

■ ダイバータへ流出したエネルギーを発電に有効利用

核融合原型炉では、核融合反応によって生ずる中性子(1200メガワット)がブ ランケットと呼ばれる炉内機器に衝突したときに発生する熱を冷却水の熱とし て取り出して発電に利用します。一方、核融合反応の生成物であるヘリウム (300メガワット)は、炉心プラズマの燃焼を維持するエネルギーとして利用しま すが、ダイバータと呼ばれる機器に到達すると熱エネルギーになります。ダイ バータではこの熱が狭い領域に集中するため除熱で精一杯で、取り除いた熱 を利用することは難しいと考えられていました。

最近の原型炉設計検討において、ダイバータの冷却系統を熱が集中する部 分とそれ以外の部分に分けて、後者の冷却水温度条件をブランケットと同じに することで、ダイバータの熱を発電に有効利用する方法を考案しました。この 際、ダイバータとブランケットでは冷却水の流速が異なり単純に冷却配管を接 続できないことから、図1に示すように、ダイバータ熱交換器を介して熱の有効 利用を図りました。この方法を採用すると、核融合原型炉で発生する電気を従 来の530メガワットから620メガワット(約17%増)まで増大できる見通しが得られ ました。



図1 核融合原型炉の冷却機器系統の概念図

■ JT-60SAトロイダル磁場コイル(TFC)9体の設置完了

JT-60SAの組立ては順調に進み、2015年8月の真空容器340度の完成(2015 年夏号参照)、2016年11月の真空容器サーマルシールド(VVTS)340度の組立 完了(2016年秋号参照)に続いて、2016年12月から超伝導トロイダル磁場コイル (TFC)の組立てを開始しました。2017年6月現在、全18体のうち半数の9体の設 置を完了しました(図2)。

JT-60SAの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、 その重量は22トン、高さ7.5m、幅4.6mと非常に大型の構造物で、高温のプラズマ を閉じ込めるために必要とされるドーナツ状の磁場(トロイダル磁場)を発生しま す(2016年夏号参照)。ニオブチタン(NbTi)の超伝導導体72ターンの巻線で構成 される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℃に 冷却し、最大25.7キロアンペアの電流を通電して、半径2.96mの位置で2.25テスラ (22,500ガウス)のプラズマ閉じ込め磁場を発生します。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)サクレー研究 所に陸上輸送されて、実際の運転状況下と同等に液体ヘリウムを流して-269℃ に冷却して、25.7キロアンペア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、順次、貨物船で日本に輸送され、2017年6月末時点で11体 のTFCが那珂融合研究所に搬入されました。

TFCの組立ては、以下の手順で行います。

①TFCを起立させ、起立架台上に固定して形状計測等を行い、自重による起立時 のわずかな変形が組立てに支障のないことを確認する。

- ②起立架台の固定金具を取り外した後、天井走行クレーンでTFCを吊り上げる。
 ③旋回クレーンのガーター(桁)の間から真空容器の20度開口部にTFCを挿入し、
 仮固定した後、旋回クレーンに吊り替え、旋回クレーンで回し込みながら所定の位置まで移動する(図3)。
- ④レーザートラッカー(3次元座標精密測定器)を用いて、TFCの電流中心の位置を 組立基準と合わせて±1mmの組立精度で設置する。

隣り合うTFC同士の接続部は、内側コイル間構造物(IIS)と外側コイル間構造物 (OIS)をそれぞれ油圧テンショナーを用いてボルト締結する構造となっています。 TFC内側直線部で発生する向心力¹⁾に対しては、上下2箇所にボルト締結構造が あり、1箇所当たりボルト15本、キー2本で締結して、支持します。TFC外側で発生 する転倒力²⁾に対しては、外側コイル間構造物(OIS)が1コイル間当たり5箇所のボ ルト締結構造物があり、それぞれの表裏をステンレス板(スプライスプレート)で挟 み込んで22本のボルトで締結して、支持します(図4)。このスプライスプレートして、 TFC組立後のOISのボルト穴位置を測定し、データを欧州に提供、欧州で機械加 エ、製作された後、日本に送付され、組立メーカーに支給して取り付けています。 2018年半ばに、全18体のTFC設置、コイル間構造物の組立てを終了する予定で す。 【用語解説】

