Fusion Forefront No.5 2016 Spring

■核融合炉の炉壁の損耗の様子をシミュレーションする

核融合炉のエネルギーは、炉内中心のドーナツ状の炉心プラズマで生み出されます。ドーナツの周囲にある炉壁は炉心プラズマからの厳しい熱や粒子にさらされ、長い時間のうちに少しずつ削られます。これを損耗といい、炉内機器の寿命を決める要因の一つになります。今回、炉壁の中でも一番厳しい条件にさらされるダイバータという機器の損耗過程をシミュレーションで調べたところ、核融合炉のプラズマ条件では損耗する分と堆積する分が打ち消し合しあい、正味の損耗が殆ど生じない可能性を示す結果が得られました。

壁から弾き出された原子（ここではタングステン）の挙動を図1に示します。弾き出された原子は、プラズマと衝突してイオン化されることによって図中の(1)や(2)のように壁に押し戻す力が作用し、ほぼ元の位置に堆積することがわかりました。この結果、図2に示すように、損耗量（緑）と堆積量（赤）はほぼ均衡し、これらを合算した正味の量（青）は弾き出された原子の1%未満になっています。

この研究をさらに発展させ、核融合炉の炉内機器の長寿命化に繋がる方策を見出したいと考えています。

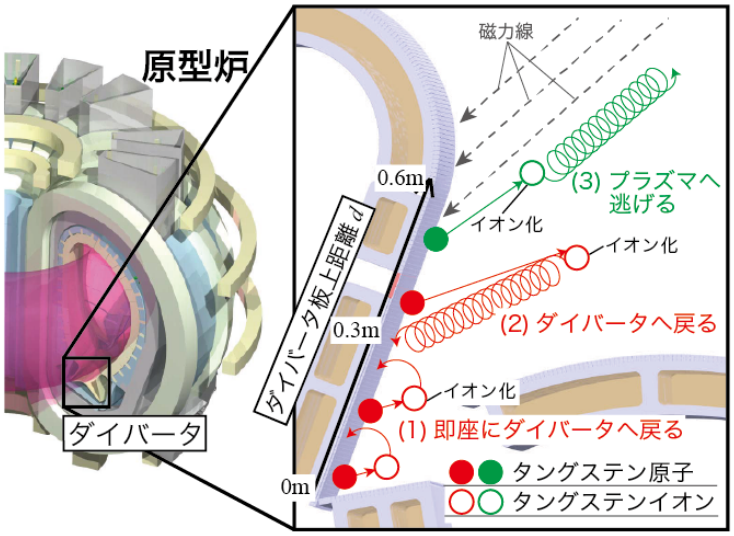

図1：弾き出されたタングステンの挙動

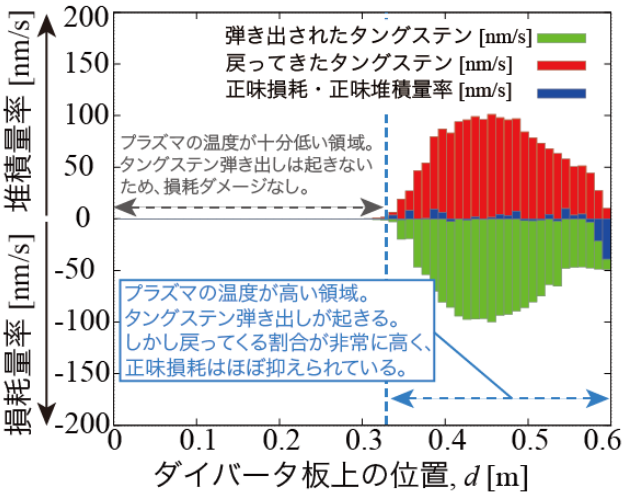

図2：ダイバータ表面の損耗シミュレーション結果

■ジャイロ運動論コードと輸送コードの結合による大域的なプラズマ分布の発展を予測するコードの開発

トカマクプラズマの粒子や熱は、プラズマ中の微細な温度や密度の揺らぎが引き起こす乱流によって系外へと運び出され、閉じ込めが悪化してしまいます。この乱流輸送は密度や温度の分布を決定する上で最も重要であるため、乱流輸送を記述するモデルを開発し、精緻化する試みが長年続けられてきました。乱流は小さなスケールの揺らぎが原因となるため、詳細な扱いは第一原理的なジャイロ運動論コードに委ねざるを得ませんでしたが、それには多くの計算資源を必要としたため、物理を簡約化したモデルが広く使われてきました。

