

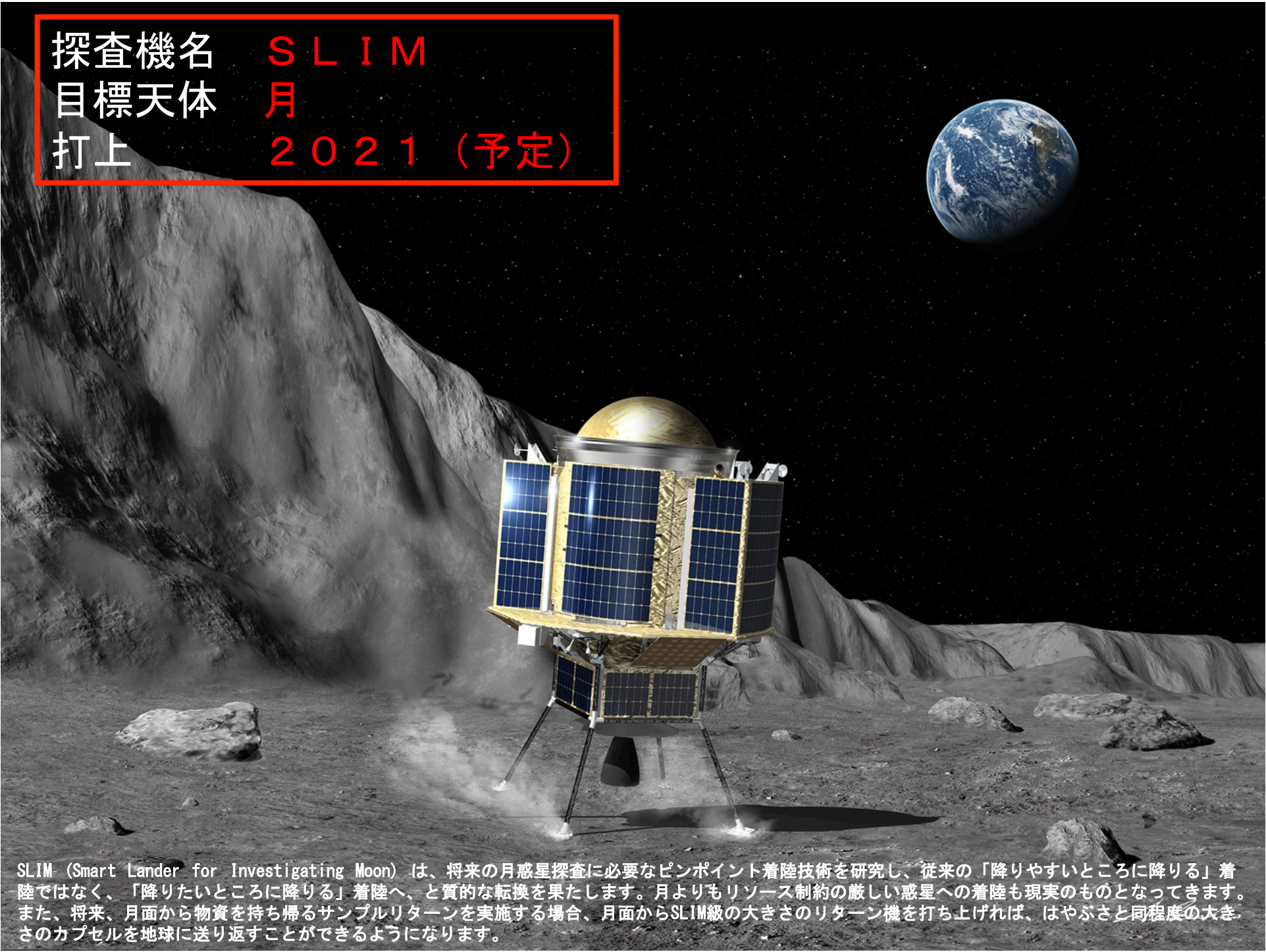
イノベーションの発露としての JAXA「深宇宙探査船団」計画

平成31（2019）年1月31日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

理事・宇宙科学研究所長 國中 均

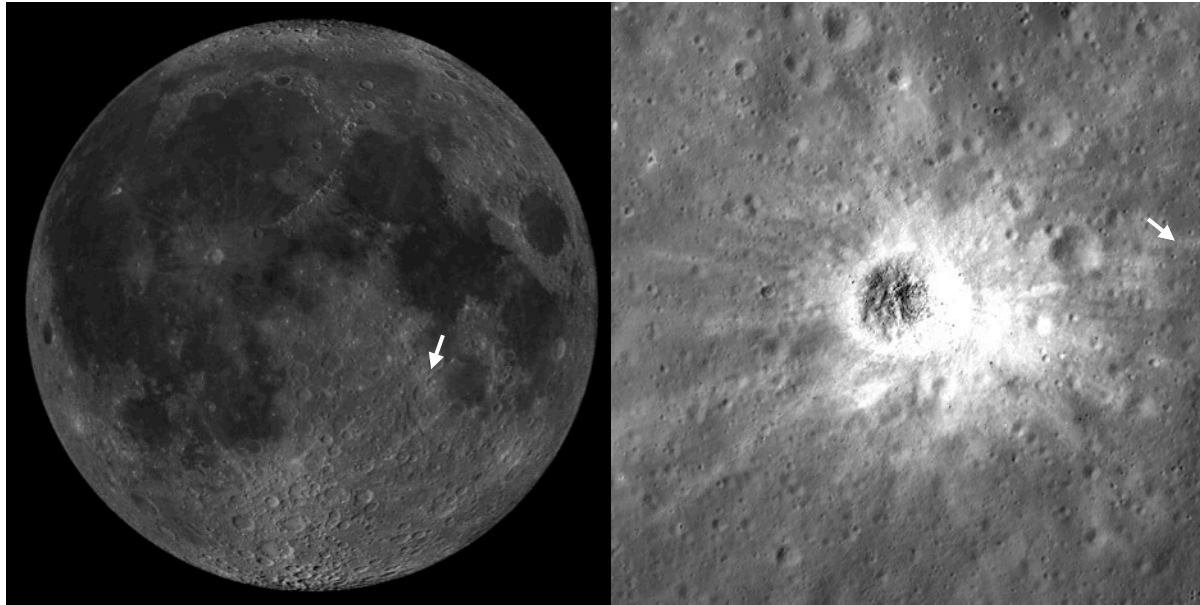
探査機名	SLIM
目標天体	月
打上	2021 (予定)



SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) は、将来の月惑星探査に必要なピンポイント着陸技術を研究し、従来の「降りやすいところに降りる」着陸ではなく、「降りたいところに降りる」着陸へ、と質的な転換を果たします。月よりもリソース制約の厳しい惑星への着陸も現実のものとなってきます。また、将来、月面から物資を持ち帰るサンプルリターンを実施する場合、月面からSLIM級の大きさのリターン機を打ち上げれば、はやぶさと同程度の大きさのカプセルを地球に送り返すことができるようになります。

SLIM着陸目標地点の選定結果

- 月マントル物質の可能性があるカンラン石が露出している地域は、「かぐや」により特定されている。
- 月表側にあるこのような地域の中から、斜度・地形等、着陸性の観点から選定を行い、SLIM着陸目標地点を選定した。
- SLIMがこの地点へピンポイント着陸して観測を行うことで、巨大衝突仮説の検証など月の起源と進化過程の解明に貢献できる。

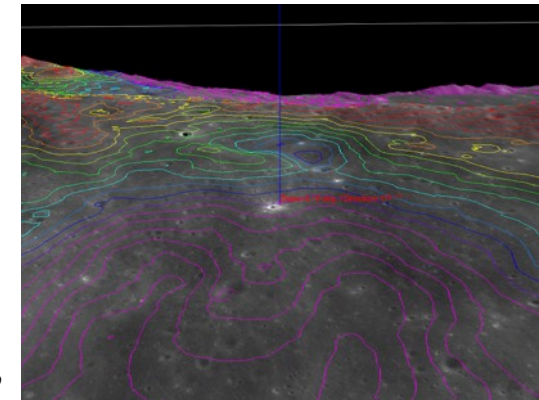


SLIM着陸地点
(左: 月全体における位置、右: 拡大図)

