

JT-60SA 用超伝導マグネット機器の量産

Mass production of superconducting magnet components for the JT-60SA

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

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

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

1. はじめに

原子力機構の JT-60 トカマク本体を超伝導装置 JT-60SA(Fig.1)に改修する計画が、日本と EU 間の幅広いアプローチ(BA)活動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。日本担当の平衡磁場(EF)コイルおよび中心ソレノイド(CS)用導体の量産を継続している。EUの担当するトロイダル磁場(TF)コイルについては、導体の量産を開始するとともに、コイルの製作が開始された。ヘリウム分配システムの設計を実施した。高温超伝導電流リードは詳細設計が完了して製作が開始された。ヘリウム冷凍機の技術仕様が確定して実機製作を開始した。

2. ポロイダル磁場コイル

CS と EF コイル用導体は、2010 年から超伝導導体の量産を開始し、2013 年 3 月までに超伝導撚線とジャケット材の製作を全て完了した。導体複合化は、在庫調整をしながら生産し、CS と EF 導体 46 本(全 92 本)の製作を完了した。

NbTi 導体を用いた EF コイルの製作は順調に進捗しており、2012 年末に EF4 コイルが完成し、2013 年末に EF5 コイルと EF6 コイル(Fig.2)が完成予定である。

Nb₃Sn 導体を用いた超伝導コイルの製造を確認するための CS モデルコイルが完成し、その後の試験において特性の劣化が無いことを確認した。CS 実機パンケーキ巻線(Fig.3)については 2014 年完成を目指して量産を開始した。

3. トロイダル磁場コイル

TF コイル用導体製作は、2011 年から素線製作を開始し 2013 年には全ての素線の製作が完了した。導体複合化を 2012 年から開始して、現在まで 36 本(全 108 本)の超伝導導体を量産した。そのうちの超伝導導体 1 本が TF コイル用フィーダー導体用として日本に 2013 年末に輸入される。

TF コイルは、2 か所の製作治工具の準備が完了して、最初の TF コイルのパンケーキ巻線を開始した。コイル容器の鋼材の製作や加工が開始された。

4. フィーダー

ヘリウム分配システムの設計を実施した。フィーダーは機器仕様が確定し、HTS 電流リードは製作が開始された。超伝導コイルに電流を供給するためのコイル端子箱(CTB)とクライオスタット内の超伝導フィーダーの概念設計が完了した。CTB 内に設置する 26 本の高温超伝導(HTS)電流リードは、EU が製作を担当する。これまで、HTS リードの技術仕様が確定して、2011 年から製作を開始した。KIT での実機電流リードの試験(13 回)に用いるジャンパー導体を日本が 4 本製作している。本ジャンパー導体は、実機用超伝導フィーダーの試作も兼ねており、この試験に用いることで、その性能の検証が可能である。

5. ヘリウム冷凍機と受入準備

EU の担当するヘリウム冷凍機について、コイルの冷却の各種解析を実施して機器仕様(約 9kW@4.5K)が確定して機器製作を開始した。また、那珂サイトの受入れ準備のために、圧縮機棟の新築と冷凍機室の改造に係わる設計が完了して建築を開始する。

6. サーマルシールド

サーマルシールドは設計および試作が完了して、製作を 2014 年から開始する。真空容器側のサーマルシールドを

2015 年までに製作して、TF コイルの組立の組立に整合させる。現在は、クライオスタット側のサーマルシールドに取り付ける電気絶縁型多層断熱材や、電気絶縁型サーマルアンカーの開発を実施している。

7. まとめ

各国の創意工夫でコイル製作費のコスト問題も解決して、超伝導マグネットと周辺機器の製作が順調に開始された。2019年3月のファーストプラズマに向けて、クライオスタットの組み立ても開始され、真空容器の組立開始前に3個のEFコイルをクライオスタットの中に仮組するなどトカマクの組立が本格的に開始された。

