研究論文

ITER トロイダル磁場コイルの巻線試作

松井 邦浩^{*1,†}, 小泉 徳潔^{*1}, 辺見 努^{*1}, 中嶋 秀夫^{*1}, 木村 諭^{*2}, 嶋田 守^{*2}

Winding Trials for ITER Toroidal Field Coils

Kunihiro MATSUI^{*1,†}, Norikiyo KOIZUMI^{*1}, Tsutomu HEMMI^{*1}, Hideo NAKAJIMA^{*1},
Satoshi KIMURA^{*2} and Mamoru SHIMADA^{*2}

Synopsis: Cable-in-conduit (CIC) conductors using Nb₃Sn strands are used in ITER toroidal field (TF) coils. The wound TF conductor must be inserted in the groove of the radial plate (RP), which is part of the mechanical structure supporting the large electromagnetic force. Since the available gap between the conductor and RP groove is 0.5~3 mm, the tolerance of the circumferences of the winding and RP groove are +/- 0.023%. Since a tolerance of approximately +/-0.01% is needed for the RP machining, the conductor length of the winding must be controlled with an accuracy of +/- 0.01%. In this study, in order to resolve the above technical issues, the authors performed several trials on winding as the part of the activities in Phase II of TF coil manufacture. In these trials, the accuracy of the conductor length measurement system using the optical equipment was evaluated, and winding trials were performed on a 1/3-scale double-pancake (DP) winding to demonstrate use of the winding system. In addition, the conductor length of the 1/3-scale DP trial winding was evaluated, and the elongation of the conductor due to bending was clarified.

Keywords: Nb₃Sn, cable-in-conduit conductor, winding, toroidal field coil, ITER

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER) のトロイダル磁場 (TF) コイルは、高さ 16.5 m、幅 9 m、総重量約 300 トンの大型超電導コイルであり、超電導体をステンレス鋼製のラジアル・プレート¹⁾ (RP) の溝に埋め込み、これを 7 枚積層した巻線部をコイル容器等の構造物²⁾で支持する構造となっている³⁾。TF コイルの経験する最高磁場が 11.8 T に達することから、TF コイルには Nb₃Sn 超電導素線⁴⁾とステンレス鋼製のジャケットを用いたケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体⁵⁾が使用される。

TF コイルの製作では、TF 導体をコイル状に巻き、超電導生成熟処理を実施した後に、導体絶縁を施した TF 導体を RP の溝に埋め込む。これらの作業においては、以下を

考慮して導体長さを管理する必要がある。

- ・導体絶縁を施した TF 導体と RP の溝の隙間が 0.5~3 mm であるため、巻線と RP 溝の周長公差は約±0.023%
- ・RP の溝加工の精度は、約±0.01%¹⁾

これらを踏まえると、巻線時には±0.01%のオーダーで導体長さを測定し、管理する必要がある。そのため、TF コイルの製作に向けて、導体長さを±0.01%の精度で測定するとともに、TF 導体を所定の位置で所定の曲率に曲げる巻線ヘッダの開発、及び、巻線ヘッダを用いた巻線実証を実施する必要がある。

このように、原子力機構では、極めて挑戦的な高精度の自動巻線を実施する計画であり、TF コイル調達活動のフェーズ II³⁾では、TF コイルの巻線技術に関して、

- 1) 自動巻線の実施に必要な導体機械特性を把握するための機械試験
- 2) 導体長さを高精度で測定する装置の開発及びその検証試験
- 3) 巻線装置を用いて製作した巻線の導体長さ評価を目的とした、模擬導体を用いた含浸試験⁶⁾用の 1/3 規模巻線、及び、TF 導体を用いた熱処理試験⁷⁾用の 1/3 規模巻線の試作

を実施した。本稿では、これらの巻線試作の結果について記す。

Received November 30, 2011

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

^{*1} 日本原子力研究開発機構

〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

Japan Atomic Energy Agency, 801-1 Mukoyama, Naka, Ibaraki 311-0193, Japan

^{*2} 株式会社東芝 電力システム社

〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広 2-4

Toshiba Cooperation, Power systems company, 2-4, Suehiro, Tsurumi, Yokohama, Kanagawa, 230-0045, Japan

