

核融合最前線

Fusion Forefront

編集・発行：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門

■モナコ ITERビジネスフォーラム2016の開催

2016年2月8日-10日、ITER機構主催、モナコ公国後援の下、ITERビジネスフォーラム2016が開催されました。量研機構（当時は原子力機構。以下同じ。）は日本のITER国内機関として展示ブースを開設し、ITER機器の調達状況を紹介しました（図1）。ブースには、アルベールモナコ大公がビゴITER機構長とともに訪れ、説明を熱心にお聞きになりました。

ITERビジネスフォーラムは2007年から始まり、企業間及び調達担当機関の情報交換や、企業のITER調達活動への参入促進を目的として6回目の開催となります。欧州を中心に26か国から研究機関・大学・企業の計285団体が参加し、また、ITER参加極¹⁾から約600名が参加登録するという大規模なものになりました。

日本からは、量研機構、核融合科学研究所、高エネルギー加速器研究機構、名古屋大学、東芝、三菱重工の6団体から15名が参加しました。

当機構那珂核融合研究所草間副所長より、日本における調達活動を、また、同研究所先進プラズマ研究部鎌田部長からは、JT-60SA建設における産業界との国際的な協力関係を紹介し高い注目を浴びました。

ITER機器の製作技術や核融合原型炉、世界のエネルギー問題等の幅広いテーマでパネル討論も企画され、並行して企業間のビジネス面談が積極的に行われました。ITERプロジェクトの成功に向けたパートナーシップの強化が図られた有意義な会合となりました。



図1: アルベールモナコ大公及びビゴITER機構長が日本国内機関(JADA)展示ブースを訪問

1) ITER参加極は、日本、欧州、米国、ロシア、中国、韓国、インドの7つの国または地域です。

■NBTF¹⁾用直流1MV超高電圧発生器の完成

ITERに設置する中性粒子ビーム入射装置では、世界最大出力となるエネルギー100万電子ボルト(1MeVと表記します)、電流60Aの負イオンビームを1時間連続で発生させることが求められています。この製作で最難関技術とされてきた直流1MV超高電圧発生器の製作をこのほど成功裡に完了しました。

技術的に難度が高いために、ITERで使用する前に試験施設をイタリア・パドバのコンソルツィオRFX研究所に建設しています。今回完成した機器は、そこに持ち込むためのもので、電圧を上げる「昇圧変圧器」と電流を一方向に流す「整流器」との組み合わせから構成されます(図2)²⁾。

技術的にどう難しいかを少し説明します。変圧器内部では、一次巻線と二次巻線の間には直流1 MVの高電圧がかかりますが、これまで実績のある短時間の高電圧発生器とは異なり、最長1時間、直流電圧を印加しなければなりません。この時、時間とともに変圧器内の絶縁油から巻線の周りの紙製の絶縁体に高い電圧が集中するため、次第に絶縁が保てなくなってしまうのです。そこで、電圧の集中を抑制するために、紙製の絶縁体の厚みや形状を工夫した新たな絶縁構造を考え出しました。

1時間もの長い時間、高電圧を出力する整流器の冷却も課題でした。放熱フィンの配置を工夫し、整流器周りの絶縁ガスの流れによる冷却効果や絶縁体内の電圧分布の解析を行い、内部構造の配置を改良して課題を解決しました。

