

幅広いアプローチ活動だより (71)

1. 第 21 回幅広いアプローチ (BA) 運営委員会の開催

12 月 13 日にベルギー・モルにおいて、第 21 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）を含め委員 4 名と専門家 12 名、日本から増子文部科学省大臣官房審議官（日本代表団長）を含め委員 4 名と専門家 9 名、各事業長及び事業委員会議長 6 名、他 1 名の計 36 名が参加しました（図 1）。

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 つの事業について、事業の進展を確認するとともに 2018 年作業計画が承認されました。また、前回会合において本運営委員会の下に設置され、BA 協定下で実施される 2020 年以降の日欧協力についての議論を行うタスクグループから初回報告が行われ、今後、タスクグループのメンバーに日欧の政府関係者を加えて議論を進めることが合意されました。

IFMIF/EVEDA 事業に関しては、高周波四重極加速器 (RFQ) の据付が完了し、調整試験が進められています。世界初となる高周波電源システムによる RFQ への 8 系統同時入射の成功が報告されました。

IFERC 事業に関しては、原型炉 R&D 活動について、これまでの成果を取りまとめた報告書の完成と、これらの成果を原型炉設計に活用するためのデータベース構築作業の進展が報告されました。

サテライト・トカマク計画事業については、JT-60SA において 2017 年 12 月現在、真空容器の周囲に 12 体の超伝導トロイダル磁場コイルの据付が完了し、その他主要機器の調達作業を含め、事業が着実に進捗していることが報告されました。現在のスケジュールでは、トカマク組立の完了は 2020 年 3 月、ファーストプラズマは、2020 年夏頃を予定しています。

欧州研究者及びその家族に対する生活支援や教育支援に関し、青森県からの報告が行われ、運営委員会は青森県の多大な貢献に対し感謝の意を表明しました。

次回会合は、2018 年 4 月 26 日に茨城県・那珂市にて開催される予定です。



図 1 第 21 回 BA 運営委員会の日本代表団。

2. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

JT-60SA では、トロイダル超伝導磁場コイルに 25.7 kA (連続通電)、ポロイダル超伝導磁場コイルに 20 kA (220 秒通電, 30 分周期) もの直流大電流を供給します。コイル巻線には発熱のない超伝導線を用いていますが、超伝導コイルと電源の接続には、取り扱い易さとコスト抑制の観点から通常の導体を使用しています。導体の材料の候補には銅とアルミがありましたが、抵抗値の差が 2 倍より小さいため、取り扱い易さとコストが銅に勝るアルミを採用しました。導体断面は、放熱・発熱や電圧降下の低減も考慮して長方形を採用していますが、大電流を扱うため、トロイダル磁場コイル用が $7\text{ cm} \times 94\text{ cm}$ 、ポロイダル磁場コイル用が $7\text{ cm} \times 33\text{ cm}$ と非常に大きな断面としています。このような大電流を扱う大きな剛体の接続機構には、発熱による熱伸び等による位置ずれを考慮した工夫が必要です。そこで接続部には、薄板を何層にも溶接して柔軟性を高めたフレキシブル導体を製作しました。このフレキシブル導体は、アルミ導体と電源



図 2 アルミ導体とトロイダル磁場コイル用電源の接続。

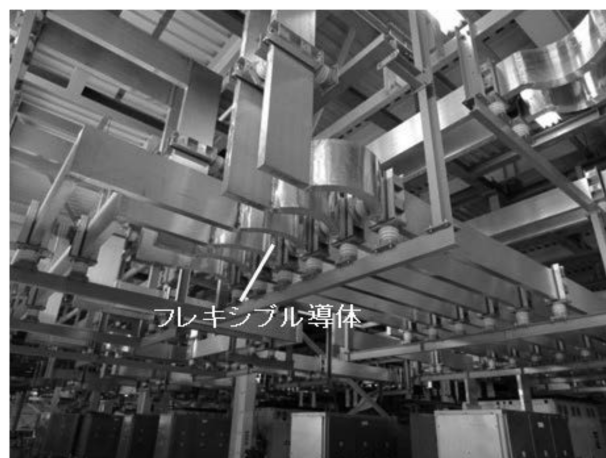


図 3 整流器棟室内に敷設されたポロイダル磁場コイル用アルミ導体。

機器（図 2）及びアルミ導体同士（図 3）を接続する箇所で行われています。

トロイダル磁場コイル電源は、トカマク本体室の隣接建屋に設置していますが、ポロイダル磁場コイル電源は離れた建屋に設置しているため、コイル 10 セット分にあたる合計 20 本の導体を建屋間に渡って新たに敷設しました（図 4）。

