

NIFS 温度可変低温設備の建設(1)

— 性能確認試験 —

Construction of 600 W helium refrigerator/liquefier with variable temperature supplies in NIFS (1)

— Performance tests —

濱口 真司, 岩本 晃史, 高畑 一也, 三戸 利行, 高田 卓(核融合研);

信時 実, 檜垣 春弘, 熊木 卓也, 撫原 浩嗣(大陽日酸)

HAMAGUCHI Shinji, IWAMOTO Akifumi, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, TAKADA Suguru (NIFS);

NOBUTOKI Minoru, HIGAKI Haruhiro, KUMAKI Takuya, NADEHARA Kouji (TNSC)

E-mail: hamaguchi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所では、超伝導マグネット研究棟の600Wヘリウム液化冷凍機の更新を行った[1-3]。液化冷凍能力は従来の液化冷凍機と同等であるが、新たに温度可変の冷媒を供給できる機能が追加され、高温超伝導体などの試験への使用も期待される。2015年3月に建設が完了し、その後、約1年間の調整を行い、併せて詳細な性能確認試験を行った。本講演では完成した液化冷凍機の仕様と性能確認試験結果について報告する。

2. 温度可変液化冷凍機の仕様

今回導入された温度可変液化冷凍機は、Linde社のLR280をベースとして、任意の温度のヘリウムガスを供給できるように設計された液化冷凍機である(Fig.1)。その設計仕様は以下の通りである。

- ・液化能力: 250L/h 以上
- ・冷凍能力: 600W 以上@4.5K
- ・SHe 供給能力: 350W 以上@4.55K, 50g/s
- ・温度可変供給能力:
(20K 送り/30K 戻り時) 1kW 以上
(40K 送り/50K 戻り時) 1.5kW 以上

ただし、全てにおいて、補助寒冷として液体窒素を使用した場合の値とする。

3. 性能確認試験

上述の5項目について、設計仕様を満足しているかについて性能確認試験を行った。液化能力は、外付けの既設の10,000L液体ヘリウム貯槽にヘリウムを液化し、その液面上昇速度により確認した。冷凍能力は、温度可変液化冷凍機内の気液分離器に液体ヘリウムを生成し、その液面が一定となるように気液分離器内のヒーターで液面制御した際のヒーター熱入力量により確認した。温度可変供給能力は、試験用に準備されたテストヒーターユニットを温度可変供給/戻り配管に接続し、そのヒーター熱入力量により確認した。SHe供給能力については、テストヒーターユニットをSHe供給/戻り配管に接続した状態でSHeを流し、テストヒーターユニットで252Wの熱入力を加えた後の戻りSHeを使って気液分離器に液体ヘリウムを生成し、その液面が一定となるように気液分離器内のヒーターで液面制御した際のヒーター熱入力量の合算により確認した(Fig.2)。

本性能確認試験の結果、全ての項目について設計仕様以上の性能が確認された。性能確認試験の後、温度可変液化冷凍機はJT-60SAの実機CS1モジュール試験等の大型実験等に使用されている。今後は新設された大口径高磁場試験装置を用いた核融合炉用の高温超伝導体や間接冷却導体の試験等に供される予定である。



Fig.1 Photograph of 600 W variable temperature helium refrigerator/liquefier in NIFS.

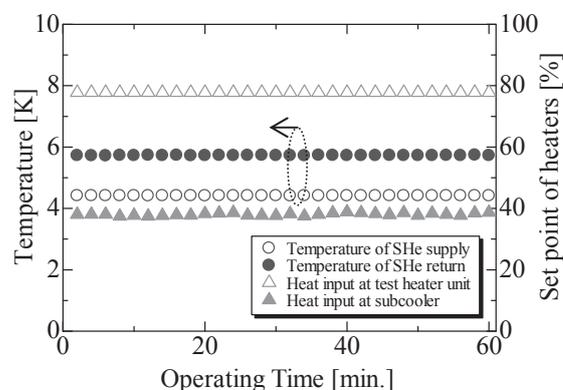


Fig.2 Measured results of temperatures at SHe supply/return and heater inputs at test heater unit /subcooler.

参考文献

1. A. Iwamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.32
2. S. HAMAGUCHI, et al.: Plasma and Fusion Research, Vol. 10 (2015) p.3405020
3. S. HAMAGUCHI, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26 (2016) p.9500404

NIFS 温度可変低温設備の建設 (2) -4 分円オリフィス流量計のその場較正 -

Construction of 600 W helium refrigerator/liquefier with variable temperature supplies in NIFS (2) - In-situ calibration of quarter circle orifice -

岩本 晃史, 濱口 真司, 高畑 一也, 三戸 利行, 高田 卓(NIFS);
 信時 実, 檜垣 春弘, 熊木 卓也, 撫原 浩嗣(大陽日酸)

IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, TAKADA Suguru (NIFS); NOBUTOKI Minoru, HIGAKI Haruhiro, KUMAKI Takuya, NADEHARA Kouji (TNSC)
 E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合研の超伝導マグネット研究棟に設置された温度可変低温設備は新機能である温度可変ヘリウムガスを供給する能力の他、従来と同様に超臨界ヘリウム (SHe) を供給する能力 (350 W at 4.55 K, 50 g/sec) を有している。被冷却体への SHe 流量監視用に 4 分円オリフィスが取り付けられている。4 分円オリフィスはドイツ規格 VDI/VDE 2041 に準拠しており、本設備の使用環境ではその場較正が必要であった。その較正試験について報告する。

2. 4 分円オリフィス

使用している 4 分円オリフィスとコールドボックスへの取り付け環境を Fig.1 に示す。オリフィス径 d と配管径 D の比 β は 0.38 になる。VDI/VDE 2041 では、4 分円オリフィスの取り付け条件として上流側と下流側の直管長さはそれぞれ $10D \pm 1D$, $\geq 6D$ が指定されている。また、 D は $40 \text{ mm} \leq D \leq 150 \text{ mm}$, β は $0.2 \leq \beta \leq 0.6$ がそれぞれ推奨されている。 $D \leq 40 \text{ mm}$ 又は $d \leq 15 \text{ mm}$ の場合は、使用条件下での較正が推奨されており、本装置への取り付け環境はそれに該当する。

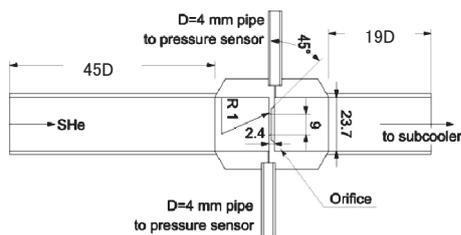


Fig.1 Installation condition of the quarter circle orifice [1].

規格の推奨条件下ではレイノルズ数 Re_D が $500 \leq Re_D < \sim 1.4 \times 10^5$ の時、流出係数 C は 0.78 になり、質量流量 m は次の式で計算できる。

$$m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \quad (1)$$

ここで、 ε , Δp , ρ_1 は膨張係数、オリフィス差圧、オリフィス上流側密度を表している。

3. オリフィス較正試験

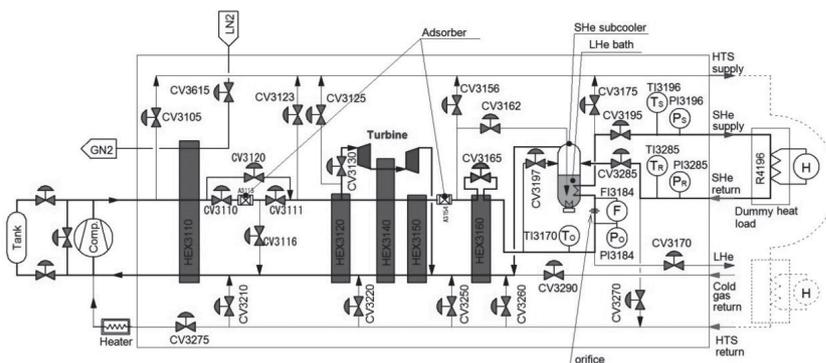


Fig.2 Flow diagram of the calibration. A dummy heat load was equipped between the SHe supply and return. FI3184 is the orifice [1].

較正試験はコールドボックスに設置した状態で行った。Fig.2 にその較正試験の構成を示す。SHe は SHe 供給→ダミー熱負荷→SHe回収の順に流れ、ダミー熱負荷で印加された熱量と供給・回収のエンタルピー差から m を計算することができる。その m と(1)式より C を求める。

Fig.3 に今回の較正試験で得られた C 値と過去の実験結果[2-4]を比較して示す。 β はほぼ同じであるが、配管径や上流・下流直管長さが異なる。 $500 \leq Re_D < \sim 1.4 \times 10^5$ の範囲では、全てのデータが VDI/VDE 2041 に従っている。我々が今回得た $C=0.784$ at $Re_D=1.43 \times 10^5$ は VDI/VDE 2041 の上部限界 Re_D 点と一致しており、その規格を支持している。その後、 $Re_D > 1.4 \times 10^5$ では C 値が急激に上昇し、ある Re_D を境に減少するという結果が得られた。過去の 2 例も同様な傾向を示しており 4 分円オリフィスの特性だと考えられる。ピーク値が異なるのは直管部の長さやオリフィス径などの違いが影響していると推測する。温度可変低温設備の仕様流量近傍の 50.8 g/sec では $Re_D = 6.23 \times 10^5$ であり、 C が一定である Re_D の範囲外にある。

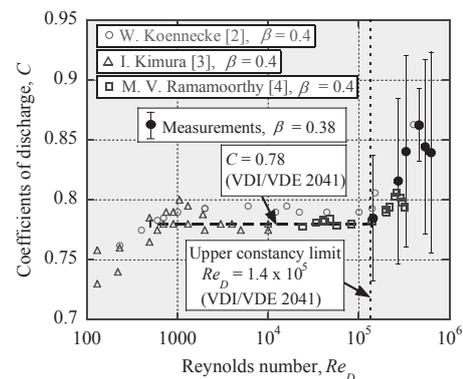


Fig.3 Dependence of C values on Re_D [1].

参考文献

1. A. Iwamoto, et al.: Fusion Eng. Des., 123C (2017), p107.
2. W. Koennecke, Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A 9 (3) (1938) 109-125.
3. I. Kimura, Keisoku 11 (9) (1961) p517.
4. M. V. Ramamoorthy, et al.: J. Basic Eng. 88 (1) (1966), p9.

