資料89-1
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
(第89回)2024.8.23

有人与圧ローバの検討状況

2024年8月23日

JAXA 有人宇宙技術部門／国際宇宙探査センター

本日報告の主旨

- 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。

- 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、与圧ローバの政策的・技術的な位置づけと、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。

目次

1. 宇宙基本計画上の位置づけ
2. 有人与圧ローバの意義価値
3. 米国アルテミス計画における有人与圧ローバの位置づけ
4. 有人与圧ローバの概要
5. 有人与圧ローバの研究開発の現状と今後の予定

1.　宇宙基本計画上の位置づけ

宇宙基本計画（2023年6月改定）

４. 宇宙政策に関する具体的アプローチ (3)(b) 月面における持続的な有人活動

【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】

（中略）

■ 具体的には、アルテミス計画の下、国際協力による月・火星探査を実施するとともに、持続的な有人活動に必要となる、環境制御・生命維持システム、月周回有人拠点（ゲートウェイ）補給機及び**有人与圧ローバの研究開発**、月極域探査機（LUPEX）による水資源関連データの取得等に向けた取組を着実に実施していく・・

宇宙基本計画工程表（2023年12月改定）

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

【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]

Bars:

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（有人与圧ローバ）に関する開発研究

（参考）「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」について

署名式の様子
盛山文部科学大臣とネルソン
NASA長官

■ 2024年4月9日に盛山文部科学大臣とNASA長官との間で署名。

■ 日本による有人与圧ローバの開発・運用（2031年打上げ目標）と、米国による日本人宇宙飛行士の２回の月面着陸機会の提供等について規定。

《 主な内容 》

➢ 日本側の責務として、以下を提供。　※JAXAは日本政府（文科省）責任の下、実施を担う
- ・与圧ローバ１台、運用、維持（補用品）
- ・与圧ローバ地上管制施設
- ・与圧ローバに係る訓練機器、日本での訓練の提供
- ・地上管制局／有人与圧ローバ間の通信（副）
- ・与圧ローバ搭載利用用機器（JAXA利用分）

➢ 米国側の責務として、以下を提供。
- ・日本人月面活動機会（２回）
  ※ 搭乗時期については、日本側の希望（できるだけ早期）と与圧ローバの主要マイルストンに留意する。
- ・与圧ローバの月面への輸送
- ・与圧ローバに係るクルーおよび物資の月面への（からの）輸送
- ・与圧ローバ以外のアルテミス要素に関する訓練の提供
- ・与圧ローバに搭載する運動機器、健康管理機器、医療機器、食料・衣料・水等
- ・地上管制局／有人与圧ローバ間の通信（主）
- ・与圧ローバ搭載利用用機器（NASA利用分）

