

JT-60SA 用超伝導マグネット・システムの製作開始

Start-up of manufacture of superconducting magnet system for the JT-60SA

吉田 清, 土屋 勝彦, 木津 要, 村上 陽之, 神谷 宏治 (原子力機構)

YOSHIDA Kiyoshi, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, KAMIYA Koji (JAEA),

E-mail: yoshida.kiyoshi56@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構の JT-60 のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60SA)」[1]として推進されている。日本担当の平衡磁界(EF)コイル用導体の試作が完了して、量産が開始された。中心ソレノイド(CS)用導体はダミー導体の製作が完了した。EF コイルの製造治具の製作が完了して、ダミー導体を用いたダブルパンケーキ巻線が開始された。一方、EU の担当するトロイダル磁場(TF)コイルと高温超伝導(HTS)リードの詳細設計が完了して調達合意された。現在、ヘリウム冷凍機の技術仕様の詳細について協議している。ここでは、2010 年 10 月現在の超伝導マグネット・システムの製作状況を示す。

2. EF コイルと CS の製作

ポロイダル磁場(PF)コイルは、4 個の CS モジュールと 6 個の EF コイルから構成(Fig.1)される。EF コイルの各要素の確認試験として、これまでに絶縁材料の放射線化での強度評価、巻線スタックの疲労試験、導体接続部の抵抗測定と交流損失の測定を実施した。冷媒導入部の疲労機械試験を実施して、漏れの無いことを確認した。EF コイルの製造は、巻線機などの製造のための治具が完成して、ダミー導体を用いたダブルパンケーキの巻線を実施している。

CS の各要素試験は、これまでに絶縁材料の放射線化での強度評価、巻線スタックの疲労試験を実施した。導体接続は現在治具の調整を行っている。今後、導体接続部の抵抗測定と交流損失を測定する。CS の製造は、巻線機などの製造のための治具を現在調整中である。

3. EF と CS 導体の製作

PF コイルは、発生磁界から、CS (8.9T)、EF-H(6.2T)、EF-L(4.8T)の 3 種類の導体(Fig. 2)を用いる。EF 素線は、製作実績の多い NbTi 素線であるので順調に製造され、ジャケット材は、SUS316L 材の通常の円管であるので順調に製造されている。導体複合化施設は、那珂核融合研究所に建家と長さ 630m の製造ラインの建設が完成し、これまでに EF-H ダミー導体 2 本と超伝導導体 9 本、EF-L 導体はダミー導体 1 本が完成した。同時に 2 本の臨界電流を測定し、要求性能を満足した。

CS 素線は ITER-TF 素線と同一仕様の素線を採用しているので、素線製造は直ちに開始され、撚線も順調に製作されている。ジャケットは、ステンレス鋼 SUS316LN で、Fig.2 に示すように矩形断面であるが、ITER の導体試作の経験から順調に製造した。撚線とジャケットの複合化は、那珂研究所内の製造設備でダミー導体 1 本を製造して、コイルメーカーに発送した。臨界電流の測定サンプルの熱処理を開始した。

4. TF コイル

EU 担当の TF コイルの詳細設計[2]が承認されたので、TF 用導体の購入が決定した。TF 導体は NbTi 素線を約 40 トン使用するが、技術仕様は EF 用素線と同等であるので、製造を開始した。TF コイルについては、設計が進展して、Fig.3 に示すように、TF コイルのターミナル部や外周支持構造などの構造が決定して、調達合意を調印した。特に、TF コイルが高圧ガス保安法の冷凍側の適応を受けるための調整を行っている。TF コイルはフランス(CEA)とイタ

リア (ENEA)が製作を分担する。

5. ヘリウム冷凍機と高温超伝導電流リード

フランス (CEA)が調達するヘリウム冷凍機については、冷凍能力の要求性能が決定され、機器の詳細設計が完了した。那珂サイトでの設備(建家、電気、冷却水など)について、日本側の受入条件との調整を行っている。また、ドイツ(KIT)が調達する高温超伝導電流リードは BSCCO 2223 と金入り銀の安定化材の HTS 部とディスク型の常伝導部から構成される。CS と EF 用にパルス運転モードでの電流リードの特性の解析が完了し設計が終了した。取合条件が決定されたので、製作が開始された。

参考文献

- [1] K. Yoshida, et al., Physica C 470 (2010) 1727-1733
 [2] M. Peyrot, et al., FTP/P6-29, IAEA 2010

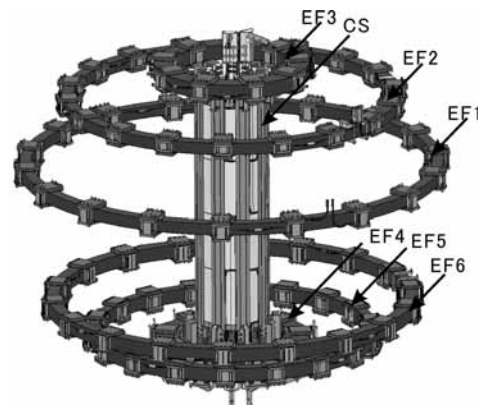


Fig. 1 Poloidal Field Coils for JT-60SA

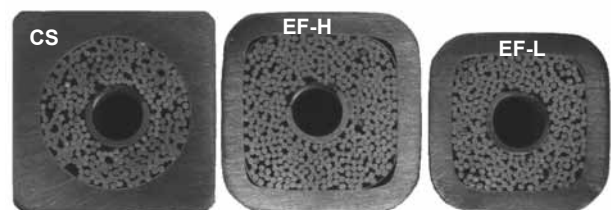


Fig. 2 Cross section of CS, EF-Hand EF-L Conductors

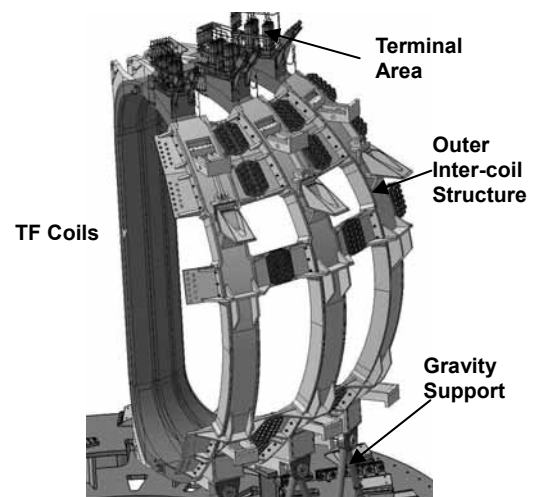


Fig. 3 Toroidal Field Coil System for JT-60SA

JT-60SA 用サーマルシールドの支持構造の詳細設計

Detailed support design of thermal shield for JT-60SA

大西 祥広, 浅川 修二, 市毛 寿一, 星 亮, 神谷 宏治, 吉田 清 (原子力機構)

ONISHI Yoshihiro, ASAKAWA Shuji, ICHIGE Toshikatsu, HOSHI Ryo, KAMIYA Koji, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: ohnishi.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構のJT-60のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本とEU間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60SA)」として推進されている。

超伝導コイルへの放射熱の侵入を抑えるため、サーマルシールド(TS)を超伝導コイルの周囲に配置する(Fig.1)。TSの重力支持は、TFコイルから支持されるため、その支持構造はTSから極低温機器への熱侵入を極力抑え、さらに室温のプラズマ真空容器等との間隔を一定に保つこと等が要求される。そこで、これら要求項目を満たす運転中の支持構造ならびにTSの組立途中における仮支持構造について検討した。

2. 運転中の支持構造

TSの支持構造には、その自重(約100t)を支えるという役割だけでなく、様々な仕様が要求される。本報告では、設計した支持構造(Fig.2およびFig.3)について報告する。

①周辺機器とのクリアランス

周辺機器が密集しており、支持構造は大きさに制限を受ける。一方、極低温機器より80KのTSを支持するため、熱侵入の観点から機器間には十分な距離が要求される。本支持構造は、Arm part、Shaft part、Base part からなり、Base partよりArm partを吊り、内部にて熱侵入経路を折り返す構造とした。

②自由度

プラズマ運転時にかかるトカマク特有のフープ力やディスラプションによる電磁誘導による衝撃などを吸収するため、水平方向への自由度を確保する必要がある。そこで、TFコイルよりTS全体を吊上げる方式を採用した。また、TSの機器原点と装置全体の原点を調整するために芯だし機構を設計した。