参考文献

[1] Y. Kamada, Nucl. Fusion, vol. 53, no. 10, (2013) p. 104010

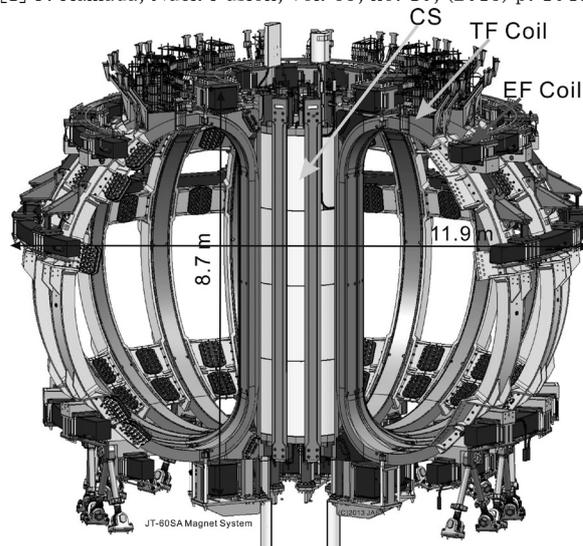


Fig. 1 JT-60SA Tokamak System



Fig.2 EF5 and EF6 Coil Manufacturing

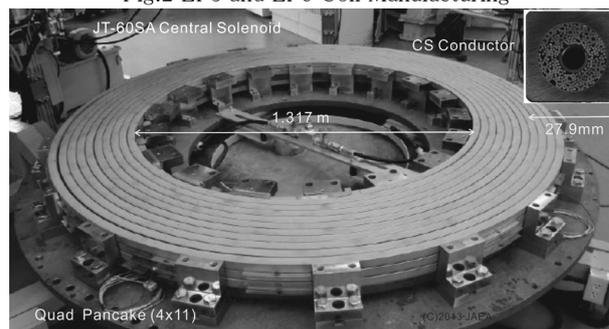


Fig.3 CS Quad (4-layer) Pancake Winding

JT-60SA 中心ソレノイドモデルコイル試験結果

Test Results of JT-60SA Central Solenoid Model Coil

村上 陽之, 木津 要, 神谷 宏治, 土屋 勝彦, 小出 芳彦, 吉田 清(原子力機構); 尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 石 浩孝, 夏目 恭平, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS); 野元 一宏, 今井 良夫(三菱電機);
 MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, Tsuchiya Katsuhiko, KOIDE Yoshihiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);
 OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hiroataka, NATSUME Kyohei,
 IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS); NOMOTO Kazuhiro, IMAI Yoshio (Mitsubishi Electric)

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

1. はじめに

JT-60SA 装置の中心ソレノイド(CS)は、Nb₃Sn 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接続し製作される[1]。CSの製作方法の妥当性を確認するため、実機と同じ導体・製作治具を用いて図 1 に示すモデルコイルを製作し性能確認試験を行った。

モデルコイルの性能確認試験は、核融合科学研究所(NIFS)の大型試験装置を用いて、圧力損失測定、接続抵抗測定および臨界電流測定を実施した。本発表では、今回実施した試験の概要および結果について報告する。

2. モデルコイル

モデルコイルは 4 層パンケーキで構成され、実機と同じ曲げ半径で巻線し、実機と同等の熱処理を行った。電流フィーダは、実機 CS に用いるバットジョイントにより接続し、接続部の評価も同時に行える構造とした。モデルコイルの冷却に用いる SHe は、巻線中央から供給し(+)極側と(-)極側の二流路に分かれ両端の電流フィーダから排出される。

供給する SHe の温度をヒーターにより調整し、モデルコイルの温度を変化させた。出口に取り付けた流量計により各流路の流量を測定し、入口圧力および出口圧力から圧力損失を測定した。接続抵抗は接続部両端に電圧タップを取り付け測定した。臨界電流はモデルコイル最内層に 1/6 周ごとに取り付けた電圧タップを用いて測定した。

3. 性能確認試験

圧力損失測定は実機運転条件に近い、温度 5 K、SHe 圧力 0.5 MPa の条件で SHe 流量を 2 g/s から 8 g/s まで変化させ実施した。図 2 に圧力損失測定の結果を示す。圧力損失は冷凍機負荷より決定される設計値に比べ 20%程度低い値であり、圧力損失の異常は観測されなかった。

接続抵抗試験は、温度 6 K の条件で通電電流を 0 kA から 30 kA まで電流変化率 50 A/s で上昇させ実施した。試験の結果、(+)極、(-)極のバットジョイントの接続抵抗は、それぞれ 2.5 nΩ および 1.6 nΩ であり、以前実施した接続部サンプルの結果とほぼ同じであった。接続抵抗は仕様値の 5 nΩ 以下を満足しており、導体の接続工程に問題がないことが示された。

臨界電流は入口温度を 11.5 K から 14.0 K の範囲で変化させ測定した。通電電流は 50 A/s の電流変化率で上昇させクエンチが生じた時点で遮断を行った。臨界電流は常伝導電圧が 100 μV/m 基準に達した電流値とした。磁場は自己磁場のみであり、最大磁場は通電電流に比例し、30 kA 通電時で 2.86 T である。臨界電流測定の結果および素線特性から予測される特性曲線を図 3 に示す。試験結果は素線の歪を -0.95%とした場合の特性曲線とよく一致することが分かった。短尺導体で評価された歪は -0.60%であり、両者の違いの原因を調査する予定である。一方、試験結果は高磁場部で要求値を満足しており、実機運転に支障がないことが確認できた。

