

ILC 用伝導冷却・超伝導四極プロトタイプ磁石の性能試験

Results of performance test of the conduction cooled superconducting quadrupole prototype magnet for ILC

木村 誠宏, 山本 明(高エネ研); TARTAGLIA Michael, KASHIKHIN Vladimir (Fermi 国立研究所);
戸坂 泰造, 高橋 政彦(東芝)

KIMURA Nobuhiro, YAMAMOTO Akira (KEK); TARTAGLIA Michael, KASHIKHIN Vladimir (Fermi Lab.);
TOSAKA Taizo, TAKAHASHI Masahiko (Toshiba)
E-mail: nobuhiro.kimura@kek.jp

1. はじめに

International Liner Collider (ILC)では、主線形加速器用クライオモジュールの真空容器内にビーム収束及び制御用超伝導磁石が超伝導キャビティと共に組み込まれる。これら磁石の冷却手段としてモジュール内に設置されているキャビティ冷却用飽和超流動ヘリウム管からの伝導冷却が提案されている¹⁾。今回、米国Fermi 国立研究所(以下、Fermi 研)が試作したILC用超伝導四極プロトタイプ磁石(以下、四極磁石)の伝導冷却化改造を行い、冷却・励磁試験を行った。本講演では、伝導冷却化した四極磁石の冷却特性並びに励磁電流30Aまでの励磁特性について報告する。

2. 超伝導四極磁石の伝導冷却化改造

伝導冷却化した四極磁石の仕様をTable 1に示す。四極磁石は液体ヘリウムを用いた冷却により予め励磁特性が確認されている²⁾。

今回行った主要な改造点を以下に示す。

- 1) 4個の超伝導コイルパック表面及び磁石-冷凍機コールドヘッド間に伝導冷却路として5N高純度アルミシート及びA1050純アルミ材を装着する。この伝導冷却化により磁石の冷却重量は400kgになった。
- 2) 中間に高温超伝導体製電流リードを組み込む事で四極磁石への熱侵入を抑制する。
- 3) 冷却用冷凍機として住友重機製1W/4K 2段パルス管冷凍機 (RP-082B) を採用し、磁石と共に磁場測定用の常温ボアを持つ輻射シールド付縦型クライオスタットに組み込む。

伝導冷却化した磁石周囲の外観を Fig.1 に示す。

設計上の熱負荷は、冷凍機 1st Stage 41 W/45 K, 2nd Stage 0.55 W/3.5K であった。パルス管冷凍機の冷凍能力³⁾から求めた必要冷却時間は10~12日と予想された。

3. 冷却・励磁試験

冷却並びに励磁特性の性能評価試験を行った。

Fig.2 に磁石の冷却特性を示す。本磁石の冷却所用時間は、7.7日(185時間)で事前の予想よりも2.3日早い結果となった。また、冷凍機の熱負荷は1st Stage 32 W/38.6 K, 2nd Stage 0.6 W/3.53K であった。

冷却完了後、ACロス測定並びに励磁電流30Aまでの遮断試験を行い、その励磁特性を確認した。励磁電流を30Aに制限したのは磁石に接続するクエンチ保護回路のKEK側の設備の制限からである。この試験で励磁速度0.4A/sの交流損失によるクエンチは発生せず、超伝導コイルに対して十分な温度マージンがあることが確認された。

4. まとめ

Fermi 研で試作されたILC用超伝導四極磁石の伝導冷却化改造を行い、その冷却性能を確認した。

今後、本伝導冷却化磁石はクライオスタットと共に Fermi 研に輸送され、定格電流120Aまでの励磁特性試験及び精密磁場測定を行う予定である。

参考文献

1. V. S. Kashikhin, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 19 (2009) p. 1176

2. V. S. Kashikhin, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 22 (2012) p. 400
3. N. Kimura et al.: Abstract of CSJ conference, Vol.85 (2011) p.218

Table 1 Magnet Parameters

| Magnet Type | Quadrupole |
|-----------------------------|-------------------------|
| Coil Type | 910 turn racetrack coil |
| Magnet Aperture (m) | 0.039 |
| Magnet Length (m) | 0.74 |
| Magnet Outer Diameter (m) | 0.28 |
| Magnet Weight (kg) | 295 |
| Magnet Inductance (H) | 10.4 |
| Maximum Current (A) | 100 |
| Peak Gradient @ 100 A (T/m) | 54 |

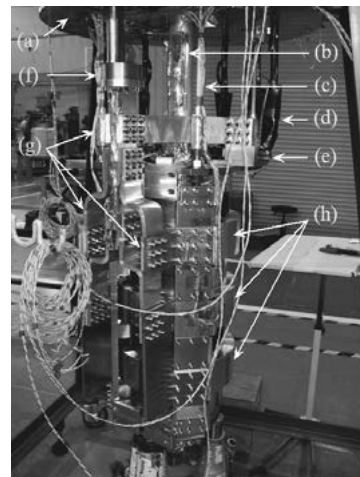


Fig. 1 Conduction cooling test stand during construction: a) top radiation shield, b) warm bore shield, c) vertical magnet support, d) Cu lead below HTS, e) Cu/SC lead thermal anchor, f) PTCC stage 2 cold head, g) pure Al and Cu conduction channels, h) pure Al clamps around magnet yoke.

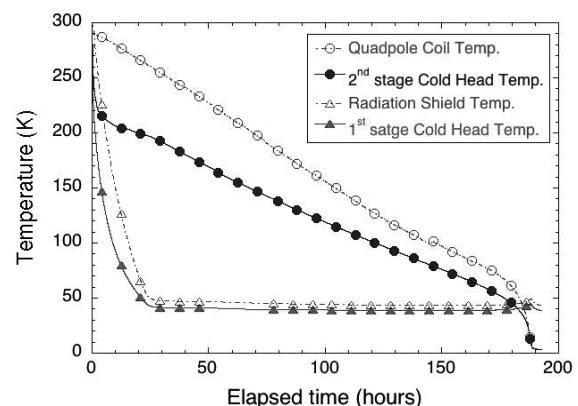


Fig.2 Cool down characteristics from 300 K to 4 K.

TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発⑦ (2 kA 級超電導電流リードユニットの作製と通電特性) Development of current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes ⑦ (Transport performance of 2 kA class current lead units)

本橋春樹、坂井裕貴、細野優人、山田豊(東海大);

小泉勉、引地康雄、箕輪昌啓(昭和電線ケーブルシステム)、田村仁、三戸利行(核融合科学研究所)

Haruki MOTOHASHI, Yuki SAKAI, Yuto HOSONO, Yutaka YAMADA, (Tokai University);

Tsutomu KOIZUMI, Yasuo HIKICHI, Masahiro MINOWA (SWCC); Hitoshi TAMURA, Toshiyuki MITO (NIFS)

E-mail:2BAZM014@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

前報 TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発⑥では、2 kA 級電流リードユニットを 10 組使用した集合型超電導電流リードの作製と通電特性について報告した。本報では、新たに 24 本の YBCO テープ線材を用いて小型化した 2 kA 級超電導電流リードユニットを作製し、通電特性及び熱侵入量を評価したので報告する。

2. 実験方法

TFA-MOD 法により作製した YBCO テープ線材は、幅 5 mm、厚さ約 130 μm (Hastelloy substrate: 100 μm、YBCO layer: 1.5 μm、Ag layer: 24 μm) である。

Fig. 1 に作製した電流リードユニットの外観及び模式図を示す。YBCO 線材を 4 枚 1 組に重ね合わせ、表裏 3 列に配置後、両端を Cu 電極にハンダ接合し、計 24 本の YBCO 線材を用いた電流リードユニットを作製した。電圧測定は電流リードユニット全体の発生電圧 $V_{overall}$ 、Cu 電極-YBCO 線材間の発生電圧 $V_{Cu(+)} \cdot V_{Cu(-)}$ 、YBCO 線材の発生電圧 V_{YBCO} である。また、自作のログスキーコイルを用いてスweep時の起電力を測定し、YBCO 線材の偏流を評価した。なお、通電試験は核融合科学研究所において行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に 24 本の YBCO 線材の素線 I_c 値 (@77 K, s. f.) を示す。YBCO 線材の素線 I_c 値は、最小値 147 A、最大値は 155 A、平均値 152 A であった。

Fig. 3 に電流リードユニットの通電結果 (@77 K, s. f.) を示す。2000 A 通電時まで YBCO 線材には電圧が発生せず、3000 A 通電時に最大 14 μV、3500 A 通電時には最大 71 μV の電圧が発生した。Cu 電極部の電圧 $V_{Cu(+)}$ と $V_{Cu(-)}$ は通電電流とともにほぼ直線的に増加し、3500 A 通電時に 1.6 mV および 1.4 mV であった。これら $V_{Cu(+)}$ と $V_{Cu(-)}$ の和は、 $V_{overall}$ の 3.1 mV にほぼ等しくなった。

ログスキーコイルに発生した起電力から YBCO 線材に流れる電流値を計算した。スweepレート 1000 A/s で、3000 A まで通電した時には表側 12 本の YBCO 線材に 1570 A、裏側 12 本は 1280 A と計算され、表裏で 300 A 程度の偏流が認められた。この時 計算された合計値は 2850 A となり、実際の通電電流値とは 150 A の差が生じたが、YBCO 線材に流れる直流電流の偏流をある程度定量的に評価できたものと思われる。

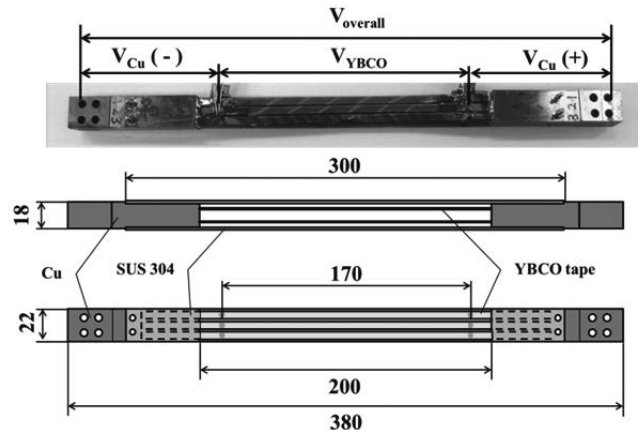


Fig. 1 Current lead unit prepared by twenty four YBCO tapes.

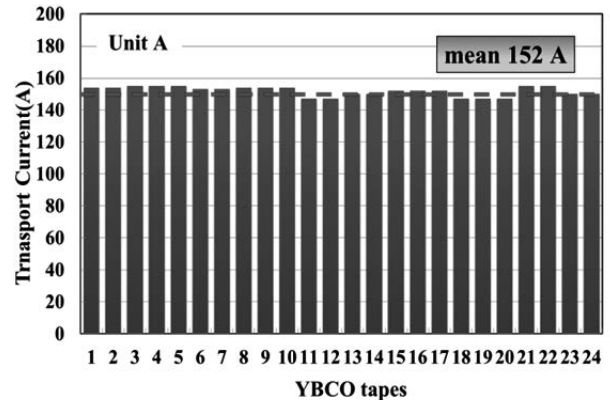


Fig.2 Transport critical current of twenty four YBCO tapes prepared for a current lead unit at 77 K in self field.

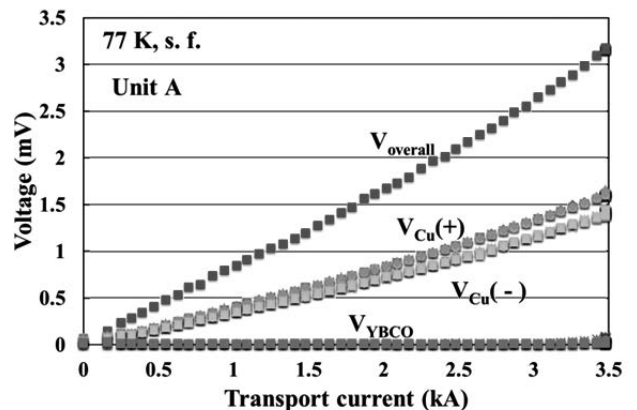


Fig.3 Transport current at 77 K for the current lead.

1 kA 級ペルチェ電流リードの開発

Development of 1 kA - class Peltier Current Lead

菅根 秀夫, 引地 康雄, 箕輪 昌啓 (昭和電線); 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大学)
 SUGANE Hideo, HIKICHI Yasuo, MINOWA Masahiro (SWCC); HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio,
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)
 E-mail: h.sugane036@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

ペルチェ電流リード(以下 PCL)とは、中部大学の山口らによって考案されたペルチェ素子を用いた電流リードである[1]。昭和電線では、中部大学との共同研究により、この PCL の大容量化に取り組んできた。2009 年以降、中部大学の 200 m 級直流超電導送配電システム実証試験路(CASER-2)に組み込まれ、その有効性が確認されている[2, 3]。しかし、CASER-2 の通電容量が 2 kA であるのに対し、PCL 単体の通電容量は 100 A であるため、CASER-2 には 23 対(正極負極併せて 46 本)もの PCL が端末部に並べられている。今回、我々はコンパクトな終端部の実現を目指し、より大容量な PCL を開発するため、1 kA 級 PCL の試作と評価を行った。

2. サンプル諸元

大容量化に当たり、下表のようなサンプルを作製した。

Table 1 Property of samples.

| Sample | Designed current | Ratio of cross sectional area | Remark |
|--------|------------------|-------------------------------|-----------------|
| A | 100 A | 1.0 | |
| B | 200 A | 2.2 | |
| B' | 200 A | 2.2 | With heat sink. |
| C | 1 kA | 10.5 | |

サンプルは全て、銅電極とペルチェ素子を半田接続して作製したものである。サンプル A は CASER-2 に採用されている PCL を模した構造であり、通電容量は 100 A で設計した。サンプル B は通電電流が 200 A、サンプル C は 1 kA で最適となるよう、ペルチェ素子断面積と電極サイズを大きくしたものである。また、B' はサンプル B に放熱フィンを取り付けて高温側の放熱効果を高めたものである。

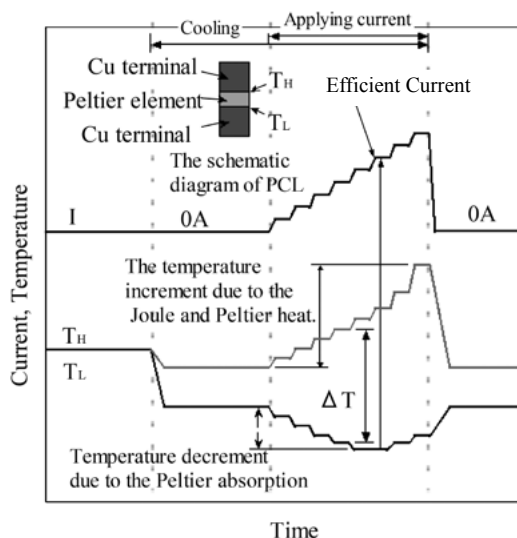


Fig. 1 The procedure of measurement.

