

## 第3章 有人安全評価・管理技術

### 1. 序論

「きぼう」の完成と同時に「きぼう」の本格的な利用が開始され、その成果の創出が期待されている。今後、「きぼう」の安全な利用と運用を着実に進めるにあたり、軌道上に打上げる装置等の設計時には、有人宇宙システム特有の安全要求の適用が課せられる。

「きぼう」の軌道上有人実験室機能を維持するためのシステムや実験ペイロードが安全に、かつ所定のミッションを達成させるために、すべてのシステム機器や、実験ペイロードは、使用される部品や使用材料のレベルで評価を行い、宇宙環境の中で、定めた寿命期間中、安全に作動することを打上げ前に評価している。これらの評価はアメリカ航空宇宙局（NASA : National Aeronautics and Space Administration）と連携して行っている。

本章では、有人宇宙システム特有の安全要求とその適用例として「きぼう」の安全設計技術の紹介、さらには、軌道上での運用を通して得られた、統合安全解析、ペイロードの寿命や廃棄品の管理技術等を紹介する。

### 2. 有人宇宙システム特有の NASA 安全要求

有人宇宙システムには、宇宙の閉鎖空間で搭乗員に対する長期間の安全を確保しながら、所定の機能を果たすための安全設計要求が課されている。国際宇宙ステーション

（ISS : International Space Station）に搭載する機器に適用が要求されている安全要求は、NASA がシャトル時代から積み上げてきた技術要求である。以下にその要求内容と、これを適用した結果について説明する。

#### 2.1 火災

ISS のような密閉空間では、火災の発生や、火災による有毒ガスの発生は搭乗員の生命を脅かす。このため、安全要求としては火災防止設計に重点が置かれている。火災は、可燃性材料、発火源及び支燃性ガスによって発生する。火災発生を防止するため、難燃性の材料・部品の選定、バッテリーや回転機器などの発火源の管理、を行うことが要求されている。発火に至る前の異常を検知する手段、異常検知時に機器を停止させる手段が要求されている。また、過去にロシアの宇宙ステーション「ミール」で火災が発生した事例もあるため、万が一の場合に備え発生後の消火手段や退避手段も準備されている。ISS を構成するモジュールには、すべて入り口から 90 cm 以内に消火器と酸素マスクの設置が義務付けられている。

#### 2.2 減圧

宇宙空間は真空であることから、船内からの空気の漏洩は搭乗員に重大な危険をもたらす。「きぼう」モジュールや HTV と NASA モジュールとの結合部からの空気の漏れや、隕石・デブリの衝突による与圧構造物の破損等が減圧の原因として想定されている。

モジュール間の結合部からの空気の漏れに対しては、シールを2重にする等の故障許容設計による対策を行うよう要求されている。また、一般的に大きな隕石・デブリに対してはISSが軌道を変更して避ける対策が取られるが、小さな隕石・デブリは避けきれないため、防護壁を設置する等で貫通する確率を小さくすることが要求されている。それでも衝突により空気の漏洩が発生した場合には緊急避難用の宇宙船により退避する等の手順を準備している。

### 2.3 汚染

ISSでは実験の結果、有毒ガスが発生することがある。有毒ガスは複数の封入手段によって、搭乗員が居住する与圧船内へ漏洩することがないように対策を取ることが要求されている。制御の基本は、毒性のレベルに応じて最大3重の封入対策（2故障許容設計）を講じなければならない。

また、ISSでは環境制御モジュールは一部に集約されており、各与圧モジュールから送りこまれる空気から二酸化炭素を除去し、清浄化した空気を各モジュールに供給している。この供給機能が故障すると、モジュール内に二酸化炭素が蓄積してしまう。このため機能の故障に対して3重の対策をとることとしている。

### 2.4 船外活動

船外活動に使われる宇宙服は、それ自身が、小さな宇宙船である。宇宙服の損傷は中に入っている飛行士の生命を脅かす。船外活動中に飛行士が触れる可能性のある突起物や、鋭利な個所、高温あるいは極低温になっている個所等はすべて重大なハザードとなる。そのため、これらの危険部位が存在しないよう、設計、製造で取り除くことが要求される。し

