

幅広いアプローチ活動だより (101)

1. BA フェーズⅡにおける原型炉 R&D 活動の進展

2020年4月より始まったBA活動 フェーズⅡでの原型炉 R&D 活動においては、欧州と連携した4つの開発タスクを実施しています。2020年度に具体的な活動内容について議論を重ね、2021年度から日欧で合意した活動を、国内大学・研究機関と協力して継続して進めています。

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と水処理系についてのモデリングの整理を開始しました。炉内のトリチウム蓄積モデリングに向けては、JETのITER-Like Wall 実験キャンペーンで使用されたベリリウムリミッターとパルクタングステンダイバータ試料を量研六ヶ所研究所の原型炉R&D棟にて、日欧の多くの研究者が連携して分析を行いました。これまでのJETの共同研究の成果が認められ、第39回プラズマ核融合学会にて「第27回技術進歩賞」を受賞しました。

構造材料開発（タスク2）においては、ブランケット構造材料の共通データベース開発を進めています。低放射化フェライト鋼F82Hの研究開発では、モンテカルロシミュレーションに基づくベイズ推定に着目し、限られた中性子照射データから統計的信頼性を考慮した材料基準値を予測する検討を進めました。またダイバータ材であるタングステンの研究開発では、これまで困難であった脆性タングステンへの疲労予き裂導入に成功し、破壊靱性特性評価とき裂進展挙動の評価を進めています。核融合中性子照射データベース整備にむけた材料モデリング・シミュレーション研究も並行して進め、原子シミュレーションによるボイド熱的安定性のサイズ・温度依存性を導入した新たな核生成モデルを導入することにより、

ボイドスエリング速度の照射場依存性を理論的に表現できる基盤モデルを構築しました（図1）。さらに大学との共同研究を通じて、構造設計における多軸負荷問題、脆性・延性破壊ルール、予寿命診断、非破壊検査技術などの研究開発を進めています。

増殖機能材料開発（タスク3）においては、ロシア・ウクライナ情勢により、ロシアでの日欧連携照射試験の計画が取りやめになったため、ベルギーのBR2での照射後試験用の照射試験とカザフスタンのWWR-Kでのその場トリチウム放出試験を実施することになりました。今年度は、照射試験における照射試験体の概念検討や安全性評価等を実施しています。それに平行して、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）ブロックの開発を進めました。焼結密度の最適化研究においては、焼結温度1000℃以上で理論密度に近いベリライドが製造できることを明らかにしました[1]。さらに、機械的特性評価をすすめ、圧痕から発生した亀裂（クラック）の長さから靱性を評価する圧子圧入法（IF）による破壊靱性の評価を実施した結果、1050℃の焼結温度、50 MPaの圧力でプラズマ焼結したBe₁₂Ti試料の破壊靱性値はドイツの先行研究結果と同等であることを明らかにしました。

材料腐食データベース開発（タスク4）においては、核融合特有の環境を模擬した水の放射線分解により生じる過酸化水素の影響評価や磁場環境での腐食特性評価に着手し、低放射化フェライト鋼F82Hの腐食データベース整備を進めました。また、ダイバータ用銅合金の高温高圧水腐食評価においては、水中の溶存水素により局部腐食深さが異なることを実験的に明らかとし、水素量の最適化による水質管理の必要性を見出しました。

2. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

那珂研究所では、JT-60SA 統合試験運転の再開に向けて、超伝導コイルと電路との接続部の短絡事象への対策を進め、一連の対策後の耐電圧性能を確認するために全体パッシェン試験を実施しました。超伝導トカマク装置において世界初の試みとなる全体パッシェン試験の実施にあたっては、放電箇所を特定するため、100個以上のUSBカメラを、十分な視野を確保するよう適切な位置に設置するとともに、発光領域を特定するためのシステムを開発しました。本システムの開発においては、画像処理における発光領域の輪郭の抽出手法やノイズ除去手法を確立しました。その結果、全体パッシェン試験により、追加で対策すべき箇所を特定することができ、追加の対策を12月末までに完了させることができました。再び全体パッシェン試験を実施して耐電圧性能の最終確認を行い、カメラの撤去等を実施した後に、本格的に統合試験運転を再開します。全体パッシェン試験に関する知見はITER計画へも貢献するものです。また、統合試験運転時

