



## プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

### 3. ITER トロイダル磁場コイルの製作

#### 3. Manufacture of Toroidal Field Coil in ITER

辺見 努, 梶谷秀樹, 松井邦浩, 櫻井武尊, 井口将秀, 水谷拓海, 坂口香織,  
山根 実, 安藤真次, 中本美緒, 高野克敏, 中野俊英, 稲垣 隆,  
HWANG Se-Sub, 田中信彦, 猪野昌信, 中平昌隆, 小泉徳潔  
HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiro, SAKURAI Takeru,  
IGUCHI Masahide, MIZUTANI Takumi, SAKAGUCHI Kaori, YAMANE Minoru,  
ANDO Shinji, NAKAMOTO Mio, TAKANO Katsutoshi, NAKANO Toshihide, INAGAKI Takashi,  
HWANG Se-Sub, TANAKA Nobuhiko, INO Masanobu, NAKAHIRA Masataka and KOIZUMI Norikiyo

\*国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付日: 2015年12月7日)

ITER トロイダル磁場 (TF) コイルは19個が製作され, 日本はそのうちの TF コイル 9 個と全数の TF コイル構造物の製作を担う. TF コイルでは, D 型形状に巻線し, 熱処理した巻線をラジアル・プレート (RP) 溝に挿入するため, RP 溝と導体の隙間が 2~3 mm と小さいことから, 導体長として 0.02% (1 ターン約 34 m に対して 7 mm) で巻線長を管理する必要がある. この技術課題を解決するため, 1) 高精度巻線技術の確立, 2) 熱処理前後の導体伸びの予測, 3) RP 組立時の RP 溝長の調整により, この技術的困難に立ち向かうこととし, その他の要素技術の開発も含めて実規模試作により, 製作技術を実証するとともに, 2014年より実機 TF コイルの製作を開始した.

#### Keywords:

fusion, superconducting coil, Nb<sub>3</sub>Sn, winding, toroidal field coil, ITER

#### 3.1 はじめに

国際熱核融合実験炉 (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 [1]. これらのコイルシステムの総重量は, 約 10,500 t に及ぶ. この中で, 日本原子力研究開発機構 (原子力機構) は日本の国内機関として, 予備 1 個を含めた 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. TF コイルは 1980 年代から設計活動及び研究開発を重ね, 2008 年に調達取決めを締結した. TF コイルの製作工程を加速するため 2 メーカーと契約し, これらの契約の中で, TF コイルの製作技術を確認するため, 要素技術の開発及び実規模試作を実施するとともに, 2014 年 3 月より実機 TF コイルの製作を開始した. 現在, 実機 TF コイルの第 1~3 号機の製作を進めている.

#### 3.2 TF コイル [2]

##### 3.2.1 TF コイルの構造

TF コイルは, ITER の骨格を成す主要機器であり, プラ

\*現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

ズマ閉じ込めを行うとともに, 超伝導コイルシステムの全体に作用する重量及び電磁力を支持する. TF コイルに作用する電磁力は, 向心力が約 400 MN, 転倒力が約 50 MN にも達する. これらの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 2 に示すように, 高さ 16.5 m, 幅 9 m, 総重量約 300 t で, これまでに製作経験のない大型超伝導コ

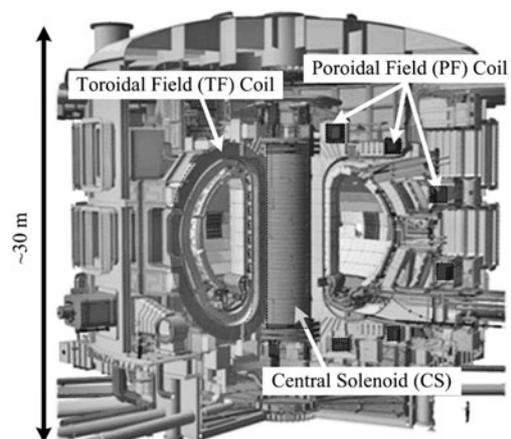


図 1 ITER 超伝導コイルシステム.

