

原子力（技術トピックス編） —ITER トロイダル磁場（TF）コイルの開発—*

辺見 努^{***}, 梶谷 秀樹^{***}, 高野 克敏^{**}, 松井 邦浩^{***}, 小泉 徳潔^{***}



辺見 努



梶谷 秀樹



高野 克敏



松井 邦浩



小泉 徳潔

Nuclear Energy (Technical Topic)

—Development of ITER Toroidal Field (TF) Coil—*

by HEMMI Tsutomu^{***}, KAJITANI Hideki^{***}, TAKANO Katsutoshi^{**},
MATSUI Kunihiro^{***} and KOIZUMI Norikiyo^{***}

キーワード 核融合, ITER, 磁場閉じ込め, 超伝導, TFコイル, 溶接技術, 高精度巻線技術

1. はじめに

核融合発電は、燃料を海水からほぼ無尽蔵に採取できること、高レベル放射性廃棄物が生じないことなど多くの利点がある。一方、巨大な装置を精密に製作する必要があり、商用化のためのコストが高くなるため、他のエネルギー源に対して優れた経済性を確保する必要がある等の課題もある。

そこで、1988年に米国、ソ連（現ロシア）、欧州、日本が参加して、国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計が開始され、韓国、中国、インドが加わり、2005年にITERの建設サイトが南仏のカダラッシュに決定した。現在、7極がそれぞれ分担する機器の製作及びサイト建設を進めている¹⁾。

ITERはトカマク型と呼ばれ、ドーナツ型の超高温プラズマを磁場で閉じ込めるタイプの核融合炉である。ITERの超伝導コイルシステムは、図1に示すプラズマを閉じ込めるためのトロイダル磁場（TF）コイル、磁束変動に

よってプラズマ電流を誘起するための中心ソレノイド（CS）、プラズマの位置及び形状を制御するためのポロイダル磁場（PF）コイル、不整磁場補正コイル（CC）、及び支持構造物等から構成される²⁾。これらのコイルシステムの総重量は、約10,500 tonに及ぶ。この中で、原子力機構は日本の国内機関として、全数に対する25%のTF導体、予備1個を含め19個のTFコイルのうち9個のTFコイル、19個全数のTFコイル容器の製作を担当している²⁾。

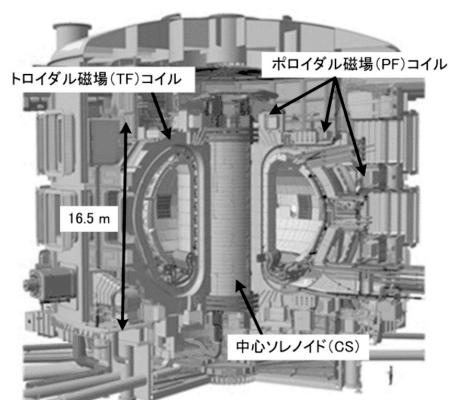


図1 ITER

*原稿受付 平成26年6月6日
**正 員 日本原子力研究開発機構 Member, Japan Atomic Energy Agency
*** 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

2. TF コイルの構造と製作方法の概略

2.1 TF 導体

核融合炉用超伝導コイルでは、高磁場・大電流の超伝導導体が必要とされ、ケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体は、要求を満足する最も有望な超伝導導体と考えられており、ITERでもCIC導体が用いられる。TF導体は、図2及び表1に示すように、超伝導体としてNb₃Snを採用したCIC導体であり、日本、欧州、韓国、ロシア、中国、米国の6極で製作している³⁻⁵⁾。

2.2 TF コイルの構造²⁾

TFコイルは、ITERの骨格を成す主要機器であり、プラズマ閉じ込めを行うとともに、超伝導コイルシステム全体に作用する電磁力及び重量を支持する。TFコイルに作用する電磁力は、向心力として約400MN、転倒力として約50MNにもなる。このため、TFコイルは巨大な電磁力に耐えるため、高強度の構造物を有する構造となっている。

