

# 月面探査における科学・実証等の検討状況

2025年8月6日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

国際宇宙探査センター

宇宙科学研究所

# 本日報告の主旨

- 国際的に多様な月探査ミッションが進行/予定される中、将来の持続可能な月面探査活動に向け、日本が世界第一級の成果を創出するための月面における科学・実証等の進め方について、検討を深める重要な時期。
- 2031年打上げを目指す有人と圧ローバーの活用に加え、月面における多様な探査活動の展開を踏まえた科学・実証等の進め方についても検討を進めているところ、その検討状況をご報告する。

# 1. 月面における科学・実証等に係る背景（1/2）

- 第19回 宇宙政策委員会基本政策部会（令和3年5月）にて、「月面活動に関する基本的考え方について」策定。以下の方針が確認された：
  - 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目指す。
  - また、他天体での活動も念頭に置いた技術実証を行うとともに、国際的な協力の下で、段階的に進められる基盤整備に我が国の強みを活かして参画する。
- 第45回 宇宙科学・探査小委員会（令和3年5月）にて、「月面活動に関する基本的考え方について」に示されたテーマ例に基づき、日本の得意分野・得意技術を生かし、月面で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「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」の3分野を抽出・議論。

※その後、宇宙基本計画（令和5年6月13日策定）にて、以下のとおり明示された。（以下、本3分野を月面3科学という。）

アルテミス計画による月面活動の機会（有人与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。

# 1. 月面における科学・実証等に係る背景 (2/2)

- ISS・国際宇宙探査小委員会における議論を経て、第88回宇宙開発利用部会（令和6年7月）にて、「月面探査における当面の取組と進め方について」策定。以下の方針が確認された：

## 3. 月面探査に関する当面の取組

各国において月面活動が本格化している状況に鑑み、我が国としても切迫感を持って戦略的に月面探査を進める必要がある。具体的には、将来の有人探査に向けて、水等の資源や地質などの月面の調査を実施するとともに、アルテミス計画を着実に進める必要がある。あわせて、宇宙科学の成果の創出を目指し、月や火星の形成過程の解明やそのための技術開発等を推進することも重要である。これらの推進に当たっては、月面における調査や技術実証の機会を定期的に確保するとともに、産学官の多様な機関や人材が探査活動を担うための基盤を構築する必要がある。将来の火星探査への更なる展開も考慮に入れつつ、必要な技術や知見の獲得に努めていくことも重要である。（以下略）

※下線・強調は今回付記

## 2. 月面での科学研究・技術実証に係るこれまでの取組（1/2）

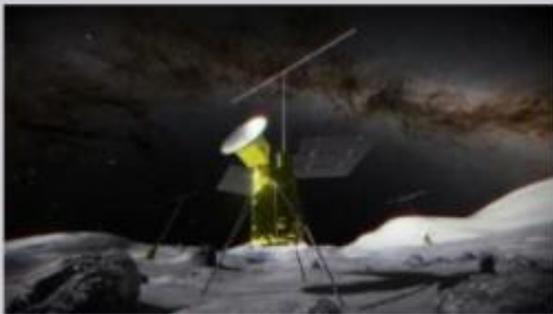
### 【月面での科学研究・技術実証に係る検討状況】

- 令和3年7月、同5月に示された「月面活動に係る基本的な考え方」をふまえ「[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（以下、月面科学FS）](#)」の公募を開始。以下の課題A・Bで選定された各テーマは、2022年度から1年間程度、実現性の検討を行った。
- その後、月面科学FSの成果を踏まえ、[TRL4相当までの実証を目指す先行的な技術の研究開発として、フロントローディング活動（以下、月面科学FL）](#)を実施している。
  - 課題A： 持続的な月面探査と月面利用の拡大に不可欠な月面環境情報(ground truth)の取得ならびにそれに基づく環境予測モデル(予測方法)の構築
  - 課題B： 世界をリードする科学成果の月面活動からの創出（「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」）

