

ネオン冷凍機の熱負荷変動に対する制御特性 (第1報)

Development of neon refrigerator with LN Sub-cooler for HTS power equipment

尾崎 信介* 平井 寛一* 弘川 昌樹* 吉田 茂**
 OZAKI Shinsuke HIRAI Hirokazu HIROKAWA Masaki YOSHIDA Shigeru

高温超電導機器 (以下, HTS 機器) 冷却システムの減量運転に関するプロセスシミュレーションおよび, 熱負荷変動に対する制御特性試験を行った。冷却システムはネオンを冷媒とする冷凍機 (以下, ネオン冷凍機) と HTS 機器を冷却するサブクール液体窒素循環システムで構成される。HTS 機器の熱負荷で昇温したサブクール液体窒素 (以下, サブクール LN₂) はサブクール熱交換器を介してネオン冷凍機で冷却される。しかしネオン冷凍機の動作温度は LN₂ の凝固温度に近く, サブクール LN₂ を凝固させる可能性がある。そこで冷凍機の運転負荷を約 25 ~ 100% まで変化させた場合のプロセスシミュレーションにより, サブクール熱交換器内の温度分布を予測し, 液体窒素が凝固しないことを確認した。また冷凍機は HTS 機器の熱負荷変動に対してサブクール LN₂ 温度が一定となるよう冷凍能力制御を自動化する必要がある。そこでターボ圧縮機の回転数制御による負荷変動特性を 0.2 ~ 1.5kW の範囲において確認し, 回転数制御による冷凍機の自動冷凍能力制御が可能であることを確認した。

We developed a Reverse-Brayton cycle refrigerator with a small turbo-expander and a compact turbo-compressor for HTS (High Temperature Superconducting) power equipments. Its cooling power is more than 2 kW at 65 K. We also developed a sub-cool heat exchanger (a sub-cooler) to cool liquid nitrogen. Sub-cooled liquid nitrogen (LN) has high dielectric strength, and can allow larger critical current than saturated liquid nitrogen. It is thought that sub-cooled LN is the most suitable fluid for cooling HTS power machines. However, a possibility of freezing of liquid nitrogen in the sub-cooler is a considerable issue. Then, we designed the new sub-cooler in which the liquid nitrogen never freezes. The sub-cooler was assembled into a refrigerator cold box in order to make a compact cryogenic system, though the previous sub-cooler was set into a separate circulation pump unit. We finally intend to install both the sub-cooler and the circulation pump in the refrigerator cold box. Our new refrigerator controls the turbo-compressor rotational speed so as to keep the sub-cooled LN temperature constant, while our previous refrigerator controlled an electric heater power against fluctuation of cold neon gas temperature. In this paper, we report performances of the new refrigerator.

1. はじめに

高温超電導を利用した機器には送電ケーブル, モータ, 変圧器などがあり, 高温超電導電力機器 (以下, HTS 機器) の実用化を目指して盛んに研究開発が行われている。すでに機器の要素開発から実システムでの実証試験の段階に進んでいるものもある^{1), 2)}。

* 開発・エンジニアリング本部つくば研究所低温技術研究室

** 開発・エンジニアリング本部つくば研究所超伝導プロジェクト

一方, 超電導状態を維持するための冷却システムについては, 実用の HTS 機器に適したものが望まれているが, 開発途上の状況である。冷却システムには (1) 冷凍能力 2 ~ 10kW (冷却温度 70K), (2) メンテナンスフリー, (3) 省スペースなどの要求事項があり, 当社ではこれらの事項を満足するシステムとしてネオンを作動流体としたターボブレイトンサイクル冷凍機 (ネオン冷凍機) を提案し, 開発を続けてきた³⁾。ターボブレイトンサイクルの冷凍機では, 作動ガスの圧縮

と膨張をターボ圧縮機と膨張タービンで行うことにより、大きな冷凍能力を省スペースで実現できるといった長所を持つ。またターボ圧縮機と膨張タービンの軸受に摺動部のない磁気軸受を採用することによりメンテナンスフリーを実現できる^{3),4)}。

超電導機器冷却システムは、ネオン冷凍機とサブクール液体窒素循環システムから構成されている。Fig.1に概略フローを示す。HTS 機器を冷却するサブクール LN₂はサブクール熱交換器を介して冷凍機で発生した低温のネオンガスにより冷却される。しかし冷凍機の動作温度は LN₂の凝固温度 (63K) よりも低い約60Kであるため、運転中に LN₂が凝固しないようサブクール熱交換器の設計には注意が必要である。

