

有人与圧ローバの検討状況

2024年5月17日

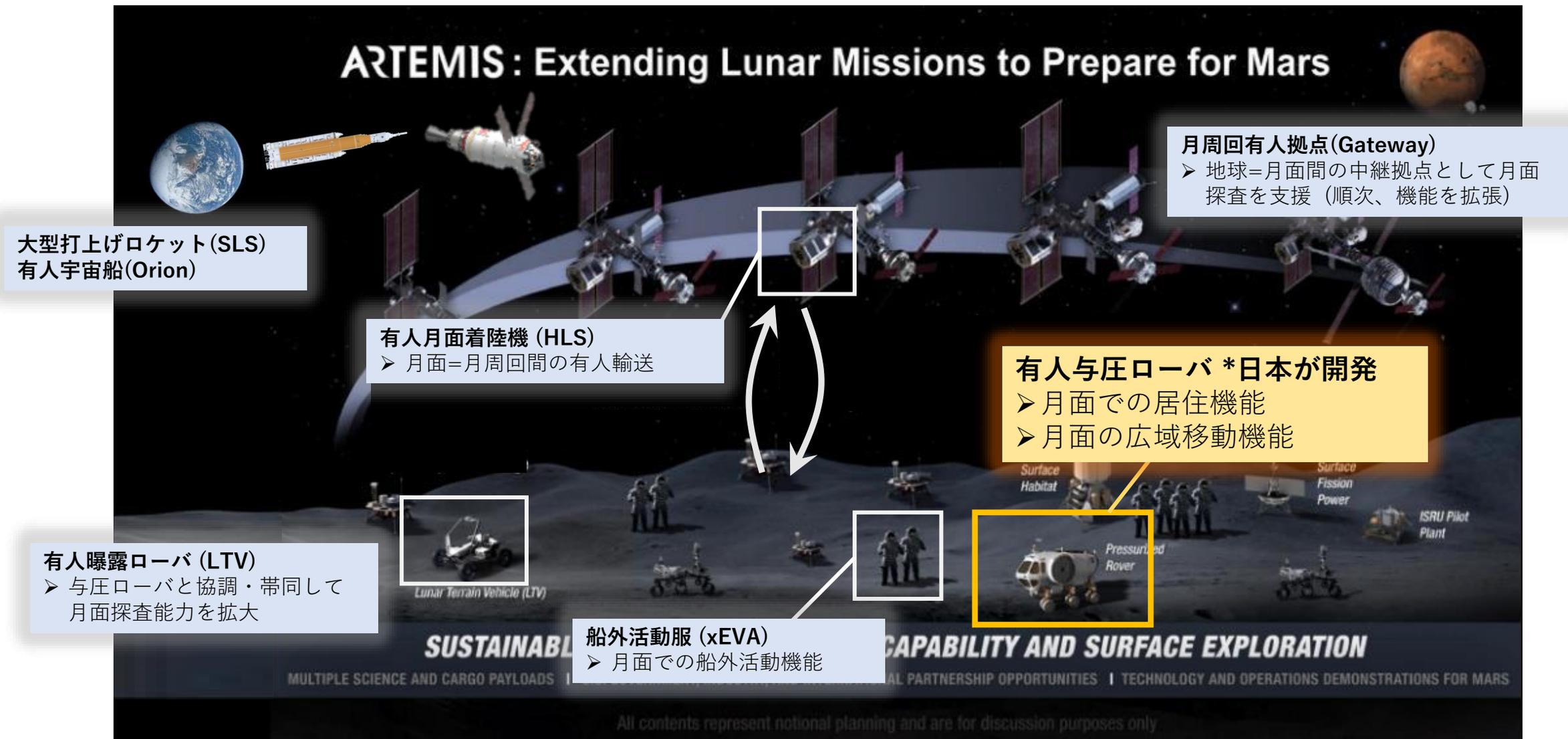
JAXA 有人宇宙技術部門／国際宇宙探査センター

- 日米間で「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に署名がなされ、**日本は2031年を目標に月面活動で唯一無二の貢献となる有人与圧ローバを実現すること**、並びにNASAは日本人宇宙飛行士による2回の月面着陸機会を提供することが合意された。
- 日本が開発して15年にわたり維持・運用している「**きぼう**」の技術と、現在開発中の月周回有人拠点**Gateway**居住棟搭載用**生命維持・環境制御システム(ECLSS)**技術、**日本の自動車メーカーのモビリティ技術**を活用して、月面での「**居住機能**」と「**移動機能**」を併せ持つ、世界初の有人与圧ローバシステムの実現を目指し、研究開発を進めているところ。
- 本報告では、米国アルテミス計画における与圧ローバの技術的位置づけと、現在の研究開発の状況および今後の予定について、ご報告する。

