

幅広いアプローチ活動だより (107)

1. 第37回 BA 原型炉設計活動タスク会合の開催

幅広いアプローチ活動 (BA) の国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) 事業の原型炉設計活動 (DDA) では、2023年11月7、8日に第37回 DDA タスク会合が開催され、5つの設計タスク (プラズマシナリオ開発、ダイバータと熱排出、安全性等) の進捗が報告されました (図1)。日欧双方において、ブランケット設計を共同で実施することの重要性が改めて強調されるとともに、トリチウムインベントリ計算についても今後共同で実施することが提案されました。また、2025年2月までとなっている現在の調達取り決め期間を延長する際に各タスクにおいてどのような活動にさらに注力すべきかの検討を開始しました。先行して議論が進んでいるブランケット設計 (タスク3) の検討状況を共有し、原型炉 R&D 活動におけるタスクも含めて重複や協力して活動すべきトピックが出てきていることから、2024年3月に開催される予定の DDA 技術調整会合までに関係者間でこれらを整理することとしました。また、そのほかのタスクについても欧州から見直し案が提示され、日本側関係者も含めた調整を技術調整会合までに進めることとなりました。

2. BA フェーズ II における原型炉 R&D 活動の進展

BA 活動フェーズ II における原型炉 R&D 活動では、欧州と連携して、4つのトピックスについて課題解決に向けた研究開発を進めております。

トリチウム技術開発 (タスク1) においては、原型炉燃料サイクル内トリチウム挙動とトリチウム滞留量・必要初期トリチウム装荷量を評価するトリチウムサイクルシミュレーターの開発に向けて、トリチウム保持量の大きい水素同位体分離系についてのモデリングコードを整理しました。炉内のトリチウム蓄積モデリングに向けては、英国 JET 装置の ITER-Like Wall 実験キャンペーンで使用されたバルクタンングステンダイバータ試料に対し、欧州から2名の共同研究者が量研六ヶ所研究所に来所さ

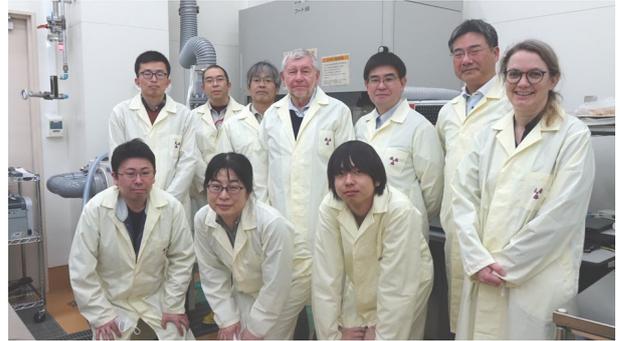


図2 2023年12月のJET ITER-Like Wall分析に参加した日欧の関係者。

れ、原型炉 R&D 棟にて日本の研究者と連携して分析を行いました (図2)。タンングステン材表面近傍の残留トリチウム量の定量評価に関する新しい分析手法を実施し、初期データの取得に成功しました。これら分析では、茨城大学の学生らによる主体的な貢献があり、若手育成にも寄与しました。

構造材料開発 (タスク2) では、現在、ブランケット構造材料の共通データベース整備を継続し、例えば低放射化フェライト鋼 F82H の引張強度における中性子照射影響の評価を進めております。新たに照射の影響を無視できる臨界条件を開発中のベイズ予測モデルに組み込み、統計的信頼性を持つ設計指標を提示しました。また、クロムジルコニウム銅合金に関する研究では、初めて 5 dpa*1 までの中性子照射試験データを取得し、同材料の優れた耐照射性を初めて明らかにしました。同時に、核融合中性子照射データベースの整備に向けて、材料モデリング・シミュレーション研究を進めています。例えば、被照射材料内部における空孔の形成挙動に対するヘリウム効果に関する実験結果を元に、同効果をより精緻に再現可能な改良モデルを構築しました。また、大学との共同研究を通じて、構造設計における電磁力問題、多軸負荷問題、脆性・延性破壊ルール、予寿命診断、非破壊検査技術などに焦点を当てた研究開発も進めています。

増殖機能材料開発 (タスク3) では、ベルギーの原子炉 BR2 での照射後試験用の実験と、カザフスタンの原子炉 WWR-K でのトリチウム放出試験を新たに計画し、具体的には照射試験体の概念検討や安全性評価、照射リグ*2の製作を進めています。同時に、先進中性子増倍材であるベリリウム金属間化合物 (ベリライド) ブロックの焼結条件を最適化し、これまでに焼結温度 1200°C 程度で理論密度に近いベリライドを製造することに成功しま



図1 第37回 BA 原型炉設計活動タスク会合の様子 (2023年11月、Web会議にて開催)。

*1 dpa (displacements-per-atom) : 原子あたりの弾き出し数であり、放射線の照射量の単位。

*2 照射リグ : 多重に計装を施した被照射材料をひとまとめにして収納容器に格納したもの。

した [1]. 機械的特性評価では, 例えば 1200°C で焼結したベリライドの引張強度が 1050°C で焼結した同材料の引張強度よりも高くなる傾向があることを明らかにし, この成果をもとに空孔率と最小引張強度の関係を実験的に整理しました. また, 常温試験だけでなく, 320°C, 640°C などの高温での特性変化を系統的に調査し, ベリライドの特性データベース構築に寄与しました.

材料腐食データベース開発 (タスク 4) では, 低放射化フェライト鋼 F82H 及びダイバータ用銅合金を対象に, 高温高圧水による腐食データベースの拡充を進めています. 特に, 核融合環境を模擬した水の放射線分解による過酸化水素の影響評価や, 磁場環境下での腐食挙動, 水質の違いによる影響評価などを継続しています. これまでに限られた条件ですが, 耐食性に寄与する金属界面の酸化物に有意な磁場影響がないことが明らかになるなど, 重要な知見を得ています [2].

3. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

那珂研究所では, 日欧で協力して進めてきた JT-60SA の統合試験運転を 2023 年 12 月 15 日に終了し, プラズマ加熱実験に向けた増力期間に入りました.

2023 年 10 月 23 日 (月) にプラズマ電流 0.13 MA, パルス幅 ~ 0.5 秒の初トカマクプラズマを達成しました (図 3). その後, 低プラズマ電流値での制御に適したプラズマ中心制御 (PCC) とコーシー条件面 (CCS) を利用したフィードバック制御を用いることで, プラズマの着火からプラズマ電流ランプダウンまで安定な放電を開発することができました. プラズマ電流 ~ 1.0 MA で 3.0 秒間ダイバータ配位の維持を実現するとともに, ダイバータ配位でプラズマ電流 ~ 1.2 MA まで到達することができました. その他, プラズマの制御性, 壁洗浄, MHD 安定性領域等を検証しました. 今後詳細な解析を進めていきます.

増力期間が始まり, 関連する機器の整備が進んでいます. JT-60SA の真空容器内の下部にはダイバータを設置します. JT-60SA のダイバータはトロイダル方向に 10 度ずつ, 全 36 体のモジュール構造となっていて交換ができ

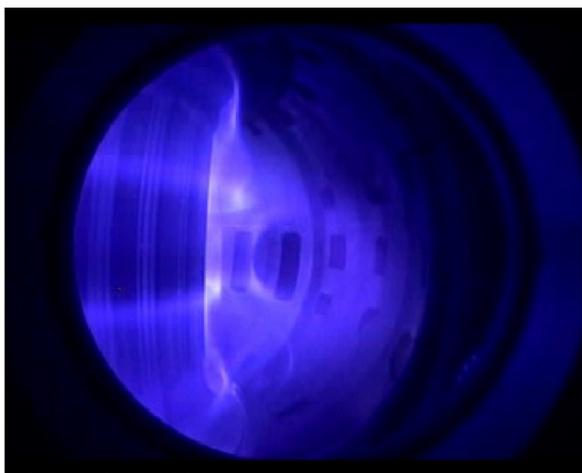


図 3 初トカマクプラズマの可視カメラによる画像.



図 4 JT-60SA 用ダイバータモジュール.



図 5 JT-60SA 用ダイバータモジュールの組立の様子.

るようになっていきます. 1 体は完成済みで, 残り 35 体の組立を順調に進めています (図 4). ダイバータにはプラズマ閉じ込め磁場の磁力線が横切る部分があり, この部分ではプラズマと接触するために熱負荷が高くなります. 局所的に熱負荷が高くなることを防ぐために, この部分では ±1 mm 以下という高い組立精度が要求されます. そこで, レーザートラッカーとワイヤレスプローブを用いて 0.1 mm 以下の精度で測定することにより, 要求精度を満たすように組立を行っています (図 5).

- [1] T. Hwang, J. Kim, Y. Sugimoto, Y. Akatsu, S. Nakano, Tensile properties of beryllium-titanium intermetallic compounds, *Fusion Eng. Des.* 191 (2023) 113739. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113739>.
- [2] M. Nakajima, T. Nozawa, Effect of Magnetic Field on High-temperature and High-pressure Water Corrosion Property of F82H, *Plasma Fusion Res.* in press (2024).

(量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門)

幅広いアプローチ活動だより (108)

1. 第34回IFERC事業委員会の開催

2024年3月22日(金)に青森県六ヶ所村の量子科学技術研究開発機構(量研)六ヶ所フュージョンエネルギー研究所(令和6年度より名称を変更,六ヶ所研)において,第34回IFERC事業委員会がテレビ会議形式にて開催されました。2020年4月から開始されたBAフェーズIIにおいて第8回目の事業委員会であり,日本側からは委員3名と専門家15名,欧州側からはGONZALEZ DE VICENTE議長を含む委員3名と専門家16名,これに矢木事業長,中島副事業長,KAMENDJE副事業長を含む事業チーム員5名と書記1名の計43名が参加しました(図1)。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状況報告を受け着実な進捗を確認しました。また,IFERC事業の2023年年度報告,調達取り決めの状況及び計画,IFERC事業計画の更新案,2024年作業計画の更新案,及び,IFERC事業チームと統合事業チームの更新案が報告されました。審議の上,これらを第33回BA運営委員会(BASC,2024年4月18日(木)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。主な報告・審議事項は,以下のとおりです。

- 原型炉設計活動では,8つの設計タスク(プラズマシナリオ開発,ダイバータと熱排出,安全性等)の進捗や,日本・欧州の原型炉開発の近年の進展や今後の共同設計活動について議論を行った内容について報告されました。本活動では,日欧の技術責任者を中心と

したウェブ会議を行い,特にダイバータ設計とブランケットの分野において共同活動が推進されていることが報告されました。また,欧州と日本の原型炉ロードマップにおけるITERの役割と増殖ブランケット戦略について集中的に検討されており,その結果は2025年以降の調達取り決めの内容に反映されることも併せて報告されました。