3. 通電性能評価

各サンプルの性能を評価するため、下記の測定を行った。まず、Fig. 1 のようにペルチェ素子と銅電極の接続界面から銅電極側に 2 mm ずらした位置に熱電対を取り付けた(T_H , T_L)。そして、通電回路を成す導体の内、サンプル下部に取り付けた導体を液体窒素に浸漬し、 T_L 部を初期温度(-85°C)に設定した。その後、サンプルと液面の距離を固定して冷却能力を一定に保ち、一定時間(5 分)温度変化が無いことを確認した後、通電を行った。通電は一定時間おきに電流値をステップ状に上昇させ、各電流値における到達温度を測定した。

半田の熔融を防ぐため、 T_H が 150°C に達した時点で通電を終了し、その電流を最大電流値 I_{Max} とした。また、 ΔT が最大値を取る点を I_Δ 、 T_L が最小値をとる電流値を I_{eff} とした。

Table 2 Experimental results.

| Sample | I_{eff} | I_Δ | I_{Max} |
|--------|-----------|------------|-----------|
| A | 80 A | > 160 A | 160 A |
| B | 120 A | > 280 A | 280 A |
| B' | 140 A | 280 A | 340 A |
| C | 500 A | > 1200 A | 1200 A |

4. 評価結果

I_{eff} はペルチェ効果による冷却とジュール熱、伝熱による熱侵入の和が最小になる電流値で、冷媒への熱侵入量低減効果を最大に得られる電流値であるといえる。また、 I_Δ はペルチェ効果による熱の汲み上げと、ジュール熱や熱伝導による熱侵入がバランスする電流値であり、この点より電流値が大きな領域は PCL の効果が小さくなっていく領域である。

Table 2 の結果によると、サンプル A, B, C の I_{eff} はそれぞれ 80, 120, 500 A であり、設計値と比べて小さい値である。これは、理論計算では $T_H = 27^\circ\text{C}$ で固定されている[4]のに対し、測定時には電流を流すほど温度が上昇し、理論計算における熱伝導の項のずれが大きくなったためと考えられる。

また、サンプル A, B, C において電流値を増加させていくと、 ΔT が最大を示す前に T_H が測定上の上限温度に達し、 I_Δ の特定ができなかった。 I_Δ を確認するため、サンプル B に放熱フィンを取り付けたサンプル B' の測定を行ったところ、 I_{Max} が増大し、 ΔT の最大値を確認することができた。更に、 I_{eff} も 140 A となり、サンプル B よりも設計値に近い値となった。これは、 T_H の上昇が抑えられたためと考えられる。

サンプル D においても I_{eff} は 1 kA に達しないものの、 I_Δ が 1 kA 以上であることを確認できた。この結果から、最適化には調整が必要だが、1 kA 通電時に PCL の効果を得られることが確認できた。今後、今回の 1 kA 級 PCL の構造(サンプル D の構造)に放熱フィンやその他の冷却構造を付与することで、 I_{eff} が 1 kA の PCL を開発する予定である。

参考文献

1. S. Yamaguchi et al; Physica C Vol. 471 (2010) p.1300
2. T. Kawahara et al; Physics Procedia Vol. 27 (2012) p.380
3. H. Sugane et al; Physics Procedia Vol. 27 (2012) p.384
4. K. Sato et al; Cryogenics Vol. 41 (2001) p.497

シート状自励振動式ヒートパイプ(OHP)の室温動作可視化実験

Visible experiments of the flat-plate oscillating heat pipe (OHP) at room temperature

三戸 利行, 夏目 恭平, 柳 長門, 田村 仁 (NIFS)
 MITO Toshiyuki, NATSUME Kyohei, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS)
 e-mail: mito@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超電導 (HTS) マグネットの冷却特性を改善するため、巻線内に組込可能なシート状の低温動作自励振動式ヒートパイプ (OHP: Oscillating Heat Pipe) の開発研究を行っている。2 枚のステンレス板にヒートパイプ流路となる溝をレーザー加工し、その上下面に板を積層して 4 枚の板を真空ロウ付けすることで立体的な流路を構成する薄いシート形状の OHP を開発した。低温での動作実験に先立ち、ヒートパイプ上面を透明なプラスチック板に置き換えた OHP を製作し、エタノールを作業流体とした室温での OHP 動作可視化実験を行った。マグネットへの組込みを想定し、複数の OHP を作業流体を補給するバッファタンクに並列接続した配置で自励振動の発生と OHP としての動作を確認した。

2. シート状自励振動式ヒートパイプ(OHP)

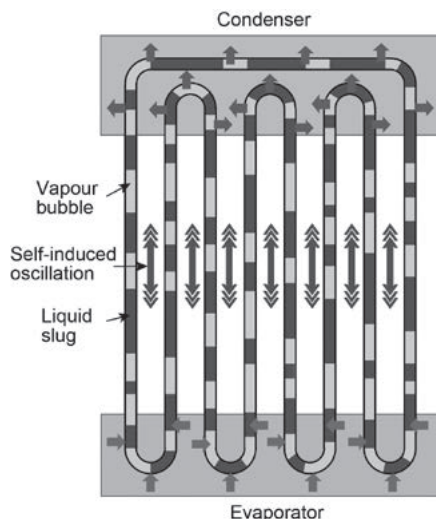


Fig. 1 Schematic representation of OHP.

OHP の動作原理を Fig.1 に示す。気液2相の作動流体で満たされたヒートパイプ流路は、加熱端(Evaporator)と冷却端(Condenser)の間を繰り返し折り返した構造をしている。加熱端と冷却端の温度差によって、気相と液相が膨張、収縮することにより自励振動が発生し、縞模様の気液混合相が移動することで加熱端から冷却端に素早く効率的に熱を輸送することができる。Fig.2 に4枚の板を積層したシート状 OHP の構造を示す。中央の上下2枚の板には、互い違いの位置となるヒートパイプ流路が溝加工され、端部で流路が繋がるように溝が切られている。2枚を重ねることにより、上側から下側、下側から上側へと繰り返し折り返す、ヒートパイプ流路が構成される。

3. OHP 動作可視化実験

Fig.3 に巻線内に OHP を組み込んだ HTS マグネットの設計例を示す。HTS 線材をダブルパンケーキ巻きしたコイルの両側に OHP を埋め込んだ冷却パネルを挟み込む。巻線内で発生した熱は OHP により、巻線の内外半径側に速やかに伝えられる。巻線の内外半径側には、冷凍機からの冷媒を循環する冷却流路が設けられており、ここで OHP の両端が冷却される。OHP のマグネット組込状態での動作特性を確認するため、低温での実証実験に先立ち、室温での動作可視化実験を行った。可視化実験装置の構成を Fig. 4 に示す。講演では撮影した動画も用いて可視化実験の様子を紹介する。

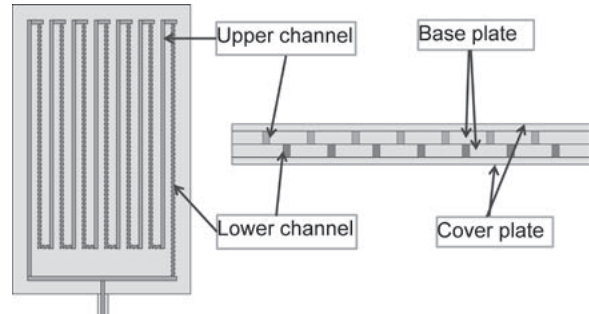


Fig. 2 Design concept of a flat-plate OHP.

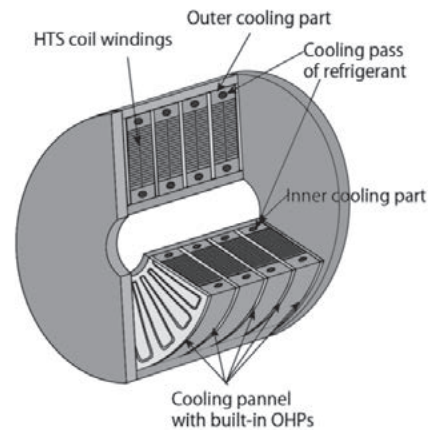


Fig. 3 Design of HTS magnets using the built-in OHP

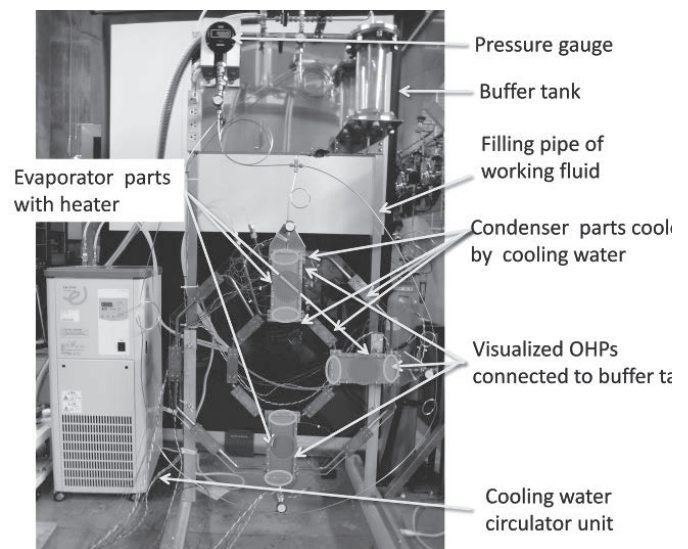


Fig. 4 Experimental setup to visualize the operation of OHPs

参考文献

- [1] 夏目恭平他, 「低温動作振動式ヒートパイプの開発」, 2011年度秋季低温工学・超伝導学会講演概要集, p. 152.
- [2] 夏目恭平他, 「シート状自励振動式ヒートパイプ (OHP) の低温動作実験」, 2012年度秋季低温工学・超伝導学会, 1B-a05

シート状自励振動式ヒートパイプ(OHP)の低温動作実験

Cryogenic experiments of the sheet-shaped oscillating heat pipe (OHP)

夏目 恭平, 三戸 利行, 柳 長門, 田村 仁(NIFS)

NATSUME Kyohei, MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS)

E-mail: natsume@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超電導(HTS)マグネットの冷却特性を改善するため、巻線内に組込可能なシート状の低温動作自励振動式ヒートパイプ(OHP: Oscillating Heat Pipe)の開発研究を行っている^{1), 2)}。2枚のステンレス板にヒートパイプ流路となる溝をレーザー加工し、その上下面に板を積層して4枚の板全体を真空ロウ付けすることで立体的な流路を構成する薄いシート形状のOHPを開発した。室温での動作可視化実験³⁾の成功を受けて、クライオスタットとGM冷凍機を用いて低温動作実験を行った。水素、ネオン、窒素をそれぞれ作動流体としてOHPの動作を確認し、実効的な熱伝導率を測定することによって、高い熱輸送特性を持つことがわかった。

2. 自励振動式ヒートパイプ(OHP)

OHPは細いパイプを何重にも折り曲げた形状の流路を持つ熱輸送機器である。OHPに作動流体を気液混合状態になるよう適量封入し、両端を加熱・冷却すると、蒸発・凝縮を伴う圧力変化が振動流を駆動し、潜熱と顕熱によって熱を素早く輸送する³⁾。

3. 実験方法

Fig. 1に実験装置の概略図を示す。OHPをクライオスタット真空容器内に設置し、OHPに冷凍機とフォイルヒーターを接続することによって、OHPの断熱及び冷却と加熱を行う。各所に温度計や圧力系を設置することによって、作動流体の封入量を調整し、OHPの動作を確認する。ヒーター入熱量及び加熱部と冷却部の温度差を測定することによって、OHPの実効的な熱伝導率を求めた。

4. 実験結果と考察

Fig. 2に水素を用いたシート状OHPの低温動作実験のデータを示す。上から凝縮部(冷却部)と蒸発部(加熱部)の温度、その凝縮部と蒸発部との温度差、ヒーター入熱量をそれぞれ表している。ヒーター入熱量に伴い温度は上昇するが、各部の温度差には大きな変化が無いことがわかる。グラフ後半(5000 s以降)は冷凍機側の温度調整を誤ったことにより、凝縮部の温度が下がり過ぎ、熱輸送特性が低下している。

