

### 3. 月全球の探査

#### 3.1. 「Q3. 国際宇宙探査を通して、理学コミュニティが参加する科学的意義は何か？」

**結論： ISAS の太陽系科学探査と戦略を共有して一連の小天体探査計画や重力天体探査を補完し、相乗効果を上げること**

「生命の起源」という 21 世紀科学の大問題を解き明かすためには、太陽系科学、地球科学、天文学、宇宙化学、そして生命科学が一体となって取り組んでいかなければならない。その学際間連携の鍵を握っているのが太陽系外縁から内惑星領域への水・有機物の輸送である。この物理過程は 45 億年前の太陽系形成期と、38-35 億年前の隕石重爆撃期に劇的に輸送効率が上がっていたと考えられる。JAXA 宇宙科学研究所が描く太陽系探査の戦略は、まさにこの輸送過程の解明を目指して小天体探査とサンプルリターンのシリーズ化を実現しようとしている。一方、MMX を嚆矢とする火星探査では、重力天体の環境変動を調査することが重要なテーマである。地球、火星、月といった重力天体の内部進化が固有磁場の消長や大規模火成活動を通して惑星の生命生存可能環境とどのように影響し合い変遷してきたかを知ることはもう一つの鍵である。将来的には系外惑星の天文観測と結びつけて地球外生命の探査と発見に寄与する。日本にとっての国際宇宙探査は、科学探査と戦略を共有して一連の小天体探査計画や重力天体探査を補完し、相乗効果を上げる事が強く期待される(図 3-1)。

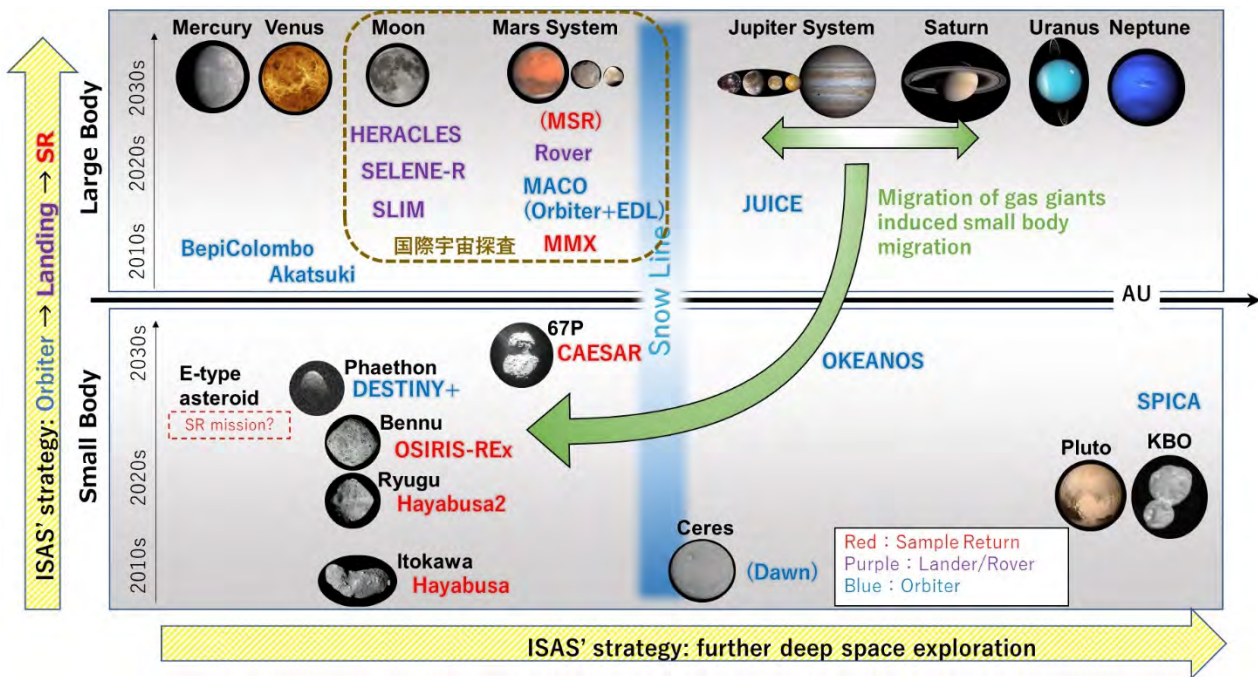


図 3-1 日本の科学探査と国際宇宙探査の関連

同時に月面での観測という地理的条件を考慮するならば、アルテミス計画が目指すべき第一の重要課題は (A) 月でしか実現しない科学であり、第二に (B) 月でこそ高い成果が実現する科学、である。

ここでいう『科学』には、理学における狭義の太陽系科学だけではなく、将来の太陽系探査に繋がる工学技術開発や、近未来の人類宇宙進出に繋がる知見の集積も含まなければならない。残念ながら国際宇宙探査における科学は最優先事項ではない。与えられた機会とリソースの下で、(A)と(B)の観点において個別の観測提案の重みを判断し、最大限に科学成果を上げる事が科学コミュニティには求められる。

こうした方針を明確にするために、本節で扱う科学テーマを図 3-2 のように整理した(図中の(1)～(9)については、それぞれ 3.1.1～3.1.9 項に詳細説明がある)。なお、本節で抽出した項目以外にも個別の TF 報告書には多くの科学テーマが列挙されており、全てのテーマには各 TF チームが敢えてピックアップしただけの重要性が認められている。その中でも特に複数の TF 報告書に共通して指摘されている重要項目は、7 章に一覧表として示している。

年代	45 億年前	38-35 億年前	—	現在～近未来
太陽系内のイベント	太陽系形成	氷微惑星の散乱 地球生命の誕生	生命生存環境の変遷	人類の宇宙進出
重要プロセス	水・有機物の輸送	隕石重爆撃	惑星大気散逸 内部と環境の共進化	
(A) 月でしか		隕石重爆撃の痕跡 (1)	ドライな系の熱史 (2)	太陽風からの水供給 (1)
(B) 月でこそ	月の形成: 巨大衝突の物理化学 (2) マグマ・オーシャン (3) 原始地殻 (3)		衝突・レゴリス形成 (4)	水などの資源開発 (3) (5) (8) 将来探査のための諸技術の獲得・実証 (6) (7) (9)
月以外で実現すべき科学	小天体サンプル採集 小惑星内部の水探査 水星の形成と軌道進化	木星トロヤ群からのサンプル採集	火星大気散逸 火星・金星気候変動 木星・土星衛星の地下海 地球(ウェットな系)の熱史	宇宙天気予報 惑星保護 拠点建設

図 3-2 国際宇宙探査における科学観測の重要性

### 3.1.1. 月への揮発性成分(特に水)の供給過程の調査

月表層に存在する可能性のある水の起源を知り、地球・月周辺への外部からの水の供給過程や太陽系内における揮発性成分の移動に関する知見を得ることは、太陽系の進化や生命発生環境を把握するという点で、また火星における物質探査に繋がるという点でも重要な科学目標である。地球～月～火星のローカルな環境を『系統的に』調査して比較することで、内惑星領域での水の移動プロセスの理解が促進する事を特に強調しておきたい。ただし、現在起きている物理過程と 46 億年間に起こった物理過程は必ずしも同じではないはずなので、年代の変遷を意識的に区別して観測データを収集しなければならない。そのためには、若い溶岩流のクレータ年代とサンプル年代を調査して太

陽系内衝突史を把握する事もあわせて必要である。後期重爆撃期の有無をはじめとし、太陽系内で起こったとされる天体衝突の歴史を月面のクレータの形成年代を把握するなどにより、太陽系形成による物質移動を把握することは太陽系形成の理解に重要である。

一方、現在の揮発性物質と月環境の関係を明らかにするために、太陽風、地球起源のイオンのインプランテーション、地球起源大気や磁場、電位変動と浮遊ダスト、磁気異常と静電バリア形成過程を調査する。太陽風プロトンダイナミクス、日陰での挙動、月面帯電環境を把握することは太陽系内での基礎プロセスを理解するだけでなく、今後の有人・無人の天体表層探査を実施する上でも重要である。特に極域では太陽風プロトンが日陰領域へ侵入するプロセスが想定され、その理解により多領域でのプロセス理解に繋がる。ちなみに、火星表面と月表面では大気の有無など環境が大きく異なるので、同等な手法で環境計測を行うことはできない。しかし、軌道上からの電離層観察、大気散逸モニタリング等の観測では科学的興味と観測装置が共通している。こうした軌道上からの環境観測は Gateway から MMX に繋がる重要項目である(図 3-3)。

昨今の月周回衛星観測や試料分析により大量揮発性成が存在する可能示唆された。一方で、外来天体による供給量の大部分を担う微小隕石や 彗星ダスト自体は月試料から見つかっていない。Gateway での微小隕石・彗星ダスト収集と微小部分析、そして地球に持ち帰った後の詳細分析による月へ揮発性成供給機構の解明が必要である。

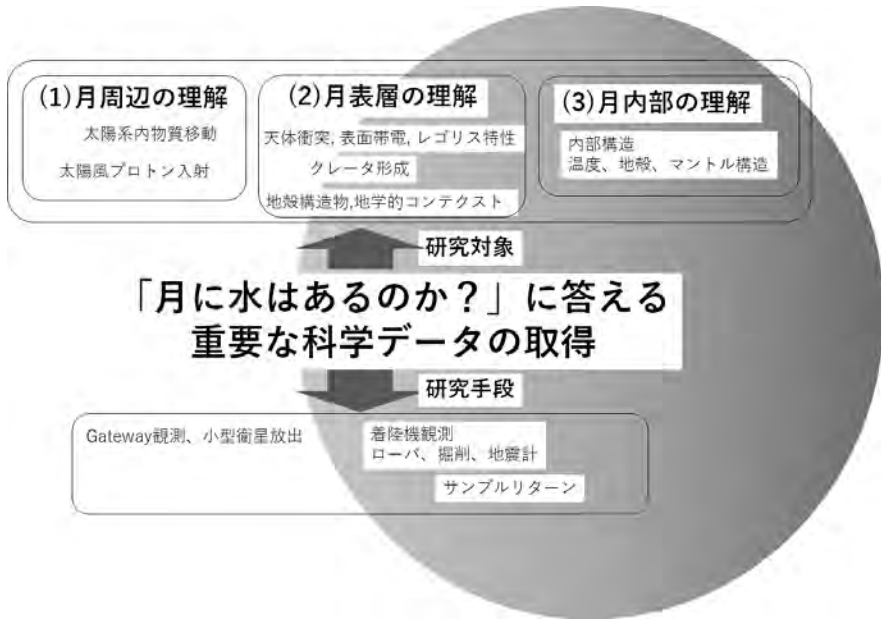


図 3-3 Q2 に答えるための観測戦術

なお、現在日本以外にも複数の国が月極域での水探査を計画している。日本が月極域の探査を行う前に他国による同様の探査が実施された場合の科学的意義について考える。

これまでに国際協働により月極域探査を実施することで一連の探査で得られる成果を最大とする目的で、月極域探査の目標、観測項目や機器に関する情報交換、議論・調整等を行う MCD team (Lunar Polar Volatile Mission Coordination Dialogue、数カ国の研究者が参加) が NASA 主導により 2017 年に設立した。そこに日本も参加して検討を行なっている。そこでは 4ヶ国 (共同探査は 1 国とカウント) 程度が日本と同様規模の極域探査を検討中。上記活動の成果として、国際的な惑星科学を中心とするコミュニ

ティによる議論の中で、探査地点の候補は複数あり、1箇所の探査で理学的な観点でもまた資源利用の観点でも必要な情報の全てを得ることは不可能であり、複数の探査が必要との参加する研究者らの共通理解が得られた。また以下の内容が提言された。

- ・ -複数機が同じ地点に着陸するよりも、環境の異なる複数地点への着陸が重要
- ・ -基礎情報（深さ 1m 以上までの H 量の測定、H の形態の理解、地質環境、レゴリスの物性）と補助的な情報となる観測項目を選定した
- ・ -探査ミッション間でのデータの共有が重要

一方、日照・通信・傾斜など様々な条件を満たす着陸点候補（南極側）は過去の論文によると 12 箇所あり (De Rosa *et al.*, 2012 [45])、実際に候補地点は複数個存在している。なお以前より米国は月極域探査の早期実現を目指しており、MCD でもそのように議論されている。今年になり米国による月極域探査の計画が具体化したが、上記 MCD による議論や着陸点候補の数を考えれば、日本よりも前に他国による月極域探査が行われる場合であっても、日本が行う探査の意義は変わらないと考えられる。

## 引用論文

[45] De Rosa *et al.*, 2012, Planetary and Space Science, 74, 224.

## 関連する要素技術

- ・ その場での同位体測定や希ガス分析のための加熱技術、質量分析
- ・ 微小隕石・ダストの分析(フラックス、帯電、移動・付着過程)、並びに外来天体よる月への揮発性成供給機構解明
- ・ 放射線環境、太陽風のその場観測
- ・ サンプルリターンによる詳細な物質分析と年代測定(特に玄武岩や pyroclastic deposit (深部からの噴出物) など)。
- ・ その場分析による年代測定
- ・ 月面定点プラズマ観測 (月面定点で長期的にプラズマ観測により宇宙天気的确立と地球磁気圏のダイナミックな変動を理解する。)
- ・ 月面からの電場の高度分布を計測する電場計測装置、および電波計測装置
- ・ 磁気異常などにおける磁場分布を計測する磁場計測装置
- ・ 低～高エネルギー粒子を計測するイオン・電子エネルギー分析装置
- ・ 浮遊ダストの分布や運動を観測するダスト計測装置
- ・ 水関連分子の供給や輸送を観測するイオン・中性粒子質量分析装置
- ・ ローバによる移動技術
- ・ 表面試料のその場観測技術
- ・ 物理探査 (レーダー、地震波など)
- ・ 掘削 (ボーリング) 探査

### 3.1.2. 月内部進化の理解

分化天体の進化を知る上で、月は根源的な情報元となる。形成直後の内部の熱的・化学的状態を推定する上での根拠となる観測を充実することが重要で、月の膨張・収縮テクトニクスや海の火成活動といった地質学的情報に加え、現在の月内部の温度分布や地殻・マンツルの構造を明らかにするための内部構造探査、さらに海の岩石の放射年代測定、異なる年代における典型的な岩石の地球化学的情報をあわせて議論することが重要である。

我が国は地球の地震学、火山学で学術的に極めて高いレベルを維持しており、こうした分野をベースとした内部構造探査を行うことは、月のみならず火星など他天体探査における学術的優位性を確保する上でも重要と考えられる。今後、地震計を多地点に設置するプロジェクトは、世界各国で実施されると考えられ、月面に地震計観測ネットワークが構築されると考えられる。しかし、各国の地震計の特性（周波数特性や時刻など）が異なる場合には、期待されている成果が得られない可能性がある。そこで国際的な枠組みで地震計の基準を検討し、最大限の成果を出す努力が必要である。例えば、各国の地震計が様々な地点で同時に稼働する環境を構築し、各国が協力して（月面に分散している）地震計データを中継・転送する枠組み作りが必要になると考えられる。我が国は、地震計の設置等において多くの実績を有しており、この国際的な枠組みにおいて、世界をリードできると考えられる。