2014（平成 26）年 8 月から開始したこの敷設工事は、本年 2 月にすべて完了し、電源から本体室までの全長約 5300 m（総重量 330 t）を接続しました。このように那珂核融合研究所では、電源本体の製作のみでなく、周辺設備の整備も予定どおり進行しており、2020 年のファーストプラズマに向けて着々と準備を進めています。

（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）

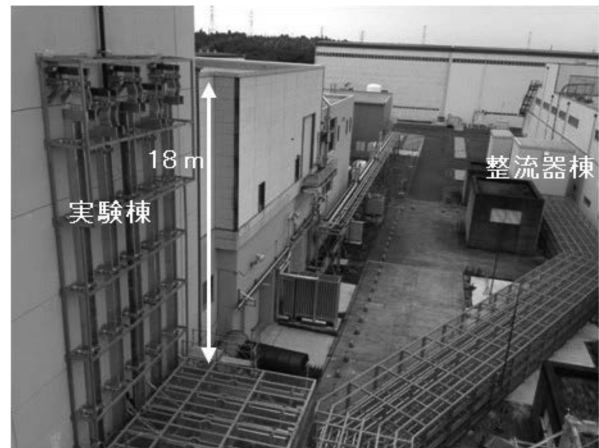


図 4 整流器棟とトカマク本体室を繋ぐ屋外導体設備。

幅広いアプローチ活動だより (72)

1. 第 22 回 IFERC 事業委員会が開催

2018 年 2 月 16 日に大阪市の大阪大学中之島センターにおいて、第 22 回 IFERC 事業委員会が開催されました。欧州側からメゾニエ議長を含む委員 3 名と専門家 6 名、日本側から委員 2 名と専門家 10 名、これに中島事業長及び事業チーム員 5 名と書記 1 名の計 27 名が参加しました (図 1 参照)。今回の事業委員会では、IFERC 事業下の各活動 (原型炉設計・R&D, ITER 遠隔実験センターなど) の 2017 年の活動状況の報告を受け、2017 年年度報告について審議しました。審議を踏まえて技術的な勧告をまとめるとともに、2018 年 4 月 26 日に茨城県那珂市で開催される第 22 回 BA 運営委員会に同年次報告を付議し、承認を求めることに同意しました。主な確認・審議事項は、以下のとおりです。

原型炉設計活動では、延長期間中 (2017 年 6 月 - 2020 年 3 月) に取り組むべき作業課題を整理し、それらの解決に向けた設計作業を継続しました。特に、遠隔保守機器、ダイバータの概念設計で進展がありました。原型炉 R&D 活動では、欧州のトカマク装置 JET の真空容器内部から採取したダスト試料を六ヶ所研に受入れ、試料分析を行いました。2017 年に新たに開発した測定法 (燃焼法) を用いてダスト中の放射性トリチウム吸着量を測定したところ、ITER と同様のタンングステン壁の場合、ダストに吸着するトリチウム量は炭素壁と比べ 2 桁小さいという、ITER や原型炉の安全性に関連して重要な初期結果が得られました。ITER 遠隔実験センター活動 (REC 活動) では、BA 期間中の成果 (REC ルーム及びネットワークの整備、ソフトウェア開発、並びに総合機能試験) を最終報告書にまとめる作業を進めていることが報告されました。

次回の事業委員会は、2018 年 10 月 9 - 10 日に青森県六ヶ所村で開催される予定です。

2. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

超伝導トカマク JT-60SA の最重要機器である超伝導ト



図 1 第 22 回 IFERC 事業委員会の参加者。

ロイダル磁場 (TF) コイルは、2016 (平成 28) 年からこれまで、順次船舶により日本に輸送され、現在 14 体までの据付けが完了しています (図 2)。冷凍機を用いた 18 体目の TF コイルの冷却・通電試験が、1 月 26 日にフランス CEA サクレイ研究所にて完了しました。組立作業の促進の一貫として、最後の 2 体が、空輸されることになりました。JT-60SA の TF コイルは、高さ 7.5 m、幅 4.6 m、重量 20 トンの巨大な機器で、輸送のための台枠を含めると、高さ 9.3 m、幅 5.6 m、重量 34 トンにもなるため、通常の輸送機には積み込めません。そこで、世界に 56 機

