

# ITERトロイダル磁場コイルの実機製作に着手

Start of Manufacturing of Toroidal Field Coils for ITER Project

大勢持 光一 柳 寛 油 晶紀  
 ■OHSEMOCHI Koichi ■YANAGI Yutaka ■ABURA Masakazu

ITER (国際熱核融合実験炉) のトロイダル磁場 (TF) コイルは、高温かつ高密度のプラズマを閉じ込めるための高磁場を作る役割を持つ主要機器の一つである。このTFコイルは、これまでに製作経験のない大型の超電導コイルで、巻線の製作や構造物の溶接組立てなどに高い製作精度が要求されるという技術課題がある。

東芝は、この課題を解決するために専用の製造装置を開発し、種々の研究開発やモックアップによる試験検証を実施し、世界最大級の実機超電導コイルの製作に着手した。

ITER is an international project being promoted by seven member entities including Japan with the aim of demonstrating the technological and scientific feasibility of fusion energy. ITER uses toroidal field (TF) coils to produce high magnetic fields that confine the high-temperature and high-density plasma needed to generate a fusion reaction. As the TF coils, equipped with superconducting conductors, are huger than ever before, there is a strong need for extremely high-accuracy winding and welding technologies.

In response to this situation, Toshiba has developed and introduced various manufacturing technologies and equipment based on the knowledge it has accumulated through its research and development efforts in this project. After verification of manufacturability, we started manufacturing the world's largest class TF coils for ITER, including four TF coils and six TF coil structures (TFCS), in 2015, with shipments scheduled to commence in 2017.

## 1 まえがき

ITER (国際熱核融合実験炉) 計画<sup>(1)</sup>は、核融合発電装置の工学技術の検証を目的として2020年の“ファーストプラズマ”点火を目指し<sup>(2)</sup>、日本、EU (欧州連合)、ロシア、米国、韓国、中国、及びインドの7極の国際協力で進められている。

ITERの主要機器の一つであるTFコイルは、高温かつ高密度のプラズマを閉じ込めるための高磁場を発生させるとともに、コイルシステム全体に掛かる電磁力や重量を支持する役割を持っている<sup>(3)</sup>。ITERは18基のTFコイルで構成され、TFコイル1基は、高さ16.5 m、幅9.0 m、質量約300 tのD字型形状をした最大磁場12 T (テスラ) の世界最大級の超電導コイルである (図1)。

TFコイルは超電導コイル部であるワインディングバック (WP) と、WPを収納するコイル構造物 (TFCS) から成る (図2)。

WPは7層のダブルパンケーキ (DP) コイルから構成され、DPコイルは、2層の超電導導体 (以下、導体と略記) の巻線とこれに挿入したラジアルプレート (RP) から構成される。

一方TFCSは、四つのサブアセンブリから構成され、各サブアセンブリは三つ又は四つのベーシックセグメントから構成される。

東芝は、1990年代のITER工学設計活動から参画しており、2008年から始まった詳細製作設計及び実規模製作試験を通じて、これまでに1/3サイズのDPコイルや実機大RPの製作、及びTFCSの試作を実施し、製作検証を積み重ねてきた。そして、2013年にわが国の分担分であるTFコイル9基の

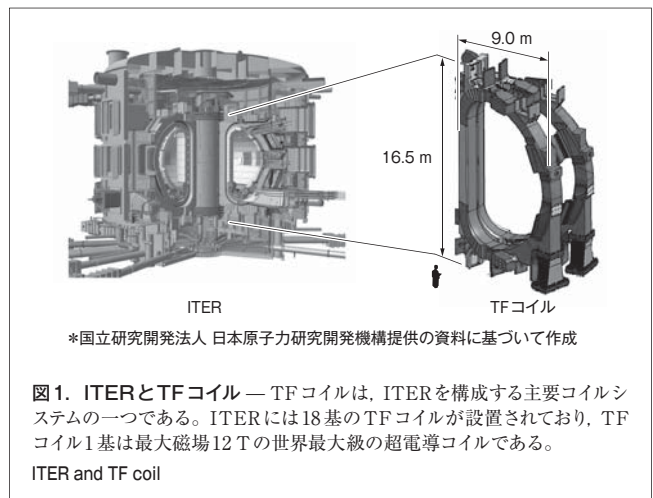


図1. ITERとTFコイル — TFコイルは、ITERを構成する主要コイルシステムの一つである。ITERには18基のTFコイルが設置されており、TFコイル1基は最大磁場12 Tの世界最大級の超電導コイルである。  
 ITER and TF coil