1. 米国アルテミス計画における有人月面探査
2. 有人与圧ローバの概要
3. 有人与圧ローバの現状と今後

1. 米国アルテミス計画における有人月面探査 (1/2)

- アルテミス計画による月面探査を構成する主要要素として、大型打上げロケット、月周回有人拠点、有人月面着陸機、有人曝露ローバ等が定義されており、日本が開発する有人与圧ローバも含まれる。



1. 米国アルテミス計画における有人月面探査 (2/2)

- NASAは、これまでの約10年間(FY2012~FY2022)で約40B USD ^{*1}を投入。
- 今後5年間(FY2025~FY2029)で、更に約39.8B USD ^{*2}を投入し開発を進める計画。

米国が開発している主要構成要素の概要

	主要機能	ミッション期間	経費(推定)
大型打上げロケット(SLS)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LEO投入能力: >105t (SLS Block 1B) ▶ 月遷移軌道投入能力: >38t (SLS Block 1B) 	—	23.8B USD ^{*3} (FY2012~FY2025)
有人宇宙船(Orion)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 地球~月周回間の有人輸送 	4人x21日 滞在	15.0B USD ^{*1} (Orion開発費)
月周回有人拠点(Gateway)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 地球~月面間の中継拠点として月探査ミッションを支援 ▶ 月周回上での実験環境を提供 	>15年間 4人x30日/年滞在	3.0~3.7B USD ^{*4}
有人月面着陸機(HLS) (次頁参照)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 月面と月周回間の有人輸送 ▶ この派生型として大型カーゴ輸送機(HDL) 	4人x8日 滞在	3.5B USD (SpaceX) 3.4B USD (Blue Origin) ^{*1}
有人曝露ローバ(LTV) (次頁参照)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 月面での有人移動手段 (船外活動服を着用した状態で搭乗) 	2人x8時間 (xEVA活動時間)	1.7B~1.9B USD ^{*5} (LTVサービス提供企業の提案額)
月面船外活動服(xEVA)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 月面(船外)での有人活動機能 		3.5B USD ^{*1}

※JAXA調べ

*1: NASA OIG Report – IG-24-003 – “<https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/ig-24-003.pdf>”

*2: NASA, FY2025 PRESIDENT’S BUDGET REQUEST SUMMARY – Deep Space Exploration Systems, “<https://www.nasa.gov/fy-2025-budget-request/>”

*3: Final Report - IG-24-001 - NASA’s Transition of the Space Launch System to a Commercial Services Contract, “<https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/ig-24-001.pdf>”

*4: United States Government Accountability Office, GAO-23-106021 “<https://www.gao.gov/assets/830/826494.pdf>” P.110 “Gateway Initial Capability”

*5: SPACENEWS, dated April 15, 2024 “<https://spacenews.com/nasa-document-outlines-selection-of-lunar-rover-companies/>”

■ 有人ランダと無人大型カーゴランダ

- NASAは、2021年4月に1機目の有人ランダ調達候補としてSpace-X社を選定。その後、2023年5月に、3機目以降の(再使用可能)有人ランダ調達候補としてBlue Origin社を選定。
- NASAは、有人月面ランダ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。
- 与圧ローバは、NASAが提供するこの大型貨物輸送用ランダによって、月面へ輸送される。



