Fusion Forefront No.13 2018 1st.

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

■ ITER中心ソレノイド用導体の開発、製作完遂と輸送完了式典の開催

熱核融合実験炉イーター（ITER）の中心ソレノイド（CS）に用いる高性能ニオブ3スズ(Nb_3Sn)超伝導導体は、量子科学技術研究開発機構（以下「量研」という。）が約8年の歳月をかけ開発・製作し、今回、製作した全導体について米国への輸送が完了しました。今後、米国においてこの導体を用いてCSを巻線、製作することになっています。

CSはイーターの主要機器の1つで、プラズマに電流を流しプラズマ閉じ込め磁場を作るための超伝導磁石であり、13T（テスラ）の高磁場の環境下で4万アンペアの大電流を流せるNb_3Snを用いた超伝導導体が必要です（図1）。

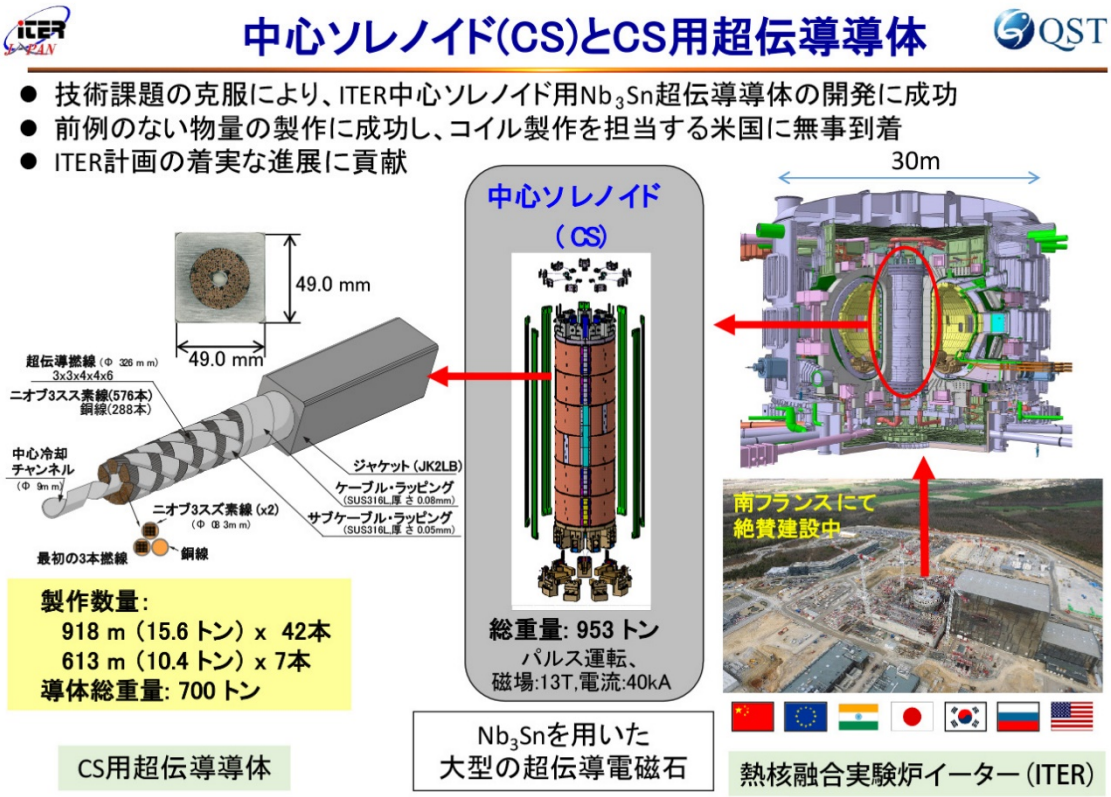

図1　中心ソレノイド（CS）とCS用超伝導導体

全部で49本の導体（計700トン）を用いますが、日本がその全ての製作を担当しており、量産化が必要でした。量研は、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)、イーエナジー(株)、古河電気工業(株)、コベルコ鋼管(株)及び新日鉄住金エンジニアリング(株)と協力し、高性能化及び量産化技術を確立しました。

