

10kW ネオンターボブレイトン冷凍機の実用化開発

Practical development of a 10 kW class neon turbo-Brayton refrigerator

尾崎 信介* 弘川 昌樹* 小林 英樹* 平井 寛一*

OZAKI Shinsuke HIROKAWA Masaki KOBAYASHI Hideki HIRAI Hirokazu

超電導送電ケーブルや限流器などの高温超電導電力機器の実用化開発が世界各国で取り組まれており、これらの機器には2kW～10kWの冷凍能力を持つ冷凍機が必要である。大陽日酸では、高温超電導電力機器の実用化が必要とされる冷凍能力10kWのネオンを冷媒とするターボブレイトン冷凍機の開発に取り組み、NeoKelvin®-Turbo 10kWを商品化した。冷媒のネオンガスを圧縮、膨張するターボ回転機には、高速モータ主軸の両端部に圧縮部と膨張部を備えたタービンコンプレッサを2台使用している。タービンコンプレッサの軸受には摺動部のない磁気軸受を採用し、メンテナンス間隔の長期化を実現した。プロセス圧力は低圧側が0.5MPa、高圧側が1.0MPaである。2台のタービンコンプレッサの圧縮機側は直列接続の2段圧縮とし、タービン側は並列接続で1段膨張としている。冷凍機的设计仕様は、冷却温度65Kにおける冷凍能力を10kWとしている。タービンコンプレッサは高速モータで駆動され、高周波インバータで回転数を調整する事により冷凍機の冷凍能力を変更する。これにより冷凍機の熱負荷に応じた適切な冷凍能力を発生し、冷却温度を一定に保つことができる。本報告書では、2016年に商品化されたNeoKelvin®-Turbo 10kWでのクールダウン試験、冷凍能力試験、ロードサイクル試験について報告する。

HTS (High Temperature Superconductivity) power applications have been developed actively and the refrigerator requires larger cooling power. To satisfy this request we have developed 10 kW class turbo-Brayton refrigerator which uses neon gas as working fluid. The refrigerator consists of a pair of turbine-compressors which have turbine, compressor and PM motor on the same shaft. Turbine-compressor has magnetic bearings with no rubbing parts, that results in long maintenance interval. Neon gas is compressed from 0.5 MPa at inlet to 1.0 MPa at outlet by two compressors and expands through two turbines in parallel. Design cooling capacity is 10 kW at cooling temperature 65 K. We made a commercial model refrigerator and tested cool down characteristics, load cycles and cooling capacity using liquid nitrogen circulation system. Specification and configuration of the refrigerator and its test results are shown in this paper.

1. はじめに

高温超電導(以下、HTS)電力機器には送電ケーブル、限流器、モータなどの応用分野があり、各分野で実用化に向けた研究や実証試験が積極的に実施されている¹⁾⁴⁾。

HTS電力機器は、液体窒素温度以下まで冷却することで超電導特性を示し電気抵抗がゼロとなる。送電ケーブルや限流器ではこの超電導状態を維持するため、一般的に液体窒素による冷却が行われ、冷却に必要な

冷凍能力は冷却温度-200℃において2～10kW程度と言われている。大陽日酸では、HTS変圧器向けの冷凍機として、2008年より国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として冷媒にネオンを使用した冷凍能力2kWのターボブレイトン冷凍機の開発を開始した⁵⁾。当時、HTS電力機器の研究における冷却にはパルスチューブ冷凍機やスターリング冷凍機が用いられていた。スターリング冷凍機の場合、冷凍能力は1気筒あたり-200℃において最大で1kWで4気筒連結させて1台あたり4kWの冷凍機と

*開発本部 プロジェクト推進統括部 超電導プロジェクト

して使用できる。スターリング冷凍機は各産業分野での使用実績があり、また導入コストが安価であることが利点である。しかし、スターリング冷凍機では冷媒の圧縮と膨張にピストンが用いられているため、摺動部のシール性能は運転時間とともに劣化する。冷凍機の性能を維持するためには、開放点検による定期的なメンテナンスが必要となる。HTS 電力機器では、その運用目的から冷凍機を停止させることができない。そのため冷凍機についてもメンテナンスによる停止期間を可能な限り少なくする必要がある。当社のネオンターボブレイトン冷凍機（以下、ネオン冷凍機）では冷媒の圧縮と膨張にターボ回転機を用い、そのターボ回転機の軸受に磁気軸受を採用した。磁気軸受は、回転部を非接触で保持することから摺動部がなく、運用におけるターボ回転機の分解点検が不要となり、メンテナンス間隔の長期化が可能となる。2013年には冷凍能力 2kW のネオン冷凍機（商品名 NeoKelvin®-Turbo 2kW）を商品化し、現在までに日本、中国、ロシアなどで合計 8 台の納入実績がある。