これらの機器は、2016年4月に予定どおり日本からイタリアに向けて輸送を開始しました。

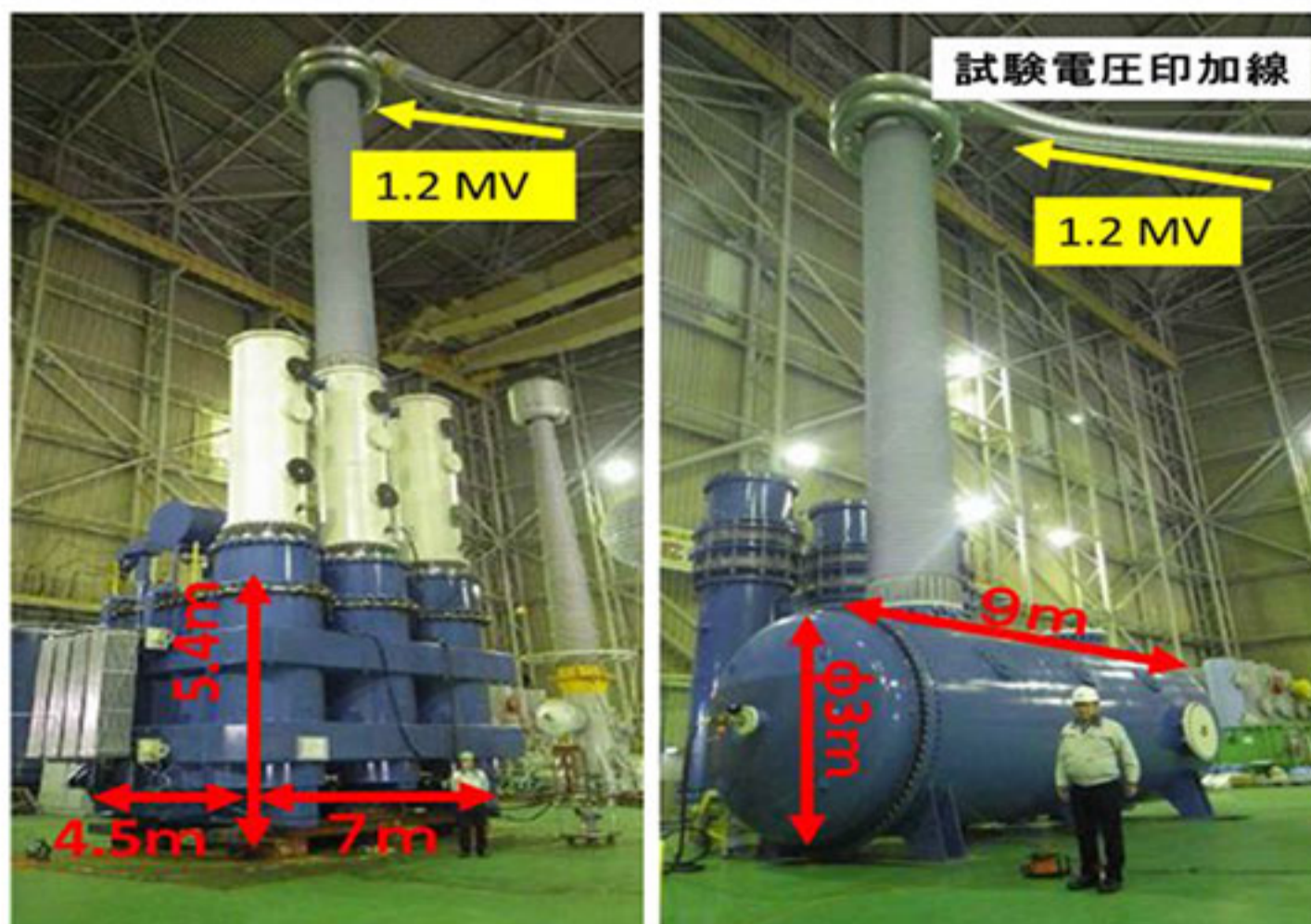


図2: 直流1MV超高電圧発生器: 昇圧変圧器(左)及び整流器(右)

1) NBTFは、中性粒子入射加熱装置実機試験施設(Neutral Beam injection heating system Test Facility)の略。

2) 今回完成した機器は、「昇圧変圧器」と「整流器」です。具体的には、インバータと呼ばれる電力変換装置から低電圧高周波交流(6.5 kV、150 Hz)の形で受電し、昇圧変圧器で電圧を上昇させ、さらに、この電圧を整流器で200 kVの直流電圧を発生させます。この直流高電圧発生器を5段直列接続し、全体で1 MVを発生させる構成となっています。

■「逃走電子」の発生機構の解明と発生量の予測に向けた 3次元シミュレーションコードの開発

トカマク型核融合装置では、プラズマの閉じ込めに必要な電流が何らかの原因で阻害されると放電停止に至ります。その時即座に電磁誘導によってドーナツ状の真空容器内部に強い電圧がかかって、プラズマ中の主として電子が周回加速され、「逃走電子」と呼ばれる高エネルギー電子が発生することがあります。逃走電子が真空容器内の機器に当たると機器の損傷につながり、装置の寿命を縮めるため、ITERではその抑制が重要な研究課題となっています。一方で実際のITER実験でどのように逃走電子が発生するかについてはまだ十分に予測できておらず、シミュレーション研究に期待が高まっています。

これまで装置中の逃走電子の発生量を調べる計算には、磁場の情報を単純に表現した1次元モデルが用いられるのが普通でした。今回、プラズマ理論シミュレーショングループでは、逃走電子の発生過程を現実と同じ3次元で取り扱う新しい計算コードを開発しました。1次元から3次元に拡張した一番の理由は、逃走電子が発生するときに生じる不安定性を取り扱えるようにしたことです。

図3は不安定性を無視した場合と考慮した場合の比較の一例で、この計算により、不安定性が逃走電子の発生量や空間分布、時間変化に大きく影響することを明らかにしました。今後、逃走電子の発生メカニズムの解明と発生量の予測、抑制手法の妥当性の確認など、ITERに貢献する幅広い成果が期待できます。