- 原型炉 R&D 活動では,4つの日欧共通タスク(トリチウム技術開発,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)の活動が引き続き良好に進捗していることが報告されました。特に,トリチウム技術開発におけるJET-ILW分析では,化学エッチングによるバルクタンクステン内部におけるトリチウムの深さ方向分布の分析が世界で初めて実施され,分析手法の確立と初結果の取得に成功したことが報告されました。増殖機能材中性子照射実験においては,ロシア・ウクライナ情勢に端を発した照射施設に関する問題が解決したことが報告されました。
- ITER遠隔実験センター(REC)活動では,ITER機構CODACセクションとの共同研究が計画通りに実施されており,CODACが開発している各種アプリケーションに関連する次の試験を準備中であること,IFMIF/EVEDA事業との協力では,欧州からLIPAcへの遠隔実験参加を促進するために,スペインのF4Eに設置されているLIPAc遠隔サーバーの改良が実施されたこと,及び,LIPAc運転フェーズにおける遠隔実験参加方法を決定するための試験が実施されたこと,並びに,サテライトトカマク計画事業との協力では,JT-60SAの遠隔実験参加システムの構築に向けた会合が開催されたことなどが報告されました。
- 計算機シミュレーションセンター(CSC)活動では,六ヶ所研のスパコンJFRS-1が2024年度も運用され,計算資源の一部が引き続きCSC活動に提供されること,JFRS-1を利用しているシミュレーションプロジェクトの研究分野及びITER等の貢献についての分析結果の概要,JFRS-1を利用する2024年度のシミュレーションプロジェクトの公募結果,ITERにおけるディスプレイのモデリングのプロジェクトとITERのエッジ・SOL・ダイバータプラズマシミュレーションのプロジェクトにおいてITERシナリオ構築にとって重要な結果が得られたこと,ITERとの協力と関連して2024年作業計画において2つの新規分野が提案されていることなどが報告されました。

次回の事業委員会は,六ヶ所研において2024年10月23日(水)に開催される予定です。

(量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)

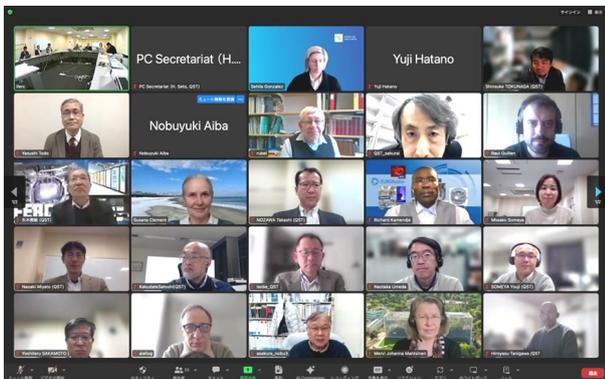


図1 第34回IFERC事業委員会における現地及びオンライン参加の様子。

2. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

那珂フュージョン科学技術研究所(令和6年度より名称を変更)では、日欧で協力して進めているJT-60SAのプラズマ加熱実験に向けた装置増強期間に入っています。

統合試験運転で使用した機器の解体作業を進めており、真空容器を大気開放して容器内作業が始まりました。容器内の様子を図2に示します。まずは、初めてのプラズマ運転にて使用した機器の健全性を確認し、その後、保護リミターなどを撤去して、加熱実験に向けた機器の据付の準備を進めます。真空容器外では、プラズマの着火や加熱に使用した導波管ランチャー及び傾斜架台、伝送路機器等の高周波加熱装置の機器撤去を完了しました。その時の写真を図3に示します。今後、トロイダル・



図2 JT-60SA 真空容器内の様子。



図3 導波管ランチャーをクレーンで運搬する様子。

ポロイダル方向の高周波入射角度可変機能を備えたランチャーや長パルス運転に対応した伝送路機器の据付等、装置整備を進めていきます。

計測装置の整備も本格化しています。プラズマ中の電子温度と密度の空間分布を計測するトムソン散乱計測装置のうち、プラズマ周辺部の散乱光を集光する集光光学系やそれを支える架台、ポートプラグ等は欧州が調達することになっています。その調達分の立会い試験を令和6年2月にルーマニア国立研究所にて実施しました。集光光学系を格納する長尺のポートプラグに治具をマウントし、ポートプラグ取付けのための動作確認を行いました(図4)。このポートプラグは、JT-60SAの斜め下のポートから真空容器に向かって挿入されます。ポートプラグ先端部に固定される集光光学系は、プラズマ側で高強度パルスレーザーによって散乱された光を集光するもので、実験中でも動作するレーザー光軸位置に焦点を当てるためのアライメント機構の調整後に日本への輸送が開始される予定です。



図4 ポートプラグとそれを駆動する治具。

(量子科学技術研究開発機構
那珂フュージョン科学技術研究所)

幅広いアプローチ活動だより (109)

1. 第33回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の開催

2024年3月21日(木)～22日(金)に青森県六ヶ所村の量研六ヶ所フュージョンエネルギー研究所において、第33回 IFMIF/EVEDA (国際核融合材料照射施設による工学実証・工学設計活動) 事業委員会が開催されました。参加者は Carin 事業長と、欧州側が委員2名と専門家6名、日本側が林議長を含む委員3名と専門家6名、これに関係者33名の計51名で、六ヶ所の現地に加えリモート接続を併用した開催となりました (図1)。

今回の事業委員会では、2023年作業計画に基づく事業の進捗状況を確認し、IFMIF/EVEDA 事業計画の更新案について審議しました。審議結果を踏まえ、第33回 BA 運営委員会に対する勧告をまとめるとともに、IFMIF/EVEDA 事業計画の更新案を BA 運営委員会に提出すると、事業長の提案が同意されました。事業委員会での主な報告事項は、以下のとおりです。

- 高周波4重極リニアック (RFQ) でのコンディショニング (ビームのない状態での大電力高周波による空洞の清浄化プロセス) では、定格電力における 27% のデューティサイクル*まで達成しました。
- RFQ のビーム試験では、デューティサイクル 1.5% まで到達しました。パルス幅は最長 2 ミリ秒を実現し、令和4年度の試験で 0.1 ミリ秒であったものから 20 倍伸張することができました。
- RFQ のコンディショニングやビームの高デューティ化試験の結果、定常運転 (デューティ 100%) 実現には、

カプラ (高周波を RFQ 空洞に導入するための機器) の更なる改良の必要性が明らかとなりました。この対応に時間を要することから、カプラの対応と超伝導リニアックの組み立てとを並行に行い、スケジュールへの影響を最小化することとしました。

