



資料60-1-1
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
ISS・国際宇宙探査小委員会
(第60回)

月極域探査機 (LUPEX) について

2024年4月24日

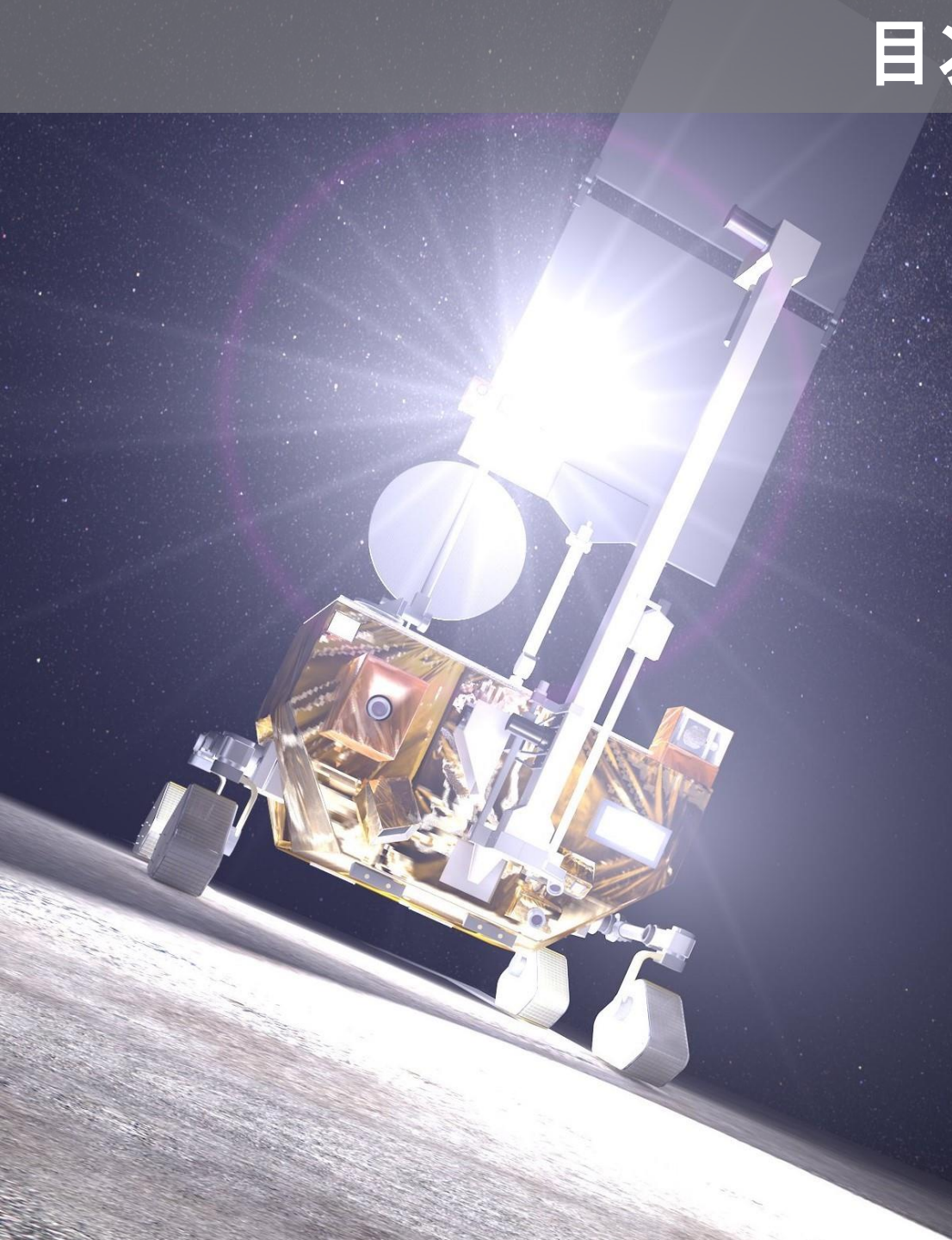
JAXA 有人宇宙技術部門

月極域探査機 (LUPEX) プロジェクトチーム

麻生 大

LUPEX

Lunar Polar Exploration



1. はじめに
2. 水探査の重要性とアウトカム
3. 各国の水探査動向
4. 運用概要
5. 国際連携
6. 開発状況
7. 後続ミッションへの技術継承

1. はじめに

- **月探査協力に関する文科省とNASAの共同宣言 (JEDI) Sec. 2. A), 2020/7/10**

月極域探査ミッションへのNASAの機器搭載、NASAが計画している月面探査ミッションへのJAXA機器の搭載を議論するとともに、これらの協力を通じて得られた観測データを共有する。

- **宇宙開発利用部会** (令和4年7月8日 第67回「LUPEXプロジェクト移行審査の結果について」)

プロジェクト移行について審議、了承。

総開発費 248億円 (運用費含まず)

令和6年度予算 7.12億円 (※)

※24年1月30日 第58回 ISS・国際宇宙探査小委

- **宇宙基本計画 工程表** (令和5年度 改訂版)

月極域探査機については、インド等との国際協力のもと、2025年度の打上げを目指して着実に開発を進める。

また、アルテミス計画に向けて、着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術を米国と共有する。

年度	令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度 (2030年度)	令和13年度 (2031年度)	令和14年度 (2032年度)	令和15年度以降
9 月面における持続的な有人活動①	【国際パートナーや民間事業者と連携した持続的な月面活動】										
	米国提案の国際宇宙探査計画(アルテミス計画)への参画[内閣府、文部科学省等]										
	ゲートウェイ居住棟への我が国が強みを有する技術・機器の提供						ゲートウェイの運用・利用				
	HTV-XによるISSへの物資補給機会を活用した技術実証							ゲートウェイ補給機によるゲートウェイへの物資輸送			
	車輪や走行系等の要素技術の開発研究・技術実証										
	月面探査を支える移動手段(有人と圧ローバ)に関する開発研究										
	着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術の共有										
	月極域探査機の開発										
	運用 打上げ										
	持続的な活動に必要なインフラ(測位通信、資源探査・採掘利用・電力供給、無人建設、食料生産)の研究開発[内閣府、国土交通省、総務省、文部科学省、経済産業省、農林水産省等]										
宇宙無人建設革新技術開発[国土交通省・文部科学省]											
測位・通信に関する研究開発 [文部科学省・総務省]											
月面におけるエネルギー関連技術開発 [経済産業省・総務省・文部科学省]											
エネルギーシステム全体に関する技術課題整理 [経済産業省]											
水電解技術の研究開発 [経済産業省]											
無線送電技術の研究開発 [経済産業省]											
テラヘルツセンシング技術に関する研究開発 [総務省]											
宇宙空間での生活を支える食料供給産業育成の推進 [農林水産省]											
月面等における長期滞在を支える高度資源循環型食料供給システムの開発 [農林水産省]											