近年の計算技法と計算機性能の進展により、局所的なジャイロ運動論計算なら現実的な時間で実行可能になったため、第一原理的な手法でより厳密にプラズマを解析・予測するための分布発展を担う輸送コードTRESSを新たに開発しました。そして、乱流輸送を計算する局所的なジャイロ運動論コードGKVと結合した、TRESS+GKVコードを開発しました。

アイデアの検証とコードの動作の実証のために、まずはイオン温度勾配モードと呼ばれるイオン温度分布勾配が急峻化すると不安定化する乱流のみに着目し、GKVコードでその乱流の揺らぎの成長率を計算し、成長率から熱流束を評価するモデルを作成しました。図3は、10 MWの外部加熱を行って定常状態に達したときのイオン温度分布とGKVで評価した乱流輸送係数分布です。プラズマの中心部では一定の温度勾配値で分布が保たれていることが分かります。比較的短時間でより厳密な輸送と分布形成の計算が出来る見通しを得ることが出来ました。今後は電子の熱輸送や粒子輸送も扱えるように拡張を続けていく予定です。

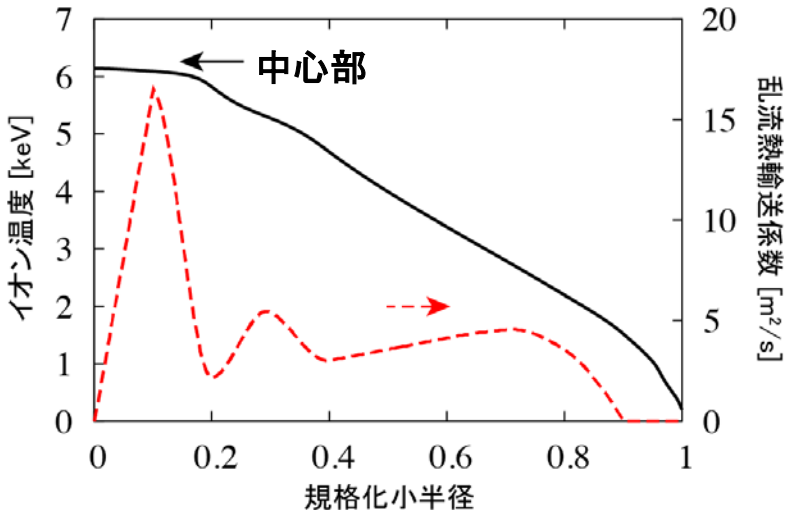

図3：10 MW加熱時の定常状態におけるイオン温度（黒線、左軸）と乱流熱輸送係数（赤破線、右軸）。

■超伝導平衡磁場コイル用高電圧発生回路の整備（日本調達分2ユニットの据付作業完了）

5月26日、JT-60SAの超伝導平衡磁場コイル（EF3及びEF4）用高電圧発生回路（量研機構担当分[1]）の据付作業が完了[2]しました（図4）。高電圧発生回路は、プラズマを着火する際に必要となる高電圧（-5 kV）を超伝導コイルに印加するための電源装置で、直流電流遮断スイッチと放電抵抗器及び切換器で構成されます（図5）。通常はスイッチが閉じており、通電中にスイッチが開くと電流（最大20 kA）が抵抗器に流れて電圧が発生する仕組みです。このときに発生する電圧はオームの法則の「抵抗値×コイル電流」で決まりますが、JT-60SAの多様な運転に対応するため、あらかじめ切換器で抵抗器を選択（計15通り）できるようになっています。