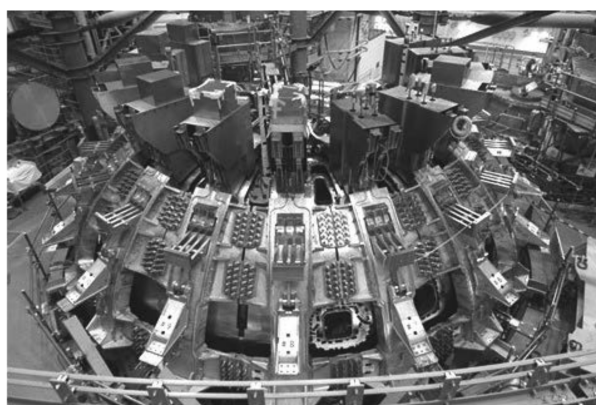


図 2 JT-60SA トカマク本体へ据付けを完了した 14 体のトロイダル磁場コイル。



図 3 中部国際空港に到着した輸送機アントノフ An-124 型機。

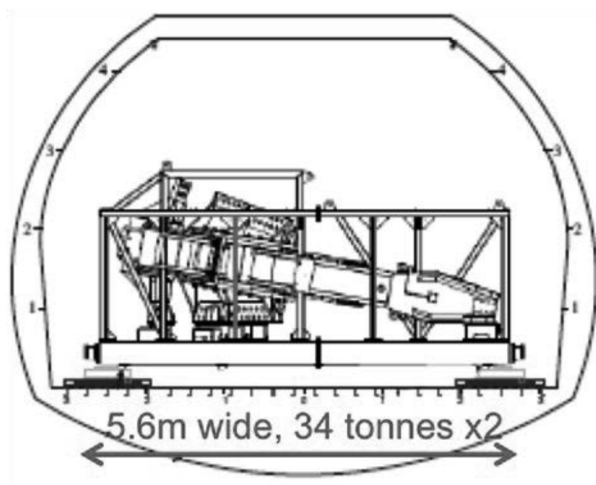


図 4 機内に格納された TF コイルのスケルトン図。格納時はシートに梱包されている (図 5, 6)。

しかない世界最大級の輸送機アントノフ (An-124 型機, 図 3) をチャーターすることとしました。さらに, その大きさ故に, 日本における空港から那珂研までの輸送経路を考慮し, 到着空港を中部国際空港に設定しました。

当輸送機 An-124 は, 2 月 15 日にフランス・ヴァトリー国際空港にて TF コイルを図 4 のように積載して出発し, 途中, トルクメニスタンと中国にて燃料補給に立ち寄った後, 中部国際空港に無事 2 月 17 日の早朝に到着しました。

中部国際空港での着陸, 荷降ろし (図 5), 船積み (図 6) の模様は, ほぼ一日に亘り, ニコニコ生放送によりネット生配信されました。多くの視聴があり, 最終的な視聴は, 5 万を超えました。なお, 動画は現在も視聴可能となっています。

その後, 2 体の TF コイルは, 海路にて 2 月 19 日に日立港に到着し, 2 月 21 日に那珂研に到着しました。据付け前の調整後, 順次据付けを進めていきます。

(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)



図 5 輸送機 An-124 からの荷降ろしの様子。



図 6 TF コイルと輸送船。

幅広いアプローチ活動だより (73)

1. 第 22 回幅広いアプローチ (BA) 運営委員会の開催

4 月 26 日に茨城県那珂市の那珂核融合研究所において、第 22 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) を含め委員 3 名と専門家 12 名、日本から増子文部科学省大臣官房審議官 (日本代表団長) を含め委員 4 名と専門家 10 名、各事業長及び事業委員会議長 5 名の計 34 名が参加しました (図 1)。

今回の運営委員会では、国際核融合材料照射施設に関する工学実証及び工学設計活動 (IFMIF/EVEDA)、国際核融合エネルギー研究センター (IFERC)、サテライト・トカマク計画の各事業の進展を確認し、2017 年年次報告と事業計画の更新を承認しました。また、本運営委員会の下に設置された BA フェーズ II タスクグループから報告が行われ、各事業長に対し、2025 年までの事業計画を検討するよう要請が行われました。

IFMIF/EVEDA 事業では、原型加速器 (LIPAc) の中エネルギービーム輸送系などの多くの構成機器の調整試験が順調に進んでいます。欧州の自主的貢献機関、産業界から多くの研究者、技術者の参画を得て、高周波四重極加速器 (RFQ) によるビーム加速試験が 3 月に開始されました。

IFERC 事業に関しては、すべての活動が計画通り進んでいます。特に、遠隔実験センター活動は暫定最終報告書が提出されました。2018 年に予定されている JET や WEST などの実験装置への遠隔参加の実証試験結果と合わせ、最終報告が纏められる予定です。

