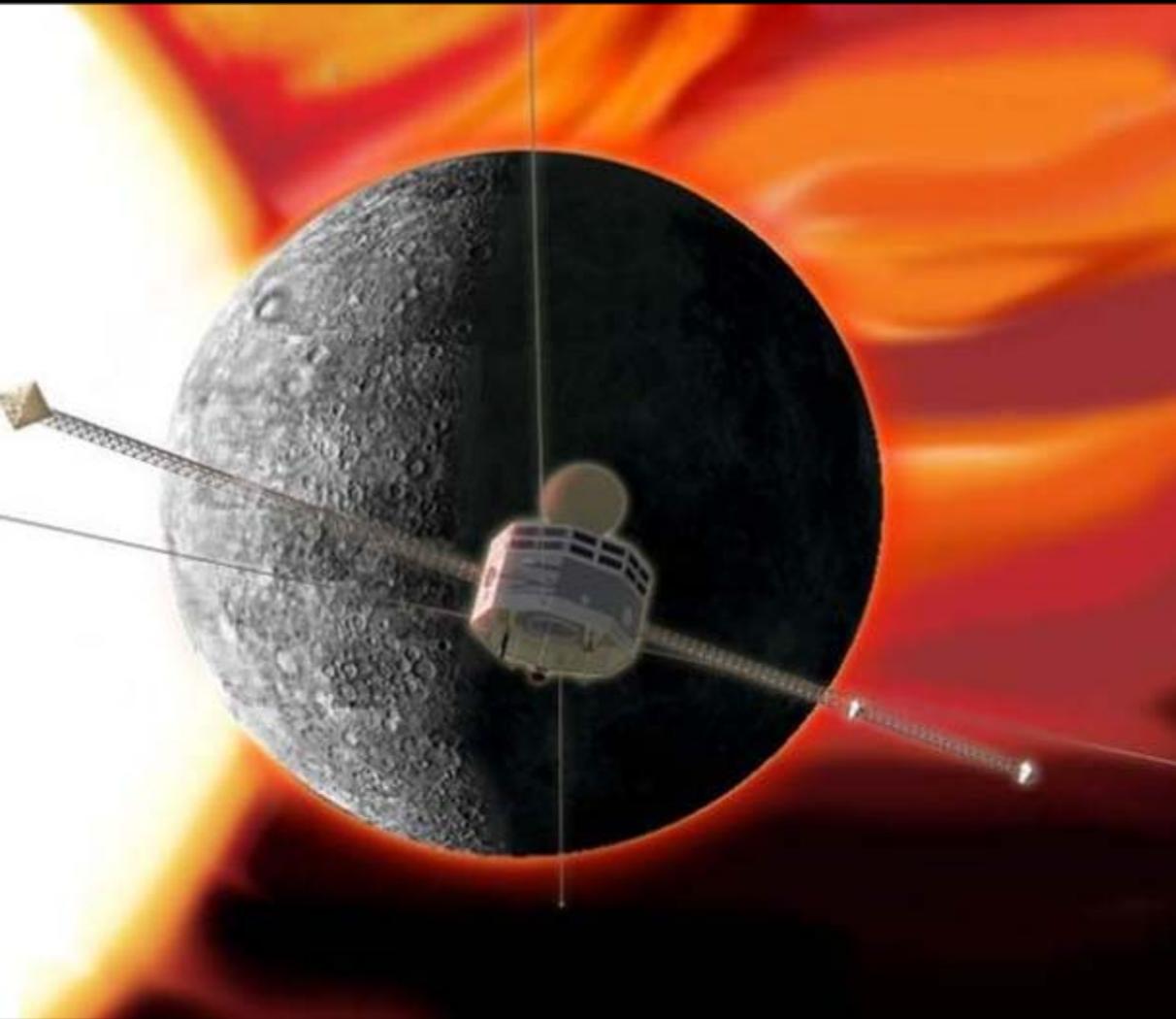


水星探査計画(BepiColombo)プロジェクトについて



打上予定: 2013年
観測予定: 2019年
1年間の観測を予定

宇宙航空研究開発機構

早川 基

2008年1月15日

目次

	ページ
0. 概要	3
1. 目的	7
2. 目標	14
3. 開発方針	24
4. システム選定と基本要件	25
5. 開発計画	43
6. リスク管理	50
参考	58

0. 概要

0-1. 水星計画の背景

水星は紀元前からその存在が知られるが、太陽に近い灼熱の環境と、軌道投入に多大な燃料を要する事から、周回探査機の実現は困難であった。その為これまで辿り着いた探査機は、未だに米国マリナー10号の3回にわたる通過(1974-5)のみである。

しかしこの探査は、予想だにされなかった磁場と磁気圏活動の発見をもたらした。地球との比較は、地球の磁場と磁気圏の理解を深め、惑星磁気圏の普遍性と特異性の解明へ大きなステップとなる。また磁場の存在は、巨大な鉄の中心核を持つこの惑星の形成史に遡ると考えられる。しかしこれらの究明は、30年以上にわたる夢に留まってきた。

耐熱技術の進展に代表される技術革新が、この大きな壁を取り除きつつある。一番乗りを目指す米国は、いち早く小規模の“ディスカバリーミッション”の一環として、周回探査計画「MESSENGER」を打ち上げた。(平成16年打上、平成23年到着予定)。

日本では、高い実績を挙げてきた磁気圏分野などの科学者集団と宇宙工学研究者の密接な協力により、平成10年にスピコン型探査機の提案を行うに至った。

この計画と欧州計画との合流によって誕生した日欧共同水星探査計画「ベピ・コロombo (BepiColombo)」は、ESAでは大規模の“コーナーストーン*”ミッションであり、水星の全貌解明に挑む。

MESSENGERは初の水星周回衛星となるため、多くの発見がMESSENGERによってなされると期待されるが、謎を解き明かすには至れないと考えられている。マリナー10号、MESSENGERにより想起された謎をBepiColomboの総合観測で明らかにするという理解の元、現在国際協力の枠組みについて議論が行われている。

* 科学的なインパクトがあるが、多額の予算を要する大型のミッションのことをESAではコーナーストーンミッションと呼ぶ。BepiColomboはESAとして5番目のコーナーストーンミッションである。

日本：水星探査計画
欧州：BepiColombo計画

BepiColombo計画

[平成25打上、平成31到着]

平成 9年 6月	水星探査ワーキンググループを公式結成	(旧ISAS)
平成10年11月	日本独自の水星探査計画を提案	(旧ISAS)
平成11年11月	ESAからISASへ、BepiColombo水星探査計画の共同検討の提案	(ESA→旧ISAS)
平成12年 9月	ISASからESAへ、共同計画への参加意志を表明	(旧ISAS→ESA)
10月	ESAで、BepiColombo計画が次期Cornerstone[大型ミッション]として正式選定	(ESA)
平成13年 9月	国際水星科学ワークショップの開催	
9月	宇宙理学委員会に提案	(旧ISAS)
平成15年 6月	宇宙開発委員会による開発研究着手前の事前評価	
平成16年 8月	宇宙開発委員会による進捗状況確認	
平成16年11月	搭載科学観測機器を公募により決定	(ESA, JAXA)
平成17年 3月	プロジェクト移行審査 (PRR)	(JAXA)
平成19年 2月	ESAの閣僚会議でBepiColombo打上げまでの費用を正式承認	(ESA)
平成19年11月	宇宙開発委員会による事前評価準備が整った	

0-3. 打上げ時期および システム構成の変更について

- ESAとの協力を開始した当初は平成22年打上げ、平成26年到着を想定。
- 平成15年11月 ESA側の予算プロファイルの問題から平成24年打上げ、平成28年到着に変更。また、着陸機(MSE)の開発に必要なコスト(約900億円)に対して期待される成果(想定寿命:約2週間)が小さすぎること、開発のリスクが大きすぎることから着陸機(MSE)をキャンセル(平成16年 8月の宇宙開発委員会にて進捗状況確認を行い、了承された)。
- 平成17年12月 質量・コストの制約によるESA側スケジュール遅延に伴い平成25年打上げ、平成31年到着に変更。
- BepiColomboプロジェクトはESA、JAXA双方の協力の下に進められている国際協力プロジェクトであり、「5-1. BepiColombo スケジュール」、「5-2.スケジュール上の留意点」に記載されている様に、打ち上げ時期(平成25年)を守るためには**来年度には開発作業に着手する必要がある**。

1. 目的

1-1. プロジェクトの目的

概要

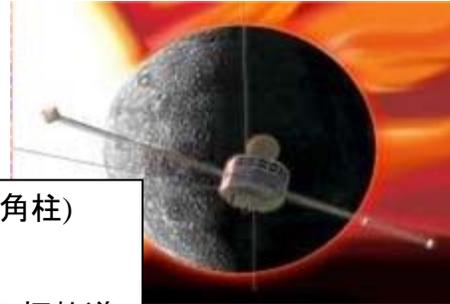
・欧州宇宙機関(ESA)との国際協力により、謎に満ちた水星の磁場・磁気圏・内部・表層にわたる総合観測で水星の現在と過去を明らかにする

期待される成果と効果

- ・固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星の初探査により、惑星の磁場・磁気圏の知見に大きな飛躍(MMO)
- ・特異な内部・表層の全球観測により、地球型惑星の起源と進化の解明に貢献(MPO)
- ・2機の衛星観測による磁場の外部・内部起源の分離。磁気圏現象の原因と結果の同時観測
→ 1機だけの観測に比べ質的な飛躍が期待される



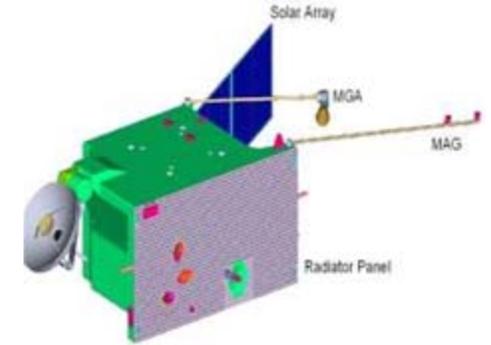
水星磁気圏探査機 (MMO)



直径: 180cm(八角柱)
高さ: 90cm
質量: 250kg
周期: 9.3時間の極軌道



水星表面探査機 (MPO)



固有磁場の成因
特異な磁気圏
希薄大気の生成・消滅過程
太陽風との相互作用の観測

巨大な鉄の中心核
形成初期の姿を残す表面地形
鉱物・元素組成
極の氷の存在検証



BepiColomboの目的



- ・惑星の磁場・磁気圏の研究飛躍
惑星環境(現在)の理解
- ・太陽に一番近い領域で起きた惑星形成の秘密に迫る
起源と進化(過去)の解明

我が国における宇宙開発利用の基本戦略 (平成16年9月9日 総合科学技術会議)

多くの人々に夢や希望を与えるべく、未知のフロンティアとしての宇宙に挑む。宇宙空間を探索し、利用することにより、宇宙の起源、地球の諸現象などに関する根源的な知識・知見を獲得する。

宇宙開発に関する長期的な計画 (平成15年9月1日 総務大臣、文部科学大臣、国土交通大臣)

地球及び惑星の大気や磁気圏、太陽圏空間プラズマの観測的・理論的研究を推進し、宇宙空間の環境の理解及び地球環境の普遍性と特殊性の解明を行う。

科学的意義

- 惑星環境の理解 (主としてMMO)[現在]
- 起源と進化の解明 (主としてMPO)[現在→過去]

惑星の大気や磁気圏、太陽圏空間プラズマの観測的・理論的研究を推進し、宇宙空間の環境の理解及び水星環境の普遍性と特殊性の解明を行う。

技術的意義

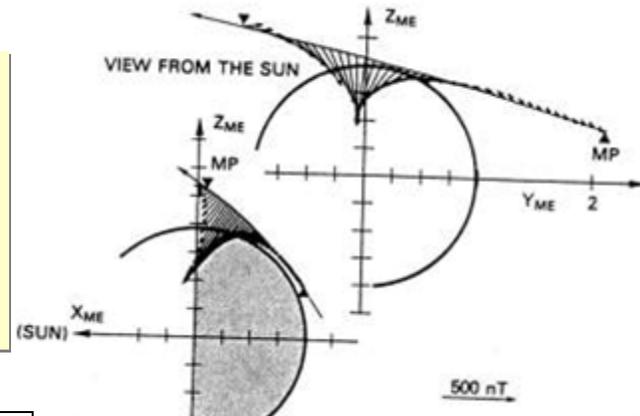
- 水星周回軌道の「厳しい環境下で1年間」の「高性能観測」を実現

耐環境技術・軽量化技術の進歩、科学観測機器の性能向上により、太陽系における到達可能・計測可能な領域を拡大する。

社会的意義

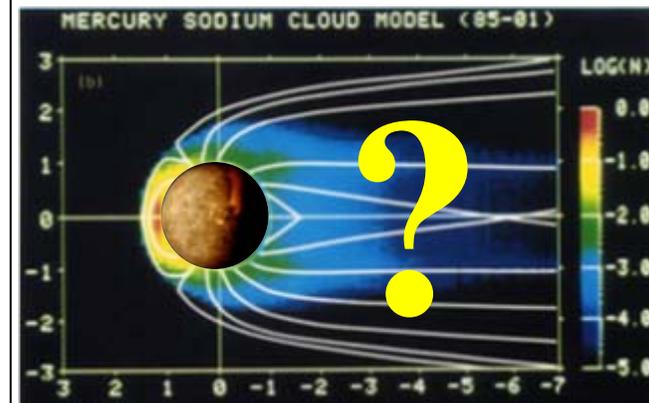
- 国際協力: 宇宙科学における日欧国際共同プロジェクトの推進によって、国際社会への責務を果たす。
- 社会への還元: 社会からの強い関心に応える。実践的教育機会を供給する。

固有磁場を有する地球型惑星は、水星と地球だけである。
この両者の比較は、地球周辺環境の更なる理解に貢献する。また、更に広く、宇宙に存在する様々な磁気圏の特殊性と普遍性を知るための大きなステップとなる。



Mariner10による水星磁場の発見

固有磁場は、水星内部状態と熱史の重要な手掛かりとなる。



水星磁気圏・Na大気モデル

電離圏がない太陽系最小の磁気圏の探査は、惑星磁気圏の比較研究を創出する。

○固有磁場の成因の解明を目指す

→水星の内部構造と進化の理解を深める

○地球と異なる特異な磁気圏の解明を目指す

→地球との比較によって普遍性と特異性を明らかにする

○激しく変動する希薄な大気（ナトリウムが主成分）

→生成・消滅過程とその原因の解明を目指す

○太陽近傍の惑星間空間の観測

→高マッハ数の衝撃波を観測し、そのエネルギー過程の解明を目指す

- 水星周回軌道の「厳しい環境下で1地球年間」の「高性能観測」を実現

耐熱技術：過酷な高温環境における探査基盤技術

10倍の太陽光強度、約500°Cに達する水星表面からの輻射
将来の太陽観測衛星・金星気球のシステム・観測装置技術の基礎

耐放射線技術：高放射線環境における探査基盤技術

将来の放射線帯観測・木星探査のシステム・観測装置技術の基礎
特に耐放射線半導体部品の開発では、民生移転も展望

軽量化技術：高機能・低コストミッションの基盤技術

将来の探査機システム・観測装置の性能向上・コストダウンの基礎

科学観測機器：国際的な競争・共同開発環境の導入

公募で選定された日欧共同チームによる世界トップクラスの観測機器を搭載

- 国際協力 ～国際社会における文化国家・日本の責務を果たす～

ESA-JAXAおよび日欧研究者協力

今後の日欧共同宇宙科学ミッションの礎を作る

太陽系科学全般における欧州全体との深い協力関係を樹立する

探査機・科学観測機器技術の交流

探査機・観測装置を介した日欧の研究者・技術者間の技術交流を図る

- 社会への還元

知の創造を目指す宇宙科学に対する社会からの強い関心に応える

火星探査機「のぞみ」署名応募:27万人、「はやぶさ」署名応募:88万人、

「かぐや」署名応募:41万人

太陽系科学に対する国内外の強い関心に応える

実践的教育機会の提供: 社会へ有為の人材供給を行う

大学共同利用機関として、理工学に跨る幅広い分野の大学院教育を担い、探査機開発現場を実践的教育機会として活用する

1-3. 役割分担

JAXA: MMOの製作及び水星周回軌道における運用
 ESA: MPO及び全体システムを担当。
 両衛星の搭載観測器は公募により選定
 科学観測データに関しては両者がともにデータアーカイブを行う。

	衛星開発	打上げ	巡航軌道 運用	水星周回 軌道投入	水星周回 軌道上 衛星運用	データ アーカイブ	科学観測 機器 取り纏め
ESA	○(MPO,MTM, サンシールド)	○	○	○	○(MPO)	○	○(MPO)
JAXA	○(MMO)				○(MMO)	○	○(MMO)

