

第 8 章 有人システム維持技術～熱制御系技術

1. 序論

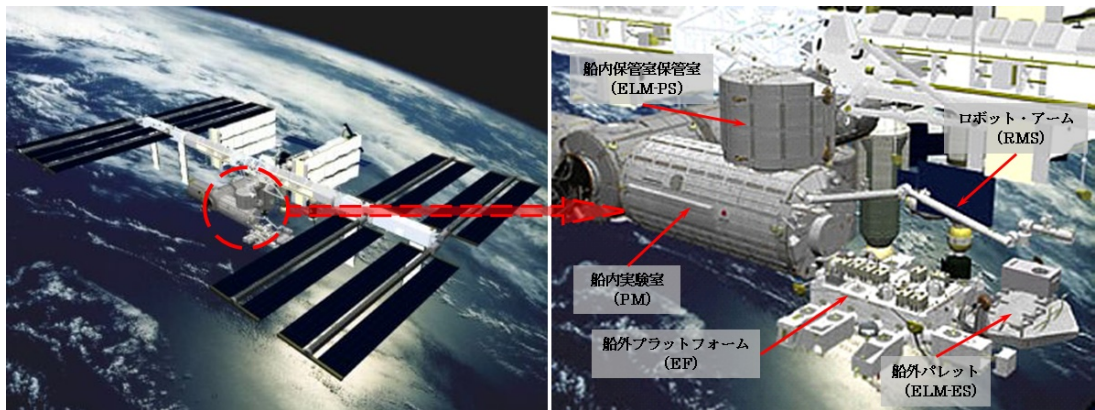
我が国初の有人宇宙長期滞在対応モジュールである「きぼう」は、かつて類を見ぬ複雑な熱的相互干渉環境にあり、適切な熱制御を行うに際して各システム間の緊密な熱的連携が必要となる。「きぼう」の達成すべき船内熱環境は、有人であることから厳しい制御範囲を要求されたものとなっている。そのため、受動熱制御系（PTCS：Passive Thermal Control System）、能動熱制御系（ATCS：Active Thermal Control System）、環境制御系（ECLSS：Environmental Control and Life Support System）間での熱的連携作動を考慮した設計概念がとりわ

け重要なものとなる。

本章ではまず、各システム間の連携作動がどのように設定されたか、そして、これを実現するためのインターフェースの制御／管理をどのように行ったかについて述べる。

次に、国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）本体（第 1 図左）側と「きぼう」（第 1 図右）との間、そして「きぼう」の各構成要素間での熱的干渉の設計への取込み方と、その検証方法について述べる。

最後に、設計及び検証における種々の問題を紹介します。大型有人宇宙構造物の設計・検証をどのようにして実現したかを示すと共に、軌道上運用についても示す。



第 1 図 国際宇宙ステーション（左図）と「きぼう」（右図）

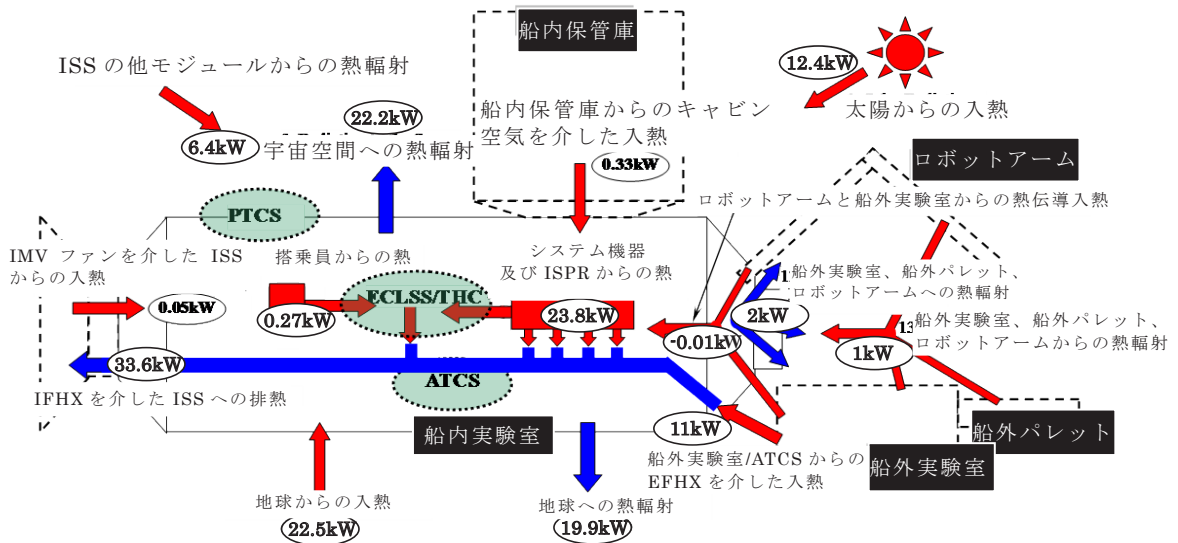
2. システム間連携作動とインターフェースの制御・管理

搭乗員が宇宙服無しで活動する船内空間では、キャビン空気温度は快適性の観点から

18.3℃～26.7℃、船内活動により搭乗員が接触する可能性のある壁面や機器表面の温度は結露防止と搭乗員の安全確保の観点から15.6℃～45℃という、非常に狭い温度範囲での制御が要求されている。加えて、搭乗員の船外活動での時間制約の無い接触部には-42℃～62.8℃、各種曝露機器ではその許容温度範囲内に各部温度を制御せねばならない。

