

TODAY'S TOPIC

日本の国際宇宙探査シナリオ(案)の紹介

説明者

JAXA 国際宇宙探査センター 宇宙探査システム技術ユニット
島田 潤、牧野 克省、古賀 勝

目次

1. 日本の国際宇宙探査シナリオ(案)とは？
2. 月探査促進ミッション(LEAD)計画の概要
3. 月面活動に向けた測位・通信の総合アーキテクチャの検討状況
4. 月面における水資源利用の構想
5. 質疑応答





日本の国際宇宙探査
シナリオ(案)とは？

発表者：技術U 島田

日本の国際宇宙探査シナリオ(案)

国際宇宙探査シナリオ(案)とは？

- ◆ 我が国として今後していくべき国際宇宙探査のグランドデザインを宇宙機関としてまとめたもの
- ◆ トップダウン的なアプローチにより、全体システム構想やロードマップを導出することを目標とする。
- ◆ 最新の国際情勢、国内政策議論の進展や研究開発の進捗などを踏まえ適宜改訂。
- ◆ 本シナリオに沿って政府の国際宇宙探査政策や産業界、アカデミアへの提言を行っていくとともに、宇宙探査に関する研究開発を進めている。

第3版(2021年度版)作成の背景

- ◆ 米国が表明したアルテミス計画の取り込み。
- ◆ 2020年8月に国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が公表した国際宇宙探査ロードマップの最新版(GER Supplement)にも対応。



2016年度版



2019年度版



2021年度版

2020

2025

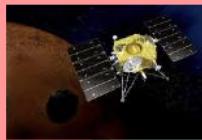
2030

2040

NASA Artemis Program

Human Lunar Return

Sustained Lunar Presence



IREM

火星衛星探査計画
MMX (2024)

②表面探査技術

水分布・輸送観測
ミッション(MIM)拠点建設(推薦プラント、居住棟、電力, etc)
(2030代中頃～)

火星

民間活動

ISS実証(流体)環境計測
(2023)月極域探査
LUPEX (2024)有人与圧ローバ#1
(2029) 有人与圧ローバ#2
(2032)第1級の科学成果の創出
(例:サンプルリターン、月震計による内部探査、月面天文台)

①重力天体着陸技術

超小型探査機
Omotenashi (2022)小型月着陸実証機
SLIM (2023)

(小型ランダ追加予定)

中型月着陸船
(2031以降数年おき)完全再使用型
離着陸船

月面

超小型探査機
Equuleus (2022)③有人滞在技術
(ECLSS, 医学)HTV-XG1
(2030以降数年おき)

④深宇宙補給技術 (ランデブドッキング技術)

ISSでのドッキングデモ

⑤通信・測位システム構築

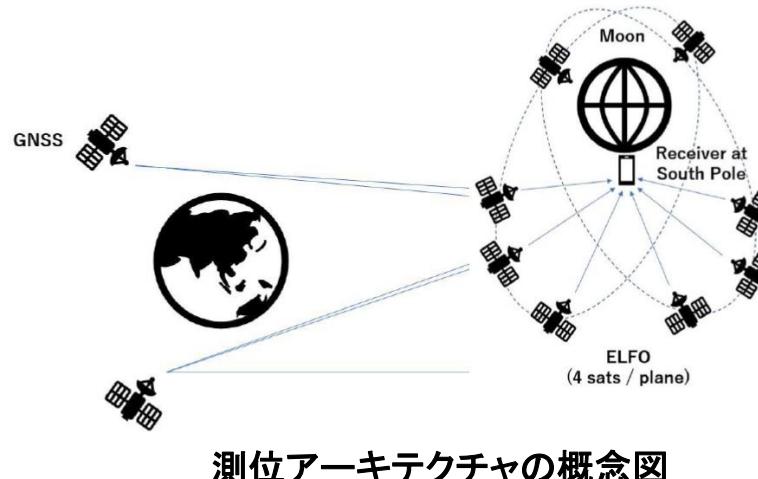
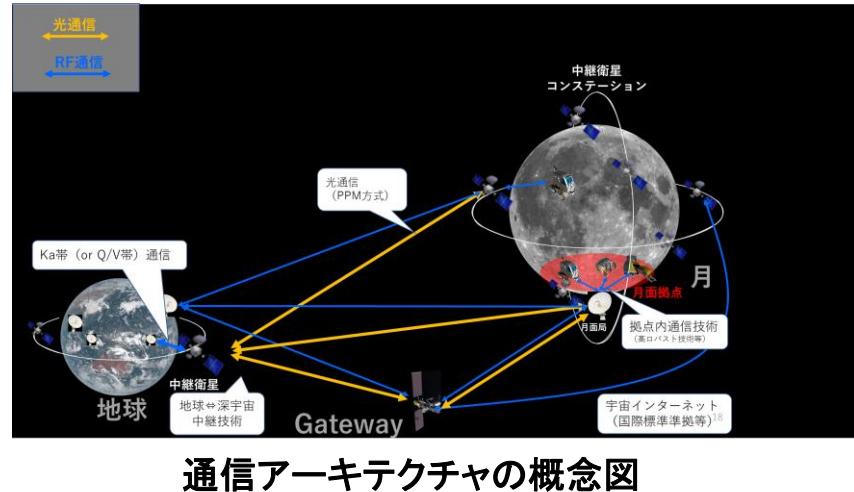
有人火星探査船

月軌道

宇宙探査に向けた5つの重点課題

宇宙基本計画工程表で重点課題とされた4つの技術に関し、全体アーキテクチャを実現するため技術目標を設定。また、通信・測位技術についても探査シナリオ2021年度版で技術目標を追加。

- ① 重力天体着陸技術
- ② 重力天体表面探査技術
- ③ 有人宇宙滞在技術
- ④ 深宇宙補給技術
- ⑤ 通信・測位技術



① 重力天体着陸技術

- 着陸エンジン: 80kN以上(有人月着陸の場合、比推力(Isp)370以上、40%スロットリング)
300kN以上(有人火星着陸の場合)
- 着陸精度: 直径100m以下
- エアロキャプチャ／エアロブレーキ技術 (有人火星探査)

② 重力天体表面探査技術

- 電力: リチウムイオン電池で250Wh/kg、再生型燃料電池(RFC)で600Wh/kg以上
- 走行技術: 与圧ローバで10,000km以上、登坂能力:20deg以上、
障害物乗り越え性能:30cm以上、走行速度15km/h以上

③ 有人宇宙滞在技術

- ECLSS: 水・酸素補給／消耗品ゼロ
- 放射線防御: 有人火星ミッション(約1000日)で最大の太陽フレア発生でも制限値を超えない放射線防護・退避技術の確立
- 健康管理: 有人火星探査で宇宙飛行士が安全かつ健康に地球に帰還できること。

