

The image features a large, brown, cratered asteroid on the left side. On the right side, the MMX spacecraft is visible, with its solar panels and various instruments. The background is a dark space filled with stars. The title '火星衛星探査計画MMX' is written in large white characters across the center.

火星衛星探査計画MMX

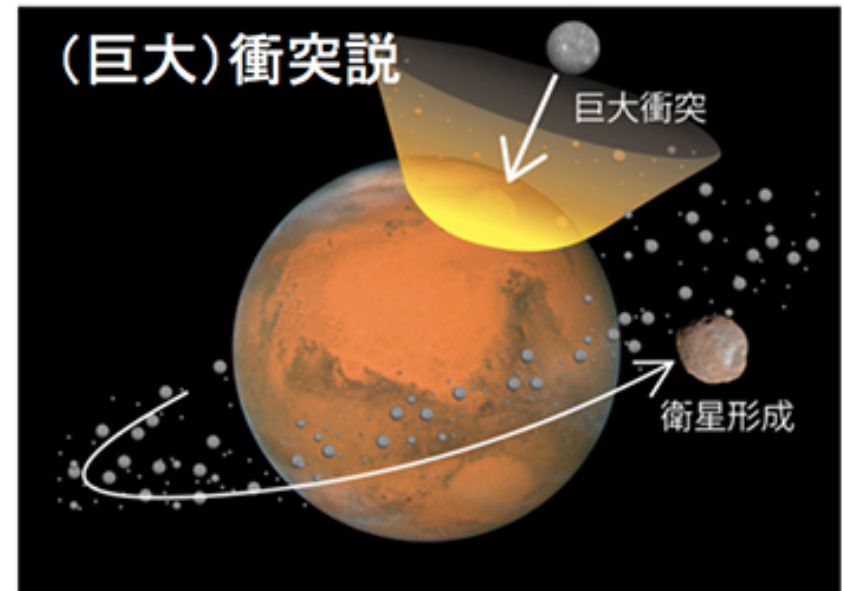
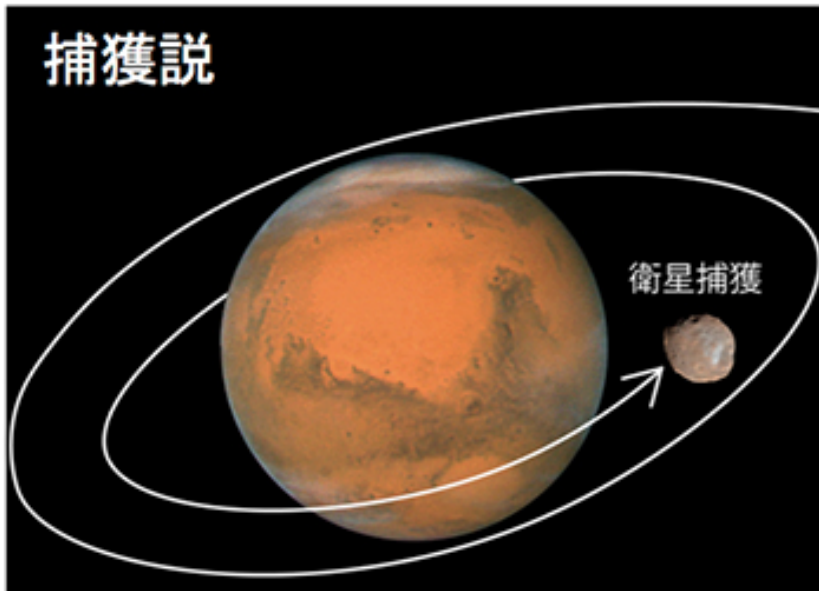
倉本 圭^{1,2}

川勝 康弘²、藤本 正樹²、玄田 英典³、平田 成⁴、今村 剛⁵、亀田 真吾⁶、
松本 晃治⁷、宮本 英昭⁵、諸田 智克⁸、長岡 央²、中川広務⁹、中村 智樹⁹、
小川 和律¹⁰、大嶽 久志²、尾崎 正伸²、佐々木 晶¹¹、千秋 博紀¹²、橘 省吾⁵、
寺田 直樹⁹、臼井 寛裕³、和田 浩二¹¹、渡邊 誠一郎⁷、MMX study team

1.北海道大学、2.JAXA、3.東京工業大学、4.会津大学、5.東京大学、6.立教大学、7.国立天文台、
8.名古屋大学、9.東北大学、10.神戸大学、11.大阪大学、12.千葉工業大学

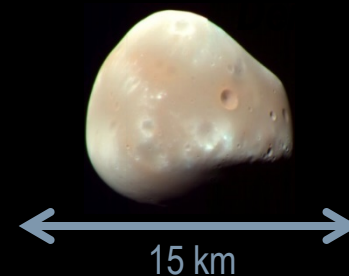
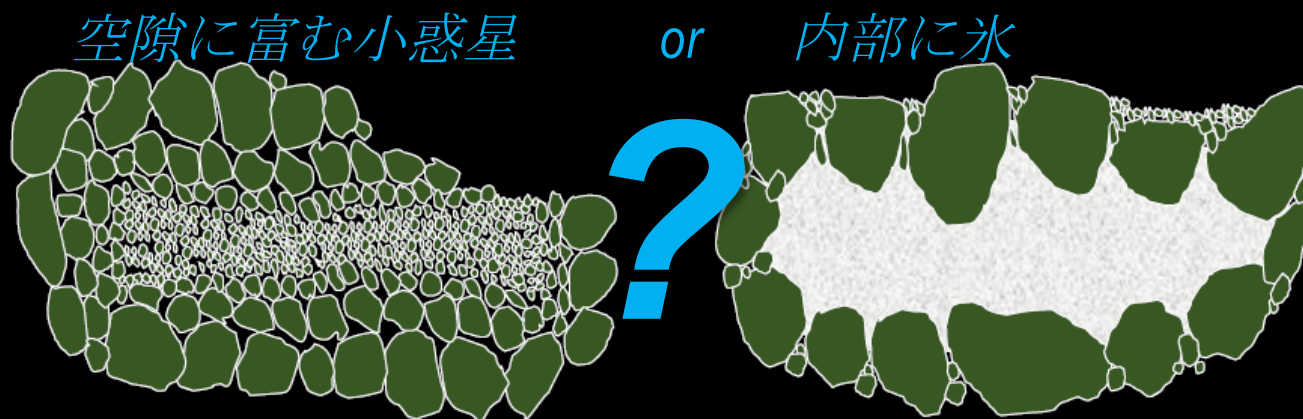
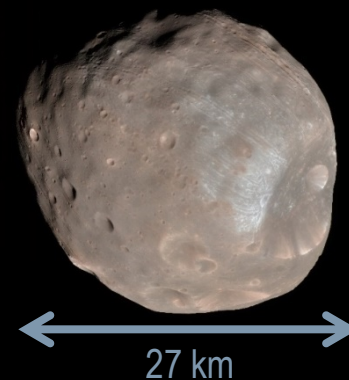
MMX (Martian Moons eXploration) 概略

- Phase A study (ISAS/JAXAプリプロジェクト)
- 火星重力圏を往還
- 2024年打上, ミッション期間 5 年
- 接近観測とPhobosサンプルリターンにより、火星衛星の起源とハビタブル惑星の形成過程を解明



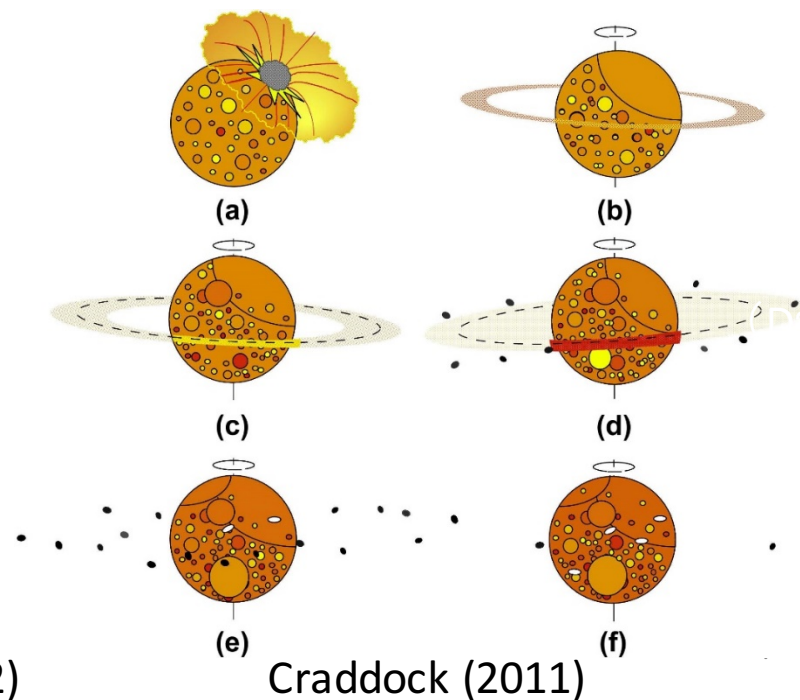
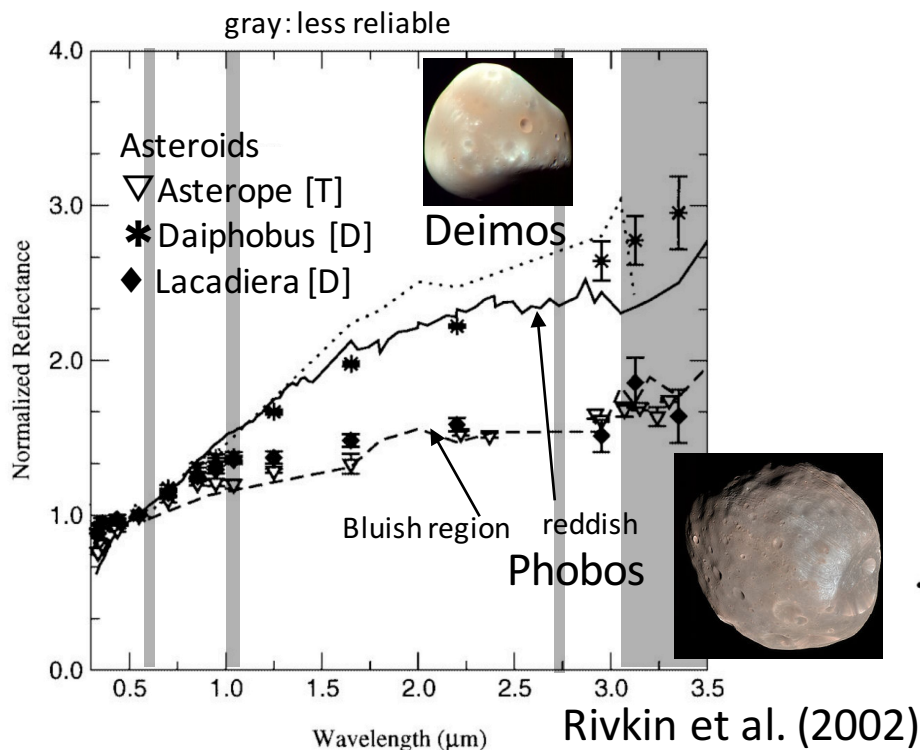
Phobos and Deimos

- 低質量 & 低密度 (c.f. 地球の月)
 - 質量 : Phobos = 1.07×10^{16} kg, Deimos = 1.48×10^{15} kg
 - 密度 : Phobos = 1.87 g/cm^3 , Deimos = 1.47 g/cm^3



