

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

■イーターの遠隔実験に向けて世界最大規模の高速データ転送に成功

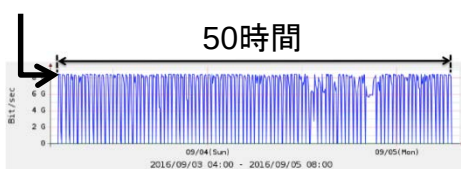
現在、幅広いアプローチ(BA)活動の一環として、南フランスに建設中の国際熱核融合実験炉イーターに六ヶ所核融合研究所からの実験参加を可能にする遠隔実験センター(REC)を整備中です。遠隔実験のためには、大量の実験データを短時間で六ヶ所研まで転送し、現地と時間差のない実験環境を実現する必要があります。

8月30日から9月5日にかけて、量子科学技術研究開発機構(量研機構)は、国立情報学研究所、核融合科学研究所及びイーター機構の協力により、イーターの初期実験で想定される大量データ(1実験当たり1テラバイト)を想定実験間隔(30分以内)で繰り返し安定的に転送する試験に成功しました(9月27日プレス発表)。50時間で積算105テラバイトの大量データをイーターサイトからRECへ高速転送(毎秒約7.9ギガビット)できることに成功したもので、大陸間級の長距離サイト間転送量として世界最大クラスになります。この成果により、日本国内の研究者が、六ヶ所村のRECを拠点として、イーターサイトと同じ環境で実験参加できる見通しが得られました。

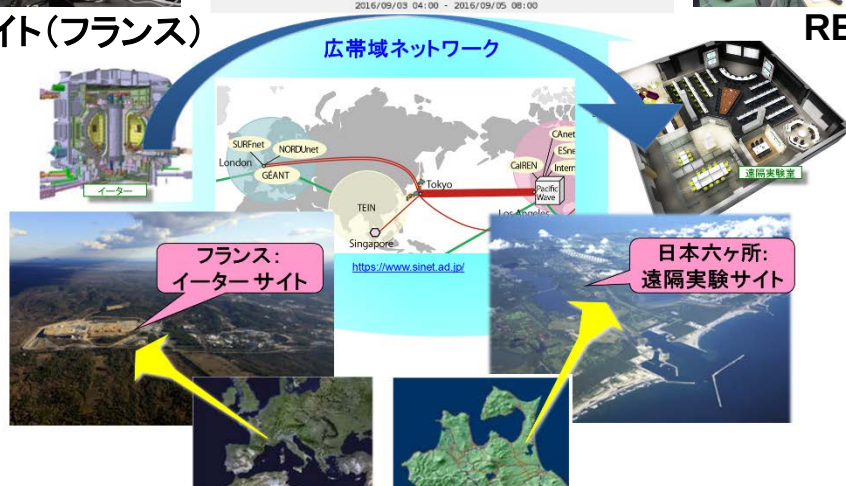
平均 7.2ギガビット



イーターサイト(フランス)



REC(六ヶ所村)



データ転送試験の様子

■ トカマク統合モデリングによるアルヴェン固有モードの時間発展の評価を初めて可能に

トカマク型核融合装置において、核融合反応や強力な中性粒子ビーム(NB)によって生ずる高速イオンは、プラズマ加熱やプラズマ中の電流駆動に関して重要な役割を担っています。一方で、高速イオンの量が多くなると「アルヴェン固有モード」と呼ばれるプラズマ中のゆらぎが大きくなり、そのゆらぎによって高速イオンが外に吐き出されることが懸念されます。プラズマを総合的に解析する統合モデリングコードでは、今までアルヴェン固有モードを考慮できませんでした。そこで、ゆらぎの振舞を解析するコードTASK/WMを、プラズマの状態を模擬するTOPICSコードと高速イオンを模擬するBAFPコードと連携させ(図1)、プラズマや高速イオンの状態に応じて、アルヴェン固有モードが変化する様子を模擬できるように統合モデリングコードを拡張しました。

図2は、幅広いアプローチ活動の一環として日欧共同で那珂研に建設しているトカマク型超伝導核融合装置JT-60SAのプラズマにNBを入射した場合の統合計算例で、色はゆらぎの大きさを表していて、最も赤い点が固有モードを表します。プラズマが変化するにつれて、ゆらぎの周波数が大きくなります。また、高速イオンの量が増えることでゆらぎの成長率が負から正になり、不安定化されます。このように、今回の統合コード拡張によって、アルヴェン固有モードが変化する様子を初めて模擬できるようになり、ゆらぎが不安定化しない運転シナリオの検討を可能にしました。

