

## 30 kA 級高温超伝導導体の製作と試験(1) 全体概要とサンプル製作

### Fabrication and testing of a 30 kA-class HTS conductor (1) Overview and sample fabrication

柳 長門, 夏目 恭平, 濱口 真司, 野口 博基, 田村 仁, 三戸 利行, 相良 明男(NIFS); 寺崎 義朗(総研大); 伊藤 悟, 川井 健司, 清野 祐太郎, 大日方 達也, 丹野 裕介, 橋爪 秀利(東北大)

YANAGI Nagato, NATSUME Kyohei, HAMAGUCHI Shinji, NOGUCHI Hiroki, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS), TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); ITO Satoshi, KAWAI Kenji, SEINO Yutaro, OHINATA Tatsuya, TANNO Yusuke, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 の超伝導マグネットシステムは蓄積磁気エネルギーが 160 GJ に及び、3次元形状をしたヘリカルコイル(大半径 15.6 m)には、経験磁場 13 T において電流値 100 kA 級の導体が要求される[1]。導体の選択肢のひとつとして、銅酸化物系高温超伝導 (HTS) 導体を間接冷却で使用することを検討している[2-4]。HTS 導体は冷却安定性が高く、コイルがクエンチする心配を大幅に軽減できるとともに、巨大なヘリカルコイルを短尺導体の接続によって迅速に製作することができると期待される。今回、NIFS と東北大学の共同研究として 30 kA 級の HTS 導体サンプルを製作し、NIFS の大型導体試験装置を用いて冷却・通電試験を行った。本発表では、試験の全体概要とサンプルの詳細について述べる。

#### 2. 30 kA 級 HTS 導体サンプル

サンプルの HTS 線材には、(株)フジクラ製の GdBCO 線材 (FYSC-SC10)を用いた。これは、IBAD/PLD 法で製造され、幅 10 mm、厚み 0.22 mm で、ハステロイ基板の反対側の超伝導層の上に銅安定化材が付けられている。温度 77 K、自己磁場における臨界電流は実力値として 600 A である。これを 20 枚用いて、2列×10 層で単純積層して銅ジャケットに収め、その外側にステンレスジャケットをボルト締めして導体とした (Fig. 1 参照)。さらに、その外側に FRP ジャケットを被せて断熱した。また、通電時の強大な電磁力を支持するため、20 mm 厚のステンレス板を用意し、有限要素法を用いた計算によって高強度のステンレスボルトの間隔を決めた。サンプル全体はレーストラック形状として、両端を接続した。接続には、東北大学によって開発された機械的ブリッジジョイントを採用した。サンプルの実際の写真と導体試験装置内における設置の様子を Fig. 2 に示す。サンプルは液体ヘリウムに浸漬し、FRP ジャケットの下に仕込んだステンレスヒータを用いて温度制御した。

#### 3. 通電試験の方法

サンプルは短絡構造であるため、通電するためには、外部磁場を印加しているスプリットコイルを1次巻線としてその電流を変化させることによって2次巻線であるサンプルに電流を誘起した。サンプルの自己インダクタンス、および、サンプルとスプリットコイルとの相互インダクタンスを数値計算で求め、これより、例えば、スプリットコイルの中心磁場を 8 T から 7 T まで下げることによってサンプルに 50 kA の電流を流せると予測した。ただし、接続抵抗を  $4 \text{ n}\Omega$  ほどと評価して、電流の減衰時定数が約 10 分になると見積もった。また、今回は、導体の一部を GdBCO 線材の臨界温度以上に上げるヒータは割愛したため、バイアス磁場の上昇時にはサンプルに逆電流が流れるが、励磁速度を遅くして接続抵抗で減衰させることで逆方向の電流値を制限するようにした。サンプルに流れる電流はサンプル表面に貼り付けたホール素子、および、サンプル導体の周りに巻き付けたログスキューコイルによって測定を行った。通電試験の結果、および、接続抵抗測定の結果については、次の発表2件を参照されたい[5, 6]。

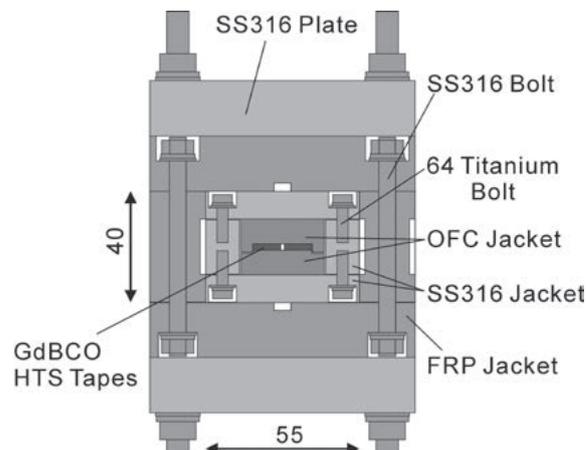


Fig. 1 Cross-sectional image of the 30-kA class GdBCO HTS conductor.

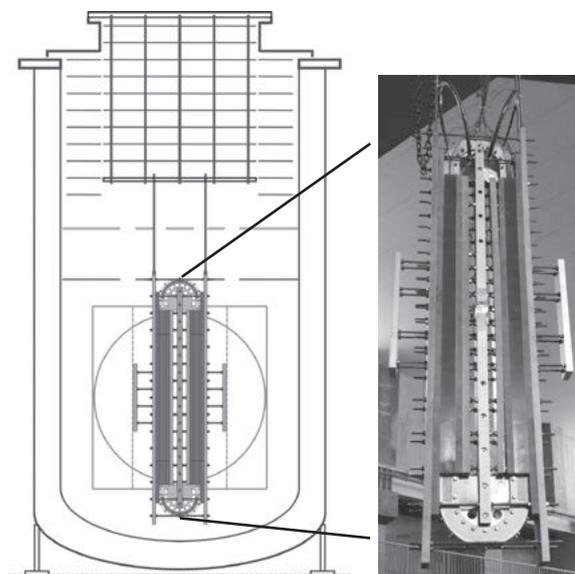


Fig. 2 Schematic illustration of the 30-kA class HTS conductor sample installed in the large-conductor testing facility at NIFS together with an actual photo of the sample.

#### 参考文献

- [1] A. Sagara, et al.: Fusion Eng. and Des. **87** (2012) 594.
- [2] H. Hashizume, et al.: Fusion Eng. and Des., **63** (2002) 449.
- [3] N. Yanagi, et al.: Fusion Sci. and Tech., **60** (2011) 648.
- [4] Y. Terazaki, et al.: Plasma and Fusion Research, **7** (2012) 2405027.
- [5] Y. Terazaki, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a02.
- [6] S. Ito, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a03.

## 30 kA 級高温超伝導導体の製作と試験(2) 通電試験結果 Fabrication and testing of a 30 kA-class HTS conductor (2) Excitation results

寺崎 義朗 (総研大) ; 柳 長門、夏目 恭平、濱口 真司、野口 博基、田村 仁、三戸 利行、相良 明男 (NIFS) ;  
伊藤 悟、川井 健司、清野 祐太郎、大日方 達也、丹野 裕介、橋爪 秀利 (東北大)

TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); YANAGI Nagato, NATSUME Kyohei, HAMAGUCHI Shinji, NOGUCHI Hiroki,  
TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, KAWAI Kenji, SEINO Yutaro, OHINATA Tatsuya,  
TANNO Yusuke, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 のマグネット設計オプションのひとつとして、接続構造を持った高温超伝導 (HTS) 導体の研究開発を行っている[1, 2]。これまでに REBCO 線材を用いて 10 kA 級 HTS 導体を製作し、低抵抗接続が原理的に可能であることを確認している[3]。今回、核融合炉用 HTS 導体の本格的な開発に向けて、30 kA 級導体の製作と試験を行った。ここでは導体の通電試験結果について述べる。実験全体の概要とサンプルの詳細、および、接続抵抗の評価については他の 2 件の発表を参考にされたい[4, 5]。

### 2. 試験結果

導体は GdBCO 線材 (2 列 10 層) を銅ジャケット内に単純積層し、銅ジャケットの周りをステンレスジャケットで囲う構造とした。これを電流リードのないレーストラック形状にし、接続部を設けて導体サンプルとした。試験はバイアス磁場を変化させて通電を行うフィールドクーリング法を用いた。

Fig. 1 に通電結果の一例を示す。上から、バイアスコイルの中心磁場強度、30 kA 級導体サンプルに流れた電流、導体の温度をプロットしている。導体の温度を 20 K に保った状態で、バイアスコイルの中心磁場を 8 T から 6.1 T に変化させたとき、約 40 kA の電流を安定的に流すことに成功した。導体は接続部を持つため電気抵抗が生じ、外部磁場が一定になったあと、電流が徐々に減衰している。今回の実験では、その時定数は 90 秒弱であった。

