

Symposium on Planetary Sciences 2020

Exploration Technology Development for Moon to Mars

2020/02/16

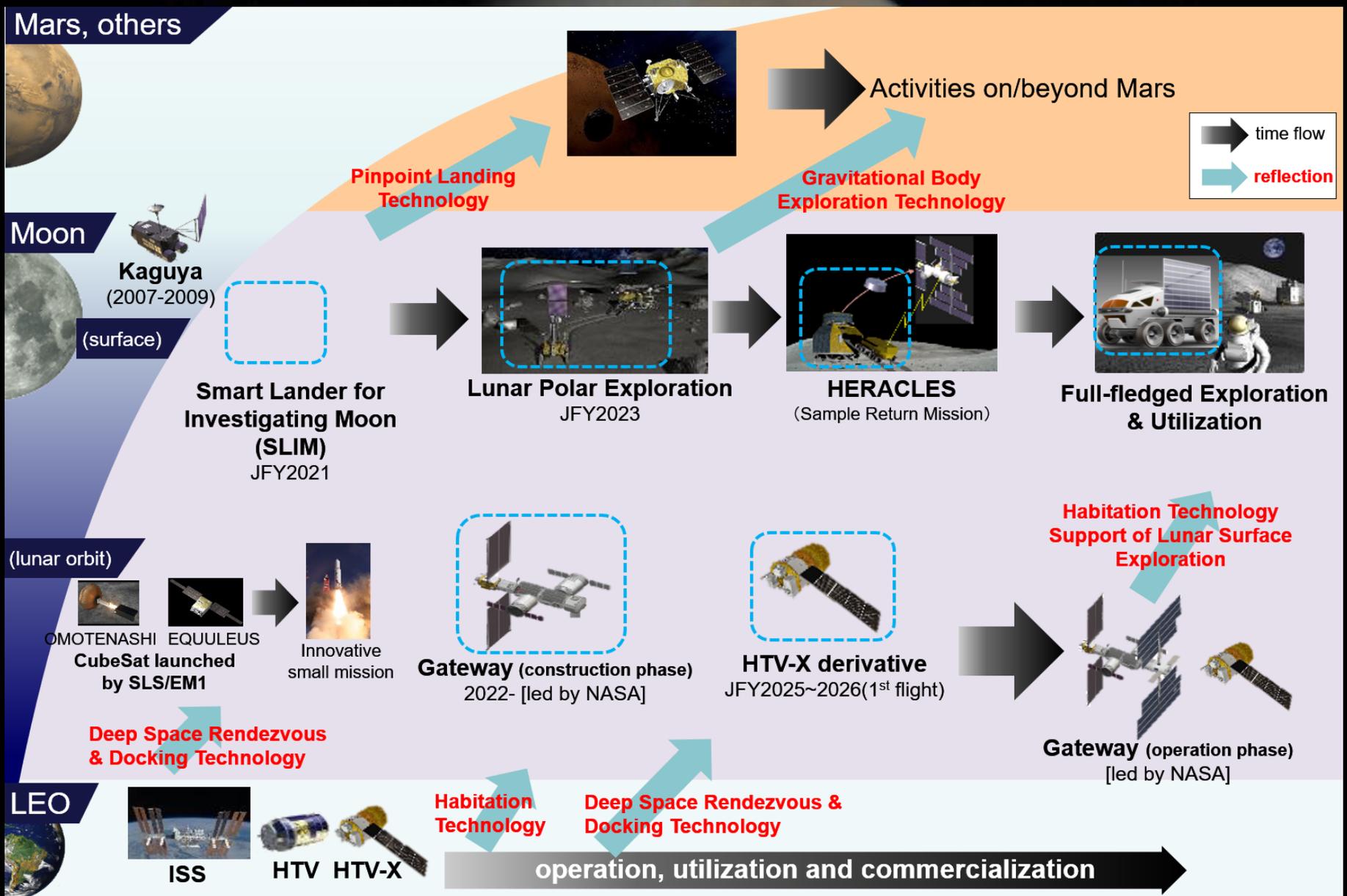
Fujita, K. and Usui, T.

Institute of Space & Astronautical Science / JAXA

Sato, N.

JAXA Space Exploration Center / JAXA

JAXA 国際宇宙探査ロードマップ(2019 版)

