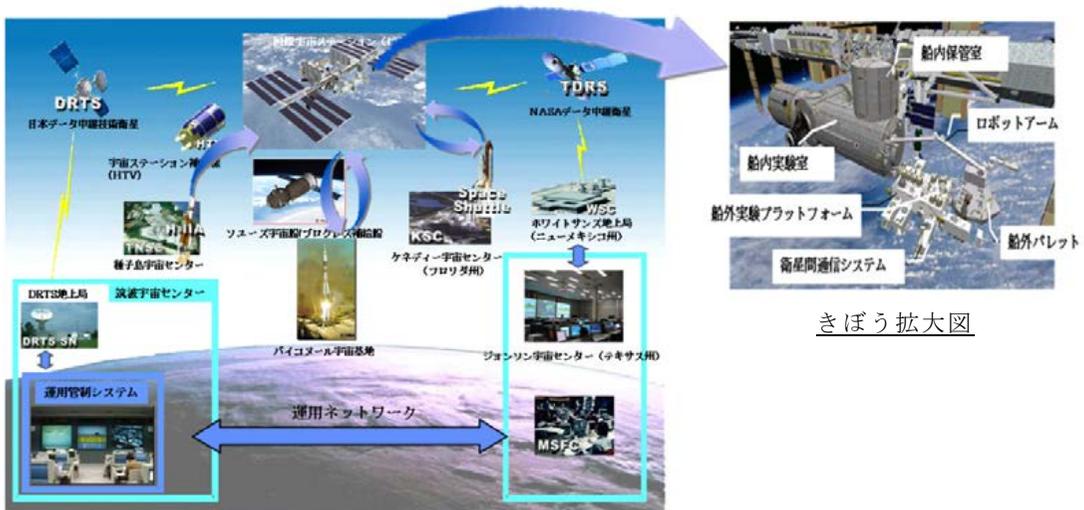


第 1 章 有人宇宙システムのプロジェクト管理技術

1. 序論

JAXA はこれまでに、NASA など米国が取り入れたプロジェクト管理手法を人工衛星やロケットの開発に採用してきた。しかし、大きさがサッカー場ほどもあり、“人類初”の巨大で複雑、かつ、完成までに 20 年を超える歳月を要し、以降も長期に亘り運用される有人宇宙基地、“国際宇宙ステーション (ISS) 計画”におけるプロジェクト管理は非常に複雑で困難である。また、ISS を完成して運用するためには第 1 図に示すような、

米国・ロシア・欧州 (11 ヶ国)・カナダ及び日本が開発した、有人往還機、打上げ用ロケット、組み立て用ロボットアーム、及び主要国の地上管制施設などが不可欠であり、これら主要国との国際調整及び協働作業も非常に複雑で困難である。本章では、日本が ISS 計画に参加して国際パートナーと調整及び協働しながら「きぼう」を開発し、運用する中で獲得している、大規模で複雑な有人宇宙システムのプロジェクト管理手法について報告する。



第 1 図 きぼうの組立・運用体系

2. ISS 及び「きぼう」プロジェクト管理の難しさ

2.1 ISS 及び「きぼう」のミッション／システム

無人の宇宙機と比べた場合、ISS や「きぼう」のプロジェクト管理（スケジュール、コスト、コンフィギュレーション、コミュニケーション、安全・信頼性・品質、リスク等）が複雑で困難な理由として大きく 3 つ挙げられる。1 つ目は、宇宙飛行士が長期滞在する有人宇宙機であること。2 つ目は、システムが巨大で複雑であること。3 つ目は、多国籍国際協働ミッションであること。以下にそれぞれの概要を示す。

