

核融合最前線

Fusion Forefront

編集・発行：日本原子力研究開発機構、核融合研究開発部門、那珂核融合研究所、六ヶ所核融合研究所

■イーター・中心ソレノイド・コイル用導体の高い超伝導性能を実証

中心ソレノイド(以下、CS)コイル用に製作している超伝導導体の性能試験を、イーターと同じ運転条件下で実施し、その高い超伝導性能を実証しました。さらに、今まで予測できなかった電磁力によるコイル変形が、超伝導状態を維持できる温度(上限温度)に与える影響を試験し、イーターの運転における上限温度を正確に予測することを可能にし、イーターの安定な運転へ向け大きく貢献しました。

CSコイルは、イーターのプラズマ中に電流を流してプラズマ閉じ込め磁場を作る超伝導磁石です。イーターでは、日本がすべてのCS導体を製作し、それを用いて米国がCSコイルを製作します。日本はCS導体の製作を2014年から開始し、その完成品を米国に逐次発送しています。CS導体では、上限温度が高い方がコイルのより安定した動作が期待できます。これまでは、スイスにある試験装置を用いて一部を模擬した条件下で上限温度が設計条件を満足することを確認する試験を行ってきました。イーターの運転条件では、模擬試験結果から予測される上限温度より更に上昇することは分かっていたましたが、どの温度まで上昇するかは正確には分かかっていませんでした。

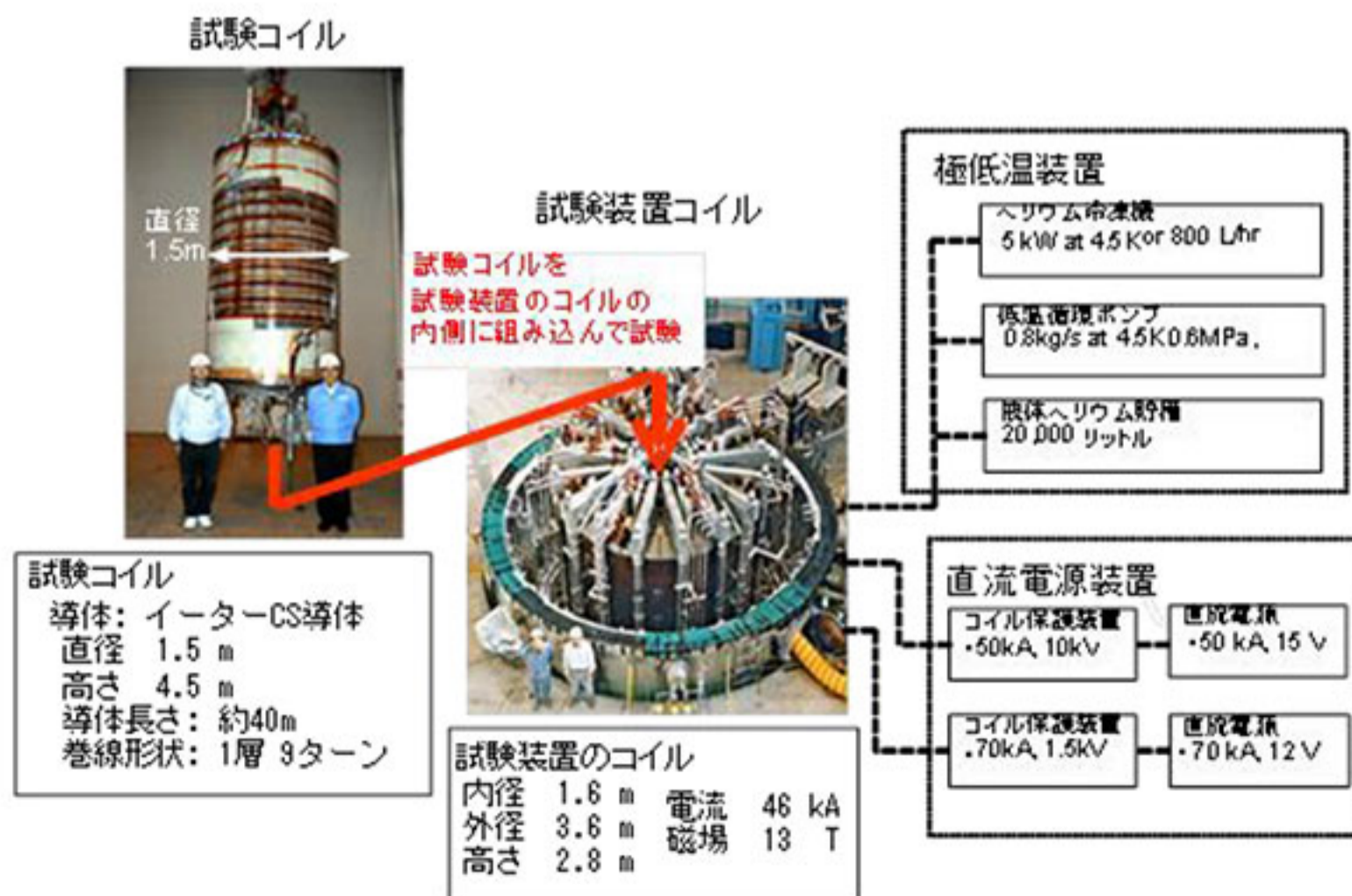
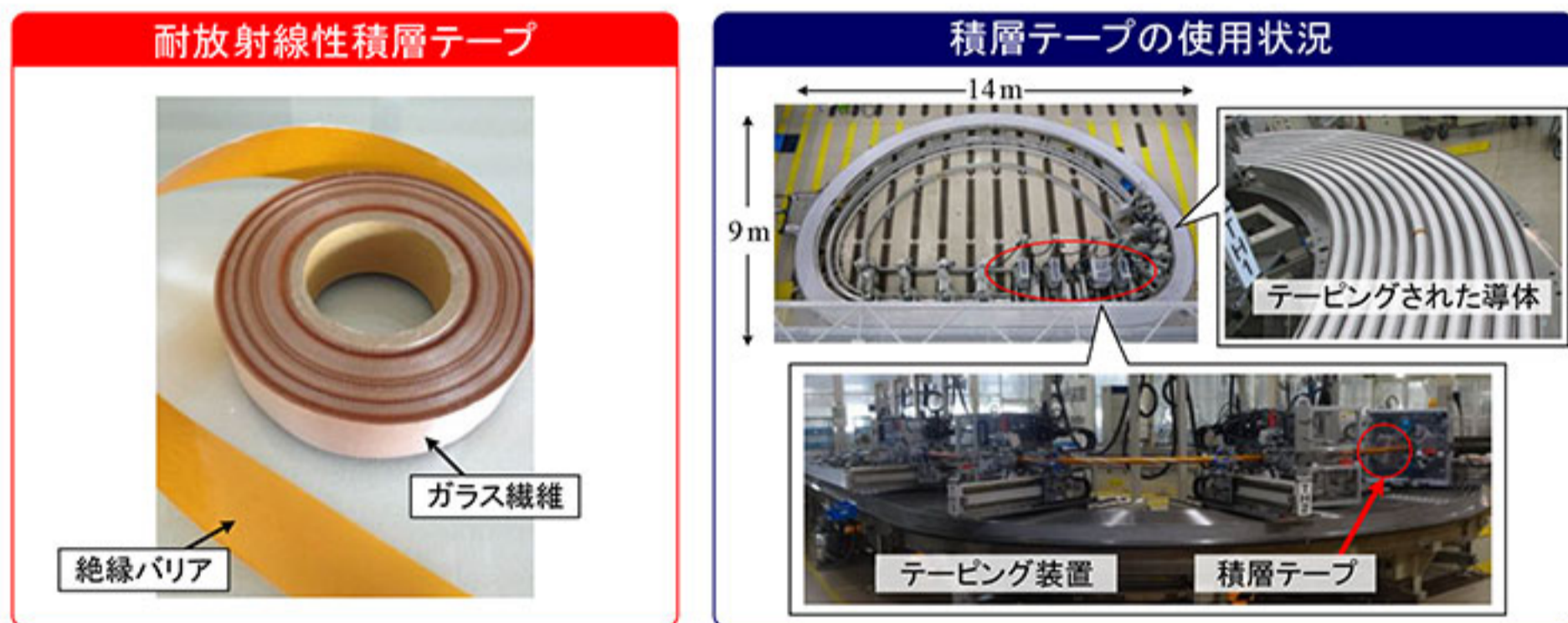