サテライト・トカマク計画事業では、機器とシステムの製作・納入や、組立、据付、調整試験の活動が順調に進捗しています。特に、18 機すべての超伝導トロイダル磁場コイルの真空容器周囲への設置が完了しました。これは、プロジェクトの最も重要なマイルストーンの一つであり、2020 年 3 月に予定されているトカマク組立作業

の完了に向け、明確な見通しが得られました。

また、欧州研究者及びその家族に対する生活支援や教育支援に関する報告が行われ、運営委員会は青森県の多大な貢献に対し感謝の意を表明しました。

次回会合は、2018 年 12 月 5 日にフランス・グルノーブルにて開催される予定です。

2. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

2015 年 8 月には真空容器、2016 年 9 月には真空容器側から超伝導トロイダル磁場 (TF) コイルへの熱侵入を防ぐ真空容器サーマルシールド (VVTs) が、それぞれ 20 度分を残して設置を完了し、2016 年 10 月より残りの 20 度分の空間から TF コイルを回し込んで設置する作業を開始していました (図 2)。



図 2 20 度分の空間から一体目の TF コイルを挿入する様子 (2016 年 10 月)。



図 1 第 22 回 BA 運営委員会の日欧代表団。



図3 大型輸送機 An-124 からの荷降ろしの様子.



図4 17体目のTFコイルの設置完了.

この度,2月下旬に大型輸送機 An-124 にて EU より日本に到着したものを含む TF コイル (図3) の据付けを行い,全18体の据付けの完了という大きな節目を迎えました.

図4は18体目を設置する直前で,17体のTFコイルの設置が完了している状態です.最終部では真空容器及びVVTSも同時に据え付ける必要があり,図5のように,TFコイル,VVTS及び真空容器を一体として吊り込みました.この最後の吊り込みは4月20日に実施し,その様子は報道関係者に公開され,五つのメディアで報道されました.

図6は吊り込みが完了した状態です.遂にトーラス形状が出来上がりました.

今後,最終部の真空容器等の溶接を進めていきます.また,所定の位置にプラズマ形状制御用の平衡磁場コイルを設置していきます.

(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)



図5 18体目のTFコイル,VVTS及び真空容器を一体として,20度分の空間から挿入する様子.

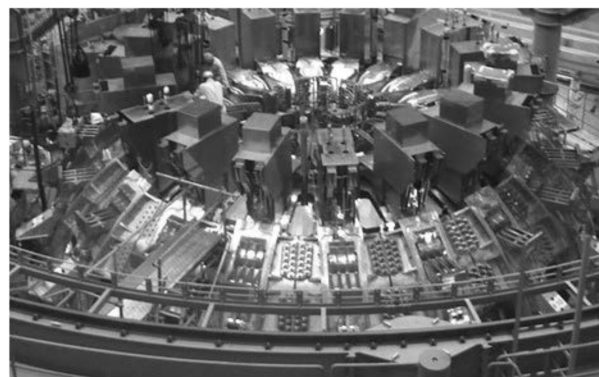


図6 遂にトーラス形状となる(2018年4月).

幅広いアプローチ活動だより (74)

1. IFMIF/EVEDA 原型加速器の RFQ による 2.5 MeV までの陽子ビームの加速に初めて成功

六ヶ所核融合研究所では日欧同事業として 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、IFMIF の原理実証を目的として、大電流 (125mA) の重陽子イオンビームを 9 MeV まで加速することを目指した、世界でも最大級の大電力加速器です。QST と欧州の研究機関が合同チームを作り、日本のリーダーシップの下、据付調整試験を進めています。昨年 10 月から高周波四重極線形加速器 (RFQ) への大電力高周波入射 (RF コンディショニング) を 24 時間体制により本格的に開始していましたが、本年 5 月までに陽子ビームの 2.5 MeV までの加速に必要なコンディショニングを完了し、6 月からいよいよ RFQ へのビーム入射試験を開始しました。そして、6 月 13 日に、RFQ による 2.5 MeV までの陽子ビームの加速に初めて成功しました (図 1)。

現在の原型加速器は、加速用イオンを発生させる入射器 (フランス CEA サクレイ研究所担当)、RFQ (イタリ

ア国立原子核研究所担当)、中間エネルギービーム輸送系 (スペイン CIEMAT 担当)、ビーム診断系 (スペイン CIEMAT 担当)、低出力ビームダンプ (イタリア国立原子核研究所担当) から構成されており (図 2)、高周波源システム (スペイン CIEMAT 担当) から RFQ へ加速用の大電力高周波 (175 MHz、合計最大 1.6 MW、CW) が供給されます。この RFQ は、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 (9.8 m) の RFQ です。また、最終目標である電流 130 mA (ビーム電力 0.7 MW) の重陽子ビーム加速を実現するため、世界初となる 8 系統の高周波源を同期させて駆動し単一の加速器空洞に入射する方式を採用しています。このような同期入射の実現には先進的な制御技術が不可欠であり、昨年 10 月以来、様々な困難に直面しながらも、日欧チーム一丸となって一つずつ問題を解決し、今回のビーム加速の成功に至りました。現在、陽子ビームにおける最大定格の 65 mA 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ており、今年度後半には重陽子ビームの 5 MeV 加速試験に移行する予定です。

2. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

今回は、バルブボックス (VB) についてご説明します。JT-60SA では、極低温の冷媒ヘリウムを複数の用途で使います。4.4 K の冷媒ヘリウムはトロイダル磁場コイル (TFC)、平衡磁場コイル (EFC) 及び中心ソレノイド (CS) の超伝導導体の冷却に、3.6 K の冷媒ヘリウムはダイバータ排気のためのクライオポンプで使用します。また、比較的高温である 50 K の冷媒ヘリウムは、高温超伝導電流リード (超伝導体と常温導体の接続に使われる機器) の高温端の冷却に、80 K の冷媒ヘリウムは極低温機器への熱侵入を抑制するサーマルシールドに用います。これらの冷媒ヘリウムは 4.5 K 換算 9 kW の巨大な冷凍機で製造しますが、適切な流量管理を行わないと上記の需要に対応できません。JT-60SA には、そのような流量管理を行うバルブが多数あります。このようなバルブを収めた



図 1 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。

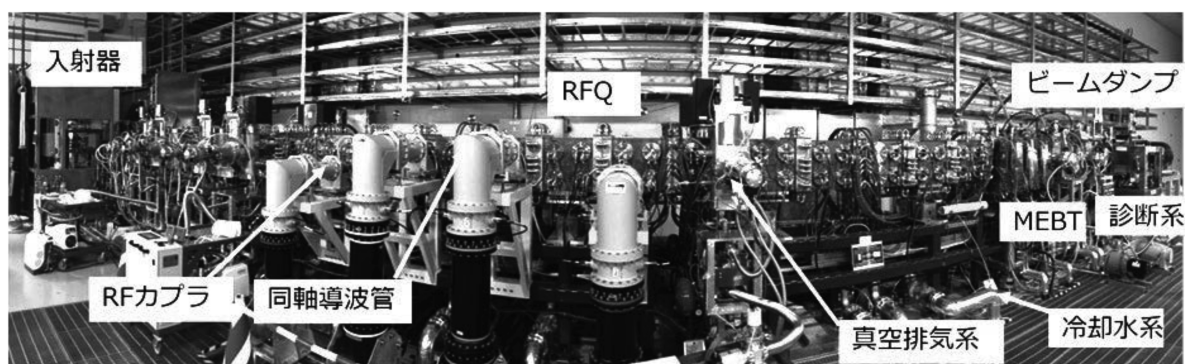


図 2 IFMIF/EVEDA 原型加速器の全体図。

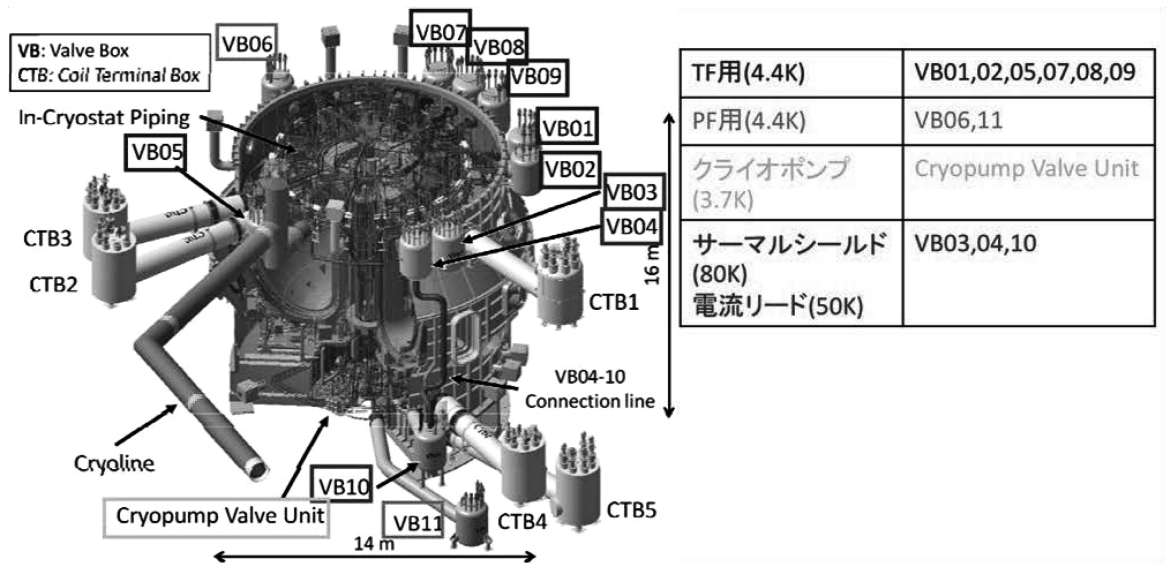


図 3 配置された VB とその用途.

