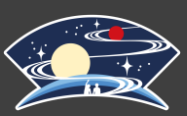




有人と圧ローバー開発から 見る「有人」と「月面」 ～月面居住へのチャレンジ～

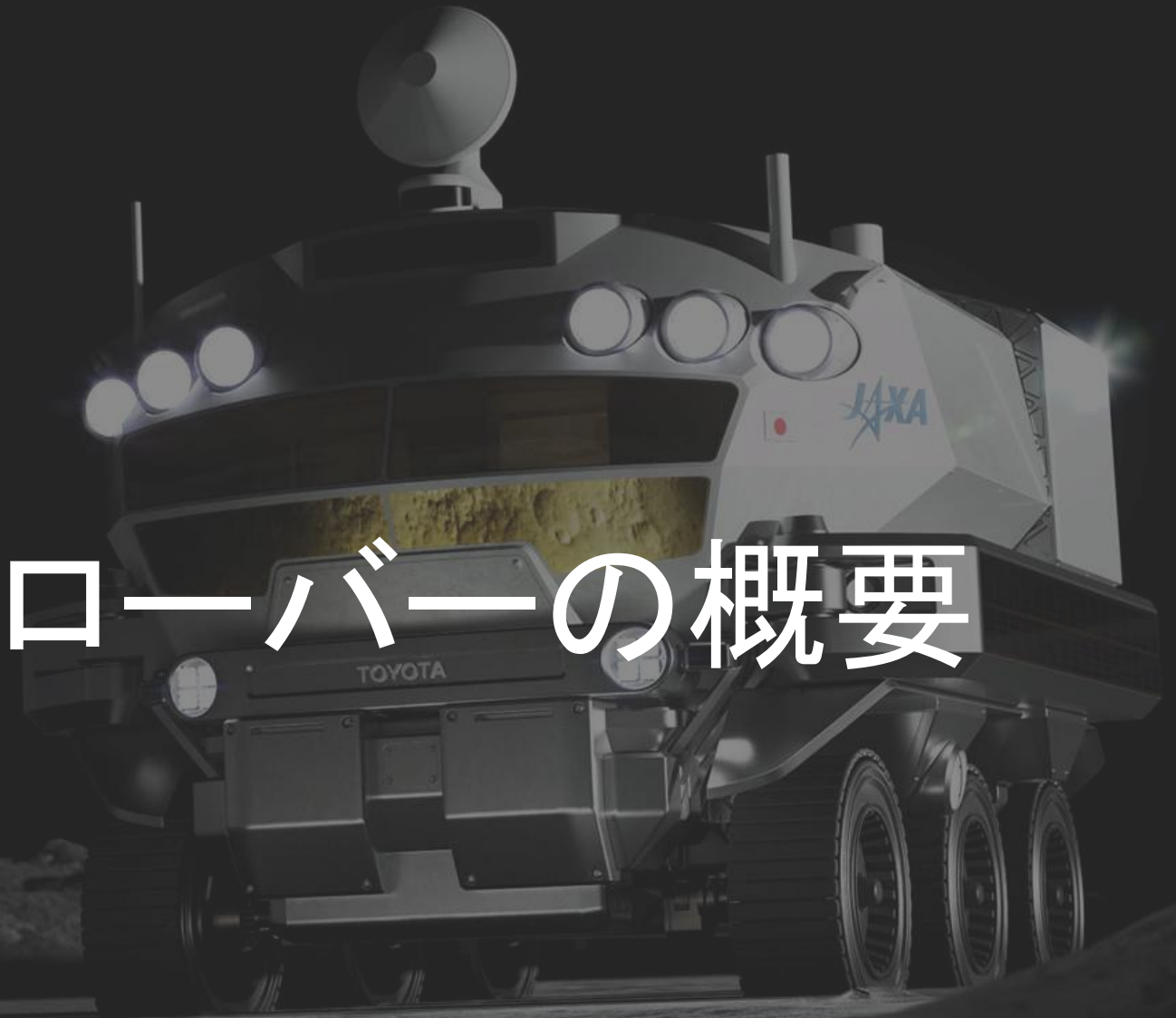
JAXA 有人と圧ローバーエンジニアリングセンター
センター長

筒井 史哉



1. 有人と圧ローバーの概要
2. 月面運用の環境
3. 有人と圧ローバーの技術的特徴
 - 3.1 走行
 - 3.2 航法誘導
 - 3.3 熱制御
 - 3.4 越夜用蓄電
 - 3.5 発電
 - 3.6 生命維持・環境制御
 - 3.7 船内レイアウト
 - 3.8 クルーの安全
4. 有人と圧ローバーの利用

1. 有人与圧ローバーの概要



1.1 米国アルテミス計画における有人月面探査

- 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。

ARTEMIS : Extending Lunar Missions to Prepare for Mars

大型打上げロケット(SLS)
有人宇宙船(Orion)

有人月面着陸機 (HLS)
➢ 月面=月周回間の有人輸送

有人曝露ローバ (LTV)
➢ 与圧ローバと協調・帯同して
月面探査能力を拡大

月周回有人拠点(Gateway)

➢ 地球=月面間の中継拠点として月面
探査を支援(順次、機能を拡張)

有人与圧ローバ *日本が開発

➢ 月面での居住機能
➢ 月面の広域移動機能

船外活動服(xEVA)
➢ 月面での船外活動機能

SUSTAINABLE CAPABILITY AND SURFACE EXPLORATION
MULTIPLE SCIENCE AND CARGO PAYLOADS | PARTNERSHIP OPPORTUNITIES | TECHNOLOGY AND OPERATIONS DEMONSTRATIONS FOR MARS

All contents represent notional planning and are for discussion purposes only

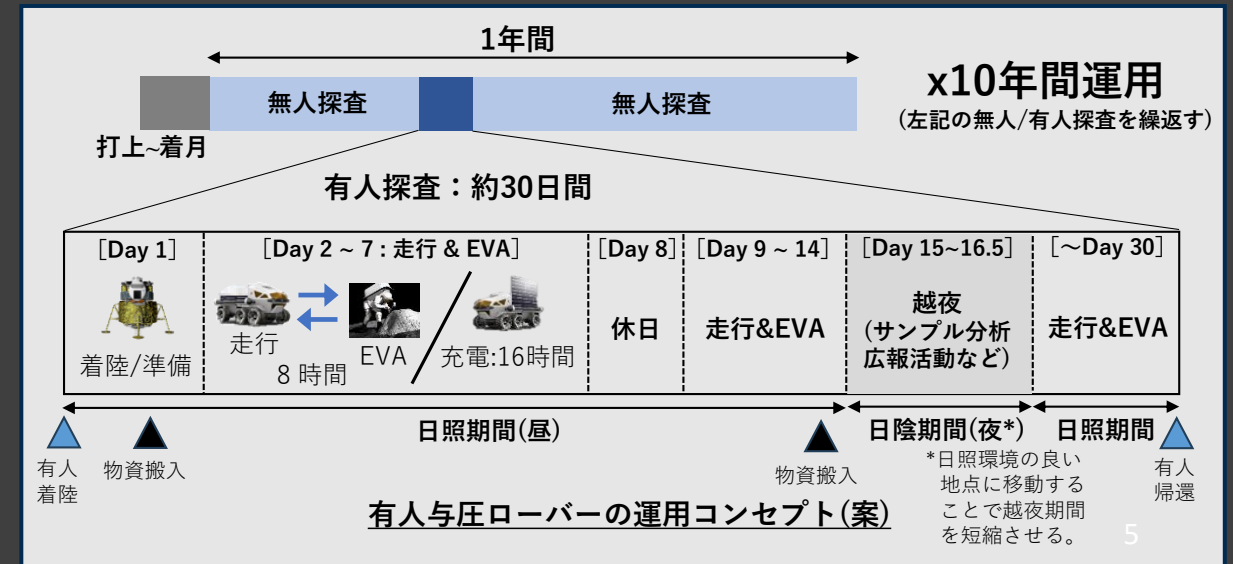
1.2 有人与圧ローバーとは

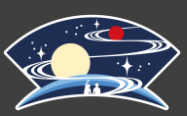
- 米国が主導する「アルテミス計画」のキー要素として、月面上の広い範囲を長期間にわたり移動可能なモビリティ
 - 人類初のシステム、かつ日本初の独立型有人宇宙船
- 有人月面着陸機(HLS)で到着した飛行士に、月面上での「居住空間」と「移動手段」を提供
 - 船外宇宙服を着た状態で乗降
 - シャツスリーブで居住
 - 飛行士の操作、遠隔操作及び自律運転で移動
- 年1回の有人ミッション期間以外は、無人探査ローバとしての探査機能を提供



©JAXA/TOYOTA

有人探査 ミッション 要求	運用期間	2031年～
	探査領域	南極域(フェーズ1)
	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)
	越夜能力	有人:36h、無人:192h
	連続走行距離	18 km/1充電
	EVA頻度(クルー)	7回/2週
システム 走行性能	総走行距離	10,000 km(目標)/10年間
	最大速度	15km/h
	最大斜度	±15度
	障害物乗越え性能	30 cm @平坦路 7 cm @15° 傾斜路
(検討中)		