[†] E-mail: matsui.kunihiro@jaea.go.jp

2. TF 導体の機械試験

巻線を行う際には、導体の機械的特性を予め測定し、その結果を基にして、巻線ヘッドでの導体の曲げ試験を実施し、この結果を巻線ヘッドへの入力値とすることで、効率良くかつ正確に自動巻線を実施することができる。巻線試験においても、模擬導体及び TF 導体の機械特性を把握するために、それらの短尺導体を用いて引張試験及び曲げ試験を実施した。なお、模擬導体は TF 導体と同じ構成をし、構成する素線に全て銅素線を用いた導体である。

模擬導体及び TF 導体の引張試験の結果を **Fig. 1** に示す。TF 導体の引張剛性はジャケットに対して 2 倍以上あるのに対して、模擬導体に比べると約 10% 程度低い結果となった。これは、模擬導体の銅素線には、通常の銅線に比べてより超伝導線の剛性に近く、超伝導線よりも剛性が高い硬銅線を使用していることによる。また、模擬導体及び TF 導体の曲げ試験の結果は **Fig. 2** に示すとおりで、TF 導体と模擬導体の曲げモーメントはほぼ同等で、ジャケットに比べて若干大きいことが分かった。

一方、曲げ試験において導体上に取り付けた歪ゲージによる歪測定結果から、曲げによる導体の伸びを評価した。曲げ曲率と導体軸上の歪の関係を **Fig. 3** に示す。この結果は、導体を大きな曲率（小さい曲げ半径）で曲げた場合には、導体の長さが伸びることを意味しており、直線部と曲線部の混在する TF コイル巻線の製作における導体長さの管理においては、これを考慮する必要がある。

3. 巻線ヘッドの導体測長システム

TF コイルの巻線作業で使用する巻線ヘッドに関しては、レーザー・マーカによる光学的な測長システムを持つ巻線ヘッドを既に開発している⁸⁾。今回、これに CCD カメラを追加し、この巻線ヘッドに取り付けた測長システムの詳細な測長精度の評価を実施した。

巻線ヘッドは、**Fig. 4** に示すように、垂直及び水平レベラー、3 点ベンダー、レーザー・マーカ、2 台の CCD カメラ、及び、3 点ベンダーの前後に設置するエンコーダーで構成される。

導体長さは、以下の手順で管理する。

- 1) レーザー・マーカは導体上に 2 台のレーザー・マーカ間の距離に相当する区間で罫書きを付ける。
- 2) 2 台の CCD カメラはその罫書きがカメラの下を通過する際に罫書きを読み取り、2 点の罫書き間の距離を評価する。
- 3) エンコーダーにより連続的に測定された導体長さに反映し、導体の全長を管理する。

なお、これらの罫書き及び測定は、導体の曲げ方向と垂直の導体上面において実施している。

測長精度の評価では、まず、各機器の精度を個別に評価

Fig. 1 Tensile test on the jacket, the dummy and the TF conductors.

Fig. 2 Bending test on the jacket, the dummy and the TF conductors.

Fig. 3 Estimated tensile strain on the conductor axis as a function of the curvature of the TF conductor.

Fig. 4 Winding head with the conductor length measurement system using the optical equipment.

Fig. 5 Ratio of distance measured using the CCD camera, encoder and caliper.

Fig. 6 Relationship between the position of the bending roller and the expected and measured curvature.

し、全ての機器の精度が目標値の $\pm 0.01\%$ 以下であることを確認した。その後、システムとしての精度評価を実施した。具体的には、直状の模擬導体の表面にレーザー・マーカーにより 4395 mm の距離で罫書きを入れ、その距離を CCD カメラ、エンコーダー及び直尺で測定することを 6 回実施した。この測定結果を **Fig. 5** に示す。図の縦軸は、CCD カメラによる測定値に対するエンコーダー及び直尺の測定値の差を示しており、直尺の測定精度は 0.5 mm であることから、この測定結果は約 0.011% ($=0.5 \text{ mm}/4395 \text{ mm}$) の精度であることが期待できる。この測定結果から、測長システムの中のエンコーダーの測定精度は約 0.03% であり、CCD カメラの測定精度が $\pm 0.01\%$ であることを踏まえると、エンコーダーの測定誤差は最大で 0.02~0.04% であることが分かった。そのため、エンコーダーの測定値は CCD カメラによる光学的測定系の測定値で較正することとした。