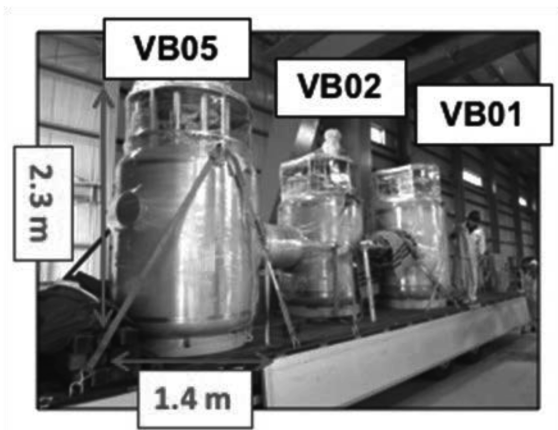


図 4 那珂核融合研究所に納品された VB01, VB02, VB05.

ものが VB です (図 3, 4). VB は内部に設置された温度・圧力・流量の計測素子及びバルブによって、冷媒ヘリウムの状態を監視し、機器への分配を調整します. 冷媒ヘリウムの温度は、配管に設置された抵抗素子の抵抗を測ることによって計測します. JT-60SA では温度域や要求精度によって、白金、炭素、ジルコニウム酸窒化物といった異なる材質の抵抗素子を用います. 流量は、配管内に設置されたオリフィス板 (中央に小さな穴の空いた板) の前後の圧力差を測定することによって算出します. 流量の調整に用いるバルブには、室温部から冷媒ヘリウムへの熱侵入を低減するため、室温部から極低温部までの弁軸が長い (600 ~ 800 mm) 特殊なものを使用しています (図 5).

(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)

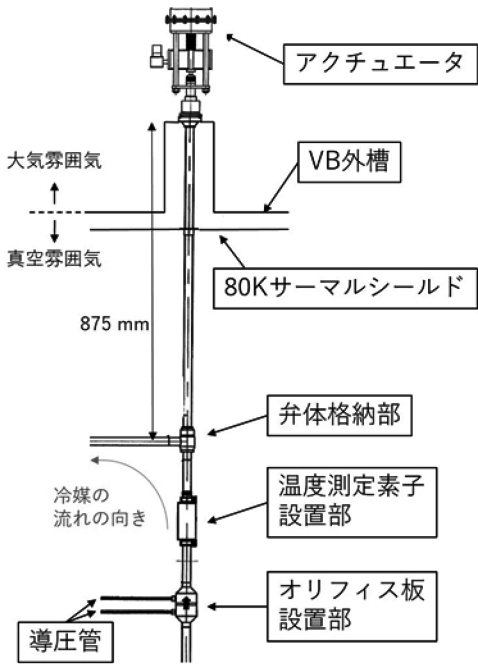


図 5 低温バルブの模式図.

幅広いアプローチ活動だより (76)

1. 第23回 IFERC 事業委員会が開催

2018年10月9日～10日に量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所において、第23回 IFERC 事業委員会が開催されました。欧州側からメゾニエ議長を含む委員3名と専門家4名、日本側から委員3名と専門家9名、これに中島事業長及び事業チーム員5名と書記1名の計26名が参加しました（図1参照）。今回の事業委員会では、各活動（原型炉設計・R&D、ITER 遠隔実験センターなど）の2018年の活動状況報告と共に2019年の IFERC 事業における作業計画案について審議しました。当該作業計画案は審議を踏まえて技術的な勧告をまとめるとともに、承認を得るために第23回 BA 運営委員会（2018年12月5日、フランスで開催予定）に提出することに同意しました。

