

2. 今後の対応方針について

(1) 国際宇宙探査の当面の対応についての検討状況

【基本的な考え方(案)】

深宇宙における人類の活動領域の拡大や新たな価値の創出に向けて、**まずは月面での持続的な活動に向けた技術的な見通しを得ていくことが重要。**

【当面の対応(案)】

- (1) 国際宇宙探査の参画に当たっては、我が国の**強みを活かして重要な役割を担うとともに、戦略的な参画**となるよう、宇宙分野にとどまらない幅広い産業界とも連携しながら、必要な調整や開発を加速させる。
- (2) Gatewayについては、我が国として優位性・波及効果が見込まれる技術のうち、**有人宇宙滞在技術や深宇宙補給技術を中心に**、引き続き調整・技術検討を進める。
- (3) 月面着陸・探査を巡る国際競争が加速する中、月探査における我が国のプレゼンスの確保のため、**小型月着陸実証機(SLIM)の2021年度打上げに向けた取組や、インド等との協力による2023年度の月極域着陸探査を目指した取組を、タイムリーかつ着実に実施**できるよう、必要な調整や開発を加速する。
- (4) Gatewayへの参画や月面探査ミッションの機会を、科学コミュニティや宇宙分野にとどまらない幅広い産業界が最大限活用できるようにする。特に、Gatewayや補給機等からの超小型衛星・探査機の放出の機会や、相乗り等による打上げ機会を、多様な機関が活用でき、そのような取組を通じて新しい発想や革新的な技術力を持つ人材の育成にも資するような具体的な対応策を検討する。
- (5) なお、本年3月に米国が有人月着陸の前倒しの方針を示したこと等を踏まえ、**引き続き米国等の動向に留意しつつ**、国際調整や具体的な技術検討・技術実証を継続・加速する。

(参考) 我が国における国際宇宙探査の検討状況(全体イメージ)

様々な国が月面着陸探査ミッションを計画・実施しており、特に月極域の水氷や高日照率域の探査が国際競争になる中、我が国としては、国際協力の機会の戦略的な活用や、宇宙分野にとどまらない幅広い産業界との連携を通じながら、月面での持続的な活動に向けた技術の見通しを得ることを目指す



(参考) JAXAの当面のシナリオ



小天体資源探査他
サンプルリターン

火星他

人類の活動領域の拡大

ピンポイント着陸技術
重力天体表面探査技術



MMX: 2024年度
重力天体
表面探査技術



初期火星探査

- 火星の生命探査
- 火星の科学探査



本格探査

- 火星の利用可能性調査
- 長期にわたる火星の科学探査

月

かぐや



小型月着陸実証機
(SLIM)
(2021年度)

月面活動を主体に

ピンポイント
着陸技術

ピンポイント
着陸技術



月移動探査(2023年頃~)

- 月極域の水氷利用可能性調査
- 月面拠点の調査等



月広域・回収探査

- 南極や裏側探査とサンプルリターン
- 月面本格探査に向けた技術実証等



月の本格的な探査・利用

- 無人探査機/有人能力の協調による効率的資源探査・科学探査
- 多種多様な主体による月面活動

OMOTENASHI EQUULEUS

小型機による実証機会

深宇宙補給技術

補給ミッション・月探査支援
(2026年頃~)

- 小型探査機放出
- 月面観測他

支援

地球



国際宇宙ステーション

有人滞在技術

民営化を推進

Gateway組立段階
(2022年-)

- 月面探査の支援
- 深宇宙環境を利用した科学

支援

有人滞在技術

Gateway
運用段階

- 火星探査に向けた技術実証

(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案)

【構想】

各国に遅れることなく、**月極域における水の存在量や資源としての利用可能性を確認**することを主目的としながら、重力天体表面探査技術の確立を目指した探査ミッションを国際協力で進める。また、この機会を活用して、**科学的成果創出にも貢献**する。

【ミッション】

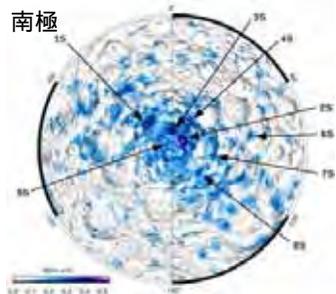
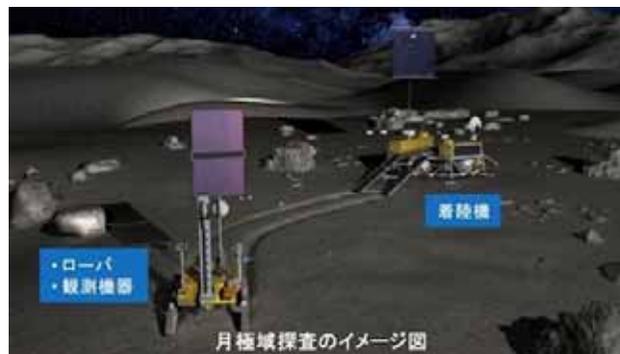
事前に環境や地質が特徴的な探査領域と観測地点を選定。