corresponding author's e-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

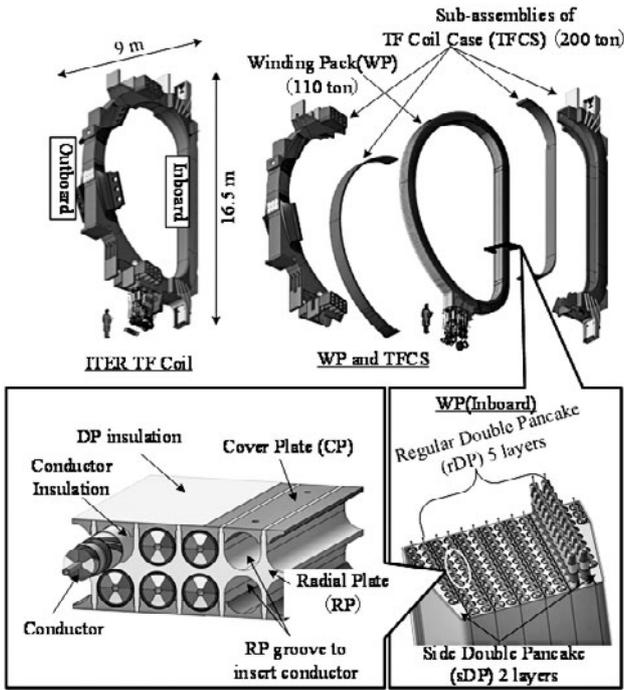


図2 ITER TF コイル.

イルであり、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線を撚り合わせた撚線とステンレス鋼製の金属管で構成される TF 導体を巻線して含浸した巻線部とコイル容器で構成されている。表 1 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、電気絶縁の機械的及び電氣的信頼性を高めるおくことが求められる。このため、TF 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 TF 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板に挿入し、カバー・プレート (CP) を被せて導体を固定する構造としている。Nb<sub>3</sub>Sn を生成するために、熱処理を実施する必要がある。Nb<sub>3</sub>Sn が脆性材料であることから、熱処理後に0.1%以上の曲げ歪を加えることができない。このため、D 型形状に巻線し、超伝導生成熱処理を実施した後、RP 溝に導体を挿入する。

3.2.2 TF コイルの製作プロセス

TF コイルの製作手順のうち、ダブル・パンケーキ (DP) は図 3 に示すとおり、TF 導体を製作する極から TF 導体を受け取り、1) TF 導体を D 型形状に巻線し、2) Nb<sub>3</sub>Sn 生成のため、超伝導線メーカ毎に指定された熱処理 (650℃, 約200時間) を行い、3) RP の溝に、絶縁テープ

表 1 ITER TF コイルの主要パラメータ.

Outer diameter of conductor	43.7 mm
Diameter of cable	39.7 mm
Jacket material	SS316LN
Number of coils	18
Number of DPs	7 (5rDPs + 2sDPs)
Conductor length in DP	760 m / rDP, 415 m / sDP
Nominal current	68 kA
Nominal field	11.8 T

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 (CP 溶接)、5) 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て製作する。巻線部は、サイド DP (sDP) 2 枚と標準 DP (rDP) 5 枚の合計 7 枚の DP を積層し、絶縁、含浸して製作される。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。

3.2.3 TF コイルの技術課題

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り、これらを解決するための要素技術の開発及び実規模試作を実施する必要があった。

- 1) D型形状に巻線し、熱処理した導体を RP 溝に挿入することから、導体長として±0.02% (1 ターン約 34 m に対して±7 mm) の高精度で巻線長を管理する必要がある。
- 2) ITER の20年間の運転により約 10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> の中性子、10 MGy の放射線照射を受けるため、機械特性の劣化が生じない電気絶縁材料を開発し、DP 及び巻線部を絶縁する必要がある。
- 3) rDP では、長さ約 1.5 km にわたって、sDP では上下面で非対称に約 400 m と約 200 m にわたって、CP

