

冷却システムと励磁電源が分離可能な RE 系モバイルマグネット Mobile magnet using RE wire with detachable cooling system and power supply

小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢(鉄道総研)

OGATA Masafumi, Mizuno Katsutoshi, ARAI Yuki, HASEGAWA Hitoshi, SASAKAWA Takashi, NAGASHIMA Ken

(Railway Technical Research Institute)

E-mail:ogata@rtri.or.jp

1. はじめに

RE 系線材(RE-Ba-Cu-O 線材)を浮上式鉄道用超電導磁石へ適用する概念設計検討[1]を進めている。これまでに RE 系線材を用いた小型レーストラックコイルの通電特性を報告[2]してきたが、今回そのコイルを用いて小型の高温超電導磁石(Fig.1)を製作した。磁石製作にあたり、コイル温度 50 K で 1 T の磁場が発生できること、冷却システムと励磁電源を分離して磁石単体で磁場発生可能なモバイルマグネットとして運用できることを目標とした。

2. 磁石仕様

Table 1 に RE 系モバイルマグネットの主要仕様を示す。コイルは、線材長 100 m のレーストラック形シングルパンケーキコイルを 4 個積層したもので、86 A 通電時のコイルの最大経験磁場が 1 T となる。冷却システムは、磁石内部に引き通した冷却用配管に外部から低温ヘリウムガスを供給する方式とし、コイルを 20 K 以下まで初期冷却した後、ガス供給管を切り離す。また、機械式スイッチを用いて閉ループ電流回路を構成することにより、励磁電源分離後の磁場発生を可能とした。

3. 試験結果

(1)通電特性

本マグネットの臨界電流 I_c と n 値の温度依存性試験結果を Fig.2 に示す。50 K における I_c が 113 A であり、このときのコイル最大経験磁場が 1.31 T となることから、目標の 1 T @50 K を超える磁場発生性能を確認した。

(2)保冷特性・磁場減衰特性

初期冷却した本マグネットに、定格 86 A の励磁電流を通電し、機械式スイッチを閉じて閉ループ電流回路を構成した後、冷却システムと励磁電源を分離した。分離後のコイル温度とコイル最大経験磁場の特性を Fig.3 に示す。コイル温度が 20 K から 50 K に上昇するまでの保冷時間は約 9 時間であった。また、磁場は 10 時間後に当初の 27%まで減衰した。これは閉ループ電流回路の抵抗に換算すると $3.2 \mu \Omega$ に相当する。フラックスフロー抵抗や機械式スイッチを含む常電導材料部分の抵抗の低減が課題と考えられる。

4. おわりに

今後は、本マグネットの技術をベースとして、RE 系線材による 5 T 級マグネットの開発を進めていく計画である。

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.Nagashima, et al.: Abstracts of CSJ Conf.,Vol.79(2008) p.102
2. M.Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.81(2009)p.98

Table 1 specifications of RE mobile magnet

Wire type	YBCO(MOCVD) / Hastelloy
Width / Thickness	4.1 mm / 0.1 mm
Min. I_c (77 K, s.f.)	112 A
Coil shape (pancakes)	Racetrack (4 single pancakes)
Outer / Inner diameter	150 mm / 100 mm
Straight length	150 mm
Turns	562 turns
Wire length	400 m
Inductance	97 mH
Rating current	86 A
Magnet structure	Coil + Coil case + Radiation shield + MLI + Outer vessel
Cooling method	Flow of gas He in cooling pipe
Initial cooling temperature	< 20 K
Magnetization method	Closed current using mechanical switch
Dimensions	W:600 mm, T:400 mm, D:200 mm
Weight	52 kg

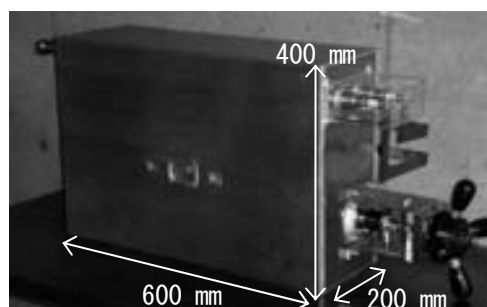


Fig.1 RE mobile magnet

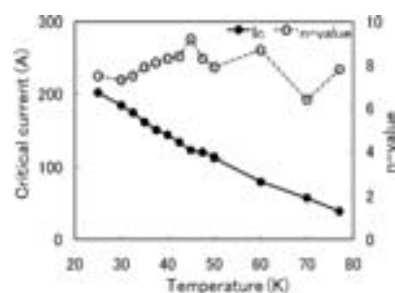


Fig.2 Temperature dependence of I_c and n -value

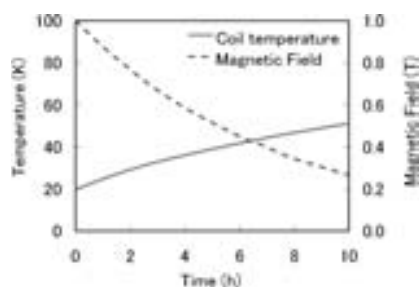


Fig.3 Temperature and magnetic field characteristics after separation of cooling system and power supply

伝導冷却イットリウム系含浸コイルの熱暴走特性評価

Thermal runaway of conduction-cooled impregnated YBCO coil

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)
 MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,
 URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)
 E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

イットリウム系超電導コイルは、高い熱的安定性を有しているため、伝導冷却の場合においても高負荷率で運転することが可能である。しかしながら、電流密度が高いため、発生電圧がある閾値を超えて熱暴走した場合には、発熱密度が高くなり、コイルが焼損する危険性がある。そのため、コイルを安定に運転するためには、熱暴走特性を定量的に把握することが重要となる。今回、試作したイットリウム系含浸コイルを用いて、伝導冷却で過負荷通電試験を実施し、実験と解析の両面から熱暴走特性を評価したので報告する。



Fig.1 Impregnated YBCO coil

2. コイル諸元および伝導冷却試験

実験に使用したイットリウム系含浸コイルを Fig.1 に、諸元を Table.1 に示す。本コイルは、樹脂含浸したシングルパンケーキコイル 2 個(#A および#B)をコイル軸方向に積層し、コイル内周で相互を電氣的に接続した構成となっている。また、コイル内部の電圧を測定するため、#A および#B の各パンケーキコイルの内部(1, 30, 60, 90, 119 ターン目)に電圧タップを取り付けている。