(1) 有人宇宙機の特徴

無人宇宙機と有人宇宙機との最大の違いは、宇宙飛行士の存在の有無である。宇宙飛行士が宇宙機に搭乗することで、無人宇宙機とは全く異なる有人特有のシステム要求や有人安全要求が課せられる。有人宇宙機では宇宙飛行士の安全確保が最優先の要求となる。ISS には「きぼう」を含む多くの与圧（船内）実験室等が結合されている。宇宙の閉鎖空間で宇宙飛行士が長期間安全に生存し滞在することを保障しなければならない。具体的には、火災、急減圧、有毒ガス発生のような、“致命的な危険要因”が発生しないようにシステムを構築するとともに、警告・警報システムの設置や危害の封鎖が必要となる。これら以外にも、有人特有のシステムとして、照明、エアコン、トイレ、健康管理（CHeCS）、船外活動用スーツ（EMU）など多数ある。また、有人システムの大きな特徴の一つとして、機器の故障時には軌道上で修理が可能（事後保全）であること及び有限寿命品（水、食糧、酸素、エアコン用フィルタ等）を事前に交換可能（予防保全）であることが挙げら

れる。

(2) 巨大で複雑なシステム

ISS は“人類初”の巨大で複雑な有人宇宙基地である。ISS の建設は 1998 年に打上げられたロシアの基本モジュール（ザーリヤ：FGB）から始まったが、すべて建設するためには各国の宇宙往還機（スペースシャトル（米）、ソユーズ（露））と宇宙輸送機（プログレス、ATV（欧）、HTV（日））を 40 回以上も打上げる必要があった。

打上げた後は、軌道上でスペースシャトルのロボットアーム（加）や ISS のロボットアーム（加）を使って組み立てた。「きぼう」の船外実験装置を船外実験プラットフォームに取り付けるときには「きぼう」のロボットアームが使われた。

(3) 多国籍国際協働ミッション

ISS は、米国を中心としたロシア・欧州（11ヶ国）・カナダ・日本の計 15 ヶ国が参加する多国籍で有人の国際協働ミッションである。後述するが、国際協定（IGA）の下で ISS を実際に推進する実行組織のトップ会議は宇宙ステーション管理会議（SSCB）であり、NASA（米）、FSA（露）、ESA（欧）、CSA（加）、JAXA（日）の各 ISS プログラムマネージャが出席し NASA が議長を務める。

この会議で議論される課題は、各国が分担する物品の打上げスケジュールや組立てスケジュールなど、各国が単純に合意できる内容のものばかりではなく、各国の事情や思惑を含んだ困難な課題が多く調整は非常に難しい。また、ISS 構成品の打上げから組立てと完成まで、どの国のどのシステムが問題を起こしても ISS の組み立てスケジュールに影響するため、各国の責任と協働作業が非常に重要となる。

2.2 複雑な「きぼう」の組立と運用

「きぼう」を ISS 軌道上で組み立てて運用するためには、「きぼう」構成要素間のインターフェースだけでなく、宇宙飛行士、ISS、スペースシャトル、ロボットアーム、HTV、ソユーズ/プログレス、ATV 及び地上管制施設等、多国間に亘る複雑な国内/国際調整が必要であり、「きぼう」のプロジェクト管理も柔軟な管理が求められる。以下に「きぼう」の組立と運用の複雑さの一端を示す。

(1) 「きぼう」は 3 回の打上げで完成

「きぼう」は、スペースシャトルによる 3 回のフライトで ISS に輸送され、シャトルのロボットアーム (SRMS) 及び ISS のロボットアーム (SSRMS) を使用して組み立てられた。2008 年 3 月及び 6 月に、それぞれ船内保管室 (ELM-PS) と船内実験室 (PM) 及びロボットアーム (RMS) が打ち上げられ、2009 年 7 月に船外実験プラットフォーム (EF) 及び曝露ペイロード等が搭載された船外パレット (ELM-ES) が打ち上げられ、きぼうは完成した。

(2) 船内保管室及び搭載ラックの移設

ロシアの途中参画に伴う ISS の軌道傾斜角の変更により、スペースシャトルの打上げ能力が制限 (約 15 トン) されたことから、船内実験室及びロボットアーム並びに搭載ラックを全て (約 19 トン) 同時に打ち上げることができなかった。このため、船内実験室には起動するのに必要最小限のシステムラックのみを搭載して打ち上げることとし、残りのシステムラック、実験ラック、保管ラック等 8 台のラック (約 4 トン) は船内保管室 (約 4 トン) に搭載して、リスク低減の観点からこれらを先行して 1 回目 (1J/A) として打ち上げ、ISS 第 2 結合部 (Node2 : ハーモニ) の天頂部に暫定的に取り付けた。

