



研究論文

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, 泊瀬川 晋

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

量子科学技術研究開発機構

(原稿受付: 2024年5月25日 / 原稿受理: 2025年2月18日)

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 コイルに用いる全超伝導導体の25% 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, TF コイル構造物19基の製作を担当した. TF コイルは, プラズマを閉じ込めるための磁場を発生する役割を持つ超伝導コイルであり, その導体には Nb_3Sn 超伝導線が用いられた. この導体を D 型に巻線して製作された巻線部と, その巻線部を内部に収めるステンレス製の容器 (TF コイル構造物) から構成される. 2008年に実機 TF コイル用導体の製作を開始 (Takahashi, et al., Nuclear Fusion, 2011) し, 2013年10月の実機 TF コイル製作の着手からおよそ7年後の2020年1月に世界初の ITER TF コイルが完了した (Nakamoto, et al., Nuclear Fusion, 2021). 導体, 巻線部, 構造物, そして一体化とそれぞれの製作段階で技術課題の克服に取り組み, その後も製作の効率化を図ることで, 2023年8月にスペアを含む9基全ての製作が完了した. 本稿では, ITER TF コイル製作の中で取り組んだ技術課題の克服及び製作の効率化と10年以上に及ぶ製作結果について報告する.

Keywords:

fusion, magnet, superconductor, Nb_3Sn , ITER

1. ITER TF コイル概要

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 核融合実験炉では, プラズマ電流を誘導する中心ソレノイド (6 モジュール), プラズマ位置と形状を制御するポロイダル磁場コイル (6 基), プラズマ閉じ込めの磁場を発生させるトロイダル磁場コイル (TF コイル, 18 基), 磁場の補正を行う補正コイル (18 基) の4種の超伝導コイルが組み込まれる. うち, TF コイルは真空容器に覆いかぶさるように組み込まれ, 18基がドーナツ状に組み立てられることで, その役割を果たす構造となっている[1].

TF コイル用導体の製作は欧州, ロシア, 韓国, アメリカ, 中国, 日本の6極で分担しており, 日本はそのうちの25%である33導体を製作した[2]. これらの導体は TF コイルの製作を分担した欧州と日本に輸送され, 日本では 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 TF コイル製作を行った[3]. TF コイル構造物の製作においては, 日本が19基全ての製作を担当した[4]. 本稿では, 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.

1.1 ITER TF コイルの構造

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 Nb_3Sn 超伝導コイルとなっており, 最大11.8 T もの磁場を発生させる. その構造は D 型をしており, 巻線部 (WP) と, 4つに分割されたステンレス製のコイル構造物 (TFCS) から構成される (図1). TF コイルは, 18基をドーナツ型の真空容器を覆うように配置するため, 装置中心側の直線部は側面が10度の傾斜を持った楔形状となっており, 隣接する TF コイルと互いに支えることで, 運転時の電磁力による変形に耐える構造となっている.

WP はダブルパンケーキ (DP) を7枚積層し, 絶縁を施した構造である. DP はラジアルプレート (RP) と呼ばれるステンレス構造物の内部に絶縁を施した導体を納め, 更に表面を絶縁した D 型の構造である. RP は断面が長方形または片面楔形状の D 型のステンレス構造であり, 上下両面に3~11ターンの溝が加工されており, この溝に導体が収まる.

TFCS は大きくは AU, BU, AP, BP から構成される. AU, BU はそれぞれ, D 型の直線部と曲線部の容器であり,

本論文は第40回プラズマ・核融合学会年会 (2023年盛岡) での招待講演に基づきます

National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

Corresponding author's e-mail: nakamoto.mio@qst.go.jp

AP, BPはそれぞれの内側の蓋である。AUとBUでWPを外周側から覆い、APとBPで内周側から蓋をし、AU・BU間とAU・AP間、BU・BP間を溶接で封止することで、TFCSが1つの構造となる。その後、TFCSとWPの間の隙間を樹脂で固めることでTFコイルとして一体化される。

1.2 ITER TFコイル製作要求

プラズマ閉じ込めに必要な磁気性能として、システムの誤差磁場の制御が重要である。ITERでは、誤差磁場の許容値はプラズマ境界における非軸対称成分に対し設けられており、大半径上磁場5.3 Tに対し、 5×10^{-5} を目標としている[5]。

誤差磁場軽減として、TFコイルにおいては製作誤差及び据付時のコイルの変形や位置誤差について、制御が求められる。製作誤差については、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。TFコイルの各製作段階における主要な仕様は以下のとおりである。電流中心線（Current Center Line, CCL）は、WP内の134ターンの導体の重心位置として定義した。

- 導体製作におけるNb₃Sn素線の臨界電流 I_c に対する下限値（190 A @ 12 T, 4.2 K）
- WP製作におけるCCL位置公差
 - 直線部：面内方向に ± 1.0 mm以内
 - 曲線部：WPで面内方向に ± 2.0 mm以内