極低温下における光学実験のための無冷媒希釈冷凍機システムの開発

Cryogen-free dilution refrigerator system for optical experiments at very low-temperatures

中川 久司(産総研 物理計測標準研究部門), 阿子島 めぐみ(産総研 物質計測標準研究部門),
三石 雄悟(産総研 太陽光発電研究センター)

NAKAGAWA Hisashi (RIPM, AIST),

AKOSHIMA Megumi (RIMCM, AIST),

MISEKI Yugo (RCPV, AIST)

E-mail: hisashi-nakagawa@aist.go.jp

1. はじめに

極低温環境では、熱擾乱が低減され、弱い相互作用が主役になるような物理現象の発現や超伝導量子デバイス性能の向上が期待できる。連続的に極低温を生成する希釈冷凍機は、物性研究や超伝導量子デバイスを用いた光・量子計測などには不可欠なツールである。我々は、これまでに極低温標準の研究[1]において、到達最低温度 4 mK の希釈冷凍機 (DR) などの極低温冷却技術を開発した[2]。この極低温冷却技術を活用し、超伝導量子デバイスを用いた光・量子計測の研究に適した光学実験用無冷媒 DR システム (DODR) の開発を行っている。

2. 無冷媒希釈冷凍機に求められる性能

超伝導量子デバイスを用いた光・量子計測においては、熱擾乱の低減化やエネルギー高分解能化のため、デバイス動作温度の低温化、さらに光結合効率の良い光学窓からの光 (平行空間光) の導入や素子の集積化、低雑音化のための低温電子回路の利用が求められている。以上から、DODR には、平行空間光や素子集積化による多数の測定配線、低温電子回路のために生じる熱流入量に打ち勝ち、かつ到達最低温度が低い冷凍能力が要求される。また検出素子評価には短いターンアラウンド実験も必要のため、室温からの予冷時間の短縮が必要である。

3. 光学実験用無冷媒希釈冷凍機システム

図 1 に開発を進めている DODR の写真を示す。DODR の予冷ステージには冷凍能力が 0.9 W@4 K のパルスチューブ冷凍機 (PTR) を利用している。実験空間の低振動化のために、PTR 本体および実験室フロアと、DODR 低温部分との間に、空気ばねなどの除振装置を設置している。拡張性を持たせるため、多数のストレート実験アクセスポートを有している。

DR は、 ^3He - ^4He 混合ガス (混合ガス) を循環させ、低温部で液化させた後、混合室においてその量子効果により連続的に極低温を生成する。一般の無冷媒 DR では、混合ガスの液化に固定式ジュール・トムソン弁 (J-T 弁) を使用している。これは極めて狭い配管で高いインピーダンスを作るため、長期運転でのガス汚染による配管閉塞のリスクがある。DODR では、 ^4He 蒸発冷却を利用した 1 K ステージを装備している。温度 1 K は ^4He ガスの循環閉回路により連続的に生成される。DODR では配管やガスハンドリングシステムが増加するため、製作・操作には手間がかかる。しかし、1 K ステージにより、J-T 弁なしに、長いキャピラリにより比較的緩やかに液化インピーダンスを作ることができるため配管閉塞のリスクは低減できる。またこのステージは測定配線や低温電子回路の冷却に利用でき、実験空間への熱流入量の低減、低雑音化が期待できる。DODR では室温からの予冷には、メイン混合ガス循環閉回路とは別系統の低インピーダンスの予冷用混合ガス循環閉回路およびパッシブガス熱スイッチを並列活用する。現在、使用するガスの種類や熱交換器・熱スイッチ構造について検討し、設計・製作を進めている。

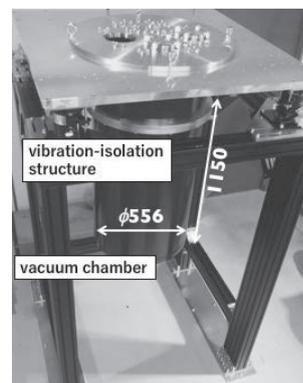


Fig.1 Photograph of the cryogen-free dilution refrigerator system under construction

平行空間光の導入などによる熱流入量の増加に対抗しつつ、超伝導量子デバイス温度を低下させるため、DODR の設計冷凍能力は、到達最低温度 10 mK、250 μW @100 mK である。10 mK 以下に到達するには、大表面積を有する焼結銀粉末製ステップ型熱交換器 (ステップ型熱交換器) が不可欠である。この熱交換器は固体と液体ヘリウム界面に大きな温度差を作るカピツァ熱界面抵抗問題を解決する DR のキーデバイスである。図 2 に我々が製作したステップ型熱交換器表面の走査型電子顕微鏡の写真を示す。熱交換器では、ナノ銀粉末を焼結し多孔質化させることで、大きな熱交換表面積を形成する。我々は、ステップ型熱交換器の熱交換効率を従来よりも向上させるために、様々なナノ銀粉末について、焼結実験や、その比表面積および熱伝導、形状解析の物性評価を行っている。

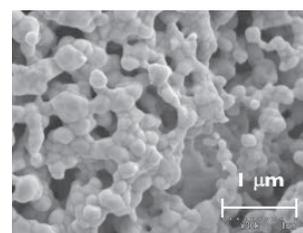


Fig.2 Scanning electron microscope image of the sintered silver heat exchanger

4. まとめ

我々は、予冷機構およびステップ型熱交換器などの高性能化の研究を推し進め、超伝導量子デバイスを用いた光・量子計測の高度化に対応し、その研究発展に資する光学実験用無冷媒希釈冷凍機システムの開発を行っている。

参考文献

1. H. Nakagawa: Int. J. Thermophys., Vol. 37 (2016) 112
2. H. Nakagawa and T. Hata: Int. J. Thermophys., Vol. 35 (2014) pp.999 - 1018

気候変動観測衛星「しきさい(GCOM-C)」搭載多波長放射計向け冷却系の開発 Development of a Cooler Dewar Assembly for infrared scanning radiometer on board GCOM-C

金尾 憲一, 大塚 清見 恒松 正二(住重);板橋 孝昌(JAXA);天野高宏(NEC)

KANAO Ken-ichi, OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji(SHD); ITAHASHI Takamasa(JAXA); AMANO Takahiro (NEC)

E-mail: kenichi.kanao@shi-g.com

1. はじめに

「しきさい」は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が2017年度に打ち上げを予定している気候変動観測衛星である。「しきさい」には、多波長光学放射計(SGLI)が搭載されており、近紫外から熱赤外域の複数の波長域で観測を行う。大気中に浮遊して日射を和らげる塵や雲、植物、プランクトンの分布が観測対象である。SGLIには赤外走査放射計部が搭載されていて、その中にある熱赤外検出器は55±0.1Kに冷却される。本稿では、スターリング冷凍機を用いた冷却系の開発について報告する。

2. 要求仕様

冷却系に対して求められる主な仕様を表1に示す。検出器を55の低温に冷却することを求められている。検出器の発熱量や信号線は比較的によく、55Kまでの冷却を成立させるための熱設計が重要になる。また、軌道上で5年間連続運転できることが求められている。

Table 1 Requirement for the cooler Dewar assembly

Item	Specification
Cooling temperature	55K±0.1K
Heat load from the detector	45mW
Number of wires	41
Ambient temperature	20deg C or less
Life time	5 year in orbit
Power consumption	50W or less

3. 設計結果

2項で述べた要求を満足するために、デュワの設計にあたっては、低温部への熱侵入を減らすことに注力した。Fig1にデュワ部の断面を示す。打ち上げに耐える強度を持ち、断熱性もよい構造を実現するために、赤外線検出器を、GFRP製のサポートで支持する構造を工夫した。また、検出器の信号線にステンレス線を使用することで熱負荷の低減をはかっている。Table1に55K領域への熱負荷を示す。合計330mWの熱負荷となった。この熱負荷を冷凍機で吸熱して、検出器を55Kに冷却する。

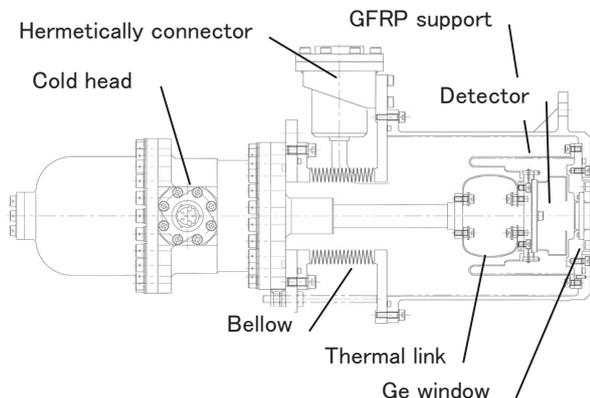


Fig.1 Cross section of the Dewar

冷凍機は、これまでに打ち上げた実績があるスターリング冷凍機¹⁾をベースに、コールドヘッドの発生振動を抑制するためのバランサーを備えた最新モデルである。冷凍機と検出器は銅箔で作られたフレキシブルなサーマルリンクで接続されている。

Table 1 Heat load to 55K area

Item	Specification
Heat load from the detector	45mW
Conduction heat load through GFRP support	200mW
Conduction heat load through wires	12mW
Radiation heat load	73mW
Total	330mW

4. 製作、試験

3項の設計に基づき、Cooler Dewar Assembly (CDA)を製作した。Fig2に完成したCDAの外観写真を示す。

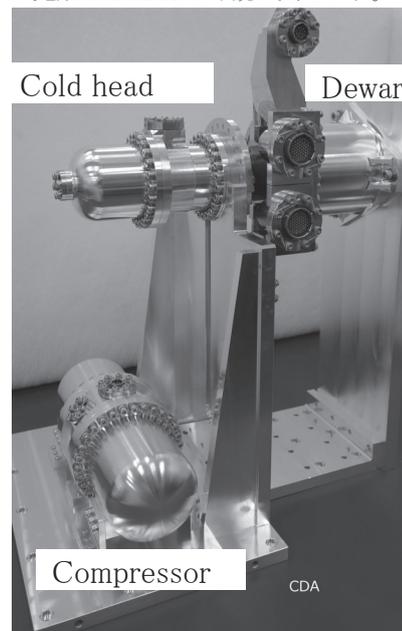


Fig.2 Photograph of the Cooler Dewar Assembly

CDAは検出器を55Kに冷却できることを確認した。冷凍機制御電源の温調機能によって、外部環境温度が20℃変動したとしても、検出器の温度安定度を±0.1K以内に抑えることも実現している。発生擾乱測定試験、振動試験、熱真空試験にも合格し、赤外走査放射計部に引き渡された。

5. 今後の予定

「しきさい」は現在2017年度中の打ち上げをめざして、宇宙航空研究開発機構種子島宇宙センターで打ち上げの準備作業が進められている。

参考文献

1. K. Narasaki, et al.: CRYOCOOLERS 19, ICC Press (2016) p.613

Performance Analysis of 2K Heat Exchanger for Superfluid Helium Cryogenic System at KEK

Ashish Kumar (Sokendai)

Hiroataka Nakai, Kota Nakanishi, Hiroataka Shimizu, Kazufumi Hara, Yuuji Kojima, Teruya Honma (KEK)

E-mail: ashish@post.kek.jp, kumar_ashish@anet.soken.ac.jp

1. Introduction

The recent operating temperature of the 1.3 GHz niobium superconducting radio frequency cavity (SRF) is 2.0 K or below and such low operating temperatures are achieved with superfluid helium ($T < 2.17$ K). To achieve such temperatures a 2K heat exchanger (2K HX) in series with a Joule-Thomson (JT) valve is employed in the cryogenic system. The heat exchanger is required for liquid helium (LHe) temperature reduction from 4.4 K to ~ 2.2 K or below before JT valve using sensible heat capacity of cold helium gas (GHe) at 2.0 K evaporating from helium tank of SRF cavities. Lower inlet temperature results in flash loss reduction (40 \rightarrow 10%) after JT expansion and hence increased production rate of superfluid helium [1]. The JT valve maintains level and pressure of superfluid helium in the helium tank of SRF cavity. To cool liquid helium to approx. 2.2 K or below before the JT valve, minimum effectiveness of 85% is required for the 2K heat exchanger. At KEK, we have two variants of finned type 2K HXs, whose performance has to be determined with the help of computational flow dynamics (CFD) and a 2K heat exchanger test stand.