以上の結果より、モデルコイルに問題となる性能低下は確認されず、開発した製作治具および製作方法により JT-60SA

の CS を製作できることが立証できた。本試験の結果に基づき、CS の量産を開始した。

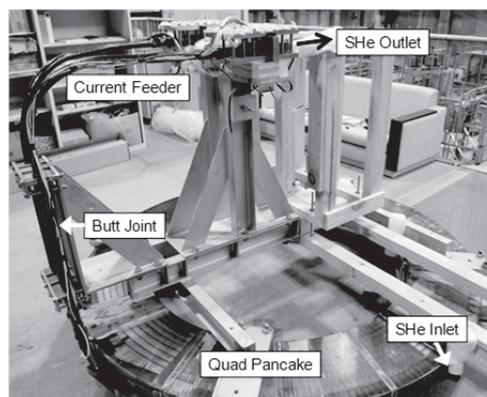


Fig.1 JT-60SA central solenoid model coil

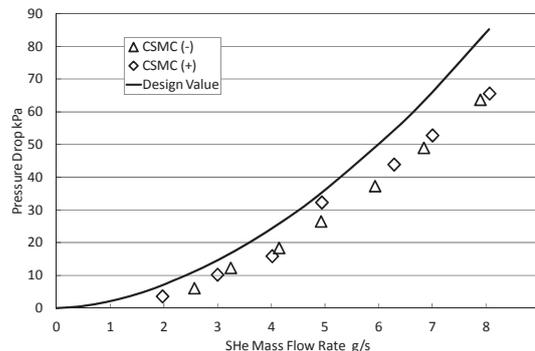


Fig.2 Results of pressure drop measurement

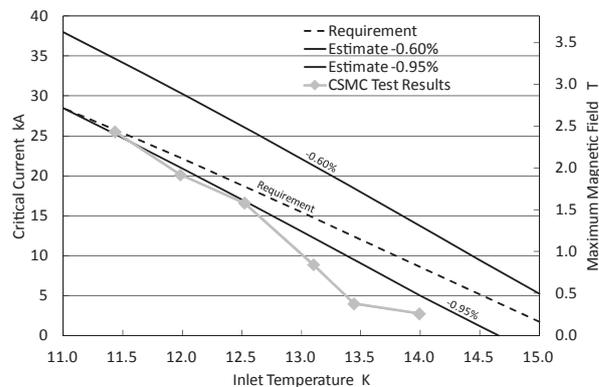


Fig.3 Critical current of central solenoid model coil

参考文献

1. K. Yoshida, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22 (2012) 4200304
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.40

JT-60SA 中心ソレノイドにおける接続部の安定性評価

Stability Evaluation of Joint in JT-60SA Central Solenoid

川原 譲, 山本 侑祐, 中村 一也, 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大学);

村上 陽之, 吉田 清(原子力機構); 夏目 恭平, 濱口 真司, 尾花 哲浩, 高畑 一也, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS)

KAWAHARA Yuzuru, YAMAMOTO Yusuke, NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia University);

MURAKAMI Haruyuki, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA); NATSUME Kyohei, HAMAGUCHI Shinji, OBANA Tetsuhiro,

TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: y.kawahara@sophia.ac.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の中心ソレノイド(CS)は、限られた空間に設置される。そこで、CS 導体の接続法として、省スペースで用いることが出来るバットジョイントを採用した。バットジョイントは燃線をかきしめることで製造されるため、超臨界ヘリウム(SHe)は接続部表面を流れる。そのため、接続部は SHe による冷却が限られ、他の部分と比べて安定性が低いと考えられる。そこで、クエンチ時の外部 SHe 温度と接続部内導体温度を把握することでバットジョイントの安定性評価を行った。

本論文では、バットジョイントにおけるクエンチ時の接続部内導体温度の測定試験結果及び解析結果に関して報告する。試験結果は[1]にて報告を行った。

2. クエンチ時接続部内導体温度解析設定

試験では限られた条件しか測定を実施できなかったため、クエンチ時の外部 SHe 温度と流量の一般的な関係は明らかにできていない。そこで、有限要素法を用いてクエンチ時の接続部内導体温度を評価した。解析には Fig. 1 の下部に示すバットジョイントを模擬したモデルを用いて行った。燃線部は銅とブロンズと Nb₃Sn の複合モデルとした。比熱容量、熱伝導率は導体の構成比から求めた。また、熱伝達係数 h は以下の式(1)から求めた[2]。

$$h = 0.0259 \cdot \frac{k}{D} (\text{Pr})^{0.4} (\text{Re})^{0.8} \left(\frac{T_{\text{He}}}{T_C} \right)^{0.716}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \quad \text{Re} = \frac{Q \cdot D}{\nu \cdot A} \cdot \dots \cdot (1)$$

ここで、k は SHe の熱伝導率、D は水力直径、Pr はプラントル数、Re はレイノルズ数、T_{He} は SHe 温度、T_C は導体温度、ν は SHe の動粘性係数、α は温度拡散率、Q は体積流量、A は断面積である。

接続部に与える熱量は試験の電流・電圧から計算した。接続抵抗による発熱は Fig. 1 の銅シートに与え、常伝導抵抗による発熱は Fig. 1 の複合モデルに与えた。以上のモデルを用いて、クエンチ時の接続部内導体温度を評価した。

解析モデルの妥当性を確認するため、外部磁場 4 T における SHe 流量ごとのクエンチ時の接続部内導体温度を Fig. 2 で求めた。解析結果から、クエンチ時の接続部内導体温度は SHe 流量には依存せず、通電電流に依存することが示された。クエンチ時の接続部内導体温度は冷却方法によって変化しないため、この解析モデルは妥当であると言える。

3. クエンチ時接続部内導体温度解析結果

上記の解析モデルを用いて、接続部の安定性を評価するため、接続部の熱負荷を変化させ解析を行った。解析条件は実機運転条件を模擬し、外部磁場 2 T、SHe 流量 6.0 g/s、通電電流 20 kA とし、接続抵抗を 50 nΩ まで変化させた。結果は Fig. 3 に示す。Fig. 3 からバットジョイントの接続抵抗の定格値である 5 nΩ において、クエンチ時の外部 SHe 温度は 12 K となった。運転温度 7 K に対して、5 K の温度マージンを持つことが示された。これは導体の最小温度マージンである 1.3