③自重変形の補整

完成時において、VVTS(真空容器サーマルシールド)の中心側は約4mm垂れ下がり、またこの自重変形はVVTS中心側を吊上げることにより(5kN)補正できると解析された。そこで、Fig.3に示す支持構造(Inner Strap)を設計した。

3. 組立途中の仮支持構造

TSの支持構造はTS組立工程の中盤にて設置される。しかし、VVTSは組立工程序盤から設置されるため、その間仮支持する必要がある。

①VVTSの仮支持

VVTSの設置は、真空容器設置後に行われる。そこで、真空容器よりVVTSを仮支持することを検討した。また、TS支持構造設置時にはそれらを取り外すため、仮支持箇所を作業可能なポート位置付近の三点とした。

②自重変形の補正

TSはSUS316L(N)製の2枚の板(t=3mm)とその間に挟まれるように設置した冷媒配管およびリヴから構成され、「①VVTSの仮支持」を行った場合、20度セクターでは約20mm垂れ下がると見積もられた。それゆえ、VVTS中心側を真空容器から押し上げる仮支持構造を検討している。

4. まとめ

運転中の支持構造および組立途中の仮支持構造の仕様をまとめ、それを満たす支持構造の設計を行った。

運転中の支持構造として、図2に示す支持構造およびVVTSの自重変形を補整する支持構造(図3 Inner Strap)を設計した。また、組立途中におけるVVTSの仮支持構造には真空容器からの支持を採用した。

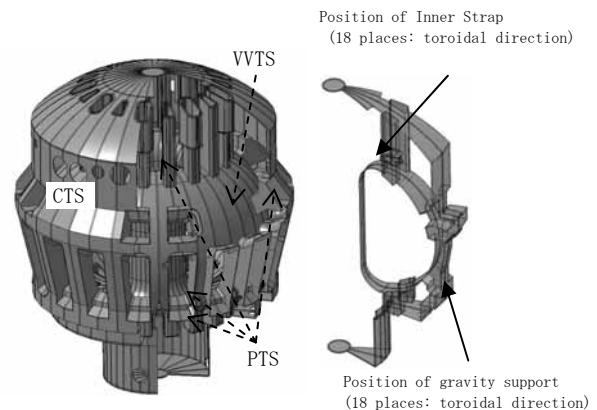


Fig.1 Overall Thermal Shield

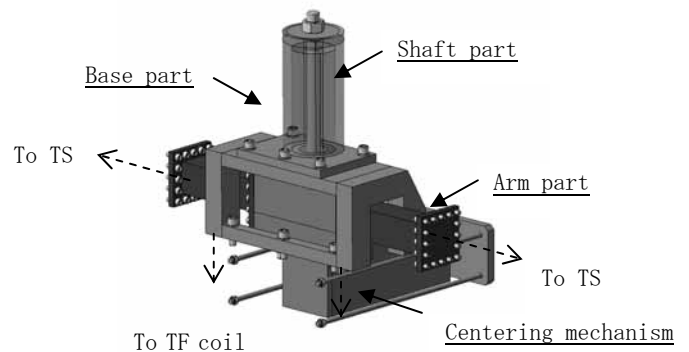


Fig.2 Gravity Support of TS

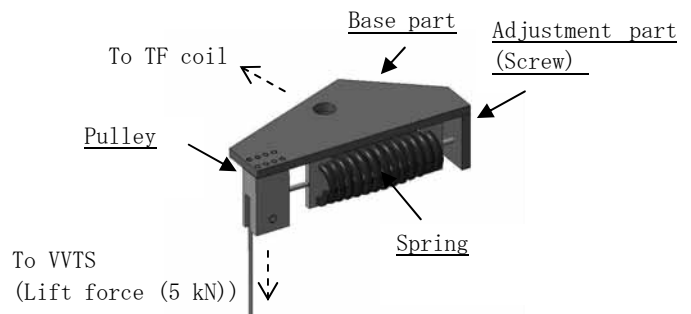


Fig.3 Gravity Support (Inner Strap) of TS

参考文献

1. K.Kamiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.57
2. K.Kamiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.125

JT-60SA マグネット用ヘリウム分配システムの設計(II)

The design of helium distribution system for JT-60SA (II)

神谷 宏治, 米田 昌生, 木津 要, 吉田 清 (原子力機構)
 KAMIYA Koji, KOMEDA Masao, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: kamiya.koji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA のヘリウム冷凍機は、超伝導コイル、高温超伝導電流リード、サーマルシールド、およびクライオポンプを冷却する[1][2]。冷凍機の冷凍能力には、これら機器の熱負荷に、超伝導コイルを 0.5MPa、4.4K の超臨界ヘリウムで強制冷却するための循環ポンプの動力が加わる。このため、超伝導コイル冷却循環ループの動力(質量流量×圧力損失)の評価は重要である。JT-60SA ヘリウム冷凍機は 2 つの循環ポンプ(CP)を備え、CP1 で EU が製作するトロイダル磁場(TF)コイルおよび構造物を、CP2 で日本が担当する4つの中心ソレノイド(CS)と6つの平衡磁場(EF)コイルを冷却する。CP1とCP2の要求圧力損失は 120kPa と 100kPa 以下である。本講演では、CS と EF コイルの CP2 に対して質量流量の最適化と圧力損失計算を行い、要求圧力損失を満足したことを報告する。

2. 超伝導コイルの熱負荷と質量流量

超伝導コイルは通常運転時、プラズマシナリオに加え、プラズマ制御による交流損失、そして核発熱による熱負荷を受ける。循環ポンプ動力にとって、ヘリウム質量流量の減少は有益だが、同時に超伝導コイルの温度上昇、つまり分流開始温度との温度差である温度マージンの減少を促進することになる。このため、要求温度マージンに対する質量流量を決定することが必要である。Fig.1 に CS4 モジュールの通常運転時における、1 パンケーキ当たりの質量流量 6g/s と 8g/s での温度マージンを示す。Fig.1 において 6g/s での温度マージンは全体的に減少するが、両流量とも時刻 0 で温度マージンは最小となり、その値はほぼ等しいため、質量流量 6g/s でも運転可能であることがわかった。同様の解析で他の CS モジュールも 6g/s で、また EF コイルの質量流量は 3g/s で運転可能であることがわかった。

3. 超臨界ヘリウム循環ループ

JT-60SA ヘリウム冷凍機では、液化機で作られたヘリウムは、低温循環ループを備えた Auxiliary Cold Box(ACB)に送られる。ACB の出口を基点とした CP2 の系統図を Fig.2 に示す。CP2 ループでは、4つの CS モジュールと 6 つの EF コイルが並列で冷却される。Fig.2 において、コイル端子箱(CTB)を経由して超伝導コイルに接続する電流リードも示した。10 個の超伝導コイルを流れるヘリウム冷媒は超伝導コイル下流のバルブで流量調節される。それぞれの流路に対して圧力損失を計算し、最大値を冷凍機への動力負荷とした。

4. 結果とまとめ

温度マージン解析で得られた質量流量を用いて計算した各超伝導コイル冷却流路の圧力損失を Fig.3 に示す。計算ではバルブの圧力損失は個別計上するが、冷媒配管の幾何形状による相当長は、配管圧力損失結果に安全係数 2 を乗ずることで取り込んだ。Fig.3 では、コイル冷媒導入の圧力損失も加算して評価した。その結果 CP2 ループでは、CS を 6g/s、EF コイルを 3g/s の質量流量で冷却すれば、最大圧力損失は CS3 でも 81kPa であり、要求圧力損失の 100kPa 以下を満足することがわかった。

参考文献

1. M. Komeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.124
2. M. Komeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.56

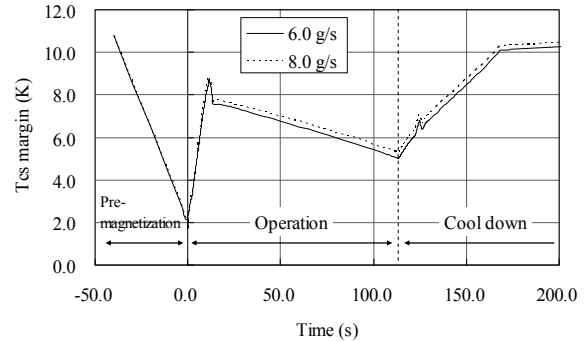


Fig. 1 Temperature margins for CS4 module during operation at different mass flow rate