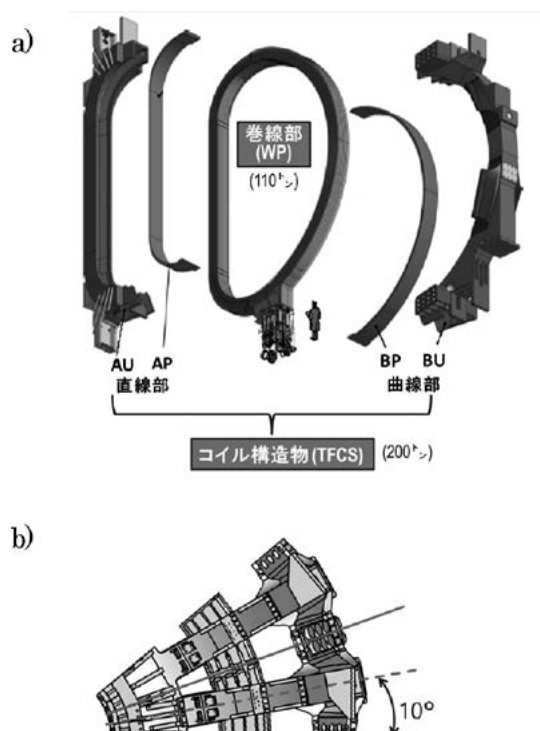


図1 a) ITER TFコイルの構造, b) TFコイル2基が接続されたときの上面図。ステンレス製のコイル構造物（TFCS）と呼ばれる容器内にNb₃Sn超伝導導体をD型に巻線した巻線部（WP）を収めた構造となっている。コイル構造物は大きく4つの構造体に分割できる。D型形状の直線部がAU・AP、曲線部がBU・BPである。その重量はWPが110トン、TFCSが200トンである。TFコイルは18基をドーナツ状に組み立てる構造となっているため、装置中心側の直線部は片面10°の傾斜を持った楔形状となっている。

- TFコイル製作におけるCCL位置公差
 - 直線部： $\varnothing 2.6$ mm以内
 - 曲線部：面外方向に ± 3.0 mm以内

2. 製作技術開発

前述のように、プラズマ閉じ込めに必要な磁束密度と磁場精度を満たした磁場の発生のため、TFコイルに対し、各製作段階で要求公差が設定された。導体製作においては、12 T, 4.2 Kにおける臨界電流値 I_c を190 A以上に保ったうえで、安定したNb₃Sn素線の量産が求められた。WP製作では、導体の熱処理時の熱伸びによる巻線形状の変形を考慮した上で、高精度のCCL公差（直線部で誤差 ± 1.0 mm以下、曲線部で ± 2.0 mm以下）を達成する必要があった。また、TFCS製作では、ミリ以下の高精度なAU-BU溶接開先合わせが求められた。これらを達成することで、TFCS溶接変形によるWP-TFCS位置関係の変化を加味しても、一体化製作における高精度のCCL公差（直線部で誤差直径2.6 mm以下、曲線部で ± 3.0 mm以下）が達成可能となった。本項では、これらの要求の達成における代表的な技術課題について紹介する。

2.1 導体製作課題

TF導体製作は2008年に実機TFコイル用導体の素線製作を開始した[6]。これまでに経験したことがない量のNb₃Sn素線の量産を行う必要があったため、素線の性能を統計的に管理する手法を取った[7]。この統計的プロセス管理では、 I_c の場合、まずは I_c が190 A以上となるように管理を行い、素線を100 km製作したところで I_c の平均値 I_{c_ave} と標準偏差 σ を算出し、以降の製作目標値を $I_{c_ave} \pm 3\sigma$ に設定した[5, 7]。次に、素線を760 km製作したところで再度、目標値の見直しを行い、製作を進めた。その結果、素線品質のばらつきを低減し、全ての素線で I_c 下限値を達成した。

図2に日本の製作分の導体素線の I_c 測定結果の分布を示す。 I_c 測定はスプールごとに実施した。1つのビレット（素

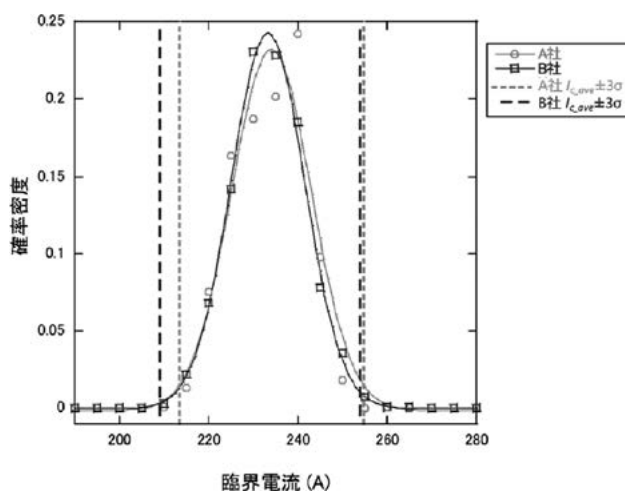


図2 日本製作分導体素線の臨界電流（ I_c ）測定結果分布。製作は2社により行われた。各社の製作管理目標の範囲 $I_{c_ave} \pm 3\sigma$ を点線で示す。管理目標から外れたものはわずかであった。