着陸機は観測領域近傍の長期日照地帯に高精度着陸し、ローバを展開する。

ローバで走行しながら地下2mまでの観測により、水氷分布の可能性のある領域を識別する。同時に表層の水分布を観測。

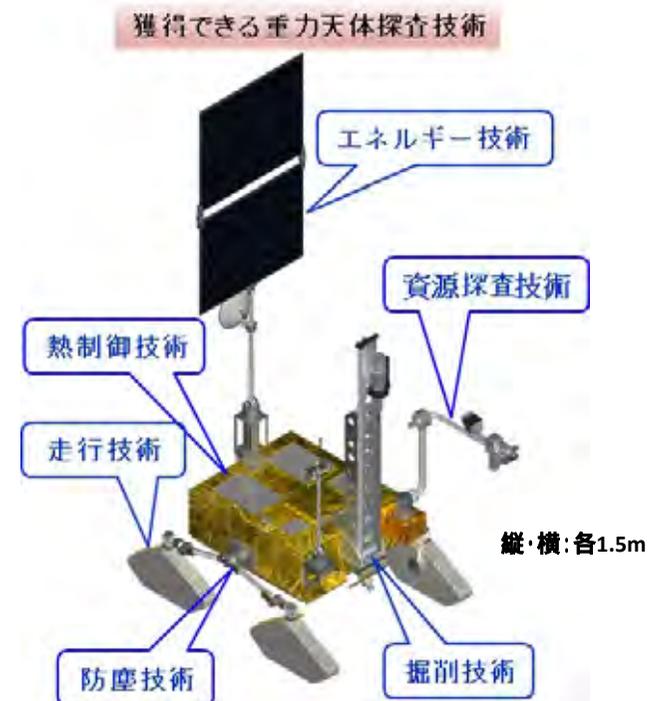
水氷分布の可能性のある地点で**元素観測**を実施し、水素が検出されれば、オーガ等による掘削・試料採取を実施。試料を加熱し、揮発性物質をガス化して**化学種同定**、**水量分析**、**同位体分析**を行う。