2 回目 (1J) の船内実験室が打ち上げられた後に、ISS 上の宇宙飛行士がシステムラック及び実験ラックを船内保管室から船内実験室に移設し、船内保管室を本来の設置位置である船内実験室の天頂部に移設した。3 回目 (2J/A) の打上げでは、船外実験プラットフォームを船内実験室に取り付けた後、曝露ペイロード等 3 台を搭載した船外パレットを船外実験プラットフォームに取り付けた。その後、船外パレット上の曝露ペイロード等 3 台を「きぼう」のロボットアームを使い船外実験プラットフォーム上の所定のポートに取り付けた。

(3) 「きぼう」完成後の実験ペイロードやスペア品の輸送と交換

「きぼう」が完成した後の船内/曝露ペイロードやスペア品 (軌道上交換ユニット (ORU : Orbital Replaceable Unit) 等) の輸送及び廃棄は宇宙ステーション補給機 (HTV) 等によって実施される。船内実験ペイロード及びスペア品等は HTV の補給キャリア与圧部で輸送され、曝露ペイロードは補給キャリア非与圧部で輸送された後、それぞれ所定の運用位置に設置される。

3. ISS 及び「きぼう」のプロジェクト管理手法

大きく複雑な日本初の有人宇宙実験施設「きぼう」の開発を進めるだけでも大変な状況の中、1993 年のロシア参加及び大幅な ISS リデザインの実施、2003 年のスペースシャトル・コロンビア号の事故等により、今日に至るまで何度も参加国の業務分担やスケジュール等が大幅に変更され、ISS 及び「きぼう」のプロジェクトはその度に大幅な見直しを余儀なくされてきた。

以下に、日本が ISS 計画に参加して「き

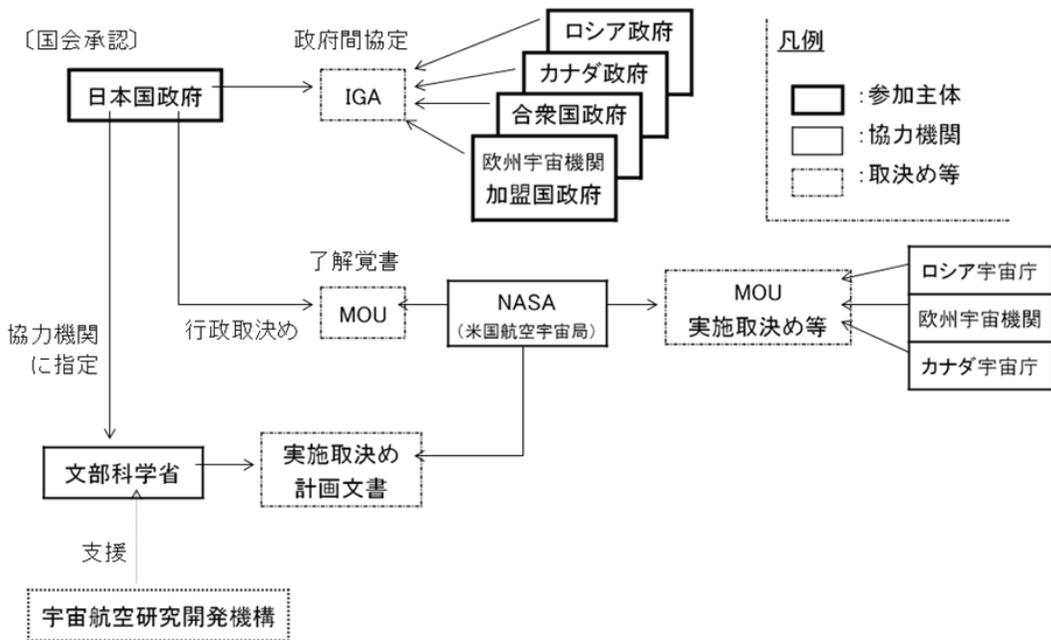
ぼう」を開発し、国際パートナーと調整及び協働する中で獲得した、大規模で複雑な有人宇宙システム特有のプロジェクト管理手法について示す。

