

第 14 章 「きぼう」 与圧系システムの開発成果

～与圧システムの熱・流体系

1. 序論

有人宇宙開発における熱制御技術、とりわけ長期間にわたる滞在・実験運用を目的とした宇宙ステーションの開発においては、宇宙環境下での温度維持は勿論のこと、長期に渡り安全かつ安定した運用状態を維持するためのシステム／機器設計、運用コンフィギュレーションの変化への対応性など、求められる要求は非常に高度かつ複雑なものであり、重要なキー技術のひとつである。

本稿では、我が国初、国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）最大の有人宇宙長期滞在对応モジュールである「きぼう」与圧系熱制御システムの構成及び開発成果・運用実績を述べるとともに、日本独自の設計思想、構成機器について紹介する。

2. 与圧系熱制御システムの構成

「きぼう」与圧系は、船内実験室（直径 4.4m、長さ 11m）及び船内保管室（同 4.4m、4m）から成り、ISS の船内キャビン空間（クルーの船内活動エリア）の一部を構成する。熱制御システムに求められる機能は、船内クルー活動のためのキャビン空気温度維持（18.3℃～26.7℃）、結露防止・クルー接触温度からの与圧隔壁（構造殻）面を含む船内機器表面温度コントロール（15.6℃～45℃）、

さらには内部発熱する電子機器の排熱・機器温度維持である。これら機能を実現するため、「きぼう」熱制御システムは冷却水循環系統、ヒータ、多層断熱材（MLI：Multi-Layer Insulation）から構成されている。

熱制御システムは、冷却水の強制循環による熱制御を行う系統と、MLI、ヒータによる断熱・給熱を行う系統に大別され、前者を能動熱制御系（ATCS：Active Thermal Control System）、後者を受動熱制御系（PTCS：Passive Thermal Control System）と称する。以下にそれぞれの系統について紹介する。

2.1 ATCS

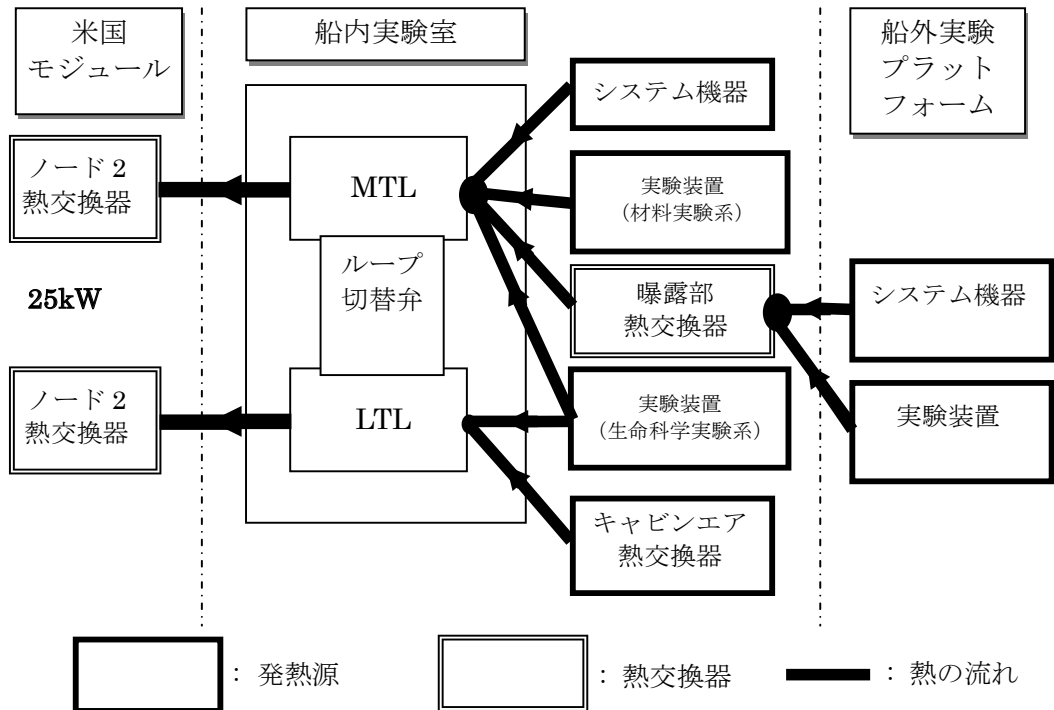
ATCS は、「きぼう」船内実験室及び船外実験プラットフォームに適用されており、搭載電子機器及びキャビンエア熱負荷の冷却のため、冷媒を循環させることで熱収集・移送を行うシステムである。船内保管室は ATCS を有しない。（キャビンエアを介した間接的な排熱方式を採っている。）

冷媒により収集した熱負荷は、「きぼう」に隣接する米国モジュール（ノード 2）における熱交換器で最終排熱され、ここでは最大で 25kW の排熱が許容されている（第 1 図参照）。

なお、ISS からの最終排熱は ISS 側に設置されたラジエータ（深宇宙への放射）により行われる。船内実験室、船外実験プラットフォームは独立した冷媒循環ループを有し、