図1: CS試験コイルと試験装置

このたび、那珂核融合研究所にあるイーターの運転条件下で試験できる世界で唯一の装置を用いて上限温度を精密に評価しました。その結果、イーターの運転条件下でのCS導体の上限温度は模擬試験から予測される結果より更に約0.5度高く、零下約266.5°C、6.7K(ケルビン)であることを明らかにし、十分な性能を有することを実証しました。今回の結果は、プラズマ電流を流すために不可欠なCSコイルの安定な動作を通じて、イーターの安定な運転に大きく貢献する成果です。

■耐放射線性に優れた超伝導コイルのための電気絶縁用積層テープの開発に成功

イーターの超伝導トロイダル磁場コイルでは、これまでの核融合実験装置よりも10倍以上の放射線に耐える電気絶縁が必要とされています。原子力機構と有沢製作所は共同で、この要求を満足する耐放射線性に優れた超伝導コイル電気絶縁用積層テープの開発に世界で初めて成功しました。



(写真は三菱重工業株式会社、三菱電機株式会社提供)

図2: 耐放射線積層テープと積層テープの使用状況

導体のコイルの電気絶縁は高電圧に耐える絶縁バリアとガラス繊維を接着した積層テープを超伝導導体の周りに規則的に巻きつけ、樹脂を浸透させて加熱することで硬化し、電気絶縁層を形成して必要な電圧に耐える構造となっています。しかしながら、これまでの接着剤を用いた積層テープは放射線環境での性能が十分でなく、その開発がイーターのトロイダル磁場コイルの製作において重要な課題でした。

