

# 月面の科学について

令和6年（2024年）5月17日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

# 1. 月面の科学検討に係る背景・経緯 (1/2)



- 「国際宇宙探査における科学の位置づけ」において宇宙理工学委員会 国際宇宙探査専門委員会に設けた理学・工学検討チームを中心に科学的意義を検討した結果として「惑星科学では、ネットワーク観測が重要となってくる内部構造探査を筆頭に、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・火成活動史把握の価値が特に高い。」とJAXAより紹介。  
(第36回宇宙科学・探査小委員会：令和2年2月5日)
- 「アルテミス計画における科学」への 国際宇宙探査専門委員会の取り組み」で国際宇宙探査専門委員会よりアルテミス計画における科学についての検討内容を紹介。(第42回宇宙科学・探査小委員会：令和2年11月13日)

- 月そのものの科学  
資源・環境・内部構造の理解(分科会で検討中)
- 月面からの科学  
天文観測、宇宙天気、宇宙線観測、重力波望遠鏡
- 月面を利用した科学  
月以遠での科学探査技術の獲得(分科会で検討中)、宇宙における生命の存在可能性の探求、ムーンビレッジなど人類の活動圏拡大、宇宙防災

- **第19回 宇宙政策委員会 基本政策部会(令和3年5月26日)** 「月面活動に関する基本的考え方について」策定。「アルテミス計画への参画により、我が国の月面活動の機会が拡大していくことを念頭に、当該機会を活用して新たな知の創造につながる世界的な科学の成果を創出することを旨とする」ことが明示。
- 「月面活動に関する基本的考え方について」に示された第一級のテーマ例に基づき、日本の得意分野・得意技術を生かし、月面のできる第一級科学成果の創出が期待できる科学テーマとして下記の3分野を「月面天文台」「初期衝突盆地の年代決定(月面サンプル)」、「月震計ネットワークによる月面内部構造の把握」抽出・議論。(第45回宇宙科学・探査小委員会：令和3年5月21日)

# 1. 月面の科学検討に係る背景・経緯 (2/2)

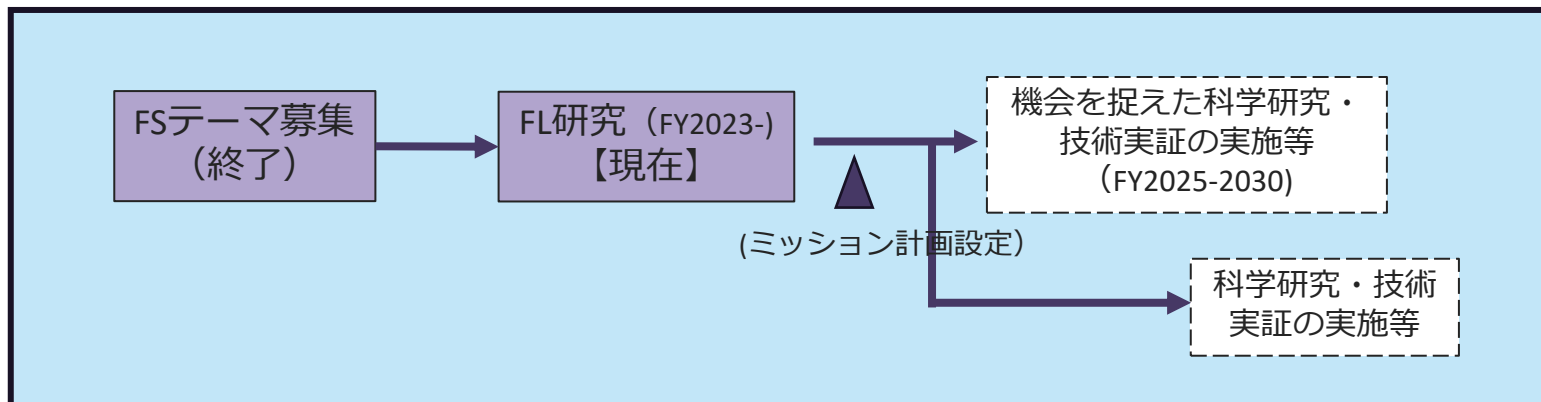


- 3テーマ等に係る「月面での科学研究・技術実証ミッションに係るフィジビリティスタディ (FS)」の公募実施。(第46回宇宙科学・探査小委員会：令和3年7月28日)
- 翌8月に公開シンポジウムを議論促進の観点からJAXAで実施。
- 採択テーマは令和4年度から約1年間かけて「月面における科学(以下、月面3科学)」を実現するためのフィジビリティスタディ (FS) を実施。なお、科学評価はI S A S宇宙理工学委員会・国際宇宙探査専門委員会において実施。