出典: NASA/LRO

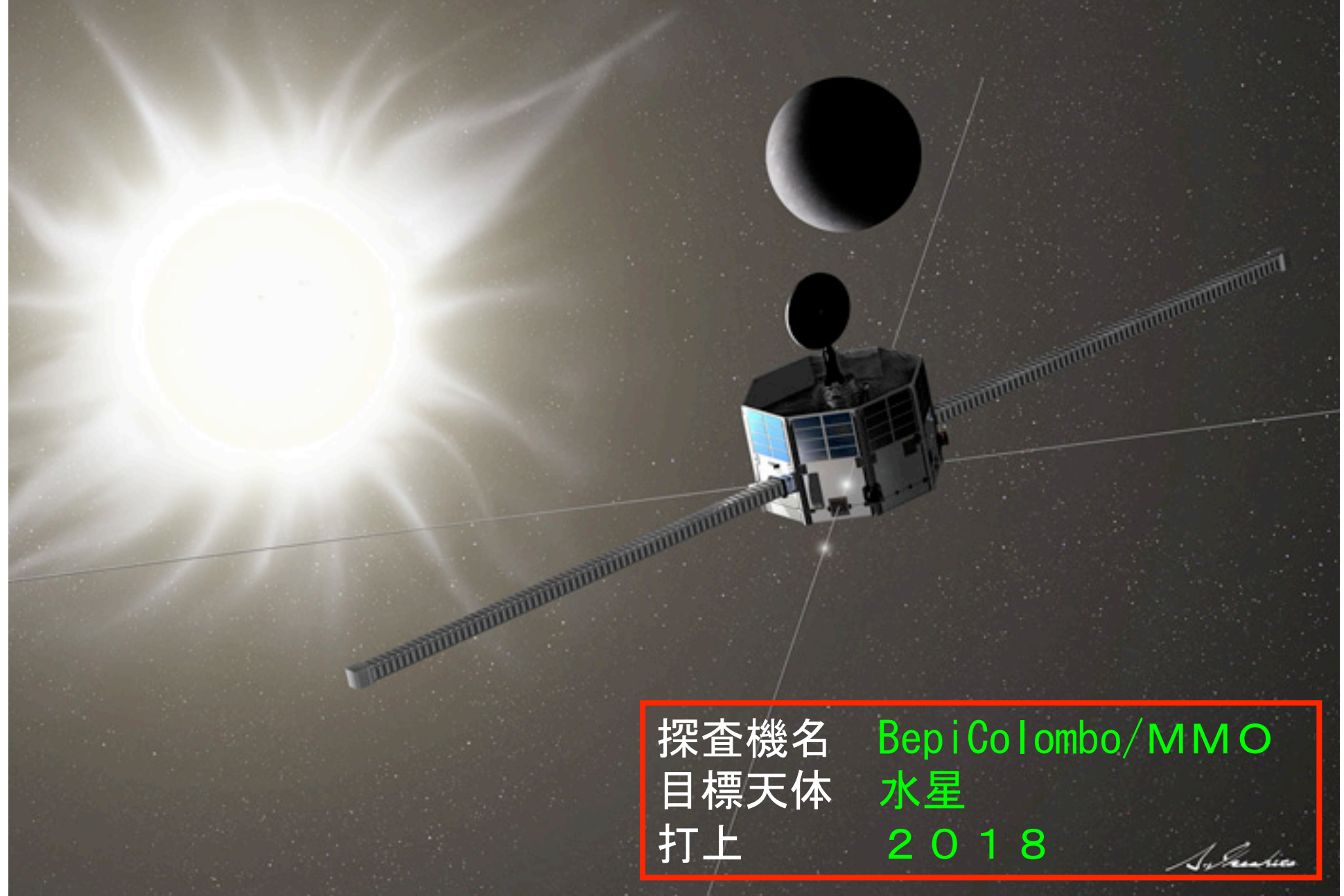
選定された着陸目標地点は、**“神酒の海”**と呼ばれる低緯度地域に存在する。斜度が15deg程度以下で概ね一定の地点である。

南緯: 13.3degS / 東経: 25.2degE



出典: JAXA/かぐや

マリナー10号の探査によって、水星にも磁場と磁気圏活動があることが発見されました。「BepiColombo」は、この惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測し、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」、「地球型惑星の起源と進化」について明らかにします。



探査機名	BepiColombo/MMO
目標天体	水星
打上	2018

BepiColombo mission plan

Launch: Oct.
2018

Earth swing-by x 1
Venus swing-by x 2
Mercury swing-by x 6

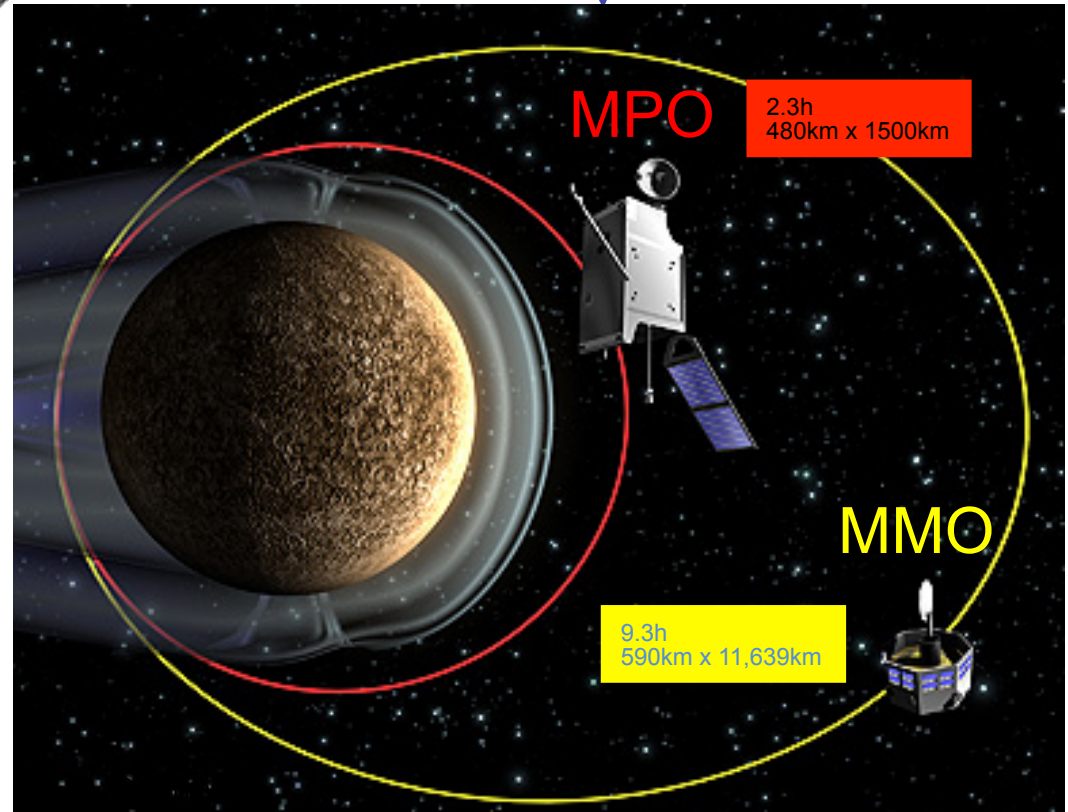
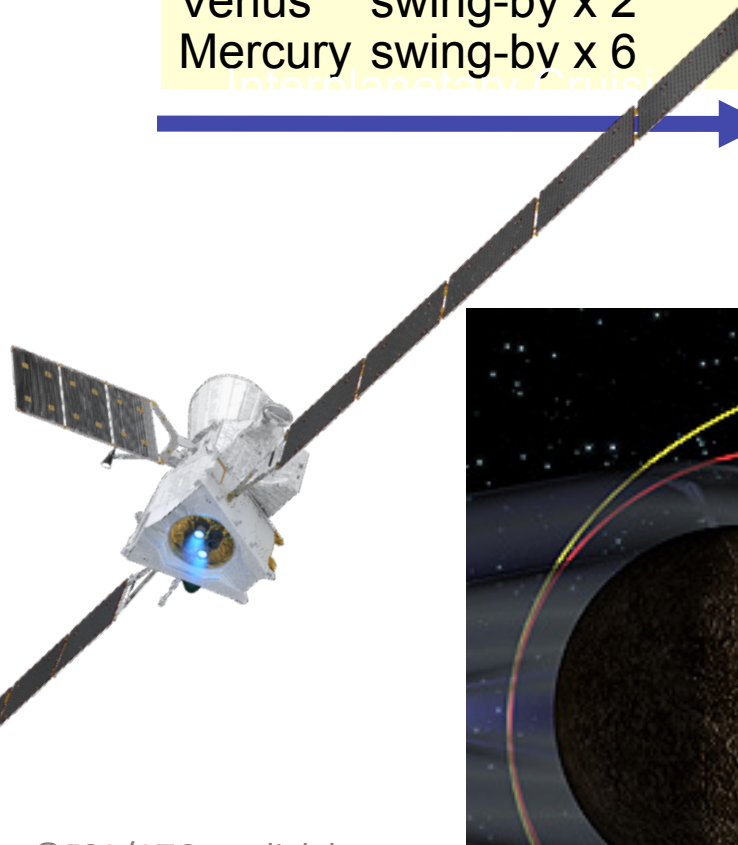
Arrival: Dec. 2025