2. 2K Heat Exchangers

The 2K heat exchanger is helical coiled finned type with two variants Type I (Old Version) for heat loads until 30W (40 loops) and Type II (New version) for heat load up to 100W (30 loops). The design methodology of both heat exchangers is similar with difference being in the fin design. The fins provide larger surface area for efficiently extracting enthalpy from LHe flowing in helical tubes.

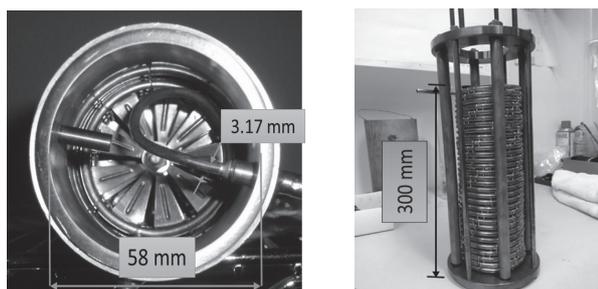


Fig.1 Type I and II 2K Heat Exchanger

3. Numerical and Experimental Setup

ANSYS CFX® for CFD is used to determine the performance of the type II 2K HX by simulating LHe and GHe flowing through it. The fluid conditions are assumed to be steady state with properties varied with respect to pressure and temperature in the operating range of 4.4 K to 2.0 K and adiabatic conditions from surroundings on 2K HX.

To determine the performance of heat exchangers experimentally, a test stand primarily consisting of dummy load tank at 2.0 K, a LHe storage tank, a heat exchanger, a JT valve and control valves is employed. Temperature and

pressure sensors at specific positions measure the state of fluids. LHe flows through the 2K HX via the JT valve to the dummy load tank. Evaporating GHe from dummy load tank flows through the 2K HX to helium gas pumping system while exchanging enthalpy with LHe and cooling it.

4. Result and Discussions

Numerical analysis of type II 2K HX at 37 W steady heat load yielded 2.62 K subcooled liquid helium at the exit of heat exchanger with effectiveness of approximately 72% and will keep on decreasing at higher heat loads. Pressure drop observed through the heat exchanger for GHe is 8 Pa for 37 W and 65 Pa at 100 W.

Type I 2K HX is currently being tested with the heat exchanger test stand. The latest experimental run resulted in 2.45 K subcooled LHe at the exit of heat exchanger. The effectiveness was 76% at 16 W of thermal load in the dummy load tank.

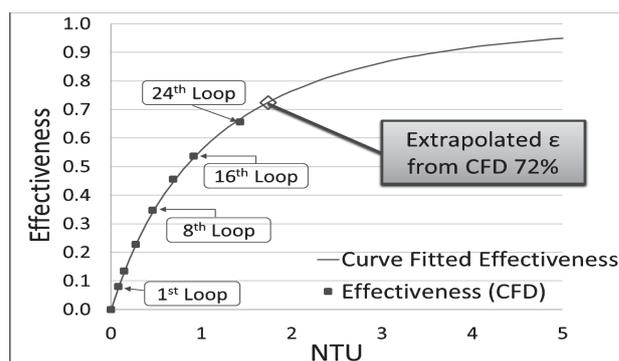


Fig.2 Effectiveness of type II heat exchanger from CFD

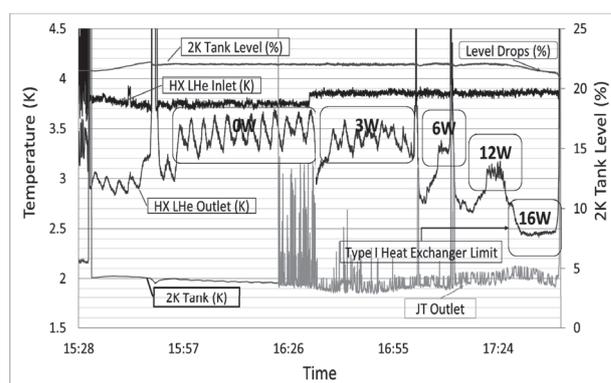


Fig.3 Latest experimental run with type I heat exchanger

5. Future Work

The experiment to measure performance of the 2K heat exchangers will be continued and the experimental results would be verified by the numerical analysis.

References

- H. Nakai, et al.: AIP Conference Proceedings (2014) (pp. 1349–1356)

大型低温重力波望遠鏡低温設備の開発(8)

-極低温鏡冷却のための超高純度アルミニウムヒートリンクの評価-

Development of Cryogenic System for Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope (8)

-Evaluation of the ultra high purity aluminum heat-link for cryogenic mirror-

山田 智宏, 鈴木 敏一, 牛場 崇文, 梶田 隆章(東大); 木村 誠宏, 都丸 隆行(KEK);
高田 卓 (NIFS); 井上 優貴 (Academia Sinica)

YAMADA Tomohiro, SUZUKI Toshikazu, USHIBA Takafumi, KAJITA Takaaki (University of Tokyo);
KIMURA Nobuhiro, TOMARU Takayuki, (KEK); TAKADA Suguru (NIFS); INOUE Yuki (Academia Sinica)

E-mail: tyamada@icrr.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は鏡を 20K まで冷却することで熱雑音を低減し、最も良い感度帯における感度の向上を目指している。鏡は 8 段の防振装置の最下部に懸架され、下部 4 段が冷却される。冷却には振動流入を防ぐという観点から 99.9999% の超高純度アルミニウム [1-3] を直径 0.15mm まで引き延ばし撚り合せたヒートリンクを用いる。

2015 年 9 月の LIGO による重力波初検出に加え、2017 年 8 月には LIGO と Virgo の 2 台の検出器が同時に検出し、天体位置決定精度が飛躍的に向上した [4]。地理的に離れた KAGRA がこの重力波観測ネットワークに入ることによる天体位置決定精度の向上を目指し、極低温鏡の達成に向けたヒートリンクの評価を行った。

2. 極低温懸架系

KAGRA の極低温鏡を懸架する超高防振システムは約 12m の常温部と約 1.5m の低温部(極低温懸架系, Fig.1)から成る。12m の防振装置は 国立天文台によって開発され、倒立振子や Geometric Anti-Spring (GAS) というシステム等を用いて地面振動から低周波防振を達成している。極低温懸架系は Fig. 1 のように鏡を懸架するミラーチェーンとその外側を取り囲むリコイルマスチェーンから成る。ミラーチェーンの最下部は熱雑音を抑えるために全てサファイアによって構成されている。

極低温懸架系の冷却は輻射と伝導の二つをもって行われる。クライオスタット内部には 80K シールドと 8K シールドがあり、8K シールドと極低温懸架系をブラックコーティングすることで 100K 付近までの輻射冷却を効率的に行う。それ以下の温度ではヒートリンクによる伝導冷却が主な冷却手段である。今回評価を行ったヒートリンクは冷凍機に繋がっている冷却バーの先端からマリオンネットリコイルマスに接続される。さらに懸架系の各段もヒートリンクにより繋がれ冷却される。

3. RRR 測定と熱伝導率測定

このヒートリンクについて残留電気抵抗比 (RRR) 及び熱伝導率の測定を行った。RRR 測定ではサンプルを測定治具に固定し、常温での電気抵抗値と液体ヘリウム温度での電気抵抗値を測定して算出した。純度が非常に高く、サンプル径が 0.15mm と細いため、サイズ効果が表れていることを確認した。

熱伝導率は Longitudinal Heat Flow 法を用いて 3K 付近から 80K 付近まで測定を行った。測定には液体ヘリウムを用い、4.2K 以下は液体ヘリウムを減圧して行った。ピークは 10K 付近で約 17000W/m/K に達し、非常に高い値を示した (Fig.2 参照)。Wiedemann-Franz 則と電子伝導理論を考慮して経験的に導かれた RRR と熱伝導率の関係式 [5] との比較も行い、ほぼ同様の振る舞いを示すことを確認した。また、熱伝導率についてもサイズ効果が表れていることを確認した。

4. バネ定数測定

KAGRA は超高純度のアルミニウムを用いてヒートリンクの本数を減らすことで振動流入を抑えている。加えて、直径 0.15mm の細線を撚り合わせてヒートリンクを作り、同じ断面をもつ単線と比較してバネ定数を下げる工夫をしている。

直径 1mm と同程度の断面をもつ直径 0.15mm 細線の 45 本撚り線の共振周波数を測定し、バネ定数に換算した。その結果、約 1/43 にまで低下していることを実測した。

5. まとめ

KAGRA の極低温鏡実現のため、ヒートリンクの評価を進めている。これまでに RRR、熱伝導率及びバネ定数の測定を行い、現在成果をまとめている。今後は測定した結果を用いて、本年 8 月に KAGRA サイトで行われた極低温懸架系冷却試験の結果を解析し、有限要素法解析と並行しながら冷却と振動流入低減の双方の観点からヒートリンクの本数・配置についての検討を進めていく。

6. 参考文献

- [1] Hoshikawa *et al.*, CEC/ICMC2011
- [2] Hoshikawa *et al.*, ICEC-ICMC2012
- [3] Hoshikawa *et al.*, ASC-2012
- [4] B.P.Abbott *et al.*, PRL **119**, 141101 (2017)
- [5] Tomaru *et al.*, 低温工学 Vol.46 No.7 (2011)

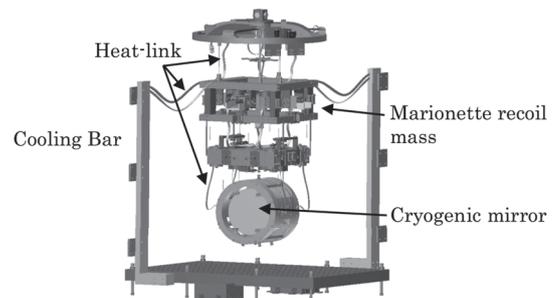


Fig.1 : Cryogenic payload system

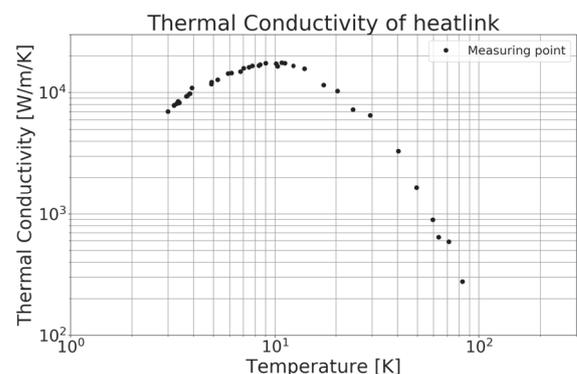


Fig.2 : Result on thermal conductivity measurement

高温超伝導自己シールド型脳磁計用ゼロボイルオフシステムの開発

Development of Zero Boil-Off Cooling System for Superconducting Self-Shielded MEG