【採択課題B】世界をリードする成果の創出が期待される月面科学3領域

- ✓ 水資源探査とも連携した宇宙の暗黒時代に迫るガンマ線・低周波電波の月面天文台
- ✓ 第一級の月面科学を実現するためのシナリオと実現性の検討

- ミッション実現に向けた月面搭載機会に向けたマイルストーン等の検討開始。(第55回宇宙科学・探査小委員会：令和5年5月18日)
- 宇宙基本計画改定内容を踏まえ、令和5年度半ばからFSを踏まえ、観測機器部の技術成熟度 (TRL) を向上させるためのフロントローディング (FL) 活動実施。
- 宇宙基本計画 (令和5年6月13日) にて「**月面3科学の具体化**」明示。




月面での科学研究・技術実証の実施等に係るJAXAの活動概念図

# 2. 月面3科学について



宇宙基本計画（令和5年6月13日策定）（(a)宇宙科学・探査【太陽系科学】抜粋）  
 （略）アルテミス計画による月面活動の機会（有人と圧ローバの活用を含む。）を活用し、「月面における科学」  
(i. 月面からの天体観測（月面天文台）、ii. 重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・分析、iii. 月震計ネットワークによる月内部構造の把握）の具体化を進める。「月面における科学」の研究の実施及び必要な要素技術の開発のため、小型月着陸実証機（SLIM）技術を維持・発展させた月探査促進ミッションと、可能な限り民間サービスを活用していくことについて検討を進める。

	i .月面からの天体観測 （月面天文台）	ii .重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・分析	iii .月震計ネットワークによる月内部構造の把握
科学的意義	<p><u>低周波電波天文観測による宇宙初期への理解促進</u>  <u>低周波電波天文学</u>                      月面裏側で波長1-50MHz帯の電波干渉計での観測実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>天文形成前の宇宙最初期における中性水素21cm線の情報を捉え、初期の密度ゆらぎを直接観測</li> <li>インフレーションによる物質密度の揺らぎ観測</li> <li>系外惑星のオーロラ観測</li> </ul>	<p><u>太陽系形成過程や地球冥王代の様相の理解促進</u>  <u>月の起源と初期の分化過程→月形成直後に固化した始原地殻岩（純粋斜長岩）</u>                      始原地殻岩露頭から試料採取し、元素・同位体組成や形成年代を決定。月形成時のバルク組成を決定することで月形成条件を制約。  <u>太陽系初期における天体衝突史→巨大天体衝突によって溶融した衝突溶融岩</u>                      衝突盆地の衝突溶融岩帯の露頭から試料採取し、その形成年代を決定。45億年前から38億年前までの衝突頻度の時間履歴を復元することで、巨大惑星の軌道移動の有無、その時期や規模を制約。</p>	<p><u>月の起源や進化・分化、天体進化の基本過程の理解促進</u>                      月の正確な一次元内部構造及び地質構造による内部構造の違いの解明。</p>
月の優位性	月は大気（電離層含む）がなく、また特に月裏面は地球からの電波妨害がなく天体観測において良好な環境	天文進化の早期段階で停止した月表面には天体衝突の記録残存	天文進化の早期段階で停止した月は天体進化の基礎過程理解の最適研究対象
	 <p>月面天文台イメージ</p>	 <p>小型ローバ（左）イメージ 宇宙飛行士による月面サンプル採取（右）イメージ</p>	 <p>月震計ユニットイメージ</p>

