■　イーター中心ソレノイド用超伝導導体の全製作を完了

核融合実験炉イーターの主要機器の1つである中心ソレノイド（CS）は、超高温プラズマを維持するためにプラズマに電流を流す超伝導コイルです（図1）。CSには高磁場（13テスラ）の環境下において4万アンペアの大電流を流すことができる高性能なニオブ3スズ超伝導導体（CS導体）が49本必要です。日本がその全てを分担しており、この度8年間の製作期間を経て、全CS導体の製作が完了しました（図2）。

2009年から製作に着手し、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)の協力を得て、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、極低温（－269℃）中で大きな電磁力に耐えられる従来と比べて約2倍の強さを持つ金属の管を開発しました。製作した導体は総延長約43km、総重量は計700トンに達しました。これだけの物量のニオブ3スズを用いた製作は世界で初めてとなります。このような超伝導導体の技術開発は、超伝導送電、電力貯蔵装置、医療用加速器の小型化への応用が期待されます。

製作したCS導体は全て米国に輸送し、米国においてCSが製作されています。CS導体の製作完了はイーター計画が着実に進んでいることを示す重要な成果です。

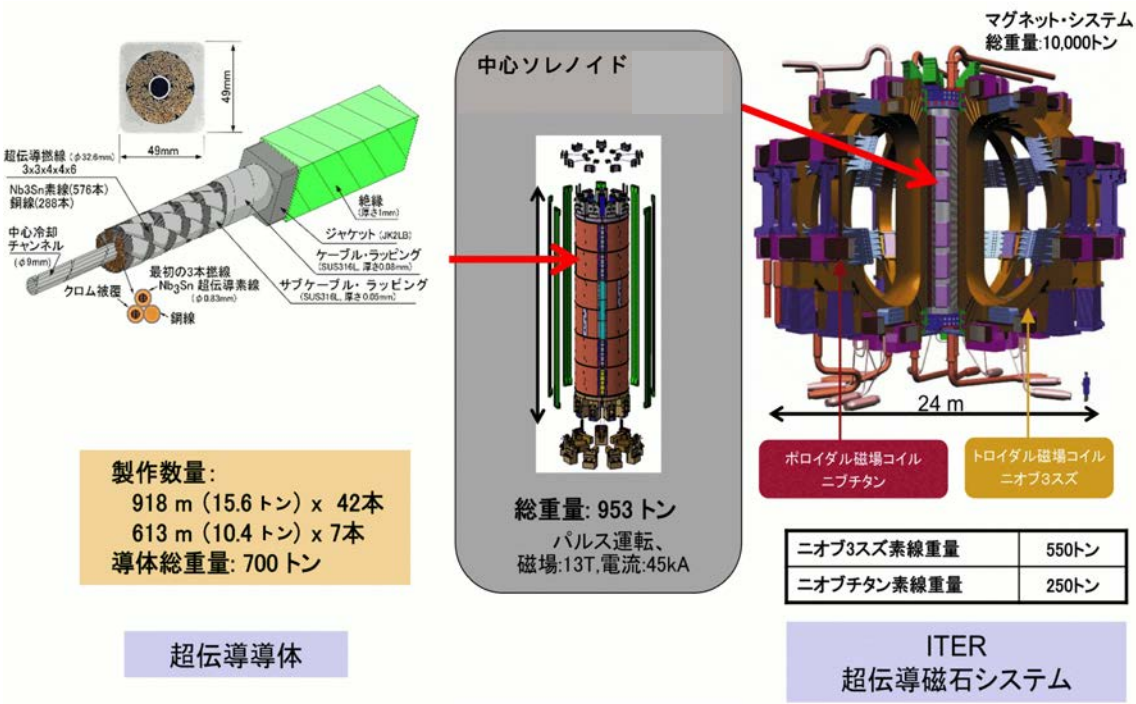

図1 CS用超伝導導体、CS及びイーター超伝導磁石システム

図2 完成した最後の導体と関係者（導体製作工場にて）

■ 世界初RFQ へ高周波パワーの8 系統の同位相入射実証 ― 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（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）。この大強度加速器は0.1メガ電子ボルトまでを静電的に加速し、0.1から5メガ電子ボルトまでの加速を高周波四重極線形加速器（RFQ）で行い、5から9メガ電子ボルトまでの加速を超伝導線形加速器（SRF）が行う構成となっています。

