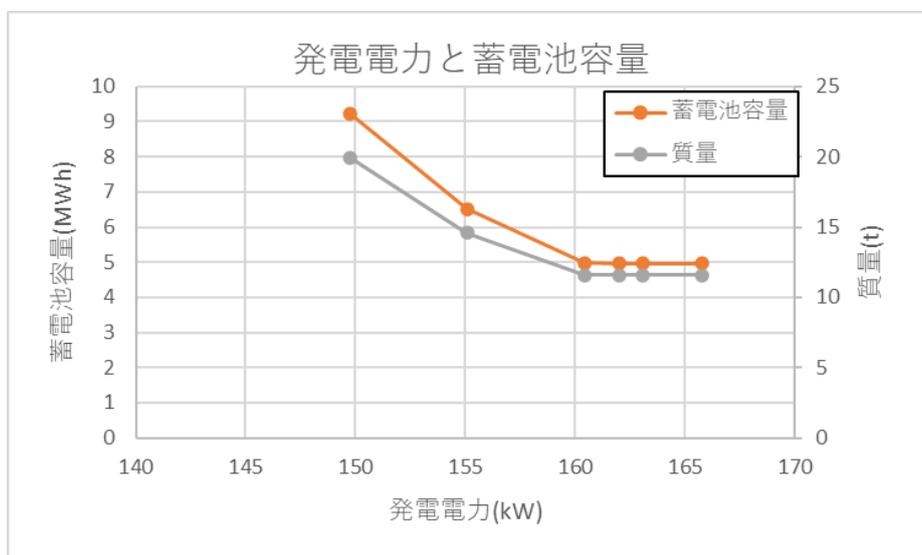


図 2-145 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 2、再生型燃料電池)

出所)大林組

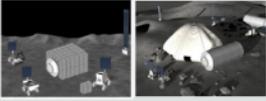
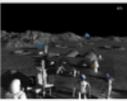
## 2.2.5 月面上での送電システム

### (1) 送電システム全体の検討

#### 1) 月面上での送電システム構築のシナリオ概要

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」を参考に整理したものを表 2-68 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表 2-69 に示す検討を実施した。

表 2-68 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    | 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   | 長期滞在中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  | 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  | 拠点を拡張、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

表 2-69 送電システム構築に向けた検討内容

| NO. | 検討内容                          | 条件   |
|-----|-------------------------------|--|
| 1   | 月面上拠点建設場所(候補地1、2)の策定          | 水素 WG より提案された場所を引用した。                          |
| 2   | 候補地1、2の活動拠点(各ゾーン)における必要電力の算出  | 水素 WG より提案された必要電力についてはそれを引用した。                 |
| 3   | 候補地1、2における送電システムイメージの検討       | JSS 殿より提案された、送電システム案、「ケース1」、「ケース2」に沿う形で検討している。 |
| 4   | サービスゾーンから資源ゾーンにおける伝送経路の検討     | マイクロ波による送電を想定している。                             |
| 5   | 伝送経路上におけるレゴリス密度の評価            | 今年度は定性評価まで                                     |
| 6   | 候補地1、2における送電システムの定格電力/必要電力の算出 | 定格電力/必要電力は現時点での概算値としている。                       |
| 7   | 技術課題の検討                       | 現時点で想定されるものを記述                                 |

出所)IHI エアロスペース

## 2) 月面上での拠点建設場所

月の極域には日照時間の長い(半年以上日影がない)地域も存在する。また、極域のクレータ内部の永久影(PSR)には氷の存在が示唆されており、その近傍に水素生成プラントが建設されることが想定される。そのため、水素生成に必要な電力を供給するための送電システムを日照時間の長い地域に構築する必要がある。そこで送電システムを構築するにあたり、月面上での拠点建設場所として、候補地1、2が提案されている。候補地1、2の活動拠点として、下記5つのゾーンが提案されているため、それぞれのゾーンにおいて必要とされる電力を整理して、送電システムを構築していく必要がある。

- (a) サービスゾーン・・・発電設備を配置するエリア
- (b) 居住ゾーン・・・人が居住するエリア
- (c) 観測ゾーン・・・観測設備を配置するエリア
- (d) 発着ゾーン・・・物資輸送船が離着陸するエリア
- (e) 資源ゾーン・・・月面の資源を採掘するエリア(PSR を想定)

## 3) 月面上活動拠点における必要電力の算出

送電システムとして、サービスゾーンに発電設備を集約させ、各ゾーンにおいて必要とされる電力はサービスゾーンから送電されることを現在想定している。送電システムの検討を進めるにあたり、まずは

各ゾーンにおける必要電力を整理する必要があると考えられるため、各ゾーンにおいて必要とされる電力の算出を下記の通り行った。

算出した必要電力が、サービスゾーンから各ゾーンに供給されることを前提に送電システムの検討を行っていく。

- 居住ゾーン  
必要な電力は、EZA-2021001の有人ローバーの走行時以外の消費電力を参考に3kWとした。
- 観測ゾーン  
天体観測用の望遠鏡等が配置されることを想定し、ジェームズウェッブ宇宙天体望遠鏡の供給電力2kWを参考とし、複数観測装置が設置されることを想定して10kWとした。
- 発着ゾーン  
水素関連電力として水素WGより提案された高圧化のための10kWに加え、離着陸時の一時的な人の滞在を考慮して、居住ゾーンと同じ3kWが必要と考え、計13kWの消費電力を想定した。
- 資源ゾーン  
水素資源を輸送するための手段として、ローバー輸送及びパイプライン輸送が水素WGより提案されている。ローバー輸送において、ローバー給電はサービスゾーンで行う前提のため、資源ゾーンに必要な電力はない想定となっているが、パイプライン輸送では圧力ポンプにかかる必要電力として5kWを挙げられているため、それぞれで必要電力が異なってくる。ローバー輸送及びパイプライン輸送共通で水素資源の熱抽出にかかる電力として、水素WGより稼働時130kWと提案されているため、それぞれにおいて必要電力は下記としている。
  - ローバー輸送ケース:130kW
  - パイプライン輸送ケース:135kW

#### 4) 送電システム構築の検討

検討した各ゾーンにおける必要とされる電力をもとに、その電力を賄うための送電システムについて検討する必要がある。そこで令和4年度に検討を行った送電方式選定フロー(参考として図 2-146 に示す)及び、表 2-70 に示す送電システム案「ケース1」及び「ケース2」に従い、それぞれの運用シナリオに沿った、月面拠点における送電システムのイメージを考案した。

考案した送電システムのイメージを図 2-147 及び図 2-148、建設シナリオを表 2-71 及び表 2-72 に示す。

なお資源ゾーンにおける必要電力分の送電については下記を想定している。

- 「ケース1」  
資源ゾーンの必要電力は、一旦資源ゾーン(終点)までサービスゾーンよりマイクロ波送電し、そこから電力を分配して、掘削及び水抽出を行う想定とした。
- 「ケース2」

資源ゾーンの必要電力は、月周辺軌道太陽光発電システムより送電される想定とした。

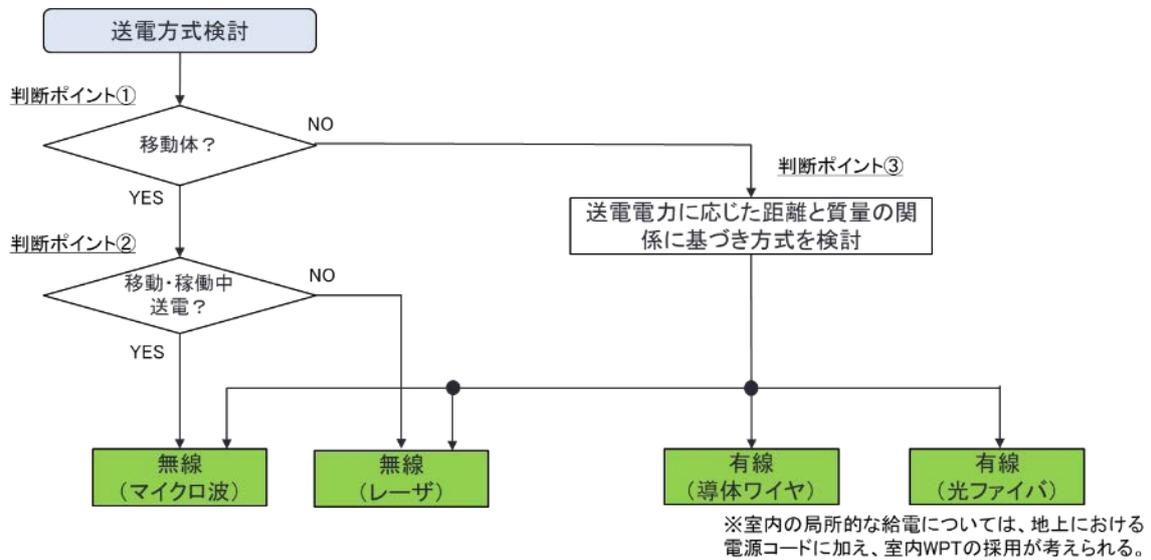


図 2-146 送電方式選定フロー(令和4年度の検討結果)

出所)IHI エアロスペース

表 2-70 送電システム案の概要

| 送電システム案 | 運用シナリオ(案)  |
|---------|--|
| ケース 1   | 各ゾーンで必要な電力は、サービスゾーンから賄われる想定送電システム。<br>なおサービスゾーンから各ゾーンへの電力伝送方式は下記を提案している。<br>・居住ゾーン：有線(導体)<br>・発着ゾーン：無線(マイクロ波)<br>・資源ゾーン※1：無線(マイクロ波)<br>・観測ゾーン：無線(レーザー) |
| ケース 2   | 資源ゾーンでの必要電力は月周辺軌道太陽光発電システムから賄われ、それ以外のゾーンにおける必要電力はサービスゾーンから賄われる想定送電システム。<br>サービスゾーンから各ゾーンへの電力伝送方式は、資源ゾーンを除きケース1と同様に提案している。                              |

※1.マイクロ波により、サービスゾーンから資源ゾーンの終点に送電を行い、そこから電力を分配して、掘削及び水抽出を行う想定としている。

出所)IHI エアロスペース

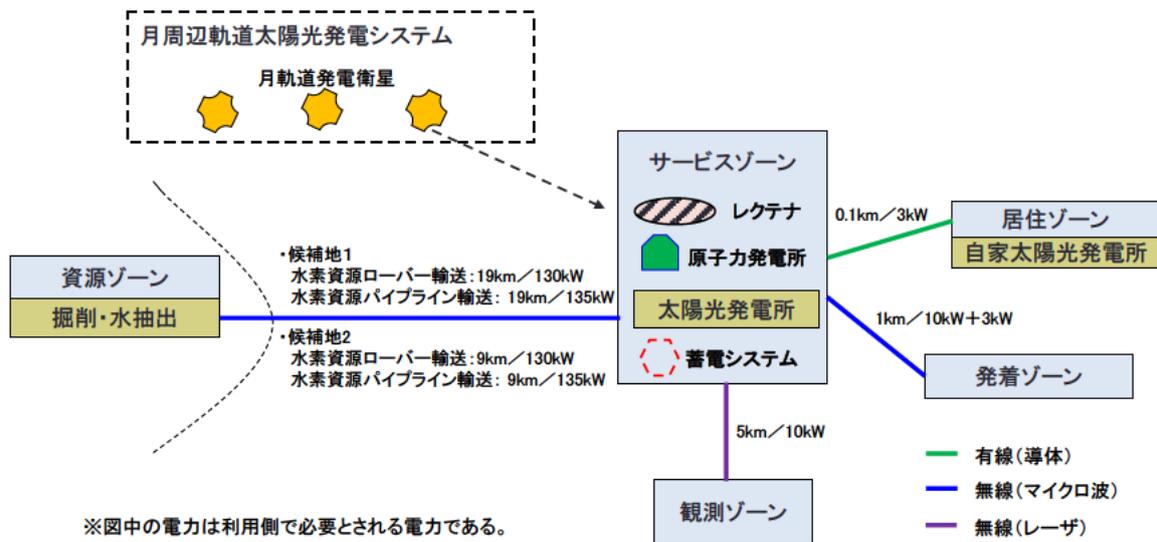


図 2-147 送電システム「ケース1」のイメージ図

出所)IHI エアロスペース

表 2-71 送電システム「ケース1」の建設シナリオ(案)

| 建設順 | 建設ゾーン   | 根拠   |
|-----|---------|--|
| 1   | 発着ゾーン   | 必要機材輸送のため、第一に建設が必要<br>発着ゾーンだけだと生命維持ができないため、有人ではなく、機械による建設を想定 |
| 2   | 居住ゾーン   | 他のゾーン建設人材確保のため<br>生命維持に関わる物資については、発着ゾーンより定期的に輸送              |
| 3   | サービスゾーン | 他のゾーンへの送電網整備及び、資源ゾーン建設のための、電力設備を整備するため                       |
| 4   | 資源ゾーン   | サービスゾーン建設後でないと、必要電力が確保できないため                                 |
| 5   | 観測ゾーン   | 観測ゾーンは必須設備ではないと考えられるため                                       |

出所)IHI エアロスペース

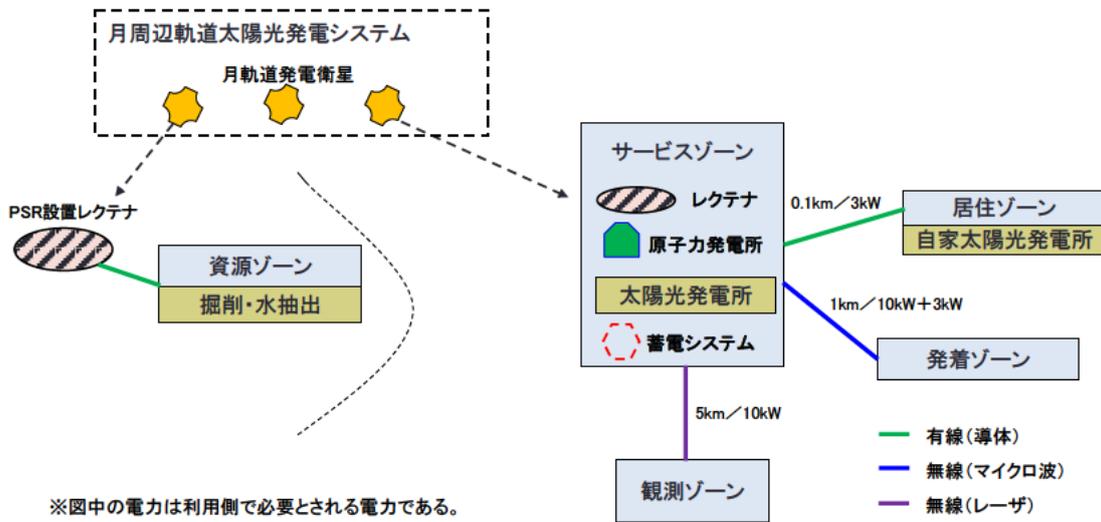


図 2-148 送電システム「ケース 2」のイメージ図

出所)IHI エアロスペース

表 2-72 送電システム「ケース 2」の建設シナリオ(案)

| 建設順 | 建設ゾーン            | 根拠  |
|-----|------------------|---|
| 1   | 発着ゾーン            | 必要機材輸送のため、第一に建設が必要<br>発着ゾーンだけだと生命維持ができないため、有人<br>ではなく、機械による建設を想定                    |
| 2   | 居住ゾーン            | 他のゾーン建設人材確保のため<br>生命維持に関わる物資については、発着ゾーンより<br>定期的に輸送                                 |
| 3   | サービスゾーン<br>資源ゾーン | 他のゾーンへの送電網を整備するため<br>月周辺軌道太陽光発電システムより、必要電力が供<br>給されるため、サービスゾーンと同時並行の建設を<br>想定しているため |
| 4   | 観測ゾーン            | 観測ゾーンは必須設備ではないと考えられるため  |

出所)IHI エアロスペース

## 5) 候補地1、2のサービスゾーンから資源ゾーンにおける伝送経路

前述の送電システム「ケース1」では、サービスゾーンから資源ゾーンまで無線(マイクロ波)にて送電することを想定しているが、見通しが確保できるか不明瞭であった。そのため、最適な伝送経路の提案として、水素 WG より提示された月面の高度プロファイルに基づき、候補地1、2それぞれの伝送経路を検討した結果を図 2-149 及び図 2-150 に示す。

サービスゾーンから資源ゾーン(終点)に送電する場合、送電側の持ち上げ高度が候補地1、2どちらにおいても必要となってくるが、見通し可能との結果が得られた。なお資源ゾーン(始点)及び資源ゾーン(中継)に送電する場合、送電側の持ち上げ高度が 100m 以上となってしまうため検討の対象外としている。

またシステム規模を考慮し、表 2-73 及び表 2-74 に示すとおり、資源ゾーンに至るまでの伝送経路に中継点を設ける又はサービスゾーンを有線にて延長することも検討したが、いずれの場合においても次のことが分かったため、伝送経路はサービスゾーンから資源ゾーン(終点)まで直達を前提とした。

- 中継点を設けてそこから資源ゾーンまで送電するより、直達の方がサービスゾーン送電側必要高は低い。(候補地1では約 6km 地点、候補地2では約 3km 地点に中継点を設置する想定で検討)
- 中継点を設置する場合は中継分の送電ロスが発生するため、直達の送電効率が良い。
- 候補地 2 においては、サービスゾーンを延長することで、サービスゾーン送電側必要高が低くなることがわかっているが、延長することにより、システムの必要質量が大幅に増加する。

表 2-73 候補地1の伝送方法検討

| No. | 内容                 | サービスゾーン⇒中継点<br>送電側必要高[m] | 中継点⇒資源ゾーン<br>送電側必要高[m] | 総重量[ton]                     |
|-----|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1   | サービスゾーンから資源ゾーンまで直達 | 7.1                      | -                      | ローバー輸送：18.6<br>パイプライン輸送：19.2 |
| 2   | 中継点を約6km地点に設置      | 19.5                     | 45.5                   | ローバー輸送：24.6<br>パイプライン輸送：25.2 |

出所)IHIエアロスペース

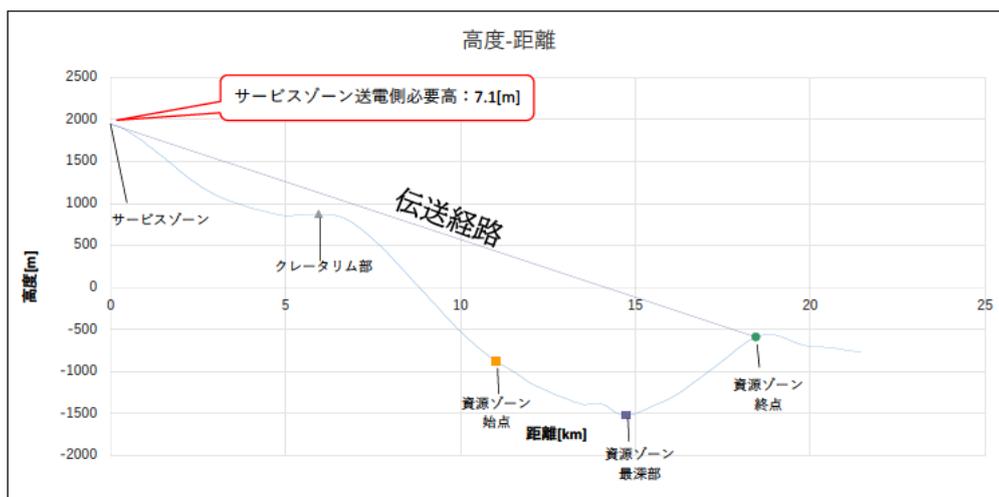


図 2-149 候補地1の伝送経路検討結果(直達)

出所)IHI エアロスペース

表 2-74 候補地 2 の伝送方法検討

| No. | 内容                                      | サービスゾーン⇒中継点<br>送電側必要高[m] | 中継点⇒資源ゾーン<br>送電側必要高[m] | 総重量[ton]                     |
|-----|---|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1   | サービスゾーンから資源ゾーンまで直達                      | 68.7                     | -                      | ローバー輸送：16.6<br>パイプライン輸送：17.2 |
| 2   | 中継点を約3km地点に設置                           | 81.7                     | 39.4                   | ローバー輸送：22.6<br>パイプライン輸送：23.2 |
| 3   | サービスゾーンを0.8km地点まで有線延長し<br>そこから資源ゾーンまで直達 | 2.2                      | -                      | ローバー輸送：75.5<br>パイプライン輸送：78.4 |

出所)IHIエアロスペース

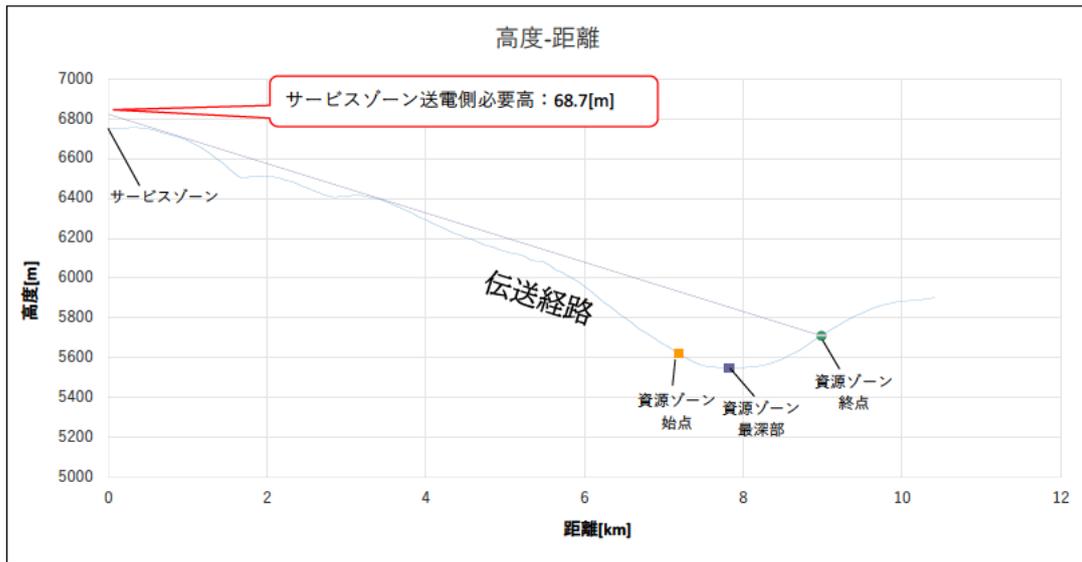


図 2-150 候補地 2 の伝送経路検討結果(直達)

出所)IHIエアロスペース

## 6) 伝送経路上におけるレゴリス密度の評価

無線送電におけるマイクロ波方式とレーザー方式では、定常的な月面上分布のもとでは、浮遊レゴリスによる影響はほぼない。しかし、浮遊状況により適切な方式が変化する可能性があるため、今年度は定性的ではあるが、表 2-75 に示すとおり、想定される伝送経路上のレゴリス密度の評価を行った。

場合によっては、現在提案されている送電システムが変わってくるため、評価内容について、妥当であるか水素 WG と共同で確認し、最適な送電システムを考案していく必要がある。

表 2-75 送電経路上のレゴリス密度

| NO. | 経路              | レゴリス浮遊 | 根拠   |
|-----|-----------------|--------|--|
| 1   | サービスゾーン⇒資源ゾーン終点 | 低／中    | ① ローバー輸送ケースでは、送電経路近傍をローバーが走行するため、レゴリス巻上が発生する：中<br>② パイプラインケースでは、送電経路近傍に定常的な機材立入は想定されない：低 |
| 2   | 資源ゾーン終点⇒始点・最深部  | 高      | 機材移動が多くあり、レゴリス浮遊が非常に多い状況と考えられる<br>(終点からの分配は、バッテリー給電などが望ましいと考える)                          |
| 3   | サービスゾーン⇒発着ゾーン   | 中      | 水素WGより、巻上防止策が取られるとのコメントがあるが、一定量の影響は避けられない可能性がある。   |

出所)IHI エアロスペース

## 7) 候補地1、2における送電システムの定格電力／必要重量の算出

レゴリスによる影響が十分に検討できていないものの、これまで検討してきた、各ゾーンでの必要電力、サービスゾーンから各ゾーンへの送電方式及びサービスゾーンから資源ゾーンに至る伝送経路を前提として、候補地1、2における送電システムの定格電力／必要重量について検討した結果を表 2-76 及び表 2-77 に示す。

送電システム「ケース2」においては、資源ゾーンの必要電力は月周辺軌道太陽光発電システムより送電される想定になっているが、ここでは一旦資源ゾーンの必要電力はサービスゾーンからマイクロ波により送電される前提としている。具体的な値は表中の通りであるが、候補地 1 は候補地 2 に比べてサービスゾーン送電側必要高が低くなることが示されている。サービスゾーン送電側必要高が高くなると、送電設備の建設が困難になると想定するため、電力伝送の観点においては月面上での拠点建設場所として候補地 1 がより適していると考えられる。今後、より必要高さが低くなるよう水素 WG と共に各ゾーンの最適な場所を検討する必要がある。

表 2-76 候補地1における送電システムの定格電力／必要重量

| ケース         | 利用目的         | 送電側地点   | 利用側地点     | 定格[kW] |       | 送電方式      | 伝送距離  | 送電効率 | 質量     |
|-------------|--------------|---------|-----------|--------|-------|-----------|-------|------|--------|
|             |              |         |           | 発電側    | ⇒ 利用側 |           |       |      |        |
| ① ローバー輸送ケース | ローバー給電       | サービスゾーン | サービスゾーン   | 3.7    | 3     | 有線（導体）    | 0.5km | 81%  | 0.4ton |
|             | 熱抽出          | サービスゾーン | 資源ゾーン（終点） | 278    | 130   | 無線（マイクロ波） | 19km  | 47%  | 9ton   |
| ② パイプラインケース | ポンプ内ヒータートレース | サービスゾーン | サービスゾーン   | 24     | 11    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
|             | 熱抽出+圧力ポンプ    | サービスゾーン | 資源ゾーン（終点） | 288    | 135   | 無線（マイクロ波） | 19km  | 47%  | 9ton   |
| 水抽出プロセス     | 与圧設計維持+マージン  | サービスゾーン | サービスゾーン   | 27     | 12.5  | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
|             | 純水製造         | サービスゾーン | サービスゾーン   | 1.2    | 1     | 有線（導体）    | 0.5km | 81%  | 0.1ton |
|             | 水分解          | サービスゾーン | サービスゾーン   | 150    | 70    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 3ton   |
|             | 高圧化          | サービスゾーン | 発着ゾーン     | 21     | 10    | 無線（マイクロ波） | 1km   | 47%  | 1ton   |
|             | 水素液化         | サービスゾーン | サービスゾーン   | 32     | 15    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
| 居住等に必要電力    | 居住           | サービスゾーン | 居住ゾーン     | 3.6    | 3     | 有線（導体）    | 0.1km | 84%  | 0.1ton |
|             | 観測           | サービスゾーン | 観測ゾーン     | 41.7   | 10    | 無線（レーザー）  | 5km   | 24%  | 2ton   |
|             | 一時滞在         | サービスゾーン | 発着ゾーン     | 6.4    | 3     | 無線（マイクロ波） | 1km   | 47%  | 1ton   |

| プロセス方式      | サービスゾーン送電側必要高[m] | 必要総電力[kW] | 総質量[ton] |
|-------------|------------------|-----------|----------|
| ① ローバー輸送ケース | 7.1              | 564.1     | 18.6     |
| ② パイプラインケース | 7.1              | 594.6     | 19.2     |

※サービスゾーン送電側必要高があるため、送電設備の持ち上げにかかる質量が必要だが、具体的な数値が現時点では不明のため、今回は考慮していない。

出所) IHIエアロスペース

表 2-77 候補地2における送電システムの定格電力／必要重量

| ケース         | 利用目的         | 送電側地点   | 利用側地点     | 定格[kW] |       | 送電方式      | 伝送距離  | 送電効率 | 質量     |
|-------------|--------------|---------|-----------|--------|-------|-----------|-------|------|--------|
|             |              |         |           | 発電側    | ⇒ 利用側 |           |       |      |        |
| ① ローバー輸送ケース | ローバー給電       | サービスゾーン | サービスゾーン   | 3.7    | 3     | 有線（導体）    | 0.5km | 81%  | 0.4ton |
|             | 熱抽出          | サービスゾーン | 資源ゾーン（終点） | 278    | 130   | 無線（マイクロ波） | 9km   | 47%  | 7ton   |
| ② パイプラインケース | ポンプ内ヒータートレース | サービスゾーン | サービスゾーン   | 24     | 11    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
|             | 熱抽出+圧力ポンプ    | サービスゾーン | 資源ゾーン（終点） | 288    | 135   | 無線（マイクロ波） | 9km   | 47%  | 7ton   |
| 水抽出プロセス     | 与圧設計維持+マージン  | サービスゾーン | サービスゾーン   | 27     | 12.5  | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
|             | 純水製造         | サービスゾーン | サービスゾーン   | 1.2    | 1     | 有線（導体）    | 0.5km | 81%  | 0.1ton |
|             | 水分解          | サービスゾーン | サービスゾーン   | 150    | 70    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 3ton   |
|             | 高圧化          | サービスゾーン | 発着ゾーン     | 21     | 10    | 無線（マイクロ波） | 1km   | 47%  | 1ton   |
|             | 水素液化         | サービスゾーン | サービスゾーン   | 32     | 15    | 無線（マイクロ波） | 0.5km | 47%  | 1ton   |
| 居住等に必要電力    | 居住           | サービスゾーン | 居住ゾーン     | 3.6    | 3     | 有線（導体）    | 0.1km | 84%  | 0.1ton |
|             | 観測           | サービスゾーン | 観測ゾーン     | 41.7   | 10    | 無線（レーザー）  | 5km   | 24%  | 2ton   |
|             | 一時滞在         | サービスゾーン | 発着ゾーン     | 6.4    | 3     | 無線（マイクロ波） | 1km   | 47%  | 1ton   |

| プロセス方式      | サービスゾーン送電側必要高[m] | 必要総電力[kW] | 総質量[ton] |
|-------------|------------------|-----------|----------|
| ① ローバー輸送ケース | 68.7             | 564.1     | 16.6     |
| ② パイプラインケース | 68.7             | 594.6     | 17.2     |

※サービスゾーン送電側必要高があるため、送電設備の持ち上げにかかる質量が必要だが、具体的な数値が現時点では不明のため、今回は考慮していない。

出所) IHI エアロスペース

## 8) 技術課題の検討

前述の通り、送電システムの検討を行ってきたが、月面上での太陽光発電や月周辺軌道太陽光発電システムの電力プロファイルは明確化されつつあるものの、それらを組み合わせた定量評価が実施できておらず、送電システムの候補となっている、「ケース1」及び「ケース2」の成立性や総重量に影響を与え得る、蓄電池のサイジング等は検討されていないのが実情である。その前提の上で現時点の技術課題

として考えている項目を下記に示す。

- サービスゾーン送電側の必要高やシステム総重量を加味した、より適切な月面上拠点建設場所の推定
- レゴリス浮遊による影響を精査したうえでの、適切な無線送電方式の取り決め
- 月面上での太陽光発電や月周辺軌道太陽光発電システムの電力プロファイルを組み合わせた、月面上電力ネットワークのモデル化と、各種検討を取り込んだ定量評価

## (2) マイクロ波送電の検討

### 1) 今年度検討内容の概要

令和4年度の検討では、月面上におけるマイクロ波電力伝送の周波数として、半導体素子の使用を想定した ISM 帯の 24GHz 帯及び 61GHz 帯における送受電システム検討が実施され、ビーム形成及び熱的成立性の観点から定められた開口径が実現されれば、高い伝送効率の送受電システムが成立可能である旨が示された。

今年度の検討では、FY2035 のプラント実証(「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」技術ロードマップより)初期への適用を意識し、5G 関連技術の転用が可能な 24GHz 帯並びに半導体素子をターゲットに、既存デバイス使用をベースラインとした構成検討を実施した。なお本検討に際しては、昨年度同様 10km 送電、10kW 及び 100kW 受電を前提としている。

加えて、月面開発の中期～後期(実用フェーズ)への適用を想定し、より小規模にシステムを構築可能な更なる高周波領域に係る検討のほか、半導体素子以外のデバイスに関する調査・検討を実施した。

### 2) 月面上送受電システムの構成

月面上における送受電システム構成について、構成イメージを図 2-151 に示す。構成としては大きく送電部、受電部、電力制御部に分かれる事を想定する。送電部は、月面上送電システムから供給された電力を基に、制御部、DC-RF 変換部、パイロット信号処理部を駆動し、パイロット信号処理(レトロディレクティブ処理)の結果に基づき、送電用アンテナより受電部への無線電力伝送を実施する。

受電部はレクテナパネルを備え、送電部より受電した電力を DC 電力に変換・出力する動作を行う。また、送電部の高精度ビームポインティングのため、送電方向決定のためのパイロット信号送信系を備えるほか、ビームパターン調整のためのデータ取得用に送電電力モニタを有することを想定する。確実な送電実施のためには、これらの情報を送電部にフィードバックし、適切に送電系キャリブレーションを実施する必要があると考えられるため、別途キャリブレーション用のデータフィードバック経路を設ける事を想定する。

また送電部は高効率送電のため、ビーム形成のための微調整を除き、送電電力は一定とする事を想定するが、レゴリスの浮遊状況等、送電経路上の月面環境条件によっては受電部に到達する電力に変動が生じる可能性がある。これに対応するため、受電部には蓄電池及び PPT 回路から成る、電力制御部を併設する事を想定する。本コンポーネントにより、受電電力密度及びユーザーサイドの電力使用状況によらず、レクテナを最適負荷状態に保つことで、高効率な RF-DC 変換を実現する。