うち4基、及びEUで製作されるTFコイル10基 (予備1基を含む) のうち6基に使用するTFCSの製作を受注した。2017年から順次納入する計画で、実機製作を2015年に開始した。

## 2 TFコイルの製作工程

TFコイルの製作は、RPの製作、DPコイルの製作、WPの製作、及びTFCSの製作に分けられる<sup>(3)</sup>。それぞれの製作工程について、以下に述べる。

(1) RPの製作 RPは電磁力を支持するためのステンレス

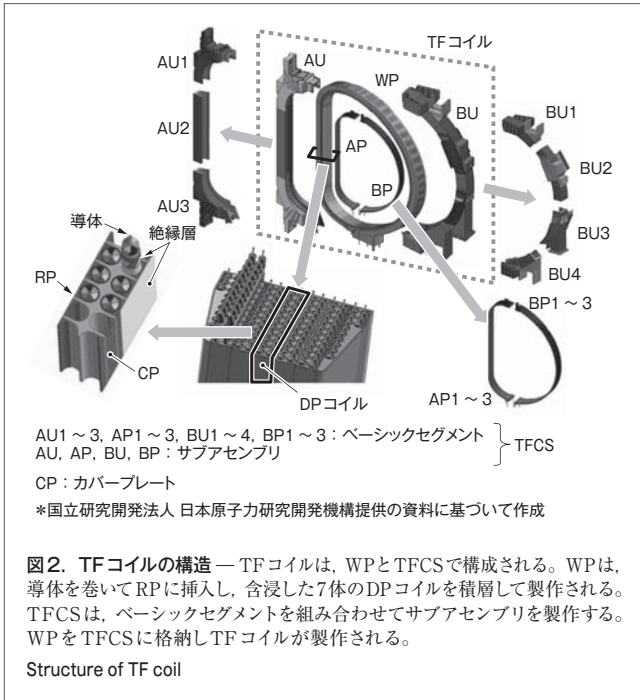


図2. TFコイルの構造 — TFコイルは、WPとTFCSで構成される。WPは、導体を巻いてRPに挿入し、含浸した7体のDPコイルを積層して製作される。TFCSは、ベーシックセグメントを組み合わせてサブアセンブリを製作する。WPをTFCSに格納しTFコイルが製作される。  
Structure of TF coil

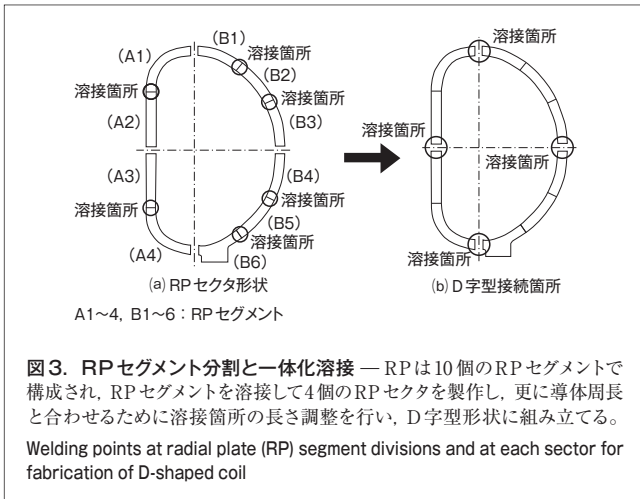


図3. RPセグメント分割と一体化溶接 — RPは10個のRPセグメントで構成され、RPセグメントを溶接して4個のRPセクタを製作し、更に導体周長と合わせるために溶接箇所を長さ調整を行い、D字型形状に組み立てる。  
Welding points at radial plate (RP) segment divisions and at each sector for fabrication of D-shaped coil

