

第 12 章 「きぼう」 与圧系システムの開発成果

～船内実験室と船内保管室の構造系

1. 序論

本章では、与圧系システムの船内実験室と船内保管室の構造系について説明する。

日本実験モジュール「きぼう」(JEM: Japanese Experiment Module) の構造体は軌道上運用時の各種荷重やスペースシャトルでの打上げ時の荷重に耐えるように設計している。また有人施設として軌道上では与

圧空間や隕石・デブリ防御の機能も必要である。要求に対して JEM の構造、特に、船内実験室(与圧部)がどのように設計・検証されているかについて、実例を含めて概説する。

2. 各部構造概要

第 1 表に JEM 各構成要素の構造仕様の概要を示す。

第 1 表 JEM (船内実験室／船内保管庫) 主な構造仕様

	船内実験室	船内保管室
主構造様式	<ul style="list-style-type: none"> ・アルミ・アイソグリッドパネル ・溶接円筒構造 	
主な構造材料	<ul style="list-style-type: none"> ・シリンダ部 : Al 2219 ・その他の部位 : Al 7075 ・トラニオンピン: ニッケル基合金 (INCONEL-718) 	
寸法 (m)	外径: 4.4 内径: 4.2 長さ: 11.2	外径: 4.4 内径: 4.2 長さ: 4.2

2.1 船内実験室 (または与圧部)

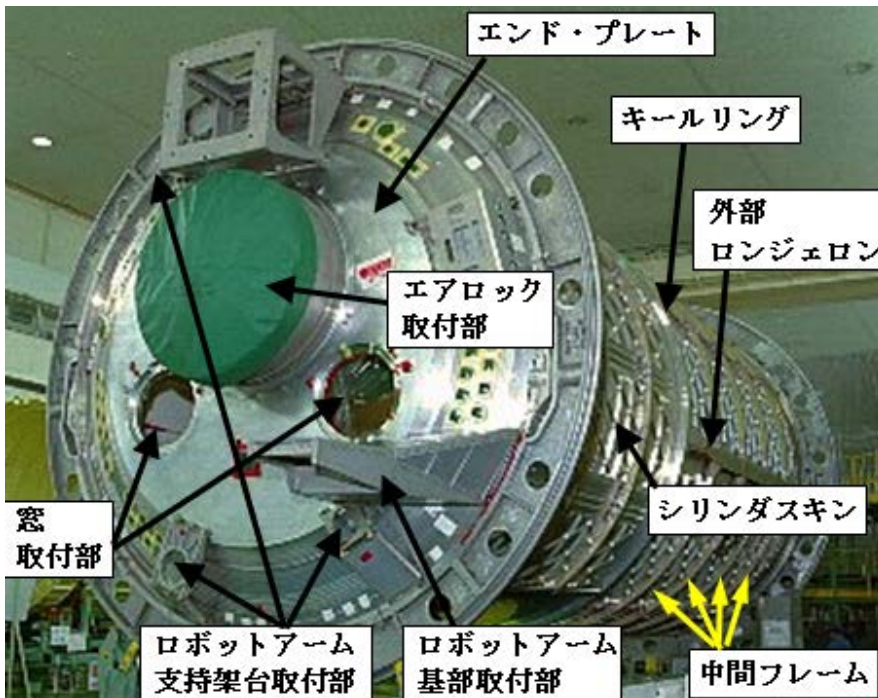
2.1.1 1次構造

第 1 図に船内実験室の主構造外観写真を、第 2 図に主構造概要を示す。船内実験室は、内径 4.2m でアルミ合金製のアイソグリッドパネル構造シリンダ部及び内部の搭載機器の荷重を支えるためのフレームから構成される。また、船内実験室支持荷重を適切に分散するために、シリンダ部左右舷に外部ロン

ジェロン(断面積の大きい縦通材)を取り付けている。シリンダ端部のエンドコーンは、国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)側と結合される右舷エンドコーンとロボットアームやエアロックなどが取付けられる左舷エンドコーンがある。右舷エンドコーンは、モジュール共通結合機構の取付インターフェースから形状が定まる円錐形状となっており、左舷エンドコーンは、

