

## 超電導電力機器の冷凍・冷却技術の進展

## Development of Refrigerator for HTS Power Machines

奈良 範久*	吉田 茂*	上森 賢悦*	平井 寛一**
NARA Norihisa	YOSHIDA Shigeru	UWAMORI Kenetsu	HIRAI Hirokazu
高池 明**	弘川 昌樹**	尾崎 信介**	上岡 泰晴***
TAKAIKE Akira	HIROKAWA Masaki	OZAKI Shinsuke	KAMIOKA Yasuharu

当社では高温超電導電力機器用にネオンガスを作動流体とするターボブレイトンスイクル冷凍機を開発している。2007年に試作冷凍機を製作し、冷却温度70K、冷凍能力2kWの性能を得た。更にいくつかの検討と改良を行った結果、改良型の冷凍機ではプロセス圧力の変更と磁気軸受式膨張タービンの開発が行われ、タービンの断熱効率は70%以上であった。膨張タービンの試験結果を元に現在開発中のターボ圧縮機と組み合わせた場合のプロセスシミュレーションを行った結果、改良型冷凍機でのCOP(冷凍効率)の予想値は0.06となった。

We are developing a Reverse-Brayton cycle refrigerator with a small turbo-expander for HTS (High Temperature Superconducting) power machines. Neon gas was adopted as a working fluid. The prototype refrigerator was made in 2007 and some improvements have been done. The modified refrigerator has a lower system pressure and a turbo-expander with active magnetic bearings. The turbo-expander has more than 70% of isentropic efficiency. We are also developing a compact turbo-compressor whose isentropic efficiency is expected more than 70%. A new refrigerator COP (Coefficient of Performance) is predicted to be 0.06.

## 1. はじめに

高温超電導応用機器(High Temperature Superconducting Applications: HTS 機器)の研究開発は、高温超電導体であるビスマス系やイットリウム系の線材が実用化段階に達し、HTS 機器に応用できるようになってきた。

HTS 機器の実用化は着実に近づいており、既に、超電導変圧器<sup>1,2)</sup>や超電導ケーブル<sup>3,4)</sup>は実際の電力システムに導入しての試験が行われ、良い成績を収めている。また、超電導モータ<sup>5,6)</sup>や超電導限流器<sup>7)</sup>も実用化まであと一歩である。

HTS 機器用の冷凍機としては、1) 超電導維持に必要な冷却温度と冷凍能力、2) 長期連続運転が可能な高い信頼性、3) 運転時の冷凍効率(省ランニングコスト)、4) 設置スペースの小型化、5) 設備コストの低減などの項目が求められている。しかし、HTS 機器を冷

却する冷凍機あるいは冷却システムは既存のものがそのまま使用され、最適でない状況にある。

当社では、HTS 機器用の冷凍機として求められている項目を満足する冷凍機として、2007年にネオンガスを作動流体とするターボブレイトンスイクル冷凍機(以下、ネオン冷凍機)を試作した。試作のネオン冷凍機の性能は冷却温度70Kにおいて冷凍能力2kWであった<sup>8,9)</sup>。2009年に、性能改善のために、プロセスの圧力を2.0MPa/1.0MPaから1.0MPa/0.5MPaに変更した。プロセス圧力の変更に合わせて、改良型冷凍機の膨張タービン用に3種類のインペラを試作し、性能試験を行った。

本論文では、最初にHTS 機器に必要なとされる温度と冷凍能力について述べ、次に当社の開発状況、実験結果と改良したネオン冷凍機の性能予測結果を記述する。

## 2. HTS 機器が必要とする冷凍能力

HTS 機器が十分な性能を出す温度は、その機器と

\* 開発・エンジニアリング本部 つくば研究所 超電導プロジェクト  
 \*\* 開発・エンジニアリング本部 山梨研究所 低温技術研究室  
 \*\*\* 低温工学協会専務理事(元当社顧問)