高性能化では従来よりも約30%高い電流を流せる超伝導素線を開発するとともに、「繰り返し電磁力」に対して性能低下する技術課題に関して、素線を撚線する際の撚りピッチを従来より短くする短ピッチ型撚線を開発し解決することができました。また、極低温（零下269 ℃)中で大きな電磁力に耐えられる従来と比べて約2倍の強さを持つジャケットと呼ばれる金属管を開発しました。量産化では自動溶接や効率的な検査、品質管理法を確立しました。これにより、これまでにない物量の高磁場・大型超伝導導体を、求められた性能を満足しつつ完了し、日本の優れた超伝導技術を世界に示しました。5月3日、米国でCSの製作を担当するカリフォルニア州サンディエゴ近郊のジェネラルアトミックス(GA)社において、日本が製作した導体の米国輸送完了を記念した式典が、同社主催により開催されました(図2)。この式典には、日本からは、文科省の松浦戦略官、製作メーカー代表者、及び量研の板倉理事ほか関係者らが出席し、米国からは、エネルギー省のヴァンダム科学局次長、ソートフ米国イーター国内機関長、及びGA社の関係者が参加しました。多くの関係者の知恵と不屈の精神でITER用の超伝導導体製作を完遂し、それらを手がけた製作メーカーも含め多くの関係者が本式典に参加できたことは非常に意義深いものでありました。

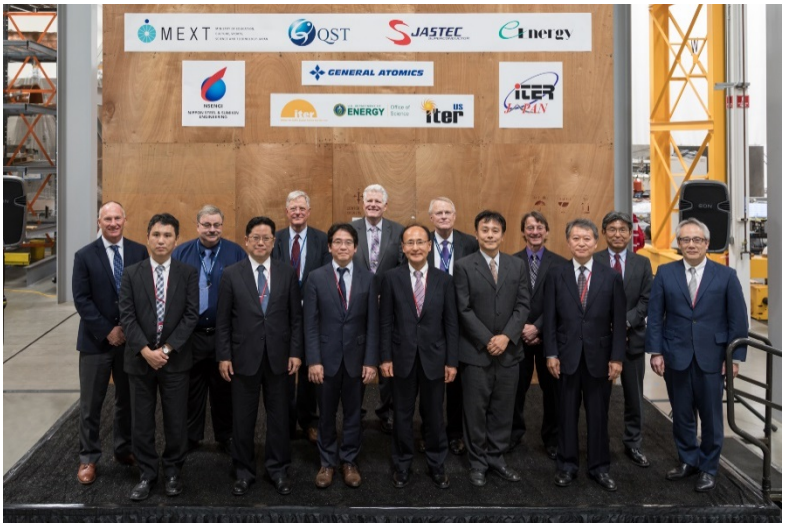

図2　米国で開催されたCS導体の輸送完了に係る式典

■ 新スパコンの運用開始準備を完了

六ヶ所核融合研究所で導入を進めてきた核融合研究専用のスーパーコンピューターは6月の試験運用を無事に終え、7月から本格運用を開始する準備が整いました。これまで、2012年に核融合専用スパコン（Helios、愛称：六ちゃん）を欧州と共同で導入し、2016年末の運用停止まで、核融合プラズマや核融合炉材料などに関する複雑なシミュレーションに活用してきました。この間、当初の予想を上回る学術的価値の高い多くの成果が得られたことから、六ヶ所研ではスパコン２号機となる日本国内向け核融合研究専用スパコンを導入したもので、新スパコンはJFRS-1（Japan Fusion Reactor Simulator -1、愛称： 六ちゃん-II）と命名されました(図3)。このスパコンはクレイ社製XC50-LC（理論性能 4.2ペタ・フロップス）という機種であり、2018年4月には六ヶ所研に搬入、同年5月末に据付調整を終了という極めて短期間に導入までこぎ着けました。
JFRS-1は、典型的な核融合計算に対して従来機Heliosよりも約４倍高速であることが確認されており、例えば、これまでは１か月の計算時間を要したプラズマ乱流の大規模シミュレーションが１週間程度で可能になります。JFRS-1には、既に100名を超える国内の研究者から利用申請があり、計算機の利用率も日増しに高まっています。今後は、Heliosよりも更に優れた研究成果を創出し、核融合エネルギーの早期実現に貢献できるよう、効率的な運用と利用者へのサポートを実施していく考えです。