K[3]に比べ十分裕度が大きい。また、接続抵抗が 50 nΩ の場合においても、クエンチ時の外部 SHe 温度は導体の最小温度マージンを上回ることがわかった。

以上の結果から、バットジョイントの接続抵抗は定格値の 10 倍となった場合でも安定した通電が可能で、JT-60SA を運用する際、裕度を持った運転ができることが示された。

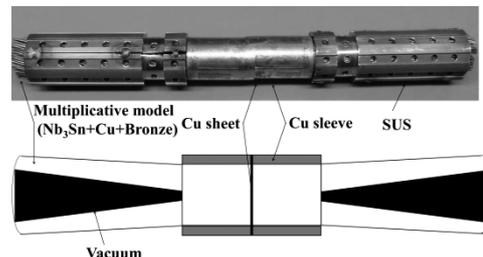


Fig.1 Top is photo of butt joint and bottom is analytical model for numerical calculation

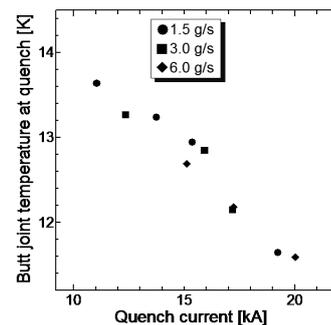


Fig.2 The simulated butt joint quench temperature as a function of the quench current

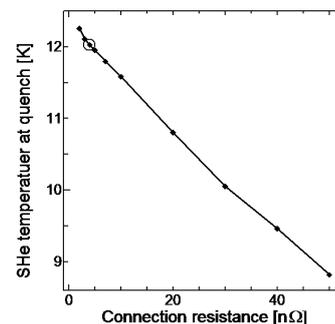


Fig. 3. The dependence of the superfluid helium quench temperature on the resistance of the butt joint

参考文献

1. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.40
2. P. J Giarratano, et al.: Cryogenics, vol. 11, issue 5, (1971), pp. 385-393
3. H. Murakami, et al.: Proceedings of ICEC24-ICMC2012, (2013), pp. 575-578

JT-60SA サーマルシールド要素部品の開発

Development of JT-60SA thermal shield components

神谷 宏治、大西 祥広、古川 真人、吉田 清 (原子力機構)

Koji KAMIYA, Yoshihiro ONISHI, Furukawa Masato, Kiyoshi YOSHIDA (JAEA)

E-mail: kamiya.koji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA サーマルシールド(TS)は、真空容器サーマルシールド(VVTS)、ポートサーマルシールド(PTS)、およびクライオスタットサーマルシールド(CTS)という主要 3 部品で構成されており[1][2]、各部品がさらに複数のパネルで構成されている。各パネル同士は、60 mm の隙間でカプラーと呼ばれる接続部品で相互締結される。クライオスタットやプラズマ真空容器からの放射を遮蔽するため、JT-60SA ではこの隙間をステンレスの薄板(放射カバー)で覆う。また絶縁接続部の隙間は、絶縁体(G-10 シート)と SUS 薄板で構成された電気絶縁型の放射カバーで覆う。

サーマルシールドは電磁力により変形するため、放射カバーはこの変形量を許容する設計でなければならない。特に電気絶縁放射カバーは G-10 シートと SUS 薄膜で構成されており、G-10/SUS 接着部と G-10 シートの機械的強度が要求値を満たさないことが危惧される。本講演では電気絶縁放射カバーの機械的強度を確認するため、接着部の熱処理の有無と冷却サイクルの有無という条件下で引張試験を実施した結果を報告する。

また JT-60SA は、トロイダル磁場コイル(TFC)重力支持の下端温度が室温であるため、支持途中に 80K の熱アンカーを設け CTS に接続する。TFC と TS は電気絶縁されるため、熱アンカーもサファイアを挿入して電気絶縁する。本講演では、熱アンカーの伝熱試験について報告する。

2. 電気絶縁放射カバー

電気絶縁放射カバーは、Fig. 1 で示すように電気絶縁するサーマルシールドパネル同士を接続し、SUS 薄膜と G-10 シートで構成されている。SUS 薄膜と G-10 シートの接着には、Stycast 1266 を使用する。サーマルシールドは電磁力により変形し、最大 0.04 mm 引っ張られる。

本研究では、G-10 の最適な厚さを決定するため、0.2 mm 厚と 0.4 mm 厚の G-10 母材の引張試験を実施した。その結果、0.2 mm 厚の G-10 はメーカー保証値を満足しないことから試験及び実機は 0.4 mm 厚の G-10 を用いることとした。

せん断試験は、「JIS K6850 接着剤の引張せん断接着強さ試験方法」を参考にして行い、Fig. 2 の試験サンプルを製作した。Table 1 に示した試験サンプルは 80°C で 24 時間熱処理の有無と液体窒素温度と室温の冷却サイクルの有無で 4 種類準備した。

