「かぐや」の目指すミッションとミッションサクセスの為の活動について

・「かぐや」ミッションの紹介
・ミッションサクセスのための活動

平成20年度宇宙開発品質保証シンポジウム
2008年11月

© JAXA/NHK

“かぐや”ミッションの紹介

・ミッションの目的

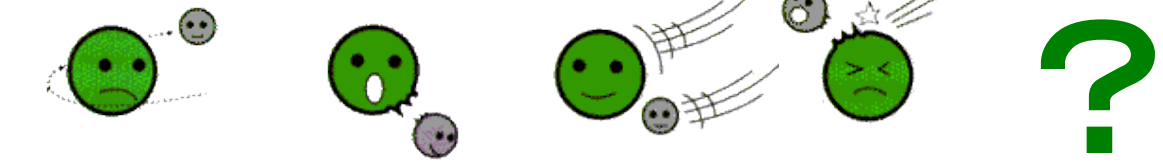
・搭載機器

・運用経過と計画

・主要な科学成果

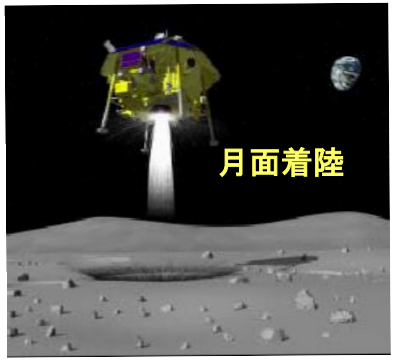
“かぐや”の目的

1. 月の科学：月の起源と進化の解明（主目的）



原始地球に火星くらいの大きな天体が衝突？

2. 将来の月面上の活動や月利用のための調査



月利用のための探査技術

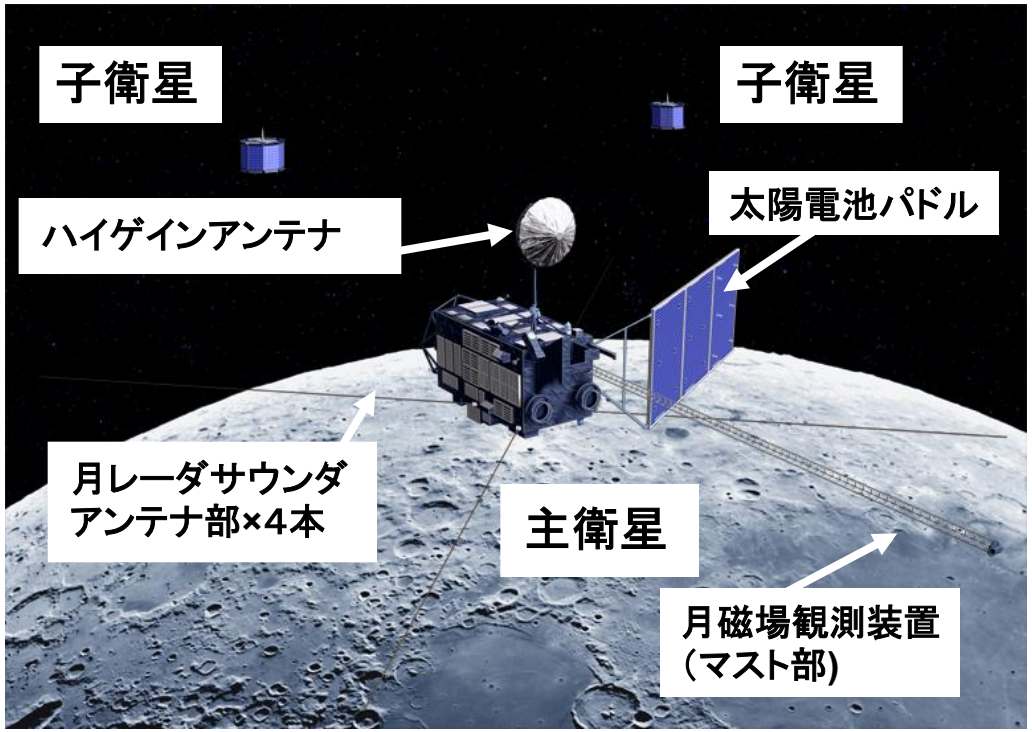
3. 将来の月探査・開発のための技術の習得

4. 宇宙開発・宇宙科学の社会へのアピール

ハイビジョンカメラによる「地球の出」等の動画像取得

宇宙への興味と感動

「かぐや」の主要諸元



月周回軌道飛行中のコンフィギュレーション

（主衛星：かぐや）

- 質量：　約3ton（打上げ時）
  （子衛星約50kg×２機を含む）
- 構体外形寸法：　約2.1×2.1×4.8m
- 姿勢制御方式：　3軸安定
- 発生電力：　約3.5 kW(最大)
- ミッション期間：　約１年
- 観測軌道：　高度100km／傾斜角90度の円軌道

（子衛星）

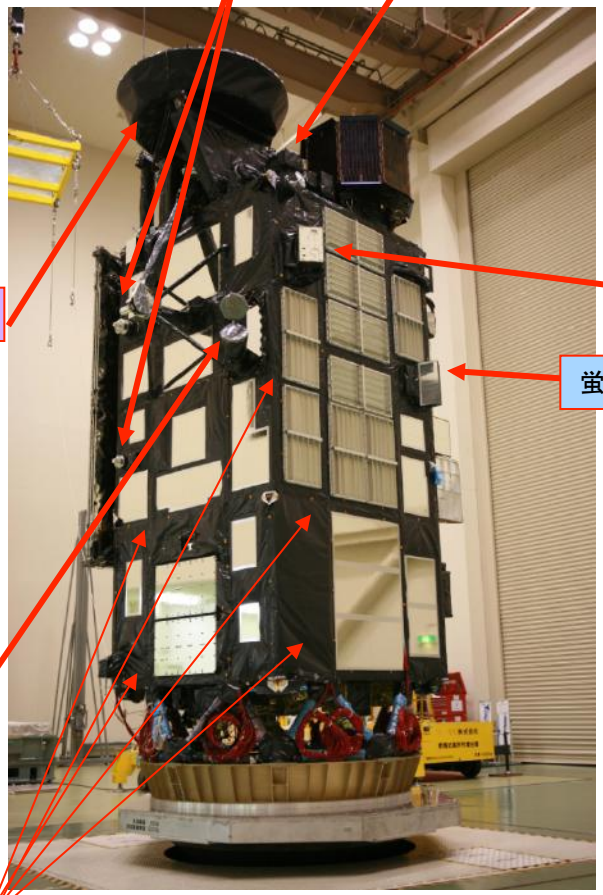
- 質量：　約50kg
- 構体外形寸法：　約0.99×0.99×0.65m
  （八角柱状）
- 姿勢制御方式：　スピン安定
- 発生電力：　約70W
- ミッション期間：　約１年
- 観測軌道（分離時）：
  - （リレー衛星）：　高度100km×2400km
    の楕円軌道
  - （VRAD衛星）：　高度100km×　800km
    の楕円軌道