(a) 不安定性を無視した場合

(b) 不安定性を考慮した場合

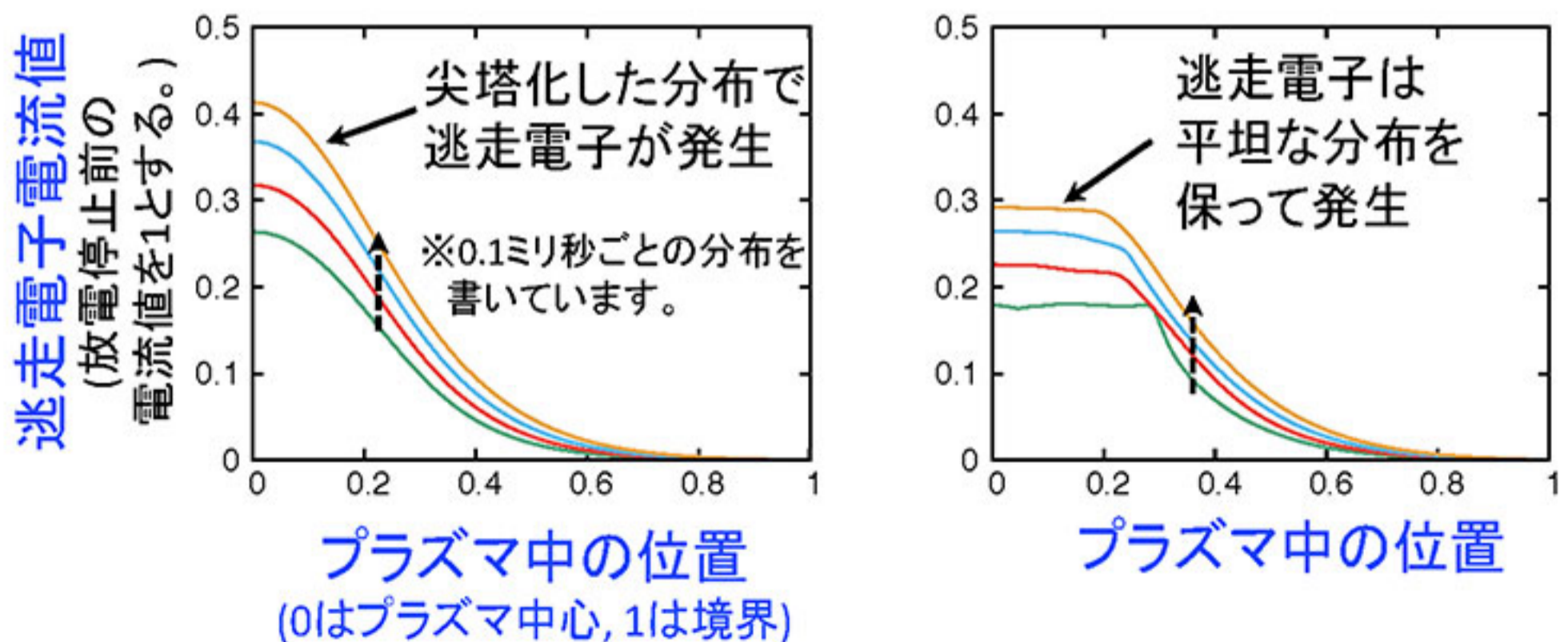


図3: 不安定性を無視した場合と考慮した場合の逃走電子電流分布の時間発展の比較。0.1ミリ秒ごとの分布を比較すると、不安定性が存在する場合にはプラズマ中心部で分布の平坦化が起こる。

■IFMIF¹⁾ 原型加速器入射器のビーム調整試験を完了

核融合研究開発に関する日欧幅広いアプローチ活動の一つのプロジェクトとして、六ヶ所核融合研究所ではIFMIF原型加速器による大電流ビーム加速の実証試験を進めています。

2016年3月に、欧州実施機関F4E及びイタリア国立核物理学研究所のレニャーロ研究所から専門家が六ヶ所核融合研究所に滞在し、共同で初めての入射器のビーム調整試験を実施しました。その結果、水素(H⁺)ビームを用いたエミッタンス²⁾向上試験により、当初目標通りのデータを取得し、調整試験をほぼ計画どおり完了させることが出来ました。

特に、ビーム透過量³⁾とエミッタンス(ビームの品質を表す指標)の関係を示す2次元マップを作成し、高周波四重極加速器⁴⁾に入射する条件を満たした領域を初めて定量的に同定することができました。