使用される HTS 線材によって異なるが、通常 40K ~ 80K の温度で使用される。今後の線材開発状況によって、より高温側にシフトすることが予想されている。

### 2.1 HTS 機器

いくつかの HTS 機器が実際の電力系統に設置され、試験が行われている。主なものには、変圧器<sup>1,2)</sup>、ケーブル<sup>3,4)</sup>、モータ<sup>5,6)</sup>、限流器<sup>7)</sup>がある。超電導ケーブルは米国に於いて実系統での試験<sup>4)</sup>が成功しており、日本<sup>3)</sup>でも実系統での計画が進んでいる。特に超電導変圧器は、九州電力に於いて実系統での試験が3週間連続で行われ<sup>1)</sup>、その有効性が示された。さらに大型のもの開発が進められている。

### 2.2 必要な温度と冷凍能力

現在検討されている HTS 機器は、40~70K の温度域で冷却されている。近い将来には線材の性能向上に伴って、65~80K の高い温度域で使用されるようになることが予想される。冷却に必要な冷凍能力は、HTS 機器の発熱或いは機器への侵入熱によって決まり、上に述べた温度において、数百 W から数十 kW であり、機器によって広範囲に及んでいる。各種の HTS 機器冷却に必要な温度と冷凍能力の関係を Fig. 1 に示す<sup>9)</sup>。

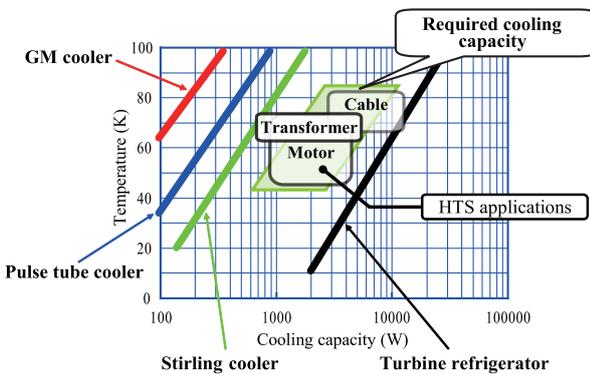


Fig. 1 Cooling power map of existing cryocoolers and the cooling power required by HTS power applications<sup>9)</sup>

図中の線は現在入手出来る冷凍機の性能を示し、各々 GM Cooler, Pulse Tube Cooler, Stirling Cryocooler, Bryton cycle Turbine Refrigerator (Turbo-Brayton Refrigerator) の温度と冷凍能力の関係を示している。

HTS 機器の冷却には比較的大きな冷凍能力が必要である。超電導ケーブルでは冷却温度 65K において数 kW ~ 20kW, 超電導変圧器では 65K において数 kW, 超電導モータでは数 kW ~ 10kW 程度の冷凍能力が必要となる<sup>10)</sup>。

Fig. 1 を見て注目すべきは、主要な HTS 応用電力機器を冷却する冷凍機が市場に存在しない事である。市場に受け入れられる冷却システムが無ければ HTS 機器の市場への投入は困難である。HTS 機器そのもの

の開発と同時に、機器冷却のための冷凍機の開発が急務となっている。

## 3. HTS 機器用冷凍機の開発

### 3.1 ネオン冷凍機の開発

当社では、ネオンガスを作動流体とするターボブレイトンサイクル冷凍機の開発を進めてきた。HTS 機器用冷凍機で必要となる冷却温度の範囲は 65~80K であり、ヘリウムガス、水素ガスとネオンガスが作動流体の候補になった。タービンでは流体の分子量が軽いと、高い回転数が必要になる。このため 3つの流体のうち分子量がもっとも重いネオンを作動流体として採用した。2007年に試作したネオン冷凍機の性能は、冷却温度 70K において冷凍能力 2kW であった<sup>9)</sup>が、冷凍能力と COP 向上のため、試作機での実験を基にシミュレーションを行い、2009年にプロセス圧力を 2.0MPa/1.0MPa から 1.0MPa/0.5MPa に変更した<sup>11,12)</sup>。現在は冷凍機の性能目標として、冷却温度 65K における冷凍能力 2kW, 80K における COP 0.06 の達成に向けて開発を行っている。