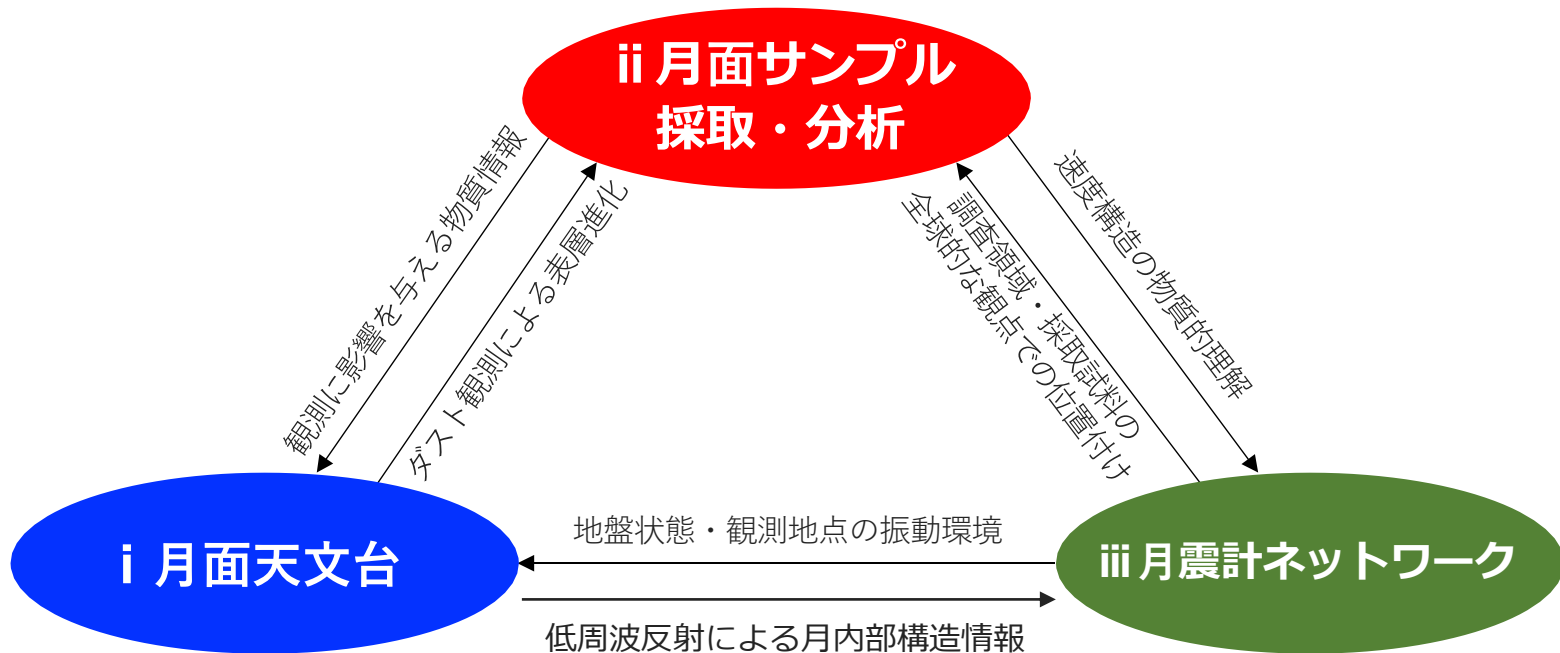
## 2. 月面3科学について



### 月面3科学の相乗効果

月面3科学はそれぞれで第一級の科学成果を創出するものであるが、相乗効果も期待でき、3科学観測を同時に実施することで、これまでにない幅の広い科学が展開可能。

- ✓ 月震観測による物理的性質を物質理解まで進めるには、月面サンプル採取・分析での科学成果が必須。
- ✓ 着陸地点付近の月サンプルの情報や地震探査による浅部構造は、月面天文台の観測環境に対して有用な情報。
- ✓ 月面天文台でのダスト観測は、月面サンプル採取・分析のその場観測から表層地質進化を解釈する上で重要。



