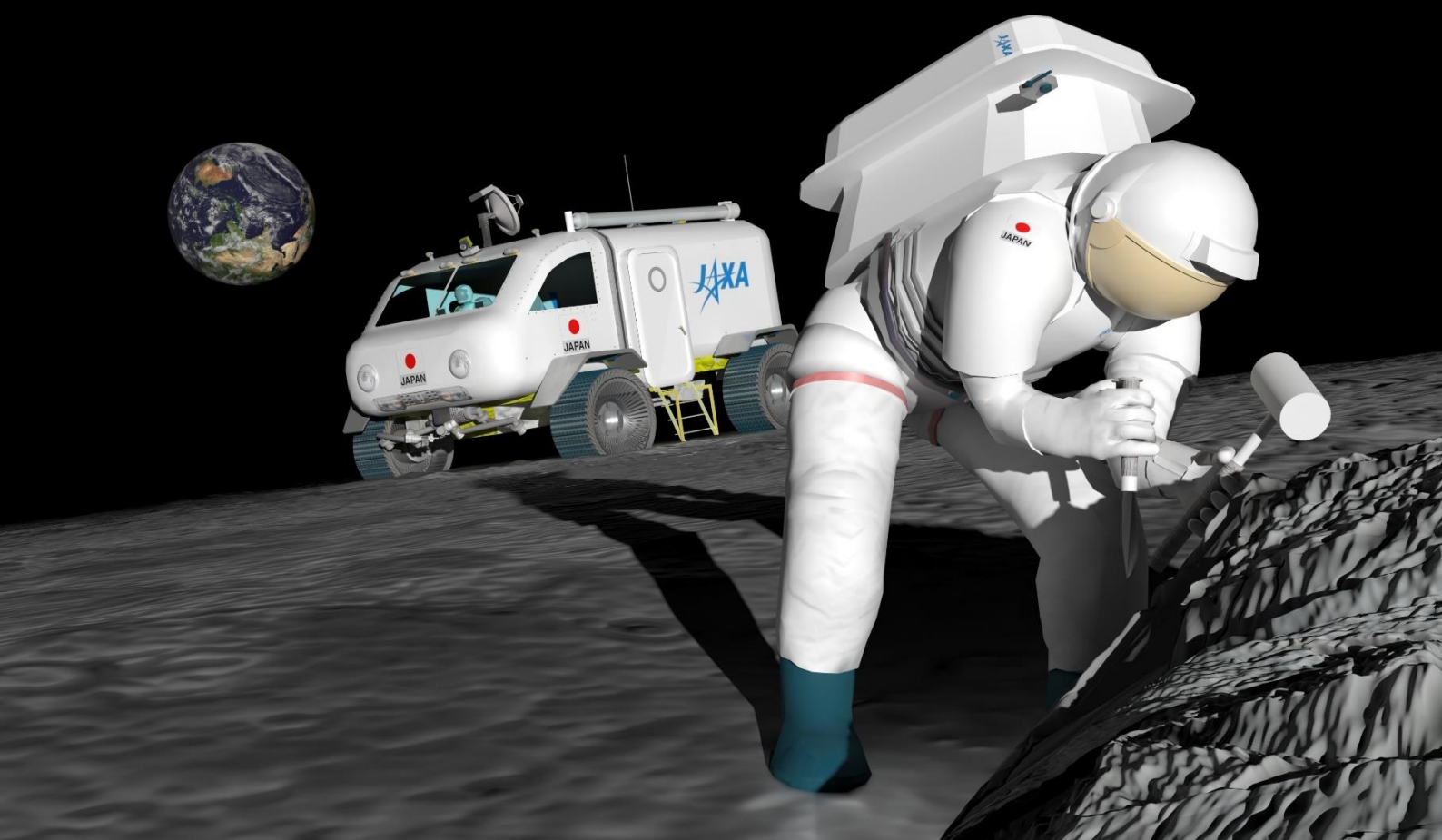


# 日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021

## Executive Summary



宇宙航空研究開発機構  
国際宇宙探査センター  
宇宙探査システム技術ユニット

Intentionally Blank

## 1. 経緯と目的

2000 年代初頭から、米国を中心として国際協力による有人宇宙探査計画の検討が開始された。国際宇宙探査フォーラム(ISEF)や国際宇宙探査協働グループ(ISECG)などで国際的に合意されている目標は「国際協力による有人火星探査の実現」である。これらを踏まえ、JAXA では有人火星探査を視野に入れつつ、中間目標としての有人月面探査の実現に向けてその目標やシナリオ、ロードマップ等の検討を継続的に実施してきており、2016 年には最初の報告書をまとめた。

2019 年には国際宇宙探査ロードマップ(GER)第 3 版をベースに改定版をまとめたが、今回は米国が表明したアルテミス計画や 2020 年 8 月に ISECG が出した GER Supplement に対応しつつ、国内政策議論の進展等を踏まえて、2021 年度版としてまとめなおしたものである。

本文書の位置づけは、我が国として今後行っていくべき国際宇宙探査のグランドデザインの(案)を宇宙機関としてまとめるものである。JAXA はこのシナリオに沿って政府の国際宇宙探査政策／計画への提言を適宜行っていくとともに、研究開発を進める。

