

高温超電導ケーブル冷却用液体窒素ポンプの最適設計

Optimum Design of Liquid Nitrogen Pump for Cooling of High Temperature Superconducting Cables

只熊 健太, 松川 一弘(九大); 上岡 泰晴, 石山 敦士(早大); 今川 信作(NIFS); 中村 武恒(京大);
平井 寛一, 尾崎 信介(大陽日酸)

TADAKUMA Kenta, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); KAMIOKA Yasuharu, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
IMAGAWA Shinsaku (NIFS); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); HIRAI Hirokazu, OZAKI Shinsuke (TNSC)
E-mail: takakuma@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導 (HTS) 線を用いた電力ケーブルの研究開発が国内外で実施されている[1,2]。しかし、長尺な HTS ケーブルの冷却には液体窒素の循環ポンプが必要であるが、実用化に要求される吐出圧とメンテナンス間隔をもつ高効率なポンプはまだ開発されていない。そこで、我々のグループでは、低温磁気軸受と超電導モータで構成される低温液体ポンプの開発を目指している。その一環として、既存の HTS ケーブルの冷却配管をモデル化し、これにサブクール液体窒素を循環させた際の圧力損失や温度分布を予備的に評価した。本研究ではまず、圧力損失の評価に入熱項を導入し、その影響を定量的に評価した。次に、送液距離が最長となる流量を求める最適化プログラムを構築した。さらに、ケーブル配管の高低差を考慮した場合や窒素の戻り配管を追加した場合の圧力損失や温度上昇についても評価した。

2. 圧力損失および温度分布の評価

湾曲、継ぎ目等がない場合、ケーブル配管の単位長さ当たりの圧力損失 Δp と温度変化 ΔT はそれぞれ、

$$\Delta p = \rho \left\{ \frac{f v^2}{D_h} + \frac{\alpha v^2 W}{C_p \dot{m}} + gh \right\} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{1}{C_p} \left\{ (1 - \alpha T) \frac{f v^2}{D_h} + \frac{W}{\dot{m}} - \alpha Tgh \right\} \quad (2)$$

で表される[3,4]。ここで、 ρ は密度、 f は Darcy 摩擦係数、 D_h は水力直径、 v は流速、 α は等圧下の熱膨張率、 C_p は定圧比熱、 W は単位長さ当たりの入熱、 \dot{m} は質量流量、 g は重力加速度、 h は単位長さ当たりの高低差である。

Table 1 に示す 2 つのモデルケーブルにおける圧力損失と温度上昇のケーブル長依存性を評価した。ただし、(1)、(2)式の右辺第 3 項で表される高低差の影響は考慮していない。ポンプ入口圧力を 0.5 MPa、ポンプ出口 (ケーブル入口) 圧力 p_0 を 1.5 MPa、ケーブル入口温度 T_0 を 65 K とする。モデルケーブル 1 の場合、1 MPa 圧力降下する距離は 3.45 km であり、温度は 6.47 K 上昇する。(1)式について、右辺は通常第 1 項 (管摩擦の効果) のみを用いて評価されるが、第 2 項の寄与は 6.7 ppm であり、入熱の効果は無視することができる。一方、(2)式について、右辺は通常第 2 項 (入熱の効果) のみを用いて評価されるが、第 1 項の寄与は 6.0% であり、管摩擦の効果は無視できないことがわかる。モデルケーブル 2 については、1 MPa 圧力降下する距離は 10.97 km であり、温度は 7.20 K 上昇する。また、管摩擦と入熱の効果についても同様に、(1)式の第 2 項の寄与は 9.9 ppm で無視できるが、(2)式の第 1 項の寄与は 5.4% で無視できない。

3. ケーブル長とポンプ流量の最適化設計

モデルケーブル 1, 2 において、圧力降下 1 MPa 以内、温度上昇 15 K 以内の条件下で送液距離 x_1 が最長となる流量 x_2 を求める最適化プログラムを構築した。その際、非線形最適化ライブラリ NLOpt を利用した[5,6]。この場合、目的関数 F

および不等式制約式は次で定義される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } F(x_1, x_2) = -x_1 \\ & \text{subject to } p_0 - p_d \leq 1.0 \text{ MPa} \\ & \quad T_d - T_0 \leq 15 \text{ K} \end{aligned}$$

ただし、 p_d, T_d はそれぞれケーブル終端の圧力、温度である。最適化計算を実施した結果、Fig. 1 に示すように、モデルケーブル 1 では流量 $x_2 = 73.6 \text{ L/min}$ のとき送液距離が $x_1 = 6.17 \text{ km}$ で最長となった。一方、モデルケーブル 2 では流量 $x_2 = 76.1 \text{ L/min}$ で送液距離 $x_1 = 18.08 \text{ km}$ となった。

Table 1 Specifications of model cables.

| パラメータ | モデル 1 | モデル 2 |
|-----------|----------------------|----------------------|
| 参照研究開発 | 横浜プロジェクト[1] | 石狩プロジェクト[2] |
| 単芯ケーブルの外径 | 45 mm | 40 mm |
| 三芯ケーブルの外径 | 97 mm | - |
| 配管形状 | コルゲート管 | 直管 |
| 配管の内径 | 101 mm | 72.1 mm |
| 凹凸の高さ | 5 mm | - |
| 流路断面積 | 32.4 cm ² | 28.3 cm ² |
| 熱侵入 | 1.8 W/m | 1.8 W/m |
| 交流損失 | 3 W/m | - |
| 誘電損失 | 0.3 W/m | - |

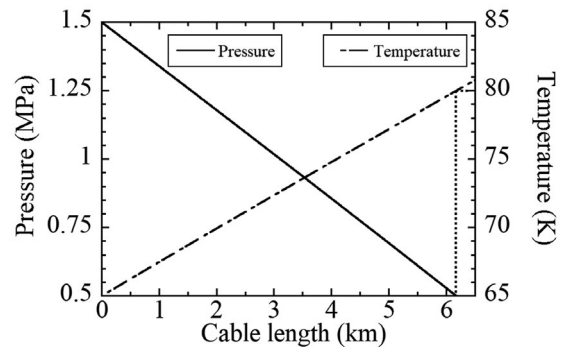


Fig. 1 Pressure drop and temperature rise in model cable 1.

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) / 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の支援により実施されたものである。

参考文献

- H. Yumura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, No. 3, 5402306 (2013)
- H. Watanabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, No. 4, 5400205 (2017)
- L. Bottura, et. al.: J. Comput. Phys., Vol. 125, No. 1, pp. 26-120 (1996)
- L. Trevisani, et al.: Cryogenics, Vol. 47, No. 2, pp. 113-120 (2007)
- S. G. Johnson: NLOpt nonlinear-optimization package; <http://ab-initio.mit.edu/nlopt> (accessed 2018-9-21)
- M. J. D. Powell: Acta Numerica, Vol. 7, pp. 287-336 (1998)

超電導き電システムのコンパクトブレイトン冷凍機の開発

Development of compact Brayton refrigerator for introducing super conducting feeding system

大野 隆介, 小松 峻介, 植田 翔太, 町田 明登(前川製作所);
鈴木 賢次, 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研)

ONO Ryusuke, KOMATSU Shunsuke, UEDA Shota, MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg.);
SUZUKI Kenji, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)
E-mail: ryusuke-ono@mayekawa.co.jp

1. はじめに

鉄道き電線超電導ケーブルシステムの実現には、限られた設置スペースを考慮に入れた冷凍機のコンパクト化が必須である。現状の運用に超電導き電線システムの導入を想定すると、設置容積 $2\text{m}^3/\text{kW}$ の冷凍機が求められている。冷凍機を小型にすることで冷凍能力の低下が懸念されることから、冷凍機を構成する圧縮機、膨張機、熱交換器等の配置の最適化が重要である。これまで NEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」において、電力システム用高効率・高信頼性ターボブレイトン冷凍機の開発を行ってきたが、本報ではその技術をベースに超電導き電線用コンパクト冷凍機の開発状況について報告する。

2. 冷凍機システム構成

長距離き電線の冷却を想定し、冷凍機の冷凍能力は 5kW 級とした。本研究開発で製作したブレイトン冷凍機のシステムフロー図を fig.1 に示す。冷凍機はネオンを冷媒とした圧縮機 3 基と膨張機 1 基からなる逆ブレイトンサイクルとした。

冷凍機は、2 基の圧縮機をハーマチックモータで直結した 2 段圧縮機と圧縮機と膨張機を上記同様にモータで直結した膨張機一体型圧縮機を搭載し、冷却部分となる冷熱回収熱交換器 (fig.1 中 Hex1)、LN2 クーラー (fig.1 中 Hex2)、膨張機等を一つの真空容器に納めたコールドボックス、圧縮機のアフタークーラーから構成される。また冷凍能力を調整するためにネオンガスの圧力を変える機能を持つバッファタンクを設けている。冷凍機の運転は循環する液体窒素の温度が一定になるように、モータ回転数とネオンガス圧力制御で行っている。

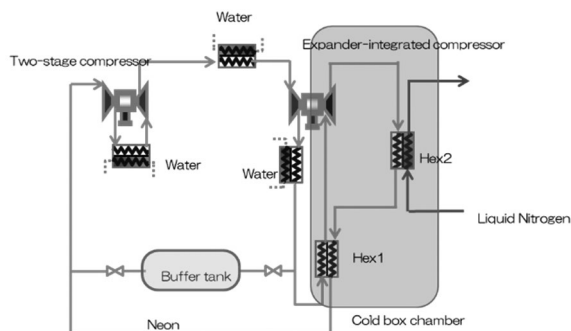
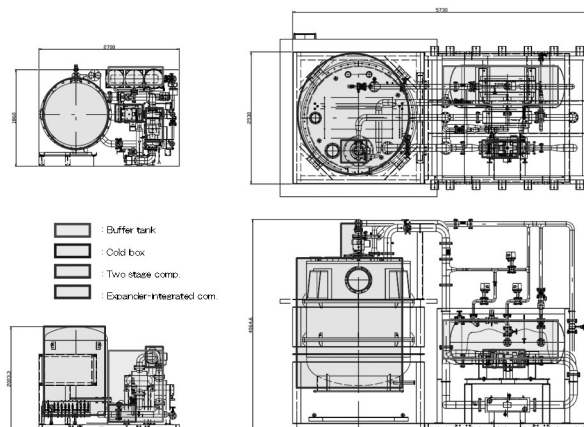


fig.1 Schematic of cooling system

3. 冷凍機のコンパクト化

冷凍機をコンパクト化する上で比較的設計自由度のある熱交換器を重視し、コールドボックスの小型化を実現した。従来の開発機 (NEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」) で製作したプレートフィン熱交換器の構造を見直し、許容圧力損失の拡大、縦方向熱伝導の抑制、2 分割を行った。LN2 クーラー (Hex2) と膨張機を最短で接続し、コールドボックス内部を下方集中配管にして、容器を上方開放構造とすることで、メンテナンススペースを必要としないため、コンパクト化へ大きく

寄与した。且つ温度変化による熱収縮を考慮した構造解析から配置の最適化を行った結果、設置容積は fig.2 に示すように従来開発機の約 60m^3 から約 10m^3 ($1.86\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.0\text{m}$) と $1/6$ となり目標容積を達成した。開発した冷凍機の外観写真を fig.3 に、主要仕様を table.1 に示す。今後、実運転で $2\text{m}^3/\text{kW}$ を達成すべく冷凍機性能の検証を実施していく。



a) Development model

b) Conventional model

fig.2 Size comparison with the conventional Brayton refrigerator

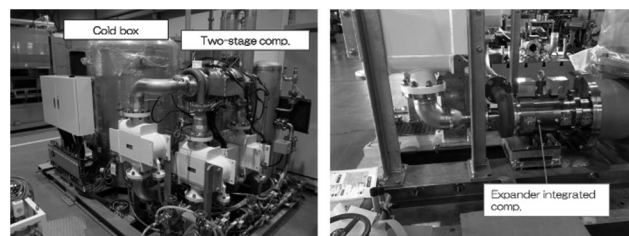


fig.3 Apparatus of turbo Brayton refrigerator

table.1 Specification

| Refrigeration cycle | Reversed Brayton cycle |
|---------------------------|--|
| Compressor/Expander stage | 3 stage/1 stage |
| Compressor/Expander type | Turbo |
| Pressure | < 1 MPaG |
| Size | $1.86\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.0\text{m}$ |
| Cooling power (target) | 5kW |

4. おわりに

鉄道き電線超電導ケーブルシステムの適用に向け、設置容積約 10m^3 ($1.86\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.0\text{m}$) の 5kW 級コンパクト冷凍機を開発した。今後、冷凍機の性能、信頼性等の工場試験を行い、さらに長距離き電線の冷却実証試験を行う予定である。

本研究は、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) から委託を受けて実施したものである。

超電導き電用ブレイトン冷凍機の試作

Prototype brayton cryocooler for superconducting feeder system

鈴木 賢次, 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研);小松 峻介, 植田 翔太, 町田 明登(前川製作所)
 SUZUKI Kenji, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (RTRI);
 KOMATSU Shunsuke, UEDA Shota, MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg)
 E-mail: suzuki.kenji.64@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道き電システムに超電導技術を適用することで、再生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道での電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている [1-3]。一般に、変電所間隔は、地方で 5-10km、都市部で 2-5km 程度であり、超電導き電ケーブルの導入には、長距離冷却用の大容量冷凍機が必要となるが、現状のブレイトン冷凍機は 2kW 級である[4]。今回、大容量化、鉄道現場への設置を想定したコンパクト化を目指し、5kW 級の超電導き電用ブレイトン冷凍機の試作を行った。

2. 超電導き電用ブレイトン冷凍機的设计・試作

ブレイトン冷凍機のコンパクト化にあたっては、熱交換器の小型化が大きく寄与するため、これまでにプレートフィン熱交換器の基礎特性評価を進めてきた[5]。熱交換器の大きさや性能(熱効率や圧力損失)は、トレードオフの関係にあるため、性能の低下を許容しつつ、著しく試作機の冷凍能力が低下しない範囲で熱交換器の小型化をはかった。膨張機一体型圧縮機の配置を縦置きから横置きに見直し、コールドボックスの小型化をはかった。冷媒の配管ラインについても、許容される圧力損失の範囲内で配管径や曲がり等のレイアウトを省スペース化する設計を行った。

その結果、図1のとおり、同等の冷凍能力を持つブレイトン冷凍機で従来、約 60m³であった設置容積が本試作機では、約 16m³とすることができた。その他の仕様は表 1 に示す通りである。従来型のブレイトン冷凍機の約1/4の設置容積で、5kW 級のブレイトン冷凍機を設置でき、コンパクトな本試作機は、鉄道現場への導入に際し、有効である。

また、鉄道で想定される変動熱負荷に対応するため、ネオン冷媒の流量制御と圧縮機・膨張機の回転数制御の併用により、冷凍能力の調整を効率的に行える設計とした。

3. おわりに

5kW 級の超電導き電用ブレイトン冷凍機の試作を行い、従来に比べ、約1/4の設置容積にコンパクト化することができた。今後、本試作機は、国立研究所において、冷凍能力などの評価試験を進めていく。(図 2)

当日は、その結果についても紹介する予定である。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導イノベーション」の支援を受けて実施したものである。

参考文献

1. M. Tomita *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) 181.
2. Superconductors drive trains, Nature 542 (2017) 275.
3. M. Tomita *et al.*: Energy 122 (2017) 579-587.

4. M. Tomita *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) 117.
5. A. Maeda *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) 132.

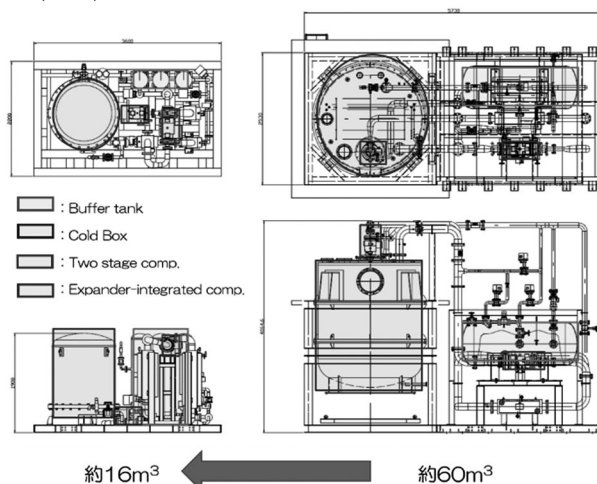


Fig.1 Size comparison of this prototype and 5kW-class conventional brayton cryocooler

Table1. Specification of 5kW-class prototype brayton cryocooler

| | 本試作機(5kW級) |
|-----------------------|-----------------|
| 冷凍能力(W)@77K | ~5000(調整可能) |
| 消費電力(kW) | 66 |
| 設置寸法(m) | 2.2 x 3.6 x 2.0 |
| 設置容積(m ³) | 16 |
| 重量(t) | 7 |

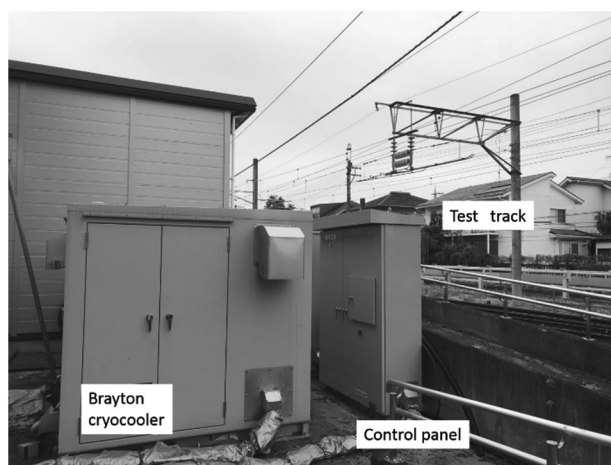


Fig.2 Photograph of brayton cryocooler at RTRI

高温超電導コイルを冷却する冷媒循環システム Cryogenic refrigerant circulation system for cooling HTS coil

謝 雲芝, 永井 せつら, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹(中部電力); 平塚 善勝(住重)

XIE Yunzhi, NAGAI Setsura, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co.);

HIRATSUKA Yoshikatsu (SHI)

E-mail: xie.y.ac@m.titech.ac.jp

1. Introduction

Cryocooler is widely applied in order to cool down the temperature of superconductor when using the superconducting technology in industry.

In heat conduction cooling system, temperature of superconducting coil as expected cannot be achieved when the distance between the coil and the cryocooler is large. It caused by temperature gradient in the heat transfer plate. Furthermore, the superconductor cannot be cooled uniformly and the cooling performance is unstable. Therefore, a method for cooling the superconducting coil with long-distance by circulating the helium gas was proposed [1].

2. Concept of the cooling system

Helium gas is discharged by a compressor passes through a pre-cooling heat exchanger which transfers heat with the return gas, and thereafter the gas cooled by the GM cryocooler. Eventually, the helium gas is utilized to cool a coil.

3. Configuration of the cooling system

In the cooling system, the inner diameter of gas flow path is 6.4mm. A pre-cooling heat exchanger (helical double-tube heat exchanger) consists of an inner pipe (inner diameter of 6.4 mm, outer diameter of 8 mm) and an outer pipe (inner diameter of 10 mm). The length of single path is 60m (overall length is 120m).

