

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (9-1) -本格始動した QCS -

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (9-1) - QCS Starts First Beam Operation -

有本 靖, 青木 香苗, 植木 竜一, 大内 徳人, 大木 俊征, 川井 正徳, 宗 占国, 土屋 清澄, 中村 衆, 山岡 広, 王 旭東 (KEK/総研大)
ARIMOTO Yasushi, AOKI Kanae, UEKI Ryuichi, OHUCHI Norihito, Oki Toshiyuki, KAWAI Masanori, ZONG Zhanguo,
TSUCHIYA Kiyosumi, NAKAMURA, Shu, YAMAOKA Hiroshi, WANG Xudong
E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

1. はじめに

SuperKEKB では Belle II 検出器と最終集束超伝導電磁石システム (QCS) の加速器リングへのインストールが 2017 年に完了した [1]. 2018 年 3 月から始まった SuperKEKB コミッショニング, Phase2 において QCS は本格的に始動した. ここでは, この期間 Phase2 における QCS の運転状況について報告する.

2. SuperKEKB コミッショニングと Phase 2

SuperKEKB では加速器の運転フェーズを以下のように 3 段階に分けてコミッショニングを進めている.

- Phase 1 (2016 年 2 月-2016 年 6 月): Belle II 検出器無し, QCS 無しで加速器ビーム調整, 真空焼き出し.
- Phase 2 (2018 年 3 月-2018 年 7 月): Belle II 検出器有り, QCS 有りで加速器ビーム調整. (初のビーム衝突).
- Phase 3 (2019 年春-): Belle II 検出器へピクセル検出器をインストール. 本格的な物理 Run の開始.

Phase 2 での主な目的は

- ナノビームスキームの実証,
- Belle II 検出器でのビーム起因のバックグラウンドの評価,
- 入射方法の確立

である [2].

Phase 2 の運転に先立ち, QCS の Belle II 検出器へのインストールがなされた. ここでは衝突点検出器ビームパイプと QCS のビームパイプとが RVC(Remote Vacuum Connection) 機構により締結された. Fig.1 の写真は Belle II 測定器にインストールされる直前の QCS-L クライオスタットである.

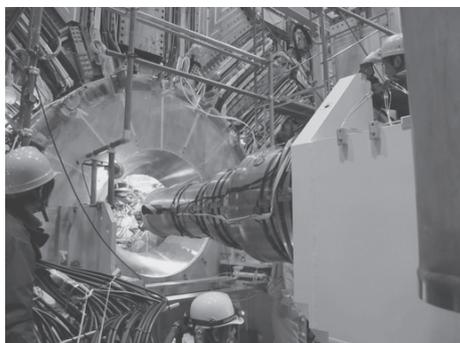


Fig. 1. QCS-L just before the installation to Belle II detector.

ビームの加速器リングの入射調整は 3 月 19 日から開始され, 3 月 21 日に HER リング, 3 月 27 日に LER リングでのビームの周回に成功した. この時, QC2LP のコレクターの電源配線が入れ替わっていることが発覚しその修正を行うような小さなトラブルがあった. その後は順調に衝突点でのビームサイズ (β^*) を絞る, 4 月 26 日に Belle II 検出器において初のハドロン事象

が観測された. その後, ビーム調整を実施し, Phase2 の目標である, ナノビームスキームの実証がなされた. SuperKEKB 加速器の衝突性能を表わすルミノシティは最大で $5.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録した.

3. QCS の運転

QCS の 4 極電磁石, 補正ダイポール, キャンセル電磁石, 補償ソレノイド電磁石の電流値は最初は設計値にセットされた. その後ビーム調整の段階でこれらの電流も調整されていった.

QCS 電磁石電源は Phase2 の終盤では暑さのため不安定となったが, おおむね安定に稼動させることが出来た.

また Phase2 開始前に行なったメンテナンスにより QCS へリウム冷凍システムも期間中, 安定に稼動した.[3]

4. QCS の運転時の問題点

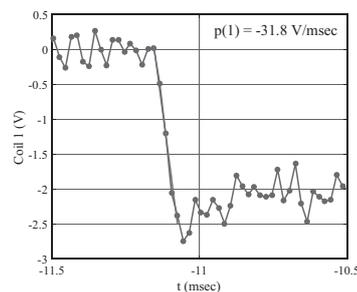


Fig. 2. Profile of coil voltage when QC1RP was quenched.

ビーム運転中に発生した QCS の主な問題点はクエンチである. ビーム入射時, または蓄積時に何らかの原因によりビームが QCS に衝突してクエンチする事象がたびたび発生した. 図 2 に QC1RP がクエンチした時に観測されたコイル電圧である. 急激に電圧が発生していることがわかる. ビーム起因であることは推定されているがまだ詳しい発生原因についてはわかっておらず, 粒子トラッキング等の手法を用いて調査を進めている段階である. このクエンチの問題については王 [4] が報告する.

5. まとめ

Phase 2 ではクエンチという問題が発生したが, QCS はおおむね安定に稼動させることが出来た.

参考文献

1. N. Ohuchi, *et. al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.94
2. Y. Ohnishi: Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2018), p. WEOLP01
3. Z. Zong, *et. al.*: Abstracts of this conference.
4. X. Wang, *et. al.*: Abstracts of this conference.

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (9-2)

- Phase-II ビーム運転におけるクエンチ事例 -

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (9-2)

- Quench Results in Phase-II Beam Commissioning -

王旭東, 有本靖, 植木竜一, 川井正徳, 宗占国, 中村衆, 大木俊征, 青木香苗, 山岡広, 土屋清澄, 大内徳人 (KEK)
 WANG Xudong, ARIMOTO Yasushi, UEKI Ryuichi, KAWAI Masanori, ZONG Zhanguo, NAKAMURA Shu, OKI Toshiyuki,
 AOKI Kanae, YAMAOKA Hiroshi, TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito (KEK)
 E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子ビーム衝突型加速器 KEKB のアップグレード(SuperKEKB)を2010年から行っている。2018年3月から7月までのPhase-IIビーム運転において、ビーム最終集束用超伝導電磁石(QCS)システムの実運用をはじめて行った。QCSシステムは、Fig. 1に示すように2台のクライオスタットから構成されている。衝突点(IP)を中心に加速器リング内側から見て左がQCS-L、右がQCS-Rである。QCS-LとQCS-Rには、ビーム集束用に8台の4極超伝導磁石、ビーム調整用に43台の補正超伝導多極磁石、ビームライン上のソレノイド磁場調整用に4台の補償用超伝導ソレノイド磁石が組み込まれている[1, 2]。本発表は、Phase-IIビーム運転で発生したQCSシステムの超伝導磁石のクエンチ事例について報告する。

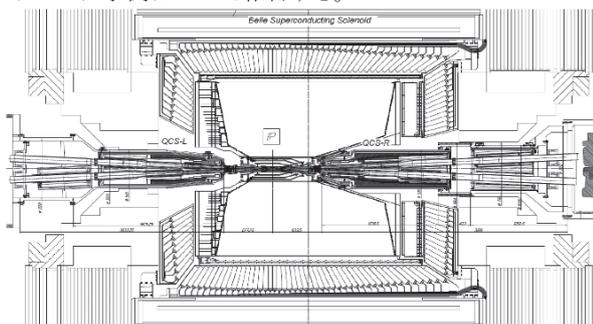


Fig. 1 Schematic drawing of the interaction region.

