インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（83）

サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

JT-60SA の高密度，高非誘導電流駆動割合，長時間放電へ対応するため，エネルギー 0.5 MeV，総電流 22 A（電流密度 130 A/m^2），100 秒の負イオンビーム（NNB）の連続生成が求められています．QST では，この要求を満たすべく物理的・工学的課題を解決する方法を検討し研究開発を進めてきました．現在 JT-60SA は建設中のため，研究開発は JT-60SA と同様の構成で，負イオンビームのサイズを小さくした負イオン源（**図 1**）を用いて進めてきました．

研究開発にあたり大きな課題が二つありました．一つは，負イオン生成に用いるセシウムの量を適正に制御する方法，もう一つは，安定な耐電圧の維持です．

セシウムを負イオン生成部に導入した際，その大部分が冷たい壁に付着し，一部が負イオン生成に使用されます．しかし，数十秒を超える長パルス運転で壁の温度が増加した際，壁に付着していたセシウムが再放出され，負イオン生成に悪影響を与えることがわかってきました．この特性を理解するため基礎的な実験を進め，結果，このセシウムの再放出を抑制するためには，壁の温度を 60℃以下に維持する必要があることがわかりました．そこで，壁温が 50℃以下となるように冷却構造を改良しました．これにより運転中のセシウムの再放出量を，従来の 1/15 程度まで抑制できました．

耐電圧を改善するためには，電極間距離を広げる必要がありますが，その際ビームの発散角が増大し，加速電極への熱負荷増大が懸念されました．そこで，耐電圧設計とビーム軌道計算を相互に実施し，耐電圧および電極の熱負荷ともに満足し得る電極間距離と構造を見出し，加速器を改良しました．結果，耐電圧が改善しかつ長パルス運転時の電極熱負荷も設計許容値内となりました．

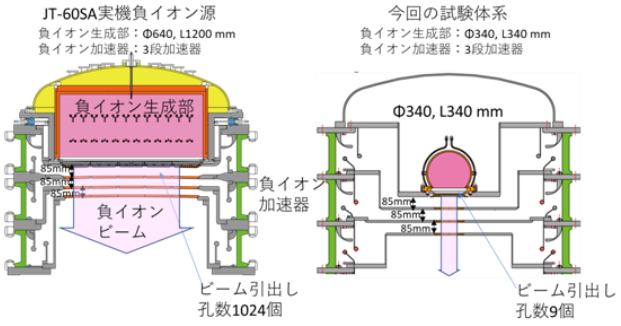

図 1　JT-60SA 用負イオン源（左）と同様の構成で，負イオンビームのサイズを小さくして総電流量を小さくした負イオン源（右）．

加えて，先行研究では，セシウムを入れ続けると，耐電圧が劣化していくことが観測されましたが，新しい加速器では年間運転の 2 倍のセシウム（5 g）を導入した際も，耐電圧が維持できることを確認しました（**図 2**）．

このような開発の結果，負イオンビームへの要求値を超える，エネルギー 0.5 MeV，電流密度 154 A/m^2，118 秒の連続ビーム加速を実証できました（**図 3**）．

この成果は，JT-60SA の負イオン源に適用され，JT-60SA の運転に貢献すると共に，ITER や原型炉に向けた定常運転 NBI の大きな布石となります．

（量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門）

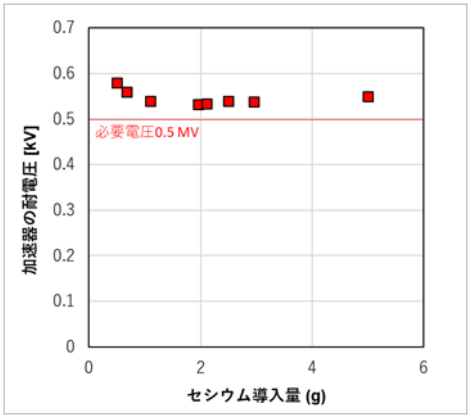

図 2　年間運転の 2 倍のセシウム(5g)を導入した際も，耐電圧が維持できることを確認．

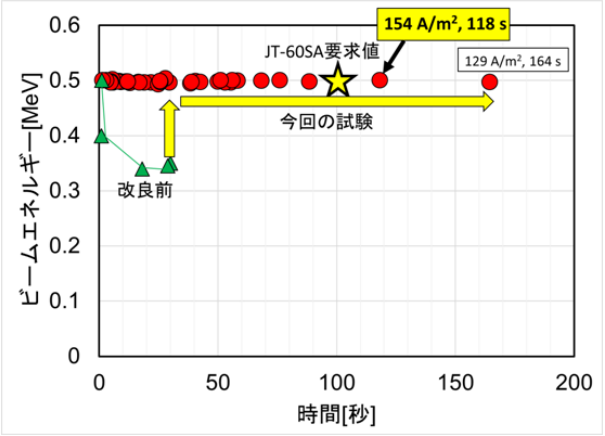

図 3　要求値を超えるエネルギー 0.5 MeV，電流密度 154 A/m^2，118 秒の連続ビーム加速を実証．

インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（84）

1. 第 26 回 IFERC 事業委員会の開催

2020年3月4日に青森県六ヶ所村の量研六ヶ所核融合研究所において，第 26 回 IFERC 事業委員会が開催され，欧州側からメゾニエ議長を含む委員3名と専門家3名（うち5名が TV 会議で参加），日本側から委員 3 名と専門家 10 名（うち 6 名が TV 会議で参加），これに中島事業長及び事業チーム員4名と書記1名の計24名が参加しました（**図1**参照）．会議冒頭に議長から新型コロナウィルスによる移動制限のために TV 会議での開催であるとの説明がなされました．今回の事業委員会は2007年に開始した BA フェーズI最後の事業委員会であり，原型炉設計・R&D 活動（JET タイルとダスト分析）に関する 2 つの最終報告書及び ITER 遠隔実験活動に関する最終報告書が作成され，本年 3 月末までに IFERC 事業における BA フェーズIの目標が全て達成され成功裏に終了することが報告されました．この BA フェーズ I での成果を基に，2020 年 4 月から新たに開始される BA フェーズ II の事業計画及び 2020 年作業計画の更新案が審議され，BA 運営委員会に提出することが同意されました．

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，BA フェーズ I での日欧共同の成果を最終報告書に取り纏められたことが報告されました．これは，欧州との共同作業による相乗効果により，設計の信頼性・創造性の向上と，日本チームとして 172 名の研究者・技術者の参画により成し遂げられたものです．また，原型炉 R&D 活動では，欧州トカマク装置 JET の真空容器内から採取したタイル及びダスト分析に関する最終報告書が取り纏められたことが報告されました．本成果は，ITERにおけるトリチウム吸蔵量評価コードの予測精度向上に貢献する成果として注目されています．

次に BA フェーズ II における IFERC 事業計画及び 2020 年作業計画の更新案が議論されました．BA フェーズ II における IFERC 事業計画の概要を以下に示します．

- 原型炉設計・R&D ： BA フェーズ I で得られた成果を基に，日欧共通の課題に関して原型炉に向けた設計研究及び研究開発を実施します．特に建設中の ITER，本年3月に完成し，秋頃から実験が開始される予定である JT-60SA（茨城県那珂市）からの成果を原型炉設計・研究開発に反映する事を検討します．
- 計算機シミュレーションセンター（CSC）での QST 所有の核融合専用スパーコンピューター（JFRS-1）については，計算機資源の 50％を日欧の BA 活動に提供し，ITER 及び BA 事業，原型炉開発を目指した日欧のシミュレーション研究を推進します．
- ITER 遠隔実験センター（REC）では，BA フェーズ I で整備されたシステムを活用し，JT-60SA 及び IFMIF 原型加速器への適用，更には ITER 機構との共同研究により，将来の ITER 遠隔実験参加のための技術開発を行います．