原型炉設計活動では、核融合原型炉の機器及びこれらを統合したシステム設計が順調に進展し、特に、ブランケット及びダイバータの概念設計、並びに原型炉設計のための低放射化フェライト鋼及びブランケット機能材料データベースの拡充において進展したことが報告されました。また、2019年に日欧共同で最終報告書に取りまとめる計画が提案されました。原型炉 R&D 活動では、増殖ブランケットの材料を中心とした研究開発活動が2017年3月に終了したことを受けて日欧の専門家によるピアレビューが行われ、当該活動の成果は当初の目標を十分に満たしており、構造材料の開発などにおいて核融合原型炉の設計の基盤となる優れた成果が得られたとの評価結果が報告されました。ITER 遠隔実験センター（REC）活動では、RECの総合機能確認のために11月26日～30日に欧州トカマク装置 WEST との遠隔実験を計画しており、その準備状況について報告されました。この遠隔実験の様子は11月28日にプレス及び地元高校に公開するとともにライブ配信（「ニコニコ動画」）する予定であることが報告されました。

2. 第22回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の開催

2018年10月15日～16日に六ヶ所核融合研究所におい



図1 第23回 IFERC 事業委員会の参加者。



図2 第22回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の参加者。

て、第22回 IFMIF/EVEDA 事業委員会が開催されました。欧州側が委員3名と専門家4名、日本側が石田議長を含む委員3名と専門家5名、これにカサ事業長（前任のナスター氏の退任に伴い4月より着任）及び事業チーム員他18名の計33名が参加しました（図2）。

今回の事業委員会では、主に IFMIF/EVEDA 事業の進捗状況を2018年作業計画に基づき確認するとともに、2020年4月からの5年間を含む事業計画案及び2019年作業計画案について審議しました。また、12月にフランス・グルノーブルで開催される第23回 BA 運営委員会に対する技術的な勧告をまとめるとともに、事業計画案及び2019年作業計画案等を運営委員会に提出するとの事業長の提案に同意しました。

事業の進捗については、以下のとおりです。

六ヶ所核融合研究所の IFMIF 原型加速器施設において、高周波四重極線形加速器（RFQ）を用いた水素ビーム加速試験を開始し、これまでにエネルギー2.5 MeV、電流25ミリアンペアの水素ビーム加速に成功しました。

連続運転に向け RFQ の下流に接続される高エネルギービーム輸送系、大電力ビームダンプの部品が搬入されつつあります。今後、順次加速器室に設置し、調整を行います。

超伝導加速器の組み立てのためのクリーンルームを完成させるとともに、冷凍設備の試験運転を開始しました。

3. IFMIF 原型加速器のビームダンプ及び鉛シャッター容器の設置を完了

最終フェーズの9 MeV までの加速試験のためには、超伝導加速器（SRF）、高エネルギービーム輸送系（HEBT）、1 MW の大電力ビームを受け止めるビームダンプ（BD）の設置が必要です。

このうち HEBT と BD については、スペイン CIEMAT 研究所が調達を担当しました。主要機器は8月までに完成し、現地立会い試験の後、9月から10月にかけて六ヶ所研に搬入され、据付が開始されました。最初に据付けたのは、HEBT と BD を接続するコーン状ビームダクトと



図3 コーン状ビームダクトと鉛シャッター容器の据付。



図4 設置した大電力ビームダンプ（直径約2 m，長さ約4 m）。

鉛シャッター容器です(図3)。これらは厚さ70 cmの遮蔽コンクリートを貫通する形で遮蔽プラグと一体で設置され、アライメントの調整を含め非常に難易度の高い作業でした。

続いて設置したのは総重量60トンを超えるBD本体です。CIEMATの担当者の立会いの下、レーザートラッカー2台を用いた精密なアライメント調整を実施しながら、1 MWの大電力ビームを受け止める銅製の冷却コーン、中性子遮蔽のための大型のポリエチレンシールド、鋼鉄製のシールドなど、分割された部品を順次組み上げていきました(図4)。最終的には鉛シャッター容器及び冷却配管と接続し、真空リークチェックを行い設置が完了しました。

4. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

今回は、ダイバータカセットの冷却水配管接合のために開発されたレーザー溶接ツールについてご説明します。JT-60SAのダイバータは、将来の改造及び遠隔操作(リモートハンドリング)による保守を想定し、全36体の取外し可能なカセット状の構造となっています(図5)。JT-60SAのダイバータカセットの場合、冷却水配管の取り付けとして「往き配管」と「戻り配管」のそれぞれに2カ所ずつ、合計4カ所の接続部(図6右側)があ