3.1 多国籍有人宇宙プロジェクトの進め方

第2図に日本と他参加国とのISS計画の枠組みを示す。ISS計画への参加国は政府間

協定(IGA)及び米国との了解覚書(MOU)を締結し、これら国家レベルの取決めに従ってISS計画を推進している。

プロジェクト管理で最も重要な事項は意思決定プロセスであり、その決定事項を関係者全員に周知・徹底(コミュニケーション)することが重要である。



第2図 ISS計画の枠組み

第3図にISSプログラムの意思決定に係る枠組みを示す。実行レベルのトップ会議である宇宙ステーション管理会議(SSCB)は、参加国のISSプログラムマネージャをボードメンバーとして構成され、議長はNASAのISSプログラムマネージャが行う。SSCBの下には多くの管理会議が構成されており、参加国のマネージャや担当者が参加し専門分野ごとの進捗確認や意思決定を行う。ミッ

ションインテグレーション&運用管理会議(MIOCB)などは、下位に多くの管理会議を持っており、有人で複雑なシステム管理を階層的に行う体系となっている。なお、ISSの軌道上組立が完了し運用段階に移行した後は、本格利用の推進や業務合理化等、施策的観点から第3図におけるPCB、PICB、VCB、MIOCB等の業務所掌に一部見直しが行われ、会議名称が変更されたものもあるが、

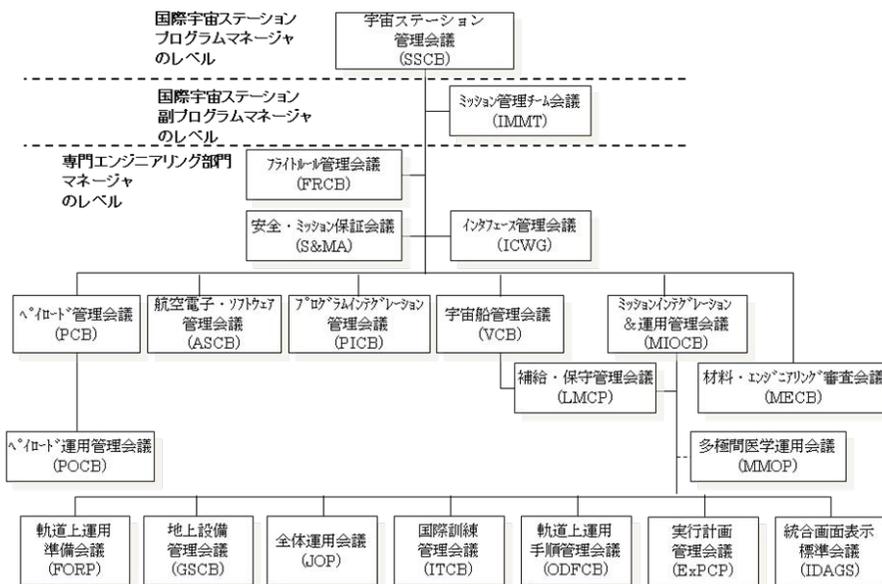
基本的な体系には変更は無い。

ISS ミッション管理チーム会議 (IMMT) は、NASA の ISS 副プログラムマネージャレベルが議長となり、毎週月曜日と木曜日に開催して、ISS の運用や課題処理等について進捗確認及び意思決定を行っている(スペースシャトルの現役当時、シャトルのフライト中は毎日開催した。ソユーズや HTV など、他の宇宙機のフライトの場合は連日の開催は無い)。