線の製造単位)から複数のスプールが製造されるため、ビレット長に対するスプール長で重みづけを行った。点線で製作目標値 $I_{c_ave} \pm 3\sigma$ の範囲を示す。A社、B社それぞれ 99.8%、99.4%がこの範囲内で製作された。

統計的プロセス管理では、 I_c だけでなく、ヒステリシス損失や残留抵抗比、銅比、素線直径やツイストピッチ等のパラメータも管理対象とすることによって、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Nb₃Sn生成後に素線に加えられたひずみの影響を大きく受けるため、運転中の繰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TFコイル用導体に対して、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、繰返し電磁力を印加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TFコイル用導体の製作を進めた。

2.2 巻線部製作課題

WP製作時のCCL位置誤差はD型直線部で ± 1 mm、曲線部で ± 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℃という高温での熱処理が必要であり、熱処理による導体の伸びが巻線の周長や形状の変化として現れる。そのため、事前の導体熱処理試験の結果から各導体の熱伸び量を把握し、導体の熱伸びによる影響を加味した上で巻線形状を決定した。

熱処理後の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、ITER TFコイルでは巻線後に熱処理を行うこととした。RPの溝の幅は、曲線部及び直線部から曲線部への遷移部では絶縁後の導体の寸法に対し、裕度が設けられている。熱処理後の導体を超伝導性能を損なわずにRPの溝に挿入するには、熱処理後の導体とRP溝の周長差を溝裕度から求めた許容値 $\pm 0.023\%$ に納める必要があった。そのため、巻線作業は20℃に温度管理された環境で行い、レーザーマーカーで3 mごとにマーキングを行うことで、実際の巻線形状を正確に把握することで、巻線時の周長誤差を0.01%の精度で管理した。

巻線作業では、まず1層目を自動巻線装置でD型に巻きながら受け台に設置していく。熱処理前後で導体のターン間の距離を保持したまま巻線に熱伸びが発生するように、RP溝と同じ間隔のくし形構造の受け治具を周長方向に配置した。これにより、熱処理後の巻線形状をRP溝形状と許容内の差で一致させた。1層目が完了したら、1層目から2層面への層間部の成形を行い、2層目を支持するブロック構造を設置し、2層目も1層目同様に自動巻線装置でターン巻きを行う。

当初は数メートルから数十メートルのサンプル導体を用いた熱処理試験から熱伸び量を想定して巻線形状を逆算して決定し巻線作業を行い、熱処理後の導体の周長測定後にRPの製作を行うことで周長差を制御していた。製作を進める中で、熱処理前後の巻線形状の計測結果から熱伸び量を評価したところ、当初に決定した熱伸び量とは数値に差があったため、以降の巻線には実機製作の中で得た熱伸び量の値を用いることで、より正確に熱処理前の巻線形状

から熱処理後の巻線形状を予測可能となり、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。これによりRP製作の最終組み立て段階を導体の熱処理を待たずに並行して実施できるようになった。

図3に熱処理前後の巻線形状と設計形状の比較を示す。視覚的な比較のために巻線形状は誤差を100倍もしくは200倍で計上し、誇張して表現した。熱処理前の比較結果から、熱伸び後の巻線が許容できる誤差内となることを確認した上で熱処理を進めているが、形状の制御が難しかった直線部から曲線部への遷移部において、熱処理後も誤差が大きくなっていることが読み取れる。ITER TFコイルにおいては許容範囲内であったが、将来、更に高性能な超伝導コイルの開発をめざすには巻線形状を巻きやすい形状に改善することが最善であると考ええる。

2.3 構造物製作課題

TFCSのサブアッセンブリ間の溶接は、初期の合わせが溶接変形に大きく影響することから、サブアッセンブリは合計約200トン、長さ16.5 mの大型構造物であるにも関わらず、1 mmレベルの合わせ精度が求められた。特に、AU-BU間の溶接部は15 m離れた2断面の突合せ溶接となっており、自重による変形の影響を受けやすい。そのため、サブアッセンブリ製作後には、一体化と同じ姿勢、同じ治具を用いて、仮組試験を実施している。

AU-BU組立時、AUは直線部背板を床面に向けて設置し、BUを上から吊りこむ形で位置合わせを行う。この時、BUは両側面に3ヶ所ずつ取り付け付けた吊治具を用いて吊り上げられ、BUは自重変形によりAUとの合わせ面が片側5 mm程、内側に変形する。合わせ面における変形方向を図4に黄色矢印で示す。対策として、BUのAUとの合わせ面に近い位置でBUをジャッキで受け、更にそのジャッキを受け面に対し水平方向に可動可能な構造の受け台で支