■ 有人曝露ローバ(LTV) ※飛行士が船外活動服を着て搭乗

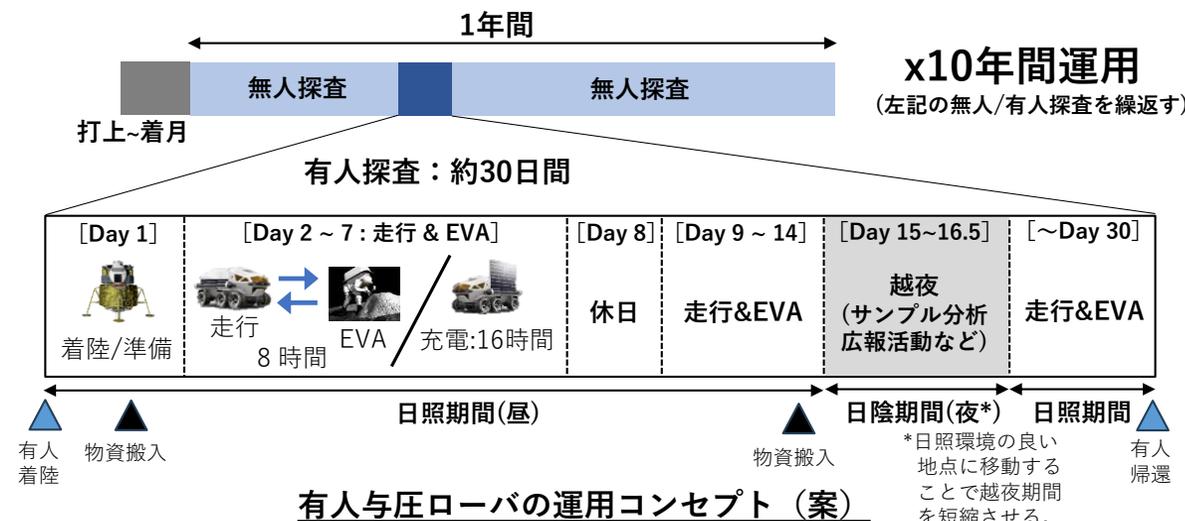
- 2024年4月、NASAはLTV開発事業者として3社を選定(Intuitive Machines社、Lunar Outpost社、Venturi Astrolab社)。3社それぞれと基本設計フェーズまでの契約を締結。今後、1社に絞られる予定。
- LTVは、有人と圧ローバ運用開始までの月面移動手段として機能する。また、有人と圧ローバ運用時には常に帯同し、有人と圧ローバ故障時等の緊急時には有人ランダまでの帰還に使用する予定。



- 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



有人探査 ミッション 要求	運用期間	2031年～
	探査領域	南極域
	クルー人数	2名
	有人ミッション頻度	1回/年
	有人ミッション期間	28日 (+ 異常時対応3日)
	越夜日数	36時間(検討中)
	連続走行距離	20 km/1充電
システム 走行性能 (検討中)	EVA頻度 (クルー)	4回/週
	総走行距離	10,000 km(目標)/10年間
	最大速度	15km/h
	最大斜度	±20度
	障害物乗越え性能	30 cm @平坦路 7 cm @20° 傾斜路



2. 有人と圧ローバの概要 (2/3) —検討中の構成案—

Kaバンドアンテナ

LiDAR

船外照明

窓

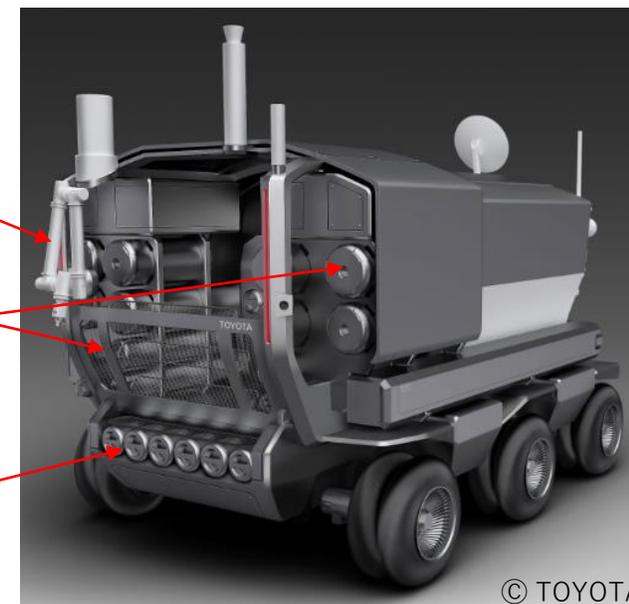
カメラ

ロボットアーム

ガスタンク
(船内環境制御用)