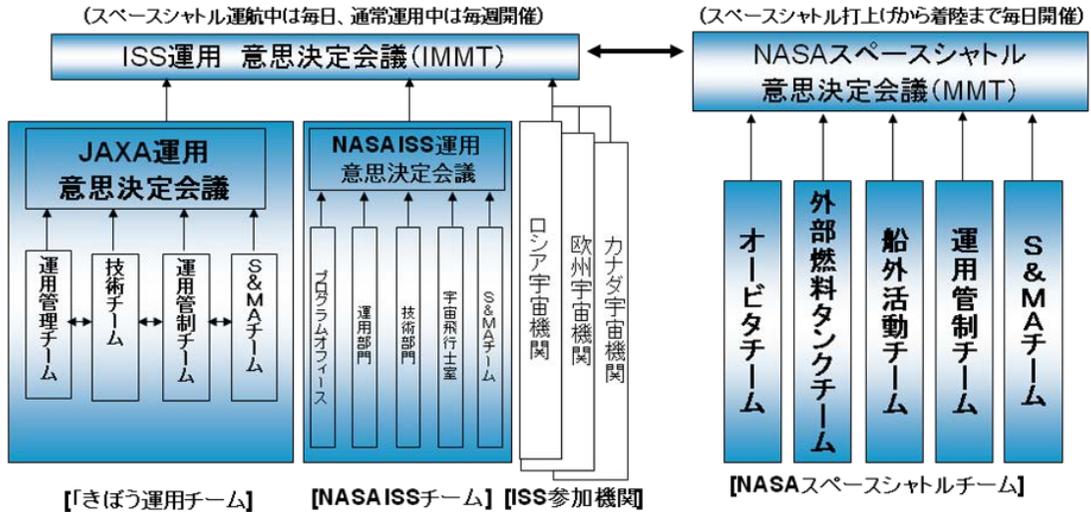
第 4 図にスペースシャトルの打上げ及びフライト中の意思決定の枠組みを示す。NASA はスペースシャトルの打上げから着陸までのスペースシャトルプログラムの意思決定会議として ISS とは独立した管理会議 (MMT) を持ち毎日開催した。IMMT と MMT には両者の代表者が参加し、情報の共有とそれぞれの意思決定を行った。JAXA は運用管理チーム、技術チーム、運用管制チーム、S&MA チーム等から構成される独自の管理会議(「きぼう」運用管理会議)を持ち、スペースシャトルのフライト中は毎日、それ

以外は毎週「きぼう」や ISS の情報共有及び意思決定を行った。「きぼう」が定常運用に移行した現在、「きぼう」運用管理会議の開催は隔週金曜となっている。

IMMT は、プログラムレベルでの調整や意思決定を要する準実時間運用上の課題を迅速的確に処理することにより、運用現場を担う運用管制チームをサポートすることを旨としており、従って IMMT の運営にはより周到な事前調整と円滑な進行が求められる。NASA、とりわけジョンソン宇宙センターは、スペースシャトル・コロンビア号の事故の後、意思決定プロセスにおける反対意見や少数意見、プログラム要求に対するウェーバー処理等の取扱いについてより細心の注意を払うよう、組織を挙げた改革に取り組み、IMMT や MMT などの運営に反映している。JAXA でも、IMMT 前に内部で対処方針調整を行うと共に、必要に応じて NASA と二者間での事前調整テレコンを行い、円滑確実な課題処理に努めている。



第 3 図 ISS プログラムの意思決定の枠組み



第4図 シャトルの打上げ及びフライト中の意思決定の枠組み

3.2 安全・開発保証の管理

ISS及び「きぼう」の開発、運用、利用においては、安全性、信頼性、品質等の互いに関連が深い管理を統合的に管理してミッションを達成させる、安全・開発保証（S&MA：Safety and Mission Assurance）活動に従ってプロジェクトを推進している。それぞれの管理について、有人宇宙機特有の主な事項を以下に示す。

(1) 安全管理

前項でも述べた通り、有人宇宙機の最大の特徴が宇宙飛行士の有無であり、開発・運用上で最も重要な要求事項が宇宙飛行士の安全である。有人安全要求を適用することによって、有人宇宙機は無人宇宙機とは大きく異なる設計、製作及び試験・検証を要求される。有人の安全管理では、開発・運用・利用の全段階において危険要因（ハザード）を識別し、それらを排除又は制御するとともに、残存するリスクが許容可能かどうかを判断するデータ（ハザード・レポート）として纏める。纏めたハザード・レポートを基に各開発段階

毎（基本設計、詳細設計、維持設計）に安全審査会（Phase-I、II、III）を開催しその妥当性を評価する。「きぼう」の安全審査では、初めに国内の安全審査を行ってから NASAの安全審査を行っている。