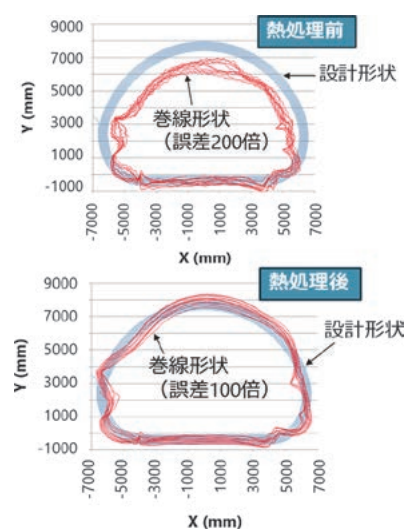


図3 a) 熱処理前、及びb) 熱処理後の巻線形状。赤線で計測値の設計形状からの誤差を200倍もしくは100倍にして示す。青線は設計形状を示す。直線から曲線に変わる遷移部での形状のコントロールが難しく、それらの箇所設計形状からの誤差が大きくなっている。また、熱処理により導体は伸びるが、熱処理前の形状が熱処理後も維持されることがわかる。

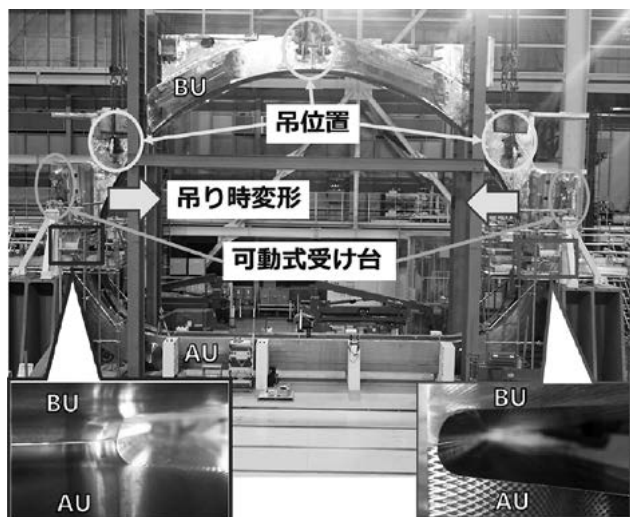


図4 AU-BU 溶接部位置合わせ。AUの背面を下にしてBUを垂直に吊りこみ、合わせ面の位置合わせを実施した。BUは片面3ヶ所で吊られており、吊時には、BUのAUとの合わせ面が内側に変形する。水平方向に可動可能な受け台でこの合わせ面に近い位置でBUを受けることで変形を修正している。位置合わせ後のAU-BU合わせ面の写真も示す。

持することで、自重変形を修正し、0.5 mm以下の精度でAU-BU間の位置合わせの微調整を行った。

図4に位置合わせ後のAU-BU間全体図と溶接部の拡大写真を示す。前述のようにTFCSは運転時にTFコイルにかかる応力に耐える必要があり、また、他のコイルを支える支持構造の役割も担うため、溶接部も母材部分と同じ構造強度が求められる。そのため、100 mm程度の板厚分の溶接部は完全溶け込み溶接とする必要がある。しかしながら一体化作業時には、AUとBU内にはWPが格納されており、外周面からの溶接のみ可能である。図4の合わせ部分拡大写真にあるように、合わせ部分には底面まで溶接可能とするための溝が切られており、AUとBUを合わせた時にU字の溝になる。溶接品質の担保には溝部分のAUとBUに同等に溶け込む必要があるため、その溝の底面位置におけるAUとBUに食い違いや段差が1 mm以下に制御する必要があるが、これを達成している。溶接後にはこの溝は全て埋められ、AUとBUは一体の構造体となる。

仮組試験は一体化と同じ姿勢で実施する必要があるが、2号機以降では一体化作業と並行して実施するには作業場所や作業員の確保の懸念があった。そのため、AU-BU間の仮組試験については、レーザートラッカーによる三次元計測の知見及び経験と初期の数基で収集した仮組試験時の測定データから、サブアッセンブリの計測データと構造解析を用いて仮想的に仮組を行う手法を検討し、実際の合わせと0.65 mm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た。これを実機へ適用することで、仮組試験によるリソースの圧迫を排除し、また仮組試験に要する期間を削減した。

2.4 一体化製作課題

WPとTFCSの一体化作業は、WPのAUへの挿入、BU・BP・APの吊り込み、サブアッセンブリ間の溶接、WPとTFCS間の隙間の樹脂含浸、TFCSの他機器との取

り合い部の機械加工の順に進められる。一体化後のTFコイルのCCL位置公差を満足させるためには、WP製作時に得られたCCL位置をTFCSに正確に転写して把握する必要がある。その際、WPとTFCSの重力や溶接による変形などに伴う位置変化を考慮する必要がある。レーザートラッカーによる3次元の測定を、製作ステップ毎に実施することで、製作作業中の状況変化によるCCL位置のずれを逐次計測し、記録し、CCL位置を正確に評価した。また、この測定結果から、サブアッセンブリ間溶接後のCCL位置調整作業における目標調整量を決定した。更に、計測の際には繰り返し計測を行うことで、測定の不確かさ目標値0.3 mm以下を約95%の計測において達成した。