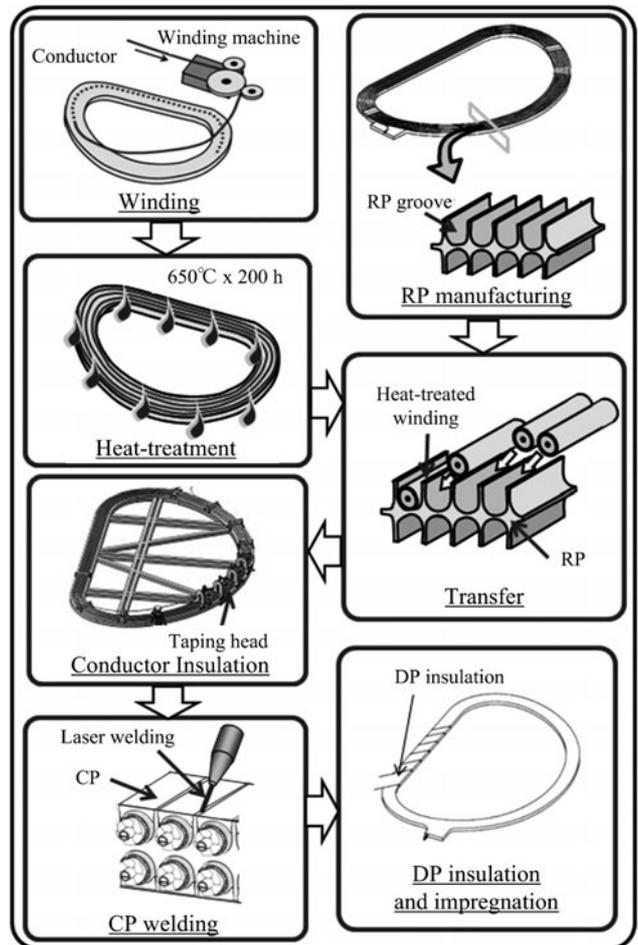


図3 TF コイルの製作プロセス [4].

溶接（レーザー溶接）を行い、CP 溶接による変形として DP の平面度は  $\pm 2 \text{ mm}$  以下とする必要がある。

- 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 [4]。
- 5) TF コイルは、高さ  $16.5 \text{ m}$  × 幅  $9 \text{ m}$  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。

### 3.3 TF コイル製作技術の開発 [3-5]

最も困難と考えられた技術課題は、巻線を RP 溝に挿入するために巻線長を  $\pm 0.02\%$  で管理することである。これを解決するため、1) 高精度巻線技術の開発、2) 熱処理による導体伸びの予測、3) RP 組立時の RP 溝長の調整により、この技術的困難に立ち向かうこととした。これらの技術開発について、実機 TF コイルの製作結果を踏まえつつ、技術開発の成果について述べる。なお、実規模試作では、一方の製作メーカがダミー-rDP とダミー-sDP と呼ばれる 2 個の実規模 DP を試作し、もう一方の製作メーカがダミー-rDP 2 と呼ばれる 1 個の実規模 DP を試作している。

#### 3.3.1 高精度巻線技術の開発 [6]

従来のエンコーダを用いた測定では、導体にローラを接触させ、その回転数を測定することでローラの円周と回転数から導体の長さを測定する。この方法では、エンコーダと導体との間に滑りが生じるため、長尺導体の場合、発生したエラーは蓄積され、大きな誤差となる。導体長の管理目標を  $\pm 0.01\%$  とするためには、新たな導体長測定方法が必要であった。そこで、図 4 に示す光学的測定法が開発された。これは、導体表面にレーザーでマーキングし、CCD カメラを用いてマーキング間の距離を測定し、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、エンコーダの誤差は蓄積されず、CCD カメラ間の距離 (3 m) で誤差を補正することが可能となる。加えて、曲げ開始前に 1/4 ターンに相当する導体長でマーキングし、D 型形状に巻かれた TF 導体を置く架台上の正確な位置に

