

核融合最前線

Fusion Forefront

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

■中性粒子入射装置実機試験施設(NBTF)用高電圧電源機器がイタリア・パドバのRFXコンソーシアムに到着

国際熱核融合実験炉イーター(ITER)のプラズマを外部から加熱する中性粒子入射加熱装置はビームエネルギー100万電子ボルト、単機入射パワー16.5メガワットという、既存システムの2倍以上の高エネルギー中性粒子加熱装置です。高電圧・高出力の要求に加えて、放射線環境で100万ボルトの高電圧を真空中で絶縁する機能や、ITERのプラズマを加熱し、またプラズマ中に電流を駆動してITERの運転を制御する機能が求められています。このため、ITERでは、実機と同等の性能で試験をする中性粒子入射装置実機試験施設をイタリア・パドバにあるRFXコンソーシアムに建設し、実機の製作に先行して試験を行います。

日本は中性粒子入射装置実機試験施設のうち、100万ボルト超高電圧直流電源の中核機器の調達を担当し、機器の開発・製作を進めてきました。100万ボルトの超高電圧直流電源は、昇圧変圧器と整流器を組み合わせた直流発生器5台を直列に接続して発生します。昨年度末に直流発生器の開発が完了し、5台のうち低電位側の3台(20万ボルト、40万ボルト、60万ボルト発生用)の直流発生器を製作してイタリアのパドバへ向けて出荷しました。2015年12月9日に現地に到着し(図1)、予定どおり現地据付作業を開始しました(図2)。

日本による調達機器の現地到着と据付工事の開始を祝して、ITER機構、イタリア教育・大学・研究省、日本の文部科学省、欧州委員会、ITERの欧州極内機関から来賓を迎えて、12月10日にRFXコンソーシアムにおいて、式典が開催されました。



図1: ベニス、マルゲラ港での電源機器の荷揚げCS試験コイルと試験装置



図2: RFXコンソーシアムに到着したNBTF用電源機器(トランスと電送系)

■「内閣総理大臣表彰第6回ものづくり日本大賞 優秀賞」を受賞

ITERプロジェクト部NB加熱開発グループの戸張博之主幹研究員が、「ITER向け世界最大級絶縁継手の金属ロウ付技術開発」(図3)によって、内閣総理大臣表彰第6回ものづくり日本大賞の優秀賞を株式会社日立パワーデバイスと共同受賞しました(図4)。

ITERのプラズマを核融合反応が起こる約1億度の高温まで加熱する装置の1つが中性粒子入射装置です。この中性粒子入射装置では、水素のマイナスイオンを100万ボルトの高電圧で加速し、中性化したのちにプラズマに入射してプラズマを加熱します。このため、ITER用中性粒子入射装置では100万ボルトの高電圧を電気絶縁するために、世界最大口径(外径1.56 m)のセラミックリングを開発してきました。このセラミックリングはNB装置の一部である高電圧ブッシングと呼ばれる機器に組み込んで一体化されますが、そのためにはこのセラミックリングと高電圧ブッシングの金属部品を接合して、内部を密閉する必要がありました。セラミックと金属という異なる素材の接合には、両者の間に溶けた金属を流して接着するロウ付けと呼ばれる技術が広く用いられていますが、直径が1 mを超える大型のセラミックのロウ付けでは、ロウ付け時に約800°Cまで温度を上げると、わずかな熱膨張の差でもセラミックと金属の間に力が発生してセラミックが割れてしまうという問題がありました。受賞者は株式会社日立パワーデバイスと協力して、セラミックと金属部品の間に特殊合金板を入れ、熱膨張の差によって発生する力が集中しないように合金板の形状を工夫することにより、この大口徑セラミックを金属部品と接合する技術の開発に成功しました。