今後は、RFQ及び関連機器の据付・調整を進め(図4)、5 MeVで125 mAの重陽子(D⁺)ビームの加速実証に向けた調整を行う予定です。

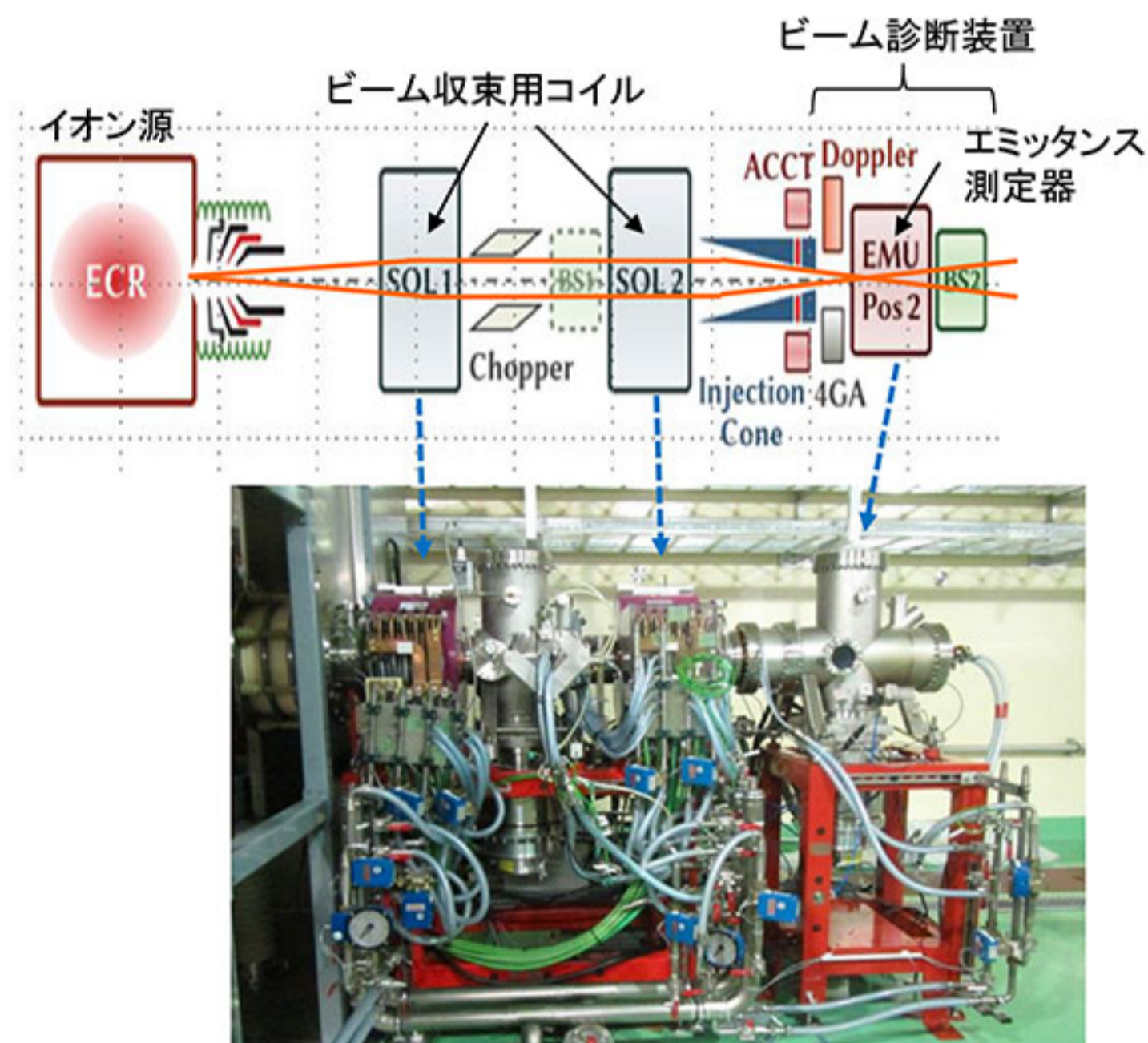


図4: 入射器のビーム調整試験の様子。上段は各機器の模式図、下段は各機器の写真。ビーム診断装置を撤去し、その位置にRFQを接続する。

1) IFMIFとは、International Fusion Materials Irradiation Facility(国際核融合材料照射施設)の略。幅広いアプローチ活動では、日本と欧州各国(フランス、イタリア、スペイン、ベルギー)が協力してIFMIFの加速器部分を設計製作し、六ヶ所の核融合研究所に持ち込んで組み立て、試験をします。加速器部分では、入射器、高周波四重極加速器(RFQ)、超伝導線形加速器(SRF)を完成させる予定です。

2) ビームの位相空間における広がりを表す指標であり、ビームの品質に対応する。小さいほど品質が良い。

3) イオン源から引き出されたビームに対する最終的なビーム到達量。ビーム収束用コイルで調整する。

4) 電磁波の特性を利用して、直流ビームを収束させて加速する直線加速器のひとつ。

■JT-60SAリサーチプランを改訂

超伝導トカマク装置JT-60SAでは、日欧の協力の下、ITERや原型炉に向けた課題を解決するための実験研究を行います。日欧の研究者は、JT-60SAで行う研究の内容と計画を議論し、それらをまとめた「JT-60SAリサーチプラン」を策定してきました。

2011年12月に日欧の協力により策定したVersion 3.0を基に、研究項目と研究計画を一層具体化した改訂版 (Version 3.3) (図5) が、2016年3月に完成しました。

今回の改訂では、JT-60SAでの研究領域が、日本の原型炉に加えて欧州の原型炉まで拡張され、また原型炉に向けた定常運転シナリオの検討やプラズマ性能の予測が進みました。現在378名の日欧の研究者(15か国、45研究機関)が議論に加わっています。今後も、日欧の強い協力体制の下、JT-60SAの実験に向けて、改訂作業を進めていきます。