かし、センサの突起部位のように飛行・実験上どうしても取り除くことができない部位については、船外活動中に危険な箇所に近づいてはいけないエリアを設定する等の対応をとらなければならない。

### 2.5 構造

与圧居住部の構造破壊、防止に対しては、想定される負荷に対して十分な安全係数を確保し試験により検証することが要求されている。二次構造部に、ねじなど複数の締結部品を用いる場合は、1、2本の損傷があった場合でも構造全体に影響を与えないよう、故障許容の考え方を適用することが求められている。

ISSは現時点では、構造物の損傷の有無を点検することはできない。そのため、安全上重要な構造部に対しては、内在する欠陥が、運用中に致命的なまでに進展しないことを解析で確認し、さらに打上げ前の材料選定から製造工程を含めて損傷、欠陥が存在しないことを確認する破壊管理（フラクチャーコントロール）という概念を導入し材料の健全性を確認することが要求されている。

## 3. 「きぼう」への安全評価解析の適用例

20年を超える「きぼう」の開発を通じて有人宇宙システムとして考慮しなければならない安全設計要求やその実現技術及び評価技術に関する知見を積み上げてきた。

「きぼう」の設計段階では、26件のハザードが識別された（第1表）。今回はその中から搭乗員の死傷/ISSの損失につながる主要なハザードとこの発生を防止する対策について紹介する。

第1表「きぼう」におけるハザード一覧

No.	ハザード内容
1	火災
2	水の漏洩
3	環境空気汚染
4	環境空気悪化（温度、湿度、空気組成）
5	減圧
6	正圧による構造破壊
7	圧力システム/コンポーネントの破裂
8	負圧による構造破壊
9	隕石/デブリとの衝突
10	打上げ/上昇/下降時の荷重による構造破壊
11	軌道上で浮遊した機器との衝突
12	JEMマニピュレータとの衝突
13	回転機器への接触又は回転機器破損による破片の衝突
14	ガラス破片の散乱
15	感電
16	接触面温度異常
17	鋭利端部および突起物への接触
18	切断/挟み込み
19	過度の電離放射線
20	過度の騒音
21	隔離/退避不能
22	軌道上での荷重による構造破壊
23	電磁干渉による機器誤動作
24	不適切な船外活動移動支援具による船外活動帰還不能
25	船外排気による船外活動クルーへの傷害
26	地上局からの不適切なコマンドによる誤作動

### 3.1 火災

「きぼう」での可燃物の制御では、不燃性、難燃性が検証された材料を選定して使用する対策を取り、発火源の制御としては、スイッチ等の作動時に発生するスパークを外部空気にさらさないよう、密封性が確認されている部品を使用し、電気機器、モータ部等により発火を引き起こす温度に至る可能性のある部品に対しては、発火点に至らない使い方あるいは解析により、これに至らないことを検証して使用している。さらに上記のハザード制御に加えて、万が一の火災発生に備えて火災検知及び消火の手段が準備されている。

「きぼう」（ISS 全体）では、消火剤として二酸化炭素が用いられているが、その消火方法は主に区画化された領域に二酸化炭素を注入し、その区画内の酸素濃度を延焼不能なレベルまで低下させることにより火災を消火する対策を取っている。

空気が循環している領域では、煙検知器により火災の検知を行う。また空気循環が無く煙検知器の設置が困難な領域には、火災の前段階と考えられる温度異常などを検知する手段を講じている。また、実運用においては煙検知器に代わる手段として、クルーの目視による煙の確認や嗅覚による燃焼ガスの確認が行われる場合がある。

### 3.2 減圧

「きぼう」や HTV では、NASA モジュールとの結合部や、実験後に発生したガスを船外に排出するための真空排気ラインのコネクタやバルブ結合部は、高分子材料のシールに対しては 2 重のシール、メタルシールは 1 重シールを設け、打上げ前にリークチェックを実施し、組立プロセスの管理を徹底することでリスクの発生を最小限にする「リスク最小化設計のアプローチ」を実施している。また、ヒューマンエラーによって真空排気ラインのバルブを開としないように、複数のアクション後に開となるよう、インヒビットの確保により 2 重故障許容相当の制御を行っている。

