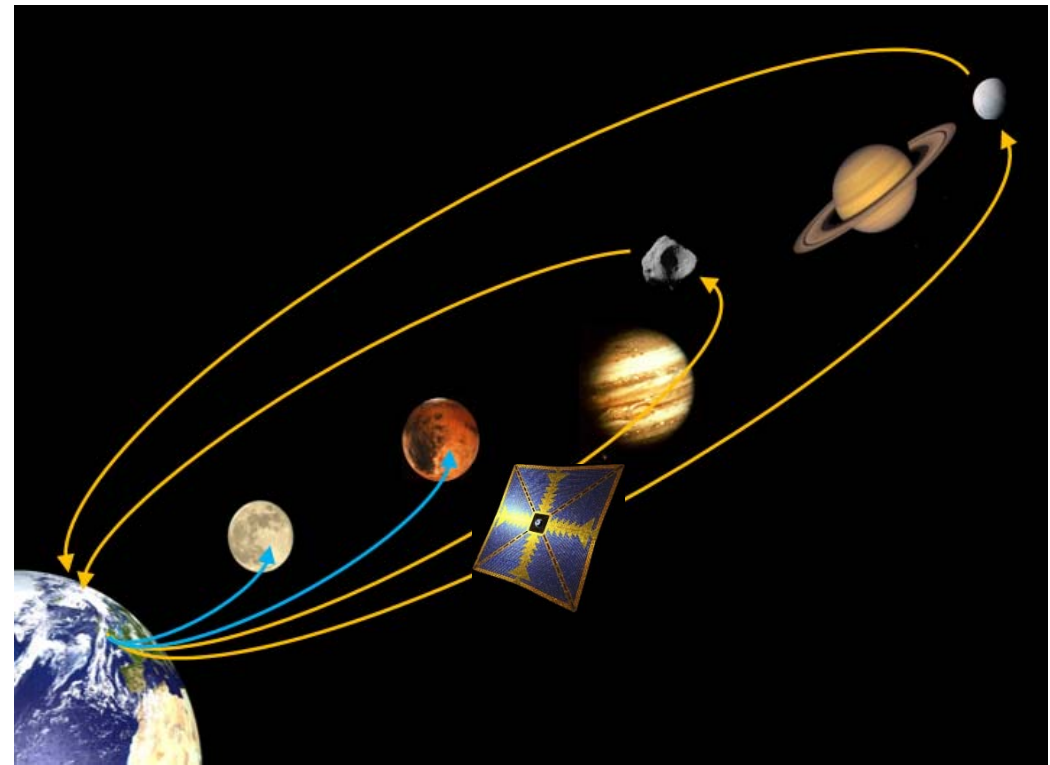
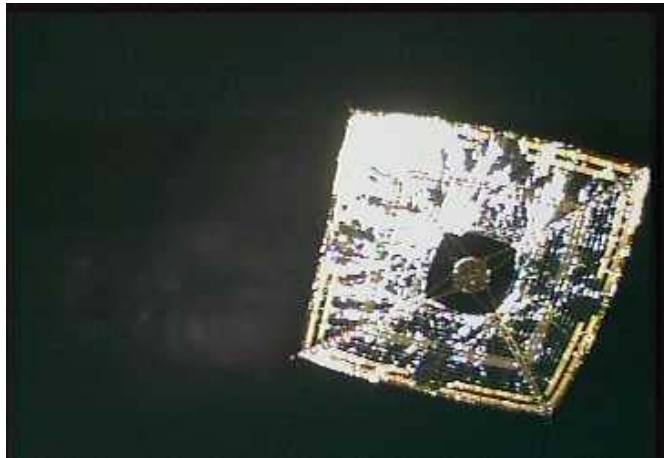


挑戦的ミッションと 信頼性の在り方



森 治 (JAXA)

宇宙科学・探査ミッションの実情

- ・日本と欧米の技術水準の格差

通信系技術(木星圏)

はやぶさ2:2Kbps v.s. New Horizons:38Kbps



New Horizons

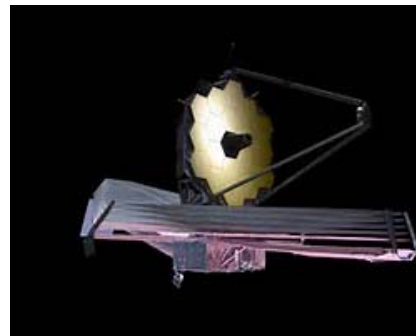
- ・日本と欧米の資金規模の格差

中型計画でも300億円

Rosettaは3000億円, JWSTは1兆円



Rosetta



JWST

挑戦的ミッション

技術水準と資金規模の格差を埋める ⇒ 新技術をリーズナブルに挑戦する

・単独ミッションによる挑戦

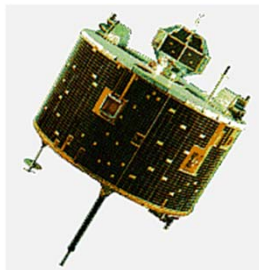
→ 特定の技術実証ミッション: 相乗り衛星

・シリーズ化(姉妹機)ミッションによる挑戦

→ 総合的な技術実証ミッション: 主衛星

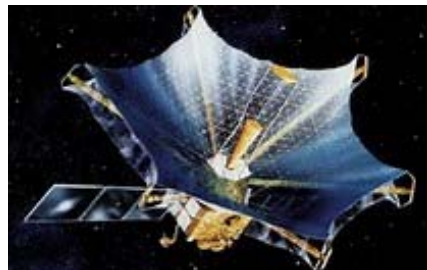
(現在: 中・小型計画, 過去: MUSES計画)