VRAD: VLBI RADio source
VLBI:　Very Long Baseline Interferometry

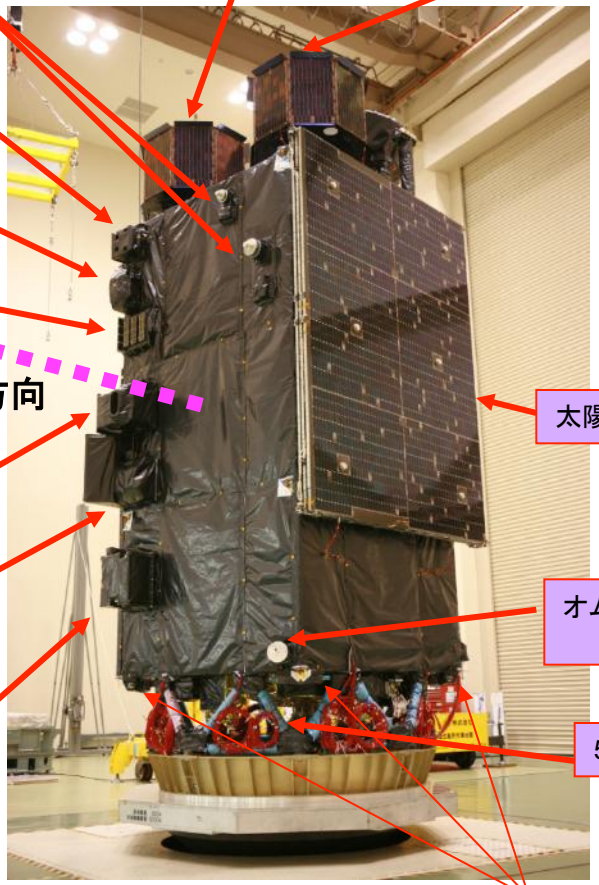
かぐやの観測ミッション

	観測ミッション	観測項目	観測内容
1	蛍光X線分光計	元素分布	太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面のAl, Si, Mg, Fe等の元素分布を調べる。
2	ガンマ線分光計		月面から放射されるγ線を観測し、月表面の放射性元素(U、Th、K等)分布を調べる。
3	マルチバンドイメージャ	鉱物分布	月面からの可視近赤外光を複数の波長で観測し、地質を調べる。
4	スペクトルプロファイラ		月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、地質中に含まれる鉱物の組成等を調べる。
5	地形カメラ	地形・表層構造	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。
6	月レーダサウンダ		月面に電波を発射し、その反射により月の表層構造(地下数km程度)を調べる。
7	レーザ高度計		月面にレーザ光を発射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。
8	月磁場観測装置	月面環境	月面および月周辺の磁気分布を観測する。
9	粒子線計測器		月周辺における、宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線、及び月面から放射されるα線を観測する。
10	プラズマ観測装置		月周辺の太陽風の電子とイオン及び月面からの反射電子と二次イオンを測定する。
11	電波科学		衛星のリム通過時に衛星からの電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を検出する。
12	プラズマイメージャ	地球プラズマ環境	月軌道から地球の磁気圏及びプラズマ圏のダイナミクスを画像として観測する。
13	リレー衛星中継器	月の重力分布	主衛星が月裏側を飛行中に地球局との4ウェイドップラ計測を行う。主衛星の軌道擾乱から月裏側の重力場データを取得する。
14	衛星電波源		2機の子衛星に搭載する電波源に対し地球局から相対VLBI観測を行い、両衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。
15	高精細映像取得システム	映像取得	月面上の「地球の出」等のハイビジョン撮影を行う。

主な搭載機器と配置



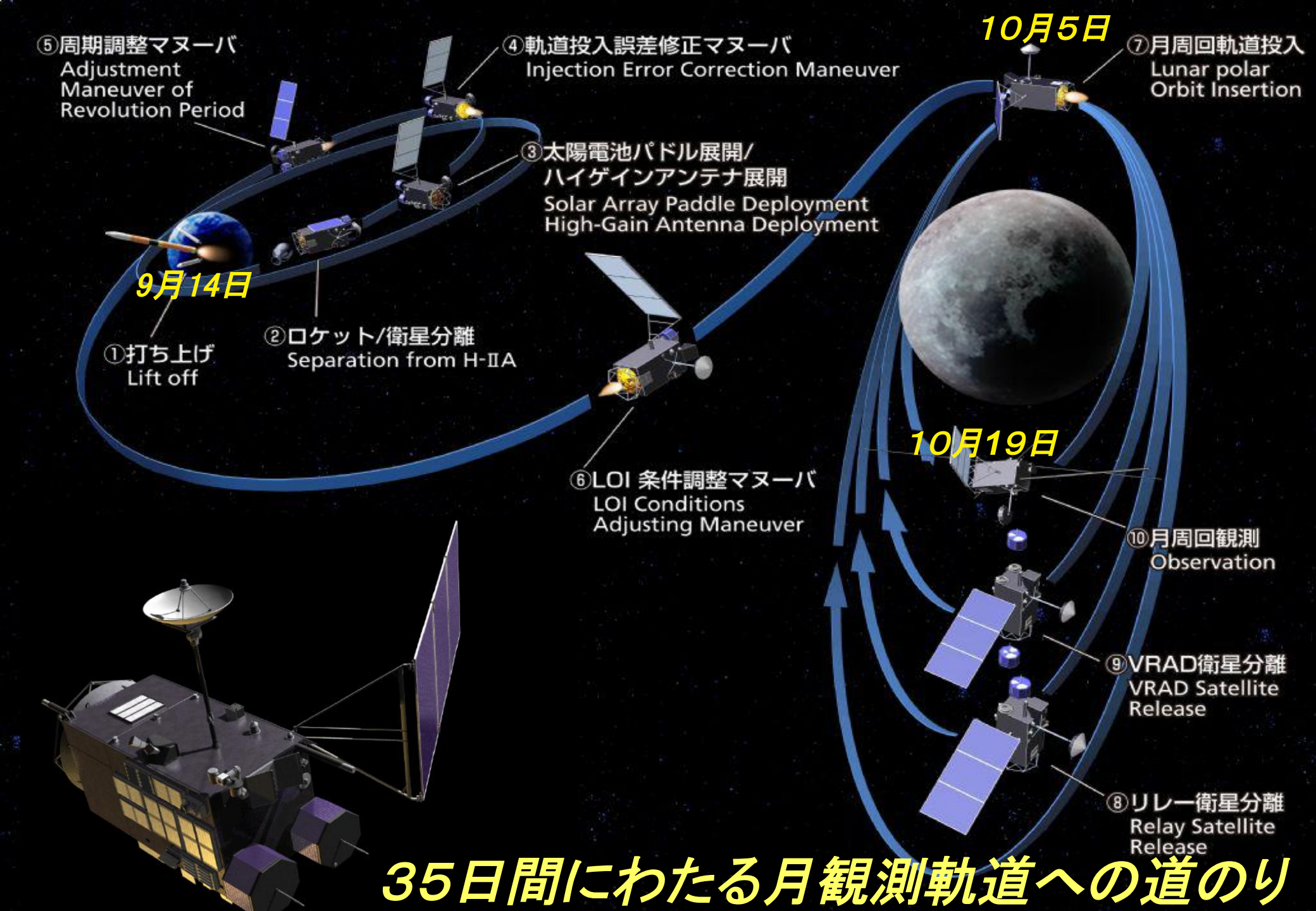
プラズマ観測器
プラズマイメージャ
ハイゲインアンテナ
スタートラッカ
放熱面



プラズマ観測器
VRAD衛星
リレー衛星
地形カメラ
マルチバンドイメージャ
スペクトルプロファイラ
粒子線計測器
蛍光X線分光計
月面方向
レーザ高度計
ガンマ線分光計
高精細映像取得システム
太陽電池パドル
オムニアンテナ
500Nスラスタ
1Nスラスタ