機構系（エアロック、ロボットアーム、窓など）の構造取付の観点から、円錐とエンドプレートを組み合わせた形状を採用している（第2図）。左右舷の両シリンダ端部には、船内実験室の内圧及びスペースシャトル搭載時の荷重支持に十分な強度・剛性を有するエンドリングフレームが取り付けられている。また中間部のキールトラニオンが位置する部分にキールリングが取り付けられている。これら主構造は圧力容器を構成しており、気密性

の要求から溶接による一体構造となっている（シリンダ与圧壁厚さ 4.8mm）。このため、使用材料は軽量・高強度で、且つ溶接性にすぐれたアルミ合金 2219 材が採用されている。またスペースシャトルに搭載されて打ち上げ時の荷重を受ける構造には、より比強度の高いアルミ合金 7075 材が使用されている。シャトル結合部のトラニオンピンは、シャトル搭載の要求 1) により、ニッケル基超合金（インコネル）を用いている（第1表）。



第1図 船内実験室の主構造概観⁸⁾

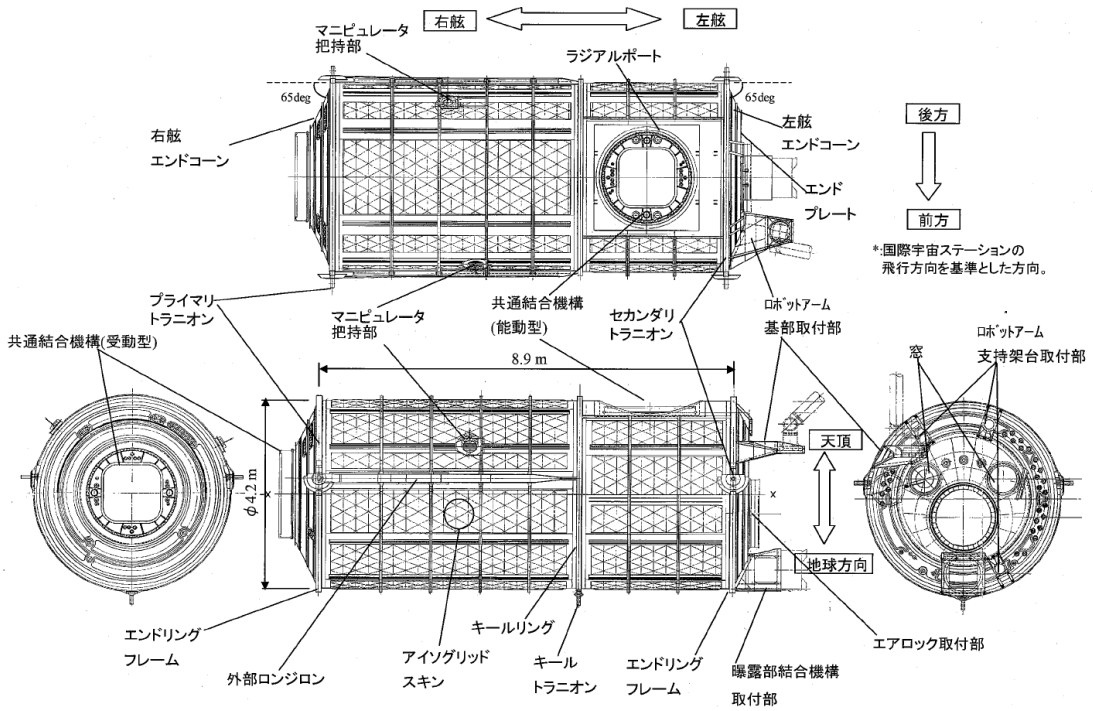
（注記）上下逆に支持された状態である。

2.1.2 2次構造

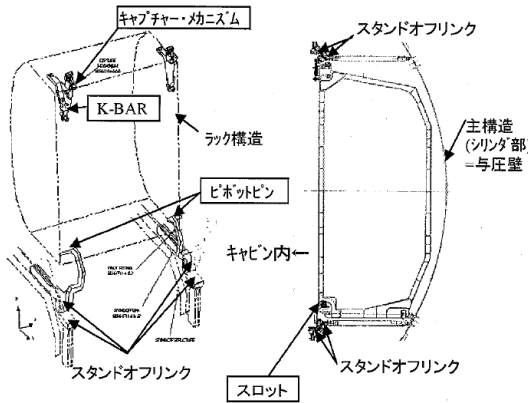
2.1.2.1 隕石・デブリ防御構造（バンパ）

主構体の周囲はバンパと呼ばれる厚さ 1.27mm のアルミ板からなる隕石・デブリ防御構造で覆われている。ISS の進行方向には

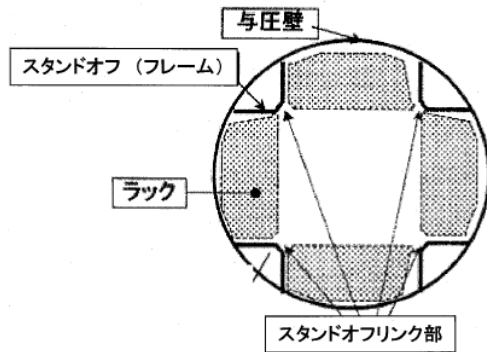
ケブラーなどで構成されたスタッフィングと呼ばれる繊維材をバンパ裏面側に、2 段目バンパとして追加して防御性能を向上させている（3.4 項参照）。



第 2 図 船内実験室主構造構成 (2 次構造である隕石・デブリ防御構造を取り外した図) 8)



第 3 図 軌道上でのラック取付概要 8)



第 4 図 ラック取付概要 (モジュール断面)

2.1.2.2 ラック取付構造

ラック取付構造とは、電力機器、熱・環境制御機器、通信制御機器、軌道上実験装置(実験ラック)、ワークステーション、ロボット・