超伝導コイルを固定するために従来より使用していた放射線に強く低温(150°C、423K)で硬化する樹脂は粘度が低く、積層テープの接着剤として用いることが出来ませんでした。そこで、低い硬化温度と高い耐放射線性を両立しつつ粘度を最適化した接着剤用の樹脂を開発し、これと絶縁バリア及びガラス繊維を組み合わせた新たな積層テープを開発することに成功しました。これにより、耐放射線性が必要な超伝導コイルの電気絶縁性能を従来の10倍以上の1.1億グレイの放射線に耐えることが可能になり大きく性能を改善しました。

本積層テープはイーター機構においても耐放射線、電気絶縁性能を満足することが確認され、その高い性能が国際的に認められました。その結果、本積層テープは日本が製作しているトロイダル磁場コイルにおいて2015年6月から開始した電気絶縁作業に使用されています。さらに、欧州が担当するトロイダル磁場コイルにも採用されました。また、将来の核融合原型炉用超伝導コイルの電気絶縁技術に寄与できるとともに耐放射線性が必要な電気機器にも応用が期待されます。

■IFMIF原型加速器入射器の重水素ビーム試験において、大電流引出しに成功 欧州からの機器が搬入され据え付け開始

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(以下、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7月に初期の入射器にて初の100 keVの重水素ビームの生成に成功しました(図3)。重水素ビームの発生に伴い、核反応による中性子も観測され、施設の遮へい性能等も当初の設計、評価のとおりであることを確認しました。

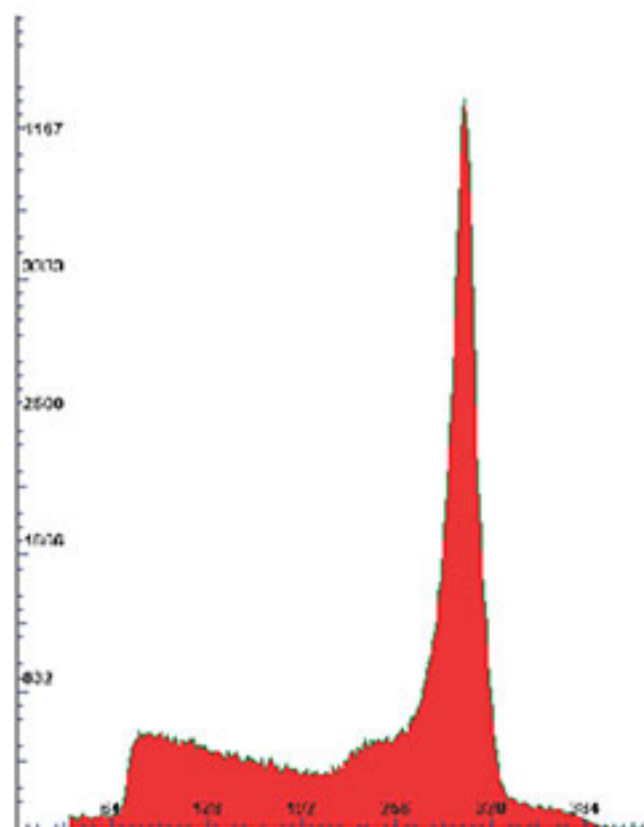


図3: ヘリウム3比例計数管で測定した中性子のエネルギースペクトル。ピーク値はヘリウム3と中性子による核反応を示す



図4:初めての重水素ビーム、中性子発生を記念

これにより、原子力安全技術センターによる放射線障害防止法に基づく施設検査にも合格し、施設検査合格証を受領しました。8月には、本格的な重水素ビーム試験を開始し、イオン源のコンディショニングの結果、重水素イオンビームにおいて100keVで181mAの大電流を引き出すことに成功しました。

これまでに、低エネルギー輸送系において不要な分子イオンを選別し、次段階の高周波四重極加速器(以下、RFQ)の入口に相当する部分を通過する電流値は、目標の140mAを超える145mAに達しています。

さらに、欧州が製作したIFMIF原型加速器用のRFQの最初の高周波源2式と高圧電源7式、分電盤が六ヶ所核融合研究所に搬入され据付けを開始しました。全て所定の位置に固定され、引き続きケーブルトレイ等の据え付けを開始しました。このように来年度から始まるRFQの加速試験に向けて急ピッチで準備を進めています。



図5: 初めて六ヶ所核融合研究所に搬入された高周波源を開梱し握手をする原子力機構とIFMIFプロジェクトチームの担当者



図6: IFMIF/EVEDA開発試験棟の高周波電源室に据付けられた高周波源モジュール2式(上段)と高圧電源7式(下段)

■JT-60SA真空容器340度の完成

(340度真空容器のセクター間溶接作業を終了)

