

経済産業省 御中

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)) 報告書

MRI 三菱総合研究所

JSF 一般財団法人
日本宇宙フォーラム

2023年3月

目次

1. はじめに.....	1
1.1 調査の目的	1
1.2 昨年度の調査結果の概要.....	1
1.3 本年度の調査の概要	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 個別プロセスの検討	6
2.1.3 全体アーキテクチャの検討.....	40
2.1.4 水素生成に係る必要電力量の算出	69
2.1.5 今後の検討課題	76
2.2 電力に関する技術課題整理.....	79
2.2.1 検討の全体像	79
2.2.2 月面電力供給全体システム.....	81
2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システム.....	91
2.2.4 月面設置発電システム.....	118
2.2.5 月面上での送電システム	154
2.2.6 今後の検討について	219
3. 有識者委員会・WG 運営	226
3.1 有識者委員会.....	226
3.2 水素 WG	228
3.3 電力 WG	229
4. 国内外動向調査.....	231
4.1 水素に関する動向(月面での水資源関連技術の海外動向調査)	231
4.1.1 欧米以外(中国、インド、韓国、UAE)の月探査動向.....	231
4.1.2 レゴリスからの酸素(金属)抽出技術動向	236
4.2 電力に関する動向.....	240

4.2.1 米国の動向.....	240
4.2.2 欧州の動向.....	255
4.2.3 中国の動向.....	262
4.2.4 各国における要素技術比較	263
4.3 国内企業ヒアリング調査	266
5. まとめと今後の課題.....	267
5.1 調査結果まとめ	267
5.2 今後の課題	267

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	4
図 2-2 各プロセスにおける処理量(昨年度検討結果にもとづく)	7
図 2-3 各プロセスにおける必要エネルギー量(昨年度検討結果にもとづく)	8
図 2-4 レゴリス中の含水率の変化に伴う手法・技術比較結果	9
図 2-5 レゴリス中の水の性状の影響範囲	10
図 2-6 電気加熱による掘削・抽出の概要	11
図 2-7 太陽光加熱による掘削・抽出の概要図	12
図 2-8 PSR、日照領域、発着地点の位置関係、ケース区分の詳細	13
図 2-9 ヘリオスタット反射鏡例	16
図 2-10 凍結乾燥機・コールドトラップ構成例	17
図 2-11 LCROSS の結果の概観およびレゴリス水中の揮発性成分の含有率(重量比 wt%)	18
図 2-12 OLI(電解質熱力学モデル)によるレゴリス抽出水のシミュレーション結果	19
図 2-13 レゴリス中の微粒子の直径と含有率の関係	20
図 2-14 水電解以降のプロセス	23
図 2-15 月面開発の前提	26
図 2-16 ゾーン間の位置関係	28
図 2-17 アポロ・ルナミッションにおける地盤の変形と強度パラメータの関係	29
図 2-18 建設シナリオ	30
図 2-19 施工手順の例	32
図 2-20 ベース部分を共通化した多目的月面車両	32
図 2-21 月の模擬砂から作った焼結ブロック	33
図 2-22 地上における機器設置概略施工フロー	34
図 2-23 月面における機器設置概略施工フロー	34
図 2-24 地上におけるマネジメントシステム(例)	35
図 2-25 施設内／間および施設と管理システム間通信のイメージ	36
図 2-26 実証試験での動作案	38
図 2-27 海底油田の高度安全保護装置	39
図 2-28 全体アーキテクチャ検討の進め方	40
図 2-29 「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」にもとづいて設定した前提条件	45
図 2-30 JAXA 探査シナリオにおける月面拠点基本構成イメージ	47
図 2-31 施設配置に関する前提	48
図 2-32 アーキテクチャ A-1 案(水抽出以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)	49
図 2-33 アーキテクチャ B-1 案(水抽出をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	50
図 2-34 アーキテクチャ B-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	51
図 2-35 アーキテクチャ B-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	51

図 2-36	アーキテクチャ B-4 案(貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	52
図 2-37	アーキテクチャ C-1 案(水純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)	53
図 2-38	アーキテクチャ C-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	53
図 2-39	アーキテクチャ C-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	54
図 2-40	アーキテクチャ C-4 案(液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	54
図 2-41	アーキテクチャ D-1 案(高圧化以降を発着ゾーン周辺で実施)	55
図 2-42	アーキテクチャ D-2 案(高圧化をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)	56
図 2-43	アーキテクチャ D-3 案(貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施)	56
図 2-44	アーキテクチャ E-1 案(液化処理以降を発着ゾーン周辺で実施)	57
図 2-45	アーキテクチャ E-2 案(貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施)	58
図 2-46	アーキテクチャ F-1 案(全プロセスを PSR 内部で実施)	58
図 2-47	アーキテクチャ評価結果の整理方法	60
図 2-48	アーキテクチャ総合評価結果	60
図 2-49	施設建設の観点からの評価結果	61
図 2-50	施設への電力供給の観点からの評価結果	63
図 2-51	物資輸送に必要な消費電力の観点からの評価結果	65
図 2-52	必要な物資輸送量の観点からの評価結果	65
図 2-53	全体アーキテクチャ C-1 案(純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)(再掲)	67
図 2-54	全体アーキテクチャ C-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲)	67
図 2-55	全体アーキテクチャ C-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲)	68
図 2-56	全体アーキテクチャ C-4 案(液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲)	68
図 2-57	施設配置と電力供給アーキテクチャのイメージ	70
図 2-58	太陽光加熱方式による水抽出概観	71
図 2-59	パイプラインの検討ケース	73
図 2-60	ミッシングピース整理の概要図	77
図 2-61	各プロセス/もしくは各プロセス間に必要となる機能(ミッシングピース)	77
図 2-62	月面での電力供給システム機能ブロック図	80
図 2-63	地上における電力供給システムの概念	81
図 2-64	月面上での電力供給システム概要(予想図)	82
図 2-65	極域基地と候補地点1、2、シャックルトンクレータの位置関係	84
図 2-66	水輸送パイプ凍結防止に必要な電力要求	88
図 2-67	水輸送パイプ保温システム概要	88
図 2-68	水輸送パイプ保温ヒーターの一例	89
図 2-69	極寒寒冷地における水及暖房水蒸気の配給事例	89
図 2-70	PSR 水採掘場所近傍のローバ充電ステーション	90
図 2-71	ローバへの無線送電概要	90

図 2-72	アンテナの大きさと遠方界とみなせる距離の関係	92
図 2-73	周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:100m)	93
図 2-74	周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:1000m)	93
図 2-75	500メートル球面電波望遠鏡(FAST)(左図)及びアレシボ望遠鏡(右図)	96
図 2-76	ロバート・バード・グリーンバンク望遠鏡(左図)及びエフェルスベルク電波望遠鏡(右図)	96
図 2-77	臼田宇宙空間観測所(左図)及びアレン・テレスコープ・アレイ(右図)	96
図 2-78	SPS2000で検討されたレクテナ支持構造	97
図 2-79	軌道高度と周期の関係	97
図 2-80	遠月面高度 1,000km の場合の軌道	98
図 2-81	遠月面高度 1,000km の場合の距離と仰角の関係	99
図 2-82	ビーム掃引角度と機体数	99
図 2-83	高度 5,000km と 10,000km の極軌道	101
図 2-84	シャックルトンクレータとレクテナの配置	102
図 2-85	シャックルトンクレータ底面および斜面	102
図 2-86	シャックルトンクレータの直上を通過する軌道	103
図 2-87	5.7GHz 電力分布図	107
図 2-88	24GHz 電力分布図	108
図 2-89	レクテナ径 500m の場合の電力分布図	109
図 2-90	マイクロ波管の適合領域	112
図 2-91	半導体増幅器モジュールの動作周波数と付加電力効率(PAE)の現状	112
図 2-92	日本/世界のトランジスタ微細化の流れ	113
図 2-93	ETS-VIII 搭載大型アンテナ(外径最大寸法:約 19 メートル×17 メートル)	114
図 2-94	久原等の扇子型展開アンテナコンセプトと 1m 扇子型展開アンテナ	114
図 2-95	Grumman Company、SRST 等による 5m の試作モデル	114
図 2-96	月周回軌道からのエネルギー伝送システム	115
図 2-97	太陽電池の分類	119
図 2-98	シリコン太陽電池と化合物 3 接合型薄膜太陽電池の比較	120
図 2-99	IMM3J セル外観と電気特性	120
図 2-100	フィルムシートの外観と構造	121
図 2-101	ガラスシートの外観と構造	121
図 2-102	太陽ユニット形状とその特性	122
図 2-103	太陽追尾型架台(左:1 軸追尾型、右:2 軸追尾型)	123
図 2-104	固定型架台(左:平板固定型、右:多面体)	123
図 2-105	時間の推移による発電量の変化(例)	124
図 2-106	参考用の月南極域の基地イメージ	125
図 2-107	24 時間換算時刻の平均ボロメータ温度	126
図 2-108	月極域の日照率	127
図 2-109	Astrobotic 社 VSAT	128
図 2-110	Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)	128

図 2-111 Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)説明図	129
図 2-112 Lockheed Martin 社 VSAT	129
図 2-113 10kW の Relocatable Solar Array (RSA)	130
図 2-114 RSA の展開手順	131
図 2-115 Langley Research Center の VSAT	132
図 2-116 展開・収納機能を持つタワーの BBM(ブレッド・ボード・モデル)	132
図 2-117 伸展構造	134
図 2-118 太陽基準での地球と月の自転と公転角度の関係	135
図 2-119 月南極点からみた太陽の軌跡	136
図 2-120 月南極域の 3D 地形データ(国交省スターダスト計画)	136
図 2-121 月南極域の多目的タワー設営候補地点(国交省スターダスト計画)	137
図 2-122 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	138
図 2-123 各候補地点における 360°方向の最高地形角度グラフ(-1.54°以下はフラット)	138
図 2-124 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	139
図 2-125 燃料電池運転パターン	142
図 2-126 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)	142
図 2-127 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)	143
図 2-128 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)	143
図 2-129 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、燃料電池)	144
図 2-130 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、燃料電池)	144
図 2-131 令和 3 年度時点での月面上でのバリューチェーン全体像	145
図 2-132 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、燃料電池)	146
図 2-133 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、燃料電池)	146
図 2-134 国際宇宙探査シナリオにおけるエネルギーに関する技術ロードマップ	149
図 2-135 太陽光発電装置の設置方法	152
図 2-136 支持脚の展開方法	152
図 2-137 1 軸追尾式の発電量に対する間隔の影響	153
図 2-138 リム上の基地配置(ゾーン方式)の例	153
図 2-139 シャックルトンクレータの位置	155
図 2-140 リム上の拠点配置(ゾーン方式)の例	155
図 2-141 送電方式選定フロー	156
図 2-142 10kW 送電時の送電距離と質量の関係	158
図 2-143 100kW 送電時の送電距離と質量の関係	158
図 2-144 送電距離と送電効率の関係	159
図 2-145 月面拠点の送電システム(案)	160
図 2-146 昼夜境界における 3hr 毎の浮遊粒子数実測値	162
図 2-147 粒子径の関数としての浮遊高さ計算例	162
図 2-148 レゴリス、ダストの昼夜境界における浮遊高さの算出例	163
図 2-149 レゴリス・ダストの浮遊層分布とダストクリティカルな構造物の設置高さ(案)	164

図 2-150	SSPA と TWTA の市場での使用割合	165
図 2-151	SSPA と TWTA の特長比較	165
図 2-152	送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(20-50GHz)	166
図 2-153	送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(50GHz 以上)	166
図 2-154	レクテナ効率実績(1-100GHz:周波数特性)	167
図 2-155	レクテナ効率実績(20-40GHz:出力電力特性)	167
図 2-156	世界初のエンハンスモード GaN HEMT の開発イメージ	168
図 2-157	マイクロ波送受電システムの最上位ブロック図と電力ロス配分	171
図 2-158	正方形アンテナのビーム効率(振幅分布は一定)	171
図 2-159	ビームウエストを中間位置に置くビーム伝送光学系	172
図 2-160	総受電部の放射冷却による廃熱概念図	173
図 2-161	移動体向けマイクロ波送受電システムの最上位ブロック図と電力配分	182
図 2-162	アレイファクタとグレーチングローブ発生限界角度との関係	182
図 2-163	シャクルトンクレータ形状とビーム走査角度、距離の関係	183
図 2-164	ビームウエストを受電レクテナ面に置くビーム伝送系	183
図 2-165	矩形アンテナの回折による正規化ビーム効率(一様振幅分布の電力包含角度半径)	184
図 2-166	総受電部の放射冷却による廃熱概念図	185
図 2-167	マルチビーム送電アンテナから複数移動体に対する給電サービスのイメージ	189
図 2-168	ファイバーレーザの構造を利用した光ファイバー送電の考え方	192
図 2-169	典型的な石英ファイバー伝送損失の波長依存性	192
図 2-170	3 波長別の電気 to 電気総合効率	194
図 2-171	高出力用光ファイバーケーブルの例	195
図 2-172	高純度石英ファイバーと F ドープ耐放性仕様は、耐放性が高い	196
図 2-173	国産独自技術:フォトニック結晶ファイバー(PCF:Photonic Crystal Fiber)	196
図 2-174	低効率箇所を逆手にとった熱供給を含めたエネルギー供給手段としての利用可能性	197
図 2-175	水道管凍結防止帯の製品例	198
図 2-176	キャビネットに収まっているファイバーレーザ製品	199
図 2-177	IPG フォトニクス社のファイバーレーザ製品群カタログ値による出力/重量比	200
図 2-178	LADEE ミッションにおける月周回軌道上のダスト粒子の高度分布計測の例	201
図 2-179	LADEE ミッションにおけるダスト粒子径分布とその高度分布。実線は経験式。	201
図 2-180	meteoroid 衝突によるレゴリスのダスト微粒子の舞い上がりモデルの検討	202
図 2-181	月面上の放射線スペクトルの評価例	205
図 2-182	「きぼう」の電力分配系統	206
図 2-183	導線による長距離送電の計算方法	207
図 2-184	使用するケーブルの断面	208
図 2-185	適用するケーブルの仕様	208
図 2-186	室内 WPT の活用イメージ	211
図 2-187	想定施設の配置イメージ	212
図 2-188	送電アンテナの配置イメージ	214

図 2-189	電波分布の解析モデル.....	214
図 2-190	電波分布の解析結果.....	215
図 2-191	送電アンテナの配置イメージ.....	216
図 2-192	電波分布の解析モデル.....	216
図 2-193	電波分布の解析結果.....	216
図 2-194	走行中無線給電によるロボットへの無線給電イメージ.....	217
図 2-195	マイクロ波共振技術によって屋外の電力を屋内に送電するイメージ.....	218
図 3-1	親委員会と WG の開催.....	226
図 4-1	月面での資源利用サイクル.....	236
図 4-2	レゴリスの組成(静かの海).....	237
図 4-3	熔融レゴリス電解法による酸素抽出の概念図.....	239
図 4-4	月面拠点における電力に関する要素技術の全体像.....	240
図 4-5	STMD のフレームワーク(赤色・黄色は電力に関連する事項).....	241
図 4-6	“Power and Energy Storage System”の開発目標.....	241
図 4-7	50kW 級太陽光パネル(左)と GW 級太陽光パネル(右).....	242
図 4-8	VSAT(左)と LunaGrid サービスのイメージ(右).....	245
図 4-9	Fission Surface Power System のイメージ図.....	246
図 4-10	PSR 内(低温環境下)において作動するローバのイメージ図.....	250
図 4-11	PSR 内(低温環境下)において作動するローバのイメージ図.....	251
図 4-12	固体酸化物形燃料電池の反応フロー図.....	252
図 4-13	Horizon Europe の構造.....	256
図 4-14	ロードマップで開発が想定されている主要な要素技術.....	257
図 4-15	LUNABOX イメージ.....	258
図 4-16	Moon Village の全体像(左)とモジュールのイメージ(右).....	259
図 4-17	2016 年頃に想定されていた欧州の宇宙における原子力利用のロードマップ.....	262
図 4-18	ILRS のイメージ図.....	263
図 4-19	出力・技術開発レベルの国別比較.....	264
図 4-20	出力・技術開発レベルの国別比較.....	265

表 目次

表 2-1 各プロセスの概観及び本年度検討事項の整理.....	5
表 2-2 水抽出技術の構成比較	6
表 2-3 適用技術・アーキテクチャごとの定性評価結果(必要エネルギーにもとづく)	10
表 2-4 各ケースにおけるメリット及びデメリット	12
表 2-5 掘削・抽出に係る原料土量(質量).....	13
表 2-6 各計算パラメータ(概算)	14
表 2-7 各要素技術の試算結果	14
表 2-8 含水量別(0.5%、1.0%、5.0%)の試算結果.....	15
表 2-9 パターン①及び②の評価結果.....	21
表 2-10 水電解システムに係る消費電力の導出条件(水質低下に伴う消費電力増加を考慮).....	22
表 2-11 純水製造システムに係る消費電力の導出条件.....	22
表 2-12 高圧化タイミングに係る比較(水素で JT 使用する場合).....	24
表 2-13 水素・酸素ガスを大気圧から 2.0 MPaG に昇圧する場合の構成例.....	24
表 2-14 高圧化に係る具体手法.....	24
表 2-15 拠点建設の制約条件	27
表 2-16 拠点建設の前提条件	27
表 2-17 今後取得すべきデータと取得方法・期限.....	31
表 2-18 今後想定されている月探査ミッションと必要技術(掘削技術含む).....	33
表 2-19 コントローラの月面での適用に向けた課題整理	36
表 2-20 センサデバイスの月面での適用に向けた課題整理	37
表 2-21 共通・横断技術の要素技術	37
表 2-22 地上プラントでの HAZOP の記載例.....	39
表 2-23 シナリオ案(レベル 1)	42
表 2-24 シナリオ案(レベル 2)	44
表 2-25 各ゾーンの概要.....	47
表 2-26 前提条件をベースとした 15 種類のアーキテクチャの概要	48
表 2-27 アーキテクチャ案評価のための論点	59
表 2-28 施設建設の観点による評価結果(必要建設工数面での評価)	62
表 2-29 施設建設の観点による評価結果(建設時の必要建設技術面での評価).....	62
表 2-30 建設・運用時の効率的な電力供給面での評価結果.....	64
表 2-31 施設運用時の消費電力面での評価結果.....	64
表 2-32 建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価結果.....	66
表 2-33 施設利用の汎用性についての評価	66
表 2-34 ゾーン間の物資輸送に係る前提.....	70
表 2-35 必要電力値の算出結果(300 日稼働、レゴリス中の水含有率 1%):水抽出プロセス①(掘削+ PSR 内部で水抽出)を採用するパターン.....	71

表 2-36 必要電力値の算出結果(300 日稼働、レゴリス中の水含有率 1%):水抽出プロセス②(サーマルマイニングによる水抽出)を採用するパターン.....	72
表 2-37 パイプライン中の水(液体)の保温に必要な熱量.....	74
表 2-38 経路1の輸送必要電力量算出に係る前提条件.....	74
表 2-39 経路 2 の輸送必要電力量算出に係る前提条件.....	75
表 2-40 電力供給システム全体の検討条件.....	85
表 2-41 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(100kW・リチウムイオン電池) ..	85
表 2-42 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(100kW・燃料電池) ..	85
表 2-43 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(10kW・リチウムイオン電池) ..	86
表 2-44 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(10kW・燃料電池) ..	86
表 2-45 候補地点から極域基地までの供給電力効率評価(100kW) ..	87
表 2-46 候補地点から極域基地までの供給電力効率評価(10kW) ..	87
表 2-47 レクテナの直径を 1km としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$) ..	94
表 2-48 レクテナの直径を 500m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$) ..	94
表 2-49 レクテナの直径を 100m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$) ..	95
表 2-50 軌道高度 10,000km と 5,000km の必要機体数 ..	101
表 2-51 軌道高度 1,000km の必要機体数 ..	101
表 2-52 軌道高度 100km の必要機体数 ..	102
表 2-53 シャックルトンクレータの直上を通過する軌道の送電時間、機体数.....	103
表 2-54 シャックルトンクレータに設置するレクテナの直径が 500m の場合の送電アンテナの直径 (ビーム収集効率:90%).....	104
表 2-55 シャックルトンクレータに設置するレクテナの直径が 1000m の場合の送電アンテナの直径 (ビーム収集効率:90%).....	104
表 2-56 フェーズドアレイアンテナを構成する場合の周波数、送電距離、送電アンテナの直径、アンテナ素子の個数(アンテナ素子間隔は 0.65λ).....	105
表 2-57 アンテナサイズ(周回軌道高度:100km).....	106
表 2-58 アンテナサイズ(周回軌道高度:300km).....	106
表 2-59 アンテナサイズ(周回軌道高度:500km).....	106
表 2-60 回線計算結果(周回軌道高度:100km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図)).....	106
表 2-61 回線計算結果(周回軌道高度:300km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図)).....	107
表 2-62 回線計算結果(周回軌道高度:500km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図)).....	107
表 2-63 電力密度.....	108
表 2-64 レクテナ直径 500m の時の送電アンテナの直径.....	109
表 2-65 レクテナ直径 500m の場合の電力密度.....	110
表 2-66 軌道上セグメントの諸元.....	116
表 2-67 TWTA 型(レクテナ:500m).....	117
表 2-68 TWTA 型(レクテナ:100m).....	117
表 2-69 SSPA 型(レクテナ:500m).....	117
表 2-70 架台方式比較表.....	124

表 2-71	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.....	126
表 2-72	年間を通した日照時間比の変化(1:月単位での日照時間比).....	139
表 2-73	年間を通した日照時間比の変化.....	140
表 2-74	電源系候補の構成とそのトレードオフ結果.....	141
表 2-75	必要発電電力・蓄電池容量・システム質量.....	147
表 2-76	NASA の VSAT の要求仕様(2021 年資料).....	148
表 2-77	電力技術の目標とギャップ.....	149
表 2-78	太陽発電システム仕様.....	150
表 2-79	レゴリスの特性値.....	151
表 2-80	想定される月面利用と電力システム.....	154
表 2-81	送電方式検討結果(水抽出プロセス①(掘削+PSR 内部で水抽出)の場合).....	160
表 2-82	送電方式検討結果(水抽出プロセス②(サーマルマイニングによる水抽出)の場合).....	161
表 2-83	24GHz 帯/61GHz帯の100mW級レクテナの予測効率.....	168
表 2-84	マイクロ波送受電サブシステム検討に使用する予想効率.....	169
表 2-85	固定設置電力伝送システムの検討条件.....	170
表 2-86	固定設置送受電システムの送電部検討条件.....	174
表 2-87	24GHz 帯 BW 成立条件.....	175
表 2-88	61GHz 帯 BW 成立条件.....	175
表 2-89	24GHz 帯の送電部成立性解析結果.....	176
表 2-90	61GHz 帯の送電部成立性解析結果.....	177
表 2-91	受電レクテナ検討条件.....	177
表 2-92	24GHz 受電レクテナ規模と熱的成立性.....	178
表 2-93	61GHz 受電レクテナ規模と熱的成立性.....	178
表 2-94	送受電部の予想質量.....	179
表 2-95	伝送距離、送電電力毎に整理した送受電部質量.....	179
表 2-96	月面の自動運転重機の所要電力と主要性能.....	181
表 2-97	移動体向けマイクロ波電量伝送システム検討条件.....	185
表 2-98	周波数帯、伝送距離、ビーム効率に対応し必要となるレクテナ辺長(単位は m).....	186
表 2-99	2m ² 程度のレクテナが受電可能な伝送距離毎のビーム効率 (単位 m).....	187
表 2-100	送電アンテナ辺長 6m の場合のアンテナ構成と表面温度.....	187
表 2-101	10 台程度の移動体への給電を想定した素子出力 20mW 時の送電アンテナ成立性.....	188
表 2-102	送電アンテナ辺長 3.1m ² 、4kW 送電時の伝送距離毎のレクテナ取出電力とサービス台数.....	188
表 2-103	送電アンテナ辺長 3.1m ² 、4kW 送電時のレクテナの熱的成立性.....	189
表 2-104	マルチビーム送電アンテナ、移動重機搭載レクテナ部の推定質量.....	190
表 2-105	3 つのレーザ波長に対する石英ファイバー伝送損失.....	193
表 2-106	石英ファイバー伝送損失の波長依存性(典型値)からの単位長さあたりの発熱量の見積.....	198
表 2-107	月面の土壌サンプル(レゴリス)の成分比。二次生成の元となる材料.....	204
表 2-108	月面上の線量当量の評価例.....	205

表 2-109	電圧が 120VDC のケース.....	209
表 2-110	電圧が 400 VDC のケース.....	209
表 2-111	電圧が 1000VDC のケース.....	210
表 2-112	室内電力用途による有線・無線の選定案.....	213
表 2-113	各構成システム構築における今後の課題.....	219
表 2-114	月面上での送電システムの主要課題と対応(案).....	222
表 3-1	有識者委員会 構成員一覧表(五十音順 敬称略).....	226
表 3-2	有識者委員会の開催履歴.....	227
表 3-3	水素 WG 構成員一覧表(五十音順).....	228
表 3-4	水素 WG の開催履歴およびアジェンダ.....	228
表 3-5	電力 WG 構成員一覧表(五十音順).....	229
表 3-6	電力 WG の開催履歴およびアジェンダ.....	230
表 4-1	中国の月探査ミッション(嫦娥シリーズ).....	232
表 4-2	中国の月探査における資源探査パイロード.....	232
表 4-3	インドの月探査ミッション(Chandrayaan シリーズ).....	234
表 4-4	インドの月探査における資源探査パイロード.....	234
表 4-5	韓国の月探査における資源探査パイロード.....	235
表 4-6	UAE の月探査における資源探査パイロード.....	236
表 4-7	レゴリスからの主な酸素抽出技術.....	237
表 4-8	レゴリスからの主な酸素抽出技術の比較.....	238
表 4-9	50kW 級太陽光パネル(垂直及び平面)及び GW 級太陽光パネル(平面)の概要.....	243
表 4-10	50kW 級及び GW 級太陽光パネルに関するプログラムへの資金拠出状況.....	243
表 4-11	月の極域における最大電力需要予測(50kW 級太陽光パネルを用いた場合).....	244
表 4-12	Fission Surface Power(核分裂発電) ¹ に関する STMD の取り組み.....	245
表 4-13	Fission Surface Power(核分裂発電)に関するプログラムへの資金拠出状況.....	246
表 4-14	Transmission Cable System(有線送電システム)に関する STMD の取り組み.....	247
表 4-15	Transmission Cable System(有線送電システム)に関するプログラムへの資金拠出状況.....	247
表 4-16	高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関する STMD の取り組み.....	247
表 4-17	高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関するプログラムへの資金拠出状況.....	248
表 4-18	長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関する STMD の取り組み.....	248
表 4-19	長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関するプログラムへの資金拠出状況.....	248
表 4-20	最大 10kW 級の無線電力伝送に関する STMD の取り組み.....	249
表 4-21	最大 10kW 級の無線電力伝送に関するプログラムへの資金拠出状況.....	249
表 4-22	ラジオアイソトープ電源に関する STMD の取り組み.....	250
表 4-23	ラジオアイソトープ電源に関するプログラムへの資金拠出状況.....	250
表 4-24	低温環境下で作動する二次電池に関する STMD の取り組み.....	251
表 4-25	低温環境下で作動する二次電池に関するプログラムへの資金拠出状況.....	251
表 4-26	CH ₄ /O ₂ 固体酸化物形燃料電池に関する STMD の取り組み.....	252
表 4-27	CH ₄ /O ₂ 固体酸化物形燃料電池に関するプログラムへの資金拠出状況.....	252

表 4-28	電力に関する NASA の動向まとめ.....	253
表 4-29	第 1 フェーズ、第 2 フェーズの概要.....	254
表 4-30	第 1 フェーズで受賞した事業者と受賞理由.....	254
表 4-31	第 2 フェーズでの入賞した事業者と、課題内容.....	255
表 4-32	Moon Village 構想における電力試算の前提条件.....	260
表 4-33	Moon Village 居住棟における消費電力及び必要となる太陽光発電システムの推算 蓄電システムとして LiB を利用するタイプ(左)と RFC を併用するタイプ(右) オレンジ色の枠が入力、灰色の枠が出力を示す.....	260
表 4-34	Moon Village 居住棟における消費電力及び必要となる原子力発電システムの推算 オレンジ色の枠が入力、灰色の枠が出力を示す.....	261
表 4-35	開発中の太陽光発電システム(米国).....	264
表 4-36	開発中の太陽光発電システム(欧州).....	264
表 4-37	開発中の原子力発電システム.....	265
表 4-38	国内企業ヒアリング.....	266

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ртеミス計画(有人月探査計画)への参画を決定した。当該計画への参画に当たっては、宇宙基本計画(令和2年改訂)の中で、「民間事業者等とも協働しつつ、月・月以遠での持続的な探査活動に必要な基盤技術の開発・高度化を進め、国際宇宙探査を支える基盤の強化及び裾野の拡大を図る」こととしているが、宇宙飛行士の常時滞在やそれに先立つ短期間の有人月面探査、居住施設の設置・建設といったあらゆる活動において、月面での電力確保と安定供給が必要である。

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3年度の調査「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))」(以降、昨年度調査とも呼ぶ)では、我が国が米国提案のアрте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3年度の成果としては、一定の前提条件の下で、水資源のバリューチェーンである探査、掘削/熱抽出、輸送、水抽出、水電解、液化・貯蔵の各プロセスにおいて必要となる技術について、候補となる技術の選定を行うとともに月面で利用する場合のメリット・デメリットや課題など利用可能性の評価を行った。そして、評価結果を基に各プロセスの施設を組み合わせた基本施設構成(モデルケース)を整理した。さらに、具体的な検討ケースとして、レゴリス中の水の含有率(0.1%と1%)、水素の製造期間(35日間と300日間)を設定し、各施設で必要となる電力量等についてのパラメータスタディを実施した。一方、「電力」の検討も、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3年度の成果としては、一定の前提条件の下で、月面上および月周辺軌道における発電、二次電池等による蓄電、マイクロ波やレーザ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・技術の洗い出しを行うとともに、実現に向けた課題を整理した。加えて、具体的な検討ケースとして電力供給量100kW、送電距離10kmを設定し、これを実現するシステム構成を基本構成(モデルケース)と位置づけるとともに、発電、蓄電、送電の各システムにおいて実現に向けた課題の洗い出しを実施した。

有識者委員会・WGの運営では、7名の有識者により構成された有識者委員会を3回、具体的な技術課題の検討を行うWGを水素WGと電力WGに分けて設置し、それぞれ5回開催した(5回目は合同開催)。

国内外の動向調査では、水素については欧米を中心とし、また民間企業に着目して動向把握を行った。その結果、米国が様々なプログラム／プロジェクトを活用して技術開発を行っていることなどが判明した。電力については、発電、蓄電、送電に分け、それぞれの関連技術の最新動向を調査・整理した。

1.3 本年度の調査の概要

令和4年度も令和3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年度と同様に「電力」と「水素」に分けて並行して検討を進めた。「電力」は、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。「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。最終的に、月面エネルギーアーキテクチャ全体としてのエネルギーマネジメント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

技術課題整理に係る内容について国内外の動向調査を行った。調査は「ウェブ・文献調査」と「国内企業へのヒアリング調査」を組み合わせで行った。

「ウェブ・文献調査」では、主に海外政府および企業の動向について調査を行った。令和3年度の欧米を中心とした調査に続き、インド、中国、UAE等の主に欧米以外の海外政府及び研究機関の動向について調査を行った。また、欧米については、令和3年度より詳細な調査として、レゴリスからの酸素(金属)抽出技術について調査・分析を行った。

国内企業へのヒアリング調査では、令和3年度の検討において新たに検討が必要になった施設や構成要素、あるいは関連する技術を保有する企業に対してヒアリングを行い、同企業が保有する要素技術、現在の研究開発の現状、今後の計画等について情報収集を行った。

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。

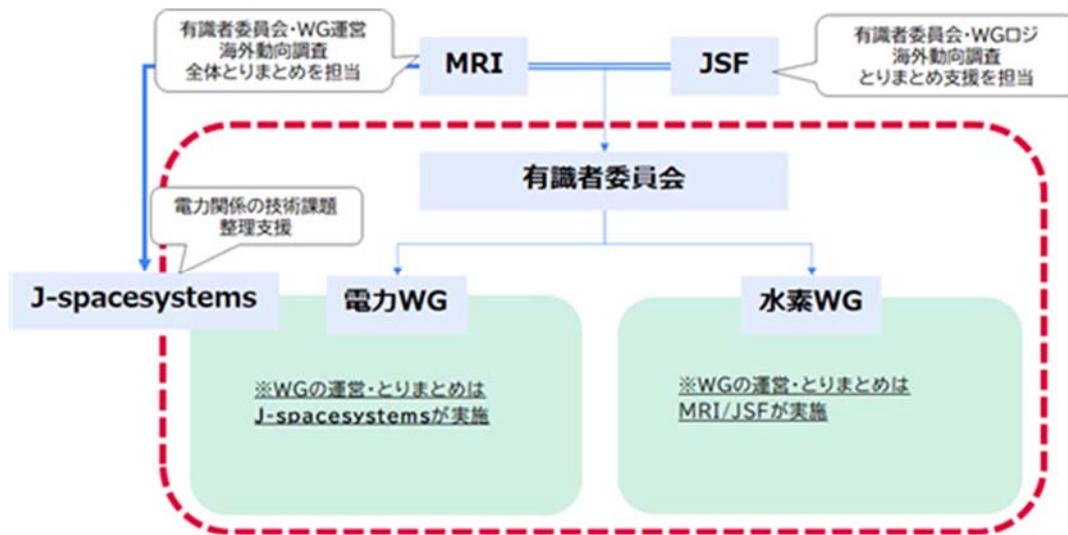


図 1-1 実施体制図

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。「電力」は、発電、蓄電、送電の一連の流れを一貫して検討した。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、その他の電力供給源についても一部検討した。最終的に、月面エネルギーアーキテクチャ全体としてのエネルギーマネジメント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

水素に関する検討は、令和3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。

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った。また、電力の検討との横断的な課題として、ケーススタディとして水素の各プロセスの施設で必要となる電力量を試算し、電力側の検討との整合性を確認した。以降で各プロセスの検討結果を順次述べる。

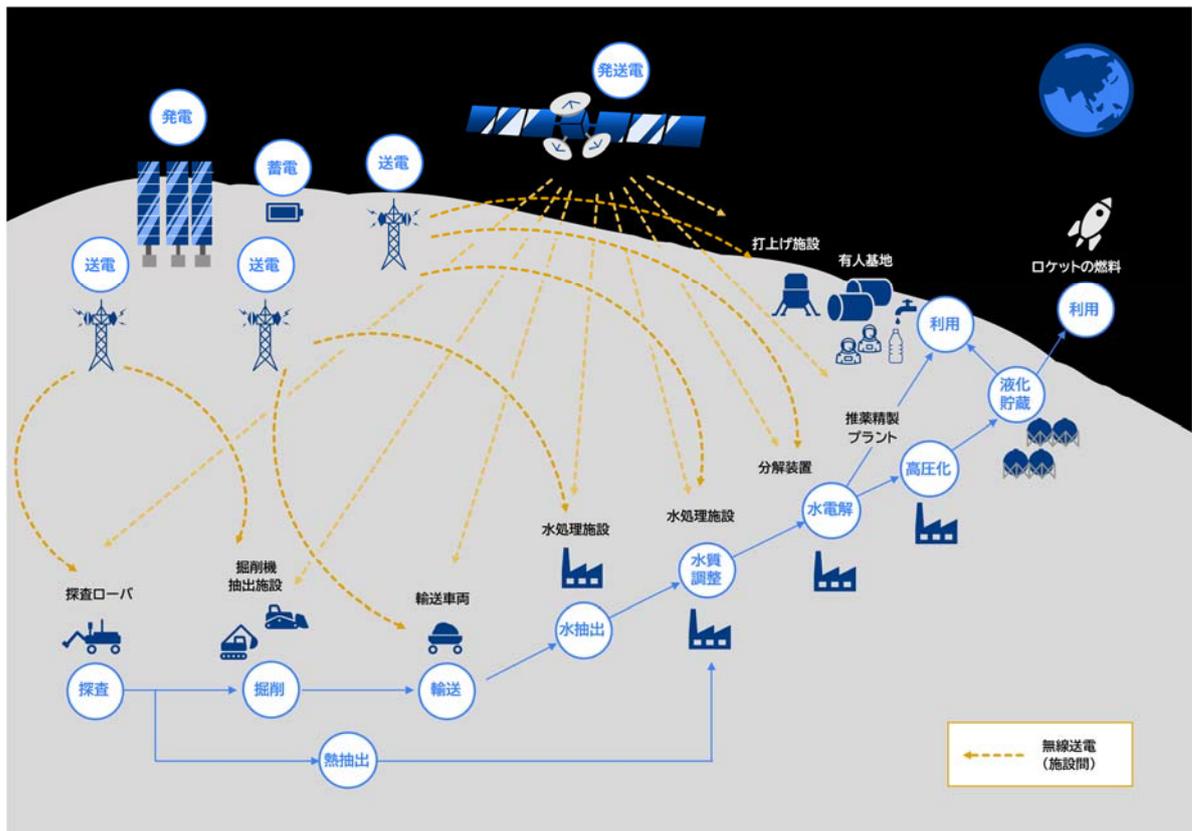


図 2-1 バリューチェーン全体像

出所)三菱総合研究所作成

本年度に要素技術の検討を行ったプロセス及び検討内容を表 2-1 に示す。なお、一部のプロセスについては昨年度に比較評価を実施済みであり、本年度に個別プロセスとしての検討は行っていない。

表 2-1 各プロセスの概観及び本年度検討事項の整理

プロセス	プロセス概要	本年度の検討事項
探査	レゴリス中の水探査として、水の空間的な位置、量、存在形態、性状等の把握するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度に探査手段の比較評価を実施済み
輸送	レゴリスや抽出水など施設間の水含有物資の移送するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度に輸送手段の比較評価を実施済み
熱抽出 (サーマルマイニング)	蓄熱・伝熱技術を応用してレゴリスから水資源を抽出するプロセス。※抽出場所は PSR 内部に限らない	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度に熱抽出(サーマルマイニング)に係る技術の比較評価を実施済み
掘削・水抽出	PSR 内部でレゴリスの掘削、電気加熱や太陽光加熱などを用いてレゴリス中から水をする抽出するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度は抽出場所や抽出手法によるメリット・デメリットの比較評価を実施 ・ 本年度は必要な消費電力の観点で適用技術の比較評価を実施
純水処理 【新規追加】	レゴリスからの抽出水に含まれる不純物(揮発性物質やレゴリス微粒子など)の除去を行うプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度の検討にて必要性が確認され、本年度から新規に検討対象に加わったプロセス ・ 本年度はレゴリス抽出水を対象に純水処理を行う上での課題整理及び最適な適用技術の評価を実施
水電解	水処理後の純水から水素・酸素(気体)を生成するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度は月面での水電解技術について、地上における複数の電解技術の比較評価を実施 ・ 本年度は純水処理プロセスに関連して、純水処理の有無による水電解に係る消費電力の差分を算出(⇒純水処理プロセスの必要性の補完)
高圧化 【新規追加】	水電解により生成された水素・酸素(気体)の高圧化を行うプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度の検討にて必要性が確認され、本年度から新規に検討対象に加わったプロセス ・ 本年度は高圧化のタイミング及び適用技術の比較評価を実施
液化	高圧化された水素・酸素(気体)を液体化し、水素・酸素(液体)を生成するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度に液化手段の比較評価を実施済み
貯蔵	着陸船やホッパーなどへの投入までに水素・酸素(液体)を保管するプロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 昨年度に貯蔵手段の比較評価を実施済み
横断的検討	月面上での建設や施設制御システムなどすべてのプロセスに共通・横断的に関わる技術の検討	<p>【建設技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本年度、JAXA が発行している「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」(以降、「JAXA 探査シナリオ」という)における検討内容調査を行うと共に、月面での建設に関して今後取得するべきデータを整理 <p>【制御技術】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 月面上での施設全体を統合するマネジメントシステムの実現に向けて、コントローラやセンサデバイスの月面での利用に係る課題を整理 ・ 通信及び保守システムを対象とした現在の技術課題を整理すると共に、解決に向けた地上実証実験と机上検討の案を提示

出所)三菱総合研究所作成

2.1.2 個別プロセスの検討

(1) 掘削・水抽出

昨年度に実施した水抽出に係る複数技術の比較検討として、「水抽出場所による比較」及び「水抽出技術による比較」を実施した。水抽出として有望と考えられる4ケースについて、それぞれのケース概要、必要設備、メリット/デメリットの列挙を行った結果を表2-2に示す。

表 2-2 水抽出技術の構成比較

ケース	PSR 内で電力抽出	PSR 内で太陽光抽出	リム部で電力抽出	リム部で太陽光抽出
説明	クレータ底部 PSR で掘削したレゴリスを、電力加熱(ヒータ・マイクロ波等)して水を抽出する。	クレータ底部 PSR で掘削したレゴリスに、反射集光鏡(ヘリオスタット)を活用してリム部太陽光を照射・加熱して、水を抽出する。	クレータ底部 PSR で掘削したレゴリスをクレータリム部へ輸送し、ここで電力加熱(ヒータ・マイクロ波等)して水を抽出する。	クレータ底部 PSR で掘削したレゴリスをクレータリム部へ輸送し、ここで太陽光を照射・加熱して水を抽出する。
掘削場所	クレータ底 PSR			
抽出場所	クレータ底 PSR	クレータリム部		
抽出エネルギー	電力	太陽光利用	電力	太陽光利用
PSR~クレータリム間輸送物	抽出水 (150トン/年@2035年 TBD)	レゴリス (30,000トン/年@2035年 TBD 含水率 1%, 掘削~抽出まで収率 50%の場合)		
必要設備				
PSR 部	(掘削設備) ・レゴリス加熱・抽出装置(電力駆動) ・レゴリス供給・排出装置 ・受電設備(無線送電)	(掘削設備) ・レゴリス加熱・抽出装置(太陽光利用) ・レゴリス供給・排出装置	(掘削設備)	(掘削設備)
PSR~リム部間	(抽出水輸送装置(タンク+ローバ))	(抽出水輸送装置(タンク+ローバ))	(レゴリス搬送設備(トラック・コンベア)等)	(レゴリス搬送設備(トラック・コンベア)等)
リム部	・送電設備(無線送電) ・貯水タンク	・ヘリオスタット(集光装置、長距離用) ・貯水タンク	・レゴリス加熱・抽出装置(電力駆動) ・レゴリス供給・排出装置 ・貯水タンク	・ヘリオスタット(集光装置、短距離用) ・レゴリス加熱・抽出装置(太陽光利用) ・レゴリス供給・排出装置 ・貯水タンク
Pros. Cons. (抽出プロセスの観点より)				
Pros	・PSR~リム部の輸送物量小	・PSR~リム部の輸送物量小 ・電力消費量少ない	・技術開発の難易度低い ・環境厳しい PSR 部での稼働機器は最小	・技術開発の難易度低い ・電力消費量少ない ・環境厳しい PSR 部での稼働機器は最小
Cons	・環境厳しい PSR 部での稼働機器の開発要 ・電力の無線伝送技術の開発が重要 ・電力消費量 多い	・環境厳しい PSR 部での稼働機器の開発要 ・月面で稼働するヘリオスタット技術開発が重要	・PSR~リム部の輸送物量が多い ・電力消費量 多い ・輸送中レゴリスから、水分の気化ロス	・PSR~リム部の輸送物量が多い ・輸送中レゴリスから、水分の気化ロス

注) 抽出エネルギー「電力」の場合、加熱方法として、抵抗加熱、マイクロ波加熱の両オプションを含む。

電力の伝送方法として、上記無線給電以外にバッテリー輸送等が考えられるが、重量の点で不利のため、ここでは割愛した。

上記以外に、物理的なレゴリス 水分離技術が提唱されているが、詳細不明のためここでは割愛する。

出所) 各社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

本年度は昨年度列挙した水抽出場所及び技術について、必要エネルギーの観点から定性／定量的に比較検討を実施した。

1) 各プロセスの対象物・処理量・必要エネルギー量の整理

水素生成に関わる全体アーキテクチャを検討する上で、各プロセスの処理量及びプロセス間の輸送量を整理することは重要である。この検討において、特に、「レゴリス掘削～水抽出」プロセスは、レゴリス中の水氷の含水率や原料性状(水氷の存在形態や他揮発性物質の有無など)の影響を大きく受けるプロセスである。したがって、「掘削～水抽出」プロセスの月面での適用技術を検討する際には当該影響を考慮に入れることが必要である。

JAXA 探査シナリオを参照し 2035 年段階で純水量 75ton/年の供給が必要であるとの前提のもと、各プロセスにおける処理量を算出した。各プロセスでの処理量の導出に際し、レゴリス中の水の含水率を①0.5%、②1%、③5%と設定したが、範囲は本検討での仮置き値である点に留意が必要である。また、「歩留まり(%)」値は昨年度の本検討での採用値であり、各プロセスでの検討が進むにしたがって、数値は変動する可能性がある。図 2-2 に各プロセスにおける処理量の算出結果を示す。

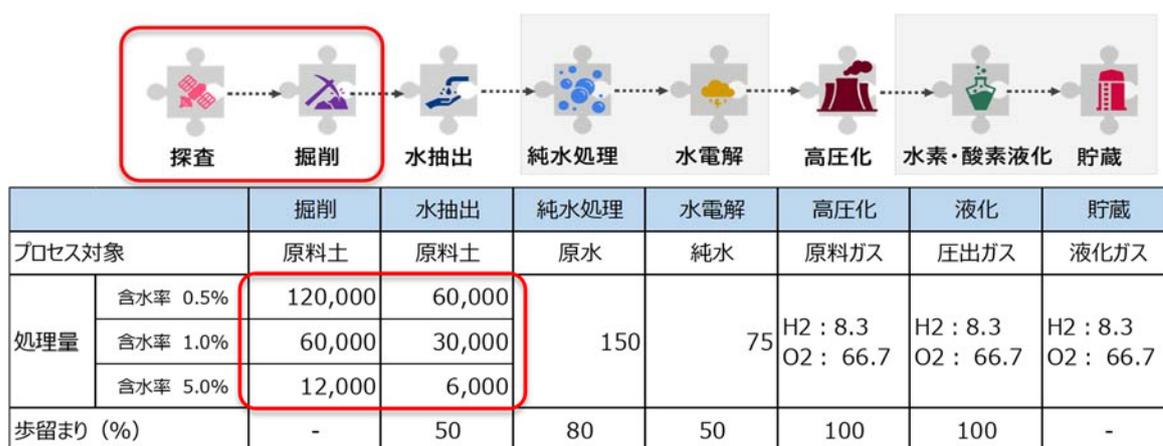


図 2-2 各プロセスにおける処理量(昨年度検討結果にもとづく)

出所)千代田化工建設提供資料

図 2-2 においても明らかであるように、処理量が水の含水率に依存するプロセスは水抽出までであり、含水率が低くなるにつれて、処理しなければならないレゴリス量は増大する。昨年度結果に基づいて、各プロセスに必要な電力量を算出した結果を図 2-3 に示す。以下に前提とした条件を示す。

- 覆土厚 30cm、水氷を含む原料土は 30～60cm に存在すると仮定
- 水抽出に際して、加熱レンジ -60℃ → 20℃と仮定
- 抽出熱の回収・再利用は考慮しないと仮定
- 純水処理以降電力は昨年度検討ベースと仮定

当該図では「掘削」「覆土除去」「水抽出」「水抽出以降」における電力量を整理しているが、全体プロセスにおいて、「掘削」～「水抽出」が占めるエネルギー(電力)割合が最も大きく、且つ含水率によって大

大きく変動することが明確である。従い、それぞれの含水率ごとに有効な全体アーキテクチャや適用技術は異なり得ると考えられる。

本年度の検討の 1 つとなっている水素生成に関わる全体プラントアーキテクチャの決定においても、「レゴリス掘削～水抽出」の条件・技術設定は重要事項のひとつである。

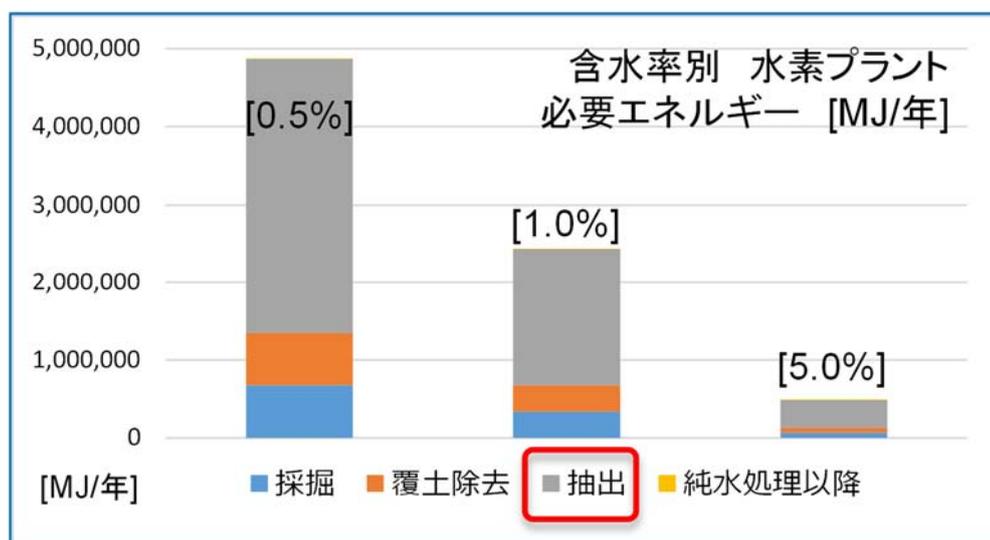


図 2-3 各プロセスにおける必要エネルギー量(昨年度検討結果にもとづく)

出所)千代田化工建設提供資料

2) 水抽出に関わる適用技術の定性影響評価

a. レゴリス中の水含有率の変化に伴う必要技術の評価

レゴリス掘削～水抽出プロセスまでの適用技術の定性評価のため、昨年度検討した内容も踏まえ、レゴリス中の水含有率の変化における掘削方法、リム外輸送方法、水中抽出のためのエネルギー源、熱回収の有用性について整理した。レゴリス中の水の含水率が低い(0.1%～1.0%)ことを仮定する場合、必要量の水氷を確保するために掘削エリアは広範囲となる。一方で、含水率が高い(5%以上)ことを仮定する場合、掘削エリアは狭範囲となる。各項目における手法・技術比較結果を図 2-4 に示す。

- **掘削方法:**レゴリス中の含水率が低密度かつ深い位置に存在する場合、原位置抽出(サーマルマイニング)が有効であると考えられる。
- **リム外輸送方法:**基本的に水氷はクレータ内部(PSR)に存在すると考えられており、人間活動で利用するためにクレータ外部に輸送する必要がある。含有率が低い場合、輸送すべきレゴリス量が膨大となるため、レゴリスでの輸送ではなく抽出水としての輸送が適している。一方で含水率が高い場合、レゴリスでの輸送も選択肢の一つとなりうる。
- **水抽出のためのエネルギー源:**含有率が低い場合、輸送すべきレゴリス量が膨大となるため、電力を利用した電気加熱では膨大なエネルギーが必要となり現実的ではなく、太陽光を利用した抽出が現実的である。一方で、含水率が高い場合、電気加熱による水抽出も選択肢の一つになりうる。

- **熱回収の有用性**:熱回収は電気加熱方式との親和性が高いため、水含水率が高い場合に特に有用であると考えられる。



図 2-4 レゴリス中の含水率の変化に伴う手法・技術比較結果

出所)千代田化工建設提供資料

b. レゴリス中に含まれる水の原料性状による影響評価

レゴリス中の水の性状はエネルギーだけでなく、装置の構成、サイズや仕様にも影響し、結果としてプラントの構成、サイズ及び仕様や地球からのペイロード等に影響することが想定されるため、原料性状の同定が非常に重要となる。原料性状の例として、レゴリス中の水の含有率だけでなく、氷粒サイズやその他の揮発性物質の含有率が挙げられる。氷粒サイズについて、小さいほど気化しやすい性質をもつため、熱抽出手法を用いることで抽出を容易に行うことが可能である。一方で、レゴリス輸送は困難であると考えられる。また、他の揮発性物質の含有率について、抽出時の水組成、さらに純水処理プロセスに影響を与える。具体的な組成情報等については過去に LCROS に係る情報等を活用し、仮置きすることが想定される。

レゴリス中の水の性状がどのようなプロセスに影響を与えるかを図 2-5 に示す。上述のように、他の揮発物資の含有率については水抽出までではなく、純水処理にまで影響を与える可能性がある。

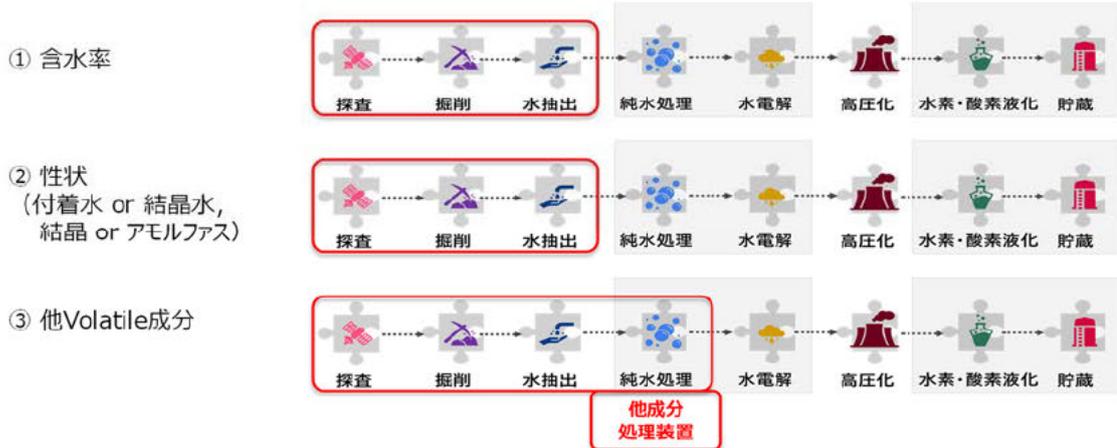


図 2-5 レゴリス中の水の性状の影響範囲

出所)千代田化工建設提供資料

c. 必要エネルギーに基づく適用技術の評価

レゴリスから水を抽出するにあたって、「掘削」「抽出(場所)」「給電方法」の 3 つの軸の組み合わせが想定される。具体的には表 2-3 に示すような技術組合せが考えられる。

掘削の観点では、物理掘削において掘削機等の什器の稼働が必須であるため多くの電力量が必要であると考えられる一方で、サーマルマイニング技術の適用において、掘削は必要なく原位置抽出が前提となるため電力量の消費は最小限にとどめることが可能である。また、水抽出手法の比較として、電気加熱方式による抽出では膨大な電力量を消費するため、太陽光加熱による水抽出の方が電力消費の観点で有利である。さらに輸送物の観点では、レゴリス中の水含水率が低い場合、レゴリスをクレータ外部まで輸送にあたって膨大な電力を消費することとなるため、抽出水の輸送の方が有利であると考えられる。

上記の定性評価を踏まえ次項において、電力量ベースの定量的な評価を行い、月面での適用において有利な技術・アーキテクチャの検討を行う。ただし、いずれのケースでも、原料性状(含水率等)影響は非常に大きく、レゴリス中の水の性状把握のため、早急な「探査」が特に重要である。

表 2-3 適用技術・アーキテクチャごとの定性評価結果(必要エネルギーにもとづく)

適用技術・アーキテクチャ			必要エネルギー(操縦電力)定性比較			
掘削	抽出(場所)	PSR 給電	掘削	水抽出	輸送物	バッテリー輸送
物理掘削	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー	×	×	○ 抽出水	×
		無線給電	掘削機 駆動電力	抽出電力 大		○(最小)
	太陽光加熱 (PSR 内)	バッテリー		○ 電力不要	△大 (掘削)	
		無線給電				○(最小)
太陽光加熱	バッテリー			×	大(掘削)	

	(クレーム)	無線給電			含水レゴリス	○(最小)
サーマル マイニング	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー	○ サーマルマ イニングで は掘削不 要	×	○ 抽出水	大(抽出)
		無線給電				○(最小)
	太陽光加熱 (PSR 内)	バッテリー		○ 電力加熱不要		
		無線給電				

出所)千代田化工建設

d. 必要電力以外の評価軸に基づく適用技術の評価

本項では、必要電力以外の評価軸にもとづいて月面での水抽出技術の評価を行う。前提として、PSR での掘削・抽出技術として、「電気加熱」ケースと「太陽光加熱」ケースを比較するとし、PSR 内部において掘削を行わないサーマルマイニング技術はここでは対象外とする。

ケース 1 として「電気加熱」技術を採用した電気チャンバケースを想定する。当該システムの概観を図 2-6 に示す。図に示されているように、水抽出にあたって、密閉加熱チャンバ(電熱)へレゴリスを投入して電気加熱を行い、水蒸気をコールドトラップに移送し水抽出を行う。初期段階ではバッチプロセスで実現することが想定されるが、将来的には水素・酸素の需要量の拡大に合わせて連続化による処理量増加が重要課題であると考えられる。

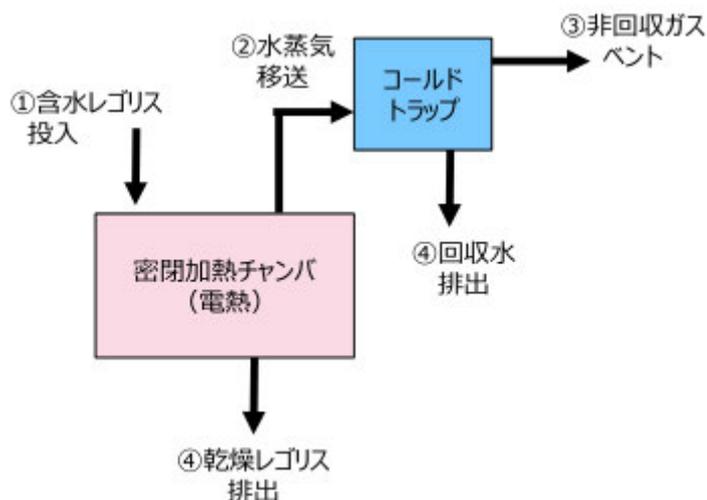


図 2-6 電気加熱による掘削・抽出の概要

出所)千代田化工建設提供資料

ケース 2 として「太陽光加熱」技術を採用した太陽光加熱・露天ドームケースを想定する。当該システムの概観を図 2-7 に示す。図に示されているように、PSR 内に密閉ドームを設置し、掘削した含水レゴリスを集約する。露天ドームに対して太陽光を反射・照射して加熱し、水抽出を行う。水抽出の際には、30m 四方のドームを設置し、移動しながら採取するイメージが考えられる。

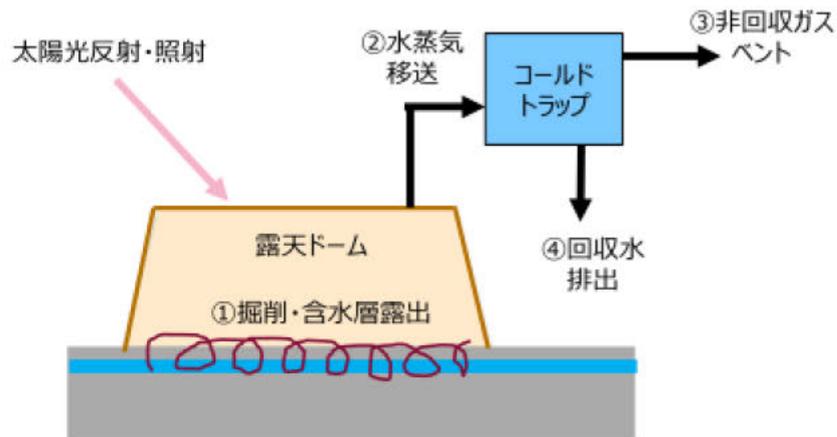


図 2-7 太陽光加熱による掘削・抽出の概要図

出所)千代田化工建設提供資料

ケース 1 及び 2 それぞれに関して必要電力を含めてメリットとデメリット整理する。具体的な整理結果を表 2-4 に示す。

表 2-4 各ケースにおけるメリット及びデメリット

	ケース 1(電気加熱)	ケース 2(太陽光加熱)
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 加熱乾燥レゴリスから熱回収技術を確立できると省電力化に繋がる 	<ul style="list-style-type: none"> 省電力 レゴリスハンドリング容易
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 大電力必要 レゴリス移送・投入等の搬送機構が必要 電気輻射での低熱伝導率レゴリス加熱は効率低い 	<ul style="list-style-type: none"> ケース1に対して漏洩水蒸気大、歩留り小

出所)千代田化工建設提供資料

3) 水抽出に関わる適用技術の定量影響評価

a. 検討目的

本年度は 2)にて検討を行った定性評価に基づいて、「掘削～水抽出プロセス」の各アーキテクチャについて必要電力量を試算した。本検討の目的は以下に示す通りである。

- 「掘削～水抽出プロセス」は、水素生成に関わる施設の運転電力の大半を占める可能性があり、当該観点での実現性の評価を行うため。
- 「掘削～水抽出プロセス」は、プロセスの一部を採掘場所・PSR で実施することが必須であり、当該領域での活動の実現性や給電方法が、今後に向けた重要な技術課題となり得るため。

また、比較したアーキテクチャは以下に示す内容の組み合わせであり、表 2-3 に示す適用技術・アーキテクチャに対応する。また、月面上での PSR、日照領域、発着地点の位置関係、ケース区分の詳細を図 2-8 に示す。ただし、クレータリム部での抽出技術では、「電気加熱」は除外し「太陽光加熱」のみとした。

- 含水率:3 ケース(0.5wt%、1.0wt%、5.0wt%)
- 掘削技術:2 ケース(物理掘削、サーマルマイニング)
- 抽出技術:2 ケース(電気加熱、太陽光加熱)
- 抽出場所:2 ケース(PSR 内、クレータリム部※)
- PSR 給電方法:2 ケース(バッテリー、無線給電)

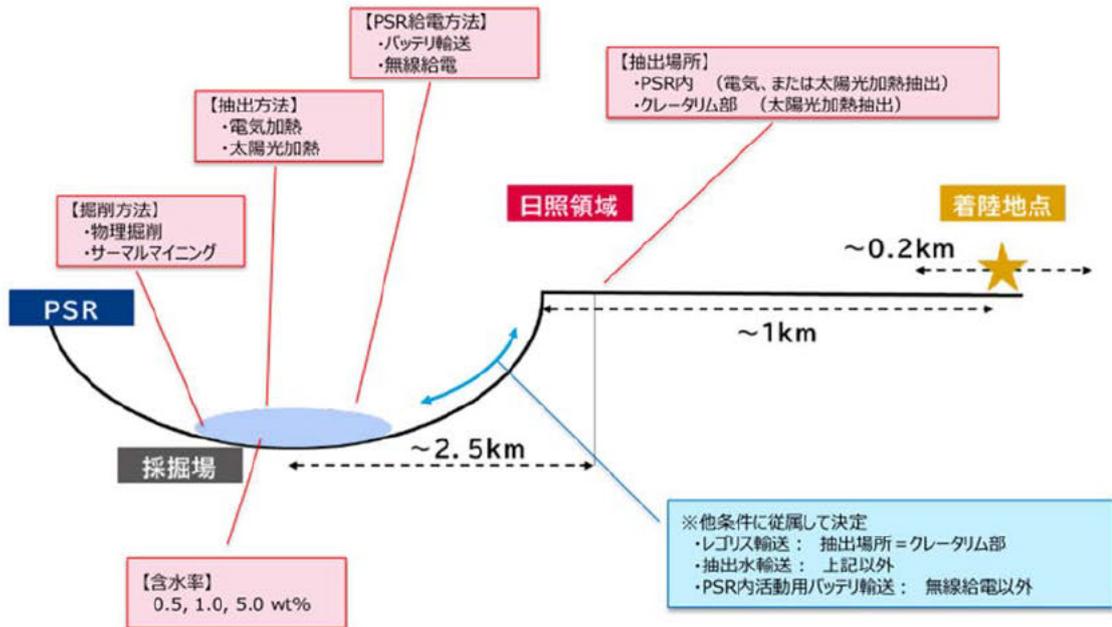


図 2-8 PSR、日照領域、発着地点の位置関係、ケース区分の詳細

出所)千代田化工建設提供資料

b. 検討の前提条件

掘削～水抽出までの必要電力の算出における前提条件として、掘削・抽出に係る原料土量(質量)は、に示す通り、JAXA 探査シナリオを参照し、年間 75ton/年の水が必要との前提のもと、含水率 0.5% の場合 37,500ton/年、含水率 1.0% の場合、18,750ton/年、含水率 5.0% の場合 3,750ton/年と設定した。数値から明らかなように、水の含水率が処理量に大きくかかわっていることが確認できる。

表 2-5 掘削・抽出に係る原料土量(質量)

工程		掘削・抽出	純水処理	水電解
プロセス対象		原料土	原水	純水
処理量 (トン/年)	含水率 0.5%	37,500	75	75
	含水率 1.0%	18,750		
	含水率 5.0%	3,750		
歩留まり(%)		50	80	100

出所)千代田化工建設提供資料

その他電力量算出に必要なパラメータである「レゴリス物性」、「掘削・採掘条件」「抽出条件」「輸送条件」などは表 2-6 に示す設定とした。なお、掘削～水抽出に係る必要電力量の概算を把握することが目的であるため、特に月面環境等のファクターは考慮していない。

表 2-6 各計算パラメータ(概算)

項目		パラメータ値		備考
レゴリス物性	比熱	670	J/kgK	
	かさ比重	1.7	g/cm ³	
掘削・採掘条件	覆土層厚	30	cm	
	含水層厚	30	cm	
	掘削所要電力	2	KWh/トン	昨年度報告書表 2-18 バックホウ、100kg/hr200W より。
抽出条件	初期温度	-80	℃	
	加熱後温度	-30	℃	
輸送条件	輸送距離(往復)	10	km	片道直線 2.5km、斜面う回・往復を考慮し4倍とする。
	輸送所要電力	1	kWh/km・トン	三菱ふそう「eCanter」仕様より。ただし不整地であり仮に5倍する。
その他	(地球)年間稼働時間	6000	時間	20 時間× 300日、昨年度報告書設定より。
	バッテリー重量効率	150	Wh/kg	昨年度報告書表 2-164 リチウムイオン電池より。
	無線給電効率	25	%	

出所)千代田化工建設提供資料

c. 必要電力の試算結果

必要電力の算出にあたって、各適用技術・アーキテクチャごとに「覆土除去」「掘削」「抽出」「処理物輸送」「バッテリー輸送」で消費されるプロセス電力の合計値として算出した。例としてレゴリス中の水の含水率 0.5%と設定した場合の、試算結果を表 2-7 に示す。表中の青ハッチングは「50KW 以下」のケースに対応する。

結果から明白であるようにプロセスを通じて「抽出」プロセスが占める電力が最も大きく、電力の供給方法として PSR 内に「無線給電」するとバッテリー輸送が不要となるものの、変換ロスが加算されるため、「無線給電」では「覆土除去・掘削・抽出」電力がバッテリーの4倍程度多くなるとの結果となった。また、「サーマルマイニング」による水抽出では「覆土除去・掘削」プロセスの電力が不要である他、抽出方法として「太陽光加熱」を適用する場合、「抽出」プロセスでの電力が不要となる点が特徴的である。

表 2-7 各要素技術の試算結果

適用技術・アーキテクチャ			プロセス電力 kw※					
掘削	抽出(場所)	PSR への給電	覆土除去	掘削	抽出	処理物輸送	バッテリー輸送	合計
物理掘削	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー	13	13	58	0.31	5.5	89
		無線給電	50	50	233	0.31		333
	太陽光加熱 (PSR 内)	バッテリー	13	13		0.31	1.7	27
		無線給電	50	50		0.31		100
	太陽光加熱 (クレーター)	バッテリー	13	13		62.50	1.7	89
		無線給電	50	50		62.50		163
サーマルマイニング	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー			58	0.31	3.9	62
		無線給電			233	0.31		233

	太陽光加熱 (PSR 内)	(プロセス 電力なし)				0.31		0.31
--	------------------	----------------	--	--	--	------	--	------

※本表ではプロセス用主電力のみ概算。設備の設置、維持、移設、補助等電力は試算外。
 ※※ここでは「抽出」排熱の回収・効率化は考慮しない。

出所)千代田化工建設提供資料

上述した考え方に基づいて、各含水率で試算した結果の集計を表 2-8 に示す。含水率が高くなるほど、100kW(昨年度電力 WG で目標と設定した数値)以下で操業可能なケースは増加し、含水率 5% の場合にはすべてのケースで 100kW を下回ることが確認できる。当該結果より、含水率により有効な技術は変わり得る他、含水率 5%以上の場合には必要電力値以外の評価軸で適用技術の評価する必要があることが分かった。

また、プロセス電力量の観点のみで比較すると、PSR への給電方法としては「バッテリー」の方が「無線給電」より有利であることがわかったほか、「太陽光加熱」は「電気加熱」よりプロセス電力の点で有利であることが分かった。

なお、本検討では各技術成熟度、設備物量(建設費用)を比較の対象に含んでいないため、より詳細な検討においては概念設計レベルの精査が望ましいと考えられる。

表 2-8 含水量別(0.5%、1.0%、5.0%)の試算結果

適用技術・アーキテクチャ			プロセス電力 kw※		
掘削	抽出(場所)	PSR への給電	含水率 0.5%	含水率 1.5%	含水率 5.0%
物理掘削	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー	89.0	44.7	6.7
		無線給電	333.0	166.6	24.1
	太陽光加熱 (PSR 内)	バッテリー	27.0	13.6	0.5
		無線給電	100.3	50.3	0.9
	太陽光加熱 (クレーン)	バッテリー	89.2	44.6	6.4
		無線給電	162.5	81.3	6.8
サーマル マイニング	電気加熱 (PSR 内)	バッテリー	62.3	31.3	6.5
		無線給電	233.0	116.6	23.6
	太陽光加熱 (PSR 内)	(プロセス電力なし)	0.3	0.3	0.3

※青ハッチングは「50KW 以下」ケース

出所)千代田化工建設提供資料

上記結果を踏まえ、以降の検討ではプロセス電力上で最も有望だが地上で類似技術が乏しい、「物理掘削・太陽光加熱」ケースの技術検討を行い、実現性を確認する。

4) 定性/定量評価結果に基づく掘削・抽出プロセスの具体検討

2)3)において、月面上での掘削～水抽出にかかわる適用技術・アーキテクチャとして、「物理掘削・太陽光加熱」ケースが有望である可能性が高いと考えられる。本項では、当該ケースに着目して、特に月面における「太陽光抽出」に転用可能な地上技術の整理を行った。

a. ヘリオスタット(太陽熱集光発電用反射鏡)

月面での「太陽光加熱」技術を用いた水抽出に転用可能な地上技術として、ヘリオスタット(太陽熱集

光発電用反射鏡)の活用が考えられる。ヘリオスタットとは、太陽光を反射・集光し、熱媒を加熱発電するための反射鏡で、太陽移動に追従して位置制御する。地上では短距離伝送が主用途であるため、月面上の利用にあたっては長距離・軽量化開発が必要となると考えられる。

仮に水抽出エネルギーとして 58kW の集熱に必要な反射鏡面積は $58\text{kW} \div 1.4\text{kW}/\text{m}^2$ (太陽定数) = 42m^2 と計算できる。ただし、効率を考慮し、この数倍が必要と想定する。また、太陽光抽出では、抽出の熱エネルギーは伝送可能だが電力送信は不可であるため、掘削等エネルギーは、無線給電等で電力受信が適切であると考えられる。



図 2-9 ヘリオスタット反射鏡例

出所)千代田化工建設, <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/renewable-energy/solar-energy/>, 2023 年 3 月 6 日閲覧

b. 凍結乾燥コールドトラップ

月面での「太陽光加熱」技術を用いた水抽出に転用可能な地上技術として、凍結乾燥コールドトラップの活用が考えられる。凍結乾燥コールドトラップは、低圧・低温の物質から内部水を気化させ、氷として凝固・回収する技術で、医薬品、フリーズドライ食品等で活用されている。図 2-10 に構成イメージを示す。本技術を月面での水抽出に採用することにより、以下のメリットがあると考えられる。

- レゴリス中揮発成分を極力排除して水回収可能。後工程の水処理の負担を軽減可能。
- 低温・低圧のため、加熱に必要なエネルギーを削減。またドームからの圧力差による漏出水蒸気低減や軽量化が可能。

月面における水抽出の実現に向けて、加熱部 250K、100Pa、コールドトラップ部 200K、10Pa 程度を見込む。ただし、低温・低圧での揮発性物質・水の挙動は、不明点が多く、さらなる検討が必要である。

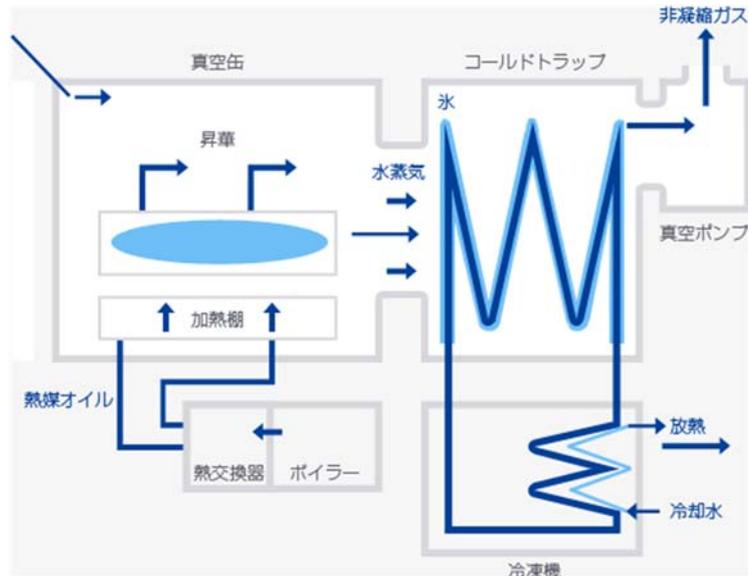


図 2-10 凍結乾燥機・コールドトラップ構成例

出所)日本エフディ株式会社, <https://www.nihonfd.co.jp/technology/what.html>, 2023年3月6日閲覧

5) 今後の課題

本年度はプロセス電力量の観点から、「掘削～水抽出」の各アーキテクチャを比較評価した。この結果、以下が明らかとなった。

- 抽出適用技術において、「太陽光加熱」は「電気加熱」に比べて有利
- PSR 給電において、効率の点から「バッテリー給電」は「無線給電」より有利
- 上記を鑑み、100kW の給電制約(仮)の点で、「太陽光加熱・バッテリー給電」が有利

ただし、レゴリス条件(含水率等)により適用技術・規模が替わり得る点は留意すべきであり、今後の月面探査進展が重要となると考えられる。また、上記評価は、プロセス電力量以外の評価指標(技術成熟度、設備物量等)は含んでいないため、今後のシステム間レベルの概念設計等による精査が必要である。

さらに、「太陽光加熱・バッテリー給電」については、地上類似技術の転用で実現できる可能性があることを確認した。ただし今後の具体化のための詳細検討は必要。特に個別装置技術に加え、低温低圧下での水・揮発性物質の挙動の解析技術が重要であると考えられる。

(2) 純水処理

昨年度の検討結果を踏まえ、月面上での水素生成に関わるプロセスとして「純水処理」に関して月面での適用技術評価を実施した。

月面における純水製造にあっては、想定されるレゴリス抽出水の性状に対して最適な水処理システムフローの提供することが求められる。水抽出のより抽出されるレゴリス抽出水の性状を把握し、最適な純水処理システムの詳細を検討することが重要であり、特に候補となる揮発性物質として二酸化ケイ素(SO₂)、アンモニア(NH₃)、メタノールなどを把握すると共に、抽出水中に残存するレゴリス微粒子の径や量を特定する必要がある。レゴリス抽出水の性状により水処理システム構成が大きく異なると考え

られるため、当該情報を特定し、金属を極低濃度レベルまで低減されておりかつ、保管時の金属溶出が抑制された純水が水電解への入力として求められる。

1) レゴリス抽出水の性状予測の前提条件

レゴリス抽出水の性状予測にあたって、以下に示す前提条件を仮定する。

- 使用熱量の大部分はレゴリスを加温するために費やすため、10～50℃での真空加熱蒸留による抽出を想定する。
- 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。
- レゴリス中の水分量は 0.1% 又は 1% とする。
- 年間の水利用量：75ton/年を前提とする。

2) レゴリス抽出水の性状予測

1) にもとづいて、レゴリス抽出水の性状予測を実施し、予測の対象としては「揮発性物質」及び「レゴリス微粒子」の性状について検討を行った。

a. 揮発性成分

レゴリス中の揮発性成分の含有率について、極地のレゴリスに氷と数%オーダーの揮発性成分が含まれていると結論付けた NASA の LCROSS ミッションの結果にもとづいて予測した。これらが蒸気に移行すると抽出水中の揮発性成分濃度は非常に高濃度となることが想定される。に LCROSS の結果の概観およびレゴリス水中の揮発性成分の含有率(重量比 wt%)を示す。結果から分かるように、硫化水素(H₂S)、アンモニア(NH₃)、二酸化硫黄(SO₂)などの重量比が高く、数%～十数%程度含まれる可能性があるとの結果が得られた。

Table 3. Reported and revised abundance of volatile components detected in the LCROSS ejecta plume

Component	Formula	Reported abundance with respect to water vapor detected ²	Reported abundance with respect to soil mass ³	Revised abundance of reported values with respect to water in lunar soil
		Moles per moles water vapor x 100% (mol%)	Mass per mass soil x 100% (mass%)	Moles per moles water per 1 kg soil x 100% (mol%) ⁴
Hydrogen	H ₂	N/R	1.4 ^b	225
Water	H ₂ O	228.3 ^c	5.6 ^a	100
Carbon Monoxide	CO	N/R	0.7 ^b	8.09
Hydrogen Sulfide	H ₂ S	16.75 ^a	N/R	7.30
Ammonia	NH ₃	6.03 ^a	N/R	2.66
Sulfur Dioxide	SO ₂	3.19 ^a	N/R	1.40
Ethylene	C ₂ H ₄	3.12 ^a	N/R	1.37
Carbon Dioxide	CO ₂	2.17 ^a	N/R	0.94
Methanol	CH ₃ OH	1.55 ^a	N/R	0.67
Methane	CH ₄	0.65 ^a	N/R	0.28
Mercury	Hg	N/R	0.22 ^b	0.36

N/R: Not Reported; ^a: as reported by Ref. 2; ^b: as reported by Ref. 3; ^c: as calculated in this work

Wt%に換算

	MW	LCROSS分析結果 [wt%] (水を100として)
H2	2.01588	25.2
H2O	18.01528	100
CO	28.0104	12.6
H2S	34.07988	13.8
NH3	17.03052	2.5
SO2	64.0628	5.0
C2H4	28.05376	2.1
CO2	44.0098	2.3
CH3OH	32.04216	1.2
CH4	16.04276	0.25
Hg	200.59	4.0

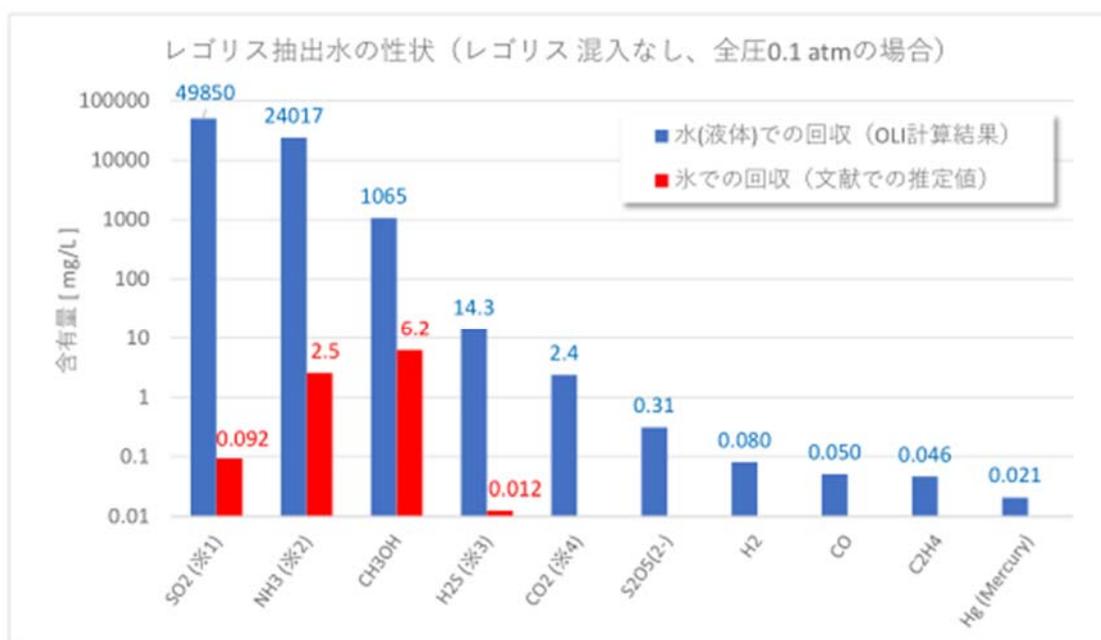
図 2-11 LCROSS の結果の概観およびレゴリス水中の揮発性成分の含有率(重量比 wt%)

出所) Jordan B. H. et al., "Analysis of a Cold Trap as a Purification Step for Lunar Water Processing", ICES-2020-71 に追記

文献にて得られた調査結果も考慮し、OLI(電解質熱力学モデル)によるレゴリス抽出水のシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、抽出水中の揮発性物質濃度として、揮発性成分由来の亜硫酸、アンモニア、メタノール、硫化水素が多量に含まれるという結果が得られた。具体的なシミュレーション結果を図 2-12 に示す。LCROSS データによる揮発性物質質量で計算している。

この結果に基づくと、水(液体)として凝縮させるとレゴリス中の揮発性成分が溶解し、水処理が困難な水質となる恐れがあり、地上においても濃縮液として産廃処分する液性状レベルとなっていることが分かる。当該課題を回避するため、抽出水の揮発性物質濃度を低減可能な方策をとる必要がある。

方策として、コールドトラップにて、抽出水を水(液体)ではなく、氷として捕捉することで揮発性物質を数 mg/L に抑制できる可能性がある。シミュレーション結果より、コールドトラップを行うことにより、水(液体)で回収する場合と比較して、抽出水中の揮発性物質の含有率は低減することが可能である。



※1 SO₃(2-)+HSO₃(-)+SO₂(aq) ※2 NH₄(+)+NH₃(aq) ※3 H₂S(aq)+HS(-) ※4 HCO₃(-)+CO₂(aq)

図 2-12 OLI(電解質熱力学モデル)によるレゴリス抽出水のシミュレーション結果

出所)栗田工業提供資料

b. レゴリス微粒子(< 20 μm)

レゴリス抽出水に含まれる不純物として揮発性物質の他にレゴリス微粒子(< 20 μm)が想定される。以下に示す考え方にもとづいて、抽出水 1kg に含まれるレゴリス粒子量の試算(レゴリス含水率 1%の場合)を行うと、抽出水 1kg におよそ 90g のレゴリス微粒子が混入する可能性があることが分かった。

$$\text{レゴリス量 } 100 \text{ [kg/kg-水]} \times \text{レゴリス中の微粒子割合 } 9 \text{ [wt\%]} \times (100[\%] - \text{集塵率 } 99[\%]) = 90 \text{ [g]}$$

図 2-13 に示すレゴリス微粒子径に対応するレゴリス水における含有率より、レゴリス中の微粒子の

割合を 9[wt%]と設定した。また、集塵率 99%について、一般的なバグフィルタの性能にもとづいて設定した。具体的には、粒子径 20~0.1 μm 微粒子 90~99%除去にて、最大性能の 99%が得られた場合の想定を行っているが、電気集塵機の適用により、より集塵率を高められる可能性がある(～99.9%)

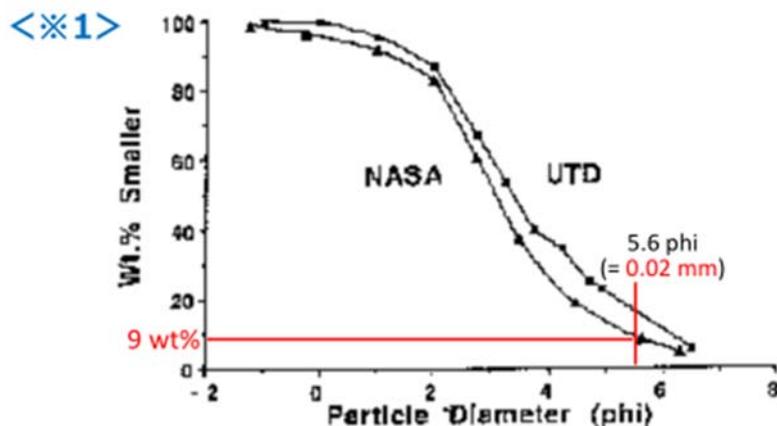


Figure 3. Particle size distribution curves for JSC-1. Particle diameters in phi units ($\phi = -(\ln d) / (\ln 2)$, $d = \text{diameter in mm}$).

図 2-13 レゴリス中の微粒子の直径と含有率の関係

出所) David S. McKay et al., "JSC-1: A NEW LUNAR SOIL SIMULANT", Engineering, Construction, and Operations in Space IV, American Society of Civil Engineers, pp. 857-866, 1994

3) まとめと今後の進め方

レゴリス抽出水は、水(液体)として回収すると揮発性物質が溶解し、水処理が困難な性状となることが想定される。抽出水の揮発性物質を低減する対策を講じる必要がある。レゴリスからの蒸留時に、蒸気内にレゴリス微粒子がエアロゾルとして多く随伴する可能性がある。蒸気のコールドトラップ前に、レゴリス微粒子を除去する集塵機の設置が必要と考えられる。したがって、水処理システムの構成を検討するためには、処理可能な抽出水水質で検討を進める必要がある。

(3) 水電解

本年度における水電解プロセスにおける検討として、昨年度事業にて報告した水電解装置のスペックにもとづいて、水質条件の違いによる水素製造への影響について試算を行った。

水質条件の違いによる水素製造への影響は、担当企業様の実験データ(厳密な実験データ(生データ)は機微なため、一部加工して設定)を踏まえて、水質による効率値(η :効率低下)を設定した。

水素製造への影響(試算結果)は、純水を製造する水処理に係るエネルギー(電力量)と比較し、どちらを優先すべきか総合的な評価を行うのが望ましいと考えられる。本検討では純水処理に必要な電力量も含んだ形での検討となっている。

1) 水質条件の違いによる影響評価に係る前提条件

昨年度の検討において、月面上での探査で使用する曝露ホッパー及びゲートウェイと月面を往復するための着陸船の推進剤として水素を利用することを考慮し、2つのパターンに分けた水素生成のシナリオを検討した。具体的には1パターン目として、無人期間も含めて水素を300日かけて「少しずつ生成」

するパターン(以降、「パターン①」と表記)、2 パターン目として、有人期間中に 35 日という短時間で「一気に生成」するパターン(以降、「パターン②」と表記)である。試算検討に於ける前提条件として、以下を想定した。

- **必要水素量:**100Nm³ と仮定、水素製造量 5Nm³/h の水電解装置での性能・製造時間・質量について比較検討
- **水電解装置の設置環境:**地上での装置稼働に必要となる温度条件(4℃～45℃)を満たすと圧された閉鎖空間 ⇒ 暴露部での装置稼働は不可のため
- **製造可能期間:**14 日間(336 時間)※越夜は温度条件がより厳しい環境となるため、製造できない期間とする ⇒ 越夜環境でも温度条件を保つ空間であれば稼働可

上述した前提条件のもと、それぞれのパターン①及び②の評価結果を表 2-9 に整理する。

表 2-9 パターン①及び②の評価結果

	少しずつ作って溜める方式 パターン①		一気に作って溜める方式 パターン②	
水素製造原単位 ※ある条件下での一例	4.1kWh/Nm ³ (水素製造効率:87%)	○	5.1kWh/Nm ³ (水素製造効率:69%)	×
必要電力量 (最大電力)	410kWh+補機(20%) (2.1kW+補機動力)	○	510kWh+補機(20%) (25.5kW+補機)	×
水素製造時間	100Nm ³ 製造まで 200 時間を要する	△	100Nm ³ 製造まで 20 時間を要する	○
セル質量	定格の 10%運転のため 過剰設計となる	×	F/Sとして 5Nm ³ /h を採用 30kg を月面に輸送は困難	△
水素貯蔵(ガス)	差異なし	△	差異なし	△
水素貯蔵(液化)	保管に多くのエネルギーが必要となる	×	パターン①より エネルギー量は少ない	△

出所)高砂熱学工業提供資料

本年度は純水処理プロセスとの連動を考慮し、水電解システムの要求水質を満たすため定常的に純水処理を動作させた場合と、純水処理を行わず水電解システムを動作させた場合での必要電力の差分を計算した。前者の場合は水質が一定に保たれるため性能は維持されるが、純水処理に必要な電力が加算される一方で、後者の場合は純水処理システムを動作させる電力は必要ないが、水質が低下するため、前者同等量の水素を生成するために水電解システム動作に必要な電力量は増加すると考えられる。

計算に使用した水電解システムに係る前提条件は以下の通り

- 月面用水電解装置に要求する水質:10MΩ・cm
- 水電解装置の仕様:水素製造量 5Nm³/h, 水素製造効率 5.1kWh/Nm³
- 水質の違いによる水素製造への影響として、10,000h 運転で水質が 10MΩ・cm → 1MΩ・cm に劣化した場合、水電解装置の性能は10%低下することを実験データより仮定

上記の全て条件に基づいた水電解システムの消費電力は表 2-10 に示すとおりである。水質の低下に伴って1,275kWhの差分が生じていることが分かる。

表 2-10 水電解システムに係る消費電力の導出条件(水質低下に伴う消費電力増加を考慮)

項目	具体値	備考
水素製造量	50,000Nm ³	5.0Nm ³ /hの水電解装置を10,000h稼働した場合
装置1台あたり水素製造量(10MΩ・cm)	5.0Nm ³ /h	前提条件
装置1台あたり水素製造量(1MΩ・cm)	4.5Nm ³ /h	実験データにもとづく前提条件
装置1台あたり消費電力(10MΩ・cm)	5.1kWh/Nm ³	前提条件
装置1台あたり消費電力(1MΩ・cm)	5.61kWh/Nm ³	実験データにもとづく前提条件
稼働時間	10,000h	前提条件
消費電力(10MΩ・cmを維持した場合)	255,000kWh	-
消費電力(1MΩ・cmを維持した場合)	256,275kWh	-
差分	1,275kWh	-

出所)各社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

一方で、水質 10MΩ・cm を維持するためには純水での水電解が必要であり、当該処理に必要な電力量を計算した。

計算に使用した純水製造システムに係る前提条件は以下の通り

- 必要な純水量は水素製造量 50,000Nm³に基づいて、40.2tonと仮定
- レゴリス抽出水からの回収率は80%と設定

上記の条件に基づいて、純水製造システムの消費電力は表 2-11 に示すとおりである。純水製造に関わる消費電力は200kWhであることが分かった。

表 2-11 純水製造システムに係る消費電力の導出条件

項目	具体値	備考
純水量	40.2ton	水電解システムにより生成される必要のある水素量より算出
要求水質	10MΩ・cm	前提条件
レゴリス抽出水処理量(総量)	50.3ton	回収率80%より算出
レゴリス抽出水処理量(1時間当たり)	5.03kg/h	稼働時間に基づいて算出
稼働時間	10,000h	前提条件
消費電力(10MΩ・cmを維持するための増加分)	200kWh	-

出所)各社提供資料に基づき三菱総合研究所作成

純水製造による増加分を考慮する場合、要求水質(10MΩ・cm)を維持する場合と水質を改善しな

い場合の必要電力量の差分 d は $d = 256,275\text{kWh} - (255,000\text{kWh} + 200\text{kWh}) = 1,075\text{kWh}$ との結果が得られた。これは純水製造に伴う電力の増加影響よりも水質悪化による水電解効率低下の影響の方が大きいことが確認できた。消費電力の観点からも水電解システムに入力する抽出水としては純水であることが望ましいと考えられる。

(4) 高圧化

昨年度の検討結果を踏まえ、月面上での水素生成に関わるプロセスとして「高圧化」についての月面での適用技術評価を実施した。

1) 水素及び酸素の高圧化

水素及び酸素の液化プロセスにつなげるためには高圧化が必要となる。高圧化のタイミングは図 2-14 に示すように電気分解の“前”と“後”の 2 種類が想定される。水素の液化に気体冷凍方式を採用する場合、液化に際して JT 膨張が必須となり 2MPaG 程度まで昇圧する必要がある。また、液化処理後の BOG (Boil off Gas) に対しても昇圧することが想定される。

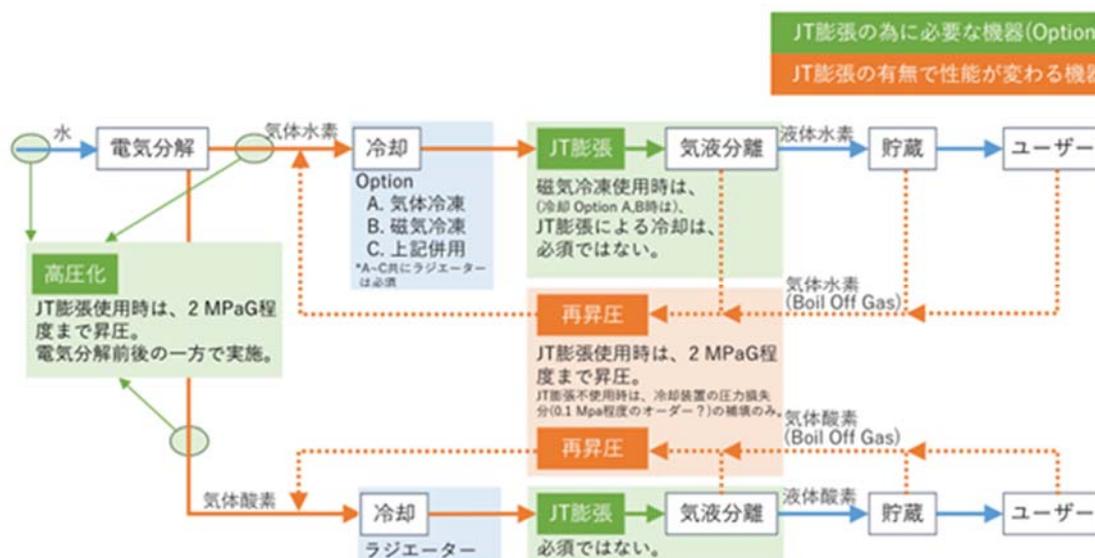


図 2-14 水電解以降のプロセス

出所)日揮グローバル提供資料

前述したように、高圧化のタイミングでは電気分解の“前後”にて実施する 2 パターン想定される。月面での適用を考えた際、様々な観点からどちらのパターンを採用するか検討することが必要である。高圧化タイミングの比較(水素で JT 使用する場合)に係る評価結果を表 2-12 に示す。設備質量、消費電力、冷却要否、機器数等の観点において水電解前での実施が望ましいとの結果となる。一方で、既存の地上での利用を前提とする電解装置の耐圧要求にもとづく、高圧化された水(液体)を電解し、高圧水素及び高圧酸素を抽出することは困難である。

本検討では、電解装置の耐圧要求を優先し、水電解“後”に高圧化処理を行うことを前提として技術比較を実施している。

表 2-12 高圧化タイミングに係る比較(水素で JT 使用する場合)

		純水の段階 (電解前)	水素・酸素(気体) の段階(電解後)	備考
設備質量		○	×	低圧ガスは容積大
消費電力		○	×	無駄な加熱(=電力効率低下)と 冷却が発生
冷却要否		○	×	
機器数	酸素 JT 使用	○	×	・水素と酸素の 2 系列必要 ・ガスは 2 段昇圧&熱交も必要
	酸素 JT 使用せず		△	
電解装置の耐圧要求		×	○	

出所)日揮グローバル提供資料

気体の高圧化は、圧縮比に応じた温度上昇の発生を伴う断熱反応である。表 2-13 に水素・酸素ガスを大気圧から 2.0 MPaG に昇圧する場合の構成例を示す。2 段圧縮の高圧化の構成を想定しており、1 段目に 0MPaG(大気圧)⇒0.46MPaG に昇圧、2 段目に 0.46MPaG⇒2.0MPaG に昇圧することを想定している。なお、2 段目に入力される水素・酸素(気体)の温度について、200 度⇒20 度まで冷却させる必要がある点に留意する必要がある。

必要電力の観点においては、ガスの昇圧は大きなエネルギー消費を伴う温度変化(無駄な加熱や冷却操作)が発生するため低効率であると考えられる。

表 2-13 水素・酸素ガスを大気圧から 2.0 MPaG に昇圧する場合の構成例

		1 段目	2 段目	備考
吸込圧	MPaG	0(大気圧)	0.46 弱	
吸込温度	degC	20	20	1 段目の後で 200→20℃に冷却
吐出圧	MPaG	0.46	2.0	
吐出温度	degC	180℃弱	180℃弱	空気による徐熱がないため、未知数。

出所)日揮グローバル提供資料

2) 充填時の高圧化にかかる具体手法

充填時の高圧化の具体手法についても比較評価を実施している。比較評価結果を表 2-14 に示す。想定される 3 種類の手法について、各手法の概要及び利点・欠点を整理している。

表 2-14 高圧化に係る具体手法

	A.貯蔵圧力を上げる	B 液化ガス用ポンプ	C.自己加圧
説明	・ 液化圧力を高く設定し、充填圧より高い圧力で貯蔵する。	・ ポンプで充填圧以上に昇圧し、輸送する。	・ 一部の液化ガスを電気ヒーターで加熱&気化させることでタンク内を充填圧以上に高圧化し、輸送する。
利点	・ 機器点数が少ない ・ BOG(Boil Off Gas)も減る	・ 特になし	・ 動機器が無いので、メンテナンスが不要。 ・ 月面適用しやすい。
欠点	・ 全ての液を払い出す事は出来ない。B か C との組み合わせが必要となる。	・ 動機器であるのでメンテナンスが必要。 ・ 月面利適用に際しハードルが高い ・ 大容量タイプは開発中	・ BOG が若干増える。

出所)日揮グローバル提供資料

(5) 横断的検討

1) 建設に関する検討状況

建設関連では以下の事項について実証することが必要である。特に、どのような構造物を作るのかの決定がなければ、具体的な計画立案は難しい。そのため、本年度においては JAXA 探査シナリオの建設関連の情報を整理した。今後月面上での建設を進めていく上で必要とされる建設関連の実証事項を以下に示す。

<建設関連で実証が必要とされる事項>

- 月面上にどのような構造物を建設するのか決定
- 上記のモジュール化
- モジュール組み立て方法
 - 仮設基地建設
 - 材料調達
 - エネルギー調達(生産)
- 組み立てロボットの仕様明確化
- ロボットの自律化
 - 動力源の決定
 - ロボット自体の組み立て
 - 月面走破性の確保
 - ロボットへのエネルギー供給方法
 - 遠隔操縦および自律化システムの開発
- 上記を踏まえた施行方法の具体的な構築
- 品質管理手法の検討

a. JAXA 探査シナリオにおける建設関連情報の整理

月面開発について、前提として図 2-15 のように 10 年以内に 4 人が 300 日、2035～2040 年に 4 人が 500 日滞在することが目標とされている。月開発において、この目標実現に向けて月での建設が特に重要な要素の一つとして挙げられる。月面上に展開する構造物と建設作業を行う宇宙機の設計法が確立していない中で開発を進めていくには、地上の土木・建築技術の応用を前提とし、その宇宙仕様化に取り組んでいくとともに、輸送コストを考慮した小型軽量の建設機械の利用が必要と考えられている。

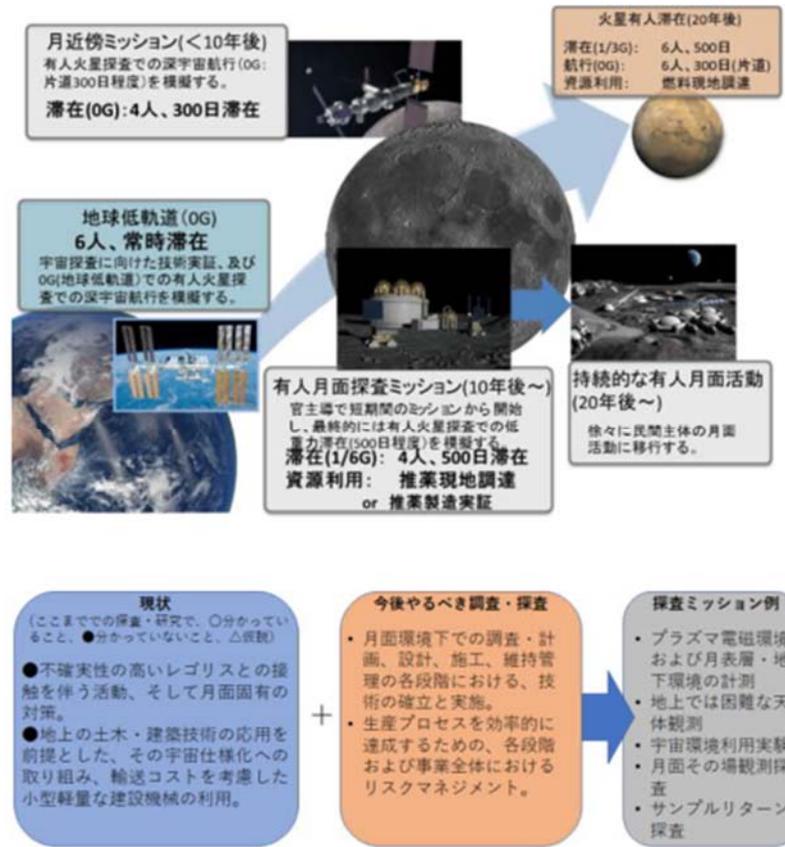


図 2-15 月面開発の前提

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021 より抜粋

ア) 必要な技術・探査

月面環境下では、地上技術を基盤としつつ、「調査・計画」、「設計」、「施工」、「維持管理」の各段階において、以下に示す技術の確立と実施が求められる。

- 調査・計画: 非 GNSS 環境下における測位・測量、地質・地盤調査、インフラ・構造物の設置・建設計画、拠点拡張性を考慮したインフラ整備計画(シナリオ検討)
- 設計: レゴリスの地盤解析・挙動シミュレーション、土工(盛土・切土・整地・締固め)の設計法、耐環境性モジュール/構造物の設計法・設置法
- 施工: 軽量で多目的な建設機械、自律・遠隔施工、電源・建設資材の輸送・製造、施工・品質管理
- 維持管理: 構造物の変状観測、劣化の想定とメンテナンス、機能診断評価