2. Phase-II ビーム運転で発生したクエンチ事象

Phase-IIビーム運転の間に、QCSシステムは合計42回のクエンチを観測した。QCS-L/QCS-Rの磁石位置およびクエンチ発生箇所と発生回数の概略図をFig. 2に示す。図中の矢印はクエンチした超伝導磁石を指しており、数字はクエンチ発生回数である。すべてのクエンチは、IPに近い4極超伝導磁石(QC1)とその近傍の補正超伝導多極磁石で観測された。4極超伝導磁石(QC1)で14回、補正超伝導多極磁石で28回のクエンチを観測した。なお、補正超伝導多極磁石は4極超伝導磁石よりもビーム軌道に近い内層側に巻かれている。ビームライン別で見ると、電子ビームライン(e-)で25回、陽電子ビームライン(e+)で17回のクエンチを観測した。クエンチ発生時のビーム運転状況別で見ると、ビーム入射中に発生したのが16回で、その際に誘発されたクエンチが9回、光学軌道補正などの調整試験中に発生したのが10回で、その際に誘発されたクエンチが4回、その他(冷却不十分と電流リード不具合)によるものが3回であった。またクエンチ以外で電源通信異常による遮断がQCS-L側で1度発生した。

クエンチ発生時の電圧電流波形の一例をFig. 3に示す。Fig. 3は陽電子ビームラインのIPを過ぎた直後にある4極超伝導磁石QC1LPでクエンチを観測したときの波形である。QC1LPは4極磁場を形成するために4つのコイルで構成されており、電圧上昇はCoil 2とCoil 3で観測された。Coil 2とCoil 3は加速器リングの内側に面しているため、陽電子ビーム

が軌道中心から内側へ振れたことによる影響でクエンチが発生したと考えられる。図中のV_valanceはQC1LPを2分割したCoil 1, 2側とCoil 3, 4側の電圧差分である。V_valanceが1Vを10ms継続して上回ると、QC1LPのクエンチ検出器から電源へ遮断信号が送られる。電源が遮断信号を受け取り、実際に電流が減衰開始するまで5ms弱の遅れがある。なお、電流波形は保護回路側ではなく電源回路側のDCCTより測定しているため、遮断直後に電流が0Aとなっている。Phase-IIIのビーム運転までに保護回路側から取得するように変更する予定である。

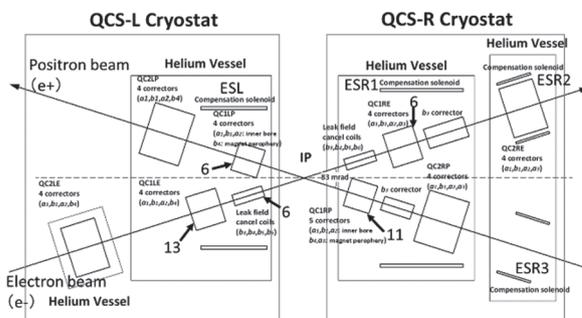


Fig. 2 Composition and quench information (arrows and numbers) of the superconducting magnets of QCS-L and QCS-R cryostats.

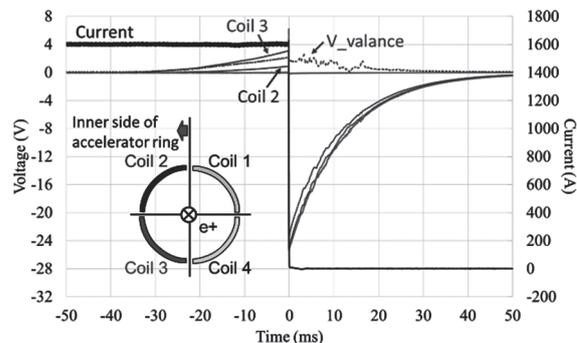


Fig. 3 Quench results of QC1LP.

3. まとめ

Phase-IIビーム運転で発生したQCSシステムのクエンチ事象について紹介した。43回発生したクエンチの内39回(約90.7%)がビームに起因するものと考えられる。クエンチ時のコイル電圧波形と配置から、軌道中心よりビームがある方向に振れたことでクエンチに至ったと予測できる。Phase-IIのビーム運転で見つかった不具合に対しては、Phase-IIIのビーム運転までに修正および改善を進めていく予定である。

参考文献

- N. Ohuchi, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 21 (2011) pp.1829-1832
- X. Wang, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 26 (2016) 4102205

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(9-3)

SuperKEKB Phase II コミッショニングでの冷却システム運転経験

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (9-3)

Operation experiences of cryogenic systems with the SuperKEKB Phase II commissioning

宗 占国, 大内 徳人, 有本 靖, 王 旭東, 青木 香苗, 山岡 広, 川井 正徳, 植木 竜一, 近藤 良也, 土屋 清澄 (KEK);
遠藤 友成 (株式会社 日立プラントメカニクス)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, WANG Xudong, AOKI Kanae, YAMAOKA Hiroshi, KAWAI Masanori,
UEKI Ryuichi, KONDOU Yoshinari, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); ENDOU Tomonari (HITACHI)

E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

1. はじめに

2017年4月～8月にかけて、SuperKEKBビーム最終集束超伝導電磁石システム(QCS-L・R)の冷却試験・励磁試験及び磁場測定が行なわれた。その後、SuperKEKB 加速器ビーム衝突調整運転 Phase II 開始までの間に QCS 電流リードの改良、QCS-R 冷凍機の自動弁シート漏れ修理、冷却システム運転制御ソフトの変更を行った。2018年3月からの Phase II 運転に先駆け、2月に QCS 冷却システムの再冷却試験を行い、クライオスタットがスムーズに冷却できるように自動制御のパラメータの調整を行うと共に熱負荷測定を再び実施した。この後、2018年3月～7月17日まで連続運転を行った。本発表では、冷却システム性能改善と SuperKEKB 加速器の Phase II 運転での冷却システム運転について報告する。

2. QCS-R 冷却システムの調整

QCS-R 冷凍機では、2017年5月の冷却試験において、冷却タービンの流量測定用ガス回路の誤りとコールドボックス深冷部バイパス自動弁からの冷却ヘリウムガス(～7 K)のシートリーク(低圧部容器の圧力変化により計算で約1 g/s)があったため、クライオスタットの冷却が20 K で停滞し、また冷凍能力が建設時より約20 W 程度少ない状態となった[1]。そのため、Phase II 運転開始までに修理・改良等を行い、2018年2月に冷却システムの再冷却試験を実施し、20 K からの冷却状態を調べた。試験結果として、QCS-R 電磁石が20 K まで冷却された時、冷凍機に戻る低温ヘリウムガス温度が冷却モードを進める設定値より高温であった。このために、冷却が停滞したが、この温度設定値は KEKB の QCS 冷却システムで使用していた値であり、KEKB 用 QCS クライオスタットよりも、SuperKEKB 用 QCS のコールドマス質量及び熱負荷が増加したことが原因である。この温度設定値を上げる(28 K→32 K)と、冷凍機が強制的に次の冷却モードに入り、クライオスタットから戻ってくる低温ヘリウムガスが、冷凍機の低温熱交換器を順番に通過するので、低温ヘリウムガスの冷却能力を十分に利用する事ができ、冷凍機の冷凍能力は大幅に改善され、約48時間で超伝導電磁石を4 K まで冷却し、55時間で通電可能状態になる(Fig. 1)。

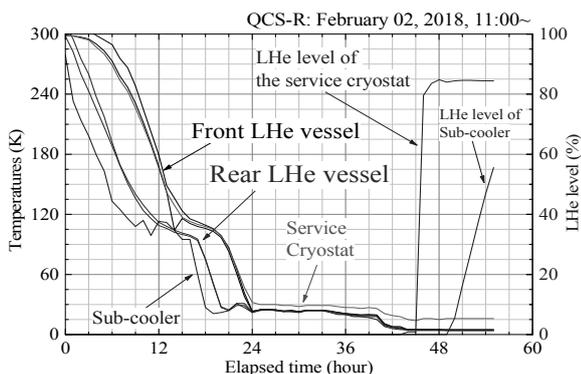


Fig.1 Cooling curves of the QCS-R cryogenic system.