那珂核融合研究所では、JT-60SAの真空容器の組立作業を行っています。8月22日に120度ブロックと110度ブロック2体とのセクター間溶接接続を終了し、これを以って真空容器340度が完成しました(図7)。真空容器は、40度セクター×7体、30度セクター×2体、そして最終接続部20度セクター×1体の計10体のセクターで構成されます。5月に2体目の110度ブロック(40度セクター×2体+30度セクター×1体)を完成させた後、セクター間溶接による熱収縮を均等にするため、120度ブロック(40度セクター×3体)と110度ブロック2体との2箇所のスプライス溶接を同時に実施しました(図8)。

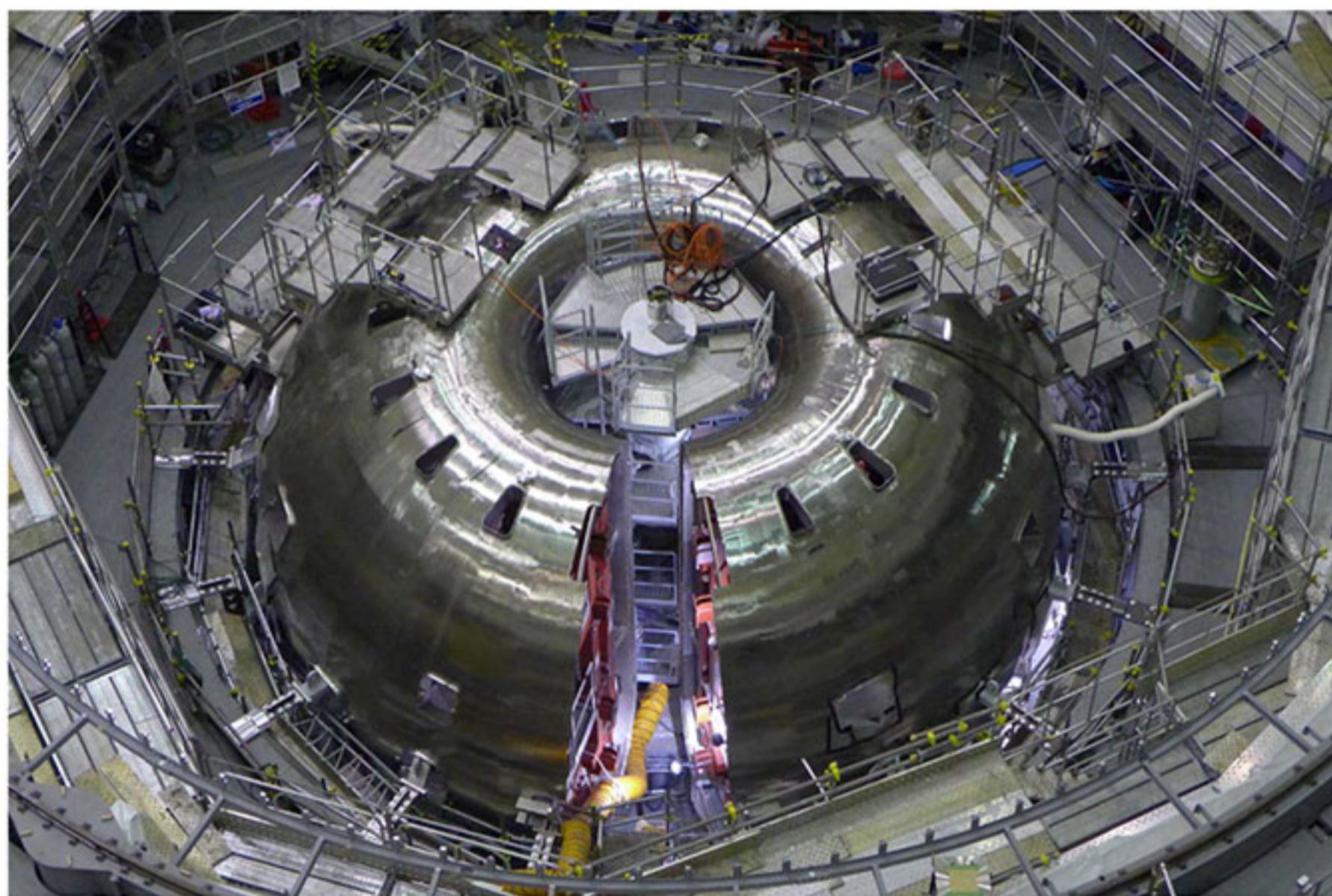


図7: 真空容器340度の完成

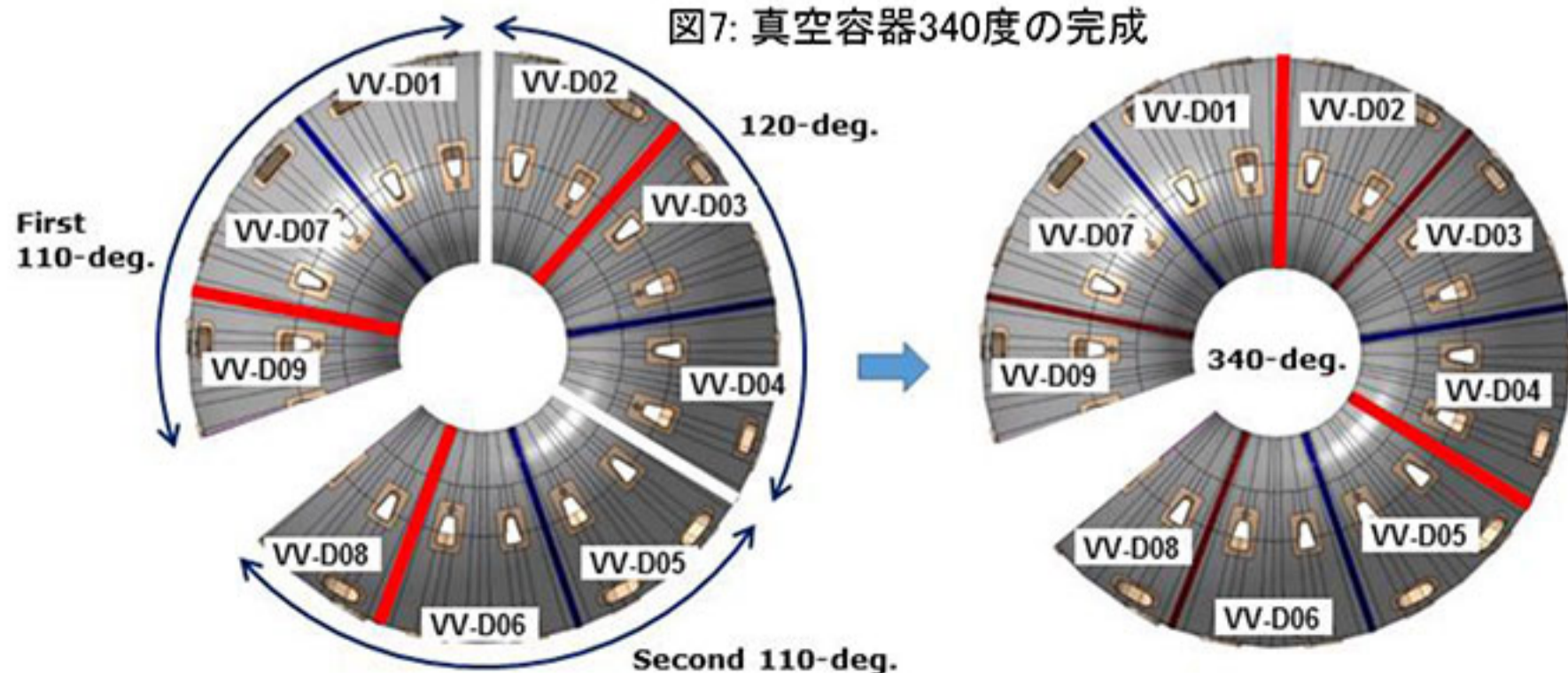


図8: 120度と110度ブロックのセクター間溶接接続 (右図: 2箇所のスプライス溶接)

スプライス溶接とは、二重壁の端面間にスプライスプレート(真空容器と同じ材質SUS316L製の幅約80mm板)を介して溶接接続する方法です。