* MTM:巡航軌道中に用いる電気推進モジュール

サンシールド:MMOを太陽の直射光から防御する覆い

1. 目的

1-4. ミッションシナリオ



打ち上げ: 平成25年8月

金星 フライバイ x 2
水星 フライバイ x 2

水星到着: 平成31年

周回軌道投入
重力捕捉

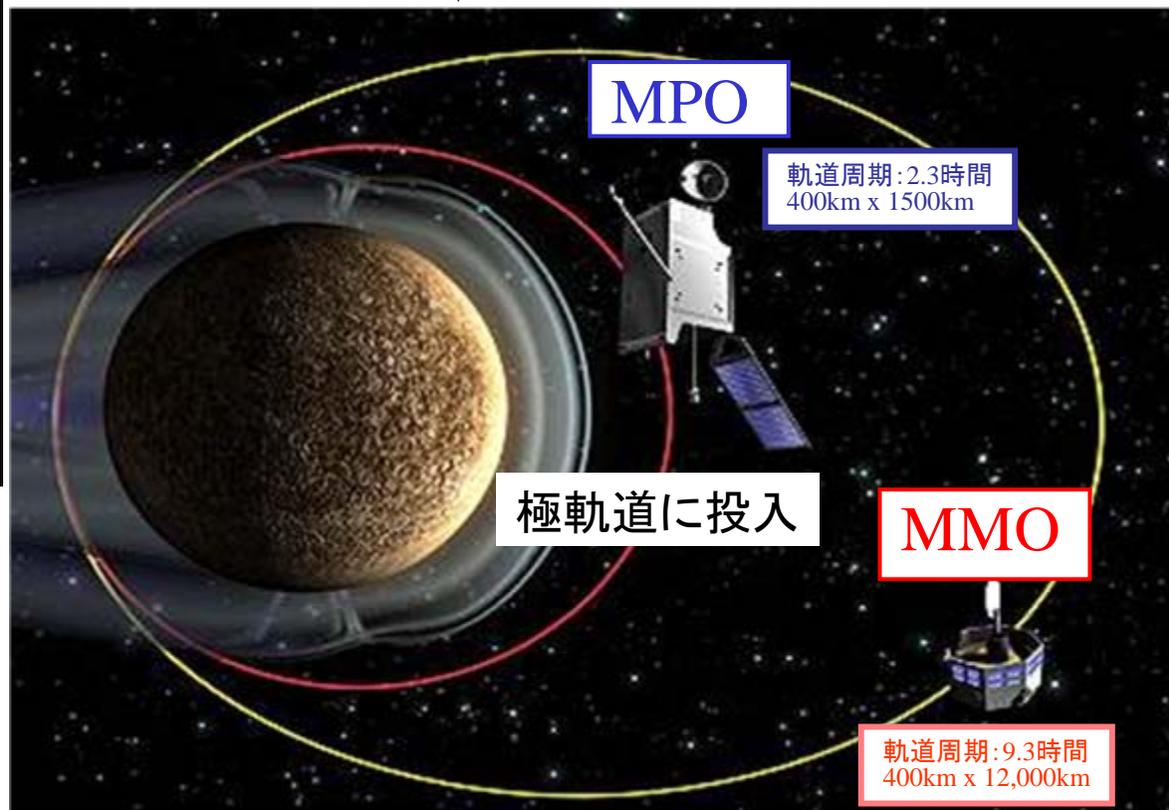
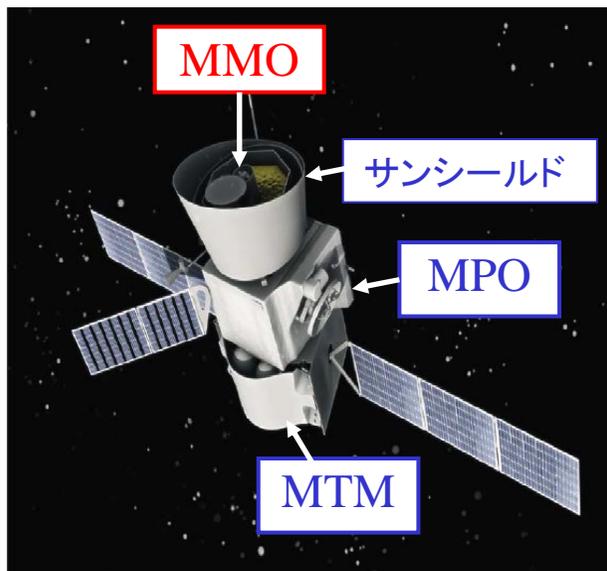
巡航フェーズ(約6年)

MTM分離

コミショニングフェーズ(3ヶ月)

電気推進[MTM]

MPOの推進系でMMOの軌道(極軌道)へ移行
MMO分離、サンシールド分離の後
MPOの軌道(極軌道)へ移行



Soyuz Fregat 2B:
MPO+MMO

赤字:



青字:



観測期間: 1 地球年 (+延長1年)

2. 目標(MMO)

2-1. 科学目標:水星環境

○水星磁場の成因の解明

- 水星周辺の磁場を高い精度($\sim 1\text{nT}$ *以下)で計測
水星の内部構造と進化の理解を深める

○水星磁気圏の解明

- 磁気圏の構造・運動・高エネルギー現象を10秒以下の時間分解能で観測し、
地球との比較によって普遍性と特異性を明らかにする

○激しく変動する希薄な大気(ナトリウムが主成分)の解明

- 地域によって大気量に2倍以上の差があり、分単位で変動の可能性
水星大気の全球分布・時間変動(数分程度)を観測し、
その生成・消滅過程とその原因の解明を目指す

○太陽近傍の惑星間環境の観測

- 高マッハ数(数10以上)の衝撃波を観測、エネルギー過程の解明を目指す
(遭遇する確率は低いため、エクストラサクセスとして扱う)

* 地球の表面での磁場強度は日本付近では40,000nT程度。MMO,MPOの軌道では水星起源の磁場は最大で200nT程度が予想されている。

水星周辺の磁場を高い精度で計測

水星本体が有する固有磁場の成因の解明を目指す。

地球以外の磁場惑星で、全球磁場マッピングを実現

観測値(r, t) = 内部磁場(r) + 外部磁場(r, t)

内部磁場：水星の固有磁場

磁場の成因

外部磁場：磁気圏界面、磁気圏尾部を流れる電流に起因

太陽風との相互作用、磁気圏の活動を反映

水星は低高度でも外部磁場の影響大！

外部磁場・内部磁場の分離のため、

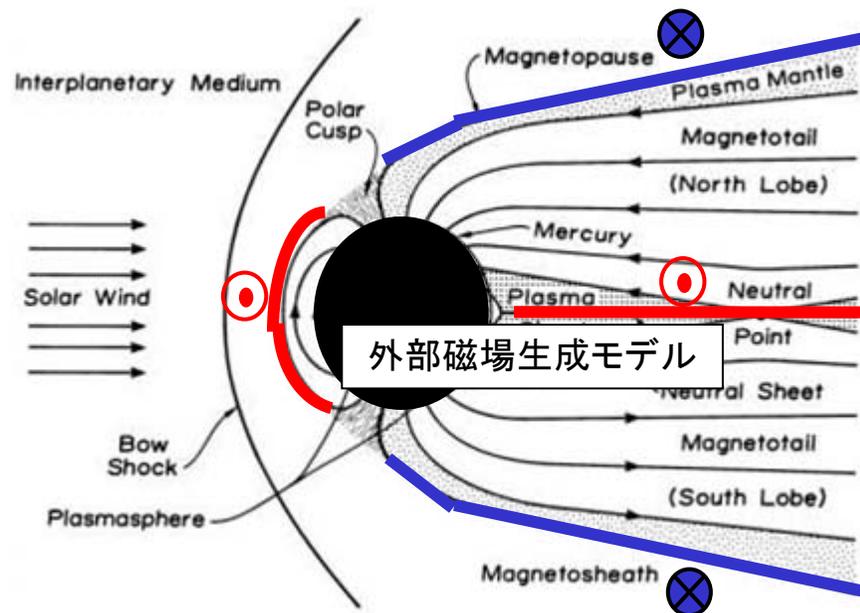
MMO/MPOの同時観測が必須

→ MMO、MPOの両衛星に磁力計を搭載

[MMO探査機における磁場計測]

<1nTの計測精度を実現

MMO探査機は、この要求に応える
クリーンな電磁環境を実現

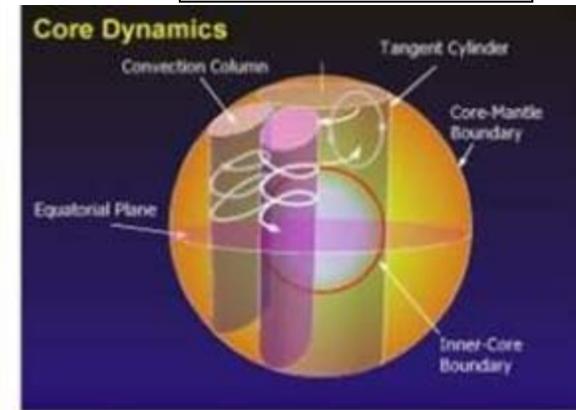
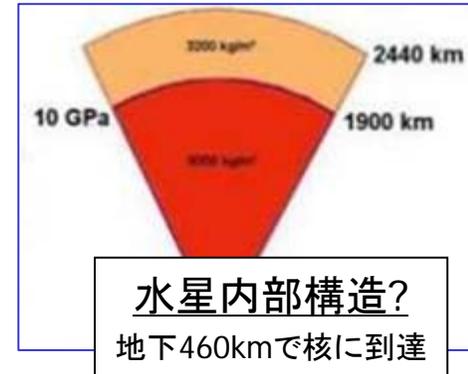


- 全球マッピング

→MMO、MPOの**共同観測**により内部・外部磁場の分離

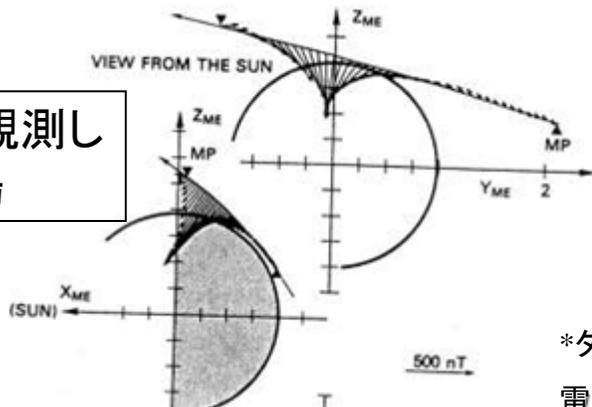
→表面磁場構造の導出

- ・ 双極子成分とそれより高次の成分の分離
 - ダイナモ*作用による磁場かの確認**
- ・ 「コアサイズ」(重力場計測から推定)の情報とあわせて
「コア表面磁場構造」を導出できる可能性
 (地球より「近く」で中心核を観測)
 →**ダイナモ理論への貢献**
- ・ 地殻の残留磁場の導出
 プレートテクトニクスはあったか(磁場反転の痕跡)
 →**地殻の形成史**



コア表面の磁場の想像図

Mariner10が観測した極域の磁場



*ダイナモ理論: 導電性の流体核の対流運動から電磁誘導により誘起された電流が磁場を生成する事で、固有磁場ができているとした理論

2-1-2. 水星磁気圏

◎地球と異なる特異な磁気圏の解明を目指す

→ 地球との比較によって普遍性と特異性を明らかにする。

[MMO探査機における電磁場(PWI)・プラズマ観測(MPPE): 磁場(MERMAG-M)に加えて・・・]

- ・粒子 時間分解能1~4秒で、10eV~数百keVの電子・イオン観測
- ・電場 1mV/mの計測精度
- ・波動・電波 ~20kHzの磁場波動、~3MHzの電場波動・電波を観測
- ・粒子リモート観測 100eV-3keVで水星表面・周辺から放出される粒子を観測
- ・大気リモート観測 <1MRのナトリウム原子輝線を広視野・数分ごとで撮像観測

MMO探査機は、この要求に応えるクリーンな電磁環境を実現

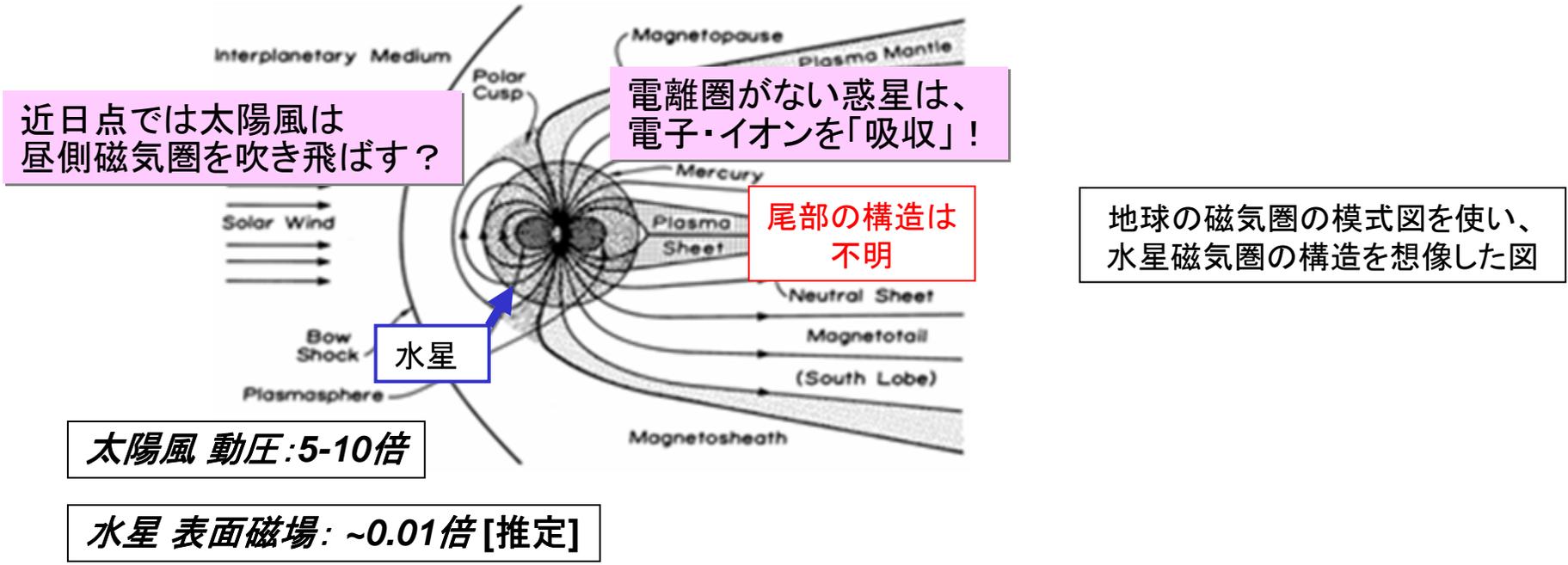
電子・イオンの密度・温度・速度と電場・磁場の観測

→ 水星磁気圏の基本的な構造・運動とその変動、電離圏の役割

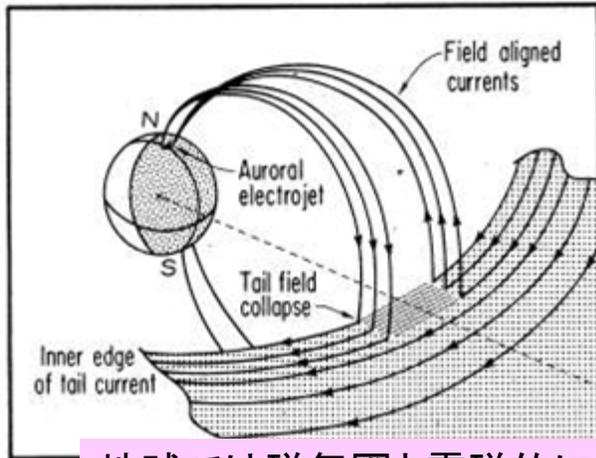
電子・イオンと電磁波動の観測

→水星磁気圏での高エネルギー現象(粒子加速・加熱、時間変動)

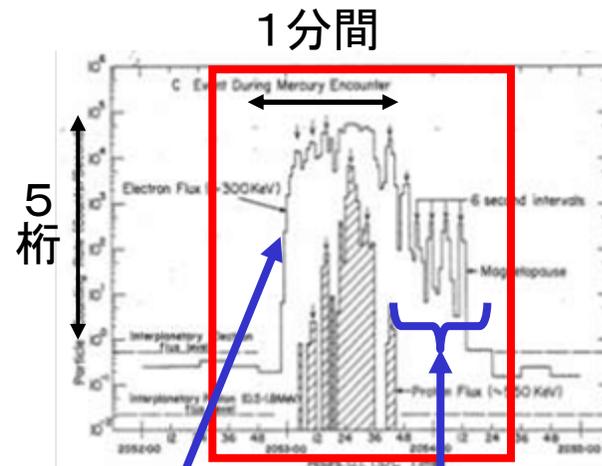
地球	水星
<p>磁気圏の大きさ 流体的近似が成立</p>	<p>地球の1/20程度 流体近似は成立しない可能性が高い →個々の粒子の運動が大事</p>
<p>磁気圏に対する惑星の大きさ 磁気圏の径の10分の1以下 プラズマを蓄積できる</p>	<p>惑星本体が大部分を占める プラズマは惑星に吸収されてしまう？ →尾部のプラズマをどうやって維持？</p>



地球	水星
<p>電離圏の存在</p> <p>ある</p> <p>磁気圏の電流が迂回できる</p> <p>プラズマを磁気圏へ供給</p> <p>高エネルギー電子</p> <p>数百keV、数分で変動</p>	<p>ない</p> <p>電流の迂回先がない？</p> <p>→尾部の構造の変化はどうか？</p> <p>惑星からはほとんど供給ない？</p> <p>→尾部のプラズマの供給源は？</p> <p>数百keVで、数秒で変動</p> <p>→加速のメカニズムは？</p> <p>何が数秒の変動を引き起こすのか？</p>