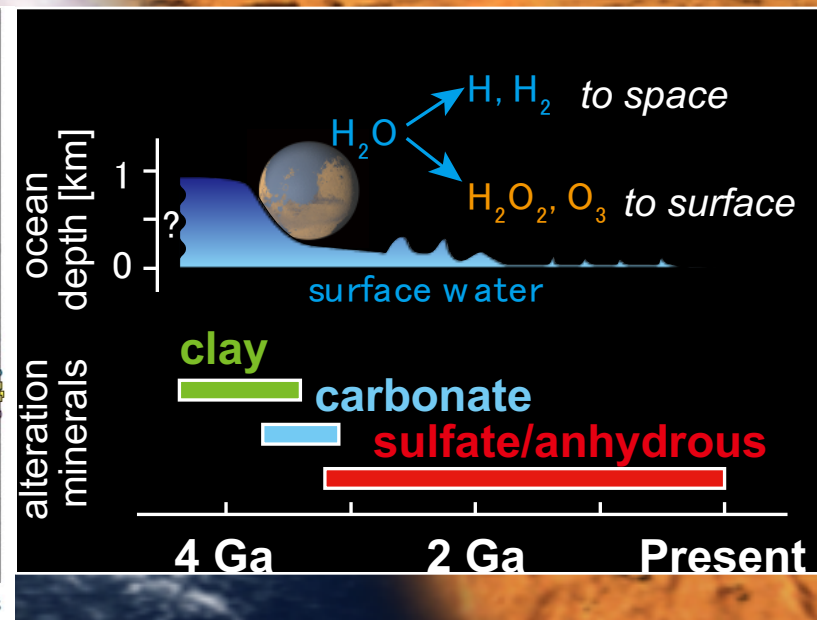
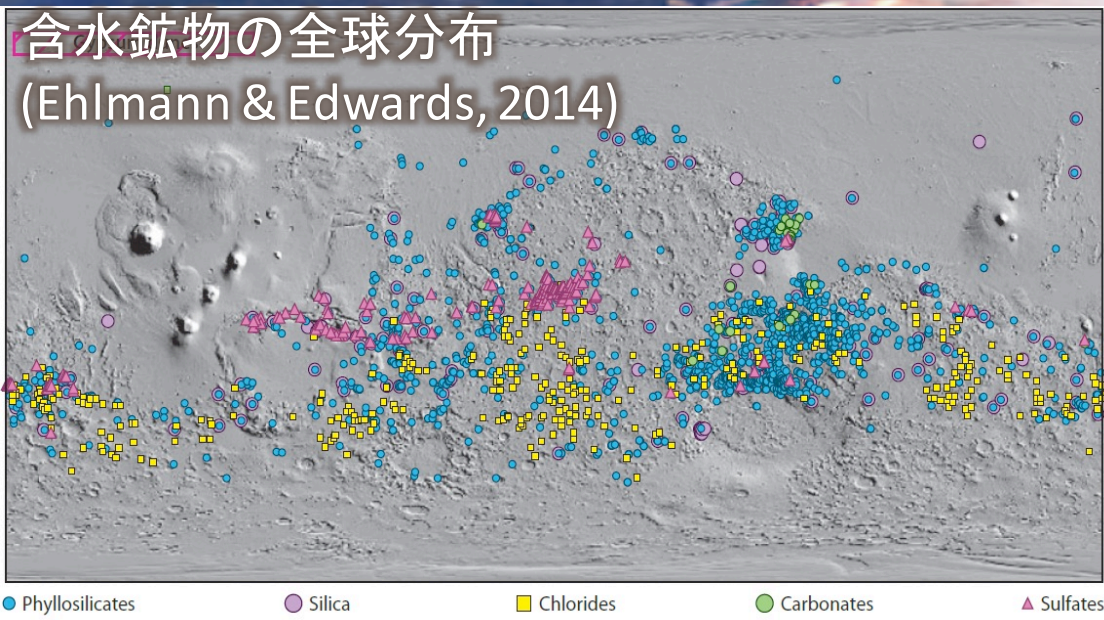
Phobos and Deimos

- 低アルベド (geometric \sim 0.07), 赤みを帯びた反射スペクトル
→ 水と有機物に富む始原天体の捕獲を示唆
- ほぼ赤道円軌道 → 巨大衝突起源を示唆
- 反射特性 \simeq D, T 型小惑星
 - 炭素質隕石に似る
 - 軌道半径 $=2.76R_M$ (P), $6.92R_M$ (D)
 - $i < 2^\circ$, $e < 0.02$
 - 地球の月に似る



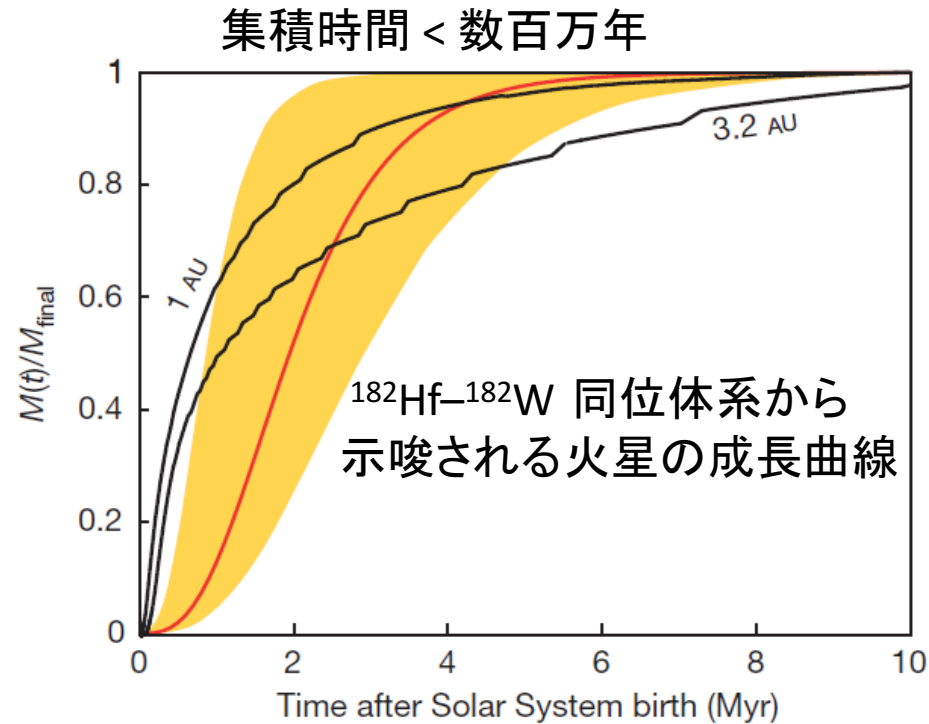
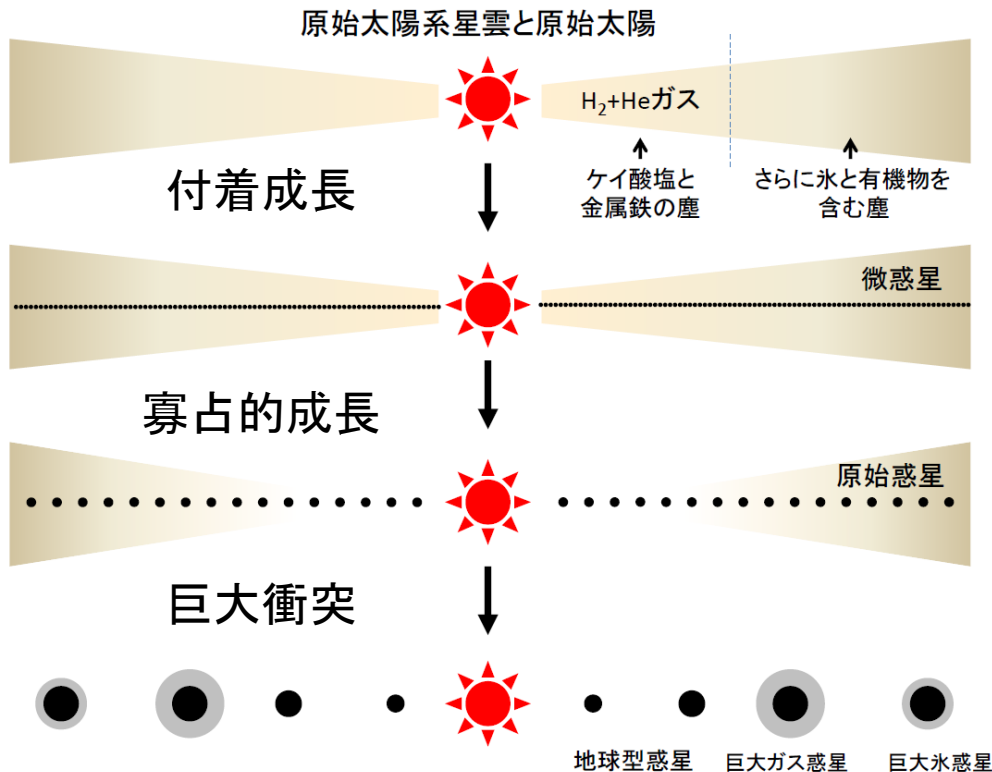
火星とその月の重要性

- 太陽系内でもっとも地球に似る惑星
 - 大気, 液体水の活動, 火成活動, 月の存在, ...
- 過去40億年間の地質記録を良好に保存
 - 衝突の履歴、風化変質鉱物の層序、...
 - 湿潤環境から乾燥環境へ+永年的な酸化
- 形成過程: 表面探査のみでは限界、寄りそう月の探査が重要



原始惑星の生き残りとしての火星

- 惑星形成理論の予測する原始惑星質量に近い
- 火星隕石の年代学が示唆する火星の急速な集積成長と調和的

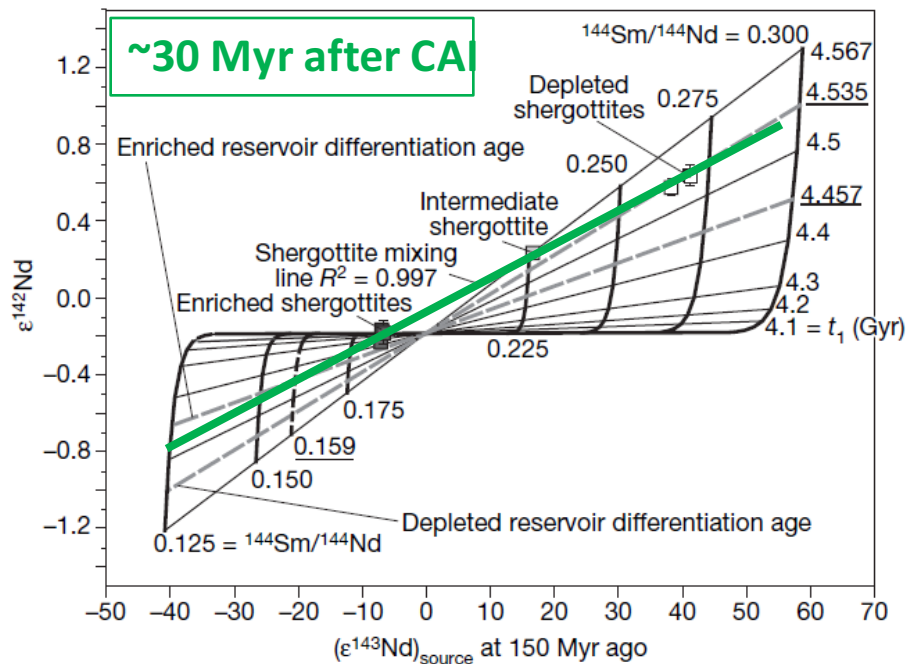


Dauphas & Pourmand (2011)

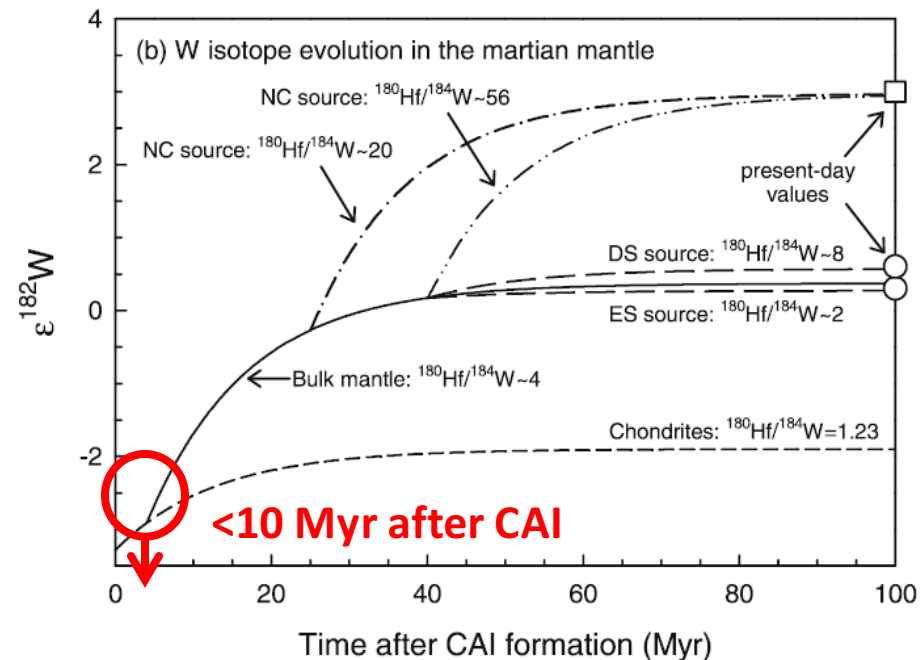
原始惑星の生き残りとしての火星

- 惑星形成理論の予測する原始惑星質量に近い
- 火星隕石の年代学が示唆する火星の急速な集積成長と調和的
- 初期のマントル分化リザーバーを保持
- 地球質量惑星に至る直前の状態をとどめた惑星

$^{147,146}\text{Sm}-^{143,142}\text{Nd}$ system (silicate differentiation)



$^{182}\text{Hf}-^{182}\text{W}$ system (metal-silicate differentiation)



内惑星領域

外縁に位置する火星

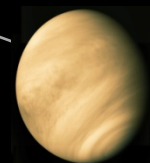
- 外惑星領域からの水、有機物輸送の最前線に位置
- 水や有機物の内惑星系への供給、原始惑星の形成過程、分化過程のすべてに、実証的制約を得られる

