
5. 開発計画

5. 開発計画

5.1 スケジュール(打上まで)

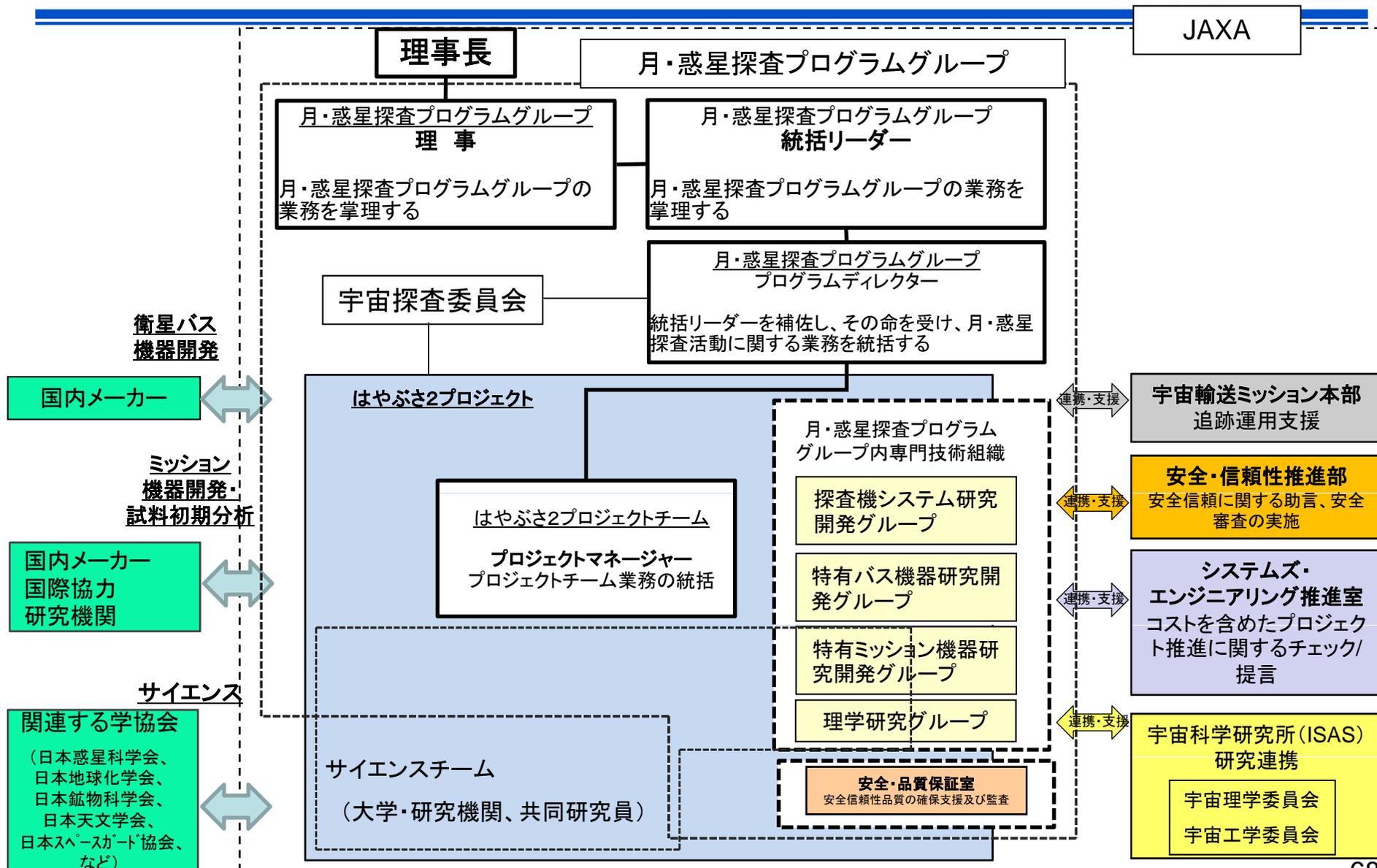
はやぶさの技術を最大限に活用し、変更を抑えることで開発期間の短縮を図っている。

2011(H23) 年度半ばよりFM製作に着手し、2012 (H24)年度半ばに一次噛合試験を開始する。

年度	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26
	FY2010	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014
主要イベント	<ul style="list-style-type: none"> ▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その1) ▲新機器RFP ▲システム設計審査会(SDR) ▲プロジェクト移行審査 	<ul style="list-style-type: none"> ▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その2) ▲基本設計審査会(PDR) ▲詳細設計審査会(CDR) 		▲納入	▲打上
開発フェーズ	設計	製作		組み立て・試験	射場・打上準備

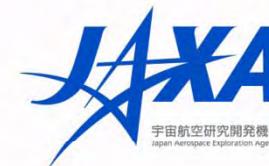
5. 開発計画

5.2 実施体制(組織体制)