MUSES-A



ひてん

MUSES-B



はるか

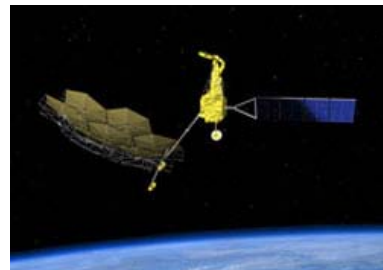
MUSES-C



はやぶさ



GEOTAIL



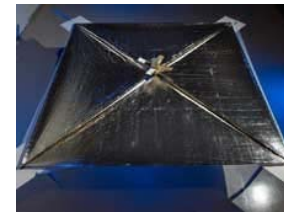
ASTRO-G



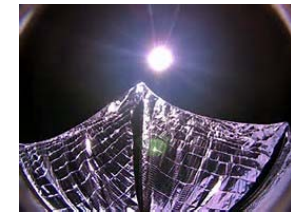
はやぶさ2

特定の技術実証ミッション

- ・小規模なコスト・体制で情報を共有しながらタイムリーに実行できることが重要.
- ・現状の中型計画や小型計画の枠組みではこの実現が難しい.
ロケットの費用が含まれ、大幅なコストダウンができない.
信頼性を思い切って下げることはできず、プロジェクトの進め方も慎重になる.
- ・相乗りを積極的に活用する.
ピギーバック(CubeSatなど)
大学中心に実施.
副衛星 (IKAROS, PROCYONなど)
IKAROSは300kg, 15億円規模



NanoSail-D2



LightSail-1

CubeSatでは、サイズの制約が非常に厳しい。

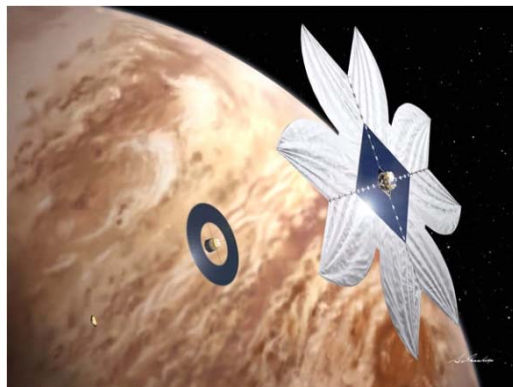
例えば、CubeSatを用いたソーラーセイルミッションが多数提案されているが、ほとんどが数mのセイル展開ミッションであり、IKAROSで実現した10m以上のセイル展開や光子加速による軌道制御を実施するミッションはほとんどない。

(多数のCubeSatを打ち上げることで新しいミッションが実現できる可能性あり)

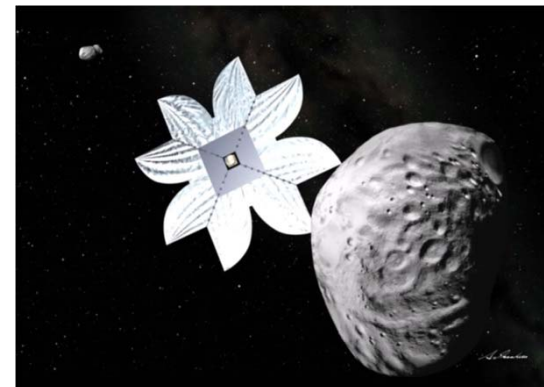
最近のロケットの高機能化・低価格化を踏まえると、副衛星によるミッションの枠組みをきちんと用意しておく必要がある。

IKAROS実施の経緯

- 2001年に宇宙工学委員会にソーラーセイルWGを発足した。
- 2003年10月にミッション提案を行い、宇宙工学委員会から次期工学ミッション候補として推奨された(JAXA統合の影響で、科学衛星の選定はしばらく行われず)。
- 2005年12月に宇宙工学委員会ソーラー電力セイル評価委員会より第25号科学衛星のフェーズAを開始する候補として推薦された。
- 2006年2月に開催された宇宙科学研究本部企画調整会議では、第25号科学衛星のフェーズAを開始する候補に選ばれなかった(ASTRO-Gが選定された)。
技術的なリスクについて指摘され、今後着実に準備が進められることが期待された。
- 2007年6月にイプシロンロケットを使った小型計画(30億円規模)を提案したが、コストが高いという点で認められなかった。
- 2007年7月にあかつきとの相乗りでの小型計画(15億円規模)を提案し、理事会にて認められた。