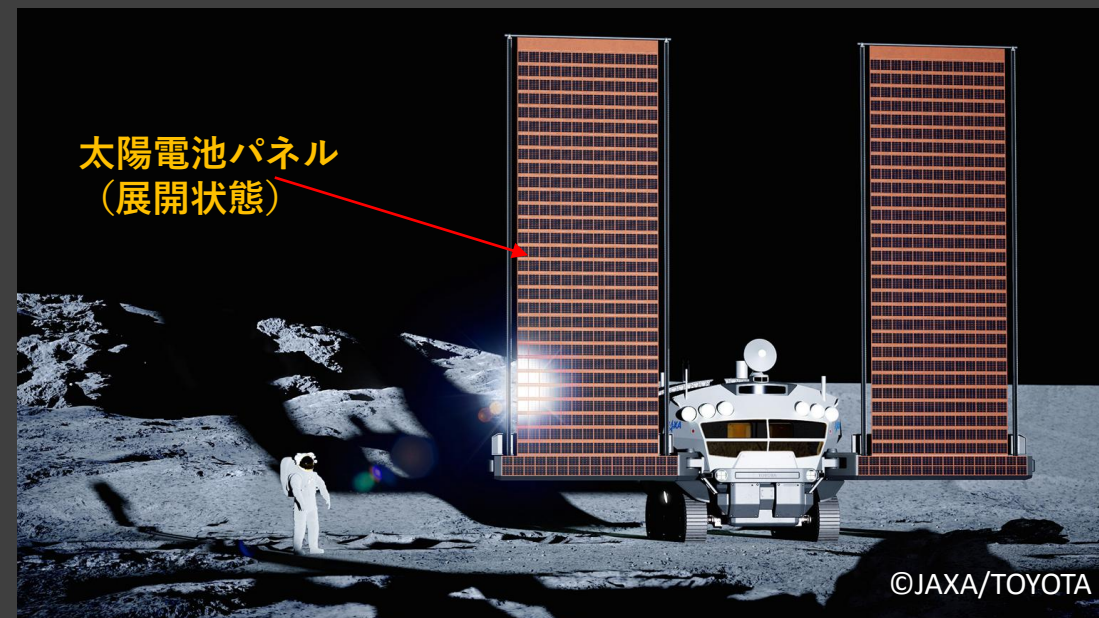
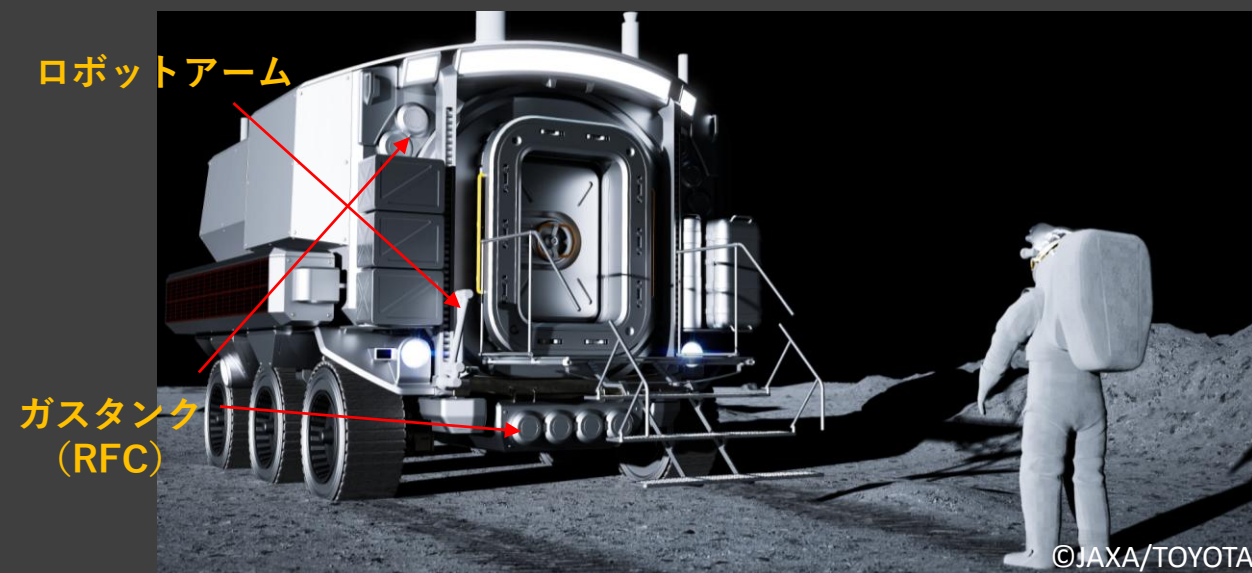


1.3 システムの概要 (1/2)

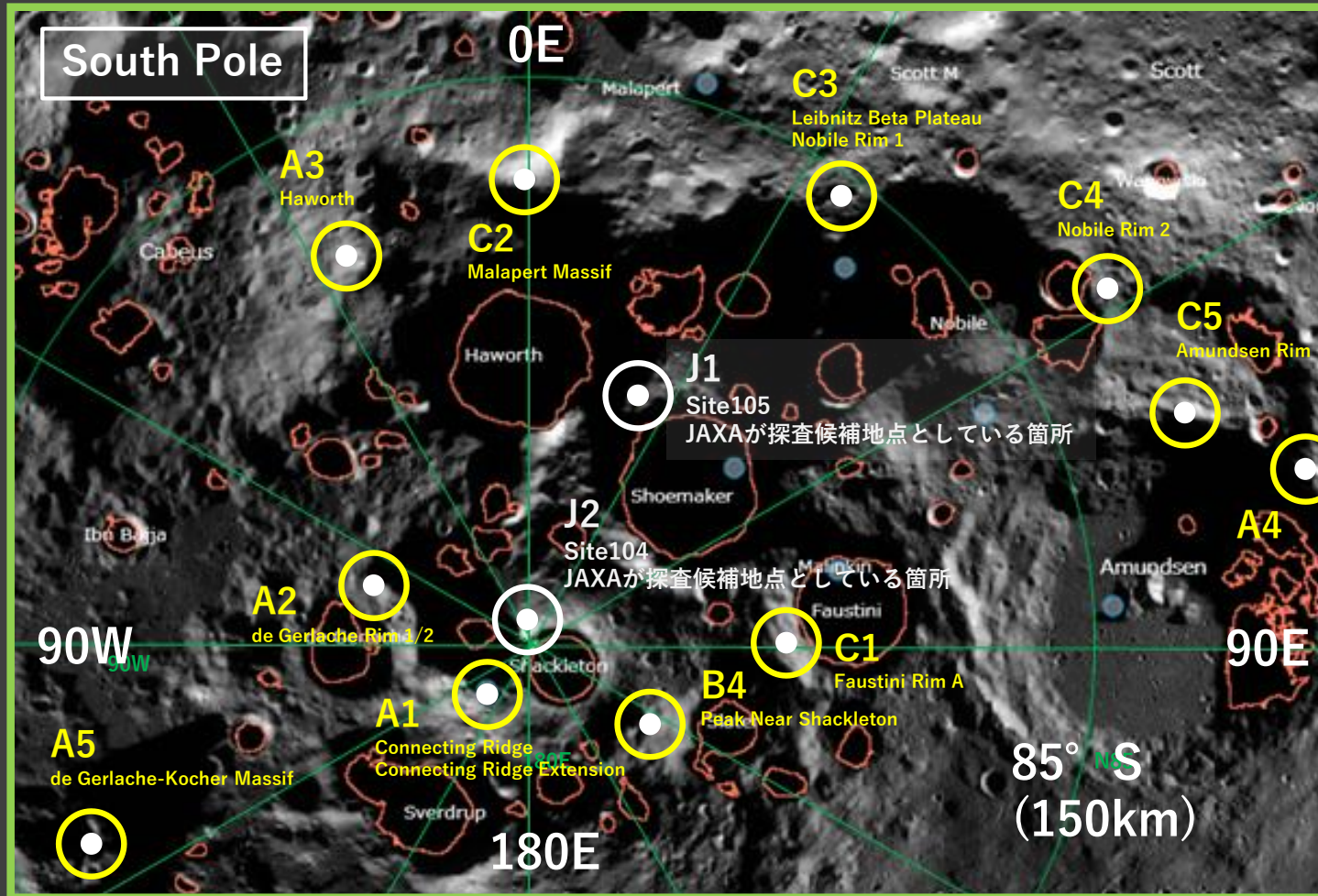




- $L \times W \times H = 6.44\text{m} \times 4.84\text{m} \times 4.85\text{m}$
(打上げ時エンベロープ $6.35\text{m} \phi$)
- ホイールベース = 3,810mm
- トレッド幅 = 3,200mm
- 打上げ時初期質量 $\leq 15\text{MT}$
- 最大搭載量 = 3MT
- 月面上全備質量 $\leq 18\text{MT}$



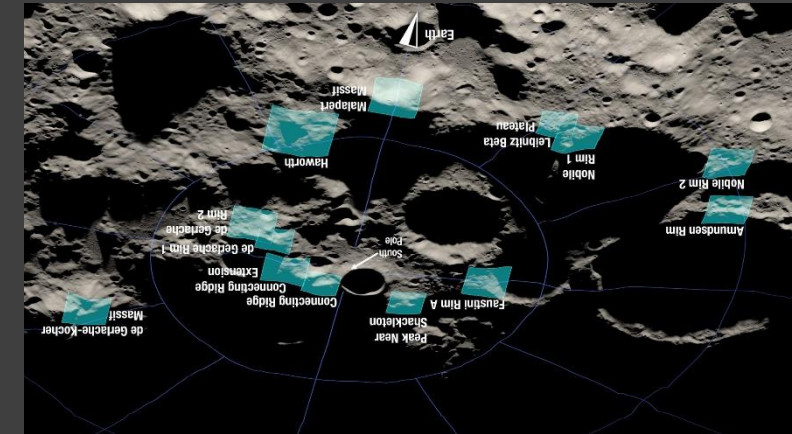
1.4 想定探査領域



A1~C5(黄色) :

