

■イーター超伝導トロイダル磁場コイル1 号機の巻線部の 対地絶縁作業を完了

核融合実験炉イーターの主要機器の1つであるトロイダル磁場コイ ルは、図1に示す通り、プラズマ中に電流を流してプラズマ閉じ込め磁 場を作る超伝導コイルです。イーターでは予備機1基を含む19基のトロ イダル磁場コイルを必要としており、日本はそのうち9基の製作を分担 しています。トロイダル磁場コイルは巻線部と構造物から構成されてお り、巻線部は、超伝導導体をD型に巻き、ラジアル・プレートと呼ばれる 構造体の溝に収めて固定し、これを7体積み重ねて(積層)製作しま す。このたび、トロイダル磁場コイル1号機の巻線部を積層し、その外 周に対地絶縁用の電気絶縁テープを巻く作業を完了しました(図2)。 今後は巻線部を構造物に納めて溶接し、コイルを完成させます。 イーターでは主要機器の調達の進捗を管理するため、イーター理事会 がマイルストーンを設定し、期日までに達成することを求めています。 トロイダル磁場コイルについては、1号機の巻線部の対地絶縁作業が マイルストーンに設定されており、今回期日までに作業が完了しまし た。これはイーター計画における大きな進展であるとして、イーター機 構の機構長を始め、国内外から高く評価されました。



図1 核融合実験炉イーター用トロイダル磁場コイル



図2 対地絶縁作業を完了したトロイダル磁場コイル1号機の巻線部

■ イーター中性粒子入射装置実機試験施設(NBTF)用の 高電圧電源機器の製作を完遂

イーターのプラズマを核融合が起こる1億℃以上まで加熱する装置 の一つが中性粒子入射装置(NBI)です。イーターが要求するNBIの 性能^{※1}は従来のNBIに比べて格段に高いため、イーターと同一の NBIを事前に試験する施設(NBTF)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。

日本は、このNBTF用の高電圧電源のうち、直流発生器(DCG)全 5台(最大電圧1MV)、1MV絶縁変圧器、直流フィルター、及び伝送ラ イン1、2、3などから成る計14種類の電源機器を調達します。今回、 (株)日立製作所での約4年半にわたる設計・製作が完了し、NBTF用 電源機器の製作を完遂しました。

最後の製作機器となった伝送ライン3は図3に示す通り、内部に6気圧 の絶縁ガスを封入する外径2.7m、90度屈曲の圧力容器となっており、温 度変化や地震による変位を吸収する構造を有しています。内部には電 力導体、冷却水、ガス供給配管等、多数の配線・配管が組まれており、 外側の圧力容器壁との間で最大1MVの高電圧を絶縁する必要がありま す。

そこで定格電圧の20%増しの1.2MVをかけて絶縁性能を確認する耐 電圧試験を国内工場試験で実施しました。その結果、イーターの要求で ある1時間安定保持を達成し、製作完遂となったものです。

これまでに製作した電源機器は、順次NBTFサイトへ輸送して据付工事 を実施しています。すでに、NBTFサイトでは全体の約9割の機器の組み 立てを完了し(図4)、平成29年度内には据付を完了して平成30年からイ ーターNBIの試験を開始する計画です。

※1 NB入射装置はエネルギー100万電子ボルト、電流40Aの負イオンビームを1 時間連続で発生させるための装置です。 Fusion Forefront No.8 2016 Winter



図3 NBTF用伝送ライン3の外観



図4 NBTF装置(イタリア・パドバ)での直流1MV高電圧電源機器の組立・据え助作業の進捗

JT-60SA用ECHランチャーのミラー駆動機構開発に成功 (真空中繰返し駆動試験にて目標達成)

JT-60SAの電子サイクロトロン加熱(ECH)装置には、プラズマにマイ クロ波ビームを入射し、その角度を幅広く変えられる機器(ECHラン チャー)が必要です。今回、マイクロ波反射ミラーの駆動機構について、 耐久性を確認する試験を実機に近い環境で行い、JT-60SAにおける想 定動作回数から決めた目標の10万往復を超える動作に成功しました。