Ariane-5:
MPO+MMO

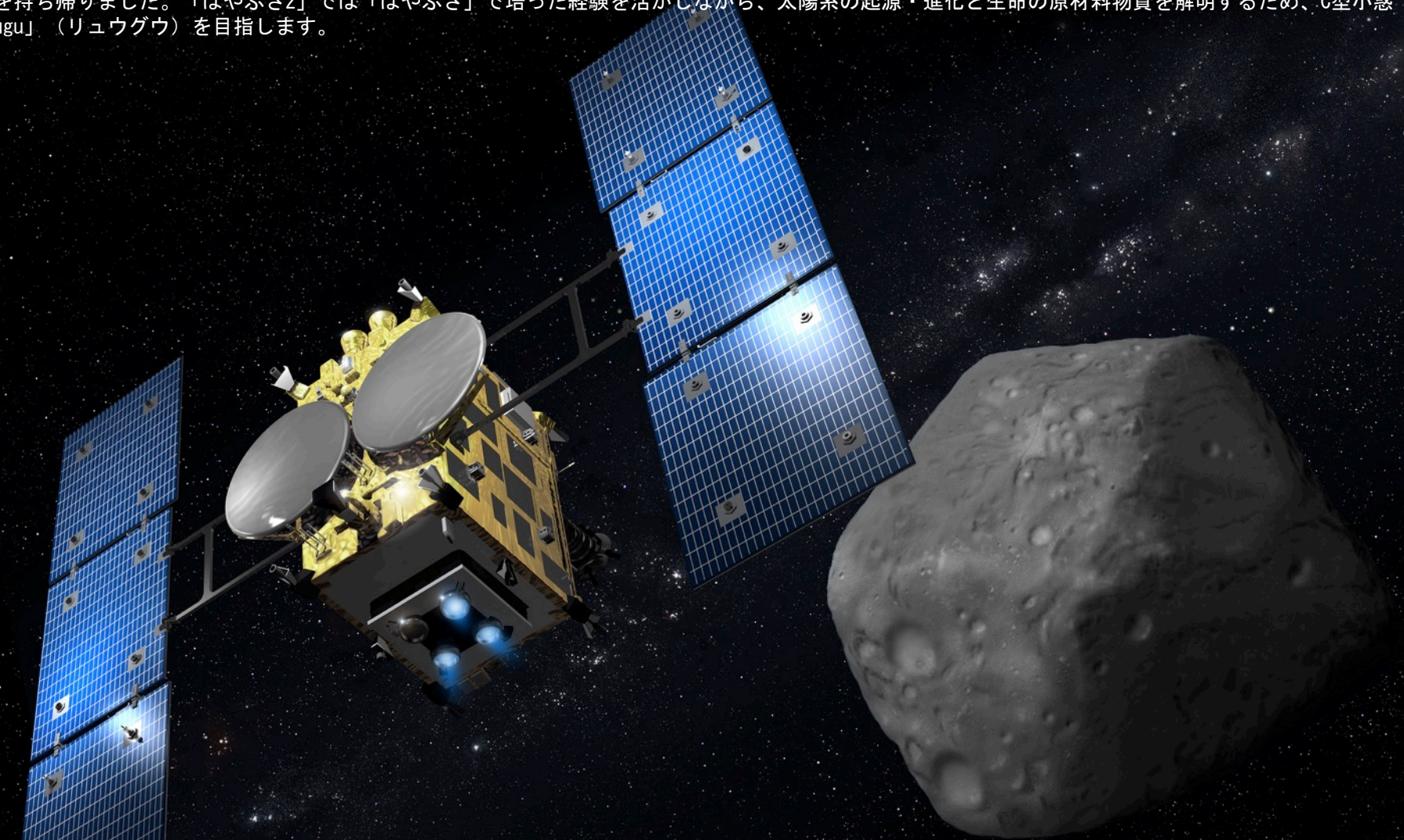
©ESA/ATG medialab

Yellow:
Red:

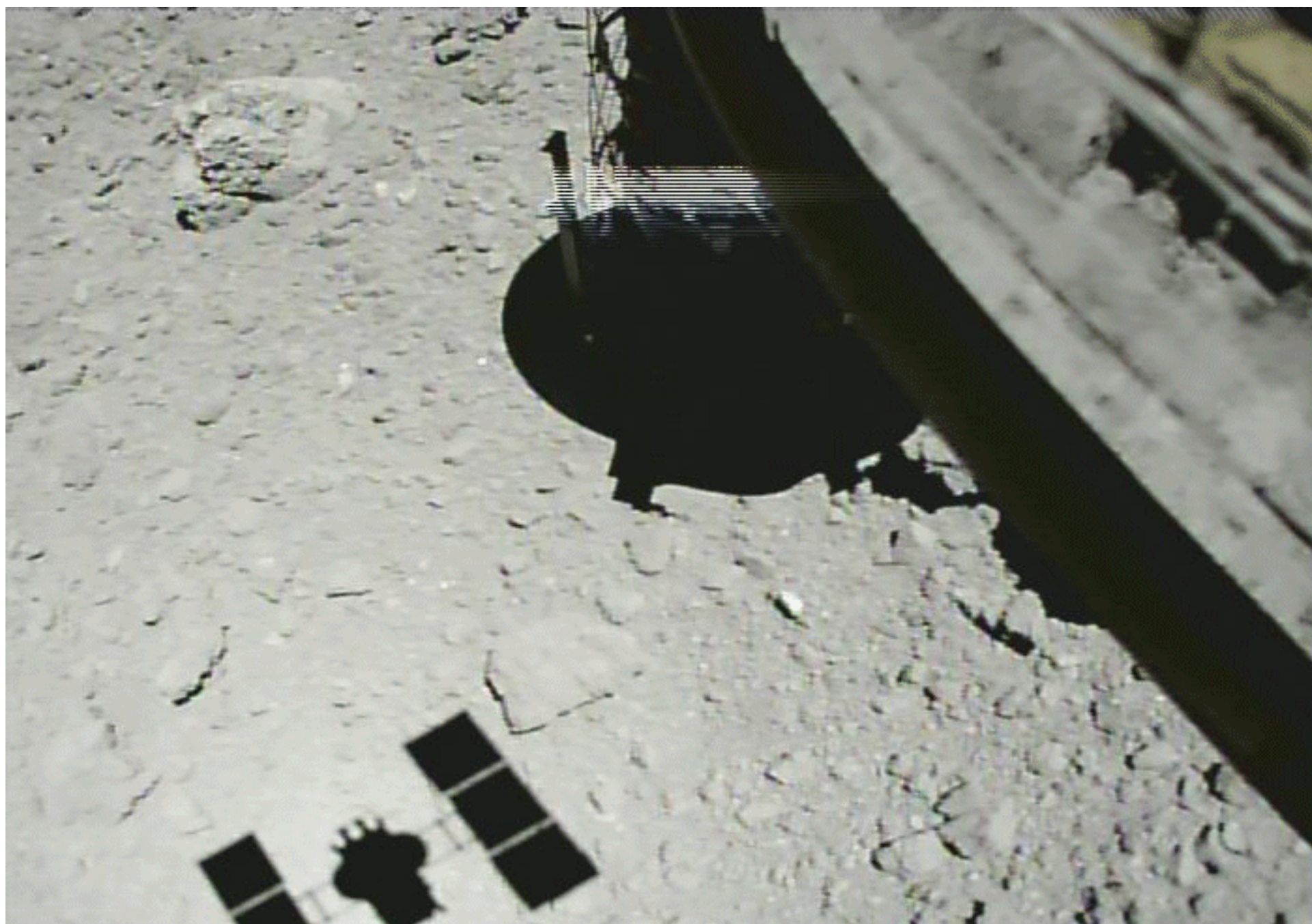


Observation: 1 Earth year (+Extension)

「はやぶさ」では、イオンエンジンによる新しい航行方法を確立しながら、太陽系の起源の解明に繋がる手がかりを得ることを目的に、小惑星イトカワのサンプルを持ち帰りました。「はやぶさ2」では「はやぶさ」で培った経験を活かしながら、太陽系の起源・進化と生命の原材料物質を解明するため、C型小惑星「Ryugu」（リュウグウ）を目指します。



探査機名	はやぶさ	はやぶさ2
目標天体	いとかわ	りゅうぐう
打上	2003	2014



探査機名 MMX
目標天体 火星
打上 2024
(予定)

Martian Moons eXploration = MMX
Martian moons: Phobos, Deimos

Launch

2024

Arrival at Mars

2025

Sampling

Departure

2028

Return to Earth

2029

火星衛星探査計画MMXは、2020年代前半の探査機打上げを目指し、研究開発が行われている。火星衛星の擬周回軌道（QS0: Quasi Satellite Orbit）に入り、火星衛星観測・サンプル採取を行う。観測と採取を終えた探査機は、サンプルを携えて地球に帰還する。

探査機名
目標天体
打上

DESTINY+
小惑星フェイトン
2020年代前半
(予定)

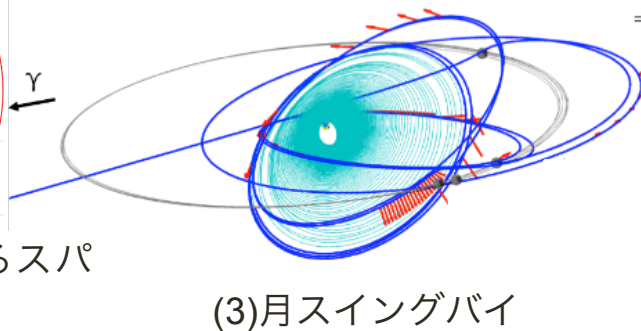
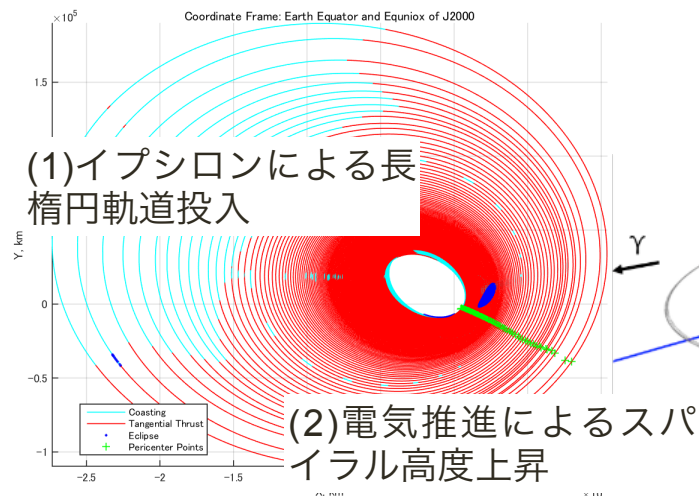
小型深宇宙機の実現を目指しています。イプシロンロケット打ち上げによる地球周回超楕円軌道から、イオンエンジンによるスパイラル上昇と月スイングバイを組み合わせて、地球脱出を行って太陽系宇宙に進出します。搭載するダスト分析器で太陽系内のダストの分布や化学組成を計測します。さらに動力航行を続けて小惑星フェイトンとのフライバイを行い、搭載カメラで小惑星表面の撮像を計画しています。