1)向心力:TFCの内側のトロイダル磁場とTFCの巻線に流れる電流によって発 生するトカマク中心に向かう電磁力。JT-60SAでは、TFC直線部上下の側面 同士を接触させて固定するウェッジ(楔形)支持構造を採用。

2)転倒力:ポロイダル磁場コイルが作る垂直磁場とTFCの巻線に流れる電流 によって発生する電磁力。TFC外側曲線部を転倒させようとする力となる。



図2 9体の超伝導トロイダル磁場コイル(TFC)の設置完了



図3 TFCの吊り込みの様子



図4 OISの組立て(右図:油圧テンショナーによる22本のボルトを一括締結、左図:締結後)

ITER-超伝導コイルの性能評価の研究により低温工学・ 超電導学会誌論文賞を受賞

超伝導磁石開発Grの研究員が低温工学・超電導学会誌に投稿した論文 「ITER-CS インサート・コイルの分流開始温度特性」により、同学会2017年 度論文賞を受賞しました。

国際プロジェクトにより建設中の核融合実験炉ITERに用いる中心ソレノイ ド(CS)超伝導導体では、当初、繰り返し通電による性能評価試験において、 予想外の性能劣化が観測されました。受賞者らは、イーター機構と協力し て、その原因を究明して性能改善策を立案し、その有効性を短尺サンプル で検証しました。さらに、最終検証試験として実規模コイル試験を行い、ITER の運転条件でも性能劣化が起こらないことを確認して本論文で報告しまし た。今回の受賞は、これらの成果の集大成として投稿した本論文が評価さ れたものです。



図5 CSインサート・コイルとCSモデルコイル

ITERプロジェクトではコスト合理化のために、1990年代のITER工学設計活動の中で開発したITER CS用高性能超伝導撚線の構成を合理化しました。 しかし、合理化後の導体の性能を短尺サンプルを用いて評価したところ、 ITERで想定される3万回の通電を繰り返し行うと性能が大幅に低下すること が判明しました。そこで、性能劣化原因を詳細に調べた結果、繰り返し通電 時に導体内の超伝導(Nb₃Sn)素線に過大な曲げ歪が加わっており、これが 原因となって導体性能が劣化したことを明らかにしました。受賞者らは、撚 線の撚りピッチを短くすることによって素線の曲げに対する剛性を高め、素 線の曲げ歪を抑制できると考え、改良導体を試作し、イーター機構と協力し てこの短尺サンプルを用いた試験を実施しました。その結果、撚りピッチを 短くした導体が繰り返し通電に対して性能劣化しないことを確認しました。 ITERでは、運転時の電磁力によってコイル形状のCS導体を押し広げる 方向に引張り歪が加わりますが、短尺サンプルの試験では引張り歪は発 生しません。このため、引張り歪が加わった状態でも、素線の曲げ歪を防 止できていることを確認する必要がありました。そこで、受賞者らは、那珂 核融合研究所のCSモデルコイル試験装置を用いて、ITER CS導体で製作 した試験コイル(CSインサート・コイル)(図5)を、ITERと同一の運転条件で 性能試験し、引張り歪が発生する条件であっても、撚りピッチの短い改良 CS導体で繰り返し通電による性能劣化が起きないことを実験的に確認し ました。

NBTF用HVブッシングのサイト受入試験完了

ITERのプラズマに粒子ビームを入射して加熱する中性粒子入射装置(以下「NBI」という。)では、ビームを発生する負イオン源において、従来のNBIに比べ、エネルギー、電流それぞれが2倍(100万電子ボルト、40アンペア)、連続運転時間360倍(1時間)となる高い性能が要求されています。そこでITERでは、この性能を確実にするため、イタリア・パドバのコンソルツィオRFX研究所にNB実機試験施設(NBTF)を建設する計画であり、日本はその重要機器となる100万ボルト・大電流電源機器の製作を担当しています。