機器の精度評価の後、巻線ヘッドの設定値を決めるために、模擬導体を用いた曲げ試験を実施した。巻線ヘッドの初期の曲げ条件は、機械試験により得られた S-S 曲線を基にした。この条件で曲げ試験を実施した結果、**Fig. 6** に示すように、曲げられた模擬導体の曲率の測定値は期待値に対して 5~10% 程度の差が生じた。そこで、測定値に合うように S-S 曲線の補正を繰返し実施した。その結果、最終的には **Fig. 6** に実線で示すように、期待値と測定値は良く一致し、これを巻線ヘッドの設定値とした。また、TF 導体についても同様の曲げ試験を実施し、巻線ヘッドの設定値を決定した。

4. 巻線装置製作及び 1/3 規模巻線試作

前述の巻線ヘッドを用いた巻線実証のために、TF コイルの 1/3 規模の巻線を製作する巻線システムを開発し、試巻線を実施した。1/3 規模巻線は、TF コイル巻線の約 1/3 規模 (縦 7.0 m, 幅 4.1 m, 高さ 0.6 m) で 6 ターンのダブル・パンケーキである。この試作では、模擬導体を用いた含浸試作用⁶⁾、及び、TF 導体を用いた熱処理試作用⁷⁾の 2 つの 1/3 規模巻線を試作した。

巻線システムは、**Fig. 7** に示すように、導体マンドレル、2 組のベンダー、巻線ヘッド及び巻線テーブルで構成される。導体マンドレル上にある半径 2 m で巻かれた導体は、第 1 ベンダーで半径 4.5 m に曲げ戻され、その後、直線化ベンダーで直線化される。直線化された導体は、巻線ヘッドに挿入された後に所定の曲率に曲げられて、RP の溝を模擬したピンを持つ巻線テーブルに置かれる。導体が挿入される巻線テーブルのピンと導体との隙間は、導体絶縁が施された導体と RP 溝との隙間の距離を模擬しており、巻線の直線部で 0.5 mm、曲線部で 2~3 mm である。これらの隙間から許容される導体長さを評価すると、約 0.057% となる。このような巻線システムを用いて、パンケーキ間渡り

Fig. 7 Winding system for fabrication of the 1/3-scale DP trial winding.

Fig. 8 Bending tool used to bend the conductor at the layer-to-layer region.

Fig. 9 Bending tool used to bend the conductor at the terminal region.

Fig. 10 Fabricated 1/3-scale DP trial winding using the dummy conductor for the insulation/impregnation trial.

Fig. 11 Fabricated 1/3-scale DP trial winding using the TF conductor for the heat treatment trial.

部及び接続部を除き、自動巻線を実施した。一方、パンケーキ間の渡り部、及び、接続部については、**Fig. 8** 及び **Fig. 9** に示す曲げ治具を個別に用意し、曲げ加工した。

巻線の試作では、先ず、シングル・パンケーキの試作を実施し、それが巻線テーブルに納まることを確認した後に、1/3 規模巻線の試作を実施した。試作した含浸試験用 1/3 規模巻線及び熱処理試験用 1/3 規模巻線を、それぞれ **Fig. 10** 及び **Fig. 11** に示す。試作した巻線を矯正することなく巻線テーブルのピン間に挿入できたことから、両巻線の導体長は 0.057%以下の誤差で管理できていることが確認できた。

5. 1/3 規模巻線の試作結果

5.1 曲げによる導体長さの変化

1/3 規模巻線の試作では、巻線ヘッドの 3 点ベンダーの前後に取り付けた 2 つのエンコーダーで導体長さを測定した。これら 2 つのエンコーダーで測定された導体長さの差と巻線の曲率との関係を **Fig. 12** に示す。図中の実線及び点線は、短尺導体を用いた機械試験の結果を示している。これらの結果は、曲率が大きく（曲げ半径が小さく）なるに従って、導体が伸びていることを示している。このことは、曲げにより導体の中立軸が圧縮側（曲げ半径の中心側）に移動することと一致している。これらの結果から、TF 導体では、今回の試作で使用した巻線ヘッドにより曲げた場合には、2000～2500 mm の曲げ半径において、導体が約 0.04～0.05%伸びることが分かった。一方、模擬導体では、導体の伸びはほとんど発生しなかった。

5.2 導体長さ評価

1/3 規模巻線の導体長さを直接測定することは困難であるため、RP 溝と導体間の隙間から導体長さを評価する方法、及び、三次元画像計測による 2 種類の手法で導体長さを評価した。