冷媒はそれぞれ調質水、フロリナート（FC72）である。船外実験プラットフォームの熱負荷は、曝露部熱交換器（EFHX：Exposed

Facility Heat Exchanger）を介して搭乗員が活動する船内実験室に移送される。本稿では、船内実験室の ATCS を中心に紹介する。



第1図 ATCS による排熱の流れ

以下に船内実験室 ATCS の主要機能を示す。

(1) 熱交換機能

冷却対象（システム機器、実験装置、キャビンエア、曝露部熱交換器他）に対し冷却水を配分し、収集した発生熱をノード2における熱交換器に移送・排熱する機能を有する。

(2) 冷却水温度制御機能

システム機器、実験装置等の被冷却機器を許容温度範囲に保つため、ATCS はこれらの機器への冷却水供給温度と流量を一定に制御する機能を有する。冷却水温度は熱制御系

装置（TCA：Thermal Control Assembly）によりフィードバック制御され、実験装置等の排熱量の変動に対する供給温度の安定化を実現している。

(3) 冷却水系統圧力制御機能

TCA 内のアキュムレータにより、冷却水系の系統圧力を 100psia（690kPa）以下に維持する機能を有する。

(4) 冷媒管理機能

冷媒管理機能として、冷媒補給機能、ガス除去機能、微粒子除去機能を有する。

(5) ループ切換機能

「きぼう」管制システムの指示に基づき、冷却水ループの切換を行い、故障時または保全時に、片系電力の供給のみでシステムを維持する機能を有する。

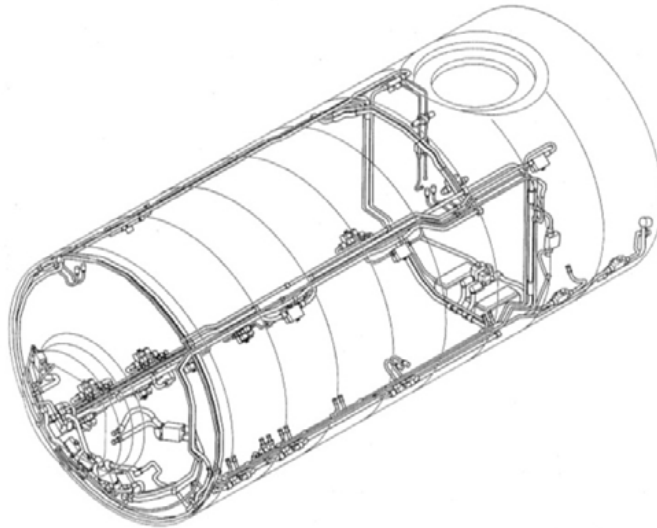
ATCS を構成する主要機器は第 1 表の通りであり、システム構成は第 2 図及び第 3 図に示す通りである。

ATCS は、被冷却対象の必要とする温度要求範囲に合わせ、中温冷却水系統（MTL：Moderate Temperature Loop）と低温冷却水系統（LTL：Low Temperature Loop）の

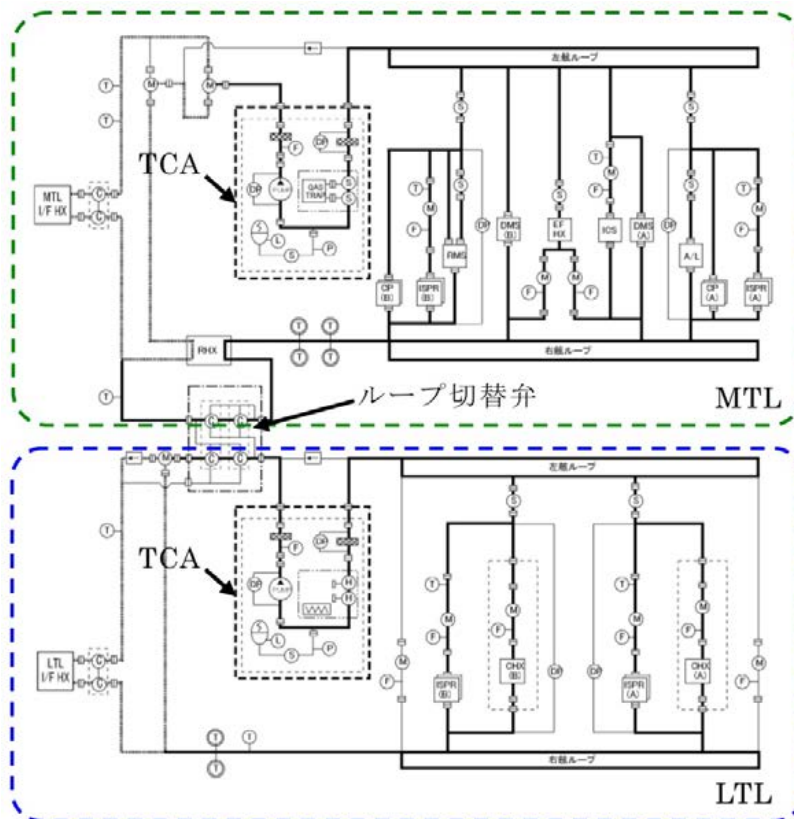
二つの循環ループから構成される。MTL/LTL の供給冷却水温度制御範囲は、MTL：16.1℃～23℃、LTL：3.3℃～10℃である。MTL 及び LTL はそれぞれが冷媒の循環機能（ポンプ）を有し、片系故障時には MTL/LTL の 2 ループ構成（2WCL：2 Water Cooling Loop）から、一方の系統のみで全体の冷却水循環を行う 1 ループ構成（1WCL：1 Water Cooling Loop）への切り替えが可能な冗長システムとなっている。

第 1 表 ATCS 構成品

名 称	概 要	搭載台数
熱制御系装置 (TCA)	冷却水循環ポンプ、アキュムレータ、フィルタ、ガストラップ及び各種センサから構成され、ATCS の主要機能を集約した装置である。	2 台
流量調節弁／ 流量センサ	ボール弁を有し、流体抵抗を変更することで実験装置／その他分岐ラインへの冷却水供給流量を調節する。また、冷却水流量／温度計測機能を有する。	23 台
ループ切替弁	8 ポート弁 2 台が組み合わされ、2WCL／1WCL の切替を行う機能を有する。	1 台（内部冗長あり）
系統遮断弁	ボール弁開閉により冷却水流路の遮断を行う機能を有する。	7 台
系統差圧センサ ／温度センサ	系統差圧センサ：中温冷却水系統／低温冷却水系統の差圧をモニタし、冷却水流量の配分状態を監視する。 温度センサ：系統各部の冷却水温度をモニタする。	系統差圧センサ：4 台 温度センサ：11 台



第 2 図 船内実験室 ATCS 配管構成



第 3 図 船内実験室 ATCS 系統

2.2 PTCS

船内実験室／船内保管室の PTCS は、搭乗員等からの内部発熱と断熱材による温度維持、並びに発熱不足時はヒータ加熱による温度維持を行うシステムである。以下に PTCS の主要機能を示す。

(1) 凍結・結露防止機能

断熱（不足時はヒータ加熱）により、構造殻内温度をキャビンエアの露点以上に保ち結露を防止する。また、モジュール内の水（ATCS 系の冷却水、実験ラック内の水など）の凍結を防止する。