なお送電部も、常に出力電力を一定とするため電力制御回路及び蓄電池が必要と考えられるが、こ

これはサービスゾーンの電力変換器に求められる役割と同じであるため、月面上送電システム側の電力変換器により兼ねることを想定する。

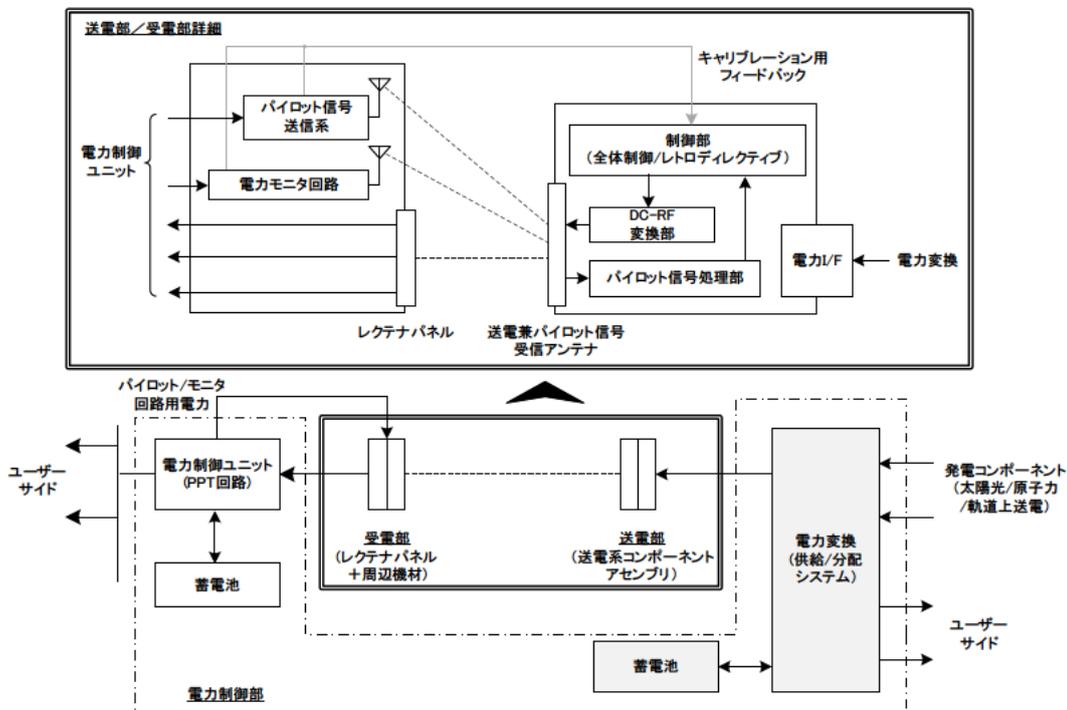


図 2-151 月面上送受電システムの構成イメージ

出所)IHI エアロスペース

送電部の内部構成イメージについて、図 2-152 に示す。送電部は一辺 10m 超の開口径を持つ大型構造部となる事が想定されている。よってある程度の系統・機能単位でのブロック化を行い、その状態で地球～月間を輸送後、現地で最終組立を行う事が望ましいと考える。

送電部の全体制御を行う主制御部(図中「Main Processor」)及び、RF 信号生成に用いる源振(図中右端ブロック)は全体で共有化する必要があるが、その他コンポーネントは各系統で独立する形で構成可能であり、数十～数百の RF 系統、それを統括する副制御部(図中「Sub Processor」)、並びそれらの駆動に必要な電源回路を含む、回路ブロック単位での構成を想定する。

図中の RF 信号の流れとしては、源振から出力された信号は経路損を補うため一度増幅された後、RF 出力系統毎に分配供給される。各出力系統はビーム形成制御及び系統毎の特性差補正のため、減衰器及び移相器を備え、それらにより適切に調整された信号はパワーアンプにて増幅された後、アンテナに給電、電磁波として放射される。

また先述の通り、送電部はビーム方向制御のため、受電部より放射されたパイロット信号に基づくレトロディレクティブ制御が必要となる。月面上のマイクロ波電力伝送では、送受電部の相対角度は大きく変化せず、ビーム方向制御に高い応答速度も要求されないため、ソフト処理によって内部回路の特性変化への対応や、検出回路(図中「Phase & Power Detector」)の間引き配置による構成の簡略化の可能性があり、ソフトウェア レトロディレクティブ制御の適用を想定する。送電系とパイロット信号受信系は、一旦方向性結合素子による分割を想定したが、信号間のレベル差による系統間リークが問題とな

る場合、RF スイッチによる経路切断や周波数フィルタの追加等が必要となる。

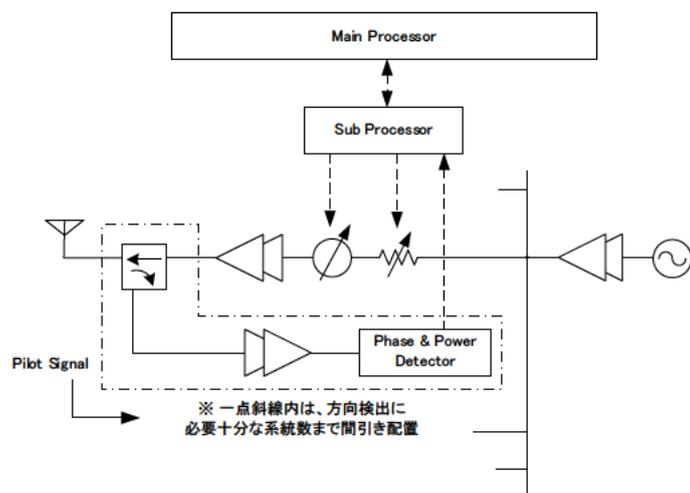


図 2-152 送電部の内部構成イメージ

出所) IHI エアロスペース

### 3) 既存技術適用を想定した送受電部検討

#### a. 検討前提と想定仕様

本項では、月面開発初期段階での適用を想定する 24GHz 帯送受電システムに関する検討をまとめた。検討に際して前提とした内容は下記の通り。

- FY2035 付近での月面適用を想定し、キーデバイスは既存品(現行品/販売予定品/シミュレーションレベルで実現が確認されたデバイス)により構成することを想定する。
- 各種電力及びサイズは、送電距離 10km、受電電力 100kW/10kW を前提とする。
- 一定の成立性が確認されている、令和4年度検討における送受電部仕様を踏襲する。踏襲した仕様に関しては表 2-78 記載の通りである。なお後述の4)では、受電部のアンテナ間隔について 0.8λ 程度を基準としているが、本検討に際しては昨年度検討を踏襲する形で 0.95λ を採用した。

表 2-78 24GHz 送受電部システム仕様抜粋(FY2022 検討)

| No. | 対象  | 項目    | 100kW<br>受電仕様                 | 10kW<br>受電仕様 | 備考 |
|-----|-----|-------|-------------------------------|--------------|----|
| 1   | 送電部 | 開口部寸法 | 11.2m×11.2m                   |              |    |
| 2   |     | 素子間隔  | 0.95λ                         |              |    |
| 3   | 受電部 | 開口部寸法 | 11.2m×11.2m                   | 7.0m×7.0m    |    |
| 4   |     | 素子間隔  | 0.95λ                         |              |    |
| 5   |     | 出力電力  | 100 kW                        | 10 kW        |    |
| 6   | 共通  | アンテナ数 | 送電素子及び受電素子に対して<br>アンテナ数は1対1対応 |              |    |
| 7   |     | 伝搬効率  | 90%                           |              |    |

出所)FY2022 報告書 マイクロ波検討内容より抜粋

送電部の仕様並びに、目標とする受電電力密度の決定のため、レクテナに入力されるべき必要電力についてレクテナ変換効率を変数にパラメータスタディを行った。ここで得た値を、24GHz 帯レクテナの予想変換効率に重ね書きしたグラフを図 2-153に示す。グラフから100kW 想定では80%超、10kW 想定では70%超の高い変換効率が期待できる事が分かる。

上記検討を踏まえ、受電電力からフローダウンする形で送電部の1系統当たりの必要出力を求めた。検討結果を表 2-79 に示す。

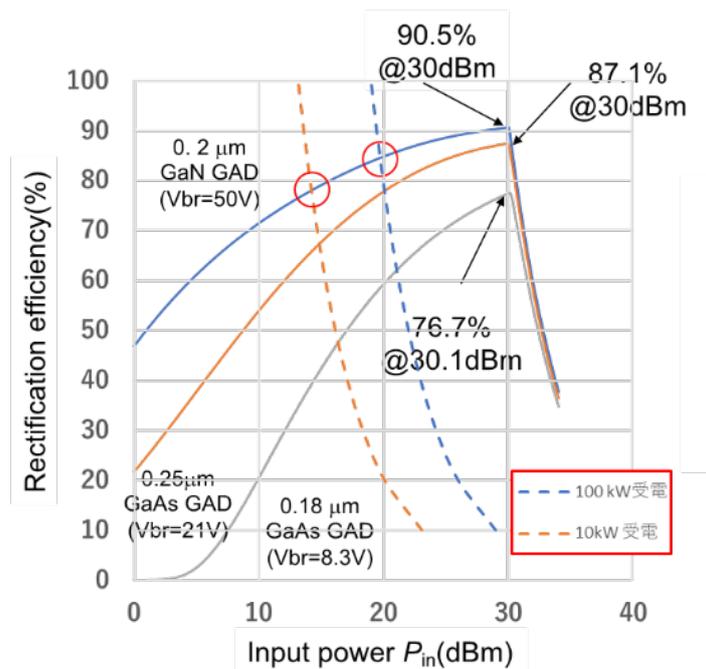


図 2-153 適用想定レクテナ効率

出所)金沢工業大作成のグラフに、IHI エアロスペース側で破線(赤枠凡例)のプロットを追加

表 2-79 送電部の必要出力電力に関する検討結果

| No. | 区分       | 項目           | 100kW想定   | 10kW想定    |                     | 備考                      |
|-----|----------|--------------|-----------|-----------|---------------------|-------------------------|
| 1   | 共通       | 周波数          | 24        | 24        | GHz                 |                         |
| 2   |          | $\lambda$    | 0.0125    | 0.0125    | m                   |                         |
| 3   |          | 伝搬効率         | 90%       | 90%       |                     | FY2022検討を踏襲             |
| 4   | 受電部      | 受電電力         | 100       | 10        | kW                  |                         |
| 5   |          | 開口径          | 11.2      | 7.0       | m                   | FY2022検討を踏襲             |
| 6   |          | 開口面積         | 125.4     | 49.0      | m <sup>2</sup>      | 矩形を想定                   |
| 7   |          | アンテナ開口能率     | 70%       | 70%       |                     | 仮置き                     |
| 8   |          | アンテナ間隔       | 0.8       | 0.8       | $\lambda$           |                         |
| 9   |          | 1系統当たり開口面積   | 1.00.E-04 | 1.00.E-04 | m <sup>2</sup> /系統  |                         |
| 10  |          | =            | 100.0     | 100.0     | mm <sup>2</sup> /系統 |                         |
| 11  |          | 1系統当たり一辺     | 10.0      | 10.0      | mm/系統               |                         |
| 12  |          | 系統数          | 1,254,400 | 490,000   | 系統                  |                         |
| 13  |          | レクテナ変換効率     | 82%       | 76%       |                     | 0.2 $\mu$ m GaN GAD特性より |
| 14  |          | 1系統当たり必要RF入力 | 0.10      | 0.03      | W/系統                |                         |
| 15  |          | =            | 19.9      | 14.3      | dBm/系統              |                         |
| 16  |          | 送電部          | 必要送電電力    | 193.6     | 20.9                | kW                      |
| 17  | 開口径      |              | 11.2      | 11.2      | m                   | FY2022検討を踏襲             |
| 18  | 開口面積     |              | 125.4     | 125.4     | m <sup>2</sup>      | 矩形を想定                   |
| 19  | 電力密度     |              | 1.54      | 0.17      | kW/m <sup>2</sup>   |                         |
| 20  | アンテナ間隔   |              | 0.95      | 0.95      | $\lambda$           | FY2022検討を踏襲             |
| 21  | 1系統当たり面積 |              | 1.41.E-04 | 1.41.E-04 | m <sup>2</sup> /系統  |                         |
| 22  | =        |              | 141.0     | 141.0     | mm <sup>2</sup> /系統 |                         |
| 23  | 1系統当たり一辺 |              | 11.9      | 11.9      | mm/系統               |                         |
| 24  | 系統数      |              | 889,547   | 889,547   | 系統                  |                         |
| 25  | 1系統当たり出力 |              | 217.6     | 23.5      | mW                  |                         |
| 26  | =        |              | 23.4      | 13.7      | dBm                 |                         |

出所)IHI エアロスペース

## b. 送電部の検討

a 項にて検討した送電部仕様のもと、既存品をベースとした送電部の構成検討を行った。

表 2-79 より確認できる通り、送電部は 100 万系統近い大規模フェーズドアレイとなっており、1 系統当たりの実装面積も 1cm 四方程度と、高密度な RF コンポーネント配置が求められる。このため、各要素をディスクリート部品で構築するのは困難であると考えられ、特に高発熱体が少なく回路が大規模化しやすい RF の小信号領域では積極的な IC/LSI の活用が必須と考える。

現在いくつかのメーカからフェーズドアレイシステム向けのビームフォーミング IC が発表されており、メーカが新規設計に推奨している製品のの一つに ANALOG DEVICES 社の ADMV4821 が存在する。本 IC の代表的な仕様を表 2-80 に、内部ブロック図を図 2-154 にそれぞれ示す。以降の検討では RF 系の小信号領域の回路について、ADMV4821 を中心に構成する事を前提として、送電部の検討を行った。

表 2-80 ADMV4821 の代表的な仕様

| No. | 項目                   | 仕様                           | 備考                        |
|-----|----------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1   | RF 周波数範囲             | 24~29.5GHz                   |                           |
| 2   | RF 入出力系統数<br>(アンテナ側) | 16 系統<br>(8×2 系統)            | 各系統独立して<br>位相・振幅制御が可能     |
| 3   | RF 入出力系統数<br>(内部回路側) | 2 系統                         | 系統毎に Tx モード、<br>Rx モードを選択 |
| 4   | 位相制御精度               | 6bit                         |                           |
| 5   | 振幅制御精度               | 6bit                         |                           |
| 6   | IC サイズ               | 10mm×10mm<br>72 端子 LGA パッケージ |                           |

出所) IHI エアロスペース

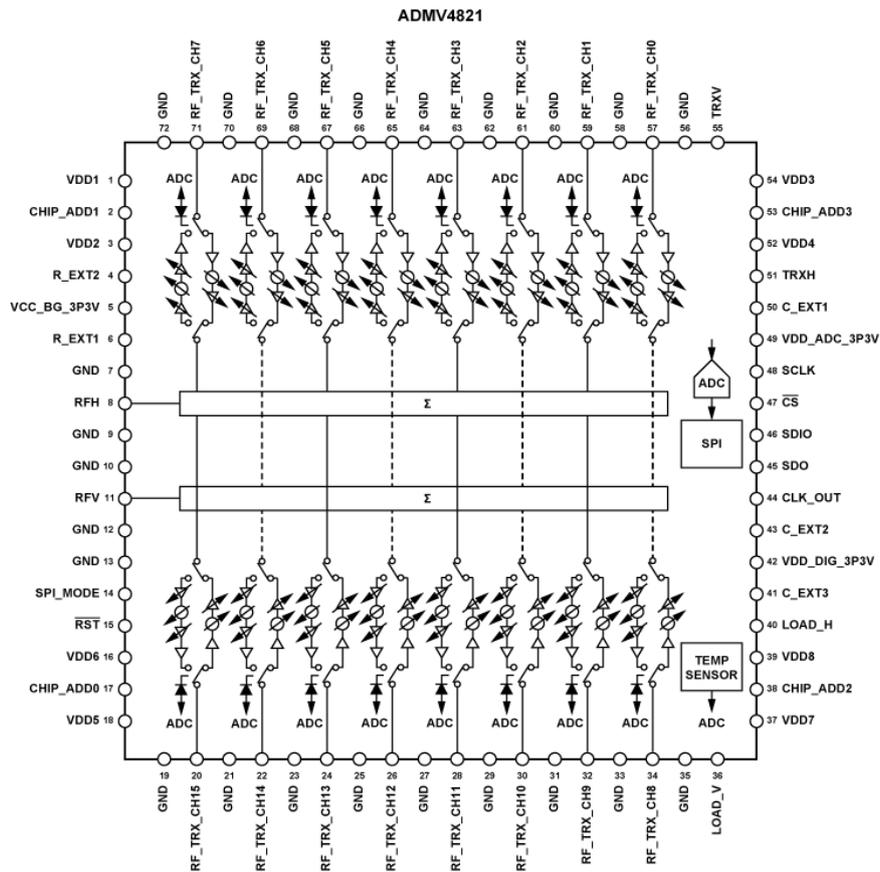


図 2-154 ADMV4821 の内部ブロック図

出所) ANALOG DEVICES 社 HP (<https://www.analog.com/jp/products/admv4821.htm>) より引用

図 2-152 に示した送電部の想定内部回路について、ADMV4821 を適用して置き換えた場合の内部回路構成の想定を、図 2-155 に示す。アンテナ～IC 間に入れた 2 段の方向性結合器は、パイロット信号受信時に最終段 PA をバイパスする事を想定したものであり、前述の通りリーク量に応じて、バイパス経路上にフィルタ追加を要する可能性がある。

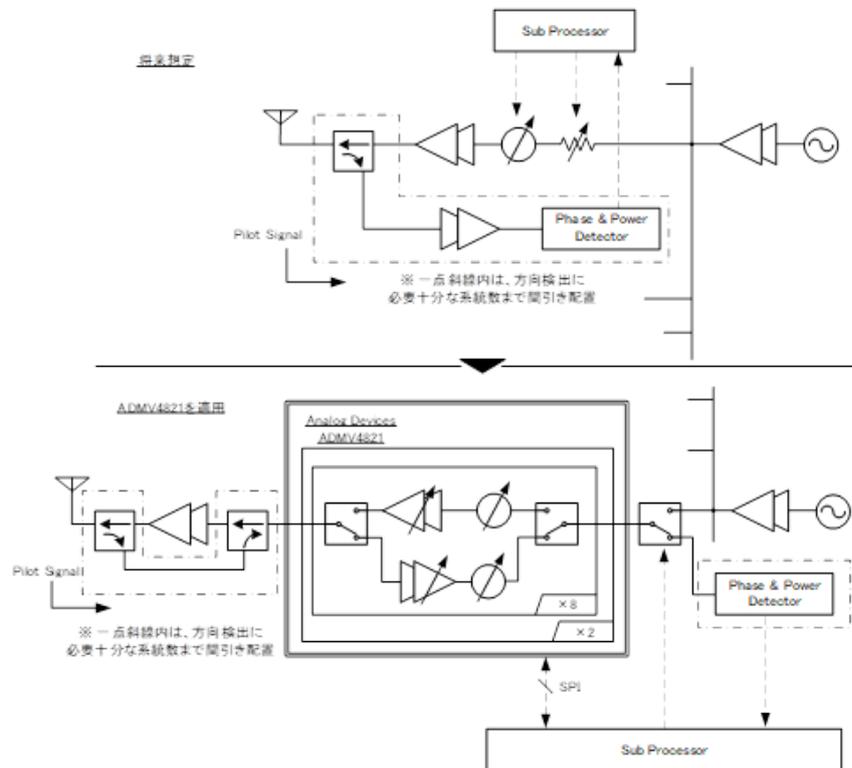


図 2-155 ADMV4821 を適用した場合の送電部内部構成

出所)IHI エアロスペース

図 2-155 に示す内部構成のもと、100kW 受電、10kW 受電それぞれを想定したレベルダイヤについて検討した。検討結果を表 2-81、表 2-82 にそれぞれ示す。また、レベルダイヤ中で想定した市販品パワーアンプについて表 2-83 に整理した。表中の PAE は、レベルダイヤ中の出力電力のもと、データシート中の電気特性評価時の消費電力からそれぞれ求めたものである。飽和電力と実消費電力の兼ね合いから PAE にばらつきが出ているものの、概ね最適動作点付近で動作させた場合には 20% 程度の効率が期待できると考えられる。

レベルダイヤでは、昨年度の検討同様に送電部アンテナ端で一様な出力電力密度分布としたケース(表中 Nom)に加え、到達電力向上(サイドローブ低減)のため、10dB 程度のテーパを付与したケースについても検討した(表中 High、Low)。またプリアンプ(表中 PreAmp)やスイッチ及びサーキュレータには、将来的に回路設計に基づく挿入損が含まれる事を想定し、悪い側に想定した値をそれぞれ用いた。

表 2-81 100kW 受電を想定した場合のレベルダイヤ

| コンポーネント種別<br>型番 | PLL<br>-  | PreAmp1<br>- | RF-SW1<br>- | Beamformer<br>ADMV4821 | Coupler1<br>- | PowerAmp<br>- | Coupler2<br>- | FeedLoss<br>- |      |      |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|------|
|                 |           |              |             | N/A                    |               |               |               | N/A           |      |      |
| 共通              | ゲイン       | dB           |             | 3                      | -1.5          | -             | -1.5          | -1            |      |      |
| Nom             | ゲイン       | dB           | -           |                        | 13.5          | 19            |               |               |      |      |
|                 | 入力電力      | dBm          | -           | -6.6                   | -3.6          | -5.1          | 8.4           | 6.9           | 25.9 | 24.4 |
|                 | 出力電力      | dBm          | -6.6        | -3.6                   | -5.1          | 8.4           | 6.9           | 25.9          | 24.4 | 23.4 |
| Low             | ゲイン       | dB           |             |                        | -1.5          | 29            |               |               |      |      |
|                 | 入力電力      | dBm          |             |                        | -5.1          | -6.6          | -8.1          | 20.9          | 19.4 |      |
|                 | 出力電力      | dBm          |             |                        | -6.6          | -8.1          | 20.9          | 19.4          | 18.4 |      |
| High            | ゲイン       | dB           |             |                        | 12.5          | 25            |               |               |      |      |
|                 | 入力電力      | dBm          |             |                        | -5.1          | 7.4           | 5.9           | 30.9          | 29.4 |      |
|                 | 出力電力      | dBm          |             |                        | 7.4           | 5.9           | 30.9          | 29.4          | 28.4 |      |
| 制約              | P1dB[dB]  | dBm          |             |                        | 17.5          |               |               |               |      |      |
|                 | 出力電力(min) | dBm          |             |                        | 15            |               |               |               |      |      |
|                 | 出力電力(max) | dBm          |             |                        | -15           |               |               |               |      |      |

出所)IHI エアロスペース

表 2-82 10kW 受電を想定した場合のレベルダイヤ

| コンポーネント種別<br>型番 | PLL<br>-  | PreAmp1<br>- | RF-SW1<br>- | Beamformer<br>ADMV4821 | Coupler1<br>- | PowerAmp<br>- | Coupler2<br>- | FeedLoss<br>- |      |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|
|                 |           |              |             | N/A                    |               |               |               | N/A           |      |
| 共通              | ゲイン       | dB           |             | 3                      | -1.5          | -             | -1.5          | -1            |      |
| Nom             | ゲイン       | dB           | -           |                        | 19.8          |               |               |               |      |
|                 | 入力電力      | dBm          | -           | -6.6                   | -3.6          | -5.1          |               | 14.7          |      |
|                 | 出力電力      | dBm          | -6.6        | -3.6                   | -5.1          | 14.7          |               | 13.7          |      |
| Low             | ゲイン       | dB           |             |                        | 14.8          |               |               |               |      |
|                 | 入力電力      | dBm          |             |                        | -5.1          |               |               | 9.7           |      |
|                 | 出力電力      | dBm          |             |                        | 9.7           |               |               | 8.7           |      |
| High            | ゲイン       | dB           |             |                        | 2.8           | 25            |               |               |      |
|                 | 入力電力      | dBm          |             |                        | -5.1          | -2.3          | -3.8          | 21.2          | 19.7 |
|                 | 出力電力      | dBm          |             |                        | -2.3          | -3.8          | 21.2          | 19.7          | 18.7 |
| 制約              | P1dB[dB]  | dBm          |             |                        | 17.5          |               |               |               |      |
|                 | 出力電力(min) | dBm          |             |                        | 15            |               |               |               |      |
|                 | 出力電力(max) | dBm          |             |                        | -15           |               |               |               |      |

出所)IHI エアロスペース

表 2-83 レベルダイヤにて想定した市販品 PA

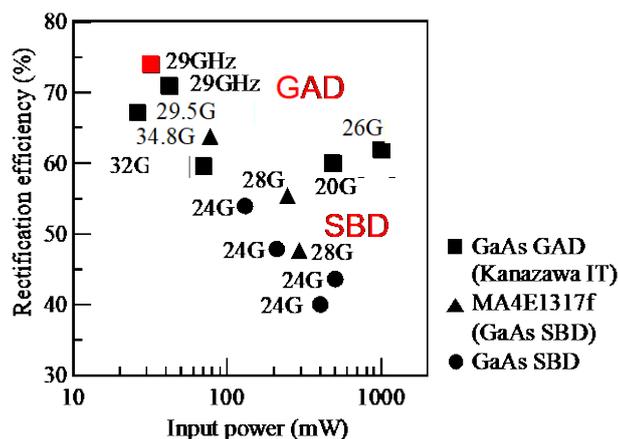
|            | 100kW             |           |                         | 10kW      |
|------------|-------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|            | Nom               | Low       | High                    | High      |
| メーカー       | ANALOG<br>DEVICES | ALTUM RF  | MicroWave<br>Technology | ALTUM RF  |
| 型番         | HMC863ALC4        | ARF1106Q4 | MMA<br>-212734D-M5      | ARF1106Q4 |
| 周波数範囲[GHz] | 24-29.5           | 24~31     | 21-27                   | 24~31     |
| Gain[dB]   | 24                | 29        | 25                      | 29        |
| P1dB[dBm]  | 27                | 24.4      | 33                      | 24.4      |
| Pout[dBm]  | 25.9              | 20.9      | 30.9                    | 21.2      |
| PAE        | 20%               | 11%       | 10%                     | 12%       |

出所)IHI エアロスペース

### c. 受電部(24GHz 帯 1W 級レクテナ)の検討

ここではミリ波領域における 1W クラスの受電電力のレクテナについて、検討結果を示す。

図 2-156 に周波数 20GHz から 40GHz までの、入力電力 10mW 以上の整流器・レクテナの整流効率を示す。●が GaAs SBD、▲が市販 GaAs SBD で最も高遮断周波数である MACOM 社 MA4E1317f、■は GaAs GAD を用いたものである。図に示すように、GaAs GAD は GaN SBD と比較し、大電力である程、効率面で有利である。



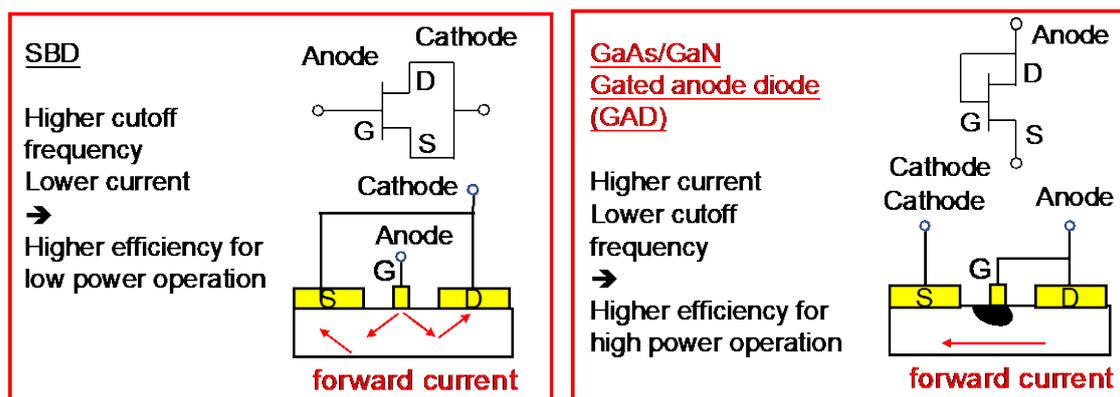


図 2-157 GaAs SBD と GaAs GAD(GaN GAD)の比較

出所)金沢工業大学

表 2-84 既存デバイスでの整流素子の比較

|                      | Si-SBD<br>HSMS-282p | GaAs-SBD               | 0.5 $\mu$ m<br>E-pHEMT<br>GAD | GaAs<br>SBD<br>(MA4E1317f) | 0.18 $\mu$ m<br>E-pHEMT<br>GAD |
|----------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Manufacturer         | Broadcom            | Mitsubishi<br>Semicon. | WIN<br>Semcon.                | MACOM                      | WIN<br>Semcon.                 |
| $V_{br}$<br>(1mA/mm) | 22.4 V              | 28 V                   | 13.2 V                        | 7 V                        | 8.3 V                          |
| $f_{c0}$             | 30 GHz              | 330 GHz                | 253 GHz                       | 1.99 THz                   | 810 GHz                        |
| $I_{max}/C_t$        | 83 mA/pF            | 415 mA/pF              | 731<br>mA/pF                  | 444<br>mA/pF               | 1155 mA/pF                     |

出所)金沢工業大学

表 2-84 において、GaAs SBD(MA4E1317f)と台湾 WIN semiconductors 社の 0.18 $\mu$ m GaAs E-pHEMT GAD を比較すると、ブレークダウン電圧  $V_{br}$  は同等、遮断周波数  $f_{c0}$  は約半分と劣るが、端子容量  $C_t$  あたりの最大電流  $I_{max}$  が高く、大電流動作が可能であることがわかる。この 0.18 $\mu$ m GaAs E-pHEMT GAD を用い、図 2-156 にプロットされた整流効率 62%@入力電力 1W の 26GHz 帯整流器 MMIC を開発している<sup>22</sup>。

さらに金沢工業大学では、レクテナの高効率整流技術として、アンテナと整流器の直接整合による回路損失の抑制を行っている。図 2-158 にレクテナの機能ブロック図を示す。内部抵抗  $R_0$  の RF 電源(通常  $R_0=50\Omega$ 、放射素子)に、インピーダンス変成器(変成比:  $n$ )、整合用インダクタ  $L_m$ 、高調波処理回路(HRC: harmonic reaction circuit)を介し、整流用ダイオードを接続する。整流用ダイオードから平滑キャパシタ  $C_L$  を介し DC 電力を取り出す。同図にアンテナと整流器のインタフェースを 3 種類示す。同図 Antenna-A は従来の  $R_0=50\Omega$  に整合されたアンテナである。ダイオードを  $50\Omega$  に整合するために、インピーダンス変換、整合用インダクタ  $L_m$  の機能を整流器内に設ける。さらに HRC を接続する。これらの挿入損による効率劣化を生じる。同図 Antenna-B は高インピーダンスアンテナである。インピーダンス変成機能をアンテナに実装することにより、高整流効率とできる。同図

<sup>22</sup> 角谷直哉、廣瀬裕也、坂井尚貴、伊東健治:” GaAs E-pHEMT GAD を用いる準ミリ波帯 1W 整流器 MMIC”、信学技報 MW2022-165、2022.

Antenna-C は、レクテナの RF フロントエンドの全機能をすべてアンテナに組み込む構成である。このような高効率な高機能アンテナと整流用ダイオードを直接接続することで、損失のある回路部品を用いることなく整流器を実現できる。図 2-159 に示す直接整合による 5.8GHz 帯レクテナでは整流用ダイオードで決まる整流効率の限界値 92.8%を得ている。このとき高機能アンテナの放射効率は 96.9%であり、僅かな効率低下で回路機能が実現できている<sup>23</sup>。本報告においても、このような直接整合による高効率化を前提とした、検討・報告を行う。

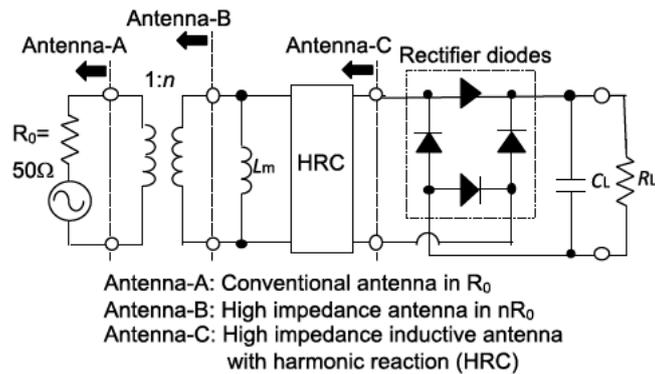


図 2-158 レクテナの機能ブロック図

出所)金沢工業大学

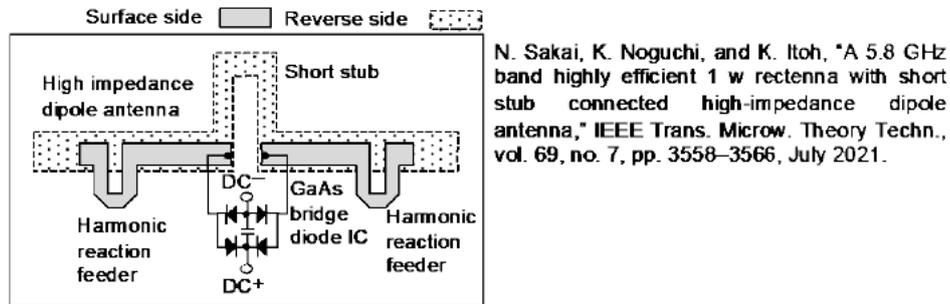


図 2-159 直接整合による 5.8GHz 帯レクテナの構成

出所)金沢工業大学

ここでは、表 2-84 に示す既存の整流素子  $0.18\mu\text{m}$  GaAs GAD( $V_{br}=8.3\text{V}$ )に加え、表 2-85 に示す次世代の整流素子によるミリ波領域の大電力レクテナの特性を検討した。次世代の整流素子としては、(1)  $0.25\mu\text{m}$  GaAs GAD( $V_{br}=21\text{V}$ )、(2)  $0.2\mu\text{m}$  GaN GAD( $V_{br}=50\text{V}$ )を取り上げる。(1)は  $0.18\mu\text{m}$  GaAs GAD より高耐圧であり、既存の  $0.8\mu\text{m}$  GaAs GAD<sup>24</sup>(参考文献: 加藤岳,

<sup>23</sup> N. Sakai, K. Noguchi, and K. Itoh, "A 5.8 GHz band highly efficient 1 w rectenna with short stub connected high-impedance dipole antenna," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 69, no. 7, pp. 3558–3566, July 2021.