2.　有人与圧ローバの意義価値

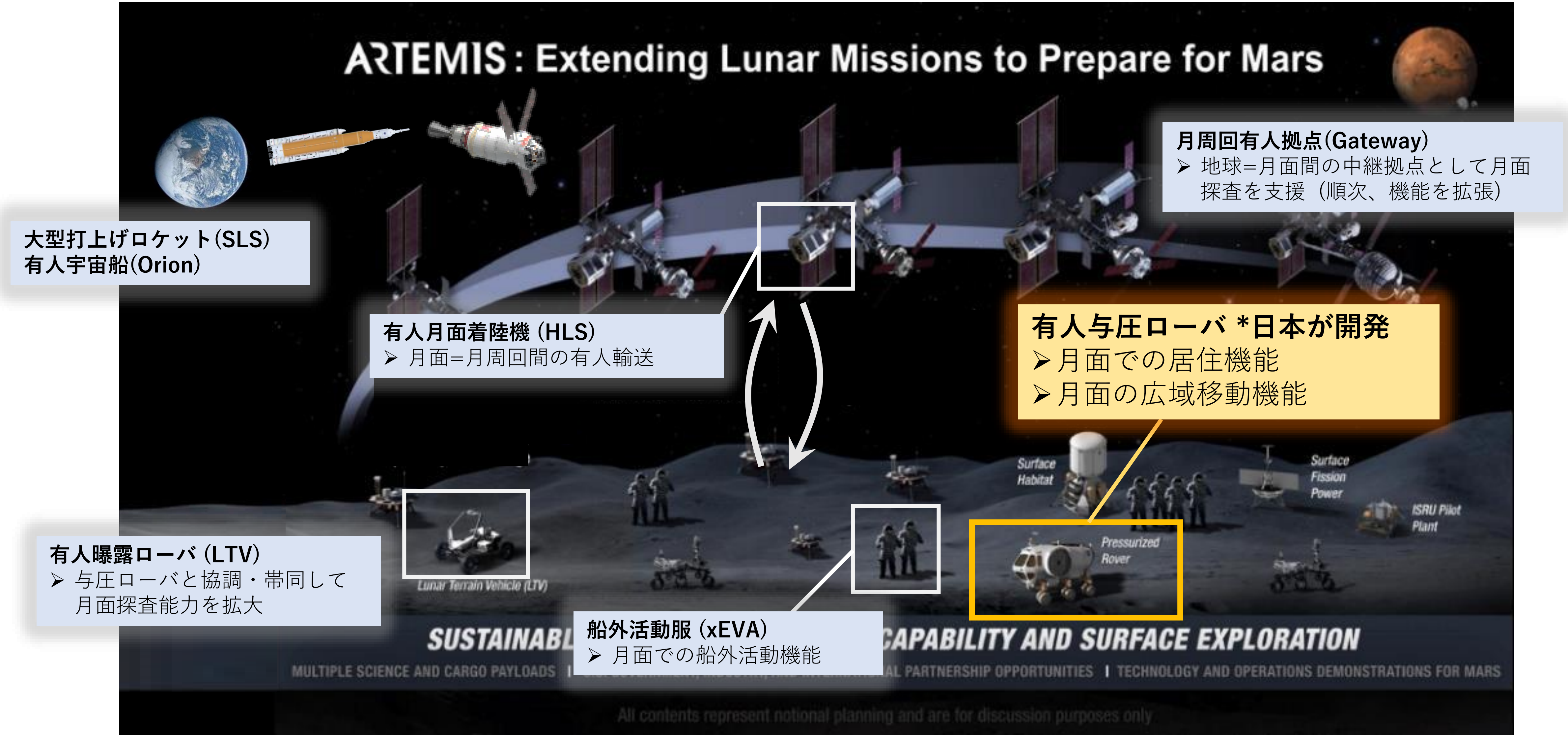
①有人の月面探査範囲を飛躍的に拡大。無人時も常に遠隔操作で探査を実施。
- 「持続的な月面探査」の中心的役割。【人類の活動領域の拡大】
- 実施可能なサイエンスの幅が大きく拡大。【科学的成果の創出】

②月面・火星面探査技術の実証【技術的能力の拡大】
- 日本として初の独立型の有人宇宙システム。
- モビリティ技術・居住技術の実証と、運用データの獲得。

③アルテミス計画における主要構成要素の提供による貢献【国際的なプレゼンス】
- 世界初のシステム。　日本だけが提供する方向。
- 日本人宇宙飛行士の月面着陸の機会の確保。

3.　米国アルテミス計画における有人与圧ローバの位置づけ

■ 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。



FY2023 Budget Request (NASA)より抜粋した図にJAXAが追記

（参考）有人与圧ローバの活動に直接関連するNASA側開発要素の動向

■ 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、有人与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。**