恒松 正二, 檜崎 勝弘, 松原 雄二, 横山 一博, 篠原 正志(住重)

TSUNEMATSU Shoji, NARASAKI Katsuhiko, MATSUBARA Yuji, YOKOYAMA Kazuhiro, SHINOHARA Masashi (SHI)

E-mail: shoji.tsunematsu@shi-g.com

1. はじめに

住友重機械工業株式会社(SHI)が、2007 年以来、開発を進めている高温超伝導自己シールド型脳磁計は、高温超伝導磁気シールド、SNS 素子型 SQUID センサ、及びゼロボイルオフ冷却システムで構成される。全体システム構成を Fig.1 に示す。本脳磁計は、大がかりな磁気シールドルームが不要であり、都市部や、工場などの高い環境磁気雑音がある地域でも高感度な脳磁計測が可能となる。

本稿では、ゼロボイルオフ冷却システムの開発状況について報告する。

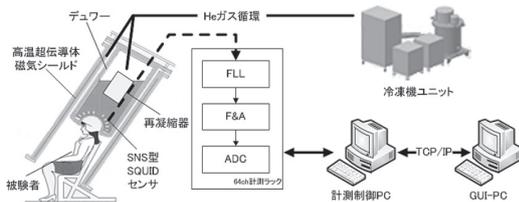


Fig.1 SHI's MEG system

2. 高温超伝導磁気シールド

磁気シールドは、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_x$ (Bi2223) 系高温超伝導体を採用することにより、超伝導体を持つ完全反磁性によって外部磁場を遮蔽しており、低周波数領域でも遮蔽性能が低下しない特徴を持っている。寸法は、内径 650mm、高さ 1600mm であり、90K 以下に冷却して運用する。本磁気シールドにより、周囲環境に大きく左右されない脳磁計測が可能となり、また、脳磁計本体を容易に移動することも可能となった。

3. SNS 素子型 SQUID センサ

自社製の SQUID センサは、従来のシールドルーム型脳磁計で主に使用されている SIS 接合型と異なり、低雑音特性に優れた SNS 接合型を採用している。センサ単体のノイズレベルは、 $5\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下@10Hz, $20\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下@1Hz であり、40 回の熱サイクルや 90mA の電流が接合部に負荷されても性能劣化しない等、高いロバスト性も確認されている。

4. ゼロボイルオフ冷却システム

本システムは、蒸発する液化ヘリウムの再凝縮ラインと、高温超伝導磁気シールドを冷却する2つの冷却ラインから構成されている。脳磁測定において、大きなノイズ源となる冷凍機本体駆動部は、約 8m の断熱フレキシブルチューブにより、デュワから分離し、デュワとは、冷媒をガスの状態で授受している。Fig.2 にフロー図を示す。

再凝縮ラインは、計測中の侵入熱により蒸発する液化ヘリウムを Joule-Thomson (JT) 冷凍機の再凝縮器で、常時再凝縮することにより、液面レベルを保持し、常時計測を可能としている。冷凍機本体で冷却され、断熱フレキシブルチューブ、デュワ内に設置した熱交換器を通り、JT 弁でJT膨張したヘリウムガスは、再凝縮器でセンサ部から蒸発してくる極低温のヘリウムガスと熱交換し、再凝縮させる。

シールド冷却ラインの冷却ガスは、デュワのシールドを冷却した後、高温超伝導磁気シールドを 90K 以下に冷却し、断熱フレキシブルチューブのシールドを冷却しながら、冷凍機本体に戻る。

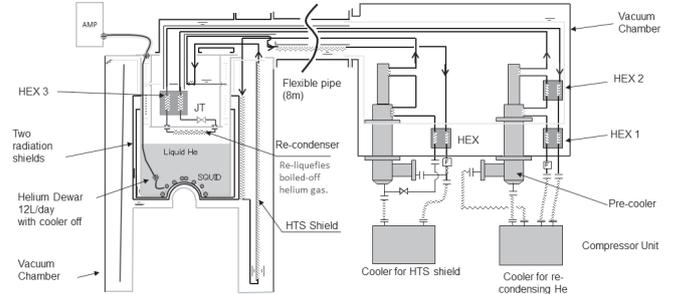


Fig.2 Diagram of the zero-boil off system

5. 冷却試験

Fig.3 に、常温から、ゼロボイルオフに至るまでの温度履歴を示す。冷却開始後、約 22hr で超伝導磁気シールドが、90K 以下となり、超伝導状態となった。41hr 経過時点で LHe のデュワへの注液を開始し、約 53hr 経過時点で、デュワから大気へ放出されるヘリウムガスがなくなり、ゼロボイルオフ状態となっている。本冷却では、蒸発量が約 12L/day のデュワのゼロボイルオフ化を達成した。Fig.4 に SHI 新居浜工場で測定した代表的なノイズレベルを示す。

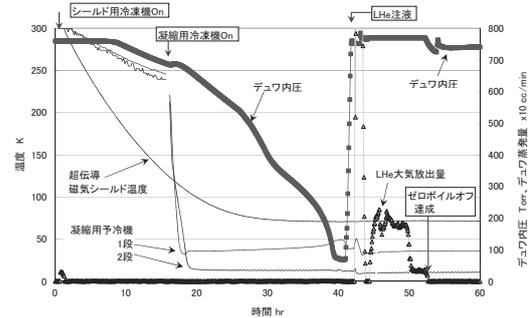


Fig.3 Cooling profile of the zero-boil off system

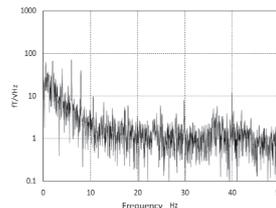


Fig.4 Frequency spectrum from a single sensor

6. おわりに

高温超伝導磁気シールド、SNS 素子型 SQUID センサ、ゼロボイルオフ冷却システムで構成される高温超伝導自己シールド型脳磁計で、ゼロボイルオフ試験、ノイズレベル測定試験を実施し、当初の目標を達成した。今後、この評価機を貸し出して、従来の脳磁計との比較評価を計画すると共にユーザービリティの向上を目指している。

参考文献

1. Hiroshi, O. et al. (2007) A Whole-Head SQUID System in a Superconducting Magnetic Shield, IEEE Trans. On Applied Superconductivity Vol.17, 730-733

耐圧液体水素クライオスタットの開発

Development of a pressure tight cryostat for liquid hydrogen

中納 暁洋 (産総研); 後藤 修一 (ジェック東理社)

NAKANO Akihiro (AIST); GOTO Shuichi (JTC)

E-mail: a.nakano@aist.go.jp

1. はじめに

地球温暖化抑制において水素エネルギーは将来重要な役割を果たすと期待されている。現在、水素は主に化学工場や半導体製造工場などで消費され、小規模ではあるが既に市場が形成されている。これらの工場への水素の輸送は高压ガスから液体方式に切り替えられつつある。液体水素トレーラーや液体水素貯槽は大気圧から約 9.5 気圧までの圧力域で運用されている。よって、温度センサーや液面計等、各種液体水素デバイス開発の場では実運用環境が再現できる試験装置が必要になる。しかし、液体水素において加圧環境が容易に作り出せる実験装置が見当たらなかったことから、10 気圧までの評価試験が可能な耐圧液体水素クライオスタットの設計・製作を試みた。内部可視化用の観測窓を有し、実験空間の内容積 V (単位: m^3) と設計圧力 P (単位: MPa) の積 PV を 0.004 未満に抑え、高压ガス保安法の定める特定設備にはならないクライオスタットを製作し、実際に液体水素を入れて耐圧試験を行い、その安全性及び有効性の確認を行った。また同時に白金抵抗温度計に関する評価を行った。

2. 耐圧液体水素クライオスタット及び実験内容

Fig. 1 に耐圧液体水素クライオスタットの概要を示す。Fig. 1(a)にクライオスタット全景写真、Fig. 1(b)はその詳細を表す。耐圧仕様のため材質はステンレス製で、液体窒素予冷層の内側に液体水素を入れる実験槽を設けている。この実験槽は内径 68.3 mm の円筒形で、内容積を 0.00328 m^3 (3.28 L) に抑え、高压ガス保安法の定める特定設備としない設計とした。液体水素の最大充填量は 2.38 L で高压ガス製造施設としての処理能力は $1.9 \text{ Nm}^3/\text{日}$ の小型施設である。実験槽内が観察できるようにクライオスタット下部側面に 1 対の可視化用窓を設置した。また、トップフランジからの熱輻射低減のため、クライオスタットインサート上部に 8 枚のバフ板を設置した。実験槽下部の真空断熱層側外壁に 50W のカートリッジヒーターを 2 つ取り付け、これらを加熱することにより液体水素を蒸発させ実験槽内を昇圧する。実験槽内の圧力は共和電業社の絶対圧測定用圧力変換器 PAB-A-2MPa を用いて測定した。

実験層内の温度計測のためネツシン社の R14 型(直径 2mm,

長さ 3cm)白金抵抗温度計 PT-2000 を 1 本、PT-1000 を 2 本用意した。PT-2000 は産総研研計量標準総合センター、物理計測標準部門で校正を行った PT-1000 を使用してネツシン社で校正を行った特注品である。一方、2 本の PT-1000 は未校正の温度計である。実験では直径 1cm、長さ 3cm の銅ブロック上面 3ヶ所に直径 2.1mm、深さ約 2cm の穴を開けたものを用意し、この銅ブロックをクライオスタットの底から約 1cm の場所に設置した。銅ブロックに開けた 3ヶ所の穴に 3 本の温度計を差し込み、温度計測を行った。この温度計測の目的はクライオスタット内の温度変化を観測すると同時に、未校正の PT-1000 で読み取った抵抗値をネツシン社の校正用 PT-1000 で使用している抵抗値-温度変換表を用いて温度変換した値と PT-2000 で読み取った温度値を比較することにある。現在 PT-1000 には PT-100 で使用されているような基準抵抗値表が存在しない。PT-2000 で読み取った温度と PT-1000 で読み取った温度の差異が必要精度以内であれば、ネツシン社の校正用 PT-1000 で使用している抵抗値-温度変換表を PT-1000 用基準抵抗値表として活用することができる。

3. 実験結果

Fig. 2 に耐圧液体水素クライオスタットへの液体水素の移送から実験終了までのクライオスタット内温度と内部圧力の時間変化を示した結果を示す。図中、青、橙、緑色の線が内部温度を表し、紫色の線が内部圧力を示す。ステンレス製のクライオスタットは熱容量が大きいため、液体移送に 50 分程度要した。耐圧試験については約 1.05 MPa まで昇圧を 2 回行った。1 回目の耐圧試験後の降圧で液体が無くなったため、図中約 11500 秒地点で 2 回目の液体移送を行い 2 回目の耐圧試験を行った。その後、圧力制御試験を試みたが改善が必要なことが判明した。なお、PT-2000、PT-1000 白金抵抗温度計での温度計測の詳細については当日報告を行う。

4. まとめ

製作した耐圧液体水素クライオスタットを用いて液体水素移送、耐圧性能、圧力制御等についての確認試験を実施した。液体水素移送、耐圧性能については問題無いことを確認したが、圧力制御については改善が必要なことが分かった。

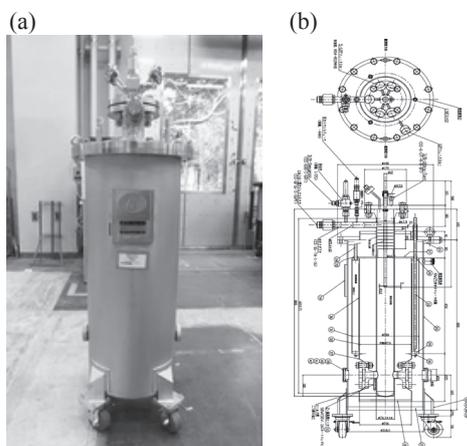


Fig. 1 Pressure tight LH₂ cryostat (a) Photograph. (b) Cryostat design.