コンソール及び保管ラックというシステム機器をラック単位で組み込んで船内実験室壁に取り付ける構造である。船内実験室には総数 23 個のラックが取付可能である。

軌道上でのラック構造取付の概要を第 3 図、第 4 図に示す。打ち上げ時には、打ち上げ荷重に耐えるために、ラック前面上部と後面下部の四隅に 2 本づつ設けられた固定ピンが船内実験室内の受け金具と結合される。軌道上では、クルーによるラック交換作業を容易にするために、打ち上げ用拘束を解除し、新たにラック前面上部に取り付ける 2 本のピン (K-BAR) とキャビン内受け金具 (キャプチャー・メカニズム) を結合し、ラック前面下部のスロットに 2 本のピボットピンを差し込むことで結合・固定される。

このように取付状態を打ち上げ時と軌道上で換装することにより、軌道上の船内実験室内のクルーは上部結合を手動で解除し、下部のピボットピンを中心にラックを動かすことで、保全作業のためにラックを容易にキャビン側に倒すことができる。但し、ラック下部の接続ケーブル類の長さに注意が必要であり、軌道上実装と異なる古い図面によってラックチルト解析を行い、その結果に基づきケーブルを接続状態のままラックチルトした結果、ケーブルに大きなテンションを掛けてしまい破損したケースがある。

ラックのモジュールへの取付インターフェースは国際標準実験ラック (ISPR : International Standard Payload Rack) の規格要求により標準化されている。

2.1.2.3 機構系などの取付構造

右舷エンドコーンとラジアルポートには国際宇宙ステーションのモジュール共通結合機構とハッチを有する。左舷側のシリンダ端には、2 つの窓組立、ロボットアームの取付部船外実験プラットフォームとの結合部である曝露部結合機構、及び船外実験プラットフォームへ実験装置や試料の出し入れを行うエアロックがある。船内実験室はロボットアームを取り付けた状態でスペースシャ

トルで打ち上げられた。

2.2 船内保管室 (または補給部与圧区)