スプライスプレートを用いる溶接接続は、真空容器の製作誤差を許容する溶接(5mm程度の端面のずれがあっても溶接可)で、セクター間溶接接続による熱収縮を予想して、できる限り真円に近い真空容器を作るために採用した方法です(図7)。溶接接続1箇所では約4mmの熱収縮が観測されており、340度全体で周方向(ドーナツに沿った円周)に52mm(スプライス溶接5箇所: $8\text{mm} \times 5 = 40\text{mm}$ 、直接接続3箇所: $4\text{mm} \times 3 = 12\text{mm}$)の熱収縮が生じています。この熱収縮を予め見込んで、端面の幅、スプライスプレートの幅を決定しました。

また、10月14日に茨城県労働基準監督署の立会いの下、旋回クレーンの落成検査を行い、書類検査、外観検査、荷重試験(定格30トンの1.25倍)に合格しました(図9)。この旋回クレーンは、今後、熱遮へい板、及び欧州が製作し那珂研に搬入するトロイダル磁場コイル(全18個)の組立に使用します。これらの組立では、真空容器の20度の隙間から熱遮へい板、トロイダル磁場コイルを順次、真空容器周囲に廻し込みながら組み立てます。最後に真空容器20度セクターと熱遮へい板(20度分)及びトロイダル磁場コイル(18番目)を一体にして組み込み、トカマク本体360度分の組立を完了させます。