- 核融合中性子源の設計活動については、リチウム純化系試験装置の製作や工学設計活動などが予定通り進捗しています。

今回の事業委員会は 2024 年 10 月 23 日 (水)～24 日 (木) に量研六ヶ所フュージョンエネルギー研究所で開催することとしました。

2. ITER 遠隔実験センター (REC) 活動の進捗

六ヶ所フュージョンエネルギー研究所にある国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) の ITER 遠隔実験センター (REC) では、BA 活動のフェーズ II として、ITER 機構 (IO) との協力、IFMIF/EVEDA 事業との協力、サテライト・トカマク計画 (STP) との協力の 3 つを柱とした研究活動を展開しています。

IO との協力では、IFERC 事業と IO の協力に関する作業計画に基づき、ITER 制御計測セクション (CODAC: Control, Data Access and Communication) が開発を進めるソフトウェア試験が継続して進められました。2023 年 4 月に、ITER 主制御室においてオペレータが使用するソフトウェアであるオペレータインタフェース (OPI) が、六ヶ所の遠隔実験センターに構築された CODAC ターミ



図1 第33回 IFMIF/EVEDA 事業委員会における現地及びリモートでの参加者。

* デューティサイクル：繰り返しパルス運転において、パルス幅を t_p 、パルス周期を t_w とすると、 t_p/t_w で定義される値。デューティサイクル 100% は連続運転に対応する。

ナル上で利用可能となり、現地主制御室と同等の情報がほぼリアルタイムで得られる環境が稼働を開始しました。その後、このOPIの機能検証と更新をIOとの協力のもとで継続して進め、2023年秋には新たに現地とのアラーム共有機能が追加されました(図2)。これにより、遠隔実験参加者は現地制御室と同じようにITER設備の状況に関するアラームを共有できることになり、実験中に現地では何が起こっているかを把握できるようになりました。

OPI試験と並行して、ITER実験データへアクセスするためにCODACが開発しているソフトウェア(UDA: Unified Data Access)試験に向けた、UDAシステムの六ヶ所所への部分構築・試験を進めました。UDAが備える機能のうち、データファイルの所在管理機能(IndexDB)の六ヶ所RECへの構築と、そこへデータを登録する機能の検証試験を行い、六ヶ所REC側でデータ新規登録が問題なく動作することを確認できました。これにより、ITERから転送・複製した実験データを六ヶ所RECのUDA IndexDBに登録して管理することが可能であることが実証されました。また試験を通じて発見・解決されたバグはIOへフィードバックされ、UDA次回リリースで改善されることになりました。引き続き、リクエストされたデータをIndexDBを参照してユーザに提供する部分の機能実証試験を進める計画です。

IFMIF/EVEDA事業との協力では、これまで構築を進めて来たIFMIF原型加速器(LIPAc)の遠隔実験参加環境(LIPAc DMZ)に関して、各サーバのメンテナンス・ソフトウェアアップデートを行うための仕組みが構築されました。これによりLIPAc DMZは実運用で必要とされる機能が一通り完成し、IFMIF事業進捗に不可欠なインフラとして安定稼働に入りました。欧州側からの評判も上々であり、LIPAcデータへのスムーズかつセキュアな遠隔データアクセスを実現する、事業に不可欠な研究開



図2 ITERオペレータインタフェース(OPI)による遠隔アラーム共有試験の様子。

発基盤として、日欧実施機関から活発に利用され続けています。

STPとの協力では、2024年1月にJT-60SAの遠隔実験参加システムの構築に向けた会合が開催されました。今後、2026年までのJT-60SAの増力改修期間を利用して、JT-60SA遠隔実験参加環境構築に向けた協力を本格化する計画です。またSTP-RECの協力として、JT-60SAの遠隔データバックアップを六ヶ所で行うことも合意されました。

(量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)

幅広いアプローチ活動だより (110)

1. 原型炉 R&D 活動の進捗

原型炉 R&D 活動では、4つの日欧共通タスク（トリチウム技術開発、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）を柱とした研究活動を展開しています。

トリチウム技術開発（タスク 1）では、原型炉燃料サイクルにおける水素同位体ガス組成の有力な分析手法であるラマン分光法を用いた遠隔リアルタイムガス分析システムの開発を進めています。現在開発している多重反射機構を採用した光学系では、構成するミラー等の部品の一部を水素同位体ガスが流れる光学セルの内部に設置します。これらは全て金属あるいは酸化物の材料ですが、これまでトリチウム環境下で使用した実績が無いため、トリチウムを用いた試験に先立ちそれらの材料の試験片をトリチウムガスに曝露し、トリチウム環境下での使用に問題がないことを確認しました。図 1 に曝露試験装置の概略と写真を示します。対象となる材料は、アルミコートしたミラー、光学アルマイト処理（表面にポーラスな酸化物層が形成）を施したアルミ片等で、装置内には約 34 GBq の純トリチウムガスを導入しました。曝露による変化の有無をビューポートから観察し、反射防止材をコーティングしたサファイア窓については、レーザー光を透過させ、その透過強度の時間変化を観測しました。40 日間の曝露で、試験片やレーザー光の透過強度に変化はなく、これらの材料がトリチウムガスの遠隔リアルタイムガス分析に使用できることが確認できました。

原型炉コンポーネント用ブランケット構造材料開発（タスク 2）では、低放射化フェライト鋼 F82H の溶接部の 50dpa までの中性子照射試験データを得るなど、構造設計において重要な知見を得ております。また、実環境を想定した磁場下での強度特性評価を進めるなど新たな課題にも取り組んでおります。ダイバータ用タングステンについては、き裂進展挙動の理解が重要であり、破壊