#### 関連する要素技術

- ・ 小型アクティブ地震探査
- ・ ペネトレータ（多地点での同時地震観測と熱流量観測）（要素技術開発は完了、実際に打ち込んでシステムとしての成立性を示す課題が残っている。水探査であれば別途水氷を検知するセンサの開発が必要。）
- ・ 月内部構造探査パッケージ（月面サバイバルモジュール）（短周期地震計+広帯域地震計、磁力計、熱流量計、逆 VLBI 電波源の4つの地球物理学的観測機器を月面に設置して、長期間観測を行う。）
- ・ 熱伝導率計測システム
- ・ 地下探査レーダサウンダ
- ・ 重力偏差計
- ・ 越夜技術
- ・ 放射年代測定

### 3.1.3. 地殻構成物の多様性の把握

地球型惑星の火山活動と熱組成進化を精査し、地質学的コンテクストを把握する。月の地殻は、かつて想定されていたような、単純なマグマ・オーシャンの冷却・固化モデルでは説明しにくい、遥かに複雑な構造を持っていることが明らかになりつつある。この構造を調査しマグマ・オーシャンの歴史を解明するためには、高い空間分解能での地球化学的・岩石学的な地殻物質の分析やその放射

年代測定に加えて、分析した試料の地質学的コンテキストを明らかにするための露頭調査やアクティブ地震計・地中レーダなどを用いた浅部地下構造の把握が重要である。

月では北極（裏側）と南極（南極エイトケン盆地の影響を受けていない部分）周辺に月の初期地殻らしき地域が認められ、この領域での岩石の化学組成の測定を行うことで、月の初期進化・内部構造の把握に繋がる情報が得られる可能性が高い。

月資源の可能性を把握するには、フィードストックとして期待される金属や地殻濃集元素や、燃料や還元剤としての揮発性成分について、それぞれの分布や濃集形態、濃集機構を調べることが重要となる。これにはガンマ線や中性子線スペクトルメータなどによる元素マッピングよりも数段高い解像度で元素分布を把握する必要があり、詳細な地質調査が鍵を握る。地質学的コンテキストの理解や複数地点におけるサンプリングなども不可欠となるが、これらは地殻構成物の多様性の把握のために実施すべき探査手法・項目とほぼ重複する。

フェッチローバ(100 kg 級のローバからミニローバを吊るして急傾斜地を探査する、など)も火星探査では考えられている。この技術は大型の永久影クレタ探査や、縦穴探査にも利用でき、共通性の高い重要技術となる。(これまでの TF 報告書には指摘されていないが、理学検討チームからの推薦として追記する。)

#### 関連する要素技術

- ・ ローバによる移動
- ・ その場観測
- ・ サンプルリターンによる年代測定。
- ・ フェッチローバ

### 3.1.4. 衝突とレゴリスプロセス

太陽系内に普遍的に存在する地殻構成破砕物の特性や挙動を理解し、ガーデニングや宇宙風化の効果を調査する。月面はレゴリスと呼ばれる岩石の破砕物で覆われており、その粒径や密度、鉱物組成、機械特性などは地域性も含めあまりよくわかっていない。ところが月面での移動や人工物の敷設、建築などインフラ整備、資源利用などを考えると、レゴリスの特性を理解することが必須となる。ほかにも表面ダスト粒子の挙動や人工物への付着、掘削や土砂採取、人工物との相互作用やスラストによる巻き上げ、越夜の電力維持など、将来の月面での活動を考えると不可欠な情報・技術が数多く存在する。

#### 関連する要素技術

- ・ 着陸ミッション
- ・ 人工衝突（粒径、密度、鉱物組成、機械特性、レゴリスの移動現象の理解）
- ・ アクティブ地震探査（広範囲の浅部地質構造を明らかにし、レゴリス層の特性（地盤強度・粒径分布・間隙率）を推定することで、レゴリスの形成メカニズムと進化、資源量の評価、基地建设に必要な地盤情報などに関する情報を得る）

### 3.1.5. 浅い地下構造の探査

月資源探査に必須の技術であると同時に、将来の火星探査、小天体探査においても重要な基盤観測技術となる。月の科学にとっては、初期進化・内部構造の把握に繋がる情報が得られる可能性が高い。これにより太陽系探査の科学目標の大目標（「太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求」）において重要な固体天体の形成と進化の過程に繋がる。

掘削技術に関して月極域探査での要求は、傾斜 20-25° 以下にアクセスし、平地において深度 1.5 m 以上の掘削を行うことである。月探査ではこの要求をベースとし、将来は火星地下水圏探査のために、傾斜 30° 以上で深度 1 m 以上、または平地で深度 15 m 以上の掘削技術を獲得する事を目指す。

ここで、工学的視点から地下掘削技術について言及する。深度方向にアクセスするドリル系については、目的深度が 1 m 程度まで、それ以深で構造・機構が違ってくるので TRL も違う状況にあると思われる。深いほど技術難易度が高くなる。特に、1 m 以深となると、ロッドを継ぐ機構が必要となり、リソースが増大する。なお、掘削するだけならドリルについてのみ考慮すれば良いが、探査の可能性を広げるためには、ドリルの軸に観測機器を内蔵し、ドリルの振動を使って地盤/地質調査を行うなど、他の観測と組み合わせることも検討しなければならない。

環境条件としての課題は以下の通り。環境はクリティカルな条件にはなりにくいと思われる。

- ・ 温度： 電気系・機械系の稼働温度を維持しなければならない。
- ・ 放射線、太陽光： 電気系に対する影響評価が必要である。
- ・ 大気： 大気がないと放熱しにくいいため、ドリル先端の掘削発熱の影響評価が必要である。
- ・ 重力： 機器の自重による反力の確保、掘削効率を評価しなければならない。
- ・ 土質： 土なのか岩なのかで構造が異なるため、トルク、スラスト、摩耗、ボアホールの自立、排土効率等に影響する。

いずも火星より月の方が厳しめなので、月用に開発すると火星以遠でも使えると思われる。月惑星ドリルやマニピュレータについては米国が実績含め、先導している状況にある。しかし技術面で特に高いハードルは無いようにも思えるため、国産でも対応できる技術と判断される。掘削するだけならドリルが良いが、ドリルの軸に内蔵する観測機器や、ドリルの振動を使った地盤/地質調査など、他の観測と組み合わせることによって、探査の可能性が広がると思われる。

#### 関連する要素技術

- ・ ローバ搭載 GPR による月表層地下構造層序の広域探査、誘導電場の測定。
- ・ 月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物の検出
- ・ その場分析による年代測定により地殻・マンツルの各地層の形成年代を把握する。

### 3.1.6. 他の科学分野と連携しそれら研究において必要とされる諸技術の獲得・実証

我が国が Gateway において行う科学として、宇宙工学の観点では、1) 宇宙理学やアストロバイオジーといった他分野を成り立せるための技術獲得、2) 補給船関連技術の獲得、3) 将来探査に向けた技将の実証、といった切り口が考えられる。月面上での無人探査、有人活動の支援、あるいは火星



探査に共通に必要な技術は日本として確立しておく必要がある。

月から火星、さらには太陽系内天体の探査に共通して必要とされる技術とは、重力天体の探査目標地点近傍へ正確に着陸する技術、着陸点から探査目標地点へアクセスする技術、探査目標地点において試料等を採取する技術、そしてそれらの試料を分析する技術である。深宇宙通信技術については、既に探査ミッションにおいて実績があるものの、性能向上が強く期待されている。しかし、一般に通信容量を増加するにはアンテナ規模を大きくし電力を増加させなければならず、探査機の規模を小さくできないという本質的な制約を与えてしまう。要すれば、小規模の送受信システムを用い低電力で大容量の通信を可能とする通信技術を獲得することが望ましい。

#### 関連する要素技術

- ・ 通信技術の向上(IP プロトコル通信)
- ・ 重力天体着陸技術
- ・ Gateway から超小型機を月面に向けて放出する機構
- ・ 月面レゴリスを使用したレーザ推進系
- ・ マスドライバによる月資源の軌道へ運搬

### 3.1.7. 惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発

地球、月、火星、それぞれでサンプル収集を行うことで、ローカルな環境の違いが明らかになり、宇宙惑星科学に重要な貢献がある。また、サンプル収集、回収、軌道上解析、キュレーションの技術を確認することは将来の宇宙探査の科学の基盤となるとともに、有人活動への波及もある。DSG-ADD-001 の“5.13 External Robotics”に月サンプルツール、“5.15 Utilization”にロボット月面上昇船利用について Gateway にやってきたサンプルコンテナに付着した月由来のダスト除去のためのツールの記載あり。ダスト除去技術や汚染管理という意味では、Gateway でも重要な技術になっていると理解できる。

同様に、惑星保護、惑星検疫の技術確立も重要である。月・火星で採集された試料を Gateway 内、および地球の隔離施設内で分析を行い、地球からの Gateway までの資材の運搬や Gateway 内での準備、探査機による月からのサンプリング時のフォワードコンタミネーションを評価する。ただし、全てを日本単独で行うには巨額の予算が必要になる。国際的協力、日本の分担を考えることは今後の課題としてコミュニティ中心の検討が必要である。

#### 関連する要素技術

- ・ 月・火星で採集された試料の Gateway 内、および地球の隔離施設内での分析
- ・ 地球からの Gateway までの資材の運搬や Gateway 内での準備、探査機による月からのサンプリング時のフォワードコンタミネーションの評価



### 3.1.8. 月資源利用可能性の把握

月は安定した軌道を持つ最も地球に近い固体天体であり、各種元素のフィードストックとしての必要性が高い。特に宇宙空間で比較的豊富に存在している始原的隕石とは異なり、地殻濃集元素が高い濃度で存在することが期待されるため、この存在形態や鉱物組成、空間分布を精密に調べることは、実利用を考える上で最も重要な位置づけにある。Al、Ti、親鉄元素（Fe、Co、Ni、Mo、白金族元素など）、REE、太陽風・隕石起源の揮発元素（H、He、C、Nなど）は、フィードストックとしての可能性について頻繁に議論されている。

特に、揮発性物質は、ライフサポートや燃料、還元剤の獲得で重要である。極域における水素の濃集以外にも太陽風のインプラントーションを起源とする水素、ヘリウムのレゴリス表面への濃集が注目されており、今後は着陸探査によってさらに詳細な存在量の把握が進むと考えられる。水（氷）は単位重量あたりの宇宙放射線量低減効果が高く人体にとって安全であるため、宇宙放射線遮蔽材料としても期待される。太陽風や隕石衝突が起源となる濃集シナリオを考えても、濃度が場所によって異なる可能性が高く、複数地点での観測が極めて重要となるだろう。こうした目的のために、金属等地殻濃集元素の濃度、水平・垂直分布、濃集形態、鉱物組成、濃集過程、および、極域および月面広域に及ぶH、その他揮発性成分の存在度、存在形態、詳細な分布、深度方向の分布、濃集過程を調査し、資源として賦存量を明らかにする。将来的には原子力電池用核燃料の採掘鉱山を想定した高濃度地域の特定が必要となるなど、初期から資源工学との強い連携が望まれる。

月面は、表層から数メートルの深さに及んでレゴリスと呼ばれる隕石衝突に伴う岩石の破砕物で覆われており、その粒径や密度、鉱物組成、機械特性などは、地域性も含めあまりよくわかっていない。アポロ計画で採取されたレゴリスのサイズは、数ミクロンから数ミリと広範囲に及んでおり、上述した元素資源の抽出、人工物部材への加工、インフラ整備など、地球からの輸送コストに応じたその場資源化にニーズは高く、レゴリスの材料特性を理解することが必須となる。こうした目的のために、レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工技術を高度化する。特に、月面低重力下での材料プロセスには、「きぼう」利用材料実験の成果活用が期待できる。

#### 関連する要素技術

- ・ 資源工学
- ・ 水素等を還元剤とする還元技術
- ・ レゴリスを用いたその場製造（3Dプリンタ）（Gateway TF, 4.4.3.1-1）： 月レゴリスの静電浮遊熱物性評価、レゴリス利用積層造形のための熔融凝固シミュレーション、宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化
- ・ 月面資源開発（Gateway TF, 4.4.3.1-3）： 月レゴリスからの酸素・水素および水の製造技術、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬プロセス
- ・ 光格子時計による共通時間標準（Gateway TF, 4.4.3.1-6）： 超高精度周波数標準を用いた月面重力アノマリー観測および資源マッピング

### 3.1.9. 有人月探査への準備

今後月面での探査活動が活発化することを見越すと、機器の最適設計や有人活動の安全性などの意味で月面環境の適切な把握が不可欠となる。例えば、中低緯度帯では月面の負電位が日陰で数 100 ボルトに達し、太陽擾乱に応答して数 1000 ボルトまで変動することが知られている。また、月面は地球外の宇宙環境一般を解明するための貴重な実験場という位置づけを持つことから、月面環境を精密に把握する必要性が生じる。具体的には、温度や表面起伏、ボルダ存在率、放射線環境、表面の帯電状態、プラズマとの関連、太陽風の影響、微小隕石のフラックス、ダスト（レゴリス）の帯電や移動・付着の可能性、ダストのコヒージョン、放射線シールド性能などの調査は、異なる場所でひとつひとつ精密に実施することとなるだろう。ほかにも表面ダスト粒子の挙動や人工物への付着、掘削や土砂採取、人工物との相互作用やスラスタによる巻き上げ、越夜の熱源・電力維持のための月面エネルギー開発など、将来の月面での活動を考えると必要不可欠な情報・技術が数多く存在する。

月面は言うに及ばず月近傍の周回軌道は、地磁気や大気で守られた地球近傍と異なり、太陽風放射線や太陽光紫外線に直接暴露される。従って、ISS に比べて有人月探査においては、被曝線量の飛躍的な増加がガン化を含む重篤な放射線障害を誘発する可能性があり、生物的影響やその修復能力を理解するだけでなく、そのための計測や予測、遮蔽に関する技術開発が必要となる。最近の ISS 研究によれば、心理的ストレスや微小重力・低重力が放射線・紫外線の生物応答に複合的な影響を及ぼすことが指摘されており、Gateway を活用したデータ収集を計画的に進めることが重要である。

さらには、微小（低）重力やレゴリスなど特有の宇宙環境・資源を利用した植物栽培、宇宙植物工場を可能とする生物学的知見を見出し、人類による深宇宙探査・惑星居住に必要な課題解決に取り組むとともに、健全な長期宇宙滞在を可能にする応用研究と技術開発を展開する必要がある。このためには、宇宙放射線や太陽光紫外線が DNA 損傷や染色体異常に与える影響等の調査を可能とする全自動無人植物栽培装置の月面設置が有望である。

#### 関連する要素技術

- ・ 基礎物理（Gateway TF, 4.4.2.1-6）： プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象、プラズマ-レゴリス相互作用による微粒子制御
- ・ 月面エネルギー開発（Gateway TF, 4.4.3.1-2, 4.4.2.1-4）： ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム、水素を利用した燃料循環型燃焼・発電器、火災安全プロトコル
- ・ 宇宙生命科学（Gateway TF, 4.4.3.3-3, 4.4.3.3-4）： 宇宙放射線・紫外線の生物影響、微小重力・低重力との複合的生物影響
- ・ 宇宙医学・健康科学（Gateway TF, 4.4.2.3-4）： 内耳・深部知覚等平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策、有人活動を行うための船外活動、深宇宙有人探査・宇宙居住のための障害・ストレス対抗策
- ・ 生態工学（Gateway TF, 4.4.3.2-1, 4.4.3.2-2, 4.4.3.2-3）： 植物栽培・宇宙植物工場の実証試験、低重力下における植物栽培の最適化、月面レゴリスなど地球由来以外の物質が生物に及ぼす影響