	代表提案者	選定テーマ	参加機関
課題A	名古屋大学 三好由純	月面利用の拡大に向けた超小型・高機能な宇宙放射線環境の計測技術とリアルタイム被ばく線量評価システムの構築	東京大学、原研、慶応大学、神戸大学、理研、高工ネ研、京都大学、JAXA
	東京大学 宮本英昭	マルチスケール月面誘電率計測のフィジビリティスタディによる月浅部地下探査新手法の検討	東北大学
課題B	理化学研究所 榎戸輝揚* *現在は京都大学	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	国立天文台、近畿大学、広島大学
	JAXA/ISAS 佐伯孝尚、森治、吉光徹雄	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	国立天文台、東京大学、立命館大学、岡山大学、東京農工大学、パリ大学 他

# 2. 月面での科学研究・技術実証に係るこれまでの取組 (2/2)

## ■ 月面3科学について

	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>  <b>低周波電波天文学</b>                      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>  <b>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)</b>                      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。  <b>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</b>                      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>

3

# 3. 有人と圧ローバーの利用に係る検討状況 (1/2)

## 【利用の枠組み】

- 日米枠組協定下の「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に基づき設置される「共同利用フォーラム (joint utilization forum)」が、与圧ローバの利用計画を調整、設定することとなっている。今後、フォーラムの共同議長となるJAXAとNASAにて具体的な調整プロセスの設定を進める予定。

(参考) 与圧ローバによる月面探査の実施取決めの関連条項 - 抜粋

※下線は今回付記

### SECTION 6. MANAGEMENT

E. A joint utilization forum will be established to manage the science, technology, and, as appropriate, commercial utilization activities to be carried out using the PR. The forum will be co-chaired by representatives from NASA and JAXA. Forum decisions will be made by consensus to the greatest possible extent. Where consensus cannot be achieved, either co-chair, or both, may raise the issue to the PRPCB for decision.

- 有人と圧ローバを用いた科学利用の候補テーマの国内における選定は、上述の「共同利用フォーラム」での取扱い方法・調整プロセス等をふまえて、行うことを想定している。
  - ✓ 科学コミュニティに対し透明性及び予見性をもった選定プロセスとなるよう検討を進める。
  - ✓ 加えて、有人活動において期待される柔軟な対応力、複雑な作業力、現場での優れた洞察力等の特徴を踏まえた科学利用となるよう検討を進める。

# 3. 有人与圧ローバー利用に係る検討状況（2/2）

## 【与圧ローバーの要求仕様検討】

- 有人与圧ローバは、現在概念設計フェーズ（Phase A）にあり、システム要求に係るNASAとの調整およびその実現解の検討を進めている。
- そのなかでは、NASA要求のみならず、「月面3科学」等の月面科学FS/FLテーマ（上述）を含め科学側の利用想定を取り込んで、科学機器の搭載に必要な標準的なインターフェース要求の設定を進めている。
  - ✓ 本年4月にNASA/JAXAで共同開催された「有人与圧ローバーを利用した月面無人科学ミッションに係るワークショップ（LSSW26）」では、無人科学探査での用途や潜在的な利用可能性につき、広く議論を実施。（参考6に概要を紹介）
  - ✓ これら以外にも、「宇宙飛行士の月面滞在」を活かした生命医科学や材料科学等の研究が想定される。
- 与圧ローバの質量・容積・機能機器レイアウトの制約を念頭に、以下のようなペイロード搭載インタフェース（機械取付、電力、通信）を具備する予定（NASAと調整中）。
  - ✓ 船外PLの搭載(前後左右計4つ)、月面展開PLの搭載(後方側2つ)、ロボットアーム把持(1つ)
  - ✓ 船外保管庫の搭載(ツール用1つ、月面サンプル用2つ)
  - ✓ キャビン内PLの搭載(計4つ)

# 4. 月面での科学・実証等に向けた搭載機会の確保 (1/4)

- これまでのFS/FL活動における実現性検討や先行的な技術の研究開発、また有人と圧ローバの活用も見据えた科学界との対話等を通じ、月面3科学やそれに留まらない月面の利用ニーズ(\*)が具体化してきている。