(2) 信頼性管理

有人の信頼性管理で特徴的なのは、故障許容の設計、FDIR（Failure Detection, Isolation and Recovery）及び部品材料管理である。故障許容には、2故障許容、1故障許容及び0故障許容があるが、無人宇宙機の設計では殆どが1故障許容（冗長構成）と0故障（冗長系無し）の設計である。2故障許容は、2つの故障又は誤操作があっても安全を保てるように設計するもので、宇宙飛行士の致命傷やISS及びスペースシャトル全体の損失等、“致命的な危険要因”に対して要求される。FDIRは、故障の検出、隔離、復旧のプロセスを示す。無人宇宙機でも同様のプロセスはあるが、有人宇宙機の場合には機器の故障が宇宙飛行士の致命傷になる場合があるため、クリティカリティのレベルに応

じた処置が要求される。また、復旧の方法として、軌道上で宇宙飛行士が補用品と交換できることも有人宇宙機特有である。部品材料管理は無人宇宙機でも実施しているが、有人宇宙機では、火災、有毒ガス、構造破壊等が宇宙飛行士にとって致命的であるため、設計段階から部品・材料の選定、可燃性試験及びオフガス試験並びに構造部材評価試験の実施等、厳しく管理している。

(3) 品質管理

品質管理は、ほぼ無人宇宙機と同様の管理を行っているが、有人宇宙機の品質次第で宇宙飛行士にとって致命的の不具合を生じ得るため、試験・検証の徹底や構造部材の品質管理（フラクチャー管理）等、徹底した品質管理を行っている。

上記 3 点については後章にて詳述する。

3.3 コミュニケーション管理

巨大で複雑、かつ、多国籍の協働ミッションにおいて、各国との情報共有や調整（コミュニケーション管理）は非常に重要なプロジェクト管理項目の一つである。ISS では、参加国との SSCB やその下位の多数の管理会議等を定期的に開催し、ISS 推進に関する情報共有と課題の調整を行っている。これらの定期的な管理会議以外にも、「きぼう」の開発及び打上げに関する NASA との各種インターフェース調整会議や各種審査会の開催等を通じ、NASA との情報共有及び課題調整を行った。日本国内に関しては、プロジェクトのマスタスケジュールに従った各種審査会、毎月開催される JAXA/各社のプロジェクト会合などを通じ、JAXA と開発企業との情報共有及び課題調整を行っている。JAXA 内では、プロジェクト内マネージャ会議の実施（毎週）、プロジェクト全体会議の実施（毎月）、プロジェクト管理会議の実施（毎週）、

プロジェクト内の各チーム会議（毎週）を開催し、各責任者と技術担当者間の情報共有と課題の調整等を行っている。

3.4 コスト管理

前述のとおり、計画に必要な資金は各参加国が負担し、その資金上の義務は自国の利用可能な予算に従うことになっていることに伴い、参加国の事情で計画の遅延が余儀なくされる。打上げ時期や組立て時期が遅延すればその分だけ開発企業の体制を維持しなければならず、単純計算では計画コストが大幅に増加してしまう。これらコスト増を低減するため、設計費や製作・試験費等の詳細なコスト評価を徹底して行い、年度毎に契約を執行することで全体のコスト管理を行った。また、要求仕様を若干変更してコスト低減が可能かどうかを詳細評価したり、設計の共通化を行って部品・材料のまとめ買いを行う等の対応を行った。

3.5 スケジュール管理

ISS は、1986 年に予備設計を完了した時点では 1995 年に完成する予定であったが、実態は 1998 年に最初の打上げがスタートし、2011 年に完成した。これは、ISS 計画が国家間の取決めであっても、計画に必要な資金は各参加国が負担し、その資金上の義務は自国の利用可能な予算に従うことになっているからで、各国の事情で計画の遅延が余儀なくされている。

ISS 組み立ての詳細スケジュール管理は SSCB で行われ、参加機関はこのスケジュールに従って自国の開発スケジュールを管理している。JAXA は統合マスタスケジュール（プログラム全体、JEM 開発プロジェクト、JEM 運用プロジェクト、HTV プロジェクト、実験ペイロードの各責任者が合意）を制定し、

これと整合する各プロジェクトマスタスケジュールを作成し維持管理した。クリティカルパスを明確にし、打上げ予定時期を厳守するために、実験ペイロード等の引渡し時期、射場への輸送時期、NASA への引渡し時期等を明記し維持管理した。