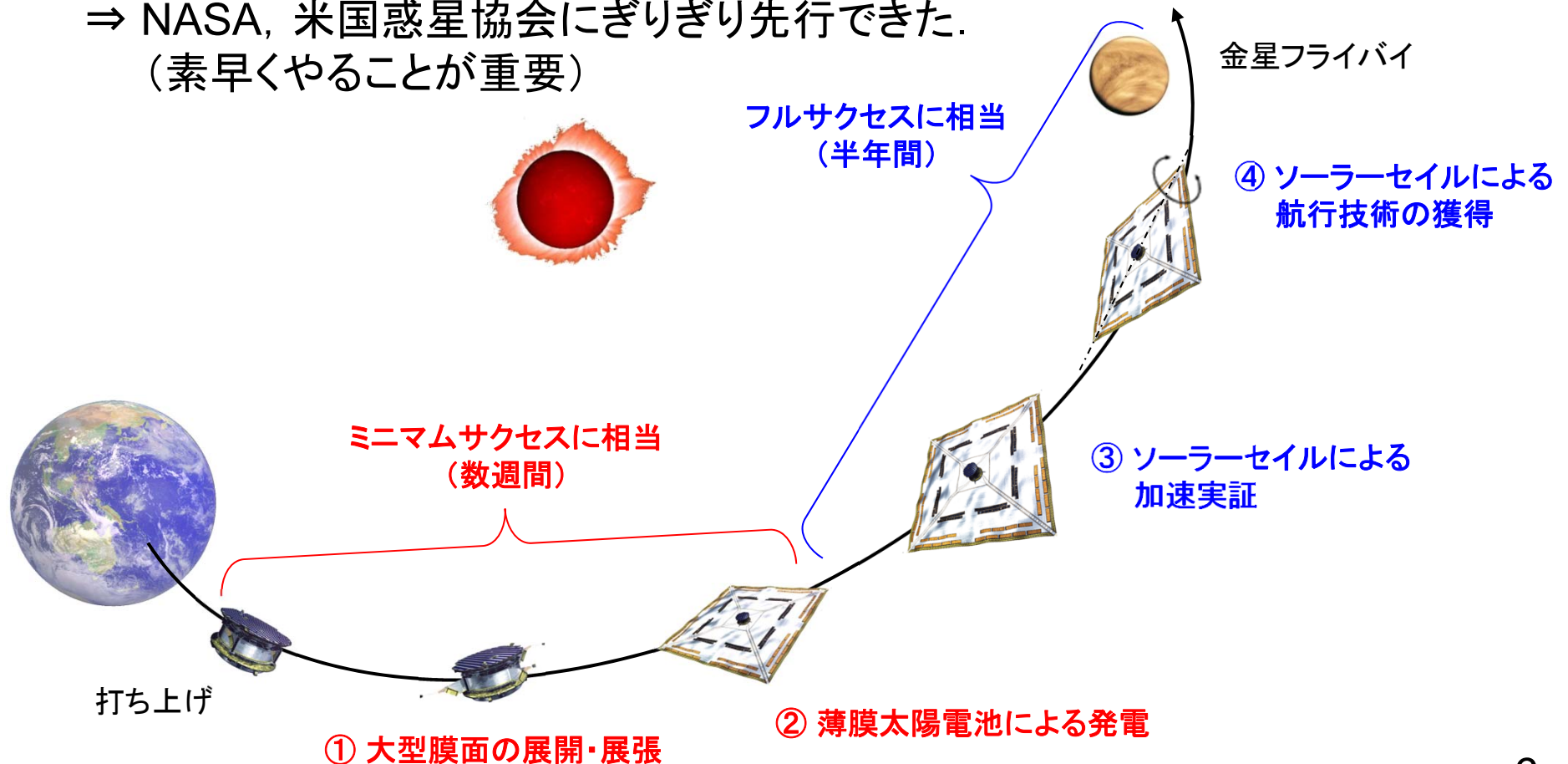
木星周回機



トロヤ群小惑星マルチフライバイ

IKAROSのミッション

- ・外惑星領域探査を目指すソーラー電力セイル探査機の開発リスク軽減のためのフロントローディングとする。
- ・単独ミッションとしても世界初・世界最先端の技術実証を目指す。
世界で初めてソーラーセイルおよびソーラー電力セイルを実証する。
⇒ NASA, 米国惑星協会にぎりぎり先行できた。
(素早くやることが重要)



IKAROS開発の制約と方針

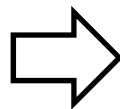
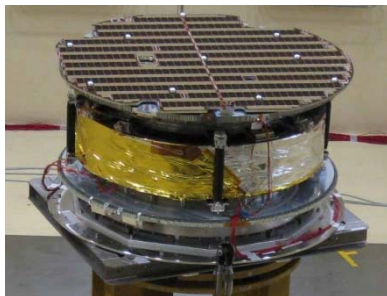
<制約>

- ・計画開始から打ち上げまでわずか2年半(従来の科学衛星の1/2~1/3).
- ・コストも非常に小さく15億円程度(従来の科学衛星の1/10規模).

<方針>

- ・開発スケジュールに適切なマージンを持たせた.
- ・バス部とミッション部のI/Fを明確にして, それぞれ独立に開発できるようにし, マンパワーをミッション部に集中した(CDRも別々に実施した).
- ・バス部はPFM方式とし, さらに, 他プロジェクトからの既存品・既開発品を多く採用した.
- ・ミッション部は若手職員, 学生が主体的に設計・製作・試験・運用を実施した.
ソーラーセイルWGにおいて事前研究をしっかりと行った.
- ・各サブシステムにおいて, ベテランの担当者に加わってもらい, 技術相談にのってもらった.

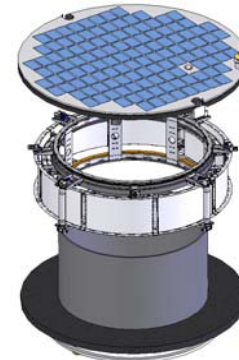
年度	2007				2008												2009					2010								
月	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05
開発フェーズ					詳細設計								フライトモデル製作・単体試験					総合試験					予備		射場作業					
イベント					▲ロケットI/F確定				▲バス系CDR				▲ミッション系CDR							打上▲										
					▲コンフィギュレーション確定																									