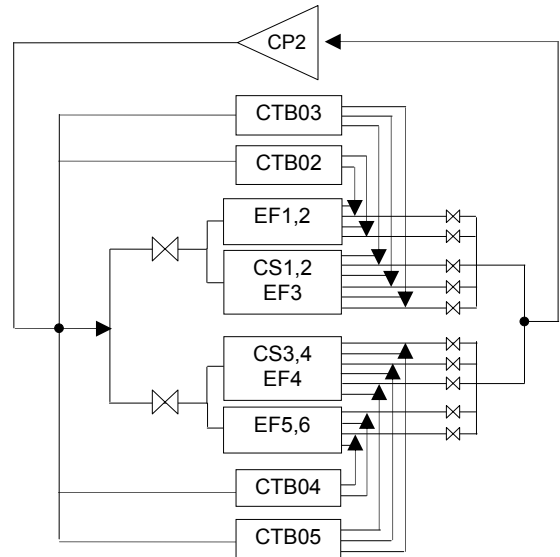


Fig.2 Flow diagram of CP2 cooling loop

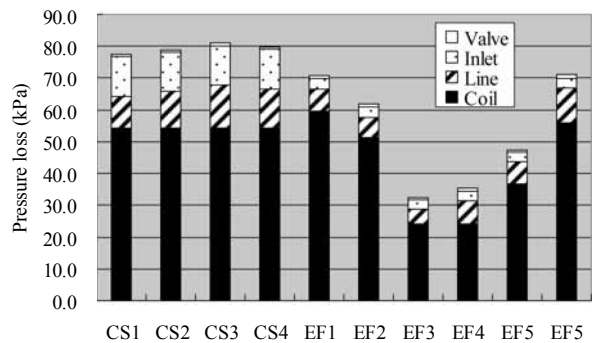


Fig.3 Pressure drop of CS and EF coil loops in CP2

JT-60SA EF コイル用 NbTi 導体接続部の性能評価試験

Performance verification test of NbTi joint for JT-60SA EF coil

村上 陽之, 木津 要, 土屋 勝彦, 吉田 清(原子力機構); 尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司,
柳 長門, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS); 中村 一也, 高尾 智明(上智大学)

MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA); OBANA Tetsuhiro,
TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS);
NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.)

E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の平衡磁場(EF)コイルは、NbTi 素線を用いたケーブル・イン・コンジット導体を用い、複数のパンケーキ巻きコイルをラップ接続し製作される[1]。接続部は、実機運転時に常伝導転移が生じないよう、発熱を抑えた構造で製作する必要がある。

これまで実施したプロトタイプの実験より、運転に支障のない程度に発熱が抑えられることが分かっており、基本構造の妥当性は証明されている[2],[3]。一方、実機接続部は発熱抑制のため超伝導体間の銅を薄くし、また製作性の面から接続部の固定方法を溶接からボルト締結に変更した。

これらの設計変更の影響を含め、実機接続部の発熱特性を評価するため、実機と同じ方法で製作したサンプルを用いて、性能評価試験(接続抵抗試験およびACロス測定試験)を日本原子力研究開発機構(JAEA)と核融合科学研究所(NIFS)、上智大学が共同で実施した。本発表では、これらの性能試験の結果および発熱特性について報告する。

2. 性能評価試験

JT-60SA の EF コイルは最大磁場 6.2 T で用いる高磁場用コイル (EF-H) と最大磁場 4.8 T で用いる低磁場用コイル (EF-L) の二種類のコイルからなる[1]。本試験は EF-H コイル接続部を対象にしており、EF-H 導体同士を接続するパンケーキ(Pancake)ジョイントと、電力供給を行うフィーダー (EF-L 導体) とコイル (EF-H 導体) を接続したターミナル(Terminal)ジョイントの二種類のサンプルの試験を行った。

接続抵抗試験は、Fig. 1 に示す中央部に二種類のジョイント部を設けたサンプルを用いて実施した。試験は、液体ヘリウム中で実施し、ジョイント部に 0~3 T の外部磁場を印加し、最大 20 kA の通電を行った。試験結果の一例として、外部磁場 3 T の時の測定結果を Fig.2 に示す。接続抵抗試験の結果、外部磁場 3 T の時に接続抵抗が最大となり、パンケーキジョイントで約 1.8 nΩ、ターミナルジョイントで約 2.1 nΩであり、プロトタイプで測定された約 2.8 nΩに比べ、接続抵抗が抑えられていることが分かった。

AC ロス測定試験は、Fig.3 に示すサンプルを用いて行った。試験は液体ヘリウム中で行い、台形波状の外部磁場を加え熱量法により AC ロスを測定した。外部磁場は B_0 から B_{90} まで 30 度ずつ四通りに方向を変化させ測定した[3]。試験結果の一例として、磁場印加方向が B_0 の時の測定結果を Fig.4 に示す。AC ロス試験の結果、いずれの磁場印加方向においてもパンケーキジョイント、ターミナルジョイントともに、プロトタイプの半分程度の損失であることが分かった。

3. まとめ

今回実施した EF 接続部の性能試験の結果、異常な発熱は観測されず製造プロセスに問題がないことが確かめられた。また、接続抵抗・AC ロスともにプロトタイプより低く、実機の接続部に問題なく使用できることが確かめられた。

なお、実機運転時の接続部の発熱特性については、当日会場にて報告する。

参考文献

1. K. Yoshida, et al.: Physica C, 470 (2010) pp. 1727-1733
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.55
3. T. Takao, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20 (2010) pp. 503-507

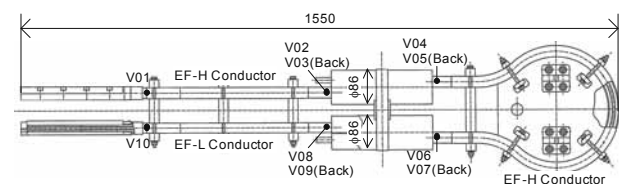


Fig.1 Joint Resistance Test sample
(Upper: Pancake Joint, Lower: Terminal Joint)

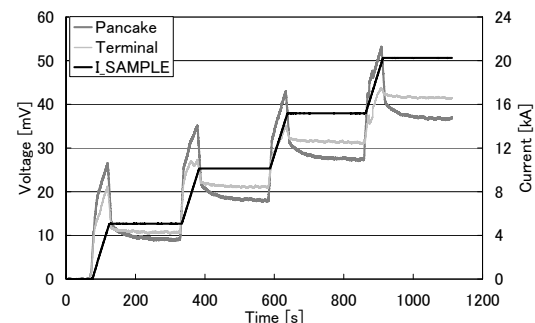


Fig.2 Resistance Test Result (B=3 T)

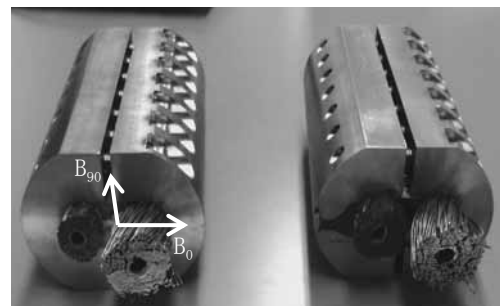


Fig.3 AC loss sample
(Left: Terminal Joint, Right: Pancake Joint)

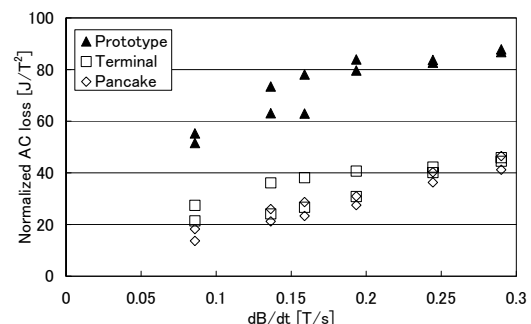


Fig.4 EF Joint AC loss

JT-60SA 平衡磁場コイル用 NbTi ケーブル・イン・コンジット導体の自己磁場測定

Self magnetic field measurements on a NbTi cable-in-conduit conductor for JT-60SA EF coil

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS); 木津 要, 村上 陽之, 土屋 勝彦, 吉田 清(JAEA)
 OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS);
 KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

