

水探査を含めた国際宇宙探査，工学からの期待

稲富裕光 (ISAS)、石上玄也 (慶応大)、川勝康弘 (ISAS)、小泉宏之 (東京大)、
小林泰三 (立命館大)、後藤健、竹内央、津田雄一、徳留真一郎 (ISAS)、永田晴紀 (北海道大)、
福田盛介、船木一幸、船瀬龍 (ISAS)、山崎直子 (宇宙飛行士)、渡辺隆行 (九州大)

1. 背景

アルテミス計画は月面への有人着陸に関するすべてのプログラムの総体であり、Gateway 計画、SLS 計画、Orion 計画、Human lander 計画、CLPS 計画、その他の月面活動を包含した計画を指す。NASA は、月面探査だけでなく 2030 年代に火星有人着陸を目標に掲げ、それに向けて月面での持続的な活動を通じて、必要な技術を獲得しようとしている。

2019 年 10 月の宇宙開発戦略本部決定「米国提案による国際宇宙探査（アルテミス計画）への日本の参画方針」においては、当面の協力項目として以下の 4 点を挙げつつも、「今後の宇宙基本計画の改定に向けた検討において、それ以降の本計画への参画のあり方も含め、我が国の科学探査を含む国際宇宙探査全体のあり方を検討・整理し、翌年以降の宇宙基本計画工程表に反映させる」とある。

- ① 第 1 段階 Gateway への我が国が強みを有する技術・機器の提供
- ② HTV-X、H3 による Gateway への物資・燃料補給
- ③ 着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術の共有
- ④ 月面探査を支える移動手段の開発

これを踏まえて、基本政策部会で進められている宇宙基本計画の改定に間に合うよう、日本の参画方針の協力項目に科学探査の立場を反映させることになる。それ故、これまでの科学探査の実績や今後の方向に照らし、これ以外にアルテミス計画に貢献できる項目があるのであれば宇宙基本計画の改定に埋め込んでおくことは急務である。

2. 国際宇宙探査への日本の参加について

前述の宇宙開発戦略本部決定に先立ち、宇宙政策委員会 宇宙産業・科学技術基盤部会 宇宙科学・探査小委員会から宇宙科学研究所と科学コミュニティに対して、月面の水が本当に使えるのか、どのように使えるのか、新たに米国が提案をしてきたアルテミス計画に日本がどのように関わっていくかについて、同委員会の判断に資するようにレビューすることが求められた。これにタイムリーに答えるべく、国際宇宙探査専門委員会の下に委員会内外の有志による理学および工学検討チームが組織され、係る検討を行った。工学検討チームでは 4 つのタスクフォース（月極域探査 TF、ヘラクレス TF、火星 TF、Gateway TF）の報告書、NASA および JAXA 資料を基に理学検討チームと情報共有しながら、理学の要素技術、そして将来の宇宙科学の展開・人類活動圏の拡大に繋がる工学技術を検討した。

学界諸賢においては、このタイミングで「国際宇宙探査への日本の参加」をキーワードとして、より組織的な対応を開始していくべきと考える。よって、本講演では、学術コミュニティが国際宇宙探査の活動にどのように参加し機会を活用するのかを今後議論して頂く一助として、これまでの理学・工学検討チームの検討結果を踏まえた上で特に工学コミュニティからの期待を中心にして話題提供するものである。

水探査を含めた国際宇宙探査，工学からの期待

稲富裕光 (ISAS), 石上玄也 (慶応大), 川勝康弘 (ISAS), 小泉宏之 (東京大),
小林泰三 (立命館大), 後藤健 (ISAS), 竹内央 (ISAS), 津田雄一 (ISAS),
徳留真一郎 (ISAS), 永田晴紀 (北海道大), 福田盛介 (ISAS), 船木一幸 (ISAS),
船瀬龍 (ISAS), 山崎直子 (宇宙飛行士), 渡辺隆行 (九州大)

月の水（氷）探査

ステップ1：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での**水の存在形態と存在量、深さ分布を調査する**。月極域探査において達成されることが期待される。（**月極域に集中した科学探査**）