図3 六ヶ所研計算機室に設置された新スパコン

■ JT-60SA計画の進展について

◎トロイダル磁場コイル(TFC) 全18体の設置を完了:

トロイダル磁場コイル(TFC :高さ7m、幅4.5m)等の組込みを進めてきたJT-60SA本体組立作業について、4月2日に17体目、20日に18体目のTFCを本体に組み込みました。これにより、18体全てのTFCを本体へ組み込む作業が完了し(図4)、JT-60SA組立の重要なマイルストーンを達成しました。また、本成果をプレスに公開し毎日新聞、茨城新聞、日刊工業新聞、電気新聞等に、記事が掲載されました。

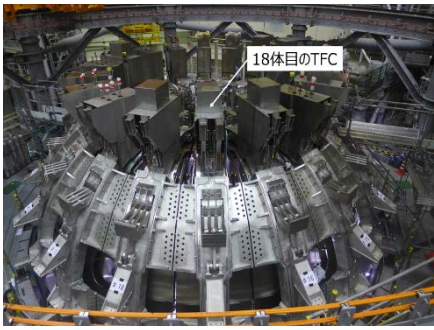

図4 全18体のTFC の設置を完了

最終の18体目のTFCの本体への組込みに際しては、TFC、真空容器(VV)、真空容器熱遮蔽体(VVTS)を一体化して(図5)、本体へ組み込みました。一体化に際しては、事前に、18体目のTFCやVVTSとVVを一体化したモジュールを、それぞれ、本体に仮組みし、隣接するTFCやVVとのギャップ長などを測定し、その結果を基に、18体目のTFCとVVやVVTSのギャップ距離を調整しました。その結果、設計値+/-3mmに対して、+/-1mmの公差でTFCを設置することに成功しました。

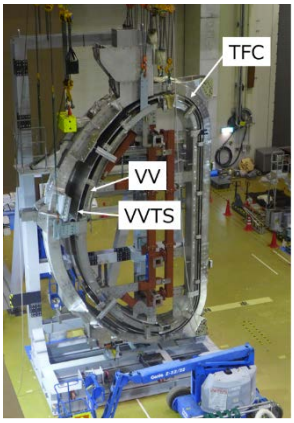

図5 TFC, VV, VVTSを一体化した最終セクター

◎真空容器最終セクターの溶接作業開始:

TFCの取付作業に引き続き、二重壁を有する真空容器の最終セクターの溶接作業を5月27日から開始しています。同作業では、最初に、真空容器の外壁を溶接し、その後内側を溶接します。一般的に溶接する際には、溶接する箇所の裏側からアルゴンなどの不活性ガスを吹き付けて、空気(酸素)を取り込みにくくし、金属の酸化及びそれに伴う品質低下を防いでいます。しかしながら、当該作業では、外壁の外側(溶接箇所の裏側)に熱遮蔽体があり、不活性ガスを吹き付けることができないために、溶接箇所の裏側に板を取り付け、溶接箇所に空気が入り込むことを抑制する対策を施しました(図6)。これにより、ブローホールなどの欠陥もなく、品質の高い溶接を行っています。これまでに、外壁の厚さ(18mm)に相当する10層を溶接し、外壁の溶接を完了しております。現在、内壁の溶接に着手しており、7月中を目途に終了する予定です。