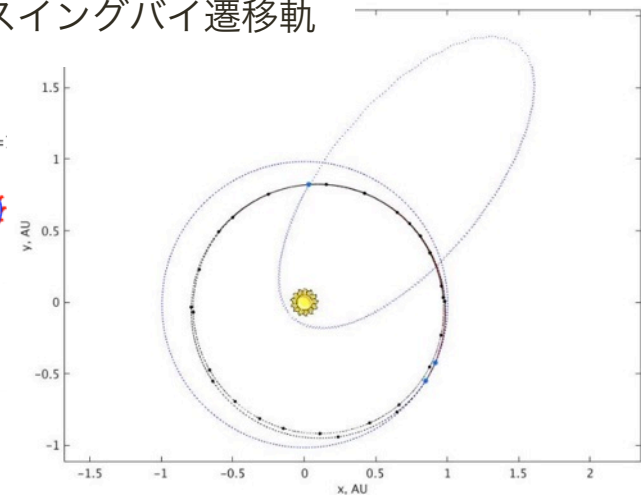
DESTINY+ ミッションの概要

DESTINY+ ミッションプロフィール

	期間	運用段階	運用イベント
(1)	約1ヶ月	イプシロンによる長楕円軌道投入	初期機能確認期間
(2)	約1年半	スパイラル軌道上昇	放射線帯脱出、月作用圏到達
(3)	約半年	月スイングバイ	Phaethon遷移軌道への接続
(4)	約2年	Phaethon遷移軌道	遠日点=地球出発 (1.0au)
(5)	数日	Phaethonフライバイ観測	近接観測
(6)	約2年	地球スイングバイ遷移軌道	近日点通過 (0.75au)
(7)	数日	地球スイングバイ	小惑星遷移軌道へ接続
(8)	TBD	小惑星遷移軌道	

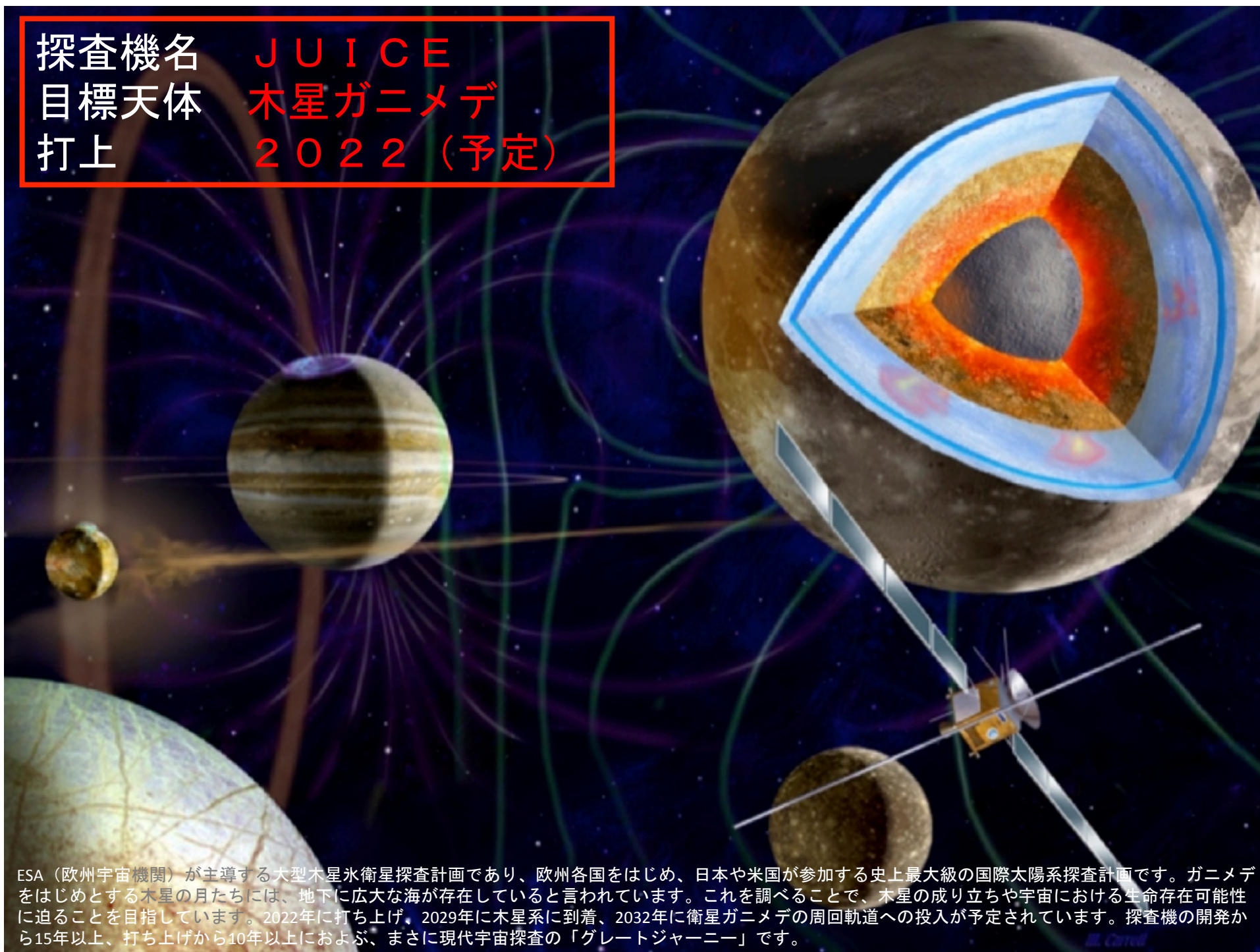


(4)Phaethon遷移軌道
(5)Phaethonフライバイ観測
(6)地球スイングバイ遷移軌道



審査項目②システムの実現可能性および開発計画全体の妥当性

探査機名	J U I C E
目標天体	木星ガニメデ
打上	2022（予定）



ESA（欧州宇宙機関）が主導する大型木星氷衛星探査計画であり、欧州各国をはじめ、日本や米国が参加する史上最大級の国際太陽系探査計画です。ガニメデをはじめとする木星の月たちには、地下に広大な海が存在していると言われています。これを調べることで、木星の成り立ちや宇宙における生命存在可能性に迫ることを目指しています。2022年に打ち上げ、2029年に木星系に到着、2032年に衛星ガニメデの周回軌道への投入が予定されています。探査機の開発から15年以上、打ち上げから10年以上におよぶ、まさに現代宇宙探査の「グレートジャーニー」です。

小天体着陸技術/サンプルリターンカプセル(SRC)技術

はやぶさ・はやぶさ2で培った小天体着陸技術/SRC技術は、現状でも世界でも突出した技術であり、戦略的・継続的に継承・発展させていけば、世界を牽引できる技術の一つとなれる。

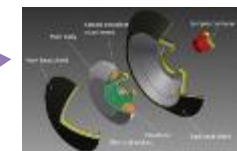
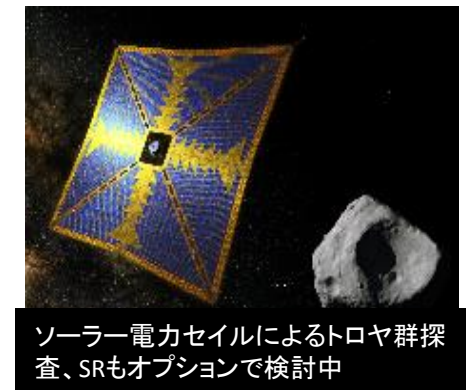
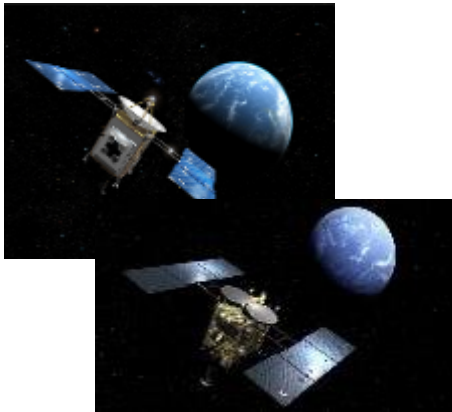
MMX, CAESAR等の開発を進めることで、直径40cm～1.2mの様々なサイズのSRC開発技術を獲得し、世界のSR計画を先導する鍵技術を確認たるものにすることができる。

はやぶさ&はやぶさ2
打ち上げ:2003年、2012年
SRC直径:**40cm**
SRCシステム重量:～20kg
突入速度:12km/s
サンプル温度:80℃以下

火星衛星探査計画(MMX)
打ち上げ:2024年(予定)
SRC直径:**60cm**
SRCシステム重量:～50kg
突入速度:12km/s
サンプル温度:80℃以下