今後は、各機器の現場調整と機能試験（無負荷）、及び試験用直流電源と模擬負荷コイルを使った通電試験を行い、年度内に超伝導磁場コイル用電源の整備を終える予定です。

図4：据付作業が完了した高電圧発生回路

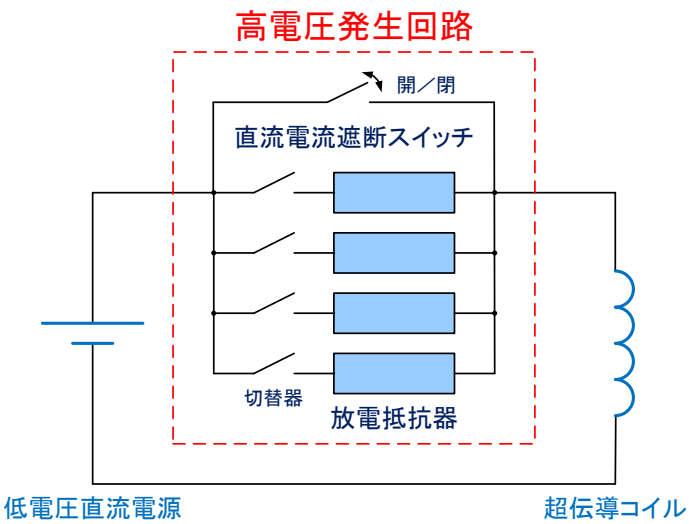

図5：高電圧発生回路の概略図

1）JT-60SAでは、超伝導中心ソレノイド（CS1～4）用の4ユニットとEF3及びEF4用の計6ユニットの高電圧発生回路が使用され、欧州がCS用を、日本（量研機構）がEF用を調達します。

2）今回完了した作業は、具体的には各構成機器の位置合わせと固定、機器間の主回路（高圧）ケーブル及び制御（低圧）ケーブルの敷設・接続と、そのためのケーブルダクト類の設置です。全ての機器間配線が完了した後、主回路一括の耐電圧試験（AC5 kV；10分間）を行い、絶縁性能に問題がないことも確認しました。

■組成均質化熱処理が不要な$Be_{12}V$微小球の直接造粒に成功

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が問題となり[2]、最高使用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）[3]の製造技術開発を進め、今まで合成すら困難であったチタン合金($Be_{12}Ti$)の合成及び造粒に成功しました。しかしながら、$Be_{12}Ti$は、造粒の再溶融に伴う組成変化のために組成均質化熱処理が必要で、かつ、その熱処理によって表面積が増加して水素生成量が増加することが明らかになりました。そこで、組成探索の結果、造粒時に組成変化しないバナジウム合金($Be_{12}V$)の直接造粒に成功しました。図6に、Be-V系の相図と造粒直後の組成写真を示します。$Be_{12}V$組成は、溶融状態から冷却しても組成変化を生じない組成です。造粒直後の組成写真からも表面及び断面も$Be_{12}V$単相であることが明らかになりました。

この$Be_{12}V$微小球を用いて、水素生成試験と重水素を用いた放出特性試験を実施しました。図7に、1273 K（1000 ℃）での水蒸気との反応による水素生成量を示します。$Be_{12}Ti$では、組成均質化熱処理することによって、水素生成量が増加してしまいましたが、$Be_{12}V$微小球は、水素生成量が小さいことが明らかになりました。