## 3.2. Gateway を活用した月全球探査技術の発展

月極域の多地点での水探査を可能とするシステムを構築出来れば、その技術転用により探査領域は月全球に拡大し、それはアカデミアに留まらずより広い範囲から民間企業の参加を促すことにも効果的であろう。ただし、『点』の観測である着陸探査の成果を広範な領域内の水資源探査へ拡張させて行くためには、3.1.1項で述べた「水の供給過程」についての理解と並行して進めていく必要がある。

ここでは、工学の参加項目を2.3節での条件（月極域の水探査）を拡張して以下の条件で考える。

- a. アルテミス計画の方向に適合する。
- b. 月全球での3次元的資源探査、地球・月間のインフラに拡大する。
- c. これまでの科学・探査の実績・強みを活かす。
- d. その成果が今後の科学・探査の構想（月探査に限らない）に寄与する。

d. では2.3節と同様に宇宙科学技術ローマップの「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」にとどまらず新たな可能性にも紐付けた。

2.3.1項の「超小型探査体による超多点探査」は、月面移動における露頭到達技術と表面探査全般を可能にする。また、2.3.2項の「超多地点からのサンプルリターン」は、サンプル解析における詳細な物質分析・年代測定技術、複数点サンプリングを可能にする。そして、月面移動、表面探査、サンプル解析は、理学分野における月面環境と天体衝突史、内部構造・熱史の理解を深める。月の全球における3次元的資源探査技術（深さ方向および水平方向）は、太陽系の進化や生命発生環境の把握の上でも必要な火星における水を含む物質探査に繋がる。これらの活動を支えるためには、Gateway および月を活用した超小型探査機、軌道間輸送、電気推進式輸送機、通信・測位コンステレーションなどインフラの高度化が必要である。

Gateway の統合アーキテクチャは、第1段階と第2段階に分かれている（NASA 資料：DSG-RQMT-001 Gateway System Requirements）。第1段階の間、Gateway アーキテクチャは、2024年に予定されている月探査ミッションを支援する限られた機能を提供する。第1段階および第2段階での統合アーキテクチャと重要な機能を表3-1、表3-2に示す。

Gateway は、電力および推進機能、居住スペース、船外活動を可能にするエアロック機能、地球と月の両方のアセットとの通信、外部ロボティクスを可能にするロボットアーム、ドッキングポート機能、補給機能を可能にするロジスティクスモジュールを提供する。ロボットアームは衛星放出機能の付加が期待される。ドッキングポートは軌道間輸送において有人/無人宇宙機とのドッキング/ドッキング解除のために必要となる要素である。Gateway 通信システムは高速通信をサポートし、地球との常時かつ直接通信を可能にする。

表 3-1 Gateway 第 1 段階統合アーキテクチャおよび機能

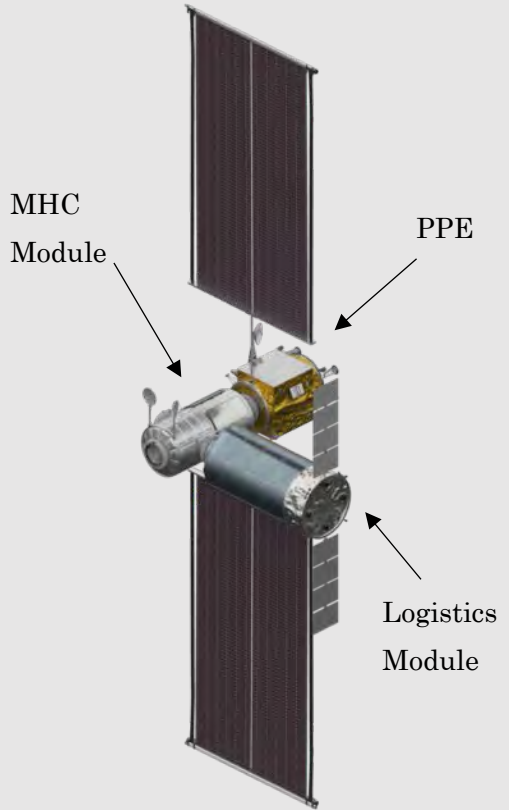
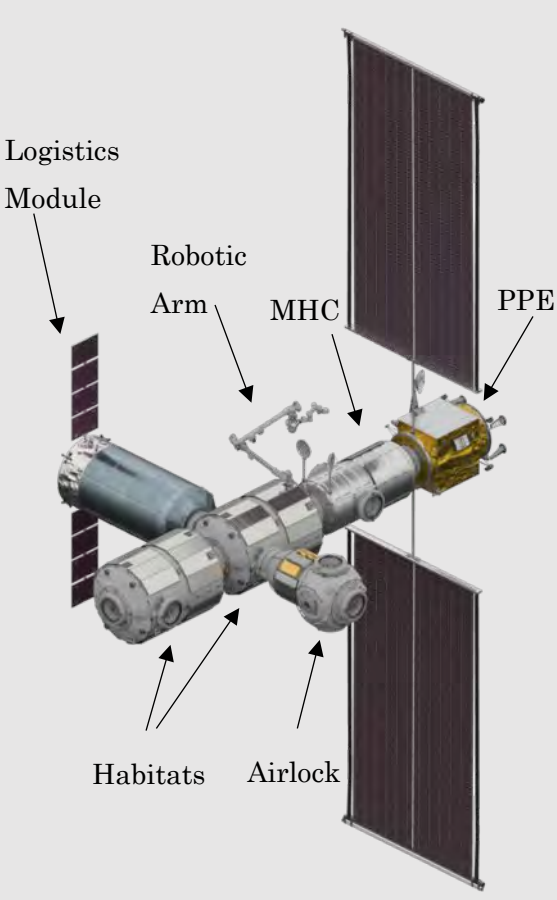
 <p>MHC Module</p> <p>PPE</p> <p>Logistics Module</p>	<p><b>要素</b></p> <p><b>Power and Propulsion Element (PPE)</b></p> <p>Gateway の電力、通信、姿勢制御、および軌道間輸送機能</p>
	<p><b>Minimum Habitation Capability (MHC) Module</b></p> <p>ドッキングハブ、拡張ライフサポート、補給船および月面通信、および限られた使用能力を提供する与圧部</p>
	<p><b>Logistics Module</b></p> <p>消耗品の貨物配送、装備、追加の利用部の提供</p>
<b>居住</b>	<p>最長 30 日間の乗務員の消耗品と強化された生命維持</p> <p>2~4 人の乗組員を支援</p>
<b>推進</b>	<p>太陽電気推進および化学推進</p>
<b>アセンブリ</b>	<p>商用打ち上げロケット (CLV) で打ち上げられたモジュール</p> <p>Gateway Docking System Specification (GDSS) 互換ドッキングポートを介したモジュールまたは宇宙船ドッキング</p> <p>有人/無人宇宙機とのドッキング/ドッキング解除に対応</p>
<b>運用</b>	<p>各モジュール (ロジスティクスモジュールを除く) の寿命は、展開後少なくとも 15 年</p> <p>補給なしで最大 3 年間の無人運用が可能</p>
<b>利用</b>	<p>科学、技術デモンストレーション、および商業的および国際的なパートナーの利益を含む限られた内部および外部の利用実験を支援する</p>

表 3-2 Gateway 第 2 段階統合アーキテクチャおよび機能

	<b>要素</b>
	<b>Power and Propulsion Element (PPE)</b> Gateway の電力、通信、姿勢制御、および軌道間輸送機能
	<b>Minimum Habitation Capability (MHC)</b> ドッキングハブ、拡張ライフサポート、補給船および月面通信、および限られた使用能力を提供する与圧部
	<b>International Habitation Module (I-Hab)</b> 環境制御、生命維持、および利用能力を備えた与圧部
	<b>US Habitation Module (US-Hab)</b> 環境制御、生命維持、および利用能力を備えた与圧部
	<b>Airlock</b> 船外活動を可能にし、ドッキング要素を収容する可能性
	<b>Robotic Arm</b> メンテナンス、宇宙機の停泊および検査、科学ペイロードの設置のための機械式アーム
<b>Logistics Module</b> 消耗品の貨物配送、装備、追加の利用部の提供	
<b>居住</b>	最低 30 日間の乗務員による消耗品と生命維持 2~4 人の乗組員を支援
<b>推進</b>	太陽電気推進および化学推進
<b>アセンブリ</b>	Space Launch System (SLS) または Commercial Launch Vehicles (CLV) で一緒に搭載するペイロードとして打ち上げられたモジュール IDSS 互換ドッキングポートを介したモジュールまたは宇宙船ドック 有人/無人宇宙機とのドッキング/ドッキング解除に対応
<b>運用</b>	各モジュール(ロジスティクスモジュールを除く)の寿命は、展開後少なくとも 15 年 補給なしで最大 3 年間の無人運用が可能
<b>船外活動</b>	船外活動宇宙服/ハードウェア、偶発事象、利用を支援。
<b>利用</b>	科学、技術デモンストレーション、商業的および国際的なパートナーの利益を含む内部および外部の利用実験を支援

### 3.2.1. 超小型探査機

Gateway から放出することで火星遷移軌道への投入、突発的に飛来する天体への interceptor ミッションの実現を可能にする。Gateway から超小型機を月面に向けて放出する機構(Gateway TF, 4.2.3-6) を活用することにより、チャレンジングで高度なミッションへと向けた布石とする。

- a. 高精度な着陸技術の実証、危険な場所への着陸
- b. Gateway から超小型探査機の放出
- c. 他ミッションの相乗りにより、科学成果を高いコストパフォーマンスで創出
- d. 超小型衛星用要素の実証 (表 3-3)、深宇宙・月近傍・月面での挑戦的かつ機動的な探査

Gateway への、あるいは Gateway を経由した人と物資の月面・月近傍への輸送が大量・頻繁・低コストに行われる時代においては、現在、超小型衛星が相乗りで ISS や地球周回低軌道へ打ち上げられていることと同様に、その輸送機会に超小型衛星・探査機を相乗りさせることで、科学成果を高いコストパフォーマンスで創出できる可能性がある。これは、超小型という小さな重量リソースの範囲内では地球から Gateway (あるいはそれ以遠) への物資・推進剤の輸送費は度外視できることが前提であり、そのような状況においては、(その探査機を単独で輸送し実施することと比較して) 軌道力学的に損をしても、あるいはシステム構成上複雑になって損をしても、Gateway 経由の方が pay するという状況を作れる、ということである。

この可能性の判断のために、Gateway が NRHO に存在することを前提として、月圏そしてその以遠への到達手段(1)~(4)について検討した。Gateway の衛星放出機能は、現時点では ISS と同様にロボットアームを用いることを想定している (表 3-2、2025 年以降の第 2 段階 Gateway にてロボットアームが装備される)。よって、超小型探査機による Gateway の本格的利用は(2)~(4)となる。

#### (1) Gateway 以外の方法により月低高度周回軌道 (LL0) へ

Gateway から LL0 への到達に必要な  $\Delta V$  を獲得する準備として、超小型探査機の軌道変換能力拡大を図る。その方策は以下の通り。

- ① イプシロンによるミッションの希望する軌道への直接投入 (革新実証 X 号機)
- ② HTV-X (2021 年以降の技術実証機打ち上げを想定) による放出前の軌道変換補助

等により超小型 LL0 ミッションを実施していく。その間に、ETS9 相乗り等を実証機会とすることで、超小型衛星用キックモータ技術あるいはそれに類する超小型推進系技術を獲得する。

#### (2) Gateway から LL0 へ ( $\Delta V = 700$ m/s 程度を想定)

(1) を達成した後、第 2 段階 Gateway のロボットアームを用いて超小型探査機の放出を行う。ただし、これが実現した後もイプシロン、HTV-X の利用は依然として有効であろう。

#### (3) Gateway から深宇宙へ ( $\Delta V > 500$ m/s 程度を想定)

(2) に対応する  $\Delta V$  能力を超小型衛星が持てるようになれば、行き先は LL0 に限らず深宇宙へのアクセスも可能になる。Gateway から、月スイングバイや地球パワードスイングバイ等の軌道操作技術を以って地球一月圏から深宇宙への離脱、火星遷移軌道への投入などが可能になるだろう。

#### (4) Gateway から月面へ ( $\Delta V = 2700$ m/s 程度を想定)

Gateway から月面着陸を超小型探査機自体で実現することは現時点では相当難しく、この状況は NRHO (高度: 4000~75000 km)、LL0 (高度: 100~1000 km 程度) のいずれからでも変わらない。6U

の CubeSat でかつ OMOTENASHI クラスのキックモータが使えるようやく 1kg 以下のペイロードを月面に到達させられるかどうかである。従って、OMOTENASHI クラスの推進機能を超小型着陸機に持たせて、自力でゲートウェイから月面に到達させるというのは最良のアイデアではない。一方で、前述のように Gateway から月面への定期的な人・物資運搬がある状況になれば、それと組み合わせることで、輸送船の着陸地点近辺に超小型プローブを投射する、危険な地域に超小型着陸機が着陸を試みるということが考えられる。超小型着陸機の完全自力でなく、定期的な Gateway-月面間の輸送船への強い依存でもない月面への新たな到達方法は今後検討すべき課題である。その解決に向けたアイデアの1つとして、将来的に Gateway にマストライバを備えることが考えられる。その利用により、超小型探査機を月に着陸させる際に近月点で Gateway の軌道速度を軽減する、さらには打ち消す可能性がある (3.2.2 項)。

アルテミス計画に係る超小型探査機ミッションの将来的な展開においては、

- 1) 水の存在と存在形態を知るための着陸機ローバによるピンポイント探査
- 2) 水採取・利用を月面のどこで行うのが効率的なのかを知るための初期的な水平探査
- 3) 水資源利用を前提にした人・物資の月面・月近傍への輸送
- 4) 地球から月圏・火星圏への人・物資輸送が大量・頻繁・低コストに行われる時代への移行
- 5) 超多点探査がもたらす月そして火星での全球探査

という、月圏あるいはそれ以遠を意識して構築していこうとする輸送ネットワークの発展およびその場資源利用と組み合わせた時間軸で考えていくことが重要である。

Gateway を活用した超小型探査機ミッションの形態としては、

ケース A : Gateway への人・物資の打ち上げの途中 (例：月遷移軌道) で超小型探査機を放出する

ケース B : Gateway に超小型探査機を運搬し、Gateway から超小型探査機を放出する

ケース C : Gateway から月面への人・物資運搬の途中で超小型探査機を放出する

などが考えられる。

A、B のケースでは、現在 2020 年に SLS Artemis-1 相乗りの 13 機の 6U CubeSat (重量 14kg 以内) で予定されているような、月周回ミッション (例：Lunar Flashlight、Lunar IceCube、LunaH-Map)、月ラグランジュ点ミッション (例：EQUULEUS)、近地球型小惑星へのフライバイ (あるいはランデブ) 探査 (例：NEA Scout)、惑星間軌道へ脱出し各種観測を行うミッション (例：BioSentinel、CuSP) などを実施することができる。これらのミッションでは、探査機自身がある程度の軌道変換能力 (数 10m/s～数 100m/s 台後半) を持つ必要があるが、現有の超小型衛星技術で達成可能な範囲である。この程度の軌道変換能力があれば、Gateway から放出した超小型衛星を、太陽潮汐力・月/地球スイングバイを駆使することで、月遷移軌道 (ケース A) あるいは Gateway から (ケース B) 火星遷移軌道へ投入することも可能である。