3.6 コンフィギュレーション管理

ISS 及び「きぼう」のコンフィギュレーション管理 (CM) は、コンフィギュレーション管理会議 (CCB) によって管理されている。CCB は各種コンフィギュレーション識別文書 (全体システム、各機器の仕様、インターフェースを規定) の審査・修正・承認 (制定) 及びその後の維持管理を行っている。「きぼう」の開発中に NASA が規定する仕様要求に適合しない事象が発生した場合で、ISS 及び「きぼう」のシステム性能に影響しないと判断される場合には、NASA にウエーブ申請を行い承認を受ける。ISS 及び「きぼう」のような巨大な有人宇宙システムを開発するためには、膨大な各種開発仕様書、インターフェース仕様書、検証要求書等が必要となる上、それらを適切に変更管理する必要がある。変更管理を間違えればその記述はそのままハードウェアやソフトウェアの設計ミスに繋がってしまう。

因みに、日本以外の他極は、ISS の計画発足から完成に至るまでの間に、財政等諸々の事情から、各構成要素の大幅な仕様変更を行ってきた。このような中で、日本はコスト管理の努力も続けながら、「きぼう」の当初からの仕様を大きく変えることなく堅守した。その事が現在、小型衛星放出ミッションのように、ロボットアーム、エアロックなど、「きぼう」の有する様々な能力を有機的に活用して宇宙利用の拡大に資する新規ミッションの創出にも繋がっている。

3.7 リスク管理

ISS 及び「きぼう」の開発過程では、スケジュール、コスト、システム性能の点で、当初の要求を満足させることが困難な課題に多く直面する。前項でも述べたように、ロシア参加や ISS の大幅設計変更、スペースシャトルの事故等は、プロジェクトへのインパクトが大きく、課題の解決にも相当な時間を要した。これらの発生する可能性のある課題又は発生した課題は、発生時の影響度と発生頻度を考慮し優先度を付けて管理し、参加国が出席する SSCB 等で情報共有し解決してきた。「きぼう」プロジェクト内のリスク管理としては、リスクとなる課題を全てリストアップし、優先度、担当者、対処方針、期限を明確にし毎週進捗を確認した。また、月 1 回の開発企業との会合でも課題情報を共有し、プロジェクトのマスタスケジュールに影響が出ないように管理した。

なお、軌道上組立が完了し運用段階に移行した「きぼう」のリスク管理は、宇宙飛行士の安全確保は言うまでもないが、宇宙実験の円滑かつ安定的な遂行と成果の創出に対して阻害要因となり得る、打上げ計画やリソース配分の変更、及びシステム機器や実験装置の不具合への迅速な対処などの比重が増しており、こういった実運用上のリスク管理活動は、JAXA の ISS プログラムマネージャが主宰する「きぼう」運用管理会議において、中短期的利用・運用計画の方針調整と合わせて、継続的にフォローされている。

4. まとめ

「きぼう」を開発した当初は英語を話せる技術者も少なく、また、初めての有人宇宙用語も理解できずに大変苦労したと聞く。初心者は1年以上もISS略語集を片手に英語の勉強をしながら仕事をするようになった。しかし、今では巨大で複雑、厳しい有人安全要求を満たす有人宇宙機の設計、製造、試験・検証及び運用ができるようになった。

プロジェクト成果の一つとして、習得した技術を文書にして蓄積し新たなプロジェクトに活用することは非常に重要である。一方、その文書を行間まで理解し次期プロジェクトで最大限に活用するには、先行プロジェクトの経験者の活用が非常に効果的である。人類初の巨大な国際宇宙ステーション計画に、日本は初の有人宇宙実験施設「きぼう」を開発することで参加し、多くの有人宇宙システム開発技術と有人宇宙技術者を獲得した。また、「きぼう」の維持・運用と高機能化などの取組みを通じて、現在も有人宇宙技術の蓄積を継続している。これら獲得した有人宇宙技術は、人材も含め既に宇宙ステーション補給機（HTV）の開発に活用されており、更に将来の有人宇宙システムの開発にも活用されるものと期待する。