一方で、HTS 送電ケーブルにおいては線材開発と実証試験の進展によりケーブルの長尺化が可能となり、冷却に求められる冷凍能力が増大してきた。最近の発表では、例えばオランダの SupernetNL プロジェクトの検討において、ケーブル長 3.4km に対する冷凍能力は全体で 17kW となっている⁹⁾。

大陽日酸では冷凍能力 10kW のネオン冷凍機の開発に取り組み、2016年に NeoKelvin®-Turbo 10kW を商品化した。本冷凍機は 2kW ネオン冷凍機と同様にターボ回転機に磁気軸受を採用しメンテナンス間隔の長期化を図っている。

この 10kW ネオン冷凍機は、韓国電力が取り組む世界初の商用 HTS 送電ケーブルの冷却向けに採用された。商用運転では所定の性能だけでなく高い信頼性や安定性も求められる。本報告では、この商用プロジェクトに採用された 10kW ネオン冷凍機の性能評価の結果について報告する。

2. 冷凍機設計

10kW ネオン冷凍機の開発は、HTS 送電ケーブルの冷却をターゲットに 2014 年より開始された⁷⁾。Table1 に 10kW ネオン冷凍機的设计値を示す。各設計値は 2013年に商品化された 2kW ネオン冷凍機の冷凍機サイクルのシミュレーションモデルを改良した設計プログラムを使用している⁸⁾。冷凍能力は液体窒素の冷凍機出口温度が 65K のときに 10.2kW で

Table 1 Design specifications

Design Item	Design Value
Cooling temperature	65 K
Cooling capacity	10.2 kW
Process pressure	0.5 MPa / 1.0 MPa
Gas flow rate	0.96 kg/s
Input power	162 kW
COP	0.063

ある。プロセス圧力は 2kW ネオン冷凍機と同様に低圧側を 0.5MPa、高圧側を 1.0MPa とした。そして所定の冷凍能力を得るために必要な冷媒の流量やターボ回転機の効率を加味した消費動力を計算し COP(冷却効率)などの目標値を設定している。

Figure1 に冷凍機のプロセスフローを示す。タービンコンプレッサを 2 台使用し、圧縮機は直列、タービンは並列に配置している。このプロセスフローを採用することで、同一構造のターボ回転機を 2 台使用できる。そのため、2kW ネオン冷凍機のように膨張タービンとターボ圧縮機をそれぞれ開発する必要はなく開発期間の短縮や製作コストの低減を図った。

Figure2 にタービンコンプレッサの外観写真を示す。タービンコンプレッサの内部上側に圧縮機インペラ、下側にタービンインペラが据え付けられている。定格回転数は 700rps で、冷却対象の熱負荷に応じて自動的に回転数を調整し、冷却対象を一定温度に維持することができる。Figure3 は 2016 年に商品化した 10kW ネオン冷凍機の外観である。冷凍機は、コールドボックス、動力盤、制御盤、ガスチャージユニットの 4 つのユニットより構成される。電力供給および各ユニット間の信号ケーブルの接続や液