④ 深宇宙補給技術

- 深宇宙ランデブドッキング技術(GPSを使用しない相対位置／速度同定)と標準化

⑤ 通信・測位技術

- 通信容量:1Gbps以上、抗たん性:遅延耐性ネットワーク(DTN)対応
- GNSS測位精度:30m以内、月面での測位精度:40m以内

上記技術目標をベースに、先導研究「宇宙探査技術の研究」を2016年度から実施中。

ポイント1. キー技術の発展、日本人宇宙飛行士の月面到達

ポイント2. 月輸送サービスの構築

ポイント3. 科学成果の最大化

ポイント4. 火星探査



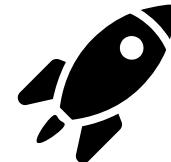


ポイント1. キー技術の発展、日本人宇宙飛行士の月面到達

キー技術を発展させつつ、国際協力の枠組みを有効に活用し、2020年代後半の日本人月面到達を目指す。

- **重力天体着陸技術**: 小型月着陸実証機(SLIM)でのピンポイント着陸技術を南極対応に発展させつつ、着陸能力を段階的に拡大。
- **表面探査技術**: 月極域探査(LUPEX)等で走行技術、電力発生技術、越夜などの基本技術を実証した上で、与圧ローバ等に発展。
- **有人宇宙滞在技術及び深宇宙補給技術**: 将来の有人探査に有効な中継点となる月周回有人拠点(Gateway)を国際協力で構築し、日本は国際宇宙ステーション(ISS)で蓄積した知見を生かし、再生型環境制御・生命維持システム(再生型ECLSS)や新型宇宙ステーション補給機による参加。
- **通信・測位技術**: 日本の優位性のある技術を生かしつつ、国際協力により、通信・測位アーキテクチャの構築を目指す。

ミッションシナリオのポイント



ポイント2. 月輸送サービスの構築

探査シナリオ(案) 11.11項

月探査にサイエンスコミュニティや産業界がより多く参加できるよう、定期的な月輸送サービスを構築する。(月探査促進ミッション)



ポイント3. 科学成果の最大化

探査シナリオ(案) 4章

様々なミッション機会を活用し、月科学のロードマップに沿って科学成果の最大化を目指す。(月面天文台、サンプルリターン、月震計による内部探査など)



ポイント4. 火星探査

探査シナリオ(案) 4.6項

火星衛星探査計画(MMX)での火星重力圏往還技術をベースに、火星周回ミッションで地下氷探査を行い、その後の着陸探査で火星生命環境や水環境の理解を目指す。



NEWS

— 2022.04.27 (new!)

「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」 を掲載しました

この度、JAXA国際宇宙探査センターでは「日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021」を広く、産業界やアカデミアの皆様をはじめ、国民の皆様にお読みいただくために、同文書の概要（Executive Summary）及び詳細版を掲載することといたしました。

本文書の位置づけは、我が国として今後していくべき国際宇宙探査のグランドデザインの(案)を宇宙機関と

☆国際宇宙探査センターHPにて公開中☆



月探査促進ミッション
(LEAD)計画の概要

発表者:技術U 古賀

月探査促進ミッション(LEAD) ミッションコンセプト

- 搭載ミッション(ペイロード)は国産基幹ロケット(H3)と小型月着陸機により月面・月周回軌道に輸送
- ペイロード輸送能力としては200~400kg程度を想定
- 搭載ミッション及び小型月着陸機の実証とともに民間企業の積極的な参加を促進