次回の IFERC 事業委員会は，青森県六ヶ所村の量研六ヶ所核融合研究所において 2020 年 10 月に開催予定です．

図 1　第 26 回 IFERC 事業委員会の参加者．

2. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

超伝導コイルの冷却システムの負荷を抑え，運転を経済的に行うため，超伝導コイルを回りの高温（室温ですら高温）環境から隔離する機構が必要になります．そのために設けるのが，サーマルシールドと真空断熱を利用するクライオスタットです．クライオスタットは JT-60SA の全ての超伝導コイルを覆うため，加熱機器以外の全体を覆う非常に大きな真空機器となります．

クライオスタットは，底部，胴部及び上蓋部で構成されています．この内，底部と胴部の製作は欧州・スペインの CIEMAT 研究所が担当しました．底部は，JT-60SA の最初の構造物として2013年3月に据え付けを終えました．胴部については設置を 2019 年 9 月より開始し（**図 2**），12 月までに完了しました（**図 3**）．上蓋部は QST が担当しました．直径が 11.5 m（**図 5** 参照）で二体の 180 度セクターに分割して製作しました．日本の製作物の中

図 2　クライオスタット胴部の設置開始．

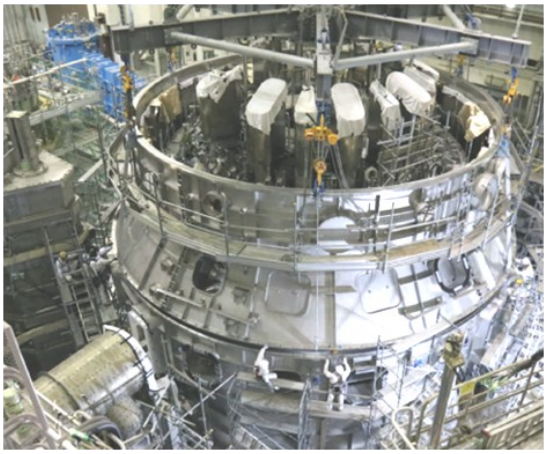

図 3　設置完了間近のクライオスタット胴部．胴部上部パーツの組み込みの様子．

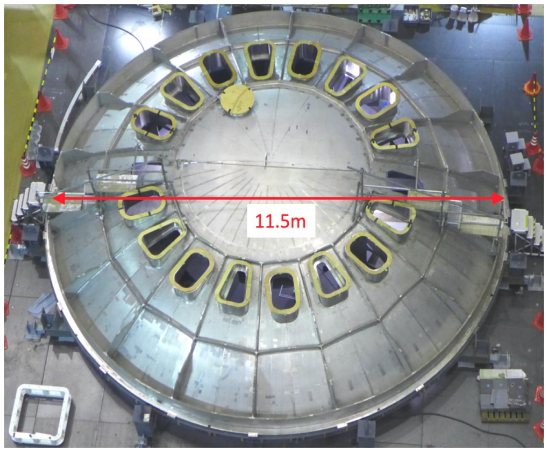

図 5　組立室で一体化を進める上蓋部．

図 4　長崎での船積みの様子．

で単品としては最大の大きさになります．そこで製作は港に近い長崎の工場で行いました．この大きさにも関わらず径方向に 5 mm 未満の精度で製作することができました．製作は 2019 年 9 月に完了しました．完成品を船積みし（**図 4**），日立港を経て，那珂研究所まで輸送しました．その後，本体室内にて一体化を行いました（**図 5**）．

この上蓋を設置することでクライオスタットが完成するとともに，JT-60SA の外観がほぼできあがることになります．

（量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門）

インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（85）

1. 原型炉設計フェーズⅠ活動の終了

BA 協定に基づき，2011 年 6 月から 2020 年 3 月まで日欧共同の原型炉設計活動が実施されました．当初，日欧の目指す原型炉概念には大きな隔たりがあることから，同一の原型炉概念設計を追求するのではなく，共通の設計課題について予備的な原型炉概念設計を実施することになりました．活動の推進にあたっては，原型炉設計タスク会合 34 回（**図 1**），設計技術調整会合 10 回を開催し，設計コードベンチマーク，各設計課題への対応策・設計方針等の議論により共同作業を実施することで，設計の信頼性・創造性の向上及び相乗効果が得られ有益な活動になりました．

2020 年 2 月には，システムコード開発，物理設計，ダイバータ設計，炉内機器設計，超伝導コイル設計，遠隔保守設計，プラント設備設計，安全性の 8 分野に加え，構造材料研究開発（2017 年 6 月からの延長期間中に実施）に関する最終報告書がまとめられ，原型炉設計フェーズⅠ活動は終了しました．本活動には，実施機関である量研を中心に大学・研究機関との共同研究やメーカーとの検討作業を通して国内チームとして 172 名の専門家の貢献がありました．さらに，本活動は原型炉設計合同特別チーム（文部科学省核融合科学技術委員会の要請により 2015 年 6 月に設置）の活動基盤に繋がったことから，その意義はとても大きいです．

今後は BA 活動フェーズⅡの下，引き続き日欧合同の原型炉設計活動を展開する予定です．

図 1　第 34 回原型炉設計タスク会合（2019 年 11 月，ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所内の F4E にて）．

2. ITER 遠隔実験センターフェーズⅠ活動の終了

これまで QST 六ヶ所核融合研究所で進めてきた BA-IFERC 事業計画の中核の 1 つである ITER 遠隔実験センター（REC）活動は，2020 年 3 月をもって BA 活動フェーズⅠにおける活動を完遂し，これまでの活動（2013 年 4 月～ 2020 年 3 月）の成果をまとめた REC 活動最終報告書が発行されました．

将来の ITER 実験への遠隔参加に向けたハードウェアおよびソフトウェアの準備と検証を目的に進められてきた本活動では，遠隔実験室や広帯域ネットワークの整備，

図 2　ITER 遠隔実験センター（六ヶ所）での ITER 機構 CODAC セクションとの共同研究キックオフ会合（2020 年 1 月）．

ITER から REC へ 50 時間で 105 TB の高速データ転送を実証，那珂核融合研究所で建設が進む JT-60SA を使った遠隔実験システムや遠隔参加のための解析ソフトウェア開発と試験，東京大学の TST-2，欧州の JET，WEST 等の装置を用いた試験による遠隔実験技術の実証に成功するなど，炉設計技術への貢献に資する多くの成果が得られました．

今後の BA 活動フェーズⅡにおいては，ITER 機構，IFMIF 原型加速器，JT-60SA との連携協力を柱とした活動を展開していく予定です（**図 2**）．

3. IFERC-CSC スパコン利用による日欧共同シミュレーション研究の開始

青森県六ヶ所村にある国際核融合エネルギー研究センターの計算機シミュレーションセンター(IFERC-CSC)では核融合研究開発専用のスーパーコンピュータ JFRS-1（総理論性能 4.2PF）を 2018 年 6 月より運用中です（**図 3**）．JFRS-1 は運用開始以来，安定に運用され，最近は利用率も非常に高い状態を維持しています．2020 年 4 月からは BA 活動フェーズⅡの一環として，JFRS-1 を用いる日欧のシミュレーション研究が開始されました．2020 年度は ITER や JT-60SA 等への貢献を考慮して優先度の高い 27 プロジェクトが選定されています．これらは，ディ

図 3　IFERC-CSC スパコン（JFRS-1）の外観．

スラプションや高エネルギー粒子駆動不安定性のシミュレーション, ELM や SOL-ダイバータプラズマのシミュレーション, 乱流輸送シミュレーションによる内部輸送障壁形成の研究などの重要な課題に取り組むものです. 各プロジェクトに関する情報はIFERCのウェブサイトに掲載予定ですので, ご興味のある方はIFERC ウェブサイト（https://www.iferc.org/）をお訪ねください.