船内保管室は、船内実験室と同じく内径 4.2m のアルミ合金製アイソグリッドパネルの溶接構造により構成される (第 1 表)。軌道上では船内実験室上部にモジュール共通結合機構により結合される。船内実験室と同様に隕石・デブリ防御のためのバンパ構造を持つ。また、船内保管室にも、8 個のラックが取り付け可能である。シャトル打上重量制約より、船内実験室では一度に運べないラック 8 個を船内保管室に搭載して、「きぼう」の第 1 便としてスペースシャトルで打上げられた。

3. 設計要求と設計検証概要

JEM 構造には、スペースシャトルに搭載されるペイロードとしての要求 2) と有人施設としての要求がある。主な設計要求 1)、3) としては、質量/質量中心、荷重、剛性、強度、隕石・デブリ防御/断熱性能、寿命、及びエンベロープ (シャトルカーゴベイとのクリアランス) がある。以下ではこれらの内いくつかの設計要求を JEM 構造開発、主に船内実験室においてどのように設計に反映し、検証されているかについて概説する。

3.1 質量/質量中心

スペースシャトルの打ち上げ性能から、ペイロードには上限質量が割り当てられている、さらに、打ち上げ時や緊急帰還時におけるシャトルの姿勢制御性や空力安定性確保のために質量中心位置も制限されている。

JEM にはスペースシャトルによる 3 回のフライトに対して質量が配分されている。JEM 構造設計においては、2 項で説明した

ように主として軽量で且つ高い強度を有するアルミ合金を使用し、軽量化を図っている。

各モジュールの質量／質量中心は製造時や出荷時に計測されており、これらのデータに基づき、実験装置や各種機器を搭載した打ち上げ形態での質量／質量中心位置を解析し、検証している。射場であるケネディ宇宙センター（KSC：Kennedy Space Center）でもスペースシャトルカーゴベイ搭載前に、最終的な質量／質量中心計測を実施し、要求範囲内であることを確認した。

3.2 荷重

JEM 構造は自重を支えるとともに搭載している実験装置や機器からの荷重に耐える必要がある。これらの荷重には大きく分けて、a) スペースシャトルによる打ち上げ飛行時に負荷されるもの、b) 軌道上で負荷されるものの2つがある。以下の項では、この両者について説明する。

3.2.1 スペースシャトルによる打ち上げ飛行荷重

3.2.1.1 打ち上げ時／着陸時の過渡振動

シャトル打上時／非常着陸時の荷重は、スペースシャトルの構造数学モデルに打上モジュールの構造数学モデルを結合し、シャトルの外力条件を入力とする過渡振動応答解析（柔結合解析：CLA=Coupled Load Analysis）を行い算出している。算出された設計荷重に対して、静荷重強度試験による確認を実施している。

また柔結合解析に使用する構造数学モデルの検証のためにモード試験を実施し、構造数学モデルを試験結果に対して合わせ込むこと（コリレーション）が求められている。このため JEM の各構成要素についてモード試験を実施した。

3.2.1.2 準静的加速度及びカーゴベイの熱・圧力変形

スペースシャトルの上昇／下降時には、機軸方向の加速度と共に、ウインドシア（風速の高度変化）によりピッチ／ヨー方向の加速度が負荷される。また同時にスペースシャトル・カーゴベイの熱変形およびシャトル上昇に伴うカーゴベイ内与圧変形により結合部であるトラニオンを通してシャトル搭載ペイロードに荷重が負荷される。打ち上げ時／着陸時と同様に、スペースシャトル構造数学モデルに JEM 構造数学モデルを結合し、トラニオン部などで、これらの荷重を評価している。

3.2.1.3 カーゴベイ内音響

スペースシャトル打ち上げ時にはメインエンジンや固体ロケットからの噴流による音響がカーゴベイ内のペイロードに負荷される。主構体に対しては問題にならないが、音響の影響を受けやすい搭載機器やその取付構造に対しては、上記カーゴベイ内音響により励起されるランダム振動荷重を考慮して設計を行っている。また JEM 構造の開発においては、音響試験を実施し、機器に負荷されるランダム振動環境の測定を行っている。

