

日欧共同水星探査計画 BepiColombo: 2003FY

早川基、山川宏、笠羽康正、小川博之、向井利典(JAXA/ISAS)、水星探査 WG

BepiColombo/MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter): 2003FY

山川宏、早川基、笠羽康正、小川博之、向井利典(宇宙科学研究所)、水星探査 WG
水星プロジェクト室: <http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/>

1. 計画概要

水星は、紀元前からその存在が知られる。しかし、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査の実現は困難であった。これまで辿り着いた探査機は、米国マリナー10号の3回の通過(1974-5)のみである。この探査は、小さな惑星にはあり得ないと考えられていた「磁場・磁気圏」の予想外の発見をもたらしたが、その究明は30年以上続く夢に留まってきた。耐熱技術の進展に代表される技術革新が、ようやく大きな壁を取り除きつつある。

「ベピ・コロombo(BepiColombo)」¹計画は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との共同によって、この惑星の磁場・磁気圏・内部・表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。

本計画の科学的意義は、以下の二つである。

- 1) 固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけであり、水星の詳細探査は「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」の機会となる。「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすことが期待される。
- 2) 磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核に代表される水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献することが期待される。

本計画は、上記の目標に最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO: 3軸制御、低高度極軌道] と、磁場・磁気圏の観測に最適化された水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO: スピン制御、楕円極軌道] から構成される(図1)。両探査機は、一体で「ソユーズ・フレガート 2B」ロケットで打ち上げられ、水星へ伴に旅をする。水星到達後に分離して、協力して観測活動を行う。

ISAS/JAXA は、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とする MMO 探査機を担当する。ESA は残りの全て、すなわち、「打ち上げ・惑星間空間の巡航・水星周回軌道への投入」および MPO 探査機を担当することとなる。

両探査機の搭載観測機器は、日欧に開かれた国際公募(2004年に実施予定)によって選抜搭載する。これに向けて、日欧に跨る多数の装置開発チームで検討が進められている。また、観測計画の立案・実施は、観測機器開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成される「BepiColombo 科学ワーキングチーム」で行われる。

¹ マリナー10号の計画軌道[金星スウィングバイを利用して水星に3回近づいた]の提案や、水星の自転・公転の共鳴関係の解明などに貢献したイタリアの応用数学者 Giuseppe (Bepi) Colombo(1920-1984)にちなむ。

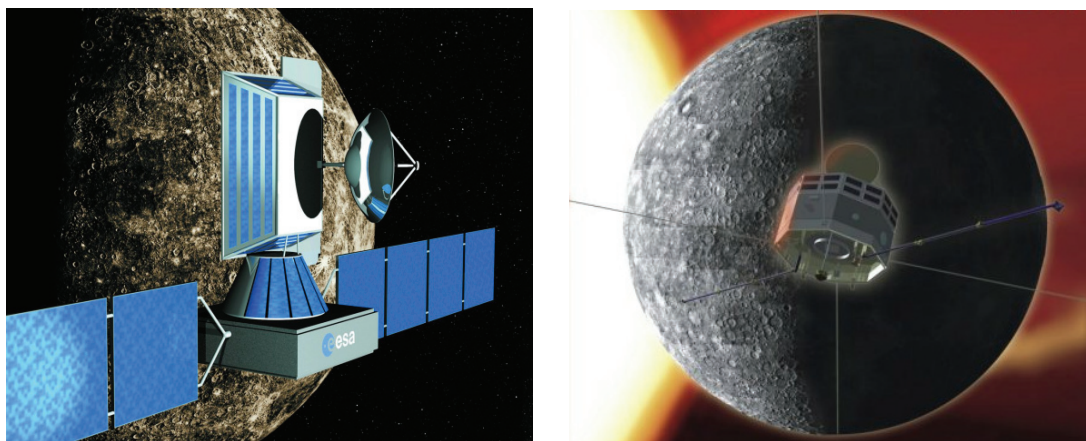


図1(左) 水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO] (ESA 提供)
 (右) 水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO] (京大 RASC 提供)

