

国際協力による月探査計画への参画に向けて 参考資料

令和元年8月

国際協力による月探査計画への参画に向けて とりまとめ（概要）

背景・理由

- 国際宇宙探査の大きな流れは月、火星、ついで深宇宙に集約。
- 米国は、2024年有人月面着陸、2030年代の有人火星着陸を目指す「アルテミス計画」を発表。また月周回有人拠点「ゲートウェイ」を構築する計画を発表し、世界各国に参画を呼びかけ。
- これに応じて、カナダは既に参画を表明、欧州も本年11月末の欧州宇宙機関閣僚会議で参画を決定する見通し。
- 新興国による宇宙開発の加速により宇宙空間を巡る地政学的バランスは変化しており、戦略的な国際協力関係の構築が不可欠。
- ゲートウェイ計画の中で、我が国が自らが強く、意義ある部分を確保できる可能性を高めるためにも、参画表明のタイミングが重要。

国際協力による月探査計画への日本の参画意義

〔国際協力取組への参画意義〕

- 外交・安全保障（協力国間の強固な関係構築、国際プレゼンス等）
- 産業競争力強化やイノベーション（最先端技術、新たな製品等）
- 科学技術（国際協力による大規模な挑戦等）
- 人材育成（国民の誇りや共感、次世代育成等）

〔当面の目的地としての月の意義〕

- 火星・深宇宙も視野に入れた効率的・効果的な技術実証の場
- イノベーション（新たな産業の創出等）
- 資源探査（極域の水氷の燃料活用、高日照率域の確保等）
- 科学的知見の創出（月の起源、水氷の由来等）

国際協力による月探査計画への参画に向けた方針

- ◆ 国際協力による月探査計画への参画には様々な観点から意義が確認でき、時宜を逸せず、早期に参画を表明することが極めて重要。
- ◆ なお、ゲートウェイを含む月探査計画に参画する場合、上述の意義が総合的に均整の取れた形かつ、費用対効果の高い形で享受できるよう、戦略的に参画することが重要であり、考えられる具体的な協力取組としては現時点では以下の4点が考えられる。
 - 2024年の有人月面着陸に向けて建設される初期型ゲートウェイの組立要素（ミニ居住棟）に、我が国が強みや「きぼう」等で実績を有する生命環境を制御する熱制御系や空調系の技術・機器（例えば熱制御系ポンプやバッテリー等）を提供。
 - 有人月面着陸の前倒しに伴う物資・燃料補給ニーズの増大に対応するため、現在開発中の新型補給機(HTV-X)・H3ロケットを用いてゲートウェイへの物資・燃料補給を行う。
 - 2024年の有人月面着陸・探査の着陸地点選定等に資する月面の各種データを共有。小型月着陸実証機(SLIM)の開発や、月極域着陸探査を目指した取組を着実に進め、月面探査における我が国のプレゼンスを確保するとともに、ゲートウェイを活用した月面探査の国際協力枠組みの一環としても位置付け。
 - 月面での持続的な有人探査活動にも資する、米国からも期待の高い月面の移動手段を開発。