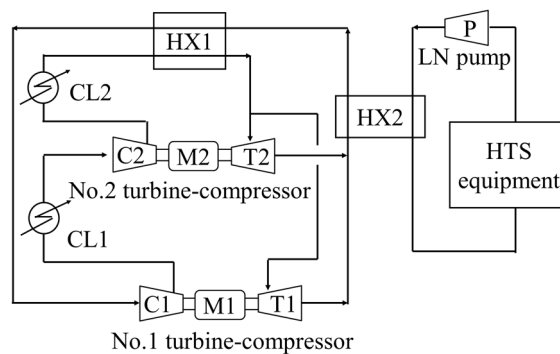


Figure 1 Schematic of flow diagram

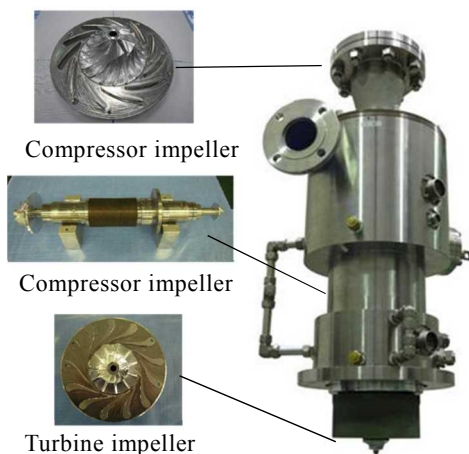


Figure 2 Turbine-compressor

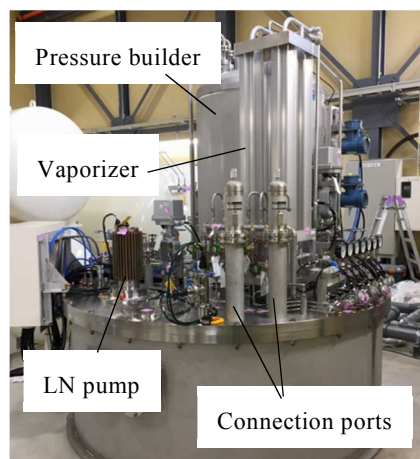


Figure 4 Performance test result



Figure 3 10 kW refrigerator overview

体窒素および冷却水配管の接続，作動ガスであるネオンの充填を行えば運転が開始できる。冷凍機の起動，クールダウン，ケーブル冷却時の負荷調整は，制御盤のタッチパネルで温度を設定することにより全自動運転が可能である。

3. 性能試験

ネオン冷凍機の性能試験では，常温から所定の温度まで冷凍機自体を冷却するクールダウン試験，冷凍機の冷凍能力および COP を測定する試験，冷凍機の熱負荷変動への安定性を確認するロードサイクル試験を行った。

このうち冷凍能力試験と COP 試験，ロードサイクル試験については大陽日酸が所有する液体窒素循環設備を用いた。Figure 4 に設備の外観を Figure 5 に設備を用いた性能試験フローを示す。本設備の主な構成機器は，圧力調整槽，蒸発器，循環ポンプ，配管取付ポート，熱負荷模擬ヒータである。圧力調整槽は液体窒素の温度変化による体積変化などによる内部圧力の変動を防止し，圧力を一定に保つ役割を持つ。内部圧力が低下した際は，圧力調整槽の液体窒素を蒸発器でガス化して戻

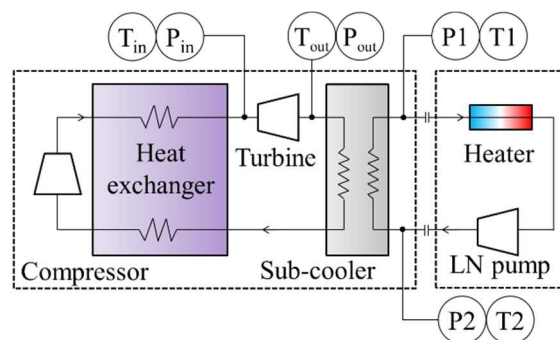


Figure 5 Flow diagram of performance test

すことで内圧を上昇させる。圧力が上昇した際は循環する液体窒素を圧力調整槽の上部に供給しガス相を冷やすことで圧力を下げる。ネオン冷凍機への液体窒素の供給は循環ポンプを使用し，流量 30~50L/min の能力を持つ。熱負荷ヒータは液体窒素循環設備の内部に組み込まれ，最大出力は 15kW である。

冷凍機と液体窒素循環設備は，真空断熱されたトランスファーチューブで接続され外部からの侵入熱を防いでいる。

3.1 クールダウン試験

Figure 6 にクールダウン時のタービン入出の温度変化を示す。クールダウン試験では，タービン入口温度が 78 K まで冷却されるよう設定している。冷凍機の運転前はタービン温度はほぼ常温であるが，時間 0 分に冷凍機が起動すると温度は徐々に低下する。起動後約 140 分で設定値であるタービン入口温度 78K に到達している。クールダウン中は，冷却スピードが一定になるようタービンコンプレッサの回転数を変化させている。タービン入口温度が 78K に到達すると，そのまま 78K を保持するようタービンコンプレッサの回転数が自動制御される。この場合，温度のアンダーシュートを防ぐ