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



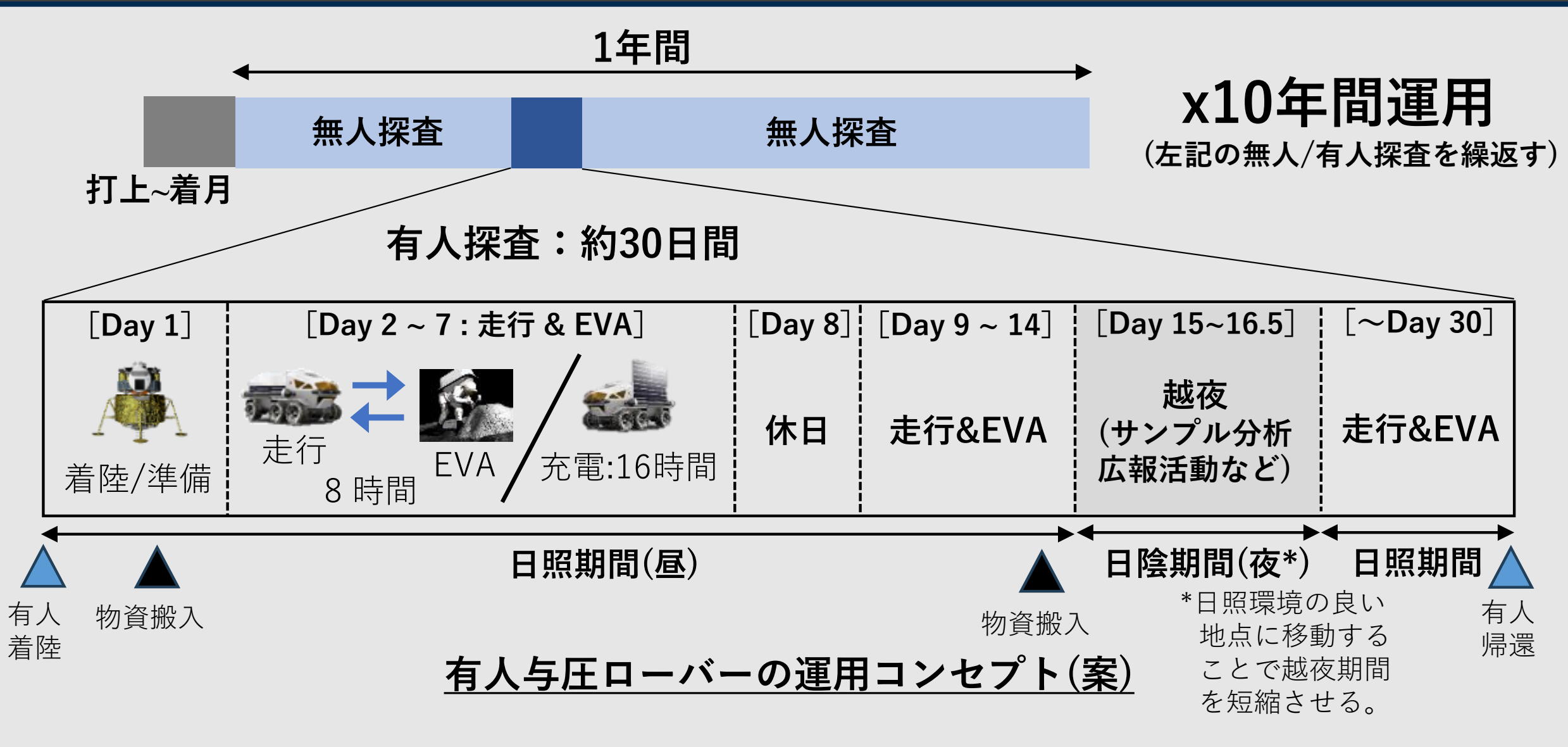
(ref.) <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon/>
(Aug.19, 2022)

「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に基づく10年間（想定）の有人－無人ミッション期間ののち、南極域から離れた領域(SPA盆地等)への無人探査を想定。そのため、越夜能力の増強等の拡張性を持たせる。

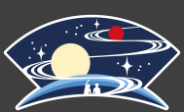
- ・運用期間(フェーズ1)は10年間
- ・1年のうち約1か月は宇宙飛行士がローバーに搭乗し月面探査を行う「**有人探査**」期間
- ・残り11か月は遠隔操縦およびロボティクスによる「**無人探査**」期間



1.5 運用概要(2/2) -有人探査-



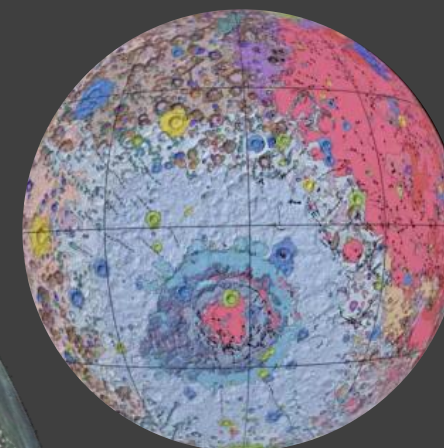
2. 月面運用の環境



2. 月面運用の環境 (1/1)



- 月面の岩石やクレーターなどの不整地
- レゴリスによる軟弱地盤/ダスト
- 真空/放射線/高温・低温環境
- 極域における日照条件
- 1/6Gの重力環境



月面地質マップ
(地質・地形ごとに色分け)
© NASA/GSFC/USGS

3. 有人と圧ローバーの技術的特徴

3.1 走行 (1/4)

月面の環境

- 1/6G重力
- レゴリス
- 傾斜分布
- 面の荒さ・クレータ分布

月面走破性・探査範囲(仕様)

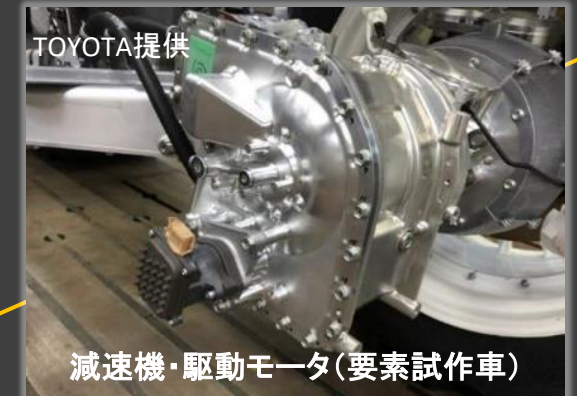
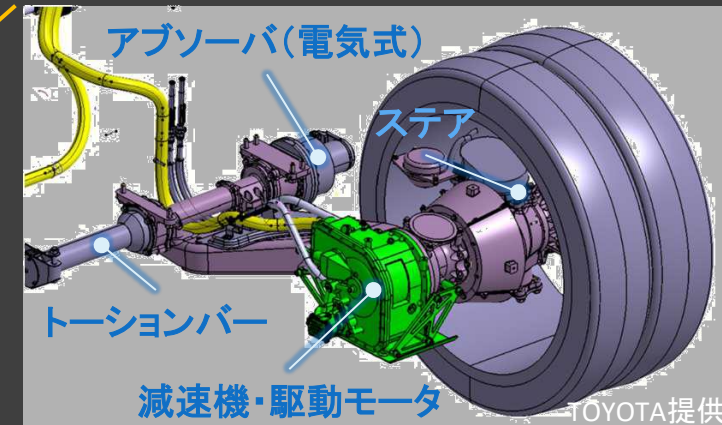
- 斜面登坂・降坂能力(15deg)
- 運用速度(～3.5kph)
- 運用期間・走破距離(1万キロ/10年)