また、隕石やスペースデブリの衝突については、そのサイズを 1cm 以下、1cm 以上 10cm 以下、10cm 以上の 3 種類に分類して対応方針が決められている。1cm 以下のデブリに対しては外壁の外側に貼り付けたアルミ製のバンパでデブリのエネルギーを弱める対策を施している。バンパは交換が可能である。ISS プログラムでは、モジュールの

取付位置や軌道を考慮してスペースデブリがモジュールに衝突する数学モデルを用意しており、モジュールごとにデブリがモジュール壁を貫通しない確率（非貫通確率（PNP：Probability of No Penetration）が規定されている（「きぼう」の場合 10 年間の運用期間中のスペースデブリ/隕石の非貫通確率値は 97%以上）。「きぼう」は、ISS プログラムから要求されるこのデブリの非貫通確率を満足する設計となっている。10cm 以上の大きさのデブリについては地上のレーダなどで予め軌道を予測し、ISS との衝突が予想される場合には、デブリの接近前に ISS の軌道を変更して衝突を避ける対策を取っている。1~10cm のデブリが当たった場合は、与圧壁に穴が開く可能性がある。仮に「きぼう」の壁に直径約 10cm の穴が開いたとしても、室内の気圧が 1 気圧から 0.7 気圧まで低下するのに約 200 秒かかると推定されており、搭乗員は ISS 内が危険なレベルの圧力に到達する前に退避行動を開始するよう計画されている。

### 3.3 汚染

二酸化炭素の濃度上昇や、窒素の大量漏洩、実験装置の排ガス、あるいは機器からの有害成分の揮発（オフガス）等による居住環境中の空気の汚染が懸念される。

ISS では発生するガスごとに許容量を規定し、搭乗員に危険をもたらす可能性のあるガスの総量管理を行っている。「きぼう」に搭載する機器等は、適切な材料選定を行うことにより個別にオフガスを最小化する手段を講じている。

「きぼう」船内実験室内の環境制御系には二酸化炭素の除去機能はなく、NASA のモジュール側の正常な空気と換気を行うことでモジュール内の空気の組成、成分を制御して

いる。NASA モジュールに送気する機能の故障は「きぼう」の生命維持環境に対する重大なハザードとなるため、NASA モジュールへの送気機能は冗長構成とし、さらに冗長系ともに故障した場合に備えて、NASA モジュール側に退避する手段を含めて 2 重故障許容を確保した設計としている。

実験機器からの廃気は船内の配管を通じて船外に排出される。この際、配管部のシール等の損傷によって有害なガスが船内に漏洩した場合、重大なハザードを引き起こす可能性があるため、シールを 2 重にする等して、故障許容設計を確保している。

### 3.4 ヒューマンインターフェース

#### (1) 船内活動

船内においては機器への接触温度、鋭利な端部への接触、挟み込みによる負傷、電気コネクタ着脱による感電等は、搭乗員に怪我を負わせる危険がある。

搭乗員が接触し得る場所は、最悪時でも -18℃~49℃の温度範囲に入るように設計されている。機器の端部には丸みをつける等、搭乗員の負傷を予防している。電気コネクタを抜き差しする場合には、アクセスする際コネクタ上流の電源スイッチを切ること、給電コネクタのピンが直接触れないよう、電源上流側をソケット、下流側をピンとする設計対応を取っている。

#### (2) 船外活動

船外活動に使用する宇宙服及び手袋は、表面温度が -120℃~113℃の範囲の機器まで接触することが認められており、船外に置かれる機器はこれを超えないよう熱設計が考慮されている。

