

3005 JAXA の国際宇宙探査シナリオ (輸送アーキテクチャ)

○成田伸一郎, 池永敏憲, 杵淵紀世志, 張科寅, 出原寿紘, 森戸俊樹, 阪口剛史,
宮北健, 梅村悠, 降旗弘城, 池田直史, 和田勝, 関谷優太, 星野健, 古賀勝, 中島潤, 佐藤直樹

International Space Exploration Scenario (Transportation Architecture) of JAXA
Shin-ichiro Narita, Toshinori Ikenaga, Kiyoshi Kinefuchi, Cho Shinatora, Toshihiro Idehara,
Toshiki Morito, Takefumi Sakaguchi, Takeshi Miyakita, Yu Umemura, Hiroki Furihata, Naofumi Ikeda,
Masaru Wada, Yuta Sekiya, Takeshi Hoshino, Masaru Koga, Jun Nakjima, Naoki Sato (JAXA)

Key Words: Lunar Surface Exploration, Human Lunar lander, Pressurized Rover, In-Situ Resource Utilization

Abstract

JAXA is studying the space exploration scenario through international collaboration. Effective transportation architecture is especially important for the sustainable scenario to the long-term lunar exploration roadmap of JAXA. In these days, water ice is estimated to be buried around lunar polar area. This paper shows several trade-off studies for transportation architecture, including in-situ water ice resource utilization.

1. 緒言

現在, 低軌道における有人宇宙活動の成熟期を迎え, 更なる人類の活動の領域拡大を目指した国際宇宙探査の検討が活発化している¹⁾。

アポロ計画, および科学探査を目的とした無人探査ミッション等の過去の計画と比較して, 国際宇宙探査では, 効率性・持続的に事業活動を継続することがより一層重要である。そのための輸送アーキテクチャとして, Gateway や月面を対象に, クルー・カーゴの輸送・補給技術, 月面への着陸技術, 月面探査技術, さらにこうした探査に必要とするエネルギーを現地調達する資源利用技術が重要となる²⁾。本稿では各輸送アーキテクチャの構成要素とそのトレードオフ検討結果概要, および資源利用技術の詳細について報告する。

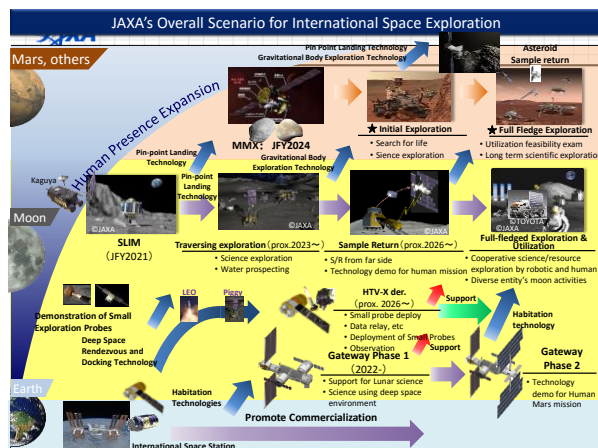


図 1 JAXA の提案する国際宇宙探査シナリオ

2. 輸送アーキテクチャの構成要素

輸送アーキテクチャを構成する各要素について以下に詳細を示す。

- 深宇宙補給技術 (Gateway への補給のための軌道航行・軌道制御・推進のためのエンジン技術)
- 離着陸技術 (月面⇄Gateway 間のクルー・カーゴ輸送のための離着陸技術)
- 表面探査技術 (月面の広範囲な探査領域を踏破する走行, および越夜を含む滞在技術)
- 資源利用技術 (軌道航行・離着陸・表面移動のために必要な推薬を現地で生成する技術)

A, B, C は対象とするシステムまたは探査地点までの輸送手段であり, D は各輸送手段で必要となるエネルギーの生成手段である。以下の図に資源利用を基盤とした輸送アーキテクチャの図を示す。推薬生成プラントから生成した高圧水素・酸素ガスを有人と圧ローバに, 液化水素・酸素を離着陸機に供給する。