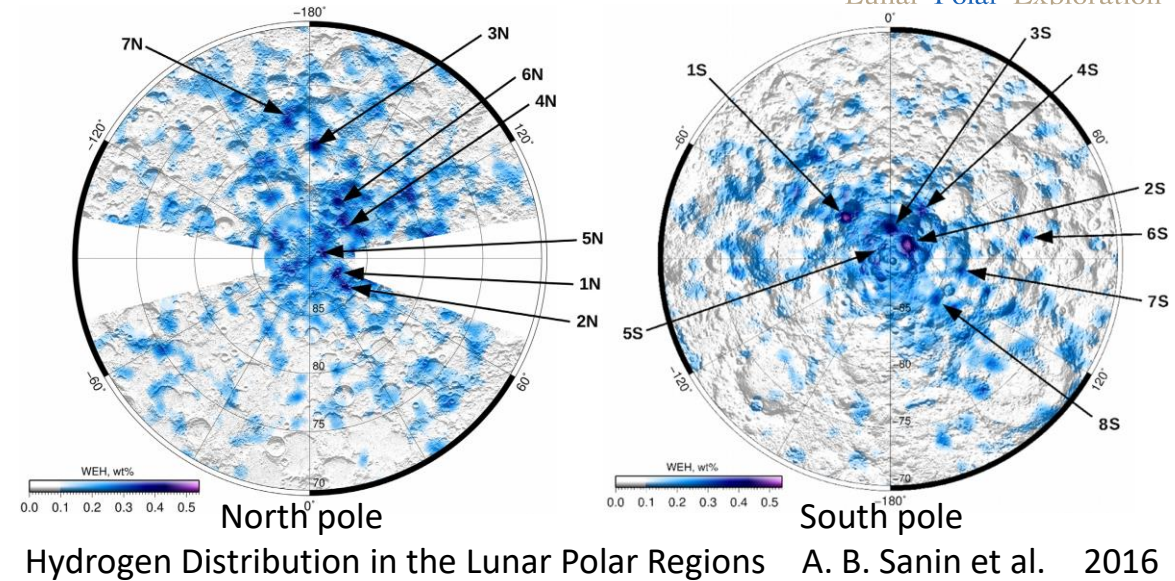
2. 水探査の重要性とアウトカム

● 月の水の最新理解

月極域には彗星・小惑星・太陽風によりもたらされた水氷（あるいは水素）が保存されていると考えられている。リモートセンシング観測でも、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（右図）。

● 未解決の課題

研究により推定含水率は0.08-20wt%と幅がある（別紙5参照）。また環境条件と含水率の関係、水の存在形態も不明。



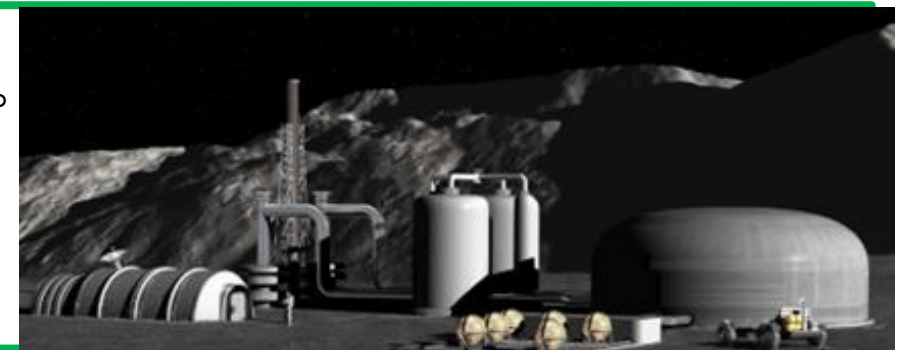
水探査の重要性 = 水の現地資源としての「可用性」判断

水（分解すれば液体水素と液体酸素）が人類活動のエネルギー源として利用可能かを判断するためには、含水率、環境条件による水の分布、水の抽出し易さ（分子量、分子種）を定量的に調査する必要がある。

水探査のアウトカム = 持続的な月面活動

以下の検討・実現から、月ならびに月以遠の持続的な探査活動へと繋がる。

- エネルギー生成工場（例. 推薬生成プラント：右図）建設
- 月面居住基地建設
- 月の科学（水の由来、水の濃集原理の解明など）



3. 各国の水探査動向(1/2)

★：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)



~2022	2023	2024	2025	2026	2027~
-------	------	------	------	------	-------

日本

- かぐや(周回) 2007年打上げ ~2009年終了
- HAKUTO-R M1 (着陸失敗) (2022年打上げ) **民間**
- SLIM (着陸成功)
- LUPEX (着陸) [開発中]
- 中型ランダ (着陸・SR)

米国

1966年 無人機月着陸 (Surveyor 1)
 1969年 有人月着陸 (Apollo 11)

(CLPS 商業月輸送サービス)
 (商業輸送契約を含む官民パートナーシップのもと、定期的な月面探査を推進)

民間

- Peregrine (着陸せず)
- Griffin (着陸) ★
- Blue Ghost (着陸)
- SERIES-2 (着陸)
- Blue Ghost2 (着陸)
- Nova-C (IM-1) (着陸成功)
- Nova-C (IM-2) (着陸)
- Nova-C (IM-3) (着陸)

アルテミス計画

- Artemis I (無人・周回)
- Gateway: PPE+HALO
- Artemis II (有人・周回)
- Artemis III (有人・着陸) ★
- I-HAB
- Artemis IV (有人・着陸) ★

中国

- 2013年 無人機月着陸(嫦娥3号)
- 2019年 無人機裏側着陸(嫦娥4号)
- 嫦娥5 (SR)
- 嫦娥6 (裏側着陸・SR) ★
- 嫦娥7 (極域着陸) ★
- 嫦娥8 (極域着陸?) ★

ロシア

- 1966年 無人機月着陸
- Luna 25 (着陸失敗) ★
- Luna 26 (周回)
- Luna 27 (極域着陸) ★
- Luna 28 (極域着陸・SR) ★

欧州

- Beresheet (着陸失敗) **民間**
- Lunar Pathfinder (周回) **民間**
- PROSPECT ★
- Argonaut (着陸)

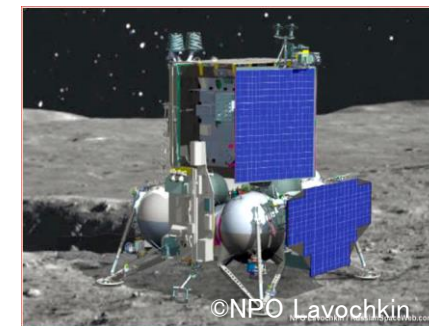
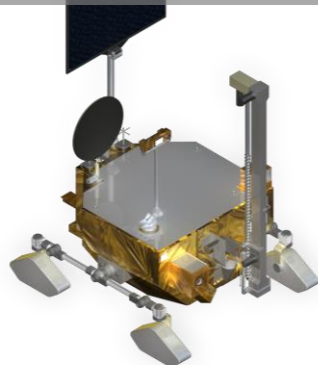
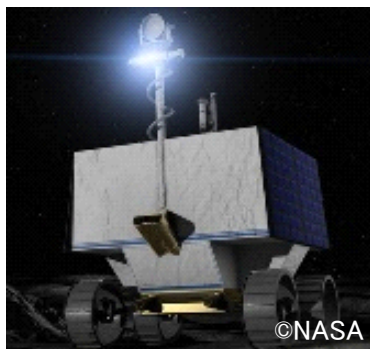
インド

- Chandrayaan-2 (周回(着陸は失敗)) 2019年打上げ
- Chandrayaan-3 (着陸成功) ★
- KPLO(周回) 2022年打上げ
- LUPEX (極域探査(着陸)) ★