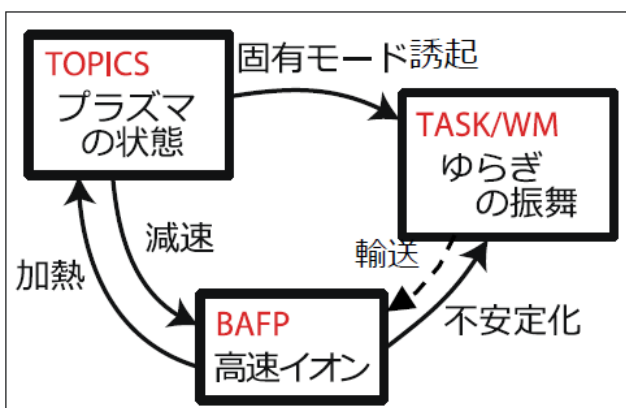


図1: アルヴェン固有モードを考慮した統合モデリングの概念図

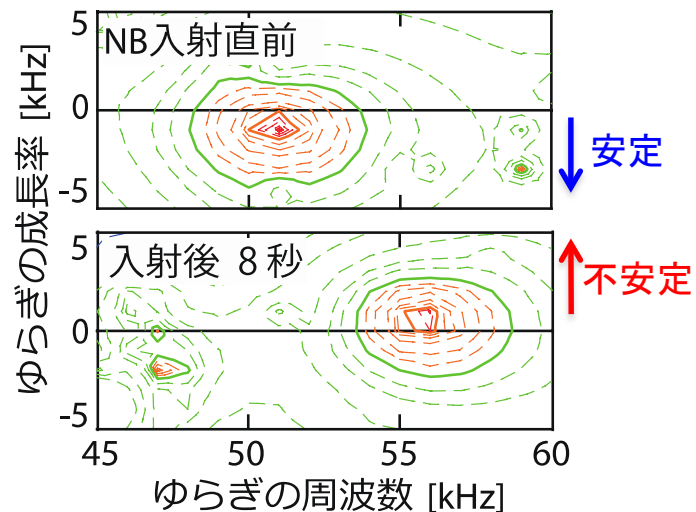


図2: アルヴェン固有モードの成長率と周波数の時間変化

■トリチウムを確実に酸化させるトリチウム酸化触媒塔の性能実証試験を実施

イーターのトリチウム除去系(Detrutiation System: DS)は、異常時にトリチウムが核融合施設内に漏えいした際、トリチウムを確実に取り除くことが求められます。DSはトリチウムを酸化しトリチウム水蒸気にする触媒酸化塔システムとトリチウム水蒸気回収塔(スクラバ塔)システムから構成されます。イーター機構は両システムの性能を仏原子力規制当局に報告する義務があり、触媒酸化塔の性能報告を行うための試験を進めています。私たちは空气中水蒸気による酸化性能の低下を防ぐ疎水性の白金触媒を開発し、反応速度に関するデータの収集を完了したため、現在は各異常事象を模擬した際のDSによる施設内のトリチウム除去の動的挙動を評価する試験を行っています。想定される異常事象のうち、特にトリチウムの触媒酸化が難しい条件である1)低濃度トリチウムの漏えい(低濃度では触媒の酸化効率が悪くなるため)、2)大量の水蒸気を伴うトリチウムの漏えい(水蒸気の膜が触媒の活性サイト表面を被覆し触媒性能が低下するため)、3)火災により発生する炭化水素を伴うトリチウムの漏えい(炭化水素とトリチウムの反応を考慮する必要があるため)を中心にDSのトリチウム除去挙動を検証しました。建屋に見立てた気密容器にトリチウム等を放出し、DSを図3のように接続し、気密容器内のトリチウム濃度が順調に低下することの確認(図4)、及び触媒塔に供給されたトリチウムの99.9%を酸化するために必要な触媒量の同定を進めました。検証の結果、触媒酸化が最も難しい条件は大量の水蒸気を伴うトリチウムの漏えいであり、イーターのDSにおける必要触媒量は処理流量 $1400\text{m}^3/\text{h}$ 当たり 0.8m^3 と評価しました。また、火災時に懸念されていた、発生するメタンとトリチウムの反応で生じるトリチウム化メタンの生成速度は極めて遅く、トリチウム化メタンを燃焼させるための高温触媒塔を設ける必要がないことを明らかにしました。