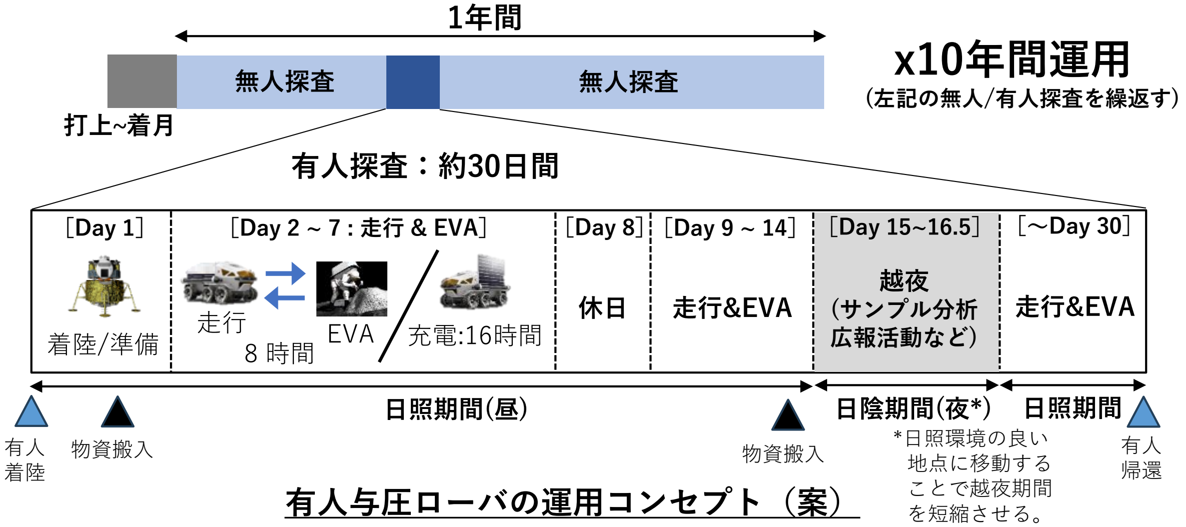
■ 有人曝露ローバ(LTV) ※飛行士が船外活動服を着て搭乗

- 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、有人与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、**有人与圧ローバ運用時には常に帯同し、有人与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。**

4.　有人与圧ローバの概要（1/3）ー主な特徴(NASAとの間で要求調整中)ー

- 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

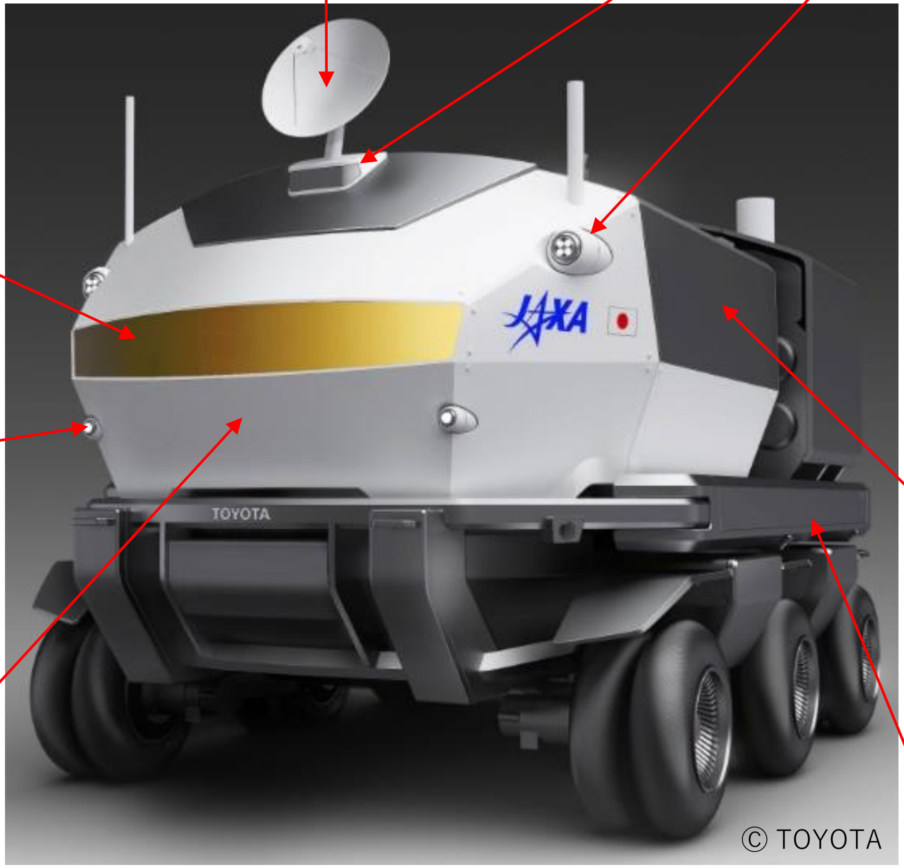
有人探査ミッション要求	運用期間	2031年～
	探査領域	南極域
	クルー人数	2名
	有人ミッション頻度	1回/年
	有人ミッション期間	28日（＋異常時対応3日）
	越夜日数	36時間(検討中)
	連続走行距離	20 km/1充電
	EVA頻度（クルー）	4回/週
システム走行性能（検討中）	総走行距離	10,000 km(目標)/10年間
	最大速度	15km/h
	最大斜度	±20度
	障害物乗越え性能	30 cm　@平坦路 7 cm　@20°　傾斜路