TFコイルは、図3に示すように、高さ16.5m、幅9m、総重量約300トンのこれまでに製作経験がない大型超伝導コイルであり、TF導体を巻線して含浸した巻線部 (WP) とこれを格納するコイル容器で構成されている。表2にTFコイルの主要パラメータを示す。ITERの20年間の運転のため、TFコイルでは、大電磁力に耐えるため、電気絶縁の機械的及び電氣的信頼性を高める必要がある。そのため、導体周りの絶縁材に他のターンの電磁力が重畳されないように、巻線して電気絶縁を施した導体をラジアル・プレート (RP) と呼ばれるD型の溝付きステンレス鋼板に挿入して、カバー・プレート (CP) を

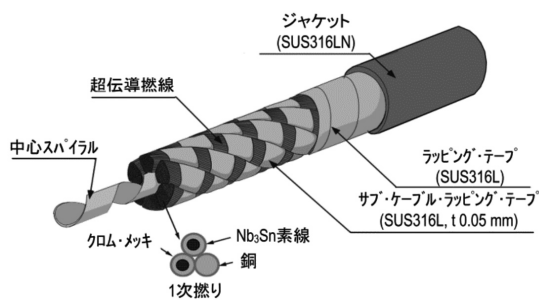


図2 ITER TF導体

表1 ITER TF導体の主要パラメータ

Nb ₃ Sn 線の本数	900 本
銅線の本数	522 本
Nb ₃ Sn 線及び銅線の直径	0.82 mm
クロム・メッキの厚さ	2 μm
撚り構造	[(2Nb ₃ Sn + 1Cu) x3x5x5 + 12Cu]x6
導体直径	43.7 mm
撚線直径	39.7 mm
撚線内の空隙	30%

被せて導体を固定する構造としている。Nb₃Snを生成するために、熱処理を実施する必要があるが、Nb₃Snが脆性材料であり、歪により超伝導性能が簡単に劣化することから、熱処理後に0.1%以上の曲げ歪を超伝導導体に加えることができない。このため、D型形状に巻線した後、超伝導生成熱処理を実施し、RP溝に導体を挿入することとなる。

2.3 TF コイルの製作手順²⁾

TFコイルの製作手順は、図4に示すとおり、以下のとおりである。1) TF導体をD型形状に巻線し、2) Nb₃Sn生成のため、650℃×200時間の熱処理を行い、3) RPの溝に、絶縁テープを巻き付けた導体を挿入し (導体絶縁)、4) 導体固定のためCPを被せ、CPとRPをレーザー溶接し、5) ダブル・パンケーキ (DP) 全体に絶縁テープを巻き付け (DP絶縁)、6) 導体絶縁とDP絶縁を同時に樹脂で含浸し、7) サイドDP2枚と標準DP5枚の合計7枚のDPを積層し、絶縁、含浸して巻線部を製作する。また、巻線部と並行としてコイル容器の4つのサブ・アセンブリを製作し、巻線部とコイル容器を一体化することでTFコイルが完成する。

2.4 TF コイル製作の技術課題²⁾

TFコイルの製作開始の時点では、以下に示す技術課題があった。

1) D型形状に巻線し、熱処理した導体をRP溝に挿入す

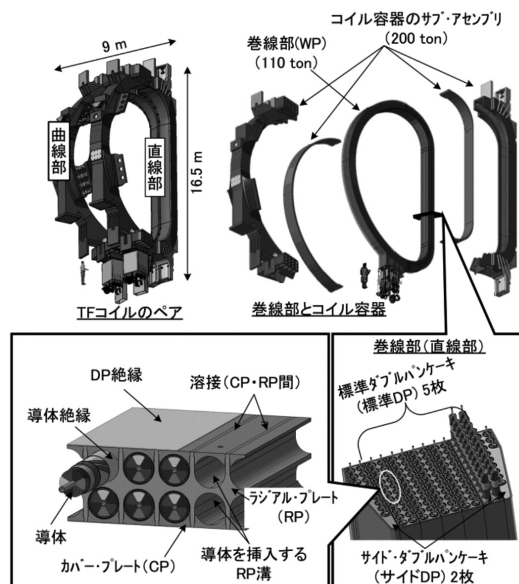


図3 ITER TFコイルの構造

表2 ITER TFコイルの主要パラメータ

TFコイル数	18 個
TFコイルを構成するDP数	標準DP 5枚 (対称) サイドDP 2枚 (非対称)
導体長	760 m (標準DP) / 415 m (サイドDP)
定格電流	68 kA
最大磁場	11.8 T