An energy conservation equation was used as a governing equation for one-dimensional numerical analysis. The helium temperature of whole path is calculated by energy conservation equation. The calculation condition is shown in table 1.

Experimental equipment includes: GM cryocooler, cryostat, buffer tank, pressure gage, flowmeter, helium compressor (for circulation), heater (coil emulation). The cooling system is shown Fig.1.

4. Experimental process

Test targets: the temperature of coldhead, the temperature of helium gas (inlet of cryostat, inlet, surface and outlet of coldhead, outlet of a heater), supply side and return side pressure of helium flow path, flow rate.

Experimental process:

1) Evacuate the cryostat. The pressure inside the cryostat is reduced to 10 Pa or lower by a rotary pump. Subsequently, vacuum evacuation is performed until about 10^{-3} Pa by a turbo molecular pump.

2) Flush the helium circulation flow path. The overall helium path is filled with helium ranged from 0.5 MPa to 1.0 MPa when flushing. Flushing is conducted three times to reach high purity helium.

3) Activate the circulating compressor and leakage checking. Adjust the flow rate of helium (0.42 g/s). Switch on the GM cryocooler and wait for the temperature is steadily. Steady is defined as the situation that the temperature variation of the coldhead is smaller than ± 0.05 K.

4) Targets measurement. Measurements were processed once per 10seconds, lasting 1 hour.

5. Results and discussion

Figure 2 shows the numerical and experimental results of the temperature distribution along the helium flow path. The temperature at 60.00m means the temperature of coldhead inlet,

60.10m is coldhead, 60.25m is coldhead outlet, and 60.60m is coil outlet.

Comparing the numerical simulation values with the experimental values, helium temperature of coldhead outlet by experiment is much higher than that by numerical simulation. It is mainly attributed to a large heat leakage during heat conduction between the radiation shield and cryostat.

Future work: Improve the experimental equipment to achieve high accuracy and high stability. Adjust the boundary conditions of experiment and numerical calculation. Compare and evaluate difference in results.

Table 1 Calculation condition

| Cooling method | Helium loop cooling |
|-----------------------------|---------------------|
| Mass flow rate m [g/s] | 0.42 |
| Discharge pressure [MPa] | 1.425 |
| Room temperature [K] | 295 |
| Aim of coil temperature [K] | 20~40 |

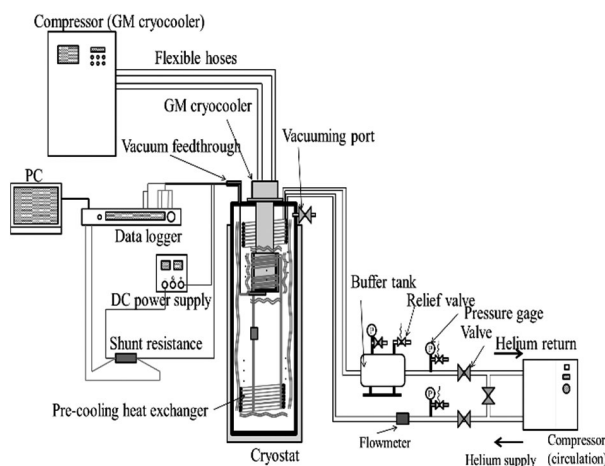


Fig. 1 Helium circulation cooling experimental system

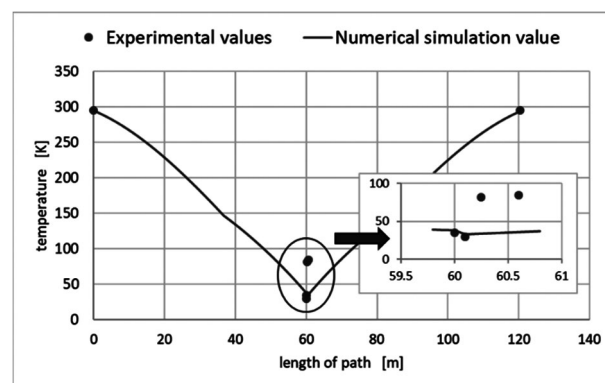


Fig. 2 length of path - temperature

Reference

- [1] T. Trolhier, et al.: Remote Helium Cooling Loops for Laboratory Applications, Cryocoolers 17, (2012).

全超電導回転機の低圧ガスによる回転子冷却に関する解析モデルの検討

Study of analytical model on rotor cooling by low pressure gas
of fully superconducting rotating machines

加藤 幹人, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

KATO Mikito, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kato.mikito18@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

全超電導回転機の回転子冷却を簡略化する方法として、エアギャップ中の低圧ガスの熱伝導と対流熱伝達を用いた冷却方法の実現性をこれまで検討してきた[1]。しかし、従来の定常状態における熱解析モデルはトルクチューブの構造等を簡略化したものであり、より現実に近いモデルでの解析が望まれる。本講演では、トルクチューブや電機子巻線冷却のための冷媒流路等を含めた、熱解析モデルを検討し、有限要素法により解析・考察を行った結果を報告する。

2. 解析モデルと解析方法

対象とする全超電導回転機の諸元はこれまでの解析[1]と同じとした。より詳細なモデルで解析を行うために、固定子と回転子を分けて、有限要素法解析ソフト COMSOL による熱解析を行った。

固定子モデルの断面図を Fig. 1 に示す。周期性から 1/6 の部分について、電機子巻線の端部を除く軸方向長を考慮した 3次元解析を行った。液体水素 (LH2) を軸方向に流す。強制対流沸騰熱伝達に関する境界条件として、他の数値解析の研究[2]でも使われている RPI (Rensselaer Polytechnic Institute) 沸騰モデルを適用した。RPI 沸騰モデルでは壁面 (巻線) から流体 (LH2) への熱流束を3つの要素に分けて考える。電機子巻線には交流損失を想定した発熱を与えた。LH2 の流速、交流損失の大きさをパラメータとして変化させ、固定子の温度分布を算出した。また、流路の本数や直径を変えたときの固定子の温度分布の違いも比較した。

回転子は周方向を一様に近似した軸対称モデル (Fig. 2) を用いて解析を行った。回転子両端にトルクチューブを設け、エアギャップ中のガス He での冷却を考える。エアギャップには、固定子の解析より算出した温度分布と回転二重円筒間の熱伝達に関する実験式[3]より求めた熱伝達係数を考慮した境界条件を与えた。室温部 (300 K) から回転子への侵入熱は、薄肉

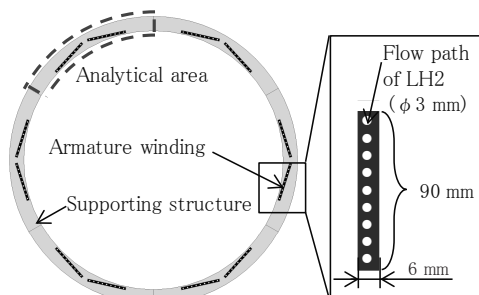


Fig. 1 Cross section of analytical model of stator

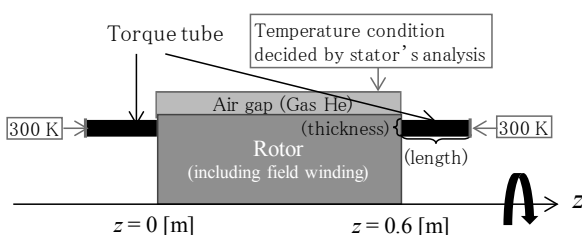


Fig. 2 Analytical model of rotor

円筒のトルクチューブの厚さと長さによって決まる。トルクチューブの寸法を変化させて回転子表面の温度分布を算出し、設定した固定子条件のときに低圧ガスによる回転子冷却が可能であるかを調べた。

3. 解析結果

固定子の解析結果として、電機子巻線の最高温度と LH2 の流速の関係を Fig. 3 に示す。流速の増加に伴い、巻線温度は低下し、その後一定となる。また交流損失が大きいほど、巻線温度が一定に達するまでに、より大きな流速を要することがわかる。次に、LH2 流速 20 m/s、交流損失 5 kW のときの固定子の温度分布をもとに回転子の解析を行った。Fig. 4 に回転子表面の最高温度とトルクチューブの寸法の関係を示す。トルクチューブを薄く長くするほど、回転子への侵入熱が小さくなるので、回転子表面の温度を下げるができる。

4. まとめ

本研究では、トルクチューブと冷媒流路を含めた解析モデルを検討して熱解析を行い、低圧ガスによる回転子冷却の実現性を調べた。温度分布の解析結果より、検討する冷却方法を実現するために必要な LH2 の流速やトルクチューブの寸法を明らかにした。

参考文献

1. M. Kato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.138
2. Y. Zheng, et al.: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42 (2017) pp. 30804-30812
3. M. Fenot, et al.: International Journal of Thermal Sciences, Vol.50 (2011) pp.1138 -1155

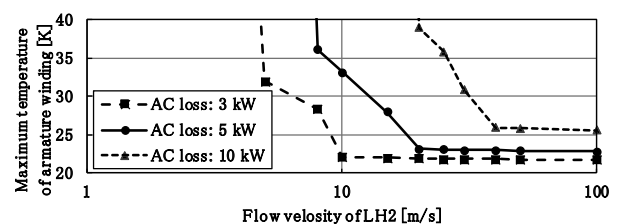


Fig. 3 Maximum temperature of armature winding as a function of flow velocity of LH2

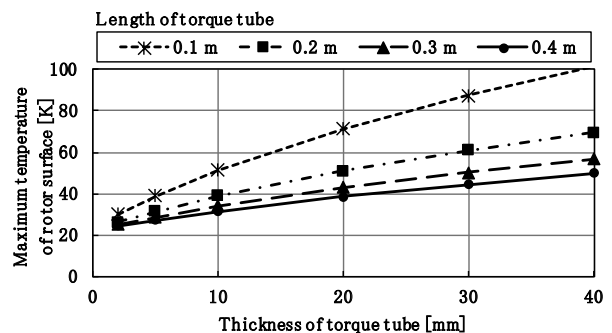


Fig. 4 Maximum temperature of rotor surface as a function of size of torque tube

ヘリウム 4 を使った到達温度 2K 以下 GM 冷凍機の評価検討

A Gifford-McMahon cryocooler below 2K with helium 4

平塚 善勝(住重)

HIRATSUKA Yoshikatsu(SHI)

E-mail: yoshikatsu.hiratsuka@shi-g.com

1. はじめに

2012 年以降、独立行政法人情報通信研究機構で開発中の超電導単一光子検出器 (SSPD) を冷却するための小型 Gifford-McMahon (GM) 冷凍機が住友重機械工業株式会社 (SHI) によって開発されてきた。市販の RDK-101 GM 膨張機と比較して膨張機の全高が 33%削減され、既存の CNA-11 圧縮機ユニットと比較して総体積が 50%削減された。2016 年に、平塚などは、オイルレスリニア圧縮機開発し、2K GM 膨張機の冷却性能を測定し、2.1K 未満の無負荷温度および 20 mW at 2.3 K の冷却能力は、1.1kW の電気入力で達成されたとことを報告した[1]。SSPD の性能は、冷却温度が低下するにつれて向上する。そこで、ヘリウム 4 を使ったリニア圧縮機と RDK-101 GM 膨張機を用いて 2K 以下の温度を実現する可能性を検討し、さらに 4KGM 冷凍機性能計算用に開発された数値計算コード[2]の 2 K 以下における性能計算結果について評価検討を合わせて行ったので、その結果について報告する。

2. リニア圧縮機による RDK-101 膨張機の性能

ヘリウム 4 のエントロピー一定における圧力に対する温度変化は、比較的高温の領域においては圧力が増加すると上昇するが、温度が 2 K 未満の領域では、圧力が増加するに伴い温度が低下する領域が存在する。このため、充填ガス圧力を高くすることで低温化が可能であると予測されるが、既存の CNA-11 圧縮機ユニットでは、吸着器とオイルセパレータが存在するため大きく圧力を上げることは難しい。しかし、オイルレスリニア圧縮機はその限りではない。高圧試験は、小型 2K GM 膨張機は SSPD システムに搭載されていたため、熱負荷を加えて冷却性能を評価することは困難なため、市販 RDK-101 膨張機とリニア圧縮機を用いて行った。Fig. 1 は、CNA-11 圧縮機を使用した RDK-101 膨張機の冷却能力を測定した結果とリニア圧縮機を用いて初期充填ガス圧力を変化させたときの冷凍能力への影響が示されている。膨張機の耐圧限界のために、最大初期圧力は 3 MPa に設定された。CNA-11 圧縮機は、動作周波数 50 Hz、初期圧力 1.95 MPa において 2 段冷凍能力 19.1 mW at 2.3 K、到達温度 2.1 K の冷却能力が得られたのに対し、リニア圧縮機は、到達温度 1.96K、2 段冷凍能力 3.86 mW at 2.0 K であった。同図より、リニア圧縮機の性能は、2 段温度 2.3 K 未満において、CNA-11 圧縮機に対し良好な結果が得られているが、充填ガス圧力が増加すると、2 段温度は低下するが 1 段の温度は上昇していることが分かる。

3. 数値計算による検討

4KGM 冷凍機性能計算プログラムを使って冷却性能に及ぼす充填ガス圧力の影響を検討するために数値計算検討を行った。基本方程式は、作動ガスの質量、運動量及びエネルギー保存式および蓄冷器マトリックスのエネルギー保存式で、各空間の圧力は、密度と温度から圧縮係数を求め計算する。伝導、放射およびシャトルの熱損失は収束結果から差し引く。各微分方程式は差分法により離散化され、運動方程式の対流項は一次風上差分を用いて解かれる。バルブの流量は、実際のバルブタイミングを考慮している。エネルギー対流項については、1 段および 2 段蓄熱器にはそれぞれ 3 次風上差分 (QUICK) および 1 次風上差

分が用いられ、オイラー法は時間進行法に使用する。Fig. 2 に充填ガス圧力 1.95 MPa と 2.55 MPa 時の数値計算結果を示す。同図より、2.0 K 近傍における 2 段冷凍能力は、圧力 1.95 MPa の方が高くなっており実験結果と異なるが、1 段冷却能力は低下し、実験結果と同様の傾向を示す。2K 以下の GM 冷凍機性能向上を検討するために数値計算プログラムを改善する必要がある。

4. まとめと今後の予定

SSPD システムの性能を向上させるために、ヘリウム 4 を用いて 2K 以下の温度を達成する可能性について実験ならびに数値計算により検討した。リニア圧縮機を用いて初期充填ガス圧を増加させることで、無負荷条件下で 2 段温度 1.96 K、冷凍能力 3.86 mW at 2.0 K が得られたことを確認した。今後、蓄冷器材料とバルブタイミングの最適化ならびに数値計算コードの改善により 2 段温度をさらに低下させることを検討する。

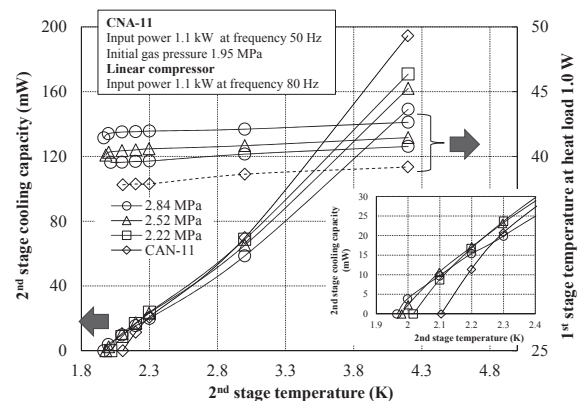


Fig.1 Cooling performance of a RDK-101 expander using a CNA-11 and a linear compressor unit.

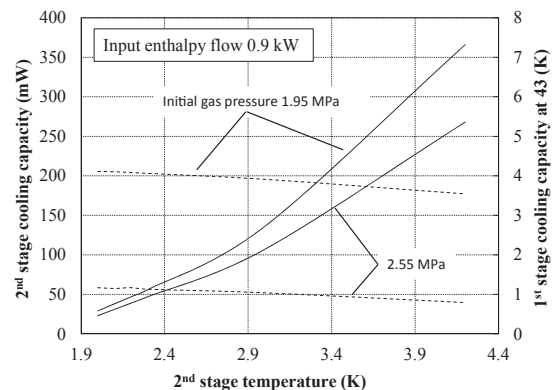


Fig.2 Numerical simulation results of the cooling performance.

参考文献

- [1] Y. Hiratsuka, et al.: 26th ICEC and ICMC in 2016 (New Deli, India), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 171(2017) 012072
- [2] 平塚善勝, 佐藤敏美, : 4K-GM 冷凍機蓄冷器特性の検討: 2 段蓄冷材の鉛粒径の影響: 機講論, 06-29, (2006), 87-88.