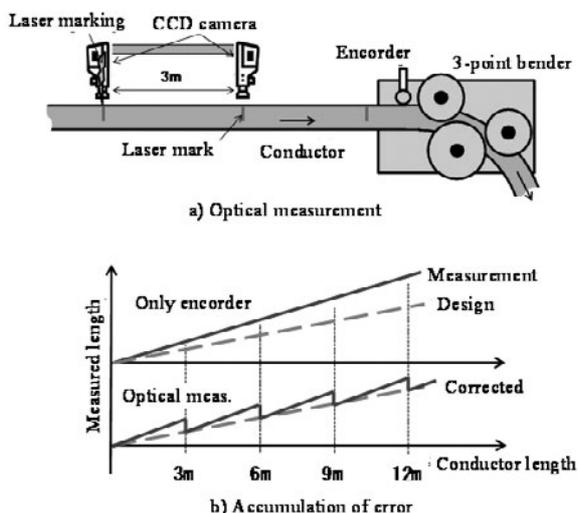


図 4 光学的測定法を用いた導体長の管理。

付けたマーキングとのずれ量に合わせて、図 5 に示すように、導体長を補正する方法を考案した。この 1/4 ターン補正法は、曲げによる導体長の変化など、CCD カメラを通過した後に導体長が変化しても対応できる管理手法である。

開発した巻線システムを用いて、図 6 に示すダミー-sDP を含め、3 回の実規模試作を実施した結果、図 7 に示すとおり、すべての巻線において導体長の管理目標である  $\pm 0.01\%$  以下 (各ターンのバラツキも  $\pm 0.006\%$  程度) となり、巻線時の導体長の管理目標を達成した。実機巻線においても、図 8 に示すとおり、管理目標を達成していることを確認している。

#### 3.3.2 熱処理前後の導体伸びの予測 [7]

直状の短尺導体及び数ターンの実規模サイズの巻線の熱処理結果から熱処理前後の導体の伸び量を予測し、ダミー-sDP の熱処理による TF 導体の伸び量のバラツキを評価した。その結果、伸び量は  $0.061\% \pm 0.006\%$  であった。ターンの違いによる伸び量のバラツキは  $\pm 0.006\%$  であったこと