るためには、RP溝と導体のギャップから、導体長として±0.02%（1ターン約34mに対して±7mm）の高精度で巻線形状を管理する必要がある。

- 2) TFコイルは、20年間の運転により約 10^{22} n/m²の中性子照射を受けるため、機械特性の劣化が生じない樹脂を開発し、本樹脂でDP及び巻線部の含浸を実施する必要がある。
- 3) 標準DPでは、長さ約1.5kmにわたって、サイドDPでは上下面で非対称に約400mと約200mにわたって、CP溶接（レーザ溶接）を行い、DPの平面度として4mmが要求されている。
- 4) コイル容器及びRP用の高強度厚肉完全オーステナイト・ステンレス鋼板の製作技術の確立、及びこれらの溶接技術の確立が要求されている。
- 5) TFコイルは、高さ16.5m×幅9mの大型コイルであるにもかかわらず、mmオーダーの公差が要求されている。

これらの技術課題を解決して、実機TFコイルの製作を進めるため、以下に示すステップを段階的に進めることとして、2007年から計画がスタートした。

詳細仕様の策定等、調達準備を行うフェーズIから始まり、以下に示すように、詳細製作設計及び実規模試作による製作技術の最適化（フェーズII）に続いて、フェ

ーズIII、IVと製作を段階的に進めている。

- 1) フェーズII：詳細製作設計、治工具の準備、及び実規模試作による製作技術の最適化を実施し、詳細技術仕様及び製作手法を確定する期間
 - 2) フェーズIII：フェーズIIで確定された詳細技術仕様及び製作手法に基づき、1番目の巻線部及び構造物を製作し、それらを一体化してTFコイルを製作する期間
 - 3) フェーズIV：残りの巻線及び構造物を製作するとともに、それらを一体化してTFコイルを製作する期間
- 本解説では、上記で挙げた技術課題のうち、高精度に巻線形状を管理するための技術（技術課題1）及びそれに関連して、溶接技術を含むRPの製作技術（技術課題4及び5の一部）について報告する。他の技術課題に対する開発状況については、参考文献にて詳述されているので、参照されたい⁶⁻⁹⁾。

3. TFコイル製作技術の開発¹⁰⁾

TFコイル製作の技術課題である導体をRP溝に挿入するための技術課題を解決するため、1) RP組立時のRP溝長の調整、2) 高精度巻線技術の開発、及び3) 熱処理前後の導体収縮量の評価とその巻線形状への反映により、この技術的困難に立ち向かうこととし、要素技術の開発及び実規模試作により、TFコイルの製作技術の開発を実施した。

3.1 RP組立によるRP溝長の調整¹¹⁻¹³⁾

TFコイルに使用されるRPは、高さ13m、幅9m、厚さ0.1mの大型構造物であるにもかかわらず、7枚のDPを積層して、1体の巻線部を形成するため、DPの平面度として4mmが要求され、CP溶接における面外変形を考慮して、RP単体では平面度1mm、輪郭度1mmを達成する必要がある。RP溝の軌跡は、寸法精度が比較的緩い曲線部で輪郭度として6mmの裕度を作ることができ、これを利用して、RP溝長が調整できれば、新たに、導体長に対して0.03%の裕度を得ることができる。そこで、ITER計画における製作工程を満足しつつ、この裕度を確保するために、図5に示すように、RPを10セグメントに分割して材料の製作及び機械加工を実施した後、溶接で4分割までRPを製作しておき、熱処理後の巻線の導体長に合わせて外側に設けた余長を調整して組立てる方法