我々は2011年に検討したサブクール熱交換器を組み込んだ新たなネオン冷凍機を2012年の3月に製作した(以下、モデル冷凍機)。

また、実用の HTS 機器では通電状態により熱負荷が変化するため、ネオン冷凍機はサブクール LN₂の温度を一定に保つよう冷凍能力を自動で調節する必要があるが、モデル冷凍機では圧縮機回転数による冷凍能力の制御機能を付加した。

本報告書では、ネオン冷凍機を減量運転した際のサブクール熱交換器の温度分布を解析し、定格条件以外

でのサブクール LN₂の凝固の有無について確認を行った。またネオン冷凍機の冷凍能力制御を評価するため、ネオン冷凍機単体において、熱負荷変動に対する自動制御運転を行ったのでその結果を報告する。

2. サブクール熱交換器のプロセスシミュレーション

既に述べたとおり、サブクール熱交換器の設計ではサブクール LN₂が低温のネオンガスにより凝固しないよう考慮する必要がある。我々はすでに冷凍機の定格運転におけるサブクール熱交換器の設計検討を行い、液体窒素が凝固しないサブクール熱交換器の仕様を決定した⁵⁾。しかし、HTS 機器の熱負荷が減少した場合など定格運転以外においても凝固の可能性がないか確認が必要である。そこで、ネオン冷凍機の流量を変化させた際のサブクール熱交換器内部の温度分布をプロセスシミュレーションソフト「gPROMS」を用いて解析した。

解析条件としてネオンガスの流量は0.3 kg/s, 0.275 kg/s, 0.25 kg/s, 0.225 kg/s, 0.2 kg/s の5つの条件を実施した。また、初期条件として液体窒素流量30L/min, 液体窒素出口温度67K, タービン出口圧力0.541MPaとした。定格条件以外でのプロセス計算では、ターボ圧縮機および膨張タービンの運転条件も定格と異なるため、各条件における効率や流量を過去の性能試験データからモデル化して解析に反映させている。

Table.1に解析結果を示す。Case No.1が冷凍機の定格運転の条件である。タービン出口4で61.2Kのネオンガスはサブクール熱交換器出口4bで69Kとなっている。

4bのネオンガスは再びサブクール熱交換器へ入り、ネオンガス同士が並流で熱交換することによりサブクール熱交換器内部4a, 4cの温度が64.74K, 65.43Kとなり窒素の凝固点(63K)より高い結果となった。その後、液体窒素はネオンガスと熱交換するためサブクール LN₂は凝固しない。

その他の条件においてもサブクール熱交換器内部

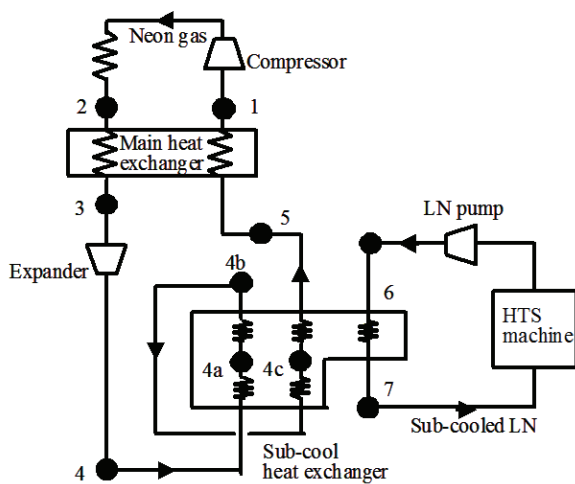


Fig.1 Flow diagram of neon refrigerator

Table.1 Temperature distribution in the sub-cooler

Case No.	Neon flow rate (kg/sec)	Cooling Power (kW)	Temperature at point 6 (K)	Temperature at point 7 (K)	Temperature at point 4 (K)	Temperature at point 4b (K)	Temperature at point 4a (K)	Temperature at point 4c (K)	Temperature at point 5 (K)
No. 1	0.300	2.53	70.00	67.00	61.20	69.00	64.74	65.43	69.00
No. 2	0.275	1.97	69.34	67.00	61.97	68.62	65.02	65.55	68.62
No. 3	0.250	1.49	68.80	67.04	62.79	68.30	65.34	65.74	68.30
No. 4	0.225	1.10	68.30	66.99	63.42	67.96	65.54	65.84	67.96
No. 5	0.200	0.68	67.81	67.00	64.48	67.63	65.96	66.14	67.63