凡例 水探査

*1 ESA水観測機器「PROSPECT」は、当初、露のLuna 27搭載予定だったが、現在は米CLPSのPRISM22搭載予定。

3. 各国の水探査動向(2/2) ~比較・優位性~



：LUPEXのVIPER
に対する優位性

打上年	Nov. 2024 by CLPS	2025年度	2026	2026-2027 by CLPS	NET2028
主要開発国	米国	日本／インド	中国	欧州	ロシア
ミッション名称	VIPER (*1)	LUPEX	嫦娥 7	PROSPECT (*2)	Luna 27
搭載箇所	ローバ	ローバ	ローバ、ホッピング機	ランダ	ランダ/ローバ
重量濃度	間接的な推定のみ	直接測定 (0.1wt%精度)	間接的な推定のみ (質量分析計)	間接的な推定のみ (精密重量測定なし)	不明
分析環境	開放系での簡易測定	閉鎖系での定量分析 (高精度な収率計算が可能)	開放系(表層)の測定	閉鎖系での分析 (精密重量測定なし)	不明
ガス抽出方法	太陽光加熱による ガス蒸発(表層のみ)	封止したうえで 500Kまで能動的加熱	表層の揮発ガス分析	封止したうえで 1273Kまで能動的加熱	揮発ガス計測 (詳細不明)
永久影内	ノミナルで探査予定	エクストラで探査予定	ホッピング機で観測予定	予定なし(着陸地点で観測のみ)	観測予定
垂直分解能	掘削時の排土が混ざる	垂直分解能 3cm未満	(採取なし)	分解能不明(採取量 45mm ³)	不明(ロシア製へ変更)
同位体計測	質量分析のみ	3つの独立した手法で計測実施	質量分析のみ	質量分析のみ	質量分析のみ
ローバ活動期間	100日	着陸後3.5ヶ月 エクストラで1年	不明	越夜予定なし	当初：1年間 (現状不明)

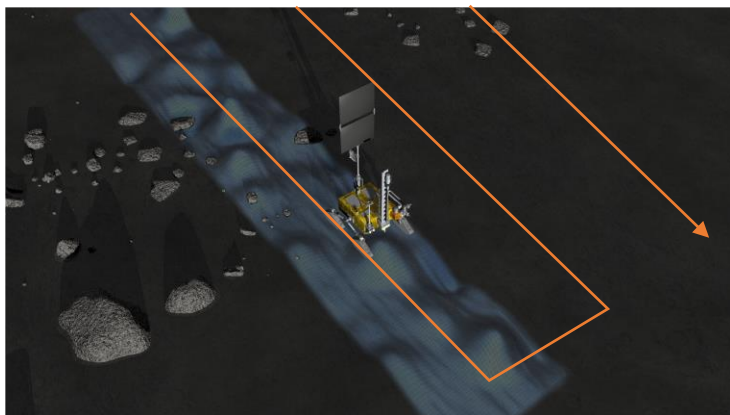
(*1) VIPER : Volatiles Investigating Polar Exploration Rover

(*2) PROSPECT : Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploitation and Transportation

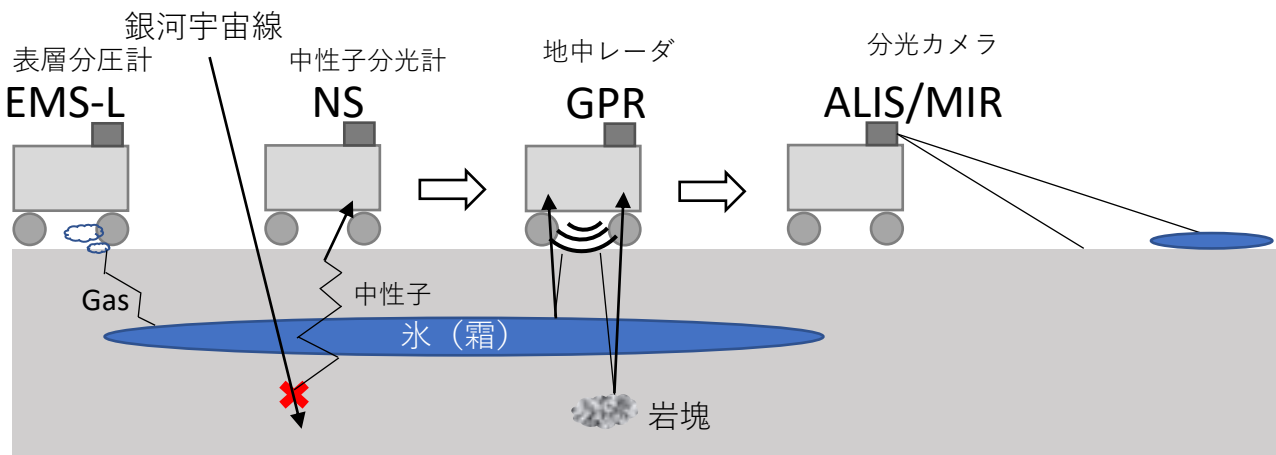
4. 運用概要 ～疎観測・詳細観測～

● 疎観測

- 水等の存在を確認選定されたウェイポイントまで移動
- 探査領域内を移動しながら、掘削地点を決定

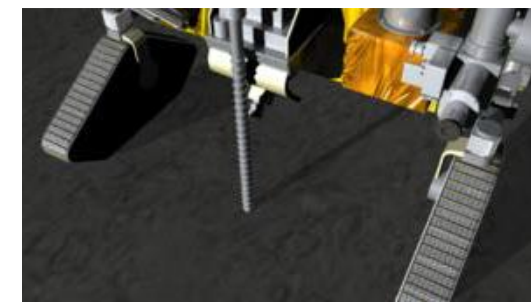
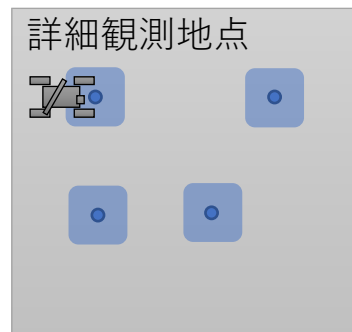