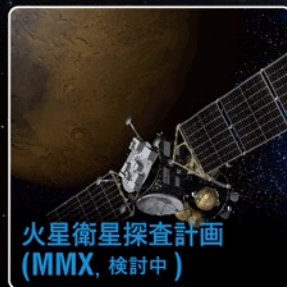
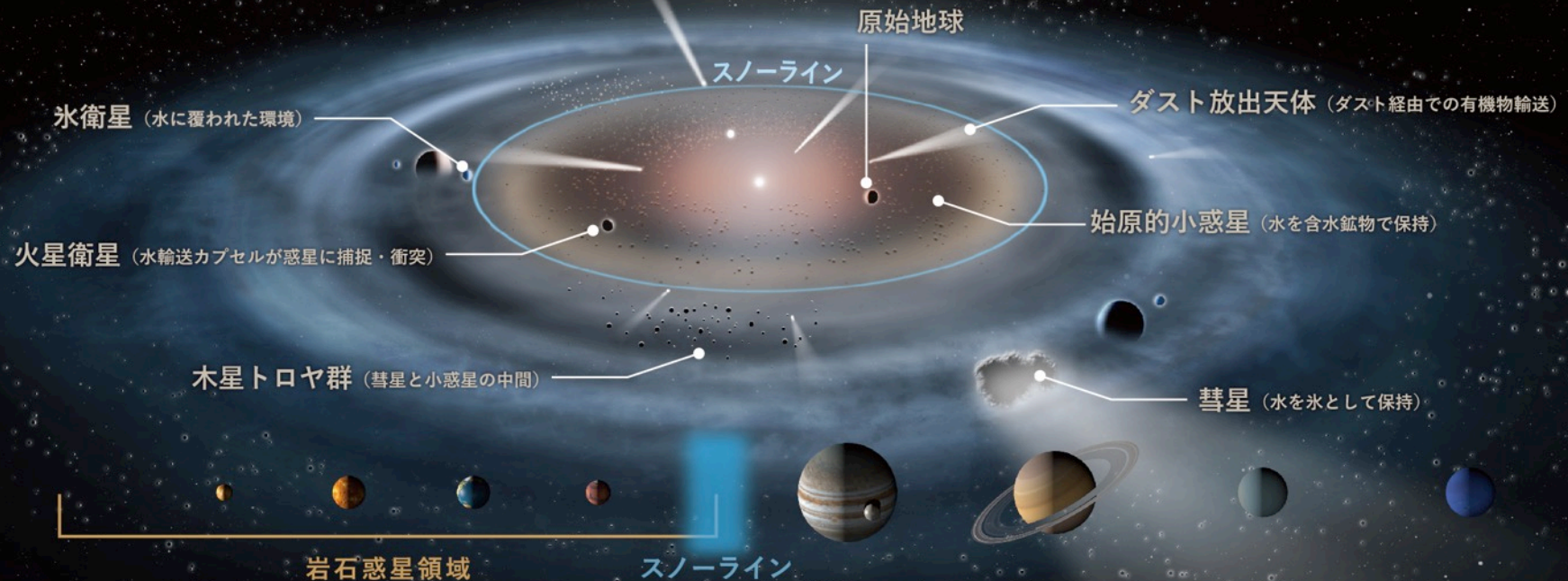
国際共同彗星SR(CAESAR)
打ち上げ:2024年(予定)
SRC直径:**120cm**
SRCシステム重量:～270kg
突入速度:12km/s
サンプル温度:0℃以下

トロヤ群探査(OKEANOS)
打ち上げ:2020年代後半
SRC直径:**40cm?**
SRCシステム重量:～20kg
突入速度:15km/s
サンプル温度:20℃以下

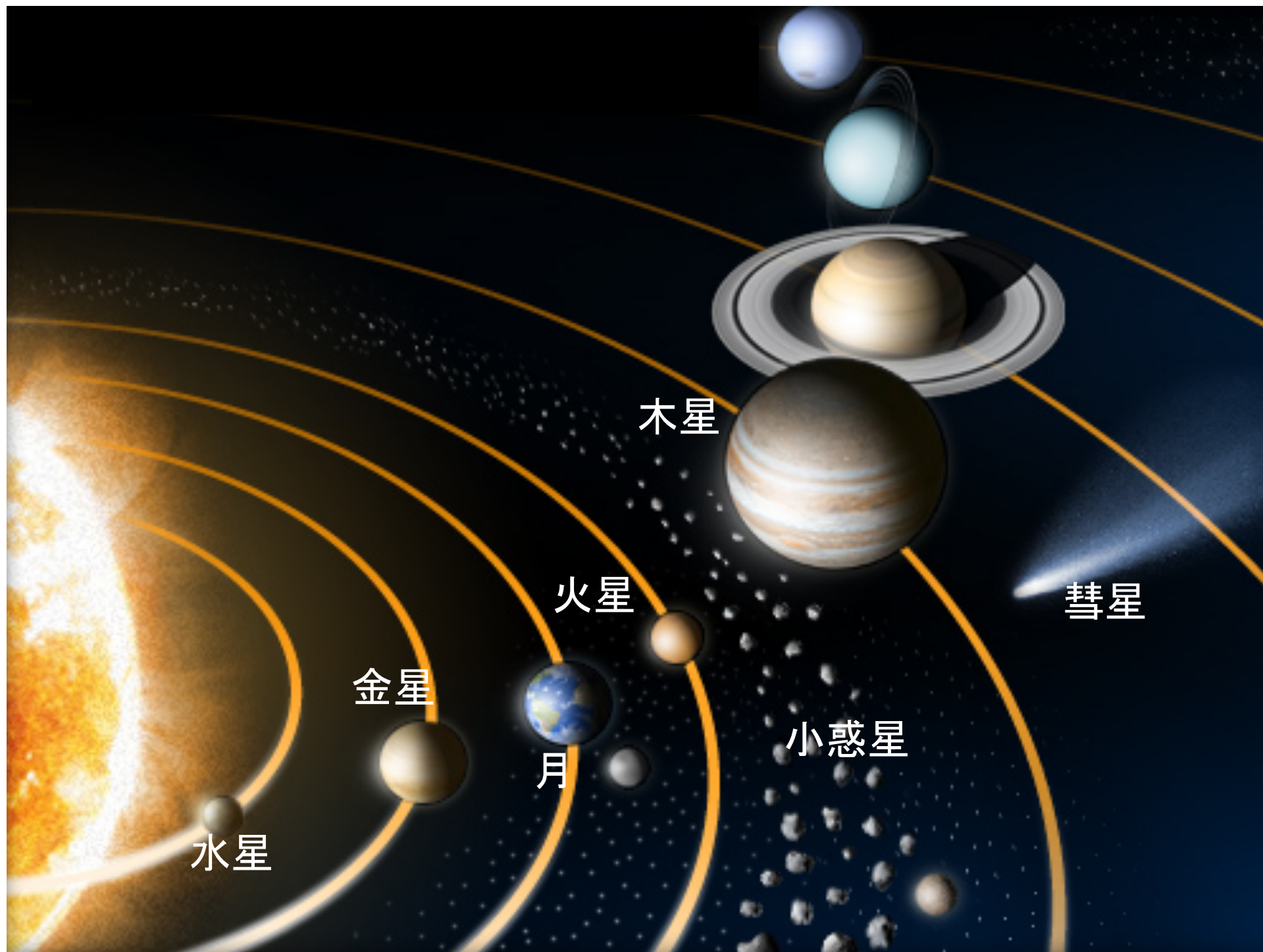


ISASの小天体探査戦略

スノーラインの外で生まれた小天体。最初は凍った泥団子であり、その後、多様な姿に進化する
これらの天体が運ぶ水、有機物等の揮発性物質が、地球型惑星を生命居住可能にするために必須であった。
しかし、いつ、どの天体が、どのように水を原始地球に持ち込んだのか？