開発中のECHランチャー(図5)は、真空中でビームを反射する直動ミ ラーの直線駆動(~40cm)と固定式の大型曲面ミラーの組合せにより、 プラズマの垂直断面を幅広くカバーするビーム入射角度可変範囲(~ 60度)を得ることが特徴です。直動用の駆動軸の内部をミラー冷却水の 配管とすることで真空中の水配管を不要とし、高い信頼性と幅広いビー ム入射角度範囲を両立させることが設計の狙いです。

この直線駆動の実現にはミラーの駆動軸を保持する直動用軸受けが 必要ですが、これまで、JT-60SAにおける超高真空と高磁場の環境で 使用可能な直動用軸受けは実用化されていませんでした。そのため、 磁場の影響を受けない非磁性の、オーステナイト系ステンレス鋼製の レール及びセラミック製ボールを用いた直動軸受けを試作、試験しまし た。セラミック製ボールは、JT-60SAの前身であるJT-60Uにおいて、超 高真空維持に悪影響のあるオイルを用いない無潤滑の回転軸受けとし て使用実績がありました。しかし、初回の試験において目標の1割程度 の往復回数でレールが磨耗し、異音と振動が発生しました。無潤滑では ボールの転がり抵抗が大きいため、比較的軟らかい非磁性ステンレス が硬いセラミックボールにより削られたことが原因でした。

今回、超高真空中でも実績のある二硫化モリブデン系の膜をセラミックボールにコーティングして固体潤滑剤として用い、転がり抵抗を減らすことで軟らかいレールでも削れにくいように改良した直動軸受けを試作しました(図6)。これを用いて繰り返し動作試験(図7)を行った結果、目標の駆動回数(10万往復)に相当する80kmを超える総駆動距離まで、異音や振動が発生することなく、真空中で直動を繰り返すことに成功しました。これにより、JT-60SAのECHランチャー駆動機構の実現に見通しを得ました。今後は、試作した軸受けを用いたECHランチャー全体の最適化設計を行い、その後実機製作を行う計画です。



図5 直動用軸受けで支持した駆動軸により直動ミラーを前進/後退させることで、 マイクロ波ビームが大型曲面ミラーで反射する位置を変化させ、プラズマへの入射 角度を可変とする。2系統のビームのうち、一方を下向き(左図)又は両方上向き(右図)に入射することなどが可能。



図6 磁性体のレールとボール及びオイル潤滑を用いた一般的な直動用軸受 け(左)、ボールが内部を転がるブロック部分を分解した状態(中央)、非磁性 レール、セラミックボール及び固体潤滑膜を用いた改良品(右)。



図7 真空中でのミラー繰り返し駆動試験に成功したECHランチャー駆 動機構のモックアップ

■JT-60SAコイルターミナルボックス(CTB)の製作 (1台目のCTBの現地製作作業が完了)

JT-60SAの超伝導コイルは、1億度以上の超高温プラズマを閉じ込め たり、プラズマ中に誘導電流を発生させたり、プラズマの形状・位置を制 御するために用いられます。超伝導コイルは、電気抵抗をゼロとするた めに、-269℃付近の極低温状態まで冷却して使用し、運転時には最大 25,700Aの電流を通電します。コイルターミナルボックス(CTB: Coil Terminal Box)は、室温に置かれた電源と、極低温状態で運転される超伝 導コイルを接続するために必要な給電機器の一つです(図8右)。

JT-60SAのCTBには、ドイツのカールスルーエ工科大学(KIT)が開発し 調達した高温超伝導体(-223℃で運転)を使用した電流リードを、室温と 極低温の接続部に採用しました(図8左)。高温超伝導電流リードを使用 することで、通常の銅製電流リードを使用した場合より、電流リードでの 発熱を減らし、電流リードを冷却するために必要な冷凍機の能力を30%削 減することが可能になりました。