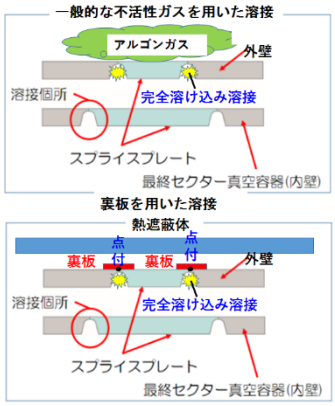

図6 真空容器最終セクターの完全溶け込み溶接

◎欧州(ENEA)製磁場コイル用サイリスタ電源(SCMPS)の受入試験開始：

JT-60SA超伝導コイル用電源の製作及び据付けは、欧州内の複数の研究所が分担しており、クエンチ保護回路、TFC用電源、平衡磁場コイル用電源の一部(EF2,3,4,5)は既に那珂核融合研究所での受入試験を2017年7月までに完了しており、残る電源は、イタリアのENEA（*Energia Nucleare ed Energie Alternative*）研究所が担当しているセンター—ソレノイド用電源、平衡磁場コイル用電源の一部(EF1,6)及び高速位置制御用電源となっています。

これらの電源は2017年4月及び12月に那珂研に搬入され、12月から据付作業を行いました。機器設置、ケーブル敷設、冷却配管などを終了し、予定どおり2018年5月30日からENEA電源の受入試験を開始しました（図7）。

今後、12月までを目途として受入試験を継続する予定です。

図7 那珂研に設置されたENEAの電源の一部

■ JT－60のダイバータプラズマ中の炭素イオンの密度計測に成功

核融合炉では、核融合反応により生じた膨大な熱がダイバータと呼ばれる除熱機器に流れ込みます。ダイバータが除熱できる熱には限りがあるため、ダイバータ部に炭素などの不純物を導入し、不純物イオンによる発光（放射）によってダイバータへの熱流入量を下げることが考えられています。不純物イオンから放射されるパワーは、不純物イオンの密度に比例するため、不純物イオンの密度を計測することは非常に重要です。そこで、炭素イオンの複数のスペクトル線の絶対強度を測定し、それをモデル解析することによって炭素イオンの発光位置での電子温度と電子密度を同時に求めました。さらに、炭素イオンの発光の二次元分布を測定し、コンピュータートモグラフィーにより炭素イオンの発光体積を決定しました（図8）。これらのデータから世界で初めてダイバータプラズマ中の炭素イオン密度を導出することに成功し、電子密度の0.2%程度の炭素イオン密度でも、ダイバータ部の放射パワーが充分大きなプラズマが実現できることがわかりました。