Table 1にOHP低温動作実験の結果をまとめた。作動流体として水素、ネオン、窒素を用いた。運転温度はそれぞれ18-24 K (H₂), 26-32 K (Ne), 79-84 K (N₂)となった。作動流体を変えることによって、幅広い温度域で使用することが出来る。液体封入率はおよそ20-60%の間で動作を確認した。本実験では、バッファタンクの容量と安全弁の限界圧力による制限によって、比較的低い液体封入率でしか実験を行っていないので、実際はより多くの作動流体を封入しても動作すると考えられる。得られた実効的な熱伝導率は850-3500 W/m·Kになった。これらの値は、超伝導体の安定化材として用いられる純度の高い銅やアルミニウムの熱伝導率と比べ、同程度かやや高い値である。但し、シート状OHPはステンレススティール製なので、銅やアルミニウムに比べると、機械的強度が高いという利点がある。さらに、OHPは原則的に入熱量が大きい程、熱伝導率が高くなる傾向がある。従って、シート状OHPを適用することによって、冷却安定性と剛性の観点から高温超電導マグネットの高性能化が期待出来る。

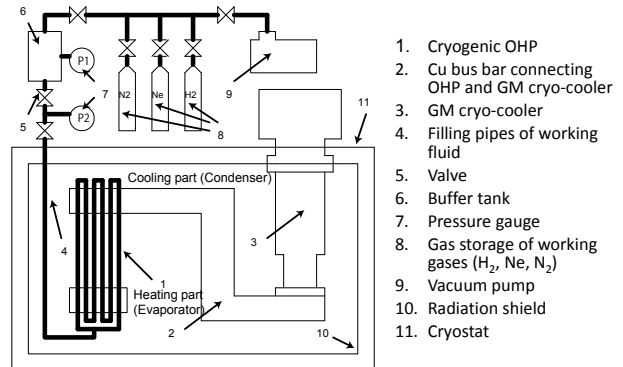


Fig. 1 Schematic detail of the cryogenic experiment

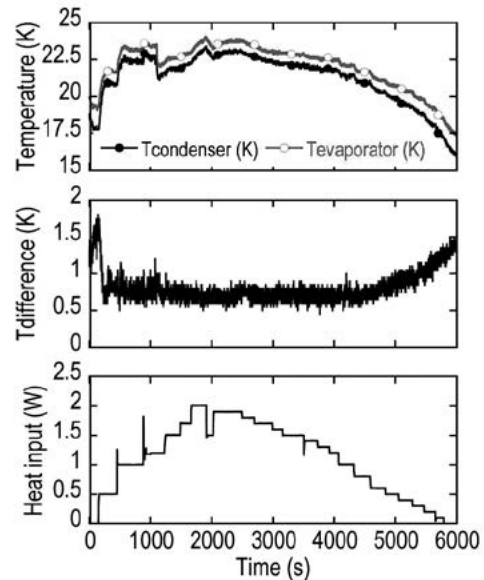
Fig. 2 Data of a cryogenic experiment for H₂ as working fluid

Table 1 Results of Experiments of the sheet-shaped cryogenic OHP

| Working fluid | Operating temperature (K) | Filling rate of liquid (%) | Effective thermal conductivity (W/m·K) |
|----------------|---------------------------|----------------------------|--|
| H ₂ | 18 - 24 | 23 - 60 | ~850 |
| Ne | 26 - 32 | 23 - 53 | ~2500 |
| N ₂ | 79 - 84 | 22 - 45 | ~3500 |

参考文献

1. K. NATSUME et al., *Abstract of CSSJ Conference*, Vol. **84**, (2011), p. 132, 2P-p13
2. K. NATSUME et al., *Abstract of CSSJ Conference*, Vol. **85**, (2011), p. 152, 2P-p35
3. T. MITO et al., *Abstract of CSSJ Conference*, Vol. **86**, (2012), 1B-a04

Y系線材を用いたパンケーキ型コイルに加わる過渡熱応力分布の解析

Analysis of transient thermal stress distribution in pancake-coil with coated conductor

高橋 利典, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(八戸工大)
 TAKAHASHI Toshinori, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University);
 HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute of Technology)
 E-mail: takatoshi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Y系線材は高磁界中で高い電流密度を有するので、SMESやマグネット等への応用が期待されている。しかしY系線材を用いたコイルをエポキシ含浸し使用する場合、コイル特性が劣化するという問題が生じている[1]。これは冷却時や昇温時の熱応力による超電導層の剥離が原因と考えられる。コイルを室温から液体窒素温度(77K)に冷却した場合、冷却での定常状態の最大熱応力は+数MPa程度となり、剥離が起きることは考えにくい。そこで、コイルを室温から液体窒素温度まで冷却した場合と、液体窒素温度から室温まで昇温した場合についてコイル内部の過渡的な温度分布と応力分布について解析を行った。

2. 解析条件

Fig.1(a)にテープ断面を、Fig.1(b)にコイル寸法を示す。絶縁被覆したsuperpower社製のYBCO超電導線(SCS4050)を用いたシングルパンケーキコイルを解析モデルとして用いた。巻枠は厚み10mmのGFRP円筒、巻数を50ターンとし、巻線部の内径を60mm、外径を80mmとした。解析は温度、応力分布ともに三次元有限要素法を用いた。その際材料の比熱、熱伝達率の温度依存性を考慮に入れた[2][3]。温度については室温を300K、液体窒素温度を77Kとし、コイル表面を冷却、昇温温度に固定した場合について非線形非定常熱伝導解析を行った。

3. 解析結果

室温から液体窒素温度に冷却した場合のコイル内の温度分布をFig.2に、応力分布の解析結果をFig.3に示す。温度分布についてみると、GFRP部に特に熱が残っており、巻線部との間に明確な温度差があることが分かる。応力分布については、冷却後の定常状態と冷却途中の状態とは値が大きく異なり、応力値は冷却開始時から大きくなり始め、1secの境に小さくなる。最内層で径方向応力は最大となり、特に1secの時コイル最内層で約-50MPaの応力が発生している。しかしこの応力は圧縮応力であるため、これが剥離に寄与するとは考えにくい。また、一方、液体窒素温度から室温に昇温した場合のコイル内の温度分布と応力分布の解析結果をそれぞれFig.4, 5に示す。Fig.5をみると、最内層で1secの時約+55MPaとなり、冷却定常状態に比べ大きな値となった。この値はYBCO層の剥離する応力の値(+10~+20MPa[4]、または>+40MPa[5])を超えており、剥離に寄与する可能性が高い。過渡的な熱応力は冷却・昇温されているコイル表面と、熱が残っているコイル内部との温度差が主な原因と考えられるため、特にコイルを昇温する際に表面の急激な温度上昇を抑制することが重要となる。

参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470(2010) pp.674-677
2. 低温工学協会: 超電導・低温工学ハンドブック, オーム社
3. 熱物性ハンドブック編集委員会: 熱物性ハンドブック, 養賢堂
4. D.C. van der Laan, et al.: Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 765.
5. Y. Xie, et al.: Applied Superconductivity Conference, Washington DC., USA, Aug. 2, 2010

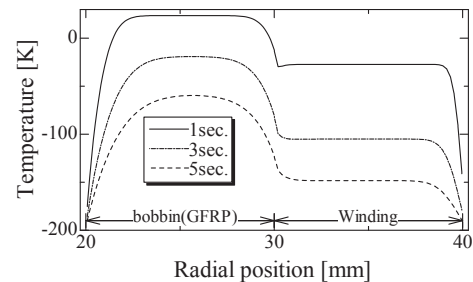
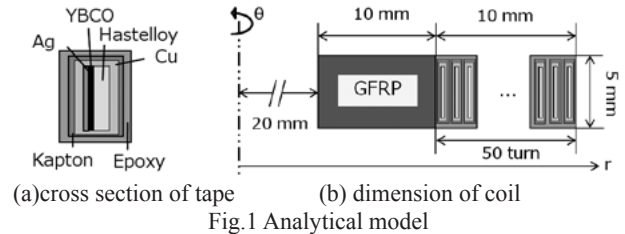


Fig.2 Temperature distribution within a coil (cool-down process)

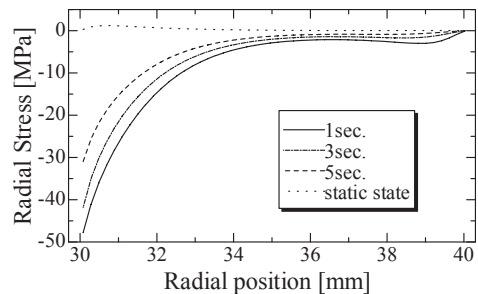


Fig.3 Radial stress distribution within YBCO layers (cool-down process)

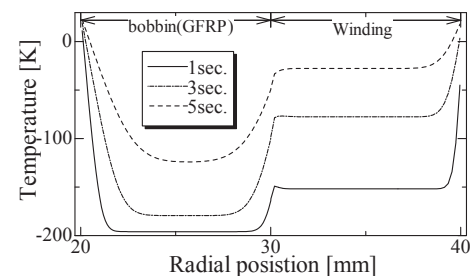


Fig.4 Temperature distribution within a coil (warm-up process)

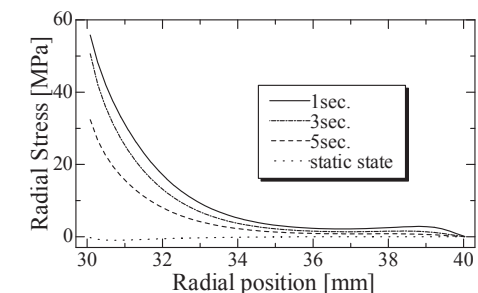


Fig.5 Radial stress distribution within YBCO layers (warm-up process)

パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造(1)-新コイル構造の提案-

A new stress control structure for high strength pancake coil wound with ReBCO conductors

-Proposal of new stress control structure-

長屋 重夫、平野 直樹、渡部 智則(中部電力); 淡路 智(東北大学); 石山 敦士(早稲田大学)
 NAGAYA Shigeo, HIRANO Naoki, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power);
 AWAJI Satoshi, (Tohoku Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)
 E-mail: Nagaya.Shigeo@chuden.co.jp

1. はじめに

超電導コイルの高磁場応用には、電磁力に対する耐性の高いコイル構造が必須である。今回、Y系超電導線材の強度のみに依存するのではなく、コイルを構成する枠や側板によって、作用する電磁力(フープ力)をコイル構造体全体で支えるパンケーキコイル構造を開発した。Yoroi-coil と称する、コイル内部の応力を制御する新コイル構造を報告する。また、超電導特性を低下させない低温で硬化が可能な液状樹脂を用い、Y系超電導線材のはく離を抑制し、曲げに強いフレキシブルな超電導線材被覆技術を開発したので報告する。

2. 液状樹脂による絶縁被覆

ワニス被覆は硬化させる処理温度が高く、超電導特性を低下させる恐れがあるため、Y系超電導線材の絶縁には、樹脂テープを巻きつける手法が採られている。この手法は、コイルなどの曲げ加工の際に、樹脂テープが切れたり偏ったりして絶縁性能が低下したり、線材間に不均一な応力が発生する可能性などが問題で、最終的にはエポキシ等の樹脂含浸を行って一体化することで対応する必要がある。しかし、含浸で一体化すると線材間に発生する半径方向の応力によって、線材内部の層間剥離を起こす問題が発生していた。今回、超電導特性を低下させない低温で硬化が可能な液状樹脂を超電導線材被覆に適用し、フレキシブルな絶縁被覆を形成することで、エポキシ含浸を不要とした。図1に絶縁被覆を施したY系超電導線材の断面を示す。液状変成ポリアミドと称するこの樹脂の物性は、商用周波数破壊電圧(ACBD)が10 kV / 25 μm (厚)で従来の樹脂テープと同等であり、熱伝導率は約2 W / K mで、樹脂テープの10倍程度の高い熱伝導率を有するので、伝導冷却によるコイル应用到に適用することも可能な絶縁である。この塗布絶縁を11 m長のY系超電導線材に施し、シングルパンケーキコイルを作製し、パラフィンによるモールドを併せて実施し、プロセスごとにコイルの通電特性を評価した。図2に示すように、超電導特性に一切の劣化は認められず、この絶縁手法が有効であることが確認された。

3. 構造強化高強度コイル(Yoroi-coil)

超電導コイルでは、高電流密度化して強磁場を発生させることができるが、線材には、これを伸ばそうとする強い電磁力(フープ力)が働く。コイルに作用する電磁力は、コイルの発生磁場(B)と電流密度(J)とコイル径(R)の積($B \times J \times R$)が大きいほど強く作用するため、大型コイルでは作用する応

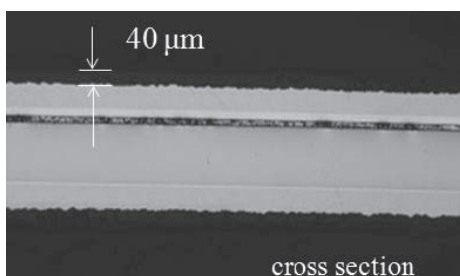


Fig.1 Cross-section of coated conductor insulated by liquid resin of low-temperature-curable-polyamide

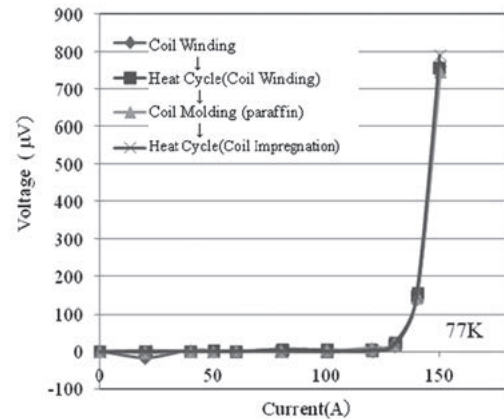


Fig. 2 $I-V$ characteristics of SP coil measured at each

力がコイルの強度を超えてコイルの特性低下や破壊が生じないように、電流密度を低下させるため通電電流を抑制し、超電導線材の通電特性を十分に発揮することが出来ないという問題があった。Y系超電導線材は、ハステロイのような高強度金属を基板として使用することで、線材の機械強度が高く、線材自体が強い電磁応力を支えるコイル構造が実現でき、これまでの超電導コイルよりもはるかに強い電磁応力に耐えることが可能となると考えられる。しかし、Y系超電導コイルでは、上記の線材の剥離問題もあり、超電導線材自体の引張強度を十分活用することはできなかった。