Table.1 Specification of YBCO tape and coil

Tape width	4.4 mm
Tape thickness	0.2 mm
Min. Ic@77K, 0T	85 A
Coil inner diameter	100 mm
Coil outer diameter	164 mm
Coil height	10 mm
Number of pancake coils	2
Number of turns(#A/#B)	119/119

試作した含浸コイルを伝導冷却試験装置に組み込み、通電試験を実施した。コイル上下面に厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付け、アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段階冷却ステージに接続してコイルを冷却した。コイル温度は 2 段階冷却ステージに取り付けたヒータにより制御し、設定温度は 30 K から 60 K の範囲で変えた。30 K から 60 K の各温度における電界-電流特性の実験結果、および短尺線材の臨界電流特性から計算した電界-電流特性を Fig.2 に示す。30 K から 60 K の各温度において実験結果と計算結果は定量的に一致し、試作した含浸コイルが良好な超電導特性を有していることを確認した。

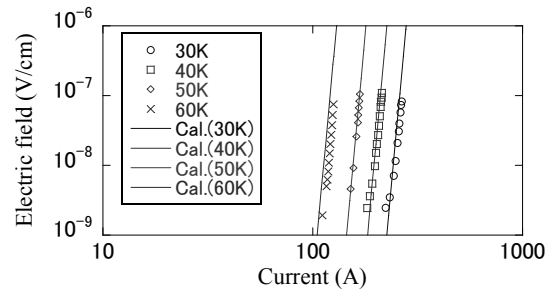


Fig.2 E-I characteristics of YBCO coil from 30K to 60K

3. 熱暴走試験

30 K から 60 K の範囲でコイル温度を変えて過負荷通電を実施し、コイルが熱暴走する際の電圧挙動を調べた。試験は、コイル温度を一定値に制御しながら通電電流値を 0.1 A 刻みで上昇させ、電圧の急激な上昇が確認された場合には通電電流値を下げる方法とした。コイル温度 30 K のときの熱暴走試験結果を Fig.3 に示す。電流値 283.2 A に上昇させた後、数秒間は緩やかな電圧上昇であったが、その後電圧が急激に上昇し熱暴走した。このときコイル#A の 30 ターンと 60 ターン間の電圧は、わずか 0.2 秒程度で 1 V 以上となった。コイル温度を 30 K から 60 K の範囲で設定して過負荷通電試験したときの熱暴走電流値、および 3 次元熱解析により求めた熱暴走電流値を Fig.4 に示す。各温度において、実験結果と解析結果が定量的に一致し、解析により熱暴走電流を定量的に予測できることを確認した。

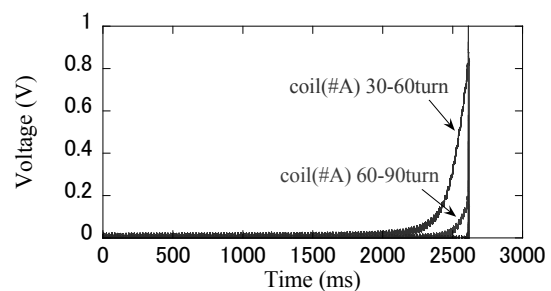


Fig.3 Voltage variations inside YBCO coil at 30K

4. まとめ

イットリウム系含浸コイルを試作し、伝導冷却にてコイル温度を変えて熱暴走試験を実施した。30 K から 60 K の幅広い温度領域で熱暴走電流を解析により定量的に予測できることを示した。

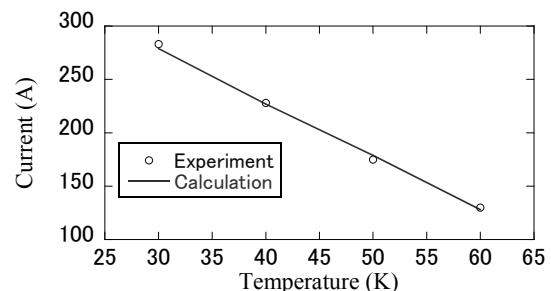


Fig.4 Thermal runaway current of YBCO coil from 30K to 60K

ポインティングベクトル法を用いた高温超伝導コイルの局所異常検出

Local detection of abnormal condition in high temperature superconducting coils by using the Poynting's vector method

木元 武尊、藤岡 直人、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工)

KIMOTO Takeru, FUJIOKA Naoto, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k5010288@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導線材は比熱の大きい高温で使用できる。そのため、超伝導コイルの一部が常伝導転移した場合、その領域は広がりにくく、局所的な異常が発生する可能性が高い。この場合、常伝導転移した部分の抵抗が大きくなってもその領域が小さいため、異常による電圧変化が超伝導コイル全体の電圧に比べても小さく、異常の検出は困難である。そのため、高温超伝導線材を用いたコイルの異常検出を行うには、異常検出領域を細分化し、異常検出感度を向上する必要がある。これまでに、我々の提案している、ポインティングベクトル法を用いた異常検出システムでは、異常検出領域をコイル軸方向に分割できることが実証されている[1]。今回は、異常検出領域をコイル周方向に細分化できるかどうかを実験的に調べた。

2. 測定方法と測定装置

本測定方法は、超伝導コイル周辺のポインティングベクトルを測定することによって、異常の検出を行っている。超伝導コイル周辺の磁界と電界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。磁界と電界の測定には、ピックアップコイルとポテンシャルリードをそれぞれ用いる。サンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、高強度銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を1層×15ターン巻線した内径70mm、高さ64.3mmのソレノイドコイルである。なお、ポテンシャルリード電圧のうち誘導性電圧は、ピックアップコイル電圧を使ってキャンセルし、ポインティングベクトル測定の精度を上げた。

3. 実験方法

次の手順で実験を行った。サンプルコイルに、50Hz、10Armsの交流電流を定電流モードで通電しながら、コイル周方向の一部に室温のガス窒素を吹き付け、強制的に常伝導転移させた。その際、ガスの流量を0.40/secと0.150/secと変えることによって、異常の程度を変化させた。異常を発生させた側(異常側)とその180度反対側(正常側)とのポインティングベクトルの時間変化を2点同時に観測し、超伝導コイルの異常検出を行った。測定を行った場所は、Fig. 1に示すように、異常側と正常側のどちらもコイル中心の高さである。また、本異常検出方法とは別の方法でサンプルコイルの状態をモニターするため、サンプルコイル両端電圧の損失成分と各ターンの温度の観測も同時に行った。このサンプルコイル両端電圧の損失成分の測定は、従来の異常検出方法である有効電力法に相当する。