製構造物で、表裏面にらせん状の溝（以下、RP溝と呼ぶ）加工が施されたD字型形状をしていて、10個のRPセグメントから構成される（図3）。

- (a) RPセグメント製作 10個のRPセグメントを機械加工により製作する。
- (b) RPセクタ製作 複数のRPセグメントを溶接して、D字型を4分割したRPセクタを製作する。
- (c) RP一体化 RPセクタをD字型に組み合わせ、RPセクタ間を溶接してRPを製作する。
- (2) DPコイルの製作
  - (a) 巻線 導体（直径0.82 mmの超電導素線を約1,000本より合わせ、直径43.7 mm、厚さ2 mmのステンレス製保護管に入れたもの）を上下2層のD字型らせん状に巻く。

各層は11ターンで、合計22ターンとなる。

- (b) 熱処理 超電導生成化処理のため、導体巻線に650℃で200時間の熱処理を行う。
- (c) トランスファ 熱処理後の導体表面に絶縁テープを巻き付け、(1)で述べたRP溝に導体を挿入し、導体を固定するためにカバープレート（CP）をかぶせて溶接する。
- (d) 含浸 コイル全体に絶縁を施し、耐放射線性樹脂で含浸してDPコイルを製作する。
- (3) WPの製作 DPコイル7体を積層し、DPコイル間のターミナルを接続した後、更に耐放射線性樹脂で対地絶縁を施し、WPを製作する。
- (4) TFCSの製作 ステンレス構造材から成るベーシックセグメントを溶接組立てにより製作し、更にそれぞれのベーシックセグメントを組み合わせることで四つのサブアセンブリを製作する。
- (5) TFコイルの製作 WPをTFCS内に格納し、溶接及び含浸して一体化することにより、TFコイルが完成する。

### 3 TFコイルの製作技術上の課題と対策

#### 3.1 DPコイルの製作技術

DPコイルの製作では、熱処理した導体をRP溝に挿入する。干渉することなく導体をRP溝に挿入するためには、導体とRP溝との周長誤差を $\pm 0.023\%$ （1ターン34 mに対し $\pm 7.8$  mm）以内にする必要がある。熱処理により導体長が変化するため、熱処理前後の導体長変化を予測した巻線軌道を設定してコイルを巻かなければならない。したがって、高精度で巻線周長及び導体曲率を管理しながら製作する巻線装置の開発及び製作方法を確立する必要がある。

そのために、エンコーダに直結したローラを導体に押し付け、導体の移動量を計測し、一定間隔でレーザーマーカによるライン印字を行う。これをエンコーダで認識し、画像処理で補正することで、導体の送り量を正確に計測する導体測長システムを開発した。その結果、導体周長を目標の $\pm 0.02\%$ 以下に対し $\pm 0.01\%$ （ $\pm 0.1$  mm/m）以内で管理できるようになった（図4）。巻線ヘッドには、これまでの開発実績を基に、3点ロールベンド式を採用した（図4）。D字型に成型する巻線ヘッドの制御パラメータを決定するため、導体の曲げ検証試験を実施し、巻線ヘッドによる導体押込み量と成型曲率との関係を求め、DPコイルの実規模試作による巻線検証を行った。その結果、導体の曲率成型精度を目標の $\pm 10\%$ 以内に対し約 $\pm 5\%$ 以内で管理できる制御手法を確立した。

また、熱処理後の導体は、その周長を正確に測定して、結果をRP製造に反映させ、導体をRP溝に挿入できるようにする（3.2節参照）。ガラステープにポリイミドテープを貼り合わせた絶縁テープを導体に数層巻き付けながらRP溝に挿入して