(2) 機器許容温度維持機能

断熱（不足時はヒータ加熱）により、船外（与圧隔壁外）機器の温度低下を防止し、許容温度以内に維持する。

(3) クルー接触許容温度維持機能

船体の構体外表面温度を船外活動（EVA : Extravehicular Activity）におけるクルーの接触許容温度要求内に維持する。また、構造殻内部温度を船内活動（IVA : Intravehicular Activity）における接触許容温度要求内に維持する。

PTCS を構成する主要機器を第 2 表に示す。また、船内実験室／船内保管室のシステム構成をそれぞれ第 4 図、第 5 図に示す

第 2 表 PTCS 構成品

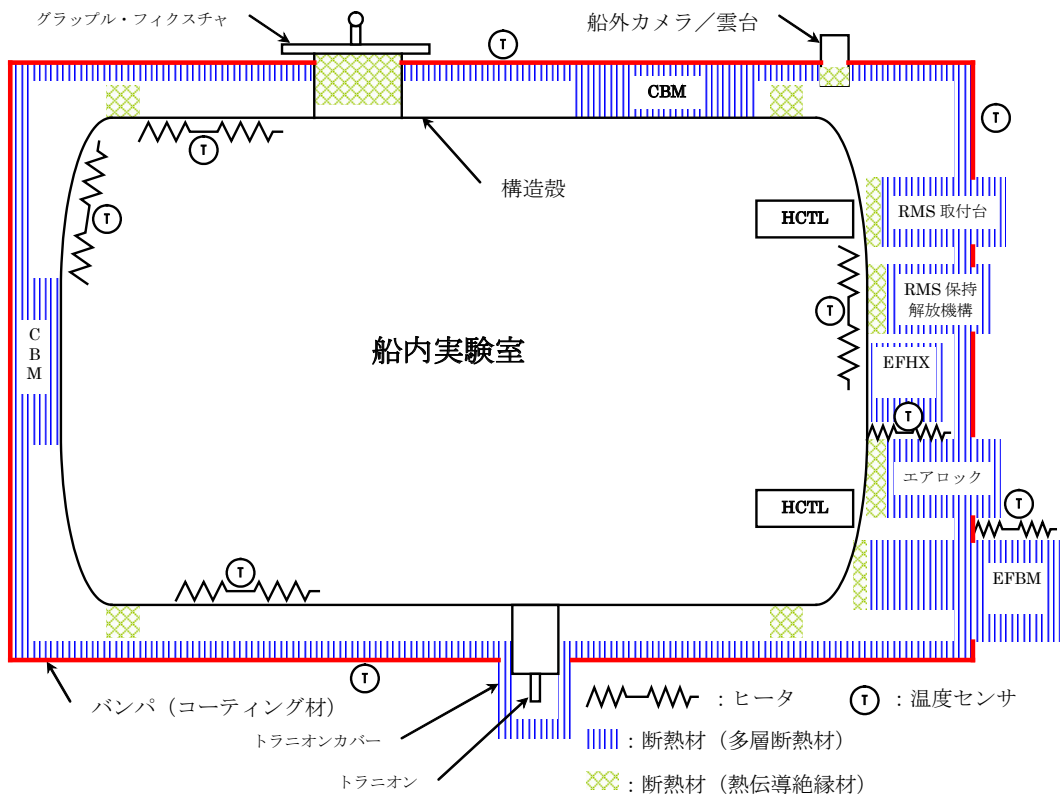
名 称	概 要	備 考
HCTL (ヒータコントローラ)	温度センサの信号を受けてヒータへの電力をコントロールする。	船内実験室：2 台 船内保管室：1 台
ヒータ	保温必要箇所を温める。HCTL より給電される系統と、PIB（電力供給の ON/OFF 制御装置）から直接給電されるものとの 2 種類ある。	船内実験室：346 枚 船内保管室：113 枚
温度センサ	HCTL に接続されるものと、DIU（データ送受信装置）に接続されるものがあり、HCTL 接続のものは、ヒータ制御用（構造殻及び機器温度モニタ）と構造殻温度のモニタ用の 2 種類ある。DIU 接続のものはモニタ用のみである。	—
MLI (多層断熱材)	バンパと構造の間に位置し、モジュールの放射断熱材として使用される。	モジュール構造のほぼ全面を覆う形で艤装
表面コーティング	バンパ表面を適切な表面光学特性である表面処理（化学被膜処理等）とすることにより、宇宙熱環境からのモジュールへの熱の授受を抑制する。	—

船内実験室の外部構造は、厚さ約 5mm のアルミ製グリッド構造殻 (Structure Shell) 及びその外側に、デブリ防御のための厚さ約 1mm のアルミの外壁 (バンパ) を有する。

構造全体・外部露出機器の温度レベルを適切な範囲とするために、バンパ・機器表面には特殊コーティングを施し適切な表面光学特性を持たせることで、バンパ及び機器温度の制御や、放射断熱性能を向上させている。

特殊な取付構造を採用した MLI は、モジュール外殻全体を覆う形でバンパと構造殻との間に艗装され、外部環境とモジュール構造殻を熱的に遮断し、構造殻を適切な温度範囲に維持する機能を有する。

ヒータは、構造殻及び機器 (特に船外露出機器) の低温側温度を許容温度以上に保温するためのものである。ヒータコントローラ (HCTL : Heater Controller) より給電される系統と、電力供給の ON/OFF 制御装置 (PIB : Power Interface Box) から直接給電されるものとの 2 種類がある。HCTL ヒータは構造殻全面と機器に設置され、冗長設計として 2 系統の電力供給により運用される。HCTL は、15 ゾーン (15ch.) に分割された構造殻の温度を個別に制御している。分散ヒータは、HCTL ヒータの補助として、構造殻にのみ設置され、ON/OFF コマンドにより制御する。

