

# 大型超伝導コイルの製作

## Fabrication of Large Superconducting Coil

小泉 徳潔  
Norikiyo Koizumi

量研機構 ITERプロジェクト部 超伝導コイル開発Gr  
Superconducting Coil Technology Group, Department of ITER Project, QST

### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構（量研機構；QST）は、ITERにおける日本の国内機関として、ITERトロイダル磁場コイル[1]（Fig.1：スペア1個を含み19個。以下、簡単のためにTFコイルと記す。）のうち9個のTFコイル、19個分のコイル容器の調達を担当している。TFコイルは、ITERの超伝導コイルの中でも最大の超伝導コイルであり、かつ、製作の難易度も最も高いコイルである。本稿では、TFコイルの製作方法、技術的課題を説明するとともに、その製作の進捗を報告する。

### 2. TFコイルの製作方法

TFコイルでは、超伝導導体を巻線して含浸した巻線部（WP）とこれを格納する構造物（コイル容器）で構成されている（Fig.1）。Table 1にTFコイルの主要緒元を記す。TFコイルは、20年に渡って安定に運転する必要があり、大電磁力に対する電気絶縁の機械的、電氣的信頼性を高めるために、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の溝に挿入して、カバー・プレート（CP）を被せて導体を固定する構造を採用している。詳細なTFコイルの構造については、[1]を参照されたい。

TFコイルの製作フローは、以下のとおりとなる。1) RPのセグメントを機械加工で製作し、最終組立前の4分割RPセグメントまで組み立て、2) これと並行して、1コイル当たり長さ4.6kmのTF導体を、高さ約14m、幅約9mのD型に数mmの寸法公差を満足するように巻線し、3) 冷媒入口部、ジョイント部を取付け、4) Nb<sub>3</sub>Sn生成のための650°C、100時間以上の熱処理を行い、導体長を測定し、5) これにRP溝の周長が合致するように、4分割RPセグメントの最終組立を行い、6) RPの溝に、ガラス・テープとポリイミド・テープを積層して巻き付け

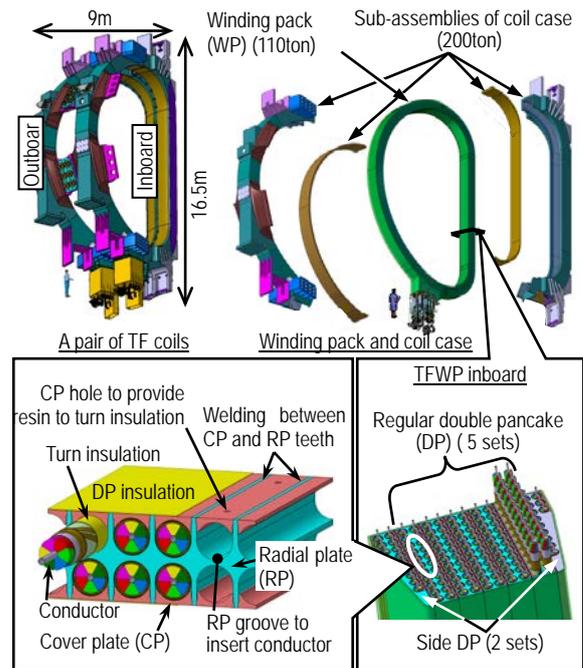


Fig.1 ITER TF coil and structures

Table 1 Major parameters of ITER-TF coil

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

た導体を挿入（トランスファー）し、7) 導体固定用のCPを被せ、CPをRPにレーザー溶接し、8) ダブル・パンケーキ（DP）全体にガラス・テープとポリイミド・テープを積層して巻き付け、9) 導体絶縁とDP絶縁を同時に耐放射線性の樹脂で含浸し、10) 2枚のサイドDP（sDP）と5枚の標準DP（rDP）の合計7枚のDPを積層し、DP間のジョイントを接続し、11) これらに耐放射線性の樹脂で対地絶縁を施して巻線部を製作し、12) 巻線部と並行してサブ・アッ

