

## S7-3

ITER TFコイル開発から学んだこと、そして原型炉への展望

### 3) ITER TFコイル巻線部の製作

## Lessons learned from ITER TF coil development and load to DEMO

### 3) Manufacturing of Winding Pack of ITER TF Coil

柳 寛  
YANAGI Yutaka

東芝エネルギーシステムズ株式会社 京浜事業所  
Kehin Product Operations, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

#### 1.はじめに

東芝エネルギーシステムズ(株)では、ITER TFコイル(TFC)2機(図1)とTFCS(コイル構造物)6機を、2021年11月までに完成させた。現在TFC3,4機目の最終製作工程を進めている[1]。

ITERにとってTFCは重要機器の一つであることから、製作精度をはじめ品質管理の要求が高い。要素技術開発や部分試作検証などを経て、TFCの製作技術を確立した。一方、製作工程の長期化や経済的な影響が課題となった事は否めない。

本稿では、ITER TFCの製作経験から課題と技術的成果を述べる。それらに基づき、現在基本設計が進められている原型炉超伝導コイルへ向けた提言を行い、近い将来、原型炉を経て核融合による商用発電を実現させるための一助としたい。尚、TFC主要諸元及び製作手順は「S7-1」にて、またRP、TFCS、一体化溶接の製作経験からの知見については、「S7-4」にて詳細を報告する。

#### 2.ITER TFコイル製作の課題と技術的成果

1) 導体巻線時は、曲げ成型により周長が伸びる。また、超伝導(Nb<sub>3</sub>Sn)生成のための熱処理を実施することで、さらに導体周長が変化する。加えて、RPの製作誤差も重畳し、熱処理後の巻線導体がRP溝に挿入不可能となる懸念があった。これを回避するには、熱処理後の巻線導体周長誤差とRP溝周長誤差の和を、±0.02%以下に管理する必要がある。一方、導体は国内外4極で製作され、個々に熱処理後の周長変化特性が異なる。そのため、各極で製作された導体に対し、予め熱処理試作試験にて熱処理後の長さ変化量を測定、予測した。また、実機巻線導体の熱処理を複数回経験することで周長変化量データを蓄積し、統計的にその予測量を補正した。それに基づき、熱処理後に設計形状となる様、巻線形状を決定した。前記の通り、巻線

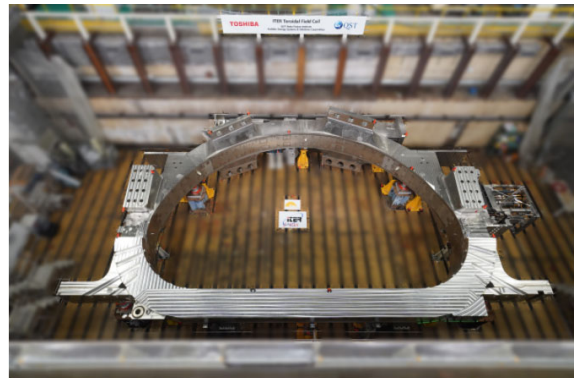


図1. 完成後のITER TFコイル

出典 : [https://www.toshiba-energy.com/info/info2021\\_0608.htm](https://www.toshiba-energy.com/info/info2021_0608.htm)

時も周長が伸びるため、1m毎の光学的周長測定管理と1/4ターン毎(約9m)の周長補正を繰り返した。同時に、導体実体温度測定からの周長温度補正を実施した。その結果、熱処理後巻線導体周長誤差とRP溝周長誤差の積算を±0.01%以下(3.5mm/ターン)に抑えることが可能となり、RP溝周長を設計値で製作することが可能となった。

2) トランスファーでは、DPのパンケーキ間を開き、その空間内でRPを水平、上下、傾斜、回転と複雑な運動を制御する必要がある(図2)。また、Nb<sub>3</sub>Sn導体の超伝導性能劣化防止から、導体に加わるひずみを0.1%未満とするため、パンケーキ間の間隔も制限する必要がある。このため、予め検証用巻線導体でひずみ状態を測定し、ひずみ制限を超過させないDPパンケーキ間の間隔を400mmとした。また、その空間制限内でのRPの運動手順をシミュレーションし、トランスファー装置制御系へ反映した。さらに、導体及びRPの実体温度差も管理することで、各々の周長方向相対位置誤差を±3mm以下で挿入させることを実現した。