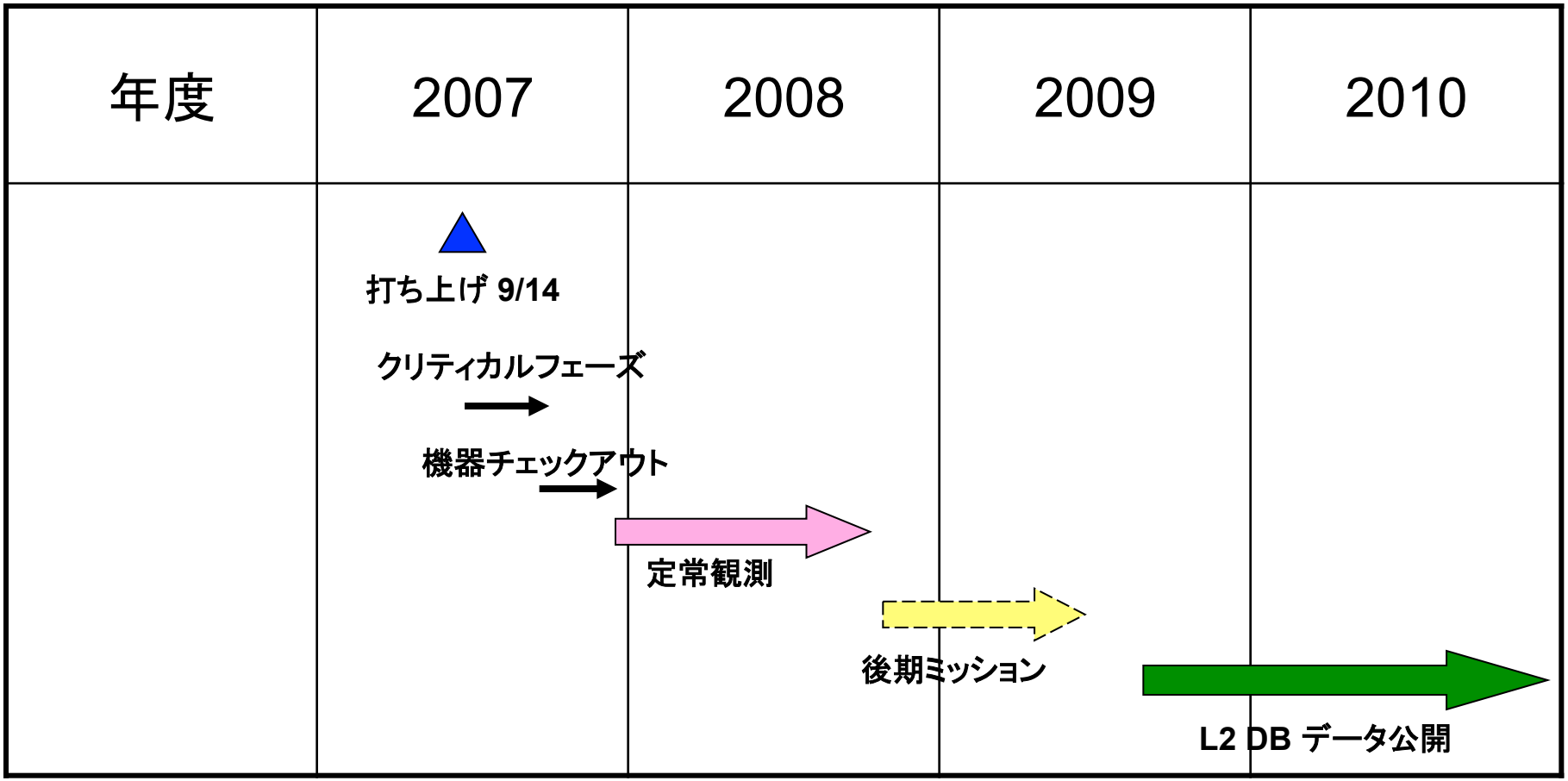
14搭載機器による18項目の観測

ミッション機器
バス機器

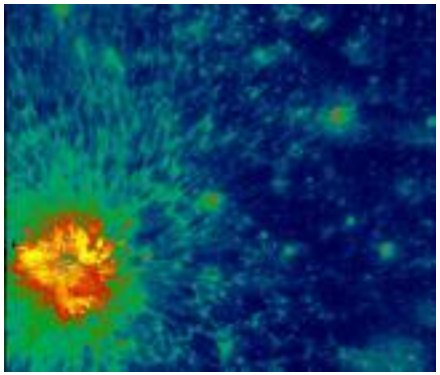


35日間にわたる月観測軌道への道のり

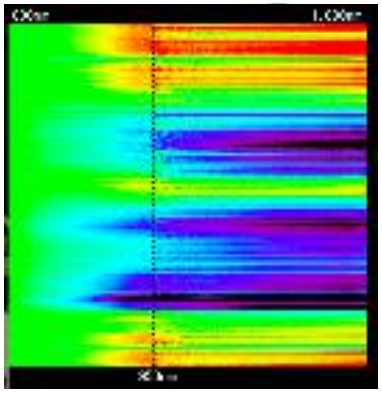
かぐやの運用経過・今後の計画



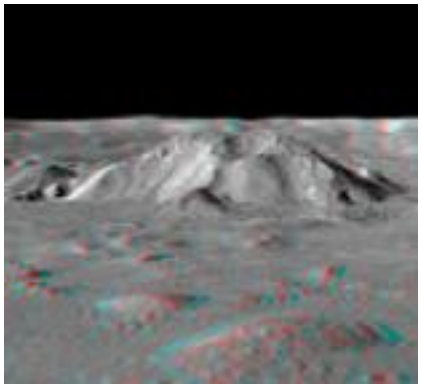
これまでの代表的な観測の例



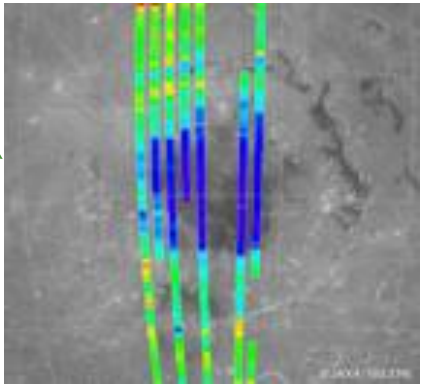
・マルチバンドイメージャーとスペクトルプロファイラによる鉱物分布観測



・地形カメラによる三次元精細画像の取得



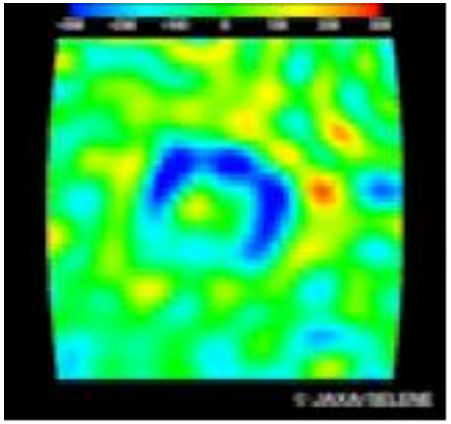
・レーザー高度計による詳細な高度分布図

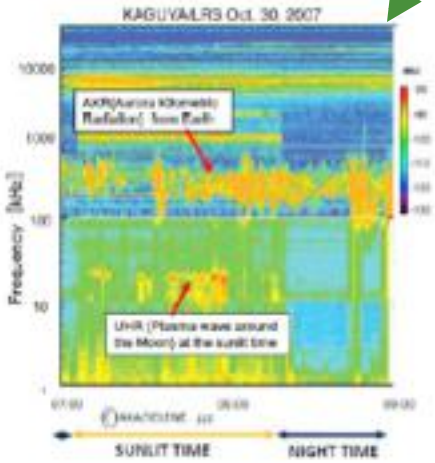


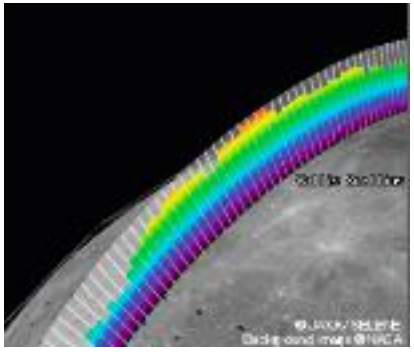
・レーダサウンダーによる地下構造探査

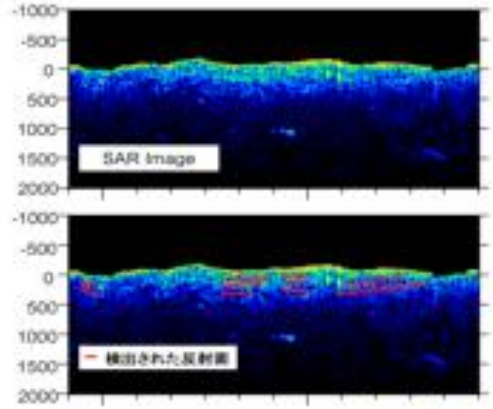
・リレー衛星による月裏側の重力場の観測

・月周辺電磁プラズマ環境の観測

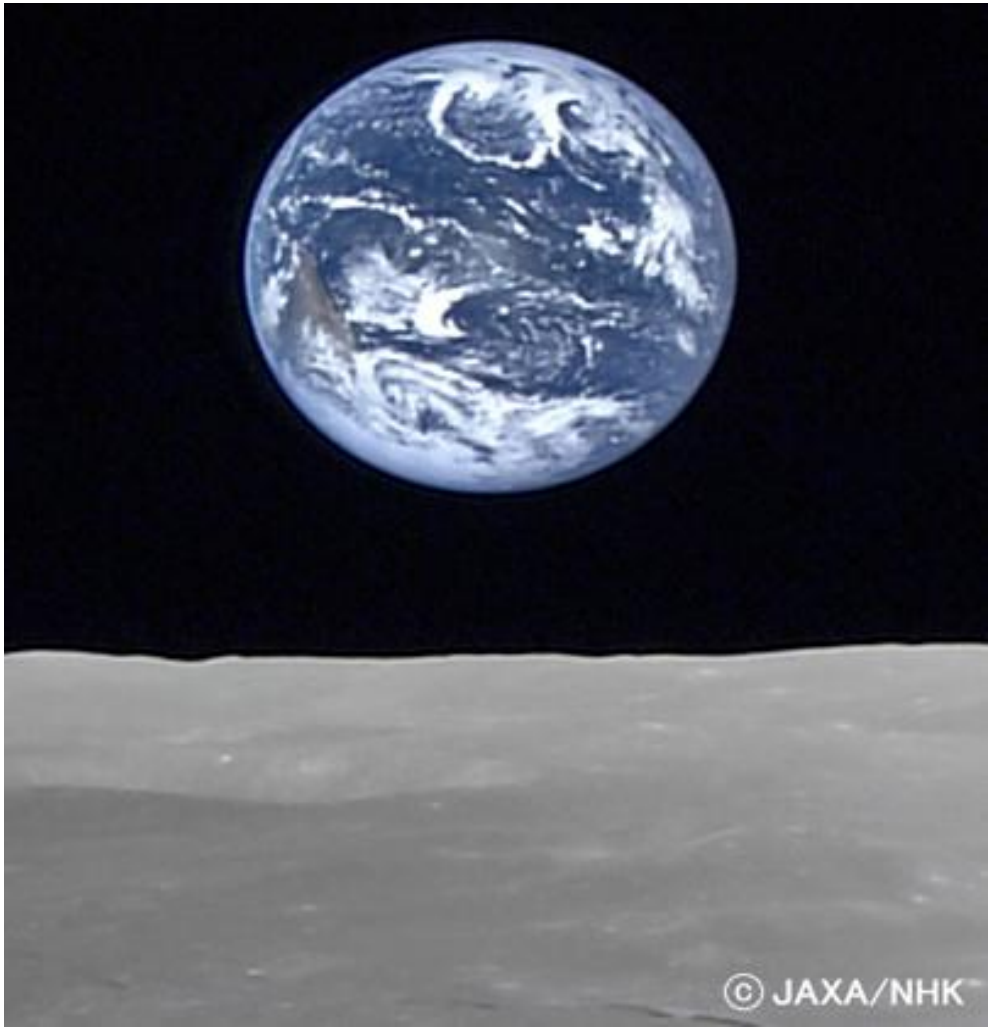








HDTVで撮影した月面からの満地球の出



ミッションサクセスのための活動

「かぐや」特有の課題：
（当初は）文化の異なる2機関（旧NASDA、旧ISAS）が双方の得意な分野を建設的に融合し、多分野（惑星科学、太陽・地球系プラズマ環境、天文、探査技術）の研究者が参加する大型ミッションを遂行