4. IFMIF/EVEDA原型加速器RFQの大電力/長パルスビーム試験用ビームラインの完成

六ヶ所核融合研究所では, BA 活動に基づく日欧共同事業の一環として, 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. このIFMIF原型加速器は, IFMIF の原理実証を目的として, 大電流の重陽子ビームの加速試験を行うための装置です. これまで, 高周波四重極線形加速器 (RFQ) による 5 MeV までの重陽子パルスビーム加速に 2019 年 3 月に初めて成功し, 同7月 24 日には世界最大電流となる 125 mA の重陽子パルスビームの5 MeV までの加速に初めて成功しました.

この試験では, 加速したビームを受け止めるビームダンプと呼ばれる機器の冷却性能の制約から, ビームのパルス長を 1 ms に制限していました. 将来, 最終段階の 9 MeV までの加速を担う超伝導 RF (SRF) 加速器をビームラインに組み込む前に, RFQによるさらに長いパルス長のビーム加速試験を行い, RFQの動作とビームロスの検証を行うこと, かつ定常ビームを受け止めることができる大電力ビームダンプのコンディショニングや, ビームダンプまでビームを輸送する高エネルギービーム輸送系 (HEBT) の動作試験を行うことが重要と判断し, SRF を置き換える新設ビーム輸送系（MEBT extension line, MEL）を含む RFQ 長パルス試験用ビームラインを整備する作業を昨年 8 月から進めてきました. この新設ビーム輸送系は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の協力の下, ビームダイナミクスシミュレーションを含め量研主体で新しく設計され, 日本国内で製作されました. 2020 年 3 月までに, 新設ビーム輸送系を含む, RFQ の長パルス試験に必要な全ての機器の据付が完了し, 大電力/長パルスビーム試験用のビームラインが完成しました（**図 4**, **図 5**）. 現在, 全ての加速器機器と中央制御システムの連係動作を確認する, 統合試験を実施しています.

今後は, 定常ビーム加速に向けた試験を精力的に実施していく予定です.

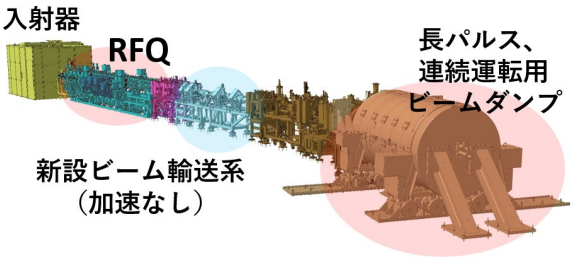

図 4 完成した RFQ 大電力/長パルス試験用ビームラインの構成図.

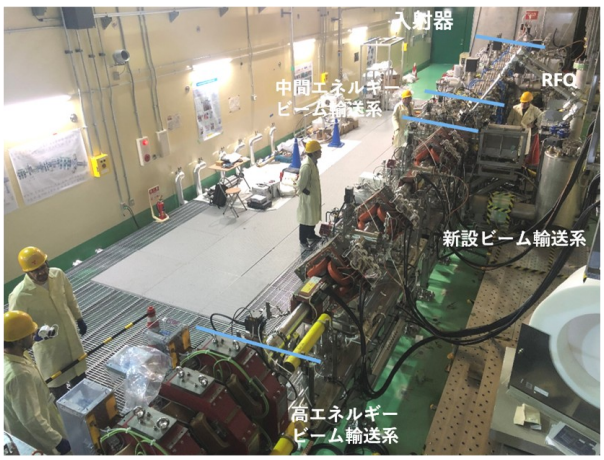

図 5 新設したビーム輸送系を含む IFMIF 原型加速器の写真.

5. 第 25 回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の開催

2020年3月 18 日～19 日に六ヶ所核融合研究所において, 第 25 回 IFMIF/EVEDA 事業委員会が開催されました. 今回は新型コロナウイルス感染拡大防止のための措置として, 欧州および国内委員はビデオ参加となり, 時差を考慮して, 15:00から 19:30までの開催となりました. 欧州側が委員 3 名と専門家 5 名, 日本側が議長を含む委員 3 名と専門家 4 名, これに事業長及び事業チーム員他 26 名の計 42 名が参加しました（**図 6**）. 今回の事業委員会では, 主に 2019年作業計画に基づき IFMIF/EVEDA 事業の進捗状況を確認し, 2019 年 年次報告を審議するとともに, 3 月 2 日に日欧政府により署名された本年 4 月から新たに開始する BA活動フェーズIIに関する共同宣言に基づき, フェーズ II の事業計画, および 2020 年作業計画について審議しました. また, 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, フェーズIIの事業計画, 2020年作業計画及び2019年 年次報告を承認のため BA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.

事業委員会での主な報告事項は, 以下のとおりです.

1）2019 年 7 月に高周波四重極線形加速器（RFQ）を用

図 6 第 25 回 IFMIF/EVEDA 事業委員会におけるビデオ会議による参加者.

いて事業の目標の一つであるエネルギー5 MeVで電流125 mAの加速を達成した後，長パルス実験のための整備を進め，入射器からRFQ，中間エネルギー輸送系，計測プレート，高エネルギー輸送系，大電力ビームダンプまで接続された加速器系が完成しBA活動フェーズIのマイルストーンを達成しました．4月から開始されるBAフェーズIIにおいては，先ずRFQの長パルス加速の実証を行い，その後，RFQの下流に接続されるSRF加速器の組立を進め，最終目標である9 MeV，125 mAのビーム加速試験を実施する予定です．

2) 入射器の連続運転試験を行い，長寿命のマイクロ波イオン源を用いた入射器では世界最高値となる100 keV / 140 mAの重陽子ビームの連続出力に成功しました．

6. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

量子科学技術研究開発機構は，2007年6月にJT-60SA計画を開始して以降，2008年10月に最初の機器（ポロイダルコイル超伝導撚線）の製作を開始し，2013年1月に本体室での機器（クライオスタットの底部）組立を開始するなど，機器製作と組立を着実に進めてきました．その過程ではいくつかの技術的課題も発生しましたが，その都度EUと協力して課題を解決してきました．その成果として，この度JT-60SA本体の組立が完了しました．

組立の最終段階では，超伝導コイルの冷却に使用する液体ヘリウムの流量制御に利用されるバルブ類が収められたバルブボックス(VB)や超伝導コイルと常温の電源線とを接続する高温超伝導電流リードが収められたコイルターミナルボックス（CTB）（**図7**），超伝導コイルをJT-60SA周辺の高温（室温ですら高温）環境から隔離する断熱機構の内，残りの部分であった上部サーマルシールド（TCTS）（**図8**）が次々と設置されました．そして，