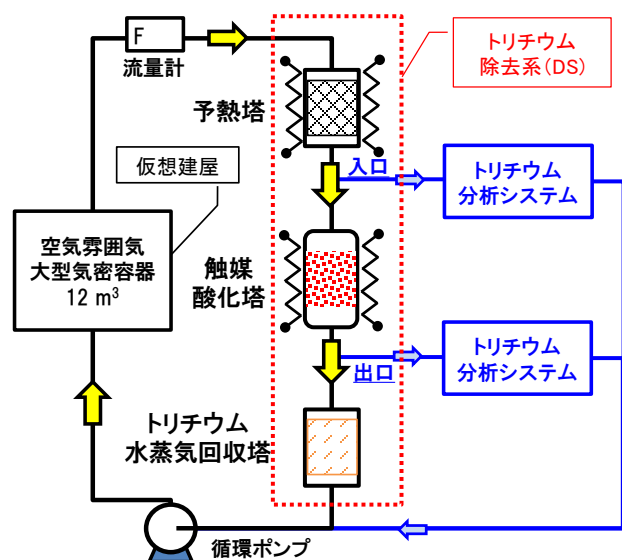


図3: トリチウム触媒酸化塔性能検証試験装置

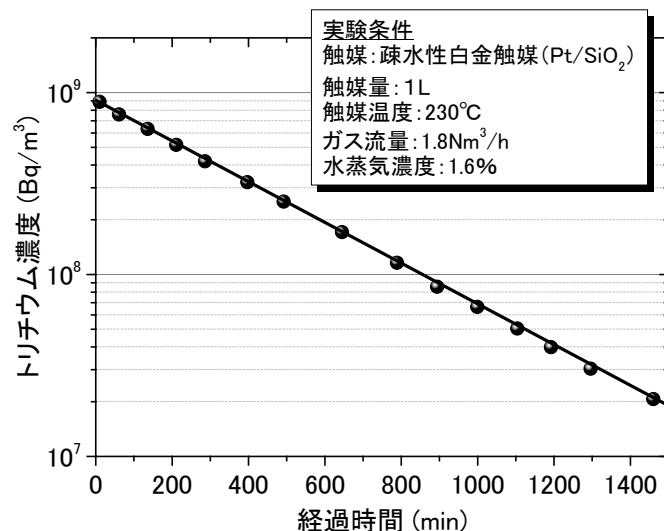


図4: 大量の水蒸気を伴うトリチウム漏えい模擬時のDSによる容器内トリチウム濃度の低下挙動

■IFMIF原型加速器用の高周波入力結合系の大電力試験を完了

幅広いアプローチ(BA)活動の1つの事業である「国際核融合炉材料照射施設の工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)事業」の日本側実施機関として、六ヶ所核融合研究所でIFMIF原型加速器の工学実証活動を実施しています。

IFMIF原型加速器には、高周波四重極線形加速器が組み込まれています。高周波四重極線形加速器(5MeV-125mA)の高周波入力結合系(カプラー)開発では、2014年12月及び2015年3月に最初の2台のカプラーを製作し、茨城地区にて性能確認のための実験に成功していました。残り7台のカプラー製作を2016年2月に完了し、最終的な確認試験を行うため大電力高周波システムがある六ヶ所核融合研究所にて専用の試験設備(図5)の整備を実施した後、6月中旬から実験を開始し、7月下旬までに計画どおり性能確認試験を完了させることができました。試験に用いた設備ではエネルギーが蓄積されるため、少ない入力電力(730W)に対し、等価的に大きな入力電力(200kW)に対応する電界を発生することが可能となり、実機での連続動作相当の運転を実証できます。試験の結果、カプラー内で放電が発生していないこと、真空度は $3.5 \times 10^{-5} \text{Pa} \sim 4.0 \times 10^{-5} \text{Pa}$ の無視できる変化であったこと、試験設備への高周波入射電力730Wに対して反射電力は5W以下であったことから、耐電圧、ガス放出及び高周波特性に関して技術的な問題がないことを確認しました(図6)。