疎観測のイメージ図

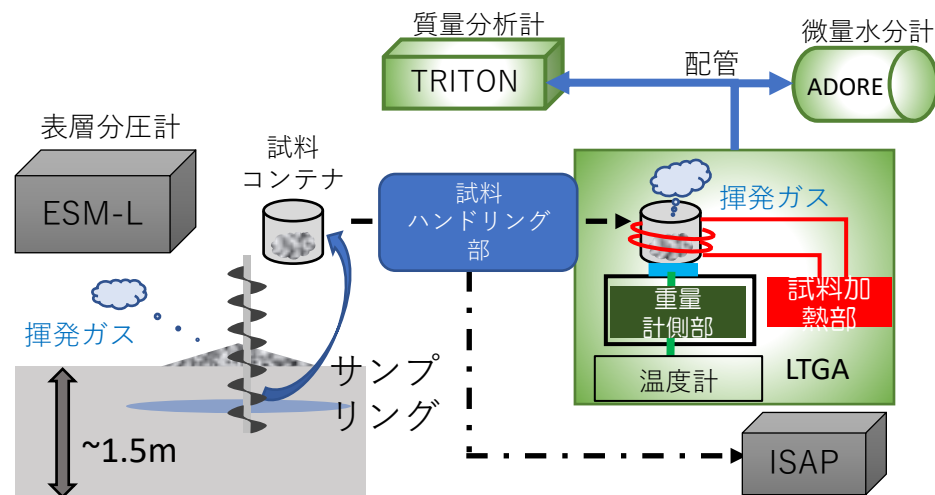


● 詳細観測

- 決定した掘削地点に移動し、月面を掘削
- 表層～深さ約1.5mの土壌サンプルを採取
- 水資源分析計等で詳細観測を行い、水の量・状態・形態等を解明

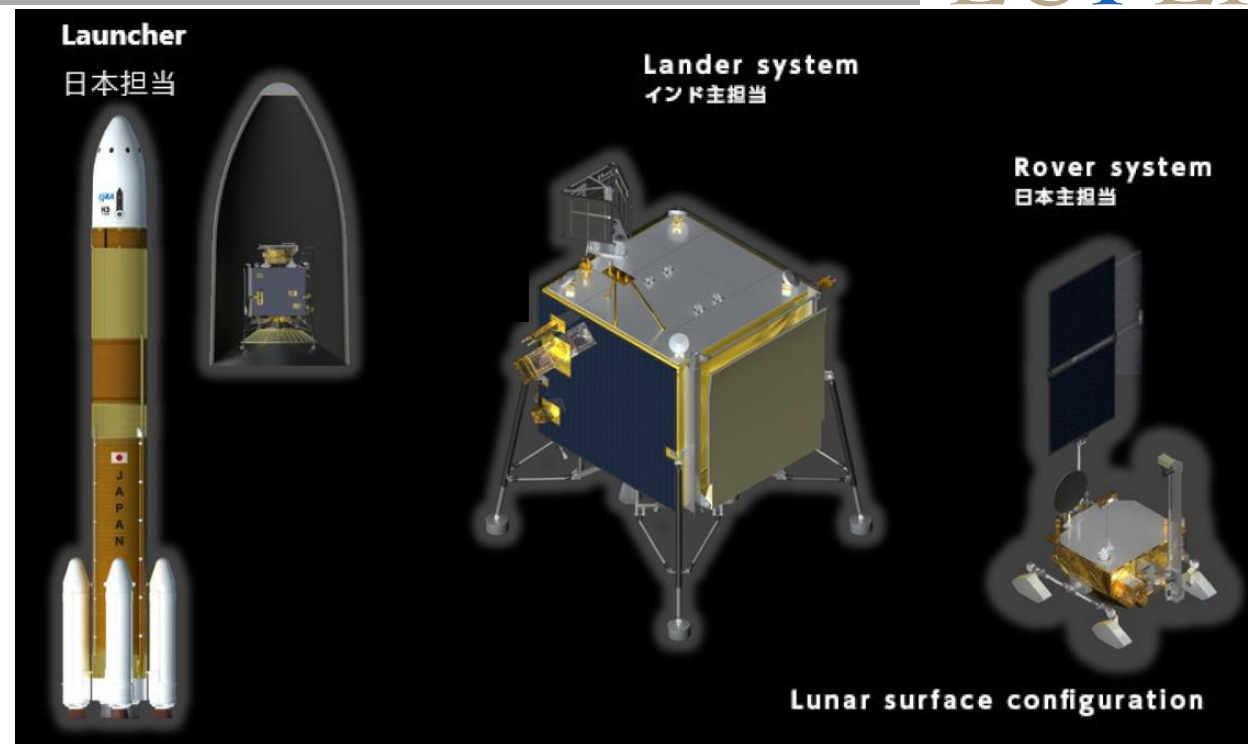


詳細観測のイメージ図



5. 国際連携

- ISRO (着陸機、観測機器、地上系)
- JAXA (ローバ、観測機器、打上ロケット調達、地上系)
 - NASA (観測機器、追跡ネットワーク)
アルテミス計画に向け、着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術を米国と共有
 - ESA (観測機器、追跡ネットワーク)



打上ロケット	H3-24L (2025年度末：調整中)
投入軌道 (要求値)	遠地点高度 10~14万km (調整中)
ペイロード質量 (要求値)	約 6.5 ton (調整中)
ローバ質量とサイズ	350kg (観測機器含む) L1.75m × W1.80m × H1.50m (TBD)
ローバミッション期間	着陸後3.5か月間 (Nominal) 着陸後1年間 (Extra)
着陸地点	月南極域

打上げ約26日後に月面着陸

(参考) 日印協力経緯

Date	Activities
Pre-phase-A: Dec. 2017	ISRO-JAXA月極域探査ミッションの協働実施の可能性を検討する IA (*1) 締結
Dec. 2018	ISRO-JAXA合同ミッション定義審査 (Joint MDR)
Nov. 2019	JAXAプロジェクト準備審査
Phase-A: Jan. 2020	LUPEXプリプロジェクトチーム発足. Phase-A (概念設計・計画決定) 開始
Apr. 2020	観測機器の選定 (TRITON, ADORE & ALIS). 概念設計開始
Mar. 2021 – July 2021	RFPによるローバ開発業者の選定. 予備設計開始
June 2021	2社競争による REIWA (LTGA+TRITON+ADORE...) 開発業者の選定. 予備設計開始
Jan. 2022	システム定義審査 (SDR). 同時に競争入札によるALIS開発業者の選定.
Feb. 2022	JAXAプロジェクト移行審査
Phase-B: Mar. 2022	JAXA内プロジェクト発足. Phase-B (基本設計) 開始
July 2022	政府 (MEXT宇宙開発利用部会) によるプロジェクト認可
Dec. 2022 – Jan. 2023	REIWA 基本設計審査 (PDR), ALIS PDR
April 2023	ISRO-JAXA合同 Phase-A (概念設計) 完了のための技術会合 (対面@Bengaluru)
Sep. 2023	ローバ・地上系・運用 メーカーPDR#1 (対ISRO構造系IF除く)
2024年中目途	ISRO側LUPEXプロジェクト移行次第, ISRO-JAXA 合同 Phase-B以降運用までを対象とする IA (*1) に合意予定

6. 開発状況

概念設計

基本設計

詳細設計・EM試験

WBS	Phase A	Phase B	Phase C
ローバ	▶		
- BBM試験 *1	▶		*5
地上系	▶		
REIWA *2	▶		
ALIS *3	▶		
技術IF調整	▶		
着陸地点選定	▶		
ODCT *4	▶		

- *1 信頼性・運用性向上のためのBBM試験
- *2 REsource Investigation Water Analyzer (水資源分析計)
- *3 Advanced Lunar Imaging Spectrometer (近赤外画像分光装置)
- *4 Output Data Creation Team (サイエンスコミュニティとの連携)

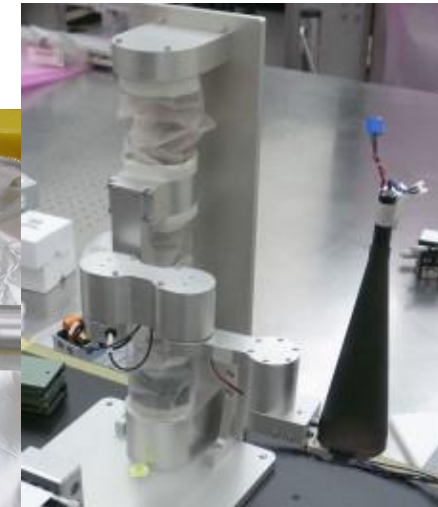
今後、フライトモデル製造組立、射場作業を経て打上・運用予定

*5 掘削・採取性能試験 (左)、走行・操舵データ取得試験 (右)