の4a, 4cは液体窒素の凝固点を上回っていることが確認された。サブクール熱交換器のLN₂入口6とLN₂出口7の温度差はネオンの流量が減少するに従い小さくなる。これはLN₂の流量を一定としているため熱負荷の減少と共にLN₂入口温度6が降下するためである。逆にタービン出口4は流量の低下と共に上昇する。これは圧縮機の圧力比が減少するからである。

3. 熱負荷変動に対する制御特性

実用のHTS機器では使用状況により熱負荷が変動する。冷却システムはHTS機器の熱負荷に対応して冷凍能力を調整し、サブクールLN₂の温度を一定に保ち、HTS機器の超電導状態を維持する必要がある。そのためには冷凍機の制御特性を評価しておく必要がある。

ネオン冷凍機の冷凍能力は、圧縮機の回転数を増減することにより調整可能であり、これまでに回転数と冷凍能力の関係がほぼ直線の関係となる結果を得ている⁵⁾。圧縮機には高周波モータが内蔵されており、インバータ制御によって任意の回転数に自由に变化させることができる。圧縮機回転数の変更により、作動流体の圧力比が変化する。また、膨張タービンでは膨張比が変化することで熱落差(入口と出口のエンタル

ピー差)が変化する。従って圧縮機の回転数を変更することで作動ガスの流量と熱落差が変化し、冷凍機の冷凍能力を調整することが可能となる。

Fig.2に新たに製作したモデル冷凍機とこれまで実験に使用していた試作冷凍機の冷却温度制御フローを示す。Fig.2(a)がモデル冷凍機、Fig.2(b)が試作冷凍機の制御フローである。試作冷凍機(Fig.2(b))では、圧縮機の回転数は任意に設定できるが、設定した回転数においてサブクール熱交換器出口のガス温度が一定となるよう、ヒータの入力電力を制御していた。そして、主熱交換器およびサブクール熱交換器の温度分布が定常となるとヒータの熱負荷は一定となり、このときのヒータ入力電力を冷凍機の冷凍能力として評価した。一方、モデル冷凍機(Fig.2(a))では、サブクール熱交換器出口のガス温度を一定に保つよう、圧縮機回転数を自動制御するフローとなっている。

冷凍機の熱負荷はサブクール熱交換器へヒータを取付け電気入力を与えている。

熱負荷の変動パターンについては、実用HTS機器の熱負荷変動パターンが不確定なため、今回の制御特性の評価では、熱負荷のステップ変動における圧縮機回転数、サブクール熱交換器出口のガス温度、タービン出口温度の挙動を測定した。