6輪独立駆動

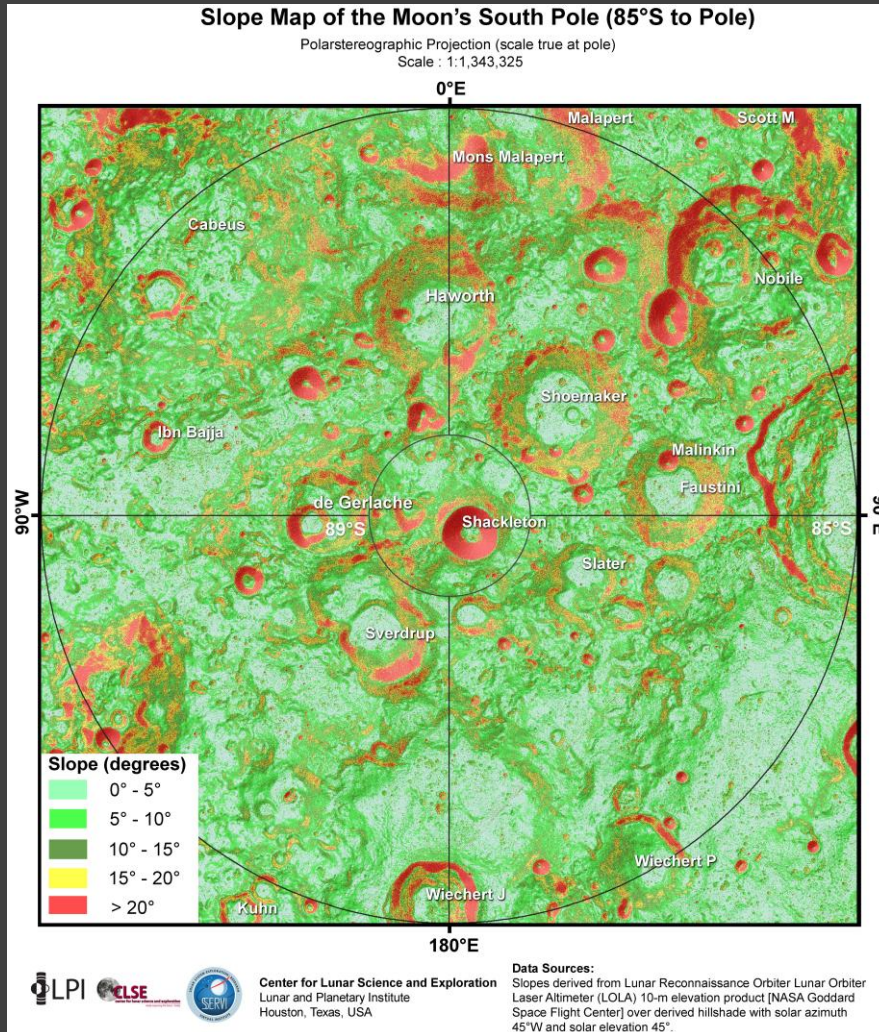
- 潤滑(オイル、固体)
- 真空下排熱(オイルクーラ、回生ブレーキ)

大径弾性タイヤ

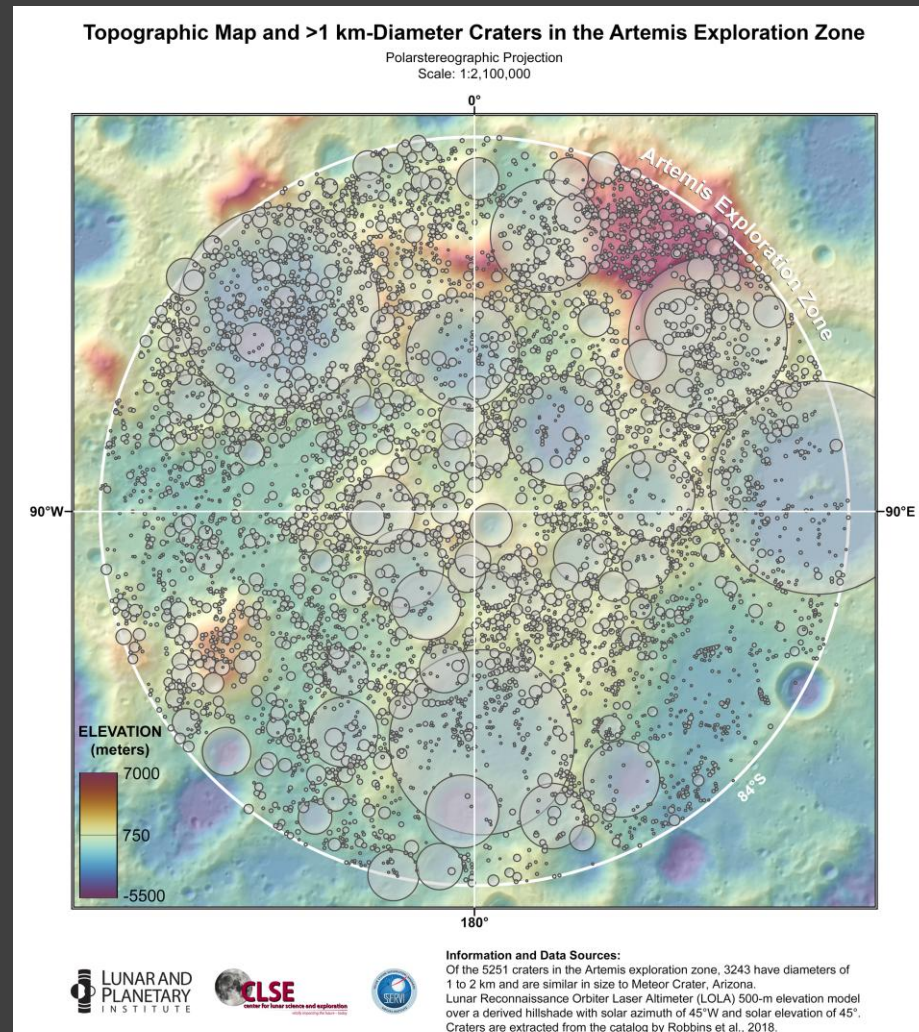
- 非空気支持(板バネ)
- 大接地面積
- 材料の環境耐性(温度、放射線)



傾斜角度分布



クレーター分布



3.1 走行 (3/4)



走行シミュレーションによる
設計検証(1/6G環境模擬)

フィードバック



©JAXA/TOYOTA

コリレーション

出典: 陸上装備研究所広報ビデオ日本語版
(https://youtu.be/1eyzqJeE_k0?si=8ZKXq34QI3MznCdh&t=878)



構造特性の取得



要素試作車による走行試験動画



©小学館

出典 : https://youtu.be/wWJpmqI86_8?si=tUy86A0nSzDgy4Oz

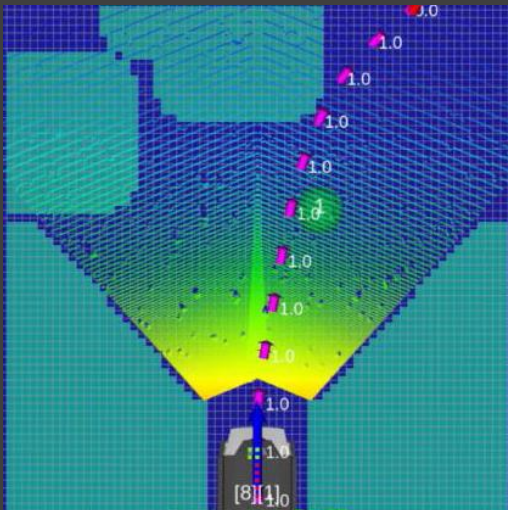
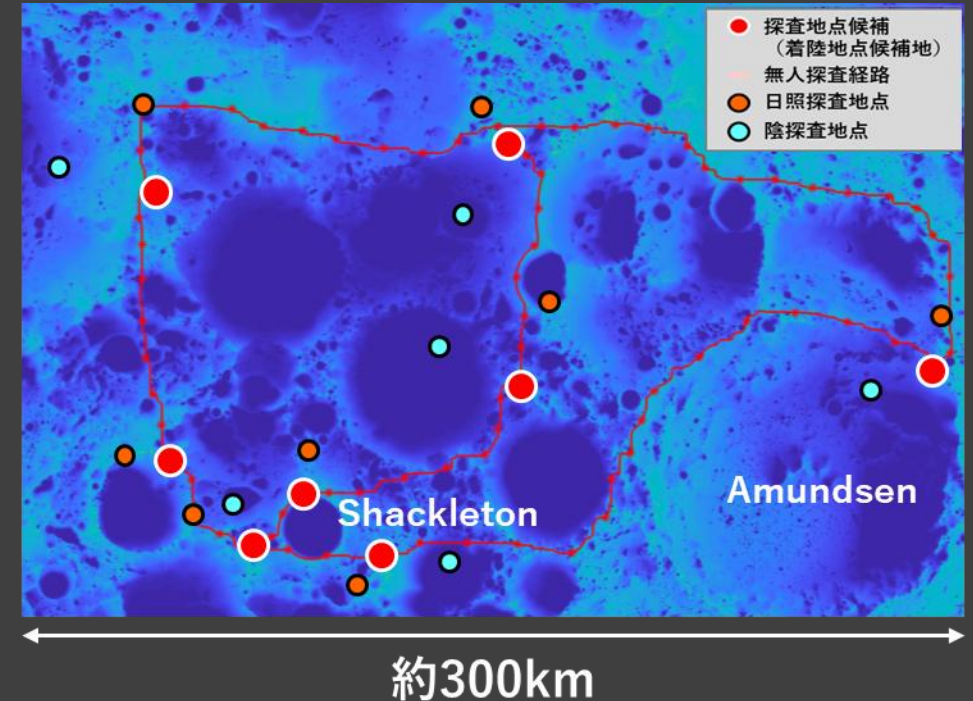
ブリヂストンが実施した、タイヤ試験の様子@鳥取砂丘の実証フィールド「ルナテラス」

グローバル経路計画(地上管制にて計画)

- 月周回衛星の観測データをもとに作成された月面標高地図を使い、走行可能経路を識別
 - 必要電力、移動時間、日照条件などの複数条件を考慮した最適経路を算出

自己位置推定(ローバー機能)

- LCRNS衛星のLunar Augmented Navigation Service(LANS)を用いた絶対位置情報と、IMUやスタートラッカによる慣性航法値を複合して自己位置推定を行う



ローカル経路計画(ローバー機能)