有人与圧ローバの運用コンセプト（案）

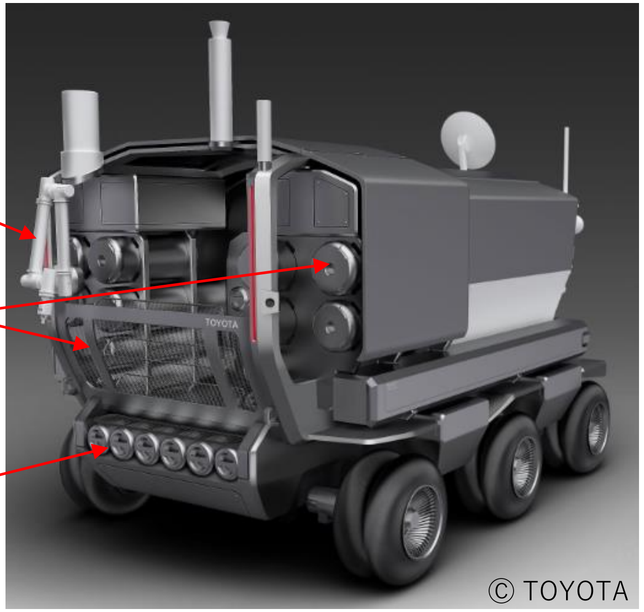
4.　有人与圧ローバの概要（2/3）　ー構成案(JAXAで検討中の案)ー

Kaバンドアンテナ
LiDAR
船外照明
窓
カメラ
微小隕石
防護バンパ

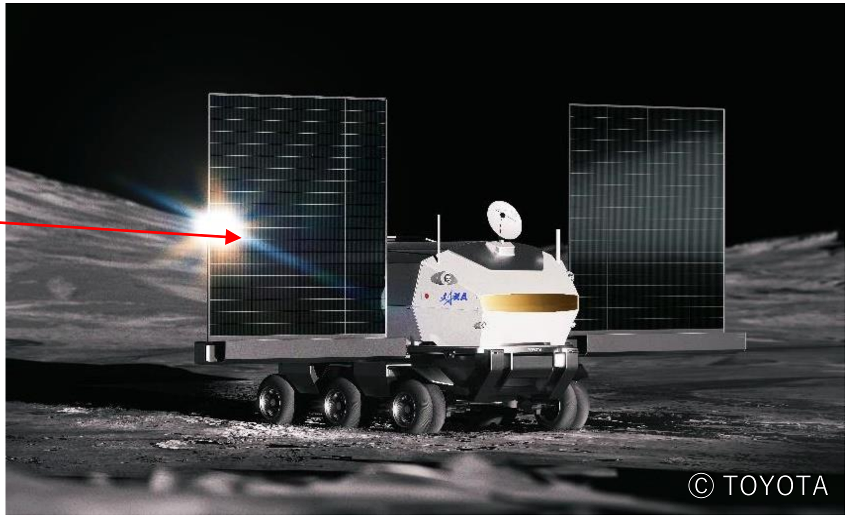


ラジエーター
（濃グレー部）
太陽電池
（収納状態）

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）



太陽電池
（展開状態）



システムサイズ(JAXA検討案、NASA等と継続調整中)
- 走行時質量：　＞15MT
- 寸法：　L6.3m × W4.7m × H4.9m

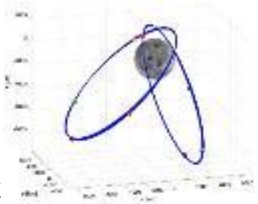
月面走行システムの確立

加振試験

- ■ 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**

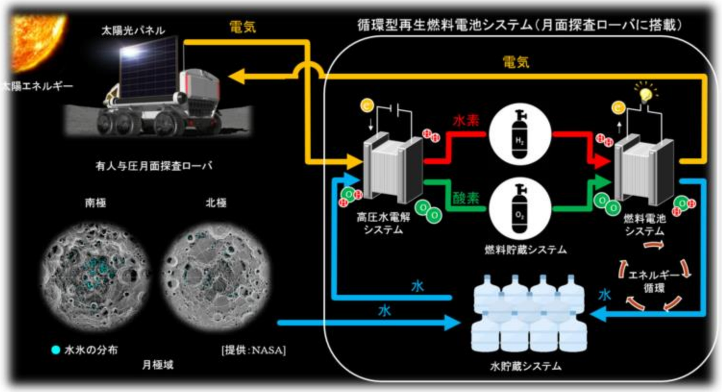
