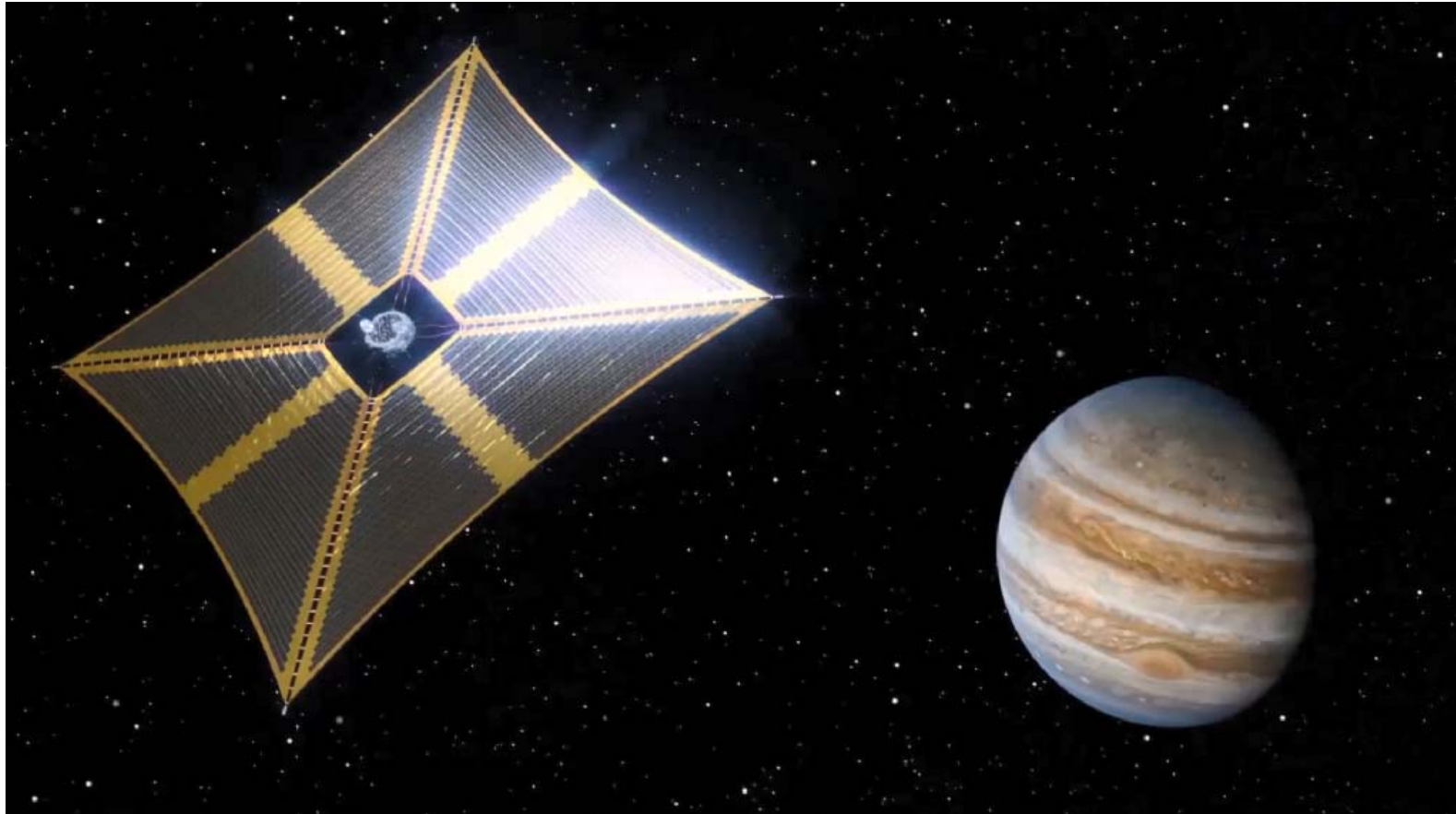


# ソーラー電力セイルミッションの展望



森 治

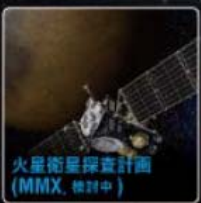
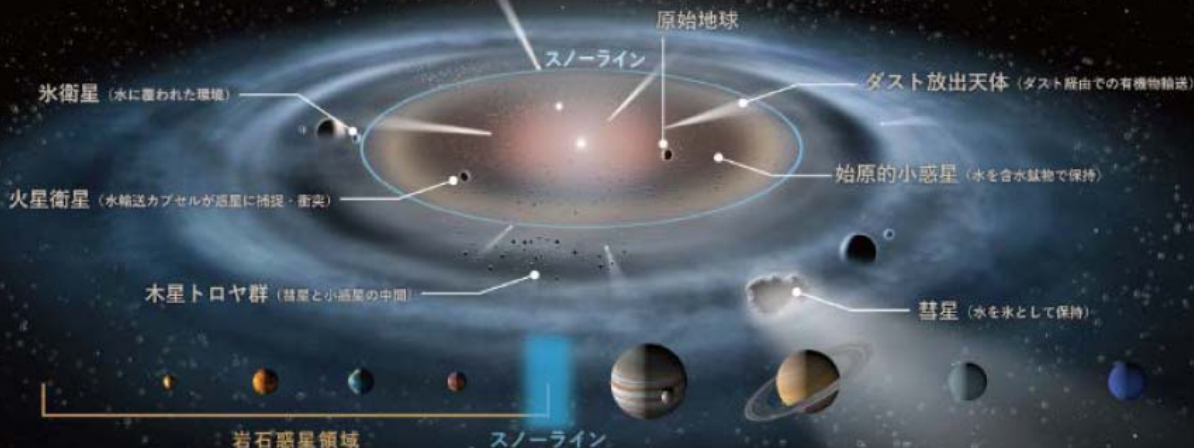
ソーラー電力セイル探査機プリプロジェクト候補チーム

# ソーラー電力セイルの意義・使命

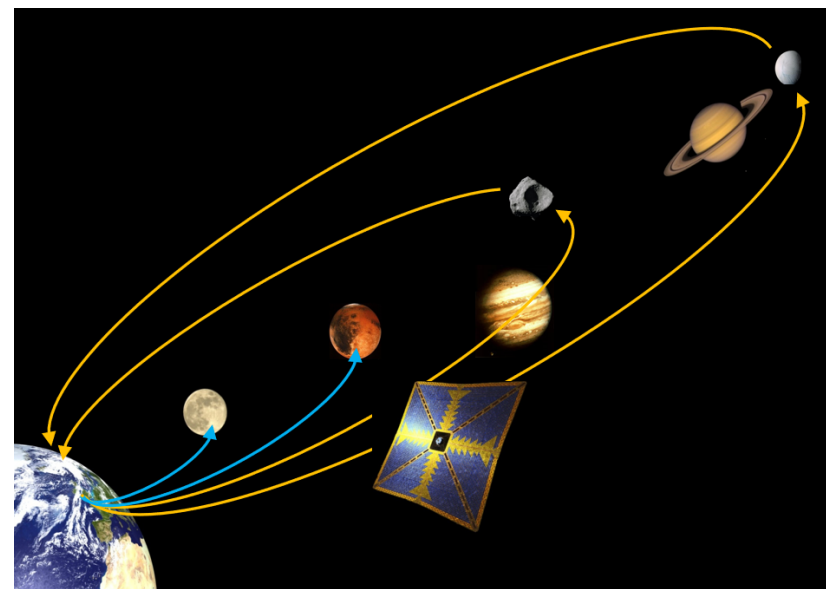
月・火星(国際宇宙探査)に注力することが一つの大きな流れ。  
一方で、外惑星領域でも日本は世界一級の成果を狙っていくべき。  
深宇宙探査船団(外惑星領域も含めて探査機を送り込む)の一翼を担っていきたい。