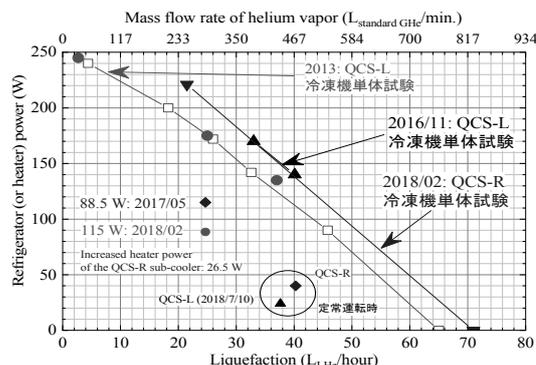


Fig.2 Measured working points in the load map.

深冷部バイパス自動弁のシートリークの影響は、修理前後で過冷却器内蔵ヒーターの出力(定常運転時の余剰冷凍能力)の変化によって(Fig. 2)推定でき、約26.5 Wである。その後クライオスタットを接続しないで、冷凍機の単体性能試験を行った。QCS-L・R の2台の冷凍機は同じ冷却能力(約250 W または 70 L_{LHe}/h 液化能力)を有することを確認した。

3. QCS 冷却システムの運転

SuperKEKB 加速器の QCS 冷却システムは、TRISTAN・KEKB の QCS 冷却システムの運転経験と実績から、プロセス制御計算機により、冷却制御及び監視を行った。冷凍機を熟知した運転員でなくても運転ができるよう、冷却、加温、各種トラブルに対する処置をすべて自動化した。Phase II コミュニケーションの開始から、QCS クエンチが問題となっていた。QCS の超伝導4極電磁石と超伝導補正電磁石は蓄積エネルギーが小さくて、クライオスタットの圧力と冷凍機の運転には何の影響もありません。超伝導コイルの電気絶縁、クエンチした時の電圧波形とクエンチの原因を確認して、すぐに励磁通電できる。超伝導補償ソレノイド(ESL・ESR1)はクエンチが発生したら、QCS 冷却システムは自動でクエンチ対応と復旧モードに入ると、約5時間(2018年7月16日に ESL 電源トラブルにより QCS-L 側全マグネット電源遮断、自動でクエンチ復帰処理の実績)後再励磁通電できる。

QCS 冷凍機の冷却能力は約半分以上(液化能力70 L/h 内の40 L/h)が電流リードの冷却するように利用されている。安定のために、電流リードに設計値の約1.5倍の冷却ガスを流している。Fig. 2に QCS-L・R 定常時の運転点を示す。QCS 冷却システムは余剰冷凍能力(L: 20 W/R: 40 W)が少ない状態での運転となっている。2018年秋には、SuperKEKB の Phase III コミッショニングに向けて、両冷却システムのメンテナンス作業と制御システムの改良を行っている。

参考文献

1. N. Ohuchi, Y. Arimoto, X. Wang, K. Aoki, and M. Kawai et al., CSSJ2018a, CSSJ2017a, PASJ2017, PASJ2018.

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(9-4) —Phase-II 試験運転における冷凍システム用モニタリングシステムの運用—

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (9-4)

-The remote monitoring system for the QCS and BELLE II cryogenic system in Phase-II commissioning-

青木 香苗, 大内 徳人, 宗 占国, 有本 靖, 王 旭東, 山岡 広, 川井 正徳, 近藤 良也, 榎田 康博(KEK);
遠藤 友成(日立プラントメカニクス); 廣瀬 雅哉(関東情報サービス); 岩崎 昌子(大阪市大); 中村 卓也(三菱電機システムサービス)
AOKI Kanae, OHUCHI Norihito, ZONG Zhangguo, ARIMOTO Yasushi, QANG Xudong, YAMAOKA Hiroshi, KAWAI Masanori,
KONDOU Yoshinari, MAKIDA Yasuhiro (KEK);
ENDO Tomonari (Hitachi Plant Mechanics); HIROSE Masaya (Kanto Information Service); IWASAKI Masako (Osaka City Univ.);
NAKAMURA Takuya (Mitsubishi Electric System & Service)
E-mail: kanae.aoki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、2019 年早期の物理実験開始(Phase-III)を目指して SuperKEKB 加速器及び Belle II 測定器の建設を進めている。2018 年 3 月から 7 月まではビーム衝突調整のための試験運転(Phase-II)を行った。

ビーム衝突点近傍には、測定器用超伝導ソレノイド(Belle ソレノイド)及び加速器ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(QCSL 及び QCSR)が位置している。我々は、この超伝導電磁石群及びヘリウム冷凍システム用リモートモニタリングシステムの開発を行って、Phase-II において運用した。

このリモートモニタリングシステムは、オープンソースソフトウェアの集合体である EPICS (Experimental Physics and Industrial Control)を利用したものである。EPICS は SuperKEKB 加速器及び Belle II 測定器の様々なデータ収集、モニターとして使用されており、これを利用したことにより実際の運用に際して加速器、測定器、超伝導低温間の情報の共有を容易に実現することができた。

本発表においては、長期運用を想定した異常事態への対策、大規模実験における情報共有の状況を報告する。

2. 超伝導電磁石と冷凍システム及び制御系との関係

衝突点に Belle ソレノイド、QCS 超伝導電磁石群(QCSL、QCSR; 加速器ビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石と超伝導補正磁石群)が設置されており、3 台のクライオスタットに分かれて、それぞれが専用のヘリウム冷凍機で冷却、超伝導状態が維持されている。

これらの冷凍運転は、総合計装システム EX-8000 によって制御されている。

我々が開発したリモートモニタリングシステムは、EX-8000 専用ネットワーク上の GWU(Gate Way Unit)から、データを吸い上げて、一般的なネットワークにおいて超伝導電磁石とヘリウム冷凍機の状態をモニター可能としたものである (Fig.1)。

Data 収集点数は、制御系内部 data も含めて 1050 点であり、1 秒周期で収集、データベースへの保存を行っている。

3. 長期運用を想定した異常事態への対策

EPICS は、分散化されたプログラム構造を持つリアルタイムコントローラーを実現するソフトウェア集合体であり、次の要素が重要である。

- ① EPICS IOC (IO Controller)
- ② データベース(CSS [Control System Studio] アーカイバー+データベース管理ソフトウェア)

我々のリモートモニタリングシステムは、元々 2 つの LAN (加速器制御ネットワーク、KEK-LAN)に渡って構成されているので、それぞれにデータベース (Fig.1 の DB1 と DB2)を置いてお互いのバックアップとしているが、さらに特に重要な①

と②に関しては、スペア PC を用意した。現在運用している PC に異常があれば、スペア PC にネットワーク上で切り換える。

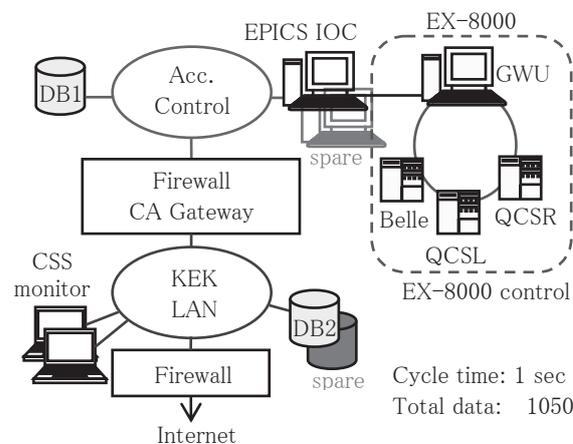


Fig.1 The remote monitoring system

4. 情報共有の状況

EPICS を利用したことにより、同じく EPICS を利用している加速器コントロールと Belle-II 測定器モニターとの data の共有が容易になった。3つの LAN(加速器制御ネットワーク、KEK-LAN、Belle-II-LAN)に渡って、data はその名称によって参照可能であり、一部の data を相互にモニターしている。