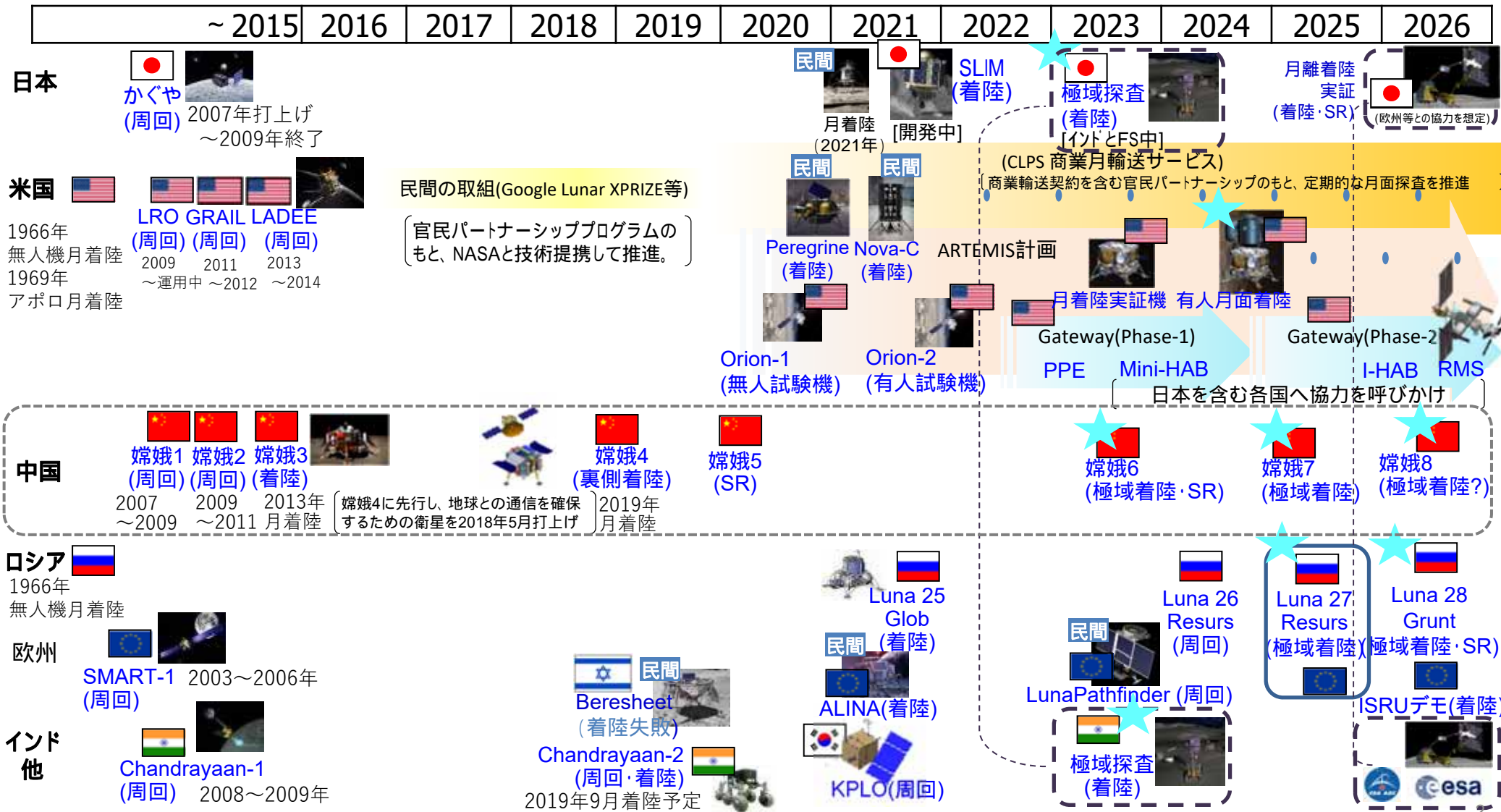
〔留意事項〕

- 宇宙基本計画では、「得られる効果と要する費用に関し、厳しい財政制約を踏まえつつ、厳格に評価を行う」とされており、これらの取組については今後更なる検討や精査が必要。
- 宇宙関連産業にとどまらず、幅広い産業界等の積極的な参画を呼び込むための取組を進めることも重要。
- 今後の国際交渉においては、日本人宇宙飛行士のゲートウェイ建設への参画や月面着陸の機会を確保し、宇宙先進国としてのプレゼンスの確保を図ることに留意。
- ISS計画への参画を通じて得られた技術や成果を最大限活かして費用対効果の高い形で進めるとともに、ISSでの取組から国際協力による月探査活動に係る取組をシームレスで効率的に進めることも留意。
- ISSを含む地球低軌道の在り方について、「きぼう」の運用・利用の更なる効率化や民間利用の拡大を図りつつ、長期的な対応オプションや移行期のISS運用・利用の合理化の検討を加速。

月探査をめぐる各国の動向

月面：2018年以降、主要国は多くの月面探査ミッションを計画。
 米国は官民パートナーシップも活用し、2024年に有人月面着陸を計画。
 2020年代前半には米露欧日中印等が月極域への着陸探査を計画(月の水氷や高日照率域に高い関心)。
 月近傍：米国は月周回有人拠点(Gateway)を構築する計画を示し、各国に参画を呼びかけ。

★：極域着陸ミッション
 SR：サンプルリターン
 (検討中のものを含む)



米国の有人月面探査計画(アルテミス計画)の概要

2019年3月26日(米国時間)、第5回米国国家宇宙会議にて、**ペンス副大統領が、5年以内に米国ロケットで米国宇宙飛行士による月面着陸の実現を目指すことを表明。**

- NASAは5年以内に、米国宇宙飛行士を月面へ着陸させる。
- 着陸候補地としては、水氷資源等の存在が示唆されている月面南極域。
- 新型大型ロケット(SLS)開発遅延に強い不満。開発加速の必要性を強調