室温磁気冷凍機における階層充填構造と冷凍能力の関係

Relationship between Layered Bed Configurations and Cooling Performance for Room-temperature Magnetic Refrigerator

星野 洋志, 叶谷 祐介, 岡村 哲至(東工大); 裴 相哲(サンデン AT)

HOSHINO Hiroshi, KANOYA Yusuke, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (Sanden ATJ)

E-mail: hoshino.h.ad@m.titech.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調機器のノンフロン化を実現するため、磁性材料の持つ磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機の研究が行われている。先行研究より、磁気再生機 (Active Magnetic Regenerator; AMR) 内にキュリー温度の異なる複数の磁性材料を階層状に充填することによって、磁気冷凍機の最大温度スパンが拡大することが明らかとされている[1,2]。本研究ではマンガン (Mn) 系合金を階層充填した際の性能を 1 次元伝熱数値解析によって調べた。

2. 磁性材料について

本研究では MnFeRuSiP 系合金を用いた。比熱の最大値を示す温度をキュリー温度 T_c と呼び、MnFeRuSiP 系合金では Fe と Ru の含有量を変化させることでキュリー温度を制御することができる。各物性値が測定できている材料はキュリー温度が異なる 3 種類のみであるため、その他のキュリー温度の物性値は既知の 3 種類の物性値から補完した。

3. 一次元伝熱数値解析

一次元伝熱数値解析を用いて磁性材料充填ダクトの熱特性を調べた。ダクト内の計算には、熱輸送媒体と磁性材料との間の一次元エネルギー方程式を解いた。有効熱伝達率は Ranz の式および磁性材料のピオ数を用いて算出した[3,4]。本研究では、流体摩擦による損失およびダクト外部からの熱侵入は無視した。

4. 解析条件

Fig.1 に解析に用いた磁性材料充填ダクト内の Mn 系合金の充填構造を示す。内径 14mm 磁性材料充填長さ 150mm に平均粒径 0.45mm の球状材料を充填した。両端部に充填される材料のキュリー温度は固定として、低温端に $T_c=1^\circ\text{C}$ の材料、高温端に $T_c=25^\circ\text{C}$ の材料を充填した。その上でキュリー温度間隔を変えて充填種類数および長さを変化させた。(a)キュリー温度間隔 1°C 、25 種類、各 6mm、(b)キュリー温度間隔 3°C 、9 種類、各充填長さ 16~17mm、(c)キュリー温度間隔 6°C 、5 種類、各充填長さ 30mm、の 3 通りの条件について検討した。磁場を印加する周波数は 2.0Hz、流量は 0.5L/min、排熱温度は 25°C とした。

5. 結果と考察

Fig.2 に Mn 系合金の階層充填種類数と冷凍能力の関係を表す解析結果を示す。縦軸に冷凍能力、横軸に材料充填ダクト低温端の温度を示す。充填する材料のキュリー温度間隔が小さいほど冷凍能力が向上している。これは隣り合う磁性材料の磁気エントロピー変化量 ΔS_M J/kg/K の重なりが大きく、 ΔS_M の小さい領域が減少するためだと考えられる。Mn 系合金は ΔS_M や断熱温度変化量 ΔT が大きい値を示す温度域が狭いため、階層充填を行う材料のキュリー温度間隔を密にする充填が効果的であることが示された。また、充填種類数によらず低温端材料のキュリー温度によってダクト低温端温度がおおよそ決まることも示された。ランタン (La) 系合金についても同様の傾向が示された。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構・戦略的創造推進事業 (先端的低炭素化技術開発:ALCA Grant Number JPMJAL 1408) の助成を受けて行ったものである。ここに謝辞を表す。

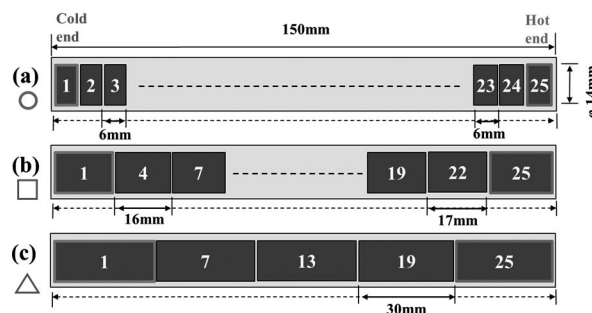


Fig.1 Configurations of Mn-based alloys with different Curie temperatures used in simulations (numbers shown in the AMR duct denote the Curie temperature)

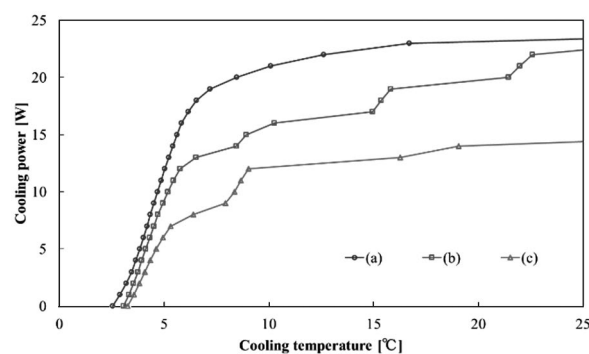


Fig.2 Analysis results of cooling power for configurations in Fig.1

参考文献

1. M. A. Richard, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) p.2146-2150
2. C. Zimm, et al.: International Journal of Refrigeration, Vol.29 (2006) p.1302-1306
3. W. E. Lanz, et al.: Chemical Engineering Progress, Vol.43 (1952) p.141-146
4. K. L. Engelbercht, et al.: Journal of Heat Transfer, Vol.128 (2006) p.1060-1069

水素液化磁気冷凍用磁性体 $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ の磁気熱量効果

Magnetocaloric effect of magnetic refrigerant for hydrogen liquefaction $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$

表 秀樹, 渡辺 祥太, 松本 宏一(金沢大学);

Ilidar Gilmutdinov, Airat Kiiamov, Dmitrii Tayurskii(カザン連邦大学)

OMOTE Hideki, WATANABE Shota, MATSUMOTO Koichi(Kanazawa University);

ILDAR Gilmutdinov, AIRAT Kiiamov, DMITRII Tayurskii(Kazan Federal University)

E-mail: sennkouzi@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いられる磁性材料の研究をしている。水素液化磁気冷凍機に用いられる磁性材料として、酸化物ガーネット・金属間化合物・希土類硫化物などの磁気熱量効果について報告してきた。

希土類-遷移金属酸化物 GdTiO_3 はペロブスカイト構造を持つフェリ磁性体であり、 Gd^{3+} イオンと Ti^{3+} イオン間で反強磁性相互作用が起こっている[1]。 GdTiO_3 は水素液化温度近傍で磁気相転移を起こし、大きな磁気エントロピー変化を示すことを前回報告した[2]。磁気転移温度の制御については、先行研究より、Gd を Sm に置換することで磁気転移温度を下げる事ができるという報告がある[3]。しかし、磁気熱量効果については不明であった。

本研究では $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ の作製を行い、磁化・比熱測定による磁気熱量効果の評価を行ったので報告する。

2. $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0.2,0.3] の作製

原料として純度が 99.9%以上の $\text{Sm}_2\text{O}_3, \text{Gd}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{Ti}$ を用いて化学量論組成近傍の組成になるように秤量した。混合した粉末をラバーチューブに詰め、静水圧プレスで棒状に成形した。できた原料棒をフローティングゾーン法により結晶育成させた。結晶育成には、クリスタルシステムズ社製赤外線単結晶製造装置を用い、育成時は、雰囲気中にアルゴンガスを流した。

X 線回折により、 $\text{Sm}_{0.2}\text{Gd}_{0.8}\text{TiO}_3$ の単結晶が得られたことを確認し、結晶軸の確定を行った。 $\text{Sm}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{TiO}_3$ は単結晶がうまく作製できなかったため、多結晶の粉末を測定に用いた。

3. $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ の磁気熱量効果

磁化測定では Quantum Design 社製の MPMS(磁気特性測定システム)を用いて 5T までの磁化測定を行った。Maxwell の関係式からエントロピー変化を導出し、磁性体としての性能を評価した。また、比熱測定では Quantum Design 社製の PPMS(物理特性測定システム)を用いて、緩和法で 0~5T の磁場中比熱測定を行った。比熱から磁性体のエントロピーを導出した。

4. 実験結果

$\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0,0.2,0.3] の磁化の温度依存性を Fig.2 に示す。Fig.2 より、低温側で典型的な強磁性体の振る舞いが観測された。磁化測定から温度、磁気ヒステリシスは観測されず、ゼロ磁場比熱測定においては磁気相転移に伴うピークが観測された。ゼロ磁場比熱測定で得られたピーク温度をキュリー温度 T_c とした。 $\text{Sm}_{0.2}\text{Gd}_{0.3}\text{TiO}_3$ は $T_c=24\text{K}$ 、 $\text{Sm}_{0.3}\text{Gd}_{0.7}\text{TiO}_3$ は $T_c=18\text{K}$ となった。Gd を Sm で置換することにより、磁気転移温度が下がることを確認した。また、印加磁場が 0.1T での dM/dT の最小値を評価することにより得られたピーク温度はキュリー温度 T_c と一致する結果となった。磁場中比熱からエントロピー線図を求めた。

磁化の温度依存性から求められた $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0,0.2,0.3] の質量当たりの磁気エントロピー変化 ΔS を Fig.3 に示す。水素液化温度 20K での磁気エントロピー変化

は GdTiO_3 と比べ $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0.2,0.3] は磁場変化が 5T では約 5%、3T では約 10%、1T では約 20%増加した。このことから、水素液化温度においては $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0.2,0.3] は GdTiO_3 よりも大きな磁気熱量効果が期待される。

講演では、測定結果の詳細について報告する。

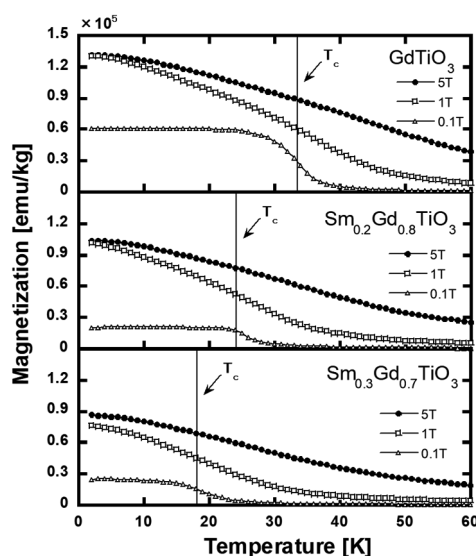


Fig.2 Magnetization of $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0,0.2,0.3]

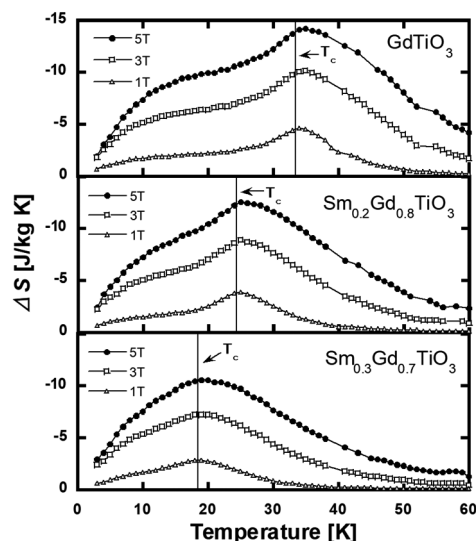


Fig.3 Entropy change of $\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{TiO}_3$ [x=0,0.2,0.3]

参考文献

1. Carl W. Turner, et al.: Journal of Solid State Chemistry 34, 207-213 (1980)
2. H. Omote, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p67
3. G. Amow, et al.: Journal of Solid State Chemistry 154,619-625 (2000)

積層した REBa₂Cu₃O_y 超伝導テープ線材における中心到達磁界を使った交流損失の予測手法

Estimation Method Using Penetration Field for AC Loss of stacked REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes

川崎 剛輝, 佐々 滉太, 三浦 峻, 岩熊 成卓(九州大学); 和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 顕(産総研)

KAWASAKI Goki, SASA Hiromasa, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka(Kyushu Univ.);

IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira(AIST)

Email:kawasakig@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導線材を交流機器に応用する際、超伝導巻線部分で交流損失が発生し、冷凍機の温度上昇を引き起こす等、重大な問題となりうる。また、高い臨界温度を持つ REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 超伝導テープ線材は広い温度領域での応用が想定されており、交流損失は線材の温度、積層枚数、外部磁場印加角度等に依存するが、各条件について測定を行うことは、コストや時間の観点から好ましくない。そこで、様々な条件における交流損失特性を容易に予測する手法が求められる。

我々は鞍型ピックアップコイルを用い、温度 25-77 K において積層枚数 1-12 枚の無分割 REBCO 超伝導テープ線材の交流損失の測定を行い、得られた交流損失曲線が、中心到達磁界 B_P で規格化を行うことで積層枚数に依らない一本のマスターカーブに一致するという特性を明らかにした。

2. 線材諸元と試験方法

試料の諸元を Table.1 に示す。これを 1-12 枚積層し、鞍型ピックアップコイル法を用いて測定した。冷凍機による伝導冷却を用いて 25K-77K まで冷却し、磁界をテープ面に対して垂直に印加した。

Table. 1 Specifications of EuBCO+BHO tapes

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Width | 5mm |
| Length | 60mm |
| Thickness of EuBCO+BHO layer | 0.7 μ m |
| Tape Thickness | 106 μ m |
| Critical Current I_c at 77K | 200A |

3. 実験結果

各積層枚数において、25K における交流損失の測定結果を Fig.1 に示す。この交流損失特性を各積層枚数における中心到達磁場 B_P で規格化を行った。中心到達磁場 B_P とは Fig.1 で示す二つの直線の交点における磁場であり、この二つの直線はそれぞれの測定結果の近似曲線を表している。この中心到達磁場 B_P を用いて、横軸を中心到達磁場 B_P で、縦軸を中心到達磁場 B_P における交流損失 W_P で規格化をおこなった。その結果を Fig.2 に示す。この結果から各積層枚数における交流損失が、低磁束ではばらつきが見られるものの、一本のマスターカーブにほぼ一致していることが分かる。また、ばらつきが生じる原因としては測定誤差等が考えられる。

4. まとめ

以上の結果より、今回の EuBCO+BHO 線材において、積層枚数に依らず、中心到達磁場 B_P でスケールリングすることが分かった。しかし、積層枚数に対する中心到達磁場 B_P の特性は、何らかの累乗関数の特性を示すということしかわかっていない。そのため、現在はまだ中心到達磁場 B_P による規格化を用いて各積層枚数の交流損失の予測を行うことができない。今後は中心到達磁場 B_P の特性の解明が課題となる。

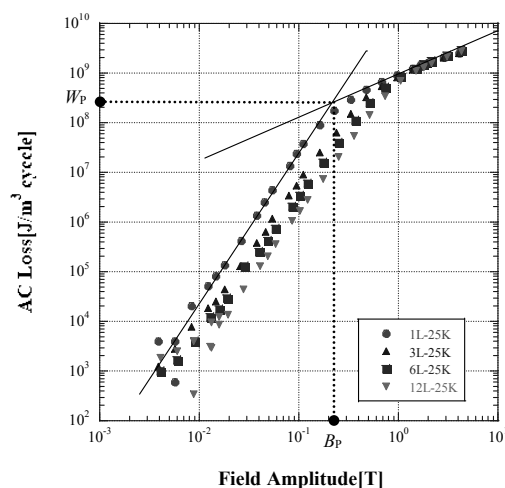


Fig. 1 AC losses of EuBCO+BHO tapes at 25K

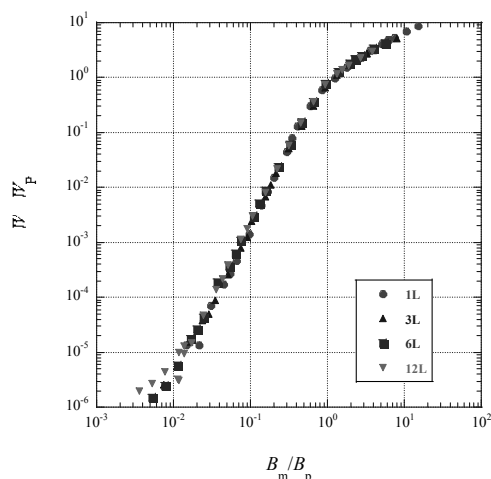


Fig.2 Penetration Field scaling of ac loss of EuBCO+BHO at 25K

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(17H06931, 18H03783)、および JST-ALCA の助成を受けて実施したものである。

異なる端部接触抵抗の Y 系超電導並列導体の付加的交流損失

Additional AC loss properties of Y-based superconducting parallel conductor of several different contact resistance

古川 琢馬, 三浦 峻, 岩熊 成卓(九州大学)

Furukawa Takuma, Miura Shun, Iwakuma Masataka(Kyushu University)

1. はじめに

我々は大電流容量化を目指す酸化超伝導線材の構成法として素線を並列に並べ、巻線途中で転位を施す方法を提案している[1,2]。本研究では素線の通電特性として n 値モデルを採用し、その理論表式の妥当性を実験にて明らかにすることを目的にした。

前回の報告では一つの試料についてピックアップコイル法にて測定をしたが、本研究では、並列導体の端部の接触抵抗を変えた試料をいくつか用意し、同様の方法で測定を行い、理論式と比較検討をした。

2. 実験方法

ピックアップコイル法による交流損失の測定は、並列導体をコイル状に巻き、その軸方向に印加される交流磁界によって現れる磁化信号を検出することによって求める。この磁化信号を検出するため、試料コイルに対して十分大きなピックアップコイルを同軸上に配置し、このピックアップコイル側面上のポインティングベクトルを交流一周期にわたって積分することによって求める。このとき交流損失は次式のようになり、外部印加磁界 B_c 及びピックアップコイルの端子間電圧 V_{pc} を測定すれば交流損失が求まる。

$$W = -\frac{L_{pc}}{\mu_0 S_s L_s N_p} \int_0^T dt B_c V_{pc} \dots\dots(1)$$

ここで、 L_{pc} はピックアップコイル長、 N_p はピックアップコイルの巻き数、 S_s は試料コイルの断面積、 L_s は試料コイル長である。

また、解析的には非飽和状態での交流損失の周波数依存性は、デバイ型曲線で現れ、交流損失が最大になる周波数 f_c は次式のようになり、端部接触抵抗 R に比例する。

$$f_c = \frac{Rw}{\pi\mu_0 k' d_s L} \dots\dots(2)$$

ここで、 w は線材幅、 d_s は線材間距離、 L は導体長である。

3. 結果と考察

端部接触抵抗 $R=1.0 \times 10^{-6} \Omega$ 、(2)式より $f_c=0.61$ である試料の交流損失の外部磁界振幅依存性は Fig.1 に示している。これより、 f_c から離れるにつれ非飽和状態での1周期の交流損失が小さくなる点、飽和状態に向かうとき n 値モデルを仮定した計算値が測定値とよく一致しており、計算モデルの妥当性が確認された。

次に、端部接触抵抗がそれぞれ $1.5 \times 10^{-7} \Omega$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \Omega$ 、 $3.0 \times 10^{-6} \Omega$ 、である試料について交流損失の周波数依存性を印加磁界 0.02T として測定した結果を Fig.2 に示す。ここで、 f_c は(2)式よりそれぞれ 0.092 Hz、0.61 Hz、1.8 Hz である。これより、測定値と計算値がおおむね一致していることが確認される。一方で、端部接触抵抗が $1.5 \times 10^{-7} \Omega$ の試料については高周波数のとき測定値が計算値よりも大きな値を取っている。これは動的抵抗損失、もしくは I_c や n 値の低下が原因だと考えられる。

4. まとめ

並列導体の交流損失を異なる端部接触抵抗の試料について測定し、n 値モデルを仮定した計算値と比較した。これらはおおむねよく一致しており、理論表式は比較的妥当だと確認された。引き続き2本並列導体について測定および比較を行っていく。

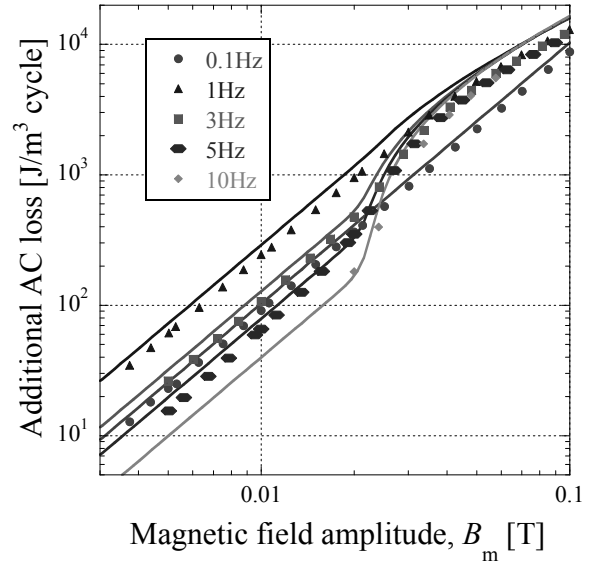


Fig.1 The dependences of the additional AC losses on magnetic field amplitude for the situation of various frequency

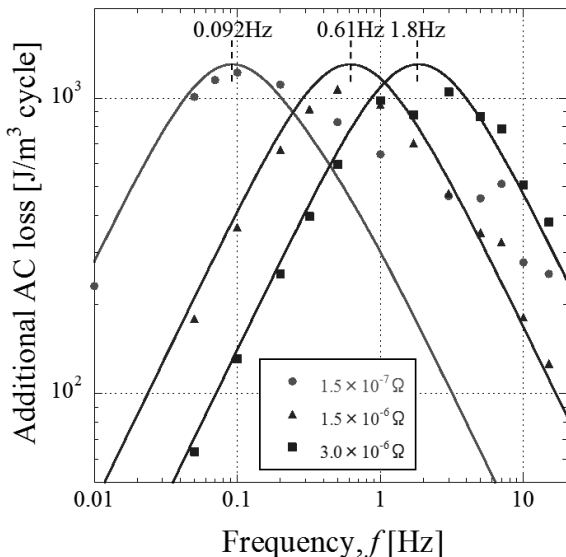


Fig.2 The dependences of the additional AC losses on frequency for the situation of various contact resistance

