

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(1)

- 全体計画と磁石の概念設計 -

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (1)

- scenario and conceptual design of the magnet -

中本 建志, 徐 慶金, 飯尾 雅実, 荻津 透, 木村 誠宏, 佐々木 憲一, 山本 明, 吉田 誠(KEK);
TODESCO Ezio, ROSSI Lucio(CERN)

NAKAMOTO Tatsushi, XU Qingjin, IIO Masami, OGITSU Toru, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Ken-ichi, YAMAMOTO Akira,
YOSHIDA Makoto(KEK); TODESCO Ezio, ROSSI Lucio(CERN)

E-mail: tatsushi.nakamoto@kek.jp

1. はじめに

欧州原子核研究機構(CERN)のLHC加速器は2010年から運転を開始し、徐々に装置の性能を向上させながらビーム衝突実験を行ってきた。これまでに順調にデータを蓄積しており、近い将来にヒッグス粒子の発見等の新しい成果を上げることが期待されている。しかしその一方で、衝突ルミノシティ(輝度)を向上させるための高輝度化アップグレード計画(High Luminosity LHC Upgrade: HL-LHC)の検討も既に始まっている。本講演では、LHC 高輝度化アップグレードの全体概要と高エネ研で実施している超伝導磁石の概念設計について報告する。

2. LHC 高輝度化アップグレード計画

LHCには、4つのビーム衝突点があり、そのうちATLAS実験とCMS実験において、重心系8 TeV陽子・陽子衝突(2014年から14 TeVを予定)による標準理論の検証と、さらにそれを超える新しい物理の探索を行っている。しかし、数年後には統計精度の改善が頭打ちとなり、衝突ルミノシティ(現在の設計値は $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)を飛躍的に改善しないままでは多大の運転時間が必要になることが予測されている。

このため、ATLAS及びCMS実験における衝突ルミノシティを現在の5倍に向上させ、10年間の実験期間で積分ルミノシティ 3000 fb^{-1} を達成することを目標とした、HL-LHCアップグレード計画が検討されている。入射加速器の改良、ビーム衝突点超伝導磁石の交換、クラブ空洞やコリメータの導入など大掛かりなハードウェアの開発、改良、更新が検討されている。このうち超伝導磁石を含む主なアップグレードは2022年に予定されている。

高エネ研は、EC-FP7(ヨーロッパ第7次研究枠組み計画)に採択された『HiLumi-LHC 概念設計研究』に2011年秋から正式に参加しており、特に加速器物理・ビーム光学(WP2)、超伝導磁石(WP3)、クラブ空洞(WP4)の各サブグループに参加して、研究活動を行っている。

3. ビーム分離用大口径双極磁石の概念設計

WP3では、主に新しいビーム衝突点超伝導磁石システムについて研究を行っている。CERNを中心にCEA-Saclay、米国(BNL, Fermilab, LBNL)及び高エネ研が研究開発、概念設計に参加している。ビーム最終収束四極磁石Q1~Q3は、特に10 Tを超える高磁場化が求められるため、従来のNbTiに置き換わるNb₃Sn超伝導コイルの採用が検討されているが、米国を中心として重点的な開発が進められている。

一方高エネ研は、ビーム最終収束四極磁石Q1~Q3の直後に隣接して、陽子ビームを衝突用軌道(1つ)から周回用軌道(2つ)に戻すためのビーム分離用大口径双極磁石(D1)の概念設計を担当している。高い磁場精度やクエンチの無い安定した通電性能が要求される点はもちろんだが、大きな課題として、(1)ビーム交差角増大のためのコイル内径の大口径化(80 mm→160 mm)、(2)磁石外径制限による漏れ磁場や

磁場精度の劣化、(3)材料の耐放射線性能や超伝導コイルの除熱性能の向上、などが挙げられる。

現時点での主な設計パラメータを表1に、また検討中の超伝導磁石断面を図1に示す。現行LHCアーク部主双極磁石で使用された外層用NbTiケーブルの余材を採用している。漏れ磁場を防ぎ、できるだけ鉄ヨークによる磁束リターンを期待するため、J-PARCニュートリノビームライン超伝導磁石と同様にヨークカラー方式を採用して、鉄ヨーク幅を最大化している。超伝導コイルは1層構造とし、1.9 Kでの70%の負荷率で、直線部定格磁場5 Tを発生する。

4. まとめと今後の予定

CERNを中心とした国際共同研究の一環として、高エネ研ではHL-LHCアップグレードを目指したビーム分離大口径超伝導双極磁石の概念設計を行っている。2012年度に概念設計を完了させ、引き続き2013年度以降に詳細な工学設計を行う。平行して、ビーム衝突点で特に問題となる、耐放射線性能と除熱に関する研究を進める。

Table 1 Main design parameters of a large-single aperture superconducting dipole magnet for the HL-LHC.

積分二極磁場	40 Tm
定格磁場/ピーク磁場(2D)	5.04 T / 5.9 T
コイル口径	160 mm
磁石外径	570 mm
運転温度	1.9 K (HeII)
誤差磁場(参照半径 50 mm)	$< 10^{-4}$
コイルへの線量、入熱量	$\sim 100 \text{ MGy}, > 10 \text{ W/m}$

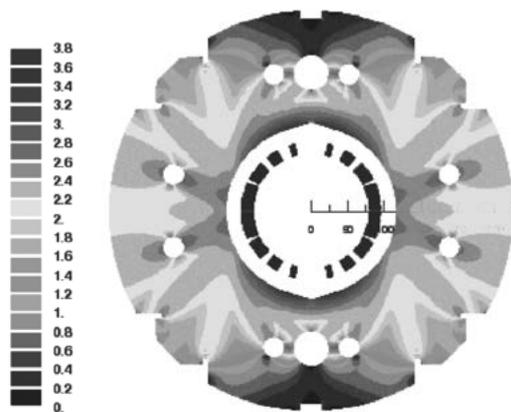


Fig. 1 Cross section of the large single-aperture superconducting dipole magnet for the HL-LHC. (unit: T)

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発

- QC1 プロトタイプの開発と低温試験結果 -

Development of Final Focusing Superconducting Magnet System for SuperKEKB

- Development and Test Results of QC1 Prototypes -

有本 靖, 大内 徳人, 土屋 清澄, 岩崎 昌子, 多和田 正文, 東 憲男, 宗 占国, 大木 俊征, 山岡 広(KEK);
田中 学(三菱電機システムサービス); 遠藤 友成(日立プラントテクノロジー)

ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, IWASAKI Masako, TAWADA Masafumi, HIGASHI Norio, ZONG
Zhanguo (KEK); TANAKA Manabu (Mitsubishi System Service); ENDO Tomonari (Hitachi Plant Technology)

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子衝突型加速器である KEKB の性能を 40 倍まで高めた SuperKEKB 加速器の建設が進められている。SuperKEKB では電子・陽電子ビームの衝突点においてそれぞれのビームが鉛直方向に約 60 nm まで収束される。このビームの収束は衝突点近傍に設置される 8 台の超伝導 4 極電磁石によって行なわれる。これらの超伝導電磁石は新たに設計・製作される。現在、設計は完了して実機の製作が進められている。本学会では実機の製作に先立ち、製作・低温試験を行なった超伝導 4 極電磁石である QC1P 及び QC1E のプロトタイプ機について報告する。