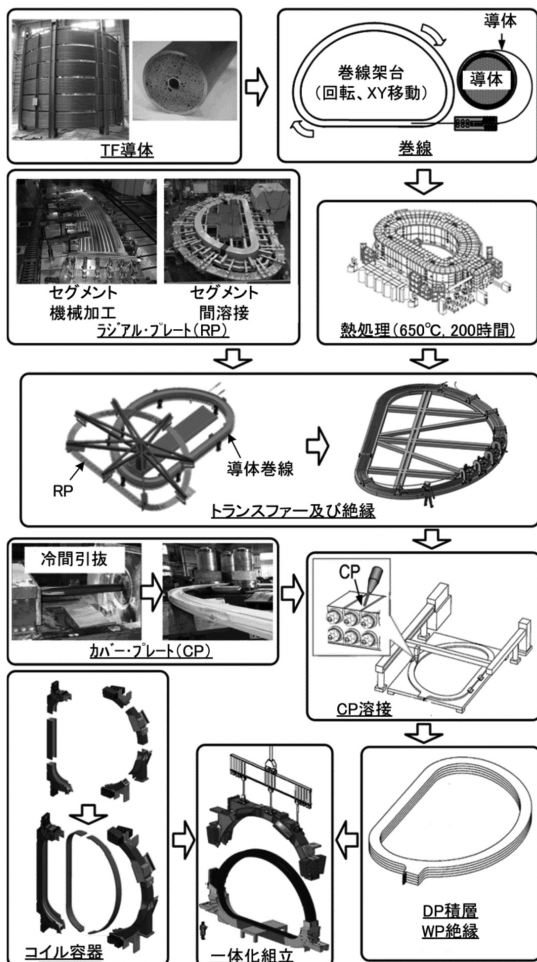


図4 ITER TFコイルの製作手順

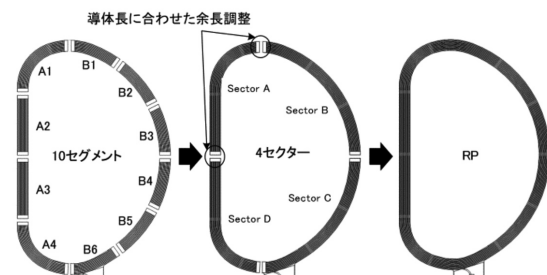


図5 RPの製作手順

が考案された。

1) RP セグメントの材料製作

RPセグメントで使用される材料は、日本機械学会の核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格¹⁴⁾に規定されている表3に示す材料であり、高窒素含有の完全オーステナイト・ステンレス鋼である。このため、溶接に対する割れ感受性が高く、溶接部に欠陥が生じるリスクの低減を図る必要があるとともに、機械特性の要求値（900 MPaの耐力、 $180 \text{ MPa m}^{1/2}$ の破壊靱性値（KIC））を満足する必要がある。そこで、溶接における割れ感受性を低減させることを目的として、ディロングの組織図において、図6に示すフェライト0%となる直線に近い完全オーステナイト相とする化学成分をターゲットと定めた。このターゲットに従って製作したRP材料（母材）の製作実績が図6のプロットであり、ターゲットとした化学成分がおおよそ達成できていることが示されている。

2) RP セグメントの高精度機械加工技術

10個のRPセグメント製作における機械加工は、導体をRP溝に挿入するために、RP溝長の公差として $\pm 0.006\%$ が要求され、高精度な機械加工技術の確立が求められていた。加えて、TFコイル製作工程上の律速となるため、更なる機械加工時間の短縮化も必要であった。一方、RPには、断面が対称な標準RPと非対称なサイドRPがあり、これらは機械加工による変形の挙動が異なると考えられた。そこで、標準RP及びサイドRPを対象として実施した試作試験の結果、機械加工機の剛性を活用できる加工法の採用、及び加工条件の最適化を実施することにより、大幅な加工時間の短縮が図られ、TFコイルの製作工程を十分に満足する機械加工技術の確立に成功した。また、加工変形においても、平面度の要求値を十分に満足する標準RP：0.3mm以下、サイドRP：

0.6mm以下の高精度な製作精度を達成されている。

3) RP セグメント間溶接技術

組立後のRPに要求される厳しい公差を満足するためには、溶接変形を小さく抑える必要がある。そこで、溶接変形が小さく、溶接時間の短縮も図れるレーザー溶接を採用することとした。ただし、レーザー溶接の溶け込み深さの制限から、中央約50mmの厚さをレーザー溶接し、残りの部分をアーク溶接（GTAWまたはレーザーMIGハイブリッド溶接）することとした。また、高窒素完全オーステナイト・ステンレス鋼を用いるため、割れ感受性が高く、すでに述べたRP材料の最適化に加えて、高度なレーザー溶接技術の開発が求められた。そこで、割れの無い健全な溶接部とするために、靱性に影響を与える酸素濃度の管理等、溶接条件の最適化を実施し、図7に示す溶接部における横断面及び縦断面のマクロ観察の結果、割れの無い、健全な溶接品質であることを確認した。