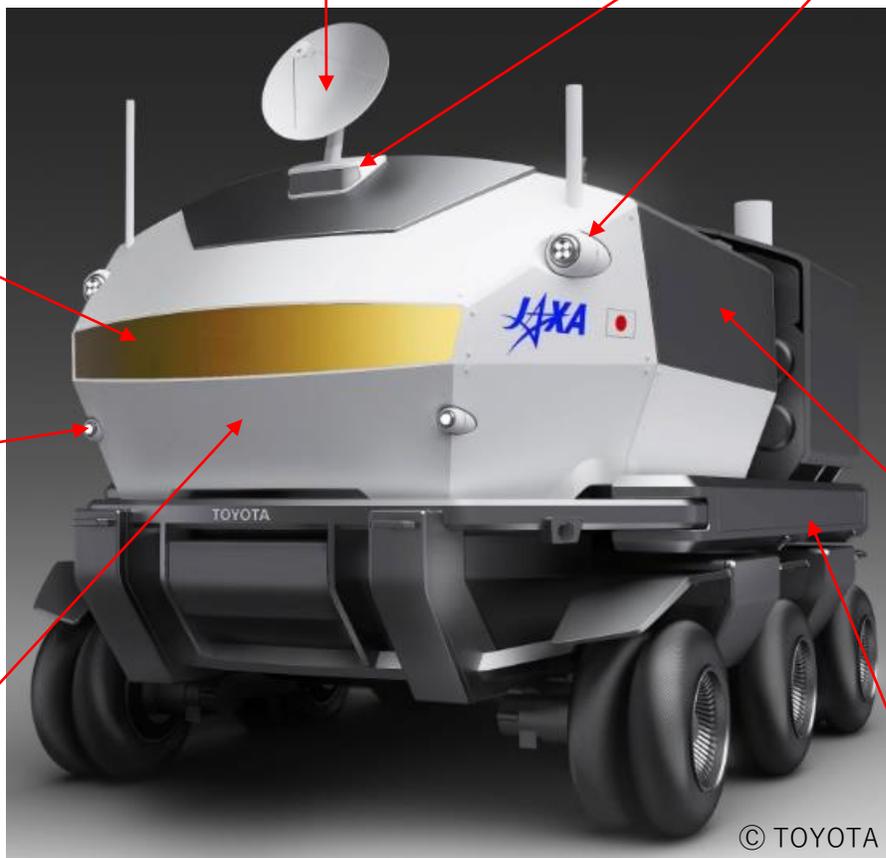
ガスタンク
(RFC)

ラジエーター
(濃グレー部)



© TOYOTA

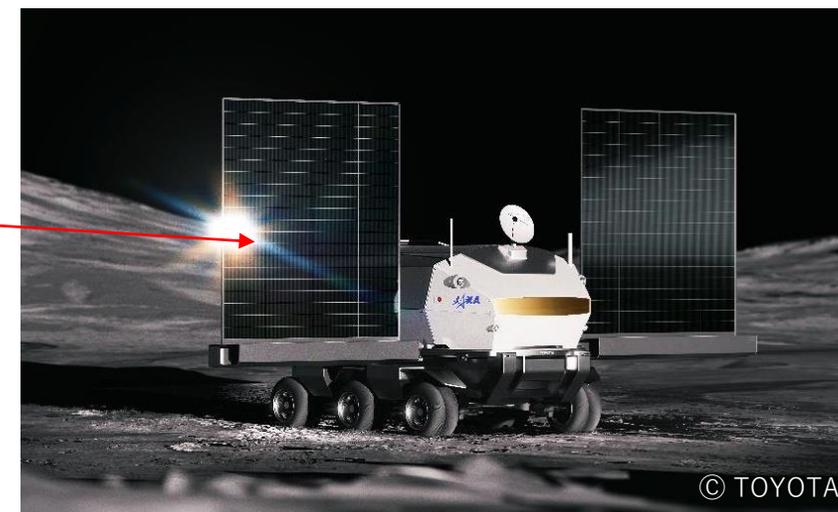
微小隕石
防護バンパ



© TOYOTA

太陽電池
(展開状態)

太陽電池
(収納状態)



© TOYOTA

- $L \times W \times H = 6.3\text{m} \times 4.3\text{m} \times 4.6\text{m}$
- ホイールベース = 4,060mm
- トレッド幅 = 3,200mm