ケース C では、例えば大型輸送船が月面着陸する直前に超小型探査機を放出することによって、高精度な着陸技術の実証ミッションや、危険な地域 (傾斜がきつい領域や永久影領域など) への着陸技術の実証ミッションを、着陸直前に必要になる軌道変換能力だけを持った低リソースな超小型探査機で、大型ミッションとは切り離された状態でリスクを取って実施する。言い換えれば、大型ミッションはリスクを取らずに、比較的安全な場所に着陸しつつ、その過程で超小型探査機を放出し、超



小型機自身はリスクをとって危険な場所への着陸に挑戦することができる。

以上は、Gateway から実施可能なミッション、という観点で例示したものであるが、さらに「Gateway ならではの特長」を生かすなら、突発的に飛来する天体への interceptor ミッションも有効である。つまり、事前に Gateway に超小型探査機を配備しておくことにより、突発的に飛来し発見される天体に対して、(発見してから探査機を打ち上げても間に合わないような状況で) 適切なタイミングを逸することなくアクセスすることが可能である。

なお、ISS 放出ミッションにおいては、「軌道高度が低いため、仮に衛星に能動的に軌道離脱するための推進系がなくとも、短期間に大気圏に再突入するためデブリにならない」という、ある種「大胆なミッション」も許容できる状況があったが、Gateway ミッションにおいてはそのようなことは期待できないため、ミッション終了後の探査機の投棄方法など、月近傍の軌道環境の保持は要検討課題である。月面に大量に超小型機が着陸するようなシチュエーションは今のところ国際的にコンセンサスにはないと思われるが、放出した超小型衛星が月面に落ちるとすれば将来は月面の基地や活動中の人間に衝突しないようにする必要がある。非月面の月近傍ミッションについては既に SLS 初号機で CubeSat が大量に飛行するミッションが計画されていてそれと同じような考え方を今後も適用すると予想される。例えば EQUULEUS ではミッション終了後にラグランジュ点から深宇宙等へ離脱することが求められている。

一方、超小型ミッションのもたらす今後の科学・探査への貢献として人材育成は一つの柱になり得るだろう。宇宙ミッションに参画することによって厳しい環境条件で確実に作動する宇宙システムを作る技術を実践的に身につけることができるが、それが超小型ミッションであることによって、

①短期の開発・運用期間であること、

②小規模なシステムでありプロジェクトの各構成員が全体像を見通しやすいこと、

により、さらなる教育効果が期待出来る。その結果、アカデミアのみならず産業界にも人材を輩出して将来の宇宙開発を支え、さらには宇宙開発とは関係ない分野への人材供給の可能性も考えられる。

**表 3-3 超小型探査機ミッションの関連要素技術（「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より）**

要素技術	開発・実証ステータス (TRL など)	実験・実証事例と実証された時期
大電力薄膜太陽電池	TRL4-7	以下のように、R&D の結果を軌道上実証しつつ、ミッションの特色に合わせて投入 SPRINT-A/NESSIE (軌道上実証)、HTV#6/SFINKS (軌道上実証)、SLIM(ボディマウント)、DESTINY+(大面積パドル)、OKEANOS(電力セル)
低消費電力技術	TRL3-4	ヒータ電力の削減の観点から、低温動作バッテリーについて車載セルの評価を宇宙科学技術プログラム委員会の枠組みで実施。非凍結型低温 2 液推進系はソーラーセイル WG で研究
小型軽量コンポーネント技術	TRL3-4	一筐体・多機能コンポーネントや、MEMS によるワンチップ化や高密度実装を用いた小型軽量化、ドライバや電力供給部 (PSU) の高効率化の試作などの研究開発を実施中 (戦略研究)
宇宙機バスの革新的な軽量化 (例: 現在の標準小型バス 250 kg を 150 kg 級に、イプシロン余剰能力をミッション部に)	現在の標準小型バスは 250 kg 級。バス機器の中には軽量小型の機器の開発が進んでいるものもあるが、組織的な検討は行われていない。	NASA SMEX においては、衛星バスが 150 kg 級で実施されており、搭載できるミッション機器に自由度が多い。

超小型・低消費電力計算機	CubeSat 向け 1 W 級 OBC は開発済み (打ち上げ待ち)	CubeSat 向け 1 W 級 OBC を EQUULEUS で開発。2019 年以降実証予定。性能はさほど落とさずに、さらなる低消費電力化を図り、土星以遠の超小型探査に備えたい。
超小型・大電力・高効率電力増幅器	50 kg 級衛星向けは軌道上実証済み。 CubeSat 級 (12U、24U-class 含めて) への展開に早く取り組むべき。	PROCYON、ほどよし等の 50kg 級衛星で GaN アンプ実証済み (2014 年)、CubeSat 級 (12U、24U-class 含めて) への展開 (超小型化) が必要。EQUULEUS・OMOTENASHI では「大電力」は目指していないので、新たな開発・実証の場が必要。
超小型衛星用高利得アンテナ	50 kg 級衛星のための 50 cm 級 HGA は開発・打ち上げ済みだが、軌道上未実証。 CubeSat 級は (利得はそこまで稼げないが) JPL が展開型 HGA 軌道上実証済み。	50 kg 級衛星のための 50 cm 級 HGA は PROCYON 向けに開発済みだが、軌道上での作動機会がなく未実証。どこかで実証機会が必要。 将来的には、薄膜小型 Phased Array Antenna 等を開発して、姿勢運用制約なく高レート通信を可能にするアンテナ技術が欲しい。
超小型衛星用高推力推進系	BBM 実験段階	水を推進剤とした統合推進系が、BBM 実験段階。一部 (水レジストジェット) は 2019 年以降実証予定で FM 開発中。
超小型キックモータ	BBM/EM 実験段階	観測ロケット/低軌道/GTO 等で段階的に実証する。Storable な酸化剤を適用したハイブリッドロケットを想定。2021 年 GTO 相乗りを目指して BBM/EM 実験段階@北大
超小型 EDL 技術	サブスケールの軌道上実証を経てミッション提案段階	EGG (2017 年) でサブスケールの柔軟エアロシエルの展開・再突入実験に成功 火星 EDL へ適用し実証を計画中 (SPUR)
地上局との更新頻度を極端に減らす自律航行技術	具体的なミッションを想定した取り組みはない	超小型探査機の運用スタイルは、まだ小型中型探査機と同じスタイルを踏襲している。超小型探査機の運用コストを低減し、多数機・高頻度な探査を実現するためには、自律管制・自律軌道決定・自律軌道制御の実現に向けた研究は「極めて重要だが、戦略的に研究がされているとは言えない。 軌道決定に関しては、原理レベルの基礎研究段階 (LiAISON、ASST) or X 線パルサー航法は超小型向けではないが ISS で原理検証はされた。また、衛星間測距+小Δによる複数探査機による自律軌道決定技術も研究には着手されている (東京大学)。
観測装置の小型・軽量化 (例: 編隊飛行 STP ミッションに搭載のその場観測装置)	波動: TRL 5-6 粒子: TRL 2-3	波動: 京都大学、金沢大学において、受信器部、プリアンプ部の ASIC チップの開発が行われている。アナログチップは、SS-520-3 ロケット実験に搭載される LFAS に組み込まれており、宇宙実証実験の準備が整っている。 粒子: 宇宙研において超小型エネルギー分析部の BBM レベルの検討・開発が行われている。

### 3.2.2. 軌道間輸送

惑星間航行技術 (Gateway TF, 4.2.3-7): ラグジュ点を利用した深宇宙港を経由する探査機の飛行実証、マストライバによる月資源の軌道への投入 (Gateway TF, 4.2.3-6): 月面そのものへのアクセスが不要な探査機で月面物質を推進剤に利用。

- a. 月の水資源を利用した深宇宙航行の拠点構築。他国への貢献大。
- b. 地球低軌道から月近傍までの輸送ネットワークとサービス、およびマストライバの実現。
- c. 小型探査機を月圏まで運ぶ機会の増加
- d. ドッキング/再補給/推進剤合成、超小型衛星用高推力推進系の発展 (表 3-4)、重力天体に超小型探査機を送り込む技術の獲得

探査センターによる日本の国際宇宙探査シナリオは、地球から月面までの範囲内で最適な拠点を検討したもので、その結果は基本的には妥当と考える。ある程度の濃度で月に水が存在すれば、推進剤プラントを月面に建設し、再使用有人離着陸船や燃料電池の与圧ローバにより効率的に有人月面探査を持続的に行っていくというのが探査センター独自のアイデアであり、NASA も水の利用実証までは考えているが同様のビジョンを示していない。しかし、例えば火星を目指した場合の最適解は異なる結果になる可能性がある。月面までの最適解で良しとするか否かは深宇宙へ探査網を広げるシナリオ次第であろう。

月周回軌道から月面までは 1.7 km/s、月面から深宇宙までは 2.4 km/s が必要なので、月面に何も無ければ軌道力学的な観点のみで考える限り深宇宙探査ミッションにとっては地球から月近傍を経由するメリットが無いのは明らかであるが、その一方で、

- 1) 月にて水を豊富に入手し、推進剤として利用する、もしくは月面や Gateway 等に加速設備（マストライバ）を建設する等により、深宇宙への拠点を構築する
- 2) 超小型探査機について地球から Gateway 以遠への物資・推進剤の輸送費は度外視できる状況であれば、単独の輸送・実施と比較して軌道力学的あるいはシステム構成上損をしてでも Gateway 経由の方が pay する

という新たなシナリオが考えられる。

月を活用した惑星探査が優位性を持つためには、推進剤となる資源を地球には頼らず、月領域にて十分かつ低コストで速度増分が得られる状況ができた場合に限られる。水を推進剤とする場合には、月に存在する水資源の量、それを取り出して Gateway に輸送し宇宙機に充填するためのコスト、繰り返し数と輸送量にも依存する。月圏に深宇宙への拠点を構築するためには、月表面で十分な量の水等を現地生産し、鉱物（建造材）採掘を本格化するだけでなく、月から Gateway へとこれを輸送して貯蔵する、月あるいは軌道上組立を可能にするなどの大規模なインフラ整備とサービス体制の構築が不可欠であろう。月の資源を Gateway に輸送可能な状態にできてかつ安全に輸送機に充填できる技術があることは重要であるが、NASA の資料には具体的技術の記述は見当たらない。これらハードルに対しては「リスク」に関する評価が必要であり、「Gateway に立ち寄って推進剤充填に伴うリスク」と「十分な C3 を有する大型ロケットで火星直接のリスク」の比較があるべきである。

ここでは月の水資源利用にフォーカスして、水を離着陸機および探査機の推進剤として用いる場合、水を電解して得た水素と酸素、そして水そのものの利用の可能性について検討した。

- 1) Gateway-月面間の離着陸機の輸送について： 探査センターが現在検討している有人輸送の場合は滞在日数を考えると化学推進が現実的な選択肢である。化学推進の中で推進剤には色々な選択肢があり得るが、月で入手可能なものに限定すると LOX/LH2 であろう。一方で、もし無人輸送の場合は、ペイロードを増やす効果は少ないが、Gateway から月低軌道 (LL0) の  $\Delta V$  が約 2 km/s なのでここで電気推進、LL0 から月面の  $\Delta V$  が 2 km/s 弱なので化学推進とする、推進方式のハイブリッド化も考えられる。その理由は以下の通り： 月周回軌道の軌道速度が大きいため月に着陸するには SLIM のサイズですら推力が 500 N 級、通常の月着陸船ならば 10 kN 級が必要となる。月地表すれすれを飛ぶ宇宙船の軌道速度は 1.9km ほどあるため、インパルス  $\Delta V$  でこれを相殺して着陸する必要がある。よって、化学推進に比べて著しく推力が低い電気推進 (1 N 以下)

ではインパルス  $\Delta V$  が無理なので、月面へのタッチダウンには使えない。

- 2) Gateway からの超小型探査機放出について： 化学推進を用いれば速やかに深宇宙への軌道に遷移出来るが、電気推進では時間が掛かる（一か月程度）。水素を用いる場合、液体でも低密度でタンクが大きくなる課題を抱えているので、探査機がガスで積み込んで行くことは有り得ず、従って LH2 での貯蔵になると考えられる。一方で、液体の水の利用として探査機オンボードで電気分解をすることが考えられる。もしくは日本の先導的研究である「水を推進剤とした電気推進」が使えば、水素の貯蔵等難問と複雑なシステムを回避した簡易な推進システム構成が可能となることから、電気推進を利用するメリットが大きくなる。一方で、推力が太陽電池パネルの出力で制限され、速やかな軌道遷移というメリットが失われる可能性はある。

次に、月の土壌からの水の抽出・高純度化に関する技術開発について検討した。水が結合水なのか、空隙水なのか、あるいは水のまままとまった形状なのかが不明なので、水の存在形態とその定量化のための熱重量分析開発がまずは優先となり、その結果によって水の抽出と高純度化の技術的な課題が明確になる。水の抽出技術そのものは地上技術の転用となるので、月面環境での実用化には大きな問題はないと考えられる。抽出は蒸気圧を使った分離が最も簡単だが、水以外に揮発成分が含まれている可能性があり、多段プロセスになる可能性がある。結合水や空隙水としての水が存在しているならば、月の技術をそのまま火星の技術に転用可能と考えられる。

土壌に含まれている水の定量化には熱重量分析の技術が必要だが、まだ世界的にどこも開発できていない。ようやく JAXA で検討が 2 年前くらいから始まっている状況。プラント設計は地上の技術の延長なので、日本での優位性はないかも知れないが、それに必要な工学的研究は日本がリードしている分野もある。水を単に分離するのではなく、土壌の水素還元による固定層、流動層、さらには連続運転については実験室レベルでの研究例がある。

ある程度まとまった氷ならば、単に加熱して蒸気圧での分離になるので、技術的課題で問題にならない。結合水の場合には高温が必要になる。存在量の定量化ができれば、そのエネルギー量と掘削量が具体化するが、濃度によって掘削面積が変わると同時に水以外に無駄に土壌を加熱する顕熱が必要となる。探査センターによる日本の国際宇宙探査シナリオにて必要とされている毎年 72.5 トンの水を得るには、仮に加熱して蒸気圧での分離を用いるとするとその蒸発潜熱は 5.2 kW となる。（この計算はかなり単純化しており、融解熱、固体、液体、気体の顕熱を無視しているが、オーダー的問題ない）。5.2 kW の規模は一般家庭の電化製品程度の規模となるので小型の実験装置になる。ただし、これは単に水を蒸発させるだけのエネルギー量であり、実際には水を含んでいる土壌の加熱も必要なので、水の濃度が 0.1 % の場合には土壌を 100 °C 上昇させるのに 230 kW のエネルギー量が必要となり、これは月面での製造プラントとしては全く現実的ではない。このように水の濃度によって水の抽出に必要なエネルギーも大きく変わることは十分留意すべきことである。