高温超伝導電流リードは高い磁場の中では使用することができないた め、装置中心から離れた磁場の低い場所に設置する必要があります。そ のため、CTBは約7mの長いダクト状の真空ダクトを介して装置本体に接 続する構造で、ダクト内の超伝導導体は熱収縮による変形で装置が損傷 しないよう、クランク状に曲げた複雑な形状で収められています(図9)。

1台目のCTB製作は、製作請負メーカーである三菱電機(株)が那珂核 融合研究所内にて現地組立てを進めてきました。平成29年2月末に全て の製作が完了し、量研に引き渡されました(図10)。CTB は全体で5台製 作する予定であり、現在は残る4台のCTBの製作を進めています。



図8 給電機器全体とコイルターミナルボックス



図9 クランク状に曲げられた超伝導導体



図10 完成したCTB01

JT-60SA中心ソレノイド(CS)の製作 (CS1 モジュールの完成とNIFSへの輸送・搬入完了)

中心ソレノイド(Central Solenoid) はJT-60SAのプラズマ中に5.5 MA (550万アンペア)の誘導電流を発生させるための電磁石で、全部で4個 のCSモジュールで構成されます。この超伝導コイルの製作は、量研が 担当しています。9月下旬に請負メーカーである三菱電機(株)電力シス テム製作所(神戸市)にてCS1号機(CS1モジュール)の製作を完了し、9 月30日に共同研究による冷却・通電試験を実施するために岐阜県土岐 市の核融合科学研究所(NIFS)への輸送と搬入を行いました(図11)。

CS1モジュールは重量約20トン、高さ1.6m、外直径2.0m(内直径1.3m)の超伝導コイルで、ニオブスズ(Nb3Sn)の超伝導導体を円筒形(巻き数: 549)に巻いています。4個のCSモジュールに20kAの電流を流すことで 最大9テスラ(90,000ガウス)の磁場を発生します。

量研はNIFSとの共同研究で、CS1モジュールの冷却試験及び通電試験を行いました。CS1モジュールを超伝導状態にするために、導体に液体へリウムを流して-269°Cに冷却して、20kAの電流を通電します。搬入後、NIFSにある真空断熱容器(クライオスタット)にCS1モジュールを設置しました(図12)。この試験装置を用いて、超伝導状態から常伝導状態に転移する温度の確認試験や、磁場の変化による発熱の評価試験を行い、製作したCS1モジュールがJT-60SAのプラズマ運転に必要な性能を満足することを確認します。

今後、残り3個のモジュール(CS2、CS3、CS4)を製作し、4個のCSモジュールを積み重ね、支持構造物で一体化(図13)することで、CSの製作を完了させます。



図11 NIFSに輸送したCS1モジュール



図12 クライオスタットに設置したCS1モジュール





■核融合の燃料粒子の流れをシミュレーションする

核融合炉では、燃料となる粒子を循環させながら炉心プラズマを安定 に維持します。凍らせた燃料を炉心プラズマの内部に供給して高温プラ ズマを生み出し、プラズマから漏れ出した燃料は中性粒子となって排気 されます。排気は核融合炉の下部にあるドームの下側に設置した排気ポ ンプで行います。今回、中性粒子の衝突(中性ガスの粘性)を考慮するモ デルを開発し、中性粒子となった燃料が排気ポンプ吸気口に到達して排 気されるまでの流れをシミュレーションにより調べました。

プラズマが冷えて原子となった粒子がドーム下側領域に流れ込んで分子になり、排気されなかった分子がプラズマ側へ戻る燃料粒子の流れ(逆流)が明らかになりました(図14)。中性ガスの粘性を考慮した場合には、逆流が小さくなるため、排気ポンプ吸気口付近の中性ガス圧力が2~3倍高くなり、既存のポンプ性能で十分な排気効率を確保できる見通しが得られました(図15)。