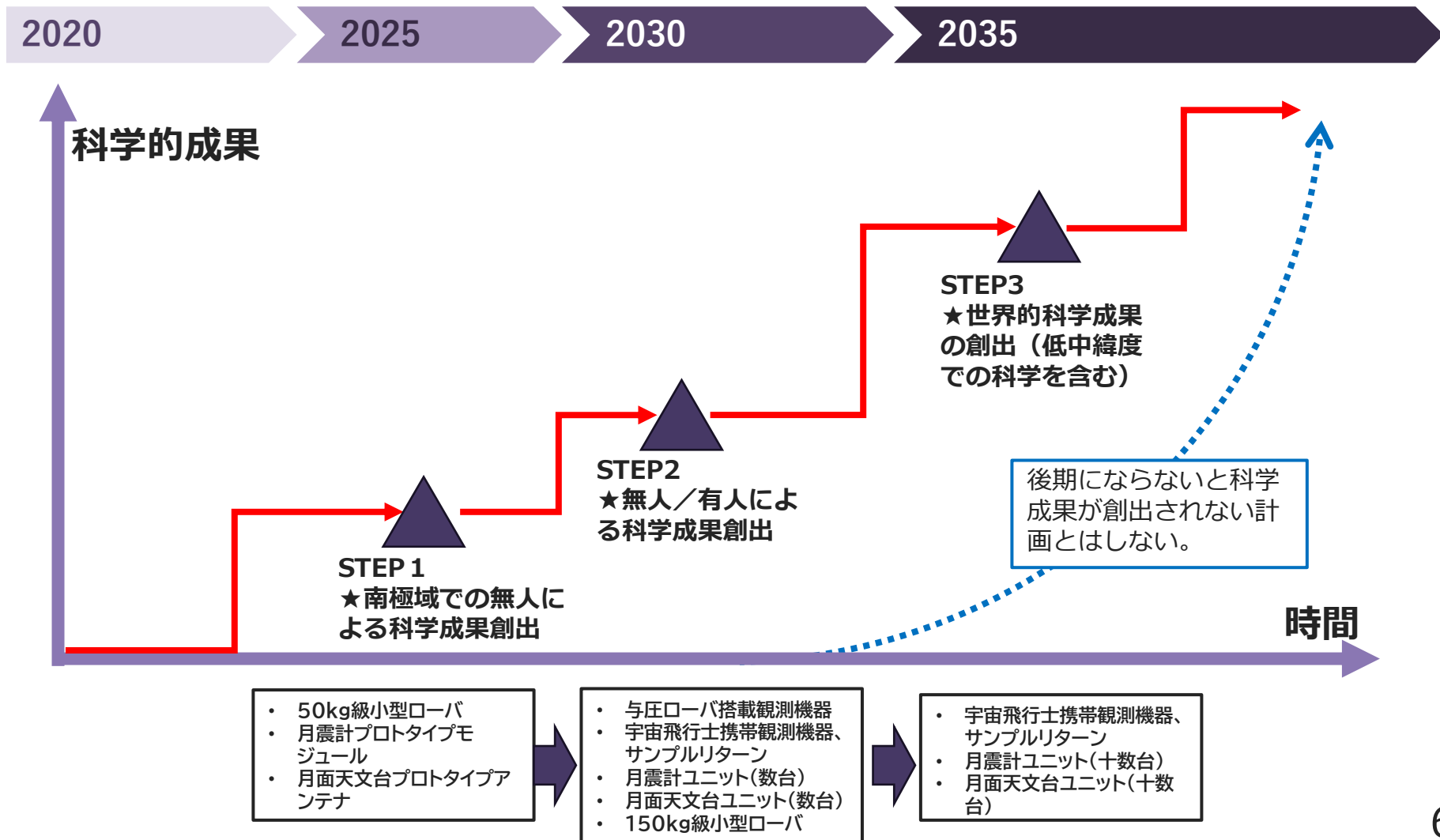
# 【参考】JAXAの国際探査の月面3科学の位置づけ



# 3. 月面3科学への取組み基本的考え方

課題認識：2030年代以降の月面活動の増大が期待されるものの、輸送サービス（コスト・頻度・積載量等）等の月面活動の予見は困難。

**基本方針：外部要因に依存しすぎず、早期かつ段階的に科学成果が創出できる計画を策定**  
**：日本単独だけではなく国際協力を念頭に、世界全体での第一級成果の早期創出を指向**





# 4. 月面3科学ステップ（案）

	プリカーサミッション (Step1) 2028年頃	本格科学ミッション開始 (Step2以降) 2031年頃	本格科学ミッションの将来像 2030年代
i. 月面天文台	<p>月面における1-50MHz帯の電波観測実証とともに電波計測環境の測定を行う。</p> <p><u>同周波数帯での天の川銀河を含む宇宙電波スペクトルをはじめて月面から測定する。</u> また、月の浮遊ダスト・地下構造測定実験を行う。</p> <p>このため、電波観測プロトタイプ・アンテナをランダーから展開し、夜間に観測を行う。</p>	<p>観測システムをパッケージ化（電源・通信系等を内蔵）し、月面における1-50MHz帯の電波干渉実験に挑む。</p> <p>宇宙の暗黒時代の中性水素21cm線グローバルシグナルの初期観測を行う。また、月の電離層測定を行う。</p> <p>夜間に継続的な観測を行う。</p>	<p>少なくとも3基の自立ユニットを月の裏側に配置し宇宙の暗黒時代の中性水素21cm線グローバルシグナル観測を行う。</p> <p>月の電離層や月の地下構造の場所による違いを調べる。これを段階的に発展させ、10基程度の自立ユニットからなる観測を実現しグローバルシグナルの検出を目指す。</p> <p>将来的な、宇宙の暗黒時代の物質分布測定のため、国際協力により、さらに多素子のアンテナユニットからなる電波観測の実現を目指す。</p>
ii. 月面サンプル採取・分析	<p>広域観測に基づき、分析を行う対象となる岩塊の選別手法を確立する。</p> <p><u>岩塊を研削し、その場で簡易分析する。</u></p>	<p>始原地殻岩または衝突溶融岩の露頭からサンプルを採取・研削し、各種分析機器で詳細分析する。</p>	<p>始原地殻岩または衝突溶融岩の露頭において、その場分析による試料選別を行い、地球に持ち帰る。</p> <p>他国サンプルリターン計画と協力し月面各地から冥王代試料を持ち帰る。</p>
iii. 月震計ネットワーク	<p><u>広帯域・高感度な月震計を設置し、年単位の観測を行う。</u></p>	<p>光学干渉式月震計パッケージ（電源・通信系等を内蔵）を設置し、年単位の観測を行う。</p>	<p>国際協力で月面の全球へ合計5地点以上の、長期間（1年以上）のNW計測を行う。日本側は自国の観測点（2点程度）および光学干渉式月震計の提供を行い、イニシアティブをとるとともに、データの相互公開、センサーの性能情報交換、研究協力をを行う。</p>