日本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、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）（イタリア国立核物理学研究所（INFN）レニャーロ研究所が製作を担当）へ高周波を入射する大電力調整試験を7月から開始しました（図3）。

高周波源システムの調整の結果、8系統の高周波パワーを1つの共振器であるRFQへ同時に入射し、かつナノ秒レベルで位相同期させることを世界で初めて実証しました（図4）。 この成果は、White Rabbit というタイミング分配ネットワーク技術を用いて8台の高周波制御システムからの出力をナノ秒レベルで同期させる調整を行うもので、実機の加速器に適用し高精度同期が確認された事例としては重要な成果です。この成果は速報的に8月に北海道大学で開催された第14回日本加速器学会年会や11月に青森市で開催された第18回核融合炉材料国際会議でも報告されました。

今後は、RFQへの入射パワーの増加及び入射時間の延伸を行い、来年に予定されている水素ビーム加速試験に向けた調整を進めていきます。

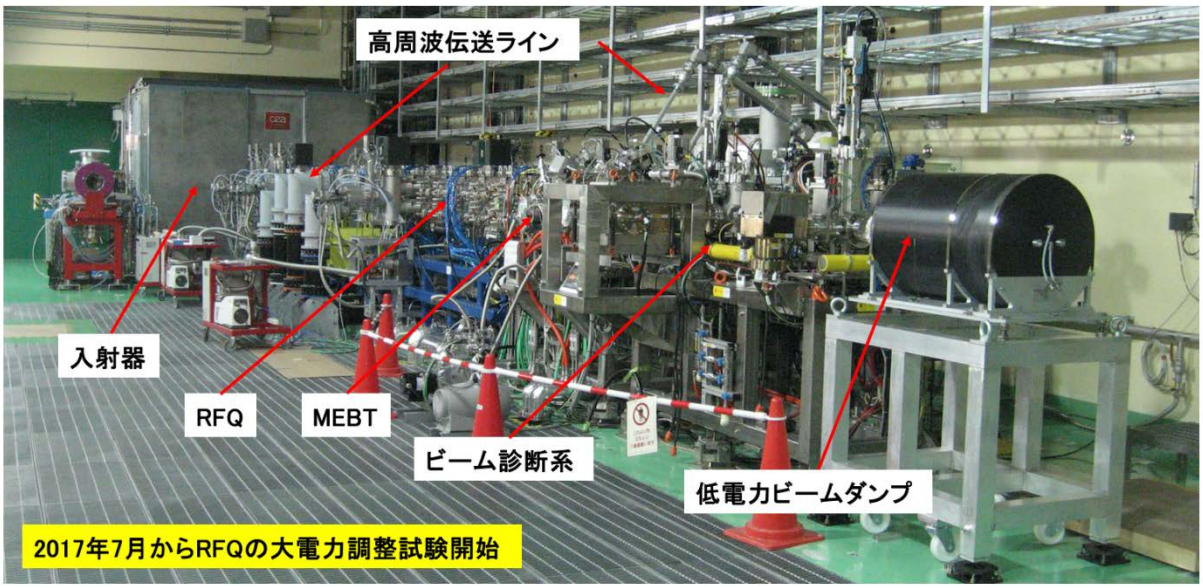

図3：入射器、RFQ、MEBT、ビーム診断系、低電力ビームダンプ、