参考文献

[1] M Iwakuma, H Tanaka and K Funaki 2002 Supercond. Sci. technol. 15 1525
 [2] M Iwakuma, H Tanaka and K Funaki 2002 Supercond. Sci. technol. 15 1537

短尺直線状 HTS 線材の交流損失特性の高感度測定

Highly sensitive measurement of AC loss characteristics of short and straight HTS tapes

原本 佳人, 平山 齊, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HARAMOTO Yoshito, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k6211602@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導 (HTS) 線材の交流損失特性の高感度測定は、低損失 HTS 線材を開発する上で重要である。本研究では、短尺直線状 HTS 線材の交流横磁界印加時の交流損失測定の高感度化を図るために、測定サンプルがないときに発生する見かけの損失 (キャンセル残り) の低減について検討した。さらに、その結果をもとに低減を狙った磁界印加用マグネットを作製し、交流損失測定を行い、測定感度について検討した。本発表では、その結果について報告する。

2. 交流損失測定法とキャンセル残り低減の方策

本研究では、交流損失測定はピックアップコイル法を用いて行う。キャンセル残りを低減するために、まずマグネット巻線用線材の線径を細くした。これは、マグネット巻線に生じる渦電流が測定空間に作る磁場の影響を小さくするためのものである。さらに、測定に用いるピックアップコイルとキャンセルコイルをマグネット内に対称配置することで、測定二次回路の位相誤差を低減し、キャンセル残りの低減を試みる。そのためにこのような測定が可能なマグネットを新たに設計・作製した。

3. 外部印加磁界用マグネット

Fig. 1 は現有の外部磁界印加用マグネットの外観図である。楕円形のスプリット型の 2 対のコイル (メインコイルとサブコイル) から成り、直径 0.3 mm の Cu 線の 7 本撚り線を用いて巻線したものである。サンプル線材は同図に示すようにマグネット中心部に挿入し、サンプル線材には線材幅広面に対し垂直方向から平行方向の横磁界を印加できるようになっている。なお、このマグネットでは、ピックアップコイルはマグネット中心に位置するため、キャンセルコイルとは対称な位置関係にはない。

4. マグネット巻線用線材の細線化とキャンセル残り

Fig. 2 は、外部磁界振幅に対するキャンセル残りの測定結果である。□印は Fig. 1 に示すマグネットを使用したときの測定値で、○印は線径 1.0 mm の Cu 単芯線で巻線した従前に作製したマグネットを使用したときの測定値である。撚り線を用いることで、マグネット巻線に生じる渦電流による磁場の測定空間への影響が低減されてキャンセル残りが小さくなったものと考えられる。

5. 巻線用線材の細線化とキャンセル残りの低減の関係

マグネット巻線用線材の細線化とキャンセル残り低減の関係について調べるために、Table 1 に示すような巻線径の異なるソレノイドを作製した。また、Fig. 3 に示すようなピックアップコイルとキャンセルコイルの種々の組み合わせを準備して、キャンセル残りを測定した。

Fig. 4 にキャンセル残りの測定結果を示す。P2-C2 の検出コイルの組み合わせにおいて、細い線径で巻線したソレノイドがキャンセル残りの低減が図れている結果が得られた。対称配置の場合のキャンセル残りが下がらなかった理由については、現在検討中である。これらの知見を活かしたスプリット型のマグネットの設計・製作は完了した。これを用いたキャンセル残りの測定結果ならびに交流損失の測定結果については、当日報告する。

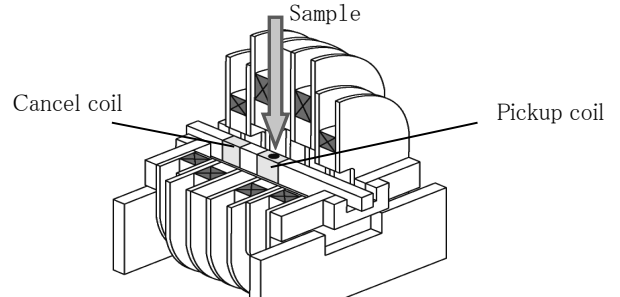


Fig. 1. Schematic view of split-type magnet.

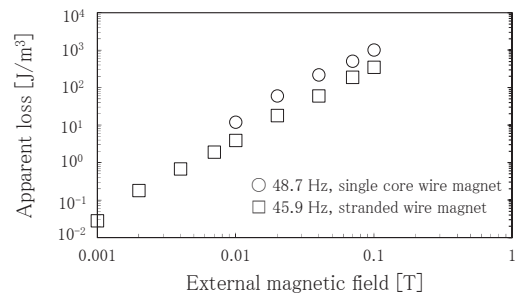


Fig. 2. Measured apparent loss characteristics.

Table 1. Parameters of solenoid coils.

| | Solenoid 1 | Solenoid 2 | Solenoid 3 | Solenoid 4 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Wire diameter | 1.0 mm | 0.85 mm | 0.70 mm | 0.30 mm × 7 |
| Wire form | Single core | Single core | Single core | Stranded |
| Coil inner dia. | 32 mm | 32 mm | 32 mm | 32 mm |
| Coil length | 100 mm | 100 mm | 100 mm | 100 mm |
| Total turns | 453 | 580 | 659 | 485 |
| Layers | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Inductance | 2.14 mH | 3.40 mH | 4.30 mH | 2.42 mH |
| Central field | 0.1 T @ 17.2 A | 0.1 T @ 14.4 A | 0.1 T @ 12.0 A | 0.1 T @ 15.5 A |

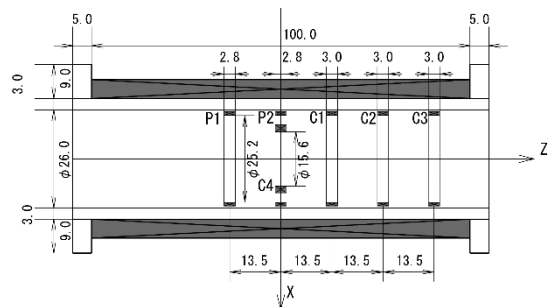


Fig. 3. Alignment of solenoid and detection coils.

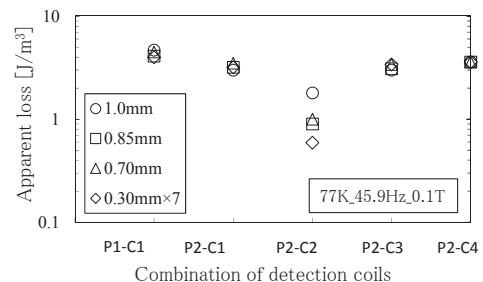


Fig. 4. Measured apparent loss for solenoid coils.

パワーエレクトロニクス機器での使用を想定した HTS コイルの 交流損失特性に関する検討

Study on AC loss characteristics of HTS coil assumed to be used in power electronics devices

西尾 亮哉, 松本 賢輔, 平山 齊, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

NISHIO Ryoya, MATSUMOTO Kensuke, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k2669508@kadai.jp

1. はじめに

超伝導技術の適用領域拡大の観点から、パワーエレクトロニクス機器用の常伝導コイルを高温超伝導コイルに置き換えたときの特性の把握など、産業応用分野への超伝導技術の適用可能性についての検討を行うことは重要である。本研究では、パワーエレクトロニクス機器での使用を想定した HTS コイルの交流損失特性を定量的に評価することを目的としている。本研究では、まず交流損失の測定に用いる液体窒素蒸発法における測定精度の改善を図った。その後、液体窒素蒸発法を用いて、種々の条件下で HTS サンプルコイルの交流損失特性を測定した。本発表では、これらの結果について報告する。

2. 液体窒素蒸発法による交流損失測定方法

交流損失の測定は液体窒素蒸発法を用いて行った。Fig. 1 に本実験で用いた蒸発法による交流損失測定システムの概略図を示す。測定値を校正するために、ヒータ入熱に対するガス流量の測定値から熱量を換算し、その結果から最小二乗法を用いて校正近似式を算出した。交流損失の測定で得られた測定値に校正近似式を適用することで窒素ガス蒸発量から損失値を求めた。この校正試験は交流損失の測定毎に行った。

3. 液体窒素蒸発法の測定精度の改善

液体窒素蒸発法は、冷媒窒素の蒸発ガス量から交流損失を求める方法であり、試料形状に関わらず損失の総量を簡便に測定できる利点があるが、測定精度が低いことが欠点である。そこで本研究では、測定精度改善のために、液体窒素の自然蒸発量を低く抑えるための方策について検討した。

その結果、空気層を持つ二層構造の測定容器とすることや、リード線取り出し口による気泡侵入防止対策を施すことが外部からの熱侵入低減に効果があることがわかった。また、発熱量のばらつきを低く抑えるための測定容器とガスメータの最適配置位置関係も把握できた。得られた知見をもとに新たに設計・作製した測定容器での性能試験の結果、Fig. 2 に示すように、自然蒸発量は 30 mW 程度まで低減でき、40 mW 以上の交流損失測定ができる測定環境に改善できた。

4. 試料コイルと交流損失測定回路

試料コイルには内径 40 mm で、層数、ターン数を変えたパンケーキコイル型コイルを用いる。このコイル巻線には、線材断面形状 4.1 mm × 0.21 mm、臨界電流 116 A (@ 77 K, s.f.) の Bi-2223 テープ線材を使用した。試料コイルへの通電および外部磁界印加用マグネットに通電する電流波形は、台形波電流の場合と、パワーエレクトロニクス装置駆動による方形波電流である。

Fig. 3 は、パワーエレクトロニクス装置駆動回路を含む実験回路である。整流回路および非対称 H ブリッジ回路から成り、指令電流波形はファンクションジェネレータから供給される。非対称 H ブリッジ回路の IGBT 制御のための PWM 信号は、指令電流と電流センサからの測定電流信号を比較することにより生成される。Fig. 4 は 100 Hz、電流立ち上げ時間 2 msec

のときの、指令電流と測定電流の波形である。測定電流には PWM 信号に伴う脈動が見られる。これらの電流波形の場合を含む交流損失測定の結果については、当日報告する。

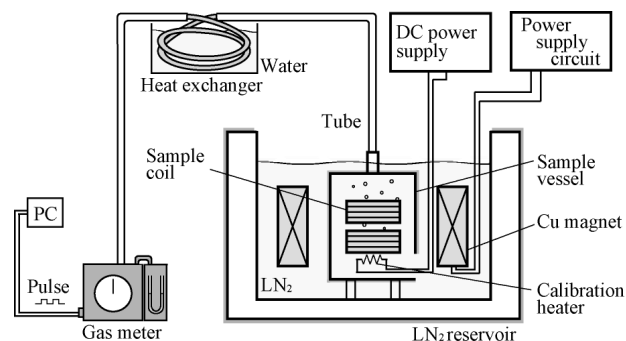


Fig. 1. Schematic view of AC loss measurement system using a nitrogen boil-off method.

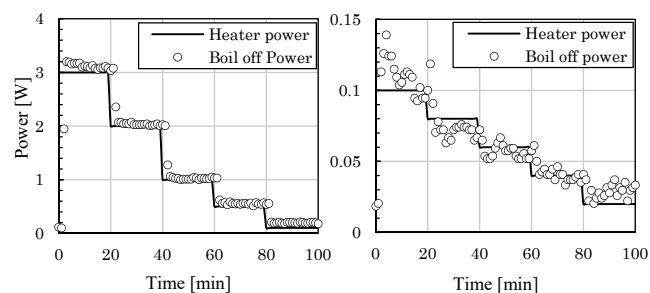


Fig. 2. The time variation of the relation the between boil off power and the heater power

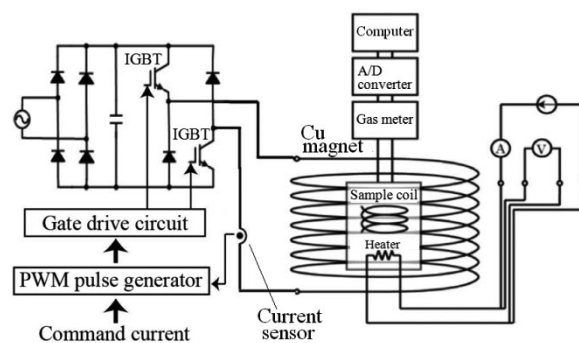


Fig. 3. Experimental circuit for measuring AC losses

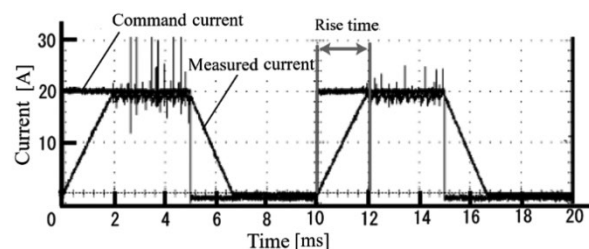


Fig. 4. Current waveform when driving power device

異種超伝導線材間における超伝導接続の検討

Evaluation of superconducting joint between different kinds of superconducting wire

武輪 裕之, 小黒 英俊(東海大)

TAKEWA Hiroyuki, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.)

E-mail: 8bajm024@mail.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

高磁場 NMR では、低温超伝導線材と高温超伝導線材の両方を利用することが考えられるが、永久電流モードでの運転のためには、超伝導接続技術は必須である。現在では、MOD 法やバルク体を用いた希土類系高温超伝導線材同士の接続や Bi2223 線材同士の接続などの同一の線材における接続が行われている[1]。しかし、異種超伝導線材同士では報告が少ない。本研究では、特に製作現場で容易に利用できることをコンセプトにおいて、コイル作製後に適用できる接続方法を検討した。同種の超伝導線材も含めて、様々な超伝導線材のゼロ抵抗での接続を試みたのでその結果を報告する。

2. 実験方法

REBCO coated conductor を用いて、簡便な接続を検討するために以下の実験を行った。Fig.1 に示すような構成で試料を作成した。まず、線材表面の銅を硝酸によってエッチングした。その後、銀の表面上に所定の濃度の YBCO 粉末(TEP 製)と銀ペーストを混合したものを塗布した。図に示すように保持し、冷凍機にて約 50 K まで行い、100 mA で四端子法にて行った。試料は測定後、SEM にて観察を行った。

異種超伝導接続の簡便な方法の検討のため、Fig.2 に示すような構成で試料を作成した。線材は GdBCO、Bi2223、Nb₃Sn、NbTi を用いた。まず、Bi と Pb を 350℃ で 6 h で加熱し、熔融拡散させた。その後、線材を熔融した BiPb に挿入し、急冷した。この際、挿入した線材は、高温超伝導線材は銀シース・低温超伝導線材は超伝導層を露出させた状態で行った。測定は 4.2 K(LHe 中)で行い、測定方法は四端子法で行った。試料は測定後、SEM にて観察を行った。

3. 結果と考察

Fig. 3 に REBCO coated conductor 同士のペースト接続に対する、77.2 K における YBCO 粉末濃度と電気抵抗の関係を示す。YBCO 粉末の割合が増加すると電気抵抗も増加していくが、70wt%で極大となり、銀ペーストに YBCO 粉末を 80wt% 添加したときが最も低い $7.81 \times 10^{-7} \Omega$ になった。Fig. 4 に 80wt% の温度における電気抵抗の変化を示す。このことから、YBCO 粉末の割合が増えいくと、ある割合で電気抵抗が下がる可能性があることが分かった。この現象に関して再現性の確認はしているが、引き続き精査していく予定である。

当日は作成手法・条件・微細組織などをより詳細に示し、報告する。

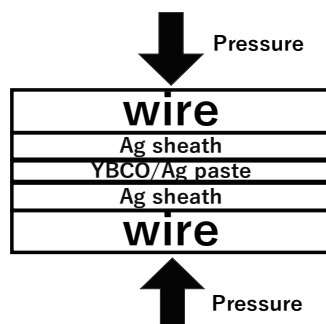


Fig. 1 Schematic illustration of the Ag paste joint for coated conductors.

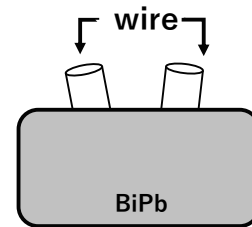


Fig. 2 Schematic illustration of the BiPb solder joint for a Bi2223 superconducting wire and a Nb₃Sn wire.

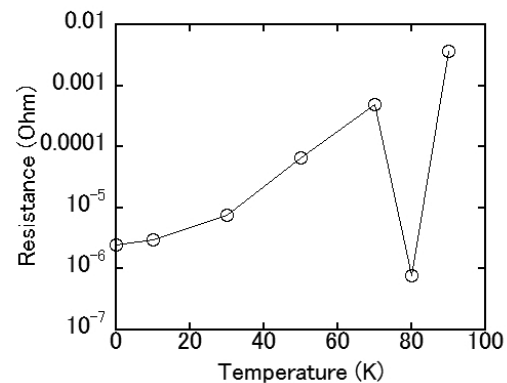


Fig. 3 Joint resistance for the various ratio of the YBCO powder and the Ag paste at 77.2 K.

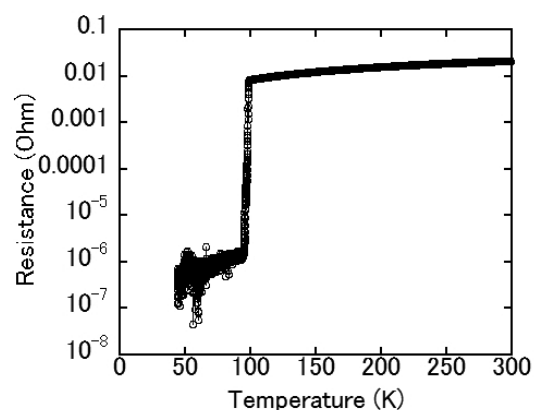


Fig. 4 Joint resistance as a function of temperature for the Ag paste joint of 80wt% YBCO powder.