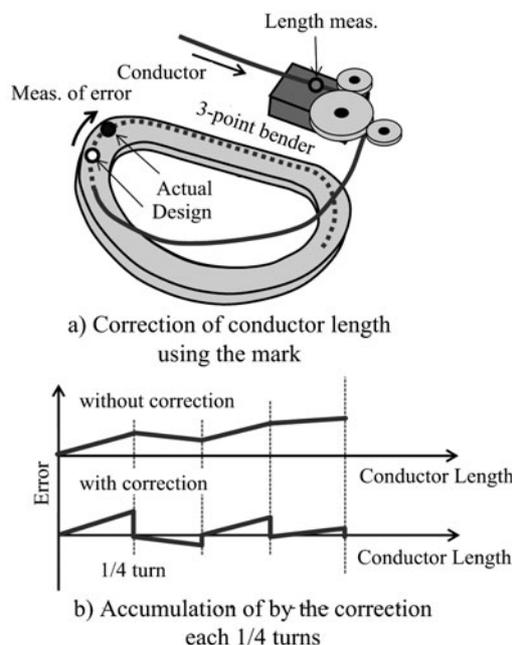


図 5 1/4 ターン補正法。

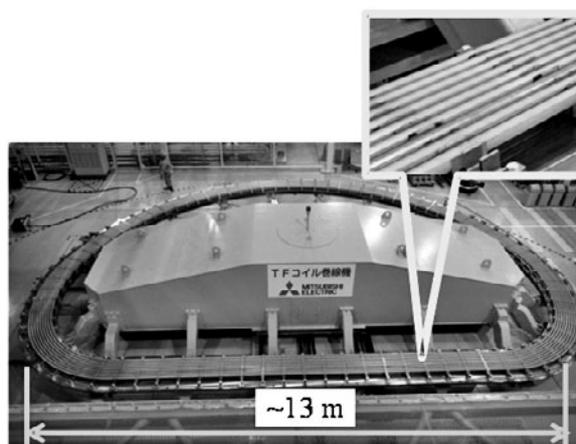


図 6 巻線が完了したダミー-sDP。

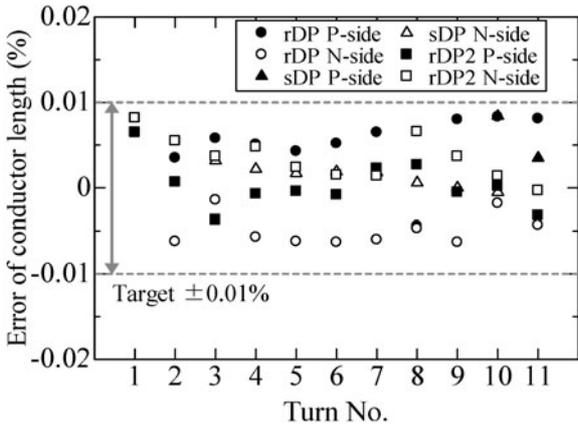


図7 実規模試作における巻線結果.

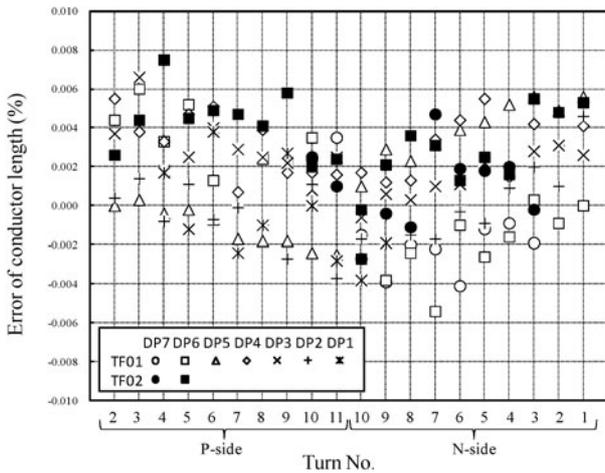


図8 実機の巻線結果.

から、導体毎のバラツキも同程度と考えられ、伸び量の予測の目標とした $\pm 0.01\%$ を達成できる目途が得られた。

この成果をもとに、図9に示す熱処理炉を用いて、実機巻線の熱処理を実施した結果、図10に示すように、試作結果と同様であることが確認された。なお、データの蓄積とともに予測値は修正を続けている。

3.3.3 RP組立によるRP溝長の調整[8-10]

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 $\pm 0.03\%$ の裕度を追加できる。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11に示すように、RPを10体の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を考案した。

3.3.4 巻線のRPへの挿入の実証

RP溝長の調整による導体長の裕度は $\pm 0.03\%$ であるが、

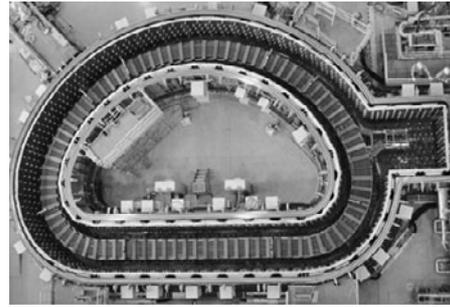


図9 熱処理炉に設置された巻線.