バス部



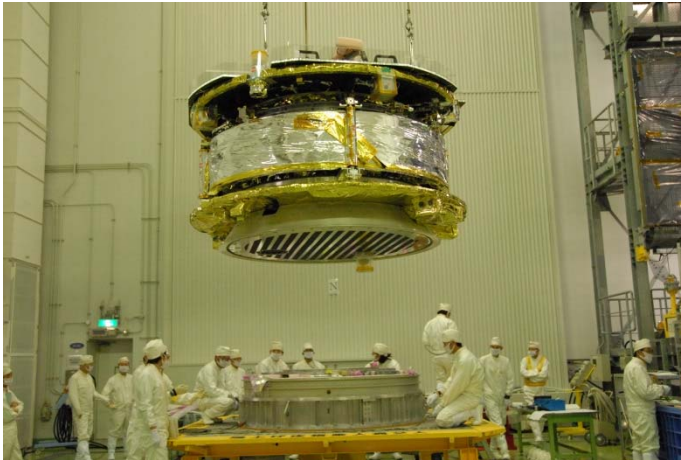
ミッション部



バス部の開発

- PFM方式の採用

構造モデルを製作しない代わりに、バス部を円柱とすることで機械環境の予測を容易にし、さらに構造重量も増やすことで振動試験を問題なくクリアした(ミッション部はセイルを抑えるのに苦労した)。熱モデルを製作しない代わりに、バス部の下面を放熱面とし、この面積で熱環境を調整可能とした。
→ 熱真空試験後に放熱面の面積を調整して打ち上げたが、一部の温度が想定以下の値となった。(放熱面の調整後に熱真空試験のやり直しは必要だった)

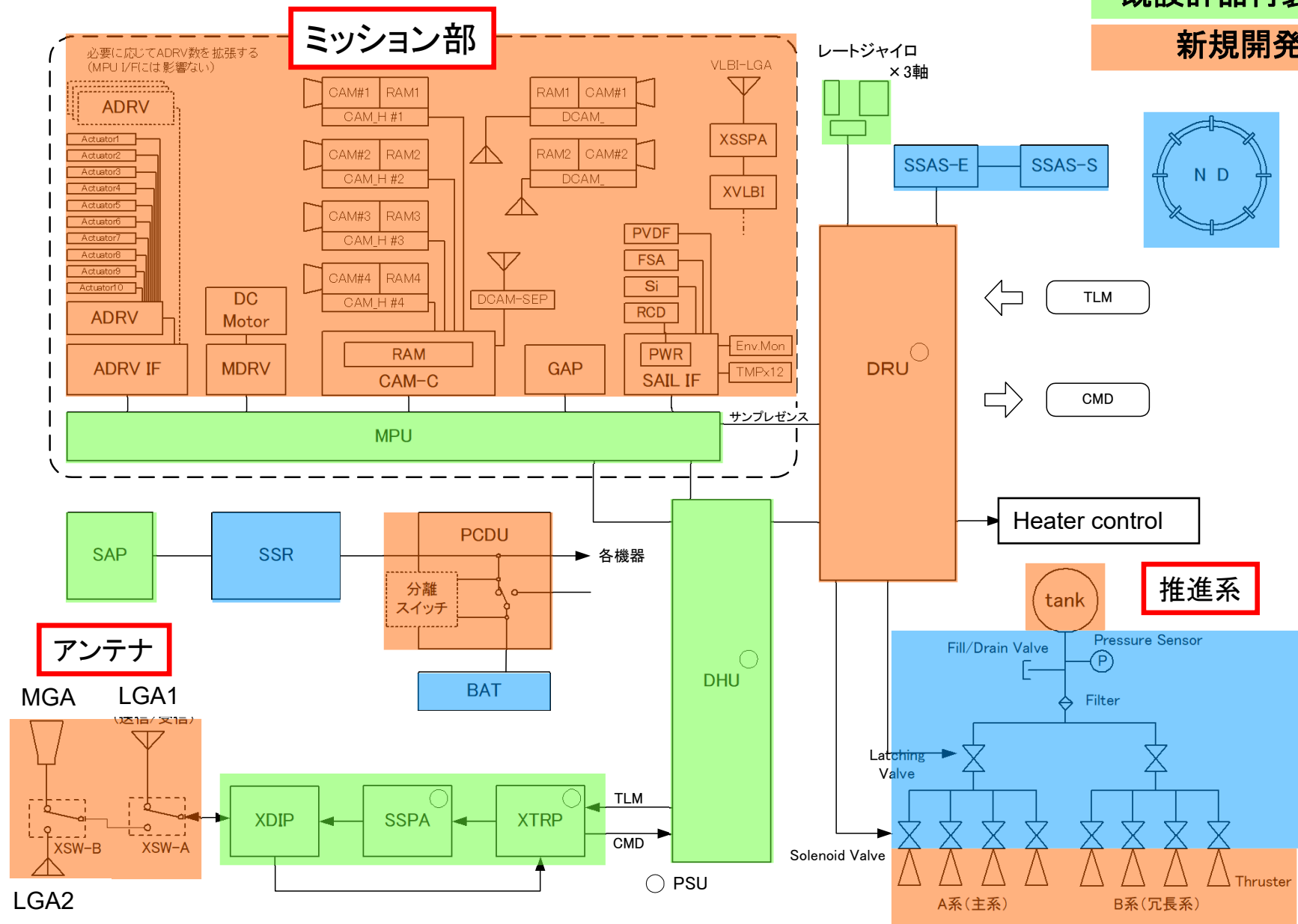


- 既存品の流用, 既設計品の再製作

はやぶさ, LUNAR-A, M-Vロケット, DRTSの利活用品を積極的に用いた
→ バルブ類等の長納期部品の流用はスケジュール短縮に効果があったが、最低限の信頼性確保のためにリファービッシュや追加試験が必要となった。
DHU等は、オーバースペックであるが、あかつきの既設計品を再製作した。