不確実性の高い月面では、生産プロセスを効率的に達成するために、各段階および事業全体においてリスクマネジメント(リスクの認識→評価→対応策選定→実施→フィードバック)の実施が求められる。上記を達成するために必要な探査として、プラズマ電磁環境および月表層・地下環境の計測、地上では困難な天体観測、宇宙環境利用実験、月面その場観測探査、サンプルリターン探査が必要と考えられる。

イ) 月面基地の要件

JAXA 探査シナリオにもとづいて、長期常駐拠点としての有人月面基地の目的としては、1/6 重力下

での500日滞在実証(有人滞在、技術実証を含む)、資源利用による本格的探査(燃料製造、現地物質の直接利用)、科学探査(調査・分析、整備・保守)などがあげられる。月面の長期常駐拠点における実証の要件として、現地において人間が生活するうえで必要な電力や酸素の確保をはじめとするインフラ整備はもちろんのこと、拡張性を備えた活動空間の構築及び現地資源の活用(ミニマムは太陽光発電とレゴリスの直接利用)などが想定される。

表 2-15 に月面上での拠点建設の制約条件を示す。表に示されるように、現実的な実証等を想定する上で数多くの制約条件が挙げられている。また、当該制約条件を満たすために JAXA の国際宇宙探査シナリオにおいては拠点建設に関わる前提条件の検討もすすめられている。具体的な前提条件を表 2-16 に示す。

表 2-15 拠点建設の制約条件

項目	内容
地上打上能力	70~130t
打上回数	頻度 年1回(年2回のうち無人1回と仮定)
最大寸法	フェアリングサイズ:φ8m×L15m
月面輸送可能質量	10t程度/回
耐振動性	5G 程度(打ち上げ時)
輸送時温度	別途整理
月面での温度	別途整理
構築期間	拡張を含め 10 年程度
耐用年数	構築から 20 年(廃棄せず保守・改修し延命する)
メンテナンス	数年ごとに 1 回
クルータイム	建設時は年 1 回 28 日程度、4 名
着陸精度	航法支援有り:±10m、航法支援無し:±100m
地球可視	地球との通信は常時確保
車両	基地内の人の移動は曝露車及び与圧車が利用可能

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

表 2-16 拠点建設の前提条件

項目	内容
構築期間	2035 年頃に、月面に 4 人が長期間滞在可能な拠点が構築される。
中長期計画等	拠点の拡張性と合わせて検討。
拠点全体規模	約 4km ² (約 2km 四方)
拠点の構成	複数ゾーンから構成。具体的には、着陸ゾーン、居住ゾーン、サービ スゾーン、観測ゾーン、ゾーン間道路の 5 種。
拠点の拡張性	増設可能な建設方式が不可欠。用途変更(スペース可変)を含めるかは要検討。
拠点建設方式	拡張性と効率を両立する方式を選定。モジュール方式、展開方式、組立方式、現地での建設方式、など。
現地調達可能な材料	物質:岩石鉱物、レゴリス、噴出性揮発物質(火山性ガスなど)、非月物質(隕石など) エネルギー:太陽光・熱、重力 人工物:使用済みのランダ、タンクなど
月面環境	別途整理

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

ウ) 建設場所

月面有人拠点の候補について JAXA 探査シナリオの中で言及されており、日当たりの良い、地球との通信が有利な場所が候補となっている。特に、月南極域に位置するシャクルトンクレータのリムなどが候補として挙げられている。また、着陸機やホッパー等が位置する発着地点から、電力発電施設が位

置する地点、クレータ内部の資源を採取する地点など、クレータリムの数 km 程度の細長い領域に、機能ごとにゾーン分けされた配置を持つことを想定している。現在 JAXA で検討が進められているゾーン間の関係性について図 2-16 に示す。

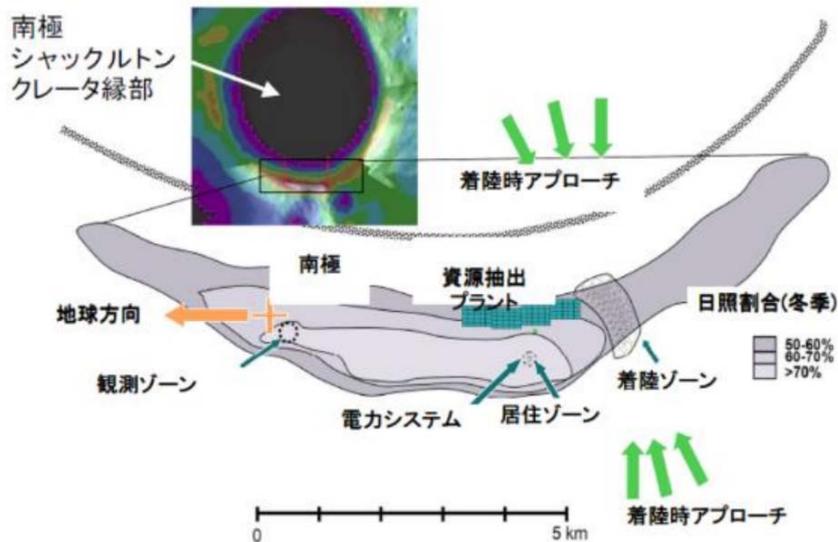


図 2-16 ゾーン間の位置関係

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

各ゾーンにおける概要及びその他のゾーンとの位置関係について以下に示す。

- **発着ゾーン**: 離着陸の際の噴射推薬から他のゾーンを守るため、本ゾーンは他ゾーンから 1km 程度離れた距離を置く。発着場の主要な構成要素は、推薬生成プラント(推薬貯蔵タンク、水素液化装置、水電解装置、水抽出装置、水含有レゴリス貯蔵所)、着陸誘導ビーコン装置などがあげられる。
- **サービスゾーン**: 発電設備(太陽光発電、原子力発電)を配置するエリア。長期日照が得られる比較的標高の高い立地に配置。発着ゾーンからは 1km 程度の距離離れていることを想定する。
- **居住ゾーン**: サービスゾーンとは徒歩で往来できる距離に配置することとする。(100m 程度)
- **観測ゾーン**: 他のゾーンから数 km 離れた場所に配置。
- **資源ゾーン**: 月面の資源を採掘するエリア。主にクレータリム(縁の部分)の永久影内で、レゴリスに含まれる水氷資源の採掘を実施する。他のゾーンより数 km 離れているものと想定。

工) 測位要求

月面上での有人拠点を建設するにあたって、高性能な測位技術が必要となる。JAXA 探査シナリオにおける測位精度要求は 0.1m であり、拠点建設時の施工精度を想定した精度要求として設定してい

る。サービス対象領域としては有人拠点内部(特に、数 km 四方の限られた拠点内)であり、上記高精度な測位精度は実現できればよいものと考えられる。当該構成の即位を実現するために、拠点内の月面局を測位基準として用いる等のアーキテクチャが想定される。一方で、拠点建設初期の資源採掘・整地等の活動においてはより低い精度でも問題はないと思われる。

オ) レゴリス土質特性

月面上での建設にあたって重要な要素の一つにレゴリスの土質特性が挙げられる。レゴリスの土質については地上での土質と異なると考えられている特性が数多く存在しており、今後進められる月面探査を通じて明らかにする必要があると考えられる。過去に実施された探査として、アポロ・ルナミッションで、コーン貫入試験等による土質特性の間接測定(測定データから経験則により特性を導出)が実施されているが、地盤の変形・強度パラメータは、地上での経験則を介して求められた推定値に過ぎず、信頼性に劣り、ばらつきが大きい(図 2-17 参照)。

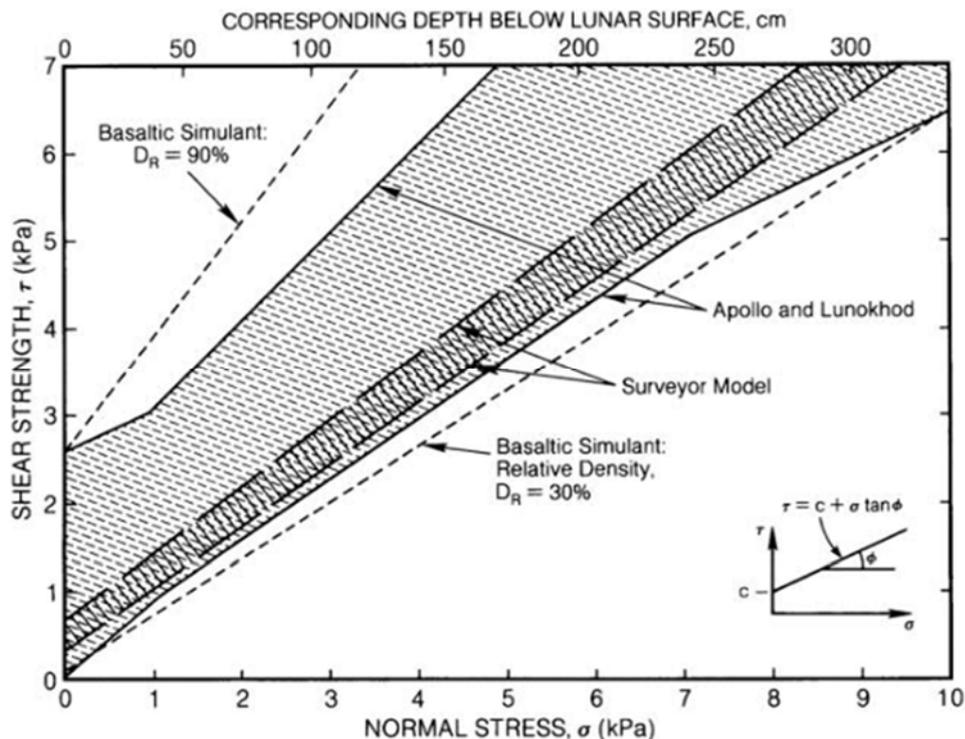


図 2-17 アポロ・ルナミッションにおける地盤の変形と強度パラメータの関係

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

今後は 1/6G 下でのテラメカニクスモデル(地盤と車両間の力相互作用)の構築のため、土質特性の直接的(経験則を介さずに導出)、かつキャリブレーションデータとして走行データを組み合わせた測定が必要であると考えられる。

カ) ロードマップ

月面における建設に関して、JAXA 探査シナリオにおいて大まかなロードマップが示されている。2020 年代は実証期間と設定し、本格的な拠点の建設は2030年以降を予定している。

- **2020年代前半(利用可能性調査)**:SELENE-R による利用可能性調査(揮発性物質、地盤)(2022年)
- **2020年代後半(利用実証)**:SELENE-R2(仮称)による利用実証(燃料製造、拠点建設)(2026年)
- **2030年代前半(拠点建設の開始)**:年1回程度の有人科学探査を5年継続予定であり、無人による有人拠点建設を並行して実施予定。年1回21日間、5年程度):21日間/年の作業を5年継続する都市、作業機械は、6か月程度は稼働を行うと想定する。4~10名が6か月程度の滞在可能な拠点が完成(2035年頃)
- **2030年代後半(有人長期滞在)**:拠点の拡張、常駐が主目的となり、有人滞在期間の延長(500日程度の滞在)が想定される。
- **2050年頃~**:一般人の月面滞在を開始

上記で示したように JAXA 探査シナリオにおいて、2030年以降にて本格的な月面上での拠点設置が開始される予定であり、図 2-18 に示すような建設シナリオが考えられている。

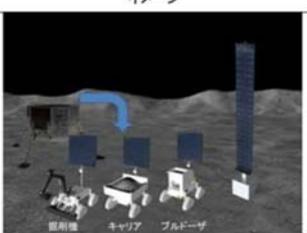
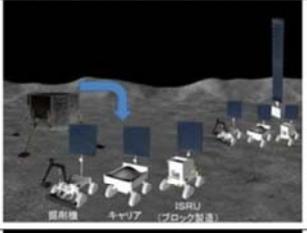
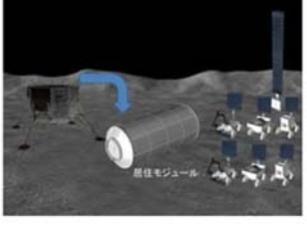
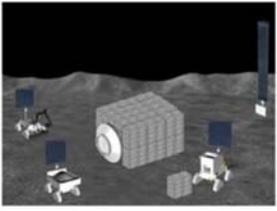
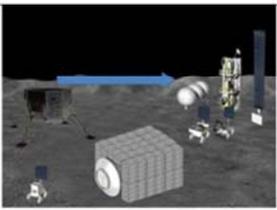
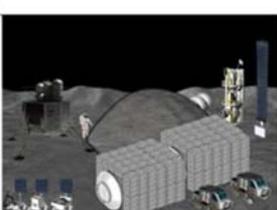
時期	ミッション及び実施内容	イメージ	
FY2030	拠点構築ミッション1 ・電源と建設機械の輸送 ・無人による建設開始(着陸ゾーンと居住ゾーンの整地)		
FY2031	拠点構築ミッション2 ・建設機械の輸送 ・遮蔽用ブロック製造開始		
FY2032	拠点構築ミッション3 ・居住モジュール輸送(短期滞在用のオールインワンモジュール。Small Hub のイメージ。)		
		・居住モジュールの設置、遮蔽作業の開始	
FY2033	拠点構築ミッション4 ・資源プラント輸送 ・資源プラント稼働開始(運搬作業等には建設機械を共用)		
FY2034	有人滞在ミッション1 ・居住モジュール完成。 ・長期滞在開始(6か月)。 ・拠点拡張開始。 有人車を使った広域探査が可能となるが、ホッパーはまだ無し。		
FY2035 ~	有人滞在ミッション2 ・有人長期滞在開始(500日)。 燃料製造が定常化しホッパーの利用が可能となる。		

図 2-18 建設シナリオ

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

キ) 今後取得すべきデータ

JAXA 国際宇宙探査シナリオでは、月面上での建設実現のために、今後取得すべきデータについての時期と取得方法が表 2-17 のようにまとめられている。

表 2-17 今後取得すべきデータと取得方法・期限

項目		該当 項番	新規取得 理由	既存データ等の有 無	データ取得計画			
					取得条 件・粒度	取得方法例	取得期限	優先 度
自然環境条件	基本的 特性	B.1	月土壌シ ミュラ ント開発、 防塵仕様 の過剰設 計防止	赤道域サンプルの ふるい透過試験及 び SEM 試験デー タ(地上計測)有	南極域の データ	南極域でのふる い透過試験 (現地計測)	～詳細設 計(2035 年頃)	低
	機械的 特性		C.1	月土壌シ ミュラ ント開発、 数値解析 条件設定	赤道域サンプルの 土粒子の密度試験 データ(地上計測) 有	南極域の データ		土粒子の密度 試験(リターン サンプルによ る地上計測)
	かさ密度 ρ	C.2	走行試験 条件設 定、数値 解析条件 設定	赤道域のコーン貫 入試験データ(現地 計測)有	南極域で の現地計 測月表面 から深さ 約 1.5m まで、約 15cm 刻 み	南極域での コーン貫入試 験から推定(現 地計測)		高
物理的 特性※	摩擦 特性	D.1.1	数値解析 条件設定	赤道域のコーン貫 入試験及びベン セン断試験からの 推定データ(現地計 測)有	南極域で の現地計 測 疎観測: 約 50m 間 隔 詳細観 測:約 1m 間隔(水 平方向)	南極域での ベンセン断 試験から推定 (現地計測)	疎観測: ～基本設 計(2030 年代前 半) 詳細観 測:～詳 細設計 (2035 年 頃)	高
		D.1.2	数値解析 条件設定	赤道域サンプルの 三軸圧縮試験デー タ(地上計測)有 LUPEX で月南極域 のせん断強さを取 得予定		南極域での ベンセン断 試験から推 定、または三 軸圧縮試験 (現地計測)		中
	変形 特性	D.2	数値解析 条件設 定、地盤 の沈下・ 変形評価	赤道域サンプルの 圧縮試験データ(地 上計測)有		南極域での ベンセン断 試験から推 定、または孔 内水平載荷試 験(現地計測)		中
	圧縮 性	D.3	数値解析 条件設定	赤道域サンプル データ(地上計測) 有		南極域でのピ バメータによ る荷重貫入試 験(現地計測)		高

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

b. 宇宙探査イノベーションハブでの取り組み

宇宙探査イノベーションハブにおいて月面上での建設に関連する検討が進められている。具体的には、以下に示す内容などが議論されている。

- 図 2-19 に示すような長時間遅れを伴う遠隔施工の実現
- 図 2-20 に示すような超軽量で多目的な建機機械の実現
- 環境に依存する技術課題への取り組み(自重に極力依存しない締固め手法、掘削情報から地盤特性の逆推定手法等)
- 建設資材の現地製造(図 2-21)
- 今後の取り組み課題(構造物や設置の検討、事前の計画や施工・設置後の評価、測量・地図作成等)

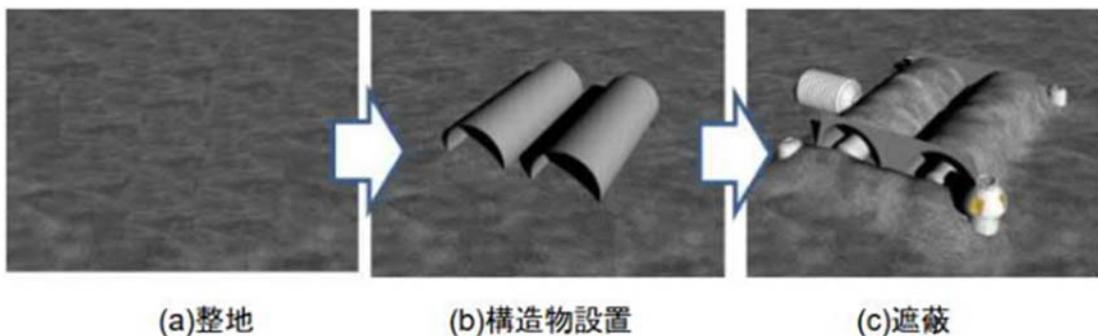


図 2-19 施工手順の例

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

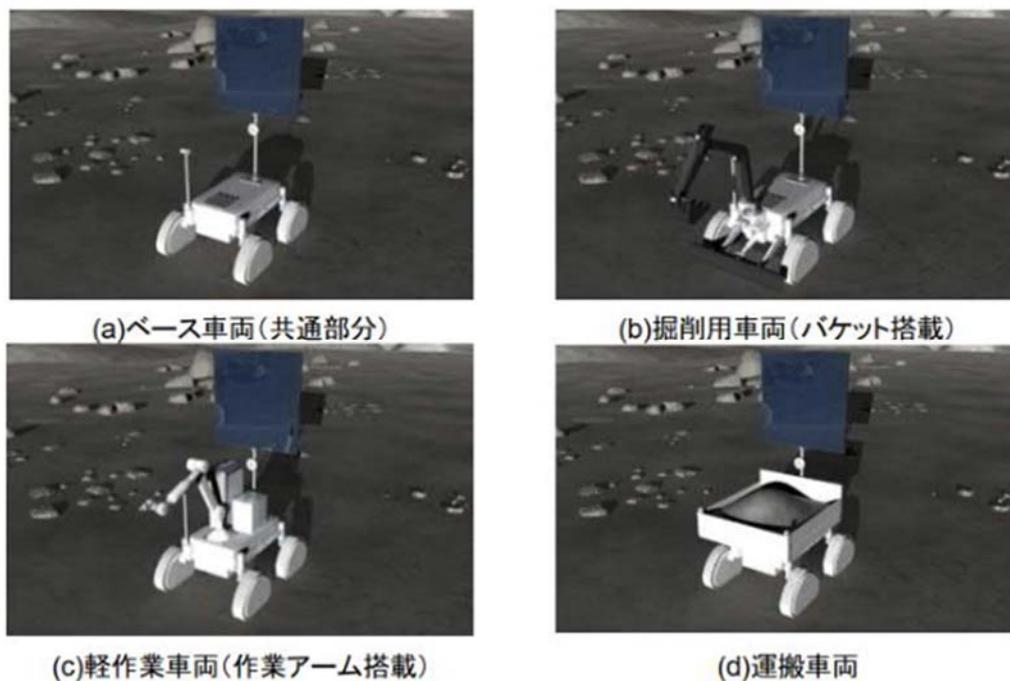


図 2-20 ベース部分を共通化した多目的月面車両

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021



(a) 角型焼結ブロック



(b) レゴ型焼結ブロック

図 2-21 月の模擬砂から作った焼結ブロック

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

また、基地建設については、①未開の月面を切り開く土木作業と、②居住モジュールの設置等を行う建築作業に分かれる。土木作業としては、今までの宇宙活動では経験のない重作業であり、基地の設計に依らない技術課題である。必要とされる掘削作業は、地上技術から類推してバケット掘削などの重作業となると考えられる。バックホウのような作業機械が燃料製造の原料となる土砂等の移動を行うことが想定される。月面用の作業機械は、地上の建設機械を宇宙仕様化することで実現できる可能性があり、その一例として、地上の建設機械の軽量化の検討がある。

一方で、建築作業については建築物の設計に依存するため今後の課題であるが、宇宙探査イノベーションハブの共同研究において、ISS と類似の円筒形与圧モジュールを想定した運搬・設置方式の検討例がある。これは、着陸機からの荷降ろし・運搬とも共通する課題であり、揚重機なども含めた作業機械の開発が必要となる可能性がある。

その他、精細作業用のマニピュレータなど個別ミッションで使用する作業ツールは、個々のミッション目的に依存するが、今までのロボットアーム技術の蓄積(JEM、ETS-7、MFD 等)があり、それらを活かして進めることが想定される。

掘削用の作業ツールは、地盤に及ぼす力や地盤から受ける力をうまく扱う必要があり、不意に大きな外力が発生した場合の損傷を回避する「力のいなし」やツールを対象にあてがいがいながら位置合わせを行う「力のならい」が重要である。このような作業ツールの力制御機能に関する開発も進められている。特に各年代において想定されている月探査ミッションとそれらを実現するために必要な掘削技術及び掘削技術に関わらない技術について表 2-18 に示す。

表 2-18 今後想定されている月探査ミッションと必要技術(掘削技術含む)

	2023 年	2030 年～	2035 年～
	月極域探査機ミッション LUPEX(水調査)	月面作業検証ミッション(作業 車両による作業技術の検証)	月面基地建設ミッション(作業 車両によるプラント建設)
掘削 技術	深さ 1.5m 以上の掘削 (再現性、直線性)	・掘削技術の高度化 ・バケット掘削実証	・バケット掘削
上記 以外	・水氷評価用サンプルの採取	・資源の抽出、加工実証	・土砂の運搬作業 ・推薬生成プラント ・基地

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

c. 月面における機器設置工事

月面における機器の設置工事に際しては、必要作業について地上での既存のフローとの比較が有用である。また、地球から搬送する資機材を極力減らすため、「①工事工程の簡素化」「②複数の作業をこなす機械の開発」「③構造物自体のロボット化」等の実現が必要となる。地上における機器設置概略施工フローを図 2-22 に、月面で想定される機器設置概略施工フローを図 2-23 に示す。

月面におけるフローチャートに示すように地上でのフローで一般的である「基礎」造りの工程は省かれている。これは月面上でのレゴリス等を活用した基礎の設置も想定はされるが、基本的に月面上での初期の構造物としてレゴリス上への直置きが一般的と想定されるためである。また、月面上では地上とは異なり無人が前提(有人であっても実施可能な建設は制限あり)であり、構造物のユニット化/プレハブ化が想定される。その場合、複数設備の一体化や構造物自体をロボット化する検討も進められており、「配管・配線」フローについても省かれている点が地上でのフローと異なる点である。

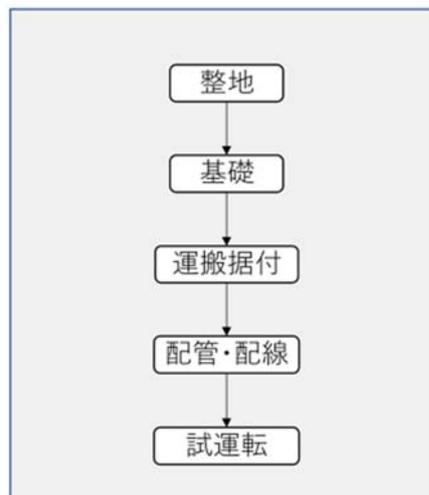


図 2-22 地上における機器設置概略施工フロー

出所)大林組提供資料

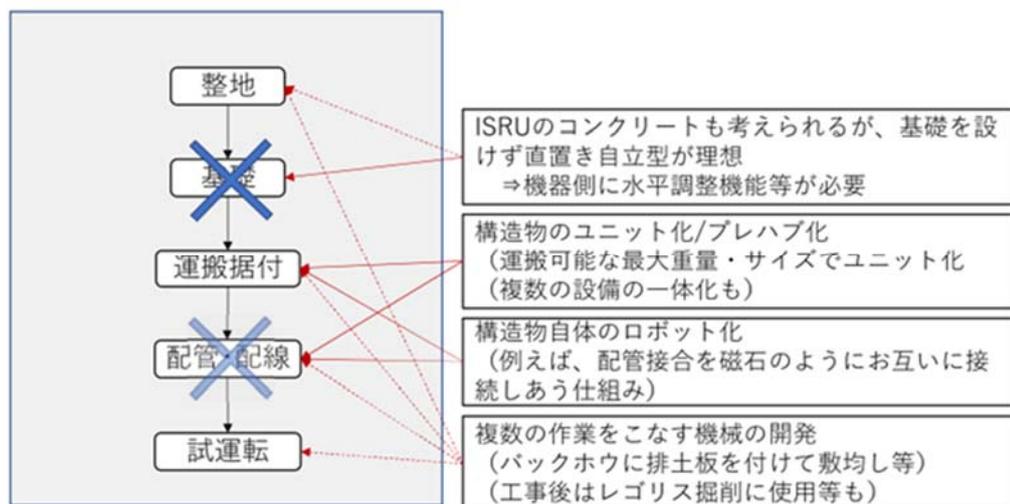


図 2-23 月面における機器設置概略施工フロー

出所)大林組提供資料

2) 制御システムに関する検討状況

個別プロセスごとの技術評価に加え、プロセス間のコミュニケーション手段や運用保守に関するリモート／自律運用等における制御システムに係る検討も重要である。また、検討結果にもとづいて水素バリューチェーン全体を横断する月面統合マネジメントシステムの開発も必要となる。

地上における一般的なマネジメントシステムの構成を図 2-24 に示す。当該システムはエッジ側で制御及び計測を行う現場層、各種管理システムを内包する管理層、管理システム全体を統合する連携層の3層に分類することが可能である。

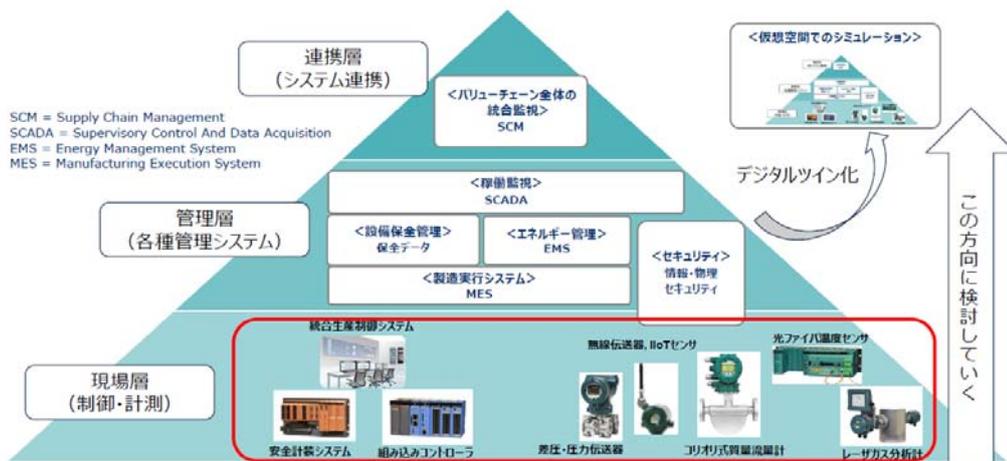


図 2-24 地上におけるマネジメントシステム(例)

出所)横河電機提供資料

月面上での施設の運用及び保守を想定した場合、安全計測システムや組み込み型のコントローラ、IoT センサデバイスなどの活用が必要となると考えられる。コントローラの役割として、以下に示す事項が挙げられる。

- 製造制御
 - 製造条件に基づく設備の動作指示や補正
- 施設間通信
 - 搬送指示や製造情報の受け渡し
- 上位通信
 - 製造実績送信
 - 製造条件受信
- 通信 I/F(共通機能)
 - プロトコルや通信手順の標準化
 - 二重化など

また、施設内／間および施設と管理システム間通信のイメージを図 2-25 に示す。

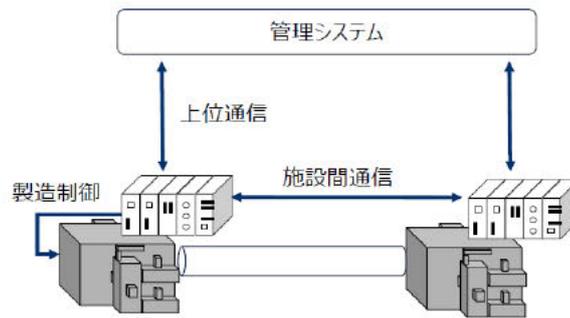


図 2-25 施設内/間および施設と管理システム間通信のイメージ

出所)横河電機提供資料

月面におけるコントローラの信頼性・可能性・保守性等の評価のため、地球上で重要プラントを支える制御システム DCS (Distributed Control System) を例に取り上げ、月面での有効性を検討した。コントローラの月面上への適用可能性の検討において考慮すべき諸条件は以下の通りである。

- 環境要因(放射線、真空、温度、低重力、レゴリスなど)
- ハードウェア要因(部品寿命、静電気など)
- ソフトウェア要因(ソフトウェアアップデート、サイバーセキュリティなど)

上記の条件を踏まえ、月面でのコントローラの信頼性・可能性・保守性の観点で必要な要求条件、当該要求条件を地上で対応するための事項、月面での課題について表 2-19 に整理した。各要求条件に関して月面での適用に向けて課題が挙げられるため、さらなる研究開発が必要であると考えられる。また、本年度は定性評価としたが、今後定量的な評価も必要である。

表 2-19 コントローラの月面での適用に向けた課題整理

要求条件	地球上での対応	月面における課題
故障しにくくする (フォールトアポイダンス)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部品選定 ・ 部品の設計マージン ・ 評価試験等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射線トータルドーズの影響から、ミッション期間が長期の場合は故障してしまう ・ 放射線シングルイベントの影響で、一時的な故障は避けることができない
故障の場合にも正常に機能し続ける(フォールトトレランス)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各種プロセッサカードの二重化 ・ 二重系照合ペア方式 ・ 制御ネットワークの二重化等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射線環境とアプリケーションの可用性要求により、二重化で十分かどうかの評価が必要
故障からの早期回復 (メンテナビリティ)	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユニットのオンライン交換 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユニットのオンライン交換は月面サービスが困難

出所)横河電機提供資料

また、月面におけるセンサデバイスの信頼性・可用性・保守性等の評価のため、センサデバイスの月面対応についてギャップ分析を実施し、月面における課題を洗い出した。センサデバイスの月面上への適用可能性の検討において考慮すべき条件は以下の通りである。

- 耐環境性(放射線、真空、温度、低重力、レゴリスなど)
- 長期安定性(低ドリフト、ペリフィケーション/キャリブレーションなど)

- 高機能性(マルチバリアブル機能、補正演算・制御機能、フィールドデジタルなど)
- 診断機能(自己診断、ファームウェアアップデート機能など)
- 一部の技術的課題について、地上実証実験と机上検討を計画

上記の条件を踏まえ、月面でのセンサデバイスの信頼性・可能性・保守性の観点で必要な要求条件、当該要求条件を地上で対応するための事項、月面での課題について表 2-19 に整理した。各要求条件に関して月面での適用に向けて課題が挙げられるため、さらなる研究開発が必要であると考えられる。

表 2-20 センサデバイスの月面での適用に向けた課題整理

要求条件	地球上での対応	月面における課題
高真空対応	—	・ 高真空度における安定動作
バリフィケーション/キャリブレーション機能	・ リモート確認・構成機能	・ キャリブレーションを不要、もしくは頻度・手順の削減 ・ 正しい性能になっていることの確認手段
高機能性	・ 複数センサ及び演算を担う伝送器	・ 気体/気液状態における流量測定手法の検討とガス流量補正演算の確認
診断機能	・ 統合センサデバイス管理機能連携 ・ 現場における機器調整機能連携	・ 月面用統合センサデバイス管理機能の検討及び自己診断手法の検討 ・ 機器交換後のセットアップ・調整機能のリモート化
センサデバイスデジタル通信	・ 測定値、制御値、診断値などの双方向マルチバリアブル通信	・ 保守を考慮したセンサデバイスとのデジタル通信手法の検討

出所)横河電機提供資料

さらに、図 2-24 を踏まえ、月面上での施設管理の上で必要となる共通・横断技術の要素技術を表 2-21 に示す。当該表のうち、通信レイテンシー対応システム、衛星通信途絶時安全システム、及び時間猶予を確保できる保安全管理システムに関する技術的課題について、解決策模索のために地上実証実験と机上検討を計画した。

表 2-21 共通・横断技術の要素技術

地上に配置する技術	超遠隔プラント操作監視システム	遠隔操作監視を安全に行うための情報付加とプレゼンテーション
	通信レイテンシー対応システム	未来プロセス予測による疑似リアルタイムオペレーション
月面に配置する技術	自律制御システム	自律コントローラ、スマートIO等で構成される制御システム
	衛星通信途絶時安全システム	エッジコンピュータによるプロセス安全確保と経済性の両立
	低重力・真空下で動作する制御アルゴリズム	月面用 PID(比例・積分・微分)制御
保守・設備管理	低重力・真空下で動作する測定技術	月面用センサ
	時間猶予を確保できる保安全管理システム	コンディションベース、リスクベースのメンテナンス
	ロボットベース作業指示システム	巡回点検の自動化やハード設計含めた部品交換などの最適化

出所)横河電機提供資料

a. 地上実証実験

「通信レイテンシー」に係る技術課題に対する地上実証試験案を以下に示す。

- 実際にレイテンシーを発生させて、操作/監視の困難さを確認する
- 未来予測の操作・監視の有効性を確認する

「衛星通信が途切れた場合」に係る技術課題に対する地上実証試験案を以下に示す。

- 通信途絶時のプラントへの影響を確認する（フォールバック ポリシーの比較検討）
- 月面エッジコンピュータが適切な安全状態にプラントを遷移させる確認する

「通信レイテンシー」及び「衛星通信が途切れた場合」に係る技術課題に対する地上実証試験案について、具体的なイメージ案を図 2-26 に示すと共に、実証試験での動作案を以下に整理する。

- 液体水素などを想定し、液体の貯蔵で不可欠なレベル制御を実施する
- 地上と月面の通信レイテンシー、エラーレートをソフトウェアで模擬する
通信途絶状態を発生させ、通信異常を検知したエッジコンピュータにより、プラントを適切な縮退運転状態へ遷移させる
- 簡易シミュレータによる予測制御を実施する

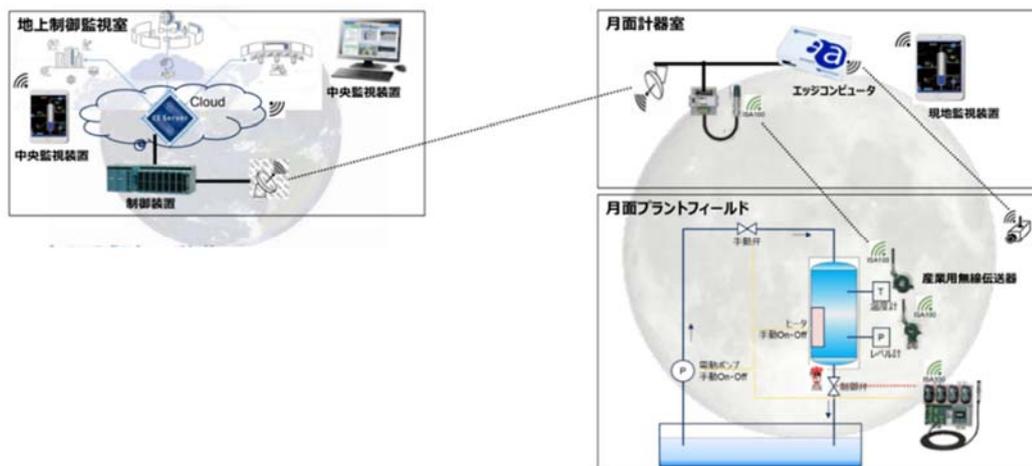


図 2-26 実証試験での動作案

出所)横河電機提供資料

b. 机上検討(月面保守の課題)案

海底などの人類が容易にアクセスできない場所における既存の保守事例などが月面における保守の参考になると考えられる。そこで、保守困難という月面と同様の課題を持つ海底油田を参考として、制御システムの保守手段の調査及び HAZOP によるリスク特定、必要な保守の抽出に係る机上検討を実施することが案として挙げられる。

地上プラントでの HAZOP の記載例を表 2-22 に示す。具体的な記載事項は以下に示すとおりである。月面での事例について直接的に当該 HAZOP の検討を行うのではなく、容易にアクセスできないが既存の保守事例が存在する海底油田に関する検討を行うことで、課題の洗い出しを行うことが重要で

あると考えられる。参考として海底油田の高度安全保護装置の概観を図 2-27 に示す。

- 現象: 想定する故障モード
- 原因と結果: 故障の原因と、それにより生じる現象
- 通知: 発生した現象がオペレータに通知されるかどうか
- 対応方法: 発生した現象の復旧方法
- リスクランク: インパクトと発生確率から求めるリスク度合い(1:High~5:Low)

表 2-22 地上プラントでの HAZOP の記載例

機器	現象	原因と結果	既存予防手段	オペレータ通知	必要な対応	リスクランク
圧力計	入力信号 LOW	断線により圧力を報告できない	1oo3 構成	アラーム経由	該当機器の再起動	4
圧力計	入力信号 HIGH	診断エラーまたは電氣的な故障により圧力を報告できない	1oo3 構成	アラーム経由	該当機器の再起動	4
圧力計	入力信号 スタック	CPU 系あるいは通信系の障害により圧力を報告できない	1oo3 構成	アラーム経由	該当機器の再起動	4
バルブ	オープン状態でスタック	腐食によりバルブが閉じない	ストロークテスト 1oo2 構成	アラーム経由	影響を受けるモジュール情報収集	3
バルブ	疑似クロージング	コイルの焼損または断線によるバルブの疑似トリップ	なし	ステータス表示	影響を受けるモジュール情報収集	2
バルブ	ベントがブロックされる	ベントポート内にゴミが溜まり解放できない	なし	ステータス表示	無人潜水機で調査	4
:	:	:	:	:	:	:

出所)横河電機提供資料

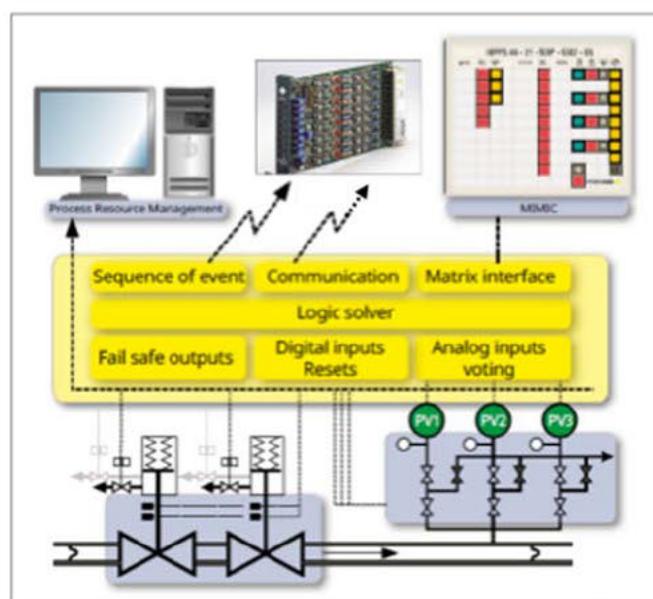


図 2-27 海底油田の高度安全保護装置

出所)横河電機提供資料

2.1.3 全体アーキテクチャの検討

本年度は個別の施設レベルの検討に加え、全体アーキテクチャの検討を行った。図 2-28 に全体アーキテクチャ検討の進め方を示す。水素 WG 内での共通認識の醸成を目的として、今後の有人探査の計画やその他想定される月面での人間活動を考慮したシナリオを策定し、年代ごとに想定される人数・活動・施設のレベル等の前提条件を整理した後、水素生成に係る全体アーキテクチャの検討を実施した。全体アーキテクチャの検討にあたっては水素生成施設や電力供給システムの全体配置・形態などを考慮に入れて検討を進めた。

Step1	シナリオ策定	昨年度調査した国内外における有人の月探査計画や最近公開された「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」を出発点として、年代ごとに想定される人数・活動・施設のレベルを設定
Step2	前提条件の設定	Step1で策定したシナリオ実現に必要な水素生成に係る全体アーキテクチャの前提条件を設定する
Step3	論点ごとに比較検討・評価	STEP2で検討した前提条件を考慮しつつ、想定される施設の配置図(案)等を作成し、想定される論点について比較検討・評価を行う。
Step4	全体アーキテクチャの可視化	Step3での比較検討にもとづいて、シナリオごとに想定される全体アーキテクチャ(案)を図示化する。

図 2-28 全体アーキテクチャ検討の進め方

出所)三菱総合研究所作成

(1) STEP1:シナリオ案の策定

水素 WG における共通認識の醸成のために、昨年度調査した国内外における有人の月探査計画や JAXA の国際宇宙探査シナリオ(案)2021を出発点として、年代ごとの活動概要、活動人数、活動場所、エネルギー調達(水素・電力)の割合などの変遷を整理した。

シナリオ案は、情報の粒度により、2 階層(レベル 1 とレベル 2)で作成した。

- レベル 1:月面での水素・酸素の生成にあたって基礎的な情報を整理したもの。年代ごとの活動の概要や人数、活動範囲などが該当する。
- レベル 2:水素・酸素生成アーキテクチャに関するより詳細な情報を整理したもの。年代ごとの月面への輸送可能重量や施設の形態(例:曝露環境か与圧環境か)などがレベル 2 に該当する。

1) シナリオ(レベル1)の概要

水素・酸素生成アーキテクチャを検討する上で基礎的かつ必要な項目を整理した。#0～#4 までの 5 年代に分類し、それぞれの年代での月面での活動を明確化することで、水素 WG における共通認識の醸成を行った。

レベル 1 のシナリオ案を表 2-23 に示す。

2) シナリオ(レベル2)の概要

シナリオ(レベル 2)として、水素・酸素生成アーキテクチャに関するより詳細な情報を整理した。レベル 1 と異なり、水素・酸素生成に関わるより具体的な内容について盛り込んでおり、以下に示す項目が含まれている。なお、月面資源開発に取り組む日本の産業規模(企業数)については、自社投資、政府の開発・実証プロジェクト(FS は除く)への参画、契約に基づく政府へのサービス提供等の実施をしている企業を対象としてその数を推計した。

- 月面資源開発に取り組む日本の産業規模(企業数)
- 月面へ輸送可能な重量及びサイズ、年間輸送量
- 取得すべきサイト情報(水資源の分布や絶対量や地形等)
- 施設・装置の設置箇所・活動環境(曝露環境・与圧環境)
- 月面での水素の需要量

シナリオ(レベル 2)を表 2-24 に示す。

表 2-23 シナリオ案(レベル1)

年代	#0	#1	#2	#3	#4	考え方	
	実現性検証と概念設計の時代		システム設計する時代	輸送/建設する時代	推薬精製プラント初期稼働の時代		推薬精製プラント本格稼働の時代
	2022年～2024年	2025年～2028年	2029年～2034年	2035年～2040年	2041年～		
活動概要	官主導による無人活動主体 (※一部民による探査計画あり)	官・民主導による無人活動 + 官主導による有人活動開始	官主導による有人活動主体 + 民主導による無人活動継続	官・民の協働による有人活動主体 + 民主導による無人活動継続	民主導による有人活動主体 + 民主導による無人活動継続	月面での有人活動の開始は、2025年以降に計画されている NASA ARTEMIS III以降となることが想定される。#0では官・民による無人探査機による水を含む揮発性物質探査などが想定される。	
活動人数 (※日本人のみの人数を想定)	0人	2人～4人	最大4人	最大6人+数名程度(民間による活動の活発化に伴う上ブレを考慮)	最大100名程度	#3までは日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021で示されている活動人数にもとづく。#3以降では民間による活動の活発化が想定されるため上振れする可能性あり。	
活動目的・概要	・OMOTENASHI(2022年)やSLIM(2023年予定)などによる月面での着陸技術の実証、LUPEX(2024)による月表面探査技術実証など、無人探査機を用いた技術実証や科学探査が主目的となる。 ・民の活動としてはダイモン社のYAOKI(2022)、ispace社が進める「HAKUTO-R」のミッション1におけるランダー(2022)やミッション2におけるマイクロローバ(2024)などが計画されており、長期的な月面開発につながる月面環境の把握が行われる予定である。また、ミッション2では高砂熱学工業社にて開発が進められている水電解装置を用いた水素生成ミッションが実施される予定である。	・NASA Artemis IIIを皮切りに月面での少人数の有人活動が開始され、無人/有人探査車両の走行・制御実証や月極域近傍における有人の科学探査が主目的となる。 ・月面への輸送能力の向上に伴い、民間の探査機による月面探査も活発化され、より多くの探査機が月面上で活動する。 ・ロボット等による無人での技術実証等が進む。 ・LUPEXや無人探査機による月表面探査情報を基にした推薬生成プラント概念設計を行う。	・月面と圧ローバ+曝露ローバを用いた広範囲の科学探査が主目的となる。(日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021における有人探査ミッションのフェーズ1) ・民間による月面探査は継続され、政府の科学探査の補完的な役割を果たしつつ、高精度かつ多様な月面環境情報を収集する。 ・推薬生成プラント建設に向けた機材・モジュールの輸送、組み立て、遠隔操作による実証等が行われる。	・月極域周辺を拠点とし、ホッパー+月面と圧ローバ+曝露ローバの活用、推薬・電力などのエネルギーの現地調達を含めた本格的な広範囲の科学探査が主目的となる。(日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021における有人探査ミッションのフェーズ2) ・さらに、官による活動だけでなく、エンタメ・観光などをはじめとする民間の有人活動が開始されることが想定される。 ・推薬生成プラントの稼働が開始するとともに、水資源の掘削から利用までの小規模なVCが完成する。	・有人活動の本格化に向け、様々なインフラが整備される。 ・月面活動の主体は官から民間に移行し、様々な産業と絡めた月面でのビジネスが開始する。 ・研究施設や居住施設などが設置され、一般人による最大100人規模の月面での長期滞在も想定される。 ・居住者の増加に伴い、推薬生成プラントが拡充される。	#3までは日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021で示されている活動人数にもとづく。#3以降では民間による活動について言及している。	
有人探査における活動拠点	-	月軌道上に拠点(Gateway)	月軌道上に拠点(Gateway)	月極域周辺に拠点	月極域を中心とし、より広範囲な領域の複数個所に分布	#3までは日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021で示されている活動人数にもとづく。#4以降では活動主体が増加するため月極域を中心として広範囲に拠点が分布すると予想する。	
活動範囲 (※月極域を拠点とし、どの程度遠方まで活動範囲を広げることが想定されるか。)	月極域周辺(数km範囲)	月極域周辺数km範囲内(曝露ローバによる数km範囲での移動を想定)	月極域周辺～極域から100km程度範囲内	月極域周辺～極域から1000km程度範囲内(ホッパーの利用が開始されると1000km程度の移動が可能)	月極域周辺～極域から1000km程度範囲内(走行技術等の向上により活動範囲は広域化することが想定される)	日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021にて活動範囲の言及は少ないが、当面は月極域を中心とし、利用が想定される移手段の可動範囲にもとづいて予想する。	
滞在日数	-	年1回/14日(昼)	年1回/42日(昼+夜+昼)	人の滞在日数:最大500日(長期滞在)	人の滞在日数:最大500日(長期滞在)	#3までは日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021で示されている滞在日数にもとづく。#4以降ではより長期間の滞在は可能となると想定されるが、1/6重力や放射線による人体への影響も考慮し、滞在日数の大幅な増加の可能性は低いと予想する。	

年代	#0	#1	#2		#3	#4	考え方
	実現性検証と概念設計の時代		システム設計する時代	輸送/建設する時代	推薬精製プラント初期稼働の時代	推薬精製プラント本格稼働の時代	
	2022年～2024年	2025年～2028年	2029年～2034年		2035年～2040年	2041年～	
エネルギー調達(液体水素+液体酸素)	-	Gatewayと月面の往復に利用する推薬(液体水素+液体酸素)について、地球からの調達:100%	Gatewayと月面の往復に利用する推薬(液体水素+液体酸素)について、一部実証は開始されるものの地球からの調達が主		月面での活動で利用する水素・酸素について、小規模なプラントの稼働が開始されたこともあり、一定の割合が月面での自給となる	月面での活動で利用する水素・酸素について、プラントが拡充されたことにより月面での自給が主となる	#1及び#2では月面上に拠点はなく、有人活動の拠点はGatewayであることが想定されている。一方で、#2にて建機や建設設備への電力供給のためのエネルギー生産拠点の整備は開始されていることが想定される。#3以降にて月面上に拠点がおかれると同時に、推薬プラントの初期運用が開始し、#4までに月面のみですべて賄うようになると予想する。
エネルギー調達(電力)	・人の滞在拠点での利用:-(月面での拠点なし) ・その他(ローバ・建機、無人の拠点等)での利用:自家発電(太陽光発電)	・人の滞在拠点での利用:-(月面での拠点なし) ・その他(ローバ・建機、無人の拠点等)での利用:自家発電(太陽光発電)	・人の滞在拠点での利用:-(月面での拠点なし) ・その他(ローバ・建機、無人の拠点等)での利用:月面上での発電・送電による供給実証が開始されるも自家発電(太陽光発電)が主 ・夜間は蓄電池・燃料電池、その他の発電方法等からの供給とする		・人の滞在拠点での利用:月面での自給を主とするが、蓄電池等の一部は地球から調達 ・その他(ローバ・建機、無人の拠点等)での利用:月面上での発電・送電を主電力として稼働するローバも出現	・人の滞在拠点での利用:月面での自給 ・その他(ローバ・建機、無人の拠点等)での利用:月面上での発電・送電を主電力として稼働するローバが主	#0の無人活動においてはローバ利用に関わる電力供給は月面上のみで可能と想定する。一方で#1での有人活動開始に伴い、地球からの電力供給(蓄電池等)は必要と予想する。また、#3以降の月面拠点設置に伴い、定常的に大量の電力が必要になるため、月面のみでの電力供給の実現は#4以降になると想定する。

出所)三菱総合研究所作成

表 2-24 シナリオ案(レベル2)

	年代	#0	#1	#2		#3	#4	考え方
		実現性検証と概念設計の時代		システム設計する時代	輸送/建設する時代	推薬精製プラント初期稼働の時代	推薬精製プラント本格稼働の時代	
		2022年～2024年	2025年～2028年	2029年～2034年		2035年～2040年	2041年～	
月面開発・活動の進展	月面資源開発に取り組む日本の産業規模(企業数)	数十社程度	50社程度	100社程度		100～200社程度	200社以上程度	月面開発・活動の進展を示す指標として、月面資源開発に取り組む日本の産業規模(企業数)を推計した。自社投資、政府の開発・実証プロジェクト(FSは除く)への参画、契約に基づく政府へのサービス提供等を実施している企業を対象としている。
施設の建設・設置に関する情報の進展	月面へ輸送可能な重量及びサイズ、年間輸送量		<p><大型輸送機> 1tクラス:年1回以上</p> <p><小・中型輸送機> 100kgクラス:年2回以上 500kgクラス:年3回以上 (ボトムラインの数値)</p>	<p><大型輸送機> 10tクラス:年1回以上 1tクラス:年1回以上</p> <p><小・中型輸送機> 100kgクラス:年2回以上 500kgクラス:年3回以上 (ボトムラインの数値)</p>	<p><大型輸送機> 10tクラス:年1回以上 1tクラス:年2回以上</p> <p><小・中型輸送機> 100kgクラス:年4回以上 500kgクラス:年3回以上 (ボトムラインの数値)</p>	<p><大型輸送機> 10tクラス:年2回以上 1tクラス:年3回以上</p> <p><小・中型輸送機> 100kgクラス:年6回以上 500kgクラス:年3回以上 (ボトムラインの数値)</p>	N/A *予測に基づくデータの見当がつかないものの左記数値から飛躍的に増大すると予想。	施設の建設・設置に関する情報として、月面へ輸送可能な重量及びサイズ、年間輸送量を検討した。 大型あるいは大量の物資を輸送可能であるが、輸送回数が限定的となる「大型輸送機(Starship等)」と、小型あるいは少量の物資のみ輸送可能であるが、輸送回数が稼げる「小型輸送機」に分類し、公開情報等に基づき設定した。
	施設・装置の設置箇所・活動環境(曝露環境・与圧環境)			<p><個別プロセスに関する施設> 掘削・水抽出:曝露環境を想定 純水処理以降の推薬プラント施設:与圧環境を想定</p> <p><バリューチェーン全体の管理システムに関する施設> 状態監視および管理システム:地球(超遠隔設置) エッジ制御システム、安全計装システム、センサー・アクチュエータ:各推薬プラント施設ごとに設置を想定 ※ただし、施設環境は技術進歩等の影響により変化する可能性あり。</p>				施設の建設・設置に関する指標として、施設・装置の設置箇所・活動環境(曝露環境・与圧環境)を検討した。純水処理や水電解施設は推奨される稼働温度に保つため、与圧環境内での稼働を想定した。「全体管理システムに関する施設」については、各施設内に設置されるセンサ等と地球からの遠隔監視を前提とした管理システムの2種類に分けている。
施設の運用に関する情報の進展	水素の需要量		<p>ゲートウェイ月面間の着陸船往復のみ(年1回)</p> <p>・水の需要量:48.0t程度 ・水素の需要量:5.3t程度</p>	<p>ゲートウェイ月面間の着陸船往復のみ(年1回)</p> <p>・水の需要量:48.0t程度 ・水素の需要量:5.3t程度</p>		<p>ゲートウェイ月面間の着陸船往復(年1回)+曝露ホッパーでの利用(1000km利用)</p> <p>・水の需要量:75.1t程度 ・水素の需要量:8.3t程度</p>	<p>民間・グローバルでの需要も考慮し#3時点での需要量の10倍程度と設定</p> <p>・水の需要量:751t程度 ・水素の需要量:83t程度</p>	施設の建設・設置に関する指標として、月面での水素の需要量を検討した。 #4は2035年の初期稼働時における国際宇宙探査シナリオ(案)で示されている水需要量75.1tonを前提に、2041年以降の民間・グローバルの需要を考慮し、#3の10倍程度の需要量と設定している。

出所)三菱総合研究所作成

(2) STEP2:前提条件の設定

STEP1 で策定したシナリオ実現に必要な水素生成に係る全体アーキテクチャを検討するための前提条件を設定した。設定した前提条件は、国際宇宙探査シナリオ(案)2021に基づいて設定した条件と、不足する条件について水素 WG にて独自に設定した前提条件の 2 種類がある。

1) 水資源採取に関する前提条件の設定

月面における水資源の採取にあたってはクレータ内部の永久影(PSR)を対象とした探査が行われることが想定されている。そこで、クレータ内部のレゴリス中の水含有率や、クレータ内部や発着場などの水素・酸素生成に関係する領域についての前提条件を設定した。

a. JAXA 探査シナリオに基づいて設定した前提条件

ア) クレータ内部

クレータ斜面の傾斜はシャクルトンクレータの実測データに基づいて 30[deg]以下と設定した。

イ) 日照領域

クレータ内部で採掘したレゴリス(もしくは水抽出後の液体水など)を、PSR から PSR 外部の日照領域に運搬する距離については、JAXA 探査シナリオにおけるゾーン配置図に基づき、9[km]程度と設定した。

ウ) 着陸地点

着陸地点は PSR より最大 1[km]程度遠方にあるとしたが、着陸船の着陸地点を中心として最大 0.1[km]程度ずれる可能性も考慮した。なお、着陸精度の向上により、誤差は極小化することも想定される。

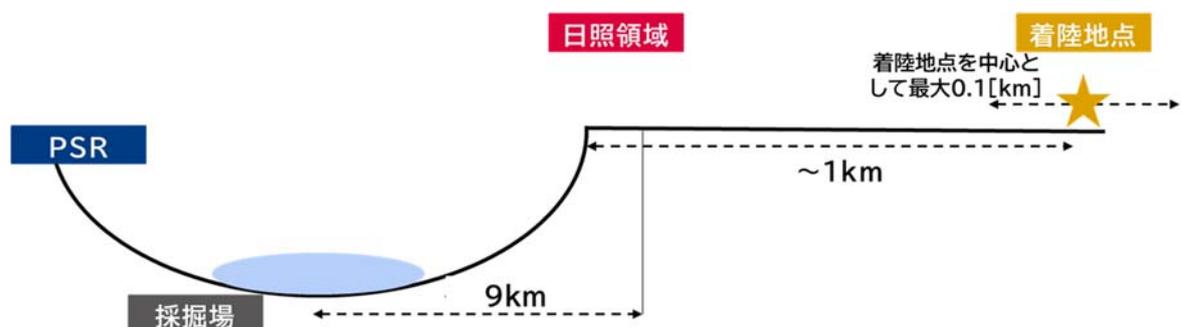


図 2-29 「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」にもとづいて設定した前提条件
出所)三菱総合研究所作成

b. 水素 WG にて独自に設定した前提条件

ア) 水資源採取に関する前提

水資源を含むレゴリスの採取はクレータ(PSR)内部の水含有率が高いと考えられる領域で実施すると仮定し、水抽出の手段としては以下に示す 3 種類を想定した。

- 水を含むレゴリスを PSR 外部に移送し、リム部で水抽出を実施
- レゴリスからの水抽出を PSR 内部で実施し、水をリム部以遠に移送
- PSR もしくはその周辺でサーマルマイニングシステムを利用して水を抽出

また、レゴリス中の水の含有率は既存の月周回衛星のデータ等を考慮し、想定される①0.1%、②1.0%、③5%の3パターンを想定した。また、月面上重機の掘削能力を鑑みて、掘削場の半径 r は $r < 0.35[\text{km}]$ 程度を想定した。なお、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 $250[\text{mm}]$ を想定した。

なお、この前提条件は、再使用離着陸船で月面と月近傍拠点を往復し、有人曝露ホッパーで月面を移動するために必要な推薬を生成可能な水の量である $74.3 [\text{ton/年}]$ を前提としたものである。月面での活動が年代ごとに拡張するにしたがって必要量は変化することも考えられるが、その点は、本年度の検討では考慮していない。

2) 施設配置に関する前提条件の設定

a. JAXA 探査シナリオにもとづいて設定した前提条件

JAXA 探査シナリオにおいては、2035 年以降(#3 以降)では月面での 500 日滞在を実現するために拠点の建設が計画されており、月面拠点基本構成イメージが提案されている。JAXA 探査シナリオでの月面拠点基本構成イメージを図 2-30 に、各ゾーンの概要を表 2-25 に示す。

以降のアーキテクチャ検討においては、日照領域での施設配置は効率的な電力供給を確保する観点からサービスゾーン周辺に配置することを想定した。

なお、アーキテクチャ検討では、JAXA 探査シナリオにて示されている構成イメージを参考に、各プロセスの配置案は俯瞰図と断面図で示すこととした。

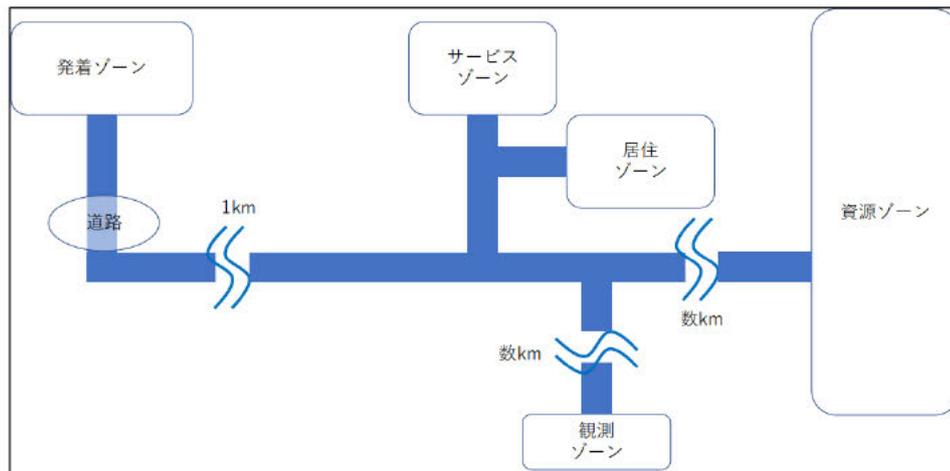


図 7.4-1 月面拠点基本構成イメージ

図 2-30 JAXA 探査シナリオにおける月面拠点基本構成イメージ

出所)JAXA 国際宇宙探査シナリオ(案)2021

表 2-25 各ゾーンの概要

ゾーン	概要
発着ゾーン	<ul style="list-style-type: none"> 有人離着陸機、カーゴランダ、曝露ホッパーの離発着するエリア。 離着陸の際の噴射推葉から他のゾーンを守るため、本ゾーンは他ゾーンから 1km 程度離れた距離を置くこととする。
サービスゾーン	<ul style="list-style-type: none"> 発電設備(太陽光発電、原子力発電)を配置するエリア。 長期日照が得られる比較的標高の高い立地に配置する。
居住ゾーン	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙飛行士が居住するスペース。居住モジュールを配置する。 サービスゾーンとは徒歩で往来できる距離に配置することとする。(100m 程度)
観測ゾーン	<ul style="list-style-type: none"> 月面上の科学観測や天文観測を行うエリア。
資源ゾーン	<ul style="list-style-type: none"> 月面の資源を採掘するエリア。主にクレータリム(緑の部分)の永久影内で、レゴリスに含まれる水氷資源の採掘を実施する。 他のゾーンより数 km 離れているものと想定する。

出所)JAXA 探査シナリオに基づいて三菱総合研究所作成

b. 水素 WG にて独自に設定した前提条件

月面上での水素・酸素の生成は、8 つのプロセス(探査、掘削、水抽出、純水処理、水電解、高圧化、水素・酸素液化、貯蔵)から構成されると想定している。各プロセスの配置の検討にあたり、個別プロセスごとに配置場所を設定するのではなく、同一場所の配置である必要があるプロセスが存在しないか検討を行った。検討結果を以下に示す。

- 水電解プロセスへのインプットはできる限り不純物の少ない抽出水であることが不可欠なため、純水処理後にすぐに水電解プロセスに渡せるように、純水処理プロセスと水電解プロセスは同一場所に配置する。
- 入熱による BOG 発生リスクの最小化することを考慮し、水素・酸素液化プロセスと貯蔵プロセスは同一場所に配置する。
- クレータ内部からクレータリム部までの輸送物の形態は、外界が極低温であり、凝縮(あるいは凝固)を防ぐためコストが多くなるほか、BOG や固体化のための対策が必要との観点で水(気体)は除外する。

- その他のプロセスの配置場所については、特段の制約条件は課さないこととする。

水素 WG にて独自に設定した施設配置に関する前提条件の整理結果を図 2-31 に示す。

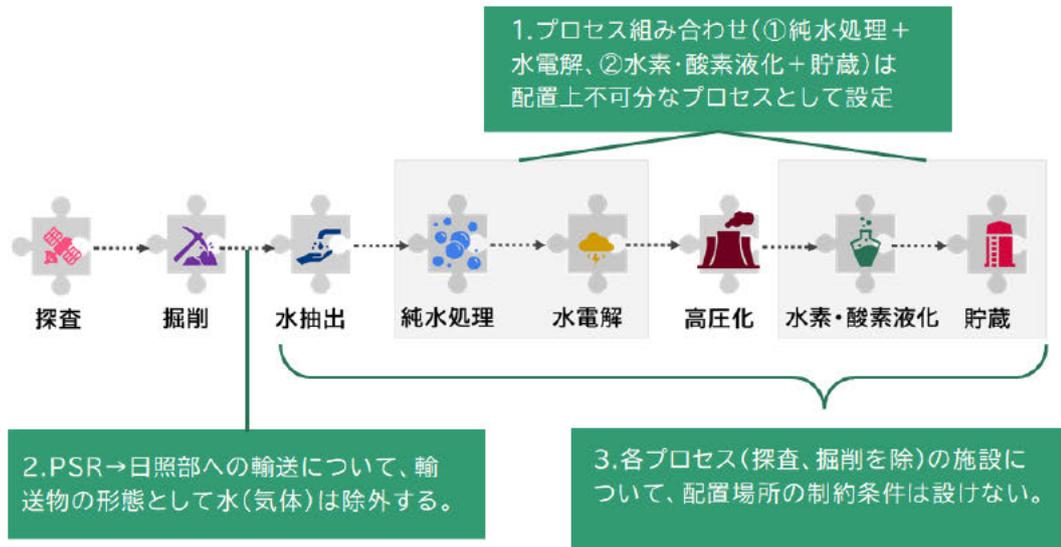


図 2-31 施設配置に関する前提

出所)三菱総合研究所作成

(3) STEP3:論点ごとに比較検討・評価

1) 全体アーキテクチャ候補の検討

ここまで述べた前提条件をベースに、各プロセスの設置場所について表 2-26 に示す 15 種類のアーキテクチャを設定した。大カテゴリ(A~F)の分類では、どのプロセスまでをクレータ内部で実施するかを整理軸として設定しており、A→F に向けてより多くのプロセス及び施設をクレータ内部に配置することとしている。小カテゴリ(X-1, 2, 3...など)については、クレータ外部に設置する施設についてサービスゾーン周辺に配置するのか、着陸機やホッパー等を配置する発着ゾーン周辺に配置するかで分類している。

アーキテクチャごとに施設配置の特徴及び施設間の物質の輸送形態についても表 2-26 中に整理している。なお、各アーキテクチャの施設の位置を示す断面図及び俯瞰図を以降で順次示す。

表 2-26 前提条件をベースとした 15 種類のアーキテクチャの概要

アーキテクチャカテゴリ		アーキテクチャ概要
A	A-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水抽出以降は全て発着ゾーンで実施 ・ 輸送物はレゴリスのみ
B	B-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水抽出をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物はレゴリス、水(液体 or 固体)
	B-2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物はレゴリス、水素・酸素(気体)
	B-3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物はレゴリス、高圧水素・酸素(気体)

	B-4	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物はレゴリス、水素・酸素(液体)
C	C-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水(液体)or 水(固体)
	C-2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水(液体)or 水(固体)、水素・酸素(気体)
	C-3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水(液体)or 水(固体)、高圧水素・酸素(気体)
	C-4	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水(液体)or 水(固体)、水素・酸素(液体)
D	D-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧化以降を発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水素・酸素(気体)
	D-2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧化をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水素・酸素(気体)、高圧水素・酸素(気体)
	D-3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)
E	E-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液化処理以降を発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は高圧水素・酸素(気体)
	E-2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施 ・ 輸送物は高圧水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)
F	F-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全プロセスを PSR 内部で実施 ・ 輸送物は水素・酸素(液体)

出所)三菱総合研究所作成

a. アーキテクチャ A(1 案):水抽出以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施

水抽出以降は全て発着ゾーンで実施し、輸送物はレゴリスのみと想定するアーキテクチャである A 案を図 2-32 に示す。

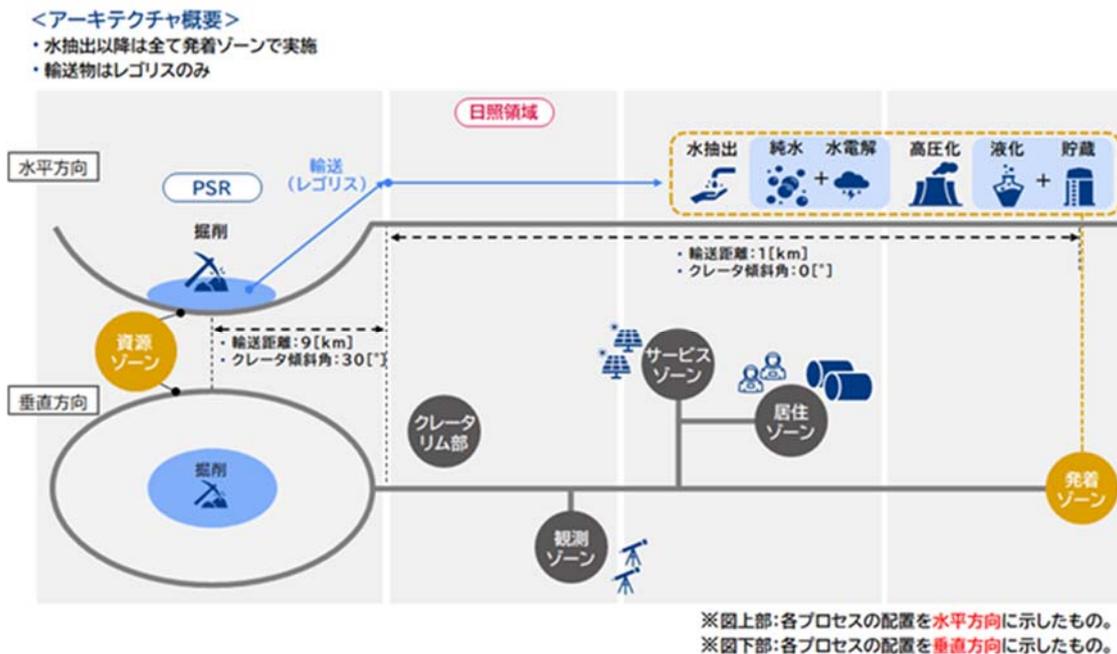


図 2-32 アーキテクチャ A-1 案(水抽出以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)

出所)三菱総合研究所作成

b. アーキテクチャ B(4 案):水抽出以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施

水抽出以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施するアーキテクチャであるB案(B-1、B-2、B-3、B-4)を図 2-33～図 2-36 に示す。

B-1 案(図 2-33)では、水抽出をクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物はレゴリス、水(液体 or 固体)を想定している。

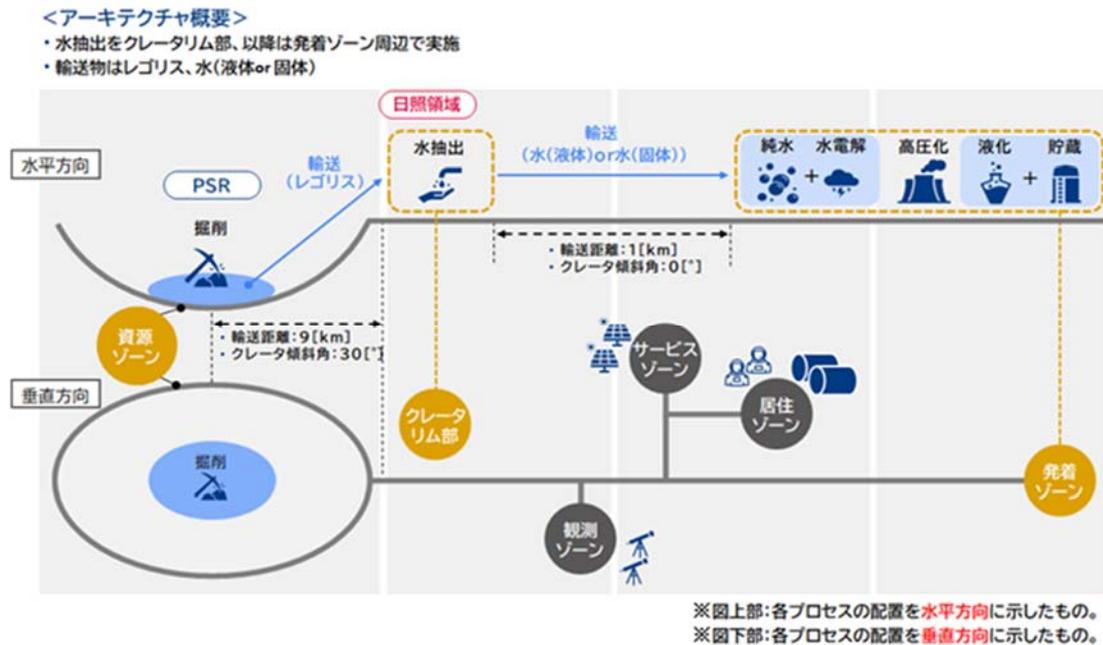
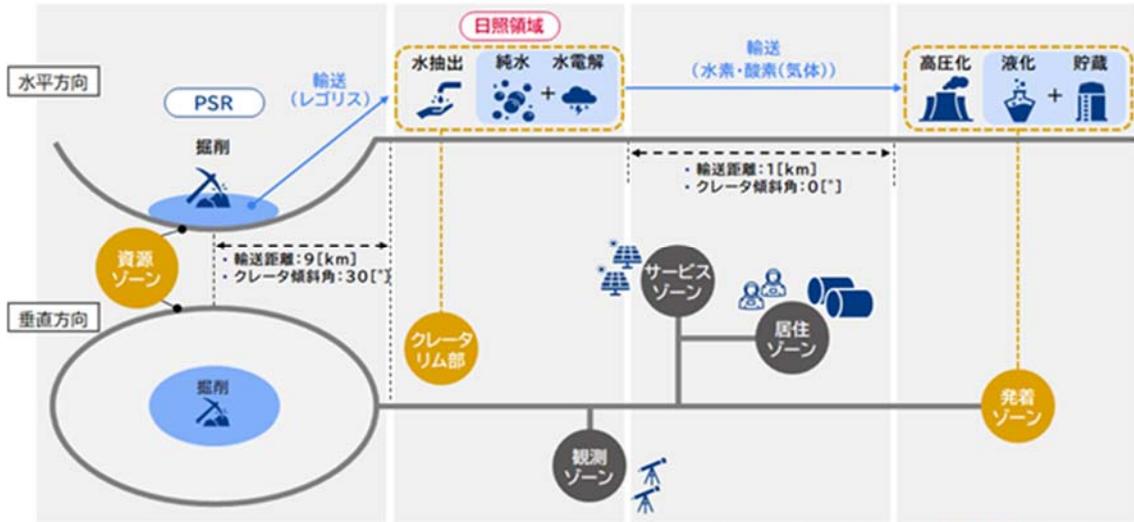


図 2-33 アーキテクチャ B-1 案(水抽出をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

B-2 案(図 2-34)では、水電解までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物はレゴリス、水素・酸素(気体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・輸送物はレゴリス、水素・酸素(気体)



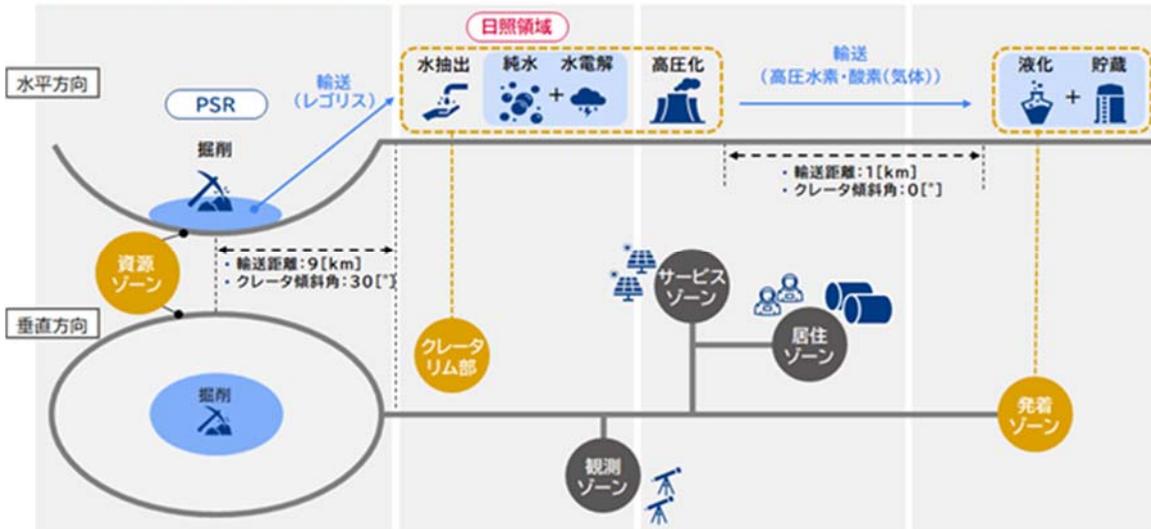
※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-34 アーキテクチャ B-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

B-3 案(図 2-35)では、高圧化までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物はレゴリス、高圧水素・酸素(気体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・輸送物はレゴリス、高圧水素・酸素(気体)



※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-35 アーキテクチャ B-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

B-4 案(図 2-36)では、貯蔵までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物はレゴリス、水素・酸素(液体)を想定している。

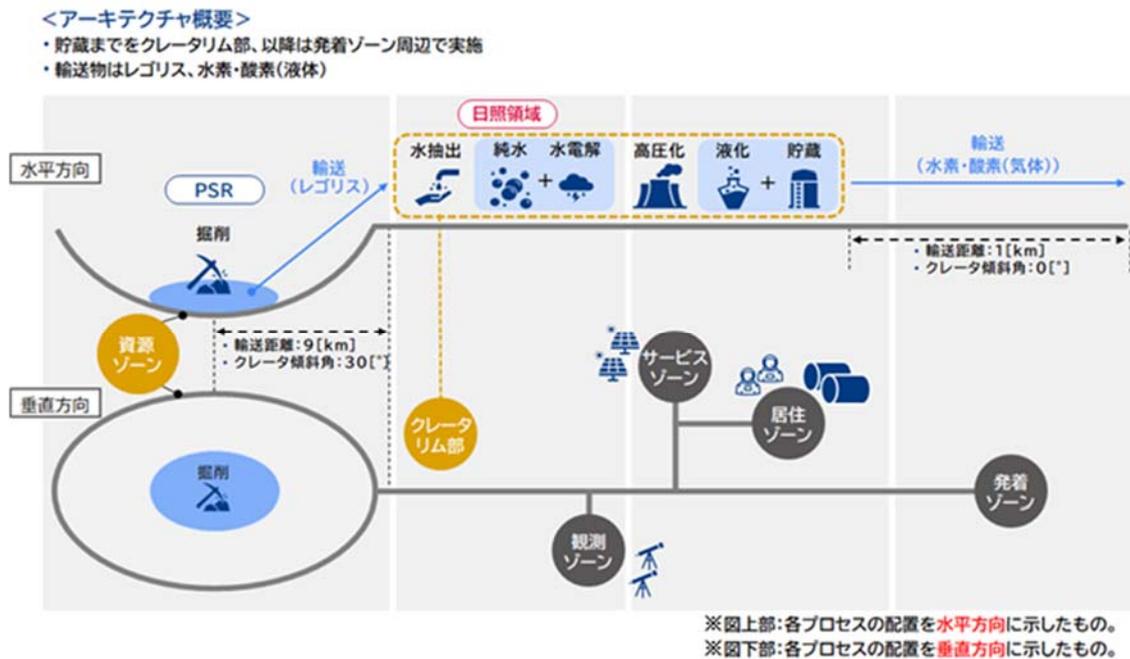


図 2-36 アーキテクチャ B-4 案(貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

c. アーキテクチャ C(4 案):純水処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施

純水処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施するアーキテクチャである C 案(C-1、C-2、C-3、C-4)を図 2-37～図 2-40 に示す。

C-1 案(図 2-37)では、水純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水(液体)or 水(固体)を想定している。

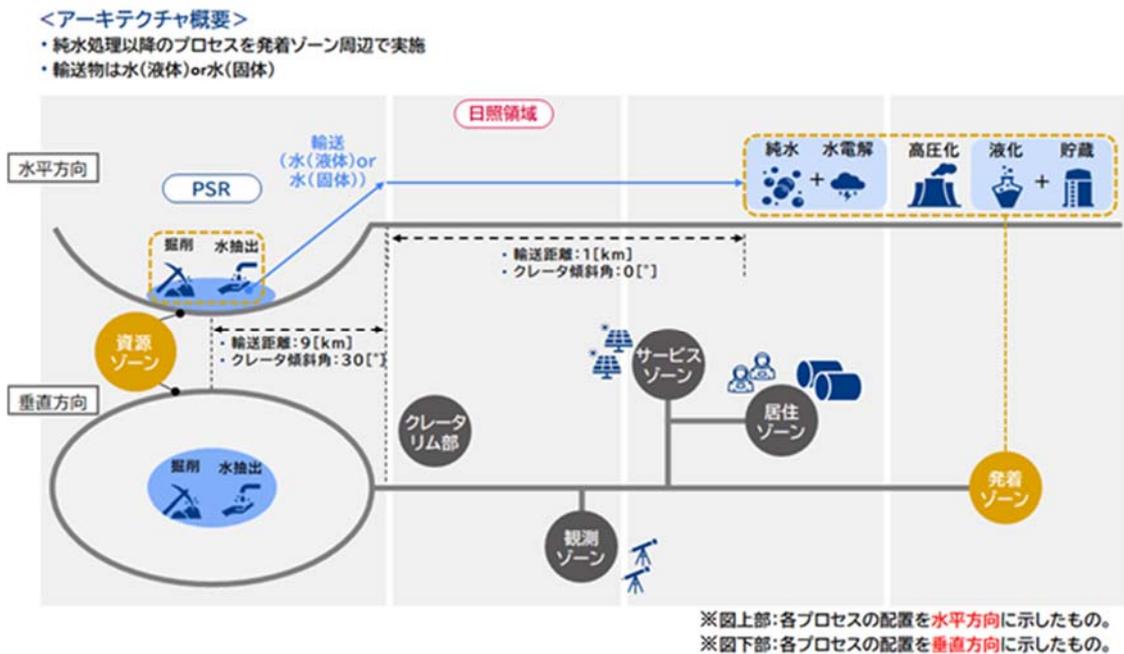


図 2-37 アーキテクチャ C-1 案(水純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

C-2 案(図 2-38)では、水電解までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水(液体)or水(固体)、水素・酸素(気体)を想定している。

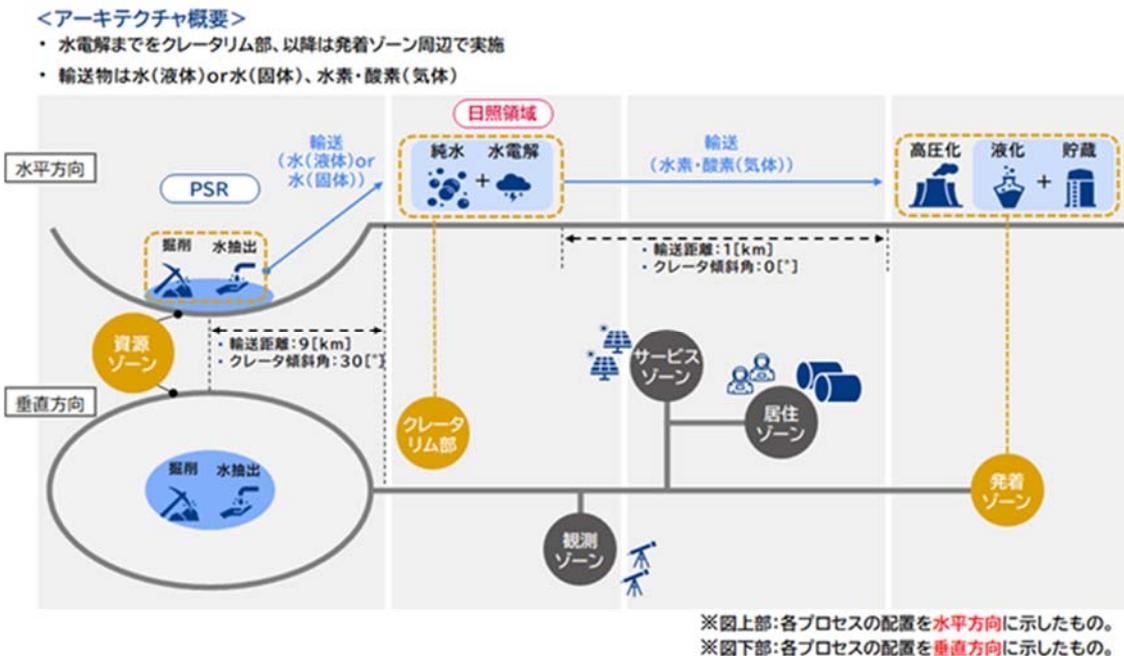
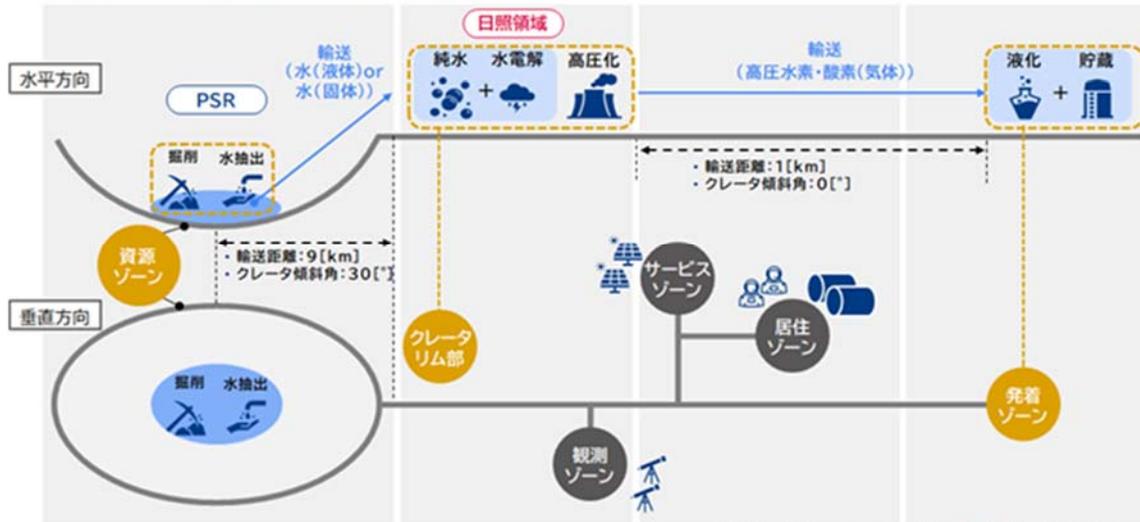


図 2-38 アーキテクチャ C-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

C-3 案(図 2-39)では、高圧化までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水(液体)or水(固体)、高圧水素・酸素(気体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水(液体)or水(固体)、高圧水素・酸素(気体)



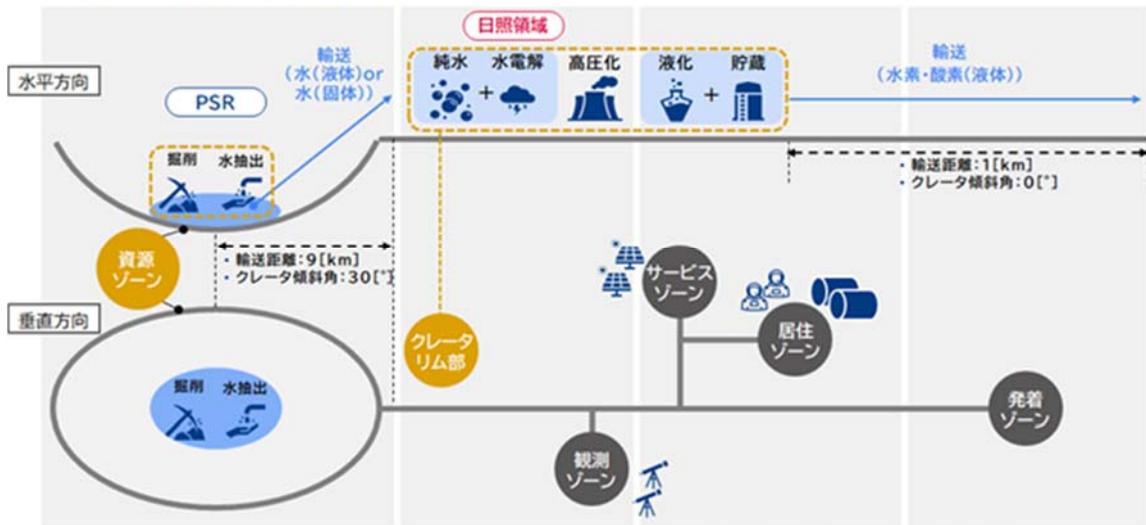
※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-39 アーキテクチャ C-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
出所)三菱総合研究所作成

C-4 案(図 2-40)では、液化・貯蔵までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水(液体)or水(固体)、水素・酸素(液体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水(液体)or水(固体)、水素・酸素(液体)



※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-40 アーキテクチャ C-4 案(液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
出所)三菱総合研究所作成

d. アーキテクチャ D(3 案):高圧化以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施

高圧化以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施するアーキテクチャである D 案(D-1、D-2、D-3)を図 2-41～図 2-43 に示す。

D-1 案(図 2-41)では、高圧化以降を発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水素・酸素(気体)を想定している。

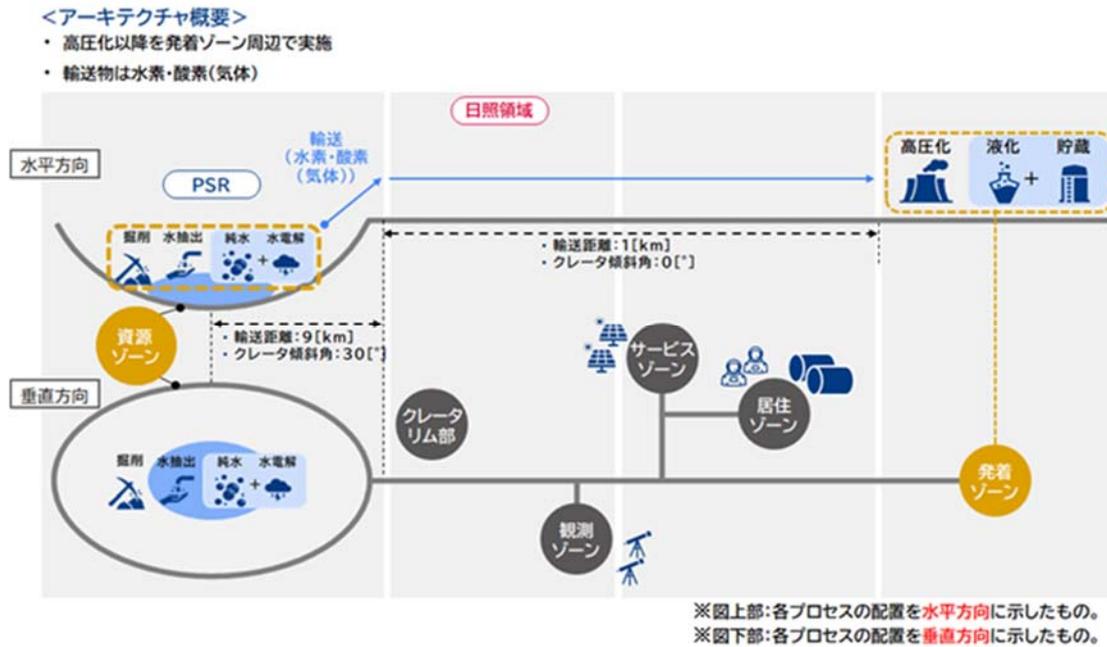


図 2-41 アーキテクチャ D-1 案(高圧化以降を発着ゾーン周辺で実施)

出所)三菱総合研究所作成

D-2 案(図 2-42)では、高圧化をクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水素・酸素(気体)、高圧水素・酸素(気体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 高圧化をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水素・酸素(気体)、高圧水素・酸素(気体)

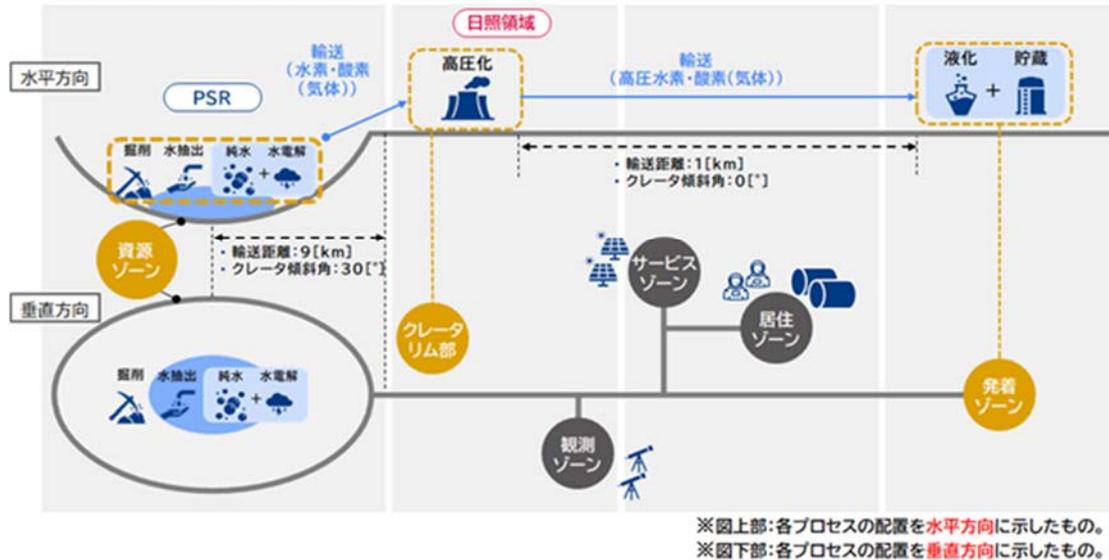


図 2-42 アーキテクチャ D-2 案(高圧化をクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

D-3 案(図 2-43)では、貯蔵までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)

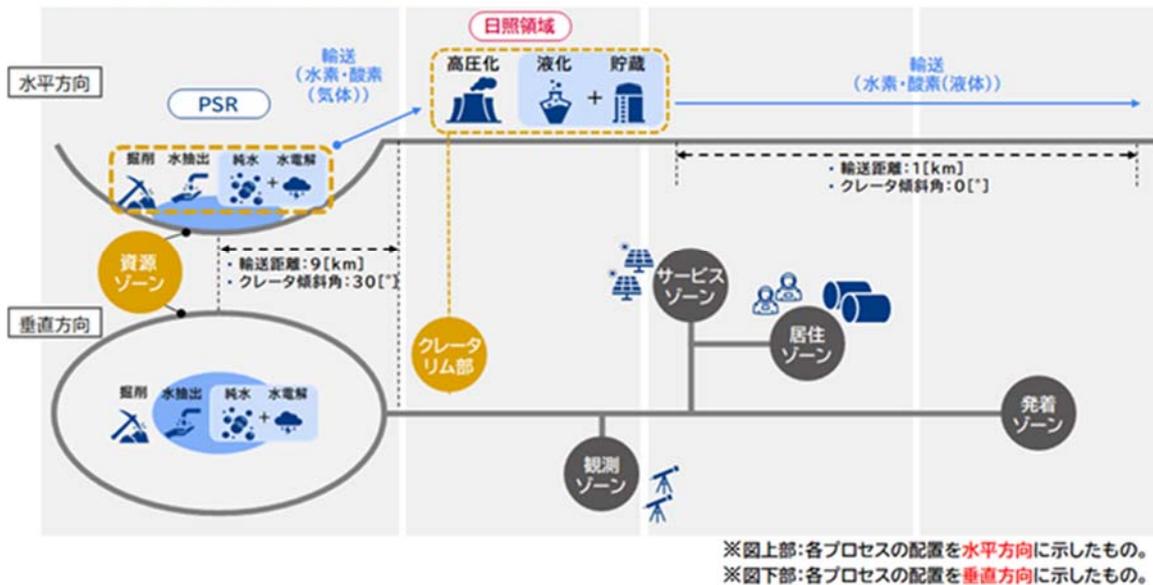


図 2-43 アーキテクチャ D-3 案(貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

e. アーキテクチャ E(2 案): 液化処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施

液化処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施するアーキテクチャである E 案(E-1、E-2)を図 2-44～図 2-45 に示す。

E-1 案(図 2-44)では、液化処理以降を発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は高圧水素・酸素(気体)を想定している。

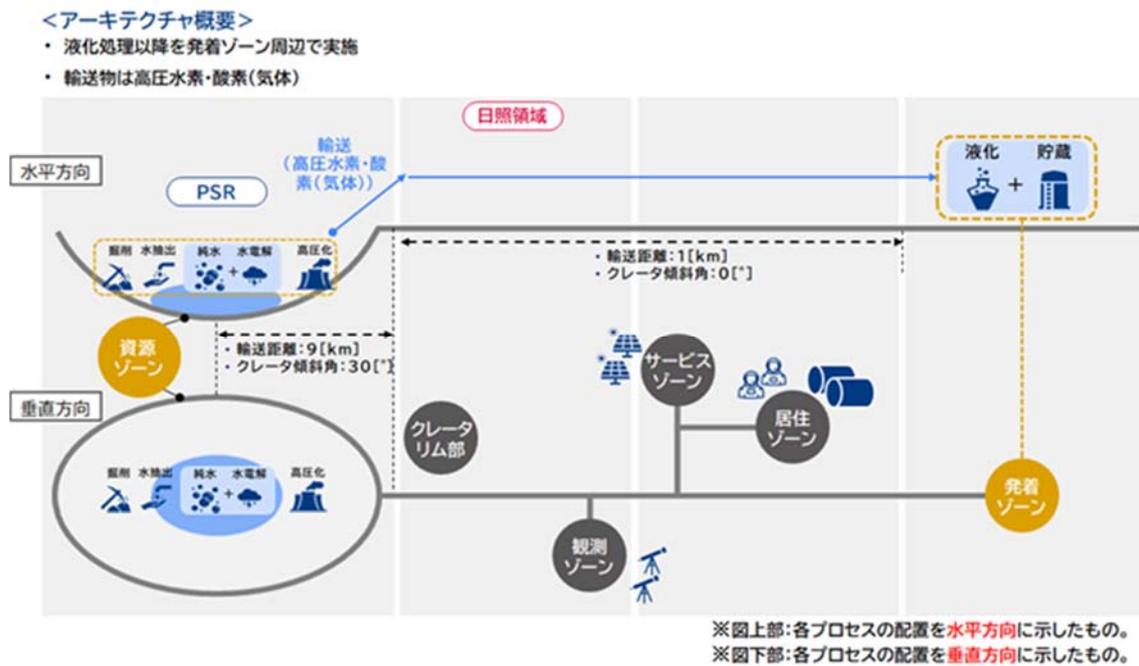


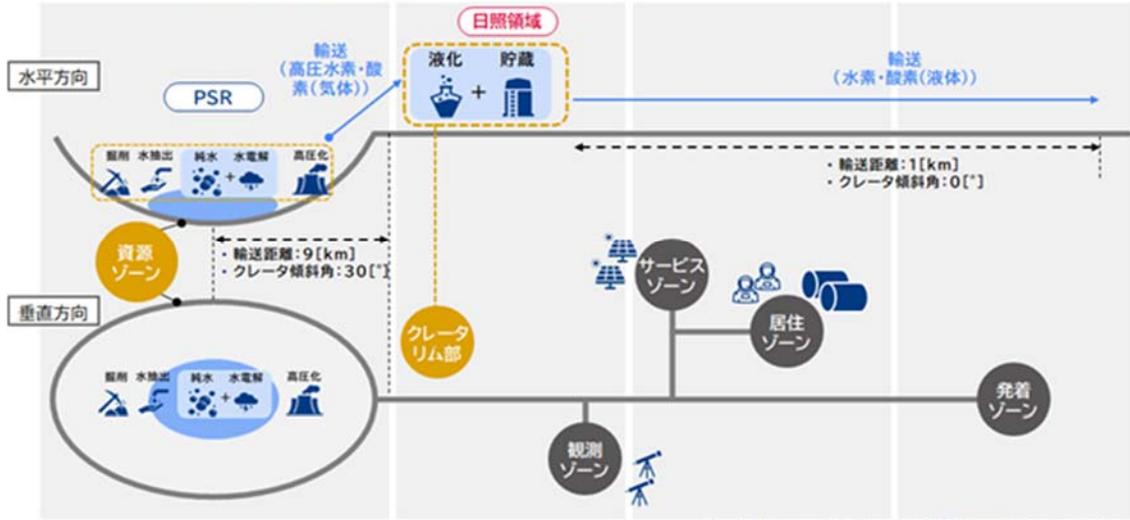
図 2-44 アーキテクチャ E-1 案(液化処理以降を発着ゾーン周辺で実施)

出所)三菱総合研究所作成

E-2 案(図 2-45)では、貯蔵までをクレータリム部で行い、それ以降の処理は発着ゾーン周辺で実施する。輸送物は高圧水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)を想定している。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は高圧水素・酸素(気体)、水素・酸素(液体)



※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

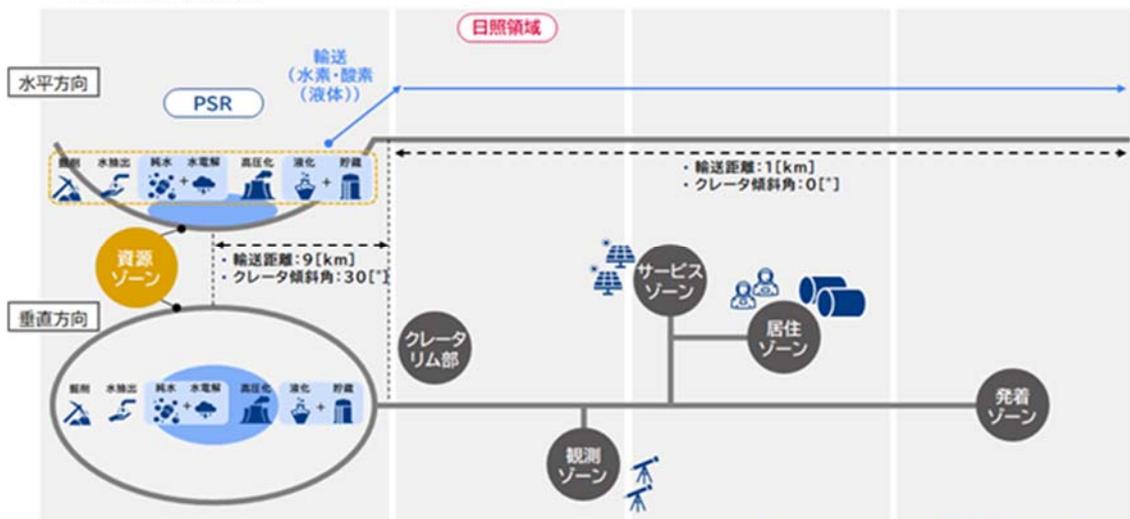
図 2-45 アーキテクチャ E-2 案(貯蔵までをクレータリム部で、以降は発着ゾーン周辺で実施)
 出所)三菱総合研究所作成

f. アーキテクチャ F(1 案):全プロセスを PSR 内部で実施

全プロセスを PSR 内部で実施し、輸送物は水素・酸素(液体)と想定するアーキテクチャである F 案を図 2-46 に示す。

<アーキテクチャ概要>

- ・ 全プロセスをPSR内部で実施
- ・ 輸送物は水素・酸素(液体)



