

ITER TFコイル製作の完遂 Completion of ITER TF Coil Fabrication

中本美緒、辺見努、諏訪友音、竹林圭哉、馬場貴志、高野克敏、阪本和幸、齋藤健吾、清水辰也、宇野康弘

NAKAMOTO Mio, HEMMI Tsutomu, SUWA Tomone, TAKEBAYASHI Keiya, BABA Takashi, TAKANO Katsutoshi, SAKAMOTO Kazuyuki, SAITO Kengo, SHIMIZU Tatsuya, UNO Yasuhiro

量研
QST

1. はじめに

南フランスのサン・ポール・レ・デュランスで建設が進められているITER核融合実験炉に組み込まれるトロイダル磁場コイル (TFコイル) のうち、日本はTF導体の25%である33本と、TFコイル18基のうち8基とスペアコイル1基の合計9基の製作を担当している。2010年3月に実機導体の製作を開始[1]し、2013年10月の実機コイル製作の着手からおおよそ7年後の2020年1月に世界初のITER TFコイルが完了した[2]。その後も製作の効率化を図り、2023年8月にスペアを含む9基全ての製作が完了した。本発表では、TFコイル製作における技術課題の克服及び製作の効率化と製作結果について報告する。

2. 技術課題の克服と製作の効率化

ITER TFコイルは高さ16.5 m、幅9 m、総重量約300トンにも及ぶ世界最大級のNb₃Sn超伝導コイルである。その構造は、導体をラジアル・プレート (RP) と呼ばれるステンレス構造体の溝に納めた巻線部 (WP) と、4つに分割されたステンレス製のコイル容器 (TFCS) から構成される (図1)。プラズマ閉じ込めのために必要な磁場性能は導体製作では超伝導性能として、Nb₃Sn素線の臨界電流 I_c に対し下限値が設けられており、また、TFコイル製作では電流中心線 (CCL) に対する公差が定められている。TFコイルは段階的に製作されるため、各製作段階で要件を満たす必要がある。

(1) 導体製作

TF導体は、溶接により長尺化したステンレス製のジャケット管に、5段階のNb₃Sn撚線を引き込み、ジャケット管を圧縮成型し、製作される[3]。TF導体製作では、これまでに経験したことがない量のNb₃Sn素線の量産を行ったため、素線の性能を統計的に管理することによって、製作条件の異常を察知し、素線品質が均一となるように素線製作を進めた。また、Nb₃Sn素線の I_c はひずみによって大きく劣化するため、運転中の繰り返し電磁力による導体性能の劣化が懸念された。そのため、製作

した実機導体に対して、運転条件と同等の高磁場下 (11.8 T) における性能試験を実施し、繰返し電磁力を印可しても導体性能が要求性能以下とならないことを確認しながら、実機導体の製作を進めた。

(2) WP製作

2層複数ターンのD型に巻線した導体を熱処理し、溶接により組み立てたRPの両面の溝に挿入する。導体に絶縁層を施工した上でカバープレートをRPに溶接し、その表面にさらに絶縁層を施工し、含浸を行う (ダブルパンケーキ, DP) [4]。7枚のDPを積層し、更に絶縁含浸を行う[5]。

WP製作時のCCL位置誤差はD型直線部 (インボード) で±1 mm、曲線部 (アウトボード) で±2 mm以内に収める必要があった。Nb₃Sn超伝導体の生成には650°Cという高温での熱処理が必要であり、熱処理後の導体が伸びることで周長や形状が変化する。そのため、導体の熱伸びによる影響を加味した上で巻線作業を実施し、熱処理時の導体のサポート構造を設計する必要があった。また、Nb₃Snは脆く、曲げ歪みを0.1%以下に管理しなければならないため、熱処理後の導体とRP溝の周長差を±0.023%に納める必要があった。巻線時の周長誤差を0.01%の精度で管理し、熱処理時の受け台をRP溝の間隔と同じくし形とし、D型の台に周長方向にほぼ等間隔で配置することで、熱処理後の巻線形状をRP溝形状と一致させた。当初は熱処理後の導体の周長を計測してからRPの製作を行うことで周長差を制御していたが、導体熱処理とRP製作を並行して行えるよう効率化を図った。

(3) TFCS製作

13分割したベーシックセグメントと呼ばれるステンレス製の構成体を加工により製作し、これらを溶接及び加工による成型を行いサブアセンブリ (AU, AP, BU, BP) を製作する[6]。分割された4つのサブアセンブリの合わせが溶接品質を担保できるものであることを確認することでTFCS製作は完了する。

初期の合わせが溶接後の形状にも大きく影響

することから、サブアセンブリは合計約200トン、長さ16.5mの大型構造物であるにも関わらず、1mmレベルの合わせ精度が求められた。これに対し、実際の合わせと0.65mmの誤差で仮想的に合わせの評価が可能であることを確認し、実機への適用を行った。