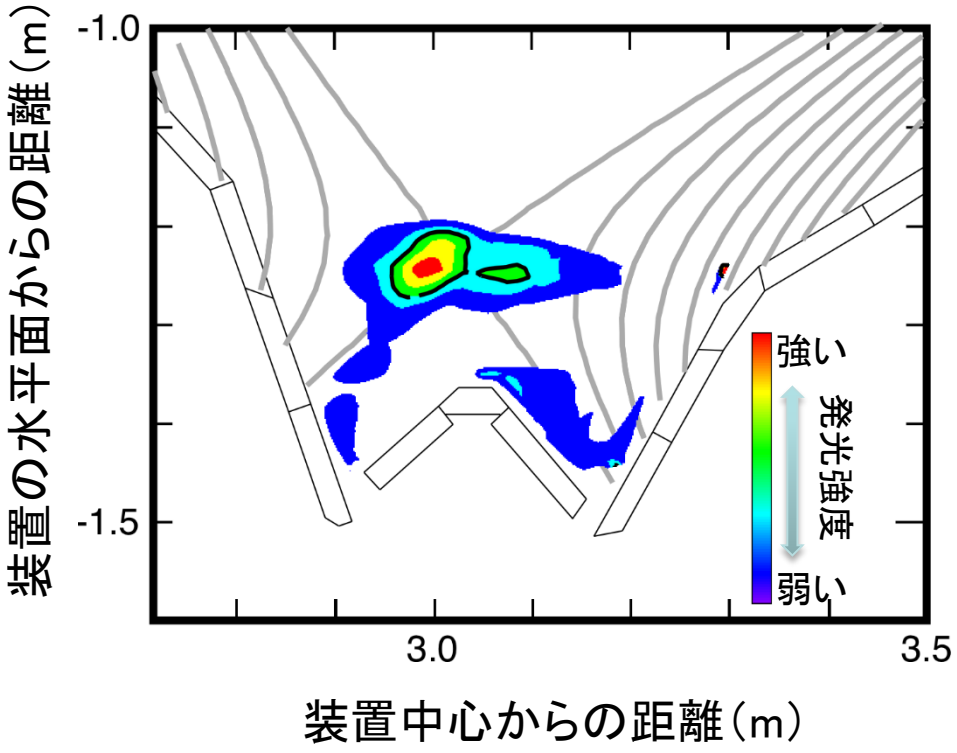

図8 ダイバータ部における炭素イオンの発光の2次元分布

黒太線は最大発光強度の半分の強度の範囲を示す。

■ JT-60SAの第7回日欧研究調整会議を開催

6月4日～8日、JT-60SAの第7回日欧研究調整会議が那珂核融合研究所にて開催されました。この会議は年に1回開催され、日欧の研究コミュニティからの代表者が一堂に会して、JT-60SAを用いた研究の進め方とその検討のための研究協力を議論します。今回、日欧から約60名の研究者が参加しました（欧州23名（5か国11研究機関）、量研32名、国内大学等4名、JT-60SA事業チーム1名）(図9)。

会議では、JT-60SAリサーチプランの改訂版作成に向けて、初期研究段階での研究目標や研究項目の優先順位を確認するとともに、日欧共同研究（プラズマ・モデリング、シナリオ開発検討、プラズマ制御検討、ダイバータ排気検討等）の進捗状況を確認しました。また、JT-60SA実験チームが設置される2021年4月までの活動計画について議論し、2020年までプラズマ・モデリングや実験に必要な機器の検討を継続すること等を合意しました。次回は、2019年秋頃に開催を予定しています。

図9 第7回JT-60SA研究調整会議の参加者

■ IFMIF原型加速器RFQ による2.5 MeV までの陽子ビーム加速に初めて成功

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（図10）（ここで、9メガ電子ボルトはエネルギーの単位で、重水素イオン粒子を9メガボルトの電圧で加速することに相当）。量研と欧州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。

この度、日欧合同チームが、大電流の直流ビームを安定して加速するための鍵となる高周波四重極線形加速器（RFQ）を用いた、2.5 MeV までの陽子ビーム加速に初めて成功しました（図11～13）。このRFQは、IFMIF原型加速器に必要な大パワー（電流130ミリアンペア、ビーム電力0.7メガワット）の重陽子ビーム加速を実現するため、世界初となる8系統の同期した高周波源で多重駆動する方式を採用しています。また、ビームの発散が少ない最適形状となるように内部の電界パターンが設計された、世界最長（9.8m）のRFQです。今後は、陽子ビームにおける最大定格の65ミリアンペアのビーム加速の実証に向け、ビーム試験を精力的に実施し、その後、重水素ビーム加速試験に移行する予定です。来年度以降には、超伝導高周波加速器(SRF)を含めたIFMIF原型加速器の最終構成でのビーム加速試験が予定されており、本成果はこの目標へ向け、大きく弾みをつけるものです。