2007 年度から、核融合科学研究所(NIFS)の大型超伝導導体試験装置を使用して、JT-60SA プラズマ平衡磁場(EF)コイル用 NbTi ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を試験する計画が、NIFS と日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同で開始された。本計画では、CIC 導体の電流分流開始温度(T_{cs})測定と安定性試験を実施し、導体評価を行っている[1]。また、各試験条件における CIC 導体内の電流分布を理解するために、CIC 導体の自己磁場測定を行っている[2]。本講演では、高磁場EFコイル(EF-Hコイル)用CIC導体のT_{cs}測定時における導体の自己磁場測定、及び導体内での電流分布について発表する。

2. EF-H コイル用CIC導体サンプル

EF-H 用 CIC 導体は、Ni メッキを施した 450 本の NbTi 素線を、3(1次撚り)×5(2次撚り)×5(3次撚り)×6(最終撚り)のケーブルリングパターンで撚り合わせており、サブラップテープは使用していない。また、導体中心部には、スパイラル管が配置されている[3]。Fig.1 に導体サンプルの概略図を示す。導体サンプルはラケット形状であり、サンプルの円環部には、外部磁場発生用スプリットコイルによって、均一な磁場を印加することが可能である[4]。Fig.2 に、CIC 導体の周囲に配置した6つのホール素子(B01~B06)の配置図を示す。ホール素子は、スプリットコイルから発生する外部磁場の影響を軽減するように配置にした。

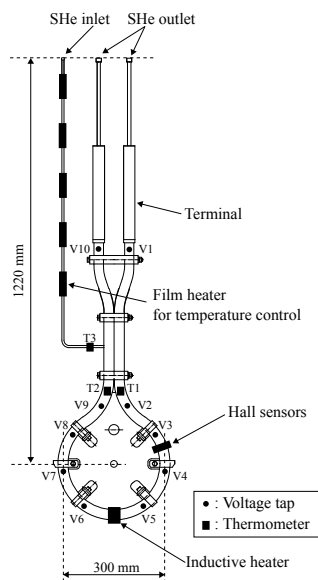


Fig.1 Schematic view of EF-H conductor sample.

3. T_{cs} 測定時における自己磁場測定

本実験では、導体サンプル円環部への印加磁場 6.2 T、導体サンプルへの通電電流値 20 kA、供給冷媒流量 4 g/s、圧力 0.7 MPa に保持した状態で、供給冷媒温度を上昇させた際の導体サンプルの発生電圧、及び x 方向の自己磁場を測定した。Fig.3 に、T_{cs} 測定時における導体サンプルの入口配管温度(T₃)と自己磁場を示す。供給冷媒温度を約 6 K から

徐々に上昇させて、約 6.2 K で T_{cs} (定義: 0.1 μV/cm) となり、約 6.3 K に達したところで、常伝導伝播が発生した。また、常伝導伝播発生前において、供給冷媒温度に伴う自己磁場の変化は非常に小さく、最大変化量は約 3 mT であった。従って、EF-H 導体サンプルの T_{cs} 測定時において、導体内での大きな電流転流現象は発生していないと考えられる。磁場測定結果に基づき、簡易な解析モデルを用いて CIC 導体内の電流分布を検証した解析結果は、当日発表する。

参考文献

1. K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.36
2. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.123
3. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.122
4. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2008) p.37

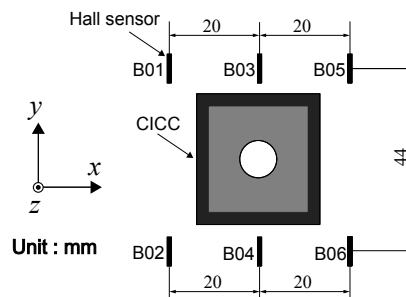


Fig.2 Layout of the hall sensors around the CIC conductor.

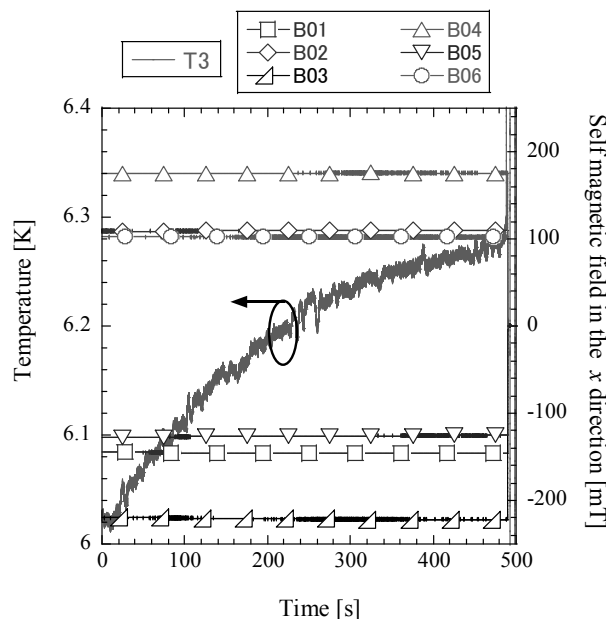


Fig.3 Measurement result of the self magnetic field during the T_{cs} measurement.

YBCO ソレノイドコイルの遮蔽電流磁場に及ぼすコイル形状の効果

Effect of coil shape on the screening current-induced magnetic field for YBCO coils

柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大); 木吉 司(NIMS); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)
 YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); KIYOSHI Tsukasa (NIMS);
 TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
 E-mail: y_yanagisawa@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

近年 YBCO 線材が商品化されコイル応用に向けた研究が活発にすすめられている。YBCO 線材は引っ張り強度が高く、従来の超伝導線材とくらべ大幅に高い電流密度でのコイル設計が可能となる。しかしながら YBCO コイルの問題の一つに、励磁中に誘導される遮蔽電流がある。この電流はコイル中心に反対向きの磁場(遮蔽電流磁場)を発生させるので、(1)中心磁場が設計値に比べて減少してしまう[1]。さらに遮蔽電流はフラックス・クリープにより緩和するため(2)中心磁場が時間的にドリフトしてしまう[2]。これらは NMR や MRI 磁石、加速器用磁石、高磁場磁石などで重大な問題となる。我々はこれまで、YBCO ソレノイドの遮蔽電流磁場強度はコイルが min. volume 形状(Fig.1(a)参照)の場合にピークとなり、最大で18%の磁場減少が起こることを実験と数値計算で示した[1]。ただしこの検討はコイル内径が18mmと小さく、通電電流が臨界電流に対して十分低い運転条件に限定したものであった。そこで本報ではコイル内径とコイル電流/臨界電流の比が遮蔽電流磁場に与える影響を数値計算により調べた。

2. 解析条件・手法

Fig. 1(b) に解析に用いたコイルの模式図を示す。これらのコイルは min. volume 形状を持ち、コイル形状を表す係数 α (外径/内径の比)と β (コイル長/内径の比)の値は全て等しいが、内径が18mmから216mmと異なる。線材幅は4mm、運転温度は4.2Kを想定した。これらのコイルを0Aからコイル臨界電流 I_{coil} (磁場の印加角度を考慮した $I_c - B$ 曲線とロードラインの交点から得られる電流値)まで通電したときの遮蔽電流磁場 B_s を解析した。

解析には外部磁場・自己磁場下における超伝導ストリップモデルを用いた数値計算手法を用いた[1]。まずコイルの各ターンについて、超伝導ストリップモデルにおける電流密度を表す方程式[3,4]を立てる。それらを各時間ステップにおいて連立して解くことで遮蔽電流を含んだ電流密度分布が得られる。最後に得られた電流密度分布をもとにコイル中心での遮蔽電流磁場を計算する。

3. 結果と考察

Fig. 2 に数値計算による解析結果を示す。縦軸は遮蔽電流磁場 B_s /中心磁場 B_c の比 ($|B_s/B_c|$)、横軸はコイル通電電流 I /コイル臨界電流 I_{coil} の比 (I/I_{coil}) である。内径18mmのコイルの場合、 $I/I_{coil} < 0.4$ のとき $|B_s/B_c| = 0.16$ でほぼ一定である。この領域において B_s は B_c とともに増加するため、その割合は変わらない。その後 I/I_{coil} が大きくなるにつれて $|B_s/B_c|$ が減少していき、 $I/I_{coil} = 0.8$ のとき $|B_s/B_c| = 0.075$ ($B_c = 3.2$ T, $B_s = -0.24$ T) である(点(A)参照)。これは、通電電流が上昇していく過程で B_s は飽和するが、 B_c は上昇し続けるためである。一方、内径216mmのコイルの場合、 $I/I_{coil} < 0.1$ で $|B_s/B_c|$ が減少し始め、 $I/I_{coil} = 0.8$ のとき $|B_s/B_c| = 0.013$ ($B_c = 12$ T, $B_s = -0.16$ T) である(点(B)参照)。このようにコイル内径が大きいほど $|B_s/B_c|$ が減少しはじめるのが早く、その値も小さくなる。これは、内径が大きいコイルほど発生磁場が高く、遮蔽電流磁場 B_s が飽和を示すのが早いからである。Fig. 2 より min. volume 形状の YBCO ソレノイドについて、内径と通電電流の割合を