謝辞

この研究の一部は、東海大学イメージング研究センターより支援を受けています。

参考文献

[1] K. Ohki et al., Supercond. Sci. Technol., **30** (2017) 115017

KOH を反応助剤に用いた REBCO-CC 同士の超電導接合

Superconducting-Joint for REBCO-CCs by KOH as reaction auxiliary agent

船木 修平, 高田 綾, 畠田 菜月(島根大); 宮地 優悟(島根大, 学振特別研究員 DC); 山田 容士(島根大)
 FUNAKI Shuhei, TAKATA Aya, HATADA Natsuki (Shimane Univ.); MIYACHI Yugo (Shimane Univ., JSPS Research Fellow);
 YAMADA Yasuji (Shimane Univ.)
 E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 超電導線材(REBCO-CC)の研究は応用フェーズに入り, 鉄道き電線や高磁場マグネットなどの様々な応用に向けた検討がなされている。しかしながら, REBCO-CC の一度の製造長に限界があること, また運搬時の重量規制があることから, 利用現場においてREBCO-CC同士, または異種の超電導線材との超電導接合が必要不可欠とされる。その中で, 多くの研究機関によりREBCO-CC同士の超電導接合技術の開発が進められてきたが, これまでの提案では, 接合時に生じた $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123)の酸素欠損を補うための酸素アニールが必要であることから, 利用現場で施工可能な装置, 環境, 工程における接合技術の確立が必要であると考えられる。

一方, 接合部分で超電導性を発現する候補材料としては, RE123 や $\text{REBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ (RE124), $\text{RE}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ (RE247)が挙げられる。RE124 は結晶構造中の二重の Cu-O 鎖に起因し, 酸素欠損を生じない構造安定性を有し, さらに, Ca などを置換させホールドープすることで T_c が 90 K まで向上することが知られている[1]。そして, これまで我々は水酸化物をフラックスに用いることで, $T_c = 90$ K 級の RE123 及び RE124 を 600°C 程度の低温下で合成できることを報告してきた[2-4]。さらに他の研究機関では, 同手法により酸素欠損のない Eu123 を 450°C で合成した例もある[5]。つまり, この結晶育成手法によって得られる RE123 及び RE124 は, 酸素アニール不要で超電導性を示すことが期待できる。

これらの背景から, 本研究では水酸化物をフラックスに用いた酸素欠損の無い RE123 及び RE124 の低温成長反応を利用して, REBCO-CC 同士の超電導接合を試みた。

2. 実験方法

Eu_2O_3 , BaO_2 , CuO 原料粉末を金属モル比が $\text{Eu} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2 : 4$ となるように秤量・混合し, 厚さ 0.2 mm のペレットに 20 MPa で加圧・成形した。保護層を除去した REBCO-CC の RE123 層間に原料ペレットを挟み, 冶具により約 20 MPa の圧力を印加した。これらを, 水酸化カリウム(KOH)を入れたアルミナるつぼ内に配置し加熱することで, KOH 蒸気による低温反応で接合した。

3. 結果及び考察

図 1 に, KOH 量を 26.3 g (るつぼの容積比 = 174 g/l)として, 大気中において 525°C で 12 h 熱処理をした試料における, 接合部を介した REBCO-CCs, 接合部外の REBCO-CC, 接合界面の $R-T$ 測定結果を示す。図より, 接合部外の REBCO-CC は熱処理前と同等な 90 K 級の T_c を示したが, 接合部を介した REBCO-CCs 及び接合界面の T_c は, 60~70 K であった。

接合部の T_c が低い要因を検討するため, 同試料の接合界面の XRD 測定を行った(図 2)。図より, 接合界面には RE123 相以外に RE247 相が混在していることがわかった。これまでの我々の研究から, KOH 法によって生成される結晶相は, 温度により RE124-RE247-RE123 と変化することがわかっていることから, 今後, 接合の熱処理温度を変化させることで, 単相化, さらに高 T_c 化が期待できる。また当日は,

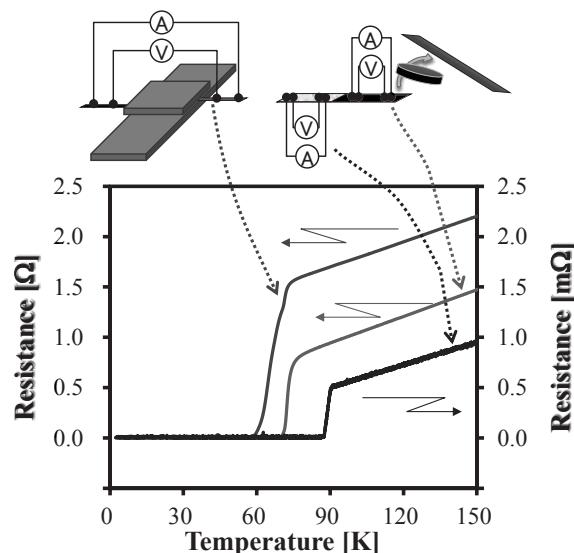


Fig.1 $R-T$ curves for several regions of heat treated REBCO-CCs

RE247(00ℓ) RE123(00ℓ)

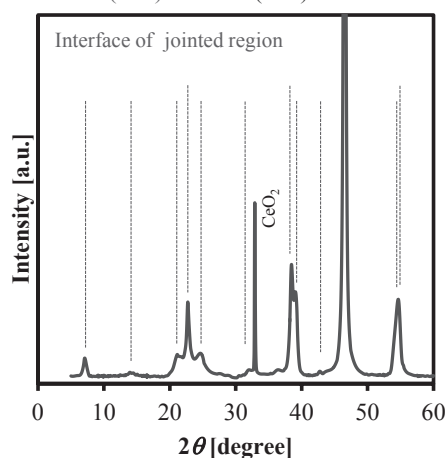


Fig.2 XRD pattern for interface of jointed region in heat treated REBCO-CC

REBCO-CC 間に挟む原料粉末の粒度, 形状を制御することで, 反応時間の短縮を試みた結果についても発表する予定である。

謝辞

本研究の一部は, JST, 未来社会創造事業, JPMJMI17A2 の支援を受けたものである。

参考文献

1. T. Miyatake, et al.: Nature, Vol. 341 (1989) p.41
2. S. Funaki, et al.: Physics Procedia, Vol. 27 (2012) p.284
3. S. Funaki, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55 (2016) p. 04EJ13
4. Y. Miyachi, et al.: Physics Procedia, Vol. 65 (2015) p. 129
5. L. N. Marquez, et al.: Chem. Mater., Vol. 5 (1993) p. 761

(Ba,K)Fe₂As₂ テープ線材を用いた超伝導接合と臨界電流特性の評価

Critical Current Properties of Superconducting Joint between (Ba,K)Fe₂As₂ Tapes

今井 翔太, 西尾 太一郎(東理大);

石田 茂之, 土屋 佳則, 伊豫 彰, 永崎 洋, 松崎 邦男, 吉田 良行(産総研)

IMAI Shota, NISHIO Taichiro (TUS);

ISHIDA Shigeyuki, TSUCHIYA Yoshinori, IYO Akira, EISAKI Hiroshi, MATSUZAKI Kunio, YOSHIDA Yoshiyuki (AIST)

E-mail : imai.s@aist.go.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体は上部臨界磁場が大きく、その異方性が小さいことから高磁場応用材料として期待されている。[1](Ba,K)Fe₂As₂及び(Sr,K)Fe₂As₂テープ線材では、臨界電流密度(J_c)は 4.2K,10T で実用水準の 10^5 A/cm²を超えている。[2,3] 一方、超伝導マグネットに応用するためには超伝導接合技術が必要である。最近 Zhu らによって(Sr,K)Fe₂As₂ テープ線材のホットプレス法を用いた超伝導接合が作製された。接合線材の臨界電流比(CCR= $I_c^{\text{joint}}/I_c^{\text{tape}}$)は、4.2K, 10T で 35.3%を達成している。[4] そこで本研究では、コールドプレス法を用いた簡便な方法で(Ba,K)Fe₂As 接合線材を作製し、臨界電流特性の評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

(Ba,K)Fe₂As₂の T_c が最適化される K 濃度 0.4 を選択し、PIT 法を用いて線材の作製を行った。外径 6mm,内径 4.3mm の銀管に粉末を充填し、断面積が 2×2 mm²になるまで圧延した。次に、平ロールで厚さ 0.40mm のテープ状に加工した。このテープ線材を 50mm に短尺化した。短尺テープ線材の Ag シースを除去し、超伝導コアを 4mm \times 2.5mm 露出させた。露出させた超伝導コアを Fig.1 のように張り合わせ、銀箔で巻き、約 100MPa の圧力でコールドプレスした。その後、850°Cで 3h 焼結した。接合作製はすべて窒素雰囲気下で行った。作製した接合線材は、4 端子法による臨界電流測定、SEM-EDX によるコアの断面観察及び組成分析を行った。

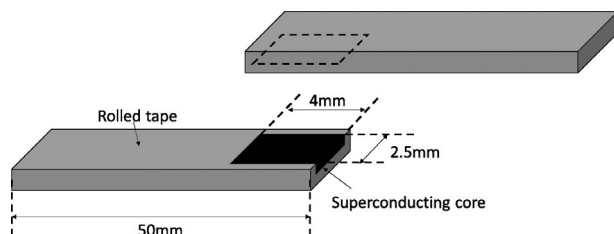


Figure 1 A schematic picture of jointing process.

3. 実験結果

Figure 1 に接合前後の臨界電流の磁場依存性を示す。4K において接合部の臨界電流値は自己磁場で 49A、CCR は 60%であった。また 3.5T の磁場中では 6A で、CCR は 20%であった。自己磁場で比較的高い CCR を示したが、磁場中において大きく制限されている。

Fig.3(a) に接合界面部分を拡大した SEM 画像を示す。黒の破線部分が接合界面である。SEM 画像から(Ba,K)Fe₂As₂の接合部分でクラックのない界面が観測された。また、接合部で不純物などの析出物も見られなかった。Fig.3(b) に線材の長手方向断面の SEM 画像を示す。接合端部分で線材どうしがオーバーラップしており、不均一な変形が生じている。この接合端部分で接合線材の臨界電流が大きく制限されていると考えられる。講演では(Ba,K)Fe₂As₂ 接合線材の特徴を考察し、さらなる CCR 向上の指針を議論する。

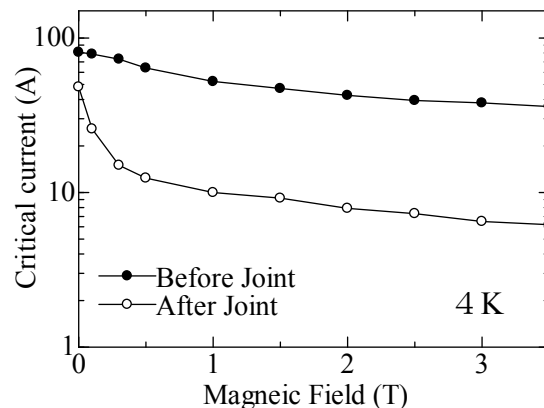


Figure 2 Magnetic field dependence of critical current of (Ba,K)Fe₂As₂ tape and joint at 4 K with field parallel to the tape surface.

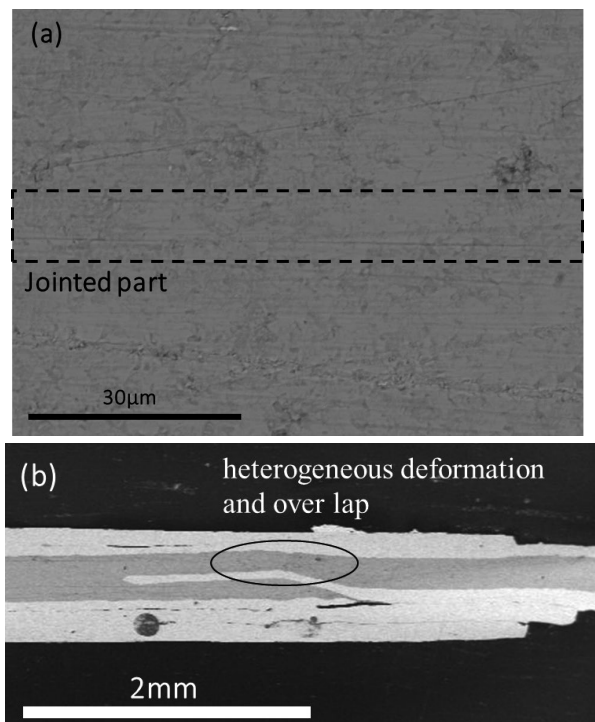


Figure 3 (a) A SEM image of a jointed part in the BaK122 Joint. (b) A SEM image of longitudinal cross section of BaK122superconducting joints

参考文献

- [1] Ma. Y. W *et al*, Supercond. Sci. Technol **25**, 113001 (2012).
- [2] Huang.H *et al*, Supercond. Sci. Technol **31**, 015017 (2018).
- [3] Lin.H *et al*, Sci. Rep 4 : 6944 (2014).
- [4] Zhu.Y *et al*, Supercond. Sci. Technol **31**, 06LT02 (2018).

FEMを用いた YBCO 線材の超電導接合の評価

Evaluation of Superconducting-Joint for YBCO coated conductors by using FEM

張 睿哲, 木下 雄士, 小田部 莊司(九工大); 赤坂 友幸, 石原 篤, 富田 優(鉄道総研)

Ruizhe ZHANG, Yushi Kinoshita, Edmund Soji Otabe(Kyutech); Tomoyuki Akasaka, Atushi Ishihara, Masaru Tomita(RTRI)

E-mail: ruizhe.zhang354@mail.kyutech.jp

1. はじめに

1987年に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)が発見されて以来、線材化の工夫がなされ、第二世代(2G)希土類バリウム銅酸化物被覆導体(CC)は実用的なレベルまで開発が進んだ。CCは高い臨界電流密度 I_c を持っており、また I_c の高磁場での劣化が低く、良好な機械的特性および妥当なコストのため、超高磁場MRIへの応用が期待されている[1]。これを実現するためには、これらCCの間の接合技術が必要である。このために超電導接合が研究されている[2]。また、超電導線材を用いた送電ケーブルを利用することで、電力を消費することなく送電が可能となる。超電導線材は現在数百メートル単位でしか製造できないため、実際に実現するためには線材どうしを低抵抗で接合して長距離での送電に対応させる必要がある。このように接合することによって、通常の超電導線材とは異なる電流密度分布・磁界分布、また力を受けるときの応力分布などが表れると考えられる。

本研究では、超電導線材の接合部における電気特性および機械特性を明らかにするため、有限要素法(FEM)(JMAG-Designer17.0、COMSOL Multiphysics®)を用いて接合を数値シミュレーションし、超電導接合の際の電氣的・機械的特性を評価した。

2. 解析方法

本研究では、電気特性に対する有限要素法計算のために、JSOL社製JMAGを使用した。線材を接合させたモデルを作成し、電流密度をシミュレーションした。Fig. 1(a)に示すような厚さ $50\ \mu\text{m}$ のはんだを接合に用いた場合に電流を流したときの計算を行った。超電導線材は厚さ $100\ \mu\text{m}$ の銅板と $1\ \mu\text{m}$ のYBCO超電導体で構成されている。モデルの左から、電流を流し、有限要素法を用いて計算し、断面の電流密度分布を明らかにした。Fig. 1(b)に示すように、はんだに穴を空けた場合の計算も同様に行った。臨界電流密度の磁界依存性($E-J$ 特性)は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の実験結果を用いた[3]。

また、機械特性を解析するため、COMSOL社製COMSOL Multiphysics®を使用した。電気特性と同様に有限要素法を用いた。計算の内容は、超電導線材を接合して左右から力をかけ、引っ張られた際に加わる応力の分布を明らかにする。

3. 結果

Fig. 2を示すのはJMAGで解析した電流密度の結果である。(a)ははんだをつけたときの結果で、電流密度が超電導層に集中しているのがわかる。(b)ははんだに穴を空けた場合の結果であるが、図からは穴による電流密度分布への影響はあまり見られなかった。

Fig. 3はCOMSOLで解析した応力分布の結果を示す。Fig. 3に示されるように、接合面の頂点近傍に応力が集中している。このように、シミュレーションを用いて電氣的・力学的特性を評価することができた。

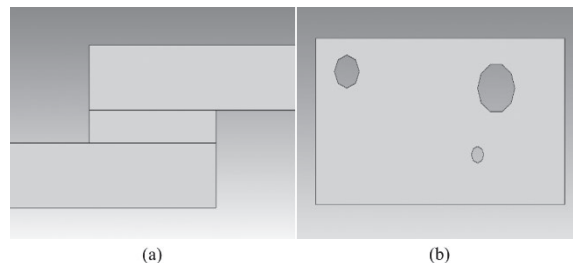


Fig. 1: Joining models of superconducting wire

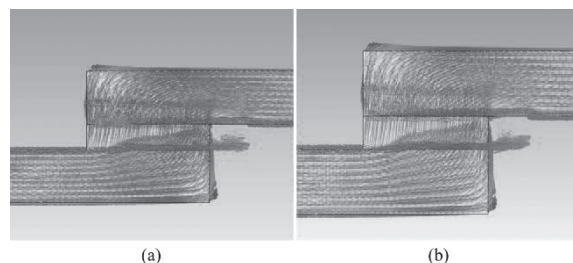


Fig. 2: Current density distribution of Fig. 1

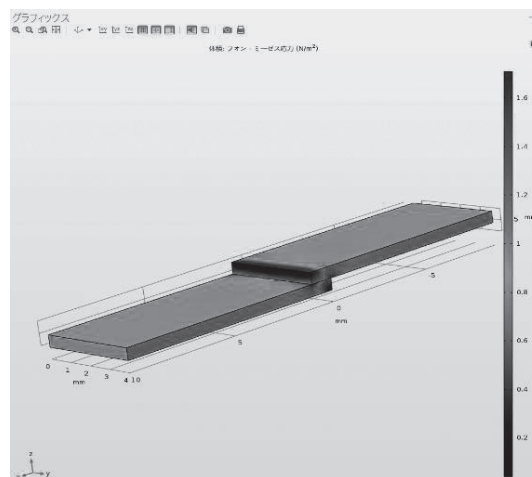


Fig. 3: Stress distribution of joined superconductor

参考文献

1. Y. Park, et al.: NPG Asia Materials, Vol. 6 (2014) e98
2. X. Jin, et al.: Supercond. Sci. Technol, Vol. 28 (2015) 075010
3. W. Zhai, et al.: Crystal Growth & Design, Vol. 15 (2015) p. 907 - 914

接続を含む REBCO シングルターンループに捕捉された磁場の減衰

Decay of trapped magnetic field in REBCO single-turn loop with a joint

松本 真治, 西島 元(NIMS); 中井 昭暢, 坂本 久樹, 向山 晋一(古河電工); 三好 康之, 斉藤 一功, 濱田 衛(JASTEC)
 MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen (NIMS); NAKAI Akinobu, SAKAMOTO Hisaki,
 MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); MIYOSHI Yasuyuki, SAITO Kazuyoshi, HAMADA Mamoru (JASTEC)
 E-mail: MATSUMOTO.Shinji@nims.go.jp

1. はじめに

磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 検査には、1.5-T 超電導マグネットが多く用いられてきた。現在では、3-T 超電導マグネットにより、検査装置が高磁場化され、短い撮像時間で鮮明な画像を得ることが可能となってきている。実用 MRI 検査装置の Nb-Ti 金属系超電導コイルは、液体ヘリウムにより 4.2 K に冷却する必要がある。超電導マグネットを運転するには、液体ヘリウムの安定的な確保とコストが課題である。MRI 装置を安定的に運用するためには、液体ヘリウムを使用しない高温超電導マグネット開発がひとつの解決方法である。高温超電導線材の特性を活かすことで、MRI マグネットの高磁場化・小型化を可能にし、製造コストの低減が期待できる。

現在、MRI 高温超電導マグネットに必要なマグネット技術開発を実施している[1]。RE(Rare Earth)Ba₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) 高温超電導コイルにより、30~50 K の温度で運転する、冷凍機冷却方式 3-T MRI マグネットを想定したものである。MRI マグネットに必要な安定高磁場生成のためには、REBCO マグネットを、高安定化電源駆動モードまたは永久電流モードで運転する必要がある。永久電流モード運転を行う場合、REBCO 線材間の超電導接続技術開発が不可欠である。REBCO 線材間の超電導接続の成功はすでに報告[2]されているが、本研究では、古河電工および東北大学が開発・検証[3,4]した接続方法により、MRI マグネットへの実装を想定し、超電導接続の性能向上を図っている。