<sup>24</sup> H. Takahashi, Y. Ando, Y. Tsuchiya, A. Wakejima, H. Hayashi, E. Yagyu, K. Kikkawa, N. Sakai, K. Itoh, and J. Suda: "Electrical characteristics of gated-anode diodes based on normally-off GaN HEMT structures for rectenna applications", Electron. Lett., vol. 57, pp. 810–812, 2021.

河野孝昌, 廣瀬裕也, 坂井尚貴, 伊東健治, ” GaAs GAD の閾値変更による整流器 MMIC のダイナミッククレンジ拡大,” 2024 年信学総大 C-2A-33, 2024.) を微細化したときのパラメータを予測したものである。(2) は  $0.8\mu\text{m}$  GaN GAD を微細化したときのパラメータを予測したものである。構成はブリッジ整流器とし、前述のようにアンテナと整流器を直接整合する。周波数は、24GHz、35GHz、60GHz、94GHz で検討を行う。35GHz までは入力電力 1W で GAD の電極サイズ的设计を行う。60GHz と 94GHz では波長に対する電極寸法が無視できないために、図 2-160 に示すようにダイオード段数とゲート幅のスケールリングを行う。従い、60GHz と 94GHz では動作電力が低下する。表 2-86 および図 2-161 に計算結果を示す。既存の  $0.18\mu\text{m}$  GaAs GAD に対し、 $0.25\mu\text{m}$  GaAs GAD と  $0.2\mu\text{m}$  GaN GAD を用いる整流器では効率、DC 出力電力が改善されている。これは、高耐圧化の効果により GAD 段数が削減できるためである。

表 2-85 次世代整流素子の性能予測

|                      | 0.18 $\mu\text{m}$<br>GaAs GAD | 0.8 $\mu\text{m}$<br>GaAs GAD | 0.25 $\mu\text{m}$<br>GaAs GAD | 0.2 $\mu\text{m}$<br>GaN GAD |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Manufacturer         | WIN<br>Semcon.                 | Nisshinbo<br>MD               | Nisshinbo<br>MD                | Nagoya U.<br>・<br>Nagoya IT  |
| $V_{br}$<br>(1mA/mm) | 8.3 V                          | 21 V                          | 21 V                           | 50 V                         |
| $f_{c0}$             | 810 GHz                        | 92 GHz                        | 400 GHz                        | 1100 GHz                     |
| $I_{max}/W_g$        | 1.1<br>A/mm                    | 0.46<br>A/mm                  | 1.5<br>A/mm                    | 1.5<br>A/mm                  |
| Status               | Mass<br>production             | Mass<br>production            | Prediction                     | Prediction                   |

出所)金沢工業大学

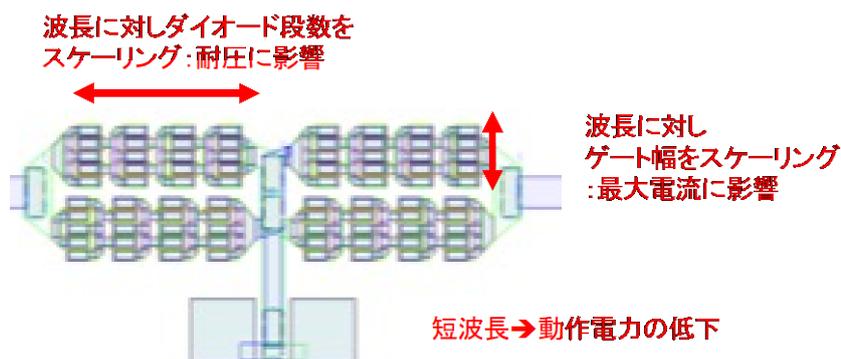


図 2-160 ブリッジ整流器のレイアウトと高周波数化に対するダイオード段数とゲート幅のスケールリング

出所)金沢工業大学

表 2-86 計算結果まとめ

| Frequency (GHz) | 0.18 $\mu\text{m}$ GaAs GAD (Vbr=8.3V) |                |                     | 0.25 $\mu\text{m}$ GaAs GAD (Vbr=21V) |                |                     | 0.2 $\mu\text{m}$ GaN GAD (Vbr=50V) |                |                     |
|-----------------|--|----------------|---------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------------------------|----------------|---------------------|
|                 | Max. input power (W)                   | Efficiency (%) | DC output power (W) | Max. input power (W)                  | Efficiency (%) | DC output power (W) | Max. input power (W)                | Efficiency (%) | DC output power (W) |
| 24              | 1                                      | 76.7           | 0.77                | 1                                     | 87.1           | 0.87                | 1                                   | 90.5           | 0.91                |
| 35              | 1                                      | 74.8           | 0.75                | 1                                     | 85.4           | 0.85                | 1                                   | 90.1           | 0.9                 |
| 60              | 0.4                                    | 72             | 0.29                | 1                                     | 79.1           | 0.79                | 1                                   | 83             | 0.83                |
| 94              | 0.1                                    | 63.4           | 0.063               | 0.2                                   | 69             | 0.14                | 1                                   | 79.1           | 0.79                |

出所) 金沢工業大学

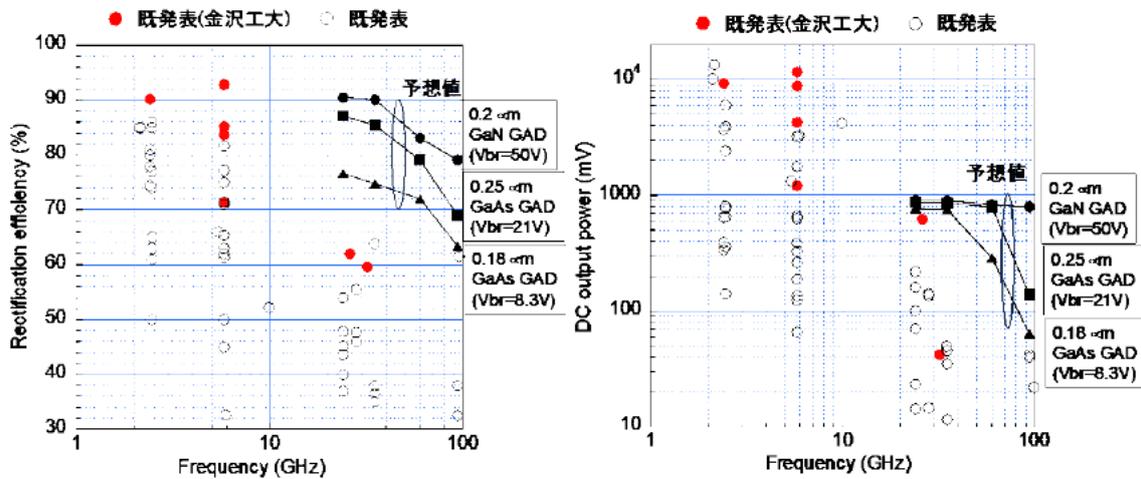


図 2-161 周波数に対する整流効率と DC 出力電力(既発表と予測値)

出所) 金沢工業大学

また図 2-162 に 24GHz 帯でのブリッジ整流器の入出力特性を示す。0.25  $\mu\text{m}$  GaAs GAD や 0.2  $\mu\text{m}$  GaN GAD では、高耐圧化の効果で最大入力電力での効率が改善される。また高耐圧化により GAD 段数を削減でき、それにより低閾値となるため、低電力領域での効率が改善される。

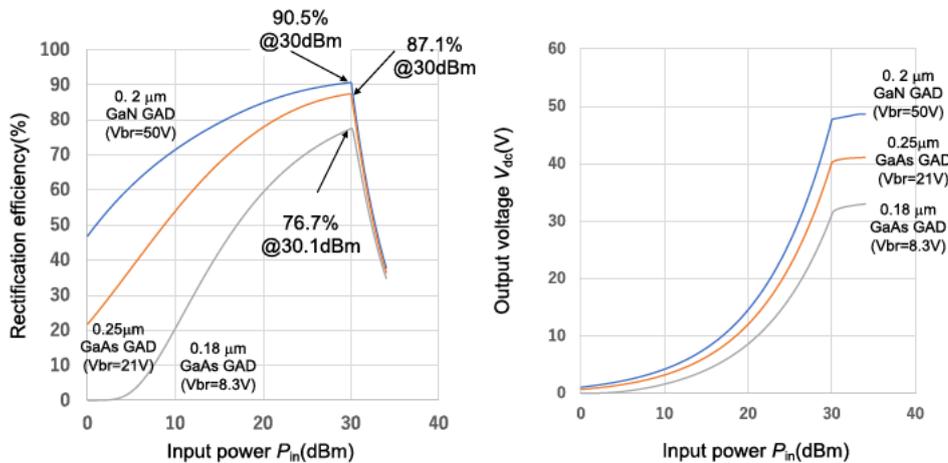


図 2-162 24GHz 帯でのブリッジ整流器の入出力特性

出所) 金沢工業大学

以降では、レクテナアレイとしての受電電力密度を求める。レクテナに 6dBi 程度の放射利得のアンテナを用いたとき、アンテナ間隔は  $0.8\lambda$  程度が適当である。図 2-163 にこの条件でのレクテナアレイの受電電力密度の予測値を示す。高周波数域での DC 出力電力低下により、 $0.18\mu\text{m}$  GaAs GAD では 35GHz 以上、 $0.25\mu\text{m}$  GaAs GAD では 60GHz 以上で頭打ちであるが、 $0.2\mu\text{m}$  GaN GAD では  $100\text{kW}/\text{m}^2$  を突破する。

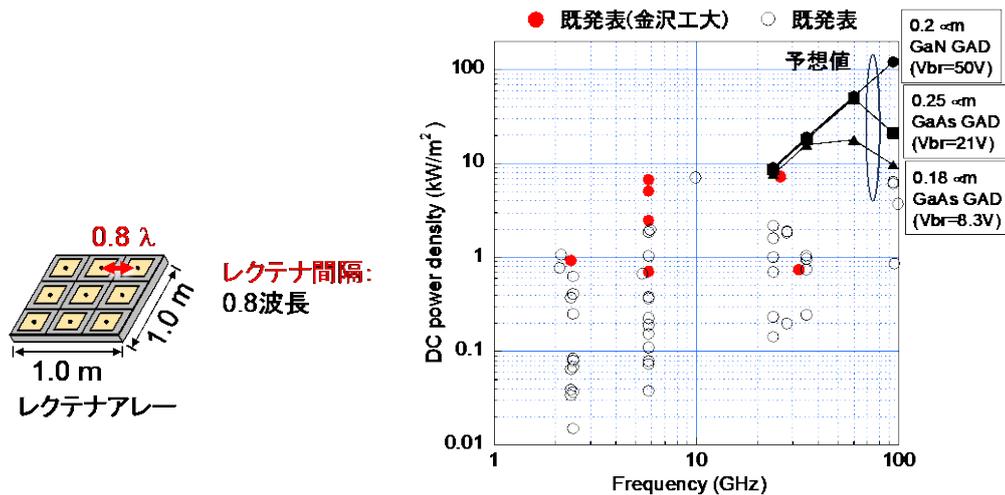


図 2-163 レクテナアレイの受電電力密度の予測値

出所)金沢工業大学

検討結果より、24GHz での1W 整流器を起点に高周波としたときの特性変化を予測した。また既存の GAD のデータをもとに微細化したときの性能を予測した。100mW 程度のレクテナに対しても同レベルの効率は維持可能であると考えられる。

#### d. まとめ

これまでの検討を踏まえ、月面上実証初期を想定した 24GHz 帯検討における、送電部の変換効率を表 2-87に、またマイクロ波送受電システムにおける送電効率を表 2-88の通りに算出した。送電効率はレベルダイヤの条件毎に算出したが、参考として 100kW 受電のノミナル電力条件において、高効率なパワーアンプを適用したケースとして、PAE=40%のデバイスを前提とした効率を計算した。PAE=40%の設定根拠としては、図 2-164 に示すパワーアンプの既存報告を参考とした。

検討結果より、以下を確認した。

- 総合変換効率は既存品を用いた場合 10%未満であり、特に送電部の効率改善が急務である。
- 既存品を用いて送電部を構築する場合には、効率低から放熱経路などに別途検討が必要なものの、送電電力密度に関しては一定の実現性がある。よって、送電機能及び性能検証を目的とした検証機製造は一案であると考えられる。
- 送電部構成は、小信号領域の制御 IC により大きく左右されるため、早々に適用デバイスの選定と耐環境性の確認が必要である。

- 高効率パワーアンプを適用した条件でも、送電部の変換は 20%程度に留まる。よって効率改善のためには、PA の効率向上も勿論だが、送電電力に関係なくバイアス的に必要となる小信号領域の消費電力による効率低下を補うため、ビーム形成に影響のない範囲でのサブアレイ化など、1 系統当たりの出力を大きくする構成検討が必要である。

表 2-87 既存品をベースとした Beam Forming IC1 台当たりの変換効率

| No. | コンポーネント        | 型番           | 消費電力[W] |      |       |      |      |      | 備考                                   |                         |
|-----|----------------|--------------|---------|------|-------|------|------|------|--------------------------------------|-------------------------|
|     |                |              |         |      |       |      |      |      |                                      |                         |
| 1   | Main Processor | -            | -       | -    | -     | -    | -    | -    | システム全体に係るものであり、比率低のためここでは除外          |                         |
| 2   | Sub Processor  | -            | 2.5     | 2.5  | 2.5   | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 10W消費のIC1台でBeam forming IC4台制御として仮置き |                         |
| 3   | PLL            | -            | 5       | 5    | 5     | 5    | 5    | 5    | 仮置き                                  |                         |
| 4   | Beamforming IC | ADMV4821     | 6.43    | 6.43 | 6.43  | 6.43 | 6.43 | 6.43 | TxモードのTyp値を利用                        |                         |
| 5   | Power Amp      | HMC863ALC4   | 30.8    |      |       |      |      |      |                                      | 100kW(Nom)              |
|     |                | ARF1106Q4    |         | 19.2 |       |      |      |      |                                      | 100kW(Low) / 10kW(High) |
|     |                | MMA12734D-M5 |         |      | 192.0 |      |      |      |                                      | 100kW(High)             |
|     |                | N/A          |         |      |       | 0.0  |      |      |                                      | 10kW(Nom)               |
|     |                | N/A          |         |      |       |      |      | 0.0  |                                      | 10kW(Low)               |
|     | PAE40%デバイス     | -            |         |      |       |      |      | 15.5 | 100kW(Nom)                           |                         |
| 6   | その他回路          | -            | 5       | 5    | 5     | 5    | 5    | 5    | 仮置き                                  |                         |
|     |                | 小計           | 49.7    | 38.1 | 210.9 | 18.9 | 18.9 | 34.4 |                                      |                         |
|     |                | RF出力計[W]     | 6.2     | 2.0  | 19.7  | 0.4  | 0.1  | 6.2  |                                      |                         |
|     |                | DC⇒RF変換効率    | 13%     | 5%   | 9%    | 2%   | 1%   | 18%  |                                      |                         |

出所) IHI エアロスペース

表 2-88 既存品をベースとした 24GHz 送受電システムの総合変換効率

| No. | 項目      | 100kW | 10kW | 備考          |
|-----|---------|-------|------|-------------|
| 1   | 送電部変換効率 | 13%   | 2%   | Nom値にて計算    |
| 2   | 伝搬効率    | 90%   | 90%  |             |
| 3   | 受電部変換効率 | 57%   | 50%  | レクテナ効率+開口能率 |
| 4   | 総合変換効率  | 6.7%  | 0.9% |             |

出所) IHI エアロスペース

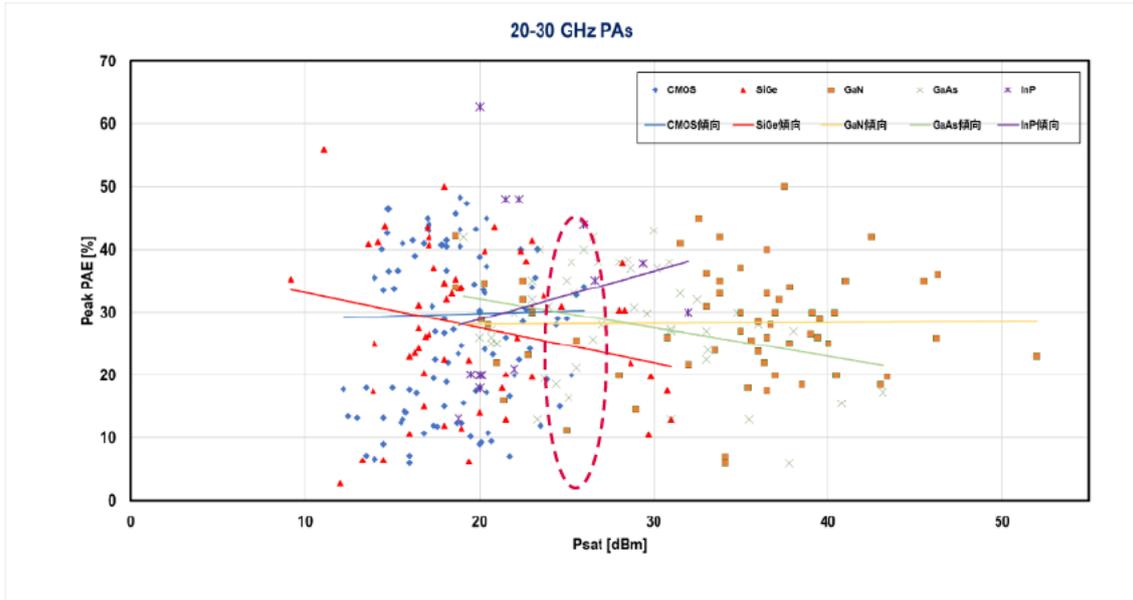


図 2-164 20～30GHz 帯パワーアンプの既存報告における PAE 傾向

出所)ジョージア工科大学ホームページ [https://gems.ece.gatech.edu/PA\\_survey.html](https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html)(閲覧日:2024/01/12)  
Hua Wang et al., "Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present,"を元に IHI エアロスペース作成

#### 4) 将来的な適用を想定した送電素子検討

##### a. 検討概要

本項では、月面開発の中期～後期(実用フェーズ)への適用を想定した半導体素子以外の送電素子として、電子管デバイスに関する検討結果をまとめる。検討対象としたデバイスは進行波管(Traveling Wave Tube:TWT)、クライストロン、マグネトロン、ジャイロトロンの4種である。

##### b. 各素子の現状

現在市販されている電子管デバイスの周波数帯と CW 出力傾向を図 2-165 に整理した。また代表的な市販デバイスの諸元について表 2-89 に示した。

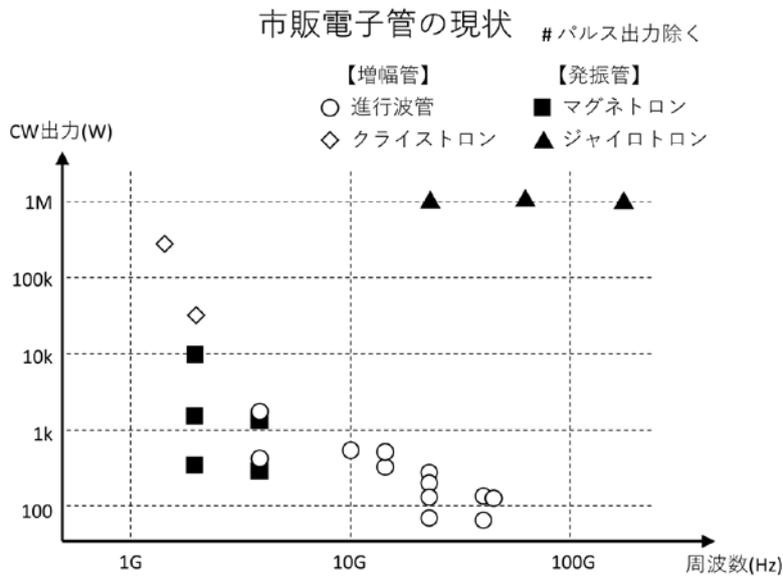


図 2-165 市販電子管デバイスの周波数帯と出力の傾向

出所) 京都大学

表 2-89 代表的な市販電子管デバイスの諸元

| 種別      | 型番                    | メーカー          | 周波数 (GHz) | CW出力 (W) | 質量 (kg) | 効率 (%)            |
|---------|-----------------------|---------------|-----------|----------|---------|-------------------|
| 進行波管    | LD7360 <sup>[1]</sup> | NEC ネットワークセンサ | 27.5-31.0 | 500      | 3.6     | 45                |
|         | LD7727 <sup>[2]</sup> | NEC ネットワークセンサ | 47.2-51.4 | 150      | 4.2     | 30                |
| クライストロン | E37750 <sup>[3]</sup> | キャノン電子管デバイス   | 1.3       | 300k     | 180     | 63                |
|         | E3739B <sup>[3]</sup> | キャノン電子管デバイス   | 2.45      | 30k      | 30      | 58                |
| マグネトロン  | H0915 <sup>[4]</sup>  | 日立            | 2.46      | 10.0     | 5.0     | 62.5              |
|         | M5803 <sup>[5]</sup>  | パナソニック        | 5.8       | 1.5      | 2.3     | 58.5              |
| ジャイロトロン | E39200 <sup>[6]</sup> | キャノン電子管デバイス   | 28        | 1M       | 750     | -                 |
|         | E39104 <sup>[6]</sup> | キャノン電子管デバイス   | 170       | 1M       | 820     | 50 <sup>[7]</sup> |

出所) [1]: LD7360 カタログより

[2]: NEC ネットワークセンサ PRODUCT LINE-UP カタログより

[3]: <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/klystron.html>

[4]: <https://www.hitachi-power-solutions.com/product/magnetron/magnetron/products/h0915/index.html>

[5]: M5803 データシートより

[6]: <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/gyrotron.html>

[7]: 文献からの推定値 Y. Oda, et. al, "Development of the first ITER gyrotron in QST", Nuclear Fusion, vol. 59, paper no. 086014, 2019.

また、表 2-89 では質量として、電子管デバイス単体の質量を記載した。その他に、別途電源や周辺機材の質量が必要になるが、公開情報が少なく本表では含めていない。電子管デバイス及び必要機材

の質量に関しては下記の傾向があると考える。

- 諸元例の通り、大電力デバイスになるほど質量は増となる。
- 電子管本体の質量のみならず、駆動電源の質量も加味する必要がある。一般論としては、電力増とともに電源質量も増加するが、月面や衛星で使用する高電圧駆動電源に関しては今後の検討が必要となる。  
※ 既存の高電圧駆動電源は、三相交流商用電源が入力源。月面や衛星で三相交流を作ることは現状考えにくく、DC-DC コンバータでの高電圧駆動の研究開発が必要と想定される。
- クライストロン、ジャイロトロンは、駆動電源に加えて、高磁場発生用の電磁石電源も必要であり、その分の質量が追加される。

### c. 電子管デバイスの今後の傾向

調査結果から推定した、電子管デバイスの諸特性に関する今後の傾向について、以下に整理する。

#### 【出力電力】

大出力は電子管デバイスの特徴であり、重要な研究項目のため、出力電力の向上は続くものと考えられる。ただし、CW 開発は用途次第(レーダー等、パルス用途も多い)であり、その点が開発項目となる可能性がある。

#### 【高周波化】

デバイス種別にもよるが、THz をターゲットとした研究開発が進められており、その様なデバイスは高周波化が期待できる。

#### 【効率】

基本的には、現状の諸元例に示した効率値で頭打ちであり、効率向上が見込まれたとしても数ポイント程度であると考えられる。理由としては下記 2 点が挙げられる。

- 10GHz 以下の市販品に関しては、開発終了品がほとんどであり今後の大幅な改善は見込めないため。
- 10GHz 以上の市販品および将来の開発品に関しては、高周波化に伴う作用空間の縮小により真空管内の電子運動に対して、より精密な電磁界制御が必要となる。電磁波エネルギーに変換されない電子運動エネルギーの残存はエネルギー損失となり、高周波ほど高効率化が困難となるため。

#### 【寿命】

寿命に関する研究開発の議論はみられないが、陰極材料の研究開発が、実質的には大出力化・長寿命化の議論と繋がると考えられる。

### d. 将来の月面上送電への適用性

調査結果をもとに、デバイス種別毎の月面開発への適用性を検討した。検討結果を表 2-90 に示す。なお適用性検討に際して前提とした条件は下記の通りである。

- 将来的な月面開発ではコンポーネントの小型化が志向され、高周波帯(30GHz~)の利用が主流となる。

- 遠距離の送電を想定すると、0.1°以下のポインティング精度が要求されるためビームの電子走査が前提となり、フェーズドアレイ化が必須となる。よって10km、100kW及び10kW受電を想定した、実証機ではフェーズドアレイ化が可能なデバイスを選定する必要がある。
- 一方で近距離の電力伝送への適用を想定し、機械的なアライメント精度でシステムが成立する場合は、フェーズドアレイ化は不要である。よって上記実証計画とは別尺度で評価する。

表 2-90 デバイス種別毎の月面上送電への適用性検討結果

| 種別      | 遠距離送電<br>(実証計画)への<br>適用性 | 近距離送電への<br>適用性 | 判断根拠  |
|---------|--------------------------|----------------|---|
| 進行波管    | ○                        | ○              | 【遠距離】<br>高周波帯に対応した市販品もあり、出力周波数もカスタマイズ可能なため、半導体素子の代替となる可能性がある。<br>1素子当たりの出力が大であることや、半導体と比べると高集約化に向かない事から、所望の伝搬効率を実現するビーム形成が可能か、検討が必要。適用可能となれば系統数大幅減が実現できる。 |
|         |                          |                | 【近距離】<br>半導体素子よりも高い出力電力を活用し、数系統をクラスター化(小信号領域で同相調整した後合成)するなどして、単一アンテナから放射する事で適用できる可能性がある。  |
| クライストロン | ×                        | ×              | 高周波帯(30GHz~)での開発実績が無く、開発年数やコストの観点から半導体素子よりも不利となる可能性が高い  |
| マグネトロン  | ×                        | ×              |   |
| ジャイロトロン | ×                        | △              | 【遠距離】<br>1系統当たりの出力が極めて大であり、フェーズドアレイ化する場合は大電力を分割・位相調整が必要となり開発要素が多い。  |
|         |                          |                | 【近距離】<br>アンテナからの放射を伴う運用事例が無く、アンテナとの接続が開発要素となる。この点が将来的に解決できれば、1系統単一アンテナからの大電力放射としてシステム化可能な余地があると考ええる。  |

出所)IHI エアロスペース

## e. まとめ

将来的な月面上送電部への適用を想定して、電子管デバイスに関する調査検討を行った。現状の想定のもとでは、電子管デバイスの中では進行波管の適用が最有力候補と考える。一方で進行波管の将来的な適用可否は、実現可能な素子配置のもと所望のビームが形成可能かにかかる部分が多く、詳細な検討に進む前には、この点の明確化が必要である。

### (3) 光ファイバレーザー送電の検討

令和4年度までの検討において、無線送電については、10 kW 級出力のシングルモードファイバレーザーに伝送系を組み合わせた送電システムにより総出力 200 kW を確保し、距離 10 km を経て設置するレーザー波長に適合した光源変換モジュールで受光し、概ね変換効率 50% で電気に変換して 100 kW を供給するシステムを提案した。有線送電については、中距離伝送用として最長 1 km の光ファイバを用いたレーザー送電について、複数の波長に対する伝送効率を検討した。

今年度は、発電所を要するサービスゾーンから距離 5km にある観測ゾーンへの 10kW 無線給電を要件とし、概念設計を行った。あわせて、この設計の流れを整理し、要件の数値が変化しても簡易に検討ができるようにした。光ファイバについては、レーザー光の光電変換に関する動向をアップデートした。

レーザーを用いた無線給電の概念設計の流れについて、以下のように整理した。

まず、ガウスビームの伝搬の式(1)を用いて<sup>25</sup>、伝送前後のビーム径の関係を明らかにする。

$$\omega = \omega_0 \left\{ 1 + \left( \frac{4\lambda x}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$\omega$ : 距離x伝搬後のビーム(受光)径

$\omega_0$ : 送光時のビーム(ウエスト)径

$\lambda$ : レーザ波長

x: 伝搬距離

式(1)により、レーザー波長 $\lambda$ と伝搬距離xを決めれば、伝送前後のビーム径( $\omega_0$ と $\omega$ )の関係が明らかになる。ここでは伝送パワーは関係なく、シングルモードと呼ばれるガウスビームの伝搬特性から計算をしているのみである。

例として、今年度の検討要件である距離 5km、ファイバレーザー波長である 1,070nm を代表値として式(1)に代入し、横軸を送光時のビーム径 $\omega_0$ 、縦軸を 5km 先のビーム径 $\omega$ としたグラフを図 2-166 に示す。送光径 0.08m、受光径 0.12m を最小径(グラフ中の谷底)とする V 字型を描いている。この最小径よりも大きい右側の領域では、送光径と受光径が一致(赤の直線)しており、いわゆるフレネル回折の領域である。一方、左側の領域では、送光径が小さいほど受光径が大きくなり、いわゆるフラウンフォーファー回折の領域である。図 2-167 に月周回軌道上から月面への伝送を想定した、距離 100km から 1,000km に対する計算結果も合わせて示す。

<sup>25</sup> 結像光学入門 松居吉哉 啓学出版 1988.