| “ISAS” Mercury Exploration Project: 日本としての計画検討 | | |
|---|--------------------------------|----------|
| 1997 June | 水星探査ワーキンググループを公式結成 | ISAS |
| 1998 Nov. | 日本独自の水星探査計画を提案 | ISAS |
| “ESA & JAXA/ISAS” BepiColombo Project: 日欧共同としての計画検討 | | |
| 1999 Nov. | 水星探査計画の共同検討の提案 | ESA→ISAS |
| 2000 Sep. | 共同計画への参加意志を表明 | ISAS→ESA |
| Oct. | 次期 Cornerstone[大型ミッション]として正式選定 | ESA |
| 戦略的基礎開発(2001-2002FY) | | |
| 2001 Sep. | 国際水星科学ワークショップ(相模原) | ISAS/ESA |
| 2002 Jan. | ISAS/宇宙理学委員会で承認 | ISAS |
| 2003 Mar | 水星 WG 全体会合 | ISAS |
| 基礎研究(2003FY) | | |
| 2003 Apr | 第6回 ESA-ISAS meeting (ESTEC) | ESA/ISAS |
| July | 宇宙開発委・評価小委員会での評価 | 日本政府 |
| Oct | 総合科学技術会議での評価 | 日本政府 |
| Nov | ESA/宇宙科学委員会(SPC)での見直し | ESA |
| Mar | 日 ESA 行政官会議(東京) | JAXA/ESA |
| 2004 Jan | 第7回 ESA-ISAS meeting (ESTEC) | JAXA/ESA |
| Mar. | 水星 WG 全体会合 | JAXA |

表 1 水星探査プロジェクト:1997~2004

2. 計画構成

本計画は、「コーナーストーン」と呼ばれる ESA の大型ミッションに日本も参加・協力するものであり、ESA との初の大型共同ミッションでもある。日・米・欧は 90 年代後半にそれぞれの水星探査

計画を練っていたが、日・欧は共同の道を選択した。ここまでの検討・開発の経緯を表1に示す。

BepiColombo 計画は、日欧それぞれで検討・提案・承認のプロセスを踏みつつ進んできた。この過程で、ESA は、2002 年 12 月の「アリアン V 打ち上げ」の失敗に起因した財政難のため、科学プログラム委員会 (SPC: Science Programme Committee) において宇宙科学計画全般の見直しを行った。11 月に “New Cosmic Vision” によってこの結論が出されたが、BepiColombo 計画についてはリスク縮小と経費削減の観点から以下の骨子を提案した。

- ・技術的/経費的リスクが懸念されていた「水星着陸機」MSE を本計画から切り離す。
- ・MPO と MMO の2探査機を一体で、ソユーズ・フレガート 2B ロケットによって打ち上げる。
- ・打ち上げ時期は、2011-2012 の Window とする。

12 月(東京)および 1 月(ESTEC)にて行われた ESA-JAXA の会合にて、日欧は基本的にこの方針で同意している。計画の骨子確定を踏まえて、ESA では MPO に搭載される観測装置を公式選定するための作業が 1 月から始まった。JAXA も MMO の観測装置について同様な作業を開始しつつある。また、紳士協定で行ってきた JAXA・ESA 間の協力も文書化する必要があり、LOA (Letter of Agreement) の準備を進めつつある。

現計画のシナリオを図2に示す。MPO・MMO 両探査機は、惑星間軌道で使用される電気推進モジュール (SEPM = Solar Electric Propulsion Module)、および水星への周回軌道投入に用いる化学推進モジュール (CPM = Chemical Propulsion Module) と結合させた、単一の「統合モジュール」として打ち上げを行う。打ち上げは、ソユーズ・フレガート 2B (現存する「ソユーズ・フレガート」の増強型) により、2011-2012 年の Window で実施する。ISAS/JAXA は MMO 探査機を担当し、ESA は残りの全て、すなわち、複合システムの打ち上げ・惑星間空間の巡航・水星周回軌道への投入、および MPO 探査機を担当する。