この 2021 年版での 2019 年版からの主な変更点は下記のとおりである。

- サイエンス目標／ロードマップにつき、理工学委員会国際宇宙探査専門委員会からの提案の取り込み。
- ミッション成功に鍵となる環境データの検討を詳細化し、事前取得すべきデータを明確化。
- 測位に関するアーキテクチャ検討を追加するとともに、通信アーキテクチャ検討も最新化。
- Gateway 補給に関し、国際調整に基づき、打上げ 30 日以内到着を満足する HTV-XG ミッション検討を追加。
- 月探査促進ミッション(案)の追加とシナリオでの位置づけの整理。
- 先導研究等での研究進捗を踏まえて、技術ロードマップを更新。

## 2. 国際宇宙探査の目標

国際的に合意されている宇宙探査の目標は「有人火星探査の実現」であるが、それだけでは抽象的すぎるため、地球上でのこれまでの人類による探査・探検とのアナロジーから、新しい科学的発見を求める「科学」と、人類の新しい活動の場所を求める「有人活動」に分けて具体的な目標を設定した。「有人活動」については、20 年後頃に最初の有人火星探査を実現することを最終目標に、その技術・運用の実証を行うという観点から、中間的な目標として 300 日滞在の月近傍ミッションおよび 500 日滞在の有人月面探査ミッションと推薬の現地調達を目標として設定した。なお、有人月面活動については、その発展形態として民間による持続的な有人月面活動が開始されることを目標とし、宇宙機関では資源利用システムや再使用システムの開発などの技術開発を行うことを目標とする。図 2-1 に有人活動に関する具体的な目標を示す。