更に、軌道上での電力リソースの観点から、使用するヒータの電力を最小限に抑えることも必要である。

そのため、次の(1)～(5)に示すような制御概念と各システムの有機的な連携動作を熱制御の根幹に置き、効率的な熱制御分担を実現している(第2図)。



第2図 「きぼう」の熱連携の一例

(1) 均一温度の魔法瓶

キャビン空気の暖房は PTCS による保温効果で対応する。即ち、多層断熱材 (MLI)、炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP)、チタン合金等の断熱材の適切配置により魔法瓶効果を与えると共に、内壁面表面からの熱輻射やキャビン空気の強制対流熱伝達からの入熱、並びに、搭乗員からの発熱により、キャビン空気温度を 26.7℃程度になるようにする。魔法瓶となる構体はステンレスより熱伝導率が1桁大きいアルミ合金とすることで、各軸方向の構体温度分布の均一化を図る。

(2) 構体内壁面温度保持

外部環境状態(太陽光入熱量、地球赤外輻射、地球太陽光反射、ステーション本体との熱干渉)の変化によって、放熱量に比し入熱量が不足する場合には、PTCS のヒータで加温し、構体内壁面温度を維持する。

(3) 冷房機能のみの ECLSS

キャビン空気温度を下げる場合には ECLSS で冷房を行う。空気の昇温は冷房力を落して対応する。

(4) 能動的最終排熱は ATCS

ECLSS の最終排熱や船内機器の主排熱は ATCS が担う。

(5) ATCS の最終排熱は ATCS

曝露系 ATCS の最終排熱は、与圧部 ATCS による冷却という形態を採用する。尚、与圧部 ATCS の最終排熱は、ステーション本体側の ATCS による排熱という形態を採っている。

システム間のインターフェース(以降 I/F) 規定の概念説明を行う。各システムに対して想定した適切な連携作動が実現されるには、前提となる作動環境の保証が必須となる。そのために設定・管理されるものが I/F 規定である。その一例と保証すべき機能について第 1 表に示す。I/F 規定は一般に、規定を交わす双方に機能・性能上の保証を与えるものとなっており、これを逸脱することは互いの損失につながることを意味する。例としてラッ

ク機器の温度制御に注目する。まず、ラック表面温度が I/F 値を逸脱した高い値になる(表中矢印①の不成立)とキャビン空気への熱負荷が増大(矢印②の不成立)する。これにより、ECLSS によるキャビン空気温度制御に支障をきたす(矢印③の不成立)とともに、ECLSS から ATCS への排熱量が増大(矢印④の不成立)し、ATCS 冷却水の温度が上昇(矢印⑤の不成立)するため、ATCS から機器への冷却水供給温度が上昇(矢印⑥の不成立)することにより、ラック機器やラック表面温度の上昇(矢印⑦、⑧の不成立)という悪循環を引き起こす。このように、I/F 規定逸脱は多方面へのインパクトを発生させる可能性があるため、遵守すべきものであることが容易に分かる。

第 1 表 熱関連の代表的 I/F 規定と保証される機能背景

系統	I/F 箇所	I/F 規定	システム側に保証される事項	システムの相手側に保証される事項
PTCS	「きぼう」各要素間	表面温度	<ul style="list-style-type: none"> ・他要素から自要素への熱流入の定量的把握 ・自要素から他要素への熱流出の定量的把握 ⇒自要素温度解析の前提条件を保証する。	
		赤外放射率		
		形状とサイズ		
ATCS	システム～ラック&機器	冷却水流入温度	<ul style="list-style-type: none"> ・機器からの入熱量保証 ⇒前提条件保証の下、システムによる冷却水温度制御の実現。	<ul style="list-style-type: none"> ・機器設計(排熱量)の前提条件を保証。 ⇒適切な機器温度制御の実現。
		冷却水流出温度		
		冷却水供給流量		
ECLSS	システム～ラック&機器	ラック表面の赤外放射率	<ul style="list-style-type: none"> ・キャビン空気への熱負荷条件の保証 ⇒前提条件保証の下、システムによるキャビン空気温度制御の実現。	<ul style="list-style-type: none"> ・ラック機器作動環境の前提条件を保証。 ⇒適切な機器温度制御の実現。
		ラック表面とキャビン空気間の熱伝達係数		
		キャビン空気温度		
		露点規定		