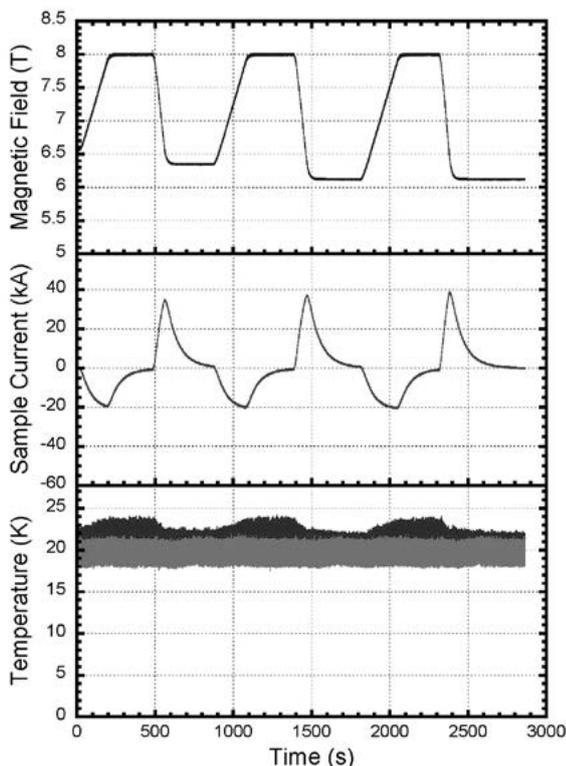


Fig.1 Example of the excitation results

また、Fig. 2に、導体温度が20 Kのときに通電電流が臨界電流に達したときの波形を示す。上から、バイアスコイルの中心磁場、導体に流れた電流、導体 (非接続部) の最大磁場印加位置の電圧を示している。磁場変化によって通電の最初から誘導電圧が発生しているが、導体電流が40 kAに達したときに電圧がさらに上昇してクエンチしており、ここで臨界電流に達したものと評価できる。このとき、導体に印加されていた磁場は5.95 Tであった。現在、導体全体で測定された臨界電流について、線材単線の特性から評価するための解析を行っている。

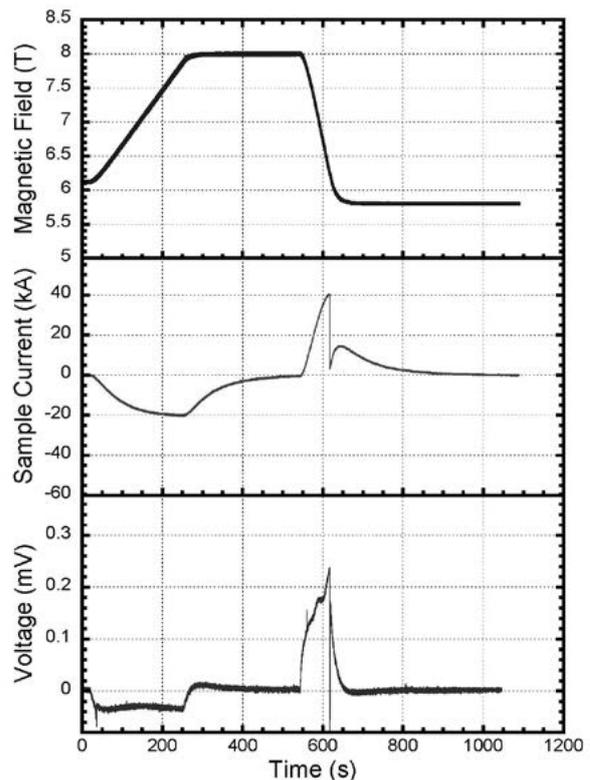


Fig. 2 Example of the critical current measurement

### 参考文献

- [1] N. Yanagi et al, Fusion Science and Technology, **60** (2011) 648.
- [2] H. Hashizume et al., Fusion Engineering and Design, **63** (2002) 449.
- [3] Y. Terazaki et al., Plasma and Fusion Research, **7** (2012) 2405027.
- [4] N. Yanagi, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a01
- [5] S. Ito, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a03

## 30 kA 級高温超伝導導体の製作と試験 (3) 接合部抵抗評価

## Fabrication and testing of a 30 kA-class HTS conductor (3) Evaluation of joint resistance

伊藤 悟, 川井 健司, 清野 祐太郎, 大日方 達也, 丹野 裕介, 橋爪 秀利(東北大);

柳 長門, 夏目 恭平, 濱口 真司, 野口 博基, 田村 仁, 三戸 利行, 相良 明男 (NIFS); 寺崎 義朗(総研大)

ITO Satoshi, KAWAI Kenji, SEINO Yutaro, OHINATA Tatsuya, TANNO Yusuke, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.);

YANAGI Nagato, NATSUME Kyohei, HAMAGUCHI Shinji, NOGUCHI Hiroki, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki,

SAGARA Akio (NIFS); TERAZAKI Yoshiro (Sokendai);

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

## 1. はじめに

ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 のマグネット設計オプションのひとつとして、マグネット(もしくは導体)を分割製造し、組み立てて(接続して)使用する分割型高温超伝導マグネットを提案している[1, 2]。FFHR-d1 では 100 kA 級高温超伝導導体が要求されるが、今回、導体開発の第一段階として、東北大と NIFS の共同研究で 30 kA 級導体の試作・通電試験を行った。この導体は、東北大の研究グループが NIFS と共同で開発を進めている機械的ブリッジジョイント[3,4]を用いた接続部を有する。本講演では、接続部の設計・製作および通電試験時の接合抵抗の評価結果を報告する。実験全体の概要とサンプルの詳細、および、通電試験時の臨界電流の評価については他の 2 件の発表を参考にされたい[5, 6]。

## 2. 接続部の設計・製作

Fig. 1 に機械的ブリッジジョイントの概念図、およびサンプルの接続部構造の概要を示す。本接続方式では 2 列 10 層に積層された GdBCO テープ(フジクラ製 FYSC-SC10)の銅層同士が機械的にラップジョイントされるような形状になっている。なお、個々の GdBCO テープの厚さの違いにより生じる隙間などが接合抵抗の上昇につながる[3,4]ため、接合面には厚さ 50  $\mu\text{m}$  のインジウム箔を挿入している。接合長さはテープ 1 枚あたり 30 mm で、接合部 1 ヶ所で 300 mm、全長で 620 mm となっている。接合力は SUS 316 ジャケット(厚さ 10 mm の平板)を M4 の 64 チタンボルトを順に締結していくことで与えた。ボルトは 25 mm 間隔で、接続部 1 ヶ所あたり 26 本配置した。締結トルクは 6.0 kNm (ボルトの軸力は約 7.5 kN)とし、接合部 1 ヶ所あたり 195 kN の接合力(平均接触圧力は 34.8 MPa)を与えた。また接合部 2 ヶ所それぞれには接合部の電圧を評価するための電圧タップを取り付けた。

## 3. 接合抵抗の評価

Fig. 2 に接合部温度が 4.2 K のときの実験結果の例を示す。2 つの接続部の接合抵抗を求めると、それぞれ  $\sim 2.5 \text{ n}\Omega$ 、 $\sim 25 \text{ n}\Omega$  という結果となった。サンプルの自己インダクタンスは 2.21  $\mu\text{H}$  であり、サンプルの接合抵抗 27.5  $\text{n}\Omega$  で除して求めた時定数は約 80 秒である。実際の実験結果から読み取った時定数は 80~90 秒程度であり、接合抵抗の評価結果は妥当であると考えられる。GdBCO テープ 1 層・2 層の機械的ブリッジジョイントの実験[3,4]から求めた接合抵抗率は  $1 \sim 3 \times 10^{-11} \Omega\text{m}^2$  程度であり、この値を用いて今回のサンプルの接合抵抗を予測すると接続部 1 ヶ所あたり  $2 \sim 6 \text{ n}\Omega$  程度になる。一方の接続部の接合抵抗はこの予測値とおよそ一致したが、もう一方の接続部の接合抵抗は予測値を大幅に上回った。現状、この原因は接続部の構造にあると考察している。今回のサンプルにおける接合力の負荷方法では、ボルトの締結力により SUS 316 ジャケット(平板)が曲がり、接触圧力が不均一になる。また、接続モジュールの銅ジャケット部が連続になっているため、一方の接続部の接合力が過剰になると、もう一方の接合力が低下するような構造になっている。さらに、接合抵抗の結果は接触圧力が 100 MPa 程度以上にならなければならなくとも報告されており[4]、今回のサンプルでは接合力が不足し

ていたと考えられる。今後は、凸型の SUS 316 ジャケットによる接続部の固定、接続モジュールの銅ジャケット部の分割、ボルト径・配置の再検討など、設計の見直しにより、これらの問題を解決していく予定である。