図3: 特殊合金板とロウ付けした大口徑セラミックリング

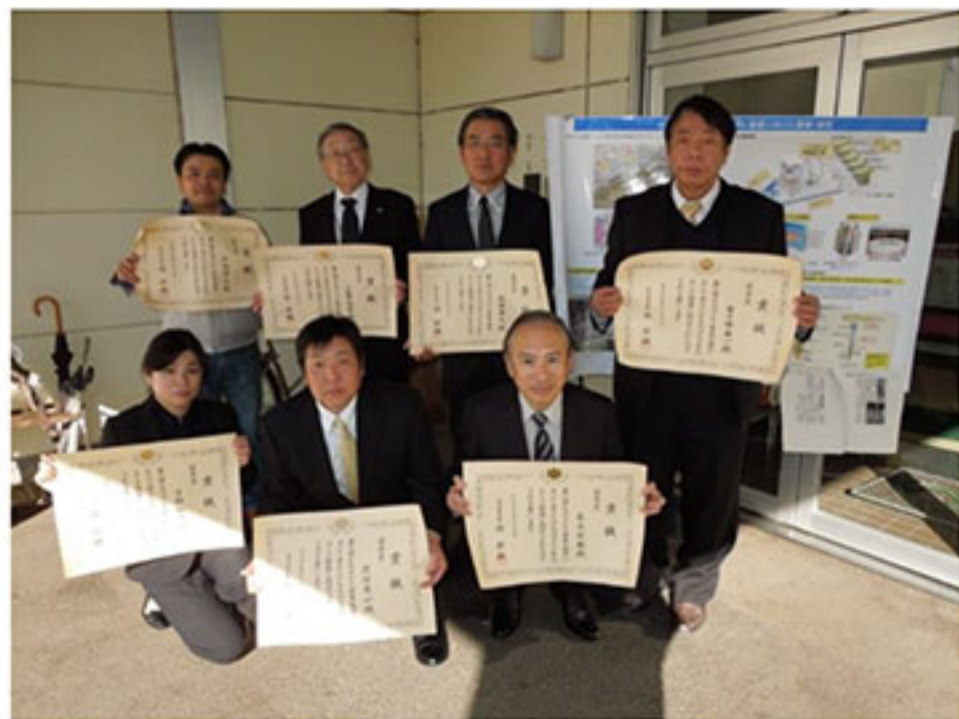


図4: 戸張主幹研究員(後列左)と株式会社日立パワーデバイスの開発担当者

■「プラズマ・核融合学会 若手学会発表賞」を受賞

ITERプロジェクト部RF加熱開発グループの小林貴之研究員が、2015年11月に開催された「第32回プラズマ・核融合学会年会」において、「JT-60SAに向けた電子サイクロトロン加熱電流駆動装置の設計及び開発の進展」の題目で発表し、若手学会発表賞を受賞しました(図5)。

ITERやJT-60SAのような大型核融合実験装置において磁場で閉じ込めたプラズマを加熱するには、電子サイクロトロン周波数帯と呼ばれる、高い振動数(周波数)の高周波を用いるのが効果的な方法です。RF加熱開発グループでは、この高周波を発生する高周波源「ジャイロトロン」の開発を行っています。水分子を加熱する電子レンジで使われている周波数が2.45ギガヘルツであるのに対し、プラズマ加熱用の電子サイクロトロン加熱電流駆動装置は10ギガヘルツ以上であり1秒間の振動回数が1000億回にも達します。受賞者らは、JT-60SAに向けて性能目標としていた1000キロワット、100秒の出力を、単一の高周波源として世界で初めて2つの周波数(110ギガヘルツ、138ギガヘルツ)の両方で達成しました。さらに110ギガヘルツにおいて従来の出力世界記録(1500キロワット)を上回る1800キロワットを確認、同じジャイロトロンの第3の周波数である82ギガヘルツにおいても1000キロワットの出力を得ることに成功し、これらの成果を学会で報告しました。この成果により、たった1台の高周波源を用いて複数の周波数で大電力・長時間の加熱が可能となり、JT-60SAの幅広い実験条件においてプラズマを加熱することができるようになりました。



図5: プラズマ・核融合学会での授賞式(小林研究員:後列右から2番目)

■JT-60SA真空容器360度の仮設置、拘束治具の撤去完了

真空容器340度(ドーナツ外直径10 m、高さ6.6 m)の完成後、真空容器の最終接続部20度セクターを吊り込み、真空容器340度の間に挿入し360度の仮設置を行いました(図6)。真空容器340度の両側の拘束治具と仮支持脚2本で、この20度セクターを固定し、仮合せを実施しました。この20度セクターは最終的に隙間を埋めるスプライスプレートを用いて340度部分と一体化溶接するため、溶接箇所(図6)の熱収縮(4 mm/箇所×4箇所)を予測して、最終形状より真空容器340度とのギャップを16 mm余分に開けた状態としました。この状態で最終接続部20度セクター両サイドのギャップ計測を行い、その値をスプライスプレートの製作寸法としました。なお、この20度セクターは、2015年12月中に取り外され、真空容器サーマルシールド取付けとトロイダル磁場コイル挿入に向けて真空容器は340度に戻してあります。