アルテミス(Artemis)計画

月周回有人拠点(Gateway)を経由した有人月探査を**2段階**で進める

第1段階 2024年までの月南極への有人着陸を実現。Gatewayは必要最低限のモジュールのみ。電気推進エレメントを2022年に打上げ。

第2段階 2028年までに持続的な月面探査を実現。Gatewayの組み立てを継続し、完成形とする。

SLSロケットの開発を加速し、無人・月周回のアルテミス1ミッションの2020年实现を目指す。

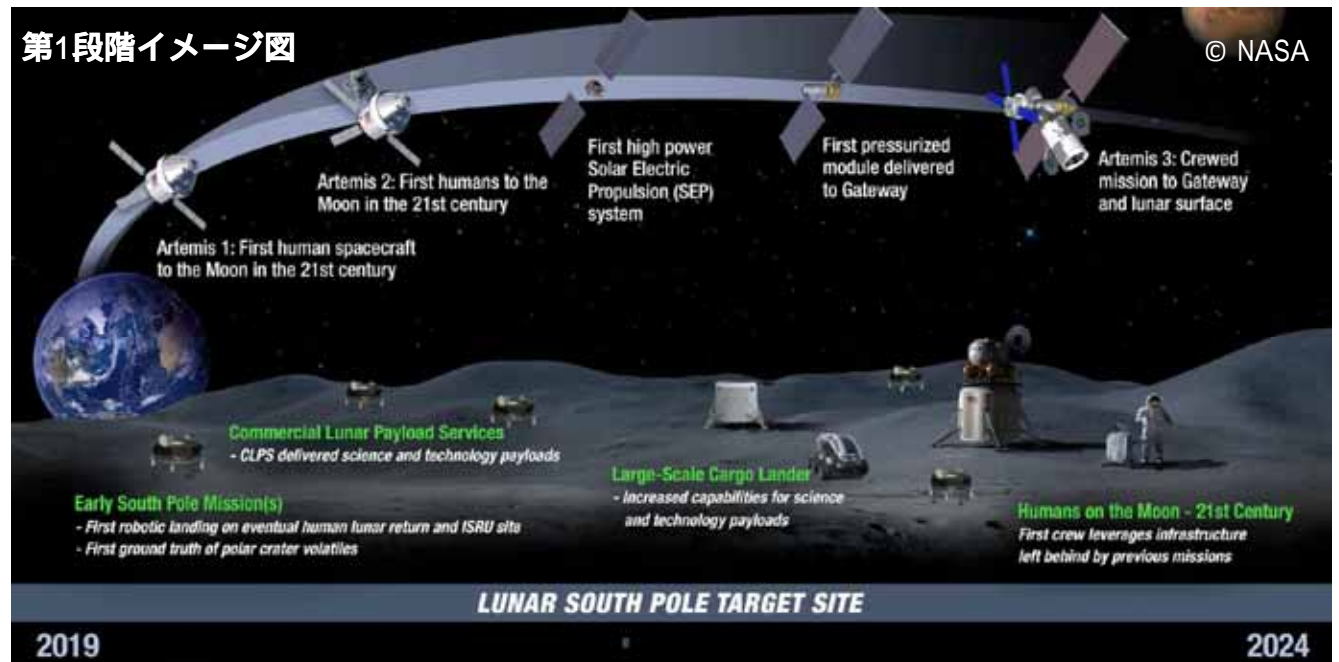
数ヶ月以上、月で持続的に活動できる能力を実証するとともに、2030年代の有人火星着陸を実現するための能力を培うことを目的とする。

