

### 【本成果の意義】

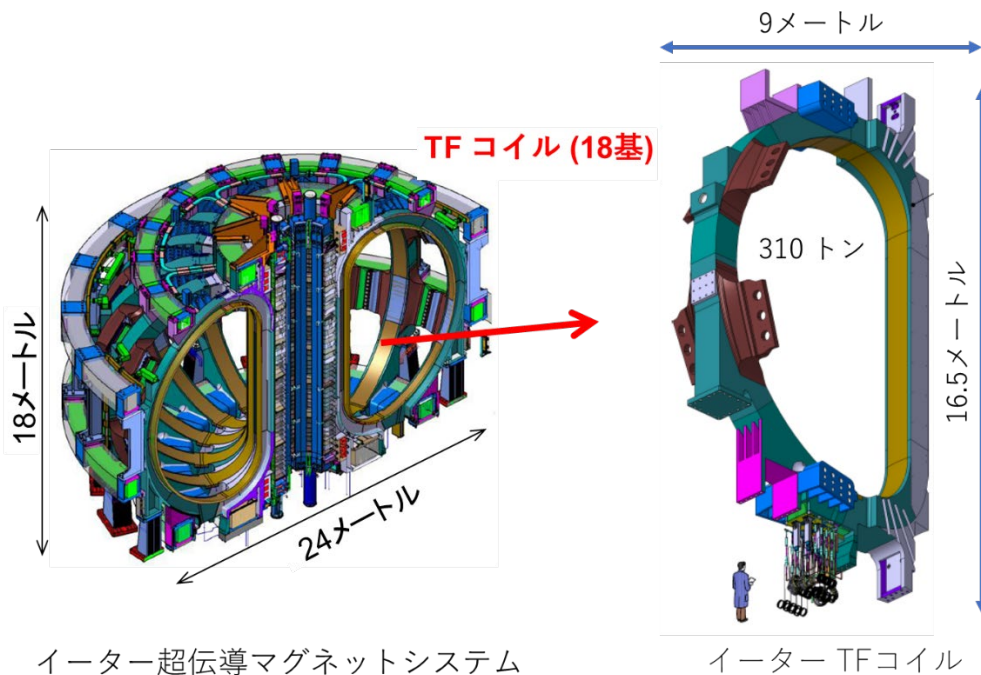
核融合実験炉イーターの TF コイルは、イーターの主要機器のひとつであり、強力な磁場によって数億度のプラズマを閉じ込める超伝導を用いた電磁石です(図 1)。イーターでは、TF コイルを 18 基組み込みますが、このうち日本で 8 基、欧州で 10 基を製作します。なお、この他にスペア 1 基の製作を日本が担当しています。

このたび、東芝 ESS が TF コイル 4 基を完成させたことで、量研は、イーターに組み込む日本が分担する全 8 基の TF コイル製作を完遂し、イーター計画の進展に大きく貢献しました。完成した TF コイルの内 7 基は、フランス南部のサン・ポール・レ・デュランスにある国際核融合エネルギー機構(以下「イーター機構」という。)に順次輸送され、イーター機構が運転開始に向けて、これら TF コイルの組立・設置作業を行っています。

### 【TF コイル開発における技術的課題とその解決】

TF コイルにはプラズマを閉じ込めるための高い磁場精度が要求され、電流中心線の位置は、その巨大さにもかかわらず、わずか数ミリの誤差しか許されません。量研と東芝 ESS は、タッグを組み、双方の技術力を結集し、これら解決困難な技術的課題を克服し、TF コイルを完成させました。

TF コイルは、巻線部と構造物をそれぞれ製作して、これらを一体化することで完成します(図 2)。TF コイルは、上記の電流中心線の位置公差の要求を満足するために、巻線部と構造物を精度良く組み合わせる必要があります(技術課題①)。また、TF コイルの運転時に生じる巨大な電磁力に耐えられるように、巻線部と構造物を隙間なく一体化する必要があります(技術課題②)。このように、高精度で巻線部と構造物を組み合わせることと、隙間なく一体化することが、TF コイル開発における大きな課題でした。