月面の水抽出・電解、液化後の LH2 の保存のプロセスにおいて、LH2 貯蔵にて求められている BOR(0.3 %/day) というターゲットは、タンクの容積に大きく依存するが地上の LH2 貯槽（真空二重断熱容器）の BOR としては特別な値ではなく、JAXA 能代ロケット実験場の 30 m<sup>3</sup>LH2 タンクもその程度である。月では LH2 貯槽の周囲が真空環境なので輻射熱さえ抑制すればよく、例えば JAXA で開発された高性能 MLI : NICS-MLI を用いることで設備を小規模化となることが期待される。

いずれにしろ、深宇宙に出発するための何らかの支援設備を月面に作るというステップをシナリオに組み込むのであれば、月面への大量物資輸送が必要になるので、探査センターによる月面での水資源利用に関する検討方針は妥当である。Gateway 計画に伴って月への物流が増え、それに HTV 技術や H3 等の次世代基幹ロケットなど大型輸送システムが協力出来るのであれば、小型探査機を月圏まで運ぶ多くの機会に繋がるのが期待され、我が国にとっては重力天体に超小型探査機を送り込む技術を獲得する絶好の機会と言えよう。

究極的には、人や食物は地球から輸送、その他の推進剤と建造物資材は月からマストライバで輸送、それらを軌道上で組立てて深宇宙へ、というアイデアもあり得るだろう。大質量で大気が無い月が地球のそばに有るという状況を踏まえると、月面に電磁加速器等のマストライバが有っても良いのかも知れない。Gateway がマストライバを備えていれば、超小型探査機を月に着陸させる際に近月点で Gateway の軌道速度を軽減する、さらには打ち消すのには使える可能性がある。月面との相対速度をゼロに出来た場合でも、着陸の際には落下速度を打ち消すための推進機関が必要になるが、軌道速度を打ち消すのに比べればより少ない推進剤量で Gateway から月面へ超小型探査機を運ぶことが可能と考えられる。NASA 資料“DSG-RQMT-001 GATEWAY SYSTEM REQUIREMENTS”に衛星放出機能についての簡単な記載はあるが、ISS と同様にロボットアームを用いることを前提としており（表 3-2、Gateway でのロボットアーム装備は第 2 段階）、マストライバとしての実用的な機能を期待するならば今後の検討課題である。

これまで述べてきたように、日本の工学コミュニティが目指す軌道間輸送、すなわち、地球低軌道から月近傍までの輸送ネットワークとサービスの実現にあたり、Gateway での活動はその試金石となりうる重要な機会である。工学コミュニティが誇る高頻度繰返し運用可能な再使用ロケットやイオンエンジンの技術に加え、HTV-X、H3、ETS-9 の JAXA 基幹技術を拡張してこれらを月輸送へと発展させることで、巨大重量物輸送を可能とする将来の軌道間輸送へと繋がる技術の実証が得られるだけでなく、民間による事業推進のための機会が与えられる。水あるいはクリーンな推進剤を用いた独自の推進系の研究開発は、頻度高く軌道間を往復するための強みの技術と繋がっていくだろう。

**表 3-4 軌道間輸送の関連要素技術（「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より）**

要素技術	開発・実証ステータス (TRL など)	実験・実証事例と実証された時期
軌道間輸送技術 (ドッキング/再補給/推進剤合成)	TRL3	極低温推進剤長期保存技術研究 (戦略研究) H-IIA 上段高度化、HTV 技術試験衛星 (ETS7) ※今後、要素レベルでの研究開発とともに、再使用観測ロケットや基幹ロケットを用いた宇宙環境での技術実証、実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う
二液推進系エンジン	TRL5 (SLIM)	あかつき、SLIM でセラミックスラスタを実証 さらに軽量・大型・高性能化を目的としたセラミック/金属接合スラスタを研究開発 (戦略研究)
超小型衛星用高推力推進系	BBM 実験段階	水を推進剤とした統合推進系が、BBM 実験段階。一部 (水レジストジェット) は 2019 年以降実証予定で FM 開発中。

### 3.2.3. 電気推進式輸送機

中長期的にアルテミス計画にとって重要。実現性は民間企業でも負えるのでそれなりに高い。宇宙科学への波及効果も高いと思われる。惑星間航行技術(Gateway TF, 4.2.3-7): ラグジュ点を利用した、深宇宙港を利用する探査機の飛行実証。Gateway をプラットフォームとしてさらに深宇宙を目指すとしたら必要な、民間企業でも負える技術。

- a. 月圏での活動を支える基盤。他国への貢献大。
- b. ホールスラスタ、DESTINY+
- c. 他天体への電気推進式探査機による探査
- d. ホールスラスタの深宇宙適用 (表 3-5)、補給技術の蓄積

ドッキングそのものは国際ドッキングシステム標準に準拠するが (DSG-ADD-001 の"4.5 Robotic Arm"、"4.6 Airlock"、"5.2 Mechanisms"に記載あり)、ISAS がめざすより自在な深宇宙探査の観点では、(深宇宙探査、OTV の実現の両方の観点で) ドッキング・再補給は重要なキーワードとなる。 超遠方探査用の軽量ドッキングシステムを開発しておくことは、NASA も目指している将来の火星有人や火星サンプルリターンとの協働の観点で、有効と考えられる。

Gateway の運用には補給船が必須となる。この補給船については、国際宇宙ステーション(ISS)における HTV のような参加形態で無人補給機を担当することは当然ながら想定できる。補給船については、今後の議論の中で民間主導での開発が合理的であると結論づけられる可能性もあるが、そのような場合であっても、たとえば、電気推進エンジンやLIDAR 技術などで新規技術を開発・実証することを通して宇宙工学研究が貢献できる余地は大きい。

電気推進エンジンについては、既存技術の延長線として、

- 1) 推進剤補充による再使用型電気推進モジュールの実現
- 2) 高電圧作動による比推力向上
- 3) 複数台クラスタ化による高推力化

が有望であり、このうち、2)、3)については、JAXA ETS-9 のホールスラスタ開発成果を有効に活用できる。ただし、「補給」に関しては、無人での安全・高信頼性な補給は技術課題が多いという認識。米国との適切な距離を保ちながら、(深宇宙探査の視点で) 日本独自の補給技術を蓄積するのは有用と考える。

なお、地球から Gateway までの軌道/推進システムトレードオフについては、GTO からの軌道遷移で電気推進のメリットが出るはずは無く、ME0 から LE0 への打ち上げと1年近くをかけたの軌道上昇が化学推進のケースの2倍程度のペイロードを輸送可能な成立解。(例えば最近では *Cassady*, IEPC-2019-711)。小規模のペイロードを素早く月に届けられる化学推進の輸送機と、よりペイロード重量を重視した電気推進ベースの輸送機との双方を、日本が貢献する方法として議論すべきであろう。また、姿勢制御を電気推進(オール電化)というオプションも検討するべきだろう。

表 3-5 電気推進式輸送機の関連要素技術(「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より)

要素技術	開発・実証ステータス (TRL など)	実験・実証事例と実証された時期
ホールスラスタの深宇宙適用	TRL4	ETS9 向けホールスラスタを開発中

### 3.2.4. 通信・測位コンステレーション

超小型探査機に地球周辺同様の活動環境を提供するために必須の活動インフラであり、小型衛星でも可能、かつ民間企業でも負える技術。超小型探査機のためだけでなく、月面活動を支える意味でも中長期的に重要だと思われる。IP プロトコルをベースとした深宇宙通信(Gateway TF, p. 32, 4.2.3-5): 既存のプロトコルをベースとすることで、大幅なコストダウンが図れる。

- a. 月表面活動を支える基盤。民間導入に適している。他国への貢献大。
- b. 小型・超小型衛星技術、地球-Gateway 間の常時通信
- c. 他天体の(複数システムによる)総合探査ミッション
- d. 大容量通信技術およびヘルスマネジメント技術の発展、フォーメーションフライト技術の獲得(表 3-6)、宇宙機運用の自在性向上、我が国の地の利を生かしたミッション運用

DSG-ADD-001 の"5.7 Communications"に Gateway 通信システムは Ka 帯や光通信など高速通信をサポートし第 1 段階(表 3-1)で利用可能、DSG-RQMT-001 の"3.2.21 Utilization"に利用ダウンリンクのために少なくとも 5.15 Tbits/day を割り当てるとの記載がある。Gateway が常に地球と直接高速通信可能であるという重要な特徴を生かし、以下の新たな展開が考えられる。

(1) 宇宙機運用の自在性向上: わが国の地の利を活かし、国際的な地上局ネットワークの中で日本の局が重要な役割を担うことが期待される。一例として Artemis 1 ミッションの太平洋上への地球帰還時には日本の国内局で測位を行うことにより DSN(Deep Space Network)局(オーストラリア、ゴールドストーン)を補完して太平洋を取り囲む geometry で軌道決定を行うことが可能となり、軌道決定精度が大幅に向上することから、NASA からの要請で JAXA 内之浦局にて 3-way ドップラ受信による支援を行うことになった。その支援に対するバーターとして Artemis 1 の日本の相乗り衛星である OMOTENASHI/ EQUULEUS に対する DSN 支援を受けられることが決まっている。さらに既に将来の Artemis 2、3 ミッションに対する NASA からの支援要請も受けている。このように JAXA の深宇宙探査用地上局が DSN と協力することで、地球-月間通信システム利用も視野に入れた海外局支援を国内ミッションが受けられるようになり、我が国における今後の宇宙機運用の自在性向上へ繋げることが可能になる。その結果、将来の北半球、特にアジア圏でのサンプルリターンミッションの運用では日本が主導的に貢献出来るだろう。

(2) 探査機搭載通信系の小型化、測位サービスの構築: 地球と直接通信するよりも Gateway 経由の方が短距離となるので探査機搭載通信系を従来の超小型探査機よりも小型化できるメリットもある。そして測位サービスが月近傍で提供されていると、従来は直接地球と通信することで軌道決定(測位)していたことがより低リソースに実現できることになる。測位サービスの構築には、月周回に測位衛星群を配置することのほか、地球用 GNSS(Global Navigation Satellite System)の電波を活用することも考えられる。また、これまで深宇宙ミッションのみで利用されてきた DDOR(Delta Differential One-way Range)技術は、地上局の追跡時間が限られる超小型衛星では極めて有効であり、OMOTENASHI での利用が決まっている。将来、超小型衛星にもかかわらず数十 m 以下の着陸精度を目指すような野心的なミッションにおいて有効な技術になると考えられ、将来は DDOR 処理のリアルタイム化も実現する必要がある。また、月の裏面の危険な場所への着陸技術の実証を超小型探



査機で行う場合は技術的には難しいことに挑戦することになるため、その時に地上から通信回線が常時確保できていることによって異常時にタイムリーに対処し、仮に失敗したときにも探査機をロスする直前までテレメトリが得られるので次の機会に向けた教訓を最大限得ることが可能となる。

(1)、(2)により、月全球の超多点探査が進み、他の深宇宙探査ミッションが高度化・高頻度化すれば、今までとは質・量共に次元の異なるデータ受信を必要とするようになるため、地球一月間の大容量データ伝送の強化は一層重要になる。精密協調制御技術、編隊飛行する多数の宇宙機の運用技術においては、いずれも将来的に月面を利用してシステムを構築することがあるかも知れない。さらに、深宇宙探査そして地球圏の影響を受けない宇宙観測を定常的に実施するためには、地球一月圏の要所に拠点（軌道上ステーションや月面基地等）を建設・維持することが必要である。それらに係る物流とデータ伝送に係るコストを大幅に低減し支えるためには、地球一月圏を人類の経済活動圏内とする必要がある。そして、宇宙探査利用そして民間利用の増大に伴い十分な帯域幅の確保が今後難しくなるであろう Ka 帯など RF 通信に拘ることなく、光通信の利用も視野に入れるべきであろう。

**表 3-6 通信・測位の関連要素技術（「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より）**

要素技術	開発・実証ステータス (TRL など)	実験・実証事例と実証された時期
大容量通信技術	Ka 帯導入(はやぶさ 2)ターボ符号導入(MMO)	1. 周波数帯 X 帯⇒Ka 帯(GREAT 54m) 2. 多値変調化 QPSK⇒8 PSK⇒64 APSK 3. 高能率符号化(ターボ符号、LDPC 符号化) 4. 衛星間光通信 NASA 実績: Parker Solar Probe(0.6 m HGA、34 W TWTA Ka-band、167 kbps at 1AU distance) から、10 年後にあるべき伝送速度としては 0.5 Mbps/sec@1AU 程度の数字が挙げられる。
大容量データ伝送 (近地球やL1/2点の科学ミッションのKaバンド使用)	右欄参照	追跡ネットワーク分科会にて、JAXA 追跡ネットワークの整備構想が検討されており(2017年7月)、まず地球観測データダウンリンクの X 帯→Ka 帯化の為の地上局の整備が始まっている。また、科学衛星向けの Ka 帯対応化も構想として考えられ始めている。海外(NASA)では、2020年代の科学ミッションは Ka 帯が標準。またスペクトラム拡散通信のロングコードの使用などによる高信頼性、高データレート通信技術の開発も検討に値する。
精密協調制御技術	TRL3	衛星間のフォーメーションフライト制御系(粗制御系)は、レーザ干渉計を干渉可能範囲に保ちつつ、プルーフマスを可動範囲(0.1 mm)内に保つようにレーザ干渉計制御系(精制御系)と協調制御を行う必要がある。
編隊飛行する多数の宇宙機の運用技術	TRL4	多数の宇宙機間で相互に通信し、相対位置を計測し、宇宙機の健康状態を相互監視して、一部に異常が発生した場合には正常な宇宙機が安全に退避し、編隊を再構成する技術が必要となる。ETS-VII では 2 機の宇宙機間で相互通信、相対航法、安全監視と自動退避技術を実証した。複数宇宙機間の通信および測距技術は、準天頂衛星システムで 7 基の衛星間で研究開発を行っている。
ヘルスマネジメント技術(先進搭載センサ/ワイヤレスネットワーク等)	TRL3-5	要素レベルでの研究開発とともに、再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う

### 3.3. 月の全球探査における理学・工学項目の関係

3章で述べた月の全球探査に関する理学項目と工学項目との関係を図3-4に表す。今後月面での活動が活発化することを見越すと、月面での移動や人工物の敷設、建築などインフラ整備、資源利用、そして健全な長期宇宙滞在を可能にする応用研究と技術開発を展開する必要がある。従って、月面環境の適切な把握は、月における水の供給過程を明らかにするという理学的な目的の達成にとどまらず、機器の最適設計や有人活動の安全性などの意味でも不可欠となる。