3.2.2 軌道上荷重

3.2.2.1 振動／衝撃荷重

軌道上振動／衝撃荷重としては、国際宇宙ステーションへ、プログレス無人貨物船がドッキングする際に生じる衝撃荷重、宇宙ステーション運用時に軌道高度を上げるために増速（Re-boost）する際の加速度荷重及び宇宙飛行士の船外活動（EVA：Extravehicular Activity）によるキック荷重などが存在する。JEM 構造においてはモジュール共通結合機構、曝露部結合機構及び装置交換機構などに

加わるこれらの結合部荷重やエンドコーン構造に対してこれらを考慮した設計を行い、強度試験を行っている。

3.2.2.2 圧力荷重

軌道上では船内実験室および船内保管室内は1気圧に保たれており、船外との間に差圧が生じる。

船内実験室の開発においては、強度試験用の供試体を用いて降伏圧力で有害な変形を生じないこと及び破壊圧力で破壊しないことを確認している。またフライトモデルに対してプルーフ圧力を負荷し強度が確保されていることを確認している。

3.3 剛性

JEM 構造には様々なインターフェース規定からの剛性要求が存在する。

スペースシャトルの飛行制御の観点から、スペースシャトル搭載形態での最低次の固有振動数が規定されている。JEM 構造は打ち上げ形態でトラニオンが支持された状態で上記要求を満足できるように設計されている。また JEM は軌道上でスペースシャトルあるいは宇宙ステーションのマニピュレータにより組み立てられる。このためマニピュレータとの結合部である把持部（GF：Grapple Fixture）と呼ばれる部位を支持した状態での最低次固有振動数も規定されている。これらの部位についてはチタンなどの高剛性材料を使用するなど、剛性を配慮した設計を行っている。

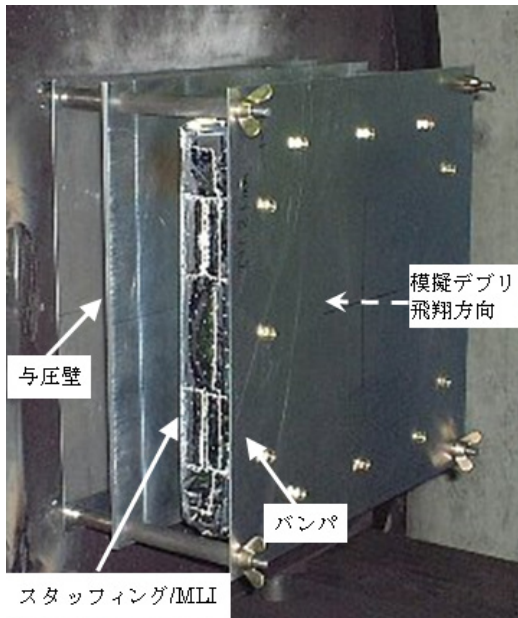
このほか機器搭載構造に対しては最低次固有振動数が 35Hz 以上になるように設計を行っている。スペースシャトル搭載時の最低次固有振動数はモード試験の結果をもとに解析で確認を行っている。

3.4 隕石・デブリ防御／断熱

JEM は有人宇宙施設であり、隕石・デブリの衝突／貫通による構造破壊や急減圧から搭乗員を保護する必要がある。このため船内実験室および船内保管庫に対しては隕石・デブリ防御の要求が非貫通確率（PNP：Probability of No-Penetration）という形で与えられている。これは10年間宇宙ステーションを運用した場合に隕石・デブリにより与圧壁に貫通穴が生じない確率を規定したものである。宇宙ステーション全体の安全性を考慮し、船内実験室および船内保管室を合わせた非貫通確率要求は0.9738以上と規定されている。

隕石・デブリ防御のために船内実験室および船内保管室は2項で述べたように隕石・デブリ防御構造が実装されている。バンパ構造には Whipple Bumper と呼ばれるバンパ／与圧壁と、 Stuffed Whipple Bumper と呼ばれる Whipple Bumper にケブラー（アラミド繊維）と Nextel（セラミック繊維）からなるスタッフィング部材を追加し防御性能を向上させたものがある。両タイプのバンパの内側には、モジュールの断熱性能向上の為に、バンパ／与圧壁間に多層断熱材（MLI：Multi Layer Insulator）が設置されている。これらバンパの設計は、秒速3～7kmの模擬デブリをバンパ／与圧壁供試体に衝突させる試験も実施しその性能を評価している^{4)～6)}。