## 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



マスタープランの重点大型研究

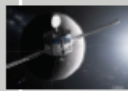




# ソーラー電力セイル探査機OKEANOSの評価

戦略的中型計画のセレクションで選定されなかった(次点). 評価結果の概要は以下3点.

- ミッションの意義は高い.
- 技術は妥当である.
- × コストが上限値「300億円(予備費を含む)」を確実に満足できることを示せなかった. これまでは「約300億円」であったが, 昨今の予算事情を考慮すればやむなし..

⇒ ミッション案を見直して, 次の戦略的中型計画を狙う(しぶとく提案し続ける).

戦略的  
中型計画

FY 2017	FY 2018	FY 2019	FY 2020	FY 2021	FY 2022	FY 2023	FY 2024	FY 2025	FY 2026	FY 2027	FY 2028
	 Bepi Colombo			 XRISM			 MMX			 LiteBIRD	
										 OKEANOS	

2030年ごろ

# ミッション案の見直しの方針

---

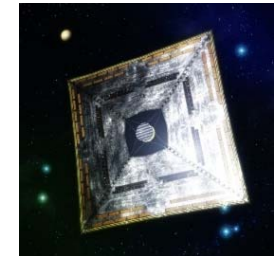
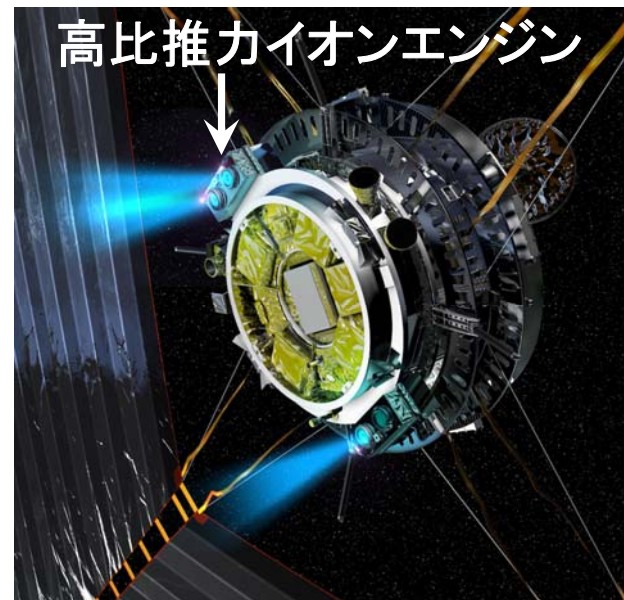
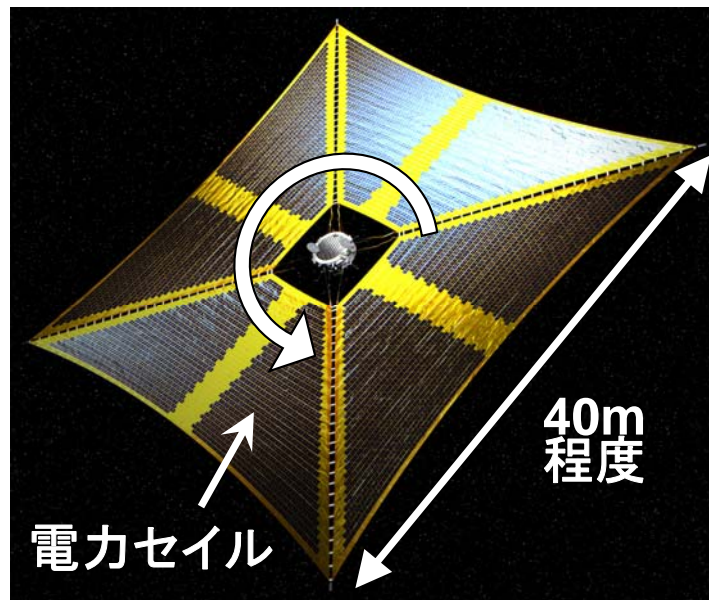
- ・新しい外惑星領域探査を切り拓くミッションとする。
- ・理学観測はクルージングサイエンスとトロヤ群サイエンスの両方を実施する。
- ・トロヤ群は着陸までとする(ソーラー電力セイルの能力としては, 往復も可能)。
- ・着陸機(MASCOT型)はDLRが担当する。
  
- ・比較的成本が大きい高比推力イオンエンジン(IPPUを含む)について・・・
  - 高比推力イオンエンジンの台数を減らす
    - イオンエンジン案
    - 高比推力イオンエンジンをなくす
      - ソーラーセイル案
      - 化学推進+小型ソーラー電力セイル案
- ・技術のフロントローディングにより技術リスクを減らし, コストダウンをはかる。



# OKEANOSのシステム

## <ソーラー電力セイル>

大型のセイル膜面上に搭載した**薄膜太陽電池**で発電し(**電力**の確保),  
外惑星領域でも**高比推力イオンエンジン**により航行する(**燃料**の節約).