2. QC1 プロトタイプ機

衝突点用超伝導電磁石システム(QCS)は電子・陽電子ビームラインに組み込まれる超伝導 4 極電磁石ダブレットから構成されている(図1)。今回製作したのは衝突点に近い電子ビーム用 QC1E(または QC1RE)及び陽電子用 QC1LP(または QC1RP)のプロトタイプ機である。ここで、それぞれのプロトタイプ機を”QC1E”及び”QC1P”と呼ぶ(図 2)。磁場性能を評価するため、電磁石サイズ、コイル形状、発生磁場勾配、励磁電流は実機と同じである[1](ただし補正コイルは実装されていない)。製作は KEK において行なわれ、製作日数は各々約一月であった。



Fig. 1: QCS layout (plan view)



Fig. 2: Photographs of the prototype magnets. Left: QC1E. Right: QC1P.

3. 低温試験結果

完成した QC1E、QC1P プロトタイプ機は液体ヘリウムクライオスタット内に設置され、液体ヘリウム温度にて冷却され、励磁試験、磁場測定が行なわれた。QC1E の励磁試験では(電源リミットである)2157 A までクエンチなしで励磁できた。また測定された 4 極磁場成分は定格通電電流 1561 A において、 $G=70.07$ T/m (図3)であった。これらの磁場測定結果と励磁試験結果より、QC1E が加速器運転上必要とされる 4 極磁場を十分な運転マージンをもって発生することができることが示された。一方、高次の磁場エラー成分のうち 6 極磁場成分のスケール、ノーマル成分がそれぞれ(4 極磁場成分の大きさに対し)

$a_3 = 1.14 \times 10^{-4}$ 、 $b_3 = 5.50 \times 10^{-4}$ であり、他の多極成分より大きな値を示した。

QC1P の励磁試験では、QC1E と同様に 2100 A までクエンチなしで励磁できた。磁場測定では通電電流 1626 A において、 $G=68.38$ T/m が得られた(図4)。この値もまた、加速器の光学設計から要求される値を満足している。一方、6 極磁場成分は光学設計からの要求より大きなエラー成分を示していた。その大きさは直線部では 4 極磁場成分の大きさに対し $a_3 = 3 \times 10^{-4}$ 、 $b_3 = 4 \times 10^{-4}$ であり、エンド部では $a_3 = 1 \times 10^{-3}$ 、 $b_3 = 2 \times 10^{-3}$ であった。この原因はコイルの組込み時に、コイル断面形状が円形から約 $50 \mu\text{m}$ 程度ずれたためと考えている。実機製作時には組込み方を工夫する必要がある。

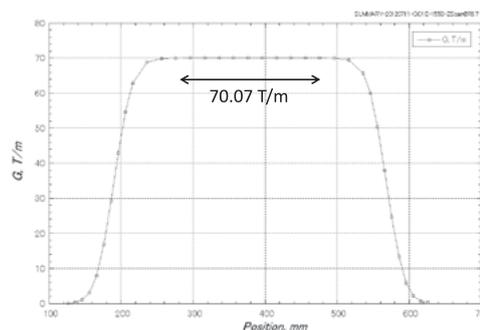


Fig. 3: Profile of quadrupole component for the QC1E as a function of a beam-axis position.

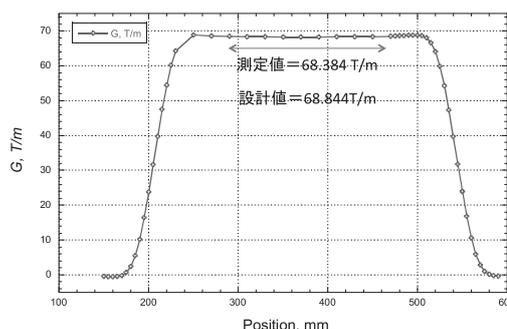


Fig. 4: Profile of quadrupole component for the QC1P as a function of a beam-axis position.

4. まとめ

SuperKEKB QCS システムに用いる QC1E、QC1P プロトタイプ電磁石の製作及び低温試験を行なった。ここで、いくつかの問題点が見つかったが、原因については推定されている。現在、進められている実機の製作にはこれらの結果を反映させる予定である。

参考文献

1. N. Ohuchi, *et al.*: 第 9 回日本加速器学会年会プロシーディングス, to be published.

次世代超電導サイクロトロンの開発: パンケーキコイルの高精度巻線技術

Development of Next Generation HTS cyclotron: high-accuracy winding technique for pancake coil

石山 敦士, 王 旭東 (早大); 長屋 重夫, 鹿島 直二 (中部電力); 植田 浩史 (阪大)

ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong, (Waseda Univ.);

NAGAYA Shigeo, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

筆者らは、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指している。サイクロトロン用高温超電導コイルにおいては、 $\sim 10^{-4}$ の高い発生磁場精度が求められる。磁場精度に影響を与える不正磁場の発生源としては、コイル巻線時の精度不足、超電導線材内の遮蔽電流（磁化特性）、コイル冷却時の熱応力や励磁時の電磁応力による変形等が考えられる。この中で、コイル巻線についてはテープ形状線材を用いたパンケーキコイルの高精度巻線技術の開発が必須となる。そこで新しいコイル巻線方式に基づく高精度巻線機を開発・製作した。本発表では、その概要と、実際にYBCOシングルパンケーキコイルを巻線・試作し巻線精度の評価を行った結果について報告する。

2. 電気絶縁

絶縁テープをラップ巻きすると、線材表面に大きな凹凸ができることになる。そこで液状変成ポリアイミドを塗布する方式を採り、塗布面ができるだけフラットになるような工夫を行った。さらに温度150°C以下で硬化させ、厚さ $\sim 50 \mu\text{m}$ 程度で極低温領域でもフレキシブルな絶縁層を形成した。

3. 高精度巻線機の開発とYBCOパンケーキコイルの試巻線

テープ形状線材を用いたパンケーキコイルを高精度に巻線するための巻線機を開発した。Fig. 1にその一部が示されているが、巻枠を横置きにし、且つ軸が回転中にぶれないような機構を付加するとともに巻線中に所望の張力が加えられるようにした。この巻線機を用いてFig. 2に示すシングルパンケーキコイルを試巻線した（外直径100mmの巻枠に54ターン巻線）。巻線中にレーザ変位計を用いて連続的にコイル半径方向の巻線の状況を測定した結果をFig. 2(a) (b)に示す。巻線精度の評価については、別報で報告する[1]。今回は製作した巻線機を用いて初めての巻線作業であったことと、コイル巻枠等の寸法精度