※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-46 アーキテクチャ F-1 案(全プロセスを PSR 内部で実施)

出所)三菱総合研究所作成

2) アーキテクチャ評価の論点

1)で整理した全体アーキテクチャ案を評価にあたり設定した論点を表 2-27 に示す。現時点までの月面上に関わる情報の取得状況等を鑑み、本検討では具体的な数値を設定した定量評価ではなく、定性的な評価を実施した。なお、その他の観点である「建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価」や「施設利用の汎用性についての評価」については優先度を下げ、最終的な評価では「施設建設の観点(運用開始前・建設時の論点)」「施設への電力供給の観点(運用開始後・稼働時の論点)」「物質輸送の観点(運用開始後・稼働時の論点)」の3つの観点で評価している。

表 2-27 アーキテクチャ案評価のための論点

アーキテクチャ評価のための論点		論点の詳細
施設建設の観点 (運用開始前・建設時の論点)	建設時の必要建設工数面での評価	施設建設のための資材を地球から調達する場合、資材はまず発着ゾーン付近に集積されることが想定される。全体として、建設工数をより少なくできる全体配置を検討する。
	建設時の必要建設技術面での評価	2035年の初期稼働時で構築が技術的に困難な全体配置の有無を検討する。
施設への電力供給の観点 (運用開始後・稼働時の論点)	建設・運用時の効率的な電力供給面での評価	発電・送電はサービスゾーンが起点となることを考慮し、各プロセスへの電力供給の観点で適した全体配置を検討する。
	施設運用時の消費電力面での評価	プロセス全体での消費電力の最小化に適した全体配置を検討する。
物質輸送の観点 (運用開始後・稼働時の論点)	建設・運用時の物資輸送に必要な消費電力面での評価	施設間の物質輸送における消費電力の最小化の観点で適したアーキテクチャを検討する。
	建設・運用時の物資輸送量面での評価	施設間の物質輸送における輸送重量及び輸送距離の観点で適したアーキテクチャを検討する。
その他の観点 (運用開始後・稼働時の論点)	建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価	隕石衝突(含む二次災害)への対策、持続的に運用するための施設メンテナンス(含む要員の安全性)等を考慮した際に有利なアーキテクチャを検討する。
	施設利用の汎用性についての評価	特定の PSR だけでなく、その他の PSR へのアクセスも可能なアーキテクチャを検討する。

出所)三菱総合研究所作成

3) アーキテクチャ評価結果の整理方法

現時点では月面上の情報が限定的であること、施設設置に必要な技術の獲得途上であること等の理由から、本検討では 15 種類のアーキテクチャのうち、どのアーキテクチャ案が最も有利であるかを明確にすることを目的とせず、技術的・現実的に不可能であるアーキテクチャであるかどうか、他のアーキテクチャと比較して有利である／不利であるかどうかを整理することとした。そのため、評価結果は、図 2-47 に示す「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 群に分類する形とした。

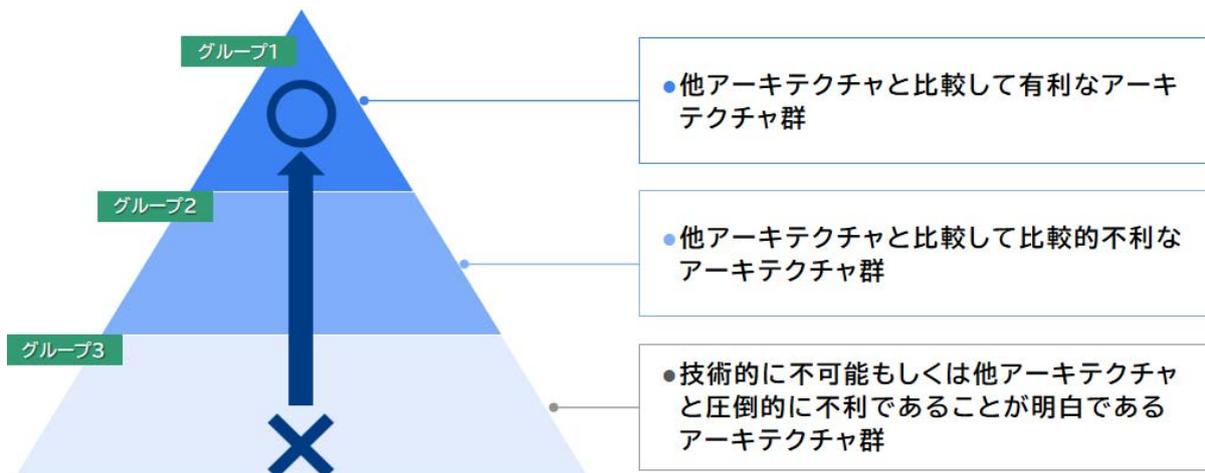


図 2-47 アーキテクチャ評価結果の整理方法

出所)三菱総合研究所作成

4) アーキテクチャ総合評価結果

水素 WGにおいて、15種類のアーキテクチャ群(A~F)について評価を行い、設定した各論点の評価結果に基づいて3つのグループに分類した。15種類の全体アーキテクチャの総合評価結果を図 2-48 に示す。

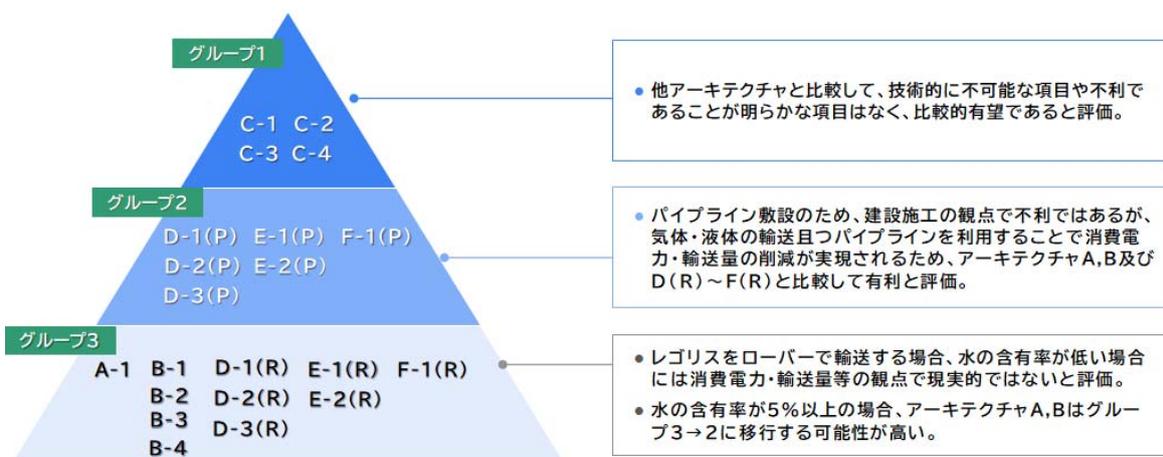


図 2-48 アーキテクチャ総合評価結果

出所)三菱総合研究所作成

評価の結果、純水処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施するアーキテクチャ C がもっとも有望なグループとなった。アーキテクチャ C は各論点について技術的に不可能であるとの評価結果がなく、他のアーキテクチャと比較して有利と判定された論点が多かったためである。

アーキテクチャ D~F は輸送手段によって評価が大きく変化するため、ローバによる輸送(R)とパイプラインによる輸送(P)に分けて評価結果を整理した。(P)パターンは導入の初期段階における月面上へのパイプライン敷設の課題はあるが、グループ1には満たないものの、グループ3と比較して優位性があるとの評価となった。一方で、(R)パターンはパイプラインの敷設が必要ではないため、初期段階での導入は容易であると考えられるが、水の需要量 75ton/年を実現する際、レゴリス及び水をローバで輸送する技術的な難易度が現実的ではないと評価し、グループ 3 に含まれるとの評価となった。

さらに、レゴリスをローバで輸送するアーキテクチャ A については、水の含有率が1%の場合であっても、少量の水を生成するために膨大な量のレゴリスを輸送する必要がある(含有率が1%である場合、10gの水抽出にあたり1kgのレゴリスを輸送する必要あり)点が技術的な難易度が現実的ではないと評価され、グループ3に含まれるとの評価となった。

なお、グループ3に分類されたアーキテクチャはいずれのパターンも現時点では大きな課題があるが、技術的なブレイクスルーがあれば上位グループとなるアーキテクチャもあると考えられる。また、前提条件に関わるレゴリス中の水の含有率や月面の地形・地質情報の追加や、技術的な進展を継続的にウォッチし、本結果を固定的なものとはせずタイミングを見て最新情報に基づく評価を行うことも必要である。

5) 各個別論点の評価結果概要

4)の総合評価の前提となる個別の論点の評価結果について順次述べる。

a. 施設建設の観点(運用開始前・建設時の論点)

施設建設の観点では、「建設時の必要建設工数面での評価」及び「建設時の必要建設技術面での評価」を実施した。当該論点について総合的に評価を行った結果、施設建設の面では発着場に近い場所に建設する方が比較的有利と評価された。一方、輸送設備建設の面ではパイプラインやコンベアを用いずローバで輸送するアーキテクチャが比較的有利と評価される結果となった。詳細な考え方についてア)イ)に示す。また、施設建設の観点でのアーキテクチャ別の評価結果を図 2-49 に示す。

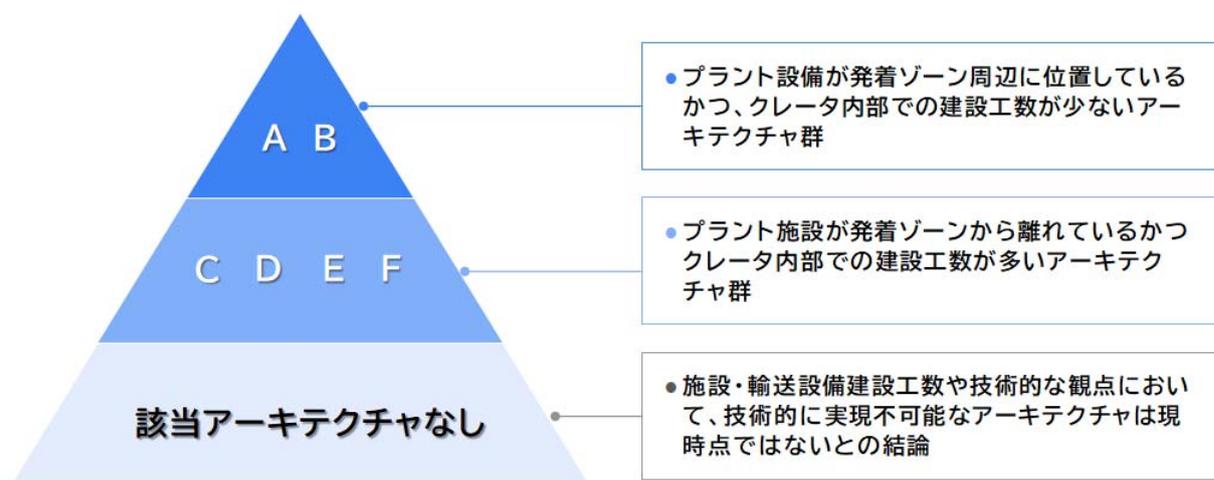


図 2-49 施設建設の観点からの評価結果

出所)三菱総合研究所作成

ア) 必要建設工数面での評価

本項目では月面上での必要建設工数として「プラント設備建設の工数」と「輸送設備建設の工数」の2種類に区別を行い、評価を行った。必要建設工数面でのアーキテクチャ評価を表 2-28 に示す。

プラント設備建設の観点では、プラント設備が発着ゾーン周辺に位置しているかつクレータ内部での建設工数が少ないアーキテクチャが有利であると評価した。理由としては、建設資材の輸送コストの最小化可能であること、斜面への建設と比較して平地への建設の方が有利であること、作業効率化の観

点で日照を得られる方が有利であること、施設保温のための追加施工を省略可能であることなどがあげられる。

一方で輸送設備建設の観点では、ローバでの輸送を有利と評価している。理由としてはパイプラインとあらかじめ敷設することに係る建設工数が多くなることが挙げられる。また、液体の水素と酸素を貯蔵プロセス以降で輸送する場合、ロケット充填時に大量の推進薬を短時間で発着場に輸送するため、パイプラインが太くなり、建設工数の面で不利であると考えられる。

表 2-28 施設建設の観点による評価結果(必要建設工数面での評価)

カテゴリ	評価軸
プラント設備建設の観点	・ 建設資材の輸送コストを最小化するためプラント設備は発着場に近い方がより有利
	・ 発着場近傍の”平地”にプラント設備を建設する方が有利(クレータ内部への建設は工数・技術的な面で困難)
	・ 建設作業性・施工性として、日照が得られる領域での作業を行える方が有利
	・ 保温などの外環境への対応に係る建設工数を最小化するため、クレータ外部への設置が有利
輸送設備建設の観点	・ ローバ等で輸送する場合の方が、気体(水素、酸素)及び液体(水、水素、酸素)を輸送するためのパイプラインを建設するよりも有利
	・ パイプラインで輸送する、且つ液体の水素と酸素を貯蔵以降で輸送する場合、ロケット充填時に大量の推進薬を短時間で発着場に輸送するため、パイプラインが太くなり、建設工数の面で不利

出所)三菱総合研究所作成

イ) 建設時の必要建設技術面での評価

本項目では月面上での必要建設工数として「プラント設備建設の工数」と「輸送設備建設の工数」の2種類に区別を行い、評価を行った。建設時の必要建設技術面でのアーキテクチャ評価を表 2-29 に示す。

プラント設備建設の観点では、クレータ内部もしくはクレータ傾斜部にて施工を行わないアーキテクチャが有利と評価した。理由としては、クレータ内部もしくはクレータ傾斜部にて施工を行う場合、極低温下で建機や人が長期間活動するための対応策、あるいは長期間活動しなくても建設できる対応策やクレータ外部からの視認性の確保等を考える必要があり、不利であると判定した。

一方で輸送設備建設の観点では、水抽出はクレータ内部で行うアーキテクチャが有利と評価した。理由としてはレゴリスの長距離輸送を行うアーキテクチャの場合、輸送に必要な機械部品が増えるため、建設時の技術的な観点で不利と考えられるためである。

表 2-29 施設建設の観点による評価結果(建設時の必要建設技術面での評価)

カテゴリ	評価軸
プラント設備建設の観点	・ クレータ内部・斜面での建設は、極低温下で建機や人が長期間活動するための対応策、あるいは長期間活動しなくても建設できる対応策やクレータ外部からの視認性の確保等を考える必要があり、クレータ外・平地での建設と比較して不利

輸送設備建設の観点	レゴリスの長距離輸送を行うアーキテクチャの場合、輸送に必要な機械部品が増えるため、建設時の技術的な観点で不利
-----------	--

出所)三菱総合研究所作成

b. 施設への電力供給の観点(運用開始後・稼働時の論点)

施設への電力供給の観点では、「建設・運用時の効率的な電力供給面での評価」及び「施設運用時の消費電力面での評価」を実施した。当該論点について総合的に評価を行った結果、プラント施設がクレータ外部に位置しているかつ、電力供給元であるサービスゾーンに近いほど有利と評価された。また、施設保温の観点で、極低温環境であるクレータ内部に位置する施設が多いほど保温のためにより多くの電力が必要となることから、クレータ外部に施設が位置している施設が多い方が有利と評価された。施設への電力供給の観点でのアーキテクチャ別の評価結果を図 2-50 に示す。

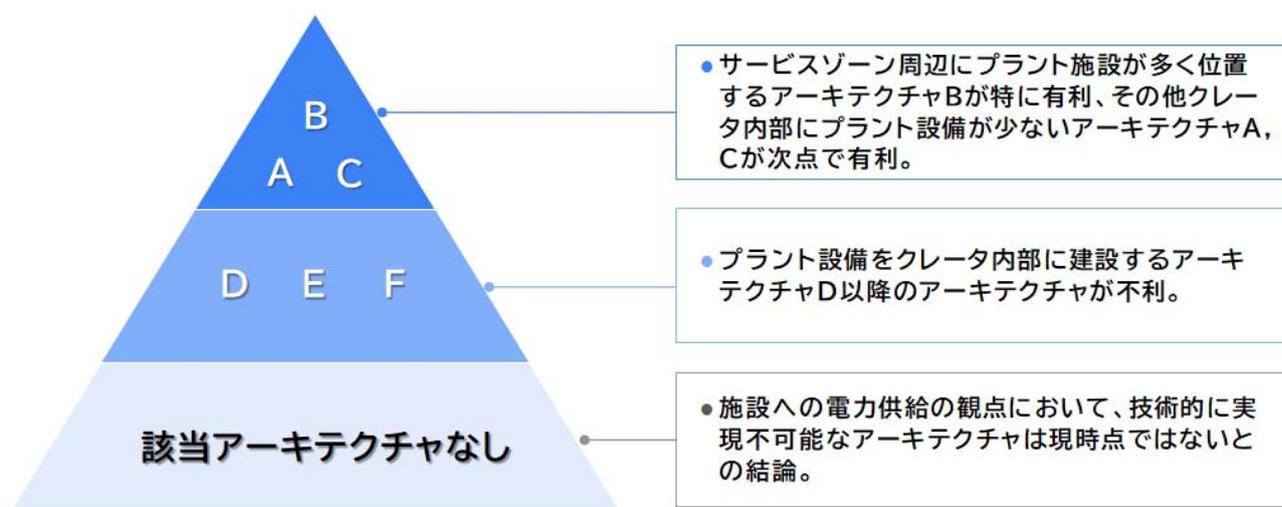


図 2-50 施設への電力供給の観点からの評価結果

出所)三菱総合研究所作成

ア) 建設・運用時の効率的な電力供給面での評価

建設・運用時の効率的な電力供給面でのアーキテクチャ評価を表 2-30 に示す。なお、本評価では電力発電手法は太陽光発電とし、供給元はサービスゾーンを想定している。原子力発電等のクレータ内部で電力供給可能な発電方式の採用により評価は変化する可能性がある点は留意する必要がある。

建設・運用時の効率的な電力供給面での評価では、プラント設備がより集約しており、かつ消費電力の大きなプロセスが電力供給元であるサービスゾーン周辺に位置している方が有利と評価した。理由としては電力供給設備の建設及び運用においてクレータ内部への送電が大きなネックとなるため、電力供給量の多い「水抽出」や「純水処理・水電解」プロセスがサービスゾーン周辺に位置することが望ましいためである。また、送電ロスを考慮するとプラント設備が分散しているよりも集約しているアーキテクチャの方が有利であると考えられる。

表 2-30 建設・運用時の効率的な電力供給面での評価結果

カテゴリ	評価軸
建設・運用時の効率的な電力供給面での評価	・ 建設面・運用面ともにクレータ底への送電が、大きな負荷となるため、クレータ内部のプラント設備が少ない方が有利。特に電力消費量の多い「水抽出」「純水・電気分解」設備がサービスゾーンに近い方が有利。
	・ 送受電設備のシステムアーキテクチャの観点で、プラント設備が分散しているよりも集約しているアーキテクチャの方が有利。

出所)三菱総合研究所作成

イ) 施設運用時の消費電力面での評価

施設運用時の消費電力面でのアーキテクチャ評価を表 2-31 に示す。

施設運用時の消費電力面での評価では、クレータ内部にプラント設備を設置しない方が有利との評価とした。理由としてはクレータ内部にプラント設備を建設する場合、正常に動作させるために施設を保温する必要があり、より多くの消費電力が必要であるためである。

表 2-31 施設運用時の消費電力面での評価結果

カテゴリ	評価軸
施設運用時の消費電力面での評価	・ 施設保温の観点で、クレータ内にプラント設備を設置する方が不利。

出所)三菱総合研究所作成

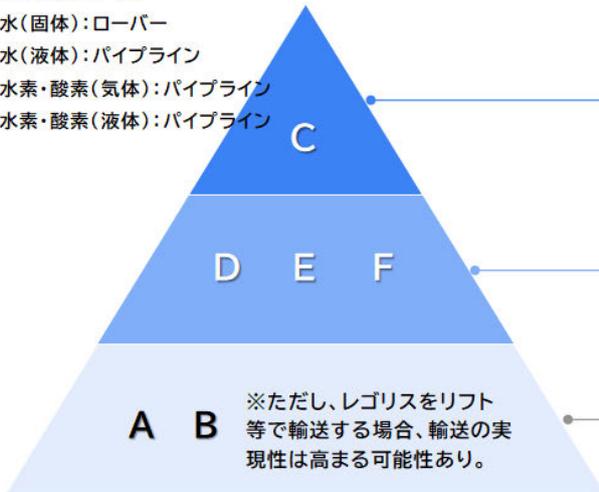
c. 物資輸送に必要な消費電力の観点

物資輸送に必要な消費電力の観点からの評価結果を図 2-51 に示す。建設・運用時の物資輸送(クレータ内部→クレータリム部までの区間)に必要な消費電力面で評価した場合、輸送物の輸送手段に大きく依存する。ただし、前述のようにレゴリス中の水の含有率が低い場合には輸送量の観点からレゴリスをローバで輸送することは非現実的な手段と判断される。なお、水素・酸素という気体状態で輸送することも手段としては考えられるが、当該気体を封入するための貯蔵タンクが必要であると考えられ、クレータリム部までの急な傾斜を輸送することは困難であると考えられることから、本検討では選択肢から除外している。

検討の結果、水(液体)をパイプラインで輸送する方式が輸送に係る消費電力の観点で有利であるとの結果とした。ただし、パイプラインを利用するアーキテクチャでは月面での水素・酸素生成の初期段階においてパイプラインを建設する必要があり、ローバを活用するアーキテクチャと比較して建設コスト面で不利となる点は留意が必要である。

なお、レゴリス中の水の含有率が現状の想定よりもかなり高い(5%以上)、リフト等の新たな大量輸送能力の獲得などの技術的な革新、などが起こった場合に上位グループとなるアーキテクチャもあるとの評価結果となった。

- ・レゴリス:ローバー
- ・水(固体):ローバー
- ・水(液体):パイプライン
- ・水素・酸素(気体):パイプライン
- ・水素・酸素(液体):パイプライン



●水(液体)をパイプラインで輸送するアーキテクチャが消費電力的には最も有利。ただし、水(液体)を保温する必要がある場合、不利となる可能性あり。

●水素・酸素(気体、液体)は水(液体)の輸送よりも消費電力の観点で不利。

●レゴリスをローバーで輸送する場合、水の含有率が低い場合には現実的ではない。(輸送に必要な輸送量が膨大)

図 2-51 物資輸送に必要な消費電力の観点からの評価結果

出所)三菱総合研究所作成

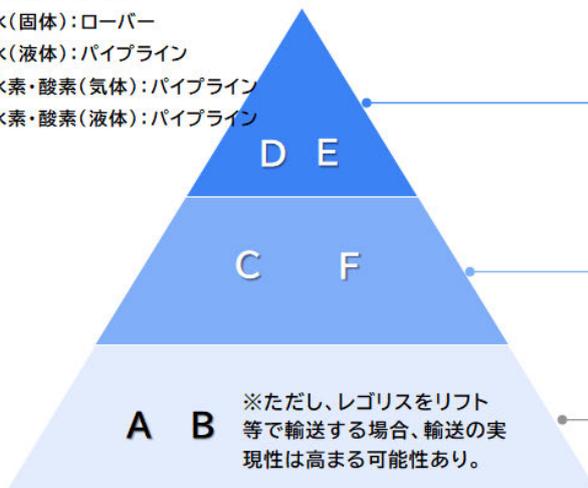
d. 必要な物資輸送量の観点

必要な物資輸送量の観点からの評価結果を図 2-52 に示す。

建設・運用時の物資輸送(クレータ内部→クレータリム部までの区間)に必要な物資輸送量面で評価した場合、輸送物の輸送手段に大きく依存するが、レゴリス中の水の含有率が低い場合にはレゴリスをローバで輸送することは輸送量の観点で非現実的であると考えられるため、レゴリスをローバで輸送するアーキテクチャは不利と評価した。なお、レゴリスをローバではなくリフトなどで輸送する場合には実現性は高まる可能性はあるため、輸送方法について継続検討する必要がある。

水素・酸素(気体)をパイプラインを使って輸送する方式については、他アーキテクチャと比較して大幅な輸送重量の削減が可能であり、有利であると評価した。一方で、水(液体)をパイプラインで輸送する(特にクレータ内部)場合、凍結の恐れがあるため保温材などの保温のための追加の資材や設備を別途設置する必要があり、輸送物資が増大するため比較的不利と評価した。

- ・レゴリス:ローバー
- ・水(固体):ローバー
- ・水(液体):パイプライン
- ・水素・酸素(気体):パイプライン
- ・水素・酸素(液体):パイプライン



●パイプラインでの気体輸送により大幅な輸送重量の削減が可能であり、クレータリムまで水素・酸素(気体)で輸送するアーキテクチャDやEが有利

●液体の水は凍結防止のため(特にクレータ内部の輸送では寄与が大きい)に保温材などの資材を要し、物資が増加するため、アーキテクチャCやFは比較的不利。

●レゴリスをローバーで輸送する場合、水の含有率が低い場合には現実的ではない。(輸送に必要な輸送量が膨大)

図 2-52 必要な物資輸送量の観点からの評価結果

出所)三菱総合研究所作成

e. その他の観点(運用開始後・稼働時の論点)

a～d で評価を行った主な論点以外のその他の論点として、「建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価」及び「施設利用の汎用性についての評価」の 2 種の論点でも評価を実施した。ただし、本論点の評価は他の論点(a～d)と比較して優先度は下がると考えられたことから、総合的な評価には加味していない。

ア) 建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価

建設・運用時の安全性・保守性の面でのアーキテクチャ評価を表 2-32 に示す。傾向として各種施設はクレータ内部に設置するとメンテナンスの難易度は上がるため、できる限り日照部に設置することが推奨されるとの評価結果であった。

表 2-32 建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価結果

カテゴリ	評価軸
建設・運用時の安全性(含む冗長性確保)・保守性の面での評価	施設有人メンテナンスの観点で居住エリアに近い方が有利
	クレータ内部の施設の保守は難易度高く、不利

出所)三菱総合研究所作成

イ) 施設利用の汎用性についての評価

施設利用の汎用性の面でのアーキテクチャ評価を表 2-32 に示す。より長期間の運用を考えた際に、単一のクレータの水資源に依存することは適切ではなく、他のクレータの水資源へのアクセス性を考慮してクレータ内部への施設設置をできる限り減らすべきと考えられる。

なお、当該観点については、現段階において必要情報(水資源の埋蔵量やクレータ周辺の地形情報)が未確定であるため評価は難しい面や、資源枯渇よりも先に設備のデコミッションングの方が先に来る可能性が高いとの考え方もある。

表 2-33 施設利用の汎用性についての評価

カテゴリ	評価軸
施設利用の汎用性についての評価	クレータ内部の設備配置は資源枯渇の際の持続可能性の観点で、不利

出所)三菱総合研究所作成

(4) STEP4:全体アーキテクチャの可視化

STEP3 での検討・評価の結果、有望であると評価されたアーキテクチャ C(4 案)を再掲する。

<アーキテクチャ概要>

- ・純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施
- ・輸送物は水(液体)or水(固体)

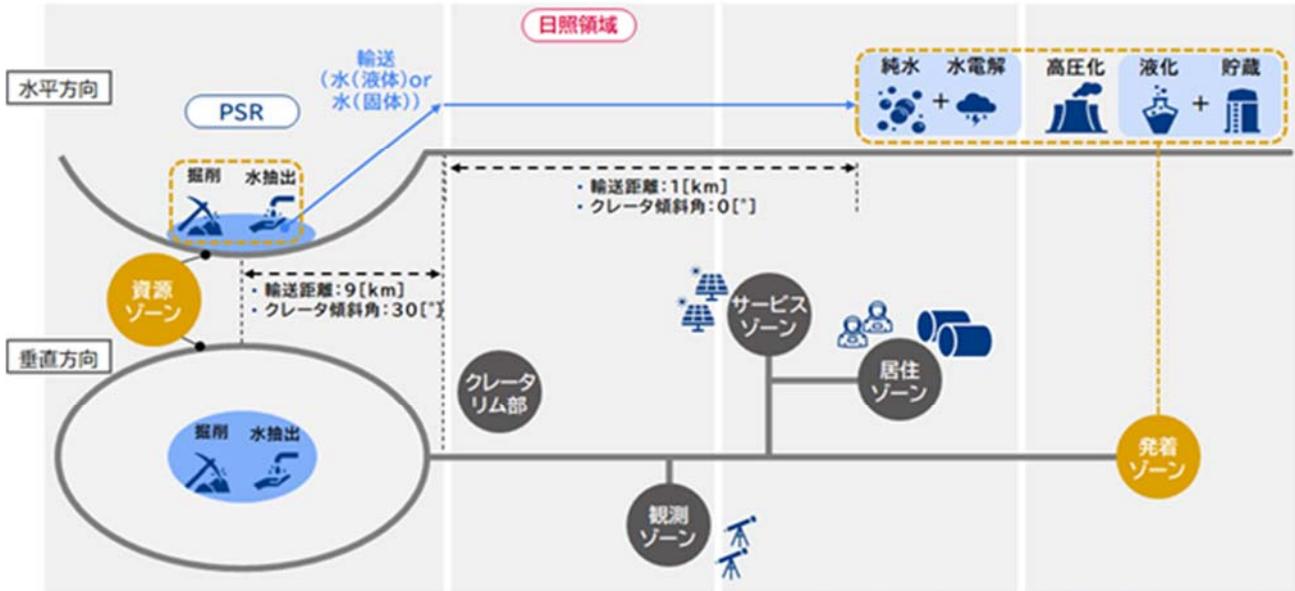


図 2-53 全体アーキテクチャ C-1 案(純水処理以降のプロセスを発着ゾーン周辺で実施)(再掲)
出所)三菱総合研究所作成

<アーキテクチャ概要>

- ・水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・輸送物は水(液体)or水(固体)、水素・酸素(気体)

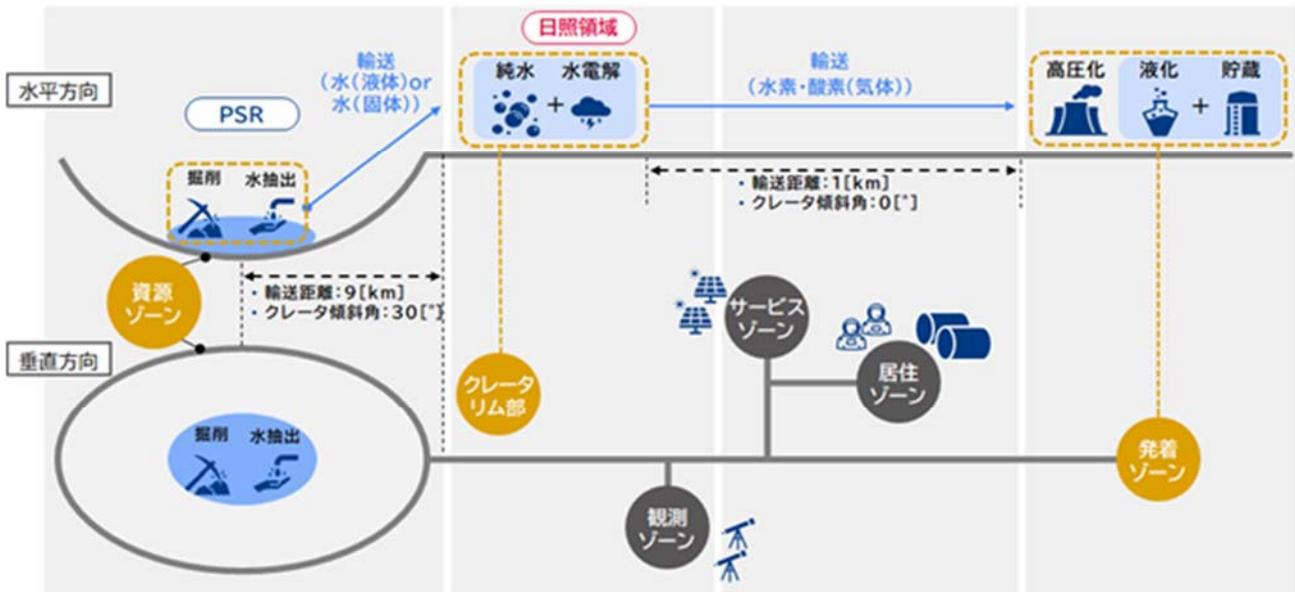
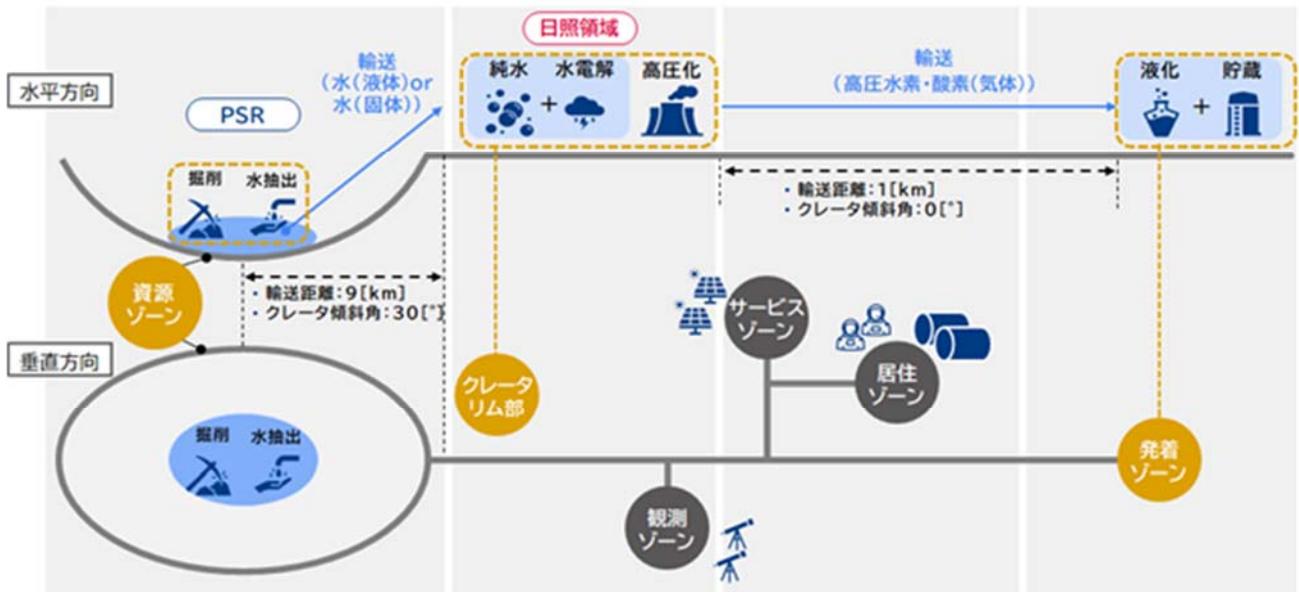


図 2-54 全体アーキテクチャ C-2 案(水電解までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲)
出所)三菱総合研究所作成

<アーキテクチャ概要>

- ・ 高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水(液体)or水(固体)、高圧水素・酸素(気体)

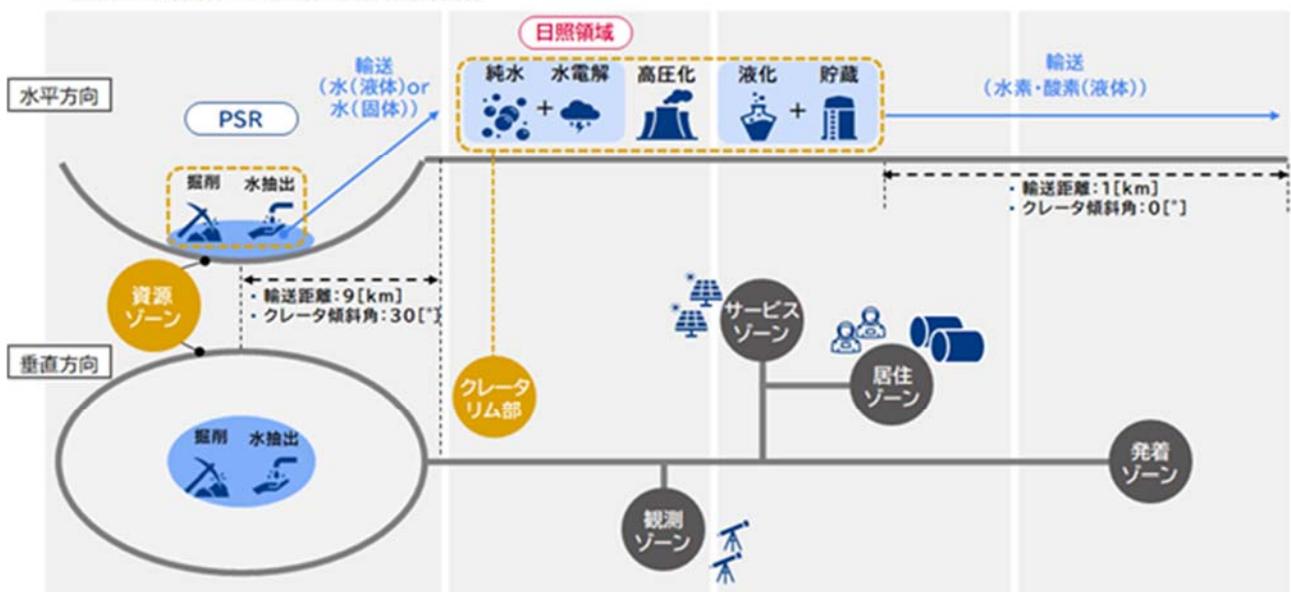


※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-55 全体アーキテクチャ C-3 案(高圧化までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲出所)三菱総合研究所作成

<アーキテクチャ概要>

- ・ 液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施
- ・ 輸送物は水(液体)or水(固体)、水素・酸素(液体)



※図上部:各プロセスの配置を水平方向に示したもの。
 ※図下部:各プロセスの配置を垂直方向に示したもの。

図 2-56 全体アーキテクチャ C-4 案(液化・貯蔵までをクレータリム部、以降は発着ゾーン周辺で実施)(再掲出所)三菱総合研究所作成

2.1.4 水素生成に係る必要電力量の算出

月面エネルギーアーキテクチャ全体の需給のバランス等を踏まえたエネルギーマネジメントの検討の一環として、2.1.3 にて検討を行った全体アーキテクチャのうち、比較的有望であると評価されたアーキテクチャ C2(純水処理以降のプロセスをクレータリム部～発着ゾーンで実施)を対象として必要電力の算出を行った。

(1) 電力算出における前提条件

電力の送電に係る前提条件として、JAXA 探査シナリオにもとづいて、発電及び送電の起点は月面上のサービスゾーンで行われると仮定した。電力検討に当たって、サービスゾーンを起点とした各施設への電力供給方法の想定は以下の通りである。

- 各ゾーンをつなぐ長距離基幹網は無線送電
- 各ゾーン内での短距離の送電は有線
- クレータ内部への送電はパイプラインを活用した有線または無線送電
- パイプラインによる輸送の際にはパイプラインを活用した有線、ローバの場合は無線送電もしくはバッテリーによる充電

また、各施設への必要電力を算出する上で、施設が配置される各ゾーン間の距離の設定が重要となる。本検討では JAXA 探査シナリオを前提として、必要に応じて月面上の実際のクレータの情報を参照しつつ以下を前提条件と設定した。

- サービスゾーン-発着ゾーン間の距離 1km(JAXA 探査シナリオに基づいて設定)
- サービスゾーン-クレータリム部の距離は 7km(シャクルトン・クレータ(深さ 4km、斜度 30 度程度)の情報に基づいて設定)
- サービスゾーン-資源ゾーン間の距離は 2km(JAXA 探査シナリオでの当該距離数kmとの前提とサービスゾーン-クレータリム部の距離 7km に基づいて設定)
- パイプラインによる輸送の場合、パイプライン内部に有線を沿わせて敷設する可能性あり
- レゴリス中の水の含有率が 1%を想定し、必要な水素を 300 日かけて徐々に生成することを想定(昨年度の検討結果より、より現実的なシナリオを想定)

ゾーン間の物資輸送に係る前提については、アーキテクチャ C2 での輸送物はクレータ内部→クレータリム部まで水(液体)、クレータリム部→発着ゾーンまで水素・酸素(気体)を前提とし、輸送手段としてはパイプライン及びローバを想定していることから、本検討では両手段に関する前提条件を以下の通り設定した。

表 2-34 ゾーン間の物資輸送に係る前提

		クレータ内部→クレータリム部 (輸送形態:水(液体))	クレータリム部→発着場 (輸送形態:水素・酸素(気体))
輸送手段	パイプライン	【パイプラインの長さ】 クレータ内部(水抽出)→処理ゾーン(純水処理・水電解)までで9km(うち7kmは斜度30度の斜面)	【パイプラインの長さ】 処理ゾーン(純水処理・水電解)→発着ゾーンまでで1kmを仮定
	ローバ	【パイプラインの太さ】 水(液体)500kg/日処理可能な太さ	【パイプラインの太さ】 水素(気体)が28kg/日、酸素(気体)が222kg/日
	ローバ	【輸送経路長】 クレータ内部(水抽出)→処理ゾーン(純水処理・水電解)までで9km(うち7kmは斜度30度の斜面)	【輸送経路長】 処理ゾーン(純水処理・水電解)→発着ゾーンまでで1kmを仮定
		【輸送重量】 水(液体)500kg/日+タンク重量	【輸送重量】 水素(気体)が28kg/日、酸素(気体)が222kg/日+タンク重量 ※輸送の実現性を高めるため、高圧化された気体である方が望ましい。

出所)三菱総合研究所作成

月面上での施設配置と電力供給アーキテクチャのイメージを図 2-57 に示す。

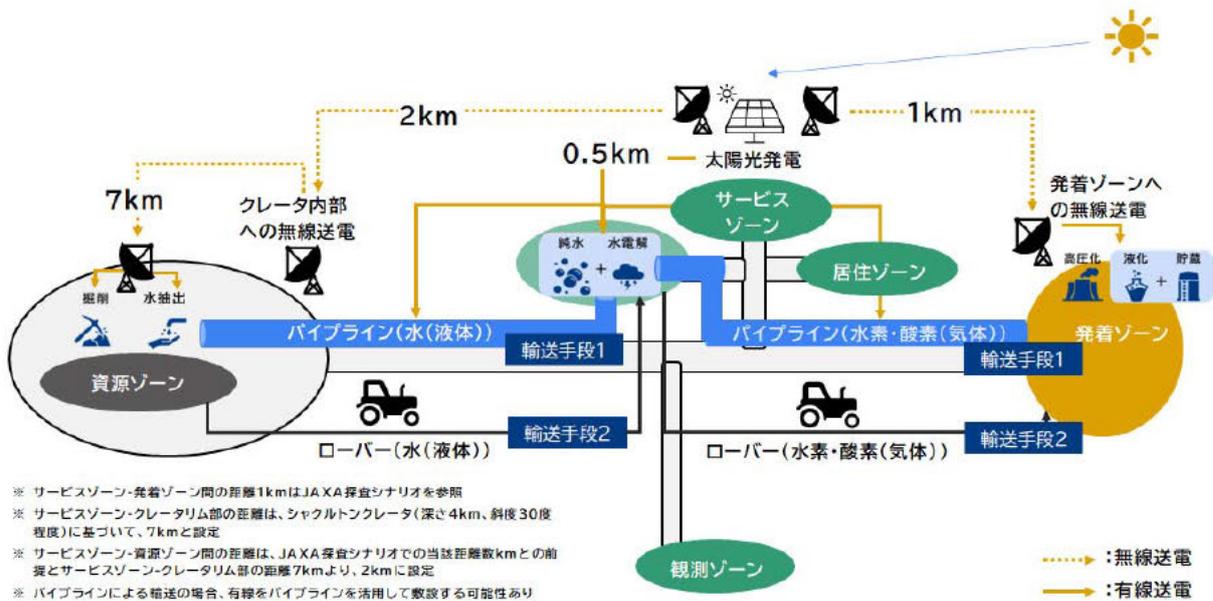


図 2-57 施設配置と電力供給アーキテクチャのイメージ

出所)三菱総合研究所作成

(2) 必要電力量の算出結果

1) 水素生成に関わる施設の必要電力

昨年度実施した電力量算出の手法を踏襲し、液化された水素及び酸素をそれぞれ 28kg/日、222kg/日を生成するために必要な各プロセスでの処理量をベースに検討を行った。水抽出プロセスに関してはクレータ内部で掘削及び太陽光加熱方式を用いた水抽出プロセス①と熱抽出(サーマルマイ

ニング)による水抽出プロセス②の2種類の方式別に電力量を算出した。

水抽出プロセス①を採用した場合の必要電力量の算出結果を表 2-35 に示す。特に水抽出で必要となる電力量に関して、昨年度と比較して大幅な低減となっている。この理由としては、前年度の検討においてはレゴリス中からの水の抽出は電気加熱方式を採用していたが、省電力化を図るため、本年度の検討では太陽光加熱方式(図 2-58 のようにリム部にヘリオスタットを配置し、PSR に配置した移動式のドーム内にレゴリスを集積させ、水抽出を行う方式)を採用していることに起因する。想定している掘削及び水抽出方式の概観を図 2-58 に示す。それに伴い一日当たり最も電力が必要となるプロセスは水電解プロセスとなっている。

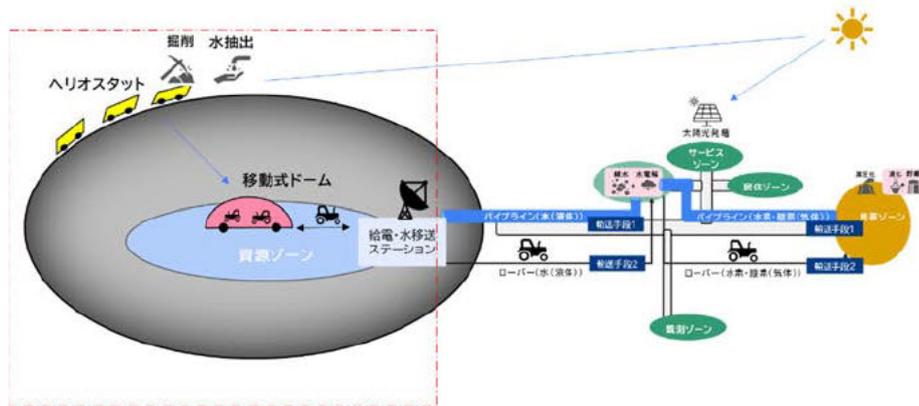


図 2-58 太陽光加熱方式による水抽出概観

出所)三菱総合研究所作成

表 2-35 必要電力値の算出結果(300日稼働、レゴリス中の水含有率1%):水抽出プロセス①(掘削+PSR内部で水抽出)を採用するパターン

プロセス		(300日稼働、レゴリス中の水含有率1%)			
		input(kg/日)	output(kg/日)	1: 必要電力量(kWh/日) 2: 定格電力(kW)	稼働場所
水抽出プロセス①	掘削	-	62,600 (レゴリス+水)	1: 501 2: 25	PSR内部
	水抽出	31,300 (レゴリス+水)	313 (水(液体))	1: 46 2: 2	
パイプライン/ローバ (クレータ内部⇒リム部)					
純水製造		313(水(液体))	250(純水(液体))	1: 12 2: 0.5	サービスゾーン (電力供給元) 周辺
水電解		250(純水(液体))	28(水素(気体)) 222(酸素(気体))	1: 1,285.8 2: 53.7	
パイプライン/ローバ (リム部⇒発着ゾーン)					
高圧化		28(水素(気体)) 222(酸素(気体))	28(高圧水素(気体)) 222(高圧酸素(気体))	1: 72(H ₂)+36(O ₂) ^{※2} 2: 3(H ₂)+1.5(O ₂) ^{※2※3}	発着ゾーン周辺

液化	28(高圧水素(気体))	28(水素(液体))	1: 240 ^{※1}	
	222(高圧酸素(気体))	222(酸素(液体))	2: 10 ^{※1※3}	

※1: 酸素はラジエーターのみで液化(電力消費無し)と仮定。水素も現在商用運転している液化装置の消費電力を基に、冷媒製造装置の仕事量相当をラジエーターに置き換えられるものとして推定。

※2: 昇圧幅は 0.1 MPaA → 2.1 MPaA を想定。昇圧に伴い必要な水素の冷却&圧縮機の冷却には電力を用いないと仮定。液化方式によっては不要となる可能性もある。特に酸素に関しては、ラジエーターのみで液化できる可能性があり、その場合は電力不要。

※3: 定格では無く、定常運転時の消費電力として。起動時のピーク電力などは未考慮。

出所) 各社提供情報より、三菱総合研究所作成

また、水抽出プロセス②を採用した場合の必要電力量の算出結果を表 2-36 に示す。プロセス①と異なり、1 日当たりの処理量を実現するため、サーマルマイニングによる電力消費が最も多くなっている。

表 2-36 必要電力値の算出結果(300 日稼働、レゴリス中の水含有率 1%): 水抽出プロセス②(サーマルマイニングによる水抽出)を採用するパターン

プロセス		(300 日稼働、レゴリス中の水含有率 1%)			
		input(kg/日)	output(kg/日)	1: 必要電力量(kWh/日) 2: 定格電力(kW)	稼働場所
水抽出プロセス②	サーマルマイニング	78,250 (レゴリス+水)	313(水(液体))	1: 2098.3 2: 87.5	PSR内部 または、リム部
パイプライン/ローバ (クレータ内部⇒リム部)		/			
純水製造		313(水(液体))	250(純水(液体))	1: 12 2: 0.5	サービスゾーン (電力供給元) 周辺
水電解		250(純水(液体))	28(水素(気体)) 222(酸素(気体))	1: 1,285.8 2: 53.7	
パイプライン/ローバ (リム部⇒発着ゾーン)		/			
高圧化		28(水素(気体)) 222(酸素(気体))	28(高圧水素(気体)) 222(高圧酸素(気体))	1: 72(H2)+36(O2) ^{※2} 2: 3(H2)+1.5(O2) ^{※2※3}	発着ゾーン周辺
液化		28(高圧水素(気体)) 222(高圧酸素(気体))	28(水素(液体)) 222(酸素(液体))	1: 240 ^{※1} 2: 10 ^{※1※3}	

※1: 酸素はラジエーターのみで液化(電力消費無し)と仮定。水素も現在商用運転している液化装置の消費電力を基に、冷媒製造装置の仕事量相当をラジエーターに置き換えられるものとして推定。

※2: 昇圧幅は 0.1 MPaA → 2.1 MPaA を想定。昇圧に伴い必要な水素の冷却&圧縮機の冷却には電力を用いないと仮定。液化方式によっては不要となる可能性もある。特に酸素に関しては、ラジエーターのみで液化できる可能性があり、その場合は電力不要。

※3: 定格では無く、定常運転時の消費電力として。起動時のピーク電力などは未考慮。

出所) 各社提供情報より、三菱総合研究所作成

なお、電力量の算出においては、以下に示す条件は考慮していない点は留意する必要がある。

- 日照率や夜間稼働の有無などにより必要設備を稼働させる周囲環境を維持するためのエネルギー量は変動することが想定されるが、本検討では変動に対応するための保温等に関わる電力量は考慮していない。

- 施設の持続的な運用のため、メンテナンスなど定常運転以外での運用に伴うエネルギーも想定されるが、本検討ではメンテナンス等に費やす電力量は考慮していない。
- 直流高圧 DC 電源が電力WGから給電されると想定し、本検討では使用電圧に変換(降圧)する場合の損失は考慮していない。

2) 輸送設備に関わる必要電力

前述のようにアーキテクチャ C2 における輸送物はクレータ内部→クレータリム部まで水(液体)、クレータリム→発着ゾーンまで水素・酸素(気体)を前提としており、輸送手段としてはパイプライン及びローバを想定している。

それぞれの輸送手段における必要電力の算出を行った結果を以下に述べる。

a. パイプラインによる輸送

パイプラインによる物質の輸送の検討にあたって、以下に示す 2 種類の検討ケースを想定した。また、保温の必要性の観点から、水(液体)を対象に必要な電力量の算出を行った。以下に示す 2 ケースの概観図を図 2-59 に示す。

- Case A: 表面に低放射率の塗料を塗布した裸配管を宙に吊るす(支柱への伝熱は考慮しない)
- Case B: レゴリスの中に埋設した状態とする



図 2-59 パイプラインの検討ケース

出所)三菱総合研究所作成

パイプラインでの輸送では、内部を通る水(液体)を保温し、凍結を防ぐために常に電力を供給する必要がある。本検討ではパイプライン中に存在する水からの放熱量を算出し、それと同等の熱量を水に与えることで保温することを前提とした。以下に計算で仮定した条件を示す。

- 水温を 40℃と仮定し、放熱量 Q [W/m]を算出。 Q [W/m]に相当する熱量を与えれば 40℃で保温できるものとする

- 必要なジュール熱 = 放熱量 Q / 効率であるが、効率は検討していない¹
- 夜間を前提とし、平地/斜面における差は割愛した
- レゴリスの物性は SLS-159(NASA)より引用し、以下の通り導出
($\epsilon = 0.95[-]$, $k(T) = 1.115e10^{-3} + 1.59e-11 \times T^3[W/m-K]$ ("Apollo 12 1970 kg/m³"を想定))
- 配管は SUS 304 のフレキシブルホースを想定した(300days : 8A / 35days : 15A)
- Case A(裸配管の宙吊り)は懸念が多く現実味が薄いだが、比較対象として検討した
($\epsilon = 0.02$ の表面加工(塗装)を前提とする。ただし実際はレゴリスが付着し、 ϵ が増加する可能性が高い。)
- 推算結果は近似と仮定を含むため、あくまで参考値としての扱いとする。

上記の前提条件に従った計算結果を表 2-37 に示す。当該結果は自らの放熱量をもとに計算した結果であり、水(液体)全体に対して均一に計算により導かれた熱量をどのように供給するかは別途検討する必要がある。また、概算での必要電力量を把握するために行っているものであり、様々な簡易的な前提と近似や仮定を含んでいることから、実際にパイプラインに供給すべき電力量とは異なる点に留意する必要がある。

表 2-37 パイプライン中の水(液体)の保温に必要な熱量

	単位放熱量 [W/m]		合計放熱量 [kW/9km]	
	300 days	35 days	300 days	35 days
Case A : 裸管の宙吊り	0.11	0.18	0.95	1.6
Case B : 埋設(10cm)	0.58	0.67	5.2	6.0

出所)三菱総合研究所作成

b. ローバによる輸送

アーキテクチャ C2 では経路ごとに輸送すべき物質の状態が異なるため、経路ごとに必要電力の算出を実施した。

ア) 経路1(クレータ内部(水抽出)→処理ゾーン)の輸送必要電力量

計算の前提となる条件を表 2-38 に示す。

表 2-38 経路1の輸送必要電力量算出に係る前提条件

ローバの単位	155Wh/km
距離当たりの必要な電力量	(一般的な小型EV車のような輸送車で1日1回(越夜時を除く)の運搬を想定し、と仮定)

¹ 効率 = 配管内の流体に届く熱量 / ジュール熱発生量で与えられるものとし、電熱線の巻き方(平行、螺旋等)、本数、その時の温度バランスによって変化すると仮定した。

走行距離	22km(片道) (クレータ内部からリム部まで:傾斜 30°で 7km→傾斜 10°を保った走路で走行した場合、走行距離約 20km。リム部から処理ゾーンまでの距離:2km)
輸送物重量	地上重量 700kg (月面 約 120kg) (水(液体)500kg+タンク重量を地上で 700kg と想定。(月面重量で約 120kg 程度))
輸送車の重量	地上重量 1.5t (月面 約 250kg) (EV 車バッテリー重量は、10kwh に対して地上約 30 kgx2=60kg(月面約 10kg) と想定。22km 走行の場合、必要電力は 3,410Wh(3.41kWh)となり、1つのバッテリーで十分補える。(ただし、月面での走行効率は地上に比べ落ちる可能性があり)輸送車自体の重量に比べ微小となる為、輸送車の重量はバッテリー込みで地上 1.5t (月面 250kg)と想定。)
越夜中／日陰のバッテリー保温に必要な電力	3.4kwh (バッテリーの機能性能の為に保温に必要な熱量を、MLI 使用を考慮し 10W 程度と想定。越夜時は走行しない前提の場合、バッテリー保温に必要な電力は、10w×14 日=3.4kwh 程度。(ただし、走行中のバッテリーや輸送車の熱設計は要考慮))

出所)ispace 提供資料

上記前提条件に基づいて、必要電力量を試算した結果、トータル必要電力量として 20kWh (往復)との結果となった。実現のためにはフル充電の 10kWh のバッテリー2つを搭載して走行することが想定される。なお、月面の重力下では地上に比べより省電力で走行ができる一方で、バッテリー保温に必要な電力の他にクレータ内部走行の傾斜+輸送物の重量+レゴリス滑走による電力負荷を考慮する必要があるが、地上での必要電力の約 3 倍の 10kWh 程度の電力があれば片道走行は十分可能と考える。

イ) 経路2(処理ゾーン(純水処理・水電解)→発着ゾーン)の輸送必要電力量

計算の前提となる条件を表 2-39 に示す。

表 2-39 経路 2 の輸送必要電力量算出に係る前提条件

ローバの単位 距離当たりの 必要な電力量	155Wh/km (一般的な小型EV車のような輸送車で1日1回(越夜時を除く)の運搬を想定し、と仮定)
走行距離	1km(片道で傾斜なし)
輸送物重量 (水素)	地上重量 200kg (月面重量約 34kg) (水素気体 28kg の容量は 313,600L(約 314m ³)と膨大になる為、輸送には圧縮タンクが必要となる。 例としてトヨタの 70MPa の樹脂高圧水素タンク使用を仮定した場合、地上 5.6kg の水素タンクが 43kg(タンク径が 299mmφ×長さが 1467mm)の為、4 本のタンクが必要となる。重量は地上で 172kg、月面重量では 29 kg程度と想定される。この重量に水素気体自体の重量(22kg)を加え、地上 200kg(月面約 34kg)

	と想定。)
輸送物重量 (酸素)	地上重量 1,211kg (月面重量約 202kg) (水素気体 222kg の容量は 155,400L(約 155m ³)となる為、水素同様に圧縮タンクが必要となる。 地上で一般的な 14.7MPa のタンクを使用した場合、1057 リッターになり、46.7 リッター容器(43kg)で 23 本=989kg(月面約 165kg)程度が必要になる。寸法は 23 cm φ×1.3m×23 本の容量。この重量に酸素気体自体の重量(222kg)を加え、地上 1211kg(月面約 202kg)と想定。)
輸送車の重量	地上重量 1.5t (月面 約 250kg、経路1同様)
越夜中／日陰 のバッテリー保温 に必要な電力	3.4kwh (バッテリーの機能性能の為の保温に必要な熱量を、MLI 使用を考慮し 10W 程度と想定。越夜時は走行しない前提の場合、バッテ保温に必要な電力は、10w×14 日 =3.4kwh 程度。(ただし、走行中のバッテリーや輸送車の熱設計は要考慮))

出所)ispace 提供資料

上記前提条件に基づいて、必要電力量を試算した結果、トータル必要電力量として 10kWh (往復)との結果となった。実現のためにはフル充電の 10kWh のバッテリー 1つを搭載して走行することが想定される。バッテリー保温に必要な電力の他に、輸送物の重量+レゴリス滑走による電力負荷を考慮する必要があるものの、地上での必要電力では往復でも 310Wh 程度であることから、10kWh の 1つのバッテリーで往復走行が十分可能と考えられる。

2.1.5 今後の検討課題

(1) ミッシングピースの整理方針

水素 WG では本年度の検討内容を踏まえて、次年度の検討に向けたミッシングピースについて、以下に示す 3つの観点で整理を行った(図 2-60 参照)。

- 各プロセスにおけるミッシングピース
 - 各社様担当プロセスに関して、昨年度及び本年度の検討スコープに含まれていないが今後検討が必要な重要な論点
 - 各社様担当プロセスに関して、海外技術との比較検討(技術比較の可能性や評価軸を含めて) 等
- 各プロセス“間”のミッシングピース
 - 水素 VC 全体が機能するために検討が抜けているプロセス 等
- 水素 VC 全体におけるミッシングピース
 - 本年度検討を実施した全体アーキテクチャ検討に関して、本年度の検討スコープに含まれていないが今後検討する必要のある重要な論点 等

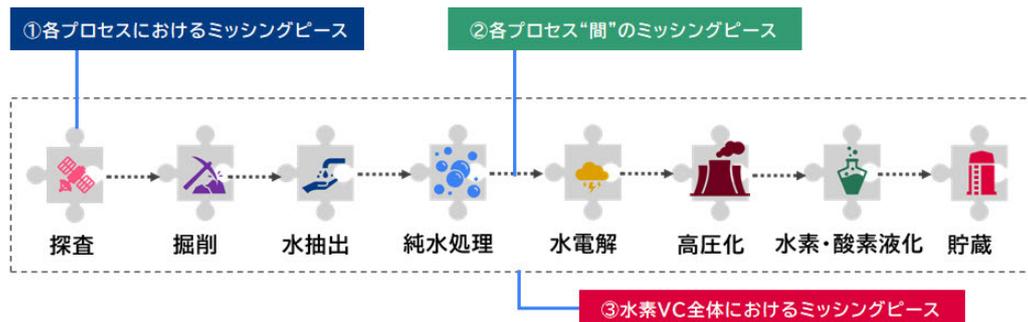


図 2-60 ミッシングピース整理の概要図

出所)三菱総合研究所作成

(2) 各プロセス／もしくは各プロセス間のミッシングピース整理

本年度の検討スコープには含まれていないが、各プロセス／もしくは各プロセス間に必要となる機能(ミッシングピース)についての整理結果を図 2-61 に示す。

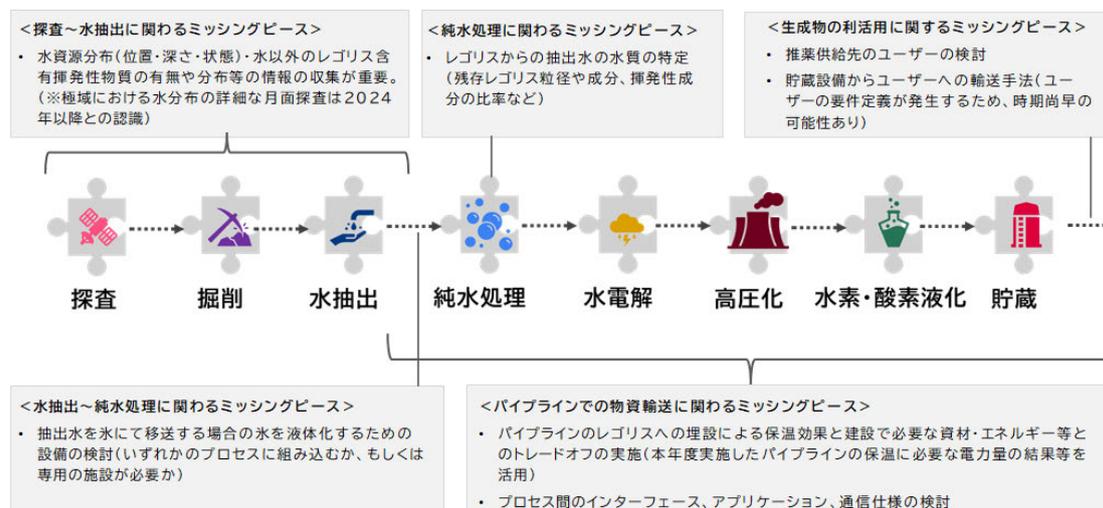


図 2-61 各プロセス／もしくは各プロセス間に必要となる機能(ミッシングピース)

出所)三菱総合研究所作成

(3) 次年度検討事項案

次年度以降検討する必要性のあるミッシングピースについて、4つの観点で整理した。整理結果を以下に示す。なお、以下に示す次年度検討では JAXA と綿密に情報交換・意見交換を行い、既存の検討内容との重複や方針が異ならないように注意し、水素生成に関わる全体アーキテクチャ検討の解像度向上や日本の戦略検討に資する情報としてとりまとめる必要がある。

(1) 具体ケースの設定による施設配置検討の解像度向上

- 本年度の検討では水素 VC における各施設の配置案を検討したが、着陸船の発着場所や水資源の採取の対象とするクレータが定まっていなかったため、一定の前提条件を設定した。
- 次年度は、水資源採取に際して、特定のクレータを仮定し、具体場所、設置数/規模、複数

基地の位置関係について検討が必要と思われる。

(2) 各施設の建設・運用に向けた検討

- 本年度は各施設の配置場所を含めた全体のアーキテクチャの検討を実施したが、個別施設のサイズ感や重量や設置形態等の詳細な内容は検討できていない状況である。
- 次年度は月面単体実証～月面統合実証を想定する場合の各施設のサイズ・重量・形態（固定設置、移動運用等）、運用環境や寿命等を検討が必要と思われる。また、運用時だけでなく、フェーズごとの施設建設プロセスを含めて全体像を検討が必要と思われる。（統合実証に向けた追加の建設プロセスなど）

(3) 海外との比較検討（ベンチマーク調査）

- 昨年度及び本年度は海外動向調査として、月面における水資源の探査ミッションや月面拠点での電力利活用に関する諸外国の動向について調査・整理を行った。
- 次年度は米国や欧州等での月面開発の動きに関して、水素生成に関わる技術の開発動向を調査する。また、海外技術の調査結果に対して、コスト、成熟度、サイズ等の複数の評価軸を設定し、我が国技術の優位性や今後の戦略についての検討が必要と思われる。

(4) 施設建設・運用に必要な極限環境対応手法の検討

- 本年度において各施設の配置場所を含めた全体のアーキテクチャの検討を行う中で、月面ならではの極限環境への対応（隕石や放射線等）について検討が必要との指摘があった。
- 次年度は月面上での水素生成にあたって真空、極低温、放射線、隕石などの極限環境や緊急事態への対応手法や冗長性について検討が必要と思われる。ただし、月面環境への適応・対応は水素生成に関わる施設のみに関わる課題ではないため、検討にあたってはJAXA等の先行研究の成果を活用することをベースとしつつ、水素 VC に特有な項目を議論することを想定する。

2.2 電力に関する技術課題整理

本節では、月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)のうち、電力部分に関連して、月面や月周回軌道での発電、送電(無線電力送電等)を含む電力供給システムに必要な要素技術に関する調査・検討を行った結果を示す。月面での有人を含むあらゆる活動を実現するためには、月面での電力確保と安定供給が必要である。必要な要素技術等を洗い出し、各アーキテクチャにおいて想定しうる技術、建設・運用シナリオ、課題等を取りまとめ、月面探査における日本の協力分野や技術開発の必要性を検討した。その場合、発電から送電までの一貫した電力ネットワークを想定し、原則として複数オプションの技術・方式の検討を行い、それぞれのメリット・デメリットを整理した。なお、電力の供給源は月面上および軌道上での太陽光発電を基本としたが、必要に応じてその他の電力供給源の活用についても検討を行った。調査・検討にあたっては、月面での活動への日本としてのエネルギー供給技術の適用という観点での整理に加え、日本が貢献して行く技術分野を明確にして行くことも意識し、既存技術の調査検討とともに、将来開発が必要とされる要素技術等についての整理を実施した。なお、月面での活動シナリオ及び必要な電力供給アーキテクチャは、JAXA が制定し改訂している最新版の「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021(EZA-2021001)」をベースとして行っている。

2.2.1 検討の全体像

(1) 調査の実施体制

本年度の電力 WG においては、

- 月面電力供給全体システム
- 月周回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

の4つの構成システムに分け、それぞれ検討チームを構成し分担して検討することとした。本年度は「月面電力供給全体システム」を新たに設置した点が特徴である。電力 WG の関係者は全員「月面電力供給全体システム」のメンバともなり、共通事項や新規の課題についての問題提起及び議論行うこととした。また、「月面設置発電システム」における太陽電池セル、「月面上での送電システム」における室内 WPT(Wireless Power Transfer(無線給電))について検討内容に含めることとした。

それぞれの検討チームの検討結果を持ち寄り、情報共有と議論を実施する電力 WG の会合を 5 回開催し、電力供給アーキテクチャ全体としてまとめることとした。電力 WG の開催状況等は 3 章に示している。

(2) 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、送電」である。そしてそれらの性能が電力供給先の要求を満たす必要がある。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、供給電力はその代表値として 10kW 及び 100kW を設定し、更に送電距離

として近距離 100～1000m、遠距離1～10km を設定して検討を実施し、規模感を見積もることとした。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。

図 2-62 に電力供給システムの機能ブロック図を示す。電力供給については送電方式のトレードオフも含めてその実現性を検討した。また、水素 WG 側からの水素バリューチェーン構築に関わる電力要求を受けた電力供給アーキテクチャも検討した。

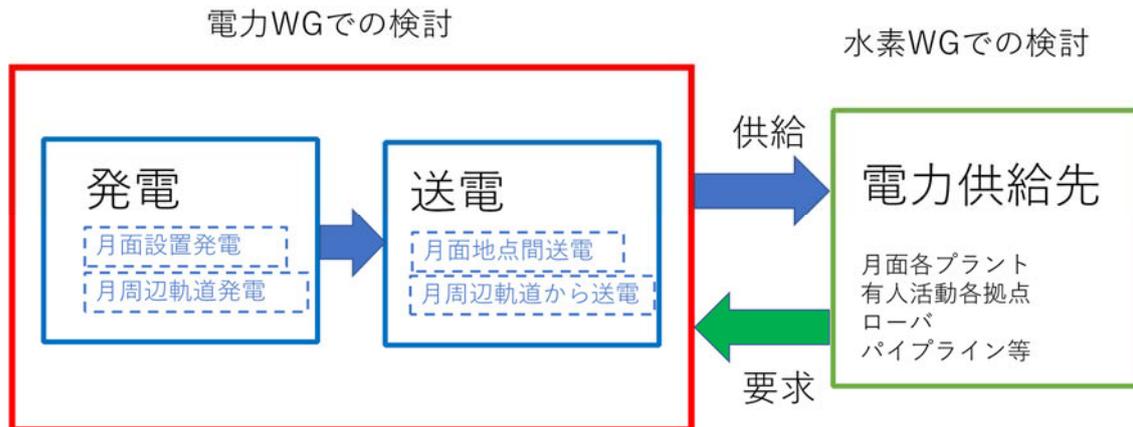


図 2-62 月面での電力供給システム機能ブロック図

出所)J-spacesystems

以降において、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及び月面上での送電システムの構成システム毎に詳細な検討結果を示す。そして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の要件の整理

本年度は、昨年度の検討結果を踏まえ、有人居住区および水素製造施設への電力供給システムとしての検討を目標とした。そのために、昨年度には無かった月面電力供給全体システムの検討チームを新たに設定した。

月面電力供給全体システムを検討するにあたって、まず月面における人類の活動に必要な電力システムが満たすべき要件は、地球上の電力システムの要件を基として考える必要があるのではないかということに着目した。図 2-63 に地球上における電力供給システムの概念図を示す。

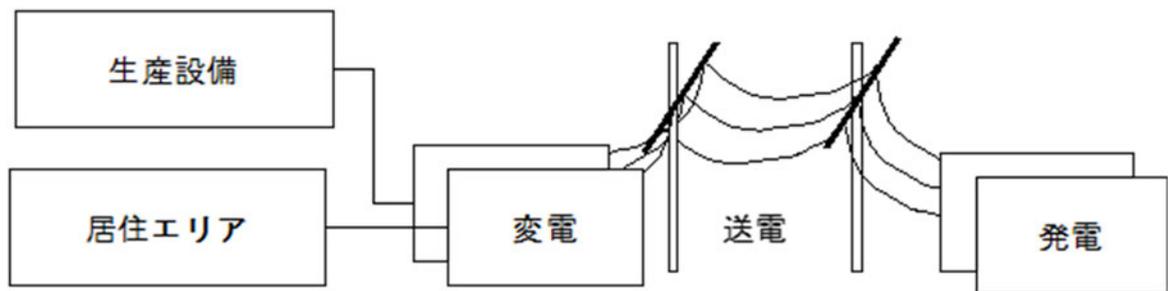


図 2-63 地上における電力供給システムの概念

出所)J-spacesystems

その特徴及び留意点を、月面での状況との比較の観点にて要点を列挙すると、

- 大気中(1気圧の空気)
- 雨、湿気にさらされるため、それらへの対応策が必要
- 電力供給を複数の系統から可能にするために電力グリッドを構成
- 重力環境は1G
- 建設資材は豊富であり、かつ容易に必要な箇所に運搬可能
- 建設資材の輸送手段も地上車両や航空機により可能

等である。一方、月面における電力供給システムとして昨年度の検討にて描いたものを図 2-64 に示す。これは 2040 年頃の月面が他の惑星への補給基地や移動の中継地点となり、100 人を越す人間が居住するようになった時点を想定している。

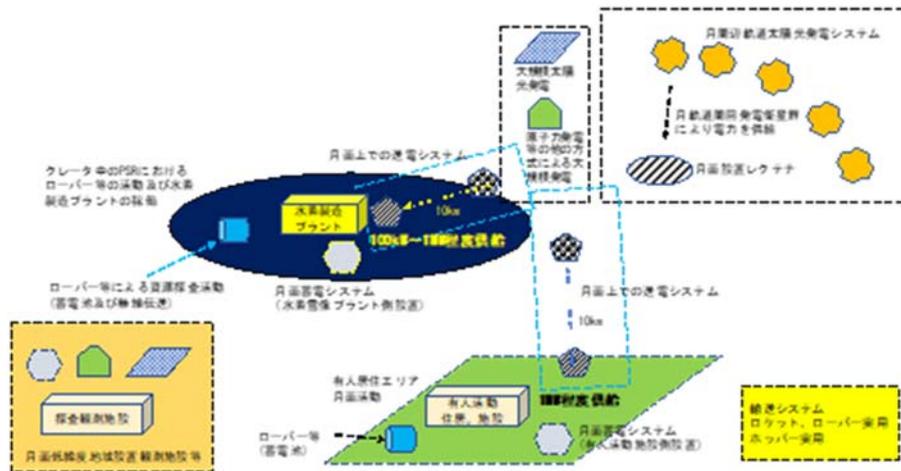


図 2-64 月面上での電力供給システム概要(予想図)

出所)J-spacesystems

その特徴及び留意点を、地上での状況との比較の観点にて要点を列挙すると、

- 真空中(0 気圧)、かつ有人居住区や製造設備の近辺ではリークガスによるプラズマ環境の可能性あり
- レゴリスによる影響あり
- 電力グリッドは構成可能であるが、最低限の範囲
- 重力環境は 1/6G
- 建設資材や構成する機器は地球よりロケットで輸送する必要があるため高コスト
- 有人対応としては 2FT(Two Fault Tolerant;原理の異なる 3 系統の電源により供給し、2 つの異なる要因の同時故障でも全ての電源の供給が停止しない)とする必要あり

となる。

(2) 月面の特殊性の考察

月面の特殊性による月面電力供給システムとして考慮すべき観点を列挙すると次の通りとなる。

- 地上においては、電力供給が停止しても、人間(生物)は(生産等の活動は遂行不可能となるが)、空気があれば短時間は生きのびることができるため、直ちに生存を脅かす事態とはならない。一方、月面においては、電力供給が停止すると生命を維持するインフラが止まるため、人間の生存が直ちに脅かされる。
- 月面では真空の問題により、送配電時の電圧についての制約がある。
- 物資は多くのものを地球から運ぶ必要から、エネルギー効率よりも物資(重量)の利用効率を優先した、省資源でのシステム構築が必要となる。そのため、システム構成は「重量」も含めた効率

化・最適化をはかる必要があり、その観点でのパラメトリックスタディを実施する事が重要になる。

- 電力断をカバーする蓄電池が随所に設置されるとともに、2FT の観点で電力源の異なる方式による供給ネットワークの構築が必要となる。

そして上述のことから全体電力システムのイメージとして、次のようなことがシステムの要件となると考えられる。

- 居住区室内及びその近傍の”ラストマイルの電力分配”は、国際宇宙ステーションで実績のある120VDC のシステムをベースに構築（確立されて実績のある技術の活用）
- 室内において必要な小電力機器は室内 WPT により複数の供給源から無線により送電することによりロバスト性を確保
- 発電所からの送電は無線によるものが電力効率よりも資源(重量)の効率を優先することから基本となる可能性あり(効率と重量についてのパラメトリックスタディにより詳細検討)
- 有人対応としては次のような2FT の電力供給源の確保が必要
 - 月面上の太陽光発電システム
 - 月軌道上での発電システム
 - (第三の方式と場所による発電) -> これをどのように実現するのが課題

なお、水素製造プラントやその他の無人の設備、観測システムへの電力供給システムについては、停電リスクの影響評価により冗長系の構成等を検討する必要がある。

(3) 地上の技術の適用の観点での調査検討

地上の電力系統の状況等から月面での電力供給システムとして考慮すべき事項について、有識者へのヒアリング調査結果等も踏まえた地上技術の適用性の考え方を示す。

- 電力ピークを考える必要がある。人間の活動は一日を三交替で活動するのか、シフト無しでの活動なのかでピーク電力が異なる。1シフトだと3倍となる。
- 発熱の熱は、単なる冷却を考えるのではなく、ヒートマス等を利用する等で活用することを考える必要がある。生成した水の凍結防止等に利用可能と考えられる。
- バックアップの電池を随所に配置する必要がある。
- 居住区外の設備では400VDCの使用も考えると良いかもしれない。交流方式は地上では過去の経緯で使用しているだけである。
- 水素製造設備へのラストマイルの供給は400VDCとできれば良いと考える。真空中における400VDC対応の放電防止に関する技術の確立が必要であるが、経験的には到達可能と考えられる。ちなみにNASAでは1000VDCの利用のための研究開発を課題としている。
- 車の配線は、筐体をリターンしているため基本的に単線であり、省資源が可能である。
- 地上の電力網は単なる電力線によるものではなく、ガスを配って発電する等の方式も取ってい

る。水素の燃料電池との組み合わせによる水素ネットワークも考慮する必要がある。

- 各発電所や変電所からの配電や送電は地上においては 2 回線の系統にて冗長構成としている。
- 電力系統は発電量と消費電力を一致させる必要がある。現在の地上の電力系統は、スマートメータ等による管理により、使用電力の制限もしている。例えば 1kW しか電力を供給しないという計画であれば、仮に電力線の容量が 10kW でも 1kW に制約できる。
- 有人居住区等の排出された炭酸ガスが捨てるのではなく有効に活用されるのと同様に、排熱についても捨てるのではなく蓄熱を活用して有効に活用するようにすべきである。また同様に全ての設備の排熱処理についてもうまく活用するようにシステムを構築すべきである。
- 直流の場合、マージンを取って送り、蓄電池をバッファとすると良い。
- 電源系統としては太陽電池との整合性等を考えると直流が良い。

(4) 月面設置発電システムと送電システムの検討結果におけるケーススタディ

本年度は後述する、「月面設置発電システム」、「月面上での送電システム」での検討を活用することにより発電システムと送電システムを融合した月面電力供給全体システムとしての各種ケーススタディが可能となった。

シャクルトンクレータのリム部に極域基地を想定し、「月面設置発電システム」で検討した、太陽光発電所の2つの候補地である、「候補地1」と「候補地2」からこの基地エリアへの電力供給について評価を実施した。太陽光発電所で発電された電力を基地エリアへ送電については、「月面上送電システム」の検討結果を活用した。それぞれの候補地と、シャクルトンクレータのリム部にあたる極域基地との位置関係を図 2-65 に、検討に用いた条件を表 2-40 に示す。

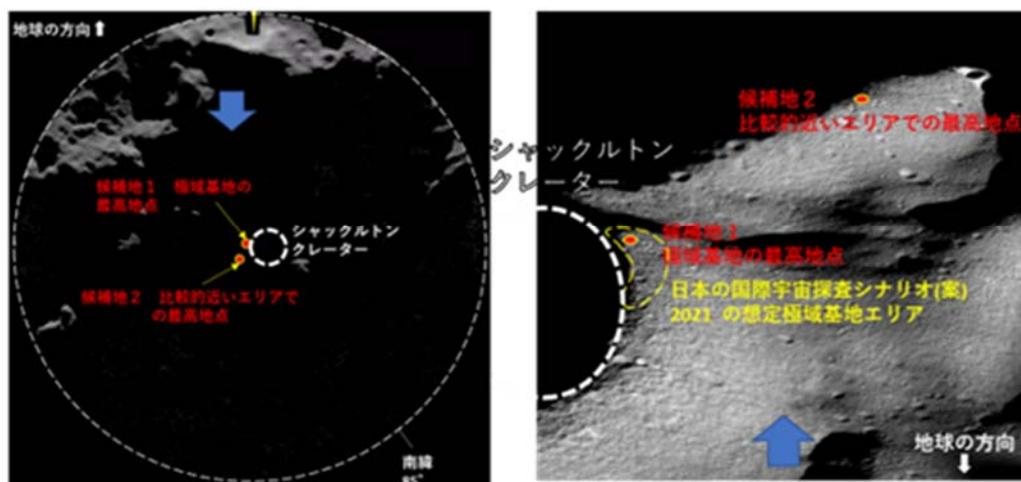


図 2-65 極域基地と候補地点1、2、シャクルトンクレータの位置関係

出所)NASA/GSFC/Arizona State University に追記

表 2-40 電力供給システム全体の検討条件

条件項目		
太陽光発電所設置箇所	候補地点 1	極域基地の最高地点 (シャクルトンクレーターリム部) • 日照時間計：341.50h • 影時間計：314.18h 極域基地からの距離：300m (極基地内)
	候補地点 2	比較的極域基地から近いエリアでの最高地点 • 日照時間計：519.08h • 影時間計：136.60h 極域基地からの距離：10.2km
	供給電力	100kW、10kWの夫々
	送電方法	電波 (マイクロ波)、有線 (導線)、ファイバー、レーザー
常時電力供給のための蓄電池	リチウムイオン電池、燃料電池	

出所)J-spacesystems

以上の条件に基づく100kW の供給についての検討結果を表 2-41、表 2-42 に、10kW の供給についての検討結果を表 2-43、表 2-44 に示す。

表 2-41 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(100kW・リチウムイオン電池)

月面設置発電システム (蓄電：リチウムイオン電池)				月面上での送電システム				総重量(a)+(b)	
発電場所	発電電力	送電端電力	発電質量(a)	送電距離	送電方法	送電ロス	供給電力		送電質量(b)
候補地点 1	890kW	214kW	76t	極基地内 (300m)	電波	114kW	100kW	2.9t	79t
	442kW	106kW	38t		有線	6.2kW		8.0t	46t
	1,143kW	275kW	98t		ファイバー	175kW		7.9t	106t
	2,079kW	500kW	178t		レーザー	400kW		20t	198t
候補地点 2	439kW	214kW	55t	10.2km	電波	114kW	100kW	5.9t	61t
	638kW	311kW	80t		有線	211kW		273t	353t
	13,749kW	6,698kW	1720t		ファイバー	6,598kW		708t	2,428t
	10,26kW	500kW	128t		レーザー	400kW		20t	148t

出所)J-spacesystems

表 2-42 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(100kW・燃料電池)

月面設置発電システム (蓄電池：燃料電池)				月面上での送電システム				総重量(a)+(b)	
発電場所	発電電力	送電端電力	発電質量(a)	送電距離	送電方法	送電ロス	供給電力		送電質量(b)
候補地点 1	1,498kW	214kW	49t	極基地内 (300m)	電波	114kW	100kW	2.9t	52t
	743kW	106kW	24t		有線	6.2kW		8.0t	32t
	1,925kW	275kW	63t		ファイバー	175kW		7.9t	70t
	3,499kW	500kW	114t		レーザー	400kW		20t	134t
候補地点 2	642kW	214kW	32t	10.2km	電波	114kW	100kW	5.9t	38t
	933kW	311kW	46t		有線	211kW		273t	319t
	20,094kW	6,698kW	992t		ファイバー	6,598kW		708t	1,700t
	1,500kW	500kW	74t		レーザー	400kW		20t	94t

出所)J-spacesystems

表 2-43 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(10kW・リチウムイオン電池)

月面設置発電システム (蓄電：燃料電池)				月面上での送電システム				総重量(a)+(b)	
発電場所	発電電力	送電端電力	発電質量(a)	送電距離	送電方法	送電ロス	供給電力		送電質量(b)
候補地点 1	147kW	21kW	4.8t	極基地内 (300m)	電波	11kW	10kW	0.8t	5.6t
	74kW	11kW	2.4t		有線	0.6kW		0.8t	3.2t
	196kW	28kW	6.4t		ファイバー	18kW		1.3t	7.7t
	350kW	50kW	11t		レーザー	40kW		2.0t	13.4t
候補地点 2	63kW	21kW	3.1t	10.2km	電波	11kW	10kW	5.9t	9.0t
	93kW	31kW	4.6t		有線	21kW		27.3t	31.9t
	2,010kW	670kW	99t		ファイバー	660kW		71.0t	170.2t
	150kW	50kW	7.4t		レーザー	40kW		2.0t	9.4t

出所)J-spacesystems

表 2-44 候補地点から極域基地までの発電・送電効率の検討結果(10kW・燃料電池)

月面設置発電システム (蓄電：リチウムイオン電池)				月面上での送電システム				総重量(a)+(b)	
発電場所	発電電力	送電端電力	発電質量(a)	送電距離	送電方法	送電ロス	供給電力		送電質量(b)
候補地点 1	87kW	21kW	7.5t	極基地内 (300m)	電波	11kW	10kW	0.8t	8.3t
	44kW	11kW	3.8t		有線	0.6kW		0.8t	4.6t
	116kW	28kW	10.0t		ファイバー	18kW		1.3t	11.3t
	208kW	50kW	17.8t		レーザー	40kW		2.0t	19.8t
候補地点 2	43kW	21kW	5.4t	10.2km	電波	11kW	10kW	5.9t	11.3t
	64kW	31kW	8.0t		有線	21kW		27.3t	35.3t
	1,375kW	670kW	172.0t		ファイバー	660kW		71.0t	243.0t
	103kW	50kW	12.8t		レーザー	40kW		2.0t	14.8t

出所)J-spacesystems

表 2-41～表 2-44 に 10kW 及び 100kW の電力供給に要する発電電力とシステム総重量との検討を示す。これらの重量効率についての評価を100kWについては、表 2-45 に、10kWについては表 2-46 に示す。

電力消費地までの送電ロス(効率)、施設の総重量等を考慮すると、候補地点1で燃料電池を用いた有線送電が最も効率的との結果となった。これは短距離の場合、送電ロスも少なくなり、有線に要するケーブル重量も抑えられたためである。また、燃料電池はリチウムイオン電池より軽量化が見込まれるため、10kW、100kWとも供給電力に対する重量効率が優位である結果となった。

2 番目に効率が良い発電・送電方法は、候補地点2における太陽光発電・燃料電池の組み合わせであり、電波による送電のケースが優位となった。「月面設置発電システム」の検討にもあるとおり、候補地点2は日照時間が長くなり、発電・蓄電効率が良い。送電距離を考慮すると有線・ファイバー、レーザーは距離に比例して重量に対する効率が悪くなり、長距離送電については電波による送電が効率的となっている。

表 2-45 候補地点から極域基地までの供給電力効率評価(100kW)

供給電力	電池	候補地	送電方法	供給電力/t (kW)	備考
100kW	リチウムイオン電池	候補地点 1	電波	1.3	
			有線	2.2	
			ファイバー	0.9	
			レーザー	0.5	
		候補地点 2	電波	1.6	
			有線	0.3	
			ファイバー	0.04	
			レーザー	0.7	
	燃料電池	候補地点 1	電波	1.9	
			有線	3.1	効率 1
			ファイバー	1.4	
			レーザー	0.7	
		候補地点 2	電波	2.7	効率 2
			有線	0.3	
		ファイバー	0.1		
		レーザー	1.1		

出所)J-spacesystems

表 2-46 候補地点から極域基地までの供給電力効率評価(10kW)

供給電力	電池	候補地	送電方法	供給電力/t (kW)	備考
10kW	リチウムイオン電池	候補地点 1	電波	1.2	
			有線	2.2	
			ファイバー	0.9	
			レーザー	0.5	
		候補地点 2	電波	0.9	
			有線	0.3	
			ファイバー	0.04	
			レーザー	0.7	
	燃料電池	候補地点 1	電波	1.8	
			有線	3.1	効率 1
			ファイバー	1.3	
			レーザー	0.7	
		候補地点 2	電波	1.1	
			有線	0.3	
		ファイバー	0.1		
		レーザー	1.1		

出所)J-spacesystems

なお、今回のケーススタディでは、表 2-40 の条件から評価を実施したが、今後、太陽光発電の発電場所、電力供給先(消費地)である各基地・施設の建設地及びそれらへの送電方法等の評価・選定については、以下に示す要因を組み合わせる分析し、適切な場所・送電方法を決定していく必要がある。

- 日照時間
- 各設備の重量
- 電力消費地までの距離
- 送電方法
- その他(建設方法の評価等、まだ検討されていない項目)

(5) 水素(製造)WG からの要求における月面電力供給全体システム

水素(製造)WG から電力 WG への要求について検討を実施した。電力供給全体システムとしての各施設に対する送電については、「月面上での送電システム」に具体的な送電方法等の検討結果を記載するが、PSR 内部で抽出した水(液体)をパイプラインを通じて、水(液体)を凍結させずに輸送するためにパイプライン中の水を凍結防止に必要な電力量が水素 WG より示されたので、保温システムについても検討した。

また、ローバを活用して水(液体)を輸送(1日1回往復)するために必要なバッテリー電力量(水素 WG より提示)の給電方法についても検討した。

1) 「水道管」の保温のための電力供給について

採掘した水の送水パイプの凍結防止のための保温システムについて、その検討の前提とする必要な電力量について図 2-66 に示す。



図 2-66 水輸送パイプ凍結防止に必要な電力要求

出所)三菱総合研究所作成

保温システムの概要を図 2-67 に示す。基本的には断熱してパイプの周りに図 2-68 に示す凍結防止ヒーターを具備することで凍結しない温度を維持する方針とした。

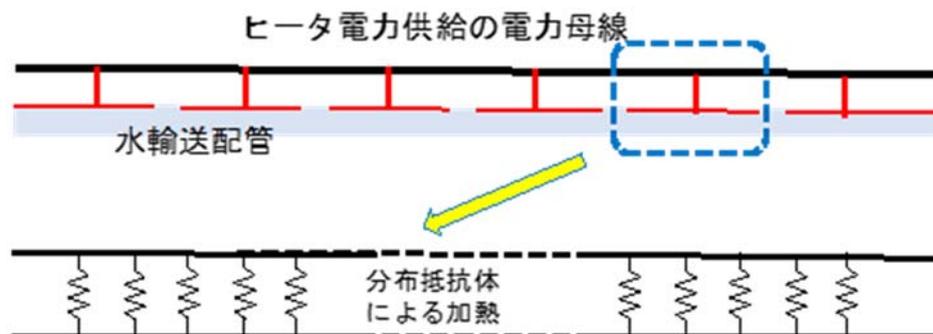


図 2-67 水輸送パイプ保温システム概要

出所)J-spacesystems



図 2-68 水輸送パイプ保温ヒーターの一例
出所) SANEI 凍結防止部材 水道凍結防止ヒーター パイロットランプ付き 2m PR551-2

また、パイプの保温設備の例を図 2-69 に示す。



図 2-69 極寒寒冷地における水及暖房水蒸気の配給事例
出所) J-spacesystems

結論として、

- 水の配管を凍結から防止する事例は「凍結防止ヒーター」により地上においても実施されている。
- 図 2-66 を前提としての計算によれば月面上に設置した場合は 10km 程度の送水でも 1.1kW 程度の消費電力となった。
- 電力供給が可能なレベルの数字であるように思われるが、現時点では不確定要素が詰めきれていない事が課題である。

2) 水資源等の探査・採掘ローバへの電力供給について

定常段階においては PSR 内にローバ用充電ステーションを設置し、定期的又は電力が枯渇したらローバがステーションに立寄り充電するような運用が想定される。充電ステーションへは無線又は有線

により送電することを想定する。図 2-70 にその概要を示す。

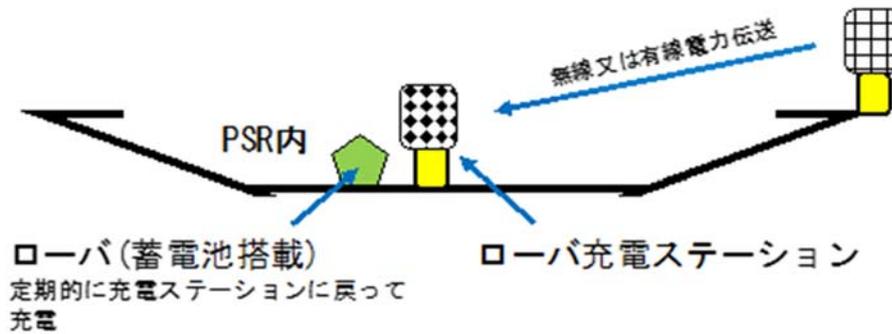


図 2-70 PSR 水採掘場所近傍のローバ充電ステーション

出所)J-spacesystems

ただし、探査開始初期段階等、岩石や表面のレゴリスの状況により探査ローバの充電ステーションへの帰還の確実性が無い段階では、ローバ自身にレクテナを搭載し、無線による電力送電も考慮しておく必要がある。また、定常段階でも救援用ローバなどが必要になる可能性があるが、それらについても無線による電力伝送を考えておく必要がある。図 2-71 にその概要を示す。

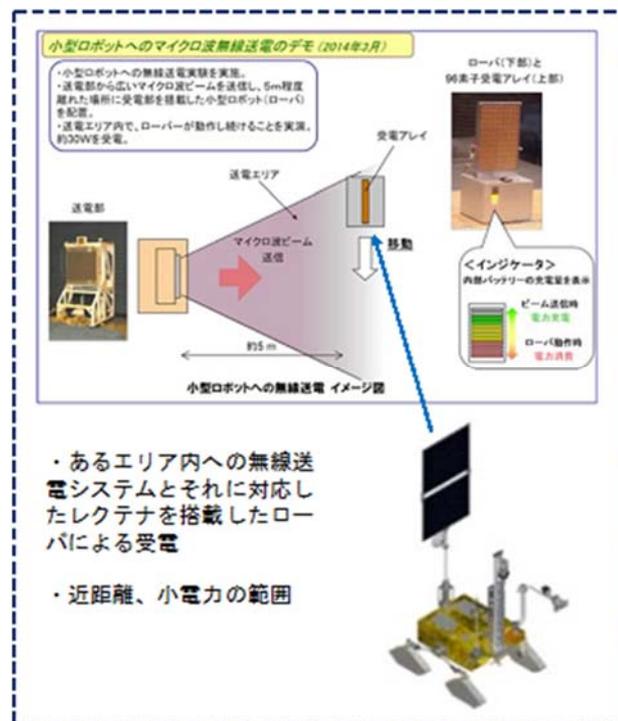


図 2-71 ローバへの無線送電概要

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

2.2.3 月周辺軌道太陽光発電システム

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

(1)では、送電距離とアンテナサイズおよび構成要素数を述べ、(2)では軌道の検討に関して述べる。(3)では、(2)の内容を基に軌道上システムでの送電システムに関して述べる。(4)では、100kW 送電の無線送電システムの検討例を示し、(5)でまとめを示す。

(1) 送電距離とアンテナサイズの検討

送電アンテナサイズに対して送電距離が十分長い場合、アンテナから放射された電磁波は平面波とみなされ、アンテナサイズと距離の関係は Friis の式で表される。式(1)に Friis の式を示す。

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} = \frac{A_t A_r}{\lambda^2 D^2} = \left(\frac{\pi d_t d_r}{4\lambda D} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 A_t 、 A_r は送電及び受電アンテナの有効面積、 d_t 、 d_r は円形開口面とした場合のそれぞれの直径、 λ 、 D は電波の波長及び送電距離である。 η は電力伝送効率である。大きさ L の広がりをもった開口からの放射において、遠方界とみなす目安の距離は(2)式で表される。

$$\frac{2L^2}{\lambda} \quad (2)$$

アンテナの大きさと遠方界とみなせる距離の関係を図 2-72 に示す。周波数 5.8GHz, 10GHz, 50GHz, 100GHz に関して示す。

² PETER E. GLASER, "Power from the Sun: Its Future", SCIENCE, 22 Nov 1968, Vol 162, Issue 3856, pp. 857-861.

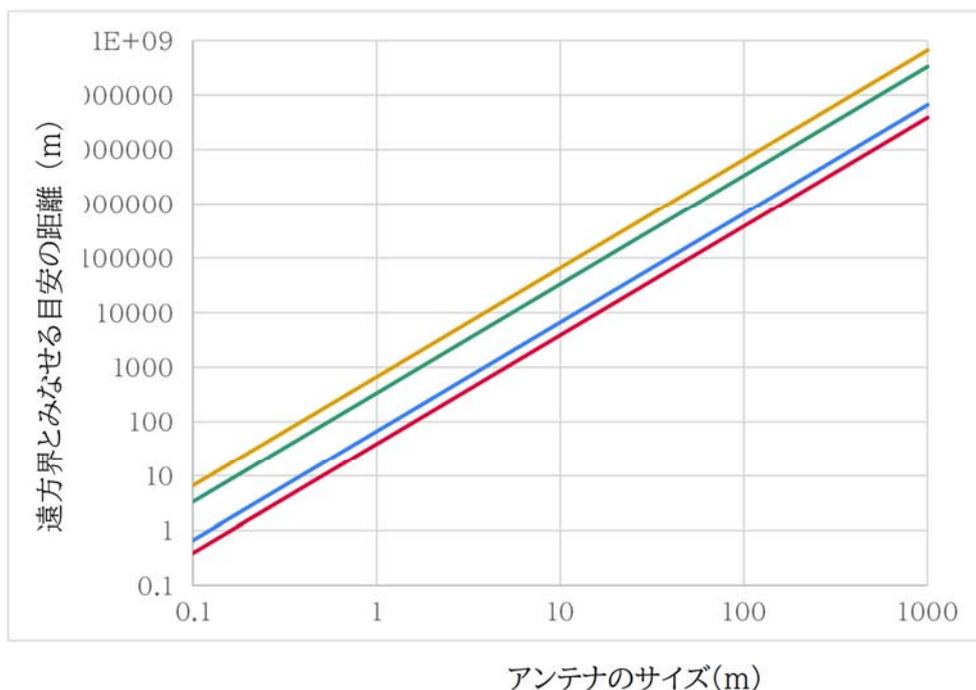


図 2-72 アンテナの大きさ と 遠方界 と みなせる 距離 の 関係

出所)JAXA/ISAS

5.8 GHz の場合、アンテナサイズが 1km 程度であるとき、38,000km 以上離れる必要がある。また、50GHz の場合は、アンテナサイズが 100m 程度の場合、3300km 以上が必要となる。近傍界領域の場合、アンテナサイズは式(3)、(4)で推定できる。³

$$\eta = 1 - e^{-\tau^2} \quad (3)$$

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

レクテナの直径を 100m、1km としたときの送電アンテナの直径を図 2-73、図 2-74 に示し、また、表 2-47、表 2-48、表 2-49 にレクテナの直径を 1km、500m、100m としたときの場合を示す。この時、式(3)の電力伝送効率を $\eta = 0.9$ とした。送電距離は 10,000km から 10km で検討し、周波数は 5.8GHz、10GHz、50GHz、100GHz とした。

周波数が高くなれば、アンテナ径は小さくできる。送電距離 10,000km では、レクテナ直径が 1km の時、送電周波数が 5.8GHz では送電アンテナの直径は約 1km、送電周波数が 100GHz では 58m まで小さくできる。送電距離を 10km まで短くできれば、送電アンテナ径は 50GHz で 10cm、100GHz で 6cm まで小さくできる。レクテナ直径を 100m まで小さくすると、送電距離 10km で、50GHz で 1.2m、100GHz で 60cm となる。レクテナの直径を 500m とすると、送電距離 1,000km の時、50GHz で 23.2m、100GHz で 11.6m となり、送電距離 100km の時、50GHz で 2.3m、100GHz で 1.2m となる。アンテナサイズのみから考えると、500m 程度のレクテナが実現できれば、

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

20m 程度のアンテナでエネルギー伝送が可能となる。地球周回の太陽発電衛星は、大気での損失を低減するために S 帯や C 帯が検討され^{4,5}、そのため、宇宙セグメントのアンテナサイズは km、地上セグメント数 km から 10km 程度の概念検討が実施されている⁴。

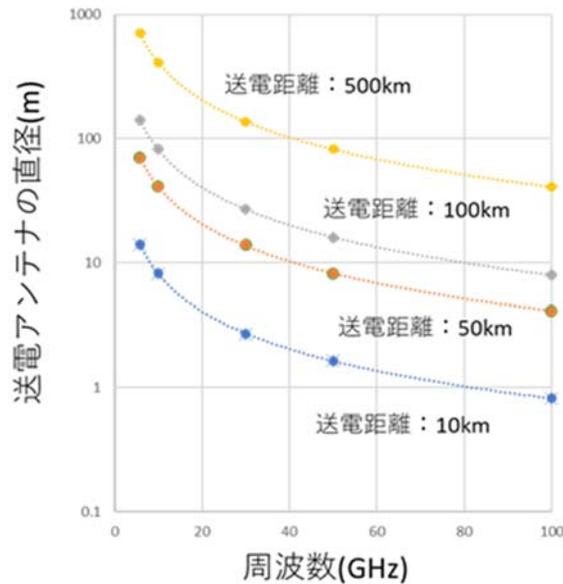


図 2-73 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:100m)

出所)JAXA/ISAS

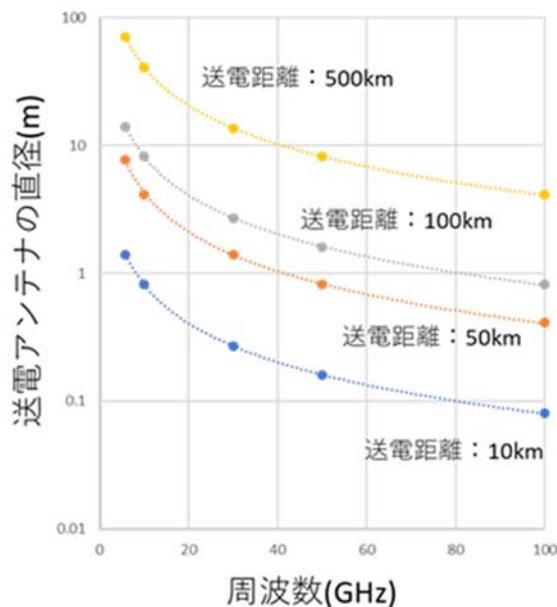


図 2-74 周波数と送電アンテナの大きさ(受電アンテナの直径:1000m)

出所)JAXA/ISAS

⁴ DOE and NASA report, "Satellite Power System ; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report, Oct. 1978.