システムブロック図

- 既存品流用
- 既設計品再製作
- 新規開発



システム設計の考え方

- 設計寿命
 - セイルの展開・展開の確認・集電に関する機器(ミッション系):打ち上げ後30日
 - 上記以外の機器(バス系):半年
- 信頼度
 - バス系:打ち上げ半年後の残存確率0.8以上
 - ミッション系:信頼度を定義しない
- 冗長性
 - コスト制約を鑑み, 基本的に冗長設計は要求しない
 - ただし, その部品の単一故障によりミニマムサクセス失敗に直結するような箇所については, 冗長(または代替手段)を確保するか, それが出来ない場合は, 標準部品(c.f. 部品プログラム)の使用や各種評価試験により十分な信頼度を確保すること
- 故障の隔離
 - ひとつのサブシステム, コンポーネントの故障が, 他のサブシステム, コンポーネントの故障を誘発しない設計であること.
 - 特に, 各サブシステム, コンポーネントの故障が電源系サブシステムに対する短絡モードとならない設計であること.
- 設計基準
 - 電気設計基準, 機械設計基準, 熱設計基準, 耐環境性設計基準, EMC設計基準, テレコマ設計条件書, 部品プログラムに準拠して設計すること

部品プログラムの概要

- 部品の分類
 - **クリティカル部品**: その部品の不具合によりIKAROSの**全機能喪失あるいはミニマムサクセス失敗につながる部品**
 - ノンクリティカル部品: 上記以外の部品
- 部品レベルの定義
 - 標準部品: 科学衛星部品プログラムで規定されている標準部品 + 実績部品
 - 非標準部品: 上記以外の部品
- 部品のクリティカリティと、対応する推奨部品レベル
 - 標準部品であれば問題なし。非標準部品を使用する場合は以下の使用条件に従う。
- **非標準部品の使用条件**
 - **クリティカル部品への適用**: 「スクリーニングの実施 + 放射線耐性の確認」または、「冗長設計や信頼性向上のための評価試験」など個別の対策を実施し、部品の適用審査を受けること
 - ノンクリティカル部品への適用: 各機器責任において使用可能
- 耐放射線性要求
 - 使用される環境や機器自体の特性を考慮し、科学衛星部品プログラムの耐放射線性要求に従う
- 流用品について
 - 各流用品がIKAROS設計基準を満たすことを確認すること
 - コスト・スケジュールの制約を考慮しつつ、**品質・信頼性・放射線耐性・経年変化について十分評価し、部品の適用審査を受けること**

廣瀬先生に部品プログラムを確認いただいた。

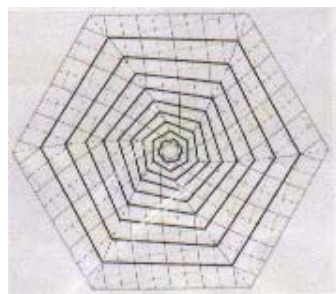
現状の中・小型計画では、標準部品が必須になっている。

(信頼性について思い切った進め方はIKAROS規模でないと厳しいかもしれない)

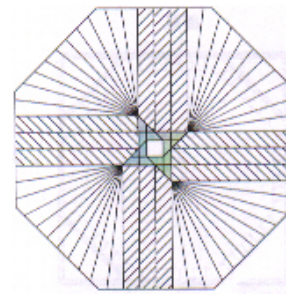
ミッション部の開発

構造系・材料系・軌道系について、それぞれの専門部会を設立し開発を進めた。
例えば、構造系専門部会で最初に、膜面形状・折り方の選定を行った。

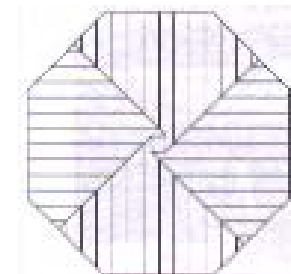
一枚膜
一段階展開
先端マスなし



らせん折り

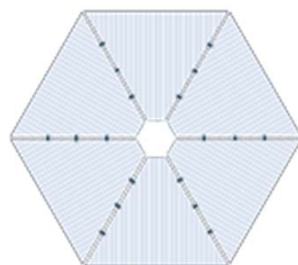


複合螺旋折り



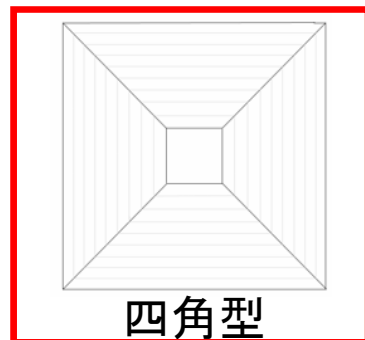
回転二重折り

ブリッジ接合
一段階展開
先端マスなし

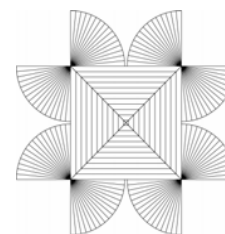


平行折扇子型

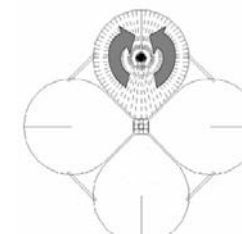
ブリッジ接合
二段階展開
先端マスあり



四角型



クローバ型



逆傘型

大型膜面の展開実験(ソーラーセイルWG)

逆傘型
(動的展開)



真空槽(φ0.8m)

クローバ型
(動的展開)



スピントーブル(φ2.5m)

四角型
(準静的展開)



スケートリンク(φ10m)



大気球B30(φ4m)



S-310観測ロケット(φ10m)