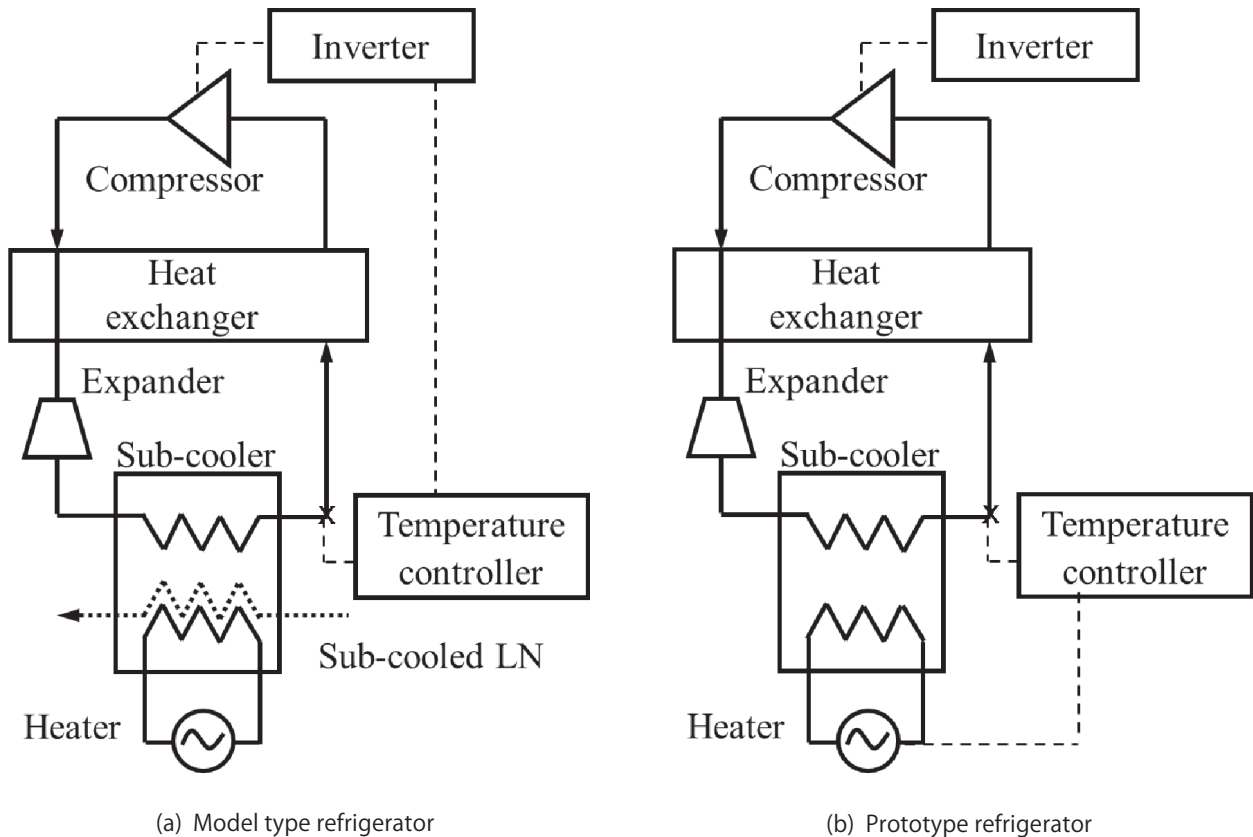


Fig.2 Diagram of cooling power adjustment

熱負荷の変動パターンをステップ変動とした理由は、圧縮機回転数の応答特性の評価と回転数制御のPID設定の調整を行うのに適しているためである。最終的には実際に冷却対象となるHTS機器の熱負荷変動のパターンに合わせて回転数制御のPID設定を調整する必要がある。また、実際のHTS機器の冷却ではサブクール熱交換器出口のLN₂温度を一定に保つ必要があるため、冷凍機の温度制御ポイントは、サブクール熱交換器出口のLN₂温度とする方が望ましく、今後サブクール循環システムとの組み合わせ評価において実施予定である。

Fig.3(a)に冷凍機の熱負荷を200Wから1500Wに変化させた場合の制御特性を示す。熱負荷を200Wで一定に保ち、冷却温度(温度計測地点はサブクール熱交換器の液体窒素出口。但し、液体窒素は未充填。)を65Kとして、ターボ圧縮機の回転数が安定した状態から、熱負荷を1500Wまで変化させている(時間0min)。熱負荷を増加させてから5分後にサブクール熱交換器出口温度は72Kまで上昇した。24分には最も低い63Kまで低下し、約60分でほぼ定常状態となった。これに対して圧縮機の回転数は20分に561rpsまで上昇した。その後、35分に525rpsまで減少し、45分に530rpsで一定状態となった。Fig3(a)から、圧縮機回転数が制御温度に追従して変化している様子が解る。

また、Fig.3(b)に冷凍機の熱負荷を1000Wから200Wへ変化させた場合の制御特性を示す。Fig.3(a)

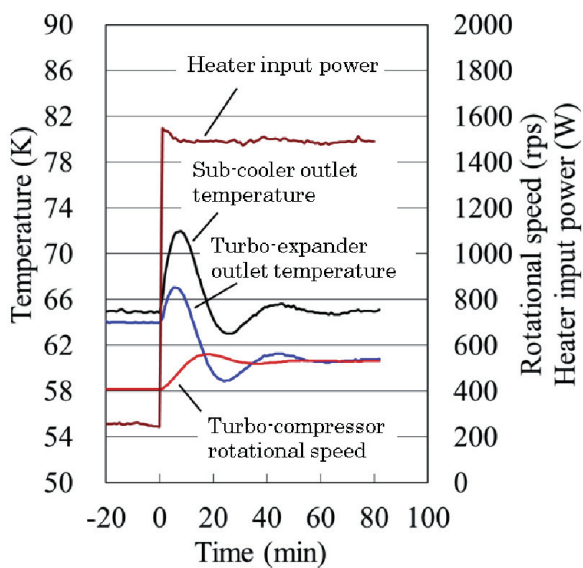
と同様に冷却温度65Kで圧縮機回転数が安定した状態から操作を開始した。5分にサブクール熱交換器の出口温度は61Kまで低下し、40分に66Kと初期温度より1K上昇したのち、60分に65Kで定常状態となった。圧縮機の回転数は490rpsから単調に減少し、15分で400rpsで一定となった。