### 3.2 インペラの改良

プロセス圧力変更前のインペラ外径は 25mm であったが、改良型ネオン冷凍機ではプロセス圧力が変更されたため、インペラを新たに設計する必要があり、羽根枚数 12 枚と 16 枚のフルブレードおよび羽根枚数 16 枚のうち 8 枚が中間羽根となったスプリットブレードの 3 種類を製作した。Table 1 は膨張タービンの設計仕様を示し、Table 2 はインペラの構造寸法を示す。また 3 種類のインペラの写真を Fig. 2 に示す。従来のタービンインペラ (外径 25mm) は性能試験で 68~70% の断熱効率であったが<sup>13)</sup>、新しいタービンインペラ (外径 32mm) では、更なる効率向上が期待される。

Table 1 The design specification of the turbo-expander

Inlet pressure	1.0MPa
Inlet temperature	68K
Outlet pressure	0.5MPa
Outlet temperature	56K
Flow rate (Neon)	0.3kg/s
Rotational speed	1200 rps
Efficiency	65%
Impeller diameter	32mm
Brake type	Alternator loaded
Bearing type	Active magnetic bearings

Table 2 Impeller configuration

Impeller No.	32F1204H25N74	32F1604H25N74	32S1604H22N71
Diameter(mm)	32	32	32
Blade Type	Full blade	Full blade	Split blade
Number of blades	12	16	Full:8, Split:8
Blade thickness(mm)	0.4	0.4	0.4
Edge height(mm)	2.5	2.5	2.2
Nozzle angle(degree)	74	74	71



(a) (b) (c)

- (a) 12-Full blade type (32F1204H25N74),
- (b) 16-Full blade type (32F1604H25N74),
- (c) 8-Full blade and 8-Split blade type (32S1604H22N71)

Fig. 2 Photographs of new impellers

3.3 タービンの軸の設計

新しいインペラは直径が大きく、体積流量は改良前の膨張タービンの2倍となる。そのため軸を太くすることによって軸の剛性を強くするようにした。一方、軸が重くなると固有振動数は低くなり、固有振動数が軸の回転速度に近づく。固有振動数と定格回転数を比較評価するため、機械構造解析プログラム ANSYS Mechanical<sup>14)</sup> を使用して固有振動数を解析した。軸とインペラの寸法を Fig. 3 に示す。解析モデルを Fig. 4 に示す。剛性に寄与しないモータや軸受などの部材は付加質量として扱った。

Table 3 は、一次から四次の固有振動数を示している。一次の曲げ固有振動数での変形を Fig. 5 に示す。一次の曲げ固有振動数の予測値は 1463.4 Hz で、定格の回転数 (1200rps) より 20% 以上高く、安定して運転できることを確認した。

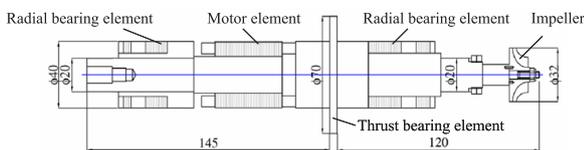


Fig. 3 Turbine shaft and impeller dimensions

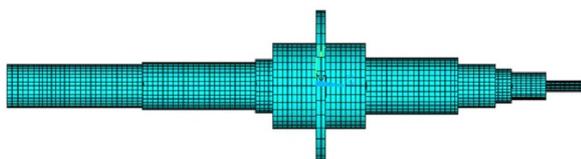


Fig. 4 Turbine shaft analysis model

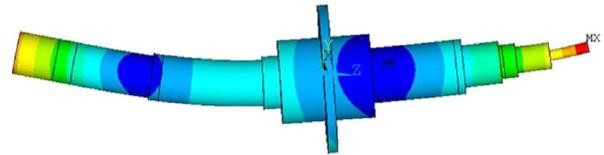


Fig. 5 Deformation by the 1st natural frequency

Table 3 Natural frequency analysis of the turbine shaft

Frequency Mode	Frequency (Hz)
First	1463.4
Second	3388.0
Third	4722.4
Fourth	4765.3