今後、さらに研究を進めて、核融合反応で発生する不要なヘリウムを 効率良く排気するための検討を行いたいと考えています。



IFERC-CSC Closing Ceremony — CSC ヘリオス「六ちゃん」完遂式 —

平成29年3月22日、量研機構六ヶ所核融合研究所で、第20回IFERC 事業会合と併せてCSC closing ceremony - CSCヘリオス「六ちゃん」 完遂式 - が開催されました。BA協定に基づき平成23年にIFERCに 導入された核融合専用大型計算機Helios(ニックネーム「六ちゃん」)は 平成24年1月に運用を開始し、当初予定どおり5年間の運用を行い平 成28年12月末に運転を終了しました。Heliosはこの間、最大567名の日 欧研究者が利用し、炉心プラズマ研究、核融合炉材料研究、核融合炉 工学研究、核融合原型炉研究、中性子源研究など核融合に関する幅 広い分野の研究に貢献し、Heliosを利用して639編(平成29年2月集計) の査読付き論文が刊行され、大きな成果を挙げて大型計算機の共同 運用という事業を完遂することができました。

Heliosの運用のためにIFERC事業長の下に構成された日欧スタッフか ら構成されたCSCチームも徐々に効率的に機能するようになり、日欧 の利用者に対するサポートを円滑に行うことができました。これらの成 果を記念して、関係者約50名が参加し、文部科学省研究開発戦略官、 六ヶ所村長、欧州委員会担当者、フランス大使館担当官などからプロ ジェクトの成功と完遂を祝してご祝辞を賜りました(図16)。



図16 六ヶ所村 戸田村長からのご祝辞

トカマクの高圧力化を妨げる不安定性に対する高エネルギー 粒子効果の解明

那珂研で建設が進むJT-60SAでは、高圧力なプラズマの閉じ込めを目指し ています。プラズマの圧力を高めるためには、抵抗性壁モード(RWM: Resistive Wall Mode)と呼ばれる不安定性を抑える必要があります。本研究 では、プラズマ中の高エネルギー粒子がRWMに影響を与えることに着目し ました。高エネルギー粒子は、例えば、プラズマの温度を上げるための中性 粒子ビーム入射 (NBI: Neutral Beam Injection) 加熱により発生します。高 エネルギー粒子とRWMの相互作用を解析するため、運動論的磁気流体力 学モデルの開発を進めました。このモデルを使うと、RWMのマクロな運動と

、粒子のミクロな運動の間のエネルギー交換がRWMの安定性に与える影響を調べることができます。本研究では、これまでのモデルでは見落とされていた、高エネルギー粒子の回転(ドーナツ状核融合装置の大周方向の粒子の流れ。核融合月報2014年11月号参照)の効果を取り入れることに成功しました。高エネルギー粒子の分布モデルを用いて回転の分布を評価することにより、高エネルギー粒子の回転が、RWMと高エネルギー粒子の間のエネルギー交換を通してRWM安定性に与える影響を明らかにしました。

拡張されたモデルに基づいた数値計算コードを開発し、JT-60SAの運転シ ナリオにおけるRWM安定性の予測計算を行いました。下図は、規格化され たRWMが成長する速さ(成長率)を、NBIの入射エネルギー及びプラズマを 閉じ込める磁場に対する入射角の関数としてプロットした図です。左が従来 のモデル、右が拡張されたモデルです。緑線は安定/不安定の境目を表して います。図から、拡張されたモデルでは、RWM成長率が減少し、安定な領 域が大きくなっていることがわかります。これは、高エネルギー粒子の回転に 伴う遠心力が、RWMから高エネルギー粒子に渡すエネルギーを増加させて 、RWMを安定化させているためです。



図 規格化されたRWMが成長する速さ(成長率)の、NBIの入射エネルギー及び閉じ 込め磁場に対する入射角の関数としたプロット。左が従来の運動論的磁気流体力 学モデル、右が本研究で拡張されたモデルに対応しています。橙色は、JT-60SAに おけるNBI入射パラメータのおおよその値を表しています。