今後は、実機の高周波モジュールを用いた連続動作運転の実証に向けた調整を行う予定です。



図5:六ヶ所核融合研究所に据え付けた試験設備。高周波進行波と反射波の定在波を用いた耐電力試験装置で730Wの入射電力で等価的な高周波電力200kWを試験できる。

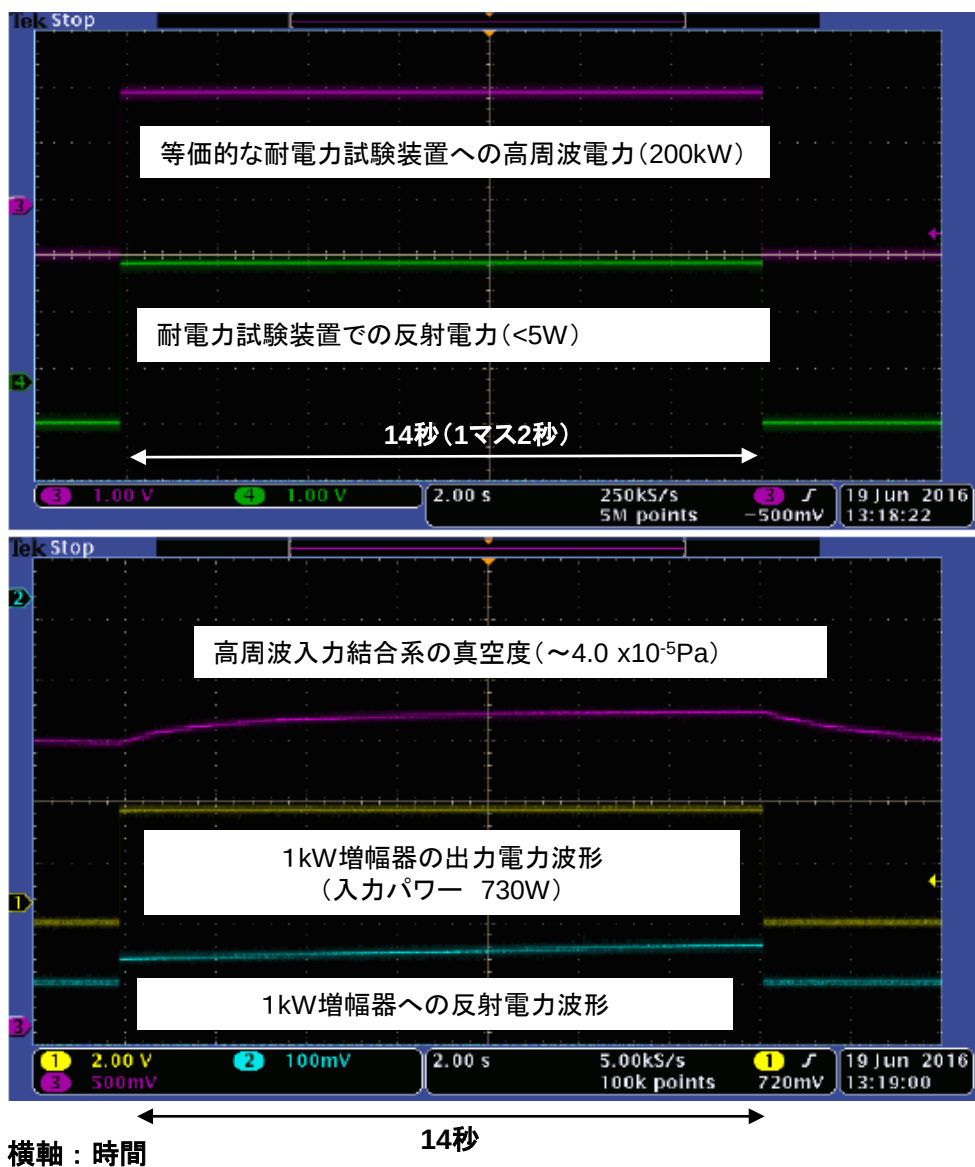


図6: 等価的な高周波電力200kW-14secを実証したデータ

■イータープラズマ加熱用中性粒子ビーム入射装置の実機試験施設の現地工事が進展

イーターのプラズマを加熱する中性粒子ビーム入射(NB)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ことが求められています。この世界に類を見ない高エネルギー・高電流・長時間のNB装置の性能を確実に達成するため、イーターと同性能の実規模試験施設(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。

量研機構では、負イオンビーム加速用の100万ボルト高電圧電源機器(1MV、60A)を製作して順次RFX研に輸送し、据付工事を実施しています。この機器のうち、直流発生器全5台の輸送が完了し、据付工事を開始しました。直流発生器は、昇圧変圧器と整流器を組み合わせ、1台当たり直流0.2MVを出力する電源であり、NBTFでは5台を直列に接続し、合計1MVの高電圧を発生させます。現地工事では、まずこの変圧器を据え付け、そこに油量調整用タンク、ラジエータ及び電圧出力引出用ブッシングの取付作業を行いました。さらに、整流器タンクを取り付け、変圧器と一体化させる作業を行って、直流発生器全5台の主要部分の据付工事が完了しました(図7)。今後は、各直流発生器を直列につなぐ接続管、冷却水及び絶縁ガス用配管の設置を行います。

