Fusion Forefront No.15 2018 3rd.

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

■ 遠隔実験センターからWESTの遠隔実験に成功

六ヶ所核融合研究所では、幅広いアプローチ（BA）計画に基づき構築したITER遠隔実験センターから、ITERを想定して1万キロ離れたフランスにあるWESTトカマク装置との遠隔実験に成功しました（平成30年11月28日）。WESTは、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA)のカダラッシュ研究所にある核融合実験装置で、ITERの至近（数100メートル）に位置します。この遠隔実験では、六ヶ所研とWEST間でTV会議を行いつつ六ヶ所研側での実験条件作成後、数分間で条件確認と運転許可をWEST側で行って、プラズマ放電実験を実施しました。プラズマ着火のカウントダウン、実験のライブデータやプラズマの映像を六ヶ所研の遠隔実験室の大画面に映し、実験状況の共有やデータ解析を実施しました。遠隔実験の様子は、ニコニコ動画で4時間にわたって生放送し、15,000人以上の方が視聴しました（図1）。
今回の遠隔実験センターを拠点とする完結した遠隔実験の実証の成功は、ITERの遠隔実験に向けた大きなステップとなります。

図1: 遠隔実験をニコニコ動画にて生放送公開
（新聞・TV・Webニュース等でも報道）

■ イータートロイダル磁場コイル用容器、国内の製作メーカー2社で初号機完成

那珂核融合研究所では国際熱核融合実験炉イーターの主要機器であるトロイダル磁場コイルを製作しています。トロイダル磁場コイルは、核融合反応を起こすために必要なプラズマを磁場の力で炉の中に閉じ込める超伝導コイルです。この超伝導コイルは、超伝導導体などで構成される巻線部と、それを収納するコイル容器から構成されます。イーターでは予備機を含む19機のトロイダル磁場コイルが必要であり、コイル容器については、日本がその全ての製作を担当しています。コイル容器は、絶対温度4度という極低温で強大な電磁力に耐えてコイルを支えるもので、コイル容器の高さが16.5mと非常に大きいのに対して、1mm以下という大変厳しい製作精度を要求されており、溶接や機械加工の高度な技術が求められます。

コイル容器は、内側容器及び外側容器並びに内側蓋及び外側蓋の4つのパーツを製作します（図2）。このような巨大なステンレス製溶接構造部を高精度かつ短期間で製作するために、コイル容器は国内2社の製作ラインで製作されています。多くの技術的困難を克服し、2017年12月に第一製作ラインで（図3）、2018年12月には第二製作ラインで（図4）、それぞれ初号機の製作を成功裏に完了しました。これらのコイル容器は、日本及びイタリアのコイル組立工場にそれぞれ輸送され、巻線部と一体化された後、南フランスのイーター建設サイトに運ばれて、イーターのトカマク建屋内にトカマク構成機器の一つとして設置されます。