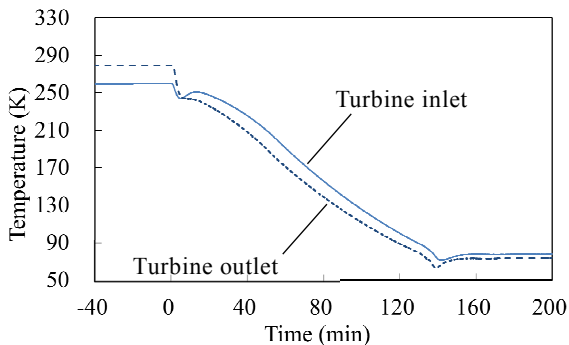


Figure 6 Cool down curve of stand-alone

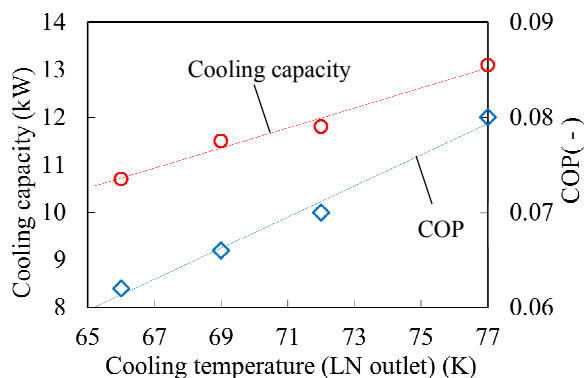


Figure 7 Cooling capacity and COP test result

ため、タービンコンプレッサの回転数が急激に減速するが、タービンコンプレッサの安定性に問題は生じず、運転開始から 200 分後にはタービン温度がほぼ一定の状態となった。

3.2 冷凍能力, COP 試験

冷凍能力と COP の試験は、Figure5 にある液体窒素の冷凍機出口温度 T1 を冷却温度として、冷却温度 66, 69, 72, 77K にて性能を取得した。タービンコンプレッサの回転数は、最大の冷凍能力が得られる 700rpm とした。各測定点の温度と圧力のデータは、時間的な変動による影響を抑えるため 30 分間の平均値を使用した。冷凍能力 Q と COP は以下の式から算出している。

$$Q = \dot{m}(H_2(P_2, T_2) - H_1(P_1, T_1))$$

$$COP = Q/W_{total}$$

ここで、 \dot{m} は液体窒素の質量流量、H はエンタルピ、P は圧力、T は温度、 W_{total} は制御盤等の電力を含む冷凍機の消費電力である。

Figure7 に冷凍能力と COP の測定結果を示す。冷却温度 66K において冷凍能力は 10.4kW であり、設計プログラムで得られた冷却温度 65K での冷凍能力 10.2kW と非常に近い結果が得られた。冷却温度 69K において冷凍能力は 11.2kW、COP は 0.067 であった。

3.3 ロードサイクル試験

ロードサイクル試験の目的は、冷凍機に無負荷から最大負荷までの急激な変動を与え、その際の冷凍機内部の圧力や温度の変動に対する安定性を確認することである。さらに最大負荷と無負荷を繰り返すことにより、長期運用に対する信頼性を確認することも目的である。

本試験では、最大負荷運転の 8 時間と無負荷運転の 16 時間を 1 サイクルとして 20 サイクルの運転を行った。最大負荷運転では液体窒素循環設備の熱負荷ヒータの出力を約 11~12kW に調整し、タービンコンプレッサの回転数を 700rpm (最高回転数) で維持した。無負荷運転では、回転数の下限は 350rpm であるが、液体窒素出口温度 T1 が一定になるように回転数が自動調整される。

Figure 8 にロードサイクル試験の 1 サイクルの結果を、Figure 9 にロードサイクル試験の 20 サイクルの結果を示す。Figure8 において、熱負荷ヒータが無負荷の状態では、液体窒素の出口温度は 69K に維持されている。熱負荷ヒータを 0kW から 12kW まで急激に増加させると、液体窒素の入口温度は急激に上昇する。冷凍機は液体窒素出口温度を 69K に保つため、タービンコンプレッサの回転数を 350rpm から 700rpm まで急激に上昇させる。回転数が 700rpm に到達すると、液体窒素出口温度が低下し 69K で維持される。最大負荷運転を 8 時間実施した後、熱負荷ヒータを無負荷へ切り替えると、液体窒素の出口温度は急激に低下する。液体窒素出口温度の低下に伴い冷凍能力を減少させるため、タービンコンプレッサの回転数が急減速している。

最大負荷運転開始時の液体窒素出口温度のオーバーシュートは約 3K、無負荷運転移行時のアンダーシュートは約 2K であった。この結果より、無負荷から最大負荷までの変動に対して、液体窒素出口温度を ±3K 以内に制御できることが確認され、タービンコンプレッサ

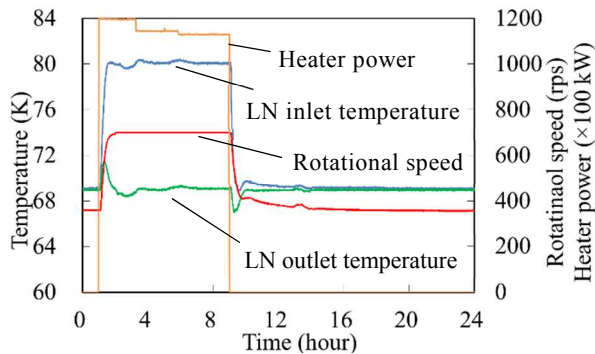


Figure 8 Load cycle test (one cycle)