3.4 性能試験

新しいインペラを評価するために、膨張タービンを試作ネオン冷凍機に設置し、性能試験を実施した。フローを Fig. 6 に、試作ネオン冷凍機のコールドボックスを Fig. 7 に示す。プロセス圧力の変更に伴い、冷凍機のレシプロ圧縮機のシリンダーヘッドの改造を実施した。

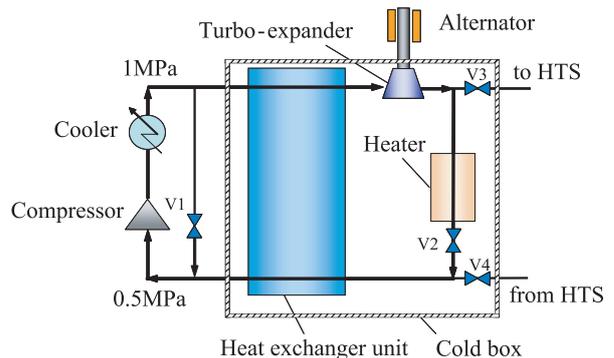
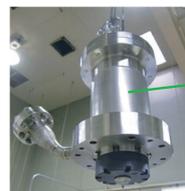


Fig. 6 Flow diagram



Turbo-expander



Fig. 7 Photograph of the cold box

性能試験ではインペラ形状とタービン効率の関係性を比較した。試験結果を Fig. 8 に示す。膨張タービンの断熱効率 $\eta$ は  $U/CO$  で評価した。ここで、 $U$  はインペラ

周速, COはノズル出口の理論断熱噴出速度を示す<sup>13)</sup>。タービンの断熱効率にはインペラ形状による大きな違いはなく, U/COが0.65~0.7付近でピーク効率を示している。ただし僅かではあるが, 羽根枚数12枚のインペラが最もピーク効率が高いので, 次の冷凍機の設計では, 羽根枚数12枚のフルブレードインペラを採用予定である。

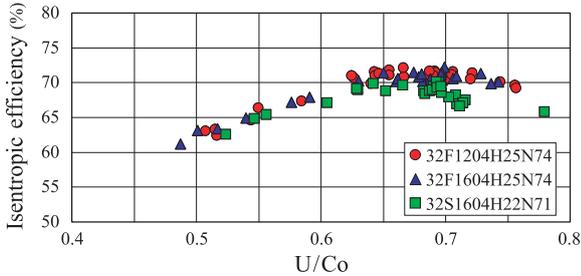


Fig. 8 Turbo-expander isentropic efficiency

4. 冷凍機性能試験と COP の予測

4.1 冷凍機性能試験結果

Table 4に冷凍機の試験の代表的な結果を示す。Table 4に示す全ての結果は, 羽根枚数12枚(フルブレード)のインペラでの運転結果である。これらの冷凍機の運転では, 主熱交換器の効率と冷凍能力を調べた。熱交換器の効率を計算するために用いた温度と圧力の測定ポイントを Fig. 9に示しめす。冷凍能力は電気ヒーターの電源入力値として測定した。65Kでの冷凍能力は約2.4kW, 80Kでは約2.9kWである。熱交換器は約99%の効率を示し, プロセス圧力が2.0MPa/1.0MPaの場合と同程度の能力であった。

Table 4 Refrigerator performance test results

Test run No.	Pressure (kPa)					Cooling power(kW)	Flow rate (kg/sec)	Coefficient of heat exchanger (%)
	P1	P2	P3	P4	P5			
#1	1015	975	558	517	483	2.40	0.330	99.0
#2	1016	980	548	507	480	2.40	0.317	98.9
#3	969	929	527	486	459	2.91	0.296	98.9
#4	962	927	520	482	455	2.83	0.288	99.0

Test run No.	Temperature (K)					Turbine isentropic efficiency (%)	Expansion ratio	Compression ratio
	P1	P2	P3	P4	P5			
#1	291.8	69.1	58.9	65.5	289.4	70.1	1.75	2.10
#2	296.6	69.2	58.8	65.6	294.1	69.4	1.79	2.12
#3	296.1	83.6	71.5	80.6	293.7	69.8	1.76	2.11
#4	297.3	83.8	71.7	80.9	295.0	68.2	1.78	2.11