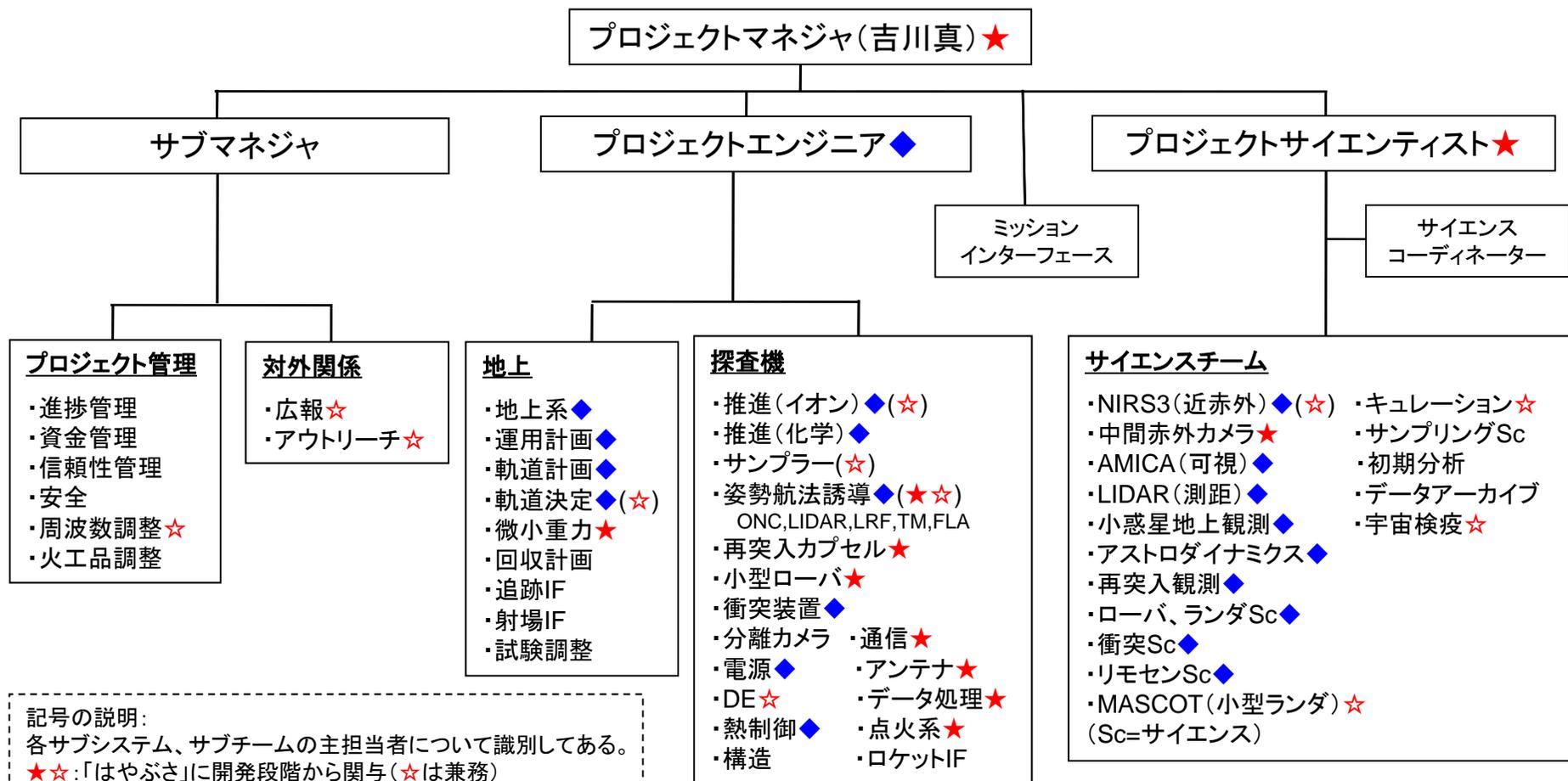


5. 開発計画

5.2 実施体制(人員体制)



下の図は、はやぶさ2プロジェクトの実施体制を示す。「はやぶさ」の経験者を各サブシステムやサブチームのリーダーとして多く取り込みつつ、新しいメンバーを加えた体制としている。なお、はやぶさ2のミッションにはJAXA外メンバーとして本文70ページに示した国内外の大学、研究所等が参加している。