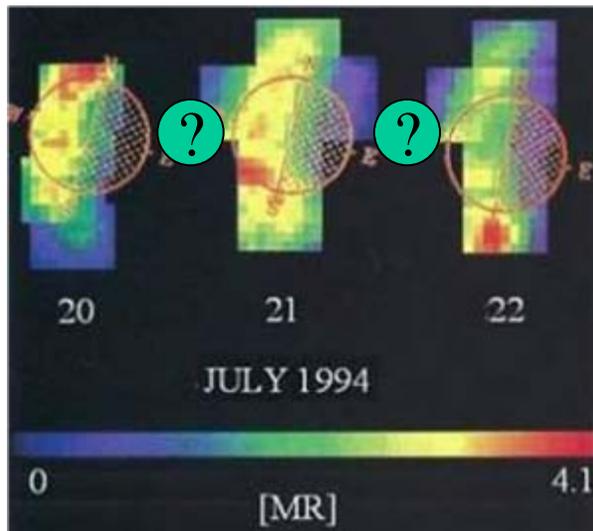
地球では磁気圏と電磁的につながる電離圏がない！



数秒の間に200keV以上の高エネルギー電子が数桁変動

これらが相互に絡み合い、磁気圏の様相を変える

ナトリウム輝線の撮像観測から、その分布と時間変動を明らかにする。[MMO]
 (大気組成を紫外線分光によって明らかにする。[MPO])



全球的な大気密度変動

- 地上観測による大規模変動の発見

(左図:○が水星本体、網掛けは夜の部分。色が密度を示す)

- 太陽風? 隕石衝突? で生成

地上では分単位の変動を継続的に捉えることは不可能

1分程度間隔での全球分布撮像 (MSASI [MMO], PHEBUS [MPO])

太陽風観測 (MPPE)、ダスト観測 (MDM) ※により

大気生成過程の解明を目指す

大気の尾状構造の時間変動

太陽距離によって分布が変化

大気の尾が伸びる時期は大気が逃げやすい

大気分布の季節変動を

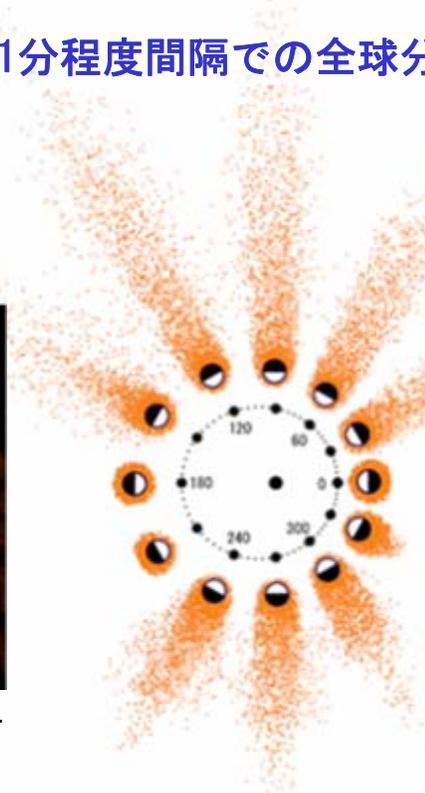
1水星年(88日)継続的に観測

(MSASI, MPPE [MMO], SERENA [MPO])

大気消滅過程の解明を目指す



地上観測により確認されたNa大気分布



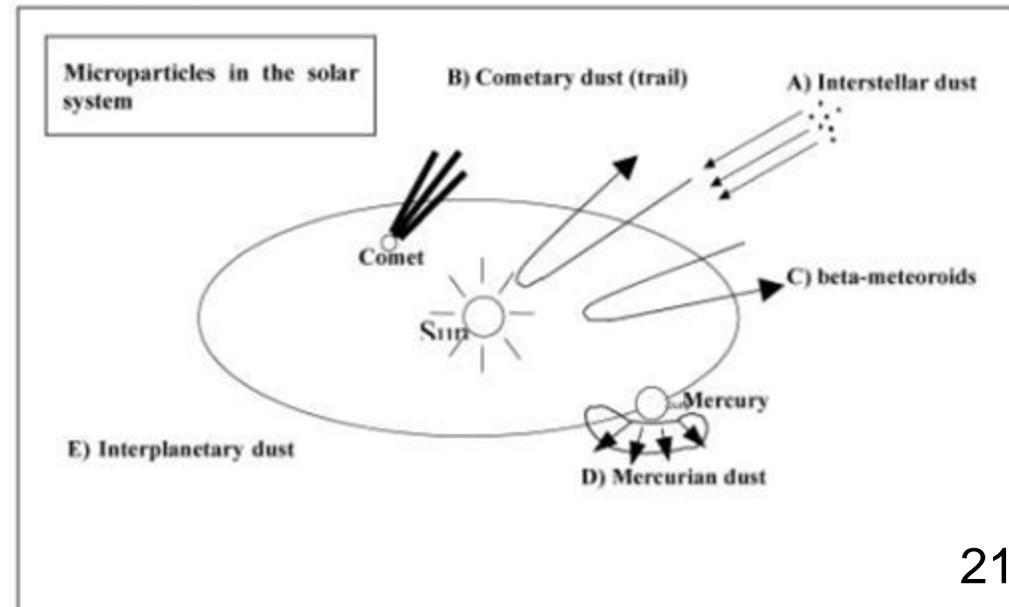
※ダスト観測(MDM)

- 地球軌道より内側では観測例が極めて少ない
 - 1970年代のHelios1-2のみ
 - 分布自身が良くわかっていない
- 内惑星領域:ダスト進化の最終段階を観測できる
- ダスト・隕石の水星表面への衝突

→ 新たなダストの
生成及び希薄大気生成
の可能性

MDM,MPPE[MMO]

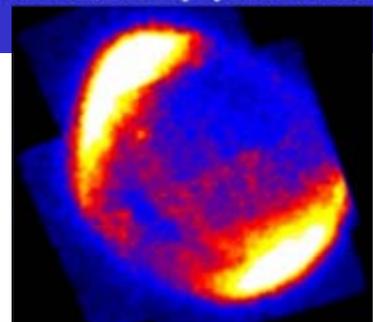
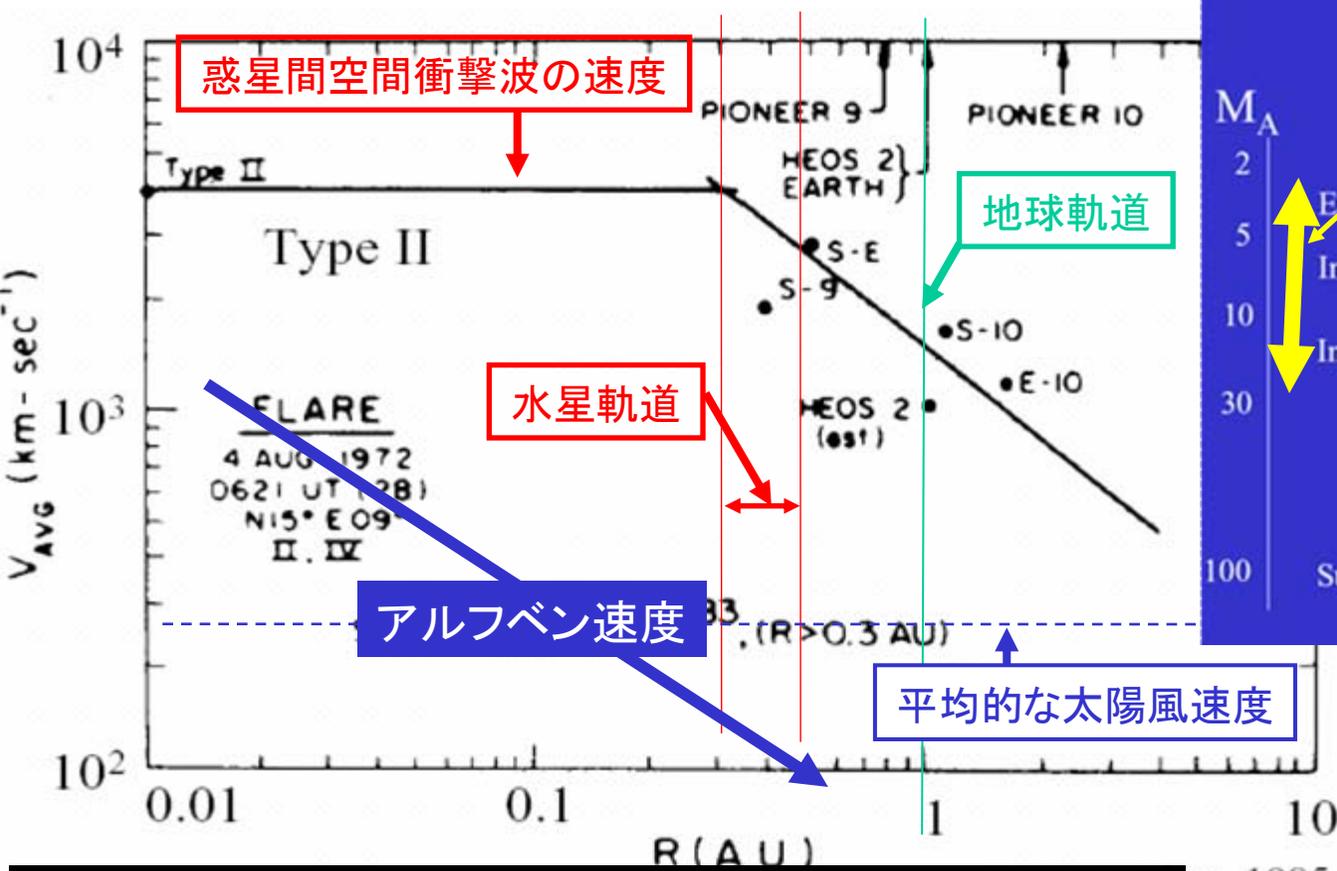
PHEBUS,SELENA[MPO]



2-1-5. 惑星間環境(衝撃波)



太陽近傍での惑星間空間観測点を持つ希少な機会。特に、
 太陽フレアが放出されたプラズマ雲は、水星軌道近傍で最も強い衝撃波を形成。
 → 効率的な電子加速が期待されるマッハ数~40の衝撃波を直接観測できる希少な機会
 (地球軌道ではマッハ数は30程度までであり、観測は期待できない)



かに星雲(超新星残骸)のX線画像
 衝撃波で高エネルギー電子が生成 [小山他]

電子・イオン(MPPE)と電磁波動(PWI)の
 高速観測から、高速衝撃波の直接観測を実現する。

	ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
磁場	磁場計測器により88日(水星の公転周期)以上の観測を実施し、固有磁場の有無を確定	1地球年のうちに1nT以下または2%以下の計測精度、200kmスケールでの全球(80%以上)観測を実施し、磁場起源の推定に資するデータの取得	内部起源・外部起源の磁場の分離。内部構造の推定(MPOとの共同観測)
磁気圏	粒子計測器、又は波動計測器により88日以上での観測を実施し、磁気圏構造の概要を確定	1地球年のうちに密度温度構造を水星半径の数分の1程度の分解能で求め、太陽風条件による相違を理解する。また、10秒以下の速い時間変動を観測し、ダイナミクスを把握する	磁気圏現象の普遍性と水星磁気圏の特異性の理解
希薄大気	—	1地球年のうちに水星軌道の4分割以上の領域において、数分程度の間隔で数時間以上継続的に大気分布の時間変動を観測し、希薄大気構造に対する太陽光、太陽風の影響を明らかにする	ダスト分布や、MPOとの共同観測による希薄大気の生成・消滅過程の理解
衝撃波	—	—	地球軌道では観測出来ない高(~40)・低マッハ数(<1)衝撃波の詳細観測

注) MMOの水星周回軌道投入後のMPOからの分離まではESAの責任範囲

3 MMOの開発方針

1. **十分な研究・設計検討及び試験**により、開発リスクを低減し、機器の確実な開発を行う。「あけぼの」・「GEOTAIL」・「のぞみ」等の**開発資産・運用経験を継承**し、必要な改善を加え、**開発リスク・コストを低減**し、信頼度を高めると共に軽量化を行う。
2. MMOの観測装置については性能を**世界最高レベルに維持**して、新たな知の地平を切り開く。これには、機器開発にたずさわる研究者が実験室において自ら開発調整を行いつつ、メーカーと緊密な共同作業で開発する宇宙科学研究本部の伝統的な開発方式の維持発展が必要である。
3. **JAXA内本部間協力により幅広い専門研究者・技術者が参加**することで確実な開発を行う。JAXAはシステム開発に対して責任を負い、メーカーは開発機器に対し、応分の責任を負う。
4. わが国初の本格的国際共同惑星ミッションとして、ESA側のBepiColomboプロジェクトオフィスと定期的な会合を持ち、お互いの進捗状況、問題点などについて**情報を共有**し、確実な開発を行う。

4. MMOのシステム選定と基本要件

4-1. MMOの基本設計要件

水星磁場・磁気圏観測に最適化した衛星

1. 観測要求を満足する観測ができること
 - (水星磁場・磁気圏の観測、希薄大気の変動、衝撃波)
 - 1-1. 観測要求条件を満足する電磁適合性(EMC)性能を有すること
 - 1-2. 衛星表面の帯電防止処置がされていること
 - 1-3. 送信ゲインが35dBi以上を有する送受共用アンテナを有すること
2. 水星近傍の過酷な環境条件(熱・放射線)で
 - 1 地球年以上の観測が可能な設計であること
3. 最低通信レートとして8bps以上が確保できる
 - 送受共用全方位指向の中利得アンテナを有すること
4. 通信の伝播遅延を考慮して探査機を安全に運用できること
5. 衛星総質量が250kg以下であること
6. 観測器総質量はノミナル43kg程度であること
7. 科学観測、熱制御等を正常に行うため、発生電力は
 - 近日点:546W、遠日点:394W程度であること