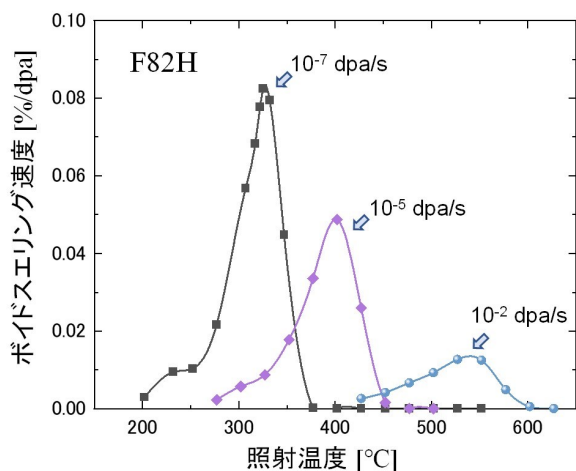


図1 ボイドスエリング速度の照射温度依存性（核生成モデルを導入した反応速度論解析）。



図2 製作が完了したヒートシンク（左上），抵抗性壁モード制御コイル用フィーダー（右上），ダイバータ用炭素タイル（下）。

の安全性を高めるために、インターロック高速化のための検討・整備を進めるとともに、コイル電源の出力電圧に重畳されるノイズを低減するための回路改良も実施しています。

一方、統合試験運転後のプラズマ加熱実験のための装置増強に向けて、機器整備も順調に進めています。特に、タイルを冷却するためのヒートシンク、抵抗性壁モード制御コイル用フィーダー、ダイバータ用炭素タイルといった多くの真空容器内機器の調達が完了し、那珂研に納入されました（図2）。統合試験運転が完了した後に組立てを実施します。

- [1] T.H.Hwang, J.-H.Kim, M. Nakamichi *et al.*, Nucl. Mater. Energy **30**, 101117 (2022).

（量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門）

那珂研究所では、JT-60SA 統合試験運転の再開に向けて、二回目の全体パッシェン試験を実施しました。その結果、追加で行った絶縁補修の効果を確認できたものの、一部の箇所です更に追加の作業が必要であることが判明したため、部分パッシェン試験により絶縁補修が必要な箇所を抽出し、追加の補修を実施しました。三回目の全体パッシェン試験を実施して耐電圧性能の確認を行い、本



136



図2 据付が完了したリップル低減フィルタ.

格的に統合試験運転を再開します。並行して、パッシェン放電を未然に防ぐために、欧州と協力し、真空計及びスパークワイヤを取り付け、クライオスタット内におけるガスのリークを検出する計測とインターロック機能の強化を図りました。また、コイル通電時のリスクを低減するために、コイル電源のリップル低減フィルタの主要機器の据付も完了しました(図2)。周辺機器の整備が終わった後に、模擬負荷を用いた試験を行います。

一方、統合試験運転後のプラズマ加熱実験のための装置増強に向けて、機器整備も順調に進めています。特に、真空容器内に設置される抵抗性壁モード制御コイル(RWMC)が完成しました(図3)。設計にあたっては、

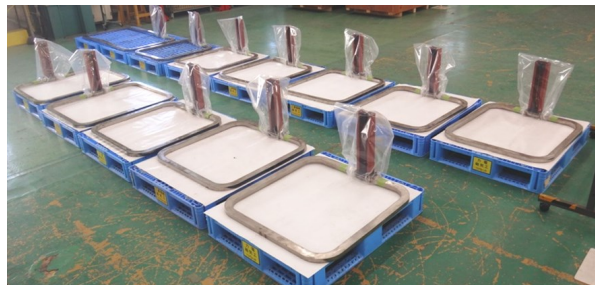


図3 製作が完了した抵抗性壁モード制御コイル.