- 車体前方のLiDARセンサを用いて地形と障害物の情報を取得
- グローバル経路計画と自己位置推定値、LiDARセンサで得た地形・障害物情報に基づき、ローカル誘導量を算出

3.3 熱制御 (1/1)

■ 昼間(日照時):

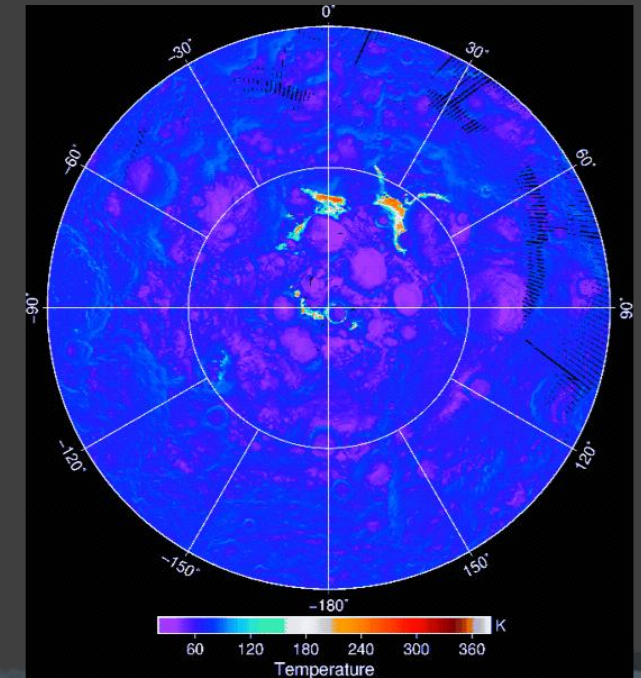
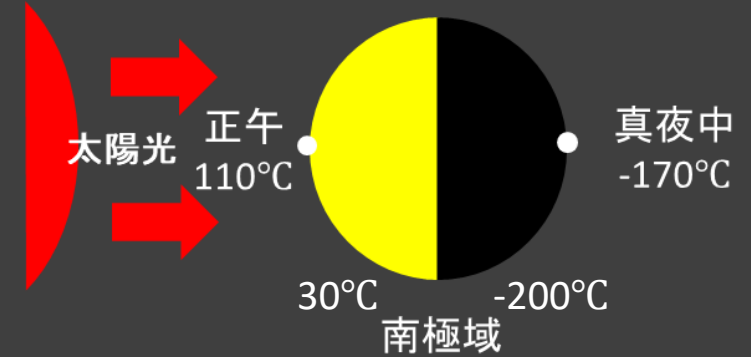
走行中・停車中とも、機器発熱を輻射放熱し、機器温度を維持(<高温側リミット)

■ 夜間(日陰時):

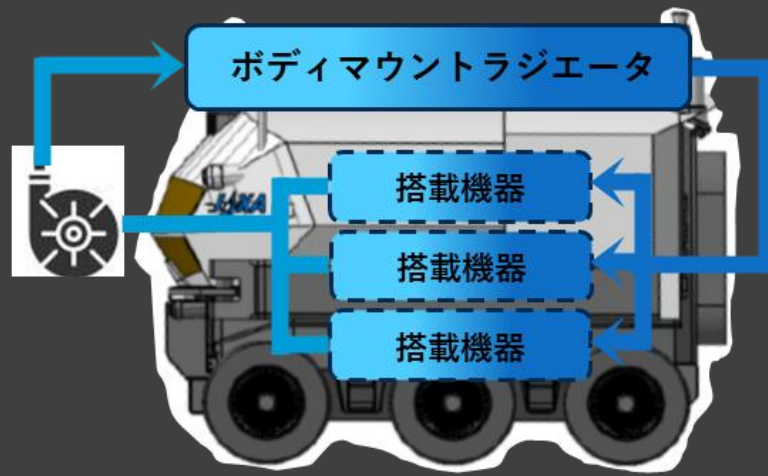
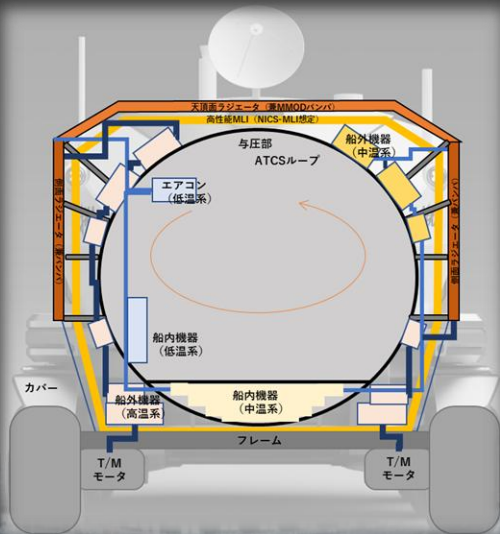
放熱量(消費電力量)を最小化しつつ、機器温度を維持(>低温側リミット)



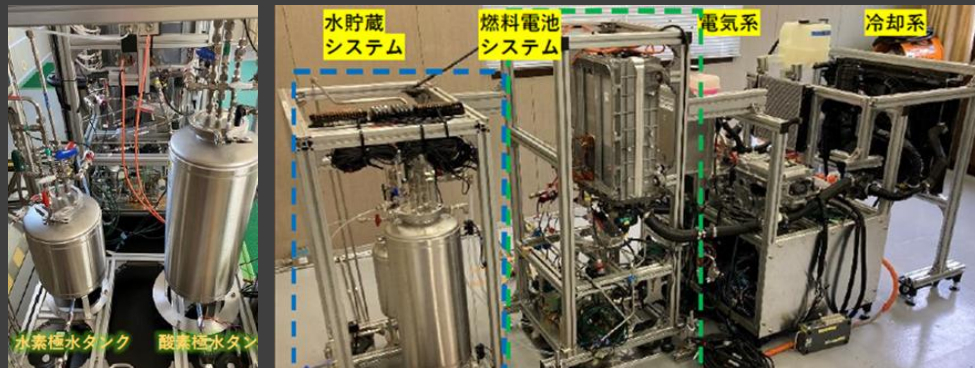
- 多層断熱材(MLI)による放熱抑制
- 単相冷媒循環ループ+ボディマウントラジエータ(〜40m³)によるアクティブ排熱(〜6kW)



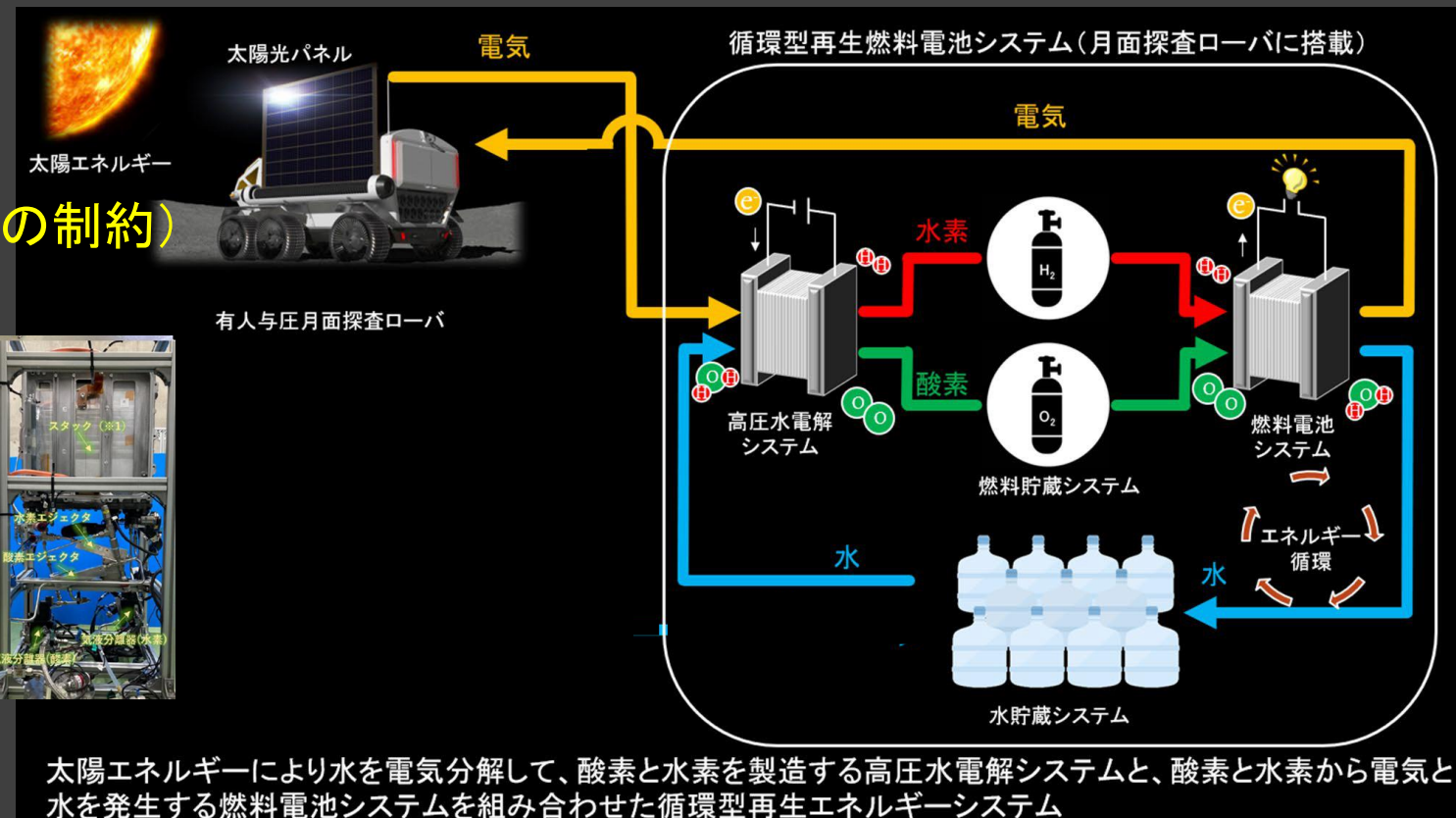
南極域の温度分布(南緯80度まで)