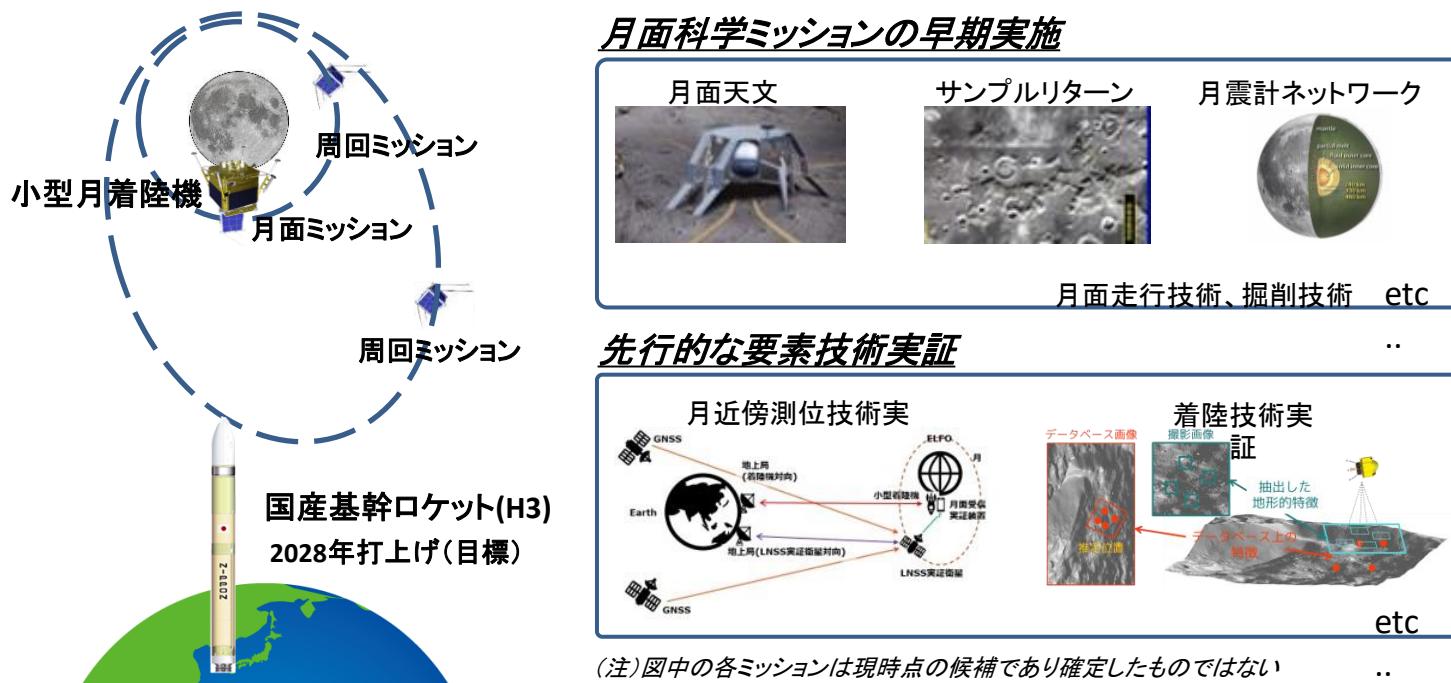


図 月探査促進ミッションのミッションコンセプト

要素技術実証ミッションの検討状況

◆月近傍測位(LNSS)技術実証ミッション

LNSS実証機システム全体概要

● LNSS実証衛星（1機）

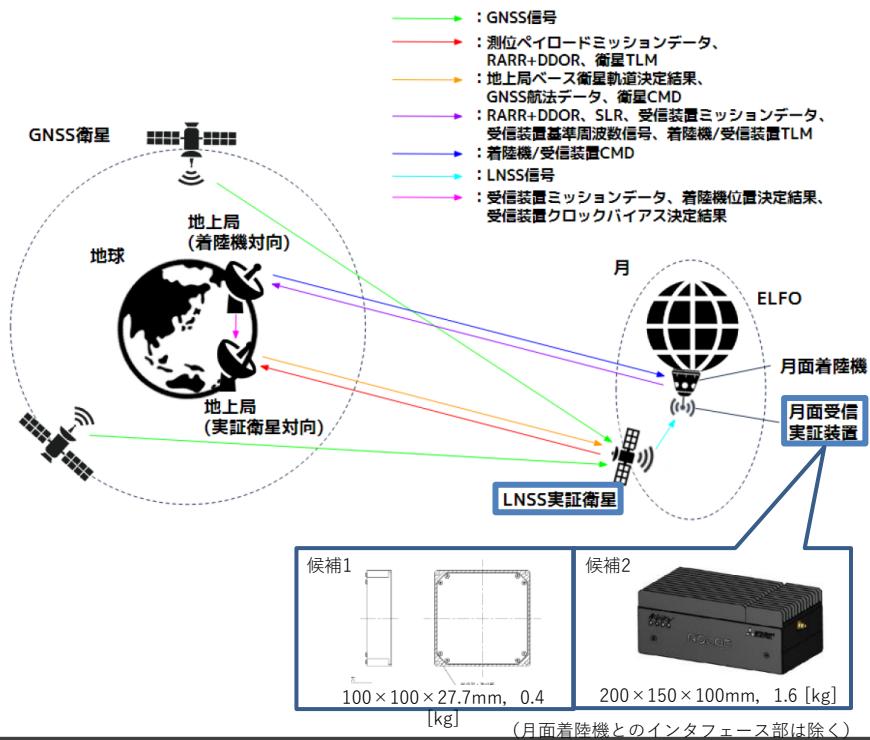
- 月周回軌道であるELFO^{#1}に1機投入
- 既存GNSS測位信号を受信することでオンボード航法を行い、航法メッセージ（軌道や時刻情報等を含むデータセット）を月面受信機に送信
- 航法メッセージ（測位信号）はS帯^{#2}で送信

●月面受信機（1台）

- 別途検討する月面着陸機に搭載
- LNSS実証衛星の航法メッセージ（測位信号）を受信
- 疑似距離観測量、航法メッセージ等を出力
- 月面着陸機経由にて、測位結果を地上送信

●地上局（既存局活用）

- LNSS実証衛星の追跡・管制
- 評価用真値データの取得のため、RARR^{#3}+DDOR^{#4}により、LNSS実証衛星及び月面受信実証装置（月面着陸機）のオフライン高精度軌道決定（位置決定）を実施



#1 : ELFO : Elliptic Lunar Frozen Orbit, 月を周回する凍結軌道（軌道保持制御を最小化する長期安定軌道）

#2 : GNSS (QZSSやGPS等) の測位信号の周波数帯はL帯 (0.5~2GHz) を使用。ただし今後の国際周波数調整では月近傍の測位信号周波数帯として、S帯 (2~4GHz) が指定される計画。

#3 : RARR : Range And Range-Rate. 衛星と地上の通信によって得られる距離・速度から軌道決定を実施。

#4 : DDOR : Delta Differential One-way Range. 2つの地上局アンテナで1衛星の電波を同時受信し時刻差から位置を計測。

要素技術実証ミッションの検討状況

◆着陸技術実証ミッション(極域対応)

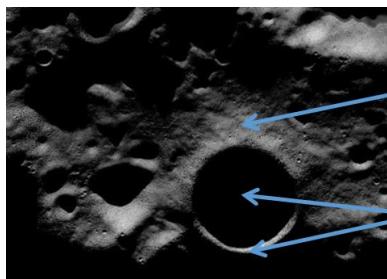


図1 月極域における地表面画像の例

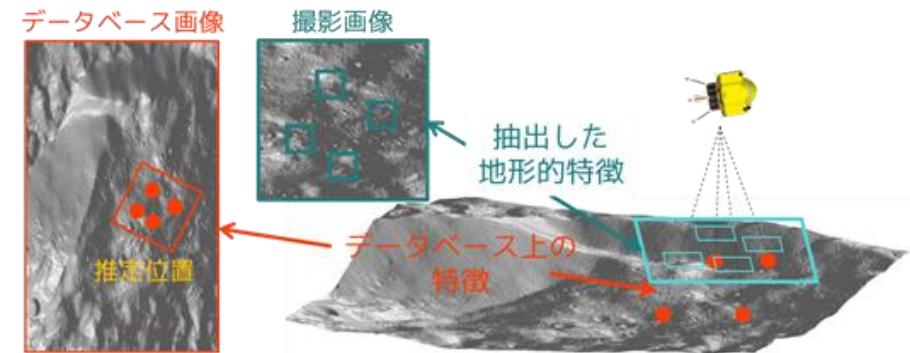


図2 画像照合航法の原理

- SLIMで獲得する高精度着陸技術の継承・応用・発展
- 将来の中型月着陸機の開発に向けた極域(南極域)での高精度着陸技術の獲得
 - ✓ 極域対応の画像航法アルゴリズムの成立性評価
 - ✓ アクティブセンサ(Flash-LIDAR)の適用検討

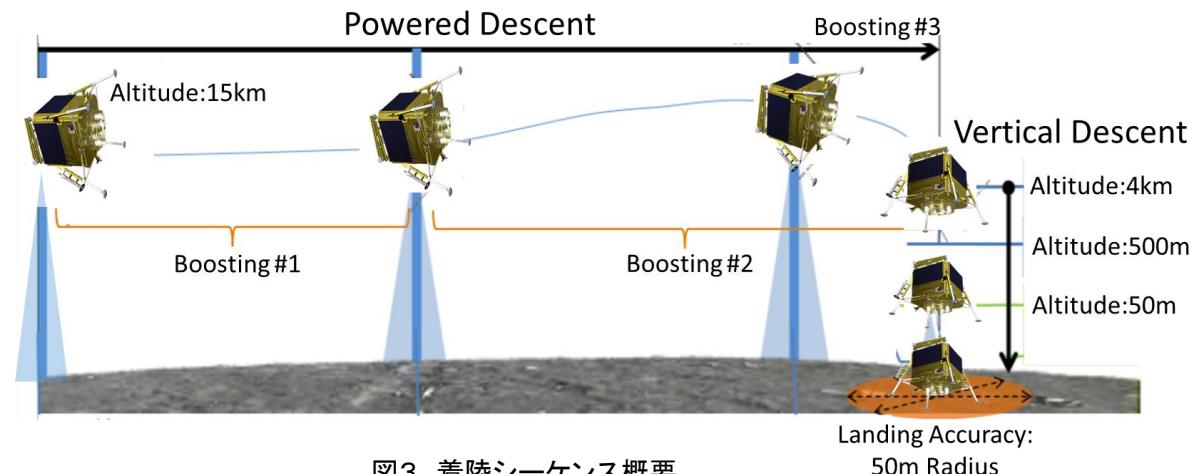


図3 着陸シーケンス概要

月面活動に向けた測位・通信の
総合アーキテクチャの検討状況

発表者：技術U 牧野

宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）におけるプロジェクトの一つ

背景・必要性

- 米国のアルテミス計画などにより、今後、月探査活動の拡大が見込まれ、測位や通信といった基盤整備が強く望まれている。
- 日本は世界に先駆けて、**月測位衛星システム(LNSS)**、**月-地球間高速光通信網**を提案する。
- これらの構築に向け、システム要求・キー要素技術の要求明確化、網羅的要素技術研究を行い、早期の技術実証ミッションの実施に備える。
- 国際競争力を高め、技術や国際調整（標準化議論）の面での優位性を確保する。