溶接箇所(全部で4箇所の溶接ライン)

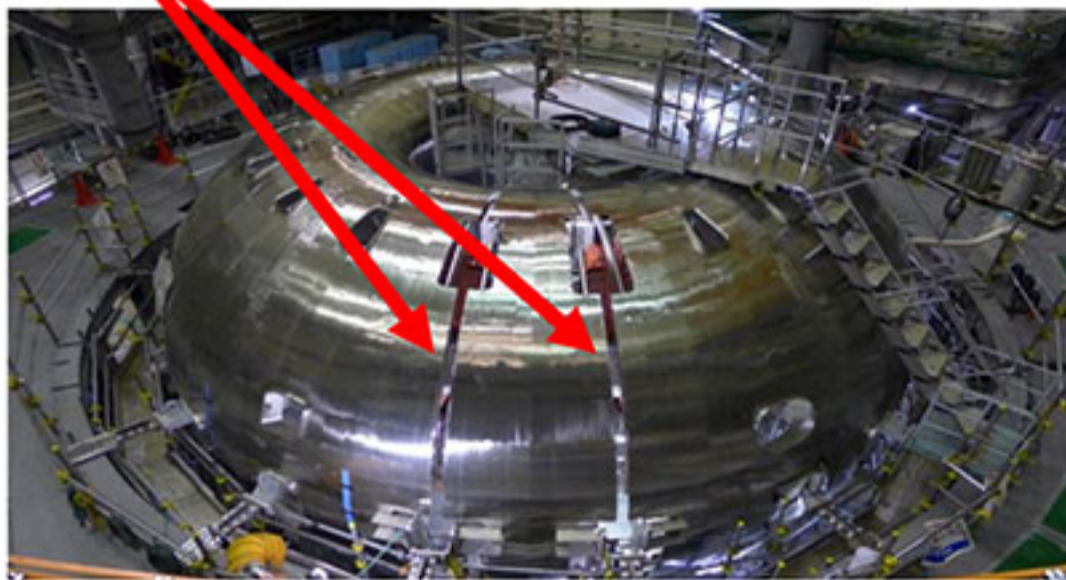


図6: 最終接続部20度セクターの仮合せによる真空容器360度の仮設置状態



図7: 真空容器40度セクターの拘束治具

また、完成した真空容器セクター(40度×7体、30度×2体、20度×1体 計340度分)の移動、起立や溶接時の変形を抑制するために設置した拘束治具(図7)の解体、撤去を行いました。撤去に当たっては、影響が小さい120度又は110度ブロックの中心部から開始し、解体・撤去に伴う変形が発生していないことを慎重に計測、確認しながら実施しました。最終的には、真空容器340度の両端の拘束治具を残して、全ての拘束治具を撤去しました。その結果、真空容器内部に入るとその構造とサイズが実感できるようになりました(図8)。



図8: 拘束治具撤去後の真空容器内部

■新たなトリチウム増殖材料の微小球を用いた、高温900℃での核融合燃料トリチウム放出特性評価に成功

核融合燃料のトリチウムは、真空容器内のブランケットの中に充填された、直径約1 mmのトリチウム増殖材料(リチウム含有セラミックス)球に中性子を当てて生産します。リチウム含有量が多いほど、トリチウム生産性に優れているため、従来のチタン酸リチウム Li_2TiO_3 よりリチウム(Li)を過剰添加した、Li添加型 Li_2TiO_3 ¹⁾の開発を行っています。この材料は、真空や水素中で焼結する等の製造プロセスが複雑な点が課題でしたが、様々な材料探索の結果、Li添加型 Li_2TiO_3 にジルコン酸リチウム Li_2ZrO_3 を20%混合(固溶)することで課題を解決し、大気中でも容易に製造可能な、新セラミックス球の開発に成功しました。

次に、この新セラミックス球に中性子を照射してトリチウムの放出特性を評価しました。核融合炉での最高使用温度900℃で試験を行うには、核融合中性子源施設(FNS)の中性子発生源に影響を及ぼさないよう、セラミックス球を充填した容器の外側を100℃以下にする必要があります。そこでこれまでの知見を活かし、容器の周りに真空断熱層と空気冷却層を設け、更に容器全体を空冷ファンで冷却した、三重の熱対策を施し、900℃で評価可能な試験体系を確立しました(図9左)。