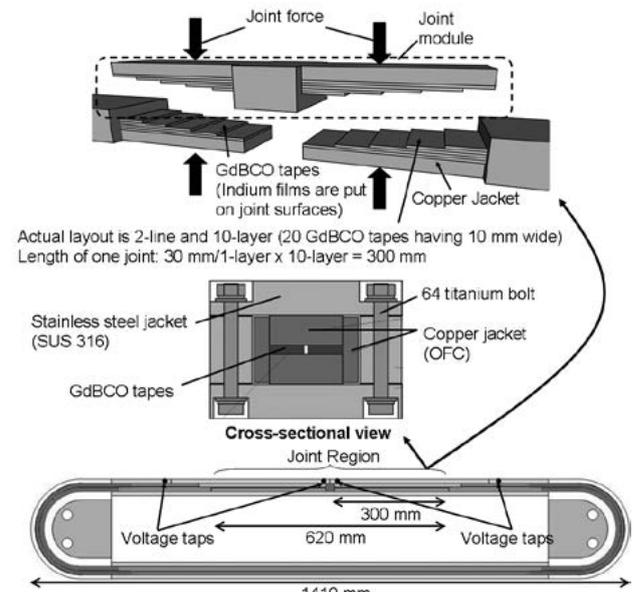


Fig. 1 Sample's structure having mechanical bridge joint

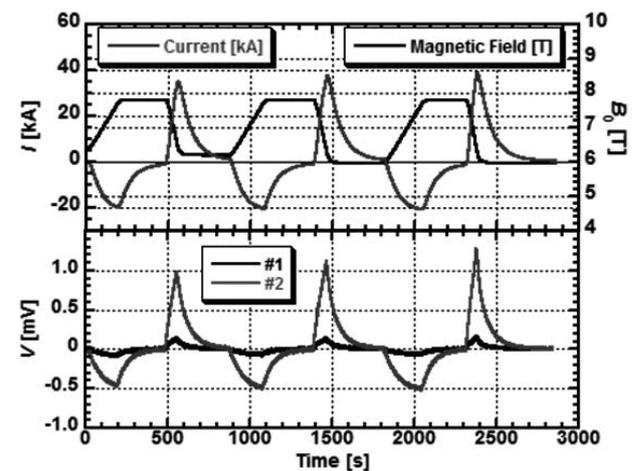


Fig. 2 An example of results in the joint region

## 参考文献

1. N. Yanagi, et al.: Fus. Sci. Tech., Vol. 60 (2011) p. 648
2. H. Hashizume, et al.: Fus. Eng. Des., Vol. 63 (2002) p. 449
3. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22 (2012) 6400104
4. K. Kawai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., submitted to publication.
5. N. Yanagi, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a01
6. Y. Terazaki, et al.: Abstract CSJ Conference (2012) 3C-a02

## JT-60SA 超伝導マグネットシステムの製作状況

### Manufacturing status of the 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、柏 好敏、本田 敦 (原子力機構)  
 YOSHIDA Kiyoshi, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, KAMIYA Koji,  
 KASHIWA Yoshitoshi, HONDA Atsushi (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 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)」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。EF コイルについては、実機コイルの巻線 EF4 が完成した。CS については、製造治具の製作と CS モデルコイルの熱処理が完了し、モデルコイルの絶縁処理が開始された。EU の担当する TF コイルについては、導体の量産を開始するとともに、コイル製作の治具を製作している。ヘリウム分配システムの設計を実施した。高温超伝導リードの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を確定して調達を開始した。

#### 2. 平衡磁場コイルと中心ソレノイド

EF コイルと CS 用導体の量産は、全超伝導導体 92 本のうち 42 本 (46%) が完成した。超伝導撚線と EF 用ジャケットは全数製作が完了し、CS ジャケットは 2013 年 3 月までに製造する。今後は、コイル製造での使用する導体に合わせて、導体の量産を続行する。

EF コイルの製作は、2012 年 4 月に EF4 巻線が完成 [1] した。一般道での搬送が不可能な大型コイルの製作のために、製造設備を那珂サイトに移動して、機器調整を完了し、ダミー導体でのパンケーキ試作を行った。現在、EF5 と EF6 コイルの実機パンケーキ製作を開始したところである。

CS は  $Nb_3Sn$  素線を用いた高磁場高電流密度のコイルであるので、巻線、 $Nb_3Sn$  生成熱処理、絶縁テープ巻き、真空含浸の各製造工程を、実証しながら試作を行っている。ダミー導体を用いたパンケーキは、すべての製造工程が完了して、超伝導導体を用いた CS モデルコイルは、絶縁テープ巻きまで完了した。また、導体接続にはバット接続法を採用し、絶縁テープ巻き工程中に用いる小型の導体接続装置を開発し、それを用いた導体接続部の実証試験 [2] を完了した。

#### 3. トロイダル磁場コイルコイル

EU の担当する TF コイル用導体については、イタリアのトリノ近郊の工場に ITER と JT-60SA 用の導体複合化設備が設置された。超伝導撚線は、 $NbTi$  素線で内部にブロンズバリアを有し、表面が純銅の素線である。これまで導体の試作、性能確認を経て、実機導体が 9 月に完成し、実機導体の月産 6 本の量産が開始された。導体接続法は、半田を用いない接続法で、実測の結果  $1n\Omega$  程度と低い値を示した。TF コイル製作は、イタリアのジェノバとフランスのペルフォートの工場での製造設備の準備が進んで、年内には、ダミー導体の巻線が開始される。コイル容器も来年にイタリアが製作を開始する。

#### 4. ヘリウム冷凍機と HTS リード

EU の担当するヘリウム冷凍機は、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、契約完了後に機器製作を開始する。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ついて、EU 側と建築の技術仕様を調整している。超伝導コイルに電流を供給するために、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、ドイツのカールスルー

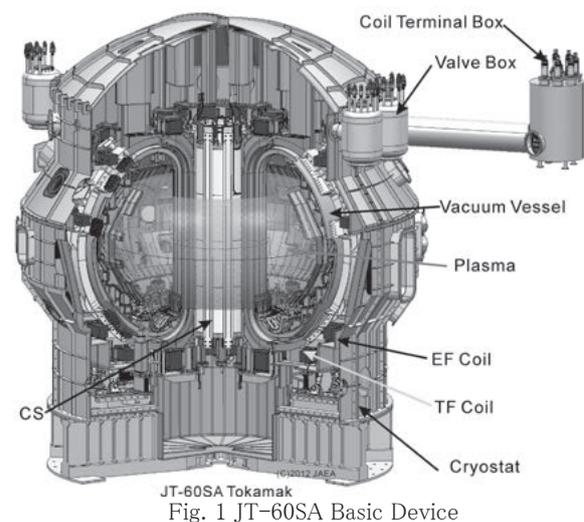
エ工科大学 (KIT) が製作を担当する。これまで、HTS リードの技術仕様を確定して、2011 年から製作を開始した。KIT での実機電流リードの試験 (13 回) に用いるジャンパー導体を日本が 4 本製作している。本ジャンパー導体は、実機用超伝導フィーダーの試作も兼ねており、この試験において用いることで、その性能の検証が可能である。

#### 5. まとめ

JT-60SA 計画は、各機器の製作期間や組立期間を見直して、プラズマ点火を 2016 年 3 月から 2019 年 3 月に 3 年間延期した。各機器の設計や実証試験が完了して、順次実機の製作を開始した。JT-60SA 装置の各機器の製作は順調に進んでいる。2013 年初頭には、クライオスタットの基礎部がスペインから日本に搬入され据付を開始し、EF コイル 3 個も仮設置し、プラズマ真空容器の組立が開始される。

#### 参考文献

- [1] K. Tsuchiya, et al., "Fabrication and transport of equilibrium field coils for the JT-60SA", to be published at Fusion and Engineering and Design (SOFT 2012)
- [2] K. Kizu, et al., "Development of central solenoid for JT-60SA", to be published at IEEE Trans. Appl. Supercond. (ASC2012)



## JT-60SA ヘリウム分配システムの設計

### The design of helium distribution system for the JT-60SA

大西 祥広, 神谷 宏治, 倉持 勝也, 本田 敦, 吉田 清(原子力機構)

ONISHI Yoshihiro, KAMIYA Koji, KURAMOCHI Katsuya, HONDA Atsushi, 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装置JT-60SAに改修する計画が、日本とEU間の共同プロジェクト「サテライト・トカマク計画」として推進されている。JT-60SAでは、超伝導コイルおよび関連設備を冷却するため、ヘリウム冷凍機は3.7 K, 4.4 K, 50 K および 80 K のヘリウムをそれぞれ 270 g/s, 1840 g/s, 25 g/s および 431 g/s で供給する。

本報告では、これらヘリウム分配システムの設計およびクライオスタット内における冷媒配管ヘッダーの支持方法について報告する。

#### 2. ヘリウム分配システムの設計

Fig. 1 に、ヘリウム分配システムの系統図を示す。Fig. 1 に示すように、各コイルは2つの循環ライン(CP1, CP2)で冷却され、クライオスタット内に設置するその他関連設備はCP3循環ラインおよび80 Kラインで冷却される。