実施内容・期待される効果

- ◆ 月探査活動においては、当面、有人与圧ローバでの探査が主たる手段となり、水平40mの航法精度が求められている。この精度を目標としたLNSSのキー要素技術（マルチGNSS化、月近傍航法機能、航法高精度化）の開発を行い、**成熟度TRL4**（実験室環境レベルでの有効性確認）まで上げる。
- ◆ 月-地球間の高速通信1Gbpsを目標として、**高感度送受信技術**（位相変調方式光通信技術）の研究とともに関連要素技術（遠距離捕捉追尾技術、大口径光学系等）を向上させ、**成熟度TRL4**を目指す。
- ◆ LNSSは地球地上局の運用制約の影響を受けず、リアルタイムでの航法値が得られるため、**宇宙機（月周回機及び月面における人・ロボット・ローバ等）運用効率の飛躍的向上、探査ミッションの価値拡大と創出**が期待できる。

実施体制・スケジュール

主管実施機関：JAXA
共同参画機関：NICT

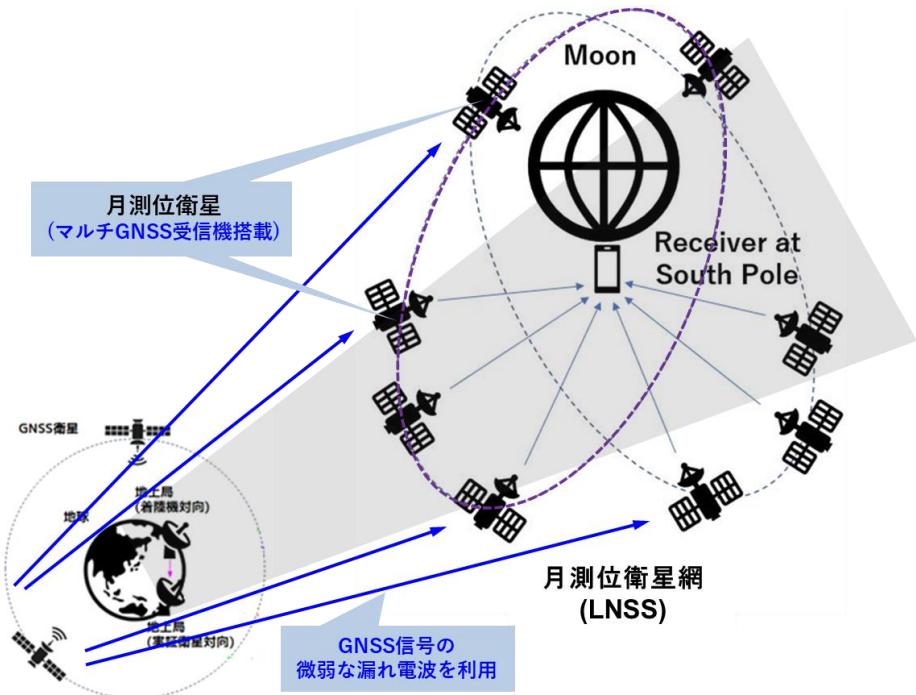
実施項目	R3	R4	R5	R6	R7
測位・通信アーキテクチャ／システム検討	→				
測位	LNSS実証機システムの検討	→			
	マルチGNSS化	→			
	月近傍航法機能	→			
	航法高精度化	→			
通信	国際インターラボラビリティ方式の研究	→			
	遠距離捕捉追尾技術の研究	→			
	月-地球間通信用高感度送受信技術の研究	→			
	軽量大口径光学系の研究	→			
搭載補償光学技術の研究					

月測位衛星システム（LNSS※）構想の概略

※ Lunar Navigation Satellite System

- GPSライクな測位衛星網を月軌道に構築し、月面探査の様々な活動(与圧ローバ、曝露ローバ、EVA活動)の効率化に貢献
- 軌道決定には静止GPS受信技術を発展させたマルチGNSS受信機を想定
- 測位アーキテクチャのシステムコンセプト

1. サービスエリア : **月南極域（南緯84° 以南）**
2. サービス期間 : **10年**
3. 測位精度／移動体 : **水平40m (2D RMS)**
4. LNSS衛星の投入軌道 : **ELFO (2軌道・8衛星)**
5. アベイラビリティ : **98% 以上 (TBD)**
6. GNSS受信 : **GPS, QZSS, Galileoのマルチ受信**
7. HDOP : **平均1.3~1.5 以下**