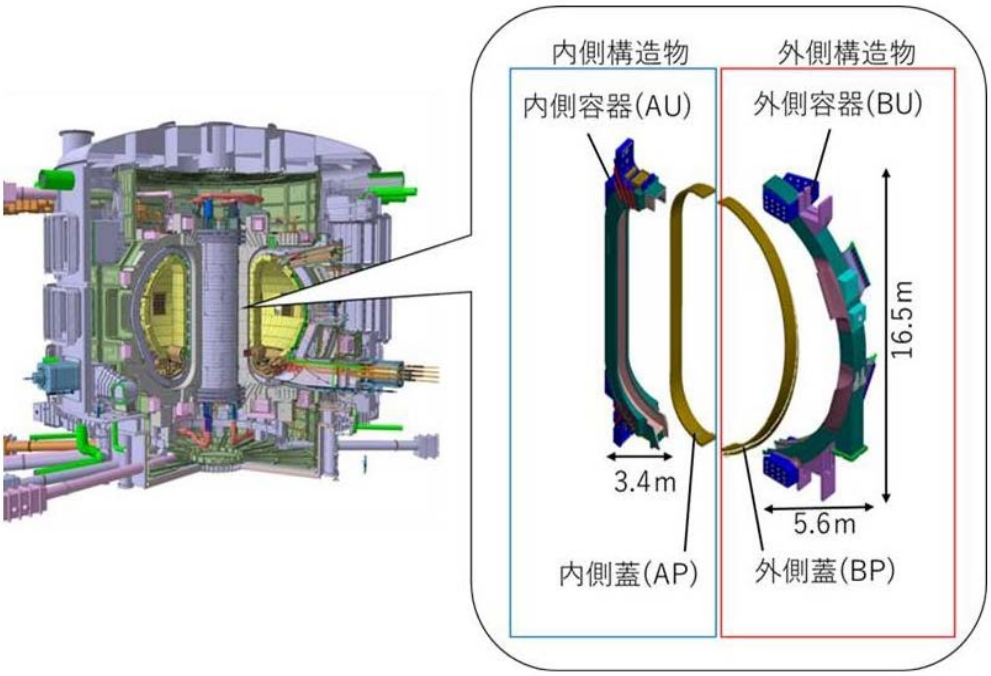


図2：イーター及びトロイダル磁場コイル容器の構成

図3：製作を完了した第一製造ラインのコイル容器初号機

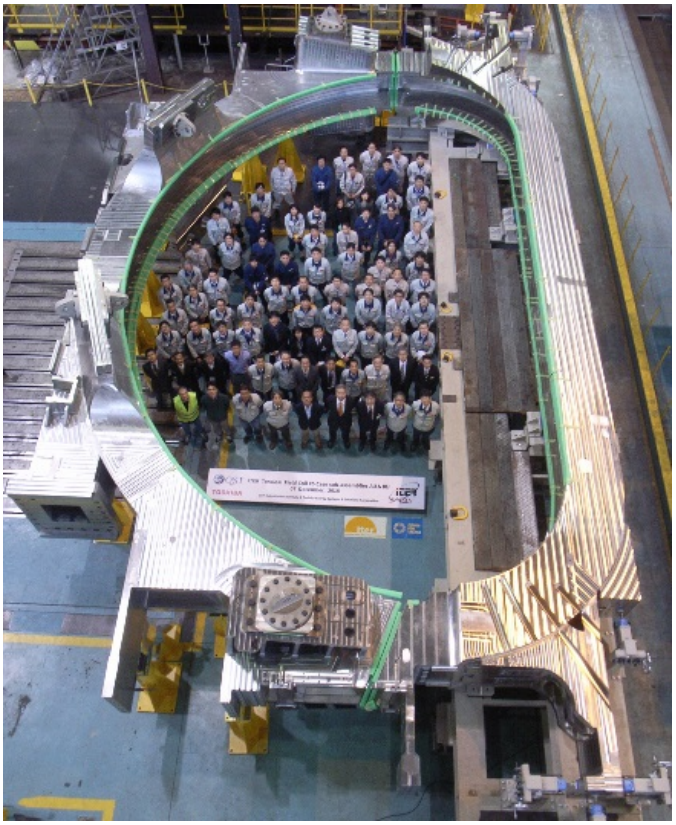


図4：製作を完了した第二製造ラインのコイル容器初号機

■ ITERジャイロトロン1機目が完成試験検査に合格！

量子科学技術研究開発機構（以下「量研」という。）は、ITER（国際熱核融合実験炉）事業の日本国内機関として開発を進めてきたITER用ジャイロトロンの1号機について、ITER 機構から要求された全ての完成試験検査項目に合格しました。

ITERでは、プラズマ生成や加熱、制御を行う電子サイクロトロン加熱・電流駆動装置（EC加熱装置）として、電子レンジのように電波でプラズマを加熱する、周波数170GHz（ギガヘルツ）・出力1MW（メガワット）のジャイロトロンを24機装備します。量研は、そのうち8機のジャイロトロンを調達します（図5）。2007年にITERジャイロトロンの原理実証に世界で初めて成功して以来、ジャイロトロン内部のエネルギーロス低減やマイクロ波の安定化に向けた技術開発、ジャイロトロンの高速繰返し運転のための高電圧電源や運転制御システムの開発を進めてきました。2017年に最初の2機の製作が完了し、ジャイロトロンと運転制御システムを統合した調整運転を進めてきましたが、今回、ITER機構のジャイロトロン技術担当者立会いの下で、1号機の完成試験検査を実施しました。その結果、出力1MWで電力総合効率50%の300秒間連続発振などの検査項目全てを達成することに成功し（図6、7）、ITERジャイロトロン実機1号機のITER機構への納入準備が整いました。

2020年から順次ITER機構へのジャイロトロンの輸送を開始する計画となっており、今後2号機以降の製作と試験も進めていきます。2025年のITERファーストプラズマに向けて、日本のITERジャイロトロンの調達は計画どおり順調に進んでいます。