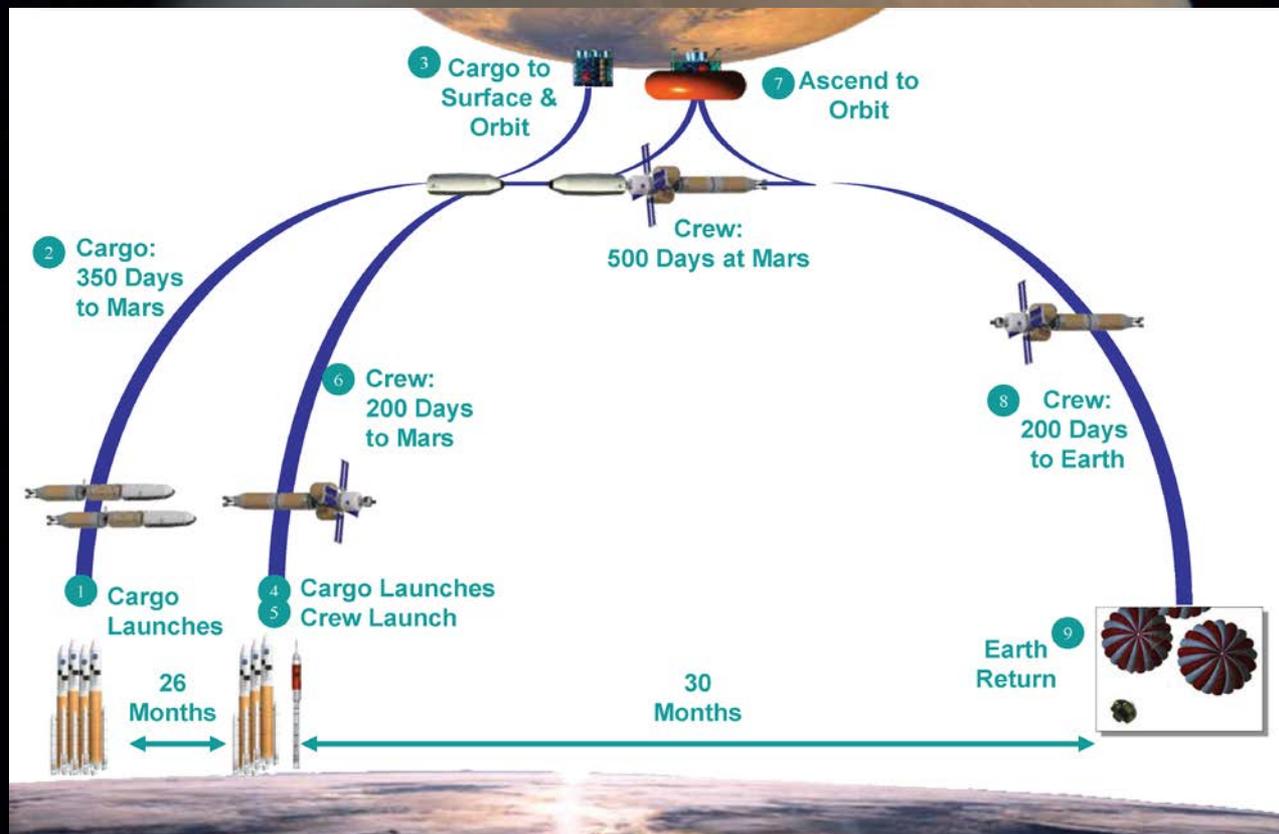


火星有人探査アーキテクチャと日本の役割(1/2)

5

■ 火星有人探査アーキテクチャ

DRA5.0 によれば, 国際協働火星有人探査においては, 有人活動に必要な物資(地上への輸送物資を含む)をエアロキャプチャによって火星周回軌道へ投入し, 火星軌道上へ駐留させた後, 火星表面へ物資を輸送し, 地上活動を支援する案が有力である. 火星オービタ(仮称; International Mars Station; IMS)は, 現在の ISS と類似の形態・機能を要求されると推察される.



火星有人探査アーキテクチャ(Design Reference Architecture 5.0)

火星有人探査アーキテクチャと日本の役割 (2/2)

6

■ 日本の役割

リソースが限定的な我が国では、すべての技術領域を担うことが不可能であり、我が国の強みを生かした選択と集中が求められる

4つの柱の火星圏への拡張

- 1. 有人宇宙滞在技術:** 二酸化炭素を除去したり、宇宙で水や空気をリサイクルできる再生型環境制御システムの技術
→ 火星有人宇宙船, 火星ベースにおける利用
 - 2. 深宇宙補給技術:** HTV(このとおり)の後継として ROP-G 等へ物資輸送を行う HTV-X
→ IMS への物資輸送を行う HTV-M
 - 3. 重力天体離着陸技術:** SLIM で基本実証し、極域探査や HERACLES で高度化
我が国が得意とする大気突入技術
→ 火星表面への自在な着陸技術(無人)
 - 4. 重力天体表面探査技術:** 極域探査や HERACLES で獲得
→ 火星科学探査で獲得
- ライフサイエンスと惑星保護(新規):
比較的「未開」の技術領域であり、極限生物学や放射線医学に強い我が国が、これからでも世界をリードできる分野

自在で独自の
火星科学探査

火星ステーション輸送機 (HTV-M) 構想

■ HTV-X 開発の現状

ISS への輸送能力・運用性の向上と運用コスト低減、および将来の宇宙技術・宇宙システムへの波及性・発展性を目的として、HTV の発展型である HTV-X の開発が 2021 年の打ち上げを目標として進められている。

HTV-X の活用の一つとして、国際宇宙探査シナリオに記載される月圏探査における探査機等の軌道間輸送技術への活用が掲げられている。すなわち、2020 年代には月圏探査において HTV-X が月圏への物資輸送を担うことが期待される。

■ HTV-M 構想

HTV が ISS への物資輸送の役割を担い、その発展型である HTV-X が国際的な月圏宇宙活動において物資輸送の役割を担うであろうことを考えれば、最終目標である国際協働火星有人探査においても、HTV-X の発展型となる HTV-M (仮称; H-III Transfer Vehicle for Mars) を用いて火星軌道上への物資輸送を担うことが、現在の ISS、および将来の月圏探査に係る宇宙活動の延長として、合理的かつ発展的に整理されると考えられる。

このような戦略上の合理性に加え、技術的な観点からも、HTV より HTV-X を経て HTV-M へ至る流れは、その技術的な連続性によって、日本が強みとする宇宙輸送技術の国際的な競争力を、比較的抑制された開発コストによって、維持・発展させるものであると期待される。もちろん、技術的な連続性のみならず、後述するように、HTV-M にはエアロキャプチャ技術など世界的にも新規の技術が導入される可能性が高く、このことが深宇宙輸送技術における我が国の優位性を一層高めるものと期待される。