© ITER Organization, <http://www.iter.org/>

図 1 イーター TF コイル

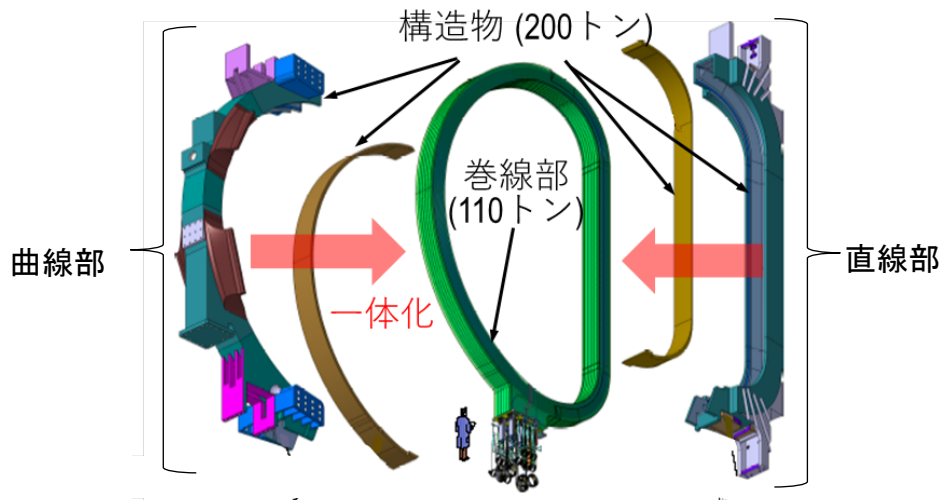


図 2 TF コイルの構造

技術課題①では、巻線部と構造物を精度良く組み合わせる必要がありますが、すでに両者には、それぞれの製造過程で製作誤差が生じています。そのため、巻線部と構造物の製作誤差を考慮しつつ、どのように最適な位置で巻線部と構造物を組み合わせるかということが重要な技術課題のひとつでした。巻線部と構造物を組み合わせる作業として、図 3 に示すように、まず直線部の構造物に巻線部を設置して、次に曲線部の構造物を設置し、その後、構造物蓋を取り付けることで、巻線部が構造物内に格納されます。こうした巨大構造物を取り扱う作業に対して、技術課題①である電流中心線の位置公差を満たすために、0.01 ミリメートルオーダーの精度を有する光学的計測装置を導入し、作業中の巻線部と構造物の形状をリアルタイムで計測し、必要に応じてこれらを矯正できる手法を確立することで、巻線部と構造物を高精度で組み合わせることに成功しました。その結果、図 4 に示すとおり、巻線部と構造物を合わせた後の電流中心線の位置は、TF コイル全 4 基とも所定の公差を満足することができました。

一方、技術課題②では、巻線部と構造物を一体化するため両者の隙間に液状の樹脂を注入したのち硬化する一体化含浸が必要になりますが(図 5)、樹脂は時間が経つと硬化しますので、一度固まってしまうとやり直しができなくなります。そのため、限られた時間内に約 1,700 リットルもの樹脂をどのように均一に注入するかということがもうひとつの重要な技術課題でした。この課題を解決するために、パワフルかつ緻密な制御が可能な含浸システムを開発することで、短時間で確実に一体化含浸を行えるようにしました。具体的には、強力な樹脂送り用ポンプを装備することで、12 時間以内に約 1,700 リットルもの樹脂注入を可能とし、また、構造物内の圧力をコントロールすることで空隙なく樹脂を含浸できるようにしました。図 6 は、TF コイル一体化含浸中の巻線部と構造物間の静電容量を表していますが、両者の隙間に樹脂が注入されると徐々に値が上昇し、隙間が全て樹脂で埋まると静電容量は飽和します。このように、静電容量が飽和したことで、樹脂注入が問題なく適切に充填されたことを確認できました。そして、樹脂硬化後に、最終製作工程として、構造物の他機器との取り合い部等の機械加工を行い、要求を満足する TF コイル全 4 基を完成させました。