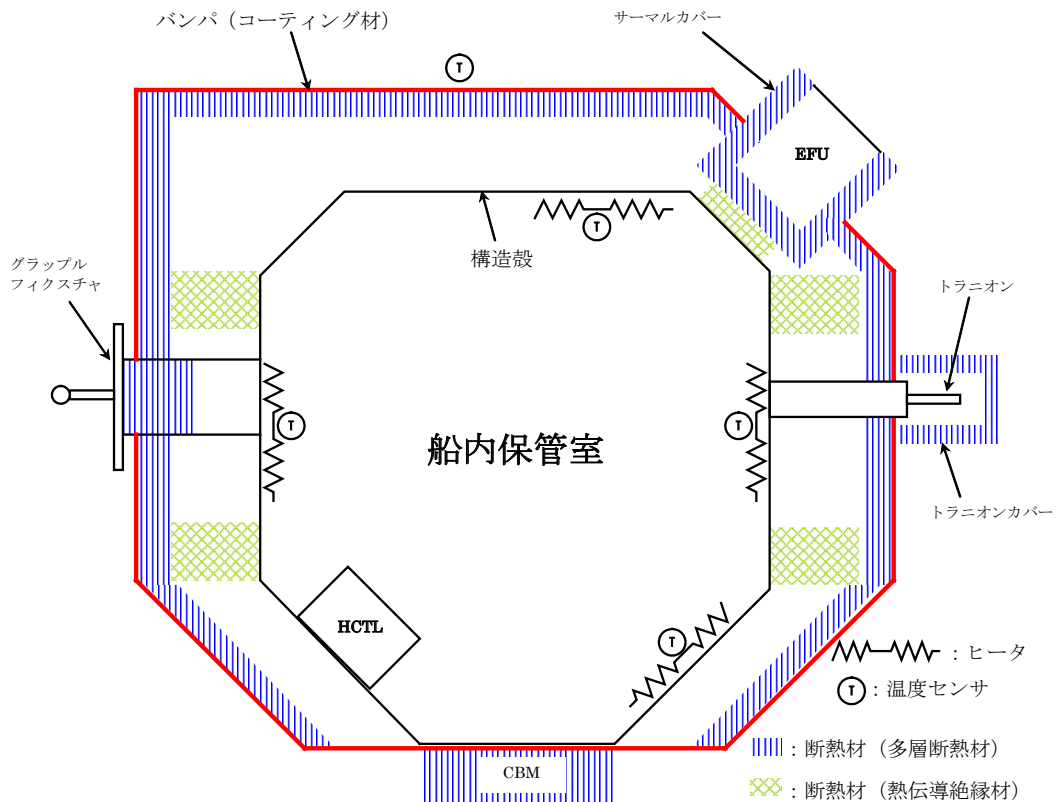


第 4 図 船内実験室 PTCS 構成

船内保管室は、外部構造へのコーティング、MLI の艀装は、船内実験室と同様である。ヒータの機能も船内実験室と同様であるが、船内保管室ヒータは HCTL に接続されるものの 1 種類のみである。

HCTL ヒータは構造殻全面と機器に設置

され、電力は一系統のみで運用されるが、故障により電力供給が不可能となった場合でも、電源ラインの切替により他系統からの電力供給をうけることが可能である。HCTL は、10 ゾーン（10ch.）に分割された構造殻の温度を個別に制御している。



第 5 図 船内保管室 PTCS 構成

3. 開発成果

「きぼう」熱制御系に関し、開発段階及び軌道上運用を通じて得られた知見・技術について、いくつかの事例を紹介する。

3.1 ATCS 関連の開発成果

(1) 冷却水管理

(a) 開発段階

「きぼう」冷却水システムは、配管総延長 220m、総容積は 200liter にもなり、このような複雑な流路構成を持つ大型冷却水システムの管理は国内初の経験であった。

「きぼう」打上前、すでに軌道上運用中であった他国の ISS モジュールでは、水質の劣化が原因の不適合(析出物によるフィルタの目詰まり、pH 低下による腐食の進行、微生物殺菌能力の低下)が生じていた。そのため、「きぼう」では 1999 年のモジュールへの水充填以降、打上までの約 9 年間に渡り、定期的な(約 6 ヶ月毎)水の入替え、水質検査を繰り返しその水質を維持してきた。

また、冷却水ループへのエア混入防止も重要な課題である。系統中に存在する気泡は、熱交換器における滞留による熱交換性能の低下、冷却水循環ポンプへの気泡噛み込みによるポンプ損傷を招くリスクがある。

軌道上初期運用時、とりわけ打上後の初期起動時においては重要な問題であり、いかに地上での打上準備期間においてエアを取り除き、混入させないかが開発上の課題となった。ポンプへの許容エア混入量はわずかに 50cc/台であり、配管総容積の 0.05%以下(水充填率 99.95%以上)に残留エア量を低減することを目標とした。

「きぼう」は、その大きさから、一旦エアが混入すると(特に地上では重力の影響もあり)循環によってもエア除去は容易ではない。

モジュール全体を常に大気圧に対し正圧となるよう加圧し、エアの混入を防止するとともに、打上直前の準備作業では地上支援装置(GSE: Ground Support Equipment)としてエア除去装置(Vacuum Pump による溶存気体の除去装置)を機体に接続しエア除去を行った。

第 6 図に船内実験室の打上準備作業(NASA 射場作業)でのエア混入量の推移を示す。長期に渡るエア混入管理/エア除去作業の結果、最終的には、系統内のエア混入量を 100cc 以下まで低減することができた。

(100cc は 2 台のポンプの合計許容量。第 6 図中の 2007 年 8 月の最終データ 370ml がエア混入量 100cc 以下に対応する。)

これら 9 年に及んだ地上での水質・エア混入管理作業により、船内実験室の初期起動及びその後の軌道上運用において、水質/エア混入に起因する不適合は発生していない。

(b) 軌道上運用

運用開始以降、水質管理のため、冷却水の一部を定期サンプリングすることによる冷却水水質のトレンドモニタや、実機テレメトリによる冷却水量のトレンドモニタを行っている。