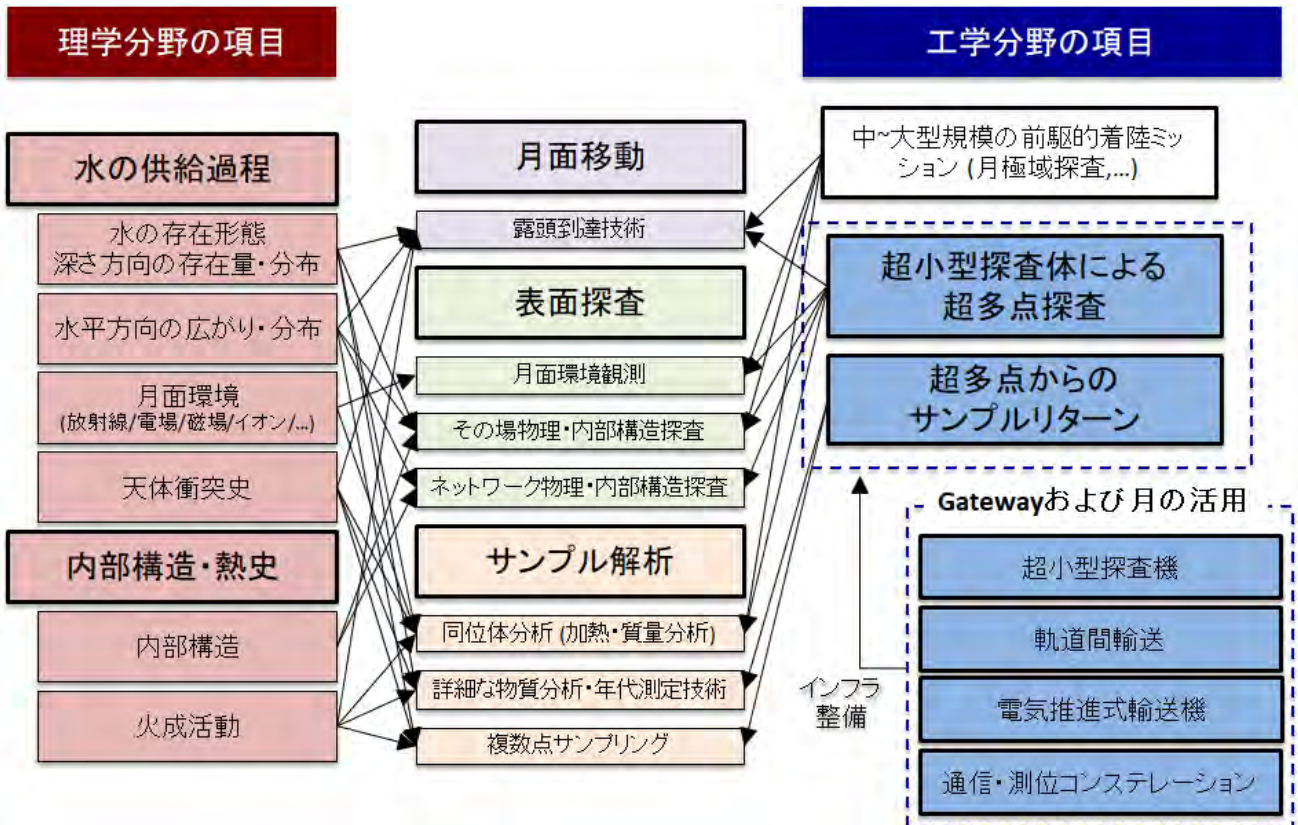


図3-4 月の全球探査に関する理学項目と工学項目の関係

## 4. 月、そして火星へ

今後の惑星科学における重要な科学目標の一つが、生命の存在条件に支配的な影響を及ぼす惑星表層環境の解明である(3.1項)。海をたたえる地球、海の消失により表層の乾燥化が進行した火星、氷が表層を覆う木星衛星ガニメデ・エウロパに見られるように、太陽系天体は様々な表層環境を保持している。今後の太陽系探査では、このように一見すると多様な惑星表層環境の底流にある科学的本質、すなわち汎惑星表層環境進化を正しく記述するための実証・観測データを取得することが求められる。

惑星表層環境進化の観点で太陽系天体を俯瞰した際、火星は惑星探査プログラムの中核をなす。火星は、大気・水環境を安定的に保持し、水の化学進化および分布に関する情報を提供する唯一の内惑星であり、また地球との比較対象として、汎惑星表層進化解明の鍵を握る。一方、水環境システムの初期条件である水の起源は、太陽系全体での物質循環過程の結果を反映するため、複数の太陽系天体を系統的に探査することでのみ正確な描像を得ることが可能となる。つまり、水の“受け手”である内惑星の重力天体(水・金・地・火・月)と、外惑星領域を起源とする水の“送り手”である小天体(小惑星・彗星)の両者からの知見を総合することが必須となる。我が国は既に、はやぶさ・はやぶさ2・DESTINY<sup>+</sup>(開発段階)を含む小天体探査プログラムを実行に移している。そこで、汎惑星表層環境進化の解明を科学目標とした戦略的な惑星探査プログラムでは、これら小天体探査と相補的なプログラムとして、火星を軸とした重力天体探査プログラムを遂行すべきと考える。

2000年代初頭まで、ほぼ米国により主導されてきた火星探査は、欧州宇宙機関(ESA)によるマーズ・エクスプレスの成功を受け、国際協調の時代に突入し、現在その流れはさらに加速しつつある。2020年には、ESA/NASA協働ミッションである火星サンプルリターン計画(MSR: Mars Sample Return)の第一弾として、MSR用のサンプルキャシュを搭載したローバが火星に向けて打ち上げられる予定である。また、同年には、ESA、中国、アラブ首長国連邦がそれぞれ独自の火星探査の打ち上げを予定している。このような、国際競争および国際協調の枠組みでの実施が検討されている火星サンプルリターン・火星有人探査(2030年代以降実施)に日本が主導的な役割を果たすためには、月・火星・小惑星といった天体ごとに探査目標・探査技術の切り分けを行うのではなく、獲得技術の展開が可能となるような中長期戦略に基づく探査プログラムが必須である。

現在、我が国は、はやぶさ探査で獲得した、世界唯一の小惑星サンプルリターン技術を生かし、はやぶさ2、そしてMMXに繋がる強力な小天体探査戦略を実施・計画している(図3-1)。MMXは、小天体である火星衛星(Phobos・Deimos)からのサンプルリターンという日本の優位性を生かし、火星重力圏への往還技術という、将来のMSR、そしてPhobosを拠点とする構想など有人探査を見据えた基幹技術へと発展させる使命を有する。また、2029年のサンプル帰還を計画しているMMXは、2030年代初頭のサンプル帰還を目指すMSRに先行することで、火星探査における我が国の科学的優位性も併せて担保することになる。科学・技術における優位性に加え、NASA・ESAを巻き込む形で進められているMMXでは、MSRに先んじて国際キュレーション・初期分析を実施する。つまり、MMXを通じ、我が国は、今後の世界の惑星探査の潮流である火星サンプルリターンにおいて、探査技術・科学・枠組みの3点においてイニシアティブを発揮することになる。

将来の火星探査では、サンプルリターンと共に生命探査が主要なテーマであり、その両者を可能



にするためには、着陸探査が必須といえる。MSR を共通の目標とした今後の火星着陸探査シリーズでは、着陸や試料放出の観点から、低緯度・低高度・低傾斜地に集中的に大型の着陸機を送ることとなる。しかしながら、火星は地球と比するほど地質学的多様性に富んだ惑星である。つまり、MSR から、非常に精密で高精度だが、一方で極めて偏った科学情報が取得される懸念がある。そこで、MSR とは相補的な探査計画、つまり超小型探査体による極域・非整地への超多点探査 (3.2.1 項) が必要となる。ただし、火星の地質学的多様性のみ強く依存し、地域地質学に落とし込まれるような“ニッチ”なサイエンスを目指すべきではないことは明白である。

そこで火星 TF では、日本の目指す戦略的惑星探査プログラムが解くべき課題の一つとして、地下環境に探査対象を絞り込んだ火星探査計画を提案している (火星 TF, 2.1) (図 4-1)。

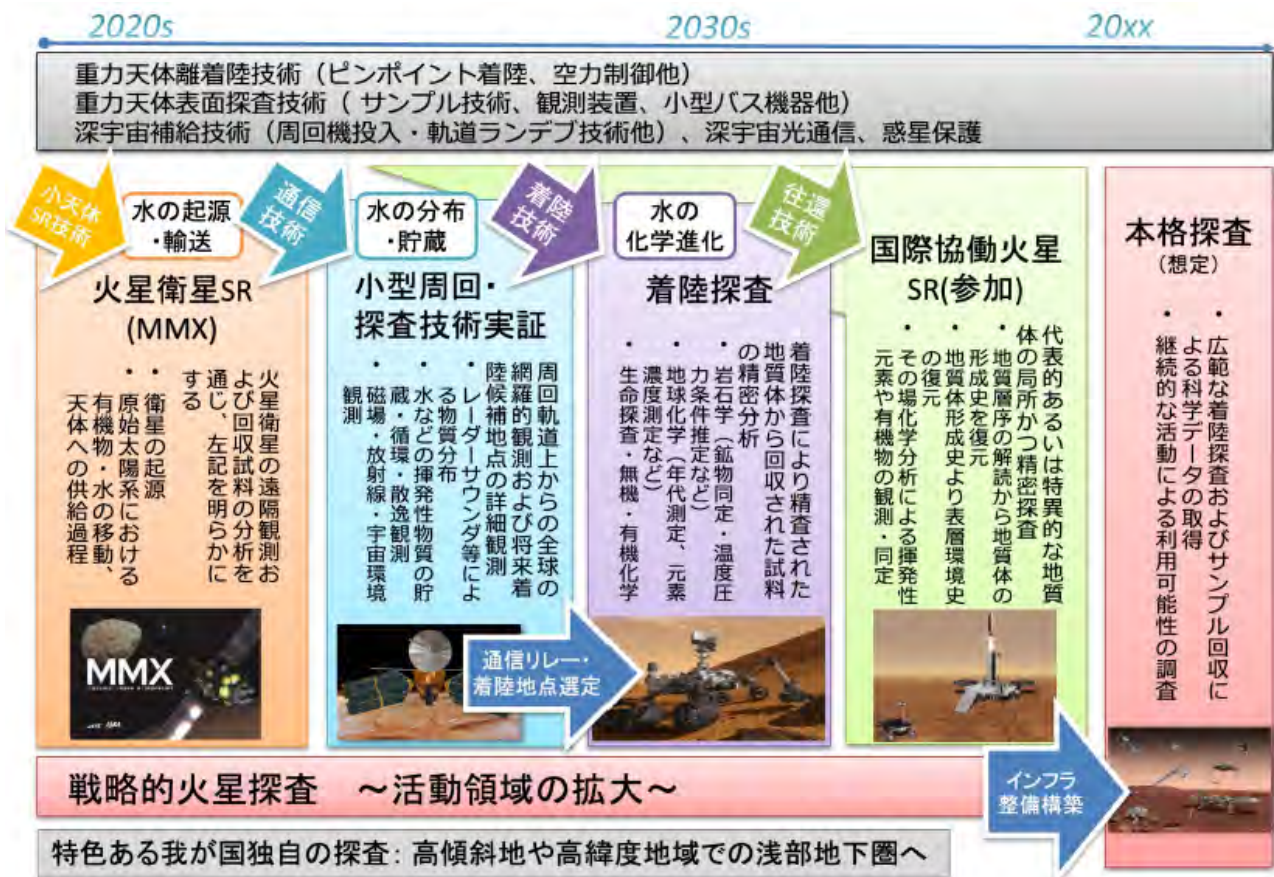


図 4-1 戦略的火星探査プログラム案の概略 (火星 TF)

この火星地下圏探査は、先行する欧米の火星探査や MSR では積極的に得ることを意図していない水環境システムに関する知見を提供するという点で、日本の独自性と国際貢献の両者を担保する。ここでは、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査」を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX」および、それに続く「小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画」の 3 つからなる、戦略的火星探査シリーズが提案されている。戦略的火星探査シリーズは、工学および観測装置の技術開発の観点において、月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけられるだけでなく、国際宇宙探査の視点で JAXA 全体の惑星探査ロードマップ

にも組み込まれている。つまり、(1) 2020年代中盤のMMXを端緒に、同時期に実施される月着陸探査(SLIM・月極域探査など)で獲得される重力天体着陸技術を生かしながら、(2) 2020年代後半から2030年代初頭にかけて、火星での着陸実証技術の獲得を目指した火星周回機探査を行い、(3) 2030年代の本格的火星着陸探査へと繋げていく。特に、本格的火星着陸探査で実施する地下水圏の探査においては、月の水資源探査で獲得される、傾斜地へのアクセス技術・走破技術(2.2.2項)や掘削・サンプリング技術(2.2.3項)の発展的利用が必須である。工学的には月探査で開発される軌道間輸送(3.2.2項)、電気推進式輸送機(3.2.3項)、通信・測位コンステレーション(3.2.4項)が火星探査実現への必要条件である。つまり、月探査とはそれ自身の価値に加え、火星探査を行うという境界条件のもと、その存在意義が担保されることとなる。

## 5. おわりに

1.3 節で述べた探査小委員会からの問いかけに対する答えは以下の通りである。

Q1) 月に水はあるのか？あるとしたら、どれくらい？どの深さに？

A1) **月に水はあるが、その形態・存在量・深さ方向の分布については不明。**

Q2) もしQ1に答えられないなら、どうすれば分かるか？

A2) **月面着陸探査による水の直接分析。**

Q3) 国際宇宙探査を通して、理学コミュニティが参加する科学的意義は何か？

A3) **ISASの太陽系科学探査と戦略を共有して一連の小天体探査計画や重力天体探査を補完し、相乗効果を上げること。**

月表層に水が存在することを示す科学データは数多く報告されているものの、その存在量や存在形態、存在する深さについてはよくわかっていない。そのような状況下で、国際宇宙探査の活動では資源としての水の探査の重要性が強調されてきた。しかしこれまで述べてきたように、水の探査が理学的に高い意義を持つことも明々白々である。特に太陽系外縁からの内惑星領域への水の輸送過程、月惑星表面での水の放出・移動・濃集過程、水に関わる月惑星内部進化過程の理解は、いかに惑星表面に生命生存可能環境が形成されるか、を紐解く上で必須であり、地球惑星科学、天文学、生命科学といった広範囲の学問分野を横断するテーマである。

その中で太陽系外縁からの水の供給過程とその歴史の理解は過去45億年間の天体衝突の地質記録を保持した月でしか実現しない科学テーマである。加えて、月面は大気がないため太陽風由来の水素原子が直接固体表面と相互作用しており、現在起こっている水供給の場を観測する上でも重要である。また、水に関わる月惑星内部進化過程の理解において、月はドライな系の代表であることも重要な視点である。以上のことから月探査では、**3.1 節**で挙げた科学テーマの中で特に、

**(1) 月への揮発性成分(特に水)の供給過程の調査**

**(2) 月内部進化の理解**

が優先度の高い科学テーマであろう。これらを実現するためには月面での地質・物質科学的なその場露頭調査、様々な物理探査による内部構造探査、水供給に関わるイオンや中性子、浮遊ダストなどの月面環境調査、サンプルリターンによる詳細な物質分析と年代決定が必須となってくる。