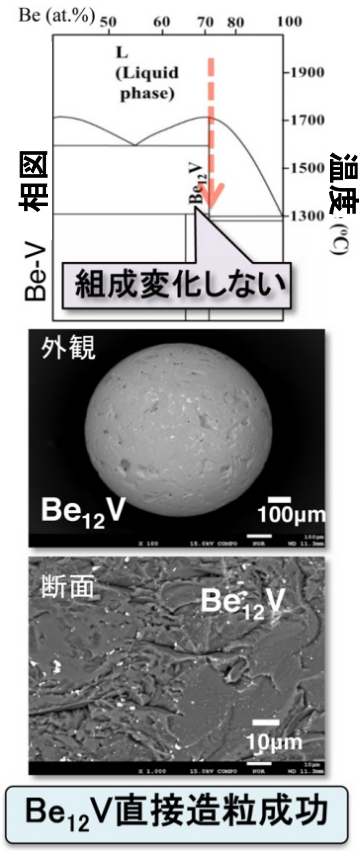

図6：Be-V系相図と$Be_{12}V$微小球写真

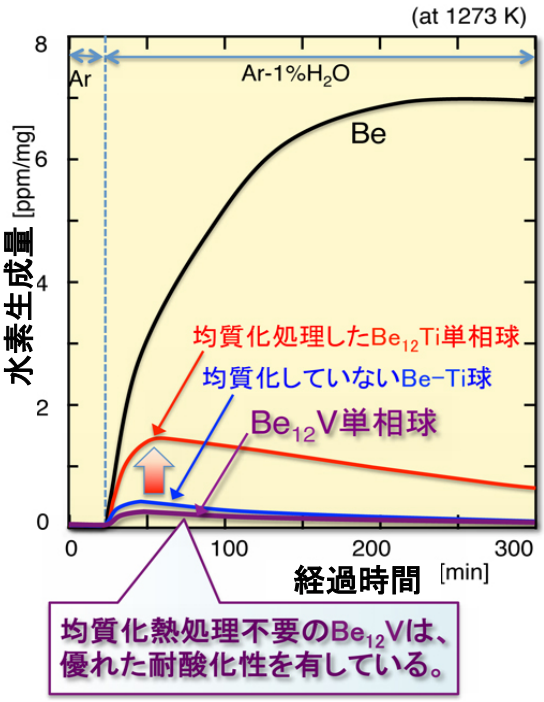

図7：1273Kでの1%水蒸気雰囲気における水素生成量の変化

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) 水素濃度が高くなると水素爆発の危険性が増すため問題となります。
3) 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。

図8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、材料中に重水素イオンを保持させ、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。実環境では、Beは中性子照射で微量のトリチウムが生成されるが、Be使用量が多い為ブランケット交換時には数キログラムのトリチウムがBeに蓄積され、取扱いが困難となるため、そのトリチウムが放出されにくいこと（大量のトリチウムが蓄積されること）が大きな問題となっています。本結果から、ベリライドは、Beと比べてより低い温度でトリチウムが放出され、さらに$Be_{12}Ti$よりも$Be_{12}V$の方がより低温で重水素が放出されることが明らかになりました。したがって、トリチウム放出については同位体の重水素で模擬することが可能であるため、ベリライドはBeと比べてトリチウムが蓄積されにくく、さらに$Be_{12}Ti$よりも$Be_{12}V$の方がトリチウムが蓄積されにくいことがわかりました。

これらの結果から、組成均質化熱処理不要で、単相の$Be_{12}V$微小球の直接造粒に成功し、その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。今後は更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。

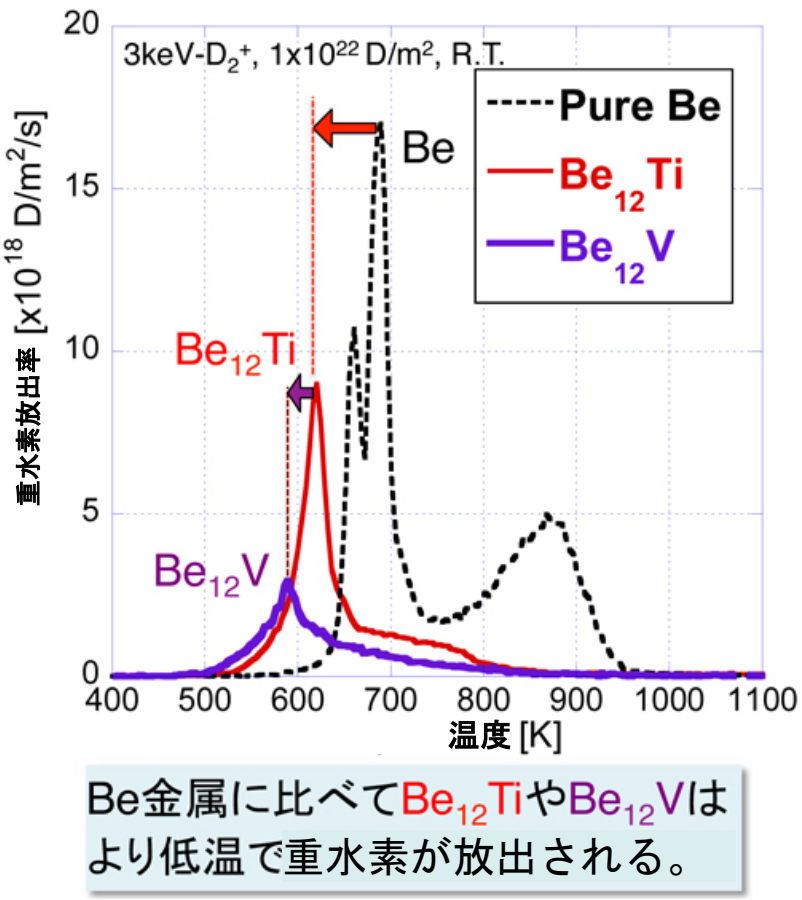

図8：高温水蒸気との反応による重水素放出特性

■ JT-60SAの第5回日欧研究調整会議を開催

5月16日から20日、JT-60SAの第5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50名を越える研究者が参加しました（欧州20名（5か国13研究機関）、量研機構22名、国内大学5名、JT-60SA事業チーム2名）。