船外で電気コネクタにアクセスする場合、スパークによりピンの金属部が熔融し飛散して、宇宙服に飛び散る可能性についても考

慮している。熔融金属が宇宙服に接触して宇宙服に穴を開ける等のハザードを考慮して、この場合には上流の電源機器を確実に遮断する安全対策が取られている。

船外活動中に、機構部品が作動し、宇宙服や手袋を挟み込まれて搭乗員が拘束され、船内に帰還ができない可能性も考慮している。このようなハザードの防止対策として、搭乗員が船外活動を実施している場合には、機構部品を船外活動中の搭乗員の付近では動作させない等の運用制約によって、ハザード制御を行っている。

### 3.5 構造安全

#### (1) 構造

軌道上に打上げる機器は、打上げ時またはISSからの帰還時に輸送用ロケットから受ける振動等、あるいはISS設置後のISS軌道変更や搭乗員との接触等が、構造物に与える荷重条件となる。打上げ時あるいは帰還時、軌道上のコンフィギュレーションを考慮したうえで構造物にかかる最大負荷に対して十分な安全係数を見込んだ耐性を有するよう、材料の選定、設計を行っている。

構造部材は、材料の選定に始まり、安全寿命設計解析の実施と製造時の特殊工程管理、非破壊検査の実施、さらに試験までの一連の活動で管理を行っている。

#### (2) 圧力システム

「きぼう」モジュールには、システム機器や実験機器の排熱を行うために、ポンプによって一定の圧力を作り出して冷却水を循環させている。また、実験装置にガスを供給するガスタンクがあり、ガス供給ラインにも圧力が加わっている。その他、船内実験室/保管室も宇宙空間に置かれており、1気圧の空気圧が内部にかかった圧力システムに該当する。

「きぼう」の圧力システムは、ヒューマンエラーを含めた2故障の組み合わせの際に発生する最大圧力を求め、これに十分耐えられる配管を設計している。「きぼう」の船内実験室/保管室は、軌道上において外部と1気圧の差圧があるため、2故障相当の事象が発生しても最大設計圧を超えないように内圧を制御する機能が設けられている。

「きぼう」は軌道上の真空環境においては常に内圧が高い状態を維持することとなるが、スペースシャトルで軌道上に運ばれた際に、スペースシャトルの緊急帰還等により大気圏に帰還することも想定し、打上げ時の温度、大気圧、モジュール内圧と帰還時の条件の差異により、船内実験室/保管室の圧力が外部圧力よりも低くなる（負圧がかかる）可能性に対しては、外圧の上昇率を十分に吸収できる圧力リリーフ機能を設定した。

### 3.6 放射線

「きぼう」の船内実験室/船内保管室内で作業をする搭乗員に対しては、ISSでは造血器官（深さ5cmの線量相当）への被曝が年間400mSv（40rem）を超えないこととの要求を満足させた設計としている。「きぼう」の外壁にはアルミを使用し、外壁の外側にはアルミ製のデブリシールド、多層断熱材が設置されている。また、船内実験室内に搭載したラック、艙装品も、放射線の遮蔽に寄与している。

### 3.7 感電

船内で、搭乗員が機器を操作/メンテナンスする際に、感電しないための対策がとられている。例えば、電気機器は構造物に適切にボンディングすることで機器の故障だけではなく不適切な地絡電流等が搭乗員に直接流れることがないように感電の防止対策を取

っている。また、使用するすべての電線についても ISS 共通の規格に適合するものを使用することで、感電を防止している。機器の交換等のために搭乗員がコネクタを外したり、取り付ける場合には、交換前に上流の電源を落とすことが手順書に盛り込まれており、コネクタは給電側にソケット、受電側にピンがくるよう設計されており、給電側に直接触らない対策が取られている。

船外活動中は、宇宙服を着用しているため感電することはないが、ショート等により金属ピンが溶融飛散し、宇宙服を損傷する恐れがあるため、船内での制御と同様の対策を施している。

### 3.8 ガラス飛散

微小重力空間ではガラスが破損し破片が発生した場合には、空間を浮遊してしまい、搭乗員が吸い込む、あるいは目に入る恐れが考えられる。これを防止するため、極力ガラスの使用を避けることとしている。しかし、どうしても使用が避けられない場合には、工具類の衝突等によっても破損しない十分な強度を有しているものとする、あるいは万が一破損した場合の破片の飛散を防止するため、ガラス表面にフィルム等のカバー／コーティング等を行うなど、居住空間に飛散しないよう、50 $\mu$ 以下の金属メッシュか金属板による封入を行う等の対策を行っている。