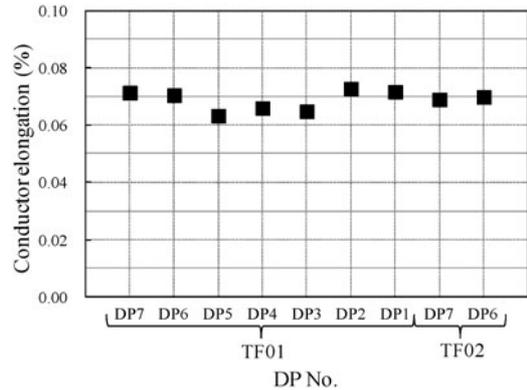


図10 実機巻線の熱処理結果.

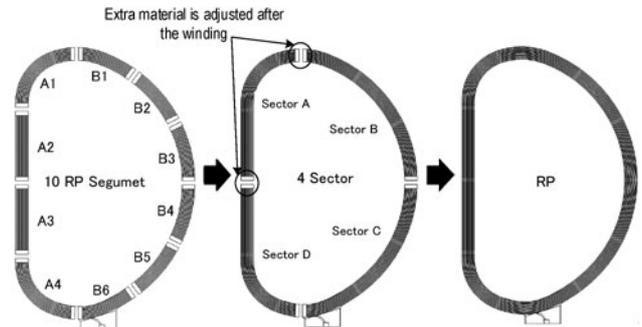


図11 RPの製作手順.

これは各ターンで同じ長さの余長で調整するものであるため、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 $\pm 0.02\%$ の裕度は各ターンのバラツキに対応できる裕度である。これまで述べた巻線、熱処理及びRP製作による誤差を表2にまとめた。誤差<裕度となっており、RP溝に巻線を挿入可能であるとの目途を得た。巻線のRPへの挿入では、図12に示すように上下に開いた巻線間に知恵の輪のようにRPを挿入し、RPの溝にTF導体を挿入する。次に、RPの溝に挿入した巻線の一部を取り出して、導体に絶縁テープを巻き付け、再びRP溝に挿入する。図13に示すように絶縁された巻線をRPに挿入できることを確認し、最も困難と考えられた巻線長の管理技術に関する一連の技術開発に成功した。

3.3.5 耐放射線性電気絶縁テープの開発[11-12]

ITERの20年間の運転中に、TFコイルの電気絶縁材は $10^{22}$  n/m<sup>2</sup>の中性子、10 MGyに放射線照射及び19 kVの高電圧に耐えることが要求される。TFコイルの電気絶縁材

表2 導体長の裕度と誤差.

	Margin	Error
Average	Adjustment of the length of RP groove $\pm 0.03\%$	Winding $\pm 0.01\%$
		Heat-treatment $\pm 0.01\%$
Deviation from average	Gap between RP groove and conductor $\pm 0.02\%$	RP manufacturing $\pm 0.006\%$
		Winding $\pm 0.006\%$
		Heat-treatment $\pm 0.006\%$

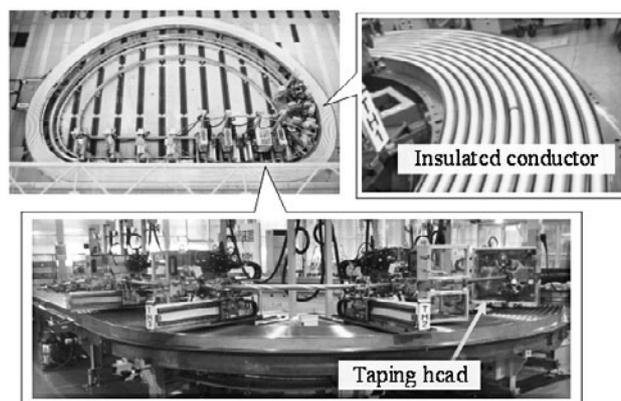


図13 RP溝に挿入された導体絶縁後の巻線.