が不十分であったことから、さらに高い精度での巻線が可能であると考えている。本研究の一部は科研費基盤研究A (23246053) に依ったことを付記する。

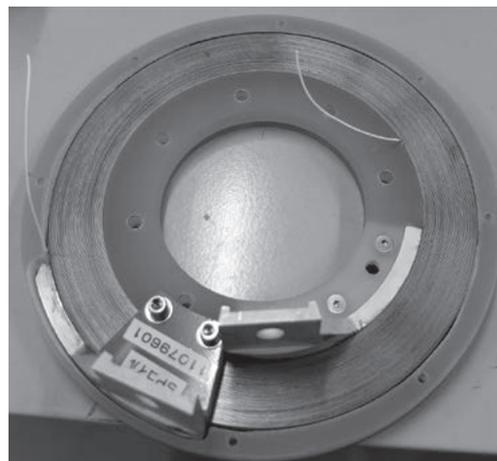
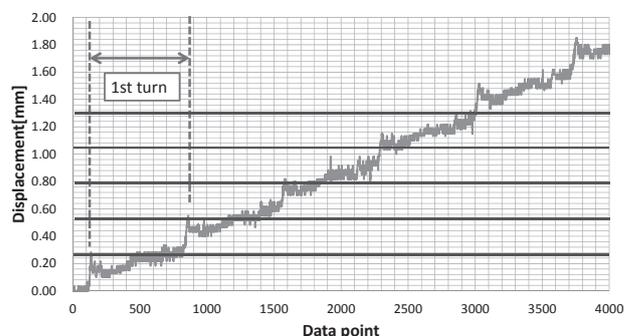
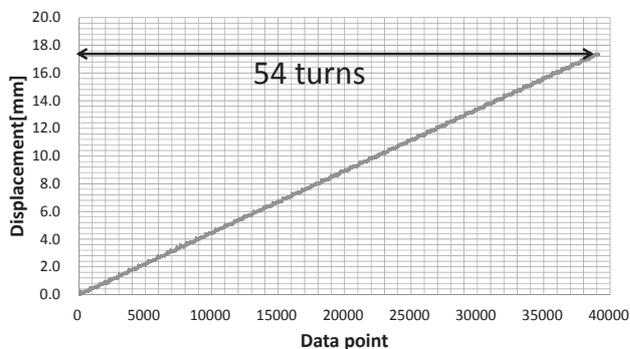


Fig.2 YBCO single pancake coil wound by the new winding machine



(a) First 5 turns



(b) Total turns

Fig.3 Trace of winding process by laser displacement meter

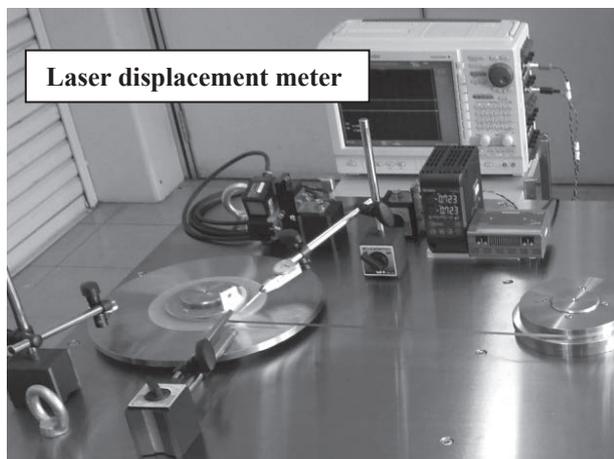


Fig.1 A new coil winding machine for YBCO pancake coils

参考文献

[1] 86th CSJ Autumn Conference, 2P-p40 (2012)

次世代超電導サイクロトロンの開発: コイル形状の設計最適化

Development of Next Generation HTS Cyclotron: Design Optimization of Coil Shape

植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大), 野口 聡(北大); 石山 敦士(早大);
長屋 重夫, 鹿島 直二(中部電力); 宮原 信幸(放医研)

UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power Co.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)
E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指している[1]。重粒子を高いエネルギーまで加速するためには、磁場を等時性に保ちつつ、かつ、周方向に強弱を持つ磁場 (AVF) を形成する必要がある。特に、磁場分布をスパイラル状にするとより強い収束効果が得られ、高いエネルギーのビーム出力が可能となる。放射線医学総合研究所の HIMAC と同等の出力 (400MeV/核子, 300nA) を持つ高温超電導サイクロトロンを想定して、等時性磁場発生用のメインコイルと、AVF 発生用のスパイラルセクターコイルの設計最適化を行ったので、その結果について報告する。

2. 超電導コイルシステムの試設計

等時性磁場発生用のメインコイルとして円形スプリットコイル (4 対を想定) と AVF (Azimuthally Varying Field) 発生用のスパイラルセクターコイル (4 対を想定) の試設計を行った。

2.1 スパイラルセクターコイルの設計

6 価の炭素イオンを 400 MeV まで加速するとして、平均磁場 B_{ave} は 6 T とした。この時ビーム引出半径は 1.06 m となる。また、フラッター (磁場の段差の度合い) を

$$F^2 = (B_{hill}/B_{ave} - 1)(1 - B_{valley}/B_{ave}) = 0.06$$

とする。ここで、 B_{hill} 、 B_{valley} はそれぞれ AVF の hill 部と valley 部の磁場である。次に鉛直方向のベータトロン振動数が $0 < \nu_z < 0.5$ となるように、径方向位置 r とスパイラル角 (ϵ) の関係を求めた (Fig. 1 参照)。巻線の最小曲率半径は 50 mm, 高さ 100 mm, 巻厚 50 mm とした。

2.2 メインスプリットコイルの設計

スパイラルセクターコイルが納まるメインコイルを設計する。中心より最も離れたセクターコイルの巻線の位置は 2.1 の結果を基に、メインコイルの内半径を 1.2 m とした。セクターコイルで発生する磁場の周方向平均した分布を Fig. 2 に示す。所望の等時性磁場分布と併せて示した。この差の磁場をメインコイルで発生させることになる。設計条件を以下のように設定し、コイル形状・位置等を設計変数として GA-SA 法を用い、使用超電導線材量が最少となるよう設計最適化を試みた。制約条件は、1) YBCO 線材は幅 1 cm, 厚さ 200 μm (基板, 安定化銅を含む) とし、 I - V 特性の磁場強度・磁場角度依存性を考慮する。巻線は絶縁等を含めて占積率を 0.7 とする; 2) 冷凍機伝導冷却で運転温度は 20 K, 運転電流は負荷率 0.7 とする。加速エネルギーを可変にすることを想定して、複数のスプリットコイルは別電源で励磁される; 3) コイルに加わる応力 (BJR) は 1.0 GPa 以下[2]に抑える。

2.3 設計結果

Fig. 3 に設計したコイルの概観と mid-plane 上の磁場分布を示す。中心磁場はセンターコイルを追加して調整する。また、不整磁場はトリムコイルなどで微調整する。

なお、本研究の一部は科研費 (基板研究 A: No. 23246053) に依ったことを付記する。

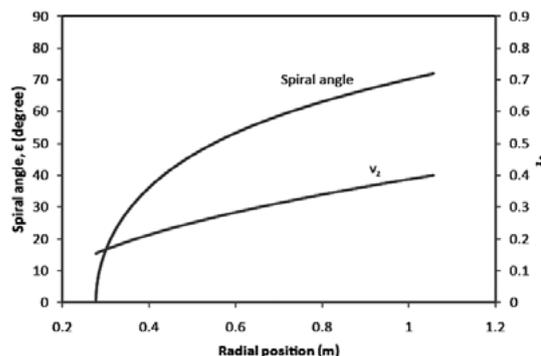


Fig. 1. The relationships between radial position and spiral angle, betatron oscillation, ν_z .