## 電力セイル

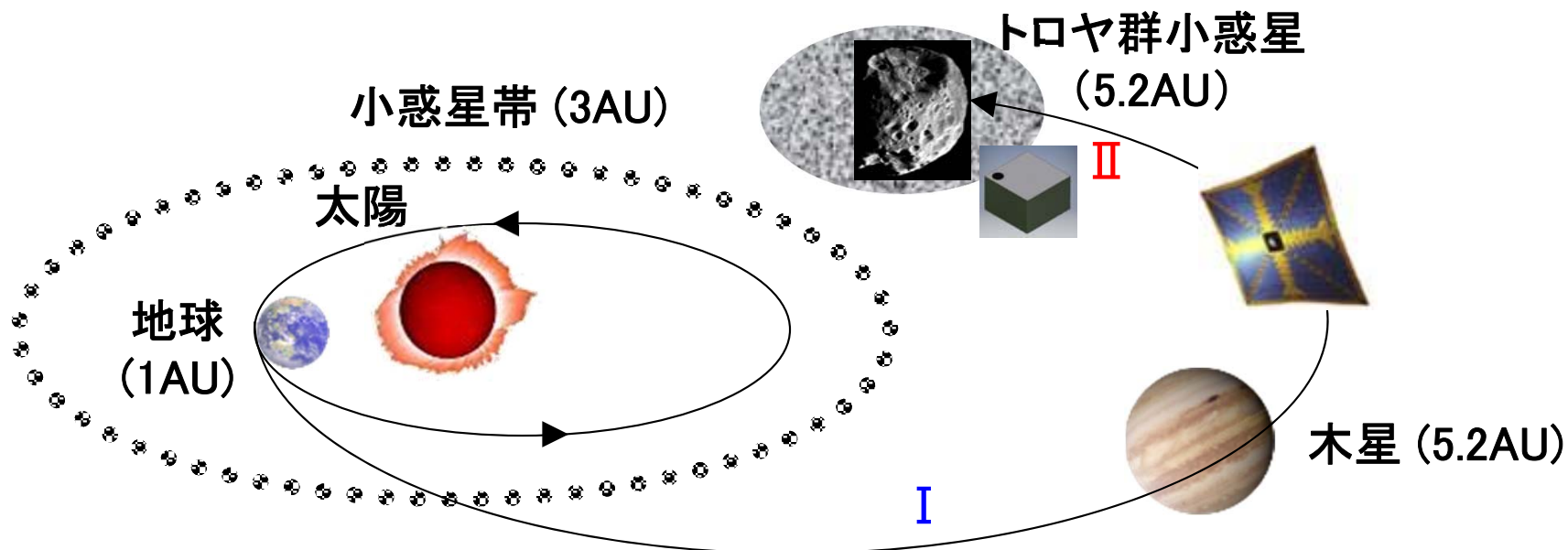
- 大面積 : 1辺40m程度 (IKAROSの10倍程度)
- 超軽量発電システム : 薄膜太陽電池使用 (JUNOの1/20倍以下)
- 大電力発電 : 3.8kW@5.2AU (JUNOの10倍程度)

## 高比推力 イオンエンジン

- 高比推力 : 最大6800秒 (はやぶさシリーズの2倍以上)
- 大きな $\Delta V$  (主に外惑星領域) : 3000-6000m/s程度 (JUNOの2倍以上)



# 理学観測



## I. クルージングフェーズ

- ・宇宙赤外線背景放射の掃天観測 (EXZIT)
- ・太陽系ダスト分布のその場計測 (ALDN2)
- ・ガンマ線バーストの偏光観測 (GAP2)
- ・磁場観測 (MGF)

深宇宙プラットフォーム

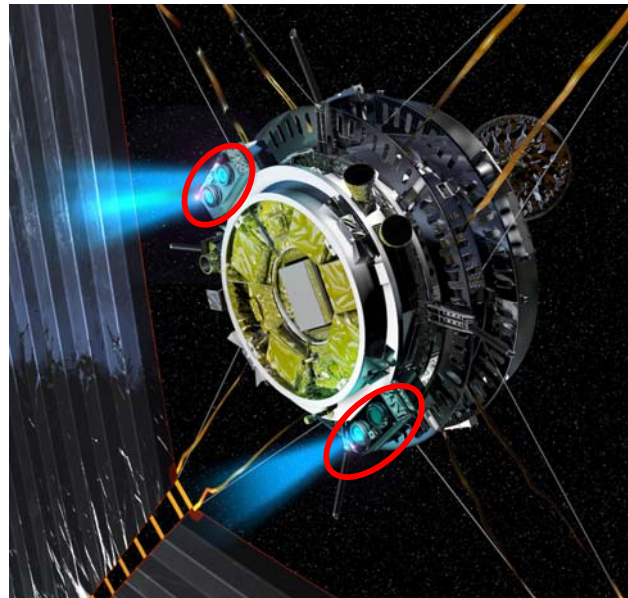
## II. ランデブーフーズ

- ・トロヤ群小惑星の観測・試料分析 → Lucyと相補関係



# イオンエンジン案のコンセプト

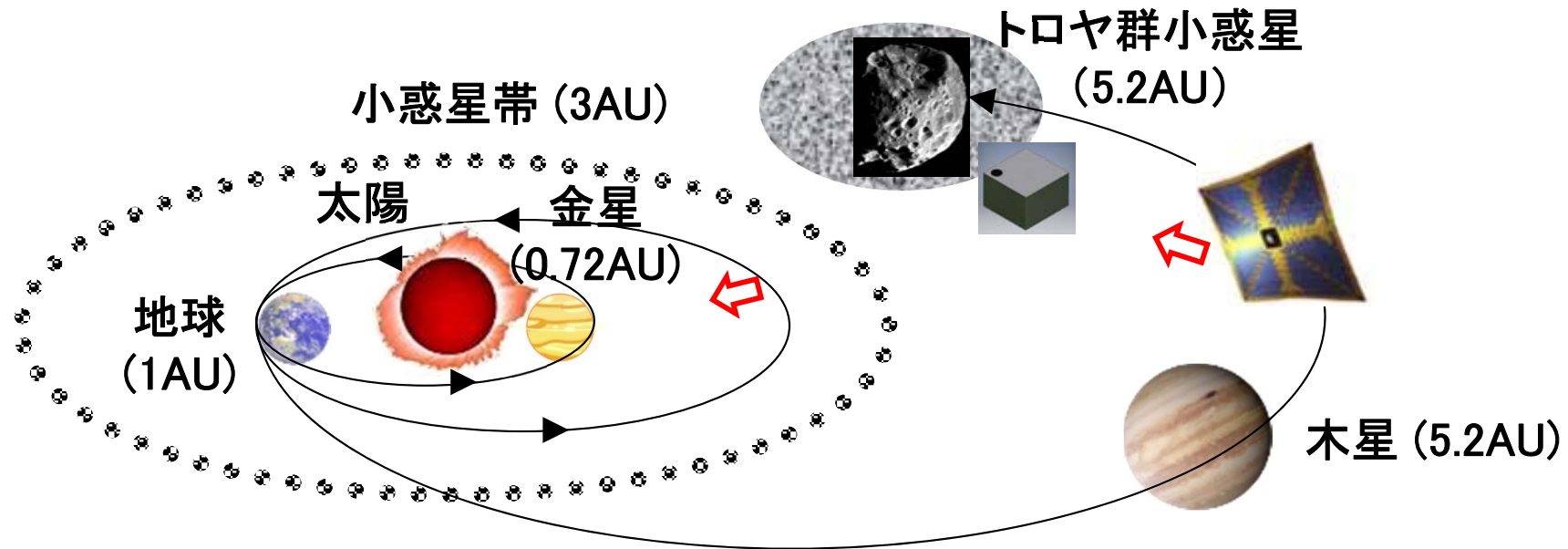
- 高比推力イオンエンジンの台数を減らして $\Delta V$ を実現する。  
4-6基(最大同時運転3基)⇒1-2基(最大同時運転1基)
- 金星スイングバイを活用することでEDVEGAの $\Delta V$ を小さくする。
- セイルサイズは変更なし。  
一辺40mの電力セイル(木星圏でバスと高比推力イオンエンジン1基に電源供給)
- 打上重量は1.4tonで変更なし。