越夜技術、レゴリス上の走行技術等の持続的な探査活動に必要な基盤技術の実証を行う。



LROの中性子観測データをもとに推定された南極の水の分布。A.B. Sanin et al., 2017

国際分担の一例

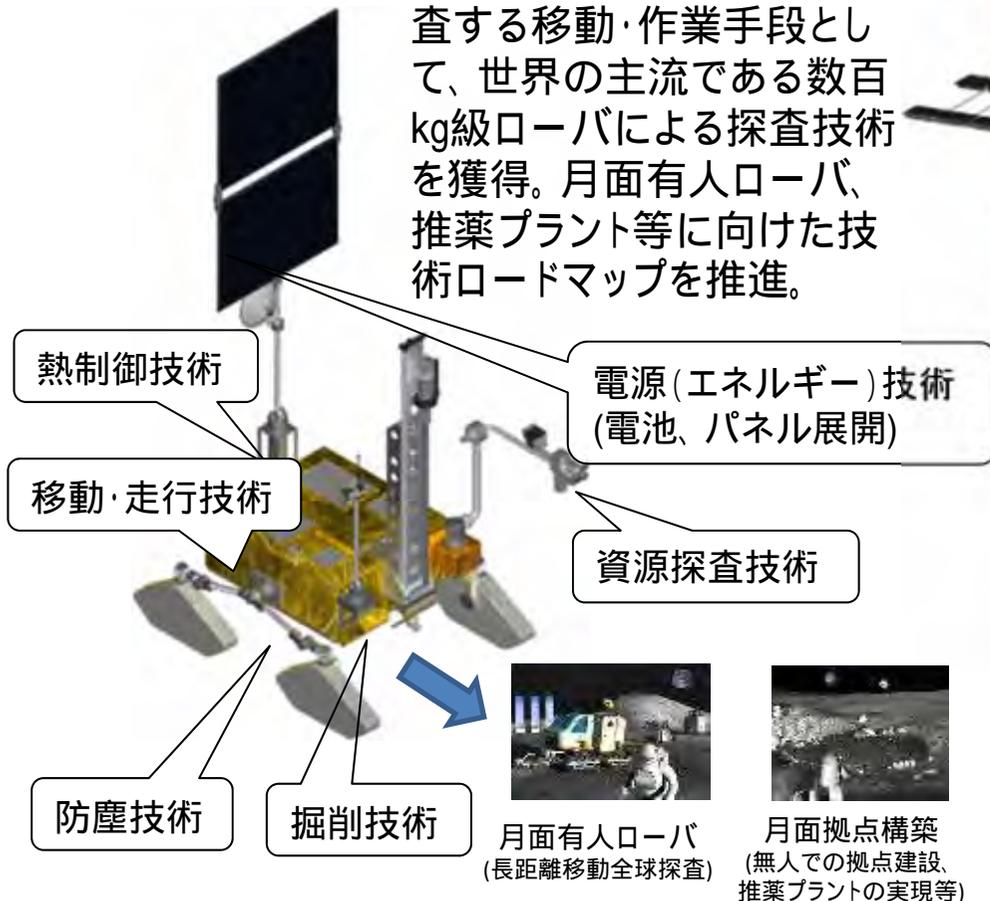


(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案) 検討中の探査機(ローバ・着陸機)の概要

- 重力天体表面を自在に探査する能力の獲得とともに、将来の拠点構築に貢献
- 世界初の再生可能エネルギーによる月面での長期活動の実現
- SLIMで獲得するピンポイント着陸技術の極域への適用・発展

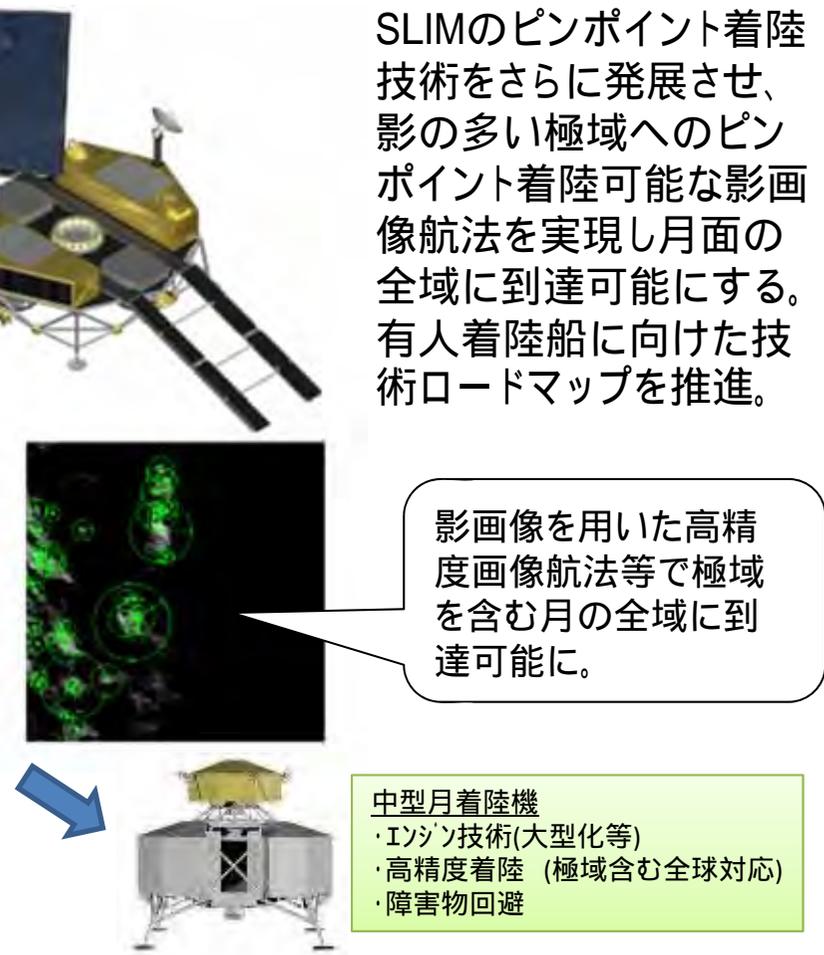
獲得できる重力天体表面探査技術

重力天体表面を自在に探査する移動・作業手段として、世界の主流である数百kg級ローバによる探査技術を獲得。月面有人ローバ、推薬プラント等に向けた技術ロードマップを推進。