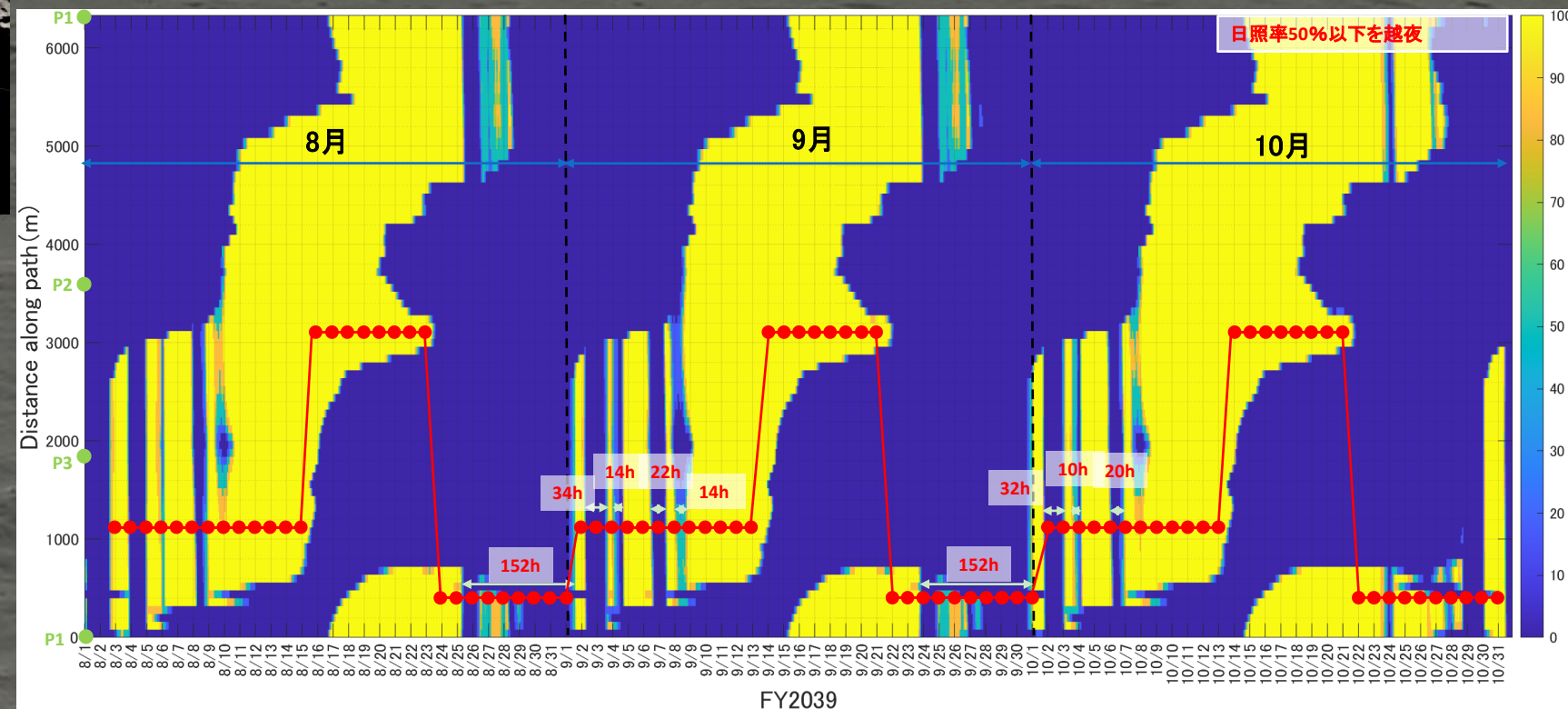
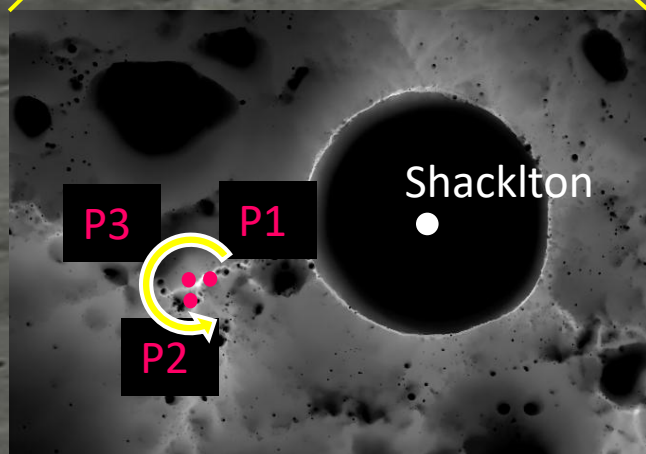
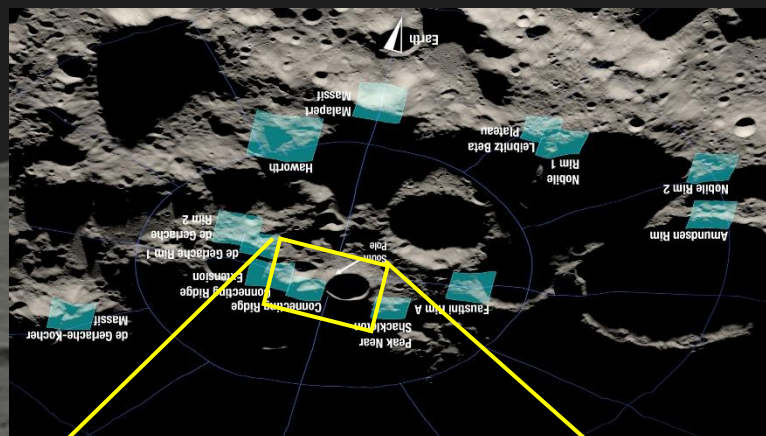
- 無人越夜(連続8日間)(次頁解析例):
 - 南極域の特定の位置で、システムを保存
 - 放熱量とバランスするエネルギーが必要($2\text{kW} \times 8\text{日間} = 400\text{kWh}$)
- 宇宙用LiBの場合、4トン以上必要 ⇒ 質量制約から非現実的
 - LiBセル+筐体+バッテリー管理+コールドプレート
- 再生型燃料電池(RFC)システムの場合、2トン程度で実現の見込み
 - 酸素・水素の超高圧貯蔵(搭載容積の制約)



TOYOTA提供



3.4 越夜用蓄電 (2/2) - 越夜能力の設定-



■ 必要発電能力：~10kW

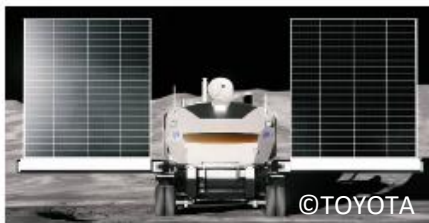
- 大面積(70m²規模)をローバー表面に確保することは不可能（ラジエータ面確保とも競合）
- 展開状態で、走行振動への耐性を持たせることも困難

● 展開／収納型太陽電池パネル

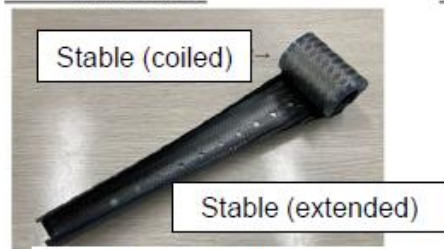
- 搭載性と防塵性を備える機構として、**双安定性ブーム**を用いた機構を採用
- **1000回を超える繰り返し展開/収納**