外惑星系
水と有機物に富む

内惑星系
高温

H₂O, organics

Akatsuki



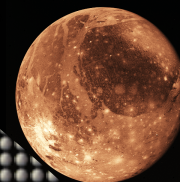
Bepi colombo

Kaguya

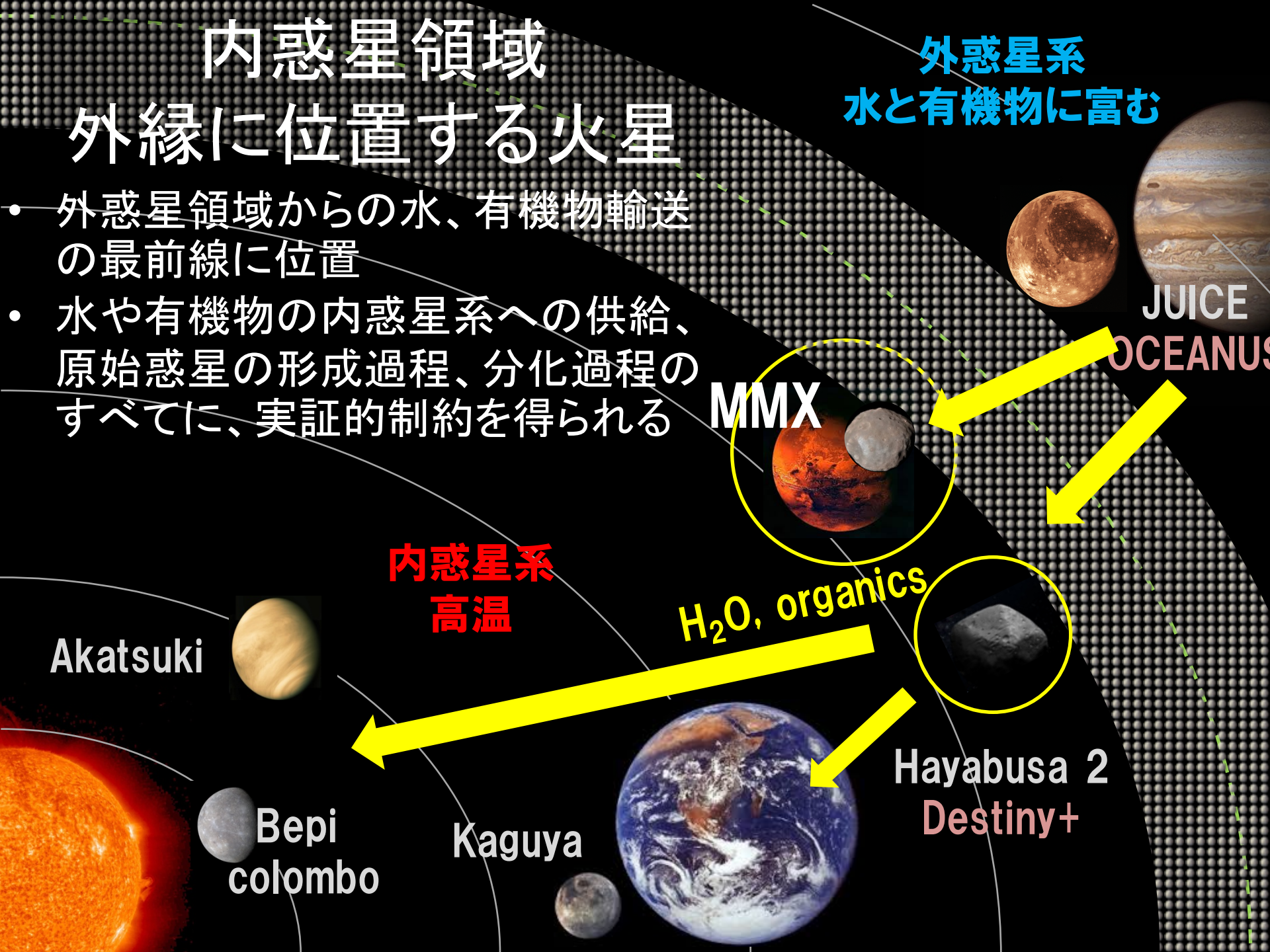


Hayabusa 2
Destiny+

MMX

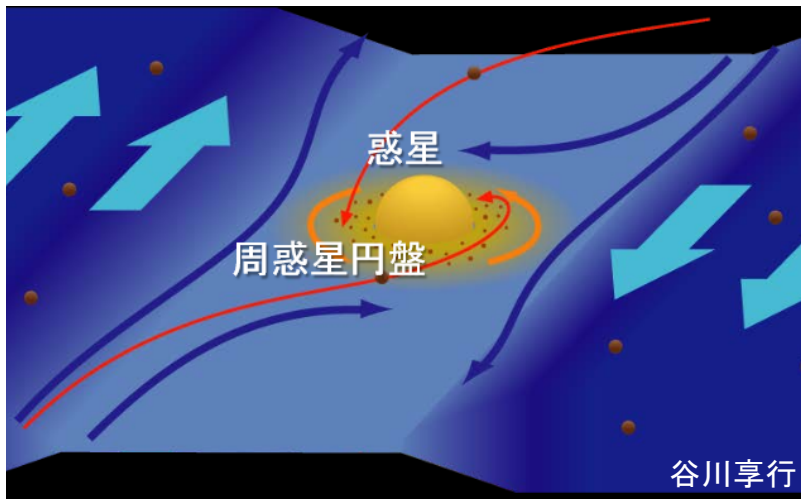


JUICE
OCEANUS



火星衛星の重要性

- 衛星の起源を知ることで、従来の火星探査ではアプローチ困難な、火星の形成過程に迫ることができる
 1. 火星は原始惑星の生き残りなのだろうか？地球同様に、瞬時に全球的極端昇温をもたらす巨大衝突を経たのだろうか？
 2. 衝突天体あるいは捕獲天体はどこから来たのか？その輸送に外惑星系の力学進化はどんなつながりを持っていたのか？火星の材料物質はどのようなものか？いかに水や他の揮発性成分が供給されたのか？
 3. 火星の大気や水圏はどのように形成し、どんな初期条件から出発したのか？



捕獲説が正しい場合、衛星軌道を低傾斜角・低離心率化の説明には、原始太陽系星雲と原始大気が必要

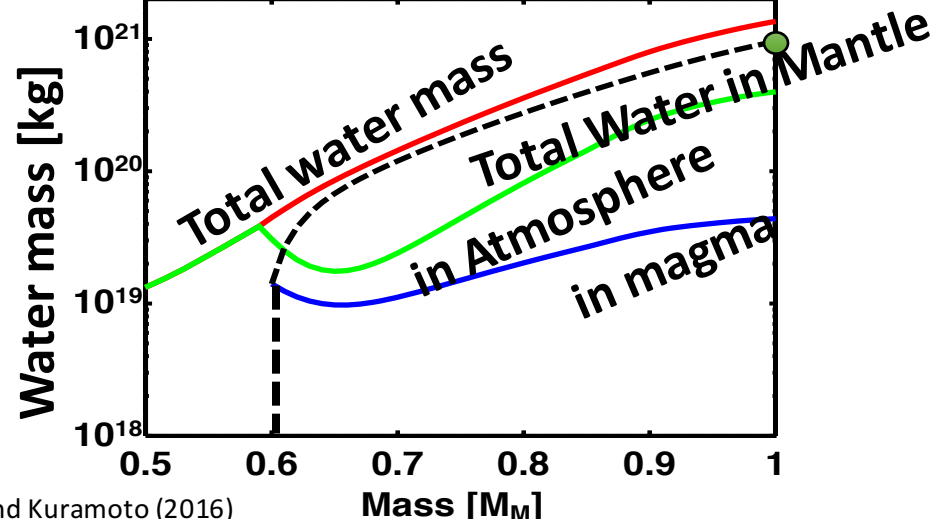
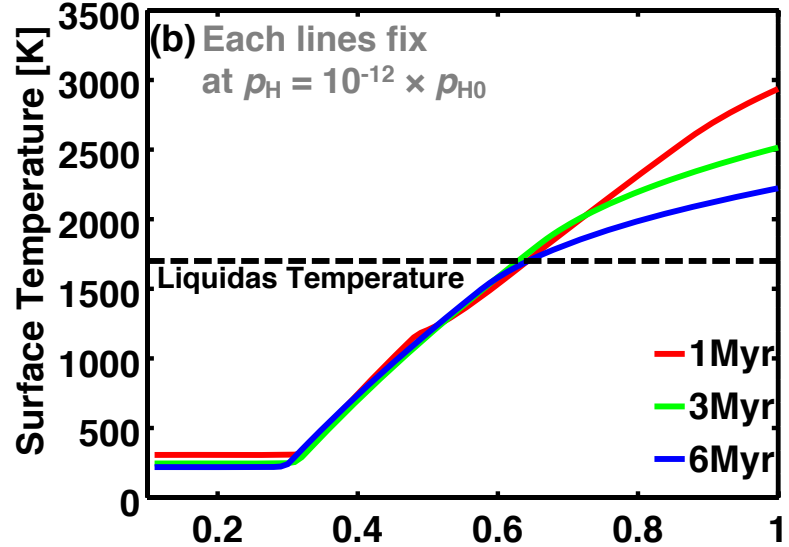
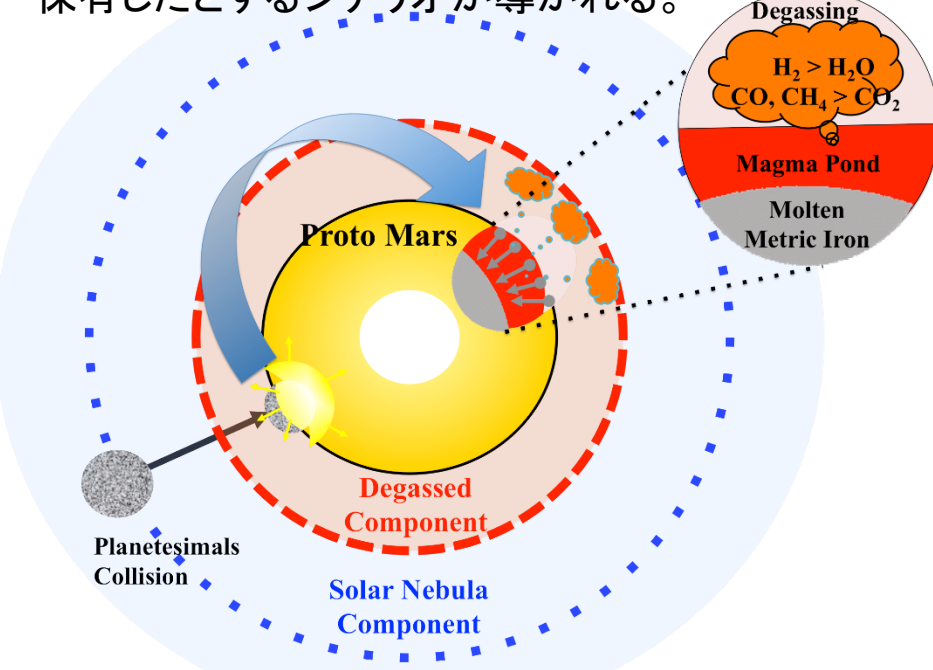


巨大衝突説が正しい場合、衛星表面が著しい宇宙風化を受けるなどし、光学特性が変化した必要

惑星分化論・大気形成論への波及効果

- 材料物質組成や集積過程を制約すれば、火星の分化過程、表層内部間の揮発性物質分配、原始大気の温度・圧力・組成が推定できる

火星は原始惑星段階で原始太陽系星雲ガス成分と衝突脱ガス成分からなる混成型原始大気を獲得し、その保温効果により表面が融解して分化した可能性がある。材料物質に揮発性物質が十分量含まれていたなら、火星は集積完了後に、生命誕生に適する温暖で還元的な原始大気を保有したとするシナリオが導かれる。



Kuramoto (1997), Senshu, Kuramoto, Matsui (2002), Saito and Kuramoto (2016)

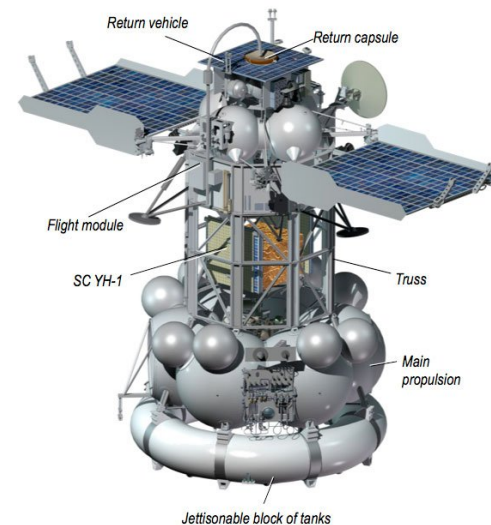
これまでの火星衛星探査

- 火星衛星の調査は火星探査草創期から繰り返し行われているが、副次的なフライバイ観測にとどまる。フォボスを目指した探査はいずれも到達に失敗。現時点で、実現見込みのある他国の火星衛星探査計画はない。