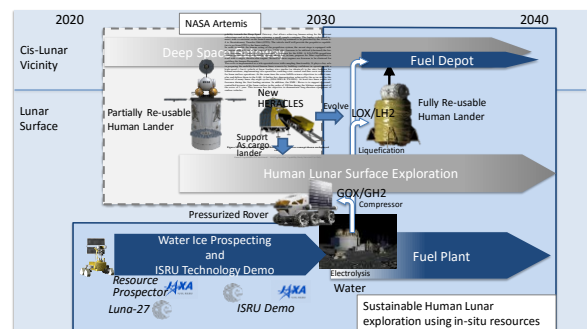


図 2 資源利用を基盤とした輸送アーキテクチャ

A, B, C について、輸送元・輸送先、および搭載物の種類をまとめた表と、各輸送に必要なエネルギーを示した図を以下に示す。特に A, B, C については同セッション内において詳細検討の報告があることから、本稿では概要とトレードオフ結果の報告に留め、これらで必要となるエネルギー生成のための D. 資源利用技術について中心に報告する。

表 1 輸送アーキテクチャの構成要素

項目	輸送元	輸送先	搭載物
補給	地球低軌道	Gateway	カーゴ
離着陸	Gateway (月面)	月面 (Gateway)	クルー カーゴ サンプル
表面探査	月面	月面の各探査地点	クルー カーゴ サンプル

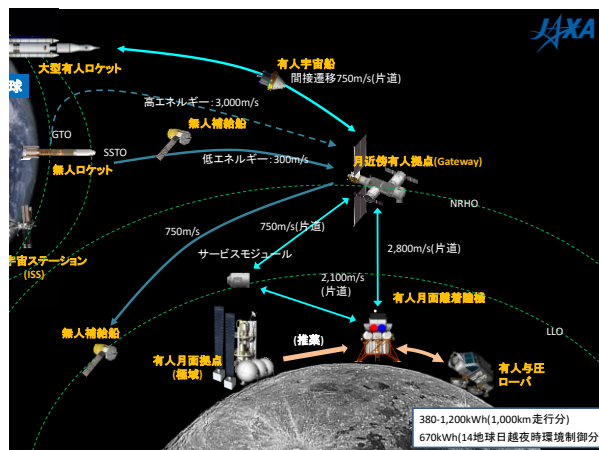


図 3 輸送アーキテクチャの概要とエネルギー量

3. 深宇宙補給技術

深宇宙補給技術の詳細について以下に示す。

- 直接遷移 (地球近傍で大きなエネルギーを使用し、Gateway に到達する。)
- 間接遷移 (月スウィングバイを用いて遷移に必要なエネルギーを節約する。)
- 低エネルギー遷移 (軌道面変更等に伴うエネルギーを最小化する。)
- 高エネルギー遷移 (電気推進を用いて徐々に軌道を変更する。)
- ハイブリッド遷移 (EDV-LGA と呼ばれ、化学推進と電気推進を併用する。)

低エネルギー遷移や電気推進を利用する場合は輸送質量を増やすことが可能となるが、輸送期間が長

期に渡るため、カーゴ補給便としての利用となる。また、電気推進を利用する場合は大電力の生成が必要となり、太陽電池面積などの機体規模に対する大きな影響が想定される。従って、C が第一案となる。

表 2 深宇宙補給手段の種類

項目	エンジンの種類	輸送期間 [日]	搭載質量 [t]	総合
直接遷移	化学推進	3	6.1	×
間接遷移	化学推進	7	8.5	△
低エネルギー遷移	化学推進	100~	10.5	○
高エネルギー遷移	電気推進	200~	9.7	△
ハイブリッド遷移	化学推進 電気推進	350~	10.1	△

4. 月面離着陸技術

離着陸技術の詳細について以下に示す。

- 完全再使用 (単段式で機体を完全に再使用する。)
- 離陸機再使用 (月面で着陸段を廃棄し、離陸機のみ再使用する。)
- エンジン再使用 (主要な軌道遷移を実施した後に、空になった推進タンクを廃棄する。)
- A のケースに Gateway⇌LLO 間遷移のためのサービスモジュール (SM) を追加する。
- B のケースに Gateway⇌LLO 間遷移のためのサービスモジュール (SM) を追加する。
- C のケースに Gateway⇌LLO 間遷移のためのサービスモジュール (SM) を追加する。