引張試験の結果、Table 1 の「Sample 1、3」と「Sample 2、4」の比較から、熱処理により引張せん断接着強さは 50 %程度、破断時のひずみは 60 %以上向上することが確認された。従って、実機放射カバーは熱処理を実施することとした。また Table 1 から、冷却サイクルの引張せん断接着強さへの影響はほとんどないことを確認した。破断時のひずみにおいては、熱処理していないもので 30 %程度の劣化がみられたが、熱処理しているものでは、ほとんど劣化のないことが確認された。以上より、電気絶縁放射カバーは 0.4 mm 厚の G-10 シートを Stycast 1266 で接着し熱処理を実施する設計とした。

3. 電気絶縁熱アンカー

CTS と TFC を接続する電気絶縁熱アンカーの伝熱試験の目的は、JT-60SA で要求する耐電圧を満足しつつ、伝熱量を

確保することである。Fig. 3 に熱アンカー試験の概略図と写真を示す。電気絶縁材はサファイアを用い、低温側の可とう導体を液体窒素に浸す。高温側の可とう導体側からヒーターによって熱流を制御する。本研究では、真空断熱を行わない伝熱実験を試みた。実験の結果については講演で報告する。

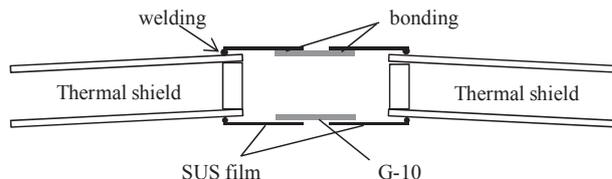


Fig. 1 Structure of insulation radiation cover

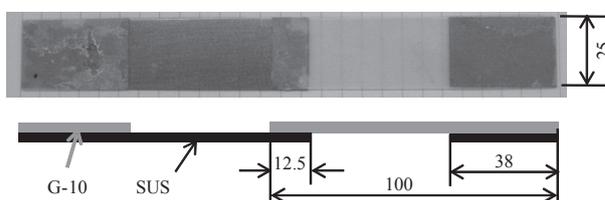


Fig. 2 Test sample of tensile shear strength

Table 1. Shear strength of bonding and elongation at break

	Heat treatment	Heat cycle	Breaking point	Shear strength	Elongation
Sample 1	No	No	bonding	3.8 MPa	10280 μ
Sample 2	Yes	No	bonding G-10	6.1 MPa	16346 μ
Sample 3	No	Yes	bonding	4.0 MPa	7350 μ
Sample 4	Yes	Yes	bonding	5.8 MPa	15237 μ

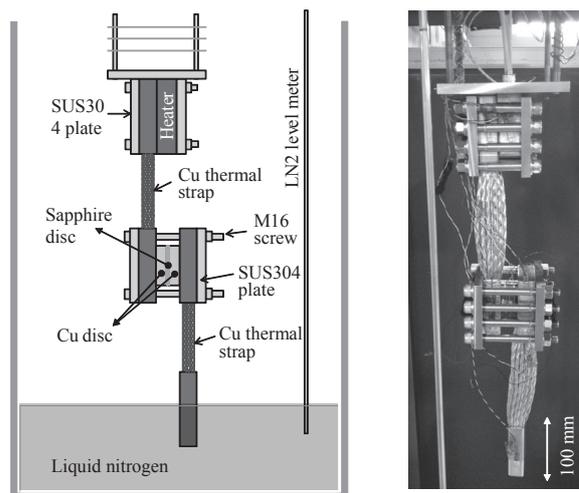


Fig. 3 Picture of thermal anchor test sample

参考文献

1. K. Kamiya, et al.: Proc. ICEC24-ICMC2012 (2012) pp. 587-590.
2. K. Kamiya, et al.: Proc. ICEC23-ICMC2010 (2011) pp. 797-802.

EPICS を用いた SuperKEKB 冷却システム用リモートモニタリングの開発

Development of the remote monitoring for the SuperKEKB cryogenic system using EPICS

岩崎 昌子、青木 香苗(KEK); 廣瀬 雅哉(関東情報サービス); 中村 卓也(三菱電機 SC)

IWASAKI Masako, AOKI Kanae(KEK); HIROSE Masaya(Kanto Information Service); NAKAMURA Takuya(Mitsubishi Electric System & Service)

E-mail: masako.iwasaki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器および Belle 測定器を用いた B ファクトリー実験が行われてきた。現在、KEKB 加速器の更なる高輝度化を目的として、SuperKEKB 加速器および BelleII 測定器の建設が進められている。SuperKEKB 実験では、KEKB 実験で記録した世界最高の電子・陽電子衝突頻度を約 40 倍に高め、超高精度の B ファクトリー実験を目指している。SuperKEKB 実験の運転開始は、2015年1月を予定している。

我々は、SuperKEKB 加速器最終収束系超伝導電磁石システム(QCS)および BelleII 測定器用超伝導ソレノイド磁石のためのヘリウム冷却システムのリモートモニタリングシステムを、EPICS を用いて開発した。このシステムにより、ヘリウム冷却システムのモニタリングを、リアルタイムに行うことができる。この SuperKEKB 冷却システム用リモートモニタリングシステムの詳細について、報告する。

2. 冷却システムモニタリングシステムの概要

SuperKEKB 最終収束系超伝導電磁石システムおよび BelleII 測定器用超伝導ソレノイド磁石用冷却システムは、日立総合計装システム EX-8000 によって制御されている。我々は、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [1]を用いて、QCS および BelleII 測定器用ソレノイド磁石用、冷却システムデータを収集するプログラムを作成した。ここで、EPICS は広く国内外の加速器、物理実験等で使用されている、分散型制御ソフトウェアである。EPICS IOC (Input Output Controller) から、EX-8000 に備えられているゲートウェイを経由して、冷却システムデータを収集する。