高周波伝送ラインが加速器室に据え付けられた。

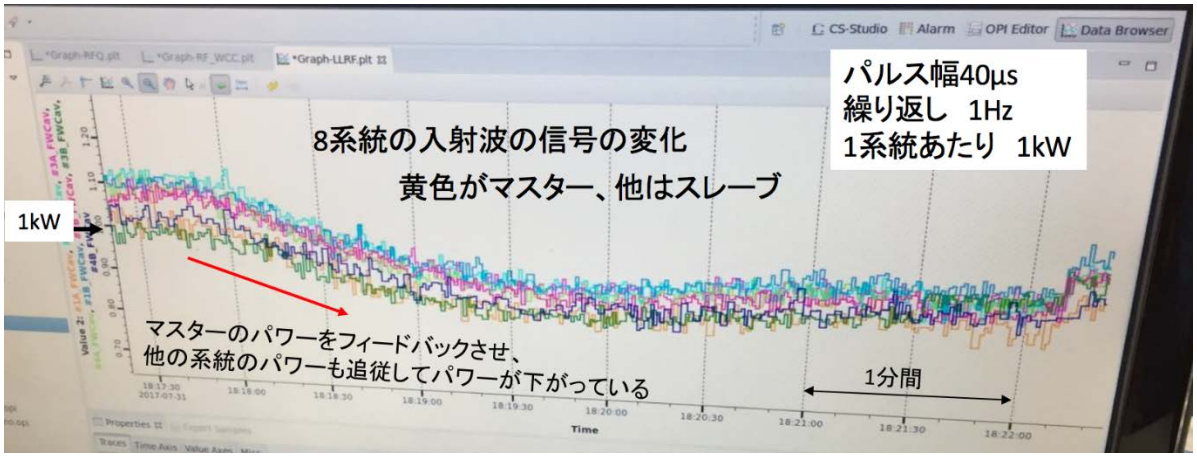

図4：8系統同時入射の入射波信号の変化。マスター信号のフィード
バック制御により、他の7系統が追従して出力変化をしている。

■ 大型ブランケット集合体を遠隔で保守するための機器概念を考案

核融合原型炉では、燃料となるトリチウムの生産や熱エネルギーを取り出す機能を持つブランケットを、定期的に遠隔で保守交換する必要があります。保守交換に必要な時間を短くするため、ブランケットを大型の集合体(高さ約10m、重さ約100トン）の上部を掴んで炉内から搬出する方法を考えていましたが、不安定な「片持ち」をどう解決するかが大きな課題でした。

最近の概念設計研究により、①大型ブランケット集合体の上下両端をしっかり掴むエンドエフェクタ、②腕の長さを変えて集合体を上下動させるテレスコピックマニピュレータ、③トーラス方向に回転する機能を備えた台車、④水平方向の位置を調節するパンタグラフから構成される遠隔機器の概念を考案しました。これにより、大型ブランケット集合体を炉内で姿勢を安定に維持したまま移動・搬出できるようになります。今後は、冷却配管など他の炉内機器の取扱いや集合体の固定方式も考慮して、詳細な概念検討を進めます。