⁵ 平成 19 年度 太陽光発電利用促進技術調査成果報告書, 平成 20 年 3 月 (財)無人宇宙実験システム研究開発機構

表 2-47 レクテナの直径を 1km としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$)

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

出所)JAXA/ISAS

表 2-48 レクテナの直径を 500m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$)

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

出所)JAXA/ISAS

表 2-49 レクテナの直径を 100m としたときの送電アンテナの直径(電力伝送効率 $\eta=0.9$)

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

出所)JAXA/ISAS

現在、世界最大の電波望遠鏡は 2020 年1月に稼働開始した中国の 500メートル球面電波望遠鏡 (FAST、Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)である(写真:図 2-75(左図))。また、FAST が稼働するまで世界最大であったプエルトリコのアレシボ望遠鏡は 1963 年に完成し、口径は 305m である。現在は、2020 年のケーブル断線を契機として、望遠鏡は崩壊している(写真:図 2-75(右図))。可動式電波望遠鏡としては、米国ウェストバージニア州グリーンバンクにあるロバート・バード・グリーンバンク望遠鏡が最大であり、縦 100m、横 110mである(写真:図 2-76 (左図))。ドイツのボン郊外に設置されているエフェルスベルク電波望遠鏡も口径が 100m である(写真:図 2-76(右図))。日本では、長野県佐久市にある白田宇宙空間観測所の 64m アンテナが最大である(写真:図 2-76(左図))。

無線送電における受電アンテナは必ずしも一枚の大型の鏡面で作る必要はない。米国カリフォルニア州サンフランシスコ北東 290 マイルの所にあるハットクリーク電波天文台において建設中であるアレン・テレスコープ・アレイ(Allen Telescope Array, ATA)は、350 台のパラボラアンテナが並ぶことになる(写真:図 2-77(右図))。月面に建設する受電設備は、小規模なアンテナと整流素子の集合体で構成できるため、地上の大規模アンテナと比べ技術的要求は低いと考えられる。レクテナの構造体の例として SPS2000で検討されたレクテナの支持構造を図 2-78 に示す。SPS2000では、送電周波数として 2.45GHz が用いられたが、月周回軌道からのエネルギー伝送には、数十 GHz の周波数も可能であり、アンテナの具体的構造は今後の課題である。

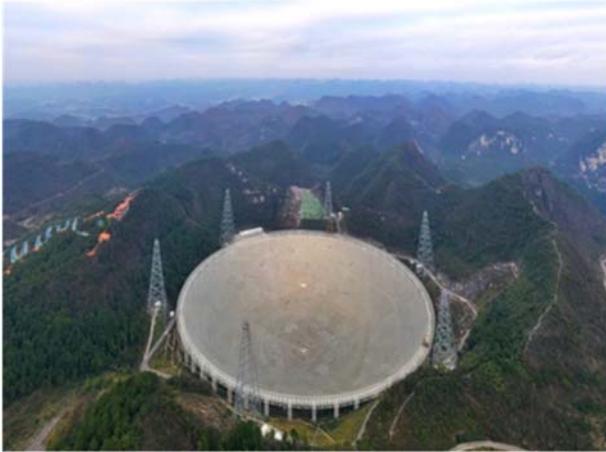


図 2-75 500メートル球面電波望遠鏡(FAST)(左図)及びアレシボ望遠鏡(右図)

出所)(c)Xinhua News. http://www.xinhuanet.com/english/2016-07/03/c_135485389_2.htm
<https://www.naic.edu/ao/content/arecibo-observatory-0>



図 2-76 ロバート・バード・グリーンバンク望遠鏡(左図)及びエフェルスベルク電波望遠鏡(右図)

出所)<https://greenbankobservatory.org/science/telescopes/gbt/#jp-carousel-609>
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/en/effelsberg>



図 2-77 白田宇宙空間観測所(左図)及びアレン・テレスコープ・アレイ(右図)

出所) https://www.jaxa.jp/about/centers/udsc/index_j.html
 (Allen Telescope Array, ATA)[https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=72307, Credit:
 Seth Shostak, SETI Institute]

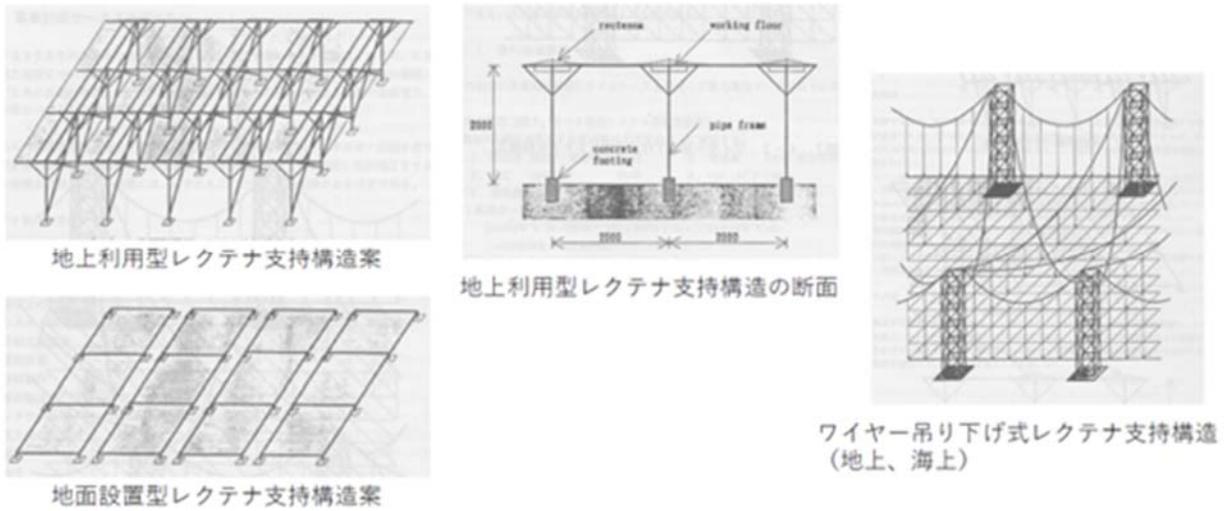


図 2-78 SPS2000で検討されたレクテナ支持構造

出所)太陽発電衛星 WG, “SPS2000 概念計画書”, S2-T1-X, 1993 年7月

(2) 月周回軌道の検討

前節での送電距離とアンテナサイズの検討をもとに月周回軌道の検討を行った。図 2-79 に軌道高度と周期の関係を示す。軌道周期は、軌道高度 10,000km で約 31 時間、1,000km で 3.5 時間、100km で約2時間である。

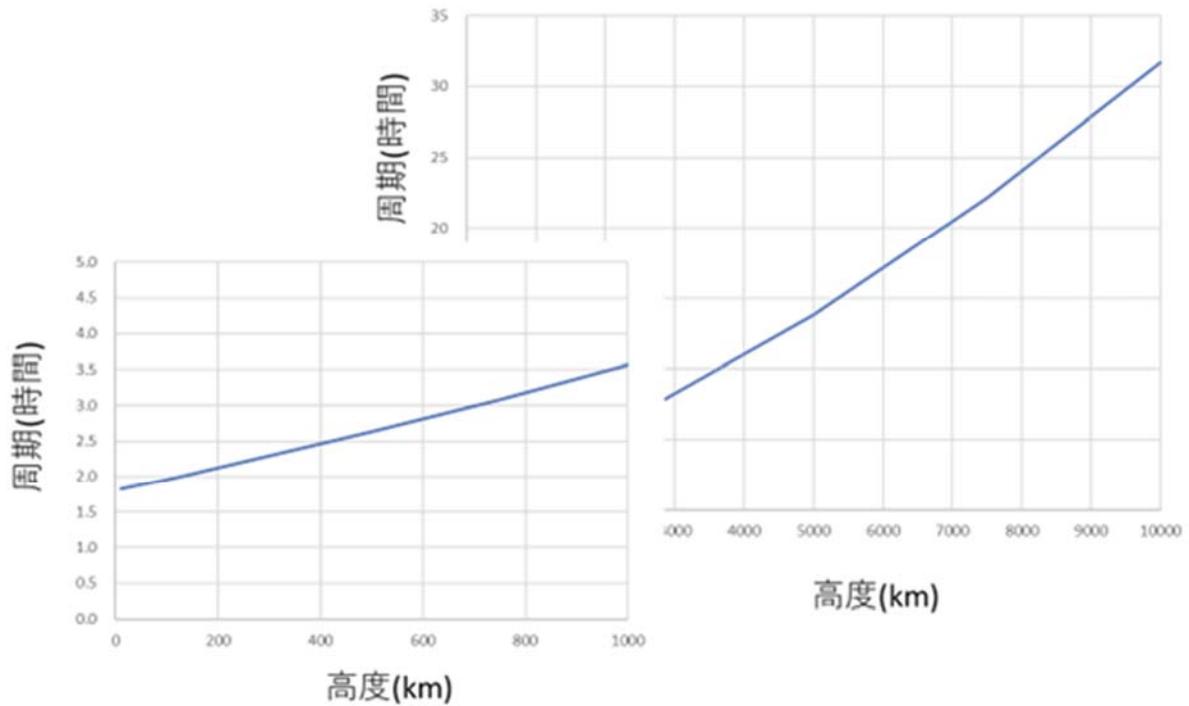


図 2-79 軌道高度と周期の関係

出所)JAXA/ISAS

図 2-80 に遠月面高度 1,000km の場合の軌道を示す。円軌道の場合と近月面高度 100km、10km の場合も併せて示している。また、高度 1,000km の場合の月面上のある地点上空を通過する際の高度と仰角の関係を図 2-81 に示す。ある地点の直上を通過する時、仰角 90 度の距離は 1,000km であり、仰角が 0 度の時は約 2,100km となる。上空を通過する時にもっとも送電距離が短くなり、角度が浅くなるとともに距離が増加することから、レクテナ形状は距離の増加と角度の変化を考慮しなければならない。また、月面形状により送電可能な仰角が決まり、仰角 0 度まで送電ができるわけではない。

仰角が変化した場合、送電ビームの方向を目標地点に向ける必要がある。広い仰角範囲で送電するには、広いビーム掃引が必要である。ビーム掃引可能な仰角を通過する時間と軌道周回時間との比から常時ある地点に送電するために必要な衛星機体数を図 2-82 に示す。軌道高度を高くすれば、可視時間の割合が増えるので、機体数を減らすことができるが、送電距離が長くなる。軌道高度が低くなると、送電距離は短くなりアンテナサイズを小さくできるが、可視時間の割合が少なくなり必要な機体数が増加する。高度 1000km でビーム掃引角度を±60 度まで可能とすると必要機体数は数機となる。しかし、高度 100km でビーム掃引角度が±15 度までの場合は 200 機以上が必要となる。

軌道高度が10倍変わると、同じ直径のレクテナにするために必要な送電アンテナの直径は 10 倍となる。送電システムを考慮する際、衛星サイズや軌道上での複数回の輸送による建設必要性を考慮する必要がある。また、一機当たりの要求される送電電力量も考慮しなければならない。軌道高度を上げることで、機体数は削減できるが、一機当たりの送電アンテナサイズが増加し、また、送電電力量も増加するため、太陽電池のパネルサイズの増加や排熱設計の課題も大きくなる。

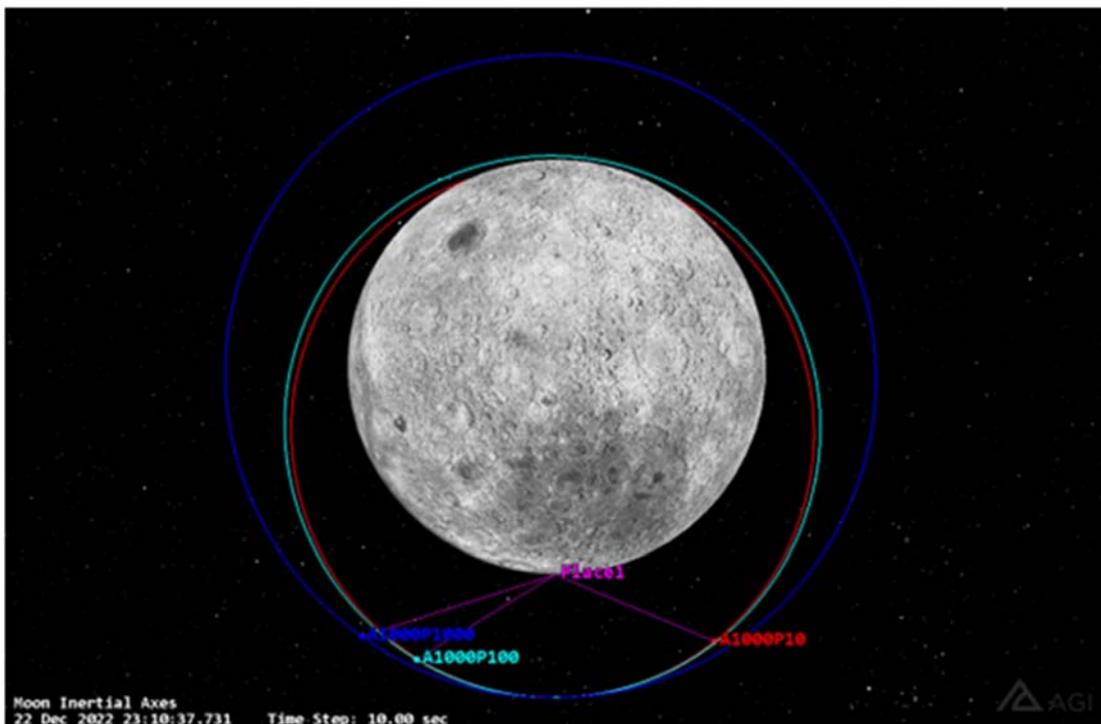


図 2-80 遠月面高度 1,000km の場合の軌道

出所)JAXA/ISAS

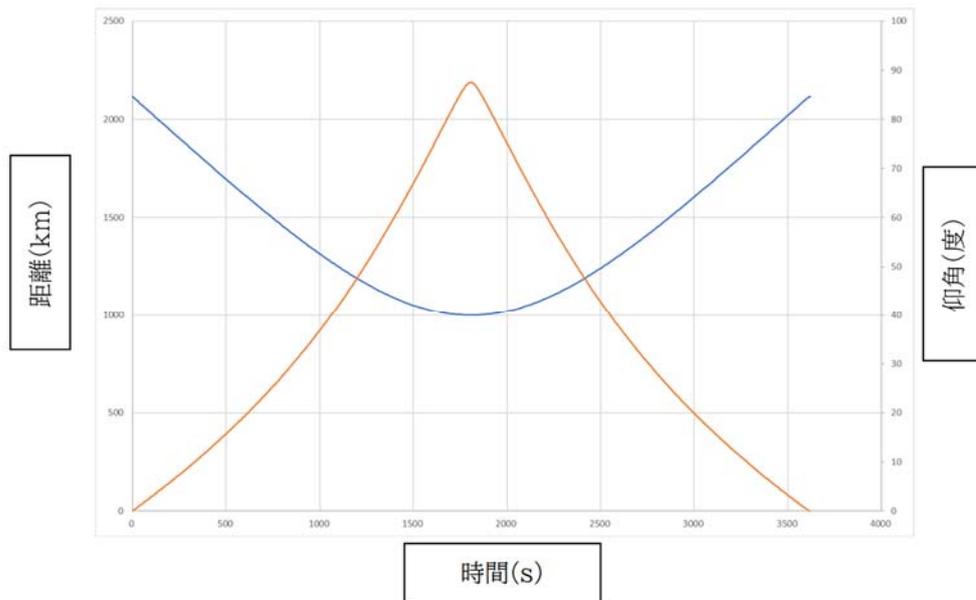


図 2-81 遠月面高度 1,000km の場合の距離と仰角の関係

出所)JAXA/ISAS

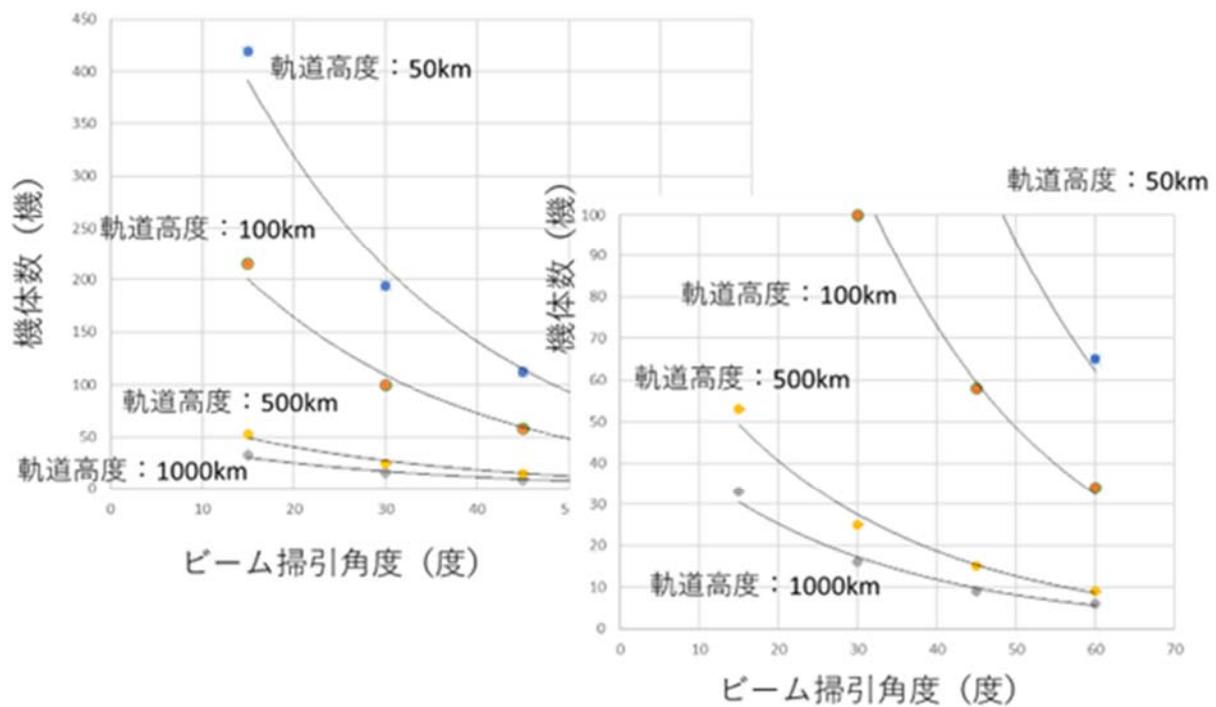


図 2-82 ビーム掃引角度と機体数

出所)JAXA/ISAS

遠月面高度 100km から 10,000km の範囲で、機体数の見積もりを行った。この時、送電可能な仰角を ± 45 度とした。図 2-83 に高度 5,000km と 10,000km の極軌道を示す。軌道高度と 10,000km と 5,000km の必要機体数を表 2-50 に示す。

円軌道と楕円軌道で比較を行った。高度 10,000km の円軌道の場合、仰角 ± 45 度の可視時間の

割合(送電可能時間)は約 22%となる。この場合、連続的に送電するためには5機必要となる。近月面点高度を100kmとする楕円軌道を選べば、可視時間の割合は66%まで増加し、機体数は2機となる。軌道高度 5,000kmの楕円軌道の場合は、必要機体数は3機である。軌道高度 1,000km の場合を表 2-51 に示す。円軌道の場合は、10 機必要であるが、楕円軌道にすることで 7 機による連続送電が可能である。軌道高度 100km の場合を表 2-52 に示す。送電可能な可視条件となる仰角を ± 45 度とすると、62 機のコンステレーション運用が必要となる。

上述の結果を踏まえて、月極域のシャクルトンクレータ内に設置したレクテナへの送電を検討した。シャクルトンクレータの位置は、南緯 89.9 度、東経 0.0 度である。斜面の角度が 30° 、クレータの深さが 4.2km、直径 6.6km の同心円状の平底があり、中央には、2~300m の小丘がある。図 2-84 にシャクルトンクレータとレクテナの配置を示す。また、図 2-85 にシャクルトンクレータの外形と仰角 ± 45 度での無線送電範囲を示す。クレータの壁面斜度が 30 度から、中心近くにレクテナを設置した場合、仰角 ± 45 度の範囲は送電可能であることが分かる。これより大きな角度でビームを制御した場合はクレータリム部の干渉が懸念される。以降の検討では、ビーム制御角を ± 45 度とした。クレータの底部は直径 6.6km程度の広さがあるため、レクテナサイズは直径 500m と 1km で比較を行った。

シャクルトンクレータの直上を通過する軌道を図 2-86 に示す。軌道の検討から、遠地点高度 1,000km~5,000kmで比較を行った。表 2-53 にシャクルトンクレータの直上を通過する軌道の送電可能時間と連続送電に必要な機体数を示す。高度 5,000km の場合、円軌道から楕円軌道にすることで、周回時間が 13 時間47分から約7時間となり、そのうちの仰角 ± 45 度の時間が2時間38分から3時間20分となる。送電可能な時間の割合が約 19%から 47%となり、常時送電に必要な機体数は6機から3機へ削減できる。高度 1,000km の楕円軌道の場合は、常時送電には8機必要であり、一機の衛星は周回時間が約 2 時間46分でそのうち24分間送電を行う。

クレータ内に直径 500m と1000mのレクテナを仮定した場合の、送電アンテナのサイズを表 2-54 と表 2-55 に示す。レクテナ直径が500mの場合、軌道高度 1,000km では、送電周波数 5.8GHz の時送電アンテナの直径は 200m、送電周波数 50GHz で 23mとなる。レクテナの直径を 1km まで拡大できれば、周波数 50GHz で送電アンテナの直径は 12m程度となる。アンテナサイズの観点からは、10-20mのサイズが可能であれば、一回あるいは数回の輸送で構築できる可能性がある。

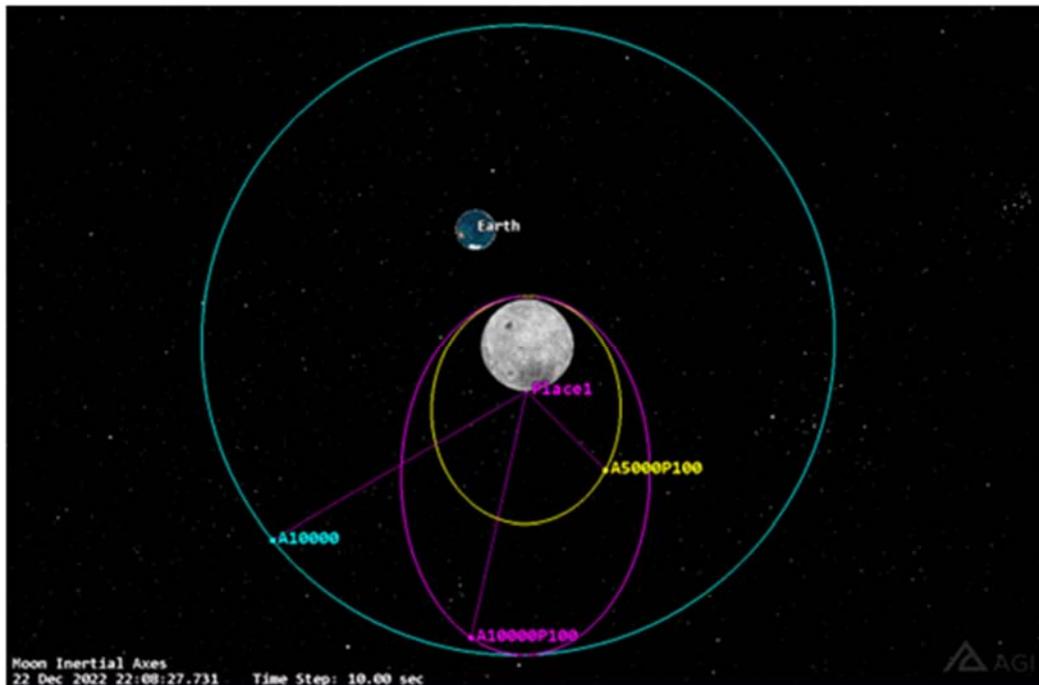


図 2-83 高度 5,000km と 10,000km の極軌道

出所)JAXA/ISAS

表 2-50 軌道高度 10,000km と 5,000km の必要機体数

遠月面高度 (km)	近月面高度 (km)	軌道周期 (s)	可視時間 仰角0度(s)	1周回中の割合	必要な機体数	可使時間 仰角±45度(s)	1周回中の割合	必要な機体数
10,000	10,000	114,107	51,569	0.45	3	24,660	0.22	5
10,000	100	50,177.9	43,210	0.86	2	33,300	0.66	2
5,000	100	25,191	18,447	0.73	2	11,940	0.47	3

出所)JAXA/ISAS

表 2-51 軌道高度 1,000km の必要機体数

遠月面高度 (km)	近月面高度 (km)	軌道周期 (s)	可視時間 仰角0度(s)	1周回中の割合	必要な機体数	可使時間 仰角±45度(s)	1周回中の割合	必要な機体数
1,000	10	9,528.5	3,539.8	0.37	3	1,440	0.15	7
1,000	100	9,816.8	3,547.8	0.36	3	1,430	0.15	7
1,000	1,000	12,851.8	3,612.1	0.28	4	1,310	0.10	10

出所)JAXA/ISAS

表 2-52 軌道高度 100km の必要機体数

遠月面高度 (km)	近月面高度 (km)	軌道周期 (s)	可視時間 仰角0度(s)	1周回中の割合	必要な機体数	可使時間 仰角±45度(s)	1周回中の割合	必要な機体数
100	100	7,067.4	743.3	0.11	10	115	0.02	62

出所)JAXA/ISAS

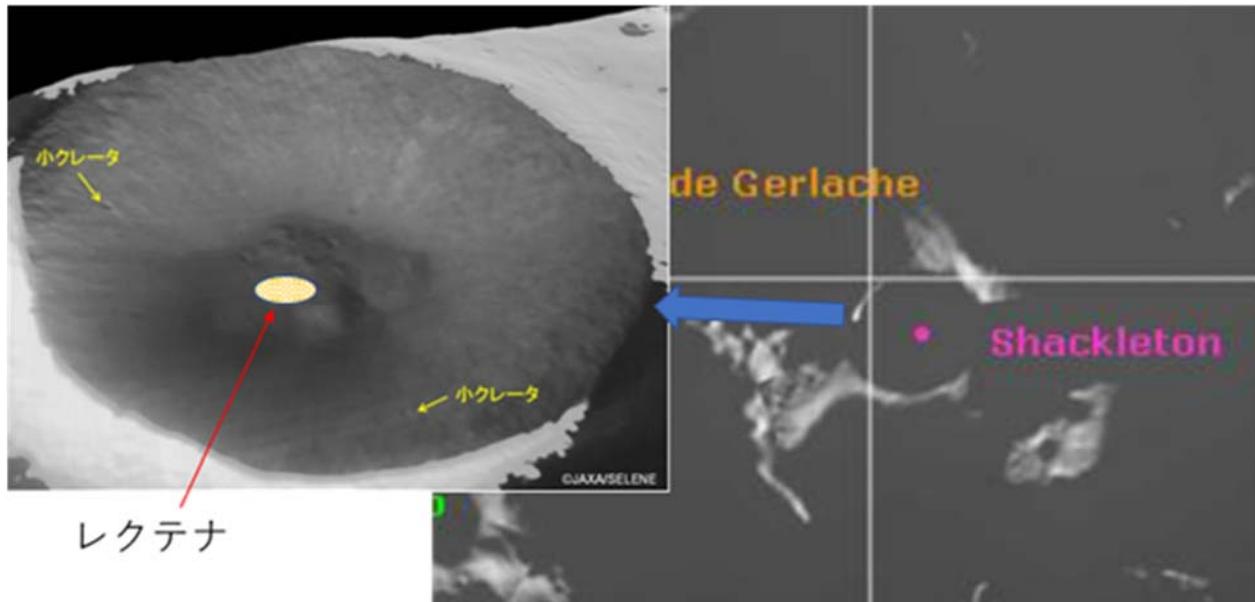


図 2-84 シャックルトンクレータとレクテナの配置

出所) https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA00001_modest.jpg, [Moon_South_Pole.jpg](https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA00001_modest.jpg): Image PIA00001 Courtesy SA/JPL-Caltech
https://www.jaxa.jp/article/special/kaguya/seika02_j.html

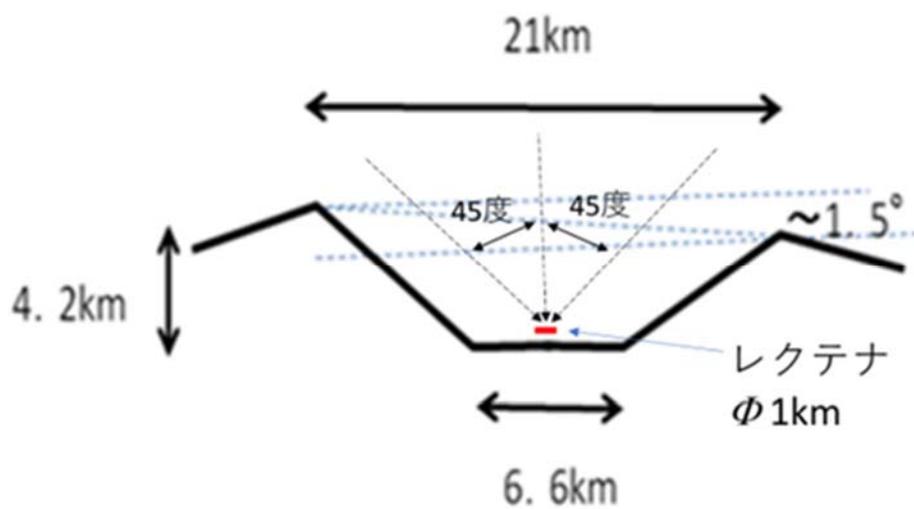


図 2-85 シャックルトンクレータ底面および斜面

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

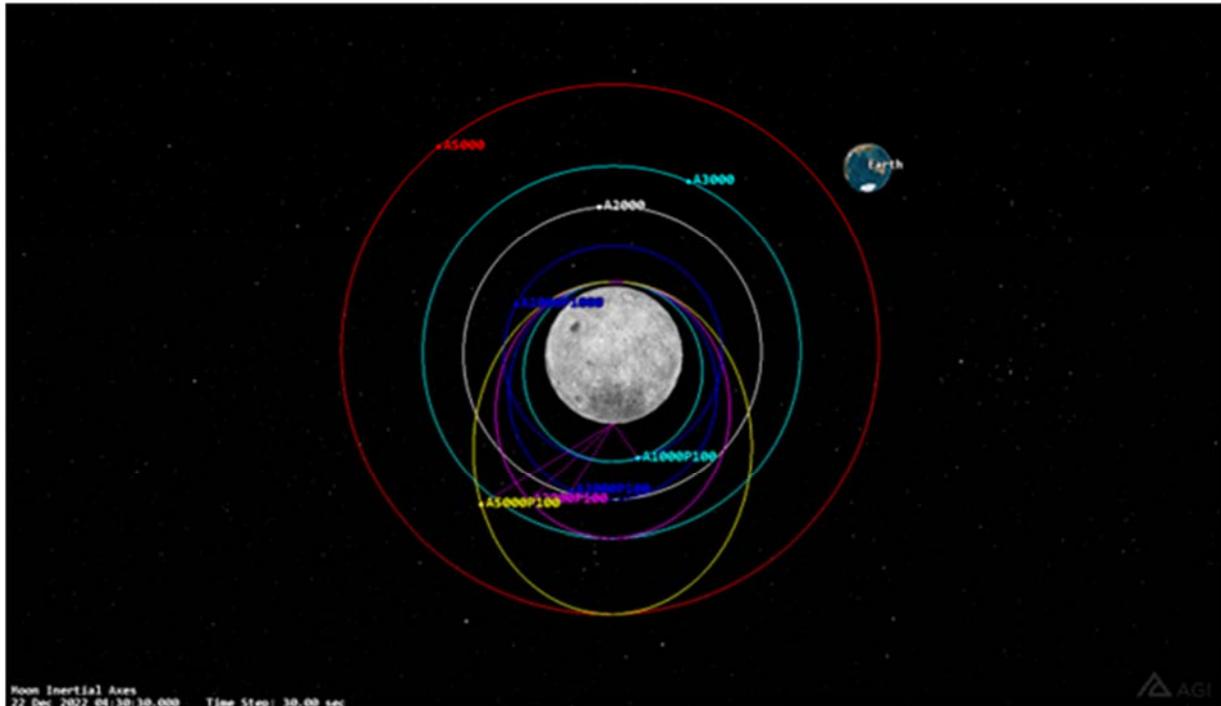


図 2-86 シャツクルトンクレータの直上を通過する軌道
(遠月面高度 1,000km-5,000km)

出所)JAXA/ISAS

表 2-53 シャツクルトンクレータの直上を通過する軌道の送電時間、機体数

遠月面高度 (km)	近月面高度 (km)	周期 (min)	仰角±45度の時間 (min)	1周回における 送電時間の割合	連続送電に必要な 機体数
1,000	1,000	214.2	22	0.103	10
1,000	100	163.6	24	0.147	7
2,000	2,000	341.7	48	0.140	7
2,000	100	220.1	56	0.254	4
3,000	3,000	487.7	80.5	0.165	6
3,000	100	281.9	97	0.344	3
5,000	5,000	827.1	158	0.191	5
5,000	100	419.9	200	0.476	2

出所)JAXA/ISAS

表 2-54 シャックルトンクレータに設置するレクテナの直径が 500m の場合の送電アンテナの直径
(ビーム収集効率:90%)

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

出所)JAXA/ISAS

表 2-55 シャックルトンクレータに設置するレクテナの直径が 1000m の場合の送電アンテナの直径
(ビーム収集効率:90%)

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

出所)JAXA/ISAS

(3) 送電システムの検討

1) 周波数とアンテナ素子数

送電システムは、ビーム制御部、増幅部、放射部から構成される。表 2-56 に放射部をフェーズドアレイアンテナで構成する場合の、周波数、送電距離、送電アンテナの直径、アンテナ素子の個数を示す。アンテナ素子間隔は 0.65λ とした。5.8GHz の場合、直径 200m のアンテナに 0.65λ 間隔でアンテナを敷き詰めた場合、約 2800 万素子が必要となる。周波数を上げた場合、100GHz ではアンテナのサイズは十数分の一にできるが素子数ほぼ同じ 3,000 万素子が必要である。高度 5,000km では、約 7 億素子必要である。大きな角度のビーム制御にはフルフェーズドアレイが必要であり、非常に多くの素子の制御が要求される。

表 2-56 フェーズドアレイアンテナを構成する場合の周波数、送電距離、送電アンテナの直径、アンテナ素子の個数(アンテナ素子間隔は 0.65λ)

周波(GHz)	送電距離(km)	送電アンテナの直径(m)	アンテナ個数
5.8	1000	200	27793077
10	1000	116	27793077
50	1000	23	27315952
100	1000	12	29742889
5.8	5000	999	693437976
10	5000	580	694826935
50	5000	116	694826935
100	5000	58	694826935

出所)JAXA/ISAS

ビーム制御を電氣的に行わず、衛星の機体制御で行う場合は、必ずしもフェーズドアレイアンテナを搭載する必要はない。パラボラアンテナのような大きな開口面を有するアンテナアレイでも可能である。この場合、1デバイス当たり 100W 以上連続放射可能な電子管デバイスの選択も可能となる。

2) 電力伝送の回線計算と電力密度

電力伝送の回線計算結果を示す。計算の前提条件は、送受信アンテナ間の電力伝送効率 63% 、月周回軌道高度は、100km、300km、500km、周波数は 5.7GHz、24GHz、受信電力は 100kW とした。

アンテナサイズを表 2-57～表 2-59 に示す。高度 100km の時、5.7GHz のアンテナサイズは直径 106m、24GHz のアンテナサイズは直径 51m である。高度 100km、300km、500km の回線計算結果を表 2-60～表 2-62 に示す。また、図 2-87、図 2-88 に -10dB のテーパをつけた場合の電力分布図を示す。図 2-87 は 5.7GHz、図 2-88 は 24GHz の場合であり、それぞれ、高度 100km、300km、500km の結果を示している。さらに表 2-63 に電力密度を示す。5.7GHz の場

合、正面電力密度は、高度 100km の時は約 4mW/cm²、500km の時は 0.8mW/cm²である。端部ではそれぞれ、0.5mW/cm²、0.1mW/cm²である。24GHz の場合、正面電力密度は、高度 100km の時は約 17.0mW/cm²、500km のときは 3.3mW/cm²である。端部ではそれぞれ、1.8mW/cm²、0.4mW/cm²である。人体の安全基準である 1mW/cm² はおおむね満たされているが、24GHz で高度 100km の場合、安全距離をもう少し取る必要がある。

表 2-57 アンテナサイズ(周回軌道高度:100km)

周波数 [GHz]	アンテナサイズ [mφ]
5.7	106
24	51

出所)JAXA/ISAS

表 2-58 アンテナサイズ(周回軌道高度:300km)

周波数 [GHz]	アンテナサイズ [mφ]
5.7	183
24	89

出所)JAXA/ISAS

表 2-59 アンテナサイズ(周回軌道高度:500km)

周波数 [GHz]	アンテナサイズ [mφ]
5.7	236
24	115

出所)JAXA/ISAS

表 2-60 回線計算結果(周回軌道高度:100km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図))

周波数 [GHz]	5.7	周波数 [GHz]	24
月周回軌道高度 [km]	100	月周回軌道高度 [km]	100
送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)	送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)
送信アンテナ利得 [dBi]	73.8	送信アンテナ利得 [dBi]	80.0
受信アンテナ利得 [dBi]	73.8	受信アンテナ利得 [dBi]	80.0
受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)	受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)
送受信アンテナサイズ [mφ]	106	送受信アンテナサイズ [mφ]	51
自由空間損 [dB]	148	自由空間損 [dB]	160

出所)JAXA/ISAS

表 2-61 回線計算結果(周回軌道高度:300km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図))

周波数 [GHz]	5.7	周波数 [GHz]	24
月周回軌道高度 [km]	300	月周回軌道高度 [km]	300
送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)	送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)
送信アンテナ利得 [dBi]	78.5	送信アンテナ利得 [dBi]	84.8
受信アンテナ利得 [dBi]	78.5	受信アンテナ利得 [dBi]	84.8
受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)	受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)
送受信アンテナサイズ [mφ]	183	送受信アンテナサイズ [mφ]	89
自由空間損 [dB]	157	自由空間損 [dB]	170

出所)JAXA/ISAS

表 2-62 回線計算結果(周回軌道高度:500km、周波数:5.7GHz(左図)、24GHz(右図))

周波数 [GHz]	5.7	周波数 [GHz]	24
月周回軌道高度 [km]	500	月周回軌道高度 [km]	500
送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)	送信電力 [dBm]、()内はkW表示	82.0 (159)
送信アンテナ利得 [dBi]	80.8	送信アンテナ利得 [dBi]	87.0
受信アンテナ利得 [dBi]	80.8	受信アンテナ利得 [dBi]	87.0
受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)	受信電力 [dBm]、()内はkW表示	80.0 (100)
送受信アンテナサイズ [mφ]	236	送受信アンテナサイズ [mφ]	115
自由空間損 [dB]	162	自由空間損 [dB]	174

出所)JAXA/ISAS

周波数: 5.7GHz
電力分布図: -10dBガウシアン

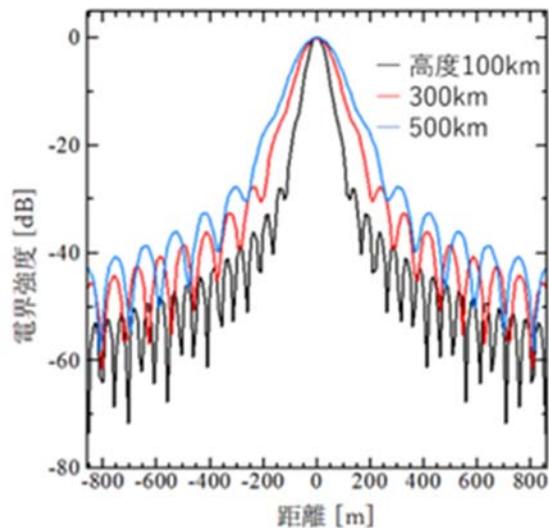


図 2-87 5.7GHz 電力分布図

出所)JAXA/ISAS

周波数：24GHz
電力分布図：-10dBガウシアン

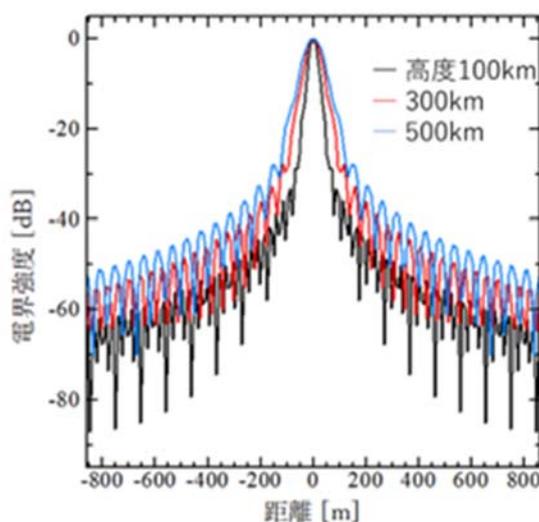


図 2-88 24GHz 電力分布図

出所)JAXA/ISAS

表 2-63 電力密度

5.7GHz

周波数 [GHz]	高度 [km]	アンテナ径 [m φ]	アンテナ正面利得 [dBi]	正面方向電力密度 [mW/cm ²]	アンテナ端部電力密度 [mW/cm ²] ()内の数字はアンテナ端 [m]
5.7	100	106	74.99	3.99	0.491 (53)
5.7	300	183	79.70	1.31	0.152(92)
5.7	500	236	81.95	0.792	0.089(118)

24GHz

周波数 [GHz]	高度 [km]	アンテナ径 [m φ]	アンテナ正面利得 [dBi]	正面方向電力密度 [mW/cm ²]	アンテナ端部電力密度 [mW/cm ²] ()内の数字はアンテナ端 [m]
24	100	51	81.30	17.04	1.83(26)
24	300	89	86.06	5.67	0.596(45)
24	500	115	88.12	3.28	0.413(58)

出所)JAXA/ISAS

レクテナの直径が500mである場合の送電アンテナの直径を表 2-64に示す。周波数は、5.8GHz, 24GHz, 61GHz である。送電距離が100km である時、アンテナ径は、20m, 4.8, 1.9m である。電力分布を図 2-89 に示す。高度は 100km、受信電力は 100kW である。表 2-65 にレクテナ径 500m の場合の電力密度を示す。送電距離は 100km, 送電電力は 100kW と 1MW である。100kW

送電時、正面電力密度は、5.8GHz の場合約 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ 、24GHz で約 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ 、61GHz でも約 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ である。端部の電力密度は3種類の周波数とも約 $0.01\text{mW}/\text{cm}^2$ である。1MW 送電時は、正面電力密度は3種の周波数とも $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 、端部の電力密度は3種類の周波数とも約 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ である。人体の安全基準は、いずれの場合も満たされている。

表 2-64 レクテナ直径 500m の時の送電アンテナの直径

周波数 [GHz]	送電距離 [km]	レクテナの直径 [m]	送電アンテナの直径 [m]
5.8	100	500	19.99
24	100	500	4.83
61	100	500	1.90

受信レクテナの大きさ:500m に固定

出所)JAXA/ISAS

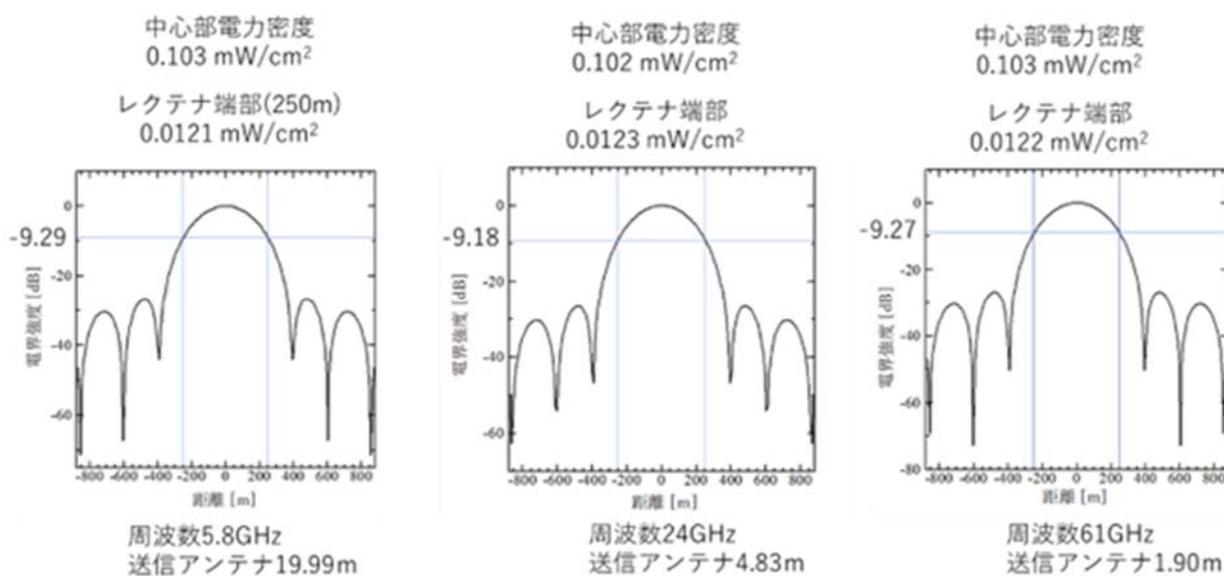


図 2-89 レクテナ径 500m の場合の電力分布図
高度:100km、受信電力:100kW

出所)JAXA/ISAS

表 2-65 レクテナ直径 500m の場合の電力密度

受信電力：100KW

周波数 [GHz]	高度 [km]	アンテナ径 [mφ]	アンテナ正面利得 [dBi]	レクテナ中央電力密度 [mW/cm ²]	レクテナ端部電力密度 [mW/cm ²]
5.8	100	19.99	60.67	0.103	0.0121
24	100	4.83	60.61	0.102	0.0123
61	100	1.90	60.66	0.103	0.0122

受信電力：1MW

↓ 約10倍

周波数 [GHz]	高度 [km]	アンテナ径 [mφ]	アンテナ正面利得 [dBi]	レクテナ中央電力密度 [mW/cm ²]	レクテナ端部電力密度 [mW/cm ²]
5.8	100	19.99	60.67	1.03	0.122
24	100	4.83	60.61	1.02	0.123
61	100	1.90	60.66	1.03	0.122

電波防護指針値：1mW/cm²※一般環境、1.5GHz~300GHz

出所)JAXA/ISAS

3) 電力増幅器

電力増幅器には、半導体デバイスと電子管デバイスがある。図 2-90 にマイクロ波管の適合領域を示す。

半導体アンプは、近年、GaN-HEMT デバイスによる高出力化や高調波処理等による高効率化が行われている。応用分野の技術進展としては、2000 年以降、無線通信の高速化要求に対応して 60GHz 帯の通信システムの開発が活発になり、MMIC の高集積化が行われている。また、車載レーダ用 MMIC も近年開発が盛んである。76.0-77.0GHz の周波数帯域は世界共通であり、77 GHz 帯ミリ波遠距離車載レーダ製品が市販されている。車載レーダに必要な主要半導体ミリ波機能は、発振器 (Osc)、送信用電力増幅器 (PA)、低雑音増幅器 (LNA)、受信用ミキサ (Rx-Mix) であり、無線送電システムと共通な要求に対応した MMIC が開発されている。

図 2-91 は、半導体増幅器モジュールの動作周波数と付加電力効率 (PAE) の現状を表したものである。10MHz 以下の周波数では 90% を超える PAE が実現されている。また、20GHz 以下ではアルミナなど低損失回路を用いた 3 倍程度の高調波処理が可能で、E 級や F 級、R 級といった理論効率 100% の増幅器設計が可能となり 80% を超える PAE が可能となる。20GHz を越える周波数になると自由空間波長の二分の一が 7.5mm 以下となりハイブリッド実装が難しくなるため MMIC の適用が必要となる。MMIC の場合マイクロストリップ線路の基板厚が 80 ミクロン程度であるため、ストリップ導体幅も 100 ミクロン以下となり結果として導体による回路損失が大きくなる。このため、PAE も大きく落ち込む。94GHz で MIS-HEMT デバイスを用いた増幅器で 38.5% (PAE) の効率が報告されている⁶。日本/世界のトランジスタ微細化の流れを図 2-92 に示す。ゲート長の微細化による高速化、高

⁶ W. Li, B. Romanczyk, et. al, "Record 94 GHz performance from N-polar GaN-on-Sapphire MIS-HEMTs: 5.8 W/mm and 38.5% PAE", 2022 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) | 978-1-6654-8959-1.

周波化、高集積化が世界的な取り組みであるが、我が国における技術の進展は、停滞の傾向にある⁷。アレイアンテナを構成する場合、ミリ波帯では（特に 90GHz 以上）ではウェハースケールインテグレーションが必要となり、アンテナを含めて MMIC を一枚のウェハースケール上に構成してアレイシステムを実装することが必要となり、放熱や電源バスを含めてハードルはかなり高い。

一方で電子管は、放送、通信、レーダ、加熱などの分野で研究開発が行われており、核融合、加速器などの応用分野で高性能化が進められている⁸。進行波管や後進波管、マグネトロンは、通信衛星やレーダに使用され、数 GHz から 30GHz までの周波数で、数 10W から数 kW の出力を持つ。製品化されている NEC ネットワーク・センサ製の Ka 帯進行波管増幅器(TWTA)は、周波数 27.5GHz-30.0GHz、定格出力 250W(CW)、効率 40%、重量 2.8kg、サイズは 400 x 70 x 64 mm である⁹。また、近年発表された NEC ネットワーク・センサ製の Q 帯 TWTA は周波数 42.5GHz-45.5GHz、定格出力 190W(CW)、効率 37%、重量 4.3kg、サイズは 400 x 70 x 70 mm である¹⁰。

ジャイロトロンは、電子サイクロトロン共鳴メーザーの原理を利用するマイクロ波発振管である。キヤノン電子デバイスの核融合用に開発されたジャイロトロンは、周波数 170GHz、出力 1MW、効率 50%、持続時間 300s(5kHz 繰り返し)で高さ 3m、重量 800kg である^{11,12}。

マグネトロンは、パルスマグネトロンであれば周波数 36GHz~220GHz の範囲においてピーク出力 1kW~120kW、平均出力 0.3W~120W の開発事例があるが¹³、連続波(CW)マグネトロンに関してはミリ波帯以上の周波数での開発実績は他の電子管と比較して乏しい。

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

⁷ K.Honjo(provate communication)

⁸ 岡本 正, “電子管技術の系統化調査”, 国立科学博物館, 2007-03-30.

⁹ <https://www.necnets.co.jp/product/twt/ld7321.html?>

¹⁰ Sosuke Higashibata, et.al., “Q-band 190W Helix TWT with Two Stage Collector”, 978-1-6654-4325-8/22/\$31.00 ©2022 IEEE.

¹¹ Yasuhisa Oda, et al, “Development of the first ITER gyrotron in QST”, 2019 Nucl. Fusion 59 086014.

¹² 坂本慶司, “小特集 核融合プラズマにおける電子サイクロトロン加熱・電流駆動の進展 3.ECH・ECCD 実験の進展 3.1 ECH・ECCD 装置の進展”, J. Plasma Fusion Res. Vol.85, No.6 (2009)351-356.

¹³ V. D. Naumenko, “Survey of Existing Designs of Millimeter Wave Band Magnetrons”, Radioelectronics and Communications Systems, 2017, Vol. 60, No. 4, pp. 141-160.

マイクロ波管の適合領域

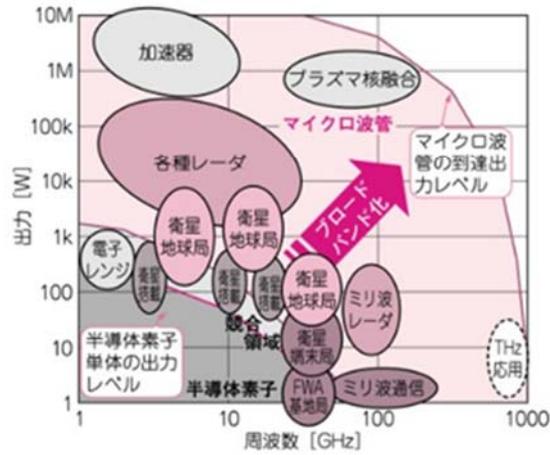


図 2-90 マイクロ波管の適合領域

出所) 鷲木 邦夫, 藤原 英次, "衛星通信やレーダなどのマイクロ波/ミリ波で活躍する高出力 高効率デバイス", RF ワールド, No. 97, p.97.

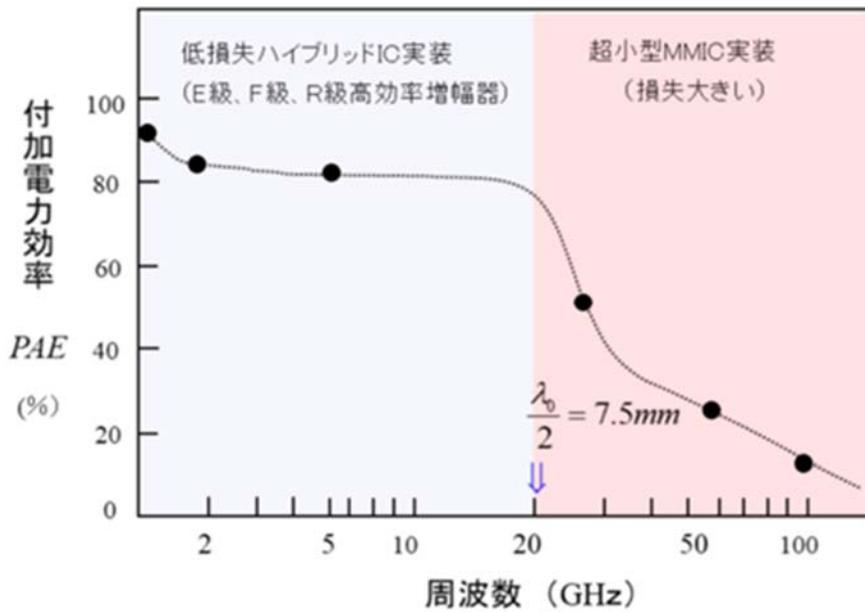


図 2-91 半導体増幅器モジュールの動作周波数と付加電力効率(PAE)の現状

出所) K.Honjo(provate communication)

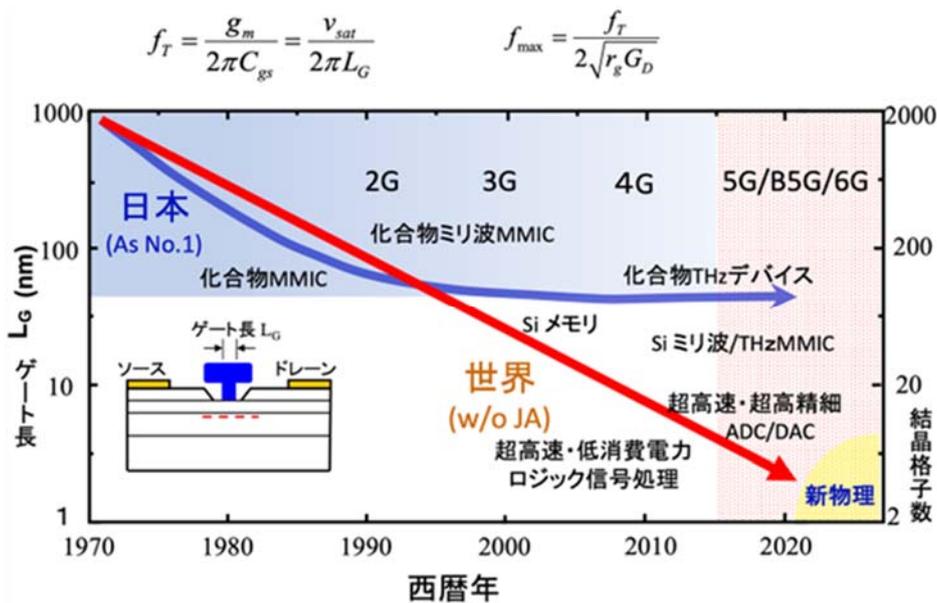


図 2-92 日本/世界のトランジスタ微細化の流れ

出所)K.Honjo(provate communication)

4) 宇宙用反射型アンテナ

周波数が 50GHz 以上のミリ波領域になると、フルフェーズドアレイアンテナの場合、放射部のアンテナ素子サイズは数 mm となる。この場合は、前節で示したようにアンテナ素子と MMIC との一体形成が課題となる。一方で、増幅部に電子管デバイスを用いた場合、単管出力が数十 W から 1kW クラスとなるため、無数の放射素子への分配は現実的ではなく、メートルサイズのパラボラアンテナのような反射型のアンテナのアレイ化が考えられる。衛星と搭載用パラボラアンテナは、大型化、高周波数化のための高精度化が行われてきた。4つのタイプに分類され、リジッドな構造、膜構造、メッシュ構造、インフレータブル構造を有するアンテナが開発された。DUAN Baoyan が宇宙用展開型アンテナに関してまとめている¹⁴。Ka 帯/Ku 帯では、リジッドなアンテナが使用されてきたが、ロケットフェアリング内に収納するために、展開型のアンテナの開発が進められている。ETS-VIII の展開型アンテナを図 2-93 に示す。サイズは約 19 メートル x 17 メートルで正六角形のモジュールを14個連結して構成している。小澤等は、ETS-VIII LDR¹⁵や WINDS MBA¹⁶の技術に基づき、開口径 5m の Ka 帯向けアンテナの開発を行なっている¹⁷。目標面精度は、使用する上限周波数である 30GHz の波長の 1/50 である 0.20mm rms である。また、久原等は、扇子型展開アンテナのコンセプトを用いた開口径 1m、周波数範囲 8-40GHz のオフセットパラボラアンテナの開発を行なっている。図 2-94 にコンセプトと展開の様子を引用する。L3HARRIS が 5m の Ka 帯用のメッシュ展開アンテナを開発している¹⁸。また、高い面精度を

¹⁴ DUAN Baoyan, "Large Spaceborne Deployable Antennas (LSDAs) —A Comprehensive Summary", Chinese Journal of Electronics Vol.29, No.1, Jan. 2020.

¹⁵ K. Nakamura, Y. Tsutsumi, K. Uchimar, A. Tsujihata and A. Meguro, "Large Deployable Reflector on ETS- VIII," 17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, AIAA-1998-1229, Yokohama, Japan, 1998.

¹⁶ S. Ozawa, T. Maeda, M. Shimada, K. Hirayama, A. Fukatsu and Y. Koishi, "Design of Onboard Multibeam Antenna System for GIGA Bit Class Communication Satellite," 11th Ka and Broadband Communications Conference, K000084, Rome, Italy, Sep. 2005.

¹⁷ 小澤 悟, 他, "扇子型展開式高精度大型反射鏡の概念検討", 宇科連, 3M13, 2019.

¹⁸ "UNFURLABLE KA-BAND REFLECTORS", L3Harris.com.

達成するために、膜状電極を用いたアクティブな制御によるアンテナ開発も行われている。図 2-95 に展開試験の様子を引用する。



図 2-93 ETS-VIII 搭載大型アンテナ(外径最大寸法:約 19 メートル×17 メートル)
出所)<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/ets8/>

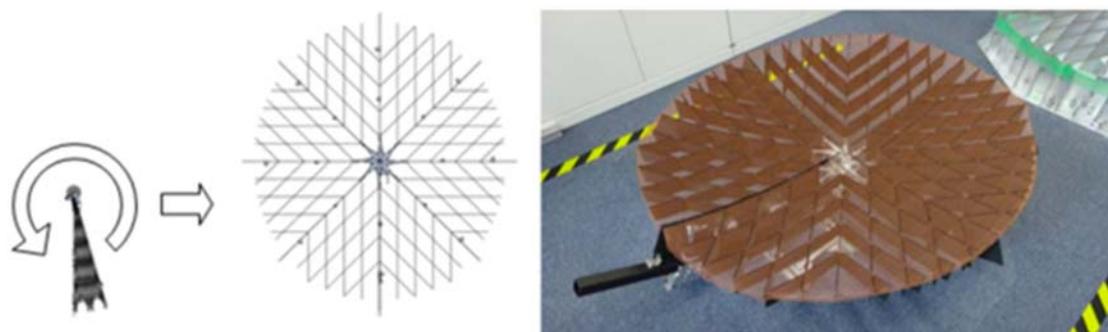


図 2-94 久原等の扇子型展開アンテナコンセプトと 1m 扇子型展開アンテナ
出所)久原隆博, 他, “1m 扇子型展開アンテナの開発”, 宇科連, 3J14.

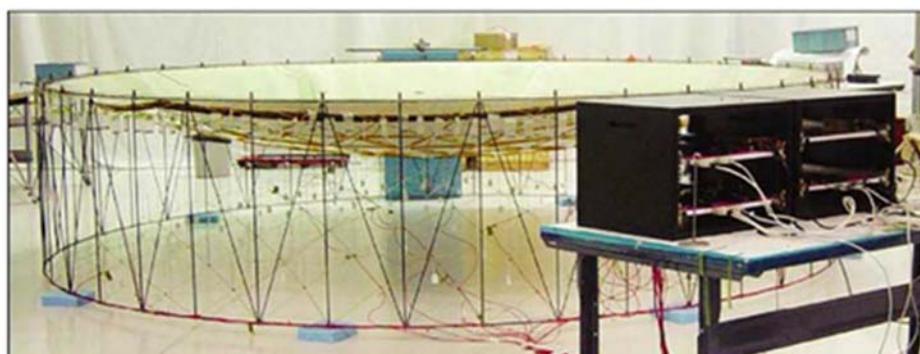


図 2-95 Grumman Company、SRST 等による 5m の試作モデル
出所)DUAN Baoyan, “Large Spaceborne Deployable Antennas (LSDAs) —A Comprehensive Summary”, Chinese Journal of Electronics Vol.29, No.1, Jan. 2020.

(4) 100kW 無線送電システム検討例

図 2-96 に月周回軌道からエネルギーを送るシステムのブロック図を示す。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る。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¹⁹。しかし、ビーム掃引角度要求が大きく異なる。静止軌道上に太陽発電衛星を建設する場合はマイクロ波ビームの掃引角度は数度程度であるが、月軌道からの場合は、すでに述べたように±45 度程度が要求される。この場合、フルフェーズドアレイアンテナか衛星の姿勢制御によるビーム掃引が必要である。衛星の姿勢制御でビーム制御を行う場合は、アレイアンテナを必要としない。開口面の大きなパラボラアンテナのアレイ化でアンテナシステムを構成できる。

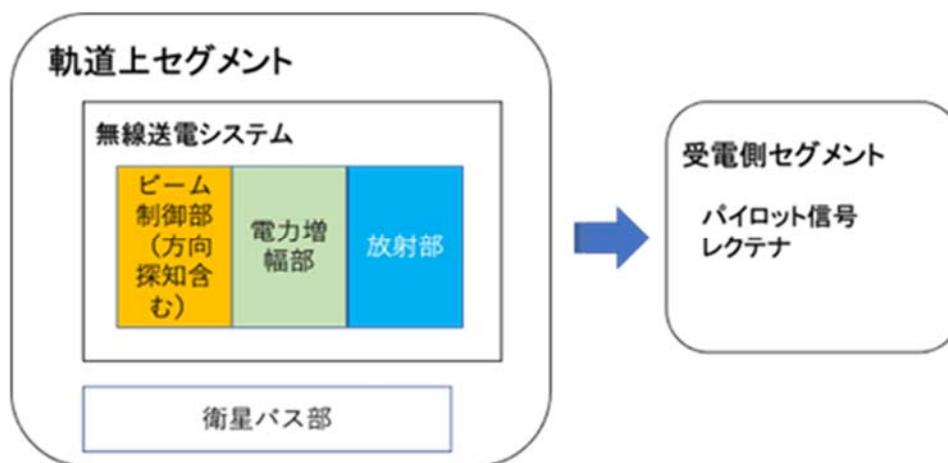


図 2-96 月周回軌道からのエネルギー伝送システム

出所)JAXA/ISAS

既に述べたように、軌道高度を高くすれば、一周回中の送電時間の割合を増やすことができるが、一周回時間は長くなる。アンテナサイズは、送電距離と周波数で決まる。ビーム掃引角度を大きくすれば、一周回中の送電時間の割合を増やすことができる。ビーム掃引角を大きくするには、フルフェーズドアレイあるいはサブアレイを小さくしなければならない。レクテナ設置場所の観点からは、クレータリム部などの周辺の地形条件で送電可能角度が制限される。浅い仰角からの送電の場合、レクテナ部へのビーム照射エリアが広がるため、レクテナはそれを考慮した面積が必要である。

衛星に搭載する太陽電池パネルに関しては、パネルのサイズは、必要な発電量により決まり、太陽電池パネルは太陽方向を指向する必要がある。極軌道は、可視時間が限られるため間欠送電となる。そのため大容量バッテリーの搭載が必要である。

軌道上からの送電が周期的な間欠送電であるため、月面上蓄電システムは、間欠送電に応じた充電容量を考慮する必要がある。

周回する機体数は、一周回中の送電可能時間の割合、一機当たりの送電可能電力、一周回で必要となる供給電力を考慮しなければならない。加えて、月面上蓄電システムと衛星からの送電電力双方を考

¹⁹ 橋本、他、”ソフトウェアレトロディレクティブ方式によるSPS,” 信学技報, sps2003-15, 2004.

慮した最適化が必要である。また、一機の機体の損失で、全送電電力が失われるリスクは避けた方が良く
いと考える。

以上を踏まえた月極域への送電を仮定したシステム検討の一例を以下に示す。

遠月面点高度 1,000km, 近月面点高度 100kmとした場合、ビーム掃引角が±45 度とすると一周
回約 163 分中 15%程度の送電時間となる。送電周波数を 50GHz とすると直径 500m と 100m の
レクテナへ送電する場合は、送電アンテナ直径は各々23m と 116m 程度となる。レクテナ部直径は、斜
め入射を考慮すると各々700m と 140m 程度となる。5機で 100kW 送電する場合、1 機あたり
136kW 送電する必要がある。エネルギー変換効率を 50%とすると、10m×57m の太陽電池パネルが
必要となる。太陽電池の変換効率は 35%と仮定した。また、衛星には、大型のバッテリーが必要である。
DOD50%の運用を考えると、1,268kWh の容量が必要である。日産リーフのバッテリー 40kWh²⁰タイ
プ相当を搭載する場合、32 台必要となり、質量は 9.6 トン程度である。

軌道上セグメントの諸元を表 2-66 に示す。小型のパラボラアンテナアレイで送電アンテナを構成す
る場合を表 2-67と表 2-68に示す。500mレクテナの場合、TWTAの出力は1kW、500W、100W
を検討し、100mレクテナの場合、TWTAの出力は500W、100W、50Wを検討した。500mレクテ
ナの場合、1kWのTWTAは136台必要となり、送電アンテナを136機のパラボラアンテナで構成す
ると各アンテナの直径は2m必要である。100Wの場合は、1,363台必要であるが、パラボラアンテナ
の直径は60cmですむ。100mサイズのレクテナの場合は、100W TWTAを使用すると、3.1mのパ
ラボラアンテナが必要である。SSPA型に関しては、アンテナ直径23mを仮定した。表 2-69に示す。
2700万素子以上の位相制御、電力増幅機、アンテナ素子が必要である。また、一つのアンテナエレメン
トからの放射電力は約5mWである。

表 2-66 軌道上セグメントの諸元

項目	諸元		備考
送電距離	1,000	km	遠月面点高度:1000km, 近月面点高度:100km
送電電力量	981,600	kJ/周回	
機体数	5	機	
一機当たりの送電電力	136.3	kW	
送電周波数	50	GHz	
送電アンテナ径	23/116	m	
受電設備の直径	500/100	m	
ビーム制御角度	±45	度	
一機当たりの発電電力	779	kW	DC-RF 変換効率 50%
太陽電池アレイのサイズ	10 x 57	m	太陽電池の変換効率 35%
バッテリー容量	1268	kWh	DOD50%
バッテリー質量	9.6	t	リーフのバッテリー 40kWh-->303kg

出所)JAXA/ISAS

²⁰ <https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf/charge/battery.html>

表 2-67 TWTA 型(レクテナ:500m)

TWTA 出力	1	kW/台	0.5	kW/台	0.1	kW/台
TWTA の数	136	台	273	台	1363	台
パラボラアンテナ数	136	台	273	台	1363	台
パラボラアンテナの直径	2	m	1.4	m	0.6	m

出所)JAXA/ISAS

表 2-68 TWTA 型(レクテナ:100m)

TWTA 出力	0.5	kW/台	0.1	kW/台	0.05	kW/台
TWTA の数	273	台	1363	台	2726	台
パラボラアンテナ数	273	台	1363	台	2726	台
パラボラアンテナの直径	7	m	3.1	m	2.2	m

出所)JAXA/ISAS

表 2-69 SSPA 型(レクテナ:500m)

アンテナ数	27315952	個
アンテナからの放射電力	0.00497878	W/個
波長	6	mm

出所)JAXA/ISAS

(5) 月周辺軌道太陽光発電システム検討まとめ

月軌道上から月面にエネルギーを伝送するシステムに関して検討した。月周辺軌道太陽光発電システムは軌道上セグメントと月面上セグメントから構成される。月極域への送電システムに関して、軌道と送電距離を検討し、アンテナサイズ、搭載する送電システムに関して検討を行った。高周波数化はアンテナサイズを低減できるが、アンテナの面精度要求が高くなる。また、月極域への送電の場合は、大角度のビーム制御が必要となり、この実現方法として、フルフェーズドアレイアンテナによる電氣的制御か衛星の姿勢制御により実現するかを今後評価する必要がある。この評価には、半導体デバイスおよび電子管デバイスの今後の開発動向が重要である。また、増幅器やアンテナ技術は開発課題が大きい。ビーム制御に関しては、小規模な宇宙実験により早期に確認する必要がある。

2.2.4 月面設置発電システム

本項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、原子力、温度差発電などの方法も考えられるが、本年度は太陽光発電に絞って検討を行う。

検討を行うにあたり、前提とした条件は、下記の通り。

- 月面基地の建設場所は、極域のクレータ(例えばシャックルトンクレータ)のリム部で、月面設置発電システム建設場所はリム部、あるいは、その近辺の標高の高い日射が得られる場所を想定。
- 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、着陸ゾーン、サービスゾーン、観測ゾーン、資源抽出プラント等にゾーン分けされる。
- 電力は資源抽出プラントゾーンの水素生成システムに供給する。
- 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は、2035年頃に小規模なプラントに対して日照時・影時とも常時 100kW 送電とする。2040年頃からは、数 10MW に増強するとともに、低緯度地域への電力供給も視野に入れる。

(1) 方式・候補の調査検討

1) 太陽電池セル

a. セルの比較(シリコン系、化合物系、有機系の比較、化合物系が有望なこと)

太陽光を電力に変換する光電変換素子としての、太陽電池は材料、接合数、厚みにより構造が分類される。

材料による分類はシリコン系、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、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 接合数によりも分類され、構造が単純な単接合型と、より高効率な多接合型があり、支持基板が無い又は薄い構造を持つ薄膜太陽電池がある。

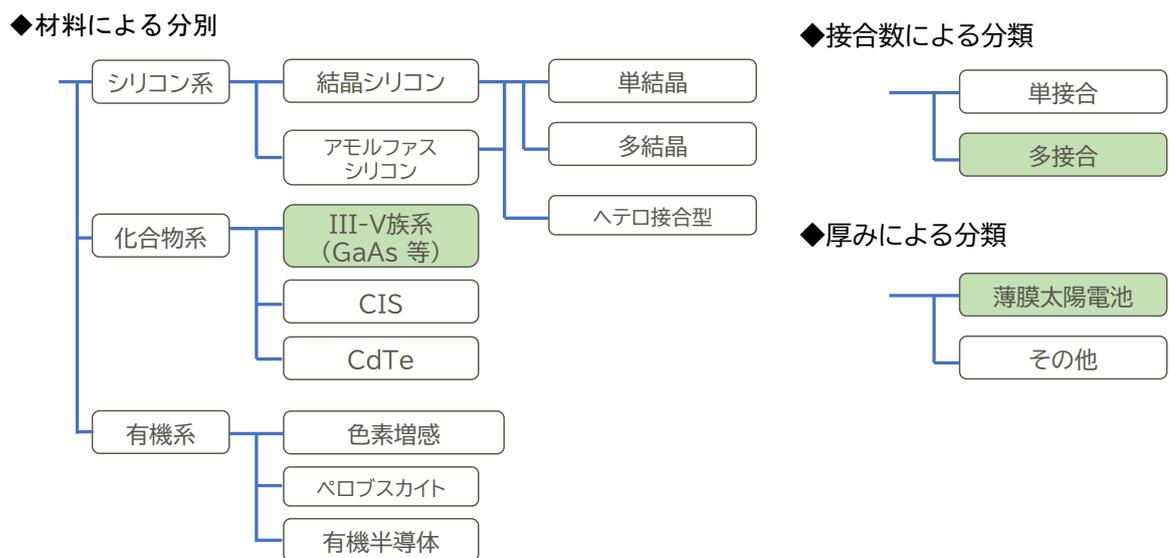


図 2-97 太陽電池の分類

出所) シャープ

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)高い変換効率 (2)軽量性 (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のが III-V 族系 3 接合型薄膜太陽電池(以下 IMM3J セルとする。)である。発電層は III-V 族の単結晶で構成されるため、高効率・高信頼性であり、接合数としても(InGaP/GaAs/InGaAs)の 3 つの発電層が積層されているため、より高効率である。構造としても発電層のみであり通常の太陽電池に存在する厚い支持基板が無く、薄膜構造であるため他のセルより軽量となる。

図 2-98 に示すように結晶シリコン太陽電池と IMM3J セル (InGaP/GaAs/InGaAs)の比較を行う。太陽光エネルギー分布において、結晶シリコン太陽電池ではシリコンのバンドギャップに対応する波長領域で光電変換を行う。一方で IMM3J セルでは、3 つの各光電変換層が各波長での発電を担うことでより太陽光エネルギー分布の広い範囲で無駄なく発電が可能となる。エネルギー変換効率は図中の面積比に相当し、IMM3J セルはシリコンセルの約 1.7 倍の発電量となる。

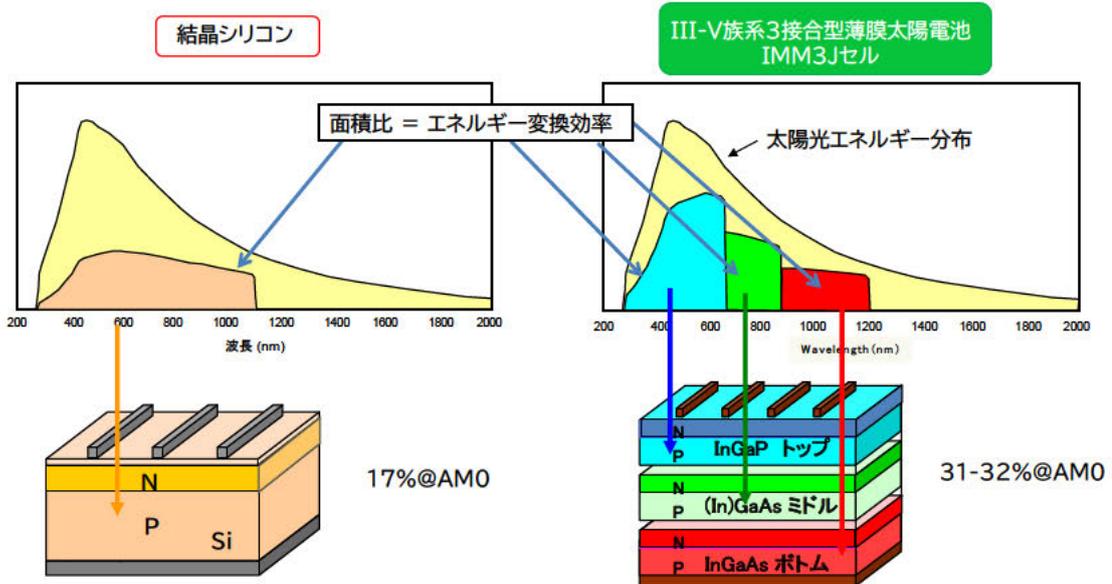


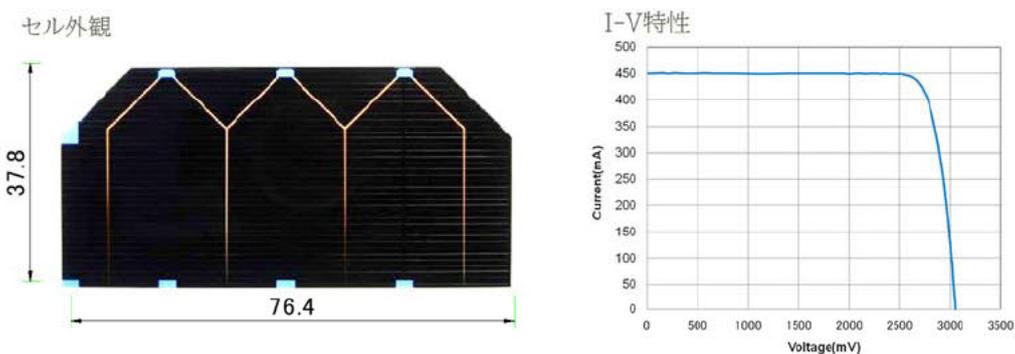
図 2-98 シリコン太陽電池と化合物 3 接合型薄膜太陽電池の比較

出所)シャープ

b. 化合物セルの仕様

宇宙用 IMM3J セルの一例として、シャープ製 IMM3J セル特性を図 2-99 に示す。

典型値として、AM0、周囲温度 25℃において効率は 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 27.4cm²)であり、薄膜タイプではない基板付き化合物 3 接合セルの 1/4 以下と非常に軽量となっている。今後3つの積層された各太陽電池の膜厚や構成材料、電極面積、反射防止膜等の構造を最適化することにより 2035 年までに発電効率 40%を目指す。



電気特性

Cell area: 27.4cm² AM0, 25℃

Voc (V)	Isc (A)	FF	Pmax (W)	Eff. (%)
3.05	0.452	0.845	1.16	31.0

図 2-99 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シートとガラスを用いたガラスシートがある。用途や期間により最適なものを選択する必要がある。

ア) フィルムシートについて

フィルムシートの外観と断面構造を図 2-100 に示す。表面に柔軟な樹脂フィルムを用いているため、モジュール自体にフレキシビリティがあり、衛星筐体の形状に沿わせて搭載することが可能である。また、シートに鋭利な端部が存在しないため船外活動等の有人環境下での安全性が高い。

一方で、使用している樹脂フィルムはトップクラスの耐環境性があるものを使用しているが、宇宙環境下の長期的な放射線性および紫外線暴露にはフィルム自体の着色や脆化が発生するため、半年程度の短期ミッション用途として利用されることが多い。



図 2-100 フィルムシートの外観と構造

出所)シャープ

イ) ガラスシートについて

ガラスシートの外観と断面構造を図 2-101 に示す。表面に 50~100 μ m の薄板ガラスを用いて作製している。フィルムシートと比較して、無機物であるガラスを用いることで宇宙環境下の激しい放射線および紫外線に耐えうる構造となっている。数年レベル以上の期間のミッションにはガラスシートが用いられることが多い。シート構造においてもモジュール構成部材のバックシートを薄膜化することにより、モジュール自体の厚みは約 0.4mm となっている。



図 2-101 ガラスシートの外観と構造

出所)シャープ

c. 面積当たりの発電電力

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、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 2-102 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。

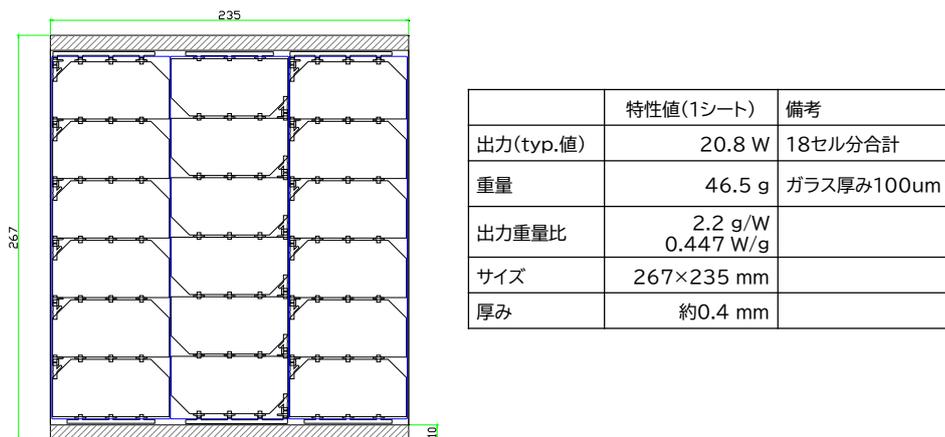


図 2-102 太陽ユニット形状とその特性

出所)シャープ

1シートにおいて18セル搭載し、シートとしての出力値はモジュール温度が+25℃の際、20.8Wとなる。重量について表面保護ガラスに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。

また、IMM3Jセルの電気出力温度特性は-0.23%/℃であるため、発電時のモジュール表面温度を+100℃と想定した場合17.2W、+80℃とした場合18.2Wとなる。

発電ステーションにおける発電出力の一例として、モジュール設置面積を6m×3m×2翼を想定した場合、上記モジュールが572シート搭載でき、モジュール総数の重量は26.6kgとなる。

発電出力としては、モジュール温度が+80℃時には、発電出力は約10.4kWとなり、面積当たりの発電出力は、0.29kW/m²となる。

d. レゴリス防塵対策(静電気防止等)

月面環境下に存在するレゴリスの太陽電池表面付着によって発電効率低下が懸念される。主に静電気起因で付着すると考えられるため、ガラス最表面に透明導電コートを実施することでレゴリス付着を回避できる可能性がある。

一般的な透明導電コートの一例としてITOコートがあるが、ITOを含め透明導電コートは一般的に屈折率が高く、ITOコートでは2.1~2.2であり、ガラスの屈折率1.5よりも高いためITOコートを設置した場合ガラス表面の反射ロスが発生してしまう。膜厚の最適化により反射ロスの最小化を行うこと

と、設置の効果を地上実験で見極めた上で今後レゴリス防塵対策を行う必要がある。

2) 架台の方式

大きく分けて、太陽追尾型と固定型に分類される。

a. 太陽追尾型

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。太陽追尾型でも、図 2-103 のように 1 軸追尾型と 2 軸追尾型がある。1 軸追尾型は、文字通り 1 つの回転軸で太陽を追尾する仕組みである。日射の入射角が常に垂直とはならないが、太陽の方位を追尾することで、固定型より多くの発電量を得られる。2 軸追尾型は方位角に加えて、太陽高度に合わせて追尾するため、常に垂直の日射が得られ最大限の発電量を得ることが可能である。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り、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。

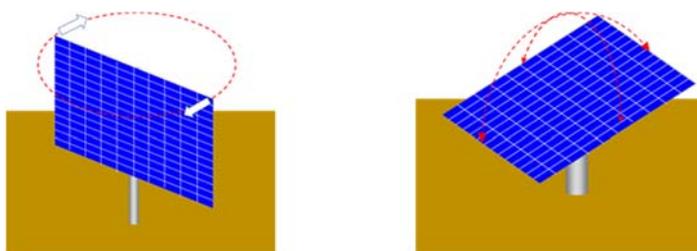


図 2-103 太陽追尾型架台(左:1 軸追尾型、右:2 軸追尾型)

出所)大林組

b. 固定型

図 2-104 の左側のような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。北半球であれば、一般的に南向いて設置されることが多いが、朝・夕は太陽の入射角が小さいため、発電電力が小さくなることや、逆に設置面積に対して、多くの容量を設置できる特徴がある。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、図 2-104 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が考えられる。

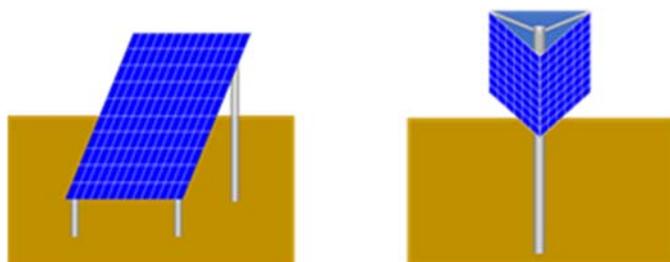


図 2-104 固定型架台(左:平板固定型、右:多面体)

出所)大林組

固定型は太陽の方位角により発電量が変化する。影が無く 100%の日照率が得られた場合の、時間(日)の推移による発電量の変化の例を図 2-105 に示す。なお、多面体でパネルは3面に貼っているとしている。平板固定(両面発電と仮定)の場合は、パネルの方向と太陽の方位角が 90°ずれた場合に発電量が0となるが、多面体の場合には変動はするが、最大発電電力を100%とすると87~100%の範囲内であるため、ある程度安定した発電量を得られることが分かる。多面体の面数を増加させれば、より安定した発電量を得られ、円柱状に設置した場合は、常に一定電力が得られる。

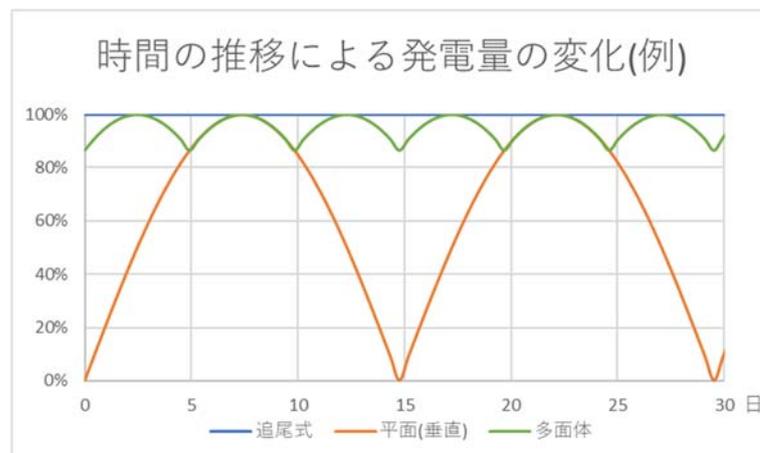


図 2-105 時間の推移による発電量の変化(例)

出所)大林組

表 2-70 架台方式比較表

型式	追尾型		固定	
	1軸式	2軸式	平面(垂直)	多面体
図				
概要	太陽の方位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 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 可動部が無いので故障が少ない
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

架台の方式(太陽追尾型と固定型)についての比較を表 2-70 に示す。

多面体の形状で、追尾型と同じ発電電力を得られるためには、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するリスクがあり、故障時に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が考えられる。

(2) 設置場所、環境条件

1) 設置場所

当該月面設置発電システムは初期の月面基地として有力視されている南極域での基地に使用されることとする。基地のイメージは EZA-2021001「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021」(JAXA 国際宇宙探査センター 宇宙探査システム技術ユニット文書 公開版)を参考とし(図 2-106)、月南極 Shackleton クレータ(Shackleton Creator)のリム部に設置することを想定する。この図では特にリム部でも標高の高い位置に電力システムの設置が想定されている。これは最も太陽光エネルギーを用いた電力システムとして、日照時間の観点から有効な位置である。この地点を有力候補の1つとしつつ、後述のように、より詳細な日照シミュレーションを行い、他の候補地点についても検討した。

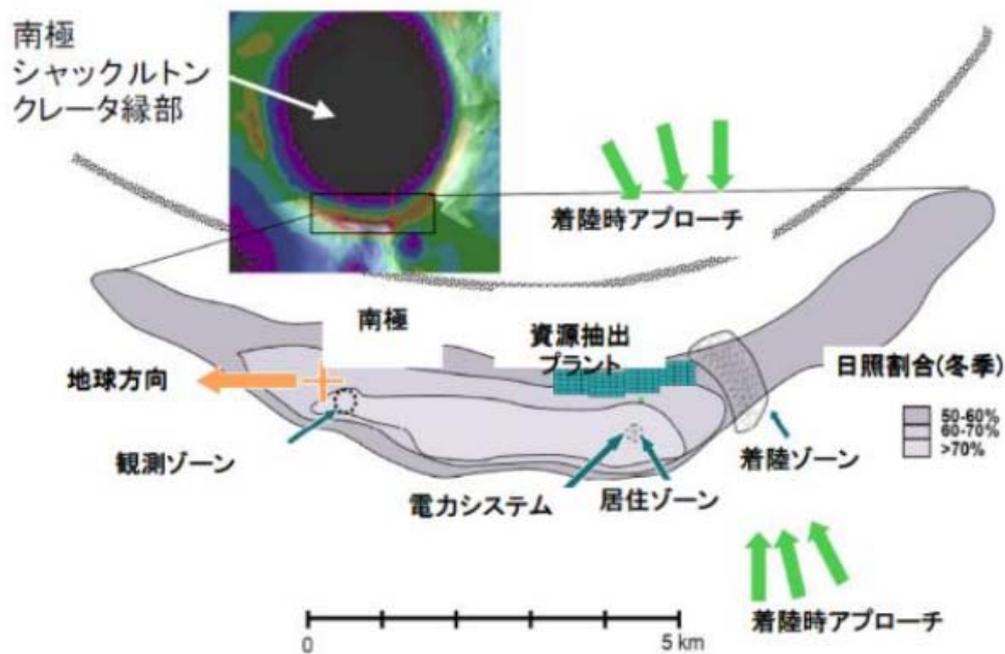


図 2-106 参考用の月南極域の基地イメージ

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

2) 環境条件

建設が想定される極域での温度条件については、文献「CROSS-PROGRAM DESIGN SPECIFICATION FOR NATURAL ENVIRONMENTS (DSNE)」によると、表 2-71、図 2-107 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 2-71 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)

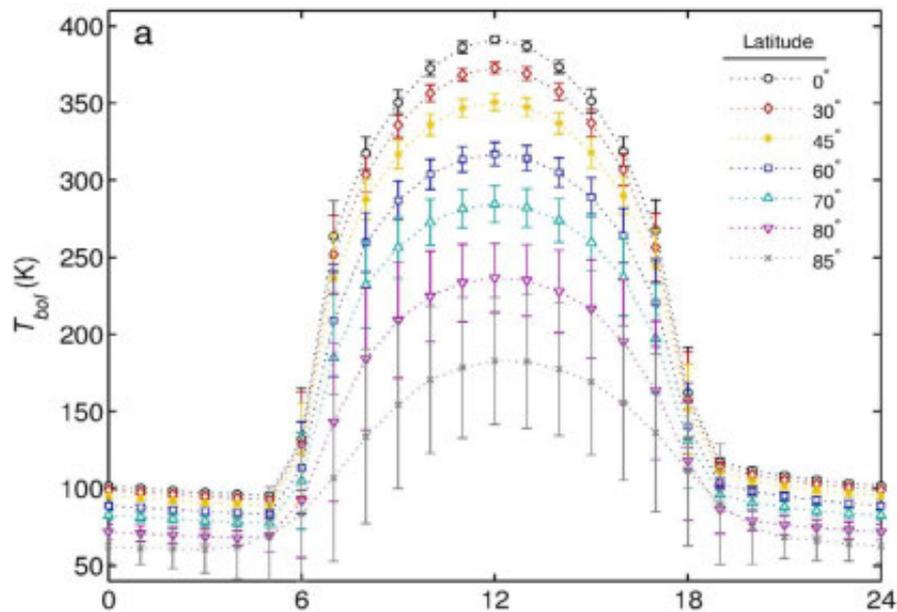


図 2-107 24 時間換算時刻の平均ボロメータ温度

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 2-108 のようになっており、月面で最大の日照率は南極域で 86%であることが分かった。平均的には日照が悪いが、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。またさらに、後述の(4)で検討したように、タワー型の太陽光発電システムを設置すると、日照率がさらに上昇して、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、タワー型太陽光発電システムとすることが適していると考えられる。

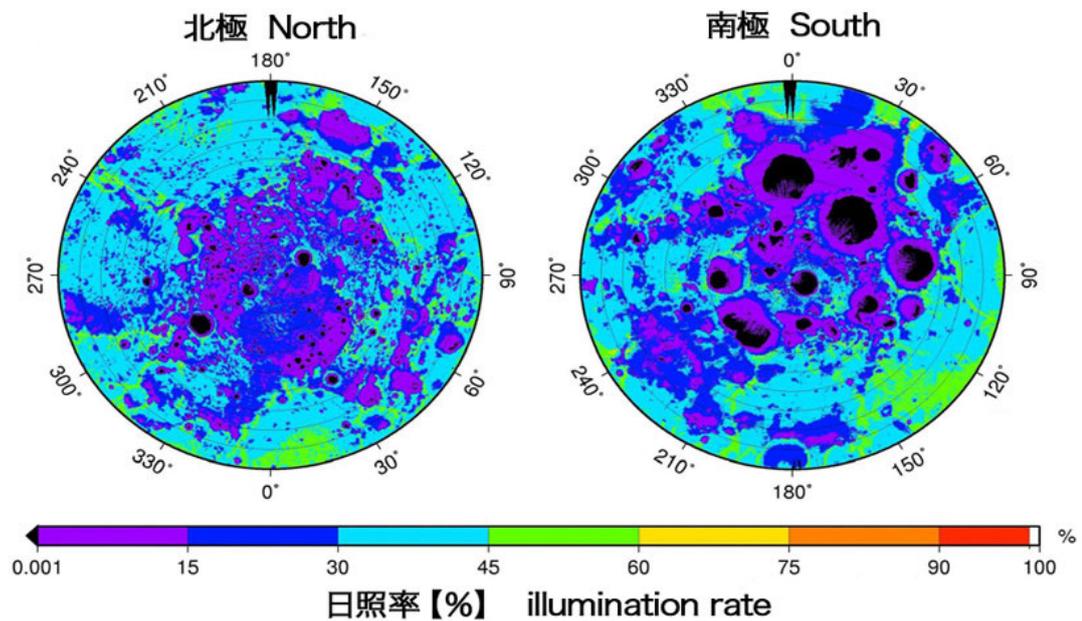


図 2-108 月極域の日照率

出所) https://www.jaxa.jp/article/special/kaguya/seika01_j.html

(3) 既存の検討事例

1) 太陽光発電システム

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。

a. NASA の VSAT (Vertical Solar Array Tower) の開発状況

NASA の LSII (Lunar Surface Innovation Initiative) は、2021 年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、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。

ア) 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 で生成された電力を供給される。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。

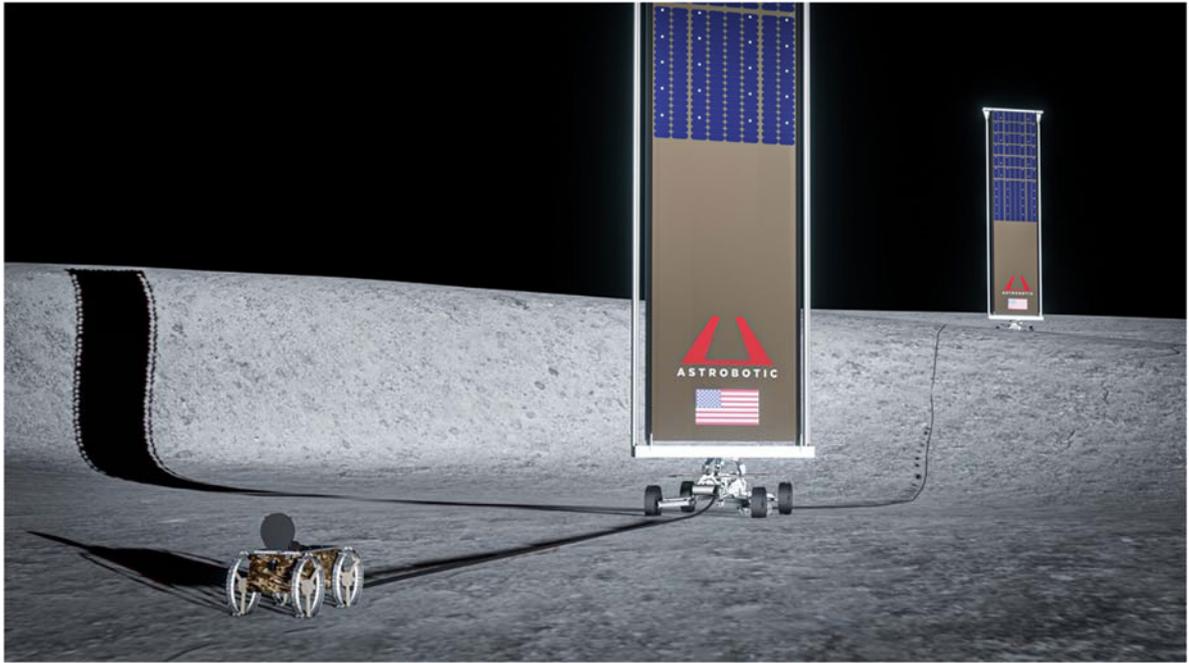


図 2-109 Astrobot 社 VSAT

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

イ) 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。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。

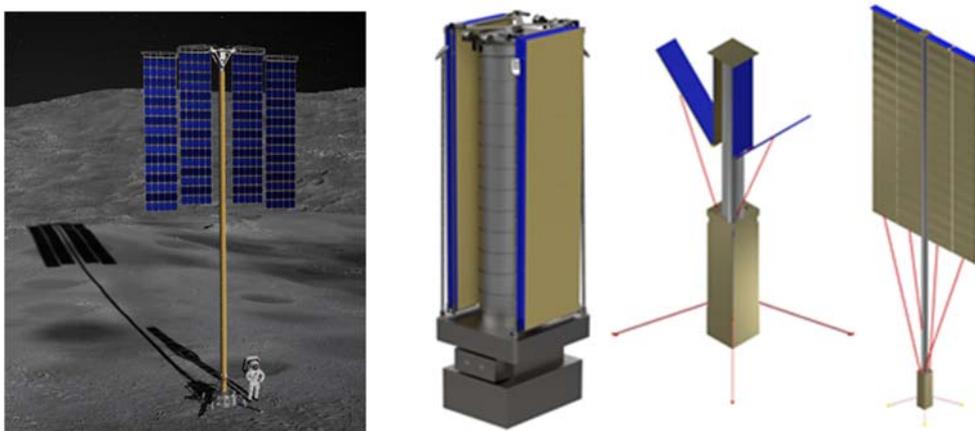


図 2-110 Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)

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/>

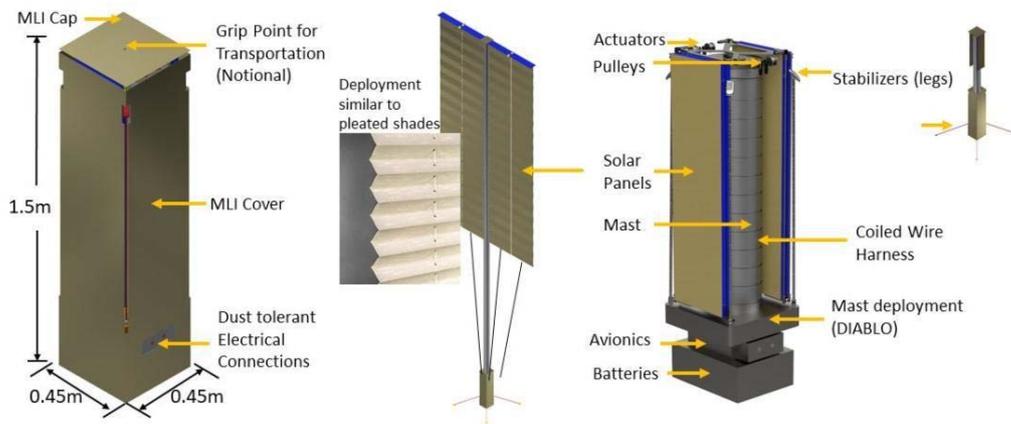


図 2-111 Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)説明図

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

ウ) 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 を開発する。スクールバス 2 台分の長さとなる。

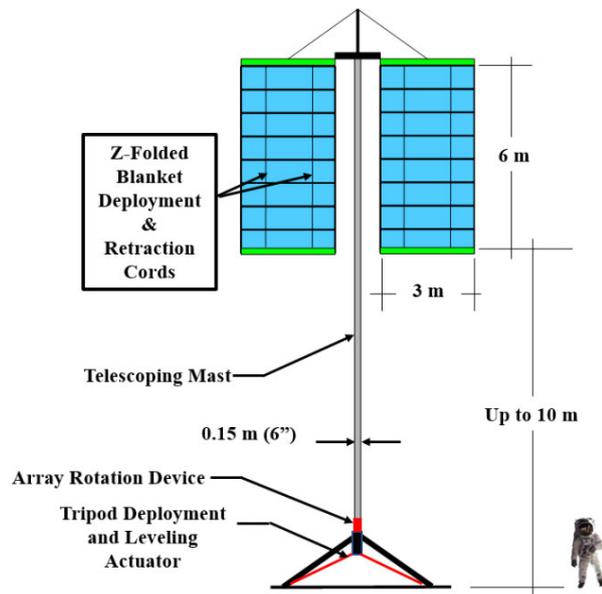


図 2-112 Lockheed Martin 社 VSAT

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

エ) 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っている太陽電池、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/m³と考えられており、全体質量は 120kg と想定されている。

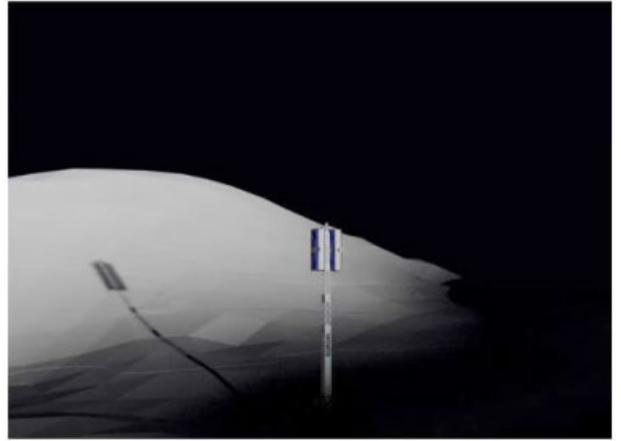


☒ 2-113 10kW の Relocatable Solar Array(RSA)

