

# ITER トロイダル磁場コイルの 製作法確立と実機製作

久野和雄\*  
湊 恒明\*\*  
長谷川 満\*\*\*

*Development of ITER Toroidal Field Coil Manufacturing Process*

*Kazuo Kuno, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa*

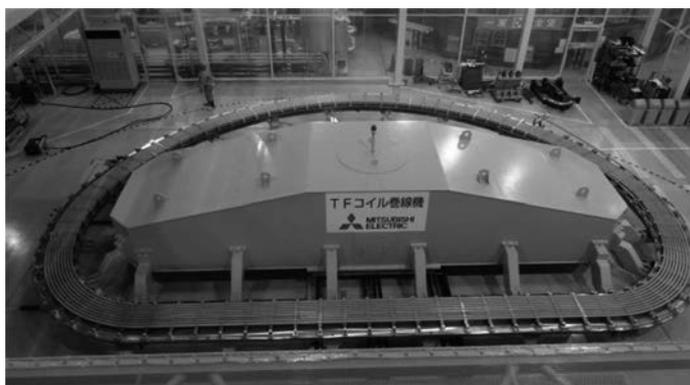
## 要 旨

国際熱核融合実験炉ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)は長時間の核融合反応の実証を目指し、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの国際協力で製作が進められている。三菱電機は、1970年代から核融合実験炉の事業に取り組んでおり、多くの製作実績を活用することで、現在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(Super Advanced)用超電導コイルとともにITERのトロイダル磁場コイル(以下“TFコイル”という。)の製作に参画している<sup>(1)(2)</sup>。

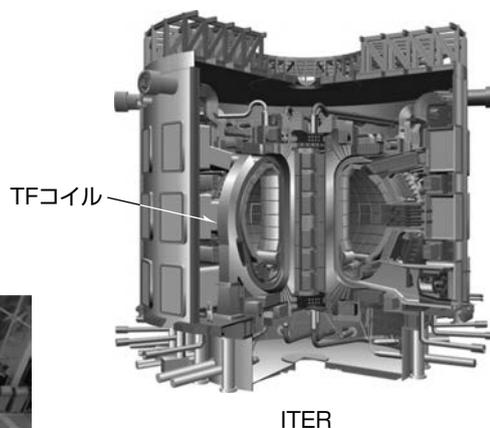
ITERのTFコイルは1コイルが幅9m、高さ15m、質量300トン、巻線パック質量110トンの世界最大の核融合

用大型超電導コイルである。TFコイルの製作は三菱重工業(MHI)と共同受注し、MHI二見工場内で協力して製作を進めている。三菱電機は巻線部分を担当している。

超電導線は高磁場の発生が可能なNb<sub>3</sub>Sn(ニオブ3スズ)であり、巻線後にNb<sub>3</sub>Sn生成のための熱処理が必要である。また、電磁力が強大で、電磁力支持のため導体をラディアルプレートと呼ばれる構造物に組み込む必要がある。これらの点及び超大型コイルであることによって製作が難しく、製作法確立のために各種の試作を行い、技術課題を解決するとともに製作設備の準備を進め、実機量産を開始する段階となっている。



TFコイル巻線



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

## 国際熱核融合実験炉ITERとTFコイル巻線

ITERは直径約30m、質量23,000トンの大型炉である。核融合反応させるプラズマを強力な磁場で閉じ込めるため、大型の超電導コイルが使われる。プラズマ閉じ込めを担うTFコイルは日本とEUで分担して製作される。TFコイルの1コイルのサイズは9×15(m)である。

### 1. ま え が き

三菱電機は2012年ITERのTFコイルの製作をMHIと共同受注した。巻線部を三菱電機が担当し、ラディアルプレートなどの構造物をMHIが担当している。TFコイルは大型で重いため(巻線パック質量110トン)、製作の効率化、製作中の輸送を少なくする等の観点から、MHI二見工場の大型機器工場内で巻線の製作を行っている。2社が同一工場で作成に取り組むことによって、得意分野をそれぞれが担当して協力する体制ができている。また、巻線製作のための各種設備の製作が終わり、実機製作が軌道に乗り出した。