考慮することで、遮蔽電流磁場/中心磁場の比を見積もることが可能である。

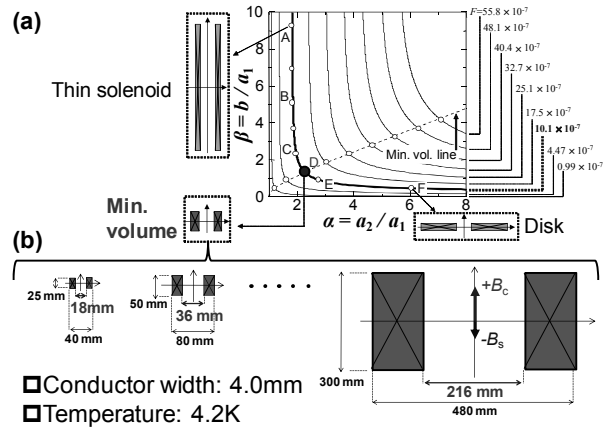


Fig. 1 (a) Constant lines of the central field, B_c . (b) Min. volume coils with various inner diameters of 18 mm - 216 mm.

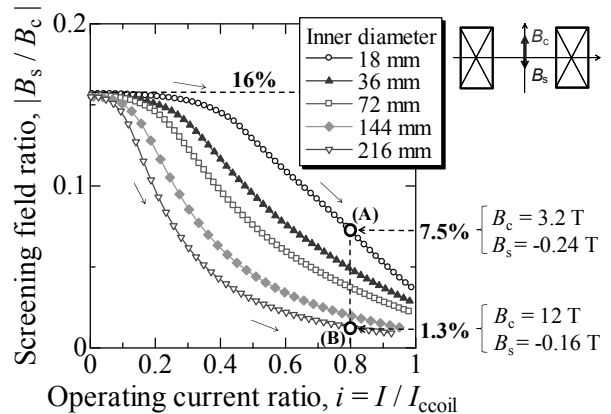


Fig. 2 Screening field ratio as a function of operating current ratio to the coil critical current for min. volume coils with inner diameter of 18 mm - 216 mm.

4. まとめ

YBCO ソレノイドにおいては、コイル内径が大きく、通電電流/コイル臨界電流の比が大きいほど、遮蔽電流磁場/中心磁場の比が小さくなる。

本研究は(独)科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. Y. Yanagisawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20 (2010) pp. 744-747
2. Y. Yanagisawa, et al: Physica C, Vol. 469, (2009) pp. 1996-1999
3. E. H. Brandt: Phys Rev. B, Vol. 49 (1994) pp. 9024-9040
4. T. Yazawa, et al: Physica C, Vol. 310 (1998) pp. 36-41

YBCO コイルに生じる遮蔽電流による中心磁場の時間変動とその抑制法

Central magnetic field drift with time due to screening current induced in a YBCO coil and suppression methods for the drift

柳澤 吉紀, 小湊 康陽, 中込 秀樹(千葉大); 福田 竜彦, 高尾 智明(上智大); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori, KOMINATO Yasuaki, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);

FUKUDA Tatsuhiko, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: y.yanagisawa@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

YBCO 線材は軸方向引っ張り強度が高く(700 MPa 程度)、従来の線材と比べて高電流密度での磁石運転が可能である。この利点を活かせば NMR や MRI 磁石、加速器用磁石、高磁場磁石などを大幅に小型化することが可能である。しかし、YBCO コイルには通電時の径方向磁場によって遮蔽電流が誘導され、問題となる。遮蔽電流は励磁過程においてコイル中心に下向きの磁場を発生させるため、中心磁場を減少させる。さらに遮蔽電流はフラックス・クリープにより緩和するため中心磁場が時間的にドリフトしてしまう[1]。この種の磁場ドリフトは NMR や MRI、加速器において重大な問題となる。YBCO コイルについてこの現象を系統的に調べた報告はまだない。本報では YBCO コイルの磁場ドリフトの基本的な振る舞いを明らかにするために、液体窒素温度(77 K)での YBCO コイルについて、中心磁場ドリフトと通電電流値の相関を実験と数値計算により調べた。また、磁場ドリフトを抑制する通電手法として電流掃引逆転法[2]の効果を検証した。

2. 実験方法

実験には幅 4.1 mm、厚さ 0.1 mm の YBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) を用いて非含浸で巻いたダブルパンケーキコイルを使用した。内径、外径、コイル長はそれぞれ 30 mm、38 mm、27 mm でターン数は 162、励磁係数は 44.5 G/A である。77 K での $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に対応する臨界電流 (I_{coil}) は 50 A である。コイル電流値は DCCT、中心磁場はホール素子を用いて計測した。

3. 実験結果

コイルを 0 A から 40 A まで通電した場合の遮蔽電流磁場を Fig. 1 (a) に示す。励磁の途中の 10 A、30 A、40 A においてそれぞれ 30 分ずつ電流値を一定に保持しながら通電し、磁場ドリフトを計測した。それぞれの電流保持において遮蔽電流磁場がドリフト(緩和)している (Fig.1(a)の破線矢印を参照)。緩和は通電電流の値が大きくなるにつれて顕著に現れている。Fig. 1 (b) に各電流保持における遮蔽電流磁場の緩和率を示す。横軸は電流値保持後の経過時間 t_p である。10 A 保持の場合、緩和率は非常に低く $t_p = 1800 \text{ s}$ において数%しか緩和していない。一方、40 A 保持の場合、緩和率は大きく $t_p = 1800 \text{ s}$ において 60%も緩和(遮蔽電流磁場が消失)している。これは通電電流が臨界電流に近づくことで自己磁場の効果が支配的になり、磁束の移動が起りやすくなるためであると推察される。

運転電流値を 20 A、40 A に設定し、それぞれについて 2 A の電流掃引逆転を適用した場合の効果を調べた。結果をそれぞれ Fig. 2(a)と(b)に示す。縦軸は遮蔽電流磁場の緩和率、横軸は経過時間である。運転電流 20 A の場合、電流掃引逆転をすることで、磁場ドリフト(緩和)が完全に抑えられている。一方、運転電流 40 A の場合、ドリフト抑制の効果は小さく、電流掃引逆転を行った場合でも、 $t_p = 1800 \text{ s}$ において 45%も緩和が進んでいる。

4. 検討

超伝導スリッパモデルと n 値モデルを使用した数値計算 [3]により、実験の通電過程を解析した。結果は Fig. 1, Fig.2 に示されおり実験結果と良く一致している。解析で得られたコイル中の電流密度分布を調べることで、電流掃引逆転の効果

を検討した。運転電流 20 A で電流掃引逆転を行った場合、コイル中の線材の上下端に磁束障壁が形成される。遮蔽電流の緩和はこの障壁の効果で止まり、磁場ドリフトが抑制される [2]。運転電流 40 A の場合は、通電電流が臨界電流に近く、自己磁場効果が支配的な電流密度分布 [4]であった。この場合、電流掃引逆転をしても磁束の障壁は形成されなかった。そのため緩和が止まらず、磁場のドリフトは抑制されなかった。

当日の講演では遮蔽電流磁場を消失させるデマグネタイゼーション法の効果についても論ずる。

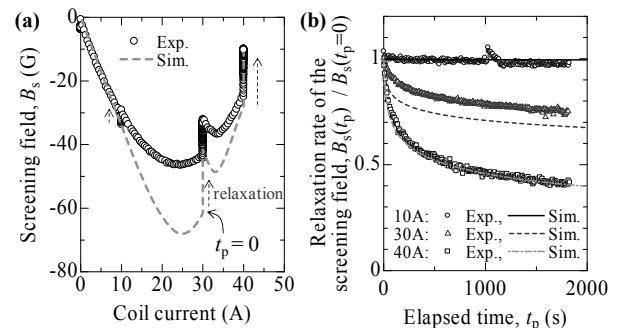


Fig. 1 (a) Screening field as a function of coil current. (b) Relaxation rate of the screening field. t_p shows an elapsed time after each current pause.