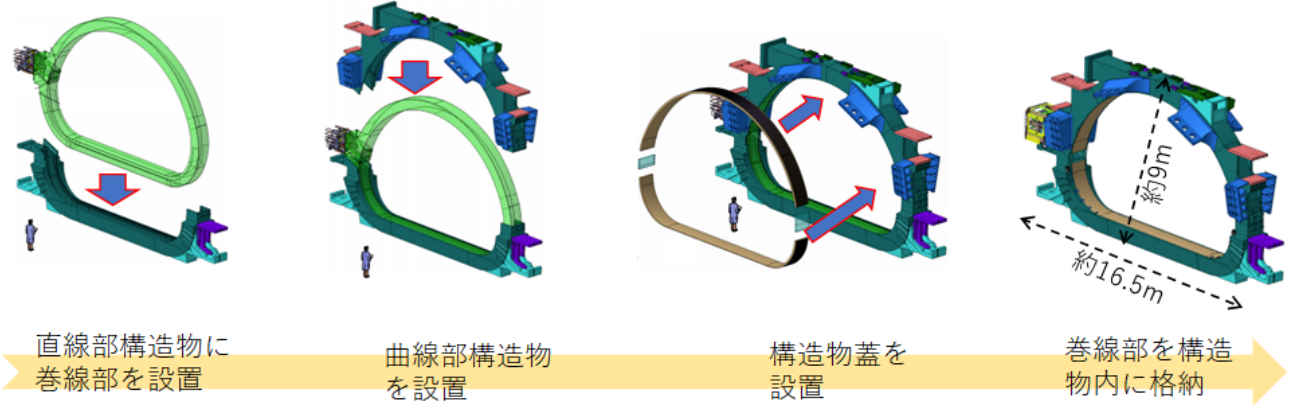


図3 巻線部と構造物を組み合わせる作業

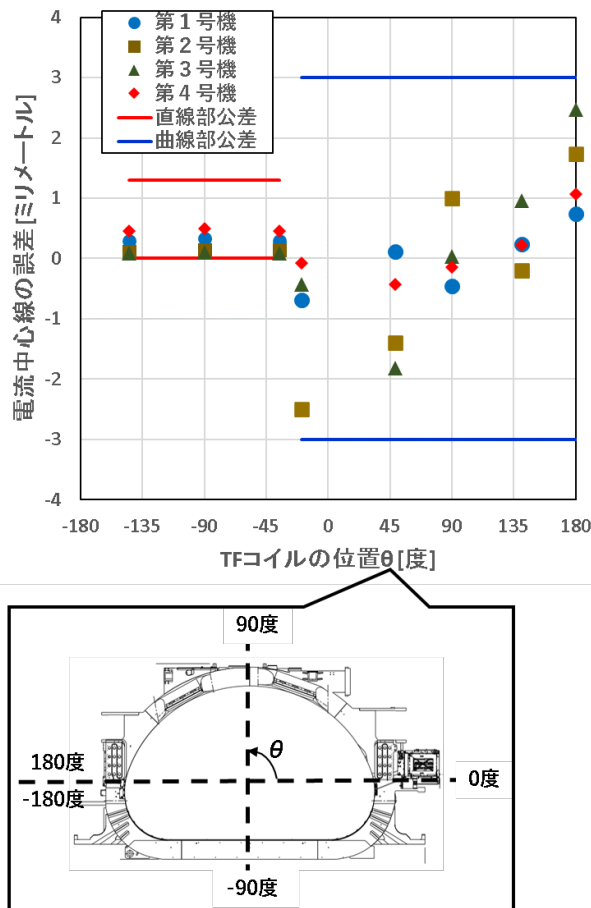


図4 巻線部と構造物を合わせた後の電流中心線の位置

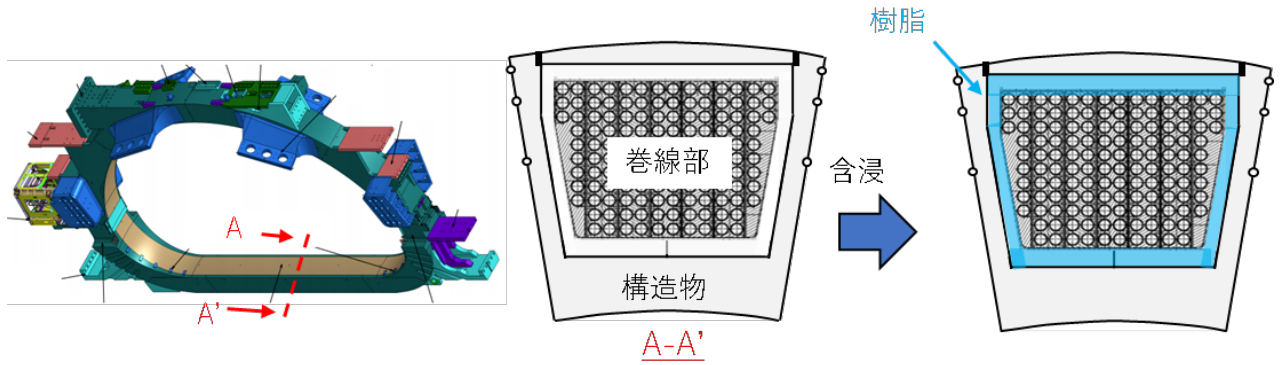


図5 一体化含浸における樹脂の注入

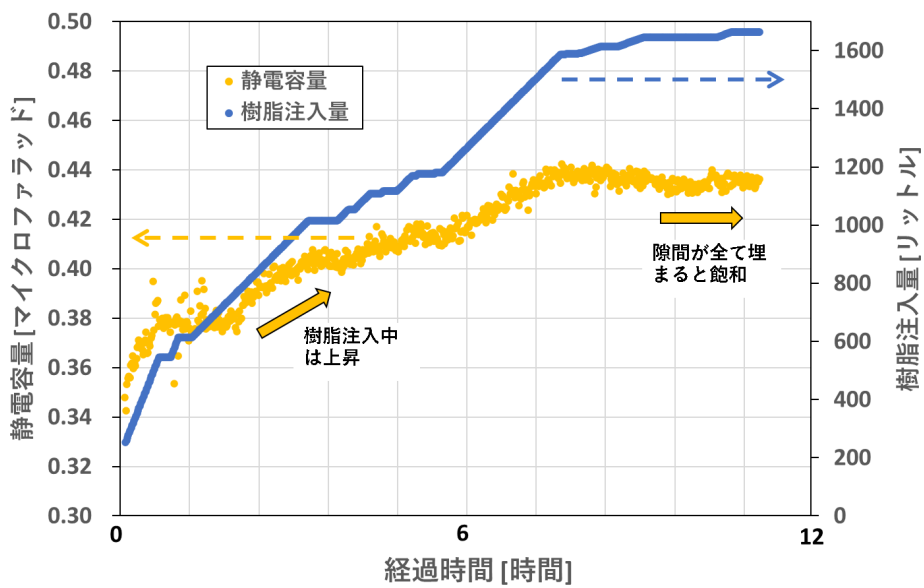


図6 一体化含浸時の巻線部と構造物間の静電容量



## 【用語説明】

### 1) 核融合実験炉イーター

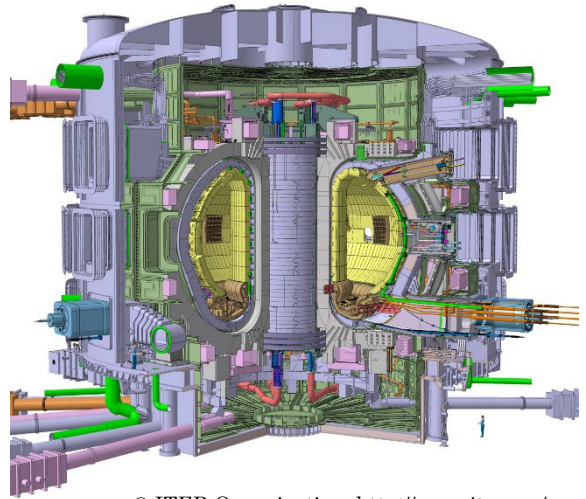
我が国は、世界7極 35 か国の国際協力により、実験炉の建設・運転を通じて核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する ITER(イーター)計画を推進しています。現在、サイトがあるフランスのサン・ポール・レ・デュランスにおいて、運転開始に向けた建屋の建設や機器の組立が進められているとともに、各極において、それぞれが調達を担当する様々なイーター構成機器の製作が進められています。

イーター計画に関するホームページ(日本語)

<https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/>

イーター機構のホームページ(英語)

<https://www.iter.org/>