5. 開発計画

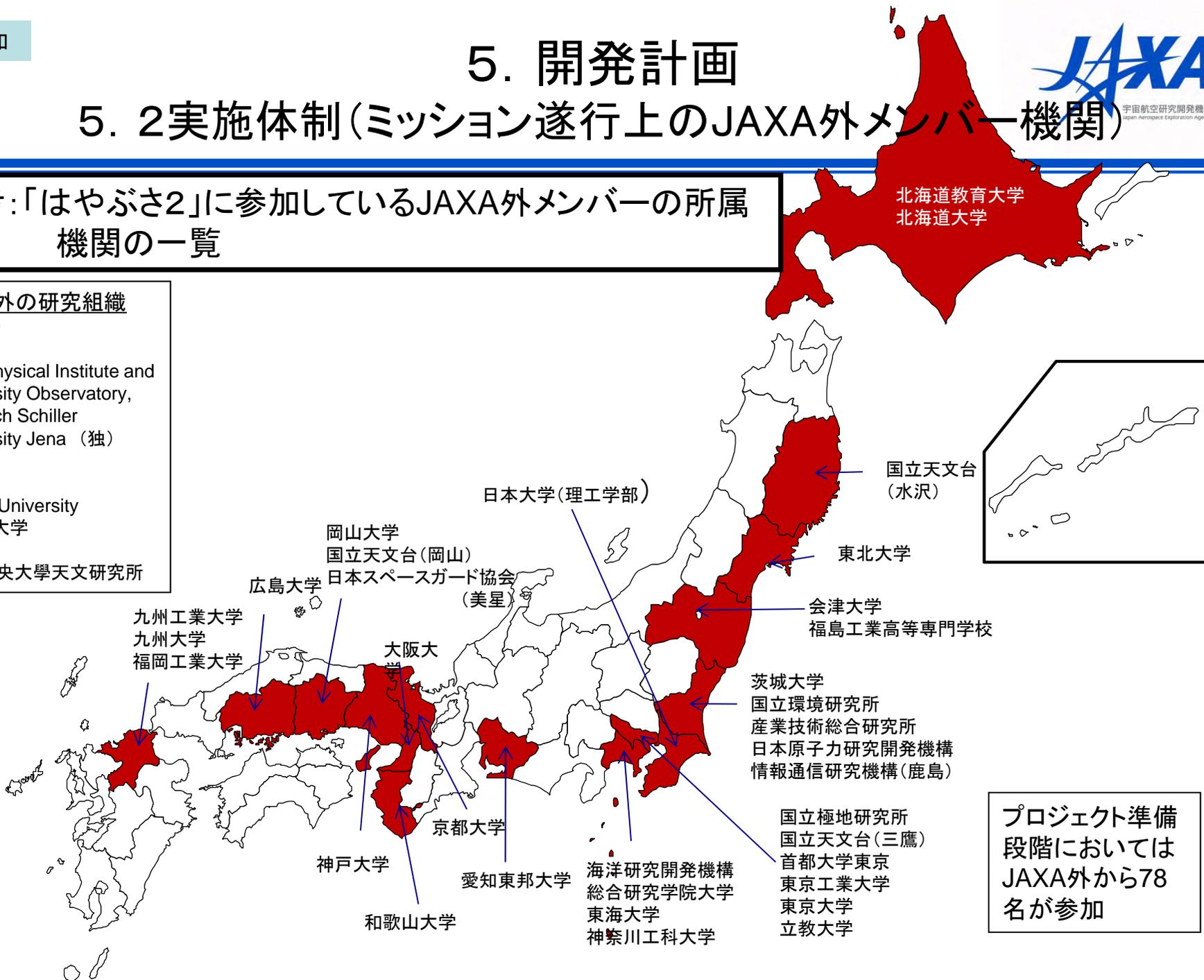
5. 2実施体制(ミッション遂行上のJAXA外メンバー機関)



参考:「はやぶさ2」に参加しているJAXA外メンバーの所属機関の一覧

海外の研究組織

- (ドイツ)
 - DLR
 - Astrophysical Institute and University Observatory, Friedrich Schiller University Jena (独)
- (USA)
 - NASA
 - Brown University
- (台湾)
 - ハワイ大学
 - 国立中央大學天文研究所