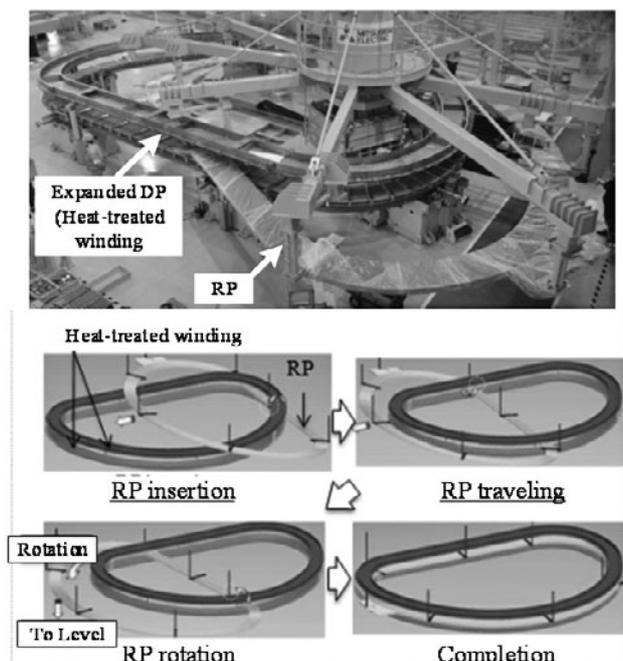


図12 熱処理後の導体をRPに挿入する手順.

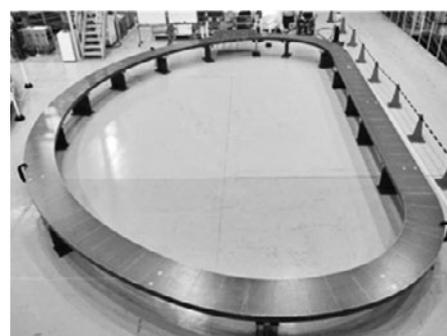


図14 含浸・加熱硬化されたダミー rDP.

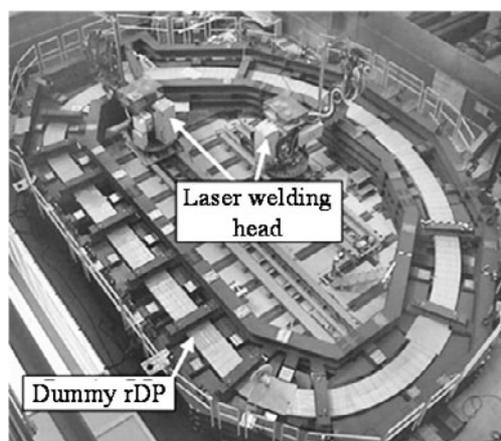


図15 CP溶接設備とCP溶接されたダミー sDP.

として用いられるポリイミドとガラス繊維は接着され、積層テープとして導体の周りに規則的に巻きつけられて樹脂を真空含浸で浸透させ加熱硬化することで形成される。これまで超伝導コイルに用いられてきた接着剤を用いた積層テープは放射線環境での性能が十分でなく、その開発が重要な技術課題であった。放射線に強い低温(150℃程度)で硬化する樹脂は粘度が低いため、積層テープの接着剤に適さなかったが、低い硬化温度と高い耐放射線性を両立し、粘度を最適化した接着剤用の樹脂を新たに開発した。この樹脂を用いた積層テープを用いて試験片を製作し、110 MGyの放射線照射を行ってもTFコイルの要求値である65 MPaを満足するせん断強度を有することを確認した。開発した積層テープは、図13に示すように実機でも電気絶縁材として適用されている。図14はDP絶縁後に真空含浸し、加熱硬化されたダミー rDPである。

### 3.3.6 CP溶接技術の確立[13]

巻線をRPに挿入した後、CPを被せて、CPとRP間をレーザー溶接して接合する。図15に示すように、CP溶接設備はRPの中に10 kW出力の2つの溶接ヘッドを有するため、2か所で同時に溶接することが可能である。CP溶接設