「科学」については、地球型惑星領域での目標を下記 6 つに再整理し、ロードマップを再検討した。

- 太陽系年代の理解
- 月の形成・進化の理解

- 月面環境の理解
- 月での宇宙物理観測・基礎物理実験
- 月を含む科学、月開発に向けた月科学・工学
- 火星・金星・水星における表層環境の進化過程の把握

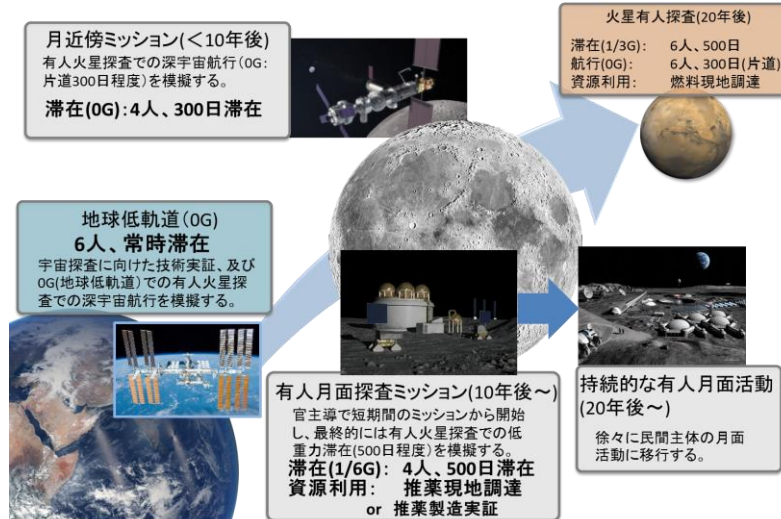


図 2-1 国際宇宙探査(有人活動)の目標

### 3. 有人宇宙探査実現に必要なデータの分析

有人宇宙探査を計画・実行するにあたっては、宇宙機や軌道計画のコンセプト検討だけでなく、環境や資源のデータを十分に揃えることが必要である。現在得られているデータについてそれぞれ整理した結果、有人宇宙探査のアーキテクチャに大きな影響を与える月の水の分布量の調査、宇宙飛行士の健康管理上の重要な課題であり放射線(特に太陽フレア発生時)のデータの取得が緊急かつ重要性の高い課題であることが分かった。表 3-1 に分析結果の抜粋を示す。

2021年版では、アルテミス計画で適用している Apollo データを基準にした月の環境条件書 SLS-SPEC-159 を詳細に分析した結果、南極ミッションにそのまま適用することにはリスクが伴うものとして、クレータ/岩石分布、走行抵抗、走行時のレゴリス飛散特性などを抽出した。

表 3-1 有人宇宙探査実現に必要なデータの分析(抜粋)

	現状	今後取得すべきデータ	優先度付け			
			安全性	アークチテクチャへの影響	緊急性	総合
水	これまでのリモートセンシング観測で、極域の地下(1m程度)に水素(水氷と考えるのが合理的)の存在を示す観測データが得られている。存在量は、0.08-20wt%と研究により開きがある。	着陸ミッションにてその場での直接的に存在分布を計測することが必要。	高	低	高	高
放射線	宇宙飛行士の被ばく線量を精度よく推定するには、エネルギースペクトラムデータが必要であるが、特に被ばく線量への影響の大きい太陽フレア時の地磁気圏外の実測データはないため、その被ばく量を適切に予測することが困難で、深宇宙ミッションでの放射線被ばく対策の目途が立たない状況。	月・火星探査無人ミッションの機会をとらえつつ、太陽活動による変動も考慮して太陽フレア時のエネルギースペクトラムデータを蓄積していくことが必要。	高	低	中	高
レゴリス安全性	化学組成による毒性は研究されNASAの毒性研究Gが2010年にまとめたデータ有。ただし実レゴリスによる実験データはほとんどない。	実レゴリスのサンプルリターンによる動物実験でのデータ取得。	中	低	中	中

#### 4. 全体アーキテクチャ検討

特に重点を置いて検討したのが、全体アーキテクチャの根幹となる輸送アーキテクチャ検討である。なお、その輸送アーキテクチャの検討にあたり、基本的な前提条件として、地球から中継地点までの有人輸送に関しては開発中の米国 SLS/Orion を前提とし、日本がその有人輸送系を開発する検討は実施していない。

輸送アーキテクチャの要検討項目は多岐にわたり、現時点で完全に網羅的な検討ができてはいないが、主要な検討項目とその結果は下記の通り。

##### ①月周回のステー징ポイントの有無と軌道

南極へのアクセスやランダの再使用を可能にするためステー징ポイントを設け、その軌道を Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO)とすることが最適である、との結論。