ガス窒素の流量が0.40/sec及び0.150/secで異常を発生させたときの温度、端子間電圧、正常時の値で規格化したポインティングベクトルの測定結果をFig. 2に示す。Fig. 2の横軸は、測定開始からの経過時間である。ガス窒素の流量が0.40/secのとき、端子間電圧と異常側の温度が変化すると同時に、異常側のみポインティングベクトルが変化していることが分かる。このことから、異常検出領域をコイル周方向に分割することが可能であることが分かった。また、ガス窒素の流量が0.150/secのとき、異常側の温度の変化と同時にポインティングベクトルが変化しているが、端子間電圧には変化が見られなかった。このことから、端子間電圧では検出できない程度の異常でも、本異常検出システムで検出が可能であることが分かった。

4. まとめ

高温超伝導コイル内の局所的な異常発生状態を想定し、コイル周方向の一部に異常を発生させて、ポインティングベクトルの測定を行った。その結果、異常側のみポインティングベクトルの変化が見られた。これにより、異常検出領域を周方向に分割できることが実証された。また、従来の異常検出方法では検出できない程小さな異常でも、検出可能であることを実証した。

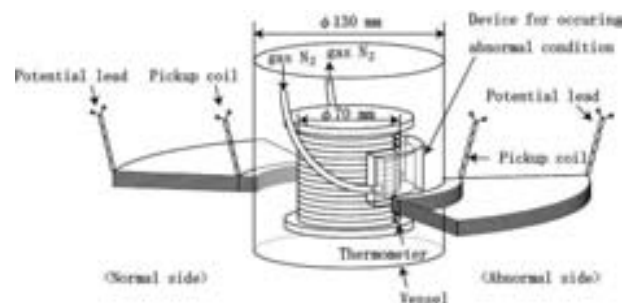
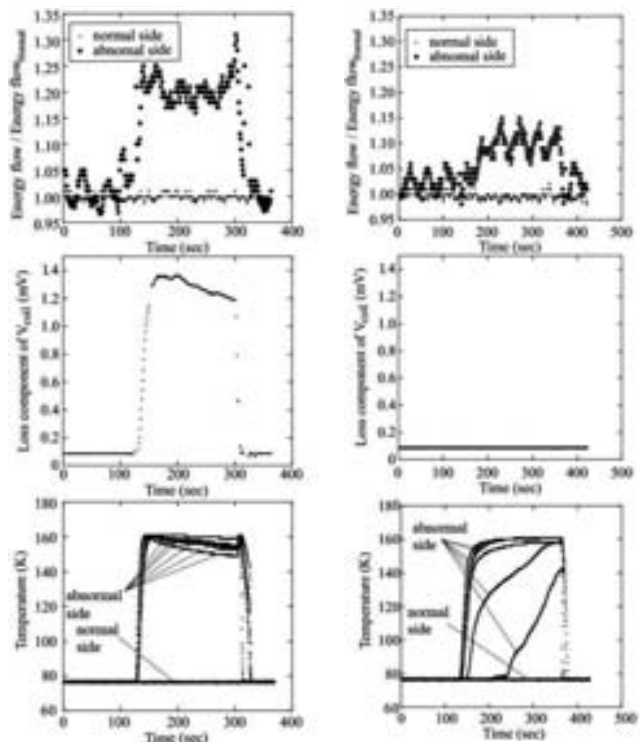


Fig. 1 Measuring system to detect locally abnormal condition in HTS coil.



(a) Flow rate of G. N2 is 0.4 l/sec (b) Flow rate of G. N2 is 0.15 l/sec
Fig. 2 The measuring results on the sample coil in which local abnormal condition have been generated.

Reference

[1] M. Tokuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.22

積層高温超伝導導体の機械的ラップジョイントに関する基礎研究

Fundamental Research of Mechanical Lap Joint of High Temperature Superconducting laminated Conductor

内田 美子, 伊藤 悟, 橋爪 秀利(東北大)

UCHIDA Yoshiko, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku University)

E-mail: yuchi@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉のコスト削減のために、マグネットを分割製造し、着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている[1]。

分割型高温超伝導マグネットの実現には、接合部の抵抗低減が不可欠である。接合の方法には、高温超伝導テープの断面同士を接触させた接合法(機械的バットジョイント)と、超伝導テープの表面同士を接触させた機械的な接合(機械的ラップジョイント)の2種類がある。本研究では、大電流用の積層高温超伝導導体の機械的ラップジョイント技術開発のための基礎研究として、1層および2層の高温超伝導導体の機械的ラップジョイントの抵抗を評価した。本発表ではその結果について報告する。

2. 実験方法

Bi-2223 テープを用いて、以下の二つの実験を行った。

(1)試験 I :Bi-2223 テープの応力-抵抗特性の評価 Bi-2223 テープの厚さ方向に圧縮応力を加えると、変形によって臨界電流が低下し、抵抗が発生する[2]。これは、機械的ラップジョイントの際の抵抗の一因となる。そこで、図1に示す試験部を用いて、Bi-2223 テープ(測定テープ)に負荷される厚さ方向の圧縮荷重と抵抗の関係を評価する(印加電流50A)。図1に示したダミーテープは 0 枚 (I-1段)、1枚 (I-2段)、2枚 (I-3段)の3条件とする。

(2)試験 II :積層 Bi-2223 導体の機械的ラップジョイント試験 1層導体の機械的ラップジョイント(II-1層)、2層導体の機械的ラップジョイント(II-2層)において、接合部に負荷する圧縮荷重と接合抵抗の関係を評価する。実験体系をそれぞれ図 2(a)および(b)に示す。II-1層は、図2(a)の接合部の左上側のテープ(テープ a)、右下側(テープ b)の間の接合抵抗を計測する(印加電流 100A)。II-2層は、図(b)の接合部の最も上から重ねているテープ(テープ c)と、中段右側(テープ d)の間の接合抵抗を測定する(印加電流 200A)。

