

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

■ イータートロイダル磁場コイル構造物第1号機の輸送完了

日本が製作した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構造物の第1号機は、平成30年1月29日に出荷され、約1か月かけて2月27日に無事イタリアに到着しました(図1)。

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構造物から構成されます。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、日本がその全ての構造物の製作を担当しています。構造物の高さは16.5mと非常に大きなものですが、製作精度は1mm以下を要求されているため、高度な作業が必要となります。構造物は、内側構造物容器及び外側構造物容器並びにそれらの蓋の4つのパーツに分けて製作し(図2)、イタリアの工場に輸送しました。到着した構造物は、巻線部と一体化された後、イタリアから南フランスのイーター建設サイトに運ばれて、本体に組み立てられます。

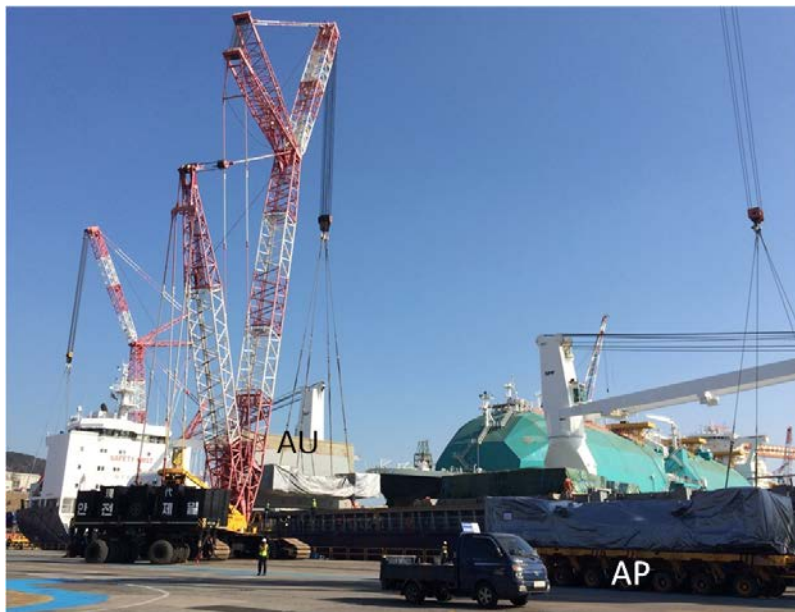


図1: イタリアの一体化工場に向けて輸送したトロイダル磁場コイル構造物第1号機の内側構造物容器(AU)とその蓋(AP)の船積みの様子

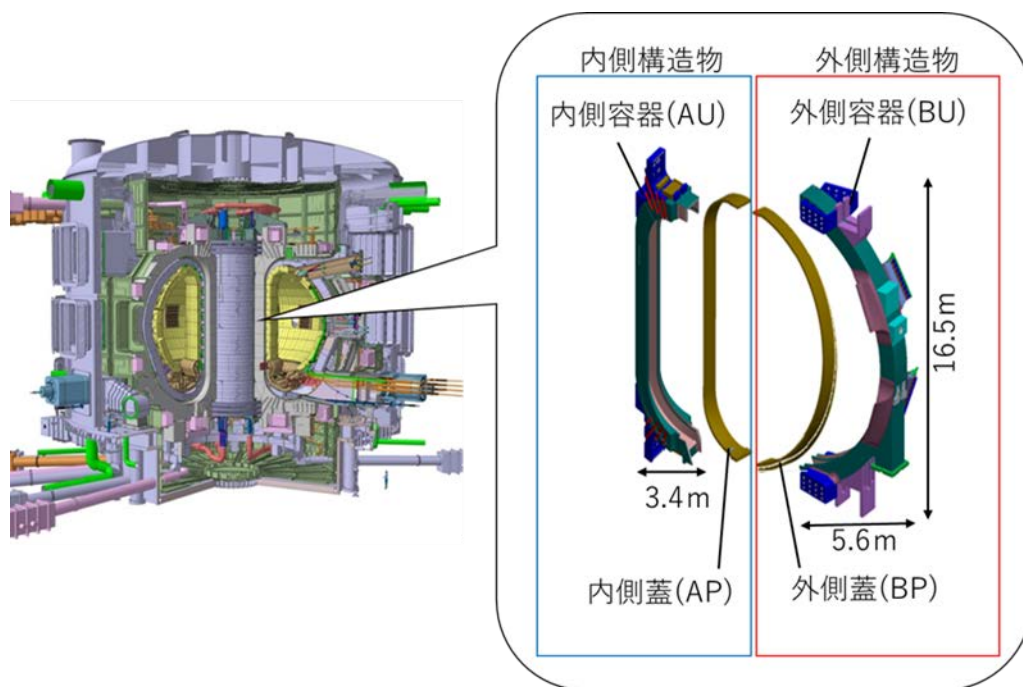


図2: イーター及びトロイダル磁場コイル構造物の構成

■強固な構造と燃料生産を両立する増殖ブランケット概念を考案

核融合原型炉では、発電のための熱の取り出しと燃料であるトリチウムの生産を、核融合反応によって発生する高速の中性子を炉心プラズマの周りに設置した増殖ブランケットで受け止めて行います。増殖ブランケットの容器中には、リチウムと中性子を反応させてトリチウムを生産するためのリチウム化合物や中性子を増やしてトリチウムの生産効率を高めるためのベリリウム化合物の微小球(ペブル)と、冷却水が流れる配管を設置します。これまでは、トリチウムを自給自足することと、冷却配管が破れ内圧が上昇しても壊れない増殖ブランケットの堅牢性を両立させることが大きな課題でした。

最近の設計研究において、増殖ブランケット容器に補強リブを、一辺が10cmの格子状になるよう配置することで、容器の堅牢性を確保することができました。また、冷却配管のレイアウトを工夫し、さらに、冷却水に通常の水(H_2O)よりも重たい重水(D_2O)を利用することで、必要な量のトリチウムを生産できる見通しを得ました。これは重水によって、中性子を効率良く利用してトリチウムを生産できるためです。今後は、格子状の補強リブを配置した増殖ブランケットの製作方法も考慮して、詳細な概念検討を進めます。