プロジェクト準備段階においてはJAXA外から78名が参加

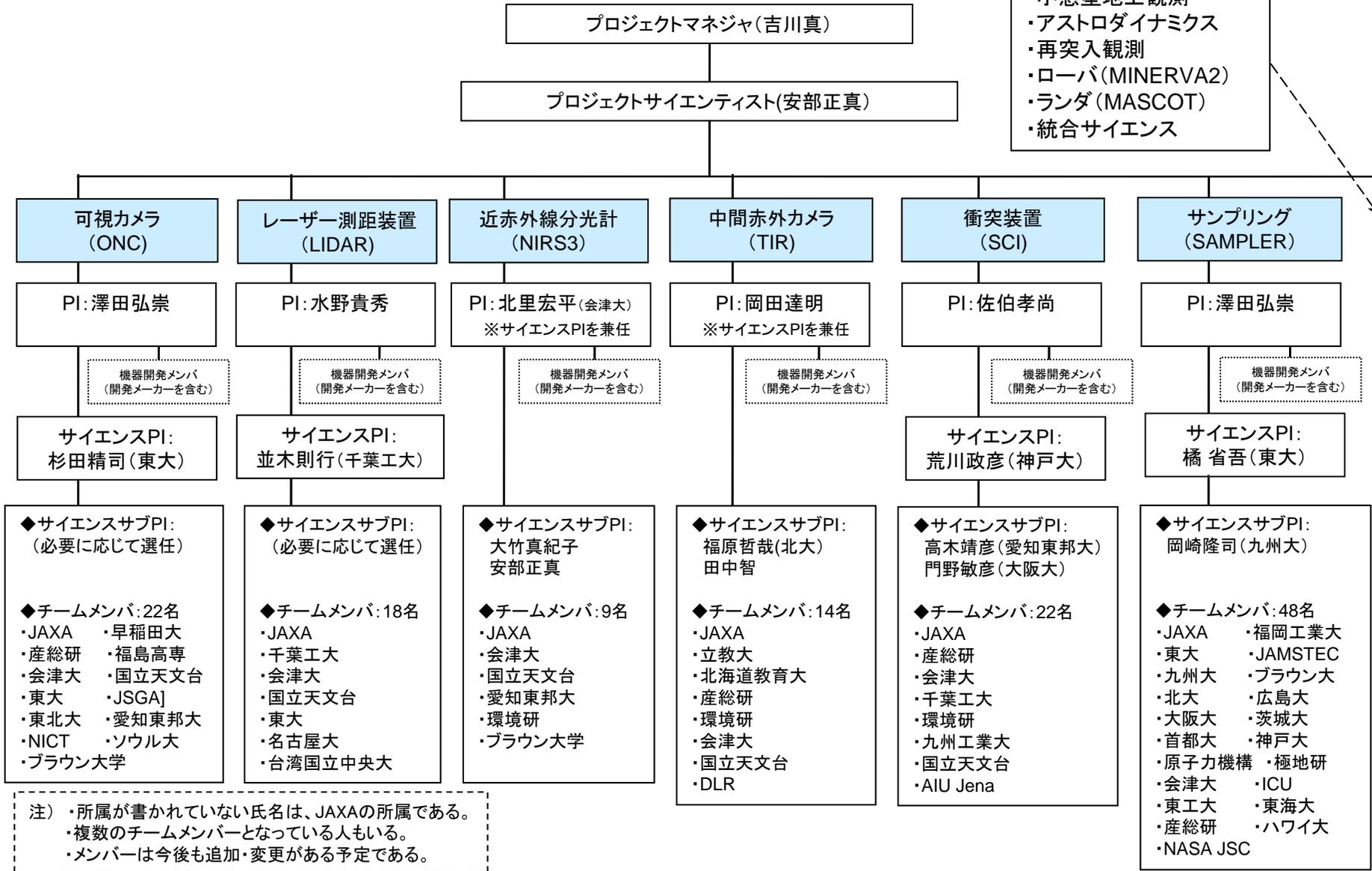
5. 開発計画



5. 2実施体制(サイエンスの体制)

その他のサイエンス

- ・データアーカイブ
- ・小惑星地上観測
- ・アストロダイナミクス
- ・再突入観測
- ・ローバ(MINERVA2)
- ・ランダ(MASCOT)
- ・統合サイエンス



注) ・所属が書かれていない氏名は、JAXAの所属である。
 ・複数のチームメンバーとなっている人もいる。
 ・メンバーは今後も追加・変更がある予定である。

C

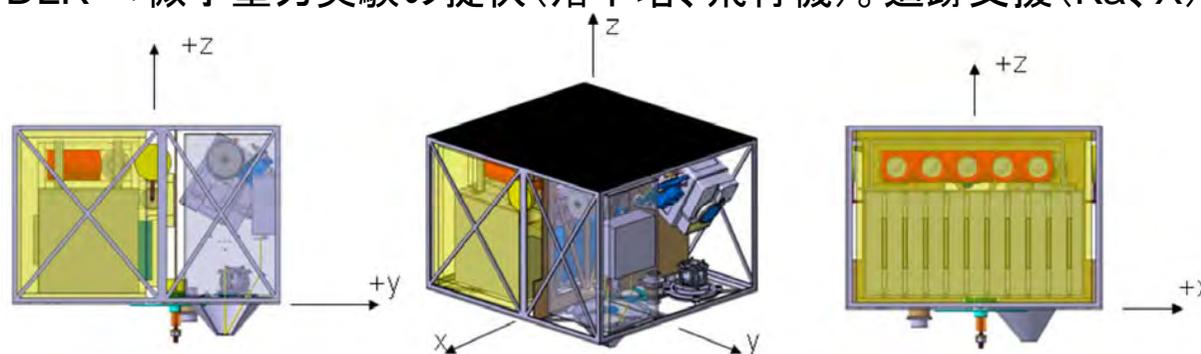
5. 開発計画

5.2 実施体制(海外協力)

「はやぶさ2」においては、DLR(ドイツ航空宇宙センター)、NASA(アメリカ航空宇宙局)、オーストラリア政府(SLASO)との協力予定である。DLRとNASAとは協議を進めているところで、現時点で検討されている協力内容は以下ようになる。

■DLRとの協力

- ・JAXA→DLRが開発した小型ランダ(MASCOT)を搭載。
MASCOT:総質量は10kg以下。搭載が検討されているミッション機器は4種類。
- ・DLR →微小重力実験の提供(落下塔、飛行機)。追跡支援(Ka、X)。



DLRが検討中の小型ランダ:MASCOT

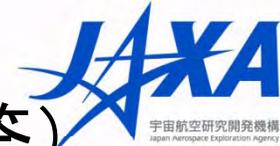
MASCOT搭載予定機器

機器名称	機能
MicroOmega	分光顕微鏡
CAM	広角カメラ 4色LED付き
MARA	熱放射計
MAG	磁力計

■NASAとの協力

- ・「はやぶさ」と同様な協力関係
- ・JAXA→観測データやサンプルの提供。有人ミッション検討に関連するデータの提供。
- ・NASA→追跡、軌道決定支援。宇宙検疫のサポート。ヒートシールド試験支援。地上観測。

5. 開発計画



5. 2実施体制(推進部会助言に対する回答)

推進部会の助言

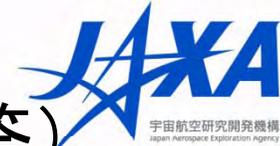
今回のミッションは月・惑星探査プログラムグループの下でのものではあるが、宇宙科学研究所の進め方とは異なるとはいえ、今回のような理学、工学の両方で目標を掲げるならば、小惑星探査に強い情熱を持つ小惑星・太陽系科学者、深宇宙探査の工学的専門家がそれぞれリーダーとして見えるような体制を早急に構築すること。

回答:

下記のように「はやぶさ2」プロジェクトの体制を構築した。

- ・各サブシステム、サブチームの主担当者には、可能な限り「はやぶさ」の経験者を配置した。
- ・世代交代も意識して若手を主担当に起用している場合もあるが、そのような場合には、チームメンバーとして「はやぶさ」開発経験者を配置した。
- ・月惑星探査プログラムグループ(JSPEC)だけでなく、宇宙科学研究所(ISAS)やその他のJAXA部署からもメンバーが加わった体制となっている。
- ・「はやぶさ2」では、サイエンスが大きな比重を占めるため、検討段階からJAXA外の研究者にも多く加わってもらい、「はやぶさ2」のサイエンスチームとなっている。

5. 開発計画



5. 2実施体制(推進部会助言に対する回答)

推進部会の助言

JAXA内外で多数の分散化されたチームや研究者が関わっており、はやぶさ2の2014年の確実な打上げを目指し、プロジェクトを効率的に管理すること。

回答： 従来の科学衛星と同様に、以下のようにプロジェクトを進めることとしている。

- ミッション機器のチームには、必ずJAXAのメンバーが加わり、情報の展開/収集や議論をリアルタイムに行う。
- およそ2ヶ月に一度、関係者(*)が一堂に会して設計会議を開催する。(すでに3回開催)。

*バスおよびミッション機器、探査機システム、地上系システムの関係者、研究者および各メーカー担当者の全てが集まる。

5. 開発計画

5.3 開発資金

はやぶさ2プロジェクトの資金計画は、以下を目標とする。

項目	コスト(億円)	備考
衛星開発費	約 162 (*1, *3)	
地上設備開発	約 10 (*2)	キュレーション設備、地上設備分含む
運用費	約 25 (*2)	運用費(帰還運用含む)、初期分析(設備含む)、アウトリーチ活動含む

B

補足説明

*1: 開発研究移行事前評価(平成22年8月)から、+11億円。

はやぶさ Lessons Learnedの反映(サンプル内面鏡面研磨等)、SAC事前評価(その1)での助言反映(LRF追加、ヒータ制御装置追加等)によりコスト増となった。

*2: 開発研究移行事前評価(平成22年8月)から +4億円(STEのみ)と項目の再整理。

衛星試験装置(STE)整備費追加(相模原地上系設備の老朽化による整備)、地球への帰還運用・初期分析(設備整備含む)、アウトリーチ活動経費を新たに運用費に含め、追跡管制ソフトウェア開発分を運用費から地上設備に含めると整理したため。

*3: 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく追加対策により、+3億円。

B

参考: 過去・現在の類似探査機開発費(打上費用除く)

- はやぶさ (日本、小惑星サンプルリターン、運用2003-2010年):
約127億円(運用費は含まない)
- スターダスト (米国、彗星塵サンプルリターン、運用1999-2006年):
約1.5億米ドル(180億円:1999年支出官レート)
- オシリス・レックス(米国、小惑星サンプルリターン、フェーズA検討中):
8億米ドル以下(712億円:2011年支出官レート)

5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)

本プロジェクトに限らず、開発資金の妥当性に関して、より明確にするための方途につき検討すること。

回答:

はやぶさ2としては、開発資金について、以下の事項に整理した。

- ① 衛星開発費
- ② 地上設備開発費（キュレーション設備、地上設備分含む）
- ③ 運用費（運用費、初期分析、アウトリーチ活動含む）

また、2011(H23)年3月に実施したJAXA内審査会では、コスト評価として、

- a. 開発方針と開発方針に応じたコスト推定内訳及び推定に至る考え方・根拠
- b. 算定プロセス・状況
- c. リスクへの対応策

などに関してははやぶさとの比較等により開発資金の妥当性について審査を行った。

はやぶさからの変更箇所を最小限にすることによる低コスト化・開発期間の短縮、他プロジェクトで実績のあるコンポーネントの使用による開発試験の一部省略などのコスト削減を図りつつ、はやぶさ Lessons Learnedの反映による信頼性向上や、各リスクへの対応策を施す状況を踏まえ、開発資金は概ね妥当と判断した。

5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



推進部会の助言

探査機が採取した試料の分析に関し、「初期分析を1年間行った後、全世界の研究者に公開して詳細分析を行う」とされているが、真空保管や高純度窒素ガス雰囲気での作業を計画しているものの、大気中の酸素や水により試料の状態が時間とともに大きく変化する可能性があり、短寿命放射性元素に関しても時間の影響が大きいので、最大の「科学的成果」を挙げるためには、初期分析の優先順位の検討や、1年後ではなく初期段階から世界の専門家の英知を結集して分析する等、事前に十分検討すること。

回答:

地上回収後速やかに、かつ、地上での汚染がない状態で試料分析を始められるようサンプルコンテナの改良を進めており、時間とともに大きく変化しないよう対処します。

その上で、以下のように行うことで、最大の科学的成果を挙げる計画です。

- ・初期分析の項目は、サンプルの状態を考慮した優先度の検討を進めている。
- ・分析チームでは、手法及びテーマごとにサイエンスの多角的検討を行っている。
 - 1) 鉱物・組織分析、同位体分析、有機物分析、希ガス分析
 - 2) 銀河・分子雲、原始太陽系円盤、微惑星、宇宙風化
- ・日本の惑星物質分析のレベルは世界最高水準にあるため、それぞれのチームのリーダーは日本人研究者が務めること検討している。但し、短期間の初期分析で最大の成果をあげるために、日本でおこなうことが難しいような分析項目などを中心に海外の研究者の協力を得たいと考えている。