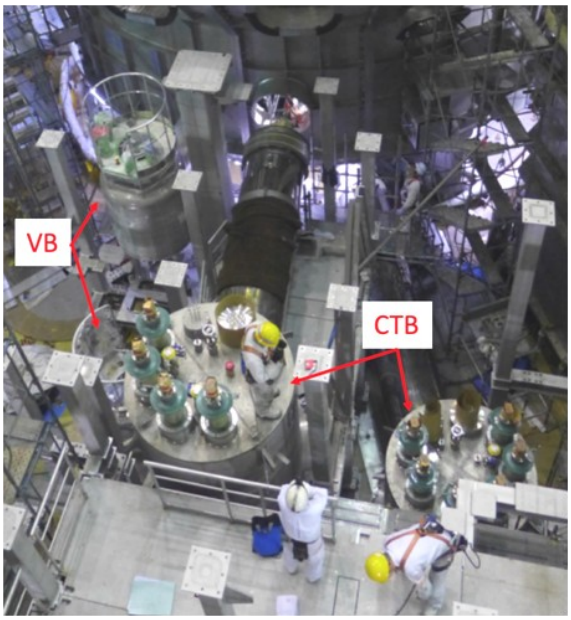

図7　設置中のバルブボックス(VB)とコイルターミナルボックス（CTB）．

2020年3月末にクライオスタット上蓋部（**図9**）が設置され，JT-60SA本体の組立が完了しました（**図10**）．

今後，JT-60SA装置の真空排気や超伝導コイル冷却など，順を追って各機器の健全性を確認しつつ動作させて，2020年秋ごろ最初のプラズマを着火する，統合試験運転を開始する予定です．

（量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門）

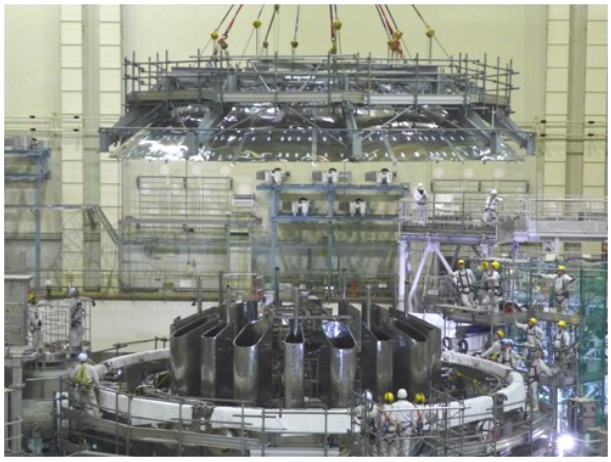

図8　上部サーマルシールド設置の様子．

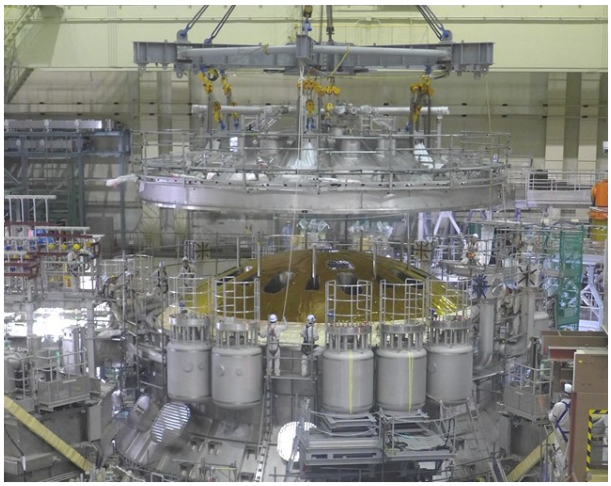

図9　クライオスタット上蓋部設置の様子．

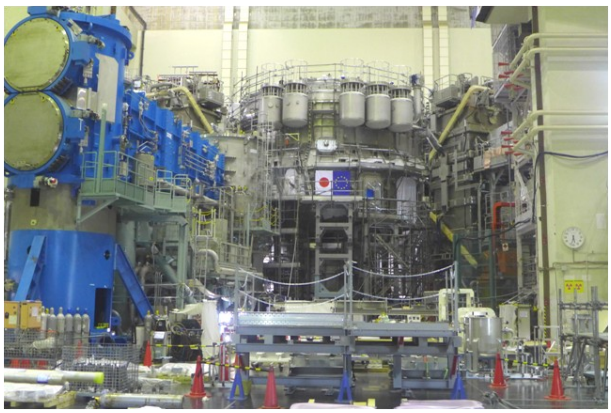

図10　完成したJT-60SA本体．

インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（86）

1. ITER 遠隔実験センターの BA フェーズ II 活動の計画

今年度より BA 活動（核融合エネルギーの早期実現に向けた日欧共同事業として進めている幅広いアプローチ活動）のフェーズⅡが開始されました（2020年4月～2025年3月）. 現在, 青森県六ヶ所村にある国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）においては, フェーズⅡ活動での主要課題の 1 つである ITER 遠隔実験センター（REC）活動が展開されています. フェーズⅡ活動では, フェーズⅠ活動での遠隔実験技術に関する各種検証試験の成功を踏まえ, ITER 機構（IO）との協力, IFMIF 原型加速器（LIPAc）との協力, JT-60SA との協力の 3 つを柱とした活動を計画しています.

ITER との協力では, 昨年 11 月に成立した ITER と BA の協力合意に基づき, IO の 制御・データ収集系（CODAC）セクションとの共同研究を開始する計画です. 2018 年 6 月, 11 月, 2019 年 6 月と会合を重ね, 2020 年 1 月に六ヶ所でキックオフ会合を行いました. 現在双方で合意文書の準備を進める一方, 技術的な検討と準備も進めています. 米西海岸と並び最も ITERから遠い不利な位置にいる日本の研究者が, 活発に ITER 実験に参加して装置をフル活用した研究ができるよう, ITER 主制御室にいるのと変わらない実験参加環境を提供することを目指して双方のシステム構築と改良, 実証試験を行います. 実験時の放電条件提案, 主制御室との円滑なコミュニケーション等の機能に加え, ITER 実験・運転のライブモニタリング, 全ての計測・プラントデータの六ヶ所サイトへの高速転送と大規模ストレージへの保存を行う予定です. 保存した ITER 実験データベースおよびライブデータモニタリングサーバへの国内からのアクセス・データ解析, 解析に利用するスパコン等計算資源のスムーズな利用等を実現出来れば, 国内研究機関・大学研究者, 納入機器に関わる企業の方等が気軽に ITERデータにアクセスして研究やモニターを行えるようになると考えています（**図 1**）. フェーズⅡ期間中に試験システムを構築する予定ですので, ITER 納入機器のコミッショニング等への活用も視野に入れた活動を考えています. 既に IO と REC の間の広帯域専用回線は 2020 年 5 月に開通し, 今後 CODAC が開発した遠隔実験参加ツールのテスト, ITER 実験データベース（DB）レプリケーション試験, ライブデータ転送・表示試験等を順次実施していく計画です.

REC と IFMIF 原型加速器との協力（LIPAc-REC）は, コロナウイルスの世界的流行の影響により欧州側研究者・技術者の来日が困難になったことから, IFMIF プロジェクト推進に不可欠な要素として, 日欧で優先度を上げた精力的な取り組みが始まっています. 10 月のビーム実験再開に向け, まずは欧州側とのデータ共有システムの構築が進められています. 遠隔実験技術において常に重要な課題は利便性とセキュリティの両立ですが, LIPAc-REC では, データダイオードと呼ばれる一方向のみの通信が可能な仕組みを用いて, 加速器計測データを閉鎖ネットワークから外部へと送出する一方, 外部からの悪意ある侵入を確実に防ぐデータ共有システムの構築を進めています. また JT-60SA との協力についても今後検討を進めていく計画です.

ウィズコロナの時代の実験研究推進に有益なツールとして, 国内の核融合研究者・技術者の皆さんに実験装置とそのデータを最大限活用していただける REC となるよう, フェーズ II での開発計画を進めていきたいと考えています.