4. まとめ

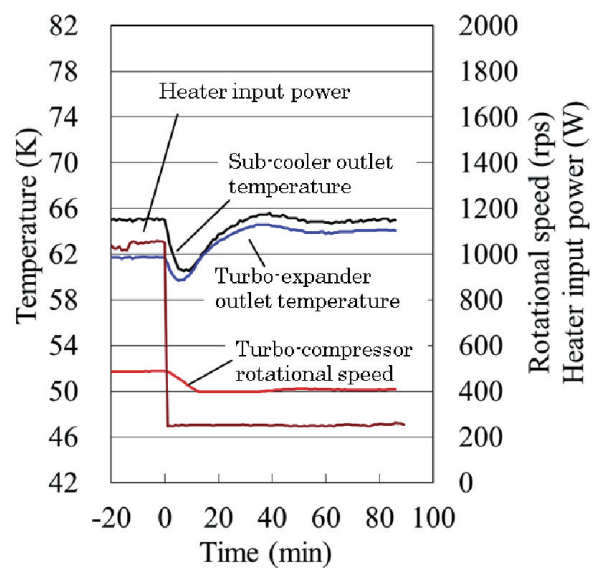
プロセスシミュレーションによって冷凍機の運転負荷を25%~100%にした場合のサブクール熱交換器内部の温度の検討を実施した。その結果、冷却温度67Kにおいて熱交換器内でサブクール液体窒素が凝固しないことが確認された。现阶段で、サブクール熱交換器の製作が完了しているため、今後、液体窒素を用いた冷却システムの総合運転を行い、温度の評価を実施する予定である。

HTS機器の発熱を模擬したヒータを使用して、熱負荷変動に対する制御特性試験を実施した。ヒータの熱負荷をステップ的に上昇、低下させた場合の2条件において、温度変化に対応した圧縮機回転数の自動制御運転を行った。この自動制御運転において、圧縮機回転数のPID制御値はまだ最適化されていないため、サブクール熱交換器の出口ガス温度にオーバーシュートが認められた。

実際のHTS機器の冷却では、サブクールLN₂の熱容量が大きくガス温度の変化が鈍いと考えられるため同様の試験にて挙動を評価する必要がある。



(a) Heat load increasing 200W to 1500W



(b) Heat load decreasing 1000W to 200W

Fig.3 Characteristic of cooling power adjustment

謝 辞

本研究の成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託した「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」において達成されたものである。

参考文献

- 1) Yazawa, T.; Ootani, Y.; Sakai, M.; Kuniyama, T.; Urata, M.; Tokunaga, Y.; Inoue, K. "66 kV/1 kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet", IEEE Transaction on Applied Superconductivity 15. No.2, 2005, p.2059-2062
- 2) Yang, H.; Sohn, S.; Lim, J.; Oh, S.; Yim, S.; Kim, Y.; Lee, K.; Jang, H. and Hwang, S. "Long Term Performance Test of Cooling System for HTS Power Cable in the KEPCO Power Grid", to be published
- 3) Hirai, H.; Suzuki, Y.; Hirokawa, M.; Kamioka, Y.; Iwakuma, M.; Shiohara, Y. "Development of a Turbine Cryocooler for High Temperature Superconductor Applications", Physica C 469 Proceedings of 21th International Symposium on Superconductivity, Elsevier, 2009, p.1857-1861
- 4) Hirai, H.; Hirokawa, M.; Yoshida, S.; Kamioka, Y.; Takaike, A.; Hayashi, H.; Okamoto, H.; Shiohara, Y. "Development of a neon cryogenic turbo- expander with magnetic bearings", Advances in Cryogenic Engineering 55, AIP Press, Melville, New York, 2010, p.895-902
- 5) Hirai, H.; Hirokawa, M.; Yoshida, S.; Nara, N.; Ozaki, S.; Hayashi, H.; Okamoto, H.; Shiohara, Y. "Neon Turbo-brayton Cycle Refrigerator for HTS Power Machines", Advances in Cryogenic Engineering 57, AIP Press, 2011, p.1672-1679