靱性評価に注力しております。これまで困難であった予き裂の導入に成功し、ASTM に準拠した試験に一定の見通しを得るなど、試験法開発が進展しました。核融合中性子照射影響に関する材料モデリング・シミュレーション研究では、例えばボイド核生成現象のより正確なメカニズムを導入した物理モデルを構築し、計算機シミュレーションを実施しました。その結果、ボイドスエリング現象の照射場依存性を明らかにすることが可能となり、スエリング予測技術の精度向上に寄与することができました。また、構造解析における負荷の多軸影響や電磁力影響の取り込み、欠陥診断のための非破壊検査技術の開発などについても大学との共同研究を活用して取り組んでおります。

増殖機能材への中性子照射実験（タスク 3）では、ベルギーの原子炉 BR2 での照射後試験用の照射試験が開始されるとともに、カザフスタンの原子炉 WWR-K でのトリチウム放出試験におけるモックアップ照射試験を完了し、そこから取得したデータを反映した照射リグ製作を進めています。また、共同研究の一環として、ドイツの KIT（カールスルーエ研究所）とのラウンドロビン試験を実施し、先進中性子増倍材であるベリリウム金属間化合物（ベリライド）ブロックの焼結条件の最適化を図り、その条件で製造したベリライドブロックの圧縮強度と圧縮試験温度の関係を実験的に整理することで、原型炉設計に不可欠であるベリライドの機械的特性に関するデータベース構築が進展しました。

材料腐食データベース開発（タスク 4）では、低放射化フェライト鋼 F82H 及びダイバータ用銅合金を対象に、高温高压水による腐食データベースの拡充を進めています。特に、核融合炉運転中に発生する磁場が腐食特性にどのように影響するのかについて詳細な検討を進めています。これまでに磁場の方位が酸化物の表面への付着挙動に影響することを実験的に明らかとしており、今後の放射性腐食生成物の管理に関わる検討にとって重要な知見を得ております。

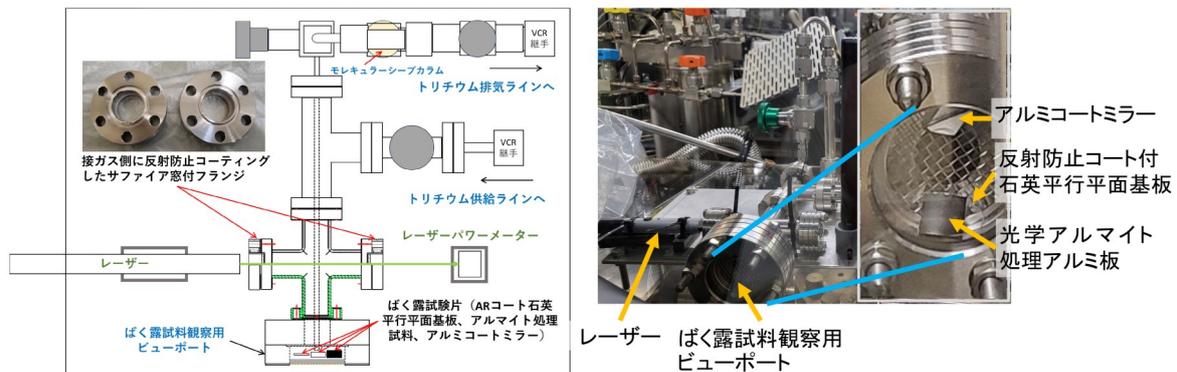


図 1 トリチウムガス曝露装置の構成（左）と装置の写真（右）。



図2 第12回BA原型炉設計活動タスク調整会合の様子(2024年3月)。

2. BA 原型炉設計活動タスク調整会合の開催

幅広いアプローチ活動(BA)の国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業の原型炉設計活動(DDA)において、第12回BA原型炉設計活動タスク調整会合を3月5、6日に量子科学技術研究開発機構六ヶ所研究所(現六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)にて開催しました。本会合には日本側から16名、欧州側から10名(合計26名)が参加しました(図2)。

今回の会合では、BADDAにおける8つの設計タスク(プラズマシナリオ開発、ダイバータ設計、増殖ブランケット設計、遠隔保守、安全性、システムコード、超伝導マグネット、及びプラントシステム)の内、特に日欧共同で進めている5つの設計タスク(プラズマシナリオ開発、ダイバータ設計、増殖ブランケット設計、遠隔保守及び安全性)について、2025年2月までが期限となっているBADDA調達取り決めの延長に関する議論を行いました。日欧の各タスク責任者から、延長した場合にどのような課題に取り組むかについて事前に検討した結果が報告され、おおよそ適切な内容であると判断されました。延長については本年秋に開催されるIFERC事業委員会及びBA運営委員会で承認されてから実施することから、追加の検討が必要と判断された内容については継続してタスク責任者間で議論することになりました。また、増殖ブランケットの設計や品質保証に関する議論を集中して行い、設計において詳細解析が必要と考えられる項目や製造したブランケットが想定通りの性能・安全性などを確保しているかを評価する方法などについて積極的な意見交換が行われました。

(量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)

3. サテライト・トカマク(JT-60SA)計画の進展

那珂フュージョン科学技術研究所では、日欧で協力して進めているJT-60SAのプラズマ加熱実験に向けた装置増強工事が本格化しています。

本体室では、増強される加熱装置や計測器を設置する



図3 (上) P04LOポート吊り込みの様子、(下) P04LOポート挿入後(真空容器管台部)。

真空容器ポートの組立が開始されました。図3(上)は本体室において、P04斜め下ポート(P04LO)に取り付けるポートと組立治具を吊り上げている様子です。既設装置の隙間からトカマク本体の斜め下にあるP04LOポート部に挿入し、ポート管台部と溶接して真空容器に固定します。図3(下)は真空容器に接続中のP04LOポートの様子です。今後、加熱増強期間中に、水平、斜め下及び斜め上の合計23箇所においてポートを組立てる予定です。