第5図に Stuffed Whipple Bumper 供試体を示す。



第 5 図 バンパ／与圧壁供試体⁸⁾

3.5 寿命

ステーションの運用は 10 年が計画されているが、構造に対しては 15 年の寿命が求められている。寿命を評価するには打ち上げ荷重および軌道上荷重だけではなく、地上での輸送時、プルーフ試験時の荷重を考慮することが必要である。NASA 提供の亀裂進展解析コード FLAGRO⁷⁾ を用いて寿命を解析評価し、要求を満足することを確認している。

3.6 エンベロープ

JEM 構造に対するエンベロープ要求としては、

- スペースシャトルカーゴベイに対するもの
- ロボットアームに対するもの
- 船内実験室内壁と実験ラック間

などが挙げられる。いずれも干渉を避けるためのものであり、JEM 構造設計時にはこれらを考慮して設計を行ってきた。JEM では

早期に外部エンベロープ要求を製造図面に盛り込むとともに、3次元 CAD モデルを作成し NASA に提示して、前述 CLA により変位を算出し、干渉解析を行ってきた。特にスペースシャトルカーゴベイとパイロードの厳しい規定クリアランスを確認するために、船内実験室および船内保管室については実機ハードウェアの 3 次元寸法計測を実施し、詳細クリアランス評価に供した。

4. 主な苦勞した点

船内実験室の開発にて苦勞した主な点につき、最近の事例を以下に示す。尚、船内実験室の構造開発時に解決したその他の主要課題は、参考文献⁸⁾に示されている。

4.1 NASA とのインターフェース

3.2.1.2 項に示したように、JEM 構造数学モデルの必要情報を NASA に提出し、NASA でスペースシャトル構造数学モデルに JEM 構造数学モデルを結合し、トラニオン部などでの荷重が算出されそれを、日本側でも評価するという流れであるが、NASA 側スケジュール都合で、こちらの望む時期になかなか結果が出てこない時もあり、MHI から JAXA を通じて適宜、強力にフォローした結果、丁度良い時期にアウトプットが出てくるということが再三あり、国際プロジェクトの難しさを知らされた。この事象は、スペースシャトルとのインターフェースに限らず一般的に該当することであった。

4.2 窓組立

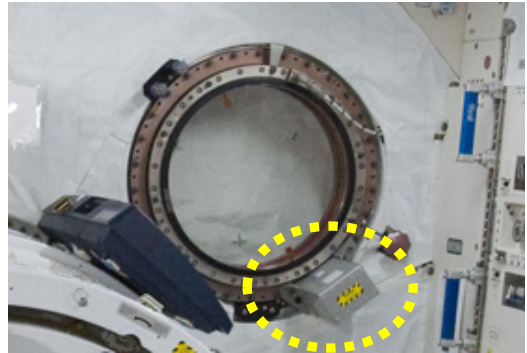
船内実験室の左舷エンドコーン部には 2 つの窓組立が取り付けられている (2.1.2.3 項)。この窓組立は、国際宇宙ステーション (ISS) に先に結合されている米国実験モジ

ジュール(US-LAB: United States Laboratory Module) の窓組立と基本的に同じ ISS 共通品で、米国製造メーカからの購入品である。源泉の図面や取扱要求・手順文書は英文であるため、微妙なニュアンスが分かりにくいところについては、米国製造メーカに何度も確認し、最終的には射場であるケネディ宇宙センター(KSC)で直接説明も受けて理解に齟齬の無いことを確実に確認した上で、船内実験室に取付けた。

尚、参考までに、第7図の写真中に見える窓組立の脇に取り付いている四角の箱状構造物は、「窓フレキ配管保護ボックス」と呼ぶ後付けしたものである。これは、既存のUS-LABの窓組立で構成部品であるフレキ配管をクルーが誤ってハンドレールのように掴んだことで漏洩が発生する可能性があったため、掴むことのないように箱でカバーしたものである。US-LABでは部品を軌道上に打上げて軌道上でクルーにより組み立てて取付けたが、船内実験室では、US-LABからの展開情報がなかったために、事前に新たに設計製作し、打上前に、ケネディ宇宙センター(KSC)にて取付けた。