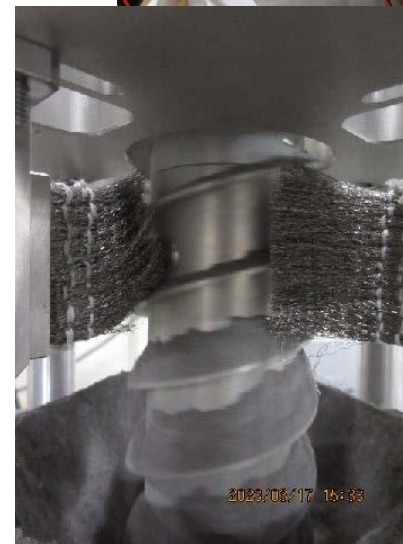
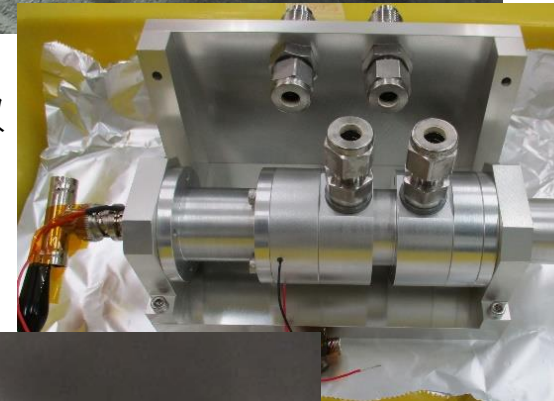


*5 耐久性試験 (10km走行)

*6 試料移送試験



*6 BBM吸収スペクトル性能試験



7. 後続ミッションへの技術継承(1/2)

技術開発



与圧ローバ



民間連携

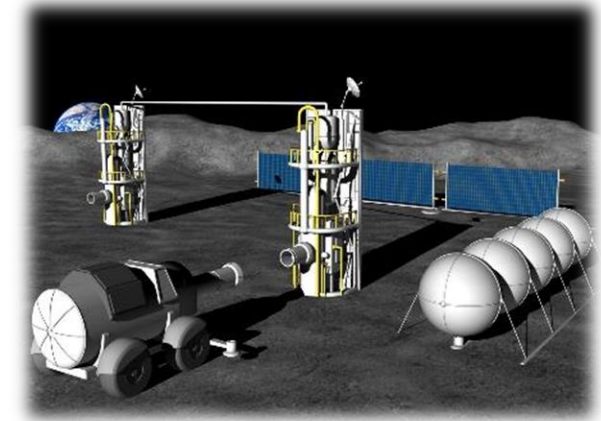


月面拠点構築

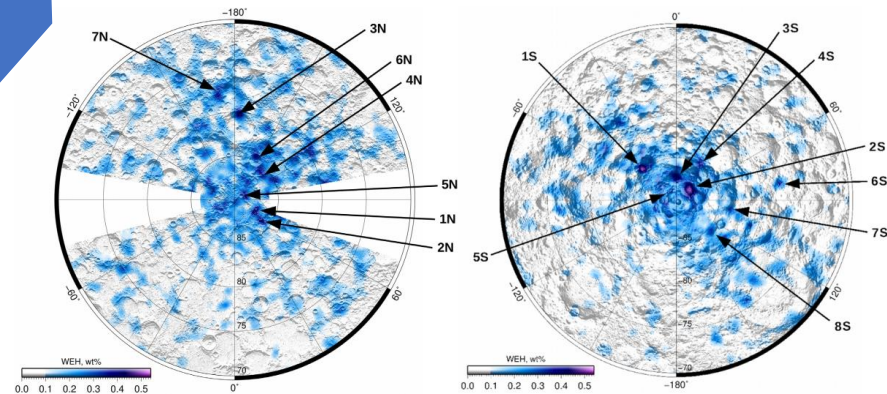


Artemis計画

事前調査



水資源プラント



科学

7. 後続ミッションへの技術継承(2/2) ～与圧ローバへ～

技術分野	技術項目	きぼう	LUPEX	I-HAB	与圧ローバ	有人火星探査	
サンプルリターン技術	サンプルの回収・保管技術	N/A	○ (回収のみ)	保管機能追加 →	○ (回収・保管)	○	
	サンプルの現地分析技術		○		○	○	
探査技術 (エネルギー)	発電技術	N/A	○ 展開機能のみ	収納機能追加 →	○ 展開収納機能付き	○	
	充電技術	N/A	○ 充放電	高頻度化 →	○ 高頻度充放電	○	
	越夜技術	N/A	○ Li-ion電池	長期越夜対応 →	○ 再生型燃料電池	○	
探査技術 (表面移動技術)	走行技術	N/A	○ 最大10km程度	長距離化 →	○ 10,000km	○	
	航法・誘導・制御技術		○ 自己位置推定他	→	○ 自己位置推定他	○	
探査技術 (作業技術)	ロボットアーム技術	JEM搭載アーム 0G, 大型	掘削系アーム 1/6G, 小型	—	ローバ搭載アーム 1/6G, 中型	○ 1/3G, 中型	
	掘削技術	N/A	○ 掘削系ドリル	多機能化 →	○ 掘削等の機能は アーム先端に取付	○	
滞在技術 (ECLSS)	ECLSSコア技術 空気循環・換気、 温湿度制御、圧力制御、 CO2除去、有害ガス除去	○ 空気循環・換気、 温湿度制御、 圧力リフ	○ 圧力制御、CO2除去、有害 ガス除去機能付加	→	○ 空気循環・換気、 温湿度制御、圧力制御、 CO2除去、 有害ガス除去	○ 1/6G 対応 全て搭載	○
	ECLSS再生技術 酸素製造、CO2還元、水再生	一部ISSで実証中	N/A	—	○	○ 再生ECLSS	
	トイレ	—	—	—	○ 新規開発	○	



LUPEX
Lunar Polar Exploration

(別紙1) 各国の月着陸ミッションの状況

直近の月着陸ミッションの結果 (CLPS除く)

打上げ	ミッション名	開発	着陸地点	目的	月着陸結果
2022.12.11	HAKUTO-R Mission 1	ispace (民間)	氷の海	<ul style="list-style-type: none"> 民間企業初となる月面軟着陸の実証 JAXAの変形型月面ロボットやMBRSC(UAE)開発の月面探査ローバ等のペイロード輸送 	<p>失敗 (2023.4.27) ランダの高度計測に異常。実際の月面高度約5kmに対し、ランダがゼロ(月面着陸)と自己推定。燃料が燃え尽きた後で自由落下、月面に硬着陸し機体損失。</p>
2023.7.14	Chandrayaan-3	ISRO	月南極域付近	<ul style="list-style-type: none"> 月南極域付近への軟着陸(CY2では失敗) 搭載観測機器(ローバ含む)による月面観測 	<p>成功 (2023.8.23)</p>
2023.8.11	Luna-25	ROS COSMOS	月南極域付近	<ul style="list-style-type: none"> 1976年Luna-24以来の月面軟着陸 	<p>失敗 (2023.8.19) 軌道遷移でエンジンを噴射も、噴射84秒の予定時間に対し127秒噴射。その後、月面に硬着陸し機体損失。</p>
2023.9.7	SLIM	JAXA	神酒の海	<ul style="list-style-type: none"> ピンポイント着陸技術の実証 マルチバンド分光カメラによる月面観測 	<p>成功 (2024.1.20) メインスラスト1機の脱落により、想定と異なる接地。</p>

直近の月着陸ミッションの予定 (CLPS除く)

打上げ	ミッション名	開発	着陸地点	目的など
2024年	嫦娥6号	CNSA	月の裏側	<ul style="list-style-type: none"> 月の裏側からのサンプルリターン 先行してデータ中継衛星「鵲橋2号」を24年3月に打上げ、同年4月に通信試験に成功したと発表
2024年	HAKUTO-R Mission 2 (RESILIENCE)	ispace (民間)	-	<ul style="list-style-type: none"> 自社開発のマイクロローバを含む5つのペイロードの月面輸送 レゴリスの採取およびNASAへの所有権譲渡を予定(2020.12 にispace Europe-NASA間で契約)
2026年	LUPEX	JAXA/ ISRO	月南極域	<ul style="list-style-type: none"> LUPEXローバによる月南極域での水資源探査 重力天体上での探査技術の実証
2026年	嫦娥7号	CNSA	月南極域	<ul style="list-style-type: none"> 月南極域への高精度着陸 永久影の調査(水資源探査含む)

