

技術紹介

## 高温超電導機器用冷却システムの開発

### Development of Turbo-Brayton Cycle Refrigerator for High Temperature Superconducting Applications

平井 寛一\*                      鈴木 佳明\*\*                      長坂 徹\*\*\*                      坂上 誠一\*\*\*\*  
 HIRAI Hirokazu                      SUZUKI Yoshiaki                      NAGASAKA Toru                      SAKAUE Seiichi

#### 1. はじめに

高温超電導（以下、HTS）を利用した変圧器、送電ケーブル、モーターなどのHTS機器では、HTS線材を60～80Kに冷却して超電導状態を維持するための冷却システムが不可欠である。

これまでHTSに関する研究開発では、冷凍能力が数W～1kWの小型のレシプロ式冷凍機（GM冷凍機やスターリング冷凍機、パルスチューブ冷凍機など）が多く使用されてきた。しかし、HTS機器が実用化され商用規模になると、必要な冷凍能力は60～80Kにおいて2～10kWになると言われている。

レシプロ式冷凍機で数kWの冷凍能力を得るには、複数台の冷凍機が必要となるため、設置スペースが大きくなるというデメリットが生じる。また、レシプロ式冷凍機は一般的に年1回のメンテナンスが必要であり、HTS機器に要求される連続運転での耐久性や信頼性にも課題が残る。

図1は冷凍機の冷凍能力と冷却温度の関係を示したものである。このうち図の中央部はHTS機器に必要な

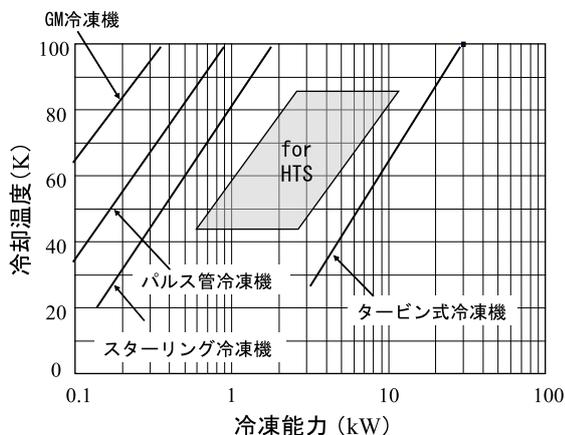


図1 冷凍機の冷凍能力と冷却温度

\* 開発・エンジニアリング本部山梨研究所低温技術研究室  
 \*\* 開発・エンジニアリング本部ガスエンジニアリング統括部超低温技術部  
 \*\*\* 開発・エンジニアリング本部ガスエンジニアリング統括部シミュレーションセンター  
 \*\*\*\* 開発・エンジニアリング本部つくば研究所分離技術研究室

な冷凍能力の範囲を示す。図1よりタービン式冷凍機はレシプロ式冷凍機に比べ冷凍能力が大きく、設置スペースの低減が期待できる。さらに膨張タービンはメンテナンス間隔を長く（もしくは不要に）することができるため、連続運転が可能となる。

タービン式冷凍機は空気分離やヘリウム液化に数多く利用されているが、空気を冷媒とすると、冷却温度は空気が液化する温度（約83K）が限界となるため、HTS機器に必要な温度まで冷却することができない。また、ヘリウムを冷媒とすると分子量が小さく軽いため、HTS機器用の冷却では十分な冷却性能を発揮できない。

そこで当社では、商用規模のHTS機器に最適な冷却方法として、ネオンを冷媒としたタービン式冷凍機（以下、ネオン冷凍機）と液体窒素循環装置を組み合わせた冷却システムの開発を行っている。