当初想定していた設置場所では抵抗性壁モードの制御に必要な電流値が大きくなり電源等の製作に問題がありましたが、シミュレーションにより、コイルに流す電流値を小さくでき、かつディスラプション時の応力が小さくなる設置個所を明らかにしました。また、コイル面積が小さいことから、プラズマへの効果が不十分となる懸念がありましたが、イタリアのRFX装置においてJT-60SAを模擬した実験を行い、効果が十分であることを確認しました。製作にあたっては、絶縁材の選定やコイル構造の複雑化に伴うコスト増の課題は、絶縁材の使用環境の最適化や、コイル構造の2次元化により解決しました。また、溶接手法の工夫により、絶縁材への影響をなくすとともに、精度よく製作が行われました。統合試験運転が完了した後に組立てを実施します。

(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 (103)

1. 第 32 回 IFERC 事業委員会の開催

2023 年 3 月 28 日に青森県六ヶ所村の量子科学技術研究開発機構(量研)六ヶ所研究所において、第32回 IFERC 事業委員会がテレビ会議形式にて開催されました。今回は 2020 年 4 月から開始された BA フェーズ II において第 6 回目の事業委員会であり、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 3 名と専門家 16 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 41 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 2022 年次報告、調達取り決めの状況及び計画、及び、事業計画の更新案について審議を行い、第 31 回 BA 運営委員会(BASC, 2023 年 5 月 11 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状況、特に 2022 年 11 月に対面でのタスク会合(第 36 回)を開催し、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。この対面会合後にも、日欧の技術責任者を中心としたウェブ会議を行い、特にプラズマ不安定性と逃走電子発生統合モデリングシミュレーションやダイバータコードのベンチマーク、安全性における放射性廃棄物に関する検討結果の更新などの各分野において、共同活動が推進されていることが報告されました。
- 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)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、構造材料開発、腐食データベース開発においては中間報告書が提出されたこと、増殖機能材中性子照射実験においては、カザフスタンおよびベルギーの研究炉での照射試験準備が順調に進捗している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 機構との協力に関する作業計画に基づき、REC で稼働する遠隔実験用アプリケーションを ITER サイトで稼働するサーバと整合性を保って更新して長期的に安定運用するためのシステム構築が完了し、それに基づく遠隔実験用アプリケーション試験の環境構築が進捗していることなどが報告されました。IFMIF/EVEDA 事業との協力では、EPICS*に基づく遠隔データアクセス(RDA)システムの運用を開始したこと、また遠隔コンピュータアクセス(RCA)に基づく解析環境の準備が進んでおり、RDA と RCA の比較試験が計画されていること、冗長経路確保による遠隔実験参加環境の可用性向上など、事業進展への貢献と遠隔実験技術の実地での評価検討を進めている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)活動では、六ヶ所研究所のスパコン JFRS-1 が 2023 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 2023 年度のシミュレーションプロジェクトの公募結果、ITER 機構が JFRS-1 を利用して実施している ITER のディスラプションシミュレーションで得られた成果などが報告されました。

今回の事業委員会は、六ヶ所研究所において原型炉設計活動技術会合又は原型炉設計活動タスク会合と合同で 2023 年 10 月 10 日(火)又は 11 日(水)に開催される予定です。