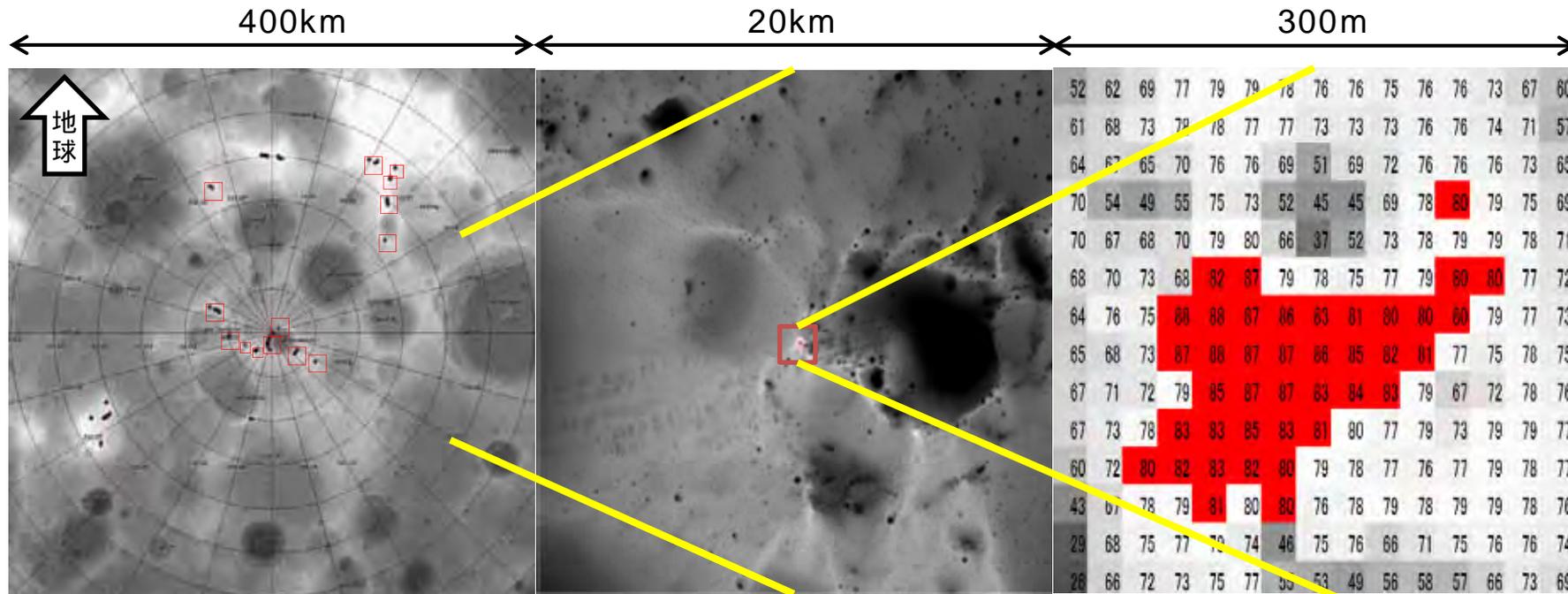
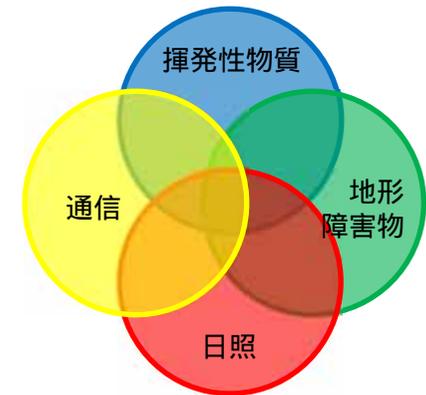
獲得できる重力天体着陸技術

SLIMのピンポイント着陸技術をさらに発展させ、影の多い極域へのピンポイント着陸可能な影画像航法を実現し月面の全域に到達可能にする。有人着陸船に向けた技術ロードマップを推進。



(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案) (参考) 月極域探査における着陸地点

- 着陸地点の条件
 - 揮発性物質の存在可能性、長期運用が実現可能な日照条件・通信条件、着陸可能な地形(傾斜)、クレータやボルダ等の障害物が少ない 等
- これらの条件を満たす着陸地点は非常に限られるとともに狭い領域である。
 - 水資源に加え、半年以上の連続日照や、80%(年間300日)以上の日照率が得られ、有人無人に関わらず持続的な活動に有利な領域は非常に希少。
 - このような希少領域に先に日本が着陸して、活動を開始することは、国際競争、権益の確保の面でも有益。
 - ピンポイント着陸技術も必須となる。



南極400km四方の地形

20km四方の中心の赤い点が80%
(年間300日)以上の日照域

300m四方の赤い領域(1辺20m)が
80% (年間300日)以上の日照域

(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案)