RPに要求される平面度及び輪郭度の要求を満足するためには、溶接部の面内、面外変形及び収縮量を把握する必要がある。そこで、実機のRPセグメントを組立てる際に使用する治工具の検証を兼ねて、実規模RPセグメントの溶接試験を実施し、溶接変形を評価した。その結果、溶接部の溶接前後における面内、面外変形は測定誤差の範囲内であり、RP溝長手方向の収縮量は約1mmであった。この結果から、RPセグメント組立時に各セグメントの両端に溶収縮による余肉を設けることで、溶収縮量のばらつきを考慮しても、要求される公差を満足することを確認した。

以上より、導体をRPに挿入するために、RP溝長の調整による導体長の裕度確保のために考案した巻線の熱処理後の導体長の測定結果に合わせてRPを製作する方法について、余長の調整方法及びRPの要求公差を満足する高精度機械加工・溶接技術が確立された。

3.2 高精度巻線技術の開発^{10, 15, 16)}

RP溝に導体を挿入するための巻線形状の管理では、曲げる位置（導体長）の管理が重要である。曲率は巻線後に修正できるが、曲げる位置は後で修正できないためである。導体長の管理目標を $\pm 0.01\%$ とした場合、従来のエンコーダの回転数により長さを測定する方法では、エンコーダと導体間に滑りが生じて大きな誤差が発生し、

表3 RP材料の化学成分¹⁴⁾

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	C+N
FM316LNH (母材)	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.15- 0.22	\geq 0.180
FMJJ1 (ワイヤ)	0.030 max.	0.75 max.	9.00- 11.00	0.035 max.	0.015 max.	11.00- 13.00	11.00- 13.00	4.00- 6.00	0.21- 0.27	-

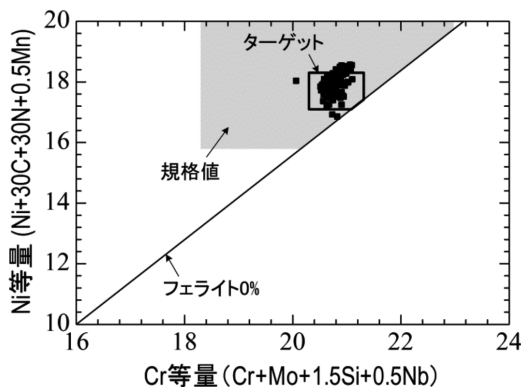


図6 RP材料（母材）の化学成分のターゲットと製作実績

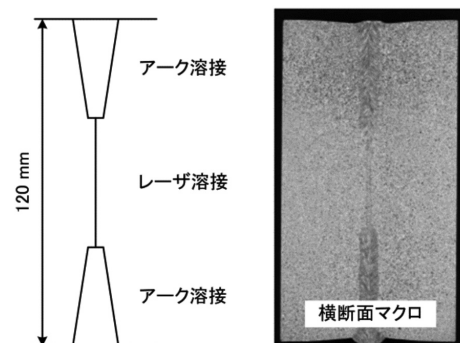
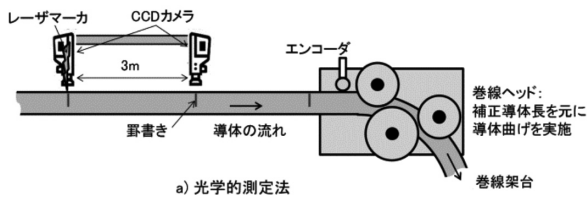
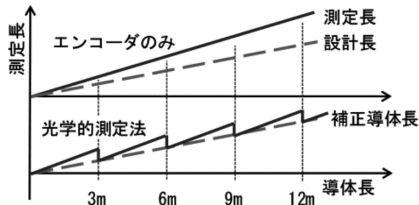