また、大規模な実験であり、作業者が多岐にわたるので、安全対策として超伝導低温関係の安全に関わる状況を示すモニターを入出口に表示することとした (Fig.2)。

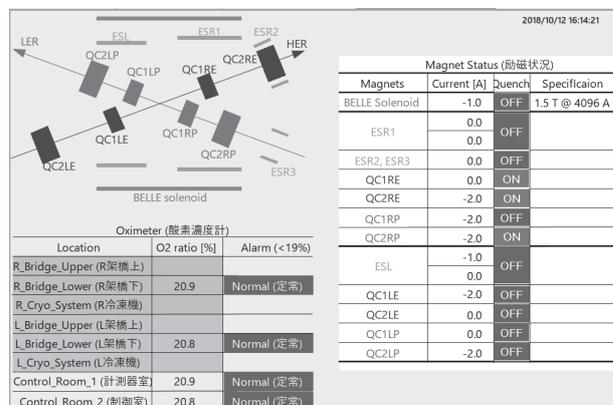


Fig.2 Safety information display of the monitor

参考文献

1. K. Aoki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.99

日本における ITER-TF コイルの製作進捗

Progress of ITER TF coil manufacture in Japan

小泉 徳潔, 中平 昌隆, 正木 圭, 松井 邦浩, 井口 将秀, 中本 美緒, 梶谷 秀樹, 尾関 秀将, 櫻井 武尊, 高橋 良和, 葛西 裕磨, 高野 克敏, 安藤 真次 (量研機構)

KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka, MASAKI Kei, MATSUI Kunihiro, IGUCHI Masahide, NAKAMOTO Mio, KAJITANI Hideki, OZEKI Masahide, SAKURAI Takeru, TAKAHASHI Yoshikazu, KASAI Yuma, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji (QST)

E-mail: koizumi.norikiyo@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構;QST)は, ITER における日本の国内機関として, ITER トロイダル磁場(TF)コイル[1](Fig.1 及び Table 1:スペア1個を含み19個.以下,TFコイルと記す.)のうち9個のTFコイル,19個分のコイル容器の調達を担当している.TFコイルは,ITERの超電導コイルの中でも最大の超電導コイルであり,かつ,製作の難易度も最も高いコイルである.本稿では,日本が担当しているTFコイル及びコイル容器の製作進捗を報告する.なお,TFコイルの製作手順の詳細等については,[1]を参照されたい.

QSTでは,TFコイルとコイル容器の製作に加えて,TFコイル用導体の性能検証再試験も本年上期に実施した.この主な成果についても報告する.

2. 日本におけるTFコイル及び構造物調達体制

日本では,TFコイル5機及び欧州向け構造物の4機は三菱重工,三菱電機及び現代重工が協力して,TFコイル4機及び欧州向け構造物の6機は東芝が担当し,2025年のファースト・プラズマを達成できるように,調達を進めている.

3. 調達進捗

日本におけるTFコイル及びコイル容器の製作進捗は,以下のとおり.

- ・巻線:44ダブル・パンケーキ(DP)完了(全DP数=63)
- ・熱処理:43DP完了
- ・ラジアル・プレート(RP)製作:39RP完了
- ・DP含浸:28DP完了
- ・巻線部(WP)含浸:2WP完了
- ・WP製作:1WP完了
- ・コイル容器:3機完了(内2機は欧州分)

TFコイルの製作における主な成果としては,TFコイルでは,その大きさ(Fig.1参照)に対して,数mmの厳しい公差が要求されているが,DPの製作を進めるなかで,これらの要求公差を達成できるようになっている.詳細は,[2]で報告する.

また,コイル容器においては,一部でより厳しい公差が要求されており,これらを満足しながら製作を進捗させている.詳細は,[3]で報告する.

上述のように,TFコイル及びコイル容器共に量産段階に入っており,QSTではこれまでの製作経験を基に,合理化やリスク低減の検討も進めている.その一例を[4]で報告する.

4. TF導体性能再検証

TF導体の性能検証試験を実施したところ,冷却,昇温を繰り返すと,臨界電流性能が劣化する現象が観測された.そこで,その影響を確認するために,TFインサート・コイル(TFIC)の再冷却,通電試験を実施した.その結果,冷却,昇温による性能劣化は飽和することが確認でき,ITERでのTFコイルの運転にも問題が無いことが確認できた.TFICの再試験結果の詳細は,[5]で報告する.

5. まとめ

日本では,9機のTFコイル,19機のコイル容器の製作を進めている.初号機WPや3機のコイル容器の製作を完成させるなど,ITERの2025年ファースト・プラズマを目指して,製

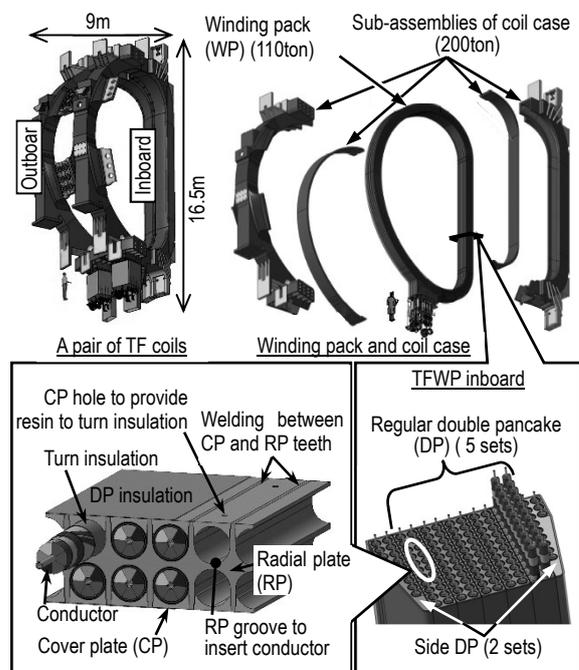


Fig.1 ITER TF coil and structures

Table 1 Major parameters of ITER-TF coil

Conductor outer diameter	43.7 mm
Cable diameter	39.7 mm
Conduit material	SS316LN
Number of coils	18
Number of DPs	7 (5rDPs + 2sDPs)
Conductor length in DP	760 m / rDP, 415 m / sDP
Nominal current	68 kA
Nominal field	11.8 T

作は順調に進捗させている.また,TF導体の性能検証も行い,実機TFコイルの運転に備えている.

謝辞

TFコイルの製作では,三菱重工,東芝,三菱電機,現代重工等多数のメーカーに協力を頂き,技術的課題を解決しながら進めています.これらのメーカーのご協力に感謝します.

参考文献

- (1) ITER TFコイル特集号: 低温工学, 47(2012) 135-139
- (2) 葛西裕磨, 他, “日本におけるITER-TFコイル巻線部の初号機完成と製作進捗”, 本講演集, 2D-a06 (2018)
- (3) 井口将秀, 他, “ITER-TFコイル容器の製作進捗”, 本講演集, 2D-a07 (2018)
- (4) 梶谷秀樹, 他, “ITER-TFコイル用Nb₃Sn素線のI_c値における熱処理擾乱の影響”, 2D-a09 (2018)
- (5) 諏訪友音, 他, “ITER TFインサートコイルの分流開始温度における昇温再冷却サイクルの影響”, 本講演集, 2D-a08 (2018)

日本における ITER-TF コイル巻線部の初号機完成と製作進捗

Manufacturing progress of ITER TF coil Winding Pack and Completion of first product in Japan

葛西 裕磨, 久野 和雄, 湊 恒明, 野元 一宏, 長谷川 満, 山根 実, 金 太炫, 藤本 路奥, 大橋 賢剛(三菱電機);
松井 邦浩, 梶谷 秀樹, 中本 美緒, 安藤 真次, 小泉 徳潔(量研機構)

KASAI Yuma, KUNO Kazuo, MINATO Tsuneaki, NOMOTO Kazuhiro, HASEGAWA Mitsuru, YAMANE Minoru, KIM Tae-hyun, FUJIMOTO Rooku, OHASHI Kengo (Mitsubishi Electric); MATSUI Kunihiko, KAJITANI Hideki, NAKAMOTO Mio, ANDO Shinji, KOIZUMI Norikiyo (QST)