Fusion Forefront No.8 2016 Winter

■低トリチウム保持量の3元系先進中性子増倍材の造粒に成功

核融合炉燃料のトリチウムは核融合反応で生じる中性子をリチウムに当て て生産します。このとき、より効率よく燃料を生産するために中性子の数を増や す中性子増倍材が不可欠です。従来材のベリリウム(Be)^{※1}は、高温下での水 蒸気との反応による水素生成などが問題となり、使用最高温度を制限していま す。そこで、高温下でより安定なBe金属間化合物(ベリライド)^{※2}の製造技術開 発を進め、チタン(Ti)やバナジウム(V)との2元系ベリライドの造粒に成功しまし た。しかし、2元系ベリライドのBe₁₂Tiでは、造粒時に溶けてから冷えて固まる際 にBe₁₂Tiとは異なる組成が形成されてしまう包晶反応が起こるため、組成を均 質化する熱処理が必要で、かつ、微小球の強度が低下しました。また、Be₁₂V は均質化の熱処理は不要ですが、同程度の低い強度でした。そこで、新たに Be-Ti-Vの3元系ベリライドに着目し、造粒試験を行い、直接造粒に成功し、そ の特性評価を実施しています。

図18に各ベリライド微小球の強度及び微小球表面の顕微鏡写真を示しま す。Vの添加により強度は低下しますが、V含有率が高い、Be₁₂Ti_{0.3}V_{0.7}と Be₁₂Ti_{0.1}V_{0.9}では、写真からもわかるように組織が細かくなり、強度が均質化後 のBe₁₂TiやBe₁₂Vの約2倍になることを明らかにしました。

次に、実環境では、Belは中性子照射で微量のトリチウムが生成されるので、 そのトリチウムが放出されにくいことがBeの場合問題ですので、その保持特性 をトリチウムと同様の水素同位体である重水素を用いて調べました。図19は、 温度に対する重水素の放出率を示しています。この試験では、微小球に重水 素イオンを照射して、材料中に保持させ、その後温度を上げて取り込んだ重水 素がどの温度で放出されるのかを示したものです。結果、Be₁₂Ti_{0.1}V_{0.9}や Be₁₂Ti_{0.3}V_{0.7}微小球に保持された重水素は、金属Be微小球と比べてより低い温 度で放出されることが明らかになりました。また、図20に示すイオン照射量に対 する全重水素保持量のとおり、Be-Ti-Vの3元系ベリライド微小球は、Be微小 球に比べて重水素保持量が約50%と少なく、生成トリチウムをより低温で放出 できることを明らかにしました。

これらの結果から、Be-Ti-Vの3元系ベリライド微小球が優れた特性を有して いることを明らかにしました。今後は、さらにブランケット設計に必要な工学的 データの取得を目指し、核融合炉の早期実現に向け貢献したいと考えていま す。

※1 ベリリウム(Be)は、中性子が1個当たると2個の中性子を出し、中性子を増倍します。

※2 ベリリウムとその他の金属によって構成される化合物で、成分元素とは異なる特有の物理、化学及 び機械的特性を有しています。

17



■炭素へのタングステン接合技術の開発〜JT-60SAの炭素プラ ズマ対向壁の金属化に見通し

現在建設が進められているJT-60SAでは、炭素プラズマ対向壁での高 ベータ・定常プラズマの生成実験完了後、燃料ガスの吸蔵が少ないタングス テンプラズマ対向壁に換装する計画があります。JT-60SAではプラズマ対向 壁を軽量化しなければならないため、炭素プラズマ対向壁の表面にタングス テンを接合する技術を確立する必要があります。これまでにタングステンと 炭素の間に炭化ケイ素粉末のシートを挟み、高温・高圧を印加することで 20mm角の炭素ブロックの表面にタングステンを接合することができていまし た。しかし、接合界面にクラックや空隙が発生したため、プラズマ対向壁とし て必要な30mm角程度の炭素ブロック用に接合面積を拡大すると接合界面 で剥離する可能性がありました。クラックや空隙の発生原因が界面反応の過 度の進行にあると考え、接合時の温度を下げることで接合界面のクラックや 空隙の抑制を試みました。

図21に接合界面周辺の断面を接合時の温度で比較したものを示します。 界面反応層の材料の焼結温度である1900℃で接合した場合、図21(a)に示 すように、界面反応層にクラックや空隙が多数発生しました。一方、接合時 の温度を1800℃に下げた場合は、図21(b)に示すように接合界面でのクラッ クや空隙の発生を抑制できました。接合時の温度管理を適切に実施すること により、30mm角まで接合面積を拡大でき、JT-60SAのプラズマ対向壁用炭 素ブロックと同面積の炭素へのタングステンの接合に見通しを得ることがで きました。