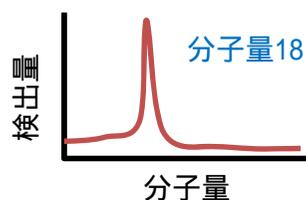
(参考) 水氷探査機器

- 水の質と量に関するデータおよび水の濃集原理を明らかにするためのデータを取得するためのミッション機器をローバに搭載する。
- より良い観測機器の実現のため公募を発出した。

「月極域探査のための観測機器の検討提案および搭載希望調査」

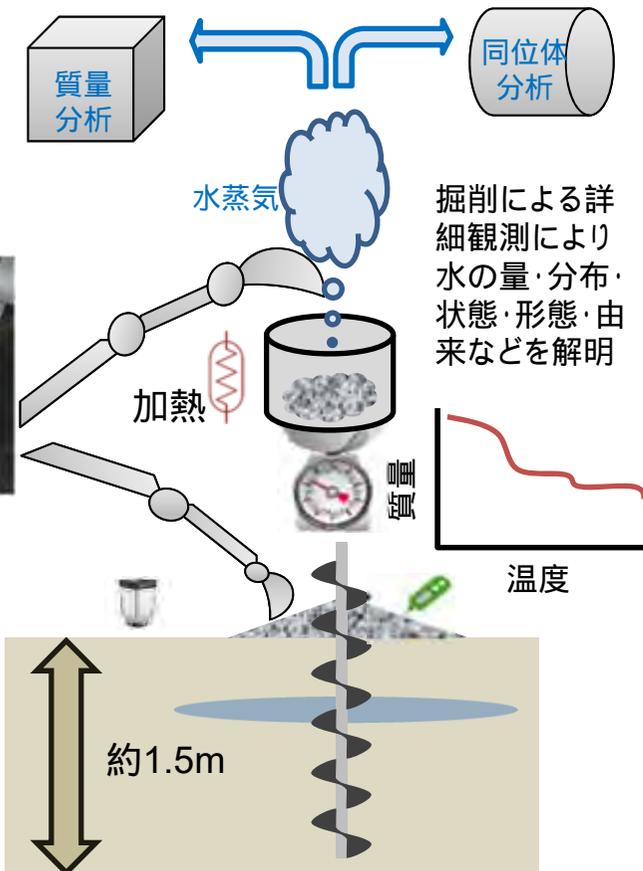
水氷探査機器の一案

地中レーダー
中性子分光計
イメージ分光カメラ
熱質量分析計
質量分析計
微量水分計



質量分析

同位体分析



走行しながら水素の存在を粗観測し、サンプル採取地点を決定



(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案)

(参考) 越夜技術

月の厳しい環境に対応し長期間の活動を実現する越夜技術が重要

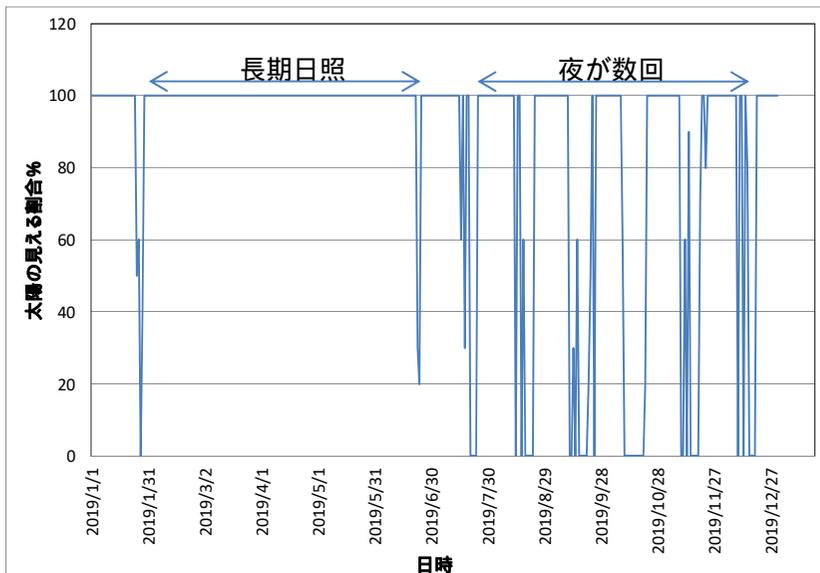
- 日陰や夜間の極低温環境での機器の越夜のための技術(発電技術、蓄電技術、節電技術)が重要。
 - 月面での長期活動はすべて原子力エネルギーによる越夜が前提(参考参照)
 - 原子力を用いないと活動は昼間に限定
- 原子力に頼らない越夜技術(電源技術、熱制御技術等)の確立を目指す。