##### ① CP1, CP2 循環ライン(4.4 K)

トロイダル磁場コイルとコイル構造物は、CP1 という低温循環ラインで冷却し、ポロイダル磁場コイルの冷却は、CP2 という低温循環ラインで冷却する。また、クールダウン初期はコイル構造物のみを冷却することが計画されており、それを可能とするためにCP1 Bypass(a)を設けた。

##### ② CP3 循環ライン(3.7 K)

プラズマ真空容器内の不純物ガス除去を目的としたクライオポンプは、一つの低温循環ポンプによって冷却される。これをCP3循環ラインとした。本ラインはバルブボックスを持たず、クライオスタット側面に直接設置するバルブ(b)によって冷媒を分配する。

##### ③ 80 K ライン

室温から超伝導コイルへの放射熱を遮蔽するサーマルシールドは、80 K ラインによって冷却される。80 K ラインは、各循環ラインと異なり、供給及び排気配管の圧力差を用い冷媒を供給する。80 K の冷媒配管ヘッダーから超伝導コイルへの放射熱を低減するために、ヘッダーの一部をクライオスタット外に設置することとした。(c)

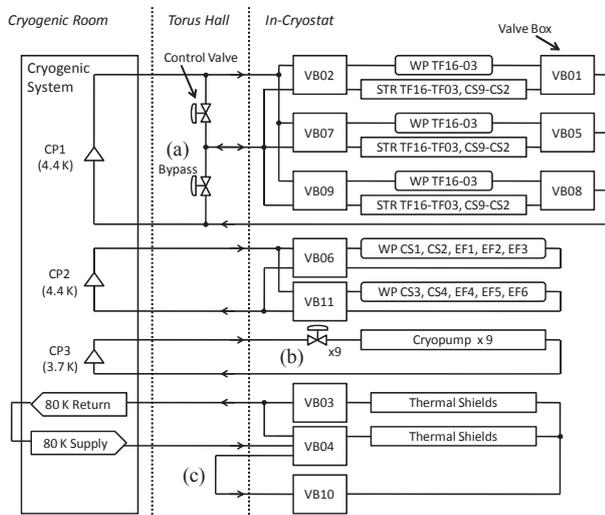


Fig.1 Flow Diagram of Helium Distribution system

#### 3. クライオスタット内冷媒配管の支持方法

JT-60SA では、JT-60 既存設備の一部を再利用するため、クライオスタット外のスペースを自由に確保することができない。それゆえ、ヘリウム分配システムの一つであるバルブボックスを11機に分け、クライオスタット側面の各場所に配置(d)することとした。Fig. 2 に、各バルブボックスの配置と冷媒配管ヘッダーの外観を示す。

##### ① 冷媒配管ヘッダーの配置

クライオスタット外における冷媒配管ヘッダーの配置においても、空間的制約から、各バルブボックスへ冷媒を分岐することは困難であった。そこで、冷媒配管ヘッダーをクライオスタット内に設置し、各バルブボックスへの分岐はクライオスタット内部にて行うこととした。

##### ② 冷媒配管ヘッダーの支持概念

冷媒配管ヘッダーの支持位置候補としてトロイダル磁場コイルがあるが、クールダウンによる熱収縮および電磁力による変形が大きいことから、支持位置に適さないことがわかった。そこで、クールダウンおよび電磁力の影響が少ないクライオスタットから、支持することとした。

##### ③ ヘッダーの形状変更

冷媒配管ヘッダーの配置およびその支持概念の変更より、冷媒配管ヘッダーの支持点、クライオスタット上下部(e)および各バルブボックス等の入出口とした。これに伴い、ヘッダーの形状をこれまでのリング状から Fig. 2 に示す放射状に変更した。

#### 参考文献

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

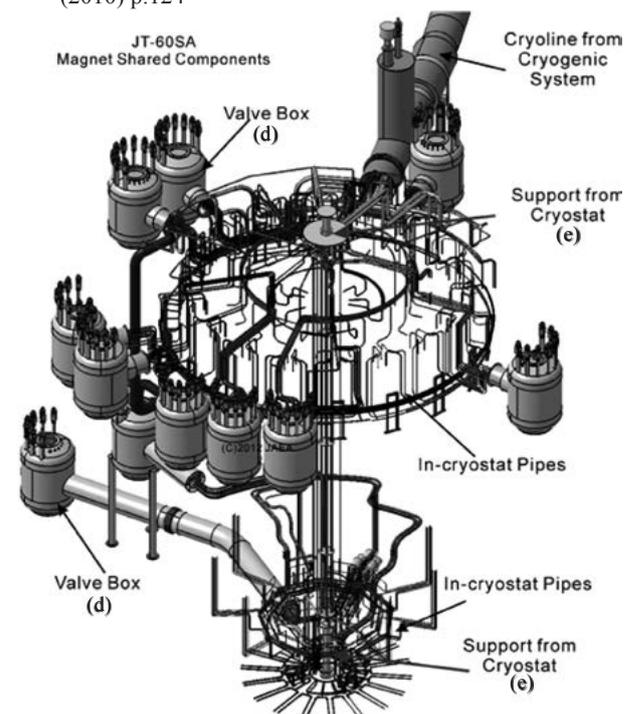


Fig.2 The support concept of header in the cryostat

# JT-60SA 超伝導マグネット計測系の設計

## Design of instrumentation system for JT-60SA superconducting magnets

村上 陽之, 古川 真人, 本田 敦, 吉田 清(原子力機構)

MURAKAMI Haruyuki, FURUKAWA Masato, HONDA Atsushi, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

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

### 1. はじめに

JT-60SA 装置[1]の超伝導マグネットは、超臨界圧ヘリウム(SHe)を用いて約 4.5K に冷却し運転する。クエンチ検出や温度測定・SHe 圧力測定などの計測系は、超伝導マグネットの保護および装置の運転管理において重要なシステムであり、JT-60SA 超伝導マグネットの製作と並行して、計測系の設計を進めている。

本発表では、クエンチ検出システムの概要、計測センサの配置など計測系の設計および計測に用いるケーブルなどの機器開発の現状について報告する。

### 2. クエンチ検出

JT-60SA では、TF コイル、CS および EF コイルの超伝導マグネット本体に加えて、クライオスタット内電流フィードおよび高温超伝導電流リードが超伝導機器に含まれる。

TF コイルのクエンチ検出は、隣り合う二つのコイル電圧に対しブリッジ回路を用いて誘導電圧を除去し、常伝導電圧を検出する(図 1 右)。検出システム(ブリッジ回路)を二重化することで互いにバックアップ回路として働くよう設計した。

CS および EF コイルのクエンチ検出は、ピックアップ電圧により誘導電圧を除去し常伝導電圧を検出する(図 1 左)。CS および EF コイルの検出システムも二重化することで冗長性を持たせている。EF コイルはKSTARなどで実績のある共巻きセンサ(図 2 左)を用いた。色の濃い導体部分同士の間にはφ1mm の SUS 線を二重に配置した。一方、CS は導体形状が正方形に近いため導体間の隙間が少なく、共巻きセンサの使用は製作が非常に困難であり、かつ断線の高リスクが高い。そのため CS はディスク形状のピックアップコイル(図 2 右)をパンケーキ間に挟む方法を用いる[2]。GFRP の板に5mmピッチで溝を切りφ0.5mm の SUS 線を埋め込み含浸し製作した。ディスク両面に線を通すことでピックアップコイルを二重化する。

クライオスタット内電流フィードおよび高温超伝導電流リードのクエンチ検出は、EF コイルと同様に共巻き線により誘導電圧を除去し常伝導電圧を検出する。また、SHe 供給側ヘリウム流量の監視によるクエンチ検出を併用することでクエンチ検出システムを二重化する。

### 3. 計測センサ

JT-60SA の計測センサは、センサ本体やケーブルの絶縁不良による不具合の抑制・コスト削減を目的とし、運転管理する上で必要最小限のセンサのみ設置する計画である。

超伝導マグネットの電圧は、クエンチ検出に必要なマグネット両端のターミナル間電圧のみ測定する。また、マグネットに供給する SHe の流量センサは各コイルの冷媒出口に一つずつ、温度センサは入口側・出口側ヘッダに一つずつのみ設置する。マグネット構造物およびサーマルシールドの温度センサは、冷却状態の監視に必要な冷媒出口側のみを設置することとした。

### 4. 計測ケーブル

JT-60SA に用いる計測ケーブルは、極低温や放射線環境下で使用される。1MGy を超える照射を受けても使用可能な Polyimide や PEEK (polyetheretherketone) を絶縁材料に用いた場合、計測ケーブルが硬く曲がりにくいため狭隘な環境