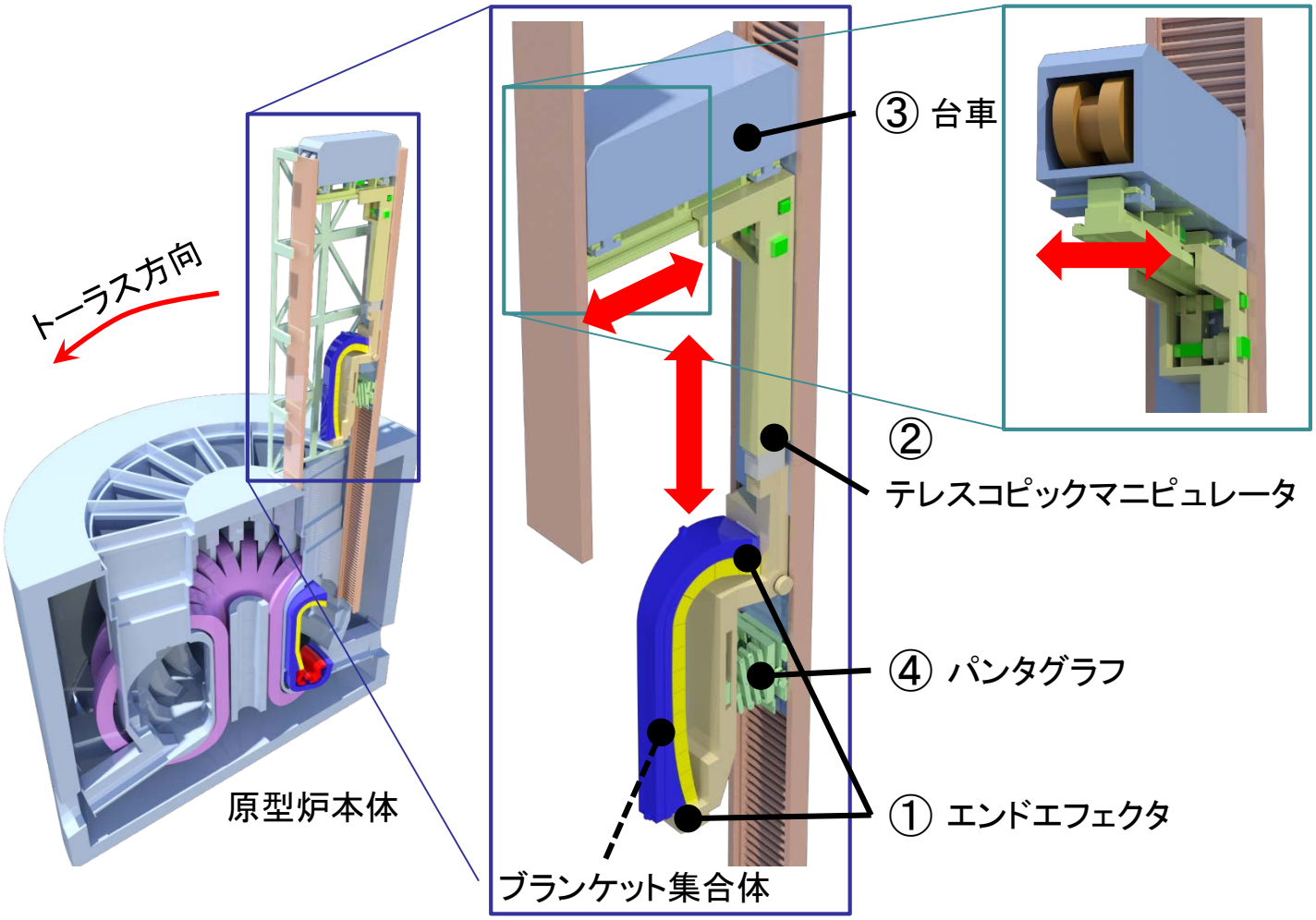

図5: 核融合原型炉の保守用遠隔機器の概念図

■ ITER機構要請のITER－DS 触媒酸化系における触媒へのハロゲン化水素影響検証試験を完了

●ITERの設計の進捗により、トカマク複合建家に設置する電源キュービクルにハロゲンを含む高分子材の使用が避けられない状況となっています。電源キュービクル火災時に生じるハロゲン化水素がITERの安全システムの要であるトリチウム除去システム(DS)のトリチウム除去性能に与える影響の評価が重要であるため、ハロゲン化水素の影響評価試験を実施しました。