備のコミッショニングの後、ダミー rDPの溶接を実施した。その結果、レーザー溶接前後の溶接変形は平面度で0.55 mmとなり、目標とした2 mmを達成した。上下部の面内変形1.7 mmが目標値を満足できなかったが、これは巻線部とコイル容器との隙間で吸収可能である。これより、CP溶接技術の検証が完了し、実機DPの溶接を2015年7月より実施している。

### 3.3.7 コイル容器の製作技術の確立[14, 15]

TFコイル容器は完全オーステナイト・ステンレス鋼製であり、最大260 mmとなる厚肉溶接が必要なため、大きな溶接変形が生じる。しかし、最も厳しい箇所である輪郭度4.0 mmの公差が要求されるため、溶接品質を確保しつつ、かつ厳しい公差が達成できる溶接変形制御方法の確立

が必要であった。そのため、溶接変形の評価及び実規模試作を実施し、製作メーカーの製作方法に合わせて各ステップの終了時における寸法管理値を決定した。

これらによって決定した製作方法を適用し、コイル容器の製作を、2013年4月から開始した。第2号機目以降の製作では、リスクを低減するために、この第1号機の製作結果を確認し、適切に製作方法に反映することとした。そのため、第1号機の各ステップの終了時に、溶接変形を寸法管理値内に制御し、かつ溶接品質に問題がないことを確認した後に次号機以降の溶接を段階的に開始することとしている。これらの段階を経ることで、製作方法の技術的妥当性を確認している。現在製作中の第1号機のインボード側コイル容器の写真を図16に示す。

### 3.4 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)高精度巻線技術の開発、2)熱処理前後の導体伸び量の評価、及び3)RP溝長の調整、の3本柱を技術開発のターゲットに定め、技術開発を行うことにより、これに成功した。その他についても耐放射線性電気絶縁材の開発、CP溶接技術及びコイル容器の製作技術の確立など、段階的ではあるが、着実に技術課題を解決している。これらにより、開発した製作方法を適用し、TFコイルの実機製作を開始しており、12個の巻線、7個の熱処理及び5個のRPの製作を完了している。現在、ITER計画のスケジュールを堅持するべく、実機TFコイルの製作を進めているところである。

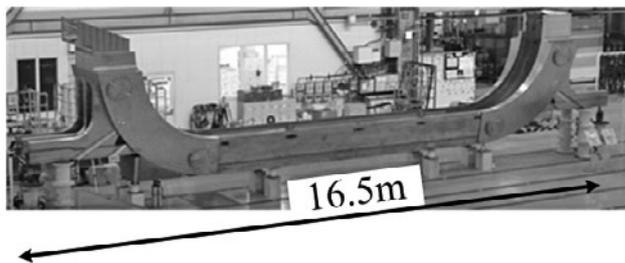


図16 製作中のインボード側コイル容器（第1号機）。

### 参考文献

- [1] N. Mitchell *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **84**, 113 (2009).
- [2] 小泉徳潔ら：低温工学 **47**, 135 (2012).
- [3] K. Matsui *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24**, 4203105 (2014).
- [4] K. Matsui *et al.*, Procurement of ITER Toroidal Field coil in Japan<sup>1)</sup>, presented at ISFNT-12, P0369, (2015)
- [5] N. Koizumi *et al.*, Progress in Procurement of ITER Toroidal Field Coil in Japan, presented at MT-24, 4OrCB, (2015)
- [6] 松井邦浩ら：低温工学 **47**, 160 (2012).
- [7] 松井邦浩ら：低温工学 **47**, 166 (2012).
- [8] 高野克敏ら：低温工学 **47**, 178 (2012).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. Hemmi *et al.*, *Adv. Cryog. Eng.* **60**, 154 (2014).
- [12] 辺見 努ら：低温工学 **47**, 172 (2012).
- [13] 小泉徳潔ら：低温工学 **47**, 186 (2012).
- [14] 井口将秀ら：低温工学 **47**, 193 (2012).
- [15] T. Sakurai *et al.*, Development of manufacturing technology for ITER TF Coil Structure, presented at ISFNT-12 P0434, (2015).