

技術紹介

ニュートリノ超伝導ビームライン用低温設備

Cryogenic System for Neutrino Superconducting Magnet Beam Line

永見 将和* 高橋 亘* 中嶋 俊哉* 伊藤 厚之*
 NAGAMI Masakazu TAKAHASHI Tooru NAKASHIMA Toshiya ITO Atsushi

1. はじめに

2009年3月、日本原子力研究開発機構の原子力科学研究所敷地内にニュートリノ振動実験に供するヘリウム冷凍設備（以降「本設備」と略す）を高エネルギー加速器研究機構に納入した¹⁾。

本設備は、陽子ビーム偏向のための超伝導マグネット群（28台直列に配列、全長150m）を超伝導状態に維持し、長期間安定した励磁運転を保証することが要求される。

また、本設備の制御システムには、運転自動化による運転員の負担軽減、膨大な入力信号の管理・短時間での確実な処理などを行うため、より優れた操作性・汎用性、及びより高い信頼性が要求される。

ここでは、上記要求を満足するためにハード面として初採用した「超臨界ヘリウム循環ポンプ」及び「高効率タービンを搭載したヘリウム冷凍機」、ソフト面としては機能拡張した当社開発の「制御システム」について、その概要を述べる。

2. プロセスの概要

本設備の概略系統を図1に、性能を表1に示す。

本設備は、超伝導マグネット28台直列配置から成る被冷却体の超臨界ヘリウム（以降「SHE」と略す）の強制循環冷却を行う「SHE 循環サイクル」と、飽和液体ヘリウムを生成する「クロードサイクル」との複合サイクルを採用している。

SHE 循環サイクルでは、全長150mに及ぶ被冷却体を5K以下に冷却するため大流量のSHE 循環ポンプ（以降「本ポンプ」と略す）を採用していることを特徴とし、クロードサイクルでは、より高いプロセス効率（カルノー効率）を得るためJTラインに超臨界膨張タービン（T3タービン）を配置していることを特徴としている。

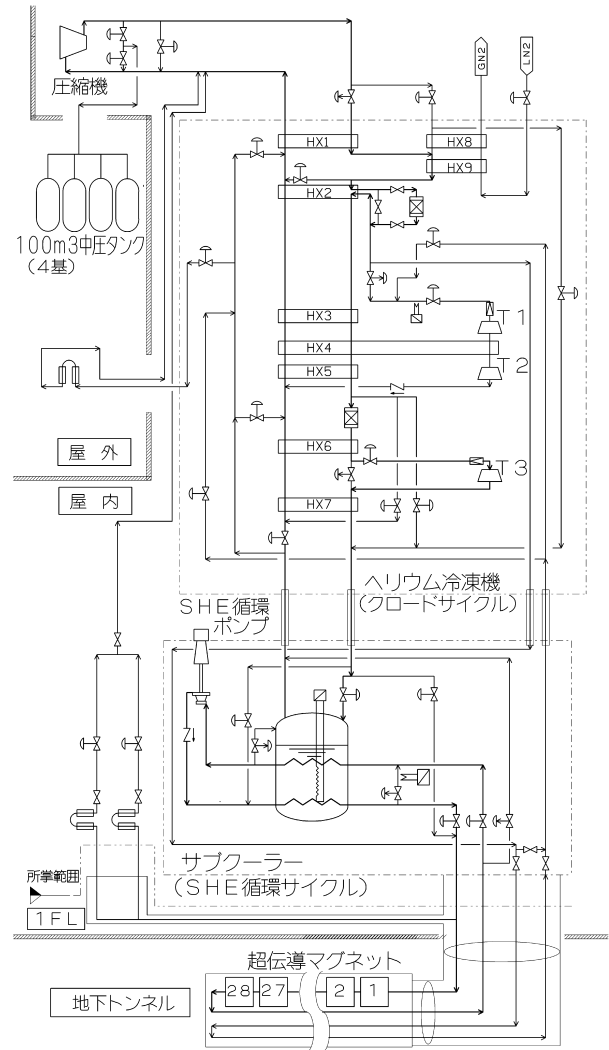


図1 低温設備の概略系統図

表1 低温設備の性能（冷凍能力）

マグネット冷却	1,200 W at 4.5K
シールド冷却	2,400 W below 80K
電流リード冷却	1.1g/s ヘリウムガス at 4.5K

※液体窒素未使用時の設計値を示す。

3. SHE 循環ポンプ

SHE 循環サイクルの要といえる本ポンプには、Barber-Nichols 社（米国）製遠心ポンプを当社として

* オンサイト・プラント事業本部プラント事業部プラント・エンジニアリングセンター

最大規模の SHE 強制循環冷却を行う本設備に初採用した。本ポンプの主要緒元を表2に、2009年12月に実施した本設備の初期単独冷却試験の結果を図2に示す。

表2 Barber-Nichols 社製 SHE 循環ポンプ緒元

型式	遠心式
軸受け	ボールベアリング(無潤滑)
定格流量	300g/s at 100kPa
吐出圧	0.4MPa (absolute)