それぞれの形態に対して、推進剤として LOX/LH₂、メタン、ストアラブルを想定する。極低温の推進剤では高性能断熱材を用いることで推進剤の蒸発を抑える。

(特に LH₂ について蒸発ガス低減 (BOR=0.3%以下) のための詳細検討 (冷凍機の併用や、艙装性を考慮した統合解析・試験を含む) が必要である。)

形態 A~D に比べ E, F の補給量は小さい。E, F の補給量はほぼ同等であるが、F は軌道上でのタンク廃棄のために複雑な分離機構が必要となることや、それらの有人仕様化といった大きな影響が想定される。

形態 A は LOX/LH₂ のみ記載しているが、構造効率の改善 (26%以下) により成立解が存在する。また後述する資源利用技術 (推進剤生成プラント) により月面での推進剤補給が実現すると、地上からの補給量は完全に不要となり、この形態が圧倒的に優れたオプションとなり得る。

今後は優先順位の高い高性能断熱材の詳細検討を実施する。離着陸機システムの詳細検討と合わせ、蒸発ガス低減実現性が見込みが得られれば、形態は A または D、推薬として LOX/LH₂ とする。実現性が困難な場合は、形態は D、推薬としてメタンとする。

表 3 離着陸機形態の種類

項目	エンジン	全備質量 [t]	補給質量 [t]	総合
完全再使用	LOX/LH ₂	TBD	TBD	△
離陸機再使用	LOX/LH ₂	40	46	△
	メタン	45	46	△
	ストアラブル	55	48	×
エンジン再使用	LOX/LH ₂	37	43	×
	メタン	42	44	×
	ストアラブル	52	47	×
完全再使用 (SM 有り)	LOX/LH ₂	48	76	△
	メタン	47	70	×
	ストアラブル	52	77	×
離陸機再使用 (SM 有り)	LOX/LH ₂	24	39	○
	メタン	26	40	○
	ストアラブル	31	42	×
エンジン再使用 (SM 有り)	LOX/LH ₂	23	39	×
	メタン	25	40	×
	ストアラブル	30	42	×

5. 月面移動技術

月面移動技術については、システムとして有人月面ローバを想定する。エネルギーを必要とする主要なミッション要求として、広範囲な探査領域の走行および越夜を含むクルー滞在を想定する。欧米のアーキテクチャ検討ではエネルギー源として原子力電池が挙げられているが、打ち上げの安全性や、我が国におけるエネルギー政策方針および地上自動車技術の利活用の観点から、本稿では燃料電池を想定する。

月面移動のための動力源として燃料電池を用いた場合の詳細について以下に示す。

- 燃料電池・再生無し（地上自動車と同様にタンクに保存された燃料を用いて走行する。ミッション毎に燃料の補給が必要となる。）
- 燃料電池・再生有り・高圧水電解（走行後に生成された水を高圧電気分解して燃料を再生する。）
- 燃料電池・再生有り・常圧水電解（走行後に生成された水を電気分解して燃料を再生する。電気分解

が高圧ではないため、地上の水素ステーションと同様に昇圧のためのコンプレッサ等が必要となる。）

高圧・常圧水電解の手法に限らず、再生有りの場合がミッションを 5 回遂行する際に総質量が効率的となる。今後はより効率的な高圧水電解手法を中心に再生型燃料電池の詳細検討を実施する。

表 4 月面移動動力源手段の種類

項目	与圧モジュール[t]	電源モジュール[t]	燃料/5 ミッション [t]	総合
燃料電池再生無し	7.3	9.7	9.0	×
燃料電池再生有り（高圧水電解）	7.3	11.7	1.8	○
燃料電池再生有り（常圧水電解）	7.3	16.3	1.8	△