新セラミックス球(約540グラム)に中性子を5時間照射したところ、放出されたトリチウム(HTガス成分とHTO水成分の和)は、900℃照射後約3時間でほぼ全量回収できることを明らかにしました。また、そのトリチウムの化学形は、核融合燃料として取扱いが容易なHTガス成分が主で、HTO水成分は約6%と、従来材 Li_2TiO_3 の600℃における結果(HTO水成分が約30%)より、大幅に抑制することができました(図9右)。

今後は、核融合炉使用温度範囲(300~900℃)におけるトリチウム放出特性評価を進め、新セラミックス球の早期実用化を目指します。

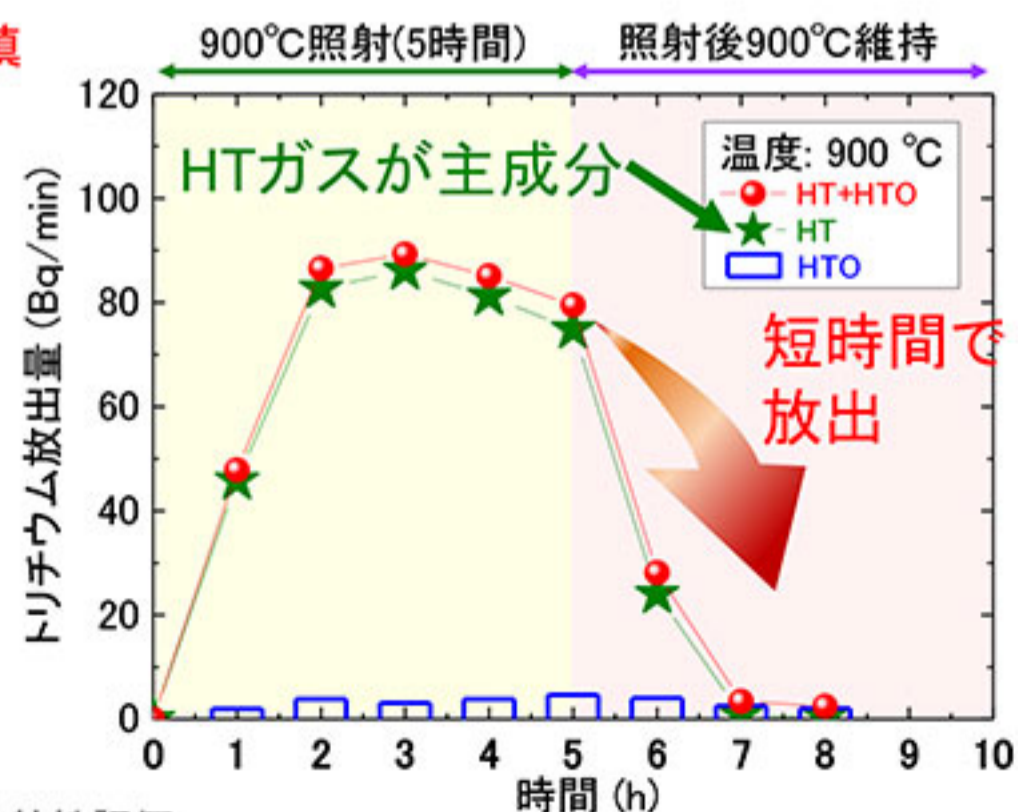


図9: 新たなリチウム含有セラミックス球のトリチウム放出特性評価

1) 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。

■原型加速器入射器において、陽子ビーム及び重陽子ビームの調整試験を日欧が共同で実施

日欧共同事業として六ヶ所核融合研究所では国際核融合材料照射施設(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。

2015年9月には、ビームの品質の指標となるエミッタンスを測定するための測定器の位置をビーム収束をさせるコイルの中間位置から、高周波四重極加速器(RFQ)と結合する近辺の位置に移動させ(図10)、高周波四重極加速器への入射ビームを最適化試験するための調整試験(フェーズA2試験)を日欧共同で実施しました。順調に入射ビームの性能確認試験が進展し、様々なパラメータ依存性のデータを取得しました。特に11月~12月にかけて、欧州実施機関のフュージョン・フォー・エナジー(F4E)から2名、フランスの原子力庁(CEA)サクレー研究所から2名、イタリアの国立核物理学研究所(INFN)レニャーロ研究所から2名が入射器のビーム性能試験に参加し、陽子ビームを用いたシミュレーションとの比較試験、重陽子ビームを用いた最適パラメータの調整が精力的に実施されました(図11)。重陽子ビーム試験では、核融合科学研究所(NIFS)との共同研究において中性子計測を実施し、重水素ビームが材料に照射されて発生する中性子の正確な量を測定することができました。



