

## ITER TFコイル開発から学んだこと、そして原型炉への展望

## 1) 要旨説明

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

## 1) Introduction

小泉 徳潔

Norikiyo Koizumi

量子科学技術研究開発機構

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

## 1. はじめに

「2050年カーボンニュートラル」の実現のための新たなエネルギー源として、近年、核融合発電が一候補として期待されている。核融合エネルギーを社会に受け入れてもらうためには、CO<sub>2</sub>を出さない、燃料が海に無尽蔵にあるなどの核融合発電のアドバンテージだけでなく、適切なコスト競争力も必要となる。

一方、ITERの最重要機器であり、先行して製作が開始されたITER TFコイル、真空容器の製作には長期間を要しており、その分、コスト競争力も低くなっている。このため、核融合発電の実現のためには、これらの機器の製作性の改善が必要と考えられる。

本シンポジウムでは、日本が製作を担当したITER TFコイル製作の経験から、製作性の改善が見込める点を抽出して、その改善策について協議し、今後の原型炉の開発の一助としたい。

本稿では、始めに、ITER TFコイル開発の概要、その主要諸元を説明する。続いて、その製作手順を簡明に説明して、以降の発表の位置付け、本シンポジウムの狙いについてまとめる。

## 2. ITER TFコイルの主要諸元

ITER TFコイルは、図1に示すように、幅9m、高さ16.5m、総重量約310トンのこれまでに製作経験がない大型超伝導コイルであり、超伝導導体を巻線して樹脂を含浸した巻線部(WP)とこれを格納する構造物であるコイル容器(CC)で構成されている。また、その定格電流値、定格磁場は、68kA、11.8Tである。

ITER TFコイルは、20年に渡って安定に運転する必要があり、強力な電磁力を受ける電気絶縁材の機械的、電気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

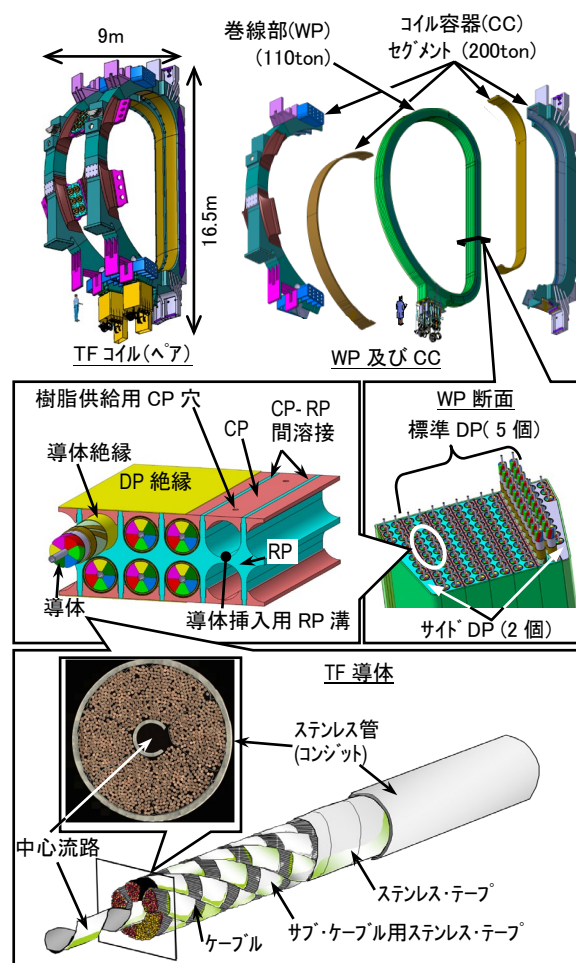


図1 ITER TFコイル

(CP)を被せて導体を固定する構造を採用している(図1参照)。

## 3. ITER TFコイル開発の概要

ITER TFコイルの調達では、日欧で、それぞれ9機(スペアを含む)、10機の製作を分担し、また、全てのCCを含む構造物の製作を日本が担当している。日本では、図2に示すように、これらの製作を2社体制で進めている。

2013年10月のITER TFコイル初号機の製作

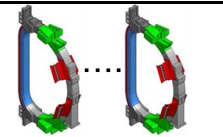
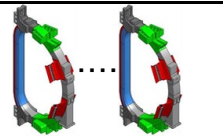
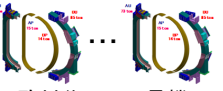
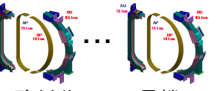
	第一製造ライン (MHI&MELCO&HHI)	第二製造ライン (東芝)
TFC 日本分	 日本分 1,2,3,6,スベアー号機	 日本分 4,5,7,8 号機
TFCS 欧州分	 欧州分 1,2,8,9 号機	 欧州分 3-7,10 号機