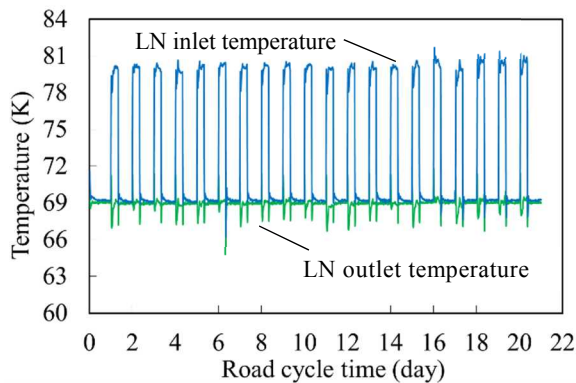


Figure 9 Load cycle test (20 cycles)

などが商用運転において十分な安定性と信頼性を確保していることを確認した。また、熱負荷が一定の場合は液体窒素出口温度は一定に保たれており、定常運転時の温度制御でも発散がないことを確認した。

4. まとめ

HTS ケーブルの冷却を目的とした 10kW ネオン冷凍機を 2016 年に商品化し、2017 年に韓国電力が取り組む世界初の商用での HTS ケーブルの冷却向けに採用された。10kW ネオン冷凍機のクールダウン試験、冷凍能力試験、COP 試験、ロードサイクル試験を実施し、商用運転に必要な安定性と信頼性を確認した。

クールダウン試験では、常温から 78K までのクールダウンを行い、約 140 分で目標温度に到達した。クールダウン中はタービンコンプレッサの回転数や系内圧力の調整により一定の温度勾配でクールダウンが完了した。またクールダウン完了から温度保持におけるタービンコンプレッサの安定性などにも問題は生じず、約 200 分で各部の温度は定常となった。

冷凍能力試験では、冷却温度 66K で冷凍能力 10.4kW が得られた。設計プログラムでの計算結果である冷却温度 65K、冷凍能力 10.2kW との比較により、実測値と計算結果は非常に近い値であることが確認できた。

ロードサイクル試験では、液体窒素循環設備と冷凍機を接続し、最大負荷運転を 8 時間、無負荷運転を 16 時間を 1 サイクルとして、20 サイクルの連続運転試験を実施した。最大負荷運転における熱負荷ヒータの出力は 11~12kW であった。ヒータ出力の変化により液体窒素の冷凍機入口温度が大きく変化するが、液体窒素出口温度が一定温度となるようにタービンコンプレッサの回転数や系内の圧力が適切に自動制御されることが確認できた。また、ヒータ出力切替時の設定温度と液体窒素出口温度の差は最大 3K で、20 サイクルに

わたる安定した冷凍機の運用が確認できた。特に同様の形式の冷凍機において、これまでに熱負荷 10kW 以上でのロードサイクル試験に成功した報告はなく、安定性と信頼性を備えた最も大容量の冷凍機を実用化することに成功した。

参考文献

- 1) S. Yamaguchi et al., "Concept and Design of 500 Meter and 1000 Meter DC Superconducting Power Cables in Ishikari, Japan," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. ID. 5402504
- 2) B. Yang et al., "Qualification Test of a 80 kV 500 MW HTS DC Cable for Applying Into Real Grid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. ID. 5402705
- 3) H. Kojima et al., "Fault Current Limitation Coordination in Power Transmission System With Superconducting Fault Current Limiting Cables (SFCLC)," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. ID. 5401904
- 4) T. Nakamura et al., "Tremendous Enhancement of Torque Density in HTS Induction/Synchronous Machine for Transportation Equipments," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. ID. 5202304
- 5) S. Yoshida et al., "Sub-cooled liquid nitrogen cryogenic system with neon Turbo-refrigerator for HTS power equipment," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59 (2014), 1246-1253
- 6) H.J.M. ter Brake et al, "SupernetNL program: 3.4 km 110 kV AC underground superconducting cable in the Dutch grid" IWC-HTS Karlsruhe, June 14-15, 2017
- 7) H. Hirai et al., "Development of a turbine-compressor for 10 kW class neon turbo-Brayton refrigerator" *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59 (2014), 1236-1241
- 8) S. Yoshida et al., "New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines" *Advances in Cryogenic Engineering* 55, edited by Weisend II, et al., AOP Press, Melville, New York, 2010, pp. 1131-1138.