図9: 落成検査を終了し、運転を開始した旋回クレーン

■乱れた磁場中の高速イオン振舞いの解析

イーターでは、ELM(Edge Logical Mode)と呼ばれるプラズマ周辺での周期的な熱及び粒子の吐き出し現象の緩和制御が求められています。ELM制御には磁場に適度な乱れを加えることが有効と考えられています。しかし、磁場の乱れによって、プラズマ中の高速イオンがプラズマの外に出て行く(高速イオンの損失)可能性があります。プラズマから出た高速イオンがプラズマを囲む壁に衝突すると、その壁の寿命に影響します。そのため、乱れた磁場中の高速イオンの振舞いを評価することが重要です。高速イオンは磁場に沿って運動するため、振舞いの評価には、磁場の乱れを正確に模擬することも必要です。ところが、ELM制御用に加えた磁場の乱れに、プラズマが応答することにより、その磁場の乱れが変わることが予想されています。今回、自然科学研究機構 核融合科学研究所の協力により、プラズマ応答を考慮して磁場構造を解くことができるコードを用いて、磁場構造がどのように変わり、さらに高速イオンの損失がどのように変わるかを調べました。

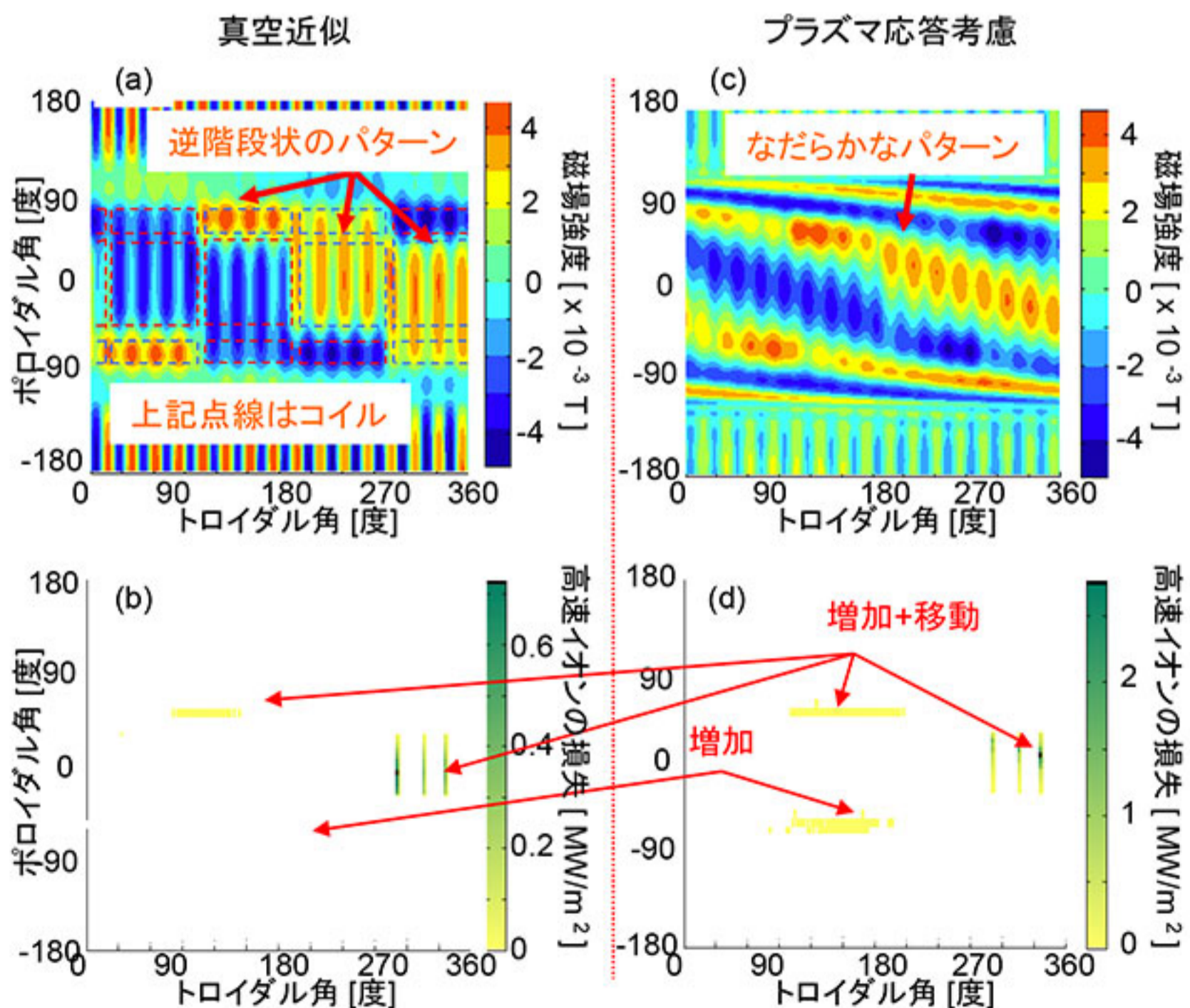


図10:磁場の乱れを用いたELM制御時の磁場構造の変化と高速イオン損失。(a),(c)磁場強度の空間分布。(b),(d)壁への高速イオンの損失分布。(a),(b)は真空近似の場合、(c),(d)はプラズマ応答を考慮した場合。