ステップ2：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**。（**月全球の資源探査**）

これらを実現するためには、Gatewayの利用を視野に入れた、

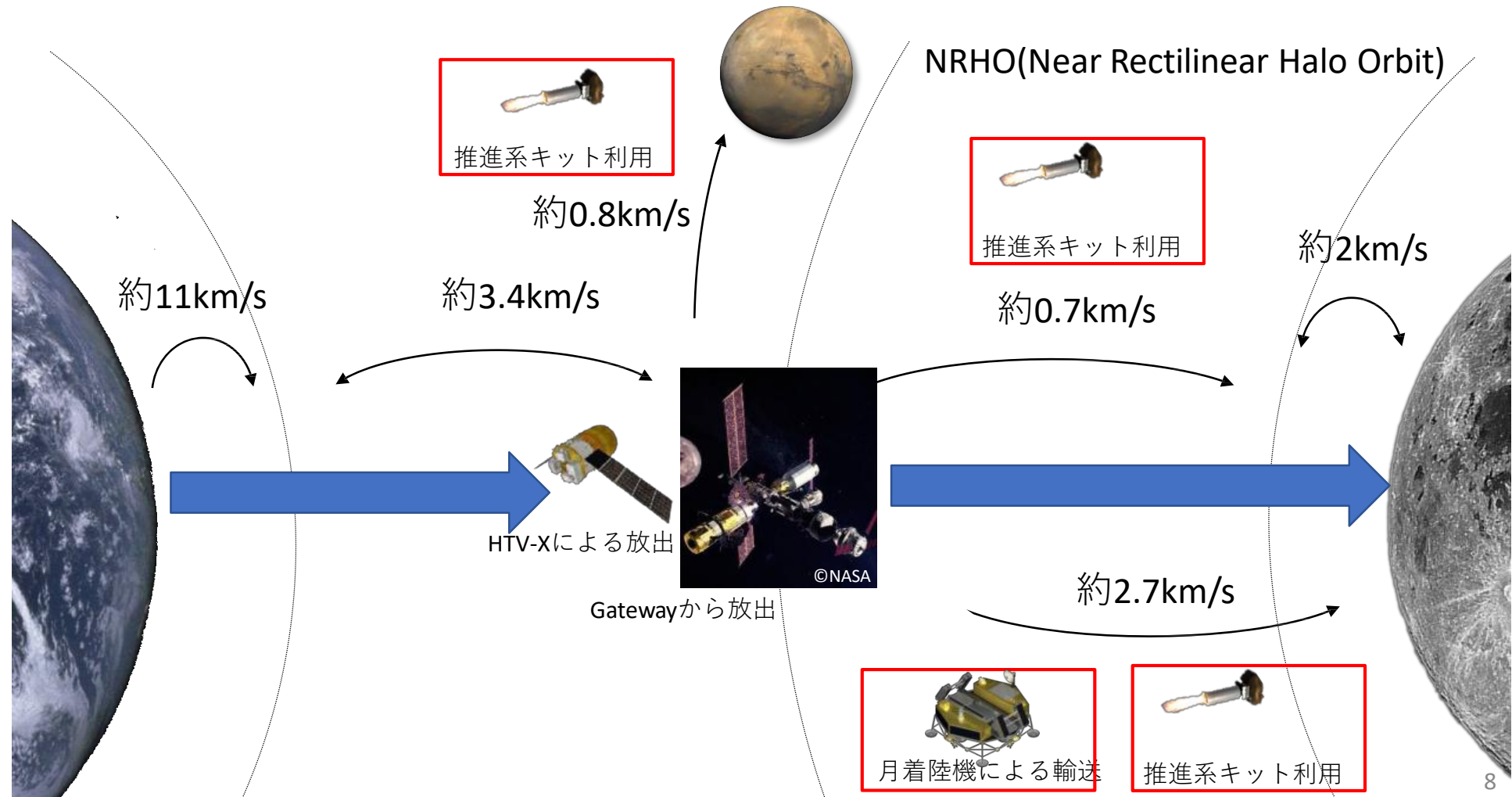
(a) 超小型探査体による超多点探査

(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。

Gateway軌道から超小型探査機の放出 (JAXA検討例)