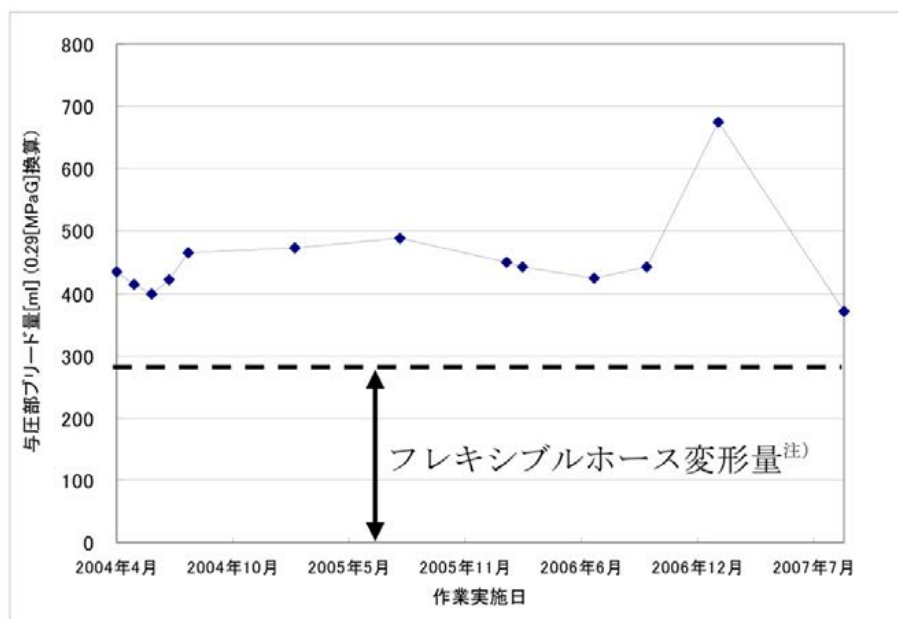
これらの結果、長期間の運用における水質の変化傾向や、系統からの冷却水の定常的な減少レートに関し、いくつかの知見が得られている。

第 7 図及び第 8 図に、軌道上冷却水のサンプル分析結果に基づく水質トレンドを示す。特徴的な傾向として、長期間の運用による冷却水の腐敗を防止する目的で添加されている防腐剤(オルトフタル酸アルデヒド)の濃度が、時間の経過とともに減少し、徐々にその効果が下がってくることが判った。このため、2~3 年に 1 回程度の定期的な防腐剤の軌道上での追加を実施する必要性が生じ

ている。また、船内の二酸化炭素の影響と考えられているが、pH 値が徐々に下がる傾向があることが判っている。pH 値の低下は、金属配管・熱交換器フィンなどの腐食を進行させる環境因子となるため、従来より低下抑制対策（pH 緩衝材の添加）が取られて来たが、なお低下を完全に抑えることはできていない。

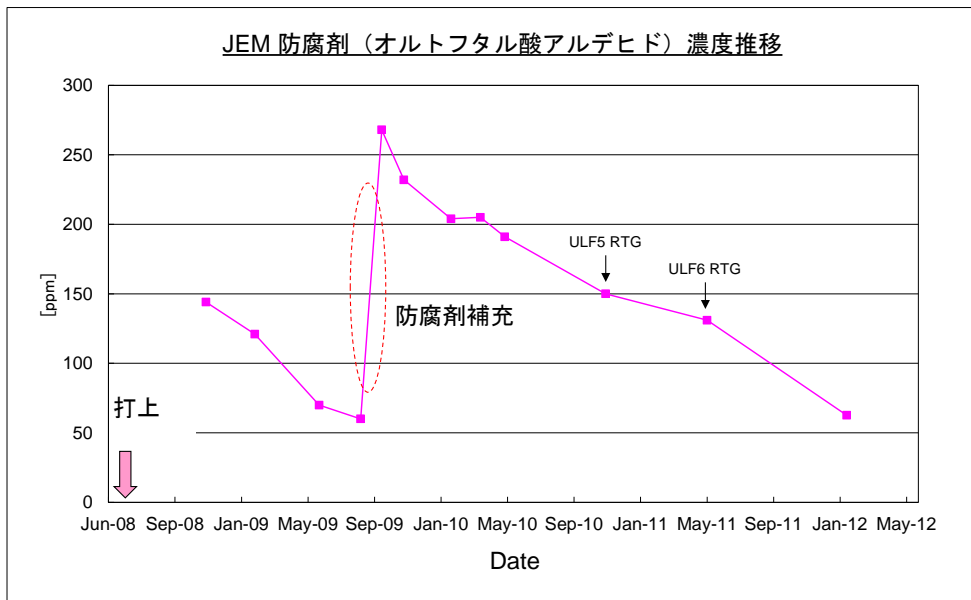
また、冷却水の量は、第 9 図に示す様に、

特に冷却水の抜き取りや、リークなどの異常がなくとも、定常運用状態で一定の割合の減少がある。これらは、系統中の配管継手部や、テフロンチューブなどからのごく緩やかなリークによるものと考えられるが、仕様値・解析値のみではなく、実運用による実力値が得られたことは、今後の宇宙機のシステム設計にとって大変有意義である。