先ず、模擬導体を用いた 1/3 規模巻線については、含浸試作に用いる RP の溝に巻線を挿入し、溝と導体間の両側の隙間を測定し、これから導体長さを評価した。含浸試作用の RP の形状はレーザー・トラッカー、溝と導体間の隙間は隙間ゲージにより測定した。溝と導体間の隙間については、6 つのターンに対して導体長手方向の 34 点において測定を実施した。この測定結果を **Fig. 13** に示す。これらの測定結果から評価した導体長さは 80596 mm であり、巻線

の設計上の導体長さ 80605 mm と比較すると、これらの差は約 0.011%であり、目標の±0.01%をほぼ達成できた。なお、6 つのターンの隙間測定結果は、ほぼ同様の傾向にあり、均一に巻線を実施できていることが確認できた。

一方、TF 導体を用いた熱処理試作用の 1/3 規模巻線に対しては、導体長さの評価には三次元画像計測を用い、巻線テーブルの導体拘束治具を解除する前後に計測を実施した。導体長さ評価の対象は、三次元画像計測により評価可能な上パンケーキとし、上パンケーキの画像を CAD 上において Fig. 14 に示すように 7 つのセクターに分割して、それらのうち口出し部及び層間渡り部を含む 2 つのセクターを除く 5 つのセクターに対して、それらの長さを評価した。

各セクターの導体拘束治具の解除前後の導体長さ評価結果を Table 1 に示す。導体拘束治具の解除前後の導体長さの差は 0.01%以下であり、三次元画像計測が巻線の導体長さ評価に十分な精度を有していることが確認できた。

Fig. 12 Conductor elongations evaluated via mechanical tests and measured using encoders.

Fig. 13 Measured gap between the conductor and RP groove of the 1/3-scale DP trial winding using the dummy conductor.

Fig. 14 Separation of the 1/3-scale DP trial winding into seven sectors for evaluation of the conductor length.

Table 1 Comparison between the conductor lengths before and after releasing the constraint jigs

Line	Before (mm)	After (mm)	dL (%)
2	7305.36	7305.53	0.0023
3	7239.15	7240.23	0.00149
4	7132.64	7132.95	0.0043
5	7064.47	7065.58	0.0157
6	6961.41	6961.86	0.0065
Average			0.0088

Table 2 Comparison between the design and measured conductor lengths

Line	Design (mm)	Measured (mm)	dL (%)
2	7302.77	7305.53	0.0354
3	7235.77	7240.23	0.0467
4	7130.26	7132.95	0.0333
5	7063.6	7065.58	0.0123
6	6956.87	6961.86	0.0652
Average			0.0386

一方、設計値と導体拘束治具の解除前の導体長さは Table 2 に示すとおりで、両者の差の平均値は約 0.04%であった。この差が曲げによる導体の伸びと考え、曲げ半径が 2000～2500 mm の時の導体伸び量を 0.05%として 1/3 規模巻線全体の導体長さの変化を評価した。その結果、巻線全体としては Table 2 に示す結果とほぼ等しい約 0.04%となり、三次元画像計測による結果からも曲げによる導体の伸びを確認できた。

6. まとめ

TF コイル調達活動の Phase2 において、導体長さを高精度で測定する装置の開発、巻線装置を用いて製作した巻線の導体長さの評価を目的として、小規模及び中規模の試作