水探査の視点では、まずはリモートセンシングデータに基づいて選ばれた重要地点における水の存在形態と存在量、深さ分布を調査することが最優先であり、これを探査目標とする月極域探査において達成されることが期待される。その次のステップとして重要なのは、複数地点の探査による水分布の水平方向の分布の理解と、サンプルリターンによる詳細な物質科学的分析である。それらを実現するためには Gateway の利用を視野に入れた、

**(a) 超小型探査体による超多点探査**

**(b) 超多点からの小型サンプルリターン**

を可能とする超小型プローブ、そして小型探査機・サンプルリターン機の開発が重要である。これらの実現は、水の空間分布の理解だけでなく、ネットワーク観測が重要となってくる内部構造探査、複数サンプルの詳細物質分析・年代決定が必要な天体衝突史・火成活動史把握に対しても価値が高い。そして、(a)、(b)で培う3次元的天体表面探査技術は太陽系の進化や生命発生環境の把握の上でも

必要な火星における水を含む物質探査に繋がる。従って、(a)、(b)の開発は、技術的難易度の高い部分があるとしても、日本がアルテミス計画に参加することで科学技術の優位性を維持し、また新たに獲得していくためには避けて通れない。

さらに、それらの活動を支えるために Gateway および月を活用した超小型探査機、軌道間輸送、電気推進式輸送機、通信・測位コンステレーションなどインフラの高度化が必要である。この高度化による成果は、月探査に限らない以下の今後の科学・探査の構想に寄与することが期待される。

- ・超小型探査機： Gateway 経路による深宇宙での挑戦的かつ機動的な探査ミッションの実施
- ・軌道間輸送： 月の資源利用による深宇宙航行拠点の構築
- ・電気推進式輸送機： ホールスラストの深宇宙適用、補給技術の蓄積を通しての日本独自の惑星間航行技術の構築
- ・通信・測位コンステレーション：  
地球-月間高速通信システムを活用した、大容量通信技術の発展、フォーメーションフライト技術の獲得、我が国の地の利を生かしたミッション運用

一方で、火星以遠へのアクセスにおいて、Gateway 経路はエネルギー効率が良いかも知れない選択肢の 1 つとして保持するのは良いと思うが唯一の拠点というほど強い優位性がある訳では無い。従って、Gateway 経路のみに一本化するのにはリスクが大きいと考えられる。規模と目的の探査天体によっては Gateway を経由せずに行われるミッションも数多く残るであろう。地球と火星の間の何処かに拠点が必要とは思われるが、それは必ずしも月圏ではなくても良いし、月に水が無ければ火星大規模輸送が不可能というわけでもないだろう。民間レベルの火星大規模輸送を実現するためには技術開発に加えて経済規模を拡大することが必要で、地球-月圏全体を経済活動圏の内側にする必要があると言えよう。

日本として Gateway に投資するならば、それが日本のどのような深宇宙探査の将来シナリオに接続するのかを描く必要があるだろう。その将来シナリオにおける工学の貢献は、探査への近未来における直接的な貢献に加えて、アカデミアならびに民間の技術をいかに成熟させ発展させていくかという戦略も合わせて考えていく必要がある。

我が国は、はやぶさ探査で獲得した世界唯一の小惑星サンプルリターン技術を生かし、「はやぶさ 2」、そして MMX に繋がる強力な小天体探査戦略を実施・計画している。2029 年の火星衛星からのサンプル帰還を計画している MMX は将来の有人探査を見据えた基幹技術へと発展させ、2030 年代初頭のサンプル帰還を目指す MSR (ESA/NASA 協働による火星サンプルリターン計画) に先行することで我が国が宇宙探査において科学的優位性を獲得するに至る。3 章までの本検討の結果を踏まえて描いた、アカデミアが期待する今後の月資源探査のイメージを図 5-1 に示す。日本のアカデミアそして民間が協同してアルテミス計画に参加することで得る経験は、我が国が宇宙科学・探査において国際的なプレゼンスを高めるための「Gateway」となるであろう。

## 本検討の結論

米国提案による国際宇宙探査への日本の参画は、NASA の活動を補完するだけでなく、国内の強みと重点分野を伸ばしていくことになるべきということが重要なポイントである。従って、アカデミ



アがアルテミス計画への日本の参画を好機と捉えて科学を推進することを意識し、以下の新規項目提案を踏まえたさらなる検討が望ましいと考える。

- ① ピンポイント着陸技術を生かした月極域での科学探査（我が国の強みを活かす）
- ② 超小型探査体による超多点探査で得た月全球の各種データや技術の共有（我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画、人材育成）
- ③ 火星探査を見据えた 3 次元的天体表面探査技術の開発（我が国の技術獲得）
- ④ 電気推進式輸送機による Gateway およびその以遠への大量物資輸送の強化（我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画）
- ⑤ Gateway を契機とした、地球・月圏を人類の活動圏とする方策の実行（国際協力、民間の参画）

また、アルテミス計画のアセットの定義が進むにつれ、Gateway の他に、例えば、構想中の与圧ローバ（JAXA と民間との共同研究）や有人月離着陸機が科学にどの程度貢献しうるのか、逆に科学としてのメリットを高めるための仕様要求は何か、が今後の検討項目として考えられる。

最後に、本書は 4 つの TF の報告書、NASA および JAXA 資料を元に横断的な検討を行ったものであるが、時間的な制限もあり、必ずしも広範囲の科学コミュニティからの意見をまとめたものではない点に注意すべきである。今後、各方面の科学コミュニティの意見を定期的に反映するとともに、継続的に議論を行い、学際的な検討体制を構築していくことが重要である。

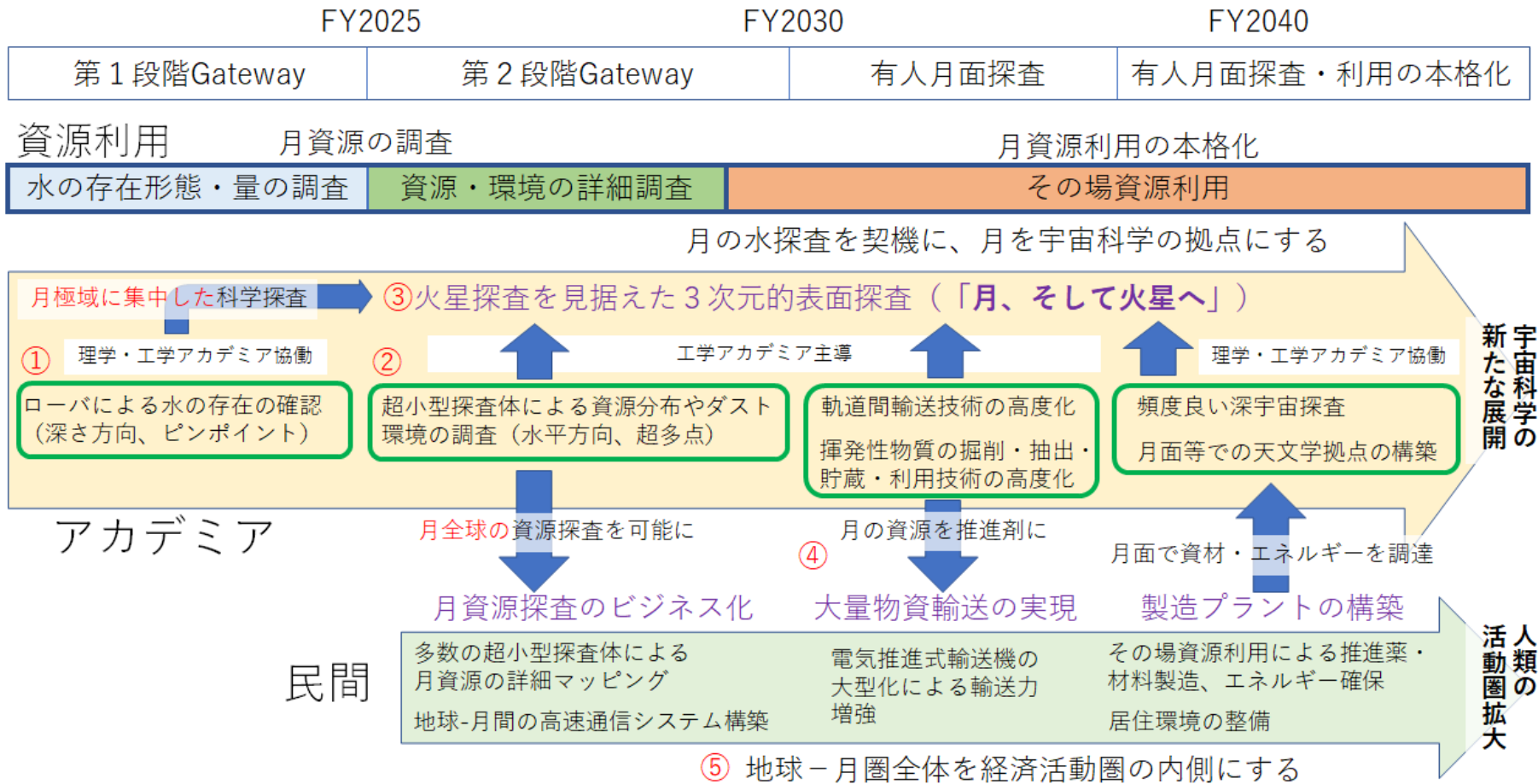


図5-1 アカデミアが期待する今後の月資源探査のイメージ

- ① ピンポイント着陸技術を生かした月極域での科学探査（我が国の強みを活かす）
- ② 超小型探査体による超多点探査で得た月全球の各種データや技術の共有（我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画、人材育成）
- ③ 火星探査を見据えた3次元的天体表面探査技術の開発（我が国の技術獲得）
- ④ 電気推進式輸送機による Gateway およびその以遠への大量物資輸送の強化（我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画）
- ⑤ Gateway を契機とした、地球・月圏を人類の活動圏とする方策の実行（国際協力、民間の参画）

## 6. 参考文献

査読対象とした資料は主に以下の5つ。

### 【NASA 資料】

- GP 10028 UTILIZATION CONCEPT OF OPERATIONS (CONOPS) FOR THE GATEWAY (Initial Release (DRAFT), 05/07/19)
- DSG-CONOP-001 Gateway Concept of Operations (Initial baseline (DRAFT), February 25, 2019)
- DSG-RQMT-001 GATEWAY SYSTEM REQUIREMENTS (Baseline, June 27, 2019)
- DSG-ADD-001 Architecture Definition Document (Initial baseline, Revision: IAC4 draft, August 2019)

### 【JAXA 資料】

- 国際宇宙探査シナリオ説明会資料 (2019年10月10日および16日開催)

参考資料は以下の通り。

### 【国際宇宙探査専門委員会で取りまとめた TF 報告書】

- 月極域探査 TF 報告書
- ヘラクレス TF 報告書
- 火星 TF 報告書
- Gateway TF 報告書

### 【JAXA 資料】

- 宇宙科学技術ロードマップ 初版 (特に、科学・探査分野で今想定しているミッション構想を元に必要技術を抽出し並べた「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」)

## 7. 補足資料： 重要観測項目と観測手段の一覧

3章の科学テーマ(1)～(9)に対応する重要観測項目を4つのTF報告書から抽出し、周回探査、表面探査、サンプルリターン、ネットワーク探査、月面基地利用という5つの観測手段で分類した。

- ・ 科学テーマの優先度：科学テーマ(1)と(2)は「(A)月でしか実現しない科学」に対応し、特に重要。
- ・ 観測手段の優先度：どの観測手段がどのようなスケジュールで実現するかは国際宇宙探査の全体計画のより決定される。

各々の重要観測項目は、「緊急に重要な項目」、「長期的に重要な項目」、「うまく行けば重要だが、成功の可否判断が難しい項目」に識別し、下記のように色分けした。

緊急に重要な項目	長期的に重要な項目	うまく行けば重要だが、成功の可否判断が難しい項目
----------	-----------	--------------------------

科学テーマと観測手段でまとめられたブロック毎に科学的優先度(①～⑥)を評価した。

今回の検討結果として追加した項目は、太い黒枠の中に赤字およびボールド体で記載した。

観測 手段 科学 テーマ	周回探査 (小型衛星、Gatewayにおける 科学)	表面探査(着陸機、ローバー)	サンプルリターン	ネットワーク探査	月面基地利用
<b>(A) 月でしか実現しない科学</b> (1) 月への揮発性成分(特に水)の供給過程の調査(3.1.1項)	①太陽地球惑星系科学では、これまでに数々の科学衛星に観測装置を搭載しておりそれによる科学的実績も国際的に認められている。その技術は世界最先端であり、すでにかぐや衛星観測でも実証されている。月周回軌道での長期安定観測を実現するためには、観測装置の小型化、省電力化、放射線耐性、低温耐性などの技術をさらに成熟させる必要があるものの、基本的には、以下の各計測は月環境に限らず他の国際宇宙探査にも資するものである。かぐや搭載機器の技術やノウハウを継承発展させることにより、以下のプラズマ電磁環境計測および地球惑星磁気圏、大気圏撮像ができる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 月面からの電場の高度分布を計測する電場計測装置、電波計測装置</li> <li>・ 磁気異常などにおける磁場分布を計測する磁場計測装置</li> <li>・ 低～高エネルギー粒子を計測するイオン・電子エネルギー分析装置</li> <li>・ 浮遊ダストの分布や運動を観測するダスト計測装置</li> <li>・ 水関連分子の供給や輸送を観測するイオン・中性粒子質量分析装置</li> <li>・ 地球磁気圏X線撮像装置・紫外撮像装置(Gateway TF、4.1.2.1、4.1.3.1)</li> </ul>	①月周辺への水の供給(月極域 TF、5.1.2、5.3)：月表層に存在する可能性のある水の起源を知り、地球・月周辺への外部からの水の供給過程や太陽系内における水など揮発性成分の移動に関する知見を得ることは太陽系の進化や生命発生環境の把握の上でも、火星における水を含む物質探査に繋がる重要な科学目標である。その達成にはローバによる移動技術および表面試料のその場観測技術、物理探査(レーダー、地震波など)、掘削(ポーリング)探査が重要となる。観測技術としてもその場での同位体測定や貴ガス分析のための加熱技術、質量分析技術の確立が必要。	①太陽系内衝突史の把握(月極域 TF、5.3.1、5.3.1)：後期重爆撃期の有無をはじめとし、太陽系内で起こったとされる天体衝突の歴史を月面のクレータの形成年代を把握するなどにより、太陽系形成による物質移動を把握することは太陽系形成の理解に重要。重要となるのはサンプルリターンによる年代測定。	<b>2.3.1. 超小型探査体による超多点探査</b> <b>2.3.2. 超多点からのサンプルリターン</b> <b>3.2.1. 超小型探査機</b> <b>4. 月、そして火星へ</b>	
	②微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体による月への揮発性供給機構の解明(Gateway TF、4.1.2.1-5)：昨今の月周回衛星観測や試料分析により大量揮発性成分が存在する可能と唆された。一方で、外来天体による供給量の大部分を担う微小隕石や彗星ダスト自体は月試料から見つかっていない。Gateway上での微小隕石・彗星ダスト収集と微小部分分析による月への揮発性供給機構の解明が必要である。	②月面での太陽風プラズマ環境の観測(月極域 TF、5.1.1)：太陽風プロトンダイナミクス、日陰での挙動、月面帯電環境を把握することは太陽系内での基礎プロセスを理解するだけでなく、今後の有人・無人の天体表面探査を実施する上でも重要。特に極域では太陽風プロトンが日陰領域へ侵入するプロセスが想定され、その理解により多領域でのプロセス理解につながる。観測としてその場におけるプラズマ粒子観測、中性外圏大気観測、重イオン分析が重要。	②LHB期の水の同定(月極域 TF、5.3.3)：サンプル分析によりLHB期の水が同定できれば供給源や水の供給時期の同定に繋がりが重要。また玄武岩、斜長岩など多種資料の分析により、Grand Tack期の水供給との区別が可能となる可能性もある。ただしLHB期の水が存在するのかどうか、どこにどのような形で存在するのかなど現状では不明点が多い。		
	③(火星 TF) 広域的な火星浅部地下水圏と下層・上層大気との相互作用	③その場年代測定による地層形成年代の把握(月極域 TF 5.2)：その場分析による年代測定により地殻・マントルの各地層の形成年代を把握することは、固体天体の進化過程の理解の基礎であり重要。サンプルリターン可能な試料には限りがあり、その場観測による年代測定が可能となれば、より効率てきな成果があげられる。			
	④月面衝突閃光観測から探る隕石の衝突頻度と超高速発光物理の解明(Gateway TF、4.1.2.1-4a)：EQUULEUSに提案済み。月震観測に重要。	④月環境調査(ヘラクレス TF、2.2.2)：温度や表面起伏、ボルダ存在率、放射線環境、表面の帯電状態、プラズマとの関連、太陽風の影響、微小隕石のフラックス、ダストの帯電や移動・付着の可能性、ダストのコヒージョン、放射線シールド性能などの調査は、異なる場所でひとつひとつ精密に実施			