容器内コイル電源の整備も本格化しています。増強後には、高性能なプラズマの制御に用いるため、誤差磁場補正コイル(EFCC)、高速プラズマ位置制御コイル(FPPCC)

及び抵抗性壁モード制御コイル (RWMC) の3種類の容器内コイルを設置します。これらの容器内コイルに用いる電源は、欧州が調達を担当し、これまでに調達が完了しています。また、据付・試験を日本が担当し、FPFCC電源の据付・試験はこれまでに完了しています。今回新たに、量研が実施するEFCC電源の現地据付が令和6年4月に完了しました。その後、設計・製作を担当した欧州の技術者の立会の下、模擬負荷を用いたEFCC電源の受入試験を量研が実施し、令和6年6月に予定通り受入試験を完了しました。図4(上)は据付したEFCC電源、図4(下)は日欧の担当者によるEFCC電源受入試験の様子です。今後、残るRWMC電源の据付・試験を進めるとともに、真空容器内へのコイル本体の据付、コイルと電源を接続するケーブルの敷設等の整備も進めていきます。

(量子科学技術研究開発機構
那珂フュージョン科学技術研究所)



図4 (上) 据付されたEFCC電源, (下) 日欧担当者によるEFCC電源受入試験の様子.



1. IFERC-CSCスパコンを用いた数値シミュレーション研究

昨年度、IFERC-CSCのスーパーコンピュータJFRS-1を利用して実施された日欧のシミュレーション研究プロジェクトの主要な成果の共有を目的としたワークショップを5月21日に開催しました。昨年同様6件(JAプロジェクト3件, EUプロジェクト2件, 日欧合同プロジェクト1件)の発表がありました。JAプロジェクトのMISONIC(発表者: 矢本(QST))からは、SOLPS-ITERとSONICの2つのダイバータコードのベンチマーク活動の進展について報告がありました。炭素壁のある重水素プラズマを対象にして、計算グリッドの敏感性や物理モデルや入力パラメータに関する確認を行った後、運動量フラックス、熱フラックス、ソース項の比較が2つのコードの間で実施されました。TOKEDGE(発表者: 瀬戸(QST))からは、抵抗性ドリフト-バルーニング不安定性によるELMの非線形シミュレーションについての報告がありました。シミュレーションではトカマクプラズマ全体を取り扱い幅広いトロイダルモード数を計算したもので、当初、線形不安定な短波長のモードが成長し、小さな圧力勾配の崩壊が発生した後で、線形安定なテアリング不安定性が励起される結果が得られ、その過程の詳細について発表がありました。EUプロジェクトのGBStell(発表者: Loizu(EPFL-SPC))からは、ステラレータープラズマの流体シミュレーションを行い、低トロイダルモード数を持つコヒーレントなモードがステラレーターの周期性を壊すことや、スペインのTJ-K装置で観測される揺動スペクトルと同様なスペクトルが得られたことなどが報告されました。日欧プロジェクトのMISTIK(発表者: Widmer(NINS))からは、大域的なジャイロ運動論コードによるテアリングモードの非線形シミュレーションを行い、非線形的に生成される帯状磁場の影響や、磁気島のセパトリクスで誘起される流れの影響などについて発表されました。JAプロジェクトのGGHB(発表者: 今寺(京大))からは、ジャイロ運動論コードのSOL/ダイバータ領域への拡張と、大域的なシミュレーションによる燃料供給・不純物排気のための粒子輸送研究についての発表がありました。最後にEUプロジェクトのJTGENE(発表者: Krutkin(EPFL-SPC))からは、JT-60SAプラズマを対象にした局所ジャイロ運動論シミュレーションの結果についての発表があり、炉心領域では電磁的なモードが重要な役割を果たしており、磁力線方向の磁場揺動を含む電磁的効果を適切に考慮することの重要性が報告されました。また6月20日にはGPUプログラミングに関するワークショップも開催され、GPUへのコード移植や高速化に関するものなど、日欧から4件の発表がありました。これらワークショップのプ

ログラムや発表資料はIFERCのWebサイト[1]に公表されています。加えて6月には、欧州の核融合関連コードのGPUプラットフォームへの移植、高速化の支援などを行っているAdvanced Computing Hubのスタッフが六ヶ所サイトを訪れ、日欧の状況や今後の展望について意見交換を行いました。

(量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)

2. サテライト・トカマク(JT-60SA)計画の進展

那珂フュージョン科学技術研究所では、日欧で協力して進めているJT-60SAのプラズマ加熱実験に向けた装置増強作業が順調に進展しています。

本体室では、増強する加熱装置のひとつである中性粒子ビーム入射(NBI)装置とトカマク本体真空容器のポートを接続する作業を開始しました。図1は最初に接続した接続線入射NBIの主排気タンクとポートの接続部の写真です。主排気タンクとポートのフランジ面間372 mmの間に、大型のゲート弁と絶縁フランジ・接続フランジを一体化した部品(幅356 mm)を挿入して接続しています。ゲート弁を含むNBI機器はJT-60Uの再利用機器です。こ

