

▶ Special feature.01

ITER 計画が 新たなステージへ

世界各極の英知と技術の詰まった機器が現地フランスに続々と輸送され、ついに始まった ITER(イーター)本体の建設。

2025年に予定されるプラズマ生成に向けて、いよいよ始まった、フランスでの ITER 本体の建設の様子と、日本が製作を担当する2つの機器にスポットを当ててお伝えします。



量子エネルギー部門
ITER プロジェクト部 部長
井上 多加志

核融合実用化への道をつなぐ ITER

「ITER」はラテン語で「道」のこと。世界7極(日欧米露中韓印)が英知を結集するITERは、核融合反応から発電に必要なエネルギーを取り出せることを実証するための核融合実験炉の名称であり、ITERこそが、過去から未来へつなぐ核融合研究の長い道のりの現在地であり、最前線であるともいえます。

核融合は、燃料となる水素ガスをプラズマ状態にして核融合反応を引き起こしますが、ITERでは具体的な実証目標が2つあります。1つは、入力エネルギーに対し10倍の出力が得られるプラズマを400秒間維持すること。もう1つは、入力エネルギーに対し5倍の出力が得られるプラズマを1時間持続させることです。これらの目標の達成が、核融合研究が描く未来につながる道の扉を開いていきます。ITERの次の扉は、発電実証を目指す核融合「原型炉」建設。そして、最後の扉が、今世紀中葉の実現を目指す核融合エネルギー発電の実用化です。

ついに炉心本体の組み立てフェーズに突入

これまで ITER 機構主導の下で参加各極が分担して機器を製作してきました。今はまさに、各機器の製作フェーズから本体組み立てフェーズへの転換期です。2025年に予定される、ITERでの初めてのプラズマ生成、通称「ファーストプラズマ」に必要な主要機器の多くが各極国内での製作を

終え、フランスの ITER 建設サイトへ続々と運び込まれ、ITER 機構が主体となって炉心本体の組み立てを開始しました。炉心にはプラズマを閉じ込めるために強力な磁場を発生させる「トロイダル磁場コイル(TF コイル)」が全18基組み込まれますが、日本で製作を担当する9基の内、完成した3基が ITER 建設サイトへ搬入されて組み立てが開始されており、さらに2基が ITER を目指して航海中です。

ITER に搬入した機器が設計通りに機能するかを確認するため、QSTは、フランスへ渡って組み立て支援や試験データ取得を行うスタッフと、日本に残り、現地から届くデータを解析して設計と突き合わせ、試験のバックアップなどを行うスタッフに分かれて作業を進めます。そして、これまでに行ってきた ITER 用機器の設計・製作や、ITERでの組み立て・性能試験などで得られる知見を蓄積し、ITERの次の段階である原型炉に向けた設計基盤を構築していきたいと考えています。

国際プロジェクトならではの苦労と醍醐味

世界7極で一丸となって進める ITER 計画で痛感したのは、言葉の違い以上に、考え方の違いによるコミュニケーションの難しさです。例えば、何かを製作するにあたり、日本は議論を基にまずモノを作ってみて、その中でわかる課題や問題点を積極的に改良して製作を進めようとしています。一方欧州は、設計段階で徹底的に議論して、製作の過程で課題が発生してもなかなか方針を変更せず、完成後に課題も含めた検証を行うおうとすることがあります。日本が実



**INOUE
TAKASHI**

際にモノを作って得た知見と欧州が徹底的に議論を尽くした設計が、同じ目標を向いていても時に進め方の議論としてぶつかるのです。言葉には表れないこうした考え方の違いから、議論がなかなか進まないこともあります。長いプロジェクトの中で、この違いをお互いに認識したうえで議論を進めることで、最終的にはお互いに納得し、より良い方法に辿り着こうという良い雰囲気が出ています。いかに大規模な国際プロジェクトといっても、突き詰めれば、お互いを理解し尊重しあう、人と人とのコミュニケーションの基本が何より重要なのです。