このたび、その一環として、高気圧絶縁ガス中の電源から真空中にある負 イオン源に、最大100万ボルトの電力を導入できる高電圧(HV)ブッシングを 完成させ、これをNBTFサイトへ輸送し、イーター機構による受入試験に合格 し、2012年から開始した約5年に渡る調達活動を完了しました(図7)。本機器 は100万ボルトを真空中で絶縁する前例のない機器であり、1990年代の工 学設計活動の段階からNBI実現の最難関といわれていましたが、要素技術 を順次開発して完成することができました。

HVブッシングの構造を図8に示します。HVブッシングが電力を供給する負 イオン源は、1段当たり20万ボルトが印加される電極を5段積み重ねて100万 ボルトでビームを加速します。このような高電圧の絶縁によく使用される絶 縁ガスは、ITERでは放射線によってイオンと電子に電離され、電流が流れる ようになってしまうため、真空で絶縁する必要がありました。その結果、HV ブッシングには、高気圧(6気圧)の絶縁ガスで満たされた電源から真空中の 加速器へ、20万ボルトずつ、最大100万ボルトとなる5つの電圧を導入し、か つ圧力隔壁の役割も果たす、という特殊な機能が必要となりました。

本ブッシング開発に当たり、ITERの燃料であるトリチウムを含む真空境界 として高い気密性を維持できる絶縁管が必要とされ、まずセラミックリングの 開発に取り組みました。100万ボルト絶縁に必要な直径がメートル級のセラ ミックリングは存在しなかったため、世界最大のセラミック製造設備を利用 し、新たな成型法を考案して、2010年、世界最大径のセラミックリング(外径 1.56m、高さ0.3m)を実現するとともに、この大型セラミックリングに熱膨張率 が近いニッケル合金(コバール、厚さ3mm)をロウ付けして接合する技術を開 発しました。

変電所などでも高電圧線を屋外から建屋内に導入する際にブッシングが 用いられています。しかし、そのブッシングの内部には1本の導体が入ってい るのみで、複数の高電圧線を導入するにはそれぞれにブッシングが必要で す。一方、ITERではスペースの制約があり、この大型セラミックリング内に20 万ボルトごとに100万ボルトまで、5本の導体と多数の冷却水配管、ガス配 管、信号線などを収める必要がありました。そこで20万ボルトごとに円筒形 の電極を5層同軸状に配置したコンパクトな構造を考案しました。

7

限られたスペースの中で多層同軸電極間に絶縁距離を確保するために、解 析を行うとともに類似の同軸電極試験体を用意し、試験を行って必要な絶縁 距離を割り出し、本ブッシングの絶縁設計を完成させました。