次に、I/F 条件の管理について述べる。第 2 表のように大別して 3 つに分類される。一つめは、各種審査会等で、設定された I/F 規

定が設計に取り込まれていることの確認、二つめは、熱解析結果が整合していることの確認、そして三つめは試験検証結果が整合して

いることの確認作業である。これらの管理活動により、I/F 条件の適切な反映、並びに、全体として矛盾なく成立していることの確認を行っている。

尚、設計時や試験時に I/F 規定を逸脱する

懸念がある場合には、運用を考慮したシステムレベル成立性検討を行い、問題ない場合には関連する全ての管理文書の改訂・周知を行い、成立しない場合は設計変更を行うことになる。

第 2 表 I/F 条件の管理

管理方法	内容
① I/F条件遵守の確認	・各種審査会等での設計仕様書内容の評価と確認。
② I/F条件での全体熱解析と個別熱解析の結果の整合性確認	・各種審査会等で、システム側解析結果と機器側解析結果との整合性を確認。
③ I/F条件での全体熱試験と個別熱試験の結果の整合性確認	・各種審査会等で、システム側試験結果と機器側試験結果との整合性を確認。

3. 熱的干渉の設計への取込みと検証方法

「きぼう」は、第 1 図にあるように、複雑な構造を有する ISS 本体と「きぼう」との間の陰の影響を含めた熱輻射の授受、加えて軌道上での日陰・日照と太陽光入射角の変化の影響を考慮せねばならない。

更に、開発上の実務的問題として、ISS 本体と「きぼう」各構成要素の開発担当社と開発時期の差異による熱解析及び検証の困難さの克服と、船内実験室内部での PTCS、ECLSS、ATCS というシステム間での協調的熱制御設計の実現化が挙げられる。ここでは、とりわけ代表的な PTCS を主に説明する。

第 3 図に「きぼう」で採用した、PTCS の設計と検証のコンセプトを示す。同図上部に、従来、日本の宇宙開発で用いてきた典型的な開発プロセスを示している。両者の違いは以下の背景によるものである。

a) ISS (全長 108m×74m) は巨大構造物であり、かつ、軌道上長期運用フェーズによってその形態が変わるため、最終形態での地上試験は不可能である。

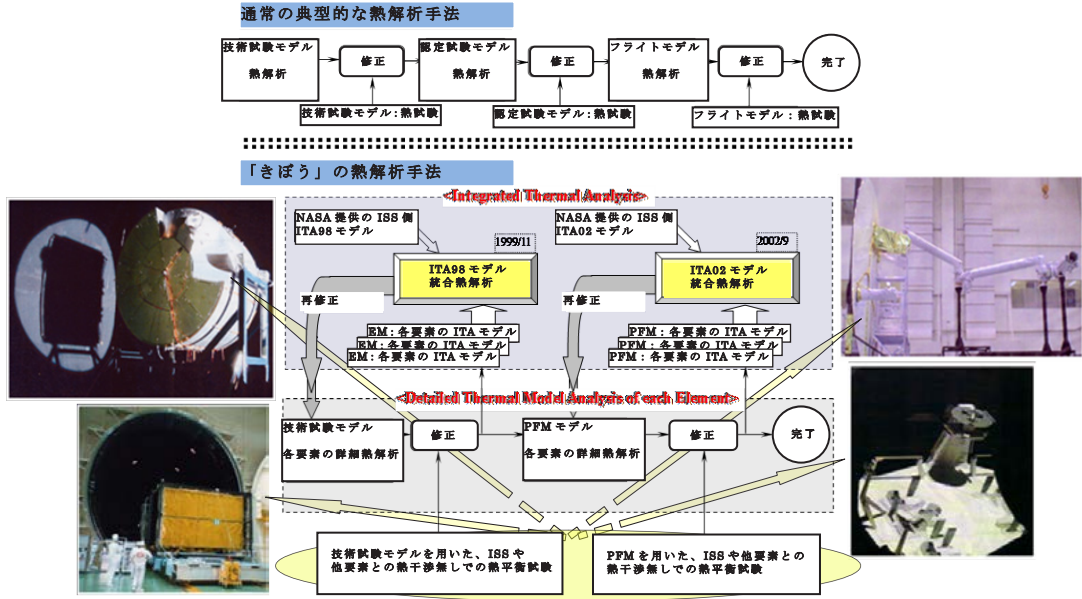
b) ISS 最大の「きぼう」は、第 1 図右の 5 主要要素を結合した地上熱試験は JAXA 所有の我国最大の φ13m スペースチャンバでも行えず、また、軌道上で実験機器搭載形態が運用によって変わる。

上述 a) 及び b) を踏まえ、熱干渉問題に関しては第 3 図が示す下記 1) ～3) のような設計への取込みと検証方法を構築し、これを実行している。即ち、1) は軌道上の各種形態への対応を、2) は解析精度の向上を、3) は解析精度の確保と実機製造の確認を行うものである。