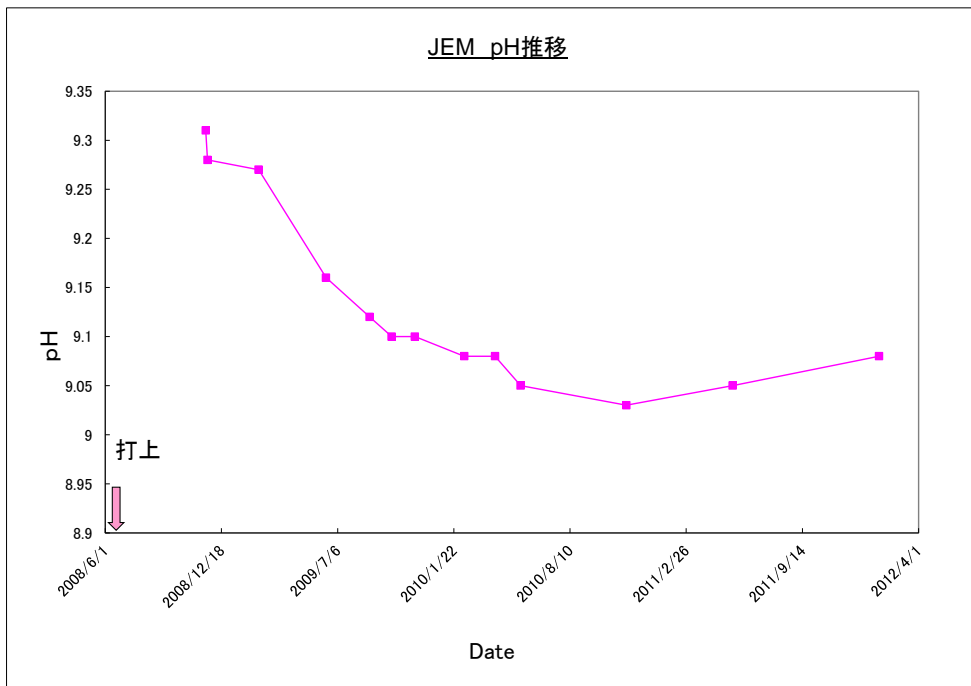


第 6 図 船内実験室エア混入量推移

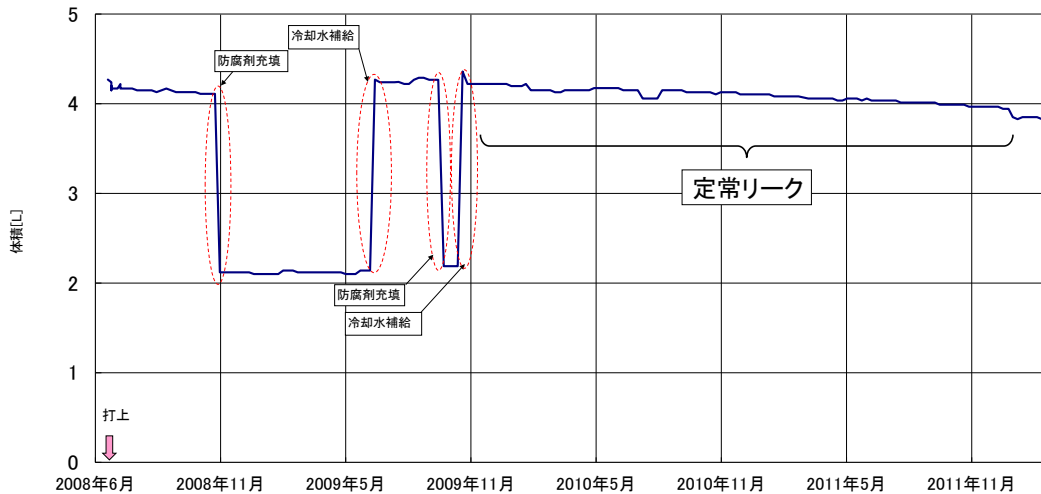
注) 系統内のエア量は直接計測できないため、系統を一定圧力で加圧し、圧力を降圧した際に排出される水の量（ブリード量）で評価している。なお、ブリード量には系統配管（フレキシブルホース）の圧力変形量も含まれており、上記図で約290mlがフレキシブルホースの変形量である。



第 7 図 軌道上冷却水水質トレンド（防腐剤濃度）



第 8 図 軌道上冷却水水質トレンド（pH）



第 9 図 冷却水量トレンド (LTL の例)

3.2 PTCS 関連の開発成果

(1) ヒータの共通化

PTCS は、スペースシャトルによる打上ミッションから宇宙ステーション本体への組立て、その後の軌道上運用の全てのフェーズにおいてモジュールの温度環境を維持する必要がある。この時、温度維持のために使用するヒータの電源供給条件は、それぞれ以下の通りである。

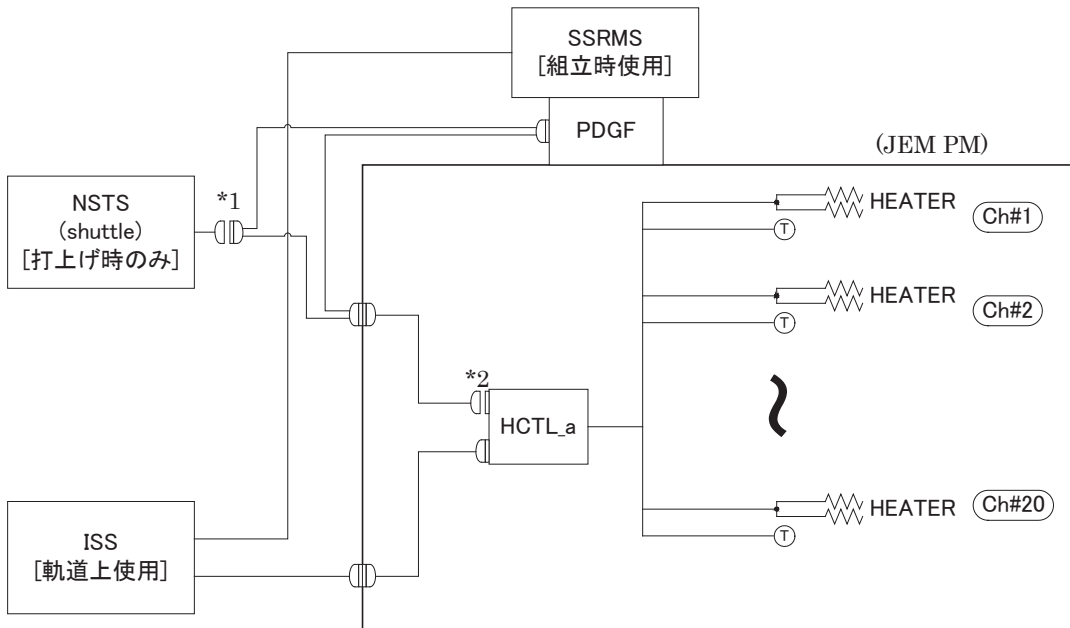
打上時：シャトル電源

ISS への組付け時：ステーションロボットアーム（SSRMS：Space Station Remote Manipulator System）

定常運用時：ノード 2（米国側モジュール）

このうち、打上時及び ISS への組付け時用の電源インターフェースは船外に設置する必要があるため、他国のモジュールは、ヒータ及び ON/OFF 制御機器をこれらのフェーズ専用に船外に艀装し、定常運用時用のヒータを船内に有している。