大気球B200(φ20m)

2003.8

2004.8

2006.8

ソーラーセイルWGでの研究成果をIKAROSミッションに集約することで
IKAROSは非常に短い開発期間(2.5年)にもかかわらず、成功することができた。¹³

若手職員・学生によるミッション部の開発



セイルの開発



セイルの収納



セイルの展開運用

若手職員・学生が中心となることで小規模でタイムリーな開発が実現できた。

14

人材育成

IKAROSチームから、はやぶさ2の中心メンバーを多数輩出

<はやぶさ2での担当例>

- ・プロジェクト管理
- ・システム
- ・軌道計画
- ・軌道・姿勢制御系
- ・化学推進系
- ・衝突装置
- ・サンプル
- ・航法カメラ, 分離カメラ
- ・データ処理系
- ・地上系
- ・軌道決定系

IKAROSに加わった学生/PDがその後,

JAXA職員になり, 相模原キャンパス勤務となった人数は8名

※ 挑戦的ミッションに加わることは若手職員・学生にとって貴重な機会となりえる。
(メーカーが開発・運用の主体となることで, このメリットが失われる可能性がある)

総合的な技術実証ミッション

技術水準と資金規模の格差を埋めるためには総合的な技術実証ミッションとして実験機が有効。

- ・実験機に続いて本番機を投ずるという戦略(姉妹機とする)。
実験機と本番機的具体例としてははやぶさ1とはやぶさ2を想定。
実験機と本番機は別々にプロジェクト化する(国際共同の道もあり)。
- ・実験機であっても本番機で想定している理学観測を同様に実施する。
- ・理学成果の保証は求めない(できない)。
はやぶさは500点満点に理学成果は含まれていない。
- ・繰り返しにより、不確定要素を取り除き、信頼性を高める。
ただし、最低限のミッション成果は確実に達成できるような仕掛けとする。

以上の考え方を踏まえ、宇宙探査技術実証ミッションを束ねた

「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」

を日本学術会議が策定するマスタープランに提案し、

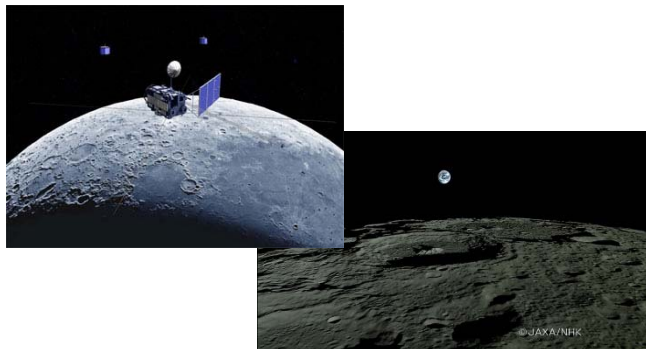
マスタープラン2014, 2017において重点大型研究に選定された。

計画の概要: 4つの技術項目

「太陽系の任意の天体に着陸して長期滞在を行い，地下試料を持ち帰る」

- ・今後の宇宙探査に必須の技術を宇宙実証により獲得する。
→ **重力天体突入・降下・着陸**，**表面長期滞在**，**外惑星領域往復**，**地下試料採取**
- ・貴重な飛翔機会を活用して，科学成果を追及する。

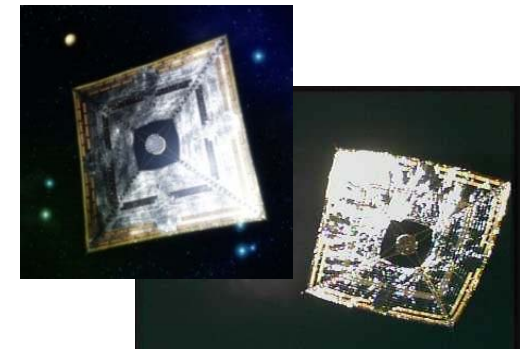
技術分野	すでに実証した技術項目	本計画で実証する技術項目
接近	重力天体周回(かぐや) 小天体降下・着陸(はやぶさ)	重力天体突入・降下・着陸
表面滞在	表面短期滞在(はやぶさ)	表面長期滞在
航行	イオンエンジンによる内惑星領域往復(はやぶさ) ソーラーセイルによる航行(IKAROS)	外惑星領域往復 (ソーラーセイル&イオンエンジン)
試料採取	表面試料採取(はやぶさ)	地下試料採取



かぐや



はやぶさ

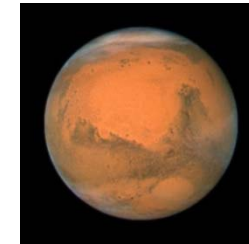


IKAROS

計画の概要: 4つのミッション

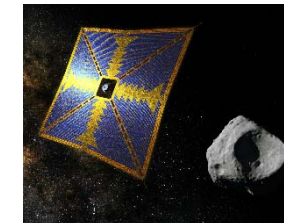
重力天体突入・降下・着陸 & 表面長期滞在の技術実証

- ⇒ **月面長期滞在技術実証ミッション**
(環境の厳しい月面での長期間の表面滞在技術の実証)
- ⇒ **火星探査技術実証ミッション**
(大気のある重力天体突入・降下・着陸技術の実証)