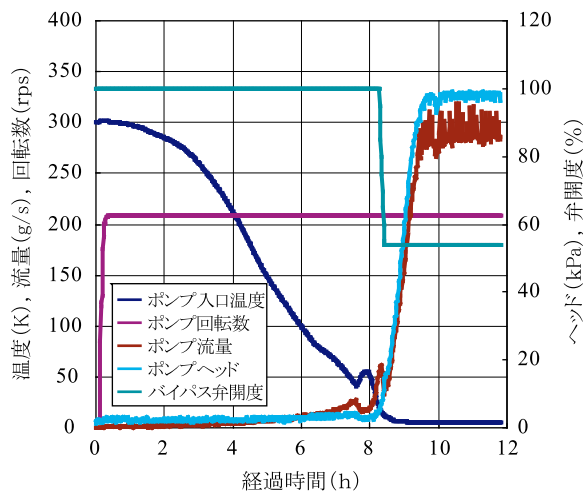


図2 初期冷却時 SHE 循環ポンプ運転データ

SHE 循環ラインはポンプ廻りの予冷や定常化をスムーズに行うために常温からの起動を行った。ヘリウム密度が小さい常温域から20Kまでは、ポンプ特性により流量及び圧力ヘッドが共に小さく、20K以下において急激に流量が増加する傾向を示す。このような流量の急激な変化に追従してポンプ循環ラインのバイパス弁を制御することで、定常状態への移行を安定的に自動運転で行うことができた。

なお、定格時に流量変動が見られるが、試運転では被冷却体である超伝導マグネットを切り離して行ったため、SHE 循環ラインの容積が小さいことが影響している。被冷却体との接続後の運転では、ここに示すような流量変動は見られていない。

本ポンプは所定の性能を発揮し、ポンプ断熱効率が66.7%であることを確認できた。

4. 高効率タービン搭載ヘリウム冷凍機

本冷凍機には Linde Kryotechnik 社 (スイス) が開発した高効率膨張タービン Turbo Expander Dynamic (以降「TED」と略す) を国内向け冷凍機として初採用した。TED は従来型で蓄積した技術をベースに、断熱効率の向上、及び軸受容量の増大などを目的に開発したものである²⁾。なかでも、軸受容量の増加は、プロセスの外乱 (負荷変動) を伴う冷凍機への採用に適

しており、断熱効率の向上 (従来型の約65%に対し80%以上へ) と相まって本冷凍機のカルノー効率は21.4%を達成し、1kWクラスの冷凍機としては高い性能を達成することができた。

また、本冷凍機は TED を初採用した国内向け初号機ということもあり、TED の計算モデルを構築して冷凍機のシミュレーションを行った。シミュレーションの一例として T3タービン入口圧力に対する冷凍能力およびタービン出口温度の関係を図3に示す。