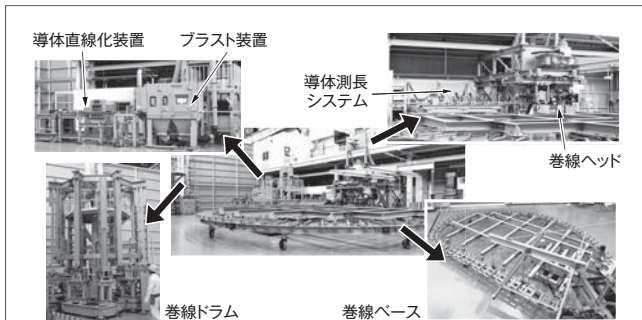


図4. コイル巻線システム — 巻線ドラムから引き出された導体は、いったん直線化され、表面がプラストされた後、測長システムを通り、巻線ヘッドで所定の曲率に曲げられ、巻棒であるD字型形状の巻線ベースに収められる。

TF coil winding system for double-pancake (DP) winding

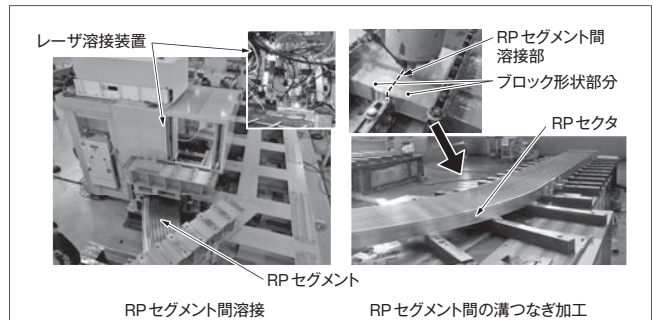


図6. RPセグメント間溶接とRPセグメント間の溝つなぎ加工 — 複数のRPセグメントを溶接治工具で固定し、端部ブロック部でレーザ溶接接続を行う。レーザ溶接及びTIG溶接後、RPセグメント間溶接部の溝つなぎ加工を行い、RPセクタを製作する。

Welding and groove machining between RP segments

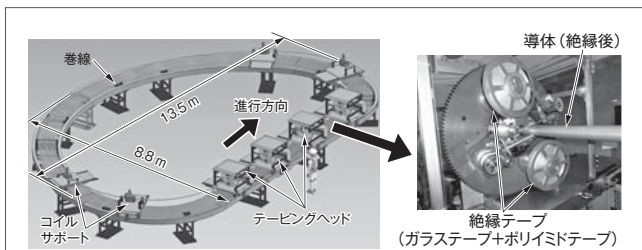


図5. 絶縁テーピングシステム — 導体絶縁テーピングシステムは、テーピングヘッド4台とその前後に連結されるコイルサポート各2台で構成される。8台が自動で同時に走行し、導体を持ち上げたり降ろしたりしながら、導体に絶縁テープを多層に巻いていく。

Taping system for insulation of superconducting conductor

いくトランスファ工程では、超電導性能を劣化させないように、導体に与える歪み(ひずみ)を0.1%以下に管理しなければならない。そのためには、導体に歪みが掛からないようにしながら絶縁テープを巻き付ける、テーピングシステムが必要である。

これを実現するために、導体に巻線方向に沿った歪みを与えないように、RP溝挿入前の導体を徐々に持ち上げながら走行し、自動で絶縁テーピングを行うテーピングシステムを開発した(図5)。このテーピングシステムは、張力の変動を±10%以下に制御して、均一な力で導体に絶縁テープを巻き付けることができ、巻きピッチや巻き方向が異なる様々なテーピングを同時に行うことができる。更に、導体巻線に沿って動く自走式装置の開発により、省スペース化も図った。

### 3.2 RPの製作技術

RPの製作では、RP全体を10個のRPセグメントとして製作する。その際、両端をブロック形状に残し、それ以外の部分に対してRP溝の加工を行う。2章で述べたようにこれらのRPセグメントを溶接接続してRPセクタを製作し、更にRPセクタを溶接接続してD字型形状にする。溶接するRPセグメント端部の厚さは120mmと非常に厚くなるため、中央の約1/3の厚さ部分の溶接には溶接収縮量を小さくできる30kW高出力