\*：例) 月面における環境情報・将来の有人宇宙活動に資する情報の収集、任意地点への科学観測装置等の設置/配備

<月面の利用ニーズに応える情報・取組みの例> ※内部でも議論中のもの

必要な情報・取組み	情報を収集する科学機器や取組みの例
月面放射線環境に関する情報	放射線計測装置等
月面プラズマ環境に関する情報	荷電粒子計測器、電磁場観測装置等
月面ダスト環境に関する情報	電波観測装置、ダスト粒子計測器等
月表層、地下、重力環境に関する情報	地形調査装置、物質分布調査装置、化学特性・元素分析装置、地中レーダ、誘電率計測器、重力偏差計等
月面環境での有人滞在に資する情報	放射線、重力環境の変化 (0G⇔1/6G)、塵ばい等による人体や作業性等への影響に関する評価等
科学観測装置等の任意地点への設置/配備	輸送コストが低く、小回りの利く小型数十kg級 複数ローバの自律的な群制御

<任意地点でのサンプル分析や観測装置等の設置を可能にする技術実証を目指してISASが検討中の小型探査ローバ>



- 探査活動の進展を見据え、月等からのサンプルリターンに係る要素技術の獲得・促進も必要。

# 4. 月面での科学・実証等に向けた搭載機会の確保 (2/4)

- 今後、これらの科学研究・技術実証を実現するために、各研究機器、観測機器、実証機等の月面への搭載機会の確保、さらに搭載に向けた予見性の確保が重要である。月面への搭載機会の確保にあたっては、以下を考慮しながら世界第一級の成果の早期かつ段階的な創出を目指す。

## (1) 搭載手段の観点として、

- アルテミス計画等の国際協力における搭載機会確保 (特に有人と圧ローバの活用)
- 自主的な搭載機会の確保

## (2) 搭載戦略の観点として、

- 先の研究・開発を見据えた計画的かつタイムリーな搭載機会

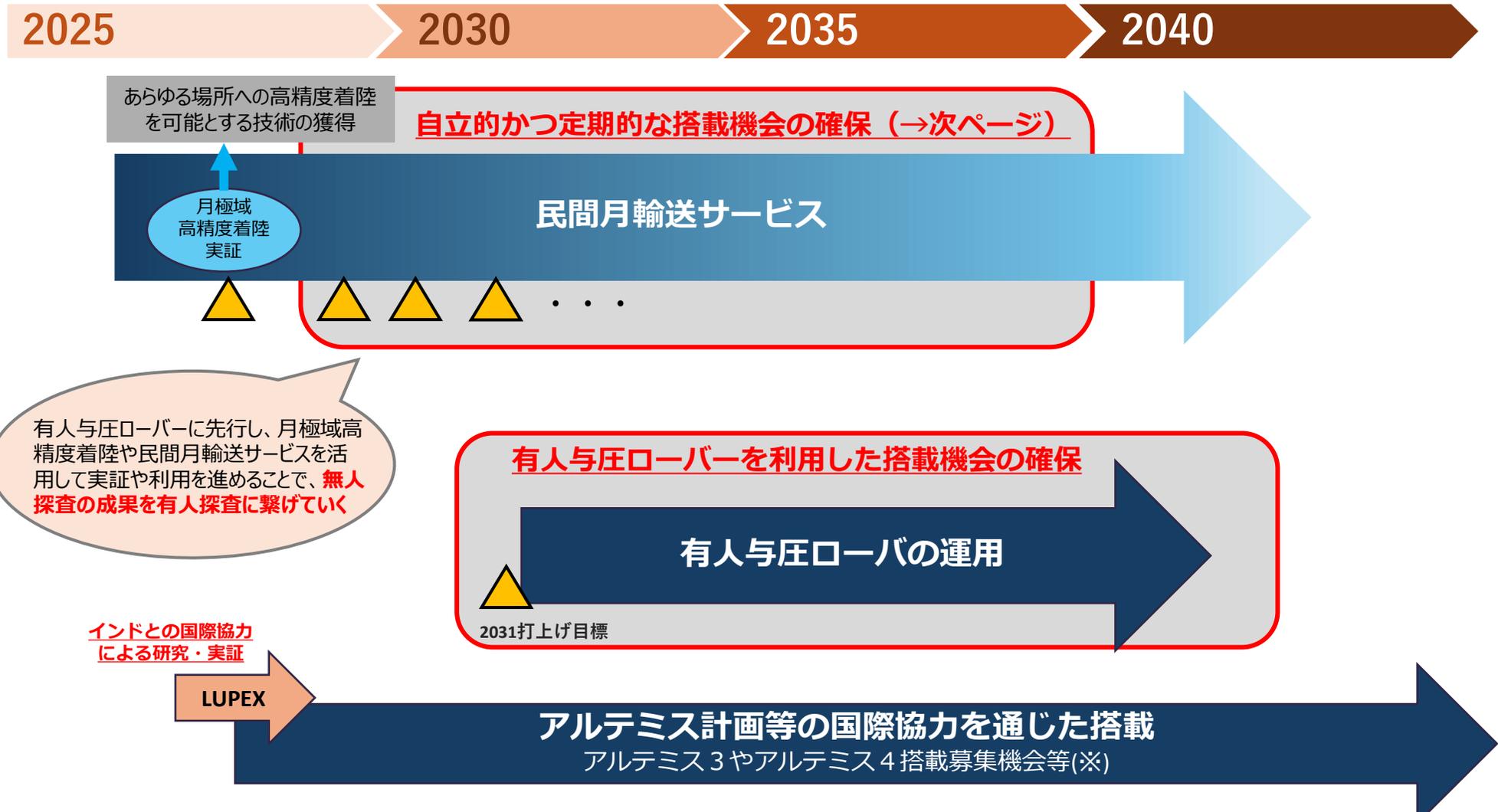
- 月面 3 科学は、月面科学FLの活動状況(TRL4(BBM)達成見込み)を踏まえ、以下の各Step による本格的なミッションの実施に向け、機器開発や搭載手段の確保に着手する時期にある。