6. 資源利用技術

資源を利用するための前提となる要求量について以下に示す。資源利用の適用先としては前述の複数の輸送アーキテクチャの他に、将来的にはクルーの飲み水や呼吸用酸素としての活用が想定される。本稿では初期の資源利用として、有人月面探査を実施するためのクルー・カーゴ輸送を対象に、Gateway と月面の往来と広範囲の月面を探査するためのエネルギー生成を行うことを想定する³⁾。

月面⇄Gateway 間の往復を行うための離着陸機、および月面の広範囲な探査を行うための曝露ホッパーに対して、必要となる合計 ΔV 量から推薬要求量は 57.6[t]となる。エンジンの燃料混合比を考慮すると、水生成の要求量は 75[t]となる。

有人探査を年 1 回行うことを想定し、1 年間に水 75[t]の生成と推薬への変換処理を行うためのプロセスを以下のように設定する。各処理プロセスの詳細、永久陰領域からの水氷が吸着されたレゴリスの掘削・運搬、および水抽出・水処理・推薬生成のための電力を必要とするプラント設備の位置関係について以下の図に示す。

ステップ 1: 掘削（水氷が吸着されたレゴリスを掘削し運搬機に搭載する。）

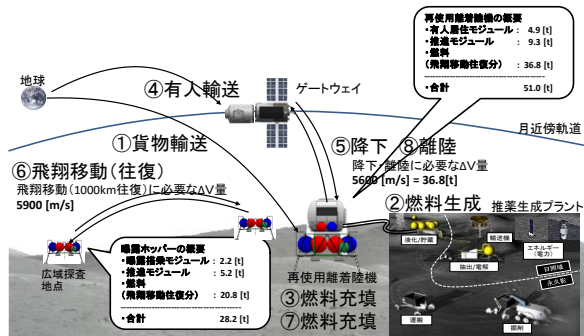


図 4 広域月面探査のためのエネルギー量

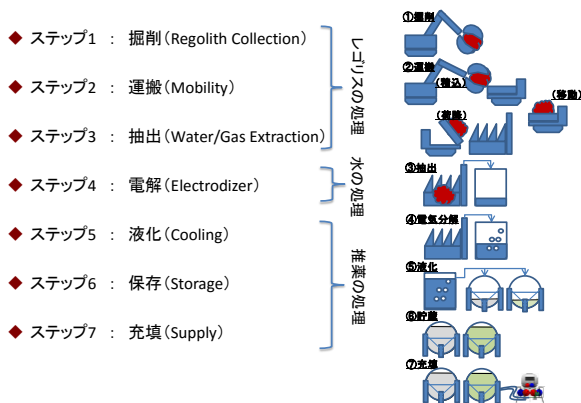


図 5 推薬生成のプロセス

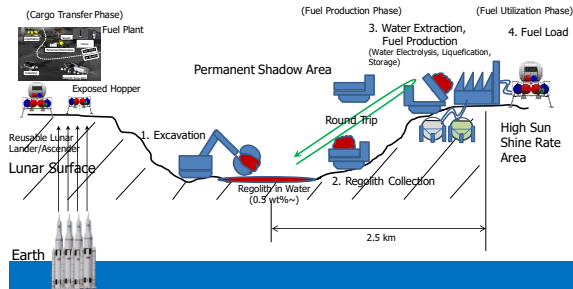


図 6 掘削・運搬と水処理・推薬生成の位置関係

- ステップ 2: 運搬 (水氷が吸着されたレゴリスを水抽出機まで運搬する.)
- ステップ 3: 水抽出 (水氷が吸着されたレゴリスを加熱し水を抽出する.)
- ステップ 4: 水電解 (水を電気分解し水素・酸素ガスを生成する.)
- ステップ 5: 液化 (冷凍機等を用いて水素・酸素ガスを液化する.)
- ステップ 6: 保存 (液化水素・酸素を保存する.)
- ステップ 7: 充填 (離着陸機または曝露ホッパーに液化水素・酸素を充填する.)