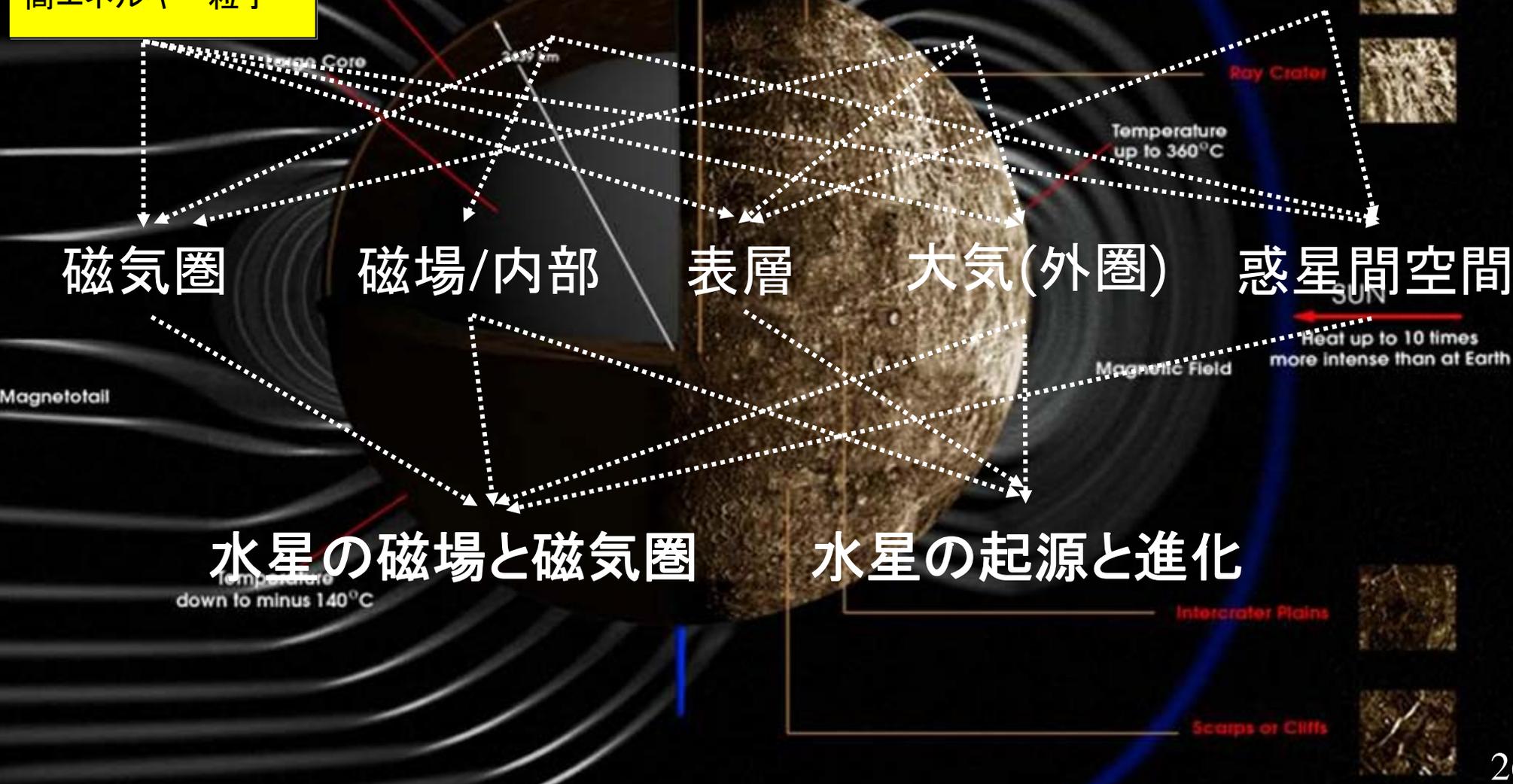
4-2. MMO観測要求

プラズマ粒子計測
電子,イオン,太陽風
高エネルギー粒子

プラズマ波動・磁場計測
磁場,電場/波動

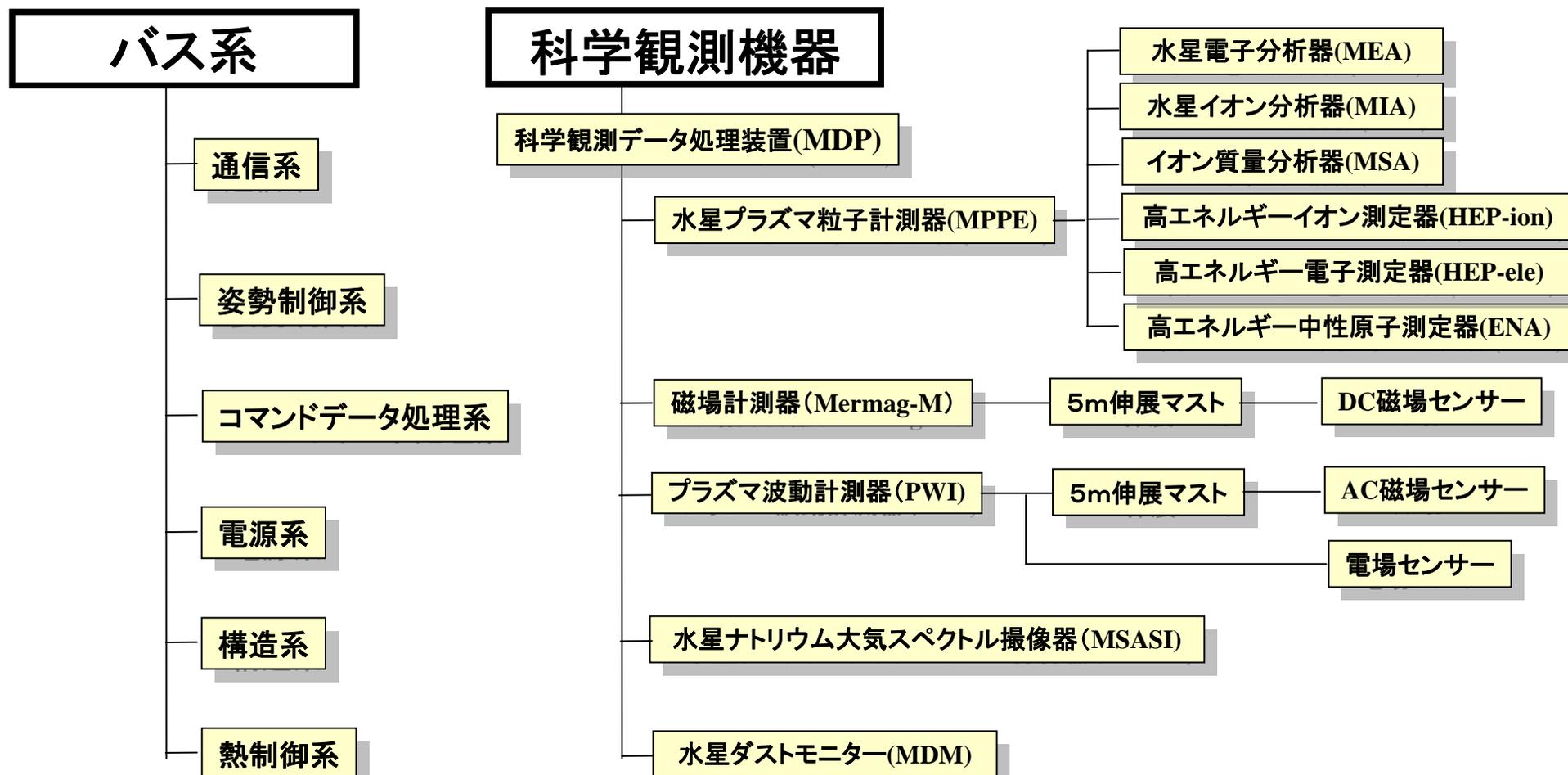
ナトリウム大気
プラズマ,大気,表層

ダスト計測



4-3. MMOのシステム構成

MMO



4-4. MMO探査機システム

- ・既存技術の活用によるコスト削減・信頼性向上
- ・新規技術開発による信頼性向上・軽量化・高性能化

衛星システム機器	198 kg (ノミナル)		開発方針
電源系	リチウムイオン電池	改良 (容量調整)	1, 4
	高効率太陽電池	改良*1 (PLANET-Cと共同 : 高温耐性)	1, 3, 4
通信系	高利得アンテナ、中利得アンテナ	新規*2 (要求性能)	1
	アンテナ指向機構	新規 (高温耐性)	1
	アンテナデスパン機構	改良 (高温耐性)	1
	トランスポンダー、TWT	新規*3 (PLANET-Cと共同 : 小型軽量化)	1
コマンドデータ処理系	CCSDSパケット	既存	1
	コマンド・データ処理装置	新規 (軽量化)	1
	スペースワイヤー	新規*4 (将来に向けての標準化)	1
姿勢制御系	窒素ガススラスタ	既存	1, 3
計装ケーブル		既存	1
構造系	シリンダー構造	既存	1
	スピン分離機構	改良*5 (大型化・低擾乱化)	1, 3, 4
	太陽電池パドル	新規 (高温耐性)	1, 3, 4
熱制御系	耐熱材料、白色塗料、熱計装技術	新規*6 (高温耐性)	1, 3, 4
科学観測機器	43 kg (ノミナル)		
	磁場計測器、粒子計測器、波動計測器	改良*7 (観測性能向上)	1, 2
	ダストモニター、水星撮像カメラ	新規*7 (小型軽量化)	1, 2
全質量	241 kg (ノミナル)		

* : 開発研究段階でBBM製作などにより技術成熟度(TRL)が向上したものの数字はリスク管理状況のリスク項目

4-5. MMO: 搭載科学観測機器

水星プラズマ 粒子計測器 (MPPE)	水星電子分析器 (MEA)	低エネルギー電子	3eV ~ 30keV、dt=1sec
	水星イオン分析器 (MIA)	低エネルギーイオン	5eV ~ 30keV、dt=2sec
	イオン質量分析器 (MSA)	イオン質量分析	5eV ~ 40keV、dt=2sec m/dm=40/15
	高エネルギーイオン測定器 (HEP-ion)	高エネルギーイオン	30keV ~ 1MeV、dt=4sec
	高エネルギー電子測定器 (HEP-ele)	高エネルギー電子	30keV ~ 700keV、dt=4sec
	高エネルギー中性原子測定器 (ENA)	プラズマ撮像	<25eV ~ 3.3keV、dt=80sec
磁場計測器 (Mermag-M)	磁力計 (MGF)	磁場	DC ~ 64Hz [MAST:5m]
プラズマ波動 計測器(PWI)	プラズマ波動計測器 (PWI)	電場、プラズマ波動、電波	DC ~ 10MHz (E) [probe:1.5m x 4] few ~ 640kHz (B) [MAST:5m]
水星ナトリウム大気 スペクトル撮像器 (MSASI)	水星撮像カメラ (MIC)	ナトリウム大気撮像	FOV: ~30deg
水星ダストモニター (MDM)	水星ダストモニター (MDM)	惑星間空間ダスト	PZT

システム機器

- 科学観測データ処理装置[Mission Data Processor (MDP)] [2 式]
 - a. 電源部 (PCU): 搭載観測機器に必要な電圧を供給
 - b. データ処理部 (DPU): CPU及びメモリー
(データ処理、テレメータデータ作成、コマンド処理など)
- 伸展マスト [2 式]
AC磁場/DC磁場計測用の5mの伸展式マスト

4-6. 選定に至るまでの検討状況・結果(1/2)

項目	選定システム	比較対象	選定理由	要求条件	開発方針
軌道	長楕円 極軌道 近水点400km 遠水点12000km	円軌道 赤道面	磁気圏の広い領域をカバー 全球マッピングが可能 MPOの軌道周期と1:4に同期	1	1
姿勢	スピン安定	3軸制御	プラズマの3次元観測、波動アンテナ 伸展 3軸制御の場合には科学観測機器の 開発コスト・質量が増大	1	1
高利得アンテナ 搭載方法	デспан	ボディーマウ ント	ボディーマウントでは熱設計が不成 立、姿勢制御用ガスも大量に必要	1,2,5	1
高利得アンテナ	ヘリカルアレイ	パラボラ スロット	耐熱性能の問題が少ない。効率が 良く小型ですむ。送受共用が可能	1,2,5	1
中利得アンテナ	双反射鏡	コリニアアレイ	スピン面内無指向性、非帯域が広く 送受共用が可能(質量・コスト低減)	3,5	1
磁場センサー 伸展機構	コイラブルマスト	3段折りブーム	質量が軽くでき、実績も十分ある。開 発コストの低下が見込まれる	1,2,5, 6	1,2

4-6. 選定に至るまでの検討状況・結果(2/2)

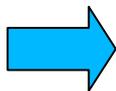
項目	選定システム	比較対象	選定理由	要求条件	開発方針
衛星形状	八角柱	円柱、四角柱、六角柱など	発生電力・熱入力の均等化、組立性、製造性、質量、内部へのアクセス性から八角柱が最適	1,2,5,7	1
熱設計	衛星下面を放熱面	上下面共に放熱面	高利得アンテナからの熱輻射、太陽電池パネル裏面からの熱輻射が大きく衛星上面は放熱面に適さない	1,2,5,7	1,3,4
搭載観測器	4-5の一覧参照	(公募)	日欧に公募を出し、プロジェクトが定めた科学観測機器選定基準に従い選定	1,2,4,6,7	1,2,3,4
衛星上の自律機能	採用	該当せず	衛星が独自の判断でコマンドを実行する事で、危険な状態に陥る事を未然に防止できる	4	1
地上の自動診断機能	採用	該当せず	衛星からのデータを地上コンピューターにより自動診断し、異常またはその予兆を運用者に通知すると共に対処方法を示す事で運用の安全性を高める	4	1
運用計画立案	支援装置を採用	該当せず	人工知能技術を用いて衛星運用計画の作成を支援し、運用計画立案者の負荷を軽減すると共にオペレーションミスを防ぐ	4	1

4-7. MMO探査機：熱設計

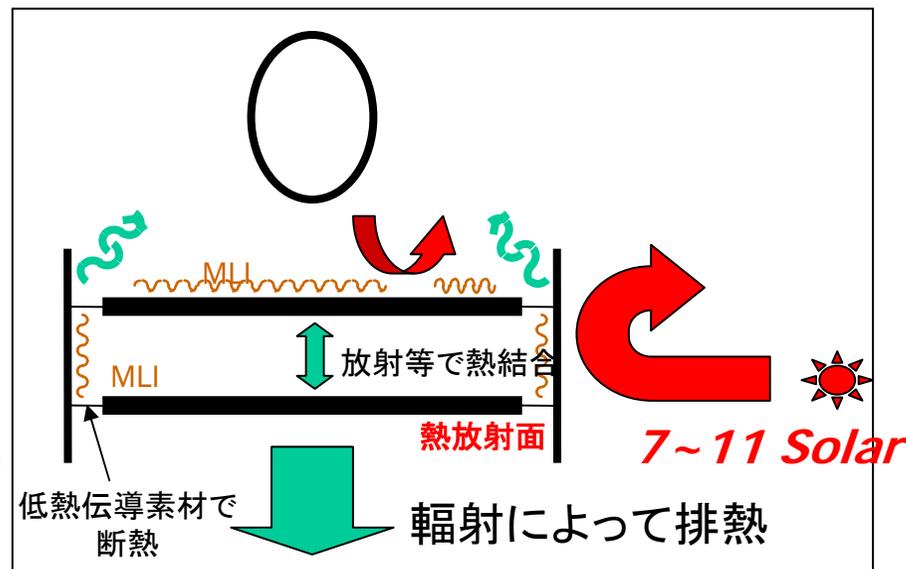
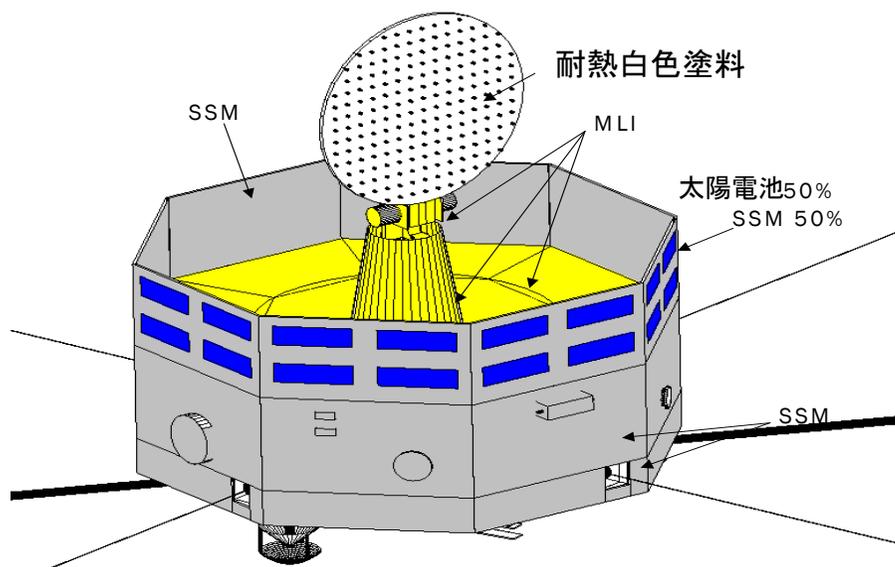
～地球軌道の11倍に達する強い太陽光に耐え抜く熱対策～

観測要求

- スピン型探査機
- 軌道と姿勢の制約
- 科学観測機器配置
- 熱設計要求(機器温度)
 - 反射・断熱面・放射面の配置
 - 高利得アンテナ形式の選択
 - 構造・材料の選定



- スピン軸：黄道面にほぼ垂直
- 衛星側面・上面：「反射・断熱面」
- 衛星下面：「熱放射面」
- 衛星下部デッキ(＝熱放射面)に多くのサブシステムを搭載
- 外部露出・開口面積は最小限. シールド・表面処理などで耐熱対策



SSM(Secondary Surface Mirror)：鏡の一種。可視光を反射し、熱を効率よく逃がす表面材
 MLI (Multi-Layer Insulator)： 多層膜の断熱材

4-8. フロントローディング状況

- * 1 : 高効率太陽電池

- 高温耐性の確認

- 熱衝撃サイクル試験

- 予想される極端な温度変化の環境下(-180度～200度)で太陽電池セルに異常が無い事を確認済

- 高温連続動作試験

- 内惑星チェンバーを用いて200°C・1000時間の連続動作試験を来年初頭に実施し高温耐性を確認予定

- 製造性の確認

- 導電性カバーガラスへの線材の取り付け性の確認

- 衛星表面電位を電磁適合性要求で規定されている電位以下に抑える為に太陽電池セルのカバーガラスの表面に導電性処理を行い、細い線により互いに接続し、最終的に衛星の構体に接地する。この線の接続は半田付けにより行うが、従来の物は半田付け性が悪く、極めて高度な半田付け技術を必要とするため、信頼性・作業性に問題があった
 - カバーガラス側電極パッドの材質の向上により半田付けの信頼性が飛躍的に向上。水星探査機で使用する半田、線材を用いた試験で確認済

→ 水星環境下で使用する太陽電池として問題が無い事を確認予定

- * 2: 高利得アンテナ(HGA)

- 6素子モデル、1/2スケールモデルの製作

- 計算に乗らない構造部材の影響等、設計の妥当性を検証済

- 構造部材の選定

- 高温環境・表裏の温度差が大きい

- 熱・熱変形に持つ素材が必要

- アルミでは駄目→チタン合金を選定

- 温度の低減、温度差の低減

- 白色塗料の温度試験

- 高温MLI(多層断熱膜)の採用

- 1/1フルスケールモデルの製作

- アンテナパターンの確認済

- 熱変形など予想されるアンテナの変形に起因する性能への影響の確認済

- 要求される性能を満足する事を確認済



HGAの1/1スケールモデル

- * 2: 中利得アンテナ(MGA)

- 送受兼用の為に幅の広い周波数特性が必要

- GEOTAIL等従来の衛星で用いられていたアンテナでは不十分で、新規開発が必要

- 1/1スケールモデルの製作

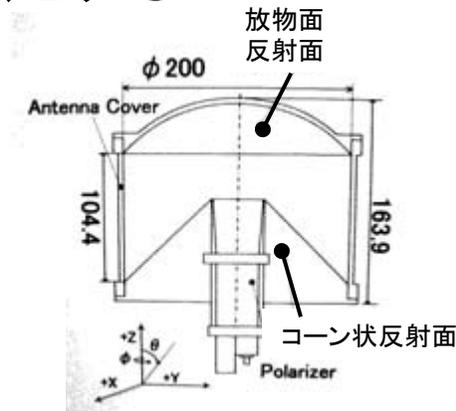
- 計算による基本設計

- 計算に乗らない構造部材の性能への影響の確認済

- 衛星構体のアンテナパターンへの影響の確認済

- 要求される性能を満足する

事を確認済



MGAの断面図



MGAの1/1スケールモデル 35

• * 3: トランスポンダー、送信機(TWT)