一連のミッションで、これらの問題を探求する



宇宙研の深宇宙探査船団

黄：終了
緑：運用中
赤：開発中
青：計画

JUICE
電力セイル：木星

のぞみ
MMX：火星

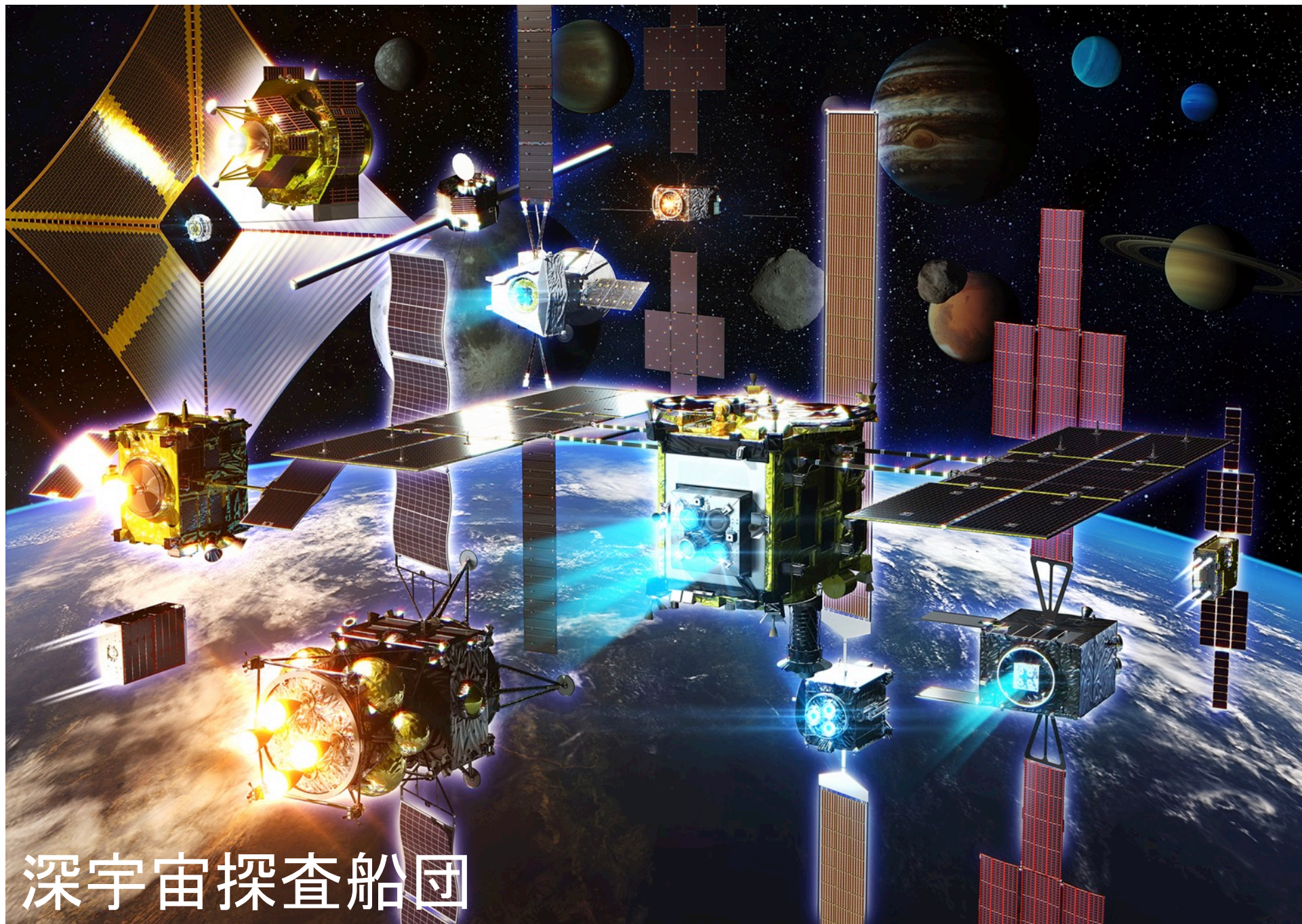
あかつき
IKAROS：金星

水星：
BepiColombo

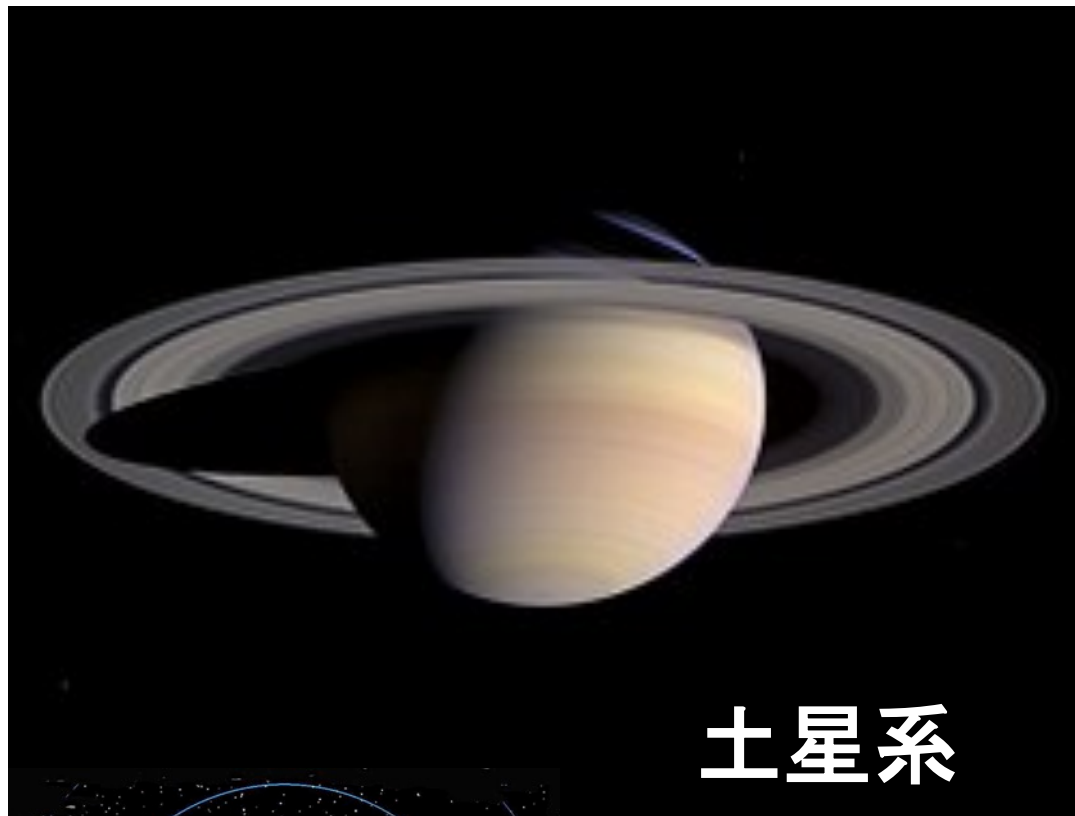
月：
ひてん、GEOTAIL、Lunar-A、
かぐや、PROCYON、SLIM、
EQUULEUS、OMOTENASHI

はやぶさ
はやぶさ2
DESTINY+
：小惑星

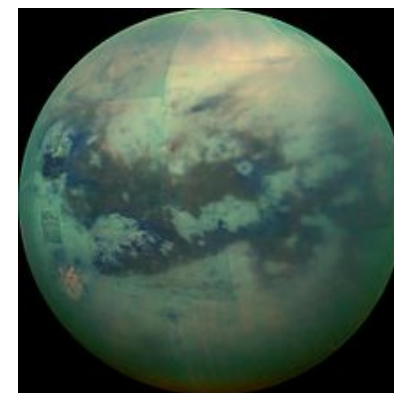
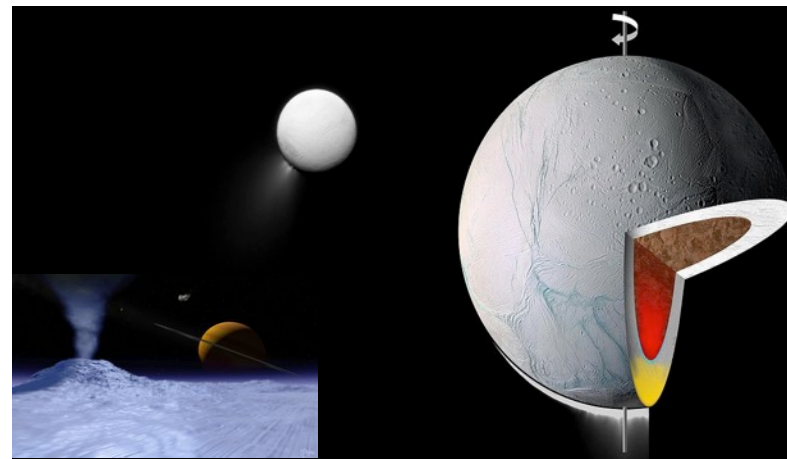
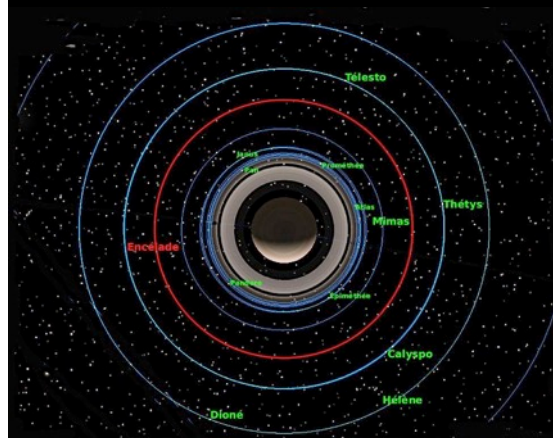
彗星：
さきがけ
すいせい
CAESAR



土星圈探查



土星系



タイタン
—大気をもつ衛星—



フェーベ
—逆行衛星—

逆行小惑星

JAXA深宇宙探査船団が次に進出するのは、

⇒ 木星／土星圏、水星より内側、逆行小惑星
月／火星表面

必要技術

超小型探査機（50kgならイプシロンでも土星到達可）

待機電力ゼロ、RTG、高性能太陽電池

電力充電 ⇒ 低Duty活動

1Wで100分充電して100W相当1分活動

低温作動、熱制御

エアロキャプチャ（バリユート、インフレーターブル）

ペネトレータ

例：

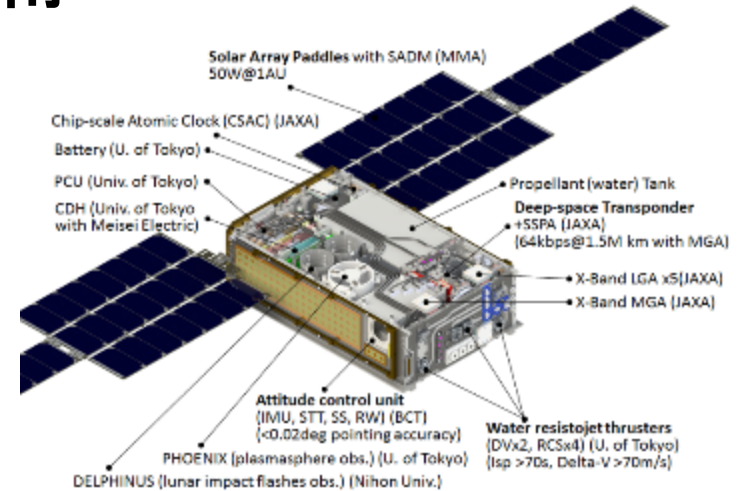
50kg探査機＋イプシロン→土星→Swing-By土星同期軌道
バリユートで火星表面に到達