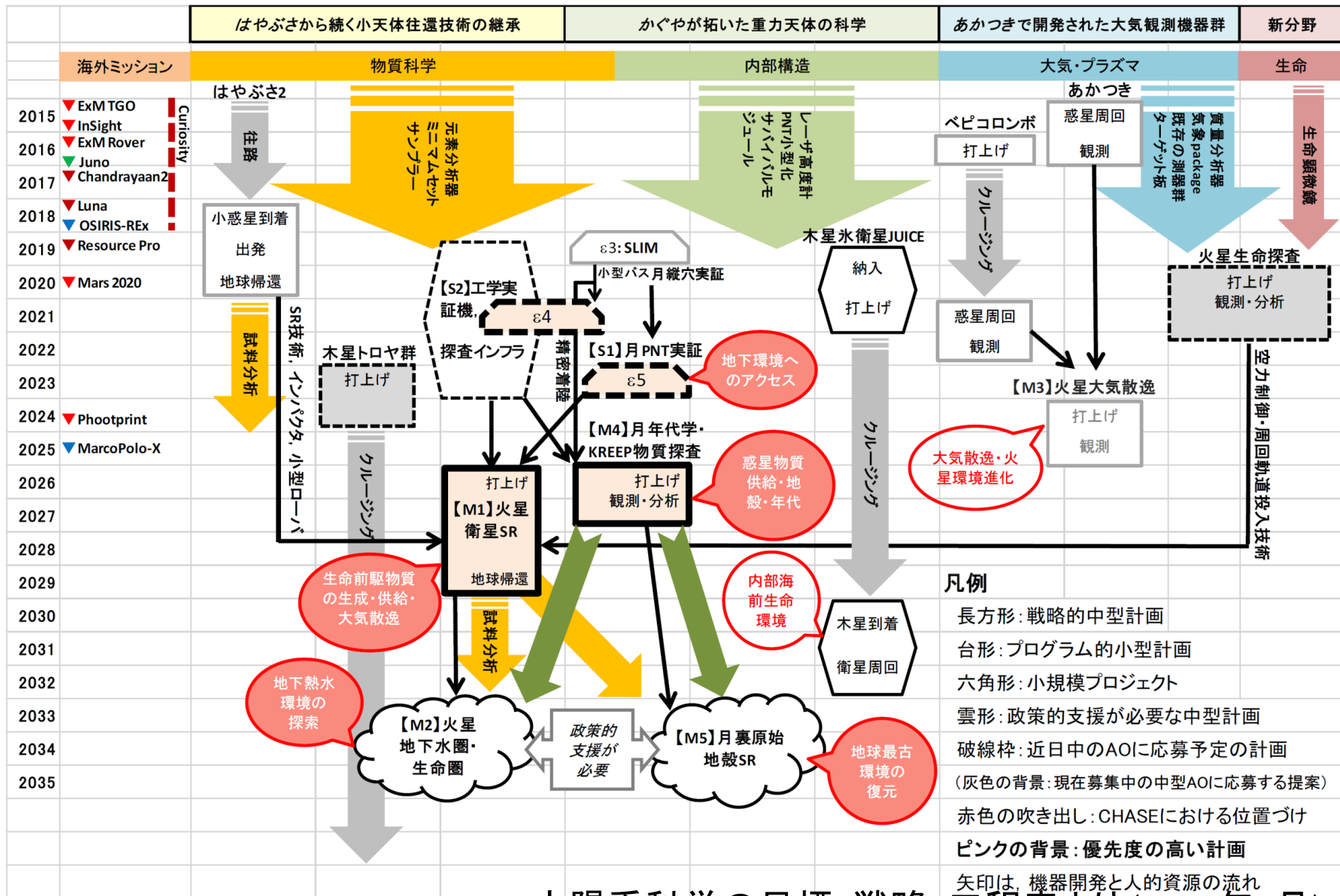
Viking 1号軌道船が1978年に撮像したフォボス

反射スペクトルから炭素質小惑星との近縁性が指摘された。またクレーター密度から、天体の年齢が太陽系年齢と同程度であることが示唆される。



2011年に打ち上げられたロシアのフォボス探査機Phobos-Gruntは打ち上げ直後の不具合により地球脱出に失敗。現時点で、再打ち上げの見込みはたっていない。

太陽系科学の工程表案



凡例

- 長方形: 戦略的中型計画
- 台形: プログラム的小型計画
- 六角形: 小規模プロジェクト
- 雲形: 政策的支援が必要な中型計画
- 破線枠: 近日中のAOに応募予定の計画
- (灰色の背景: 現在募集中の中型AOに応募する提案)
- 赤色の吹き出し: CHASEにおける位置づけ
- ピンクの背景: 優先度の高い計画
- 矢印は、機器開発と人的資源の流れ

太陽系科学の目標・戦略・工程表より (2015年2月)

ミッション科学検討

2015年4月発足 定例会(週一)

全体計画立案チーム長		川勝(工), 藤本(理)	
科学検討チーム	形成論	玄田・関根	各サブテーマ 検討 関連研究者の 協力
	サンプル	橘・臼井・澤田	
	リモセン	亀田・中村智	
	内部構造	宮本・松本	
	着陸サイエンス	坂谷・川村・千秋	
	火星・火星圏	今村・寺田	
	とりまとめ	尾崎・早川	理学-システム 間すり合わせ 成案作成
	座長・事務局	倉本・渡邊 和田・小川和	

大学連携拠点
CPS

WS・多地点会議環境・
資料Web公開

コミュニティ

宇宙科学研究所 所長

プロジェクトマネージャ
(川勝)

主任研究者
(倉本)

サブプロジェクトマネージャ
(大嶽)

計画管理
(馬場(肇))

サイエンスW
サイエンスボード
(代表 倉本)
機器PI,
分野横断研究者, 他

システム担当
(今田)

地上系担当
(IBD)

ミッション担当
(大嶽)

着地運用WT (宮本・今田)

サイエンス運用WT (中村・池田)

サンプル分析WT

形成論
SST

形状モデル
SST

表層科学
SST

内部構造
SST

システム系

石村・嶋田・戸梶

運用

池田・尾川・
三桝・井上・
大田

熱制御系

小川

構造系

馬場(満)

通信系

戸田・中台

推進系

丸・池田
小林

電源系

中村

ミッション系

尾崎・館野・白石
草野

サンプラ

澤田・加藤・
佐藤・吉川

カプセル

山田・下田

WAM/TL (亀田)

MacrOmega (Bibring)

MEGANE (Lawrence)

LIDAR (千秋)

MSA (横田)

CMDM (小林)

運用担当
(IBD)

キュレーション担当
(IBD)

※ 点線は活動準備

MMXの大目的

火星衛星の起源論に決着をつける

- 近接観測とサンプル分析

地球型惑星の形成に至る、初期太陽系過程を解明する

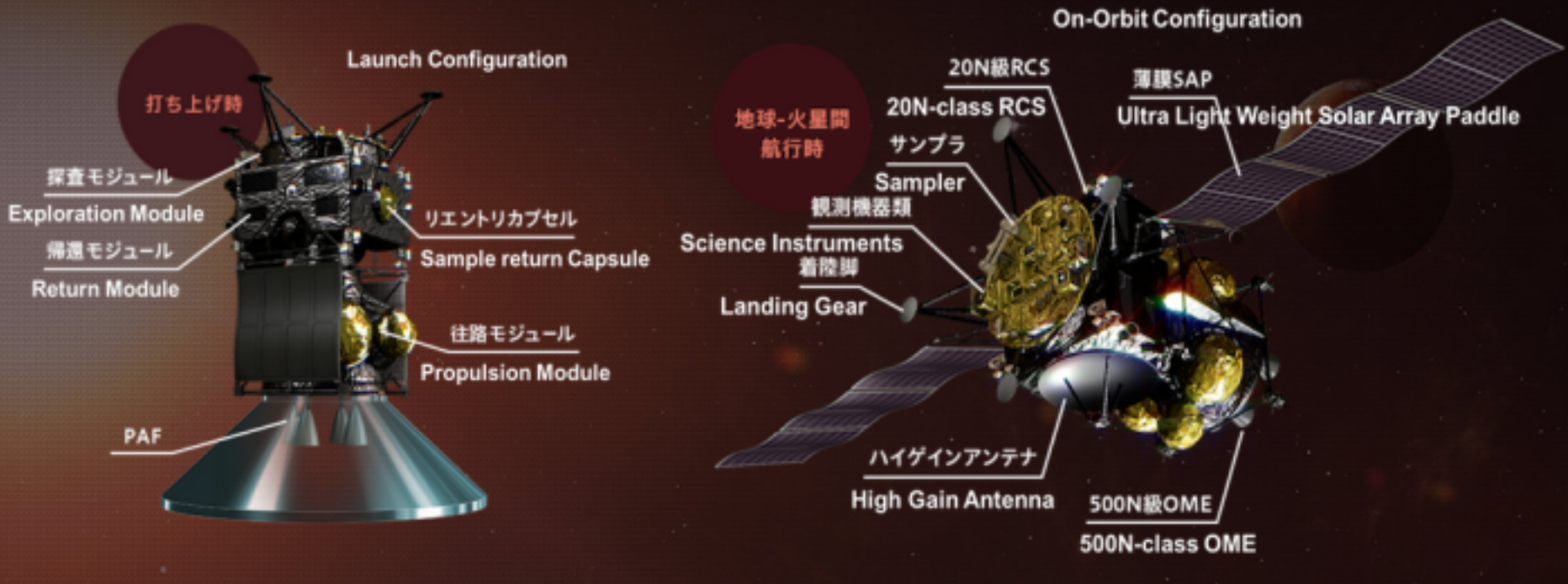
- 捕獲起源の場合：比較的低温下で保存された岩石惑星の材料物質を入手。初期太陽系における物質進化と輸送過程を制約
- 巨大衝突起源の場合：初期火星物質を入手。火星の初期分化状態を制約

火星および火星圏の進化プロセスを解明する

- フォボス・ダイモス表層の変質過程：クレーター形成、微小隕石・高エネルギー粒子の影響
- 火星表層環境の変遷：フォボス表層に混在する、火星由来の若い物質の分析
- 火星大気の動態：赤道軌道を活かした火星大気の運動と水輸送のモニタ、表層リザーバー間の水交換、宇宙空間へ逸失過程

探査機

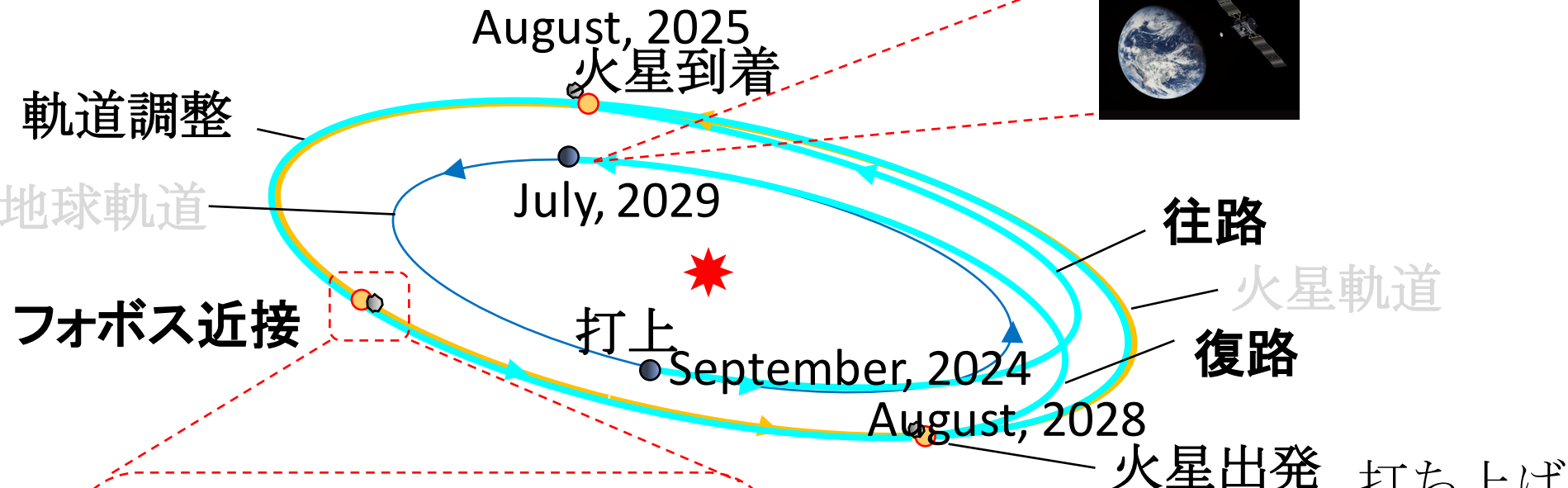
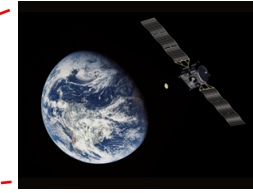
- 往路モジュール、探査モジュール、帰還モジュールの分割構成
- 高推力化学推進
- 5年往還を実現



探査機デザインの一例

ミッションプロファイル

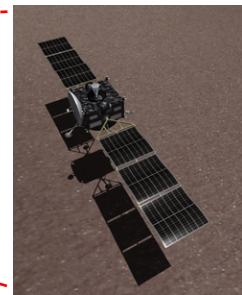
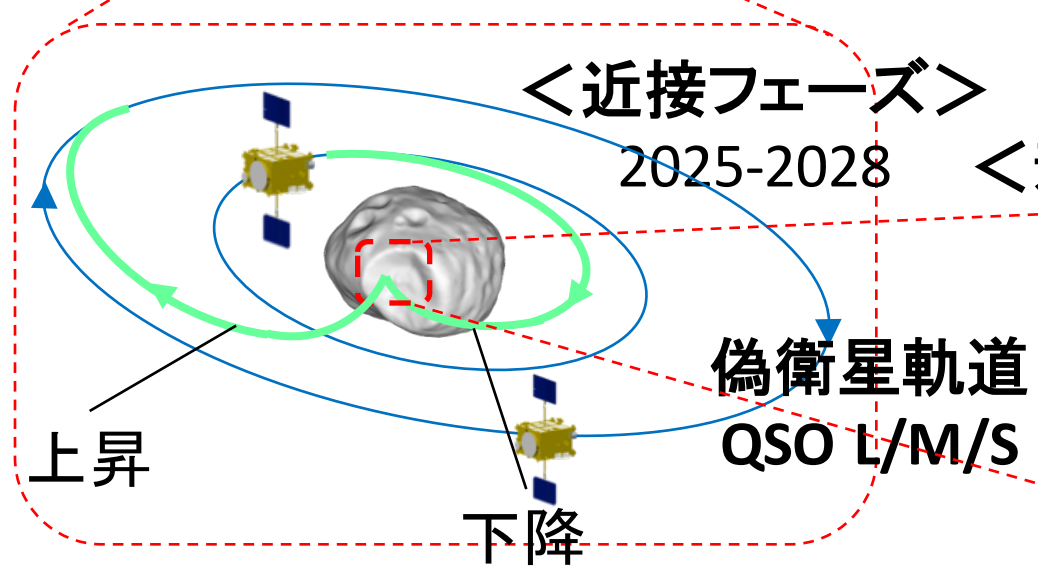
<地球帰還>