– 電磁適合性要求を満足させる内部スイッチング電源の発振周波数を安定化したEM品の製作

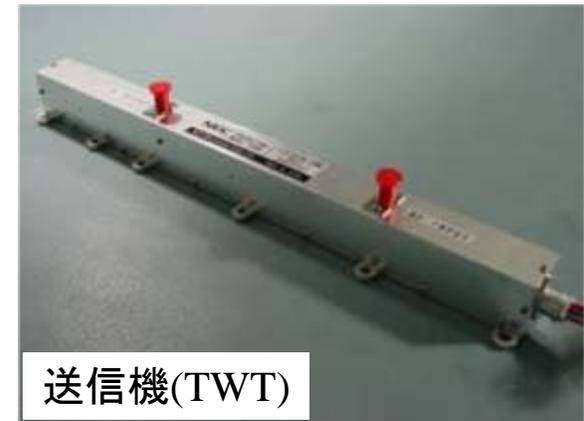
• トランスポンダー

- デジタル化による調整検査工数の低減
- 再生型測距方式*への対応による測距精度の向上



• 送信機(TWT)

- 20W送信出力に最適化した設計
 - » 従来の半導体送信機(SSTA)に比べ小型軽量化を達成
 - » 容積: 1/5程度、質量: 6割弱を達成



* : 地上からの測距信号を衛星上でビット列にまで再生し、折り返す事で、ノイズを低減する測距方法
従来と同等品質の測距データを得るのに必要な積分時間が10分の1程度に短縮できる

● * 4 : スペースワイヤー

- 次世代衛星での採用を目指してNASA/ESA/JAXA/英国ダンディー大学が共同で仕様を定義したデータ通信システム(ハードウェア、プロトコルを含む)
- 低電圧差動システム(LVDS)を用いる事で良好な電磁適合性を確保
- 仕様の決定段階から積極的に関与。プロジェクトからの要求を仕様に反映
 - リモートメモリーアクセスプロトコル(RMAP)
 - スタートアップのクロック速度
 - 通信レートは2Mbps~200Mbps
- 米国/ESAでは既に衛星バスとして採用、JAXAでは科学衛星、気球実験などに利用を予定
- 機器の開発段階から衛星搭載まで同じインターフェースが使用可能。信頼性の向上、試験時間の短縮が期待できる

- * 5 : スピン分離機構

- MMOをMPOから分離する際にスピンをかけながら分離する機構が必要

- MPOは3軸制御衛星として開発されるため、分離前に全体を回転させる事は設計上できない

- MMOを分離後スピニアップする方法は

- MMOは分離後の要求姿勢精度が高い

- 太陽に照らされる面の温度が高くなりすぎる可能性が高い

事から不適

→「かぐや」の子衛星分離に用いられた分離機構を採用

- 分離時にサンシールドに衝突する可能性

→フルスケールの分離試験を実施中

• * 6: 白色塗料, 高温多層断熱材(MLI)

– 水星環境に耐性のある白色塗料を選定

- 水星軌道上で最大の太陽光強度を模擬できる「内惑星熱真空環境シミュレーター」を用いて, 実環境を模擬した試験を, 複数の候補に対して実施.



内惑星環境シミュレーターを用いた白色塗料の試験

→ 候補を2つにまで絞り込んだ

耐放射線環境性等について確認試験を実施し、
最終選定を行う予定

– 高温耐性のあるMLIの試作・試験

- 高温MLIを試作し, 「内惑星熱真空環境シミュレーター」を用いて, 実環境を模擬した試験を実施した.



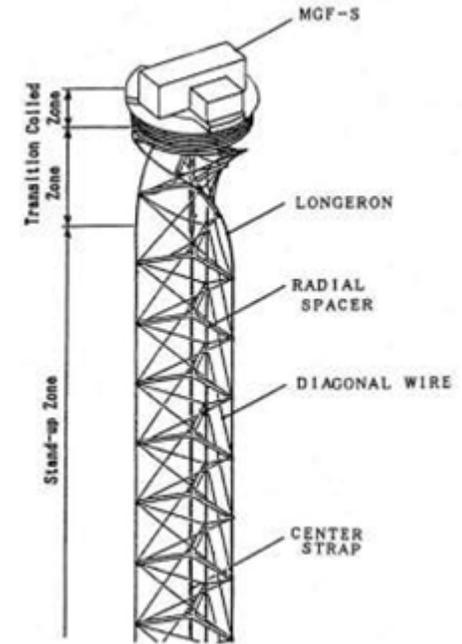
試作した高温MLI

→ 耐環境性を確認した

- * 7 : 科学観測機器関連(1/3)

- 5m伸展マスト(磁場センサー用伸展機構)

- 当初は耐熱の観点から折畳みブームを検討
 - ブームは伸展機構が複雑
 - 高温耐性のあるマストの部材を見つけられた
- 経験の豊富なマスト方式を採用



「のぞみ」で用いられたマスト
(伸展途中の模式図)

- 磁場計測器(MERMAG-M)

- 回路系の一部をデジタル化する事によりダイナミックレンジを一桁以上改善
- レンジ切り替えを行わない観測が可能に

- * 7 : 科学観測機器関連(2/3)

- プラズマ波動計測器(PWI)

- AC(高周波)磁場センサー

- 厳しい質量、低ノイズ性能要求

→ 軽量、低ノイズセンサーを新規開発

- 水星ダストモニター(MDM)

- 「のぞみ」などで用いられた衝突プラズマを測定する方法は

- 太陽光、周辺プラズマに起因するノイズによる誤信号が多い
- 予想される高温にもつ機構の製作は困難

→ ピエゾ素子(圧電素子)を用いた新たなセンサーを開発

- 国内外の施設を用いて試験特性を把握

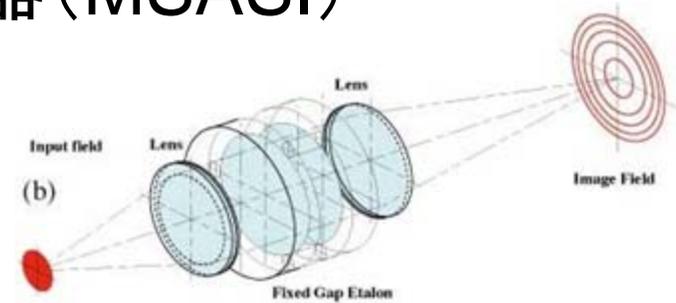
• * 7 : 科学観測機器関連(3/3)

– 水星プラズマ粒子計測器(MPPE)

- 外部露出機器である為に高温にさらされる
 - 外部からの熱入力をできる限り低減する為のサンシールドの設計
 - センサー部の高温耐性試験、詳細熱モデルによる解析を実施
- 予想される温度下での動作、保存性を確認(一部未)

– 水星ナトリウム大気スペクトル撮像器(MSASI)

- 非常に高い波長分解能を要求
 - ファブリペロー干渉光学系を採用
(地上観測では広く用いられているが惑星探査機への搭載は初)

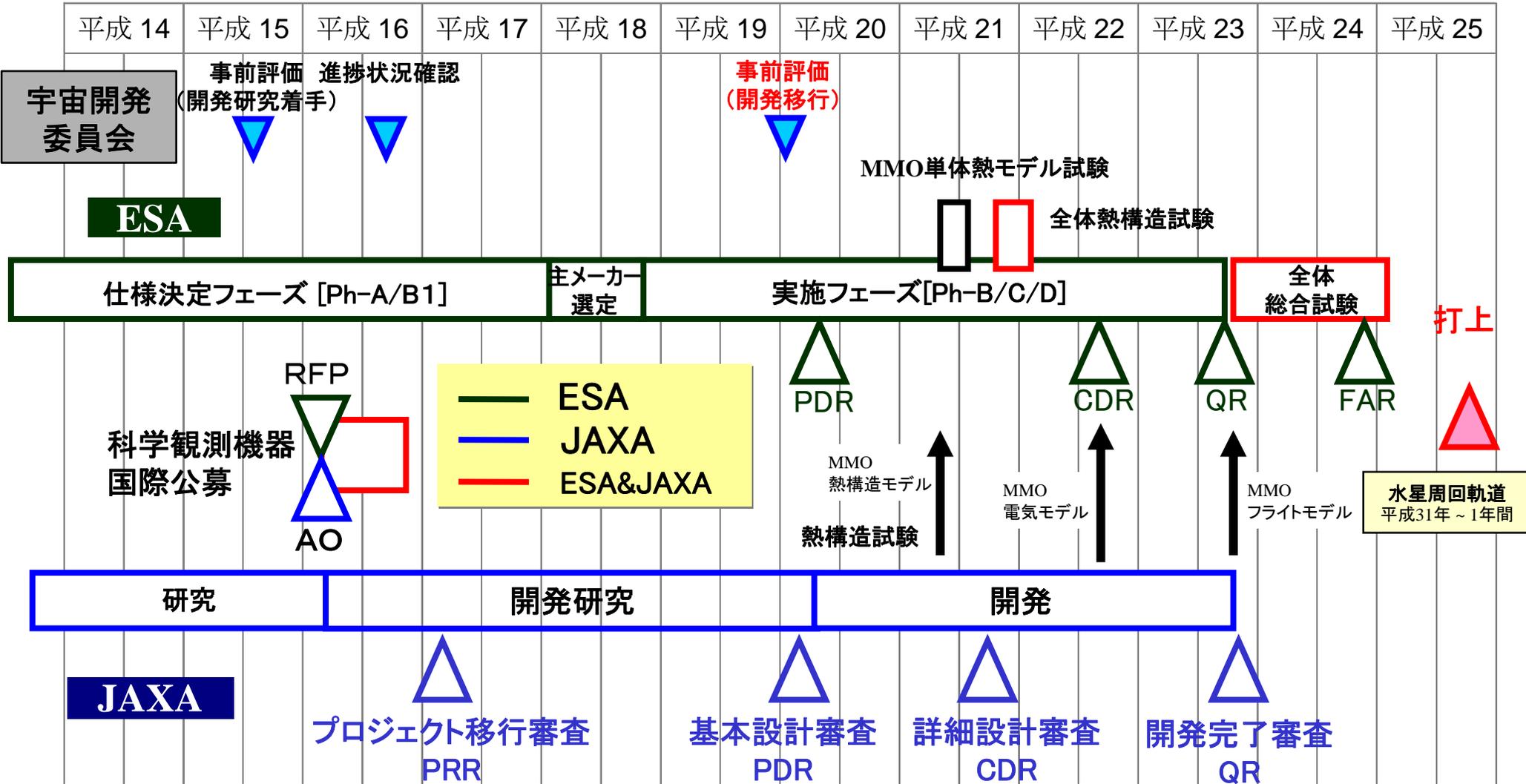


ファブリペロー干渉光学系の概念図
(平行に保持された一対の反射鏡に光をほぼ垂直に入射させ、その内部での多重反射に伴って出てくる干渉光をレンズで集める方法)

- 予想される幅広い温度範囲下での性能を出せる素材の選定

5. MMO開発計画

5-1. BepiColombo スケジュール (平成19年 9月) (カレンダー一年)



5.2 スケジュール上の留意点

・レビュー

BepiColombo全体でのレビューにはMMOも含まれる為、ESA側レビューの前にMMOの対応するレビューを行う必要がある。

	基本設計審査	詳細設計審査	開発完了審査
MMO	平成20年3月	平成21年6月	平成23年8月
BepiColombo	平成20年5月	平成22年7月	平成23年10月

・各種モデルのESAへの搬入時期

BepiColombo全体での試験に供するため各種モデルのESAへの搬入時期の遅れはBepiColombo全体のスケジュール遅延を招く

モデル名	熱構造モデル	電気モデル	フライトモデル
搬入時期	平成21年5月	平成22年6月	平成23年9月

5-3. 資金計画

BepiColomboプロジェクトの資金計画*は、JAXAが負担する衛星開発費と運用費で約150億円を目標とする。

* 開発研究段階で約30億円を支出

5-4. 他ミッションとのコスト比較

JAXAの他の惑星探査機との比較

事項	火星探査機「のぞみ」	金星探査機「PLANET-C」	水星探査機「BepiColombo/MMO」
衛星試作/製作/打上	約200億円	約250億円	約150億円

NASA/ESAの“小規模”惑星探査機との比較

BepiColomboは、ESAでは“Cornerstone”=「大型計画」の位置付け

	NEAR 小惑星探査	MCO 火星探査	MGS 火星探査	MEX 火星探査	MESSENGER 水星探査	BepiColombo 水星探査
衛星試作/製作/打上	200億円 NASA	340億円 NASA	270億円 NASA	240億円 ESA	340億円 NASA	約800億円 ESA
						約150億円 JAXA

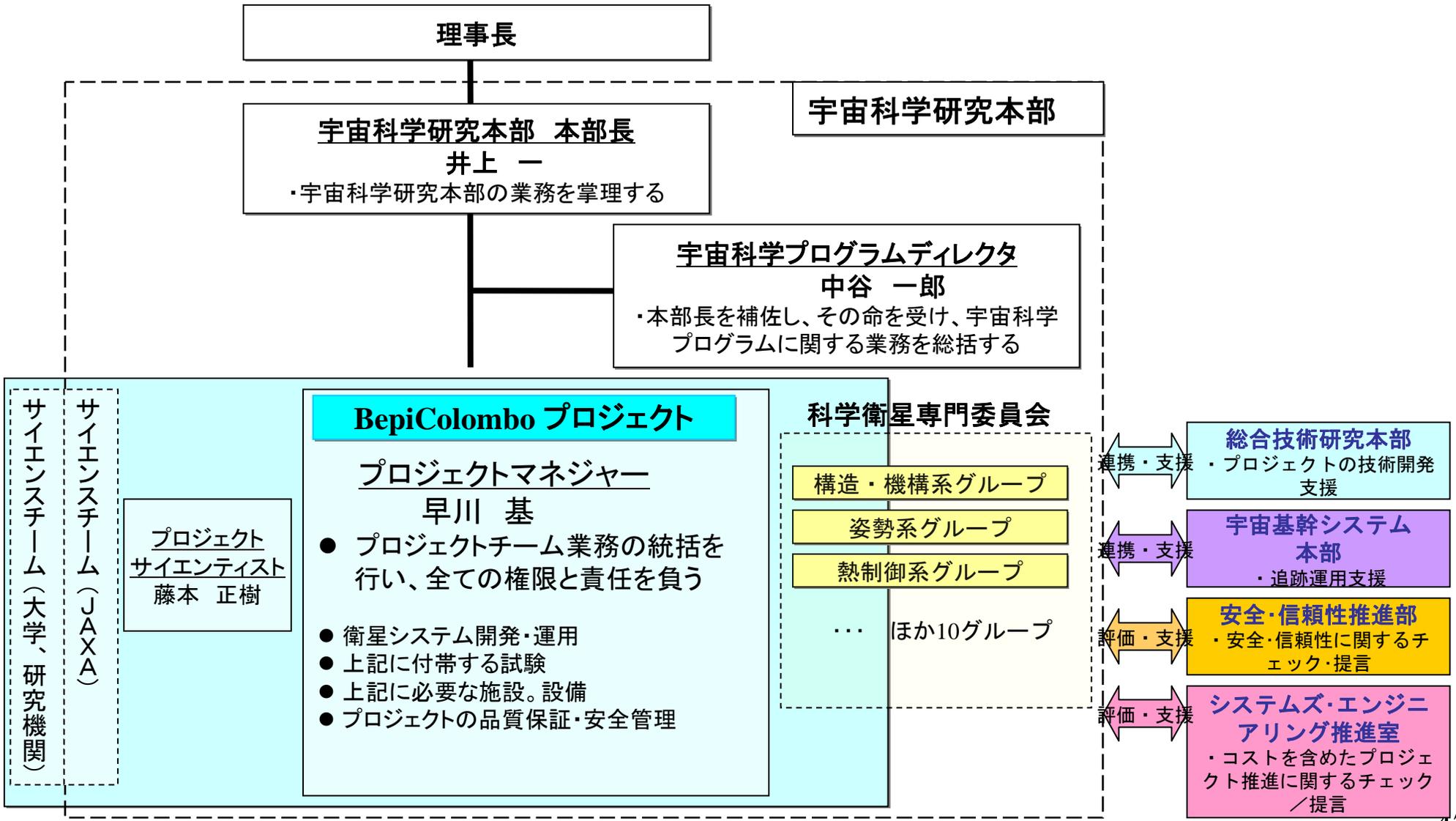
(1米ドル = 120円換算、1ユーロ = 160円換算)

注) 内容は機関・探査機によって異なる。
 NASA: 通例、衛星試作費(十数~数十億円)を含まない。
 ESA: 通例、科学観測機器費(数十億円)は加盟国負担。