E-mail: kasai.yuma@qst.go.jp

1. はじめに

三菱電機株式会社は三菱重工業株式会社(MHI)と協力し、量子科学技術研究開発機構(QST)及びITER機構(IO)が調達するITERトロイダル磁場(TF)コイル[1]をMHI二見工場で製作している。三菱電機が製作を担当している巻線部(WP, Fig.1)は、幅7m、高さ14m、質量110tで、7個のダブルパンケーキ(DP)を積層したコイルである。WPは、Nb₃Sn超電導導体の熱処理後の導体長変化[2]を見越しながらラジアルプレート(RP)の溝に導体長0.1%の精度で合うよう導体を成型するD型巻線、超伝導性能劣化を防止するために熱処理後導体へ与える歪0.1%以下での管理[3]、DP間の低電気抵抗接続など、製作難易度が非常に高いコイルである。これまでに、上記らの高度な製作要求を満たしたWPの初号機を完成させた(Fig.2)。本稿では、完成した初号機WPを含めたWPの製作進捗製作結果について報告する。

2. 製作手順

DP製作は[4]を参照のこと。WP製作の手順は次の通り。

- 1) 7枚のDP間に寸法調整材を挟み積層する
- 2) DPの電気接続部(ジョイント)を接続する
- 3) 絶縁テープを巻き、樹脂で加圧含浸・加熱硬化する
- 4) 計測線・冷媒配管を組み立てる

3. WP製作課題と達成実績

DP間のジョイント接続ははんだ接続を用いている。要求される接続性能(通電68kA・導体温度4.5K・外部磁場2Tで3nΩ以下)の実機での確認はITERトカマク組立後の冷却試験でしか行えないが、常温下でのジョイント抵抗検査手法[5]にて、これまで累計18箇所(WP3基分)のジョイントの全てが健全であることを確認している。またフルサイズサンプル[6]を製作し、累計5サンプルでジョイント接続性能(同条件で平均1.1nΩ)を達成している。

WPの絶縁にはITER運転時の電界・電磁力に耐えるため絶縁強度及び機械強度が求められる。そのためWPの絶縁及び含浸作業では、絶縁材をWPへ正確に巻き付け、樹脂で未含浸領域(ボイド)を作らず含浸・硬化することが重要である。これを達成するため、①製作したWP絶縁装置にて、自動でWPへ絶縁材を均一なピッチに巻き付け、②エポキシ樹脂とシアネート樹脂を均一に混合攪拌・脱気する樹脂注入装置を開発し、③WP含浸・キュア装置(Fig.3)で樹脂を加圧含浸・加熱硬化を行っている。これにより試作及び初号機ではボイドは見られず良好な含浸が出来ており、室温中での耐電圧試験にてWP対地耐電圧(19.9kVDC)及びパッシェン耐電圧8kVを達成している。またWP形状はその大きさ(Fig.1参照)に対し数mmの厳しい幾何公差が設定されている。それを達成するため①積層時に0.1mmの精度でDPを位置合わせし、②部材を加圧含浸による圧縮を予測して調整し、③含浸容器を絶縁に沿うよう正確に組み立てることで、直線部外周平面度1mm及びWP全体の輪郭度3mm~8mmを満たした。

WPには内部の電位計測用に高電圧計測線を取り付ける。

これはWPの絶縁内部から外部に取り出す構造のため、取り出し部で計測線損傷のリスクが高く、I0の初期設計構造での部分試作にて絶縁被覆の破断・地絡が発生した。そのため、機械強度・絶縁性を保つ構造に設計改良し、再試験を合格し実機に反映した。現在は初号機にてWP本体と合わせ室温の耐電圧試験を合格している。

4. まとめ

三菱電機は、ITER TF コイル WP の製作を実施し、要求性能を満足する初号機を完成させた。2018年10月現在は80K冷却試験及び次号機以降の製作も順調に進めている。この中で、今後の原型炉開発に向けた、超大型D型超伝導磁石の製作技術の開発と蓄積及び製作経験を積むことが出来た。

謝辞

ITER TF コイル WP の製作にご協力いただいているMHI、並びに関係会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小泉徳潔, 他, "日本におけるITER-TFコイルの製作進捗", 本講演集, 2D-a06 (2018)
- [2] K. Matsui, et al: TEION KOGAKU 47 (2012) 160-165
- [3] K. Okuno, et al: IEEE Trans. In Appl. Supercond., Vol. 12 (June 2004), No.2, p.1376 - 1381.
- [4] T. Hemmi, et al: J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.6 (2016) p.402-407
- [5] H. Kajitani et al.: IEEE Trans. In Appl. Supercond., Vol. 25 (June 2015) Art. ID. 6965582.
- [6] N. Kajitani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94(2017) p.34

Winding pack (WP) (110ton)

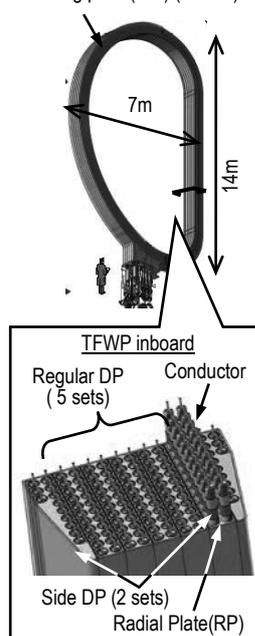


Fig.1 ITER TF coil WP

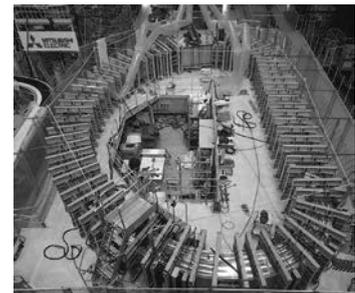


Fig.3 WP impregnation system

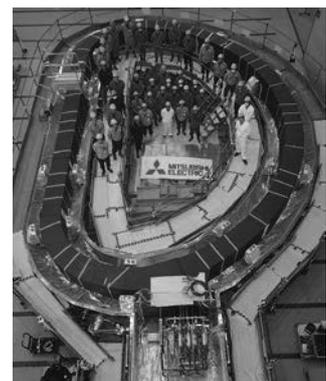


Fig.2 First WP in Japan

ITER-TF コイル容器の製作進捗

Manufacturing progress of ITER TF Coil Case

井口 将秀, 櫻井 武尊, 尾関 秀将, HONG YunSeok, 藤原 英弘, 高野 克敏, 猪野 昌信, 堤 史明, 金森 信乃, 齋藤 健吾, 田中 信彦, 栗田 智久, 花岡 敏明, 正木 圭, 中平 昌隆, 小泉 徳潔 (量研機構)

IGUCHI Masahide, SAKURAI Takeru, OZEKI Hidemasa, HONG YunSeok, FUJIWARA Eikou, TAKANO Katsutoshi, INO Masanobu, TSUTSUMI Fumiaki, KANAMORI Shino, SAITO Kengo, TANAKA Nobuhiko, KURITA Tomohisa, HANAOKA Toshiaki, MASAKI Kei, NAKAHIRA Masataka, KOIZUMI Norikiyo (QST)

E-mail: iguchi.masahide@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構)は ITER 計画において 19 個のトロイダル磁場コイル(TF コイル)構造物の調達を担当している。19 個の内、10 個を欧州が製作する TF コイルに、9 個を日本が製作する TF コイルに供する。TF コイル構造物は超伝導巻線を格納する高さ 16.5m、幅 9m、重量 200 トンのコイル容器とコイル間支持構造物から成る。量研機構は、2014 年 4 月から実機 TF コイル容器の製作を開始し、2017 年 12 月に欧州向けの初号機に対する完成検査を実施し、TF コイル容器初号機の製作を完了した[1]。本稿では TF コイル容器の製作における課題と対処、及び並行して製作を進めている日本の TF コイル向け TF コイル容器初号機の製作進捗について報告する。