第6図 船内実験室の窓からの眺め



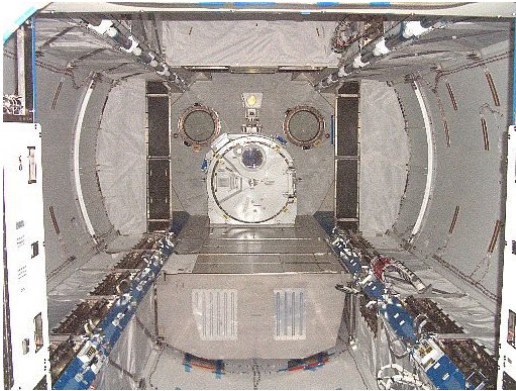
第7図 窓フレキ配管保護ボックス

4.3 スタンドオフリンクの位置精度

船内実験室、船内保管室ともにラックを搭載し打上げて、軌道上でのクルー作業のためにラック取付状態を換装する(2.1.2.2及び第3図参照)。モジュール内におけるラック取付インターフェースについては、NASAの要求文書により、隣接ラックインターフェース間距離や平面度などの位置精度が要求されている。位置精度は隣接ラック間の相対関係で規定されるため、連鎖的に全てのラック箇所でも要求を満足しなければならず、その位置調整には苦勞を要した。大型溶接構造物では、溶接による微小な熱歪(変形)が存在し、また軌道上での圧力・熱変形も考慮しなければならない。それらを整理評価した上で、各ラック箇所のスタンドオフリンク(第3図、第4図参照)はその場所毎に個別にシムとともに最適な位置調整を実施し取付けた。しかし、位置精度を調整し取付けた後、その後の作業干渉回避のために、取付けたスタンドオフリンクとシムはセットで取り外しておく必要があった。従って、その後の日本からKSCへの輸送や機体内作業の影響などを受けていないことを確認するために、地上では打上直前に最終取付けを実施する前段階に再度スタンドオフリンクとシムをそれぞ

れの場所に取り付けて位置精度確認を実施し、問題無いことを確認した。

そして、船内保管室に搭載されて先の便で打ち上げられた8個のラックが、クルー作業により、問題なく船内保管室から取り外され運ばれて船内実験室に取り付けられた（第8図、第9図）。この際、TKSCの管制室からのラック起動によって「きぼう」ロボットアームの温度データ確認を行うため、ロボットアーム・コンソール（操作卓）が最初に移設された。



第8図 船内実験室の地上での最終状態



第9図 船内実験室の軌道上でのラック取付後状態

2012年12月現時点において、船内実験室には、細胞実験ラック、流体実験ラック、勾配炉ラック、多目的実験ラックの4台が搭載され、運用中である。

5. まとめ

開発開始から二十数年かかったJEM、「きぼう」の与圧モジュールである船内保管室と船内実験室であるが、現在、軌道上で順調に運用されている。

スペースシャトル搭載時の荷重としては最も厳しいメインエンジン点火、固体ロケット着火などのタイミングを問題なく終え、また、軌道上で国際宇宙ステーション（ISS）に結合後、船内保管室から船内実験室へのラックの移設もクルーにより難なく完了できたことは、入念な検証の成果である。また機体製造時には多くの苦労があった窓組立については、その窓組立からの地球の眺めがJAXA/NASAのホームページで公開されて、多くの人々に美しい地球の姿を伝えている。

また、「きぼう」で獲得した与圧構造技術も生かして開発したHTV（H-II Transfer Vehicle）も、H-IIBロケットによる2009年9月11日の初打上げ以降、2012年7月のミッションに至るまで連続して成功裏に終わっている。今後は、「きぼう」やHTVで培った技術を絶やすことなく技術蓄積・継承して、将来の有人宇宙活動の発展に尽力していく。