<近接フェーズ>

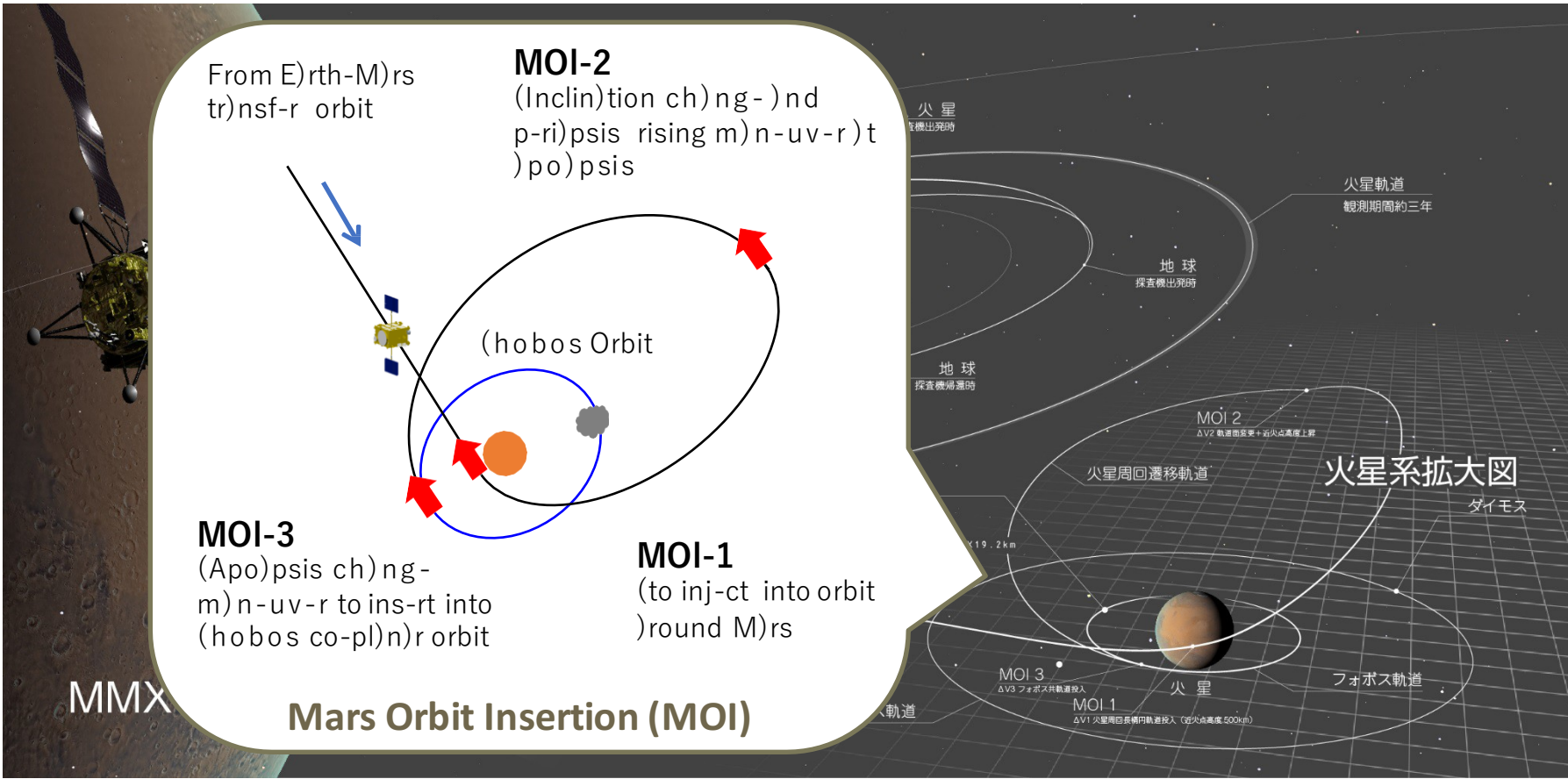
2025-2028

<着陸と採取>



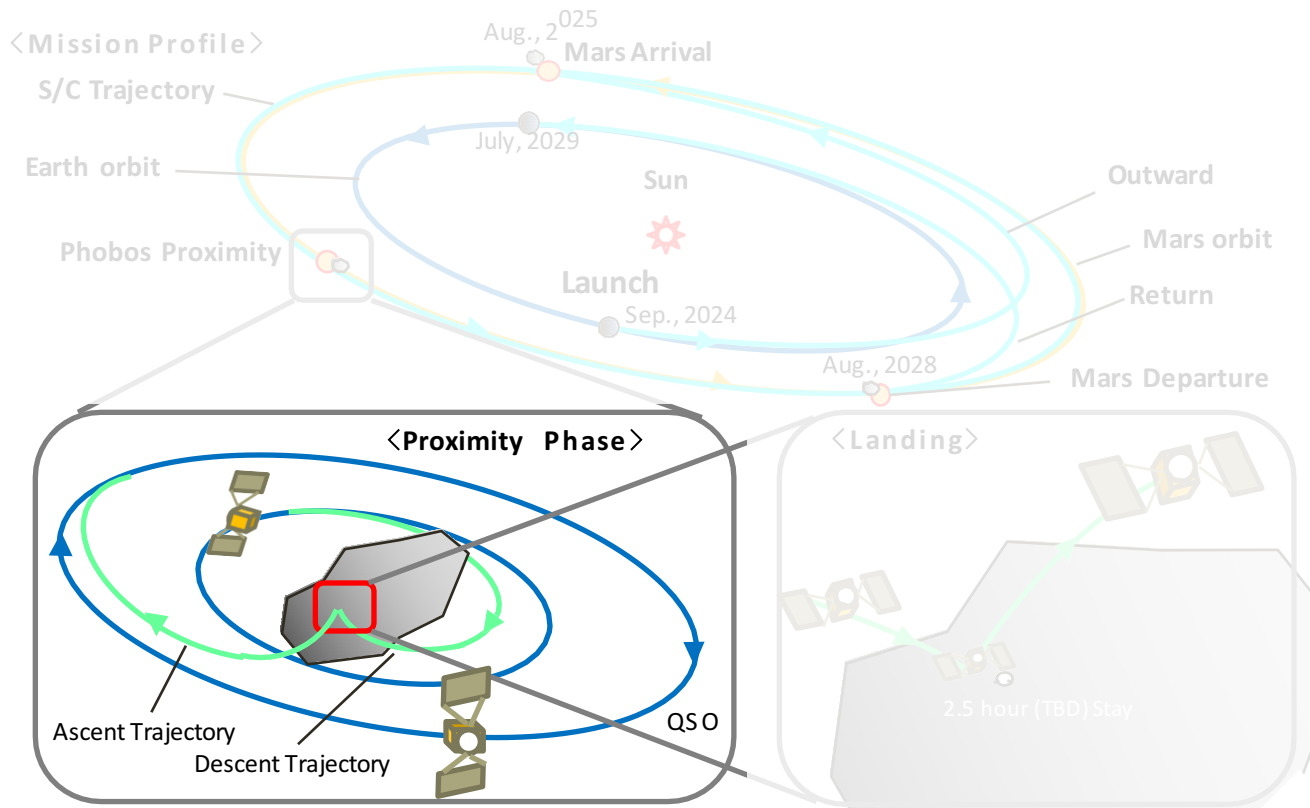
MOI(MOE)

- After reaching Mars Sphere, MOI 1-3 are carried out to insert into an orbit around Mars
- Total ΔV required through the mission is estimated to be about 5km/s



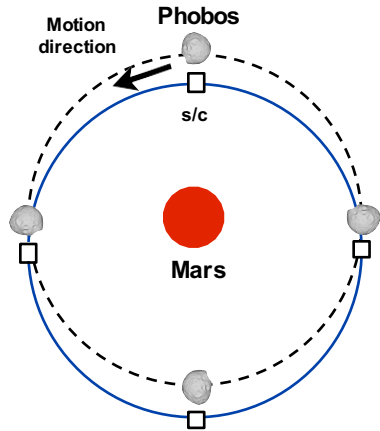
Mission Profile

- Sample return mission from Mars Moon in round-trip transfer orbit
- **Outward (1year) / Return (1year):**
 - ✓ Launch & Interplanetary trajectories,
 - ✓ Mars Orbit Insertion (MOI) and Mars Orbit Escape (MOE) to/from Mars sphere
- **Proximity around Martian Moons (3 years):**
 - ✓ Orbit around Phobos so-called “QSO” for remote sensing
 - ✓ Descent/Ascent and Landing for sampling operation

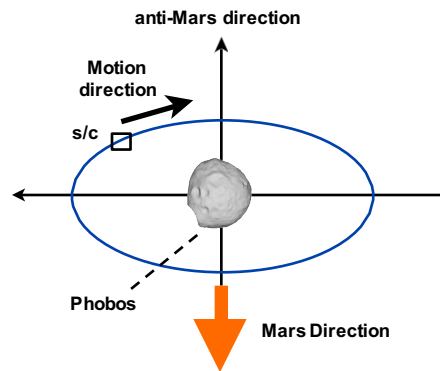


Proximity Operation, QSO

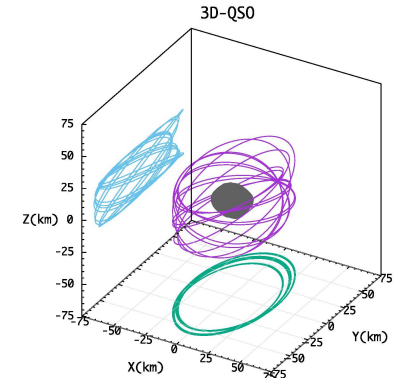
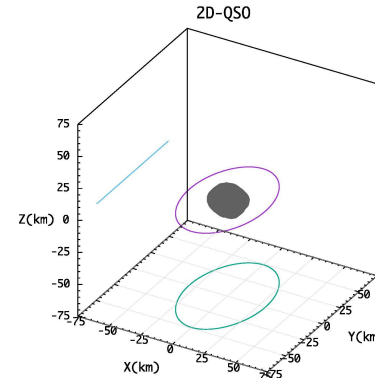
- In operation on Mars Moons proximity, remote sensing such as the surface observation is conducted on QSO as a home position.



Mars-centered inertial frame



Phobos-centered rotating frame

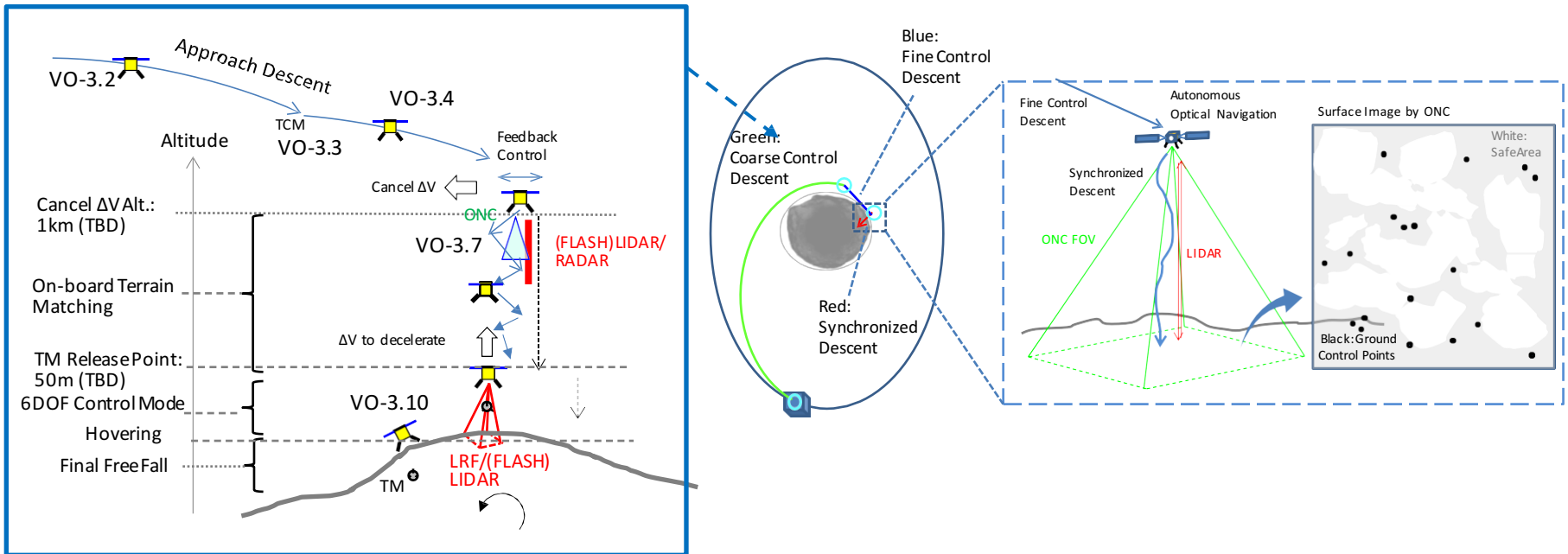


Example Trajectories of 2D-QSO and 3D-QSO

- S/C orbits in parallel with the Phobos when viewed in Mars-centered inertial frame.
- But S/C appears to orbit around Phobos when viewed in Phobos-centered rotating frame (Quasi-satellite orbit).
- Planning 3D-QSO with an inclination to Phobos rotation plane

Proximity Operation, Descent and Landing

- In proximity operation around Phobos, descent, landing and sample retrieval are the most challenging and risky operations in this mission.