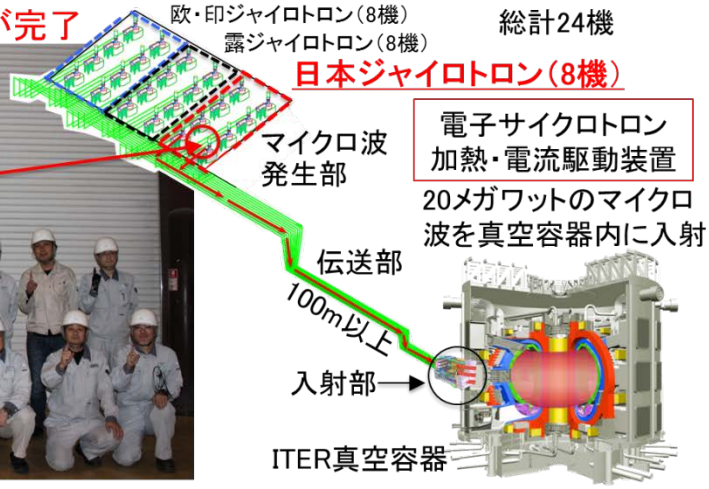
電子サイクロトロン加熱・電流駆動装置

ジャイロトロン：強磁場中で加速された電子ビームの回転エネルギーを円筒形の空洞共振器にてマイクロ波エネルギーに変換する超高真空管。

マイクロ波でプラズマ制御（電子レンジの原理）

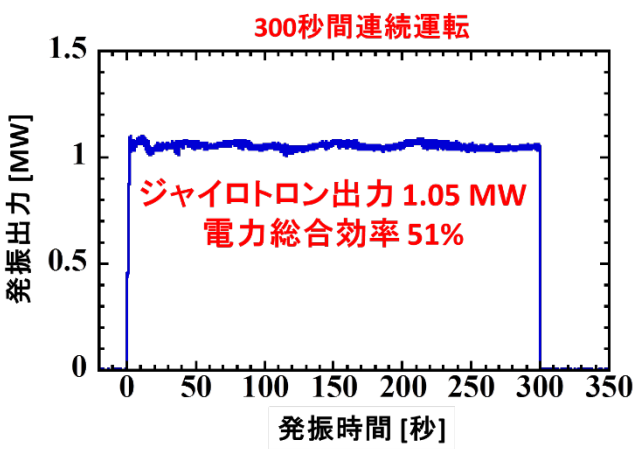
「プラズマ生成」→「プラズマ加熱」→「核融合反応開始・安定維持」（1億度以上）

2017年：1・2号機の製作が完了



ITER用ジャイロトロンには、周波数170GHz・出力1MWが必要

図5：量研が開発したITERジャイロトロン実機の写真及びITERにおける電子サイクロトロン加熱・電流駆動装置の概要



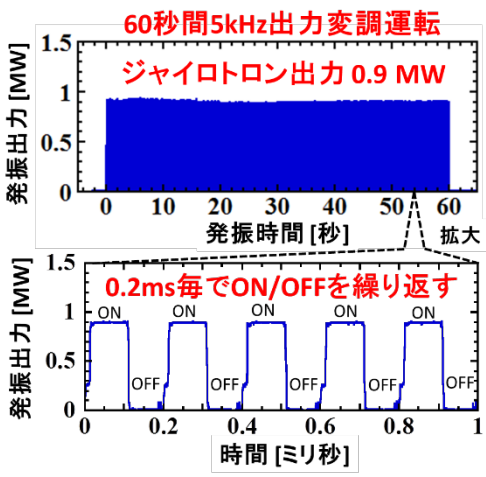


図6：発振出力1.05MW及び電力総合効率51%の300秒間連続運転を20回実施して19回成功しました（左）。また、5kHz周期（0.2ミリ秒ごと）での発振出力0.9MWオン/オフ運転を60秒間行うことに成功しました（右）。

図7：ITERジャイロトロン1機目の完成試験検査合格の記念写真。
ITER機構ジャイロトロン技術担当者（2列目一番左）。

■ 核融合プラズマ中の不純物シミュレーションの信頼性向上

核融合炉では、ドーナツ状の炉心プラズマで大きな核融合エネルギーを生み出します。エネルギーの一部は最終的に炉心プラズマを取り囲む炉壁に到達するため、周辺のプラズマに微量のアルゴンなど希ガス不純物を注入してプラズマ温度を下げ、炉壁への熱を和らげます。一方、不純物を注入し過ぎると、炉心プラズマに混入し、発生する核融合エネルギーが小さくなってしまいます。そこで、不純物の動きを予測して炉心プラズマに混入しないよう制御することが重要になります。

我々のこれまでの研究で、不純物を炉心プラズマに運ぶ働きをする「熱力」(図8の赤い矢印)という力が、これまでの予測よりも小さくなることが判明しました。我々の新しい理論モデルを用いて、不純物(アルゴン)の動きを予測するシミュレーションを行いました。従来の予測(図9左)に比べて、新しい理論モデルによる予測(図9右)では、プラズマ周辺に漂うアルゴン不純物が広範囲で減少しています。この結果は、炉心プラズマへの不純物混入が低減される可能性を示唆しています。