5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



推進部会の助言

今後の分析技術の進捗を反映して、超一流の分析の実施を目指し、更なる分析体制の充実と強化を図ること。

回答： 今後の分析技術の進捗を見据えることはリターンサンプルで最大の科学成果を得るために重要である。初期分析以降のさらなる分析体制の充実と強化は、はやぶさ2プロジェクトではなく、「はやぶさ」の経験・実績を通して活発化した分析科学コミュニティが主体となって実施される。

分析科学コミュニティでは、進捗を見据えるだけでなく、分析技術を開発・進展させることも始めており、次世代二次イオン質量分析計の開発や、J-PARCと連携し、ミュオンを用いた非破壊での軽元素バルク分析の試験をおこなっている。また、有機物分析が重要となるため、放射光施設での顕微軟X線吸光分析、微小領域での有機物質質量分析・光学活性分析といった手法の開発の検討を進めている。次世代の国内分析チームの更なる強化を目的とし、シニア研究者をとりまとめとした中堅・若手によるコンソーシアム研究も開始している。

5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



将来の深宇宙探査に向けての各種搭載機器・センサー類等についても、長期的視点で開発に取り組むこと。

回答:

センサー(サイエンス機器)は、C型小惑星探査に特化せざるを得ないが、バス系機器については、さらなる深宇宙探査においても流用できる構成としている。また、さらなる深宇宙探査においても通信データ量を確保すべく、今回Ka帯通信系も搭載することとした。新規搭載機器である衝突装置は将来、地下探査をおこなう有効な手法であると考えている。

6. リスク管理

6. リスク管理

6.1 リスク管理方針・実施計画

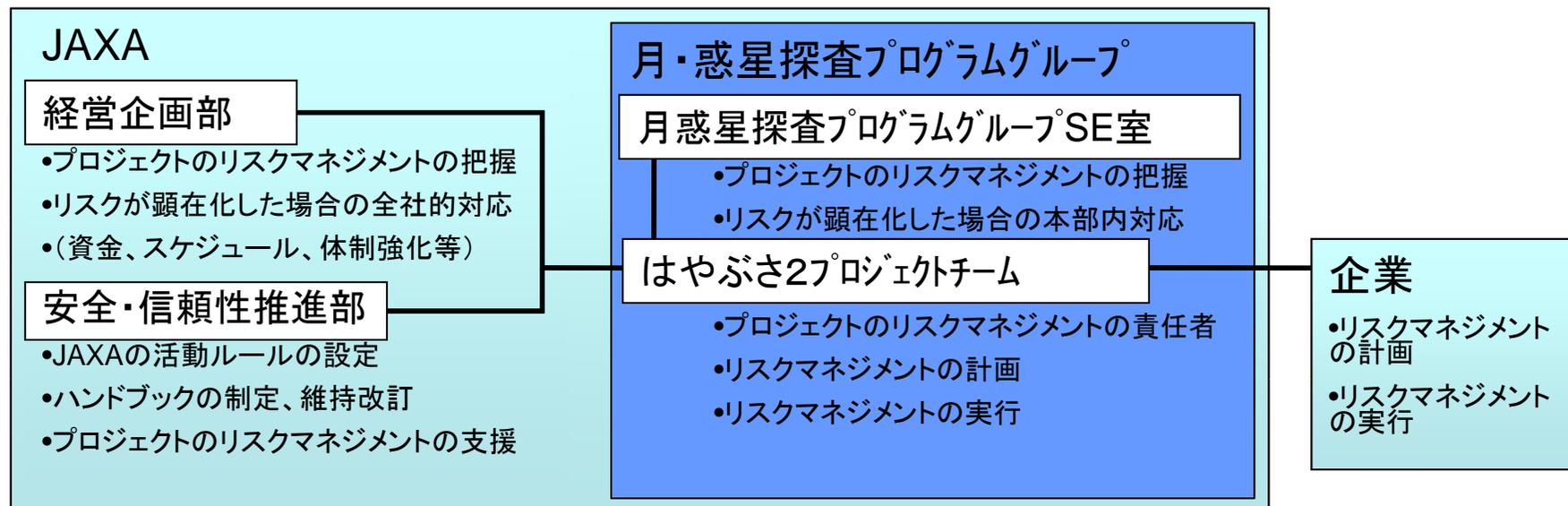
(1) リスク管理方針

はやぶさ2開発のリスクについては、探査機の開発に係わるリスクを許容できる範囲に低減し、探査機開発を確実に実行するために、リスク管理は、他の科学衛星に準じて「科学衛星リスクマネジメント標準」に基づいて管理を行う。