本稿では、ITERのTFコイルの製作法と試作・実機製作の状況について述べる。

### 2. TFコイル巻線

TFコイルはコイルケースと巻線パック(WP)からなる(図1)。図2は巻線の断面である。導体はNb<sub>3</sub>Sn超電導素

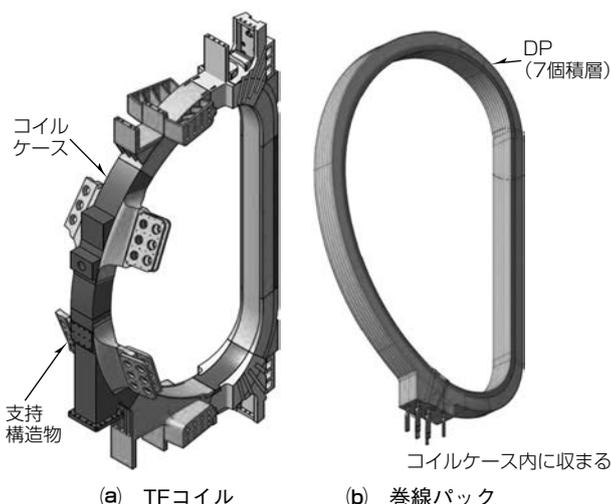


図1. ITERのTFコイル

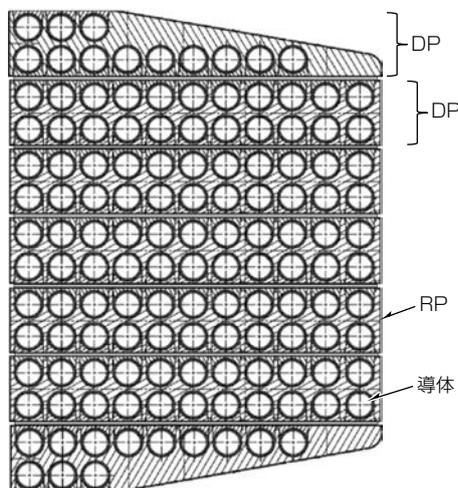


図2. 巻線の断面

線をより線にし、直径43.7mmのSUSジャケットで囲われている。導体は絶縁されて、ラディアルプレート(RP)と呼ばれるステンレスの補強板に収められる。WPは7個のダブルパンケーキ(DP)を積層して、全体を絶縁し、樹脂で固めて製作される。WPの製作手順を図3に示す。

TFコイル製作の特徴を次に挙げる。

- (1) 実績のない超大型コイルであり、各プロセスに技術課題がある。多くの試作開発を実施して、課題を解決している。
- (2) 製作方法の検討とともに設備を計画し、準備する必要がある。全ての製作設備を新たに製作した。
- (3) 不具合による後戻りは致命的となる。十分な検討と品質管理を行う。

### 3. 巻 線

巻線、熱処理後にRPの狭い溝に収納するため、大径(直径43.7mm)の導体であるにも関わらず、高精度の巻線が必要である。特にRPの溝周長と合わせるため、周長を0.01%程度で管理する必要がある。高精度巻線のため、次のような開発又は対策を実施している。

- (1) 導体曲げシミュレーションコード開発
- (2) 高精度の巻線対応の巻線ヘッド開発
- (3) 導体測長システム開発
- (4) 巻線室の温度管理
- (5) 回転テーブル上の導体受け台を高精度にアライメントし、これに導体を収納して精度を保証
- (6) 熱処理によって超電導線が約0.07%(1ターン当たり23mm)伸びる現象がある(図4)。試作及び実機製作結果を巻線寸法へ反映して製作