##### ②月周回ステー징ポイントまでの物資輸送の推進システムと軌道

輸送量のみで考えると Weak Stability Boundary 軌道での化学推進が最適であるが、Gateway プログラム要求から輸送期間を30日以内にするため、直接遷移軌道に切替えた。使用ロケットについて3つのオプションを検討中。表 4-1 にそのサマリを示す。

##### ③月の資源利用の是非

結果は図 4-1 に要約されるが、レゴリスの水含有率が 0.5%以上であれば、有人月面探査ミッションを4回以上行う場合に、そのための総打上げ質量は、推葉プラントを月面に構築したほうが構築しない場合より少ない、つまりコスト的に有利であるということである。そのためにも確認されていない月の水の実際の含有率を実測することが重要であり、LUPEX ミッションがその重要な役割を担う。

表 4-1 Gateway への補給形態オプション検討サマリ

	オプション4 基幹ロケット発展型打ち上げ	オプション5 米国大型ロケット打ち上げ	オプション6a H3×2機で打ち上げ、OTVとドッキング
コンフィグレーション	 HTV-XG 基幹ロケット発展型	 HTV-XG 米国大型ロケット	 HTV-XG H3-24 OTV H3-24
提供可能開始時期	2032年頃想定。	2030年頃に打上げ可能	2030年頃に打上げ可能
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>●「発展型」シナリオに沿う</li> <li>●GW輸送の自立性確保/国産ロケット需要創出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●将来的に補給機単体が海外に売れる可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ロケット1機の打上能力を超える輸送システムの構築。</li> <li>●GW輸送の自立性確保/国産ロケット需要創出</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>●GW搭乗権の獲得が遅れる可能性(交渉次第)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国産ロケットを使わないことによる抵抗感</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●実施コストが高い</li> <li>✓ OTV開発費</li> <li>✓ 補給リカリングのコストパフォーマンス(輸送単価)が悪い</li> </ul>
補給能力	>	>	>
運用機コスト	<	<	<
補給単価	<	<	<
1機目の経費	<	<	<

(注 不等号(<、>)は、数値の大小関係を表す)

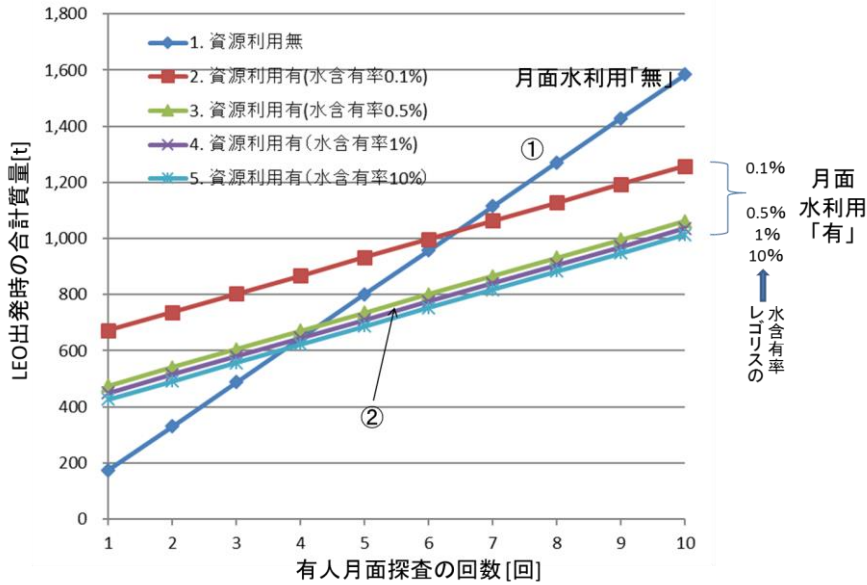


図 4-1 月の資源利用(水)の是非に関するトレードオフ結果

有人火星探査に向けてのアーキテクチャ検討は、今後の検討によるところが大きいですが、地球重力圏(月近傍ステージングポイント含む)からの火星圏への輸送としてエアロキャプチャが有効であることが検討結果として出ている。理工学委員会国際宇宙探査専門委員会の火星タスクフォースチーム報告書でも、その技術実証を進めること、及びその技術を応用した火星表面の総合的な探査が提案されており、本報告書にも技術ロードマップやミッションシナリオに取り入れている。図 4-2 に検討の結果をまとめた輸送系アーキテクチャ図を示す。