参考/大~中規模計画: Cassini[土星・NASA/ESA] ~4000億円
 Rosetta[彗星:ESA] ~840億円

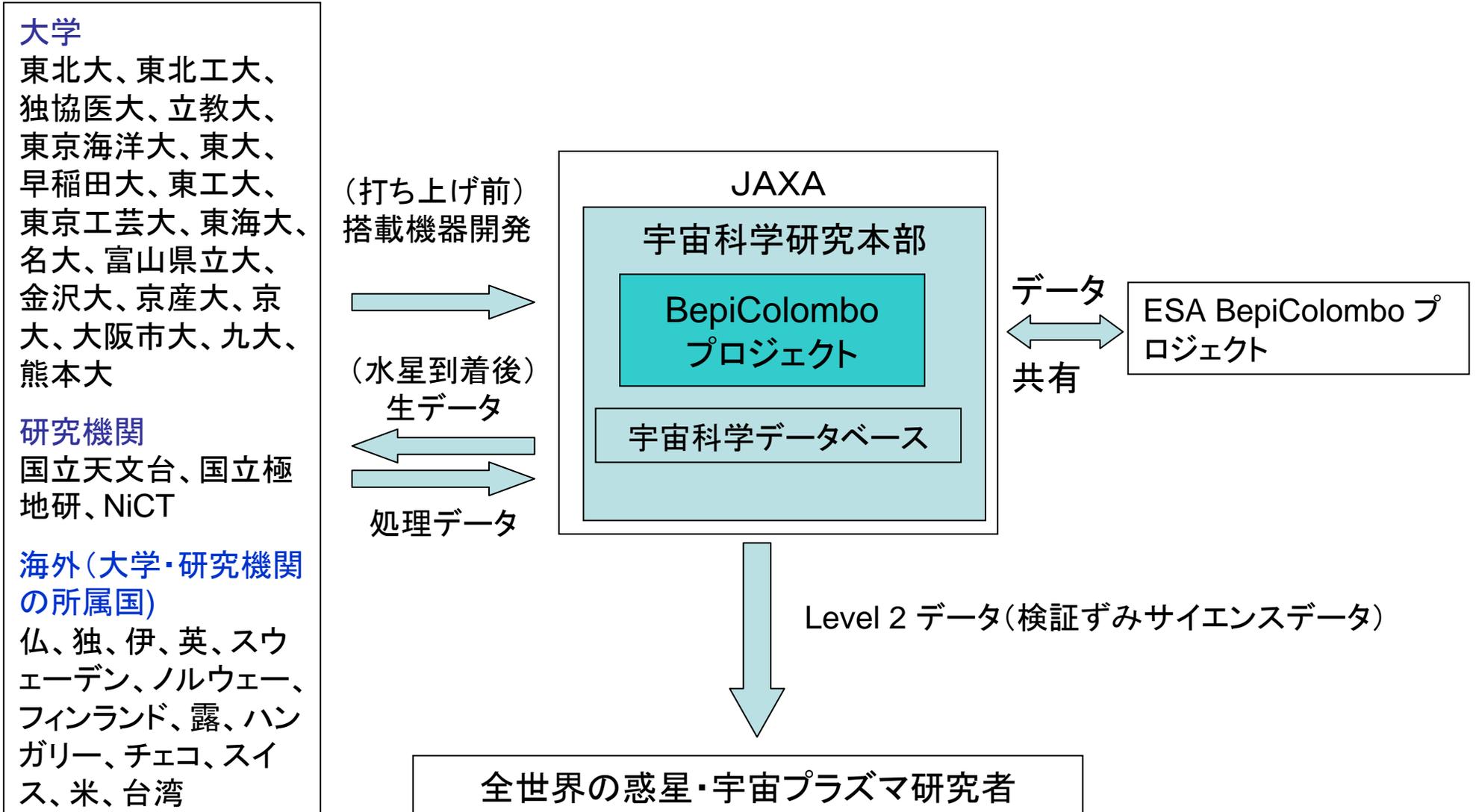
5. 開発計画

5-5. MMO開発体制－JAXA内での実施体制

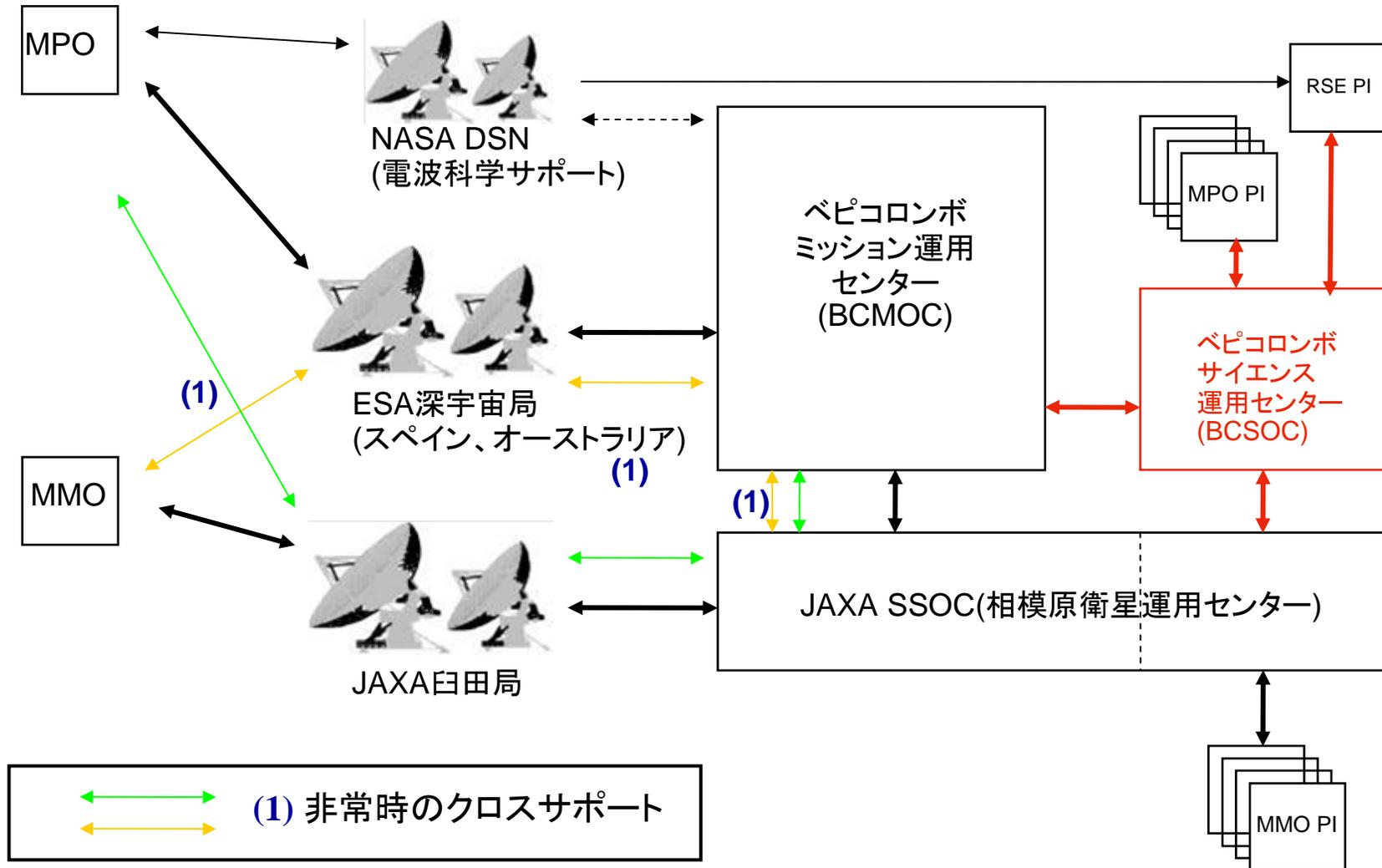


5. 開発計画

5-5. MMO開発体制—国内・国際協力体制



5-6. MMO運用体制－ESA-JAXA 運用インターフェース



6. リスク管理

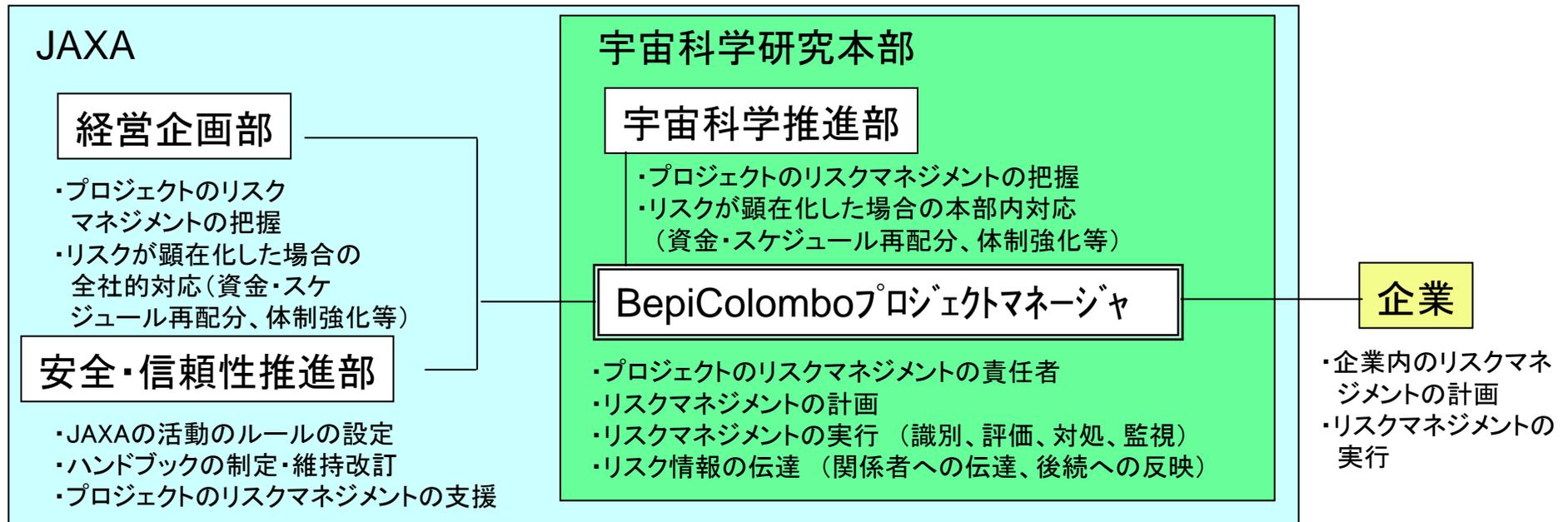
(1) リスク管理方針

BepiColomboプロジェクトのリスクについては、JAXAの標準である「リスクマネジメントハンドブック」(JMR-011)に基づき、「MMOリスクマネジメント計画書」としてまとめ、開発期間を通して維持管理を行う。

(2) リスク管理の実施計画

➤ リスク管理体制の構築

プロジェクト内外の役割と責任を決定し、リスク管理を実行する体制を構築する。

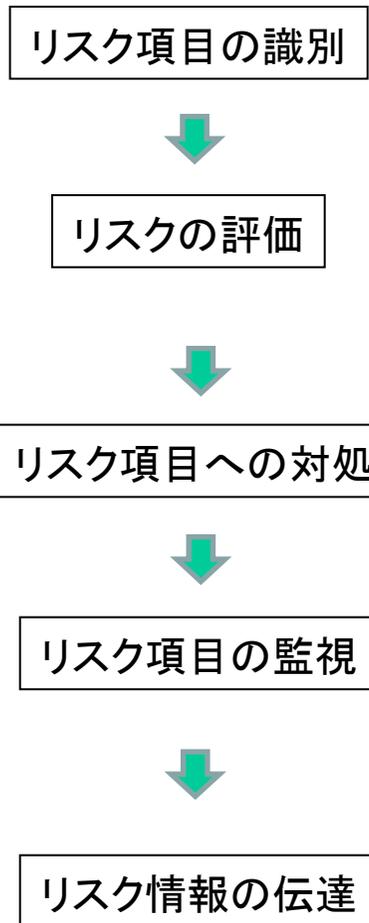


6. リスク管理

➤リスク管理の実行

プロジェクトの開始から終了まで、継続的に以下のリスク管理を実行し、開発へのフィードバックを図る。

プロジェクトの開始から終了まで継続的に実施する



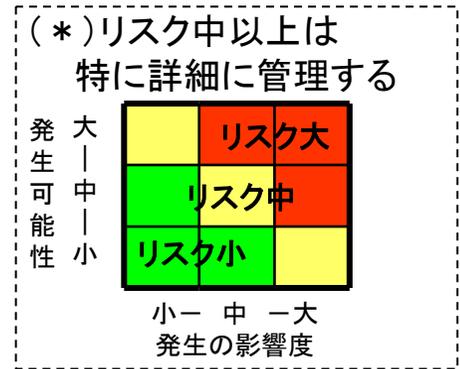
①設計結果に基づく知見、既開発衛星からの知見、不具合情報システム、信頼性解析手法、独立評価等からリスク項目を識別する。

②発生可能性、影響度からリスクの大きさを評価する。（*）

③許容できないリスクに対処策または代替策を準備、許容できるリスクは監視を継続する。

④リスク項目の対処状況を監視し、リスク項目が完了基準を満たした場合は完了とする。未了のリスクについては、再度リスクの識別・評価を行う。

⑤関係者への伝達を行い、リスク情報を共有する。プロジェクト完了後は後続プロジェクトへの反映・教訓をまとめる。



6-1. リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階の処置状況及び開発段階の計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
太陽電池の高温環境や熱衝撃環境による性能劣化。 〔カテゴリ3〕 (*1)	太陽電池セル	・来年頭に高温、高光強度下での長時間連続動作試験を実施し、性能の劣化特性について確認予定。	・開発研究段階の処置で終了。
適応可能な熱制御用の塗料が存在しない 〔カテゴリ3〕 (*6)	HGA等熱制御塗料塗布部	・内惑星チャンバを用いて、高温環境の影響や紫外線劣化について調査を実施し、適用可能な塗料の候補を複数選定。	・開発研究段階の処置で終了。
高温環境下での推進系バルブの機能喪失 〔カテゴリ3〕	推進系	・高温環境下での動作試験を実施し、機能の喪失、劣化が生じないことを確認。	・開発研究段階の処置で終了。

(注) カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの
 カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの
 カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したものの
 *: 開発研究段階でBBM製作などにより技術成熟度(TRL)が向上したものの

6. リスク管理

6-3(2). リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階での処置状況及び開発段階での計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
MMO分離時にサンシールドと衝突、または、大きな姿勢擾乱の発生 〔カテゴリ1〕 (*5)	分離機構	<ul style="list-style-type: none"> ・縮小モデルを用いた分離試験により、分離機能を確認。 ・平成19年10月より、フルスケールモデルを用いた分離試験を実施し、分離擾乱の確認を実施予定。 ・許容できない分離擾乱が生じた場合を想定し、対策を施した分離機構を用意。 	・フライト品現品による擾乱を含めた分離機能を確認予定。
MMO分離後の姿勢の乱れによる衛星の機能喪失・劣化。 〔カテゴリ2〕	分離機構 制御システム	<ul style="list-style-type: none"> ・分離機構の冗長化。 ・スピン分離及び自律制御による姿勢安定化。 	・構造・熱モデルやモーションテーブル等を用いた試験で機能確認。
MMOとMPO間での電力供給や通信によって、EMCの問題が発生。 〔カテゴリ3〕 (PRR指摘事項)	電力供給 、コマンド・ テレメトリ	<ul style="list-style-type: none"> ・MPOからの電力供給ラインの途中にDC/DCコンバータを設置し、電氣的に絶縁。 ・MPOを経由したコマンド・テレメトリに1553Bを用いた専用の通信回線を採用し、電氣的に絶縁。 	・左記の対策に基づいたシステムを製作。
MMOの電力供給系の故障がMPO側に波及。 〔カテゴリ3〕 (PRR指摘事項)	電力供給	<ul style="list-style-type: none"> ・MPOからの電力供給ラインの途中にDC/DCコンバータを設置し、電氣的に絶縁。 	・左記の対策に基づいたシステムを製作。

(注)カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの

カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの

カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したものの

*: 開発研究段階でBBM製作などにより技術成熟度(TRL)が向上したものの

6. リスク管理

6-3(3). リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階での処置状況及び開発段階での計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
水星周回軌道投入までの太陽光直射によるMMOの機能喪失・劣化。 〔カテゴリ1〕 (PRR指摘事項)	MMO衛星	<ul style="list-style-type: none"> ・ESAとの密な調整の結果、MMOが太陽光に曝されることを避け、かつ、MPOから供給されるヒータ電力量を最小にするような、MMO全体を覆うサンシールドをESA側が開発することになった。 ・サンシールドの開き角の値をMMO分離時の衝突回避の観点も含めて、ESA側と調整中。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ESA側の衛星と結合状態で熱試験を実施し、その有効性を確認する。
水星周回軌道投入までのヒーター故障によるMMOの機能喪失・劣化。 〔カテゴリ3〕 (PRR指摘事項)	MMO衛星	<ul style="list-style-type: none"> ・MMOの電源系とは独立したヒーターラインを用意し、MMOがオフの状態でも保温可能な構成を採用。ヒーターラインは冗長のため2系統用意。 	<ul style="list-style-type: none"> ・左記の対策に基づいたシステムを製作。
水星周回軌道投入までに経年変化や劣化により、衛星の機能の劣化や損失が発生 〔カテゴリ3〕	各搭載機器	<ul style="list-style-type: none"> ・最低限の機能(温度制御)のみを残した「冬眠モード」を基準とした運用を選択。 ・ヘルスマニタ／バッテリー容量管理を定期的(6ヶ月毎)に実施し、自動診断機能によりそのトレンド監視を自動化することを選択。 	<ul style="list-style-type: none"> ・左記の運用や診断が可能なシステムの構築。