2. IFMIF/EVEDA 原型加速器 RFQ の大電力/長パルスビーム試験準備の進展

量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所では, BA 活動の一環として, 国際核融合材料照射施設（IFMIF）原型加速器の研究開発を進めています. この IFMIF 原型加速器は, IFMIF の原理実証を目的として, 大電流の重陽子ビームの加速実証を行うための加速器です. 高周波四重極線形加速器（RFQ）による長いパルスのビーム加速試験を行うため, RFQ と定常ビームを受け止めることができる大電力ビームダンプを繋ぐ RFQ 長パルス試験用ビームラインの整備を進めてきました. 2020 年 3 月までに全ての機器の据付が完了し（**図 2**）, 加速器機器と中央制御システムの連係動作を確認するための統合試験を開

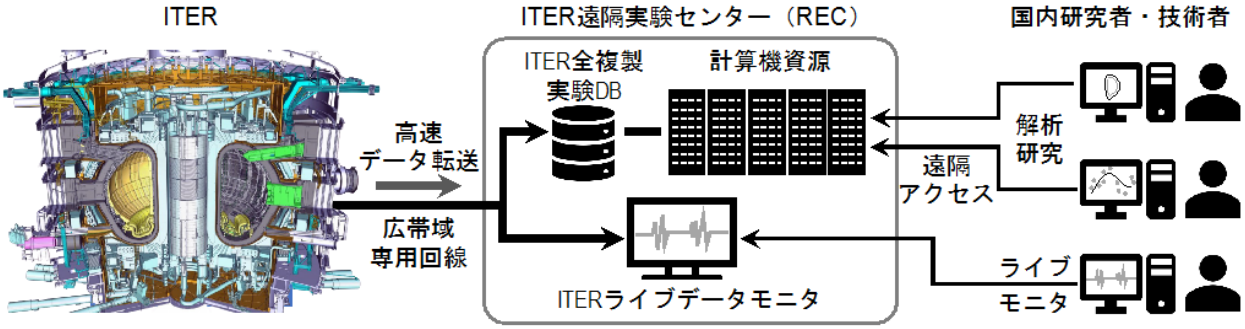

図 1 国内からの ITER データへのアクセス；ITER 全実験データベースへのアクセス及びデータ解析, ITER 実験・運転状態モニタリング.

始しました．しかしながら，3月中頃からの世界的な新型コロナウイルスの大流行によって，欧州研究機関からの専門家の来日が相次いで取りやめとなり，また，六ヶ所に長期滞在して高エネルギービーム輸送系（HEBT）の統合試験を担当していたスペインCIEMAT研究所の専門家が早期帰国を余儀なくされたため，調整に大幅な遅れが生じました．4月後半からは六ヶ所研の職員も原則在宅勤務となり，大規模流行に伴う研究所の完全閉鎖に

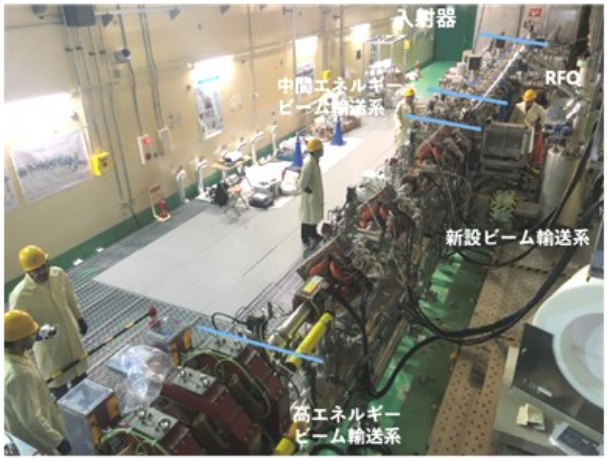

図2　新設したビーム輸送系を含むIFMIF/EVEDA原型加速器．

図3　CIEMATとのリモート接続によるHEBT試験にスペインから参加している専門家．

図4　CIEMATとのリモート接続によるHEBT試験に現地（六ヶ所研）で対応している試験担当者．

備え，真空排気装置や冷却水装置等の主要機器を停止して，保全に努めていましたが，5月14日に青森県の非常事態宣言が解除されたことを受け，通常勤務体制に移行し，徐々に現場作業を再開しました．

遅れていたHEBTの統合試験を少しでも進めるため，4月後半からスペインの専門家とインターネット経由でリモート接続し，技術的な支援を得ながらの統合試験を実施しています（**図3，4**）．CIEMAT研究所のあるスペイン マドリッドは都市のロックダウンに伴って研究所が閉鎖されており，専門家は自宅から遠隔作業を行っています．また，時差の関係から，1日3時間程度の限られた時間ではありますが，HEBTの機器と中央制御システムとの連携動作を一つずつ確認し，これまでに無事真空システムの試験を完了，電磁石の最終動作試験を7月中旬に開始しました．現在，当初計画より数か月間の遅れが生じているものの，10月以降のビーム試験を開始できるよう，日欧のスタッフが一丸となって準備を進めています．

3. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

那珂核融合研究所では，2020年3月に組立が完了したJT-60SA装置において，統合試験運転を実施しています．プラズマを用いた試験運転では，大型超伝導トカマク装置においては最大となるプラズマ電流（2.5 MA程度）のダイバータプラズマの長時間放電を実証することを目標に掲げ，(i)電子サイクロトロン波によるプラズマ対向壁洗浄（ECWC）の最適化，(ii)安定したプラズマ着火条件の確立，(iii)プラズマ平衡制御の実証，(iv)MHDとディスラプションを回避する運転領域の検討，(v)プラズマ放電シナリオ開発，の5つの項目を実施します．量研では，これまでに各項目の試験主担当が核となり，試験内容や放電プランの策定，プラズマ制御ロジックの開発，シミュレーションコードを用いたプラズマ放電シナリオや平衡制御の妥当性の検証，JT-60やTST-2等のプラズマ着火の調査とJT-60SAへの適用検討等を行ってきました．

統合試験運転には欧州からも20名程度の研究者が参

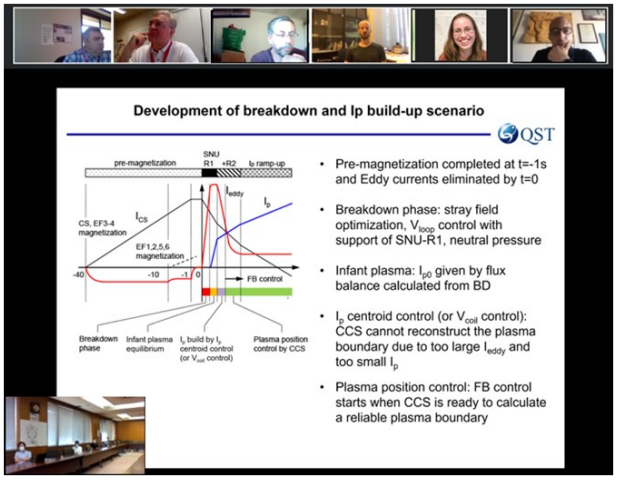

図5　TV会議で開催した第1回プラズマチーム会合の様子．

加する予定でしたが,新型コロナウイルス感染症に関わる出入国制限のため,欧州研究者の来日は見通せていません. そのような状況でも, 統合試験運転に向けた上記5つの検討状況について日欧で共有するために, 統合試験運転に参加する研究者全員が参加できる「プラズマチーム会合」を TV 会議にて定期的に開催することにしました. 初回会合は, 2020 年 6 月 23–25 日に開催し, 欧州研究者 19 名, 量研 16 名の合計 35 名の研究者が参加しました (**図 5**). 会合の冒頭で, 統合試験運転の目標, スケジュール, プラズマチームの体制, JT-60SA 運転体制との関係について紹介されました. プラズマチームでは, 上記 5 つの項目の試験主担当が中心となり, 試験計画の策定と実施, 試験結果の評価とまとめを行います. プラズマチーム員は, 各試験の目的が遂行できるよう, データ解析や評価といったサポートを一丸となって行います. 冒頭の後, 上記 5 つの項目について, 試験主担当より試験の目的, 試験内容の概要, 今までの準備状況の報告がされました. 欧州からは各項目においてプラズマ制御ロジックや放電条件などの多くの質問や制御法についてより詳細な説明の要望があり, JT-60SA の初プラズマと統合試験運転の注目度の高さが伺えました. 本会合により, 日欧で統合試験運転の達成目標やその手順を共有することができました. 定期的に会合を開催することで, より実践的な内容について情報共有や意見交換を密接に行い, 統合試験運転の目標達成を目指します.