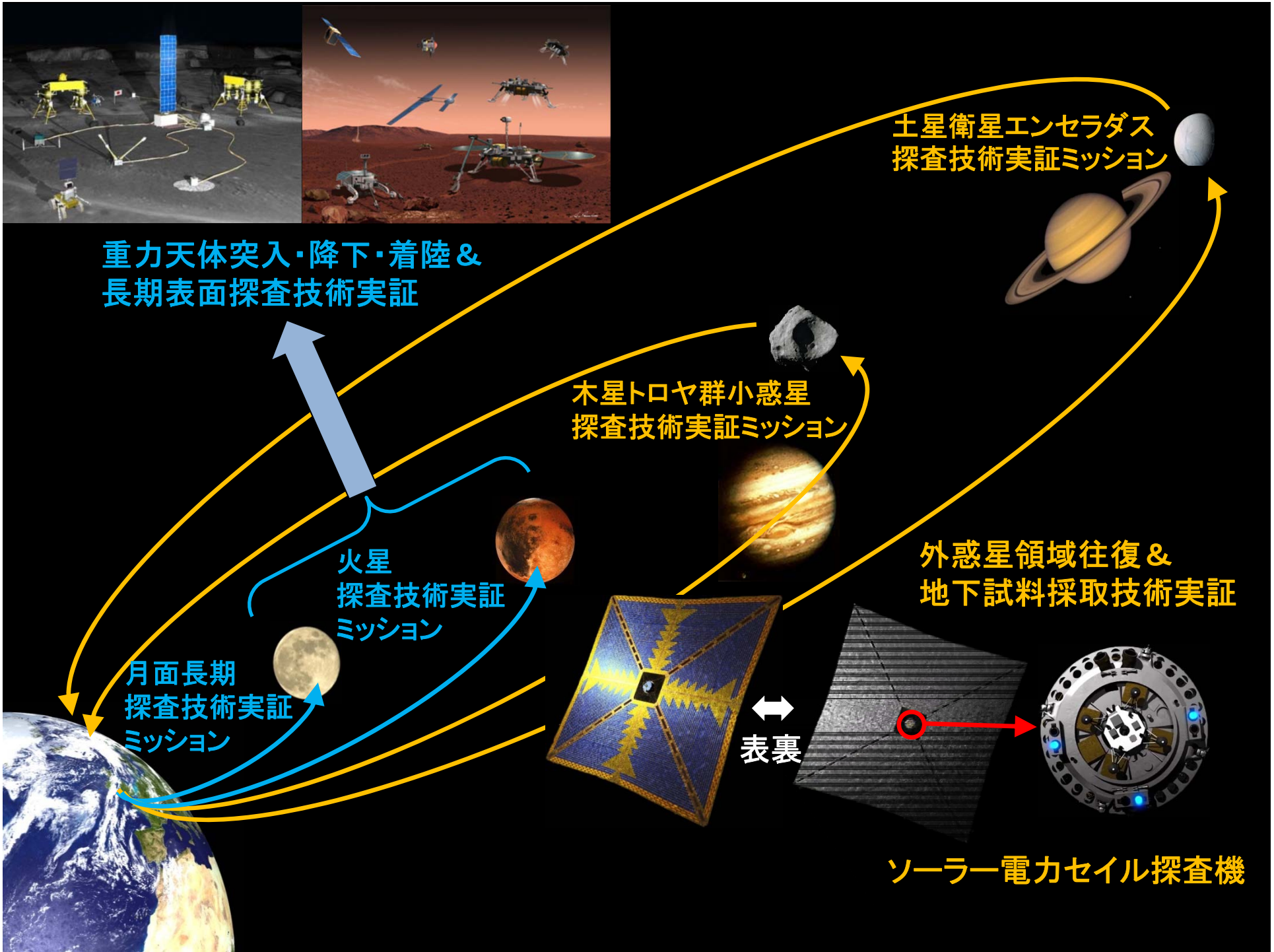


外惑星領域往復 & 地下試料採取の技術実証

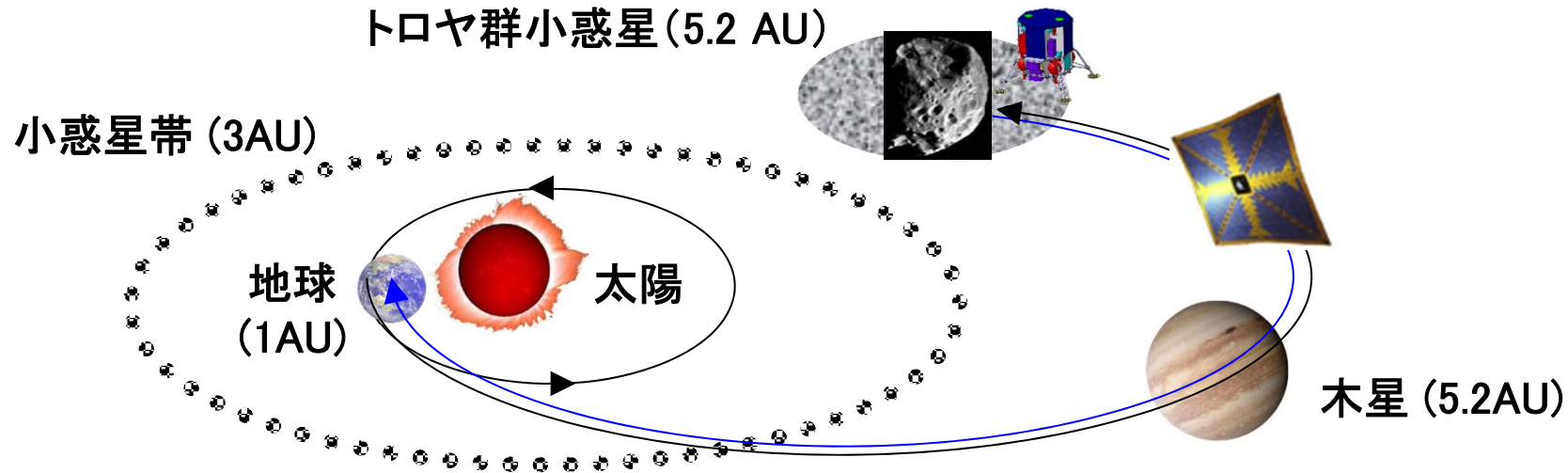
- ⇒ **木星トロヤ群小惑星探査技術実証ミッション**
(ソーラー電力セイルによる外惑星領域往復の実証)
- ⇒ **土星衛星エンセラダス探査技術実証ミッション**
(氷衛星の内部海の試料採取・分析技術の実証)



