

核融合用大型超電導コイルの製作

野元一宏* 堀井弘幸*
 湊 恒明**
 長谷川 満***

Manufacturing of Large Superconducting Coils for Fusion Projects

Kazuhiro Nomoto, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa, Hiroyuki Horii

要 旨

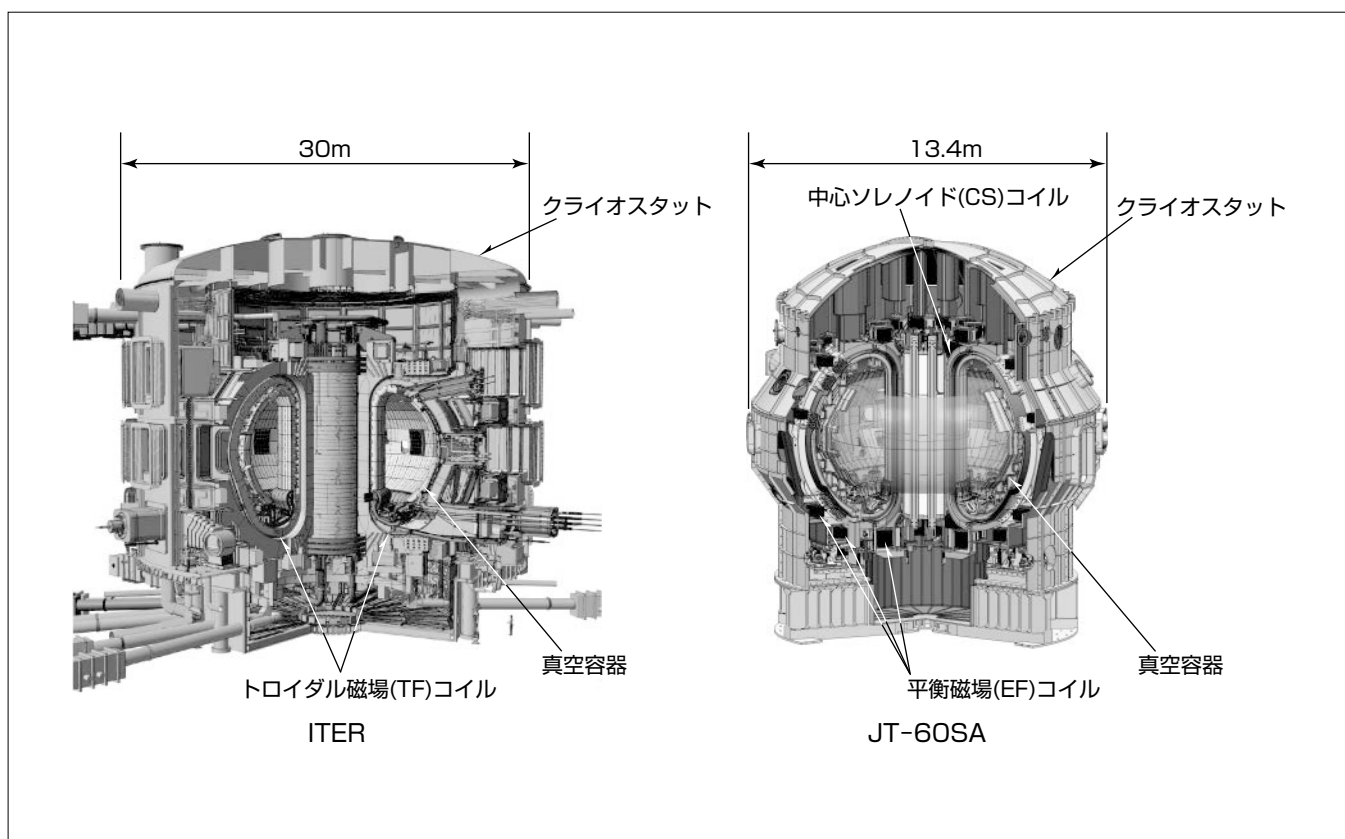
三菱電機は、核融合の科学技術的実証を目的とした国際熱核融合実験炉ITER(イーター)並びにITERの支援及び発電を実証する原型炉への補完研究を目的としたJT-60SA(JT-60 Super Advanced)の超電導コイルの製作に参画している。ITERは、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの7極の国際協力で作製を進めており、フランスのカダラッシュに建設される。

JT-60SAは、日本・EUの国際協力で(独)日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所(以下“那珂研究所”という)のJT-60の真空容器やコイルなどの主要機器を入れ替えて建設される。