における使用が難しくなる。そこで、取扱いの容易な ETFE (ethylenetetrafluoroethylene) を絶縁材料に用いた計測ケーブルに対して、耐電圧試験および耐放射線性試験を実施し JT-60SA に使用可能か検討した。

計測ケーブルを曲率半径 120mm 程度に曲げ、液体窒素温度まで三度冷却した後、21kV の耐電圧試験を実施した。試験の結果、曲げや冷却によって絶縁強度が劣化しないことが確認された。次に ETFE 材料の耐放射線性試験として、最大 2MGy のγ線照射と引張試験を行った。図 3 に示す通り、試験の結果 ETFE は 1MGy 程度まで使用可能であり、JT-60SA 運転期間を通じて計測ケーブルが受ける最大 20kGy 程度の照射線量では問題ないことが確認できた。

以上の結果より、ETFE を絶縁に用いた計測ケーブルは、JT-60SA に問題なく使用できることが分かった。

### 参考文献

1. K. Yoshida, et al.: Physica C, 470 (2010) pp. 1727-1733
2. H. Murakami, et al.: Fus. Eng. Des., 87 (2012), pp. 23-29

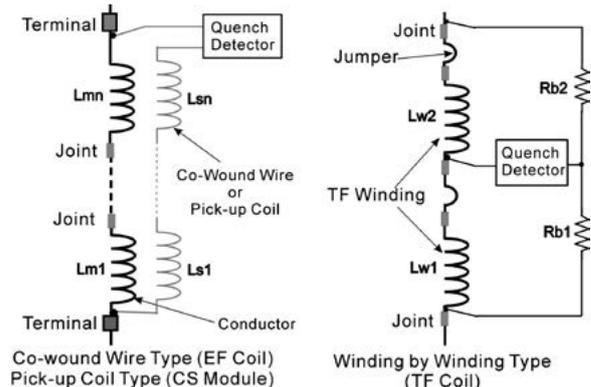


Fig.1 Circuit diagram of inductive voltage compensation

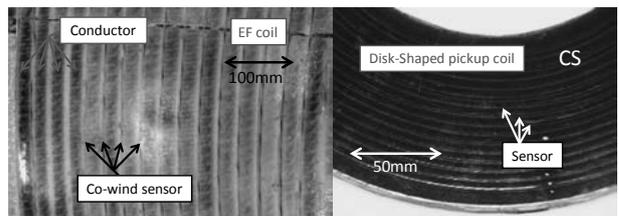


Fig.2 Pick-up sensor for EF coil (Left) and CS (Right)

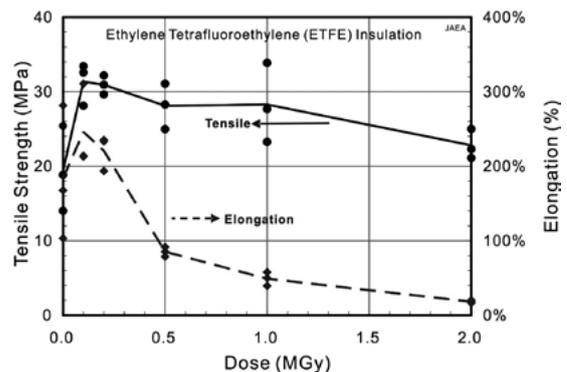


Fig.3 Tensile test results of ETFE insulation

# ITER TF コイルの調達進捗

## Status of ITER TF coil procurement

松井 邦浩, 辺見 努, 井口 将秀, 梶谷 秀樹, 西 宏, 千田 豊, 森本 将明, 小泉 徳潔(原子力機構)  
 MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, IGUCHI Masahide, KAJITANI Hideki, NISHI Hiroshi,  
 CHIDA Yutaka, MORIMOTO Masaaki, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)  
 E-mail: matsui.kunihiro@jaea.go.jp

### 1. はじめに

原子力機構は、ITER機構との調達取り決め(PA)に基づき、ITER TF コイルのうち、9 個の TF コイルと 19 個(予備 1 機を含む)の TF コイル構造物の調達を担当している。TF コイル及び構造物の調達は、3 段階に分けて段階的に行われており、これまでに、第 1 段階として、TF コイル及び構造物の製作技術を検証する中規模及び実規模の試作してきた[1]。これらの結果を受けて、今回、TF コイル及び TF コイル構造物の第 1 号機を調達する第 2 段階の活動を開始した。本講演では、TF コイル及び TF コイル構造物の調達活動の進捗を報告する。

### 2. TF コイル調達の進捗

TF コイル巻線 (Fig.1) の製作の第 1 段階では、1/3 規模での巻線、熱処理、含浸試験を完了するとともに、要求値を満足する寸法の実規模のラジアル・プレート(RP)の製作を完了した[2, 3, 4, 5, 6]。

第 2 段階では、ダミー・ダブル・パンケーキ(DP)を製作し、これらの結果を踏まえた TF コイル製作の全体製造計画書[7]を作成した後に、実機 TF コイルの製作を開始する。

このうち実機 TF コイルの製作では、WP 製作、構造物製作及びコイル一体化を含めた第 1 号機を製作するとともに、第 2 号機以降の RP 及び構造物用の材料の調達を実施する (Table 1)。原子力機構は、この第 2 段階の作業を実施する契約を、三菱重工業と締結した。本契約では、WP の製作を三菱電機、構造物の製作を三菱重工業、コイル一体化を両社が担当する。

### 3. TF コイル構造物調達の進捗

TF コイル構造物の製作については、第 1 段階において実規模の部分セグメントの試作や構造物用材料の品質確認検証試験を完了し[8]、第 2 段階では、TF コイルと同様に、構造物製作の全体製造計画書を作成した後に、実機構造物の製作を開始する。

実機構造物の製作では、EU が製作を担当する TF コイル用の第 1 号機を製作するとともに、第 2 号機以降の構造物材料の調達を実施する (Table 1)。この第 2 段階の作業を実施する契約を、イーエナジーと締結した。本契約では、インボード構造物の製作を三菱重工業、アウトボード構造物を現代重工業が担当する。

### 4. まとめ

原子力機構は、国内及び海外メーカーの協力のもの、TF コイル及び TF コイル構造物の実規模試作を進めるとともに、第 1 号機の製作及び第 2 号機以降の材料の調達を開始した。

### 参考文献

1. N. Koizumi, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 135
2. K. Matsui, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 160
3. K. Matsui, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 166
4. T. Hemmi, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 172

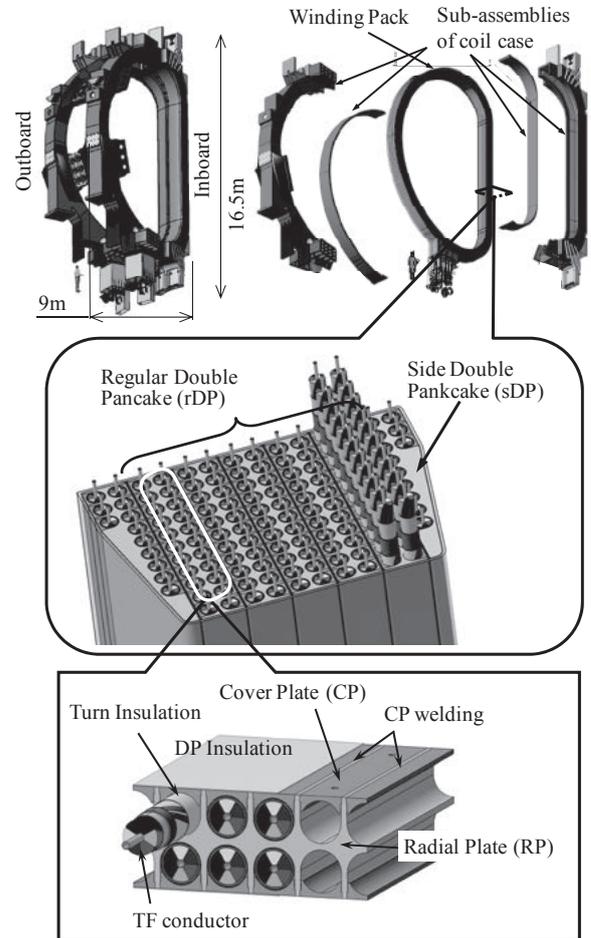


Fig. 1 Configuration of ITER TF Coil

Table 1 Strategy of the procurement of the TF coils and TFC structures

Fabrication of TF coil									
Fabrication of WP, Assembly	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Material for coil case	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fabrication of TFC structure	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Fabrication of TFC structure for EU										
Material for coil case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fabrication of TFC structure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Procured in second phase  
 Procured in next phase

5. K. Takano, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 178
6. N. Koizumi, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 186
7. Y. Nagamoto, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 200
8. M. Iguchi, et al.: TEION KOGAKU U (J. Cryo. Soc. Jpn.), 47 (2012) 193