EPICS によって収集された、冷凍機の温度、圧力等、各種冷却システムのデータは、CSS (Control System Studio) [2]アーカイバーを用いて、データベースに蓄積される。ここで、CSS は DESY で開発され、多くの研究機関が共同で開発している Eclipse ベースのシステムツールであり、データアーカイブやデータ表示等、様々な機能を提供している。CSS アーカイバーおよび EPICS IOC は、SuperKEKB 加速器制御ネットワークに接続される。図1に、EPICS および CSS アーカイバーを用いた、冷却システムデータモニタリングの概要を示す。

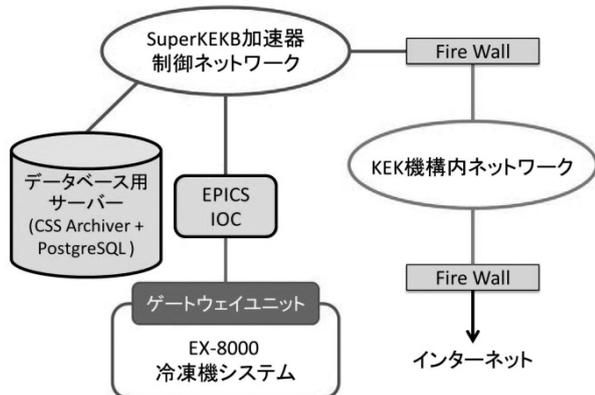


Fig.1 Schematic view of the SuperKEKB cryogenic system monitoring.

CSS アーカイバーで用いるデータ蓄積用データベースは、Oracle、MySQL、PostgreSQL など一般的なリレーショナルデータベース管理システム(RDBMS)から選択可能である。今回、SuperKEKB 冷却システムデータを蓄積するための RDBMS として、PostgreSQL を採用した。

蓄積された冷却システムデータは、CSS がインストールされたユーザー計算機によって、ネットワーク経由でリアルタイムのモニタリング、トレンド表示、過去の履歴参照が可能である。SuperKEKB 加速器制御ネットワーク内、または KEK 機構内ネットワーク内の複数の計算機が、冷却システム用データベースにアクセスできる。VPN を使用して、KEK 機構外の計算機からもデータ閲覧可能である。CSS は Linux、Windows、または MacOS 計算機にインストールすることができる。

図2は、CSS を用いた冷却システムデータのトレンド表示画面を示す。画面右上が、各種データのトレンド表示、右下はデータのプロパティ操作画面、左は、データベースに蓄積されているデータの一覧を示す。ユーザーによって、トレンド表示させるデータの種類、トレンド表示の開始時刻、終了時刻、表示形式、等の設定が可能である。また、取得データを外部ファイルに出力させることができる。

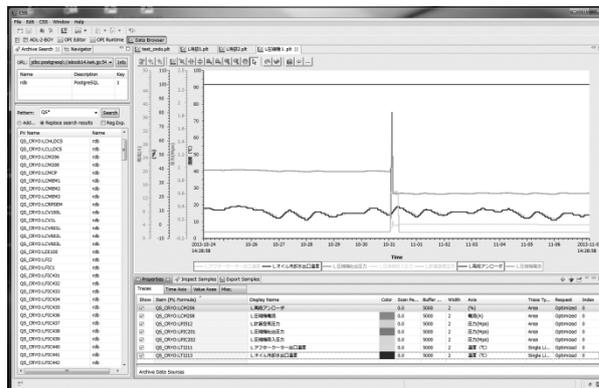


Fig.2 CSS viewer for the SuperKEKB cryogenic system monitoring.

冷却システムデータは PostgreSQL に蓄積されているため、CSS をインストールしていない計算機を使用した場合でも、直接 PostgreSQL にアクセスすることにより、データ取得を行うことが可能である。

現在、我々が作成した冷却システムモニタリングプログラムを用いて、SuperKEKB QCS L 側超伝導磁石用冷却システムのデータを、試験的に収集している。約 300 点のデータを 5 秒毎に収集・更新し、データベースに蓄積している。

3. まとめ

我々は、SuperKEKB 冷却システム用リモートモニタリングシステムを、EPICS および CSS アーカイバーを用いて開発した。その詳細について、学会で報告する。

参考文献

1. EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/index.php>
2. CSS, <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css>

変形シングルパンケーキコイルと立体コイルの組み合わせによる スパイラルセクタ FFAG 加速器用コイル支配型マグネットの検討

Feasibility of coil-dominated HTS magnets combined with deformed single pancake coils and three-dimensional coils for spiral-sector Fixed Field Alternating Gradient accelerators

合田 和弘, 雨宮 尚之, 中村 武恒, 森 義治(京都大学);

荻津 透(KEK); 来栖 努(東芝); 野田 耕司(放医研); 吉本 政弘(原子力機構)

GODA Kazuhiro, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune, MORI Yoshiharu (Kyoto University);