その結果、ITERの要求値である100万ボルトの絶縁性能を実証し、今回の 成果を達成することができました。



図7 HVブッシングのサイト受入試験完了



図8 NBTFの全体図とHVブッシング

Fusion Forefront No.9 2017 Spring

| 高速イオン輸送に関する加速シミュレーション技法の開発

核融合炉では核融合反応により生成するアルファー粒子など高速イオン が存在します。高速イオンの閉じ込め研究は核燃焼プラズマ制御を行う上 で、重要な研究テーマと位置づけられています。高速イオンの運動は、磁気 閉じ込めプラズマ中に存在する電磁流体波の影響を受けることが知られて います。このため波の振幅や高速イオンの損失とそれに伴う壁の熱負荷を 精度よく予測するためには波と高速イオン粒子の相互作用を考慮したモデ ルによるシミュレーションを行うことが必要となります。スーパコンピュータを 用いればシミュレーションは可能ですが膨大な計算資源が必要となり、1 ケースの計算に数ヶ月要するためパラメータスキャンは容易ではありません でした。我々は電磁流体波の時間スケールと高速イオンの衝突緩和の時間 スケールを内存する現象を取り扱うためマルチフェイズシミュレーション技法 をコードに導入しました。今の問題に限ると4-9ミリ秒の時間間隔において1 ミリ秒の間隔だけ波の運動を考慮すれば重要な情報が得られることを見い だしました。この技法は波の振幅や高速イオン損失のピーク値を過大評価し ますが(図9)、波の周波数スペクトルや高速イオンの圧力分布を高精度で 予測可能です(図10)。さらに、全ての時間ステップで波の運動を考慮した自 己無撞着シミュレーションに比べ、20-30%の計算時間で高精度の予測が可 能となります。この技法により、これまで困難であった数100ミリ秒にわたる 長時間シミュレーションが可能となりました。この技法による加速シミュレー ションと自己無撞着シミュレーションを組み合わせ、核融合プラズマ中の異 なる時間スケールを持つ現象間の相互作用を解明していく予定です。







図10:t=60における高速イオン圧力分布 の比較 自己無撞着シミュレーション(青線) マルチフェイズシミュレーション(赤線)

■ IFMIF原型加速器の実証試験 — 日欧共同でRFQ大電力試験の準備を完了 —

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。

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)は、イタリア国立核物理学研究所(INFN)レニャーロ研 究所が製作を担当し、2016年2月に六ヶ所核融合研究所に搬入されまし た。これまで、2016年9月には共鳴周波数や高周波特性のチューニングを 行う低電力試験を完了し、以来、真空システムや冷却システム、制御シス テムの整備や動作試験を進めてきた結果、2017年6月下旬までに全ての 準備が完了しました(図11)。

一方、RFQ空洞に高周波を入射するための高周波源システム(175メガヘ ルツ、200キロワット連続動作の高周波源(四極管式)8系統で構成)は、ス ペインエネルギー環境技術センター(CIEMAT)が調達を担当しました。構 成機器は2014年7月から述べ9回にわたり、海上輸送を経て六ヶ所核融合 研究所に順次搬入され、2017年3月末までに据付けを完了しました。4月以 降に定格200キロワット出力、連続動作(CW)のパワー試験を順次進め、6 月中旬までに8系統の試験を完了しました。その後、導波管をRFQ空洞に 接続し、空洞へ高周波を入射する準備が全て整いました(図12)。

これまでこれらの機器の開発には100人以上が携わり、スペイン、イタリ ア、フランス、ドイツなどの多くの研究所やメーカーが協力しました。機器の 調整試験のために六ヶ所核融合研究所に滞在した技術者は延べ2000人 日に上ります。さらに、六ヶ所核融合研究所における機器の据付けや配 線、配管作業を担当した日本の地元企業等、多くの方々の協力で準備が 整いました。考えも文化もインターフェースも異なった国際協力の困難さを 乗り越えてできたものです。



図11 六ヶ所核融合研究所に据え付けた高周波四重極線形加速器(RFQ)は、高 周波特性のチューニング(低電力試験)の後、クライオポンプ10台を始めとする真 空機器、8系統の同軸導波管の接続等を日欧共同で順次進め、RFQ空洞へ高周 波を入射する準備が整った。



図12 六ヶ所核融合研究所に据え付けた高周波源システムは、日欧共同で200 キロワット出力、連続動作(CW)までのパワー試験を順次進め、高周波源8系統 の調整試験を完了し、RFQ空洞へ高周波を入射する準備が整った。

Fusion Forefront No.9 2017 Spring

■ プラズマの形状データを用いてCT 解析結果を改善

Computed Tomography(CT)解析は、他視線で計測した実験データから元 の物理量を再構成する手法です。CT解析手法としてはPhillipsの正則化が広 く用いられていますが、放射強度の強いダイバータ部と弱いスクレイプオフ層 (SOL)領域を同時に計測するようなコントラストの高い放射分布を再構成し た場合、従来のPhillipsの正則化によるCT解析では放射が弱いSOL領域に 大きな誤差が生じ、真の分布にある環状構造が崩れてしまうことがわかりま した(図13(b))。