図7 RP溶接

長尺導体の場合、誤差の絶対値が蓄積されるため、導体長の管理目標である $\pm 0.01\%$ を満足できない。そのため、 $\pm 0.01\%$ を満足するためには、新たな導体長測定方法が必要である。そこで、図8に示す光学的測定法が開発された。導体表面にレーザーでマーカをつけ、一定間隔毎にCCDカメラでマーカ間の距離を測定し、エンコーダで測定した導体長を補正するという方法である。この方法では、エンコーダのみの場合のように誤差が蓄積されず、CCDカメラ間の距離で誤差を補正することが可能となる。光学的測定法に加えて、図9に示すように、1/4ターン毎に導体にマーカをつけ、導体を導体架台上の正確な位置に固定したときに生じるマーカのずれ量に合わせて、巻線中に導体長を補正するシステムを構築した。この1/4ターン補正法では、導体の曲げによる導体長の変化等、導体がCCDカメラを通過した後に導体長の変化が発生しても対応できる管理手法である。測定された導体長の誤差は次の1/2ターンで補正することでRP溝に挿入可能となる。以上より、光学的測定法及び1/4ターン補正法により、導体長を正確に補正するシステムが開発さ

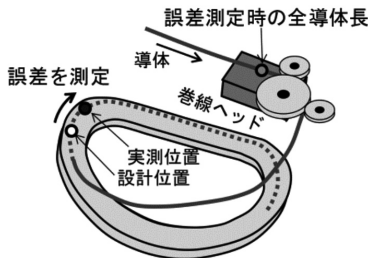


a) 光学的測定法

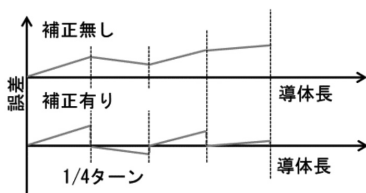


b) エンコーダのみと光学的測定法の誤差の蓄積

図8 光学的測定法を用いた導体長の管理



a) マーカを用いた導体長の補正



b) 1/4ターン補正の誤差の蓄積

図9 1/4ターン補正法

れた。

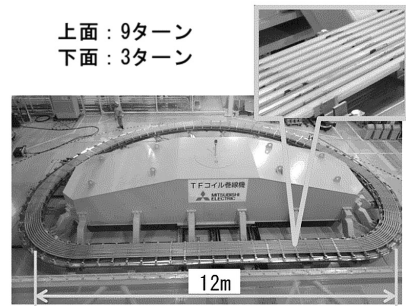
開発した巻線システムを用いて、実規模サイドDPの巻線を実施した結果、図10に示すとおり、導体長の管理目標である $\pm 0.01\%$ （各ターンのばらつきとしては $\pm 0.006\%$ ）を満足する非常に高精度で巻線が実施できることを実証し、高精度巻線技術を確立した。

3.3 熱処理前後の導体収縮量の評価¹⁷⁾

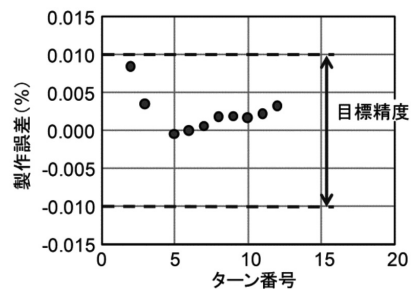
熱処理前後の導体の収縮量を評価するため、実規模サイドDPの超伝導生成熱処理を実施した。図11に示す測定結果より、熱処理後の導体の伸び量は $0.061\% \pm 0.006\%$ であることがわかった。本導体を使用した巻線を実施する場合は、 0.061% だけ小さく巻線することで、熱処理後に既定の巻線形状となるようにする。導体の製作メーカーが異なる場合は、その収縮量も異なることが想定されるため、その導体での熱処理による収縮量を評価し、巻線形状に反映させる。