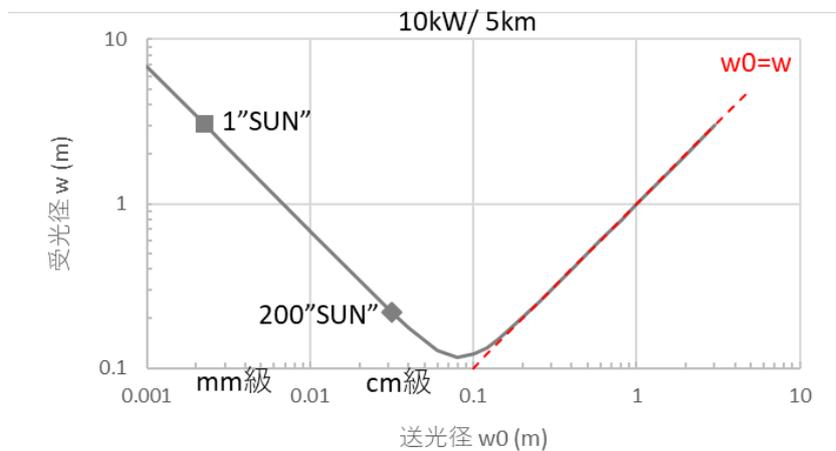


図 2-166 距離 5 km、波長 1,070 nm における送光径 $\omega_0$ と受光径 $\omega$ の関係

出所)光産業創成大学院大学

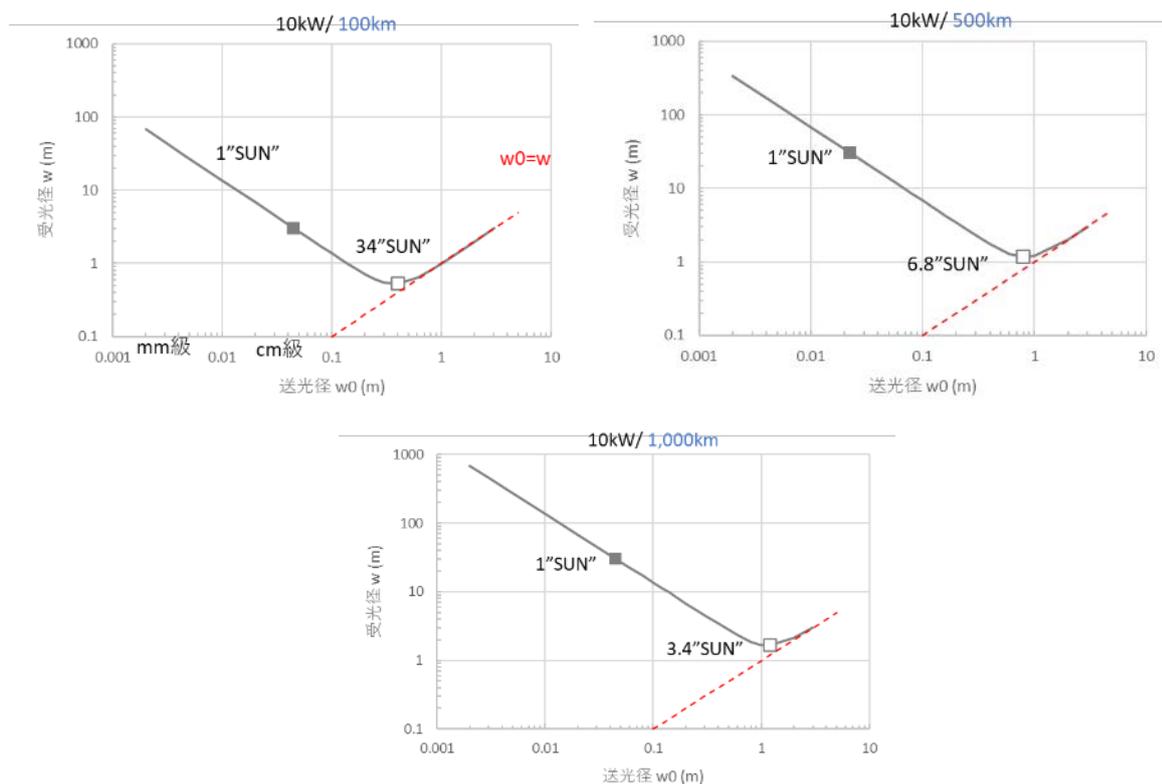


図 2-167 距離 100 km、500 km、及び 1,000 km における送光径 $\omega_0$ と受光径 $\omega$ の関係

出所)光産業創成大学院大学

次に、受光地点のパワー密度により制約を与え、図 2-166 にある伝送前後の光束径のセットのうち、どのセットを採用するかを検討する。伝送パワー $P$ に対し、受光地点のパワー密度を $P/(\text{受光径外接正方形面積})$ とし、与えたパワー密度から正方形を想定した受光モジュールの大きさを決定する。

例として、 $P=20\text{ kW}$ 、及び受光地点のパワー密度を地球周回軌道上の太陽光パワー密度である  $1.37\text{ kW/m}^2$  (1 “SUN” と表記) としてみる。すると、受光径外接正方形面積は、 $20\text{ kW}/(1.37\text{ kW/m}^2)=14.6\text{ m}^2$ 、となって平方根をとると  $3.82\text{ m}$  四方の大きさであることがわかる。この正方形の内接円の直径  $3.82\text{ m}$  が受光径であるとする、図 2-166 のグラフ上の「1”SUN”」の表記がある箇所に相当し、送光径は  $2\text{ mm}$  程度となる。1“SUN”照射は通常の太陽光発電時であり、受光モジュールの受動冷却実績がある照射パワー密度領域と捉える。

別の例として、200”SUN”照射を例に積極冷却導入時の伝送前後のビーム径を検討してみる。 $20\text{ kW}/(200\times 1.37\text{ kW/m}^2)=0.073$  となって平方根をとると  $0.27\text{ m}$  四方の大きさであることがわかる。この正方形の内接円の直径  $0.2\text{ m}$  が受光径であるとする、図 2-166 のグラフ上の「200”SUN”」の表記がある箇所に相当し、送光径は  $2\text{ cm}$  程度となる。これらのように、受光モジュールの熱負荷を想定した照射パワー密度から、伝送ビーム仕様を決定することができる。より長距離の伝送を検討した図 2-167 では、受光径が最小となるときの受光モジュール上のパワー密度を”SUN”表示してある。より長距離伝送であることから受光系が大きく、パワー密度の最高値に相当する最小受光径時であっても図 2-166 の最小受光径でない 200”SUN”よりも低い値となっている。

図 2-166 のグラフにある受光径は、ガウスビームという回折広がり小さい特徴を持つビームに対する最小径を与えているに過ぎず、ビームを送り出す光学系を調整すれば、これよりも広がる、大きな径で受光地点に送り届けることも可能である。上の 2 つの例でいえば、後者のように  $2\text{ cm}$  程度で送って最小  $0.27\text{ m}$  で送ることもできるが、前者のような  $3.82\text{ m}$  といった大きい受光径で送り届けることも可能ということである。光源であるレーザ装置からの出力ビームの理想的なガウスビームからの差の程度によっても同様に広がり加えられ、 $M^2$ (エムスクエア)と呼ばれる係数にてその差の程度が定量評価されている。受光径にその  $M^2$  を乗じた値が、ガウスビームとの差に起因して広がった受光径として見積もることができる。シングルモードは  $M^2$  が 1 で理想的なガウスビームを示しており、 $\text{kW}$  級の製品ベースでは 1.3 程度以下とその差の程度は小さい。より大きく受光径を広げるのであれば、ビーム拡大時の光学系の調整により制御することが現実的である。

最後に、受光径を送光側の光学系調整により選択できる設計自由度がある中で、送光径の選択を制約するものとして、送光光学系内外におけるパワー密度が影響する熱的成立性が挙げられる。加えて、出射窓への浮遊レゴリス付着の懸念について、高いパワー密度による照射によってクリーニング効果を与えるかもしれないし、逆に焼き付き不具合の危険性もあり、浮遊レゴリスの密度や帯電性による付着性の変化など不明点も多く、何らかの検証が必要であると考えられる。

概念設計の流れは以上で、合わせて距離  $\text{km}$  で  $200\text{ kW}$  送電、 $50\%$ 変換効率で  $100\text{ kW}$  給電を例に数値も明らかにした。この具体例によって明らかになった可能性は、以下の 3 点である。

- $\text{mm}$  級で送り、回折広がり  $1$ ”SUN”相当で受動冷却受光
- $\text{cm}$  級で送り、回折広がりあるも”集光型”で積極冷却受光
- 2 番で、より広がるビームにして受動冷却受光レベルにする。

以上のように設計の自由度が高めであることがわかった。

受光システムで上記以外の仕様については、PV セル直列内の光電変換性能からの要請により照射均一性が求められ、その数値は要精査であることが挙げられる。均一化の手法としては、強度分布が平

坦なビームを生成して伝送する、もしくは受光したビームを何らかの光学系により均一化する、と送受光の一方もしくは双方における工夫が考えられる。加えて、レゴリス付着対策も必要になると考えられる。

送光系で上記以外の仕様については、方向制御及びレーザーのビーム品質の確保、送光径内での損失が挙げられる。方向制御については、5km 先のターゲット $\phi$ 3.8m の大きさに対し、例えば 1/20 以内の位置ずれ  $\Phi$ 3.8m/20=0.19m を要求すると、0.19m/5km=38 $\mu$ rad であり、概ね 10 $\mu$ rad 級の精度が要求される。これは、例えば $\phi$ 12mm のレーザービームに対し、透過光学素子の平行平板の角度制御により $\mu$ rad 級の方向制御が報告されているように<sup>26</sup>、現実的な仕様と言える。ビーム品質 (BPP(Beam Parameter Product))については、kW 級のシングルモードファイバレーザー製品の現状を鑑み、0.33mm mrad を下限として、0.35mm mrad 程度をレーザー発振器に要求しつつも、オプションとしてその 2 倍程度までを許容し、伝送設計で吸収(より大きめの送光径を採用し、回折広がりを抑制する)する柔軟な設計が可能であると考えられる。ファイバレーザー出射後から受光面手前までの損失は、光学素子表面のおおよその個数から、5%以下(暫定目標)を掲げる。課題としては、各ビームのアライメント手順の確立、出射窓のレゴリス付着抑制・除去(光損失回避)、及び 5km 伝送光路上の大量浮遊レゴリス発生イベント時の損失検討がそれぞれ挙げられる。

レーザー発振器については、上記のビーム品質に加え、波長は 1070-1080nm、出力は国内現状 3 kW 程度(海外 10kW 製品あり)の現状に対し、保守的 5kW、楽観的 10kW で国産を想定する。電気・光変換効率(wall-plug eff.)は、保守的 35%(海外製品 40%超、一部 50%肉薄)の現状に対し、楽観的 50%を想定する。固有の課題としては、電気・光変換効率の向上、冷却系の起動・停止運用手法(極低温環境下、冷媒凍結問題)が挙げられる。

レーザー発振器 1 台・伝送系 1 セットを組み合わせた送電システムの仕様については、総出力 20kW に対し、5 kW $\times$ 4 システム、10 kW $\times$ 2 システム、もしくは冗長性からより多いシステム数が良ければ 3 kW(国内現状装置あり) $\times$ 7 システム(冗長性によってはそれ以上)といった設計の選択幅が広い状況であり、重量等の観点も含めたトレードオフにより決められるであろう。ほか、固有の課題としては、排熱処理及びその利用が挙げられる。

共通課題としては、耐放射線性、耐熱性、排熱処理が挙げられる。これまでに述べたファイバレーザーは溶接・切断などの加工用途として多くの製品が上市され、海外のトップメーカーはじめ競争が激しく、上記システム案はおそらく海外においても容易に検討できる内容と想定される。そこで、独自の国産レーザー技術であるフォトニック結晶レーザーの利用可能性について触れる。光の波長程度のナノレベルの結晶構造を制御できる精緻な半導体設計・製作技術により、光の閉じ込めと放出を自在に制御できるフォトニック結晶を用いた、京都大学の野田先生が世界トップを走る新しいレーザー発振技術である。従来の半導体レーザーは半導体積層端面からの放射で低ビーム品質(絞れない)だが、これは面発光(surface emission)型で、大きな面積からの高ビーム品質(絞れる、広がらない)の放射が特徴である。2023 年 6 月に $\phi$ 3mm の 50W のシングルモード動作が確認され、kW 級の設計が提出されている<sup>27</sup>。方向制御は従来のミラー方式で別途対応するとして、ビーム自体はこの mm 級が実現していることから、前

<sup>26</sup> 栗林, 奈良岡:月極域探査機への km 級レーザー無線給電に向けた研究開発状況, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2023-40563, 2023.

<sup>27</sup> 京大 HP 2023 年 6 月 23 日 <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/fxjtuf.pdf>  
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06059-8>

述の mm 級送光仕様の採用可能性を考えると、拡大光学系などを経ることなくそのまま送光できる可能性がある。小型軽量化に有利であるが、高密度排熱が重要となるであろう。このように、高出力化が始まっており、本件への利用可能性が長期的に考えられる有望な国産技術である。

光ファイバについては、レーザ光の光電変換に関する動向のアップデートとして、図 2-168 を示す。多くの波長に対する光電変換効率の調査結果がまとめられている<sup>28</sup>。最も高い変換効率の波長は 800nm 台(图中 8xx nm と表記)であり、低出力で 70%に近い値が報告され、横軸の出力値が大きくなると低下する傾向がみられるものの、30W で 61%の最近の報告<sup>29</sup>もある。ファイバレーザ波長の 1000nm 台(图中 10xx nm、黄色)では 1W 弱で 53%の報告<sup>30</sup>が最大効率である。

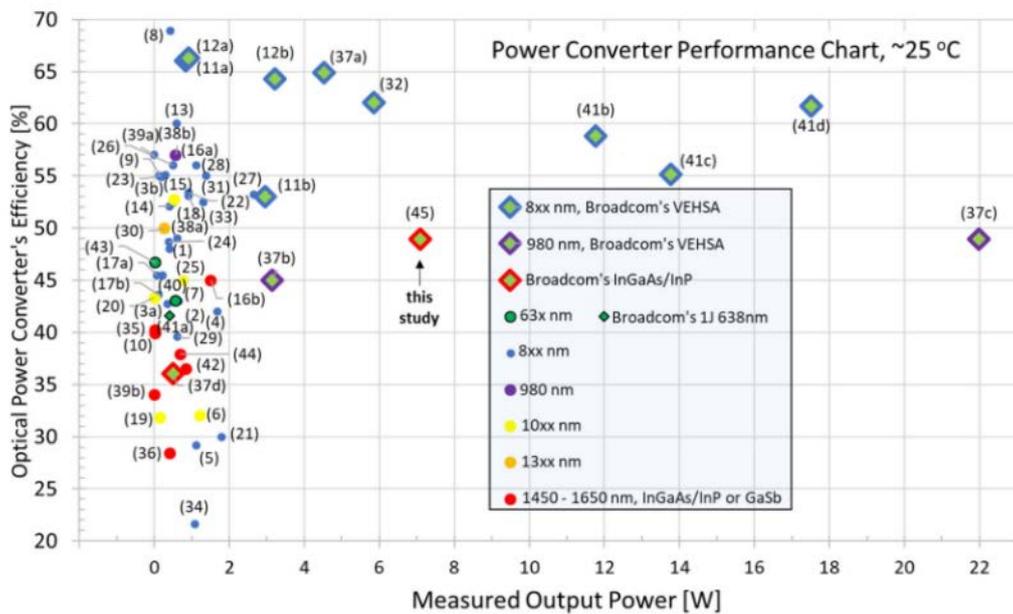


図 2-168 様々な波長に対する光電変換効率

出所) Fafard, S. and D. P. Masson (2022) [4] CC BY

<sup>28</sup> Fafard, S. and D. P. Masson (2022). "High-Efficiency and High-Power Multijunction InGaAs/InP Photovoltaic Laser Power Converters for 1470 nm." *Photonics* 9(7). <https://doi.org/10.3390/photronics9070438>. CC BY.

<sup>29</sup> Fafard, S. and D. Masson (2023). "Vertical Multi-Junction Laser Power Converters with 61% Efficiency at 30 W Output Power and with Tolerance to Beam Non-Uniformity, Partial Illumination, and Beam Displacement." *Photonics* 10(8). <https://doi.org/10.3390/photronics10080940>.

<sup>30</sup> Krut, U. D., Sudharsanan, R., Isshiki, T., King, R., & Karam, N. H. (2007). A 53% high efficiency GaAs vertically integrated multi-junction laser power converter. In 65th DRC Device Research Conference (pp. 123-124). Article 4373680 (65th DRC Device Research Conference). <https://doi.org/10.1109/DRC.2007.4373680>

#### (4) 有線(導線)送電の検討

月面上の室内及び近距離の 120VDC 系の電力システムは、基本的に国際宇宙ステーションの電力システムにおいて確立した技術を基に実現可能であるので、その技術をベースとして具体的に検討を実施する方針とした。ただし、国際宇宙ステーション JEM における電力システムにおける「電力システム設計基準」等、又はさらに NASA の設計基準や関連する「要求仕様」に基づき、それを月面上の環境に適用するための改良設計の実施という観点での取組となるが、課題はそれらの「情報」の入手方法である。現在それらの情報はクローズの状況であるが、月面での電力供給システム検討、適応性の検討、さらには不足している技術の洗い出しと追加の開発計画立案のためには、これら情報の取得が必要である。なお、NASA の方針としても、Gateway については基本的に国際宇宙ステーションの技術により NASA、ESA、及び JAXA にて分担して構築するようであり、月面上でも同様とするのがまず第一歩であると考えられる。

現在の国際宇宙ステーションの配電の電圧は 120VDC であるが、それを例えば 400VDC に上げられれば導体による電力伝送の範囲を広げることが可能となるので、そのための絶縁やプラズマ対応の技術開発及び実証を実施する意義がある。しかし、プラズマ物理に起因する現象であり、真空中での高電圧化技術開発として長年取り組まれて来ているが、なかなかパッシェンの法則の限界を越える進展が見られない課題である。

### 3. 有識者委員会・WG 運営

電力 WG と水素 WG の 2 つの WG を設置し、2 章で述べた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。さらに両 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、双方の WG メンバに加え、数名の有識者も参加の上、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 の検討結果を確認した。なお、親委員会は 3 回、WG は各 5 回開催した。

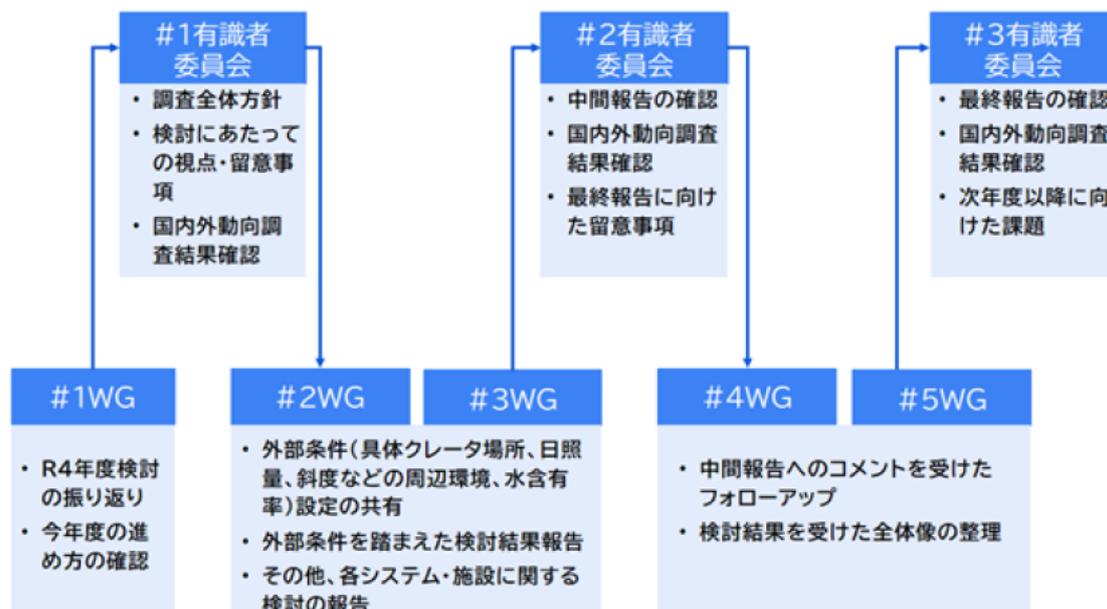


図 3-1 有識者委員会と WG の開催

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 2 つの 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。

##### (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 |

|  |       |
|--|-------|
| 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 名誉教授                       | 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 |
| 東京工業大学 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>月極域探査機プリプロジェクトチーム サブマネージャ | 星野 健  |

## (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 | 2023年9月4日(月)<br>17:00-19:00       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ R5 年度検討方針について</li> <li>・ 月面開発に向けた建設分野の動向と経産省事業との連携・接続可能性</li> <li>・ 海外動向調査報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul> |
| 第2回 | 2023年12月15日<br>(金)<br>15:00-17:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 海外動向調査報告</li> <li>・ 水素 WG 検討進捗報告</li> <li>・ 電力 WG 検討進捗報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                     |
| 第3回 | 2024年3月11日(月)<br>17:00-19:00      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 水素 WG 活動報告</li> <li>・ 電力 WG 活動報告</li> <li>・ ベンチマーク調査報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                       |

## 3.2 水素 WG

水素に関する技術課題について検討するために設置された水素 WG の構成員及び開催状況を示す。

## (1) 構成員

水素 WG の構成員を表 3-3 に示す。

表 3-3 水素 WG 構成員一覧表(五十音順)

| 水素 WG 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       |
|           | 横河電機株式会社          |
| 国研        | 国立研究開発法人 情報通信研究機構 |

## (2) 開催履歴

水素 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 水素 WG の開催履歴およびアジェンダ

| 回次    | 日時                                 | 議事  |
|-------|------------------------------------|---|
| 第 1 回 | 2023 年 7 月 28 日(金)<br>13:00-15:00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ ゲストスピーカーによる発表</li> <li>・ R5 年度水素 WG 検討方針</li> <li>・ 海外動向調査報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>   |
| 第 2 回 | 2023 年 10 月 13 日(金)<br>10:00-12:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ ゲストスピーカーによる発表</li> <li>・ IAC2023 参加報告</li> <li>・ 外部条件検討結果報告</li> <li>・ チーム 1&amp;2 検討内容報告</li> <li>・ チーム 3 方針および検討内容報告</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul> |
| 第3回   | 2023 年 11 月 17 日(金)<br>15:00-17:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 海外動向調査報告</li> <li>・ チーム 1&amp;2 進捗報告</li> <li>・ チーム 3 進捗報告</li> <li>・ 電力 WG 検討内容報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>                     |

|                    |                              |   |
|--------------------|------------------------------|---|
| 第4回                | 2024年1月26日(金)<br>13:00-15:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ チーム1&amp;2 進捗報告</li> <li>・ チーム3 進捗報告</li> <li>・ 技術課題整理に向けた実証候補項目(案)【仮】</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul> |
| 第5回<br>(電力WGと合同実施) | 2024年2月22日(木)<br>16:00-18:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 水素WG 活動報告</li> <li>・ 電力WG 活動報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>   |

### 3.3 電力WG

電力に関する技術課題について検討するために設置された水素WGの構成員及び開催状況を示す。

#### (1) 構成員

電力WG構成員を表3-5に示す。

表 3-5 電力WG 構成員一覧表(五十音順)

| 電力WG 構成員 |                      |
|----------|----------------------|
| 企業       | 株式会社 IHI エアロスペース     |
|          | 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 |
|          | 株式会社テクノソルバ           |
|          | 日本飛行機株式会社            |
| 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  |

#### (2) 開催履歴

電力WGの開催履歴および各回のアジェンダを表3-6に示す。

表 3-6 電力 WG の開催履歴およびアジェンダ

| 回次                            | 日時                              | 議事  |
|-------------------------------|---------------------------------|---|
| 第 1 回                         | 2023年8月8日(火)<br>16:00-17:30     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 全体計画・方針について</li> <li>・ 今年度の検討方針及び体制について</li> <li>・ 海外動向調査報告</li> <li>・ 質疑、今後の予定、等</li> </ul>   |
| 第 2 回                         | 2023年 11月7日(火)<br>16:00-18:00   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ IAC2023 参加報告</li> <li>・ 外部条件検討</li> <li>・ 月面電力供給全体システム</li> <li>・ 月周辺軌道太陽光発電システム</li> <li>・ 月面設置発電システム</li> <li>・ 月面上での送電システム</li> <li>・ 質疑、今後の予定、等</li> </ul> |
| 第3回                           | 2023年 12月 12日(火)<br>15:00-17:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 原子力利用の動向調査</li> <li>・ 月面電力供給全体システム</li> <li>・ 月周辺軌道太陽光発電システム</li> <li>・ 月面設置発電システム</li> <li>・ 月面上での送電システム</li> <li>・ 質疑、今後の予定、等</li> </ul>                     |
| 第 4 回                         | 2024年1月23日(火)<br>16:00-18:00    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 月面向け km 超級無線給電技術の特徴整理と傾向分析全体</li> <li>・ 月面電力供給全体システム</li> <li>・ 月周辺軌道太陽光発電システム</li> <li>・ 月面設置発電システム</li> <li>・ 月面上での送電システム</li> <li>・ 質疑、今後の予定、等</li> </ul>   |
| 第 5 回<br>(水素<br>WG と合<br>同実施) | 2024年 2 月 22日(木)<br>16:00-18:00 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開会</li> <li>・ 水素 WG 活動報告</li> <li>・ 電力 WG 活動報告</li> <li>・ 総合討議</li> <li>・ その他(今後の予定等)</li> </ul>   |

## 4. 国内外動向調査

---

### 4.1 米国における月面開発の検討体制

本節では、世界で最も先行して活動を行っている、米国における水素・電力を含む月面開発の検討体制について整理を行う。

米国では、主に NASA により実施されている将来の月面開発のための研究開発、技術ギャップに関する検討と、主に DARPA により実施されている将来の月面での経済活動創出に向けたフレームワーク・ガイドラインの検討が行われている。

#### 4.1.1 NASA における検討

##### (1) Lunar Surface Innovation Initiative (LSII)

LSII は NASA の Space Technology Mission Directorate (STMD) により 2019 年に立ち上げられたプログラムであり、将来の月面探査に必要な新技術の創出の促進、主要なシステム・要素の技術開発を加速させることを目的としている。LSII の役割と責任として以下が示されている。<sup>31</sup>

- 月面探査の成功に必要な技術開発・展開のための、野心的かつ団結力のある実行可能な政府機関戦略の確保
- 幅広いステークホルダーを統合し、産業界・学術界の強固な協力・パートナーシップを効率的に促進するための戦略の策定
- STMD プログラムを通じて月面活動を可能とするための計画、実装、予算ニーズへの取組み
- 月面実証に関連する政府投資を適切に調整するためのステークホルダー(ミッション局、各センター等)、他政府機関、大学、企業、国際パートナーとの協力

また、LSII は月面開発に向け、図 4-1 に示す 6 つの重点領域を設定している。

- その場資源利用 (ISRU)
- 月表面での電源
- 発掘・建設
- 極限環境
- ダストの軽減
- 極限下でのアクセス

上記の 6 つの領域をベースとして、LSII は官民パートナーシップによる技術開発・実証を進めている。LSII による技術実証計画の概要を図 4-2 に示す。

---

<sup>31</sup> [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/03/nwerkheiser\\_lsii\\_oct2019\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/03/nwerkheiser_lsii_oct2019_508.pdf)  
(2024 年 3 月 4 日閲覧)

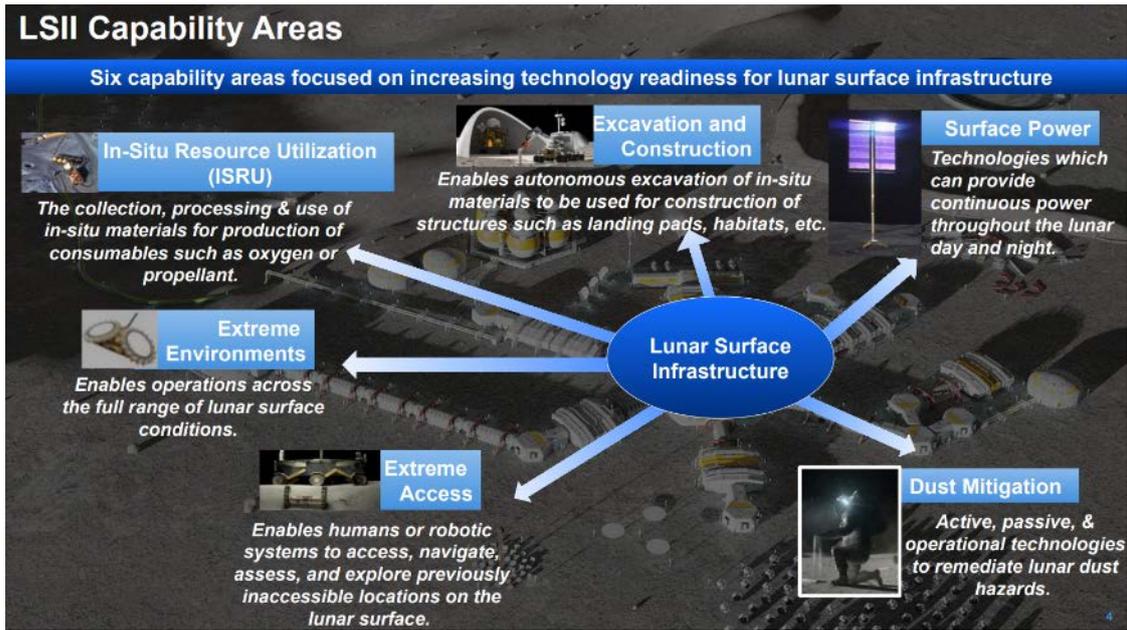


図 4-1 LSII における 6 つの重点領域

出所) [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220013229/downloads/LSII\\_IAC\\_Presentation.pptx.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220013229/downloads/LSII_IAC_Presentation.pptx.pdf) (2024 年 3 月 4 日閲覧)

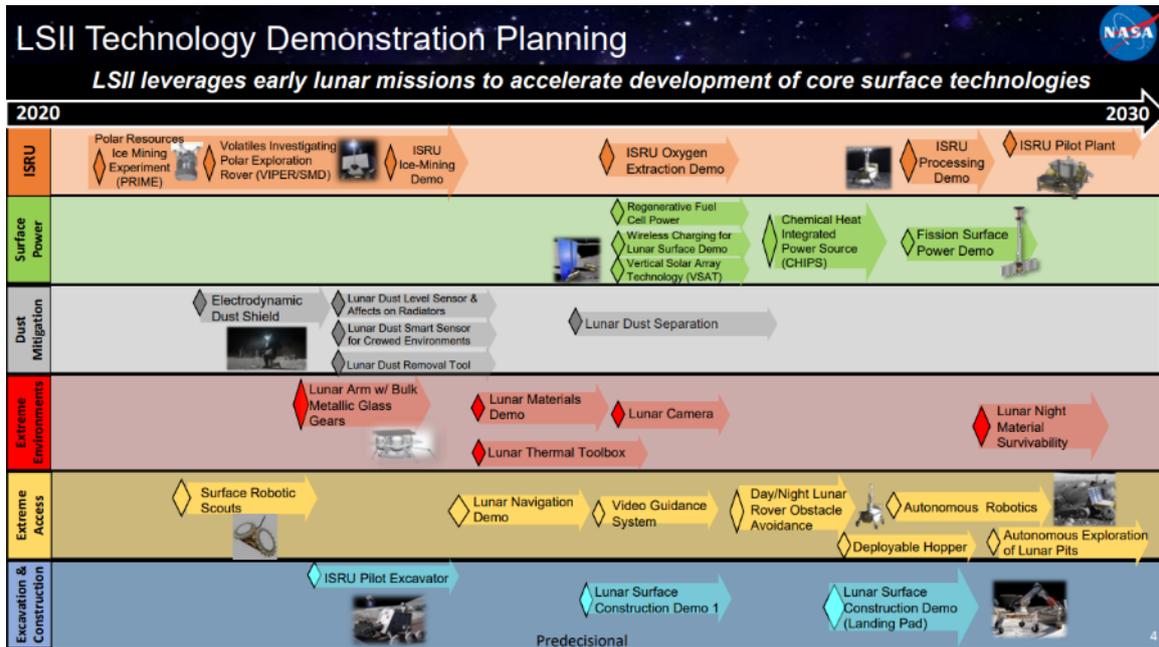


図 4-2 LSII の技術実証計画

出所) <https://www.nationalacademies.org/documents/embed/link/LF2255DA3DD1C41C0A42D3BEF0989ACAECE3053A6A9B/file/DE476BA15D706A86C4F691619081F0DC016F77FDA456?noSaveAs=1> (2024 年 3 月 4 日閲覧)

## (2) Lunar Surface Innovation Consortium(LSIC)

LSIC は、LISS の下で STMD とジョンズ・ホプキンス大学応用物理学研究所(APL)により共同で運用されているコンソーシアムである。産業界、学术界、政府機関、非営利機関が広く参加し、月面探査に向けた技術ニーズの特定、技術開発の推奨事項の整理などを行っている。LSIC では、月面技術に関するコミュニケーションの促進を目的として、NASA と参加機関間の議論の場を提供している。具体的には、NASA から提供された技術要件、ニーズ、参画機会を参加機関に共有するとともに、参加機関からは既存の能力の共有や NASA からの資金提供を必要とする技術ギャップの特定を行っている。<sup>32</sup>

LSIC では、図 4-3 に示すように LSII が設定した 6 つの重点領域に合わせて、それぞれの分野に関するフォーカスグループが設置されている。各フォーカスグループでは、APL のファシリテートのもとで定期的な会合が実施され、参加機関が有する能力や研究開発支援のニーズを整理し、NASA への共有を行っている。

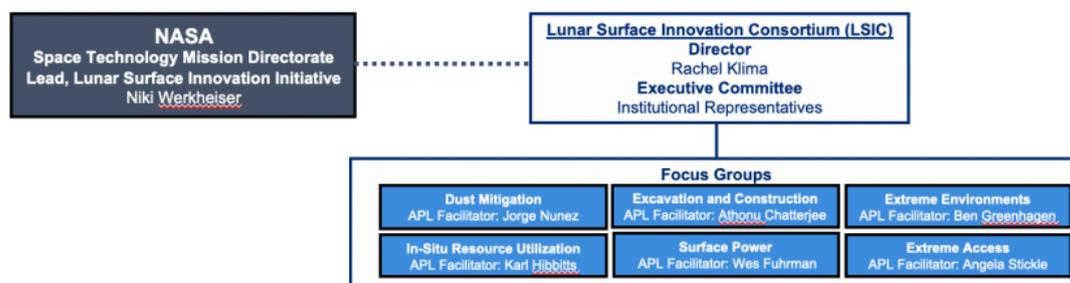


図 4-3 LSIC の体制

出所) <https://lsic.jhuapl.edu/Resources/files/Welcome%20to%20LSIC.pdf> (2024年3月4日閲覧)

### 4.1.2 DARPA における検討

#### (1) 10-Year Lunar Architecture (LunA-10)

DARPA では、2023年8月に月面における統合インフラフレームワークにより月経済圏を実現させることを目的として、月面及び月周辺での経済活動を促進する LunA-10 を発表した。LunA-10 では、独立した技術から、それらを相互運用可能な一連のシステムへと移行するための基礎技術コンセプトを開発するため、アーキテクチャ検討に取り組む企業の募集・選定を実施している。DARPA はこれらの検討を通じて、月面・月周辺での商業的活動の機会を定義し、関連する技術的課題を特定するための分析フレームワークを構築するとしており、最終的な分析フレームワークは公開することを予定している。

<sup>33</sup>

LunA-10 では①建設、②マイニング、③モビリティ、④エネルギー、⑤農業、⑥医療、⑦ロボティクス、⑧生命維持、⑨実験(月/惑星科学)、⑩通信、⑪現代の月面コンピューティングのためのデジタルインフ

<sup>32</sup> <https://lsic.jhuapl.edu/Resources/files/Welcome%20to%20LSIC.pdf> (2024年3月4日閲覧)

<sup>33</sup> <https://www.darpa.mil/news-events/2023-08-15> (2024年3月11日閲覧)

ラ、②PNT を月面での長期的な開発を維持するために開発がなされる必要がある領域として設定しており、これら領域におけるアイデアを募集している。2023年8月より募集が開始された LunA-10 TA-1 では、2023年12月に 14 社の企業が選定され、複数の月面サービスにまたがる統合システムの設計を検討している。14社には7か月の研究期間が用意されており、その中でサービスプロバイダーとユーザー両方が参加し、月及びその周辺での迅速な科学的・商業的活動の新たな機会の定義、また関連する技術的課題を特定する分析的枠組みの確立を目指すとされている。今後は2024年5月に最終的な統合システムコンセプトのレビューを受け、同年6月に最終報告を提出予定である。選定された14社を以下に示す。