試験 I・IIは、液体窒素浸漬冷却体系で行い、接合部への負荷荷重は 0~950kgf とする。

3 実験結果および考察

実験結果を図3に示す。試験 II において、電流が全てのテープに均等に流れると仮定すると、接合部領域で各テープに流れる電流は、試験 II-1層およびII-2層ともに、50Aである。

試験 I・IIにおいて、テープの変形の度合いがほぼ同等と考えられるものは、1) II-1層のテープ a と I-2 段の測定テープ、2) II-1層のテープ b と I-1 段の測定テープ、3) II-2層のテープ c と I-3 段の測定テープ、4) II-2層のテープ d と I-2 段の測定テープである。図3より、I-2段においては、負荷荷重が 650kgf 以上のとき、I-3 段においては 400kgf 以上のときに抵抗が発生する。II-2層においても、I-3 段と同様に 400kgf 以上で抵抗が上昇し、I-2 段と同様に 650kgf 以上で荷重-抵抗曲線の傾きが大きくなっていることが確認できる。このことから、II-2層における抵抗上昇の原因が、Bi-2223 テー

プの変形であること、そして変形が同程度であれば、抵抗上昇の傾向も近くなるのがわかる。一方、I-2 段においては、660kgf以上の負荷荷重で抵抗が発生するにも関わらず、II-1層では抵抗が上昇するのは、850kgf 以上のときである。I-1段では抵抗が生じていないため、テープ b の抵抗も 0 であると仮定すると、接合部では、テープ b に流れる電流の方が大きく、テープ a の抵抗の影響が小さくなっているものと考えられる。

今後は、接合部の構造解析を行い、詳細な変形の情報を取得することで、変形による抵抗発生を把握し、接合法を改良することで抵抗の低減を図っていく。

参考文献

- [1] S. Ito, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol.81 (2006) 2527-2533.
- [2] S. Ito, et al.: International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.19 (2004) 467-472.

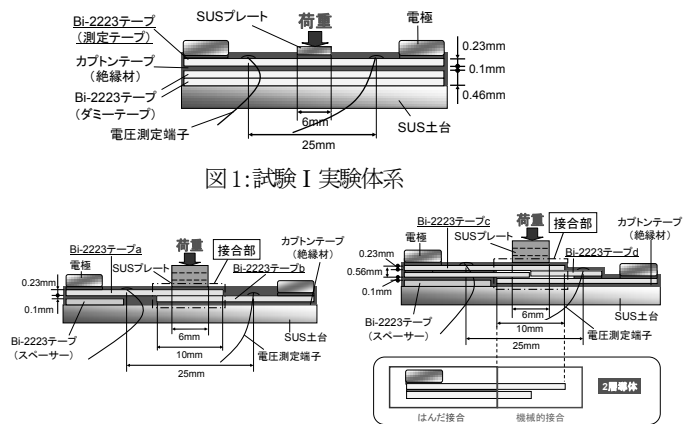
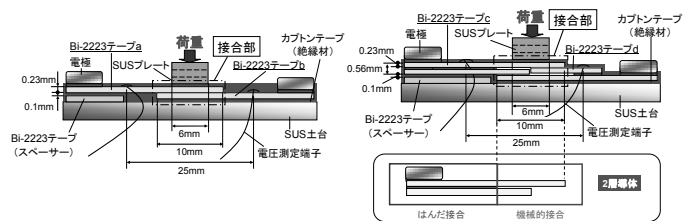


図1:試験 I 実験体系



(a)試験 II-1層

(b)試験 II-2層

図2:試験 II 実験体系

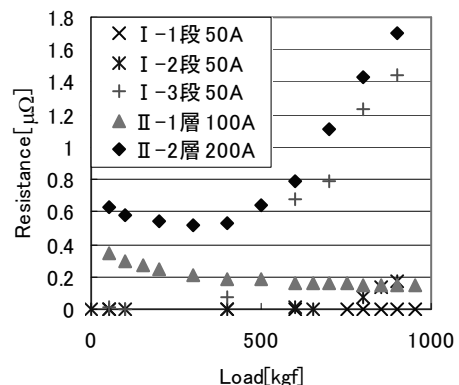


図3:試験 I および II の実験結果

磁気プラズマセイル用マグネットの最適設計に向けた Y系高温超電導コイルの電流輸送特性に関する基礎検討

Fundamental study on current transport property of Y-system HTS coil aiming at optimal design of magnet for Magneto-Plasma-Sail

中村 武恒 (京大); 船木 一幸 (JAXA); 山川 宏 (京大)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); FUNAKI Ikkoh (JAXA); YAMAKAWA Hiroshi (Kyoto Univ.)

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

1. はじめに 船木・山川のグループは、超電導マグネットの作る強力な磁場と太陽風(プラズマ流)との相互作用を利用して深宇宙探査用の高効率推進機を検討している^[1]。上記推進機において十分な推進力を得るためには、宇宙空間に大きな磁気モーメントを実現する必要があるが、打ち上げロケットに搭載可能な現実的コイル径のもとでは、強力な磁場を作ることが重要である。また、広範な温度範囲におけるオペレーション可能性の検討や冷却安定性確保の観点から高温超電導マグネットを候補として挙げている。さらには、宇宙機の主たる電力源は太陽電池であり、上記超電導マグネットの励磁制御には DC/DC チョッパー回路が利用されるが、宇宙機に対する軽量化の要求からチョッパー重量を出来るだけ小さくする必要があり、一般にはリップルが大きくなると推測される。従って、磁気セイル用高温超電導コイルの設計に際しては、マグネット単独では無く、電源回路における電流リップル特性とコイルの熱安定性の関係を定量化しておく必要がある。

本講演では、上記熱安定性を検討するための高温超電導コイルの特性評価について、その現状を報告する。

2. 検討対象とした高温超電導線材 検討対象とした試料は、Y系高温超電導薄膜線材であり、Fig. 1に外観写真を示す。線材の両面には、銅層が付与されている。上記線材約40mmについて、直流4端子法によって測定した電界(E)—電流密度(J)特性の測定結果を Fig. 2 (シンボル)に示す(電圧タップ間距離: 10mm)。また、同図実線は九大・木須らが提唱しているパーコレーション遷移モデルの解析式^[2]であるが、両者は良く一致しており、この評価式を適用して磁気セイル用コイルの特性評価や設計を実施することが可能である。

3. 高温超電導コイルの試作と試験システム 上記したY系高温超電導線材を4.3m程度切り出し、まず幅5mm(粘着剤付)のポリイミドテープを出来るだけオーバーラップが無いように巻き付ける。その後、直径86mmのポピン上にダブルパンケーキ構造でコイル化し、エポキシ系樹脂で固着した。Fig. 3には、試作したコイルの外観写真を示す。

一方、上記コイルの熱損失特性を様々なリップルを有する電流値に対して評価するための100A級模擬リップル印加電源の試作も行った。Fig. 4にその外観写真を示す。試験結果の詳細他は、講演当日に報告する。

謝辞 解析の一部について、京都大学工学部電気電子工学科4回生・高橋慶多氏ならびに高村豊氏の協力を得た。



Fig. 1 Photograph of a YBCO tape (width: 3 mm).