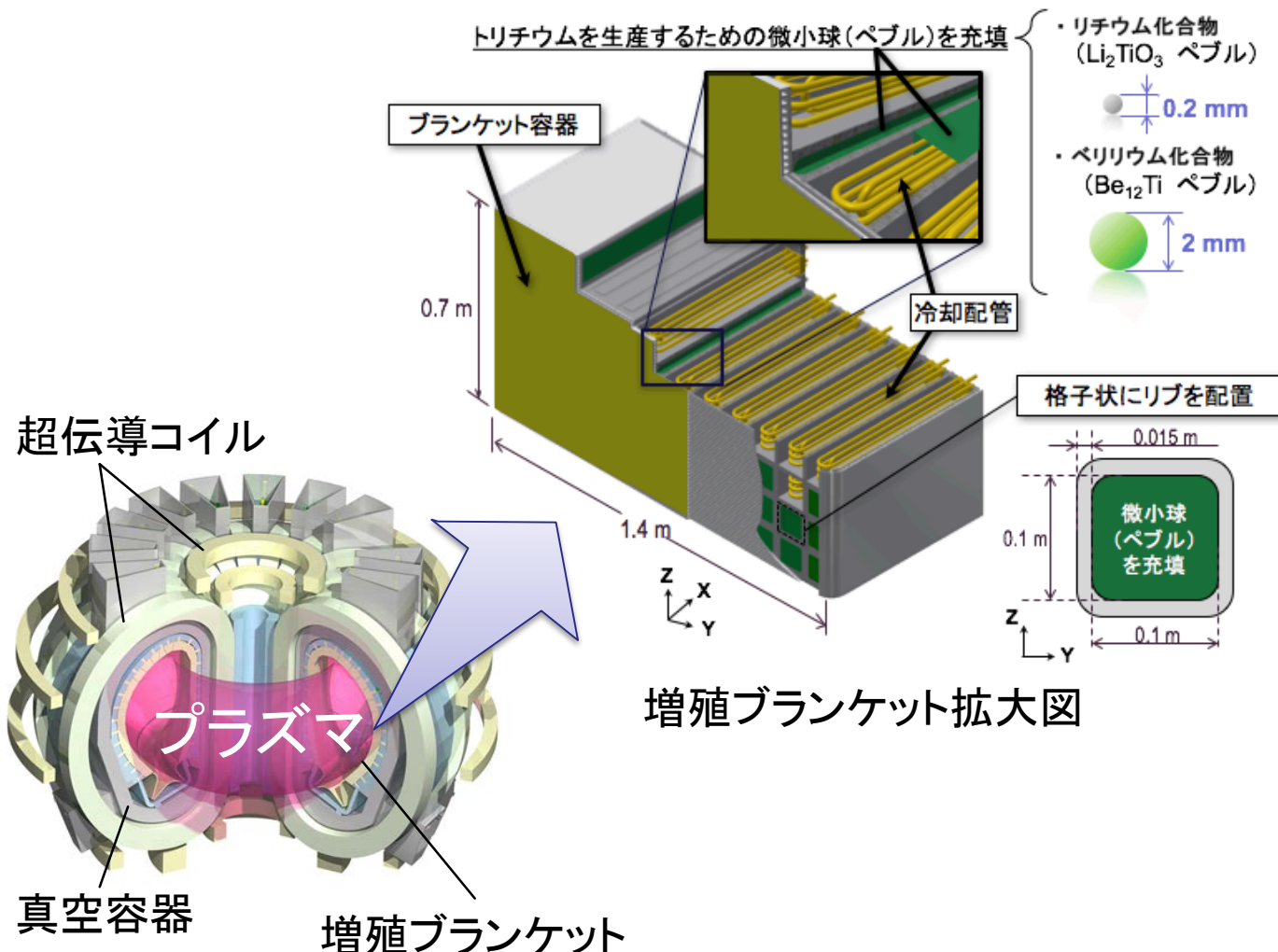


図3: 核融合原型炉の増殖ブランケットの概念図

■ JT-60SA計画の進展について

◎超伝導トロイダル磁場コイルの製作及び日本への搬入を完了：

プラズマの閉じ込めを担う超伝導トロイダル磁場コイル(TFC:高さ7m、幅4.5m)は欧州のフランスとイタリアが製作を担当しており、平成29年度第3四半期までに、全18体のうち、15体のTFCが那珂核融合研究所(那珂研)に搬入されています。残り3体のうち、2体はフランスでの製作が約2か月遅延したことから、JT-60SA建設工程に大きく影響を及ぼすことが危惧されました。このため、日欧で遅延回復策を協議し、これら2体を空輸することを決定しました。この決定に基づき、2体のTFCは大型輸送機アントノフ124(チャーター便、150トン積載可)により、2月15日にフランスのパリ郊外のヴァトリー国際空港を出発し、途中2か所の空港で給油して、2月17日にセントレア空港に無事到着しました(図4)。その後、セントレアに併設された港から日立港まで海上輸送され、2月21日に那珂研に搬入されました。また、残り1体のTFCも海上輸送後、3月21日に那珂研に到着しており、18体のTFC全てが那珂研に搬入されました。



図4: TFC 2体を大型輸送機で空輸
(トレーラーに積み替え中)