そこで、プラズマの形状データなどを用いた参照分布をCT解析に導入する ことにより再構成像を改善する改良CT手法を考案しました。参照分布の作 成は、計測データ又は装置図面から得られる情報である、①放射強度分布 の計測結果、②電磁気計測結果から評価したプラズマの磁気面形状、③ダ イバータ部の真空容器形状、の3つを用いて作成しています。この参照分布 を加えてCT解析を行う改良CT手法により誤差が大きく低減し(図13(c))、SOL 領域の環状の放射構造の判別が可能となりました。



図13 コントラストの高い放射分布を再構成した結果の比較。(a)再構成対象の真の分布(ダイバータ部の放射は周辺のSOL領域より100倍放射強度が強い)。(b)Phillipsの正則化 による再構成結果では環状構造が崩れますが、(c)改良CT手法による再構成結果では環 状構造を判別できます。

Fusion Forefront No.9 2017 Spring

■ テストブランケット冷却ループのドレンシステムの具体化に着手

テストブランケットシステム(TBS)は、ITERの核融合環境を利用して、「発 電のための熱の取出し」、「燃料トリチウムの生産と回収」を実証するための 試験装置で、試験体であるテストブランケットモジュール(TBM)と冷却系、ト リチウム回収系等で構成されます。日本のTBSは固体増殖・水冷却を採用 しており、冷却系は、早期の発電実証を目指し、実績豊富な加圧水型原子 炉と同等の条件(15.5メガパスカル、約300℃)としています。

冷却水には、ITERの運転を通じてトリチウム及びTBMの構造材料の F82H鋼からの放射化腐食生成物(ACP)の蓄積が予想されます。

冷却水からのトリチウムの取出しは、ITERが保有する装置で行いますが、 ACPの処理は具体化されていませんでした。そこで、冷却水中のトリチウム とACPの蓄積量の予測値を整理し、イーター機構と冷却水処理方法の協議 を続けています。トリチウムの蓄積は計算コードを用いて、ACPの蓄積は F82H鋼を用いた腐食試験結果と核解析に基づき算出しました(表1)。

表1 運転開始16ヶ月経過後の冷却水中のトリチウムとACPの量と濃度

	総重量	放射能	重量濃度	比放射能
	(mg)	(Bq)	(mg/m ³)	(Bq∕m³)
トリチウム	1250.0	4.5×10^{14}	416.7	1.5×10^{14}
放射性腐食生成物	9.0	4.7 × 10 ⁷	3	1.6 × 10 ⁷

(冷却水の一部を純化装置で処理し、ACP は随時除去しながら運転)

トリチウムは随時除去はしないので、プラズマ運転に伴って単純に増加し ます。16か月の運転期間後に予定される8か月の保守期間中に交換する計 画としました。また、冷却系から水を抜き取り、ITERの受入設備に送るドレ ンシステムは、常設配管か移動式タンクの利用が可能で、配管敷設ルート の調査(図14)やタンクの遮蔽厚等の評価を行っています。ACPは、金属製 フィルターとイオン交換樹脂で除去し、使用済樹脂等は遮蔽付き容器に封 入し、廃棄物保管施設に移送します。ACPの管理方針は、ドレンシステムの 設計に影響するため、設計と並行して詳細化に取り組んでいく予定です。



図14 可能性のある常設配管敷設ルート

■ BA 運営委員会(BASC-20)の結果について

4月27日に六ヶ所核融合研究所において、第20回BA運営委員会が開催 されました。欧州からガリバ欧州委員会エネルギー総局原子力・安全・ ITER局長(欧州代表団長)を含め11名、日本側から増子文部科学省研究 開発局審議官(日本代表団長)を含め19名、各事業長及び事業委員会議長 が参加しました。