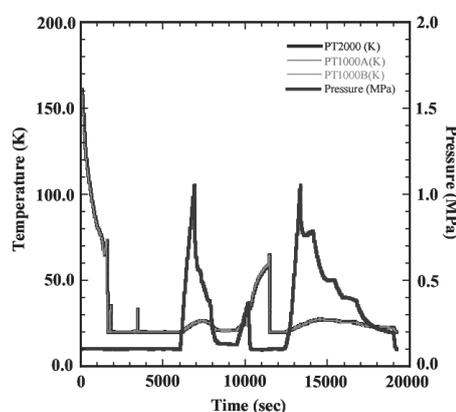


Fig. 2 Time variation of the temperature and pressure in the cryostat.

極低温サーモサイフォンにおける限界熱流束解析の研究

Analysis of Critical Heat Flux of Thermo syphon heat pipe

片山 結美子, 岡村 哲至(東工大)
 KATAYAMA Yumiko, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)
 E-mail: katayama.y.ag@m.titech.ac.jp

1. はじめに

超伝導機器の冷却方として、GM冷凍機による直冷方式と浸漬冷却方式を組み合わせ、極低温サーモサイフォン型ヒートパイプ(以下、極低温サーモサイフォン)⁽¹⁾が考案された。熱輸送能力を向上させる際に問題となるのが、蒸発した気体が液体の流れを妨げるフラドニング限界というサーモサイフォン特有の現象である。フラドニング限界が生じると極低温サーモサイフォンの内部を液体が還流せず、熱輸送が行われない。そのため、本研究では、極低温サーモサイフォンの形状から急縮小・急拡大・管摩擦を考慮したフラドニング限界による最大熱流束(以下、限界熱流束)を、数値計算を用いて求める。

2. 計算モデル

Fig.1に計算で用いたモデルとFig.2に実験装置の概略図を示す。先行研究で行った可視化実験の内部現象をベースとしたモデルを立案した。作動流体が液体ヘリウムで、定常流かつ気液完全分流であることを仮定し、気相と全体の運動量の式⁽²⁾から、極低温サーモサイフォン内において、フラドニング限界が起きない蒸気の最大無次元流速 j_g を求める。この計算式には、凝縮部および蒸発部の内径の大きさによって変化する急縮小・急拡大や、断熱部の管長によって変化する管摩擦のエネルギー損失を考慮している。計算過程では、蒸気の無次元流速とボイド率を二変数とし、極低温サーモサイフォンの形状および作動温度を入力し計算を行う。ボイド率とは、断熱部の断面積に対する、蒸気の流路断面積の比である。Fig.3に計算結果を示す。縦軸は蒸気の無次元流速で横軸はボイド率である。この結果から得られる無次元流速の最大値から、限界熱流束を計算した値⁽²⁾と実験値の比較を行う。

3. 実験結果と計算結果の比較

Fig.4に示す実験結果は、実験装置概略の液貯部側面に貼った温度センサー(Cernox)を用いて温度計測を行った先行研究の結果である。実験から、フラドニング限界が生じると、液貯部に液体ヘリウムが還流しなくなり、液貯部の液体ヘリウムが空となり、温度が急上昇する。この際の熱入力の値を限界熱流束とした。縦軸は限界熱流束で、横軸は作動温度である。実験条件は、凝縮部の温度を4.4Kから0.1K間隔で4.8Kまで変化させており、これは極低温サーモサイフォンの作動温度である。断熱部の形状は、管径:3mm 管長:300mmのものを用いた。Fig.4から実験結果と計算結果が、定性的に傾向が一致していることが分かる。このことから計算モデルに妥当性があるとし、極低温サーモサイフォンの形状および、作動温度をパラメータとすることで、限界熱流束に与える影響を調べる。

参考文献

1. H. Suzuki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 173(2005) p1732.
2. Y. Sudo: Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B Vol. 60(1994-7) No. 575

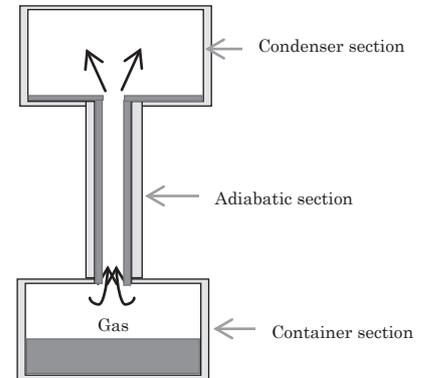


Fig.1 Calculation model

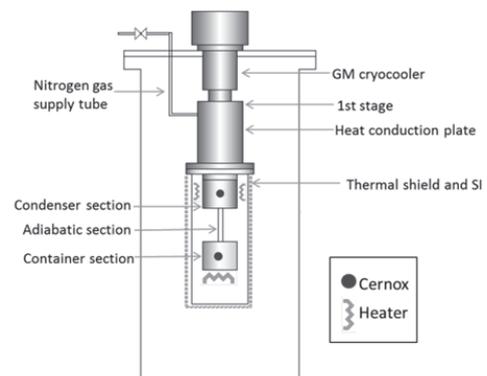


Fig.2 Experimental apparatus

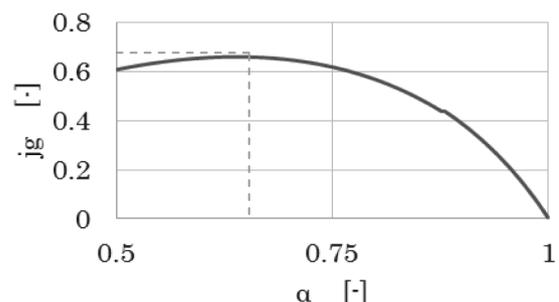


Fig.3 Calculation result of nondimensional flow velocity

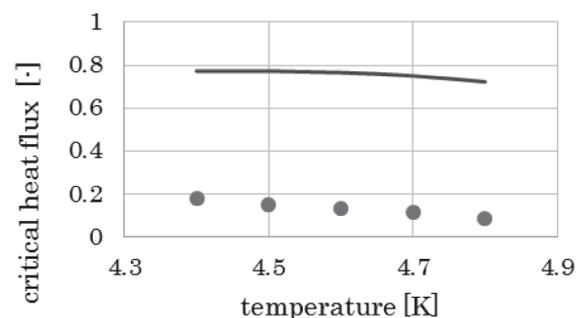


Fig.4 Experimental value and calculation value

金属多孔質体極低温冷却システムの多孔質体材料・サブクール度を考慮した伝熱相関式の修正

Modification of heat transfer correlation considering porous material and degree of subcooling for cryogenic cooling system with metal porous media

針生 明日可, 佐々木 駿介, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)
 HARIU Asuka, SASAKI Shunsuke, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: ahari@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合原型炉や商用炉の大型超伝導マグネットの先進設計案として分割して製造したコイルを着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている[1]。本コンセプトでは接合部の局所ジュール発熱が課題であり、これに対して金属多孔質体を用いた冷却システムの適用が提案されている[2]。橋爪ら[3]は、液体窒素とブロンズ粒子焼結多孔質体を用いた実験を行い、強制対流・核沸騰熱伝達と核沸騰限界点(DNB点)についての伝熱相関式を構築し、実際の核融合炉マグネットでの候補となる温度域 20~30 K の冷媒(液体ネオン, 液体水素)による除熱性能の予測を行った。しかしながら、相関式の構築時にサブクール度の影響が考慮されておらず、多孔質材料もブロンズのみであった。そこで本研究では、多孔質材料として銅を追加し、サブクール度を考慮した相関式の検討を行った。

2. 実験

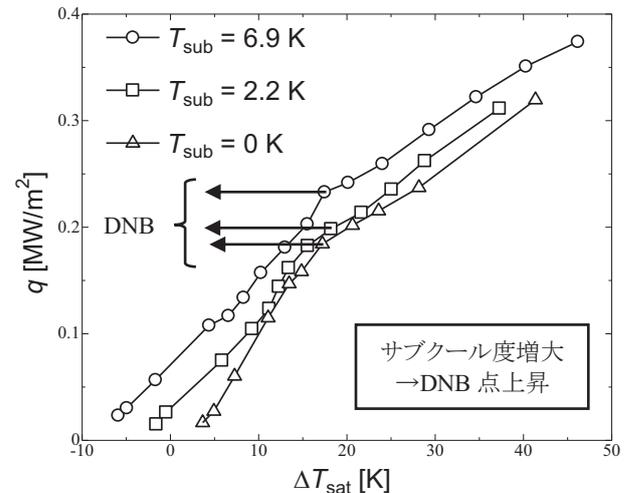
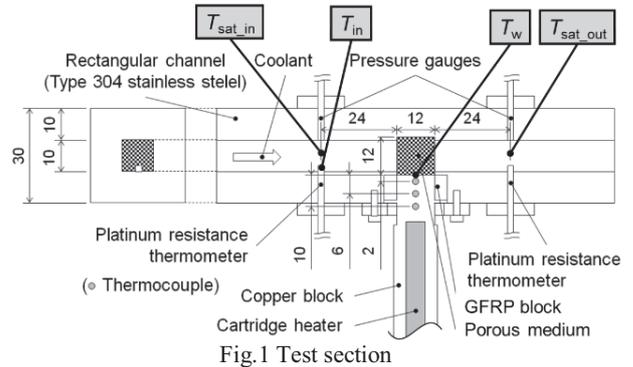
実験装置は、液体窒素供給部、試験部、排出部により構成されている。まず、供給部に充填した液体窒素を減圧することにより飽和温度を下げて沸騰させ、液体窒素のサブクール度を得た。その後液体窒素をヘリウムガスにより試験部に圧送し、最終的には排出部から排出した。液体窒素の流量 G は途中に設置されたタービン流量計で測定した。Fig. 1 に示すように試験部流路はステンレス製で一辺 10 mm の矩形流路である。なお多孔質体挿入部のみ流路が一辺 12 mm の矩形流路になっている。多孔質体には加熱用カートリッジヒーターと熱電対を挿入した銅ブロックから熱負荷を与えた。ここでヒーターからの熱流束 q , 伝熱面温度 T_w は熱電対の温度勾配から算出した。多孔質体上流・下流にはそれぞれ等距離にひずみゲージ式圧力計, 白金抵抗温度計が1つずつ設置されており、計測される圧力 P の平均から多孔質体中心の飽和温度 T_{sat} を、上流・下流平均温度として流体温度 T_{bulk} を算出した。飽和温度 T_{sat} と入口温度 T_{in} との差を取ることでその温度差を液体窒素のサブクール度 T_{sub} とした。