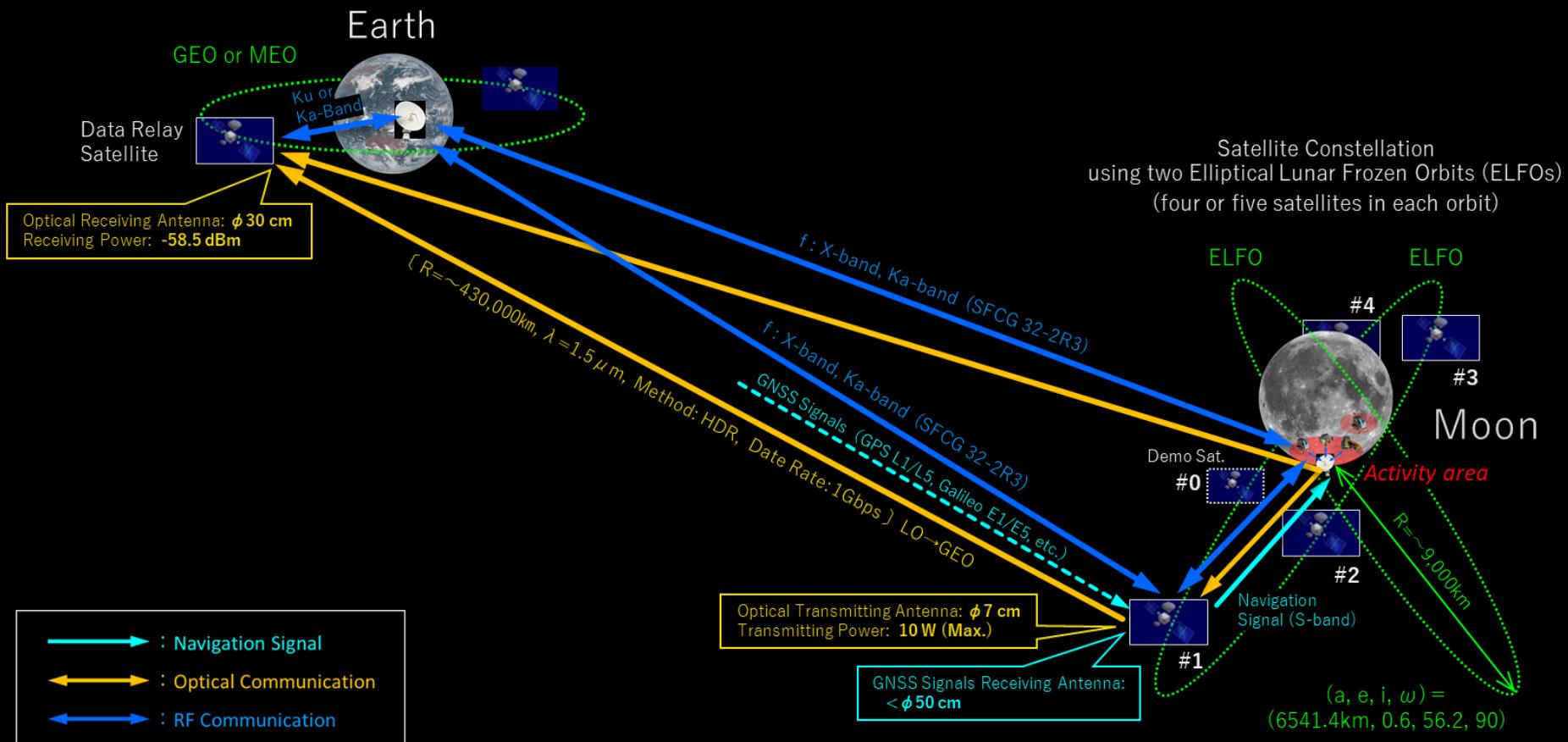


※月周回の各測位衛星の軌道決定は
オンボードGNSS航法でリアルタイムに行う

月測位衛星システム(LNSS)の概略図

- NASA/ESAも同様なコンセプトを検討しており、競争関係にあるとともに、協力関係も調整中。

- 中小規模の月面のユーザ数を50～100程度とすること前提に、月近傍におけるアーキテクチャは「ELFOの2軌道面の計8機または10機(1軌道面あたり4機または5機)によるコンステレーション」とする
- 大型月面ユーザの高速通信(1Gbps)を実現するため、月面と月周回衛星間、月周回衛星とGEO衛星との間は光通信システムを確立し、GEO衛星から地球への通信はRF通信によって行うコンフィギュレーションとする

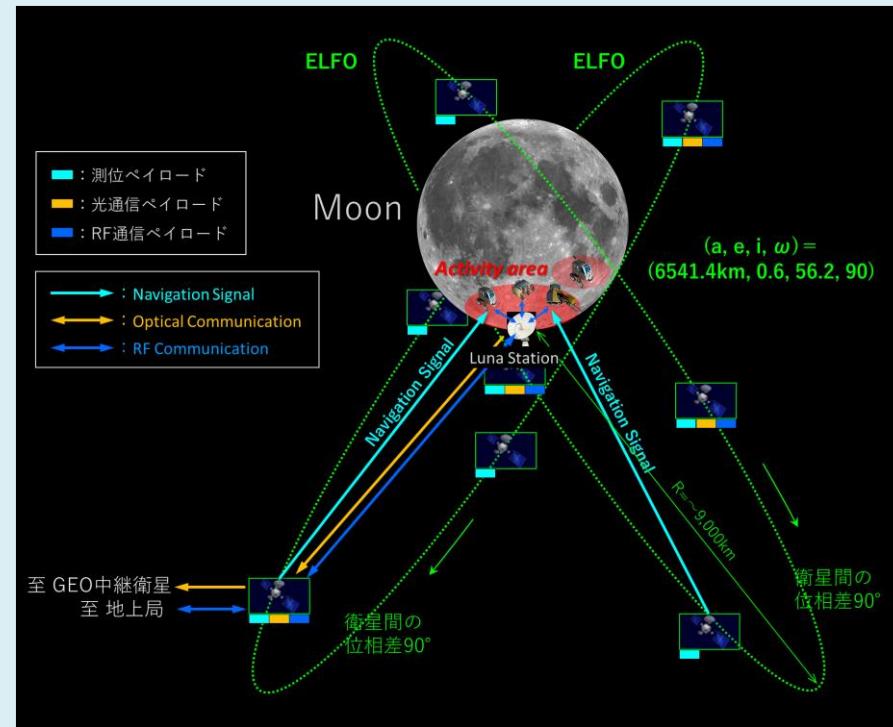


測位・通信の総合アーキテクチャの構築にあたっては …

- 多数の宇宙機開発・製造、これらの月圏への輸送を含めた月でのインフラ整備に掛かる
相当の時間とコスト
- 國際協働を前提とした長期的視点での段階的システム構築
- 当該アーキテクチャ構築途中の、それまでに打ち上げた月周回衛星等(投じたリソース)の効率的運用や測位サービスの早期サービスイン