今回の運営委員会では、IFMIF/EVEDA、IFERC、サテライト・トカマク計画 の3事業について、①高周波四重極加速器の据付・調整の進捗、②ヘリオ ススーパーコンピューターの運用の終了、③JT-60SAにおける超伝導トロ イダル磁場コイルの据付けの進捗、等の各事業の進展を確認するととも に、2020年以降の日欧協力を見据え、2020年3月までの各事業計画の更 新が承認されました。また、これまでBA協定の下に日欧両極で行ってきた 研究開発を発展的に継続するため、2020年以降の日欧協力について議論 を行うタスクグループを本運営委員会の下に設置することが合意されまし た。また、運営委員会は、六ヶ所核融合研究所の欧州研究者、技術者及 びその家族への高水準の生活支援及び教育支援に対する青森県及び 六ヶ所村の多大な努力に、謝意を表明しました。



第20回BA運営委員会の出席者

■ JT-60SAの第6回日欧研究調整会議を開催

5月22日から26日、JT-60SAの第6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18名(6か国11研究機関)、量研24名、国内大学等7名、 JT-60SA事業チーム2名)。

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について議論するとともに、日欧共同 研究(プラズマ・モデリング、プラズマ崩壊の緩和、燃料供給、プラズマ計測 機器等)の進捗状況を確認しました。本会議で推進してきた欧州による可視 カメラ計測器が、概念設計から実施設計に移行する成果も得られています。 また、ITERへの貢献が期待されるJT-60SAの研究として、プラズマの安定性 やプラズマ崩壊の緩和等がイーター機構から提案されました。今後の活動 計画については、プラズマ・モデリングや実験に必要な機器の検討、JT-60SAに向けた他装置での実験実施を継続すること等を合意しました。次回 は、2018年5月下旬に開催を予定しています。



第6回JT-60SA日欧研究調整会議の参加者

■ 研究開発支援企業技術展示会を行いました

那珂核融合研究所では5月24日に、茨城県と共催で研 究開発支援企業技術展示会を開催しました。本展示会 は、高い技術力を有し研究開発の支援を得意とする県内 企業と研究所員の交流を通じて、研究開発現場のニーズ と県内企業の持つ技術力のマッチングを図ることを目的 としています。

当日は企業21社による展示や得意分野に関するプレゼンが行われ、また、当研究所の参加者はニーズ紹介などを行いました。

参加企業対象のアンケートでは、展示会以降に当研究 所と打ち合わせ等を行う予定があると回答した社が半数 以上あり、今後の県内企業と当研究所のコラボレーショ ンに向けて有意義な会となりました。



研究開発支援企業技術展示会の様子

| 六ヶ所高校 平成29年度「第10回村内企業研究会」に参加

6月20日に青森県立六ヶ所高校にて開催された村内企業研究会へ、 六ヶ所核融合研究所として初めて参加しました。

六ヶ所村内の27の事業所が集まり、

・仕事の大変さ、困難をどのように乗り越えていくか

・仕事の楽しさ、やりがい

・どのように社会に貢献して(役立って)いるか

の3点を中心に、1回20分で計3回、六ヶ所高校の全校生徒約200人が小 グループごとに分かれ、希望する各事業所の参加者と対話形式での交 流が行われました。

平成28年4月に法人の移管統合もあり、量研の知名度がまだまだ高い とはいえない状況ですが、核融合研究を行っているという物珍しさから か、多数の生徒の皆様にお集まりいただき、当研究所の説明と質疑応 答を行いました。所長による研究の説明や仕事をする上で大切な心構 えなどに、多くの生徒たちがメモを取りながら耳を傾け、特に目前に就 職活動を控えた3年生は、熱心に質問をするなど、真剣にこの研究会に 取り組む姿勢が見られました。今後とも、量研・六ヶ所核融合研究所を より身近に感じてもらうことが出来る活動に努めてまいりたいと思いま す。



生徒たちとの質疑応答の様子