図10：IFMIF/EVEDA原型加速器の全体図

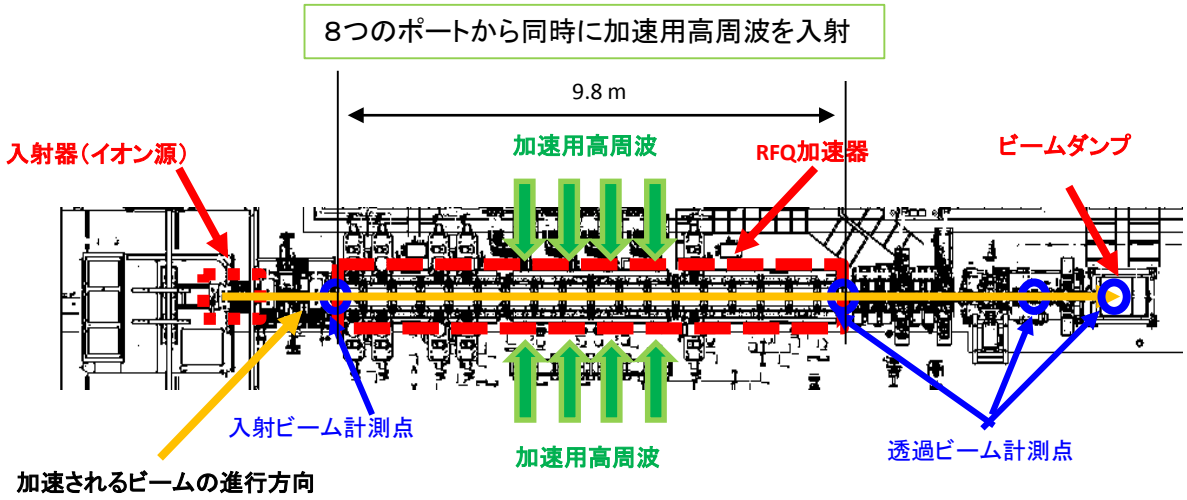

図11：原型加速器の構成とビーム電流の計測点

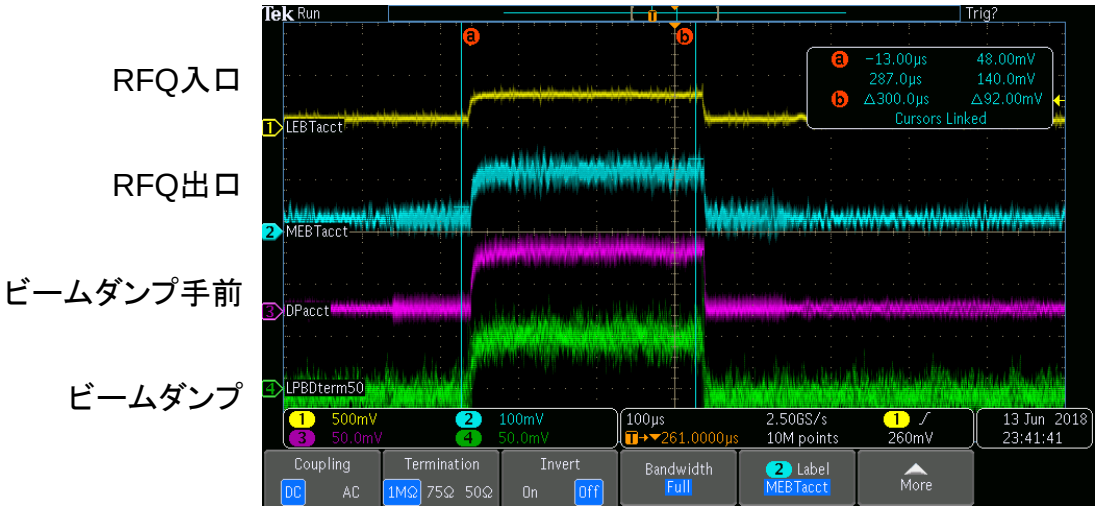

図12：初のビーム加速で観測されたビーム電流の測定結果

RFQ入口から入射したビームが出口に到達し、ビームダンプ手前の計測器を通過して、ビームダンプに到達したことを示している。

図13：日欧合同チームによる初のビーム加速成功後の記念写真

■ 核融合燃料トリチウムの安定供給に必須なリチウム同位体の高濃縮化技術を実証

核融合炉の燃料トリチウムは自然界にはほとんど存在しないため、セラミックス球状のリチウムに、プラズマ中で発生した中性子を当てて生産します。しかし、トリチウム生産は、天然のリチウムに約7.8%しか含まれない同位体と呼ばれる、重さが6のリチウム6(残りはリチウム7)から生産するため、十分なトリチウム供給には、リチウム6の割合を約90%まで高める(濃縮する)必要があります。これまで、リチウム6を分離回収する特殊な膜として、リチウム、ランタン、チタンで構成される$Li_{0.29}La_{0.57}TiO_3$イオン伝導体(LLTO)を用い、1回の分離操作にて天然比の約7.8%から約8.0%に高めることに成功しました。