超小型探査機技術

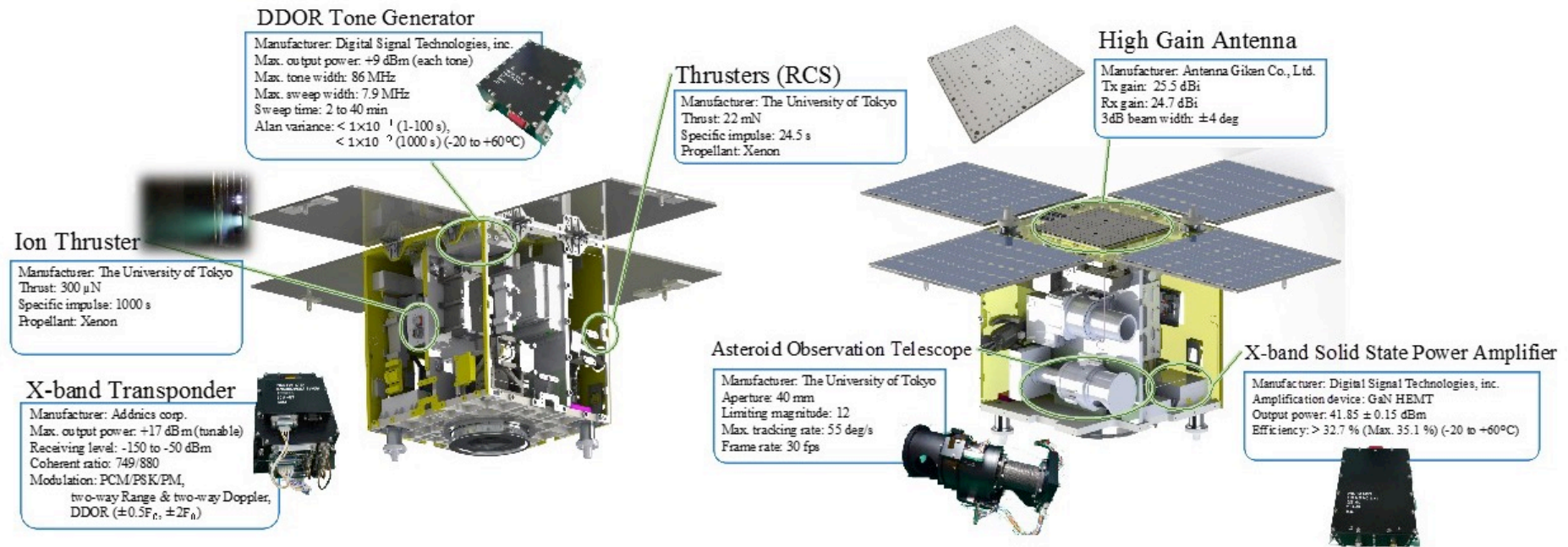
東京大学とISASが連携し、「ほどよし衛星」等、民間のミッションも含めた地球周回の超小型衛星経験を発展させる形で、世界に先駆けて超小型衛星の活動領域を地球近傍から深宇宙空間へ拡大している。

世界初の50kg級深宇宙探査機PROCYONでは、世界最高効率の通信アンプ、高精度DOOR軌道決定技術、超小型推進系等の世界初の深宇宙実証と深宇宙での科学観測に成功し（下図）、現在はCubeSatによる世界初の月ラグランジュ点探査を目指したEQUULEUSミッションを通じて、探査機のさらなる小型化（CubeSatサイズ）に取り組んでいる（右図）。

探査機の「超小型化」（低コスト化・開発期間の短縮も含む）により、その他の革新的な探査技術と組み合わせることで、土星圏等



EQUULEUSでさらなる超小型化を狙う深宇宙 CubeSatバスの構成 (20x30x10cm, 10kg)



PROCYONに搭載して世界で初めて実証した革新的超小型探査機技術

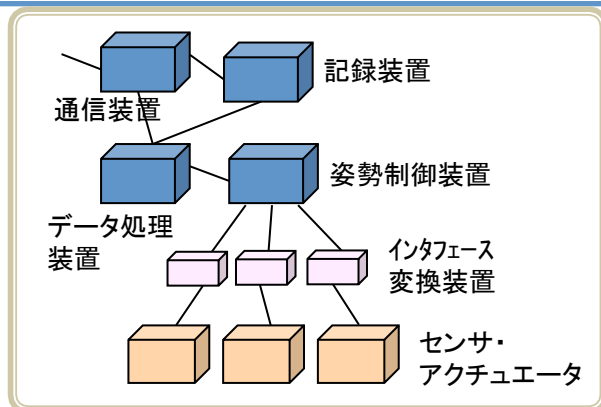
（超小型深宇宙通信系、世界最高効率のSSPA、高精度DDOR軌道決定手法、イオンスラスタ・RCSを統合した超小型推進系、小惑星超近接フライバイ観測用追尾望遠鏡など）

深宇宙探査機アビオニクスの革新的**小型軽量高性能化**

目的： 月惑星探査等の宇宙機に搭載される電子装置(アビオニクス)の重量は、航行距離や運搬するミッション機器の規模を大きく左右するため、これを革新的に小型軽量化し、また極限環境への耐性などで高性能化を図ることで、探査ミッションを新たなステージへ拓く研究開発を進める。

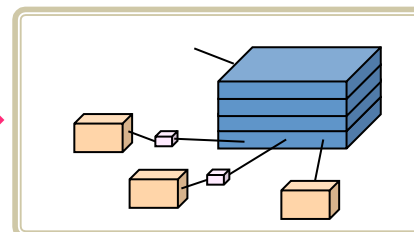
概要： 現状の探査機アーキテクチャから、当面の探査ミッションを変革し競争力を高めるための構成、さらにその先の究極としてイメージすべき形態と、段階的な成果創出を企図し、部品や機器の開発や実装技術の耐環境性・信頼性の研究を行う。その成果はドローンやロボットなどの社会インフラにデュアルユースとして波及するとともに、国産の衛星/機器の市場拡大や競争力向上に貢献する。

現状



搭載科学衛星: SPRINT-A、ASTRO-H、ERG

当面の探査ミッションを変革し、競争力を高めるための構成



集約化・I/F軽量化・センサ小型化
DESTINY+等、将来科学衛星に搭載

究極としてイメージすべき形態



量産化によるコストダウンが実現すれば、社会への普及が見込まれる。

個別事項

- ① 探査機アーキテクチャを変革するSoC(システムオンチップ)の開発→ロボティクス分野、産業機械等への波及
- ② 高効率な機器内の電源供給→災害監視無人機等への応用
- ③ 高密度実装技術の宇宙機適用(信頼性評価)→超小型衛星の高信頼化による市場拡大
- ④ 国際標準機器間通信プロトコル(SpaceWire)へのネイティブ対応→国産機器の国際市場での競争力向上
- ⑤ 極限環境でも動作可能なセンサの開発→原発現場(廃炉内確認カメラ等)への貢献
- ⑥ 異種なベアチップを3次元実装することによるアビオニクスのワンチップ化(センサチップ応用)
→災害監視ドローン等社会インフラへの適用

待機電力不要システム

→ 宇宙+地上応用性

耐放射線化(地上高信頼機器にも必須技術) 例: SOI (Silicon on Insulator)

展開型柔軟エアロシェル(バリュート)による大気圏突入技術

大気圏突入用展開型柔軟エアロシェルの技術は、将来の惑星探査における鍵技術の一つとして、世界で注目されている。この技術には、これまでの大気圏突入機にはない特徴(高効率な減速性能、高い収納効率等)を有している。それを最大限に活かすことにより、超小型探査機による本格的惑星探査を実現することで、新しい惑星探査のかたち(立体的な同時分散型探査)を拓き、惑星探査の世界にパラダイムシフトを起こす可能性を持っている。

この技術は、東京大学を中心としたチームが、JAXAが有する飛行実験の機会や大型風洞設備等を利用して、成熟させてきている。

2004 : 大気球実験@三陸
(B100-10号機実験)



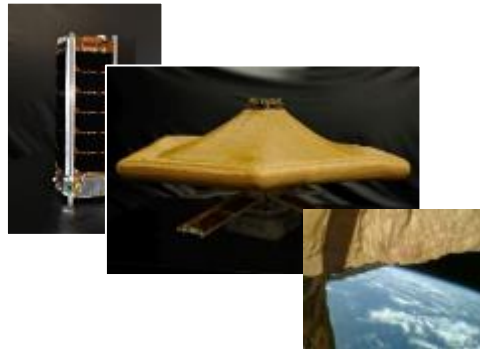
2012 : 観測ロケット実験@内之浦
(S-310-41号機実験)



2005～ : 大規模風洞試験@JAXA調布
(Φ1.27m極超音速風洞、
6.5m×5.5m低速風洞)

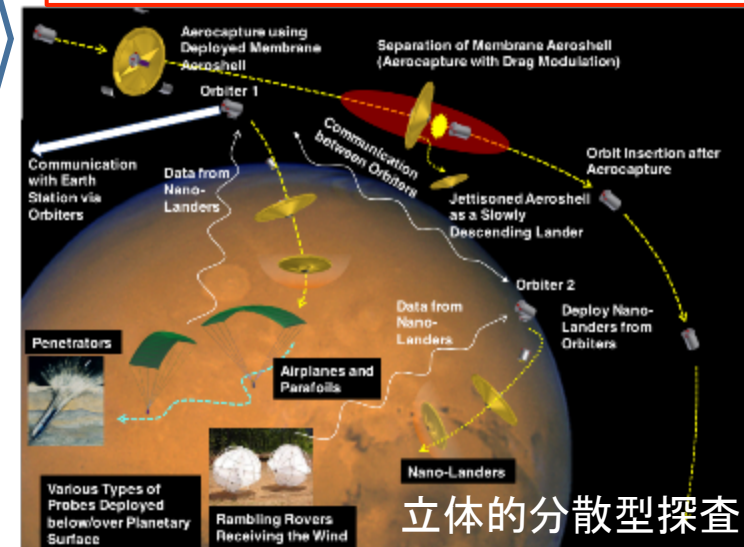


2017: 超小型衛星EGG
(From ISS-Kibo and JSSOD)