(2028年頃から2035年頃を目途に進める)

	Step 1 : 極域	Step 2 : 極域 + 移動先* *有人と圧ローバ等の移動体を想定	Step 3 : 裏側・表側
<b>月面天文台</b>	●着陸機からのアンテナ伸展、1-50 MHz の観測	●複数台による宇宙の暗黒時代の中性水素21cm線グローバルシグナル(空間的な平均温度)観測 ●電波干渉実験(系外惑星の宇宙天気環境調査)	●観測ネットワークの裏側を含む設置(天文台：10台, 月震計：合計5地点以上(国際協力))
<b>月震計ネットワーク</b>	●広帯域(長周期)月震計設置、年単位の観測	●光干渉式広帯域・高感度月震計パッケージの設置、複数台による年単位の観測	
<b>月面サンプルリターン</b>	●岩塊研削・多角的地質分析	●アルテミス飛行士による観測(ハンディ型機器)、サンプルの選別・持ち帰り	●科学的意義が高い始原的な地殻岩の露頭部や衝突盆地(表側 Nectaris, 裏側 SPA)へのアクセス

# 4. 月面での科学・実証等に向けた搭載機会の確保 (3/4)

✓ 月面利用に向けた搭載機会を段階的に確保し、月面における科学研究/技術実証の実現を目指す。



インドとの国際協力による研究・実証

LUPEX

(※) アルテミス3ミッションでは、NASAによる公募を通じ、東京大学・宮本教授の月面誘電率計測器 (LDA) が搭載機器の1つとして選定されている。

## 4. 月面での科学・実証等に向けた搭載機会の確保（4/4）

- 月面における科学研究/環境計測/技術実証ミッションの目的/目指す場所に応じた実証をタイムリーに実現するために、将来の有人と圧ローバーによる搭載機会を見据えつつ、日本として自立的な実証/利用機会を確保するため、民間月輸送サービスを活用した搭載機会を先行して整備しておく必要があると考えている。
  - これまで準備を進めてきた月面FS/FLを含む各ミッションに対して、月面への輸送手段は定まっていない状況にある。速やかに実証フェーズに移行するためには、確実な輸送手段を確保しておく必要がある。
  - 宇宙政策委員会で「月極域における高精度着陸技術については特に商業化に向けたアンカーテナントが重要」という指摘事項があった。月面探査の初期段階においては、公的機関が月面での科学研究/環境計測/技術の実証ミッションを定期的に立ち上げることは、輸送事業者にとっては商業化に向けたアンカーテナントとなり得る。更に、月面環境の利用者/月面への輸送事業者の両者に対して事業の予見可能性を持たせることが可能となり、国際宇宙探査への民間企業の参入促進にも資すると考えている。
  - 日本の国際宇宙探査にとって重要な役割を担う有人と圧ローバーの確実な実現にあたっては、有人と圧ローバーの月到着に先行して、（月極域高精度着陸や）民間月輸送サービスにより必要な科学/環境データを段階的に取得しておくことは、将来のローバー運用計画やそこでの実証計画の具体化にもつながり、ひいては日本の国際宇宙探査への貢献を最大化し、国際協力の可能性を高めるものと考えている。