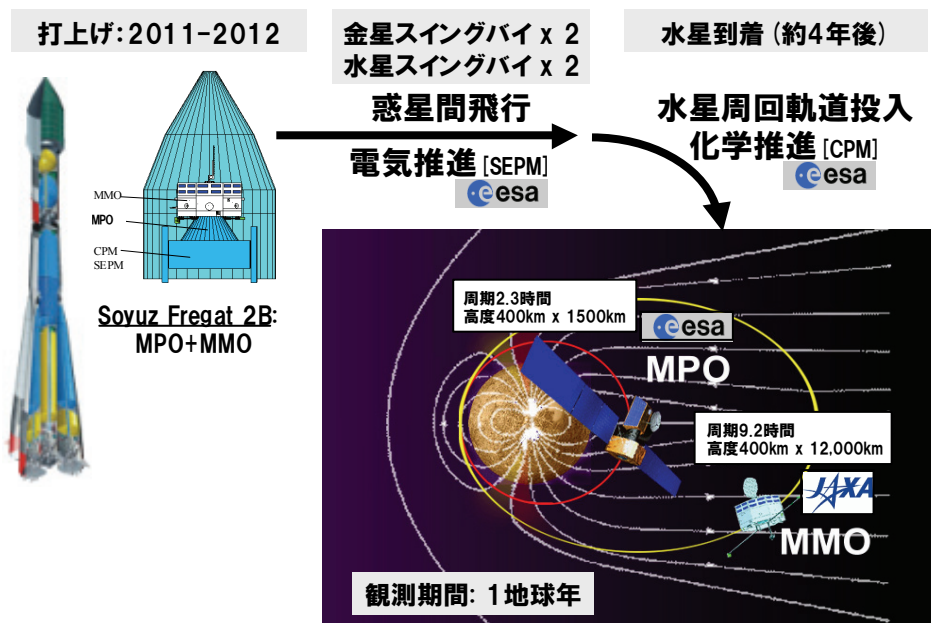


図2 BepiColombo 計画:ミッションシナリオ

各 2 回の金星・水星フライバイを含めた惑星間空間巡航は、電気推進モジュール(SEPM)にて行い、約 4 年後に水星に到着する。大きな推力を要する水星周回軌道投入は、化学推進モジュール(CPM)によって行う。この間の「統合モジュール」の制御・運用は MPO が司り、ESA によって実施される。この間、JAXA が担当する MMO 探査機は基本的に電源 OFF とし(温度維持機能を除く)、最低限のヘルスチェック運用のみを実施する。

最初に投入される軌道は、MMO の周回軌道(高度:400x12,000km, 周期:9.2 時間)である。ここで MMO は起動され、十分なヘルスチェックの後に複合モジュールからスピン分離して、臼田 64m による独自の運用・観測活動を開始する。MPO は、再度の化学推進モジュール(CPM)の噴射によって更に高度を下げ、ほぼ円軌道(高度:400x1,500km, 周期:2.3 時間)に至る。これにより、MPO/MMO 探査機は、同一軌道面を 4 倍の軌道周期で周回することになり、特に磁場の連携観測に寄与する。

3. 探査機構成

本計画を構成する2つの周回探査機の目標、仕様、モデル搭載観測機器について述べる。なお、搭載観測機器は、日欧に対して開かれる国際公募によって 2004 年中に決定予定である。

磁場や磁気圏の様子がよくわかっている惑星は地球だけで、水星は初めて地球と比較ができる惑星となる。すなわち、この両者の比較は、磁場/磁気圏を巡る惑星環境の更なる理解に貢献するとともに、広く宇宙に存在する様々な磁気圏の特殊性・普遍性を知る大きなステップとなる。JAXA の担当する水星磁気圏探査機 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO]は、この解明に最適化されたもので、以下の特徴を持つ。

- ・軌道： 磁気圏全域をカバーするため、「夜側を包含しうる長楕円極軌道」をとる。
- ・姿勢： ワイヤアンテナ展開、粒子全方位計測のため、「スピン制御」とする。
- ・EMC 対策： 精密な磁場・プラズマ計測のため、帯磁・帯電・電磁ノイズ低減を図る

磁場の存在は、半径の 3/4 を占める巨大な中心核を持つ水星の特異な構造に関係する。水星の特異な姿の原因は、原始太陽系星雲の最も内側で最後に固まったとされるこの天体の「初期」に遡ると考えられる。ESA の担当する水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter [MPO]は、この解明に最適化されたもので、以下の特徴を持つ。

- ・軌道： 表層・内部・磁場を全球計測するため、「低高度極軌道」をとる。
- ・姿勢： 表層を高空間分解で計測するため、「3軸制御」とし、常時水星表面を指向する。

各探査機において想定しているモデル観測装置を図3・図4に示した。また、両探査機の連携によって以下の観測が可能となる。

- a) **水星磁場の観測**： MMO による「本体近傍～磁気圏・太陽風の磁場観測」と、MPO による「本体近傍の磁場観測」の結合によって、水星固有磁場の“高精度決定”、および水星磁気圏の“空間分解”が初めて可能となる。
- b) **磁気圏-水星表層の直接相互作用の検出**： MMO による「磁場・高エネルギー粒子（原因）の観測」と、MPO が実施する「表面からの原子・X線放射（結果）の検出」の結合によって、希薄大気(Na が主)の生成過程や表層風化と磁気圏活動との関連が初めて可能となる。