◎センターソレノイド製作を完了：

プラズマの着火を担うセンターソレノイド(CS)は日本が製作を担当しており、4つのモジュールを積み上げた構造を有しています。これまで3つのモジュールの製作が完了し、一部のモジュールについて液体ヘリウム温度での性能試験を行い、要求性能を満足することを確認しました。

最後の第3モジュールも平成29年度第4四半期に製作を終了しており(図5)、今後、残り3つのモジュールと一体化し、平成30年12月に那珂研に納入される予定です。



図5: 最後に製作された
第3CSモジュール

◎超伝導トロイダル磁場コイル(TFC) 16体を設置：

JT-60SAの本体組立作業は順調に進展しており、平成29年度第4四半期までに、空輸された1体を含めて合計16体のTFCをJT-60SA本体に組み込んでいます(図6)。TFCの組込みに際しては、位置合わせ専用のリングレールの上にTFCを乗せて、レーザートラックで設置位置を定め、要求性能($\pm 1\text{m}$ 以下)を達成しました。また、コイル内側直線部に取り付けたシム板の厚さを最適化することによって、隣接するコイルとの間隔を許容値(0.5mm 以下)に抑えました。今後、残り2体のTFCも同様の手順によって、JT-60SA本体に組み込まれ、平成30年度第1四半期を目途に、全てのTFCの設置を完了する予定です。