今回、(Yoroi-coil : Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil)と称するコイル化手法を開発した。この手法は、超電導線材に作用する電磁力を図3のように超電導線材だけでなく、コイルの面方向の側板で支えることによって、超電導線材の強度の限界を超える電磁力に耐えることを可能にする。超電導線材の強度のみに頼るのではなく、側板の「よろい」を用いてコイル構造全体で応力を支えるのである。この新構造コイルは大型の強磁場コイルほど超電導線材の通電特性を発揮できる構造である。

4. 謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部としてNEDOの委託により実施されたものである。

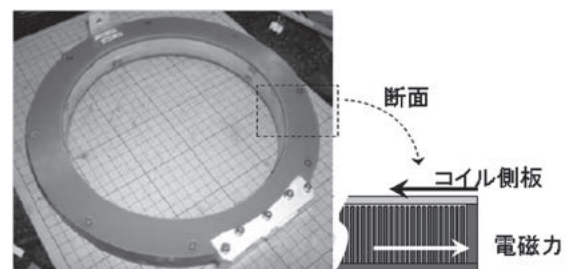


Fig.3 A schematic of supporting mechanism of "Yoroi-coil" structure against electromagnetic force

パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造(2)-検証実験-

A new stress control structure for high strength pancake coil wound with ReBCO conductors - Verification experiments -

渡部 智則、長屋 重夫、平野 直樹(中部電力); 淡路 智、小黑 英俊(東北大学); 石山 敦士(早稲田大学)
 WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo, HIRANO Naoki (Chubu Electric Power);
 AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)
 E-mail: Watanabe.Tomonori@chuden.co.jp

1. はじめに

電磁力に対する耐性の高いコイル構造は、高磁場応用において超電導線材の通電特性を発揮するために必要である。コイルに作用する電磁力をコイル構造体全体で支える構造を、Y系超電導線材を用いたダブルパンケーキコイルに適用し、フープ力の耐性を検証した。その結果、電磁力計算で1.7GPaの応力に対して、コイル全体で応力を支えることでコイル特性は低下せず、超電導特性を維持したという結果を得たので報告する。試験中の超電導線材の引張りひずみは最大0.4%程度で、Y系超電導線材の不可逆ひずみよりはるかに小さく、コイル構造体が応力を支えることで線材のひずみを制限していることが判明した。

2. 検証実験

液状変成ポリアミドを使用して絶縁被覆を施した(GD,Y)BCO超電導線材(IBAD+CVDプロセス)を用いて、Yoroi-coil(Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil)構造のダブルパンケーキ(DP)コイルを作製した。コイルの巻線部分は、内径219mm、外径240mm、高さ24mmで、ターン数は34ずつ上下のコイルに巻かれている。フレームと側板はG-FRP製で、フレーム内のコイル巻線はパラフィンでモールドしてある。図1にコイル外観を示す。液体ヘリウム浸漬によりこのDPコイルを4.2Kまで冷却し、8Tの外部磁界を印加後にコイル通電することで、フープ応力耐性を検証した。

3. 実験結果

図2にYoroi-coil構造のDPコイルを、外部磁界8Tにおいて繰り返し通電した際の、電極を除くコイル全体のI-V測定結果を示す。測定装置の上限である1,500Aまで通電を行ったところ、超電導コイルには誘導で発生した電圧のみが観察されコイルに抵抗が生じて発生した電圧は認められず、超電導状態を維持していたことが判る。このとき、コイル周方向に作用するフープ応力は、線材が完全に独立として磁界(B)×電流密度(J)×半径(R)で計算し、かつ実質的に応力を負担するハステロイのみに応力が負荷されたとすると最大で1.7GPaであった。この値は、Y系超電導線材の不可逆応力をはるかに超えているのである[1]。Yoroi-coil構造では超電導線材に作用する電磁力を超電導線材だけでなく、コイルの

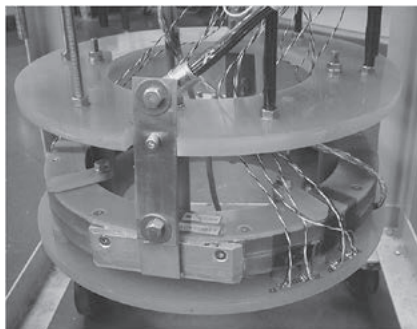


Fig.1 An outlook and specifications of the double-pancake (DP) coil with "Yoroi-coil structure.

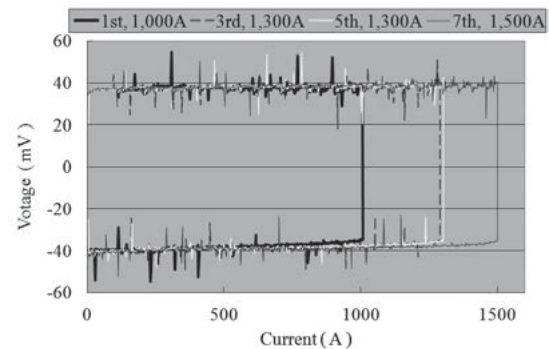


Fig. 2 I-V characteristics of the DP coil with "Yoroi-coil structure excited in 8 T magnetic field.

面方向の側板で支えることによって、高強度化を図っている。実際にコイル巻線中の超電導線材のひずみをひずみゲージで測定し、超電導線材のひずみがコイル構造によって低減されていることを確認した。図3に通電電流の変化による、DPコイル中の超電導線材のひずみの変化を測定した結果を示す。ここに示したのは、DPコイルの上部コイルで、最内層と最外層の超電導線材にそれぞれ3箇所ひずみゲージを設置して測定した結果である。超電導線材の最大ひずみは約0.4%であった。Y系超電導線材の限界ひずみは引っ張り試験で0.7%程度なので、さらに大きな応力でも耐えられる可能性を示している。また、0.4%程度のひずみなので、超電導線材には最大で500~800MPa [1]の応力が加わっていることとなり、コイル構造によって超電導線材に作用する応力が低減されていることが明らかになった。

4. 謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部としてNEDOの委託により実施されたものである。

参考文献

1. M. Sugano, et al.: Journal of CSJ, Vol. 46, No. 5 (2011) p.220

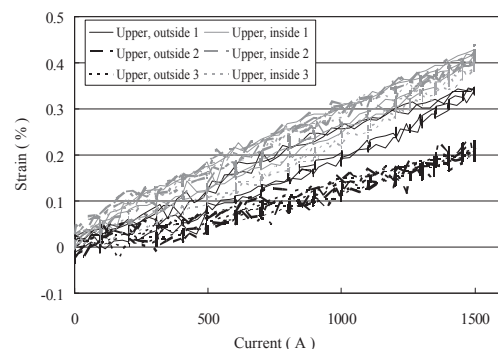


Fig.3 Current dependence of the strain of superconducting wire in DP coil armature with "Yoroi-coil structure

パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造(3)-応力/ひずみ解析

A new stress control structure for high strength pancake coil wound with REBCO conductors (3) -Stress/strain analysis-

淡路 智, 小黒英俊, 渡辺和雄(東北大金研); 渡部智則, 平野直樹, 長屋重夫(中部電力); 石山敦士(早稲田大学)
AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); WATANABE Tomonori, HIRANO Naoki, NAGAYA
Shigeo (Chubu Elect. Power co ltd); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)
E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE; 希土類)コート線材(Coated conductor)は, その高い機械特性から, 超伝導磁気エネルギー貯蔵(SMES)や強磁場マグネット応用が期待されている。これまでの研究では, ハステロイあたりの応力で 1.3GPa 程度の高い引っ張り応力(すなわち hoop 応力)が限界応力とされている。しかし, その応力限界をさらに向上することができれば, より高い電流密度でマグネット設計が可能となり, よりコンパクトな超伝導マグネットを実現できる可能性がある。我々は, REBCO コイルを外枠と上下の円板で覆うことで, コイルを補強する手法を開発した。本研究では, 実際に大きな電磁力を印加した場合のコイル変形挙動を実測し, その補強効果を実証した結果について, 主に歪と応力分布の観点から議論する。

2. 実験方法

テストコイルは, 10mm 幅の CVD 法-(Y,Gd)BCO テープを用いて作製した, 内径 219mm 外径 240mm のダブルパンケーキコイルである。このコイルは補強として最外層に肉厚 10mm の FRP 製リングと上下に FRP 製円板で完全に覆ってある。コイルには最外層及び最内層のテープ表面に歪ゲージを 3 等配で取り付けることで, コイルの変形挙動を測定した。Hoop 試験は, 東北大学金属材料研究所強磁場センターの無冷媒大口径超伝導マグネット内部の大型クライオスタットに挿入し, 液体ヘリウム中バックアップ磁場 8T 中で行った。最大の通電電流は 1500A である。

3. 結果と議論

8T のバックアップ磁場中でコイルに最大 1500A までの通電を行ったが, 磁束フローによる電圧は観測されなかった。このときの通電電流に対する内外層の代表的な歪み測定結果を図 1 に示す。測定結果から最内層で 0.4-0.5%, 最外層で 0.2-0.3% の歪みが, 1500A の通電時に誘起されたことが分かる。一方で, 最大通電電流 1500A における, コイル内部の応力分布を BJR で計算した結果, コイル内層で約 1.7GPa, 最外層で約 1.2GPa の応力が電磁力によって誘起される。定性的には, コイル内層よりも外層の方が, 応力が低くなる点で測定された歪みの結果と一致するが, 定量的にはハステロイのヤング率 200GPa を仮定しても全く合わない。すなわち, 印加している電磁力から想定される歪みの約半分程度しか, コイルが変形していない計算となる。残りの電磁力をコイル外側のリングと上下に取り付けた円板で支持しているとすると, 以下に示すように概ね計算と合うことが分かった。図 2 にコイル内部, 外側リング, 支持円板が分担する応力分布を示した。コイル内部の電磁力は Wilson の式により[1], 外周リング及び円板の内部応力分布は円筒圧力容器のモデルで計算を行った。また, 測定された歪みからコイルの約半分の応力が外側リングと円板で支持されていると仮定した。具体的には, 外側リングの内壁に約 24MPa の応力が, コイルから誘起されるとした。なお, 図中のコイル内部応力のみがハステロイあたりの応力に変換し, それ以外の応力は空間平均応力となっている。また, 外側リングと円板は最外周で拘束されていると仮定した。得られた計算結果から, コイルには内層で約 700MPa, 外層

で約 600MPa の応力となり, 外側リングと円板で残りの応力を分担していることが分かった。このコイル構造は, 肉厚の圧力容器と同様となり, 結果としてコイル外径が大きいほど, より大きな電磁力を受け持つことが可能となること, さらに計算により予想することができる。詳細は当日報告する。

なお, 本研究は「イットリウム系超伝導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施されたものである。

参考文献

1. M. N. Wilson, "Superconducting Magnets," Oxford Science Publications, Oxford, 1982, pp. 42-46.

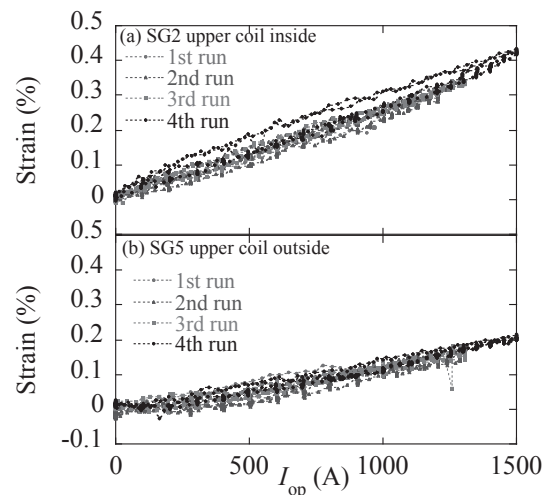


Fig. 1 Strains on (a) the inner and (b) the outer surfaces of the upper pancake coil as a function of operation current in a background field of 8 T.

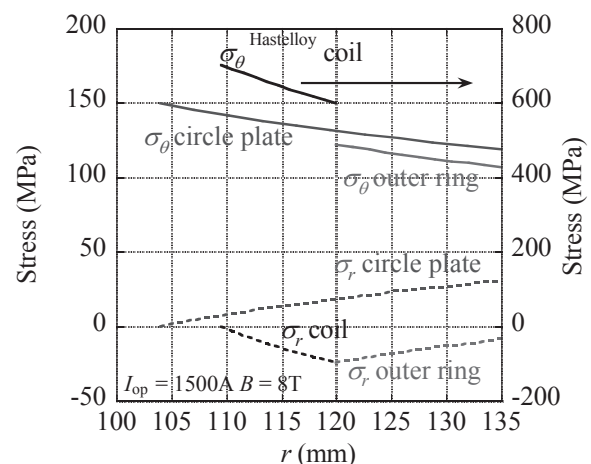


Fig. 2 Calculated stress distribution at 8 T and $I_{op}=1500$ A.

パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造(4)-3次元数値構造解析-
 A new stress control structure for high strength pancake coil wound with ReBCO conductors
 -3-D Numerical Structural Analyses -

王 旭東, 石山 敦士, 辻村 拓弥, 勝又 鴨久, 山川 宏(早大); 淡路 智(東北大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi, TUJIMURA Takuya, KTSUMATA Nobuhisa, YAMAKAWA Hiroshi (Waseda University);
 AWAJI Satoshi (Tohoku University); WATANABE Tomonori, Nagaya Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

超電導コイルの高磁場応用には、電磁力に対する耐性の高いコイル構造が必須である。筆者らは、Y系超電導線材の強度のみに依存するのではなく、コイルを構成する枠や側板によって、作用する電磁力(フープ力)をコイル構造体全体で支える新しいパンケーキコイル構造(Yoroi-coilと称する)を開発した[1-3]。また、Yoroi-coilを用いて実験した結果、1500 A通電による最大電磁力(BJR計算)が1.7 GPaに達してもコイル I_c の劣化が確認されなかった。そこで本発表では、3次元数値構造解析に基づいて、上記実験結果に対して最大電磁力におけるコイルおよび支持構造体内の応力分布の評価を行ったので、その結果について報告する。なお、コイルを含めた解析結果は学会発表時に報告する。

2. 数値解析

汎用非線形構造解析ソルバーMarcを用いて3次元有限要素解析を行った。コイル構造とGFRP支持構造の解析モデルをそれぞれFig. 1とFig. 2に示す。コイルとGFRP支持枠の諸元をTable 1に示す。コイルの支持枠は大きく5つのパーツで構成されており、上下プレート、中央プレート、中央リングとなる。解析モデルは全体の1/8(円周1/4, 断面1/2)として、4面体要素で構成した。支持枠の隣接面は対称境界とし、コイルを挟む上下のプレートの最内周を滑動端とした。GFRP支持枠は接着構造とネジ止め構造の2種類を想定し、ネジ(SUS304)は円柱状のソリッド要素としてM3の皿穴を2か所に設け、支持枠間の力の伝達はボルト及び接触のみによって荷重の伝達を行うよう定義した。解析に用いた物性値をTable 2に示す。Yoroi-coilを用いた実験結果において、コイル内層及び外層のひずみが0.3-0.4%となり、周方向のローレンツ力平均7.4 kN/mから中央リングの内周に約24 MPaの外力が加わると概算できる[2, 3]。この結果に基づき、本解析は中央リングの内周に24 MPaの外力を加得て行った。

3. 結果とまとめ

接着構造とネジ止め構造の周方向応力分布の解析結果をそれぞれFig. 3とFig. 4に示す。両構造の周方向応力は、支持枠の最外周で約80 MPaとなり、上側プレートと中央プレートの最内周で約120 MPaとなった。また、ネジ止め構造はネジ穴周辺で500 MPa以上の応力集中が発生する結果となった。よって、コイルから発生した電磁力は支持枠の上下と中央プレートにも伝わり、中央リングのみでなく支持枠全体が分担する結果となった。そのため電磁力(BJR計算)が1.7 GPaに達してもコイル I_c の劣化が確認されなかったと考えられる。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部としてNEDOの委託により実施したものである。

参考文献

1. S. Nagaya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) 1B-a07
2. T. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) 1B-a08
3. S. Awaji, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) 1B-a09

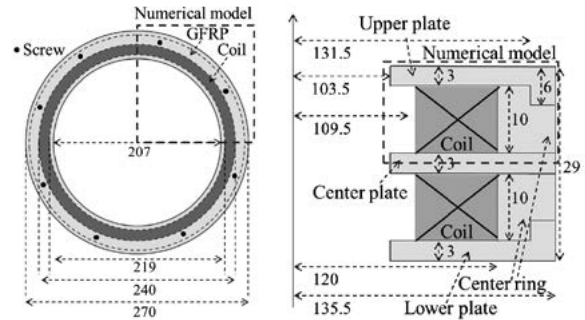


Fig. 1 Schematic illustration of YBCO pancake coil

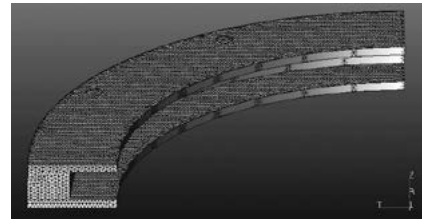


Fig. 2 Mesh structure

Table 1 YBCO pancake coil specifications

| | |
|--------------------------|------------|
| Upper/Lower plate (GFRP) | |
| Inner/Outer diameter | 207/270 mm |
| Center ring (GFRP) | |
| Inner/Outer diameter | 240/270 mm |
| Coil | |
| Insulated wire width | 10 mm |
| Inner/Outer diameter | 219/240 mm |

Table 2 Material properties

| Material | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio |
|----------------|-----------------------|-----------------|
| GFRP (G10) | 35.4 | 0.21 |
| SUS304 (Screw) | 193 | 0.3 |



Fig. 3 Circumferential stress of bonded structure



Fig. 4 Circumferential stress of screwed structure

Bi2223テープ線材を用いた3TMRI超電導マグネットの開発 -1.5Tでの撮像と3Tへの励磁試験結果- Development of 3T MRI magnet with Bi-2223 tape conductor -Results of imaging in 1.5 T and energizing up to 3 T-

川嶋 慎也、寺尾 泰昭、尾崎 修、一原 主税、長谷 隆司 (神戸製鋼) ; 北口 仁 (NIMS) ; 佐藤 謙一、小林 慎一 (住友電工) ;
中嶋 巖 (高島製作所) ; 大西 直樹 (アストロステージ) ; マイケル プール (クイーンズランド大) ;
武田 和行、浦山 慎一、福山 秀直 (京大)

KAWASHIMA Shinya, TERAO Yasuaki, OZAKI Osamu, ICHIRARA Chikara, HASE Takashi (Kobe Steel,Ltd.);

KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SATO Ken-ichi, KOBAYASHI Shin-ichi (Sumitomo); NAKAJIMA Iwao (Takashima Seisakusho); OONISHI Naoki (ASTRO STAGE); POOLE Michael (Univ. of Queensland); TAKEDA Kazuyuki, URAYAMA Shin-ichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

E-mail: kawashima.shinya@kobelco.com

1. はじめに

医療の充実に伴い、MRI装置の普及率が増加しているが、液体ヘリウムの枯渇や高騰の問題から、液体ヘリウムを用いない、冷凍機冷却型のMRI装置の開発が重要になっている。

我々は、Bi-2223テープ線材とGM冷凍機を用いた、20Kで運転が可能な脳用3T-MRIマグネットの開発を行っている。[1] これまでに、中心磁場1.5T下で5ppmの磁場均一度を達成し、MR画像の取得に成功した。また、3.0Tへの励磁試験を実施した。今回はこれらの結果について報告する。

2. マグネット設計と仕様

マグネットは、全長44.6kmのBiテープ線材を用いた5つのコイルから構成され、クライオ高さ1310mm、クライオ外径1290mm、室温ボア径500mmであり、GM冷凍機により20K以下に冷却して運転を行う。中心磁場は3Tで磁場均一度としては、250mm×200mmの空間内で5ppmを目指す。コイルの巻線は、スタイキャストを塗り込みながら行った。作製したマグネットの外観をFig. 1に示す。

3. 1.5Tでの磁場均一度補正と撮像結果

初期冷却には約570時間を要し、約7Kに到達した。冷却完了後、約92Aまで通電し、1.5Tの中心磁場を発生させた。NMRプローブにて磁場分布の均一度の計測を行った結果、Peak-to-Peakでおよそ894ppmであることが分かった。ここから、鉄板を用い磁場分布均一度の補正作業を実施し、計7回のシム調整で5ppmの均一度を達成した。その後、本プロジェクトで開発したRFコイルやスペクトロメータなどと組み合わせ、撮像試験を行った。その結果をFig. 2に示す。これらの結果から、高温超電導線材を用いたMRI装置でも従来の金属系線材のMRI装置と同等の性能を発揮できる可能性を確認した。

4. 3.0Tへの励磁結果

3.0Tへの励磁に対して、1.5T以上の未経験領域では、これまでより励磁速度を下げ、励磁を行った。励磁中、数mV～300mVの電圧スパイクが数十回発生したが、その後のコイル電圧や温度に大きな変化は見られず3.0Tに到達した。コイル温度も約14Kまでの上昇

であり、当初見積もり程度であることを確認した。この時点での、磁場均一度は、845ppmであり、1.5Tでのシム調整前と同等の値、分布が得られた(Fig. 3)。詳細は当日報告する。

参考文献

[1]寺尾ら:2011年度秋季低温工学超電導学会予稿集 2A-a03

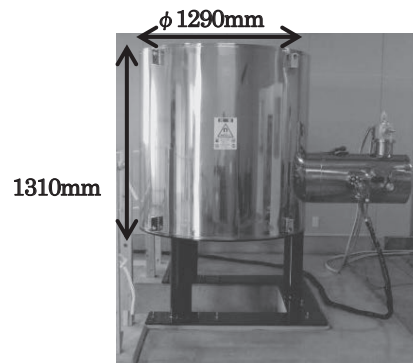


Fig. 1. Photograph of 3T MRI magnet.

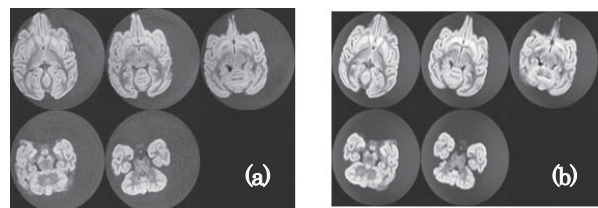


Fig. 2. Spin echo images of a Macaca brain scanned with (a) our HTS-MRI and (b) Siemens 1.5T Sonata

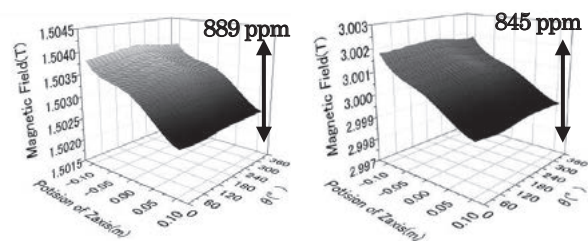


Fig. 3. The profile of magnetic field at (left) 1.5T and (right) 3.0T.

謝辞

この開発は、独立行政法人科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業(先端計測分析技術・機器開発)による成果である。

5 T 発生可能な単段冷凍機冷却によるイットリウム系高温超電導磁石 -磁石製作とその通電評価-

Five tesla class YBCO magnet cooled by single stage cryocooler -Magnet fabrication and excitation test-

水野 克俊, 小方 正文, 長嶋 賢 (鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI);

E-mail: mizuno59@rtri.or.jp

1. はじめに

希土類系高温超電導線材は磁場中で優れた通電特性を有するため超電導磁石への適用が期待されており、その一つにリニア応用が挙げられる。現行の車上超電導磁石の最大発生磁束密度は 5 T であり、これを希土類系線材によって高い運用温度条件で実現できれば磁石の大幅な小型化が可能になる。加えて、断熱構造も簡素化できるため超電導コイル-真空容器間の距離が短くなり、地上コイルへの鎖交磁束を増やせるので、その分、超電導磁石の起磁力を低減できる利点もある。

希土類系超電導線材のリニア応用が可能であることを実証するため、小型ながらも 5 T の磁束密度が発生可能な超電導磁石を製作した。本発表では超電導磁石の製作過程および励磁試験結果を報告する。

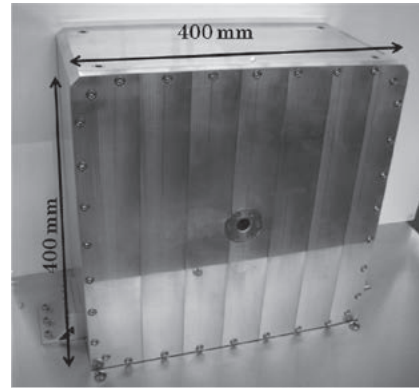


Fig.1 Overview of the 5 T class YBCO magnet

2. ユニットコイル製作および磁石構造

本超電導磁石では、ダブルパンケーキコイルを基本単位とし、積層することによって高磁場を得る。各ユニットコイルは銅ケースに収められており、含浸材にはパラフィンとシアノアクリレートを用いた[1]。SuperPower 社の線材を用いており、各ダブルパンケーキあたり約 200 m 使用している。液体窒素中での臨界電流試験結果を表 1 に示す。なお、ユニットコイルの臨界電流は $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ で評価した。低い n 値を示す #1, #6, #9 コイルはパラフィン含浸を行ったコイルであり、含浸過程で劣化が発生したとは考えにくく、臨界電流自体は他のコイルと比較しても遜色がないのでそのまま使用することとした。

磁石を構成する際には、10 個のユニットコイルが積層され、冷却は単段 GM 冷凍機によって行われる。単段冷凍機冷却のためふく射シールドを持たないクライオスタットの構造となっている。そのため、超電導コイル-クライオスタット外側表面までは 20 mm と極めて短い距離を実現している。その他磁石仕様を表 2 に示す。

3. 励磁試験結果

励磁試験においては、電流はステップ状に掃引され、ホールドした際にコイル電圧が不安定になったところで試験終了とした。45 K での励磁試験結果を図 2 に示す。10 積層したコイル全電圧及び各ユニットコイル電圧を Y 第一軸に、コイル中心磁束密度を Y 第二軸に示す。#6 および #9 コイルは通電初期から電圧が発生しており、ユニットコイル単体での低い n 値が影響している。最終的には 88 A 通電時にコイル中心磁束密度 5.5 T を達成した。88 A を越えると #8 および #10 コイルの電圧が不安定となったため通電を終了した。

励磁試験は複数の温度条件で行われ、コイル全電圧 2 mV で評価すると、40 K で 6.0 T, 45 K で 5.2 T, 50 K で 4.4 T の中心磁場となった。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.104

Table 1 Critical current and n-value of unit coils at 77K

| Unit coil | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Ic @77 K, s.f. | 28 | 29 | 32 | 35 | 36 | 35 | 32 | 30 | 29 | 28 |
| n-value | 12 | 24 | 26 | 28 | 21 | 6 | 23 | 27 | 14 | 27 |
| Impregnation Material* | P | P | P | P | C | P | C | C | P | C |

* C: Cyanoacrylate resin, P: Paraffin wax

Table 2 Specifications of the YBCO magnet

| | |
|--------------------------------------|---|
| Outer dimensions of the stacked coil | 155 mm × 155 mm × 103 mm |
| Total wire length | 2 km |
| Inductance | 1.78 H |
| Rating current | 80 A |
| Current density | 130 A/mm ² |
| Outer dimensions of the magnet | 400 mm × 400 mm × 200 mm (except cryocooler unit) |
| Cryocooler | Single stage GM cryocooler |
| Current lead capacity | 100 A |
| Center bore | φ 18 mm |

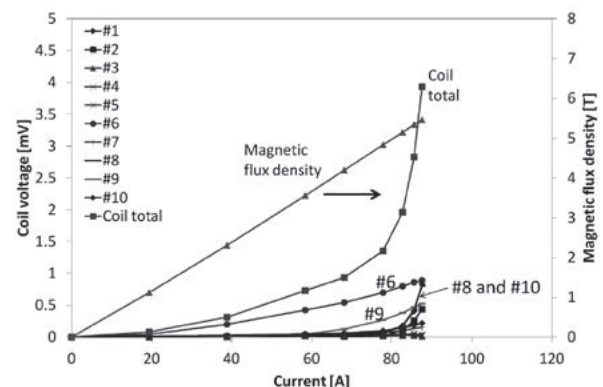


Fig.2 I-V characteristics and magnetic flux density of the stacked coil at 45 K.