OGITSU Toru(KEK); KURUSU Tsutomu(TOSHIBA); NODA Koji(NIRS); YOSHIMOTO Masahiro(JAEA)

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

1. はじめに

我々は高温超伝導体を用いたスパイラルセクタ FFAG 加速器 (Fig. 1(a)) 用のコイル支配型マグネットの研究を行っている。マグネット設計においては、磁場精度の確保のほかに超伝導線材の経験磁場を許容値以下に抑えることや、磁性体による磁場整形も重要である。そこで磁場精度の確保は今後の課題として、今回は線材の経験磁場、磁性体の磁場整形効果の観点からマグネットの実現可能性を検討した。

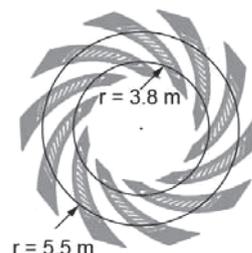


Fig. 1 Footprint of magnets

2. FFAG 加速器用マグネット設計

マグネット設計において、まず 2 次元断面設計を行った。線材一本あたりには 500 A の電流を流し、磁場の誤差は理想値の絶対値の 20% 以内という条件で実行した。次に 3 次元コイル形状を設計した。マグネットの直線部は 2 次元断面設計で得た断面導体配置を周方向に直線的に引き延ばし、直線部と開口部との立体部分は線材の機械的特性から形状が定まり、開口部はスパイラルアングルに沿ってコイルエンドを形成した。ここから本来は磁場の精度を高めるために導体配置を修正するが、今回は線材の経験磁場と磁性体の効果を見ることに焦点を当てているため、ここではビーム取り出しでの積分磁場を所望値 (3.9 T·m) に合わせることにしか行っていない。

次に上記で設計したコイルを覆うようにリターンヨーク、フィールドクランプという磁性体を配置し、それらの非線形性を考慮した磁場解析を行った。

3. 解析結果

TABLE 1 に解析結果の概要を示す。経験磁場は最大で 5.6 T となった。Fig. 3 に周方向磁場分布を示す。空心と比較すると、磁場のピーク値が大きくなり、漏れ磁場も少なくなっており、磁性体の磁場整形効果が確認できた。

今後は磁場の精度を高め、所望磁場発生観点から見たマグネットの実現可能性を検討する。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援によって行われた。

参考文献

1. K. R. Symon, et al.: "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators," Phys. Rev., vol. 103, no. 6, (1956) pp. 1837-1859.
2. S. Russenschuck: "Field computation for accelerator magnets", WILEY-VCH (2010) pp. 293-326.

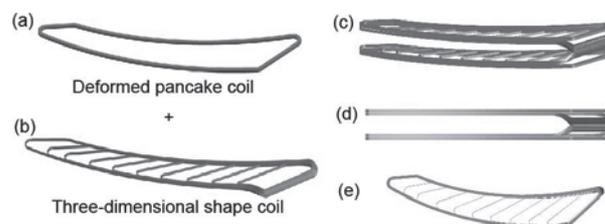


Fig. 2 Designed magnet: (a) deformed pancake coil, (b) addle-shape coil, (c) bird's-eye view, (d) side view, and (e) top view.

TABLE 1 OUTLINES OF THREE-DIMENSIONAL MAGNET DESIGNS

Number of turns	4900
Length of coated conductor per magnet	37 km
Current per tape	415 A
Integrated field at $r = 5.5$ m with iron	3.9 T·m
Maximum magnetic field to tape	5.6 T

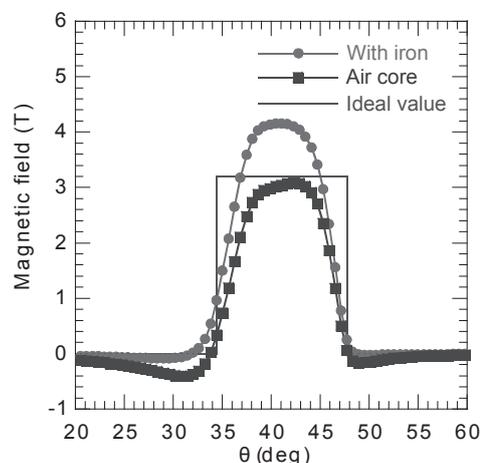


Fig. 3 Distributions of the azimuthal profiles of magnetic field

バルク MgB_2 超伝導体を用いた放射光発生用アンジュレータの提案

Proposal of the undulator using bulk MgB_2

紀井 俊輝, 吉田 恭平, Negm Hani, Konstantin Torgasin, 奥村 健佑,
三島 健太, 犬飼 元晴, 全 炳俊, 増田 開, 大垣 英明(京大)

Kii Toshiteru, YOSHIDA Kyohei, Negm Hani, NEGM Hani, KONSTANTIN Torgasin, OKUMURA Kensuke,
MISHIMA Kenta, INUKAI Motoharu, ZEN Heishun, MASUDA Kai, OHGAKI Hideaki (Kyoto University)
E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

周期交替磁場を発生させるアンジュレータは、シンクロtron放射光施設や自由電子レーザー加速器施設におけるキーデバイスである。現在は、ネオジム永久磁石を用いたものが主流となっているが、放射光の短波長化や輝度向上の潜在的な要求にこたえるために、アンジュレータの短周期・強磁場化技術の研究がすすめられている。