(2) リスク管理の実施計画

➤ リスク管理体制構築

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。

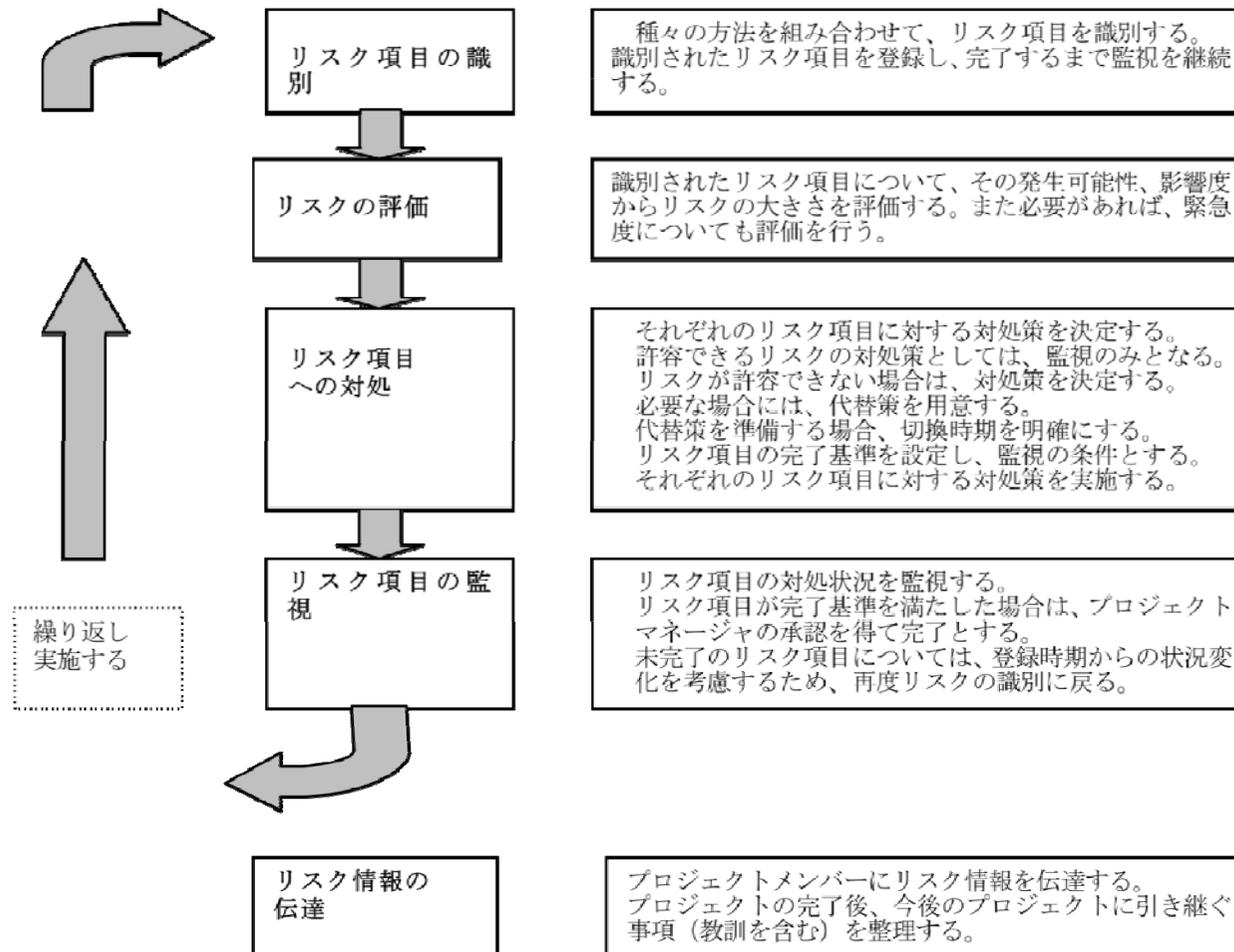


6. リスク管理

6. 2 リスク管理の考え方

➤ 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。



6. リスク管理

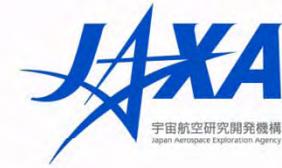
6. 3 リスク識別と対処方針

(3) リスク管理状況(プロジェクト全体レベル)

はやぶさ2プロジェクトリスク識別結果のうち、プロジェクト全体レベルに関する主要なリスクの対処計画を以下に示す。

リスク項目	プロジェクト	対処計画
H-IIAロケット打上げの遅延	ロケット	JAXA内関係部署との調整を密にし、2014(H26)年打ち上げ機会を確実に確保する。また、開発の遅延や、ロケット側の遅延に対して、2015(H27)年のロンチウインド確認と打上げロケットの調整を進める。
探査機開発の遅延	探査機	開発作業項目をブレークダウンし、衛星開発の全フェーズでクリティカルパスを明確化するとともに、マスタスケジュール等でスケジュールの進捗管理を徹底して、スケジュール遅延を未然に防ぐ。
DSN局の支援確保	探査機	海外局が確保できないと運用に大きな支障がでるため、JAXA内外関係部署との調整を密にして支援確保を図る。
衝突装置の開発	探査機	早期に設計を行い、EMまたはBBM等の開発を実施する。探査機姿勢系と合わせた設計検討と地上検証を行う。安全設計に関しても早期に着手を行い、設計検討と地上検証を行う。
近赤外分光計の開発	探査機	早期に設計を行い、EMまたはBBMの開発を実施する。探査機姿勢系と合わせた設計検討と地上検証を行う。
外部的要因による計画遅延	全体	予算等の外部的要因による開発計画のシフト、打上げ年度のシフトに対しては、2015(H27)年のロンチウインド確認と打上げロケットの調整を進める。また、それ以上の計画遅延では打ち上げウインドウを逸してしまうため、全社的なリスクとしてJAXA内外関係部署との調整を密にして遅延を未然に防ぐ。

6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

(i) 探査機本体を小惑星の表面に確実に着陸させること(転倒させない)