アポロ計画とは異なり、国際パートナーや産業界とも協力。

月面の科学研究や、その場資源利用の研究も推進。

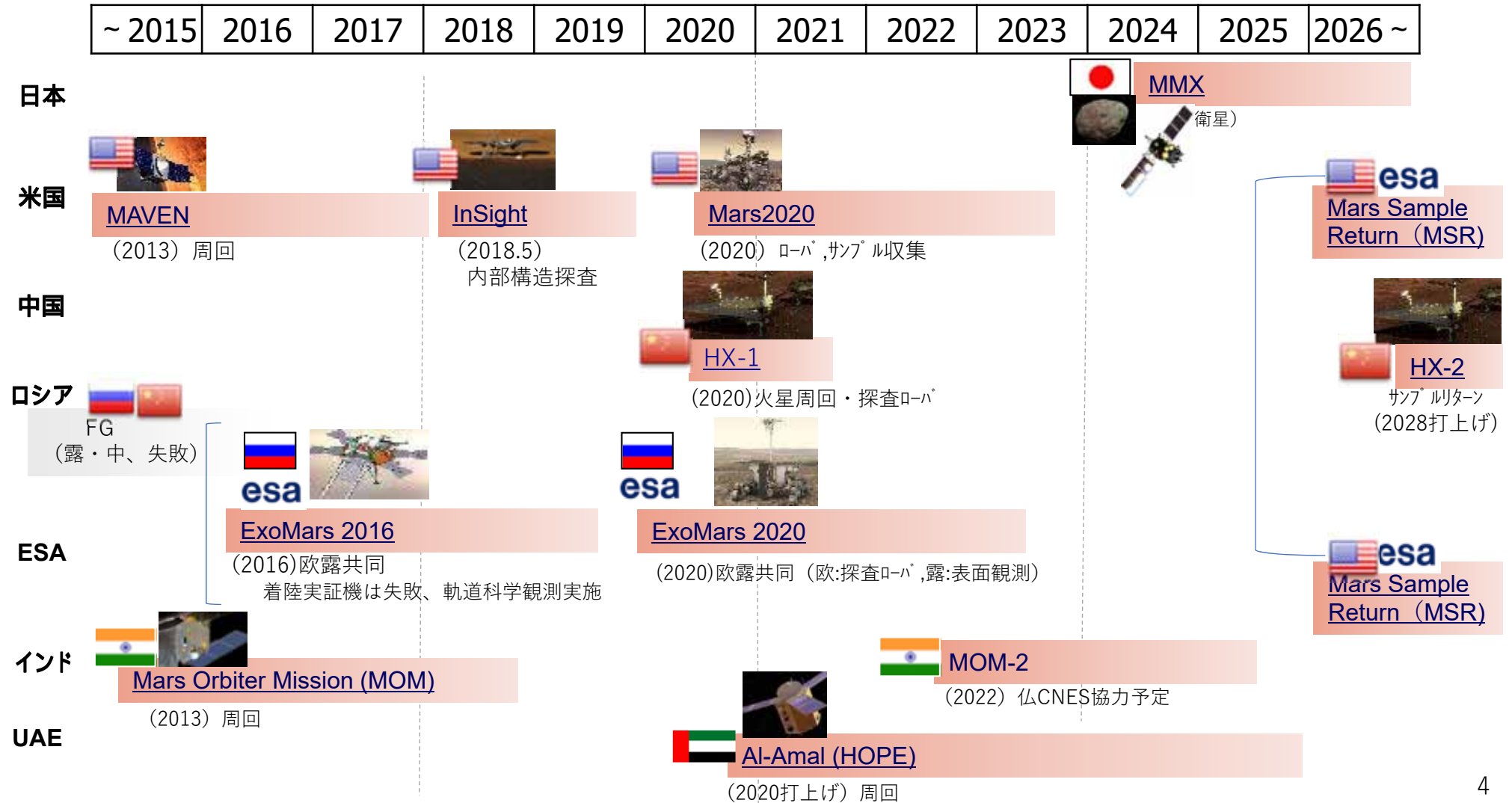
(参考1) 有人月着陸前倒しを実現するため、NASAは、**5月13日**、2020年度予算に**約16億ドルの追加要求**を発表。

(参考2) カナダは2019年2月末にGatewayへの参画を表明。欧州は2019年11月末の欧州宇宙機関閣僚会議で参画を決定する見通し。



火星探査をめぐる各国の動向

- 火星：2020年前後に各国の火星探査ミッションが集中している。引き続き、欧米、中国が2020年代中盤以降のミッションの準備を進めている。(MSRは、NASAが概念検討の予算を要求し、ESAが閣僚級理事会に提案予定。)
- 火星近傍：火星衛星への探査は日本が推進するユニークな計画(2011年にロシアがフォボスからのサンプルリターンを目指す探査機「フォボス・グルント」の打上げに失敗)。



月・火星探査ローバー (着陸年順)