を実施した。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 巻線ヘッドの測長システムは、個別の機器では目標の $\pm 0.01\%$ 以下を達成していることを確認した。一方で、測長システムとしてのエンコーダーの測定誤差は最大で $0.02\sim 0.04\%$ であるため、エンコーダーの測定値は光学的測定系の測定値で較正することとした。
- 2) 模擬導体及びTF導体を用いて試作した1/3規模巻線をRPの溝を模擬した巻線テーブルのピン間に挿入することができ、これにより両巻線の導体長さは 0.057% 以下の誤差で管理できていることが確認できた。さらに、模擬導体を用いた1/3規模巻線を含浸試験用RPの溝に挿入し、導体と溝の隙間から導体長さを評価すると約 0.011% であり、目標の $\pm 0.01\%$ をほぼ達成できたことを確認した。
- 3) 1/3規模巻線の製作時にエンコーダーで測定したTF導体の長さとの関係性を評価した結果、短尺導体を用いた機械試験と同様に、曲率が大きい領域では、曲げにより導体の中立軸が圧縮側に移動して導体が伸びていることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) K. Takano, et al.: "Trial manufacture of ITER Toroidal Field coil radial plate," TEION KOGAKU **47** (2012) 178-185 (in Japanese)
高野克敏ら:「ITERトロイダル磁場コイル用ラジアル・プレート」の試作, 低温工学 **47** (2012) 178-185
- 2) M. Iguchi, et al.: "Developments in fabricating structures for the ITER Toroidal Field coils," TEION KOGAKU **47** (2012) 193-199 (in Japanese)
井口将秀ら:「ITERトロイダル磁場コイル構造物の製作技術開発」, 低温工学 **47** (2012) 193-199
- 3) N. Koizumi, et al.: "Development of ITER Toroidal Field coils in Japan," TEION KOGAKU **47** (2012) 135-139 (in Japanese)
小泉徳潔ら:「日本におけるITERトロイダル磁場コイルの開発」, 低温工学 **47** (2012) 135-139
- 4) Y. Nabara, et al.: "Mass production and quality control of Nb₃Sn superconducting strands for ITER Toroidal Field coils," TEION KOGAKU **47** (2012) 140-146 (in Japanese)
名原啓博ら:「ITERトロイダル磁場コイル用Nb₃Sn超伝導素線の量産と品質管理」, 低温工学 **47** (2012) 140-146
- 5) K. Hamada, et al.: "Development of manufacturing technologies for ITER Toroidal Field coil conductors," TEION KOGAKU **47** (2012) 153-159 (in Japanese)
濱田一弥ら:「ITERトロイダル磁場コイル用導体の製作技術開発」, 低温工学 **47** (2012) 153-159
- 6) T. Hemmi, et al.: "Insulation and impregnation test for ITER Toroidal Field coils," TEION KOGAKU **47** (2012) 172-177 (in Japanese)
辺見 努ら:「ITERトロイダル磁場コイルの絶縁含浸試験」, 低温工学 **47** (2012) 172-177
- 7) K. Matsui, et al.: "Heat treatment trials for ITER Toroidal Field coils," TEION KOGAKU **47** (2012) 166-171 (in Japanese)
松井邦浩ら:「ITERトロイダル磁場コイルの熱処理試作」, 低温工学 **47** (2012) 166-171
- 8) N. Koizumi, et al.: "Results of R&D on ITER-TF winding critical issues," Fus. Eng. Des. **84** (2009) 923-927

松 井 邦 浩 1968年10月6日生。1992年鹿児島大学工学部電気工学科卒業。1994年鹿児島大学大学院電気工学専攻修了。同年、日本原子力研究所（現在：日本原子力研究開発機構）に勤務。主に、核融合用超伝導導体及びコイルの研究・開発に従事。低温工学・超電導学会、プラズマ・核融合学会会員。工学博士（成蹊大学）。

小 泉 徳 潔 1964年5月8日生。1988年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1990年同大学院機械工学専攻修了。同年日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）勤務。核融合炉用超伝導導体及びコイルの研究・開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会、プラズマ・核融合学会会員。工学博士。

辺 見 努 1977年10月12日生。2000年成蹊大学工学部電気電子工学科卒業。2005年総合研究大学院大学物理科学研究科博士後期課程修了。核融合科学研究所 COE 研究員を経て、2007年より日本原子力研究開発機構に勤務。主としてITER超伝導コイルの開発に従事。低温工学・超電導学会、プラズマ・核融合学会会員。博士（工学）。

中 嶋 秀 夫 1956年1月生。1981年より日本原子力研究所に入所。現在、日本原子力研究開発機構 ITER 超伝導磁石開発グループリーダー。主に、大型超伝導コイル及び極低温用構造材料の研究開発に従事。低温工学・超電導学会、日本機械学会、日本鉄鋼協会、日本保全学会会員。

木 村 諭 1976年4月14日生。1999年京都大学工学部物理工学科卒業。2001年同大学院機械工学専攻修了。同年（株）東芝勤務。主として超伝導応用機器および加速器の設計開発業務に従事。

嶋 田 守 1959年7月5日生。1982年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月（株）東芝入社。現在、新技術応用システム技術部および京浜事業所機器装置部兼務。主として超伝導応用機器の開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員、工学博士。