この研究を更に発展させ、核融合原型炉の設計に役立てたいと考えています。

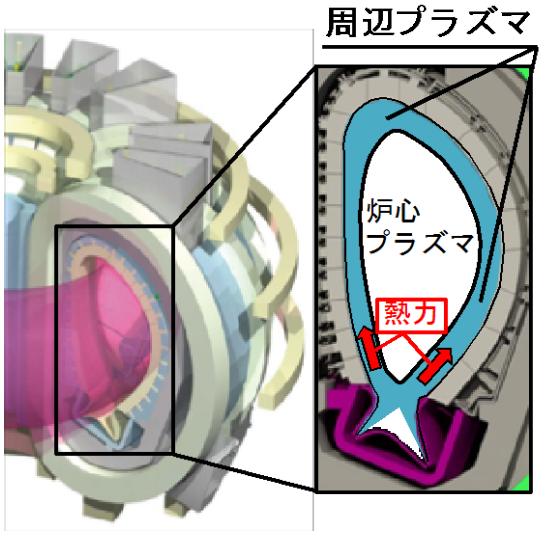


図8:核融合原型炉の周辺プラズマに働く熱力の方向

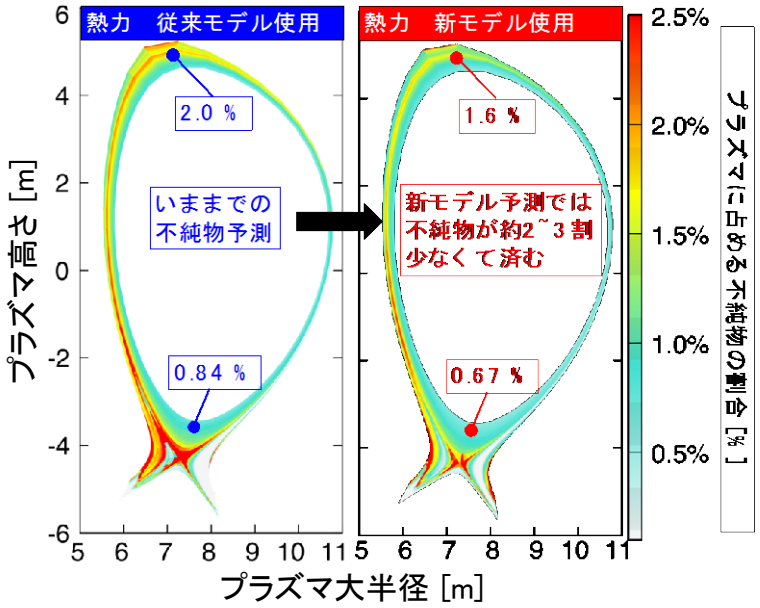


図9:プラズマに占める不純物の割合の分布
(左)これまでの予測結果
(右)新しい理論モデルでの予測結果

■ ITER/BA成果報告会2018を開催

平成30年12月14日有楽町朝日ホールにて、核融合エネルギーフォーラム主催、量研及び自然科学研究機構核融合科学研究所共催の下、ITER/BA成果報告会を開催しました。参加者は約480名にのぼりました。

最初に、来賓として、永岡桂子文部科学副大臣、森英介自由民主党核融合エネルギー推進議員連盟会長、佐々木郁夫青森県副知事、宇野善昌茨城県副知事、宮永俊一経済団体連合会副会長からご挨拶をいただきました。

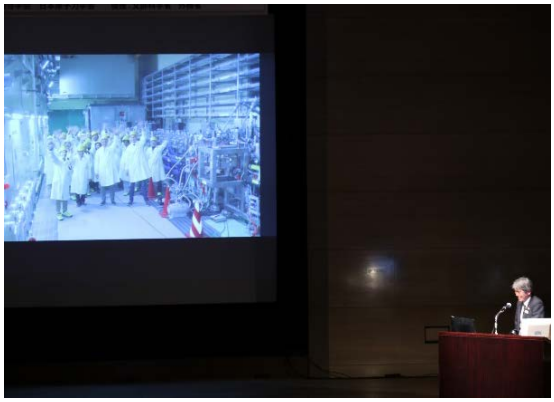
基調報告では、ITER機構のベルナール・ビゴ機構長と多田栄介副機構長による「ITER建設状況」の紹介（フランスからのライブ中継）、新井知彦文部科学省研究開発局研究開発戦略官による「日本の核融合研究開発政策」の紹介、那珂研及び六ヶ所研からのライブ中継を交えた両研究所長からの「BA活動進展」の報告が行われました。

技術報告では、キーテクノロジーを担う国内企業から、最新の機器開発及び波及効果が報告されるとともに、柴田徳思（株）千代田テクノル大洗研究所長から、加速器中性子源の産業応用が紹介されました。

本成果報告会を通じて、ITER計画及びBA活動の進展を周知することで、核融合エネルギー研究開発への理解増進に努めました。

【永岡副大臣のご挨拶】

【ITER機構からのライブ中継】



【六ヶ所研とのライブ中継】

【会場の様子】

■ 電子サイクロトロン加熱時の磁気シアがプラズマ輸送へ与える効果を確認

ITERや原型炉の核燃焼プラズマでは、核融合反応で生じるα粒子による電子加熱が主体となるため、電子加熱が強い条件下での輸送特性の理解と閉じ込め性能改善の探求は重要です。これまでに、正磁気シアプラズマに電子加熱を行うと、熱輸送が増大してエネルギー閉じ込め性能が劣化すること、負磁気シアプラズマでは性能が劣化しないことをJT-60装置及びDIII-D装置で示しました。本研究では、正磁気シアプラズマと負磁気シアプラズマの中間である弱磁気シアプラズマに電子加熱を行った際の、磁気シアがプラズマ輸送へ与える影響をDIII-D装置を用いて調べました。

磁気シアに対する、電子加熱によるイオン熱輸送の変化を図10に示します。縦軸の1は、電子加熱前後で熱輸送が変化していないこと、1以上は増加していること（性能の劣化に対応）を示します。緑の三角で示すように、負磁気シアだけでなく、弱磁気シアでも、電子加熱によるプラズマ性能の劣化が抑えられることが分かりました。本研究により確認された、磁気シアに対するプラズマ輸送への影響は磁気シアが零や負になるほど改善するという特性は、計算機シミュレーションによる解析と矛盾しない結果となりました。