ITER 超伝導導体の調達状況 –CS 撚線の開発–

Progress in Procurement for ITER Superconductors –Development of Center Solenoid Cable–

布谷 嘉彦, 高橋 良和, 名原 啓博, 堤 史明, 押切 雅幸, 宇野 康弘, 渋谷 和幸 (原子力機構); 石橋 達司 (日立電線); 渡邊 和章 (三菱電線); 杉本 昌弘 (古河電工); 村上 幸伸 (JASTEC)

Y.Nunoya, Y.Yoshikazu, Y.Nabara, F.Tsutsumi, M.Oshikiri, Y.Uno, K.Shibutani (JAEA); T.Ishibashi (Hitachi Cable); K.Watanabe(Mitsubishi Cable); M.Sugimoto (Furukawa Electric); Y.Murakami (JASTEC)

E-mail: nunoya.yoshihiko@jaea.go.jp

1. 背景

ITER 中心ソレノイド(CS)コイルは 6 個のモジュールで構成され、それぞれ独立の電流パターンで運転される。1 個のモジュールは 6 個の Hexa-Pancake と 1 個の Quad-Pancake で構成されている。導体は Nb3Sn のケーブル・イン・コンジット (CIC)型で、中心チャンネルを有する。撚線は Nb3Sn 素線が 576 本、銅素線が 288 本で構成され、5 次の多重撚線方式で製作される。この撚線を角型の中に丸い穴のあるステンレス管に挿入し、所定の外寸まで圧縮成型して、導体が完成する。定格電流値は 13T において 40kA である。ITER において日本は CS コイル用導体の 49 本全ての製作を担当している。撚線の撚りピッチは TF 用撚線と比較すると非常に短く、撚線における圧縮率が大きくなり、素線に傷の少ない撚線を製作するための開発を行った。

2. 過去の SULTAN 試験結果

ITER 機構との取り決めに基づき、CS 導体製作開始に当たり、試作した短尺の導体を、実規模導体試験装置(SULTAN)を用いて試験を行い、導体の電流分流開始温度(Tcs)が ITER CS コイルでの要求値を満たすことの実施を確認を実施する。

ITER CS コイルはプラズマ電流の誘起に必要な変動磁場を得るために、コイル電流を変化させるパルス運転を行う。この運転を模擬するために、SULTAN 試験では磁場中でサンプル電流を連続的に上げ下げするサイクリック試験を実施し、その Tcs への影響調査を行う。加えて、コイルの昇温と再クールダウンを模擬し影響調査も合わせて実施する。初めに TF 導体と同等な撚りピッチ(Table 1, TF Type)を持つ導体を試作し SULTAN 試験を実施した。測定結果を Fig.1 に CSJA2 として示す。Tcs はサイクリックに対して値が低下することが分かった。ITER CS コイルは最高 3 万回までのパルス運転を行うため、このような Tcs の変化が実際のコイルで発生する場合は、運転が制約を受ける可能性がある。

Tcs が変化する原因については未だ良く分かっていないが、コンジットと撚線の熱収縮差に起因して撚線は圧縮ひずみを受けるが、剛性が不十分であると、撚線構成する素線が座屈的変形を受け Tcs が低下することが懸念された。そこで、撚線、特に初めの 3 本撚りの撚りピッチを大幅に短くし、撚線の剛性を高めた導体を製作し SULTAN 試験の実施を ITER 機構が中心となって進めた。Table 1 (CSIO2)に試作した撚線の仕様を示す。試験結果を Fig.1 に CSIO2 として示す。CSJA2 と比較しサイクリック及び昇温とクールダウンに対して Tcs が低下しないことが分かった。

しかし、サンプルに使用した撚線の分解試験の結果、Fig.2 の左図に示す通り、一部の素線が大きく変形していることが分かった。これは、撚りピッチを短くしたことにより、撚線製作中の素線間の動きが律束されたためであり、撚線製作の改良が必要であることが分かった。

3. 撚線仕様と試作計画

定められた ITER のスケジュールに従って日本が調達責任を持つ全量の CS 導体を製作するには、複数の撚線・素線製作メーカーが必要である。そこで、原子力機構との協力で国内 3 社の撚線会社において短ピッチ CS 撚線の製作技術の確立と短尺の SULTAN 用超伝導導体の試作を行った。その

結果、各社最も大きい素線変形でも Fig.2 の右図に示す通り、超伝導素線の変形を少なくした撚線の製作技術を確立することができた。Table 1 (newly developed)に撚線パラメータを示す。

4. 今後の予定

試作した導体の性能試験は本年 11 月から来年の 2 月に掛けて順次実施し、サイクリック及び昇温とクールダウンに対して Tcs の影響を確認する。その後、来年春より、CS コイルに用いる撚線の製作を開始する予定である。

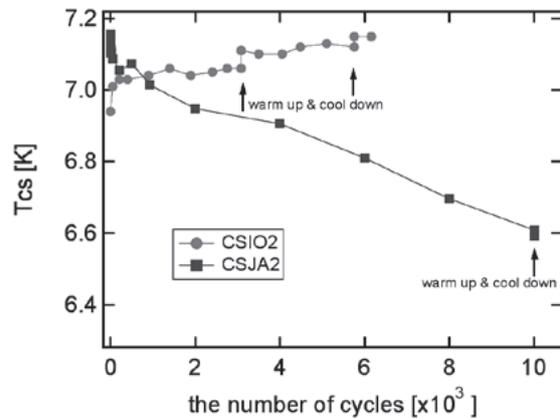


Fig.1 Tcs performance during cyclic operation

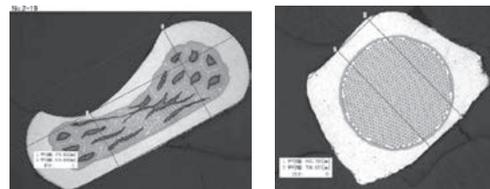


Fig.2 Largest strand deformation in a short twist pitch cable. CSIO2 cable (left) and recently developed cable (right).

	TF type (CSJA2)	CSIO2	newly developed
Jacket Inner Dia. (mm)	32.6	32.9	32.6
Central Channel Outer Dia. (mm)	9	10	9
Final Cable Dia. (mm)*	33.2	33.5	33.2
4th Stage Cable Dia. (mm)*	13.7	14.7	14.7
Strand Dia. (mm)	0.83	0.82	0.83
Number of Strands	864	864	864
Sub-Wrap Thickness (mm)	0.05	0.1	0.08
Sub-Wrapping Coverage (%)	70%	70%	70%
Final-Wrap Thickness (mm)	0.08	0.1	0.08
Final Wrap Overlap (%)	40%	40%	40%
Empty Corner Area (mm <sup>2</sup> )	20	20	20
<b>Local Void Fraction</b>	<b>0.343</b>	<b>0.323</b>	<b>0.319</b>
Twist Pitch (mm)			
1st Stage	45	22	20
2nd Stage	85	45	45
3rd Stage	145	81	80
4th Stage	250	159	150
Final Stage	450	443	450

Table 1 Cabling parameters of the last SULTAN sample and newly developed CS cable.

\* The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the ITER Organization.

# ITER 超伝導導体の量産技術－撚りピッチの変化の検証－ Mass Production Technology of ITER Conductors -Investigation of Twist Pitch Variation-

高橋 良和、名原 啓博、辺見 努、布谷 嘉彦、磯野 高明、押切 雅幸、堤 史明、宇野 康弘、濱田 一弥、  
渋谷 和幸 (原子力機構)；矢野嘉孝 (新日鉄住金エンジ)；石橋 達司、都竹 星志 (日立電線)；  
村上 幸伸 (JASTEC)；手島 修 (神鋼特殊鋼管)

TAKAHASHI Yoshikazu, NABARA Yoshihiro, HEMMI Tsutomu, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, OSHIKIRI Masayuki,  
TSUTSUMI Fumiaki, UNO Yasuhiro, HAMADA Kazuya, SHIBUTANI Kazuyuki (JAEA); YANO Yoshitaka (NSE); ISHIBASHI  
Tatsuji, TSUZUKU Seiji (Hitachi Cable); MURAKAMI Yukinobu (JASTEC); TESHIMA Osamu (KST)  
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

## 1. はじめに

ITER計画において、原子力機構は2010年3月からトロイダル磁場(TF)コイル用導体を調達している6極の中で、先駆けて実機導体の製作を開始した。TFコイルは高さ14m、幅9mで、7個のダブルパンケーキから構成されている。導体の単長は最大760mであり、通電電流値は11.8Tの磁場中において68kAである。導体はケーブル・イン・コンジット型と呼ばれるもので、900本のNb<sub>3</sub>Sn素線と522本の銅素線で構成される撚線を円形のステンレス製ジャケットに挿入し、ジャケットを圧縮成型したものである。Fig.1に示すように、完成した導体の撚線の撚りピッチが、撚線製作時のピッチより長いことが分かった。この原因を究明するため、撚線の引張試験や引込中の撚線の回転測定などを行った。この結果、撚線をジャケットに挿入している間に、撚線が撚り戻る方向に回転したために、長くなったことが定量的に解明された。これらの結果を報告する。

## 2. 撚線の引張試験

機械的特性を調査するため、長さ約5mの撚線の引張試験を行った。撚線の撚りピッチ、伸び、回転角を測定した。その結果、Fig.2に示す回転角と撚りピッチの増加の関係

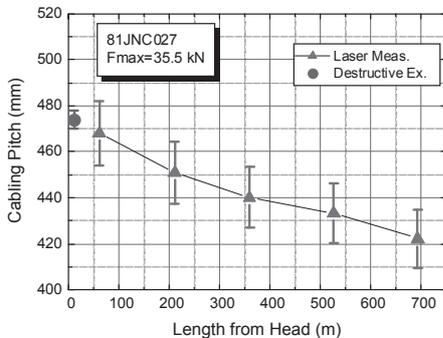


Fig. 1 Cable twist pitches measured by Laser measurement method and destructive examination on rDP. Maximum Pulling force is 35.5 kN.