Fig.2 に銅多孔質体を用いて得られた沸騰曲線の一例を示す。 d は使用した多孔質体の平均粒子径, ϵ は気孔率, $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$, $T_{sub} = T_{sat} - T_{bulk}$ である。先行研究におけるブロンズ多孔質体での実験結果と比較した結果, 沸騰曲線の多孔質材料依存性は見られなかった。また, 先行研究と本研究の両方で, サブクール度の増大により DNB 点が上昇することが確認された。

3. 伝熱相関式

得られた実験結果に基づいて伝熱相関式を構築した。式(1)が強制対流・核沸騰熱伝達の予測式, 式(2)が DNB 点の予測式である。本研究では, 両式ともにサブクール度の影響を加味するために式を変形し, 銅多孔質体による実験データを追加して回帰分析を行い, 無次元数指数を決定した。 $\Delta T_{sat, DNB}$ は DNB 点での壁面過熱度, β は DNB 点における対流影響残存度, h_{conv} , h_{boil} は対流, 核沸騰熱伝達率, $\Delta T_{bulk} = T_w - T_{bulk}$, Re_d , Re_D は粒子, 管レイノルズ数, Pr はプラントル数, k_L は流体の熱伝導率, C は多孔質体の伝熱面への接合方法に関わる係数(機械的: 0.6, 焼結: 0.9), μ_{bulk} , μ_w はバルク温度, 伝熱面温度での流体の粘度, α は

熱拡散率, C_p は定圧比熱, ρ は密度, σ は表面張力, h_{LG} は沸騰潜熱, $\Delta P_{sat} = P(T_w) - P(T_{sat})$, χ はクオリティ, u 流速, D は等価直径, $q_{DNB}(T_{sub})$ は各サブクール度における DNB 点での熱流束, We はウェーバー数, L は流路長, d_e は等価マイクロチャンネル径, \dot{m} は質量流束である。下付きの S は多孔質材料, L, G は液相, 気相, eff は有効値を表す。



$$q = \left(1 - \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat, DNB}} \times (1 - \beta)\right) h_{conv} \Delta T_{bulk} + h_{boil} \Delta T_{sat}$$

$$h_{conv} = \left(1 - \frac{d}{D}\right) Re_d^{0.61} Pr_s^{\frac{1}{3}} \frac{k_L}{d} \times C \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_w}\right)^{0.14} \left(\frac{\alpha_{eff}}{\alpha_s}\right)^{0.65}$$

$$h_{boil} = 0.000517 \left(\frac{k_L^{0.79} C_{pL}^{0.45} \rho_L^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_L^{0.29} h_{LG}^{0.24} \rho_G^{0.24}}\right) \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} S, \tag{1}$$

$$S = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6} Re_D^{1.17}}, Re_D = \frac{(1-\chi) \rho_L u D}{\mu_L}$$

$$q_{DNB}(T_{sub}) = q_{DNB}(0) + \beta h_{conv} T_{sub}$$

$$q_{DNB}(0) = 10^{-0.58} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{1.33} We^{0.056} \left(\frac{L}{d_e}\right)^{-1.02} \dot{m} h_{LG} \tag{2}$$

参考文献

- H. Hashizume et al.: J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 5 (2002) pp.532-536
- Y. Tanno et al., Advances in Cryo Eng, Vol. 1573 (2014) pp.597-604
- H. Hashizume et al.: Nucl. Fusion, Accepted for Publication

超電導ケーブル冷却用ブレイトン冷凍機実証試験

Brayton refrigerator cooling system demonstration test for HTS cable

下田 将大、仲村 直子、星野 昌幸、矢口 広晴(前川製作所)

三村 智男(東京電力ホールディングス)

渡部 充彦、増田 孝人(住友電気工業)

Masahiro Shimoda, Naoko Nakamura, Masayuki Hoshino, Hiroharu Yaguchi, (Mayekawa Mfg.)

Tomoo Mimura (Tokyo Electric Power Holdings,inc.)

Michihiko Watanabe, Takato Masuda (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: masahiro-shimoda@mayekawa.co.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルは大容量低損失送電のメリットを生かし、次世代の送電ケーブルとして実用化が期待されている。

日本国内では 2007 年度～2013 年度の間「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が実施された。このプロジェクトでは、冷凍機の大容量・高効率化及びメンテナンス間隔の長期化が課題として残った。[1]特に、スターリング冷凍機のメンテナンス間隔は、8000 時間と短く、さらに運転時間 3000 時間程度から冷却能力低下が始まったため、重要な課題である。

この課題解決のために、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発」が 2016 年 7 月からスタートし、高効率・大容量のブレイトン冷凍機の開発を行い、2017 年 3 月から旭変電所の実系統に連携する 240m 級超電導ケーブルと接続して実証試験を行っている。

本報告では、この実系統実証試験中のブレイトン冷凍機による冷却システムの運用状況を中心に報告する。

2. 冷却システム概要

2-1 冷却システム

超電導ケーブル冷却システムのフロー図を Fig.1 に示す。本システムは、冷凍機、循環ポンプ、リザーバタンク等で構成され、冷凍機以外は、NEDO「超電導ケーブル実証プロジェクト」の冷却システムと同じであり、循環液体窒素の圧力・流量の制御も同じである。冷凍機は、スターリング冷凍機 6 台から 5kWブレイトン冷凍機 1 台に変更した。

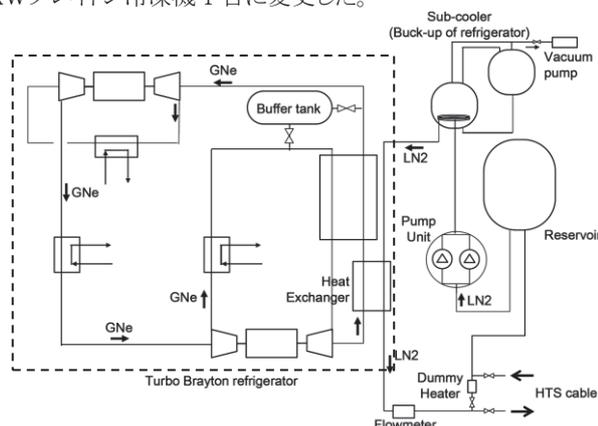


Fig.1 Diagram of LN2 cooling system

2-2 超電導ケーブル供給液体窒素制御

超電導ケーブル供給液体窒素は、圧力を 0.2～0.25MPaG、流量を 40L/min 一定に制御し、温度は特性測定ニーズのため 69K～69.2K の範囲に制御している。

温度制御は、冷凍機回転数制御と Ne 容量制御を併用している。なお、Ne 容量制御は、バッファタンクを利用して循環系内の Ne 充填量を変えることで流量変更を行い、冷却量をコントロールしている。この制御方法は、高い COP (冷却能力÷モータ消費電力) を維持して冷凍機冷却量を調整できることが利点である。

3. 系統連系実証試験

系統連系前に超電導ケーブルの冷却確認試験 (温度、圧力、流量) や停電試験等を実施し、超電導ケーブルの冷却運転に問題ないことを確認した。2017 年 3 月 31 日からは超電導ケーブルを実系統に連系して試験を実施している。系統連系実証試験中の監視項目として、ケーブル供給温度、圧力、流量、冷凍機冷却量等、10 点を重点的に監視している。

この内のケーブル供給温度、リザーバタンク内圧力、液体窒素循環流量とケーブルからの熱負荷の推移を Fig.2 に示す。Fig.2 に示すように、春から夏にかけての気温上昇に伴うケーブルからの熱負荷上昇に対して、超電導ケーブル供給 LN2 の温度、圧力、流量は、一定に制御できていることが分かる。

COP は、気温、冷却水温度の季節変動によりわずかな変化はあるが、冷却量が変化してもほぼ一定で推移している。

メンテナンス間隔に関して、今回のブレイトン冷凍機は、2016 年 9 月からの単体試験と系統連系後の運転時間を合わせて、8000 時間以上メンテナンスを行わずに運転している。これまでの運転状況監視から、冷却能力低下や機器異常の兆候は見られていない。

今後 3 月までに、13300 時間までの連続運転実績を得られる予定であり、更なる、長時間運転の冷凍機性能保障のためのデータが得られる予定である。

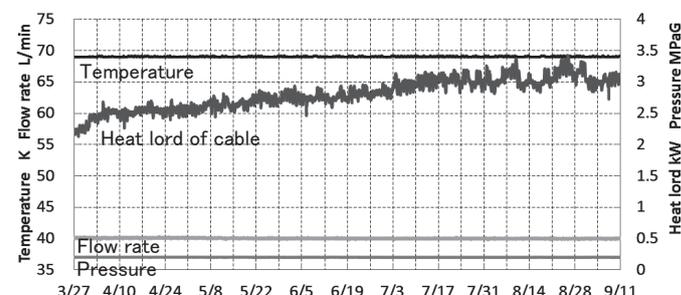


Fig.2 Parameter transition during the demonstration test

4. おわりに

2017年3月31日より実系統連系運転を開始し、現在まで異常なく運転を継続している。今後は、2018年3月まで実系統接続運転を継続した後に再度冷却能力測定を実施し、実証前の冷却能力と比較して劣化有無を確認する予定である。

謝辞

本研究は、「高温超電導実用化促進技術開発」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から補助を受けて実施したものである。

参考文献

- M Shimoda et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89(2014)

極低温液体移送サブマージドポンプへの適用を目指した 5 kW 級超電導誘導同期モータの研究開発

Research and Development of a 5 kW-class HTS Induction/synchronous Motor Aiming to Liquid Cryogen Circulation Submerged Pump

西野 竜平, 池田 健一, 飛田 美和, 中村 武恒 (京大); 柁川 一弘 (九大); 上岡 泰晴, 石山 敦士 (早大);
今川 信作 ((核融合研); 平井 寛一, 尾崎 信介 (太陽日酸)

NISHINO Ryohei, IKEDA Kenichi, TOBITA Miwa, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.);
KAMIOKA Yasuharu, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); IMAGAWA Shinsaku (NIFS);
HIRAI Hirokazu, OZAKI Shinsuke (TAIYO NIPPON SANSO Corp.)
E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、JST-ALCA プロジェクト(先端的低炭素化技術開発)の一環として、液体窒素他の極低温液体移送ポンプ用途への適用を目指した 5 kW 級高温超電導誘導同期モータの研究開発を行っている。即ち、当該被移送液体を冷媒とするサブマージドポンプの開発を行っており、回転数 5000 rpm 程度以上におけるオペレーションを目指している。本報告では、磁気等価回路、電気等価回路、および 2 次元電磁界解析を組み合わせた最適化設計を実施したので、その結果を報告する。