特に、100 mm程度の厚板のステンレス構造体であるサブアッセンブリの溶接は数ミリ単位の溶接変形が発生することが事前の試作で判明しており、溶接前後でWPとTFCSの位置関係が変化することが懸念され、実際に三次元的に数ミリの変化が見られた[8]。CCL位置の高精度な管理のためには、封止溶接後のWPが完全にTFCS内に収められた状態でもWPとTFCSの位置関係を正確に管理する必要があるため、TFCS側面数か所に設けられた樹脂注入用の含浸穴を利用し、その穴にレーザートラッカー用のプローブを差し込んでWP位置をモニターし、CCL位置の変化を評価した(図5)。

更に、WPとTFCSの一体化作業は直線部を床面に設置した縦置き姿勢で実施するため、WPをTFCS内で中心位置から左右に3.7 mの位置2点で支持した際に、自重変形により曲線部の3.5 mmの垂れ下がりに伴い、直線部では中心部が1 mm程度浮き上がることが予測された。TFCSも同様の変形が予測されたが、変形の値はWPと比較すると大幅に小さくなることが見込まれた。この差を補正しないままWPとTFCSの隙間を樹脂含浸し一体化して

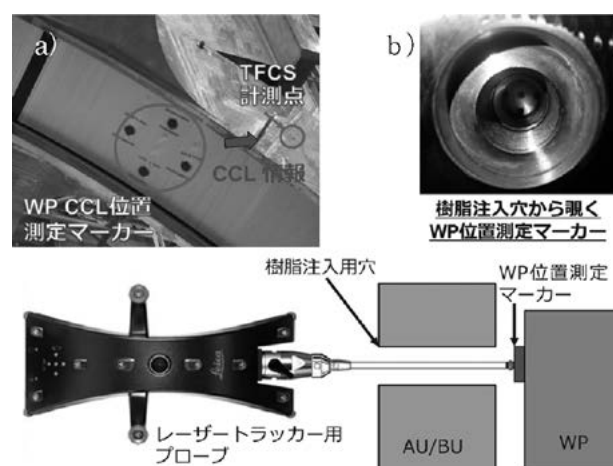


図5 a) WP CCL位置測定マーカーとTFCS計測点、b) WP位置測定マーカー、c) WP位置測定マーカーの測定模式図。WP製作で求めたCCL位置をWP内周面に設置された測定マーカーと、TFCS計測点を同じ座標系で計測することでCCLの位置情報をTFCSに転写した。樹脂注入穴の位置にWP位置測定マーカーを予め貼っておき、転写後のWP位置の変化を確認し、CCL位置情報へ反映した。WP位置測定マーカーの測定は、レーザートラッカー用プローブを用いて樹脂注入穴を通して行った。

しまうと、完成後のTFコイルのCCL位置が直線部の公差から外れることとなる。そのため、樹脂含浸前にWPの変形を矯正する必要がある。そのため、曲線部の中心から左右に25度の断面2ヶ所でTFCSに対しWPを内側から押し上げることで、直線部の浮き上がりを矯正した(図6)。

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. TFコイル製作

3.1 導体製作

TFコイルは最大11.8 Tの磁場を発生させる必要があるため、導体には Nb_3Sn 超伝導体を用いられている。導体の製作は大きくは、直径0.82 mmの Nb_3Sn 素線900本と同じ径の銅線522本を5段階で撚る撚線過程と、撚線を溶接により長尺化したステンレス製のジャケット管に引き込み、ジャケット管を圧縮成型する圧縮成型過程に分けられる[6]。図7に撚線過程を示す。

1次撚線では、2本の Nb_3Sn 素線と1本の銅線を80 mmピッチで撚る。2次撚線ではこれを3本140 mmピッチで撚り、3次撚線では、これを更に5本190 mmピッチで撚る。4次撚線では、3本の銅線4組の撚線を中心に、3次撚線5本を300 mmピッチで撚り、外周面の50%を覆うように厚さ0.1 mmのステンステープ(ケーブルラップ)を巻く。5次撚線では、直径10 mm、厚み1.0 mmのステンレス製のスパイラル管を中心に、4次撚線を6本撚り、その外周に4次撚線時と同様のケーブルラップを30から40%オーバーラップするように巻く。撚り線にゆるみが発生する

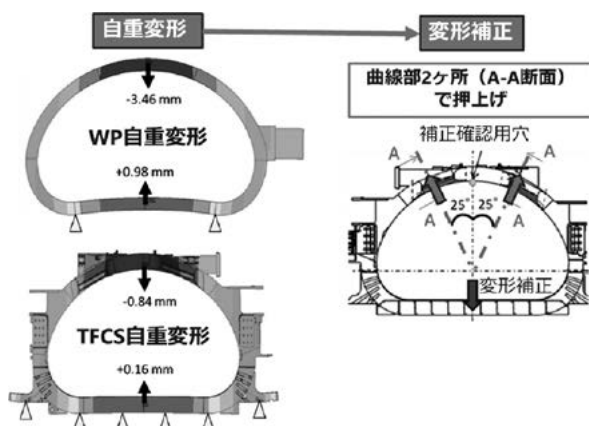


図6 巻線部自重変形矯正。WPとTFCSの一体化作業は直線部を床面に置いた垂直姿勢で実施されたため、特にCCL位置公差の厳しい直線部において自重変形の影響が懸念された。TFCSに対し、WPを曲線部で内面から押し上げることで、直線部のWPの浮き上がりをTFCSと同程度となるよう補正を行った。TFCSに設けられた確認用の穴からWPとの相対位置の変化量を確認し補正確認を行った。