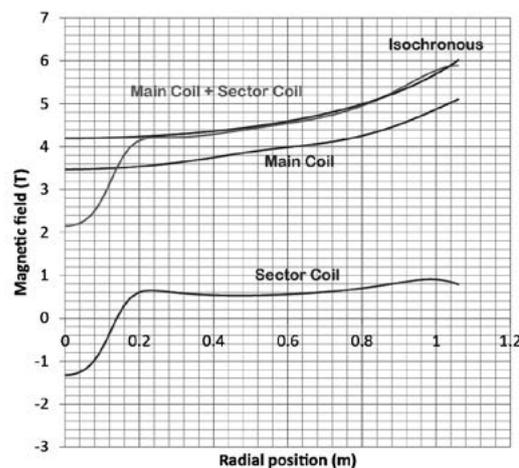


Fig. 2. Distributions of average magnetic field in radial position of mid-plane.

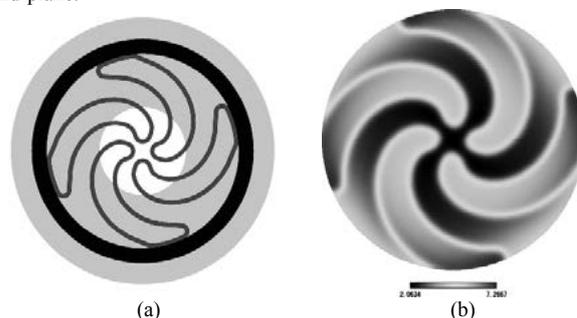


Fig. 3. (a) Schematic view and (b) magnetic field distribution in mid-plane of the HTS AVF cyclotron.

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 86 (2012) 2P-p35
2. S. Nagaya, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 86 (2012) 1B-a07

次世代超電導サイクロトロンの開発: 遮へい電流の影響の検討

Development of Next Generation HTS Cyclotron: Effect of Shielding Current

植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大); 野口 聡(北大); 石山 敦士(早大)

UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.);

NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指している。サイクロトロン用高温超電導コイルにおいては、空間的・時間的に高精度な磁場が3次元的に分布することが要求される。高温超電導コイルでは、高温超電導線材がテープ形状をしているため、遮へい電流が顕著に誘導され、それによって生じる磁場がコイルの設計磁場に影響を及ぼし、発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。今回は、Y系超電導線材に流れる誘導電流により発生させる磁場の影響について検討を行ったので報告する。

2. 支配方程式

我々の目指している次世代超電導サイクロトロンコイルは最終的にはスパイラルセクターコイルのような異形コイルが必要となる[1]。既に、我々は、異形コイルにも適用可能な3次元過渡電磁場解析のための数値シミュレーションコードを開発している[2]。Y系超電導線材は超電導層の断面アスペクト比が非常に大きいことから、線材厚み方向で電磁場が一様であると仮定する近似を用いることができるため、厚み方向の積分を実行でき、次式が得られる。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}) \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS = -\frac{\partial \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{n}}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 T はテープ面法線方向の電流ベクトルポテンシャル、 \mathbf{n} はテープ面の法線ベクトル、 d は超電導層の厚み、 \mathbf{B}_0 は外部磁場、 ρ は抵抗率である。積分範囲 S は超電導体の全領域であり、 \mathbf{R} はソース点 \mathbf{r} からフィールド点 \mathbf{r}' に向かうベクトルである。超電導特性は E - J 特性 (n 値モデル) により表現した。超電導線材外の領域は、積分方程式を利用しているため、要素分割は不要であり、精度良く計算が可能である。左辺第2項の解析領域全体に亘る積分は高速多重極法を利用した。

3. 解析例

遮へい電流の影響を抑制するために、テープにスクライビングやスリットなどの細工を施すことが考えられる。そこで、今回は、テープ幅 10 mm の YBCO 線材 (超電導層 1 μm , ハステロイ 100 μm , 銅層 50 μm メッキ, 絶縁層 50 μm コーティング) については、Fig. 1 で示したような、(a) テープ線材そのまま、(b) テープ幅を半分にしたもの、(c) テープ中央にスリットをいれたもの (端部はつながっている) を想定した。コイル内部では接続部はなく、1本のテープでダブルパンケーキ巻線されているとした。コイル内径 100 mm, コイル外径 138 mm, 60 \times 2 ターンのダブルパンケーキコイルである。Fig. 2 に遮へい電流分布の解析結果を示す。線材端部で遮へい電流が戻ることがわかる。Fig. 3 に遮へい電流磁場の分布を示す。(b)(c)ともに遮へい電流による磁場が減少していることがわかる。Fig. 2 を見ると、(a) の場合ではテープ面全体で遮へい電流がループを形成しているのに対し、(b)(c) の場合は、コイル上下端の部分に遮へい電流が流れており、コイル中心面の線材部では遮へい電流は少なくなっている。このように、テープ面が経験する磁束の鎖交面積が小さくなるため、遮へい電流による磁場も抑制されていると考えられる。

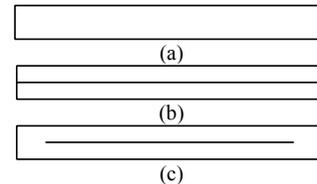


Fig. 1. Schematic drawings of (a) 10mm-width tape, (b) divided 10mm-width tape and (c) slit 10mm-width tape for pancake winding coil.

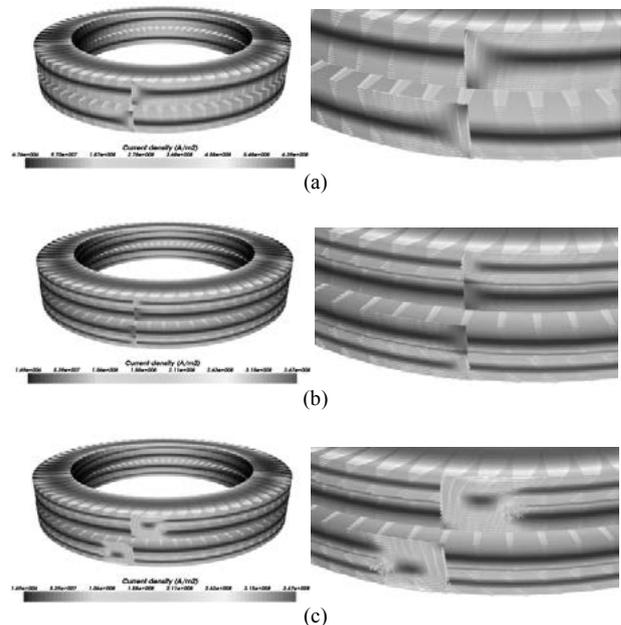


Fig. 2. Shielding current distributions of (a) coil wound 10mm-width tape, (b) coil wound divided 10mm-width tape and (c) coil wound slit 10mm-width tape.