- ■ GPSの無い環境下での**リアルタイム航法技術**が必要
  - ➤ 月面用GPS(**LunaNet**)に加え、電波航法とLidar画像を用いた複合航法等を適用。



LunaNet

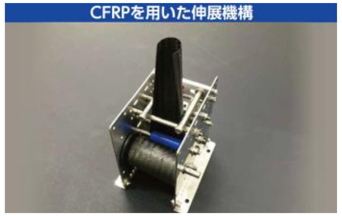
高密度蓄電システム

- ■ **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。



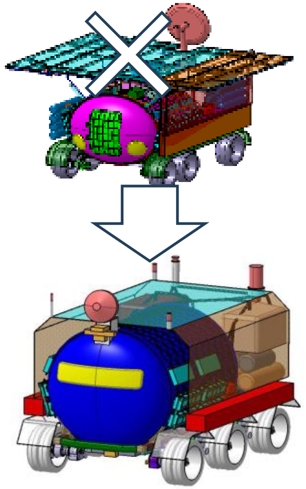
展開/収納型太陽電池パネル

- ■ 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。



高容量排熱システム

- ■ **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）走行システムの試作・試験状況

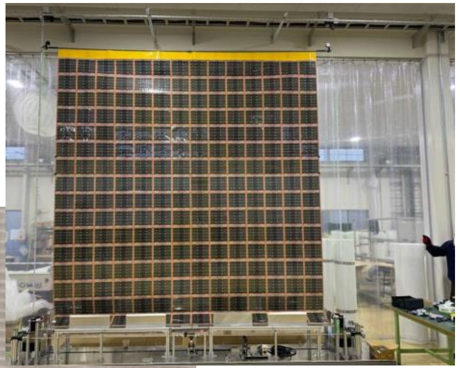
■ 2022年度から走行システム試作機の製作に着手。試作機製作が完了し、走行試験を開始。