- Blue Origin
- CisLunar Industries
- Crescent Space Services LLC
- Fibertek, Inc.
- Firefly Aerospace
- GITAI
- Helios
- Honeybee Robotics
- ICON
- Nokia of America
- Northrop Grumman
- Redwire Corporation
- Sierra Space
- SpaceX

各企業が検討する内容には、電力、マイニング/ISRU、PNT、トランジット、モビリティ、ロジスティクス、建設/ロボティクスに関するものが含まれている。以下に、いくつか公開されている各企業の取り組み内容について記載する。

- CisLunar Industries: 月面資源に関する統合フレームワークである METAL (Material Extraction, Treatment, Assembly & Logistics) フレームワークの開発
- Firefly Aerospace: 軌道上宇宙船ハブのフレームワーク開発
- Sierra Space: 月面での酸素抽出技術の商業月面インフラへの統合
- Northrop Grumman: 月面鉄道システムに向けたコンセプト設計や必要なりソースなどの検討

他プログラムとの連携として、LunA-10 で選定された上記の企業は、2024年4月の LSIC 会合に参加し、LSIC に参画している機関向けに発表を行う予定としている。

## (2) Lunar Operating Guidelines for Infrastructure Consortium (LOGIC)

DARPA は 2023 年10月、商業的な月面インフラの相互運用基準を検討・提案することを目的としたコンソーシアムである LOGIC を設置し、産業界、学术界、政府機関の関係者による議論・検討を開始した。APL は LOGIC を運営し、コンソーシアムの技術的なリーダーシップ及び管理の役割を担っている。LOGIC では、LunA-10 の研究成果を活用し、以下の領域のための基礎技術コンセプト及び標準の策定を行うことを想定しており、検討のためのワーキンググループを設置している。

- 電力
- 通信、測位・航法・計時(PNT)
- モビリティ
- ISRU/マイニング
- ロボティクス/建設
- 市場分析

LOGIC は、NASA が主導で実施している LSII 及び LSIC と緊密に連携し、送電、通信、相対測位・航法、月面調査、シスルナ領域での交通管理などの分野における技術の相互運用性標準の開発を行うとしている。また、両活動とも APL が主要な役割を果たしており、異なる組織での活動であるものの、一定レベルでの情報共有・交換はなされていると考えるべきと思われる。

### 4.2 水素関連技術に関する海外動向調査

本節では、水素製造に関連する個別技術について、過年度の調査をベースに、国内・海外の技術・研究開発レベルが比較できるような整理を行った。

より具体的には、国内技術の優位な領域の検討に資する情報を整理するため、水素バリューチェーンの各プロセス(探査、輸送、熱抽出、掘削・水抽出、純水処理、水電解、高圧化、液化、貯蔵)に係る海外の研究開発動向について、各プロセスごとに TRL ベースでの比較整理を行った。

#### 4.2.1 米国

##### (1) ISRU に関する NASA の開発スケジュール

NASA では、ISRU について以下の 2 つの方法を並行して検討している。

- レゴリスから水を抽出する方法(Ice Mining、水素 WG で検討している水抽出に対応)
- レゴリスから酸素や金属を抽出する方法(Oxygen/Metal Extraction)

2028 年頃にどちらの方法を用いて Pilot Plant を建設するかを決定し、2030 年に Pilot Plant を建設する計画となっている(図 4-4)。

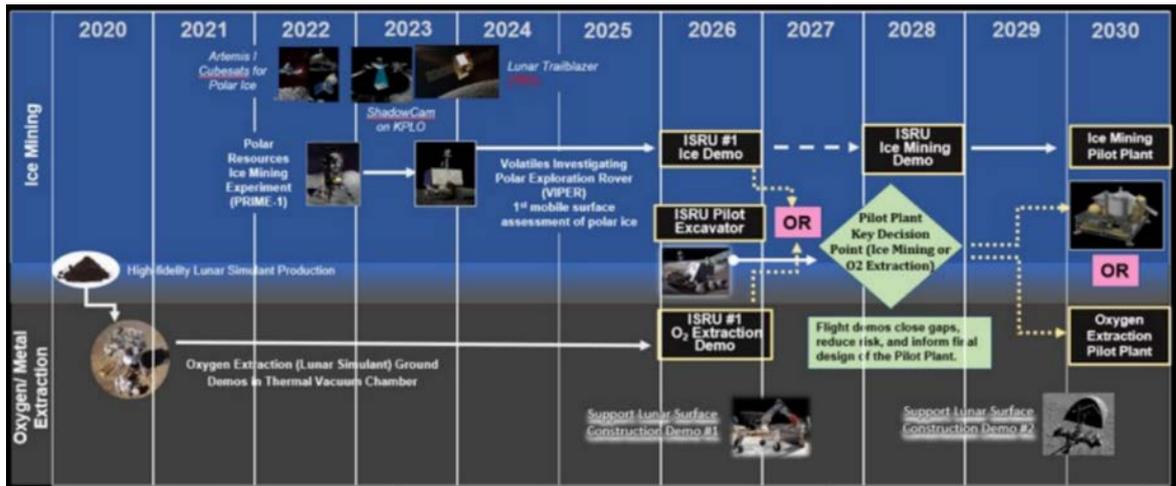


図 4-4 NASA が検討している ISRU の研究開発スケジュール

出所) <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006072/downloads/LIVE-ISRU%20-Overview-RevB.pdf>  
(2024年3月31日閲覧)

NASA の ISRU に関する研究開発の方針については、2020 年 7 月時点では ice mining を優先度高く開発を進める想定だったが、2022 年 9 月時点には ice mining と oxygen extraction を並行して開発を進める方針へシフトしている(表 4-1 参照)。

これは、2022 年 7 月に VIPER の打ち上げの延期の決定がなされたこと<sup>34</sup>を受け、VIPER のミッション成果に大きく影響を受ける ice mining について、VIPER の成果確認後に進める方針としたと推察される。

表 4-1 NASA における ISRU に関する研究開発方針

| 日時        | 文書名   | 内容   |
|-----------|---|--|
| 2020/7/15 | Lunar ISRU Development and Flight Strategy(*1)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>“Current Plan: Lead with Water Mining/Follow with O<sub>2</sub> from Regolith Dual Path”とあることから、2020年7月時点ではice miningの方を優先度高く開発を進めていく想定であったことが読み取れる。</li> </ul> <p>➤ <b>Current Plan: Lead with Water Mining/Follow with O<sub>2</sub> from Regolith Dual Path</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perform PRIME-1 CLPS and VIPER to begin to understand lunar polar water availability</li> <li>- Develop O<sub>2</sub> from Regolith high-fidelity ground demo in a TVC in parallel</li> <li>- Utilize results from these activities to inform the 2-3 subsystem tech demos in the 2024-2026 timeframe which will culminate in the scalable pilot.</li> </ul>  |
| 2022/9/14 | ISRU Presentation to Decadal Survey on Biological and Physical Sciences Research (*2) | <ul style="list-style-type: none"> <li>“multiple options are being pursued in parallel”とあることから、<b>ice mining</b>と<b>oxygen extraction</b>は並行して研究開発がなされる(どちらを優先度高く開発するものではない)ことが読み取れる。</li> <li>また、ice miningの開発スケジュールにはVIPERのミッションの成功に大きく依存する旨も記載されていることから、VIPERミッションの成果を踏まえ、どちらを採用するか決定するものと推察される。</li> </ul> <p>• <b>Technologies are being developed for both Oxygen/Metal Extraction and Polar Ice Mining</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Due to uncertainty in form, concentration, and distribution of polar water/volatiles, multiple options are being pursued in parallel until further resource information is available for down selection</li> <li>- The Mining Water path schedule is dependent on VIPER mission success</li> <li>- Technologies and demonstrations are aimed at supporting scale up for commercial operations.</li> </ul> |

出所)各種公開資料に基づき MRI 作成

\*1:<https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/524-Presentation%20from%20ISRU%20Monthly%20Meeting%20-%202020%2007%20July.pdf> (2024年3月1日閲覧)

\*2:<https://www.nationalacademies.org/documents/embed/link/LF2255DA3DD1C41C0A42D3BEF0989ACAEC3053A6A9B/file/D0E020437DFBFF29EF54F9C61CD6A0324314074F1FB5?noSaveAs=1> (2024年3月1日閲覧)

<sup>34</sup> <https://www.nasa.gov/solar-system/nasa-replans-clps-delivery-of-viper-to-2024-to-reduce-risk-2/> (2024年3月1日閲覧)

## (2) 水素バリューチェーンに関連する NASA の研究開発プロジェクトの全体像

(1)にて述べた ice mining(レゴリスから水を抽出する方法)について、NASA が取り組んでいる研究開発プロジェクトの全体像を以下に示す。図 4-5 に示す通り、プロセスごとに複数の研究開発プロジェクトが実施されている。

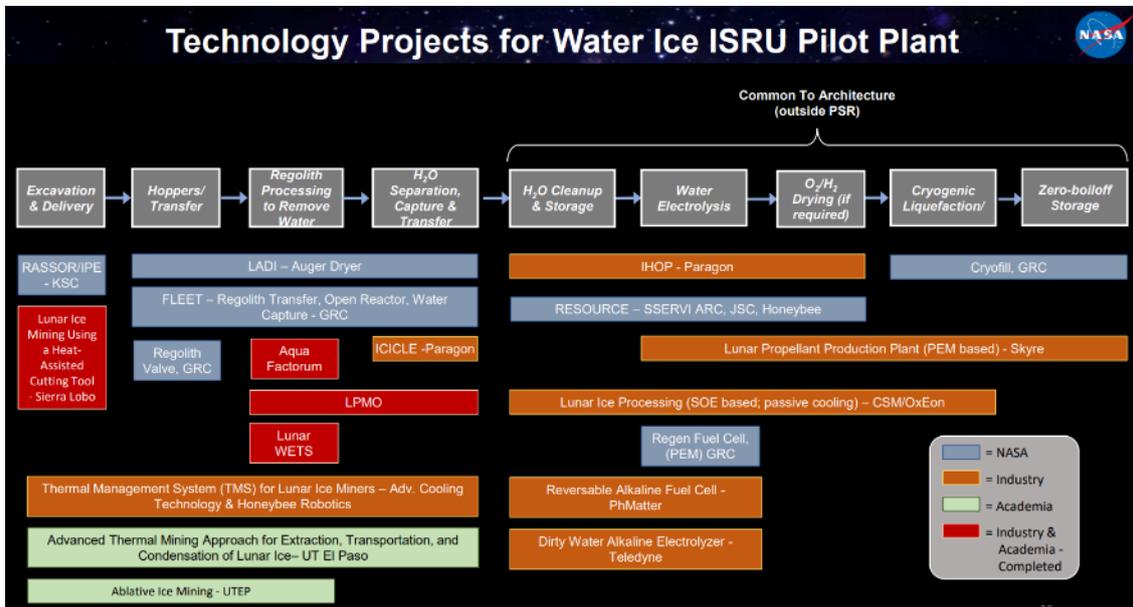


図 4-5 水素バリューチェーンに関連する NASA の研究開発プロジェクトの全体像

出所) [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220004617/downloads/LIVE-ISRU%20Envisioned%20Future%20Priorities-Lux\\_SandersV3.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220004617/downloads/LIVE-ISRU%20Envisioned%20Future%20Priorities-Lux_SandersV3.pdf) (2024年3月1日閲覧)

なお、NASA が実施する研究開発プログラムは、図 4-6 に示す通り、低い TRL から高い TRL まで幅広いレベルの技術を対象に存在している。

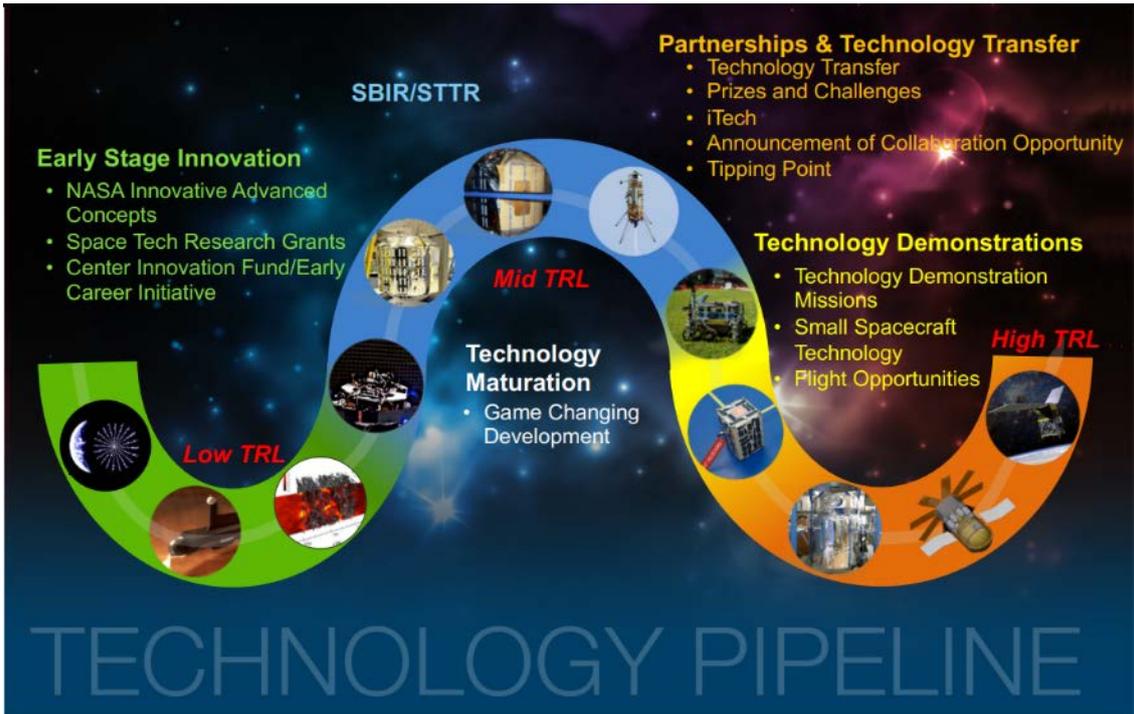


図 4-6 NASA が実施する研究開発プログラムの全体像

出所) <https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/524-Presentation%20from%20ISRU%20Monthly%20Meeting%20-%202020%2007%20July.pdf> (2024年3月8日閲覧)

### (3) プロセスごとの研究開発プロジェクトの詳細

ここでは、バリューチェーンのプロセス(掘削・水抽出・純水処理・水電解・液化プロセス)毎に、NASA が取り組んでいる研究開発プロジェクトの詳細について述べる。なお、本パートは NASA の資料「NASA Lunar In-Situ Resource Utilization Technology Overview」をもとに整理を行っている。

#### 1) 掘削プロセス

掘削プロセスについては、図 4-7 に示す通り、5 件のプロジェクトが存在している。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL5 のプロジェクトが存在する。

5 件のプロジェクトのスコープは、以下の通りとなっている。

- より効率的に掘削するための技術: 4 件
  - サーマルマイニング
  - RCD (Radiant Gas Dynamic) マイニング<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Trans Astra 社により発明された、高周波、マイクロ波、赤外線を組み合わせて使用し、深さを制御した加熱プロファイルで永久凍土やその他のタイプの氷の堆積物を加熱する技術。マイクロ波加熱を用いたサーマルマイニングは、事前に掘削が必要であったり、レゴリスが冷たい場合に水が再凍結するという問題があるが、RCD マイニングはそのような問題を解決できる。

- 熱アシスト切断技術<sup>36</sup>
- アブレイティブ・アーク(Ablative Arc)採掘技術<sup>37</sup>
- 掘削ローバーの熱管理システム開発に関する技術:1件

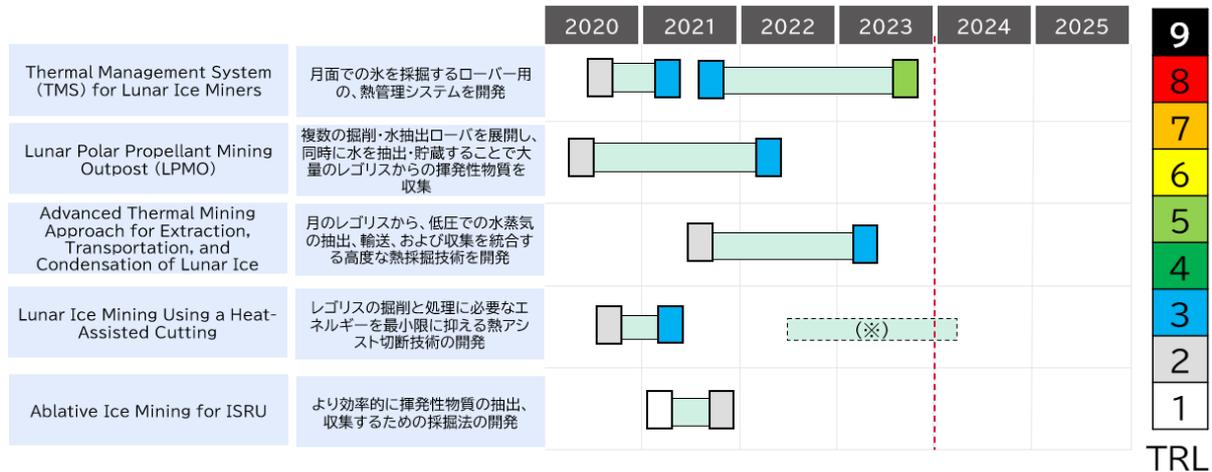


図 4-7 掘削プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト

出所) <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006072/downloads/LIVE-ISRU%20-Overview-RevB.pdf> を基に MRI 作成

(※)は将来的に Funded Work として立ち上がる可能性があることを示す。(現時点では Funded Work として動いていないため、点線で示している。)

## 2) 水抽出プロセス

水抽出プロセスについては、図 4-8 に示す通り、6 件のプロジェクトが存在している。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL6 のプロジェクトが存在する。

公開情報がない 1 件のプロジェクトを除く 5 件のプロジェクトのスコープは、以下の通りとなっている。

- 氷→水蒸気への相変化により、水を捕獲する技術:3件
  - (固定式または可動式の)ドーム状の容器を用いて、地中にあるレゴリスをマイクロ波加熱することにより水を抽出する技術、及び氷のレゴリスを容器に入れて、加熱・抽出する技術
  - レゴリスを加熱されたパイプに通すことで、レゴリスに含まれる水蒸気を抽出する技術
  - 下流の純水処理・水電解システムとも連携しつつ、レゴリスから水抽出するための技術
- レゴリス中に含まれる氷の粒を、粒のまま取り出す技術<sup>38</sup>:1件
- 水抽出に関わる基礎的技術:1件

<sup>36</sup> 加熱によりレゴリスを溶かしつつ掘削する技術。加熱しながら掘削することで、レゴリスの掘削と処理に必要なエネルギーを最小限に抑えることができる。

<sup>37</sup> 電気アークを使用して表面物質をアブレーションすることで、自由にイオン化した粒子が生成させ、その粒子を質量によって物質グループに分類の上、電磁場によって関連するコレクターに運ぶ技術。揮発性物質の輸送・収集は、サーマルマイニング技術での希薄な中性粒子のランダムウォークよりも制御されるため、サーマルマイニングよりも効率的であり、粒子の回収率が向上する。

<sup>38</sup> レゴリスを加熱して水蒸気を抽出する方法と比較して、氷→水の相変化を生じさせなくて済むことから、低エネルギーでの実現が可能というメリットがある。

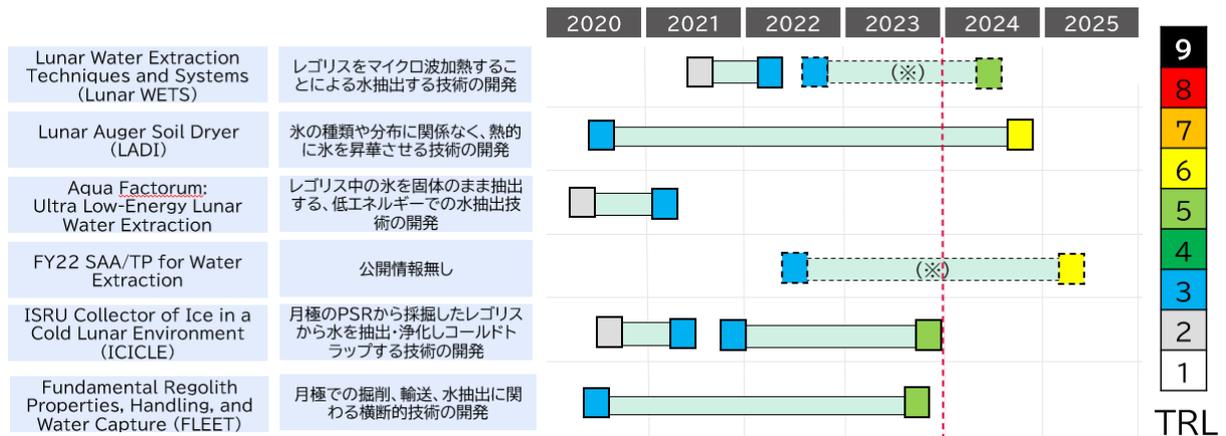


図 4-8 水抽出プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト

出所) <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006072/downloads/LIVE-ISRU%20-Overview-RevB.pdf> を基に MRI 作成

(※)は将来的に Funded Work として立ち上がる可能性があることを示す。(現時点では Funded Work として動いていないため、点線で示している。)

### 3) 純水処理・水電解・液化プロセス

図 4-9 に示す通り、純水処理プロセスについては1件、水電解プロセスについては5件、液化プロセスについては1件のプロジェクトが存在している。最も TRL が高いプロジェクトとして、純水処理・水電解・液化プロセス全てにおいて TRL5 のプロジェクトが存在する。

水電解プロセスのプロジェクト5件のスコープは、以下の通りとなっている。

- 純水処理ユニットと水電解ユニットを統合するための技術:1件
- 電解効率を上げるための技術:1件
- 不純物を含んだ水でも水電解可能にする技術:1件
- 燃料電池としての利活用も可能とするための技術:2件

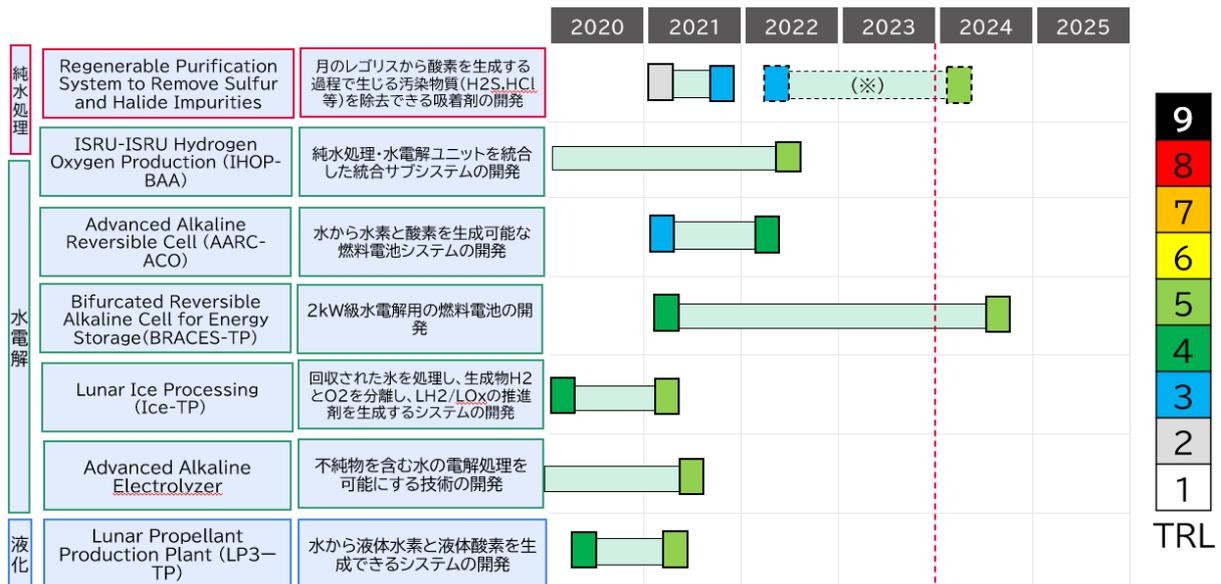


図 4-9 純水処理・水電解・液化プロセスにおける NASA の研究開発プロジェクトリスト

出所) <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006072/downloads/LIVE-ISRU%20-Overview-RevB.pdf> を基に MRI 作成

(※)は将来的に Funded Work として立ち上がる可能性があることを示す。(現時点では Funded Work として動いていないため、点線で示している。)

#### 4) まとめ

ここまで述べた整理結果を踏まえた分析を以下に示す。

- NASA が実施している各プロセスの研究開発プロジェクトは、現時点では地上で対応が可能な TRL5~6が目標となっているが、今後数年の内に宇宙/月面での実証を目指す TRL7~9を目標としたプロジェクトが始動することが予想される。
- 2024年 11 月に VIPER の打ち上げが予定されており、VIPER のミッションで得られた知見により、米国での掘削・水抽出の研究開発が大きく進む可能性がある。
- NASA では ISRU について ice mining と oxygen extraction の 2 つの方式を並行して検討している。昨年度の調査結果からは、欧州では oxygen extraction を進めている傾向も確認されている。我が国では、現時点では oxygen extraction についての研究開発は盛んとは言いが、ISRU は持続的な活動に不可欠なものであり、複数の方式を検討しておくことはリスクヘッジの面と月面開発の実現可能性を高める面の両方の効果があると考えられる。
- NASA においても現時点では多くのプロジェクトが TRL6以下であり、宇宙/月面実証には至っておらず、我が国と同様の状態と言える。一方で、NASA では、本日の紹介事例以外にもコンテスト形式の活用なども行われており、また今後は CLPS 等のプログラムを活用しつつ月面実証が進むと予想され、我が国を含む他国と技術レベルに大きな差がつく可能性が高い。

#### 4.2.2 欧州

##### (1) ISRU に関する ESA の開発スケジュール

ESA は将来計画を示した“Terra Nova 2030+ Strategy Roadmap”の中で、2030 年前

半に ISRU demo、2035 年後半に ISRU Pilot Plant の建設に言及している。

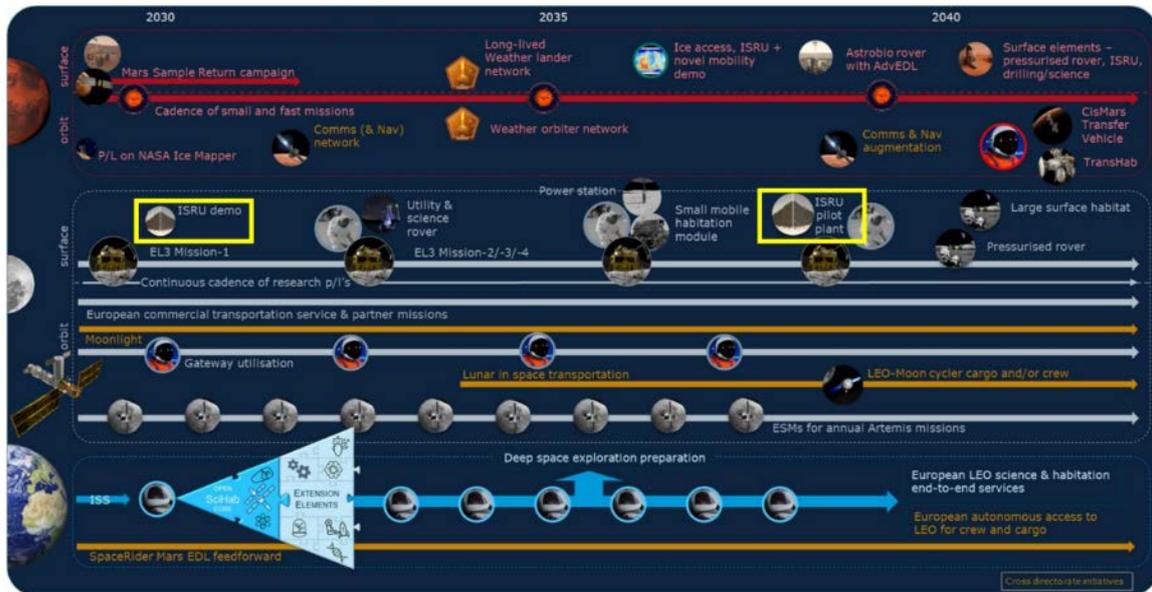


図 4-10 ESA の月面での ISRU に関する取り組みスケジュール

出所) [https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terrae\\_Novae\\_2030+strategy\\_roadmap.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf) を基に MRI 追記

## (2) ESA における研究開発プログラムの全体像

ESA が主導する研究開発プログラムの全体像を図 4-11 に示す。低い TRL を対象とするプログラムから高い TRL を対象とするプログラムまで、様々な研究開発プログラムが存在する。

また、今回取り上げた調査対象の R&D プロジェクトと、それらを所管するプログラムの対応関係をまとめたものを図 4-12 に示す。詳細は後述するが、GSTP は TRL9 までの R&D プロジェクトも扱うプログラムである一方、現時点では ISRU 関連のプロジェクトでは TRL7-9 のものが存在していない。

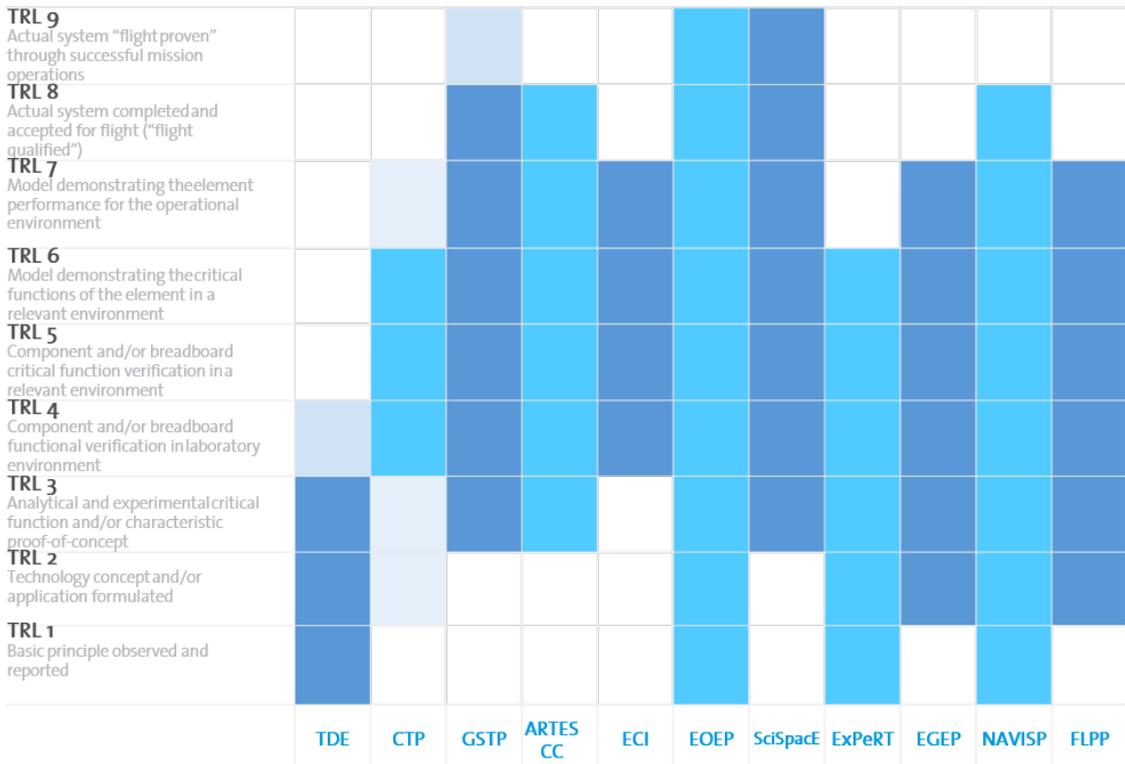


図 4-11 ESA における研究開発プログラムの全体像

出所) <https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html> (2024年3月8日閲覧)

|  |  |        |  |     |
|--|--|--------|--|-----|
| Discovery, Preparation and Technology Development (DPTD) Programme | Discovery element  | TRL1~5 | 成熟度の低い技術を含む破壊的アイデアが形成する初期的な研究・開発を対象とする。  | 7件  |
|  | Technology Development Element (TDE)                       | TRL1~4 | 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。                                   | 10件 |
| General Support Technology Programme (GSTP)                        |  | TRL3~9 | 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。                       | 4件  |
| European Exploration Envelope Programme (E3P)                      | Exploration, Preparation, Research and Technology (ExPeRT) | TRL3~6 | 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。                     | 5件  |
|  | Spaceships (Spaceship-EAC)                                 | TRL1~4 | 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。                | 5件  |
|  | Science in Space Environment (SciSpacE)                    | TRL3~9 | 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。 | 0件  |
|  | Cornerstone 3 (CS3)  | TRL5~9 | 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、月ロ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。                      | 3件  |

図 4-12 ESA における研究開発プログラムと今回調査対象の個別プロジェクトとの対応関係

出所) 公開資料に基づき MRI 作成

### (3) ESA における ISRU バリューチェーンの定義

ESA では、ISRU バリューチェーンを表 4-2 のように定義している。本バリューチェーンは、月だけではなく火星等においても適用できるものとしている。また、ISRU の対象物質についても、水素に限定されるものではなく、その他の物質にも適用可能としている。表中には現在日本で検討されている水素バリューチェーンとの対応も示しているが、大きな齟齬はないことが分かる。