回答:

「転倒させない」ために、探査機が小惑星表面にタッチダウンしてから上昇する間に、その姿勢をサンブラホーンが小惑星表面に対し垂直となるように維持します。はやぶさ2が探査対象としている小惑星1999JU3表面の重力の推定値は、 $6 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ (m^3/s^2)の範囲ですが、サンブラホーンの長さ、配置位置から、何らかの原因で探査機が転倒した場合、リアクションホイールのトルクだけでは姿勢を立て直すことは不可能で、スラストでの上昇 ΔV を行う事態を招いてしまいます。(「はやぶさ」の最初のタッチダウンがこのケースです)

このような事態を招くことが無いように、タッチダウンの際の探査機の数値制約として、

縦方向 : 0.05~0.1 (m/s)

横方向 : 0.08 (m/s) 以下

を誘導制御系の性能要求値としており、サンプル回収後、直ちに上昇することとしております。

また、タッチダウンの際にパドルなどの探査機の一部が表面に接地するような姿勢変動(例えば、7 deg)が生じた場合には、自律的に上昇するように設計しております。

6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

(ii) 探査ロボットによる小惑星の表面環境の探査

回答:

はやぶさ2では、ホバリング時ではなく小惑星表面接近時に探査ロボットを放出することで確実に、小惑星の表面環境の探査を行います。なお、放出シーケンスは、はやぶさのターゲットマーカ放出にてすでに実績が得られています。

6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

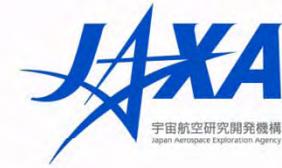
(iii) 目標としている量のサンプルを採取する手法

回答:

はやぶさのLessons Learnedを踏まえて、確実に100mg以上のサンプル採取を実現するために、サンブラに以下の改修を実施する計画です。

- タッチダウン時の弾丸発射を確実にするために、射出コマンド発行までのソフトウェア検証、End to End試験を十分に行う、また、地上シミュレーション期間を十分に確保する。
- 採取量の増加を確実なものにするために、弾丸形状変更／角運動量付加を計画
- 採取量増加に伴い、キャッチャー内を2部屋から3部屋にし、混在させずに区別して捕獲する
- ホーン先端に折り返し部を付加し、タッチダウン時に折り返し部に捕獲された粒子をHPポジション退避中に+Z方向へ加速度をかけ、キャッチャーまで運ぶ
- キャッチャー・コンテナ内を鏡面研磨し、キュレーション作業時の分解、試料回収を容易にする

6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



深宇宙探査では、対象となる天体との距離が大きく、制御系の動作と地上との時間差が問題となる。どこまでが地上からの制御で、どこからが衛星の自律的制御になるか、「はやぶさ」の成功、教訓を踏まえた上で、十分なリスク管理をすること。

回答:

以下に示す接近・降下フェーズでの小惑星との距離に応じた航法誘導制御方法において、搭載系による自動制御となるのは、3の高度約100m以下の部分のみで、他の部分は地上からの遠隔誘導を想定しています。ネックとなるのは搭載カメラ画像による小惑星との相対位置計測で、自動で画像計測できるのは3の投下したターゲットマーカの画像を用いるケースのみです。1、2のように相対距離が遠く、小惑星の自然地形画像を用いる必要がある距離域では、画像を地上に送って、地上オペレータがその画像から相対位置を求めるといった手段が最も信頼性が高いことが「はやぶさ」での教訓ですので、それを今回も踏襲する方針です。

1. JU3の全景が航法カメラ(ONC-W1)の視野内に収まる距離域 (ex. ~900m)
2. JU3の全景が航法カメラ(ONC-W1)の視野に収まらない距離域 (ex. 900m~100m)
3. ターゲットマーカの画像が使用できる距離域 (ex. 高度約100m以下)

ご指摘の通り、20分弱の地上との通信時間が問題となります。地上オペレータの作業時間を考慮すると、探査機での画像取得、画像計測に基づいた ΔV 指令が探査機に到着、その間に往復で60分程度の時間遅れが想定されますので、 ΔV 指令値の計算には60分後の探査機の状態(位置、速度)を地上で予測した結果を活用することで遠隔誘導の信頼性、精度の向上を図っております。

7. まとめ

7. まとめ

- － はやぶさ2のミッション要求、開発方針に基づき、「はやぶさ」探査機の技術を最大限に継承し、「はやぶさ」Lessons Learnedを反映して、はやぶさ2の開発仕様のベースラインを設定した。(4. システム選定と基本設計要求)
- － 新規技術開発を要する衝突装置、近赤外分光計においては新規要素技術、課題に対して、解析、要素試験/試作等のフロントローディングの実施により、開発の実現性を示した。(4. 9 サブシステム仕様(衝突装置)、4. 9サブシステム仕様(近赤外分光計))
- － はやぶさ2プロジェクトマネージャのもと、探査機システム／地上システム、観測機器システムの開発はそれぞれを担当するプロジェクトエンジニア、プロジェクトサイエンティストのもとで実施する体制を構築した。また、開発スケジュール、開発資金を明確にした。(5. 開発計画)
- － リスク管理方針・実施計画を定め、また、リスクの抽出とその対処方法を明らかにした。(6. リスク管理)

以上から、はやぶさ2の開発段階への移行が可能である。