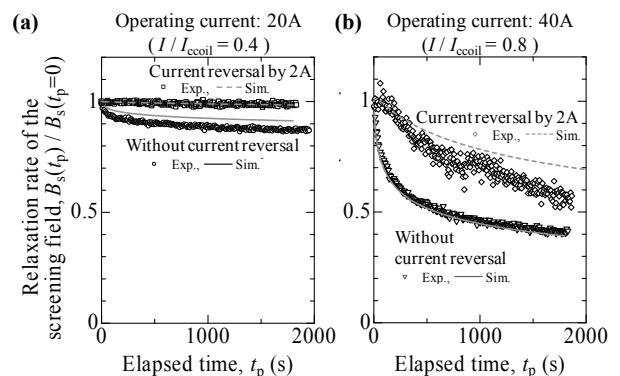


Fig. 2 Effect of current sweep reversal. (a) Operating current of 20A. (b) Operating current of 40A.

5. まとめ

77K での YBCO コイルにおいては、通電電流がコイル臨界電流に近い場合 ($I / I_{\text{coil}} > 0.8$)、緩和を待つことで遮蔽電流磁場をほとんど消失させることができる。一方、通電電流の割合が低い場合、電流逆転掃引により効果的に磁場ドリフトを抑制できる。

本研究は(独)科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. Y. Koyama et. al.: Physica C, 469 (2009) pp.694-701
2. Y. Yanagisawa, et al.: Physica C, 469 (2009) pp.1996-1999
3. Y. Yanagisawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 20 (2010) pp.744-747
4. E.H. Brandt, et al.: Phys. Rev. B, 48(1993) pp.12893-12906

イットリウム系超電導線材中の通電時電流分布の外部磁場印加による変化

Current distribution behavior in coated conductor caused by external magnetic field

宮副 照久, 関野 正樹, 大崎 博之(東大); 木吉 司(物材機構)

MIYAZOE Akihisa, SEKINO Masaki, OSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

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

1. はじめに

テープ形状のイットリウム(Y)系線材によって作製される超電導コイルの発生磁場は、線材のテープ面を貫く磁束がもたらす遮蔽電流によって減少する[1]。核磁気共鳴分光計や磁気共鳴画像装置に用いられるような高い磁場均一度が要求される超電導コイルにおいて、遮蔽電流によって誘導される磁場がコイルの発生磁場の分布に影響を及ぼす。本研究では通電中の Y 系線材に外部磁場を印加し、遮蔽電流と通電電流から成る総電流の分布の磁場依存性を示す。

2. 実験方法

液体ヘリウム中で冷却された Y 系線材に対して通電電流を与え、外部磁場を超電導マグネットにより印加した。Fig. 1 に磁場分布測定の概要図を示す。 $z = 0$ mm は線材の超電導層の上部表面と定義した。外部磁場を Y 系線材の c 軸に対して平行、すなわち Fig. 1 における z 方向に印加した。用いた Y 系線材の幅は 4.1 mm である。線材を冷却後、通電し、一定の通電電流の下で外部磁場を印加した。遮蔽電流と通電電流からなる磁場分布を、ホールセンサを走査することにより測定し、線材内の電流分布を見積もった。

磁場分布から電流分布を求めるために以下のモデルを仮定した。 x 方向に対して線材を均等に分割し、それぞれの領域において均一な電流、さらに z 方向に対して均一な電流が線材内に流れると仮定した。測定した磁場分布より、Tikhonov の正則化を利用して、線材中の電流密度を厚さ方向に対して積分したシート電流分布を求めた[2]。

3. 結果

Fig. 2 に、一定の通電電流(I_t)0 A、50 A、100 A、200 A のもとで外部磁場を 5 T まで増加させたときの $z = 1$ mm における磁場分布を示す。各シンボルは実測値を示す。 I_t が大きくなるにつれて線材の幅中心($x = 0$)に対する磁場分布の対称性が失われた。破線は磁場分布より求めた線材内の電流分布から見積もった磁場分布である。実測値と計算値とのよい一致は求めた電流分布の妥当性を示す。

Fig. 3 に、臨界シート電流(J_c)に対するシート電流(J_y)の分布を示す。ここで、 J_c は z 方向の磁場下における臨界電流(J_c)の測定結果を線材幅によって割った値である。図中の電流値、磁場値はそれぞれ通電電流、外部磁場の値を示す。 J_y/J_c の分布は I_t/I_c によって決定づけられることが実験的に示された。

4. まとめ

通電中の Y 系線材に外部磁場を印加した場合の磁場分布を測定し、線材内における遮蔽電流と通電電流からなる電流の分布を見積もった。線材内に十分に磁束が侵入する外部磁場下において、電流分布は各磁場下での臨界電流と通電電流の大きさによって決定づけられることが示された。

参考文献

1. D. Uglietti, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 115002
2. P. Ušák: Physica C, vol. 384 (2003) 93

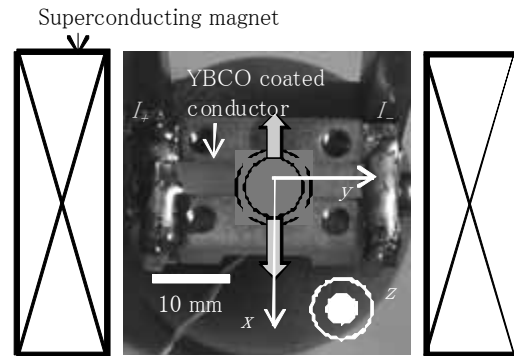


Fig.1 Schematic diagram of measurement of magnetic flux density.

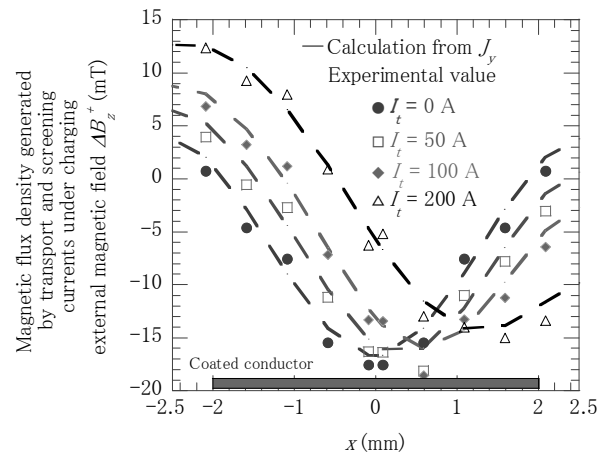


Fig.2 Distributions of magnetic flux density generated by screening and transport currents under charging external magnetic field.

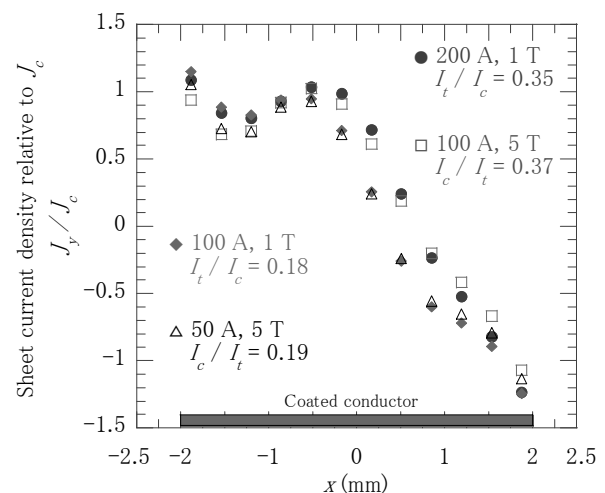


Fig.3 Distributions of sheet current densities relative to critical current density as a function of transport current relative to critical current.