# 5. 新たな科学・探査ミッションの立ち上げ

- 現在JAXAで取り組んでいる月面科学FLの各テーマについて、今年度末までにTRL4相当の技術成立性の確認を得られる見通しであることから、フロントローディング活動としては2025年度で終了する予定。フロントローディング活動の最終的な成果や、月面への搭載機会の確保の動向も踏まえて、本格的なミッション構築の検討を進めていく。
- 一方で、月面という環境を利用する科学・探査は、月面における持続的な有人探査を推進する上での重要なドライビングフォースである。JAXAとしては、既存テーマの成果創出を目指しつつ、新たな科学・探査ミッションを定期的かつ持続的に立ち上げていくことが必要と考えている。
- JAXAでは「日本の国際宇宙探査シナリオ案」の改訂を進めている。このシナリオを指標に、技術的優位性や国際関係を考慮して重点的に取り組むべき領域を識別しながら、今後の月面での科学・探査ミッションを進めていく所存。



# (参考2) 有人と圧ローバーの概要

- 米国が主導する「アルテミス計画」のキー要素として、月面上の広い範囲を長期間にわたり移動可能なモビリティ。
- 有人月面着陸機(HLS)で到着した飛行士に、月面上での「居住空間」と「移動手段」を提供。
  - 船外宇宙服を着た状態で乗降
  - シャツスリーブで居住
  - 飛行士の操作、遠隔操作及び自律運転で移動
- 年1回の有人ミッション期間以外は、無人探査ローバとしての探査機能を提供。



<b>ミッション コンセプト</b>	クルー人数	2名
	探査領域	南極域
	有人ミッション頻度	1回/年
<b>システム 要求 (NASAと 調整中)</b>	有人ミッション期間	28日 (+ 異常時対応3日)
	越夜能力	有人: 36h、無人: 192h
	移動距離	18km/日 (総走行距離: 10,000km)
	搭載量	最大3,000kg



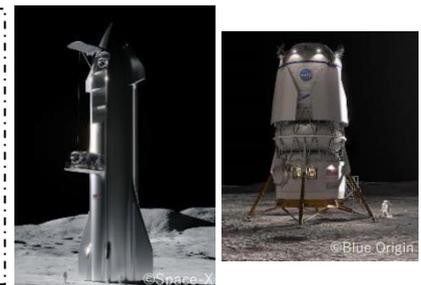
南極域を離れて中緯度側に行くためには、越夜能力の増強が必要  
(越夜能力14日以上)

↓

RFCタンク(=蓄電量)を追加できるように拡張性を持たせる予定

(参考) 有人と圧ローバーの月面輸送に関連するNASA側開発要素の動向

- 「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に基づき、有人と圧ローバーの月面への輸送はNASAが提供する。
- NASAは、有人月面ランダ (Space-X社もしくはBlue Origin社) を大型貨物輸送用に改変したものを、有人と圧ローバの輸送に使用する計画。