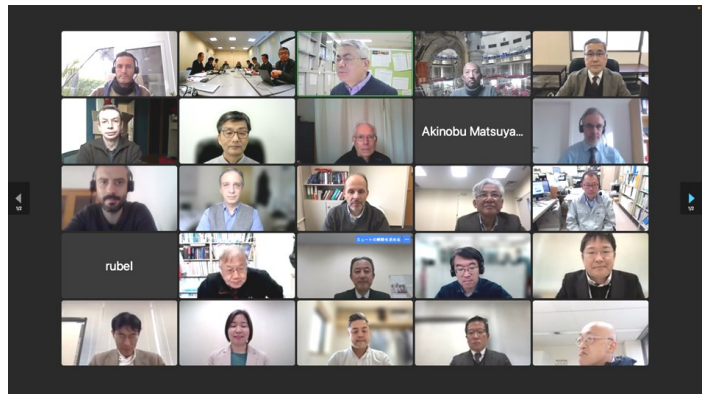


図 1 第 32 回 IFERC 事業委員会における現地及びオンライン参加の様子。

* 実験装置等の実時間制御システムのためのオープンソースソフトウェア、<https://epics.anl.gov/>



図2 遠隔実験室大画面にライブ表示されたITER主制御室のオペレータインタフェース。

2. ITER 遠隔実験センター活動の進捗

六ヶ所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 (国際核融合材料照射施設による工学実証・工学設計活動) 事業との協力、サテライト・トカマク計画との協力の3つを柱とした研究活動を展開しています。

IO と IFERC 事業の協力においては、作業計画に基づき IO が開発している遠隔実験参加 (RP) やデータ解析のための各種アプリケーション試験に向けた環境構築が進展しました。長期にわたる ITER プロジェクトを通して RP 用アプリケーション群が安定動作するためには、『ITER サイトで稼働するサーバソフトウェア』と『遠隔サイトで稼働するクライアントソフトウェア』を、常にバージョンの整合性を保って運用し、相互に同期してアップデートしてゆく仕組みが不可欠です。このためのシステムとして IO 開発ソフトウェアの遠隔リポジトリである “Capsule” を六ヶ所に構築し、2022 年 8 月に稼働を開始しました。Capsule は ITER サイトで稼働する本家リポジトリと ITER-REC 専用回線 (L2 VPN) を介して同期し、遠隔サイトで稼働する端末に適切なバージョンのソフトウェアを配布します。本家リポジトリへのアクセス集中を防いで保護しながら、RP システム全体を長期安定運用するための重要な役割を担っています。

次いでこの Capsule に基づいて、RP 用アプリケーション試験で使用するクライアント端末 (CODAC 端末) を構築しました。構築した CODAC 端末を ITER-REC 専用回線に接続し、2023 年 3 月に各種アプリケーションの試験を開始しました。まず EPICS と呼ばれる実験施設の制御・データ収集のためのツール群のデータ形式に基づく ITER 設備ライブデータへの READ ONLY アクセス試験を実施、ITER 主制御室 (MCR) と同様のライブ情報を六ヶ所遠隔実験室からセキュアに常時閲覧できる環境が構築されました (図 2)。手元の端末で動くソフトウェアで遠隔のデータを閲覧している (遠隔データアクセス: RDA) ため、ソフトウェアの応答遅延は小さく、操作性は良好

であることが確認できました。引き続き、表示データの遅延の確認等を含めた、遠隔実験室からの各種アプリケーション使用試験を順次実施してゆく計画です。

IFMIF/EVEDA 事業における IFMIF 原型加速器 (LIPAc) との協力では、LIPAc RP 環境へのアクセス経路の冗長化が実施されシステムの可用性が向上しました。また遠隔データアクセス (RDA) 手法に基づき、関係者の居室の端末から加速器のライブデータが確認できる環境を構築し、2023 年 3 月に稼働を開始しました。一方で、遠隔からログインして利用する遠隔コンピュータアクセス (RCA) 手法に基づく解析プラットフォームの構築についても日欧で議論を重ね、六ヶ所に試験環境が構築されました。現在、RDA と RCA それぞれのデータアクセス手法に基づく遠隔実験参加に関して、欧州側の協力を得て研究者にとっての利便性やセキュリティの観点からの比較・検証が進められています。日欧間の距離を越えた実際の実験データ解析活動に供する RP 環境の運用経験は、ITER 遠隔実験参加のための実環境構築に向けても非常に重要な知見となる見通しです。

3. サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画の進展

那珂研究所では、JT-60SA 統合試験運転の再開に向けて、引き続き全体パッシェン試験を実施し、これまでに

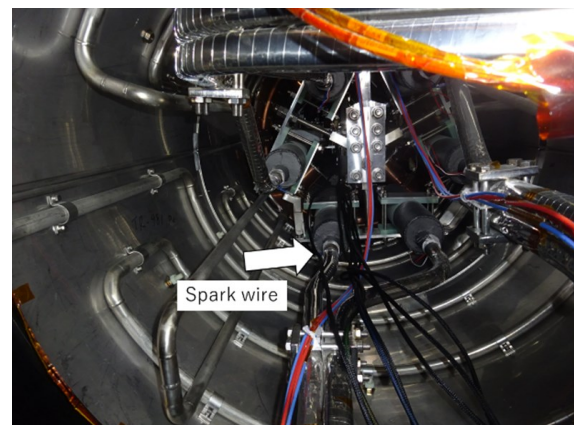


図3 敷設が完了したスパークワイヤ。



図4 那珂研究所に到着したMGI装置。

蓄積した知見に基づいて補修作業を行って装置全体の絶縁性能を強化しています。欧州と協力して進めている、クライオスタット内の電路周辺の圧力上昇を検出する計測とインターロック機能の強化については、スパークワイヤの敷設と耐電圧試験が完了し、正常に動作することを確認しました(図3)。真空計については、配線が完了し、仮設置と耐電圧試験を進めています。コイル通電時のリスクを低減するためのコイル電源のリプル低減フィルタについては、周辺機器の据付が完了しました。新たに敷設した電力ケーブルを含め、各機器の耐電圧試験を実施して絶縁性能に問題がないことを確認した上で、模擬負荷通電試験を開始しました。

一方、統合試験運転後のプラズマ加熱実験のための装

置増強に向けて、機器整備も順調に進めています。大量の水素/希ガスを射出することでプラズマを短時間で消滅させる大量ガス入射(MGI)装置については、欧州が調達を担当しています。調達を進めるにあたっては、日本の担当者がドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所(IPP)に赴いて、各種試験方法や動作を確認する等、日欧の緊密な協力が必要不可欠でした。図4は、IPPで製作されたMGI装置が完成し、那珂研に到着した様子です。MGI装置は、統合試験運転後にトカマク本体に組み込む予定です。

(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 (104)

1. IFERC 事業長の交代と IFERC 事業チームの更新

2020年6月1日から約3年の間、事業長として IFERC 事業を牽引してきた Clement 氏 (図1) が 2023年6月末日をもって IFERC 事業長を退任しました。今後は欧州実施機関のプロジェクトマネージャーとして IFERC 事業を推進されます。新事業長には量子科学技術研究開発機構 (量研) 核融合炉システム研究開発部の矢木部長 (図2) が 2023年7月1日付で着任し、合わせて IFERC 事業チームの更新が行われました[1]。今後、矢木事業長のリーダーシップの下、IFERC 事業を着実に進展させてまいります。

2. IFMIF/EVEDA 原型加速器 RFQ による長パルスビーム加速試験の進展

量研六ヶ所研究所では、幅広いアプローチ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 (LIPAc) の研究開発を進めています。この LIPAc は、IFMIF のための大電流重陽子ビームの加速実証を行うための加速器です。2019年7月に高周波四重極線形加速器 (RFQ) による世界最大電流 125 mA のパルスビーム (1 ms 幅) の加速に成功した後、定常 (CW) ビームの加速を目指し、試験を進めてきました。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長パルス試験用ビームラインを構築し、ビームダンプへのビーム入射、重陽子ビームの加速を 2021年7月に初めて実施しました。この 2021 年中の試験は短パルスビームを用いて行いましたが、さらに長いパルス長のビームを加速するための試験準備を進めてきました。