また、1MV絶縁変圧器についてもRFX研への輸送が完了しました(図8)。本変圧器は、100万ボルトの高電圧をかけた加速器上にビームのもととなるイオンを作るための電力を供給するもので、高電圧の絶縁距離を確保するため一連の輸送物の中で最大の幅を有しており、RFX研では、正面門扉や構内障害物を一時撤去するなど、構内搬入ルート確保に万全の協力体制が敷かれ、順調に輸送が完了しました。この度の輸送が計画どおりに実施されたことにより、重要な工程の一つが無事に完了しました。今後は順次据付工事を行う予定です。



図7: 直流発生器全5台の主要部分の据付完了



図8: 1MV絶縁変圧器の輸送

■JT-60SAトロイダル磁場コイル1号機、2号機の搬入と受入検査を完了

那珂研では、幅広いアプローチ活動の一環として日欧共同でトカマク型超伝導装置JT-60SAの建設を進めています。JT-60SAのトロイダル磁場コイル(TFC)は、欧州が設計、製作を担当するD型形状の超伝導コイルで、計図9に示すように配置された18個のTFCにより高温のプラズマを閉じ込めるために必要なドーナツ状の磁場(トロイダル磁場)を発生します。TFCはニオブチタン(NbTi)の超伝導導体をD型形状(巻き数:72)に巻いています。TFCを超伝導状態にするために、導体に液体ヘリウムを流して -269°C に冷却して、最大25.7-kAの電流を通電して、半径2.96mの位置で2.25 テスラ (22,500 ガウス)のトロイダル磁場を発生します。

TFCの調達取決めでは、フランスとイタリアが予備のコイル2個を含めて10個ずつ製作することになっています。製作が完了したTFCは、順次、フランスのパリ郊外にあるCEA(原子力・代替エネルギー庁)サクレ研究所に陸上輸送され、実際の運転状況下と同等に液体ヘリウムを流して -269°C に冷却し、25.7kAの通電試験を行います。この冷却試験、通電試験に合格したTFCは、貨物船で日本の日立港に輸送されます。フランスのCEAが担当したGE(General Electric Company、旧ALSTOM)製のTFC1号機と2号機は、去る7月20日及び8月25日に日立港から那珂核融合研究所までトレーラーで陸上輸送され、第一工学試験棟に搬入されました(図10)。TFCは、重量22トン(輸送架台を含めて34トン)、高さ7.5m、幅4.6mと非常に大型の構造物であるため、他の車両通行をできるだけ妨げないように交通量の少ない夜間に片側1車線道路を占有する交通規制を行いながら、那珂核融合研究所まで陸上輸送を行いました。

量研機構はTFCの受入検査として、外観検査・寸法検査、センサー類の導通確認、コイルを冷却するためのヘリウムの流路が閉塞していないことの確認試験、耐電圧試験(DC3.0kV1分以上)及び気密試験を実施し、合格を確認しました。

今後11月から、順次、これらのTFCをJT-60実験棟に移動し、組立を開始する予定です。

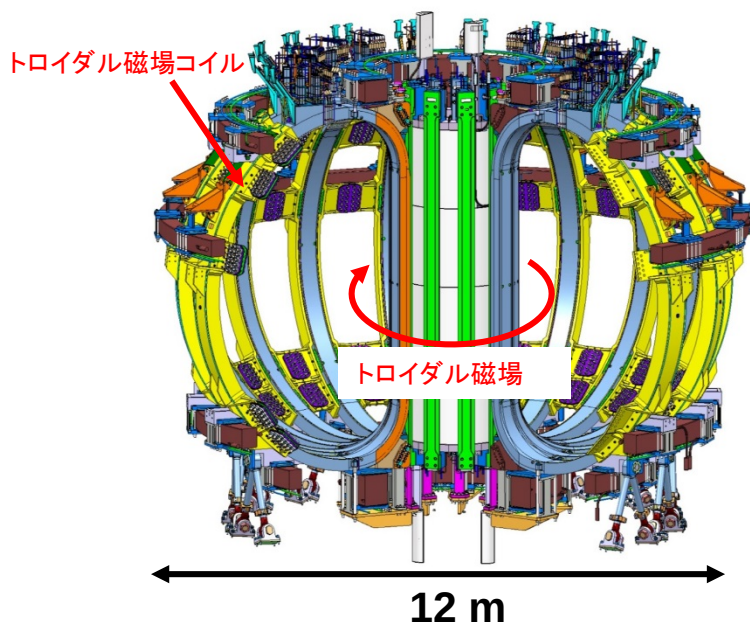


図9: JT-60SAトロイダル磁場コイル(TFC)