永久電流モード運転を実現するため、超電導接続の抵抗を $1 \times 10^{-12} \Omega$ 未満に抑えることを目指している。REBCO 線材を超電導接続したシングルターンループに磁場を捕捉させ、その減衰を測定することで、接続抵抗を評価[5]した。

2. 実験

捕捉させた磁場の減衰の測定方法[6]は、励磁コイル (常電導銅コイル) で常電導状態のシングルターンループに磁場を印加したのち冷却し、超電導状態となったところで、励磁コイルを減磁して磁場を捕捉させ、その減衰をホール素子により測定した。本測定においては、シングルターンループには、銅安定化材のない SuperPower 社製 REBCO 線材を使用した。また、接続部に磁場を印加した状態で捕捉磁場の減衰を観測するため、その位置が外部磁場印加用マグネット中心になるようにシングルターンループを樹脂型枠に納めて成形し、40-K Gifford-McMahon 冷凍機により冷却した。Fig.1 に概略図を示す (各部の寸法は不正確)。捕捉磁場の減衰測定は、接続部の温度 (35-K, 50-K) および印加磁場 (自己磁場, 0.5 T, 1.0 T) を変えて実施した。接続への印加磁場の大きさと方向は、MRI マグネットへの実装を想定したものとした。

シングルターンループ内の抵抗と捕捉磁場の減衰の比較を行った。自己磁場中、35-K 測定での捕捉磁場の減衰を Fig.2 に示す。比較のため、ループ内の抵抗が $1 \times 10^{-12} \Omega$ の場合の磁場減衰の計算値を示す。接続を含め、シングルターンループ内の抵抗が、 $1 \times 10^{-12} \Omega$ 未満であることを確認した。励磁コイルを消磁した時点での捕捉磁場より、シングルターンループ内に誘起された電流は、円電流により発生した磁場と仮定して、102 A と見積もられた。

Table 1 Specifications of REBCO single-turn loop

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| REBCO-conductor width | 6 mm |
| REBCO-conductor substrate | Hastelloy® |
| Inner diameter [m] | 5.40×10^{-2} |
| Inductance [H] | 1.05×10^{-7} |
| Center~Joint [m] | 5.42×10^{-1} |
| Excitation-coil constant [T/A] | 1.95×10^{-3} |

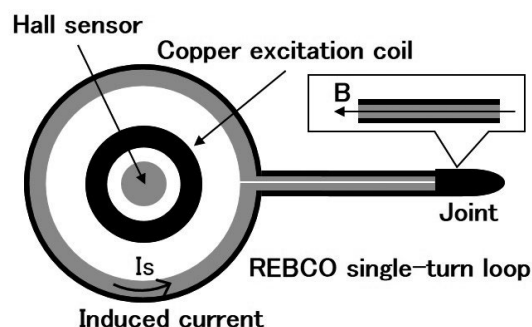


Fig.1 Schematic drawing of REBCO single-turn loop with a joint

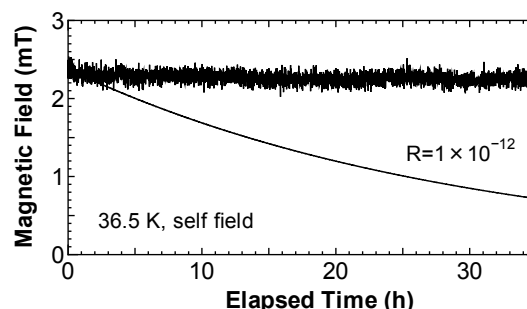


Fig.2 Decay of trapped magnetic field.

謝辞

本研究は、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「高温超電導実用化促進技術開発/高磁場マグネットシステム開発/高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100120.html
2. Y. J. Park, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 27 (2014) 085008
3. https://www.furukawa.co.jp/en/release/2016/kenkai_160427.html
4. K. Takahashi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) 4600104
5. M.J. Leupold and Y. Iwasa: Cryogenics 16 (1976) p.215
6. S. Mukoyama, et al.: J. Phys. Conf. Series, 1054 (2018) 012038

超電導フライホイールの開発①

-大荷重対応超電導磁気軸受の浮上力特性-

Development of Superconducting Flywheel Energy Storage System -Levitation force characteristics of Superconducting Magnetic Bearings supporting large load-

宮崎 佳樹, 水野 克俊, 山下 知久, 小方 正文, 長嶋 賢 (鉄道総研); 坪内 宏和, 坂本 久樹, 向山 晋一 (古河電工);
清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁 (ミラプロ); 松井 義, 土肥 哲也 (松井鋼材);
浅野 幸雄, 風間 竜也, 福崎 翔晴 (三星工業)

MIYAZAKI Yoshiki, MIZUNO Katsutoshi, YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI);
TSUBOUCHI Hirokazu, SAKAMOTO Hisaki, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric Co., Ltd.); SHIMIZU Hideki,
SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO); MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsukoza, Inc.);
ASANO Yukio, KAZAMA Tatsuya, FUKUZAKI Takaharu (Mitsuboshi Co., Ltd.)
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

我々はREコイルとREバルク体を組み合わせたフライホイール蓄電装置(FESS)向け高温超電導磁気軸受(SMB)の開発を進めている。山梨県米倉山太陽光発電所に併設された電力貯蔵技術研究サイトのFESSの実証機ではSMBで質量4,000 kgのフライホイールの安定浮上の実証試験に取り組んでいる[1]。FESSのさらなる蓄電容量向上にむけ147 kNの浮上力を発生可能なSMBを開発した[2]。本発表では、開発した超電導磁気軸受の浮上力(クリープ)特性および、断熱荷重支持材の信頼性確認結果について報告する。

2. SMB 浮上力(クリープ)特性

Fig. 1にSMB評価装置の構成を示す。高温超電導コイルと高温超電導バルクの反発力は上部のロードセルにて測定した。また、超電導バルク-コイルの反力は4組の断熱荷重支持材を介して外槽容器で支持する構造となっている。

超電導バルク体で発生するクリープ現象の初期特性を把握するため、通電電流151 A、発生荷重148 kN超で開始し、通電電流を8時間一定保持する試験を2回実施した(Fig. 2)。Fig. 2より、2回のクリープ特性は同様な特性を示し、再現性の良いデータが確認できた。8時間後の荷重減衰は2%以下であり、図中の拡大グラフでもわかるように荷重は時間の経過とともにほぼ同様に低減する傾向も確認された。荷重減衰の原因を超電導バルク体に対する磁場侵入とし、磁場侵入と浮上力の関係および超電導バルク体表面に流れる遮蔽電流密度の低下特性を考慮し、実験結果をフィッティングすると、荷重減衰は1ヶ月で3%、1年でも4%程度と試算された。超電導フライホイールは浮上高さを超電導コイルへの通電電流で制御するため、今回の試験結果から、大荷重化しても制御(荷重減衰の補充)が可能と考えている。

3. 断熱荷重支持材の引張荷重特性

断熱荷重支持材は断熱性と耐荷重特性を両立する必要があるため、熱絶縁特性と引張強度に優れるアルミナ繊維複合材(AFRP)を採用している。147 kN浮上時に断熱荷重支持材が受け持つ反力は36.8 kN/本となるが、98 kN/本まで弾性変形領域として使用可能であることを実験的に確認し、安全率2.7を有することを確認済みである[3]。

今回SMB大荷重浮上力試験後、断熱荷重支持材単体の引張試験を実施した。FRPは一般に低温で剛性が増加することから、常温試験は安全側の評価法である。Fig. 3にSMB浮上力試験前後の応力-歪線図を示す。試験前後で弾性率は変化なく、今回の試験で劣化はないことを確認した。

今後は、実運用条件を想定した繰り返し励消磁、長時間連続浮上試験など、超電導フライホイールのコア技術であるSMBの信頼性および耐久性評価を加速・継続して実施予定である。

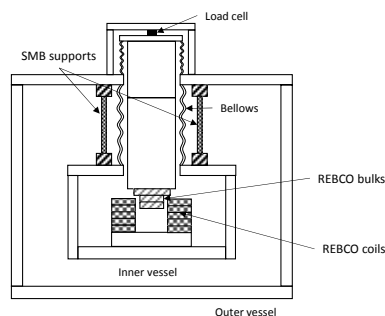


Fig. 1 Schematic of experimental set up for the SMB.

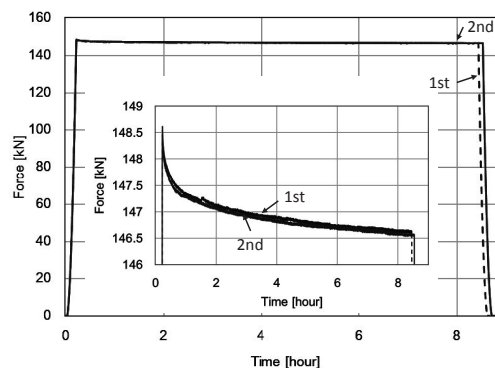


Fig. 2 Experimental result of the SMB levitation force as a function of the time.

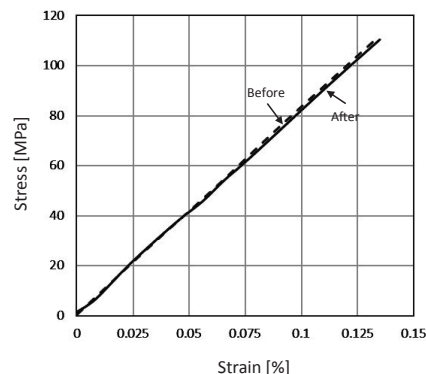


Fig. 3 Experimental stress-strain diagram of the SMB support.

参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p. 138.
- [2] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p. 140.
- [3] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 168.

超電導フライホイールの開発②

—超電導磁気軸受の信頼性耐久性評価装置の設計—

Development of Superconducting Flywheel Energy Storage System

—Design of test machine for reliability and durability of Superconducting Magnetic Bearing—

澤村 秀次, 小澤 孝仁, 清水 秀樹(ミラプロ); 山下 知久, 宮崎 佳樹, 水野 克俊, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研);
坪内 宏和, 坂本 久樹, 向山 晋一(古河電工); 柴崎 康司, 立石 仁, 谷口 学(丸和電機)

SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito, SHIMIZU Hideki (MIRAPRO); YAMASHITA Tomohisa, MIYAZAKI Yoshiki,
MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI); TSUBOUCHI Hirokazu, SAKAMOTO Hisaki,
MUKOYAMA Shin-ichi (Furukawa Electric); SHIBASAKI Koji, TATEISHI Hitoshi, TANIGUCHI Manabu (Maruwa Electronic Inc.)
E-mail: sawamura@mirapro.co.jp

1. はじめに

超電導フライホイール蓄電システムの貯蔵エネルギー増にむけコア技術の超電導磁気軸受(SMB)の大荷重化の開発を進めている[1]。その信頼性および耐久性を加速試験的に検証可能な専用のSMB信頼性耐久性評価装置(以下、評価装置と称する)を導入し、コア技術のSMBの強度余裕や寿命に関する検証試験を進めていく計画があり、現在その評価装置の概略設計検討を進めている。ここでは、当社が主体で現在検討中の評価装置の設計について紹介する。

2. 超電導フライホイール用 SMB の役割と要求事項

Fig.1 にフライホイール蓄電システム(FESS)の原理を示す。

フライホイール蓄電システムは装置に内蔵した大型の円盤(フライホイール)を回転させることで電力を運動エネルギーに変換して貯蔵し、必要に応じて再び電力に変換する機械式バッテリーである。

超電導フライホイール蓄電システムのコア技術は SMB で、回転軸側に高温超電導バルク体を、軸受側に高温超電導コイルを用いて非接触支持する軸受であり、負担可能な荷重の大きさに比べて軸受構造が小型という特徴がある。

20 年超の期待寿命に対し経験する充放電(回転数の上昇・下降)回数は、数十万回から数百万回と試算される[2]。

超電導フライホイールの実用性を検証するためには Fig.3 のような多数回の回転数の上昇・下降を繰り返しても SMB が安定浮上・安定回転可能なことを実証することが不可欠である。

3. SMB 評価試験装置のコンセプト

本評価装置に求められる要件(機能)は以下のとおり

- ①短時間で回転数を上昇・下降させ促進劣化検証が可能
- ②前項に加えて運用想定浮上力(バイアス荷重)を付与可能
- ③回転軸の振動振幅を任意に設定でき耐振性の評価可能

4. SMB 評価試験装置の設計の考え方

上記 3 項を満足する評価装置イメージを Fig.3 に示す。評価装置は SMB を上下に対向させて、回転軸に発生荷重を与えるものその荷重(浮上力)は相殺される構造を基本とし、回転軸の駆動モータは装置中央に配置する構成とした。

駆動モータは数十 Pa 程度の希薄ガスヘリウム雰囲気中、連続運転可能な方式を選定する考えである。

また、この評価装置では、SMB による浮上トラブル時の安全装置である着地軸受の性能評価も合わせて実施できる構造とする設計である。

今回検討した設計諸元の詳細については当日報告する。

5. 今後の予定

今回の検討結果をベースに、評価装置の詳細設計検討を進め、SMB の信頼性および耐久性評価に供し、強度余裕や寿命に関するデータベースを構築していく考えである。

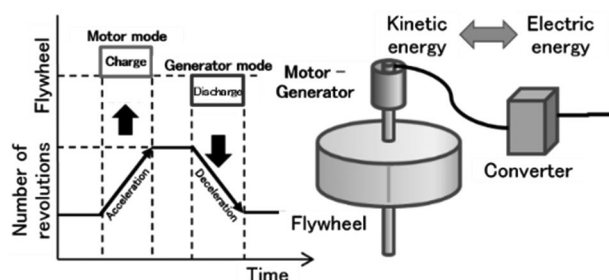


Fig. 1 Schematic representation of FESS operating principles

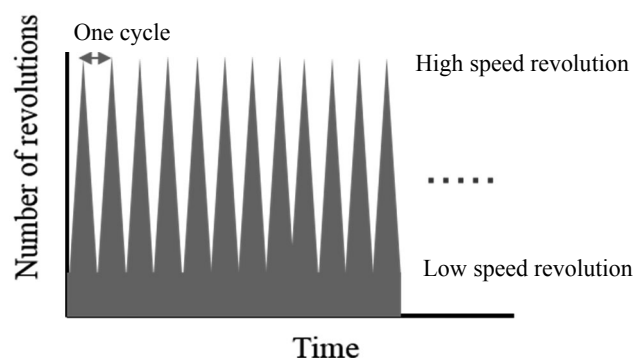


Fig. 2 Schematic of SMB test machine operation

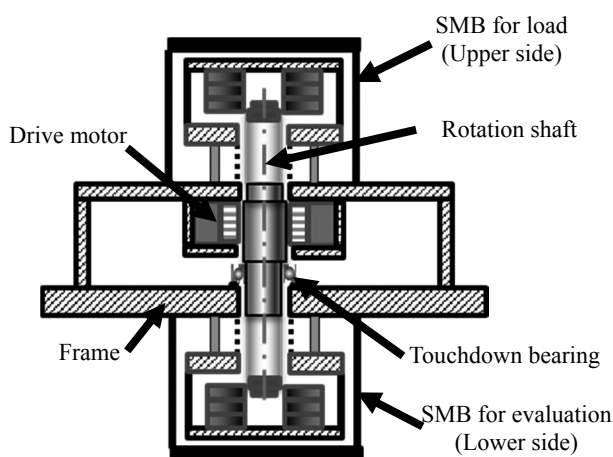


Fig.3 Schematic of SMB test machine image

参考文献

- [1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 168.
- [2] H. Shimizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 165.

立方体バルクで構成した集積型磁気軸受の検討.

Study of integrated magnetic bearing constructed in cubic bulks.

山岸 一人(横浜国立大学)
 YAMAGISHI Kazuhito (Yokohama National University)
 E-mail: yamagishi-kazuhito-sd@ynu.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルクは、その基本的特性である特異な捕捉磁束性能の劣化を伴う形状加工を行わずに、円柱形状で用いられることがほとんどであったが、最近では様々な加工が考えられている[1]. 本来、応用機器への組み込みを考えた場合、それぞれの用途に合わせてバルクの形状をカスタマイズする必要があり、特にその最大メリットである捕捉磁束特性の劣化を極力抑えることが非常に重要であると考えられる. その取り組みとして、私たちは複数個の立方体バルクを使った集積型磁気軸受を提案しており、その簡易モデルを使った設計手法について検討を行っている[2]. これは、性能の異なる立方体バルクの配置構成によって、最適軸受け面を構成することを目標としているものであり、磁気特性のばらつきなどによる回転軸の軸ぶれやそれに伴う回転損失等を考慮し、複数の小さな基本単位バルクを最適に組み合わせることによってその損失抑制が可能かどうかの検討を行っている.

2. 立方体バルクによる集積型磁気軸受の基本モデル

この集積型軸受け面の構成に、我々は表 1 に示すような緒元の円柱型バルクから切り出して作った立方体型バルクを基本単位として使用した. 1 辺 10mm 角の立方体形状に切り出されたバルクは、それぞれ浮上体として使用する永久磁石 (PM) によって FCM した後、立方体バルク表面の中心捕捉磁束密度 (B_{tc}) の測定を行った. その測定結果を表 2 に示す. この表中の中心捕捉磁束密度を各立方体バルクの基本性能値として、後述する最適計算に用いることとした. 次にこれらの基本単位となる立方体バルクを集積し構成する基本モデルを図 1(a)に示す. 以前検討したモデルは 3×3 の正方形配置パターン1面を立方体バルクで構成したもので、9 個の立方体バルクを使用した. 今回の基本モデルは、 3×3 の正方形配置パターンを上下 2 面に用いるものとした. 図 1(a)で示される通り駆動軸を通すために中心ブロックを除いて 8 個の立方体バルクで構成するものとした. 図 1(b)で示すように上部・下部のパーツは、それぞれ表 2 で示される 16 個の立方体バルクで構成し、この配置パターンによって浮上体の中心軸に対する傾きをコントロールする. ここで破線で示されたのは、PM による着磁が行われる部分である.

Table 1. Specification of HTS Cylindrical type Bulks and PM.

| Bulk | Material | Diameter (mm) | Thickness (mm) | B_{trap} (T) | J_c (A/m^2) | n value |
|------|------------|---------------|----------------|----------------|--------------------|---------|
| Bu1 | Gd-Ba-Cu-O | 34.4 | 10.4 | 1.164 | 6.84×10^7 | 20 |
| Bu2 | Gd-Ba-Cu-O | 33.5 | 11.1 | 0.872 | 4.74×10^7 | 20 |
| Bu3 | Gd-Ba-Cu-O | 32.4 | 10.5 | 0.871 | 5.19×10^7 | 20 |
| Bu4 | Gd-Ba-Cu-O | 31.7 | 10.75 | 0.844 | 4.82×10^7 | 20 |
| PM | Nd | 30.0 | 10.0 | 0.309 | - | - |

Table 2. Specification of HTS Cubic type Bulks.

| Cube bulk | B_{tc} (T) | Cube bulk | B_{tc} (T) | Cube bulk | B_{tc} (T) | Cube bulk | B_{tc} (T) |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| Cb11 | 0.125 | Cb12 | 0.130 | Cb13 | 0.129 | Cb14 | 0.114 |
| Cb21 | 0.106 | Cb22 | 0.106 | Cb23 | 0.095 | Cb24 | 0.103 |
| Cb31 | 0.124 | Cb32 | 0.122 | Cb33 | 0.120 | Cb34 | 0.121 |
| Cb41 | 0.093 | Cb42 | 0.100 | Cb43 | 0.091 | Cb44 | 0.096 |

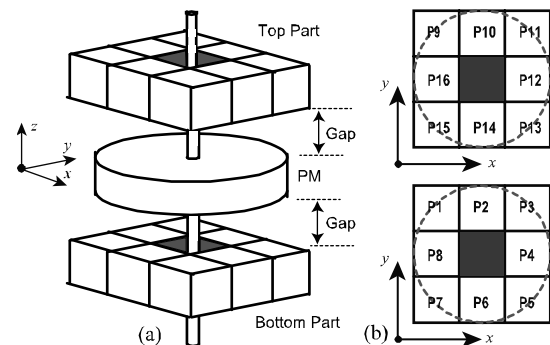


Fig.1 Basic arrangement pattern of magnetic bearings by cubic bulk. 3×3 square arrangement pattern.