2. サブ・アセンブリの製作

TF コイル容器はサブ・アセンブリと呼ばれる 4 つの構造物から構成される。トカマク中心側(内側)には、AU と、その蓋となる AP と呼ぶサブ・アセンブリがある。同様に、外側にはそれぞれ BU、BP と呼ぶサブ・アセンブリがある(Fig.1)。合理的に製作できる材料の大きさに限りがあるため、サブ・アセンブリはベーシック・セグメントというサブ・アセンブリを分割した単位で製作し、それらを溶接接合して主構造体製作した後、最終機械加工する(Fig.1)。TF コイルは、超伝導巻線部を TF コイル容器に格納した後、AU-AP、BU-BP、AU-BU をそれぞれ溶接し、一体化することで製作する。最終機械加工時にはこれら一体化溶接の溶接開先も加工する。これらの溶接開先が要求精度を満足しているかどうかを、実物同士を仮組することで確認する。この検査を仮組検査と呼ぶ。

3. 仮組検査

日本向け AU-AP、BU-BP に対する仮組検査は欧州向けサブ・アセンブリと同じ方法で実施し、合格となった(検査方法は参考文献[1-3]を参照されたい)。AU-BU に対する仮組検査では、日本向け TF コイル容器は Fig. 2 に示すように、AU を地面に垂直に設置し、BU を上方から降ろしていく垂直姿勢での検査を実施する点が、AU、BU を地面に水平に設置して検査を行う欧州向け[1]との違いである。

垂直姿勢での仮組検査の場合、Fig.2 のように BU を吊り上げた場合、自重により Fig.2 中の大きな矢印が示すように、BU は L_{BU} が小さくなる方向に変形する(片側 5mm 程度)。仮組検査時にはこの変形を修正する必要があるが、BU 吊り上げ中に BU の形状をサブミリオーダーで調整するためには、大掛かりな治具が必要となる。そこで、Fig.2 に示すように BU に BU 自重受け治具を設置し、内側に変形した BU が AU に接触する前にこれらの治具で BU を受ける。BU を治具で受けると吊り荷重が減少し、自重による変形が抑制され、BU が広がる。この動作を制御することで BU の自重による変形を調整する、という方法を選択した。検査の結果、溶接開先の隙間及び食い違いともに公差を満足していることを確認し、TF コイル容器仮組検査を終了した。(Fig.3)

4. TF コイル構造物製作の進捗

上述の仮組検査の合格を以て、日本向け TF コイル容器初号機の BU は次工程に進んだ。残りの TF コイル容器についても製作中であり、完成し次第、順次 TF コイル製作メーカーに輸送する予定である。

謝辞

TF コイル構造物の調達活動にご協力頂いている三菱重工業(株)、現代重工業(株)、イーエナジー(株)、(株)東芝、並びに関連会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 井口将秀, 他, 第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 36, (2018)
- [2] M. Iguchi, et. al, IEEE TRANS. ON APP. SUPERCOND., VOL. 28, NO. 3, APRIL 2018
- [3] 櫻井武尊, 他, 第 95 回 2017 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 50, (2017)

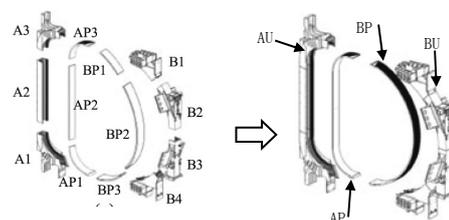


Fig. 1 Sub-assemblies of TF Coil Case

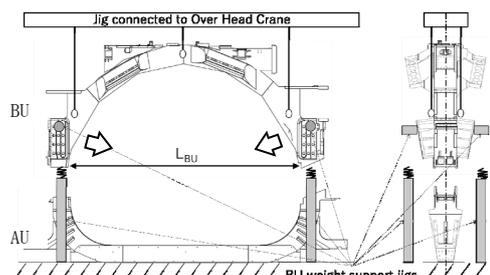


Fig. 2 AU-BU Fitting test



Fig. 3 Picture during AU-BU Fitting test

ITER TFインサートコイルにおける昇温再冷却サイクルの影響 Effect of Warm-up and Cooldown cycles on ITER TF Insert Coil

諏訪 友童, 尾関 秀将, 高橋 良和, 松井 邦浩, 河野 勝巳, 小泉 徳潔, 磯野 高明 (量研機構)
SUWA Tomone, OZEKI Hidemasa, TAKAHASHI Yoshikazu, MATSUI Kunihiro, KAWANO Katsumi, KOIZUMI Norikiyo,
ISONO Takaaki (QST)
E-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

1. はじめに

ITER トロイダル磁場(TF)コイルには Nb₃Sn 超伝導素線を使用したケーブルインコンジット導体(CICC)導体を用いられる。これまで、短尺の直状導体を用いた性能評価[1]を行ってきたが、フープ力が加わらないため、実機運転条件を模擬できなかった。そのため、より実機運転に近い条件の導体性能を調べるため、実機 TF 導体を用いたソレノイド状の TF インサートコイルを製作し、性能評価を行った[2]。その結果、300K までの昇温と 4 K への冷却(昇温再冷却)を繰り返すと分流開始温度(T_{cs})が低下することがわかった。今回、昇温再冷却を追加し、昇温再冷却が T_{cs} に与える影響をさらに調べた。

2. TF インサートコイル

TF インサートコイル(Fig. 1)は、約 40 m の TF 導体を用いた直径 1.44 m、高さ約 0.6 m、約 9 ターンのスレノイドである。TF 導体に働く電磁力を支持するため、TF 導体の外側にステンレス鋼製マンドレルが取り付けられている。TF インサートコイルの中心付近には、1/4 ターン(1.13 m)間隔で電圧タップを取り付けて電圧を測定し、導体上に取り付けられた温度計により導体温度を測定した。TF インサートコイルは CS モデルコイルのボア内に挿入され、TF コイルの定格運転と同じ条件である外部磁場 10.8 T、68 kA 通電下に T_{cs} を測定した。

3. 実験

外部磁場 10.8 T、68 kA 通電下において、導体中を流れる He をヒーターを用いて加熱し、導体温度を上げながら TF 導体に発生する電圧を測定し、電界が 10 μ V/m 発生したときの温度を T_{cs} と定義した。まず、TF インサートコイルと CS モデルコイルを冷却し(WUCD#6)、 T_{cs} を測定した。その後、TF インサートコイルのみ 3 回(累積合計 9 回)の昇温再冷却を行い、 T_{cs} を測定した。また、7 回目の昇温再冷却(WUCD#7)以降、昇温再冷却後に繰り返し通電を 5 回行い、 T_{cs} 劣化が生じないか調べた。

4. 結果

Fig.2 に昇温再冷却の回数と T_{cs} の関係を示す。9 回の昇温再冷却により、 T_{cs} は 6.8 K から 6.2 K まで低下した。昇温再冷却により T_{cs} は低下し続けたが、WUCD#6 以降、 T_{cs} の低下速度が遅くなっていることがわかった。直線近似して低下速度を求めると、WUCD#3 までは 62 mK/WUCD であるが、WUCD#6 以降 10 mK/WUCD であり、劣化速度は約 1/6 に下がった。Fig.3 に示すように、 T_{cs} 低下速度の分布は VD1112 を除き、ほぼ均一であると言える。VD1112 は誘導ヒーター取り付けのための加工がマンドレルに施されており、他の部分に比べてサポートが弱いことが T_{cs} 低下が大きい原因と考えられる。また、Table 1 に示すように、WUCD#7 以降の繰り返し通電前後の T_{cs} の差はばらついており、昇温再冷却後における繰り返し通電による明確な劣化は見られなかった。

5. まとめ

TF 導体の T_{cs} における昇温再冷却の影響を調べるため、TF インサートコイルに対して合計 9 回の昇温再冷却を行い、分流開始温度(T_{cs})を測定した。昇温再冷却により T_{cs} は低下したが、最終的に T_{cs} の低下速度は 10 mK/WUCD となっ

た。また、昇温再冷却後に 5 回の繰り返し通電を行ったが、明確な T_{cs} の低下は見られなかった。本実験により、実機 TF コイル運転の参考となるデータを取得できた。

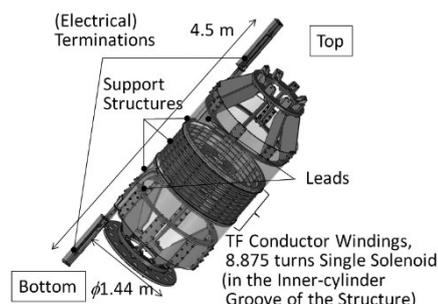


Fig. 1 Schematic view of TF insert coil.