このように、HTV-M 構想は、将来の国際協働火星有人探査へ至る我が国の宇宙開発の戦略において、極めて有効な構想の一つと考えることができる。

火星有人探査へ至るロードマップ案 (戦略的火星探査)

JAXA's Strategic Mars Exploration Program (JSMEP)

Goals & Objectives

Ensuring Expansion of the Areas of Human Activities,
Exploring Hills, High-latitudes, and the Subsurface World

Key Technologies

Entry-descent-landing (accurate landing & aerodynamic control)
Explore the surface (sampling, sci. instrument, small bus system)
Deep space transportation (orbital rendezvous, planetary protection)

20xx

Multiple & Sustainable Mars Exploration
Objectives: ISRU & landing of global Mars

Infrastructure Construction on Mars

Evolution of Water

Lander/Rover Exploration

Objectives: In-situ Sample Analysis & Surface Science

- Petrology/Mineralogy (e.g., P-T condition)
- Geochemistry (e.g., dating, elemental abundances)
- Biochemistry (e.g., biomarker/signature, life detection)

Distribution & Inventory of Water

Small Orbiter & EDL Demonstration

Objectives: Global Mapping & Landing Site Selection

- Radar sounder observation of subsurface world
- Distribution, transport & storage/loss of water and volatiles
- Space weather and climate investigation at Mars (e.g., radiation)



EDL

2030s

Origin & Delivery of Water

Martian Moons Exploration (MMX)

Objectives: Moon Science & SR

- Origin of Phobos and Deimos
- Transportation of water & organics in the early SS



Telecommunication

Sample Return
Deep Space Transportation

Participation of

International Mars Program (e.g., MSR)

(International Space Exploration Committee)

国際協働有人火星探査



将来の火星探査に求められる探査技術

9

■ MMX に続く火星着陸探査に求められるもの

- MMX の継承
- 独自の火星サイエンス／他の火星ミッションとの相補
- 世界最高水準クラスの探査技術の実証／独自の探査技術を用いた技術挑戦

■ 国際協働宇宙探査における日本の立ち位置

- ISS 後の国際協働による月圏探査(2020～)、火星有人探査(2030～)において、我が国の技術パートナーシップの地位を着実なものとし、その結果として日本人宇宙飛行士の参加や、月・火星における探査・資源利用の機会獲得の優位性を向上することが求められている。
- これを実現するために、これらの探査に求められる探査技術を着実に獲得し、国際協働探査ミッションの一翼を担う必要がある。
- 我が国がどの部分を担当するかは、日本でなければこの部分できないから、という独自性よりも、むしろコストシェアのため、日本はこの部分ならば(実績にもとづいて)任せられるから、という観点から調整されるものと推察される。



■ 求められる火星探査技術

- 独自の火星科学探査を自在に実現するための必要最低限の探査技術を保持。
- 他に類を見ない日本独自／日本が強みとする探査技術を選択的に保持・強化。

両者のバランスをとることが必要

将来の火星探査が求めるシステム・アーキテクチャ

10

1. 超小型・分散型プラットフォーム型 (FS ランダ等)

小型プラットフォームを多地点に分散させ、火星の多様性に関わる広域情報を獲得するもの。

- 利点 最もシステムが簡素・軽量で、コストも低い。一度の探査で多地点に到達し、火星の多様性に関わる広域情報を取得可能。技術的にも柔軟エアロシエル、世界初の分散型小型プラットフォームなど、独創性が高い。
- 欠点 技術的難易度が高い。ミッション期間が短期間で、獲得される成果が「広く浅く」となりかねない。国際協働火星探査に至るロードマップとの相性も良くない。

2. 定点プラットフォーム (ランダ等) による探査

- 利点 システムが比較的簡素・軽量で、コストも低い。固定プラットフォームの利点を生かした詳細観測 (地震探査, 高深度掘削による内部探査, 回転計測など) が可能。将来の国際協働火星探査に至るロードマップとの相性も良い。
- 欠点 固定プラットフォームのため観測情報が極めてローカライズされる。このため、着地点の選定, 着陸精度が重要となる。移動技術が獲得できない。

3. 移動プラットフォーム (ローバ, 飛行機等) による探査

戦略的火星探査の目標

- 利点 移動可能距離の範囲内で広域な詳細情報を獲得することが可能。このことは着地点精度への制約を緩和し、ミッション計画を冗長とする。将来の国際協働火星探査に至るロードマップとの相性が最も良い。
- 欠点 移動プラットフォームゆえに探査範囲は平面的に限定される。技術的難易度はランダに比べて高い。