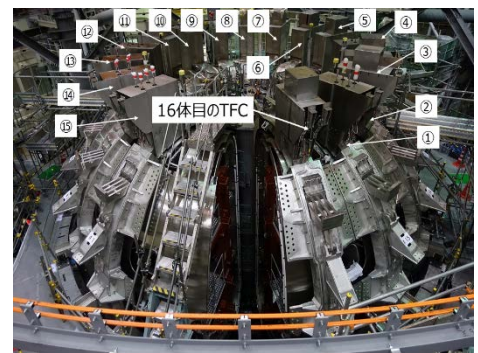


図6: TFC 16体の設置を終了

■ プラズマ崩壊の制御に向けた磁場応答診断手法の開発

核融合装置では熱い燃料プラズマを壁に触れないように磁場のカゴを作って閉じ込めます。しかしながら、かごの中に“磁気島”という磁場のカゴをほころばせる不安定性が成長すると、そのほころびから燃料が漏れ出し、閉じ込めが悪くなってしまいます。一方で、磁気島はプラズマ中を回転している間はカゴがほころぶのを抑える事ができます。しかし、磁気島は、装置の制作・据付の過程で生じる僅かな誤差によって生じる“誤差磁場”があると、誤差磁場に引き寄せられ、減速・停止する性質を持っています。停止してしまうとカゴのほころびが大きくなり、最悪の場合プラズマが崩壊します。このように誤差磁場に磁気島が引き寄せられ減速・停止する現象を“ロケットモード”と呼び、プラズマが崩壊する主要因と考えられています。本研究では外部から磁場を加えて、その磁場を回転させ、ロケットモードを制御する手法を、量研で開発している磁気流体コードAEOLUSによる計算と、米国DIII-Dにおける実験の双方で検討しました。AEOLUSの計算は結果を直接比較できるようにDIII-Dを模擬して行いました。磁気島を制御するには、制御が成功したかどうかをリアルタイムで知る必要があります。今回、カゴの外の磁場が磁気島を回転磁場で制御した時にどのように応答するかを詳細に調べ、磁気島の制御の成功・失敗をリアルタイムに判別し診断できる、2種類の磁場の応答を見つけました。

図7(a)に、AEOLUSによるシミュレーションで得られた磁場応答分布の時間変化を示します。磁気島の制御が成功するかどうかは回転磁場の強度に依存します。回転磁場が弱く磁気島の制御が失敗している場合図7(a)-(I)のような定在する応答、回転磁場が十分強く磁気島の制御が成功している場合(II)のような進行する応答となることが分かりました。DIII-Dでも回転磁場の強度を増加させると、同様に、図7(b)-(I)の定在する応答から(II)の進行する応答への変化を観測しました。DIII-D実験だけではこの応答の変化が具体的に何を示すのかが分かりませんでした。AEOLUSのシミュレーションにより、この応答が回転磁場による磁気島の制御の成功・失敗を反映している事が分かりました。また、両者の結果は得られた磁場の振幅も、(I)の応答は20G(ガウス)程度、(II)の応答は50G(ガウス)程度と良く一致しており、AEOLUSによるシミュレーションが実験をよく模擬できることを示しました。また、得られた磁場の応答を応用し、進行する応答(II)になるように磁気島を制御していけば、ロケットモードを回避する事が可能です。このように、AEOLUSのシミュレーションとDIII-Dでの実験を比較し、計測された現象の物理的な意味をシミュレーションにより明らかにしていくことで、外部から回転磁場を与えることによるロケットモードの制御手法を開発することができます。

(a) AEOLUSによる計算

(b) DIII-Dにおける実験

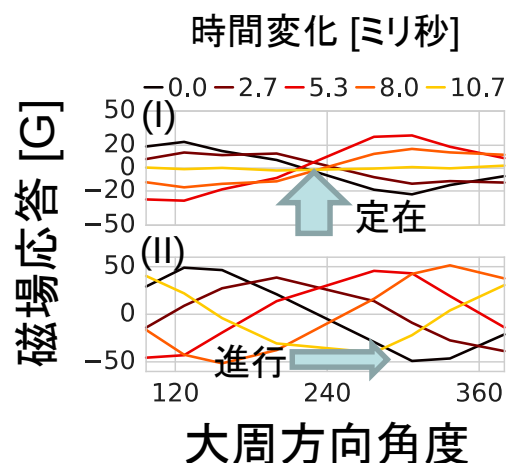
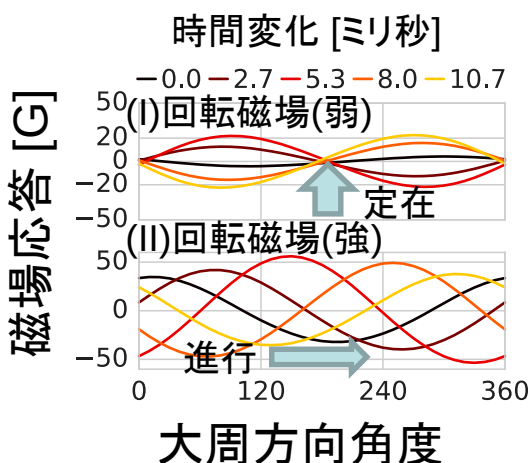