50 K 以上の高温運転を目指した高温超電導マグネットに関する基礎検討

Fundamental study on HTS magnet aiming at high temperature operation above 50 K

中村 武恒, 高村 豊, 雨宮 尚之 (京都大学)

NAKAMURA Taketsune, TAKAMURA Yutaka, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

本研究では、運転温度 50 K 程度以上で 0.5~5 T 程度の磁界発生可能な高温超電導マグネット開発のために基礎検討を実施している。一般に、高温超電導材料の臨界電流特性は使用温度が低下するほど向上するが、一方で冷却系(冷凍機)の効率や冷却能力は温度が上昇するほど改善される。

本研究では、高温運転マグネット実現と設計技術の確立を目指し、温度 50 K~77 K における高温超電導マグネット(中心発生磁界: 0.5 T)の通電特性を検討した。なお、本報告では直流通電特性に着目して検討しており、例えば誘導現象に伴う磁化や磁束クリープ現象他は対象にしておらず、今後検討していく予定である。

2. 解析方法

解析に際しては、ビスマス系ならびにイットリウム系テープ材を対象とした。また、コイル形状としてはソレノイド形と複合形コイル[1]の2種類について検討した。

まず、短尺試料の電流輸送特性を実測し、所謂パーコレーション遷移モデル[2]を用いて定式化した。次に、強制通電時のコイル各部の磁界ベクトルを有限要素法によって計算し、局所的損失の加算としてコイル全体の発熱特性を解析した[3]。その際、制約条件としてコイルの総発熱(冷凍機の一般的冷却能力の50%)と最大電界(10 $\mu\text{V}/\text{m}$)について閾値を与えた。さらに、コイル中心から直径10mm、高さ10 mmの円柱内において20 ppm以内の均一度とするコイルを解析した。なお、上記通電特性は所謂磁束フロー現象に伴うものであり、熱励起的な磁束クリープ特性は考慮していない。さらに、イットリウム系テープ材については、線材の長手方向臨界電流特性にバラつきを与え、その影響を統計学的に検討した(詳細な解析方法は文献[4]を参照)。図1(ソレノイド形)と図2(複合形)には、それぞれ検討したコイル形状を示しており、 h ならびに d を変化させてコイル設計のための感度解析を実施した。

3. 結果と検討

図 3 には、解析によって得られた必要線材長の温度変化を示す。同図から明らかなように、温度 55 K 程度以上の高温領域では、Y 系マグネットの必要線材長が Bi 系に比較して形状によらず低く抑えられている。また、同マグネットにおいても、線材長が温度 67 K 程度から急激に増加している。

一方、Bi 系マグネットについては、ソレノイド形が複合形に比較して低い線材長に抑えられている。さらに、温度 55 K 程度以下の温度領域においては、Bi 系と Y 系であまり変わらない線材長で設計可能であった。

さらに、Y 系マグネットについて長手方向における臨界電流特性のバラつきを統計学的に考慮すると、温度 50~55 K 程度の温度領域について Bi 系と Y 系で必要線材長が殆ど変わらない結果が得られている。

解析方法や同結果の詳細については、紙面の都合により講演当日に報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No. 21360132)の支援を受けて行われた。

参考文献

1. Y. Iwasa: 'Case studies in superconducting magnets (second edition)', Springer (2009).
2. T. Kiss: Physica C, Vol.392 (2003) pp. 1053-1062.
3. K. Higashikawa, PhD thesis (Kyoto University) (2007)
4. T. Nakamura, et al.: The Papers of Technical Meeting on Appl. Supercond., IEE Japan (2007) pp. 13-17

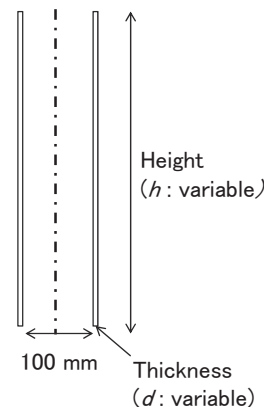


Fig.1 Schematic diagram of solenoid-type magnet.

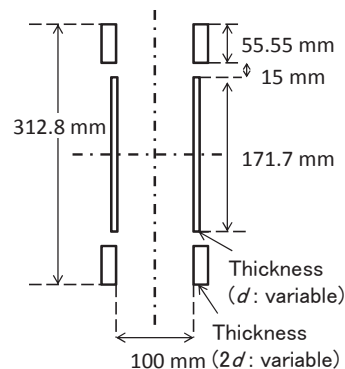


Fig.2 Schematic diagram of compound-type magnet.

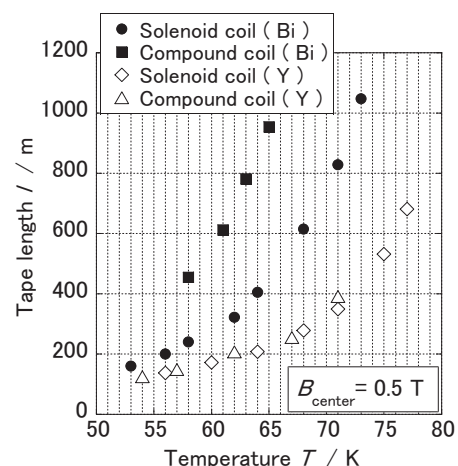


Fig.3 Analysis results of necessary tape length for HTS magnets that generates central magnetic field at 0.5 T.

高温超伝導 Roebel ケーブルと薄膜線材スタックの交流損失特性の実験的比較

Comparison of measured AC losses in HTS Roebel cable and those in stacks of coated conductors

米田 宇志, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 姜 哲男(IRL)

KOMEDA Takashi, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); JIANG Zhenan (IRL)

E-mail: komeda@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

大電流導体として転位構造を持つ高温超伝導Roebelケーブルが注目されている[1]。このRoebelケーブルを様々な機器に応用していくためには、その交流損失特性の把握が重要である。そこで、Roebelケーブル(360 mm長)、薄膜線材(130 mm長)、Roebelケーブルの素線(270 mm長)、薄膜線材3本を重ねた3×1線材スタック(200 mm長)、3×1線材スタックを二つ並べた3×2線材スタック(200 mm長)に外部交流磁界下で交流電流を通电したときの交流損失を測定し、比較検討した。

2. 実験結果

各サンプルの外部磁界なしの通电損失の比較をFig. 1に示した。Roebelケーブルでは各素線に並列に通电し、線材スタックでは各線材を直列に接続し、各線材に同じ電流を通电した。この図では、線材一本あたりの損失を線材一本の臨界電流の2乗で規格化した。Roebel素線と薄膜線材の損失は最も小さい。次に3×1線材スタックの損失が大きく、さらにRoebelケーブルと3×2線材スタックの損失はよく一致し、これらは3×1線材スタックの損失と比べて少し大きい。これは隣り合う線材に流れる電流による磁界のためであると考えられる。

各サンプルには通电せず、外部磁界をテープ面に対して垂直に印加した場合の磁化損失の比較をFig. 2に示した。この図では、線材一本あたりの損失を線材一本の臨界電流や線材幅によらないように規格化している。またE. H. BrandtとM. Indenbomの磁化損失の理論値も同時に示した。3×2線材スタックと3×1線材スタックの損失は最も小さい。外部からの磁束は、3×1線材スタックのエッジ、3×2線材スタックの内側と外側の両エッジから同様に侵入するので両者はよく一致している。一方、Roebelケーブルの損失はこれらの損失に比べて低磁界領域で大きくなっており、3×2線材スタックと比べてRoebelケーブルの内側のエッジからは外部からの磁束が侵入しづらくなっていると考えられる。これはRoebelケーブルの転位構造による効果であると考えられる。また、Roebel素線と薄膜線材の損失は最も大きい。

各サンプルに通电すると同時に外部磁界をテープ面に対して垂直に印加した場合の通电損失と磁化損失の和である全損失の比較をFig. 3に示した。この図では、Fig. 2と同様に規格化を行い、E. H. BrandtとM. Indenbomの磁化損失の理論値も同時に示した。またRoebelケーブルは負荷率が0.49のときの全損失、その他サンプルは負荷率が0.5のときの全損失を示している。Roebelケーブルと3×2線材スタックの全損失はほぼ一致した。

3. まとめ

Roebelケーブルと3×2線材スタックの外部磁界なしの通电損失はよく一致したが、通电電流なしの磁化損失はRoebelケーブルが3×2線材スタックに比べて低磁界領域で大きくなった。また、両者の全損失はほぼ一致した。

参考文献

1. W. Goldacker, et al.: Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 034003

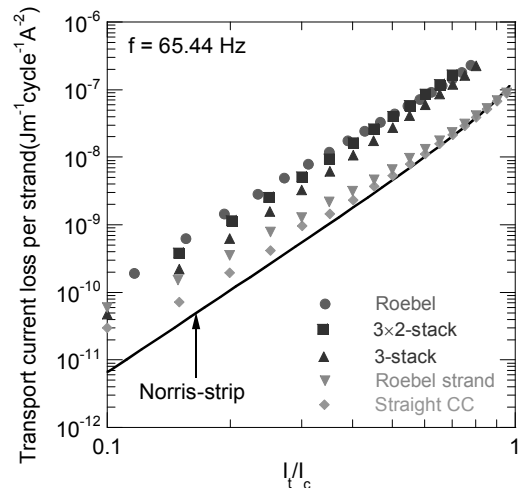


Fig. 1 Comparison of transport current loss

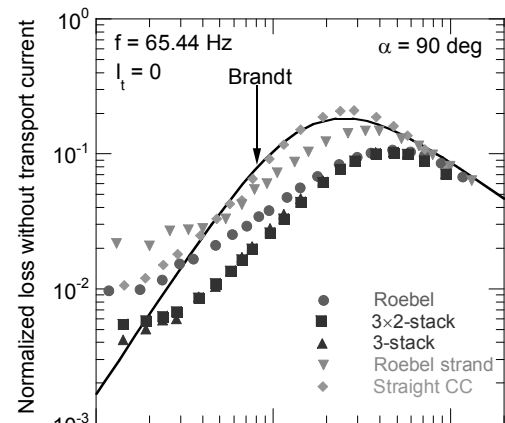


Fig. 2 Comparison of magnetization loss

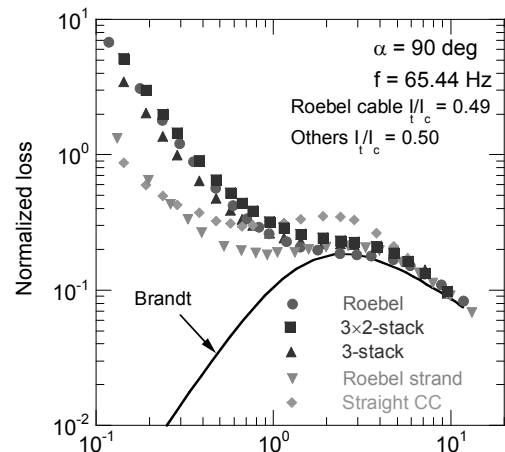


Fig. 3 Comparison of total AC loss

ポインティングベクトル法を用いた ソレノイドコイル形状 HTS 線材の斜め磁界印加時の交流損失測定

AC loss measurements in spread magnetic fields of HTS tapes formed into a solenoidal coil by using poynting's vector method

古川 匡玄, 向井 実樹成, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大・工)

FURUKAWA Masaharu, MUKAI Mikinari, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k4419353@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導線材で発生する交流損失は機器の効率を低減させる。このため、実機の条件下で交流損失を精度良く測定し、その特性を定量的に明らかにすることが重要である。そこで我々は、外部磁界と輸送電流について制約条件の少ないポインティングベクトル法を応用し、ソレノイドコイル形状にした長尺線材の交流損失測定装置を開発している[1]。これまでに、Bi-2223 多芯テープ線材の試料コイルに、交流輸送電流のみ、コイル軸方向成分の交流外部磁界のみ、そしてこれらを同時に印加した時の3つの場合において、実験と理論の両面から、本測定装置の有効性を実証した[2-3]。しかしながら、実際の条件では、テープ面に対し、斜めに印加される磁界の中で交流損失が発生している。したがって、本測定装置でも斜め磁界中で交流損失測定が行えることを実証する必要がある。そこで、コイル軸方向に対して斜めに傾いた斜め磁界空間における交流損失測定装置の開発を行い、斜め磁界中で測定が可能かどうかを検証した。

2. 測定原理と測定装置

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。ポインティングベクトルを線材周囲の複数の点で測定し、その値を線材周囲の面で面積積分することにより交流損失を求めている。