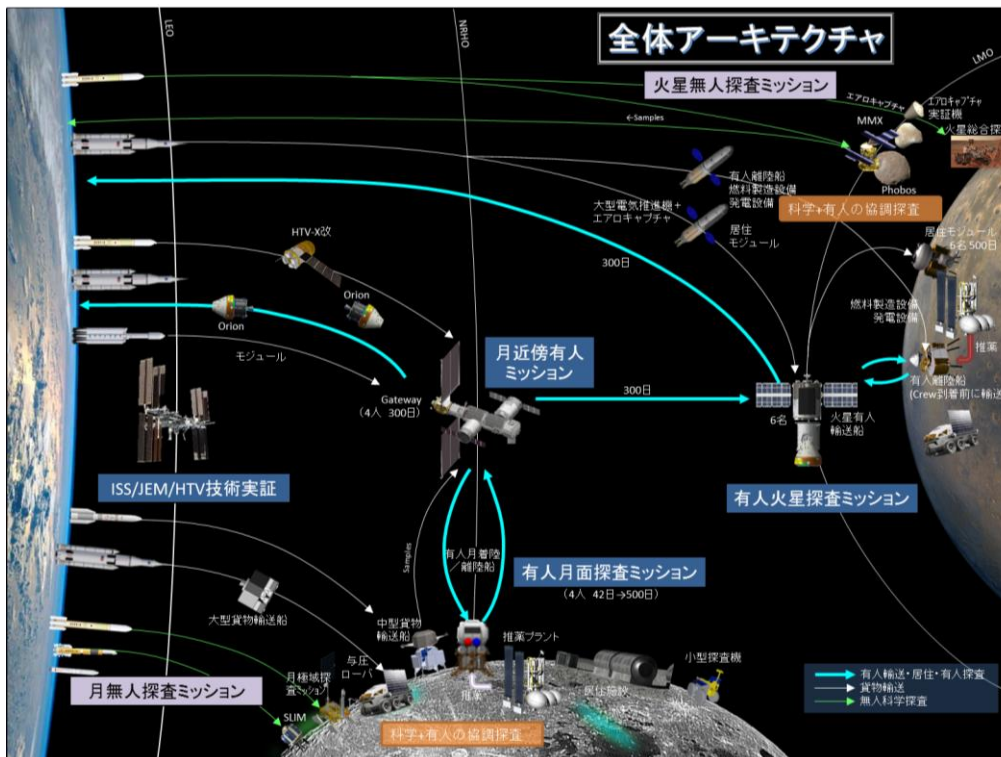


図 4-2 国際宇宙探査の輸送系アーキテクチャ

今回は測位のアーキテクチャについても検討を行った。測位に関する当面の目標としては、与圧ローバでの利用を想定し、月面の平均分解能 80m から測位精度 40m をリアルタイムで測位できるアーキテクチャを検討した。これまでの検討結果では、月周回に GPS のような測位衛星を 8 機前後配置し、その軌道決定に GNSS を利用するというコンセプトが最有力である。2019 年版での通信アーキテクチャとも融合した総合的な通信・測位アーキテクチャのコンセプトを図 4-3 に示す。