1-2基へ削減

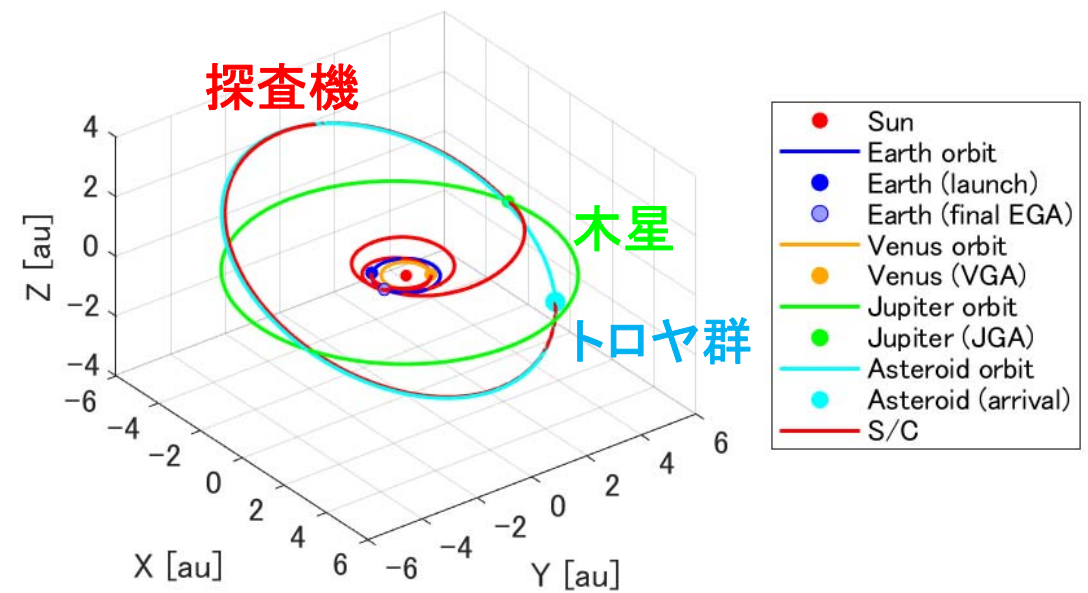
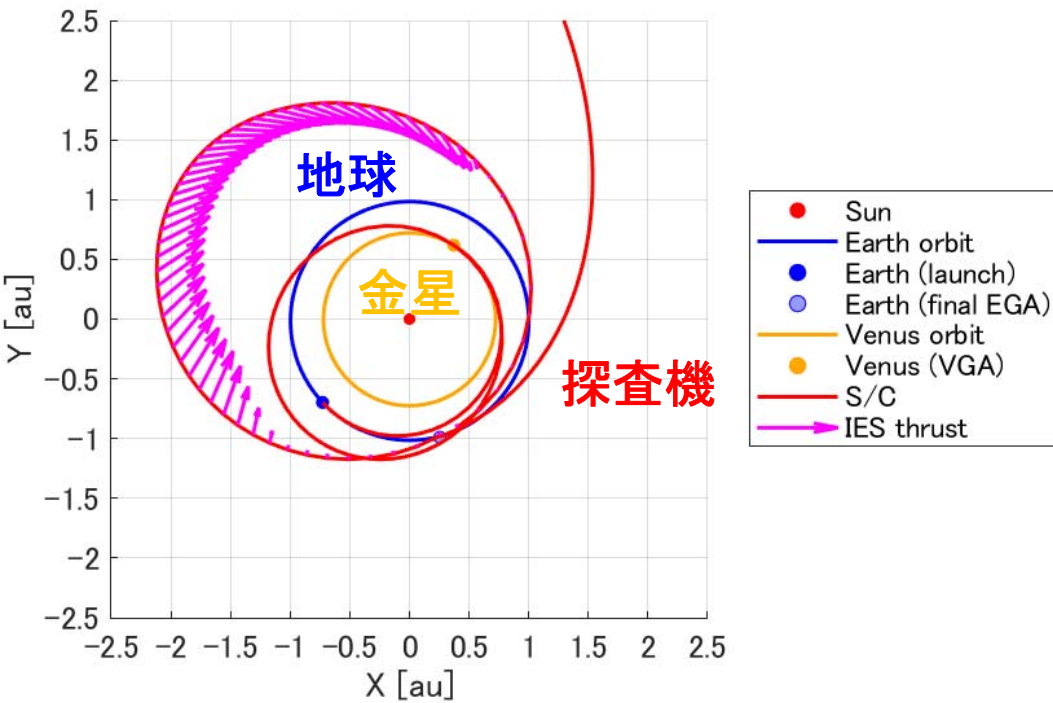


# イオンエンジン案のミッションシーケンス



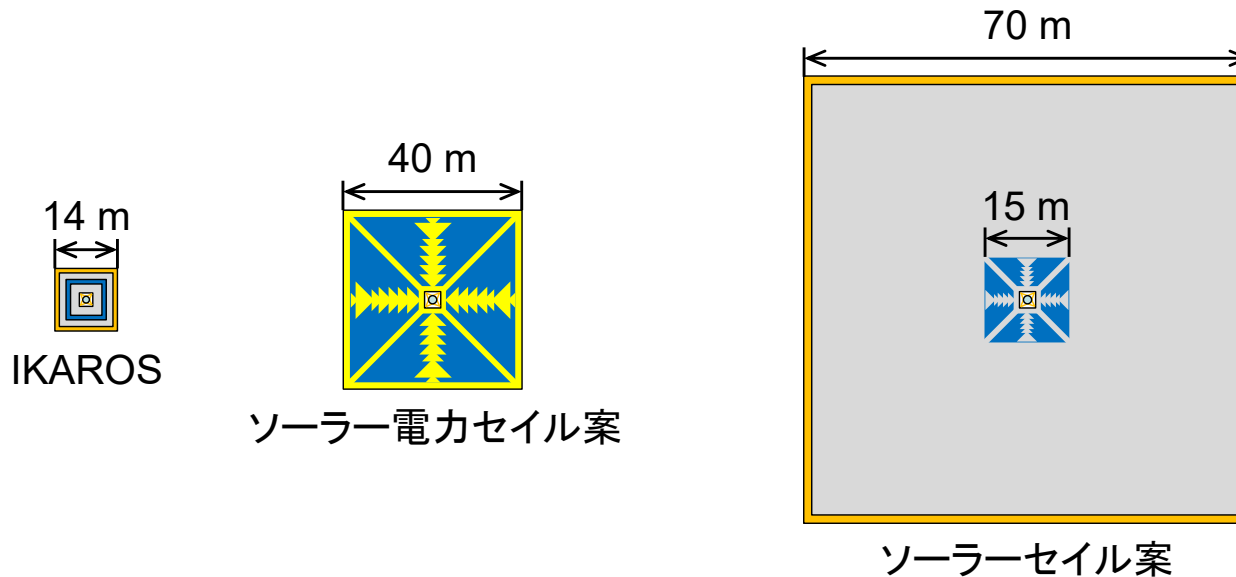
- |       |                      |                  |
|-------|----------------------|------------------|
| X     | 打上げ                  |                  |
| X+0.5 | 金星スイングバイ             |                  |
| X+2   | 地球スイングバイ             |                  |
|       | (高比推カイオンエンジン1基による推進) | EDVEGA (2年 × 1回) |
| X+4   | 地球スイングバイ             |                  |
| X+6   | 木星スイングバイ             |                  |
|       | (高比推カイオンエンジン1基による推進) |                  |
| X+15  | トロヤ群小惑星ランデブー         |                  |
| X+16  | 着陸機による着陸・試料採取・その場分析  |                  |