図10: ビーム品質の指標となるエミッタンスを測定する機器をRFQ結合位置付近に移設した様子



図11: 日欧の共同試験に参加した、核融合部門、プロジェクトチーム、F4E、CEA、INFN、NIFSのメンバー

■核融合原型炉で発生するプラズマからの熱除去技術に見通し

核融合原型炉では、核融合反応によって発生する高速のヘリウム原子核による加熱パワー(300メガワット)によって高温プラズマを維持します。この膨大な加熱パワーは、高温プラズマの閉じ込め領域から、原型炉の下部に位置するダイバータと呼ばれる機器に到達します。このため、原型炉の設計では、ダイバータの熱の除去技術が最重要課題の一つになっています。

ダイバータは、多数の小ブロック(高融点のタングステン製)を並べてその真ん中に除熱のために冷却管を通す構造を持ちます(図12)。現在設計中の原型炉では、プラズマから流出するパワーのうち、80%はダイバータの手前で放射され、残りの20%がダイバータに届き、最終的にダイバータでの熱負荷のピーク値で10メガワット/平方メートル程度になることが計算シミュレーションで予測されています。

核融合原型炉のダイバータ設計では、冷却水の温度をITERの100°Cより高い200°Cに設定するとともに、プラズマからの熱流に中性子照射によるタングステンでの発熱を加味して、ダイバータ各部の温度分布と熱の流れを詳しく調べました。その結果、熱負荷が集中する付近のタングステンブロックの端の温度が増加するものの、表面温度は最高1021°C、配管に銅合金を利用したときの銅緩衝材側の最高温度は331°Cにとどまり、材料の使用温度条件(タングステン: ~1200°C以下、銅合金: ~400°C以下)を満たすことが分かりました(図13)。これらの設計検討の結果から、核融合原型炉で発生するプラズマの熱除去概念に見通しを得ることができました。