(量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門)

インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（87）

1. BAフェーズIIにおける原型炉設計活動の計画

2011年4月から2020年3月まで実施された日欧共同事業である BA 活動の成功に基づいて，2020 年 4 月から2025年3月までBA活動のフェーズIIが継続されることになりました．原型炉概念設計活動については，これまでの予備概念設計から本格的な概念設計を実施することになります．

日本と欧州の原型炉研究開発ロードマップでは，概念設計活動，工学設計活動，建設段階への移行について，ほぼ同じタイムスケジュールになっています． 一方で，日本の原型炉は定常炉であるのに対して欧州はパルス炉など，日欧の目指している原型炉概念には違いがありますが，想定している技術基盤には共通点が多くあります．そのため，フェーズIにおいて実施された原型炉の予備概念設計活動において，8つの日欧共通の設計タスクが特定されました（**表 1**）．フェーズIIの活動では，それらの設計タスクに対して日欧から責任者を指名して連携を強化しながら，日欧共同設計作業を実施する計画です．また，ITERやJT-60SAとの協力や情報交換を推進する予定です．さらに，BA原型炉設計活動と並行して実施されている国内の原型炉設計合同特別チーム活動との連携も強化し，成果を適切に反映していきたいと考えています．

表 1 BA 活動フェーズⅡの原型炉設計タスク．

設計タスク	サブタスク
(1) プラズマシナリオ開発	(1-1) 加熱・電流駆動要件の特定 (1-2) 過渡現象を含めたプラズマ対向機器への熱負荷評価
(2) ダイバータと熱排出	(2-1) シミュレーションによる非接触プラズマと熱負荷の評価 (2-2) 粒子排出の評価と設計の最適化 (2-3) ターゲットユニットとカセット設計の共通設計基準と方策
(3) 増殖ブランケットとトリチウムの抽出と除去	(3-1) 増殖ブランケット概念設計 (3-2) トリチウム回収系，冷却材純化系，トカマク排気処理系 (3-3) 動的挙動トリチウムサイクルシミュレーターの開発
(4) 遠隔保守	(4-1) 遠隔保守設計，安全性，最適化のための工学機器の特定
(5) 安全性	(5-1) 放射性ソースタームと可動エネルギー (5-2) 起因事象と事故シーケンス (5-3) 参照事故シーケンスに対する影響緩和系 (5-4) 廃棄物の特性評価と管理方策 (5-5) 許認可における制約の評価
(6) システムコード	(6-1) システムコードモデルの更新 (6-2) 設計点の評価
(7) 超伝導マグネット	(7-1) TFコイル巻線部の設計評価 (7-2) TFコイル巻線部設計の選択における工学課題の同定
(8) 周辺機器とプラントシステム	(8-1) システム系統図 (8-2) 主要プラント構成機器の仕様 (8-3) サイト配置図

2. IFERC-CSCスパコンを用いたシミュレーション研究

BA フェーズ II の活動として，IFERC-CSC のスーパーコンピュータ JFRS-1を利用した日欧のシミュレーション研究が行われています．新型コロナウイルスの感染拡大により，日欧双方において在宅勤務への移行や外出自粛など生活には様々な影響が出ている一方，JFRS-1の運用に影響はありませんでした．また，以前の Helios 計算機と違いJFRS-1は研究室以外からもアクセスができるシステムとなっていることが幸いし，在宅勤務でも利用され，非常に高い利用率を維持しています（**図 1**）．

2020年度にBA活動の下で実施されているシミュレーション研究は27プロジェクトであり，このうち日本の研究者が代表となっているものが7プロジェクト，欧州の研究者が代表となっているものが20プロジェクトとなっています．

日本側が実施する上記7プロジェクトはそれぞれ，ダイバータ研究（プロジェクト名： MISONIC，SSDEMO），乱流輸送研究（GGHB），ELM 研究（TOKEDGE），ディスラプション研究(INDEX)，高エネルギー粒子駆動MHD研究（EPTRANS，HSEPDI）です．MISONIC では量研で開発されている統合ダイバータコードSONICを用いており，複数種の不純物入射を考慮し，JT-60SA プラズマのシミュレーション，既存の実験のシミュレーション解析や欧州のSOLPS-ITERコードとの比較などを行っています．SSDEMO では BA フェーズ II の原型炉設計活動に関連して，日本の原型炉のダイバータ設計に向け SONIC コードを用いた非接触ダイバータにおける粒子及びヘリウム排気の評価を進めると共に，SONIC と SOLPS とのベンチマークの最初のターゲットとして排出パワーが比較的低い欧州原型炉ダイバータにおいて発生する非接触プ

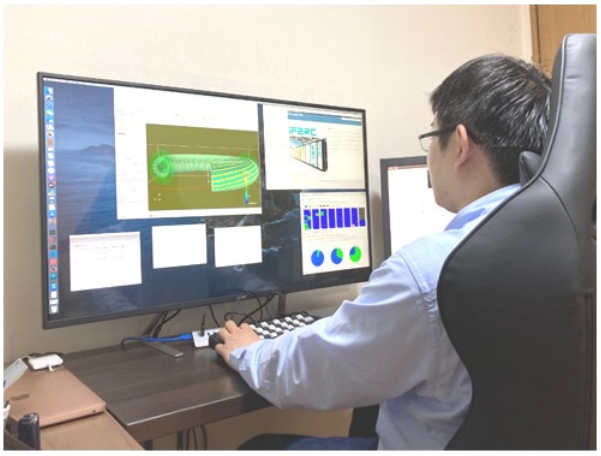

図 1 在宅からの JFRS-1 利用の様子．

ラズマの計算結果の比較を開始しました．また，GGHBでは大域的ジャイロ運動論コードGKNETを用いて，自発的な内部輸送障壁形成についての研究と，JT-60SAの高ベータプラズマに向けて電磁的な微視的不安定性及びそれに関連した乱流輸送の研究を行っており，特に複数粒子種間の衝突や高速イオンの影響を評価しています．続いて，TOKEDGEではITERにおけるELMの動特性の理解とELM制御手法の確立に向けて，日米欧で開発しているBOUT++コードを非共鳴・長波長・短波長の不安定性を同時に扱えるように拡張し，金属壁装置のELMを模擬したシミュレーション研究を進めようとしています．INDEXではストキャスティック磁場中の捕捉粒子及び逃走電子の加速・損失機構，逃走電子ビームと低温プラズマの相互作用における中性粒子の役割の解明，ITER SPI装置最適化のためのペレット粉砕入射の統合シミュレーションなど，ディスラプションに関連した諸現象のシミュレーション研究を行っています．EPTRANSでは欧州のJET装置で予定されているDT実験に向けて，これを支援するためのシミュレーションを核融合研で開発された粒子・MHDハイブリッドコードMEGAを用いて進めています．HSEPDIではMEGAコードを用いて高速イオンとMHD不安定性の相互作用についてトカマクとLHDとの比較や，ITERで重要なICRF加熱をコードに導入し，アルヴェン固有モードの時間発展に対するICRF加熱の効果などについての研究を行っています．