1 March 2016



図5: 完成したJT-60SAリサーチプランの改訂版 (Version. 3.3)

■原型炉のための電子サイクロロン波加熱を用いた低磁束消費プラズマ電流 立上げシナリオを検討

将来、発電実証を行う原型炉の設計活動が現在進められています。原型炉の経済性は、プラズマ電流を駆動するために用いられる電磁石(トカマクの中心に設置されるのでセンターソレノイド(CS)と呼ばれます。)を小さくして建設コストを削減することにより向上することが重要です。これまで、CSの大きさは、経験的なスケール則¹⁾によって予測されてきました。

一方、電子サイクロロン波(EC)でプラズマを加熱すると、電子温度が上昇して、プラズマ抵抗が減少し、磁束消費量が減少することでCSの半径を小さくできる可能性があることは知られていましたが、プラズマを加熱すると不安定になる場合があるために、十分な検討に踏み込めずにいました。

そこで、統合コードTOPICS²⁾によるシミュレーションを行って、EC加熱を行った際のプラズマ内部の圧力分布及び電流分布の時間発展を知り、どのように加熱すれば不安定性を回避しつつCSサイズを小さくできるかを検討しました。

その結果、プラズマ電流を3.3 MAから12.3 MAまで増加する間に50 MWのEC加熱を行うことで、CSの半径を10%程度小さくできる可能性を明らかにしました(図6)。これは、原型炉設計の最適化に貢献するとともに、ITER、JT-60SAなど現在建設中のトカマクの運転領域を拡大することにも貢献できる成果です。