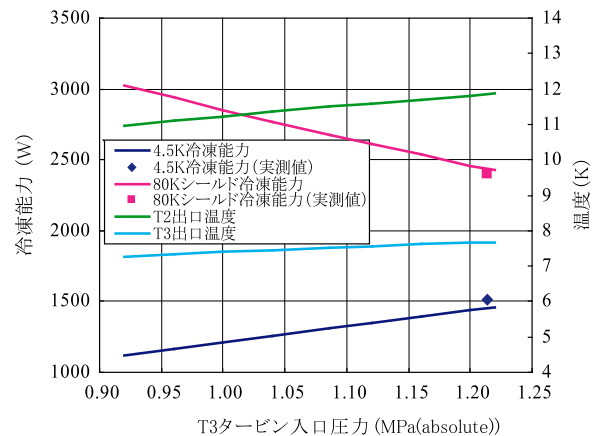


図3 シミュレーションの一例

このシミュレーションにより、運転条件の変化に対する冷凍能力を含めた冷凍機の挙動を事前に予測しておくことで、効率的な本設備の運転調整を行うことができた。

5. 制御システム

本設備の制御システムには、当社開発のデジタル計装システム³⁾を機能拡張し採用している。図4に制御システムの構成を示す。

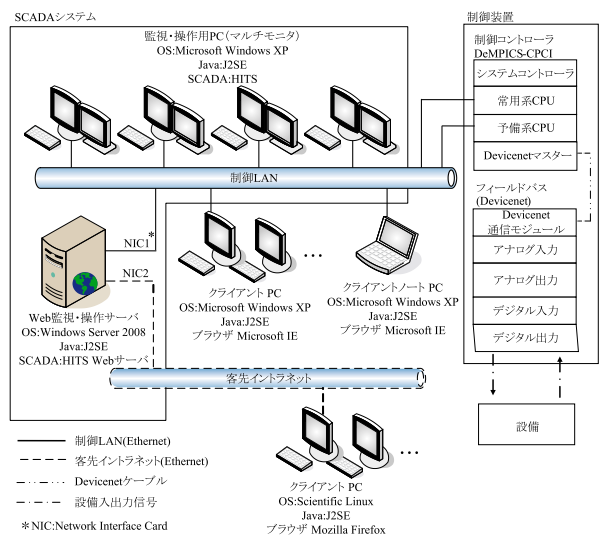


図4 制御システムの構成図

本制御システムは、自動運転プログラムを実行する「制御装置」と、手動介入操作・膨大な入力信号の長期収集などを行う「SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) システム」から構成されている。

5.1 制御装置

制御コントローラは当社開発の DeMPICS⁴⁾を採用し、CPU を二重化している。また、従来の VME³⁾バスから CompactPCI バス (PCI バスを工業製品に応用することを目的として、米国 PICMG が策定したバス規格) へ変更したことにより、制御動作中の CPU ボード交換を可能とする活線挿抜機能を実現した。

制御機能としては DeMPICS の特徴でもある機能拡張性を活かし、TED 用コントロールユニットを開発した。これにより、複雑なタービン制御ループを容易に構築可能とし、膨張タービン制御の最適化と安定性の向上を実現した。

また、入出力は、オープンフィールドバスの DeviceNet を採用したことにより、様々なメーカーの入出力装置を選択可能とした。

5.2 SCADA システム

SCADA システムは、設備の運転操作を行う監視・操作 PC と Web 監視・操作サーバ (以降「Web サーバ」と略す) とで構成される。SCADA ソフトには、LabVIEW を開発言語にした従来の SCADA ソフトから、画面切り替え速度、及びデータ収集機能で優れた HITS (当社開発: Human-Interface-Tool System) を採用し、運転操作性、及び画面構築機能などの機能拡張を行った。

HITS は Java 開発環境で開発した SCADA ソフトで、Java 実行環境で動作するため OS に依存しないマルチプラットフォーム対応となっており、監視・操作 PC の故障対応や将来的なリプレースを容易に実現することが可能である。また、ネットワーク環境で利用することを前提としており、Web サーバを容易に構築することが可能となっている。

HITS は監視・操作 PC と Web サーバにインストー

ルされており、本設備用として、グラフィック画面、トレンド画面、個別計器画面など計 110 画面を選択表示できるマルチウインドウ表示機能を有し、快適な設備の監視・操作を実現している。また、リレーショナルデータベースを搭載しており、本設備では任意のトレンドデータ (180 tag/min) や手動操作履歴の 1 年間分を高速に参照・取り出しが可能となっている。

Web サーバはクライアント PC に対し、監視・操作 PC と同等の機能を提供しており、制御 LAN や客先イントラネットの複数クライアント PC からリアルタイムにアクセス可能となっている。

6. まとめ

長期間の連続運転を必要とするヘリウム冷凍設備においては、信頼性とともな経済的な面から高いプロセス効率を有することは大きな優位性となるものであり、「SHE 循環ポンプ」「高効率膨張タービン TED」を初採用した今回の設備は、所定の性能を十分に満足しその優位性を実証できた。

また、今回機能拡張した「制御システム」においては、より優れた操作性・汎用性、及び高い信頼性を有していることを実証できた。なお、HITS は、当社のヘリウム液化機やスペースチャンバーの標準 SCADA ソフトとして展開する計画である。

参考文献

- 1) 槇田康博, 大島洋克, 木村誠宏, 岡村崇弘他. J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム (19) - 冷却系子密書ニング. 低温工学・超電導学会講演概要集. 2009, 80th, p.38.
- 2) Creteigny, D. et. al, New York, Advances in Cryogenic Engineering 2003, 2004, p.272
- 3) 飯村憲, 吉川浩史, 中嶋俊哉, 岸田太, 中村勝弘. LHD 低温制御システムの開発. 日本酸素技報. 1998, (17), p.25-35.
- 4) 飯村憲, 中嶋俊哉. Windows パソコンと VME によるプロセスコントローラの開発. 電気学会産業計測制御研究会試料. IIC-99 (33-47), 1999, p.69-76.