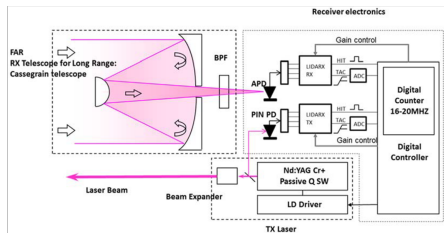


- In descending operation, reaching from low altitude QSO until the lower altitude in a ballistic flight
- ΔV is implemented to cancel the orbital motion under conducting the autonomous image navigation.
- After that S/C descends vertically and lands to the target point.

Nominal Science Instruments

LIDAR

To determine the Phobos shape and topography
Range : 100m-100km, **Range res** : 0.5m
Laser Power : >20mJ, **FOV of Tx** : <0.5mrad
FOV of Rx : <1mrad, **Repetition rate** : 1Hz



Mass Spectrum Analyzer

To determine the mass and energy of ions from Phobos, Mars and Sun

Observable ions :

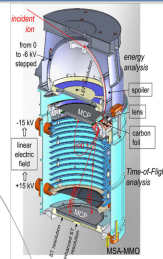
- Water related (O^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+)
- Solar wind (H^+ , He^{2+}). Escaping from Mars atm. (O^+ , O_2^+ , N^+ , Ar^+), Reflected or sputtered from satellite (H^+ , He^{2+} , O^+ , Mg^+ , Si^+ , O_2^+ , Fe^+)

Observable ion energy : 10eV/q-30keV/q

Energy res. : $\Delta E/E \sim 20\%$

Ion mass : 1-60amu, **Mass res.** : $M/\Delta M \sim 100$

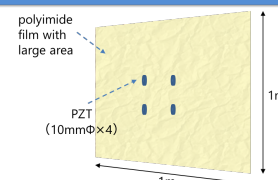
MSA equipped on Bepi Colombo MMO. Mass resolution will be improved for MMX.



Circum-Martian Dust Monitor

To detect and monitor
 • Circum-martian dust ring
 • Interplanetary dust
 • Interstellar dust

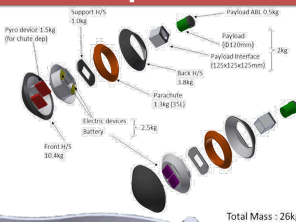
Detector : polyimide film, PZT piezoelectric sensor
Detectable dust size : > 10-20 μm
Dust velocity : >0.16 km/s



PZT's receive sound wave excited by impacts on the film

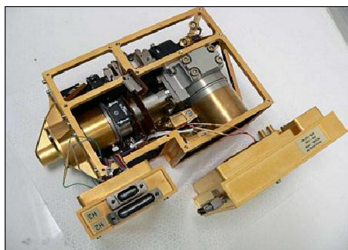
Sample Return Capsule

Enlarged from the Hayabusa 2 capsule system to carry larger mass of samples

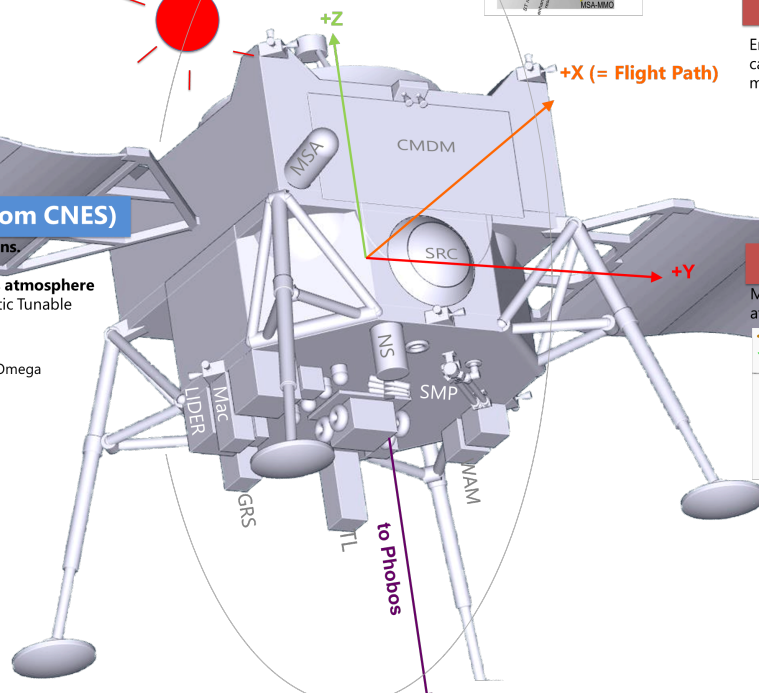


MacrOmega: Near IR Imaging Spectrometer (from CNES)

Global mapping of minerals, molecular H_2O and organics of the martian moons.
 To characterize the material distribution around the sampling sites
 To monitor the transport of H_2O vapor, H_2O/CO_2 clouds, and dust in the Mars atmosphere
Detector : HgCdTe 2D array (256x256px.) **Spectrometry** : AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) **FOV** : 6°, **Wavelength** : 0.9-3.6 μm , **Res** : <20m @H=20km

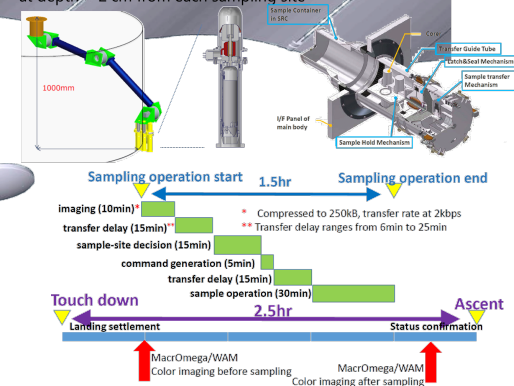


MacrOmega is based on MicrOmega of Hayabusa 2



Sampling System

Manipulator and corer system for acquiring regolith sample > 10g including at depth > 2 cm from each sampling site



MEGANE: Gamma ray and Neutron Spectrometer (from NASA)

To determine elemental abundance beneath the surface of the martian satellites

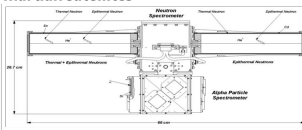
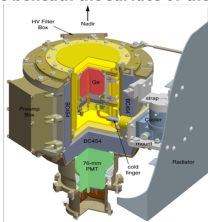
Observable elements : H, O, Na, Mg, Si, K, Cl, Ca, Fe, Th, U, etc.

Gamma ray spectrometer

Detector : Purified Ge
Energy range : 0.15-10MeV
Energy res : 3.6keV @1454keV

Neutron Spectrometer

Detector : 3He proportional counter (thermal and epithermal components), B doped plastic scintillator (fast comp.)

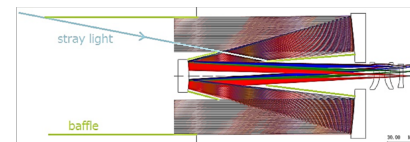


MEGANE is based on the gamma ray spectrometer of MESSENGER (left) and the neutron spectrometer of Lunar Prospector (right).

Telescope Camera

To determine the global topography and surface structure of the martian moons
 To characterize the topography around the sampling sites

FOV : $1.1^\circ \times 0.82^\circ$, Φ : 110mm, **FL** : 950mm
Res : 24cm @H=20km



Wide Angle Multiband Camera

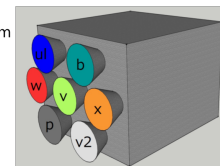
Global mapping of hydrated minerals, organics and the spectral heterogeneity of the martian moons

To characterize the material distribution around the sampling sites
 To monitor the entire Mars atmosphere with streams of cloud and dust



FOV : $66^\circ \times 53^\circ$, Φ : 2-4mm, **FL** : 13.75mm
Wavelength (width) : 390 (50), 480 (30), 550 (30), 650 (10), 700 (10), 860 (40), 950 (60) nm

Resolution :

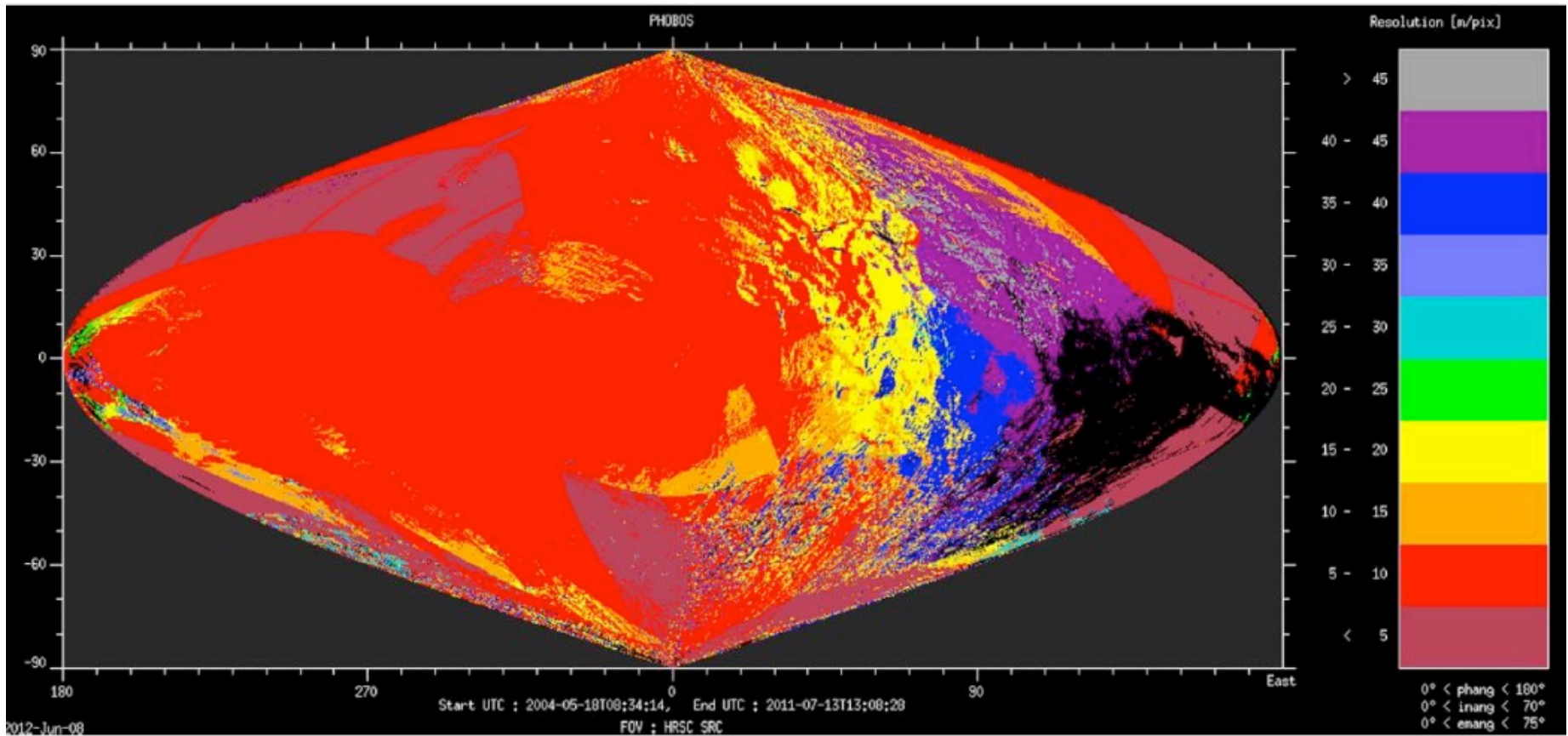
- 20m @H=20km
- 10cm for 100m square near LS
- 1mm for 1m square @ LS