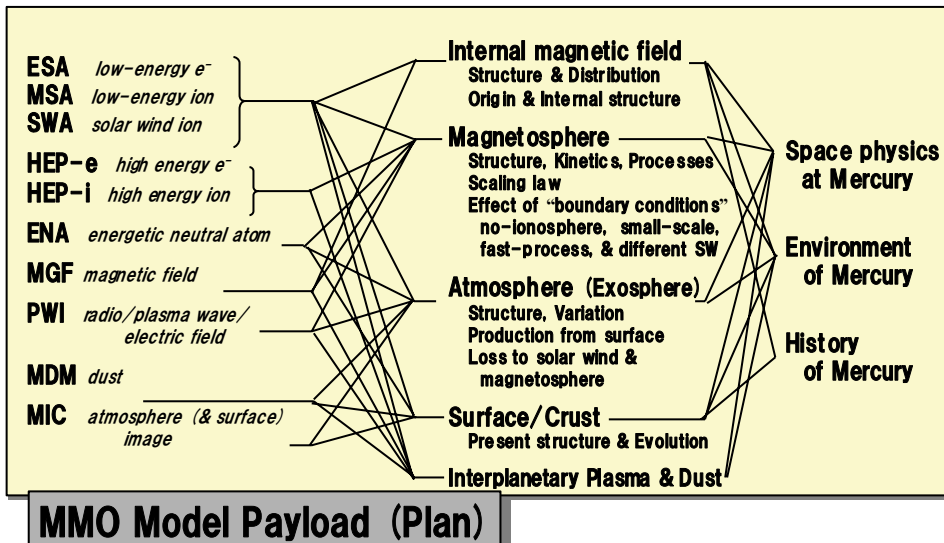


図 3 Mercury Magnetospheric Orbiter [MMO]: 観測装置候補、観測対象、科学目標

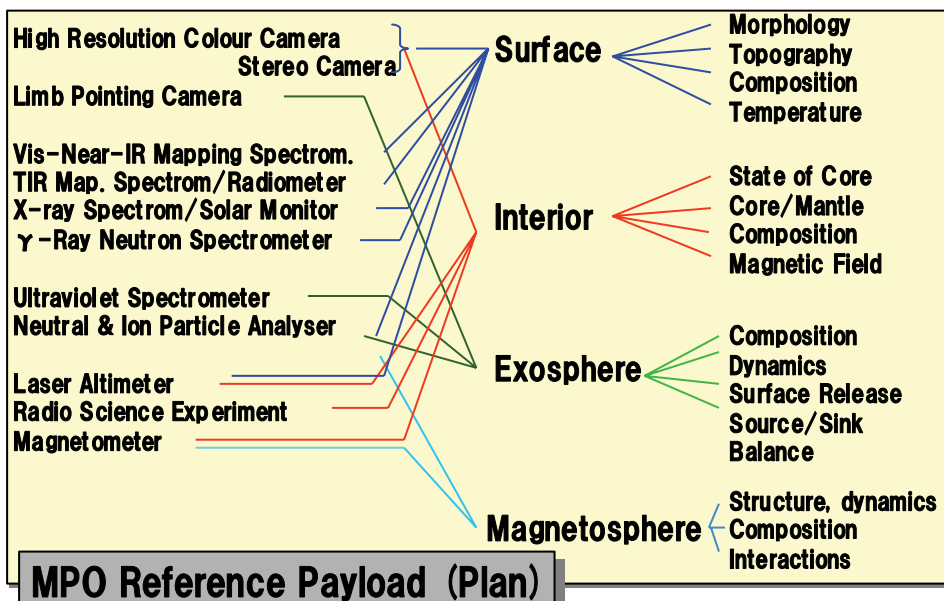


図 4 Mercury Planetary Orbiter [MPO]: 観測装置候補、観測対象、科学目標

着陸機MSEのキャンセル: その影響

着陸機MSEの検討に日本側は直接コミットしなかったが、この実現性はESA側最大の懸案だった。この切り離しで下記の損失が発生する。

- a) 磁場の観測点が減少: 「表層の磁場観測」がなくなる。誘導磁場(内部で励起される変動磁場)の分離は困難だが、「本体磁場」「磁気圏磁場」の高精度計測は可能である。
- b) 表層の直接計測ができない: 「地震・熱流量」という内部情報は手が届かなくなる。また、表層組成情報はリモートセンシングのみとなるが、データ校正などで損失を最小限に留める。