表 4-2 ESA における ISRU バリューチェーンの定義

| プロセス名   | プロセスの概要   | 日本における水素バリューチェーンとの対応 |
|---|---|----------------------|
| 探査・確立<br><i>Prospect and Establish</i>              | 鉱物学、物理的特性、現地の物質のばらつきなど、原料の特性や月や惑星の地質に関する情報を把握するプロセス。<br>豊富な資源が存在する地域が特定され、それに応じて地図が作成されれば、ISRU のための着陸地点を確立することができる。 | 探査                   |
| 採掘・輸送<br><i>Mine and Transport (Excavation)</i>     | 処理前のレゴリス原料の掘削、運搬を行うプロセス。<br>(後段のプロセスである)選鉱・精製システムによっては、特定の輸送手法を必要とするため、輸送プロセスは重要な要素である。                             | 輸送<br>掘削             |
| 選鉱<br><i>Prepare (Beneficiation)</i>                | 有用性が低い、またはその後の抽出を妨害する可能性のある他の成分を除去することで、原料中の目的成分の質量分率を増加させるプロセス。<br>例えば、資源抽出のためのレゴリスの前処理が該当する。                      | 純水処理                 |
| 生産・精製(抽出)<br><i>Produce and Refine (Extraction)</i> | 目的生成物(例:月のレゴリスからの酸素や金属等)を抽出するための還元プロセス。<br>高価値製品の分離と精製や、ユーザーの要求に応じた製品の精製も行われる。                                      | 水抽出・熱抽出<br>水電解       |
| 保管・供給<br><i>Store and Supply</i>                    | 有用な製品(推進剤と消耗品)の貯蔵と環境管理を行うプロセス。<br>最終ユーザーへの補給/再充填提供のための標準的なインタフェースとなる。<br>現地製造や建設のための、加工前の原料物質の移送を行う。                | 高圧化<br>液化<br>貯蔵      |

出所) [https://esamultimedia.esa.int/docs/business\\_with\\_esa/ISRU\\_Campaign\\_Technology\\_Roadmap\\_ESA-E3P-ISRU-MO-002.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/business_with_esa/ISRU_Campaign_Technology_Roadmap_ESA-E3P-ISRU-MO-002.pdf) を基に MRI 作成

### (4) プロセスごとの研究開発プロジェクトの詳細

本章では、各バリューチェーンプロセス(掘削・水抽出・純水処理・水電解・液化プロセス)毎に、ESA が取り組む研究開発プロジェクトの詳細について述べる。なお、本パートは ESA の資料「ISRU Campaign Technology Roadmap Update」をもとに整理を行っている。

#### 1) 掘削・水抽出・熱抽出プロセス

図 4-13 に示す通り、掘削プロセス(赤枠)については4件、水抽出・熱抽出プロセス(緑枠)については 2 件のプロジェクトが存在している。最も TRL が高いプロジェクトとしては、掘削プロセスは TRL6、水抽出・熱抽出プロセスは TRL5 のプロジェクトが存在する。

それぞれのプロセスのプロジェクトのスコープは以下の通りとなっている。

- 掘削プロセス
  - ドリルの開発(より深くまで掘るための技術):4件
- 水抽出・熱抽出プロセス
  - 氷→水蒸気への相変化により、水を捕獲する技術:2件

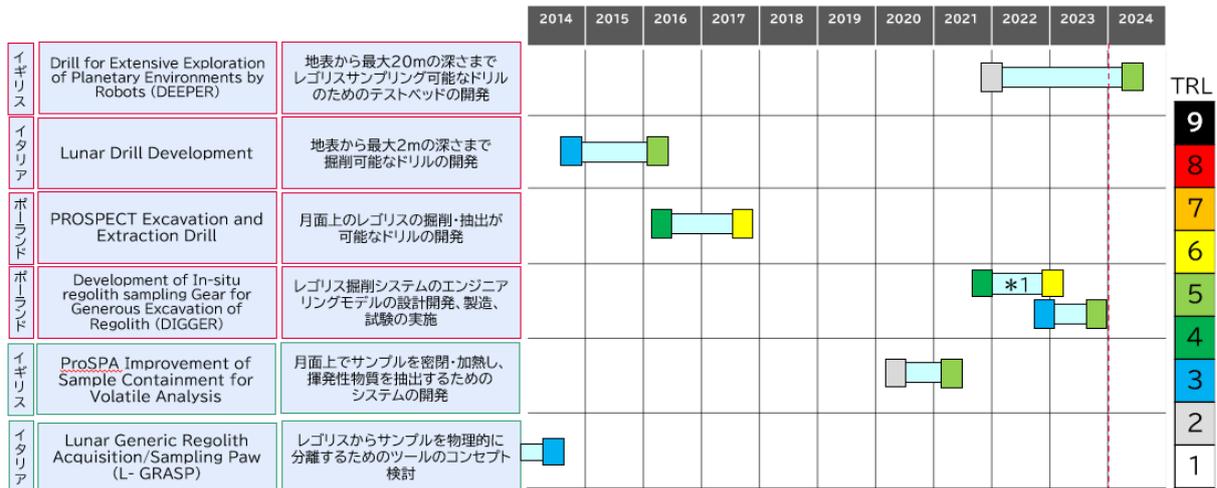


図 4-13 掘削・水抽出・熱抽出プロセスに関する ESA の取り組み

出所) [https://esamultimedia.esa.int/docs/business\\_with\\_esa/ISRU\\_Campaign\\_Technology\\_Roadmap\\_ESA-E3P-ISRU-MO-002.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/business_with_esa/ISRU_Campaign_Technology_Roadmap_ESA-E3P-ISRU-MO-002.pdf) を基に MRI 作成

\*1: 目標到達 TRL が6となっていたが、actual delay との記載があり、後続プロジェクトが立ち上がっている状況である。

\*2: 赤枠は掘削プロセス、緑枠は水抽出・熱抽出プロセスを示す。

## 2) 純水処理・水電解・液化・貯蔵プロセス

図 4-14 に示す通り、純水処理プロセス(赤枠)については 1 件、水電解プロセス(緑枠)については 1 件、液化・貯蔵プロセス(青枠)については 3 件のプロジェクトが存在している。最も TRL が高いプロジェクトとしては、純水処理プロセスでは TRL3、水電解プロセスでは TRL3、液化・貯蔵プロセスでは TRL4 のプロジェクトが存在する。

それぞれのプロセスにおけるプロジェクトのスコープは以下の通りとなっている<sup>39</sup>。

- 水電解プロセス
  - 高圧化した条件下での、電気分解システムの開発<sup>40</sup>:1件
- 液化・貯蔵プロセス
  - 推進剤貯蔵用のタンクの開発:1件
  - 極低温環境における材料特性の研究:1件
  - 液化・貯蔵に関する横断的な研究:1件

<sup>39</sup> 純水処理プロセスのプロジェクト(1件)は公開情報がないため、ここでは省略している。

<sup>40</sup> メンテナンスの観点から、コンプレッサ無しでのシステム実現が求められるため、高圧化した状態でも電気分解可能なシステムを開発している。

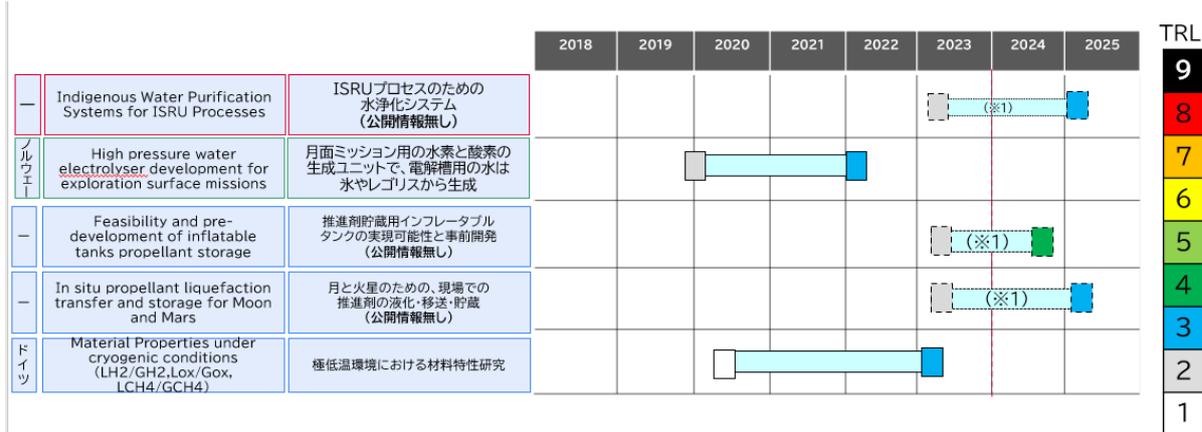


図 4-14 純水処理・水電解・液化・貯蔵プロセスに関する ESA の取り組み

出所) [https://esamultimedia.esa.int/docs/business\\_with\\_es/ISRU\\_Campaign\\_Technology\\_Roadmap\\_ESA-E3P-ISRUMO-002.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/business_with_es/ISRU_Campaign_Technology_Roadmap_ESA-E3P-ISRUMO-002.pdf) を基に MRI 作成

\*1: 将来的にプロジェクトが立ち上がる可能性があることを示す。(2023 年 4 月時点ではプロジェクトとして動いていないため、点線で示している。)

### 3) まとめ

ここまで述べた整理結果を踏まえた分析、および米国と欧州の差異に関する分析を以下に示す。

- 今回取り上げた ESA のレポートは、水素に特化したものではなく、ISRU 全般について ESA の取り組みを整理したものである。ESA は水素以外の資源についても ISRU の可能性を探っているものと推察される。
- TRL の観点では、本調査対象で最も高い TRL は6であり、宇宙実証が必要となる TRL7 以上を目標としているプロジェクトは見られない。この点は NASA も同様の結果であった。TRL が低めの技術を対象としているプログラムが主要な調査対象となっていることもあるが、コストが大幅に増加する宇宙実証の対象を幅広い候補から選定しようとしている意図も推察される。
- ISRU の観点では、NASA は①レゴリスから水を抽出 (Ice Mining) と②レゴリスから酸素や金属を抽出 (Oxygen/Metal Extraction) の両方を並行して検討していたのに対し、ESA では②に重きを置いているという違いがみられる。
- ISRU Pilot Plant の実現時期については、NASA は2030年、ESA は2035~2040 年を目標としている。ESA は少し遠い年次が目標となっており、今回の調査対象の後継プロジェクトがどのように変わっていくか、注視が必要と考える。

## 4.2.3 中国

中国における ISRU の取り組みについてはあまり情報が公開されていない状況であるが、2023 年 6 月に中国の研究者 Peng Zhang 氏より ISRU に関する論文 “Overview of the Lunar In Situ Resource Utilization Techniques for Future Lunar Missions<sup>41)</sup>” が公表されている。ここでは、当該論文についてその概要を述べる。

<sup>41)</sup> <https://spj.science.org/doi/10.34133/space.0037> (2024 年 3 月 1 日閲覧)

本論文では、諸外国の動向について述べた上で、中国としての ISRU に関して取るべき戦略について提言されている。本論文では、「水、酸素、食料を含む生存に必要な物質は、他の事柄よりも優先されるべきである」との考え方から、水・酸素・食料を生成するために必要となる物質・技術を図 4-15 の通り整理している。

なお、イルメナイト( $FeTiO_3$ )の水素還元における化学反応式は以下の通りであり<sup>42</sup>、副産物として鉄、酸化チタンが得られる。

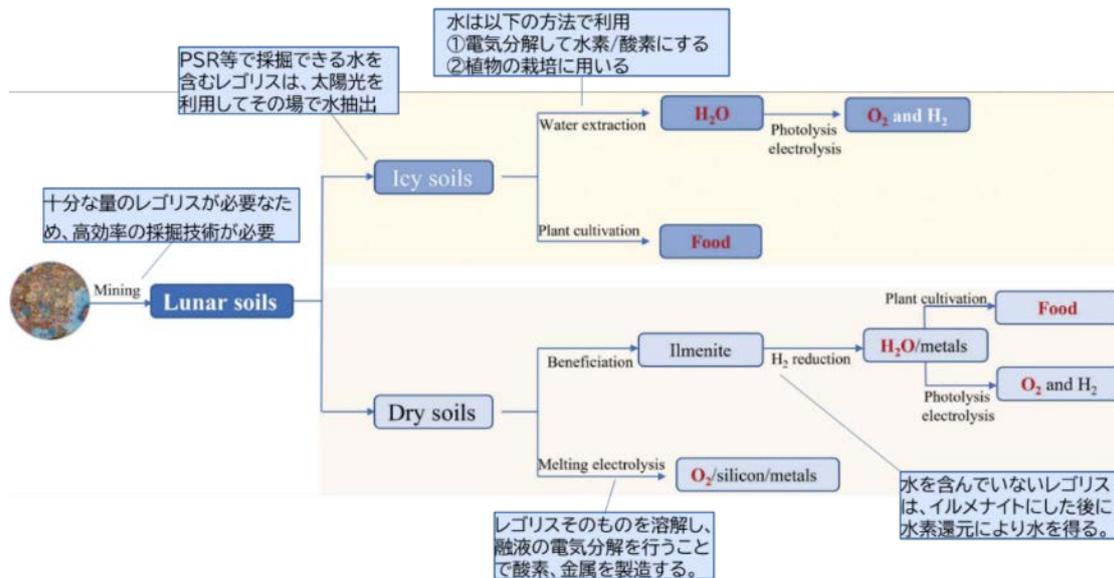
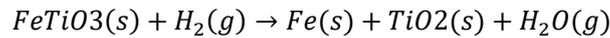


図 4-15 提案する水・酸素・食料の生成フロー

出所) <https://spj.science.org/doi/10.34133/space.0037> (2024年3月1日閲覧)を基にMRI追記

また、同論文では、中国が実施すべき ISRU のロードマップについても提言している(図 4-16 参照)。2027年までに資源探査と利活用可能性の評価、2030年までに月面上での実験、2035年までに長期滞在のために生存に不可欠な物資のパイロット規模での補給、2040年までにより大規模での補給を行うこととしている。

<sup>42</sup> <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewil7ZqEt-SEAxUnklyBHYHVDikQFnoECB8QAQ&url=https%3A%2F%2Fjaxa.repo.nii.ac.jp%2Frecord%2F13549%2Ffiles%2F63349051.pdf&usg=AOvVaw2pa35vvJYLbQ5vC5FBM-07&opi=89978449> (2024年3月8日閲覧)。なお、29トンの酸素(100名の生命維持のために必要な年間酸素量)を得るのに360トンのイルメナイト、6トンの水素が必要であり、360トンのイルメナイトを得るには約6000トンのレゴリスが必要であるとされている。

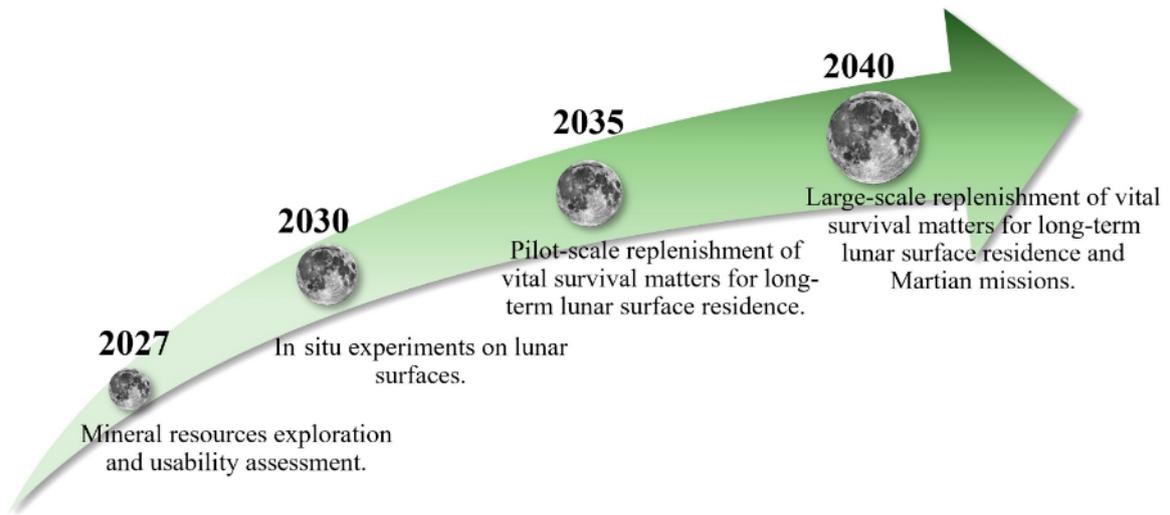


図 4-16 提案する ISRU のロードマップ

出所) <https://spj.science.org/doi/10.34133/space.0037> (2024年3月1日閲覧)

## 4.3 電力関連技術に関する海外動向調査

本節では、電力供給にかかる個別技術について、国内・海外の技術・研究開発レベルが比較できるような調査・整理を実施した。具体的には、国内技術の優位な領域の検討に資する情報を整理するため、電力供給に係る各プロセス(発電、送電、蓄電)に係る海外の研究開発動向について、主に米国の技術を中心にプロセスごとに TRL ベースでの比較整理を行った。

### 4.3.1 米国

#### (1) 電力供給に関する NASA の開発スケジュール

NASA では、月面での電力供給量及び伝送距離について月面開発の進展とともに随時拡大していく計画を立てており、以下に示すように大きく3つのフェーズに分けている。

- アルテミスベースキャンプ
  - NASA 主導でのベースキャンプの建設
  - 推進剤生成のための ISRU パイロットプラントへの電力供給を想定
- Phase  $\alpha$ 
  - 2030 年頃に月南極地域にて2MW 程度の電力供給設備を想定
  - NASA は顧客として関与
- Phase  $\Omega$ 
  - 2040 年頃に極地方に限らない GW 級の電極供給設備を想定
  - NASA は(他顧客もいる中で)小口顧客として関与

フェーズの進展によって NASA から民間へと電力供給の主体を移行していく想定をしており、アルテミスベースキャンプの段階では NASA が主導するが、Phase  $\alpha$ では顧客として関与、Phase  $\Omega$ では他の多くの民間顧客がいる中で一顧客としてのみ関与していくことが想定されている。

各フェーズにおける電力供給量及び伝送距離の関係性を図 4-17、Phase  $\alpha$ 、Phase  $\Omega$ における月面での電力供給システムの概念図を図 4-18、図 4-19 に示す。Phase  $\alpha$ では、極地方に太陽光発電、原子力発電、ラジオアイソトープ電源による発電プラント、及び蓄電設備を設置し、2MW 程度の電力を数十kmの範囲で有線・無線で送電することが想定されている。Phase  $\Omega$ では、より広範な地域に設置された MW 級太陽光発電プラント、原子力発電プラントにて発電された GW 級の電力を、1000 km級の有線・無線送電に距離において伝送することが想定されている。

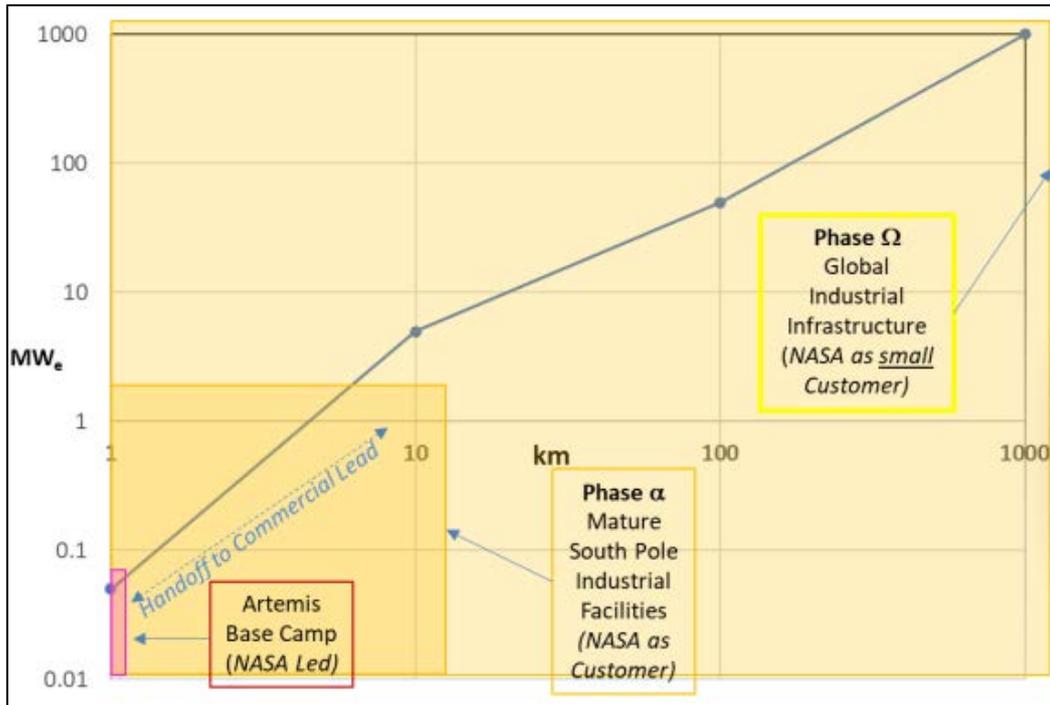


図 4-17 NASA による月面電力供給想定(縦軸:供給電力、横軸:伝送距離)

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024年3月4日閲覧)

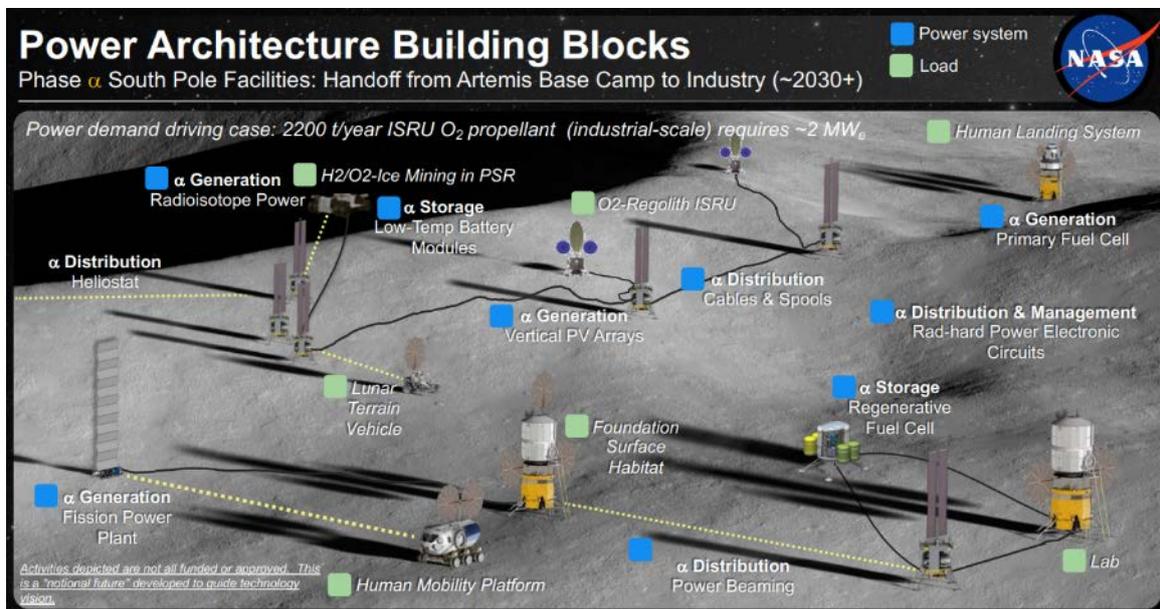


図 4-18 NASA における電力供給の将来ビジョン(Phase  $\alpha$ )

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024年3月4日閲覧)

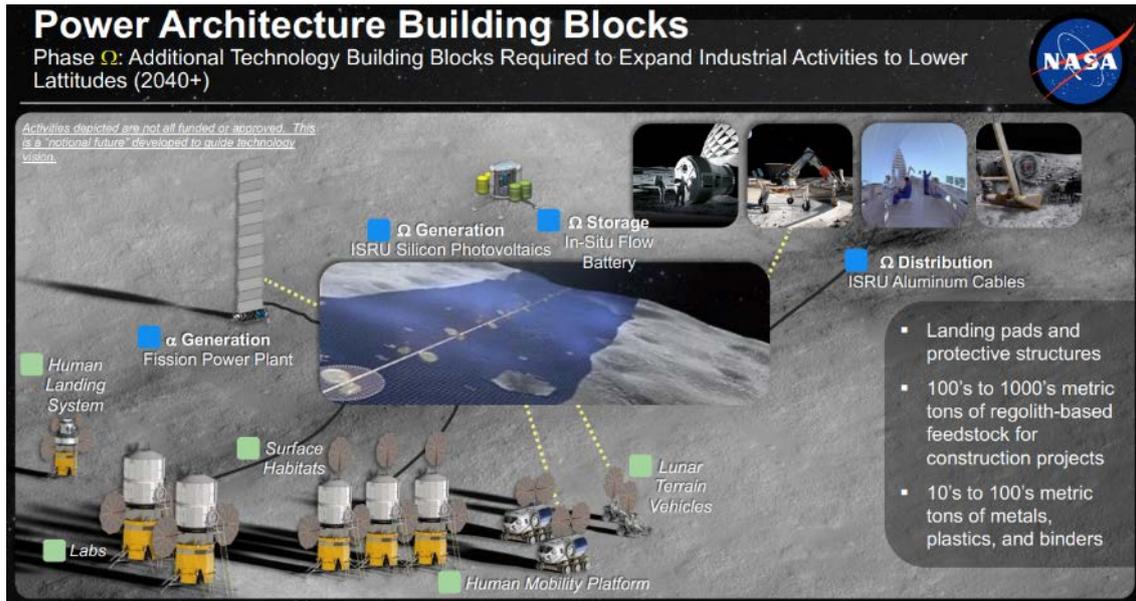


図 4-19 NASA における電力供給の将来ビジョン(Phase  $\Omega$ )

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)

## (2) NASA における電力供給に関連する研究開発要素

Phase  $\alpha$ 、Phase  $\Omega$ の実現に向けた研究開発の優先事項として、NASA は 5 つの分野、10 つの技術開発要素を特定し、それぞれについて技術ギャップを検討している。NASA は検討された技術ギャップを埋めるために、資金提供・共同研究プログラムを通じて、産業界と連携した技術開発を実施している。NASA が設定している研究開発の優先事項に関する図を図 4-20、及び各研究開発要素の Phase  $\alpha$ 、Phase  $\Omega$ での目標を整理したものを表 4-3 に示す。

各研究開発要素について、Phase  $\alpha$ に向けた定量的な目標値が定められており、技術により達成時期は異なっているが、概ね 2030 年までの TRL6 達成を目指している。また Phase  $\Omega$ に向けた目標としては、太陽光発電、二次エネルギー貯蔵について GW 級電力システム構築に向けた目標、パワーエレクトロニクス・有線送電について MW 級での100km伝送の目標がそれぞれ設定されている。



図 4-20 NASA における電力供給に関する研究開発の優先事項

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)

表 4-3 NASA における電力供給に関する研究開発要素及び目標

| No. | 技術開発要素                                     | フェーズ $\alpha$ でのTRL6達成時期と目標スペック                      | フェーズ $\Omega$ でのTRL6達成時期と目標スペック |
|-----|--|--|---------------------------------|
| A   | 持ち運び可能な月面原子力発電                             | 2028年:40kWの電力供給                                      | —                               |
| B   | 高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクス、有線送電システム              | 2030年:120–200VDC、10kWを10kmの距離で電力ロス3%/kmで伝送           | 2035年:MW級にて100kmの距離を伝送          |
| C1  | 太陽光発電                                      | 2030年:50kWの電力供給                                      | 2035年:GW級の電力供給                  |
| C2  | 超寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵                      | 2030年:MWh級の蓄電、10kWの電力供給                              | 2035年:GWh級の蓄電                   |
| D1  | 無線送電システム                                   | 2030年:10kWの電力を5kmの距離で50%の電力ロス以下で送電                   | —                               |
| D2  | 低温環境下で作動する二次電池                             | 2030年:70Kの温度環境で長期利用可能な50kWh級の蓄電<br>150Wh/kg、500回充電可能 | —                               |
| D3  | ラジオアイソトープ電源                                | 2024年:100W級を1年以上、2W/kgにて電力供給                         | —                               |
| D4  | ヘリオスタット、太陽光反射                              | 2030年:30kW級の電力供給                                     | —                               |
| D5  | 超電導ケーブル送電                                  | 2030年:5kmの距離を伝送                                      | —                               |
| E   | CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> 固体酸化物形燃料電池 | 2032年:10kWの電力供給(※)                                   | —                               |

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)を基に MRI 作成

### (3) 各プロセスでの研究開発プロジェクトの詳細

ここでは、各電力供給プロセス(発電、送電、蓄電)において、NASA が取り組んでいる研究開発プロジェクトの詳細について述べる。各プロジェクトについては、NASA の電力供給に関する研究開発方針の資料<sup>43)</sup>に記載されている現在実施中のプロジェクトを基に、調査・整理を実施した。

<sup>43)</sup> <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)

# 1) 発電

図 4-21 に示す通り、太陽光発電については、垂直ソーラーアレイや展開機構、太陽電池モジュール等の開発に関するプロジェクトが実施されている。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL6のプロジェクトが存在する。太陽光反射については、フレネルレンズを用いた太陽光反射技術に関するプロジェクトが実施されている。

原子力発電、ラジオアイソトープ電源を対象としたプロジェクトについて図 4-22に示す。原子力発電については、他プロジェクトと異なり TRL7 以降を対象とした Technology Demonstration Missions(TDM)の枠組みの中で実施されており、2028 年までに TRL8 を達成することを目標として、月面における原子力発電システムの開発が実施されている。ラジオアイソトープ電源については、スターリングエンジンを利用した技術について、2026~2028 年頃までに TRL6を達成することを目標としてプロジェクトが実施されている。

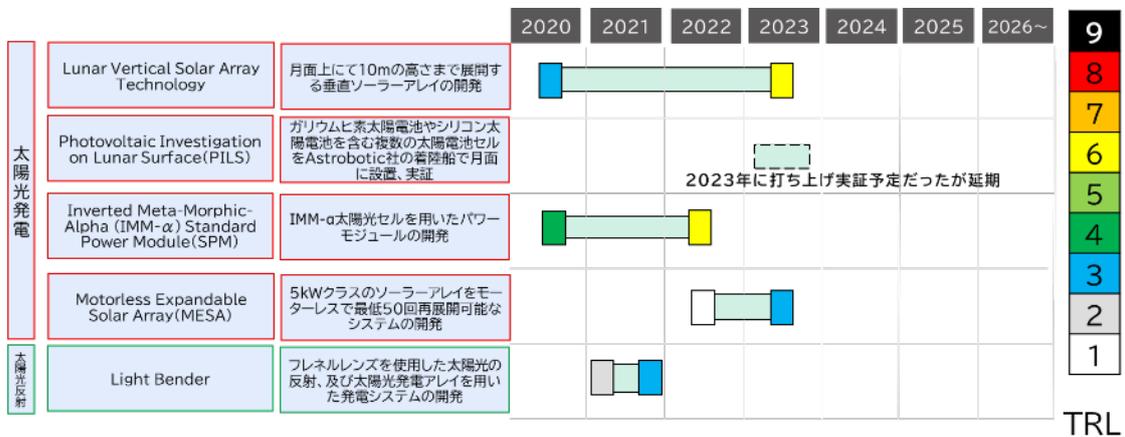


図 4-21 発電(太陽光発電、ヘリオスタット・太陽光反射)に関する NASA の取り組み

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)、その他公開資料を基に MRI 作成

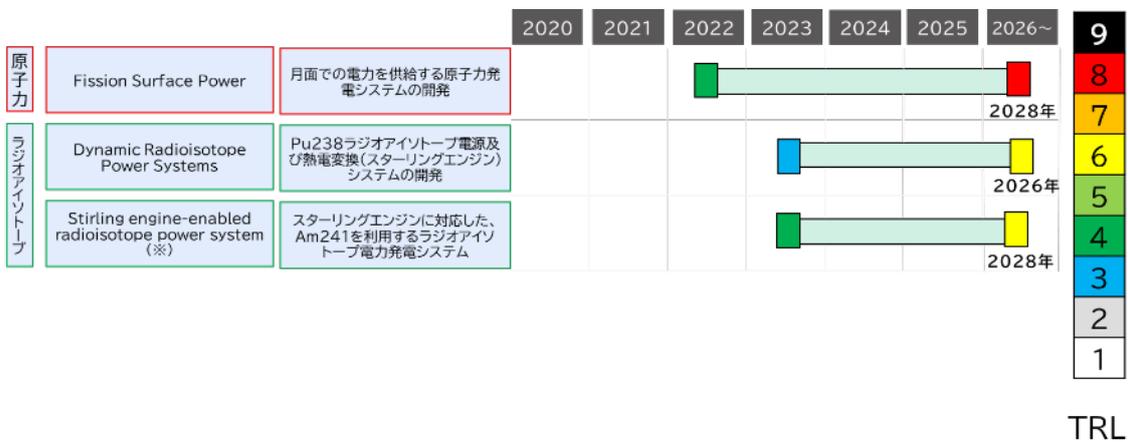


図 4-22 発電(原子力発電、ラジオアイソトープ電源)に関する NASA の取り組み

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024 年 3 月 4 日閲覧)、その他公開資料を基に MRI 作成

## 2) 送電

有線送電、無線送電を対象としたプロジェクトについて、図 4-23 に示す。有線送電については、月面で使用するための高耐久・軽量伝送ケーブルの開発が実施されている。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL6のプロジェクトが存在する。無線送電については、レーザーによる電力伝送システムの開発が実施されている。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL5のプロジェクトが存在する。