熱制御技術の例

- 夜間の断熱と昼間の放熱を両立させるには、可変熱コンダクタンスデバイスであるヒートスイッチが必要であり世界最高レベルの熱的性能を達成している。
- 真空多層断熱に、PEEKで成形したMLI締結具やスペーサにより従来比5~40倍の断熱性能を実現。



再生可能エネルギー社会を先導



極域の日照パターンの例

電源技術の例

- 我が国の宇宙用の薄膜太陽電池及びそれをフィルムアレイ化する技術は世界最先端である。
- 我が国のリチウムイオン電池技術は世界最先端であり超高エネルギー密度の電池を開発中。
- 厳しい高温・低温環境(-40~120)に耐え、かつ安全な全固体リチウムイオン電池も開発中(現時点では液式よりエネルギー密度は低い)。
- 再生型燃料電池は、いわば超軽量の蓄電池であり、500Wh/kg以上を目指して研究開発中。

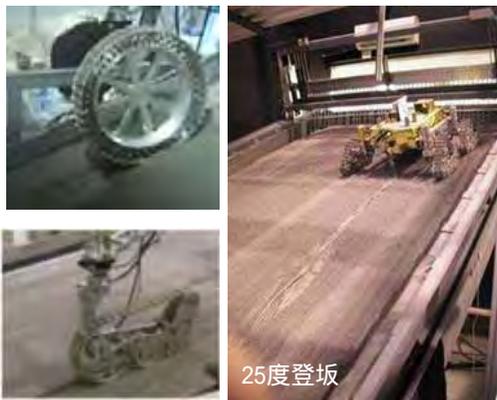


(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案) (参考) 移動・走行技術の研究開発状況

長期・広域探査のための耐久性(寿命)の確保を最優先とし効率化も検討。

・登坂性能評価

模擬砂上で斜度25度までの登坂試験を単輪及び車体で実施。



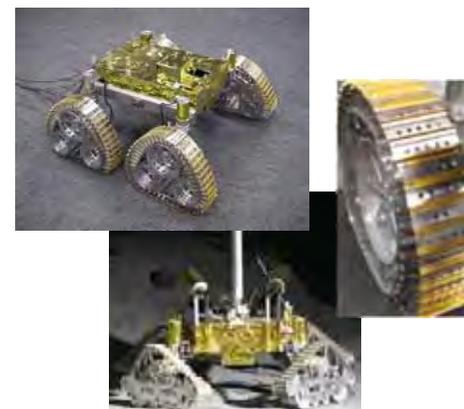
・乗り越え性能評価

段差・岩石の乗り越え、クレータリム乗り越えなどを実施。



・操舵性能等評価

4輪操舵や定点回転機能等の各種走行モードの試験を実施。



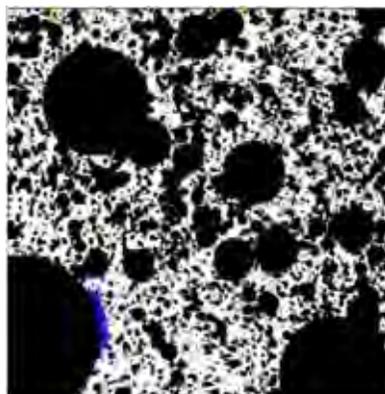
・長距離走行試験

模擬砂上の真空環境で走行機構の長距離連続走行(10km走行)を検証。



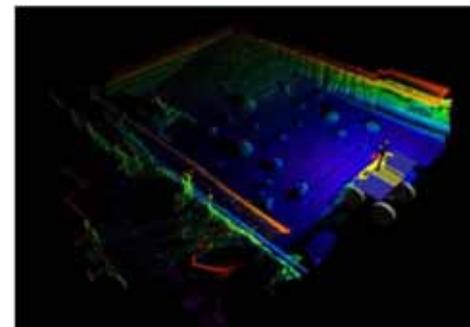
・広域経路計画

日照・通信の時間変化を考慮した広域経路計画を事前に実施。



・その場経路計画

ローバサイズのローカルな地形は事前に得られないため、その場で地図作成・経路計画を実施。



(補足) インドとの共同による月極域探査ミッションの対応方針(案)

(参考) インドとの協力の考え方

分担の考え方	備考(JAXAとしての狙い)
JAXAがローバとロケット、ISROが着陸機を担当し、重力天体表面探査技術を実証・獲得する。なお、着陸機にも電源(太陽電池、バッテリー)を提供する。	SLIMで獲得できない本格的な重力天体表面探査技術(走行技術、掘削技術、越夜技術など)を早期に実証する。
JAXAが着陸機の航法誘導センサと誘導アルゴリズムを担当し、ピンポイント技術を発展させる。	SLIMのピンポイント着陸技術を極域に発展させ、月面の全域にピンポイントで到達可能にする。
データは双方のデータの共有と一定期間後に公開(双方が合意したもののみ、PDS4形式)する。	PDS4: Planetary Data System Version4 (惑星探査データアーカイブの標準)