目標とする約90%までリチウム6を濃縮するためには、回収液を原液とし、更にリチウム6を濃縮する繰り返しの操作が必要です。しかし、この繰り返し操作によるリチウム6濃縮の可能性を検証した試験はありません。そこで、あらかじめリチウム6(^{6}Li)と7(^{7}Li)の比が同じ量(^{6}Li:^{7}Li=50:50)に調整した^{6}Liの濃縮原液を用意し、^{6}Li回収率及び^{6}Li同位体分離係数を評価しました。

^{6}Li回収率は時間とともに増加し、17日後には、原液中の^{6}Li全てが回収液側に移動したことを示す、ほぼ100%回収を達成しました(図14)。また、この評価における^{6}Li同位体分離係数は最大1.05と、海外にて実用化されていると考えられている水銀アマルガム法(^{6}Li同位体分離係数1.06)とほぼ同等の高い値が得られ、^{6}Li回収率70%(約10日後)においても^{6}Li同位体分離係数は約1.02と、高回収率でも^{6}Liが分離可能なことを明らかにしました(図15)。さらに、再現性確認のため、同じ試験を2回行いましたが、同様の結果を得ました。

本技術は、人体に有害な水銀を規制する“水俣条約”に触れず、また、水銀への^{6}Li吸脱着等の複雑なプロセスを使用せず、さらに、LLTOを用いた^{6}Li同位体分離装置を多段化する(繰り返し分離濃縮する)のみで約90%まで^{6}Liの比率を高める可能性を有する、画期的な手法であることを初めて実証しました。