(別紙2) インドの動向(チャンドラヤーン3号)

- ◆ チャンドラヤーン3号は、インド宇宙研究機関 (ISRO) の月探査ミッションであり、2008年のチャンドラヤーン1号 (月周回)、2019年のチャンドラヤーン2号 (月面着陸失敗) に続く3つ目のミッション。
- ◆ 2023年7月14日に打上げ、8月23日に月面への軟着陸に成功。月面への着陸成功は旧ソ連・米国・中国に次ぐ4か国目であり、月の南極付近への着陸は世界初。

概要

- 2023年7月14日 ISROのLVM3ロケットにより打上げ、8月23日に月面への軟着陸に成功。
- 推進モジュール、着陸機モジュール (月着陸機+月面小型ローバ) で構成、全体で質量3,900kg。
- 推進モジュールによって着陸機モジュールを月周回軌道 (月面高度100km) に投入し、その後着陸機モジュールを切り離して月面に着陸。着陸地点は、月表側の南緯69.4度・東経32.3度近傍 (4.0 x 2.4 kmの範囲内) 。
- ①月面への安全な軟着陸の実証、②月面小型ローバの走行実証、③月面上での各種科学実験 (月面組成分析等) の実施、の3つが主な目的。

主なサイエンスミッション

- 月着陸機に4個、月面小型ローバに2個の観測機器を搭載。
- 月着陸機や月面小型ローバにより、着陸地点近傍の月面組成分析や熱流量計測、月震計測等の「その場」観測を実施し、詳細データの取得を図る。ミッションは、着陸後、約2週間実施。
- 推進モジュールにも、地球のスペクトル測定と旋光測定が可能なペイロード (SHAPE) を搭載し、着陸機モジュール分離後に測定を実施。

出典: https://www.isro.gov.in/Chandrayaan3_Details.html
https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/Missions/LVM3/LVM3M4_Chandrayaan3_brochure.pdf



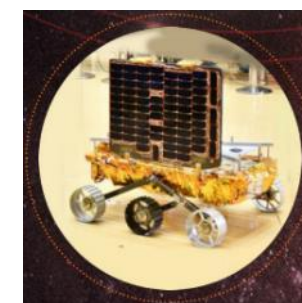
LVM3ロケット
(GSLV Mk-IIIロケット)
全長43.43m, GTO軌道へ
4ton級打上能力



推進モジュール
2,148kg
(写真は着陸機モジュールを
上部に搭載した状態)



月着陸機
2.5x2.0x1.2m, 1,752kg
(月面小型ローバ含む)



月面小型ローバ
0.92x0.75x0.85m, 26kg

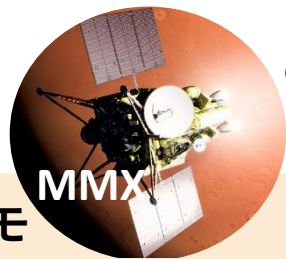
着陸機モジュール

(別紙3) JAXAの月・火星探査シナリオ

火星

2020

ロボット技術デモ



© JAXA

2030



© NASA

2040

有人
ミッション

人類活動領域の拡大



© JAXA

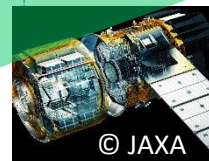
Kaguya

月



© NASA

Gateway



© JAXA

Gateway
補給

ロボットミッション

有人ミッション

表面インフラ

持続可能な探査

SLIM



© JAXA

LUPEX



© JAXA

与圧
ローバ



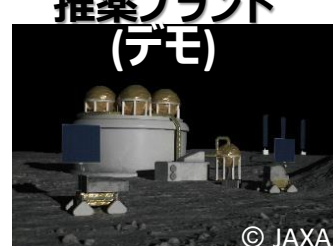
© TOYOTA

中型
カーゴランダ



© JAXA

推薬プラント
(デモ)