打上時期	2023 年頃を目標
打上ロケット	H3 ロケット
打上げ軌道	月遷移軌道
打上時質量	6トン以上
ペイロード質量	500kg以上 (ローバ含む)
運用期間	半年以上
着陸地点	月の南極域
主要ミッション機器	水氷探査機器、科学探査機器、環境計測機器 他



ロケット



ローバ



着陸機

JAXA主担当

ISRO主担当

2 . 2025年以降の地球低軌道 (ISSを含む) の在り方についての検討状況

ISSを含む地球低軌道での活動は、科学的成果の創出や無重力環境等の利用技術に加えて、深宇宙探査に必要な技術実証の場としての役割を果たすものでもあり、ISSでの取組から国際宇宙探査に係る取組をシームレスで効率的に進めていくことが重要である。また、ISSを含む地球低軌道は、宇宙ベンチャーの参入も含め、観測、測位、旅行(滞在)などの様々なビジネス活動の場としての利用が進むと推測。

地球低軌道での活動については、これまで、日本人宇宙飛行士の活躍や「きぼう」、「こうのとり」の安定的運用による国際プレゼンス向上と国際宇宙探査への主要な立場での議論参画、民間事業の創出、MAXI等による科学的成果等の多様な成果を創出していることは評価されている。ただし、その費用対効果について厳しく問われていると認識しており、民間活力や自由な発想を取り入れ、多様な需要を喚起する民間の自立的な活動の促進を図る必要がある。

上記を踏まえ、2025年以降の地球低軌道における我が国の有人宇宙活動の在り方について、各国の検討状況を注視しつつ、2019年度中に、あらゆるオプションを想定し検討を進める。その際、国際宇宙探査に係る国際調整とも連携して調整や検討を進める。現在ISSで行われている科学実験・応用利用等が継続できる代替拠点・代替プラットフォームについても検討する。

- ISSの利用を減らしてコストの削減を図る対応は、利用成果を十分に出せずに費用対効果が極端に下がることから、ISS計画に参画し続ける価値を失いかねないことに留意。
- ISSに継続して参画する場合は、ISSと国際宇宙探査それぞれへの参画を通じて得られるメリットや負担を総合的に検討し、ISSと国際宇宙探査を合わせた経費を適切に設定。

なお、ISSに参画する上での我が国の負担義務(物資補給)について、輸送単価を半減すべく、システム簡素化・搭載効率向上等を実現する新型補給機(HTV-X)を開発中である。早期にその効果を楽しむよう、HTV-Xの開発を着実に進める。(2021年度に初号機打上げ予定)

(参考) ISS計画参画から得られた知見等 (国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会(第28回)(2019/2/6開催)資料からの抜粋・要約)

(国際協力)

- 成果** 最大規模の国際プログラムにおいて、必要不可欠なメンバーとしての立ち位置を確保。
- 成果** 「日米オープン・プラットフォーム・パートナーシップ・プログラム」(2015年)において、ISSにおける日米協力は、政治的・戦略的・外交的重要性を踏まえた二国間協力の目に見える象徴であり、互恵的なパートナーシップを実証し続けていることを確認。
- 教訓** 国際宇宙探査に参画するに当たり、日本が構築・運用等に欠かせない重要な役割を担うなど存在感を持って参画することが重要であり、必要な技術の実証の場として、「きぼう」や「こうのとり」の利用・運用機会も活用するなど、ISSでの取り組みから国際宇宙探査に係る取組をシームレスで効率的に進めていくことが重要。

(技術獲得、実験利用)

- 成果** 有人輸送を除き、自律的に有人宇宙活動を行うための重要技術・基盤技術を獲得。
- 成果** 創意工夫による新たな「きぼう」利用の拡がり(超小型衛星放出等)。また、民間参入や事業化が進みつつある。
- 成果** 「きぼう」「こうのとり」の運用により国際的な信頼構築と同時に国内の技術力向上・産業振興等にも貢献。
- 教訓** 民間企業が参画・活用しやすい枠組み・制度とするためには、計画の早期段階から民間企業とともに検討を行うことが重要。
- 教訓** 国際宇宙探査に向けた技術実証の場としてISSを活用するなど、国際宇宙探査に係る取組をシームレスで効率的に進めていくことが重要。

(マネジメント(運営))