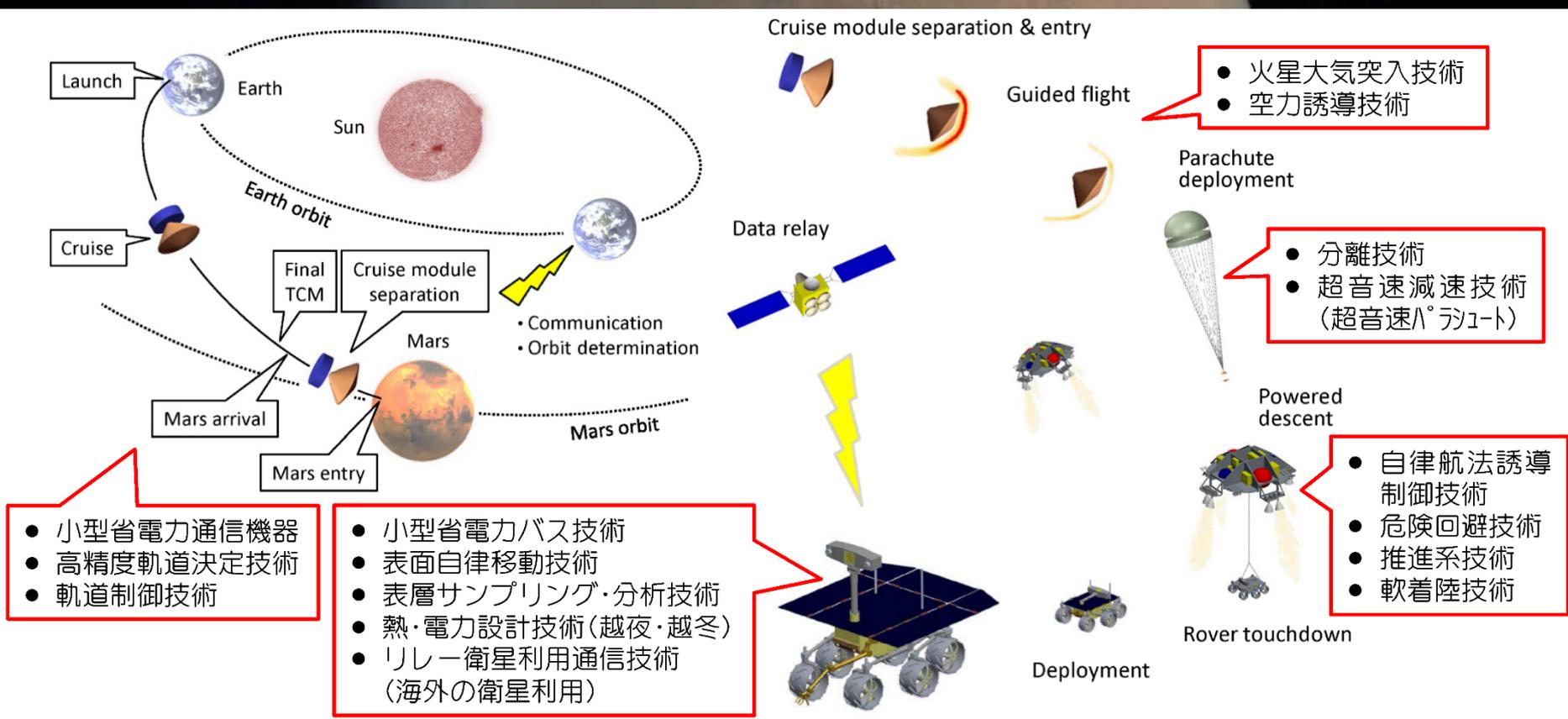
いずれのアーキテクチャにおいても独自のオービタを有することが極めて有効

将来の火星着陸探査に向けた技術課題の分析

11

■ アーキテクチャ₃を想定した技術課題の抽出

アーキテクチャ₃を想定して、将来の火星着陸探査に必要な技術課題の分析を行った。この過程では、各ミッションスコープ、プラットフォームを利用するミッションにおけるミッションシナリオをイメージし、各ミッションフェーズにおいて必要となる技術を抽出する。下記は中規模のローバを用いた狭域(～50km)の詳細探査の一例である。



プリカーサとしての火星探査実証ミッション候補

12

#	呼び	概要
1	定点着陸実証機	EDL システムとサービスモジュールから構成される着陸探査に特化した実証機で, MELOS 提案の小型版. 表層環境へのアクセスが可能で, 表層環境探査に必要なほぼすべての技術実証が可能だが, オービタを有しない.
2	オービタ + オプション地上系	通常軌道投入オービタにオプション地上系として飛行機, ペネトレータ, あるいは簡易な着陸機等を搭載したもの. 比較的小型のシステムで実現可能だが, 表層環境探査のための EDL 実証は極めて限定的. 一方, 表層環境へアクセスできる点は価値が高い.
3	オービタ + EDL 実証機	通常軌道投入オービタに EDL 実証を取り込んだもの. 表層環境探査に向けた EDL 実証のレベルに応じて規模・コストが異なる. 最も EDL 実証の達成度が大きいものは 1 を取り込んだ初期 MELOS 形態となるが, 極めて規模が大きなミッションとなる.
4	エアロキャプチャオービタ(MACO)	エアロキャプチャ(AC)によりオービタを投入するもの.AC によって定点着陸に必要な技術(着陸を除く)の実証が可能であると同時に, 科学観測や通信リレー用の軌道プラットフォームが得られるが, 表層環境へのアクセスはできない.
5	MACO + オプション地上系	4 にオプション地上系(2 を参照)を搭載したもの. 中型システムで実現可能で, AC により着陸を除く EDL 技術実証も可能. 表層環境へアクセスできる点も価値が高いが, 表面探査技術の実証は限定的.
6	MACO + EDL 実証機	4 に EDL 実証を取り込んだもの. EDL 実証のレベルに応じて AC と重複する部分が発生する可能性が高く, システムも大規模となる.