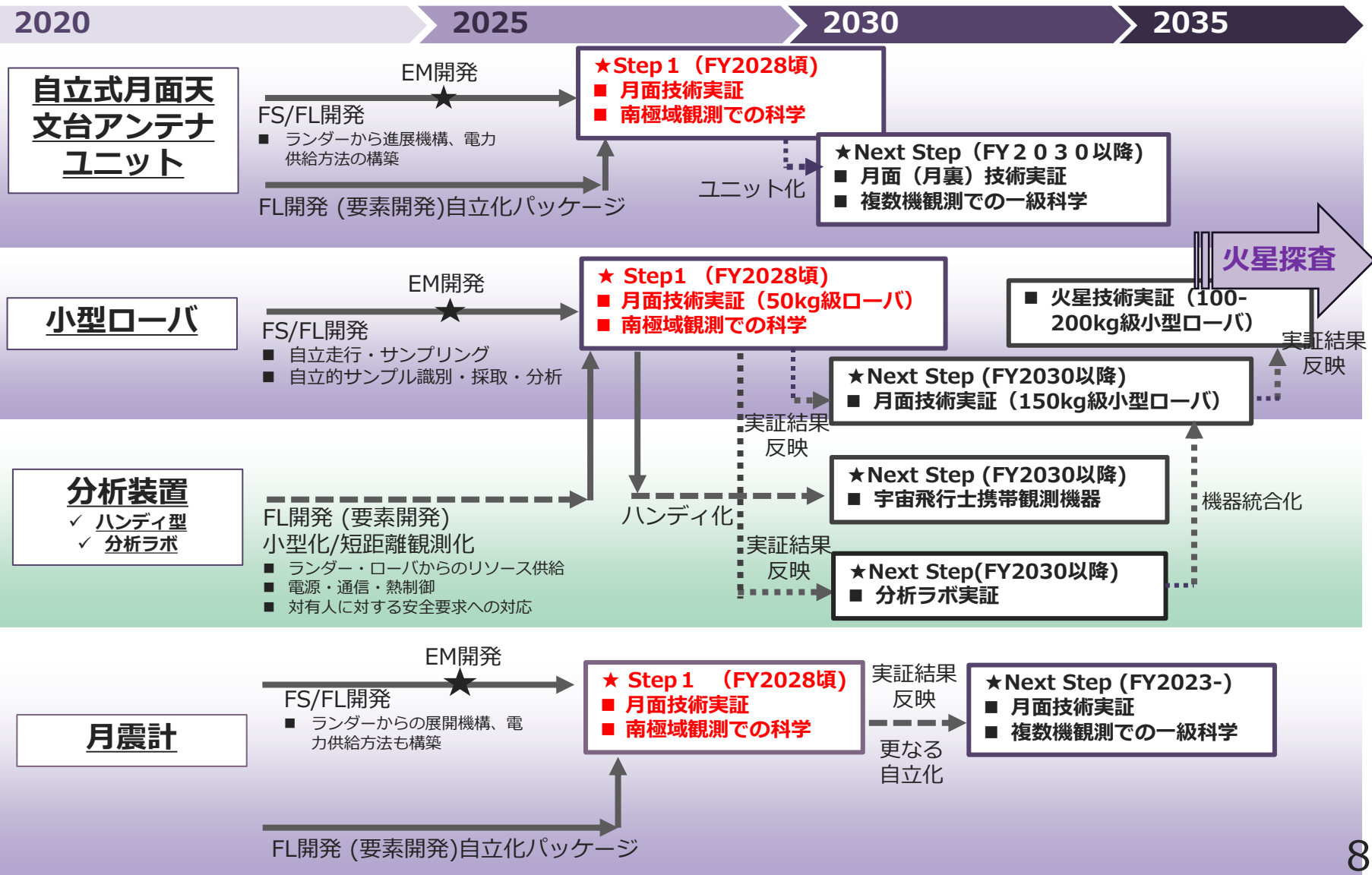
# 4. 月面3科学のステップ (案)

民間輸送サービス、与圧ローバ、有人探査(Artemis4以降)等の搭載機会獲得に向けて積極的に提案

i. 月面からの天体観測 (月面天文台)

ii. 重要な科学的知見をもたらすサンプルの選別・採取・分析

iii. 月震計ネットワークによる月内部構造の把握





# 5. 月面3科学 Step1の概要 (案)

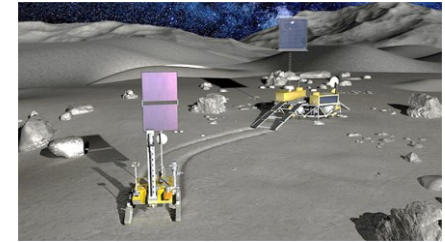
## Step 1 : 蓄積された技術を効率的に活用した早期実証・科学成果創出可能な計画 (月南極域実証)