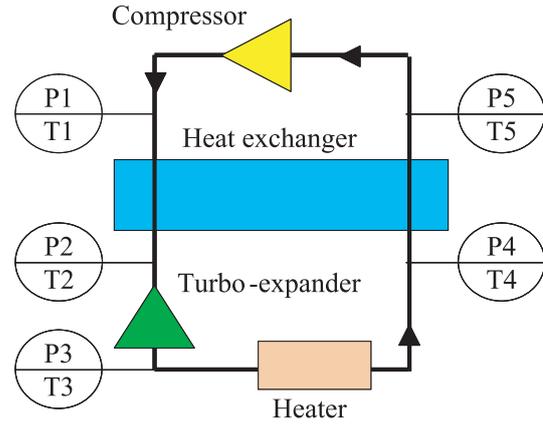


Fig. 9 Measurement points

4.2 COP の予測

今回の性能試験では, レシプロ圧縮機を使用した, レシプロ圧縮機の効率は低く, 80K 運転での COP は約0.05であった。本年度中に従来のレシプロ圧縮機に代わって, 現在開発中のターボコンプレッサーを設置する予定である<sup>15)</sup>。タービンの性能データに基づいた冷凍機のシミュレーション結果を Table 5に示す。各運転に対し圧縮機の断熱効率を65%と70%の2つのケースを設定し, 計算を行った。その結果, ネオン冷凍機の目標性能である, 冷却温度80Kでの COP0.06を達成するには, 圧縮機の断熱効率を70%以上まで向上させる必要があることがわかった。さらに圧縮機効率70%が実現されれば, 65Kでの冷凍能力も2.5kWに向上することが期待できる。

Table 5 Refrigerator COP prediction

Simulation No.	Operation temperature (K)	Assumed Compressor isentropic efficiency (%)	Calculated Compressor shaft power (kW)	Regenerative Power by expander (kW)	Predicted COP
#1-1	65.5	65	52.5	3.18	0.0411
#1-2	65.5	70	48.8	3.18	0.0412
#2-1	65.6	65	51.9	3.14	0.0417
#2-2	65.6	70	48.1	3.14	0.0449
#3-1	80.6	65	48.1	3.55	0.0572
#3-2	80.6	70	44.6	3.55	0.0618
#4-1	80.9	65	47.2	3.45	0.0566
#4-2	80.9	70	43.8	3.45	0.0612

Calculation condition:

Compressor mechanical efficiency: 90%

Turbo-expander mechanical efficiency for regenerative circuit: 70%

5. 結論

ネオン冷凍機用の膨張タービンを開発し, 試作ネオン冷凍機での性能試験を実施した。膨張タービンは高圧側圧力1.0MPa, 低圧側圧力0.5MPaの新しいプロセス圧力で運転され, タービンの断熱効率は70%

以上であった。新しい膨張タービンを組み込んだ冷凍機は冷凍能力が測定され、65Kで2.4kW、80Kで2.9kWを得た。Fig. 10はターボ圧縮機を搭載したネオン冷凍機のイメージ図である。

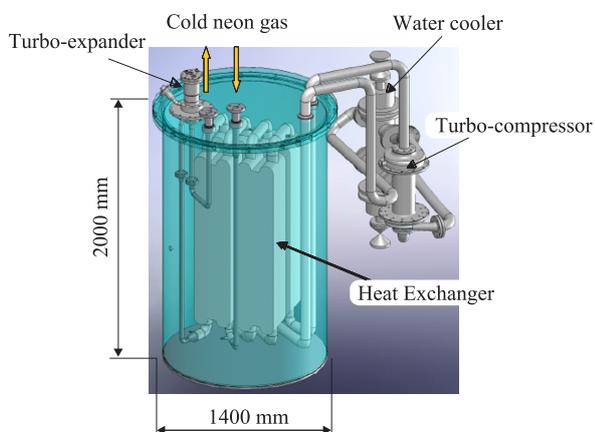


Fig. 10 A schematic drawing of the new neon refrigerator

今後、断熱効率70%以上のターボ圧縮機をネオン冷凍機に搭載することにより、冷凍能力2.5kW（冷却温度65K）、COP0.06（冷却温度80K）を達成し、HTS機器用冷凍機の実用化を進めていく。