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



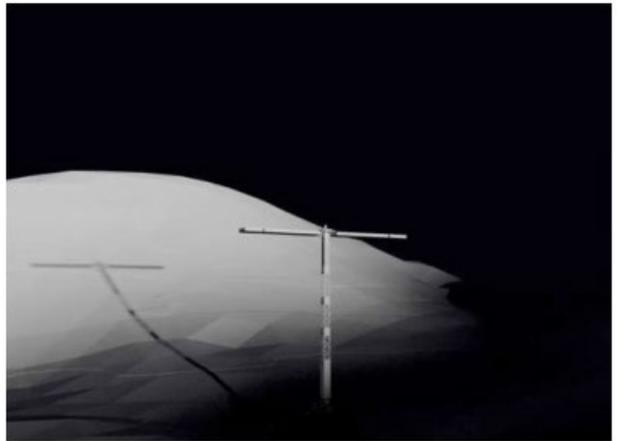
1. - Deploy Legs and Level



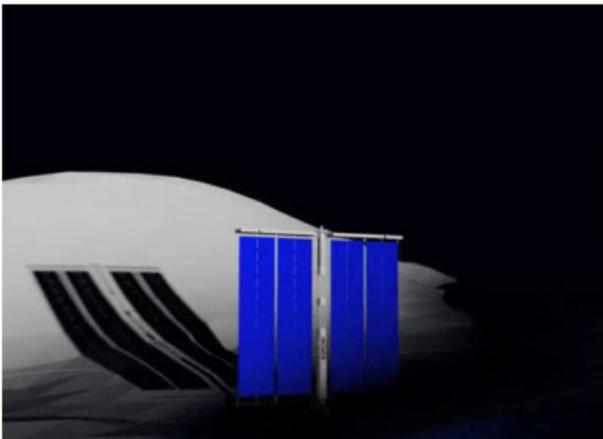
2. - Deploy Telescoping Mast to Minimum Height



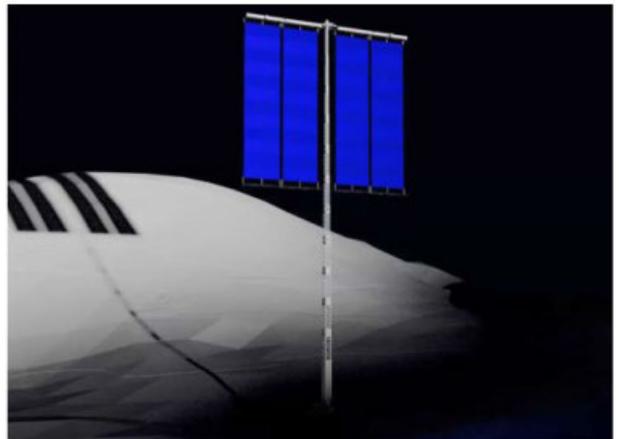
3. - Partially Rotated Blanket Panels



4. - Fully Rotated Blanket Panels



5. - Drop stowed blankets



6. - Deploy Telescoping Mast to Maximum Height

図 2-114 RSAの展開手順

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

設置方法は、図 2-114 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 2-115 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。

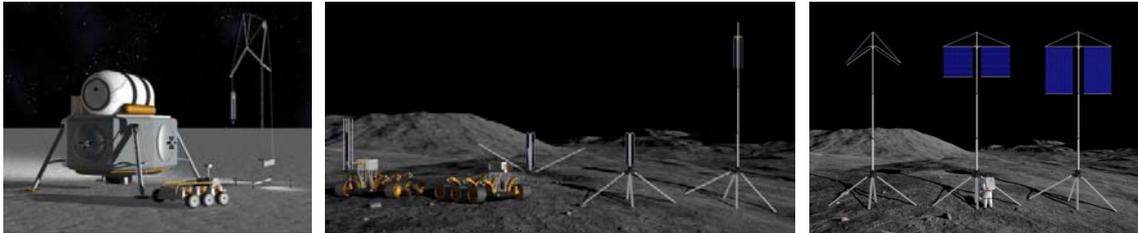


図 2-115 Langley Research Center の VSAT

出所) https://lsic.jhuapl.edu/uploadedDocs/presentations/587-Taylor_LSSI%20Talk.pdf

b. 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」において、高さ 2m(1/6G 下では 12m 相当)のタワーのブレッド・ボード・モデルが製作されている。

本モデルの展開・収納試験を行ったところ、機構が問題なく機能していることが確認されている。



図 2-116 展開・収納機能を持つタワーの BBM(ブレッド・ボード・モデル)

出所)「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」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」

2) 展開機構

地上設置太陽光発電システムは、ロケットフェアリング内に小さく収納し、設置後は多くの太陽光を得られるよう展開機構が必要である。展開機構の方式について、多くの方式が報告されている。国土交通省宇宙開発利用加速化戦略プログラム(スターダストプログラム)の「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」で調査した内容を引用すると、展開方式の整理は以下のように分類される。

- ① インフレーター式
- ② 関節型伸展トラス
 - パンタグラフ式伸展トラス
 - 高剛性伸展トラス
- ③ コイラブル伸展マスト
- ④ テープスプリング式伸展マスト
- ⑤ HELIOS 展開方式
- ⑥ NASA・DLR 方式
- ⑦ 3D プリンティングによる製造
- ⑧ コンクリート構造による製造

有力な展開方式①～④について、概要と主な特徴を図 2-117 に示す。

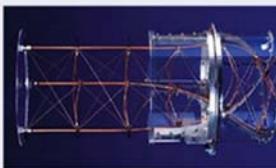
		構造概要	主な特徴
①インフレーター式 伸展ブーム		気密性のあるチューブにガスを注入して膨張・伸展させる。伸展後は金属の塑性変形や樹脂の硬化反応などを利用してガスが抜けても伸展形状を維持できるようになっているものが多い。	気密性チューブを膨らませるだけなので構造は非常に単純である。但し、強度・剛性は劣る。 ガスの注入機構が必要。樹脂硬化タイプは硬化のための加熱機構も必要。
②関節型伸展トラス		縦通材を折り畳むために回転ジョイント(ヒンジ)が各所に設けられた伸展型トラス。断面形状や折り畳む方式に各種のトラス方式がある。縦通材はCFRPまたは金属が用いられることが多い。	強度・剛性に優れるが、部材点数が多く、構造は複雑。コイラブル伸展ブームやテープスプリング式伸展ブームに比べて信頼性は劣る。
・高剛性 伸展マスト		3角柱型の伸展型トラス構造。日本でも大型展開型太陽電池パドルに用いられた実績がある。	アルミ合金製であり、高強度・高剛性であるが、質量が重く、伸展機構もかなり重く複雑な機構である。 小型化には向かない。
・パンタグラフ式 伸展トラス		パンタグラフのように折り畳まれる伸展型トラス構造。	
③コイラブル 伸展ブーム		よくしなる連続した縦通材で組んだ3角柱型の伸展トラス構造。コイル状にねじって収納するため「コイラブル」と呼ばれる。コイル状にねじられた縦通材の復元力で伸展する。縦通材にはGFRPがよく使用される。伸展型太陽電池パドルなどに使用されている。	衛星等の宇宙機の伸展構造物として実績がある。 故障要因となる可動部(ジョイント)が少ない、自己伸展力がある、比較的軽量、など特長がある。 一方で、強度・剛性はリンク式伸展トラスよりも劣る。 伸展速度を一定に制御するための伸展機構が必要。
④テープスプリング式 伸展ブーム		スチールテープ製の巻き尺と原理的には同じ。伸びた状態ではテープはパイプ状になるまった状態で、収納された状態では開いた状態で巻き取られる。	衛星等の宇宙機の伸展構造物として実績がある。 構造は単純で、軽量・小型にできる。機構として信頼性は高い。 一方で強度・剛性は劣る。 伸展速度を一定に制御するための伸展機構が必要。
・金属製 ステムブーム		テープスプリングが金属製のもの。	1970年代から衛星で使用されており、宇宙用として実績は豊富。
・CFRP製 双安定性ブーム		テープスプリングがCFRP製のもの。伸展した状態でも巻き取られた状態でも構造的に安定な形状を形成するため双安定性と呼ばれる。	国内で開発されている。 金属製に比べて軽量にできるのが特長である。 金属製と同じように構造は単純であり、信頼性は高い。 小型・軽量に適する。

図 2-117 伸展構造

出所)「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」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」

(4) 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むけた太陽光発電環境の検討に資する目的で、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した。
- 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)を設定した。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した。
- 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求めた。

1) 太陽光の動き

図 2-118 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° に対して、月の地球の赤道傾斜角は 1.54° 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 2-119 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[※]といった複雑だが影響が小さい項目は無視した。

※ 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。

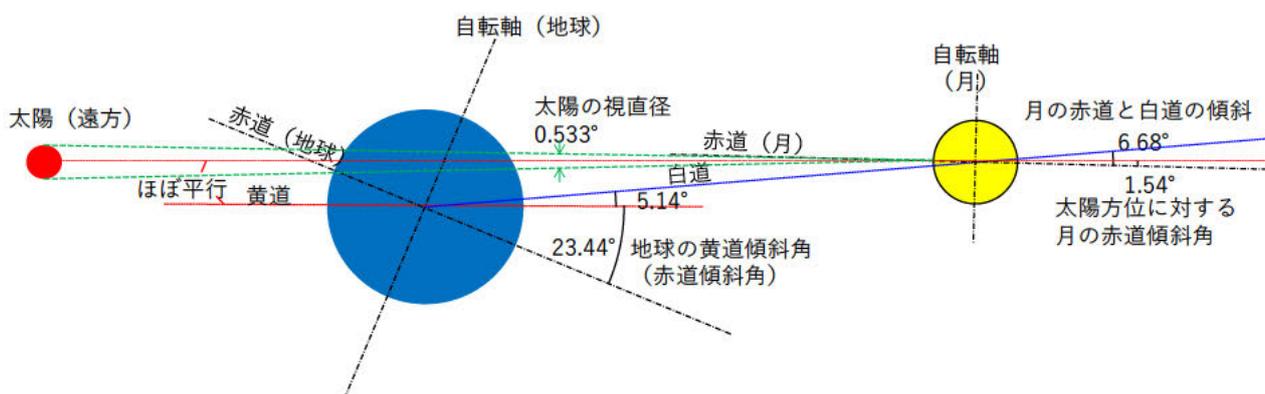


図 2-118 太陽基準での地球と月の自転と公転角度の関係

出所)大林組

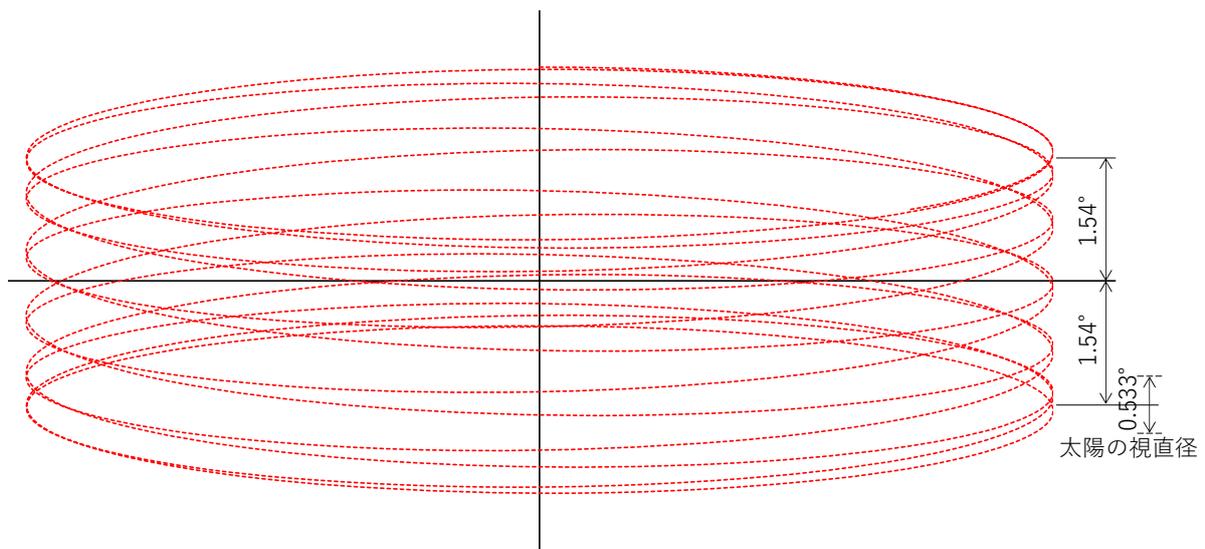


図 2-119 月南極点からみた太陽の軌跡

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検討を行っており、その一環で月南極域の 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あり、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。このデータと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。

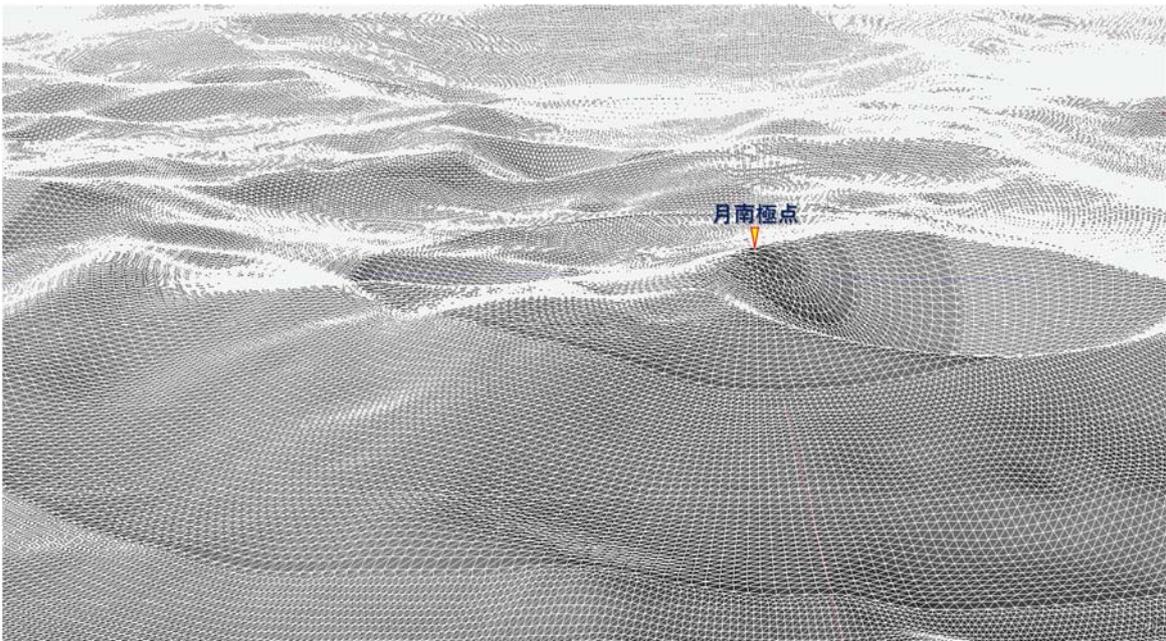


図 2-120 月南極域の 3D 地形データ(国交省スターダスト計画)

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

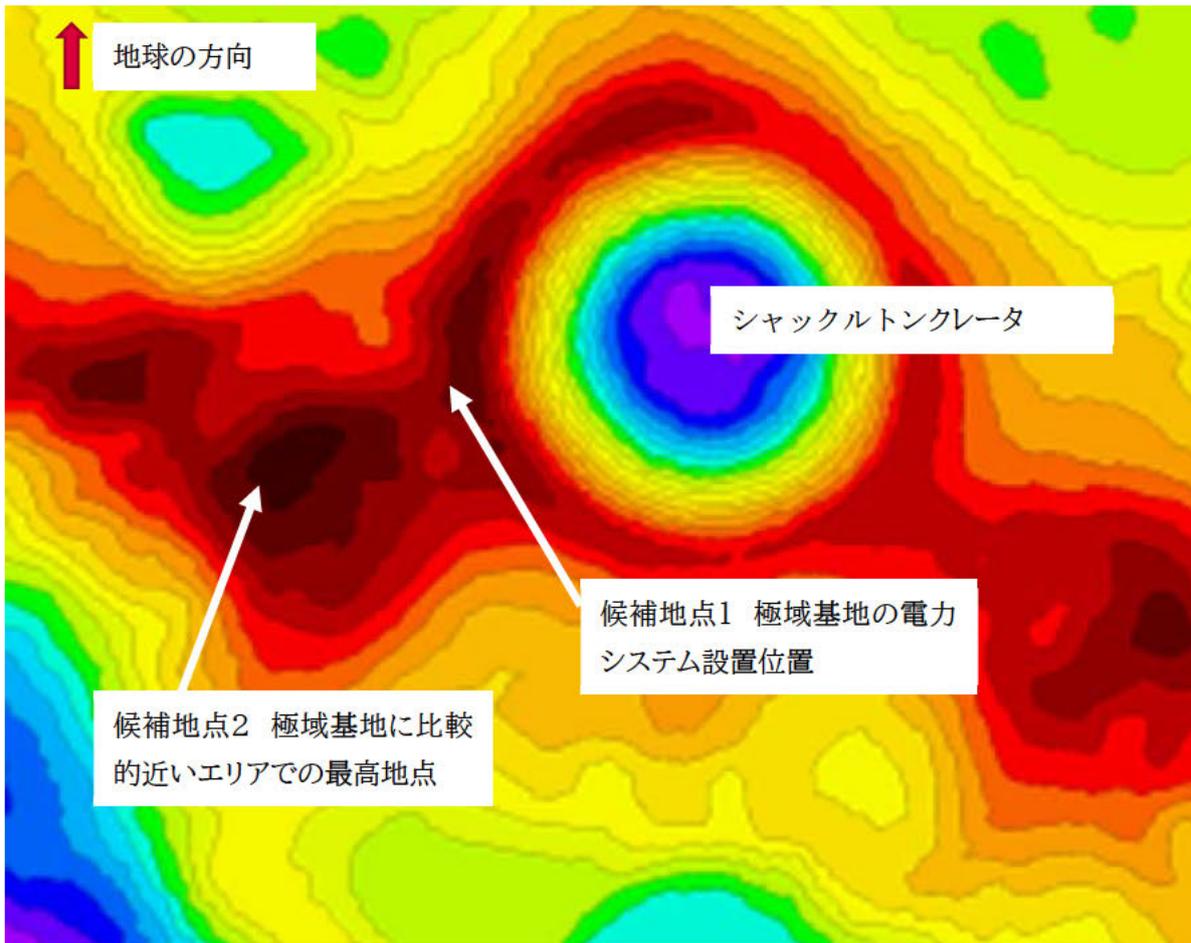


図 2-121 月南極域の多目的タワー設営候補地点(国交省スターダスト計画)

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 2-119 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では 10m、候補地点2では 20m)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 2-122 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 2-123 に示す。

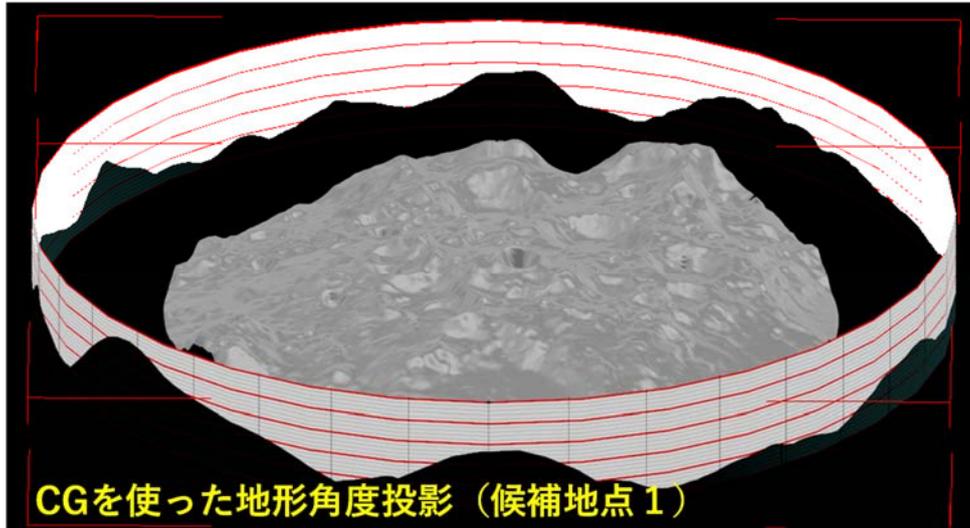


図 2-122 3D 地形データを用いて投影手法で求めた 360°方向の最高地形角度
出所)大林組

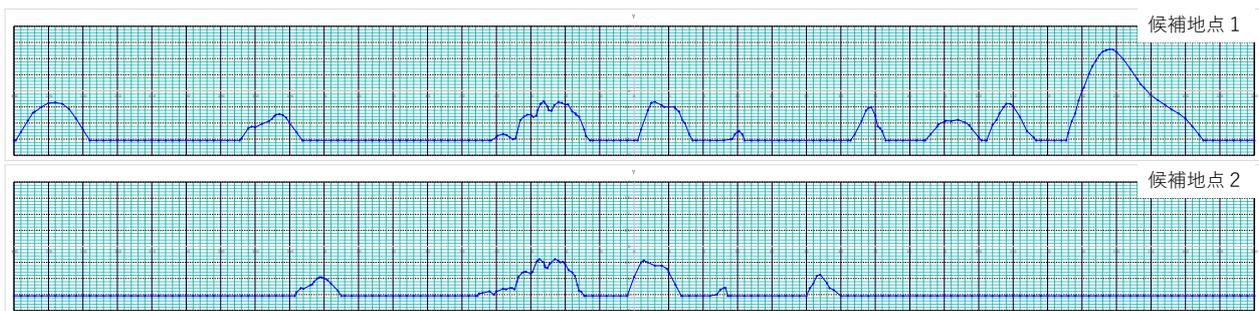


図 2-123 各候補地点における 360°方向の最高地形角度グラフ(-1.54°以下はフラット)
出所)大林組

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 2-123 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 2-124 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 2-124 の結果を基に、月単位での日照時間比を表 2-72、日照時間と影時間の長さ履歴を表 2-73 に示す。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。

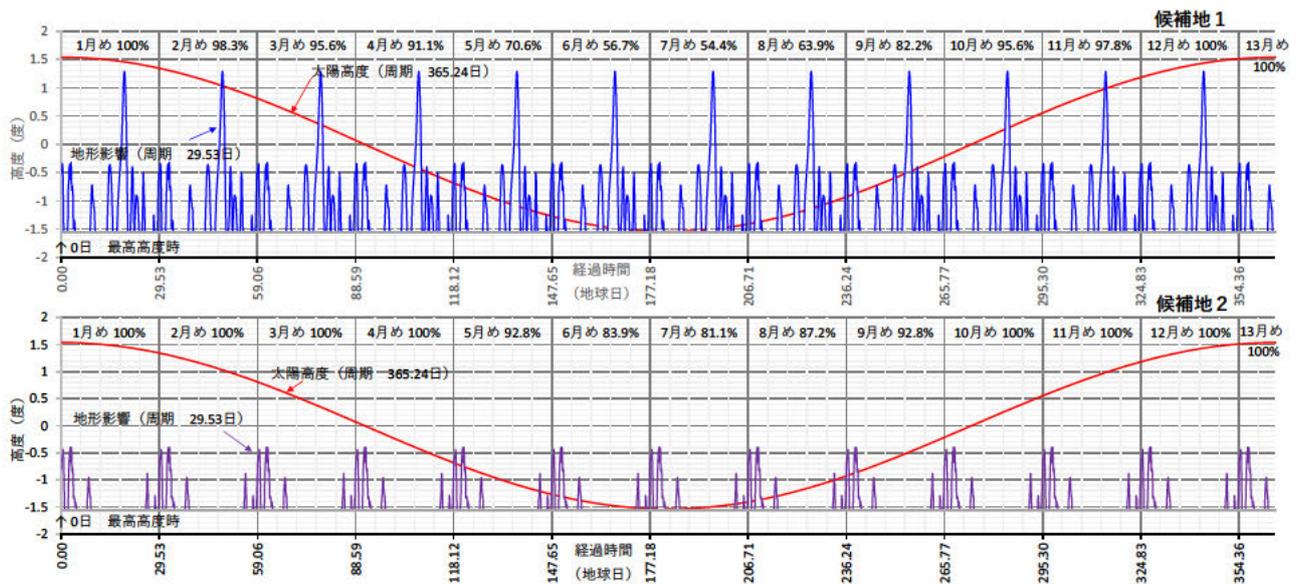


図 2-124 太陽高度と候補地点からみた太陽方位の最高地形高度の比較

出所)大林組

表 2-72 年間を通した日照時間比の変化(1:月単位での日照時間比)

月	日照時間比	
	候補地点1	候補地点2
1	100.0%	100.0%
2	98.3%	100.0%
3	95.6%	100.0%
4	91.1%	100.0%
5	70.6%	92.8%
6	56.7%	83.9%
7	54.4%	81.1%
8	63.9%	87.2%
9	82.2%	92.8%
10	95.6%	100.0%
11	97.8%	100.0%
12	100.0%	100.0%
13	100.0%	100.0%
年平均	84.4%	95.0%

※ ここでの日照時間比は月単位での日照時間/全時間を示す。

※ 1年(365.24日)=Σ1月~12月(各29.53日)+13月(10.88日)とする。

出所)大林組

表 2-73 年間を通した日照時間比の変化
 (2: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
1666.75	11.81	3.94	31.50	5206.41	7.87
689.03	27.56	23.62	19.69	3.94	3.94
669.35	43.31	63.00	7.87	543.35	3.94
236.24	7.87	19.69	31.50	82.68	23.62
47.25	7.87	27.56	55.12	31.50	35.44
3.94	3.94	110.25	31.50	102.37	15.75
267.74	23.62	90.56	39.37	405.55	15.75
51.19	63.00	31.50	78.75	47.25	3.94
27.56	15.75	19.69	23.62	23.62	27.56
19.69	11.81	7.87	23.62	27.56	59.06
35.44	11.81	27.56	15.75	27.56	59.06
98.43	23.62	66.93	3.94	78.75	27.56
35.44	35.44	27.56	27.56	397.67	15.75
129.93	27.56	31.50	35.44	47.25	7.87
90.56	39.37	129.93	19.69	19.69	27.56
35.44	74.81	102.37	31.50	27.56	59.06
19.69	23.62	43.31	66.93	78.75	27.56
7.87	27.56	27.56	15.75	401.61	11.81
23.62	19.69	66.93	7.87	74.81	27.56
63.00	3.94	106.31	19.69	31.50	35.44
23.62	31.50	39.37	23.62	106.31	7.87
27.56	55.12	271.68	3.94	507.92	15.75
110.25	35.44	74.81	47.25	39.37	19.69
86.62	39.37	677.22	27.56		
31.50	78.75	689.03	11.81		
15.75	27.56				

※ ここでの日照時間は図 2-124 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

(5) 発電システム容量・質量の検討

ここでは、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、検討を行う。計算の前提は下記の通り。

- 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、蓄電池がいっぱいの時は、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 2-74 の日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 の値を使用する。(太陽電池：0.1kW/kg、リチウムイオン電池：0.25kWh/kg、燃料電池：0.5kWh/kg)
- 日照時間と影時間の設定は、(5)で検討を行った表 2-73 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。)

表 2-74 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) + リチウムイオン電池(LIB)		太陽電池(SAP) + 燃料電池(FC)		太陽電池(SAP) + 燃料電池(FC) + 原子力エネルギー(RPS)		
		SAP	LIB	SAP	FC	SAP	FC	RPS
電力生成要求	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
電池容量要求	リチウムイオン電池[kWh]	-	750	-	-	-	-	-
	リチウムイオン電池の比質量[kWh/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燃料電池の2パターンについて検討を行う。なお、燃料電池について、図 2-125 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する。

なお、充放電効率はそれぞれ、リチウムイオン電池 95%、燃料電池 50%とする。

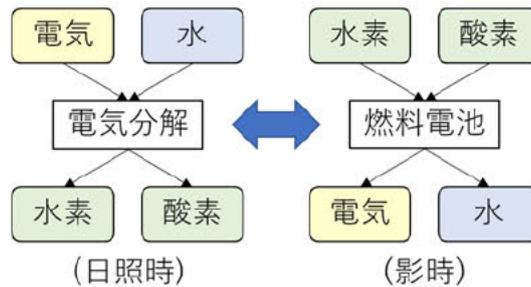


図 2-125 燃料電池運転パターン

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。下の図 2-126 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、日照時は夜間の電力を賄うために送電する 100kW 以上の容量が必要となり、影時に電力が不足しないよう蓄電池に充電を行っている。

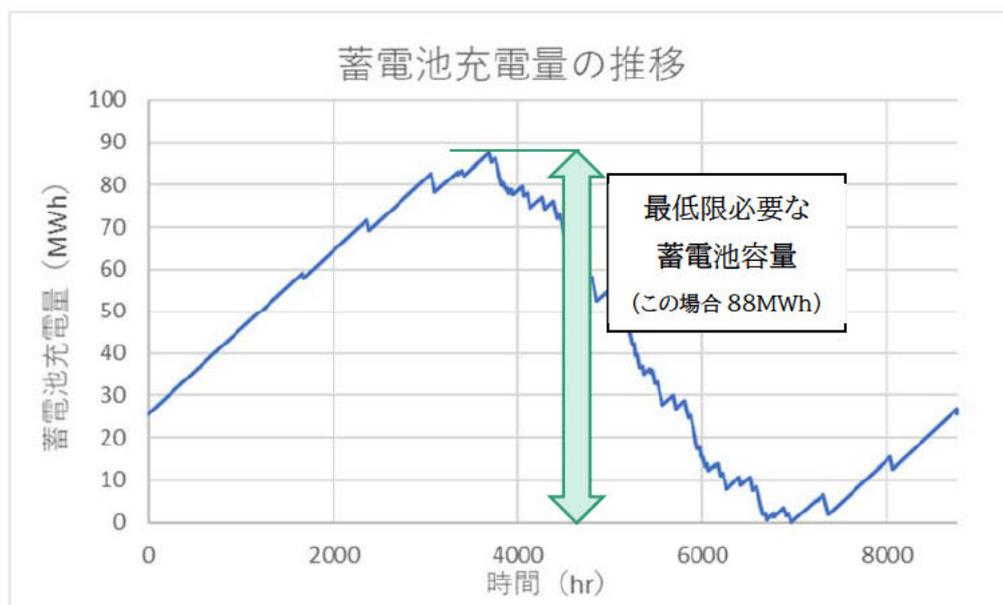


図 2-126 蓄電池容量の推移(候補地点 1、リチウムイオン電池、発電電力最小とした場合)

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 2-127、図 2-128 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。

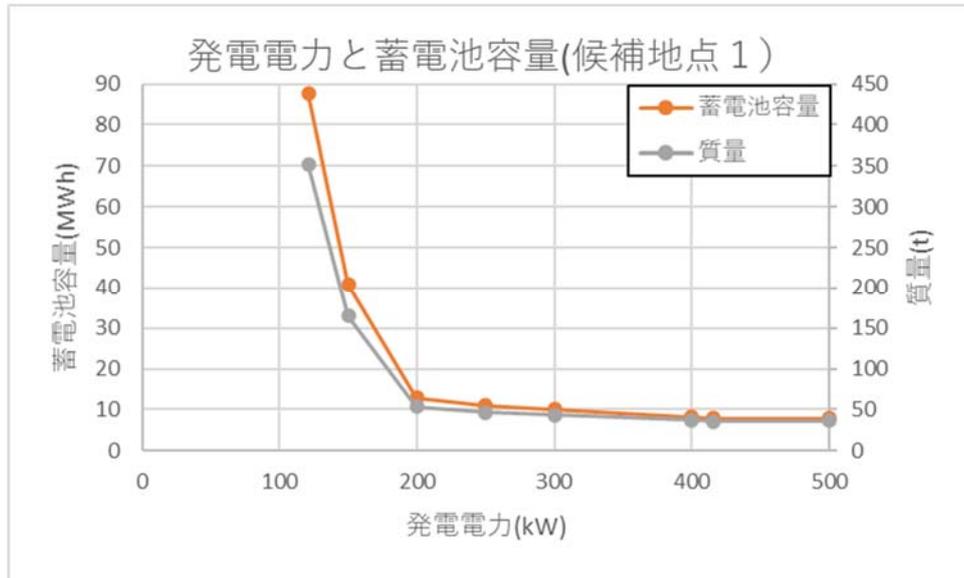


図 2-127 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、リチウムイオン電池)

出所)大林組

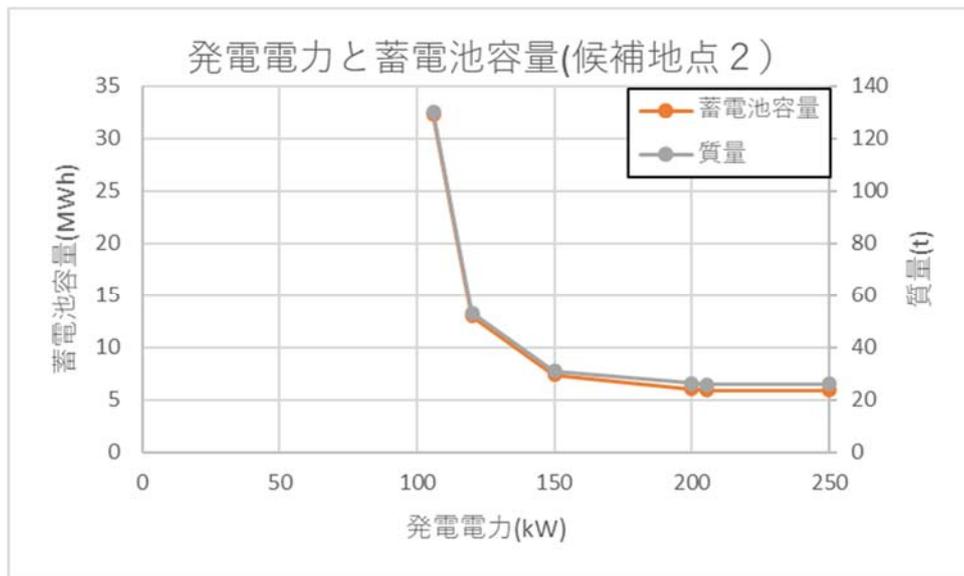


図 2-128 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、リチウムイオン電池)

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 420kW、蓄電池容量 7.3MWh で最も軽い結果となっており、この時、発電システムは 4t、蓄電池は 29t となっている。候補地点2では、発電電力量 210kW(2.1t)、蓄電池容量 5.5MWh(22t)、全体 24t 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. 燃料電池の場合

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。下の図 2-129、図 2-130 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が、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。

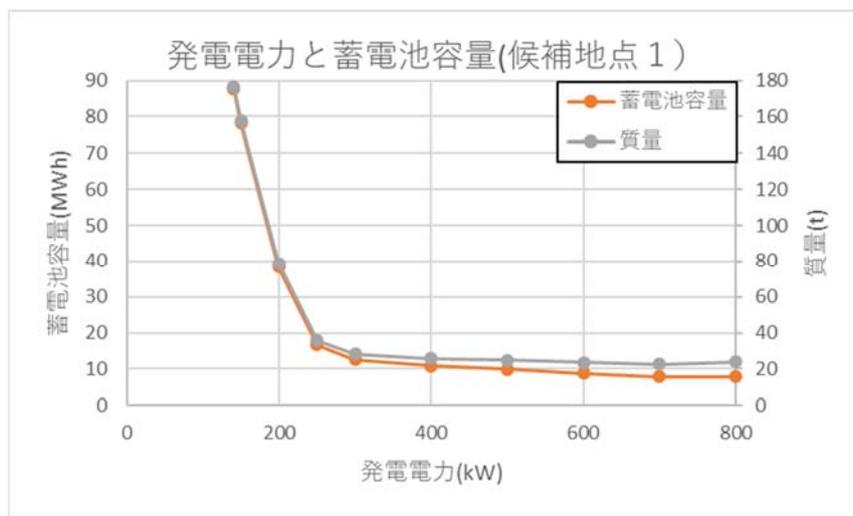


図 2-129 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 1、燃料電池)

出所)大林組

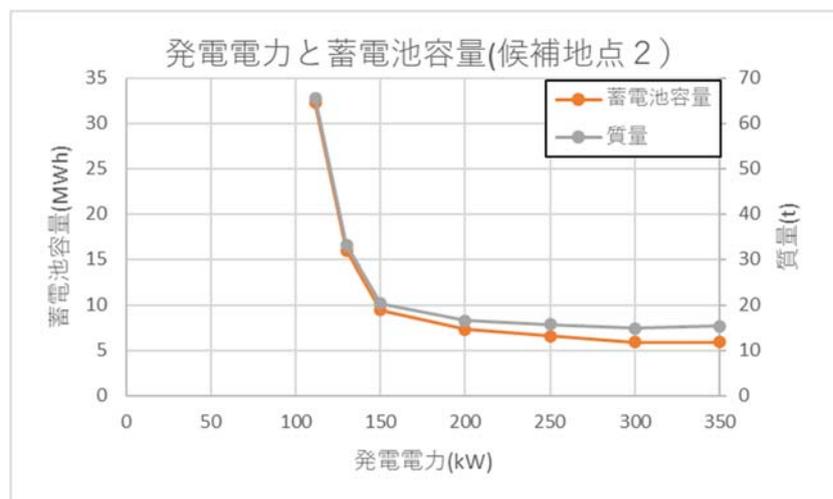


図 2-130 発電電力と蓄電池容量・質量(候補地点 2、燃料電池)

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では、発電電力 700kW、蓄電池容量 7.3MWh、全体質量 22t、候補地点2では、発電電力 300kW、蓄電池容量 5.5MWh、全体質量 14t という結果となった。

2) 質量軽減策

先述の1)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分かる。今回、図 2-131 のように、水素生成システム(掘削～推葉精製)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。

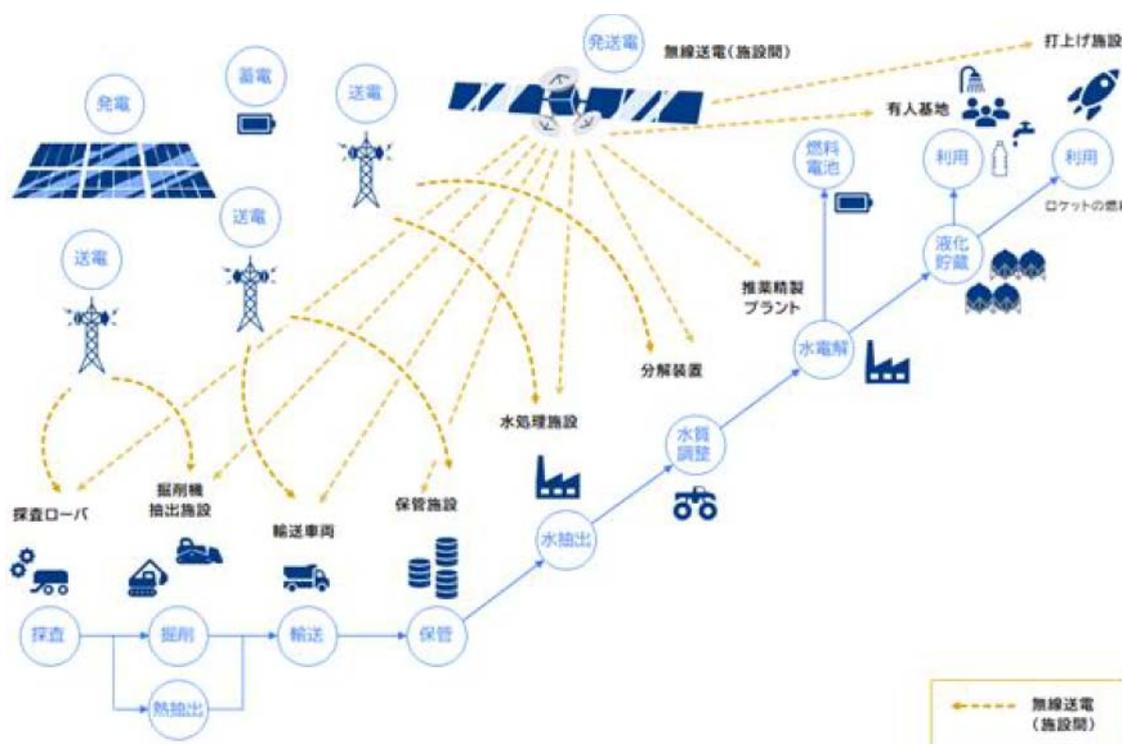


図 2-131 令和 3 年度時点での月面上でのバリューチェーン全体像

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、

- 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。
(候補地点1では、日照時間 7293 時間、影時間 1473 時間より $(7293+1472)/7293 = 120\%$ 、候補地点2では、日照時間 8285 時間、影時間 480 時間より、 $(8285+480)/8285 = 109\%$ 、であるので、時間当たりの水素生成量をそれぞれ 120%、109%と若干増加させる)
- 保温等の電力について、断熱等はきちんと対策されるため、それほど多くの電力は必要にならない

と考えられるが、今回、水素生成に必要な使用電力の1/4の25kWと仮定した。

その結果を図 2-132、図 2-133 に示す。影時も常に水素発生のために一定の電力を供給するよりも全体質量は候補地点1, 候補地点2共に30%程度(約7割減)となった。他のシステムへのインパクトや保温等の電力が不明であるため、一概には言えないが、影時は水素生成を行わず、日照時のみとした方がトータルで軽量化して有利になる可能性があることが分かった。

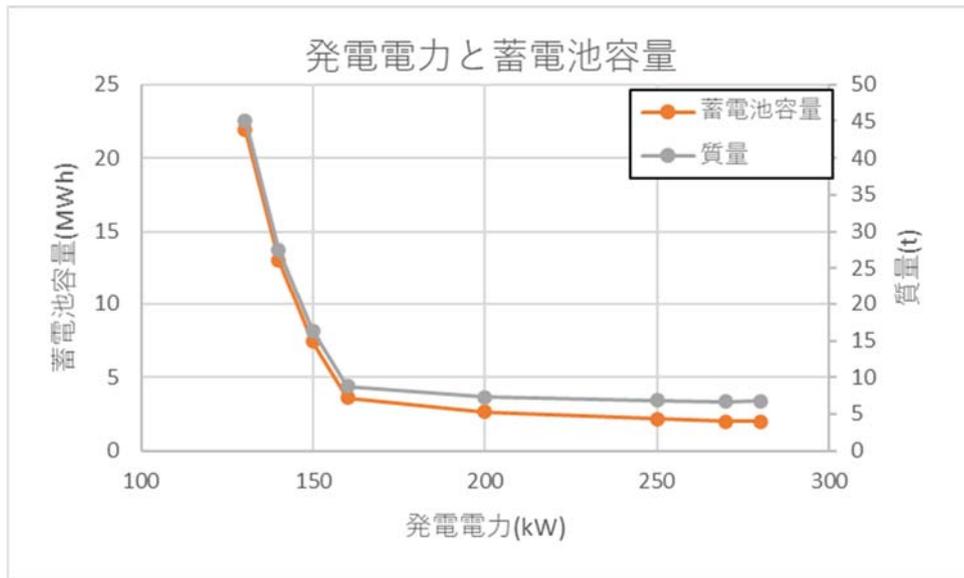


図 2-132 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 1、燃料電池)
出所)大林組

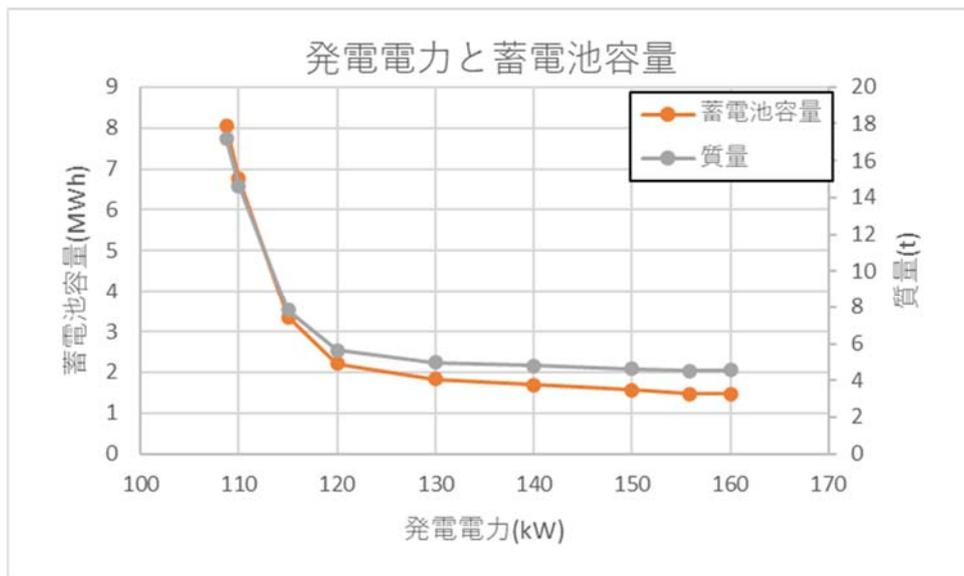


図 2-133 発電電力と蓄電池容量・質量(電力供給パターン変更、候補地点 2、燃料電池)
出所)大林組

3) 原子力の場合の質量の試算

原子力で発電する場合、日照時・影時間問わず常時発電ができ、蓄電池が不要となる。その場合の重量を日本の国際宇宙探査シナリオ案 2021 の数値をベースに試算すると、

$$100\text{kW} \div 0.005\text{kW/kg} = 20\text{t}$$

となる。候補地点 2 のように日照の良い場所よりは必要な質量が増加するが、候補地点1とほぼ同等であることから、

①候補地点1より日照条件の良くないところ

②影時も常時一定電力の供給が必要

の時に、原子力の方が有利になる結果となった。

ただし、特に有人基地への送電の場合、基地からある程度距離を置くこと必要と考えられるため、太陽発電システムよりも送電距離が長くなることが想定される。そのため、送電システムも含めたトレードオフが必要となる。

4) 低緯度地域の場合の質量の試算

参考までに、極域以外の低緯度地域の場所の場合にシステム容量がどうなるかを検討した。昼が約 14.77 日となるので、必要な蓄電池量は 35.4MWh(=100kW×24×14.77)となる。燃料電池の場合、燃料電池だけで約 71t と膨大な質量となることが分かった。影時も常時一定電力の供給が必要な場合は原子力発電がかなり有利となる結果となった。

5) 結果のまとめ

表 2-75 に必要発電電力、蓄電池容量、システム質量のまとめを示す。発電・蓄電システムに限った場合、候補地点2の燃料電池が最も軽量であった。また、昼間のみ水素発生を実施するという送電パターンを変えることで大幅に質量が減少する可能性があることが示せた。また、候補地点 1 よりも日照の悪いところや低緯度地域では、原子力が優位になる可能性があることが分かった。

表 2-75 必要発電電力・蓄電池容量・システム質量

条件		必要発電電力 (kW)	必要蓄電池容量 (MWh)	発電・蓄電システム質量(t)
候補地点1	リチウムイオン電池	420	7.9	36
	燃料電池	700	7.9	23
候補地点2	リチウムイオン電池	210	5.9	26
	燃料電池	300	5.9	15
原子力		100	—	20
低緯度地域	燃料電池	300	35.4	74
電力供給パターン変更 (水素生成施設運転パターン変更し、昼のみ水素発生の場合)	候補地点1	270	2	6.6
	候補地点2	160	1.5	4.5

出所)大林組

(6) 発電タワー仕様(1基当たりの発電電力、質量、高さ、構造)

ここでは、発電タワーに要求される仕様について検討する。NASA の VSAT の要求仕様について、表 2-76 に示す。

表 2-76 NASA の VSAT の要求仕様(2021 年資料)

KPP	Threshold Value	Goal
Stable Vertical Deployment on Uneven Terrain	10 Degree Incline with 5m Mast	15 Degree Incline with 10m Mast
Vertical Extension Mast	5m	10m
Array Retractability	Five Retraction-Redeployments During Mission Operational Life (5 yr)	10 Retraction-Redeployments During Mission Operational Life (10 yr)
Operational Life	5 Years	10 Years
Sun Tracking	Single Axis 360 degree rotation with Sun Tracking	
Array Thermal Environment	System must be capable of surviving and operating in Lunar South Pole thermal environment (-180C° to 175C°) without external systems	
Array Power	10kW BOL (Lunar Surface South Pole 10yr Mission)	
System Specific Volume	45kW/m ³ BOL (Lunar Surface South Pole 5yr Mission)	65kW/m ³ BOL (Lunar Surface South Pole 10yr Mission)
System Specific Power	75W/kg BOL (Lunar Surface South Pole 5yr Mission)	100W/kg BOL (Lunar Surface South Pole 10yr Mission)

出所) https://isic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/846-SP%20Monthly%20Meeting%20-%202021%2005%20May_Presentation%20-%20Chuck%20Taylor.pdf

次に NASA SBIR プログラム(中小企業技術革新研究プログラム)で募集されていた太陽電池アレイの設計ガイドラインを下記に示す。

- 展開面積:初期 140m²(40kW)～最大 210m²(60kW)
- 垂直軸を中心とした 1 軸追尾式
- 最大高さ 10m の延長ブーム
- 整地されていない地盤条件下でも安定する展開型基礎
- 最大傾斜 15°への対応
- 展開・再収納可能な構造(5 回以上)
- 耐環境性(ダスト・放射線・温度)
- 重量比の出力 75W/kg 以上、体積比の出力 20kW/m³
- 安全率 1.5
- 寿命 10 年以上

出所)「National Aeronautics and Space Administration Small Business Innovation Research (SBIR) Phase I Fiscal Year 2022 Solicitation」

また、「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」では、太陽電池タワーの開発ロードマップとして、表 2-77、図 2-134 のように示されている。

表 2-77 電力技術の目標とギャップ

電源	目標	現状
太陽電池タワー	2020年代に数百W級実証 2030年代に100kW級	LUPEXで展開機構込みで150W/kg級を実現できる見込み。 有人と圧ローバ用に展開収納を検討。
液体LIB	2020年頃に200Wh/kg 2025年頃に250Wh/kg	JGM160:180Wh/kg 試作セル:220Wh/kg 実時間試験を完了
固体LIB	2025年頃に150Wh/kg 2030年代に200Wh/kg	試作セル:>50Wh/kg
RFC	2025年頃に500Wh/kg 2030年代に600Wh/kg	250~300Wh/kg 実現の技術的目途を得ている。
RPS	2025年頃に7.5W/kg @100W	概念検討にとどまっている。
FPS	2030年代に20W/kg @40kW	概念検討にとどまっている。
エネルギー伝送	2020年代に数十W級実証 2030年代に数kW級実証	X W級のMLI越しの充電の検討を実施 100W級のレーザー伝送の概念検討を実施

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

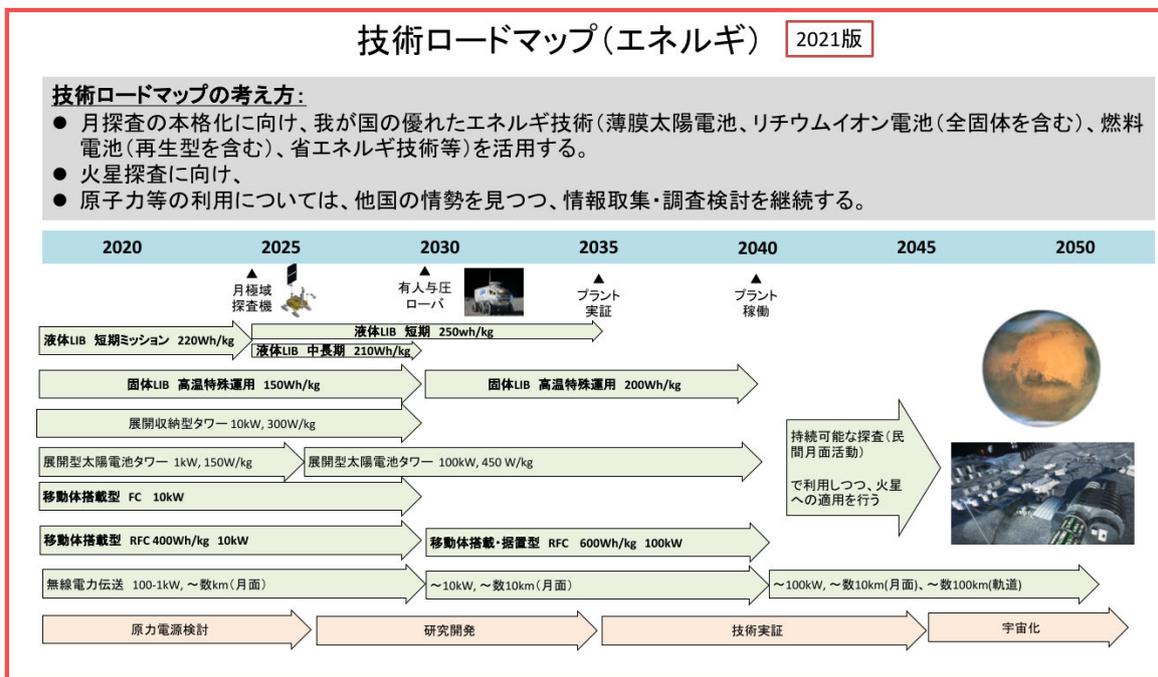


図 2-134 国際宇宙探査シナリオにおけるエネルギーに関する技術ロードマップ

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

これらの資料や本年度の検討から、太陽光発電タワーの仕様として、下記を想定した。ただし、仕様はミッションに必要な電力要求、使用可能なロケット等に依存するため、水素 WG 等からの必要な電力およびそのスケジュールに応じて、検討することが必要である。

表 2-78 太陽発電システム仕様

項目	～2030年	～2035年	～2040年
タイプ	展開型太陽電池タワー		
太陽電池セル	多接合型化合物		
発電電力容量	1～10kW	10～50kW	50～100kW
展開・収納機構	有(自動)	有(自動)	有(自動)
回転機構	無(多面体型)or 有	有(1軸)	有(1軸)
高さ	10数m	10数～30m	10数～数10m
寿命	5年	10年	10年
対応傾斜角度	10°	15°	15°

出所)大林組

(7) 建設方法検討

1) 地盤条件

月面の土壤の地質工学的特性について、アポロ計画のデータや分析等を基に『CROSS-PROGRAM DESIGN SPECIFICATION FOR NATURAL ENVIRONMENTS (DSNE)』でまとめている表を表 2-79 に示す。

ただし、これらは今回対象としている極域から遠く離れた限られた地点のサンプルであり、地球上で用いられるモデル等が月面でも適用できることを前提にしたものであるため、注意が必要である。

表 2-79 レゴリスの特性値

Property	Value	Units	Notes	DSNE Section	Sources
Bulk Density (ρ)	1.58 \pm 0.05: 0-30 cm 1.74 \pm 0.05: 30-60 cm	g cm ⁻³	Inter crater areas	3.4.2.3.1	Carrier et al. 1991
Relative Density (D_R)	74 \pm 3: 0-30 cm 92 \pm 3: 30-60 cm	%	Inter crater areas	3.4.2.3.2	Carrier et al. 1991
Specific Gravity (G) [equivalent to particle density (ρ_p : g/cm ³)]	3.1	Dimensionless or g/cm ³	Based on limited number of bulk samples. This is the recommended value.	3.4.2.3.3	Carrier et al. 1991
Typical highlands particle density ($\rho_{p_highlands}$)	2.75 \pm 0.1	g/cm ³	Highlands or polar regions. Based on limited number of bulk samples.	3.4.2.3.3	Kiefer et al. 2012
Typical mare particle density (ρ_{p_mare})	3.35 \pm 0.1	g/cm ³	Mare regions. Based on limited number of bulk samples.	3.4.2.3.3	Kiefer et al. 2012
Porosity (n)	49 \pm 2: 0-30 cm 44 \pm 2: 30-60 cm	%	Calculated	3.4.2.3.4	Carrier et al. 1991
Void Ratio (e)	0.96 \pm 0.07: 0-30 cm 0.78 \pm 0.07: 30-60 cm	-	-	3.4.2.3.4	Carrier et al. 1991
Permeability (Q)	1.7 x 10 ¹²	m ²	Firing of Surveyor vernier engines on surface	3.4.2.3.5.1	Choate et al. 1968
Diffusivity	7.7 He, 2.3 Ar, 1.8 Kr	cm ² s ⁻¹	Measured on simulant function of gas species	3.4.2.3.5.2	Martin et al. 1973
Friction Angle (ϕ)	30-50	°	-	3.4.2.4.6	Carrier et al. 1991
Cohesion (c)	0.1 - 1	kPa	-	3.4.2.4.7	Carrier et al. 1991
Compression index (C_c)	0.3: loose 0.05: dense 0.01 - 0.11: range	-	Lab measurement on 1.2 to 200 g samples	3.4.2.4.2	Langseth et al. 1973
Recompression index (C_r)	0.003: avg 0 - 0.013: range	-	Lab measurement on 1.2 to 200 g samples	3.4.2.4.2.1	Carrier et al. 1991
Modulus of deformation	15 - 29: Surface to 30 cm 240: below 30 cm	kPa	Estimated from single spacecraft measurements	3.4.2.4.3	Slyuta 2014
Coefficient of lateral stress (K_0)	0.25 - 0.45: normally consolidated 0.3 - 0.5: below a few meters 0.7: recompacted	-	Lab measurement on 1.2 to 200 g samples	3.4.2.4.3.1	Carrier et al. 1991, Slyuta 2014
Modulus of subgrade reactions (k)	8: avg 10.5 - 128: range	kPa cm ⁻¹	Based on in situ observations of boot prints	3.4.2.4.5	Carrier et al. 1991

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

2) 建設方法

掘削・整地を伴う設置には重機や大がかりな工事が必要であるため、掘削・整地無しで太陽光発電装置を設置する方法が適切であると考えられる。極域の地盤の状況にもよるが、沈み込みが発生する可能性があるため、支持脚先端の設置面積を大きくする必要があり、軽量化のためには先端を開閉式の膜材とする方法などが考えられる。また、支持脚の伸縮調整により傾斜地や沈み込みに対応するものとする。さらに、PSC を支持脚の中心部に吊り下げることにより安定化(転倒防止)を図る。図 2-135 に設置イメージを示す。また、図 2-136 に示すように支持脚は折り畳みが可能な構造とし、特に強度が必要な場合は、展開時に立体トラスを構成する機構も考えられる。

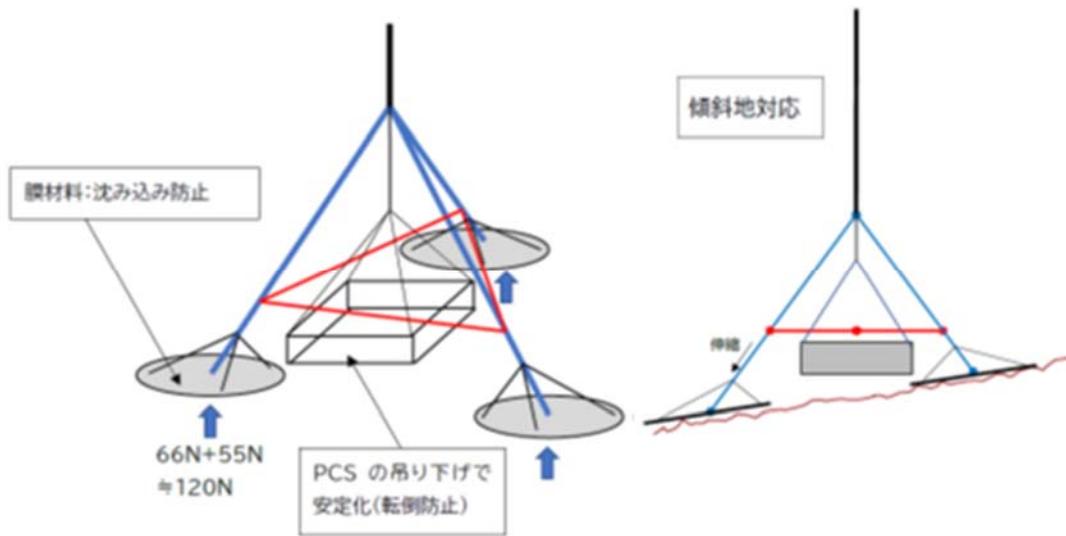


図 2-135 太陽光発電装置の設置方法

出所)大林組

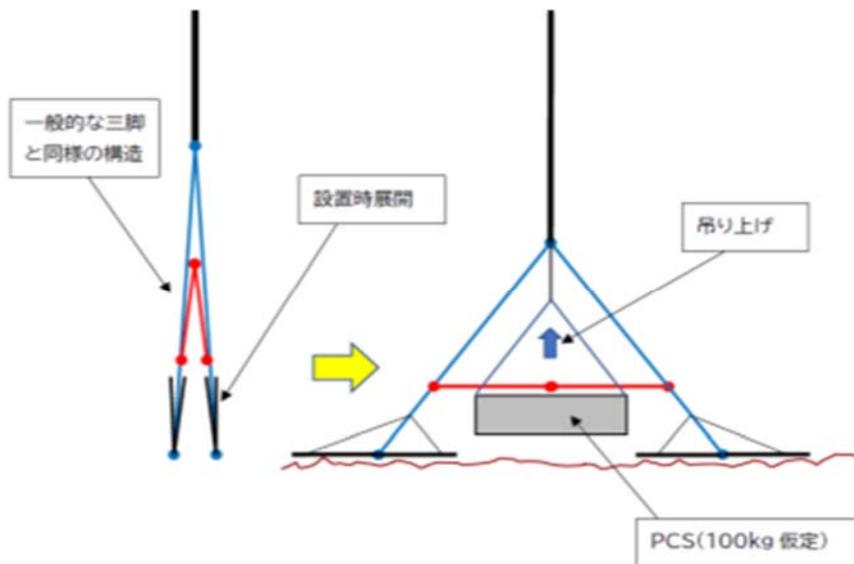


図 2-136 支持脚の展開方法

出所)大林組

3) 配置

令和3年度の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))で検討したようにパネルのサイズに対して、6~8倍間隔を取れば、前後のパネルからの影の影響が少ないことが分かった(図 2-137)。これを例えば図 2-113 の10kWの太陽電池アレイを影の影響が少ない半径の6倍程度離すとすると、間隔は約20m間隔となる。

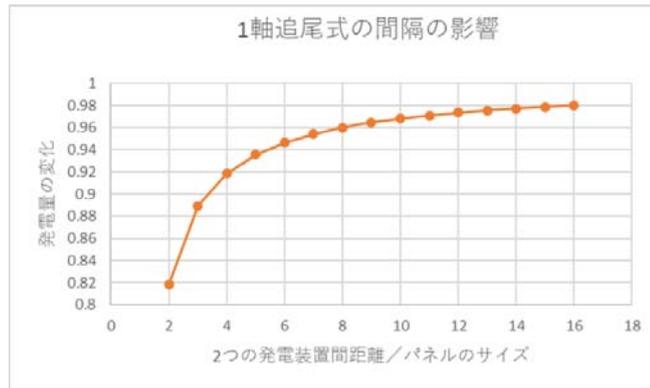


図 2-137 1 軸追尾式の発電量に対する間隔の影響

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

図 2-138 の日本の国際宇宙探査シナリオのように、日当たりの良い場所は細長い形状である。そこで、太陽発電アレイを直線状に並べるとした場合、1km で 50 基程度(約 500kW)並べることが可能である。幅が 20m 程度とするとその倍並べられるので、20m×1km で、約 1MW 程度の発電が可能である。

なお、直線状に並べる場合、真横から日が当たる時に最小時では先頭の 1 基分しか発電しないため短時間であるが蓄電池等の対応が必要である。

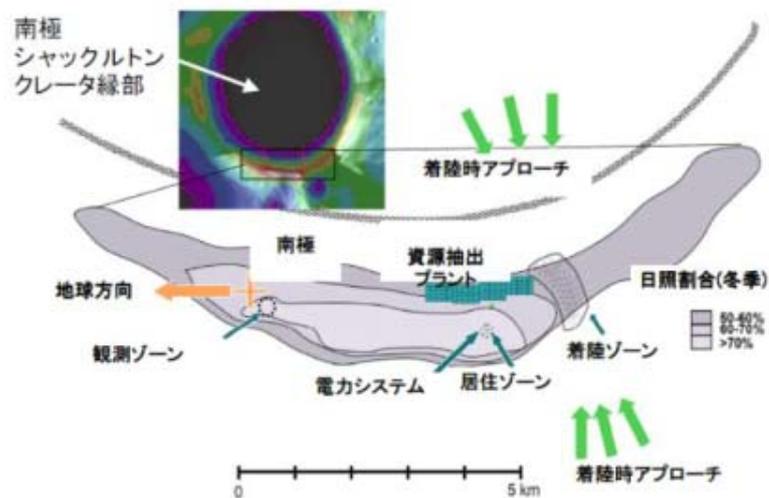


図 2-138 リム上の基地配置(ゾーン方式)の例

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

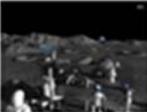
2.2.5 月面上での送電システム

(1) 送電全体

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、「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 2-80 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。

表 2-80 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) 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

2) 想定する月面活動領域

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。この場所の一例として国際宇宙探査シナリオ案2021ではシャックルトンクレータ近傍(図 2-139)が挙げられており、ここに拠点建設する場合の送電システムの検討を行うこととした。

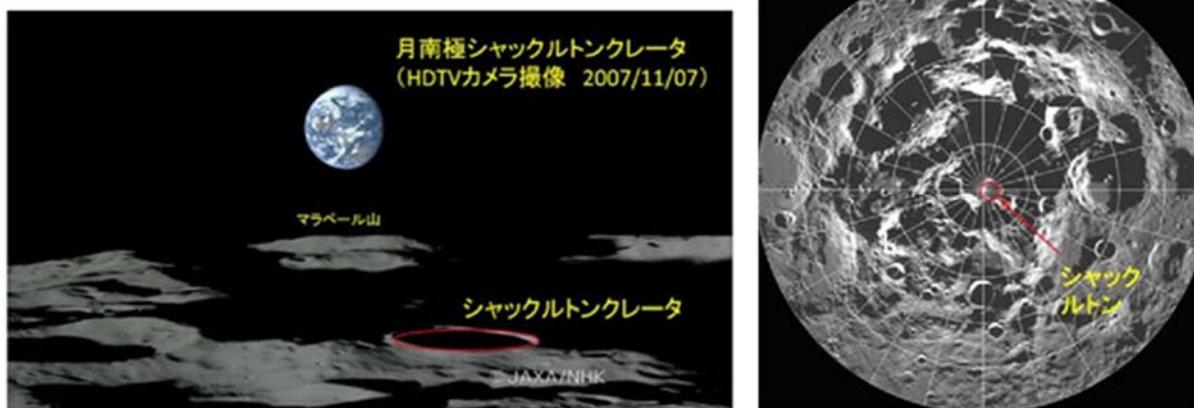


図 2-139 シャクルトンクレータの位置

出所) https://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html

3) シャクルトンクレータ近傍の拠点配置

EZA-2021001 に示されるシャクルトンクレータのリム上の拠点配置(ゾーン方式)の例を図 2-140 に示す。拠点内での送電距離は最大でも 5km 程度、クレータ内部への送電距離はそれよりも長くなると考えられる。当面はこの規模の月面活動が想定されることから、本検討においては 10km 程度を最大の送電距離とした。

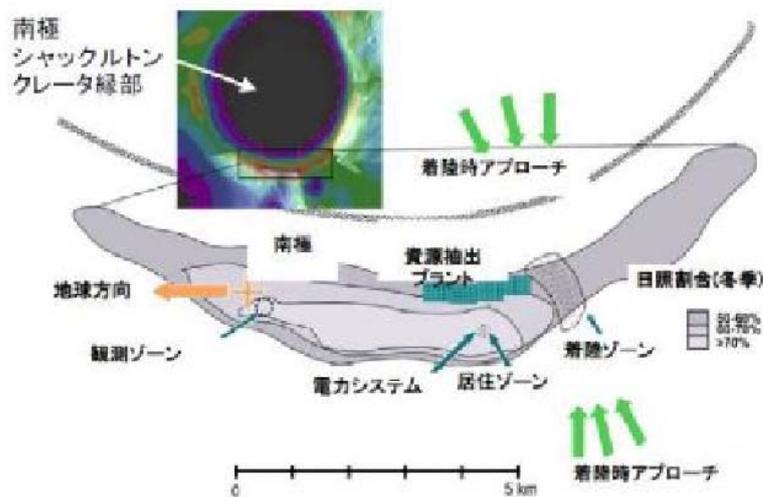


図 2-140 リム上の拠点配置(ゾーン方式)の例

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

4) 送電方式の選定方法

月面上における送電方式としては、主に無線方式と有線方式が考えられる。さらに無線方式はマイクロ波方式とレーザー方式、有線は導体ワイヤーと光ファイバーに分けられる。当面の月面活動に必要な物資や器材は地球から輸送することになると考えられることから、輸送費を抑える観点から質量が極力小さいものを選択する必要がある。また、高真空の宇宙環境下であることから、高電圧の送電に対する制

約や、ある程度の距離を離れた移動体への給電については無線にせざるを得ず、送電先の制約を受ける場合もある。これらの送電方式選定のフロー概要を図 2-141 に示す。なお、送電システム構築に必要な器材は月面上の着陸場所に到着してから必要な場所に輸送することが考えられ、有線のケーブルは送受電間の敷設、無線の送受電装置設置には送電地点と受電地点への器材の輸送が必要となるため、敷設・設置に関する優劣はここでは検討対象外とした。

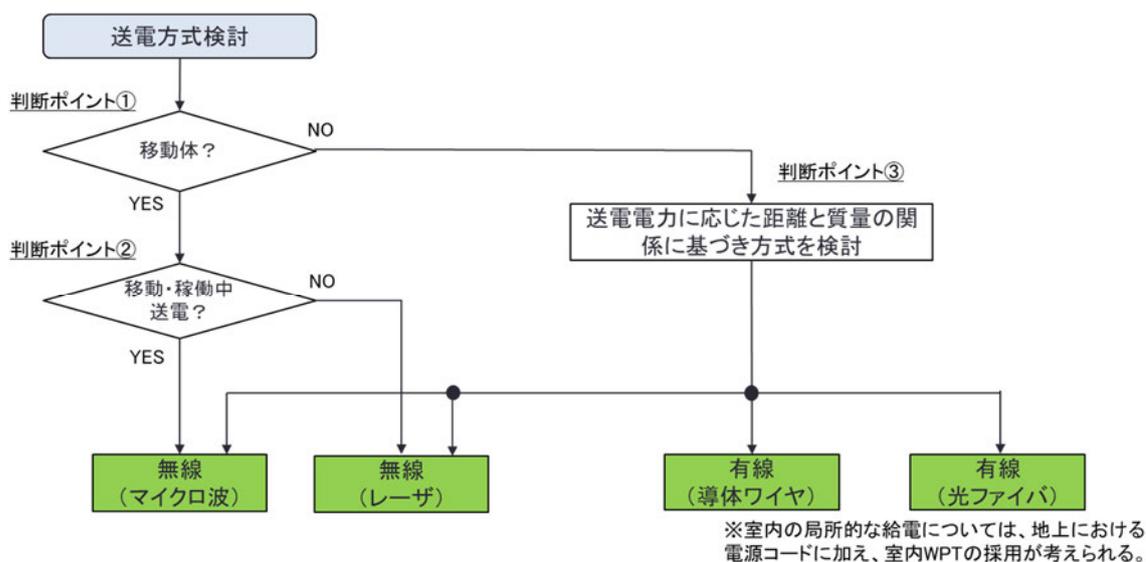


図 2-141 送電方式選定フロー

出所)IHI エアロスペース

－判断ポイント①－

移動体への給電の場合は、無線方式(マイクロ波またはレーザー)を選定する。固定点間の送電は送電電力によってその送電方式を選定する。

－判断ポイント②－

月面でのレゴリスの舞い上がりにおける空間伝搬路の遮蔽や散乱を考慮し、移動中や掘削等のための稼働中への送電はマイクロ波がまず想定されるが、レーザーに対するレゴリスの影響評価が今後必要である。それによつては、レーザー優位になる可能性がある。

－判断ポイント③－

固定点間の送電の場合は、送電距離と質量の関係を用いて、地球からの器材輸送が最小となるように質量が最も小さいものを選定する。

判断ポイント①は移動体であるか否か、移動体が稼働中であるか否かであり、判断がしやすい。一方で、判断ポイント③では各方式の送電距離と質量の関係が必要になる。例として、送電電力 10kW と 100kW の場合の各方式の送電距離と質量の関係の見積を行った。見積の条件を以下に示す。

(a) マイクロ波

公開されている宇宙太陽光発電システム(SSPS)関連の資料を基に概算した。高周波化することによってサイズを小さくすることが可能と考えられるが、ここでは地上での技術レベルを考慮して、ISM 帯のうち 24GHz 帯を使用する前提で検討を行った。空間の送電効率(ビーム収集効率)が 90%以上となるアンテナサイズとし、送電部および受電部の効率は将来の技術レベルを想定して送電系 65%、受電系 80%とし、且つ一定とした。

(b) レーザ

送光系はファイバーレーザー地上既存品ベースとし、宇宙への転用やビーム制御系のマージンとして質量 2 倍とした。受光系は冷却装置が必要となるものの、基本的には特定波長に感度を持った太陽電池であり、送光系よりは簡素で軽量と考えられるため、送光系質量の 1/2 とした。ここではビーム広がりはなく、放射したレーザーはすべて受光素子に入力されるものとした。また、送光系は励起源の半導体レーザーとファイバーの効率から 40%とした。受光系の PV セルの報告例 40~60%を参考として 50%とした。ここでは 10kW を 1 セットとし、大電力化にはこれを束ねることとした。

(c) 有線(光ファイバー)

光ファイバーは地上既存品をベースとし、ケーブルの許容電力を考慮した。ファイバーの送光系は上記(b)のレーザー送光系のファイバー出力に直結とし、質量はレーザー送光系の 1/2 とした。光ファイバーの質量は地上既存品を参考とした。また、送光系と受光系の効率は上記(b)のレーザーと同じとした。ここでは 10kW を 1 セットとし、大電力化にはこれを束ねることとした。

(d) 有線(導体)

有線(導体)は、地上既存品をベースとした。ここでは AWG#00 を使用する前提とし、ケーブルの電流のダイレーティング²¹を考慮した。また、入出力の電圧制御は含めず、必要な直流電圧が供給されるものとした。負荷供給電圧は ISS を参考に 120V とし、入力電圧は 400V 以下となるようにした。

図 2-142 に 10kW 送電時、図 2-143 には 100kW 送電時の送電距離と質量の関係を示す。また、図 2-144 には送電距離と送電効率(送電システム入力電力に対する出力電力(負荷供給電力)の比)を示す。

²¹ EEE-INST-002 “Instructions for EEE Parts Selection, Screening, Qualification and Derating”
Section W1

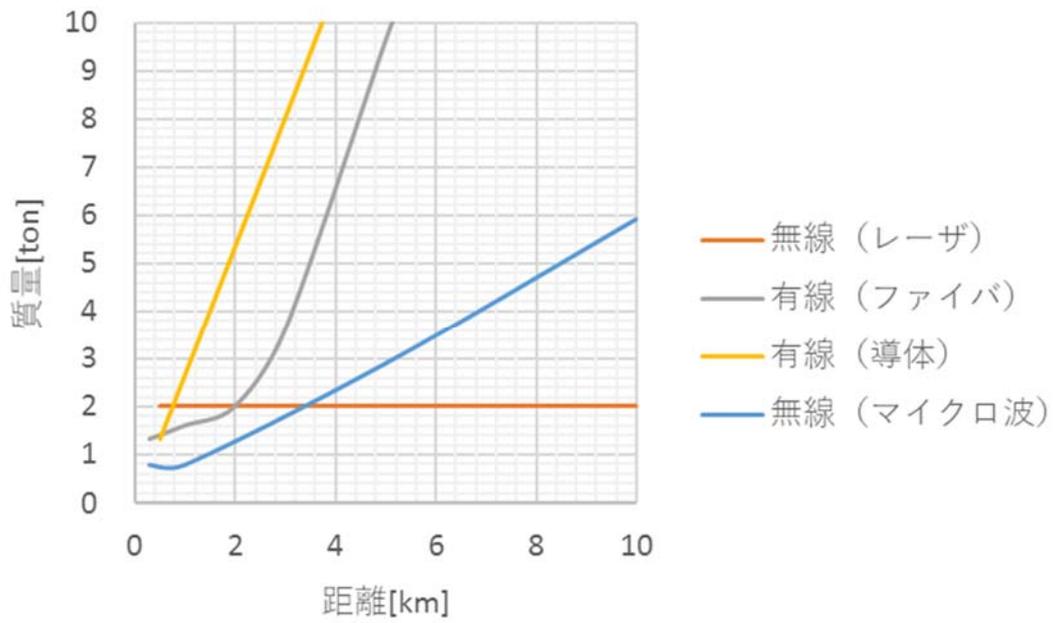


図 2-142 10kW 送電時の送電距離と質量の関係

出所)IHI エアロスペース

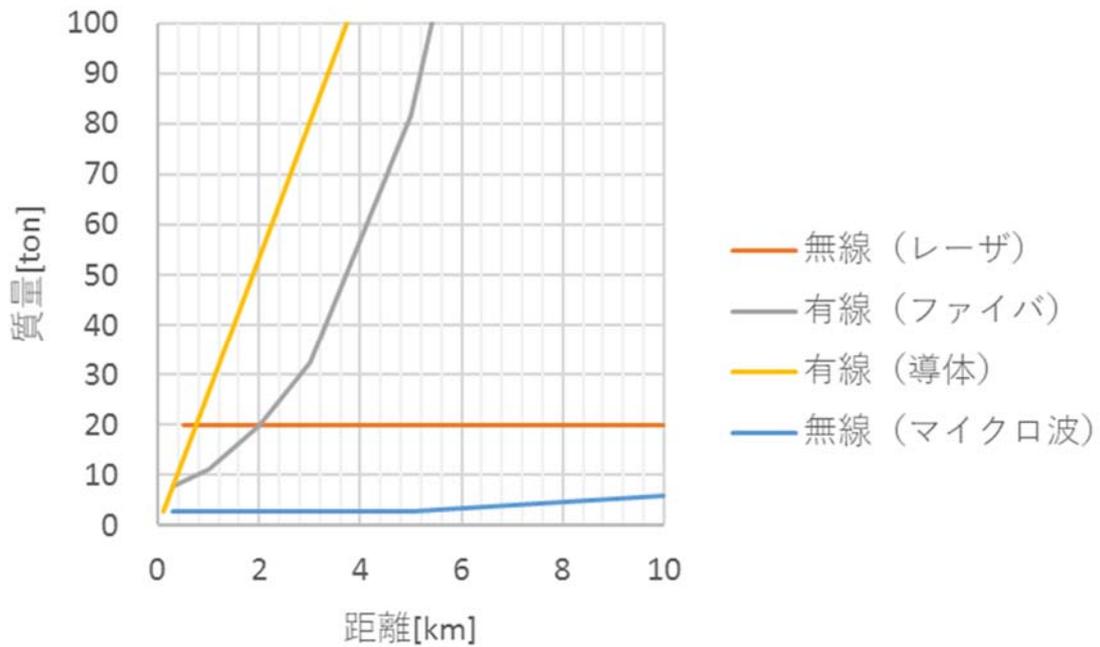


図 2-143 100kW 送電時の送電距離と質量の関係

出所)IHI エアロスペース

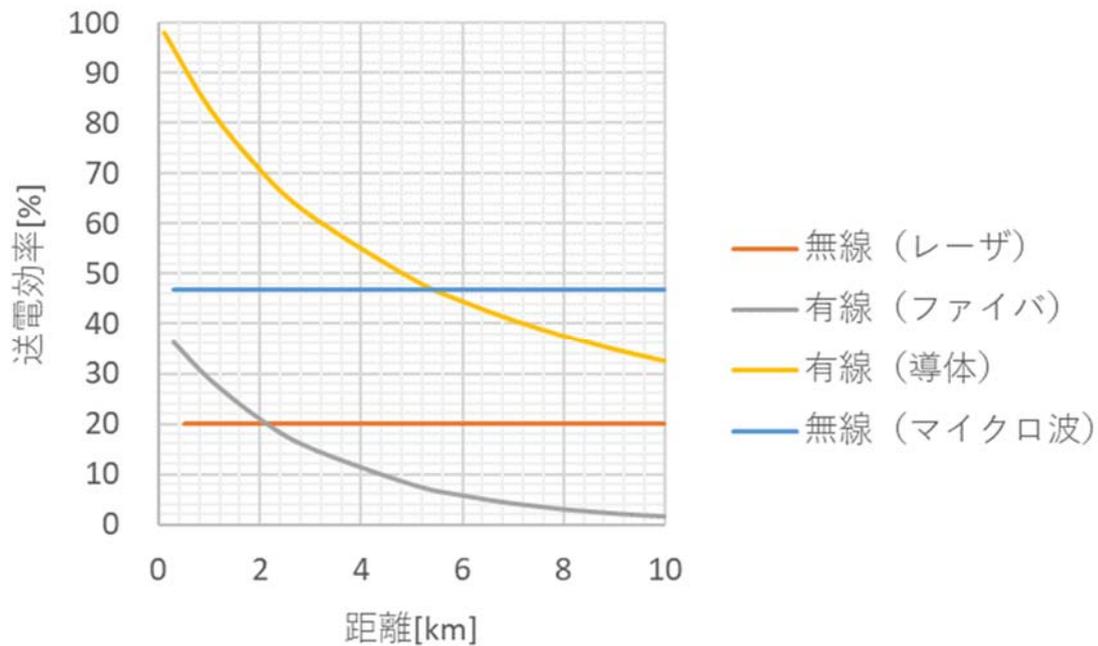


図 2-144 送電距離と送電効率の関係

出所) IHI エアロスペース

図 2-142 及び図 2-143 から、各方式は以下の特徴を有する。

- マイクロ波は、一定の空間伝送効率を得るためには送電電力に関わらず一定の規模(アンテナサイズ)が必要となる。一方で、送電電力を挙げてもシステム規模に対して支配的なアンテナサイズへの影響は小さい。
- レーザは、照射エリアの広がり小さく、送電距離によって質量は変わらないが、高出力化には複数レーザを束ねる必要があり、電力に比例して質量は増加する。
- 有線(導体)および有線(光ファイバー)は、距離の増加に伴って質量は増加する。また、高出力化には導体断面の増加(本数の増加)やファイバーを束ねる必要があり、電力に比例して質量は増加する。

図 2-144 の送電効率も踏まえると、数百 m 程度までの送電では有線(導体)が優位になり、送電電力の増加や送電距離が延びるとシステム規模への影響が小さいマイクロ波方式が優位となると考えられる。しかし、送電効率が低い場合には、発電電力の増加や蓄電能力の向上が必要となり、発電／蓄電システムから送電システムまでトータルで質量や効率を考えた時の最適化が今後必要となる。

5) ケーススタディ(水素生成に必要な電力を供給するための送電システム)

前述のように、発電／蓄電システムも含めた電力システム全体での最適化が必要ではあるものの、ここでは一旦、月面上での送電システムのみを考えた場合のケーススタディを行った。対象は、水素 WG から提示された水素生成に必要な電力を供給するための送電システムとした。また、併せて図 2-140 に示される居住ゾーンや観測ゾーン、発着ゾーンへの送電方式も検討した。

検討においては、居住ゾーンに必要な電力は、国際宇宙探査シナリオ案2021の有人ローバの走行時以外の消費電力を参考に 3kW とした。観測ゾーンには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。発着ゾーンについては、水素関連電力以外では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 の消費電力を想定した。これらに対して、送電距離と質量の関係を踏まえてそれぞれのゾーン間の送電方式を検討した結果をまとめたものを図 2-145 に示す。また、それぞれの詳細を表 2-81 及び表 2-82 に示す。

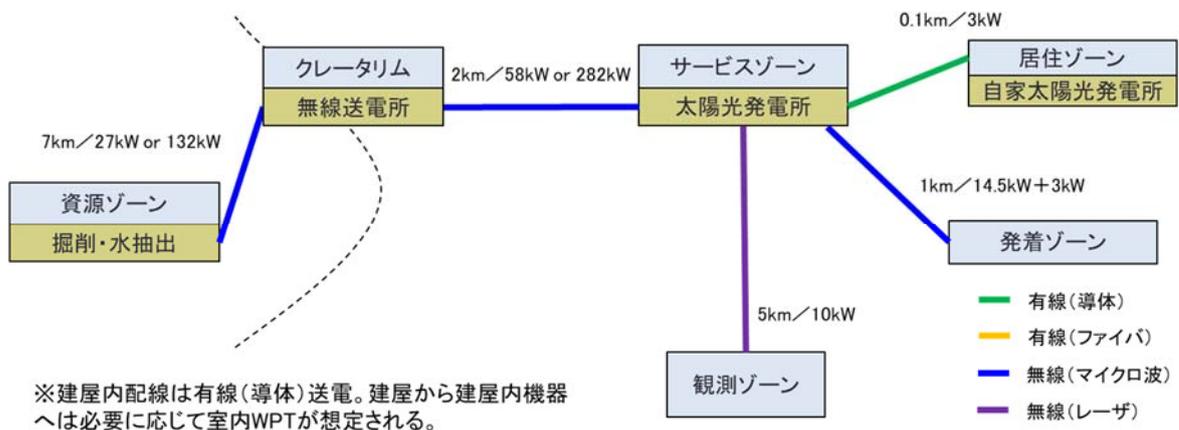


図 2-145 月面拠点の送電システム(案)

出所)IHI エアロスペース

表 2-81 送電方式検討結果(水抽出プロセス①(掘削+PSR 内部で水抽出)の場合)

対象	送電場所	送電距離	負荷供給電力	送電効率	送電元必要電力	送電方式(案) ／質量
掘削/水抽出	サービスゾーン ⇒クレータ内部への無線送電装置(中継点)	2km	58kW (下記PSR内部への送電)	47%	123kW	無線(マイクロ波) ／4 ton
	クレータ内部への無線送電装置(中継点) ⇒PSR内部	7km	27kW (25kW(掘削)+2kW(水抽出))	47%	58kW	無線(マイクロ波) ／6 ton
純水製造	サービスゾーン内	0.5km	0.5kW	82%	0.6kW	有線(導体) ／0.1 ton
水電解	サービスゾーン内	0.5km	53.7kW		115kW	無線(マイクロ波) ／2 ton
高圧化/液化	サービスゾーン ⇒発着ゾーン	1km	14.5kW (4.5kW(高圧化)+10kW(液化))	47%	31kW	無線(マイクロ波) ／0.8 ton

出所)IHI エアロスペース

表 2-82 送電方式検討結果(水抽出プロセス②(サーマルマイニングによる水抽出)の場合)

対象	送電場所	送電距離	負荷供給電力	送電効率	送電元必要電力	送電方式(案) ／質量
サーマルマイニング(リム部)	サービスゾーン ⇒リム部	2km	87.5kW	47%	186kW	無線(マイクロ波) ／4 ton
サーマルマイニング(PSR内部)	サービスゾーン ⇒クレータ内部への無線送電装置(中継点)	2km	186kW	47%	396kW	無線(マイクロ波) ／6 ton
	クレータ内部への無線送電装置 ⇒PSR内部	7km	87.5kW	47%	(上記に含む)	無線(マイクロ波) ／6 ton
純水製造	水抽出プロセス①と同じ					
水電解						
高圧化/液化						

出所)IHI エアロスペース

(2) マイクロ波

1) 浮遊レゴリスやダストの構造物への付着回避策の検討

月面では、夜明け時の昼夜境界部にて月面を覆う砂のようなレゴリスやダストが、高く舞い上がる現象が確認されている。これらがレーザ送電用の鏡面やレンズは元より、マイクロ波送受電のアンテナ面に付着すると、送電効率への影響のみならず放熱の為に構造物の表面放射率の変化を引き起こす可能性がある。よって、浮遊高さの推定とレゴリスやダストの付着回避策は、マイクロ波送受電システムだけでなく、レーザによる送受電システムを含む他の全てのダストクリティカルな建造物に対して適用されなければならないと認識する。

米国では、アポロ計画の中で、レゴリスやダストの浮遊現象の解明を目指した実測が月面にて行われており、その結果を用いた様々な解析や実験が行われている。本項では、これらの文献を調査して現段階で考えられる対策を提案する。

a. レゴリス、ダストの浮遊高さ

図 2-146 は、Apolo17 の LEAM(Lunar Ejecta And Meteorites deployed in1972)によって実測された 3 時間ごとのレゴリスやダストの浮遊粒子数である。昼夜境界においてレゴリス等の浮遊が発生し、日の出の前後数時間にわたって浮遊が発生することが確認されている。また、これによって、浮遊粒子が昼夜境界から長い断層軌道を持って昼夜境界とともに伝搬するという知見を得ている。図 2-147 は、月面上のプラズマシース(鞘)領域での電界内で電荷を帯びたダストが浮遊する高さを、ダストの粒子サイズの関数として算出した例である。図中、実線は高さ方向に常時安定して浮遊する上方の層におけるダスト高さであり、500m レベルに達する。点線はダスト同士が相互作用によって動き回る不安定な表層付近のダスト高さであり、1m 程度である。太陽光の昼夜境界におけるダストや、レゴリスの浮遊高さを考える上で、重要な知見を与える図である。

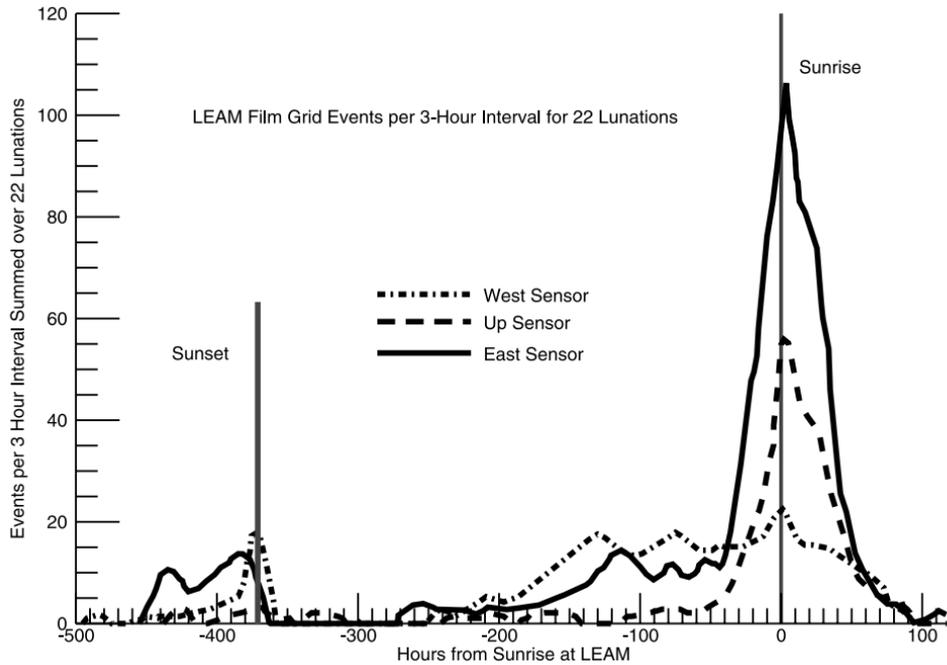


図 2-146 昼夜境界における 3hr 毎の浮遊粒子数実測値

出所)J. E. Colwell et al., Lunar dust levitation, submitted to Journal of Aerospace Engineering, 2006

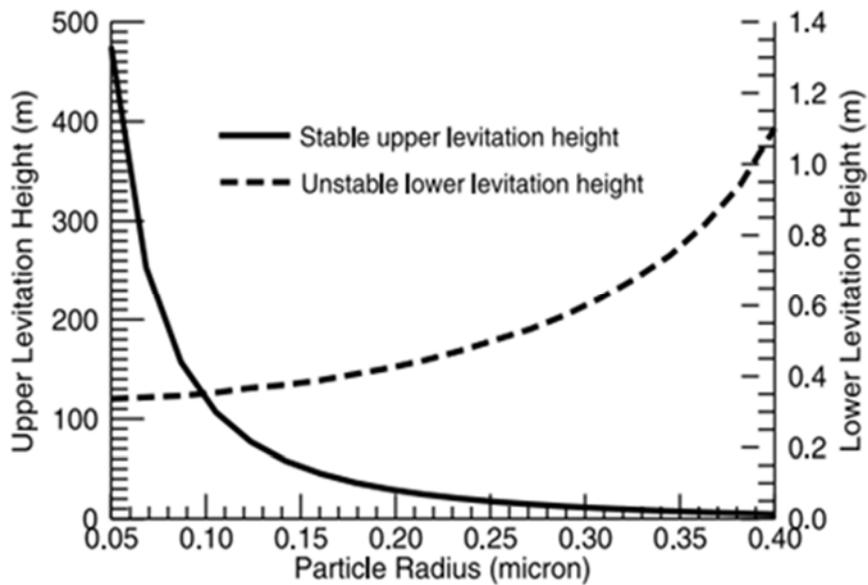


図 2-147 粒子径の関数としての浮遊高さ計算例

出所)J. E. Colwell et al., Lunar dust levitation, submitted to Journal of Aerospace Engineering, 2006

図 2-148 は、夜明け時の昼夜境界部に生じる光電子シー(鞘)領域を扱い、光電子束の動的バランスの非等角化が引き起こす、ダストやレゴリス粒の浮遊の高さを、それぞれが太陽光から受ける電荷エネルギーと重力ポテンシャルエネルギーとの平衡条件を用いて、粒子サイズの関数として算出した例である。図中、 χ_0 は、レゴリスやダストに太陽光が照射された場合の光電変換効率(量子化効率)を意

味し、月面上の値として 0.1~0.5 が使用されている。南緯 89.9°、東経 0°に位置するシャクルトンクレータ外縁付近における浮遊高さは、この図から、概略 3m 以内と見積もることができる。前頁の不安定層の浮遊高さ 1.2m 以下と合わせて考慮すれば、レゴリス、ダストの昼夜境界における浮遊高さは、3m 程度が最大と考えられる。

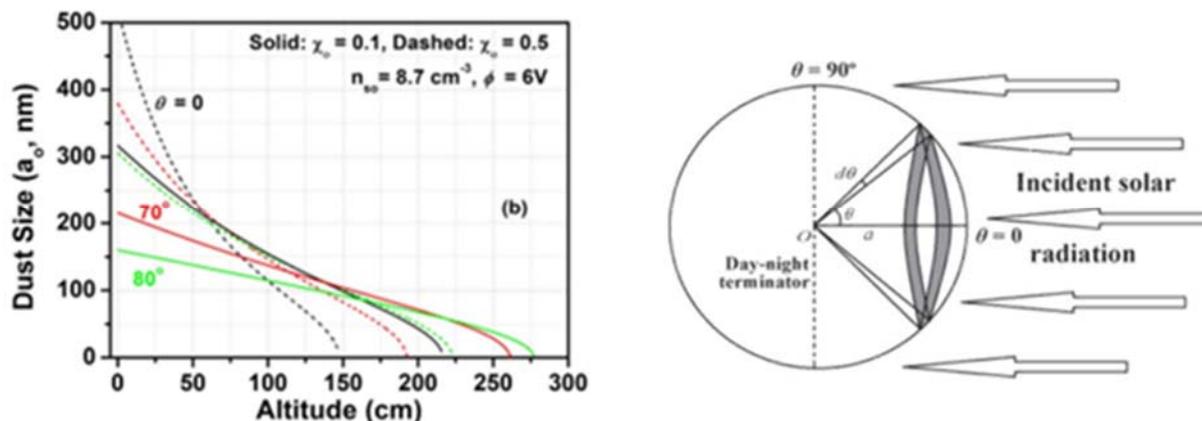


図 2-148 レゴリス、ダストの昼夜境界における浮遊高さの算出例

出所) S. K. Mishra and A. Bhardwa, "Photoelectron Sheath on Lunar Sunlit Regolith and Dust Levitation", The Astrophysical Journal, 884:5 (11pp), 2019 October 10

b. 構造物設計時のレゴリス、ダスト付着回避策

図 2-149 は、レゴリスやダストとの浮遊高さを、通常時、夜明け・日暮れの昼夜境界が通り過ぎる時間帯に分けて描いた図である。常時安定して浮遊するレゴリス等の浮遊高さは数 100m になることから、このダストの影響を避けて構造物を建造することは不可能である。ただし、1.2m 程度の高さの不安定浮遊層や、昼夜境界が訪れる時間帯に太陽光からの電荷を受ける粒子とまだ暗い領域にある電荷の安定した粒子が混在する 3m 程度の高さの浮遊層では、粒子の帯電量や帯電荷符号の非均一な分布が発生するため、建造物に付着する可能性が否定できない。付着メカニズムの解明については、今後の更なる調査研究に委ねるが、ここでは、レゴリスやダストの不安定な浮遊層を超える高さ 3m 程度以上に、レゴリス等の付着を嫌う鏡、レンズ、アンテナ等のダストクリティカルな建造物を、柱等の構造で持ち上げて設置することを提案する。

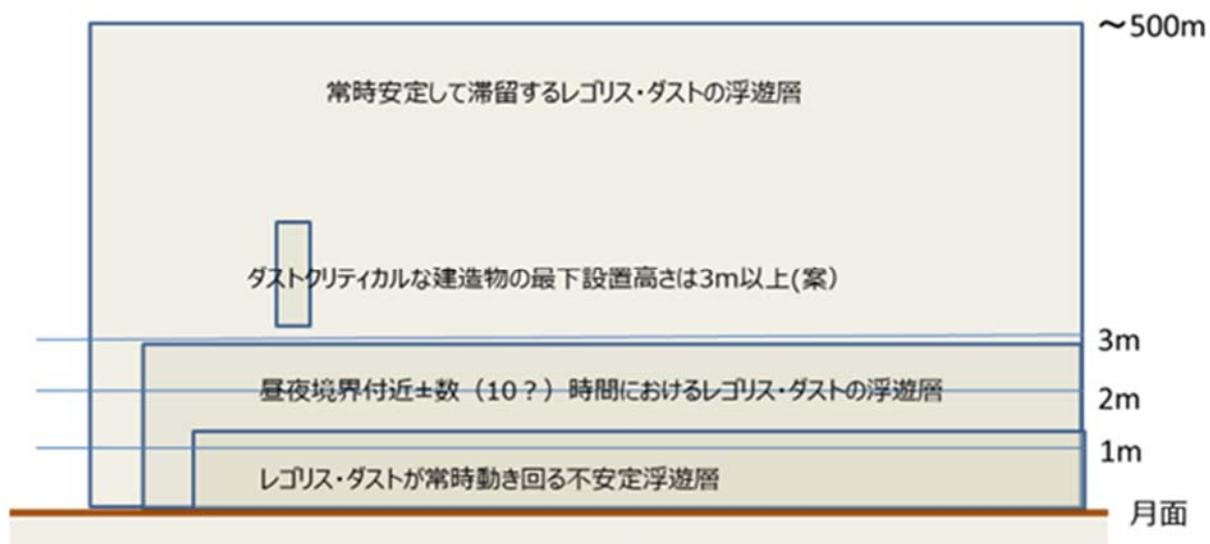


図 2-149 レゴリス・ダストの浮遊層分布とダストクリティカルな構造物の設置高さ(案出所)J-spacesystems

2) マイクロ波送受電部デバイス

月面におけるマイクロ波電力伝送システムに使用する電波の周波数は、通信等他の電波使用システムへの干渉を避ける為、ISM 帯を使用することが望ましい。よって、地上システムの 5G/6G 化によって送受信デバイスの高周波数化が著しい発展を遂げつつあるトレンドを活かし、20GHz 帯、及び 61GHz 帯を候補として選定し、以降の検討を行う。

a. 検討に使用するデバイス種類の決定

マイクロ波送電を行う送電デバイスには、主として、半導体構成のアンプ(Solid State Power Amplifier:SSPA)と進行波管(Traveling Wave Tube:TWTA)がある。現在の市場において、この両者がどのように使い分けられているかを図 2-150 に示す。図より、50GHz 以下の周波数で、0.1W ~ 数 10W 以下の出力領域では SSR の使用数が多く、それ以上になると TWTA に置換されていること分かる。また、図 2-151 に両者の特長比較を示す。本図からは、一見、TWTA に分が良いように見える。しかし、2021 年度に実施した送電アンテナ部の検討結果に着目すると、半導体素子を用いた送電アンテナにおいて、電波の回折の影響を考慮にいれた伝送光学系では、1 素子あたりの送電出力が 0.1W~1W 程度の比較的小さな出力となることが分かっている。言い換えれば、有限の開口を持つ送電アンテナの電波の回折によるビームの広がりアンテナサイズを決める支配的な要素であり、その条件を満足させるためには、大出力の送電素子は適切ではないということである。今、1 アンテナ素子当りの出力を、0.1~0.2W とすれば、本検討が目指す 100kW 級の電力伝送においては、 $10^5 \sim 10^6$ 程度の素子数が必要である。一方、TWTA では 100W 級出力が可能であるため 100 程度の数で十分であるが、検討範囲である km~10km の伝送距離における回折ビームの広がり抑える為、半導体構成のアンテナサイズと同等の開口を備えねばならない。よって、TWTA を用いた場合でも、焦点部でアレイ給電して大きな開口の反射鏡でビームを絞る方式のアンテナとなることから、サイズのメリットは出ない。また、1つの高出力アンプから多数分岐させてアンテナ素子に対して給電する場合の、分岐損失等も含めた詳細な検討が必要なこと、TWTA 素子部に集中して発生する発熱量を分散させて排熱する

必要性等から、検討が複雑化する。よって、本検討では、昨年同様、検討が単純な1アンテナ素子に対し1半導体アンプを備えたモジュールを、必要な開口面積に必要数配列するアレイアンテナタイプの送電アンテナ、及び受電レクテナを扱い、建設が見込まれる2040年～2050年代における変換効率の予測性能を使用して、システム実現性を検討する。このアンテナ構成においては、発熱部が2次元的にほぼ一様に広く分布することから、熱的成立性については、検討が単純な放射冷却を想定して検討を行う。

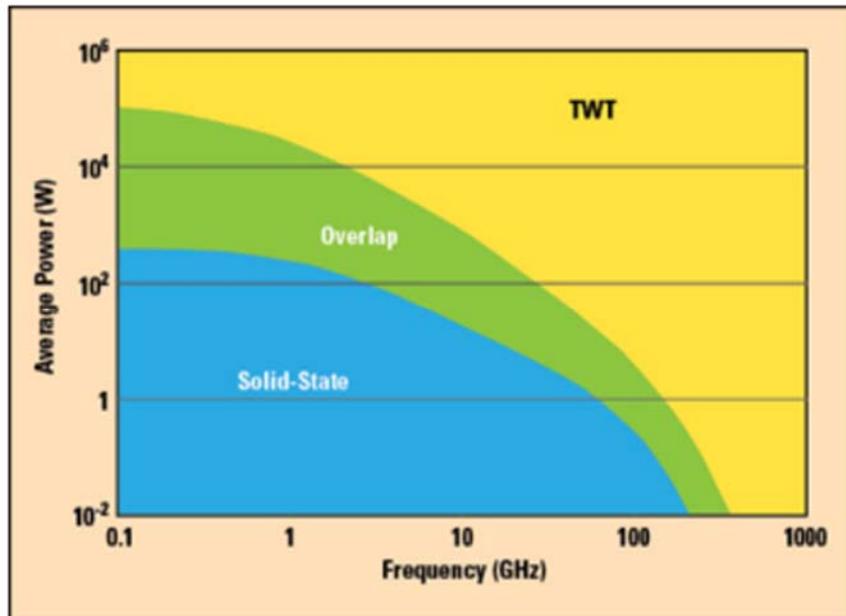


図 2-150 SSPA と TWTA の市場での使用割合

出所)TWTA Still Dominate High-Power and mmWave Applications | 2019-09-04 | Microwave Journal