1) ISS 全体と「きぼう」の全体熱検証は解析検証を採用する。

2) 全体熱検証は、ISS 側構築の簡易全体熱解析モデル (ITA モデル: Integrated Thermal Analysis) と各国開発の自国モジュール詳細熱解析モデル (DTA モデル: Detailed Thermal Analysis) の 2 種併用熱解析を、技術試験モデル (EM) フェーズとフライトモデル (FM) フェーズで実施する。

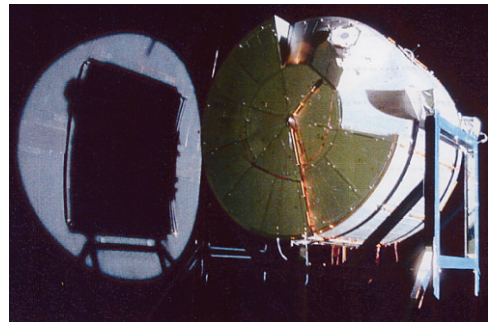
3) 「きぼう」各要素はスペースチャンバ (φ13m) を用いての熱平衡試験を実施 (PM 除く) する。



第 3 図 「きぼう」 PTCS 開発コンセプト

4. 設計及び検証におけるいくつかの問題の紹介

本項では、前項で述べた長期滞在型有人大型宇宙構造物に特有の問題である、「統合試験の限界に対する検証コンセプトの確立」に代表される設計上の問題の他に生じた種々の問題の中から特徴的なもの 4 つを選び紹介する。

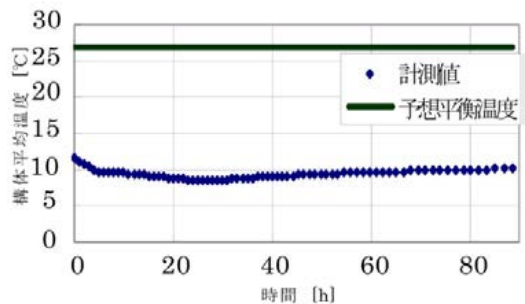


第 4 図 ELM-PS 熱平衡試験

4.1 ELM-PS 熱平衡試験での温度低下問題

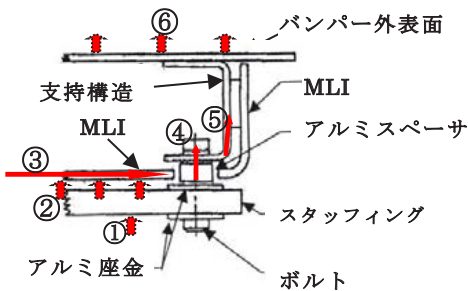
ELM-PS の熱平衡試験（第 4 図）において構体温度が予測値より大きく下回るとい問題が発生した（第 5 図）。

原因は、デブリ衝突から構体を守るため PM や ELM-PS の構体外側に設置されているバンパーと呼ばれる有人特有の防御構造からの想定外の熱漏洩であった（第 6 図）。

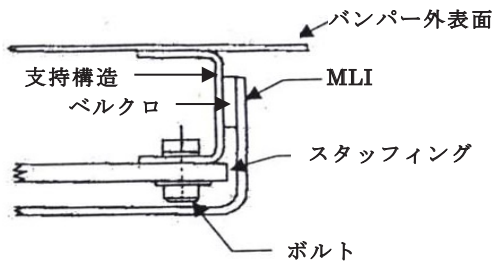


第 5 図 熱平衡試験結果の一例

MLI を貫通するスタッフィング取付ボルトからの熱漏洩量は、MLI (平均厚約 10 μm の薄層 38 層) とボルトの断面積が小さいことから試験前解析では無視できるという評価結果であった。問題発生後、面積の大きい MLI (1m×1m) が集熱板の働き (図中の矢印②) をし、熱エネルギーが MLI 薄層面内を移動する (矢印③) ことでボルトから漏洩する (矢印④) という熱漏洩パス (矢印①～⑥) を考慮した解析を行ったところ、3 次元的熱漏洩解析では当該量は無視できないという知見を得た。処置としては、第 7 図のような断熱化改善の設計変更を行い、バンパー熱試験において断熱性能の改善を確認した。



第 6 図 バンパー構造 (改善前)

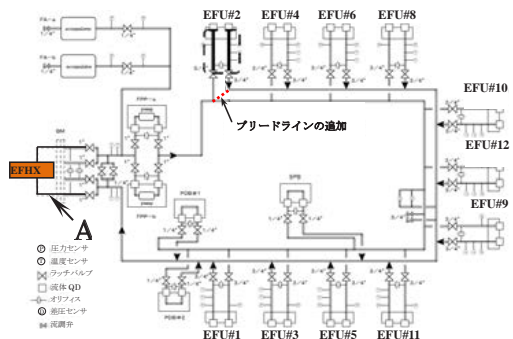


第 7 図 バンパー構造 (改善後)