ただし、日本側の直接的参加を想定していた科学目標は基本的には維持されているため、「MMO & MPO」の枠組みで進めて行く。

4. MESSENGER計画とBepiColombo計画 ～初サーベイから全貌解明へ～

米国MESSENGER計画(2004年打上、2009年水星到着予定)は、「Better, Faster, Cheaper」を標語とするDISCOVERYプログラムの一つである。近水点を高緯度に取り、衛星姿勢を太陽角準固定する(いずれも熱設計に起因)ため制約があるが、「全球の低分解初サーベイ」と「北半球高緯度の詳細観測」を行うこととなる。

磁場・磁気圏観測はMESSENGERの主目的から外れている。磁場観測は行うが、北半球高緯度のデータだけから固有磁場の成因を決めるのは困難であり、また外部磁場(磁気圏電流に起因)の影響を分離しがたい。また、MESSENGERのプラズマ観測能力はエネルギーレンジの制約(電子で10keV以上: プラズマの主要成分を観測しない)、視野の制約(3軸姿勢のため全方位をカバーしない平面的視野)、時間分解能の制約(分のオーダー)を受けている。

内部・表層の観測においても、視野を常に表面直視することができ、かつ低高度飛行による内部・表面全球観測を可能とするMPOによって、MESSENGERサーベイの成果を拡大するとともに、さらに新課題にも対応可能な高機能性により、水星の全貌を解明することが期待される。

表2に、MESSENGERとBepiColomboの関係を示す。BepiColombo計画は、MESSENGERの「初サーベイ」の成果を拡大し、かつ新観測項目(特に磁場・磁気圏)により水星の全貌解明を行う。

| | MESSENGER | BepiColombo |
|--|---|---|
| 水星環境(主にMMO) : Bepiで初めて明かされる | | |
| 水星磁場の成因の解明 | 北半球高緯度の比較的低精度な観測 → 成因は未決着 | 2探査機で全球磁場構造解明 → 成因解明、地球との初の比較 |
| 水星磁気圏の解明 | 主目的ではない | 高精度・高時間分解(MMO)による全貌解明&地球との比較 → 本格的な比較磁気圏学(普遍性と特異性)の創出 |
| 激しく変動する希薄な大気の解明 | 一部の元素組成(北半球高緯度に限定) | 元素組成、空間構造、時間変化 → 生成・消失機構の解明 |
| 太陽近傍の惑星間空間の観測 | なし(太陽シールドの後ろにいたので観測できない) | 高マツハ数衝撃波を初めて直接観測(MMO) |
| 内部・表層(主にMPO) : BepiColomboでMessengerのもたらず謎を解明する | | |
| 鉱物・元素組成の解明 極の氷の存在検証 | 全球平均と、北半球高緯度の詳細を、低精度(~30%)で観測 → 岩石の種類分類には不足。水星の起源解明に足がかり。 | 全球で高空間分解の組成比を、高精度(~10%)で明らかに。 → 水星の起源、地殻形成・火成活動史について決定打を得る。 |
| 巨大な鉄の中心核(全体の3/4)の解明 | 北半球高緯度で、潮汐変形や歳差・章動の検出を目指す。 | 「重心決定」による重力場検出 & 軌道変化検出。 → 地殻厚・中心核の大きさを初決定し、内部構造を解明。 |
| 形成初期の姿を残す表面地形の解明 | 北半球高緯度の詳細地形と大まかな全球地形を明らかに。 | 全球を、最適条件で詳細撮像。南半球の解像度は一桁以上高い。 → 全球情報により初期史解明。 |

表 2 MESSENGER と BepiColombo

5. 2003 年度(基礎研究フェイズ)の開発・検討状況

1) BepiColombo計画全体:ESA-ISAS協力・分担体制の確立へ

日欧共同ミッションに必要な各種枠組み整備をESA-JAXA間で進めてきた。主要な懸案事項は、

共同ミッションとしての責任範囲、ESA-JAXA間の文書体系の確立、品質保証の基準・方法、開発スケジュールの調整など多岐にわたるが、いずれもゆるがせにはできない。

これらは早い時期に確立を要するもので、2004年1月から、その諸条件の合意の前提となるLoA (Letter of Agreement) の締結準備を開始したところである。