総合判定

■ ミッションアーキテクチャについて

- 戦略的火星探査において2030年代初頭に総合着陸探査を実施すること、将来の国際協働火星有人探査へ我が国がを想定すれば、p.9 のトレードオフ表に示す通り
 - ① 着実な技術獲得を行う
 - ② 合理的な探査機規模で最大の費用対効果を上げる
 - ③ 後継ミッションへ軌道プラットフォーム(データ中継, 着陸点選定の観測)機能を提供するの観点において、#3 エアロキャプチャオービタ(MACO), あるいは #4 MACO+オプション地上系のいずれかが優れている。
- 小型ミッションを想定すれば MACO が最も優れているといえる

■ 火星総合探査に至る技術獲得手法

- MACOで獲得できない火星探査技術(超音速パラシュート技術, 着陸推進系技術, 画像航法技術, 障害物検知回避技術, 表面探査技術等)については、p.10 に示す通り、月ミッション等の他の探査ミッションにおいて獲得される技術を流用・発展させることによって、2020年代後半には火星への総合着陸探査に必要なすべての技術獲得が完了し、2030年代初頭の総合着陸探査は可能であると考える。
- 超音速パラシュート技術については地球圏で部分実証が可能である。着陸推進系技術, 画像航法技術, 障害物検知回避技術, 表面探査技術については、先行する月探査で獲得可能である。
- 逆に、MACO ではない探査アーキテクチャを採用すれば、2030 年代初頭に火星総合着陸探査を実現することが極めて困難であり、将来の国際協働火星有人探査においても我が国が寄与できる範囲が極めて限定的となることが危惧される。

HTV-M 構想と火星エアロキャプチャオービタ提案

15

■ 火星ステーション輸送機 (HTV-M) 構想

- H-III (およびその後継機) によって運用される HTV 発展型の軌道間輸送機
- ペイロード最大化のためにエアロキャプチャによって火星軌道へ投入
- 火星圏への深宇宙輸送 / 軌道上プラットフォーム / TRN・地上探査の支援

■ 技術課題

- 深宇宙輸送機能 (深宇宙用の極低温推進系, あるいは RCS の大型化・高性能化)
- 火星圏における運用機能 (自律的なランデブー機能, 搭載型の軌道決定機能, 光通信など)
- エアロキャプチャ機能 (空力誘導技術, 機能性軽量 TPS)

■ 火星エアロキャプチャオービタ (MACO) の提案 (ポスト MMX, 2020年台後半)

ミッションの目的	期待される効果
エアロキャプチャによる火星オービタの投入	HTV-M 及び火星表面探査への段階的発展を同時に可能とする数少ない解であると同時に, 世界に先駆けた惑星エアロキャプチャ技術の獲得.
地上探査支援機能の提供 (データレー/EDL 支援等)	既存地上系に対する国際協力 / 将来の着陸探査に向けた探査インフラの準備.
火星環境の長期的な科学観察を行うプラットフォームを提供	リモートセンシング・火星宇宙気象・大気観測など, 検討中の火星科学ミッションの実現.
	上記の結果として, 将来の火星着陸探査における着地点決定のための情報の獲得.

MACO ミッション概要

16

■ 小型ミッション

- イプシロンロケット利用・SLIM 同等(キックモータ使用)
- Destiny+ IF 軌道(230 x 37,000 km)からのTMI
- システム重量(MTO 時) = 約 300 kg

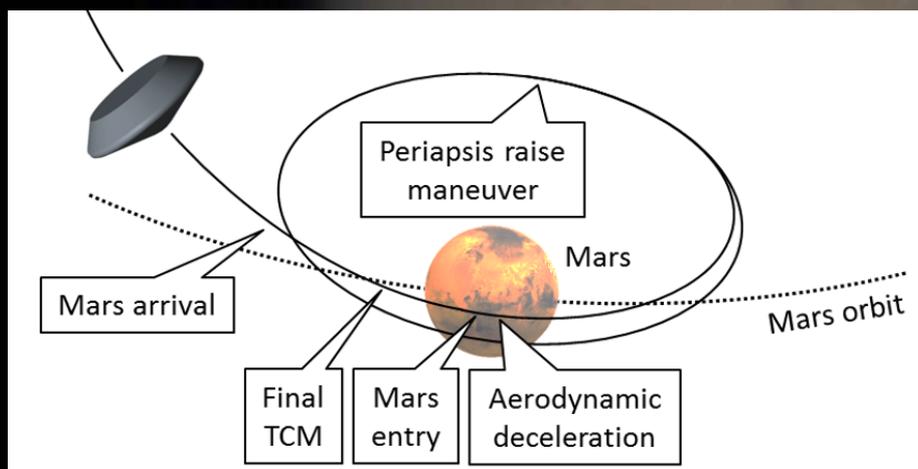
■ 火星遷移軌道

- 2026/10/31 打上げ, 2027/08/20 火星到着(太陽 0 周回).
- 到着 $C_3 = 7.36 \text{ km}^2/\text{s}^2$ ($V_\infty = 2.713 \text{ km/s}$).

■ ミッションプラン

- エアロキャプチャ技術実証

打ち上げ時期	2026 window
出発 C_3	$9.18 \text{ km}^2/\text{s}^2$
MTO 投入 ΔV	1.61 km/s
MTO 投入質量 ($I_{sp} = 310 \text{ s}$)	323 kg
到着 C_3	$7.36 \text{ km}^2/\text{s}^2$
到着 V_∞	2.713 km/s
飛行期間	293 days