これらを実施することで、問題なくRPへの巻線挿入ができています。巻線の周長誤差は要求仕様0.01%に対し、実績

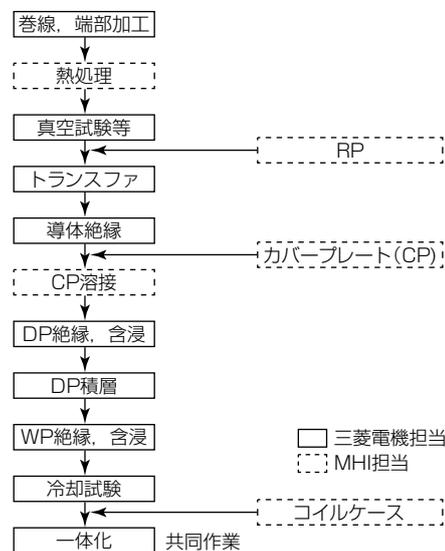


図3. WPの製作手順

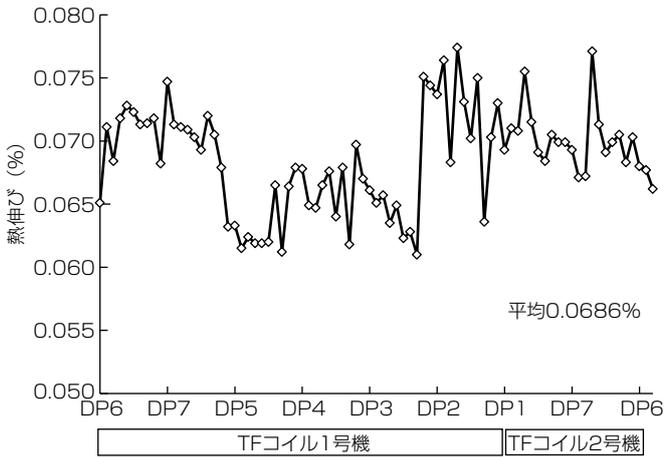


図4. 熱処理による導体の伸び

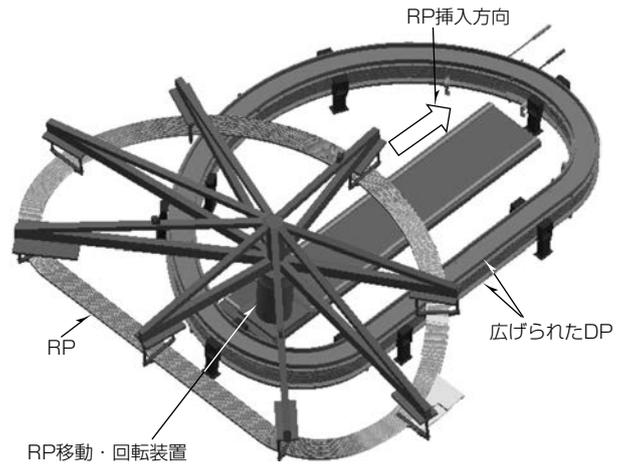


図6. トランスファ装置

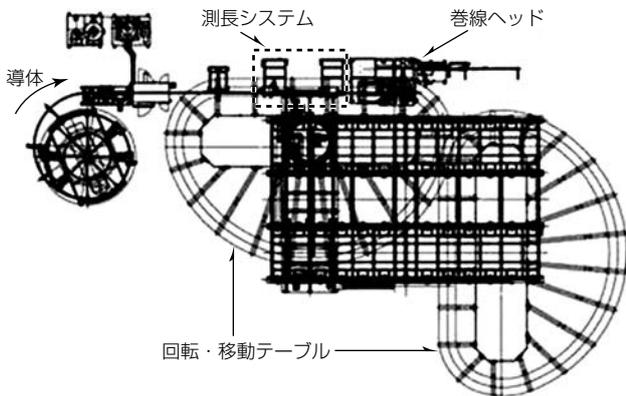


図5. 巻線装置



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図7. トランスファ(RP挿入)作業

平均0.0012%である。開発された測長システム、巻線ヘッド等で構成された巻線装置を図5に示す。装置は全体が同期して制御され、シミュレーション結果で自動的に巻かれる。

#### 4. トランスファ

巻線及び熱処理されたDPの層間にRPを挿入し、RPの溝内に導体を挿入する。1本の導体で巻線されたDPであるため、層間の渡り部を横切ってRPを挿入できず、RPを複雑に操作して、挿入を行う。熱処理後の導体であるため、導体に発生する歪(ひずみ)を0.1%以下に管理して、作業する。このための装置が図6、図7に示すトランスファ装置である。挿入の動作はトランスファ試験の結果を反映してプログラムされており、安全に作業することができる。RP挿入後、導体をRP溝内に収納し、反転した後、残った側の導体を挿入する。

#### 5. 導体絶縁

RPの溝内に挿入された導体を一旦持ち上げ、導体絶縁してクエンチ検出テープを巻いた後、再度溝に収納するための装置が導体絶縁装置である。ほかの装置同様、独自開発したものであり、D型のDPに沿って、テーピングマシン、導体昇降装置等が周回して、絶縁を施す(図8、図9)。

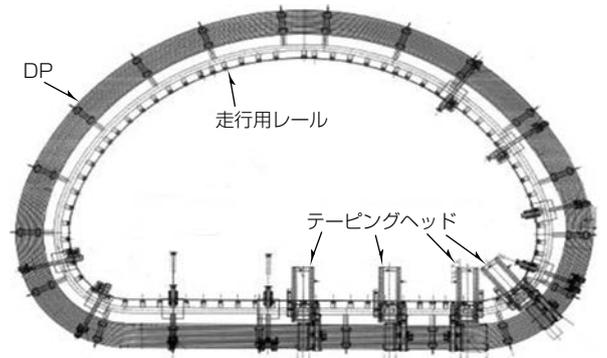


図8. 導体絶縁装置



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図9. 導体絶縁作業

#### 6. DP含浸

CP溶接及びDP絶縁されたDPにレジンを注入し、加熱硬化を行う。耐放射線性の高いシアネートエステル樹脂とエポキシ樹脂を混合して、使用することになっている。ま



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図10. DP含浸装置全景(含浸容器を傾斜させた状態)