TABLE 1		
TWTS AND MWTS VS. SOLID-STATE AMPLIFIERS FOR HIGH-POWER		
Factor	TWT/MWT	Solid-State
High Voltage Power Supply	Yes	No
Periodic Maintenance	Yes	No
Warm-Up Delay	Long	Short
Device Footprint, Volume	Larger	Smaller
Power Efficiency at Extreme Power Levels	Better	Lower
Noise Figure	Better	Lower
Power Density	Lower	Higher
Design & Fabrication Complexity	Less	Higher
Operating Temperature	Higher	Lower
Direct Heat Zone Cooling	Yes	No
Radiation Hardness	Better	Lower
Environmental Ruggedness	Better	Less
>3 Octave Bandwidth at High-Power	Yes	Uncommon
Peak Pulsed Power	Higher	Lower
Power Device Count	Lower	Higher
Breakdown Voltage	Higher	Lower

図 2-151 SSPA と TWTA の特長比較

出所)TWTA Still Dominate High-Power and mm Wave Applications | 2019-09-04 | Microwave Journal

b. 送電アンプの推定効率

図 2-152、図 2-153 それぞれに、本件の対象である 24GHz 帯、及び、61GHz 帯を含む高周波領域でのアンプの効率を、使用される半導体の種類を含めて示す。図中、緑線で示す効率が建設年代における推定効率である。

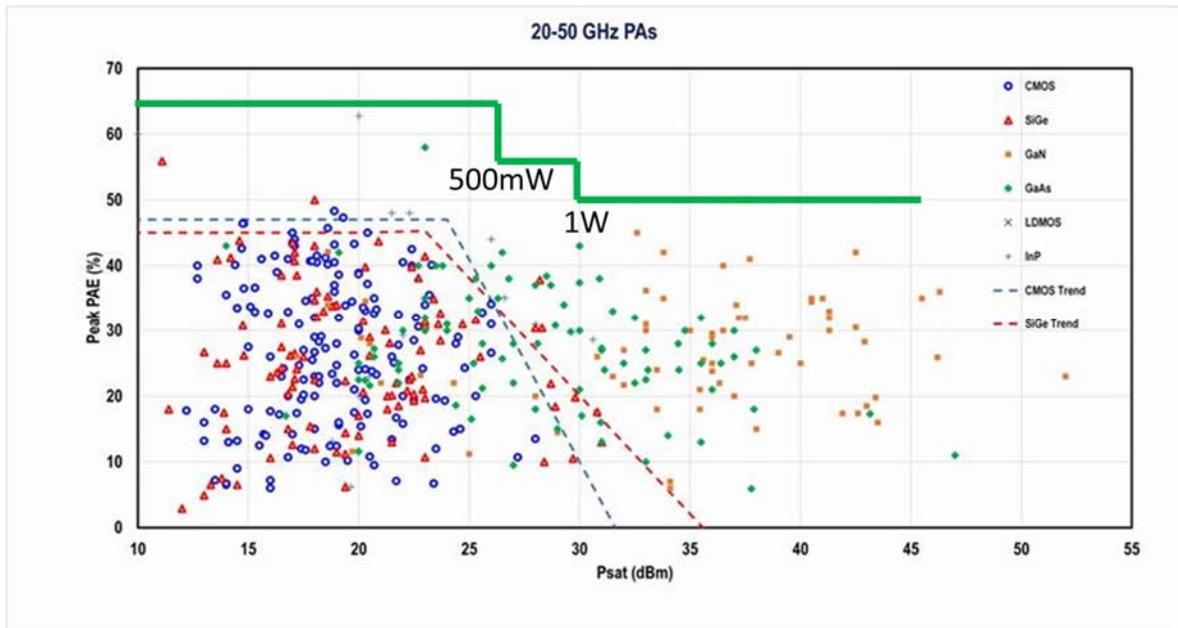


図 2-152 送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(20-50GHz)

出所) https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html

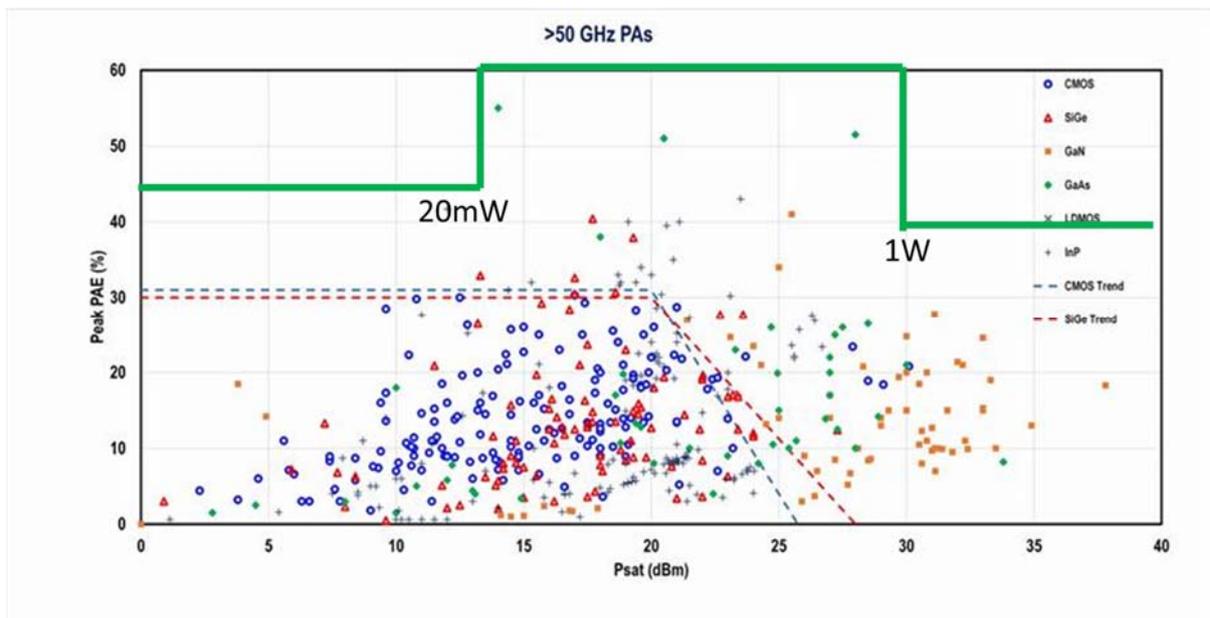


図 2-153 送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(50GHz 以上)

出所) https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html

c. 受電レクテナ

受電レクテナの整流効率に関しては、金沢工業大学が世界をリードする存在となっている。図 2-154 に現在における 1-100GHz 帯の効率実績を、図 2-155 に現在の 20-40GHz 帯の出力特性としての効率を示す。図から分かるように、整流効率は強い周波数依存性を持つが、この原因は、回路損失と使用するダイオードの遮断特性である。整流効率の出力特性の原因は、大電力に耐える整流素子化においては容量(キャパシタンス)が大きくなるため、整合損失が増加するためである。

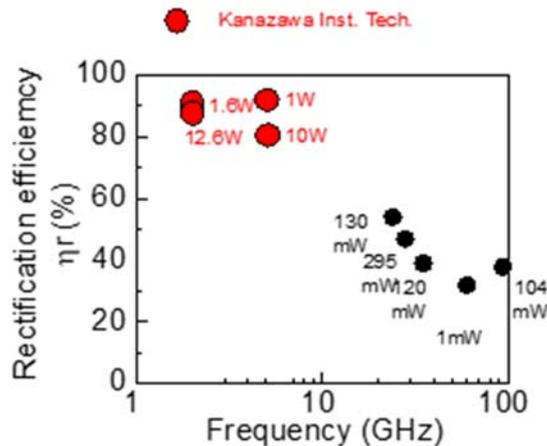


図 2-154 レクテナ効率実績(1-100GHz:周波数特性)

出所)金沢工業大学

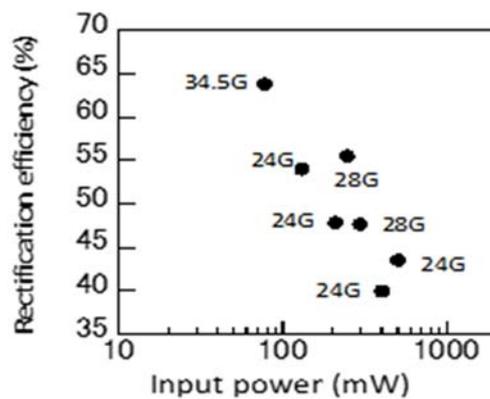


図 2-155 レクテナ効率実績(20-40GHz:出力電力特性)

出所)金沢工業大学

上記の実績値を改善し、月面建設時により高い効率を目指すには、幾つかの技術的なブレークスルーを実現しなければならない。その開発ポイントは以下である。

- GAs の Gated Anode Diode(GAD)耐圧は 7V であるが、一方でスレッシュホールド電圧は 0.5Vと低いことから、ダイオードが OFF になっている時間が長い。この為に損失が低下する。よって、図 2-156 に示す、エンハンスモード GaN HEMT(高電子移動度トランジスタ)等の導入で、通常は OFF の状況にある GAD HEMT を開発しなければならない。(世界初)

- ゲート長を短くしてダイオードの遮断周波数を上げる一方で、耐圧の低下を防止する工夫を施す。

この開発イメージを、図 2-156 に、実現可能と考えられる 24GHz/61GHz 帯でのレクテナ素子当りの受電整流効率予想値を表 2-83 に示す。

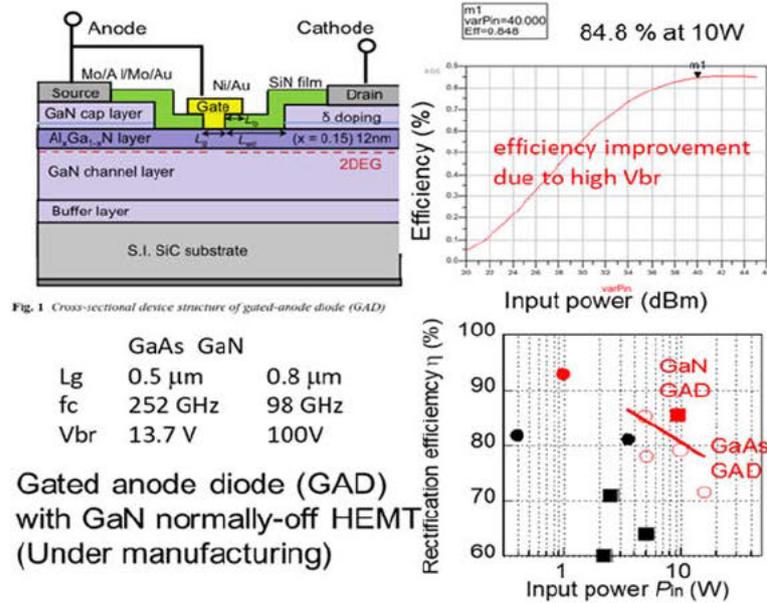


図 2-156 世界初のエンハンスモード GaN HEMT の開発イメージ

出所)H. Takahashi, Y.Ando, Y.Tsuchiya, A. Wakejima, H.Hyashi, 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,July 2021

表 2-83 24GHz 帯/61GHz帯の100mW級レクテナの予測効率

時期	手法	24GHz 帯	62GHz 帯
66%	0.18 μm GaAs: GAD (Vbr:8.3V、fc:810GHz)	66%	48% (素子サイズ 1/2)
2040 年台	高耐圧化 GaN HEMT (Vbr:20V、fc:810GHz)	80%	76% (同上)
	ゲート微細化(遮断周波数 2 倍化) (Vbr:20V、fc:1.6THz)	83%	77% (同上)

出所)J-spacesystems

d. 検討に使用する予想効率値

以上の検討から、マイクロ波電力伝送サブシステムの実現性解析に表 2-84 の効率を使用する。

表 2-84 マイクロ波送受電サブシステム検討に使用する予想効率

送受	使用諸元		
	24GHz 送電	数 10mW~500mW 65% (SiGe)	500mW~1W 55% (GaAs)
61GHz 送電	数 10mW~20mW 45% (GaN, SiGe)	20mW~1W 60% (GaAs)	1W 以上 40% (GaN)
24/61GHz 受電	数 10mW~200W 80% (GaN)	200mW 以上 NA	

出所)J-spacesystems

3) 固定設置送受電システムの検討

前節までの検討結果を用い、シャクルトンクレータの外縁リム部に設置する、固定式のマイクロ波送受電システムの成立性、実現可能な性能、大きさ、質量等を、送受共に半導体素子を用いたモジュールを搭載することを基本に検討する。検討の前提は以下の通りである。

- 2021年度の検討結果を踏まえ、2040~2050年代の期間に月南極付近のシャクルトンクレータ近傍に建造するマイクロ波を使った月面無線電力伝送システムの規模イメージを質量を含め、より具現化する。
- マイクロ波の周波数は、5G/6G の世界的広がりに伴う半導体の高周波数化により、建設年代に宇宙用部品として十分に適用が見込める ISM 帯としての 24GHz 帯、61GHz 帯の半導体の建設年代における性能予測値を用い、熱的成立性は、アンテナ、レクテナのサイズや質量に大きな影響をあたえず、かつ、構造が最も単純な放射冷却方式を想定して検討する。
- シャクルトンクレータ外縁では、月 1 日の 70%がほぼ水平方向から太陽光を受けるため、太陽光発電所は当システムの近傍に置かれ、送電部の入力インタフェース部において必要となる直流電力が入力されることを前提とする。
- 送受電部が同じ外縁部に設置されることとし、伝送距離を 1km、5km、10km、受電部から取り出し可能な直流電力を 10kW、50kW、100kW とし、パラメトリックな検討を行う。
- 使用するパワーデバイスは、動作温度が高い(300℃以上)ものの選定を想定するが、CPU 等の比較的使用温度範囲が低い部品も使用すると見て、構造体内部温度は±100℃程度が得られれば良いとし、構造表面の太陽光吸収率、熱放射率等の最適化や構造内部の熱抵抗等は今回の検討範囲から除外する。
- 実証用に開発済みのマイクロ波送電システムの質量から演繹的に月面システムのアレイ質量を推定し、送受電部の質量についても概算で検討する。

a. 電力送受電システムの検討条件

表 2-85 に定量的な検討条件を、地上用の SSPS の検討条件との比較の形で示す。

表 2-85 固定設置電力伝送システムの検討条件

項目	月面	SSPS
設置域	送電部、受電部ともに月南極付近のシャクルトンクレータのリム部	静止衛星軌道
熱環境	① 真空 ② 南極クレータリム部平均温度 260K ③ 背景放射 2.7K	① 真空 ② 背景放射 2.7K ③ 地球アルベド 0.3±0.02
太陽光	ほぼ水平方向から70%/1日 1.37KW/m ²	昼 1.37KW/m ²
1日の長さ	27.32地球日 = 655.72時間	24時間
使用電波帯域	24GHz帯、61GHz帯 (ISM帯)	2.4GHZ帯 (ISM帯)
伝送電力束密度	制限なし	電離層保護：23mW/cm ² 人体保護：1mW/cm ²
伝送電力	レクテナ電力出力部で10、50、100kW	—
伝送距離	1km、5km、10km	約36000km
レクテナサイズ	ビーム伝送系最適化による最小サイズ	電波の回折で決まるサイズ
入力電源	近隣に設置した太陽光パネル、または発電所から必要量を受給	一体型発電電パネル裏面の太陽電池から必要量を供給

出所)J-spacesystems

b. 最上位の送受電システムブロック図と電力ロス配分

送電部の検討には、ファーストティア（最上位）の送受電システムブロック図と、それに対応させた電力ロスの配分を決めなければならない。図 2-157 にそのイメージを示す。図において、*1は、受電部からのガイド信号を送電部が受けて、その方向に位相を併せて正確に送電するレトロディレクティブ方式の採用を示す。また、*2は、別途設置される太陽光パネルを並べた発電部から直接、あるいは蓄電部経由で、最終的にレクテナ部で整流後に使用可能な 100kW 電力を得るための必要量を、送電アンテナ部が授受することを前提とする。

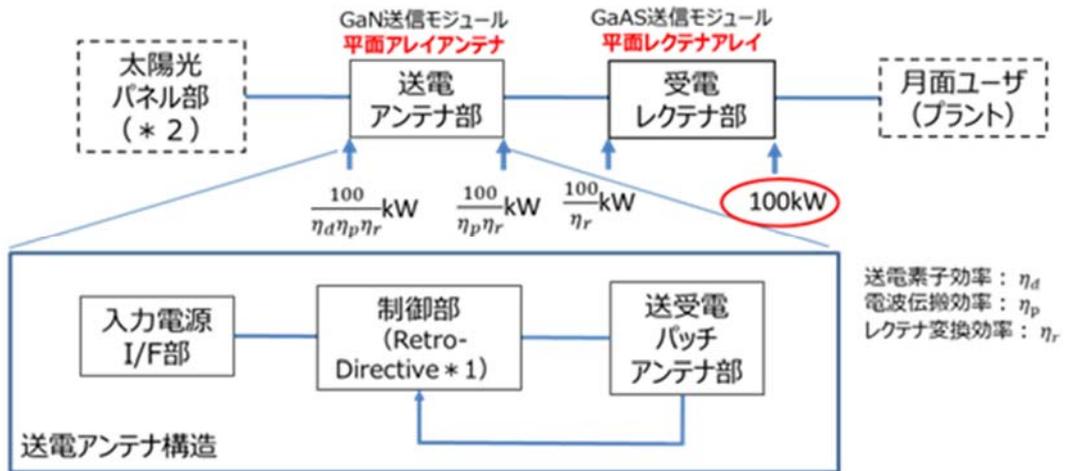


図 2-157 マイクロ波送受電システムの最上位ブロック図と電力ロス配分

出所)J-spacesystems

c. 送受間のビーム伝送系

送電アンテナと受電レクテナのサイズを決める為には、その間のビーム伝送光学系の選定が必要である。月面に設置するシステムは、最小で最軽量なものを志向することは当然であり、ビーム伝送光学系はその方向性を決定づける最上位の手段の1つである。電波の伝搬効率 η_p は、送電部から送電された電力が、送電部の開口の大ききでできるマイクロ波の回折効果により、送受間の空間の伝搬中に拡がる送電ビームを一定の開口のレクテナでどの程度覆って受電できるかの効率であり、ビーム効率と呼ぶ。レクテナを無限大の大ききにすれば、ビーム効率は100%になるが、現実はそうはいかない。ビーム伝送系の検討には、共に正方形形状の送電部開口、受電レクテナ部開口を想定すれば、開口の中心から外側に向かって一様の送信電力分布を扱う場合に、送受電部のビーム中心(光軸)から広がる送電ビームの広がり角度とその角度内に含まれる送電電力の比(=ビーム効率)は、図 2-158 となる。

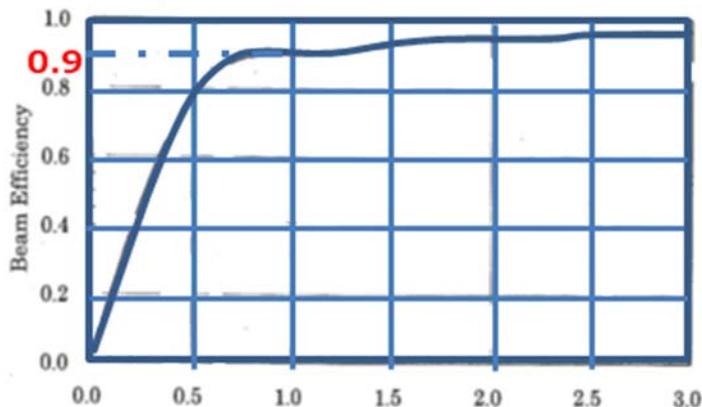


図 2-158 正方形アンテナのビーム効率(振幅分布は一定)

出所) Izumi Mikami, "Study on New concept of Space Solar Power Station (SPSS)", Kyoto University Doctor Thesis, pp-36-42, March 2005

図 2-158 において、ビーム効率 90%に対応する領域をレクテナで覆うことを想定し、その時のビーム広がり角(両幅)を θ 、アンテナ開口の一片の長さを D_t 、マイクロ波の波長を λ 、周波数を f 、光速を c とすれば、次の式が成立する。

$$\theta = 2 \left(\frac{\lambda}{D_t} \right) = 2 \left(\frac{c}{f D_t} \right) \text{ ----- (1)}$$

次に、ビーム伝送光学系を選定する。光学系には、2021 年度の検討結果を踏まえ図 2-159 に示すビームウエストを送受間の中間位置に設け、送電部と受電部の開口が等しくなる伝送光学系を選定する。

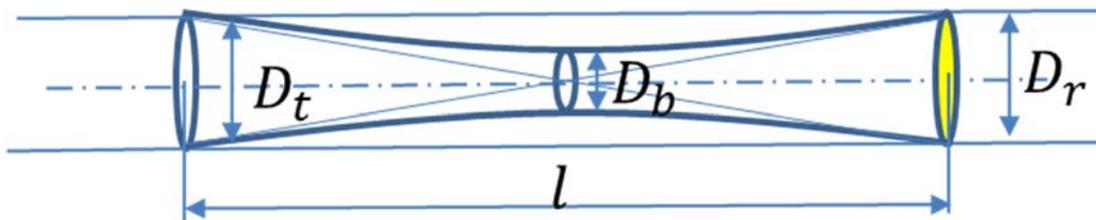


図 2-159 ビームウエストを中間位置に置くビーム伝送光学系

出所)J-spacesystems

この光学系において、 l は送受間の距離、 D_r はレクテナ開口の辺長、 D_t は送電アンテナ開口の辺長、 D_b はビームウエスト(焦点位置)におけるビーム効率に対応するビームの広がり(≒辺長)である。今、90%v のビーム効率を考えれば、

$$D_r = \frac{l}{2} * \theta = \left(\frac{c}{f D_t} \right) l \leq D_t \text{ ----- (2)}$$

が成立する。よって、送電アンテナ開口の辺長 D_t は、以下の条件を満足する必要があることが分かる。

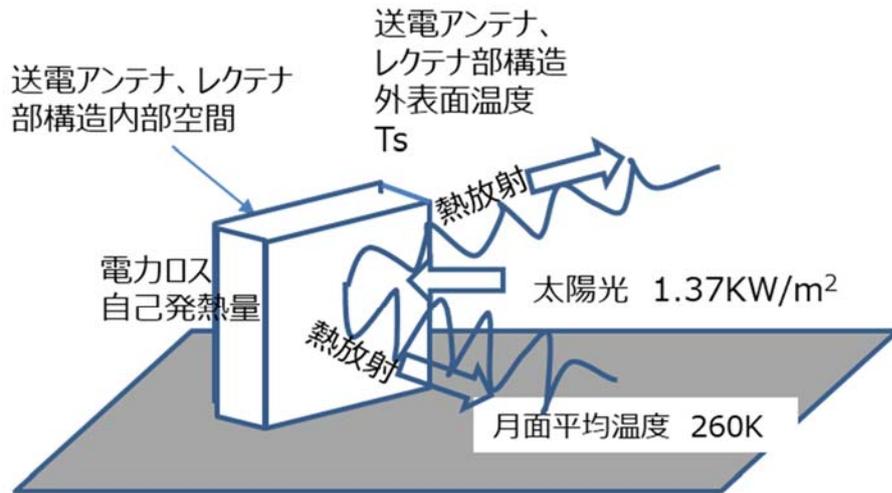
$$D_t \geq \sqrt{cl/f} \text{ ----- (3)}$$

よって、送電距離 1km、5km、10km のケースそれぞれで、式(3)を満足する送電アンテナ開口へ長を周波数ごとに探し、10kW、50kw、100kW の各送電力に対し、アンテナ 1 素子当りの出力電力をパラメトリックに与えて素子数を求め、送電部内の電力ロスから発熱量を算出して構造表面の温度を求める手法で熱的成立性までの 1 連の検討を行うこととする。

d. 熱的成立性検討モデル

送付電部の開口が正方形形状であることを念頭に、放射冷却による熱的成立性を評価するための廃熱概念図を図 2-160 に示す。

簡単化の為、外表面は一様温度とし、設置されるシャクルトクレータリム部の月面の温度は平均温度、熱放射の形態係数は、宇宙の背景放射に対して 0.5、月面に対して 0.5 と置いた。



- T_s : 送電アンテナ、レクテナ構造外表面温度 K
- T_g : 月面平均温度 260K
- T_u : 背景放射温度 2.7K
- A_0 : 太陽光吸収面積
 - 正面: 送電アンテナ開口面積
 - 側面: 送電アンテナ開口面積×0.1 (仮定)
- A : 送電アンテナ放熱面積
- σ : シュテファンボルツマン定数 5.67×10^{-8}
- ϵ_s : アンテナ構造外表面の熱放射率
- α_s : 構造外表面の太陽光吸収率
- Q : 送電アンテナ部総合発熱量 W
- Q_t : 送電アンテナ発熱量 W
- Q_s : 太陽光吸収による発熱量 W

図 2-160 総受電部の放射冷却による廃熱概念図

出所)J-spacesystems

なお、太陽光照射は、正面からの場合(温度は高め)と側面からの場合(温度が低め)の2つのケースで評価することとし、構造正面の場合に対して側面からの照射に置ける吸収面先は10%と見積る。よって、それぞれの場合の太陽光吸収熱量 Q_s は、

$$Q_s = 1.37 \times 10^3 A_0 \alpha_s \quad (\text{正面から照射}) \quad \text{----- (4)}$$

$$Q_s = 1.37 \times 10^3 \frac{A_0}{10} \alpha_s \quad (\text{側面から照射}) \quad \text{----- (5)}$$

となる。定常状態を考えれば、自己発熱量と太陽光吸収熱量の和が放射冷却熱量に一致することから、構造体表面の温度 T_s は下式で表すことができる。

$$Q = Q_s + Q_t = 0.5\sigma\epsilon_s A \{ (T_s^4 - T_g^4) + (T_s^4 - T_u^4) \} \quad \text{----- (6)}$$

$$\therefore T_s = \left\{ \left(\frac{Q}{\sigma\epsilon_s A} \right) + \frac{T_g^4 + T_u^4}{2} \right\}^{1/4} = \left\{ \left(\frac{Q_s + Q_t}{\sigma\epsilon_s A} \right) + \frac{T_g^4 + T_u^4}{2} \right\}^{1/4} \quad \text{----- (7)}$$

本検討では、太陽光吸収率と熱放射率は、実現可能な値に固定して構造表面温度を算出し、内部の電子機器が駆動可能な温度が、表面定数の設計を最適化すれば実現可能な範囲(概略-100℃~100℃)に入ることを確認することに留め、それ以上の定数最適化は実施しないこととする。

e. 送電部成立性の検討条件

表 2-86 に送電部の成立性の評価に使用する検討条件をまとめて記載する。

表 2-86 固定設置送受電システムの送電部検討条件

項目		備考		
周波数	24GHz帯、61GHz帯 (ISM帯)			
偏波	RHCP(LHCP)			
太陽光	1.37kW/m ² (正面、側面)	クレータリムに設置		
熱放射対象温度	クレータリム部月面260K、背景放射2.7K			
伝送路長	1km、5km、10km			
送電出力	レクテナ変換後の出力電力として、10kW、50kW、100kWを実現可能な送電電力			
レクテナ変換効率	0.8	2040年台の推定値		
ビーム走査角	±3°	設置誤差マージン		
アレーファクタ	0.95	昨年度は0.9		
送電部変換効率 (GaN、又は他)	1. 24GHz帯の半導体アンプの変換効率			
	素子出力	1mW≤Pe < 500mW	500mW≤Pe < 1W	1W≤Pe
	η(変換効率)	0.65	0.55	0.5
	素子	SiGe	GaAs	GaN
	2. 61GHz帯の半導体アンプの変換効率			
	素子出力	1mW≤Pe < 20mW	20mW≤Pe < 1W	1W≤Pe
η(変換効率)	0.45	0.6	0.4	
素子	GaN, SiGe	GaAs	GaN	

出所)J-spacesystems

f. 送電部アンテナ規模と熱的成立性解析結果

表 2-87、表 2-88 は、式(3)を用いて求めた、電波伝送路内ロス を 10%に軽減する Beam Waist(BW)成立条件を周波数ごとに求めた結果である。以降の検討においては、この成立条件と等しい、あるいはそれ以上の送電アンテナの開口辺長であって、かつ、熱的に成立する解を探すこととなる。

表 2-87 24GHz 帯 BW 成立条件

伝送距離 km	90%電力比の Beam Waist成立口径 m
1	3.5
5	7.9
10	11.2

出所)J-spacesystems

表 2-88 61GHz 帯 BW 成立条件

伝送距離 km	90%電力比の Beam Waist成立口径 m
1	2.2
5	4.9
10	7.0

出所)J-spacesystems

ア) 24GHz 帯

表 2-89 は、太陽熱吸収が最大となる送電アンテナ正面(正方形開口)に太陽光が垂直入射するケースと、同じく最小となる側面に垂直入射するケースにおいてそれぞれ素子当りの出力電力をパラメトリックに振り、24Gz 帯送電アンテナのアンテナ素子数、開口辺長や自己発熱量等を求め、太陽光吸収熱量と合わせた熱的成立性を、式(4)を用いて計算した結果である。この検討には、実現可能な数値として、アンテナ構造の表面処理によって実現する太陽光吸収率 $\alpha=0.1$ 、熱放射率 $\varepsilon=0.9$ という、現実的な数値を用いている。表から、全ての送電出力、全ての伝送距離で成立する解があることが分かる。10kW システムでは、3 つの伝送距離において BW 成立条件と等しい開口辺長の送電アンテナが使用可能である。50kW システムでは、熱的成立性が支配的となり、1km の伝送距離において BW 成立条件の 3.5m より大きな 5.7m 辺長の送電アンテナが必要となる。100kW システムでは、更に熱的に厳しくなり、伝送距離が 1km~5km において 5km の伝送距離の場合の BW 成立条件である 7.9m 辺長の送電アンテナを用いねばならない。

表 2-89 24GHz 帯の送電部成立性解析結果

伝送距離:												1km			5km			10km			1/5km共用			開口部正面から太陽光が入射			開口部側面から太陽光が入射		
周波数	受電電力 kW	レクテナ変換効率	出力 W/個	実効効率	消費電力 W/個	発熱量 W/個	素子数	発熱Qt W	総合送電電力 kW	総合入力電力 kW	アンテナ開口長 m	太陽光吸収率0.1 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.9 構造表面温度	太陽光吸収率0.1 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.9 構造表面温度												
2.41E+10	10	0.80	0.0131	0.65	0.020	0.007	1.0E+06	7.1E+03	13.2	20.2	11.2	1.7E+04	2.4E+04	254.3	1.7E+03	8.8E+03	233.5												
			0.0265	0.65	0.041	0.014	5.0E+05	7.1E+03	13.2	20.2	7.9	8.5E+03	1.6E+04	262.5	8.5E+02	7.9E+03	243.9												
			0.05	0.65	0.077	0.027	2.6E+05	7.1E+03	13.2	20.2	5.7	4.5E+03	1.2E+04	275.3	4.5E+02	7.5E+03	259.5												
			0.1	0.65	0.154	0.054	1.3E+05	7.1E+03	13.2	20.2	4.1	2.2E+03	9.3E+03	297.7	2.2E+02	7.3E+03	285.5												
			0.133	0.65	0.205	0.072	9.9E+04	7.1E+03	13.2	20.2	3.5	1.7E+03	8.8E+03	310.1	1.7E+02	7.3E+03	299.4												
			0.25	0.65	0.385	0.135	5.3E+04	7.1E+03	13.2	20.2	2.6	9.0E+02	8.0E+03	345.2	9.0E+01	7.2E+03	337.6												
			0.5	0.55	0.909	0.409	2.6E+04	1.1E+04	13.2	23.9	1.8	4.5E+02	1.1E+04	434.7	4.5E+01	1.1E+04	431.0												
1	0.5	2.000	1.000	1.3E+04	1.3E+04	13.2	26.3	1.3	2.2E+02	1.3E+04	535.5	2.2E+01	1.3E+04	534.5															
2.41E+10	50	0.80	0.066	0.65	0.102	0.036	1.0E+06	3.5E+04	65.8	101.2	11.2	1.7E+04	5.3E+04	282.9	1.7E+03	3.7E+04	268.6												
			0.1	0.65	0.154	0.054	6.6E+05	3.5E+04	65.8	101.2	9.1	1.1E+04	4.7E+04	297.6	1.1E+03	3.7E+04	285.4												
			0.1325	0.65	0.204	0.071	5.0E+05	3.5E+04	65.8	101.2	7.9	8.5E+03	4.4E+04	309.9	8.5E+02	3.6E+04	299.2												
			0.25	0.65	0.385	0.135	2.6E+05	3.5E+04	65.8	101.2	5.7	4.5E+03	4.0E+04	345.2	4.5E+02	3.6E+04	337.6												
			0.5	0.55	0.909	0.409	1.3E+05	5.4E+04	65.8	119.6	4.1	2.2E+03	5.6E+04	434.9	2.2E+02	5.4E+04	431.1												
			1	0.5	2.000	1.000	6.6E+04	6.6E+04	65.8	131.6	2.9	1.1E+03	6.7E+04	535.4	1.1E+02	6.6E+04	533.4												
			0.1	0.65	0.154	0.054	1.3E+06	7.1E+04	131.6	202.4	12.8	2.3E+04	9.3E+04	297.6	2.3E+03	7.3E+04	285.4												
2.41E+10	100	0.80	0.132	0.65	0.203	0.071	1.0E+06	7.1E+04	131.6	202.4	11.2	1.7E+04	8.8E+04	309.6	1.7E+03	7.3E+04	298.9												
			0.15	0.65	0.231	0.081	8.8E+05	7.1E+04	131.6	202.4	10.5	1.5E+04	8.6E+04	315.9	1.5E+03	7.2E+04	305.8												
			0.265	0.65	0.408	0.143	5.0E+05	7.1E+04	131.6	202.4	7.9	8.5E+03	7.9E+04	348.8	8.5E+02	7.2E+04	341.5												
			0.5	0.55	0.909	0.409	2.6E+05	1.1E+05	131.6	239.2	5.7	4.5E+03	1.1E+05	434.8	4.5E+01	1.1E+05	430.7												
			1	0.5	2.000	1.000	1.3E+05	1.3E+05	131.6	263.2	4.1	2.2E+03	1.3E+05	535.4	2.2E+01	1.3E+05	533.2												

注：赤の斜線は熱的成立性が疑わしいことを示す。

出所)J-spacesystems

イ) 61GHz 帯

表 2-90 は、太陽熱吸収が最大となる送電アンテナ正面(正方形開口)に太陽光が垂直入射するケースと、同じく最小となる側面に垂直入射するケースにおいてそれぞれ素子当りの出力電力をパラメトリックに振り、61GHz 帯送電アンテナのアンテナ素子数、開口辺長や自己発熱量等を求め、太陽光吸収熱量と合わせた熱的成立性を、式(4)を用いて計算した結果である。この検討には、前節と同じく、実現可能な数値である太陽光吸収率 $\alpha=0.1$ 、熱放射率 $\varepsilon=0.9$ を用いている。表から、全ての送電出力、全ての伝送距離で成立する解があるが、送電出力が大きくなると、伝送距離にかかわらず大きな開口の送電部が必要なことが分かる。これは、送電素子間の距離が周波数に反比例して小さくなり、よって開口面積が小さくなることから、熱的成立性が支配的になるためである。

表 2-90 61GHz 帯の送電部成立性解析結果

伝送距離:		1km	5km	10km	1/5/10km共用					開口部正面から太陽光が入射				開口部側面から太陽光が入射			
周波数	受電電力 kW	レクテナ 変換効率	出力 W/個	変換効率	消費電力 W/個	発熱量 W/個	素子数	発熱Q1 W	総合送電電力 kW	総合入力電力 kW	アンテナ 開口長 m	太陽光吸収率0.1 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.9 構造表面温度	太陽光吸収率0.1 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.9 構造表面温度
6.15E+10	10	0.80	0.0052	0.45	0.012	0.006	2.5E+06	1.6E+04	13.2	29.2	7.0	6.7E+03	2.3E+04	287.8	6.7E+02	1.7E+04	274.2
			0.01	0.45	0.022	0.012	1.3E+06	1.6E+04	13.2	29.2	5.0	3.5E+03	2.0E+04	315.0	3.5E+02	1.6E+04	304.8
			0.025	0.6	0.042	0.017	5.3E+05	8.8E+03	13.2	21.9	3.2	1.4E+03	1.0E+04	331.7	1.4E+02	8.9E+03	323.1
			0.05	0.6	0.083	0.033	2.6E+05	8.8E+03	13.2	21.9	2.2	6.9E+02	9.5E+03	379.0	6.9E+01	8.8E+03	373.4
			0.1	0.6	0.167	0.067	1.3E+05	8.8E+03	13.2	21.9	1.6	3.5E+02	9.1E+03	440.5	3.5E+01	8.8E+03	436.9
			0.5	0.6	0.833	0.333	2.6E+04	8.8E+03	13.2	21.9	1.8	4.5E+02	9.2E+03	415.4	4.5E+01	8.8E+03	411.1
6.15E+10	50	0.80	1	0.4	2.500	1.500	1.3E+04	2.0E+04	13.2	32.9	1.3	2.2E+02	2.0E+04	591.5	2.2E+01	2.0E+04	590.1
			0.013	0.45	0.029	0.016	5.1E+06	8.0E+04	65.8	146.2	9.9	1.3E+04	9.4E+04	328.9	1.3E+03	8.2E+04	320.1
			0.026	0.6	0.043	0.017	2.5E+06	4.4E+04	65.8	109.6	7.0	6.7E+03	5.1E+04	334.0	6.7E+02	4.5E+04	325.6
			0.05	0.6	0.083	0.033	1.3E+06	4.4E+04	65.8	109.6	5.0	3.5E+03	4.7E+04	378.7	3.5E+02	4.4E+04	373.0
			0.1	0.6	0.167	0.067	6.6E+05	4.4E+04	65.8	109.6	3.6	1.7E+03	4.6E+04	440.1	1.7E+02	4.4E+04	436.5
			0.25	0.6	0.417	0.167	2.6E+05	4.4E+04	65.8	109.6	2.2	6.9E+02	4.5E+04	545.7	6.9E+01	4.4E+04	543.8
6.15E+10	100	0.80	0.5	0.6	0.833	0.333	1.3E+05	4.4E+04	65.8	109.6	1.6	3.5E+02	4.4E+04	645.6	3.5E+01	4.4E+04	644.5
			1	0.4	2.500	1.500	6.6E+04	9.9E+04	65.8	164.5	1.1	1.7E+02	9.9E+04	936.5	1.7E+01	9.9E+04	936.1
			0.025	0.6	0.042	0.017	5.3E+06	8.8E+04	131.6	219.3	10.1	1.4E+04	1.0E+05	331.7	1.4E+03	8.9E+04	323.1
			0.052	0.6	0.087	0.035	2.5E+06	8.8E+04	131.6	219.3	7.0	6.7E+03	9.4E+04	381.9	6.7E+02	8.8E+04	376.3
			0.1	0.6	0.167	0.067	1.3E+06	8.8E+04	131.6	219.3	5.0	3.5E+03	9.1E+04	440.1	3.5E+02	8.8E+04	436.5
			0.25	0.6	0.417	0.167	5.3E+05	8.8E+04	131.6	219.3	3.2	1.4E+03	8.9E+04	545.4	1.4E+02	8.8E+04	543.5

注:赤の斜線は熱的成立性が疑わしいことを示す。

出所)J-spacesystems

g. 受電部レクテナ規模と熱的成立性

前頁で選択された送電部規模に対応させ、表 2-91 に示す条件でレクテナの規模と熱的成立性の検討を行う。

表 2-91 受電レクテナ検討条件

項目	備考
周波数	28、61GHz帯(中心周波数)
偏波	RHCP(LHCP)
太陽光	1.37kW/m2 (正面、側面)
熱放射対象温度	16.7K
伝送路長	1km、5km、10km
ビーム伝送系	送受電部中心にビームウエストを持つ伝送系が存在する場合にはそれを利用
伝送路内電波伝搬ロス	10%以下
アレーファクタ	0.95
レクテナ変換効率	0.8 受電電力範囲:0.03~0.5W/素子

出所)J-spacesystems

ア) 24GHz 帯

表 2-92 は、24GHz 帯において、受電部を送電部と同じサイズ(正方形開口)にし、開口面積とアレイファクタからアンテナ素子数を決め、受電電力毎に素子当りの受電電力と整流変換効率から発熱量を計算して、太陽熱吸収が最大となる送電アンテナ正面(正方形開口)に太陽光が垂直入射するケースと、同じく最小となる側面に垂直入射するケースごとに太陽光吸収熱量と合わせた熱的成立性を、式(4)を用いて計算した結果である。この検討には、実現可能な数値である太陽光吸収率 $\alpha=0.15$ 、熱放射率 $\varepsilon=0.4$ を用いている。この理由は、レクテナの整流変換効率が送電部より良く発熱量が少ない分、太陽光をより吸収し放熱量を抑えて、内部を温める必要があるためである。表から、全ての受電出力、全ての伝送距離で成立する解があることが分かる。

表 2-92 24GHz 受電レクテナ規模と熱的成立性

受電電力 kW	周波数 Hz	送電距離	送電部開口 m	90%B W成立直径 m	BW 成立性	BW伝送系レクテナ開口 m	レクテナ到達電力 W	変換効率	発熱量 W	素子数 ($\eta=1$)	1素子受電電力 W	開口部正面から太陽光が照射			開口部側面から太陽光が照射				
												太陽光吸収率 0.15 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.4 構造表面温度	太陽光吸収率 0.15 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.4 構造表面温度		
10	2.4125E+09	1km	3.5	3.53	○	3.5	1.25E+04	0.8	2.50E+03	8.8E+04	1.42E-01	2517.4	5017.4	308.3	251.7	2751.7	265.3		
		5km	7.9	7.89	○	7.9						4.5E+05	2.80E-02	12825.3	15325.3	271.3	1282.5	3782.5	191.2
		10km	11.2	11.15	○	11.2						9.0E+05	1.39E-02	25777.9	28277.9	265.5	2577.8	5077.8	172.8
50	2.4125E+09	1km	5.7	3.53	○	5.7	6.25E+04	0.8	1.25E+04	2.3E+05	2.68E-01	6676.7	19176.7	337.7	667.7	12751.7	305.0		
		5km	7.9	7.89	○	7.9						4.5E+05	1.40E-01	12825.3	25325.3	307.5	1282.5	13782.5	264.2
		10km	11.2	11.15	○	10.4						7.8E+05	8.06E-02	22226.9	34726.9	290.1	2222.7	14722.7	234.1
100	2.4125E+10	1km	7.9	3.53	○	7.9	1.25E+05	0.8	2.50E+04	4.5E+05	2.80E-01	12825.3	37825.3	340.0	1282.5	26282.5	310.4		
		5km	7.9	7.89	○	7.9						4.5E+05	2.80E-01	12825.3	37825.3	340.0	1282.5	26282.5	310.4
		10km	11.2	11.15	○	11.2						9.0E+05	1.39E-01	25777.9	50777.9	307.4	2577.8	27577.8	263.9

出所)J-spacesystems

イ) 61GHz 帯

表 2-93 は、61GHz 帯において、同様に、受電部を送電部と同じサイズ(正方形開口)にし、開口面積とアレイファクタからアンテナ素子数を決め、受電電力毎に素子当りの受電電力と整流変換効率から発熱量を計算して、太陽熱吸収が最大となる送電アンテナ正面(正方形開口)に太陽光が垂直入射するケースと、同じく最小となる側面に垂直入射するケースごとに太陽光吸収熱量と合わせた熱的成立性を、式(4)を用いて計算した結果である。この検討には、前節と同様な理由から、太陽光吸収率 $\alpha=0.15$ 、熱放射率 $\varepsilon=0.4$ を用いている。表から、この周波数帯においても、全ての受電出力、全ての伝送距離で成立する解があることが分かる。

表 2-93 61GHz 受電レクテナ規模と熱的成立性

受電電力 kW	周波数 Hz	送電距離	送電部開口 m	90%B W成立直径 m	BW 成立性	BW伝送系レクテナ開口 m	レクテナ到達電力 W	変換効率	発熱量 W	素子数 ($\eta=1$)	1素子受電電力 W	開口部正面から太陽光が照射			開口部側面から太陽光が照射				
												太陽光吸収率 0.15 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.4 構造表面温度	太陽光吸収率 0.15 吸収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.4 構造表面温度		
10	6.1500E+10	1km	3.2	2.2	○	3.2	1.25E+04	0.8	2.50E+03	4.8E+05	2.62E-02	2104.3	4604.3	315.5	210.4	2751.7	277.4		
		5km	5.0	4.9	○	5.0						1.2E+06	1.07E-02	5137.5	7637.5	286.5	513.8	3013.8	227.1
		10km	7.0	7.0	○	7.0						2.3E+06	5.48E-03	10069.5	12569.5	274.2	1007.0	5077.8	218.6
50	6.1500E+10	1km	7.0	2.2	○	7.0	6.25E+04	0.8	1.25E+04	2.3E+06	2.74E-02	10069.5	22569.5	317.4	1007.0	12751.7	275.2		
		5km	7.0	4.9	○	7.0						2.3E+06	2.74E-02	10069.5	22569.5	317.4	1007.0	13782.5	280.6
		10km	7.0	7.0	○	7.0						2.3E+06	2.74E-02	10069.5	22569.5	317.4	1007.0	14722.7	285.3
100	6.1500E+10	1km	10.1	2.2	○	10.1	1.25E+05	0.8	2.50E+04	4.8E+06	2.63E-02	20963.1	45963.1	315.7	2096.3	25251.7	271.8		
		5km	10.1	4.9	○	10.1						4.8E+06	2.63E-02	20963.1	45963.1	315.7	2096.3	26282.5	274.5
		10km	10.1	7.0	○	10.1						4.8E+06	2.63E-02	20963.1	45963.1	315.7	2096.3	27577.8	277.9

出所)J-spacesystems

h. 送受電部の質量推定

送受電部の質量は、大電力の送受を扱うシステムの実績を用いて行わねばならないが、公開された類似システムの事例は少ない。ここでは、三菱電機の送電部に関する公開資料を用い、送電部のアレイ当たりのモジュール質量を求め、周波数、アレイファクタ等の差を用いて検討に適用可能な数値に変換し、送電部の全質量を推定する手法を用いた。なお、受電部はレクテナ構造が単純なことから、送電部の1/2の質量と仮定して推定した。表 2-94、表 2-95 に、24GHz 帯、61GHz 帯の推定結果をしめす。なお、送電部構造は、前述のレゴリス粒子の舞い上がり高さより高い位置に設置することを想定して、支持柱の質量を固定値として与えたが、構造計算を施したわけではないため精査が必要である。

表 2-94 送受電部の予想質量

記号	項目	既存品実績	24.125GHzに変換	送電部開口長m				61.5GHzに変換	送電部開口長m				備考
				11.2	7.9	5.7	3.5		10.1	7	5	3.2	
A	メーカー	三菱電機	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	文献名	三菱電機 技術・ Vol.90・No.2・ 2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	周波数 GHz	5.8	24.125	24.125				61.5	24.125				検討結果
D	出力電力 W	423	423	100,000	100,000	50,000	50,000	423	100,000	50,000	10,000	10,000	検討結果
E	入力電力 W	1795 (参考)	651	153,852	153,852	76,926	76,926	846	200,000	100,000	20,000	20,000	検討結果
F	送電効率	35.1%	65.0%	65.0%				50.0%	50.0%				検討結果
G	アレイ質量 kg	16.1kg	-	1904.7	952.3	486.7	186.2	-	1726.0	814.1	423.4	172.6	I×K
H	上記質量内の アレイ数	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	合計アレイ数	324	324	900,000	450,000	230,000	88,000	324	5,300,000	2,500,000	1,300,000	530,000	-
J	アレイファクタ	0.7	0.95	0.95				0.95	0.95				-
K	アンテナ素子当たりの モジュール質量 kg	0.05	0.00212	0.00212				0.00033	0.00033				周波数比2乗、ア レイファクタ比1 乗で算出
L	送電部アンテナ部質量 kg	-	-	3,809.3	1,904.7	973.5	372.5	-	3,452.0	1,628.3	846.7	345.2	K×2と仮定
M	送電部アンテナ支持柱等質量 kg	記述無し	固定値を想定	100.0	100.0	100.0	100.0	固定値を想定	80.0	80.0	80.0	80.0	-
N	送電部合計質量 kg	-	-	3,909.3	2,004.7	1,073.5	472.5	-	3,532.0	1,708.3	926.7	425.2	G+L+M
O	受電部全質量 kg	-	送電部の1/2を仮定	1,954.7	1,002.3	536.7	236.2	-	1,726.0	814.1	423.4	172.6	-

出所)J-spacesystems

表 2-95 伝送距離、送電電力毎に整理した送受電部質量

伝送距離		1km		5km		10km	
		開口辺長	質量(受電部は 1/2)	開口辺長	質量(受電部は 1/2)	開口辺長	質量(受電部は 1/2)
電力	10kW	3.5m (3.2m)	0.5トン (0.4トン)	7.9m (5.0m)	2.0トン (0.9トン)	11.2m (7.0m)	3.9トン (1.7トン)
	50kW	5.7m (7.0m)	1.1トン(0.9トン)	7.9m (7.0m)	2.0トン(1.7トン)	11.2m (7.0m)	3.9トン (1.7トン)
	100kW	7.9m (10.1m)	2.0トン (3.5トン)	7.9m (10.1m)	2.0トン (3.5トン)	11.2m (10.1m)	3.9ト ン(3.5トン)

出所)J-spacesystems

i. 固定設置送受電システム検討結果まとめ

マイクロ波送電固定設置システムの実現性を24GHz と 61GHz 帯を用いて実施した。その結果、以下の検討結果が得られた。

- 24/61GHz 帯ともに、100kW で 10km 伝送距離の送受電システムは、シャクルトンクレータ外縁部設置で十分な実現性を有する。
- 5～10km 距離の送電では、ビームウエストを送受間の中央に置く伝送系が良く、24GHz 帯で

はこの光学系が成立する電波の回折から決まる送電部口径で 100kW 送電まで熱的に成立するが、61GHz 帯では 50kW がほぼ限界であり、100kW 送電では熱的成立性から口径を大きめに選択しなければならないため高周波数化による口径縮小はあまり大きくない。よって、固定システムでは 24GHz 帯の方が良い可能性がある。

- 24/61GHz 帯の双方で 1 素子当りの送信電力の平均値は 10mW~150mW 程度であることから、使用する送電デバイスはこの出力領域での効率が高い GaAs(ガリウムヒ素)が最良と考えられる。
- 24/61GHz 帯の双方で 1 素子当りの受信電力平均値は 11mW~300mW 程度であることから、送電デバイスはこの出力領域での効率が高い GaAs または GaN の何れかの選択となる。レクテナの微細化に伴うブレイクダウン電圧低下を抑制する目的では GaN が有力と考えられる。
- 24GHz における 100kW 送電部の規模は、5km 送電で 7.9m²²²、約 2 トン、10km で 11.2m²で約 4 トン程度である。同じく、受電部規模は、5km 送電で 7.9m²、約 1 トン、10km で 11.2m²で約 2 トンである。
- 本検討は、送電アンテナのビーム中心から外縁に向かって施す振幅テーパ等によるサイドローブの低減効果は含んでいない。次段階では、この効果を取り入れて必要な素子電力分布に合わせた送電デバイス配列と受電デバイス配列の決定、並びに主として送電部のサイズの精査が必要である。

4) 移動体向けマイクロ波送電システム

シャクルトンクレータ付近の月面基地設置の目的の 1 つに、クレータ内部にあると考えられる氷や資源の掘削、採集による利用がある。この為、クレータリム外縁に設置する固定の送電部からクレータ内部で連続稼働する移動式の自動運転重機へのマイクロ波給電の可能性を検討する必要がある。本節では、2040~2050 年代の期間に月南極付近のシャクルトンクレータ近傍に建造するマイクロ波を使った月面無線電力伝送システムで、建設機械等の移動体に対する電力供給システムの規模イメージと実現性を検討し、システムの在り方を具現化する。検討条件は以下の通りとする。

- 移動体は、地上で使用中の電動ショベルカーをベースモデルとし、重力加速度の比を用いて、月面で同じ走行性能や掘削性能を発揮するための等価な所要電力を換算する。
- シャクルトンクレータ外縁の送電部は、近傍に設置される太陽光発電所から、送電部の電力入力インタフェース部において必要となる直流電力が入力されることを前提とする。
- 移動体は、全く太陽光の当たらないクレータ内部で、氷や資源を昼夜連続して自動掘削する作業を行うことを想定し、シャクルトンクレータの斜面から底部のフラットな部分までカバーできる約 5km を送電距離とする。
- マイクロ波の周波数、デバイスは固定システムと同様とし、送電アンテナ、レクテナ部共に、建設が最も単純な放射冷却方式の採用を想定して検討する。移動体側はクレータ内部の全く太陽光が当たらない部分の走行を前提として熱的成立性を検討する。

²² □は「四方」の意味

a. 自動運転重機の所要電力の推定

現在地上で使用されている、電動駆動のバックホウの諸元を用い、地上と同等の掘削性能を月面で発揮させるために必要な所要電力やその他の性能を求め、表 2-96 を得る。本システムの検討には、月面の所要電力である 0.41kW を 1 台の自動運転重機に給電することを前提に、複数の重機に対して固定設置の給電部から給電するシステムの在り方を検討する。

表 2-96 月面の自動運転重機の所要電力と主要性能

項目	地上条件	月面仕様への換算条件
重力加速度	9.807m/s ²	1.625m/s ²
モデル建機	電動バックホー（ショベルカー） Komatsu Mini Excavator “Electric” 2.5kW、バイクの様に 跨って操縦	重力加速度が小さい分、掘削力は反比例で大きくなり、駆動速度は1/2乗に反比例して大きくなる。地上と同等の掘削能力になるよう所要電力を小さくし連続自動運転を実現
外観・サイズ等	 2.37mL×0.57mW×1.1mH	ほぼ同左
機体質量	350kg	≤350kg
所要電力	2.5kW	0.41kW
モータ出力	2.5kW	0.41kW
バケット容量	0.008m ³	0.008m ³
バケット掘削力	40kN	6.6kN
走行速度	1.4km/h	3.4km/h
登坂性能	25°	≥25°

出所)J-spacesystems

b. 最上位システムブロック図と電力ロス配分の定義

従来のレトロディレクティブ制御は、時々刻々と位置を変える移動体の方向に対する給電は良いが、ビームウエスト(焦点)の設置距離は変えることができない。移動体測位が搭載可能なレク開口はできるだけ小型化し、かつ一定のサイズにしなければならないことから、移動体までの距離の変化に対応させて拡がるビームの焦点範囲を最小に維持する為、ビームウエストまでの距離を可変化する必要がある。月面では、GPS と類似した月面衛星測位システムが展開されて 10m 級精度の測位が可能となることから、ビームウエストの設置距離を送受電システム間の相対距離に合わせて変える能動制御を追加した、拡張型レトロディレクティブ(Enhanced-RD)方式を採用する。この方式を前提とする、最上位システムブロック図と電力ロス配分のイメージは図 2-161 の通りである。

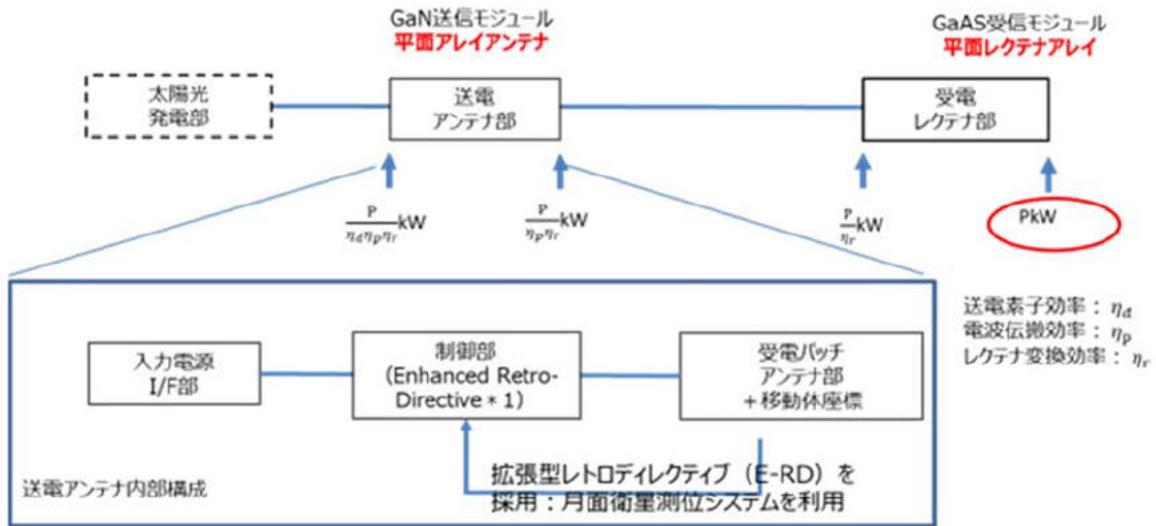


図 2-161 移動体向けマイクロ波送受電システムの最上位ブロック図と電力配分

出所)J-spacesystems

c. ビーム走査角度と伝送距離の関係

図 2-162 に、粗いアンテナを 2 次元に並べたアレイアンテナの、グレーチングローブが発生しない限界のアレイファクタとビーム送角度(片振幅)を示す。図から、アレイファクタ 0.6(波長の60%の距離を感覚として素子アンテナを設置)の場合のビーム走査角度の限界は、アンテナ正面方向から±40°であることが分かる。シャクルトンクレータの上空から撮影した写真にこの動作角度を重ね、クレータのどの範囲までビームが届くかを見たのが、図 2-163 である。図から、送電部から4km 程度の距離まで送電すれば、クレータ底部の平滑な部分での重機稼働が可能なが分かる。よって、サービス距離の目標は、ここでは、5km 程度とする。

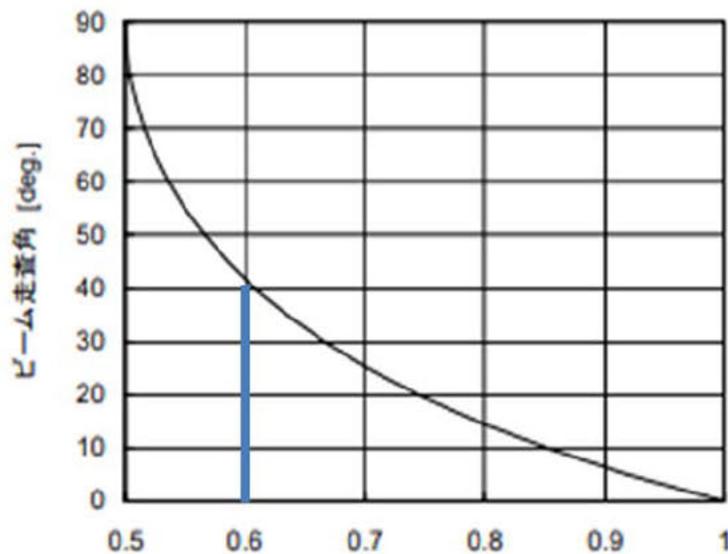


図 2-162 アレイファクタとグレーチングローブ発生限界角度との関係

出所) 高橋 徹、電子情報通信学会『知識の森』(<http://www.ieice-hbkb.org/>) 4 群-2 編-7

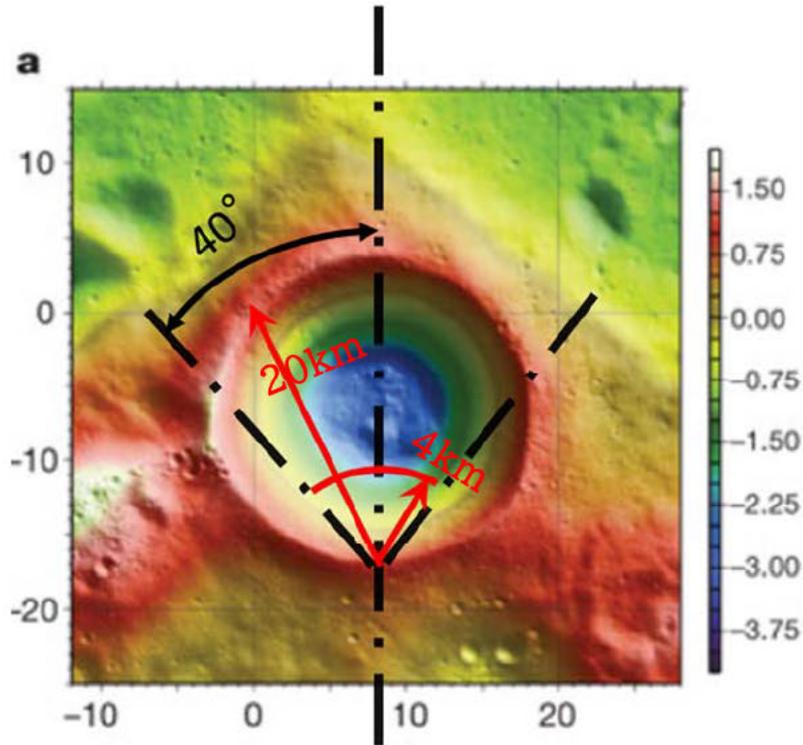


図 2-163 シャクルトンクレータ形状とビーム走査角度、距離の関係

出所) Detailed Characterization of Shackleton Crater | Solar System Exploration Research Virtual Institute (nasa.gov) の画像に追記

d. 送受電間のビーム伝送系

送電アンテナビームの回折による広がりをおさめ、送電電力の、例えば、90%が受電可能な領域をレクテナで覆うこととする。送受電部のビーム伝送光学系は、移動体側に設置される受電部を最小化する目的で下図の様に、ビームウエストをレクテナ上に置く伝送系を選択する。このイメージを図 2-164 に示す。

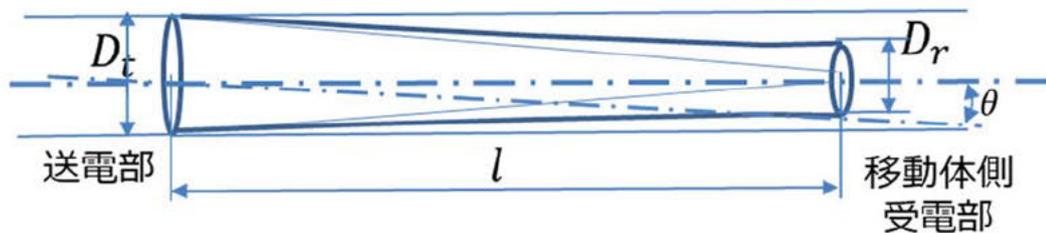


図 2-164 ビームウエストを受電レクテナ面に置くビーム伝送系

出所) J-spacesystems

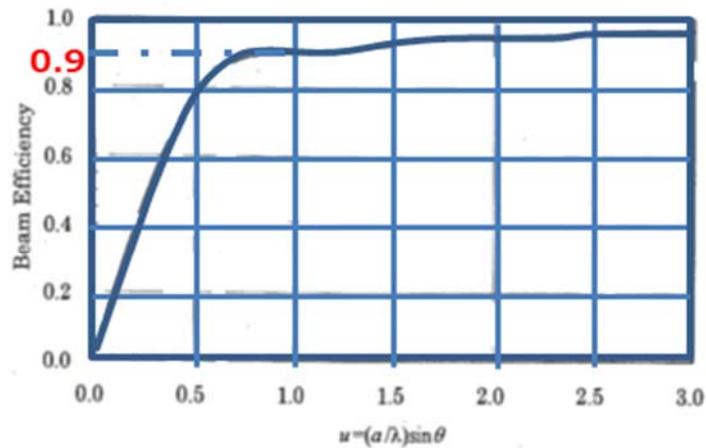
図 2-165 は、送電部を正方形の矩形アンテナとして、振幅分布が一様な送信を行うアレイアンテナの正規化ビーム効率である。図より例えば 90%電力の受電には $u=1.0$ (片幅)が必要であり、矩形受電部の 1 辺の長さは、送電中心から見た見込角 θ は、両幅で 2 倍の角度領域が必要となる。その倍率を n 、受電レクテナ開口(矩形)辺長を D_r 、送電アンテナの開口(矩形)辺長を D_t 、ビームウエストまでの

焦点距離を f 、光速を c 、送受間の距離を l とすれば、

$$D_r = n\theta l = n \left(\frac{c}{f D_t} \right) l \quad \text{-----}(8)$$

と表すことができる。レクテナ部の開口は、送電部のそれより小さくならねばビーム伝送系が成立しないことから、 $D_r \leq D_t$ とおいて、送電アンテナサイズは下式で求めることができる。

$$D_t \geq \sqrt{ncl/f} \quad \text{-----}(9)$$



(a) Beam efficiency

図 2-165 矩形アンテナの回折による正規化ビーム効率(一様振幅分布の電力包含角度半径)

出所) Izumi Mikami, "Study on New concept of Space Solar Power Station (SPSS)", Kyoto University Doctor Thesis, pp-36-42, March 2005

また、本伝送系では、送受間距離の中央にビームウエストを置く伝送系よりレクテナサイズは小さくならなければならない。それぞれの受電部口径を D_{r1} 、 D_{r2} 、送電部口径を D_{t1} 、 D_{t2} とし、 $D_{r1} \leq D_{r2}$ の条件を与えて、以下を得る。

$$D_{t1} \geq 2D_{t2} = 2D_{r2} \quad \text{-----}(10)$$

よって、式(9)を用いて受電部開口長を仮決定した後、式(10)を満足させるようパラメトリックに送電部開口長を与え、要すれば、送受間の距離ごとにビーム効率と熱的成立性の双方を勘案して、送受電部のサイズを決定する。

e. 移動体向け電力伝送システムの検討条件

移動体向けマイクロ波電量伝送システムの検討条件を、表 2-97 に示す。

表 2-97 移動体向けマイクロ波電量伝送システム検討条件

項目	月面	SSPS
設置域	送電部は、月南極付近のシャクルトンクレータのリム部に固定設置、受電部はクレータ内を移動し、連続稼働する自動運転重機に搭載	静止衛星軌道
熱環境	① 真空 ② 南極月面平均温度 260K ③ クレータ内部平均温度 90K ④ 背景放射 2.7K	① 真空 ② 背景放射 2.7K ③ 地球アルベド 0.3±0.02
太陽光	送電部：ほぼ水平方向から70%/1日 1.37KW/m ² 受電部：0 kW/m ²	昼 1.37KW/m ²
使用電波帯域	24GHz帯、61GHz帯 (ISM帯)	ISM帯
伝送電力束密度	制限なし	電離層保護：23mW/cm ² 人体保護：1mW/cm ²
伝送電力	レクテナ電力出力部で0.41kW	-
最大伝送距離	3~4km (一定の距離範囲を超えた場合は、受電電力比低下を見込んで送電電力を増加)	約36000km
最大ビーム走査角度	≥±40°	±5°程度
アレーファクタ	送電部0.6、レクテナ部0.95	0.9
変換効率	送電部50%、レクテナ部80%	電波の回折で決まるサイズ
入力電源	近隣に設置した太陽光パネル、または発電所から必要量を受給	一体型送電パネル裏面の太陽電池から必要量を供給

出所)J-spacesystems

f. 熱的成立性検討モデル

送電部の開口が正方形形状であることを念頭に置き、放射冷却による熱的成立性を評価するための廃熱概念図を図 2-166 に示す。簡単化の為、外表面は一様温度とし、設置されるシャクルトンクレータリム部の月面の温度は平均温度、熱放射の形態係数は、宇宙の背景放射に対して 0.5、月面に対して 0.5 と置いた。

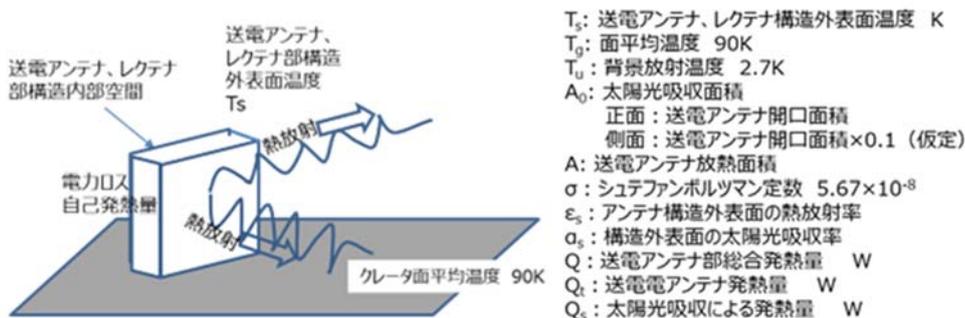


図 2-166 総受電部の放射冷却による廃熱概念図

出所)J-spacesystems

なお、送電部については、太陽光照射は、正面からの場合(温度は高め)と側面からの場合(温度が低め)の2つのケースで評価することとし、構造正面の場合に対して側面からの照射に置ける吸収面先は10%と見積る。よって、それぞれの場合の太陽光吸収熱量 Q_s は、式(4)、式(5)による。受電部は、太陽光が当たらないクレータ部にある為、

$$Q_s = Q_t = 0 \quad \text{----- (11)}$$

を用いる。定常状態を考えれば、自己発熱量と太陽光吸収熱量の和が放射冷却熱量に一致することから、構造体表面の温度 T_s は下式で表すことができる。

$$Q = Q_s + Q_t = 0.5\sigma\epsilon_s A \{ (T_s^4 - T_g^4) + (T_s^4 - T_u^4) \} \quad \text{----- (12)}$$

$$\therefore T_s = \left\{ \left(\frac{Q}{\sigma\epsilon_s A} \right) + \frac{T_g^4 + T_u^4}{2} \right\}^{1/4} = \left\{ \left(\frac{Q_s + Q_t}{\sigma\epsilon_s A} \right) + \frac{T_g^4 + T_u^4}{2} \right\}^{1/4} \quad \text{----- (13)}$$

本検討では、固定設置における検討と同様に、太陽光吸収率と熱放射率は、実現可能な値に固定して構造表面温度を算出し、内部の電子機器が駆動可能な温度が、表面定数の設計を最適化すれば実現可能な範囲(概略-100℃~100℃)に入ることを確認することに留め、それ以上の定数最適化は実施しないこととする。

g. 送電部アンテナ規模と熱的成立性解析結果

送受間距離中央にビームウエストを置く伝送系において必要なレクテナ辺長を、式(8)、図 2-165 のビーム効率図を用いて表 2-98 の様にまとめることができる。

表 2-98 周波数帯、伝送距離、ビーム効率に対応し必要となるレクテナ辺長(単位は m)

伝送距離 km	24.125GHz			61.5GHz		
	75%	80%	90%	70%	80%	90%
1	3.2	3.5	5.0	2.0	2.2	3.1
2.5	5.0	5.6	7.9	3.1	3.5	4.9
5	7.1	7.9	11.2	4.4	4.9	7.0

出所)J-spacesystems

自動運転重機は 2.5mL×0.5mB×1.1mH 程度の大きさのため、搭載可能なレクテナサイズは2m□が限界と考えられる。表 2-98 から、レクテナサイズの小型化が可能な61GHz帯、レクテナ辺長2.0mを選定して、以降の検討を行うこととする。

式(10)から送電アンテナ辺長はレクテナの2倍以上が必要であることに鑑み、送電アンテナ辺長を2倍(4m)、3倍(6m)に固定し、それぞれの送電アンテナ辺長毎に、伝送距離とビーム効率に対応するレ

クテナ辺長をパラメトリックに求めたのが、

表 2-99である。この表より、2m□の一定サイズのレクテナが一定のビーム効率で受電するには、伝送アンテナ辺長は大きい方が良いこと、及び、レクテナサイズを固定すれば伝送距離が増えるごとにビーム効率が低下して受電電力が減少するため、低下するビーム効率を補うような送電電力可変の送電システムの必要性を示唆している。

以上の検討から、送電アンテナ辺長を 6m、レクテナ辺長を 2m に固定し、月面の衛星測位システムを用いて測定可能な送受間距離に対応させ、送電線力を可変に制御する拡張型レトロディレクティブ (Enhanced Retrodirective:ER)方式の導入を想定して、移動体用マイクロ波送電システムの熱的成立性を検討する。

表 2-99 2m□程度のレクテナが受電可能な伝送距離毎のビーム効率 (単位 m)

伝送距離 km	送電アンテナ辺長=レクテナ辺長×2=4m						送電アンテナ辺長=レクテナ辺長×3=6 m					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
1	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	2.4	0.4	0.5	0.5	0.7	0.8	1.6
2	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4	4.9	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	3.3
2.5	1.5	1.7	2.0	2.4	3.0	6.1	1.0	1.2	1.3	1.6	2.0	4.1
3	1.8	2.1	2.4	2.9	3.7	7.3	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4	4.9
4	2.4	2.8	3.2	3.9	4.9	9.8	1.6	1.9	2.1	2.6	3.3	6.5
5	3.0	3.5	4.0	4.9	6.1	12.2	2.0	2.3	2.6	3.3	4.1	8.1

出所)J-spacesystems

ア) 送電アンテナ

レクテナから取出し可能な直流電力を 0.41kW 程度と固定し、伝送距離ごとに図 2-165 から得るビーム効率(到達伝搬電力比)を用いて、送電アンテナ辺長 6m の場合のアンテナ構成と表面の温度を計算した結果が、表 2-100 である。

表 2-100 送電アンテナ辺長 6m の場合のアンテナ構成と表面温度

周波数 GHz	レクテナ出力電力 kW	レクテナ変換効率	伝送距離 km	到達伝搬電力比	素子出力 W/個	変換効率	消費電力 W/個	発熱量 W/個	アレーファクタ	素子数	発熱量 QtW	総合送電電力 kW	総合入力電力 kW	アンテナ辺長 m	正面から太陽光			側面から太陽光		
															太陽吸収率 0.1	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.3 構造表面 温度 K	太陽吸収率 0.1	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.3 構造表面 温度 K
61.5	0.41	0.80	1.00	0.90	0.0005	0.5	0.0010	0.0005	0.6	1.9E+06	9.5E+02	0.95	1.90	6.0	5.0E+03	6.0E+03	290.0	5.0E+02	1.4E+03	242.4
			2.00	0.84	0.0006	0.5	0.0011	0.0006		1.8E+06	1.0E+03	1.02	2.03	6.0	4.9E+03	5.9E+03	290.8	4.9E+02	1.5E+03	243.7
			3.00	0.75	0.0006	0.5	0.0012	0.0006		1.9E+06	1.1E+03	1.14	2.28	6.0	5.0E+03	6.1E+03	291.6	5.0E+02	1.6E+03	245.0
			4.00	0.55	0.0008	0.5	0.0017	0.0008		1.8E+06	1.6E+03	1.55	3.11	6.0	4.9E+03	6.4E+03	295.2	4.9E+02	2.0E+03	251.0
			5.00	0.40	0.0012	0.5	0.0023	0.0012		1.9E+06	2.1E+03	2.14	4.27	6.0	4.9E+03	7.0E+03	299.7	4.9E+02	2.6E+03	258.2

出所)J-spacesystems

上表は、一見送電アンテナが成立しそうに見えるが、アンテナ 1 素子当りの送信電力は最大でも 1.2mW しかなく、仮定した変換効率 50%の実現はほぼ不可能であることから、成立しない可能性が高い。よって、送電アンテナ辺長をより小型化して素子当りの送電出力を増大させるとともに、ビーム効

率を犠牲にして、レクテナ外に漏洩する電力をやむなしとして、素子当りの送電電力を 20mW 以上に増やす方向を模索する。

レクテナ出力で移動体数 10 台程度への同時給電を考えた 4kW 級システムで、素子出力を 20mW に固定し、熱的に成立する送電アンテナの最小辺長を決め、その後、辺長 2m のレクテナが受電可能な電力を逆算で求める手法を取る。素子出力、アレイファクタをパラメータとして検討し、送電アンテナの辺長と熱的成立性の限界を探ったところ、表 2-101 の結果を得た。

表 2-101 10 台程度の移動体への給電を想定した素子出力 20mW 時の送電アンテナ成立性

レクテナ出力電力 kW	レクテナ変換効率	伝送距離 km	ビーム効率	素子出力 W/個	変換効率	消費電力 W/個	発熱量 W/個	アレイファクタ	素子数	発熱量 Q _W	総合送電電力 kW	総合入力電力 kW	アンテナ辺長 m	正面から太陽光			側面から太陽光		
														太陽吸収率 0.05	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.95 構造表面温度 K	太陽吸収率 0.1	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.95 構造表面温度 K
4.00	0.80	5.00	0.40	0.03	0.5	0.0600	0.0300	0.60	4.2E+05	1.3E+04	12.50	25.00	1.9	2.4E+02	1.3E+04	439.5	4.9E+01	1.3E+04	432.4
	0.80	5.00	0.40	0.025	0.5	0.0500	0.0250	0.70	5.0E+05	1.3E+04	12.50	25.00	2.4	4.0E+02	1.3E+04	393.5	8.0E+01	1.3E+04	386.5
4.00	0.80	5.00	0.40	0.02	0.5	0.0400	0.0200	0.80	6.3E+05	1.3E+04	12.50	25.00	3.1	6.5E+02	1.3E+04	350.7	1.3E+02	1.3E+04	347.7

出所)J-spacesystems

この表から、素子当りの出力 20mW(効率 50%)で、アレイファクタ 0.8(ビーム走査角度±15°)に広げ、送電アンテナ辺長 3.1m まで大きくして初めて熱的に成立する可能性が示された。

イ) 受電部

前頁で決めた 3.1m²、4kW 出力の送電アンテナからマルチビームで複数移動体に給電する場合、搭載可能な 2m²レクテナから 1 個から取出し可能な電力(直流)は、図 2-165 で決まるビーム効率を用いて伝送距離ごとに算出でき、その取出し可能電力を移動体の所要電力で除して、サービス台数(マルチビーム数)を決めることができる。結果を表 2-102 に示す。

表 2-102 送電アンテナ辺長 3.1m²、4kW 送電時の伝送距離毎のレクテナ取出電力とサービス台数

到達距離 km	レクテナ辺長 4m 時		レクテナ辺長 2m 時			
	(λ/D) 倍率	ビーム効率	(λ/D) 倍率	ビーム効率	取出し電力 W	サービス台数
5	0.4	40.0%	0.2	9.0%	360	1が限界か
4	0.65	55.0%	0.325	25.0%	1,000	2~3
3	0.8	70.0%	0.4	40.0%	1,600	4
2	1.3	84.0%	0.65	55.0%	2,200	5
1	1.5	90.0%	0.75	67.5%	2,700	7

出所)J-spacesystems

表 2-102 から、熱的成立条件を満たす一定開口、一定送電力のマルチビームアンテナから、複数台の移動体に給電するシステムのサービスは、近距離の場合に多くの台数に、遠距離になれば少数の台数に給電する概念になることが分かる。

次に、0.41W を出力可能な 2m²のレクテナの規模と構造表面温度は表 2-103 となる。

表 2-103 送電アンテナ辺長 3.1m²、4kW 送電時のレクテナの熱的成立性

周波数 GHz	レクテナ出力 電力 kW	周波数 Hz	レクテナ効 率	レクテナ 辺長 m	レクテナ 到達電力 kW	発熱量 W	素子数 ($\eta=1$)	1素子受電 電力 W	太陽光吸 収熱量 W	総合発熱量 Q W	熱放射率 0.05 構造表面温度
61.5	0.41	6.1500E+10	0.8	2.0	0.51	1.03E+02	2.8E+04	0.018	0.0	1.03E+02	260.2

出所)J-spacesystems

以上から、マルチビームアンテナから複数移動体に給電する場合、変換効率の良い素子出力範囲と熱的成立性の制約によりアンテナサイズが決定され、移動体搭載可能なレクテナサイズと送受間距離とビーム効率から、レクテナ出力が決定されるという設計シナリオになることが分かる。また、移動体の距離対応のビーム数やビーム毎の電力可変システムになる。この給電サービスのシステムイメージを図 2-167 に示す。

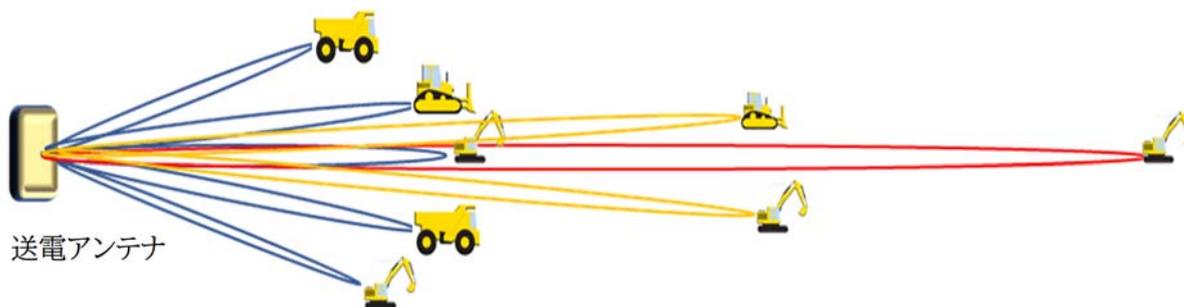


図 2-167 マルチビーム送電アンテナから複数移動体に対する給電サービスのイメージ

出所)J-spacesystems

なお、上記の例は、送電アンテナサイズ3.1m²、送電力 4kW、アレイファクタ 0.8(ビーム走査角度 ± 15 度)、素子出力 20mW の場合で熱的に成立する解であるが、ビーム走査角度を広げるためにはアレイファクタを 0.6 程度まで広げる必要があることから、開口面積は増えて温度は下がる。よって、50% の高率の実現できる範囲で素子出力を上げ、サービス数を増やす方向での最適化を測れば良い。この最適化は、今後の検討に委ねる。

h. 送受電部の質量推定

送受電部の質量は、固定設置電力伝送システムの場合と同じく、三菱電機の送電部に関する公開資料を用い、送電部のアレイ当たりのモジュール質量を求め、周波数、アレイファクタ等の差を用いて検討に適用可能な数値に変換し、送電部の全質量を推定する手法を用いた。なお、受電部はレクテナについては移動体搭載であることに鑑み、送電部と同様な換算で質量を推定した。

表 2-104 に推定結果を示す。なお、送電部構造は、前述のレゴリス粒子の舞い上がり高さより高い

位置に設置することを想定して、支持柱の質量を固定値して与えたが、構造計算を施していないため精査が必要である。

表 2-104 マルチビーム送電アンテナ、移動重機搭載レクテナ部の推定質量

記号	項目	既存品実績	12.5kW送電出力マルチビーム送電部		レクテナ受電部		備考
			同素子数で変換	送電部辺長3.1mm 出力12.5kWで換算	同素子数で変換	送電部辺長2m 出力0.41kWで換算	
A	メーカー	三菱電機	-	-	-	-	-
B	文献名	三菱電機技報・ Vol.90・No.2・ 2016	-	-	-	-	-
C	周波数 GHz	5.8	61.5	61.5	61.5	61.5	検討結果
D	出力電力 W	423	423	12,500	423	410	検討結果
E	全体電力/入力電力 W	1795 (参考)	846	25,000	846	513	検討結果
F	変換効率	35.1%	50.0%	50.0%	50.0%	80.0%	検討結果
G	アレー質量 kg	16.1	-	318.2	-	9.1	I×K
H	上記質量内の アレー数	81	81	630,000	81	28,000	-
I	合計アレー数	324	324	630,000	324	28,000	-
J	アレーファクタ	0.7	0.8	0.8	0.95	0.95	-
K	アンテナ素子当り モジュール質量 kg	0.05	0.00051	0.00051	0.00033	0.00033	周波数比2乗、アレー ファクタ比1乗で算出
L	構造等質量	-	-	318.2	-	18.2	G×2と仮定
M	マルチビーム制御系質量	記述無し	-	200.0	-	-	-
N	送電アンテナ支持構造 kg	-	固定値を想定	100	レクテナ回線機構を含む	20	-
O	合計質量 kg	-	-	936.4	-	38.2	G+L+M+N

出所)J-spacesystems

i. 移動体向けマイクロ波送電システム検討結果まとめ

以上の検討結果をまとめると、以下となる。

- 移動体の所要電力は、電動地上重機の諸元から換算して 0.41kW 程度を前提とし、また、その重機サイズから搭載可能なレクテナは 2m□が限度と推定する。
- クレータリム部に設置する送電部から、シャクルトンクレータ部の底部までの距離 5km までの給電を想定した場合、ビームウエストをレクテナ上に置くビーム伝送系が良いが、送電素子の効率が良い 10mW 以上の素子で送電部を実現するには、送電部開口の回折効果、マルチビーム数、ビーム走査角度との組合せで最適化を図り、熱的に成立する条件を見出す必要があることが分かった。
- レクテナサイズの小型化のため、ビームウエストサイズが小さい 61GHz 帯を選定し、送電部規模として、3.1m□、12.5kW の定送電出力で、伝送距離 1km でのビーム数 10、5km でのビーム数 1 で、移動体へのサービス可能性が示された。送電距離増に応じて少なくするビーム数、ビーム減に対応させ 1 ビーム当たりの送電電力を大きくする能動制御システムの導入により、移動体 1 台当たり 0.41kW 程度の給電が可能となる。本方式の更なる実現性設計を期待する。
- 建設年代における予想素子効率と素子出力を勘案して、送電部には GaAs、レクテナ部には GaAs また GaN を用いることが良さそうであり、レクテナについてはエンハンスモードの GaN HEMT の実現に向け、開発着手する必要がある。
- 建設年代における予想素子効率と素子出力を勘案して、送電部には GaAs、レクテナ部には GaAs また GaN を用いることが良さそうであり、レクテナについてはエンハンスモードの GaN HEMT の実現に向け、開発着手する必要がある。

- 本検討は、送電アンテナのビーム中心から外縁に向かって施す振幅テーパ等によるサイドローブ低減効果は含んでいない。次段階では、この効果を取り入れて必要な素子電力分布に合わせた送電デバイス配列と受電デバイス配列の決定、並びに、主として送電部のサイズの精査が必要である。

(3) 光ファイバー・レーザ

1) 光ファイバー

a. ファイバーレーザ構造を利用した光ファイバー送電の考え方

ファイバーレーザの構造を利用した光ファイバー送電の基本的な考え方を整理する。

図 2-168 には、ファイバーレーザの構成概要が示されている。同図の上部では、ファイバーレーザの基本構成が示されている。励起用 LD(Laser Diode:半導体レーザ)がファイバーレーザにとってのエネルギー源であり、光ファイバー内へ単色の光エネルギーが注入される。LD が用いられる理由は、電気・光変換効率が高く、高出力、温度管理による波長制御が容易、で高い生産技術が確立しているからである。光ファイバー内に導入された LD 光は、2 つのファイバー型回折格子に挟まれた領域で吸収され、より長波長のレーザ発振を駆動し、出力側の回折格子から一定の割合で出力させている。

同図の下部では、高出力のファイバーレーザの基本構成例が示されている。高出力の源となる LD が複数(多数)配置され、それぞれが光ファイバーに結合された後に、ガラスファイバーの高い融着技術により、一本にまとめられた(コンバイナと呼ばれる)励起源として、一本のファイバーレーザの発振に利用される。このレーザ発振により、LD 光に比し、波長はより長波長に、輝度はより高く変換されることとなる。光ファイバー内を伝播するレーザ光の経路が単一となるシングルモードでは、いわゆる回折限界の伝送ビームを出力することができる。これは長距離の空間伝送に適した光源として用いることが出来ることに加え、レンズを用いた集光により集光強度を最大にできるその物理的特性から、産業としては微細加工用の加工熱源として広く用いられている。

本稿の主題である光ファイバー伝送への利用に際しては、コンバイナで束ねられた光をそのまま伝送することが想定される。ファイバーから取り出して空間中を長距離伝送させたり、レンズにより限界まで小さく集光させて加工させたりすることができる、輝度の高いレーザビームを作る必要がないからである。オプションとして、ファイバーレーザ構造を利用する利点としては、波長を長波長に変換することができることから、波長選択の一手法とする考え方はありうる。

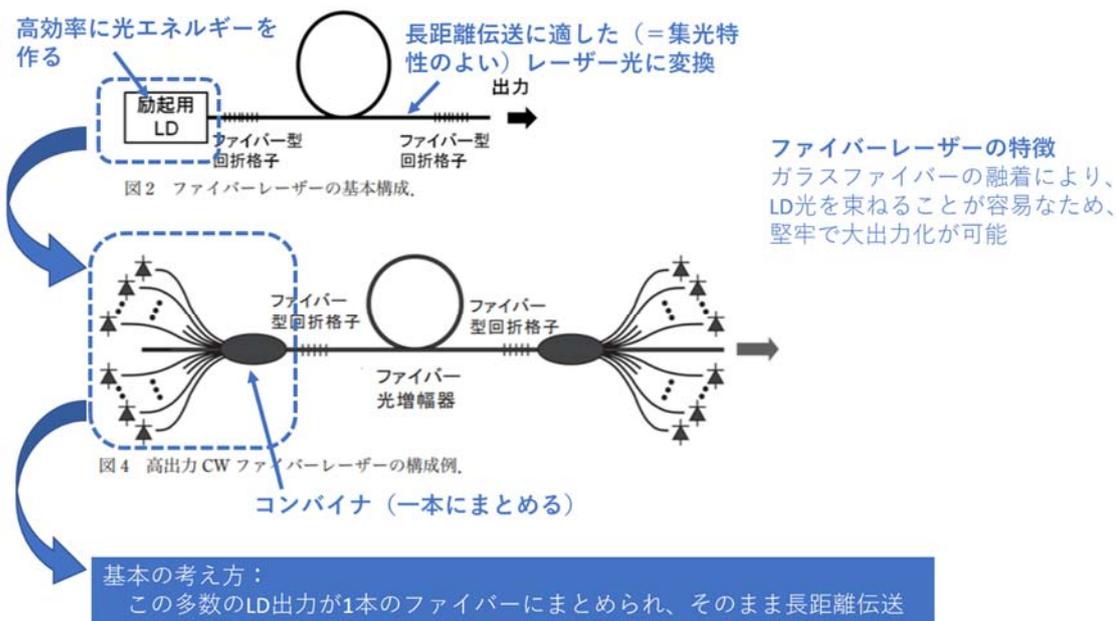


図 2-168 ファイバーレーザーの構造を利用した光ファイバー送電の考え方

出所)黒色の図は西澤典彦, 光学 42(9), 438-445, 2013-09-10. 青は光産業創成大追記作成。

b. 石英ファイバー伝送損失と伝送効率の波長・距離依存性

光ファイバーで長距離に渡って損失が少ない材料は、大陸間光通信でも広く使われている石英であり、各種添加剤の使用や径のバリエーションも豊富で、確立された製造技術が多くの利用を支えている。図 2-169 に典型的な石英ファイバーの伝送損失の波長依存性を示す。1.55 μm 付近に損失の谷があり、光通信ではこの波長を利用して低損失伝送を実現している。ここより短波長の領域は、石英材料内の微細な物質や構造による光散乱(レイリー散乱)による損失で、波長の4乗に反比例するため、なるべく長波長を選択することが低損失につながる。長波長側では石英内の分子に由来する吸収が存在する。

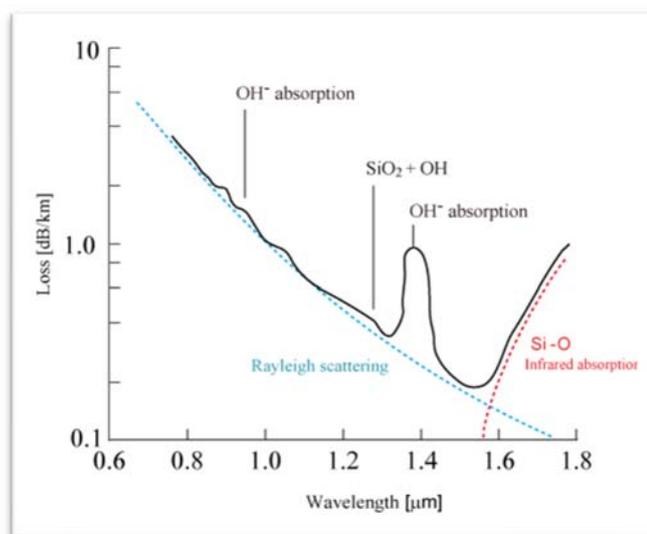


図 2-169 典型的な石英ファイバー伝送損失の波長依存性

出所)Optipedia HP: <https://optipedia.info/laser/fiberlaser/loss-1/>

加工用の kW 級以上のファイバーレーザーの転用が光エネルギーを用いた電力伝送の基本であると考え、波長は $1.07\text{--}08\mu\text{m}$ の選択となる。しかしながら、上記で議論したように、ファイバーレーザーとする前の励起 LD の出力光をそのまま光ファイバーにて伝送する場合には、波長は $0.9\mu\text{m}$ 帯となる。これは石英ファイバーによる伝送においては、より損失が大きい方向にはなるが、LD 光からファイバーレーザー光への変換損がなくなる有利な点もある。

表 2-105 にそれら 2 波長の損失について、図 2-169 の損失値から透過率に換算した値を示す。石英ファイバー長は 100m、500m、及び 1000m とし、それぞれの長さに対する透過率を示している。参考までに光通信用の $1.55\mu\text{m}$ の値も付した。短波長ほど透過率が低下しており、 $0.9\mu\text{m}$ の 1000m 伝送では 77.6% である。

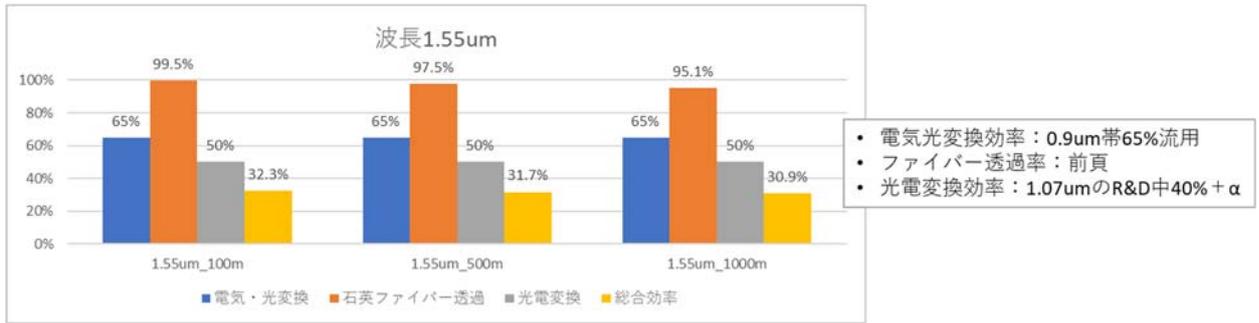
表 2-105 3つのレーザー波長に対する石英ファイバー伝送損失

波長 μm	dB/km	dB/100m	dB/500m	dB/1000m
		透過率%	透過率%	透過率%
1.55	0.2	0.02	0.1	0.2
		99.5%	97.5%	95.1%
1.07	0.7	0.07	0.35	0.7
		98.4%	92.3%	85.1%
0.9	1.1	0.11	0.55	1.1
		97.5%	88.1%	77.6%

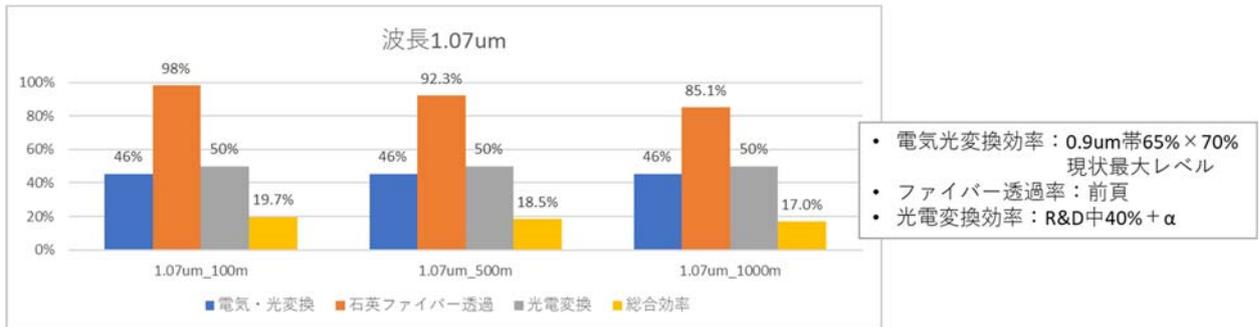
出所)図 2-169 典型的な石英ファイバー伝送損失の波長依存性から読み取り。光産業創成大作成。

図 2-170 に、3 波長別の電気・電気変換の総合効率の石英ファイバー長依存性を示す。電気・電気変換には、電気からレーザー光を生成する際の①電気・光変換、②石英ファイバー透過、レーザー光から電気へのいわゆる③光電変換、の 3 過程を含み、それぞれの効率の乗算を総合効率としている。それぞれの効率値については図中に補足した。

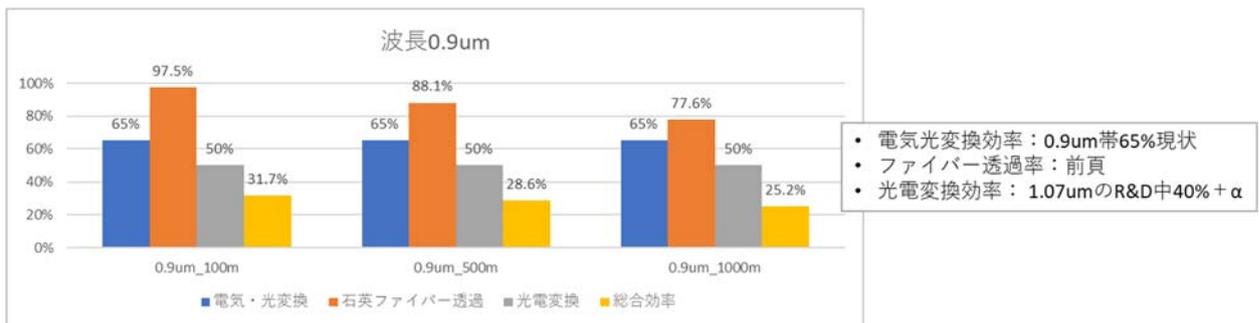
総合効率が最も低い波長は $1.07\mu\text{m}$ で 20% 弱であった。初段①の低さが効いており、LD 光からファイバーレーザー光への変換時の損失に起因している。よって、LD 光を直接伝送する波長 $0.9\mu\text{m}$ はその変換損失がない分有利となり、短波長故の石英伝送効率低下を補って 20% 台後半と総合効率が增加している。しかしながら、全体として 7 割から 8 割が損失となるシステムであることがわかる。主要因は電気と光の相互変換であり、送電・受電各サイトにおける熱損失に相当する。



(a)



(b)



(c)

図 2-170 3 波長別の電気 to 電気総合効率

出所)光産業創成大

c. 光ファイバーケーブルの重量見積

産業用の高出力用光ファイバーケーブルについては次の d で紹介するが、ここでは重量見積について検討する。図 2-171 に示すような製品の場合、筆者の実測例によると 1m 当たり 200g 程度であった。1km 当たりで 200kg に相当する。

対象のファイバーコア径は高出力用として大きめの 1,000um 程度以下を想定し、光ファイバー自体の外径を直径 1mm と仮定すると、石英ガラスの質量密度 2.2g/cm³ から、1m 当たりの重量は、

$$\pi (\phi 0.1\text{cm}/2)^2 \times 100\text{cm}/\text{m} \times 2.2\text{g}/\text{cm}^3 = 1.7 \text{ g}/\text{m} = 1.7 \text{ kg}/\text{km}$$

が光ファイバー裸線の値となる。

光ファイバー送電におけるシステム重量としては、この光ファイバーケーブルに加え、光源であるレーザー発振器、光電変換を担うレーザ PV で構成され、後者 2 つは空間伝送とほぼ同じ重量見積の考え方でまずは評価できると考えられる。

d. 光ファイバーケーブルの例、耐放性、国産新技術、熱供給含めた可能性

ここでは、上の議論に関連する光ファイバーケーブルや、耐放射線性、光ファイバーによる電力伝送に利用可能性が考えられる新しい国産の独自技術といった参考情報、及び送電・受電サイトにおける熱供給の可能性について簡単に触れる。

図 2-171 に高出力光ファイバーケーブルの例を示す。内部に石英ガラスファイバーをはじめ、各種信号線や緩衝材などを持ち、取り回しや耐環境性確保のために柔軟性・堅牢性を確保したものが光ファイバーケーブルと呼ばれている。図では黄色のケーブルが見えており、一般的には金属のフレキシブル管に防塵防水の樹脂(図では黄色)がコーティングされることが多い。ケーブル端部にはコネクタ(規格品)が接続され、光ファイバー端から安定的にレーザビームを取り出し、接続先に供給できる工夫がされている。



図 2-171 高出力用光ファイバーケーブルの例

出所)コヒーレント社 HP. QBH Fiber Optic Cable: 1030 nm to 1090 nm Datasheet
<https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/components-and-accessories/qbh-fiber-optic-cable-1030-1090nm-ds.pdf>

月面上の放射線環境に対応する光ファイバーの利用が望まれる。図 2-172 に高出力ファイバーレーザーの福島第一原子力発電所の廃炉向けの研究で示されている耐放射線性に関する実験結果を示す。非耐放性仕様の加工用光ファイバー(オプスカンド(現コヒーレント)製、図 2-171 にほぼ相当すると思われる)、耐放性仕様のある通信用シングルモード光ファイバー(フッ素ドープ仕様と高純度石英の 2 種)に対して、放射線照射設備における照射実験が行われている。宇宙環境とは異なる高線量率に対する実験ではあるが、前半にコバルト 60 を線源とした 1.1MeV の γ 線の照射、後半に 10MeV 電子線の照射を行い、光ファイバーの透過率変化を計測している。その結果、

- 0.2MGy の γ 線照射による透過率低下は小さい。
- 10MeV 電子線では非耐放性仕様の劣化が大きい。

といったことが判明している。10MeV 電子線は 8mm 厚鉄板で阻止可能なものである。

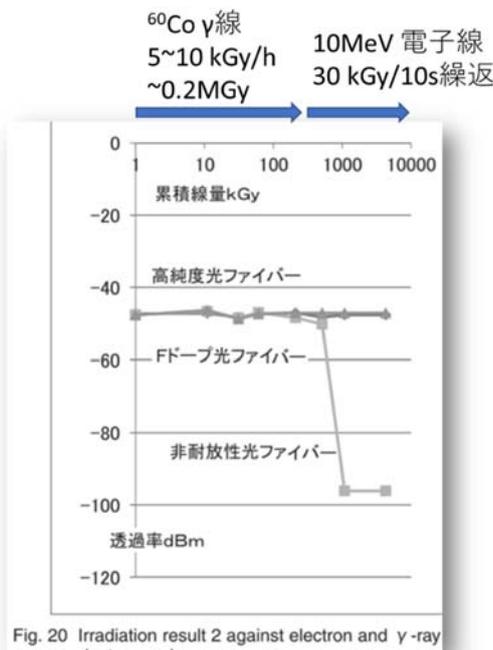


Fig. 20 Irradiation result 2 against electron and γ -ray

図 2-172 高純度石英ファイバーと F ドープ耐放射性仕様は、耐放射性が高い

出所)遠山伸一、峰原英介 (2017). "高出力ファイバーレーザを用いた切断及び除染の技術開発." Journal of RANDEC 56: 55-65. グラフより上の記述は光産業創成大追記。

光ガラスファイバーは歴史も古く、広く産業利用されているものの、宇宙用の耐放射線性を持つ実績がある石英ファイバーは海外製が主流である。しかしながら、純国産の新しい光ファイバー技術にフォトニック結晶ファイバーがある。純石英で、内部の空隙構造による光ファイバー機能を付与しており、耐放射線性が確保できる可能性がある国産技術であり、NTT と三菱重工が 2020 年に発表している。これは、シングル(単一)モードのものであり、加工用に高集光が期待できるファイバーレーザ光を長距離に渡って伝送できる可能性を持つものである。マルチモード伝送の可能性は現時点の調査で未確認である。

	一般的なSMF	均一構造PCF	準均一構造PCF (提案構造)	不均一構造PCF
空孔直径: d 空孔間隔: Λ	空孔なし	d :一定 Λ :一定	d :一定 Λ :2種類以上	d :2種類以上 Λ :2種類以上
断面構造の例				
等価屈折率分布				
設計自由度 (コアの拡張性)	×	○	◎	◎
製造性	◎	○	○	×

図1 一般的なSMFとPCFの断面イメージと特徴

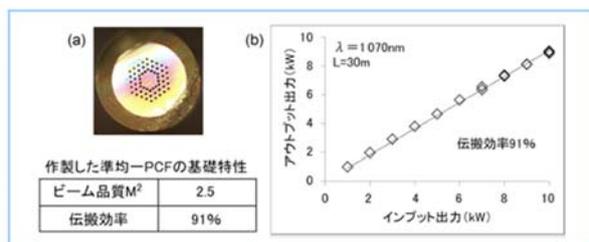


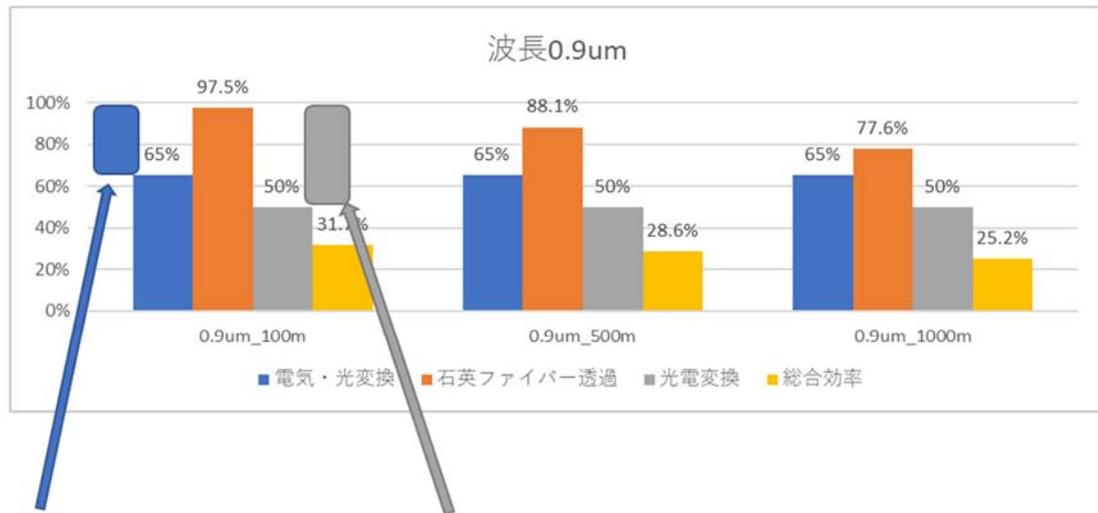
図4 試作結果及び伝送実験結果
(a)試作した準均一構造PCFの断面写真と基礎特性
(b)高品質単一モードレーザ光の入出力特性

図 2-173 国産独自技術: フォトニック結晶ファイバー(PCF: Photonic Crystal Fiber)

出所)奥田剛久、呉屋真之、藤谷泰之、井上明子 (2020). "高精度 高能率レーザ加工技術を実現するフォトニック結晶ファイバによるビーム伝送技術." 三菱重工技報 57(1): 1-4.