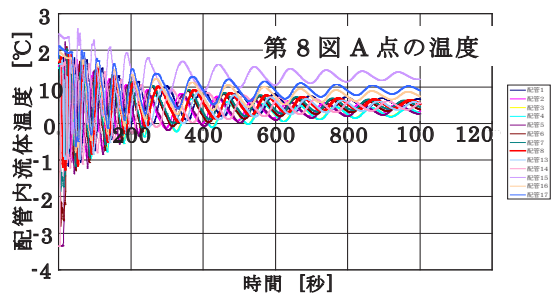
4.2 EF 軌道上低温流体流入問題

「きぼう」は軌道上で長期にわたり各種実験を行うため、実験形態も各運用フェーズで異なる。船外実験プラットフォーム (EF) には 11 か所の実験ペイロード (P/L) 用設置場所 (第 8 図の EFU) があり、実験装置搭載状態では当該部に流体が流れているが、未搭載状態ではバルブで遮断される。

そのため、止水域となった冷媒の温度が低下し、新たに打上げられた P/L が搭載されると、低温化した流体が流れ始め、これが EF と PM との間にある曝露部熱交換器 (EFHX) に流入すると、熱応力による EFHX の破壊の危険性があること、並びに、他の P/L への冷媒供給温度が長時間に亘り変動する (低温流体が「トコロテン」状のまま流れ続ける : 第 9 図の各配管内流体温度) ことが、運用検討解析の過程で判明した。

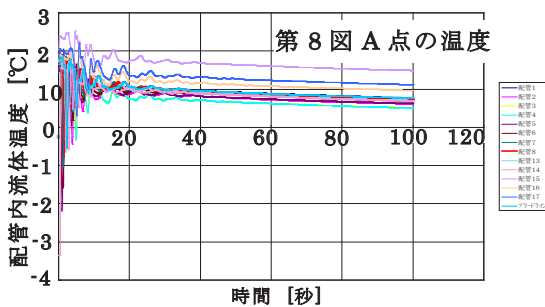


第 8 図 EF/ATCS 系統概念図と EFHX



第 9 図 EF 製造当初の流体温度予測

この解析結果を受け、第 8 図に示す位置 (EFU#2 の基部) に外径約 3mm の微小径配管 (ブリードライン) を追加した解析を実施し、第 10 図のように改善されることが分かったため、ブリードラインを追加する機体改修を行った。



第 10 図 ブリードライン追加後の
流体温度予測

4.3 冷却水系の腐食・腐敗、析出問題

EF の ATCS では凍結防止と安全性の観点からフロリナート (FC72) を使用しているが、PM では搭乗員への安全性を更に考慮し、耐腐食・耐腐敗性を付与した調質冷却水が、ISS 共通船内用冷媒として用いられている。「きぼう」打上前の 2000 年、既に運用が開始されていた軌道上の ISS において、以下の不具合が生じた。

(a) 混入気泡除去装置やフィルタに緑色の付着物が生じ、圧損が想定以上に増大した。

(b) 調質冷却水の腐敗が激しい。

原因をそれぞれ以下に記す。

(a) 軌道上 ISS のキャビン空気中の二酸化炭素は地上の約 40 倍の濃度 (許容値内) であり、ATCS のテフロンホース表面や混入気泡除去装置の気液分離膜から、ATCS 配管内の調質冷却水へ二酸化炭素が透過し、pH 値 9.0~10.0 に調質された冷却水の pH 値を約

8.4 まで低下させた。pH 値低下で熱交換器ロウ材からニッケルが溶出 (腐食) し、冷却水添加物であるリン酸イオンと結合、難溶性リン酸ニッケルとなって浮遊・移動し目詰まりを生じさせた。

(b) 調質冷却水の ATCS 充填の際、殺菌用添加剤 (イオン化傾向小の銀イオン) が析出、殺菌能力が消失した。

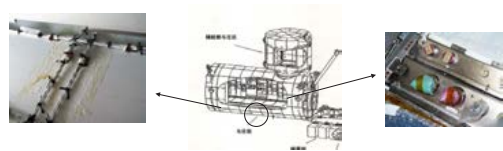
これに対し、以下のような対応をとり問題を解決した。

a) 腐敗に関しては銀イオンの代わりに、析出しにくい O-フタルアルデヒドを殺菌剤として使用する。

b) 腐食に関しては、pH 値低下の原因である二酸化炭素の透過を防止するため、炭酸塩及び重炭酸塩を新たに添加剤として使用し、また、析出するニッケル塩を生じさせないため、従来のリン酸塩は除外する。

4.4 地上試験での冷却水漏洩問題

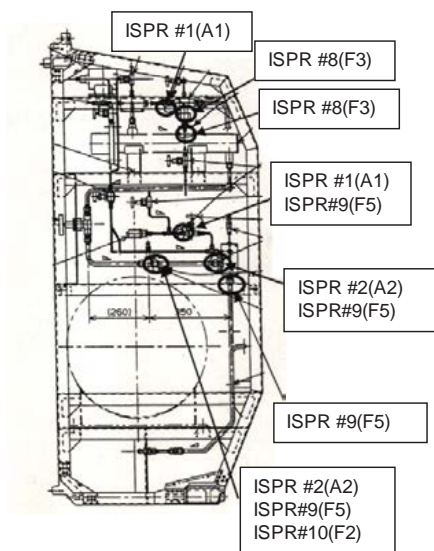
船内実験室の地上試験において、ATCS で使用している調質冷却水が船内に漏洩するという不具合が発生した (第 11 図)。