© JAXA



© JAXA

地球

LEO

ISS運用

持続可能なLEO活動

宇宙活動の民営化

科学

ISRO

JAXA

技術

D. 月表層大気の揮発性成分に関する情報の取得

E. 着陸地点における元素の分布と濃度の測定

A. その場観測による水の量と分布に関するグランド・トゥルースデータの取得

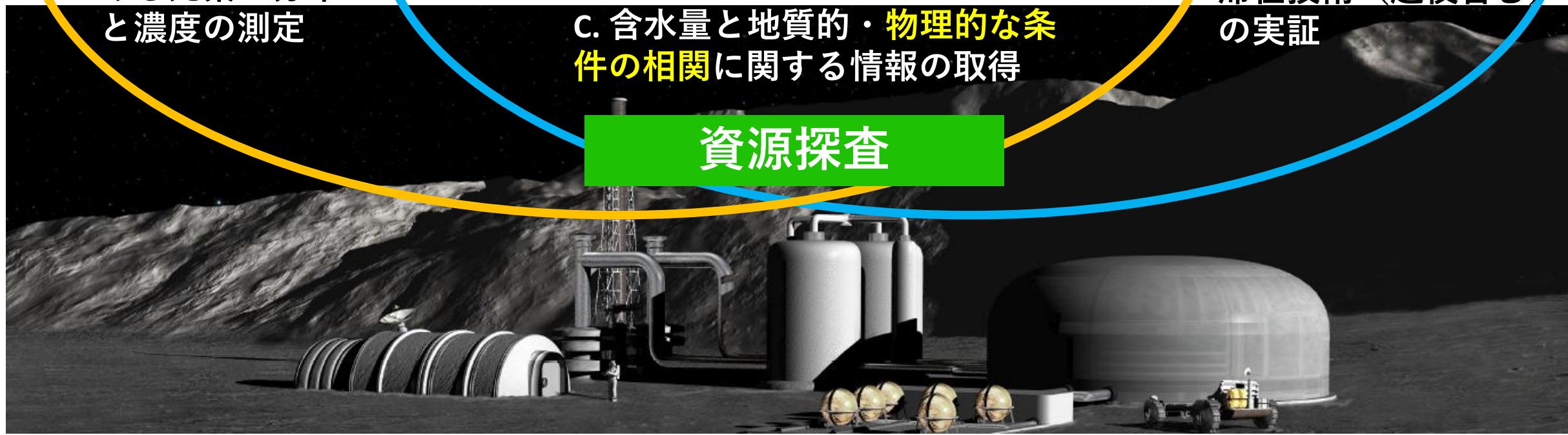
B. 水の状態や形態、揮発性物質の含有量に関する情報の取得

C. 含水量と地質的・物理的な条件の相関に関する情報の取得

F. 月面での移動技術の実証

G. 月面での長期滞在技術（越夜含む）の実証

資源探査

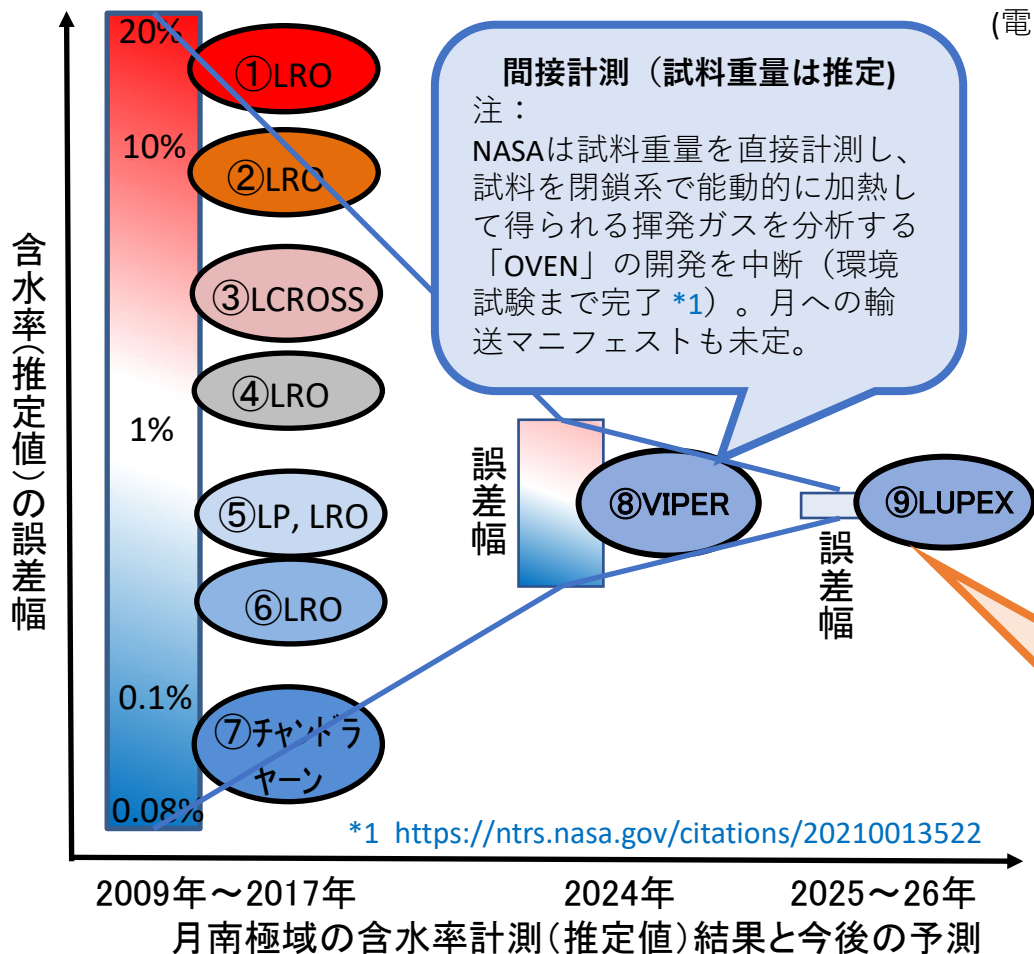


(別紙5) 直接計測による水探査の課題解決策

➤ 含水率の直接計測

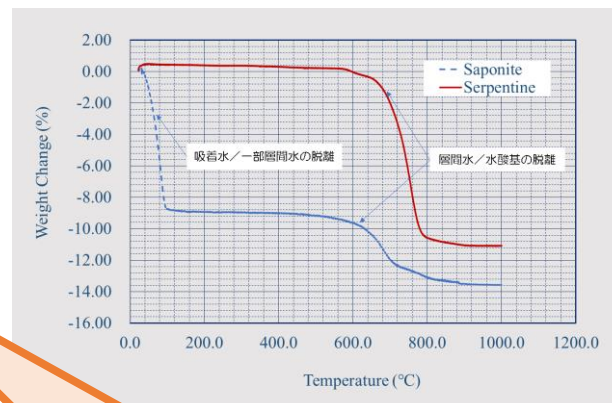
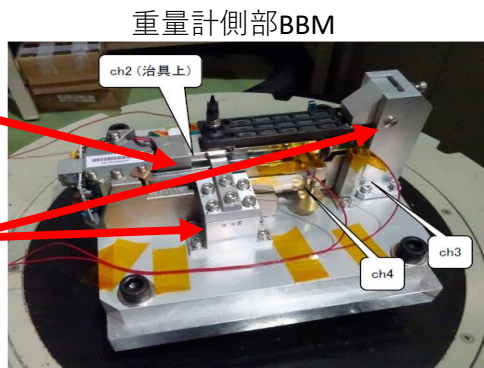
閉鎖系での熱重量分析を用いた含水率の直接計測と分子量・分子種の特定**世界初**

熱重量分析計 (LTGA: Lunar Thermogravimetric Analyzer)



重量計測部
(電子天秤)

ロンチ
ロック



熱重量分析の結果例 (N2環境)

直接計測 (試料重量も計測)