今回は冷却システムの概要とネオン冷凍機の単体性能試験結果について紹介する。

#### 2. 冷却システムの概要と試験方法

図2に試作した冷却システムの概略フローを示す。

冷却システムはHTS機器を冷却する液体窒素循環装置と液体窒素をサブクール温度に冷却するネオン冷凍機とで構成される。

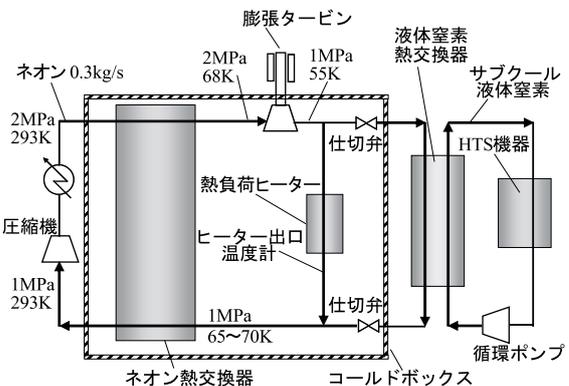


図2 試作冷却システム概略フロー

ネオン冷凍機は圧縮機、ネオン熱交換器、膨張タービン、熱負荷用ヒーターで構成される。圧縮機で1 MPaから2 MPaに昇圧されたネオンがネオン熱交換器で低圧側(1 MPa)のネオンと熱交換により68 Kまで温度低下し、膨張タービンで2 MPaから1 MPaに断熱膨張して55 Kまで温度低下する。冷凍機単体の性能試験では膨張タービンを出たネオンは熱負荷ヒーターで設定温度(65~70 K)まで昇温され、ネオン熱交換器を通して、再び圧縮機に吸入される。

冷凍能力はヒーター出口温度が一定になるよう熱負荷ヒーターを動作させ、ヒーターに供給される電力を冷凍能力として評価した。

一方、実際に HTS 機器を冷却する場合は、2ヶ所の仕切弁の二次側に液体窒素循環装置が接続され、液体窒素熱交換器を通じてサブクールの液体窒素を作り出す。サブクール液体窒素は循環ポンプで HTS 機器内部に送られ機器の冷却を行う。

冷凍機の運転で低温となる配管およびネオン熱交換器、膨張タービンなどは侵入熱が最小限になるよう真空断熱されたコールドボックスに収納される。図3にコールドボックスの外観写真を示す。



図3 コールドボックス外観写真

冷凍機的设计能力は、商用規模の HTS 機器の冷却を想定して冷却温度70 Kにおける冷凍能力を2 kWとした。システムの温度、圧力、流量などのプロセス計算やクールダウン時の挙動の予測などは、当社が空気分離装置などで蓄積したシミュレーション技術を利用している。またネオン熱交換器は、設置スペース等を配慮しアルミ合金製のプレートフィン熱交換器を採用した。

膨張タービンはネオン冷凍機のプロセスに合わせ

て、インペラ外径25 mm、回転数96000 rpmの小型・高速回転膨張タービンを採用した。

### 3. 性能試験結果

図4に冷却温度(熱負荷ヒーター出口温度)65 Kと70 Kにおける冷凍能力(熱負荷ヒーター供給電力)を示す。図中0 minは冷凍機を起動した時間である。冷凍機起動時のヒーター出口温度は約150 Kとなっており低温状態での起動である。

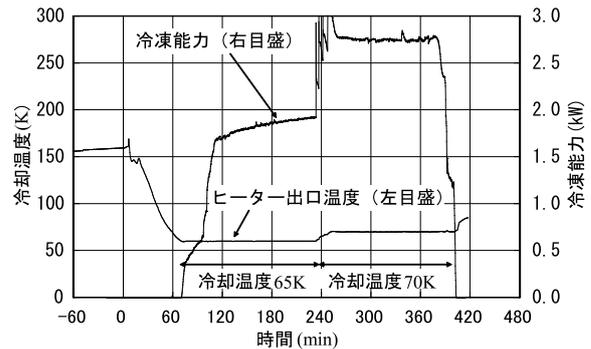


図4 冷却温度と冷凍能力

ヒーター動作開始後(71~116 min)は冷凍機内部の温度バランスが不均一なため、冷凍能力は急激に変動するが、徐々に一定となり、最終的に65 Kで1.9 kWの冷凍能力を得た。

さらに冷却温度の設定値を、ネオン冷凍機の仕様値である70 Kに変更すると2.8 kWの冷凍能力を得ることができた。

### 4. まとめ

商用規模の HTS 機器冷却用として試作したネオン冷凍機において、冷却温度70 Kで2 kWを超える冷凍能力を達成し、HTS 機器の冷却に適用できることを実証した。今後は、冷却システムの効率向上や小型化、HTS 機器の特性に合わせた運転方法の確立などを行っていく。

この成果は、財団法人国際超電導産業技術センター (ISTEC) が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より受託した「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト」において達成したものである。