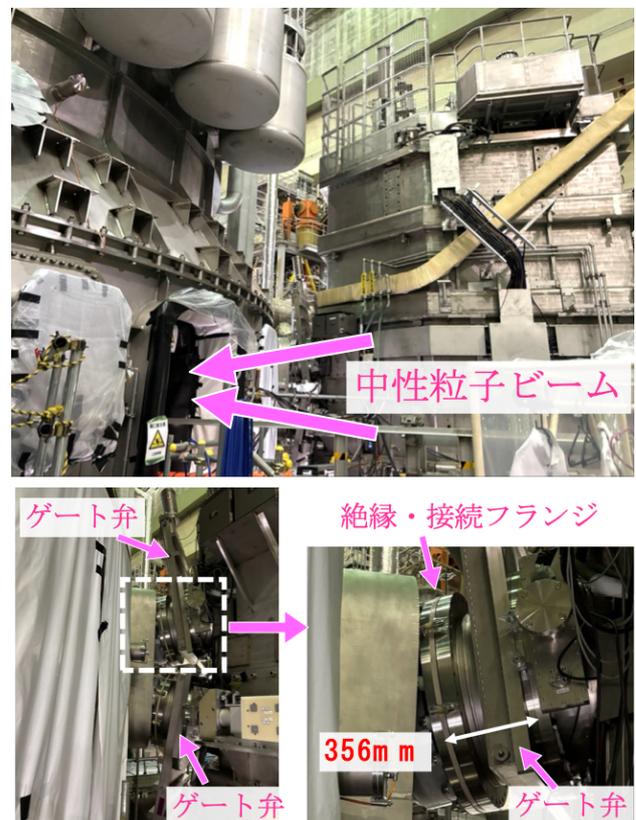


図1 (上) 接続したトカマク本体と接続線 NBI の写真。
(下) 接続部の写真。

の前後僅か8 mmという狭隘な空間において、一体化した部品をビーム軸に対し ± 2 mmの精度で取り付けるため、特殊な専用治具を開発して作業を行い、無事に1基目2ビームラインの接線入射NBIを接続しました。引き続きNBIの組み立てを進めていく計画です。

トカマク本体真空容器の中では、容器内機器の据え付けが本格的に進展しています。高性能プラズマの実現に用いる容器内コイルの一つである誤差磁場補正コイル(EFCC)を真空容器内壁に据え付ける作業を開始し、全18個のEFCCのうち、下側EFCC(全6個)の据え付けが完了しました。図2に据え付け後のEFCCの一つの写真を示します。溶接ビード等による局所的な凹凸を持つ真空容器内面形状を事前に三次元計測し、それに合わせて加工した専用の固定座を用意してEFCCを据え付けることで、要求精度10 mmに対して、5 mm程度の精度で据付を進めています。引き続き、他の容器内コイルやセンサー等の据え付け作業を進めていく計画です。

(量子科学技術研究開発機構
那珂フュージョン科学技術研究所)

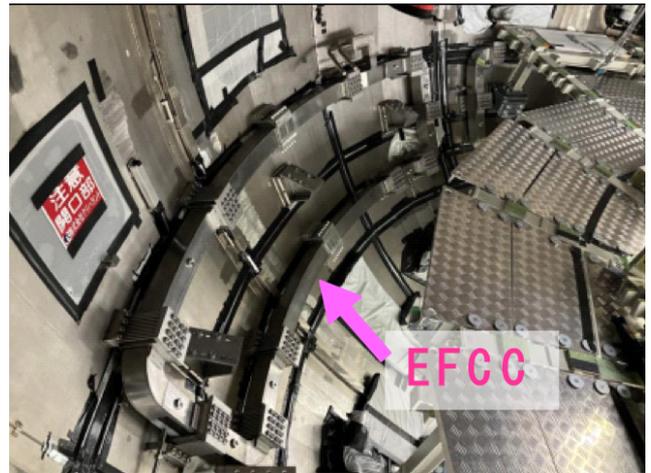


図2 真空容器内に据え付けた誤差磁場補正コイル。

参考文献

- [1] <https://www.iferc.org/>



1. 第35回IFERC事業委員会の開催

2024年10月23日(水)に青森県六ヶ所村の量子科学技術研究開発機構(量研)六ヶ所フュージョンエネルギー研究所(六ヶ所研)において、第35回IFERC事業委員会がテレビ会議形式にて開催されました。2020年4月から開始されたBAフェーズIIにおいて第9回目の事業委員会であり、日本側からは委員3名と専門家15名、欧州側からはゴンザレス議長を含む委員3名と専門家11名、これに矢木事業長を含む事業チーム員5名と書記1名の計38名が参加しました(図1)。原型炉設計、原型炉R&D、計算機シミュレーションセンター及びITER遠隔実験センターについて状況報告を受け着実な進捗を確認しました。また、IFERC事業全体の活動状況を確認するとともに、IFERC事業2025年作業計画及びIFERC事業計画更新案が報告されました。審議の上、これらを第34回BA運営委員会(2024年12月開催予定)に提出して承認を求めることが同意されました。主な報告・審議事項は、以下のとおりです。

●原型炉設計活動では、8つの設計タスク(プラズマシナリオ開発、ダイバータと熱排出、ブランケット設計とトリチウム抽出・排出等)の進捗や、日本・欧州の原型炉開発の近年の進展や今後の共同設計活動について議論を行った内容について報告されました。また、本活動は、ITER計画の状況などを踏まえた原型炉設計に係る環境

の変化を受けて、2025年以降の調達取り決めの下で実施される日欧共同設計活動について、「ダイバータ設計とプラズマ排出」、「ブランケット設計とトリチウム抽出・排出」の2タスクに注力して実施し、その他の6つのタスクについては日欧の活動の情報交換を行うことが提案されました。

- 原型炉R&D活動では、4つの日欧共通タスク(トリチウム技術開発、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)の活動が引き続き良好に進捗していることが報告されました。特に増殖機能材について、ベルギーのSCK-CEN研究所にあるBR2原子炉を用いた照射後試験のための中性子照射キャンペーンが開始し2024年の主要マイルストーンが達成されたことやカザフスタンINP研究所のWWR-K原子炉を用いたその場トリチウム放出実験の準備状況と試験の見通しなどが報告されました。
- ITER遠隔実験センター(REC)活動では、ITER機構CODACセクションとの共同研究において、CODACが開発している各種アプリケーションに関連する試験が計画通りに進められていること、IFMIF/EVEDA事業との協力では、欧州からLIPAcへの遠隔実験参加環境の定期メンテナンスを含むスケジュールが合意・設定され安定運用が軌道に乗ったこと、並びに、サテライトトカマク計画事業との協力では、JT-60SAの遠隔実験参加システムの構築に向けた計画が合意され、実施された概念実証試験の成功を受けて、必要な調達プロセスが開始されたことなどが報告されました。
- 計算機シミュレーションセンター(CSC)活動では、六ヶ所フュージョンエネルギー研究所のスパコンJFRS-1を利用する2024年度のシミュレーションプロジェクトが予定通り開始されたこと、ITER機構も参画するプロジェクトとして従来のディスラプション関係とエッジ・SOL・ダイバータ関係のものに加え高エネルギー粒子分野のプロジェクトが含まれること、昨年度の成果を共有するためのワークショップが開催されたこと、核融合計算機の調達が日欧で進展していることなどが報告されました。