# イオンエンジン案の軌道計画



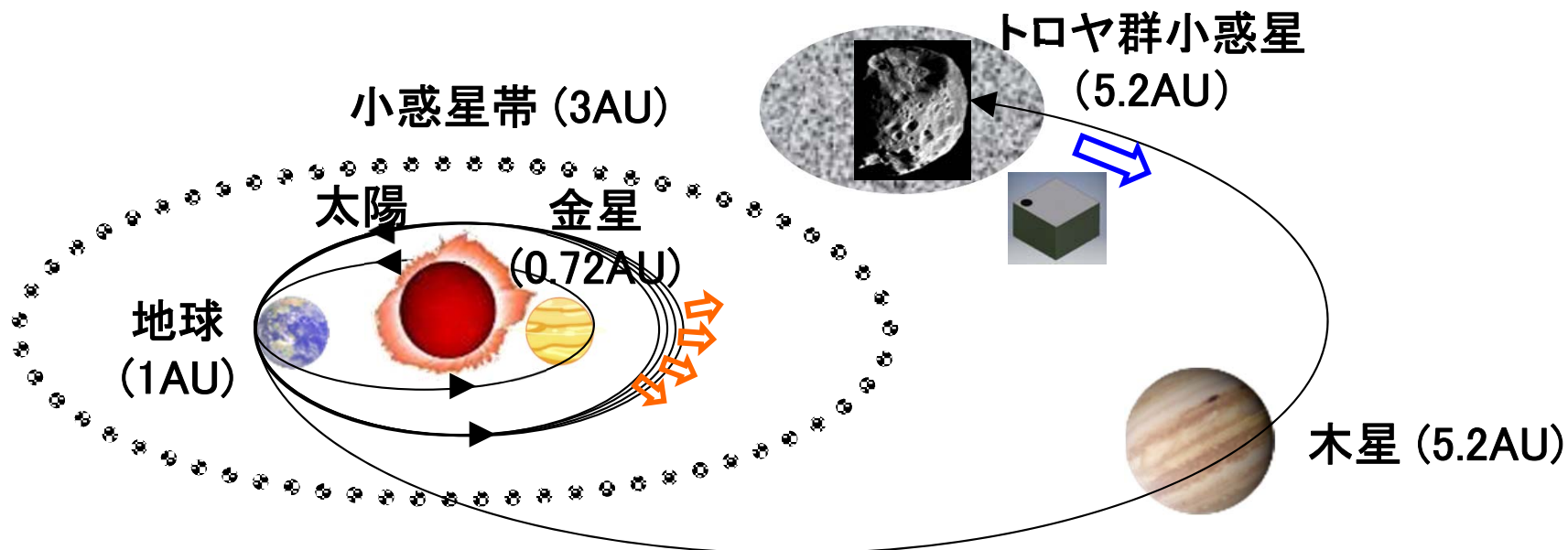
# ソーラーセイル案のコンセプト

- 高比推カイオンエンジンは搭載しない.
- ソーラーセイルと化学推進で $\Delta V$ を実現する.  
ソーラーセイルでSDVEGA (Sailing DVEGA)を行う.  
木星圏など遠方では化学推進を用いる.
- セイルサイズも変更する.  
ソーラーセイルは一边70(軌道次第) $\Rightarrow$ ソーラーセイル分野を飛躍的に発展.  
電力セイルは一边15m(木星圏でバスに電源供給)



セイルのサイズ比較

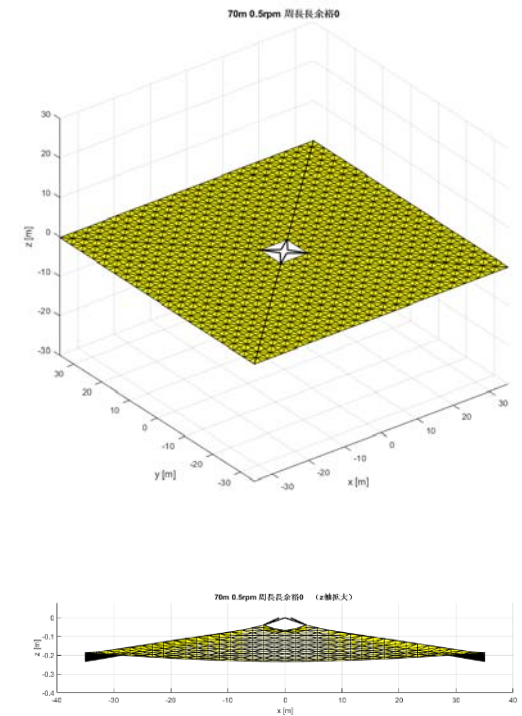
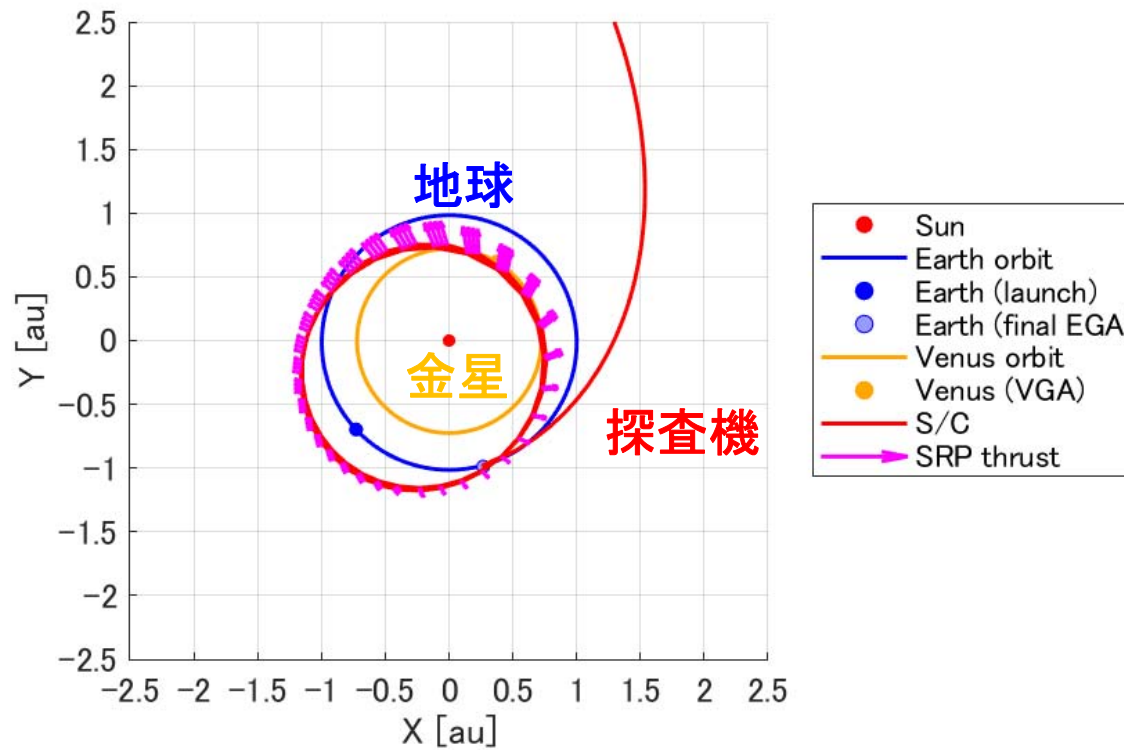
# ソーラーセイル案のミッションシーケンス