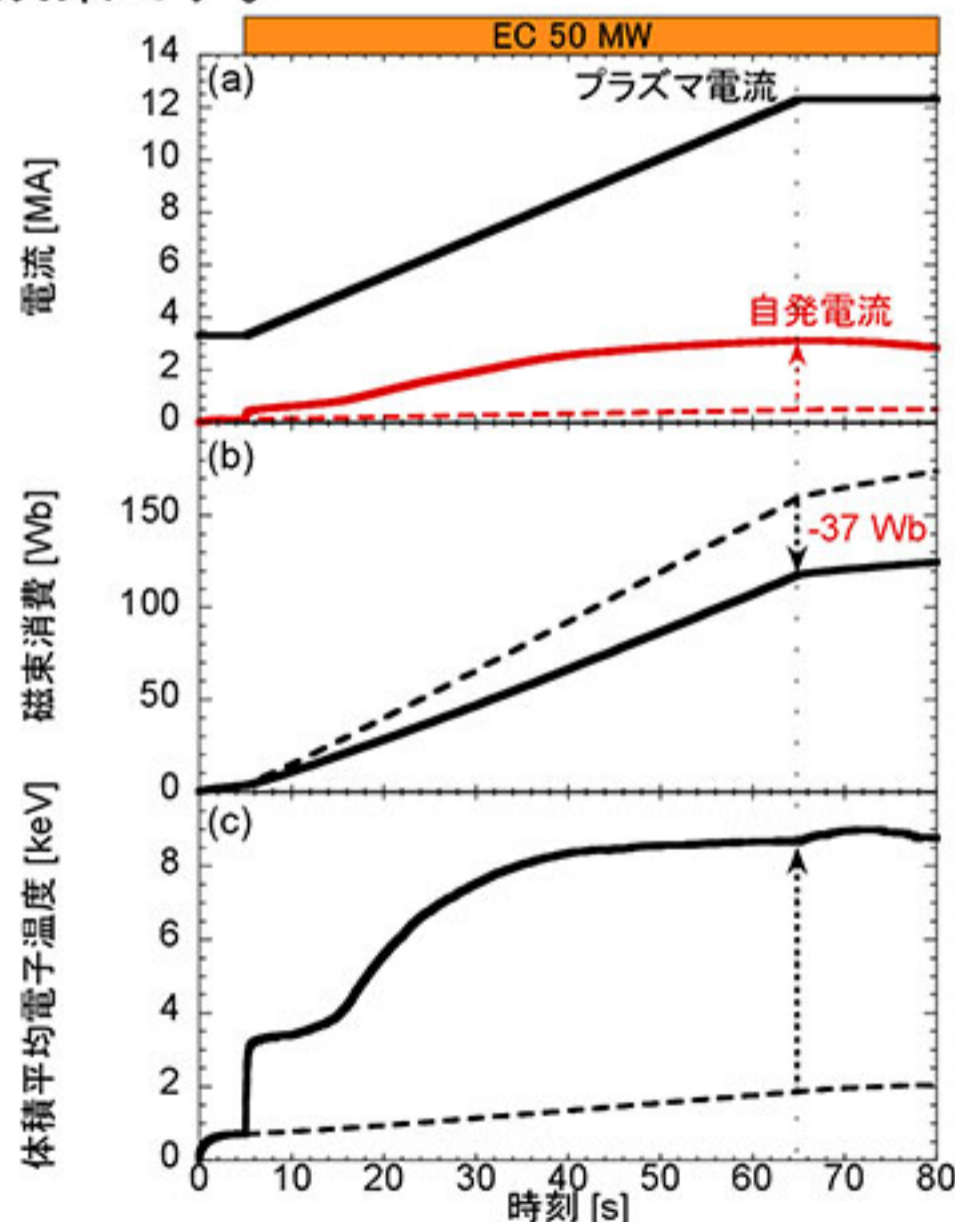


図6: 原型炉においてプラズマ電流を3.3MAから12.3MAまで増加する間に50MWのEC加熱を行うことで、CSの磁束消費を37Wb削減できることを明らかにした。必要とされるCSサイズは、磁束消費量に比例して削減できる。(Wbは磁束の単位であり、磁場の強さの指標。)

1)スケール則:磁束消費がプラズマの大きさとプラズマ電流に比例するという経験的法則。

2)統合コードTOPICS:プラズマの様々な現象を総合的に計算できるプログラム。TOPICSとは、Tokamak Prediction and Interpretation Code Systemの略。

■JT-60SA真空容器サーマルシールドの組立 (サーマルシールド3体の組立終了)

2016年2月15日に最初の真空容器サーマルシールド(VVTS) 2体が組立室に搬入され(図7)、組立¹⁾を開始しました。VVTSは、欧州が製作、超伝導トロイダル磁場コイル(TFC、全18個)と真空容器との間に熱的な障壁として設置する機器です。約-190°Cのヘリウムガスで冷却し、かつ真空容器運転中50°Cからの熱輻射(赤外線等)を遮ります。TFCは-269°Cの液体ヘリウムで極低温に冷却されて、電気抵抗ゼロの超伝導状態に維持される必要がありますが、このVVTSによって初めて極低温状態を維持することが可能となります。

真空容器サーマルシールドの組立では、組立治具に固定したVVTSアウトボード(OB)を旋回クレーンで真空容器に沿って回し込み、所定の位置に据え付けます(図8)。3月現在、3体のVVTS(#12、#13、#14)の組立が終了しました(図9)。今後、VVTSの搬入に合わせて、順次VVTSの組立を進め、11月までに17体の組立を終了する予定です。

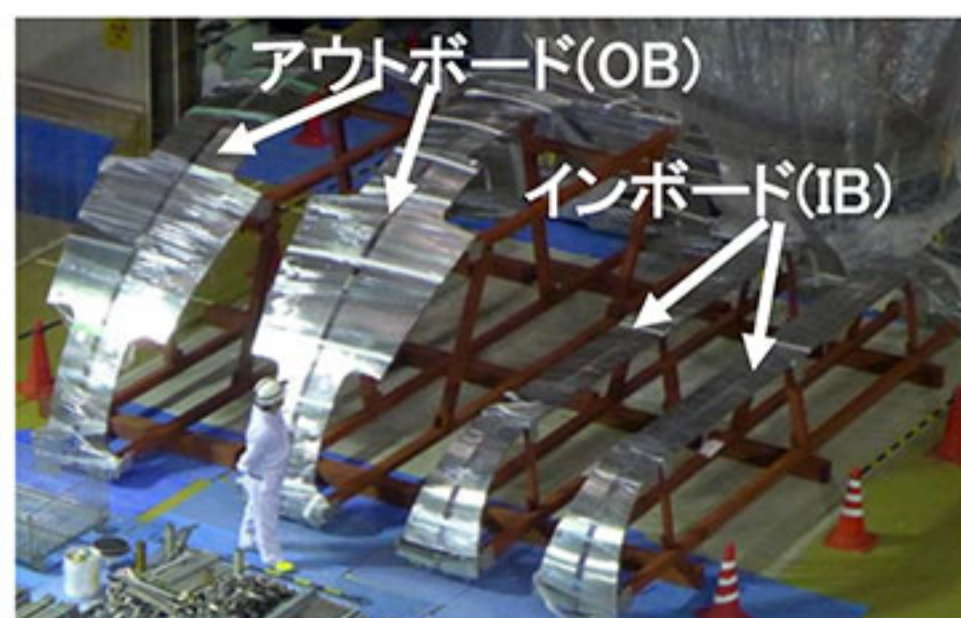


図7: 実験棟組立室に納入されたVVTS
(20度セクター2体分)



図8: VVTSの吊り込み (VVTSアウトボード(OB))