4つの技術項目を4つのミッションによって実証・獲得する。



木星トロヤ群小惑星探査技術実証ミッション



<技術実証>

航行技術の実証

- ・ソーラー電力セイル探査機による
外惑星領域航行・往復

探査技術の実証

- ・トロヤ群小惑星へのランデブー・着陸
- ・表面・地下試料の採取・分析

理学観測に関するサクセスクライテリア

フルサクセス :クルージング・ランデブーフーズの理学観測の実施

エクストラサクセス :クルージング・ランデブーフーズの理学成果の獲得

※ 結果として得られる理学成果については明らかにして、国際評価も受ける。

<理学観測>

クルージングサイエンス

- ・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)

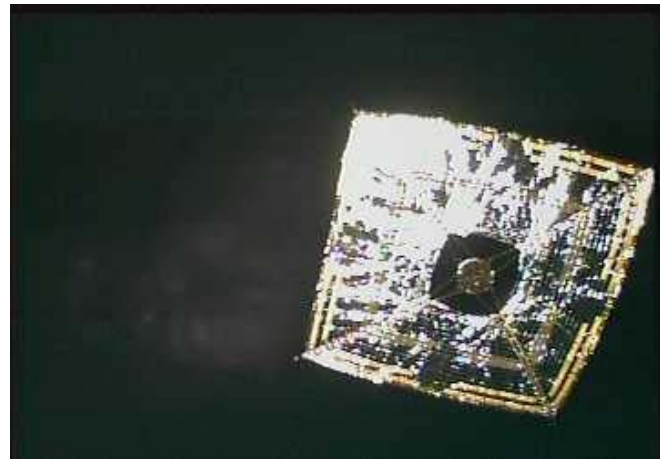
- ・磁場観測 (MGF)

トロヤ群サイエンス

- ・トロヤ群小惑星の観測・試料分析

まとめ(挑戦的ミッションの進め方)

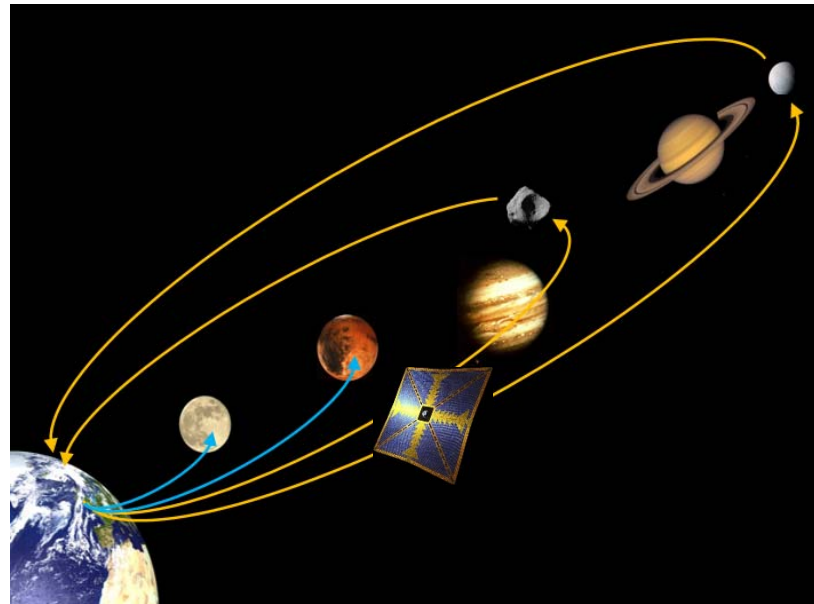
- ・挑戦的な技術実証のミッションとしての価値が認められるべき.
技術格差と資金格差を埋めて日本がプレゼンスを発揮するためには必要.
- ・現状の中・小型計画以外に相乗りの副衛星プログラムを用意すべき.
総合的な技術実証以外に特定の技術実証が可能になる.
格安で情報を共有しながらクイックに実現する.
システム設計・部品プログラムなど信頼性について思い切った進め方をする.
若手職員・学生主体の開発・運用も視野に入れる(プレイヤーの育成).
ベテラン職員が適宜サポートする(審査が絡むと相談しにくい).



副衛星ミッションによる挑戦

まとめ(挑戦的ミッションの進め方)

- ・総合的な技術実証では、技術実証と理学観測の両方を行う。
期待できる理学成果については明らかにし、きちんと評価されるべきである。
理学成果を担保するのは難しい。
- ・挑戦的ミッションを提案する前にWGで研究開発を十分に行う必要がある。
気球実験や観測ロケット実験など大規模な実験まで実施できる環境を担保し、
無謀な挑戦とならないようにする。



シリーズ化ミッションによる挑戦

まとめ

挑戦的なミッションを実現しやすい環境を整え、
継続的に技術実証を実施することで、
日本が今後の宇宙科学・探査を先導すべき。