2. 5 kW 級モータの設計方法

設計に際して、まず磁気等価回路を適用した装荷分配やスロット形状の決定を行った[1]。次に、上記決定した構造から電気等価回路を導き、トルクや効率他諸特性を計算するとともに、特に効率について所期の目標を達成しているか否か判定し、満足していない場合には再度磁気回路に戻って設計を繰り返した。上記計算に際して、スロット形状他の決定には遺伝的アルゴリズムを適用した。最適設計が終了したら、得られた構造ならびに運転条件にて2次元電磁界解析を実施し、その定量性を確認した。

3. 設計結果と考察

Table 1には、5 kW級モータ(5000 rpm)の諸元を示す。ステータ外径(115.0 mm)や積厚(120 mm)は、制約条件として固定した。また、室温(75°C)と液体窒素温度(77 K)において設計を実施し、両者の比較検討を行った。Fig. 1には、最適化設計によって得られた5 kW級機の断面構造を示す。また、Table 2には2次元電磁界解析によって得られた回転特性を示す。まず室温(75°C)の解析を実施したところ、効率76.1%であった。次に、同機を液体窒素冷却(77 K)したところ、効率93.5%にまで改善した。さらに、温度77 Kにおける支配的損失が回転子銅損(210.21 W)であることを考え、これを超電導化してゼロと仮定したところ、最終的に97%以上にまで効率改善する目的を得た。なお、極低温冷却された(Ohmの法則に従う)常伝導モータでは、その2次側抵抗が低いが故に誘導起電力が発生せず、そもそも始動困難と考えられる[2]。即ち、極低温冷却超電導誘導同期モータでは、その始動ならびに定常特性共に常伝導モータに比較して極めて有利であることが示された。具体的設計内容など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)”「高温超伝導機器冷却用低温液体循環ポンプの開発」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 竹内寿太郎 原著, 西方正司 監修: 大学課程 電機設計学(改訂3版), オーム社 (2016)
2. T. Kitano et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 23(3), 5202505 (2013)

Table 1 Specification of a 5 kW motor (5000 rpm)

項目	設計結果
ステータ外径	115.0 mm (制約条件)
ステータ内径	72.0 mm
ギャップ	0.3 mm
シャフト径	34.0 mm
積厚	120 mm
ステータスロット数	12
ロータスロット数	16
ステータスロット占積率	72.5733 %
入力周波数	5200/60 \approx 86.67 Hz
入力相電圧	200/ $\sqrt{3}$ \approx 115.5 V
75°C 抵抗率	銅: $2.64 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ アルミ: $4.35 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
77K (-196°C)抵抗率	銅: $3.32 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ アルミ: $5.47 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$

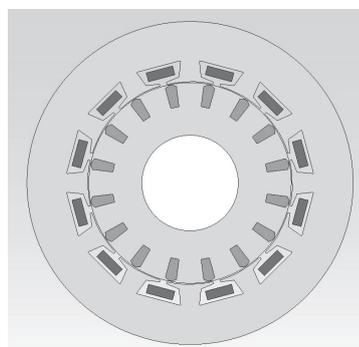


Fig. 1 Designed structure of a 5 kW class HTS-ISM

Table 2 Analyzed characteristics of a 5 kW class HTS-ISM

	75°C	77K
すべり	0.14	0.0116
相電圧(V)	115.47	115.47
周波数(Hz)	86.67	86.67
回転数(rpm)	4472	5140
出力(W)	5049	5015
ロータ銅損(W)	866.72	210.21
ステータ銅損(W)	633.37	59.07
ロータ鉄損(W)	27.84	15.59
ステータ鉄損(W)	56.17	61.23
損失計(W)	1584.09	346.10
効率(%) [出力/(出力+損失)]	76.1	93.5
力率	0.89	0.84
一次電流(A)	21.47	18.48
一次抵抗(Ω)	0.458	0.058

輸送機器への適用を志向した 50 kW 級全超伝導誘導同期モータの開発状況

Development Status of 50 kW Class Fully Superconducting Induction/synchronous Motor Aiming to Transportation Equipment

中村 武恒, 池田 健一, 唐島 智治, 郭 思宇, 西野 竜平, 小笠 卓郎, 松尾 哲司 (京大); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 大橋 義正 (アイシン精機); 福井 聡 (新潟大); 古瀬 充穂 (産総研)
 NAKAMURA Taketsune, IKEDA Kenichi, KARASHIMA Tomoharu, GUO Siyu, NISHINO Ryohei, OGASA Takuro, MATSUO Tetsuji (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL); OHASHI Yoshimasa (AISIN SEIKI); FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); FURUSE Mitsuo (AIST)
 E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、JST-ALCA プロジェクト(先端的低炭素化技術開発)の一環として、輸送機器(バス,トラック,自動車 他)への実用を目指した高温超伝導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)の研究開発を推進している[1]。これまで、20 kW 級プロトタイプ機(固定子: 銅巻線, 回転子: 超伝導巻線)を開発し、優れた特性を実証してきた[2]。本報告では、上記成果をもとに開発した 50 kW 級全超伝導機について、設計, 試作, および試験の現状を報告する。

2. 50 kW 級全超伝導モデル機の試作

Fig. 1およびFig. 2には、それぞれ開発したBi-2223 固定子(3相, 4極)およびBi-2223回転子を示す。固定子巻線には、鉄心内の超伝導導体が経験する垂直磁界成分を低下する目的で、所謂リング巻を採用している[3]。上記固定子と回転子を組み合わせ、Fig. 3 の全超伝導モデル機を完成した。

3. 試験結果と考察

試作したモデル機を液体窒素浸漬冷却し、まずは軽負荷試験を実施した。その結果、回転数1800 rpmまでの回転数において、全超伝導負荷試験に成功した。Fig. 4には、回転数1200 rpmにおける負荷試験結果の一例を示すが、2.9 kW程度までの準同期出力が実現している。今後は、定格ならびに過負荷試験に挑戦し、さらに冷却系やインバータも含めたシステム全体の最適構成を検討することによって、究極の低炭素化を目指していく予定である。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. 中村武恒: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
2. 中村武恒: OHM, 11月号, pp. 68-71 (2017)
3. K. Ikeda et al., in review

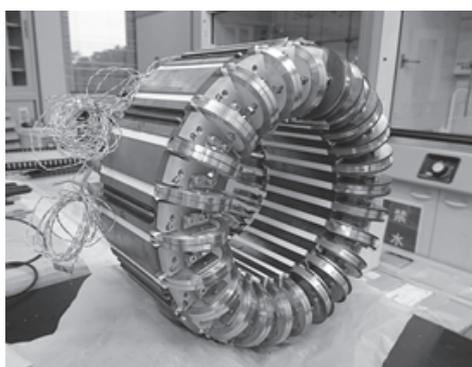


Fig. 1 Bi-2223 Stator



Fig. 2 Bi-2223 rotor

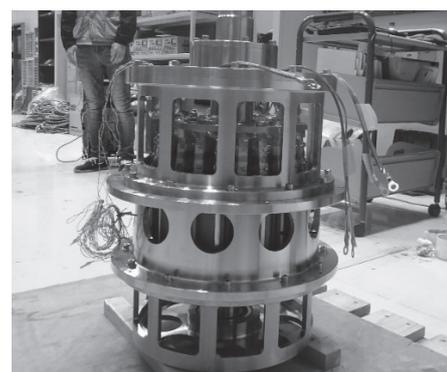


Fig. 3 Completed 50 kW class model motor

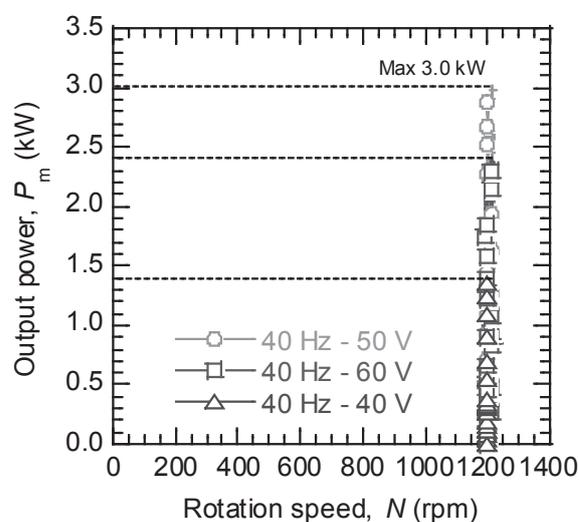


Fig. 4 Load test results at 77 K

レール状の磁気回路を用いた A.I.T. ホバーボードの走行実験

Running test of A.I.T hoverbord using rail type magnetic circuits

三浦 敦朗, 香月 淳, (足利工業大学大学院)

横山 和哉 (足利工業大学)

Atsuro Miura, Atsushi Katsuki, Kazuya Yokoyama (Ashikaga institute of Technology)

1. はじめに

超伝導特性の一つであるピン止め効果は、無制御で安定浮上が可能であり、フライホイールの軸受けや免震装置等への応用が検討されている。また、非接触型の磁気浮上装置はホコリをたてないようにする工場などでの使用が検討されている。本研究室では、大型のネオジウム磁石で製作した磁気回路と $\phi 60$ [mm] の REBCO バルク体を用いた人間磁気浮上装置を製作した。この装置はオープンキャンパスなどで多くの人に体験してもらいかなり人気がある。本文では、超伝導体のピン止め効果を利用した非接触型の磁気浮上走行装置を製作する。装置を製作するにあたり、収納容器やネオジウム磁石の磁気回路の磁束密度の評価検討を行った。

2. 製作及び実験

今回製作した装置は2本のレールの上を走る構造とした。Fig. 1. の超伝導バルク体収納容器は、片側に6個の $\phi 60 \times 20$ [mm] の GdBCO バルク体を入れ、それを木製のボードに固定する。ボードには穴を開けてあり、液体窒素を充填することができる。図2の磁石レールは 30 [mm] 角のネオジウム永久磁石を並べたものである。Fig. 3. に磁石レールの長さ方向の磁束密度分布を示す。磁石表面では約 400 [mT]、 5 [mm] 上部では約 340 [mT] となっている。今回の実験では、新たに製作した収納容器を用い実験を行う。

3. 結果

磁石レールの上に木製のスペーサを置き、その上にバルク体を入れた浮上部を配置して、液体窒素で約10分冷却した。その後、スペーサを取り除くとボードの浮上、走行を確認することができた。現在、浮上走行を安定させるために浮上装置本体の改良を行なっている。

4. まとめ

本文は $\phi 60$ [mm] の GdBCO バルク体とネオジウム永久磁石を用いて磁気浮上走行装置を製作した。ネオジウム磁石で構成される磁石レールの磁束密度は高さ 5 [mm] の地点で約 340 [mT] であり、物体を乗せた状態での装置本体の浮上と走行を確認できた。



Fig. 1. HTS-bulk containers



Fig. 2. Magnetic rails

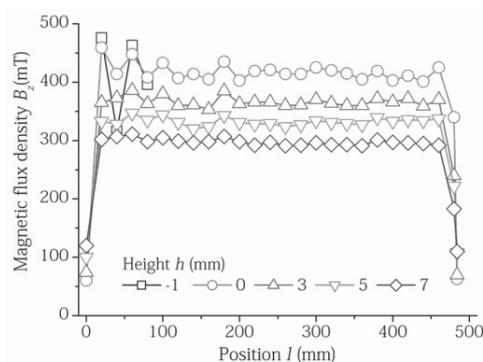


Fig.3. Magnetic field distribution of the magnetic rail.