搭載観測機器

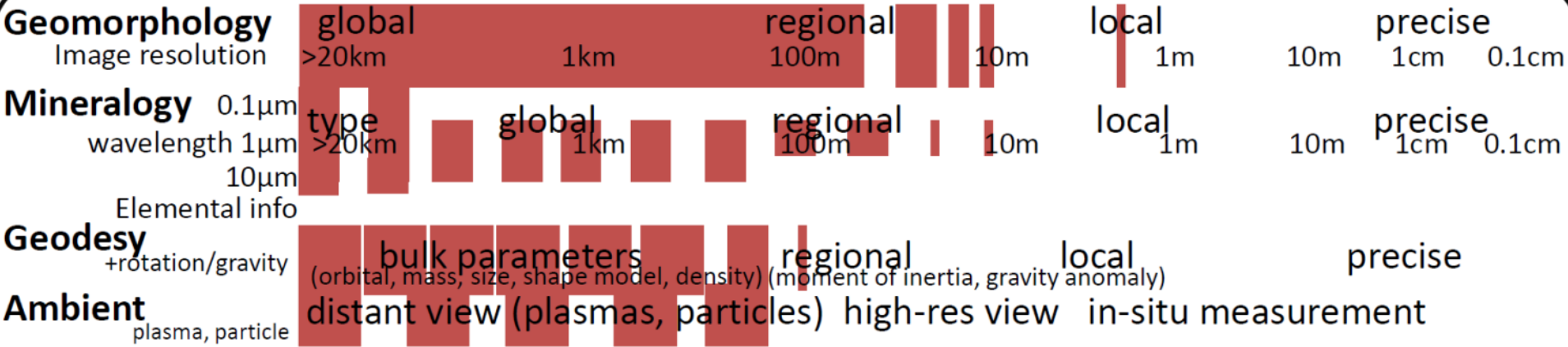
搭載機器名称	役割
<p>γ線中性子分光計 MEGANE  Mars moons Exploration with Gamma rays and Neutrons</p>	<p>表面鉱物・元素組成 水和鉱物, Fe/Si, Ca/Si, etc 水分子放出 (衛星起源の指標, 全球多角詳細調査によるサンプル 代表性の担保)</p>
<p>広角多色カメラ OROCHI Optical Raidometer composed of Chromatic Imagers</p>	
<p>近赤外分光イメージャ MacrOmega </p>	
<p>イオン質量分析計 MSA Mass Spectrum Analyzer</p>	
<p>望遠カメラ TENGOO Telescopic Nadir imager for Geomorphology</p>	<p>地形・形状・地質構造</p>
<p>レーザ測距計 LIDAR Light Detection and Ranging</p>	
<p>ダスト検出器 CMDM Circum-Martian Dust Monitor</p>	<p>ダストリング、微小隕石による風化作用</p>

- MARS EXPRESSのPhobos撮像カバレッジ

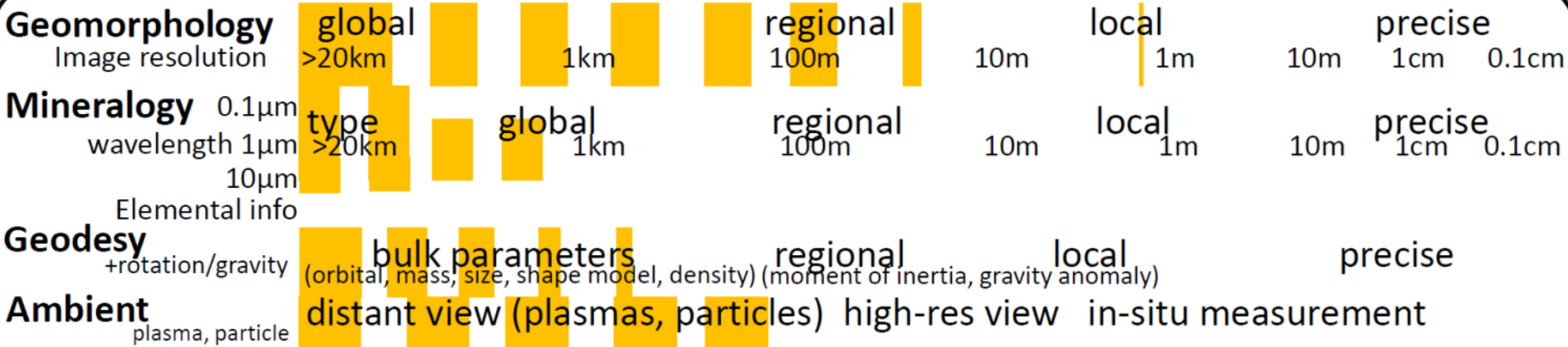


Conceptual summary of degree of previous explorations

Phobos

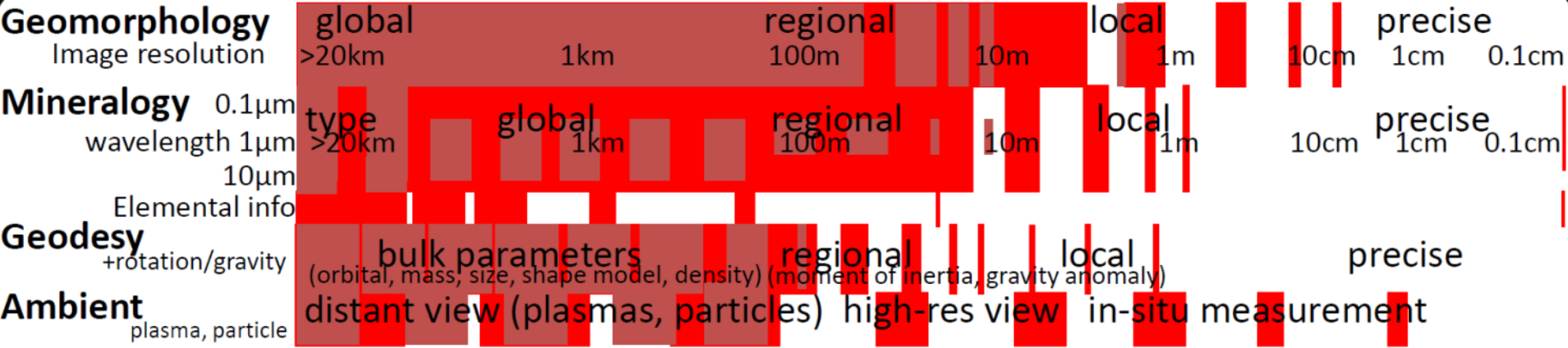


Deimos

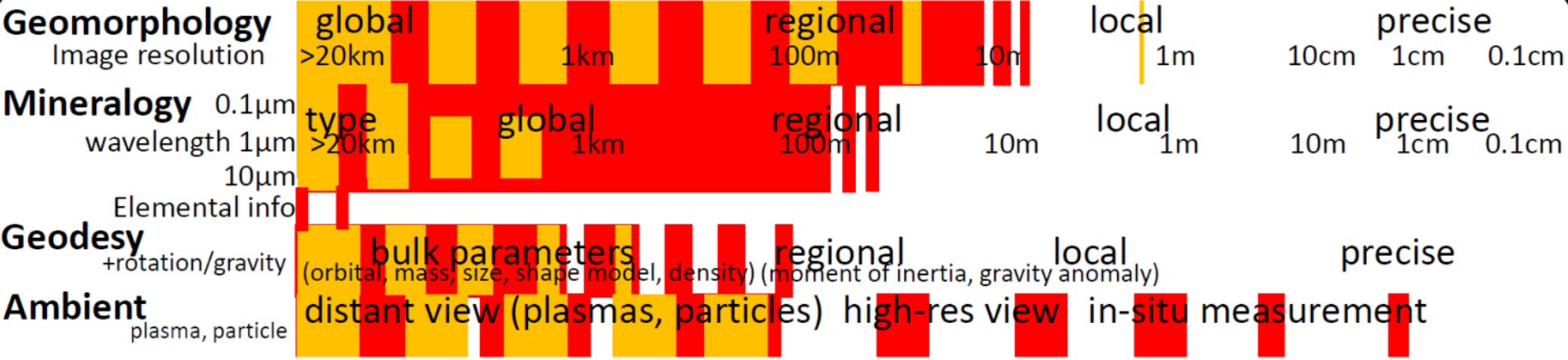


Conceptual summary of degree of previous explorations and improvements by this mission

Phobos

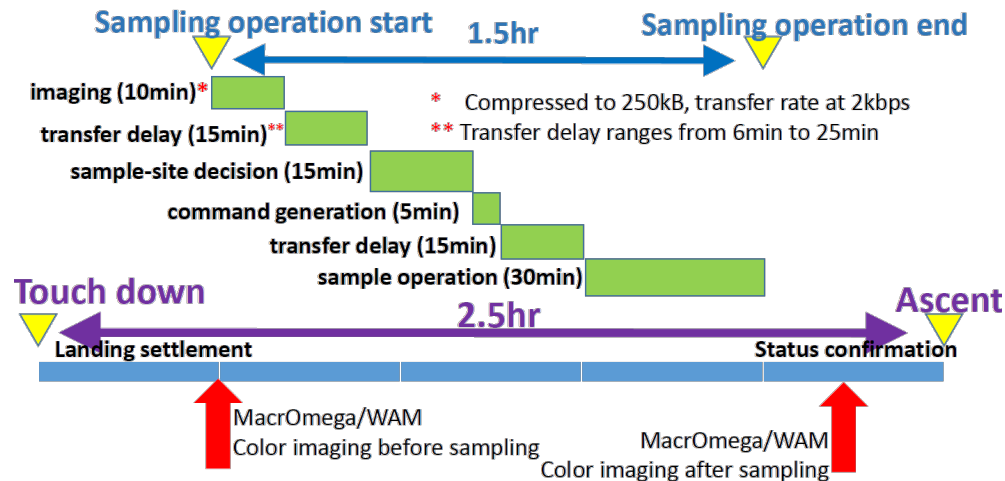
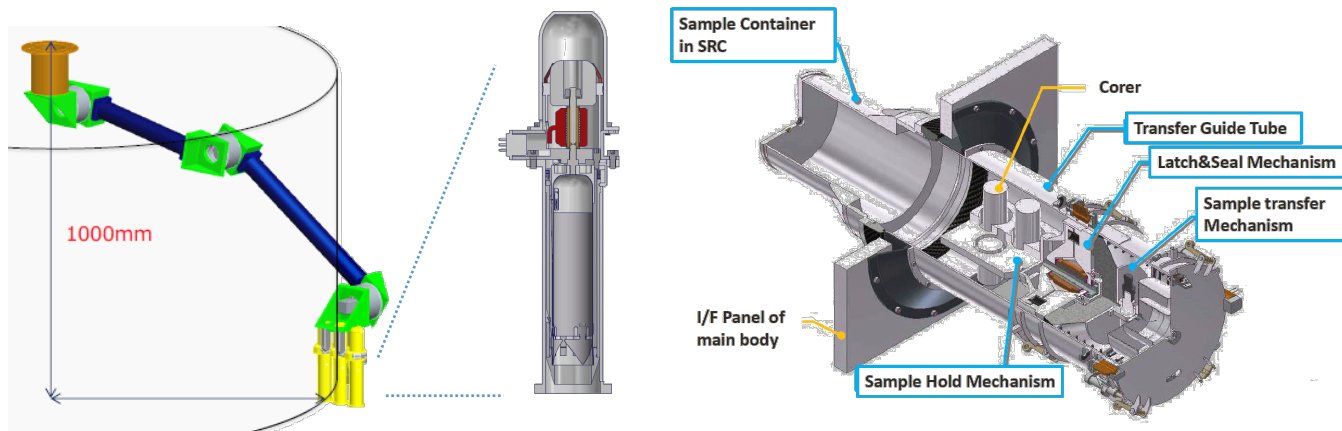


Deimos



着陸とサンプリング

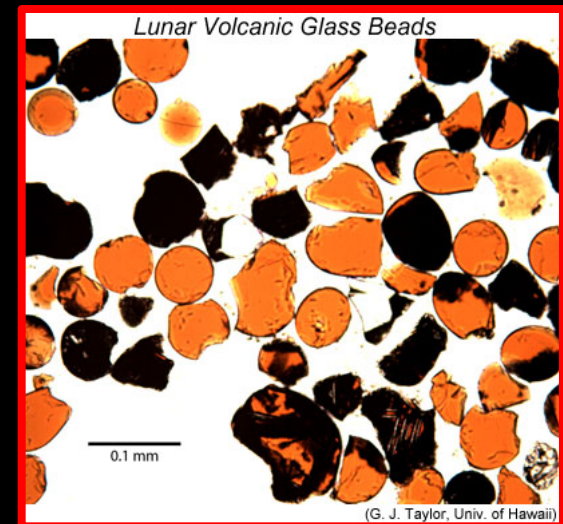
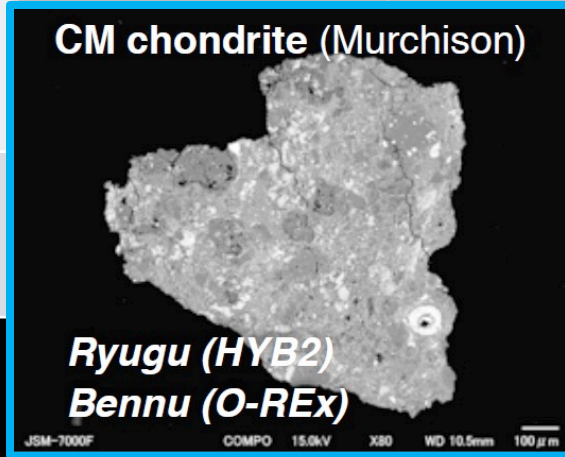
- (小)重力天体への着陸と大質量サンプリング
 - 空間スケール < 10 cm の凹凸の自動把握、安全着陸
 - 複数地点の2cm以深 > 10 g
 - マニピュレーターとコアラーを組み合わせたシステム
 - その場採取点選定