パワーエレクトロニクス関連の技術を対象としたプロジェクトについて、図 4-24 に示す。パワーエレクトロニクスについては、耐環境性能(放射線、極低温)を有するダイオードや DC-DC コンバータ、ルーターなどの開発が実施されている。最も TRL が高いプロジェクトとしては、TRL6のプロジェクトが存在する。

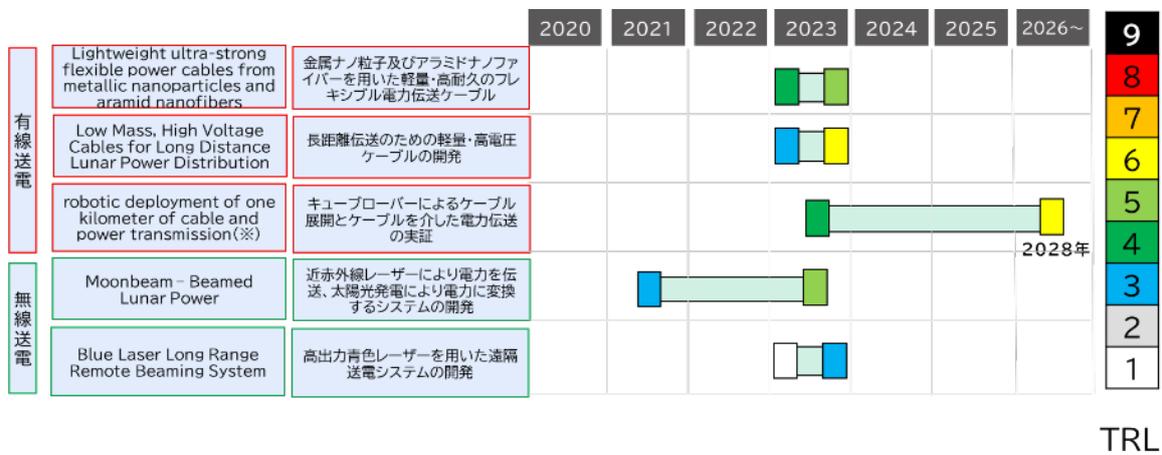


図 4-23 送電(有線送電・無線送電)に関する NASA の取り組み

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024年3月4日閲覧)、その他公開資料を基に MRI 作成

※Tipping Point プログラムの標準的な TRL として記載(提案時 TRL4、目標 TRL6 以上)

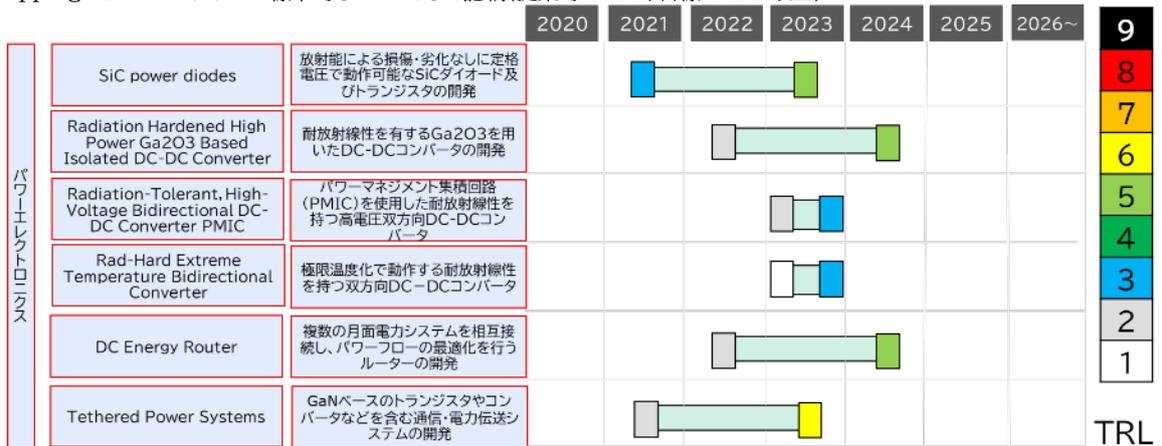


図 4-24 送電(パワーエレクトロニクス)に関する NASA の取り組み

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024年3月4日閲覧)、その他公開資料を基に MRI 作成

### 3) 蓄電

蓄電技術を対象としたプロジェクトについて、図 4-25 に示す。蓄電池については、「超寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵」、「低温環境下で作動する二次電池」、「CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 固体酸化物形燃料電池」の3つの研究開発要素が含まれている。

「超寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵」については、水⇒水素・酸素、水素・酸素⇒水の双方向変換が可能な技術を含む燃料電池の開発が実施されている。最もTRLが高いプロジェクトとしては、TRL6のプロジェクトが存在する。「低温環境下で作動する二次電池」については、極低温下でも動作可能なりチウムイオン電池の開発が実施されている。最もTRLが高いプロジェクトとしては、TRL3のプロジェクトが存在する。「CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 固体酸化物形燃料電池」については、月面上の資源から発電可能となる固体酸化物形燃料電池の開発が実施されている。最もTRLが高いプロジェクトとしては、TRL6のプロジェクトが存在する。

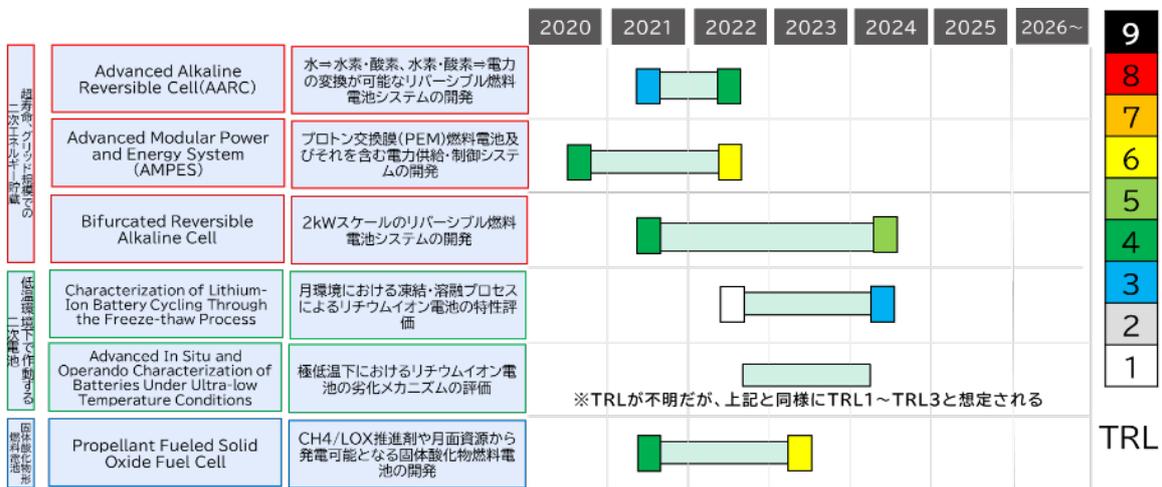


図 4-25 蓄電に関する NASA の取り組み

出所) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/live-power-and-energy-storage-update-8-april-tagged-1.pdf> (2024年3月4日閲覧)、その他公開資料を基にMRI作成

### 4) まとめ

ここまで述べた整理結果を踏まえた分析を以下に示す。

- 多くのプロジェクトについて 2023 年が目標値となっている。これらのプロジェクトについては 2030 年までのTRL6達成に向けて後続のプロジェクトが予定されていると想定される。
- NASA の方針の中では、月面だけでなく火星面への応用についても目標の中に含まれており、現時点で「原子力発電」、「高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクス、有線送電システム」、「CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 固体酸化物形燃料電池」の3つについては、具体的に火星面も含めた適用に向けた開発を行う旨が記載されている。今後これらの技術については、火星面適用に向けた定量的な目標設定、及びそれに向けたプロジェクトが始動することが予想される。
- 太陽光発電については、Photovoltaic Investigation on Lunar Surface(PILS)プロジェクトの中で、月面実証が予定されている。当初は、Astrobotic 社の月面輸送ミッションである

Peregrine Mission 1 の中で 2023 年中の打ち上げが予定されていたが、現在は Peregrine Mission 1 のペイロードからは外され、将来の月面輸送ミッションに再割り当てされるとされている。ただし、PILS プロジェクトについては、地上での試験は既に実施されているため、近く月面実証に向けた再度の計画が行われると想定される。

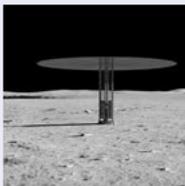
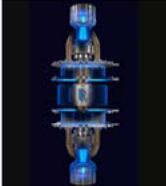
#### (4) 原子力発電に関する動向

月面での持続的な活動のためには越夜・徹夜・越昼等を行うための技術が必要であり、夜間でも発電可能な電源が求められている。そこで、米国を中心に進められている月面利用を含む宇宙用の原子力発電技術について調査・整理を行った。

調査の結果、比較的多くの情報が得られた 8 つの宇宙炉について、概要・特徴および概念図を表 4-4、表 4-5 に示す。また、宇宙用原子炉の仕様(大きさ、重量、発電量、稼働期間)、技術フェーズ、適用時期などを表 4-6 に整理して示す。これらより、概ね以下のような内容が確認できた。

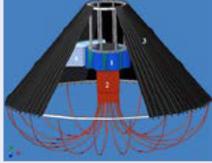
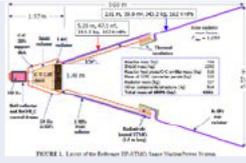
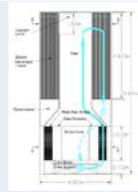
- 最大寸法はいずれも概ね 10m 未満であるが、重量は炉によって数トン～十トンを超えるものまで幅がある。また、発電量も 10kW～125MW までかなり幅がある。
- 冷却方法はヒートパイプ形式を適用しているものが多く、冷却材は液体のナトリウム、カリウムやリチウム等を使用している。
- 発電システムは、スターリングエンジン、アルカリ金属熱電装置 (AMTEC)、熱電子発電 (Thermionic conversion) などの方式が用いられている。
- 技術フェーズは Kilopower が実験段階であり、それ以外は開発中の段階である。適用時期に関して明確に月面設置目標が示されているものとしてロールスロイス社の炉が挙げられる。

表 4-4 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(1/2)

|       | ①Kilopower  | ②eVinci (WH社)   | ③ロールスロイス社   | ④HOMER-25 (LANL)   |
|-------|---|---|---|--|
| 概要・特徴 | NASAと米国エネルギー省で開発を進めている地球外惑星/衛星における長期エネルギー確保のための小型原子炉。10kW級の核分裂炉で冷却は放熱板(輻射熱)、発電システムはスターリングエンジンを使用する。 | 遠隔地や電力系統から孤立した場所でのエネルギー生成用に設計されている。また、宇宙用に試験してきたヒートパイプ技術に基づいている。40kW級の核分裂炉で、ナトリウムを用いた炉心冷却方式である。 | 核分裂のエネルギーを利用した原子炉である。月や火星の宇宙飛行のために使用され、さらに火星への移動時間の短縮も期待されている。ウラン粒子は複数の保護層に封じ込められ、極限状態に耐えることができるようになっている。 | 2000年よりロスアラモス国立研究所にてヒートパイプを用いた冷却方法を用いた宇宙用の原子炉(HOMER)に関する研究が進められている。最新のHOMER-25は25kWの核分裂炉、冷却はカリウムを使用し、発電システムはスターリングエンジンを使用する。 |
| 概念図   |                  |              |                       | <br>タイトル：マイクロ炉の全体構造                     |

出 所 ) <https://www.nasa.gov/news-release/demonstration-proves-nuclear-fission-system-can-provide-space-exploration-power/>  
<https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor>  
<https://www.space.com/rolls-royce-early-design-space-nuclear-reactor>  
<https://anstd.ans.org/NETS-2019-Papers/Track-4--Space-Reactors/abstract-41-0.pdf>

表 4-5 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(2/2)

|           | ⑤SAIRS (UNM)  | ⑥MSR (MIT)  | ⑦HP-STMCs (UNM)  | ⑧HP-ENHS (UC)  |
|-----------|---|---|--|--|
| 概要・特徴     | ニューメキシコ大学にて開発が進められているマイクロ炉である。111kW級の核分裂炉、冷却はナトリウム(ヒートパイプ形式)を使用し、発電システムはアルカリ金属熱電装置(AMTEC)を使用している。 | マサチューセッツ工科大学にて開発が進められているマイクロ炉である。900kW級の核分裂炉、冷却はリチウム(ヒートパイプ形式)を使用し、発電システムは熱電子発電(Thermionic conversion)を適用している。  | ニューメキシコ大学にて開発が進められているマイクロ炉である。110kW級の核分裂炉、冷却はリチウム(ヒートパイプ形式)を使用している。  | カリフォルニア大学にて開発が進められている原子炉である。125MW級の核分裂炉、冷却はナトリウム(ヒートパイプ形式)を使用している。   |
| イメージ図・概念図 | イメージなし  |  <p>タイトル：MSR全体のイメージ図<br/>1：コア、2：出力変換システム<br/>3：ヒートパイプ群など冷却機、4：遮蔽システム</p> |  <p>タイトル：HP-STMCsのレイアウト図</p> |  <p>タイトル：HP-ENHSのレイアウト図</p> |

出所) <https://web.mit.edu/22.33/FINAL%20REPORT/22.033%20MSR%20Final%20Report.pdf>

[https://www.researchgate.net/publication/252649761\\_Conceptual\\_Design\\_of\\_HP-STMCs\\_Space\\_Reactor\\_Power\\_System\\_for\\_110\\_kWe](https://www.researchgate.net/publication/252649761_Conceptual_Design_of_HP-STMCs_Space_Reactor_Power_System_for_110_kWe)

[https://www.researchgate.net/profile/Massimiliano-Fratoni/publication/283084286\\_Preliminary\\_Feasibility\\_Study\\_of\\_the\\_Heat-Pipe\\_ENHS\\_Reactor/links/5b0650450f7e9b1ed7e832ff/Preliminary-Feasibility-Study-of-the-Heat-Pipe-ENHS-Reactor.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Massimiliano-Fratoni/publication/283084286_Preliminary_Feasibility_Study_of_the_Heat-Pipe_ENHS_Reactor/links/5b0650450f7e9b1ed7e832ff/Preliminary-Feasibility-Study-of-the-Heat-Pipe-ENHS-Reactor.pdf)

表 4-6 宇宙用原子炉調査結果まとめ

| 名称              | 開発国  | 種類<br>(全て宇宙用) | 仕様                         |                 |       |      | 技術フェーズ | 適用時期            |
|-----------------|------|---------------|----------------------------|-----------------|-------|------|--------|-----------------|
|                 |      |               | 大きさ                        | 重量              | 発電量   | 稼働期間 |        |                 |
| kilopower       | アメリカ | 宇宙小型炉         | -                          | 全体：<br>1500kg   | 10kW  | -    | 実験段階   | -               |
| eVinci (WH社)    | アメリカ | マイクロ炉         | -                          | -               | 40kW  | 10年  | 開発中    | -               |
| ロールスロイス社        | イギリス | 宇宙原子炉         | -                          | -               | -     | -    | 開発中    | 2029年<br>月面設置目標 |
| HOMER-25 (LANL) | アメリカ | マイクロ炉         | -                          | -               | 25kW  | -    | 開発中    | -               |
| SAIRS (UNM)     | アメリカ | マイクロ炉         | -                          | -               | 111kW | -    | 開発中    | -               |
| MSR (MIT)       | アメリカ | マイクロ炉         | 原子炉：<br>直径4.8m,<br>長さ3.34m | 全体：<br>6500kg   | 900kW | 5年   | 開発中    | -               |
| HP-STMCs (UNM)  | アメリカ | マイクロ炉         | 9.6m                       | 全体：<br>4260.7kg | 110kW | -    | 開発中    | -               |
| HP-ENHS (US)    | アメリカ | 宇宙原子炉         | 原子炉：<br>直径4m,<br>長さ9m      | 全体：<br>26633kg  | 125MW | -    | 開発中    | -               |

(注記)表中の“-“は調査で確認が出来なかったもの  
出所)大林組

## 4.4 ベンチマーク調査

前節までの結果に日本の取組みを追加し、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。結果を順次示す。なお、日本における取組は、JAXA の探査ハブ殿の探査ハブ共同研究に関する取組みの内、公開できる取組みのみをピックアップしているため、日本の取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。

### 4.4.1 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 4-26 に示す。NASA の TRL の定義<sup>44</sup>に対し、ESA では ISO 規格16290<sup>45</sup>に準拠する形で TRL を定義しており<sup>46</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 4-26 NASA 及び ISO 16290(ESA)による TRL の定義

出所) <https://connectivity.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf> (2024年3月11日閲覧)

### 4.4.2 水素における日米欧の研究開発状況の比較

米欧の調査結果に日本の取組みを追加した、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 4-27 に示す。

<sup>44</sup> <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/> (2024年3月11日閲覧)

<sup>45</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> (2024年3月11日閲覧)

<sup>46</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) (2024年3月11日閲覧)

網羅的に取り組んでいる米国に対して、欧州・日本は特定領域に絞り込んでいる傾向が読み取れる。より具体的には、米国は掘削技術、水抽出技術、水電解技術で、欧州は掘削用ドリル、水抽出技術で複数プロジェクトを実施している。日本においては、液化・貯蔵プロセスに取り組む事例が多いが、この背景としては、月面水資源利用の技術課題として液化/貯蔵プロセスの優先度が高いと識別され、消費電力低減の観点から液化プロセスの省電力化や、打上げ質量低減の観点から貯蔵プロセスの小型軽量化に注力してきたことが背景にある。

なお、日本と比較して米国・欧州は TRL が高いプロジェクト(TRL5・6)が多く存在しているため、今後の動向について注視が必要である。

| プロセス名 | 技術領域   | 米国(NASA)                   | 欧州(ESA)                        | 日本(JAXA)          | TRL                                       |
|-------|--|----------------------------|--------------------------------|-------------------|---|
|       |  | TRL及び目標年度                  | TRL及び目標年度                      | TRL及び目標年度         |   |
| 掘削    | ドリルの開発<br>(より深くまで掘るための技術)                        | N/A                        | 2015年 2023年 2024年<br>2017年(*1) | N/A               | 9<br>8<br>7<br>6<br>5<br>4<br>3<br>2<br>1 |
|       | 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)        | 2021年<br>2021年 2022年 2023年 | N/A                            | N/A               |   |
|       | その他<br>(掘削ローバーの熱管理システム等)                         | 2023年                      | N/A                            | 2020年             |   |
| 水抽出   | 氷→水蒸気への相変化により、水を捕獲する技術                           | 2023年 2024年 2024年          | 2014年 2021年                    | 2017年             |   |
|       | 氷のまま収集する技術                                       | 2021年                      | N/A                            | N/A               |   |
|       | その他(基礎的技術)                                       | 2023年                      | N/A                            | N/A               |   |
| 純水処理  |  | 2024年                      | 2025年                          | 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>(システム間の統合化、他システムとの統合を含む) | 2022年                      | 2022年                          | N/A               |   |
|       | 電解効率を上げるための技術                                    | 2021年                      | N/A                            | 2021年             |   |
|       | 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)             | 2021年                      | N/A                            | N/A               |   |
|       | 燃料電池としての利活用も可能とするための技術                           | 2022年 2024年                | 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年             |   |
| 液化・貯蔵 | 推進剤貯蔵用のタンクの開発                                    | 2021年                      | 2024年                          | 2021年             |   |
|       | 材料特性の研究  | N/A                        | 2023年                          | 2017年 2017年 2021年 |   |
|       | その他<br>(機能的研究等)                                  | N/A                        | 2025年                          | 2021年 2021年       |   |

図 4-27 水素における日米欧の研究開発状況の比較

出所)各種文献を基にMRI作成  
注)ESAのTRL6はNASAのTRL5に相当する。

#### 4.4.3 電力における日米の研究開発状況の比較

電力分野における日米の研究開発プロジェクトの比較結果を図 4-28 に示す。

米国では発電・送電について複数の方式を研究しているのに対して、日本は特定の方法に絞り込んでいることが読み取れる。より具体的には、米国は発電として太陽光発電、原子力発電、原子力電池の3つ、送電として有線・無線送電及びパワーエレクトロニクスデバイスに関する取り組みを実施している。日本においては太陽光発電及び無線送電について取り組みを実施している。なお、日本において有線送電についての取組みが見られない理由としては、既存の宇宙用電線・ケーブルが技術的に成立しており、かつ最も課題である軽量化については原理的な対策に限界があると判断し、研究が立ち遅れていることが背景にある。

また、蓄電については、研究開発対象に多少の違いはあるが、米国・日本ともに燃料電池・リチウムイオン電池の双方を対象とした取り組みを実施している。

全体として、取組対象に差がある一方で、共通的に取り組んでいる技術(太陽光発電、無線送電、蓄電技術)については当該プロジェクトにて目標としている TRL に大きな差はなく、いずれも領域においても最も進んでいるものでは TRL4~6程度となっている。

| プロセス名 | 技術領域            | 米国(NASA)                               | 日本(JAXA)                   | TRL    |
|-------|-----------------|--|----------------------------|--------|
|       |                 | TRL及び目標年度                              | TRL及び目標年度                  |        |
| 発電    | 太陽光発電           | 2021年 2023年<br>2022年 2023年             | 2023年 2023年<br>2023年       | 9      |
|       | 原子力発電           | 2028年                                  | N/A                        | 8      |
|       | 原子力電池           | 2026年 2028年                            | N/A                        | 7      |
| 送電    | 有線送電            | 2023年<br>2023年 2028年                   | N/A                        | 6      |
|       | 無線送電            | 2023年 2023年                            | 2021年 2025年                | 5      |
|       | パワーエレクトロニクスデバイス | 2023年 2023年<br>2023年 2024年 2024年 2023年 | N/A                        | 4      |
| 蓄電    | 燃料電池            | 2024年 2022年<br>2025年 2022年             | 2020年<br>2023年             | 3      |
|       | リチウムイオン電池       | 2023年                                  | 2022年 2023年 2024年<br>2023年 | 2<br>1 |

図 4-28 電力における日米の研究開発状況の比較

出所)各種文献を基に MRI 作成

## 4.5 海外現地調査

本節では、海外で開催された国際学会に参加し、収集した内容について整理する。具体的には、以下の国際学会について、整理する。

- 2023 年6月にアメリカにて開催された「The Space Resources Roundtable 2023」
- 2023 年 10 月にアゼルバイジャンにて開催された「74th International Astronautical Congress 2023」

### 4.5.1 The Space Resources Roundtable 2023

#### (1) 開催概要

The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 は 2023 年 6 月に米国コロラド州にて開催された宇宙の資源開発・利用に関する国際学会である。NASA、LSA、JAXA などの政府機関だけでなく、月面探査、掘削、資源利用にかかわる民間企業からの参加もあり、全体としては米国、欧州各国、オーストラリア、韓国、日本などから 150 名程度が参加した。プログラムは口頭発表形式のものに加えてポスターセッションが開催され、全体で 100 件程度の発表がなされた。なお議論の対象としては月に関するものが多く、そのほか火星や小惑星における資源利用、生産・建設やインフラ、経済・法規制・環境的な観点に関する題材が確認された。発表セッションの概要を表 4-7 に示す。

表 4-7 発表セッションの概要

| Session   | 概観  |
|---|---|
| Session1:<br>National Plans & Priorities Panel        | • NASA, LSA, JAXAなどにおける月面でのISRU活動にかかわる検討状況について紹介された。                                |
| Session2:<br>Economic Considerations & Business Cases | • 特に月面や火星の資源利用に関して、地球の低軌道衛星への推進薬提供も踏まえた幅広いユースケースの紹介と、それらに付随するコストベネフィットについて紹介された。    |
| Session3:<br>Resource Prospecting & Exploration       | • 月・火星における資源(水や鉱物)に関する現状の知識(地理的特性を考慮した分布モデルの紹介など)の共有がなされた。                          |
| Session4:<br>Flown & Manifested Space Missions        | • 米国で進められている月面上の水探査であるPRIME-1(ドリルや計測機器の実証)やVIPPERIに関して使用する機材の詳細やミッションルートなどの紹介がなされた。 |
| Session5:<br>Power                                    | • 月面環境下で動作するリチウムイオン電池の検討や月面で動作する施設や移動体に対する電力供給形態の検討などについて紹介された。                     |
| Session6:<br>Mining & Robotics                        | • 月面上での掘削のためのアームやドリルに関する研究の紹介や、小規模なISRUプラントをパイロードとして月面上で輸送するローバーなどについて紹介がなされた。      |
| Session7:<br>Regolith & Granular Mechanics            | • 月面上のレゴリスの特性に着目し、ローバーや施設に付着したレゴリスの除去技術や真空中のレゴリスの挙動についてモデリング・実証を行っている研究などが紹介された。    |
| Session8:<br>Ices & Volatiles                         | • 水氷を含むレゴリスを仮想的に準備し、抽出するための技術やコールドトラップに関する技術等の状況について紹介がなされた。                        |
| Session9:<br>Resource Extraction & Processing I       | • NASAのSTMDの一環として採用されている月面のレゴリスから水の抽出、水処理、電気分解を含むシステムについて、現在の検討状況などが紹介された。          |
| Session10:<br>Resource Extraction & Processing II     | • Iとは少し毛色が異なり、レゴリスを溶かし、酸素や金属類を抽出する技術などについて紹介がなされた。                                  |
| Session11:<br>Space Manufacturing & Construction      | • UMVを活用した月面での建設や月面のレゴリスを使った建材の検討など、建設技術に特化した技術について紹介がなされた。                         |
| Session12:<br>Resources & Human Exploration           | • 主に月面や火星における人間の生存のためのNASAでの検討状況について紹介がなされた。  |

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 資料よりMRI 作成

## (2) 月面における水素・酸素の ISRU に関する動向

### 1) 米国/NASA の動向

米国/NASA におけるISRUの動向としては、図 4-29 に示すNASAにおける ISRUパイロットプラント実装に向けた計画の更新状況について紹介がなされた。プラントは2033年での実装を目的に計画されており、月面での活動初期段階では月極域(South Pole)において、①酸素やアルミニウム、シリコンを豊富に含むレゴリス、②水や揮発性物質の探査・利活用を推進することを計画している。また活動中期では、より低緯度地域に移動し、③鉄、チタン、その他の揮発性物質を含むイルミナイト・火山ガラス、④地球上での希少物質の探査・利活用を推進することを計画している。図 4-30 に示すように、NASA では特に火星も含めて、「月面レゴリスから酸素の抽出技術」、「極域の水資源の採取技術」、「火星の大気や水の ISRU 技術」の3つの領域に焦点を当てて技術開発や技術実証を行っている。NASA ではそれぞれの領域について完全に独立した領域として捉えておらず、「掘削技術」「電力供給技術」「酸素液化/貯蔵技術」などについて共通技術と位置付けている。また実装に向けたフェーズについて以下の4段階に分けて検討を行っている。

- Exploration Phase: ISRU の基礎となるどの物質を保護し、どの物質を再利用するかという定義を行い、掘削技術などの基礎技術の実証を行う。当該フェーズにおいて資源マッピングおよび採掘場所の選定は実施する。
- Development Phase: 初期のパイロットプラントの実装、FS、ビジネス的な間での実証を行う。
- Production: フルスケールなプラントの実装として、スケールアップを実施する。
- Remediation: 枯渇させるのではなく、次の資源サイトへの移動を検討する。

上記に加えて、NASA における技術実証プログラムである STMD (Space Technology Mission

Directorate)の更新として、2024年に実施予定であるVIPERプログラム後の技術実証について紹介された。特に図4-31に示すように、2033年のISRUパイロットプラントの実証を目標としてCT-1、CT2で何を実証すべきであるか議論がなされ、現状の実証案として「ISRU」、「エネルギー・電力」、「掘削」、「ダストによる影響低減」、「自律化&ロボット」、「建設施工」等が紹介された。なお2033年のパイロットプラント実証前に宇宙原子力発電による実証も実施予定である。

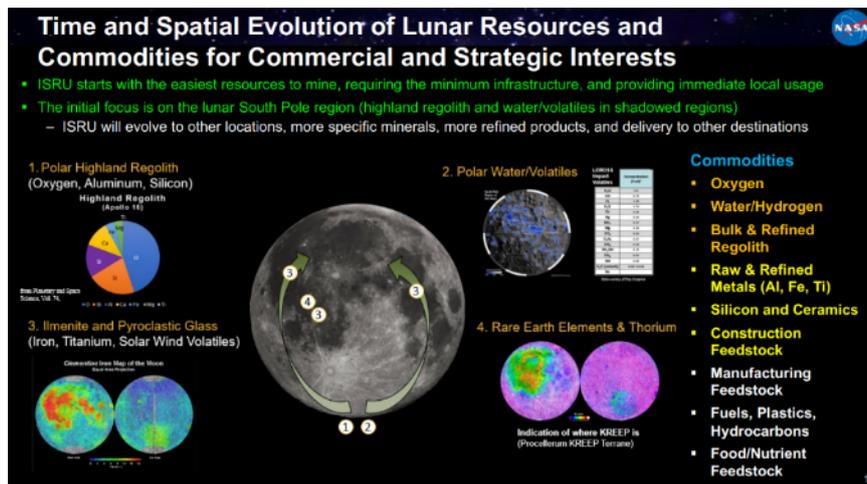


図 4-29 NASAにおけるISRUの検討状況

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋



図 4-30 ISRU 技術の領域(左)及び ISRU プラント実証にむけたフェーズのイメージ(右)

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋

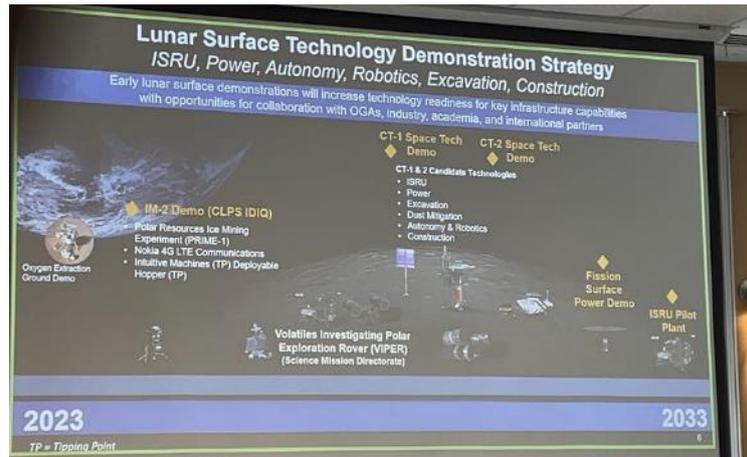


図 4-31 ISRU パイロットプラントの実証に関する戦略

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋

## 2) 代表的セッションの概要

「Lunar Power Architectures for Lunar Exploration (Session 5 – Power)」における発表では、図 4-32 に示すように Lockheed Martin 社による月面での電力供給アーキテクチャに関する検討について発表がなされた。発表では特に電力マネジメントシステムを中心に据え、発電施設や蓄電施設、電力供給先とのインタフェースについて絵姿が共有された。当該アーキテクチャでは、アルテミスにおける拠点やクレータリム部、PSR 内部といった様々な場所への電力供給形態を示しており、コンバータを用いた電圧変化まで考慮に入れた詳細なアーキテクチャとなっている点が特徴的である。初期段階では NASA などの政府機関が具体顧客になりうるとしつつ、現時点で商業的に利用したいという民間事業者が少ないという点が懸念点として述べられていた。

「An Overview of SRU Research at Imperial College London(Session 8 – Ices & Volatiles)」における発表では、図 4-33 に示すように Imperial College London 大学による月面でのプラント規模にかかわる「plant optimization(全体のプラント効率化のための最適化)」の検討について発表がなされた。酸素の抽出(レゴリスから直接抽出、水氷からの電気分解含めて)を対象とし、酸素の年間の総生産量に対する最適な抽出手法を検討しており、「Dry regolith processing(レゴリスからの直接採取)」及び「ice regolith mining(水氷からの抽出)」の 2 つの手法について発表がなされた。酸素の純粋な生産量の観点では水氷からの抽出が最適であるが、抽出効率の観点ではレゴリスからの直接採取、単位システム質量当たりの酸素の生産量の観点では上記 2 手法を組み合わせたハイブリッド手法が最適であるとの結果が報告された。

「Advancement of ISRU Technologies and Systems: Water Collection, Purification, and Electrolysis(Session 9 –Resource Extraction & Processing I)」における発表では、図 4-34 に示すように Paragon Space Development Corporation 社により、水抽出/浄水化技術(ICICLE)および浄水化/電気分解/乾燥技術(IHOP)の開発状況に関して発表がなされた。ICICLE については現状 TRL4 であり、今後 TRL5 に向けて検討中である。また IHOP は浄水化、水電解/乾燥装置も実証中(TRL4 で一部の機能は TRL5 を達成)である。特に IHOP については、水処理部分(WIPE)は 1.34kg/h の処理性能、電気分解部分(HOPE)は 1.3kg/h の水から 0.14kg/h

の水素、1.16kg/hの酸素の生成性能を要件として開発を進めていることが発表された。なお当該企業が有する技術を活用して、水の抽出を起点に浄水、酸素／水素(気体)を提供する一連のアーキテクチャの検討も行っている様子であった。