日本側では，BAフェーズII活動が開始される以前よりJFRS-1を利用していたため，すべてのプロジェクトにおいてJFRS-1の利用が進んでいます．一方，欧州側プロジェクトについては新型コロナウイルスの影響が欧州で大きかったことや，コードのJFRS-1への移植や動作テストが必要であることから，現時点では本格化していないプロジェクトもありますが，年度後半にかけては利用が本格化するものと予想されます．また，欧州側のGPU搭載スパコンであるMarconi100（総理論性能 約30PF）の計算資源の一部がBA活動のために提供されます．これは通常のCPU搭載の計算機からなるJFRS-1を補完するもので，特に機械学習やAI開発などに適しています．このMarconi100を利用したシミュレーション研究も実施し，日欧で核融合分野におけるGPUの活用について技術交流を行っていく予定です．

3. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

那珂核融合研究所では，今年3月末にJT-60SAのクライオスタット上蓋部が設置され，JT-60SA本体の組立が完了しました．その後，超伝導機器の一部や配管等の関連機器の組立てを進めてきました．そして，共通架台，冷媒配管，クライオライン，電子サイクロトロン加熱用導波管などの組立てが完了しました（**図2**）．

関連機器の組立てと並行して，個別部ごとのリーク試験や真空排気装置の試運転などの統合試験運転を進めてきましたが，関連機器の組立てが完了したことにより，JT-60SA装置の真空排気や超伝導コイル冷却など，順を追って各機器の健全性を確認しています．

また，2008年にJT-60Uの運転が終了して以降12年ぶりの本格的なトカマク装置の運転再開になりますので，プラズマを用いた統合試験運転の準備の一環として，各種インターロックの動作試験やプラズマ運転を模擬したシーケンスを流して統括制御設備，本体設備，加熱設備，計測設備などの協調動作を確認する統合リンケージ試験を実施し，各設備間の通信やデータ収集が正常に行えることを確認しました．

引き続き，新型コロナウイルス感染への対策を取りつつ，日欧で協力して，初プラズマを目指します．

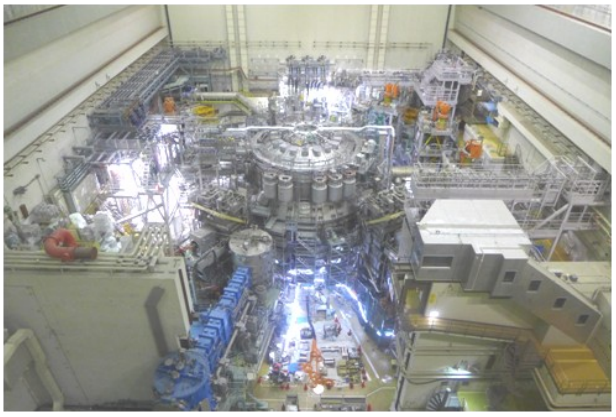

図2　関連機器の組立てが完了したJT-60SA.

（量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門）

インフォメーション

幅広いアプローチ活動だより（88）

1. 第 27 回 IFERC 事業委員会の開催

2020年10月21日に青森県六ヶ所村の量子科学技術研究開発機構（量研）六ヶ所核融合研究所において，第27回IFERC事業委員会が開催されました．今回は今年度から開始されたBAフェーズⅡでの最初の事業委員会であり，議長をはじめ，専門家及び事業長ら数名が新しい顔ぶれとなりました．日本側からは飛田議長を含む委員3名と専門家14名，欧州側からは委員2名と専門家7名，これにClement事業長及び中島副事業長を含む事業チーム員4名と書記1名の計31名が参加しました．尚，昨今の新型コロナウイルス(COVID-19)の影響による渡航制限のため，大多数がテレビ会議形式での参加となりました（**図1**）．今回の事業委員会では，BAフェーズⅡにおける各活動（原型炉設計，原型炉R&D，ITER遠隔実験センター，計算機シミュレーションセンター)について，2020年の活動状況が報告されました．また，新たに設立されたIFERC統合事業チームの構成，及びIFERC事業2021年作業計画が審議され，第26回BA運営委員会（2020年12月3日開催予定）に提出して承認を求めることが同意されました．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，BAフェーズⅠにおいて実施された原型炉の予備概念設計活動の中から計8テーマ（プラズマシナリオ開発，ダイバータと熱排出，安全性など）が日欧共通の設計タスクとして特定され，それぞれのタスクでの検討状況が報告されました．原型炉R&D活動においても同様に再編成が実施され，計4テーマ（トリチウム技術研究開発，原型炉コンポーネント用ブランケット構造材料開発，増殖機能材への中性子照射実験，材料腐食データベース開発）が日欧共通タスクとして特定され，各タスクでの検討状況が報告されました．ITER遠隔実験センター（REC）活動では，BAフェーズⅠでの遠隔実験技術に関する各種検証試験の成功に基づいて，ITER計画，IFMIF/EVEDA事業，JT-60SAとの協力（リモートによる実験参加や保守支援技術の開発）を柱とした活動を展開しており，中でもREC－ITER機構間の広帯域専用回線が2020年5月に開通したことが報告されました．計算機シミュレーションセンター（CSC）活動においても，ITER計画，JT-60SA，IFMIF/EVEDA事業の支援に向けた活動を展開しており，主要な計算機シミュレーションプロジェクトの進展状況が報告されました．その他，現時点でCOVID-19によるIFERC事業全体のスケジュールへの影響は小さいものであり，BAフェーズⅡにおける同事業が順調に立ち上がり，推進されたことが報告されました．

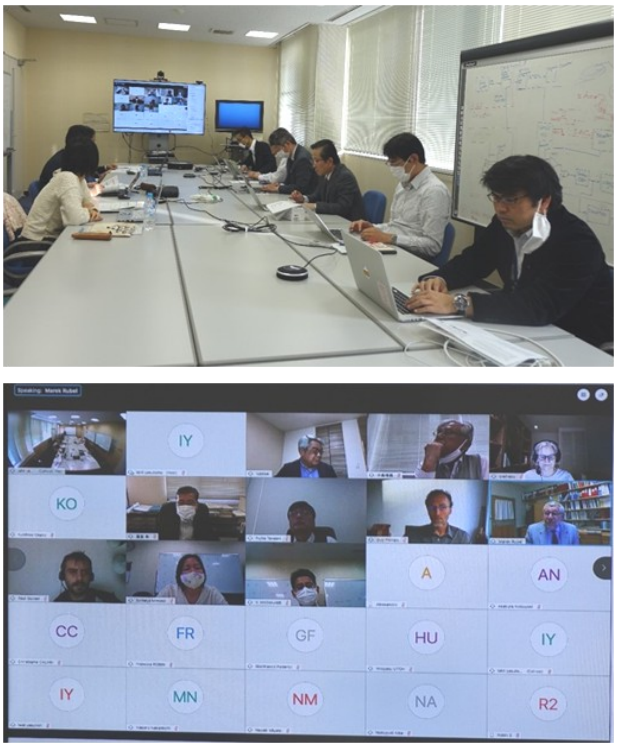

図1　第27回IFERC事業委員会における現地（上）及びテレビ会議（下）での参加者．

次回のIFERC事業委員会は，2021年3月18－19日に青森県六ヶ所村の量研六ヶ所核融合研究所において開催される予定です．

2. 第 26 回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の開催

2020年10月22日－23日に量研六ヶ所核融合研究所において，第26回IFMIF/EVEDA事業委員会が開催されました．COVID-19感染拡大防止のための措置として，前回と同様，欧州および国内委員はテレビ会議形式での参加を基本としましたが，国内委員や専門家で出席可能な方は現地でご参加いただきました．欧州側が委員3名と専門家5名，日本側が議長を含む委員3名と専門家5名，これに事業長及び事業チーム員他20名の計37名が参加しました（**図2**）．今回の事業委員会では，2020年作業計画に基づきIFMIF/EVEDA事業の進捗状況を確認するとともに，2021年作業計画について審議しました．また，技術的な勧告をまとめるとともに，作業計画案や事業計画案の更新をBA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．事業委員会での主な報告事項は，以下のとおりです．