# (参考3) 有人と圧ローバーの想定ミッションプロファイル

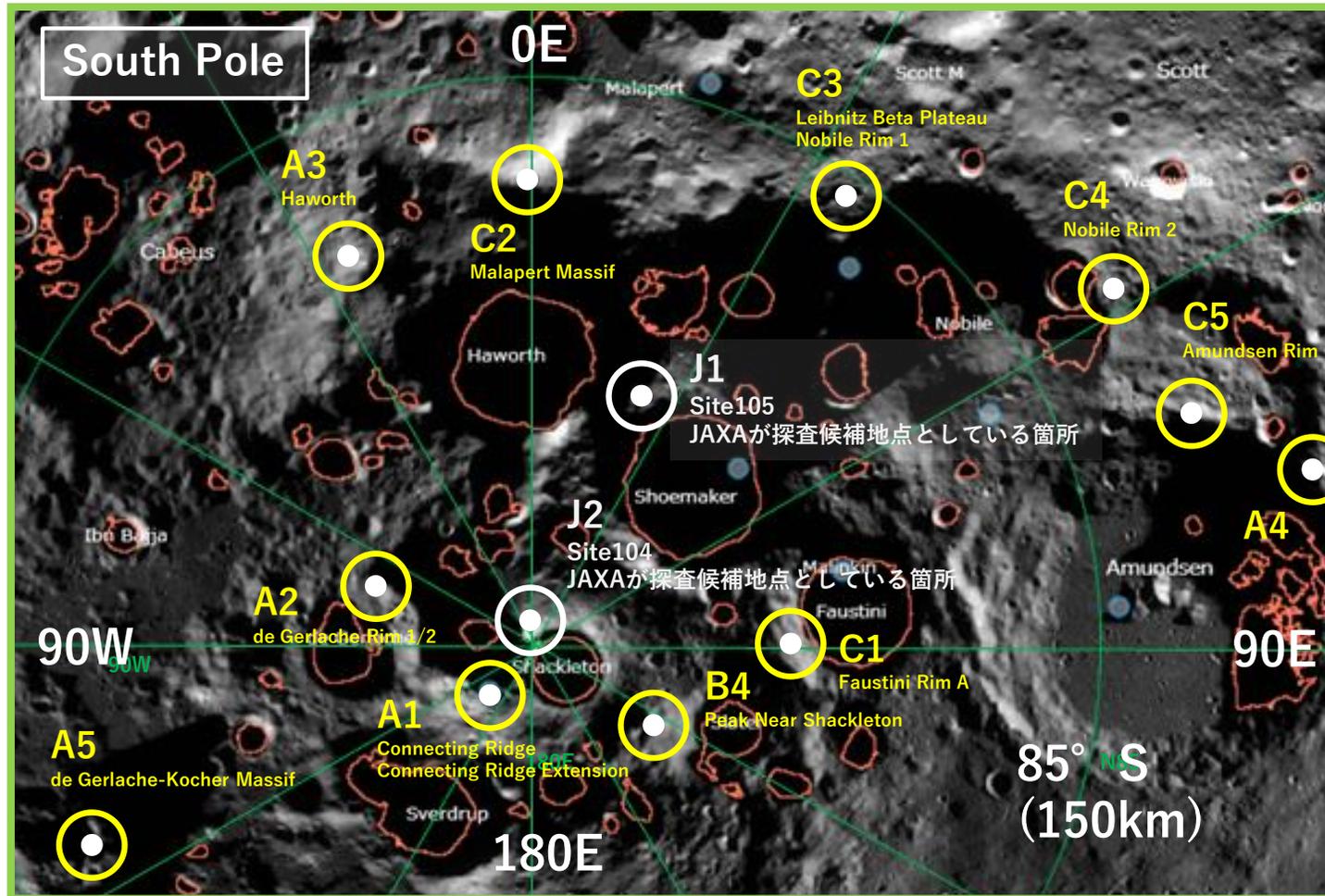
## 有人と圧ローバーの運用概要 (1年サイクル)



<p>[Day 1 : Parking /Recharge]</p> <p>Crew Return</p> <p>Standby /Recharging</p>	<p>[Day 2 : Traversing &amp; Robotic Exploration]</p> <p>Traversing</p> <p>Robotic Exploration</p> <p>Total : 8 hrs</p> <p>Parking / Recharging : Total 16 hrs</p>	<p>[Day 3 : Recharging]</p> <p>Recharging</p>	<p>[Day 4-15]</p> <p>Repeat Day 2 &amp; 3 Operations</p>	<p>[Day 16 - 23 : Parking]</p> <p>Uncrewed PED</p> <p>Standby</p>	<p>[Day 24 - 332]</p> <p>Repeat Day 1 thru Day 23 operation</p>	<p>Next Human Exploration Point</p> <p>Standby /Recharging</p>
<p>← Lunar day →</p>			<p>← Lunar night →</p>			