- 開発経緯
- 開発方針
- 開発体制
- 文書体系
- 主要な活動とその結果
- 教訓

開発経緯

1995年度　月探査周回衛星計画提案書（月周回衛星ワーキンググループ）
1996年度　衛星システム概念設計開始
1997年度　搭載機器試作モデル設計開始
1998年度　開発予算認可（2003年度打ち上げ目標）
1999年度　開発への移行（2004年度打ち上げ目標）
2000年度　計画変更（軟着陸実験の分離）
2001年度　 2005年度へ打ち上げ目標変更
2002年度　システム・サブシステムCDR
2003年度　システムかみ合わせ試験実施、2006年度へ打ち上げ目標変更
2004年度　プロジェクト点検、2007年度へ打ち上げ目標変更
2005年度　システムPFT（前半実施）
2006年度　システムPFT（後半実施）
2007年度　射場運用、打ち上げ
2008年度　定常運用完了

特記事項：
開発移行後に軟着陸実験機を取りやめるという大きな計画変更
たび重なる打ち上げ目標の遅延（ロケット不具合、予算制約）

開発方針

（1） 確実で効率的な開発を目指すため、新規技術開発要素をミッション達成上必要最小限なものとし、既存の開発品を極力採用する、設計をシンプル化する等コストパフォーマンスおよび信頼性の向上を図る。
（2） 新規技術については極力事前実証を行い、システム設計等に反映することで開発の確実化を図る。
（3） リソースの制約を考慮しつつ、効率的な開発強化策を施し、リスク低減化を図る。
（4） 衛星バス系の開発方式は、原則としてEM－PFM方式とする。
（5） 観測機器の開発は、従来の科学衛星での開発手法を踏襲する。
（6） ミッション・サクセスの定義及びリソースを考慮して、適切な冗長化を採る。
（7） 地球および月の画像を地球へ伝送する等、国民へのアピールに留意する。