次回の事業委員会は、六ヶ所研において2025年3月14日に開催される予定です。

(量子科学技術研究開発機構
六ヶ所フュージョンエネルギー研究所)

2. サテライト・トカマク(JT-60SA)計画の進展

那珂フュージョン科学技術研究所では、日欧で協力して進めているJT-60SAのプラズマ加熱実験に向けた装置増



図1 第35回IFERC事業委員会における現地及びオンライン参加の様子。

強作業と実験に向けた検討が進んでいます。

増強する加熱装置の一つである電子サイクロトロン波加熱・電流駆動 (ECH/CD) 装置では、統合試験運転で使用したシステム (1 MW・5 秒・2 系統) に加え、1 MW・100 秒・2 系統を新たに整備する計画です。高周波源ジャイロトロンとその補器類等は量研が調達し、ジャイロトロン電源システムは欧州実施機関のフュージョンフォーエナジー (F4E) が調達します。JT-60SA では、電子温度や電流分布の制御、不安定性の抑制や着火・壁洗浄など多様な用途に ECH/CD が用いられるため、単純な長パルス運転だけでなく、1 回の放電実験中に複数パルスの入射や、5 kHz 以上の高速オン・オフ変調入射を実現する機能が求められます。また、高効率な発振や長パルス運転中のジャイロトロン発振条件の変化への対応など、多様な運転に対応できる制御性、ジャイロトロン内部での異常発生時に 10 マイクロ秒以内で電圧を遮断する高速応答性等を有する高性能な電源システムが必要です。これまでに、受注者である JEMA 社 (スペイン) でジャイロトロン電源システムの設計・製作・工場試験を完了させ、量研の協力の下、F4E・JEMA 社及び国内の関係会社が那珂フュージョン科学技術研究所において据付・試験を進めてきました。図 2 は増設したジャイロトロン及び電源システムの様子です。別建屋に設置した主電源 (-60 kV・110 A) 1 台とジャイロトロン近傍に設置したアノード電源 (50 kV・100 mA)・ボディ

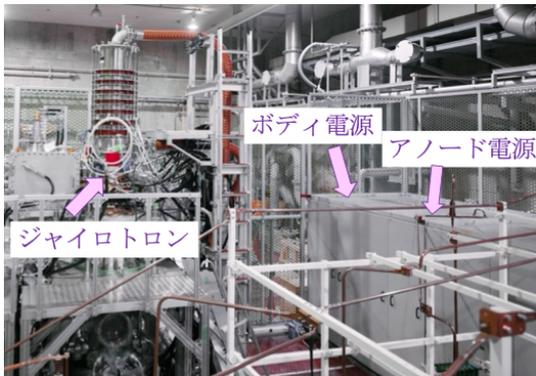


図 2 増設したジャイロトロン及び電源の様子。



図 3 受け入れ試験完了時の写真。

電源 (35 kV・100 mA) 各 2 台及びこれらを統合する制御システムの現地統合試験において、工場での組み合わせ動作試験や現地単体試験では観測されなかったノイズの問題等が発生しましたが、それらを一つ一つ解決し、2024 年 9 月に当該電源システムの現地試験を完了しました。図 3 は現地試験完了を記念して撮影したもので、コロナ禍を挟んで長期間実施した本試験においては、量研・F4E・JEMA 社及び国内関係会社の協力が不可欠でした。今回の経験をもとに、今後増設予定のジャイロトロン電源システムの整備がより効率的に進むことが期待されます。また、今後は、本電源システムを用いたジャイロトロンの実動作試験を量研が実施し、プラズマ加熱実験に向けた整備・調整を進めていきます。

本格的なプラズマ加熱実験に向けて、JT-60SA における炉心プラズマ研究を主導する JT-60SA 実験チームが 2024 年 5 月に編成されました。現時点で、総勢約 300 名の日欧の研究者が、運転領域開発、MHD 安定性及び制御、輸送及び閉じ込め、高エネルギー粒子の振る舞い、ペDESTAL 及びエッジ物理、ダイバータ・スクレイプオフ層及びプラズマ・物質相互作用の 6 分野にそれぞれ所属しています。2024 年 5 月に第一回全体会合、2024 年 9 月に第二回全体会合をそれぞれリモート会議で実施し、今回初めて那珂フュージョン科学技術研究所での現地開催として、解析・モデリング第一回ワークショップ (Analysis and Modelling week, A&M week) を 2024 年 10 月 21 日~25 日の 5 日間開催しました。本ワークショップは、プラズマ加熱実験に向けて、JT-60SA 統合試験運転結果の解析、運転シナリオモデリングを進めることを主な目的としています。今回は、JT-60SA 実験チームに参加する各研究分野の専門家 31 名 (図 4) が現地参加し、上述の活動と今後の共同作業計画を議論しました。今後も JT-60SA 実験チームの全体会合、分野会合を実施し、プラズマ加熱実験開始に向けた検討を進めていく予定です。

(量子科学技術研究開発機構
那珂フュージョン科学技術研究所)



図 4 A&M week 参加者の集合写真。