●トリチウムを触媒で酸化し、トリチウム水蒸気をスクラバ塔で回収するITERのDS構成では、ハロゲン化水素による触媒活性（水素酸化効率）の低下が懸念されます。そこで、ハロゲン化水素の触媒活性への影響について、触媒の種類（白金触媒、パラジウム触媒）による違い、触媒温度の影響（水素酸化温度の200℃、メタン酸化温度の450℃）、ハロゲン化水素濃度の影響の精査を目的として、試験を実施しました。ハロゲン化水素の成分比や濃度条件は、電源キュービクルに使用されるハロゲン含有高分子材の化学組成に基づき、体積基準でHF:HCl:HBr=17:77:6とし、300または900ppmの異なる二種の総ハロゲン化水素濃度を使用しました。図6に示す実験装置を用い、78.5gの触媒を充填した触媒塔に所定濃度のハロゲン化水素と反応物である1000ppmの水素またはメタンを含む空気を流量4L/minで22時間連続して流し、触媒塔出口における反応物の濃度を一定時間毎に測定しました。

●試験の結果、水素の酸化では白金触媒、パラジウム触媒共にハロゲン化水素ガス混在下においても99％以上の水素酸化効率が維持できることを実証しました。メタン酸化では白金触媒の場合、ハロゲン化水素導入直後から酸化効率が若干低下する現象が確認されましたが、火災時に求められる酸化効率である90%以上は維持できました（図7参照）。パラジウム触媒はメタン酸化効率の低下は見られませんでした。ハロゲン化水素ガス混入下においてもトリチウム除去性能を所定の時間維持できることを確認しました。

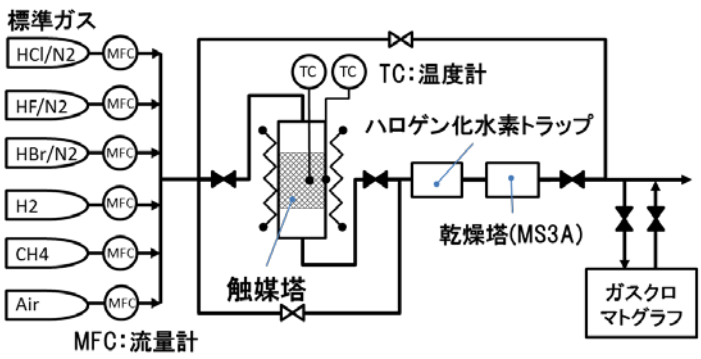

図6：ハロゲン化水素による触媒性能変化を確認する実験装置の概略図
ガスクロマトグラフによる水素・メタン濃度の測定を実施

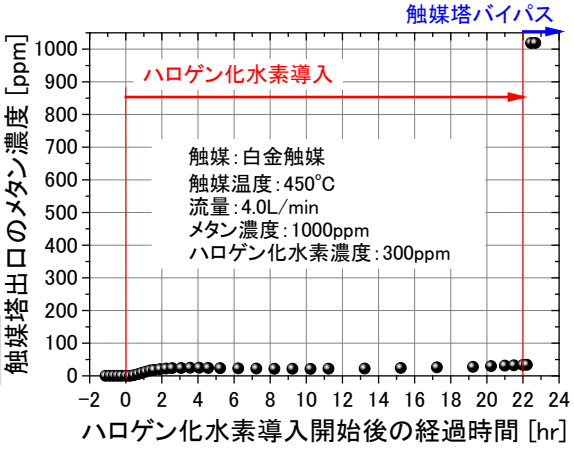

図7：試験結果の一例　ハロゲン化水素の混在下においても白金触媒によるメタン酸化性能の低下は限定的であることが明らかとなった

■ 不純物粒子輸送モデルを用いた多種不純物ダイバータシミュレーションモデルの開発

JT-60SAやITER、原型炉の高性能炉心プラズマ運転では、炉心プラズマから排出される熱がダイバータと呼ばれる機器に集中し非常に高い熱負荷となるため、この低減が重要な課題です。そのため、プラズマとの接触で壁から弾き出された壁材料不純物に加えて、外部から注入したアルゴン等の不純物ガスにより、プラズマのエネルギーを光として放射させることで、ダイバータへの熱負荷を低減することを計画しています。