オプションとして、光ファイバー給電における電気・光変換及び光電変換の効率の低さを逆手にとり、熱供給を含めたエネルギー供給手段としての利用可能性を図 2-174 に示す。熱電供給において排熱

利用を行うコージェネレーションの考え方である。3割から5割の熱利用が送電及び受電サイトで示唆される。特に受電サイトにおいては、月面の屋外空間にレーザ用PVを設置した受動冷却の場合は、排熱分の回収をしないことが想定されるが、光ファイバーのみならず、細めのレーザビームが飛来するケースでは、PVを室内のような熱回収がしやすい環境とすることで、受電サイトにおける空調熱源に利用できる可能性はある。



送電サイトにおける熱源

受電サイトにおける熱源

図 2-174 低効率箇所を逆手にとった熱供給を含めたエネルギー供給手段としての利用可能性
出所)光産業創成大

最後に、永久影における配管温度維持の熱源として、光ファイバー伝送における損失分を利用した熱源についての簡単な検討を行った。表 2-106 に、表 2-105 の石英ファイバー伝送損失の典型値を用いた、単位長さ当たりの発熱量の見積を示す。1m当たりの光の損失は 10^{-4} 程度以下であり、パワーに換算すると入力パワーにももちろん依存するが、数 W/m から 100W/m の単位長さあたりの発熱量に相当することがわかった。参考までに図 2-175 に示した水道凍結防止帯の製品例では 15W/m である。光ファイバーの損失要因の制御により、単位長さ当たりの発熱量は変化させることが原理的には可能ではある。

表 2-106 石英ファイバー伝送損失の波長依存性(典型値)からの単位長さあたりの発熱量の見積

波長 um	0.9	1.07	1.55
透過率/100m	97.5%	98.4%	99.5%
透過率/1m	99.9747%	99.9839%	99.9950%
1-透過率/1m	0.0253%	0.0161%	0.0050%
10kW入力時	2.53	1.61	0.50
100kW入力時	25.31	16.13	5.01
500kW入力時	126.57	80.64	25.06

単位長さあたりの発熱量 (W/m)

出所)光産業創成大

水道凍結防止帯



保温テープ付

- 取付けが簡単で、十分な凍結防止効果が得られます。
- 耐熱105℃ですから、給湯・給水配管の両方に使用できます。
- 信頼性の高いサーモスタットが組み込まれています。

アプリケーション

- 給湯・給水配管の凍結防止。
- ソーラーシステム配管の凍結防止。
- 一般水道配管の凍結防止。
- 下地の給排水管・ポンプ配管などの凍結防止。

在庫	型番	商品コード	電圧	容量	発熱体の長さ	サーモスタット
○	D-1	14160310	100V	15W	1m	リードスイッチ
○	D-2	14160320		30W	2m	
○	D-3	14160330		45W	3m	
○	D-4	14160340		60W	4m	バイメタル
○	D-6	14160350		90W	6m	
○	D-10	14160360		150W	10m	
○	D-20	14160370	300W	20m		
○	W-5D	14160380	単相200V	101W	5m	バイメタル
○	W-10D	14160390		200W	10m	
○	W-20D	14160400		400W	20m	

図 2-175 水道管凍結防止帯の製品例

出所)八光電機 HP <https://www.hakko.co.jp/newgoods/newg216.htm>

2) レーザ

前年度に引き続き、レーザービームの空間伝送システムの検討として、重量の試算を中心に実施した。

図 2-176 にある「製品例」のようにキャビネットに収納された装置を重量見積の対象とした。具体的には図中の「製品例」の写真から伸びる青矢印が示す点線内である。電力線を受ける電源からレーザー(LD、ファイバー)及び冷却系・制御系までで、冷凍機や放熱機構などの冷却機は別途で、電源やLDの1次冷却の配管までである。

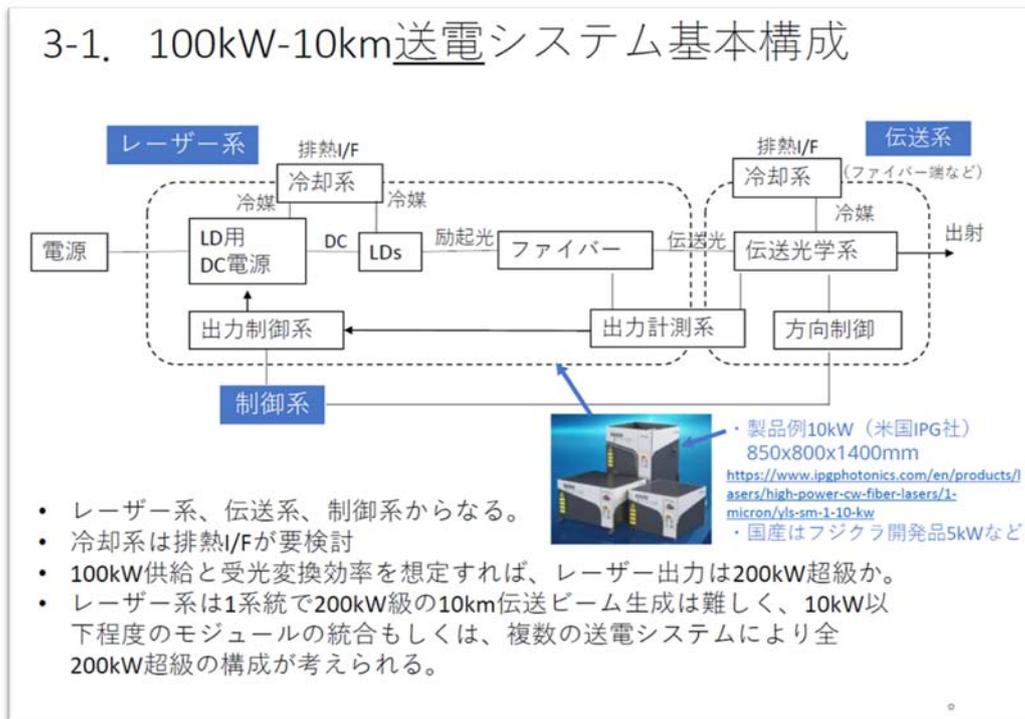


図 2-176 キャビネットに収まっているファイバーレーザー製品

出所) R3 年度 月面におけるエネルギー関連技術開発(電力関係の技術課題整理)第4回 WG 資料 E4-4-3 より

調査対象は、IPG フォトニクス社のファイバーレーザー製品群とした。以下の製品のカタログから、出力及び重量の値をそれぞれ取得した。

- YLS-*****, マルチモード、8kW から 120kW、電気・レーザー変換 45%
<https://pdf.directindustry.com/ja/pdf-en/ipg-photonics-corporation/yls-series/29249-949498.html#open1808959>
- YLS-U、マルチモード、ウルトラコンパクト型、1kW-10kW
<https://www.ipgphotonics.com/jp/85/FileAttachment/YLS-CUT+and+YLS-U+Datasheet.pdf>
- 旧製品 <https://www.shimechatronics.jp/products/laser/transmitter/fiberlaser>
 - ・YLR***-SM、シングルモード、100W から 500W
 - ・YLR****、マルチモード、500W から 10kW

※YLS-SM シリーズが 10kW までのシングルモード製品であるが、重量情報は今回未取得。

次に、得られた出力及び重量の値から、出力/重量比を得た。出力依存性を図 2-177 に示す。旧製品に比べ、より高い出力/重量比の製品(ウルトラコンパクト)が昨今登場もしてきており、出力/重量比が向上していることがわかり、発展著しいファイバーレーザー業界の様子が見て取れる。また高出力側で向上する傾向であることもわかる。ここでは、10kW 付近を目安に、25 W/kg の値を提案することとした。

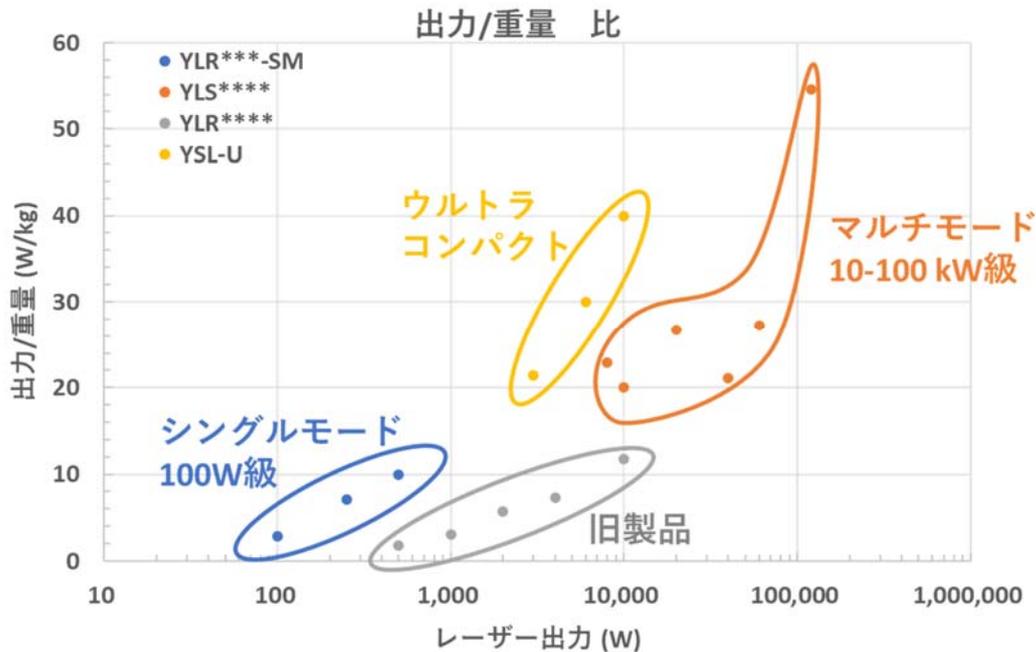


図 2-177 IPG フォトニクス社のファイバーレーザー製品群カタログ値による出力/重量比
出所)光産業創成大

3) 浮遊レゴリス

a. レゴリス粒径・空間分布の文献調査

浮遊するレゴリス微粒子は、光を吸収したり散乱させたりすることで、空間伝送するレーザービームの伝送効率低下や、周辺への散乱によるヒトの目への危険性が懸念されうる。そこで、まずは首記の文献調査を行った。

月面上のレゴリス微粒子の浮遊について、アポロ計画時代の昼夜境界付近における水平線付近の太陽光の glow が観測^{23,24}されたことがきっかけで、月面上 10-30cm 程度の高さにある浮遊レゴリス粒子による太陽光の散乱に起因していることが指摘されている。その後、浮遊メカニズムや密度の高度・

²³ R. H. G. J. E. L. W. C. N. G. A. a. Z. H. Norton, "Surveyer I Observations of the Solar Corona," J. Geophys. Res., vol. 72, pp. 815, 1967.

²⁴ J. E. McCoy, "Photometric studies of light scattering above the lunar terminator from Apollo solar corona photography," *Proceedings of Lunar Science Conference, 7th*, 第 巻 1, pp. 1087-1112, 1976.

緯度分布の観測やシミュレーションなど、多くの研究がなされている。中でも 2013 年から 2014 年に実施された The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) mission において、月面上の日照有無の境界付近における高度 3-250km 程度までの浮遊が図 2-178 のように観測されている²⁵。上空から月表面付近に向かって $0.1 \mu\text{m}$ 級粒子が $5 \times 10^5/\text{m}^3$ の密度に向けて変化していると指摘しているが、実際の表面付近の密度については測られていない。

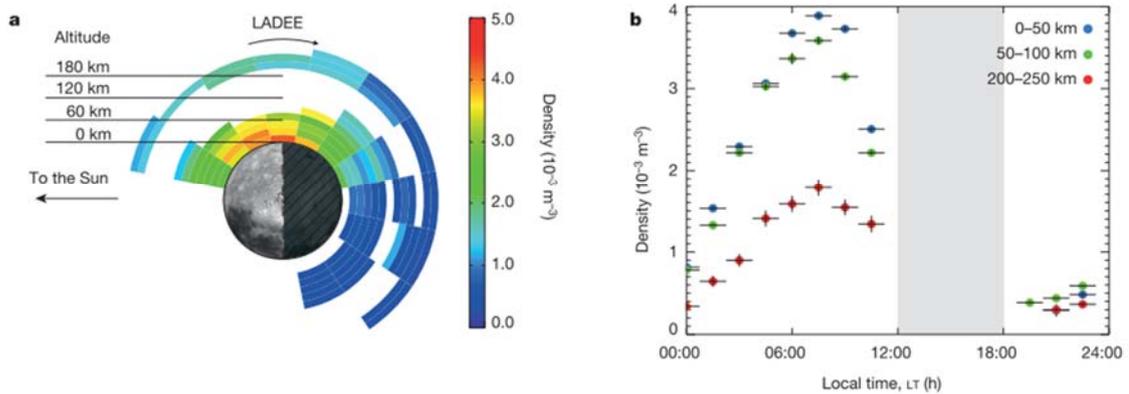


図 2-178 LADEE ミッションにおける月周回軌道上のダスト粒子の高度分布計測の例²⁵

出所)M. Horanyi et al., "A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon," vol. 522, no. 7556, 2015.

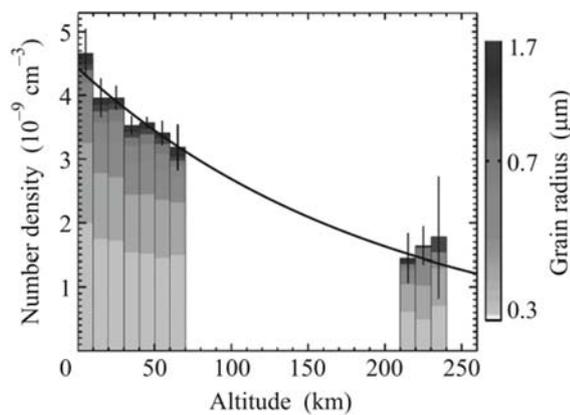


Fig. 1. Number densities of dust particles with various sizes versus the altitude from the lunar surface.

図 2-179 LADEE ミッションにおけるダスト粒子径分布とその高度分布²⁶。実線は経験式。

出所)M. Horanyi et al., "A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon," vol. 522, no. 7556, 2015.

文献²⁶では、LADEE ミッションの結果が図 2-179 のように整理されている。これによると、月面付近では、約 $5 \times 10^{-9}/\text{cm}^3 (= 5 \times 10^{-3}/\text{m}^3)$ とあり、前述の $5 \times 10^5/\text{m}^3$ との値と大きく異なっている。

レゴリス微粒子が舞い上がるメカニズムについては、惑星間プラズマ・太陽風の月面衝突による舞い

²⁵ M. e. a. Horanyi, "A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon," vol. 522, no. 7556, 2015.

²⁶ S. I. e. a. Popel, "Impacts of fast meteoroids and a plasma-dust cloud over the lunar surface," JETP Letters, 第 巻 105, 第 10, pp. 635-640, 2017.

上がりが主で太陽光照射の帯電による寄与の証拠はないものの、より低高度なら可能性ありとの報告²⁵や、meteoroid の衝突による舞い上がりについてはシミュレーションにより LADEE 観測データを説明する試みもなされている²⁶。

その文献²⁶では、地球周回軌道上のモデルをもとに meteoroid の月面上フラックスを設定し、レゴリスへの衝突による加熱からの蒸発、熔融部分からの液滴の放出、周辺からの弾性衝突による放出などの構造についてモデル化して評価している。Meteoroid の月面上へのフラックスは、約 100 個/m²/day で大きさはサブマイクロメータからマイクロメータが支配的、速度の平均は 27km/s で3つのピークを持っている。これは月面上に設置する機器や設備に直接降り注ぐものにもなる。そして、これらがレゴリスに衝突した際の周辺構造は、図 2-180 においては中心部では蒸発領域(I)、その周辺では熔融領域(II)から線形弾性変形にとどまる領域(V)までで構成され、各領域からの放出について解析的に検討している。結果として、高高度における浮遊ダストについては熔融領域から放出される液滴が重要であり、上昇に伴って冷えて固体となり、太陽風由来のイオンや電子・太陽光との相互作用による帯電を経ながら 100km まで到達する可能性が指摘されている。それは 300 nm から 1 μm サイズで密度 10⁻⁸cm⁻³ と見積もられ、前述の LADEE 観測データと合致しているとしている。また、meteoroid は常に降り注いでいるため、この月面上からの放出・上昇も常にあると考えられている。

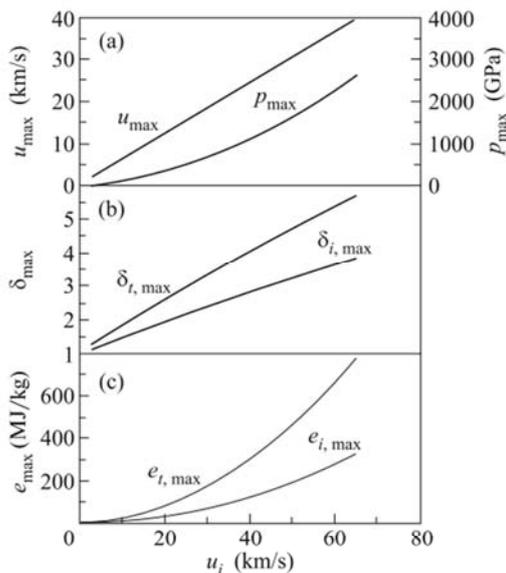


Fig. 2. (a) Maximum mass velocity u_{\max} and maximum pressure p_{\max} behind shock fronts in the impactor and target, (b) the degrees of compression of the materials of the target $\delta_{r,\max} \equiv \rho_{r,\max}/\rho_{r,0}$ and impactor $\delta_{i,\max} \equiv \rho_{i,\max}/\rho_{i,0}$, and (c) the maximum internal energies of the materials of the target $e_{t,\max}$ and impactor $e_{i,\max}$ versus the velocity of the impactor u_i .

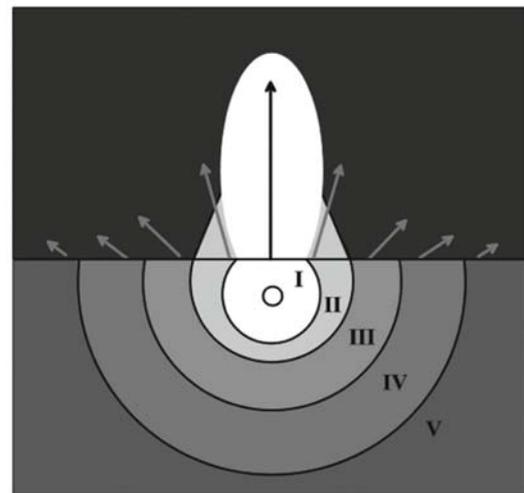


Fig. 3. Scheme of the formation of (I) material evaporation zone, (II) material melting zone, (III) destruction zone of lunar regolith particles and their irreversible deformations, (IV) zone of nonlinear elastic deformation of the regolith, and (V) zone of linear elastic deformations of the regolith over the lunar surface. The circle in zone I represents an unperturbed meteoroid located at the equivalent center of a meteoroid explosion. Arrows indicate the ejection of material (in particular, dust particles) at high velocities from the lunar surface from zones I–V. The upward ejections of evaporated and melted material are shown by the same colors as the corresponding zones.

図 2-180 meteoroid 衝突によるレゴリスのダスト微粒子の舞い上がりモデルの検討²⁶

左は meteoroid の月面入射速度に対する衝撃波後面の質量速度や圧力等、

右は衝突時の温度構造等に起因する飛び出し・舞い上がりの領域分類。

出所)M. Horanyi et al., "A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon," vol. 522, no. 7556, 2015.

このように、月面の km 以上の高度におけるダスト密度については情報があるものの、月面近傍における浮遊観測データで定量的なものは今回の調査では見つけられなかった。

また、月面着陸船のスラスト噴射時や月面上の作業等で浮遊する事実は見られ、人工的な作業時の環境による影響は注視する必要がある。

b. レーザ伝送効率への影響, 周囲散乱安全性

前項の議論で月表面付近 $0.1 \mu\text{m}$ 級粒子が $5 \times 10^5/\text{m}^3$ の密度が最大値の情報であり、危険側の検討としてこの値をここでは用いる。

この密度が 10 km の長さで続くレーザ伝送路を想定し、これらの粒子に照射されたレーザ光が完全吸収するとして最悪ケースの評価を試みる。

伝送路 10 km に対する粒子の面密度は、

$$5 \times 10^5/\text{m}^3 \times 10 \text{ km} (=10^4 \text{ m}) = 5 \times 10^9/\text{m}^2$$

粒子半径 $0.1 \mu\text{m}$ で仮に球形とすると投影面積は同半径の円で、

$$\pi \times (0.1 \mu\text{m})^2 = \pi \times 10^{-14} \text{ m}^2$$

上記面密度 $5 \times 10^9/\text{m}^2$ に乗じると 1.6×10^{-4} で 10 km 光路上で 0.016% の面積が粒子に占有されると考え、その占有面積においてレーザ光が完全に吸収されるとすれば、その占有面積比率をそのまま吸収損失としたとしてもごく小さい損失であることがわかる。

ちなみに、 $5 \times 10^5/\text{m}^3$ の密度はクリーンルームの清浄度で言えばクラス 100 から 1000 程度で精密工場内程度。光はよく通るレベルといえる。

次に、散乱光によるヒトの目への安全性について検討する。10 km 光路上で 100 kW の 0.016% の 16 W が、吸収でなく、完全散乱を受けるとする。それが月面活動中の作業者の目に照射される危険性について、最大許容露光量(MPE) $50 \text{ W}/\text{m}^2$ (波長 $1 \mu\text{m}$ 、10 秒以上露光時)を基準に検討する。16 W が一点から等方に放射されたとして、MPE を下回るその点からの距離 NOHD(公称眼障害距離)は、

$$16\text{W}/(4\pi \times \text{NOHD}^2) = 50 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$\therefore \text{NOHD} = 0.16 \text{ m}$$

事実上安全作業が可能であると考えられる。ただし、粒径が波長程度以上に大きく前方散乱が大きいミー散乱の場合はビーム前方がより危険であり、隕石の月面衝突イベントなど注意が必要である。

4) 放射線

a. 月面上の放射線環境調査

月面上空間に曝される光学素子など、耐放射線性の確保に先立ち、月面上の放射線環境について調査を実施した。

月表面付近における放射線源は以下 3 つ。

① 銀河宇宙線(Galactic Cosmic Ray) 太陽系外から飛来

イオン 98%、電子・陽電子 2%

イオンのうち陽子~87%、 α 粒子~12%、それ以上の大きいイオン~1%

エネルギーは 10MeV から 100GeV

月面へのフラックスはエネルギースペクトル含めモデルにより定式化されている。

太陽活動の結果である太陽風の大・小により、太陽系への侵入制限を受けてそれぞれ小・大の変化を伴い、上記モデルにより見積りが可能である。

②太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particles)

太陽表面の爆発的現象の程度により 5~6 桁も異なる放出数。

多くは 10MeV 以下の陽子だが、最悪ケースのイベントでは GeV に達することもある。

月面へのフラックスはエネルギースペクトル含めモデルにより定式化されている。

③地表増強(Ground Level Enhancement) 月面物質との衝突による二次生成放射線(主に中性子)

表 2-107 月面の土壌サンプル(レゴリス)の成分比。二次生成の元となる材料²⁷

Table 1. Average abundance (wt%) of major chemical elements in the soils sampled by Apollo 12 (Lucey *et al* 2006).

Elements	Abundance (wt%)
SiO ₂	46.1
TiO ₂	2.7
Al ₂ O ₃	12.6
FeO	16.5
MnO	0.21
MgO	10.2
CaO	10.3
Na ₂ O ₃	0.46
K ₂ O	0.24
Cr ₂ O ₃	0.38
P ₂ O ₅	0.30
S	0.08
Sm ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16
Gd ($\mu\text{g g}^{-1}$)	20

出所) Masayuki Naito et al 2020 J. Radiol. Prot. 40 947。

²⁷ M. e. a. Naito, "Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube," J Radiol Prot, 第 巻40, 第 4, pp. 947-961, 2020.

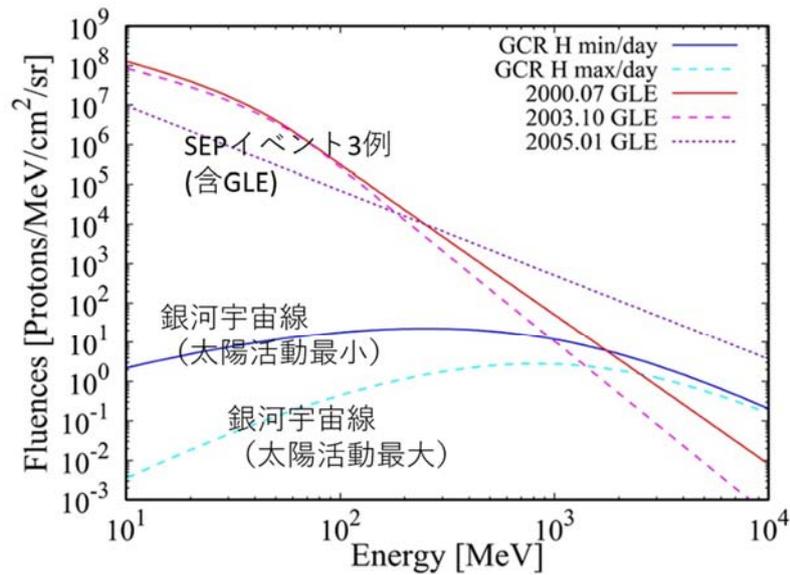


Figure 5. Differential energy spectra of the three GLE events (Mewaldt *et al* 2012). GCR energy spectra are also shown for comparison.

図 2-181 月面上の放射線スペクトルの評価例²⁷

出所) Masayuki Naito et al 2020 J. Radiol. Prot. 40 947。図中の日本語は光産業創成大が追記。

参考までに GCR に対しヒトへの線量当量でみると、400mSv/yr 程度(地球上の自然放射線からの被ばくは 1mSv レベル)、その 1 割程度が GLE の中性子である。SEL イベントに対する当量線量は最大 2000mSv/event と大きいですが、GLE は小さい。

表 2-108 月面上の線量当量の評価例²⁷

Table 2. The effective dose equivalent on the Moon due to GCR particles.

Particle	Solar minimum		Solar maximum	
	Effective dose equivalent (mSv yr ⁻¹)	Statistical error	Effective dose equivalent (mSv yr ⁻¹)	Statistical error
Primary ions	356.3	16.6	124.8	4.3
Neutron	40.6	4.2	24.7	1.5
Others	19.0	5.2	11.1	1.7
Total	416.0	17.7	160.5	4.8

Table 4. Effective dose equivalent due to direct exposure to the three GLEs.

Particle	2000.07 GLE		2003.10 GLE		2005.01 GLE	
	Effective dose equivalent (mSv)	Statistical error	Effective dose equivalent (mSv)	Statistical error	Effective dose equivalent (mSv)	Statistical error
Primary ions	2190	18	1700	14	202	1.9
Secondaries	3.2	0.6	4.8	0.7	3.2	0.2
Total	2190	18	1700	14	205	2.0

出所) Masayuki Naito et al 2020 J. Radiol. Prot. 40 947。

b. レーザシステムへの影響と課題整理

銀河起源・太陽起源の陽子・電子、二次生成の中性子などで、10MeV-100GeV くらいが対象となる。数 MeV 以下の陽子はシールドで遮蔽可能なレベルと考えられる。より高エネルギーの荷電粒子、中性子が要検討対象である。影響をうけやすいと思われるレーザ光学系を中心としたコンポーネントは以下が考えられる。

- 月面空間に曝露される光学素子のコーティング(複数の無機酸化物の相互積層構造)
- ファイバーレーザのファイバーコア*
- 半導体レーザ、ほか電子機器全般*

*シールドによる遮蔽環境への収納は得策と考えられる。

(4) 有線(導線)

1) ラストマイルの電力伝送(配電)方式

国際宇宙ステーション(ISS)においては1984年の開発開始時に120V 直流による配電方式を採用した。そのため運用実績並びにそのシステム構築に必要な各種機器のラインアップも揃っており、月面電力システムにおいても大電力とはならない有人居室における電力配電方式が最適と考える。ISSの「きぼう」での事例を図2-182に示す。

なお、近年地上における設備(例えばデータセンター等)において、直流400VDCによる電力供給システムが検討され、適用され始めている。これは直流から直流への電力変換効率の向上のみならず、常用の商用電源のみならず、必要な場合は屋上太陽電池や風力等によるBU電源を使用する際、相互の親和性が良いこともあり、研究が実施されてきている。この考え方は月面電力システムの製造設備等への供給システムの必要性や環境とも共通することもあり、今後詳細調査を行い、適用性を検討する。

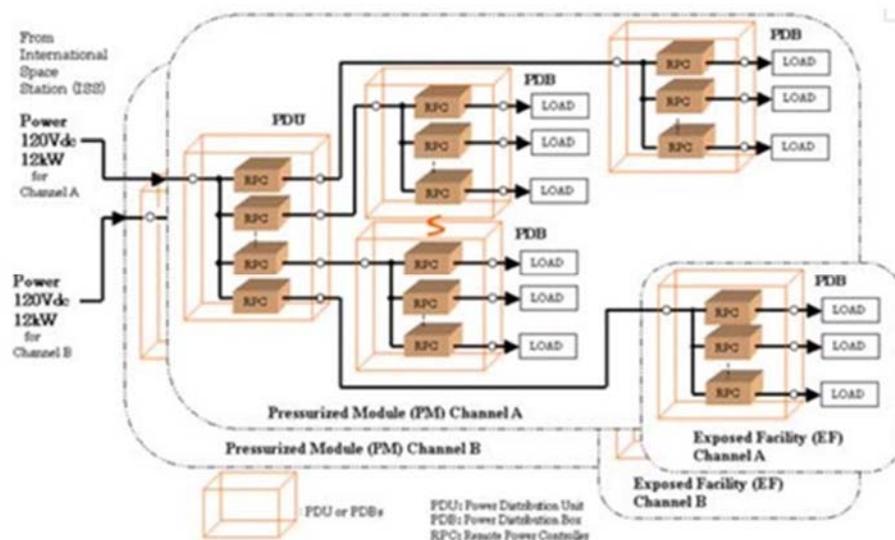


図 2-182 「きぼう」の電力分配系統

出所) 国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」で獲得した有人宇宙技術より

2) 導体による長距離送電の検討

a. 前提条件の整理

次のように検討の前提条件を設定する。

- 送電電圧 120VDC、400VDC、1000VDC ⇨ V_L (受電側の電圧で定義)
- 送電距離 100m、500m、1000m ⇨ L
- 送電電力 10kW、100kW、1MW ⇨ P_{out} (受電側の電力で定義)

算出するパラメータとしては、電力線重量及び送電効率とする。

b. 計算方法

図 2-183 に計算の前提となる系統図とパラメータの定義を示す。

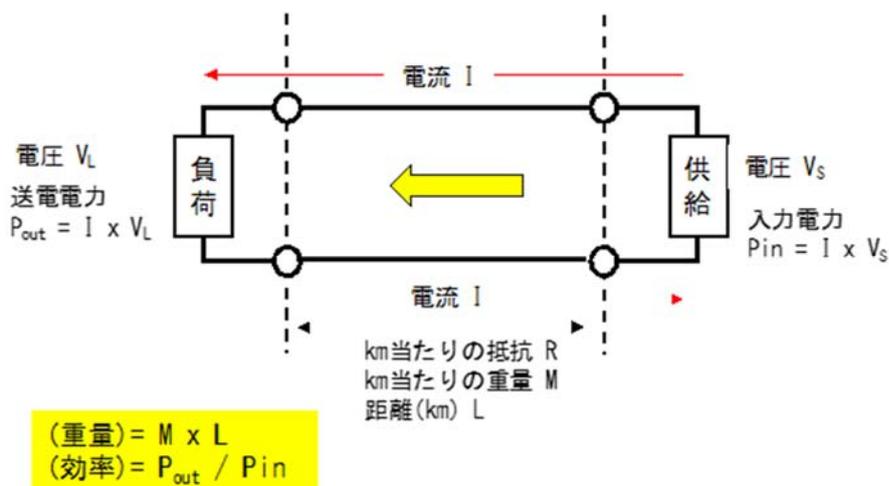


図 2-183 導線による長距離送電の計算方法

出所) J-spacesystems

c. 電力線の方式の選定

「アルミニウムの電気伝導率は銅の 60%だが、比重が約 3 分の 1 であり、そのため同じ重さの銅に比べて 2 倍もの電流を通すことが可能」ということからアルミニウム電力ケーブルにて試算する。

なお、真空仕様としては被覆の材料がビニルからテフロン系への変更の必要はあるが、現時点ではこのままの数値を使用する。

d. 前提とする電力ケーブルの仕様

住友電工製 600V 単心より合せ形架橋ポリエチレン絶縁 ビニルシースケーブル(アルミ導体)

[記号：600V AL-CVT]²⁸を前提として計算する。図 2-184 に断面図を示す。

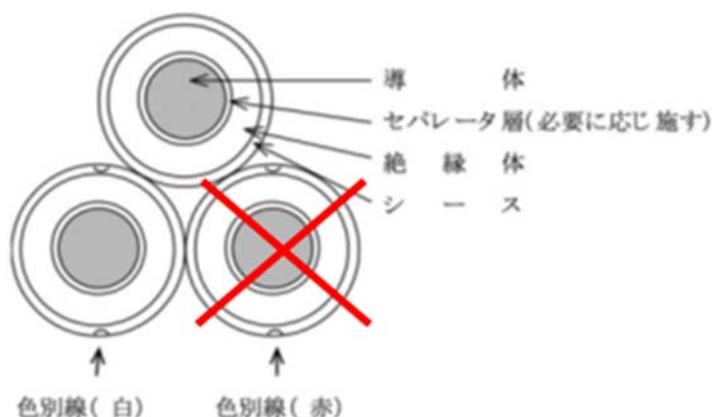


図 2-184 使用するケーブルの断面

出所) 住友電工製 600V 単心より合せ形架橋ポリエチレン絶縁 ビニルシースケーブル(アルミ導體) [記号：600V AL-CVT]
[https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

仕様書に示されているのは地上の三相交流向けのケーブル向け三本の撚り線なので、月面直流送電向けとしての重量は仕様書の重量を 2/3 として二本のより線相当とする。また計算する際に選んだパラメータを図 2-185 に示す。

種類と仕様概要

構 造 表 600V AL-CVT

[https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

導 体		絶縁体 厚さ mm	シース 厚さ mm	シース 外径 (約) mm	線心より 合せ外径 (約) mm	導 体 試 験 抵 抗 電 圧 (20℃) Ω/km	試 験 電 圧 V/1分	絶 縁 抵 抗 MQ·km	概 算 質 量 kg/km
公称 断面積 mm ²	構 成 形 状								
60	円形圧縮	9.5	1.5	15.5	34	0.510	2 500	1 500	910
100	円形圧縮	12.1	2.0	19.5	42	0.306	2 500	1 500	1 400
150	円形圧縮	15.2	2.0	23	49	0.204	3 000	1 000	2 070
200	円形圧縮	17.0	2.5	26	55	0.153	3 000	1 500	2 560
250	円形圧縮	19.0	2.5	28	60	0.123	3 000	1 000	3 170
325	円形圧縮	21.7	2.5	31	66	0.0951	3 000	900	3 930

試算のケーブルの
ケース

「導体抵抗」は3本の撚り線の
内の一本分の抵抗値とする
往復でこの2倍の抵抗を仮定す
ることとする

「概算質量」は3本撚り線の
重量なので、直流送電のため
には2本で十分なので、2/3と
仮定する

図 2-185 適用するケーブルの仕様

出所) 住友電工製 600V 単心より合せ形架橋ポリエチレン絶縁 ビニルシースケーブル(アルミ導體) [記号：600V AL-CVT]
[https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

²⁸ [https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

e. 試算結果と考察

電圧が 120 VDC のケースを表 2-109 に示す。

表 2-109 電圧が 120VDC のケース

ケーブル径 60mm ² 負荷に120VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	0.93	0.74	0.59	0.59	0.22	0.12	0.12	0.03	0.01
重量kg	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67
入力電力(kW)	10.71	13.54	17.08	170.83	454.17	808.33	8083.33	36416.67	71833.33

ケーブル径 150mm ² 負荷に120VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	0.97	0.88	0.78	0.78	0.41	0.26	0.26	0.07	0.03
重量kg	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00
入力電力(kW)	10.28	11.42	12.83	128.33	241.67	383.33	3833.33	15166.67	29333.33

ケーブル径 250mm ² 負荷に120VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	0.98	0.92	0.85	0.85	0.54	0.37	0.37	0.10	0.06
重量kg	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33
入力電力(kW)	10.17	10.85	11.71	117.08	185.42	270.83	2708.33	9541.67	18083.33

出所) J-spacesystems

電圧が 400 VDC のケースを表 2-110 に示す。

表 2-110 電圧が 400 VDC のケース

ケーブル径 60mm ² 負荷に400VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	0.99	0.97	0.94	0.94	0.76	0.61	0.61	0.24	0.14
重量kg	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67
入力電力(kW)	10.06	10.32	10.64	106.38	131.88	163.75	1637.50	4187.50	7375.00

ケーブル径 150mm ² 負荷に400VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	1.00	0.99	0.98	0.98	0.89	0.80	0.80	0.44	0.28
重量kg	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00
入力電力(kW)	10.03	10.13	10.26	102.55	112.75	125.50	1255.00	2275.00	3550.00

ケーブル径 250mm ² 負荷に400VDC供給	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	1.00	0.99	0.98	0.98	0.93	0.87	0.87	0.57	0.39
重量kg	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33
入力電力(kW)	10.02	10.08	10.15	101.54	107.69	115.38	1153.75	1788.75	2537.50

出所) J-spacesystems

電圧が 1000 VDC のケースを表 2-111 に示す。

表 2-111 電圧が 1000VDC のケース

ケーブル径60mm ²	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	1.00	0.99	0.99	0.99	0.95	0.91	0.91	0.66	0.49
重量kg	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67	60.67	303.33	606.67
入力電力(kW)	10.01	10.05	10.10	101.02	105.10	110.20	1102.00	1510.00	2020.00

ケーブル径150mm ²	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.96	0.83	0.71
重量kg	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00	138.00	690.00	1380.00
入力電力(kW)	10.00	10.02	10.04	100.41	102.04	104.08	1040.80	1204.00	1408.00

ケーブル径250mm ²	10kW送電			100kW送電			1MW送電		
	100m	500m	1km	100m	500m	1km	100m	500m	1km
効率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.89	0.80
重量kg	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33	211.33	1056.67	2113.33
入力電力(kW)	10.00	10.01	10.02	100.25	101.23	102.46	1024.60	1123.00	1246.00

出所) J-spacesystems

f. 導体の有線による電力伝送の考察

導体による月面送電におけるパラメトリックスタディの結果を以下に述べる。

- 確立された 120VDC で送電可能範囲は近距離で、かつ十数 kW レベル程度の電力と考えられる。400VDC の確立が図られれば少し規模と距離は拡大する可能性はあるが、程度問題である。また、現時点では 1000VDC はまだ研究開発の段階であるので、採用することはできない。
- そのため結論として現時点では、ラストマイルの電力送電や居室内での配電を除き、中長距離大電力送電は、重量効率の観点、並びに送電効率の両方の観点から、無線伝送等の他の手段を採用するのが現実的であると考えられる。ただし、月面でのアルミニウムの生産が本格化すれば質的転換が可能と考えられる。

(5) 室内 WPT

月面活動の拠点施設において、室内の無線給電(WPT:Wireless Power Transfer)がどのように活用されるかについて検討した。月面活動として何が行われるかは、明確に決まったものではなく、様々なビジョンにより多くの可能性が示されている段階である。図 2-186 に室内 WPT の活用イメージを示す。ここでは、与圧された空間に人が活動することを想定した居室を想定した。建物への受電は1か所からなされ、室内への電力の分配に無線給電が活用される。また、拠点の外に有人と圧ローバの駐車スペースがあり、そこへも無線給電で電力供給ができる。極地方を除き月の夜は14日間続くことから、その期間は太陽光で発電できず、拠点の蓄電池を活用することが考えられる。

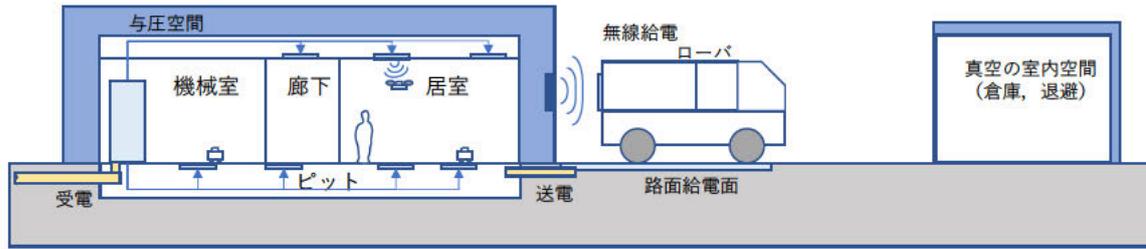


図 2-186 室内 WPT の活用イメージ

出所) 大成建設

ここでは検討に当たり次の3つの課題を設定した。

【課題 1】 室内電力用途による有線・無線の選定

無人+有人の活動拠点での、室内 WPT の利用シーン

【課題 2】 拠点建築への無線給電設備の導入方法

目的に応じて、以下の、

室内の電気機器・モビリティへの WPT

モビリティから室内の IoT センサへの WPT

【課題 3】 拠点建築からローバへの送電

壁を透過させる給電方式について検討

以下にこれらに対する検討結果を述べる。

1) 室内電力用途による有線・無線の選定

月面でのインフラ構築は主に地上からの遠隔監視の元、自律型のロボットにより行われる。月への輸送船からの荷下ろし、資材の輸送・保管、インフラ建設作業は無人のロボットにより行われる。

図 2-187 に想定される施設の配置イメージを示す。月面では無人ロボットを安定的な運用を支援するロボットの拠点が構築され、また、輸送資材の保管、基地建設部材の工場、などがミッションのために建設される。発着場から有人拠点までの間に、無人拠点として、4 つの用途を想定した。また、14日間の昼に蓄えた電力を14日間の夜間に使えるように、蓄電手段の確保も必要である。電力負荷を減らすために熱源として蓄熱槽で温水・冷水を確保し利用する計画の併用が望ましい。

これらの拠点での設備は例えば以下のように想定される。

①無人遠隔ロボット(無人による拠点維持)

→地球からの遠隔操作のため、通信ステーション、電力ステーションがインフラとして必要になる。

②無人遠隔ロボットとセンサの連携技術

- ・センサ(画像、サーモ、磁場、位置検知、收音マイクなど)で取得した情報を無線でサーバに送信
- ・サーバのセンサ情報によってロボットを最適制御, 自律制御による地上からの通信遅延に対応。

- ・無線給電と無線通信の干渉抑制
- ・有人拠点となった場合には、居住空間の智能化による滞在者の活動支援として、安全性、快適性の確保とともに利便性の向上、ストレス軽減など幅広くサポートする。

③無人ロボットと建物設備(ELV、自動扉など)の連携技術

- ・建物内でロボットが自由に移動できる環境を検討。ロボットバリアフリーな移動経路など。
- ・ロボットの位置情報から自動扉やエレベータの連携技術を検討
- ・配電、通信、制御の各系統の有線・無線の選別

④送電・配電用のコネクタ等でレゴリスの影響を受けやすい部位

→無線化により汚れによる不具合を軽減。

⑤生存のための環境維持に必要な電力

→有線。二重化する共に、信頼性の高い方式を選定。無停電装置。

表 2-112 に室内電力用途による有線・無線の選定案として一例を示す。位置が固定されているものは有線、動きがあるか、または数が多いものは室内 WPT が有効と考えられる。無人の段階ではロボットは空気を必要としないため、太陽光を避けられるような、縦孔から続く地下空洞を活用できる場合は、日射遮蔽などの機能をもつ建物自体が不要となる可能性がある。また、輸送量を減らすため、資材を最小限にできる空間デザインの可能性も検討が必要であり、これらは与条件となると考えられる。

これらの将来の拠点の目指す形や全体の動線計画などをまとめたマスタープランは初期に定め、その実現に向けて一つずつステップを重ねていくような拠点建設プロセスを経ることも併せて考えることが望ましい。

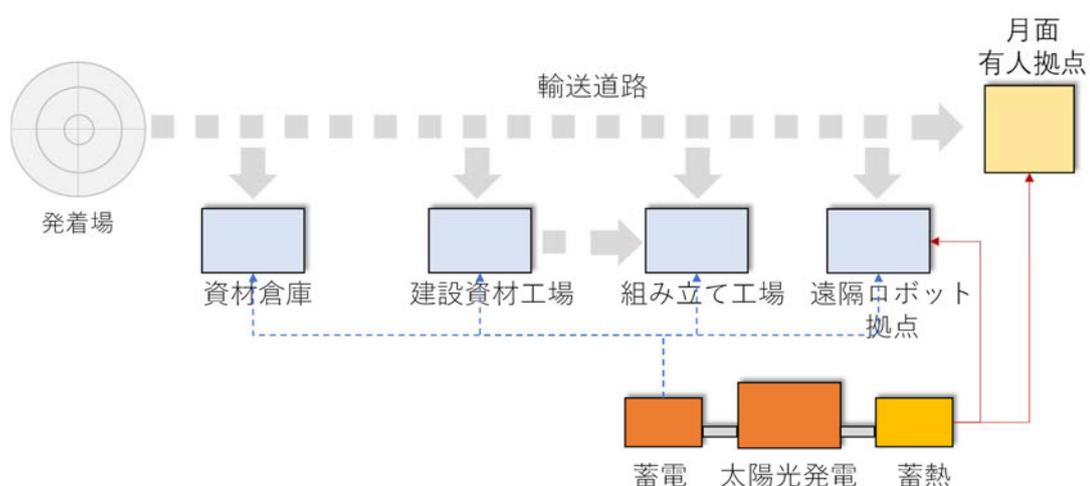


図 2-187 想定施設の配置イメージ

出所) 大成建設

表 2-112 室内電力用途による有線・無線の選定案

【無人拠点】	有線	無線
(1) 遠隔ロボット拠点 ・14日間続く夜間は太陽光が得られず活動できないため、格納庫に退避し充電、点検などのメンテナンスを行う。	検査装置	搬送
(2) 資材倉庫（真空、与圧） ・資材の保管場所。ミッションに必要な機器を保管。 ・熱、ほこりから資材を保護。 ・運搬ローバからの荷下ろし用クレーンなどへの給電	揚重	搬送
(3) 建設資材の製造・組み立て工場 ・レゴリスブロックの製造，地球から輸送された建築資材の組み立てスペース ・組み立てロボット（地球上との通信の中継）	材料加工 組み立て	搬送
(4) 太陽光発電所（電気機械室） ・太陽光発電施設の室内の電気機械室での監視・メンテナンス機器への給電	照明 （共通）	センサ （共通）
【有人拠点】		
(5) 月面有人拠点 ・与圧された室内空間で人の活動をサポートするロボットやセンサへの給電	空調 ECLSS	センサ （共通）

出所) 大成建設

2) 室内の電気機器・モビリティへのWPT

a. アプリケーション

室内に設置される電気機器、コンピュータおよび屋内を移動するドローンや小型モビリティにマイクロ波で給電する。

b. マイクロ波給電の諸元

送電周波数:5.7GHz、送電アンテナ:4 素子×4 素子アレイアンテナとすることで室内に電波を拡散させる。

c. 建物の仕様

建築の天井・壁・床の内装材は金属箔で構成する。これにより、6 面反射体の空間を形成し、室内のマイクロ波を均一に分布させる。

d. 室内の電波分布の検討

室内の電波分布の検討では 10m×10m×h4m の環境を想定した。図 2-188 に送電アンテナの配置イメージを示す。送電アンテナは天井面に均一に配置する。

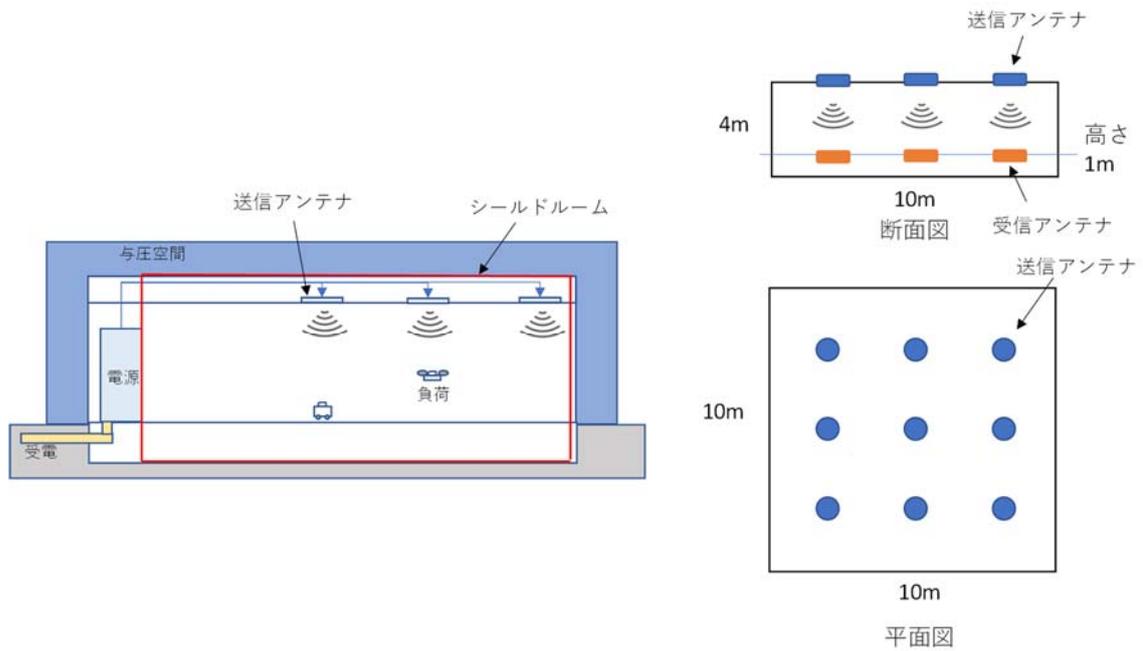


図 2-188 送電アンテナの配置イメージ

出所) 大成建設

図 2-188 のモデルをレイトレース法によって電波分布のシミュレーションを行った。解析モデルを図 2-189 に示す。解析結果を図 2-190 に示す。4 素子×4 素子アレイアンテナから 5kW の電力を出力し、内装を 6 面反射体とすることによって、床から 1m の高さでは室内のどの位置でも 50W 程度の電力を受電できる可能性があることが本結果より示された。

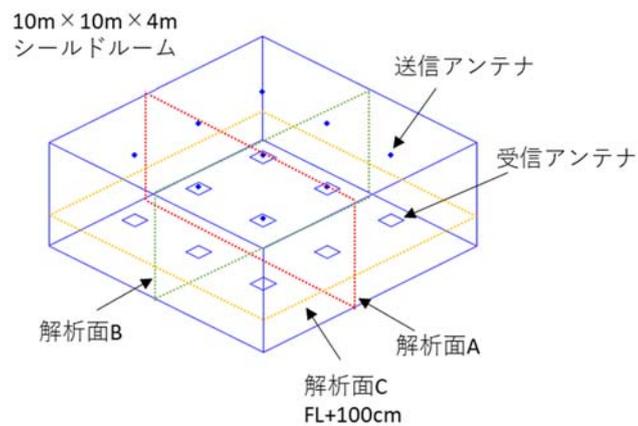


図 2-189 電波分布の解析モデル

出所) 大成建設

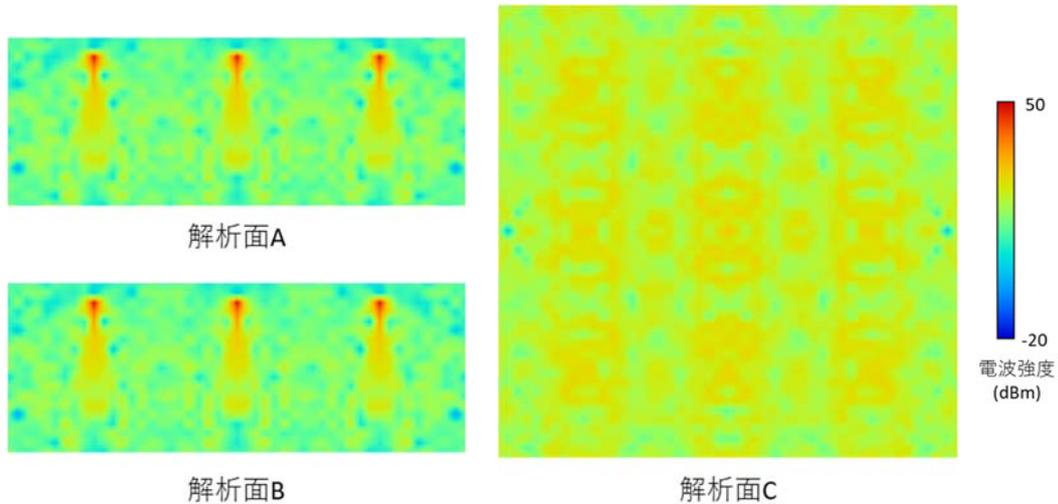


図 2-190 電波分布の解析結果

出所) 大成建設

3) モビリティから室内の IoT センサへの WPT

a. アプリケーション

室内に設置される IoT センサ等に対して小型モビリティからマイクロ波で給電する。

b. マイクロ波給電の諸元

送電周波数:5.7GHz もしくは 24GHz、送電アンテナ:6 素子×6 素子アレイアンテナとすることで小型モビリティから放射する電波のビームを受電部に集中させ、効率的なマイクロ波給電を実現する。

c. 建物の仕様

建築の天井・壁・床の内装材は金属箔で構成する。

d. 室内の電波分布の検討

室内の電波分布の検討では 10m×10m×h4m の環境を想定した。図 2-189 に送電アンテナの配置イメージを示す。送電アンテナは天井面に均一に配置する。

図 2-191 のモデルをレイトレース法によって電波分布のシミュレーションを行った。解析モデルを図 2-192 に示す。解析結果を図 2-193 に示す。6 素子×6 素子アレイアンテナから 500W の電力を出力し、内装を 6 面反射体とすることによって、床から 1m の高さでは室内のどの位置でも数 10W の電力を受電できる可能性があることが本結果より示された。

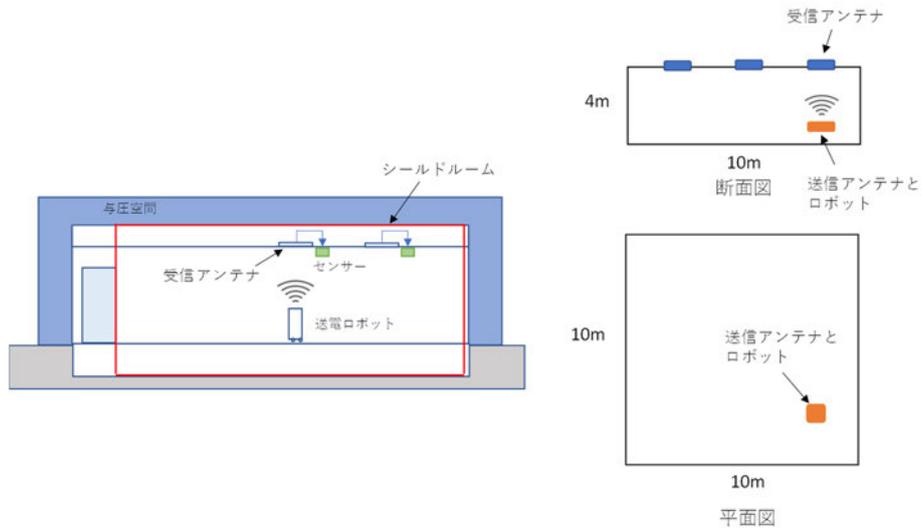


図 2-191 送電アンテナの配置イメージ

出所) 大成建設

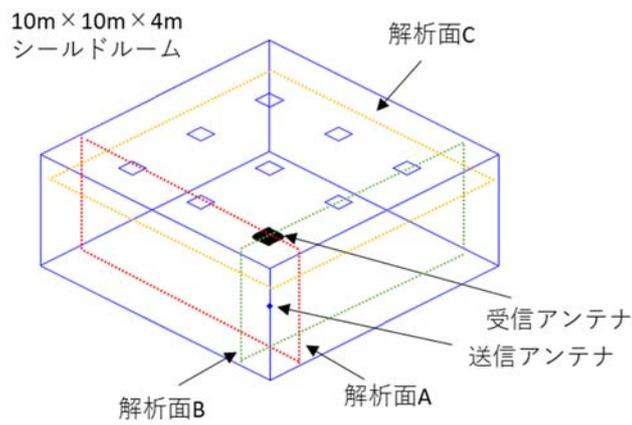


図 2-192 電波分布の解析モデル

出所) 大成建設

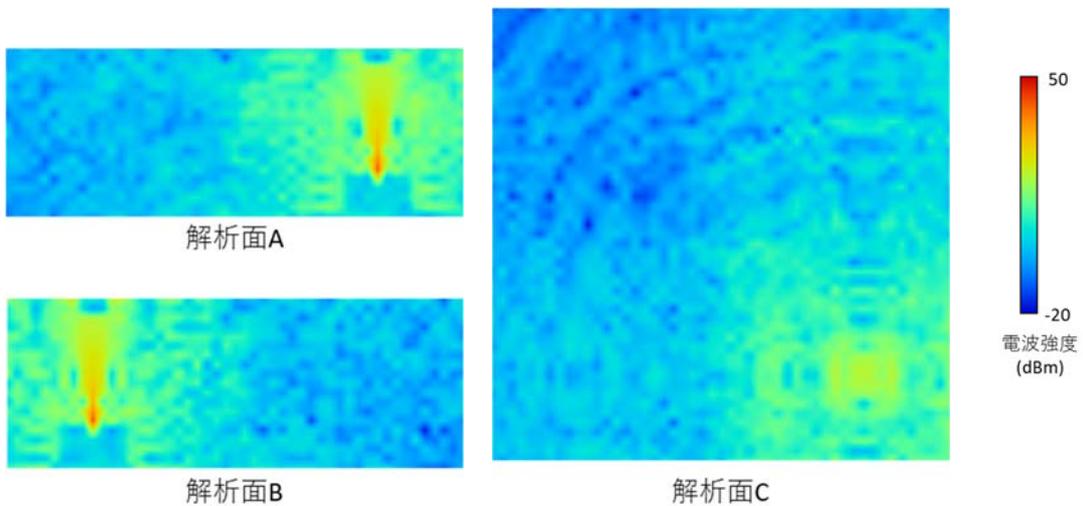


図 2-193 電波分布の解析結果

出所) 大成建設

4) 室内モビリティへの WPT

a. アプリケーション

室内を走行する小型モビリティへは床から近接 WPT によって給電する。

b. 屋内で利用する走行中無線給電の諸元

kHz～MHz 帯を利用した走行中無線給電を基地内の床に設置する。高周波出力:100kW、平均受電電力 70kW(送受電間距離 5cm 以下、走行条件)によって、小型モビリティに搭載するバッテリーを最小化し、小型モビリティの軽量化を実現する。

c. 近接型 WPT の仕様

樹脂系内装材の一部に送電電極(厚さ 500 μ m)を配線、ロボット底部に受電ユニットを搭載し、自動充電を行う。図 2-194 に近接型 WPT のイメージを示す。

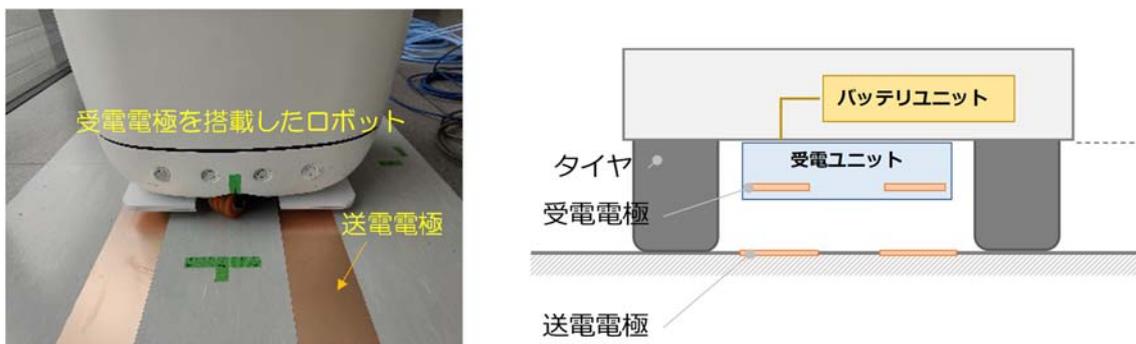


図 2-194 走行中無線給電によるロボットへの無線給電イメージ

出所) 大成建設

5) 屋上 PV から屋内への給電

a. 近接型マイクロ波給電の諸元

マイクロ波 5.7GHz 出力 100kW 級の RF 電源を室外の太陽光発電と接続し、低損失建材の屋内外に共振器を接続することでケーブルによる建物貫通部を設けずに、建物内に電力を供給する。

図 2-195 に本技術のイメージ図を示す。

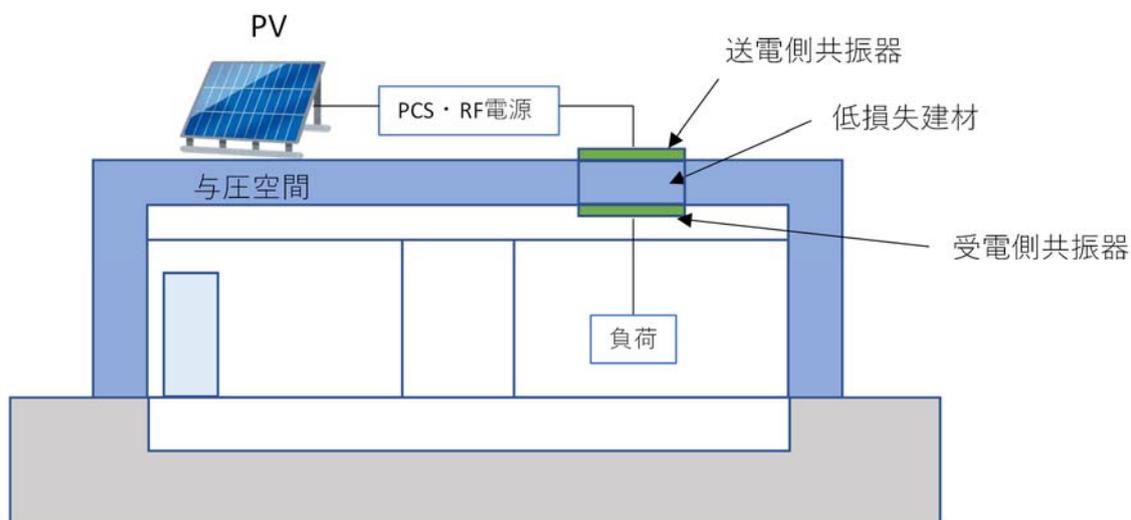


図 2-195 マイクロ波共振技術によって屋外の電力を屋内に送電するイメージ
出所) 大成建設

b. 建物内装材の仕様

周波数選択型電波透過材を開発し、建物外壁に設置する。

c. 近接マイクロ波給電導入の効果

レゴリスの影響を受けずにケーブルレスで屋内外の電力を送受電する。

6) 拠点からローバへの送電

5)と同じく、マイクロ波を利用した近接 WPT 技術を用いることで、建物内部に設置した送電システムから外壁を透過させ、非接触でローバへ給電することが可能になると考えられる。

また、ローバが走行する移動経路のうち、経路が特定できる路面は、走行中給電ができる可能性があり、ワイヤレス給電を活用したローバのバッテリー搭載量を削減できる。

2.2.6 今後の検討について

各構成システムの今後検討・実証等が必要な課題の詳細について、2.2.6(1)1) に記載する。最後に、2.2.6(2)として月面における電力インフラシステム構築に当たり、今後の検討の方向性(案)を示す。

(1) 今後の検討課題

本年度の電力 WG で、月面エネルギーの4つの各構成システムにおける今後課題について検討・抽出を実施した。それぞれ抽出された各課題について、以下カテゴリ毎にまとめたものを表 2-113 に示す。

カテゴリの分類:

- 月面活動シナリオ・システム全般
 - …全体システム、月活動のシナリオとして実施する必要のある課題
- 要素技術開発
 - …半導体等の各構成システムの要素技術
- 月面環境に対する課題
 - …レゴリス他の月における宇宙環境について対策・実証を要する課題
- 製造・建設条件
 - …月面における製造、建設条件等を示した課題

表 2-113 各構成システム構築における今後の課題

電力WG 構成システム	活動シナリオ・システム全般	要素技術開発	月面環境	製造・建設
月面電力供給全体システム 及び 共通課題等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全体システム開発整備計画の策定 ・ 安全基準、設計基準等整備 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 真空・レゴリス(付着、除去、耐性、性能劣化等)・耐放射線影響評価・低温対策 	
月周辺軌道太陽光発電システム	<ul style="list-style-type: none"> ・ 100kWクラスの大電力衛星の概念検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・ デバイス開発と受電システム構築、送電網への接続 		
システム 月面設置発電	太陽電池関係	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高効率化、軽量化 ・ 耐振動・音響評価 		
	太陽発電タワー関係		<ul style="list-style-type: none"> ・ 斜面での水平調整機構開発、耐ダスト回転等の機構開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造・パッケージング・展開・再収納の概念設計・機構開発、敷設、建設方法検討
月面上での送電システム	送電システム全体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 送受電効率/熱的成立性の検討、開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 敷設、建設方法の検討
	マイクロ波	<ul style="list-style-type: none"> ・ MEMSによる送電部位相制御方式検討、開発 ・ GaN HEMT素子のレクテナ高効率化・高耐圧化開発 ・ エンハンスレトロディレクティブ方式の10ビーム、マルチビームアンテナ検討 		
	光ファイバー・レーザ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電気・光変換効率の向上 ・ 光ファイバー内の損失抑制 ・ 光電変換効率の向上 ・ 非集光・受動冷却、集光・積極冷却の概念検討・設計 		
	有線	<ul style="list-style-type: none"> ・ 直流電力変換器の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高電圧化絶縁及びプラズマ発生・放電防止開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 月面によるアルミ線製造
	室内WPT	<ul style="list-style-type: none"> ・ 送受信機器最適配置のシミュレーション技術開発 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 電磁両立性の検討、対策

出所)J-spacesystems

1) 月面電力供給全体システム

- 月面固有の電力グリッド構築技術の確立。
- Two Fault Tolerant (2FT)電力システム実現の方策
- 実用レベルの月面電力供給全体システムを目指しての開発整備計画の策定
- 月面での実用的な電源システム構築のための安全基準、設計基準等の整備。特に国際協力による建設となるため、その枠組みの設定
- 月面での使用に耐えうる耐放射線性能を有する部品及び材料の開発

2) 月周辺軌道太陽光発電システム

2.2.3(4)で述べたように、月周回軌道から月面へのエネルギー送電には、軌道上セグメントと月面設置レクテナの開発が必要である。以下に、軌道上セグメントの課題と技術評価をまとめる。

軌道上セグメントに搭載する無線送電システムは、ビーム制御部、増幅部、放射部から構成される。送電周波数の高周波化によりアンテナサイズを小さくできるが、アンテナの面精度への要求が高くなる。アンテナをフルフェーズドアレイで構成する場合、電氣的制御でビーム制御が可能であるが、3,000 万素子程度の大規模な制御が必要となる。また、各素子からの放射電力は数 mW と低い出力レベルで高効率動作が求められる。アンプ効率としては、90GHz 付近で 30%以上が報告されているが、技術課題は高い。一方、電子管を使用すれば、数十から数千のデバイス数、アンテナ数でシステム構築が可能となる。宇宙用パラボラアンテナの開発実績からは、近未来での可能性は 50GHz 程度である。増幅器に関しては、Q 帯(周波数 42.5GHz-45.5GHz)の TWTA はすでに開発されているが、効率の向上が必要である。

ビーム制御部に関しては、2025 年実施を目途に検討している宇宙実験で超長距離送電に必要な制御技術の検証が行われる予定である。増幅部に関しては、電子管の利用も候補の一つであり、無線送電用の電子管デバイスに関しても、今後、試作評価を含む概念検討が必要と考える。

放射アンテナに関しても、40GHz 程度までの開発が行われているが、現状の開発を踏まえて、50GHz 対応無線送電用アンテナシステムの概念検討の着手が必要と考える。

また、軌道上セグメントは、100kW クラスの大電力衛星であるため、今回の検討で規模の推定を行ったが、これを基に、概念検討に着手すべきと考える。

レクテナに関しては、デバイス開発と受電システム構築、送電網への接続が課題である。デバイスに関しては、100GHz に近いレクテナ開発が行われており、高効率化が進めば、受電システムの熱設計が容易となる。受電システムに関しては、数百m規模のインフラが必要であり、その建設方法の具体的検討着手が必要である。

3) 月面設置発電システム

今後検討や開発・実施が必要な月面設置発電システムに関する課題を以下に示す。

a. 全体

発電システムに要求される必要な能力を具体的な数値に落とし込むためには、使用者側も含めて全体計画(建設場所、電力供給する設備、最大電力、電力量、電力供給パターン、送電方法、安全率等)を立案することが必要である。それにより、全体最適となる発電電力容量・蓄電池容量の決定を行うことが必要である。

b. 太陽電池関係

- ・太陽電池のさらなる高効率化
- ・耐放射線性の評価と太陽電池構造最適化による対策
- ・太陽電池モジュールのさらなる軽量化
- ・太陽電池モジュールの打ち上げ時の耐振動・音響評価
- ・太陽電池モジュールのレゴリス付着による特性低下評価とその対策

c. 太陽発電タワー関係

次年度以降の太陽発電タワーに関わる今後の課題として、下記の項目が考えられる。

- ・構造・パッケージング・展開・再収納の概念設計
- ・展開・収納機構
- ・斜面での水平調整機構
- ・軽量・高強度の材料
- ・耐ダストの回転等の機構
- ・低温対策
- ・放射線対策
- ・建設方法の検討
- ・地上並びに月面での実証試験

4) 月面上での送電システム

a. 送電システム全体の課題

月面上での送電システムの構築に際しては、当面は地球から資材を輸送して組み立てることが考えられる。現状は地球から月面への輸送は 1kg あたり 1 億円とも言われており、今後ロケットの低コスト化が進められたとしても輸送費用がシステム実現性の主要要因になると考えられる。送電システム構成品の質量見積がその実現性に大きく寄与することから、各送電方式において質量低減と高効率化を進めるとともに、システムからの観点ではその質量および効率の見積精度を高めることがシステム構成の検討で最も重要になると考えられる。表 2-114 に月面上での送電システムの検討における主要課題と対応(案)を示す。なお、ここでは送電システムの観点での課題を挙げており、送電方式個別の課題はここ

には含んでいない。

表 2-114 月面上での送電システムの主要課題と対応(案)

No.	主要課題	対応策
1	レゴリスなど月面特有の環境に対する耐性の評価（環境対策の質量への影響）	マイクロ波およびレーザーがレゴリスから受ける減衰・散乱データ取得試験の実施
2	送受電効率／熱的成立性の検討（排熱構造の質量への影響）	マイクロ波およびレーザー送受電試作機による地上実証・評価
3	敷設、建設方法の検討（自動展開含む支持構造の質量への影響）	マイクロ波送受電機器設置方法、レーザー送受電機器設置方法、有線敷設方法の検討と試作機による地上実証・評価

出所)IHI エアロスペース

b. マイクロ波

ア) 総括及び今後の課題

以下に、月面のシャクルトンクレータ付近に設置する固定設置、及び、移動体向けのマイクロ波送受電システムの実現性解析の結果と、今後の課題をまとめる。

イ) 固定設置システム

- 24GHz、61GHz 帯マイクロ波伝送の実現性は、伝送距離 1km～10km で十分にある。
- 100kW 級で 10km 送電に対して、24GHz 帯での規模は送電部が 11.2m²、3.9 トン、受電部が 11.2m²、2 トン、61GHz 帯での規模は、送電部が 10.1m²、3.5 トン、受電部は 10.1m²、1.3 トンと推定。半導体構成のシステム規模において、24GHz から 61GHz への高周波数化は、サイズの削減効果はあまり大きくないが、むしろ軽量化への貢献が大きくなる可能性が高い。
- 送電部を TWTA に代え、アレイ給電系のオフセットアンテナ形式での実現性もあると考えられるものの、電波の回折によって決まる送受電部サイズに制限されるため、半導体システムに比べ大きな小型化は困難と考えられる。

ウ) 移動体向け電力伝送システム

- 移動体搭載のレクテナサイズの限界、素子効率の良い出力範囲等の制約から、61GHz 帯を用いて、移動体までの距離を月面測位衛星によって、ビーム毎の送信電力と Beam Waist 距離、ビーム数を可変制御し、それぞれのレクテナにはレトロディレクティブアンテナを備えた、拡張型レトロディレクティブ方式によるマルチビームアンテナの採用が必要である。
- 送電部規模として 3.1m²、12.5kW 一定の送電出力、送電距離 1km でのビーム数 7、5km でのビーム数 1 で、移動体に搭載される 2m²のレクテナに 1 式に対して、0.41kW の電力を供給し、送電距離にほぼ反比例させてサービス数を増減するマルチビームアンテナと、0.41kW の電

量取出しレクテナの双方で、熱的にも成立する可能性が分かった。

- 受電部をクレータ底面に固定し、受電設備回りに移動体用の自動充電部を複数設けたステーション方式もあり得るが、システムの機能要求を満足できるかが鍵となる。

工) 今後の課題

- 振幅テーパ等による送電ビーム成形技術を導入したビーム効率の改善と送受電部規模の精査。
- 送電部、受電部の内部回路構成の概念検討、回路損失を含めた電力変換効率の見極めと送受信モジュール予想質量の精査、熱的成立性の再精査。
- MEMS を用いた損失を最小にする送電部の位相制御方式の検討、開発。
- エンハンスモードによる GaN HEMT を用いた 100mW 級入力/素子のレクテナ高効率化・高耐圧化の開発。
- エンハンスレトロディレクティブ方式の 10 ビーム(ビーム数可変、1 ビーム当たりの送電力可変機能付き)、マルチビームアンテナのシステム実現性検討。
- 24GHz、61GHz 帯における高効率送アンプ、受電レクテナの月面環境への適合性の実証。
- 輸送サイズ、月面設置簡素化を念頭に置いた構造概念検討、予想質量の精査。
- システム要求分析による、クレータ底部にレクテナを固定設置するステーション方式の検討要否判断(システム側)。

c. 光ファイバー・レーザ

ア) 光ファイバー

光ファイバー自体は軽量で大容量送電が可能ではあり、ケーブル化した際の月面耐候性の確保、重量が課題となる。送電時の総合効率においては、レーザ光源と光電変換の各電気・光変換が支配的であり、それをまかなうだけの大容量光源が必要となり、重量を決める主要因となっている。

したがって、送電手段として選択可能性を上げるためには、

1. レーザ光源の電気・光変換効率の向上
2. 光ファイバー内の損失抑制
3. 光電変換効率の向上

が課題となり、2 番は産業用途で成熟している石英ガラスファイバーの利用を前提として、波長を $1.55\mu\text{m}$ に近づけつつ、1・3 番の高出力領域における効率向上を図る必要を考えれば、 $0.9\mu\text{m}$ 帯の高出力半導体レーザの利用が現実的と考えられる。

今回の検討では保守的に $0.9\mu\text{m}$ と短波長側で代表させて評価したが、この 900nm 帯の半導体レーザの製品群の中では、長波長側の 970nm 帯も多くなってきており、 $1.07\mu\text{m}$ に近い低損失になると考えられる。しかしながら当初に述べた 1 番・3 番が支配要因であり、当該波長の半導体レーザ及び光電変換をになうレーザ PV の将来見通しに関する調査と、どの程度の改善があれば選択肢として可能性が生じるかの目安に関する検討について、今後の課題として設定することができる。

イ) レーザ

前年度に引き続き、レーザービームの空間伝送システムの検討として、効率や重量の試算を中心に実施し、比較的距離が長い伝送(例:5km/10kW)に適している可能性が指摘された。送光システムについては、昨年の検討で基本モジュールの複数並列の設計思想としたことから、この基本仕様に対する基本モジュールの概念設計が今後の課題である。

受光システムは、これまでの検討では受動冷却を想定した太陽電池(PV)のようなパネル形状のレーザー PV を想定していた。重量低減から照射強度を増して PV 面積を小さくし、積極冷却を付加し、コージェネによる熱利用を考慮するオプションも考えられる。meteoroid 照射がある月面上における設備の耐久性確保も考慮し、PV の入射面などの光学系の屋外暴露面積を少なくするメリットも享受できるかもしれない案である。よって、受光システムについては、非集光・受動冷却、集光・積極冷却、のトレードオフを含めた、概念検討・設計が課題である。

ウ) 浮遊レゴリス

レーザービームの空間伝送において、浮遊するレゴリスのダストに関する文献調査とそのレーザー空間伝送の伝送効率と安全性に及ぼす影響について調査を行った。微細な meteoroid が高速衝突して舞い上がる浮遊ダストをベースに、日射や荷電粒子による帯電効果が加わった挙動となる理解が得られ、密度としては低く、レーザービームの吸収による伝送損失や散乱による作業者の目への危険性は、ともに低いことが見積もられた。

しかしながら、人工的な作業における密度の濃い舞い上がりについては、定量調査には及ばなかったものの十分懸念されるレベルと想定される。また、帯電粒子となりうることもあって付着性が高いことから、レーザー光の空間伝送のみならず、屋外暴露にある装置類への運用上の影響は十分留意する必要がある。

よって、一部報告がある推進器噴射による視界悪化といった実例を含め、月面作業における人工的な舞上がり時の密度及びその時間変化の見積と、それによる伝送損失及び散乱による作業員の目への安全性評価が課題である。

加えて、光学系への付着とその防止及び除去に関する調査をすることが適切である。

エ) 放射線

月面上空間に曝される光学素子など、耐放射線性の確保に先立ち、月面上の放射線環境について調査を実施した。線種やフラックスはおおよそ把握できたため、レーザー伝送における主要コンポーネントに対する耐放射線性について調査し、遮蔽の可能性についての検討が必要である。遮蔽については地下利用による遮蔽効果について、常時降り注ぐ meteoroid 対策も含めた検討もオプションとして考えられる。

d. 有線

- 真空や月面のレゴリス対応等の月面環境におけるより高電圧での電力取扱が可能とするための絶縁及びプラズマ発生防止技術等による放電防止開発。電力線及び高電圧対応の直流電力変

換器の開発

- 月面の原料によるアルミ線の月面での製造技術

e. 室内 WPT

室内 WPT を宇宙で実装するにあたり、特に重要な要素技術の開発としては以下が考えられる。

- WPT に適した建築内装材の開発
- 室内に設置する送受信機器最適配置を計画するためのシミュレーション技術の開発
- 室内に設置する機器との電磁両立性の検討および対策技術の開発

また、月面への輸送量の制約を考えると、送電と通信の一体的整備による輸送部材の削減や、冗長性の確保も検討課題である。

(2) 今後の検討の方向性(案)

月面における電力インフラシステム構築にあたっては、日本一国で実現していく規模のものではなく、各国と協力していくものと想定される。今後日本が、電力インフラシステムの主要部分を担い、月エネルギーの骨幹となる事業をリードしていくため、電力 WG の今後の検討の方向性、考慮すること等についての一案を以下に示す。

案① 日本に強みがあるシステムに注力

- 電力システムの中で、我が国の知見・ノウハウ・技術力等が活かせるシステムを選定し、その部分の検討に注力。
- 国際協力により、そのパートを日本が担当することを目指す。

案② 電力システム全体の検討を継続

- 電力供給システムはインフラであり、我が国独自でフルスケールの一貫通貫のシステムの保有を目指す。
- 国際協力においても、電力部分は日本が担当することを目指す。

案③ 日本施設向けの全体システム+強みがあるシステム注力の組み合わせ

- 日本の基地等のアセットのために、小規模 最低限の全体システムの保有を目指す。
- 国際協力では、我が国の強みが活かせるシステム部分の担当を目指す。

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(親委員会)を設置した。親委員会は、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。

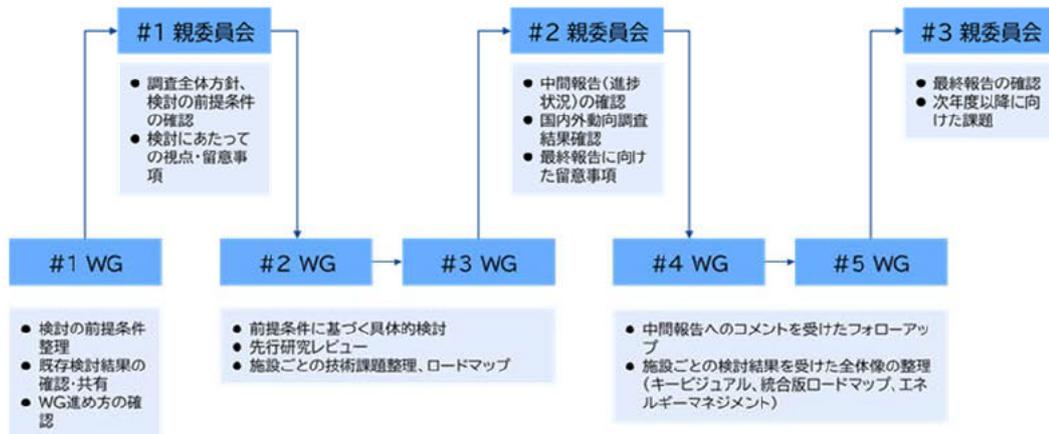


図 3-1 親委員会と WG の開催

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)

主催	
経済産業省 製造産業局 宇宙産業室	
有識者委員	
一般財団法人電力中央研究所 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 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 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 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 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 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 国際宇宙探査センター 月極域探査機プリプロジェクトチーム 副チーム長	星野 健
事務局	
株式会社三菱総合研究所	
一般財団法人日本宇宙フォーラム	

(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示す。

表 3-2 有識者委員会の開催履歴

回次	日時	主な議題
第1回	2022年8月23日(火) 17:00-19:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全体計画と方針について ・ 水素 WG の昨年度の振り返りと本年度の計画 ・ 電力 WG の昨年度の振り返りと本年度の計画 ・ 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021 ・ 総合討議
第2回	2022年12月9日(金) 10:00-12:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 月面における宇宙科学 ・ 月面での水資源関連技術の海外動向調査 ・ 水素 WG 進捗報告 ・ 電力 WG 進捗報告 ・ 総合討議
第3回	2023年3月14日(火) 10:00-12:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素 WG 進捗報告 ・ 電力 WG 進捗報告 ・ 総合討議

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)

主催	
経済産業省 製造産業局 宇宙産業室	
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
事務局	
株式会社三菱総合研究所	
一般財団法人日本宇宙フォーラム	

(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	主な議題
第 1 回	2022 年 8 月 5 日(金) 13:00-15:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新規参加企業紹介 ・ 昨年度の振り返りと本年度計画 ・ 実証テーマについての提案 ・ 討議
第 2 回	2022 年 9 月 14 日(水) 13:00-15:20	<ul style="list-style-type: none"> ・ 個別プロセスにかかわる技術の比較検討 ・ 水素生成に係る全体アーキテクチャの検討 ・ 討議
第 3 回	2022 年 11 月 14 日(月) 15:00-17:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 個別プロセスにかかわる技術の比較検討 ・ 水素生成に係る全体アーキテクチャの検討結果 ・ 技術ロードマップ作成に向けて ・ 討議

第4回	2022年12月23日(金) 10:00-12:30	<ul style="list-style-type: none"> ・ 個別プロセスにかかわる技術の比較検討 ・ シミュレータについて ・ 技術ロードマップ作成に向けて ・ 電力量算出について
第5回 (電力WG と合同で実施)	2023年2月16日(木) 9:00-11:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 両WGの結節点について ・ 電力WG活動報告 ・ 水素WG活動報告 ・ 総合討議

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電力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)

主催	
経済産業省 製造産業局 宇宙産業室	
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 シャープ株式会社 大成建設株式会社
大学	金沢工業大学 京都大学 電気通信大学 東京大学 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
事務局	
株式会社三菱総合研究所	
一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構	

(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	主な議題
第 1 回	2022 年 8 月 9 日(火) 10:30-12:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全体計画・方針について ・ 本年度の検討体制について ・ 課題の設定と進め方について
第 2 回	2022 年 10 月 11 日(火) 17:00-19:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 電力に関する動向調査
第3回	2022 年 12 月 1 日(木) 13:00-15:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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
第 4 回	2023 年 1 月 13 日(金) 16:30-18:30	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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
第 5 回 (水素 WG と合同 で実施)	2023 年 2 月 16 日(木) 9:00-11:00	<ul style="list-style-type: none"> ・ 両 WG の結節点について ・ 電力 WG 活動報告 ・ 水素 WG 活動報告 ・ 総合討議

4. 国内外動向調査

技術課題整理に関係する内容について国内外の動向調査を行った。調査は「ウェブ・文献調査」と「国内企業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。既に計画を発表している海外企業について動向を整理する他、政府が民間から調達する中で開発される月面エネルギーに関する技術開発動向についても月面エネルギー関連で研究開発している企業がないかを調査し、動向の収集・整理を行った。

国内企業へのヒアリング調査では、令和3年度の検討において新たに検討が必要になった施設や構成要素、あるいは関連する技術を保有する企業に対してヒアリングを行い、同企業が保有する要素技術、現在の研究開発の現状、今後の計画等について情報収集を行った。

4.1 水素に関する動向(月面での水資源関連技術の海外動向調査)

4.1.1 欧米以外(中国、インド、韓国、UAE)の月探査動向

水素については、月面での資源利用技術(ISRU:In-Situ Resource Utilization)が重要になってくることから、ISRUを中心とした技術動向調査を行った。月面上では、レゴリスに含まれるであろう水氷を抽出し、電解して水素と酸素を液化保存して利活用することが想定されるため、水素抽出技術のみならず、その前段階での水の月面上での探査を含め、広く技術動向の調査を行った。2021年度は欧米を中心として、海外のISRU関連動向を調査したが、2022年度は中国、インド、韓国、UAEを中心に動向調査を実施した。

(1) 中国の月探査

中国においては、中国の宇宙機関である中国国家航天局(CNSA)管轄の探月・航天工程センター(CLEP)が、国家プロジェクトとして長期にわたる中国の月探査プログラムを推進している。2007年に月周回機「嫦娥1号」を初めて打ち上げたのを皮切りに、3~5年に一度、継続的に月探査ミッションを実施しており、非常に積極的に月探査を実施している国である。

2013年12月に「嫦娥3号」で世界3番目の月着陸に成功、2019年1月には「嫦娥4号」で月の裏側への着陸に世界で初めて成功、2020年12月には「嫦娥5号」で中国で初めて月の砂のサンプルリターンに成功するなど、着実に力をつけてきており、近年では世界初の偉業を連続して達成している。

また、2018年打ち上げの「嫦娥4号」以降、海外の研究機関が開発した科学ペイロードも搭載してデータ取得を行うなど、近年、欧州を中心とした協力を推進してきていることも特徴の一つである。他方、米国との協力は少しずつ進めてきてはいるが、探査機・宇宙機の位置や撮像情報の共有などにとどまる。これまでの中国の欧米以外の月探査における協力国はロシアである。2018年3月に露RoscosmosとCNSAが月・深宇宙探査及び月プロジェクトの共同データセンター設立に関する合意文書に署名し、ロシアの無人月探査機「Luna-Resurs-1」の周回機(Luna-26)ミッション実施、及び「嫦娥6号」などで協力する意向である。

中国は、今後も継続的に月探査ミッションを実施していく計画で、月の南極への着陸、再度のサンプルリターンなどを経て、国際協力により月面基地「International Lunar Research Station (ILRS)」を構築することを発表している。2021年3月には、ロシアと中国はILRS構築に関する了解書に署名。同プロジェクトへは各国からの参加も呼びかけている。中国は、月探査プログラムの第4フェーズを承認し、ロシアと協力してILRSの基本モデル構築の準備を実施しているとの報道がある他、2021年6月の報道では、ESA長官が中国及びロシアからILRSへの参加インビテーションを受け取ったが、どのようなスタンスで対応するかの答えを持ち合わせていないと発言するなど、各国への参加の呼びかけを強めており、我が国としてもその動向を注視していく必要がある。

表 4-1 中国の月探査ミッション(嫦娥シリーズ)

	探査種類	打ち上げ	
嫦娥1号	月周回	2007年10月	・2009年3月まで運用 ・20以上の観測機器により、月面を観測
嫦娥2号	月周回	2010年10月	・2011年6月観測終了、その後フライバイ実験 ・嫦娥1号よりも低い100kmの高度から高精度に月面を観測
嫦娥3号	月着陸	2013年12月	・世界で3か国目となる月面着陸を実施 ・無人探査車「玉兔1号」により、地形や地質構造、資源の分布などを調査(活動期間8か月程度と推定)
嫦娥4号+データ中継衛星「鵲橋」	月の裏側着陸	2018年12月	・2019年1月3日に世界で初めて月の裏側に着陸 ・無人探査車「玉兔2号」により、地形や地質構造、資源の分布などを調査(現在も活動中) ・4つの海外ペイロード搭載(中継衛星に搭載含)
嫦娥5号	サンプルリターン	2020年11月	・2020年12月17日に中国初の月の砂のサンプルリターンに成功(サンプルの質量約1.731kg)
嫦娥6号	月の南極への着陸、サンプルリターン	2024年頃(予定)	・サンプルリターンに成功した嫦娥5号のバックアップ機 ・海外ペイロードも搭載予定
嫦娥7号	月の南極への着陸	2026年後半(予定)	・探査機、着陸船、探査車、中継衛星で月の南極への着陸と科学調査を計画 ・UAEの月探査車「Rashid-2」を運搬予定
嫦娥8号	月面基地ILRS技術実証?	2028年頃(予定)	・詳細不明だが、3Dプリンターや月資源の利用について検証との報道

出所)各種情報を基に日本宇宙フォーラム作成

表 4-2 中国の月探査における資源探査ペイロード

	テラヘルツセンサ	短波長赤外線センサ	短波長赤外線レーザー	立体カメラレーザー	中性子分光計	マイクロ波レーダ	その他
嫦娥1号(周回機)				○ (解像度約120m)			・画像分光器(Sagnac干渉計分光器)(元素・物質分布) ・ガンマ線分光器(元素・物質分布) ・X線分光器(元素・物質分布) ・マイクロ波放射計(地表面下の熱分布:3.0, 7.8, 19.35, 37GHz)
嫦娥2号(周回機)				○ (解像度約7m)			・ガンマ線分光器(元素・物質分布) ・X線分光器(元素・物質分布) ・マイクロ波放射計(地表面下の熱分布:3.0, 7.8, 19.35, 37GHz)

嫦娥 3 号 (探査車)			近赤外	○		○ (60MHz-, 500MHz-)	・可視・近赤外分光器(元素・物質現場 観測) ・X 線分光器(元素・物質分布)
嫦娥 4 号 (着陸機)							・中性子・放射線量測定器(月面の放 射線被ばく量):DLR
嫦娥 4 号 (探査車)			近赤外	○		○	・可視・近赤外分光器(元素・物質現場 観測) ・中性子線測定器:スウェーデン宇宙 物理研究所
嫦娥 5 号 (着陸機)			近赤外	○		○	・可視・近赤外分光器(元素・物質現場 観測)

出所)<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chang-e-1#sensor-complement-celms-stereo-camera-iim-lam-grs-gxs-hpd-swid>(閲覧日:2023年2月27日)

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chang-e-2#mission-status>(閲覧日:2023年2月27日)

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chang-e-3#change-3-moon-landing-mission>(閲覧日:2023年2月27日)

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chang-e-4#future-roadmap>(閲覧日:2023年2月27日)

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chang-e-5#spacecraft>(閲覧日:2023年2月27日)

(2) インドの月探査

インドは 2000 年代初頭から意欲的に月面探査計画を進め、2008 年 10 月に月周回ミッション Chandrayaan-1 を打ち上げ、国際協力パイロードのデータ取得含め、多くの科学的データを取得。計画よりも少し早い 2009 年 8 月に運用を終了した。Chandrayaan-1 に続き、月着陸機を伴う Chandrayaan-2 をロシアと共同実施の予定であったが、設計見直しによる重量超過から共同ミッションを解消し、インド単独で実施。打ち上げも 2014 年から延期され、2019 年に打ち上げられたが月着陸に失敗(周回機の軌道投入は成功)した。

JAXA と ISRO の協定に基づく共同月面探査計画では、H3 ロケットにより、日印合同の月極域探査ミッション(LUPEX)を 2024 年度以降打ち上げる予定となっている。着陸機(月の南極域に着陸予定)をインドが、打ち上げロケットと月面探査ローバを日本側が開発中で、開発分担をしながら共同ミッションを実施する計画。

民間の動きとしては、2010 年代に日本のチーム「HAKUTO」も参加していたロボット月面探査レース「Google Lunar XPRIZE(GLXP)」にインドの民間団体である TeamIndus が参加していたが資金不足など複数の理由でレースを断念。開発されていた着陸機やローバなどの技術は米国の民間企業 Orbit Beyond, Inc.とのパートナーシップに引き継がれ、NASA の商業月パイロード調達契約 CLPS などにも選定された(その後脱落)。

表 4-3 インドの月探査ミッション(Chandrayaan シリーズ)

	探査種類	打ち上げ	
Chandrayaan-1	月周回	2008年10月 (中国より1年遅い)	<ul style="list-style-type: none"> ・2008年11月12日に高度約100kmの月周回軌道に投入され、約10か月間運用 ・探査機本体から切り離されたインパクターが月の南極に近いシャクルトン・クレーターに衝突し、米国、旧ソ連、日本、欧州に続いて史上5番目に人工物を月面へ到達させることに成功 ・11の観測機器が搭載され、可視、近赤外線、低エネルギーX線、高エネルギーX線の各領域における詳細な月表面の観測を実施(NASA、ESA、ブルガリア科学アカデミーなどの国際協力による6つの機器)
Chandrayaan-2	月着陸 (失敗)	2019年7月	<ul style="list-style-type: none"> ・周回機、着陸機、探査車からなるミッション ・パイロードには重量制限のため原則として国内開発が搭載されたが、NASAとの合意で、探査車にNASA/GSFCのレーザ反射器(月周回衛星と探査車との間の距離の計測)を搭載 ・2019年9月にVikram着陸機が機体に搭載されたカメラと速度計、高度計のデータなどを照合して着陸を行う画像照合航法によって月面着陸を行う計画だったが、着陸直前に通信が途絶し、失敗 ・本ミッションで月周回機の投入は成功し、継続して運用中
Chandrayaan-3	月着陸	2023年頃 (予定)	<ul style="list-style-type: none"> ・月に着陸する着陸機と、月面を移動する探査車からなるミッション
月極域探査ミッション(LUPEX)	月の南極への着陸	2024年度以降	<ul style="list-style-type: none"> ・着陸機をインドが、打ち上げロケットと月面探査ローバを日本側が開発 ・水の存在有無を確認するだけでなく、水がどれだけの量、どのような分布で、どのような状態で存在するのかを調査予定 ・JAXA、ISRO 以外に、NASA、ESA のパイロード搭載予定

出所)各種情報を基に日本宇宙フォーラム作成

表 4-4 インドの月探査における資源探査パイロード

	テラヘルツセンサ	短波長赤外センサ	短波長赤外レーザレーダ	立体カメラレーザレーダ	中性子分光計	マイクロ波レーダ	その他
Chandrayaan-1 (周回機)				○ (解像度約5m、+レーザ高度計)		○ (NASA/DOD提供)	<ul style="list-style-type: none"> ・ハイパースペクトルイメージャ(鉱物分布) ・高エネルギーX線スペクトロメータ(月面からの放射) ・X線スペクトロメータ:ESA提供 ・低キロ電子ボルト原子反射解析装置:ESA提供 ・近赤外スペクトロメータ:ESA提供 ・鉱物マップ(鉱物分布):NASA提供
Chandrayaan-2 (周回機)				○		○	<ul style="list-style-type: none"> ・軟X線スペクトロメータ(鉱物分布) ・赤外線スペクトロメータ(鉱物調査)
月極域探査ミッション(LUPEX) (着陸機)						○ (ISRO提供)	<ul style="list-style-type: none"> ・質量分析器(水分子などの分子) ・レーザ微量水分・同位体分析装置(微量な水分子) ・近赤外画像分光装置(鉱物の同定や水氷)

出所) <https://www.eoportal.org/satellite-missions/chandrayaan-1>(閲覧日:2023年2月27日)

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/chandrayaan-2>(閲覧日:2023年2月27日)

(3) 韓国の月探査

韓国では、韓国航空宇宙研究所(KARI)が中心に月探査機を開発している。2022年8月5日、韓国初の月探査機「Korea Pathfinder Lunar Orbiter(公募名称:Danuri)」を打ち上げ、月へ向かう軌道に投入。探査機は Ballistic Lunar Transfer Trajectory と呼ばれる、エネルギー消費の少ない方法で月まで向かい 2022年12月に月周回軌道に投入された。軌道変更マヌーバを続け、高度約100kmの月周回軌道に投入された後、約1年ほど観測を続ける計画。Danuriの月周回軌道への投入に成功した場合、旧ソ連、米国、欧州、日本、中国、インド、イスラエルに続いて、世界で8番目に月周回軌道に探査機を投入することに成功した国となる。

韓国は2021年5月にNASAとのアルテミス合意に署名した。Danuri探査機と地球の通信には韓国の地上局の他、NASAのDeep Space Networkも利用されている。また、NASAと韓国電子通信研究院が開発した「ShadowCam」が搭載され、取得データはNASAと共有している。KARIは、2031年に予定している次世代ロケットでの次の月探査ミッションを実施予定で、約4億5900万ドルの予算で月着陸を目指すと発表している。

表 4-5 韓国の月探査における資源探査ペイロード

	テラヘルツセンサ	短波長赤外センサ	短波長赤外レーザーレーダ	立体カメラ レーザーレーダ	中性子分光計	マイクロ波レーダ	その他
Danuri (周回機)				○ (解像度約5m)			<ul style="list-style-type: none"> ・ガンマ線スペクトロメータ(元素・物質分布) ・偏光カメラ(月表面の特徴:月着陸機の着陸場所の選定) ・高感度カメラ:NASA提供(永久影など暗い場所撮影:LROの光学カメラよりも約800倍高感度)

出所)<https://www.eoportal.org/satellite-missions/kplo>(閲覧日:2023年2月27日)

(4) アラブ首長国連邦(UAE)の月探査

UAEでは、宇宙研究機関であるMohammed Bin Rashid Space Centre(MBRSC)が同国の月探査ミッションを推進しており、Emirates Lunar Missionと呼ばれる最初の月探査ミッションをスタートした。主に、探査車(ローバ)と搭載装置を開発しており、一連の月探査ミッションでは、「Rashid-1」と「Rashid-2」の2つの探査車を月に送ることが発表されている。

「Rashid-1」は、日本のispace社との契約により、「HAKUTO-R」プロジェクトの最初の着陸機「M1」に搭載され、月面に運搬される計画。米国のスペースX社のFalcon-9で2022年11月に打ち上げられ(打ち上げ延期)、約5か月後の2023年4月に月面着陸予定。

「Rashid-2」は、MBRSCと中国航天局(CNSA)が締結したMoUにより、中国が月の南極への着陸を目指す「嫦娥7号」に搭載され、2026年後半に打ち上げられる計画。

表 4-6 UAE の月探査における資源探査パイロード

	重量	サイズ	パイロード	備考
Rashid-1 (探査車)	約 10kg	全長と幅54cm、高さ8.5cm	・高解像度カメラ ・赤外線カメラ ・顕微鏡装置 ・帯電測定装置	4 輪の車輪によるローバで、太陽電池による稼働時間は約 1 日
Rashid-2 (探査車)	(不明)	(不明)	(不明)	

出所)各種情報を基に日本宇宙フォーラム作成

4.1.2 レゴリスからの酸素(金属)抽出技術動向

月面に含まれるであろう水素の他、月面のレゴリスには化学的に結合された酸素が多く含まれていることが分かっており、レゴリスから酸素を抽出する技術についても、国内外の技術動向を調査した。また、酸素は各種の金属と強く結合して存在することが多く、酸素の抽出過程において、その副産物として様々な金属が抽出できる可能性がある。それらの金属は地球から輸送することなく、月面活動において必要な資材として活用できる可能性がある。ただし、月面のレゴリスの成分組成は月面の場所によりことになっており、例えば酸化鉄のような、比較的酸素が取り出しやすい形で酸素が結合しているレゴリスは水が多く存在することが示唆されている月の極域ではなく、低緯度地域に広く分布している。そのため、本調査では、水の探査・抽出のために主な活動領域になるであろう極域での活動と、低緯度地域での酸素・金属抽出の活動の全体の最適化については考慮していない。



図 4-1 月面での資源利用サイクル

出所)NASA ウェブサイト,

https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210012921/downloads/ASCE_ES_2021_shortCourse_ISRU_Kleinheinz_v2.pdf(閲覧日:2023年2月27日)

これまで収集した月の石/砂のサンプルの分析結果から、レゴリスの重量の 40~45%程度が酸素で構成されていることが分かっている。レゴリスは月面のいたるところに存在し、酸素は重量比で言えば豊富に存在することは明らかだが、レゴリス中の酸素は酸化物として鉱石やケイ素等に化学的に強く結合されており、そのままでは酸素として活用することができない。

レゴリス中の鉱物は、主にカンラン石 ($(Mg,Fe)_2SiO_4$)、イルメナイト ($FeTiO_3$)、輝石

($XY(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$)など、様々な形で存在しており、極域、低緯度地域など、月面の地域によって、その組成は異なることが知られている。酸素の利活用のみならず、酸素抽出後に副産物として生成される金属(鉄、チタン、アルミ等)は月面での活動に活用可能であり、レゴリスから酸素を抽出する技術は様々な手法が世界中で研究中である。

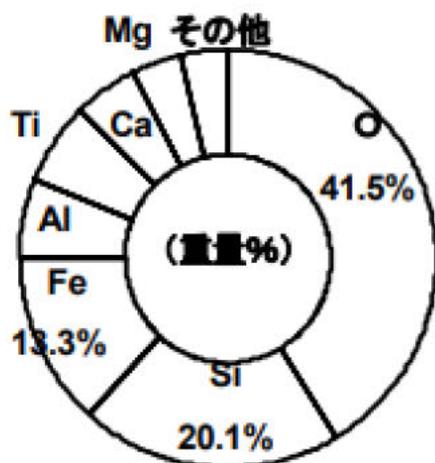


図 4-2 レゴリスの組成(静かの海)

出所)月面環境利用技術ワーキンググループ活動報告, Space Utiliz Res, 23 (2007), https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=13549&item_no=1&attribute_id=31&file_no=1(閲覧日:2023年2月27日)

表 4-7 レゴリスからの主な酸素抽出技術

	要求温度(°C)	生成量(重量%)	反応物	最終生成物
水素還元法(イルメナイト)	800-1100	1-2	イルメナイト(酸化鉄)、水素	H ₂ O
メタン還元法	500-1800	9-20	レゴリス、メタン、水素	H ₂ O、CH ₄
熔融レゴリス電解法	1300-1600	30-35	レゴリス	O ₂
熔融塩電解法	825-950	40-45	レゴリス、熔融塩(CaCl ₂)	O ₂
イオン液体(IL)電解法	<200	44	レゴリス、イオン液体	H ₂ O
気相熱分解法	900-2500	6-23	レゴリス	O ₂

※最終生成物が水の場合、その後電解して酸素と水素を分離する
 出所)Payload Concept Evaluation for Water/Oxygen production on the Moon based on Thermo-or Electro-Chemical Reduction of Lunar Regolith, 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-103, 11-15 July 2021, https://www.researchgate.net/publication/353378551_Payload_Concept_Evaluation_for_WaterOxygen_production_on_the_Moon_based_on_Thermo-or_Electro-Chemical_Reduction_of_Lunar_Regolith(閲覧日:2023年2月27日)

表 4-8 レゴリスからの主な酸素抽出技術の比較

	TRL	効率	装置 サイズ・重量	必要 電力	主な利点と課題
水素還元法 (イルメナイト)	◎	△	◎	○	<有利> ・プロセスがシンプル ・生成物が水のため扱いが容易 <課題> ・水を生成するため、その後、水素と酸素に電解が必要 ・得られる水(酸素量)が少ない:29tの酸素を得るのに約6000tのレゴリスが必要
メタン還元法	◎	○	△	◎	<有利> ・得られる水(酸素量)が水素還元よりも多い ・生成物が水のため扱いが容易 <課題> ・水を生成するため、その後、水素と酸素に電解が必要 ・2段階の化学反応プロセスがやや複雑 ・異なる温度で反応させる熱制御が難しい
熔融塩電解法	△	◎	○	○	<有利> ・プロセスがシンプル ・直接酸素が得られ、レゴリス中のほぼ全ての酸素が抽出可能 ・質の高い金属が副産物として得られる <課題> ・まだ研究室レベルの技術(低 TRL) ・生成物が気体のため、ストレージが大きくなる

※酸素抽出技術の比較(出典を参考に JSF が作成)

出所)Payload Concept Evaluation for Water/Oxygen production on the Moon based on Thermo-or Electro-Chemical Reduction of Lunar Regolith, 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-103, 11-15 July 2021(閲覧日:2023年2月27日), https://www.researchgate.net/publication/353378551_Payload_Concept_Evaluation_for_WaterOxygen_production_on_the_Moon_based_on_Thermo-or_Electro-Chemical_Reduction_of_Lunar_Regolith(閲覧日:2023年2月27日)

(1) 米国での酸素抽出技術動向

- NASA の Lunar Surface Innovation Initiative (LSII)の下、アルテミス計画の中で 10t/年の月面での酸素生成を目指す。
- NASA の他の総局やセンターとも協力し、幅広い TRL の ISRU 技術開発を進めており、GCD (中 TRL)、BAA(中 TRL)、SBIR(低～中 TRL)、NIAC(低～中 TRL)、CIR(低 TRL)、ESI (低 TRL)、各種 Challenge コンペ(低 TRL)、STRG(低 TRL)などを通して、NASA のインハウス、企業、大学・研究機関がそれぞれ要素技術を研究開発。
- 水素還元法/プラズマを用いた水素還元(Plasma Processes 社など)、メタン還元法(Sierra Space 社、Pioneer Astronautics 社など)、熔融レゴリス電解法(Lunar Resources 社など)、イオン液体電解法(Faraday Technology 社など)など、幅広い研究開発を実施。
- TRL6 に達する技術の想定：
 - ・ メタン還元法(2023 年度頃)
 - ・ プラズマを用いた水素還元(2024 年度頃)※
 - ・ イオン液体電解法(2024 年度頃)
 - ・ 熔融レゴリス電解法(2025 年度頃)
- 2022 年 8 月、Sierra Space 社はメタン還元法で NASA の SBIR フェーズ 3 を完了。CLIPS

デモを目指す。

※プラズマを用いることで従来の手法よりも効率的に酸素を抽出できる模様(7.3 重量%程度)

(2) 欧州での酸素抽出技術動向

- Airbus Defence and Space 社、OHB Italia 社、Space Applications 社、Thales Alenia Space 社らが、それぞれレゴリスからの酸素抽出技術を研究開発。
(OHB Italia 社、Space Applications 社の取組みは参考に添付)
- 2019 年 9 月、スコットランドのグラスゴー大学と英国 Metalysis 社らは、1000 度を超えない温度で、レゴリスのほぼすべての酸素を抽出できる可能性のある熔融レゴリス電解法を考案し、論文で発表。
- 欧州宇宙機関(ESA)の欧州宇宙研究技術センター(ESTEC)は研究所の中に、酸素生成プラントのプロトタイプを設置。ESA の大学や企業との共同研究支援プロジェクト Networking/Partnering Initiative で採択されたグラスゴー大学と Metalysis 社らの技術開発を支援。
- 2022 年 3 月、ESA は欧州発の月面での酸素抽出実証で Thales Alenia Space 社率いるコンソーシアム(AVS 社、Metalysis 社など含む)を選定。ESA の月面着陸機 European Large Logistics Lander(EL3)(2030 年頃打ち上げ予定)に搭載され、月面上で太陽光が得られる 10 日間以内に、レゴリス中の酸素の約 70%、50~100g の抽出を目指す。

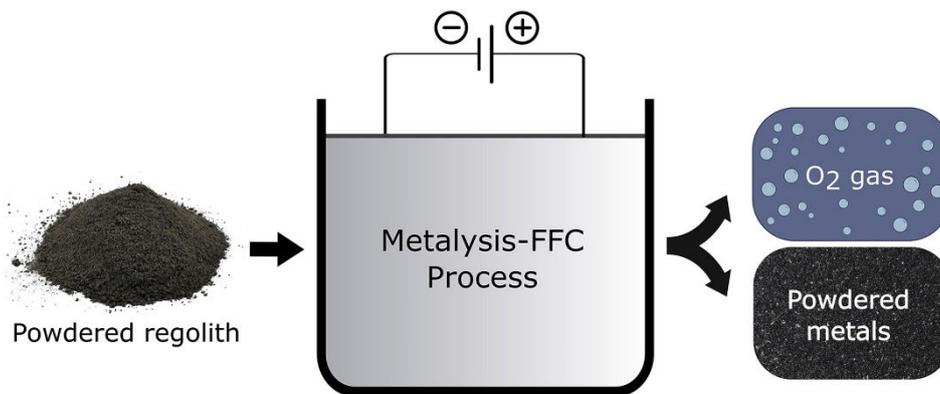


図 4-3 熔融レゴリス電解法による酸素抽出の概念図

出所) Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith, Planetary and Space Science, Volume 180, January 2020, 104748

4.2 電力に関する動向

本節では各国で計画されている月面拠点での電力利活用に関する動向について調査・整理した結果について述べる。具体的には、米国及び欧州の動向を中心に調査し、それぞれの電力に関する計画の概要と要素技術の開発動向について示す。

月面で利用される電力技術は、図 4-4 に示すように発電、送電、蓄電の 3 要素に大別され、生成された電力は最終的には月面に建設されるプラントや居住施設等で消費される。なお、本節では月面上で固定的に利用される電源のみを対象とし、ローバや宇宙船等の移動体での利用を想定した電源は対象外とした。また、原子力についても調査対象としたが、RTG (Radioisotope thermoelectric generator) 等の放射性物質の崩壊熱を熱源とする原子力電池は対象外とし、核分裂の連鎖反応による発電を行う原子炉を用いた発電技術のみを対象とした。送電技術に関しては有線によるものを対象とした。

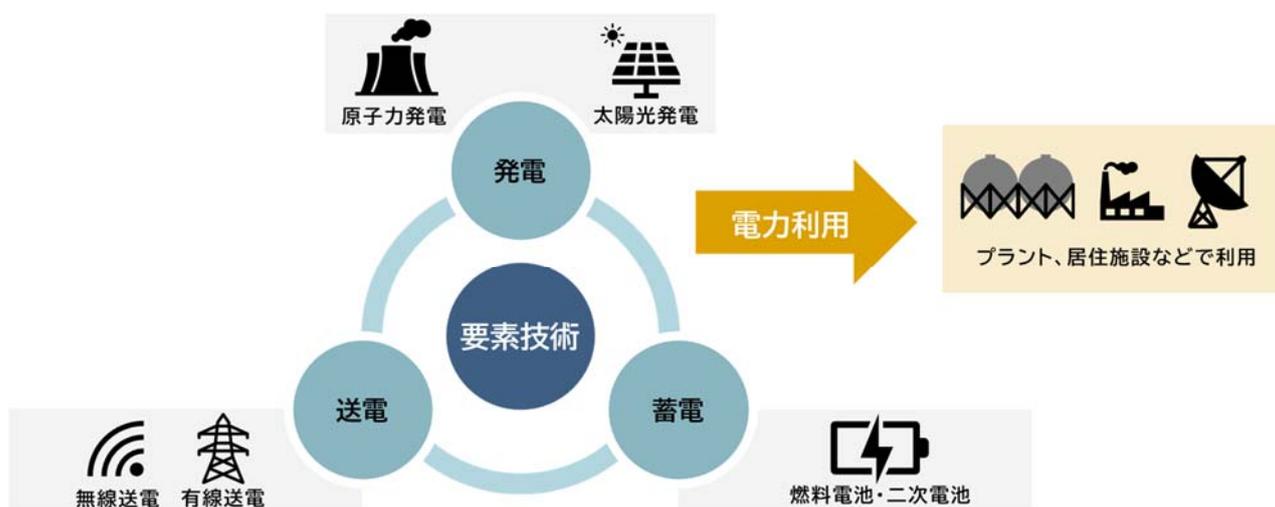


図 4-4 月面拠点における電力に関する要素技術の全体像

出所)三菱総合研究所作成

4.2.1 米国の動向

(1) 米国における月面での電力利用に関する開発動向

米国における月面での電力利用に関する開発動向として、NASA の一部門である宇宙技術ミッション本部 (Space Technology Mission Directorate: STMD) の関連動向について整理する。

STMD は NASA 及び大学・企業・研究所等の関係機関が進める技術開発を分野横断的に取りまとめ、資金や実証環境を提供する部署である²⁹。STMDの月や火星に関する活動は以下に示す区分 (①Go、②Land、③Live、④Explore) で整理されている³⁰。電力に関しては、主に③Live カテゴリの

²⁹ NASA, STMD, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/about_us/index.html (閲覧日: 2023 年 3 月 7 日)

³⁰ NASA, Strategic Framework, <https://techport.nasa.gov/framework> (閲覧日: 2022 年 10 月 4 日)

中の“Power and Energy Storage System”に分類されている。

またSTMDは上記に述べた研究開発とは別に、(6)に述べる月面の電力利用に関するコンペティション「Watts on the Moon challenge」を主催し、優勝者への賞金を拠出している。

Go
Rapid, Safe, & Efficient Space Transportation

- Develop nuclear technologies enabling fast in-space transits.
- Develop cryogenic storage, transport, and fluid management technologies for surface and in-space applications.
- Develop advanced propulsion technologies that enable future science/exploration missions.