図7: (a) AEOLUS計算と(b) DIII-D実験で回転磁場強度が(I) 弱い場合と(II) 強い場合におけるドーナツ状核融合装置の大周方向の磁場応答分布の時間変化(黒→茶→赤→橙→黄色線 [ミリ秒])。

■ 第21回若手科学者によるプラズマ研究会を開催～11大学から21名の若手研究者が集まり、活発な討議が行われました

平成30年3月14～16日に第21回「若手科学者によるプラズマ研究会」を那珂核融合研究所にて開催しました。本研究会の特徴は、毎年異なる主題の下、異なる専門性を有する若手科学者達が自らの研究を紹介し合い、将来を見据えた研究の方向性や他分野への広がりについて活発な意見交換や議論を行う点にあります。この伝統は長年にわたり連綿と受け継がれてきています。第21回目を迎えた今回の研究会では「核融合炉実現に向けた理工学制御技術の進展～プラズマから工学機器まで～」を主題とし、制御技術をキーワードとして、プラズマ・核融合研究を中心とした幅広い分野の若手科学者の講演を呼びかけました。その結果、11大学から21名(図8: 学部1名、修士課程8名、博士課程8名、助教及び研究員4名)が参加し、一般講演とポスター発表において活発な討議が行われ、炉心プラズマ、周辺プラズマ及び工学機器等、幅広い分野における制御技術の進展が今後の核融合研究において重要になるとの共通認識を得ました。



図8: 第21回若手科学者によるプラズマ研究会の参加者

RFQ内高周波電界と水素ビームの同期試験の成功 — IFMIF原型加速器の進展—

六ヶ所核融合研究所では日欧共同事業幅広いアプローチ活動の下で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(ここで、“電子ボルト”は荷電粒子のエネルギーの単位で、“9メガ電子ボルト”は電子が9メガボルトの電圧で加速された際の運動エネルギーに相当)。QST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、協力して据付調整を進めています。

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)への大電力高周波(周波数175メガヘルツ)の試験では、世界初となる8系統同期入射において、平成30年1月にRFQ内の高周波電圧144kVを達成しました。これは、重水素イオンビーム加速に必要な電圧133kVを10%上回るものです。さらに、ビーム加速試験のための第1段階として、RFQ内に高周波パワーが蓄積されている間にビーム加速するための入射器からの水素ビームと高周波電力の同期試験に成功し、第2段階のRFQによるビーム加速検証の準備を完了させました。