月有人探査5回のLEO打上げ質量を現地推薬製造有無で比較した場合、損益分岐点が含水率0.5wt%前後のため、0.1wt%精度で測定。

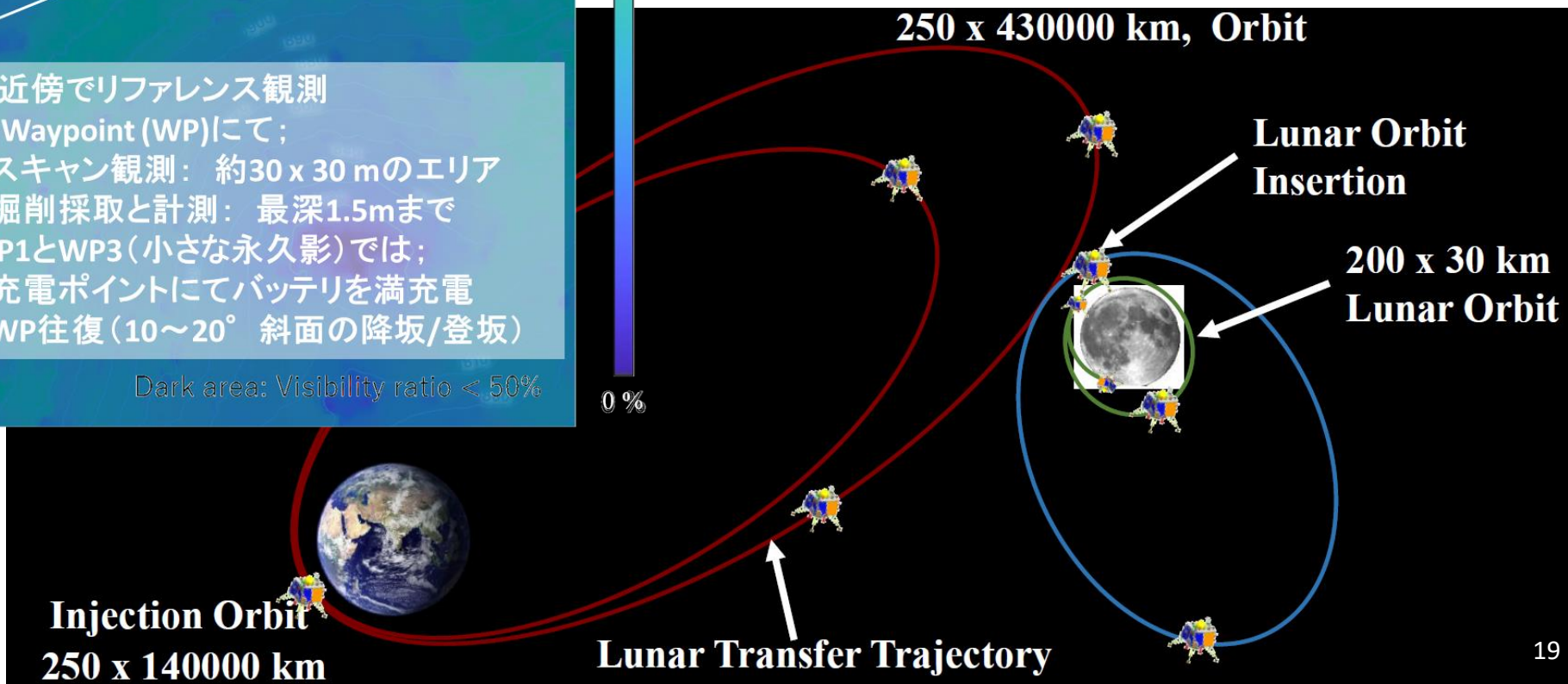
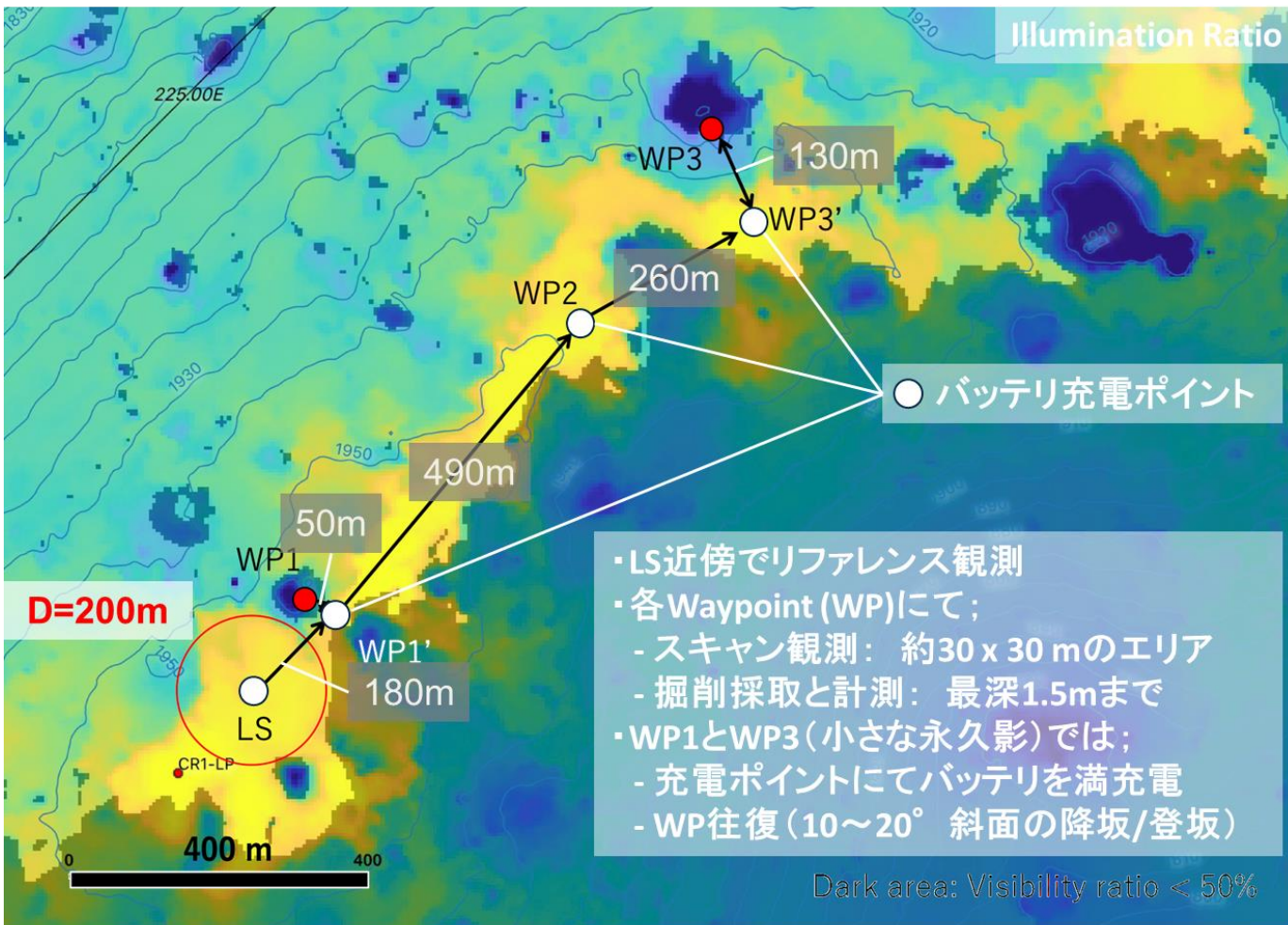
- 目標達成のための課題
 - 1/6Gで6g質量の試料中の0.1wt%を測定できるように、 $9.8 \times 10^{-6}N$ より高精度の重量計測能力を持たせる必要がある。
- 課題解決策
 - 含水率、分子量、分子種を一連計測する統合計測装置化
 - 国産電子天秤の宇宙化(左写真)
- 工夫した点(アピールポイント)
 - 揮発ガス総量、含水量、水の存在形態(氷、吸着水等)から「水の可用性」を判定。
 - JAXA探査ハブの「ガス中微量水分計の小型・軽量・ロバスト化技術の研究」の成果を応用した手法の採用による極微量水分量の計測。

諸説紛々だった含水率を高精度に求め、月面推薬製造プラントの規模を決める!

(別紙6) 月までの軌道と月面での経路計画(例)

← (左)月面での経路計画(例)
↓ (下)月周回までの軌道遷移

着陸精度: 100m x 100m area
(SLIM開発の着陸技術を用いた着陸シミュレーションをJAXAも実施予定)



電源系

サバイバビリティ
(越夜能力)

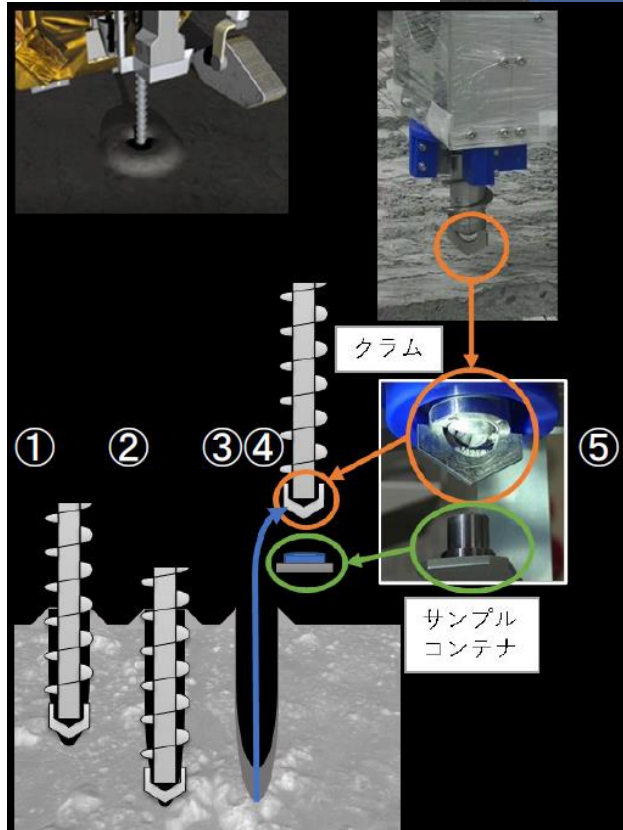
観測機器
含水率の
直接計測

作業系

高精度な
垂直採取

走行系

多様な環境の
水平探査



掘削・採取・移送の方式概要