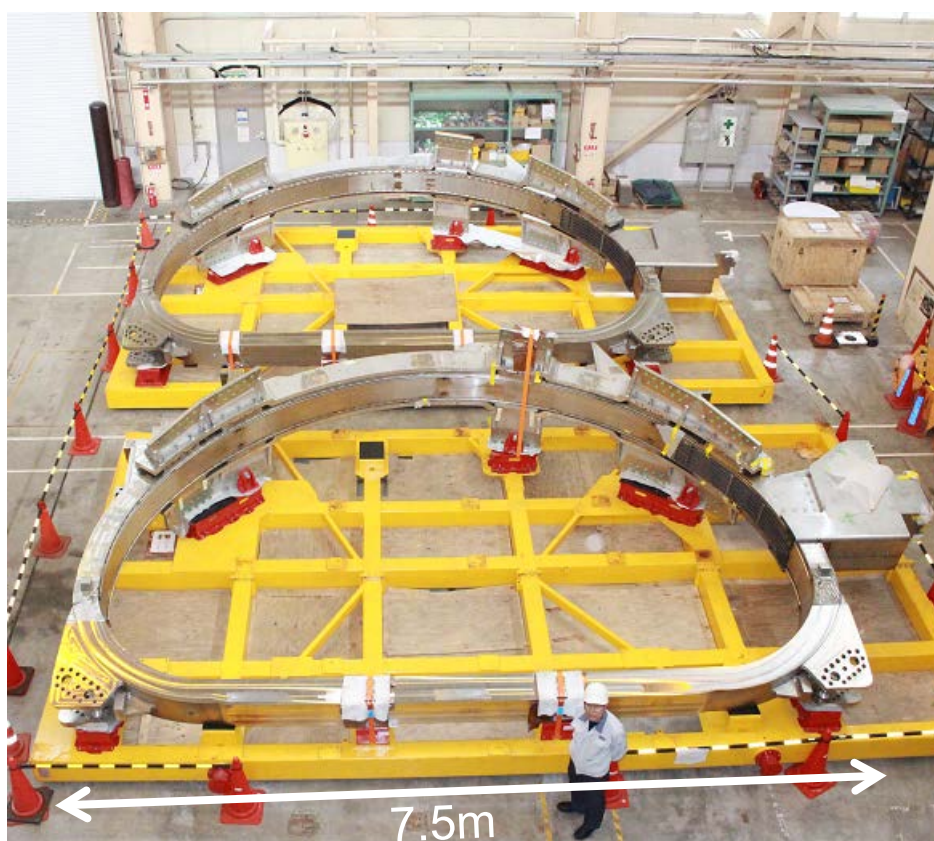


図10: 搬入された2個のTFC

■JT-60SA中心ソレノイド CS1 モジュールの製作完成と核融合科学研究所への輸送・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超伝導コイルで、全部で4個のCSモジュールで構成されます(図11)。この超伝導コイルの製作は、量研機構が担当しています。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)の製作が完了し、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・搬入を行いました(図12)。

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。

量研機構は核融合科学研究所(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す。CS1モジュールを超伝導状態にするために、導体に液体ヘリウムを流して-269°Cに冷却し、20kAの電流を通電します。搬入後、NIFSの真空断熱容器(クライオスタット)にCS1モジュールを設置しました(図13)。この試験装置を用いて、超伝導状態から常伝導状態に移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11)することで、CSの製作を完了させます。