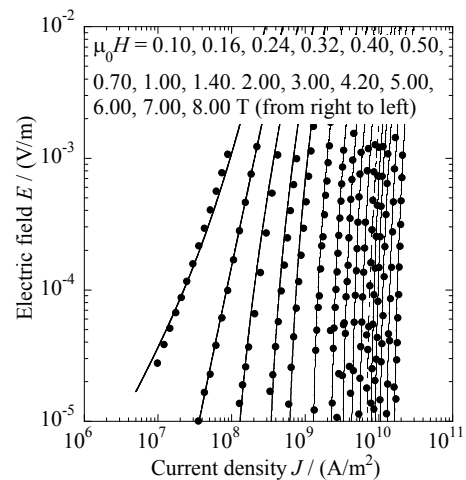


Fig. 2 Current transport property in YBCO tape at 77 K (symbols: measured data, curves: theoretical expression^[2]).



Fig. 3. Photograph of fabricated YBCO double-pancake coil (turn number: 8).



Fig. 4 100 A class current source by use of power MOS-FET (rippled current can be applied to the load).

参考文献

- [1] H. Yamakawa, I. Funaki et al.: Acta Astronautica, Vol.59, pp.777- 784 (2006).
[2] For example, T. Kiss et al.: TEION KOGAKU, Vol. 34, No. 7, pp. 322-331 (1999) (in Japanese)

5T 級 DI-BSCCO 小型コイルの特性評価(1)-コイルの交流損失-
 Characteristic tests of 5T-class DI-BSCCO small-scale coil(1)- Coil AC loss-

野上 広司, 中村 聡介, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九大); 林 敏広, 加藤 武志, 藤野 剛三(住友電工)
 NOGAMI Koji, NAKAMURA Sosuke, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ.);
 HAYASHI Toshihiro, KATO Takeshi, FUJINO Koso(Sumitomo Electric Industries)
 E-mail: nogami@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

Bi-2223 銀シーステープ線材の長尺化、高性能化(高 I_c 、高強度、低損失化)により高磁場マグネットなど超電導応用製品の開発が期待されている。高磁場 HTS マグネットにおいて励減磁時における交流損失の評価はこれまでほとんど行われていないが、マグネット応用において非常に重要な課題である。本研究では、DI-BSCCO を使用した 5T 級の小型コイルを製作し、液体ヘリウム中でコイルの低周波数励減磁時の交流損失及びコイル用巻線の交流損失を測定したので、その結果について報告する。

2. 線材及びコイルの諸元

磁界発生用及び通電損失測定対象としての 5T コイルの主な諸元と、コイル用巻線 JM28 と JM87 の諸元を Table 1、Table 2 にまとめている。コイルは、16 層のダブルパンケーキコイルをさらに 2 層重ねた 32 層ダブルパンケーキ構成である。1 層のダブルパンケーキコイルの巻数は 190.5、コイル全体の総巻数は 6,096 である。インダクタンスの実測値は 0.40 H、磁界発生率は 0.018 T/A であり、278 A の通電で 5 T 発生する。

3. 測定方法

試作した低交流損失線材の垂直磁界損失を、鞍型ピックアップコイル法により液体ヘリウム中で測定した。積層枚数を 6 とし、周波数は 0.04Hz 及び 0.008Hz、磁界振幅は 5T までの領域で損失測定を行っている。コイルの通電損失については、交流通電に対するコイルの端子電圧およびシャント抵抗器の端子電圧から得られる通電電流信号をデジタル処理し、端子電圧と通電電流のそれぞれの瞬時値の積を一周積分することにより通電損失を求めた。

4. 測定結果及び考察

JM28, JM87 における垂直磁場損失及び平行磁場損失を Fig.1 に示す。測定周波数は 0.008Hz と 0.04Hz の 2 種類であるが、この周波数領域では損失の周波数依存性はほとんど考慮しなくても良いと思われる。次に、5T コイルの液体ヘリウム浸漬冷却時の通電損失を Fig.2 に示す。横軸は通電電流の振幅 [A]、縦軸はコイルの 1 周期当たりの全損失 [J] である。測定周波数 0.008Hz と 0.04Hz における結果を比較してみると、0.04Hz での損失の方が、電流振幅が 250A(発生磁界 4.5T)を越す領域で、Fig. 1 に示した JM28, JM87 の垂直磁界損失の周波数依存性と比べると若干大きめに出ている。これについては通電の効果も含めて検討していきたい。

Table 1 Parameters of Bi-2223 5T-coil

Parameters	5T-coil
Height (mm)	173.6
Inner diameter (mm)	82
Outer diameter (mm)	136.1
Layer number	32
Total turn number	3048
Coil coefficient (T/A)	0.018
Inductance (H)	0.4

今後、コイルの各部の磁界(大きさと方向)を考慮した局所的な交流損失をこれらの短尺試料の垂直・平行磁界損失を用いて評価し、さらに局所的な損失を巻線部全体で積み上げて、Fig.2に示すコイルの通電損失がどの程度予測できるかを検討する予定である。

Table 2 Parameters of Bi-2223 taped wires

Parameter	JM28	JM87
Average Width (mm)	4.14	4.17
Average thickness (mm)	0.274	0.278
Sheath	Ag-Mg0.03wt%	
Superconducting core ratio	0.37	
Number of filament	121	
Twist pitch (mm)	—	
Overall I_c (A) at s.f. and 77K	160	158
Average J_c (A/m ²) at s.f. and	1.41×10^8	1.36×10^8
Average n value at s.f. and 77K	17	17.5
Thickness of insulation layer	25	