レーザ溶接を使用し、両側残り1/3の厚さ部分を狭開先TIG(Tungsten Inert Gas)溶接で行う溶接施工法を採用した。

またRPとして組み立てたときには、熱処理後の導体周長とRP溝周長を合わせる必要がある。そのため一体化溶接の際に、各RPセクタの溝周長と個々の熱処理後の導体周長とを測定し、溶接によるRPセクタ間の溶接収縮量を考慮してRPセクタ両端のブロック長さを決定し、周長差を小さくする製作方法を選択した。

2015年12月現在、DPコイル実規模試作用の各RPセグメント加工を完了させ、RPセクタ製作(溶接組立て、及びRPセグメント溶接部溝の機械加工)を行っている(図6)。

### 3.3 TFCSの製作技術

TFCSは、4Kという極低温での機械強度を向上させた完全オーステナイト鋼材料で製作される大型溶接構造物である。TFCSのサブアセンブリは、三つ又は四つのベーシックセグメントを溶接してコの字型に製作される(図2のAUとBUの場合)。構造物は120~250mmと厚く、かつTFCS内にWPを格納するため寸法公差及び幾何公差に対する要求が厳しいので、両側狭開先TIG溶接を採用し、変形を抑制及び管理して溶接を行う。2015年12月現在、TFCSベーシックセグメントのモックアップを用いて、溶接施工と製作方法の検証を進めている(図7)。

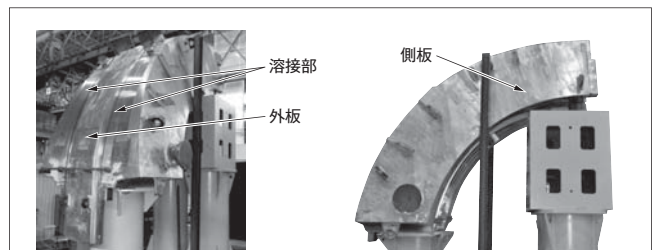


図7. モックアップによるTFCS製作検証 — AU1ベーシックセグメントの実機大モックアップを用いて、溶接組立ての検証を実施した。

Verification test using mockup for TFCS manufacturing

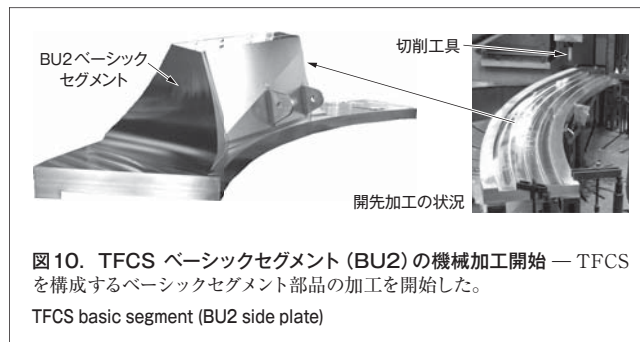
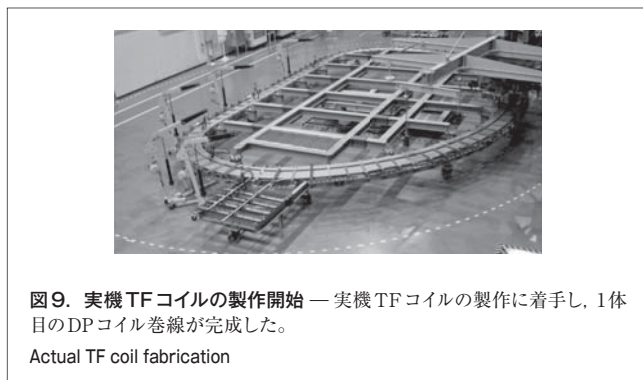
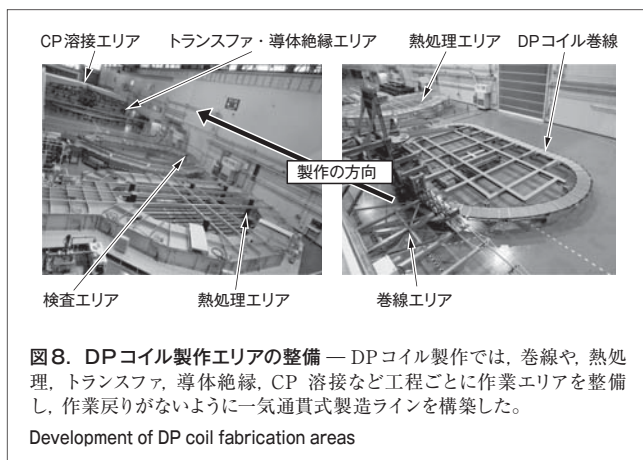
## 4 TF コイル製作エリアの整備