これに対し、「きぼう」のヒータシステムは、第 10 図に示すように船内への貫通コネクタを設置することで、打上時／定常運用時に使用するヒータ及び制御機器を共通化した設計となっている。これにより、ヒータの搭載枚数及び制御機器搭載台数の削減が可能となり、重量リソース削減、システムの簡素化による信頼性向上、開発コスト低減などのメリットが得られた。



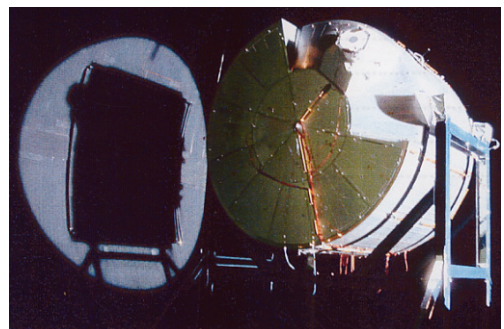
- *1): シャトルからの電力供給完了後, EVAにより切り離す
 *2): SSRMSからの電力供給完了後, IVAにより切り離す
 *3): A系のみ示す

第 10 図 ヒータ電力系統図

(2) 部分熱試験による検証

PTCS の性能検証は、実機が曝される実環境模擬の困難さ、対象構造物の複雑さ、コンフィギュレーションの多様さから熱数学モデルによる解析によっているが、この熱数学モデルの精度（確からしさ）の検証には実機での熱平衡試験が不可欠であり、他国モジュールも含め開発における基本コンセプトである。しかしながら、「きぼう」船内実験室は、ISS 最大のモジュールであり国内最大のスペースチャンバでも実機での熱平衡試験の実施が困難であった。そこで、熱設計がほぼ類似の船内保管室での熱平衡試験（第 11 図）の結果に基づき、普遍的なコリレーションを行うことで熱数学モデルを標準化／共通化し、船内実験室での試験を省略した。具体的には、結果にモデルを合わせる係数調整

ではなく実機と整合する詳細化／修正などを実施し、試験ケース以外でも適用が可能であるものとした。

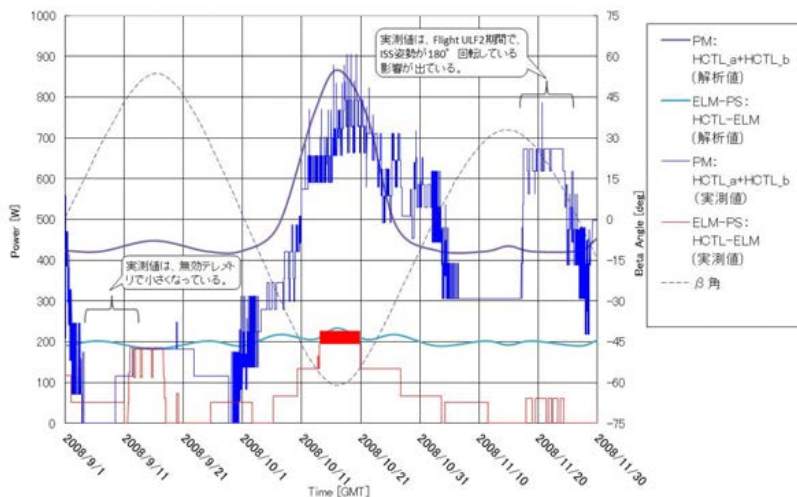


第 11 図 船内保管室 熱平衡試験

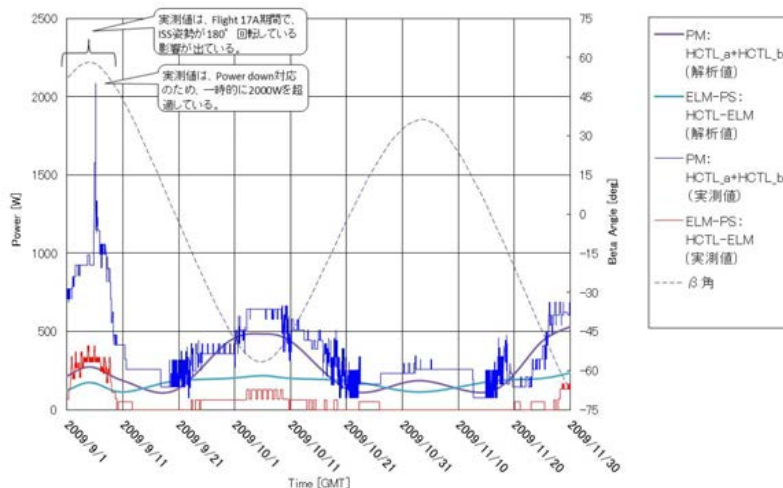
2008 年の船内保管室及び船内実験室の打上時及び打上後の軌道上運用データは、事前の熱解析結果と良く一致している(第 12 図、第 13 図参照)。

これらのデータは、PTCS 設計・解析モデ

ルが妥当であったことを示しており、部分熱試験により大型構造物の熱性能を予測・検証することが可能であることを示す実績として大きな成果である。



第 12 図 Stage1J (2008/9/01-2008/11/30) におけるヒータ消費電力



第 13 図 Stage2J/A (2009/9/01-2009/11/30) におけるヒータ消費電力

4. 構成機器紹介

「きぼう」熱制御系における構成機器は、軌道上での互換性またコスト低減の観点から、ISSを構成する他モジュールとの共通品（あるいはモディファイ品）を多く採用しているが、一部の機器については日本で独自で開発している。本項では、熱制御システムを構成する主要機器の中から、特に日本独自で開発した機器について、その概略仕様を紹介する。

(1) ヒータコントローラ (HCTL)

本装置は、120VDC、1系統（入力インターフェースは2系統）の電力を受電し、内部構成品の半導体スイッチをON/OFFすることにより、下流に接続された最大20ch.のヒータへ120VDC電力を分配供給するものである（第14図参照）。