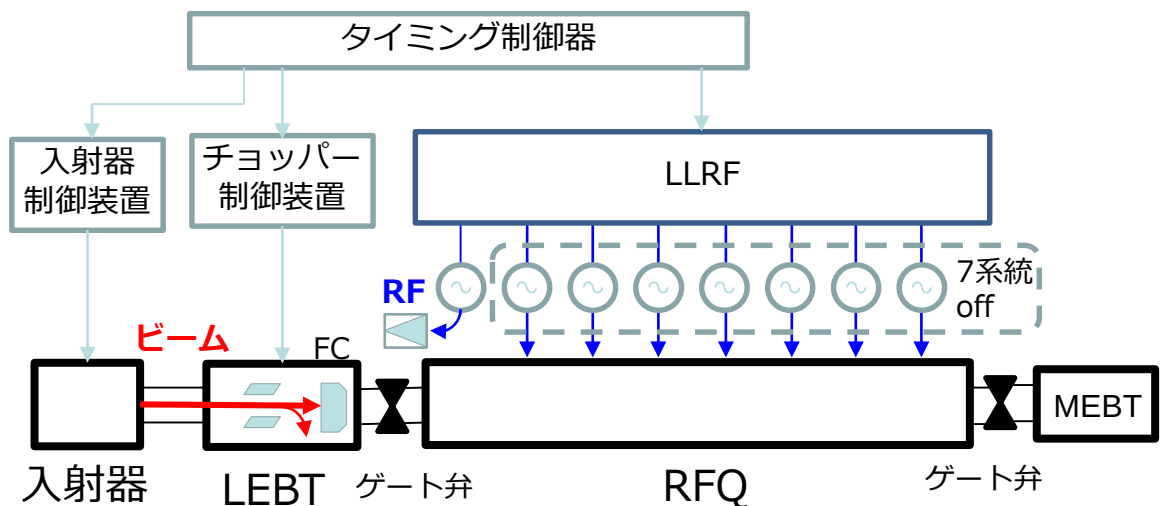


図9: 大電力高周波と水素ビーム加速準備段階のタイミング制御模式図

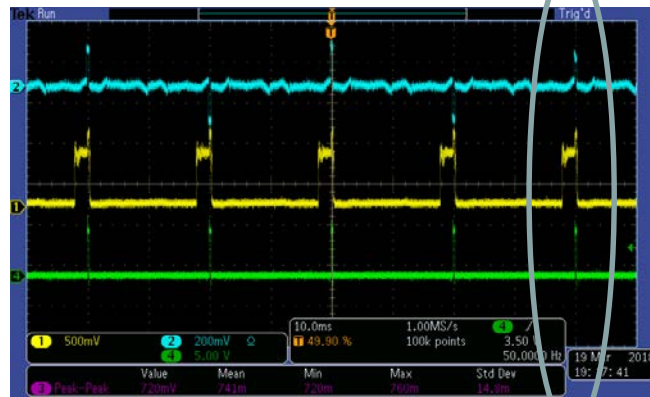
●ビーム

- 入射器とRFQの間のゲート弁は閉。
- 入射器からのビームをLEBT内のチョッパーゲートon/offによりRFQ側に入射
現状(ビーム加速試験前)はファラディーカップ(FC)で受け。

●RF

- 同期してRFの1系統をダミーに入射し、入射器からのビームと同期していることを確認。
(残りの7系統のRFはoff)

50 Hz運転時の波形



RFQ加速用RF(1系統)

入射器ビーム
(LEBT FC電流)チョッパーゲート信号
(RFQ入射ビームに相当)

図10: 大電力高周波と水素ビームの同期波形

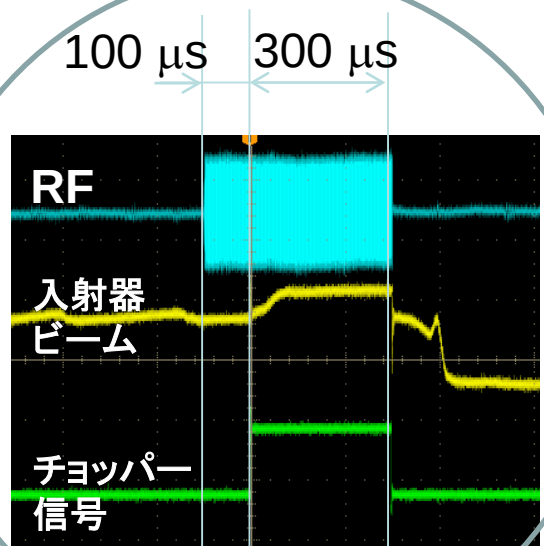
1パルスを拡大

上: RFQ内の水素イオンビーム加速用高周波
信号

中: 入射器からの水素イオンビームパルス

下: RFQへのビーム入射を示すチョッパー用
ゲート信号

RFQ内に高周波パワーを蓄積させるために
0.4ミリ秒間高周波を入射して定常状態を
作る。安定となった高周波入射後0.1ミリ
秒後に、チョッパー用ゲート信号を送り、
水素イオンビームの方向をRFQへの入射
軌道に切り替え、ビーム加速モードに
入る(0.3ミリ秒のパルスビームの加速)。