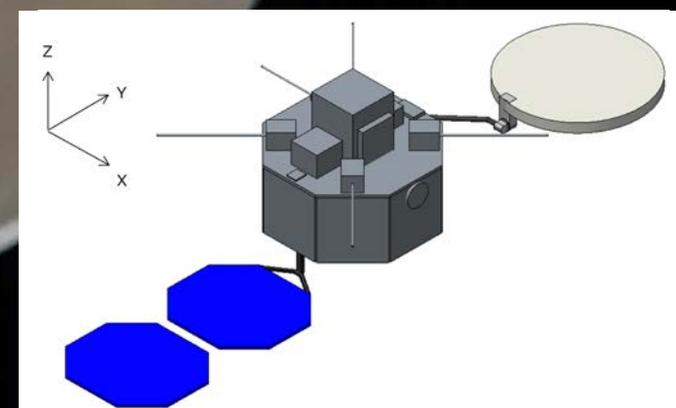
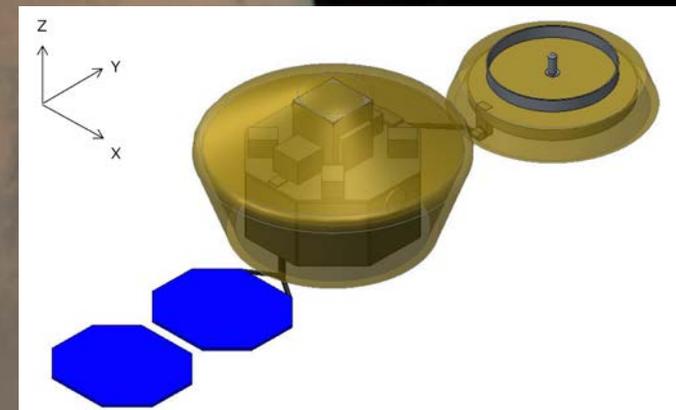
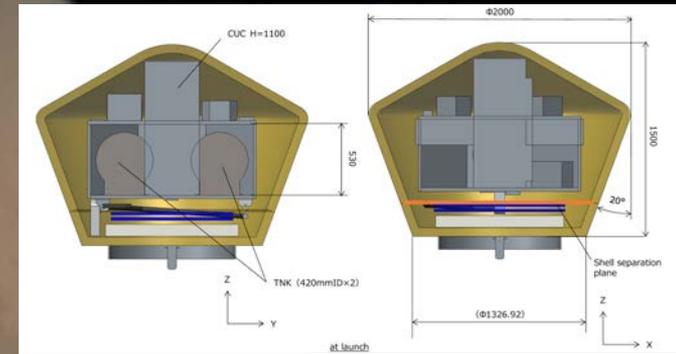
- 150 km x 2.1 Rm 極軌道(案)へ投入
- リモートセンシングによる地表の詳細観測
(活動度観測/定点のシーズナル観測)
- 火星宇宙気象(大気散逸)観測
- 火星気象観測
- 地上系へのデータルー機能提供
(国際協力)

MACO システム概要 (小型ミッション案)

17

■ 小型ミッションを想定したシステム構成

S/S	Mass, kg	備考
Aeroshell	70	$12 \text{ kg/m}^2 \times 5.8 \text{ m}^2$
COM	40	
X 帯	23	冗長系 (2 系, TAS)
U 帯 (地上用)	17	明星電気検討結果
AOCS / DHS	15	BEU 利用 (SwRI, 4.5 kg)
RCS	66	
Propellant	36	
HW (4N RCS \times 12)	30	
TCS	5	
EPS	23	BEU, SAP = 1.8 m^2
STR	40	エアロシェル併用
INT	14	
科学観測機器	30	火星宇宙気象等を想定
Margin	20	
Total	323	