※磁気シアとは、プラズマを閉じ込める磁力線のねじれ具合を示す指標です。

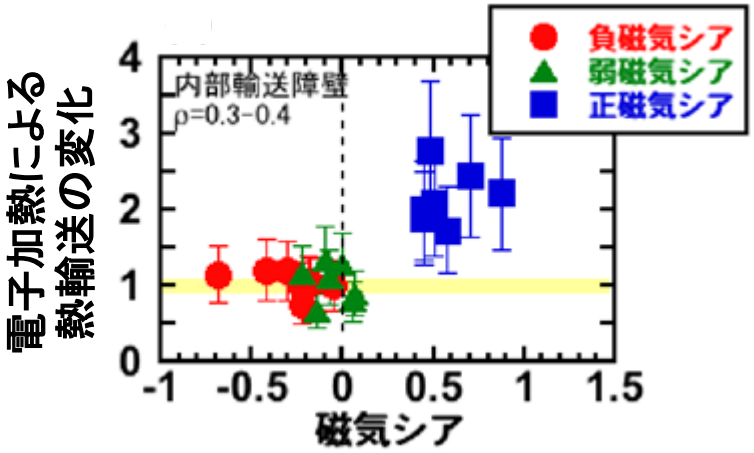


図10：磁気シアに対する電子加熱による熱輸送の変化

■ IFMIF 原型加速器の高エネルギービーム輸送系とビームダンプの据付けを完了

六ヶ所核融合研究所では日欧共同事業としてIFMIF（国際核融合材料照射施設）原型加速器の研究開発を進めています。
IFMIF原型加速器は、大電流（125mA）の重水素イオンビームを、静電加速器、高周波四重極加速器（RFQ）、超伝導加速器と三段階で、9メガ電子ボルトまで加速する、世界でも最大級の大強度加速器です。量研と欧州チームが一つの合同チームを作り、日本のリーダーシップの下、据付調整を進めています。

2018年6月から、第二段のRFQのビーム加速試験を進めていますが、第三段の超伝導加速器試験の準備として、超伝導加速器の下流に接続される高エネルギービーム輸送系（HEBT）とビームダンプの据付けを行いました。これらの機器はスペインのCIEMAT研究所が調達を担当し、日本へ船便で輸送された後、8月までに六ヶ所研に搬入されました。このビームダンプは1MWもの大パワーの重水素ビームを受け止め吸収するための機器で、発生する放射線を安全に閉じ込めるための遮蔽体で覆われ、総重量は60トンもあります。HEBTは、超伝導加速器を出たビームをビームダンプまで輸送するための大型の電磁石で構成されています。また、ビームダンプの冷却のための冷却水配管の敷設作業も併せて行われました（図11～図13）。

どちらの機器も、多数の部品から構成されており、レーザーを用いた高い精度での組付けが必要でしたが、量研の研究者・技術者、CIEMAT研究所から派遣されたスペイン人専門家と青森の地元業者が一丸となって共同作業を行い、無事に全ての機器を目標とする精度（±0.1mm）で設置することに成功しました。

図11: 加速器室に設置を完了したビームダンプ

図12: 高エネルギービーム輸送系のアライメント作業の様子

図13: 加速器室に設置を完了した高エネルギービーム輸送系

■ 核融合炉での燃料生産に必要な中性子増倍材料の微小球製造技術開発

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。中性子増倍材としては、中性子増倍特性などの観点から金属ベリリウムが候補材です。中性子増倍材は、プラズマを囲むブランケット内に微小球形状で充填しますが、より多くの微小球を充填するため、大小の直径の異なる2種類の微小球を充填して高密度充填を図ることから、小球としては直径約0.5mm、大球としては直径約2mmを目標とした造粒技術開発を行いました。

造粒技術としては、回転電極造粒法を用いており、図14に示すとおり原料となるベリリウム電極棒を回転させ、もう一方のタングステン電極間で放電を起こし、その熱によって溶けたベリリウムが遠心力で飛ばされて冷えて固まり、球になる手法です。本造粒法では、原料電極棒の回転速度を変化させることによって微小球直径を制御します。回転電極造粒法によって、まず直径1mm球の造粒最適化試験を実施して、その結果、造粒収率約90%以上の造粒条件出しに成功しました。そして次のステップとして、高密度充填を図るための造粒技術開発として、直径約0.5mmから約2mmまでの範囲を目標とした造粒試験を行いました。

原料であるベリリウム電極棒の回転速度に対する微小球の平均直径及び微小球外観写真を図15に示します。直径1mmのベリリウム微小球造粒条件としては、アーク電流60A及び回転速度5,800rpmを得ました。次に、回転速度を変化させることによって、低回転側の3,500rpmにおいて直径約2mm、高回転側の10,000rpmにおいて直径約0.5mmの微小球試作に成功し、造粒目標を達成しました。