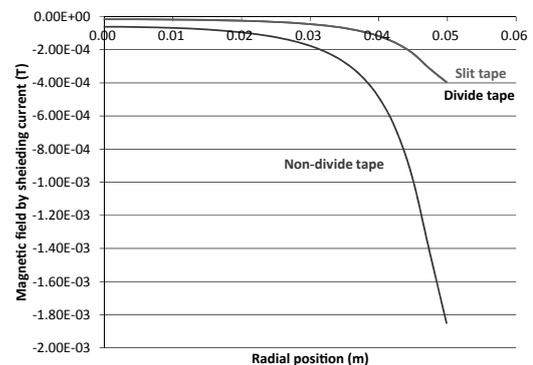


Fig. 3. Magnetic field by shielding current.

なお、本研究の一部は科研費 (若手研究B: No. 23760260) に依ったことを付記する。

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 86 (2012) 2P-p35
2. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 85 (2011) 1B-p02

冷凍機停止後も動作可能な輻射シールドレス Y 系伝導冷却マグネットの開発(1) — マグネットの特長および設計 —

A radiation shield-less conduction-cooled YBCO magnet which keeps operation
even after stopping a cryocooler (1)

— Feature and design —

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke(TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

超電導コイルを冷凍機で伝導冷却するマグネットでは、2 段冷凍機の 1 段階で冷却された輻射シールドにより超電導コイル部への熱侵入量を低減する方法が一般的である。Y 系線材は、20 K~30 K でも高い臨界電流密度を有しているため、輻射シールドがないマグネット構成が可能となる。しかしながら、輻射シールドレスマグネットでは、冷凍機が停止した場合に、コイル温度がすぐに上昇し、クエンチしてしまう。そこで、今回、冷凍機が停止しても一定時間運転可能な輻射シールドレスマグネットを開発したので報告する。

2. マグネットの特長

輻射シールドレスマグネットでは、輻射や支持材からの侵入熱が直接コイルに入ってくるため、コイル内部に温度差が生じてしまう。その結果、冷凍機と伝熱板でつながっていない箇所の温度が高くなってしまいうため、温度マージンが減少してしまう。また、冷凍機が停止した場合には、冷凍機からの侵入熱も加わるため、コイル温度がすぐに上昇してしまう。そこで、定常時のコイル内部の温度差を低減し、かつ冷凍機停止後の運転時間を長くするために fig.1 に示すようなマグネット構成とした。超電導コイルはコイルケースで覆われており、超電導コイルとコイルケースの間に断熱層を設けている。また、冷凍機とコイルおよびコイルケースの間に伝熱板を取り付け、コイル伝熱板の熱抵抗をコイルケース伝熱板の熱抵抗より大きくしている。その結果、冷凍機が停止した場合には、最初にコイルケースに熱が侵入するため、コイルケースとコイル間に温度差が生じ、結果的にコイルの温度上昇速度を遅くすることができる。一方、冷却時には、断熱材を介して冷却する必要がある。そこで、コイルケースの材質をアルミとすることでコイルケースの熱抵抗を小さくし、コイルケースの全面からコイルを冷却する構成とした。

3. 解析モデル

上述したマグネット構成の効果を確認するために、熱解析を実施した。マグネット構成部品の重量および 30 K での熱抵抗を Table 1 に示す。ここで、断熱材の充填率は 10%とし、熱伝導率および密度をエポキシの 1/10 とした。熱負荷条件としては、コイルケースへの熱侵入量を 19.6W とし、冷凍機停止後に冷凍機から侵入する熱量を 13 W とした。また、冷凍機の冷却は、冷凍能力を熱流束として与えた。

4. 解析

断熱材の効果を検証するため、断熱材有無の場合の冷凍機停止後の温度変化を解析した。コイル温度が定常となった後に、冷凍機を停止し、運転限界であるコイル温度 42 K となるまでの時間を計算した。計算結果を Fig.2 に示す。断熱層がない場合には、冷凍機、コイルケースおよびコイルの温度が同じ速度で上昇してしまうが、断熱層がある場合には、コイルとコイルケース、冷凍機間に温度差が生じるため、コイル温度上昇速度が緩やかになっている。その結果、運転限界であ

る 42 K に到達するまでの時間が、断熱層がない場合に比べて、1.6 倍の 3000 秒となることを確認した。

5. まとめ

コイルとコイルケース間に断熱材を挿入し、コイルと冷凍機間の熱抵抗を大きくすることで、冷凍機停止後も 3000 秒間運転できることを解析により確認した。引き続き、モデルマグネットの試作、温度上昇試験を実施し、今回提案した新しいマグネット構成の有効性を検証する。

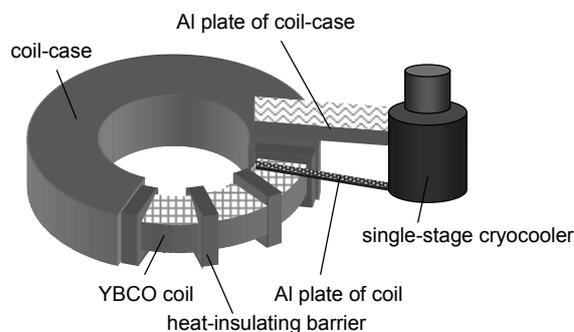


Fig.1 Schematic drawing of new concept magnet

Table 1 Specification of radiation shield-less magnet

Parts	Weight (kg)	Thermal resistance at 30 K (K/W)
coil	15.6	0.96
heat-insulating barrier	0.4	1.52
coil-case	36.4	0.34
Al plate of coil	0.03	3.0
Al plate of coil-case	1.37	0.03
cryocooler	5	-

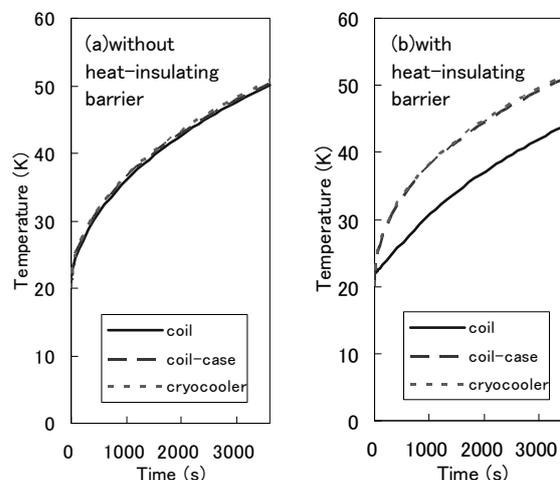


Fig.2 Calculated time variations of temperature after stopping a cryocooler

冷凍機停止後も動作可能な輻射シールドレス Y 系伝導冷却マグネットの開発(2) — マグネット試作および試験結果 —

A radiation shield-less conduction-cooled YBCO magnet which keeps operation
even after stopping a cryocooler (2)

— Fabricated and tested —

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke(TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