3) CP溶接では、DPのP、N面各々1.5kmずつの長い溶接線長をLB(レーザービーム)溶接する。また、sDPではP、N面が非対称形状であ

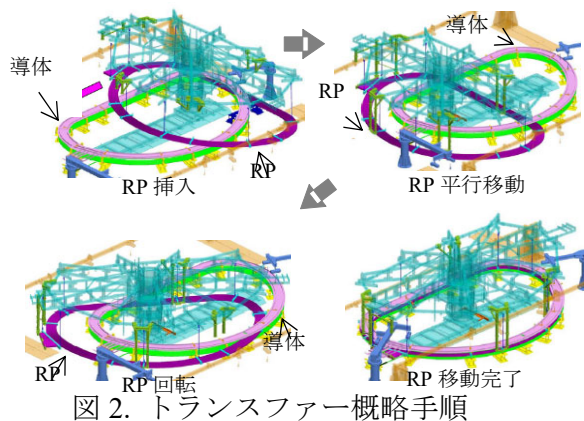


図 2. トランスファー概略手順

るため、DP 面外変形が大きくなり、DP 積層後の WP 厚(トロイダル方向寸法)が大きくなり過ぎる懸念が有る。そこで、数値計算と部分溶接検証から、P、N 面反転タイミングも含めた溶接手順を最適化し、DP 平面度 2mm 以下を達成した。一方、特に CP-CP 間溶接では肉厚 4mm に対して、溶け込み深さ 2.5mm 以上の要求があり、直下の導体絶縁層まで、1.5mm の裕度のみであった。そこで、単体溶け込み試験を繰り返して溶接条件を最適化し、0.01mm オーダーの溶け込み制御を達成して絶縁損傷リスクの回避を実現した。

4)DP 及び WP 絶縁含浸では、専用の含浸容器に DP 又は WP を格納し、乾燥炉内に設置して真空加圧含浸した。特に WP はその質量及びサイズから含浸装置システム自体も大型化し、製造エリアを大きく占有した。また、含浸時は温度均一化が必要となるが、外部加熱では WP 内部に温度時間遅れが発生する。予め数値計算を実施して予測し、含浸時にはコイル抵抗を常時測定しかつ外表面の温度測定と併用し、含浸時の WP 温度均一性を確保することが可能となった。

5)一体化工程では、WP と TFCS 間にフィラー入りの高粘度樹脂を適用する必要がある。DP/WP 樹脂と比較して粘度約 200 倍であるが、ポットライフは約 1/4 であるため、床面から約 10m 高までを短時間で送液させなければならない。そのため、含浸システムの大規模化が必要となってしまった。尚、WP への外部加熱は不可能であることから、コイルへの通電加熱方法を採用し、TFCS へは外部加熱方法とした。

最終一体加工では、実体温度差によって比較的大きな寸法差が発生する可能性がある。一方、大型機械加工機設置建屋の全空間を恒温槽とすることは容易では無い。そのため、予め基準長バー測定による機械制御の補正と、加工中の逐次実体温度測定からの再補正を併用するこ

とで、0.1mm オーダーの高精度加工を達成した。

### 3.原型炉超伝導コイル製作への提言

#### 1)コイル構造と製作プロセスの合理化

ITER TFC 製作の中では、DP から WP への製作プロセス及び期間が最も多い。RP 構造が採用されたため、DP の製作難易度向上に加え製作工程も長期化した。前項 1)~3)に記載した内容は、RP 構造であるが故に必要な製作プロセスを示している。原型炉では、導体絶縁の信頼性向上を達成することで RP 構造を採用しない構造もオプションとし、特に DP 製作プロセスの大幅な合理化を図ることを期待する。

#### 2)製作精度の合理的設定

ITER TFC ではサイズや質量が超大であるにも関わらず、製作公差はほぼ一様に 0.01-0.1mm オーダーが要求された。高精度光学的計測の多用による計測期間の長期化や要素製造技術開発期間も必要となった。原型炉では、誤差磁場補正コイルの積極的採用なども考慮し、製作精度の合理的な設定を期待する。

#### 3)製作エリア、ユーティリティ、製造装置・治具

ITER TFC では、専用製造装置・治具やその大型化及び複数化などの影響により、DP/WP 製作エリアのみで約 6400m<sup>2</sup> 超を占有した。さらに RP、TFCS、一体化のエリアが加わる。また、一体化最終加工では、希少な高剛性高精度の超大型機械加工機が必要とされた。原型炉の TF コイルのサイズでは、さらに広大な工場が必要となり、建設地近接に専用工場新設の必要性も考えられる。前記 1)で提案した合理化などにより、経済的影響を抑えることは必要であろう。

#### 4.おわりに

原型炉の TF コイルでは、ITER サイズから約 1.5-2 倍の規模となる計画である。ITER の延長線上では、製作技術及び品質管理の難易度は、より増大するであろう。また、超巨大プロジェクトとなることから、技術者をはじめとする早期人材育成も必要となる。近い将来、原型炉を経て核融合による商用発電を実現させるためには、国民の理解を得ることが必要であり、製作性合理化等による経済的成立性を説明していくことが重要である。

#### 参考文献

- [1]大勢持, 柳, 油: 東芝レビュー, 71, 1 (2016)
- [2]諏訪, 梶谷ら: 低温工学, 55, 319 (2020)
- [3]井口, 梶谷ら: 低温工学, 55, 328 (2020)
- [4]梶谷, 中本ら: 低温工学, 55, 338 (2020)
- [5]M.Nakamoto ら: 低温工学, 55, 400 (2020)
- [6]M.Nakamoto ら: 低温工学, 55, 409 (2020)