本成果は室蘭工業大学との共同研究で得られました。

図21 接合時の温度を変化させたときの接合界面周辺の断面。(a)1900℃で接合した場合にはクラックや空隙が多数発生しました。(b)1800℃で接合した場合にはクラックや空隙の発生を抑制できました。 19

「JT-60SA のフランス及びイタリアによる超伝導トロイダル磁場 コイル製作と日本による同コイル組立開始を披露する式典」を 開催

那珂核融合研究所では、日本と欧州が共同で超伝導トカマク装置JT-60SAを建設しています。欧州が製作を担当した超伝導トロイダル磁場コイル が那珂核融合研究所に搬入され、量研はこの超伝導トロイダル磁場コイルを JT-60SA本体への組み込む作業を平成28年12月から開始しました。そこで、 JT-60SA建設の進捗を披露するため、平成29年1月12日に「JT-60SAのフラ ンス及びイタリアによる超伝導トロイダル磁場コイル製作と日本による同コイ ル組立開始を披露する式典」と題する式典及び見学会を開催しました。式典 では、平野理事長の開会挨拶の後、水落文部科学副大臣、トーマス欧州委員 会副総局長を始めとするご来賓の皆様からご祝辞を賜りました。また、式典に は日欧関係者134名(量研は除く。)の皆様に参加いただくととともに、その様 子はテレビ、新聞等で大きく報道されました。



平野理事長



水落文部科学副大臣



トーマス欧州委員会 副総局長



式典参加の皆様

■サイエンス・カフェを開催しました

平成29年2月25日、那珂市立図書館において、那珂市及び近隣市町村 在住の方々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。サイエンス・カフェは毎回 テーマを変え年に1回開催しています。

今回は、「マイクロ波とプラズマ~加熱から測定まで幅広いマイクロ波の 活用~」というテーマの下、核融合とマイクロ波の関わりについての説明 と、簡易アンテナを作成しマイクロ波を測定する実験を行いました。"いか に強く受信できるか?"とアンテナの長さや角度・向きの微調整に試行錯 誤を重ね、何度も挑戦しては一喜一憂されている姿がたくさん見受けら れ、とても盛り上がった時間を過ごすことができました。また、核融合研究 開発の進捗に関する説明についても熱心に耳を傾けていただき、多くの質 問もいただきました。

今後も、ご参加いただく皆様との対話を重視し、より充実したサイエンス・ カフェを企画していきます。



核融合とは?



マイクロ波を受信中!

■高専生・高校生核融合研究施設見学会を開催

長期的に進められる核融合エネルギー研究開発の青森県内におけ る円滑な実施と次世代炉(原型炉)の誘致に向けて、次世代を担う高校 生等の理解促進を図るため、青森県ITER計画推進会議と青森県の主 催により、高等専門学校・三八地域高等学校の生徒を対象とした核融 合研究施設見学会が、平成29年3月29日に六ヶ所核融合研究所で開 催されました。

見学会では、所長からの挨拶の中で「核融合エネルギー発電の実用 化はおよそ30年後になると見込まれている。実用化を現実にするには 現在高校生である皆さんの力が今後、必ず必要となってくる。今回の 見学会が将来核融合エネルギー開発に携わるきっかけになれば」と語 りかけました。その後、加速器を始めとする最先端の研究設備の見学 のほか、実験を交えた核融合に関する体験学習を行いました。また、 六ヶ所核融合研究所では、未来のエネルギーとして期待されている核 融合エネルギーの研究開発が欧州と日本との国際協力によって行わ れていることから、六ヶ所核融合研究所に滞在し、核融合エネルギー の実用化に向け研究に励む外国人研究者と昼食を共にして交流を深 めていただきました。今後も、若い学生が核融合研究を身近に感じ、有 意義な見学会となるよう努力いたします。