無人期間中(11か月)の運用⇒

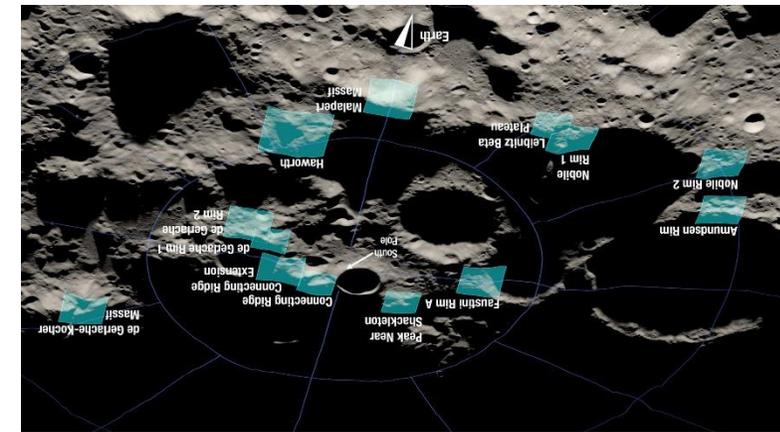
# (参考4) 有人と圧ローバーの想定探査領域



A1~C5(黄色) :

NASAが、Artemis-IIIの有人着陸候補として選定している領域

- 打上げ可能期間に加え、地形の傾き、地上との通信、日照条件等を考慮
- 永久影に十分近い一方で、6日半（アルテミスIIIの有人滞在期間）の滞在中、継続的に日照が得られる

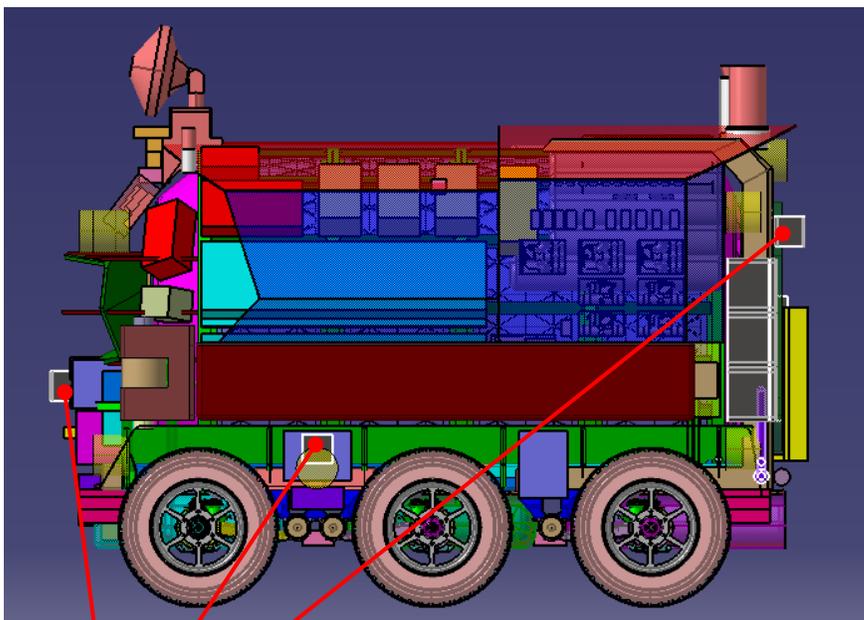


(ref.) <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon/>  
(Aug.19, 2022)



「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に基づく10年間（想定）の有人-無人ミッション期間ののち、南極域から離れた領域(SPA盆地等)への無人探査を想定。そのため、越夜能力の増強等の拡張性を持たせる。