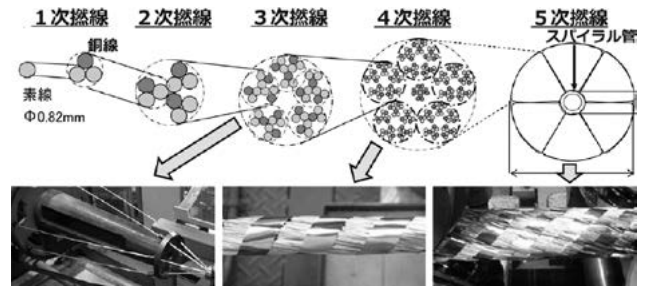


図7 ITER TF 導体撚線過程。直径0.82 mmの超伝導線と同径の銅線を5段階で撚り線して製作する。3～5次撚線について、製作写真を示す。5次撚線の際には中心部に冷媒を通すためのスパイラル管が組み込まれる。その後、圧縮成型過程で、5次撚線がジャケット管内に引き込まれ、圧縮成型され、ケーブル化される。

と、その後の工程で折れや曲がりに発展するため、各段階で約20 N、約70 N、約100 N、100-200 N、300-400 Nの張力を保ちながら撚線を行っている。撚線の構成を表1にまとめる。

完成した5次撚線の外径は約41.6 mmであった。運転の際には導体中心のスパイラル管に冷却チャンネルとして冷媒である超臨界ヘリウムが供給され、導体の超伝導転移温度を下回る4.2 K程度まで冷却する。

圧縮成型過程では、5次撚線を外径48.0 mm、厚み2.0 mmのジャケット管に2 m/min程度の速度で引き込み、圧縮成型装置で外径43.7 mmに圧縮する。導体は、コイル1基あたり、760 mのものが5本と415 mのものが2本製作された。導体1本あたりの製作期間は平均しておよそ17か月を要した。

3.2 巻線部製作

ITER TFコイルWPの製作はDPの製作から始まる。DP製作は、巻線作業、熱処理、導体挿入、導体絶縁、カバープレート溶接、DP絶縁の順に行われる。

巻線作業では、導体を2層複数ターンのD型に巻線する。ターン数はWPの側面のDPでは3ターンと9ターンであり、その他のDPでは全て11ターンである。巻線後の導体は Nb_3Sn 生成のため、650℃で200時間熱処理される。熱処理後の導体は、その外周面に絶縁を施す前に、一旦、溶接と機械加工により製作したステンレス製のRP[9]の両面の溝に挿入される。

その後、導体とRP間の絶縁のため、RPの溝から一部を持ち上げながら、ファイバーグラスとポリイミドで構成される絶縁層を施工するが、 Nb_3Sn は非常に脆く、ひず

表1 ITER TF 導体の撚線構成。

製造ステップ	構成	ツイストピッチ (mm)
1次撚線	Nb_3Sn 線1本	1次撚線
2次撚線	1次撚線3本	140 ± 10
3次撚線	2次撚線5本	190 ± 10
4次撚線	3次撚線5本 銅線3本×4 ケーブルラップ	300 ± 15
5次撚線	4次撚線6本 スパイラル管 ケーブルラップ	420 ± 20

みにより超伝導性能が変化するため、導体に歪みをかけないようにRP上面から380 mm程度の高さまで持ち上げながら絶縁を施工する装置が必要であった。装置は、導体持ち上げ部分、絶縁施工部分、導体吊降ろし部分で構成され、これらはRPの内周側に位置するレールの上を連動して移動する。熱処理後の導体の劣化防止として、ひずみを0.1%以下に抑えるため、持ち上げと吊降ろしは約6 mmに亘って徐々に行われ、実際の導体絶縁作業中の導体のひずみは0.07%以下であった。図8に導体絶縁装置の写真を示す。

導体の絶縁が完了した後に、カバープレート（CP）と呼ばれる蓋をRPの溝に溶接し、表面を絶縁層で覆い、耐放射線性の高いシアネートエステルとエポキシを混合した樹脂で含浸することでDPが完成する[10]。

完成したDPを7枚積層し、その表面にDP絶縁で用いた絶縁材で絶縁を施工し、樹脂含浸を行うことでWPが完成する[11]。絶縁の構成は、導体絶縁、DP絶縁、WP絶縁で異なっており、それぞれの耐電圧要求は、直流で2.2 kV, 3.4 kV, 19.0 kVである。また、前述のようにWPは直線部で側面が10度の傾斜を持った楔形状を取るため、7枚のDPのうち、端の2枚は導体のターン数が少なくなっている。図9にDP及びWPの断面図とDPの直線部における断面写真を示す。