	i .月面からの天体観測 (月面天文台)	ii .重要な科学的知見をもたらす月サンプル の選別・採取・分析	iii .月震計ネットワークによる月内部構造 の把握
Step1概要	月面環境(越夜等)で超低周波(1-50MHz帯)受信可能な <b>展開式ダイポールアンテナ</b> の展開・限定的な範囲でのデータ取得の実現。	<b>ランダー及び地表探査用センサを搭載する50kg級小型ローバ</b> はJAXA探査機の開発レガシー及び民生技術を活用し実現。“露頭”にある衝突溶融岩と原始地殻岩の分析においてピンポイント着陸必要。	<b>自立型光学干渉式による世界最高感度(高感度・広帯域(1000s-100Hz))の月震計</b> の実証及びデータ取得の実現。
早期実現に向けた国内技術・知見の活用	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ アンテナ展開技術: IKAROS等</li> <li>✓ 電波天文技術: ALMA望遠鏡</li> </ul>	ランダー搭載観測機器 <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ レーザー高度計: はやぶさ2 搭載</li> <li>✓ 広域分光カメラ(MBC): SLIM搭載</li> <li>✓ ピンポイント着陸技術: SLIM搭載</li> </ul> 50kg級ローバー <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 顕微分光カメラ: SLIM搭載MBC</li> <li>✓ Raman分光装置: MMXローバ搭載</li> <li>✓ ロボティックス技術: はやぶさ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ペネトレータ: LUNAR-A搭載</li> <li>✓ 地震計: Dragonfly搭載</li> <li>✓ 小型パッケージ技術: PROCYON, OMOTENASHI, EQUULEUS等</li> </ul> なお、月震計開発においては国内地震学コミュニティの知見も積極的に活用
獲得される成果	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 月面天文台1台での観測成果の創出</li> <li>✓ 固体惑星表面と地下の環境</li> <li>✓ 太陽電波バースト・木星バースト(オーロラ)</li> <li>✓ 天の川銀河スペクトル</li> <li>• 越夜環境等の実証に伴う技術的知見の獲得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 南極域での科学成果の創出</li> <li>✓ 太陽系初期天体衝突史の解明</li> <li>✓ 初期分化過程(地殻形成)の解明</li> <li>✓ 月バブル組成の解明</li> <li>• 火星探査実証に向けた小型ローバの技術実証と知見の獲得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 内部構造、物質に関する科学成果の創出</li> <li>• 自立的な常時(越夜含む)観測の実証に伴う技術的知見の獲得</li> </ul>
月面科学に向けた国際動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 米国・欧州・中国でも電波干渉計を検討中</li> <li>• 米国FARSIDE構想は0.2-40MHz帯の128基アンテナを最大距離10kmで優先接続予定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 米国・欧州・中国・インド・ロシアがサンプル採取を検討中</li> <li>• 極域(高緯度領域)や海領域での資源探査・環境調査が主ターゲットの傾向</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 米国・欧州・中国が月震計を搭載予定</li> <li>• なお火星探査機InSight(米国)の地震計は着陸機から有線で接続</li> </ul>
Step2以降への波及効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実証結果をもとに含む天文台自立ユニット化(電力・通信・超夜機能、原子力熱源(RHU)等)の検討促進</li> <li>• 複数設置による更なる一級科学成果の創出</li> <li>✓ 宇宙論・暗黒時代の観測→標準宇宙論の検証</li> <li>✓ 系外惑星のハビタブル環境→人類が居住できる環境調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 各センサ群は宇宙飛行士用のハンディタイプを想定し開発を行うことで有人仕様への発展へ寄与。</li> <li>• 無人探査用の観測機器群への標準化への寄与。ロボティックス技術活用による有人活動の拡大への寄与。</li> <li>• 150kg級小型ローバ開発への寄与。</li> <li>• サンプルリターンに向けた知見獲得</li> <li>• 火星探査に向けた知見の獲得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 独自の光学式の独自の自立型月震計開発の実証結果を踏まえた発展へ寄与。国際標準タイプとしての認知を深め国際的な採用・増進への期待。</li> <li>• 中低緯度(ネクタリス盆地等)での本格科学観測実施。</li> <li>• 月面建設予定地の地下構造や振動環境の把握にも貢献。</li> </ul>

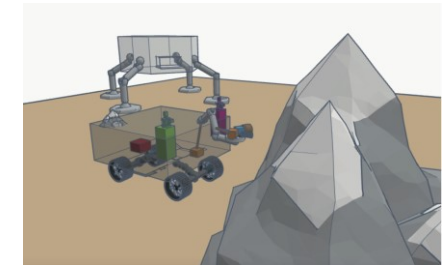
# (参考) 月極域探査機LUPEXと月面の3科学との関係について



- LUPEXは、ミッション目標として「**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とともに、重力天体表面探査技術を確立すること**」を設定し、観測機器・分析機器を搭載している。
- 他方、月面の3科学では**月の起源等に迫ることを目標**としており、例えば50kg級の小型ローバを活用し、新規開発の岩石研磨（研削）機能も用いた科学的成果の創出を目指している。
- 以上のとおり、それぞれのミッション目標に適するセンサ・機器を各々搭載。
- その場観測・分析技術及び重力天体表面探査技術について、LUPEXローバと小型ローバのサイズに違いがあることを踏まえつつ、**技術的知見を両者間で共有しつ、日本として手に入れるべき技術を着実に蓄積していく。**