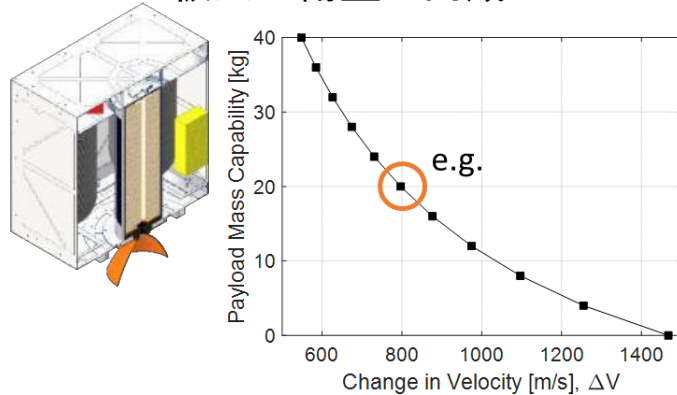
- Gatewayの軌道 (NRHO) は、月周回軌道、火星遷移軌道への共通の中継点となる。
- 月面着陸の必要増速量は、NRHOと月低軌道周回とも2km/sを超える。



超小型探査機用推進系キット構想 (JAXA検討例)

- GatewayやHTV-Xから、月周回軌道、火星遷移軌道へ遷移するのは、全体が遷移するよりも、別途開発する推進系キットを利用して超小型探査機のみが遷移することが効率的。
- 月面へは、有人着陸機か中型月着陸機の相乗りが適切であるが、OMOTENASHIの推進系も利用可能である。

自己加圧N₂Oキックモーターを
50 cm級人工衛星に内蔵



設計例

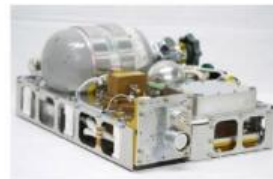
総質量: 50 kg 最高推力: 470 N

ペイロード質量: 20 kg ΔV: 800 m/s

提供: 北海道大学

ハイブリッド推進系

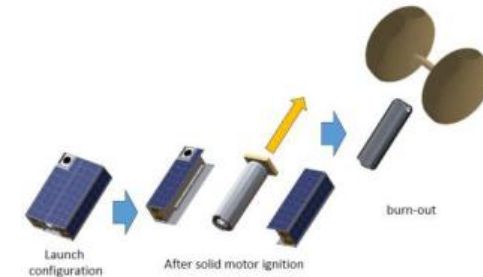
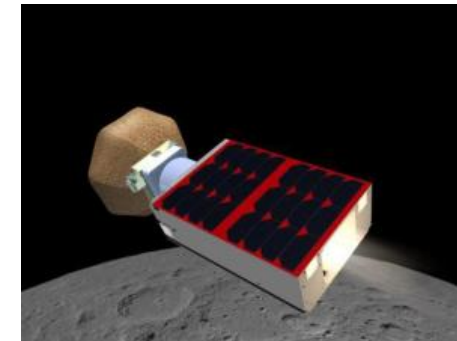
項目	値
推進系総重量[kg]	<10
うち、推進剤(キセノン)搭載重量[kg]	2.5
イオンスラスタ 比推力[s]	1000
イオンスラスタ 推力[N]	300×10^{-6}
コールドガスジェット 比推力[s]	24.5
コールドガスジェット 推力[N]	22×10^{-3}



ほどよし衛星搭載の小型イオン推進システム“MIPS”
(PROCYON推進系の開発のベースとなった)