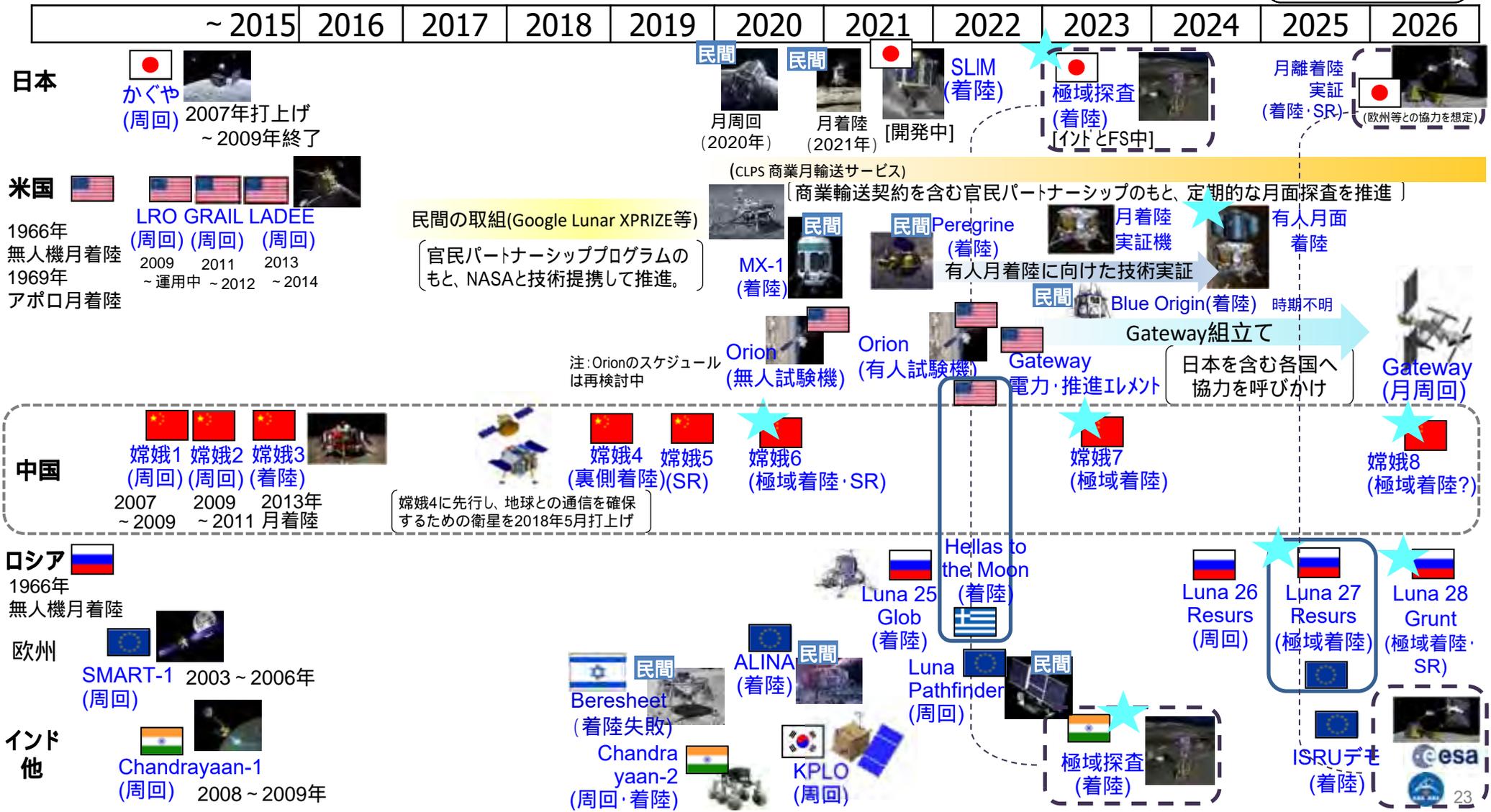
- 成果** ISS計画初期に設定された資金計画に沿った資金管理がなされてきている。
- 教訓** 費用対効果向上のためのコスト負担の更なる効率化(HTV-X開発、長期的計画を示すことによるコスト減、ISS全体の運用経費の削減等)
- 教訓** ISSでは、シャトル事故等によりISS組立・運用スケジュールに影響が生じた。国際協力プロジェクトでは、不測の事態が生じる可能性も念頭に全体計画を立案する必要。

参 考

(参考) 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年に有人月着陸を計画。2020年代前半には米露欧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：米国は月近傍有人拠点(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)



(参考) 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）。使用できる機材が限られるが、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。