RFQ入射100 μ s前にRF ONし、
300 μ sのRFQ入射ビームを加速模擬

■ 核融合燃料トリチウムの安定供給を実現するリチウム同位体分離技術を開発

核融合炉の燃料であるトリチウムは自然界にはほとんど存在しないため、プラズマを囲むブランケット内に充填したリチウム(リチウムを含むセラミックス球)に、プラズマ中で発生した中性子を当てて生産します。しかしながら、トリチウム生産が可能なリチウムは、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)です。このため、ブランケット内で十分なトリチウムを安定供給するためには、充填するリチウム中のリチウム6の割合を約90%まで高める必要があります。我々はこのリチウム6を効率的に分離する技術を、これまで開発してきました。

今回の技術は、リチウムイオンのみを分離透過する特別な膜としてリチウム、ランタン、チタンで構成される $\text{Li}_{0.29}\text{La}_{0.57}\text{TiO}_3$ イオン伝導体(LLTO)を用います。このイオン伝導体内をリチウム6はリチウム7より早く移動するという原理を利用して分離するというものです。リチウム濃度を0.1モルに調整した水酸化リチウム水溶液(0.1M LiOH)10リットルを原液として用い、LLTOに電圧5Vを加え、リチウムを原液側から回収液側(純水)へ移動させた後、回収液中のリチウム6の割合を分析しました(図11)。

原液から極力多くのリチウム6を分離するため、132日間(リチウム全体の回収率47.6%)の試験を行った結果、約1.05と高いリチウム6同位体分離係数^{注)}が得られました(図12)。これは、既に実用化されている水銀アマルガム法(リチウム6同位体分離係数1.06)と同等の高い値です。このとき、リチウム6の割合は、元の天然比の7.8%から約8.0%に増加しました。今後、リチウム6の割合を目標の90%とするには、リチウム6の割合が増えた回収液を原液側に流してやる、という操作を繰り返してやるだけでよく、安定的にリチウム6同位体を分離することができる有望な技術であり、有害な水銀を利用しない革新的なリチウム6分離回収法としての基盤技術の確立に見通しを得ました。今後は、よりリチウム6の割合を高める試験を実施する計画です。

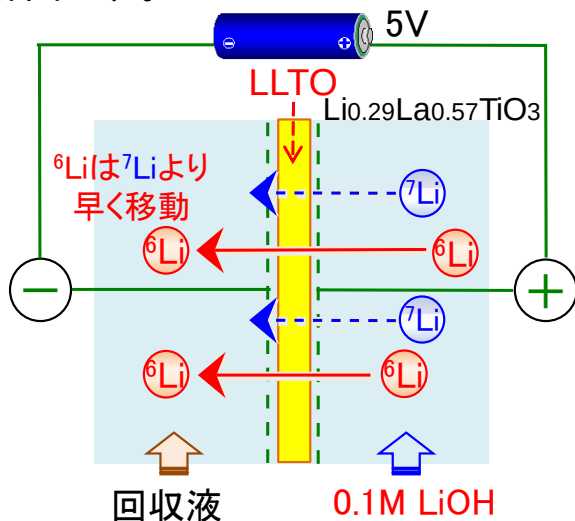


図11: イオン伝導体LLTOを分離膜とした、新たなリチウム6同位体分離技術

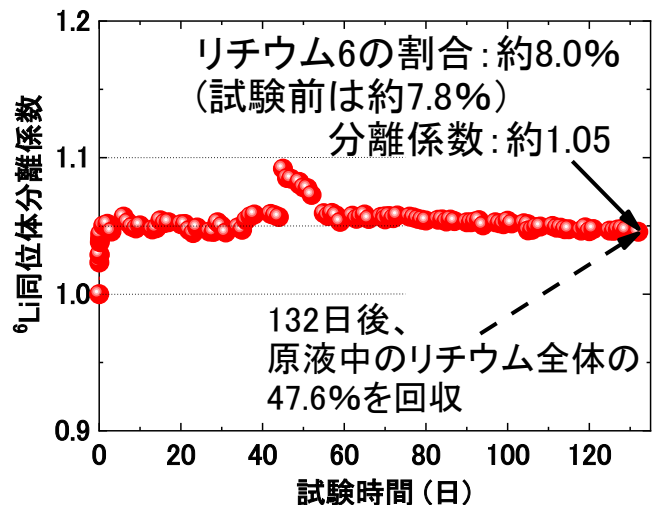


図12: 132日試験後のリチウム6同位体分離係数は1.05と、水銀法と同等の高い値を示した

注) 同位体分離係数とは回収液中のリチウム6とリチウム7の数の比を原液中の同じ比で割ったもの。

■ 親子サイエンスカフェin弘前

平成30年3月17日に、親子サイエンスカフェを青森県、青森県ITER計画推進会議及び六ヶ所核融合研究所の共催により弘前市において実施しました。

保護者20名、子供22名が参加し、子供たちは研究者が扮したプラズマ博士のクイズに積極的に手を挙げて回答してくれました。また、プラズマボール、超伝導、ダイヤモンドカッター等の科学実験など、「科学の不思議」に刺激を受けた保護者も子供と一緒に体験学習を楽しんでいただくことができました。