第 11 図 船内実験室 ATCS の
調質冷却水漏洩

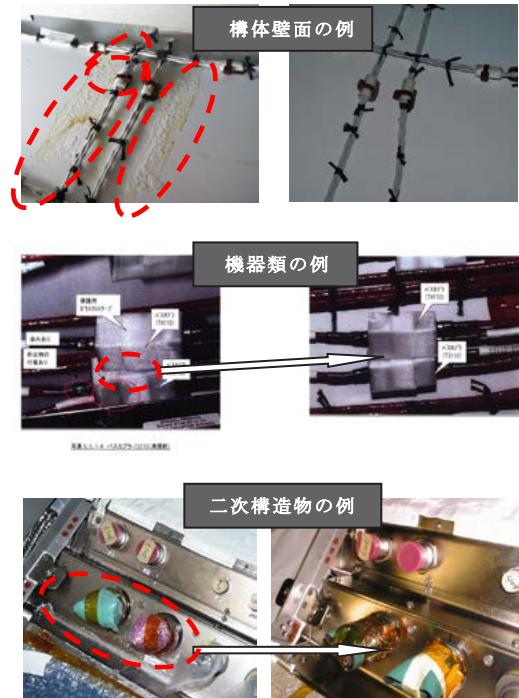
漏洩箇所は、船内実験室 ATCS の流体循環試験で使用した 3 台のダミーラック (実験ラックの圧損等を模擬したもの) の内部配管接合部であった (第 12 図)。微小重力である軌道上では、搭乗員がラックを船内実験室に搭載する際、ラックには荷重変形がかからないよう設計されており、かつ、フライト品

のラックは変形に強い構造となっている。しかし、ダミーラックは地上試験用治具（模擬品）であるため、構造簡略化の観点から配管接合部を単純な構造（フィッティング）としており、重力を受ける地上で船内実験室にこれを搭載する際、ダミーラック設計時に想定していなかった荷重変形が生じたことから、フィッティング部に内部隙間が生じたことが漏洩の原因であった。



第 12 図 ダミーラック漏洩箇所

処置としては、漏洩に曝された箇所の温水洗浄による調質冷却水残渣物の除去や部品等の交換を行う（第 13 図）と共に、交換できないものは、研究室レベルの腐食加速度試験により問題を生じないことを確認するなどし、対策の確実化を行った。



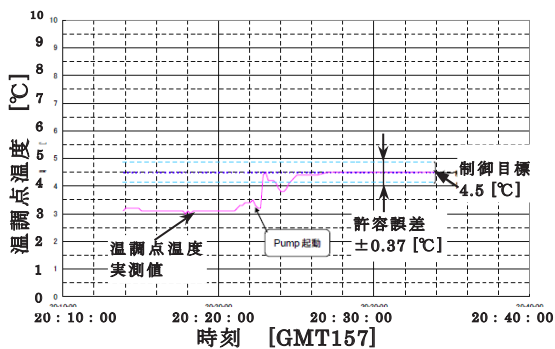
第 13 図 漏洩箇所への対応
(左：漏洩時、右：処置後)

5. 軌道上運用状況

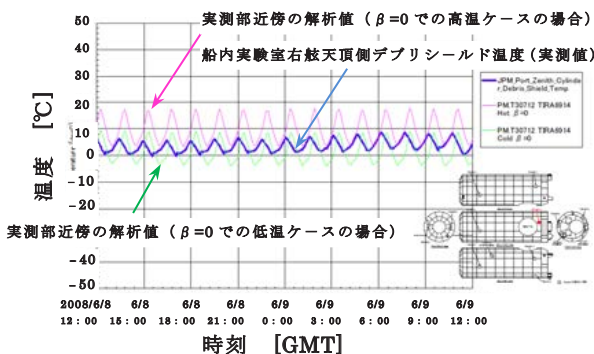
5.1 温度制御状況

2008 年 5 月の船内実験室の打上げに際し実施された軌道上チェックアウトにおいて、能動熱制御系では、流量配分特性、温調性能特性、冷媒リーク特性、フィルタ特性、能動熱制御系起動後の各機器の温度について、正常であることを確認した。その一例として、第 14 図に LTL 温調点温度制御の状況を示す。また、受動熱制御系としては、ヒータ消費電力、モジュール温度（第 15 図）、機器温度に関する評価を実施し、これらが正常であることを確認した。尚、一部の水冷機器温度に関し、機器温度は正常であるものの、予測値が低温側になっていることが判明したため、これを修正することにした。特に、第 15 図