知識や経験を伝え、次世代の研究者を後押しする

ITER 計画がジュネーブで産声をあげた1986年、那珂研究所では臨界プラズマ試験装置「JT-60」の加熱実験が開始されました。私が研究者として那珂研究所に入ったのもこの年です。JT-60で得られた数多くの研究成果は ITER にも反映されていますが、35年前の運転開始を経験した人は少なくなってきました。これまで、JT-60の運転当時の話をすることは、年寄りが若い研究者を捕まえて「昔は良かった」と昔話をすることで躊躇してきました。しかし、ITERの組み立てが始まり、運転開始が現実味を帯びてきた今、その経験を昔話ではなく、知識やノウハウとして共有し役立てるときが来たのかもしれないと感じています。次世代の ITER 計画や核融合研究を担う研究者を後押し、ITERの先の核融合研究を担う世代を立ち上げていくためにも、私自身が得た知識や経験はできる限り彼らに伝えていきたいと思っています。

Newsletter from France



ITER プロジェクト部
ITER 連携戦略グループ 上席研究員 グループリーダー
正木 圭

フランスの ITER 建設サイトでは、ついに炉本体の組み立てが始まりました。私は、組み立てを支援したり、日本から到着する大型機器の受入れ検査などを行うために日々現場に通っています。

ついに始まった炉心本体の組み立て

組み立て作業は、炉の中心部分のプラズマを発生させる「真空容器」周辺から始まっています。ドーナツ型の真空容器の外側にはプラズマを閉じ込める磁場を発生させる TF コイルが取り付けられますが、組み立ては40度ずつ、9セクターに分割して行い、現在はまさにその1セクター目の組み立てに取り掛かっています。真空容器は1セクター分でも高さ14m、幅8m、重量400t、取り付けのTFコイルはさらに大きく、高さ16.5m、幅9m、重さ330tと巨大です。そのため、真空容器とTFコイルは、別々につり上げた後で「やぐら」と呼ばれる組み立て専用の場所で一体化の作業を行います。組み立てたセクターは、360度のドーナツ形状に設置する「ピット」と呼ばれるエリアに順次、移動させ、9つのセクターすべてを溶接して一体化し、次の容器内側の機器取り付けへと移行します。



▶真空容器とTFコイルを一体化したセクターが設置される「ピット」。
©ITER organization

巨大建造物の取り扱いに慎重に慎重を重ねる

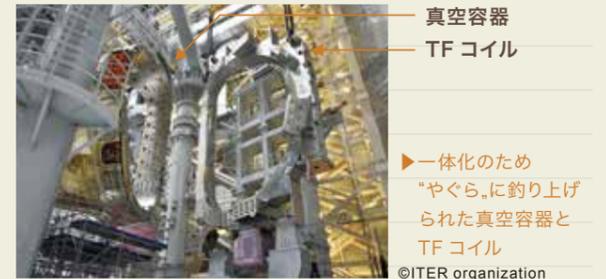
日本の TF コイルが到着したマルセイユ港から建設サイトまでは高速道路でわずか1時間の距離ですが、巨大かつ精密な TF コイルは、輸送専用の大型トレーラーが通れるように拡幅した道路を夜間だけ走行し、10日間ほどをかけて慎重に輸送されました。こうして運び込まれ、真空容器への取り付け作業の前に、垂直に立てた状態で仮置きされている TF コイルですが、実は、製作、輸送の過程では一度も起立させたことがありませんでした。設計上十分な強度があることは分かっていますが、330tの建造物の初めての引き起こし作業は、慎重に慎重を重ねました。引き起こすための専用器具に厳重に固定し、自重で歪みが発生していないかを特殊なカメラで測定しながら、24時間近くかけ、無事に垂直に立てることができました。

★ 南フランス駐在記

赴任した昨年の9月は、フランスはちょうどコロナ禍によるロックダウン中で、家具類を揃えることができず、住宅や電気・ガス・水道の契約には慣れないフランス語が必要だったりと大変な思いをしました。4カ月ほど前にやっと行動制限が緩和されたため、先日初めて車で4時間ほどのところにある、湖のきれいなところへ家族で旅行することができました。



ITER を構成する機器はそれぞれが巨大な構造物なので、変形を抑えるサポート構造や固定の位置が重要ですが、ミリ単位の組み立て精度を実現するための厳密な位置計測が可能な状態の確保と、機器をサポートする構造や固定位置の調整の両立は、日本での JT-60SA 組み立てでも非常に苦労した点です。その経験で得たノウハウを ITER の現場にも共有していきたいと思っています。