	名称	天体	着陸	質量	活動期間	走行距離	エネルギー源	画像 (C)NASA、RSA、CNSA
運用 終了	ルノート1号、2号 (2台) (ソ連)	月	1970、 1973	756kg、 840kg	10.5ヶ月、 5ヶ月	10.5km、 37km	太陽電池 +ラジ オアイト-プ (保温用)	
運用 終了	アポロ月面車 (アポロ15~17号) (3台) ※有人用 (米国)	月	1971 ~ 1972	(1台あたり) 本体+クル-2名+ ツール=708kg	(1台あたり) 3~4時間	25~35km	1次電池	
運用 終了	マーズ・パスファインダー (米国)	火星	1997	10.5kg	83日	約0.1km	太陽電池 +ラジ オアイト-プ (保温用)	
運用 終了	スピリッツ、 オポチュニティ (2台) (米国)	火星	2004	(1台あたり) 174kg	5年、15年	45.16km (2018年12月時点) (オポチュニティ)	太陽電池 +ラジ オアイト-プ (保温用)	
運用中	キュリオシティ (米国)	火星	2012	899kg	7年~ (活動中)	20km (2018年12月時点)	ラジ オアイト-プ (電源用)	
運用 終了	玉兔 (中国)	月	2013	約140kg	8ヶ月程度 ※推定	100m程度	太陽電池 +ラジ オアイト-プ (保温用)	
運用中	玉兔2号 (中国)	月	2019	約140kg	8ヶ月~ (活動中)	不明 (活動中)	太陽電池 +ラジ オアイト-プ (保温用)	
未着陸 (月へ飛 行中)	チャンドラヤーン2号 (インド)	月	未着陸 (月へ飛行 中)	25kg	— (予定: 2週間)	— (未着陸(月へ飛行中))	太陽電池+蓄電池	

月面の環境の特性と持続的な活動に必要な技術

越夜技術

昼間は太陽電池等を利用できるが、日陰や夜間の極低温環境での機器の越夜のための技術（発電技術、蓄電技術、節電技術）が必須。**原子力電池に頼らないクリーンエネルギー技術**（Li-Ion電池、再生燃料電池、完全固体電池等）の確立を目指す。

着陸技術

ミッション要求に最適な限定的な着陸地（極域等）にピンポイントで着陸する**高精度着陸技術**が必須。

移動・走行技術

不整地、登坂走行能力、スタック回避が必要。地形計測、マッピング、自動経路生成や障害物検知も必要。

掘削技術

掘削情報から地盤推定（地上技術の連携）。使用できる機材に限られるが、試料採取とともに地盤性状を把握。

【熱環境】

- ・大気がないため、昼夜の温度差が厳しい。
- ・極域では日照時-40 ~ -60、日陰時-200。低緯度で日照時+100以上、日陰時-200 近くまで温度変化。

【日照】

- ・極域では影の領域が多い（地形計測が必要）。
- ・中低緯度では夜が長い（約14.8日周期）。

【高真空】

- ・大気がほとんどなく、高真空環境（昼間は10-7Pa、夜間は10-10Pa）。
- ・放熱対策や固体潤滑が必要。

【放射線】

- ・大気も磁場もないため、強い宇宙放射線環境。電子部品の故障対策や、人体への防護対策が必要。
- ・月面の宇宙放射線は推定100~500mSv/年（地球上では、2.4mSv/年）。

耐環境技術

月面固有の厳しい環境（熱、放射線、レゴリス防塵、低重力等）へ対応した電子部品や機構部品の開発、システムエンジニアリングが必要。有人活動に向けては、加えて**隕石デブリ、放射線防護技術**が必須。



【地形・表土】

- ・月面は細かい砂（レゴリス）で覆われた不整地（レゴリスが数m~数十m堆積）であり、砂で滑ったり埋もれたりしてスタックしやすい。
- ・レゴリスは数十マイクロン以下の微粒子が多く、機構部への侵入、摩耗も課題。
- ・極域は山岳地帯（平均斜度15度、最大斜度30度程度）。

【重力】

- ・1/6重力の環境下。軽量のプラットフォームは反力の確保が課題。

【通信環境】

- ・地球から往復3秒程度。ある程度の自動化・自律化が必要。
- ・地球上の1つの通信地上局から常時月と通信することはできず、経度をずらした最低3か所の常時通信用地上局が必要となる（例：NASAのDeep Space Network）。
- ・月の裏面は地球の電波放射の影響を受けず、天文観測等に向く。一方で常に地球と直接通信ができないため、地球との通信には中継基地（衛星）が必要。

オペレーション技術

ミッションを実現するために**End-to-End**で（地上から月面まで、事前準備・訓練・実運用を通して）**組織化された運用技術**が重要。国際調整や不測の事態対応など、きぼう運用やはやぶさ運用等で得られた技術を活用する。また深宇宙探査に向けて自動化・自律化との協調も促進する。

通信技術

基幹インフラとしての頑健な通信システム構築が重要（光宇宙通信技術等の活用）。常時通信を確保する場合、3局以上の深宇宙通信用地上局を用意するか、地球周回軌道、月周回軌道などにデータ中継用衛星を用意する必要がある。

我が国が優位性を発揮できる技術や波及効果の大きい技術

(「国際宇宙探査の在り方～新たな国際協調体制に向けて～」(2017年12月 文部科学省宇宙開発利用部会 ISS・国際宇宙探査小委員会))