ELFOに投入する衛星数が限られる（計8機体制に満たない）過渡期においても、要求測位精度40m(水平)をクリアする総合システムとして機能することが望ましい。



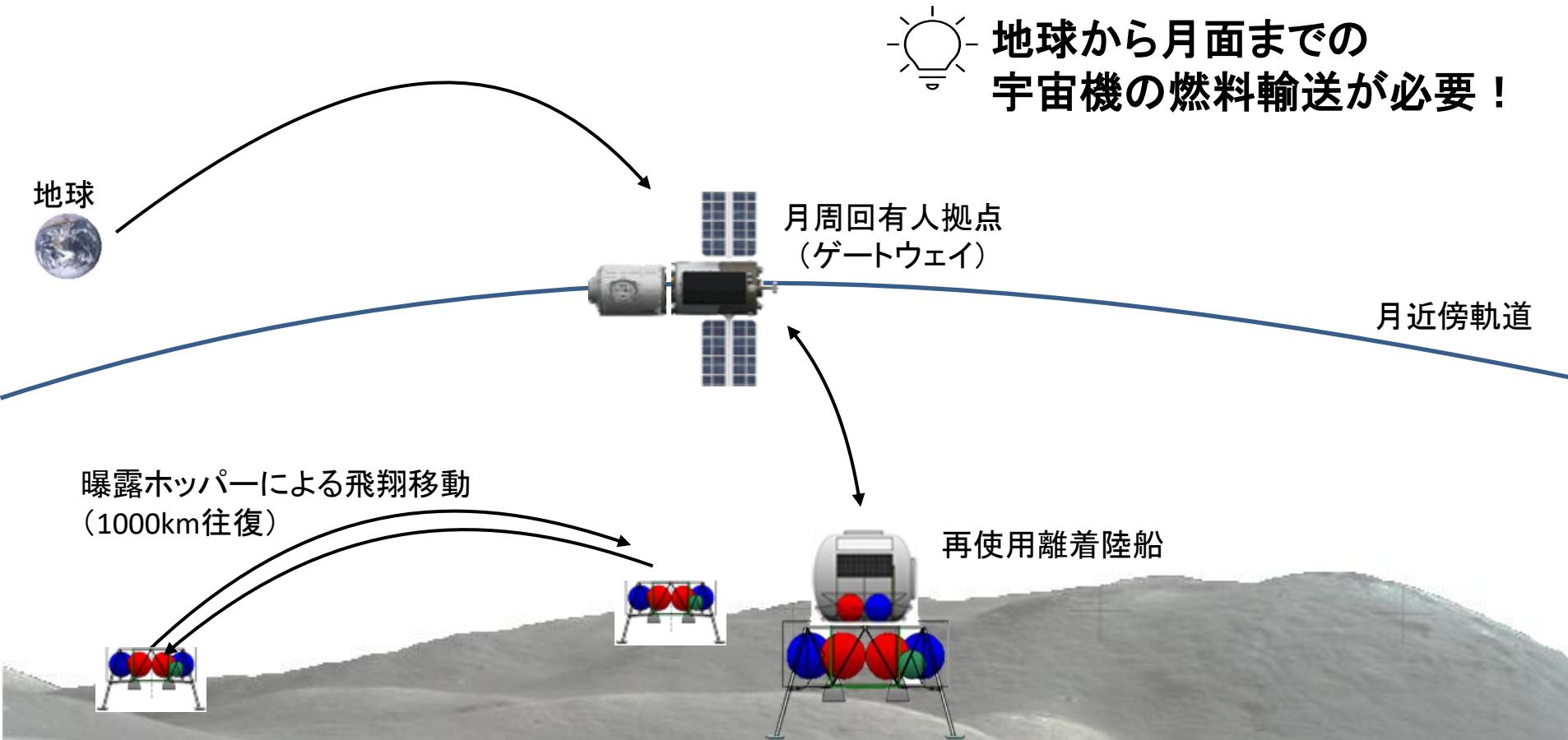
月近傍における測位通信の総合アーキテクチャ(案)
【ELFO 1軌道面あたり4機の計8機体制】



月面における
水資源利用の構想

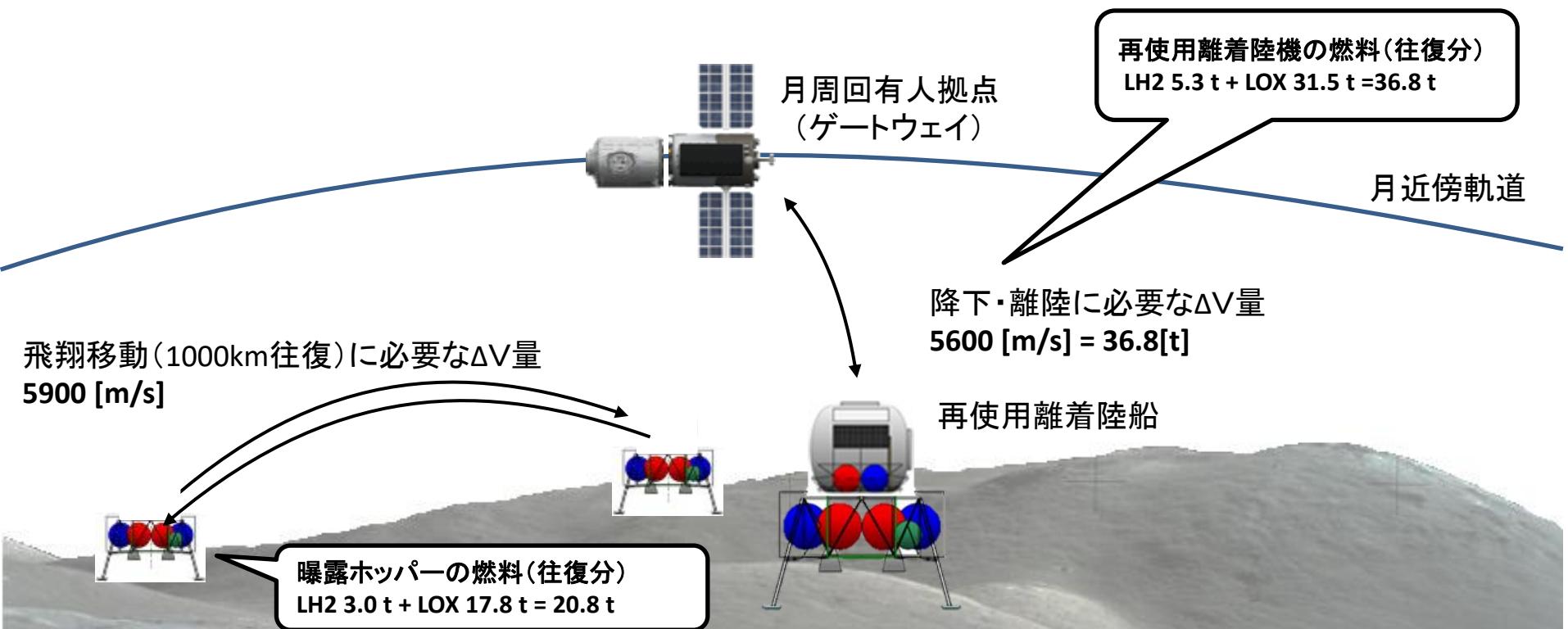
発表者：技術U 島田

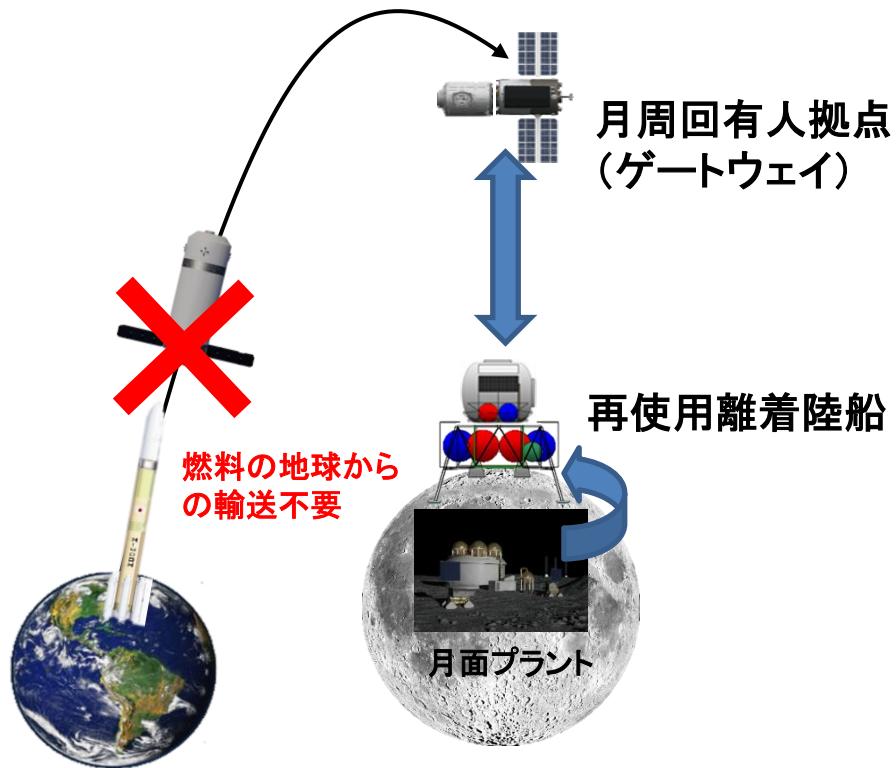
将来的な月面広域探査のイメージ図





年間の推薦消費量: 57.6t
(液体水素約8.3ton/年、液体酸素約49.3ton/年)