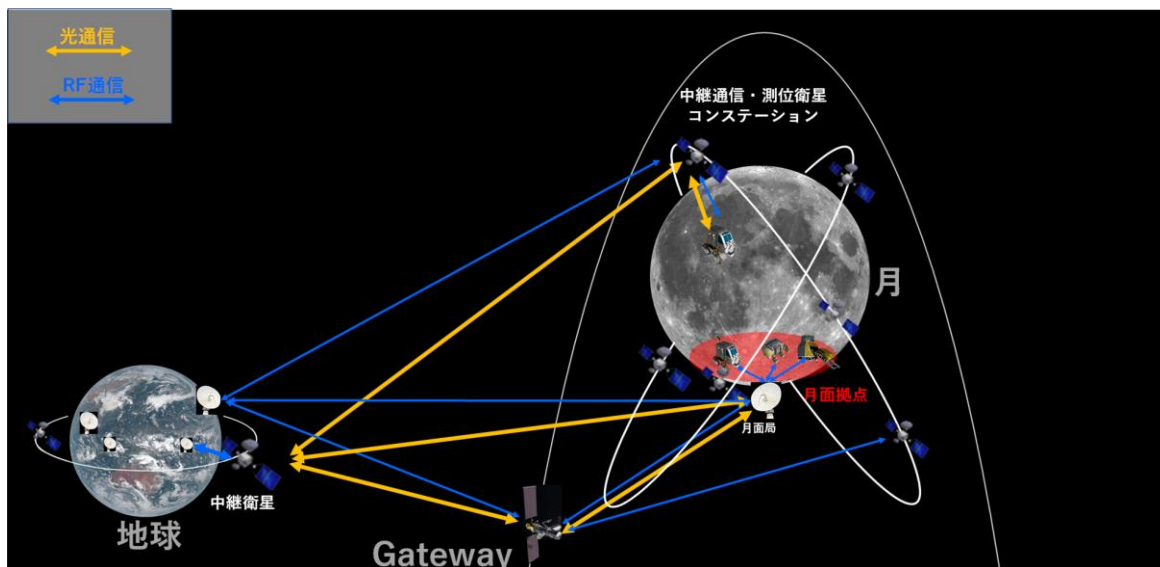


図 4-3 国際宇宙探査の通信・測位総合アーキテクチャ

## 5. 国際宇宙探査ミッションシナリオ

本文書で描くシナリオを要約すると、「人類の一大事業である有人火星探査を最終ゴールとして、その事前実証を月軌道及び月面で行うとともに将来の持続的な月面での経済活動への準備を行う。日本は第1級の科学成果の創出そしてキー技術の貢献により、日本人の月面到達や火星到達を目指す。その中で人類／生命の源である水の起源・変遷過程及び表層環境の解明を進めつつ、有効に利用して人類の宇宙進出に貢献する。」と言えるであろう。日本として実施すべきミッションを中心に国際宇宙探査ミッションシナリオ(案)としてまとめたものを図 5-1 に示す。シナリオのポイントは下記の通りである。

- ① キー技術を発展させつつ、国際協力の枠組みで有効に活用し、2020 年代後半の日本人月面到達を目指す。
  - 着陸技術については、SLIM でのピンポイント着陸技術を南極対応にまで発展させつつ、着陸能力を段階的に拡大する。
  - 表面探査技術については、月極域探査等で走行技術、電力発生技術、越夜技術などの基本技術を実証した上で、与圧ローバ等に発展させる。
  - 有人探査に有効な中継点となる Gateway を国際協力で構築し、日本は ISS での Heritage を生かし、再生 ECLSS や補給船で効率的に参加する。
  - 月探査の通信・測位に関しても、日本の優位性のある技術を生かしつつ、国際協力により、

アーキテクチャ構築を目指す。まずはそのための早期の技術実証を目指す。

- ② 月探査へ多くのサイエンスコミュニティや産業界が参加できるよう、定期的な月輸送サービスを構築する。(月探査促進ミッション)
- ③ 上記の様々なミッション機会を活用し、月科学のロードマップに沿って科学成果の最大化を目指す。(特に、月面天文台、サンプルリターン、月震計による内部探査)
- ④ 火星は、MMX での火星重力圏往還技術をベースに、火星周回ミッションで地下水探査を行い、その後の着陸探査で火星生命環境・水環境の理解を目指す。