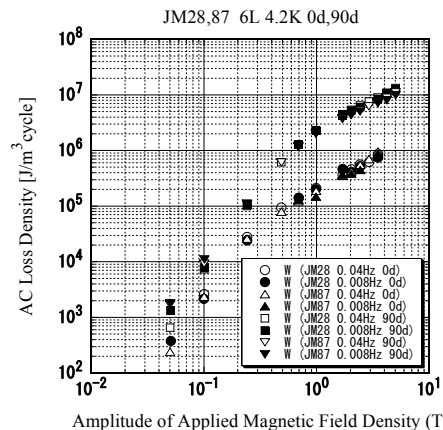


Fig. 1 AC loss density of JM28 and JM87 in transverse and parallel fields

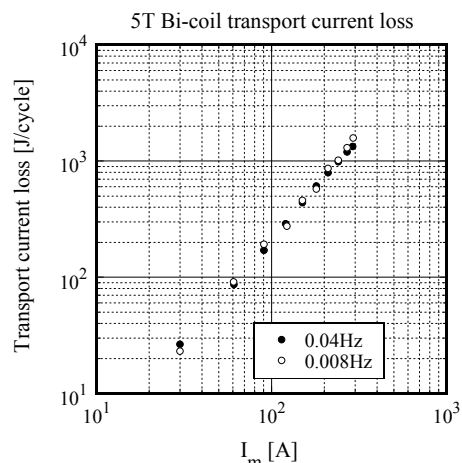


Fig. 2 Transport current loss of 5T Bi coil at 4.2K

YBCO テープ線材を用いた SMES・直流リアクトル用 トロイダルコイルの大電流容量化

Increasing current carrying capacity of toroidal coil using YBCO tapes for SMES and DC reactor

津田 理, 濱島高太郎 (東北大学); 谷貝 剛 (上智大学)

TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: tsuda@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

YBCO テープ線を用いたダブルパンケーキコイルで構成される SMES や直流リアクトル用トロイダルコイルの大電流容量化には、複数の YBCO テープ線を積層させ、各コイル間で転位を施した転位導体の採用が有効である[1]。しかし、このような YBCO テープ積層導体では、テープ線間の磁気的結合が強いため、各テープ線のテープ厚さが製造誤差等によって異なる場合には偏流現象が生じる可能性がある。そこで、本研究では、トロイダルコイルの大電流容量化において、積層導体で起こりうる偏流現象の抑制方法の1つとして、1本のテープ線で構成されるパンケーキコイルを積層導体数分並列接続する方法に着目し、その有効性を検証するために、積層導体使用時と単テープ導体使用時(積層導体数分コイルを並列接続)における、テープ線厚さと電流分布の関係について検討を行った。

2. トロイダルコイルの大電流容量化

Fig.1 の様に、YBCO テープ線で構成される積層導体を用いてダブルパンケーキコイルを作製する場合には、導体を構成するテープ線間の偏流現象を抑制するために、Coil1 と Coil2 の間で導体を転位する。そして、この転位導体で構成された複数のダブルパンケーキコイルを周方向に配置することによりトロイダルコイルを作製する。しかし、積層導体の場合、製造誤差により各テープ線厚さに違いが生じた場合には、容易に偏流が生じる可能性がある。これは、積層導体では複数のテープ線が密着しており、テープ線間の磁気的結合が強く、テープ線の自己インダクタンスとテープ線間の相互インダクタンスがほぼ同じ大きさであることに起因する。そこで、Fig.2 の様に、1本のテープ線で構成されるダブルパンケーキコイルを周方向に配置し、必要となるテープ線数だけ並列接続することを考えた。これにより、並列テープ線間の磁気的結合が小さくなり、導体の製造誤差による偏流現象の抑制を期待できる。

3. テープ線厚さと電流分布の関係

トロイダルコイルの大電流容量化における提案方法の有効性を検証するために、製造誤差によるテープ線厚さの違いとトロイダルコイル内の電流分布との関係を解析的に検討した。本解析に用いたモデルコイルの主な諸元を Table 1 に示す。本解析では、Fig.1 や Fig.2 の様なトロイダルコイルを構成する複数のダブルパンケーキコイルのうち、ある1つのコイルにおいて1本のテープ線の厚さが製造誤差により $-50 \sim 200 \mu\text{m}$ の範囲で変化した場合の電流比を評価した。その結果を Fig.3 に示す。これより、積層導体を使用するよりも、1本のテープ線で構成されるダブルパンケーキコイルを並列接続する方が、テープ線厚さの製造誤差とは無関係に偏流現象を抑制できることがわかる。また、テープ厚さの製造誤差による偏流現象を抑制するには、テープ厚さを厚くし、ダブルパンケーキコイルのターン数を少なくすることが有効であることがわかった。

参考文献

1. H. Tashiro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.203

Table 1 Specifications of toroidal coil used in analysis

Thickness of YBCO Layer (μm)	1
Width of YBCO Layer (mm)	10
Thickness of YBCO Conductor (μm)	351
Number of Turns of Double Pancake Coil	100
Inner Radius of Double Pancake Coil (mm)	300
Thickness of Double Pancake Coil (mm)	32
Radius of Toroid (mm)	410

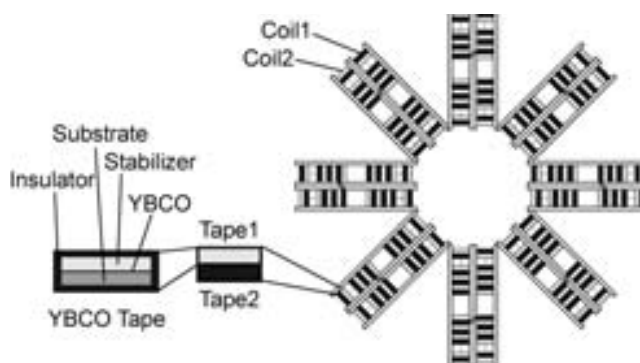


Fig. 1 Schematic drawing of a toroidal coil composed of eight double pancake coils wound by two parallel YBCO tapes.