冷凍機が停止しても一定時間運転可能な輻射シールドレス Y 系伝導冷却マグネットを開発している。本マグネットは、超電導コイルとコイルケース間に熱伝導率が小さい断熱層を挿入することで、コイルと冷凍機間の熱抵抗を大きくしている。その結果、冷凍機停止後もコイル温度は緩やかに上昇することができる。今回、試作したモデルマグネットを用いて冷凍機停止後の温度上昇試験を実施し、実験と解析の両面から保持時間を評価したので報告する。

2. マグネット試作

上述したマグネット構成の効果を実証するために、実際にモデルマグネットを試作した。試作したモデルマグネットを Fig.1 に示す。コイルには、 ϕ 730 mm 級の Y 系パンケーキコイルを 2 枚積層したコイルを使用した。コイル諸元を Table 1 に示す。使用したパンケーキコイルは、Y 系線材と SUS 線で構成されているため、通常の超電導コイルに比べて熱抵抗が大きくなってしまふ。そこで、厚さ 4 mm の Cu 均熱板をパンケーキコイルの上下面に取り付けることで、すべて Y 系線材を用いたコイルの熱抵抗に近づけている。また、断熱材は、充填率 10% を模擬するため、FRP の板を体積が 10% となるようにくり貫いて製作し、コイルとの接触面積が 10% となるようにした。また、コイル伝熱板とコイルケース伝熱板には、高純度アルミを使用し、厚みを変えることで、コイル伝熱板の熱抵抗をコイルケース伝熱板の 100 倍にしている。また、Fig.2 に示すように、両伝熱板は、単段冷凍機に取り付けられた冷却ステージに取り付けており、重ならないように 180 度位相をずらしている。

3. 温度測定試験

室温からの冷却試験の結果および定常状態から冷凍機を停止した後の温度上昇測定の結果を Fig.3 に示す。冷却時には、コイルとコイルケース間の温度差が小さく、およそ 14 時間で運転限界温度(42 K)以下になることを確認した。また、冷凍機停止後の試験では、およそ 3000 秒後に 42 K に到達した。冷却時および冷凍機停止後の温度上昇の解析結果も Fig.3 中に併せて示しているが、どちらもほぼ定量的に一致していることを確認した。以上の結果より、今回のマグネット構成が、断熱層を介しても問題なく冷却できることおよび冷凍機停止後の運転保持時間を長くできることを実証した。

4. まとめ

冷凍機停止後も一定時間運転可能なマグネットの開発を進めている。今回、モデルマグネットを試作し、冷却時間および冷凍機停止時の運転保持時間を測定した結果、冷却時間 14 時間、保持時間 3000 秒であり、解析結果と 5% 以内の精度で定量的に一致することを示した。本結果より、新しいマグネット構成の有効性を実験と解析の両面で確認することができた。今後は、実際の運用に近い条件として、通電時に冷凍機を停止する試験を実施する予定である。

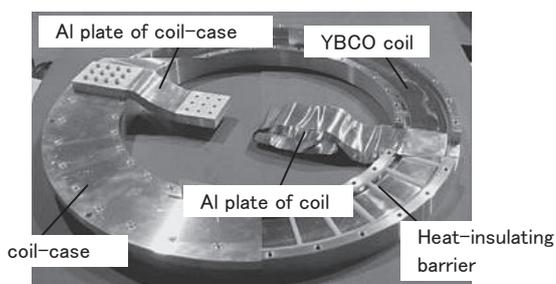


Fig.1 A radiation shield-less model YBCO magnet

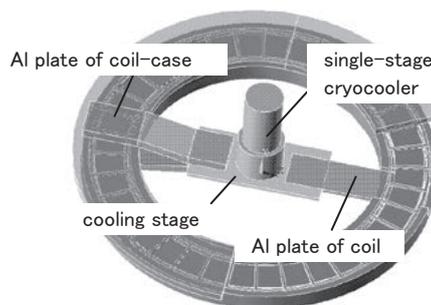
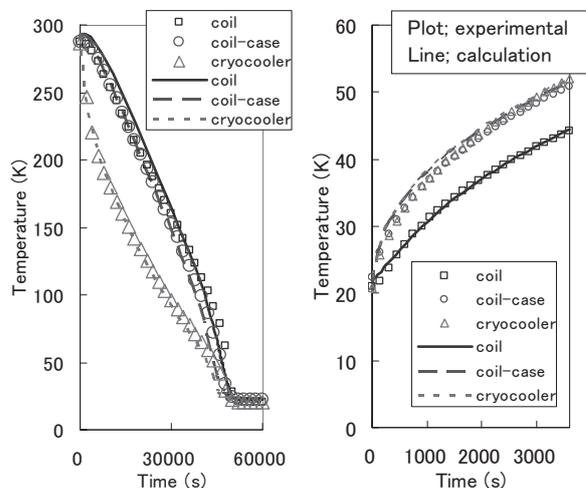


Fig.2 Schematic drawing of model magnet

Table 1 Specification of 2 stacked pancake coils

Number of YBCO tape	1
Number of SUS tape	3
Inner dia. (mm)	600
Outer dia. (mm)	730
Turns	92×2
YBCO tape length (m)	200×2
SUS tape length (m)	200×3×2
Number of pancakes	2



(a) initial cooling (b) after stopping cryocooler

Fig.3 Time variations of temperature in the model magnet

20cm 室温ボア 5T RE 系高温超電導マグネットの開発

Development of a 5T 2G HTS Magnet with a 20-cm-diameter Room Temperature Bore

大保 雅載, 藤田 真司, 原口 正志, 飯島 康浩, 伊藤 雅彦, 斉藤 隆(フジクラ)

DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, HARAGUCHI Masashi, IIJIMA Yasuhiro, ITOH Masahiko, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)

E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

1. はじめに

RE 系超電導線材は 20K 以上の温度領域でも高い臨界電流-磁場特性を示し、様々な機器への応用が期待されている。フジクラでは線材の高特性化、長尺化を進めると共に線材機械特性の把握と性能向上、さらに、小型コイル試作による伝導冷却下でのコイル特性、安定性評価などを行ってきた。RE 系超電導線の実用機器への適用を想定すると線材には均一性、高信頼性などが求められるが、より大口径コイルでの実証例も必要である。今回、フジクラ製 RE 系超電導線材を用いて 20cm 室温ボアを有する 5T 高温超電導マグネットの開発に成功したので以下に報告する。

2. 安定化銅厚

コイル保護の観点から超電導線材の安定化層厚は重要である。今回は断熱条件下での熱平衡方程式により安定化銅厚を決定した。クエンチ時の電流が安定化銅のみの流れると想定した場合、熱平衡方程式は(1), (2)式で表される [1-2]。

$$S_i C_i(T) \frac{\partial T}{\partial t} = S_{stab} \rho_{stab}(T) \cdot J_{stab}(t)^2 \quad (1)$$

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{C_i(T)}{\rho_{stab}(T)} dT = \frac{S_{stab}}{S_i} \left(t_d + \frac{E}{V_m I_0} \right) J_{stab,0}^2 \quad (2)$$