提供: 東京大学

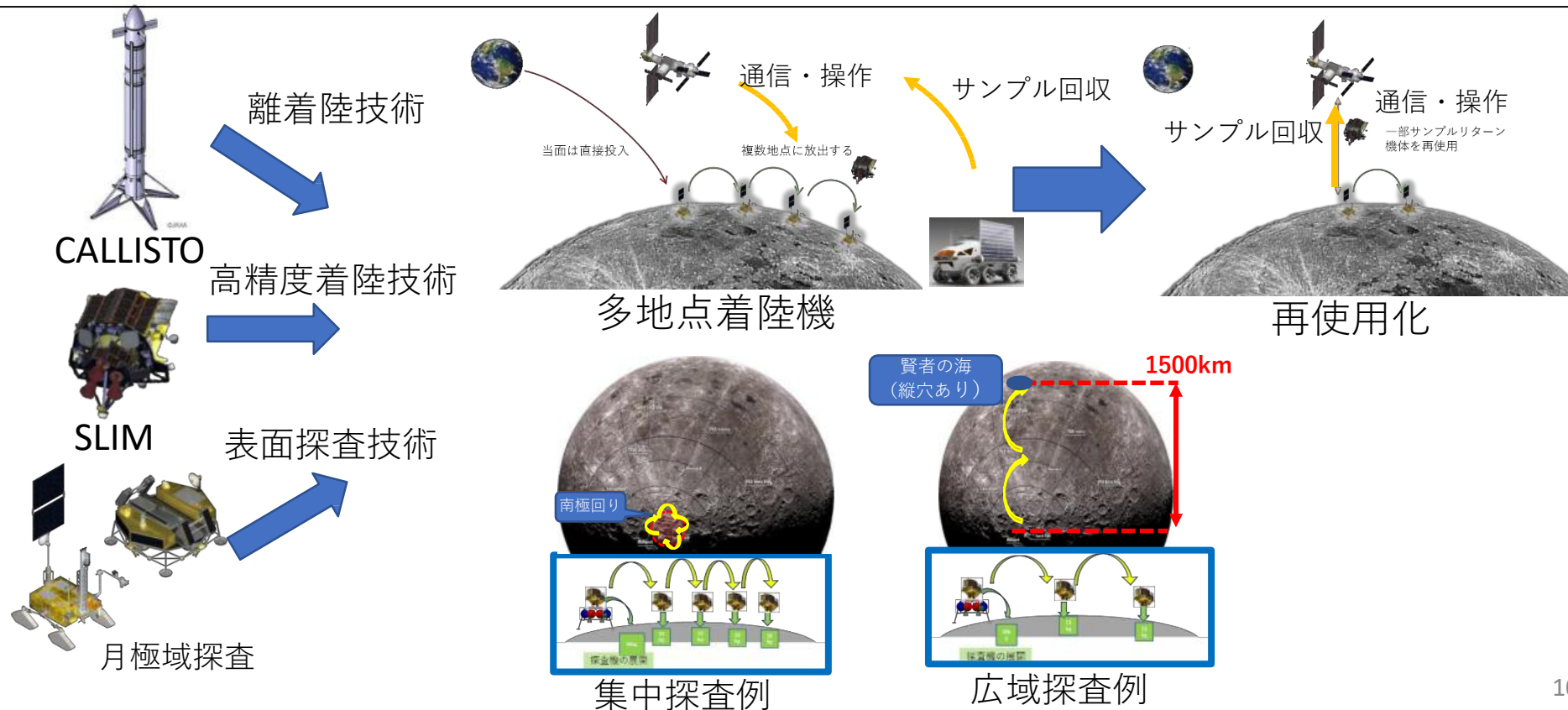
電気推進系



固体モータ
OMOTENASHIベース

ホッパーを用いた超小型探査機の広域展開（JAXA検討例）

- SLIMと月極域探査ミッション等の技術、HERACLESのシステム検討をもとに、中型の着陸機をホッパーにより、多地点での探査を可能とする。
- Gatewayによる通信や操作により、有効な探査が可能となるとともに、サンプル回収などは有人ローバとの連携で早期に実現できる。H3打上げ前提で、南極周辺に4, 5か所、もしくは1500km程度広域に2,3か所の探査が可能となる見通し。
- 定常的に活用する見通しができれば、サービス調達なども可能。



月全球探査における理学と工学の重要テーマ

理学分野の項目

工学分野の項目



水の供給過程

水の存在形態
深さ方向の存在量・分布

水平方向の広がり・分布

月面環境
(放射線/電場/磁場/イオン/...)

天体衝突史

内部構造・熱史

内部構造

火成活動



月面移動

露頭到達技術

表面探査

月面環境観測

その場物理・内部構造探査

ネットワーク物理・内部構造探査

サンプル解析

同位体分析 (加熱・質量分析)

詳細な物質分析・年代測定技術

複数点サンプリング

中~大型規模の前駆的着陸ミッション (月極域探査,...)