5T 級 DI-BSCCO 小型コイルの特性評価(2)
 —コイル通電損失の局部外部磁界損失による積算評価—

Characteristic tests of 5T-class DI-BSCCO small-scale coil (2)
 -Evaluation of transport loss in coil by accumulating local external-field losses-

八尋 達郎, 浦竹 勇希寛, 川寄 基弘, 中村 聡介, 野上 広司, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学);
 林 敏広, 加藤 武志, 藤野剛三(住友電工)

YAHIRO Tatsuro, URATAKE Yukihiro, KAWASAKI Motohiro, NAKAMURA Sosuke, NOGAMI Koji, IWAKUMA Masataka,
 FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.); HAYASHI Toshihiro, KATO Takeshi, FUJINO Koso (Sumitomo Electric Industries)
 E-mail: yahiro@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)により高磁界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。高磁界高温超電導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。

前回、我々は DI-BSCCO を使用した 5T 級の小型コイルを製作し、液体ヘリウム中でのコイルの低周波数通電時の交流通電損失およびコイル用巻き線の交流外部磁界損失を測定しその結果を報告した[1]。今回は、通電時のコイルの磁界分布に対応するコイル巻線の局所的な外部磁界損失を積算し、コイルの交流通電損失の測定結果と比較したのでその結果について報告する。

2. 5T コイルの諸元

5T コイルの主な諸元を Table 1 に示す。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 0.40H、磁界発生率は 0.018T/A であり、278A の通電で中心磁界 5T が発生する。

3. 解析方法

まず、振幅 I_m の電流通電時のコイル各部の磁界分布を、コイル軸に対して垂直な成分(垂直磁界) $B_{\perp m}$ と平行な成分(平行磁界) $B_{\parallel m}$ に分けて求めた。次に、これら各磁界成分に対して、次式によりコイルの局所的な外部磁界損失密度 $[J/m^3]$ を求めた。

$$W(B_m) = W_{\perp}(B_{\perp m}) + W_{\parallel}(B_{\parallel m}) \tag{1}$$

ここで、 $B_m = \sqrt{(B_{\perp m})^2 + (B_{\parallel m})^2}$ 、 W_{\perp} と W_{\parallel} はそれぞれ垂直交流磁界(振幅 $B_{\perp m}$)、平行交流磁界(振幅 $B_{\parallel m}$) を個別に加えたときの損失密度である。(1)式で得られる局所的な損失をコイル全体で積算してコイルの外部磁界損失とした。

4. 解析結果および考察

(1)式を用いて得られたコイルの外部磁界損失の解析結果を Fig.1 に示す。ここでは、素線 JM28 の 0.04Hz 時の外部磁界損失の結果[1]を用いている。比較のために実測結果も合わせて示している。横軸は通電電流の振幅 I_m [A]、縦軸はコイルの 1 周期当たりの交流損失 $[J/cycle]$ である。Fig.1 より実測と解析の結果はおおよそ一致しているが、300A 付近において両者に若干の相違が見られる。これは通電による効果と考えられる。また $I_m = 251A$ での平行、垂直磁界成分に対する交流損失の分布を Fig.2 に示す。Fig.2 はコイル右上半断面のみを示しており、(a)は平行磁界による損失の分布、(b)は垂直磁界による損失の分布である。Fig.2 より平行磁界に比べて垂直磁界による損失のほうが大きい領域が広く分布している。これらを積算し成分ごとのコイルの交流損失を求めると、

平行磁界損失が 91.8 $[J/cycle]$ であるのに対し垂直磁界損失は 262.2 $[J/cycle]$ と約 2.9 倍であった。よって、コイルの交流損失は垂直磁界による線材の交流損失が大きな割合を占めていることが分かる。

参考文献

1. K. Nogami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.201

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	6096
Coil coefficient [T/A]	0.018
Inductance [H]	0.4

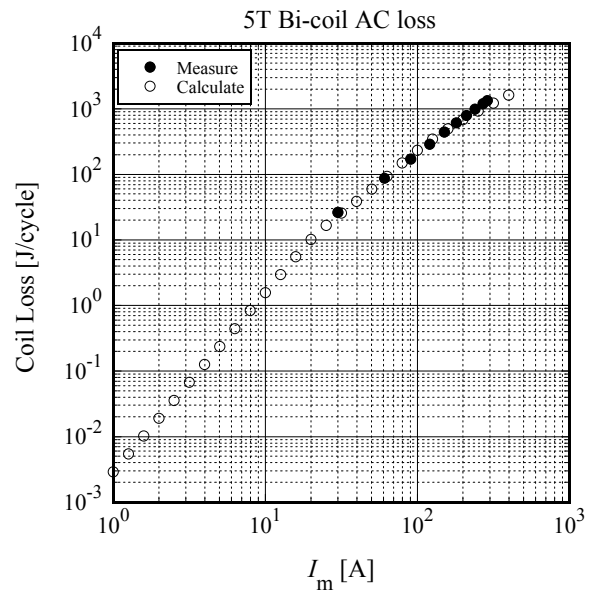


Fig.1 AC loss of 5T Bi-2223-coil at 0.04Hz and 4.2K

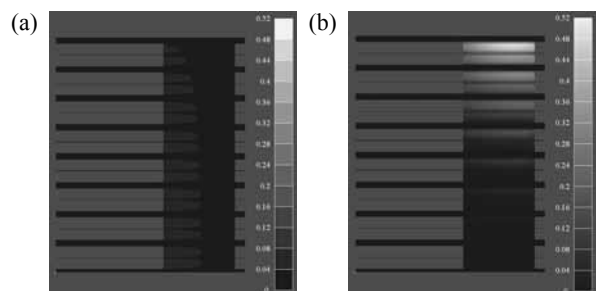


Fig.2 AC loss for parallel- and perpendicular-field components (a) parallel-field loss (b) perpendicular-field loss ($I_m = 251A$)

超伝導テープ線材で巻線した D 型断面レーストラックコイルの開発 Development of race track coil with D-type cross section by using superconducting tapes

安田 兼一, 星平 祐吾, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大)
YASUDA Kenichi, HOSHIHIRA Yugo, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)
E-mail: k6827150@kadai.jp

1. はじめに

超伝導テープ線材は電磁特性に異方性がある。テープ線材幅広面に平行な磁界(平行磁界)中では、丸線材に比べて臨界電流密度は向上し、交流損失は低減する。この平行磁界中で優れた電磁特性を示すテープ線材をコイルの巻線として活用することができれば、コイルの性能は飛躍的に向上することが期待できる。本研究の目的は、このテープ線材の平行磁界中での優れた電磁特性を十分活かすためのコイル構造を検討することである。我々は、コイル構造の一例として D 型断面のレーストラックコイル構造を提案した。レーストラック形状にして、コイル断面を D 型にすることで空間の無駄をなくし、高蓄積エネルギー密度のコイルとなる。また、テープ面に平行な磁界成分が支配的になり、テープ線の性能を活用できると考えられる。本研究では、実際にこのようなコイル形状を実現するために、直線コイルと曲線コイルから構成する場合について検討を行った。この場合の問題は、曲線コイルの外側の巻き密度が小さくなるために直線コイルとの境目で磁界が乱れテープ線材幅広面に垂直な磁界(垂直磁界)成分が増大してしまうことである。また、直線コイルと曲線コイルの間にコイルのつばによる隙間が生じることも、垂直磁界成分が増大する要因となる。そこで、曲線コイル外側の巻き密度を調整することを提案し、垂直磁界がどの程度低減できるかを理論的に検討した。

2. コイルのパラメータと計算条件

理論検討に用いたテープ線材は、幅 4.5mm、厚み 0.36mm である。D 型断面のレーストラックコイルの構造、寸法を Fig.1 に示す。直線コイルは 5 層×40 ターン、曲線コイルは 5 層×88 ターンである。今回は、曲線コイルの外側の巻き密度を変化させることによって、直線コイルとの境目における垂直磁界を低減する。この効果を検討するために、巻き密度を変化させる場合 (Case 1) と、巻き密度を変化させずに通常通り巻線した場合 (Case 2) について、巻線に印加される磁界分布の計算を行って、コイル性能の評価を行った。

3. 結果

磁界計算結果を Table 1 に示す。Case 1 では、レーストラックコイルの平行磁界最大値 $B_{//max}$ が増大し、垂直磁界最大値 $B_{\perp max}$ は減少している。 $B_{\perp max}$ は損失に対応した値と考えることができるので Case 1 は Case 2 に比べ、局所的な損失の低減と臨界電流の向上が期待できる。 $B_{//max}$ と $B_{\perp max}$ の比はコイル性能を表す指標のひとつであり、この値が小さいほど垂直磁界を低減できているということである。