設定した各プロセスに対して、地上技術に基づき推薬生成プラントの質量・電力の見積りを行った。地

Process	0.1		0.5		1.0		10		Parameter
Water ratio included in Regolith [wt%]									
Mass/Power	[t]	[kW]	[t]	[kW]	[t]	[kW]	[t]	[kW]	
Regolith Excavation	1.4	5.5	0.3	1.1	0.1	0.6	0.1	0.1	Specific Mass 0.25[kg/(kg regolith/hr)] Specific Power 0.01[kW/(kg regolith/hr)]
Regolith Collection	20.3	274.0	4.1	54.8	2.0	27.4	0.2	2.7	Specific Mass 3.70[kg/(kg regolith/hr)] Specific Power 0.05[kW/(kg regolith/hr)]
Water Extractor	1.6	317.8	0.5	65.8	0.3	33.4	0.1	4.8	Specific Mass 0.61[kg/(kg regolith/hr)] Specific Power 0.06[kW/(kg regolith/hr)] *Example case of value, 1wt% in regolith
Electrolysis	2.0	42.0	2.0	42.0	2.0	42.0	2.0	42.0	Specific Mass 49[kg/(kg water/hr)] Specific Power 2.1[kW/(kg water/hr)]
Liquefaction	0.3	195.4	0.3	195.4	0.3	195.4	0.3	195.4	Specific Mass 53.8[kg/(kg water/hr)] Specific Power 1.27[kW/(kg water/hr)]
Storage	6.8	-	6.8	-	6.8	-	6.8	-	Specific Mass 0.53[kg/(kg LH2/hr)] Specific Mass 0.11[kg/(kg LO2/hr)] Specific Mass 0.01[kg/(kg water/hr)]
Structure/Harness/Maintenance include Fuel Load	8.1	-	3.5	-	2.9	-	2.3	-	25% of sub total mass of listed above (Regolith Collector, Mobility, Extractor, Electrolysis, Liquefaction, Storage Tank)
Power	10.4	-	4.5	-	3.7	-	3.1	-	Solar Array Power Density considering high rate sunshine area, 80% (0.1kW/kg)
Total Sizing	50.8	834.7	21.9	359.1	18.2	298.8	14.8	245.0	
	[t]	[kW]	[t]	[kW]	[t]	[kW]	[t]	[kW]	

図 7 推薬生成プラントの質量・電力見積り

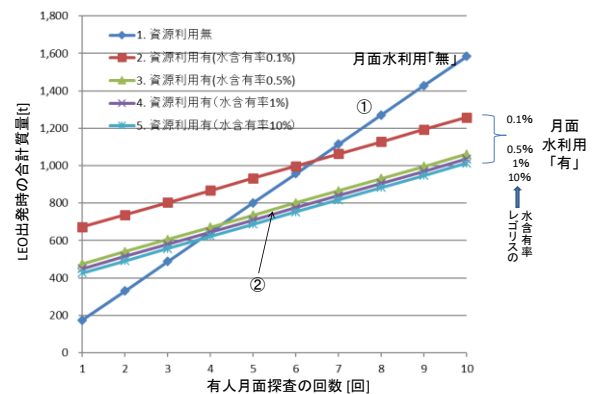


図 8 推薬生成プラントのベネフィット

上の保存タンクは真空 2 重層を設けていることから大きな質量が必要となっているが、月面の真空環境と離着陸技術検討における推薬保存を目的とした高性能断熱材の使用を想定し、軽量化対策を行った。

レゴリスの水氷吸着量が 1[%]の時に推薬生成プラントの質量は 18.2[t]、電力は 300[kW]程度となる。推薬プラント導入のベネフィットとしては、レゴリスの水氷吸着量が 0.5[%]以上の時に有人探査を 4 回以上繰り返すと総質量が効率的となる。

7. 結言

本稿では国際宇宙探査を効率的・持続的に進めるための輸送アーキテクチャについて、その概要およびトレードオフ結果を報告した。

参考文献

- 1) ISECG, The Global Exploration Roadmap the third version, January 2018.
- 2) EZA-2019002, 日本の宇宙探査全体シナリオ
- 3) 成田, 資源利用シナリオ, 第 3 回月極域探査ワークショップ, 2018 年 12 月.