(注)カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの

カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの

カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したもの

*: 開発研究段階でBBM製作などにより技術成熟度(TRL)が向上したもの

6. リスク管理

6-3(4). リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階での処置状況及び開発段階での計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
打上時及び水星周回軌道導入までにHGAの破壊または機能劣化が発生。 [カテゴリ2] (PRRでの指摘事項)	HGA	<ul style="list-style-type: none"> ・打上時にはHGAを90度寝かせた状態でローンチロック機構で支持する設計を採用。 ・ESA側が実施する柔結合解析の結果に基づき、支持点の数と位置を決定する。 ・打ち上げ後は早い段階でローンチロックを解除する運用を選択。 ・太陽光による紫外線劣化を避けるために、MMOの分離直前まで、HGAは90度寝かした姿勢を維持し、サンシールドの陰に入れておく運用を選択。 	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星の構造・熱モデルを用いた試験により、ローンチロック機構を含めた構造・機構の設計の妥当性を確認。
HGAの開発の失敗 [カテゴリ3] (*2)	HGA	<ul style="list-style-type: none"> ・1/6スケールモデルによる耐環境性や基本性能の確認を実施。 ・1/1フルスケールモデルを製作し、アンテナの熱変形やアンテナ内部の支持構造部材による利得の劣化を計測し、その影響が小さいことを確認。 ・高温下でのアンテナ素子、導波管の表面材質の試験を実施し、使用可能な素材を選定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・EMIにより、その総合性能を確認。
衛星との所定の通信リンクがとれない [カテゴリ3] (*2、*3)	通信系	<ul style="list-style-type: none"> ・十分な利得のあるHGA,MGAの開発 ・小型軽量トランスポンダー、TWTの開発(プラネット-Cとの共同開発) 	<ul style="list-style-type: none"> ・開発研究段階の処置で終了。

(注)カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの
 カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの
 カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したもの
 *: 開発研究段階でBBM製作などにより技術成熟度(TRL)が向上したもの

6. リスク管理

6-3(5). リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階での処置状況及び開発段階での計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
MMO分離後のJAXA地上局側の不具合〔カテゴリ2〕	MMO衛星 JAXA地上局	<ul style="list-style-type: none"> ・臼田局を鹿児島局およびESA局でバックアップすることで冗長化を図る。 ・自動診断機能や運用計画立案支援装置により、運用の安全化を図る。 ・海外局利用の調整 	<ul style="list-style-type: none"> ・地上システムの構築。 ・臼田局の老朽化対策 ・バックアップ局との適合性試験
MMO分離前までのESA地上局側の不具合 ⁺ 〔カテゴリ1〕	ESA地上局	<ul style="list-style-type: none"> ・ESA地上局をバックアップするために、臼田局、鹿児島局を使用することを選択。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ESA側との調整によりJAXAアンテナによるバックアップ体制の確立を行う。
機器間データ通信プロトコルの新方式(スペースワイヤー)採用 〔カテゴリ3〕 (*4)	コマンド・データ処理	<ul style="list-style-type: none"> ・スペースワイヤーの規格の制定にNASA,ESA,JAXAが協力して参画 ・プロジェクトの要望を規格に反映 	<ul style="list-style-type: none"> ・EMの電気試験において機能確認。

+: 打上げ後、MMO分離前までの運用はESA地上局を用いてESAが行う。

(注) カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの
 カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの
 カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したもの

6. リスク管理

6-3(6). リスク管理状況

MMOに関する主要なリスクの開発研究段階での処置状況及び開発段階での計画を以下に示す。

リスク項目	サブシステム	開発研究段階での処置	開発段階での対応計画
荷重条件の悪化 〔カテゴリ1〕	衛星全般	<ul style="list-style-type: none"> ・ESAへMMO構造数学モデルを送付し、ESAで柔結合解析を実施。現在、結果待ち。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ESA側との密接な情報交換により、互いの設計変更が荷重条件に及ぼす影響を管理し、設計変更を調整するプログラムを実施。
ESA側の設計・計画変更による影響 〔カテゴリ1〕	衛星全般	<ul style="list-style-type: none"> ・年4回のシステム同士の進捗報告会を開催。互いの進捗状況、問題点等の情報を交換。 ・E-Mailでの情報交換は随時、必要な場合はTV会議を開催。 ・A/Iリストを管理することリスクを低減。 	<ul style="list-style-type: none"> ・密な情報交換の場を維持。
海外調達部品の価格高騰 〔カテゴリ1〕	衛星全般	<ul style="list-style-type: none"> ・為替差損 	<ul style="list-style-type: none"> ・為替差損

(注)カテゴリ1: JAXA/プロジェクトのコントロールが困難な外的要因が主で、必要に応じて追加コスト、スケジュール見直しを要するもの

カテゴリ2: 内的要因が主で、開発研究段階で新たにリスクとして識別されたもの

カテゴリ3: 内的要因が主で、開発研究段階で処置されたため、リスクが大幅に低減したものの

参考: MMO 搭載機器と関連する科学

MPPE

水星電子分析器 (MEA)
 水星イオン分析器 (MIA)
 イオン質量分析器 (MSA)

高エネルギーイオン測定器 (HEP-ion)
 高エネルギー電子測定器 (HEP-ele)

高エネルギー中性原子測定器 (ENA)

磁場計測器 (Mermag-M)

プラズマ波動計測器 (PWI)

水星ダストモニタ (MDM)

水星ナトリウム大気スペクトル撮像器 (MSASI)

内部磁場 [MPOと共同]
 構造と分布
 成因と内部構造

磁気圏
 構造、ダイナミクス、プロセス
 スケール則
 境界条件の影響
 電離圏がない、スケールが小さい
 早い変動、異なる太陽風条件

大気 (外圏) [MPOと共同]
 構造、変動
 表面からの生成
 太陽風及び磁気圏での消失

表層・地表 [MPOが主]
 現在の構造及び進化

惑星間プラズマ及びダスト

水星における
 宇宙物理

水星周辺の
 プラズマ環境

水星の
 起源と進化

参考：MPO 搭載機器と関連する科学

SIMBIO-SYS

(高分解能カメラ
ステレオカメラ
可視-近赤外分光)

MIRTIS-TIS (赤外)

MIXS/SIXS* (X線)

MGNS* (γ線/中性子)

PHEBUS* (紫外)

SERENA*

(中性粒子・イオン)

BELA* (レーザー高度計)

ISA/MORE (電波科学)

MERMAG-P* (磁場)

表層・地表
地形学・地質学・組成・温度

内部構造
コア/マントル、組成、磁場

外圏大気
[MMOと共同]
組成、ダイナミクス、放出機構、生成、消滅

磁気圏
[MMOが主]
構造、ダイナミクス、組成、相互作用

水星の
起源と進化

水星周辺の
プラズマ環境

* : 日本の研究者が関与する観測器

参考:MMO 科学観測機器開発体制 (1/2)



機器名称	主任研究者	共同主任研究者
MGF (磁場) [2 sub-teams, 35 scientists]	W. Baumjohann (IWF, オーストリア)	松岡 彩子 (JAXA)
	日本: 東海大, 九州大, 東北工大, 熊本大, 東工大, 東京大, 情報通信研究機構 欧州: Tech. Univ. Braunschweig (独), Imperial College (英) その他: APL/JHU, UCLA (米)	

機器名称	主任研究者	共同主任研究者
MPPE (プラズマ粒子) [5+2 sub-teams, 65 scientists]	齋藤 義文 (JAXA)	J.-A. Sauvaud (CESR-CNRS, 仏) 平原 聖文 (東京大) S. Barabash (IRF, スウェーデン)
	日本: 京都大, 名古屋大, 東工大, 東北大, 東京大, 東海大, 極地研, 情報通信研究機構 欧州: CETP-IPSL, CNRS (仏), MSSL/UCL (英), CNR-IFSI (伊), Charles Univ., IAP (チェコ), MPS (独), Univ. Bern (スイス) Others: Boston Univ. (米), National Central Univ. (台湾)	

参考:MMO 科学観測機器開発体制 (2/2)



機器名称	主任研究者	共同主任研究者
PWI (電波/波動) [7+2 sub-teams, 45 scientists]	笠羽 康正 (東北大)	J.-L. Bougeret (LESIA, 仏) L. Blomberg (KTH, スウェーデン) 小嶋 浩嗣 (RISH, 京都大) 八木谷 聡 (金沢大)
日本:	富山県立大, 愛媛大, 京都産業大, 東北大, ISAS/JAXA	
欧州:	LPCE-CNRS, CETP-IPSL (仏), IRF (スウェーデン), Univ. Oslo (ノルウェー), Finn. Meteo. Inst., Univ. Oulu (フィンランド), Eotvos Univ. (ハンガリー), ESA/RSSD	

機器名称	主任研究者	共同主任研究者
MSASI (Na撮像) [2 sub-teams, 20 scientists]	吉川 一郎 (東京大)	O. Korablev (IKI, 露)
日本:	立教大, 東北大, 東京工芸大, 極地研	

機器名称	主任研究者	共同主任研究者
MDM (ダスト) [12 scientists]	野上 .Nogami (独協医大)	
日本:	東京海洋大, 早稲田大, 京都大, 大阪府立大, 国立天文台, ISAS/JAXA	
欧州:	MPI-NP (独)	

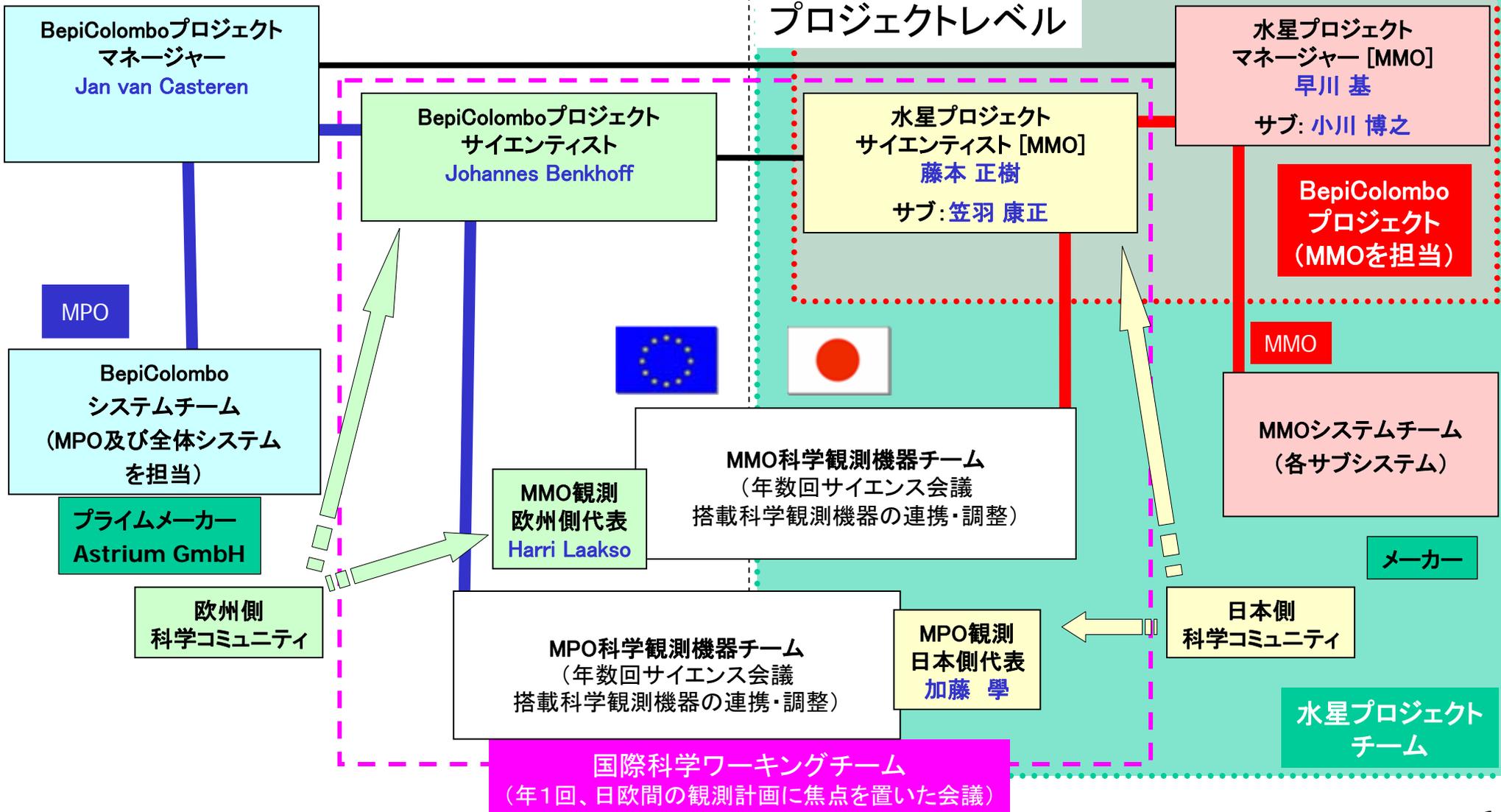
参考:MPO 科学観測機器開発体制 (1/2)

機器名称	主任研究者	共同主任研究者
[高度計] BELA (レーザー高度計)	N. Thomas (Univ. Bern, スイス)	T. Spohn (DLR Inst. Planet., 独)
[電波科学] ISA (加速度計) MORE (Ka帯通信機)	V. Iafolla (CNR-IFSI, 伊) L. Iess (Univ. Rome, 伊)	
[磁場] MERMAG (磁力計)	K.H. Glassmeier (TU-Braunschweig, 独)	C.M. Carr (ICL, 英)
[カメラ / 可視-近赤外分光] SIMBIO-SYS (ステレオカメラ)	E. Flamini (ISA, 伊)	F. Capaccioni (INAF-IASF, 伊) L. Colangeli (INAF-OAdC, 伊) G. Cremonese (INAF-OAdP, 伊) A. Doressoundiram (LESIA/Obs. Paris, 仏) O. Forni (IAS, 仏) J. L. Josset (SPACE-X, スイス)

参考:MPO 科学観測機器開発体制 (2/2)

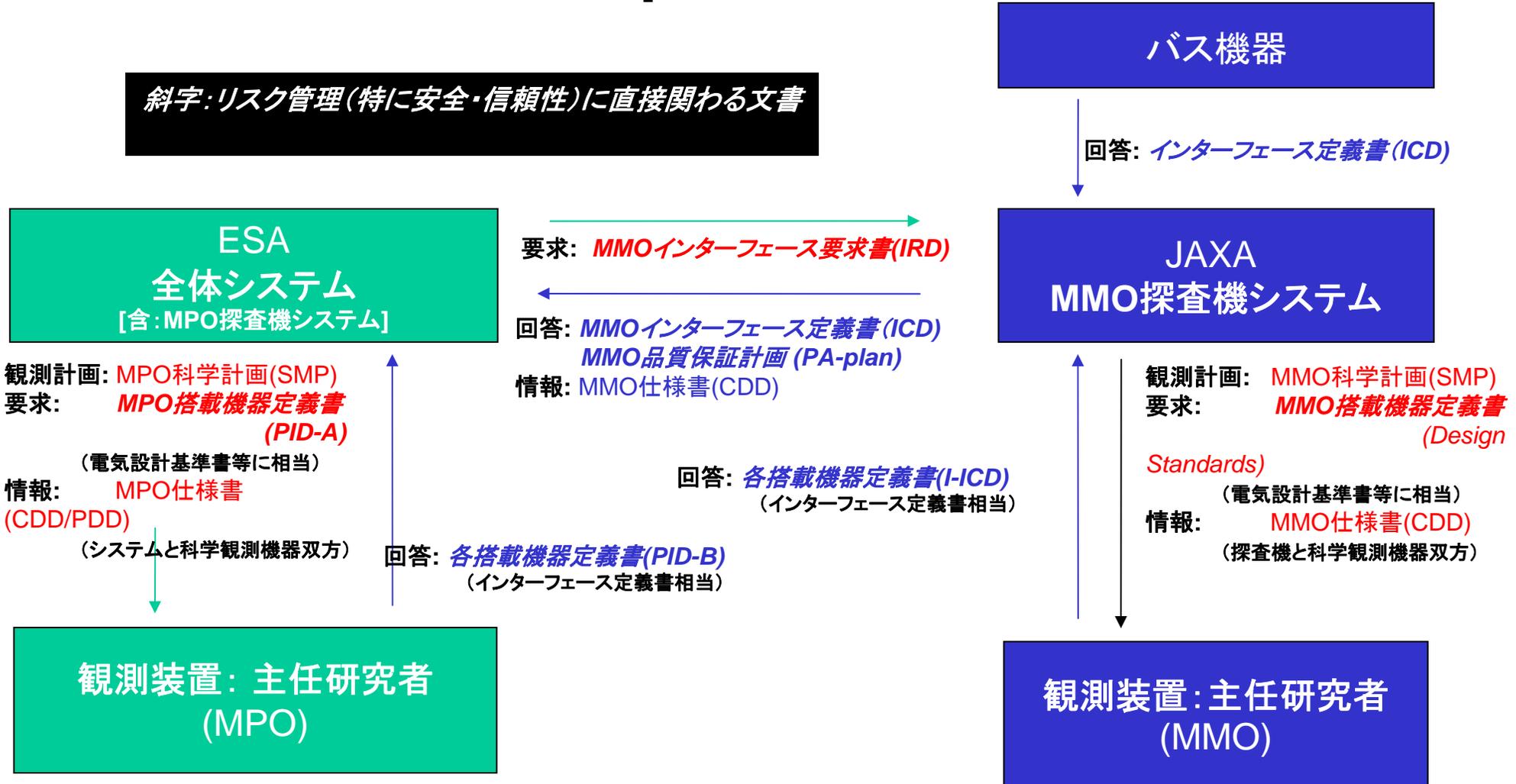
機器名称	主任研究者	共同主任研究者
[赤外] MERTIS-TIS (分光計)	E.K. Jessberger (Univ. Munster, 独)	
[γ -線/中性子] MGNS (分光計)	I. Mitrofanov (IKI, 露)	
[X-線] MIXS (分光計)	G. Fraser (Univ. Leicester, 英)	K. Muinonen (Univ. Helsinki, フィンランド)
SIXS (太陽モニター)	J. Huovelin (Univ. Helsinki, フィンランド)	M. Grande (RAL, UK)
[紫外] PHEBUS (分光計)	E. Chassefiere (SA/IPSL, UPMCP, 仏)	岡野 章一 (東北大) O. Korablev (IKI, 露)
[中性粒子 / イオン] SERENA (粒子検出器)	S. Orsini (CNR-IFSI, 伊)	S. A. Livi (JHU, 米) S. Barabash (IRF, スウェーデン) K. Torkar (SRI, Graz, オーストリア)