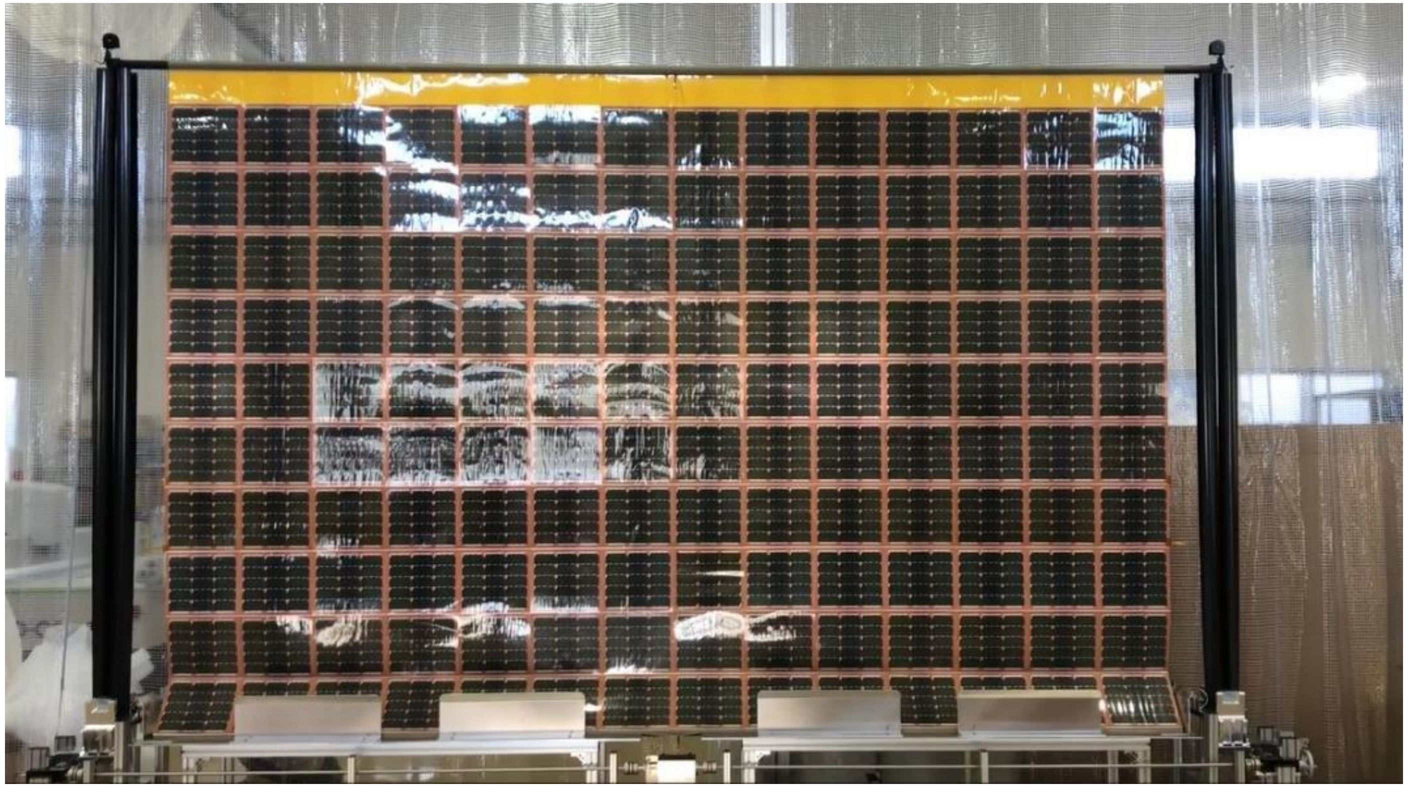
走行システム試作機

月面走行用タイヤ（検討中）

（参考）展開/収納型太陽電池パネルの試作・試験状況

- 2023年度、バイステーブル構造を用いた展開/収納機構のサブスケール（展開高3.5m）試作試験を実施。2024年度は実機大（展開高10m）の伸展機構の試作試験を行う予定。





5.　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**
    - 2023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。
  - **走行システム**
    - 走行システムの試作機を製作し、試験フィールドでの走行機能試験を開始。
  - **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。

- 2023年11月にJAXA内でのミッション定義審査(MDR)を実施。また、同12月にJAXA/NASA共同のシステム要求審査(1回目)、および安全審査(Phase-0)を実施し、要求設定に向けた主要課題を識別。引き続き、システム要求のベースライン化に向けて技術検討およびNASAとの調整を継続している。

- 2031年の打上げに向け、早期の開発着手が必要。NASAの要求検討をもとに今秋から年末にかけて調整を加速し、2024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、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ン（想定案）

（参考）有人与圧ローバの技術要素【主なフロントローディング研究課題（取り組み中）】

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(クルー安全性、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)】