ここで、 S_i , S_{stab} は導体、安定化層断面積、 C_i は導体単位面積当たりの熱容量、 ρ_{stab} , J_{stab} は安定化層の電気抵抗率、電流密度、初期温度 T_0 、最高到達温度 T_m 、蓄積エネルギー E 、最大電圧 V_m 、検出遅れ t_d である。

今回の高温超電導マグネット仕様を Table. 2 に示し、 $T_0 = 25K$ における安定化銅厚の違いによる最高到達温度の計算結果を Fig.1 に示す。検出遅れ t_d が 5s で最高到達温度 T_m が 300K 以下になる条件として、今回は安定化銅厚 0.3mm を採用した。

3. パンケーキコイル試作評価

使用した RE 系超電導線材の諸元を Table. 1 に示す。線材は液体窒素中で I_c (10^{-7} V/cm 定義), n 値 ($10^{-7} \sim 10^{-8}$ V/cm 定義) を測定した。コイルは 2 層パンケーキコイル毎に含浸し、液体窒素中でコイル I_c (10^{-7} V/cm 定義), n 値 ($10^{-7} \sim 10^{-8}$ V/cm 定義) を測定した。製作した 24 パンケーキコイルの n 値は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ V/cm の領域で 24 以上であり、コイルが健全であることを確認した。

4. 伝導冷却下における通電試験結果

完成した高温超電導マグネット外観を Fig.2 に示す。冷却は GM 冷凍機を用い、コイル温度は約 260 時間で 23.7K に到達した。通電試験結果例を Fig.3 に示す。通電電流 333A のとき中心磁場は 5.0T に達し、60 分の安定動作を確認した。

Table 1 Specifications of REBCO coated conductors

Parameters	Values
Width	10 mm
Thickness of substrate	0.1 mm
Thickness of copper stabilizer	0.3 mm (laminated)
Critical current (I_c) at 77 K, s. f.	> 467 A
n -value at 77 K, s. f.	24 - 38

Table 2 Specifications of 5T 2G HTS magnet

Parameters	Values
Inner diameter of coil	260 mm
Outer diameter of coil	535 mm
Coil height	271 mm
Number of pancakes coils	24
Total tape length	7200 m
Total number of turns	5575
Inductance	7.68 H
Stored energy	426 kJ

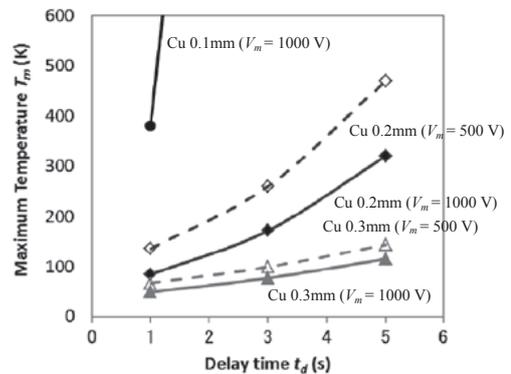


Fig. 1 Calculation results of maximum temperature for Cu thickness: $V_m = 1000$ V (solid) and $V_m = 500$ V (dotted)

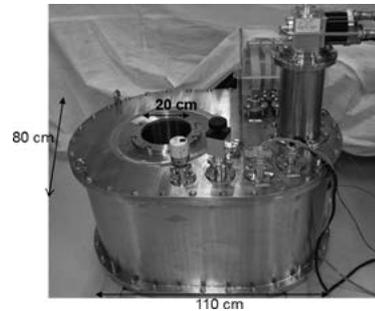


Fig. 2 Photograph of a 5 T 2G HTS magnet with 20-cm-diameter room temperature bore

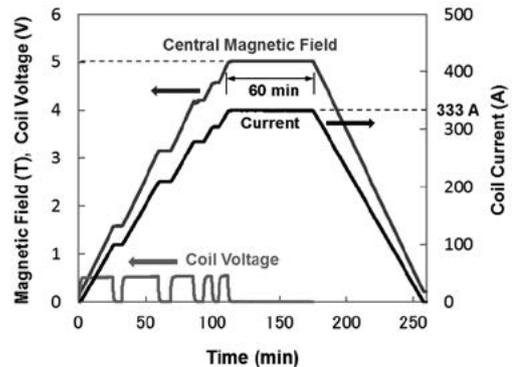


Fig. 3 Operation test results at 23.7 K

参考文献

1. Y. Kawai et al. : Physica C, vol. 470, (2010) p. 1865
2. Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, 2nd ed., Springer, (2009)

イットリウム系幅広線材を用いた積層コイルの開発

Development of a conduction cooled coil composed of a stack of single pancakes wound with YBCO wide tapes

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

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

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

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

1. はじめに

イットリウム系(以下Y系)超電導コイルの実機適用に向けた開発を進めている。Y系線材はテープ形状をしており、負荷率や運転条件に応じて適切な線材幅を選択できる特長を持つ。パンケーキコイルを複数積層する構成において、より幅の広い線材を用いる場合、テープ面に生じる遮蔽電流がコイルの発生磁場に影響をおよぼす可能性がある。そこで、実際に12 mm幅広線材を用いて4積層コイルを試作・評価し、以前製作した同外形の4 mm幅線材12積層コイルと比較することで、発生磁場に対する幅広化の影響を調べた。

2. コイル諸元および通電試験結果

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。積層後のコイルがFig.1である。巻線、含浸、積層プロセスを経た後、冷却時の熱応力による劣化の有無を調べるため、試作した4積層コイルを液体窒素中で通電評価した。発生電圧は各パンケーキコイルの両端で測定した。通電試験結果をFig.2に示す。上下層の#1,#4からのみ電圧発生が生じ、試験範囲内で#2,#3の電圧発生は見られなかった。#1および#4のコイル I_c は、それぞれ71 A, 69 A, n 値は23, 24 ($1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$ V/cm 定義)であり、 n 値が20を超える劣化の無い良好な超電導特性が得られた。また、半年後に再度冷却および通電試験を実施した結果をFig.2に重ねて示した。通電特性はほぼ一致しており、ヒートサイクルによる劣化や経年劣化が無いことを確認した。

3. 伝導冷却通電試験

各パンケーキコイル間に挿入したアルミ板の先端をGM冷凍機の2段階ステージに接続し、伝導冷却試験を実施した。2段階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、20Kから60Kの範囲で通電試験を実施した。またホール素子を用いてコイル中心磁場を計測した。

通電の結果、伝導冷却下でも液体窒素中と同じく、#1と#4において電圧発生が生じており、全ての温度領域において n 値が20を超える良好な超電導特性が得られた。各温度における最大通電時のコイル中心磁場をFig.3に示す。以前製作した4 mm幅線材(Min. I_c 82~114 A)を用いた12積層コイルの結果を併せて示した。磁場の測定値と計算値は、ホール素子の測定精度内で一致しており、幅広化による顕著な磁場の減少は見られなかった。なお、コイル温度20Kにおいて最大904 A通電時、4 mm幅線材12積層コイルの1.3倍となる5.9 Tに到達した。