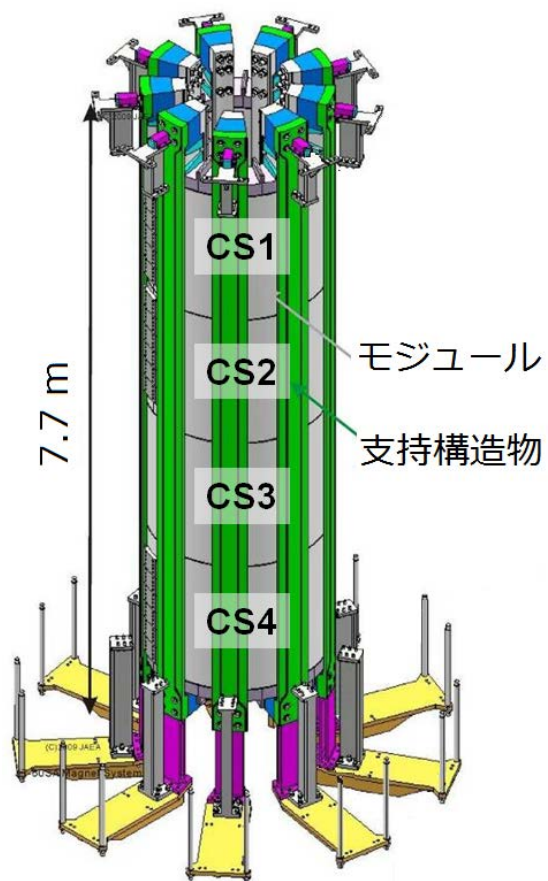


図11: CSの一体化

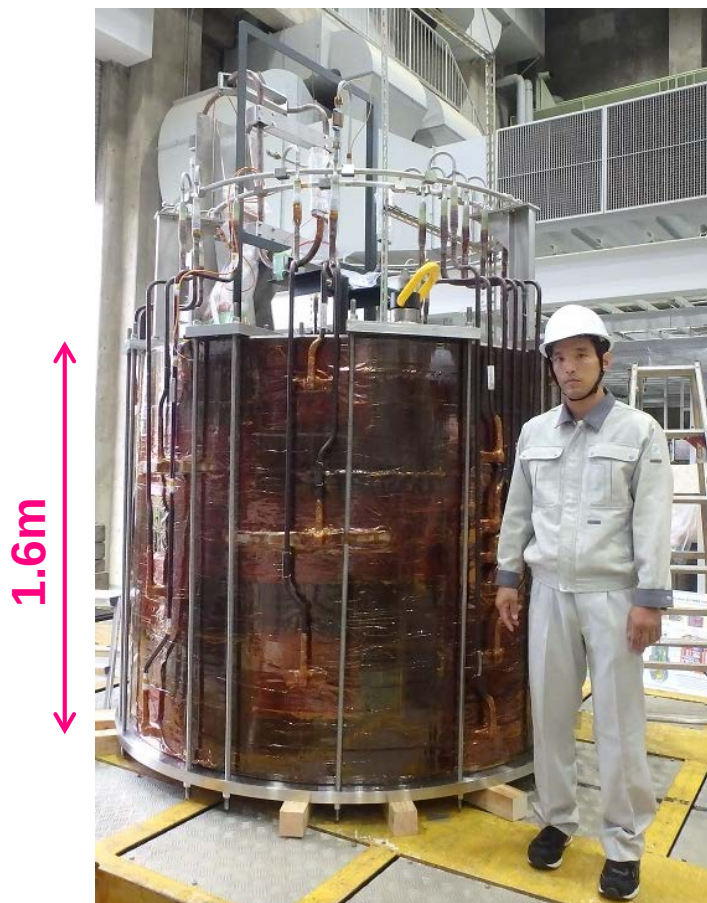


図12: NIFSに輸送したCS1モジュール

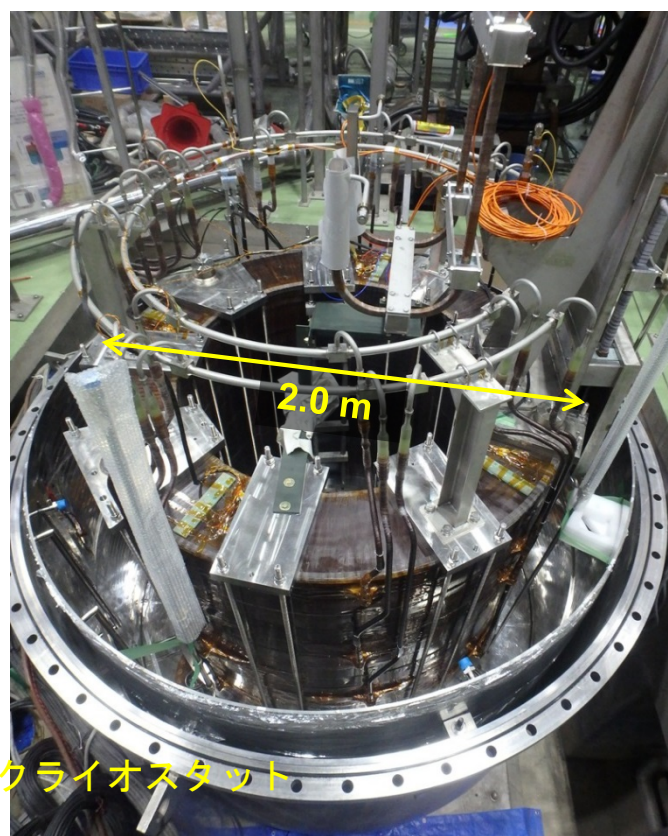


図13: クライオスタットに設置したCS1モジュール

■第25回日欧技術調整会合(TCM-25: 7月6-7日、スペイン・アビレス市)を開催

JT-60SAに関する技術的な調整を定期的に行う日欧技術調整会合の第25回会合(TCM-25)を7月6-7日、スペイン北部のアビレス市にて開催しました。本会合では、日欧の着実な機器製作や装置組立を確認し、機器輸送や試験運転等に関する詳細を調整するとともに、機器製作等に反映すべき必要事項について合意しました。