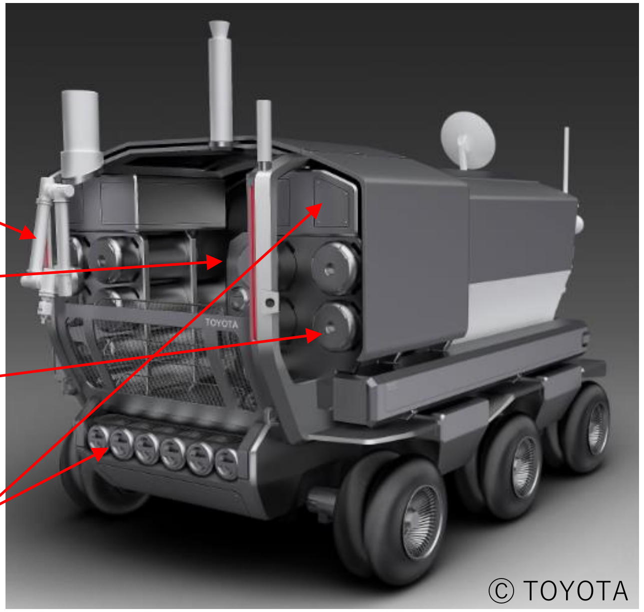
LiDAR【障害物検知性能(広範囲、分解能の精細化)】

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】

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】



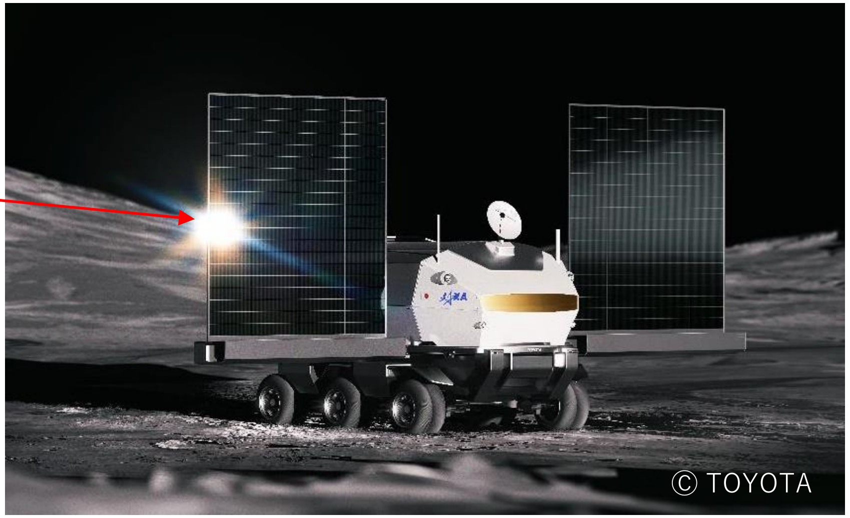
ロボットアーム
【駆動部レゴリス対策】

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】

（参考）居住・移動機能を持つ有人宇宙機の比較

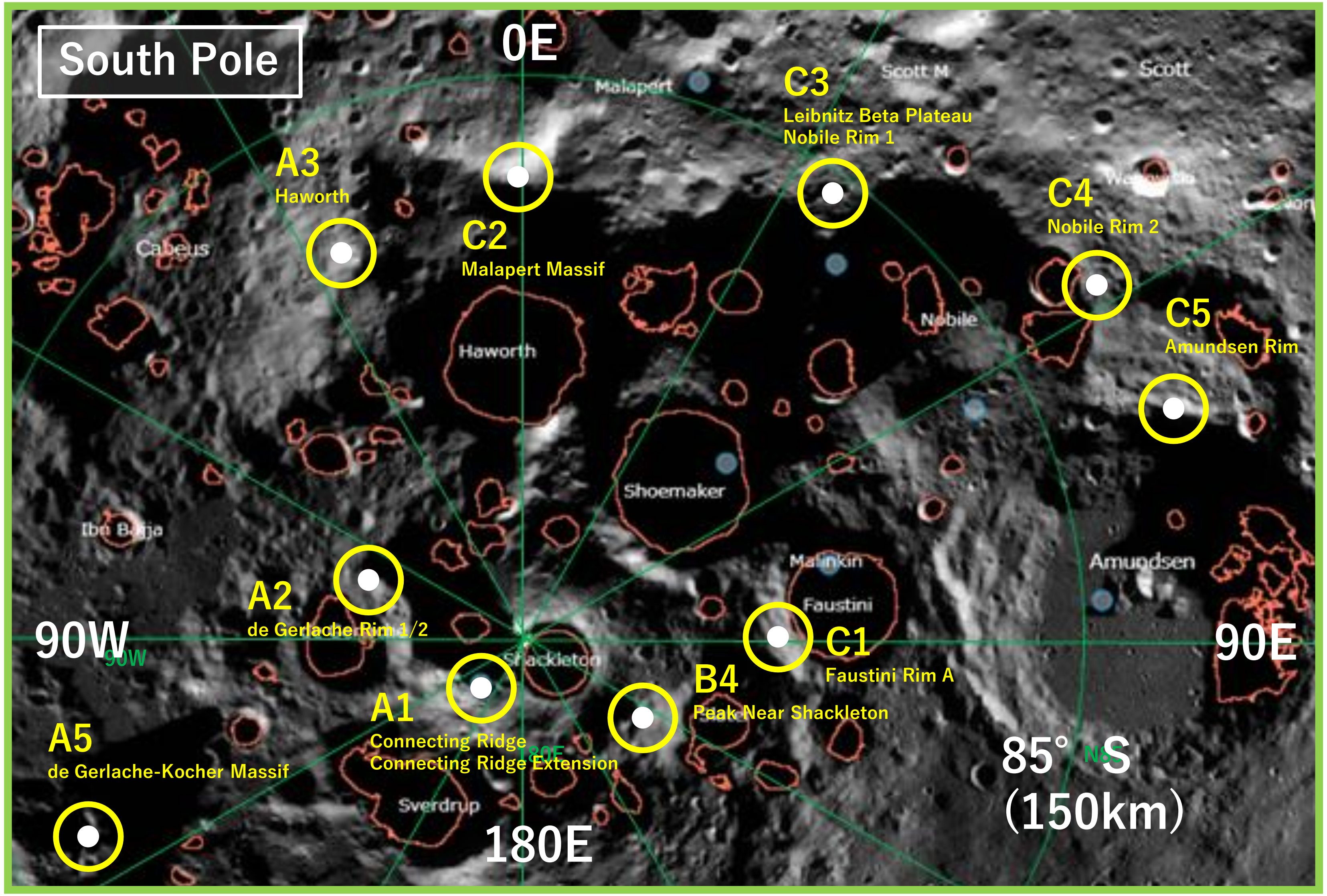
- ■ 月面の「居住機能」と「移動機能」を併せ持つ世界初の有人宇宙機
  - ● 「船外活動服＋曝露ローバ」の組合せ（表の左端）では、クルーの移動時間が船外活動服の運用時間（8時間）に制約され、居住拠点からの移動範囲が制限される。また、移動時間が長くなるほど、探査作業に充てる時間が少なくなる。