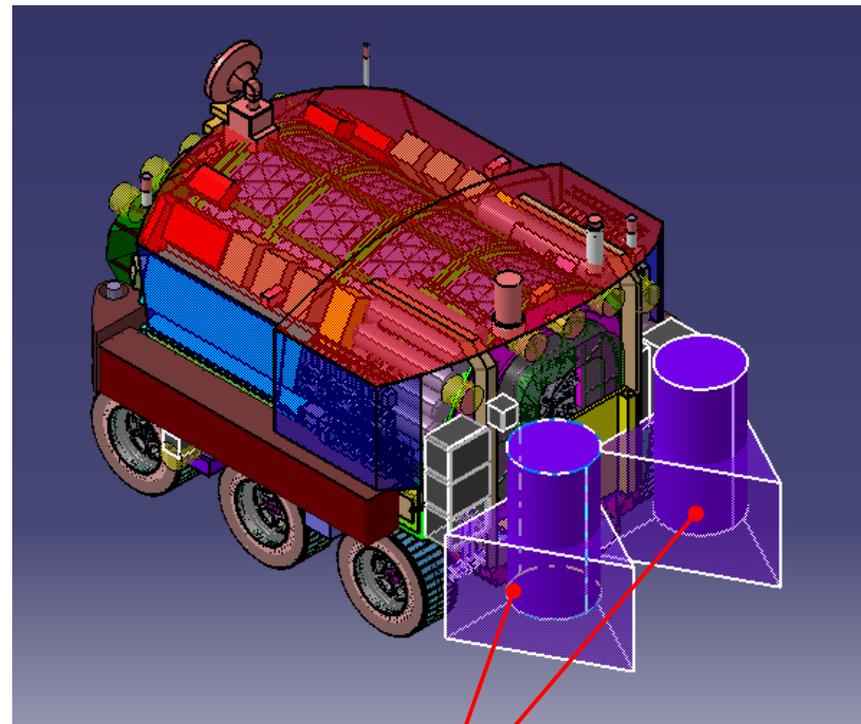
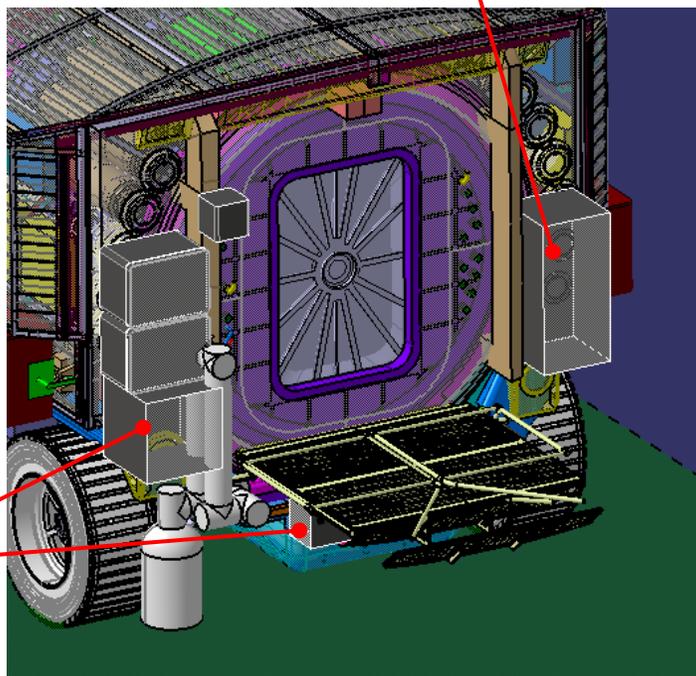
# (参考5) 有人と圧ローバー船外ペイロード配置 (検討中)



船外ペイロードインタフェース  
(前後左右面にそれぞれ1カ所、計4カ所)

サンプル保管庫

ツール保管庫



月面展開ペイロード (後面2カ所)

月面天文台ユニットの積載例  
※上部のアンテナ含め円柱で表現

# (参考6) LSSW26の結果

- 実施日程 2025年4月10日、11日
- 発表件数 プレゼン発表21件、Abstractのみ公開7件
- 参加者 4/10：180名程度、4/11：120名程度

## ■ 主な結果概要は、以下の通り。

- PRの運用コンセプト・想定能力に関して様々な質問が寄せられ、科学者からのPRへの関心・期待が高いことが伺われた。
- 本ワークショップが意図していた趣旨に沿って、参加者同士で積極的な対話がなされたことは良い点であると考えられる。多くの搭載ペイロードの可能性が提示され、PRがサポートすべき良い選択肢が多くあることが明らかになった。
- ワorkshop開催にあたって掲げた以下のような事項について議論ができ、実り多いものであった。
  - 広範な科学コミュニティとの議論により、新たなアイデアや情報が創出されること。
  - PRの能力を最大化する科学機器の参考リストが得られること。
  - PRによる無人科学運用機会に係るコンセプトが提供されること。

## ■ 期待される有人と圧ローバーの利用例

- 月面3科学の実現・促進（月面天文台、月震計ネットワーク、サンプルリターン）
- 月面環境(ダストや帯電など)に関する科学探査
- 月面の物質組成/分布に係る広域データ観測やマッピング（資源探査向け）
- 月面の鉱物組成/分布に係る広域データ観測やマッピング（科学探査向け）
- 任意地点における、月面設置型ペイロード(月震計など)の設置 など