3. 最適計算による比較検討

今回の検討では、準備した立方体バルクの個数に限りがあり、上下パーツ両方を最適にするには十分でなかったため、下部パーツを優先して最適化を行うこととした. 最適計算のフローチャートを図 2 に示す. この計算は、配置されたバルク的位置ごとに、PM による着磁および隣接するバルクによる影響を考慮して磁界計算を行い、各辺毎の合成磁界 ($B_{t,sys,y}$) を求める. この辺毎の合成磁界の大きさの違いが浮上体の傾きにつながるとし、その傾き θ_{Bx} , θ_{By} を制約条件として最適な配置を求めた. 今回行った計算では、傾きが小さい $|\theta_{Bx, y}| < 1$ の場合と傾きが大きい $|\theta_{Bx, y}| < 5$ の場合の計算を行い比較した. 以上、詳細な結果については、講演当日に報告する.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP16K06211 の助成を受けたものです.

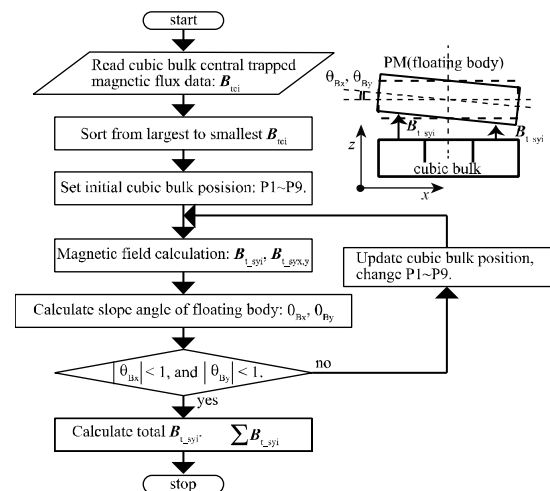


Fig. 2 Flowchart for optimal placement calculation.

参考文献

- S. Nariki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26, Issue.3, 7200404, doi: 10.1109/TASC.2016.2537382.
- K. Yamagishi.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.95 (2017), p.132.

補助リング磁石を追加した超伝導ステータの浮上特性

Levitation characteristics of superconducting stators with addition of a ring-shaped magnet

二村 宗男(秋田県立大)
 FUTAMURA Muneo (Akita Pref. Univ.)
 E-mail: futamura@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

バルク超伝導体を用いた磁気浮上技術は、接触摩擦によるエネルギーロスが無いことから高効率な機械システムとして有望である。磁気浮上システムは、外乱に耐えて大きな重量を支えるために磁気剛性を高めることが重要である。我々はこれまで、超伝導ステータにリング状永久磁石を組み合わせたハイブリッドステータを提案した[1]。提案したハイブリッドステータの水平方向、鉛直方向の磁気力を測定し、浮上特性の評価を行ったので報告する。

2. 水平方向の磁気力測定と結果

実験装置の概略図をFig.1に示す。バルク超伝導体(新日鉄 QMG-DyBaCuO, $\phi 32\text{mm}$, 5mm)下部にリング永久磁石を取り付けることで超伝導ハイブリッド固定子を形成している。断熱容器内で超伝導体上 5mm の位置に浮上用永久磁石($\phi 10\text{mm}$, 5mm, 2.85g)を固定した状態で、液体窒素によって超伝導固定子を冷却した。その後、浮上磁石を水平方向に移動しながら、作用する磁気力をデジタルフォースゲージで測定した。

水平方向磁気力の測定結果をFig.2に示す。超伝導体みの固定子の場合と、超伝導体下部にリング磁石 A(外径 30 mm, 内径 25 mm, 高さ 9 mm)を追加したハイブリッド固定子の場合である。この値を積分して磁石を水平方向に移動するための位置エネルギーを算出したところ、位置エネルギーは、超伝導体単体の場合は $x=13\text{ mm}$ 付近でピークとなり、それよりも外に移動すると減少、つまり磁石ははじき出されることになるが、リング磁石を付加した固定子の場合には 30mm を超えても増加の傾向を示した。リング磁石の付加によって復元力が作用する範囲は2倍以上に広がり、その最大位置エネルギーの値は3倍程度に増加した。

3. 鉛直方向の磁気力測定と結果

鉛直方向の磁気力の測定結果から求めた磁気剛性をFig.3に示す。超伝導体に付加するリング磁石(内外径は前述のAと同じ)を、高さの異なる3種類(A:9 mm, B:13 mm, C:18 mm)を超伝導体と組み合わせた。いずれのリング磁石を追加した場合にも、超伝導体単体の場合より磁気剛性は増加し、リング磁石の高さに依存せず1直線上にプロットされている。リング磁石付加によって、磁石高さには依存せず、磁気剛性が一定量向上することが確認された。しかし高さが大きいリング磁石を用いるほうが、浮上磁石を引き付ける力が大きいため浮上高さは低くなり、そのため、浮上位置における磁気剛性はさらに増大することになる。

4. まとめ

バルク超伝導体を用いた磁気浮上において、超伝導体下部にリング永久磁石を付加したハイブリッド固定子の磁気力を調べた。水平方向は安定浮上する範囲が2倍以上に広がり、位置エネルギーの値は3倍に拡大したことから、浮上磁石の水平方向安定性は増し、脱調する危険が小さくなる。鉛直方向については、リング磁石の追加によって磁気剛性が一定量増加し、またリング磁石による引力で浮上高さが低くなること

によってさらに磁気剛性は増大するため、超伝導体単体の固定子に比べて大きく増大することになる。

以上のように、超伝導磁気浮上にリング状永久磁石を付加することによって、水平方向、鉛直方向ともに安定性を向上することが確認された。リング磁石のサイズをさらに詳細に検討することで最適設計が可能となる。

参考文献

1. M. Futamura, et al.: Journal of Physics: Conference Series, 1054 (2018), 012088

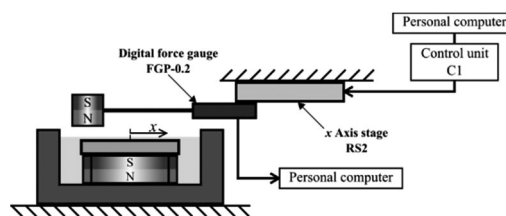


Fig. 1. Schematic diagram of measuring apparatus for horizontal magnetic force of the magnet and superconducting stator.

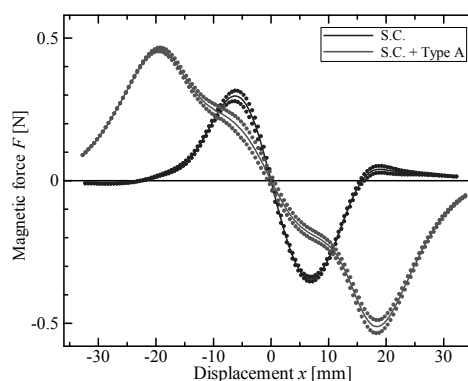


Fig. 2. Horizontal magnetic force of the magnet above various stators.

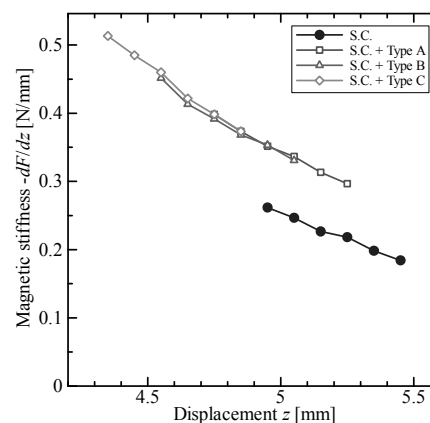


Fig. 3. Vertical magnetic stiffness of the levitating magnet for each stator type.

無絶縁 REBCO パンケーキコイルの 超電導電力貯蔵装置(SMES)への応用可能性に関する検討

Evaluation on Applicability of No-Insulation REBCO Pancake Coil to Superconducting Magnetic Energy Storage

金原 徹郎, 市川 哲理, 柿本 雄太, 尾下 遥, 石山 敦士(早稲田大学)

KINPARA Tetsuro, ICHIKAWA Tetsuri, KAKIMOTO Yuta, ONOSHITA Haruka, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置(SMES)は、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置であり、長寿命かつ大電力の瞬時応答が可能だが、貯蔵密度が極めて小さい。

無絶縁コイル(以下「NI コイル」)は、二律背反の高電流密度と高熱的安定性を両立できる巻線方式として期待されている。直流応用のみが想定される NI コイルを SMES にも応用できれば、高電流密度により高貯蔵密度を達成できる可能性がある。しかし、NI コイルでは充放電時に電流が径方向に流れジュール損失が発生する。そこで、NI コイルの欠点である損失と利点である熱的安定性の層間電気抵抗値への依存性を定量的に求め、SMES への適用性を評価したので報告する。

2. 解析方法

解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。運転温度は 20K を想定した。通電電流最大値を 540A、最小値を 420A とし[1]、一定電力での充放電制御を仮定のもと、Fig.2 の PEEC モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して解析を行った[2]。このとき、層間電気抵抗値を $70 \mu \Omega \cdot \text{cm}^2 \sim 70 \Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲で変化させ、充放電周期については負荷変動補償を想定した 18 秒とした。

3. 解析結果

絶縁コイル及び NI コイルに貯蔵されるエネルギーの時間変化を Fig.3 に示す。NI コイルでは層間電気抵抗値が小さいほど、貯蔵エネルギーの最大値と最小値の幅が小さくなっていき、充放電動作に追従できなくなっていることがわかる。層間電気抵抗値と効率及び局所的常電導転移発生 0.1 秒後の温度上昇の関係性を Fig.4 に示す。層間電気抵抗値が $100 \text{m} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下となると効率は急激に低下し、さらに抵抗値が低くなると貯蔵装置として機能しない。一方、 $100 \text{m} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上となると、温度上昇が急激に増加し安定性が保たれなくなることがわかる。

このことから、本対象コイルでは層間電気抵抗値が $100 \text{m} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度の場合において、絶縁と無絶縁のそれぞれの利点である高効率と高熱的安定性を両立できると考えられる。コイルに無絶縁巻線方式を採用し層間電気抵抗値の最適化制御を施すことで、高貯蔵密度、高効率、高熱的安定性を兼ね備えた SMES を実現できると考えられる。

本研究は科研費挑戦的萌芽研究(No.16K14220)によった。

参考文献

1. A.Ishiyama, et al.: TEION KOGAKU, vol. 48, no. 4, 141-150, 2013
2. T.Wang, S.Noguchi, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 25, no. 3, 2015

表 1 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの諸元
Table1. Specification of NI REBCO pancake coils

| | | |
|-----------------|-------------------------------------|--------------|
| REBCO conductor | Overall width [mm] | 4.02 |
| | Overall thickness [μm] | 103 |
| NI Coil | i.d; o.d [m] | 1.000; 1.021 |
| | Height [mm] | 4.02 |
| | Number of Turns | 100 |
| | Inductance [H] | 0.0335 |

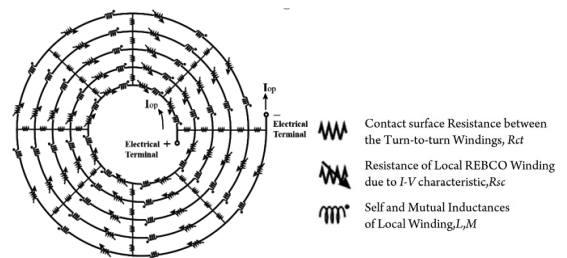


図 2 PEEC モデル

Fig.2 Partial Element Equivalent Circuit Model

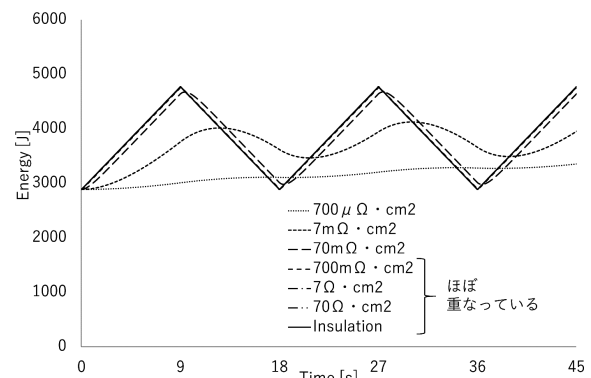


図 3 絶縁コイル及び NI コイルにおける貯蔵エネルギー
Fig.3 Stored Energy in Insulation coil and No-Insulation Coil

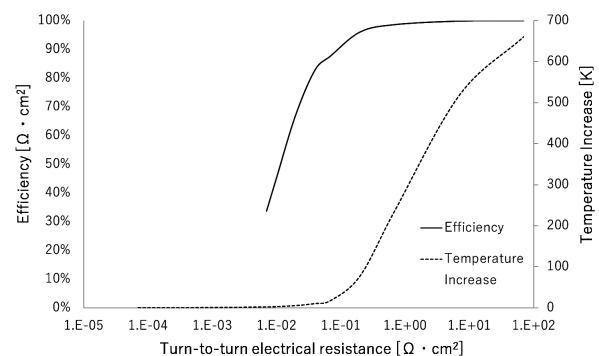


図 4 層間電気抵抗と効率及び温度上昇
Fig.4 Efficiency and temperature increase at each Turn-to-turn electrical resistance

1 T 級高温超電導磁力平衡ヘリカルコイルの開発 —線材長手方向ひずみ分布に対する臨界電流評価—

Development of the 1 T class HTS force-balanced helical coils: Critical current evaluation of the strain distribution in the length direction of the helical windings

鎌田 太陽, ニノ宮 晃, 野村 新一 (明治大); 谷貝 剛 (上智大); 中村 武恒 (京大); 力石 浩孝 (NIFS)

KAMADA Hiroharu, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.);

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); CHIKARAISHI Hiroataka (NIFS)

E-mail: kamada@meiji.ac.jp

1 はじめに

超電導コイルの高磁場化において、付随して生じる強大な電磁力が巻線に多大な負担を与え、超電導線材の性能を低下させる可能性がある。この電磁力を著しく低減できる巻線方式に電磁力平衡ヘリカルコイル (force-balanced helical coils, 以下 FBC) がある [1]。筆者らはこの FBC の巻線材料に REBCO 線材の適用を検討しており [2]、これらの組み合わせにより巻線を支える構造体を低減することができ、超電導コイルの軽量化が期待される。

しかしながら、REBCO 線材は機械的ひずみにより特長的な臨界電流 (以下 I_c) が低下する [3][4]。従って、Fig.1(a) のようにヘリカル形状に起因した線材厚み方向曲げ (以下 FW 曲げ) と幅方向曲げ (以下 EW 曲げ) により機械的ひずみが分布するため、REBCO 線材の I_c も分布すると想定される。ここではこれらの複合的曲げひずみの線材長手方向軸成分のひずみ (以下、一軸ひずみ) に着目し、この一軸ひずみ分布に対する I_c の評価方法および複合曲げ試験による検証について報告する。

2 複合ひずみに対する I_c 評価方法

REBCO 線材の一軸ひずみに対する I_c の可逆的・不可逆的な低下は次式の様なべき乗則で記述される [5]。

$$I_{c(\varepsilon)}/I_{c,max} = 1 - a|\varepsilon - \varepsilon_m|^b \quad (1)$$

ここで、 a はひずみ感受性、 ε は負荷ひずみ、 ε_m はピーク位置でのひずみであり、 a と b は線材固有のもので試験結果からフィッティングすることで求められる。但し、温度一定、外部磁場なし、機械的な弾性領域で、 I_c が可逆的に低下するひずみ領域で成り立つ条件であることが前提であることに留意されたい。

FBC ではその形状に起因した FW 曲げひずみ ($\varepsilon_w(r)$)、EW 曲げひずみ (ε_ρ) が同時に印加され、複合曲げひずみの一軸ひずみは Fig.1(b) のような分布となる。このような一軸ひずみ分布下の I_c は式 (1) で与えられる関数を線材幅方向で平均した値と考えられる [5]。従って、FBC の局所的な I_c は $\varepsilon_w(r)$ 及び ε_ρ により次式から推定できると考えられる。

$$I_{c(r,\rho)} = \int_{\varepsilon_w(r,\rho)}^{\varepsilon_w(r,\rho)} \frac{I_{c(\varepsilon)}}{\varepsilon_w(r,\rho) - \varepsilon_w(r,\rho)} d\varepsilon \quad (2)$$

ここで、 r は FW 曲げ半径、 ρ は EW 曲げ半径、 $\varepsilon_w(r,\rho)$ 及び $\varepsilon_w(r,\rho)$ は線材両幅における一軸ひずみを表しており、 $\varepsilon_w(r)$ は FW 曲げ半径 r と線材断面の中立軸から線材表面までの距離 d で、 ε_ρ は EW 曲げ半径 ρ と線材幅長 w により与えられるから、一軸ひずみの合計は次式で表される。

$$\begin{cases} \varepsilon_w(r,\rho) = \frac{d}{r} + \frac{-w}{2\rho} \\ \varepsilon_w(r,\rho) = \frac{d}{r} + \frac{w}{2\rho} \end{cases} \quad (3a) \quad (3b)$$

本講演では REBCO 線材の短尺試料を用いてこれらのひずみ分布に対する I_c 特性を調査した結果も合わせて報告する。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業 (基盤研究 (B) 16H04321) の助成を受けて実施されたものである。

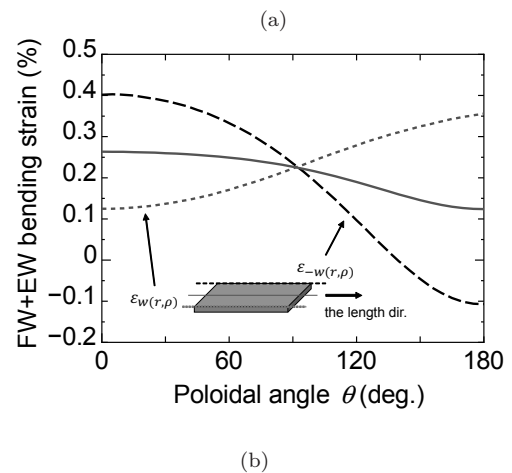
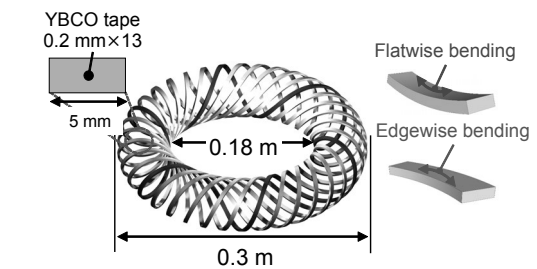


Fig. 1. Schematic illustration of a 1 T class high-temperature superconducting force-balanced helical coils, and the strain distribution in the length direction of the helical windings.