これまで、ダイバータ熱負荷の評価とその低減シナリオを構築するために、統合ダイバータモデリングコードSONICの開発を進めてきました。海外の多くのコードでは流体モデルで取り扱われる不純物輸送を、個々の粒子軌道を追跡する粒子輸送モデルでより正確に取り扱っていることが特徴です。今回、SONICを構成するプラズマ・中性粒子・不純物の各輸送モデルを統合的に実行する新しい並列計算モデルを開発し、 各モデルの改善や開発を独立に進められる基盤を構築しました。この並列計算モデルを用いることで、複数種類の不純物の数だけ独立した不純物輸送モデルを複数同時実行させることが可能になりました。不純物粒子輸送モデルに基づく多種不純物モデルの構築は、統合ダイバータモデリングコードとしては世界で初めての成果です。

多種不純物を同時に扱えるようにしたSONICコードを用いて、JT-60SA の高性能炉心プラズマ運転でのダイバータ熱負荷を評価しました。壁から発生する炭素不純物に加えて、外部からアルゴン不純物ガスを注入することで不純物による光の放射を促進し（図8参照）、運転シナリオのプラズマ条件の下で、ダイバータ熱負荷を目標である10MW/m^{2}以下に低減できることを示しました。今後、炉心プラズマへの影響がより少ない熱負荷低減シナリオの構築や将来の炭素壁から金属壁への換装後の熱負荷低減シナリオの検討を進めていく予定です。

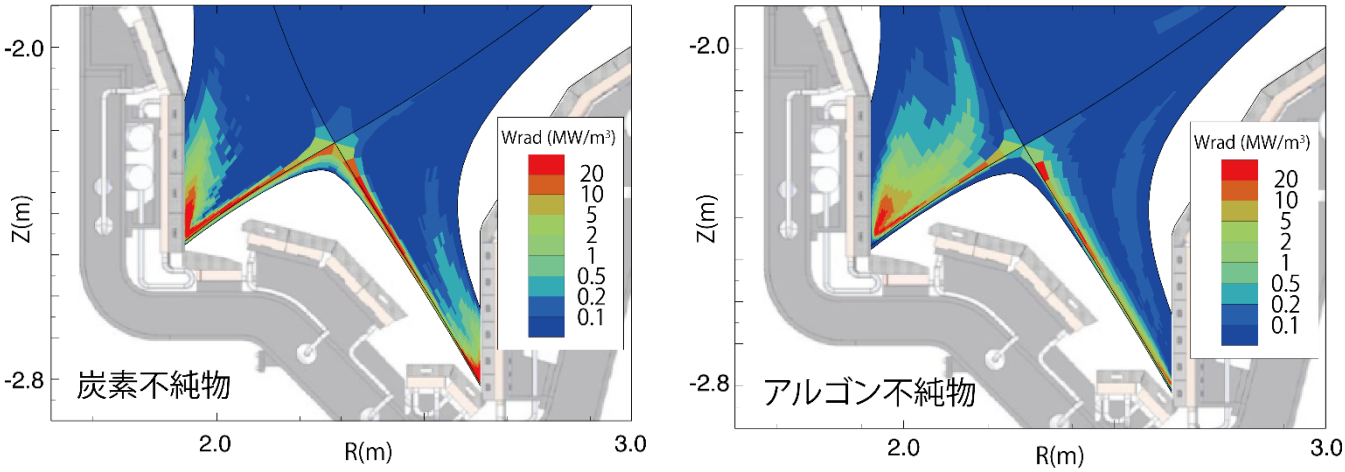

図8 ダイバータ領域における放射パワー分布（左：炭素不純物、右：アルゴン不純物）。各不純物の輸送機構や放射の電子温度依存性の違いで異なった放射パワー分布が得られ、左右で色付きの領域が接している灰色部分の機器への熱負荷を低減している。