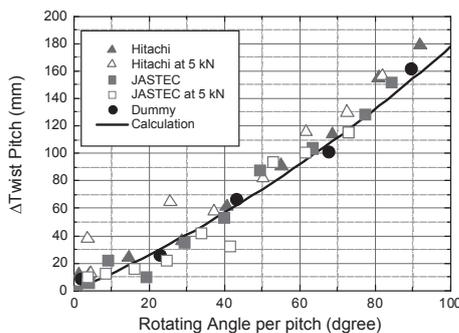


Fig. 2 Increase of twist pitches vs. rotating angle per one pitch. Solid line is calculated one.

が得られた。図中の実線は、撚線を螺旋モデルにし、幾何学的にその関係を計算したもので、測定とよく一致した。この関係を用いて、Fig.1の撚りピッチからそれぞれの位置の回転角は、Fig.3のように求められた。回転角の近似式を、先端から後端まで積分して、引込中の回転角を求めた結果、先端部の回転数は50ターンであった。

## 3. 引込中の撚線の回転測定

Fig.4に示すように、撚線の先端にネオジウム磁石を取付て、磁場センサーにより、磁石が通過したことを検知することにより、先端部の回転数を求めた。引込中の先端の回転数は、51ターンであった。これは、前節で求めた値とよく一致している。この時の最大引張力は35.5kNであった。

## 4. まとめ

引張試験と回転測定により、撚りピッチの増加は、引込中に引っ張られて、撚線は撚りが戻る方向に回転した結果であることが定量的に説明できた。この方法で導体を製作する場合、これは回避できないと考えられるので、このような振舞いを考慮する必要がある。

## 参考文献

1. Y. Takahashi, *et al.*, "Technology development and mass production of Nb<sub>3</sub>Sn conductors for ITER toroidal field coils in Japan," *Nuclear Fusion* vol. 51, 113015 (11pp), 2011.

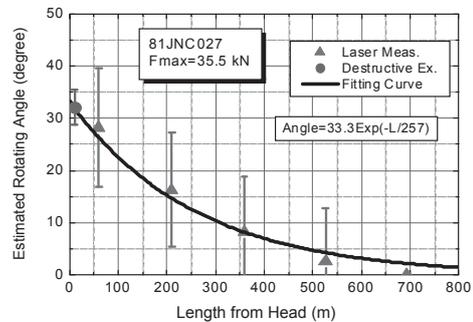


Fig.3 Estimated rotating angle per one pitch along whole length and fitting curve of the angle:  $\varphi=33.3\exp(-L/257)$ . L: Length from head.

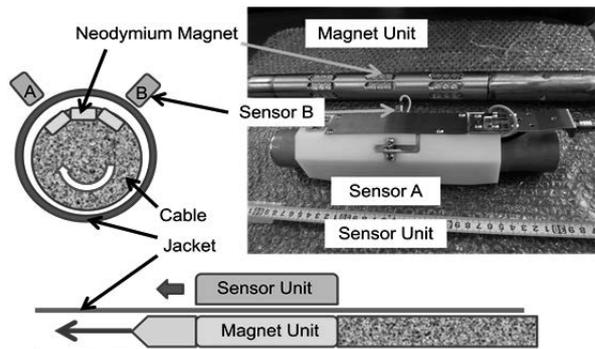


Fig. 4 Equipment of cable rotation measurement

## ITER CS 導体ジャケットの調達準備 Preparation for Procurement of ITER CS Conductor Jacket

尾関 秀将, 濱田 一弥, 布谷 嘉彦, 河野 勝己, 高橋 良和, 押切 雅幸, 齊藤 徹(原子力機構);  
松並 正寛, 手島 修(神鋼特殊鋼管(株))

OZEKI Hidemasa, HAMADA Kazuya, NUNOYA Yoshihiko, KAWANO Katsumi, TAKAHASHI Yoshikazu, OSHIKIRI Masayuki,  
SAITO Toru (JAEA); MATSUNAMI Masahiro, TESHIMA Osamu (Kobe Special Tube Co., Ltd.)  
E-mail: ozeki.hidemasa@jaea.go.jp

### 1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)計画において、原子力機構は中心ソレノイド(CS)用導体の調達を担っている。CS 導体は、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線を用いたケーブル・イン・コンジット導体であり、外形 49mm 角、内径 32.6mm の高マンガンステンレス鋼である JK2LB[1]製のジャケットに超伝導ケーブルが収められた構造である。CS 導体製作に向けて、ダミー導体用ジャケットの製作を行う中で、ITER で要求される、寸法公差、機械特性及び品質管理をすべて満足するよう、技術開発を進めてきた。その結果、ITER の仕様を満足するジャケットの量産技術を確立し、製造準備を整えた。本発表では、CS ジャケットの調達準備の状況について報告する。

### 2. 寸法特性

ジャケットは単長 7m で、外形寸法は 51.3mm $\pm$ 0.2mm 角(導体製作前)、内径 35.1mm $\pm$ 0.2mm、及び断面積公差  $\pm$ 20mm<sup>2</sup> であり、規格品のシームレス管よりも高い寸法精度が要求され、これを量産において達成することが重要である。JK2LB ジャケットは、(1)直径 160mm の円筒形ピレットを、熱間押し出し、その後、冷間引抜き加工を加え、(2)約 1100℃で溶体化熱処理を行い、(3)熱処理によるスケールを除去するための酸洗処理が行われる。JK2LB は通常ステンレス鋼(例えば 316鋼:クロム含有量 16%程度)よりもクロムが少なく(13%)、耐食性は低い。このため、酸洗処理での減肉による寸法変動により、これまで公差の達成が困難であった。これを解決するために、酸洗後、約3~4%程度冷間引抜きを加えた。本プロセスを採用するためには、冷間加工が延性に及ぼす影響を検討する必要があり、これまでの冷間加工したジャケットの機械特性データから、許容可能であると判断した[2]。一例として、Fig. 1 に示す通り、最初の 81 本のジャケットの製造において、外形、内径寸法及び断面積公差について、寸法を外れたのはわずか 1 本であり、その後引き続き製作された 100 本以上のジャケットは寸法公差通りに製作され、量産のめどを得た。

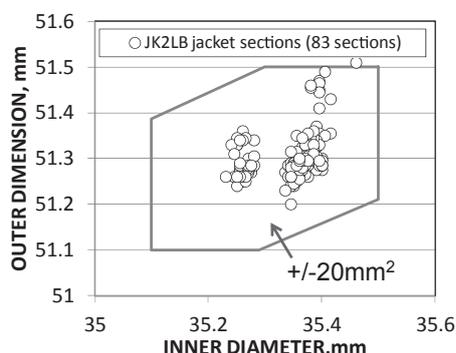


Fig. 1 Dimensional measurement results of jacket section

### 3. 機械試験結果

製作したジャケットに、実機と同じ加工を模擬して、圧縮成型、巻線を模擬した曲げ加工及び超伝導生成熱処理を加えたサンプルを製作し、液体ヘリウム温度で試験を行った。Table1に測定結果をまとめたものを示す。このように、機械特性は、過去のR&Dで試作したジャケットと同様に、ITERの要

Table 1 Mechanical test results of JK2LB jacket (compacted, bended and heat treated at 650°C x 200 hours)

	0.2% offset Yield strength, MPa	Ultimate tensile strength, MPa	Fracture toughness, MPam <sup>1/2</sup>
Spec.	850	1150	130
Measurement results	1110, 1037 1043	1439, 1420 1418	168, 159 148