月面の水を燃料として利用するシナリオ

月面の砂(レゴリス)より抽出した水から水素・酸素を製造し、宇宙機の燃料として活用することで効率的な探査が可能となる。

月面推薦生成プラント

3. 水抽出、4. 電気分解、5. 液化、6. 保管

2. レゴリス輸送

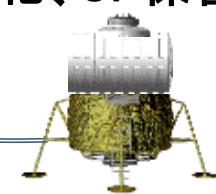
1. 掘削

永久影領域

月極域

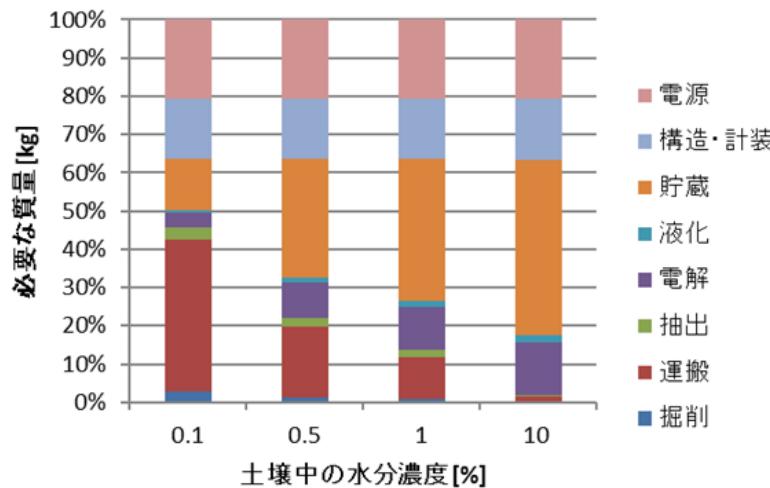
高日照領域

7. 推薦供給

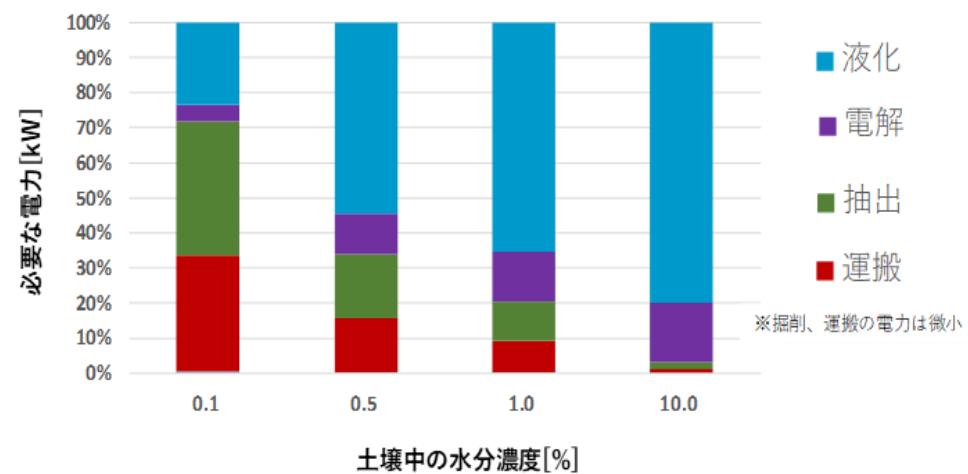


月面での水資源利用 概念図

月面での水資源利用に向けた技術課題の優先度付け



各ステップの質量比の推算
(土壤中の水分濃度別)



各ステップの電力比の推算
(土壤中の水分濃度別)

- ・液化プロセスの省電力化(消費電力低減の観点)
- ・貯蔵プロセスの小型軽量化(打上げ質量低減の観点)

月面での水資源利用に向けた技術課題(液化、貯蔵)