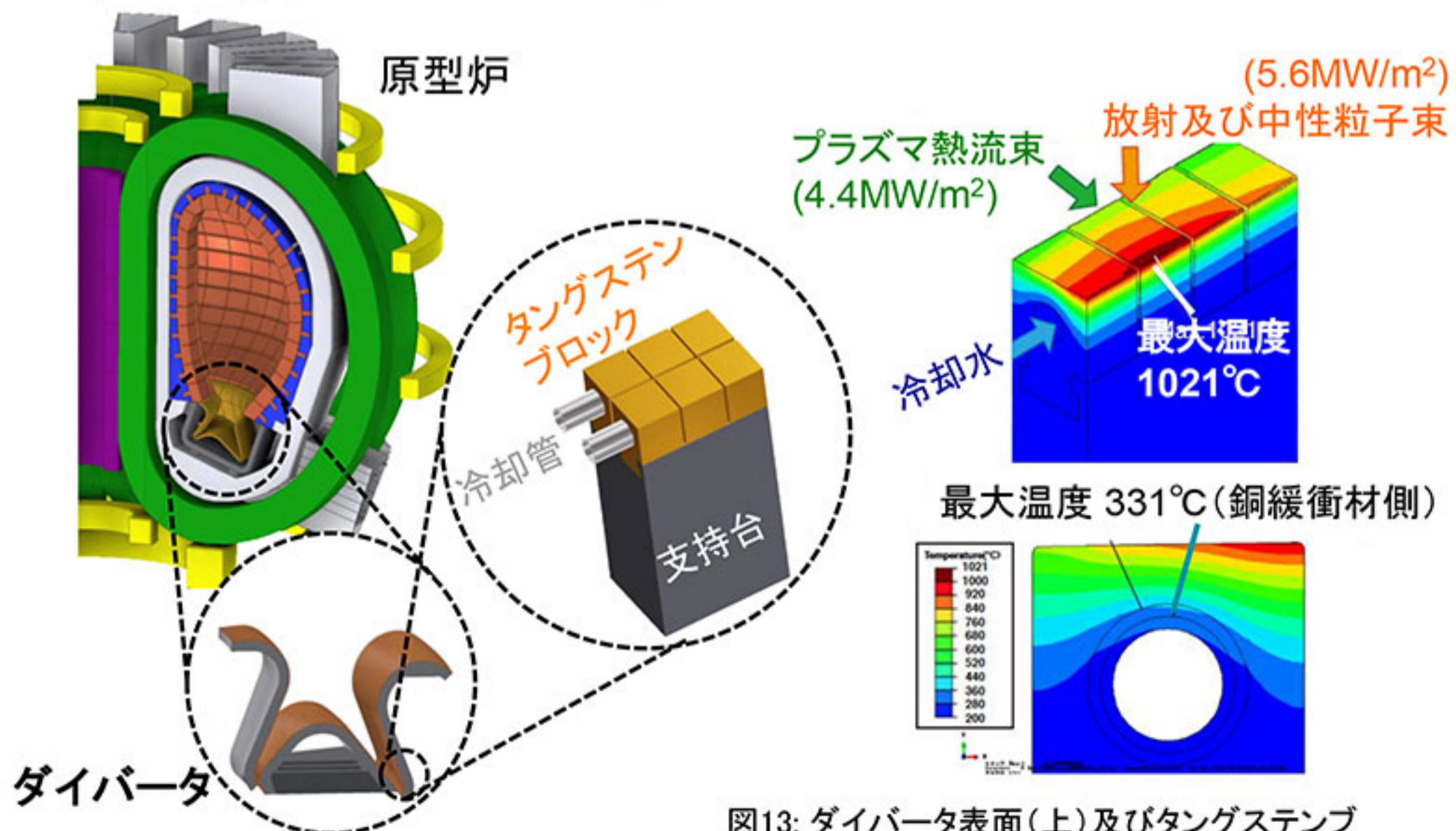


図12: 原型炉ダイバータの構造

図13: ダイバータ表面(上)及びタングステンブロック断面(下)における温度分布

■高性能な核融合炉の実現を目指して、中心ソレノイドを使わないプラズマ電流立ち上げ法を研究

トカマク型の核融合プラズマ装置では、中心に設置された電磁石(中心ソレノイド)を用いて電磁誘導によりプラズマ電流を立ち上げます。この中心ソレノイドをできるだけ用いないでプラズマ電流を立ち上げることができれば、中心ソレノイドを小さくでき、コンパクトで高性能な核融合炉を実現できる可能性があります。そこで、JT-60SAにおける中心ソレノイドを使わないプラズマ電流立ち上げの実験的な検証を目指して、統合コード²⁾(TOPICS)によるシミュレーション研究を行いました。

プラズマ電流を超える電流を中性粒子ビームや電子サイクロトロン波を用いて駆動できれば、中心ソレノイドを使うことなくプラズマ電流を立ち上げることができますが、電磁流体不安定性が問題となる可能性があります。実際、電流駆動効率の高い中性粒子ビームのみを入射した場合に、電磁流体の安定性の限界を超えることが明らかになりました(図14の点線)。そこで、中性粒子ビームの入射位置、入射パワーを調整して圧力勾配を緩和するとともに、電子サイクロトロン波による局所電流駆動の効果で安定性限界を高めることで、電磁流体の不安定性を回避できることを明らかにしました(図14の実線)。これは、統合コードTOPICSによりプラズマの圧力分布と電流分布の時間発展を統合して計算することで初めて可能になった成果です。この結果から、JT-60SAにおいて中心ソレノイドを使わないプラズマ電流の立ち上げ法を研究するための指針が得られ、中心ソレノイドの小型化による高性能核融合炉の実現へ向けた研究が進展しました。