3.3 構造物製作

TFCSは大型構造物であることから分割して製作し、それらを段階的に接合し、加工することで、最終的な形状を達成する。まずは、ベーシックセグメントと呼ばれる13個のステンレス製の構成体を製作する[12]。ベーシックセグメントの構成とそれぞれのパーツの名称を図10に示す。運転中のTFコイルにかかる応力は場所によって異なるため、部分ごとに機械特性の要求値が異なる。これに合わせて、ベーシックセグメント製作では、部分ごとに異なるクラスのステンレスを用いている。サブアッセンブリ製作では、AU1からAU3を接合することでAUを製作し、AP1からAP3でAPを、BU1からBU4でBUを、BP1からBP3でBPの4つのサブアッセンブリを製作する[12]。一体化製作時には、AU部分にWP直線部が格納され、BU部分にWP曲線部が格納される。APとBPはそれぞれAUとBUの内周面の蓋の役割を担う。WP同様、TFCSも冷却する必要があるため、クリートやパテでサブアッセンブリ



図8 導体絶縁中のITER TF 導体。絶縁装置は導体を徐々に持ち上げる部分、絶縁施工を行う部分、持ち上げた導体を徐々に下す部分に分けられる。これらの部分は連動してRP上を移動する。

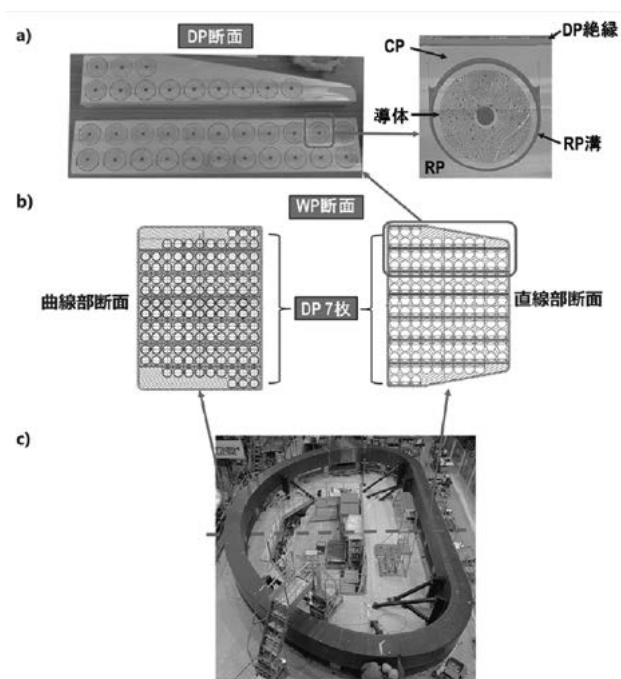


図9 a) ITER TF コイル DP 断面構造, b) WP 断面構造, c) WP 絶縁後の WP 全体図。WP は7枚のダブルパンケーキ (DP) で構成される。各 DP 内には2層3～11ターンの導体が収められている。TF コイルは18基をドーナツ状に並べて組み立てることから、隣接するTFコイルが接触する直線部の断面は角度20度の楔形状である。DPは絶縁を施したTF導体がステンレス製のプレート(ラジアルプレート, RP)の溝に収められ、カバープレート (CP) で蓋をされた構造である。DP表面にも絶縁が施されている (DP 絶縁)。

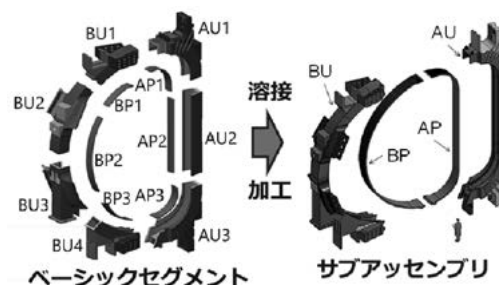


図10 コイル構造物 (TFCS) 構造。まず13個のベーシックセグメント (AU1-AU3, AP1-AP3, BU1-BU4, BP1-BP3) を製作し、それらを溶接して組み立てることで4つのサブアッセンブリ (AU, BU, AP, BP) を製作する。

の内側の面に加工された溝に冷却配管を取り付ける。

TFCSは、隣接するTFコイルとの接続や他の超伝導コイル等の機器の支持構造としての役割を果たすための取り付け部を多く有し、高精度の位置決めのためにこれらの取り付け部には厳しい公差が設定されている。しかし、TFCSは板厚100 mm程のステンレス構造のため、溶接での接合時に大きく変形する。そのため、重要な取り付け部についてはWPとの一体化後に最終形状へ加工することとし、TFCS製作ではこれらの取り付け部には溶接変形を吸収できる程度の余分な厚みを残して、製作完了となる。一体化時の4つのサブアッセンブリは溶接により一体のコイル容器となるが、その溶接部分の合わせには公差が設けられており、合わせが溶接品質を担保できるものであること