■ フランスCEA調達担当分の超伝導コイル用サイリスタ電源（SCMPS）の通電試験完了

フランスCEA（原子力・代替エネルギー庁）が調達した超伝導コイル用サイリスタ電源(Superconducting Magnet Power Supply)は、2016年6月に那珂核融合研究所に搬入された後、同年7月～2017年1月にかけて欧州が据付作業、調整試験を行いました。その後、耐電圧試験、サイリスタ導通試験等の確認試験を行った後、2017年4月から、超伝導平衡磁場(Equilibrium Field)コイル電源4式、超伝導トロイダル磁場(Toroidal Field)コイル電源1式の順で通電試験を行い、2017年7月末にこれらの試験を完了しました。

これらの電源機器は超伝導コイルに直流電力を供給する電源で、EF電源2式は定格電圧DC±1kV、定格電流DC−10kA/DC+20kAであり、 残る2式は定格電圧DC±1kV、定格電流DC−20kA/DC+20kAです。一方、超伝導TFコイルは運転パターンとして朝一度励磁すると夜間までそのまま励磁を継続するため、大電流フィーダ（アルミ製の給電器*(2016年秋号参照)*）による電圧降下分だけを補えば良いので、TF電源は定格電圧DC+80V、定格電流DC+25.7kAです。また、これらの電源には、電力用半導体素子の一つであるサイリスタ[1)]を用いていますが、制御回路の工夫により、安価かつ高性能の電源を実現しています。

EF電源は、4台のサイリスタ変換器を並列に接続した構成(図9)です。変換器1台当たり直流5kAを出力できる能力があります。プラズマの制御では、超伝導コイルの電流をプラス側からマイナス側まで連続的に制御する必要があります。サイリスタは片方向の電流しか流すことができませんので、2個の素子を逆並列に接続して両方向の電流を流すことができるようにしています。さらに、電流がゼロを横切る場合には、変換器間に循環する電流を流して、連続的に電流を制御できるように複雑な制御を行っています。一方、TF電源は片方向の電流しか必要としないため、DC6.43kA出力のサイリスタ変換器4台の構成(図10)になっています。なお、EF電源及びTF電源には、過電流や過電圧から変換器を保護するクローバ回路が出力側に接続されています。

通電試験は、欧州実施機関であるフュージョン・フォー・エネルギー、CEA及びQSTの電源関係者立会いの下で、製作メーカーJema社(スペイン)が行いました。EF電源の通電試験では、QSTが2年間かけてオーバーホールを行い、周辺電源設備の細密点検を実施した上で再稼動させた容量400MVAの電動発電機からAC18kVの交流電力を供給し、超伝導コイルの代わりに模擬負荷を用いて定格電流20kA運転を問題なく実現できました(図11、図12)。一方、TF電源は那珂核融合研究所のAC11kV系統から受電して、電源の出力端子を短絡（超伝導コイルは電気抵抗がゼロを模擬）して通電試験を実施し、最終的に定格電流(25.7kA)を連続7.5時間にわたって通電する試験に成功しました(図13、図14)。この通電試験は、QSTによる受入試験を兼ねており、この試験完了をもって、受入試験を終了しました。

今後は、イタリアのENEA（新技術・エネルギー・持続的経済開発機構）が調達を担当する残りのSCMPSの那珂研における据付・調整及び通電試験を実施する予定です。

【用語解説】

1) サイリスタ：電流を一方向にだけ流す（整流）作用を有するシリコン半導体素子で、交流を直流に変換するのに用いられる。ゲートからカソードへゲート電流を流すことにより、アノードとカソード間を導通させることができる3端子の整流素子である。