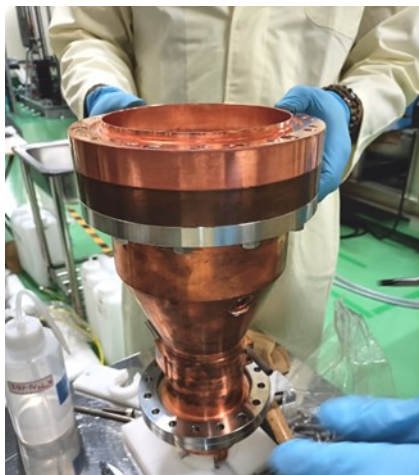
LIPAc の RFQ で重陽子ビームを加速するためには、およそ 620 kW の高周波 (RF) を入射して加速電界を生成する必要があります。その際に放電等が起こらないよう、あらかじめ RFQ 空洞に高周波を入射し、内面状態を整えるコンディショニング運転を行う必要があります。CW を目指したコンディショニング運転は 2021 年から少しずつ入射パルス長を伸ばしながら行われ、同年 12 月には定格のおよそ半分の電力で CW での RF 入射に成功しました。しかし、その後 2022 年 3 月に空洞に RF を入射するカプラーと呼ばれる機器で真空リークが発生し、その対応のため、運転を一時休止していました。2022 年中に行われた調査検討の結果、真空リークはカプラーの構造に起因する温度上昇によって引き起こされたと結論し、一部の部品の設計変更による改良を行うとともに、消耗部品の交換やクリーニングなどの保守作業を行いました (図3)。



図1 有志による Clement 前 IFERC 事業長の送別会 (右から 5 人目が前事業長)。



図2 矢木雅敏 新 IFERC 事業長。



組立中の高周波カプラー



高周波伝送系接続作業の様子

図3 IFMIF 原型加速器 RFQ 用高周波カプラーの保守作業の様子。



図4 欧州側副プロジェクトマネージャーのデービス氏の操作で真空排気運転が開始される様子。

8 台備わっているカプラー全てについての保守作業を2023年4月に完了し、同年6月下旬からおおよそ1年ぶりにRFQのコンディショニング運転を再開しました。運転再開後の空洞の状態は良好で、真空度も保守作業前より改善しており、空洞にダメージを与えることなく作業が適切に行われたことを示しています。7月下旬より、RFQによるビーム加速試験を再開し、まず短パルスで定格電流（125 mA）の加速試験を行う予定です。並行してコンディショニングを進め、今年後半には長パルス（パルス長1 ms以上）のビーム加速試験に進む計画です。

3. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

量研那珂研究所では、JT-60SA 統合試験運転の再開に向けて、全体パッシュン試験と補修作業を繰り返し実施し、装置全体の絶縁性能を強化するとともに、欧州と緊密に協力しながら、クライオスタット内の回路周辺の圧力上昇を検出する計測やインターロック機能の強化を図ってきました。加えて、コイル通電時のリスクを低減するために、コイルにかかる電圧に重畳されるリップルを低減するフィルターを整備するとともに、超伝導コイル及び回路の正極側と負極側の対地電圧を均等化する接地系の改良を実施しました。これら一連の作業が完了し、初プラズマの達成に必要な性能が確保されたことが確認できたため、2023年5月末に真空排気運転を開始し、統合試験運転を再開しました（図4）。現在は、超伝導コイルの冷却が順調に進んでいます。今後は、真空容器ベアキング、超伝導コイルの通電試験、プラズマ運転等を実施し、大型超伝導トカマク装置である JT-60SA の全てのシステムが設計どおりに連携して機能することを確認していきます。なお、6月8日に開催された総合科学技術・イノベーション会議において、総理大臣官邸と JT-60SA 中央制御室をリモート接続して JT-60SA の進捗等を説明