- |       |                      |               |
|-------|----------------------|---------------|
| X     | 打上げ                  |               |
| X+0.5 | 金星スイングバイ             |               |
| X+2   | 地球スイングバイ             |               |
|       | (一辺70mのソーラーセイルによる推進) | SDVEGA(1年×4回) |
| X+6   | 地球スイングバイ             |               |
| X+8   | 木星スイングバイ             |               |
|       | (化学推進による推進)          |               |
| X+17  | トロヤ群小惑星ランデブー         |               |
| X+18  | 着陸機による着陸・試料採取・その場分析  |               |



# ソーラーセイル案の軌道計画



打上重量は2.1tonで成立解あり.

# 化学推進＋小型ソーラー電力セイル案のコンセプト

---

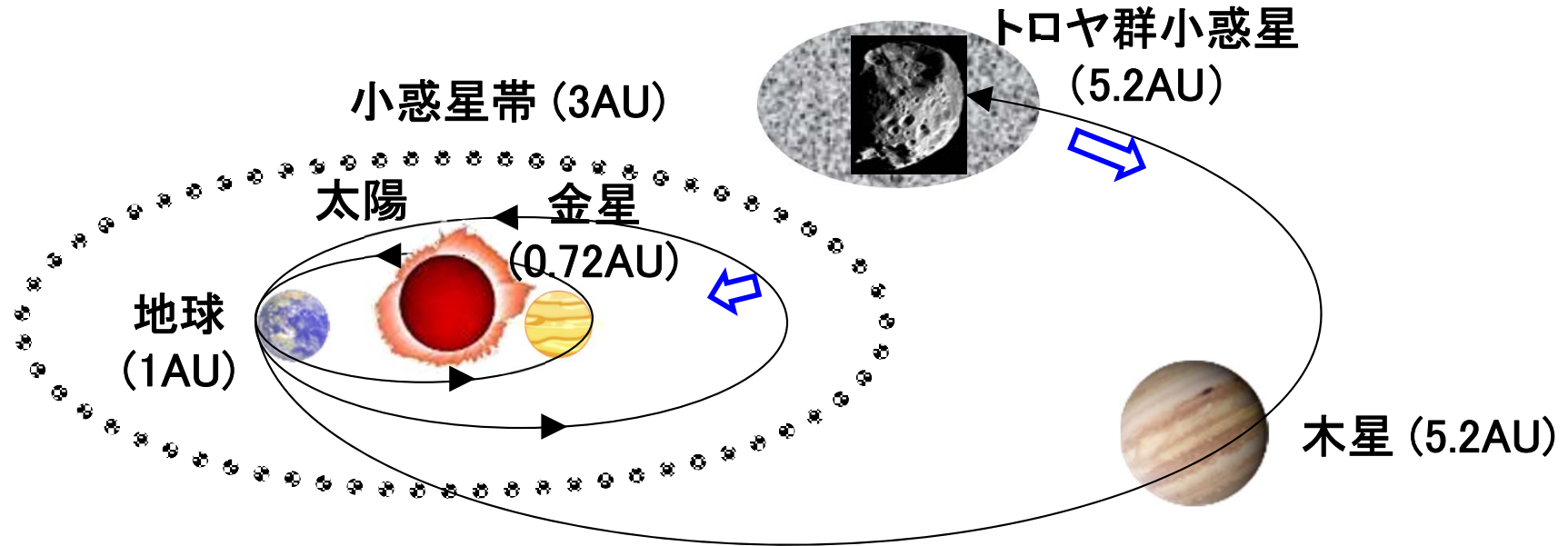
## <親機>

- 化学推進で $\Delta V$ を実現する.
- 電力セイルは一辺15m(木星圏でバスに電源供給)のマスト型で, 3軸姿勢制御方式とする.
- 降下, 着陸(自律航法誘導制御), 試料採取, その場分析を複数回行う.
- 着陸機はDLRとの国際協力で超小型サイズ(10kg以内)で実現する.
- 小型ソーラー電力セイルを分離する.
- DLRの小型着陸機を分離する(最大10kg).
- マストは駆動式とし, 着陸時に電力セイルが衝突しないようにする. 姿勢制御にも役立てる.

## <小型ソーラー電力セイル>

- 電力セイルはスピン型でスピン姿勢制御方式とする.
- 外惑星領域でミッションを実施する.

# 化学推進＋小型ソーラー電力セイル案のミッションシーケンス



- X 打上げ
  - X+0.5 金星スイングバイ
  - X+2 地球スイングバイ  
(化学推進による推進)
  - X+6 地球スイングバイ
  - X+8 木星スイングバイ  
(化学推進による推進)
  - X+15 トロヤ群小惑星ランデブー
  - X+17 親機による着陸・試料採取・その場分析  
超小型着陸機による着陸・観測
- DVEGA (2年 × 1回)

小型ソーラー電力セイルを親機から分離

# ミッション比較

ミッション	$\Delta V$	セイルサイズ	年数	打上質量	コスト
OKEANOS オリジナル案	高比推力 イオンエンジン: 最大同時運転3基	電力セイル:一辺40m	14年	1.4トン	大
イオンエンジン案	高比推力 イオンエンジン: 最大同時運転1基	電力セイル:一辺40m	16年	1.4トン	中
ソーラーセイル案	ソーラーセイル:近傍 化学推進:遠方	ソーラーセイル:一辺70m 電力セイル:一辺15m	18年	2.1トン	小
化学推進 + 小型ソーラー電力セ イル案	化学推進 ?	電力セイル:一辺15m  電力セイル:?	16年	2.1トン	小