反復パルス着磁法における細孔バルク体の捕捉磁場の評価

Trapped field evaluation of a hole-opened bulk superconductor activated by iterative pulse field magnetization

香月 淳, 三浦 敦朗 (足利工業大学大学院);
横山 和哉 (足利工業大学); 岡 徹雄 (新潟大学)

Atsushi Katsuki, Atsuro Miura,

Kazuya Yokoyama (Ashikaga institute of Technology); Tetsuo Oka (Niigata University)

E-mail:g16606@mb.ashitec.ac.jp

1. まえがき

著者らは、超伝導バルク体 (以下、バルク体と略す) のパルス着磁による強磁場発生について研究している。しかし、近年の材料特性向上に伴い、バルク体の磁気シールドが強くなり、大きな磁場を捕捉させることが難しくなってきた。そこで、バルク体に $\phi 2\text{mm}$ の細孔を加工することで意図的に特性の低い部分を作り、そこから磁束を侵入させる手法を提案した。一方、パルス磁化法で大きな磁場を捕捉する手法として、IMRA 法や MMPSC 法等が提案されている。本文は細孔加工したバルク体に反復パルス着磁法を適用した時の捕捉磁場特性を評価する。

2. 細孔加工したバルク体

パルス磁化法は、超伝導状態のバルク体に外部から磁場を印加することにより、磁束が磁気シールドに打ち勝って試料内部に侵入することで捕捉させる。しかし、大きな磁場を印加すればピンニング損失等による発熱により臨界電流密度 J_c が低下し、結果的に捕捉磁場が小さくなってしまふ。そこで、試料外周近傍に細孔を加工することで、意図的に超伝導特性の低い部分を作り、そこから磁束を侵入させる。一方、反復パルス磁化法は、印加する磁場の大きさや温度などを調整しながら複数回パルス磁場を印加する手法であり、2 発目以降の磁場印加では、既に超伝導体内に磁場が捕捉されていることから磁束の運動が少なくなるため発熱を抑制しつつ磁場を侵入させることが出来る。そのため、適切な印加磁場パターンを組むことで、大きな磁場の捕捉が可能なが明らかになっている。

3. 実験方法

結晶成長境界 (GSB : Growth Sector Boundary) の外周近傍 4 か所に $\phi 2[\text{mm}]$ の細孔を加工した $\phi 60 \times 20 [\text{mm}]$ の GdBCO バルク体を GM 冷凍機のコールドヘッドに接続したサンプルフォルダに取り付け、真空断熱した後、20[K]まで冷却する。その後、着磁コイルを取り付け、6.2[T]のパルス磁場 (立上時間 : 10[ms]) を

印加した。その後、着磁コイルを取り外して磁極表面の磁場分布を 3D ホールセンサにて測定した。着磁されたままの状態でも再び着磁コイルを取り付け、印加磁場を変えて同様の実験を繰り返した。

4. 結果と考察

図 1 に 1 発目 5.8[T]、2 発目 5.4[T] を印加した時の 1 発目印加後 (a) と 2 発目印加後 (b) の磁場分布を示す。1 発目にて 1.2[T]以上の領域が広く現れており、また磁束フローによる磁場分布の歪みも小さい。これは、印加磁場が比較的小さいため、発熱に伴う磁束フローが小さく、捕捉磁場が増加したと考えられる。その後、2 発目を印加したことで、中心部における捕捉磁場が 1.4[T]まで上昇した。

5. まとめ

本文では細孔加工を施した超伝導バルク体において、複数回パルス磁場を印加する実験を行った。その結果、本実験では、5.8-5.4[T]の組み合わせが最も効率よく磁場捕捉ができ、最適だとわかった。現在、最適な磁場印加パターンについて検討している。なお、本研究の一部は JSPS 科研費 15K05951 の助成を受けたものである。

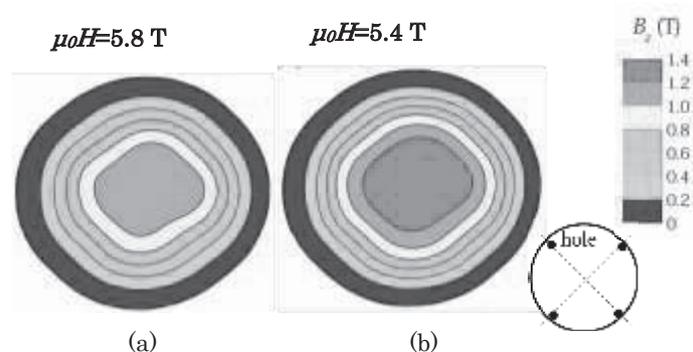


図 1 3.8T-5.4T を印加した時の磁場分布
Fig.1. Trapped field distributions for applied fields of 5.8T-5.4T

高い冷凍能力を持つ冷凍機を用いたバルク磁石装置の開発

Development of a bulk magnet system using a high-cooling power refrigerator

横山 和哉, 香月 淳, 三浦 敦郎 (足利工大); 岡 徹雄 (新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, KATSUKI Atsushi, MIURA Atsuro (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

著者らは超伝導バルク磁石の実用化を目指して、1 段 GM 冷凍機や空冷式コンプレッサの 2 段 GM 冷凍機、スターリング冷凍機を用いたバルク磁石装置を開発し、冷却及び着磁特性を評価してきた。現在、バルク磁石専用の冷凍機は存在せず、極低温物性測定や大型マグネットに用いられている冷凍機の中から選定して使用している。本年度、新たに冷凍能力が 12W@20K の 2 段 GM 冷凍機を用いたバルク磁石装置を開発した。本文では、 $\phi 60$ mm の GdBCO バルク体を上記磁石装置に取り付けて冷却及び着磁試験を行い、既存の 2 段 GM 冷凍機 (冷却性能: 5W@20K) での実験結果と比較する。

2. 新型バルク磁石装置

これまでは小型で取り扱い易く、低ランニングコストであることを優先し、特に冷凍機のコンプレッサは空冷式のものを選択してきた。そのため、冷却性能が比較的低下してしまった。本装置は冷却性能を重視して、冷却能力 12W@20K、最低到達温度 12 K の 2 段 GM 冷凍機を採用した。なお、コンプレッサは水冷式である。表 1 に既存の 5W@20K の冷凍機を用いたバルク磁石装置と、今回開発した 12W@20K の冷凍機を用いたバルク磁石装置のスペックの比較を示す。最低到達温度は、それぞれ 13 K 及び 12 K とほぼ同じである。

3. 実験方法

$\phi 60 \times 20$ mm の GdBCO バルク体 (新日鉄住金製) を冷凍機の 2nd ステージに取り付けたサンプルフォルダに配置する。真空断熱した後に冷却し、温調器で 20~50 K に設定する。着磁コイルを取り付けて 3.1~7.0 T のパルス磁場 (立ち上がり時間: 10 ms) を 1 回印加し、試料表面に貼り付けたホールセンサ (BHT-921) 及びセルノックス抵抗温度計 (CX-1050-SD) により、着磁中の磁束密度及び温度の時間変化を測定した。着磁コイルを取り外した後、磁極表面を三次元ホールセンサ (BH-703) により測定した。

4. 結果及び考察

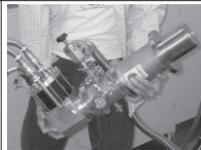
Fig. 1 に室温から最低到達温度まで冷却した時の、サンプルフォルダの温度変化を示す。冷却時間は両者とも約 2 時間半で、最低到達温度は 5WGM 機 18.4 K、12WGM 機 13.3 K であった。Fig. 2 に総磁束量 (左軸) 及びバルク体表面中央の磁束密度 (右軸) の印加磁場依存性を示す。両機とも印加磁場 4.6 T で最大値を取り、5WGM 機は総磁束量 1.7 mWb、磁束密度 2.10 T、12WGM 機は 2.0 mWb 及び 2.78 T であった。総磁束量は 1.17 倍、磁束密度は 1.32 倍向上した。

4. まとめ

本文は 12W@20K の冷却性能を持つ冷凍機を用いたバルク磁石を開発し、冷却及び着磁試験を行って、既存の 5W

@20K の冷凍機を用いたバルク磁石装置の結果と比較した。その結果、総磁束量及び捕捉磁束密度が向上し、冷却性能を大きくした効果が現れたと考えられる。本研究の一部は JSPS 科研費 15K05951 の助成を受けたものである。

Table 1 Specifications of the bulk magnet systems

	5 W GM	12 W GM
Photo		
Refrigerator	Dual-stage GM type (RS271, AISIN)	Dual-stage GM type (RM20, ULVAC)
Lowest temp.	13 K	12 K
Cooling cap.	5 W @ 20 K(2nd)	12 W @ 20 K(2nd)
Power consumption	1.6 kW / Three-phase 200 V	5.0 kW / Three-phase 200 V
Compressor	Air-cooled	Water-cooled

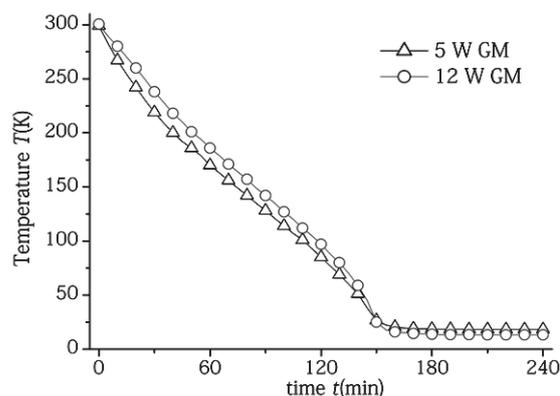


Fig. 1. Cooling characteristics (room temp. \rightarrow ultimate temp.)

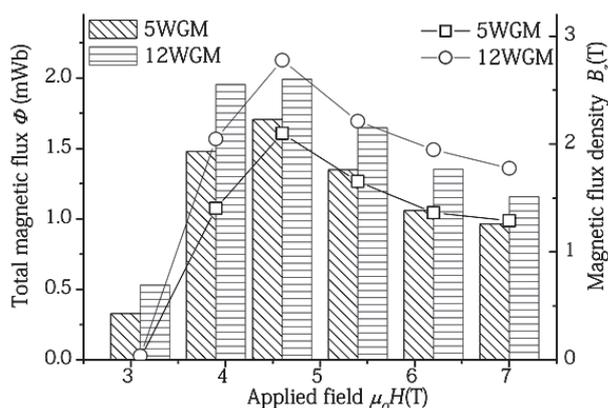


Fig. 2. Total magnetic flux and magnetic flux density as a function of applied field at 50 K.