図14：回転電極造粒法概略図

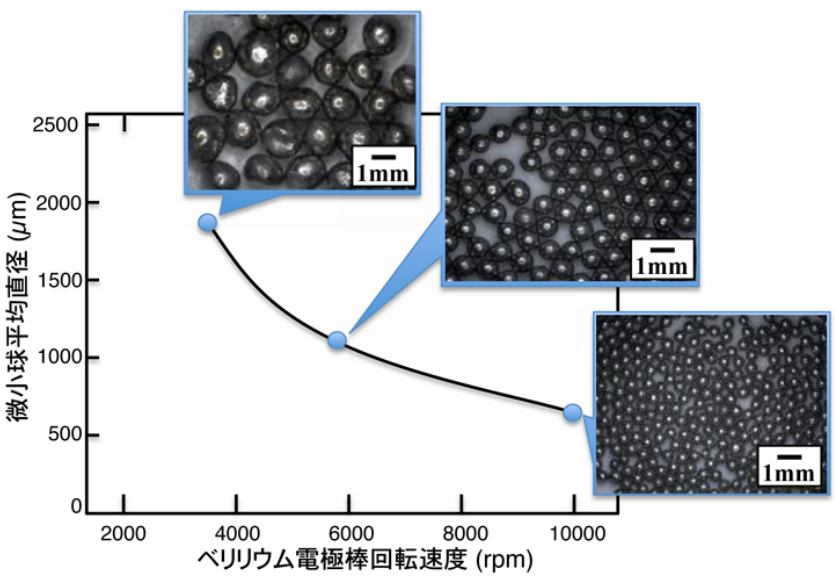


図15：電極棒回転速度に対する微小球平均直径及び外観写真

■ JT-60SA計画の進展について

◎JT-60SA本体周辺機器の取付けが順調に進展：

真空容器最終セクター設置後、本体周辺機器であるポートフレーム（管台）（図16）、ポート熱遮蔽体（図17）、真空容器内の機器（図18）などの取付けを進めました。ポート管台については、全ての管台を真空容器に溶接接続しました。ポート遮蔽体については、水平、斜め、下ポートに対する遮蔽体の全てを取り付けました。真空容器内の機器については、電磁気計測用ワンターンコイル及び第一壁接地用の台座の取付けを実施しています。いずれの作業も計画どおりに、順調に進展しています。

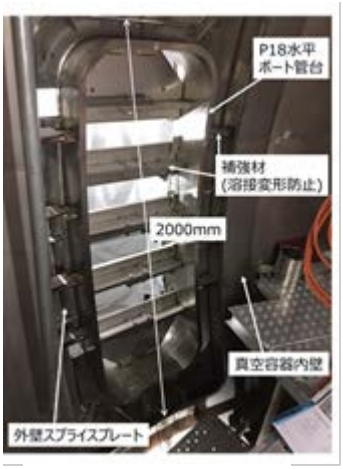


図16：ポート管台

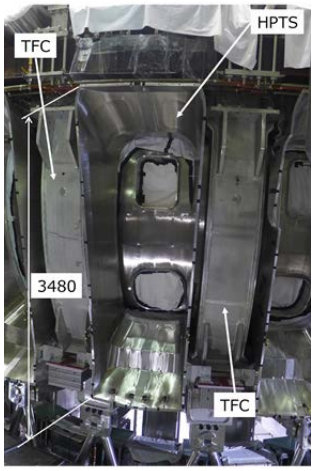


図17：水平ポート熱遮蔽体

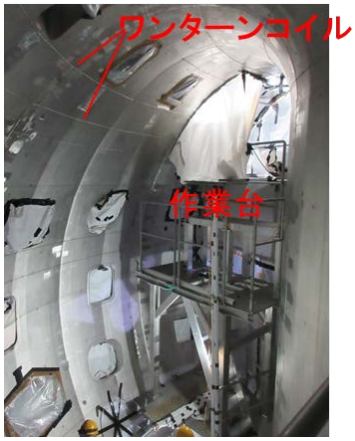


図18：ワンターンコイル

◎冷凍機の保管運転を着実に実施：

冷凍機の保管調整運転を平成30年10月に実施しました。本試験では、調整運転に加えて、過去2年間の調整運転などで明らかとなった冷凍機の不具合対策も併せて行いました。不具合は補助コールドボックス(ACB)の真空リーク、冷凍機ヘリウムガス圧縮器の油分離機からの油漏れ、制御PCの動作不良など、全11件ありました（図19）。これらの不具合を、冷凍機の性能保証の最終年である本年までに、製作会社の保証案件として処理しました。これらの不具合対策により、冷凍機が安定に動作しており、2020年4月からの試験運転をより確実なものとしました。

図19：JT-60SA冷凍機の不具合対策

◎イタリア製超伝導コイル電源の通電試験を終了:

イタリアのENEA研究所で調達した超伝導コイル電源（センターソレノイド電源4体、平衡磁場コイル電源2体、高速位置制御コイル電源2体）の通電試験を実施し(図20)、いずれの電源も平成30年12月13日に受入検査に合格しました。これにより、ENEAが調達した8体全ての電源の通電試験を完了しました。今後。平成31年1月中旬から2月中旬までの期間に、電源設備全体の現場制御盤と各電源との間の制御信号の通信試験を実施するとともに、一連の試験で顕在化した不具合（冷却水の導電率計）対策を実施する予定です。