© ITER Organization, <http://www.iter.org/>

### 2) トロイダル磁場コイル

イーターの主要機器の1つであり、プラズマの閉じ込め磁場を形成する超伝導電磁石です。高さは 16.5 メートル、幅は 9 メートルで、最大で 11.8 テスラの磁場を発生することができます。日本と欧州がトロイダル磁場コイルを製作します。製作したトロイダル磁場コイルはフランスに順次輸送し、イーターに組み込まれます。

### 3) 超伝導

超伝導とは、特定の物質(超伝導物質)を極低温に冷却すると電気抵抗がゼロとなる現象のことです。この現象を利用して、超伝導物質に大電流を流し、超伝導導体として用いることで、非常に強力な電磁石が実用化されています。トロイダル磁場コイルに用いる超伝導導体は 0.82 ミリメートルの超伝導素線 900 本と銅線 522 本を撚り合わせてケーブル化し、ステンレス管に挿入したものです。超伝導物質として Nb<sub>3</sub>Sn (ニオブ 3 スズ)を用いており、18 ケルビン(摂氏マイナス 255 度)以下の温度に冷却すると超伝導になります。

### 4) 電流中心線

TF コイルの断面には、複数の超伝導導体は何層にもわたって配置されており、それぞれに電流が流れますが、これらの導体集合体の幾何学的重心を、ここでは電流中心線としています。TF コイル製作における製作誤差によって、構造物内の導体位置はずれますので、電流中心線もずれていきます。このずれを数ミリ以内で管理する必要があります。