会議では、JT-60SAリサーチプランと関連する共同研究の進捗の報告と、ITERの最重要課題に対するJT-60SAの貢献、共同論文、実験実施体制、今後の活動予定について議論しました。平成29年末を目途に、研究項目の優先順位付けを含めたJT-60SAリサーチプランの改訂版(ver.4.0)を発行すること、日欧共同研究（プラズマモデリング、ペレット入射、プラズマ崩壊の抑制・緩和、プラズマ計測機器等）の検討を進めること等を合意しました。次回は、2017年5月中旬に開催を予定しています。

第5回JT-60SA研究調整会議の参加者

■ 「IFMIF[1] 原型加速器の入射系ビーム加速実験の成功と高周波加速器／高周波源の据付開始を披露する記念式典」開催

4月21日、IFMIF原型加速器が設置されている六ヶ所核融合研究所において、「IFMIF原型加速器の入射系ビーム加速実験の成功と高周波加速器／高周波源の据付開始を披露する記念式典」が開催されました。初段加速部である高周波四重極加速器（RFQ）[2]へ入射する重陽子ビームの加速実験の成功[3]と、欧州で製作されたRFQや後段の中間ビーム輸送系（MEBT）、ビーム診断系（D-Plate）、そしてRFQに加速用大電力を供給する高周波源の据付開始[4]を記念して開催されたもので、スペイン大使などの大使館関係者、CEA長官やINFN所長等外国研究機関の要人、欧州実施機関であるF4Eの関係者、文部科学省等の政府関係者、青森県知事や六ヶ所村長等自治体関係者、大学、企業等の約150名が出席されました。主催者である平野俊雄量研機構理事長は「本活動を通じ、この六ヶ所から、日欧の連携協力の成果として多くの研究成果を世界に向け発信したい」と挨拶し、その後、大使館、自治体、研究機関の来賓の皆様から祝辞をいただきました。また、原型加速器が設置されたIFMIF/EVEDA開発試験棟での記念撮影、加速器をバックにしたテープカットや見学会が開催されました。

この式典の様子は、NHK青森放送局や地元の新聞（3紙）で紹介されました。

主催者挨拶を述べる平野俊雄量研機構理事長

1）IFMIFとは、International Fusion Materials Irradiation Facilityの略。
2）イタリア国立核物理研究所（INFN）レニャーロ研究所が担当。
3）入射器はフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）のサクレー研究所が担当。
4）MEBT、D-Plate、高周波源はスペインエネルギー環境科学技術研究センター（CIEMAT）が担当

IFMIF/EVEDA開発試験棟加速器室での記念撮影

原型加速器をバックにしたテープカット

■日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会において最優秀発表賞を受賞

平成28年度日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会において、ITERプロジェクト部中性粒子入射（NB）加熱開発グループの平塚淳一研究員が「2次粒子抑制型静電加速器を用いた1 MeV負イオンビーム長パルス加速の達成」により最優秀発表賞を受賞しました（平成28年4月15日）。

ITER用NB装置ではエネルギー1 MeVの負イオンビームを1時間連続で加速することが求められていますが、これまでの加速器構造では加速器の電力へのイオンビームの一部が当たるため熱負荷が高く、0.4秒迄に制限されていました。

本研究では、加速器内の電磁場及びビーム軌道を詳細に調べることで、熱負荷の原因となる2次粒子の発生を抑制する構造を持った加速器を考案し、加速時間を電源の温度限界に起因する試験装置限界の60秒まで伸長することに成功しました。

加速試験時のデータから更なる加速時間の伸長への見通しが得られ、ITER仕様の実現に向けて大きく進展した点が高く評価されました。

最優秀発表賞を受賞した平塚研究員（右）

■低温工学・超電導学会において優良発表賞を受賞

低温工学・超電導学会設立50周年式典において、 ITERプロジェクト部超伝導コイル開発グループの櫻井武尊研究員が「平成28年度優良発表賞」を受賞しました（平成28年5月31日）。