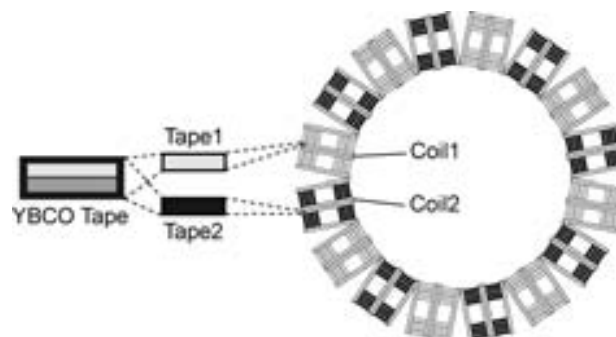


Fig. 2 Schematic drawing of a toroidal coil composed of sixteen double pancake coils wound by single YBCO tape.

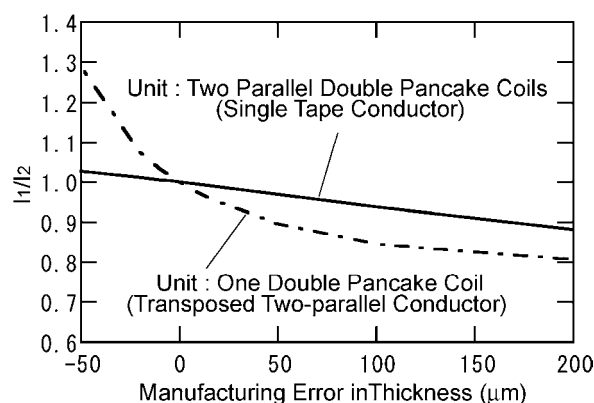


Fig. 3 Dependence of current distribution within a toroidal coil on manufacturing error in YBCO tape thickness.

イットリウム系含浸コイルのフープカ印加試験

Hoop stress tests of impregnated YBCO coils

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)
 MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,
 URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)
 E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

超電導コイルを励磁すると、フープ力により超電導線材に引張応力が発生する。イットリウム系線材は、Hastelloy®基板の線材で 600 MPa 以上、NiW 基板の線材においても 400 MPa 以上の引張応力下で超電導特性が低下しないことが報告されており[1,2]、イットリウム系超電導コイルは、これまでにない高い引張強度を有することが期待されている。一方、伝導冷却における冷却パスの確保や取り扱いの容易さ等を考慮すると超電導コイルは樹脂含浸されていることが望ましいが、樹脂含浸すると冷却時に超電導特性が低下する問題が生じる。今回、絶縁材の熱収縮量をコントロールすることで、コイル内部に生じる径方向応力を緩和させて含浸による劣化が生じないコイルを開発した。この含浸コイルが線材単体の引張強度に相当するフープ力にも耐えられることを実証したので報告する。

2. コイル諸元

試作した含浸コイル(#A および#B)の諸元を Table.1 に示し、コイル#A の外観を Fig.1 に示す。YBCO 層の向きの違いの影響および接続部の機械特性も併せて評価するため、Fig.2 に示すように、1 から 3 ターンまでは YBCO 層が内周側、4 から 10 ターンまでは外周側を向く構造とし、巻線途中に接続部を設けた。また、巻線部に均一な電磁力を印加するため、電極および巻棒がない構造とした。

3. 磁場中通電試験

試作した含浸コイル(#A および#B)を液体ヘリウムで浸漬冷却し、4 T のバックアップ磁場中で通電試験を実施した。試験は、各電流値の電圧を比較し、電圧に変化がなければ通電を継続する方法とした。NiW 基板の線材を用いたコイル#A は 586 A 通電時にコイル平均電界が 10^{-7} V/cm を超えたため通電を終了した。586 A 通電時に線材に印加された応力を数値解析により求めたところ、引張応力は 381~392 MPa であった。一方、Hastelloy®基板の線材を用いたコイル#B は 400 A までは発生電圧に変化は見られなかったが、420 A 通電時に含浸コイル以外の箇所(電極-コイル間)で電圧の上昇が見られたため通電を終了した。Hastelloy®基板の線材は NiW 基板の線材に比べて厚さが約 1/2 であるため、電流値が低くても応力は高くなる。数値解析で 400 A 通電時に線材に印加された引張応力を求めたところ 570~630 MPa であった。フープ試験後、含浸コイル(#A および#B)の劣化の有無を調べるため、液体窒素中での通電試験を実施した。試験結果を Fig.3 に示す。両コイルともに、フープ試験前後でコイル発生電圧に変化はなく劣化していないことを確認した。

4. まとめ

イットリウム系線材を使用した含浸コイルを試作し、4 T バックアップ磁場中で通電試験を実施した。NiW 基板の線材を用いた含浸コイルは最大 392 MPa、Hastelloy®基板の線材を用いた含浸コイルにおいては最大 630 MPa の引張応力を印加した。両コイルともに引張応力印加後もコイルが劣化することはなく、試作した含浸コイルが、イットリウム系線材の高強度特性を損なうことなく製作できていることを確認した。

Table1. Specifications of YBCO tapes and coils

	Coil #A	Coil #B
substrate	NiW	Hastelloy®
Tape width (Ave.)	4.4 mm	4 mm
Tape thickness (Ave.)	0.2 mm	0.1 mm
Tape length	9 m	9 m
Inner diameter	270 mm	270 mm
Outer diameter	276 mm	273 mm
Number of turns	10	10



Fig.1 Impregnated YBCO coil (Coil#A)

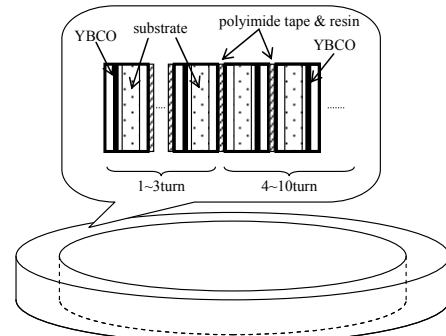


Fig.2 Schematic of YBCO coil

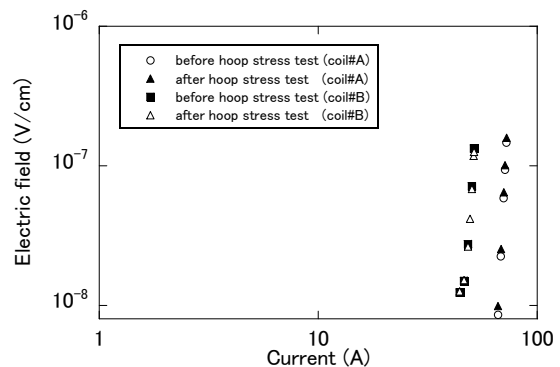


Fig.3 E-I characteristics of YBCO coils at 77K after hoop stress tests (Coil#A and Coil#B)