サンプル分析: 予想される特性

原始火星マンツルの 物理化学条件

	Captured asteroid	Giant impact
Petrology, mineralogy	Unequilibrated mixture of minerals, Hydrated phases, Organic matter	Glassy/igneous texture, High- <i>T</i> phases
Bulk chemistry	CM chondrite (Murchison)	or
Isotopes	Ryugu (HYB2) Bennu (O-REx)	between impactor



Taylor (2010)

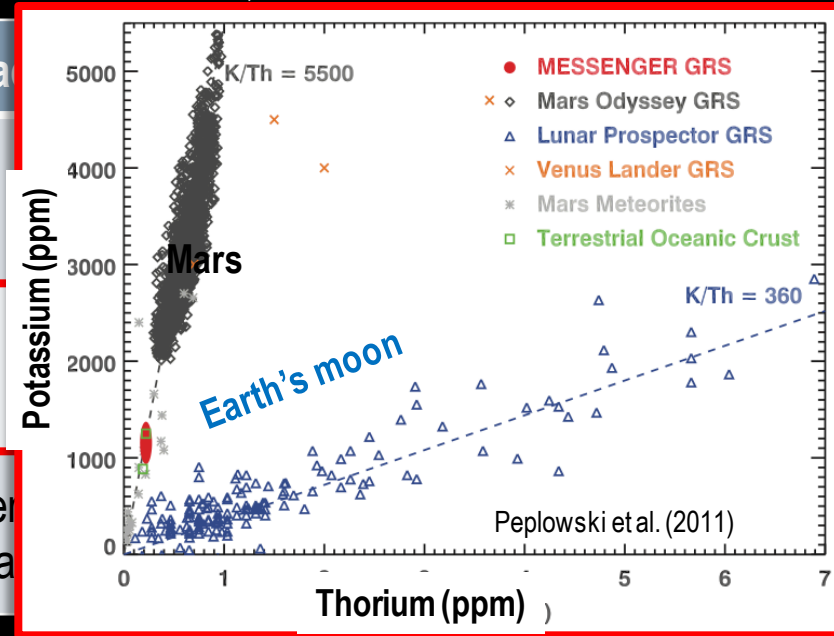
by remote sensing, in situ & sample analysis

形成条件、輸送履歴

サンプル分析: 予想される特性

	Captured asteroid	Giant impact
Petrology, mineralogy	Unequilibrated mixture of minerals, Hydrated phases, Organic matter	Glassy/igneous texture, High- <i>T</i> phases
Bulk chemistry	Chondritic, Volatile-rich	Volatile-poor Fe-poor
Isotopes	Primitive solar-system signature	Mixing between Mars and impactor

惑星と月のK, Th 相関

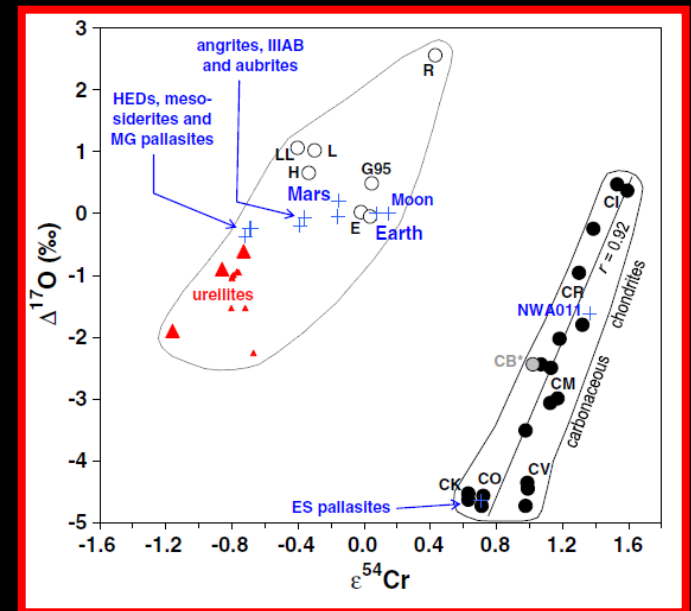


by remote sensing, in situ & sample analysis

サンプル分析: 予想される特性

	Captured asteroid	Giant impact
Petrology, mineralogy	Unequilibrated mixture of minerals, Hydrated phases, Organic matter	Glassy/igneous texture, High- T phases
Bulk chemistry	Chondritic, Volatile-rich	Volatile-poor, Fe-poor
Isotopes	Primitive solar-system signature	Mixing between Mars and impactor

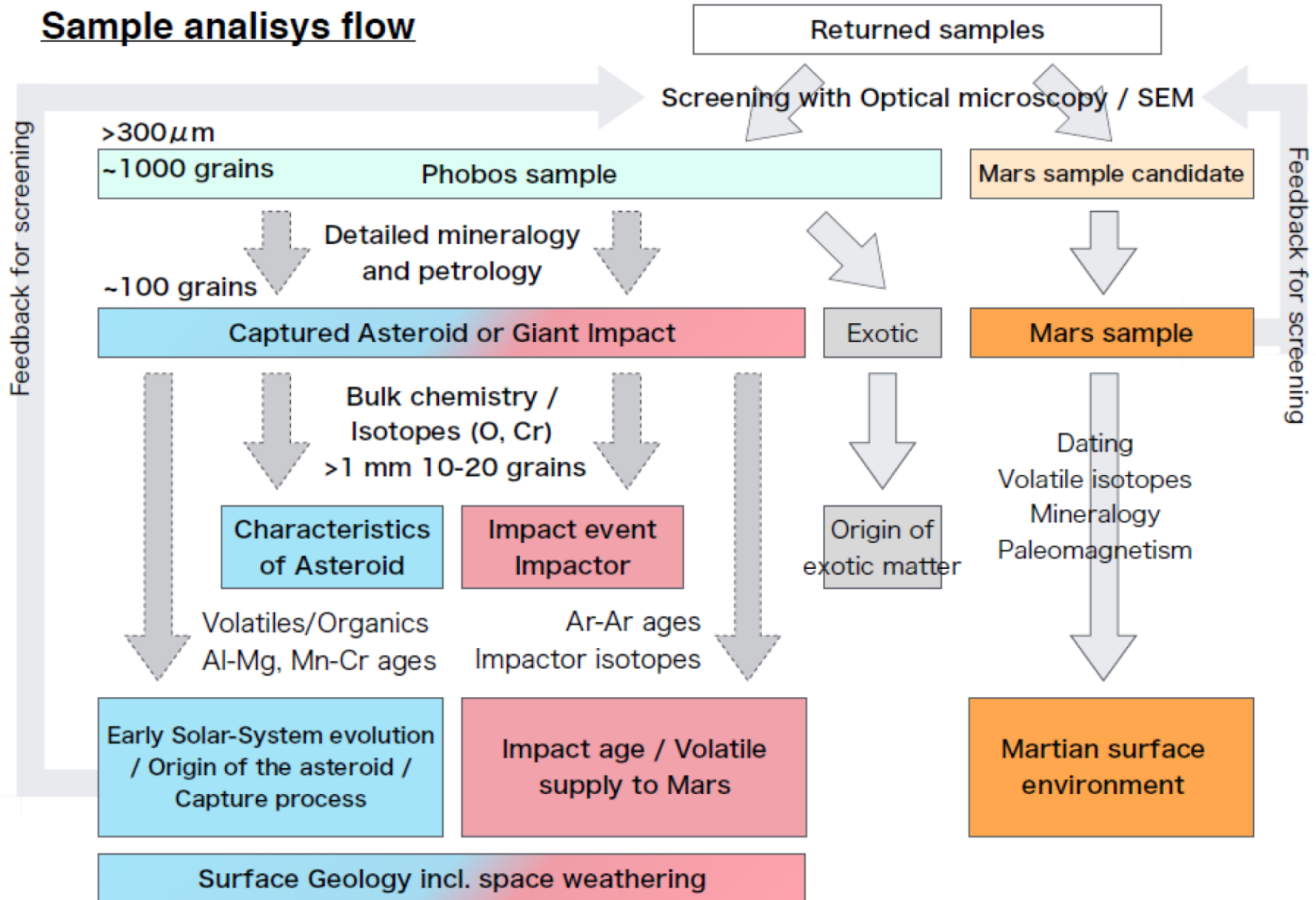
O, Cr 同位体

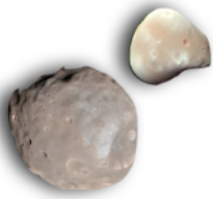


by sample analysis

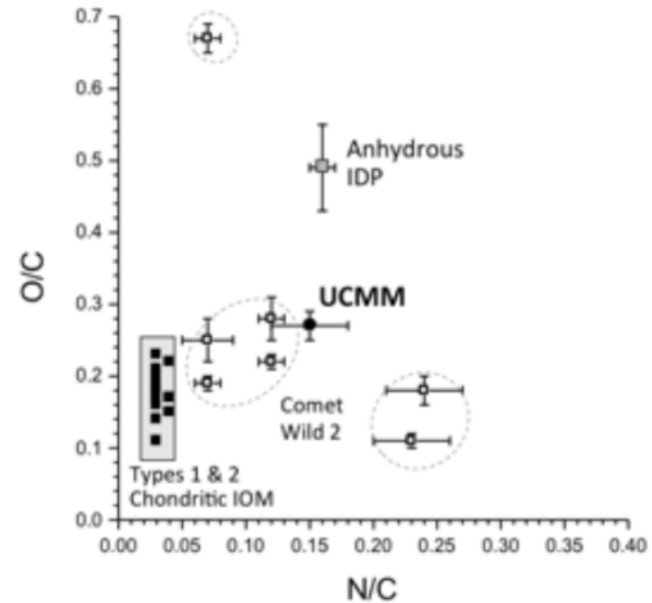
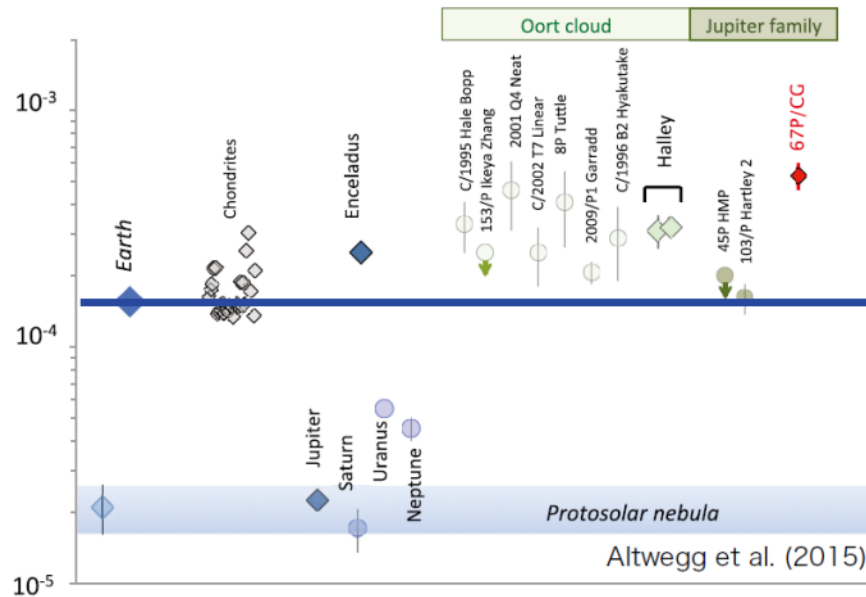
捕獲天体or衝突天体の対応隕石種と形成位置

Recovery of samples and initial analysis:

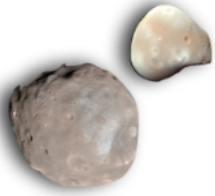




分析例 2) 水素同位体・有機物：水の起源



- ✓ 水素同位体 (D/H), 有機物化学組成：彗星的・小惑星的物質の区別
- 微小領域分析 (二次イオン質量分析計・放射光XANESなど) 適用可能



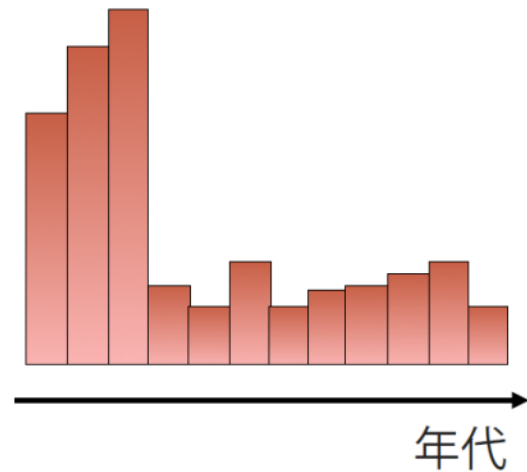
分析例 3) Ar-Ar年代：捕獲時期・衝突時期

✓ (1) 捕獲時期 (2) 巨大衝突年代

試料の年代分布ヒストグラムから (1) 捕獲時期の推定, (2) 衝突時期を特定

Ar-Ar 年代分析 $^{40}\text{Ar} > 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{g}$

- 炭素質コンドライト相当試料
K 400 ppm : 4.6 Gy で生成される $^{40}\text{Ar} 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$
→ $> 10 \mu\text{g}$ サンプル (200 μm)
- 月バルク相当試料
K 100 ppm → 40 μg サンプル (350 μm)



おわりに

- 火星と火星圏は、ハビタブル惑星の形成と進化の解明において重要な探査対象
- MMXは、わが国のサンプルリターン探査の優位性を生かし、火星衛星の起源、火星の形成と進化に迫る
- 来年度のプロジェクト化を目指し、研究開発を推進