ITER及びJT-60SAの構成機器は各極で分担して製作され、当社は日本分担分であるITERのトロイダル磁場コイル(以下、“TFコイル”という。)及びJT-60SAの中心ソレノイドコイル(以下、“CSコイル”という。)・平衡磁場コイル(以下、“EFコイル”という。)の製作を行っている。

本稿では、各超電導コイルの製作概要、技術的課題と当社の取組みを述べる。

本稿では、各超電導コイルの製作概要、技術的課題と当社の取組みを述べる。



ITERとJT-60SAの鳥瞰(ちょうかん)図(提供：日本原子力研究開発機構)

主な装置構成は、プラズマ生成維持に必要な高真空を保つ真空容器、プラズマの生成維持に必要な磁場を発生する超電導コイル、真空容器を保護する真空容器内機器、プラズマを加熱する加熱系、超電導コイルを冷却維持するためのクライオスタットである。

1. ま え が き

当社が製作するITERのTFコイル及びJT-60SAのCSコイル・EFコイルの製作概要、技術的課題と当社の取組みについて述べる。

2. ITERへの取組み

2.1 TFコイル

TFコイルは、真空容器内に生成したプラズマを磁場で閉じ込める役割を持つ。ITERのTFコイルは18個あり、日本とEUで分担して製作する。

TFコイルの構造を図1に示す。高さ14m、幅9m、質量300tのD型の超電導コイルである。

TFコイルのコイルケース内には超電導導体を2層のD型に巻線したダブルパンケーキ(以下“DP”という。)を7個積層した巻線パックが収まる。図2にDPの断面構造を示す。当社は巻線パックの製作を行っている。

2.2 TFコイルの製作手順

外径43.7mmの円形ステンレス鋼のジャケットにニオブ3スズ超電導燃線(よりせん)が入った導体を用いて次の(1)~(8)の工程によってDPを製作する。製作したDP7個を(9)の工程で積層し、絶縁した後、(10)の工程の真空含浸によって加熱硬化することで巻線パックが完成する。

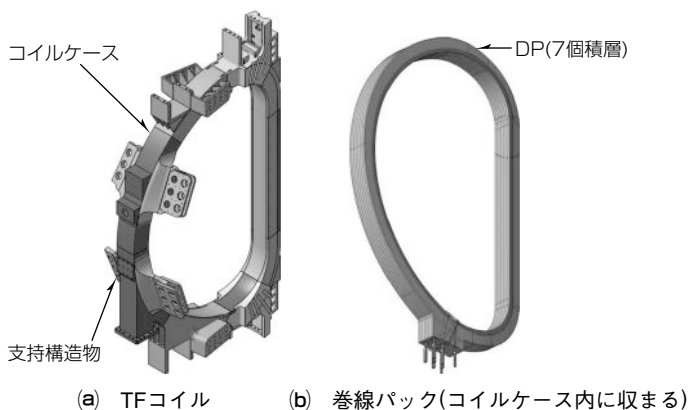


図1. ITERのTFコイル(提供：日本原子力研究開発機構)

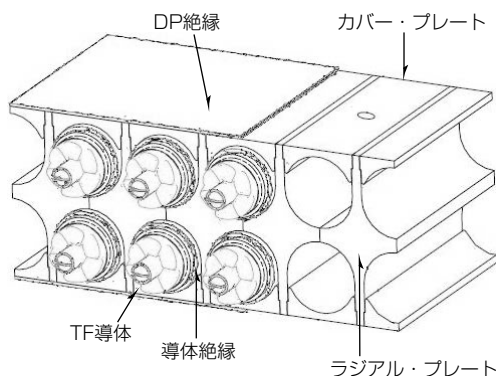


図2. DPの断面構造(提供：日本原子力研究開発機構)