が示すように、4.1項で述べた熱平衡試験での温度低下問題に対するバンパー処置が適切であり、軌道上でも有効に機能していることが分かる。更に、同図には解析との比較も示されているが、ISS 本体や地球との複雑な熱干渉を受けていること、更には、船内実験室が非常に複雑な熱的構造を有しているにも拘わらず、解析予測温度が誤差範囲内で船外温度を推定できていることが分かる。



第 14 図 LTL 温調点温度 (2WCL 遷移時)



第 15 図 船外温度の一例

5.2 MTL/LTL ジャンパ内のエア混入

2008年6月、「きぼう」取り付けミッションとして重要な1Jミッション中に発生した

事象として、ジャンパ内にエアが混入する例があったので紹介する。

ノード2-「きぼう」間の各ケーブル・ジャンパ接続を実施するクルータスクが初期起動時に行われたが、クルーがノード2バルクヘッド QD (IFHX (アンモニアループ熱交換器) 側と MTL (中温冷却水ループ) リターンジャンパ QD の接続を行った際、ノード2 LTL アキュムレータ体積が 190ml 低下したことが確認された (第 16 図)。

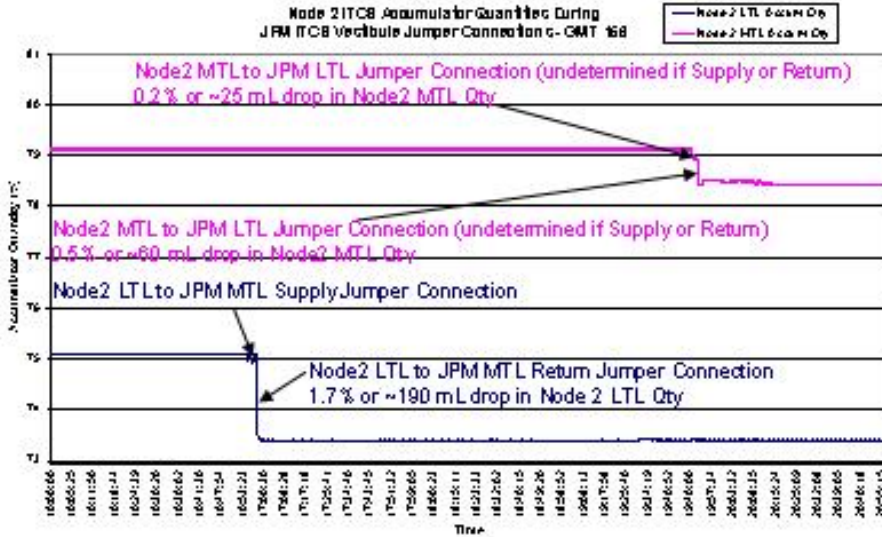
MTL リターンジャンパの容積は約 295ml (後に約 400ml と訂正された) であり、ジャンパへの気泡混入、或いはジャンパが Dry (冷却水が適切に充填されていない状態) であった可能性が指摘され、最大で 400ml@1atm の気泡がきぼうと圧能動系熱制御 (ATCS) ループに混入したことが疑われた。

なお、LTL ジャンパの接続時にも、同様の Node 2 MTL アキュムレータ体積の低下が確認された。体積低下量は、約 25ml 及び約 60ml (ただしサプライとリターンの区別はつかない) であった。

きぼう B 系起動遅延時の 1J ミッション全体へのインパクトを考慮し、MTL 起動の対応を検討・実施した。MTL リターンジャンパからの気泡は、ノード2熱交換器～きぼうシステム MTL 配管を経て分岐しながら、1WCL 時には MTL ガストラップ、ポンプに到達すると考えられるため、ガストラップに一度に流入する気泡量を低減できると推定できることから、ガストラップで気泡は除去できると判断した。さらにポンプ回転数を増加することにより、ポンプ流体軸受での気泡滞留時間を短くすることにより、ポンプタッチダウンのリスクは十分に軽減できると判断された。この判断に基づき、JPM B 系起動を継続し、MTL 起動を行ったところ、期

待されるアキュムレータ体積低下が確認されたことから、気泡はガストラップにより除

去されたことが確認された。



第 16 図 ジャンパ接続時のアキュムレータ体積変動

5.3 MTL 温調パラメータ最適化

運用開始より確認されていた特性として、きぼう与圧部 ATCS MTL 温調温度の持続変動 (*) に関し、制御性改善のための MTL 温調パラメータの変更を実施した。

(*) 変動周期：160～240[sec.]、変動幅：±0.2～±0.3℃程度。変動幅は設計許容範囲内 (17.2℃±0.37℃)。

本事象は、ノード2側熱交換器での交換特性が、地上試験装置と軌道上実機では若干異なるため、地上試験では発現せず、軌道上特性として確認されたものと推測される。

上記持続変動解消により、温調弁動作寿命へのリスク低減(常に微小動作を繰り返すことがバルブ作動寿命に対しマイナス要因と考えられ、定常時動作を極力抑えることが望ましい)及び、MTL供給温度の安定化に

よるペイロードへのサービス品質向上が期待されたため、試験データ取得を2010年5月に実施した。温調パラメータはMTL/LTL共に各々12種類あるが、今回の改善対象は以下の2件を候補とした。