技術	意義・必要性	優位性	非宇宙分野との糾合・地上技術への波及効果	他国との比較
深宇宙補給技術 (ランデブ・ドッキング技術等)	ランデブ・ドッキング(RVD)技術は、月近傍拠点での燃料補給や月面離着陸機の往還など、将来の探査アーキテクチャで必須の共通技術要素であり、国際標準に合致した安価なシステムの開発で、海外展開も期待できる。	HTVの開発・運用で獲得した技術を発展させ活用することが可能。	●RVD画像センサ技術←→(地上)自動運転車・自動建設機械、ドローンなど	ランデブ技術 日本は、HTVので実績有。米・露・欧・中と同等レベル。 ドッキング技術 日本は、有人ドッキング方式を現在研究中。米・露・欧・中は実績有。
有人宇宙滞在技術 (環境制御技術等)	宇宙空間において、人の生命を安全に維持するキーテクノロジーであり、有人宇宙活動における根幹的・共通的な技術。特に水・空気の高再生率化は運用コスト削減の鍵。	「きぼう」の開発・運用を通じて獲得した技術や、地上における環境浄化技術等を発展させ活用することが可能。	●環境制御技術←→(地上)環境浄化技術 ●骨・筋減少、免疫低下等への対策技術、放射線防護、遠隔医療 → (地上)高齢者医療、国民の健康向上・福祉、介護問題解決など	<ul style="list-style-type: none"> 米・露・中はISS等で軌道上実績有。 欧は、空気再生技術を実証予定。 日本は、来年以降順次ISSで軌道上実証予定(独自方式で大幅なりソース削減を実現)
重力天体離着陸技術 (高精度航法技術等)	重力天体の探査に必須であり、特に特定の位置へのピンポイントでの着陸技術は、競争性の高い領域への着陸に必須の技術。	「はやぶさ」で獲得した地形照合航法技術や、SLIMで実証するピンポイント着陸技術を発展させ活用することが可能。	●高精度航法←→(地上)自動車の危険物検知・回避技術 ●着地技術←→(地上)自動車・航空機などの衝撃吸収技術	<ul style="list-style-type: none"> 米・露・中は実績有。 日本は、はやぶさでの実績有。SLIM(2021年度)で重力天体の着陸技術実証予定 欧は、露との共同で着陸ミッションを予定。
重力天体表面探査技術 (表面移動技術、掘削技術、水氷分析技術、等)	表面移動技術は、重力天体の継続的且つ広域な探査活動を行うために必須。掘削・水氷探査技術は、将来の宇宙探査の在り方を大きく左右する月資源(特に水氷)探査を行うために必須。	宇宙探査イノベーションハブで開発が進められているものも含め、我が国が世界をリードする非宇宙分野の技術(建設技術、資源抽出技術、センシング技術、ロボット技術、自動運転技術等)を発展させ活用することが可能。	●表面掘削←→(地上)建設機械の自動走行・自動操作技術、自律型ロボット・遠隔型ロボット ●その場分析←→(地上)質量分析計等 ●月面走行←→(地上)自動車の路面把握・障害物検知、自動運転、悪路・未舗装道路走行技術	<ul style="list-style-type: none"> 米、露、中は実績有。ただし、露は1980年以前の実績。 欧は実績はないが、露との共同ミッションでドリルや水分析装置を提供予定。 日本は軌道上実証に向け、研究中。