### 3.9 騒音

船内実験室で劣悪な騒音環境にて長期間作業を行う、あるいは、瞬間的に過大な騒音に晒されると聴力に傷害を来す恐れがあるため、「きぼう」に搭載する機器は、発生する騒音の評価を行って打上げることとしている。また、機器の組み合わせによるモジュール内部の騒音レベルを予測し、必要であ

れば吸音材や遮音材を施工する、或いは同時に稼働させる機器の組合せに運用制約を設けること等により、騒音レベルをクルーの作業環境として適したレベルに維持する対策を行っている。これらの努力により、「きぼう」は ISS の中でも特に静穏なモジュールとしてクルーから高い評価を得ている。

### 3.10 電磁干渉による機器の誤動作

電磁干渉によって機器が故障、あるいは誤動作した場合、搭乗員の安全が維持できなくなる可能性がある。このため、電子機器類は電磁干渉を考慮した設計を行うようにし、最終的にはシステム全体を組み合わせた状態での電磁適合性試験により、相互に故障、誤作動が発生しないことを確認している。この際には、自然環境の要因として軌道上で想定される電磁場も考慮している他、通信アンテナなどの電磁放射レベルに対しても考慮した評価を実施している。

## 4. 「きぼう」運用における安全管理

「きぼう」の運用が開始され、その後、新たなシステム機器や実験機器が打ち上げられ「きぼう」への搭載が行われると、これらの組合せ、統合時の安全評価、が不可欠となり、NASA と連携した安全確保活動を行っている。

### 4.1 「きぼう」との統合安全解析

JAXA は、ISS 計画の一員として NASA の全体的責任のもとに、自ら開発し、軌道上に打ち上げるシステム機器及び実験機器の安全確保について責任を負っている。これまで ISS システムモジュールや個々の実験機器は、各々で打上げ前に安全解析・評価・審査を実施してきたが、新たに実験機器等を軌

道上に打ち上げる際には、軌道上の既存のシステム機器や実験機器と組み合わせた状態での安全を評価する必要がある。これを統合実験ハザード評価（IEHA：Integrated Experiment Hazard Assessment）と呼んでいる。

#### 4.1.1 統合実験ハザード評価の概要

軌道上に新たな実験装置等を打上げる場合には、既存の安全制御が使える状態にあること、安全を損なう新たな事象の発生がないこと等を評価する統合実験安全評価を行うことがISSプログラムでは決められている。「きぼう」に搭載する実験機器についても、新たに上げられ「きぼう」に設置される場合には、既に「きぼう」内に設置されている

システム機器や実験機器との間に安全上の問題がないことを評価する、統合的な安全確認を行っている。

#### 4.1.2 統合実験ハザード評価の対象

統合実験ハザード評価の対象は、既に軌道の上に持ち込まれているすべてのシステム機器及び実験機器と、新たに軌道の上に持ち込まれる実験機器との組み合わせが対象となる。

#### 4.1.3 統合実験ハザード評価方法

統合実験ハザード評価方法は、ISSプログラムで共通化されているが、さらに「きぼう」独自の統合実験ハザード評価実施要領書を制定しており、これらに基づき安全評価を行っている。第2表に統合実験ハザード評価時に考慮したハザードを示す。