マスタスケジュール案

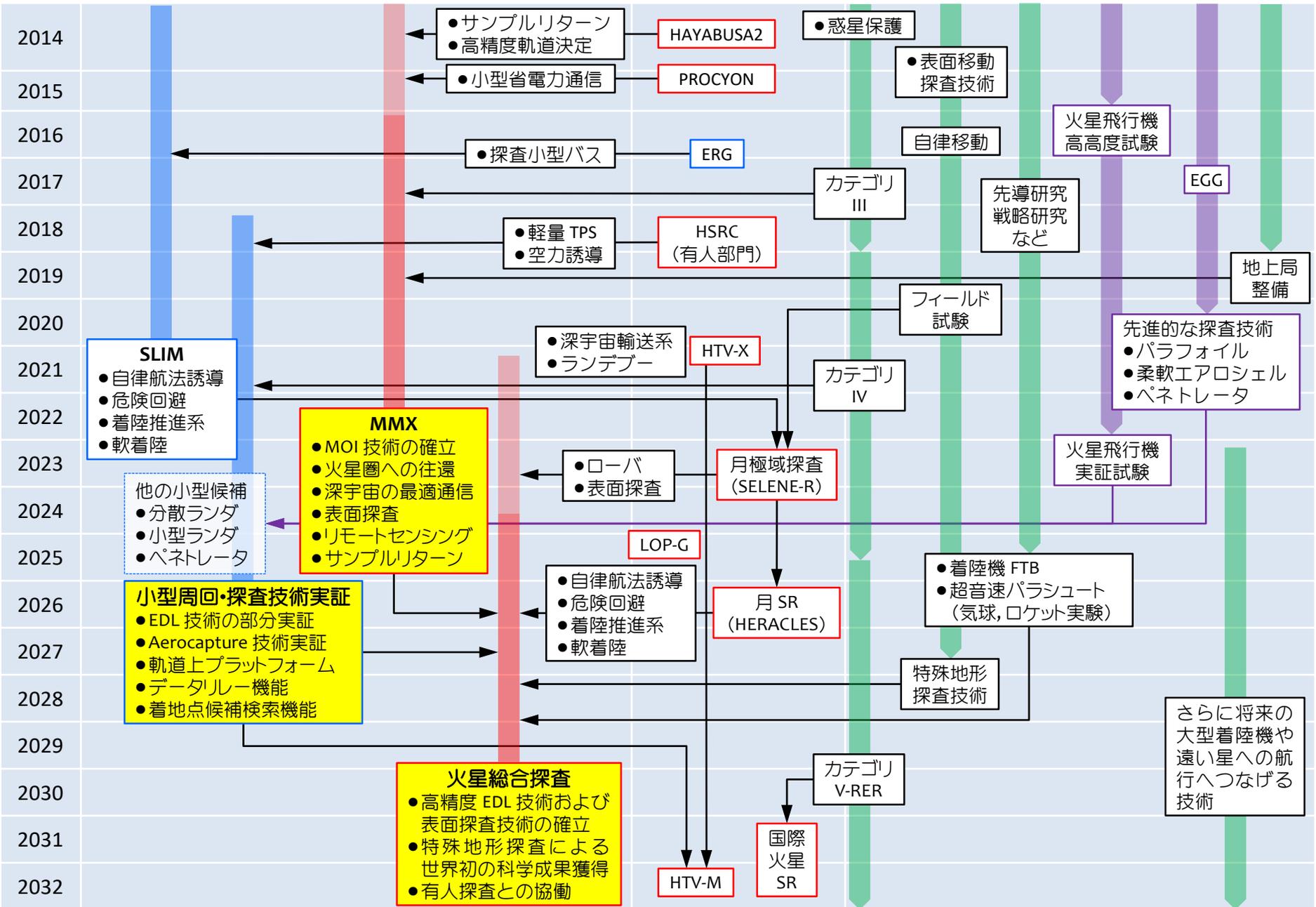
2019		2020		2021		2022		2023		2024		2025		2026			2027		2031													
JFY2019		JFY2020		JFY2021		JFY2022		JFY2023		JFY2024		JFY2025		JFY2026			JFY2027															
12		2		8		2		9		8		9		8		10		4		6			9		10		8					
Pre-phase				Phase A				Phase B				Phase C				Phase D						Phase E										
A1a		A1b		A2																												
WG proposal ▲		AO proposal ▲		PPTR ▲		MDR ▲		SRR ▲		RFP ▲		SDR ▲		PTR ▲		PDR ▲		CDR ▲		PQR ▲			LRR ▲		Launch ▲		Mars arrival ▲					
<ul style="list-style-type: none"> Creation of concept Verification of principles 		<ul style="list-style-type: none"> Refinement of concept Feasibility verification 		<ul style="list-style-type: none"> Definition of mission 		<ul style="list-style-type: none"> Conceptual study System requirement definition 		<ul style="list-style-type: none"> Frontloading study Evaluation by BBM Mission plan decision RFP / integrator decision 		<ul style="list-style-type: none"> Preparation for project 		<ul style="list-style-type: none"> Basic design STM/TTM qualification EM development Operation plan design 		<ul style="list-style-type: none"> EM qualification Detailed design Operation plan documentation 		<ul style="list-style-type: none"> FM manufacture & integration Primary assembly test System comprehensive test Operation plan documentation Operation training planning Operation training 		<ul style="list-style-type: none"> Launch site operation Training & rehearsal 		<ul style="list-style-type: none"> Interplanetary operation Aerocapture operation 		<ul style="list-style-type: none"> Initial operation 		<ul style="list-style-type: none"> Early operation (scientific observation) 		<ul style="list-style-type: none"> Late operation (data relay) 						



重力天体探査ミッション (■:中型, ■:小型)

関連ミッションマトリクス

技術開発・インフラ整備 (■:小規模)



火星有人探査に向けた惑星保護の国際的な取り組み 20

■これまでのワークショップ

- NASA による火星有人探査に係る惑星保護ワークショップ (2015年)
- 1st COSPAR Workshop on Refining Planetary Protection Requirements for Human Missions (2016年10月)
- 2nd COSPAR Workshop on Refining Planetary Protection Requirements for Human Missions (2018年5月)
- 3rd COSPAR Workshop on Refining Planetary Protection Requirements for Human Missions (2019年5月)

※ JAXA は第2回 WS より参加し、議論と作業計画に参加している。

■スコープ

- 火星有人探査の惑星保護に係る問題のすべてを議論する。
- 火星有人探査に係る問題を取り扱うが、宇宙飛行士の生命維持システムや健康・医療に関する問題はスコープ外とする。ただし、これらの課題と独立には議論ができないため、当該技術領域と密接に情報共有を行い作業を進める。

優先的な課題への行動計画

21

■ Natural Transport

汚染輸送モデルを開発, テスト, 検証するために, 提案された各 EZ の複数の固定場所で, 少なくとも 1 火星年にわたって高頻度気象データを取得するための火星表面での測定. これらの測定には, 最低でも熱と運動量の乱流フラックス, 気温, 圧力, 湿度, 風速の基本的な測定, ダスト濃度と大気中のカラムの存在量, ダストの堆積と侵食速度を含める必要がある.

■ Microbial Monitoring

微生物叢や微生物群の監視機能, 多様性およびその変化の体系的な計測手法の開発. 無人探査機については, ハードウェアの組み立て, テスト, および打ち上げ作業中に渡る監視. 有人宇宙船については, ハードウェアの組み立て, テスト, 打ち上げ作業, および軌道上における監視. ISS および後継機が対象案

■ Synergistic Biocidal Effects

宇宙機関連微生物の生存と成長に影響を与える相乗的な殺菌効果に係る地上実験.