LUPEXイメージ



50kg級小型ローバイメージ

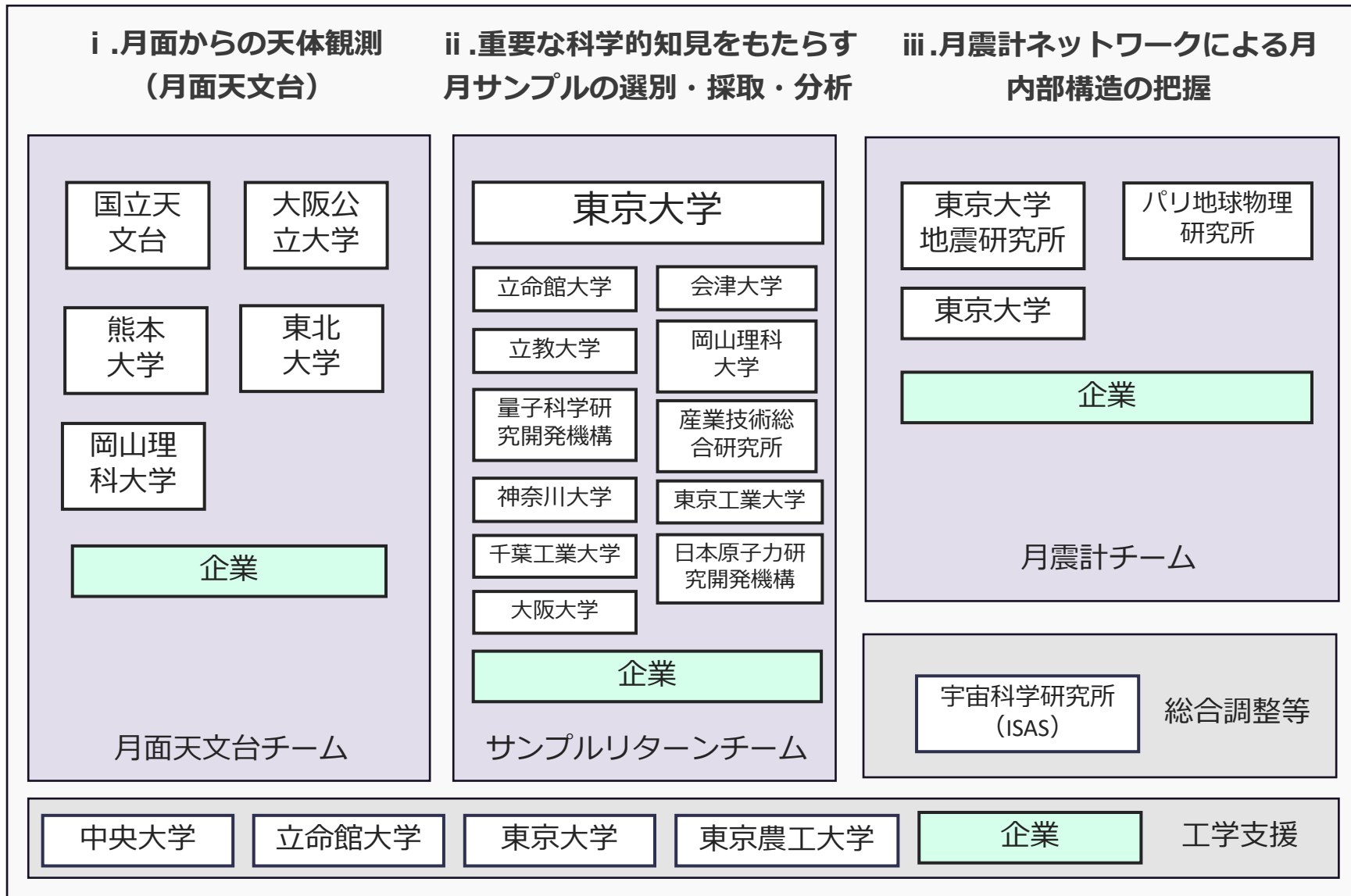
## LUPEXローバと小型ローバの比較概要

項目	50kg小型ローバ（月面3科学）	月極域探査機LUPEXローバ
重量	50kg：搭載機器，ロウンチロック込	350kg(要求仕様)：搭載機器，ロウンチロック込
ミッション目標	月の起源を含む太陽系形成過程や地球冥王代の様相の理解促進するとともに、火星本星表面探査に向けた技術を確立する	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とともに、重力天体表面探査技術を確立する
搭載機器(バス)	LUPEX, SLIM搭載LEV, OMOTENASHI, はやぶさ2搭載MINERVAの知見を活用(運用計画, 駆動機構, 環境センサ, 通信処理装置等)	MMX, SLIMの知見を活用
走行距離	最大1km (検討中)	最大10km程度
越夜対応	(オプション)SLIMの実績, LUPEXの知見を活用	越夜を実施 (高機能MLI、薄膜太陽電池、高性能バッテリーセル等で実施)
運用期間	着陸後最初の昼間のみ(検討中)	着陸後3.5か月 (エクストラで1年)
特徴(技術の差別化)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自動自律動作機能 (火星への適用を見据え)</li> <li>• 車輪移動</li> <li>• マニピュレータ搭載、岩石研磨 (研削)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地球からのテレオペレーションが中心</li> <li>• 履帯(クローラ)移動</li> <li>• 掘削ドリル搭載</li> </ul>
発展性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 科学探査用火星本星小型ローバを見据えた技術実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 与圧ローバを見据えた技術実証</li> </ul>

# (参考) 月面の3科学の実行体制について



- 月面の3科学は、これまでのSELENE（かぐや）ミッションやSLIMミッションで培われた幅広い学術コミュニティ（大学等）から多くの科学者及び企業の参画を得てALL-JAPANでの推進体制を構築。



## 7. 月科学の今後の進め方（案）



### ■ 月面3科学のStep1を早期に実施すべく 必要な技術の検討及び開発を加速

【早期実証の必要性】

- ✓ **科学のリーダーシップ獲得**：科学成果早期創出による日本の科学におけるリーダーシップの獲得