その他、体制的に課題の多いミッションであることを考慮し、サイエンスの世界では国際協力が重要視される時代ではあったが、観測機器の開発の主担当は国内の研究者とした。

SELENE/H-IIAロケット総合システム

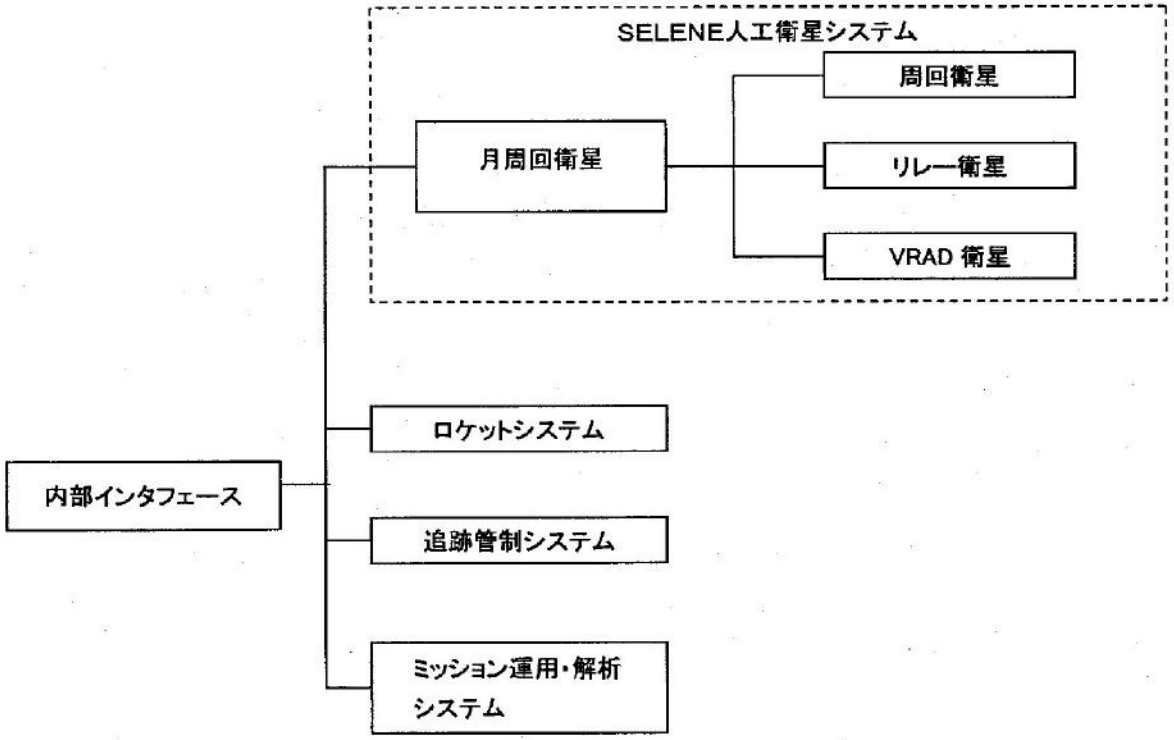


図2．3－2　総合システムの構成図（内部インタフェース）

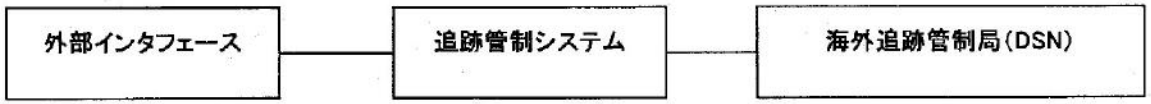
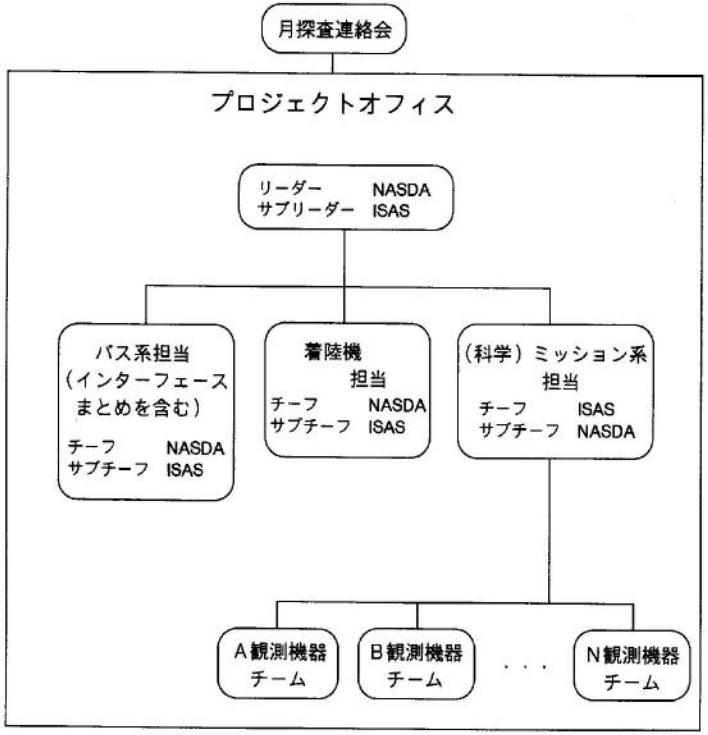