図20：ENEA調達電源の通電試験

■ ジャイロ運動論コードを用いた乱流粒子輸送過程の評価

核融合炉心プラズマの性能は核融合反応の燃料となるプラズマの密度に強く依存するため、密度分布を決定する粒子輸送過程の理解が不可欠です。トカマク型核融合装置では温度や密度の微細な揺らぎが引き起こす乱流によって粒子輸送が主に支配されています。乱流が粒子輸送を引き起こす物理過程は、拡散と炉心中心への内向き対流を生成し得るピンチの二つの機構に大別されます。これまでに開発した、ジャイロ運動論コードを用いて拡散とピンチに起因する粒子束を評価する手法（核融合最前線2017年3号参照）を用いて、粒子輸送の物理過程と密度分布形成の関係を調査しました。

調査の対象としたプラズマは図21(a)に示すようにJT-60Uで異なる密度分布を持つAとBの二つです。Bに比べてAの方が小半径が小さい領域において電子密度が高く、核融合出力の向上に望ましい電子密度分布を有しています。AとBの外部からの粒子供給量は近いため、拡散とピンチに起因する粒子束の和は同程度となります。粒子束の和を構成する拡散とピンチの成分を評価した結果を図21(b)と(c)に示します。まず、拡散は密度勾配が駆動源となっており、密度勾配がより急なAの方で大きな粒子束が生成されています(図21(b))。これは、Aの方が拡散によってプラズマから多くの粒子が流出していることを意味します。次に、ピンチは温度勾配などによって駆動されますが、生成される粒子束はAの方が炉心中心方向を示す負の方に大きくなっています(図21(c))。Aのピンチによる大きな内向きの粒子束は拡散による外向きの粒子束を相殺しているため、Bと同程度の粒子供給量で、Aがより急な密度勾配を維持する要因であるといえます。ここで、ピンチが生成する粒子束のAとBでの差は、イオン温度勾配モードと呼ばれるイオン温度勾配が急峻化するときに起こる不安定性が、Aの方でより抑制されているために生じていることが分かりました。今後は、以上で示したピンチの役割を、他のプラズマの解析から検証し、普遍的な理解へとつなげていく予定です。

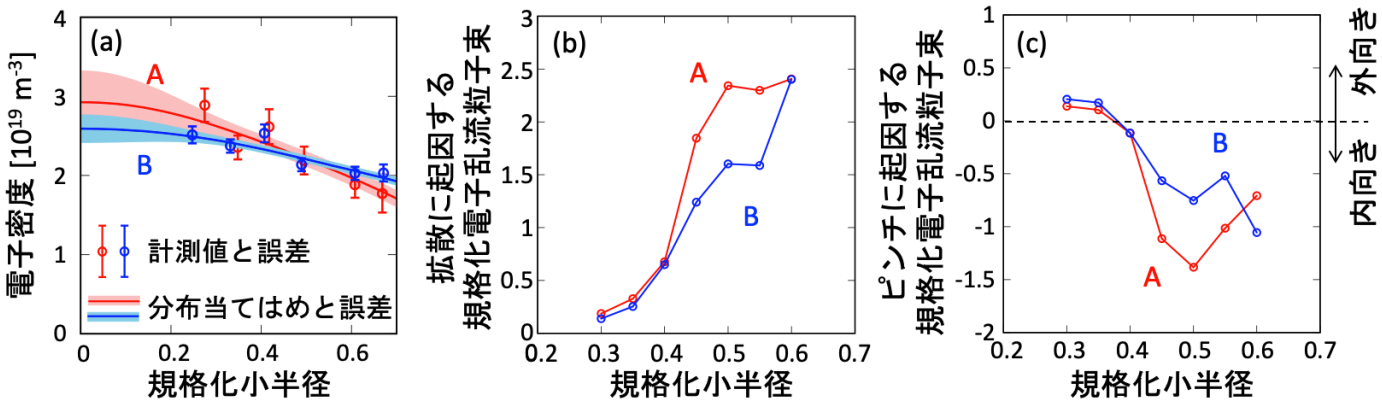


図21：解析対象としたJT-60Uの二つのプラズマAとBの(a)電子密度（実験で得られた計測値に基づき分布を当てはめている）と、評価した(b)拡散及び(b)ピンチに起因する規格化乱流粒子束の半径方向分布。特に規格化半径方向位置0.5辺りで、Bと比べてAの大きな拡散は、内向きの大きなピンチによって相殺されている。

■ サイエンスアゴラ2018に出展しました

核融合エネルギー研究開発部門は、平成30年11月10日（土）、11日（日）に東京テレコムセンタービルを会場として行われたサイエンスアゴラ2018にブース出展いたしました。

核融合エネルギーの仕組みや実現への道のりの説明のほか、人工ダイヤモンドを用いて氷を切る実験を行いました。また、フランスで建設中のITERの様子などをVRでご紹介しました。

科学に興味があるお子様方多数に足を運んでいただくなど、2日間を通し、約400名の方々と交流を深めることができました。その中には、以前研究所の見学に来られた方や、今後見学に行きたいという方もおられ、非常に有意義な時間を過ごすことができました。今後もこのようなイベントに積極的に出展し、核融合エネルギーの実現に向けた道のりや研究内容について、ご理解をいただけるような取組を続けてまいります。