  - ● それと比べ、有人与圧ローバでは、居住拠点ごと移動するので、探査範囲が広くなり、探査作業に充てる時間も多くなる。

- ■ 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	9m3以上	約50m3
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）
• 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	• **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	 • 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: 第61回 ISS国際宇宙探査小委員会資料 61-1-1, 1項掲載のxEVAとLTV(1.9B USD)の合計額

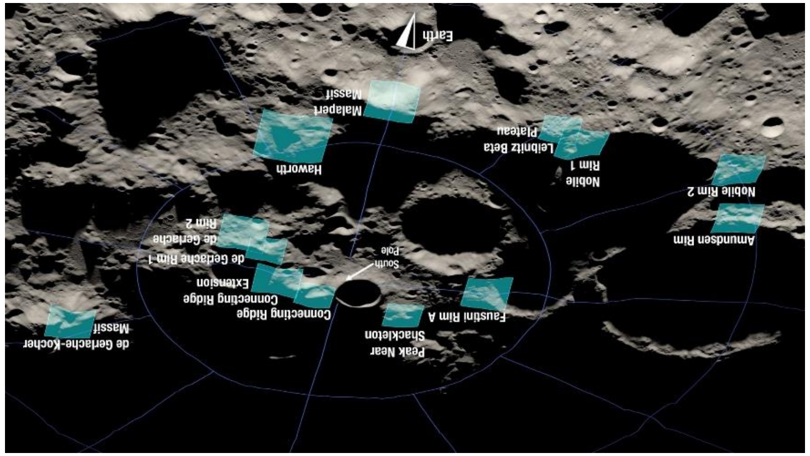
（参考）有人ミッション候補領域（南極域）



A1~C5：

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)