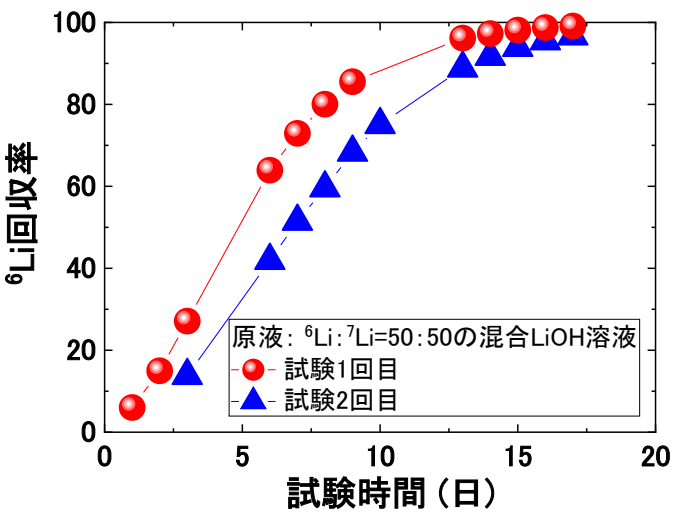

図14：LLTO中をリチウムが透過し、約17日後に原液に含まれる^{6}Liを100%回収しました

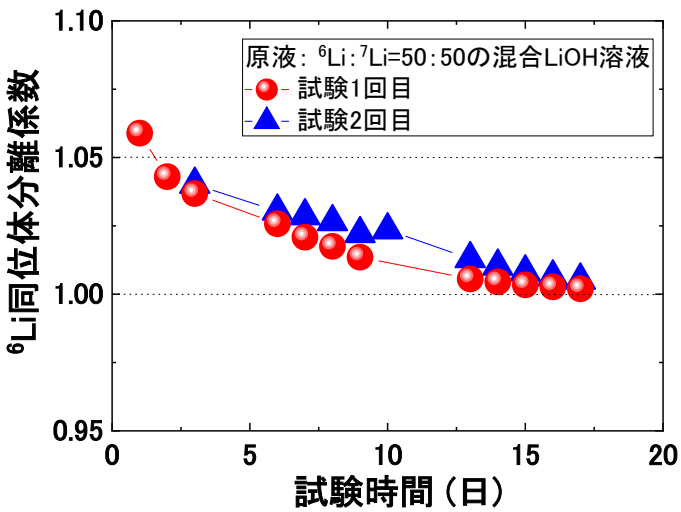

図15：約70%高^{6}Li回収率時(10日後)も分離可能な(^{6}Li同位体分離係数が1より高い)結果を得ました

■ 2018たのしむべ！フェスティバルに出展しました

6月9日（土）～10日（日）に六ヶ所村及び六ケ所村観光協会主催の地域イベント「2018たのしむべ！フェスティバル」が開催され、今年も六ヶ所核融合研究所は出展しました。今年こそ太陽望遠鏡を！と意気込んでいたのに、あいにくの悪天候…。

でも、めげてはいられません！

気軽にたくさんの方々に来ていただけるようにと願いを込めてブース配置を開始。今年は7月29日（日）に行う研究所の施設公開の予告チラシも準備しました。

今年は、どの位の方々が来てくれるかという不安がありつつもフェスティバルスタート！

呼び込み部隊が缶バッジ制作や科学実験に誘導。それを見て新たなお客様が次々と！！

当初の不安をよそに缶バッジ用の写真撮影希望の列ができ、そして科学実験にも子どもから大人まで年齢問わず興味津々のたくさんの人だかりが！

ブースを訪れる人波は絶えず、気がつけば日が落ちるギリギリまでブースを開けていました。そして初日の缶バッジ制作数は376個！！

昨年は両日で534個でしたが、初日からたくさんの方々に来ていただき、嬉しさでいっぱいでした。

そして2日目を迎えました。同日も残念ながら、太陽望遠鏡は難しい雲行き。

しかしながら前日の勢い劣らず科学実験、缶バッジ制作ともに大盛況です！

気がつけば2日目の缶バッジ制作数は450個！両日合わせて昨年より292個増の826個を作成しました。

施設公開の予告チラシの配布にも「絶対、行きます！」などのお言葉をいただき、好感触を得ることができました。

また来年も更なるブース訪問者数の増加を目指して、楽しんでいただけるブースにしたいと思います。

【プラズマボールに夢中♪】

【笑顔溢れる缶バッジ作成班】

【人口ダイヤモンドを用いた氷切りに挑戦中！】

■ 那珂市静峰ふるさと公園の八重桜まつり、原子力科学館ゴールデンウィークイベントに出展

那珂核融合研究所は、4月22日に那珂市静峰ふるさと公園において開催された八重桜まつり及び5月5日に原子力科学館において開催されたゴールデンウィークイベントに出展し、パネル等を用いた事業の紹介を行うとともに、各種理科実験等を行いました。

たくさんの方にブースにお越しいただき、核融合反応の仕組みや事業の内容について理解を深めていただく良い機会となりました。

【人口ダイヤモンドを用いた氷切り実験】

■ ガヤガヤ☆カミスガにブース出展しました

那珂核融合研究所は、6月3日（日）にJR水郡線上菅谷駅前で行われた“ガヤガヤ☆カミスガ”にブース出展しました。例年ボランティアスタッフとして当研究所のブースを一緒に盛り上げてくださっている大成女子高等学校探究部サイエンス班へ今年も協力をお願いし、当日に臨みました。

今年度は、液体窒素を用いた各種実験、フランスに建設中のITER（国際熱核融合実験炉）の建設現場をバーチャルリアリティでご覧いただくVR体験、核融合に関するパネル展示等を行いました。

VR体験は、若い方からお年寄りの方まで多くの方にご体験いただき、臨場感のあるITER建設現場の映像が大好評でした。

今後も実験等の体験型のイベントを通して、核融合エネルギーの研究に興味を持ってもらえるよう努力していきたいと思います。

【ここはITER！？（VR体験の様子）】