求特性を満足し、製造方法に問題がないことを確認した。

### 4. 超音波探傷技術による非破壊検査技術

ITER では、製作されたすべてのジャケット管に対して非破壊検査を行い、それによって以下に定める表面及び表面下の欠陥を検出することが要求されている。

(1) 長さ 2mm、深さ 0.5mm の半円形ノッチ

(2) 直径 0.5mm、深さがジャケット管肉厚の 90%の孔状欠陥  
疲労亀裂進展速度の測定結果より、ITER の運転期間中に加わる 6 万回の荷重回数に耐える JK2LB ジャケットの許容初期欠陥サイズは、10mm<sup>2</sup>であり、上記人工欠陥サンプルの大きさは、1mm<sup>2</sup>程度と十分小さく、これを精度よく検出できれば、ジャケットは十分な疲労寿命を確保することができる。人工欠陥を施工したジャケットを製作し、フェーズドアレイ方式の超音波探傷試験(PAUT)による人工欠陥が検出できるよう非破壊検査手法を開発した。Fig. 2 に、PAUT による人工欠陥の検査結果の一例として、斜角のプローブ(左図)を用いて得られた、エコーの画像(右)と、シグナル高さ(中央)を示す。この図に示されるように、人工欠陥が断面像において明確に、かつ高いシグナルレベルで人工欠陥を検出することができ、本方式をすべてのジャケットの検査に適用している。

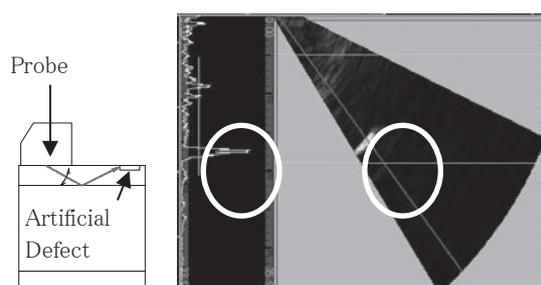


Fig. 2 Typical results of detected signal from artificial defect on jacket section (defect size: 0.5 mm in depth, 1 mm in width and 2 mm in length)

### 5. まとめ

ダミー導体用の CS ジャケットの製作を通じて、ITER 実機に適用可能な品質のジャケットの量産技術が確立され、調達準備が整った。

### 参考文献

1. K. Hamada, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 41 No.3 (2006)
2. K. Hamada, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vo. 43 No. 6(2008)

## 中性子回折を用いた ITER CS 導体試験サンプルの劣化位置の評価

Evaluation of degraded position in ITER CS conductor sample using neutron diffraction technique

辺見 努, ハルヨ ステファヌス, 布谷 嘉彦, 梶谷 秀樹, 小泉 徳潔, 相澤 一也 (原子力機構);  
町屋 修太郎 (大同大); 長村 光造 (応用科学研)

HEMMI Tsutomu, HARJO Stefanus, NUNOYA Yoshihiko, KAJITANI Hideki, KOIZUMI Norikiyo, AIZAWA Kazuya (JAEA);  
MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); OSAMURA Kozo (RIAS)  
E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

### 1. はじめに

原子力機構は ITER 計画において、中心ソレノイド(CS)コイル導体の製作を担当している。ローザンヌ工科大学が所有する SULTAN 試験装置を用いた ITER CS 導体試験サンプル (JACS01) の性能検証試験の結果、電磁力の繰り返し回数に比例して、分流開始温度が線形に低下する現象が確認された[1]。劣化の原因を調査するため、内部の撚線の状態を観察した結果、Fig. 1 に示すように、高磁場部において、電磁力により撚線が圧縮される側よりも隙間が空く側で超伝導線が大きなたわみが生じていることが観察された。超伝導線の性能は歪により劣化するが、たわみ量だけでは歪を定量的に評価することが困難である。そこで、歪を定量的に評価し、劣化箇所を特定することを目的として、歪を非破壊で直接測定することができる J-PARC に設置された工学材料回折装置「匠」を用いて、中性子回折による歪測定を実施した。

### 2. 測定方法及び結果

匠による中性子回折では、Fig. 2 のように、スリットから中性子を試料に入射し、回折した中性子を  $90^\circ$  方向に設置された検出器により中性子の飛行時間を測定する Time of Flight(TOF)法を用いている。得られた  $Nb_3Sn$  の面間隔と無歪の試料の面間隔を比較することでその回折面の  $Nb_3Sn$  の歪を決定することができる[2]。測定では、入射スリットとコリメータにより、導体内の  $7 \times 16 \times 2 \text{ mm}^3$  の領域について軸方向と径方向の回折プロファイルと同時に測定した。測定サンプルとしては、ジャケットと撚線の熱収縮差に伴う熱歪を保持し、試験後の歪状態をできるだけ維持するために、3.6m 長の性能検証試験サンプルを切断せずに測定した。測定箇所は磁場中心から 0 mm (高磁場部)、700 mm (中間部)、1150 mm (低磁場部) とし、1断面において、撚線が圧縮される側及び隙間が空く側の2箇所をそれぞれ室温で測定した。

測定した中性子回折結果から  $Nb_3Sn(211)$  面の軸方向の回折プロファイルについて、フィラメント単体で測定した無歪の  $Nb_3Sn$  とそれぞれの測定結果の比較を Fig. 3 に示す。回折プロファイルは、ピーク位置の変化が軸方向の平均的な歪(引張及び圧縮)の変化を示し、プロファイルの広がりは曲げ歪の増加を意味する。CICC 導体内の  $Nb_3Sn$  には、素線内の銅と  $Nb_3Sn$  の熱収縮差に加えて、ジャケットとの熱収縮差により圧縮歪が加わっているため、 $Nb_3Sn$  単体のプロファイルよりも圧縮側にピーク位置がシフトしている。Fig. 3 の比較より、高磁場部の隙間が空く側の測定結果において、プロファイルの広がりから最も曲げ歪が大きくなっていることがわかったとともに、ピーク位置の変化から圧縮歪が緩和していることがわかる。

### 3. まとめ

匠による中性子回折を用いることで、CS 導体試験サンプルを構成する素線の  $Nb_3Sn$  フィラメントの格子面間隔を定量的に測定することができた。その結果、Fig. 1 に示す試験後の撚線の観察結果と同様に、高磁場部の隙間が空く側でのみ曲げ歪によるプロファイルの広がりが観測され、高磁場部の隙間が空く側で曲げ歪を受け、 $Nb_3Sn$  素線が劣化していることが特定された。

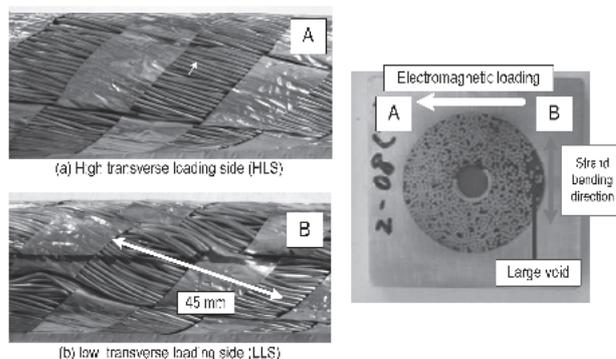


Fig. 1 Observed result of the high field zone in the CS SULTEN sample (JACS01L) after cyclic testing.

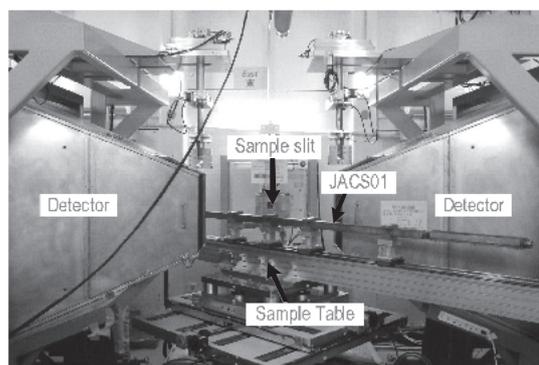


Fig. 2 Set-up of the CS SULTAN sample (JACS01L) for neutron diffraction measurement.

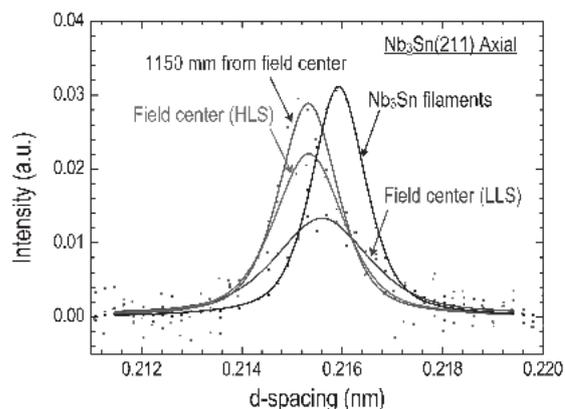


Fig. 3 Diffraction profile of  $Nb_3Sn(211)$  in axial direction of CS SULTEN sample (JACS01L) after cyclic testing.

### 参考文献

1. T. Hemmi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, no. 3, 4803305, 2012.6.
2. T. Hemmi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.163