TFコイルの製作には数多くの作業工程があり、広大な製作エリアが必要である。そのため製作エリアを分割して対応している。超電導コイル製作を得意とする当社で主にコイル巻線などWPの製作を、ターンミラーや大型ガントリなど大型機械加工機と、大型構造物の加工や組立てが可能なエリアを持つIHI・東芝パワーシステム(株)(TIPS)でRPやTFCSサブアセンブリの製作、更にWPとTFCSを一体化するTFコイル組立製作までを行う。

DPコイルの製作では、温度管理や粉じん制限などの厳しい製作環境条件に対応するために、当社の京浜事業所内にエリア最少化を図ったDPコイル製作エリアを整備し、製造工程の流れに沿ってワークが動いていく一気通貫式製造ラインを構築した(図8)。また、TIPS内にも専用のRP組立エリアを整備し、専用溶接機を設置し対応している。

## 5 TFコイルの製作

TFコイル製作に向け、DPコイル実規模試作による製作検証やTFCSモックアップによる溶接検証など、種々の研究開発を実施しながら、2015年4月から実機DPコイルの製作(図9)



及びRPセグメントの加工を開始した。また、TFCSベーシックセグメント部品の単品加工にも着手した(図10)。DPコイルの実規模試作による検証などの結果を、順次製造プロセスにフィードバックし、全TFコイルの製作を進めていく。

## 6 あとがき

核融合発電装置の工学技術を検証するためのITER計画は、フランス カダラッシュでの建屋建設が進められており、本格的に核融合炉機器の製作フェーズに突入した。

主要機器であるTFコイルは、これまでにない高い製造技術が要求される世界最大級の超電導コイルである。当社はこれまでの豊富な実績を基に、更なるブレイクスルー技術を開発し、ハードルの高い製造技術課題をクリアしながら、コイル製造を推進していく。

## 文 献

- (1) 日本原子力研究開発機構, "ITERとは?". 国際熱核融合実験炉 ITER. <<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/>>, (参照 2015-12-19).
- (2) Arnoux, R. "THE ART OF MIXING FUELS". ITER NEWSLINE 222. <<http://www.iter.org/newsline/222/1164>>, (accessed 2015-12-19).
- (3) 小泉徳潔 他. 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, 3, 2012, p.135 - 139.



大勢持 光一 OHSEMOCHI Koichi

電力システム社 京浜事業所 機器装置部主査。  
核融合・超電導機器の設計・開発に従事。プラズマ・核融合学会、低温工学・超電導学会会員。  
Keihin Product Operations



柳 寛 YANAGI Yutaka

電力システム社 京浜事業所 機器装置部主査。  
核融合機器などの開発設計・製作に従事。プラズマ・核融合学会会員。  
Keihin Product Operations



油 晶紀 ABURA Masakazu

電力システム社 京浜事業所 原子炉機器部主査。原子炉内構造物など大型製缶構造物の設計・製作に従事。日本原子力学会会員。  
Keihin Product Operations