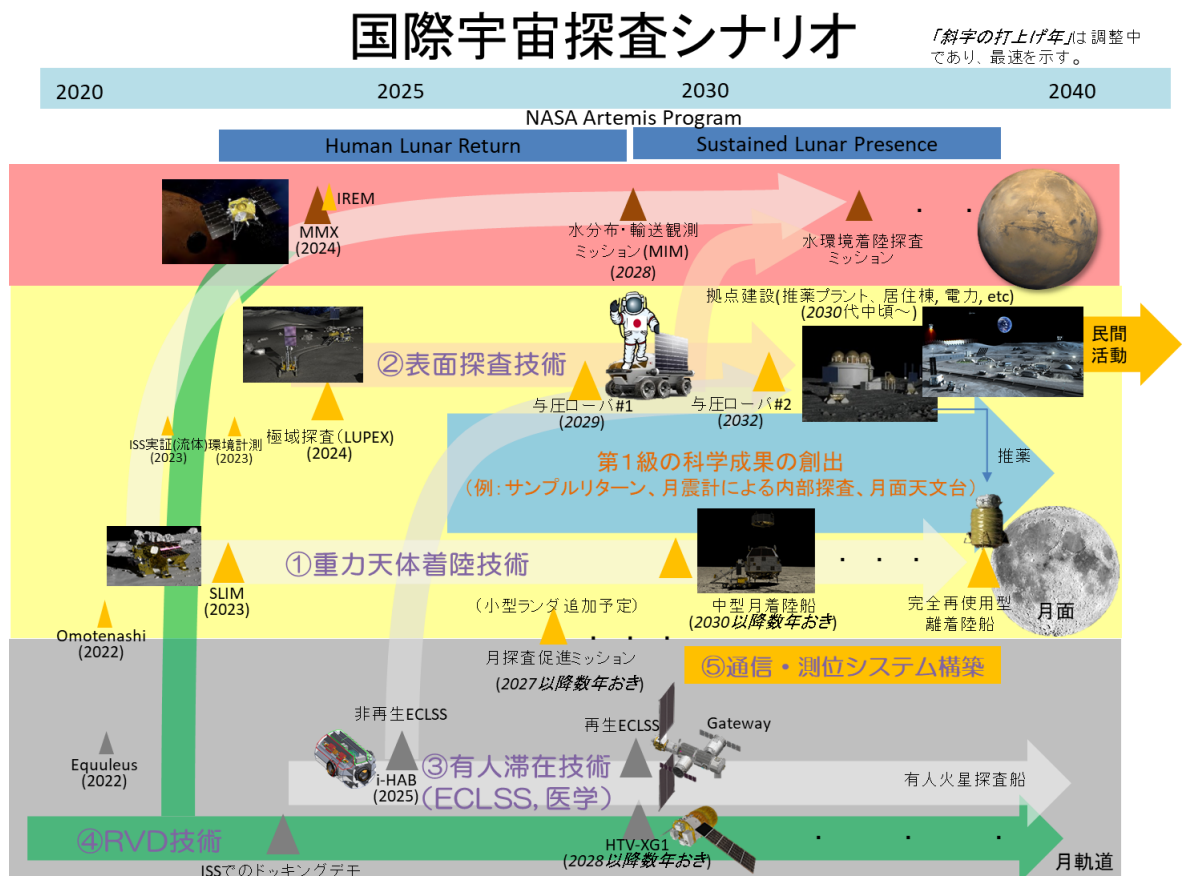


図 5-1 国際宇宙探査ミッションシナリオ(案)

### 6. 今後について

本検討結果は、2021 年末までの政府方針、国際情勢を踏まえたアーキテクチャ検討やシナリオ検討結果をまとめたものである。米国を含む国際情勢は日々変化しており、今後も日本としての目的・方針を維持しつつも、国際情勢に応じて柔軟にかつ継続的に検討を深め、適宜改定作業を行っていく。