- ✓ **搭載機会への優位性獲得**：技術的実現性を早期に高めることによる搭載機会の高い競争力の獲得。なお、第一級科学成果獲得に向けた更なる国内外の搭載機会確保に対しては機器の実証実績による優位性・信頼性獲得が有用
- ✓ **国際スタンダードの獲得**：搭載IFに左右されない自立的な機器ユニット（小型・軽量、半永久電源等）の開発、実績を踏まえた観測装置の標準化に対する国際的リーダーシップを獲得
- ✓ **有人活動寄与への事前準備**：2030年代の有人圧ローバ等を用いた本格科学ミッションの実現に向けた技術的な安全性の早期確認、有人/無人による効率的な科学の推進の検討のための知見の早期獲得
- ✓ **産業裾野拡大への貢献**：自立パッケージの小型化、ラジオアイソトープ熱源（RHU）等の開発を通じた将来の月面産業に向けた事業拡大へのステップアップ
- ✓ **国内輸送サービス企業の利用促進**：国内民間輸送サービスに対する予見性の確保による事業促進への貢献（アンカーテナシー）
- ✓ **人材育成への貢献**：早期実証を通じた将来の宇宙分野の発展を支える次世代人材の早期育成及び確保

■ 月面3科学以外の科学についても、科学成果最大化の観点から、民間輸送サービスやアルテミス計画等の搭載機会を柔軟に対応できるように宇宙科学の検討促進（機会を最大限活用すべく、コミュニティに対する情報提供や事前準備等の実施）

■ SLIMで獲得した成果の活用に係る民間輸送サービスとの連携検討の推進



アルテミス黎明期を活用した科学と産業・アカデミアとの連携  
による国際競争力強化



## 8. 月以遠の科学探査（火星探査）に向けて



- 米欧中は火星有人探査時代を見据え、トップダウンで火星探査が立案・実施中
- 今後15年間は火星表面からのサンプルリターン計画が中心的な計画
- 日本も国際宇宙探査の取り組みの中で、火星へ科学の取り組みについても言及

宇宙基本計画 ((a)宇宙科学・科学探査【太陽系科学】抜粋)

同時に、アルテミス計画との連携を視野に、月及び火星について科学的成果の創出及び技術面での先導的な貢献を図る。（中略）火星本星の探査については、米国と中国による大規模な計画が先行する中、将来の有人探査に向けて、2030年代には国際的な役割分担の議論が開始される可能性があるため、2040年代までの長期的視点を持って、我が国が有利なポジションを得るために、産学のリソースを最大限に活用して、米中を始め他国が有していない我が国の独創的・先鋭的な着陸技術・要素技術等の発展・実証を目指すとともに、火星本星の探査に関する検討を行う。



- ✓ 現状出遅れている火星着陸技術は、一朝一夕には獲得は困難。MMXや月探査の技術蓄積に加え、火星環境特有の技術についても民間企業等への蓄積を戦略的に進めることが重要。
- ✓ 政策文書でも示されている火星本星の探査の確実な実現に向けて、月面3科学の技術展開も想定しており月面における早期及び着実な技術実証が必要不可欠。引き続きJAXAやコミュニティで火星探査においても議論を進め計画の具体化を進める。