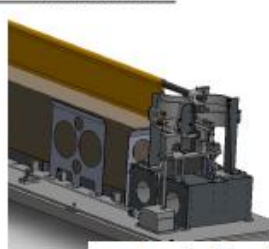
SAP格納状態



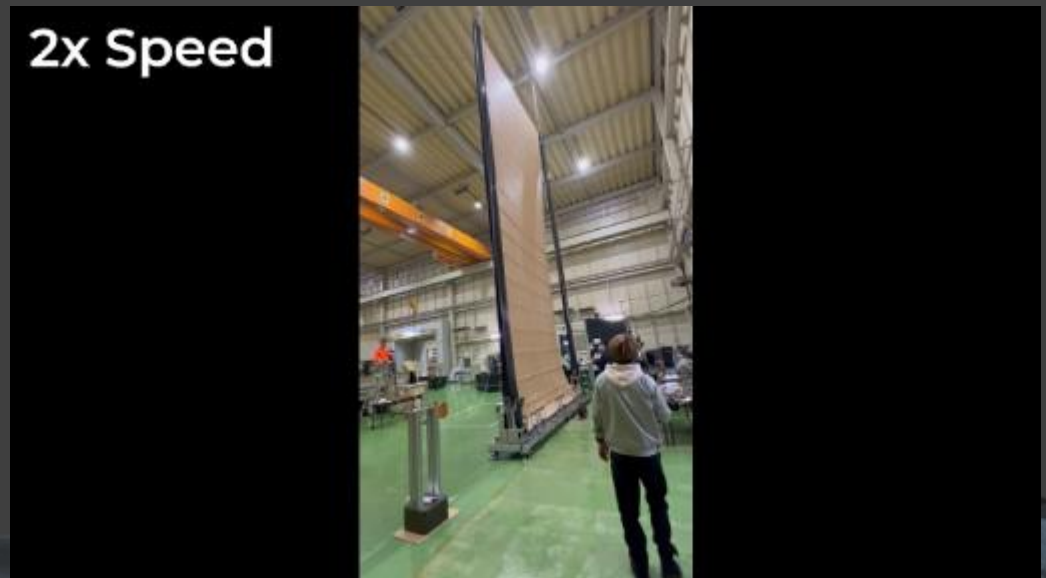
SAP展開状態



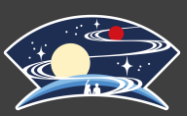
バイステーブルブーム



SAP 収納（左図）と展開（右図）



SAPフルスケール展開収納機構試験動画



3.6 生命維持・環境制御(1/1)



- 限られた電力・排熱リソース ⇒ECLSS機能は簡素化
 - 酸素・窒素・水はタンク・バッグで補給(再生無し)
 - ラジエータ排熱量を高める(冷媒温度を高くする)ため、温湿度制御はコンプレッサ式を適用
 - **CO₂除去(吸着/脱離)**、有害ガス除去(吸着＋分解)

- 船内空間が狭く、高い能力が求められる
 - 空間容積はISSの10分の1以下、Gatewayの3分の1以下

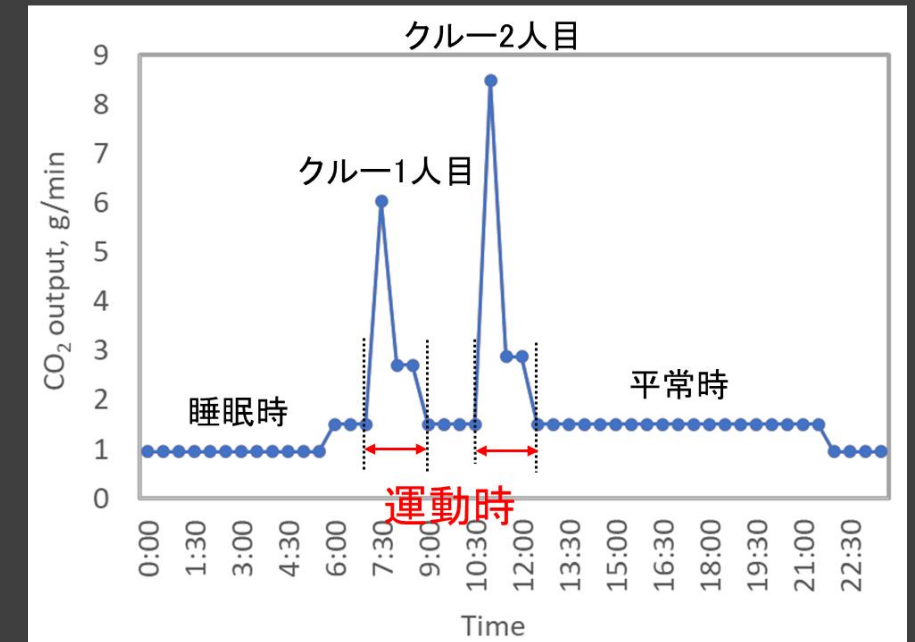
CO₂除去性能の例

宇宙機CO₂分圧基準: <3mmHg

(地上の通常環境: ~0.3mmHg(400ppm))

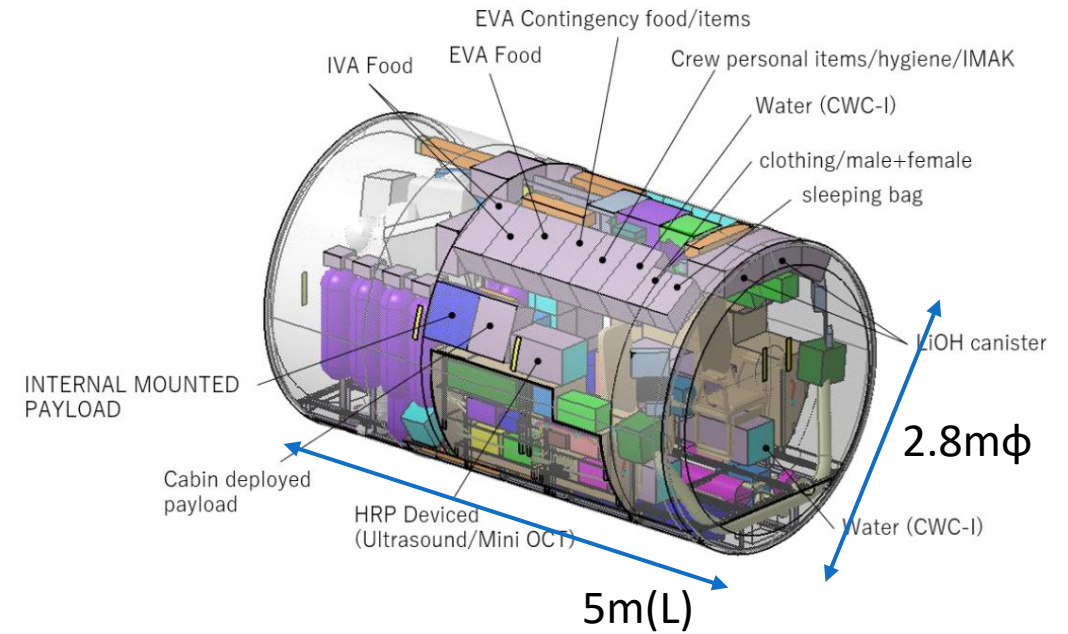
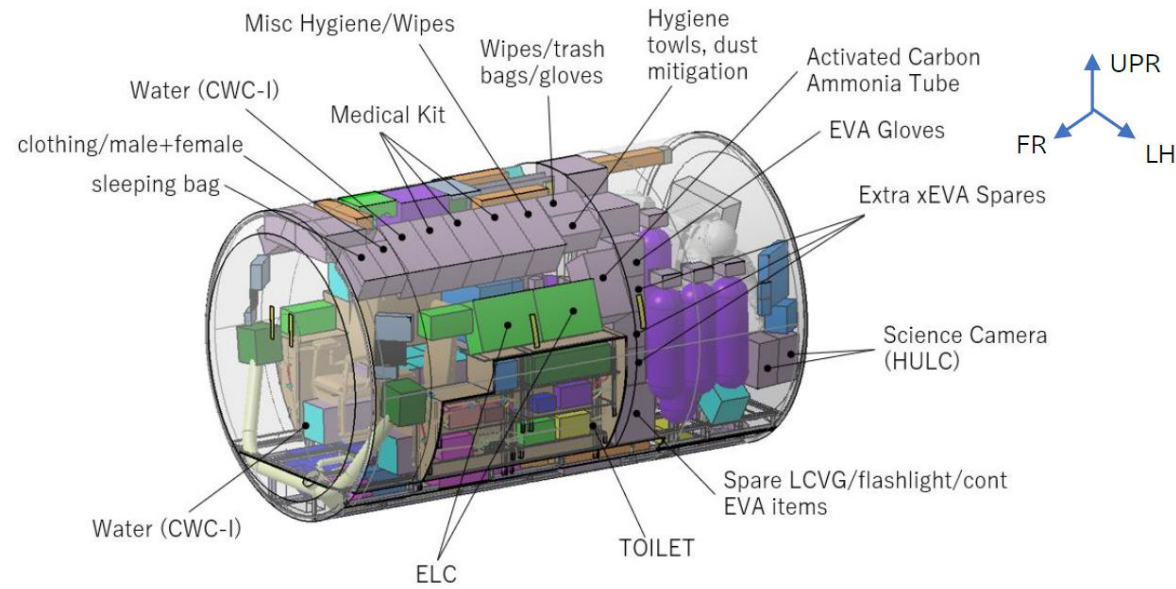
ローバー空間容積30m³と仮定すると:

- 通常クルー2名のCO₂排出: 1.4 g/min
⇒55分でCO₂分圧が1mmHg上昇
- クルー1名が運動中: 6 g/min
⇒13分でCO₂分圧が1mmHg上昇