韓国国立核融合研究所のKSTARTトカマク装置では、磁場の乱れを用いたELM制御実験を行っています。この実験を模擬して、プラズマの外部から四角形の12個の電磁コイルで発生させた制御磁場の影響を調べました。図10にプラズマ応答を考慮しない場合(以下、真空近似)と考慮した場合の比較を示します。磁場構造(a)及び(c)については、真空近似の場合(a)は四角形のコイル形状(点線:青と赤では発生させた磁場の向きが逆)による逆階段状のパターンが見えますが、プラズマ応答を考慮した場合(c)ではなだらかなパターンに変化しています。

次に、これらの磁場構造による高速イオンの振舞いを評価しました。図10 (b)及び (d)に、プラズマを取り囲む壁への高速イオンの損失分布を示します。真空近似の場合とプラズマ応答を考慮した場合で分布が異なり、量も増加していることが分かります。将来の核融合炉では、熱対策が不十分な箇所への熱負荷は問題となり得ます。原子力機構は、共同研究により、この度の解析結果を今後のKSTARの実験に活かすことで、ELM制御が高速イオンに与える影響の理解を進めていきます。

■トカマク磁気座標に適合した流体方程式系に基づく新しい流体型輸送コードの開発

トカマクプラズマの時間発展をシミュレーションするために広く用いられている輸送コードは拡散型輸送方程式に基づいています。ところが、この方程式は現象の変化がゆっくりと進むと仮定されているため、素早い遷移的な変化が取り扱えません。また、その他にも多くの仮定が含まれています。プラズマは多数の物理量が相互に影響を与えながら発展するため、その正確な記述には、仮定が少ないより高度な物理モデルに従う新しい輸送コードの開発が必要になります。

そのため核融合研究開発部門では、従来とは全く異なる世界的にも類の無い流体型輸送コードTASK/TXを開発してきました。TASK/TXでは、プラズマの巨視的発展に関わる多くの現象を再現できるように電磁場の発展を記述するマクスウェル方程式と、プラズマの流体としての発展を記述する運動方程式群から成り立っており、電磁場とプラズマ諸量が自己無撞着に決定される特徴を持っています。今回これをさらにトカマクの磁場の形状に合わせ、輸送現象を注意深く取り扱えるように新しく書き下すことで、より現実的なプラズマ解析に適用できるよう改良しました。

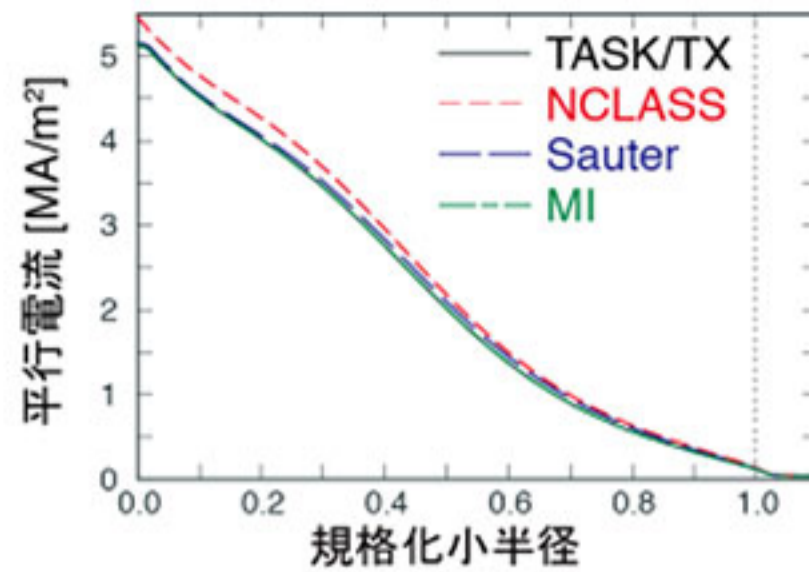


図:11 TASK/TXと他の新古典輸送モデルが予測した磁力線と平行方向に流れる電流密度分布。

TASK/TXの特筆すべき特徴として、①プラズマ電流の発展や輸送に大きな影響を与える新古典輸送¹⁾が決める諸量を、外部のモデルに頼らず内部的に計算できる点や、②他のコードでは必須であった局所的な電荷中性条件や電子とイオンの粒子束の和が零となる条件を課す必要が無い、ことなどが挙げられます。

図11では、TASK/TXと複数の新古典輸送モデルが予測した磁力線と平行方向の電流密度分布を比較していますが良好な一致が得られ、新古典輸送も内部に完全に含んだこれまでにない輸送コードであることが示されました。

また、磁気面を横切って外側へ粒子が輸送される粒子束は新古典輸送でも乱流輸送でも生じますが、TASK/TXではそれぞれに起因する粒子束を矛盾無く内部的に評価してその和を出力します。粒子束そのものを評価できるのはTASK/TXにしかない特徴です。

このコードを用いれば、JT-60SA及びイーター並びに原型炉の性能をより正確に予測することが可能になります。今後は、プラズマの高閉じ込め状態への遷移など、素早い現象が本質となる物理を調べていく予定です。