展開型柔軟エアロシェルが 超小型惑星探査機実現の鍵技術

“展開型エアロシェル技術”を応用した
超小型着陸機(ナノランダー)技術
“展開型エアロシェル”による抗力変調
方式エアロキャプチャによる超小型
探査機の惑星周回軌道投入技術



立体的分散型探査

火星の飛行探査用ドローン

飛行機型ドローン

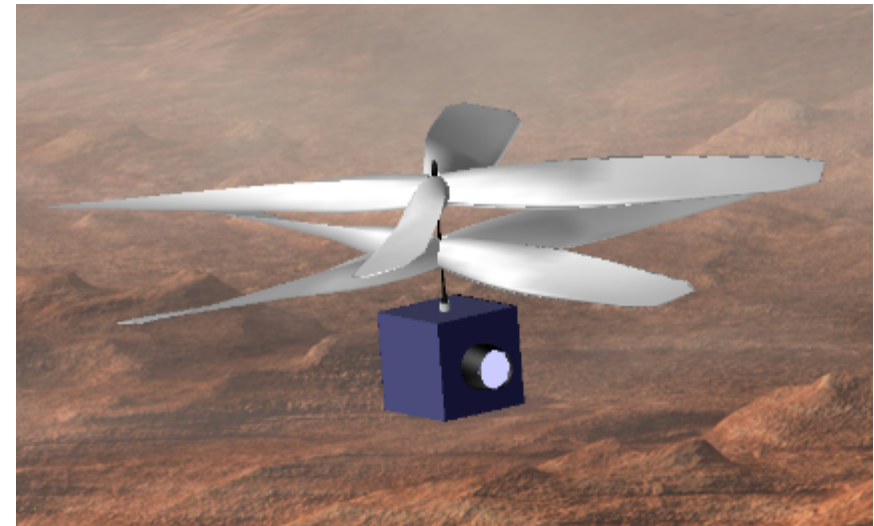
観測衛星や着陸機では実施することが難しい広範囲かつ高解像度な観測を実現することを目的とした飛行機型ドローンの研究を進めている。2016年には大気球を利用して高高度飛行試験を実施した。現在も国内の大学の研究者らとともに研究を進めている。



ヘリコプタ型ドローン

火星表面で発見された縦孔・地下空洞の探査を目的としてヘリコプタ型ドローンの研究を進めている。2018年9月に開催されたAIAA SPACE FORUMにて概念設計結果を発表した。現在も風洞試験や数値流体シミュレーションを用いて、精力的に研究をすすめている。

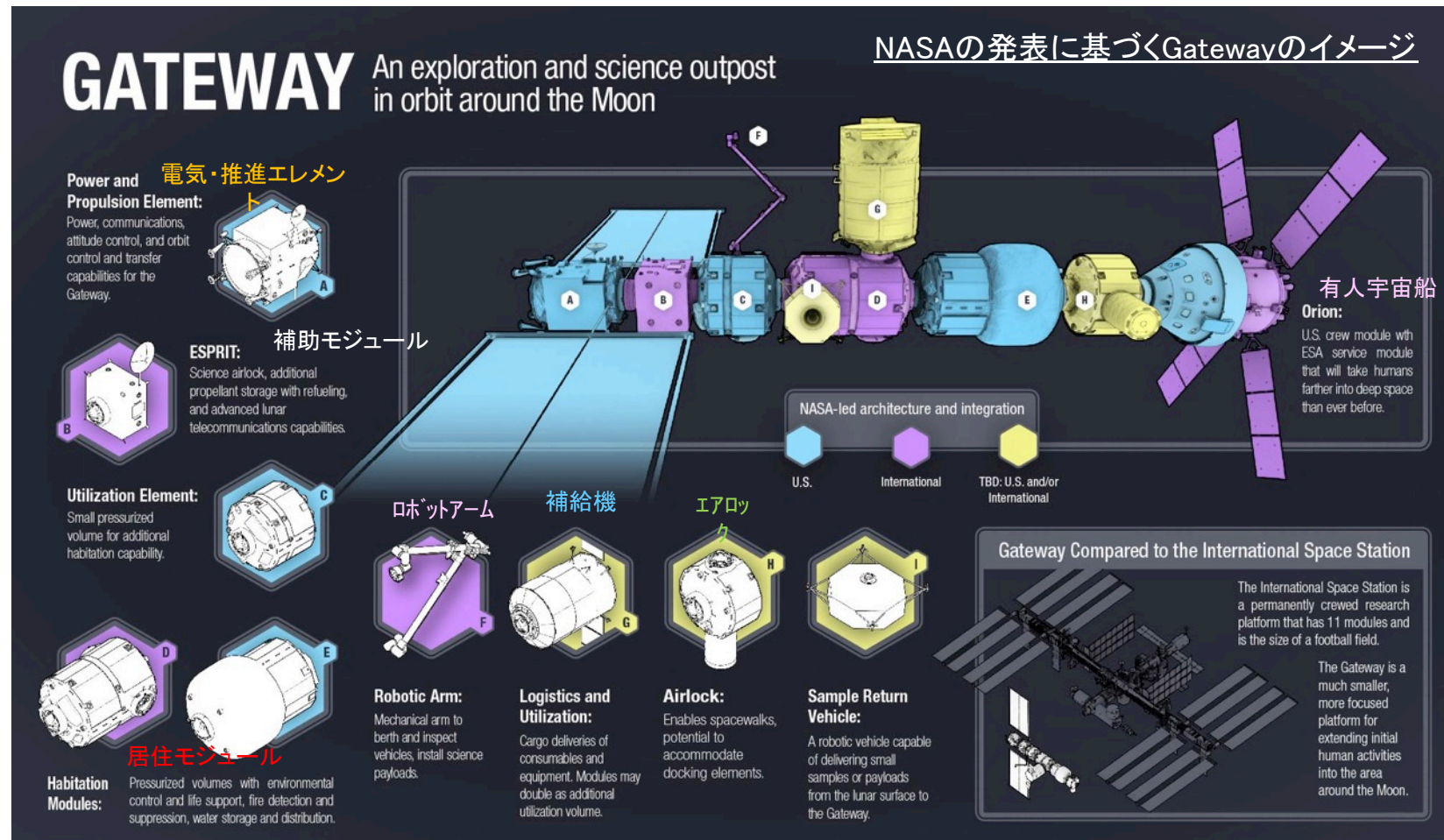
[▲火星地下水圏
(斜面着陸+ローバ)]



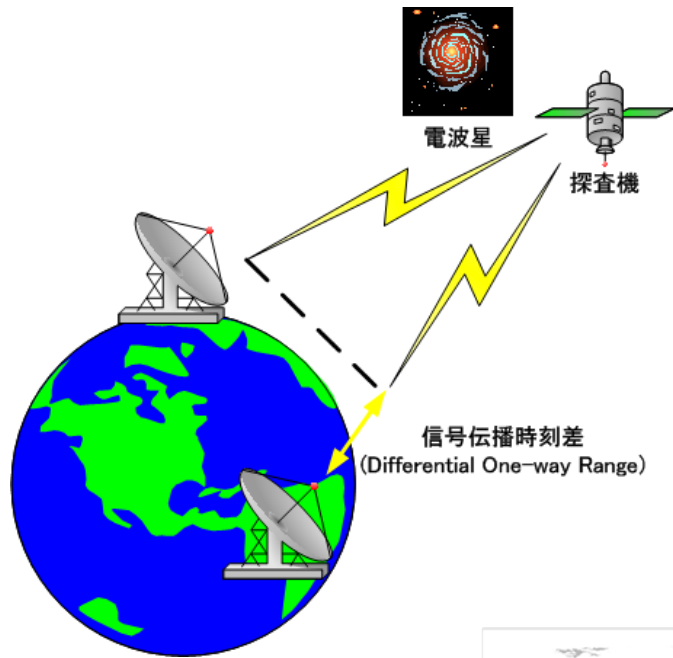
月軌道プラットフォームゲートウェイ(Gateway)について

- 2018年2月、米国予算教書において、月の周回軌道※に設置される有人拠点として「ゲートウェイ(Gateway)」を国際協力、民間との協力により構築していくことが発表された。(ISS参加5極の宇宙機関による作業チームが実施してきたコンセプトスタディを踏まえたもの)
- プログラム開始フェーズでは、4名の宇宙飛行士が30日程度滞在することを想定。
- NASAは、2022年から電気推進エレメントを打ち上げ、2026年頃までの完成を計画。

※ 月の極付近を近月点とする超楕円軌道
(近月点：4000km、遠月点：75000km)



国際貢献 地球規模に深宇宙局を接続して 高精度に探査機位置決定



- イオンエンジン動力航行中は推力の不確定性が大きいので、従来の手法による軌道決定は極めて困難である。海外（NASA, ESA）の深宇宙探査機では必ずイオンエンジンをオフにして軌道決定を行っている。NASA局とJAXA局を用いて南北と東西のDDORを同時に実施し、さらにレンジングも併用し、三次元の幾何学的位置を瞬時に直接測定する“準キネマティック法”による軌道決定を深宇宙で初めて実施した（右図）。南北・東西基線同時計測は臼田局の地理的優位性を利用した技術である。
- 2017年1月のイオンエンジン動力航行中に実証試験を行ったところ、僅か52分間の観測時間で、1.28km (1 σ)という極めて高い位置精度が得られた。
- イオンエンジン運転中に高精度軌道決定を行ったのははやぶさ2が世界初である。この技術を使えば、軌道決定のためにイオンエンジンを停止する必要がなくなり、イオンエンジンの稼働率100%を達成することもできる。