3.4 導体長の裕度と誤差

RP溝長の調整による導体長の裕度は $\pm 0.03\%$ であり、この裕度は各ターンで同じ余長で調整するものであるた



a) 製作した実規模巻線(サイドDP)



b) 導体長の測定結果

図10 実規模巻線(サイドDP)の巻線結果

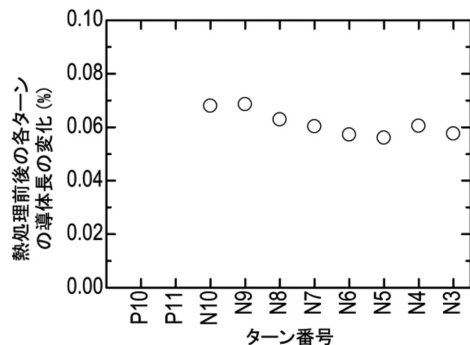


図11 熱処理前後の導体の収縮量

表4 導体長の裕度と誤差

	裕度	誤差
各ターンの平均	RP 溝長の調整 による裕度 ±0.03%	巻線の誤差 ±0.005% 熱処理の予測誤差 ±0.02%
各ターンのばらつき	RP 溝と絶縁された 導体の隙間 による裕度 ±0.02%	RP の製作誤差 ±0.006% 巻線の誤差 ±0.006% 熱処理の誤差 ±0.006%

め、各ターンの平均的な誤差に対する裕度である。また、RP 溝と絶縁された導体の隙間による±0.02%の裕度は各ターンのばらつきに対応できる裕度である。これまで述べてきた RP 製作、巻線及び熱処理による誤差を表 4 にまとめた。表 4 の結果より、裕度が誤差を上回っており、RP 溝に導体を挿入可能であることが示された。

4. ま と め

TF コイルの主要技術課題の 1 つである D 型形状に巻線し、熱処理した導体を RP 溝に挿入することを目的とし、1) RP 溝長の調整、2) 高精度巻線技術の開発、及び 3) 熱処理前後の導体収縮量の評価の 3 本柱を技術開発のターゲットに定め、技術開発を実施し、これに成功した。トランスファー技術も重要な技術課題の一つであったが、熱処理を実施していない標準 DP 巻線を RP 溝に挿入することに成功しており、トランスファー手法の実証は完了している。現在、実規模サイド RP の製作を進めており、完成後、熱処理したサイド DP 巻線のトランスファーを実施し、熱処理後の導体が RP に挿入できることで最終確認となる。これにより、2013年10月より、実機 TF コイル 1 号機の巻線等、実証に成功した作業を開始しており、2016年に TF コイル 1 号機を完成させるため、製作を進めている。

謝 辞

TF コイルの調達作業及び技術開発にご協力頂いた三菱重工工業 (株)、三菱電機 (株)、(株) 東芝並びに関連会社の方々に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：国際熱核融合実験炉，<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/index.php>
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 磯野高明ら：ITER トロイダル磁場コイル用 Nb₃Sn 撚線の製作，低温工学 47 (2012) 147-152
- 5) 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) 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) 小泉徳潔ら：ITER トロイダル磁場コイル用カバー・プレート溶接試験，低温工学 47 (2012) 186-192
- 8) 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
- 9) 長本義史ら：ITER トロイダル磁場コイル製造方法の開発，低温工学 47 (2012) 200-205
- 10) K. Matsui, T. Hemmi, H. Kajitani, K. Takano, M. Yamane, N. Koizumi: Progress of ITER TF Coil Development in Japan", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 24 (2014) 4203105
- 11) 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
- 12) 高野克敏ら：TF コイル・ラジアル・プレートの実規模試作結果，2013 春季低温工学・超電導学会予稿集 (2013) 191
- 13) 高野克敏ら：ITER・TF コイル・ラジアル・プレート製作，2013 秋季低温工学・超電導学会予稿集 (2013) 45
- 14) 日本機械学会「核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格」(JSME S KAI-2008)
- 15) 松井邦浩ら：ITER トロイダル磁場コイル巻線の巻線試作結果，低温工学 47 (2012) 160-165
- 16) 松井邦浩ら：ITER トロイダル磁場コイル巻線の熱処理試作結果，低温工学 47 (2012) 166-171
- 17) 小泉徳潔ら：日本における ITER TF コイルの製作進捗状況，平成 26 年電気学会全国大会講演論文集 (2014) 5-187