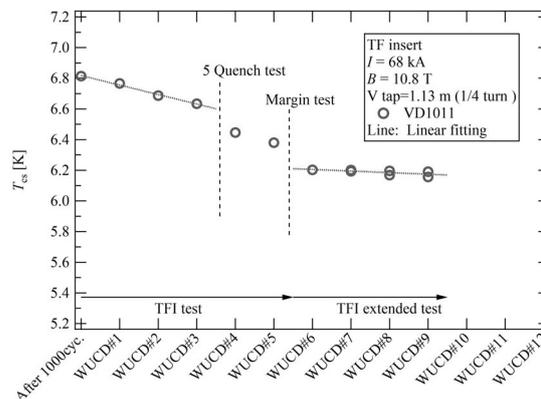


Fig. 2 T_{cs} degradation by warm-up/cooldown

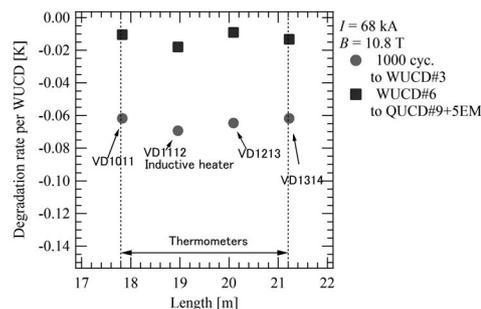


Fig. 3 Distribution of the T_{cs} degradation rate

Table 1 T_{cs} difference between cyclic loading after WUCD#7

	ΔT_{cs}
WUCD#7	9 mK
WUCD#8	-27 mK
WUCD#9	34 mK

参考文献

- Y. Nabara, et al.: J. Plasma Fusion Res. Vol92, No6 (2016) 396-401
- H. Ozeki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol28, No3 (2018) 4202905

ITER-TF コイル用 Nb₃Sn 素線の Ic 値における熱処理擾乱の影響

Influence of heat treatment disturbance on Ic for ITER TF Nb₃Sn strand

梶谷 秀樹, 中本 美緒, 葛西裕磨, 川崎 勉, 宇野 康弘, 山根 実, 松井 邦浩, 小泉 徳潔(量研機構)
 KAJITANI Hideki, NAKAMOTO Mio, KASAI Yuma, KAWASAKI Tsutomu, UNO Yasuhiro, YAMANE Minoru,
 MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo (QST)
 E-mail: kajitani.hideki@qst.go.jp

1. はじめに

ITER TF コイルのダブルパンケーキ(DP)熱処理では、素線サンプルを DP 近傍に設置し、同時熱処理した後、その素線サンプルの臨界電流値(Ic)を測定することで、熱処理の健全性を確認している。これまでに、43 体の DP 熱処理を完了しており、その全てにおいて、熱処理が健全であることを確認している。一方、熱処理中に停電等によって操炉が停止すると、導体性能が劣化するリスクがある。特に、内部拡散法の Nb₃Sn 素線では、このような温度擾乱が発生すると、その性能が劣化すると考えられているため、停電時用の予備電源を備えているが、温度擾乱が発生すれば、導体性能が劣化するリスクは残る。そこで、本研究では、ITER TF 素線を用いて、様々な温度擾乱を模擬して熱処理した素線サンプルの Ic 試験を実施し、その影響を評価したので、評価結果を報告する。

2. 素線サンプルの Ic 測定

素線サンプルは、大凡 1.3m の素線が、Ti-6Al-4V 製ボビンに、巻かれている構造である。これを、DP 近傍に配置して、同時熱処理する。熱処理された素線サンプルの Ic 測定時には、Ti-6Al-4V 製ボビンの上下に、電極となる銅リングを取り付けて、銅リングと素線端部を半田付けする。この電極部から通電し、素線中央部に取り付けた電圧タップ間の電圧を測定することで、4 K 及び 12 T における Ic 値を評価する。素線サンプルの外観を Fig.1 に示す。

3. 熱処理の温度擾乱模擬

DP 熱処理は、素線製作メーカーが推奨する熱処理パターンを設定温度として実施するが、その中で、想定される熱処理擾乱とは、a) 設定温度からの温度逸脱及び b) 停電等による操炉の停止が考えられる。そのため、ここでは、2 項と同様の素線サンプルを製作し、そのサンプルを、温度擾乱 a), b) を模擬した条件で熱処理した。

a) では、超伝導生成が行われる 650°C の領域において、設定温度 (650°C) からの逸脱が発生した場合を模擬した。例として、Fig.2 に、設定温度に対して、-10°C 逸脱した熱処理パターンを示す。b) では、操炉の停止を模擬し、急激な温度低下が発生した場合を模擬した。例として、Fig.3 に、210°C 保持中に熱処理が中断して、その後、昇温し再開した熱処理パターンを示す。

4. Ic 値における熱処理擾乱の影響

熱処理擾乱を模擬した素線サンプル Ic と、通常の熱処理を実施した健全サンプル Ic を比較することで、熱処理擾乱の影響を評価した。Ic 評価法は、2 項と同様である。ここでは、a) に関しては、Fig.2 と類似のパターンで、それぞれ設定温度から、+10, -10, -15, -20, -25°C 温度逸脱したサンプルに対して、評価した。b) に関しては、内部拡散法の素線では、Sn が液相状態で温度低下が発生すると、ブロンズ生成等に影響が出る可能性が考えられたため、低温領域においても、中断の影響を評価することとし、Fig.3 と類似のパターンで、それぞれ 210, 340, 450, 575, 650°C 保持中に熱処理を中断したサンプルに対して、評価した。これらサンプルと健全サンプルとの Ic 値比較結果を Fig.4 に示す。Fig.4 は、健全サンプルの Ic 値

を基準として、両者の差を割合として示している。a), b) サンプルは、それぞれ四角柱及び円柱棒グラフで示す。また、本評価に使用した各サンプルの素線種類(ブロンズ法:Br, 内部拡散法:IT)も同図に示す。以上より、熱処理擾乱の Ic 値への影響は、操炉停止などによる熱処理の中断の影響は小さいが、温度逸脱の影響は大きいと考えられる。

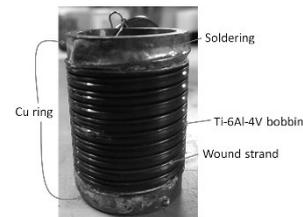


Fig.1 strand sample.

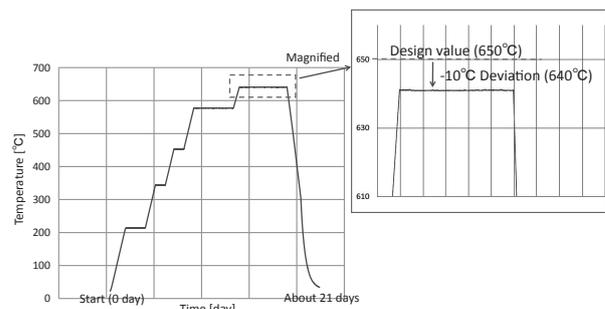


Fig.2 Heat treatment pattern of temperature deviation.