【人工ダイヤモンドによる氷切り】

■ 核融合施設見学会を開催しました

平成30年10月21日（日）に那珂研で核融合施設見学会を開催しました。本見学会は、核融合研究開発を始めとした科学技術全般に関する知識・理解の促進及び地域住民の皆様との交流を目的として毎年開催しています。

当日は、爽やかな秋晴れとなり、この日のために準備をした科学実験教室や毎年ご好評をいただいているJT-60SA見学ツアーや初開催となる中央変電所を巡るバックヤードツアー等を行い、1,254人の方々と交流を深めました。

当日実施したアンケートでは、「来年もまた来たい」、「核融合に対する理解が深まった」という感想が寄せられた一方で、「遠方から来たのに、JT-60SA見学ツアーに参加できず残念だった」などというご意見も頂戴しました。今後は、いただいたご意見に真摯に向き合い、より充実した施設見学会の開催に努めてまいります。

【なか博士の核融合講座】

■ ろっかしょ産業まつりに理科教室を出展

六ヶ所核融合研究所は、平成30年11月3日（土）、4日（日）の両日に、六ヶ所村及び六ヶ所村観光協会主催、量研六ヶ所核融合研究所ほかの後援による「第35回ろっかしょ産業まつり」に理科教室を出展しました。当日は爽やかな秋晴れとなり、多数の来場者で賑わいました。

プラズマボール、人工ダイヤモンドカッターの科学実験のほか、パネル展示やパンフレット配布により事業紹介を行うとともに、毎年恒例の缶バッジの無料制作を行いました。

科学実験においては、多くのお子様方にプラズマボール内で放つ幻想的なプラズマや、氷が簡単に切れる人工ダイヤモンドカッターに興味を持っていただき、楽しく実験に取り組んでいただくことができました。缶バッジ作りコーナーでは、親子や友達同士で顔を寄せ合い笑顔で缶バッジ用写真を撮影する姿は微笑ましい光景でした。缶バッジは大人気で、制作が追いつかず、長蛇の列が続く盛況振りでした。

太陽望遠鏡による太陽観察コーナーでは、今年は晴天に恵まれ、太陽が見えると歓声が上がるなど、楽しんでいただきました。

また、六ヶ所核融合研究所のことや事業内容に関心を寄せてお尋ねになられた大人の方々もいらっしゃいました。「施設はどこにあるのか？」、「こんなすごい研究所が六ヶ所村にあることを知らなかった」、「是非とも見学に行ってみたい！」などうれしいお言葉をいただき、多くの方にパンフレットをお持ち帰りいただきました。今後も多くの方との出会いを求めて、地元に密着したイベントに参加し、六ヶ所核融合研究所をより身近に感じていただけるよう取り組んで参ります。

【缶バッジ制作　最高の笑顔でハイ！チーズ！】

【太陽望遠鏡、太陽が見えてよかったね♪】

【人工ダイヤモンドカッターに挑戦の可愛いお客様】

【プラズマボールの不思議を体験】

■ 「親子サイエンスカフェinはちのへ」に参加協力

平成30年12月22日（土）に、六ヶ所核融合研究所は、青森県ITER計画推進会議、青森県主催、八戸市後援による「親子サイエンスカフェinはちのへ」に参加協力しました。定員15組を超える18組41名の小学生の親子のみなさまにご参加いただきました。この日を待ち焦がれていたかのように小学生は大はしゃぎ。また、クリスマス直前ということもあり、サンタ帽子を被った新鋭の新屋研究員がプラズマ博士として初デビュー。ご参加いただいた小学生は皆元気一杯で、クイズコーナーでは我先にと積極的に手を挙げる光景が印象的でした。

体験コーナーでは、光を放つプラズマボールに「綺麗！」という歓声や、恐る恐る触ってみる子も。プラズマ博士からの提案で、片手にプラズマボールを、もう片手には蛍光灯を持ってみると、なんと蛍光灯がピカッと点灯。皆、不思議そうに見つめていました。

また、人工ダイヤモンドカッターを用いての氷切り実験では、力を入れなくても人工ダイヤモンドのカッターがスッと氷の中に入っていく初めての体験に、参加者は夢中になっていました。

そして、液体窒素を用いた超伝導浮遊実験では、液体窒素に浸した超伝導体を磁石レールの上に置くとレールから離れて浮いていることに、皆一様に「なぜ？」との質問が相次いで出ました。（みんなの熱心な眼差しのエネルギーでも浮くのかも？）

最後に中庭で太陽望遠鏡による太陽観察を行いました。冬の青森は晴れの日が少ないのですが、この日は晴天に恵まれ「見えた！」と歓声が。

お話と実験による親子サイエンスカフェは、アットホームな雰囲気の中で予定の90分を終えました。一緒に実験を楽しんでいただいたご父兄方の中には六ヶ所核融合研究所の施設見学に興味を示してくださった方もいらっしゃいました。今度は六ヶ所核融合研究所にてお待ちしております。

【緊張気味の？プラズマ博士】

【二人の持つ蛍光灯が光った！】

【超伝導～どうして浮くの？】

【太陽望遠鏡に長い列が！】