コイル全体の交流損失を概算するために、コイル巻線部の各観測点の垂直磁界に観測点が代表する体積をかけたものを全観測点で合計した。この合計値を Loss_factor としている。Loss-factor は Case 1 の方が大きくなっている。これは、曲線コイル外側の巻き密度を変化させることにより最大の垂直磁界を低減できるものの、垂直磁界が広範囲に印加されていることによる。Fig. 2 は、 B_{\perp} と $B_{\perp max}$ の比をマッピングしたものである。垂直磁界成分の大きな領域が Case 1 の方が広いことがわかる。したがって、損失密度の最大値を低減したり、臨界電流をできるだけ高くしたいような応用には、Case 1 の方法が有効であるが、連続充放電を行うようなコイルの場合は、Case 2 の方が有効であると考えられる。

4. まとめ

直線コイルと曲線コイルの境目で印加される垂直磁界を低減するため、曲線コイル外側の巻き密度を調整する方法を提案し、その効果について理論的な検討を行った。巻き密度を変化させる方法では、局所的な垂直磁界の大きさは低減できるが、垂直磁界の印加される範囲が広範囲となることがわかった。また、巻き密度を変化させない通常の方法では、局所的な垂直磁界は大きい、垂直磁界の印加範囲を直線コイルと曲線コイルの境目に集めることが可能であることがわかった。

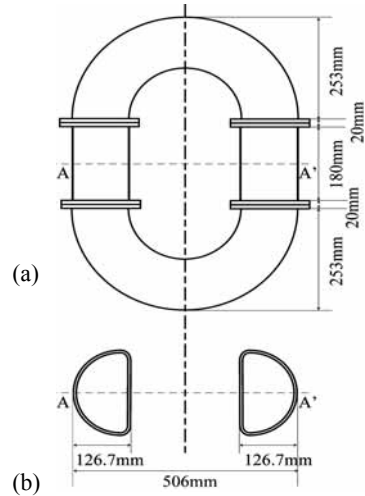
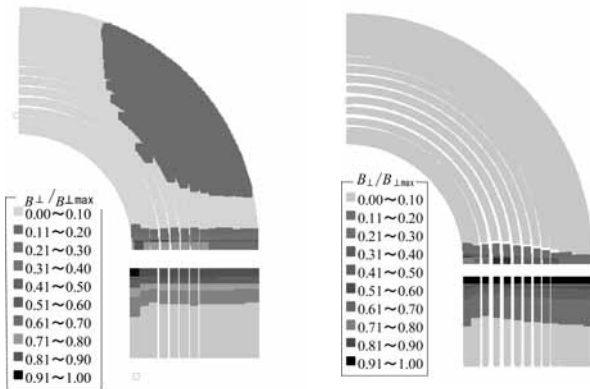


Fig.1 (a) Dimensions of race track coil with D-type cross section, (b) cross-section of race track coil

Table 1. Result of theoretical calculation

	$B_{//max}$ [T]	$B_{\perp max}$ [T]	$B_{\perp max} / B_{//max}$	Loss_factor
Case 1	1.95e-3	7.50e-4	0.38	2.13e-7
Case 2	1.71e-3	7.88e-4	0.46	1.57e-7



(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 2 Magnetic field distributions in race-track coils.

Reference

[1] T.Furubeppu, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.209

金属ジャケット付 BSCCO2223 導体の機械的バットジョイントの接合構造の改善

Improvement of Joint Structure in Mechanical Butt Joint of BSCCO 2223 Conductor with Metal Jacket

伊藤 悟, 坂下 武志, 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, SAKASHITA Takeshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉の製造コスト, メンテナンスコストの削減のためにマグネットを分割し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットを我々は提案している。そのための基礎研究として行ってきた金属ジャケット付 BSCCO 2223 積層導体の機械的バットジョイントの研究において接合面へ均一な接触圧力分布を与えることで接合抵抗を低減できる可能性があることが示されている[1]。本講演では, 接合面へ均一な接触圧力を与えるための接合構造を構造解析により検討し, さらに検討した接合構造を用いて行った実験の結果について報告する。

2. 構造解析

Fig.1 に構造解析に用いたモデルを示す。(a)は過去の研究で用いてきた接合試験体系 (Model A), (b)は新たに提案した接合試験体系 (Model B) である。それぞれのモデルに対して ANSYS を用いて構造解析 (2次元弾性解析・平面応力状態) を実施し, 接合面上の接触圧力分布を評価した。垂直方向接合力を 100 MPa として, 平行方向接合力を 1 MPa, 100 Pa とした場合の解析結果を Fig.2 に示す。本解析により新たに提案した Model B の体系を用いた場合に均一な接触圧力分布が得られることが確認できた。

3. 実験

Fig.3 に実験体系を示す。Fig.3 の本実験体系は Model B を元にして構築したものである。試験用ケーブルとしては, 長手方向に対して 45 度の傾きのある接合面を持つ銅ジャケット付 BSCCO 2223 導体 ($I_c = 1 \text{ kA}$ at 77K, self field) を用いた。本実験体系では, 接合部に垂直方向, 平行方向の双方から接合力を負荷でき, 垂直方向接合力の値はロードセルで測定が可能である。水平方向接合力はスタッドボルトをナットで締め上げることで発生させており, ナットの締結トルクを条件として記録した。比較のため, 接合面を直接接触させる Dry Joint の場合 (Model A, Model B 双方), In 箔を接合面に挿入した場合 (Model B のみ), PbSn はんだで接続した場合についてそれぞれ接合試験を行った。Fig.4 に導体に 500A を印加し, 垂直方向接合応力を 120 MPa に固定した場合の実験結果を示す (ただしはんだ接続の場合には接合力は負荷していない)。結果より Model A よりも Model B のほうが接合抵抗を低減できることが確認できる。また, 水平接合力を加えていき, 接合面での接触圧力を均一化させていくことで, Dry Joint の接合抵抗をはんだ付けや In 挿入の場合の接合抵抗よりも低くできることが確認できた (最小抵抗: 140 nΩ)。

4. まとめ

接合面での接触圧力分布を均一化させるような接合構造にすることで, 高温超伝導導体の機械的バットジョイントにおける接合抵抗を低減できることを数値解析, 実験の双方により確認した。今後は BSCCO 導体のみならず, ReBCO 導体でも機械的バットジョイントの研究を進めていく予定である。

参考文献

- S. Ito, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20 (2010) p.1747

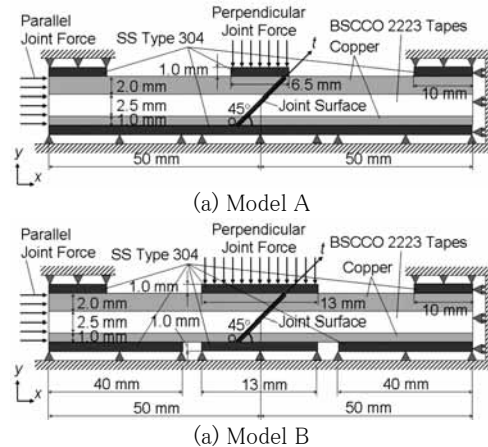


Fig.1 Models for Structural Analysis

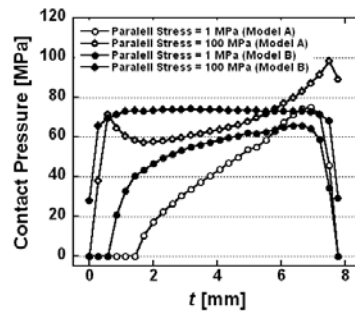


Fig.2 Contact Pressure Distribution

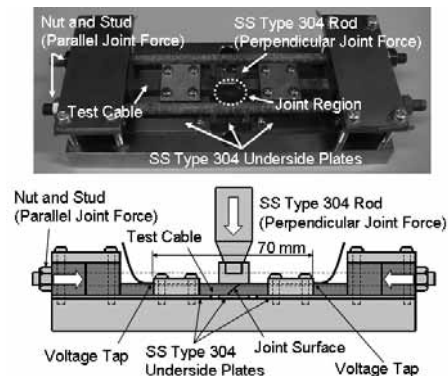


Fig.3 Experimental Set-up

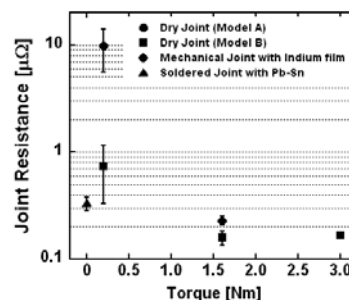


Fig.4 Experimental Results