4. まとめ

12 mm幅広線材を用いた含浸パンケーキコイルおよび4積層コイルを劣化無く製作することに成功した。また、伝導冷却試験を実施し、4 mm幅線材12積層コイルと比較した。最大通電時のコイル中心磁場について、測定値と計算値は測定精度内で一致しており、幅広化による顕著な影響は見られなかった。なお、コイル温度20Kにおいて、最大904 A通電時、コイル中心磁場は5.9 Tに到達した。

Table.1 Specifications of YBCO single-pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4
Tape width	12 mm	12 mm	12 mm	12 mm
Tape thickness	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
Tape Length	24.9 m	24.9 m	24.9 m	24.9 m
Min I_c @77 K, 0T	301 A	258 A	258 A	301 A
Inner diameter	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
Outer diameter	91 mm	90 mm	91 mm	91 mm
Number of turns	113	108	112	113
Coil I_c	87 A	106 A	93 A	86 A
n value	27	22	29	29

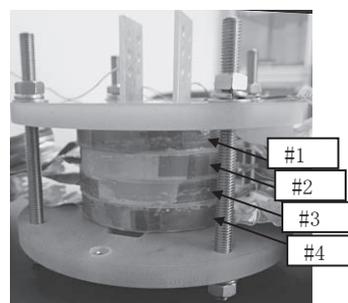


Fig.1 Stacked single pancakes wound with YBCO wide tapes

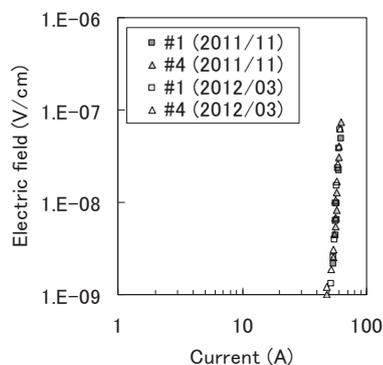


Fig.2 E-I characteristics of a stacked single pancakes at 77K

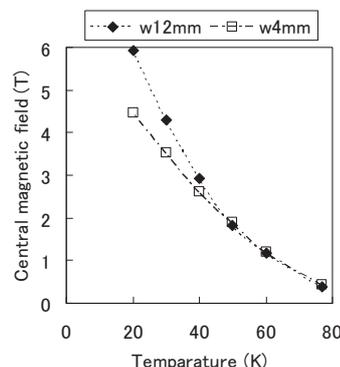


Fig.3. Temperature dependence of a central magnetic field of the coils in a conduction-cooled test at 20K~60K

イットリウム系大型レーストラックコイルの開発

Development of large scale racetrack coil wound with YBCO tapes

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)
 MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)
 E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

イットリウム系線材を用いた超電導コイルの実機適用に向け、これまで SMES などに適用可能な円形のパンケーキコイル[1]や加速器用の3次元形状のコイル[2]の開発を進めてきた。今回、風力発電機やモータなどの回転機器への適用を目指してレーストラック形状の超電導コイルを試作し、液体窒素中での通電試験により超電導特性を評価したので報告する。

2. コイル諸元および通電試験結果

超電導コイルは、巻線部に1mm程度のわずかな区間であっても欠陥が生じると超電導特性が低下してしまう。そのため、コイルが大型になるほど線材長が長くなり、高い超電導特性を有する超電導コイルを製作することが困難になる。今回、イットリウム系コイルの実機適用を目指して、線材長574mの大型のレーストラックコイルを実際に試作し、超電導特性を評価した。試作したレーストラックコイルの外観をFig.1に示し、コイル諸元をTable1に示す。

3. 液体窒素中通電試験結果

コイルは樹脂で含浸されているため、冷却速度が速すぎるとコイル内部に温度差が生じ、大きな熱応力が発生してしまう。特に、コイルサイズが大きいほど温度差が生じやすいため、室温から液体窒素温度まで3時間以上かけて冷却した。また、冷却する際には、コイル内部に温度差が生じないように、各温度を監視しながら冷却した。

液体窒素温度まで冷却されたことを確認後、通電試験を実施した。通電は1A刻みで励磁し、電圧発生するまでは5A刻みで電流をホールドし、電圧発生を確認したらホールド間隔を1A刻みとした。ここで、ホールド時間は1分以上としている。コイル両端電圧が 10^{-8} V/cmを超えたのを確認後、測定を終了した。通電試験結果をFig.2に示す。コイル臨界電流値41A(電界定義 10^{-6} V/cm)、n値24(10^{-9} ~ 10^{-8} V/cm)であり、 10^{-9} V/cm以下の領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。また、コイル磁場分布と77Kでのイットリウム系線材の臨界電流の磁場、角度依存性を用いて計算したコイル電流-電圧特性をFig.2に示す。実験結果と計算結果が定量的に一致しており、巻線部に劣化がないことを確認した。

4. ヒートサイクル試験

繰り返し熱応力に対する耐久性を評価するため、ヒートサイクル試験を実施した。液体窒素中で通電試験を実施したレーストラックコイルを室温まで昇温し、再度液体窒素温度まで冷却して通電試験を実施した。試験結果をFig.2に示す。コイル臨界電流値41A、n値22であり、電流-電圧特性が1回目と一致しており、ヒートサイクルによる劣化がないことを確認した。

5. まとめ

回転機等への適用を目指して、大型のレーストラックコイルを試作し、液体窒素中での通電試験により超電導特性を評価した。試験の結果、低電界領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。また、ヒートサイクル試験においても電流-電圧特性に変化は見られず、熱応力に対しても高い

耐久性を有することを確認した。今後は、伝導冷却にて通電試験を実施し、低温での超電導特性を評価する予定である。



Fig.1 Photograph of impregnated racetrack coil

Table 1 Specification of impregnated racetrack coil

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.1
Tape length (m)	574
Inner diameter (mm)	300
Outer diameter (mm)	408
Straight length (mm)	400
Turns	301

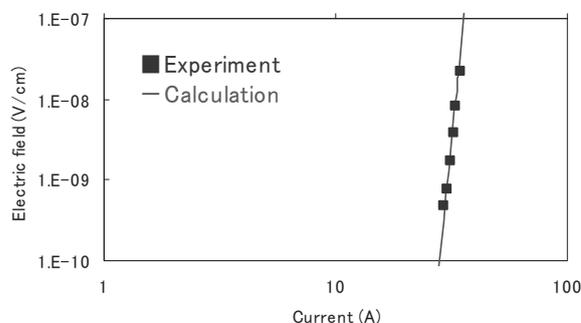


Fig.2 E-I characteristics of racetrack coil at 77 K

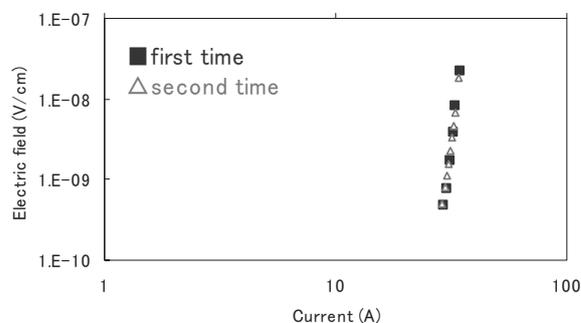


Fig.3 Thermal cycle test of racetrack coil

参考文献

- H. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.179
- K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.185