月面走行システムの確立

- 地上では1/6G環境を模擬した走行試験が実施できないことから、**走行機構の検証手法の確立**が不可欠
 - 台上試験機による**加振試験**と**モデルシミュレーション**を組み合わせた検証手法を適用
- **不整路走行の安定性確保**、レゴリスへの**沈み込み（スタック）防止対策**が必要
 - **低接地圧**となる**金属製弾性タイヤ**の開発、**走行制御技術**の開発
- GPSの無い環境下での**リアルタイム航法技術**が必要
 - 月面用GPS(**LunaNet**)に加え、**電波航法**と**Lidar画像**を用いた複合航法等を適用。



加振試験

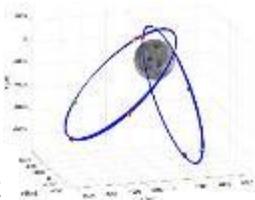
■ シャシ系・クルーシステム



サスペンション

タイヤ

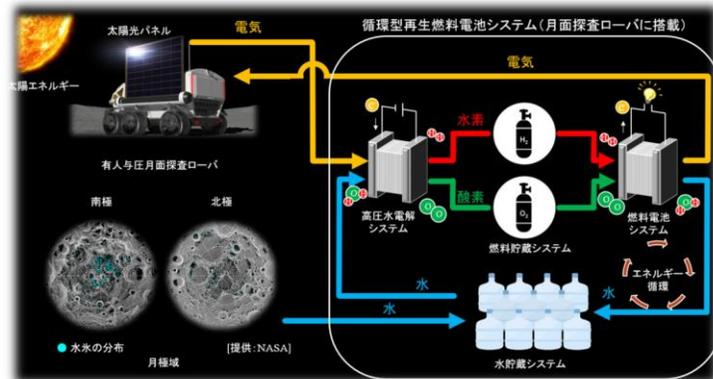
操舵装置



LunaNet

高密度蓄電システム

- **越夜**(最大15地球日)中の必要エネルギーを確保するため、**高エネルギー密度の蓄電システム**が不可欠。
 - **再生型燃料電池システム(RFC)**の採用を計画。高圧酸素系等、地上用途向けには無い技術の確立が必要。



展開/収納型太陽電池パネル

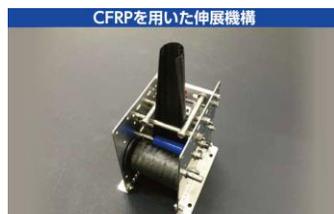
- 必要エネルギー確保のために必要となる**大面積の太陽電池パネル**に、走行振動への耐性を持たせることは困難。
 - 搭載性と防塵性を備える機構として、**双安定ブーム**を用いた機構の採用を計画。1000回を超える**繰り返し展開/収納機構**の確立が必要。



©TOYOTA

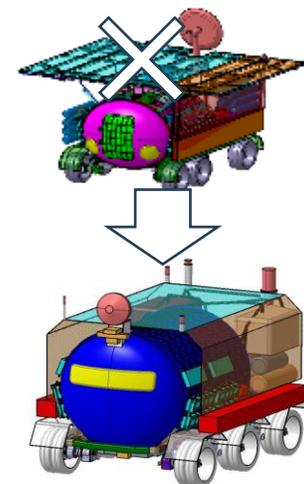


CFRPを用いた伸張機構



大容量排熱システム

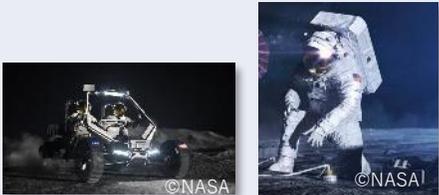
- 走行時・停車時等様々な運用シーンに対応する**大容量の排熱システム**が不可欠
 - 展開・収納機構が不要な、**ボディマウント型ラジエータ**を用いた**単相流アクティブ排熱システム**の採用を計画。必要なラジエータ面積を削減するため、船内空調機として**コンプレッサ式空調**を用いる予定。



(参考) 居住・移動機能を持つ有人宇宙機の比較

- 月面の「居住機能」と「移動機能」を併せ持つ世界初の有人宇宙機
 - 「船外活動服+曝露ローバ」の組合せ（表の左端）では、クルーの移動時間が船外活動服の運用時間（8時間）に制約され、居住拠点からの移動範囲が制限される。また、移動時間が長くなるほど、探査作業に充てる時間が少なくなる。
 - それと比べ、有人与圧ローバでは、居住拠点ごと移動するので、探査範囲が広くなり、探査作業に充てる時間も多くなる。