参考文献

1. K. Osamura, et al.: SUST, Vol.20 (2007) S211
2. M. Sugano, et al.: IEEE Trans. On Appl. Supercond., Vol. 15 (2005) p.3581

Y系線材を用いた積層コイルの伝導冷却通電特性

Test results of conduction-cooled impregnated coil wound with YBCO tapes

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

1. はじめに

運転温度を制約条件にしないために伝導冷却することを想定すると、イットリウム系(Y系)超電導コイルは樹脂含浸されていることが、冷却の観点の上望ましい。しかしながら、樹脂含浸したコイルは、冷却時に超電導特性が劣化する問題があった。今回、絶縁材の熱収縮量をコントロールすることにより径方向の応力低減を図った Y系含浸コイルを試作した。試作コイルの超電導特性が劣化していないことを検証するため、伝導冷却により幅広い温度範囲で通電特性を評価したところ、短尺線材の臨界電流特性から計算した特性と同等となる電流-電界特性が得られたので報告する。

2. パンケーキコイルの試作および通電評価

試作した含浸パンケーキコイル4枚(#1~#4)の線材諸元とコイル諸元を Table.1 に示す。巻線および含浸プロセスを経た後に、Y系線材の臨界電流特性が劣化していないことを確認するため、各パンケーキコイルを液体窒素中で通電評価した。通電試験結果を Fig.1 に示す。4枚のパンケーキコイルは、全て良好な超電導特性を示しており、 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ V/cm 定義でのコイル n 値は、全て 30 以上となった。また電流-電界特性は、短尺線材の臨界電流特性から計算した特性とほぼ一致していることから、線材の特性を劣化させることなく、含浸パンケーキコイルを製作することができた。

3. 伝導冷却通電試験

4枚のパンケーキコイルを用いて試作した積層コイルを Fig.2 に示す。積層順は下から#1,#2,#3,#4とした。2枚のパンケーキコイル毎に冷却のためのアルミ板を挿入して接着した。各アルミ板の先端は GM 冷凍機の2段ステージに熱的に接続されており、真空中で熱伝導のみによりコイルを冷却する構成とした。2 段ステージに取り付けたヒータの制御によりコイル温度を一定に維持し、20 K から 60 K の範囲で通電試験を実施した。発生電圧は各パンケーキコイルの両端で測定し、コイル温度は積層コイルの上下面に取り付けた抵抗温度計により測定した。またホール素子によりコイルの中心磁場を計測した。

コイル温度 20 K における通電試験結果を Fig.3 に示す。電圧が発生したのは、#1 パンケーキコイルのみである。電流-電界特性は、短尺線材の臨界電流特性から計算した結果とほぼ一致しており、 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ V/cm 定義でのコイル n 値は 30 以上となった。また、192 A 通電時にコイル中心磁場は 1.5 T、最大経験磁場は 2.2 T に到達した。コイル温度 30 K ~ 60 K においても、電流-電界特性は、計算結果とほぼ一致する結果が得られた。

4. まとめ

Y系線材を用いて含浸パンケーキコイル4枚から成る積層コイルを試作した。試作したコイルは伝導冷却下で幅広い温度範囲において高い n 値を有しており、短尺線材の臨界電流特性から計算した特性とほぼ一致する良好な超電導特性が得られた。また、コイル温度 20 K において中心磁場 1.5 T、最大経験磁場 2.2 T の発生に成功した。今後は、コイルの大型化および高磁場化を目指していく。

Table.1 Specifications of YBCO single-pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4
Tape width	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Tape thickness	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
Tape Length	24 m	24 m	24 m	24 m
Min Ic@77 K, 0T	83 A	82 A	82 A	94 A
Inner diameter	50.0 mm	50.0 mm	50.0 mm	50.0 mm
Outer diameter	88.9 mm	88.9 mm	88.2 mm	88.6 mm
Number of turns	111	111	111	111

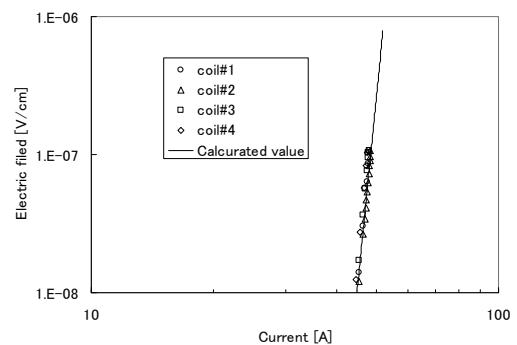


Fig.1 E-I characteristics of single-pancake coils

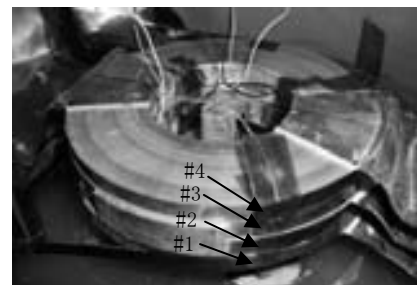


Fig.2 Stacked single-pancake coils

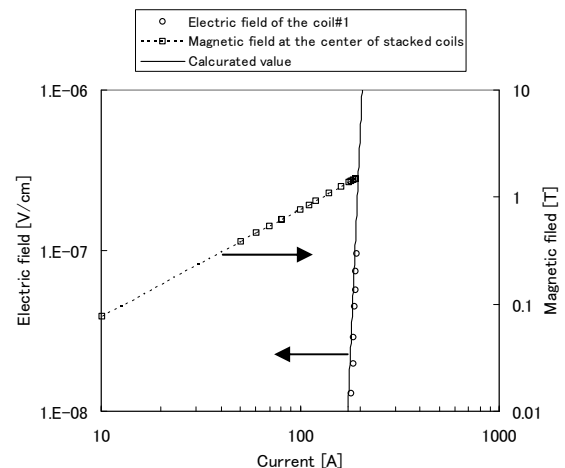


Fig.3 Excitation test results at operating temperature of 20 K