1)プラズマ中の粒子はお互いに衝突することにより、空間的に広がっていきます。これを古典的な輸送と呼びます。ドーナツ型であるトカマクでは、閉じ込めのために磁場がかけられ、それがドーナツの外側ほど弱くなっていくことに起因して、さらに早く広がる性質を持ちます。これを新古典輸送と呼びます。外部から駆動すること無くプラズマ内部で自然に生じる自発電流など、プラズマの閉じ込めに重要な性質の多くは新古典輸送に由来するものです。

■ALEと呼ばれる不安定性をシミュレーションで再現することに初めて成功

JT-60の実験の負イオン中性粒子ビームによって加熱された高ベータプラズマにおいて突発的の大事象(Abrupt Large Events)と呼ばれる現象が観測されています。この現象は数100マイクロ秒の期間、磁場揺動信号の強いスパイク状(尖った)信号として現れます。この現象が起きると炉心の高エネルギーイオン密度が平坦化し、中性子放出率が最大で25%程度低下してしまいます。これは核融合反応の低下につながるため、その物理機構の解明は高エネルギー粒子輸送研究の重要な研究テーマと位置づけられています。プラズマ理論シミュレーショングループでは高エネルギー粒子・MHD連結シミュレーションコードMEGA(アルフヴェン波と高エネルギー粒子の共鳴により駆動される電磁流体不安定性を解析)を用いてマルチスケールシミュレーションによりALEの研究を進め、これまで周波数掃引(時間的にモードの周波数が増加または減少する)現象の再現に成功していました。

今回、マルチフェイズシミュレーション手法を新たに採用し、5ミリ秒間隔ごとに1ミリ秒の間、MHDと衝突に起因する速度分布関数の緩和を解き、MHDを解かない時間帯では速度分布関数の緩和のみを解く計算手法により、ALEスパイクを再現することに成功しました。この手法を導入することにより高性能計算機HELIOSで1年以上かかる計算を約3ヶ月で実現することができました。図12にシミュレーション結果を示します。3つのモードの非線形相互作用が強く起こった結果、ALEが誘発されることを初めて明らかにしました。これはマルチモードの相互作用の重要性を示唆しています。JT-60SA実験において磁場揺動のスペクトル計測ができればALEの発生機構を検証することが可能と考えられます。

今後、詳細な分布解析を進め、非線形相互作用の物理機構を明らかにする予定です。

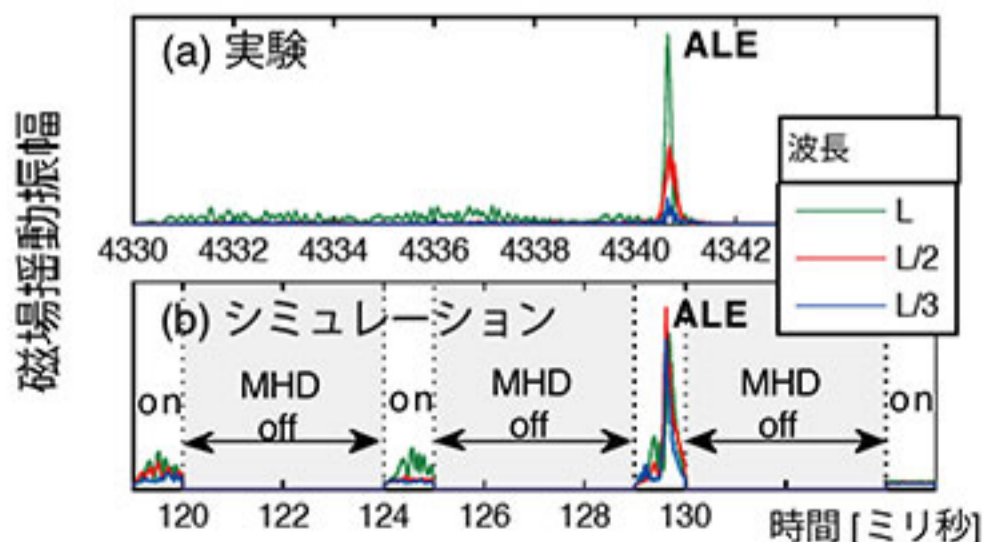


図12:磁場揺動振幅の時間発展 (a) 実験、(b) シミュレーション波長L、L/2、L/3の3つのモードの相互作用を示す。ここでLはトーラス長。

■「なかひまわりフェスティバル2015」に出展

8月29日に、毎年恒例のビッグイベント「なかひまわりフェスティバル2015」が那珂総合公園で開催されました。当日は、時折小雨が混じるぐずついた天気でしたが、那珂核融合研究所の展示スペースにも多くの方々に訪れていただきました。

那珂核融合研究所は、ミニ理科実験(図13)を実施するとともに核融合に関するパネル展示等を行いました。参加者の方々は、実験や説明を通して、核融合について、少なからず興味を持っていただけた様子が見られました。今後もこのような機会をとおして、地域の方々に対する核融合研究開発の理解促進に努めていきます。



図13: ミニ理科実験(人工ダイヤの氷切り体験)の様子