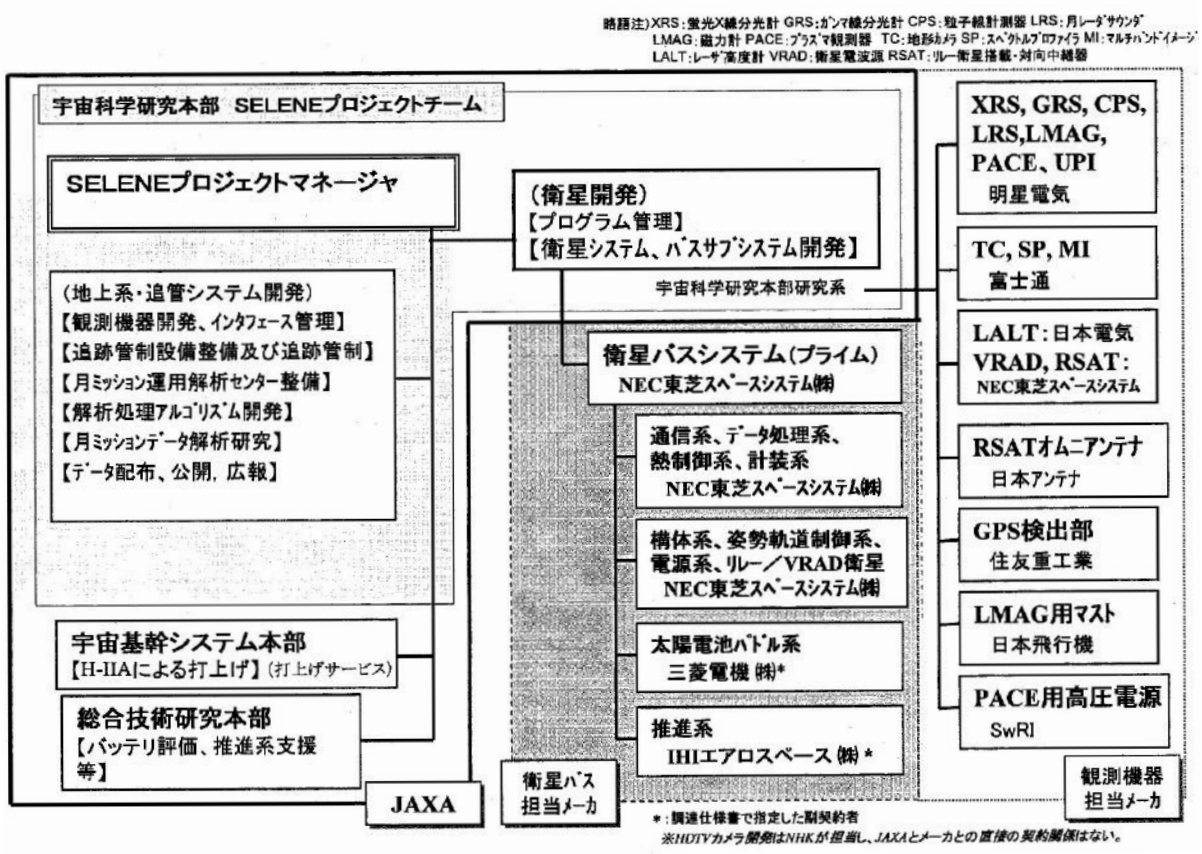
図2．3－3　総合システム構成図（外部インタフェース）

プロジェクト体制

1996年共同プロジェクト発足当時



2007年開発完了審査会時点



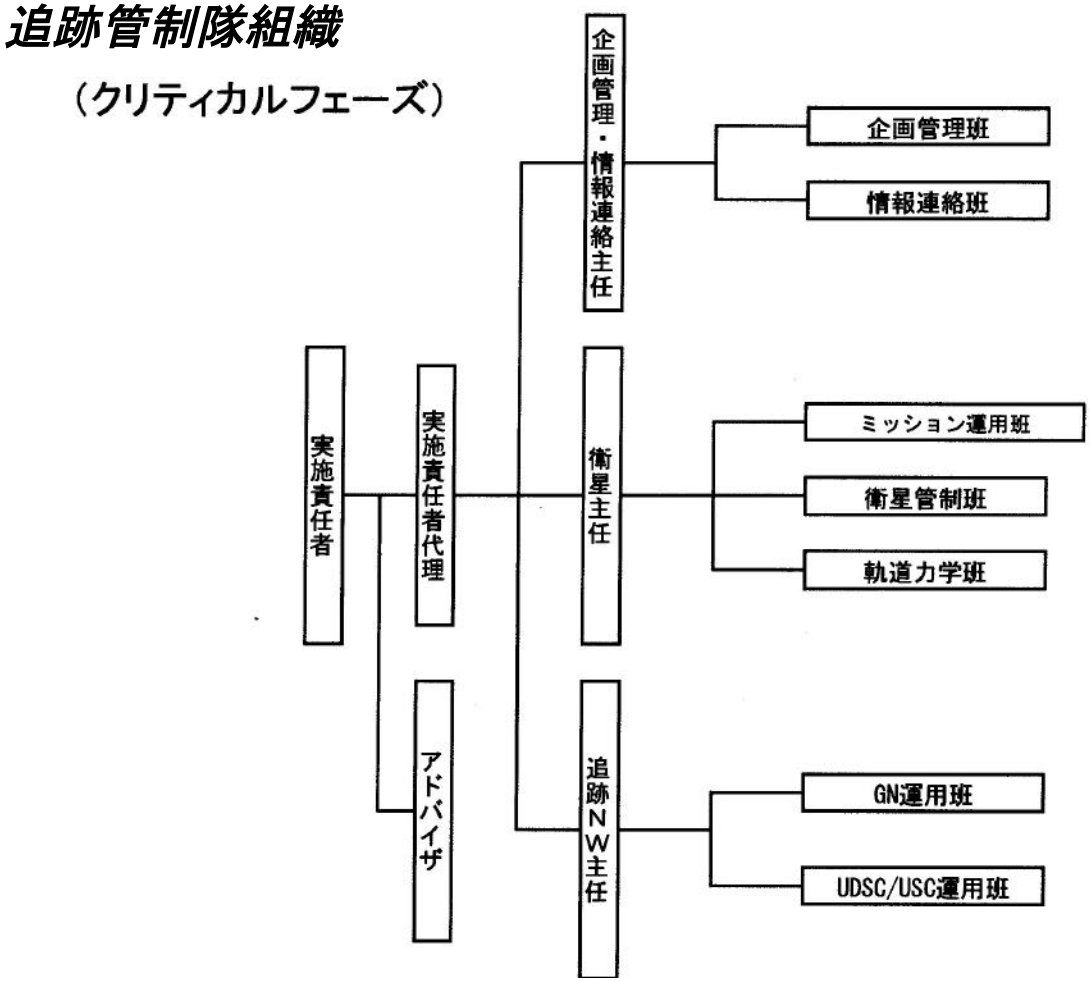
当初は組織目標や事業アプローチの異なる2機関（旧NASDA、旧ISAS）が共同してプロジェクト管理