我々は、バルク超伝導体をソレノイドコイル中に周期的に配置して、超伝導転移後にソレノイドにより環境磁場を変化させることでバルク体内部にループ状の超伝導誘導電流を誘起させる新しいタイプの超伝導スタガードアレイアンジュレータを提案し開発を行っている[1]。これまでに、希土類銅酸化物系超伝導体を用いた試験機で、磁極間隔 4 mm、周期 10 mm の条件で 0.85 T の周期交替磁場の生成に成功し[2]、磁場強度においては永久磁石系技術の限界を超える性能を実現している。その一方、磁場精度の観点からは、希土類銅酸化物系超伝導体固有の問題により、改善が必要であることも指摘[3]しており、根本的な解決の方針について検討を行ってきた。本講演では、二ホウ化マグネシウム(MgB_2)バルク超伝導体を用いることのメリットについて報告を行う。

2. バルク超伝導体アンジュレータ

バルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータ(Bulk HTSC SAU)はバルク超伝導体内部に生じる誘導電流によって周期磁場を生成するものである。Fig. 1 に構造模式図を示す。

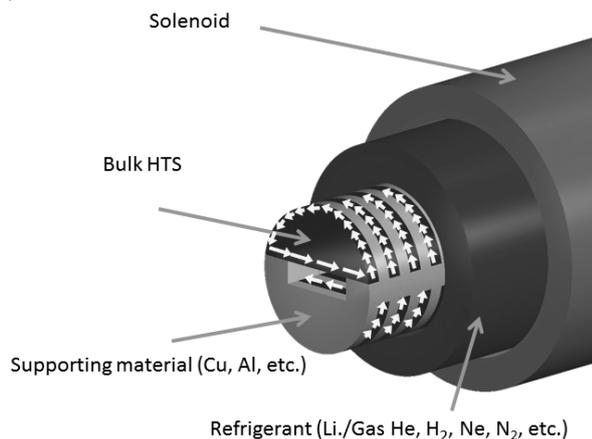


Fig. 1 Schematic drawing of Bulk HTSC SAU

このアンジュレータは、単一ドメインのバルク超伝導体を周期的にスタックしたものを、位相を半周期ずらし電子ビーム軌道を挟み配置した構造を持ち、外部ソレノイドで磁場を変化させるとバルク超伝導体内部に超伝導誘導電流(白矢印)が励起され、ビーム軌道を挟み方向の異なる電流によりソレノイド中心軸上に周期交替磁場が生成される。ソレノイドの生成する磁場と同一方向の磁場成分も生じるが、最終状態でのソレノイド強度を調整することにより軸方向成分の磁場を打ち消すことができる。

3. 磁気特性

アンジュレータ磁場は Fig. 2 に示すように概ねソレノイドによって与える磁場変化に比例している。

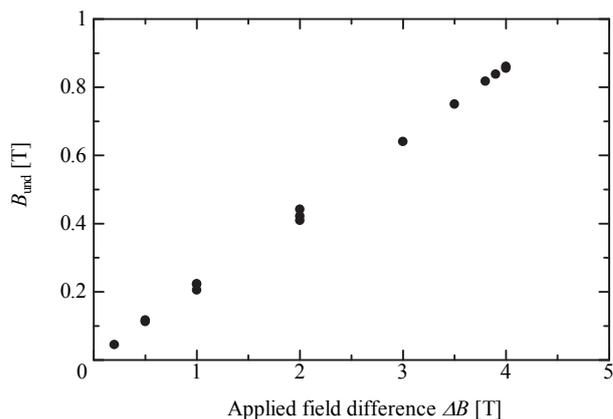


Fig. 2 Measured undulator field with REBCO HTS [2]

アンジュレータ磁場強度はバルク超伝導体全域に誘導電流が流れるようになるまで上昇を続けるが、このとき各バルク超伝導体間において臨界電流密度が異なると、特定のバルク超伝導体で先に誘導電流の飽和が発生し、磁場分布が大きく乱れる。また、個々のバルク超伝導体における局所的な臨界電流密度のばらつきも磁場分布の乱れの要因となる。

強磁場生成のためには、高い臨界電流密度をもつ希土類銅酸化物系超伝導体が有利ではあるが、種結晶を用いた結晶成長が不可欠であり、成長方向の違いや種結晶からの距離により特性にはばらつきが生じてしまう。それに対し MgB_2 は臨界電流密度で劣るものの、結晶粒間の超伝導電流弱結合特性を持たず[4]、種結晶を用いた成長過程を行うことなくアンジュレータで利用できる。そのため、REBCO に比べソレノイドにより与える磁場変化量を大きくとることが可能であり、臨界電流密度特性を補うことができる。

講演では、REBCO と MgB_2 の臨界電流特性に基づきアンジュレータ磁場強度、ソレノイド磁場強度、想定運転温度、臨界電流密度のばらつきの影響について総合的に検討した結果について報告を行う。

参考文献

1. T. Kii, et al.: Proc. FEL2006 (2006) p. 653
2. R. Kinjo, et al.: Applied Physics Express Vol. 6 (2013) 042701
3. T. Kii, et al.: Proc. FEL2010 (2010) p. 648
4. DC Larbalestier, et al.; Nature 410 (2001) p. 186