今回の受賞は、建設が進められているITER向けに、日本が調達を進めているトロイダル磁場（TF）コイル構造物の材料特性に関する成果発表が評価されたものです。

ITER超伝導コイルは-269 ℃という極低温で運転されますが、本研究では一般的には取得が困難な、極低温における実機トロイダル磁場（TF）コイル構造物材料の引張特性データを数多く取得し、今までデータが限られていた極低温における材料特性を解明したことに加えて、全ての試験材でITERの要求品質が確実に保たれていることを確認した点が高く評価されました。

優良発表賞を受賞した櫻井研究員

■日本溶接協会賞「技術賞」を共同受賞

ITER超伝導コイル開発グループの井口将秀研究員、ITERプロジェクト部の中嶋秀夫研究主幹が「ITER用高強度・高靭性溶接材料の開発および実用化」により、第46回日本溶接協会賞「技術賞」を共同受賞しました（平成28年6月8日）。

ITERで使用されるTFコイルは、-269 ℃という極低温環境において、高電流、高磁場で運転されます。そのため、容器に使用される溶接材料には、母材と同様に、極低温において高強度・高靭性が要求されます。本受賞は、母材として開発した極低温用構造材料をベースに、母材同等の極低温特性を確保しつつ、高い溶接品質を達成し得る溶接材料の開発に成功したこと、及び安定的な生産手法を確立した点が、高く評価されました。

現在、日欧で開発が進められているTFコイルに使われる容器には、この溶接材料が使われています。

左から、迎井氏（神戸製鋼所）、中村氏（タセト）、中嶋研究主幹（量研機構）、井口研究員（量研機構）、石尾氏（日本製鋼所）

■ITERプラズマ計測と高周波加熱に関する日韓協力に対して韓国国立核融合研究所から感謝盾が贈呈されました。

韓国でITER国内実機関に指定されている韓国国立核融合研究所から、ITERプラズマ計測用レーザーとプラズマ高周波加熱装置の研究開発に関する日韓協力において、韓国超伝導トカマク先進研究装置（KSTAR）の長時間放電の研究遂行に大きく貢献したことに対し、感謝盾が贈呈されました（平成28年6月28日）。

量研機構は、KSTARを活用して日本が調達を分担するITERプラズマ計測用レーザー装置及びプラズマ高周波加熱装置の研究開発を実施しました。その結果、レーザー装置においてトカマク環境下での信頼性に関わるデータを取得するとともに、プラズマ高周波加熱においてITER運転に必要な170GHz・1 MW出力運転と改良を加えたパルスステップ変調型電源による運転に成功し、ITER運転の見通しを立てることができました。同時に、これらの成果が、KSTARにおける長時間放電の生成・維持やプラズマ特性解明に大きく貢献したことから、感謝楯が贈呈されました。

韓国国立核融合研究所から贈呈された感謝盾（左上）と贈呈式（右下）

■那珂市で開催された八重桜まつりに出展

核融合エネルギー研究開発部門は、4月23日（土）に那珂市静峰ふるさと公園で行われた八重桜まつりに出展し、太陽望遠鏡等を用いた太陽観察や超伝導体を用いた人間浮上体験、核融合に関するパネル展示を行いました。

浮上体験は、若い方からお年寄りの方まで多くの方に体験いただき、何回も体験にお越しいただいた方もいらっしゃる等、大好評でした。太陽観察では、太陽が余り顔を出しませんでしたが、短い時間ながら、太陽のプロミネンスや黒点を観察いただくことができました。

超伝導体を用いた浮上体験

太陽の黒点はどこだ？

■六ヶ所村主催の「たのしむべ！フェスティバル2016」に出展

毎年恒例となっております「たのしむべ！フェスティバル2016」（六ケ所村主催）が、5月14日～15日に六ケ所村大石総合運動公園において開催されました。

核融合エネルギー研究開発部門は、来場者の皆様に核融合の原理や研究開発について理解を深めていただくために、パネルの展示・説明、超伝導浮上レールやダイヤモンド氷切り等の科学実験、太陽望遠鏡を用いての太陽観察、缶バッジつくり等を内容とした出展協力を行いました。幸いにも両日とも天気に恵まれ、延べ約600人の方にお立ち寄りいただきました。

今後ともこのような機会を通して、地域の方々の核融合エネルギーの研究開発への理解促進に努めて参ります。

太陽望遠鏡を用いた太陽観察