- 1) TPB (温度偏差比例領域)
⇒現状より大きな値とする (=比例ゲインを下げる)
- 2) KD (微分ゲイン)
⇒現状より大きな値とする (=微分ゲインを上げる)

データ取得は以下のシーケンスにて実施した。(時刻は全てGMT表示)

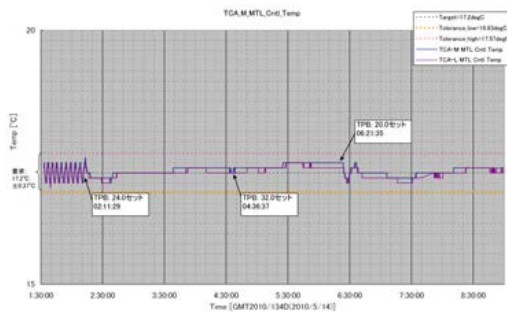
- i) 2010/5/14 02 : 11 : 29 TPB 16.0℃ ⇒ 24.0℃
- ii) 2010/5/14 04 : 36 : 37 TPB 24.0℃ ⇒ 32.0℃

iii) 2010/5/14 06:21:35 TPB

24.0°C⇒20.0°C

上記変更は、いずれも制御における比例ゲインのみを下げるものである。i) の実施直後から、従来から見られたMTL温調温度振動(*)は見られなくなり、温調温度は17.2°C±0.1°Cの幅でほぼ安定した。さらにii)を実施したところ、温調温度が目標温度=17.2°Cに対しやや中心値が上側にずれた17.4°Cで安定する傾向が認められたため、比例ゲインを下げ過ぎたと判断された。そこで再び若干ゲインを上げるためiii)にて応答を確認した。その結果、iii)つまりTPB=20.0degCにて良好な結果が確認されたことから、その後のパラメータ調整(TPBのこれ以上の調整、及び比例ゲインKD変更)は実施せず、データ取得は終了した(第17図)。

2010/6/21にTCA-M/Lのそれぞれに対しTPB=20.0degCに設定し、それ以降MTL温調温度は安定動作を継続している。



第 17 図 MTL 温調パラメータ最適化に向けたデータ取得

5.4 LTL 冷却水ポンプ故障

軌道上運用における熱制御系の大きな不具合として、過電流検知による船内実験室低温冷却水系のポンプ停止故障が挙げられる。2012年3月26日、LTLポンプ上流電源が

過電流検知によりトリップし、LTL 内冷媒循環が停止する事象が発生した。この事象は、1回目のポンプ停止が起こった後、検討・評価を実施し、JAXA 側は結露等を原因と考えたが、NASA 側は宇宙線由来のシングルイベントが原因であると考えた。協議の結果、ポンプの再立上を実施したが、一旦は起動したものの、再度、過電流トリップによりポンプが停止したことから、シングルイベントによるものでないとの結論が下された。その後、追加のトラブルシュート(抵抗計測)の結果、トリップ原因は、ポンプインバータ内の絶縁不良と特定された。補用品のポンプが HTV3 で 2012/7/21 に打ち上げられ、ISS に運ばれた。この間、ATCS は B1WCL モードで MTL ポンプのみで冷却継続しており、更なる異常により MTL ポンプが停止すると船内実験室は無冷却運転となるため、最低限のシステム維持を行いつつ、HTV3 到着を受け入れられるミニマム・コンフィギュレーション設定の検討・準備が進められた。HTV 到着後、星出宇宙飛行士により 2012/8/3 に LTL ポンプ交換が実施された。その際、故障原因の可能性としてコネクタ周辺の結露による影響が考えられたため、その防止対策としてシートでコネクタ全体を覆い、内部にデシカントを挿入し、さらに ECLSS/TCS1 ラック Closeout Panel 裏側にもデシカントを貼付した。ポンプ交換後 LTL ポンプを起動し、2WCL モードへ遷移して以降はトリップの再発もなく、正常動作を継続している。故障したポンプは補用品との交換後、SpaceX 社の Dragon 1 号機で回収し、現在、故障原因を地上で調査中である。

6. まとめ

日本初の有人宇宙長期滞在対応モジュール「きぼう」の開発着手以来、有人宇宙技術特有の種々の問題に取り組み、熱制御の分野において以下の成果を得た。

(1) 地上試験が困難な、複雑で大型の宇宙構造物に対する熱的検証手法を開発し、これを実現した。

(2) 軌道上での複雑な熱干渉のもと、人間が宇宙服無しで活動するために必要かつ快適な温度環境を与えるための統合的熱制御技術及び管理手法を確立した。

(3) 有人対応宇宙構造物の 3 次元熱解析に関する知見を得ると共に、断熱性の高いデブリシールドを開発した。

(4) 運用形態変更を伴う長期ミッションに関する流体系統への対応手法を確立した。

(5) 有人特有の調質冷却水を用いる場合の、耐腐食・耐腐敗制御技術に関する知見を得た。