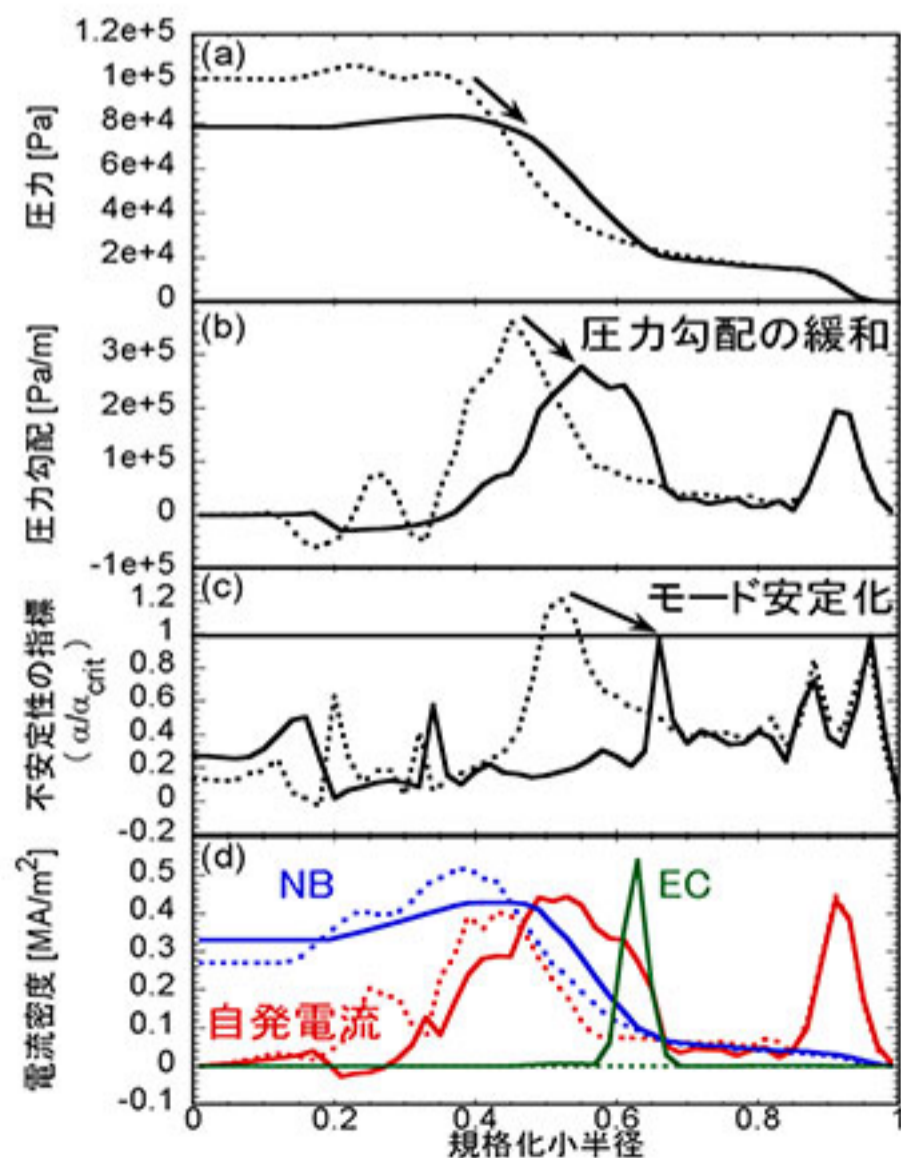


図14: JT-60SAにおいて中心ソレノイドを使わないで2.1メガアンペアまでプラズマ電流を立ち上げた直後のプラズマを示す。点線は、中性粒子ビーム(NB)入射のみの不安定なプラズマ。実線は、中性粒子ビーム入射及び電子サイクロトロン波(EC)入射を調整して得られた安定なプラズマ。

(a) 圧力分布

(b) 圧力勾配

プラズマ中の圧力の変化率で、この値が大きいと電磁流体の不安定性が駆動される。

(c) 不安定性の指標(規格化圧力勾配 α のバルーニングモードの安定性限界 α_{crit} に対する比)この値が1を超えると不安定になる。

(d) 電流密度分布

電子サイクロトロン波(EC)による局所的な電流駆動の効果で、圧力勾配が大きい位置でも不安定性の指標が小さく抑えられている。

2) 統合コード: 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。

■核融合施設見学会及び那珂核融合研究所設立30周年式典を開催

2015年11月8日に核融合施設見学会及び那珂核融合研究所設立30周年式典を開催しました。施設見学会は、核融合研究開発を始めとした科学技術全般に関する理解の促進を目的として毎年開催しています。