超小型探査体による
超多点探査

超多点からの
サンプルリターン

Gatewayおよび月の活用

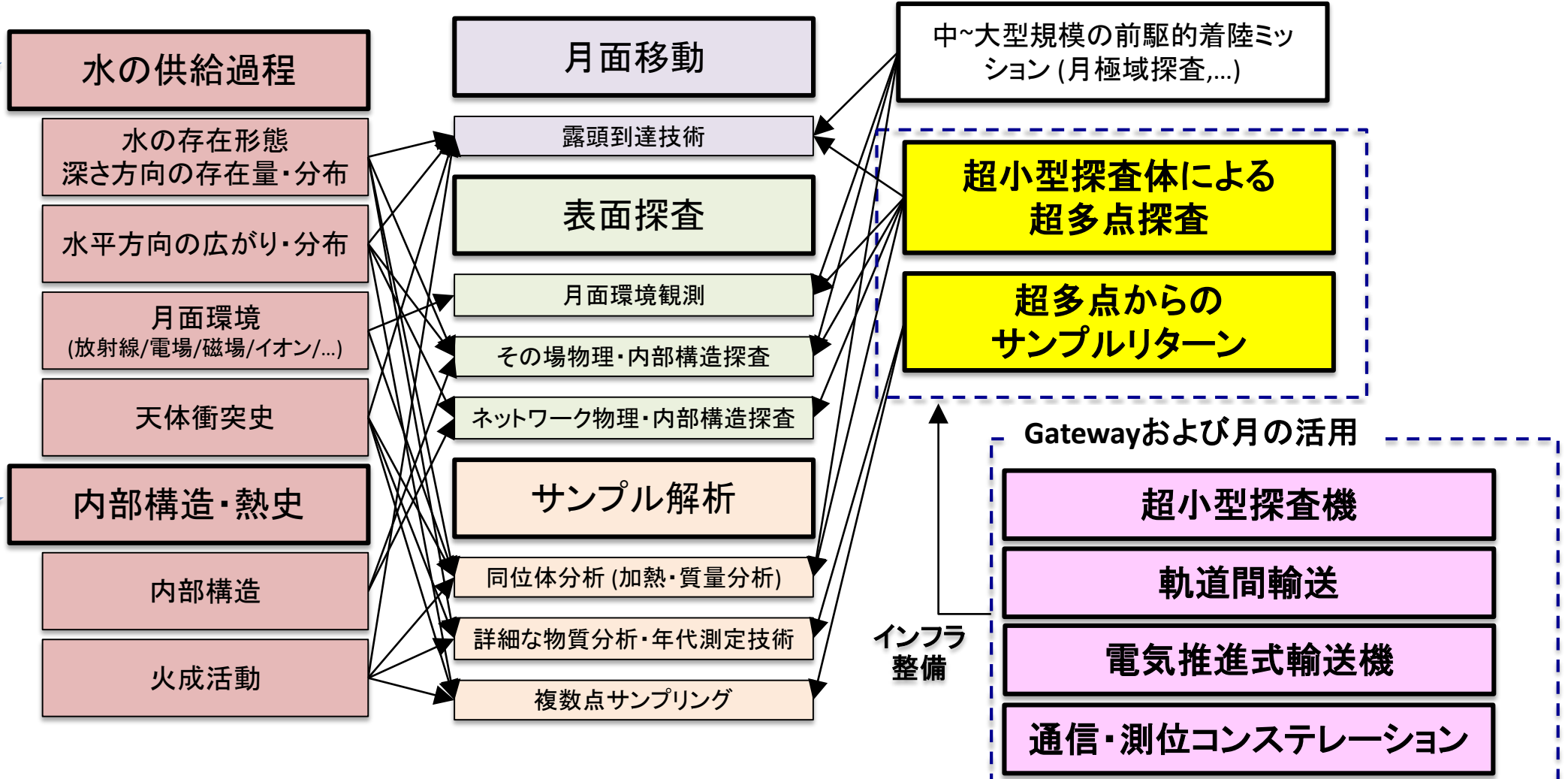
超小型探査機

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

インフラ
整備



Gatewayおよび月を活用した宇宙インフラの高度化

月探査に限らない今後の科学・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**

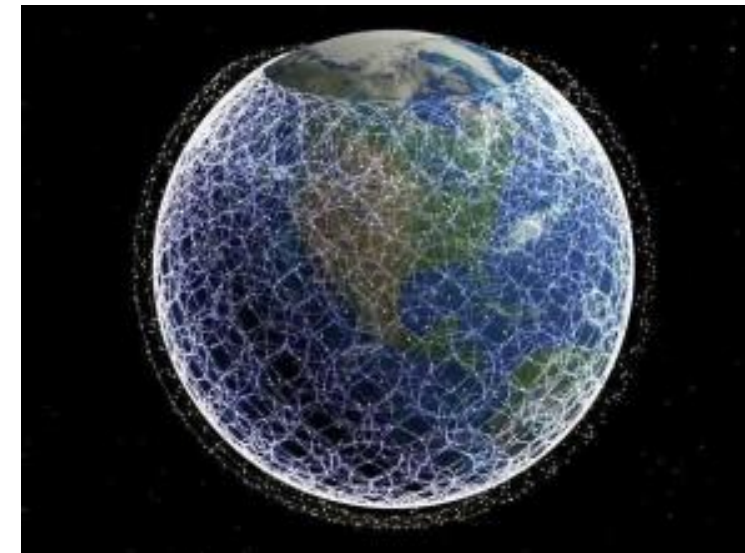
月の資源利用による深宇宙航行拠点の構築

- **電気推進式輸送機**

ホールスラスタの深宇宙適用、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**

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



引用：<https://www.businessinsider.com/spacex-starlink-satellite-ufo-terminals-how-network-works-2020-1>

軌道間輸送

- 火星以遠へのアクセスにおいて、Gateway経由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。
- 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。
- 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。
- 工学の実証の場としてGatewayを利用する、また「深宇宙OTV」構想等において月およびその近傍を推進薬の補給拠点にする、という発想もあるだろう。
- 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。

月資源利用に係るアカデミアおよび民間の方向性のイメージ（私見）

FY2025

FY2030

FY2040

Gateway

有人月面探査

有人月面探査・利用の本格化

月資源・環境の調査

その場資源利用の本格化

アカデミア

月を宇宙科学の拠点にする

月極域に集中した
科学探査

ローバによる水の存在
の確認（深さ方向、ピ
ンポイント）

超小型探査体による資源
分布やダスト環境の調査
（水平方向、超多点）

軌道間輸送技術の高度化
揮発性物質の掘削・抽出・
貯蔵・利用技術の高度化

頻度良い深宇宙探査
月面天文台等、観測
拠点の構築

月全球の資源探査

④ 水を推進薬に

民間

月資源探査のビジネス化

大量物資輸送の実現

製造プラントの構築
居住環境の整備

⑤ 地球－月圏全体を経済活動圏の内側にする