⇨相互乗り入れの混成チームを組織し、定期的・頻繁な会合で意志統一

観測機器チームは科学目的の異なる3分野（惑星科学、太陽地球系プラズマ環境、天文）が参加、衛星計画に初めて参加するグループが過半数

⇨衛星計画に経験のある専任のミッション系担当チームを組織し、観測機器開発を支援

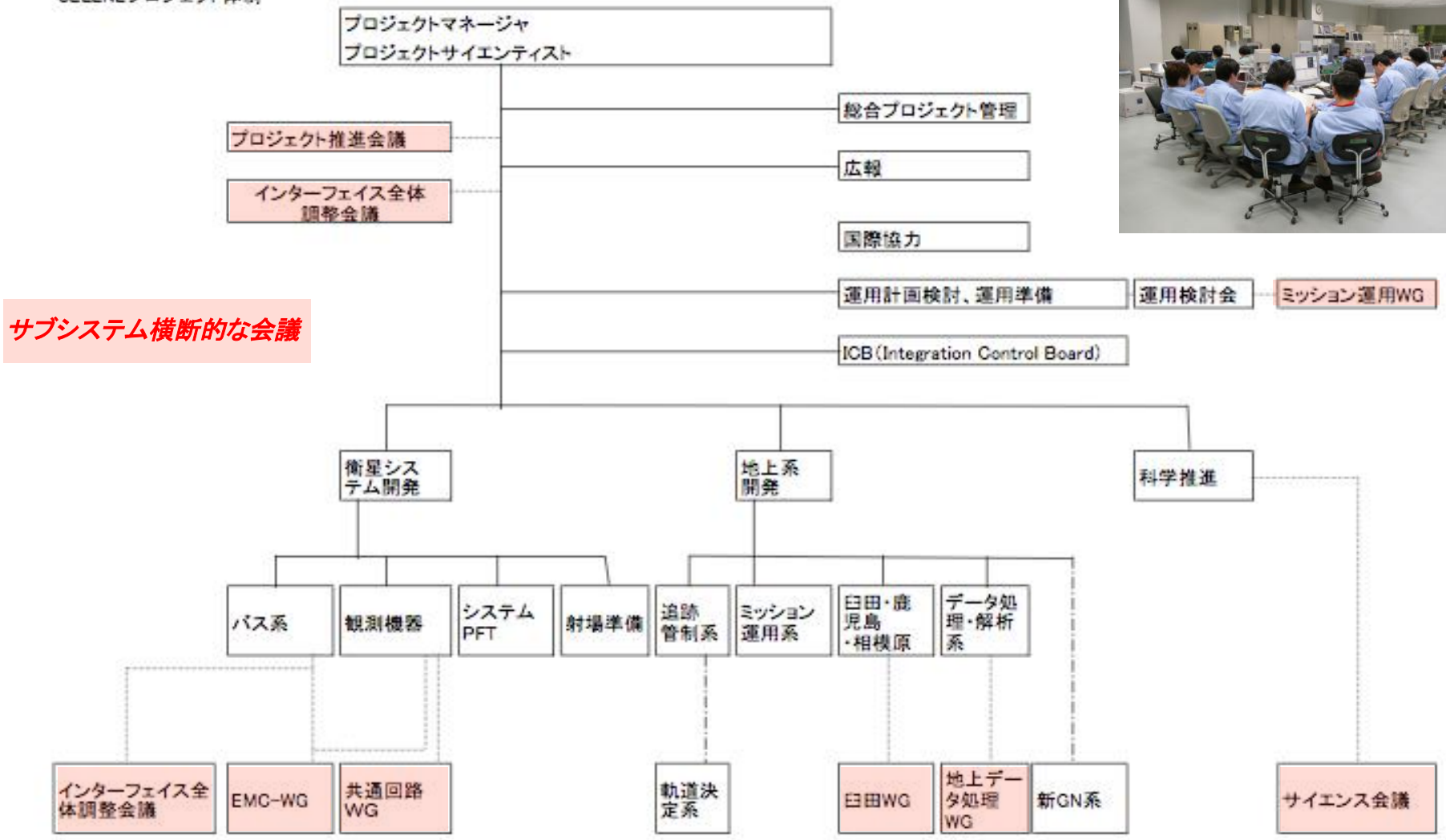
飛行運用の体制（クリティカルフェーズ）



クリティカルフェーズ終了後、定常運用フェーズでは運用チームを簡素化、後期運用フェーズでは観測機器担当者も衛星システム運用の責任を分担して参加。

会議・ワーキンググループ

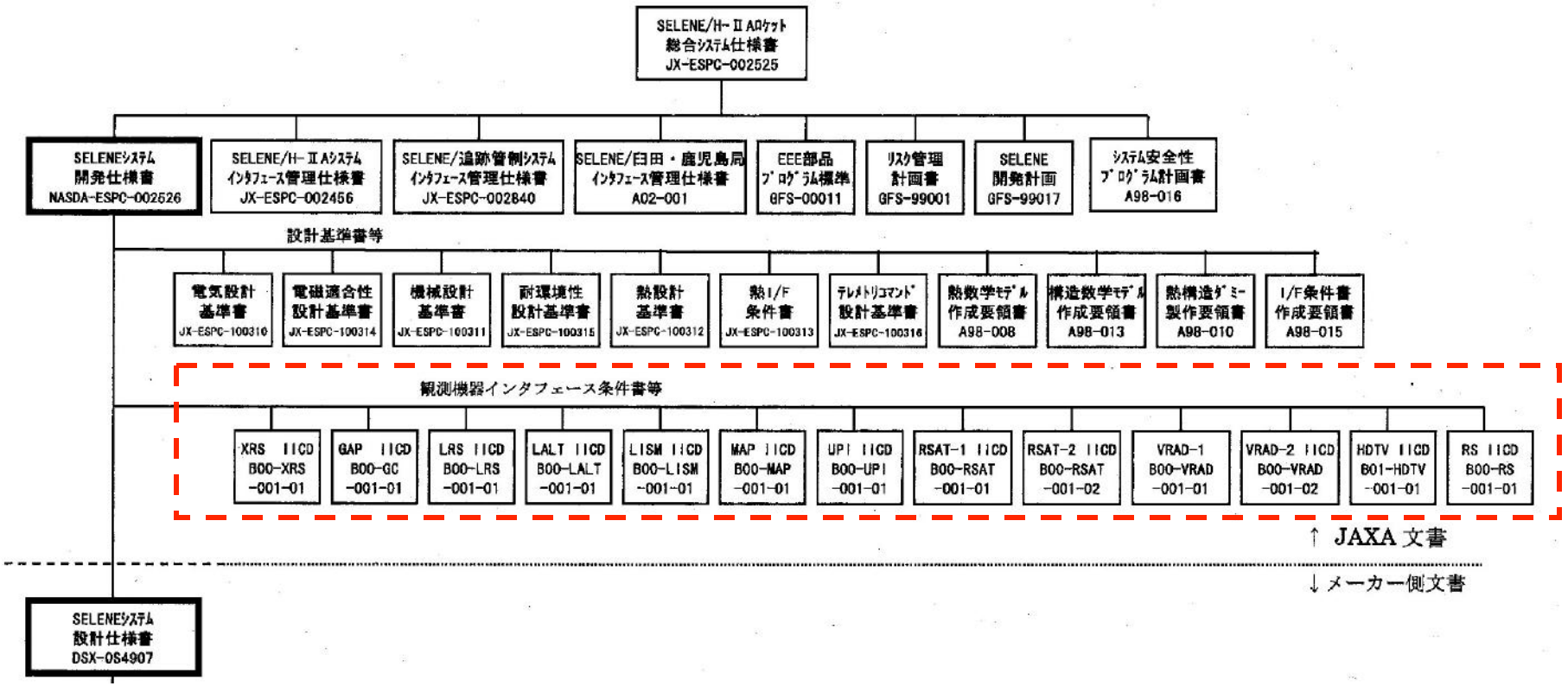
SELENEプロジェクト体制



サブシステム横断的な会議

本図は2005年当時の体制及び会議の構成。設計、製造、試験、飛行運用の各フェーズに応じ柔軟に会議、ワーキンググループを追加・廃止した。

文書体系



・インターフェイス条件書は、観測機器のシステムとのハード、ソフトのインターフェイスだけでなく、インテグレーション試験、飛行運用に係わるインターフェイスも全て本書で規定。

・観測機器開発チームは、観測機器インターフェイス条件書以外に開発計画書（スケジュール、開発経費、開発組織、開発方法、検証方法を記述）を作成し、プロジェクトのシステム管理に用いた。

ミッションサクセスのための活動とその結果（開発方針）

区分	事項	対策・活動の内容と結果
開発方針	既存技術の適用	原則としてバスの開発は既存技術を活用し、新規開発事項は観測機器に限定した。これにより、設定した科学ミッションを現実的なコンセプト（衛星システム、バス系、観測機器、地上系）で実現した。
	観測機器開発方針	観測機器の開発については、科学衛星の開発方針をベースとしたが、技術試験衛星・地球観測衛星の開発管理の考え方を導入した。具体的には、信頼性・品質管理、コンフィギュレーション管理等、プロジェクトのミッション系担当のマネージメントの下で各観測機器チームが開発管理を実行した。これにより高信頼性・高品質の観測機器の開発ができた。
	試験評価不具合処置	「軌道上へ不具合を持ち込むな」を関係者に浸透させた。試験結果の評価を単にGo/No　Goでなく、想像力を尽くして分析、評価を行った。また、発生した不具合については、原因が論理的に説明出来るまで、徹底して原因究明を行った。この姿勢は衛星システム、バス系だけでなく、観測機器開発においても貫いた。これにより軌道上不具合の発生を少なくすることができた。