第2表 統合実験ハザード一覧

No.	ハザード内容
1	ペイロードへの誤ったコマンドによるハザード
2	可燃性及び腐食性材料の使用によるハザード
3	統合状態でのペイロードの所要電力、排熱、CO2排出がISSの機能を劣化させるハザード
4	統合状態での放射線によるハザード
5	統合状態での非電離放射線によるハザード
6	統合状態での電磁干渉/電磁許容性によるハザード
7	統合状態でペイロードの荷重、加速度による構造破壊ハザード
8	曝露部でのペイロードの衝突/接触によるハザード
9	曝露ペイロード実験でのEVAに関するハザード
10	統合状態での過剰な熱の蓄積によるハザード
11	統合状態で、通常運用の干渉により引き起こされるハザード
12	統合状態でのペイロードに対する構造破壊ハザード
13	統合状態での安全上クリティカルな機能の作動/不作動によるハザード
14	統合状態でのIVA作業により引き起こされるハザード
15	統合状態でのペイロードの展開等により緊急脱出が妨げられることで引き起こされるハザード
16	統合状態での騒音により引き起こされるハザード
17	統合状態での軌道上保管物により引き起こされるハザード

## 4.2 システム／ペイロードの安全管理寿命

軌道上に打ち上げ「きぼう」内に搭載されたシステムや実験機器等を長期間にわたって運用を続けていくにあたっては、運用期間中、継続して安全状態が維持できていることを評価し、管理する必要がある。

### 4.2.1 寿命評価ガイドライン

今後、軌道上での安全状態の維持、寿命期限を各モジュールの責任機関が評価し、管理するにあたっては、NASA から安全認証（Safety Certification）とそれに必要な安全設計寿命（Safe Design Life）や安全運用寿命（Safe Operational Life）の評価方法や考え方が示された。JAXA でも、このガイドラインに基づき「きぼう」モジュールの寿命を算出し、管理を行うことが提案されている。

### 4.2.2 寿命の定義

**安全設計寿命**：あらかじめ定められたリソースと手順により保全作業を実施した上で機能を維持できる期間であり、軌道上の期間に加えて、地上での保管期間等を含めなければならない。

**安全運用寿命**：保全作業を実施せずに、特定の条件下で意図した機能を維持できる期間であり、軌道上の期間に加えて、地上での保管期間等を含めなければならない。

### 4.2.3 ISS モジュールの寿命評価の観点の例

#### (1) 高分子材料（シール材）の取扱い

高分子材料でできたシール材の安全寿命は、保管する環境条件に大きく依存するため、製造メーカーから提示された取扱方法や寿命管理方法を遵守する。特に、温度や湿度、光や放射線、外力による変形、液体や半固形物質の接触、金属との接触等による影響を受けないよう保管方法に十分注意する。

#### (2) 電気／電子部品

温度、圧力、湿度、流量等のモニタに使用されるセンサについては、有効寿命を管理す

る。特に、センサの出力データを機器のパラメータに使用している場合は、センサの検出性能が低下する前に交換する等の処置が必要となる。

また、実験機器のハザード制御に使用される、温度スイッチ、サーモスタット、リレー等は、安全設計寿命及び安全運用寿命が運用期間と比較し十分余裕があることを示さなければならない。電気／電子部品については、標準部品（MIL 品等）を使用している場合には、その部品のテストデータを評価に用いることができる。

#### (3) ファスナ

軌道上で着脱を行なうボルト類や操作するラッチ類については、着脱回数制限を考慮し安全運用寿命を定める。また、モータ等が近傍にある振動環境下で用いられるファスナ類は、振動荷重条件を十分考慮することとしている。

#### (4) バッテリ

バッテリーの寿命は、構成する極や電解質の化学特性に依存するため、その特性に基づいて保存期間や寿命を定めることとなる。

ただし、二次電池については充放電のサイクル寿命試験を実施した結果、必要なバッテリーの性能を維持できると判断できる場合には、保存期間の延長が可能である。一方で、バッテリーの性能は使用環境の影響を受け易いため、必要に応じて対応をとることとしている。

## 4.3 廃棄物の安全管理

「きぼう」の運用、利用が開始に伴い発生する廃棄物も適切に管理しなければならない。ISS に蓄積される廃棄物は、廃棄処理プロセスに基づいてプログレスや ATV、HTV が大気中に再突入する機会を利用して処理している。