- 日本として初の独立型有人宇宙機
 - ISS取付型の「きぼう」と比べ、与圧ローバでは電力・排熱・通信・環境制御などの機能の自立性が求められるとともに、月面走行機能や越夜など新規性と難易度の高い技術が付加される。

船外活動服(xEVA) + 有人曝露ローバ(LTV)	機能	有人与圧ローバ	「きぼう」日本実験棟 (JEM)
2人×最長8時間 (船外活動服)	居住環境提供 (CO2除去、O2供給、温湿度制御、排泄処理、等)	2人×30日	温湿度制御以外の居住機能はISSの他モジュールに依存
—	居住容積	9m ³ 以上	約50m ³
10年間 (LTV)	月面活動期間 (無人期間含む)	10年間	10年間以上 (現在、15年間運用中)
<ul style="list-style-type: none"> • 月面走行・自動走行 (LTV) • 越夜能力 (LTV) • 月面有人活動機能 (船外活動服) 	必要な主な機能	<ul style="list-style-type: none"> • 広域月面走行・自動走行 • 越夜能力 (大容量蓄電) • 有人居住機能 • 自立的な電力・排熱・通信機能等 • 船外活動の支援 • 月面環境における実験の支援 • クルーによる保守性・整備性 	 <ul style="list-style-type: none"> • 船外活動の支援 • 低軌道環境における実験の支援 • クルーによる保守性・整備性
5.4B USD (推定) * ₁	経費規模	検討中	2,500億円 (JEM本体開発費)
NASA	開発主体	JAXA	JAXA

*1: 1項掲載のxEVAとLTV(1.9B USD)の合計額

3. 有人与圧ローバの研究開発の現状と今後の予定

- キーとなる技術について、開発のフロントローディングを実施中。
 - **全体システム**
 - ・ 昨年度下期より概念設計を開始し、各サブシステムや構成機器の仕様検討を実施中。
 - ・ あわせて、排熱、環境制御等の要素試作試験により、実現性の確認を進めている。
 - **高エネルギー密度電池(再生型燃料電池)**
 - ・ 有人与圧ローバへの搭載・運用を想定した、再生型燃料電池システムの概念設計を実施中。
 - **走行システム**
 - ・ 昨年度に試作機の製作を完了し、本年度から走行機能試験を実施予定。
- 昨年11月にJAXA内でのミッション定義審査(MDR)、同12月にNASAとのシステム要求審査(1回目)、および安全審査(Phase-0)を実施。
- 2031年の打上げに向け、早期の開発着手が必要。本年度中にJAXA/NASA共同のシステム要求審査・システム定義審査を完了させ、有人与圧ローバのシステム要求をベースライン化する予定。



2031年打上げに向けたマイルストーン (想定案)

システム設計課題

【走行時質量・打上質量、打上げ搭載エンベロープ、システム故障許容性・保全性(クーラ安全性、ミッション継続性)、エネルギー収支(走行時、越夜時)、レゴリス対策(キャビンコンタミ)】

窓
【樹脂材の放射線等評価、隕石衝突評価】

微小隕石防護バンパ
【防御性評価試験】

- 走行時質量 > 15MT
- L × W × H = 6.3m × 4.3m × 4.6m
- ホイールベース = 4.1m
- トレッド幅 = 3.2m



LiDAR【障害物検知性能(広範囲、分解能の精細化)】

ロボットアーム
【駆動部レゴリス対策】

ハッチ
【EVA操作性、シール部レゴリス耐性】

全圧/O2分圧制御・ガスタンク
【流体部品のO2適合性】

再生型燃料電池システム(RFC)
【H2/O2昇圧、変換・蓄電効率、膜寿命、O2適合性、リーク抑制】

単相冷媒ループ・ラジエータ
【排熱効率、隕石衝突耐性(冗長配管)、越夜時排熱抑制、船内コンプレッサループ試作評価】

太陽電池パネル
【大型パネル(W4m*H10m)の重力下繰り返し展開収納、レゴリス耐性】

金属タイヤ
【低接地圧、疲労寿命、一発大入力への耐性、軽量化】

走行システム
【自動運転、検証手法の確立(試験+シミュ)、回生ブレーキ、自動車部品適用評価、機構寿命評価、レゴリス挙動評価】