1) COVID-19の発生が現場の活動に重大な影響を与えました．スタッフの在宅勤務，多くの構成装置の停止により現場での作業が困難となりましたが，運用手順書の準備や現場活動の調整など，在宅でもでき，再開後の作業効率化が期待できる業務を進めました．また，移動の制限による欧州専門家の不足を補うために，QSTスタッフに訓練を実施してカバーできるようにするなど，影響を最小限に抑える努力を行いました．

2) LIPAcのコミッショニング活動では，高周波四重極線形加速器(RFQ)を用いた長パルス運転(フェーズB＋)

図 2　第 26 回 IFMIF/EVEDA 事業委員会における現地（上）及びテレビ会議（下）での参加者.

に向け，高エネルギービーム輸送系（HEBT）の電磁石，真空システムの動作試験及び制御系の統合試験，大電力のビームを受けるためのダンプの冷却システムの動作試験などの準備を進めました. フェーズB＋の条件で運転するのに必要な施設検査に備えるため，入射器では，50%の高繰り返し率で 100 m A の重陽子を加速し，受検に必要な条件を達成しました. また，RFQ のコンディショニングを 7 月に再開し，7 月末には重陽子の加速に必要な電力条件において，繰り返し率を 8.5%まで増加することができました.

3) COVID-19 により欧州の研究者・技術者の来訪が容易でない状況を想定し，欧州側に LIPAc の測定・実験データを転送し，それを用いて欧州から遠隔でコンディショニングやビーム試験に参加できるためのシステムの構築を行いました. 六ヶ所研内でのサーバー間の転送試験の後，10 月 21 日に六ヶ所研から欧州にデータを送信する試験に成功しました.

3. EU への LIPAc における測定・実験データ転送システムの構築

上述のように，IFMIF/EVEDA 事業では COVID-19 の世界的な流行により，これまで共同で IFMIF 原型加速器（LIPAc）の調整・試験を行ってきた欧州の研究者・技術者の来日が困難となり，六ヶ所研における活動にも大きな影響を与えています. これは単に現場で実験やデータ解析を行う専門家の人員不足ということに留まりません. これまでの LIPAc の試験では，日欧ほぼ同数ずつの

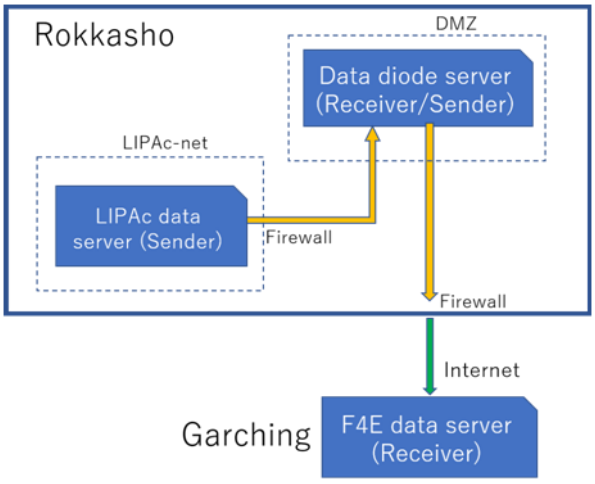

図 3　欧州への LIPAc 測定・実験データ転送システムの概念図.

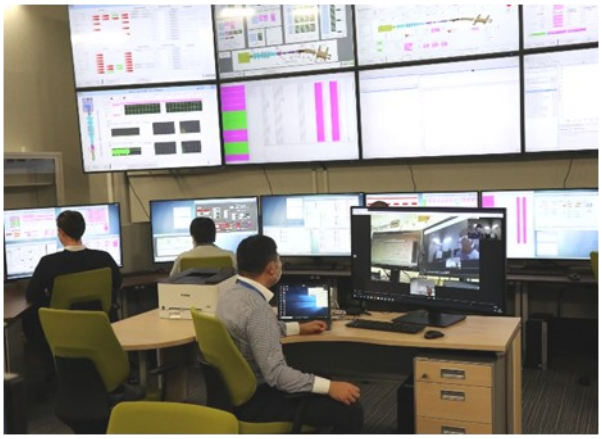

図 4　新設した遠隔実験室における欧州への LIPAc 実験データ転送試験の様子.

研究者が対等な立場で参加し，お互いに様々な役割を担いながら，アイディアや意見を出し合い，調整・試験を進めてきました. 現在，このようなプロジェクトの進め方自体が困難となり，物理的に六ヶ所に来所することができない状況であっても日欧の共同チームが一体的に調整・試験活動を共有するための仕組みの整備が急務となっています.

以前から，六ヶ所研ではインターネットを介して欧州に LIPAc の測定・実験データを転送し，実験に参加したりデータ解析を実施したりするためのシステムの構築を行っていましたが，COVID-19 流行が本格的となった 4 月以降，データ転送・共有タスクフォースを立ち上げ，このシステムの整備に精力的に取り組んできました. **図 3** に本データ転送システムの概念図を示します. 加速器の制御系ネットワークをそのままインターネットに接続することはセキュリティ上の懸念が大きく，認められません. 私たちは，インターネットからアクセス可能な DMZ にデータ転送サーバを置き，複数のデータ転送サーバを経由し，かつ，一方向のアクセス（加速器ネットワークから DMZ へ，DMZ から欧州へ）のみを許可することで，安全にデータを転送する仕組みを構築しまし

た．10 月 21 日にドイツガルヒンの Fusion for Energy（F4E）のオフィスに設置したデータ受信用サーバとの間でのデータ転送試験を実施し，初めてのデータ転送に成功しました（**図 4**）．今後，本システムを用いることで，コロナ禍においてもより円滑に日欧での共同実験を進められると期待しています．

4. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

量研那珂核融合研究所では，関連機器の組立てが完了した JT-60SA の統合試験運転を日欧で協力して進めており，真空容器の排気を開始しました（**図 5**）．真空度は順調に下がり，真空容器 260 ヵ所，断熱容器であるクライオスタット 270 ヵ所，計 530 ヵ所のリークテストを実施し，リークがないことを確認しました．また，ヘリウム冷媒系統の配管にもリークがないことを確認しました．

リークテストに引き続き，真空容器を 50℃に維持するベーキングを開始しました．超伝導コイルを冷却することに伴い真空容器の温度が低下することを防ぐため，JT-60SA の運転中は真空容器を 50℃に維持します．

真空容器を 50℃に維持するベーキング開始の翌日から超伝導コイルの冷却も進めています．超伝導コイルに温度差が生じると，熱応力によって機器が破損する恐れがありますので，日欧の専門家が各部の温度変化を確認しながら慎重に冷却を進めています．

今後，超伝導コイルの冷却が進み，定格温度に到達したら，真空容器内からのガス放出を促進すべく真空容器を 200℃で維持するベーキング試験や超伝導コイルに電流を流す通電試験などの試験を段階的に進めます．

引き続き，コロナウイルス感染への対策を取りつつ，日欧で協力して，初プラズマを目指します．

図 5　真空容器の排気開始時の中央制御室（上）と真空度を表示した大画面モニタ（下）．

（量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門）