真空容器
TF コイル
▶一体化のため「やぐら」に釣り上げられた真空容器とTFコイル
©ITER organization

国や文化の壁を乗り越えワンチームで進められる作業

ITER での組み立ては機器ごとに参加極の枠を越えてチームが生まれ、細かく分担された分業体制で行われます。組み立て自体は ITER 機構が計画した手順書に沿って進行しますが、スムーズに作業できるよう、事前に注意点や段取りを確認するためのディスカッションが行われます。各極スタッフがワンチームとなり、同じ目標をもって取り組めますが、採用しようとする手法にそれぞれの考え方の違いが表れることも多く、ときには意見が衝突します。それは、私自身が「クオリティーファースト」を心掛けているように、他極のスタッフも同様に、より良い質の結果を得ることを優先させるために、自身の経験に基づく考えを持っているからです。それゆえに作業方針の擦り合わせには非常に苦労しますが、とにかく納得がいくまで話し合いを重ねることが解決の糸口になると考えています。

✈ 過去から未来につながる核融合研究の最前線に立つ

昨年9月に赴任する前は、28年間にわたり那珂研究所で核融合に携わってききましたが、ITER 建設サイトを実際に目にしたときは、想像をはるかに超えるスケールに圧倒されました。そして、長年にわたり研究されてきた核融合の ITER の組み立てフェーズに、いま自分が携わっているこの感覚は言葉で言い表すことができません。TF コイルが日本から到着したときは、「遠いところからよく来たなあ」と感慨深いものがありましたが、私も日本から遠く離れたこの地で、ITER 完成に向けて少しでも貢献できればと思っています。



©ITER organization

トロイダル磁場コイル

✓ 磁場でプラズマを高精度に保持して閉じ込める

真空容器内に発生させた高温のプラズマを安定な状態で一定時間保持するには非常に強力な磁場が必要です。この磁場を作り出す装置がトロイダル磁場コイル (TF コイル) です。ITER では「D」字型の TF コイル 18 基をミカンの房が並ぶようにドーナツ状に並べ、プラズマを磁場で浮かせて閉じ込めます。

✓ 巨大さに対して必要な製作精度は 1 万分の 1 以下

核融合は太陽の中心部で起きている反応ですが、地球上で人工的に核融合反応を起こすためには、1 億度以上に達するプラズマを作り出し、磁場で閉じ込める必要があります。そのために使用する TF コイルの磁場は最大 12 テスラ。この強さの磁場の中に工具のスパナを持って入れれば、12t (およそ象 2 頭分) の重さを引き寄せるほどの引力が発生します。一般的に超伝導コイルの導線にはニオブ・チタンという合金が用いられますが、TF コイルではより強い磁場を得るために、加工が難しいニオブ・スズという合金を使っています。高さ 16.5m、幅 9m という大きさは、ニオブ・スズ導線を使用した超伝導コイルでは世界最大です。TF コイルは 330t もある自重で歪みが生じ、周囲のわずかな温度の変化でも膨張や収縮が発生します。一方、製作精度は最も厳しい部分で基準寸法に対してわずか 0.4mm と、その巨大さに対して 1 万分の 1 以下という高い精度が要求されました。このため、加工時や計測時の環境温度によるミリ単位の伸び縮みを算定し、20°C に温度換算した場合に形状に対する要求精度が達成できるように調整するといった、息が詰まるような作業の連続でした。

未来のエネルギーを支える



ITER 真空容器

NAKAMOTO MIO
ITER プロジェクト部
超伝導磁石開発グループ 主幹技術員
中本 美緒
SPECIAL REPORT 01



私は、製作管理や品質管理で TF コイルの製作に携わってきました。ITER 機構の要求を具体的な仕様で落とし込み、製作メーカーにその仕様を表す意味や意図も伝え、仕様通りに製作できているかを何度も確認して、完成まで辿り着くことができました。世界的な新型コロナウイルスの流行で、残念ながらフランスへ渡った TF コイルを自分の目で見ることはできていませんが、製作の過程で一度も立てたことがない TF コイルが直立した写真を見たときは、まるで我が子が初めて立った姿を見るようで、感無量でした。