Land
Expanded Access to Diverse Surface Destinations

- Enable Lunar/Mars global access with ~20t payloads to support human missions.
- Enable science missions entering/transiting planetary atmospheres and landing on planetary bodies.
- Develop technologies to land payloads within 50 meters accuracy and avoid landing hazards.

Live
Sustainable Living and Working Farther from Earth

- Develop exploration technologies and enable a vibrant space economy with supporting utilities and commodities
- Sustainable power sources and other surface utilities to enable continuous lunar and Mars surface operations.
- Scalable ISRU production/utilization capabilities including sustainable commodities on the lunar & Mars surface.
- Technologies that enable surviving the extreme lunar and Mars environments.
- Autonomous excavation, construction & outfitting capabilities targeting landing pads/structures/habitable buildings utilizing in situ resources.
- Enable long duration human exploration missions with Advanced Life Support & Human Performance technologies.

Explore
Transformative Missions and Discoveries

- Develop next generation high performance computing, communications, and navigation.
- Develop advanced robotics and spacecraft autonomy technologies to enable and augment science/exploration missions.
- Develop technologies supporting emerging space industries including: Satellite Servicing & Assembly, In Space/Surface Manufacturing, and Small Spacecraft technologies.
- Develop vehicle platform technologies supporting new discoveries.

図 4-5 STMD のフレームワーク(赤色・黄色は電力に関連する事項)

出所)NASA, Strategic Framework, <https://techport.nasa.gov/framework>(閲覧日:2022年10月4日)

なお、STMDは、“Power and Energy Storage System”において、以下に示すように発電・蓄電・送電それぞれに対して、開発目標を定めている³¹。これらの詳細については、(2)～(5)で述べる。

発電		蓄電		送電	
発電方法	用途	蓄電方法	用途	送電方法	用途
40kWe級の移動式核分裂発電システム	月の極地での作業や低緯度での月の工業化をサポートする月表面電カグリッドの構築	最大1MWhの再生型燃料電池	月の極地基地やISRUのエネルギー貯蔵	1000Vで、耐放射線、高信頼性のパワーエレクトロニクス	本格的なISRU作業のサポート
最大50kWe級の地球調達型モジュール式太陽光発電パネル	月面基地やISRUの探査・生産プラント向け	月で調達した鉱物を用いたGWh級蓄電システム	赤道付近まで月のインフラの拡張	最大10kWh級の低質量ケーブル	数kmの送電網
月のシリコンを用いたGWe級平面型太陽光発電パネル	月面基地やISRUの探査・生産プラント向け	最大50kWhの2次電池	モビリティ	月で調達したアルミニウムから作られる伝送路	大電力(MW級)、長距離(100km級)伝送
数100kWe級のラジオアイソトープ電源	モビリティの電源	最大100MWh級のLO2/LCH4一次燃料電池	月の移動装置やランダー	最大10kW級の無線電力伝送	目視内距離での照射(最大5km)

調査対象項目

- 発電: 原子力発電(核分裂)
- 発電: 太陽光発電
- 送電: 有線による送電

図 4-6 “Power and Energy Storage System”の開発目標

出所)公開情報より三菱総合研究所作成

³¹ NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

(2) 太陽光発電

1) STMD の取り組み

STMD の“Power and Energy Storage System”における太陽光発電に関する取り組みとして、50kW 級太陽光パネルと GW 級太陽光パネルの開発がある。それぞれのイメージ図を図 4-7 に、それぞれの概要を表 4-9 に示す。50kW 級太陽光パネルのケースでは発電システムを地球から運ぶ想定であるが、GW 級太陽光パネルでは材料を月面で調達し、製造する想定である。またそれぞれ技術開発目標を設定しており、50kW 級太陽光パネルでは2030年まで、GW 級太陽光パネルでは2035年までに TRL6 を実現するとしている。GW 級太陽光パネルについては月面のシリコンから太陽電池アレイを製造する技術が未成熟であるため、50kW 級よりも 5 年後ろ倒しとなっている。50kW 級太陽光パネルについては、表 4-11 に示すように月の極域における最大電力の需要予測が示されており、要求条件として50kWが設定されている。なお、表 4-10 に示すように、NASA、DoD、DoE を主体として技術分野ごとに資金拠出がなされている。

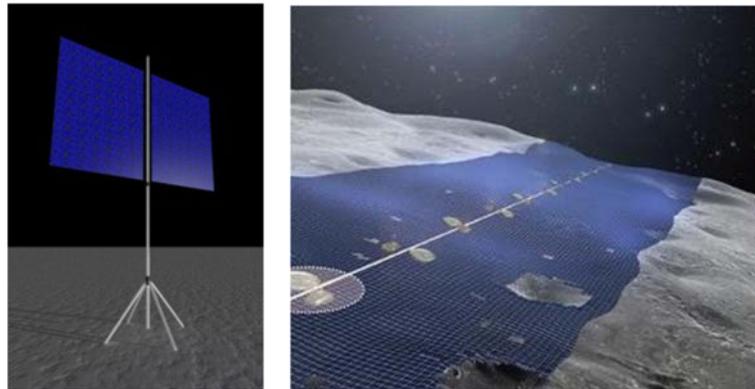


図 4-7 50kW 級太陽光パネル(左)と GW 級太陽光パネル(右)

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

表 4-9 50kW 級太陽光パネル(垂直及び平面)及び GW 級太陽光パネル(平面)の概要

	50kW級太陽光パネル	GW級太陽光パネル		
背景	<ul style="list-style-type: none"> 地球から調達する最新の太陽電池ブランケットは、月の極域の熱、塵、放射線環境下で本格的なISRU生産をサポートするための十分な耐久性と規模を備えていない。 展開塔や反射板の打ち上げ時における適合技術は、月の極域等の地平線の低い位置において、太陽光を集めるために最適化されていない。 	<p>月面のシリコンから太陽電池アレイを製造する技術は、まだほとんど開発されていない。</p>		
技術開発動向	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池アレイ(200V以下)およびLEO運用に適した展開機構はTRL9にある。 月重力下での垂直アレイ展開機構は技術開発の段階である。 10kW規模の大型反射鏡/ミラーはコンセプトレベルの開発である。 GW規模で、月面から調達したシリコンを用いた大規模な表面型太陽光発電アレイは、概念的な開発のごく初期段階である。 			
目標	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までにTRL6に到達させる。 下記の条件を満たす、垂直または水平に設置可能な太陽電池アレイを開発する。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ ①50kW級 ✓ ②200W/kg ✓ ③200V以上の電力を供給 ✓ ④月の極域環境(日陰を含む)で10年間に10%以上の劣化がない 	<ul style="list-style-type: none"> 2035年までにTRL6に到達させる。 GW規模の太陽電池ブランケットは、月で調達したシリコンを用いて平面上に製造される。これにより、地球から持ち込む材料は最小限となる。 		
目標を達成するための計画	SBIR	耐放射線太陽光発電、ブランケット、反射板・集光板を設計する	STRG/SBIR	月面シリコン採掘と太陽電池アレイを製造する
	GCD	最適化されたブランケット(集光板、ダスト耐性、耐放射線PV)をTRL6まで持つていく	GCD	2035年までに、統合された太陽光発電システムをTRL6にする
	GCD VSAT	プロジェクトを継続する		
	TDM	2025年に、10kW級のVSATまたは反射鏡タワーを飛ばし、PSRの探査を支援する	TDM	2037年までに、太陽光製造装置を月面で飛ばし、運用する
	TDM	2030年に、パイロットプラントをサポートするために50kW級のアレイを飛ばす		

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-10 50kW 級及び GW 級太陽光パネルに関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Earth-sourced PV Blankets	<ul style="list-style-type: none"> SBIR (composite Blanket) GCD ACO (FSAP) CLPS (PILS)
	Earth-sourced Deployment Structures	<ul style="list-style-type: none"> SBIR STRG (BYU) GCD (VSAT)
	Earth-sourced Reflectors	—
	Dust compatibility	<ul style="list-style-type: none"> GCD (LO-DuSST) GCD ACO (DMFlex)
	Lunar-sourced PV Blankets	—
DoD/DoE	Earth-sourced PV Blankets	—

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-11 月の極域における最大電力需要予測(50kW 級太陽光パネルを用いた場合)

Full-Scale Polar Power Demand Assumptions	kWe
Outpost Module	10
Initial Full-Scale O ₂ -from Regolith (7 t/year system - Carbothermal)	15
Initial Full-Scale Ice-Mining , Rim (10 t/year system)	46
Initial Full-Scale Ice-Mining, in PSR (10 t/year system)	22

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems、 <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

2) STMD における具体的な取り組み事例(GCDプログラム)

STMD では、表 4-10 に示す通り、研究開発プログラムとして「Game Changing Development (GCD) program」を実施しており、垂直型太陽電池パネル (Vertical Solar Array Technologies:VSAT) の研究開発も実施している³²。2022 年 8 月には VSAT のプロトタイプ作成及び実証を行うために、Astrobotic 社、Honeybee 社、Lockheed Martin 社の 3 社に対し、合計 \$19.4M の投資を実施することを発表した³²。この R&D による成果を活用して、2020 年代後半に月の南極付近に実用システムを配置する計画となっている。

3) Astrobotic 社の動向

Astrobotic 社では、STMD のプログラムへの参加以外に独自に月面での商用電力供給サービス「LunaGrid」を開始することを発表している。VSAT の開発で獲得した技術を活用して Astrobotic 社のランダにより VSAT を輸送・展開し、ローバ(CubeRover)に搭載されたワイヤレス給電器によって各顧客に分配する計画である³³。初期の段階では 10kW を発電するシステムを構築し、将来的に拡張する構想となっている³⁴。電力システムの拡張に備え、変圧器や電力管理システムも搭載される予定である。早ければ 2026 年に月の南極に向けて実証機を送り、2028 年から運用を開始する計画である。

³² NASA, Three Companies to Help NASA Advance Solar Array Technology for Moon, <https://www.nasa.gov/press-release/three-companies-to-help-nasa-advance-solar-array-technology-for-moon>(閲覧日:2022年9月28日)

³³ Astrobotic 社, プレスリリース, <https://www.astrobotic.com/announcing-lunagrid-a-commercial-power-service-for-the-moon/>(閲覧日:2022年9月28日)

³⁴ SpaceNews, Astrobotic announces plans for lunar power service, <https://spacenews.com/astrobotic-announces-plans-for-lunar-power-service/>(閲覧日:2022年9月28日)



図 4-8 VSAT(左)と LunaGrid サービスのイメージ(右)

出所)NASA, Three Companies to Help NASA Advance Solar Array Technology for Moon, <https://www.nasa.gov/press-release/three-companies-to-help-nasa-advance-solar-array-technology-for-moon>(閲覧日:2022年9月28日)
Astrobotic 社, プレスリリース, <https://www.astrobotic.com/announcing-lunagrid-a-commercial-power-service-for-the-moon/>(閲覧日:2022年9月28日)

(3) 原子力発電

STMD の“Power and Energy Storage System”での、原子力発電に関する取り組みを表 4-12 に示す。STMD では、原子力発電の中でも核分裂発電について取り組みがなされており、図 4-9 の通り核分裂発電システムのイメージ図も示されている。2018年には米国で1kWe の宇宙用核分裂炉が地上実証されており、将来的な開発目標としては2028年までに40kWe 級の移動式核分裂発電システムを TRL6で達成することが示されている。10年間で出力を40倍とする目標であり、本目標を達成するために、Fission Surface Power Project が現在進行中である³⁵。また原子力発電に関するSTMDの資金拠出状況については、表 4-13 に示すように NASA、DoD、DoE を主体として技術分野ごとに複数のプログラムが立ち上がっている状況である。

表 4-12 Fission Surface Power(核分裂発電)¹に関する STMD の取り組み

背景	月面で移動可能であり、太陽光に依存せずに電力を供給できるような、数kW規模の電源は開発されていない。このような電力は、①月の極域での持続可能な運用のために太陽光発電を補うため、②インフラが低緯度に向かって拡大する際に、月のレゴリスからモノを作るため、必要である。
技術開発動向	核分裂炉は、地球の陸上や海上では何十年も運用されてきたが、宇宙では1988年のソ連のTOPAZ I(約5kWe)の飛行以来、運用されたことはない。1994年にソ連のTOPAZ II開発機(約6 kWe)が短期間地上試験を行った。2018年に米国にて宇宙用核分裂炉開発ユニット(約1 kWe)が地上実証された。 ²
目標	2028年に月の極域の環境に適応した40kWe級の移動式核分裂発電システムをTRL6にする。より低出力(例:10kWe)のものは火星用に開発される可能性がある。
目標を達成するための計画	NASAのTechnology Demonstration Missions ProgramにおけるFission Surface Power Projectを完了させること

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

1.NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

2. M. Gibson, D. Poston, P. McClure, T. Godfroy, M. Briggs, and J. Sanzi, “The Kilowatt Reactor Using Stirling TechnologY (KRUSTY) nuclear ground test results and lessons learned,” in 14th International Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-2018, p. 12, Cincinnati, OH, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, July 2018.

³⁵ NASA ウェブサイト, https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/fission-surface-power/index.html, 2023年3月9日閲覧

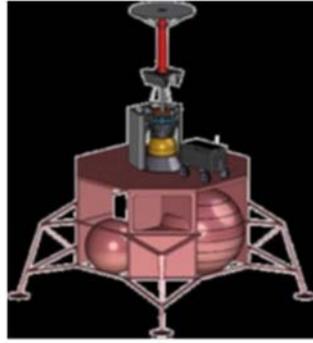


図 4-9 Fission Surface Power System のイメージ図

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

表 4-13 Fission Surface Power(核分裂発電)に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Energy conversion	<ul style="list-style-type: none"> Small Business Innovation Research Small Business Technology Transfer Program (Stirling, Brayton, ATEG, Heat Ex, Radiators)
	Radiation Shielding	<ul style="list-style-type: none"> Small Business Innovation Research (materials)
	Systems	<ul style="list-style-type: none"> Technology Demonstration Missions Program (Fission Surface Power)
DoE (Department of Energy)	Nuclear fuels	<ul style="list-style-type: none"> Small Modular Reactor
DoD (Department of Defense)		<ul style="list-style-type: none"> Project Pele

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

(4) その他の発電・送電・蓄電技術

ここでは、上述した太陽光発電・原子力発電以外の STMD が取り組む発電・送電・蓄電技術について、それぞれの開発目標と資金支援状況を整理する。

1) 有線送電システム(送電技術)

STMD の“Power and Energy Storage System”では、有線送電システムに関して、①月面用ケーブルを用いた有線電力伝送、②月で調達したアルミニウムから作られる送電ケーブルを用いた有線電力伝送のそれぞれについて、表 4-14 に示す開発目標を定めている。①と②の主な違いは、送電ケーブルの材料であるアルミニウムを月面上で調達するかどうかであり、②ではアルミニウムを月面で調達できることから、輸送コストや輸送機の制約を受けることがなく、その結果として①と比べて大出力の開発目標(MW 級)となっていることが特徴である。

月面用の有線送電システムについては、現時点では実用化の段階には至っていないが、①については2030年、②については2035年までに、TRL6 を達成するという開発目標が設定されている。また、有線送電システムに関するSTMDの資金拠出状況については、表 4-15 に示すように NASA を主体として技術分野ごとに複数のプログラムが立ち上がっている状況である。

表 4-14 Transmission Cable System(有線送電システム)に関する STMD の取り組み

	月面用ケーブルを用いた有線電力伝送 (数kmの送電網)	月で調達したアルミニウムから作られる伝送路を用いた有線電力伝送 (長距離・大電力送電)		
背景	<ul style="list-style-type: none"> 地球から調達する最新の電力ケーブルや接続・展開システムは、月の極地要素間の配電をサポートするのに十分な特定の電力と耐塵性レベルを有していない。 ケーブル、コネクタ、展開スプールの打ち上げ時における適合技術は、月の極地環境に最適化されていない。 	現地で調達したアルミニウムを用いて月面で長距離伝送(100km以上)を行うために必要な技術は、まだほとんどコンセプトが確立されていない。		
技術開発動向	月面用のケーブル、耐塵接続システム、ケーブル展開システムなどは、まだ机上の空論レベルでしか開発されていない。			
目標	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までにTRL6に到達させる。 月の極地の塵埃、MMOD、熱環境下において以下の条件を満たすシステムを開発する。 <ul style="list-style-type: none"> ①1000V ②10kW規模 ③1kmあたり3%以下の損失 ④ケーブルシステムの単位質量あたりの最大電力を供給可能 ⑤99%の信頼度で2地点間の電力供給可能 	<ul style="list-style-type: none"> 2035年までにTRL6に到達させる。 送電距離100km規模のMW級送電システムを、月で調達したアルミニウムを用いて月面上で製造することで、地球から持ち込む材料を最小限に抑える。 		
目標を達成するための計画	SBIR/ESI	接続とケーブル回収システムを検討する	STRG/SBIR	月のアルミニウム採掘と導体製造を行う
	GCD	フルスケールのシステムをTRL6にする	GCD	2035年までに、統合された電力導体システムをTRL6にする
	TDM	CLPS上のコンポーネント(ケーブル回収、接続、近接充電)の実証を行う	TDM	2037年までに、月面でパワーコンダクター製造装置を飛ばし、運用する

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>, 閲覧日:2022年10月4日を基に三菱総合研究所作成

表 4-15 Transmission Cable System(有線送電システム)に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Cable & Spooling system	<ul style="list-style-type: none"> SBIR PCC (WOTM) GCD TP (TYMPO)
	Connector	<ul style="list-style-type: none"> GCD TP (UFPC) GCD (Lo-DuSST)

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>, 閲覧日:2022年10月4日を基に三菱総合研究所作成

2) 高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクス(送電技術)

高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関する STMD の取り組みの概要を表 4-16 に示す。現在の技術開発動向としては、最大電圧200V 未満の範囲で TRL9 を達成できている状況であるが、2030年までに最大電圧1,000V の範囲で、月面環境でも10年間99%の信頼性を保つことができるパワーエレクトロニクスを TRL6にすることを将来目標として挙げている。高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関するSTMDの資金拠出状況については、表 4-17 に示すように NASA、DoD、DoE を主体として技術分野ごとに複数のプログラムが立ち上がっている状況である。

表 4-16 高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関する STMD の取り組み

背景	最新の電力管理・制御用エレクトロニクスは、月の極地で熱・塵・放射線環境下での本格的な ISRU 作業をサポートするために、十分な信頼性と耐久性を備えておらず、保守も不可能である。	
技術開発動向	現在のミッションに十分な信頼性を持つパワーエレクトロニクスは、TRL9である。(200V未満で近地球、静止軌道、深宇宙ミッションに利用できる範囲において)	
目標	2030年までに、最大1000V、最大電力密度で動作する電力管理、制御、調整回路およびソフトウェア一式をTRL6に到達させる。なおこれらは、月ダスト環境で動作可能で、月での放射線・熱環境、月の過酷な真空、火星大気環境において、10年の間99%の信頼性があるものとする。	
目標を達成するための計画	LuSTR/ECF	サブシステム(材料、デバイス、回路)の統合的な信頼性モデリングを行う
	GCD	ダスト耐性コネクタを備えた最適化された回路群をTRL6まで持つていく
	TDM	2030年に、CLPSやISRU用試験プラントで回路やソフトウェアのデモを行う

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-17 高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Materials	<ul style="list-style-type: none"> SBIRs (SiC, Ga2O3, shielding) LuSTR grant (SiC)
	Circuitry and Devices	<ul style="list-style-type: none"> SBIR (switches) STTR (controller) LuSTR grant (router) GCD TP (Apogee RPCD, TYMPO, BDPA, MIPS)
	Dust compatibility	<ul style="list-style-type: none"> GCD (LO-DuSST)
DoE (Department of Energy)	Materials & Devices	-
DoD (Department of Defense)		

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

3) 長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵(蓄電技術)

二次エネルギー貯蔵に関する STMD の取り組みとして、①再生型燃料電池、②月資源を利用した2次電池が挙げられる。それぞれの概要を表 4-18 に示す。①と②の主な違いは、①は材料を地球から運ぶのに対し、②は月面上のレゴリスを2次電池の材料として用いる点にある。月面上のレゴリスを用いた2次電池の開発はまだ初期開発段階であることから、開発目標として、①は2030年までに、②は2035年までに TRL6を達成することとしている。二次エネルギー貯蔵に関するSTMDの資金拠出状況については、表 4-19 に示すように NASA、DoD を主体として技術分野ごとに複数のプログラムが立ち上がっている状況である。

表 4-18 長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関する STMD の取り組み

	再生型燃料電池		月資源を利用した2次電池	
背景	日食期間中に、産業規模のISRU生産施設や月の極域にある有人基地をサポートするには、地球から供給されるMW規模の、長寿命でメンテナンスフリーの電気エネルギー貯蔵が必要である。		赤道付近まで月のインフラを拡張するには、月のレゴリスから供給される大規模な電気・熱エネルギー貯蔵が必要である。	
技術開発動向	<ul style="list-style-type: none"> H2/O2一次燃料電池は、1kW級、5000時間の運転寿命で、TRL6/7に近づいている。 1kW級、5000時間の運転寿命の高圧電解装置は、NASA STMDのRFCプロジェクトが完了すればTRL5に到達する。 金属-酸素フロー電池や熱交換器など、月のレゴリスから得られる電気や熱のエネルギー貯蔵は、まだ概念的な開発レベルにとどまっている。 			
目標	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までにTRL6に到達させる。 下記条件を満たすH2/O2再生燃料電池を作成する。 <ul style="list-style-type: none"> ①MWh級 ②最大電力密度を10kWe増加 ③月の極域環境において、50,000時間メンテナンス不要 ④充放電サイクルは500回可能 		<ul style="list-style-type: none"> 2035年までに下記項目についてTRL6に到達させる。 <ul style="list-style-type: none"> ①月で採取した化学物質で形成したGWh規模の二次電池 ②焼き固めたレゴリスから製造した大規模な熱交換器 	
目標を達成するための計画	LuSTR/STRG	信頼性/寿命のモデリングを作成する	STRG/SBIR	二次電気化学電池に適した月の鉱物の採掘と、熱エネルギー貯蔵のためのレゴリスの焼結
	SBIR	高耐久性膜と流体部品を作成する	GCD	2035年までに電気・熱エネルギー貯蔵システムをTRL6にする
	GCD	超長寿命RFCシステムを作成する		
	TDM	2030年の月面基地とISRUパイロットプラントの運用をサポートするために、10kWの再生型燃料電池を飛ばす	TDM	2037年までに月面でエネルギー貯蔵装置を飛ばし、運用する

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-19 長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	PEM Primary and Regen FC	<ul style="list-style-type: none"> GCD ACO (AARC) GCD ACO (AMPES) GCD ACO (LFC-Blue Origin) GRC (RFC)
DoD NUWC	PEM Primary FC	Various (SNC, Teledyne)

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

4) 最大 10kW 級の無線電力伝送(送電技術)

無線電力伝送に関する STMD の取り組みの概要を表 4-20 に示す。無線電力伝送は、超低温環境であり移動体の電力源としてバッテリーを用いることが難しい PSR 内において、有力な候補となっている。上記背景から、2030年までに、PSR 内を移動するローバ等に最大10kW の電力を供給できる無線伝送システムについて TRL6に到達することを目標としている。無線電力伝送に関するSTMDの資金拠出状況については、表 4-21 に示すように NASA、DoD を主体として技術分野ごとに複数のプログラムが立ち上がっている状況である。

表 4-20 最大 10kW 級の無線電力伝送に関する STMD の取り組み

背景	PSRにおけるISRUの氷の採掘作業(試掘から本格的な産業化まで)には、孤立した地域からPSR内陸部の移動型設備への送電が必要となる。	
技術開発動向	サブスケールの無線電力伝送システムの試作機で開発されている。また、地上のアプリケーションに関連するポインティングメカニズムも開発されている。	
目標	2030年までにTRL6に到達させる。 孤立地域またはPSRにある1000V電源からPSRの移動型負荷まで、最大10kW規模の電力を供給でき、5kmにわたり75%以下の電源-負荷損失で、システムの単位質量当たりの供給電力を最大にできる無線伝送システムを開発する。	
目標を達成するための計画	SBIR	ビーミングとポインティングメカニズムに関する取り組み
	—	100W級のサブスケールのデモがCLPSのアプリケーションをサポートする可能性がある
	GCD	フルスケールのシステムをTRL6まで持つていく
	TDM	2028年のPSRアイスマイニングのデモ用に1kWe、2030年のPSRアイスマイニングのパイロットプラント用に10kWeのデモを実施する

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-21 最大 10kW 級の無線電力伝送に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Power Beaming	<ul style="list-style-type: none"> SBIR PCC (WOTM) LuSTR grant (UCSB)
DoD	Power Beaming	Various
	Pointing Mechanisms	Various

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

5) ラジオアイソトープ電源(発電技術)

ラジオアイソトープ電源に関する STMD の取り組みの概要を表 4-22 に示す。図 4-10 の通り、ラジオアイソトープ電源は、太陽光に依存しない発電技術であり、主に PSR 内でのローバの電源としての利活用が期待されている。現在の技術開発動向としては、MMRTG にて125W の電力供給が可能な状況であるが、2024年までに500W のラジオアイソトープ電源について TRL6 に到達することを将来的な開発目標としている。ラジオアイソトープ電源に関するSTMDの資金支援状況については、表 4-23 に示すように NASA、DoE を主体として DRPS (Dynamic Radioisotope Power Systems) プロジェクトが立ち上がっている状況である³⁶。

³⁶ NASA ウェブサイト、<https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/thermal-energy-conversion/rps-program/>、2023年3月9日閲覧

表 4-22 ラジオアイソトープ電源に関する STMD の取り組み

背景	NASA の科学ミッション本部(SMD)の重要な戦略的ミッションは、月南極の永久影の領域における資源分布の把握である。2026年に、探査を行うためのモビリティには、太陽光に依存しない数100W級の電源が必要である。PSR の CLPS クラスの科学探査ミッションに必要とされる小型電源は、100W級である。
技術開発動向	現在のMMRTGIは238Pu汎用熱源(GPHS)から約125Wの供給が可能。
目標	238Pu GPHS からスターリング変換した500W級のラジオアイソトープ電源を2024年までにTRL 6にする。
目標を達成するための計画	SMDのDRPSプロジェクトを加速させる

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-23 ラジオアイソトープ電源に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	SMD RPS program	• DRPS Project
DoE		

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

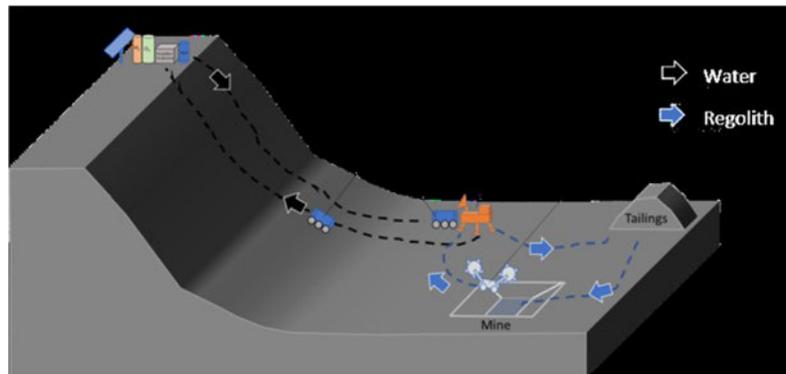


図 4-10 PSR 内(低温環境下)において作動するローバのイメージ図³⁷

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

6) 低温環境下で作動する二次電池(蓄電技術)

低温環境下で作動する二次電池に関する STMD の取り組みの概要を表 4-24 に示す。PSR 内のような低温環境下では従来の二次電池では性能が落ちることから、図 4-11 のように低温環境下でも性能良く作動する二次電池が必要である。現在の技術開発動向としては、290K にて500サイクル実現可能な二次電池が存在するが、将来的には2030年までに70K にて500サイクル実現可能な二次電池について TRL6 に到達することを目標としている。低温環境下で作動する二次電池に関するSTMD の資金拠出状況については、表 4-25 に示すように NASA を主体として二次電池のセルについてのプロジェクトが立ち上がっている状況である。

³⁷ ローバの電源として、太陽光に依存しないラジオアイソトープ電源が必要となる。

表 4-24 低温環境下で作動する二次電池に関する STMD の取り組み

背景	アルテミス計画の電池技術に関する主要な課題は、PSRでのISRU運用のためのモビリティのエネルギー貯蔵である。最新のリチウムイオン電池は、235Kで使用すると室温(295K)の容量の75%が失われる。そのため、70Kの環境下(PSR環境下)で、295K環境下の最新電池の性能を発揮できる電池モジュールがあれば、PSRでの電池の比エネルギーは3倍以上向上する。このような性能は、低温でより良い性能を発揮するように開発されたセル、改良された断熱/熱管理ハードウェア、および放射性同位元素の補助熱源を組み合わせることで達成できる可能性がある。	
技術開発動向	50kWh規模のリチウムイオン電池モジュールは、290Kにおいて 150Wh/kg で約 500 サイクルを実現することが可能である。	
目標	2030 年までに 50kWh クラスの電池モジュールを TRL 6 に到達させる。この電池は、70K の環境下で 500 サイクル、1kW の放電で 150Wh/kg 以上の比エネルギーを提供し、70K で長時間低温放置しても完全に動作する能力を備える。	
目標を達成するための計画	SBIR	セル開発、熱管理システム、補助熱源(放射性同位元素など)の取り組みを進める
	GCD	フルスケールのシステムをTRL 6にする
	TDM	2028年のアイスマイニング実証のための1kWeを実証する

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-25 低温環境下で作動する二次電池に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	Cells	ECF(various)

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

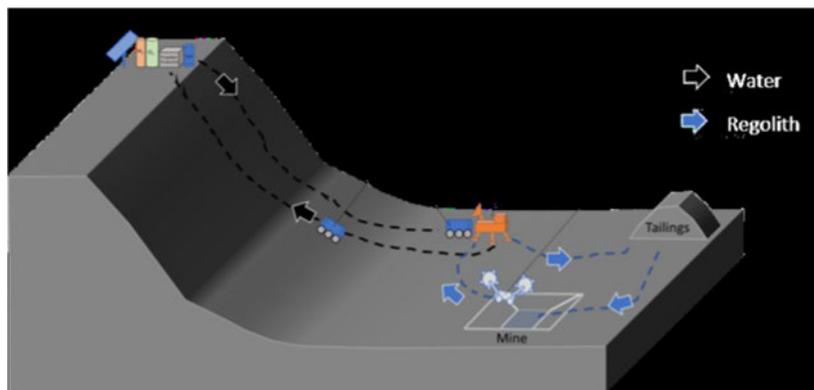


図 4-11 PSR 内(低温環境下)において作動するローバのイメージ図

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

7) CH₄/O₂ 固体酸化物形燃料電池(蓄電技術)

燃料電池に関する STMD の取り組みの概要を表 4-26 に示す。LCH₄/LO₂ 固体酸化物形燃料電池は重量の観点でランダの電源として有力視されている。LCH₄/LO₂ 固体酸化物形燃料電池は現状では実用化段階には至っていないが、10kWe 級の出力で、最大10,000 時間メンテナンスフリーで作動可能な LCH₄/LO₂ 燃料電池システムについて TRL6 に到達することを将来的な目標として掲げている。LCH₄/LO₂ 燃料電池に関するSTMDの資金支援状況については、表 4-27 に示すように NASA を主体とした SBIR プロジェクトが立ち上がっている状況である。

表 4-26 CH₄/O₂ 固体酸化物形燃料電池に関する STMD の取り組み

背景	LO ₂ /LCH ₄ 反応物貯蔵による一次電源は、月/火星の移動装置やランダーにとって質量的に最適なソリューションとなる可能性がある。	
技術開発動向	<ul style="list-style-type: none"> 空気/天然ガス固体酸化物形燃料電池は、地上では50kWまでのものが一般的である。 USN NUWCが数kW規模のジェット燃料/O₂発電を運用環境下で試験している。 NASAとベンダーは、1kW規模のLO₂/LCH₄ 固体酸化物形燃料電池をブレッドボード環境下で試験している。 	
目標	<ul style="list-style-type: none"> LO₂/LCH₄一次燃料電池発電システムをTRL6に到達させる。 最大10kW級で、月の極域・火星環境でのメンテナンスフリー寿命1万時間を達成する。 	
目標を達成するための計画	SBIR	セル開発および熱管理システムに関する取り組みを進める
	GCD	フルスケールのシステムをTRL6にする

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

表 4-27 CH₄/O₂ 固体酸化物形燃料電池に関するプログラムへの資金拠出状況

主体	技術分野	投資状況
NASA	SOFC	・ SBIR Ph 3 (Precision Combustion)

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)を基に三菱総合研究所作成

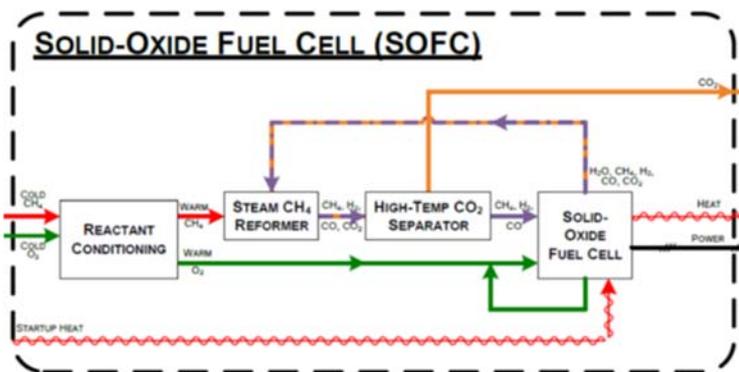


図 4-12 固体酸化物形燃料電池の反応フロー図

出所)NASA, Power and Energy Storage Systems, <https://techport.nasa.gov/file/143282>(閲覧日:2022年10月4日)

(5) まとめ

(2)～(4)にて述べた内容を発電技術・蓄電技術・送電技術に区分し、一覧表の形でまとめたものを表 4-28 に示す。将来的な技術開発目標は TRL6となっている。TRL6の定義は「地上でのシステムとしての技術成立性の確認」であることを鑑みると、STMD の所掌範囲は宇宙空間での試験以前の地上試験で最も技術成熟度が高い状態に至るところまでであると考えられる³⁸。技術開発目標の達成時期は2024～2035年となっており、今後10年間でNASA主導のプロジェクトが本格化するものと推察される。

³⁸ TRL7の定義は「宇宙空間でのシステムとしての技術成立性の確認」であり、TRL7の実現には打上げを伴う宇宙空間での試験が必須となる。そのため、TRL6の達成に比べ、TRL7を達成するには多大なコストが必要となる。

表 4-28 電力に関する NASA の動向まとめ

要素技術	用途	現時点の技術開発レベル	将来の目標値				
			出力	達成時期	技術開発レベル		
発電	Fission Surface Power (移動式核分裂発電システム)	月の極地作業、低緯度での月の工業化をサポートする	2018年に宇宙用核分裂炉開発ユニット(1kWe)が米国でテストされた	40kWe	2028年	TRL6	
	Photo voltaic Arrays	50kW級太陽光パネル (地球調達型モジュール式太陽光発電パネル)	月面基地やISRUの探査・生産プラント向け	月重力下での垂直アレイ展開機構は検討段階	50kWe	2030年	TRL6
		GW級太陽光パネル (月面調達したシリコンを用いた平面型太陽光パネル)	月面基地やISRUの探査・生産プラント向け	概念検討の初期段階	GWe級	2035年	TRL6
	ラジオアイソトープ電源	探査を行うためのモビリティ用電源	現在のMMRTGは238Pu汎用熱源が約125Weの供給が可能	500We	2024年	TRL6	
蓄電	再生型燃料電池	月の極地基地やISRUのエネルギー貯蔵	H ₂ / O ₂ 一次燃料電池は、1 kW 級、5000 時間の運転寿命で、TRL 6/7	1MWh	2030年	TRL6	
	月で調達した鉱物を用いた蓄電システム	赤道付近まで月のインフラを拡張する	月のレゴリスから得られる電気や熱のエネルギー貯蔵は、概念検討段階	1GWh	2035年	TRL6	
	低温環境下で作動する2次電池	70Kの環境下で作動するモビリティの電源	290K、150Wh / kgで500サイクル実現可能な50kWhのリチウムイオン電池が存在	50kWh	2030年	TRL6	
	LO ₂ /LCH ₄ 一次燃料電池	月の移動装置やランダー	地上では50kWeの固体酸化物燃料電池が存在	100MWh	—	TRL6	
送電	高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクス	本格的なISRU作業のサポート	近地球、静止軌道、深宇宙ミッションに利用できるものはTRL9	— (1000 V)	2030年	TRL6	
	月面用ケーブルを用いた有線電力伝送	数kmの送電網	概念検討段階	10kWe	2030年	TRL6	
	月で調達したアルミニウムから作られる伝送路を用いた有線電力伝送	長距離(100km級)伝送	概念検討段階	1MWe	2035年	TRL6	
	無線電力伝送	目視内距離での照射(最大5km)	システムの試作機開発段階	10kWe	2030年	TRL6	

出所)三菱総合研究所作成

(6) Watts on the Moon challenge の動向

月面では永久影ゾーンや夜間における電力供給に課題があることから、STMD では月面での電力管理や配電、蓄電等の技術に特化したコンペティション「Watts on the Moon challenge」を実施している³⁹。「Watts on the Moon Challenge」では、民間企業が技術的なギャップに対応するためのプロトタイプングや実証を行い、優勝者には賞金(最大 500 万ドル程度)が贈呈されることとなっている。本コンペティションは、特に電力伝送(送電)やエネルギー貯蔵(蓄電)に関する技術を対象としており、発電は対象外となっている⁴⁰。以下にコンペティションの概要および 2022 年 9 月現在の状況を述べる。

1) Watts on the Moon challenge の概要

Watts on the Moon Challenge は、第 1 フェーズと第 2 フェーズから構成されている⁴¹。各フェーズの目的・賞金・ミッションなどを表 4-29 に示す。第 1 フェーズはミッションの概念設計フェーズであり、賞金総額 50 万ドルとなっている。第 2 フェーズでは実証が含まれる、より実践的なフェーズであり、3 段階のゲートを設け、事業者の成果を評価することとなっている。

³⁹ NASA, Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/watts-on-the-moon/index.html (閲覧日:2022 年 11 月 18 日)

⁴⁰ Herox, NASA's Watts on the Moon Challenge, <https://www.herox.com/WattsOnTheMoon>(閲覧日:2022 年 11 月 18 日)

⁴¹ NASA, Fact Sheet, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/g-560103_adams_cs20_factsheet.pdf(閲覧日:2022 年 11 月 18 日)

表 4-29 第 1 フェーズ、第 2 フェーズの概要

	第 1 フェーズ	第 2 フェーズ
目的	各ミッションに対応するソリューションの構想検討を行う	ソリューションを実現するためのプロトタイプピングと NASA 施設を利用した地上実証を行う
賞金	合計 50 万ドル	合計 450 万ドル
ミッション	ミッション1:発電所からクレータ内のモビリティ(ローバ)プラットフォームに電力を供給するシステムの構想を行う。 <ul style="list-style-type: none"> 供給対象となるモビリティは氷を含むレゴリスを収集し、水抽出プラントまで運ぶことを想定 ミッション2:発電所から水抽出プラントへの電力供給を行う。 <ul style="list-style-type: none"> 水抽出プラントはレゴリス等から水を抽出し、純化する役割 ミッション3:発電所からクレータ外にある酸素製造実証プラントへの電力供給を行う。	Level 1: 既存の電源から電力を取り出し、月面環境下で 3km 以上を送電するためのコンセプトを提出(通過事業者各社は 20 万ドルを獲得) Level 2: 主要部分の開発とテスト(最大 4 事業者が通過予定、各社 40 万ドル獲得) Level 3: システム全体の真空環境下でのテスト(最大 2 事業者が選定(優勝者は 100万ドル、準優勝者は 50 万ドルを獲得予定))

出所)NASA, Fact Sheet, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/g-560103_adams_cs20_factsheet.pdf(閲覧日:2022年11月18日)
 NASA, NASA Awards \$500K in First Phase of \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/500k-awarded-in-first-phase-of-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)
 NASA, Seven Teams Advance in NASA's \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/seven-teams-advance-in-nasa-s-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)を基に三菱総合研究所作成

2) Watts on the Moon challenge の状況

第1フェーズは、2021年5月20日に終了しており、Astrobotic社をはじめとする7事業者がそれぞれ賞金5万ドルから10万ドルを獲得している⁴²。第1フェーズでの受賞者と受賞理由を表4-30に示す。

表 4-30 第 1 フェーズで受賞した事業者と受賞理由

	受賞した事業者	賞金額	受賞理由
ミッション 1	Astrobotic 社	\$ 100,000	電力ケーブルを敷設する小型ローバの群制御を提案
	Team KC Space Pirates	\$ 50,000	レーザ給電を提案
	Team Moonlight	\$ 50,000	
ミッション 2	ミシガン工科大	\$ 100,000	永久影での超電導ワイヤーを提案
	Astrolight 社	\$ 50,000	移動可能な無線電力伝送手法を提案
	Team FuelPod	\$ 50,000	リチウムイオン電池を搭載したポッドによるマイクログリッドシステムを提案
ミッション 3	Skycorp 社	\$ 100,000	温度差を利用したパワーセルを提案

出所)NASA, NASA Awards \$500K in First Phase of \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/500k-awarded-in-first-phase-of-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)を基に三菱総合研究所作成

第 2 フェーズでは、ソリューションを実現するためのプロトタイプピングと NASA 施設を利用した地上実証を行うことになっている。公募は 2022 年 2 月に開始され、表 4-31 に示すレベル1、2、3の3段階

⁴² NASA, NASA Awards \$500K in First Phase of \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/500k-awarded-in-first-phase-of-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)

階のステージゲート方式で事業者が選定される予定である⁴³。既にレベル1は2022年8月に終了し、8事業者が通過している。

表 4-31 第2フェーズでの入賞した事業者と、課題内容

	入賞した事業者	賞金額	課題内容
レベル1	以下の7事業者が通過(2022年8月発表) <ul style="list-style-type: none"> ● Electric Moon ● Orbital Mining Corporation ● Philip Lubin's Team ● Michigan Technological University Planetary Surface Technology Development Lab ● Skycorp ● Virtus Solis Technologies Inc. ● X-Wheel Inc. 	1事業者あたり \$200,000	既存の電源から電力を取り出し、月面環境下で3km以上を送電するためのコンセプトを提出
レベル2	最大4事業者が通過予定(2023年1月発表予定)	1事業者あたり \$400,000	主要部分の開発とテスト
レベル3	最大2事業者が選定(2024年9月発表予定)	優勝者: \$1,000,000 準優勝者: \$500,000	システム全体の真空環境下でのテスト

出所)NASA, Seven Teams Advance in NASA's \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/seven-teams-advance-in-nasa-s-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)を基に三菱総合研究所作成

4.2.2 欧州の動向

(1) 欧州における月面での電力利用に関する開発動向

欧州全体としての宇宙開発は主に ESA とEUのプログラムによって行われており、電力に関しても複数の構想や開発計画が確認できる。欧州での宇宙開発プログラムは特に ESA が主導しており、ESA による電力に関する複数のロードマップ及びプロジェクトが確認できる。以下に EU 及び ESA が主導する電力に関するプロジェクトの内容を示す。

1) EU の動向

現在 EU では図 4-13 に示すように 2021 年から 2027 年にかけて、累計 955 億€(≒12 兆円超)規模に上る最大の研究開発支援プログラム「Horizon Europe(ホライズン・ヨーロッパ)」を実施⁴⁴している。現在は本節で対象とするような技術に直節関係するプロジェクトはないが、原子力に関連する事例として原子力電池に関するプロジェクト(Euratom Research and Training Programme における PU-238-coupled dynamic power system for SpAce exploRation and beyond:

⁴³ NASA, Seven Teams Advance in NASA's \$5M Watts on the Moon Challenge, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/seven-teams-advance-in-nasa-s-5m-watts-on-the-moon-challenge.html(閲覧日:2022年11月18日)

⁴⁴ SOM 社, Moon Village, <https://www.som.com/research/moon-village/>(閲覧日:2022年8月10日)

PULSAR⁴⁵)などが存在する。また Horizon Europe の前身となる FP1～FP7(1984 年～2013 年) や Horizon2020(2014 年～2020 年)等が実施されており、Horizon 2020 では宇宙における原子炉開発に関するプロジェクト「DEMOCRITOS」が実施されていた⁴⁶。

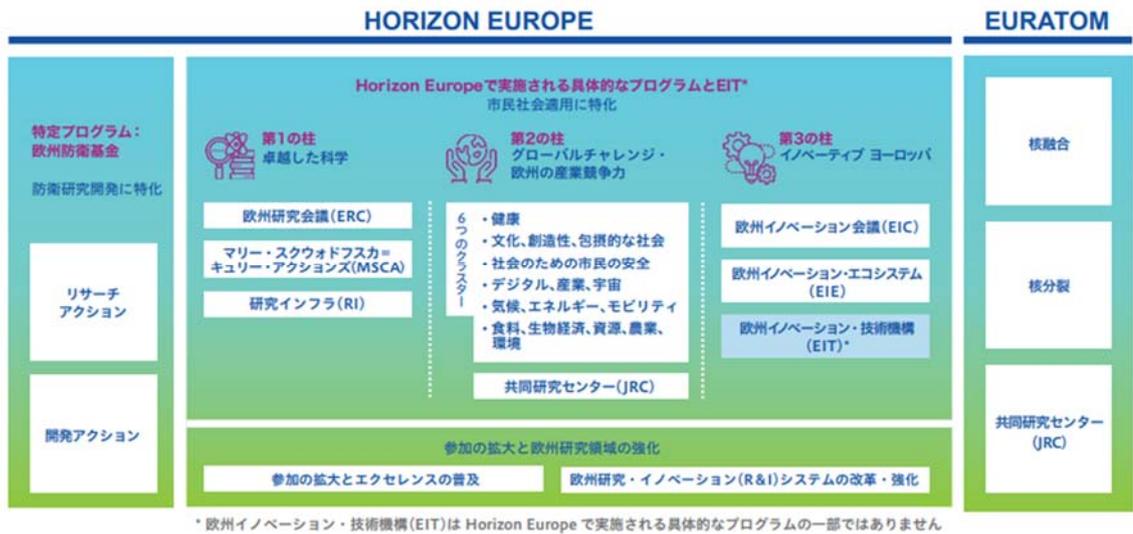


図 4-13 Horizon Europe の構造

出所)NCP Japan, Horizon Europe とは, https://www.ncp-japan.jp/wp-content/uploads/2022/02/Horizon-Europe-Brochure_NCP_A4size_link.pdf, (閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

2) ESA の動向

ESA の宇宙開発は「Horizon Europe(ホライズン・ヨーロッパ)」等の EU による研究開発支援プログラムとも連動している⁴⁷。ESA では図 4-14 に示すように、2022 年 6 月に発表された宇宙探査ロードマップ「Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap」⁴⁸や、宇宙科学・技術分野におけるビジョンを提示する Cosmic Vision(2026 年～2035 年)及びその後の Voyage 2050(2036 年～2050 年)などを公開している。「Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap」⁴⁹では今後 LEO・月・火星の 3 エリアにおける有人含む探査活動全般を拡大するとし、月面における電力施設や、太陽光発電・燃料電池・原子力発電等の技術に注力する可能性を示唆している。

⁴⁵ European commission, PULSAR, <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/how-to-participate/org-details/999999999/project/101061251/program/43298916/details>(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

⁴⁶ F. Jansen et al., "DEMOCRITOS Demonstrators for Realization of Nuclear Electric Propulsion of the European Roadmaps MEGAHIT & DiPoP", Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 14, No. ists30, pp. Pb_225-Pb_233, 2016.

⁴⁷ 駐日欧州連合代表部 EU MAG, EU の新宇宙計画始動, <https://eumag.jp/feature/b0721/>(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

⁴⁸ ESA, Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap, https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

⁴⁹ ESA, Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap, https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

また、ESA における宇宙開発計画のうち、プレフェーズ A 及びフェーズ A と呼ばれる初期のミッションコンセプトを構想する部門では、2020 年から 2021 年にかけて萌芽的なアイデアを募集するプロジェクト(Open Space Innovation Platform:OSIP)を開始している⁵⁰。OSIP では主に 2026 年から 2035 年までの 10 年を念頭に置いた計画を立案している。2022 年 10 月時点で OSIP 内におけるアクティブな計画は 37 件、このうち電力に関するプロジェクトは 3 件である。なおプレフェーズ A のミッション検討予算は 30 万€(≒4000 万円弱)規模である。

このほか民間企業との共同プロジェクトとして「Moon Village」がある。「Moon Village」は MIT (マサチューセッツ工科大学)及び SOM(Skidmore, Owings & Merrill 社、米国)と共同で進めており、建築の観点から居住モジュールを中心とした検討を進めている。建築のほか太陽光発電システム等の電力システムについても検討を行っている⁵¹。

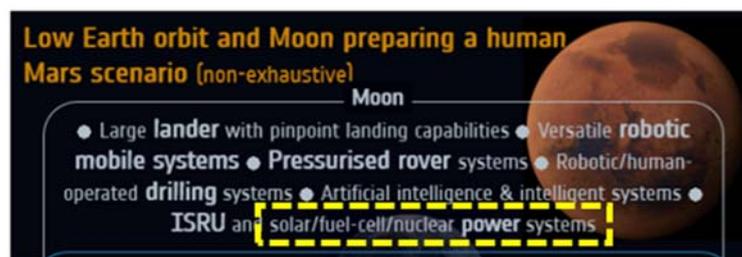


図 4-14 ロードマップで開発が想定されている主要な要素技術

出所)ESA, Terra Nova 2030+ Strategy

Roadmap, https://esamultimedia.esa.int/docs/HRE/TerraNova_2030+strategy_roadmap.pdf (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)

(2) 太陽光発電

OSIP では萌芽的なアイデアを募集しており、月面拠点に関するものとしては図 4-15 に示す月面における太陽光発電プラントの「LUNABOX」が提案されている^{52,53}。LUNABOX は 10 年間稼働可能な、1MW 級の太陽光発電システムであり、副産物として年間 1t の酸素を生産することができる。前提として既存の研究を基に年間 100kW から 10MW 級の電力が必要であると試算し、最低でも年間 1MW 級の発電が可能な仕様を提案している。予算は総額€650M(≒1000 億円弱)と見積もられている。LUNABOX では月面拠点での発電システムに先立ち、12U の CubeSat による実証ミッション「SOURCE(Silicon Oxygen ISRU Regolith Confined Extraction)」を計画しており、2025 年までに打ち上げるものとしている。LUNABOX のマイルストーンを以下に示す。

⁵⁰ ESA, OSIP,

<https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087622659011254&userAction=Browse&templateName=&documentId=3817af91809ba52ab7cd2323267d5582> (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)

⁵¹ NCP Japan, Horizon Europe とは, https://www.ncp-japan.jp/wp/wp-content/uploads/2022/02/Horizon-Europe-Brochure_NCP_A4size_link.pdf, (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)

⁵² ESA, LUNABOX,

<https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087132022741146&userAction=Browse&templateName=&documentId=533b0a3da0a90dbd1162d83187ccb160> (閲覧日: 2022 年 9 月 2 日)

⁵³ ESA, LUNABOX mission - In situ bulk production of solar power capability for the promotion of a permanent human settlement on the Moon, https://ideas.esa.int/temp/private45087132022735932/Report45087132022741263/Idea_I202005241_LUNABOXMissionInSitu.pdf?v=1657721596 (閲覧日: 2022 年 9 月 2 日)

- 2021年:Phase A/Feasibility study of LunaBox architecture
- 2021~2022年:Phase B/Preliminary Design of the LunaBox
- 2023~2024年:Phase C/Detailed Design
- 2025 ~ 2028年:Phase D/Qualification, Production, Manufacturing and System Integration
- 2028~2038年:Phase E/Launch & Operations of LunaBox
- 2038年以降:Phase F/Disposal/EoL

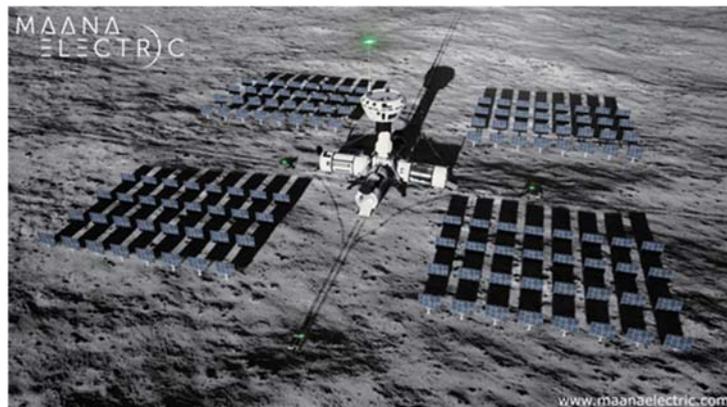


図 4-15 LUNABOX イメージ

出所)ESA, LUNABOX mission - In situ bulk production of solar power capability for the promotion of a permanent human settlement on the Moon,
https://ideas.esa.int/temp/private45087132022735932/Report45087132022741263/Idea_I202005241_LUNABOXMissionInSitu.pdf?v=1657721596(閲覧日:2022年9月2日)

LUNABOXのほか、前述のように、ESAではMIT及びSOM(Skidmore, Owings & Merrill社、米国)と共同で月面における恒久的な居住地開発「Moon Village」を構想している(図 4-16 参照)⁵⁴。南極付近のシャクルトンクレータの淵にモジュール式の建造物(図 4-16 の右図、剛体のフレーム×膨張式のシェル)を建設する構想である。ESAによるStudy Reportでは、前提となるシナリオや条件についても記載されているが⁵⁵、居住区での消費電力を約60kWと見積もっており、それを満たす外部電源として太陽光発電によるものと原子力発電によるものの2パターンが検討されている。なお、居住区の消費電力に関しては、以下に示す過去の類似検討事例及びISSでの事例を参考に概念検討を行っている。

- 月面前哨基地の必要電力:10kW⁵⁶

⁵⁴ SOM社, Moon Village, <https://www.som.com/research/moon-village/>(閲覧日:2022年8月10日)

⁵⁵ ESAREPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat, https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf(閲覧日:2022年8月10日, CDF STUDY)

⁵⁶ L.S. Mason. “A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications”, Space Technology and Applications International Forum, Albuquerque, New Mexico, February 12-16, 2006, NASA/TM-2006214120.

- クルーが居住する区域のフルパワーでの連続消費電力:60kW⁵⁷
- ISS(6人)の連続電力供給出力/最大出力:84kW/108kW(このうち25~35kWがペイロードに利用可能)⁵⁸

上記の事例を基に、Moon Village では検討の前提として消費電力の見積りを行っている。見積りでは表 4-32 に示すように定常的に生命維持のため消費される電力のほか、科学機器運用時の消費電力(5kW)を見積もった。最終的に 20%のシステムマージンを加味し、必要となる消費電力の平均値を日中で 57kW、夜間で 60kW と見積もった。

太陽光発電の検討では表 4-33 に示すように蓄電システムとしてバッテリー(LiB)と併用するタイプと再生型燃料電池(RFC)と併用するタイプの 2 種類について検討を行っている。必要となる消費電力(59kW)や太陽光パネルの出力(300W/m²)等の発電システムの性能値を入力とし、太陽光パネルの面積や蓄電システムの質量を出力として推算したものである。



図 4-16 Moon Village の全体像(左)とモジュールのイメージ(右)

出所)SOM 社, Moon Village, <https://www.som.com/research/moon-village/>(閲覧日:2022年8月10日)

⁵⁷ ESAREPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat, https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf(閲覧日:2022年8月10日, CDF STUDY)

⁵⁸ ESA, CDF STUDY REPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat,https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf(閲覧日:2022年8月10日)

表 4-32 Moon Village 構想における電力試算の前提条件

Row Labels	Transfer	Nom_Ops_Day	Nom_Ops_Night
☐ Hab (Habitat)	7320	47791	47841
☐ INS	0	491	491
Crew Quarters (Sleep Accomodation and Medical Equipment)	0	105	105
Galley (Galley and Food Systems)	0	385	385
Mob_Aids (Restraints and Mobility Aids)	0	0	0
Waste_Hygiene (Waste Collection and Hygiene)	0	1	1
☐ PWR	120	400	400
PCDU (Power Conditioning and Distribution Unit)	120	0	0
PDU_1 (Power Distribution Unit)	0	100	100
PDU_2 (Power Distribution Unit)	0	100	100
PDU_3 (Power Distribution Unit)	0	100	100
PDU_4 (Power Distribution Unit)	0	100	100
☐ SYE	0	6900	6950
Hab_light (Habitat Lighting)	0	300	350
Laptop_1 (Laptop)	0	200	200
Laptop_2 (Laptop)	0	200	200
Laptop_3 (Laptop)	0	200	200
Laptop_4 (Laptop)	0	200	200
Laptop_5 (Laptop)	0	200	200
Laptop_6 (Laptop)	0	200	200
Laptop_7 (Laptop)	0	200	200
Laptop_8 (Laptop)	0	200	200
Sci_Ops_alloc (Science/Surface Operations Allocation)	0	5000	5000
☐ TC	7200	0	0
TH_Hab_MU_Heaters (Thermal Habitat MU Heaters)	7200	0	0
☐ ECLS	0	40000	40000
Bulk_ECLS_pwr (Bulk ECLS Power)	0	40000	40000
☐ Surf_Rad (Surface Radiators)	0	0	2000
☐ TC	0	0	2000
TH_Surf_Rad (Thermal Surface Radiators)	0	0	2000
Grand Total	7320	47791	49841
Grand total with system margin	8784	57349	59809

出所)ESA, CDF STUDY REPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat, https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf (閲覧日:2022年8月10日)

表 4-33 Moon Village 居住棟における消費電力及び必要となる太陽光発電システムの推算
蓄電システムとして LiB を利用するタイプ(左)と RFC を併用するタイプ(右)
オレンジ色の枠が入力、灰色の枠が出力を示す

Solar - battery		Solar - regenerative fuel cell	
Power required by Habitat	59 kW	Power required by Habitat	59 kW
Darkness max duration	120 hours	Darkness max duration	120 hours
Energy Storage Requirement	7080 kWh	Energy Storage Requirement	7080 kWh
Effective mass-specific energy of space Li-Ion batteries	109 Wh/kg	Mass-specific energy of space H2-O2 regen. fuel cell sys.	700 Wh/kg
Required mass of Li-Ion batteries	65 tonnes	Required mass of RFC system	10 tonnes
Area-specific power of pointed solar panels	300 W/m ²	Area-specific power of pointed solar panels	300 W/m ²
Accumulated sunlight at habitat site	0.8	Accumulated sunlight at habitat site	0.8
PMAD overall efficiency	0.9	PMAD overall efficiency	0.9
Battery round-trip efficiency	0.95	RFC round-trip efficiency	0.55
Power required from solar panels	85 kW	Power required from solar panels	99 kW
Solar panel area required	282 m ²	Solar panel area required	329 m ²
Area-specific mass of solar panels	5 kg/m ²	Area-specific mass of solar panels	5 kg/m ²
Mass of solar panels	1.4 tonnes	Mass of solar panels	1.6 tonnes
Area-specific mass of panel mount and rotation system	5 kg/m ²	Area-specific mass of panel mount and rotation system	5 kg/m ²
Mass of panel mount and rotation system	1.4 tonnes	Mass of panel mount and rotation system	1.6 tonnes
Mass-specific power handling of PMAD equipment	500 W/kg	Mass-specific power handling of PMAD equipment	500 W/kg
Mass of PMAD equipment	169 kg	Mass of PMAD equipment	197 kg
Total power station mass	68 tonnes	Total power station mass	14 tonnes

出所)ESA, CDF STUDY REPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat, https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf (閲覧日:2022年8月10日)

(3) 原子力発電

欧州における原子力発電に関する動向としては、(2)で述べた Moon Village にて原子力を利用し

た場合の発電システムに関する推算を行った事例が存在する。太陽光発電システムと同様に、表 4-34 に示すように必要電力に対し、過去文献から想定した発電所の質量とラジエーター面積を推算したものである。

表 4-34 Moon Village 居住棟における消費電力及び必要となる原子力発電システムの推算
オレンジ色の枠が入力、灰色の枠が出力を示す

Fission reactor system	
Power required by Habitat	59 kW
PMAD overall efficiency	0.9
Power required from reactor system	66 kW
Mass-specific power lunar surface fission system	12 W/kg
Required mass of lunar surface fission system	5.5 tonnes
Mass-specific power handling of PMAD equipment	500 W/kg
Mass of PMAD equipment	131 kg
Total power station mass	5.6 tonnes
Power-specific radiator area	2.6 m ² /kW electric
Radiator area required	173 m ²

出所)ESA, CDF STUDY REPORT MOON VILLAGE Conceptual Design of a Lunar Habitat, https://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/Moon_Village_v1.1_Public.pdf (閲覧日:2022年8月10日)

Moon Village に加えて、EU では 2020 年頃までに以下に示す 2 つのプロジェクトにおいて宇宙での原子力利用(主に宇宙船の推進器としての利用)に関する研究を行っていた⁵⁹。

1. DiPoP (Disruptive technologies for space power and propulsion)
2. MEGAHIT (Megawatt Highly Efficient Technologies for Space Power and Propulsion Systems for Long-duration Exploration Missions)

DiPoP は低出力(20~200kW 級)、MEGAHIT は高出力(MW 級)で棲み分けがなされており、それぞれ大型科学技術プロジェクト(FP7)の一環として実施された。MEGAHIT は欧州とロシアの共同プロジェクトであったが、その後継プロジェクトとして宇宙機の電気推進への応用を目指した計画「DEMOCRITOS (Demonstrators for Conversion, Reactor, Radiator And Thrusters for Electric Propulsion Systems)」が「Horizon 2020」の一環として、2015年から2017年まで欧州、ロシア、ブラジルによって共同で実施された。図 4-17 に過去に欧州において検討されていた宇宙における原子力利用のロードマップを示す。

⁵⁹ F. Jansen et al., "DEMOCRITOS Demonstrators for Realization of Nuclear Electric Propulsion of the European Roadmaps MEGAHIT & DiPoP", Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 14, No. ists30, pp. Pb_225-Pb_233, 2016.

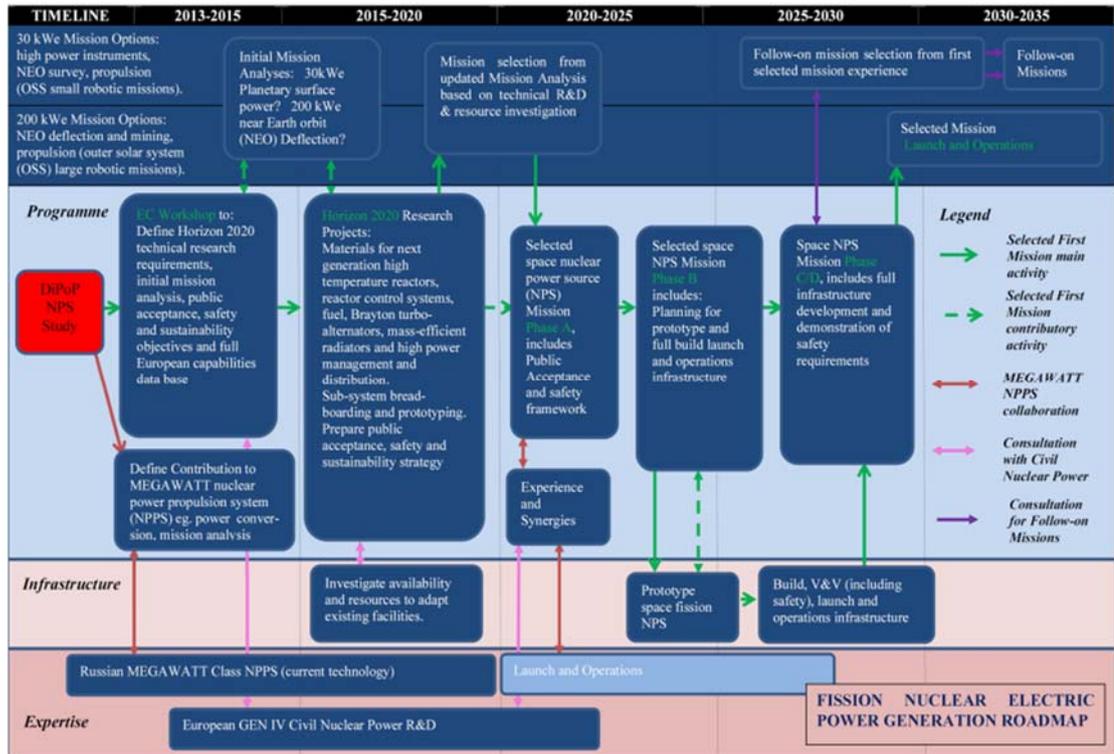


図 4-17 2016 年頃に想定されていた欧州の宇宙における原子力利用のロードマップ

出所)F. Jansen et al., "DEMOCRITOS Demonstrators for Realization of Nuclear Electric Propulsion of the European Roadmaps MEGAHIT & DiPoP", Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 14, No. ists30, pp. Pb_225-Pb_233, 2016.

4.2.3 中国の動向

中国はロシア等との国際協力で月面に国際月面研究基地「International Lunar Research Station:ILRS」を建設する計画を掲げており、2021 年 6 月にその概要を公式に発表した⁶⁰。中国の宇宙開発主体である国家航天局(CNSA)は主にロシアの ROSCOSMOS とのパートナーシップを念頭に ILRS のガイドラインを検討しており、2031 年から 2035 年までに 5 回の月面探査ミッションを計画している。なお、ガイドラインでは図 4-18 に示すように、原子力をベースとしたエネルギー源を活用し、無線送電の様子が図示されており、ISRU や水・鉱物資源開発と合わせて開発が進められる可能性がある⁶¹。

⁶⁰ CNSA, International Lunar Research Station (ILRS) Guide for Partnership, <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465645/n6465648/c6812150/content.html>(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

⁶¹ SpaceNews, China, Russia open moon base project to international partners, early details emerge, <https://spacenews.com/china-russia-open-moon-base-project-to-international-partners-early-details-emerge/>(閲覧日:2022 年 8 月 10 日)

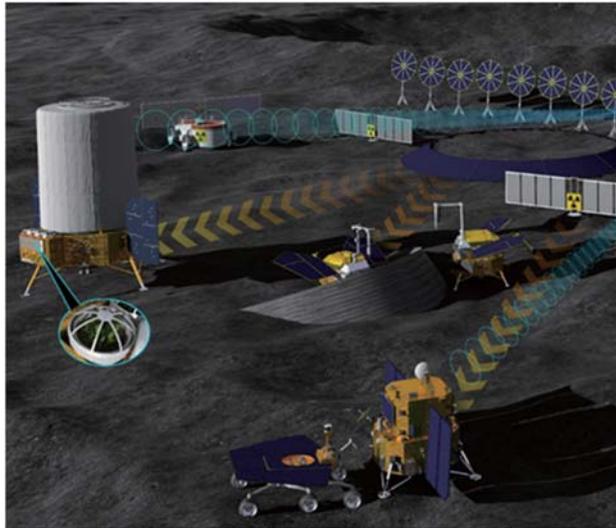


図 4-18 ILRS のイメージ図

出所)CNSA, International Lunar Research Station (ILRS) Guide for Partnership,
<http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465645/n6465648/c6812150/content.html>(閲覧日:2022年8月10日)

国家航天局とは別に中国科学院(Chinese Academy of Sciences)が宇宙での電力供給及び推進用に 1MW 級の原子炉を計画・設計している可能性がある。2022 年 8 月に中国科学技術部 (Ministry of Science and Technology)による総合的な性能評価に合格したとの報道がある^{62,63}。原子炉は2019年にスタートした国家重点研究開発計画(National Key Research and development Program:NKPs)の一環としてスタートし、既に試作品の設計と一部の部品が製造されている可能性がある²⁷。

4.2.4 各国における要素技術比較

(1) 太陽光発電

表 4-35 及び表 4-36 に各国で開発されている太陽光発電システムを示す。また 図 4-19 に各太陽光発電システムの出力とその技術開発レベルの関係を示す。米国の太陽電池アレイ(200V 以下)および LEO 運用に適した展開機構は TRL9 のレベルであるが、平面型太陽光パネル技術(GW 級)は検討のごく初期段階である。LunaGrid は既に NASA より実証に関する予算を獲得しており、他のシステムと比較しても実証段階に近い状態まで進んでいる。50kW 級の太陽光パネルにも Astrobotic 社が関わっており、技術的にも LunaGrid と近い可能性が高い。欧州の検討では 2 件とも最低 100kW 前後の消費電力を想定している。発電システムとしてより検討が詳細化されているLUNABOXでは、最低でも 1MW級の発電が可能なシステムが検討されている。

⁶² South China Morning Post, China's space programme will go nuclear to power future missions to the moon and Mars, <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3157213/chinas-space-programme-will-go-nuclear-power-future-missions>(閲覧日:2022年8月10日)

⁶³ SpaceNews, Chinese megawatt-level space nuclear reactor passes review, <https://spacenews.com/chinese-megawatt-level-space-nuclear-reactor-passes-review/>(閲覧日:2022年8月10日)

表 4-35 開発中の太陽光発電システム(米国)

国	ミッション名	主体	目標	現時点の技術開発レベル	検討の前提条件	出力	単位質量あたりの出力	備考
米国	50kW級	・NASA ・DoD ・DoE	<ul style="list-style-type: none"> 月の極域環境下において、熱、塵、放射線に対する十分な耐久性を備える。 月の極域でも、十分な太陽光を集める。 	概念検討段階	太陽電池アレイ(200V以下)およびLEO運用に適した展開機構はTRL9にあるが、月重力下での垂直アレイ展開機構は概念検討段階	50kW	200W/kg	・2030年までにTRL6
	GW級		<ul style="list-style-type: none"> 月面上のシリコンから太陽電池アレイを製造する技術を開発する。 地球上から持っていく材料は最小限とする。 	概念検討段階	月で調達したシリコンを用いることで、地球から持ち込む材料は最小限とする	1GW	記載なし	・2035年までにTRL6
	LunaGrid	Astrobotic社	<ul style="list-style-type: none"> 月南極での電力供給 ローバを活用したワイアレス給電を計画 	概念検討段階(プロトタイプ開発段階)	記載なし	10kW~	記載なし	<ul style="list-style-type: none"> NASAのVSAT技術を活用し、2026年に実証予定 将来的な拡張を計画

出所)三菱総合研究所作成

表 4-36 開発中の太陽光発電システム(欧州)

国	ミッション名	主体	目標	現時点の技術開発レベル	検討の前提条件	出力	単位質量あたりの出力	備考
欧州	LUNABOX	・ESA	<ul style="list-style-type: none"> 10年間稼働可能な、1MW級の太陽光発電システム 副産物として年間1tの酸素を生産可能 	概念検討段階	<ul style="list-style-type: none"> 年間100kW~10MW程度の需要予測 最低でも年間1MW級の電力を供給想定 	100kW~10MW	記載なし	・2028年以降に実装予定
	Moon Village	・ESA ・MIT ・SOM	<ul style="list-style-type: none"> 南極付近のシャクルトンクレータの淵に研究するモジュール式の建造物への電力供給 	概念検討段階	<ul style="list-style-type: none"> 居住モジュールのみで消費電力約60kWを想定 蓄電システムとしてバッテリー(LiB)と燃料電池(RFC)を検討 	85kW(LiB) 99kW(RFC)	1.3kW/kg(LiB含む) 7.1kW/kg(RFC含む)	・必要電力に対する発電効率を考慮

出所)三菱総合研究所作成



図 4-19 出力・技術開発レベルの国別比較

出所)三菱総合研究所作成

(2) 原子力発電

表 4-37 に各国で開発されている原子力発電システムを示す。また図 4-20 に各原子力発電システムの出力とその技術開発レベルの関係を示す。米国の Fission Surface Power は 2018 年に宇宙用核分裂炉開発ユニット(1kWe)の地上試験が実施された。欧州の Moon Village では過去事例を基にした概念設計がなされた。中国の原子力発電システムは既に一部部品の製造が開始されたとの報道もあり、実証段階の手前である可能性があるが公式な発表はない。

表 4-37 開発中の原子力発電システム

国	ミッション名	主体	目標	現時点の技術開発レベル	検討の前提条件	出力	単位質量あたりの出力	備考
米国	Fission Surface Power	・NASA ・DoD ・DoE	・月の極地作業、低緯度での月の工業化をサポートする	実証段階 (2018年に宇宙用核分裂炉開発ユニット(1kWe)が米国で地上実証済み)	—	40kW	—	2028年にTRL6を目指す
欧州	Moon Village	・ESA	・南極付近のジャクトンクレータの淵に研究するモジュール式の建造物への電力供給	概念検討段階	・居住モジュールのみで約60kWを想定	66kW	12W/kg	必要電力に対する発電効率を考慮
中国	—	・中国科学院	・宇宙での電力供給及び推進用の原子炉設計	概念検討段階 (試作品の設計、一部部品の製造)	—	1MW	—	—

出所)三菱総合研究所作成

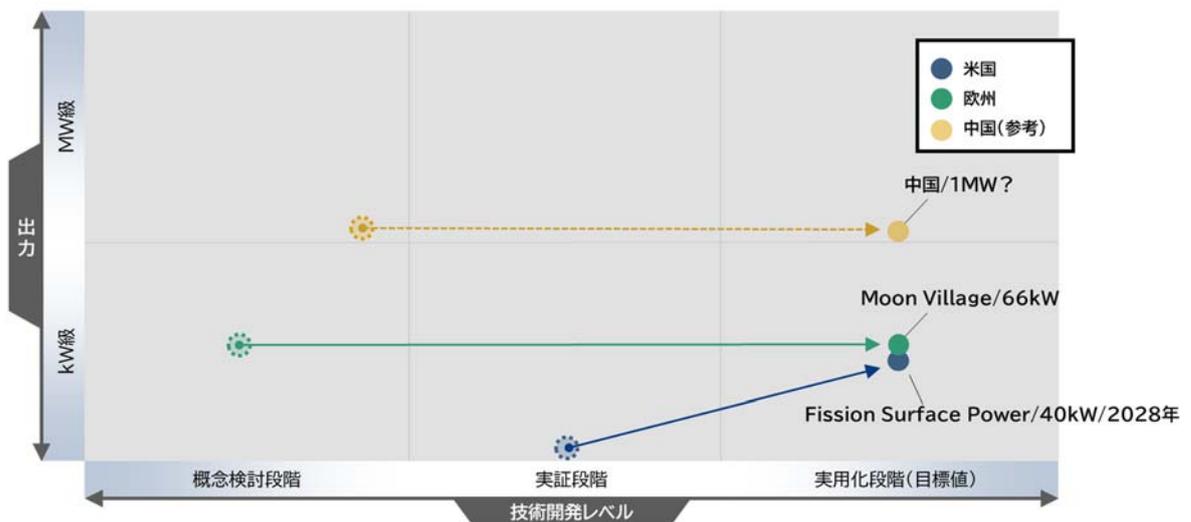


図 4-20 出力・技術開発レベルの国別比較

出所)三菱総合研究所作成

4.3 国内企業ヒアリング調査

令和3年度の検討において新たに検討が必要になった施設や構成要素、あるいは関連する技術を保有する企業に対してヒアリング調査を実施し、同企業が保有する要素技術、現在の研究開発の現状、今後の計画等について情報収集を行った。表 4-38に国内企業ヒアリングの実施状況を示す。なお、栗田工業株式会社はヒアリング後、本年度の水素 WG の検討に参加することとなった。

表 4-38 国内企業ヒアリング

企業名	ヒアリング実施日時
栗田工業株式会社	2022年7月6日(水)
本田技研工業株式会社	2023年3月2日(水)

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」は令和 3 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で行った。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で行った。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。

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 回目は合同開催)。

4 章では国内外の動向調査の結果を述べた。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ている。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結果を示している。

5.2 今後の課題

令和 4 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」については、「(1)具体ケースの設定による施設配置検討の解像度向上」、「(2)各施設の建設・運用に向けた検討」、「(3)海外との比較検討(ベンチマーク調査)」、「(4)施設建設・運用に必要な極限環境対応手法の検討」の 4 点を挙げる。令和 3 年度、4 年度の 2 カ年の検討により、基本的な検討は大きく進んだことから、具体的なケースを設定し、実際に建設し・運用を行うことを想定した検討により解像度を上げていくことが必要と考えられる。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・領域の検討が行われていくことから、海外との比較検討も重要である。なお、より詳細なレベルでの課題認

識については、2.1.5に記載している。

「電力」の検討については、引き続き、発電および送電に必要となる技術・システムについて検討を続け、詳細化・具体化をしていくこと、具体的なケースを設定し、検討の解像度を上げていくことが必要と考えられる。また、「水素」と同様に海外との比較検討も重要である。一方で、月面における電力インフラシステムの構築にあたっては、日本一国で実現していくものではなく、各国と協力していくものと想定される。現時点では国の明確な方針等は確認できないことから、今後の検討にあたっては、日本が電力インフラシステムの主要部分を担い、月面でのエネルギー供給の骨幹となる事業をリードしていくための方向性等についての整理も必要と考えられる。なお、より詳細なレベルでの課題認識については、2.2.6に記載している。

令和4年度の検討においても、令和3年度に引き続き、月面エネルギーアーキテクチャ全体として、需給のバランス等を踏まえたエネルギーマネジメントについて検討を行った。今後も本検討を続け、各システム・施設を統合的に俯瞰した全体最適の視点での検討を行うことが必要と考えられる。

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、世界的に見ても稀有な国であると思われる。この民間企業を中心として起こっているムーブメントと政府の活動のベクトルを合わせることで、月面開発・月面ビジネスにおいて世界の先駆者となりえる可能性を秘めていると考える。本事業はこのような状況において両者のベクトルを合わせる、極めて重要な役割を持つ事業であると認識している。本事業を通じて必要となる技術の課題を整理し、技術開発・実証へとつなげていくことが、今後、我が国が世界の中で月面におけるエネルギーシステムで主導的な立場となる一助となることを期待する。さらに、我が国全体として、他省庁で実施されているスターダストプログラムの成果と本事業の成果を統合し、月面開発の戦略立案につなげていくような活動も期待される。

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))

2023年3月

株式会社三菱総合研究所
フロンティア・テクノロジー本部
TEL (03)6858-3568

一般財団法人日本宇宙フォーラム
事業創造部
TEL (03)6206-4901

二次利用未承諾リスト

令和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))

株式会社三菱総合研究所
 一般財団法人日本宇宙フォーラム

頁	図表番号	タイトル
16	図2-9	ヘリオスタット反射鏡例
17	図2-10	凍結乾燥機・コールドトラップ構成例
18	図2-11	LCROSSの結果の概観およびレゴリス水中の揮発性成分の含有率(重量比wt%)
20	図2-13	レゴリス中の微粒子の直径と含有率の関係
26	図2-15	月面開発の前提
27	表2-15	拠点建設の制約条件
27	表2-16	拠点建設の前提条件
28	図2-16	ゾーン間の位置関係
29	図2-17	アポロ・ルナミッションにおける地盤の変形と強度パラメータの関係
30	図2-18	建設シナリオ
31	表2-17	今後取得すべきデータと取得方法・期限
32	図2-19	施工手順の例
32	図2-20	ベース部分を共通化した多目的月面車両
33	図2-21	月の模擬砂から作った焼結ブロック
33	表2-18	今後想定されている月探査ミッションと必要技術(掘削技術含む)
47	図2-30	JAXA探査シナリオにおける月面拠点基本構成イメージ
47	表2-25	各ゾーンの概要
84	図2-65	極域基地と候補地点1、2、シャックルトンクレータの位置関係
89	図2-68	水輸送パイプ保温ヒーターの一例
90	図2-71	ローバへの無線送電概要
96	図2-75	500メートル球面電波望遠鏡(FAST)(左図)及びアレシボ望遠鏡(右図)
96	図2-76	ロバート・バード・グリーンバンク望遠鏡(左図)及びエフェルスベルク電波望遠鏡(右図)
96	図2-77	臼田宇宙空間観測所(左図)及びアレン・テレスコプ・アレイ(右図)
97	図2-78	SPS2000で検討されたレクテナ支持構造
102	図2-84	シャックルトンクレータとレクテナの配置
102	図2-85	シャックルトンクレータ底面および斜面

(様式2)

112	図2-90	マイクロ波管の適合領域
112	図2-91	半導体増幅器モジュールの動作周波数と付加電力効率(PAE)の現状
113	図2-92	日本/世界のトランジスタ微細化の流れ
114	図2-93	ETS-VIII搭載大型アンテナ(外径最大寸法:約19メートル×17メートル)
114	図2-94	久原等の扇子型展開アンテナコンセプトと1m扇子型展開アンテナ
114	図2-95	Grumman Company、SRST等による5mの試作モデル
125	図2-106	参考用の月南極域の基地イメージ
126	表2-71	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
126	図2-107	24時間換算時刻の平均ボロメータ温度
127	図2-108	月極域の日照率
128	図2-109	Astrobotic社VSAT
128	図2-110	Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)
129	図2-111	Lunar Array Mast and Power System (LAMPS)説明図
129	図2-112	Lockheed Martin社VSAT
130	図2-113	10kWのRelocatable Solar Array (RSA)
131	図2-114	RSAの展開手順
132	図2-115	Langley Research CenterのVSAT
132	図2-116	展開・収納機能を持つタワーのBBM(ブレッド・ボード・モデル)
134	図2-117	伸展構造
136	図2-120	月南極域の3D地形データ(国交省スターダスト計画)
137	図2-121	月南極域の多目的タワー設営候補地点(国交省スターダスト計画)
141	表2-74	電源系候補の構成とそのトレードオフ結果
148	表2-76	NASAのVSATの要求仕様(2021年資料)
149	表2-77	電力技術の目標とギャップ
149	図2-134	国際宇宙探査シナリオにおけるエネルギーに関する技術ロードマップ
151	表2-79	レゴリスの特性値
153	図2-138	リム上の基地配置(ゾーン方式)の例
155	図2-139	ジャックルトンクレータの位置
155	図2-140	リム上の拠点配置(ゾーン方式)の例
162	図2-146	昼夜境界における3hr毎の浮遊粒子数実測値
162	図2-147	粒子径の関数としての浮遊高さ計算例
163	図2-148	レゴリス、ダストの昼夜境界における浮遊高さの算出例
165	図2-150	SSPAとTWTAの市場での使用割合
165	図2-151	SSPAとTWTAの特長比較
166	図2-152	送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(20-50GHz)
166	図2-153	送電アンプの出力ごとの現実力値と予想値(50GHz以上)

(様式2)

168	図2-156	世界初のエンハンスモードGaN HEMTの開発イメージ
171	図2-158	正方形アンテナのビーム効率（振幅分布は一定）
182	図2-162	アレイファクタとグレーチングローブ発生限界角度との関係
183	図2-163	シャクルトンクレータ形状とビーム走査角度、距離の関係
184	図2-165	矩形アンテナの回折による正規化ビーム効率（一様振幅分布の電力包含角度半径）
192	図2-168	ファイバーレーザの構造を利用した光ファイバー送電の考え方
192	図2-169	典型的な石英ファイバー伝送損失の波長依存性
193	表2-105	3つのレーザ波長に対する石英ファイバー伝送損失
195	図2-171	高出力用光ファイバーケーブルの例
196	図2-172	高純度石英ファイバーとFドーブ耐放性仕様は、耐放性が高い
196	図2-173	国産独自技術：フォトニック結晶ファイバー（PCF：Photonic Crystal Fiber）
198	図2-175	水道管凍結防止帯の製品例
199	図2-176	キャビネットに収まっているファイバーレーザ製品
201	図2-178	LADEEミッションにおける月周回軌道上のダスト粒子の高度分布計測の例
201	図2-179	LADEEミッションにおけるダスト粒子径分布とその高度分布
202	図2-180	meteoroid衝突によるレゴリスのダスト微粒子の舞い上がりモデルの検討
204	表2-107	月面の土壌サンプル（レゴリス）の成分比。二次生成の元となる材料
205	図2-181	月面上の放射線スペクトルの評価例
205	表2-108	月面上の線量当量の評価例
206	図2-182	「きぼう」の電力分配系統
208	図2-184	使用するケーブルの断面
208	図2-185	適用するケーブルの仕様
232	表4-2	中国の月探査における資源探査ペイロード
234	表4-4	インドの月探査における資源探査ペイロード
235	表4-5	韓国の月探査における資源探査ペイロード
236	図4-1	月面での資源利用サイクル
237	図4-2	レゴリスの組成（静かの海）
237	表4-7	レゴリスからの主な酸素抽出技術
238	表4-8	レゴリスからの主な酸素抽出技術の比較
239	図4-3	溶融レゴリス電解法による酸素抽出の概念図
241	図4-5	STMDのフレームワーク（赤色・黄色は電力に関連する事項）
242	図4-7	50kW級太陽光パネル（左）とGW級太陽光パネル（右）
243	表4-9	50kW級太陽光パネル（垂直及び平面）及びGW級太陽光パネル（平面）の概要
243	表4-10	50kW級及びGW級太陽光パネルに関するプログラムへの資金拠出状況

(様式2)

244	表4-11	月の極域における最大電力需要予測 (50kW級太陽光パネルを用いた場合)
245	図4-8	VSAT (左) とLunaGridサービスのイメージ (右)
245	表4-12	Fission Surface Power (核分裂発電) 1に関するSTMDの取り組み
246	図4-9	Fission Surface Power Systemのイメージ図
246	表4-13	Fission Surface Power (核分裂発電) に関するプログラムへの資金拠出状況
247	表4-14	Transmission Cable System (有線送電システム) に関するSTMDの取り組み
247	表4-15	Transmission Cable System (有線送電システム) に関するプログラムへの資金拠出状況
247	表4-16	高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関するSTMDの取り組み
248	表4-17	高信頼性・高耐久性パワーエレクトロニクスに関するプログラムへの資金拠出状況
248	表4-18	長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関するSTMDの取り組み
248	表4-19	長寿命、グリッド規模での二次エネルギー貯蔵に関するプログラムへの資金拠出状況
249	表4-20	最大10kW級の無線電力伝送に関するSTMDの取り組み
249	表4-21	最大10kW級の無線電力伝送に関するプログラムへの資金拠出状況
250	表4-22	ラジオアイソトープ電源に関するSTMDの取り組み
250	表4-23	ラジオアイソトープ電源に関するプログラムへの資金拠出状況
250	図4-10	PSR内 (低温環境下) において作動するローバのイメージ図
251	表4-24	低温環境下で作動する二次電池に関するSTMDの取り組み
251	表4-25	低温環境下で作動する二次電池に関するプログラムへの資金拠出状況
251	図4-11	PSR内 (低温環境下) において作動するローバのイメージ図
252	表4-26	CH4/O2固体酸化物形燃料電池に関するSTMDの取り組み
252	表4-27	CH4/O2固体酸化物形燃料電池に関するプログラムへの資金拠出状況
252	図4-12	固体酸化物形燃料電池の反応フロー図
254	表4-29	第1フェーズ、第2フェーズの概要
254	表4-30	第1フェーズで受賞した事業者と受賞理由
255	表4-31	第2フェーズでの入賞した事業者と、課題内容
256	図4-13	Horizon Europeの構造
257	図4-14	ロードマップで開発が想定されている主要な要素技術
258	図4-15	LUNABOXイメージ

(様式2)

259	図4-16	Moon Villageの全体像（左）とモジュールのイメージ（右）
260	表4-32	Moon Village構想における電力試算の前提条件
260	表4-33	Moon Village居住棟における消費電力及び必要となる太陽光発電システムの推算
261	表4-34	Moon Village居住棟における消費電力及び必要となる原子力発電システムの推算
262	図4-17	2016年頃に想定されていた欧州の宇宙における原子力利用のロードマップ
263	図4-18	ILRSのイメージ図