月・火星本格探査を支える技術のバックキャスト（イメージ）

目標



月・火星本格探査

- 有人周回拠点
- 有人拠点
- 有人ローバ
- 有人離着陸船
- 無人補給船
- 無人探査機(含SR)
- 有人ロケット
- 有人宇宙船

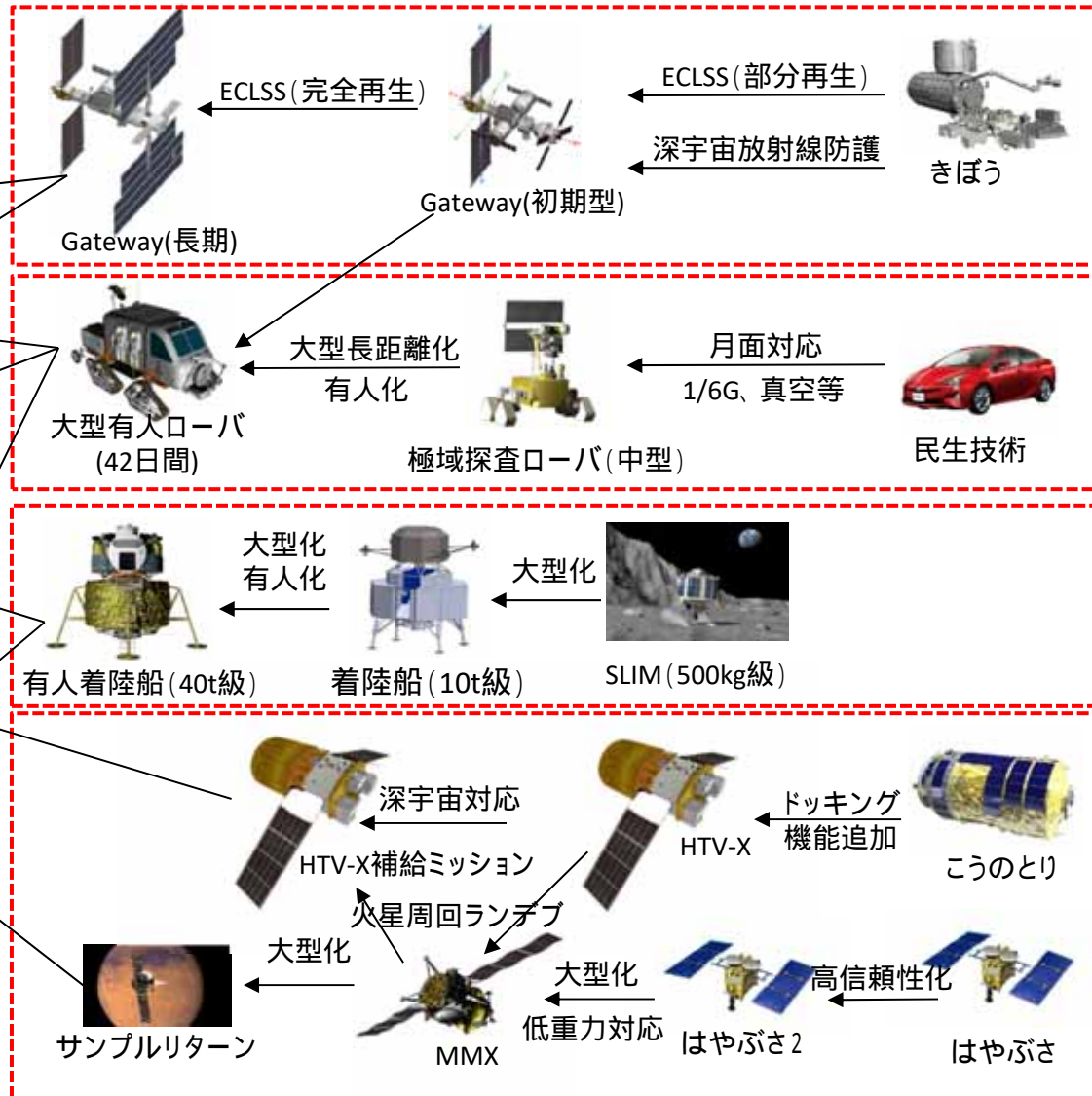
米・ロの能力を利用

2030年代

2020年代

現在

実績



有人宇宙滞在技術

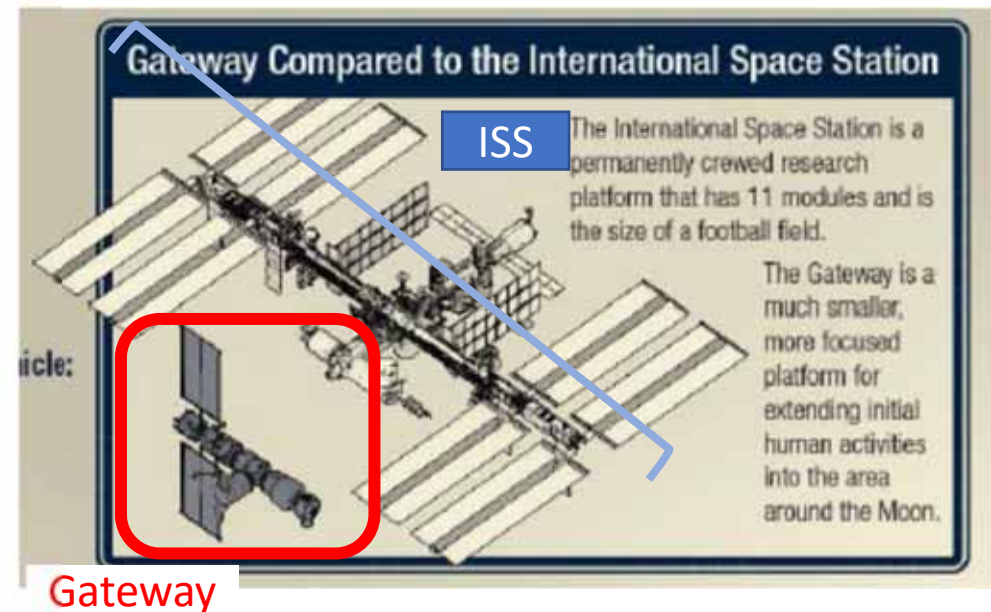
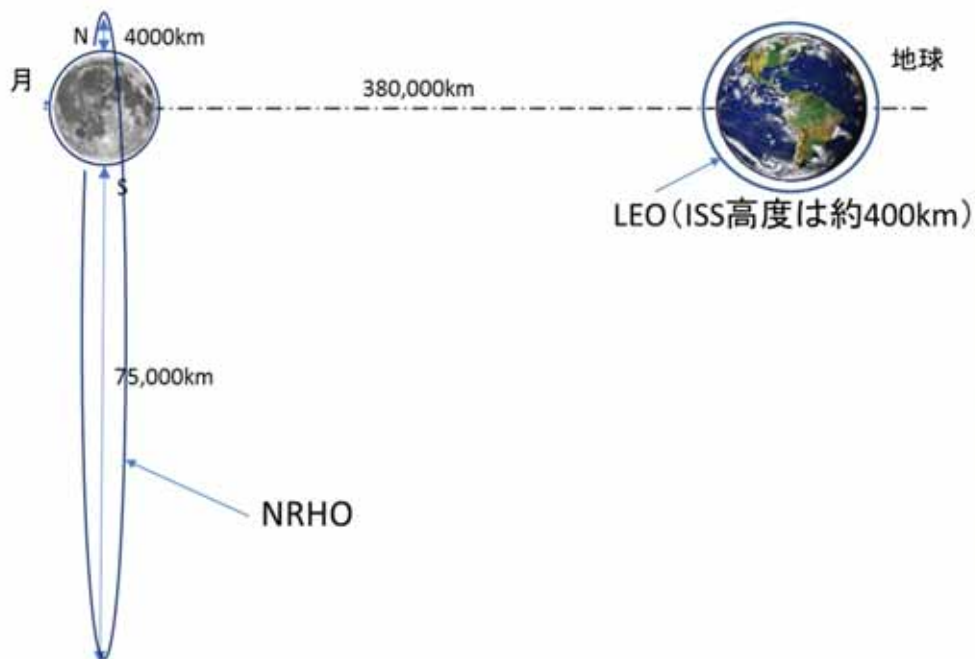
重力天体表面探査技術

重力天体着陸技術



深宇宙補給技術

ISSとGatewayの比較

	国際宇宙ステーション (ISS)	Gateway
大きさ	約108.5m × 72.8m (サッカー場)	下図参照
質量	約420トン	約70トン
組立フライト回数	43回	7回
宇宙飛行士滞在日数 (年間)	365日 (常時)	10~30日
滞在宇宙飛行士人数	6人	4人
食料、消耗品 (年間)	2,190人日分	40~120人日分



ISSとGatewayの比較(続き)

	ISS (地球低軌道)	Gateway (月長楕円極軌道(NRHO)) (*)
①利用目的	<ul style="list-style-type: none"> ● μG環境を使った利用 (宇宙医学、タンパク質結晶等) ● 地球周回軌道を使った利用 (地球観測) <p style="text-align: center;">成果の地上への還元</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● NRHO軌道の特性を使った利用 (月面観測、月面通信の中継点等) ● 月・月近傍探査の中継点としての利用 (補給、サンプル回収等) ● 地球圏外軌道を使った利用 (地球周辺観測、放射線環境評価等) <p style="text-align: center;">宇宙探査への拠点</p>
支える特性 の違い	<ul style="list-style-type: none"> ● 輸送コスト： 相対的に低 ● 通信量： 相対的に大 ● 放射線： 相対的に低 ● 軌道滞在： 宇宙飛行士の常時滞在 ● 月以遠への必要増速量： 相対的に大 	<ul style="list-style-type: none"> ● 輸送コスト： 相対的に高 ● 通信量： 相対的に小 ● 放射線： 相対的に高 ● 軌道滞在： 無人運転期間が長い ● 月以遠への必要増速量： 相対的に小
②国際協力	5極による国際協力	 パートナーシップの更なる拡大の可能性
③技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大型有人宇宙施設の開発・運用に必要な技術の獲得 ・ 探査技術の事前実証 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙施設技術の高度化、自動化 (低リソース化、通信遅延対応等) ・ 探査技術の実証・発展