(1) 巻線

3本ロール曲げによる巻線装置を用いて導体をD型2層に曲げ成形する。

(2) 冷媒入口部、ジョイント組立

導体内に液体ヘリウムを流すための冷媒入口部の加工及びDP間を電気接続するジョイント及びターミナルの組立てを行う。

(3) 熱処理

不活性雰囲気又は真空中で650℃×200時間の熱処理を行い、ニオブとスズを反応させ、ニオブ3スズの超電導線にする。

(4) トランスファー

通電時に導体を支持するステンレス鋼の溝型構造物であるラジアル・プレートを層間に挿入する。

(5) 導体絶縁

導体をラジアル・プレートから引き出して絶縁施工した後、溝に戻すことを全長にわたって実施する。

(6) カバー・プレート溶接

ラジアル・プレートの溝にカバー・プレートと呼ぶ蓋をはめ込みレーザ溶接で固定する。

(7) DP絶縁

導体がラジアル・プレートに収まりカバー・プレートが溶接されたDPに対して絶縁を行う。

(8) DP真空含浸

絶縁層にエポキシ樹脂を浸透させ、加熱硬化する。

(9) DP積層、絶縁

7個のDPを積層し、絶縁を行う。

(10) 巻線パック真空含浸

絶縁層にエポキシ樹脂を浸透させ、加熱硬化することで、巻線パックが完成する。

(11) 一体化

ステンレス鋼の大型構造物であるコイルケースに巻線パックを組み込み、封止溶接する。溶接後に真空含浸を行いコイルケースと巻線パック間の隙間を充填材で埋めて硬化させる。

TFコイルは14×9(m)の大型コイルであり、広い製作エリアが必要となる。また、すべての工程で高い品質が要求されており、高度な大型構造物加工及び溶接技術を持つ三菱重工業㈱と連携し、TFコイルの製作を行っている。

2.3 TFコイル巻線パック製作の技術課題

当社は、三菱重工業㈱の二見工場内に当社事業所を設置して巻線パックの製作を行っている。図3に製作した巻線装置を示す。

トランスファー工程でラジアル・プレートに熱処理後の導体を挿入するために、巻線時の導体長の管理及び熱処理による導体伸びの測定が重要となる。熱処理による導体伸びは0.07%程度であり、巻線時は0.01%(1m当たり0.1mm)の精度で導体長を管理する必要がある。巻線時の導体長を



図 3. ITER TFコイルの巻線装置(提供：日本原子力研究開発機構)

精度良く管理するために、巻線装置に導体送り量を測定するシステムを追加した。また、巻線及び導体長測定を温度管理エリアとすることで測定への影響を小さくしている。

曲率半径が変化するD型巻線を精度良く実施するために巻線シミュレーションコードを開発し、巻線装置による成形パターンの検討も行っている。

冷媒入口部やジョイントの組立はサンプル試験で構造や組立要領の確認を実施している。

絶縁材や含浸に使用するレジンの対放射線性や機械的強度についても、サンプル試験によって性能を確認している。

3. JT-60SAへの取組み

3.1 JT-60SAの超電導コイル

図4にJT-60SAの超電導コイル構成を示す。プラズマを生成するCSコイル及びプラズマを制御するEFコイルが日本製作分であり、プラズマを閉じ込めるTFコイルはEU製作分である。

(1) CSコイル

CSコイルは、外径2m×高さ1.6mのCSモジュールを4個積層し、タイ・プレートと呼ばれるステンレス鋼の構造物で予備圧縮を与えた構造である。CSモジュールは、27.9mm角のステンレス鋼のジャケットにニオブ3スズ超電導導線が入った導体を52層に巻線したコイルである。モジュール分の全導体長を1本の導体で賄うことはできないため、1モジュールあたり6か所の導体接続部がある。

CSモジュールは、ITERのTFコイルの製作手順と同じように①巻線、②端部加工、③熱処理、④導体絶縁・層間

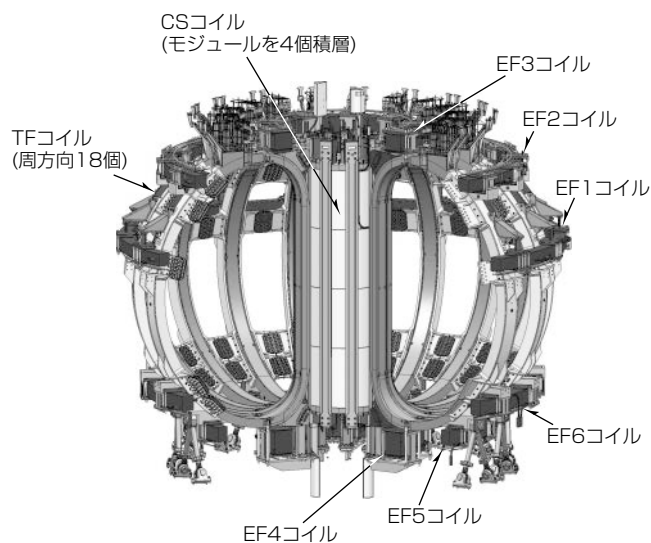


図 4. JT-60SAの超電導コイル (提供：日本原子力研究開発機構)