Fig. 1(a) に、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルの配置を示す。これらの測定素子は、サンプルコイルの内側と外側にそれぞれセットしている。本装置ではサンプルコイル軸方向に電磁界が対称であることから、サンプルコイル内側と外側でのみ測定を行えばよい。軸方向磁界のみ印加時は、Fig. 1(a)中に細線で示すように、内・外側の位置にのみ測定素子をセットしていた。斜め磁界中でも同様に、テープのエッジ部分のポインティングベクトルが無視できることを確かめるために、Fig. 1(a)に太線で示すように、サンプルコイルの上・下側にそれぞれ3対ずつピックアップコイルとポテンシャルリードのセットを追加した。このとき、ピックアップコイルはコイル径方向磁界を測定するように巻線している。

3. 斜め磁界発生マグネット

斜め磁界を発生させるために、Fig. 1(b)に示すような複合型銅マグネットを開発した。軸方向に一樣な磁界を発生させる銅マグネットの内部に2つの銅マグネットを内挿した構造となっている。内挿した2つの銅マグネットにはそれぞれ逆向きの電流を流し、軸方向磁界発生マグネットの中心よりやや上側で径方向の磁界を発生させている。このように、軸方向磁界と径方向磁界を重ね合わせることで斜め磁界を作り出している。この複合型銅マグネットは、磁界振幅 30 mT_{0-p}、軸方向に対する傾き(角度)10~30度まで発生できる。一様度は、交流外部斜め磁界の大きさ、角度ともに±5%未満である。

Fig. 1(a) 内に実線の四角で囲った領域が、測定空間である。この測定空間、軸方向に 16 mm、径方向に 1 mm であり、

実際に本マグネットを作製して発生磁場を実測した結果、設計通りの磁界が発生していることを確かめた。

4. まとめ

ポインティングベクトル法を用いたコイル形状長尺線材の交流損失測定装置を、斜め磁界が印加できるように改造し、設計通りの性能を有していることを確かめた。また、本測定装置を用いて、軸方向磁界印加時の交流損失測定を行った結果、以前の装置の結果と変わらないことを確認した。

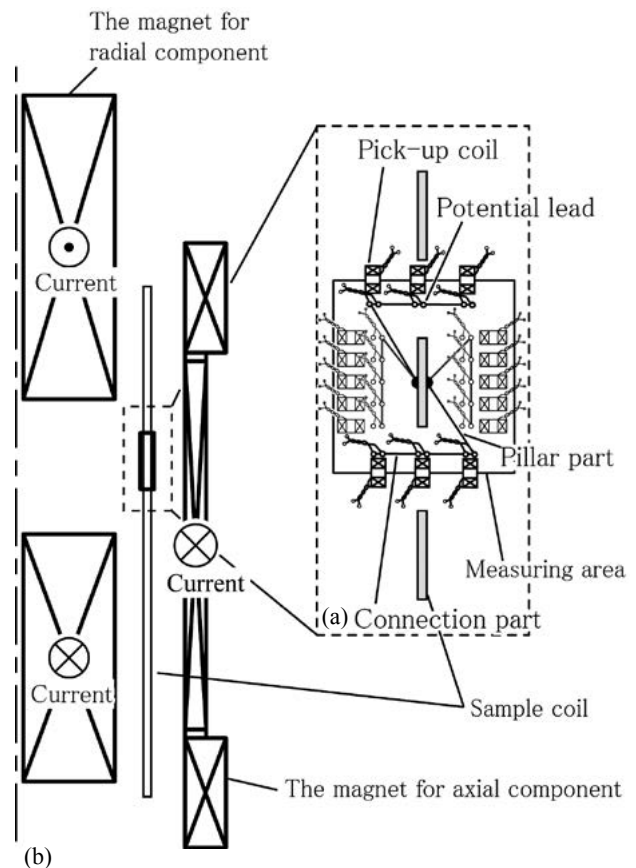


Fig.1 (a) Magnetic fields in measuring area and arrays of both potential leads and pick-up coils, (b) arrangement of a complex copper magnet system to produce spread magnetic fields.

参考文献

- [1] Y. Kasahara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 1078
- [2] Y. Haeyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84(2011) P. 38
- [3] M. Mukai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) P. 156

ピックアップコイル群による 5mm 幅 10 分割マルチフィラメント HTS 線材の電流分布測定

Measurement of AC current distributions in multifilamentary HTS tapes by a pickup coil array

平山 斉, 岩崎 翔太, 水野 正浩, 川畑 秋馬, 川越 明史, 住吉 文夫(鹿児島大); 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC-SRL)
 HIRAYAMA Tadashi, IWASAKI Shota, MIZUNO Masahiro, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi,
 SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
 E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では、低損失加工された HTS 線材内の電流分布を定量的に評価できる測定法を確立することを目的としている。本測定法では、極小サイズのピックアップコイル群を試料線材に直接貼り付けて、試料線材表面付近の磁場分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を求める。これまでに 5 mm 幅 5 分割マルチフィラメント HTS 線材に対して、本測定法により測定誤差 10 % 以内でフィラメント電流が得られることを報告した。また、さらなる低損失化のために 10 分割した線材も開発されており、これに対しても測定精度の評価を行ってきた[1]。今回は 5 mm 幅 10 分割マルチフィラメント HTS 線材に対し、コイル群を構成するピックアップコイルの細線化を行い、電流分布算出精度の向上を試みた。

2. 磁場分布測定用ピックアップコイル群

フィラメント内部に電流分布がある 5 mm 幅 10 分割マルチフィラメント HTS 線材のフィラメント電流を精度よく測定するためには、ピックアップコイル群と試料線材間の距離を近づけること、また線材幅方向の測定間隔を細かくし詳細な磁場分布を測定する必要がある。そこで本研究では、ピックアップコイル群に使用するコイルの線径を、これまでの $\phi 40 \mu\text{m}$ から $\phi 30 \mu\text{m}$ に細線化することで距離を近づけ、また測定間隔を細かくし磁場測定の空間分解能を向上させた。測定に用いたピックアップコイル群の概観図を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a)は $\phi 40 \mu\text{m}$ の絶縁 Cu 線で巻線された極小サイズのコイル 30 個からなる既存のピックアップコイル群である。1 個のコイル長は 0.25 mm、ターン数は 3 層 17 ターンである。Fig. 1(b)はコイルを細線化したピックアップコイル群である。各コイルは $\phi 30 \mu\text{m}$ の絶縁 Cu 線で巻線されており、1 個のコイル長は 0.18 mm、ターン数は 3 層 17 ターン、コイル数は 40 個である。

3. 模擬線材

本測定法の測定精度を評価するために、Cu テープ線材 10 本を平行に並べて 5 mm 幅 10 分割マルチフィラメント線材を模擬した試験導体を用いた。Cu テープ線材の寸法は幅 0.4 mm、厚さ 1 mm、長さ 100 mm である。各線材間には絶縁のために厚さ 0.1 mm のマイラフィルムを挿入した。各 Cu テープ線材にはシャント抵抗を接続し、通電電流値を測定した。

測定精度の評価は、既知の電流を試料線材に通電したときの導体表面付近の磁場分布を測定し、その測定結果から数値計算により求めた電流分布と実際の通電電流とを比較することで行った。

4. 測定結果

Fig. 2 に、今回作製した $\phi 30 \mu\text{m}$ の Cu 線で巻線されたコイルからなるピックアップコイル群による測定結果を示す。Fig. 2(a), (b), (c)は磁場分布の測定結果であり、縦軸はピックアップコイルの測定電圧、横軸はピックアップコイルの位置を示している。図中のプロットは測定値であり、実線は算出した電流から求めた計算値である。Fig. 2(d), (e), (f)はフィラメント 1 本を 3 分割し、それぞれの線材に電流要素を置いた場合、すなわち電流要素数 30 分割において電流算出を行った場合に模擬したフィラメント毎の電流値に換算した算出結果である。

棒グラフは測定結果から数値計算を用いて算出した電流値、プロットはシャント抵抗で測定した電流値である。結果より、図 2(e), (f)の電流では誤差 10% 以内で精度よく電流算出が行えているが、図 2(d)の電流では誤差が最大で 20% 程度となった。この誤差については、数値計算を行う電流算出プログラムのアルゴリズムを改善することで低減が可能であり、現在検討を行っている。マルチフィラメント HTS 線材の測定結果については当日報告する。

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」事業の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

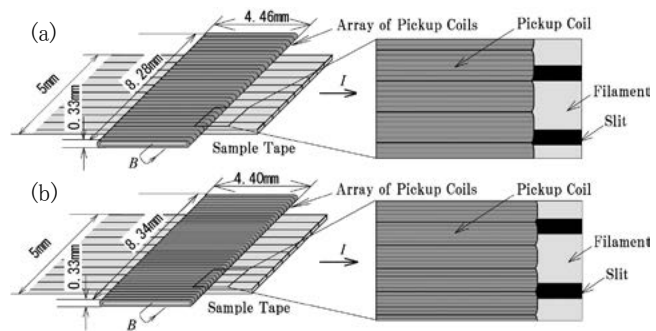


Fig. 1 Overview of pickup coil array

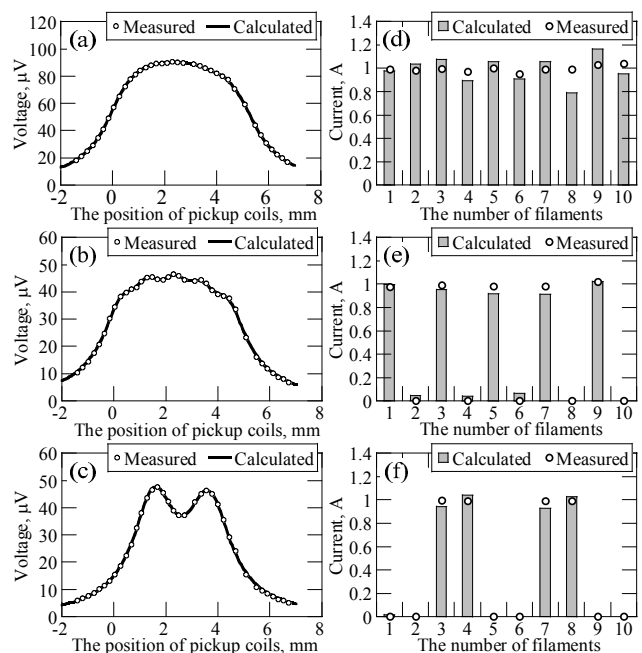


Fig. 2 Measured field distributions and calculated current distributions

参考文献

1. K. Nagata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.37

磁気モーメントを用いた GdBCO 線材の J_c 角度依存性の非接触計測

Contactless measurement on angular dependent J_c in GdBCO coated conductor by use of magnetic moment

雁木 卓, 廣松 聖人, 今村 和孝, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大);
吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC); 飛田 浩志, 斎藤 隆(フジクラ)

GANGI Suguru, HIROMATSU Masahito, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi,
KISS Takanobu(Kyushu Univ.); YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo(ISTEC); TOBITA Hiroshi, SAITO Takashi(Fujikura)
E-mail: gangi@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材を用いた電力応用機器の設計、開発において、臨界電流密度 J_c の角度依存性は重要なパラメータの一つである。しかし、 J_c の測定法として広く用いられている四端子法では、高 J_c 領域での発熱や低電界領域での電圧雑音の影響などの問題が存在する。本研究では、四端子法と相補的な測定法として、磁気モーメントベクトル測定による非破壊、非接触な J_c の角度依存性評価について検討した。

2. 実験

通常の磁気モーメント測定においては、外部磁界に対するヒステリシス損失等への興味のため、外部磁界と並行な磁気モーメント成分 m_L の測定が行われる。一方、コート線材のようなテープ状試料では、試料の回転に伴って、磁気モーメント m の長手方向への投影成分も変化することから、 m_L のみによって m の振幅の変化を精度良く捉えることは困難である。本研究では、Fig.1 に示すように、 m_L に加え、横方向成分 m_T も測定することにより、 m をベクトルとして計測し、 m の角度依存性から J_c の角度依存性の評価を行った。

実験には、BaHfO₃ を添加した GdBa₂Cu₃O_{7-δ} 線材を用いた。超伝導層の膜厚は $d=3.2\mu\text{m}$ である。同線材を幅 $w=1\text{mm}$ 、長さ $l=3\text{mm}$ の矩形に加工して磁気モーメント測定用試料とした。磁気モーメントは SQUID を用いた磁化率計 (MPMS) により測定した。

3. 実験結果及び考察

試料の外部磁界に対する角度を変化させ、各角度における磁気モーメント m の垂直成分、水平成分を測定し、 m の大きさをベクトル和によって求めると共に、基板の常磁性成分によるオフセットの影響を除去するため、増磁と減磁の際のヒステリシスより、 Δm を次の様に求めた。

$$\Delta m = \sqrt{(\Delta m \sin \theta)^2 + (\Delta m \cos \theta)^2} = \sqrt{(\Delta m_L)^2 + (\Delta m_T)^2}$$

各角度における Δm を用いて、臨界状態モデルにより、 J_c を次式によって求めた。

$$J_c [\text{A/m}^2] = \frac{6\Delta m}{dw^2(3l-w)}$$

Fig. 2 に 50 K、5 T における J_c - θ 特性を示す。磁化測定による結果は、四端子法による測定結果を用いて電界基準 $E_c=10^{-6} \text{ V/m}$ に外挿した値と定量的に良い一致を示した。

Fig.3 に磁気モーメント測定により得られた様々な温度磁場環境における J_c の角度依存性を示す。本手法によって系統的な測定を実施することが可能となる。また、4.2 K、平行磁界中の J_c 値は $2.6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ に達しており、1cm 幅の I_c 値に換算すると 8,320 A に相当することから、通電法による計測は非常に困難な領域である事がわかる。すなわち、本手法を用いることによって、四端子法で測定することが難しい高 J_c 領域の角度依存性を非破壊、非接触に評価可能となった。

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超伝導機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO から委託を受けて実施した。

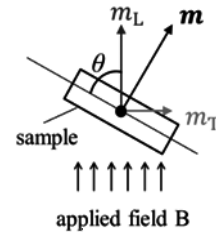


Fig.1 Schematic view of magnetic moment vector measurement, where longitudinal, m_L , and transverse component, m_T , are measured individually.