参考文献

- [1] S. Nomura *et al.*: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 14, no. 2, pp. 709-712, Jun. 2004
- [2] Y. Kimura *et al.*: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 26, no. 4, Jun. 2016, Art. no. 4202104
- [3] D C van der Laan *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 052506 (3pp)
- [4] M. Sugano *et al.*: *Physica C* 463-465 (2007) 742-746
- [5] D C van der Laan *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115002 (6pp)

新幹線用周波数変換装置への超電導限流器の導入可能性検討

Feasibility Study on the Application of Superconducting Fault Current Limiters to Electric Frequency Converters of Shinkansen

赤堀 貴広, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

AKAHORI Takahiro, TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: Akahori@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

電源周波数の異なる地域を縦断するような新幹線のき電系には、周波数変換装置(FC)によって 50 Hz から 60 Hz に変換を行うものがある。FC には回転機を回して周波数変換を行う回転形 FC と半導体素子を用いた静止形 FC がある。近年ではメンテナンス等における利点から後者の需要が高まっており、導入が進んでいる。[1]しかし、静止形 FC は従来の回転形 FC と比べて過電流に対する耐性が低いため[1]、超電導限流器(SFCL)を導入したシステムを検討する。本講演では、SFCL 導入による静止形 FC の事故電流限流効果をシミュレーションによって解析し、その結果を報告する。

2. 解析方法とモデル

Fig.1 に示す新幹線電力システムを模擬した電気回路モデルを用いて、SFCL 導入前後で FC に流れる電流を計算することによって事故電流限流効果の検討を行う。SFCL 導入位置は Fig. 1 の A, B, C 点を想定する。FC の最大許容電流は 2.2 pu を想定して 9.8 kA とする。短絡地点は Fig.1 の Fault の位置を想定し、解析において B 点では Power line B, C 点では Substation B の T 座の SFCL のみを考慮する。線材一本当たりの臨界電流は 313 A とし、各点での SFCL の臨界電流は最大負荷電流の 1.2 倍として、A 点で 6886 A, B 点で 1252 A, C 点で 939 A とする。0.2 s 短絡, 0.3 s き電回路 B 遮断, 0.75 s 再閉路, 0.85 s 再遮断とした。

SFCL は冷却能力向上のために巻線間にスペーサーを持つ bifilar コイルを想定する。1 コイルあたりの線材長は 27m とする。線材を並列に複数本まとめ、それが巻かれたコイルを所定の線材長、並列数となるように直列または並列に接続する。[2] (全体の並列数=線材並列数×コイル並列数)冷却に必要な線材長の検討のため、コイル並列数はパラメータとする。SFCL の電気特性は式(1)で表す。

$$V = \begin{cases} E_c \left(\frac{l}{l_c}\right)^n & , l < l_c, T < T_c \\ E_c \left(\frac{l - l_{cmin}}{l_c - l_{cmin}}\right)^{m+1} & , l \geq l_c, T < T_c \dots (1) \\ \rho l & , T \geq T_c \end{cases}$$

ただし、 E_c は $1 \mu \text{Vcm}^{-1}$, l_c は臨界電流, n は $n (= 30)$, l は線材長, T_c は臨界温度($= 90 \text{ K}$), l_{cmin} は臨界電流の分布の最小値[3], m は 5, ρ は線材の常電導抵抗とする。

3. 解析結果

SFCL 導入前の FC 電流の解析を行った結果、最大 46.7 kA となり、最大許容電圧 9.8 kA を大きく超えた。

SFCL をそれぞれ A, B, C 点に導入した時の最大電流を Fig.2 に示す。C, B, A 点の順に限流効果大きい。これは以下のように説明できる。平常時の負荷電流は A 点では変電所 A~C の負荷電流の合計, B 点では変電所 B, C の負荷電流の合計, C 点では変電所 B 直下の負荷電流のみとなるが、短絡時にはどの導入位置でも変電所 B の短絡電流が支配的となる。よって、C 点, B 点, A 点の順に短絡電流と最大負荷電流(および臨界電流)との比が大きくなるため限流効果もこの順に大きくなる。C 点に SFCL を導入することによって短絡電流を最大許容電流以下に抑えることができる。各導入位置、

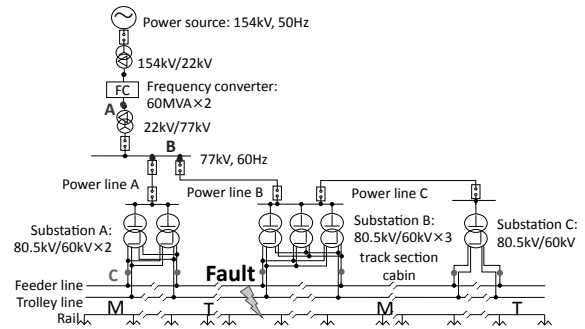


Fig.1. Electric circuit model.

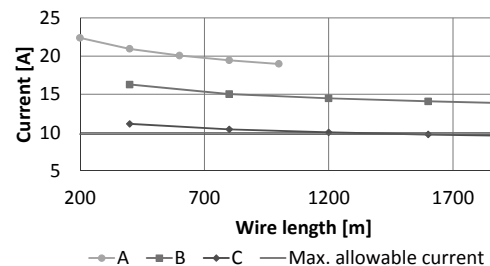


Fig.2. Max. current at frequency converter.

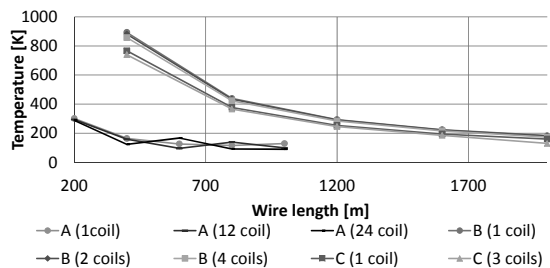


Fig.3. HTS tapes temperature at the time of interruption.

コイル並列数でのき電回路 B 遮断時の SFCL 最大線材温度を Fig.3 に示す。線材長 1600 m では、C (1 coil), C (3 coil) ともに最大温度は 300 K 以下に抑えられ、安全に運用可能となる。論文[2]と同様に外径 50 cm, 幅 5 cm のコイルを、並列では 1 cm, 直列では 5 cm 間隔で接続すると仮定すると、SFCL のサイズは外径 50 cm で長さは C (1 coil) で 595 cm, C (3 coil) で 1315 cm と概算できる。(クライオスタットを除く) ただし、この線材長では再閉路時には使用後の SFCL が常電導状態にあるため、予備の SFCL を用意する必要がある。その場合、この電力システムにおいて必要な SFCL 個数は合計 9 (6+予備 3) となる。

参考文献

1. T. Shimizu, et al.: The 2018 International Power Electronics Conference (2018) p.1803
2. H.P. Kraemer, et al.: Physics Procedia, Vol. 36 (2012) p.921
3. I. Falorio, et al.: Journal of Physics: Conference Series, Vol. 507 (2014), 022004

薄膜型超電導限流素子用温度・電位差分布同時測定装置の開発

Development of Temperature and Voltage Coincidental Measuring Setup for Thin Layer Type Superconducting Fault Current Limiting Device

宮野 将希, 星野 勉(明星大)

MIYANO Masaki, HOSHINO Tsutomu (Meisei Univ.)

E-mail: 15t3046@stu.meisei-u.ac.jp

1. はじめに 当研究室では、薄膜型超電導限流素子の温度・電位差分布を同時に測定する装置の開発を行っている [1]。先行研究によって、YBCO 薄膜素子の通電方向の電位差分布から、限流動作時の温度上昇を推定式が提案されている [2]。推定式を用いるには、一旦温度と電位差を同時測定して、パラメータ同定をする必要がある。そこで、温度プローブと電位プローブを簡便にセッティングできる治具を開発した。室温における予備試験には成功した [3] が、液化窒素ガス浸漬冷却中では、温度測定に問題が生じたので、その概要を報告する。

2. プローブの開発と室温予備試験 Fig. 1(a) に従来使われていた電位プローブを示す。測定試料に押し当てると、接触点が移動するので Fig. 1(b) に示す電位プローブを新たに開発した。Fig. 2 に出にプローブを治具に取り付けた様子を示す。これにより、電位プローブを一度にセッティングすることが可能となった。温度プローブは、0.3φ テフロン絶縁付き T 型熱電対を外径 7φ のテフロンシートを介して、六角穴付ボルト M4 でばねの力を用いて、測定試料に押し付けて固定する方式である。

開発している測定装置は、資料素子の通電方向に、10 領域の温度と電位差を測定できるようになっており、波形記録装置で信号電圧を記録できる。記録計の電圧分解能は 50 μV である。

室温における予備試験を行った。幅 40 mm、厚さ 5 μm、長さ 200 mm のニクロム箔を用いた模擬素子に、4.5 A のステップ電流 (3.08 mW/mm²) を通電した時の領域 2 の電位差 V_2 と熱起電力 V_{T2} の時間変化を Fig. 3 に示す。50 秒間で 0.8 mV 熱起電力が増加しているの、室温を温度定点として 20 K 上昇しており、温度と電位差が同時に観測できていることが分かる。

3. 液化窒素ガス浸漬冷却測定試験 室温における予備試験に続いて、LN₂ 浸漬冷却時の測定試験を行った。24.0 A (発熱密度 60.6 mW/mm²) の通電をしても、熱起電力に変化は現れなかった。その原因について、検討した。

テフロンの熱流束率は、参考文献 [4] の表 3.5 から 0.9 W/m (76K ~ 80 K), 4.8 W/m (80 K ~ 100 K), GN₂ の熱流束率は、参考文献 [4] の図 2.36 から熱伝導率を読み取って計算すると、23 mW/m (77K ~ 80 K), 0.17 W/m (80 K ~ 100 K) である。テフロンの厚さを 2 mm とすると、熱流束密度は、0.45 mW/mm² (テフロン, 76K ~ 80 K) と見積もられるので、発熱密度より小さい。このため、模擬素子は温度上昇しているとみなせる。また、今回の評価から、個体よりも気体の方が熱抵抗が大きいことが分かった。

数回の熱サイクルの後、模擬素子を取り出してみると、Fig. 4 に示す電位プローブの接触箇所によりプローブエッジによると考えられる傷が入っていた。このため、模擬素子内の電流分布が変わり、熱電対部分での発熱が少なくなったとも考えられる。今後、電位プローブ形状を改良することとしている。また、熱電対信号系統の接続確認を進め、温度変化が観測されなかった原因を解明し、低温下における同時測定を可能としていく予定である。

4. おわりに テープ導体にも適用できる薄膜型超電導限流素子用温度・電位差分布同時測定装置を開発している。今回、LN₂

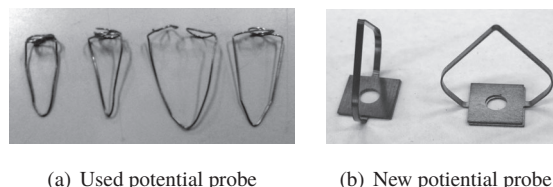


Fig.1 Developed potential probe

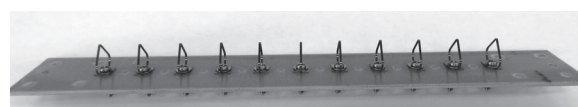


Fig.2 Stilled potential probe on base plate

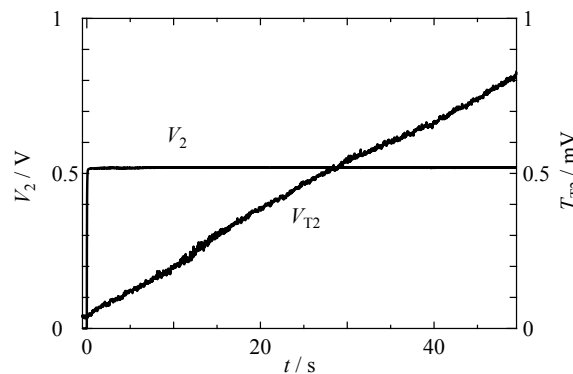


Fig.3 Measured voltage and thermoelectromotive force of second region

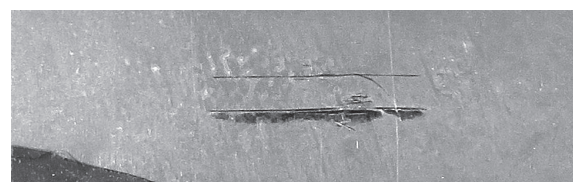


Fig.4 Scratch on the simulated element

浸漬冷却で試験をしたところ、新たな開発課題が見つかった。改良を重ね、温度・出に分布を容易にセッティングして測定できる装置の完成を目指す。

参考文献

- 宮下 隼貴: “温度・電位差同時測定による薄膜型超電導限流素子の特性推定法と測定系の構築”, 明星大学電気工学専攻修士論文 (2016.2)
- K. Hattori et. al.: IEEE T. Appl. Supercon., 23, 3, 5602005 (2013.6) DOI: 10.1109/TASC.2012.2235111
- 大倉隆照: “超電導限流素子特性測定装置—模擬素子を用いた予備測定—”, 明星大学電気電子工学系学士論文 (2018.1)
- Cryogenic Association of Japan: “Handbook of Superconductivity and Cryogenics” (1993.11) Ohm

運行パターンの変動を考慮に入れた直流き電鉄道への超電導ケーブルの導入効果の検討

Study on Benefits of Introducing Superconducting Power Cables to DC Electric Railway Systems Considering Train Scheduling Pattern Fluctuation

岩月 駿, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

IWATSUKI Shun, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki(Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: Iwatsuki.shun17@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

直流き電鉄道でのき電線の電圧降下や回生失効といった課題への対策案として超電導ケーブルの導入があり、運行本数の多い路線への導入が効果的であると考えられている[1]。本研究では数値解析を用いて超電導ケーブル導入による変電所負荷平準化、回生電力の利用効率向上に注目し、時間帯毎の運行パターン変動を考慮した効果について検討を行った。

2. 解析方法

本研究では変電所、電車、超電導ケーブルモデルからなる路線モデルについて現実の路線を参考に設定し、時間ステップ毎に各要素のエネルギー入出力等の解析を、汎用解析ソフトウェア Matlab/Simlink を用いて行った。

路線モデルは、全長 22 km で平均駅間が短い(1.3 km)区間に 8 つの変電所(SS 1-8)を持ち、運転間隔が短い通勤線区を想定した(Fig. 1)。電車の相対位置関係による各要素のエネルギーの授受に与える影響が大きいため、途中停車駅での停車時間に正規分布のばらつきと下り線の始発駅発車時刻を乱数で与え統計的調査を行うことで運行パターンによる特異性が小さくなるようにした。

3. 解析結果

時間帯毎に変化する運行状況を模擬するため、本研究では実際のダイヤを参考に 5 つの運行状況を設定した(Table. 1)。これらの条件の下、30 分間分の解析を 100 サンプル行い、超電導ケーブルを全変電所間に接続した場合の変電所の瞬時最大出力の低減効果が最も大きかった変電所 8 の瞬時最大出力について Fig.2 に示す。また、1 日のうち各運行状況に対応させた時間帯を Table. 2 に示す。Fig. 2 より、どの運行パターンにおいても瞬時最大出力が 40 %以上低減された。超電導ケーブル導入前(Without SC)の運行状況(iii)の瞬時最大出力より、超電導ケーブル導入後(With SC)の運行状況(i)の方が小さくなった。超電導ケーブル導入によって、日中運行に必要な変電所容量で運転間隔が半分になり列車本数が倍になる朝のピーク時間帯に十分供給できる可能性が示された。

超電導ケーブルの冷却エネルギーを含めた全変電所の出力電力について Fig. 3 に示す。出力電力は回生率向上によりどの運行状況においても削減されており、運行状況(iii)で最も削減効果が大きい 9.7 %となった。Table. 2 の区分を元に 24 時間分の出力電力を比較すると、超電導ケーブル導入前は 375 GJ であったのに対し、導入後は 347 GJ となり、1 日を通じて 7.6 %のエネルギー削減につながった。

4. まとめ

本研究は直流き電鉄道への超電導ケーブル導入効果について、1 日の中での運行パターン変動を考慮に入れ検討した。全線に渡って変電所間に超電導ケーブルで接続することによって、日中の運行に必要な変電所容量で朝のピーク時にも供給可能であり、消費エネルギーを 7.6 %削減できることが分かった。

参考文献

1. M. Tomita, et al.: “Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission”, Energy, Vol. 122 (2017) p.579-587

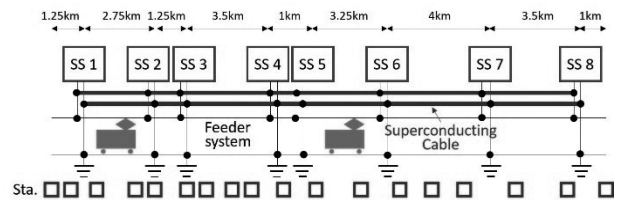


Fig.1 Analysis Model

Table.1 Analysis service pattern

| | (i) | (ii) | (iii) | (iv) | (v) |
|----------------------|-----|------|-------|------|-----|
| Interval [sec] | 150 | 225 | 300 | 450 | 600 |
| Maximum speed [km/h] | 55 | 65 | 75 | 75 | 75 |
| Occupancy [%] | 200 | 150 | 100 | 50 | 50 |

Table.2 Time division

| | (i) | (ii) | (iii) | (iv) | (v) | Not in service |
|---------|-----|-------------|-----------|-----------|------|----------------|
| O'clock | 8 | 7, 9, 17~20 | 10~16, 21 | 6, 22, 23 | 0, 5 | 1~4 |

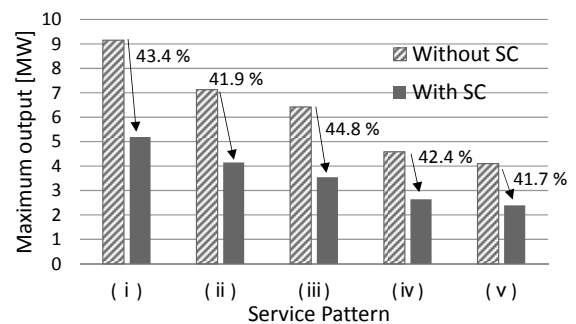


Fig. 2 Comparison maximum output of Substation 8

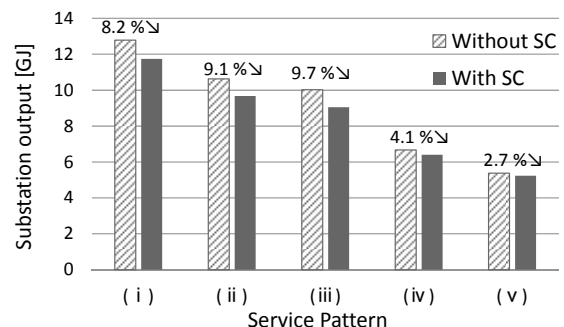


Fig. 3 Comparison of substation total output