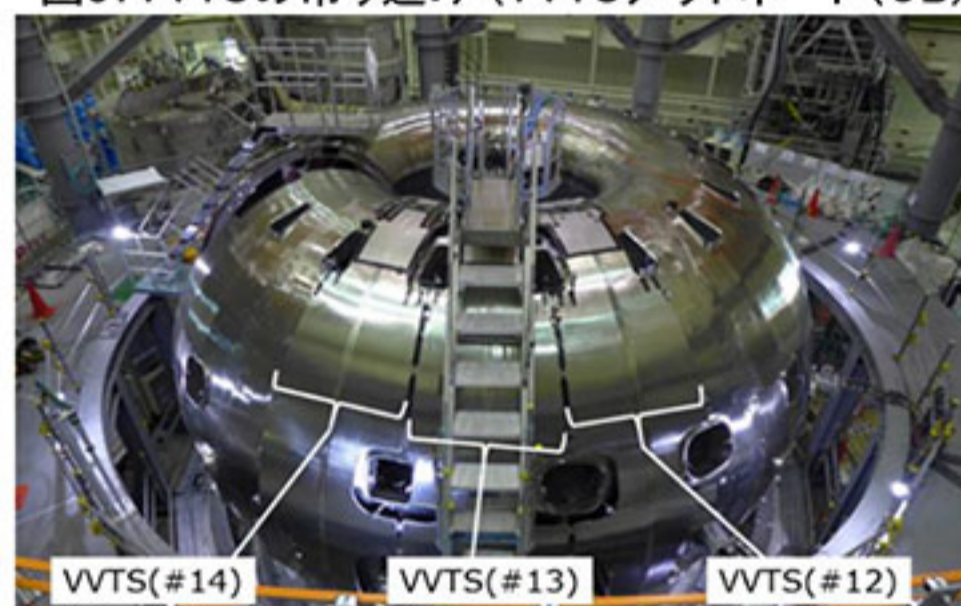


図9: VVTSの組立状況 (20度セクター3体の組立終了)

1) VVTS (Vacuum Vessel Thermal Shield) の組立手順の詳細

VVTSは、20度セクター毎に、インボード側(IB)とアウトボード側(OB)の2つの部分から構成されます。これらを次のような手順で組み立てていきます。

- ① VVTSのIBを組立治具に固定して、真空容器の20度空間から挿入し、旋回クレーンで吊って真空容器外壁に沿って回し込みながら、所定の位置まで移動します。
- ② 同様に、VVTSのOBを組立治具に固定して、真空容器の20度空間から挿入し、旋回クレーンで吊って真空容器外壁に沿って回し込みながら、所定の位置まで移動します。
- ③ 真空容器外壁の所定位置に仮固定し、ヘリウムガス配管(4本)を溶接接続した後、接続金具をボルトで固定してIBとOBを一体化します。
- ④ 一体化後、方位等の位置調整を行い、固定します。VVTSは冷却されると下方向に10.3 mm変位しますので、常温状態では赤道面から10.3 mm上方向に設置します。
- ⑤ 2体目以降は、1体目の隣に仮固定し、IBとOBを一体化した後で、隣のセクターとのヘリウムガス配管(4本)の溶接接続を行い、接続金具をボルトで固定して一体化します。

■核融合中性子源施設FNS¹⁾における先進トリチウム増殖材料の核融合燃料トリチウム放出特性に関する実験の完遂

核融合炉の燃料であるトリチウムは自然界にはほとんど存在しないため、プラズマを囲むブランケット内に充填した、「トリチウム増殖材料(リチウムを含有したセラミックスの微小球)」に、プラズマ中の核融合反応により発生した中性子を当てて生産します。そこで、ブランケット使用環境下における増殖材料からのトリチウム放出特性をあらかじめ評価するために、核融合中性子源施設FNSにおいて、増殖材料の中性子照射試験を行いました。

核融合原型炉では、従来のチタン酸リチウム Li_2TiO_3 よりトリチウムの生産性に優れた増殖材料が求められています。本要求を満たす材料として、Liを過剰に添加したLi添加型 Li_2TiO_3 ²⁾にジルコン酸リチウム Li_2ZrO_3 を20%混合(固溶)した先新的な微小球製造に成功しました。また、高温下での照射試験を行うため、特別な設計の照射容器を製作し、最高900°Cまでの照射試験を可能にしました。

トリチウム増殖材料の使用温度範囲(300~900°C)にて、中性子を5時間照射する試験を行い、トリチウム放出特性を評価した結果、主に、核融合燃料として取扱いが容易なガス(HTとして)放出されることが明らかになりました。一方、処理プロセスが複雑となる(HTO)水成分は最大約1%と、従来の Li_2TiO_3 の場合(600°C測定にて約30%)と比較して極めて少量であるとともに、微小球中の残留トリチウム量は、高温になるほど少なくなり、トリチウム放出特性に優れていることを明らかにしました(図10)。

2016年2月5日、先進トリチウム増殖材料のトリチウム放出特性に関する実験を完遂し、34年6か月間のFNS実験運転を完遂しました(図11)。今後は、核融合ブランケット内におけるトリチウム放出をモデル化する予定です。