2) MMOシステム検討：重量/熱の詳細検討へ

戦略的基礎開発（2001-2002FY）を受け継ぎ、観測装置公募の前提となる「MMO探査機の基本仕様決定」を目指した詳細検討・試作を進めてきた。2004年度の最大の目標は、各サブシステムの詳細設計を取り込んだ上で、MMO探査機を「重量的・熱的に成立させること」である。

このため、熱設計への反映、重量精度の向上、耐環境評価を主な目標として、以下のサブシステムの検討などを進めてきた。一部については試作を実施している。

- ① 分離機構： 軽量・高精度・高確実性の実現を目指しスピン分離機構の基礎検討を行った
- ② 推進系： 衛星構体外に露出するため、熱モデルの作成および熱計算を実施した
- ③ 通信系： HGAの熱・構造・電氣的検討を実施した。MGAについても着手している。
- ④ 磁場計測用進展機構： 熱設計改善のため、「MAST」方式の設計・検討を実施した。
- ⑤ 耐環境試験： 火工品の高温長期保存試験や、各種熱・放射線試験を実施した。

上記およびそれ以外を含めた全サブシステム（観測装置はモデル機器仕様による）の熱設計情報を反映した「詳細熱設計」を2003年9月より開始し、第一次結果を年末に得た。現在、「サブシステムが取り付けられる衛星構体の最高温度を60℃以下に維持する」ことを目標とした、第二次検討に入りつつある。また、「統合システム」における熱設計検討をESAとともに進めている。

最新の各サブシステムの設計・目標重量を反映した最新重量表を表3に示す。

| | |
|--|---------|
| Science (including probe antenna and mast) : | 40.0kg |
| Power: | 34.4kg |
| Communication: | 37.3kg |
| C&DH | 6.7kg |
| Attitude control | 23.7kg |
| Wire Harness | 16.0kg |
| Structure: | 34.8kg |
| Thermal: | 10.9kg |
| Total MMO(After separation): | 203.7kg |
| <hr/> | |
| Spin Ejection Device | 18.8kg |
| MMO Total: | 222.6kg |

表3 MMOの現想定重量（各機器重量は、5-20%のマーヅンを含む）

3) MMO/MPO観測装置：国際公募に耐えうる設計へ

各観測装置のチームにおいては、2004年に予定される「国際公募」を目指した仕様検討が進められている。基本的に、システムが責任を持つPCS (Payload Common System: DPU[CPU・メモリ部]及びPCU[電源ユニット]からなる)に、各センサーがシリアルI/Fを介して接続する形をとり、後者が公募の対象となる。MPO探査機においても同様の方針である。各センサーの詳細は、2004年の観測装置公募を経て決定される。

6. 2004年度：観測装置国際公募

2004年度には、観測装置国際公募を実施する。表4に基本スケジュール案を示す。11月には双方で観測装置が確定する予定である。公募は、日欧それぞれの科学コミュニティにオープンに行われる。また、選考委員会は、日欧双方の委員で構成する（MPO では日：欧＝3人：6人、MMO では日：欧＝6人：3人。MPO 選考委員会は、2004年1月に活動開始している。）

観測装置の決定後に構成される BepiColombo 運営組織を図5に示す。実際の観測計画の立案・実施は、観測機器開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成される「BepiColombo 国際科学ワーキングチーム」で行われることとなる。

また、MMO探査機は、観測装置の決定後（2004年12月頃）にPreliminary Requirement Review (PRR)を実施し、探査機の要求仕様を確定する。また、2005年度に開始する「水星環境の熱試験」のため、“ソーラーシミュレータ”（10ソーラー）の導入を行うこととなる。2005年度以降の具体的な予定については、4月に行うESA-JAXA会合（相模原で開催）にて、他の懸案事項とともに議論・調整を行う予定である。

| | MPO [ESA:確定] | MMO [JAXA: 検討中] |
|------|---|--|
| 方式 | Request for Proposal [RfP] (PDDで仕様を詳細指定) | Announce of Opportunity [AO] (大枠要求のみ) |
| 公募開始 | 3月頭 | 4月頭 |
| 公募終了 | 5月末 | 6月末 |
| 審査 | 6月～10月 | 7月～10月 |
| 決定 | 11月 | 11月 |

表4 MPOおよびMMOの観測装置国際公募スケジュール(MMOは案)

(略)

図5 BepiColombo計画：運営組織