センプリと呼ばれる4つのコイル容器セグメントも製作し、13) 巻線部とこれらのサブ・アッセンブリを組合せ、溶接、含浸することで、TFコイルとして一体化する。

### 3. TFコイル開発の主な技術課題

TFコイルの製作では、その大きさに関わらず、数mm程度の厳しい寸法公差が要求されており、主な技術課題[1-5]は、この厳しい寸法公差に起因する。以下に、これらの主な技術課題を記す。

- 1) 熱処理後の導体をRP溝に挿入するトランスファでは、巻線及び熱処理によって導体長が伸縮するにもかかわらず、熱処理後の導体長とRP溝の長さの差を $\pm 0.02\%$ の高精度で管理する必要があった。RPの組立時に、巻線と熱処理による導体長の誤差を吸収する方法が考案された。しかし、本方法を採用しても、 $\pm 0.05\%$ の公差を達成する必要がある。
- 2) rDPでは長さ約1.5kmに渡って、sDPでは上面と下面で非対称に約500mと約250mに渡って、CP溶接(レーザー溶接;LBW)を行うが、DPの平面度として3mm、7DPを積層したWPの電流中心(CCL)の輪郭度としてインボード(IB)で2mm、アウトボード(OB)で4mmが要求されている。
- 3) 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、及びその溶接技術を確立する必要がある。
- 4) TFコイルでは、約 $10^{22}$  n/m<sup>2</sup>の中性子照射を受けるため、このレベルで機械特性の劣化を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。

ITER TFコイルの製作では、上記の課題を解決しながら製作を進めている。以下に、これらの解決策と製作の進捗を記す。

### 4. ITER TFコイルの製作進捗

トランスファでは、 $\pm 0.01\%$ の高精度の光学的巻線導体長の測定システムを開発し、また、熱処理による導体の伸びも標準偏差40ppmの



Fig. 2 Completed DP.

高精度で一致しており、 $\pm 0.05\%$ の公差を十分満足できた。これらの結果から、現在では、熱処理を待たずに予めRPの組立を実施できるようになっており、13DPのトランスファを成功裏に完了している。

CP溶接では、LBWの順番を最適化し、10DPのCP溶接を完了し、平面度2.1mm~2.8mmを達成している。各DPのCCLについては、OBで一部公差を満足できていないが、7DPの平均値となるWPのCCLでは、輪郭度の公差も達成可能と予測している。

RP、構造物の製作では、30kWのLBW溶接技術を開発するなどして、溶接変形を小さく抑えることに成功し、TFコイル2機分のRP製作を完了させるとともに、コイル容器IBの最終加工を進めている。

DP含浸については、耐放射線性樹脂(シアネート・エステル)とエポキシを混合した新樹脂を開発し、加えて、導体絶縁層内のボイドを1%以下に抑える含浸技術を開発し、7DPの含浸を完了し、平面度2mmも達成している。Fig.2に含浸後のDPを、Fig.3に最終機械加工前のIBの写真を示す。

以上のように、TFコイルの製作は、多くの課題を解決しながら、順調に進展している。

### 謝辞

TFコイルの製作では、三菱重工、東芝、三菱電機、現代重工を始めとする多数のメーカーに協力を頂き、技術的課題を解決しながら進めています。これらのメーカーのご協力に感謝します。

### 参考文献

- (1) ITER TFコイル特集号: 低温工学, 47(2012) 135-139
- (2) N. Koizumi, et al. "Study of the Manufacturing Process of the ITER TF Coil Winding pack," Fus. Eng. Des., 84 (2009) 210-213
- (3) K. Matsui, et al., "Trial Fabrication of One-Third Scale Double Pancake of ITER Toroidal Field Coil", IEEE Trans., 22 (2012) 4203005
- (4) M. Iguchi, et al., "Development of Structures for ITER Toroidal Field Coil in Japan", IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 (2012) 42-33-58
- (5) N. Koizumi, et al. "Full-scale trial results to qualify optimized manufacturing plan for ITER Toroidal Field coil winding pack in Japan", Proc. of 25th IAEA Fus. Ene. Conf., FIP/1-3.



Fig. 3 Inboard sub-assembly during welding among basic segments.