観測 手段 科学 テーマ	周回探査 (小型衛星、Gatewayにおける 科学)	表面探査(着陸機、ローバー)	サンプルリターン	ネットワーク探査	月面基地利用
(2) 月内部進化 の理解 (3.1.2項)		⑤月面定点プラズマ観測(月極域 TF, 5.1): 月面定点で長期的にプラズマ観測により宇宙 天気 の 確 立 と 地 球 磁 気 圏 の ダイ ナ ミ ッ ク な 変 動 を 理 解 す る。	①月の進化(内部構造形成や水を含む分化) 過程の理解(月極域 TF, 5.1.5.2, 5.3):「月 周 辺 へ の 水 供 給 」(D11) お よ び 「 地 殻 形 成 史 ・ 内 部 構 造 の 把 握 」(D17) の 達 成 に は そ の 場 観 測 だ け で な く サ ン プ ル リ タ ー ン に よ る 詳 細 な 物 質 分 析 (特 に 玄 武 岩 や よ り pyroclastic deposit(深部からの噴出物)など)が有効で あり、それにより月形成時の水の挙動(供給 や蒸散)とその後の進化過程を把握するこ とができる。また放射性物質の濃集量を把握す ることにより月の熱履歴を明らかにするこ とができる。	①ネットワーク内部構造探査(ヘラクレス TF, 5.1.1) 地震探査を用いて、月の 内部構造を調べる場合には、月面に地震 計が分散して設置されていることが望 ましい。互いに離れた地点に複数台の地 震計を設置することで、月の内部構造の 正確な推定や、月震の震源決定が可能に なる。 <b>2.3.1. 超小型探査体による超多点探査</b> <b>2.3.2. 超多点からのサンプルリターン</b> <b>3.2.1. 超小型探査機</b> <b>4. 月、そして火星へ</b>	
(3) 地殻構成物 の多様性の 把握 (3.1.3項)		①地殻形成史・内部構造の把握(月極域 TF, 5.2):北極(裏側)と南極(南極エイトケン 盆地の影響を受けていない部分)周辺に月の 初期地殻らしき地域が認められ、この領域で の岩石の化学組成の測定を行うことで、月の 初期進化・内部構造の把握につながる情報が 得られる可能性が高い。これにより太陽系探 査の科学目標の大目標に掲げられている「太 陽系における生命生存可能環境の形成と進 化の探求」において重要な固体天体の形成と 進化の過程につながり重要。その達成にはロ ーバによる移動とその場観測が重要。 ②マグマ・オーシャンの歴史把握(ヘラクレス TF, 2.1.3): 高い空間分解能での地球化 学的・岩石学的な地殻物質の分析やその放射 年代測定、分析した試料の地質学的コンテク ストを明らかにするための露頭調査やアク ティブ地震計・地中レーダなどを用いた浅部 地下構造の把握が重要である。 ③熱進化の理解(ヘラクレス TF, 2.1.3): 岩 石学的手法によるマントルの水の含有量の 見積りと電磁探査や地震探査・熱流量測定を 組み合わせた探査	①複数地点サンプリング(ヘラクレス TF, 3.1.3) 岩石の化学組成の多様性や系統的変 化の特徴が有効な制約条件となるような研 究では、一個あたりの試料の重量を抑えてで も、多数の試料を採取した方が目的を達成し やすいことを考えると、むしろ(技術的、時 間的制約を鑑みずに述べるならば) 例えば 500g x 30 試料など1地点の採取量を減らし てもサンプル採取地点を増やすほうが、提 案されているサイエンスの実現はより確実 なものとなるのではないかと ②(火星 TF) 火星サンプルリターンの科学目 標は iMOST report を 参 照 < <a href="https://doi.org/10.1111/maps.13242">https://doi.org/10.1111/maps.13242</a> >	<b>2.3.1. 超小型探査体による超多点探査</b> <b>2.3.2. 超多点からのサンプルリターン</b> <b>3.2.1. 超小型探査機</b> <b>4. 月、そして火星へ</b>	
(4) 衝突とレゴ リスプロセス (3.1.4項)				<b>2.3.1. 超小型探査体による超多点探査</b> <b>2.3.2. 超多点からのサンプルリターン</b> <b>3.2.1. 超小型探査機</b> <b>4. 月、そして火星へ</b>	①月面活動の準備(ヘラクレス TF, 2.2.3): レゴリスの特性を理解す ることが必須となる。ほかにも表 面ダスト粒子の挙動や人工物への 付着、掘削や土砂採取、人工物との 相互作用やスラスタによる巻き上 げ、越夜の電力維持など

⑧ 月でこそ高い成果が実現する科学

観測 手段 科学 テーマ	周回探査 (小型衛星、Gatewayにおける 科学)	表面探査(着陸機、ローバー)	サンプルリターン	ネットワーク探査	月面基地利用		
(5) 浅い地下構 造の探査 (3.1.5項)	①着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンによる月表層地下構造・層序の広域探査(Gateway TF, 4.1.2.1-2b): 月資源利用のための基礎調査。レーダサウンダの小型化が必要。	①月表層・浅地下の含水鉱物 関連質有機物の検出(Gateway TF, 4.1.2.1-2c): 小型分光器による近赤外観測。月資源利用のための基礎調査。	①(火星 TF) 火星衛星サンプルリターンの科学目標は Usui et al. (SSR, submitted) を参照	2.3.1. 超小型探査体による超多点探査 2.3.2. 超多点からのサンプルリターン 3.2.1. 超小型探査機 4. 月、そして火星へ			
		②その場内部構造探査(ヘラクレス TF, 5.1.1): アクティブ地震探査をローバが月面を走り回りながら実施することで、広範囲の表層構造(深度数 km くらいまで)を推定できる。月は波動減衰が小さいため、着陸船に設置した加振源とローバに設置した地震計を利用することで、広い範囲の表層構造を推定できる可能性がある。					
		③月表層地下構造・層序の広域探査(Gateway TF, 4.1.2.1-2a): 月資源利用のための基礎調査。					
		④(火星 TF) 局所領域での詳細な浅部地下水圏の環境(水質など)の復元と生命存在可能性の評価					
(6) 他の科学分 野と連携し それら研究 において必 要とされる 諸技術の獲 得・実証 (3.1.6項)	①IP プロトコルをベースとした深宇宙通信(Gateway TF, 4.2.3-5): 既存のプロトコル(IP プロトコル)をベースとすることで、大幅なコストダウン。			3.2.4. 通信・測位コンステレーション			
		①露頭到達技術(ヘラクレス TF, 5.1.2): ピンポイント着陸技術によって達成される場合や、ローバの長距離走行能力や、越夜する技術、さらには不整地や急坂を走行する技術によって達成される場合もある。露頭に到着してからは、その場でより多くの情報を得るための、岩石切断・研磨技術や、場合によっては地面を掘削するポーリング技術が必要である。	①(火星 TF) 火星固有の表層環境(ダスト等)における越夜・越冬技術(サイエン目標ではないが必須技術)	2.3.1. 超小型探査体による超多点探査 2.3.2. 超多点からのサンプルリターン 3.2.1. 超小型探査機 4. 月、そして火星へ	①月面レゴリスを使用したレーザ推進系(Gateway TF, 4.2.3-1): 月面に普遍的存在するレゴリスを利用し、それにレーザービームを照射しアブレーションすることによって推進力を得る。		
	②Gateway から超小型機を月面に向けて放出する機構(Gateway TF, 4.2.3-6): チャレンジで高度なミッションへと向けた布石。	②傾斜地(>30度)へのアクセス技術および~1m程度までの掘削に基づく、局所領域における浅部地下構造(地下水圏・凍土層の分布など)					②マストドライバによる月資源の軌道へ運搬(Gateway TF, 4.2.3-2): 月面そのものへのアクセスが不要な探査機で月面物質を推薬に利用するための技術。建設コストの見積もりが必要。
	③(火星 TF) 大気のある天体への EDL(サイエン目標ではないが必須技術)	③(火星 TF) 上記の月での技術開発の転用					
④惑星間航行技術(Gateway TF, 4.2.3-7): ラグジュ点を利用した深宇宙港を利用する探査機の飛行実証。							
				3.2.2. 軌道間輸送 3.2.3. 電気推進式輸送機			



観測手段 科学テーマ	周回探査 (小型衛星、Gatewayにおける科学)	表面探査(着陸機、ローバー)	サンプルリターン	ネットワーク探査	月面基地利用
(7) 惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発(3.1.7項)	①惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発(Gateway TF, 4.3.4.3-B): 月・火星で採集された資料をGateway内、および地球の隔離施設内で分析を行い、地球からのGatewayまでの資材の運搬やGateway内での準備、探査機による月からのサンプリング時のフォワードコンタミネーションを評価する。		①サンプリングのコンタミネーション(ヘラクレス TF, 3.1.2): 地球帰還後の揮発性物質のコンタミネーション(試料汚染)をいかにして最小化するかが鍵となる。その観点からも、揮発性成分の分析に関しては、その場分析(とりわけ定量分析)を視野に入れたローバ搭載機器開発と関連して、将来の探査計画を踏まえた上で検討するべきである。サンプルリターンの意義をより明確にするためには、Gateway内や地球帰還後のコンタミネーションを、揮発性成分に限らず最小限に抑えることは重要である。サンプル採取においては多種の岩石が混じらないようにサンプルごとに隔離すること、採取後は温度変化が生じないように保温すること、高密封状態で運搬を行うことが求められる。これらた、Gatewayに限らず重要な技術である。 ②(火星TF) 火星・火星衛星サンプルリターンに向けた惑星検疫 ③火星サンプルリターン分析技術のうち、日本の強みを精査し、Sample receiving facilityへ搬入	2.3.1. 超小型探査体による超多点探査 2.3.2. 超多点からのサンプルリターン 3.2.1. 超小型探査機 4. 月、そして火星へ	①月面分析拠点の構築(月極域 TF, 5.4): 長期的な視点にたった探査の実現に向けて、月面に越夜可能な着陸機や多目的ローバを設置するなど、長期利用可能なインフラを構築することが将来の探査にとって重要である。
(8) 月資源利用可能性の把握(3.1.8項)	①軟ガンマ線による活動銀河活動銀河活動銀河核やブラックホール、重力波対応天体の観測(Gateway TF, 4.1.2.2-1): LEOに比べて低い放射化、安定したバックグラウンドの活用。 ②X線干渉計 MIXIM(Gateway TF, 4.1.2.2-4): 高解像度のX線撮像によりそれにより活動銀河核の超巨大ブラックホール周辺のトラス構造などの観測研究が可能になる。X線干渉計の技術は、まだ地上における原理実証段階(4.1.3.2)。	①資源探査(ヘラクレス TF, 2.2.1): 揮発性物質は、ライフサポートや燃料、還元剤の獲得などの意味で重要である。... 太陽風のインプラネーション起源や彗星起源などのシナリオを考えても、濃度が場所によって異なる可能性が高く、複数地点での観測が極めて重要 ②宇宙再電離の解明に向けた21 cm輝線観測(Gateway TF, 4.1.2.2-5): 地球上では大気の影響により難しい低周波電波観測を月の裏側で実現する。		2.3.1. 超小型探査体による超多点探査 2.3.2. 超多点からのサンプルリターン 3.2.1. 超小型探査機 4. 月、そして火星へ  3.2.4. 通信・測位コンステレーション	①月面資源開発(Gateway TF, 4.4.3.1-3): 月レゴリスからの酸素・水素および水の製造技術、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬プロセス ②レゴリスを用いたその場製造(3Dプリンタ)(Gateway TF, 4.4.3.1-1): 月レゴリスの静電浮遊熱物性評価、レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション、宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化 ③光格子時計による共通時間標準(Gateway TF, 4.4.3.1-6): 超高精度周波数標準を用いた月面重力アナマリ観測および資源マッピング

観測 手段 科学 テーマ	周回探査 (小型衛星、Gatewayにおける 科学)	表面探査(着陸機、ローバー)	サンプルリターン	ネットワーク探査	月面基地利用
(9) 有人月探査 への準備 (3.1.9項)					①基礎物理 (Gateway TF, 4.4.2.1-6) : プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象、プラズマ-レゴリス相互作用による微粒子制御
	①微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明 (Gateway TF, 4.3.4.3-A) : 粒子の細かい月や火星のレゴリス中でのゆっくりした水分移動に関して解析し、植物栽培等の基礎知見を得る。				②月面エネルギー開発 (Gateway TF, 4.4.3.1-2, 4.4.2.1-4) : ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム、水素を利用した燃料循環型燃焼・発電器、火災安全プロトコル
		①(火星 TF) 火星生命の検出および構造解析			③宇宙生命科学 (Gateway TF, 4.4.3.3-3, 4.4.3.3-4) : 宇宙放射線・紫外線の生物影響、微小重力・低重力との複合的生物影響、行動・筋萎縮・骨代謝等の生体変化
					④宇宙医学・健康科学 (Gateway TF, 4.4.2.3-4) : 内耳・深部知覚等平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策、有人活動を行うための船外活動、深宇宙有人探査・宇宙居住のための障害・ストレス対抗策
					⑤生態工学 (Gateway TF, 4.4.3.2-1, 4.4.3.2-2, 4.4.3.2-3) : 植物栽培・宇宙植物工場の実証試験、低重力下における植物栽培の最適化、月面レゴリスなど地球由来以外の物質が生物に及ぼす影響
					⑥前生物的有機物合成 (Gateway TF, 4.3.2.1) : 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験。地球上、あるいはLEOでは不可能な実験であり、かつ、一定期間内に結果が得られるように目的が明確である必要あり