■ Acceptable Contamination

有人支援システム (EVA 宇宙服, エアロック, 居住区など) からの生物学的汚染および有機汚染の放出を特徴付ける計測

JAXA の惑星保護活動における計画(案)

22

■ Natural Transport

- 我が国は火星大気循環モデルにおいて優れた競争力を有していると認識
- 今後、戦略的火星探査において「大気観測」の優先度を高め、小型の火星気象ミッションや、火星総合探査における気象パッケージの取り込み等を検討する計画
- 地下水系や生命探査は戦略的火星探査の最重要スコープとなっており、火星総合探査において実施する計画

■ Microbial Monitoring

- ISS での微生物モニタリング(有人部門において実施中)の戦略的な継続・発展
- LOP-G や月有人探査における微生物モニタリングミッションの提案

■ Synergistic Biocidal Effects

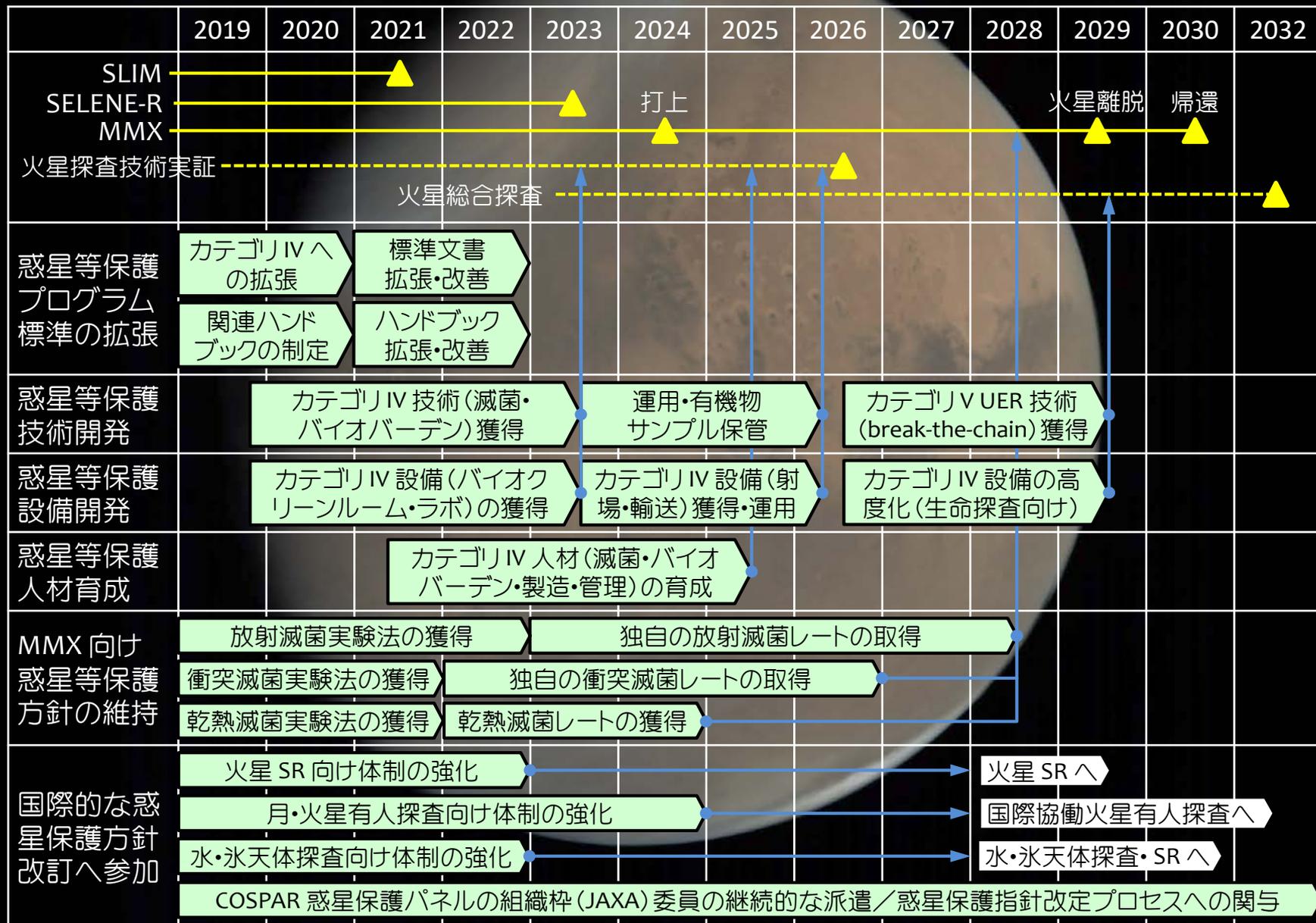
- ISS で実施されているタンポポミッションの継続・発展(拡張, in-situ 化は必須)
- LOP-G や月ミッションへの適用/地上での実験(特に外部の微生物系の協力を強く希望する)

■ Acceptable Contamination

- Onboard の in-situ 計測技術の獲得(例: LDM の発展型)
- 特に「難培養性」微生物の検出/バイオダイバーシティへの対応
- 計測とともに Synergistic biocidal effects が評価できると理想的
- 地上設備, ISS, LOP-G, 月ミッションでの実証・実践

探査ロードマップと惑星保護研究開発ロードマップ

23



まとめ

24

- 戦略的な宇宙探査のゴールとして想定される国際有人火星探査を見据え, また現在の月圏探査の動向を踏まえ, 我が国がとるべき探査技術開発の戦略をレビューした
- そのフレームワークの中で, 2020年代後半に実施することが望ましいと考える探査実証ミッション案を紹介した