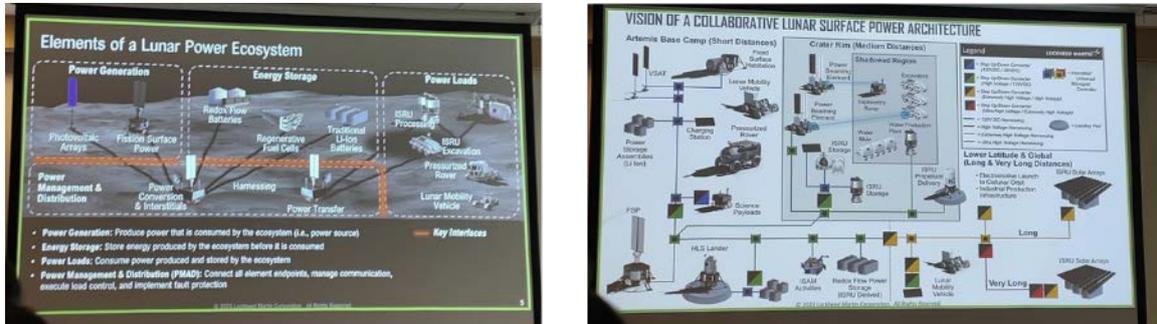


図 4-32 Lockheed Martin による月面での電力供給イメージ(左)とアーキテクチャ検討(右)

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋

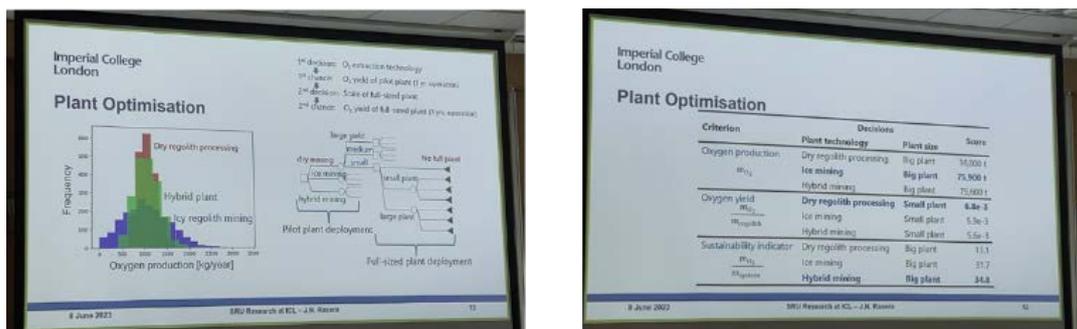


図 4-33 「Plant optimization」の概要(左)とその手法(左)

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋

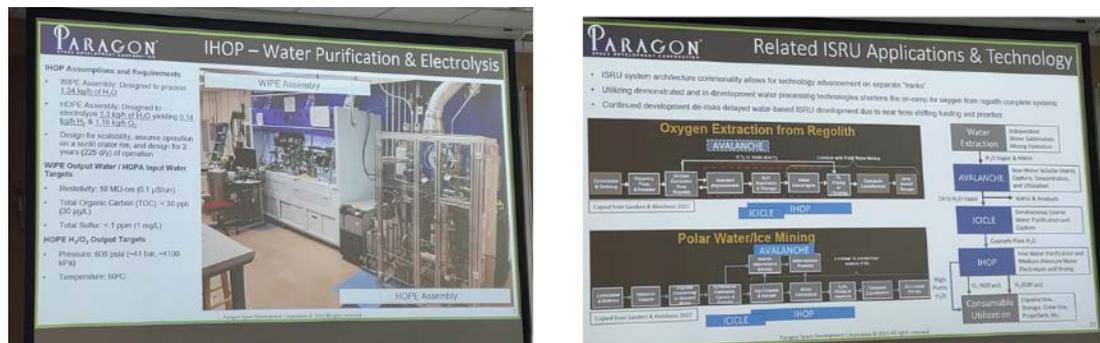


図 4-34 浄水化／電気分解／乾燥技術(IHOP)(左)及び水抽出／浄水化技術(ICICLE)(右)

出所)The Space Resources Roundtable (SRR) 2023 講演資料より抜粋

### 3) まとめ

2023年6月に米国コロラド州にて開催された The Space Resources Roundtable (SRR)では、月面での資源利用に関する内容が多数発表され、多くの大学や企業からの参加があった。プロセスの観点では水抽出(Paragon(ICICLE), Advanced Cooling Technologies Inc, Honeybee Robotics等)や水処理(Paragon (ICICLE, IHOP)), 電気分解(Paragon (IHOP))等の発表が確認された。このほか、ISRU 及び電力分野について全体のアーキテクチャ検討に関する発表がなされた。

## 4.5.2 74th International Astronautical Congress 2023

### (1) 開催概要

IAC は国際宇宙航行連盟(International Astronautical Federation:IAF)により開催される世界最大の宇宙関連イベントであり、IAF 参加国による持ち回りで毎年開催国が変わる。1950年以降、年に一度の頻度で開催されており、2023年はアゼルバイジャンの首都バクーにて開催された。

なお、今年は直前にナゴルノ・カラバフにおいてアゼルバイジャンとその隣国であるアルメニア間で軍事衝突が発生した影響により、特に欧州勢の発表・講演のキャンセルが相次いだ。一方でトルコ等の周辺国からの参加者も多く、多数の参加者が確認できた。

プログラムは講演や口頭発表形式のものに加え、企業・団体による展示や電子ポスターによる双方向的な形式のものも見られた。各国宇宙機関のトップ等、主要な講演者による全体プログラム(Plenary Programme)のほか、専門的なセッション(Technical Programme)が設けられ、特に口頭発表形式のセッション(Technical Sessions)にて詳細な情報が収集できた。

Technical Sessions の題目から作成したワードクラウドを図 4-35 に示す。「Space」「Satellite」等一般的な宇宙用語のほか、特筆すべき点として「Lunar」が多数登場している。形容詞では「new」「low」「high」等の一般的な単語のほか、「Sustainable」「Autonomous」「Commercial」等の単語が頻出している点が特徴的である。



周辺経済において重要な貢献を行うことを手助けすることを目標とした活動を進めている。現在4つのワーキンググループ(WG)を立ち上げ、通信、マーケット&ビジネス、電力&O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O バリューチェーン、サステナビリティが活動している。ISRU に関しては図 4-36 に示すように、レゴリスから抽出した酸素のバリューチェーン等に関する検討を進めている。

Offworld 社は月面での ISRU を実現するためのロボット群の実装を目的としており、2027 年に月面での実証を計画している。現時点では各バリューチェーンに対応したロボットや資源のバリューチェーン(図 4-37)等についても検討しており、実証ではレゴリスから水電解までを行う装置やPSR内を移動可能なローバーを展開することを計画している。

ESA-ASI・ミラノ工科大では図 4-38 に示す ISRU システム「ORACLE(Oxygen Retrieval Asset by Carbothermalreduction on Lunar Environment)」を開発しており、研究室レベルでの地上実証を進めている。レゴリスの酸化物から炭素酸化物、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> の混合物を適切に調整して H<sub>2</sub>O を抽出する「Carbothermal process」と呼ばれるプロセスを特色としており、将来的には CLPS への搭載及び月面での実証を計画している。

イスラエルの Helios 社は月面のレゴリスから酸素を熱抽出するプラント「MRE(Molten Regolith Electrolysis)リアクター」を計画しており、図 4-39 に示すような酸素プラントを計画している。

SGAC のグループからは、月の極域を探索し、氷を採取する長期ミッションを行うローバー「POLER (Permanently Operating Lunar Exploration Rover)」の概念設計に関する発表がなされた。ローバーの概念検討では図 4-40 に示すように、レゴリスから水抽出を行う手法(ロッド、マイクロ波、ドリル等)に関する比較検討がなされた。

このほか、学生発表としてシステムエンジニアリング手法を用いた、月面における ISRU プラント及び施設の配置検討に関する発表がなされた。配置検討に際し、平均日射量や影の期間、地球の可視率、傾斜、PSR との距離、掩蔽等のトレードオフ・パラメータについて評価したうえで図 4-41 に示すような配置案を提示した。

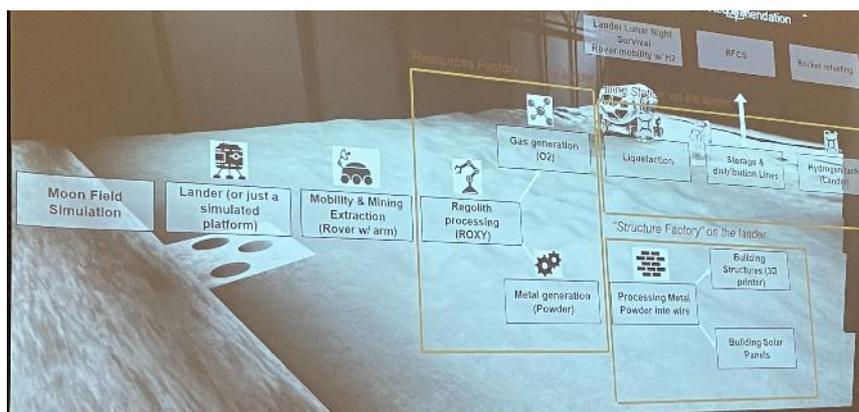


図 4-36 EURO2MOON が想定するレゴリスから抽出する酸素のバリューチェーン

出所)P. A. Joumel et al., EURO2MOON: Leveraging lunar resources exploration to foster international collaboration and benefit sustainability in Space and Earth, IAC2023. 発表資料より抜粋



図 4-37 資源のバリューチェーンに対応したロボット(左)及び想定するバリューチェーン(右)

出所)K. Acierno, OFFWORLD'S CESLESTIAL AND TERRESTRIAL SWARM ROBOTIC AND ISRU SYSTEM, IA C2023. 発表資料より抜粋

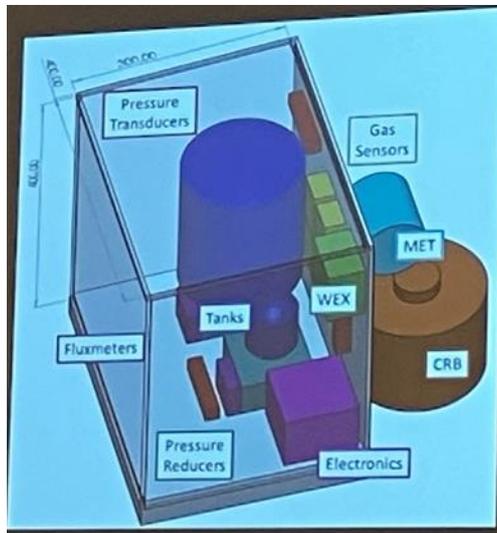


図 4-38 ORACLE の構成

出所)F. Latini et al., the oracle isru demonstrator payload for oxygen extraction on the moon, IAC2023. 発表資料より抜粋

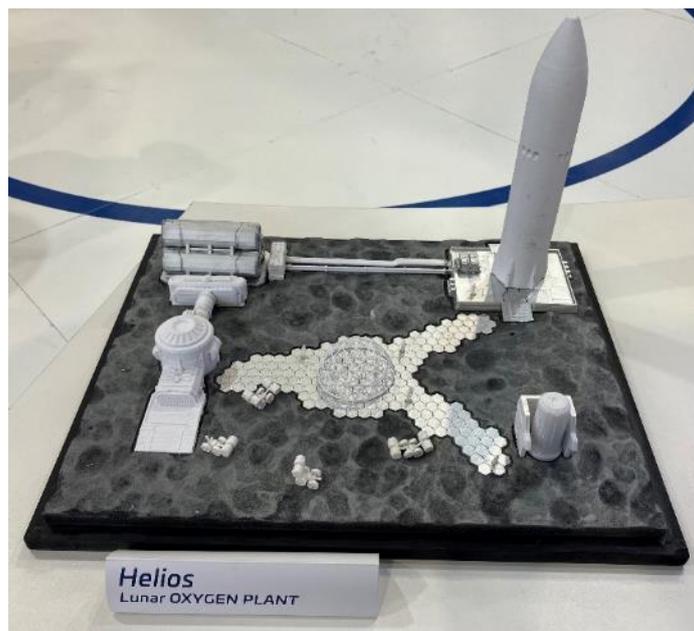


図 4-39 Helios 社の酸素プラントイメージ

出所)IAC2023における企業展示にて撮影

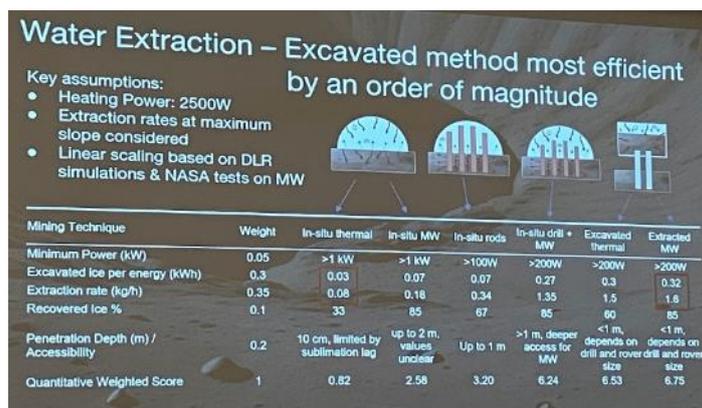


図 4-40 レゴリスからの水抽出手法の比較検討

出所)A. Huschke et al., Autonomous in situ resource utilization of lunar water ice enabled by a permanently operating lunar exploration rover (POLER), IAC2023. 発表資料より抜粋

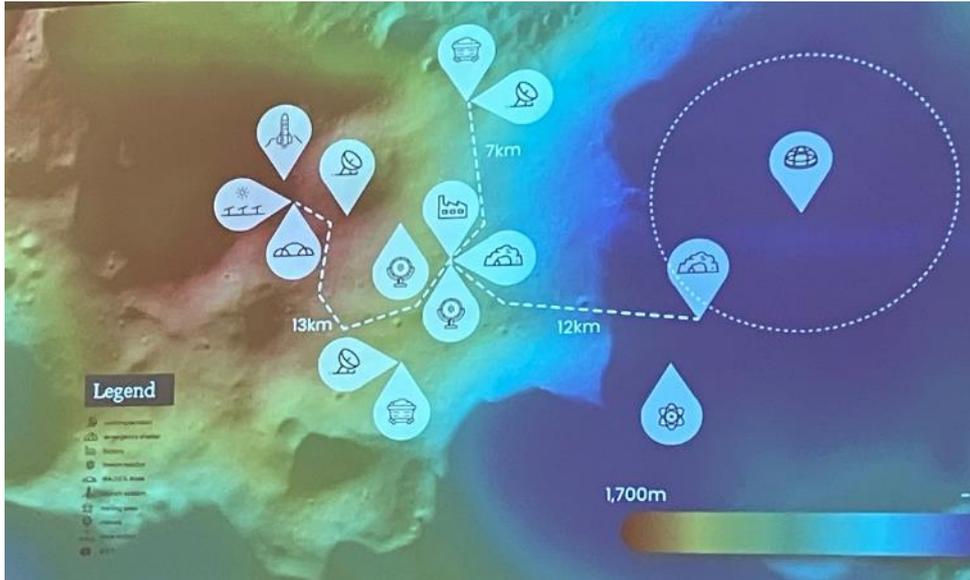


図 4-41 各プラント・施設の位置関係

出所)S. Shastry et al., Lunar Resource Extraction and Exploitation for Sustainable Space Exploration, IAC 2023. 発表資料より抜粋

### 3) 月面における電力に関する動向

2045 年における月面社会の全体像を示すアーキテクチャ検討として「OASIS 2045」が MVA (Moon Village Association) から発表され、そのうちの電力に関する検討では図 4-42 に示すような各年代における送電方式の検討等がなされている。また網羅的なユースケースの抽出やシステムに必要なエネルギー量の分析をあわせて実施している。

このほか、無線送電に関する動向として ITU における周波数共用の検討状況が発表された。月面では図 4-43 に示す Shielded Zone of the Moon (SZM) の定義がなされており、今後電波天文や宇宙関連のコミュニティを巻き込んだ議論が ITU-R Working Party 7D にて実施される予定である。

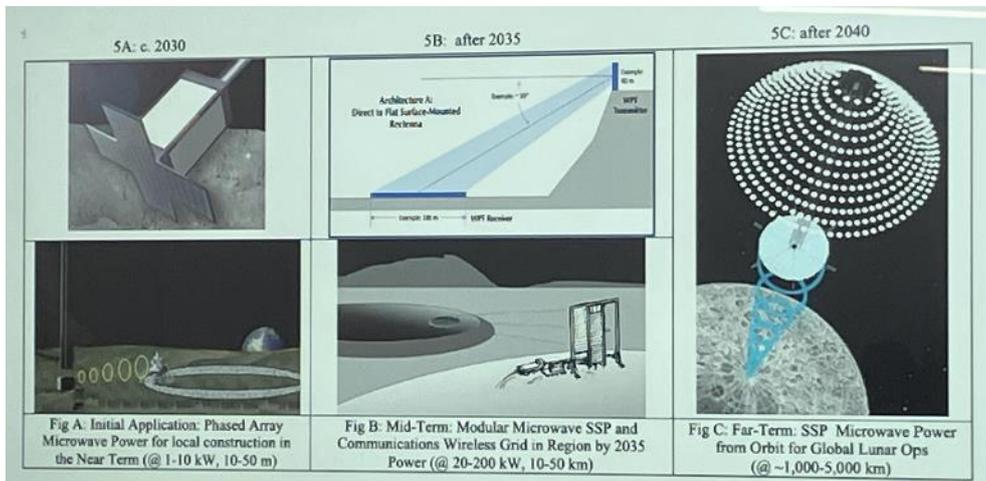


図 4-42 2030 年頃、2035 年以降、2040 年以降の 3 フェーズにおける送電方式の検討

出所)J. C. Mankins, Space Solar Power for the Moon: An OASIS 2045 Use Case Study, IAC2023. 発表資料より抜粋

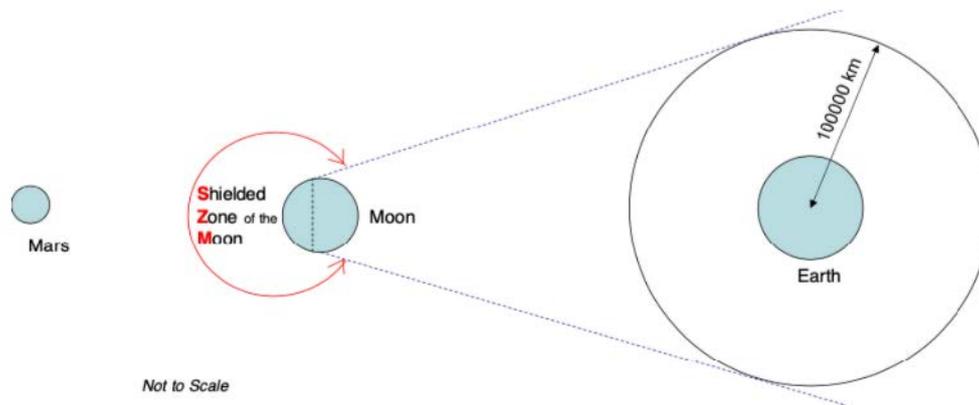


図 4-43 Shielded Zone of the Moon の定義

出所)workshop, INTERNATIONAL TREATY FOR MOON FARSIDE PROTECTION, IAC2023. 発表資料より抜粋

#### 4) まとめ

アゼルバイジャンで開催された「74th International Astronautical Congress 2023」では、直前に発生した軍事衝突の影響があったものの、世界各国から多数の発表・展示がなされた。月面開発に関する動向としては、水素・酸素等の ISRU に関する発表や電力に関する発表に加え、米国が主導する Artemis 計画や、中国主導の ILRS 計画に関する動向や今後の計画に関する発表がなされた。特に Artemis に関する動向としては HLS や CLPS をはじめとしたプログラムにて民間企業の積極的な関与が印象的であった。また企業展示やセッション構成をふまえると、中国の高いプレゼンスが感じ取れる内容であった。このほか、UAE やトルコ、アゼルバイジャン、サウジアラビア等の国からも発表がなされた。

## 5. まとめと今後の課題

---

### 5.1 調査結果まとめ

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。

2 章では、「水素」と「電力」に分けて並行して検討を進めた技術課題の整理結果を述べた。「水素」は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。本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。

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は水素WGと電力WGに分けて設置し、それぞれ5回開催した。5回目については合同開催とした。

4 章では国内外の動向調査の結果を述べた。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、情報を収集した結果も示している。

### 5.2 今後の課題

今年度の成果を踏まえ、今後も引き続き検討が必要と想定される課題について述べる。「水素」、「電力」ともに過年度の検討を通じてそれぞれのシステム・施設・技術についての検討は大きく進捗し、一定の仮定のもとでのシステム・施設配置についても解像度を向上させることができている。一方で、需要側である「水素」と供給側である「電力」との間の整合性やシステム・施設の一体的な管理の可能性については引き続き検討の余地があることから、両者を一体的に検討して月面エネルギーアーキテクチャの詳細化に取り組むことが必要である。また、現在の状況から推葉プラントの本格稼働の時代までにどのようなステップが必要で、どのような技術開発・実証が必要かといった時系列活動の具体化・解像度向上も必要である。加えて、これらの成果を基に、我が国として注力すべき技術・領域の検討や国際協力の可能性の検討を行うことも不可欠なことから、海外との比較検討(ベンチマーク調査)も引き続き行うことが必要である。

昨年度の報告書において、我が国全体として月面開発の戦略立案につなげていくような活動を期待

する旨を記載したが、令和 5 年 6 月 13 日に閣議決定された新たな宇宙基本計画においては「月面」に関する記述が令和 2 年版と比較して大きく増加し、また、内閣府において我が国の月面活動に関するアーキテクチャの議論も開始されるなど、月面開発関連で大きな動きがみられた年となった。

今後、我が国の月面開発戦略の議論が行われていくと想定され、本事業による将来の月面開発に必要となる技術の課題整理結果は、この議論に資するものである。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多数存在する国である。本事業の成果やこの多数の民間企業の熱量を活かす戦略を立案していくことも必要と考える。

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))

---

2024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

## 調査報告書

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))

株式会社三菱総合研究所

| 頁  | 図表番号   | タイトル                                    |
|----|--------|---|
| 9  | 図 2-4  | 候補地 (2か所：地図上の赤点)                        |
| 9  | 表 2-5  | 選定候補クレータ・PSRの詳細                         |
| 10 | 図 2-5  | S-①：レゴリス中の水量による比較 (俯瞰)                  |
| 10 | 図 2-6  | S-①：レゴリス中の水量による比較 (地点詳細)                |
| 11 | 図 2-7  | S-②：露出する水氷の水平分布による比較 (俯瞰)               |
| 11 | 図 2-8  | S-②：露出する水氷の水平分布による比較 (地点詳細)             |
| 12 | 図 2-9  | S-②：露出する水氷の水平分布 (LRO-LAMP) による比較 (俯瞰)   |
| 12 | 図 2-10 | S-②：露出する水氷の水平分布 (LRO-LAMP) による比較 (地点詳細) |
| 13 | 図 2-11 | S-③：平均温度 (10年間) による比較 (俯瞰)              |
| 13 | 図 2-12 | S-③：平均温度 (10年間) による比較 (地点詳細)            |
| 14 | 図 2-13 | S-③：最高温度 (10年間) による比較 (地点詳細)            |
| 14 | 図 2-14 | S-③：最高温度 (10年間) による比較 (地点詳細)            |
| 15 | 図 2-15 | S-④：PSRの存在とサイズ (俯瞰)                     |
| 15 | 図 2-16 | S-④：PSRの存在とサイズ (地点詳細)                   |
| 16 | 図 2-17 | NASA Artemis 3の着陸候補地                    |
| 16 | 図 2-18 | 選定地点周辺の着陸地点                             |
| 17 | 図 2-19 | 日照率 (俯瞰)                                |
| 17 | 図 2-20 | 日照率 (地点詳細)                              |
| 18 | 図 2-21 | 傾斜度 (俯瞰)                                |
| 18 | 図 2-22 | 傾斜度 (地点詳細)                              |
| 19 | 表 2-6  | ハレー彗星 (1/P) (短周期) の不純物比率                |
| 20 | 表 2-7  | ヘル・ボップ彗星 (C/1995 01) (長周期) の不純物比率       |
| 21 | 図 2-24 | 地点1の各ゾーン間の位置関係 (日照率との関係)                |
| 22 | 図 2-25 | 地点1の各ゾーン間の位置関係 (斜度との関係)                 |
| 22 | 図 2-26 | 地点1の各ゾーンの標高                             |
| 23 | 図 2-27 | 地点2の各ゾーン間の位置関係 (日照率との関係)                |
| 24 | 図 2-28 | 地点2の各ゾーン間の位置関係 (斜度との関係)                 |
| 24 | 図 2-29 | 地点2の各ゾーンの標高                             |
| 30 | 表 2-12 | 彗星の揮発性成分の存在量 (Hale-Bopp彗星)              |
| 31 | 図 2-32 | レゴリス抽出水のOLI計算結果 (Hale-Bopp彗星)           |
| 31 | 表 2-13 | OLI計算結果 (278.15 K, 0.1 atm)             |
| 52 | 図 2-43 | LSWの機器構成                                |

(様式2)

|     |         |   |
|-----|---------|---|
| 70  | 図 2-61  | Strashipの概要                                 |
| 80  | 図 2-70  | 機能分散型システム                                   |
| 96  | 表 2-46  | V帯(40-75GHz)電力増幅器の現状                        |
| 96  | 表 2-47  | W帯(75-110GHz)電力増幅器の現状                       |
| 97  | 表 2-48  | 110GHz帯以上の電力増幅器現状                           |
| 98  | 表 2-49  | GaNを用いた電力増幅器開発例(30GHz帯以下)                   |
| 99  | 表 2-50  | GaNを用いた電力増幅器開発例(30GHz以上)                    |
| 105 | 表 2-55  | 電子管の特性                                      |
| 106 | 図 2-80  | きずな(WINDS)                                  |
| 106 | 図 2-81  | EarthCARE/CPR                               |
| 107 | 図 2-82  | SMILES                                      |
| 108 | 図 2-84  | 5m Deployable Reflector                     |
| 109 | 図 2-85  | はるかの展開アンテナ(開口径8m)                           |
| 109 | 図 2-86  | ETS-VIII/LDR(開口径13m)                        |
| 110 | 図 2-87  | φ3.6mメッシュ展開アンテナ                             |
| 111 | 図 2-89  | Northrop GrummanのAstromesh                  |
| 111 | 図 2-90  | L3 Harrisのリブ型メッシュアンテナ                       |
| 112 | 図 2-91  | L3 Harrisのフープ型(ペリメーターフレーム)メッシュアンテナ          |
| 113 | 図 2-92  | LSSの7.5m展開型メッシュ反射鏡                          |
| 116 | 図 2-97  | 国際宇宙ステーションの太陽電池アレイウィング(SAW)                 |
| 121 | 図 2-101 | 国際宇宙ステーションのSAWの電気的性能                        |
| 122 | 図 2-103 | 太陽電池の変換効率の変遷                                |
| 128 | 表 2-59  | 各緯度と太陽照度条件に対する月表面温度の最大最小値                   |
| 129 | 図 2-108 | 24時間換算時刻の平均ボロメータ温度                          |
| 129 | 図 2-109 | 月極域の日照率                                     |
| 130 | 図 2-110 | Astrobotic社VSAT                             |
| 131 | 図 2-111 | Lunar Array Mast and Power System(LAMPS)    |
| 131 | 図 2-112 | Lunar Array Mast and Power System(LAMPS)説明図 |
| 132 | 図 2-113 | LUNARSABER                                  |
| 132 | 図 2-114 | Lockheed Martin社VSAT                        |
| 133 | 図 2-115 | 10kWのRelocatable Solar Array(RSA)           |
| 134 | 図 2-116 | RSAの展開手順                                    |
| 135 | 図 2-117 | Langley Research CenterのVSAT                |
| 135 | 図 2-118 | 展開・収納機能を持つタワーのブレード・ボード・モデル                  |
| 136 | 図 2-119 | 太陽追尾機能を持つSAPのブレード・ボード・モデル                   |
| 138 | 図 2-122 | 月南極域の3D地形データ(国交省スターダスト計画)                   |
| 153 | 表 2-67  | 電源系候補の構成とそのトレードオフ結果                         |
| 157 | 図 2-143 | バリューチェーン全体像                                 |
| 172 | 表 2-78  | 24GHz送受電部システム仕様抜粋(FY2022検討)                 |
| 174 | 図 2-154 | ADMV4821の内部ブロック図                            |
| 184 | 図 2-164 | 20~30GHz帯パワーアンプの既存報告におけるPAE傾向               |
| 185 | 表 2-89  | 代表的な市販電子管デバイスの諸元                            |
| 192 | 図 2-168 | 様々な波長に対する光電変換効率                             |
| 200 | 図 4-1   | LSIIにおける6つの重点領域                             |
| 200 | 図 4-2   | LSIIの技術実証計画                                 |
| 201 | 図 4-3   | LSICの体制                                     |

(様式2)

|     |        |  |
|-----|--------|--|
| 204 | 図 4-4  | NASAが検討しているISRUの研究開発スケジュール                             |
| 204 | 表 4-1  | NASAにおけるISRUに関する研究開発方針                                 |
| 205 | 図 4-5  | 水素バリューチェーンに関連するNASAの研究開発プロジェクトの全体像                     |
| 206 | 図 4-6  | NASAが実施する研究開発プログラムの全体像                                 |
| 207 | 図 4-7  | 掘削プロセスにおけるNASAの研究開発プロジェクトリスト                           |
| 208 | 図 4-8  | 水抽出プロセスにおけるNASAの研究開発プロジェクトリスト                          |
| 209 | 図 4-9  | 純水処理・水電解・液化プロセスにおけるNASAの研究開発プロジェクトリスト                  |
| 210 | 図 4-10 | ESAの月面でのISRUに関する取り組みスケジュール                             |
| 211 | 図 4-11 | ESAにおける研究開発プログラムの全体像                                   |
| 211 | 図 4-12 | ESAにおける研究開発プログラムと今回調査対象の個別プロジェクトとの対応関係                 |
| 212 | 表 4-2  | ESAにおけるISRUバリューチェーンの定義                                 |
| 213 | 図 4-13 | 掘削・水抽出・熱抽出プロセスに関するESAの取り組み                             |
| 214 | 図 4-14 | 純水処理・水電解・液化・貯蔵プロセスに関するESAの取り組み                         |
| 215 | 図 4-15 | 提案する水・酸素・食料の生成フロー                                      |
| 216 | 図 4-16 | 提案するISRUのロードマップ  |
| 218 | 図 4-17 | NASAによる月面電力供給想定（縦軸：供給電力、横軸：伝送距離）                       |
| 218 | 図 4-18 | NASAにおける電力供給の将来ビジョン（Phase $\alpha$ ）                   |
| 219 | 図 4-19 | NASAにおける電力供給の将来ビジョン（Phase $\Omega$ ）                   |
| 220 | 図 4-20 | NASAにおける電力供給に関する研究開発の優先事項                              |
| 220 | 表 4-3  | NASAにおける電力供給に関する研究開発要素及び目標                             |
| 221 | 図 4-21 | 発電（太陽光発電、ヘリオスタット・太陽光反射）に関するNASAの取り組み                   |
| 221 | 図 4-22 | 発電（原子力発電、ラジオアイソトープ電源）に関するNASAの取り組み                     |
| 222 | 図 4-23 | 送電（有線送電・無線送電）に関するNASAの取り組み                             |
| 222 | 図 4-24 | 送電（パワーエレクトロニクス）に関するNASAの取り組み                           |
| 223 | 図 4-25 | 蓄電に関するNASAの取り組み  |
| 224 | 表 4-4  | 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(1/2)                                  |
| 225 | 表 4-5  | 宇宙用原子炉の概要、特徴、概念図(2/2)                                  |
| 226 | 図 4-26 | NASA及びISO 16290 (ESA) によるTRLの定義                        |
| 227 | 図 4-27 | 水素における日米欧の研究開発状況の比較                                    |
| 228 | 図 4-28 | 電力における日米の研究開発状況の比較                                     |
| 229 | 表 4-7  | 発表セッションの概要   |
| 230 | 図 4-29 | NASAにおけるISRUの検討状況                                      |
| 230 | 図 4-30 | ISRU技術の領域（左）及びISRUプラント実証にむけたフェーズのイメージ（右）               |
| 231 | 図 4-31 | ISRUパイロットプラントの実証に関する戦略                                 |
| 232 | 図 4-32 | Lockheed Martinによる月面での電力供給イメージ（左）とアーキテクチャ検討（右）         |
| 232 | 図 4-33 | 「Plant optimization」の概要（左）とその手法（左）                     |
| 232 | 図 4-34 | 浄水化／電気分解／乾燥技術（IHOP）（左）及び水抽出／浄水化技術（ICICLE）（右）           |
| 234 | 図 4-35 | Technical Sessionsの題目から作成したワードクラウド（赤字：動詞、青字：名詞、緑字：形容詞） |

(様式2)

|     |        |   |
|-----|--------|---|
| 235 | 図 4-36 | EURO2MOONが想定するレゴリスから抽出する酸素のバリューチェーン         |
| 236 | 図 4-37 | 資源のバリューチェーンに対応したロボット (左) 及び想定するバリューチェーン (右) |
| 236 | 図 4-38 | ORACLEの構成                                   |
| 237 | 図 4-39 | Helios社の酸素プラントイメージ                          |
| 237 | 図 4-40 | レゴリスからの水抽出手法の比較検討                           |
| 238 | 図 4-41 | 各プラント・施設の位置関係                               |
| 238 | 図 4-42 | 2030年頃、2035年以降、2040年以降の3フェーズにおける送電方式の検討     |
| 239 | 図 4-43 | Shielded Zone of the Moonの定義                |