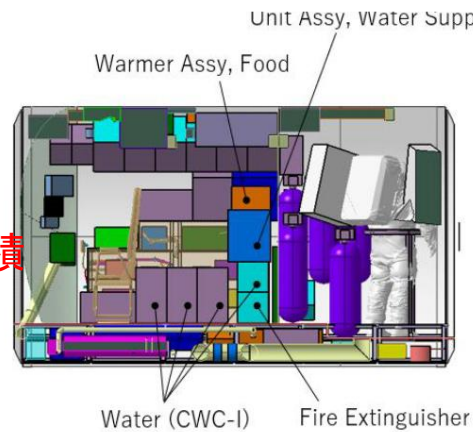


クルー2人分のCO₂排出量

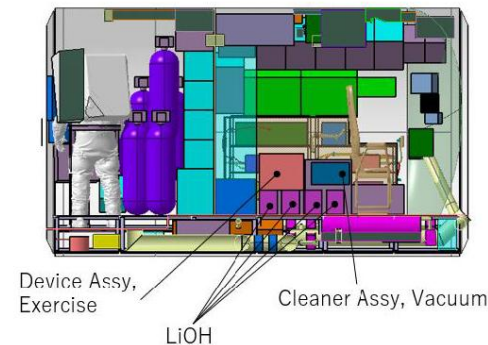
3.7 船内レイアウト (1/1)



RH側



LH側

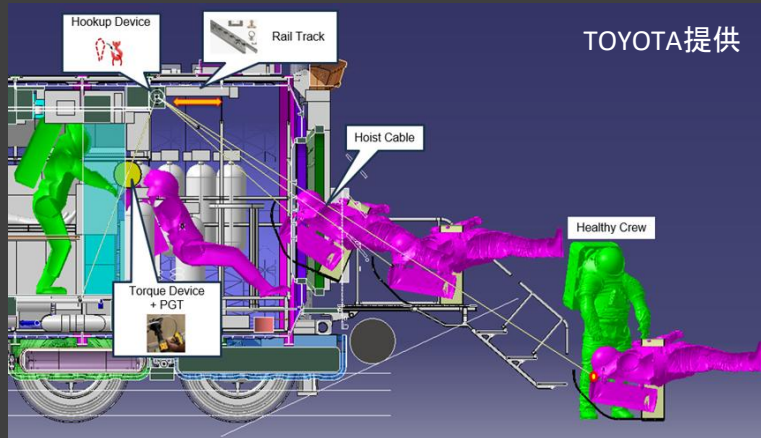


- EVAスーツの脱着容積
- 補給品(水、ガス他)搭載容積
- 電装品・ECLSS機器搭載
- 運転席
- ベッド
- 等

TOYOTA提供

■ Incapacitated Crew Rescue(ICR)

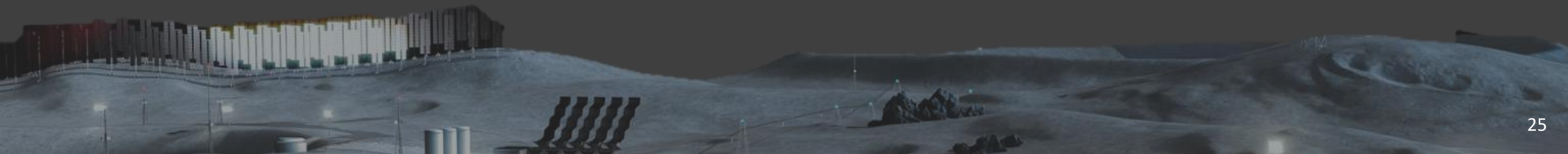
船内・船外活動中にクルーが行動不能となった場合に、他のクルーが救護活動を行う



ローバー船内への搬入方法検討

■ Crew Survival Method(CSM)

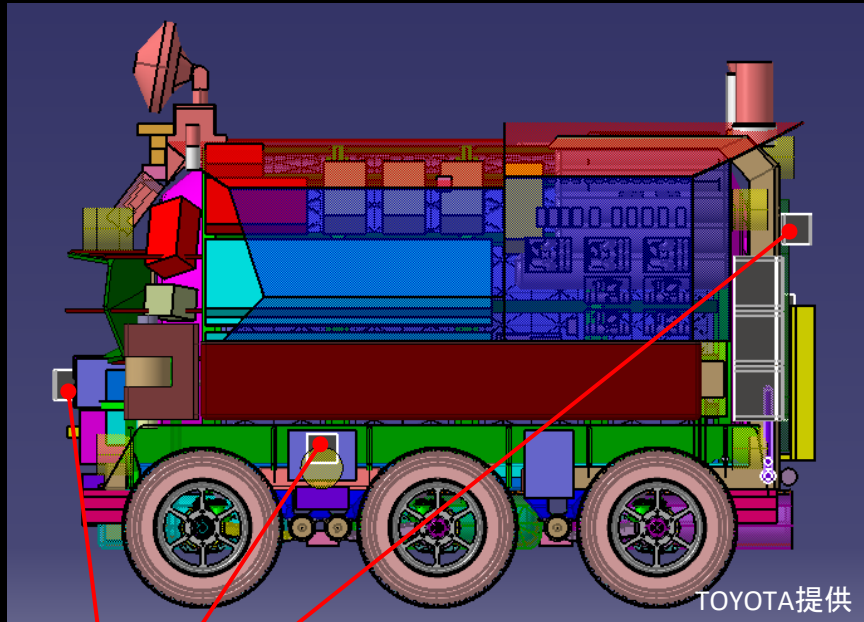
システムのハザード制御を超えた緊急事態発生時でもクルーが生存できるよう対策



4. 有人と圧ローバーの利用

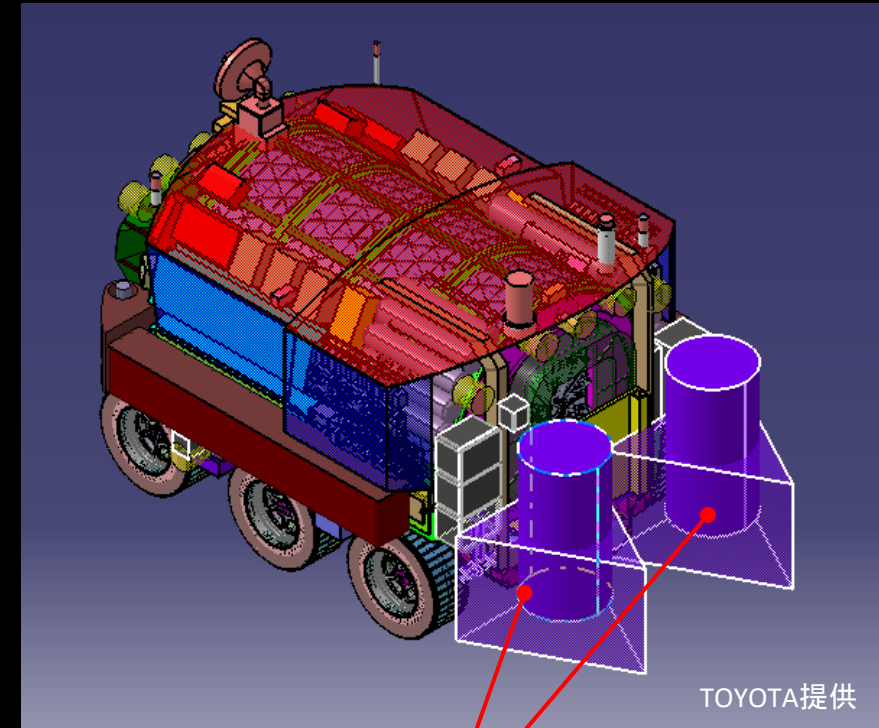
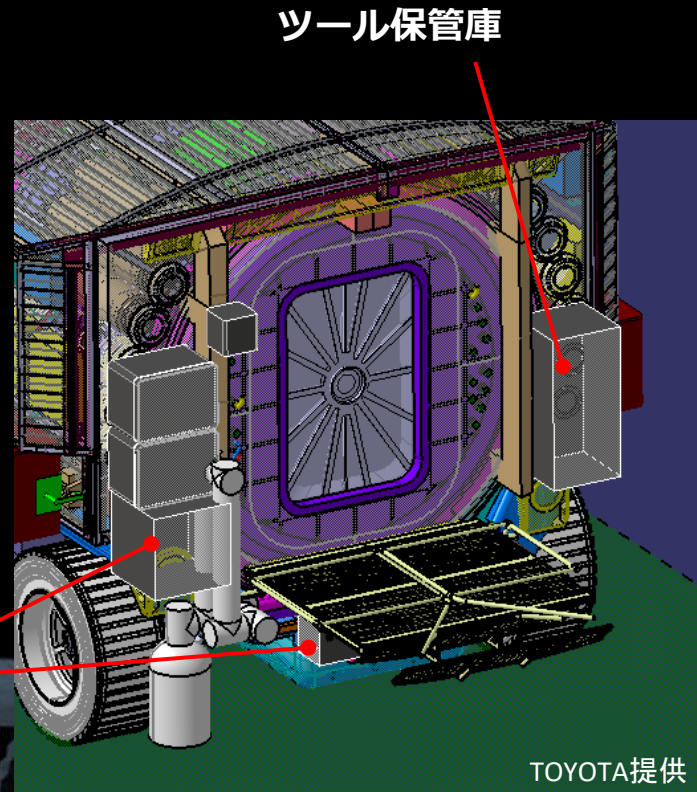
4. 有人と圧ローバの利用

- 与圧ローバーを最大限活用して、将来の月活動のための情報を得ることに期待
 - ローバー自体の運用データの利用
 - 公募によるペイロード搭載機会（船内・船外）



船外ペイロードインタフェース
(前後左右面にそれぞれ1カ所、計4カ所)

サンプル保管庫



月面展開ペイロード（後面2カ所）

月面天文台ユニットの積載例
※上部のアンテナ含め円柱で表現