アビレス市にあるアストロフェイト社は、幅広いアプローチ活動の欧州域内参加機関であるスペインのCIEMATとの契約により、これまでにJT-60SAの大型基礎架台(2013年に那珂研へ搬入)の製作を行い、現在は巨大構造物であるクライオスタット胴部を製作しています。

本会合の冒頭ではアビレス市長からご挨拶をいただき、量研機構からはJT-60SAの模型を市長に贈呈しました。本会合の参加者によるクライオスタット胴部製作現場の見学の様子は、地元新聞2誌の1面と2-3面の紙面を飾りました。



製作中のクライオスタット胴部



Asturfeito concluirá en 2017 el criostato para un reactor de fusión nuclear en Japón

Socios europeos y japoneses visitarán ayer en el PEPA un equipo que servirá para profundizar en esta forma de producción de energía

CIEMAT

AVILÉS. La empresa Asturfeito con el apoyo de 2017 en el campo de la fusión nuclear. El equipo que servirá para profundizar en esta forma de producción de energía. Los socios europeos y japoneses visitarán ayer en el PEPA un equipo que servirá para profundizar en esta forma de producción de energía.

La pieza construida en Avilés medirá doce metros de diámetro y quince de altura.

La pieza construida en Avilés medirá doce metros de diámetro y quince de altura.

La pieza construida en Avilés medirá doce metros de diámetro y quince de altura.

La pieza construida en Avilés medirá doce metros de diámetro y quince de altura.



アビレス地元新聞にて報道された、アストロフェイト社のクライオスタット胴部の製作現場を見学する会合参加者や会合の様子

■六ヶ所核融合研究所村民見学会を開催

7月22日、六ヶ所核融合研究所において六ヶ所村民見学会を開催しました。4月より日本原子力研究開発機構の量子科学関連研究の業務(核融合研究開発及び量子ビーム応用研究の一部の業務)が量子科学技術研究開発機構に移管されことを六ヶ所村の皆様に理解していただくことを主眼として、新たに試みた催しです。

見学会は、六ヶ所核融合研究所のホームページへの掲載、村内各所におけるポスターの掲示やチラシの各戸配布による広報のほか、六ヶ所村広報紙へのお知らせ掲載、役場バスによる見学者用の配車など六ヶ所村役場にも多大なご協力をいただきました。その結果、天候に恵まれたこともあり、当日は幅広い層の方々33名に参加いただくことが出来ました。

見学会後のアンケート調査では、多数の方に「色々な研究施設を実際に見ることが出来て良かった」との感想をいただきました。今後も改善を図りながら同様の催しを継続し、地元の皆様の理解促進を図っていく所存です。



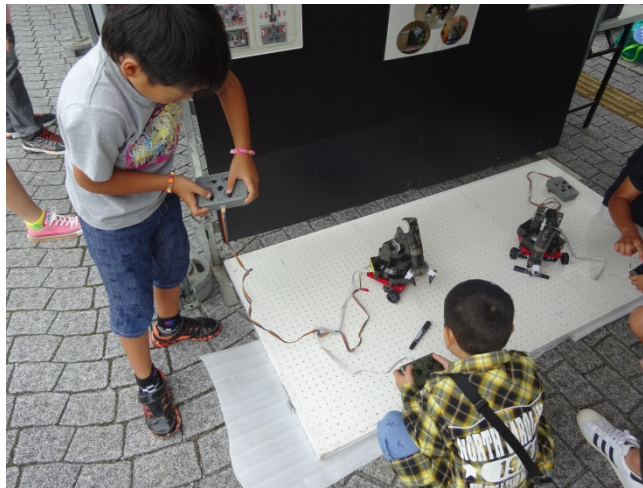
六ヶ所核融合研究所村民見学会にて

■「なかひまわりフェスティバル2016」に出展しました

8月27日、那珂総合公園で開催された「なかひまわりフェスティバル2016」に出展し、人工ダイヤモンドによる氷切り体験、ミニロボットアーム操作体験、太陽望遠鏡による太陽観測及び核融合に関するパネル展示を行いました。

残念ながら、当日は時折小雨が混じるぐずつした天気となり、太陽を見ていただくことはできませんでしたが、氷切り体験やミニロボットアーム操作体験には、多くの方にお越しいただき、楽しんでいただくことができました。

今後もこのような機会を通し、核融合エネルギーの研究開発に関して、理解を深めていただくよう努力していきたいと考えています。



ミニロボットアーム操作体験



上手く切れるかな？