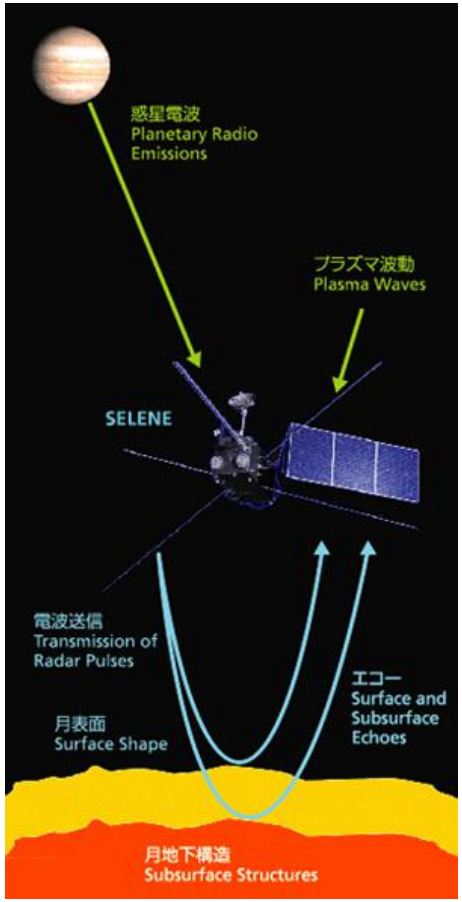
定常運用終了審査会（平成20年10月）資料をもとに作成

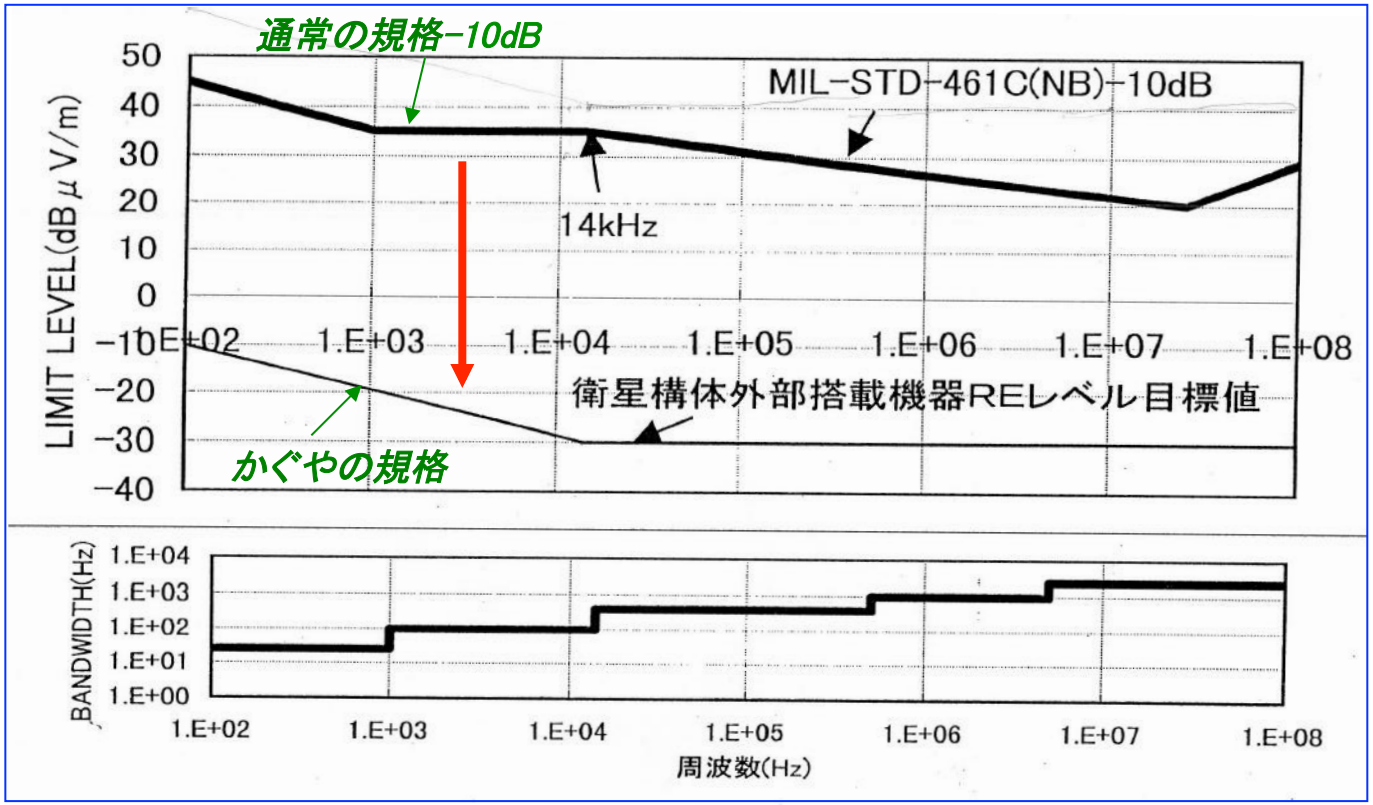
ミッションサクセスのための活動とその結果（開発体制）

区分	事項	対策・活動の内容と結果
開発体制	観測機器開発体制	特定の観測機器の開発を担当しないメンバー（理学研究者、技術者）で観測機器開発をマネージするチーム（ミッション系担当）をプロジェクト内に組織し、14機器すべての開発に横断的に関与したことで、以下のような点に寄与できた。 1）研究分野や開発経験の異なる主研究者チームが同一レベルの高い品質の観測機器を開発することができた 2）不具合情報の迅速で確実な水平展開（ある機器の不具合の経験が他機器の不具合の防止、不具合の解析に生かされた） 3）このミッション系担当が、観測機器のインテグレーション試験のマネージメントを担当し、引き続いて実運用の観測機器運用のマネージメントを担当したため、効率の良い確実なインテグレーション試験、飛行運用が実現できた
	厳しいEMC基準を実現するための体制	ミッション要求から設定された極めて厳しいEMCコントロール要求（電磁波、磁場、帯電）に対し、プロジェクト担当者に加え、関係観測機器の主研究者、有識者が参加したEMCワーキンググループを組織して、設計段階から試験段階に至るまで衛星全体で系統的な管理を行うことにより、要求をほぼ満足することが出来た。

定常運用終了審査会（平成20年10月）の資料をもとに作成

衛星の電磁ノイズを極限まで低減





月レーダサウンダー

かぐやから電波を発射し、月地下から反射される極めて微弱な電波を検出して地下構造を解明。

ミッションサクセスのための活動とその結果（開発方法と運用）

区分	事項	対策・活動の内容と結果
開発方法	質量マージン	開発初期段階に一定の質量マージンを確保したため、当初予測できなかった種々の問題に対する対策に対応することが出来た。
	観測機器開発 高電圧機器開発	開発段階では、設計や試験結果を文書として可視化し、ミッション系担当、衛星開発メーカに加え、ISASや独立評価チーム等の有識者が参加した設計審査会において評価を行った。フライトモデルの不具合管理はバス機器に準じて行った。衛星を全損に導く可能性のある高電圧機器については、その開発・運用の基準を作成し遵守することにより、放電事故のリスクを軽減することができた。
	手順書 データベース	射場及び運用で使用する管制装置（管制卓、共通QL、PIQL）、手順書ファイル及びデータベース（SIB、マクロコマンド）をシステム試験から使用したため、システムPFT以降、射場作業、打上げ後運用において地上装置の不具合は少なかった。
	End-to-end試験	実運用を模擬したEnd-to-end試験を可能な範囲で全て行った。地上試験の段階で多くの課題の洗い出しが行われ、実運用での不具合を防止することができた。
運用	広報 外部発表	適宜、適切に宇宙開発委員会、マスコミ等外部へ進捗状況を示すことで、対外的な信頼を得ることが出来た。
	広報 HDTV	広報用の機器であるハイビジョンカメラを搭載した。ハイビジョン映像は想定を超える影響力を持っており、月のみならず、地球特に地球環境を考える観点で多く活用され、プロジェクトの評価を高めた。

定常運用終了審査会（平成20年10月）の資料をもとに作成

「かぐや」プロジェクトでの教訓（一部）

区分	事項	教訓
開発方針	観測機器 開発方式	原則としてPFM開発方式としたため、一部を除きPMまたは部分試作モデルがない。システム試験および軌道上において発生した不具合原因究明に時間と労力を要した。ただし、PM-FM開発方式はコストが発生するため、トレードオフが必要である。
開発方法	自動化機能	自動化運用に用いるテーブル設定の把握が不十分だったために運用ミスが発生した。自動化運用テーブルに関するテレメトリを充実させるべきであった。また従来の自律化機能に対して、SELENEでは幾つかの機能を追加したが、運用をイメージしてさらに機能を追加すべきであった。
	観測機器高圧	地上試験で高圧機器の放電不具合が多発した。高圧機器の放電対策確認は図面のみで行わず、実機組立を目視するべきである。また、メーカの技術者と機器開発担当者が組立工程に立ち会い、完成品をクロスチェックすることが必要であった。
	地上設備冗長	射場および射点で使用する装置を冗長化しておくことが望ましい。ただし、コストとのトレードオフが必要。

定常運用終了審査会（平成20年10月）の資料をもとに作成

まとめ

“（当初は）文化の異なる2機関（旧NASDA、旧ISAS）が双方の得意な分野を建設的に融合し、多分野（惑星科学、太陽・地球系プラズマ環境、天文、探査技術）の研究者が参加する大型ミッションを遂行”

以上の課題に対し、以下の対策で克服してきた。

1. 異なる価値観をもつメンバーが、一定の緊張状態の下、共通の目的に向かって一丸となって進むことのできるような人間関係の醸成（各レベルでの極めて多数の会議、ワーキンググループの設定）。

2.「かぐや」の実情に合わせた柔軟な開発管理方針の設定（これまでの科学衛星、技術試験衛星、地球観測衛星を参考としたが「かぐや」独自の方針を設定）。

3. 決定した開発管理方針は厳格に適用（プロジェクト内の多数のグループに、グループの性格に依らず同一レベルで）。