#### 4.3.1 廃棄物の定義

「きぼう」の廃棄管理計画は、NASA の廃棄管理計画に基づいており、廃棄物の定義もこれに準拠している。

##### (1) 搭乗員廃棄物

使用済みの搭乗員用品（通常 NASA の責任で打上、回収、廃棄されるため、原則「きぼう」の廃棄管理計画で規定する対象ではない。）

##### (2) ハードウェア廃棄物

故障、寿命切れ等で不要となったシステム又は実験機器、消耗品等

##### (3) ペイロード廃棄物

実験活動から発生する実験供試体、試料、消耗品等

##### (4) 打上用拘束具等の廃棄物

打上時に機器類を保護するために取り付けられていた拘束具（Flight Support Equipment）及び梱包材等

#### 4.3.2 安全に関わる廃棄物の分類とその取扱い

安全に関わる廃棄物の定義とそれに応じて安全に廃棄するために必要な処理、取扱いを以下に説明する。

##### (1) バッテリー廃棄物

バッテリー廃棄物（Ni-Cad、Alkaline）の取扱いは、廃棄する前の外観点検を実施し、ダメージがある場合、または 9V 以上の出力があるバッテリーである場合は、電極をテープ等で保護する。

##### (2) 生物／医療廃棄物

生物／医学的な廃棄物で、人体や環境に対して安全上影響を有する可能性があるもの（血液、生理排泄物、生物実験等からの廃棄物他）が対象である。また、生物/医療廃棄物は、先ずジップロックバックを使って封入し、更にソフトバックに入れる。

##### (3) 鋭利なエッジを有する廃棄物

鋭利なエッジ、突起を有するガラス・プラスチック破片、注射器等の廃棄物、が対象である。鋭利なエッジを有する廃棄物は、破れない専用のコンテナに入れて廃棄することが要求されている。

##### (4) 化学廃棄物

特別な取り扱いを要する化学物質を含んだ廃棄物が対象である。化学物質の廃棄は個々の物質の性質毎に密閉できる廃棄コンテナに入れ安全化を行い、また必要に応じて多重の封入を行うことが要求されている。

##### (5) 放射性廃棄物

放射線を発生しうる廃棄物が対象である。放射性廃棄物は、NASA の要求に合致した適切な取り扱いのもとで処理することとしている。

#### 4.4 物品の地上への回収時の安全性

「きぼう」の運用・利用の開始に伴い、実験試料等の成果物を地上へ回収する機会が増えてきている。回収が計画されている機器等は、あらかじめ帰還時の安全性も評価している。

当初は回収が予定されていなかった機器（不具合の原因究明のために回収を要する機器）または、計画外の形態で回収する機器については、帰還時の安全性の評価を行っている。

#### 4.5 「きぼう」実運用中の安全管理

2008 年以降、「きぼう」の運用中の安全状況は、有人システム安全ミッション保証室及び協力会社の専門メンバーを中心に構成された運用安全担当により監視している。運用安全担当は、実際の軌道上作業に先立ち、個々の機器について打上げ前に評価された安全解析報告書で規定された安全確保のための制御方法が、手順書等に確実に反映され

ていることを確認する。軌道上の運用は、手順が確認・承認された後に、これを用いて実施される。

運用中に異常事象または安全審査で承認されたコンフィギュレーションからの変更等が生じた場合には、フライトコントローラを中心に、事前に承認された手順等に基づき搭乗員の安全確保及びハードウェアの保護を行う。異常事象については、発生事象、処置内容等を記録し、後日の評価、是正処置の検討等に資している。コンフィギュレーション変更については、変更が与える安全制御への影響を再評価する。

運用安全担当は、記録された異常事象等をすべて評価・確認し、処置内容、原因究明、再発防止策等の妥当性を確認し、必要により、記載内容について作成者へ助言を行っている。

異常事象に対する一次処置完了後、必要により不具合対策会議を開催し、関係者で発生事象の原因究明、処置策等について判断する。安全確保の観点からは、既存の安全解析報告書で規定されたハザード制御が引き続き維持されていることを確認し、必要に応じて安全解析の見直しを行う。また再度安全審査パネルの招集を要請し、安全審査を行うことにより必要な安全の確保を確認することもある。