図5 JT-60SAのダイバータカセットのフレーム。アーマータイルは未装着の状態。

ります。ダイバータカセットの配管は、最大 15 MW/m^2 もの定常熱負荷を除熱するために水圧2 MPa、流量750 L/minの冷却水を流すため、外径59.8 mm、肉厚2.8 mmのステンレス配管を使用します。ダイバータカセット交換時には、配管接続部上部のカバーアーマータイルを外し、狭い空間で1カセットあたり4カ所を溶接・切断する必要があります。このような作業環境を考慮し、リモートハンドリングで使用可能な専用のレーザー溶接ツールを開発しました(図7)。溶接接続するには、配管の開先き(溶接される取り付け部分のこと)を高精度で合わせる必要がありますが、接続部の周りが混み合っている狭い空間のため、制限された空間でも開先きを矯正できる機構も合わせて開発しています。真空容器側とダイバータカセット側の配管軸ずれは最大で3 mm程度ですが、開発した開先き合わせ機構により、軸ずれを0.5 mm以下に矯正可能になりました。残りの0.5 mmのずれに対しては、配管の内部から専用の計測ツールで軸ずれ量と配管同士のギャップを正確に計測し、ずれの状況に応じた溶接ツールの動きで対応できる仕組みを開発しました。また、溶接で散らばる霧状の金属がツール内のレンズやミラーを汚さないようにするガス流や溶接中の溶接箇所への酸化を防止するガス流を設ける工夫を施しています。

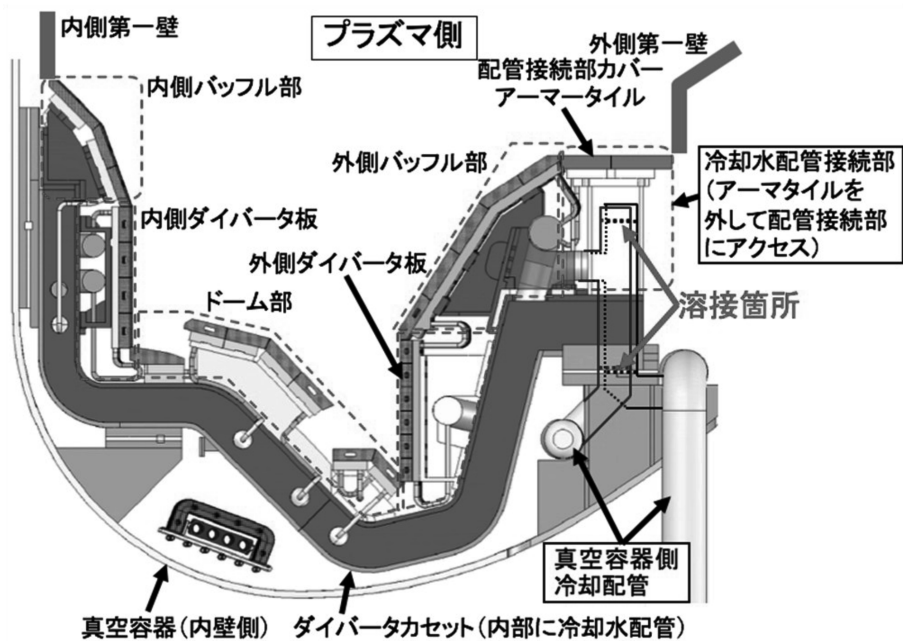


図 6 JT-60SA のダイバータカセット設置時の模式図. 右側で溶接・切断を行う.

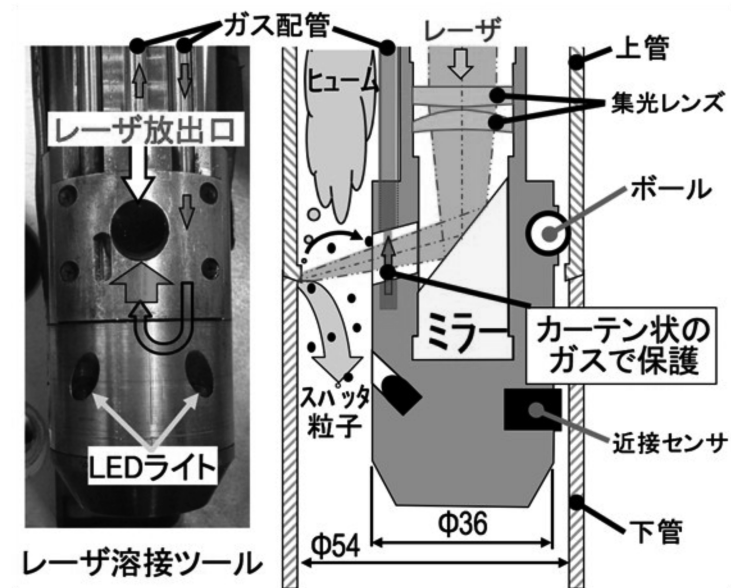


図 7 開発したレーザー溶接ツール.

(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)