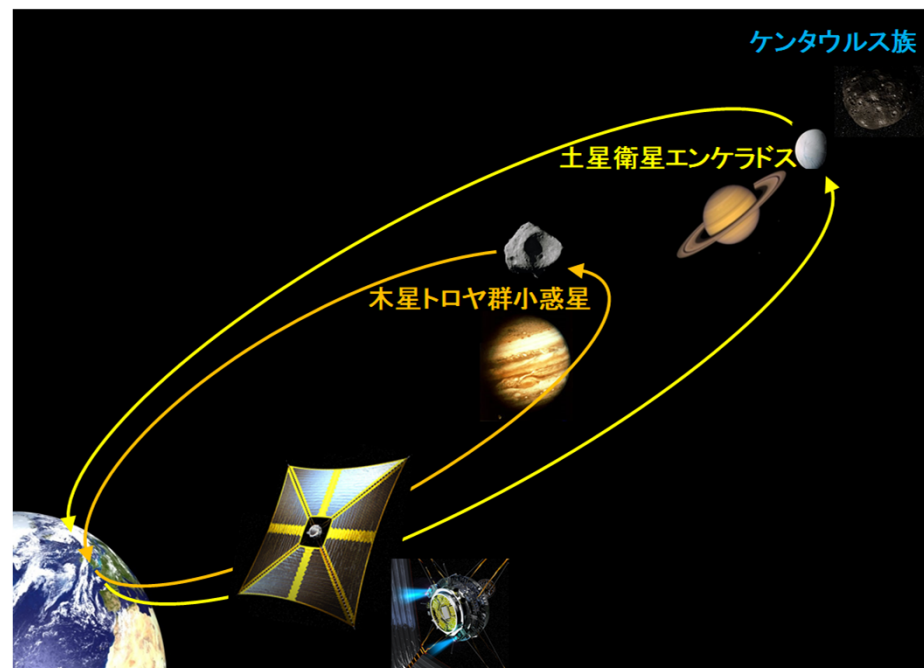
# ソーラー電力セイル(イオンエンジン案)が切り拓く探査

## 木星圏・土星圏の着陸・往復

- ・木星トロヤ群小惑星(特にD/P型)
  - ・土星衛星エンケラドス(氷衛星, 地下海)
  - ・ケンタウルス族(木星以遠に存在)
- ※ はやぶさ1,2が切り拓いた小天体探査を外惑星領域に拡張.

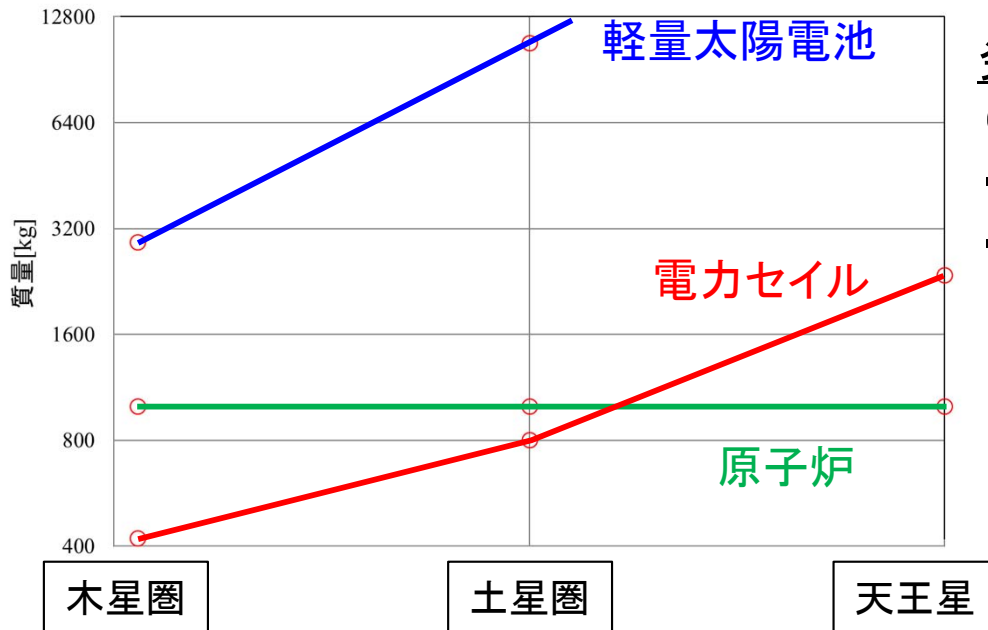
## クルージングサイエンス

ソーラー電力セイルの高い輸送能力を活用。  
(深宇宙プラットフォーム)



	木星圏	土星圏	天王星	海王星	冥王星, EKBO
フライバイ	●U ■U:Lucy	●U	●U	●U	●U:New Horizons
周回/ランデブー	●U:Galileo, Juno ■E/J:Juice ■U:Europa Clipper	●U	■U		<b>● 実績</b> <b>▲ 運用中</b> <b>■ 開発・検討中</b>  J = Japan; U = USA; E = ESA;
着陸	●U ■J:ソーラー電力セイル	●E:Cassini	■U		
サンプルリターン					

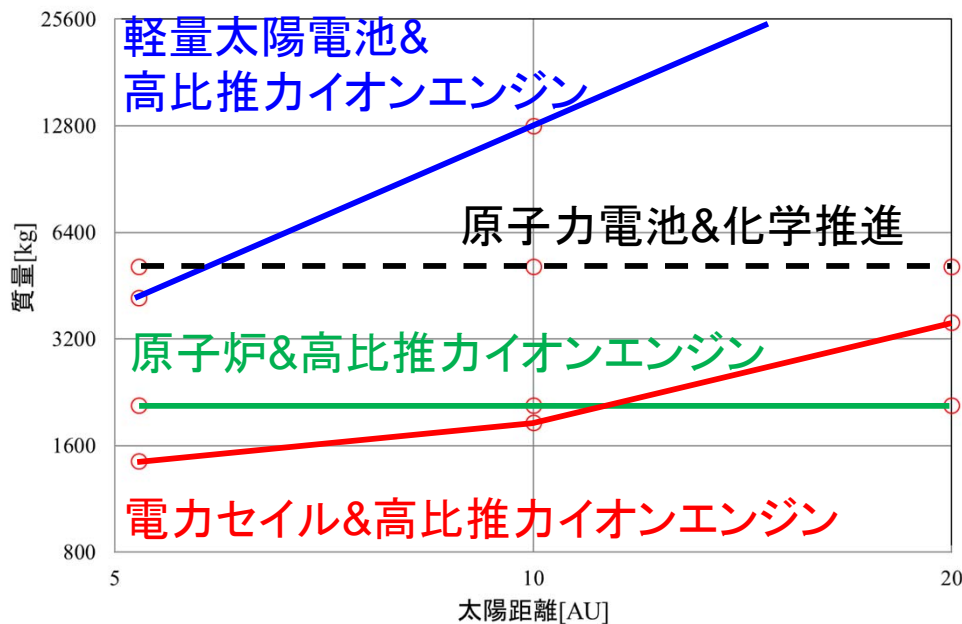
# 発電システムと輸送システム



## 発電システムの質量

(バス&イオンエンジン用に3.8kWを発電)