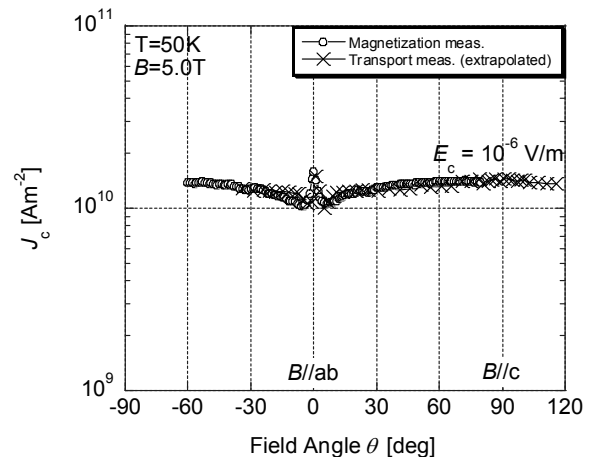


Fig.2 Angular dependence of J_c obtained at 50 K, 5.0 T. Magnetization measurement shows good agreement with transport measurement at equivalent electric field criterion of $E_c=10^{-6} \text{ V/m}$.

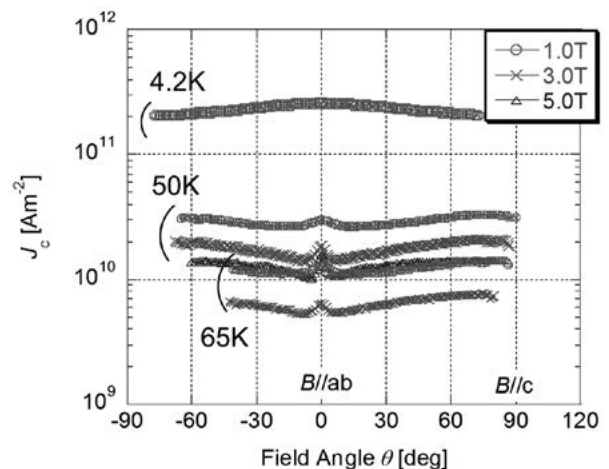


Fig.3 Angular dependence of J_c obtained from magnetic moment measurements at various magnetic field strength and temperature conditions.

四端子法と磁化法による GdBCO 線材の E - J 特性の比較

Comparison of E - J characteristics in GdBCO coated conductor estimated from four-probe method and magnetization method

廣松 聖人, 雁木 卓, 今村 和孝, 榊原 崇志, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC); 飛田 浩志, 斎藤 隆(フジクラ)

HIROMATSU Masahito, GANGI Suguru, IMAMURA Kazutaka, SAKAKIBARA Takashi, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu University), YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC), TOBITA Hiroshi, SAITOH Takashi (Fujikura)

E-mail: hiromatsu@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

臨界電流密度の評価手法としては、一般的に四端子法や磁化法が用いられる。通電法である四端子法と非接触・非破壊な磁化法とは相補的な関係にあるが、それぞれで観測される電界領域が異なるため、両者で得られる J_c の差異がしばしば問題となる。そこで本研究では、四端子法によって得られた磁場下の E - J 特性と、磁化の緩和特性により導出した E - J 特性とを実験的に比較するとともに、両者の関係について理論的考察を行った。

2. 実験及び考察

実験には、BaHfO₃ を添加しナノ欠陥を導入した GdBa₂Cu₃O_{7- δ} (GdBCO) 線材を用いた。四端子法による測定では長さ 500 μ m、幅 60 μ m のマイクロブリッジ形状に、磁化法では長さ 3mm、幅 1mm の矩形形状に、それぞれエッチング加工を施したものを試料として用いた。

Fig.1 に四端子法と磁化緩和測定により得られた 77K の E - J 特性を示す。四端子法では 10^{-4} V/m から 10^{-2} V/m の電界領域に亘る E - J 特性が得られているのに対して、磁化緩和測定では 10^{-11} V/m から 10^{-9} V/m 程度の非常に低い電界領域の E - J 特性が得られていることが分かる。これらの実験結果に対して、我々の提出している E - J 特性の解析式を用いた考察を行った。解析式は、パーコレーションモデルに磁束クリープの影響を考慮したものである[1]。解析により得られた E - J 特性を Fig.1 中に実線で示す。同図より、四端子法と磁化法のそれぞれの実験結果に定量的に良く一致する広い電界範囲に亘る E - J 特性が得られていることが分かる。

四端子法と磁化法の J_c - B 特性の差異について検討するため、解析的に得られた E - J 特性から電界基準の異なる J_c - B 特性を求めて、実験結果との比較を行った。その結果を Fig.2 に示す。四端子法で得られた一般的な電界基準 $E_c=10^{-4}$ V/m の結果を○で、磁化のヒステリシス測定より得られた電界基準 $E_c=10^{-8}$ V/m の結果を●で示すとともに、解析的に求めた特性を実線で示している。同図より、4桁の電界基準の違いが、両測定で得られる J_c 値の差異に大きく影響を与えていることが分かる。従って、四端子法と磁化法のそれぞれで得られた臨界電流特性に対しては、電界基準の差異を考慮した議論が不可欠である。

また、Fig.2 に示す解析解は、電界基準が 4 桁異なるそれぞれの J_c - B 特性と良く一致している。このことは、我々の提案する E - J 特性のモデリング手法が、広い電界領域に亘り有効であることを示している。解析の詳細や実験結果については当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超伝導機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO から委託を受けて実施した。

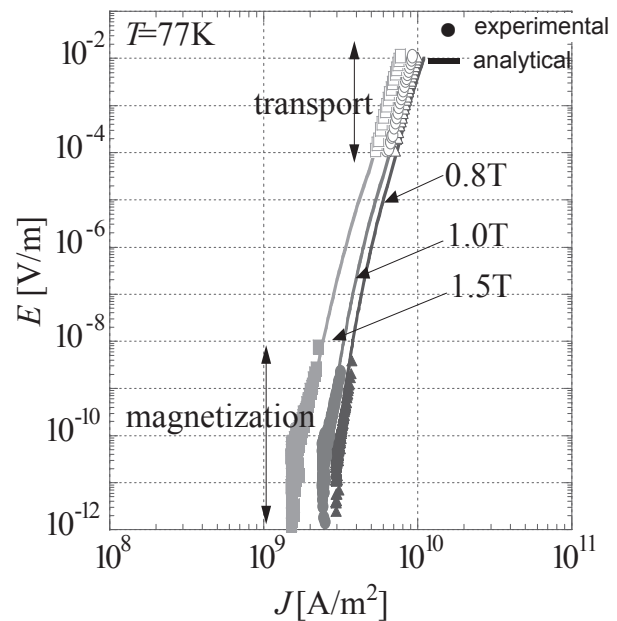


Fig.1 E - J characteristics measured by dc four-probe method (open symbols) and magnetization (closed symbols) at 77K.

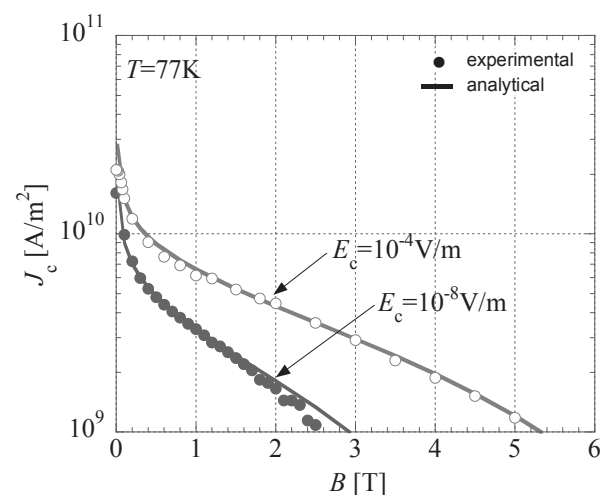


Fig.2 J_c - B characteristics estimated from dc four-probe (open symbols) and magnetization (closed symbols) measurement at 77K.

参考文献

[1] T. Kiss, M. Inoue, T. Kuga, M. Ishimaru, S. Egashira, S. Irie etc, Physica C 392-396 (2003) 1053-1062

長尺コート線材における臨界電流の幅方向分布の連続非接触計測 Continuous Non-contact Measurement of Laterally Resolved Critical Current in Long Length Coated Conductor

東川 甲平, 塩原 敬, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九大); 新海 優樹, 小西 昌也, 大松 一也 (住友電工); 町 敬人, 片山 功多, 高木 裕司, 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC)

HIGASHIKAWA Kohei, SHIOHARA Kei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
SHINGAI Yuki, KONISHI Masaya, OHMATSU Kazuya (SEI);
MACHI Takato, KATAYAMA Kota, TAKAGI Yuji, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超電導 (RE-123) 線材の機器応用に際しては、局所臨界電流特性の均一性が重要視されてきている。一方、これまで長尺線の評価は、四端子法 (長手方向に約 1 m ごと) や TAPESTAR™ (長手方向に約 1 mm ごと) で行われることが一般的となっているが、今後の交流損失低減に向けた細線化やマルチフィラメント化まで見込んだ場合、さらに幅方向の情報まで評価することが不可欠となる。そこで本研究では、前回報告したリール式磁気顕微鏡^[1]により、線材の幅方向分布まで評価することが重要となる例についていくつか報告する。

2. 細線加工線材の評価

2 mm 幅細線加工線材の評価結果を Fig. 1 に示す。線材長手方向に 800 ミクロンごと、線材幅方向に 25 ミクロンごとの残留磁界 (B_z) 分布を得ており、Biot-Savart 則の逆問題を解くことによって、その磁界を捕捉するシート電流密度 (J) 分布を得ている。臨界状態モデルによれば、このシート電流密度は臨界電流密度 (J_c) に対応するため、本手法によって局所 J_c の面内分布を取得することができる。また、この J_c 分布から局所臨界電流 (I_c) の長手方向分布を評価することが可能であり、線幅が広ければ TAPESTAR™ で得られる情報を、2 mm 幅という細い線材に対しても評価することが可能となった。さらに、上記 J_c 分布から等価線幅 (w_e)^[2] の長手方向分布を評価することが可能となり、この線材の等価線幅は平均で 1.79 mm、標準偏差 4.7% と見積もられた。これらの情報は、線材細線化手法の最適化とその品質管理に大きく資する情報である。

3. マルチフィラメント線材の評価

5 mm 幅 10 分割のマルチフィラメント線材の評価結果を Fig. 2 に示す。すなわち、フィラメント幅は 500 ミクロン未満であり、もはや通電測定による評価も困難となってくる試料である。一方、Fig. 2 には同試料の残留磁界分布を示している。10 本のフィラメントとその長手方向の揺らぎが可視化されている様子がわかる。さらに、この情報からフィラメントごとの局所 I_c の長手方向分布まで評価が可能であり、このような試料の評価は現在のところ幅方向に分解能を有する本手法によってのみ可能であると考えられる。

4. その他

上記は、本評価手法の機能を端的に示す例であるが、その他にも MOD 線材に特徴的な J_c の幅方向分布や、その改善の効果についても新しい知見を得ている^[3]。詳細は発表当日に報告する予定である。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (24360122, 23760263) の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 85, p. 153.
- [2] K. Higashikawa et al.: presented at ASC 2012, 3MPE-06.
- [3] K. Higashikawa et al.: presented at ASC 2012, 4MB-01 (invited).

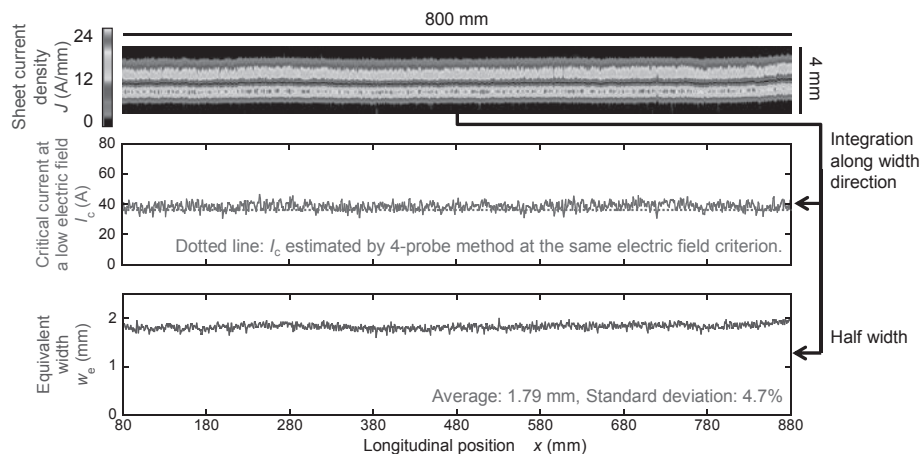


Fig. 1. Distributions of sheet current density, local critical current and equivalent width in a 2-mm-wide coated conductor.

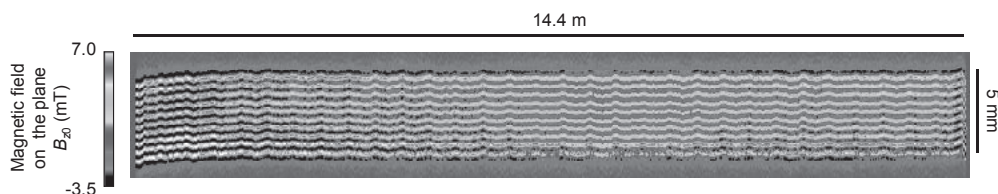


Fig. 2. Distribution of magnetic field in remanent state in a 5-mm-wide 10-filamentary coated conductor.