天候にも恵まれ、太陽望遠鏡で「プロミネンス(太陽の表面のプラズマが磁力線に沿って外に大きく飛び出したもの)」を見ようと行列ができ、運よく見つけることができた参加者からは大きな歓声が上がっていました。

なお、本イベントはFMアップルウェーブでライブ放送されるとともに、3月22日の地元紙(東奥日報)の記事として、カラー写真入りで掲載されました。



【質問に積極的に手を挙げる子供たち】



【プラズマボールの実演に夢中！】

■ 青森県内の高校生を対象とした核融合研究施設見学会

平成30年3月27日、青森県及び青森県ITER推進協議会主催の高校生を対象とした核融合施設の見学会を行いました。3回目となる今年度は、青森市内の高校を中心に参加者を募り、6校から52名(うち教員2名)の応募がありました。

緊張気味の生徒たちも、科学実験が始まると次第にうち解け始め、超伝導の不思議やダイヤモンドカッター、ガウス加速器、液体窒素を用いた実験に熱心に取り組む姿が見られました。天候にも恵まれ、屋外に設置した2台の太陽望遠鏡にも「我先に」と多くの人だかりができ、太陽のプロミネンスが見られると歓声が上がっていました。

また、昼食時には計算機・遠隔実験棟の遠隔実験室に場所を変え、9つのテーブルに分かれ、六ヶ所核融合研究所で働く欧州の外国人研究者を交え昼食会を行いました。生徒たちは、当研究所職員のサポートを受け、外国人研究者ともコミュニケーションを図り、次第に各テーブルは和やかなムードがあふれ、中には流暢な英語を駆使する強者の生徒も見受けられました。

午後からは、3班に分かれ、六ヶ所研を代表する研究施設(スパコンや遠隔実験システム、日欧協力で組立てを進めている加速器施設)の見学が行われ、中には研究者を唸らせる厳しい質問をする生徒も見受けられました。見学後の質問タイムでも数多くの鋭い質問が飛び交っていました。

本見学会は、地元2紙(東奥日報、デーリー東北)による熱心な取材が行われ、両紙ともに記事が掲載されました。



【ガウス加速器の実験を体験中】



【昼食時の外国人研究者との交流】



【素敵な笑顔で記念撮影！】

■ サイエンス・カフェを開催しました

平成30年2月24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を対象としたサイエンス・カフェ(研究者・技術者と気軽に語り合う場)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「真空体験～あなたの知らない真空のはなし～」というテーマの下、核融合と真空の関わりについての説明や真空中での物質の落下速度の違いの観察などを行いました。手作りの実験機材のため時折実験に失敗することもありましたが、参加いただいた方と一丸となって実験の成功に向け試行錯誤を繰り返しました。

これまで開催した中で一番たくさんの質問をいただき、充実したサイエンス・カフェとなりました。



【講義の様子】

■ 三菱みなとみらい技術館にて実験教室を行いました

平成30年3月21日、三菱みなとみらい技術館(横浜市)にて、「地上につくるミニ太陽『イーター』ってなに？核融合最前線」と題してイーターの解説、核融合に関する実験を行いました。

この日の横浜市は雪という悪天候でしたが、午前、午後の部ともに定員に達し、多くの方にイーターや核融合を知っていただくことができました。今回の実験教室では、液体窒素を用いた超伝導実験や人工ダイヤモンドを用いた実験などを行いました。子供たちだけでなく大人の方々にも核融合を楽しく学んでいただきました。

最後の質疑応答では、子供たちから実験の原理などの質問を受け、実験教室を通して核融合を含めた科学に興味を持てただけだと実感しました。

今後も更に多くの方にイーターや核融合を知っていただけるような活動が続けてまいります。



【ダイヤモンドで氷が切れるかな？】