(4) 一体化製作

WPはサブアセンブリ内に収められ、サブアセンブリ間の溶接後にWPとTFCSの間の隙間を樹脂で埋めることで一体化[7]し、TFCS外面を最終形状に加工する。

一体化後のコイルに対し、CCL位置誤差はインボードで $\Phi 2.6$ mmの円筒に収める必要があり、アウトボードでは面外方向に ± 3 mm以内とする必要があった。サブアセンブリは100 mmもの厚板のステンレス鋼からなるため、溶接変形が大きい。そのため、溶接前後でWPとTFCSの位置関係が変化する。CCL位置の高精度な管理のためには、封止溶接後もWPとTFCSの位置関係を管理する必要があるため、樹脂注入用の含浸穴からWP位置をモニターし、CCL位置の変化を評価した。また、TFコイル間を接続するインターフェース形状はTFコイルのCCLを最適化するように成型する必要があるため、サブアセンブリのインターフェース部には余分な厚みが付与されており、樹脂含浸後に最終形状へ機械加工される。樹脂含浸時と最終機械加工時ではコイルの姿勢が異なるが、初号機製作時に樹脂含浸時の寸法計測結果から加工方針を決定できる見込みを得たことで、以降の号機では加工機上での寸法計測を合理化し、製作の効率化に寄与した。

3. ITER TFコイル製作の成果

各製作段階で技術課題を克服したことで、全9基において、CCL要求を満たした(図2)。また、1基目の製作には第1・第2ライン共に約6年間に要したが、製作の効率化により製作期間を4年程度にまで短縮できた。現在、ITER機構では、当初予定されていなかった4 KでのTFコイル試験の検討が進められており、11月初旬にITER機構に到着したスペアコイルを第1号として4 K試験を行う計画となっている。

参考文献

1. Y. Takahashi, *et al.*, 2011, *Nucl. Fusion*, Vol. 51, 113015
2. M. Nakamoto, *et al.*, 2021, *Nucl. Fusion*, Vol. 61, 116044
3. Y. Nabara, *et al.*, 2016, *J. Plasma Fusion Res.*, Vol. 92, p. 396
4. T. Suwa, *et al.*, 2020, *TEION KOGAKU*, Vol. 55,

- p. 319
5. H. Kajitani, *et al.*, 2020, *TEION KOGAKU*, Vol. 55, p. 338
 6. M. Iguchi, *et al.*, 2012, *TEION KOGAKU*, Vol. 47, p.193
 7. M. Nakamoto, *et al.*, 2020, *TEION KOGAKU*, Vol. 55, p. 401

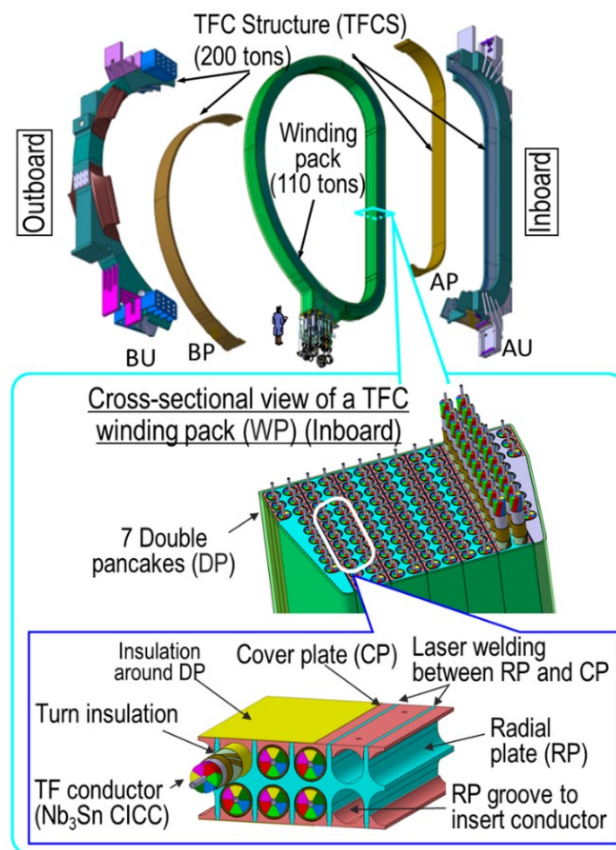


Fig. 1 TF Coil composition

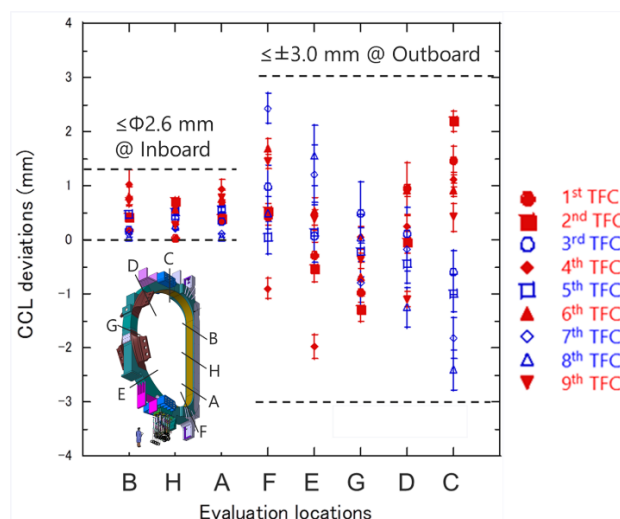


Fig. 2 TF Coil fabrication results