図2 日本での TF コイル、構造物の製作分担

着手から 6 年強の年月を費やし、欧州に先んじて、ITER TF コイルの初号機が 2020 年 1 月に日本で完成した。その後、日本の第二製造ラインでも、2021 年 6 月に初号機が完成し、両製造ラインで量産体制で製作を進めている。

#### 4. ITER TFコイルの製作方法

ITER TF コイル WP の製作方法は、以下のとおりである<sup>1-3)</sup>。1) 1 コイル当たり長さ 4.6 km の TF 導体を、高さ約 14 m、幅約 9 m の D 型に巻線し、2) 超伝導体である Nb<sub>3</sub>Sn 生成のための 600℃、200 時間の熱処理を行い、3) 電気絶縁用のテープを積層して巻き付けた導体を RP の溝に挿入し、4) 導体固定用の CP を被せ、CP を RP にレーザー溶接し、5) この全体に電気絶縁用のテープを積層して巻き付け、6) この絶縁層と導体周りの絶縁層を同時に樹脂で含浸して、ダブル・パンケーキ (DP) と呼ばれるコイル要素を製作する。続いて、7) 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、8) 各 DP の導体端部を電氣的に接続し、9) これら全体に対地電気絶縁用のテープを巻いた後に、この絶縁層を樹脂で含浸して WP を完成させる。

なお、RP については、1) 高強度高靱性ステンレス鋼板材料の製作、2) 10 分割した RP セグメントの製作 (主に機械加工)、3) RP セグメントを 4 分割の RP セクターに組立、4) RP セクターの最終組立を行う事で、RP の完成品となるため、RP 製作自体に長期間を要する。

また、WP と並行して 4 つの CC セグメント (図 1 の AU, AP, BU 及び BP) を製作し、1) WP を AU 内に設置し、2) これらと BU を組合せ、3) WP の内周面側に AP, BP をかぶせ、4) これらの CC セグメント間を溶接し、5) WP と CC の隙間を樹脂で充填することで、TF コイルとして一体化し、6) 最後に、取合い部の高精度機械加工を実施する<sup>1-3)</sup>。

なお、CC セグメントの製作も、RP と同様に、高強度高靱性ステンレス鋼板材料の製作から始まり、これらの板材を組立、機械加工する工程を繰り返すことで、最終製品となるものであり、CC の製作にも長期間を要している。

#### 5. シンポジウムの狙い

ITER TF コイルは、巨大でありながら高精度での製作が要求されるなど、これまで製作してきた核融合炉用超伝導コイルに比べて、飛躍的に技術的難易度が高いものである。一方、可能な限りのコスト低減、現実的なスピード (工程) での製作なども要求され、従来の核融合研究開発のスケールを大きく超えた計画であり、巨大プロジェクトとしての観点からも合理的、現実的な開発・製作管理が求められた。

原型炉においても、TF コイルはトカマクの骨子を形成する重要機器であり、ITER TF コイル開発で得た知見 (Lessons Learned) を活かし、技術的にもプロジェクトとしても、より合理的なものとするのが求められるであろう。本シンポジウムでは、ITER TF コイルの製作経験から得られた知見を報告し、原型炉用 TF コイルの開発、製作に向けた議論を展開したい。

本シンポジウムの S7-2 では上述の RP 及び CC の高強度高靱性ステンレス鋼材料の製作について、S7-3 では主に WP 製作と一体化の経験から製作設備の観点から、S7-4 では主に RP, CC 製作と一体化の経験から学んだ知見、課題について報告する。特に、S7-3、S7-4 では、製作メーカーが抱えている問題意識を共有する。S7-5 では、原型炉設計合同特別チームにて国内の超伝導コイルの専門家による原型炉超伝導コイルワーキンググループで議論された結果を踏まえて、超伝導導体、コイル開発全般に関して問題提起し、最後に、これらの議論を踏まえて、現状の原型炉用 TF コイルの設計について説明する。

以上の発表について、シンポジウム参加者と闊達な議論を行い、原型炉の開発の一助とし、核融合発電の実現に拍車をかけたい。

#### 参考文献

- 1) 「特集：ITER トロイダル磁場コイルの開発」、低温工学 47, (3), (2012).
- 2) 「特集：ITER トロイダル磁場コイルの製作技術～巻線部～」、低温工学 55, (5), (2020).
- 3) 「特集：ITER トロイダル磁場コイルの製作技術～構造物及び一体化～」、低温工学 55, (6), (2020).