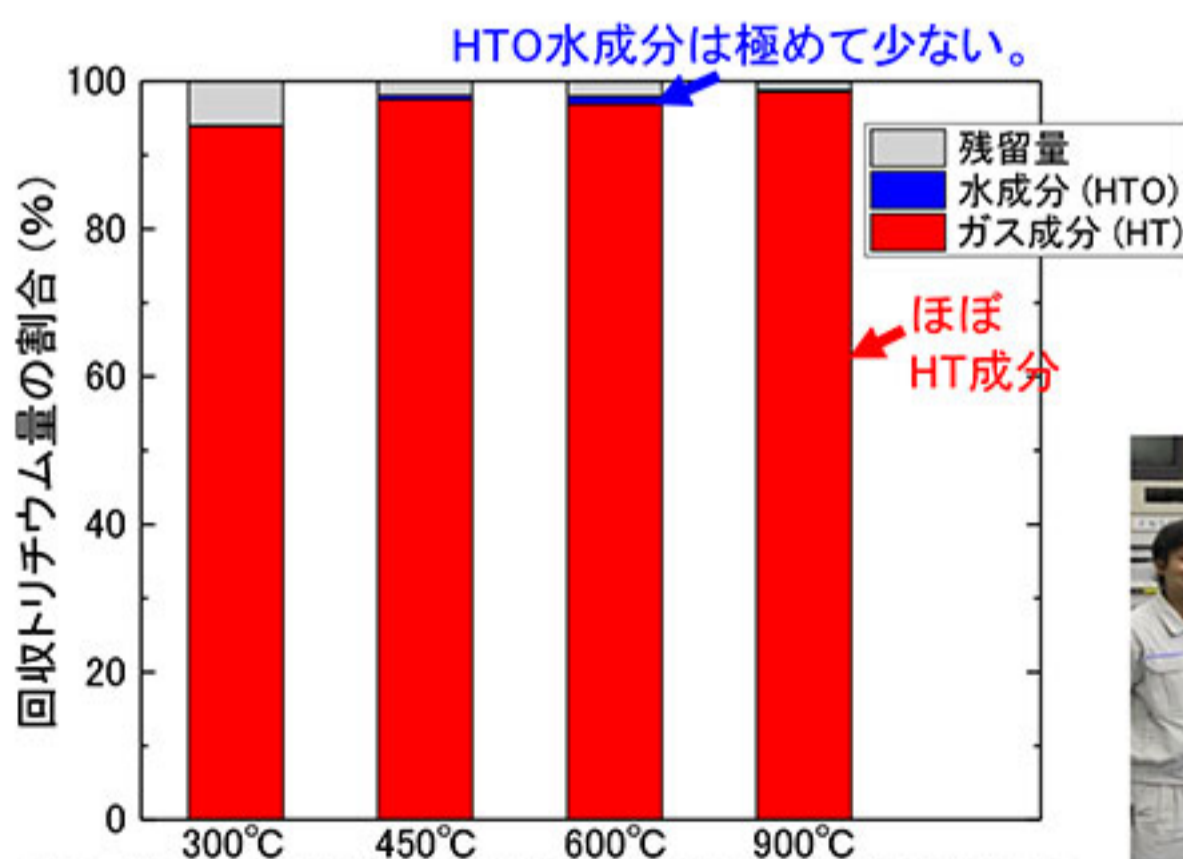


図10: 革新的な固溶体微小球からのトリチウム放出成分の温度依存性

微小球を充填した照射容器



図11: 照射試験の様子と運転完了の記念撮影

1) FNSは、Fusion Neutronics Sourceの略。

2) Li添加型 Li_2TiO_3 : 通常のチタン酸リチウムより化学的安定性を向上させるため、リチウムを多く添加したセラミックス。

■サイエンスカフェを開催

3月12日(土)、那珂市立図書館において、那珂市在住の方をはじめ、一般の皆様を対象としたサイエンス・カフェ(研究者・技術者と一般の方が気軽に直接語り合う場のこと)を開催しました。

今回は「放電の科学～小さな稲妻を作り核融合のしくみを理解する～」というテーマで、放電の性質や核融合と放電の関わりについてのお話(図12)と手のひらサイズの高電圧発生装置を用意して小さな稲妻を作るミニ実験を行いました。

参加された方には、銅箔が配られ、それぞれお好みの形状(とんがったり、丸みがかったり)に切り抜いて、電極を作って頂き、形状と放電の起こり易さの関係について比較実験を行っていただきました(図13)。小さな放電は「パチン」という音と共に火花が見えるので、現象の起こりやすさは見てすぐに判ります。この実験を通じて、楽しく放電現象について感覚的にご理解いただけたのではないかと思います。

このサイエンスカフェで、参加者の皆様が放電現象を楽しむ様子は茨城新聞紙上でも紹介されました(図14)。

今後も、研究者が工夫を凝らした新作面白実験を携えて、充実したサイエンス・カフェを企画していきます。



図12:放電とは?



図14:平成28年3月16日付茨城新聞



図13:小さな稲妻を作る実験の様子