さらに、「きぼう」以外の ISS の安全状況については、NASA の運用安全担当と直接連絡を取ることにより、各モジュールの最新の状況を把握し、「きぼう」運用中に他のモジュール及びシステム機器、実験機器との安全上の干渉がないように、運用計画全般を監視している。例えば、2011 年にロシアのプログレス宇宙船の打上げ事故に伴い後続機の打上げが延期された際には、クルーの交代計画への影響懸念から、「きぼう」を含む ISS

全体を無人化されても運用継続可能な状態に設定する計画が検討された。「きぼう」の運用に関しても、システムの安全状態を確保すると同時に、地上からの遠隔操作のみにより実験装置の運用を継続する方法の検討が進められた。運用安全担当は、ISS が無人化した場合の実験中の火災発生時の対応、毒性物質の封入状況の確認の観点で緊急的な評価を行い、計画立案に貢献した。

「きぼう」で発生した不具合の発生件数（累計）は、H23 年度末時点（打上げ後 48 ヶ月）で 75 件で、同規模の米国実験棟（USOS）の打上げ後 48 ヶ月時点の 175 件の半分以下であり、信頼性が高く安定した運用を継続している。

#### 4.6 安全審査体制

「きぼう」モジュール及び搭載ペイロードに関する安全性を評価する安全審査については、「きぼう」開発当初から JAXA 有人システム安全ミッション保証室長を議長とした有人安全審査パネル及び NASA 安全審査パネルによる 2 段階の審査が行われてきた。これは前者が主に JAXA が提供する製造物の安全性を確認するために実施されることに対して、後者は NASA は ISS 全体としての統合的な安全性を確認することを目的としているためである。このうち、「きぼう」及び NASA モジュールに搭載する実験装置等に関する安全審査については、約 20 年の JAXA 有人安全審査パネルの実績が評価され、2010 年に NASA から、NASA のペイロード安全審査パネルが有する審査権限が JAXA の有人安全審査パネルに委譲された。このため、現在では船外活動、高毒性物質の取り扱い等の特別な場合を除き、JAXA の安全審査が終了した実験装置等は、軌道に打ち上げることができるようになった。

#### 4.7 日本人搭乗員安全確認

有人システム安全ミッション保証室では、「きぼう」及び実験ペイロードの安全確認に加え、日本人搭乗員が ISS に長期滞在するにあたって、日本人搭乗員の打上げ時、軌道上 ISS 滞在時及び帰還時の安全性を確認する活動を行っている。打上げ及び帰還については、スペースシャトルに搭乗していた時代は、NASA が実施する打上げ／帰還前に実施する審査会に参加し、またソユーズ宇宙船に搭乗する場合にはロシア宇宙局が実施する打上げ／帰還前に実施する審査会に参加して、機体の準備状況、過去の不具合内容の処置状況、地上管制の準備状況、さらには日本人搭乗員を迎える ISS の安全状況等を確認している。さらに、打上げ及び帰還当日は、ジョンソン宇宙センターまたはロシアコロリョフ飛行管制センター（モスクワ郊外）において打上げから ISS までのドッキングを監視している。帰還時には ISS 離脱から着陸までの安全確保状況をモニタし、不具合の発生に備える体制としている。

軌道上滞在中については、酸素分圧及び二酸化炭素分圧等の変化を監視するとともに、これらを維持する酸素発生装置、二酸化炭素除去装置等の環境管理装置の運用状況を把握し、更に食料や水等の生活に必要な消耗品の備蓄状況を確認している。また、日本人搭乗員が船外活動を行う場合には、事前に作業内容及び関連する安全評価結果の確認、船外活動服の準備状況等が確認される審査会に出席して安全を確認するとともに、NASA 安全担当から必要な情報を入手して、JAXA 自らが安全を評価することにより、安全性を確認している。

#### 5. まとめ

2008 年の「きぼう」の運用開始以降、安全性に関わる問題は生じておらず、各機能は良好に維持されている。今後、「きぼう」を継続的に利用するにあたり、ハザードが生じた場合の対処法について、事前準備を充実させていく予定である。