「きてみてふれよう！未来へつなぐ新しいエネルギー！」というキャッチフレーズの下、ご来場くださった大勢のお客様に、現在組立中の超伝導核融合実験装置JT-60SAや関連施設(図15)、超伝導体を用いた浮遊実験等、最先端の科学技術に「みて」「ふれて」いただくことができました。また、日本科学未来館科学コミュニケーター池辺靖氏によるサイエンストーク、那珂市や近隣市町村在住の一般の方々並びに地元中学校吹奏楽部による様々な催し物、那珂市消防本部による起震車・はしご車と茨城県警那珂警察署によるパトカー展示、原子力学会北関東支部、原子力機構による協力企画も行い、来場者から大変ご好評いただきました。

那珂核融合研究所設立30周年記念式典では、これまでの歴史を振り返るとともに、核融合研究開発の現状及び今後の展望について当研究所長からご挨拶申し上げました。

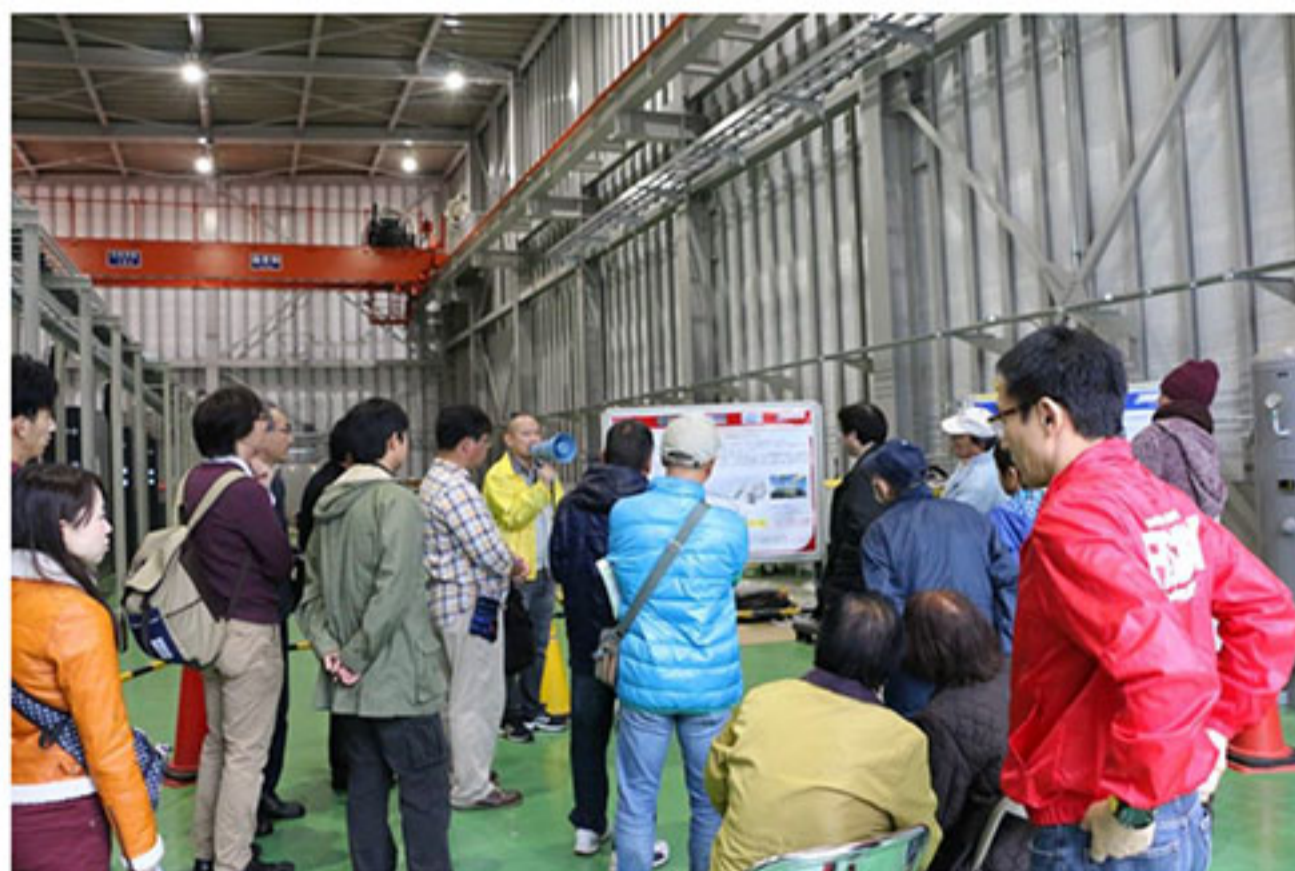


図15: JT-60見学ツアーの様子