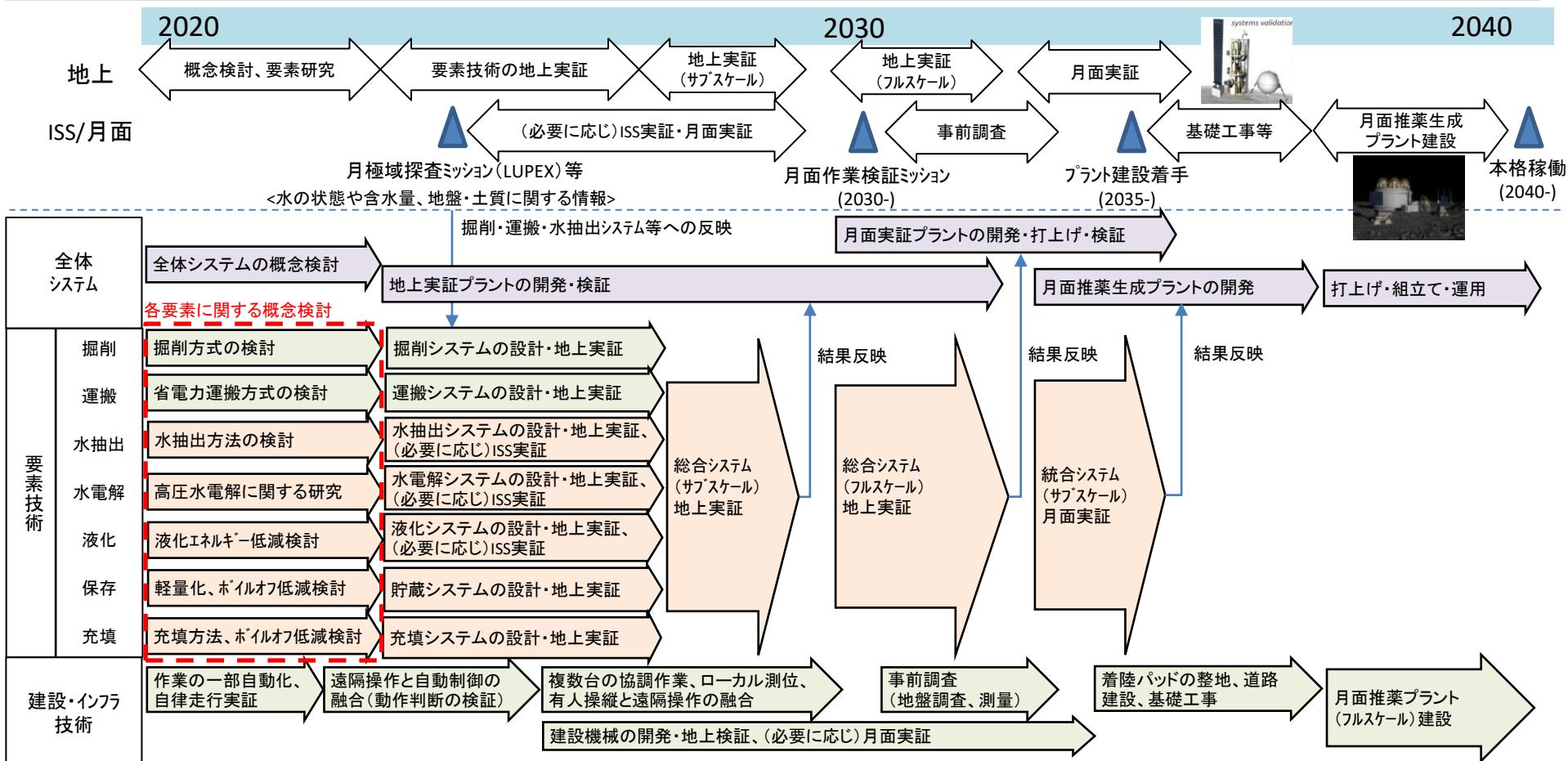
大項目	中項目	小項目
液化	予冷エネルギーの低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 予冷効率の高い冷媒適用技術 ・ 月面低温環境を利用した予冷技術
	液化エネルギーの低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 異なる冷凍方式を用いた液化技術(機械、気体または磁気冷凍等)
	電力供給の効率化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 月面資源を用いた発電技術 ・ エネルギ(電力)密度(W/kg)の高い発電/蓄電技術
貯蔵	貯蔵システムの軽量化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非金属材料等の軽量材料(樹脂、膜及び複合材等)や高性能断熱材を用いた極低温液体の貯蔵技術
	ボイルオフ低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ ボイルオフガス抑制技術 ・ 防熱技術 ・ 永久影を利用したボイルオフガスの再液化・冷却技術
	材料適合性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 酸素適合性の高い材料 ・ ガスバリア性の高い材料 ・ 軽量耐水素脆化材料 ・ 液化水素下での材料寿命評価 ・ 液化水素下での保全技術(遠隔での検知・診断、運用管理等)

技術ロードマップ 推薦生成プラント

技術ロードマップの考え方:

2020年代に月面推薦生成プラント全体システムの概念検討や要素技術検討、地上実証等を行い、2030年代にプラント建設地の事前調査(地盤調査、測量)や月面実証プラント建設に着手、2040年までに推薦プラントの本格稼働を開始する。

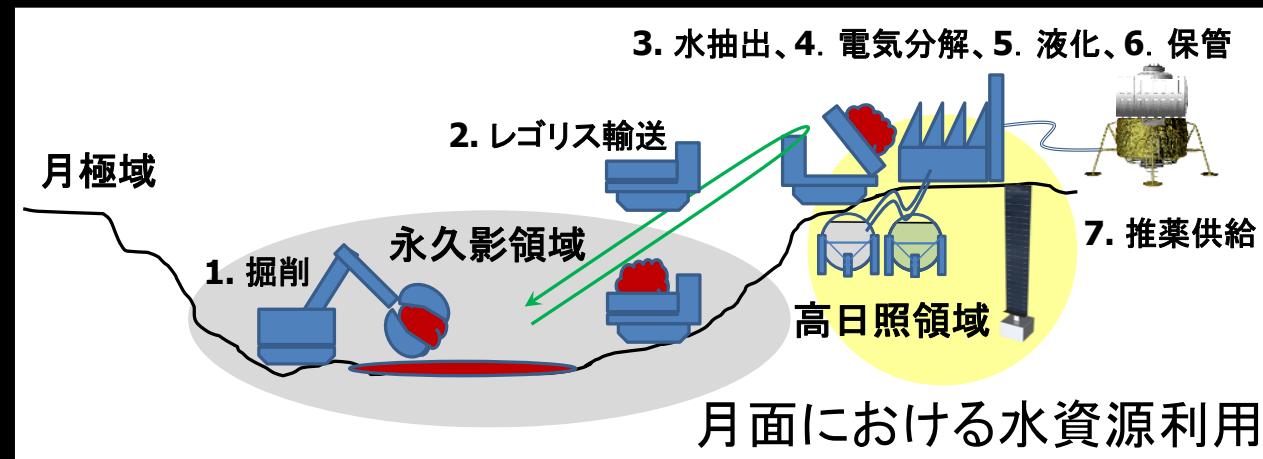
- 全体システム: 月面でレゴリスを掘削、プラントまで運搬、水を抽出した後に電気分解、得られた酸素及び水素を液化、タンクに保存、再使用離着陸機に推薦を充填する一連のシステムについて、地上のプラントメーカー等と連携しつつ、プラント全体システムの開発を行う。
- 要素技術: 水資源利用における各要素(掘削、運搬、水抽出、水電解、液化、保存、充填)について技術検討を行う。特に、月面特有の自然環境(低重力、温度、真空等)が各構成要素に与える影響を評価し、必要に応じ、ISSや月面での実証を行い技術成熟度の向上を図る。
- 建設・インフラ技術: プラント建設地の事前調査、資材輸送用の着陸パッドの整地、着陸パッド～プラント建設地点間の道路建設、基礎工事が必要。地上の建設技術を最大限活用し、自動・自律化された建設機械の開発やプラント施工に取り組む。(探査シナリオ9.4項参照)



水資源利用技術に関する探査ハブ研究の例



プロセス	研究テーマ	備考
水抽出	マイクロ波凍結乾燥(氷から水を作る技術)	RFP2 課題解決型
水電解	スケーラブル完全孤立系燃料電池の試作及び評価	RFP4 課題解決型
	沸騰連結効果の最大化 ~高効率水電解に向けて~	RFP6 アイデア型
液化	高信頼性・小型スターリング冷凍機の開発	RFP4 アイデア型
	推薦液化エネルギーを低減する磁気冷凍技術の研究開発	RFP6 アイデア型
貯蔵	カーボンナノチューブ/シリカ多孔体コンポジット材料による軽量断熱材料の開発	RFP2 アイデア型
	極低温領域を想定した高性能断熱材および軽量な真空断熱構造の開発	RFP2 アイデア型
	艦載性に優れた液体水素貯蔵タンク等向けMLIの高性能化	RFP6 アイデア型
	高効率熱交換チューブとボイルオフガス/冷凍機ループによるタンク冷却システム	RFP6 アイデア型
	薄膜ニッケル電気めっきを施した複合材による液体水素、液体酸素貯蔵系の軽量化	RFP6 アイデア型





ご清聴ありがとうございました。