参考：科学も含めた実施体制



参考：BepiColombo文書体系

斜字: リスク管理(特に安全・信頼性)に直接関わる文書



<英語略号>

IRD (Interface Requirements Document)
 ICD (Interface Control Document)
 PA Plan (Product Assurance Plan)
 CDD (Configuration Data Document)

PID (Payload Interface Document)
 PDD (Payload Definition Document)
 SMP (Science Management Plan)
 AO (Announcement of Opportunity)

参考: ESA関連情報

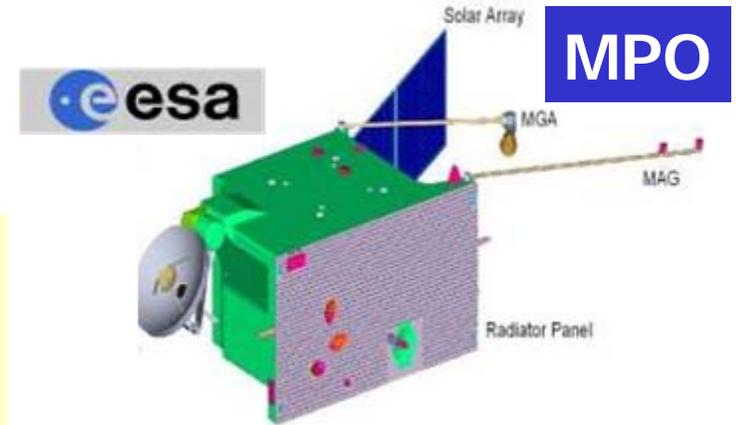
システム選定

MPO (Mercury Planetary Orbiter)

3軸衛星

～表面・内部計測に最適化: 低高度極軌道～

広視野・高分解カメラ: 表面地形
 赤外・紫外・X線・ γ 線・中性子観測器: 表面組成
 磁場計測器: 固有磁場・磁気圏磁場(MMOと連携)
 高精度軌道決定: 重力場計測・一般相対論検証 など



探査機システムの低コスト化・信頼性向上

- ・打上げロケットは、ソユーズ。バックアップとしてアリアン-5。
 →EUのロケットを使う事がESAからの要求
 ソユーズはアリアンスペース社が提供している為
 EUのロケットと見なされる。
 現在ESAの科学ミッションはソユーズによる打上げが基本
- ・惑星間軌道に電気推進を用いる事による飛行時間短縮
- ・水星周回軌道投入に重力捕捉を用いる事によるシステムの簡素化
 →信頼性向上並びに低コスト化

参考：科学的意義：内部・表層 (MPO)



磁場の存在は、巨大な中心核を持つ水星の特異な構造に関係する。太陽に最も近い水星の内部・表層に残る過去の痕跡は、太陽系形成における「地球型惑星の起源と進化」を知る手掛りとなる。

○巨大な鉄の中心核(全体の3/4)の解明を目指す

→ 重力場の全球詳細マッピングを行い、
水星の内部構造を明らかにする。

○形成初期の姿を残す表面地形の解明を目指す

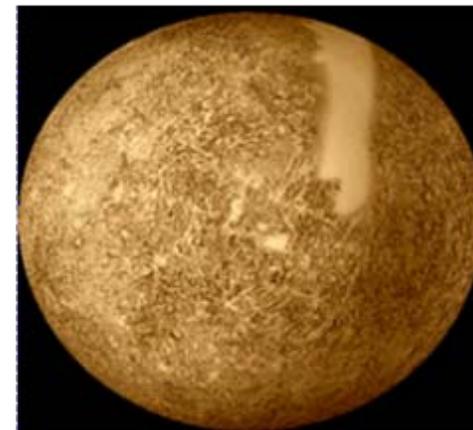
→ 詳細地形撮像を行い、表面地形の成因解明を目指す。

○鉱物・元素組成の解明を目指す

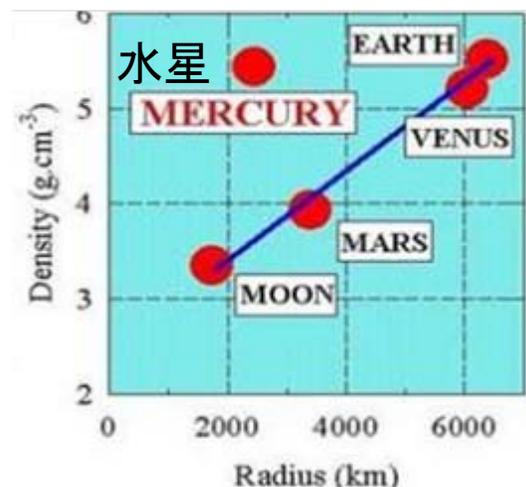
→水星の起源に手掛りを得ることを目指す。

○極の氷の存在検証を目指す

→ γ 線・中性子観測によって、水の存在を検証する。



Mariner10が撮った水星の地形



地球型惑星・月の半径-密度
水星は、圧倒的に密度が高い

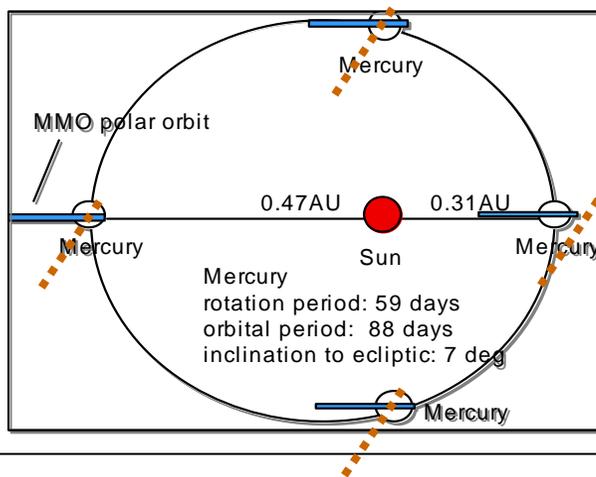
参考：MESSENGER計画とBepiColombo計画



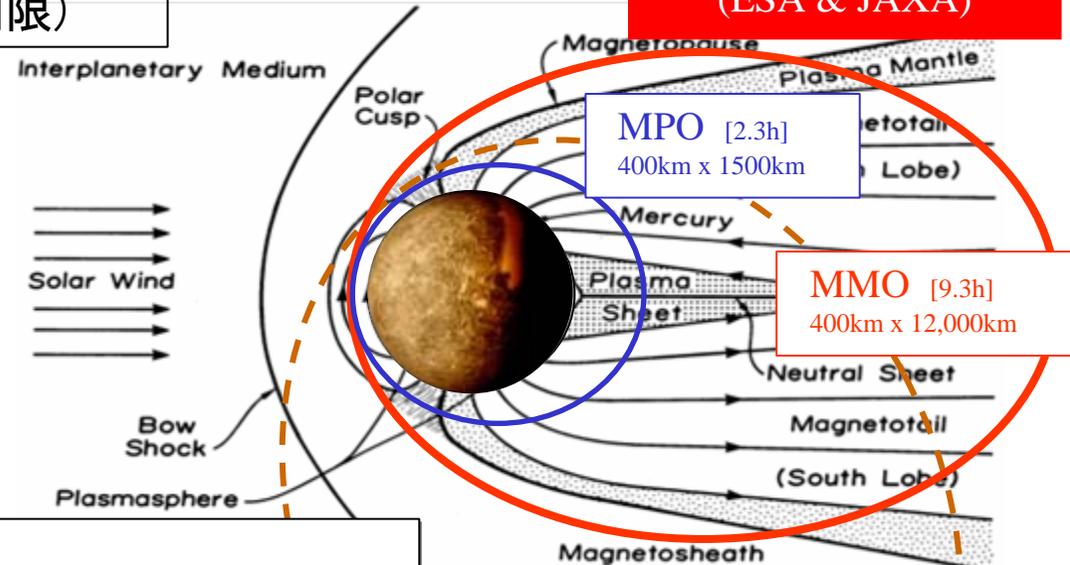
～初サーベイから全貌解明へ～

Messenger

- 全球のラフな初サーベイ & 北半球の詳細観測
 - ・ 軌道：北半球に近水点
 - ・ 姿勢：太陽に対しほぼ固定（視野に制限）



BepiColombo計画 (ESA & JAXA)



BepiColombo

- 水星のComplete studyを行う。
 - ・ 2周回探査機による複数点同時観測
 - ・ 全球および磁気圏をカバーする最適化された軌道
 - ・ 目的に最適化された探査機姿勢
 - ・ 充実した観測機能

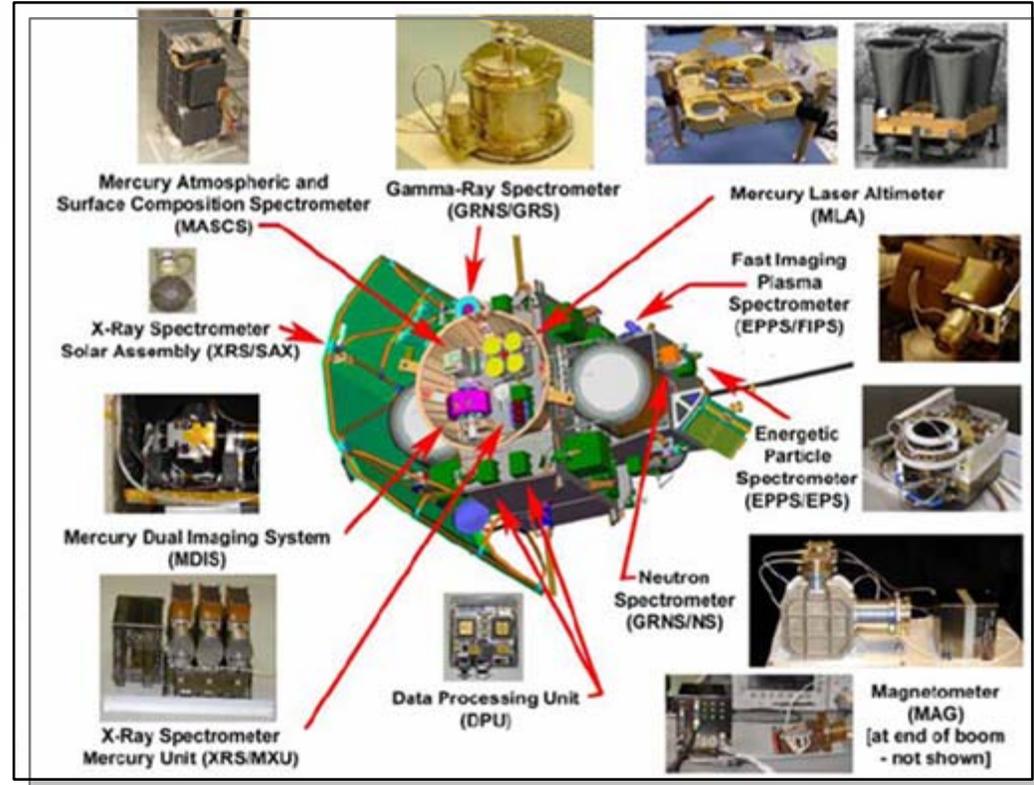
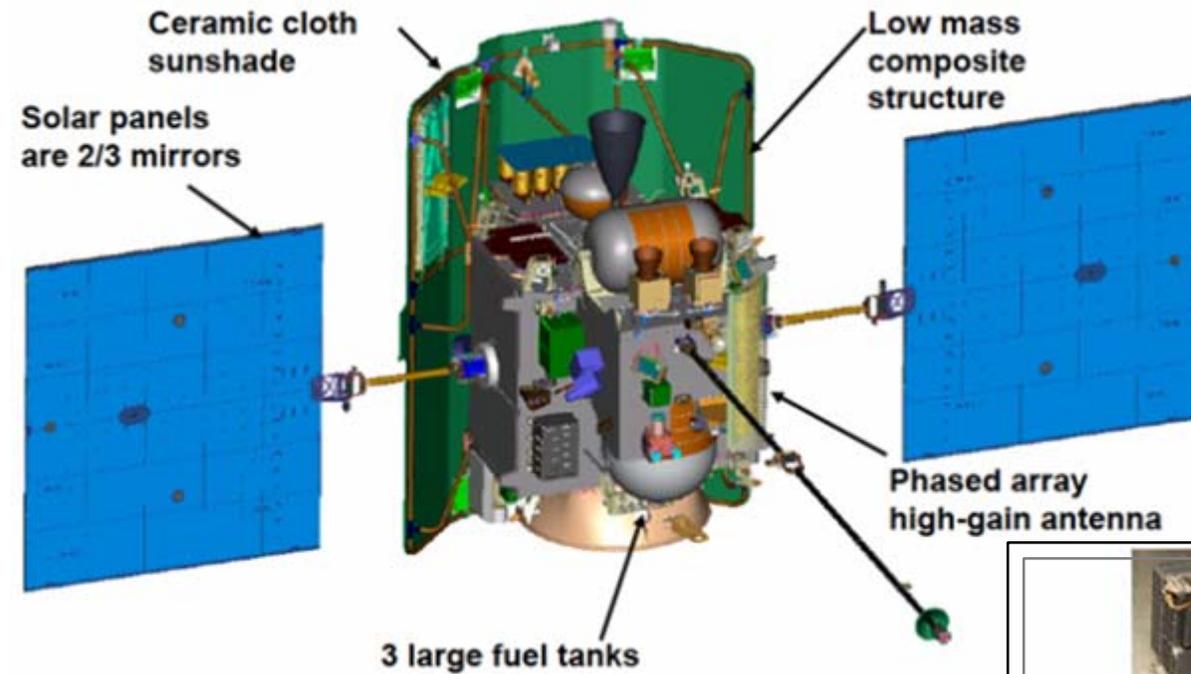
MESSENGER [NASA]

Launch: 2004
Observation: 2011

発見をするのがMESSENGER、謎を解き明かすのがBepiColombo

参考: MESSENGER

概観と搭載機器



Messenger (NASA & APL)

2004 打上げ

2011- 水星周回観測

付録：用語

太陽風：	太陽から噴出される高速のプラズマ流	MPO：	Mercury Planetary Orbiter。 ESA担当の3軸探査機。
プラズマ：	磁気圏や太陽風を占める電離気体	MTM：	Mercury Transfer Module ESA担当の電気推進モジュール
AO：	Announcement of Opportunity (科学観測機器国際公募)	OSR：	Optical Solar Reflector (SSMと同義)
BepiColombo：	日欧共同国際水星探査計画。米国Mariner 10 計画の軌道提案など、水星研究への貢献で名を 残したイタリア人科学者の名から。	PDR：	Preliminary Design Review (基本設計審査)
CDR：	Critical Design Review (詳細設計審査)	PM：	Proto-type Model (衛星試作)
Definition phase (ESA)：	2メーカーによる競合的システム検討	PRR：	Preliminary Requirements Review (プロジェクト移行審査)
EMC：	Electro Magnetic Compatibility (電磁適合性)	QR：	Qualification Review (フライトモデルの開発 完了審査)
ESA：	ヨーロッパ宇宙機関	Solar：	地球での強度を1とした太陽光強度の単位
FM：	Flight Model (衛星製作)	Soyuz：	ソユーズロケット
ISAS：	旧宇宙科学研究所	SSM：	Secondary Surface Mirror (鏡の一種)
ITT (ESA)：	Invitation to Tender (メーカー選定)	STM：	Structural and Thermal Model (熱設計・構造設計の確認用モデル)
JAXA：	宇宙航空研究開発機構	TRL：	Technical Rediness Level (技術成熟度)
Mariner 10：	1974-1975にかけ水星近傍通過観測を3回行っ た米国探査機		
MESSENGER：	NASAの水星探査計画		
MMO：	Mercury Magnetospheric Orbiter。 JAXA担当のスピン探査機。		
MLI：	Multi-Layer Insulator (多層断熱材)		