- ・軽量太陽電池と電力セルの質量は太陽距離に依存.
- ・最適な発電システム  
土星圏まで: 電力セル  
土星圏以遠: 原子炉



## 輸送システムの打上質量

( $\Delta V=6000\text{m/s}$ を実現する)

- ・最適な輸送システム  
土星圏まで: 電力セル & 高比推力イオンエンジン  
(2ton以下で実現可能)  
土星圏以遠: 原子炉 & 高比推力イオンエンジン
- ・軽量太陽電池 & 高比推力イオンエンジン,  
原子力電池 & 化学推進は超大型ロケットが必須.

# ソーラー電力セイル(ソーラーセイル案)が切り拓く探査

## 黄道面脱出

- ・太陽極域観測
- ・クロイツ族のフライバイ
- ※ SDVEGAにて木星に到達し、木星スイングバイを利用する。

## 太陽系脱出

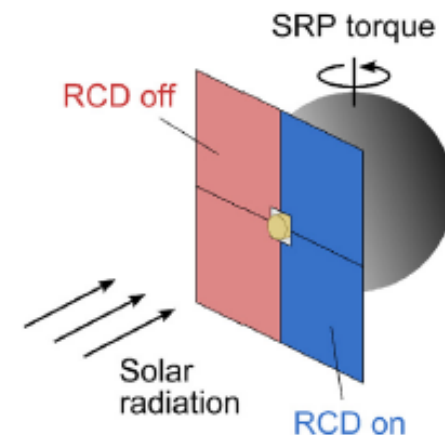
- ・EKBO等のフライバイ
- ※ 木星スイングバイ→太陽スイングバイ&ソーラーセイルで加速する。

## 小天体の軌道変更

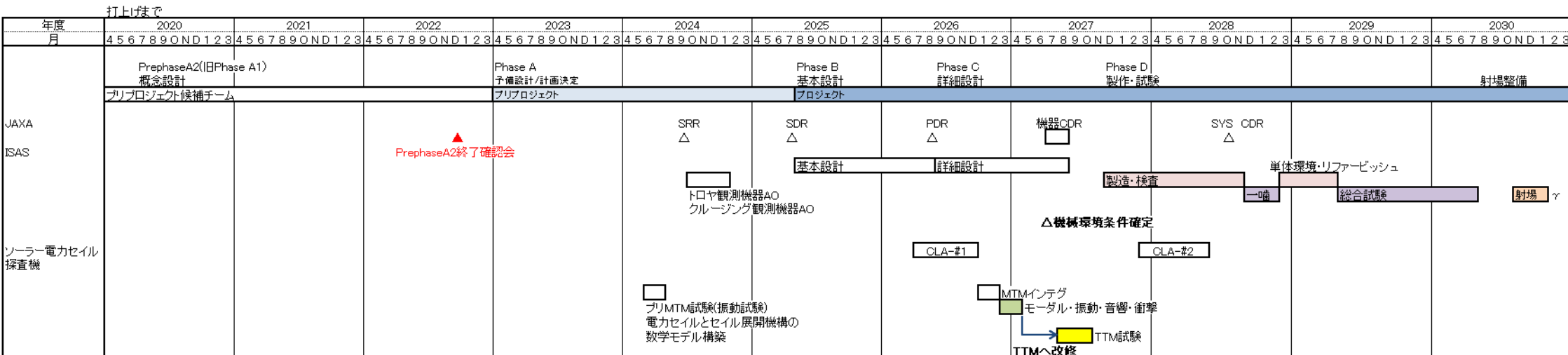
- ・スペースガード
- ※ 小天体にソーラーセイルを取り付ける。

## クーリングサイエンス

- ソーラーセイルの高い輸送能力を活用。  
(深宇宙プラットフォーム)



# スケジュール





# 技術のフロントローディング

「宇宙科学技術ロードマップ」に記載されている項目を中心に共通技術として開発を進める。

## ・薄膜太陽電池(電力セイル)

パネルではなくセイルを用いることで超軽量発電システムを構成する。

⇒ 世界最高200W/kg以上を開発・事業化につなげ、汎用品とする。

宇宙だけでなく、地上の発電システムにも応用する。

## ・イオンエンジン

イオンエンジンスラスタの高性能化(高比推力化, 高推力化, 長寿命化)

⇒ 例: 高比推力6100秒以上, 大推力24mN以上, 長寿命50000時間以上

イオンエンジン電源の高効率化・軽量化, イオンエンジンの運用性向上を実現する。

## ・ソーラー電力セイル

電力セイルは超軽量であり, イオンエンジン, ソーラーセイルは $\Delta V$ 燃料を減らせるため, 外惑星領域航行技術だけでなく, (超)小型衛星技術としても非常に有効である。

イプシロンロケットや相乗りでも有意義なミッション(コンステレーションなど)を提案し, 積極的に実証の機会を探る。

# 技術のフロントローディング

## ・自律航法誘導制御技術

降下・着陸を自律的に実施できるようにすることで重力天体や遠方天体等に広く適用できるようにする。

天体全体の画像を利用するAIT (Asteroid Image Tracking)

天体表面の特徴点を検出し利用するGCP-NAV (Ground Control Point Navigation)

天体表面の特徴点の動きから探査機の相対速度を検出し利用するOptical Flow

## ・試料採取・その場分析

サンプルリターンが困難な場合を想定して、その場分析技術を確立する。

外惑星系など遠方の天体で、往復期間が長大で実現困難

重力や大気の影響で、限られたリソースでの天体からの離脱が実現困難

揮発性成分(氷, 有機物, その他揮発性の高い物質)の保管／冷凍が困難

試料採取(表面・地下)技術と高精度質量分析技術を組み合わせる。

汎用化し, 月極域, 火星 & 火星衛星, 小惑星, 彗星等に転用可能とする。

# まとめ, 関連発表

---

- ・ソーラー電力セイルのミッション案を見直し, 戦略的中型計画3に提案する.
- ・新しい外惑星領域探査を切り拓くミッションを実現する.
- ・技術のフロントローディングを活用して, 技術リスクを低減し, 幅広いミッションに適用できるようにする.

## <ポスター>

- P1.29 OKEANOSの科学:クルーズ中のおよび木星トロヤ群小惑星の科学観測  
岡田 達明 (JAXA) ほか
- P1.30 ソーラー電力セイル探査機のミッション・システム検討状況  
杉原 アフマッド清志 (JAXA) ほか