電力特性	入力電圧：103.5～127.5Vdc 最大入力容量：1.2kW×1系統 出力系統：定格0.5A（最大1.0A×20系統） ヒータ制御精度：±2.0℃ ヒータ制御周期：100msec
外形寸法・重量	610×300×300 (mm) 30.23kg 以下
消費電力	最大 22.2W

第14図 HCTL

ヒータのON/OFF制御は、HCTLに接続された温度センサの入力に基づき、予め各ch.に設定されたヒータON/OFF設定温度に基づき自身の持つソフトウェア処置により実行される。なお、シャトル打上から初期起動までは、外部からのコマンド指示・テレメトリモニタなしに自律的にヒータのON/OFF制御を行う機能を有している。

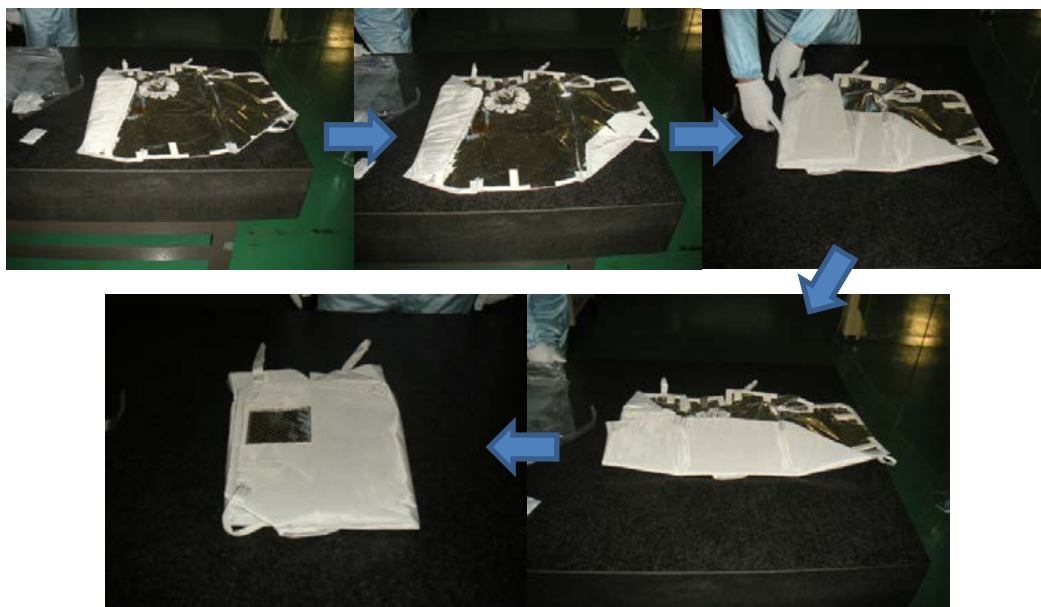
HCTLは船内実験室に2台、船内保管室に1台搭載されており、排熱は機器取付面から与圧構造への伝導及び機器表面からの放射による。

(2) MLI

MLIは、20層のアルミ蒸着したカプトンシートを積層した放射断熱材である。構造殻外部全体を包み込むように艀装し、外部環境の熱的变化の影響を最小化するものである。一部船外活動で取り付けるものを除き、軌道上での取付・取外しは実施されない。

MLIはバンパ側に取り付けられており、故障時の交換はバンパアセンブリとして一体で交換される。なお、このような特殊な取り付け方法を採用しているのは、MLIの取り付け方でその断熱性能が大きく変わるためである。

MLIの部品点数は船内実験室／船内保管室で合計約1,100点である。クルーの船外活動により軌道上取外し・取付を行うMLIのうち、一部についてはクルー要望により軌道上での運搬性を重視した設計（折りたたみを考慮した設計）となっている（第15図参照）。

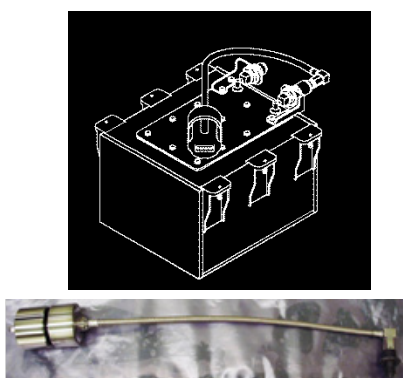


第 15 図 MLI

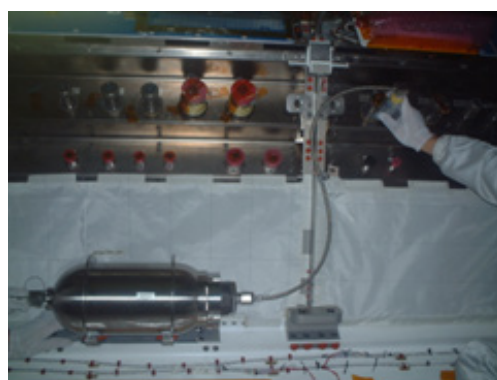
(3) 小型アキュムレータ

本装置は、「きぼう」ユニークな ATCS コンポーネントであり、打上時／軌道上保全時にのみ使用される。打上中は冷却水の温調／循環が行われなため、本装置により環境温度変化による冷却水の体積変化を吸収し系統内圧力を設計上の許容範囲(キャビンエア

圧力～689kPaA) に維持する。また、打上時の加速度変化による圧力変動を吸収し、負圧が生じることによる冷却水系統内へのエアの吸込みや、系統の低圧力化による空隙の発生・消滅に伴う水撃の発生を防ぐ重要な役割を果たしている(第 16 図参照)。



機器打上用／保全時用



船内実験室打上用

第 16 図 小型アキュムレータ

5. まとめ

本稿で紹介した事例に限らず、「きぼう」開発／軌道上運用を経て、様々な知見や経験を獲得することができた。

大型有人滞在モジュールの熱制御系技術は、冒頭でも述べたとおり重要なキー技術のひとつである。「きぼう」与圧系熱制御システムの開発を通じて得られた成果は、ISSにとどまらず、月面基地、有人推進モジュールなど、将来の有人宇宙活動に活かされるものと期待する。