建設サイトで立て起こされた TF コイル

©ITER organization

◀神戸港にて船に積まれる様子
©ITER organization



18 基の TF コイルの内、日本ではスペアを含む 9 基の製作を担当しています。その中の 5 基を三菱重工業(株)が、4 基を東芝エネルギーシステムズ(株)が製作を受け持ち、三菱重工業で 4 基、東芝エネルギーシステムズで 1 基が完成し、今は残り 4 基の製作が進められています。メーカーが違えば技術はもちろん、製造設備も異なるため、同じ機器を製作するとはいえ、製造上で生じる課題は同じではありません。それぞれのメーカーの工場に足を運んで、各製作段階で要求される仕様を満たしているかを検査、確認しながら最終的に同じ性能、形状を持つ TF コイルになるように製作を管理していきます。完成を迎えたコイルは、約 30 日かけて船でフランスへ渡ります。TF コイルは巨大ですが、精密機器です。日本から送り出す際は、日数を要する船での運搬の過程で、揺れによる損傷が起きないように梱包を行うだけでなく、海水や、陸上輸送時の雨による浸水を防ぎ、さらに湿度対策のシリカゲルを入れて何重にもビニールで巻くなど、万全の対策を講じます。これまでに 3 基の TF コイルが無事にフランスに到着しました。QST は、残る 4 基の製作だけでなく、フランスでの ITER 機構による組み立てにおけるサポートにも、製作を手がけるメーカーと共に取り組んでいきます。

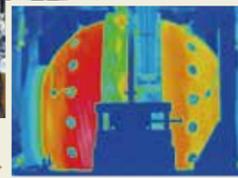
TF COIL
巨大な精密機器が海を渡る

GYROTRON
ITER で求められる性能を目指して

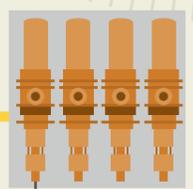
1,000 キロワットものパワーを受け止めるダイヤモンド窓



▲日本で行われている性能試験の様子
マイクロ波の出力を水温の変化で確認▶



マイクロ波発生部



QST の技術革新

SPECIAL REPORT 02

ITER プロジェクト部
RF 加熱開発グループ 主幹研究員

池田 亮介
IKEDA RYOSUKE



ついに見えてきた ITER 始動の時。
日本で製作を担当する機器のうちの 2 つについて、
製作過程や現在の状況、研究者たちの想いをお聞きました。

ジャイロトロン

✓ プラズマの着火から加熱、そして制御まで

ITER では、核融合反応を起こすために、1 億度以上の高温で高圧力のプラズマを生成し、安定に維持する必要があります。このために、プラズマを着火、加熱し、プラズマ内部に発生する乱れの抑制までをマイクロ波で制御する機器が 24 機のジャイロトロンです。

✓ ITER 参加各極がしのぎを削る

ジャイロトロンは、その名に冠するようにジャイロ運動する電子のエネルギーを効率よくマイクロ波へと変換して放出する真空管装置です。ITER で使用するジャイロトロンは高さ 3m ほどの大きさで、1 機あたり 1,000 キロワットという強力なマイクロ波を発生させてプラズマを加熱します。これは一般的な電子レンジの出力である 0.5 キロワットの 2,000 倍の強さに相当します。ジャイロトロンは、ITER の活動が始まる 90 年頃でも 500 キロワット・100 ミリ秒とまだ研究途上でした。そのため ITER が求める「170 ギガヘルツ、1,000 キロワットのマイクロ波を安定して 1 時間出力する」という桁外れの性能を実現するために、マイクロ波を発生させる仕組みや装置の形状は、担当する各極それぞれのアプローチで研究開発が進められています。このため、ジャイロトロンは、国際協力で進む ITER プロジェクトにおいて、各極がしのぎを削りあう国際競争の色合いを持ちます。24 機の開発と製作は、日本とロシアが 8 機ずつ、欧州が 6 機、インドが 2 機を担当し、それぞれの考え方や技術で製作された機器が ITER で試験されることで、より核融合発電に適したジャイロトロンというものが見えてくるでしょう。