## 6. 謝辞

この研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）からの受託により実施されています。

## 参考文献

- 1) Kimura, H.; Honda, K.; Hayashi, H.; Tsutsumi, K.; Iwakuma, M.; Funaki, K.; Bohno, T.; Tomioka, A.; Yagi, Y.; Maruyama, H.; Ohashi, K. "Test result of a HTS power transformer connected to a power grid". *Physica C: Superconductivity*. 2002, 3, p.1694-1697.
- 2) Morandi, A.; Trevisani, L.; Pibaani, P. L.; Fabbri, M.; Martini, L.; Bocchi, M. "Superconducting Transformers: Key Design Aspect for Power Applications". *J. of Physics: Conf. Series*. 2008, 97, p.1-9, (EUCAS 2007).
- 3) 市川路晴, 高橋俊裕, 鈴木寛, 向山晋一, 八木正史. "500m超電導ケーブルフィールド試験と短尺ケーブルによる短絡試験". *低温工学*. 2006, (41), p.12-19.
- 4) Yumura, H.; Masuda, T.; Watanabe, M.; Takigawa, H.; Ashibe, Y.; Itoh, H.; Hirose M.; Sato, K. "Albany HTS

- Cable Project Long Term In-grid Operation Status Update". *Advances in Cryogenic Engineering* 53. AIP Press, Melville, New York, 2008, p.1051-1058.
- 5) Sugimoto, H.; Tsuda, T.; Morisita, T.; Hondou, Y.; Takeda, T.; Togawa, H.; Oota, T.; Ohmatsu, K.; Yoshida, S. "Development of an Axial Flux-type PM Synchronous Motor with the Liquid Nitrogen Cooled HTS Armature Windings". *IEEE Transaction on Applied Superconductivity* 17, 2007, 2, p.1637-1640.
- 6) American Superconductor Corp. "Home page". <http://www.amsc.com/products/motorsgenerators/shipPropulsion.html>, (参照 2010-06-01)
- 7) Yazawa, T.; Ootani, Y.; Sakai, M.; Kuriyama, T.; Urata, M.; Tokunaga, Y.; Inoue, K. "66 kV/1 kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet". *IEEE Transaction on Applied Superconductivity* 2005, 15 (2), p.2059-2062.
- 8) 平井寛一, 鈴木佳明, 長坂徹, 坂上誠一. "高温超電導機器用システムの開発". *大陽日酸技報*. 2008, (27), p.36-37.
- 9) Hirai, H.; Suzuki, Y.; Hirokawa, M.; Kobayashi, H.; 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.
- 10) Suzuki, Y.; Yoshida, S.; Kamioka, Y. "Subcooled liquid nitrogen refrigerator for HTS power systems," *Cryogenics*, 2003, 43, p.597-602.
- 11) 平井寛一, 弘川昌樹, 高池明. "磁気軸受ネオン膨張タービンの開発". *大陽日酸技報*. 2009, (28), p.1-5.
- 12) Yoshida, S.; Hirai, H.; Takaike, A.; Hirokawa, M.; Aizawa, Y.; Kamioka, Y.; Okamoto H.; Hayashi H.; Shiohara, Y. "New Design of Neon Refrigerator for HTS Power Machines". *Advances in Cryogenic Engineering* 55. AIP Press, Melville, New York, 2010, p.1131-1138.
- 13) 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.
- 14) ANSYS Inc. "Homepage". <http://www.ansys.com/products/structural-mechanics/products.asp#mechanical>, (参照 2010-06-01)
- 15) Hirai, H.; Hirokawa, M.; Yoshida, S.; Takaike, A.; Ozaki, S.; Nara, N.; Uwamori, K.; Kamioka, Y.; Hayashi, H.; Okamoto, H.; Shiohara, Y. "Development of a neon turbo-compressor with active magnetic bearings". 21M-ps-5, ICEC 23, to be published