を仮組検査により確認する。合わせの公差をはずれた場合、溶接部に段違いや隙間が空き、溶接の難易度は上がり、スラグ巻き込みや融合不良といった溶接欠陥が発生する確率が上がる。サブアセンブリの自重変形は姿勢や支持構造に依存するため、これらの仮組検査は、一体化製作時のサブアセンブリと同じAUの背面を床面に置き、BUが垂直に吊りこまれる姿勢で行う必要がある。

3.4 一体化製作

一体化ではWPとTFCSを一体化する作業を行う。WPをサブアセンブリ内に格納し、サブアセンブリ間を溶接することで、まずはサブアセンブリを一体物のTFCSにする。その後、WPとTFCSの間の隙間を樹脂で埋めることで一体化を行う[13]。TFCSの溶接は100 mmの板厚の構造を完全溶け込み溶接で接合する必要がある、溶接変形が大きくなることが予測されたが、溶接試作や解析により溶接変形を予測し、変形を許容できるだけの余分な厚みを持たせた。そのため、TFCS外面を最終形状に加工することでTFコイルの製作が完了する。また、一体化の含浸に使用する樹脂は、熱収縮率をできるだけWPやTFCSに合わせるためにフィラーを混合しており、最適温度である40℃で混合した場合の粘度でも10 Pa・sと高粘度であった。そのため、一体化作業では、WPをサブアセンブリ内に格納する際の最適位置を予め求めておき、作業を進めた。

4. 製作成果

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11)。CCLノミナル値からの誤差と不確かさにおいては、一部のWPでCCL公差外れがあったが、TFCSとの一体化時に軸調整を行うことで達成できる見込みを確認し、一体化後の全てのTFCでCCL公差を達成した。

2020年、最初に据え付け作業を行うTFC2基(JA01/JA02)が完成し、ITER建設サイトに納入された。2023年7月には日本の最終号機(JA09)が完成し、2023年8月にJA09の輸送を開始し、2023年11月にはJA09がITERサイトに到着した。WP製作を2014年に開始してから、第一ライン・第二ライン共に1基目のコイル製作にはおよそ6年を要し、高精度なCCL位置管理を行いながら納入スケジュールを守るのは困難を極めた。後続号機では、Covid-19感染症拡大などの影響もありながら、製作の効率化などにより製作期間を4～5年に短縮できた。WP製作着手から10年間で9基全てのTFCの製作を完了し、ITERプロジェクトの推進に貢献した。

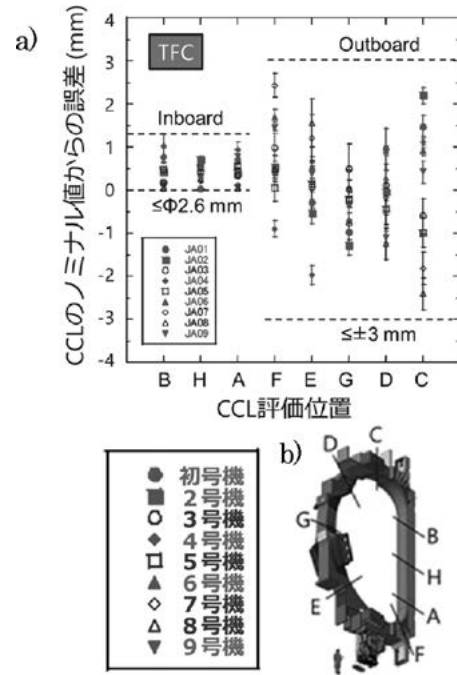


図11 CCL位置制御結果。WPとTFCSの一体化作業は直線部を床面に置いた垂直姿勢で実施されたため、特にCCL位置公差の厳しい直線部において自重変形の影響が懸念された。TFCSに対し、WPを曲線部で内面から押し上げることで、直線部のWPの浮き上がりをTFCSと同程度となるよう補正を行った。TFCSに設けられた確認用の穴からWPとの相対位置の変化量を確認し補正確認を行った。

現在、ITER機構では、当初予定されていなかった4K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機構に到着したスベアコイルをはじめとする3基*に対して4K試験を行う計画となっている。

参考文献

- [1] N. Mitchell *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **18**, 435 (2008).
- [2] 名原啓博 他：プラズマ・核融合学会誌 **92**, 396 (2016).
- [3] T. Hemmi *et al.*, Nucl. Fusion **64**, 066010 (2024).
- [4] M. Nakahira *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 086039 (2019).
- [5] R.J. Buttery *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 056111 (2012).
- [6] Y. Takahashi *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 113015 (2011).
- [7] 名原啓博 他：低温工学 **47**, 140 (2012).
- [8] M. Nakamoto *et al.*, TEION KOGAKU **55**, 401 (2020).
- [9] 諏訪友音 他：低温工学 **55**, 319 (2020).
- [10] 井口将秀 他：低温工学 **55**, 328 (2020).
- [11] 梶谷秀樹 他：低温工学 **55**, 338 (2020).
- [12] 井口将秀 他：低温工学 **47**, 193 (2012).
- [13] M. Nakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **61**, 116044 (2021).

*年会発表当時は3基だったが、現在の計画では5基となっている。