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図11. 含浸・加熱硬化後のDP

た、冷却による樹脂の割れを防ぐため、樹脂リッチにならないように(ガラス繊維の割合を高く)、絶縁を施工する。含浸工程は各種の試作を行い、そのプロセスと条件を決めている。

図10は樹脂を含浸容器内に注入する際の写真であり、樹脂内にボイドが発生することを避けるため、含浸容器を傾斜させ、下から樹脂を注入している。実機製作前に2種類のダミーDPを製作し、含浸を含めた製作プロセスの最終確認を実施している。図11は含浸・加熱硬化後のDPの外観、図12はダミーDPを含浸して切断したものの含浸状況を示す。導体絶縁内部まで、一様に含浸できていることが確認された。

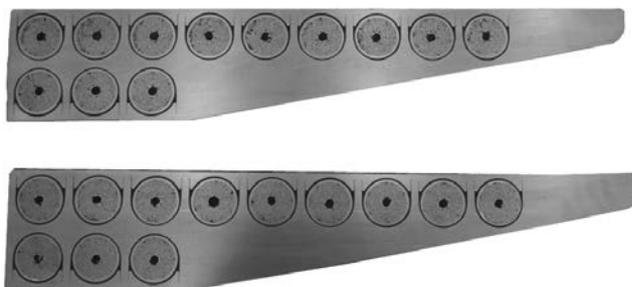
DP含浸工程は含浸準備及び含浸後の手入れ等に時間がかかるため、2台の含浸容器を用意してDP製作ピッチを守るよう計画している。

### 7. WP製作

含浸されたDPは7個積層され、対地絶縁後、再度含浸を行って、WPとなる。

図13はWP含浸のための容器を示したものである。DP積層後に、WP周囲に容器壁を組み立て、溶接して含浸容器を構成する構造としている。周囲をクランプで加圧した状態で全体を3°傾斜させ、含浸を行う。

含浸後、最終的なWPの試験として、液体窒素による冷却試験を行う。冷却履歴を与えた後、真空リークテス



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図12. 含浸状況(ダミーDPを含浸して切断したもの)

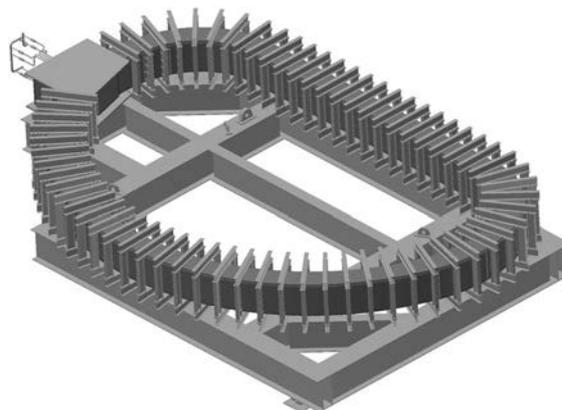


図13. WP含浸のための容器

トと電気試験を実施し、WPの健全性を確認するためである。この試験の試行として、ダミーDPを用いた試験を行い、ほぼ計画どおり冷却でき、また真空リークテスト、電気試験とも問題なくパスしている。

### 8. むすび

ITERのTFコイルの製作は発注元の量子科学技術研究開発機構による指導の下、ITER機構、EU国内機関(F4E)等とも技術交流を行って製作を進めている。

現在までに、DP製作に関する試作は終わり、実機製作もDP含浸まで進んでいる。DP製作に関しては、軌道に乗り出した段階である。

WP製作及びBCコイルケースとの一体化はこれから取り組む作業である。若干の技術課題が残っているが、これらについて早急に解決を図り、十分な品質管理を行って製作を成し遂げたい。

TFコイルの製作によって得られる技術を、将来の原型炉の設計・製作にも活用できるように取り組む。

### 参考文献

- (1) 野元一宏, ほか: 核融合用大型超電導コイルの製作, 三菱電機技報, 87, No.11, 652~655 (2013)
- (2) Hasegawa M., et al.: Manufacturing of JT-60SA equilibrium field coils, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 571~574 (2012)