展開
宇宙科学の新たな

活動圏拡大
人類の

アルテミス計画への日本の参画にあたり

- 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**獲得する分野**を伸ばしていくことになるべき。
 - アルテミス計画への日本の参画をアカデミアが好機と捉えて科学を推進することを意識し、以下の項目を踏まえたさらなる検討が必要であろう。
- 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
 - 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
 - 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
 - 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
 - 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

月、そして火星へ

- 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。**
- 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。**

探査の将来を考える勉強会(2019年)

回	日時	演題名
1	8月30日	ムーンブリッジのゴールを定義してみる
		宇宙での長期滞在:宇宙放射線とガン死リスク
2	9月18日	宇宙に滞在する人間の健康管理
		宇宙でのその場資源利用と水素エネルギー社会構築活動の接点
3	10月4日	月面ラボを拠点としたその場資源利用
		宇宙資源ビジネスの創出とエコシステムの構築
4	10月28日	宇宙での食料生産・物質循環・健康維持機能を担う植物システムの構築
5	11月11日	1000人の月面社会を運用する
		宇宙に社会を作る:新しい居住の姿
		長期宇宙滞在時の精神心理的課題と対策について
6	11月26日	閉鎖環境の暮らしと人間社会
		宇宙長期滞在の時代と法的課題
		月探査の将来を考えるにあたっての科学的知見

第3回ムーンビレッジ国際ワークショップシンポジウム

- 第1回(Strasbourg、2017年)、第2回(Los Angeles、2018年)に続いて、第3回は、2019年に東京理科大(12月5、6日)と京都大学(12月8日)を会場として開催された。
- 参加者は当初の予想を大幅に上回り230名を超え、そのうち海外からの参加は56名であった。
 - 東京会合: 56件の講演(企画、一般講演、公募、分科会)
 - 京都会場: 14件の講演、27件のポスター発表(教育と人材育成およびパブリックアウトリーチのテーマ)

(詳細は <http://www.jasma.info/mv2019/> を参照のこと。)