接続、⑤対地絶縁、⑥真空含浸の手順で製作する。CSモジュールは当社工場で製作し、那珂研究所に輸送する。

(2) EFコイル

EFコイルは、ターン数及びコイル径の異なるEF1～EF6の6種類のコイルがある。コイル外径が4.4m(EF3, EF4)～12m(EF1)と大きいため、EF4以外のコイルは那珂研究所に製作設備を設置して製作を行っている。

EFコイルは、コイルの受ける磁場が低いためニオブチタンの超電導線を使用する。そのため超電導生成熱処理が不要となる。また、コイルの含浸は、ITERのTFコイルとJT-60SAのCSコイルと同様に真空含浸するとコイルを取

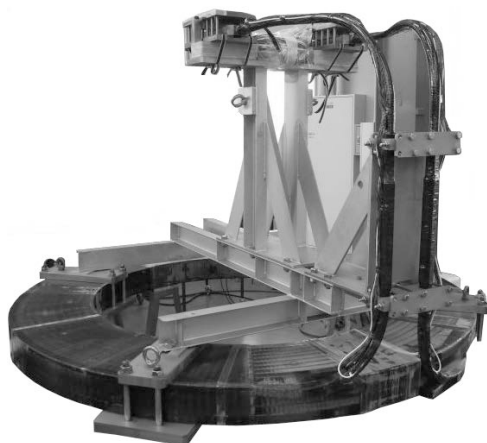


図5. JT-60SAのCSモデルコイル
(提供：日本原子力研究開発機構)

める真空容器の製作コストが高くなるため、レジンをもって浸み込ませた絶縁物を導体に巻き付けて加熱硬化させるプリ・プレグ方式とした。

3.2 CS・EFコイルの技術課題

(1) CSコイル

CSコイルの技術課題としては、TFコイル組立後の装置中心部に挿入するため、クリアランスが小さくコイルの寸法精度が求められる。そこで巻線の精度を高めるために導体の剛性に応じて巻線装置のパラメータを変更する方式とした。

また、導体絶縁を行いながら52層積層する治具は、ガイドによってコイル寸法を確保する構造としている。

導体接続も開発を行い、試験サンプルの励磁試験で接続抵抗の要求値を達成した。

CSコイルは実機モジュール製作前の試験サンプルの製作及び試験が完了し、実機モジュールの一部のコイル巻線を開始した。図5に試験サンプルの一つであるCSモデルコイルを示す。

(2) EFコイル

EFコイルの技術課題としては、プラズマ制御が目的のコイルであるためコイルの電流中心の真円度・平面度が重要となる。電流中心の要求値を達成するために、巻線及び

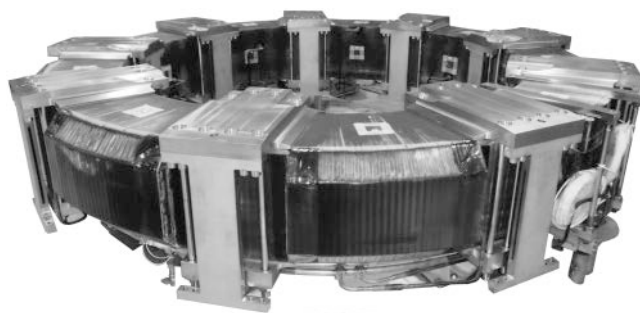


図6. JT-60SAのEF4コイル(提供：日本原子力研究開発機構)

加熱硬化に使用する治具をステンレス鋼の型で製作し、巻線した導体を収めていき、プレスした状態で加熱硬化した。その結果、コイル寸法及び電流中心の真円度・平面度の要求値を満足することができた。

EF4コイルの製作、EF5及びEF6コイルの巻線・加熱硬化が完了し、現在EF5及びEF6の積層の作業に取り掛かっている。図6に完成したEF4コイルを示す。

4. む す び

ITERのTFコイルは、実機製作前のサンプル試験を行っている。JT-60SAは、EF4コイルの製作を完了し、CSコイル及びEF5・EF6コイルを製作中である。超電導コイルは核融合装置の重要機器であり、当社はITER及びJT-60SAの両プロジェクトに参画することで核融合炉の実現に貢献していく。また、基盤となる超電導技術に関しても、経済産業省「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」に参画し技術確立を図っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) Hasegawa, M., et al.: Manufacturing of JT-60SA equilibrium field coils, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 571~574 (2012)
- (2) Yoshida, K., et al.: The Manufacturing of the Super-conducting Magnet System for the JT-60SA, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, **22**, No.3, JUNE (2012)