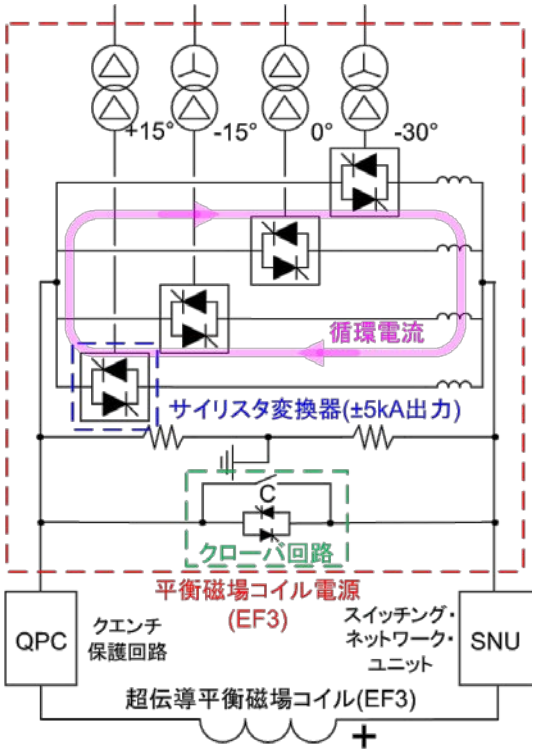

図9 EF電源回路構成図

図10 TF電源回路構成図

図11 EF電源外観図

図12 EF電源通電試験風景

図13 TF電源外観図

図14 TF電源通電試験風景

■ 那珂市総合センター“らぽーる”理科実験教室及び“なかひまわりフェスティバル”への出展

那珂核融合研究所では、8月25日に那珂市総合センター“らぽーる”において、市内小学生を対象とした理科実験教室を行いました。極低温の状態になると物質は変化することや、真空の状態では音の伝わり方に違いがあることについて、実験を通して楽しく学んでいただきました。終了後、参加した子どもたちからは「またやってみたい」といった感想が寄せられ、那珂市教育委員会教育長からもお礼状をいただきました。

また、8月26日には那珂総合公園で行われた“なかひまわりフェスティバル”にブース出展しました。太陽望遠鏡を用いた太陽観察等を通して核融合について興味を持っていただくとともに、人工ダイヤモンドを用いた氷切り体験を通してたくさんの方に科学に親しんでいただくことができました。

今後も地元の方とふれあう機会を大切にし、研究内容に対する理解促進や子どもたちの科学分野に対する興味・関心の増進に努めてまいります。

真空装置の中の目覚まし時計の音、聞こえるかな？

太陽と核融合反応の関係とは？

■ 「青少年のための科学の祭典2017」八戸大会へ参加

8月5日～6日に青森県八戸市民センターにて開催された「青少年のための科学の祭典2017」八戸大会へ参加しました。

六ヶ所核融合研究所としては2年連続の出展となります。本祭典にご来場の皆様は、科学に対する興味が旺盛なご家族が多いとの印象を受けました。中には六ヶ所研の出展内容をしっかりと理解・習得され、他の来場者への説明役をかってでてくれる方までおられました。

核融合を全くご存知ない方には、少しでも核融合を身近に感じていただけるような、また、科学について深い造詣をお持ちの方には、実際の研究現場を感じていただけるような、出展者と参加者との間で一体感のある、六ヶ所研としての今後のアウトリーチ活動の指標となるような出展となりました。

六ヶ所研の説明を聞いているうちに説明者側になってしまう方も

■ 六ヶ所核融合研究所施設公開を開催

7月30日に、六ヶ所研施設公開を開催いたしました。今年度は、同じく六ヶ所村に所在する公益財団法人環境科学技術研究所と共同で同日開催とし、六ヶ所村からもご後援をいただきました。

核融合、BA活動に関する理解増進活動はもちろんのこと、六ヶ所高校によるブラスバンド演奏、野辺地警察署によるパトカー展示等々、研究所自体を少しでも身近に感じていただけるような取組を増やしたこともあり、悪天候にもかかわらず、昨年度とほぼ同数の皆様に来所いただくことができました。

また、昨年度もご好評いただいた六ヶ所研施設公開名物ふゅ～じょんカレーについても、一部改良を加え、昨年度以上の好評を得ることができました。

六ヶ所研の施設公開が、六ヶ所村の代表的なイベントの1つとなるよう、今後も他の研究機関とも協力しつつ、内容をより充実させていきたいと思います。

核融合について話す所長