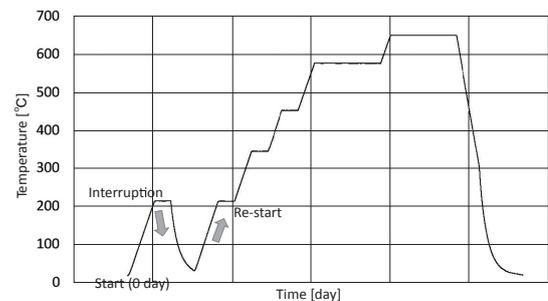


Fig.3 Heat treatment pattern of temperature interruption (same style of Fig.2).

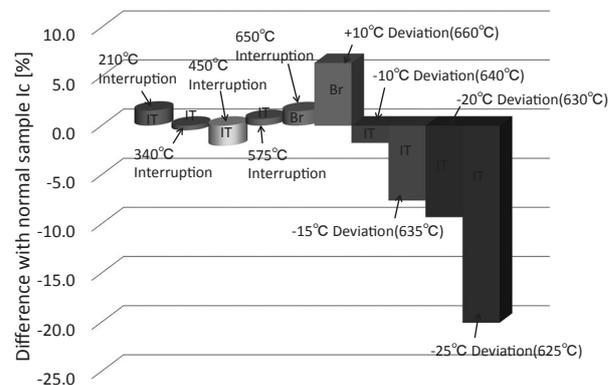


Fig.4 Comparison between heat treatment disturbance and normal samples.

ITER TF コイル用 Nb₃Sn 線材の中性子照射効果 (その3)

Neutron Irradiation Effect of Nb₃Sn wires for ITER TF coil (Part III)

西村 新, 菱沼良光(NIFS); 中本 建志, 吉田 誠, 飯尾 雅実(高エネ研); 小黒英俊(東海大);
外山 健, 山崎 正徳, 淡路 智(東北大)

NISHIMURA Arata, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); NAKAMOTO Tateshi, YOSHIDA Makoto, IIO Masami (KEK);
OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); TOYAMA Takeshi, YAMAZAKI Masanori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

JASTEC から提供を受けた ITER TF コイル用 Nb₃Sn 超伝導線材の、中性子照射効果を検討した。東北大学強磁場超伝導材料研究センターの 28T マグネットを用いて未照射材の I_c 計測を行い、真空中で伝導冷却によって試料を冷却する VTI を用いて測定した I_c との比較を行った。また、 4.9×10^{22} n/m² (> 0.1 MeV) 中性子照射した試料の I_c の変化を、8T から 15.5T の領域で計測するとともに、これまで公表されている結果との比較を行った。

2. 照射試料の準備と中性子照射

試験に供試した Nb₃Sn 線材は、直径 0.8mm、ブロンズ法によって製作されている。ベルギーの BR2 で 4.9×10^{22} n/m² (> 0.1 MeV) まで中性子照射した。照射中の試料の最高温度は 100℃ 以下である。未照射の試料は、東北大学強磁場超伝導材料研究センターの 28T ハイブリッドマグネットを用いて I_c 測定を行うとともに、東北大学大洗センターの放射線管理区域内に設置されている 15.5T 超伝導マグネットおよび VTI を用いて I_c 測定を行った。BR2 で照射した試料も、同様に、大洗センターの 15.5T 超伝導マグネットおよび VTI を用いて I_c を測定した。VTI でのデータ収集速度は 10Hz とした。

3. 臨界電流の変化

Fig. 1 に未照射材の I_c 測定結果の一例を示す。VTI での測定は試料電流を 150A/s とした時の結果である。VTI での計測では明らかに I_c が低くなる。これは、通電時の試料ホルダーのジュール発熱によるものと考えられる。28T マグネットでの I_c 測定は LHe 中で行われるため、ジュール発熱は LHe の蒸発に奪われるが、VTI では試料は真空中にあるため、熱伝導で試料が加熱され、I_c が低下するものと考えられる。なお、VTI を用いた測定では、V-I 曲線の最後の測定点付近をべき乗関数に近似して、I_c を決定した。

Fig. 2 に I_c と磁場の関係を示す。液体ヘリウム中での I_c (◇、▲) に比べ、VTI での I_c (○) は低くなっている。 4.9×10^{22} n/m² (> 0.1 MeV) 照射材の I_c (●) は明らかに未照射材より増加している。未照射材の I_c を I_{c0} とし、照射材の I_c との比を取った結果を、同時に、Fig. 2 に示す。8T から 15.5T の範囲で I_c/I_{c0} はほぼ 1.75 で一定であることが分かる。

これまで公表されている中性子照射結果と今回の結果を比較して Fig. 3 に示す。横軸は 0.1 MeV 以上の中性子の Fluence である。今回の結果は、京大原子炉 (KUR) で照射され、6T で評価された結果とほぼ一致する。KUR で用いられた試料はブロンズ法で作製されたものであり、少なくともブロンズ法ではほぼ同じ結果が得られることが分かる。

4. まとめ

中性子照射により Nb₃Sn 結晶内に照射欠陥が導入され、その欠陥が磁束のピン止め点となることから I_c が増加するものと考えられている。照射欠陥は 3次元に分布しており、磁束が相互に接触することなく固定されているものと推測される。同じ試料で照射量を変えたものや内部スズ法で作成した試料の

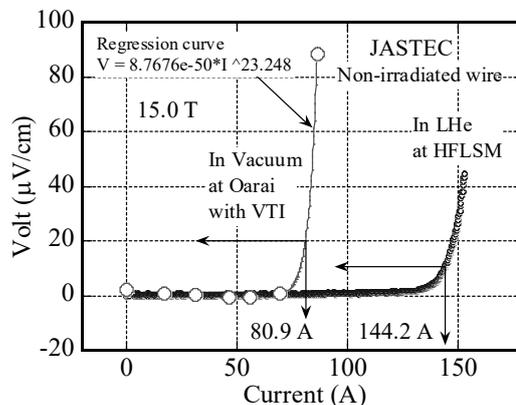


Fig. 1 Comparison of V-I curves measured in vacuum with VTI at Oarai center and in LHe at HFLSM.

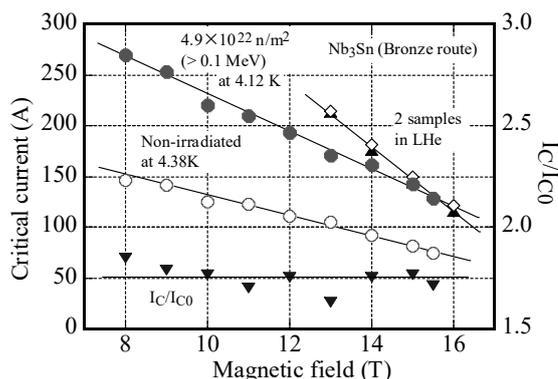


Fig. 2 Change in critical current and I_c/I_{c0} against magnetic field.

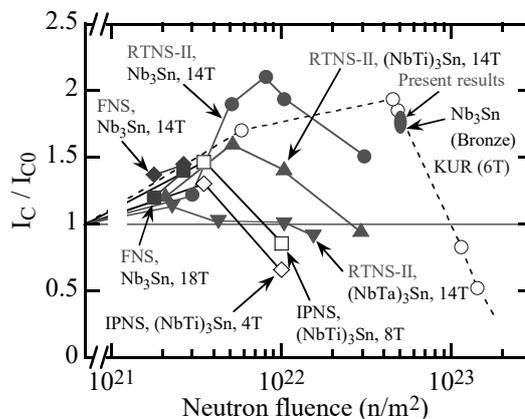


Fig. 3 Change in I_c/I_{c0} against neutron fluence of over 0.1 MeV. The result of this study was plotted on the same region as the data obtained at 6 T at KUR.

BR2 での照射を終了しており、それらの試料の I_c 測定を継続して行う予定である。それらの結果を総合して、Nb₃Sn 線材の中性子照射効果を議論できるものと期待される。