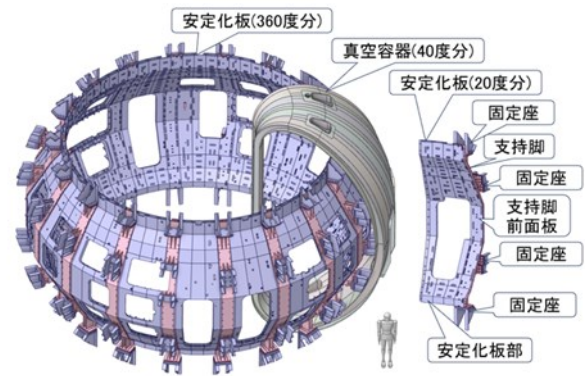


図5 安定化板の概観図。

し、岸田総理から JT-60SA チームに対して激励を頂きました [2]。

一方、統合試験運転後のプラズマ加熱実験に向けて、装置増強のための機器整備も順調に進めています。JT-60SA の安定化板（図5）は、MHD 不安定性を安定化するだけでなく容器内機器を保護する機器であるため、JT-60SA が目指す定常高ベータプラズマを実現するためには必要不可欠です。安定化板は、安定化板部、支持脚・支持脚前面板及び固定座から構成されています。安定化板は高い製作精度・設置精度が求められるだけでなく、多様な開口部の形状を有していることから、試作品を用いた事前検討を行い、溶接変形を極力抑える製作・組立手順や溶接開先形状を決める等、ポート毎に製作方法を確認・調整することとしました。また、安定化板部及び支持脚・支持脚前面板の溶接時の固定方法等を確定し、最終工程までの見通しが得られました。製作後は、仮組や位置調整を行いつつ形状の詳細な測定を行い事前に位置調整量を把握することで、据え付け精度を高く維持しつつ、工期の最適化を図り真空容器内に組み立てる予定です。

[1] IFERC 事業チーム：<https://www.iferc.org/index.php/project-leaders/>

[2] 令和5年6月8日 総合科学技術・イノベーション会議 | 総理の一日 | 首相官邸ホームページ: https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202306/08kagaku.html

（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 (105)

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22日に開催しました。昨年同様6件(日欧合同プロジェクト: EPTRANS, MEGAEDGE, SSDEMO, JAプロジェクト: GGHB, EUプロジェクト: TURBGENE, MHD)の発表がありました。EPTRANS(発表者: Bierwage (QST))からは、運動論とMHDのハイブリッドコードMEGAのFortranからJuliaへの移植に関し、運動論モジュールによるMPI並列計算についてFortranと同等の良いスケーリングが得られたこと、MEGAEDGE(発表者: Dominguez-Palacios (University of Seville))からはMEGAを用いてASDEX-UプラズマのELMシミュレーションを行い、高速イオンを考慮した場合に高周波のモードが現れることなどの報告がありました。SSDEMO(発表者: 朝倉(QST))からは日欧原型炉設計活動の一環として進められている、ダイバータコードSONICを用いた欧州原型炉ダイバータのシミュレーションの報告がありました。TURBGENE(発表者: Ball (EPFL-SPC))からは、ジャイロ運動論コードGENEによる乱流シミュレーションで負三角度と通常の三角度の場合を比較し、標準的なアスペクト比では負三角度が閉じ込めを改善する一方、球状トカマクのような小アスペクト比では閉じ込めが悪化する可能性があるとの報告がありました。GGHB(発表者: 奥田・今寺(京大))からは大域的なジャイロ運動論コードGKNETの最近の拡張と、それによるJT-60SAプラズマにおけるイオン温度勾配駆動乱流シミュレーション結果などの報告がありました。最後にMHD(発表者: Hoelzl (IPP))から欧州のJOREKコードを用いた垂直移動現象(VDEs)の非線形シミュレーションにおいて、ITERでの熱クエンチ時間として30ミリ秒程度の予想が得られたことなどが報告されました。このようにJFRS-1を利用して高エネルギー粒子を含むプラズマエッジのシミュレーションや原型炉、JT-60SAやITERのためのシミュレーションが進められ成果が得られています。また6月22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、Marconi100から更新された欧州のスパコンLEONARDOにおけるベンチマーク結果を始め、日欧から5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。

2. サテライト・トカマク(JT-60SA)計画の進展

那珂研究所では、JT-60SAの統合試験運転を日欧で協力して進めています。5月末から開始した真空排気運転は順調に継続しており、真空容器・クライオスタット内ともに高真空度に維持しています。超伝導コイルの冷却

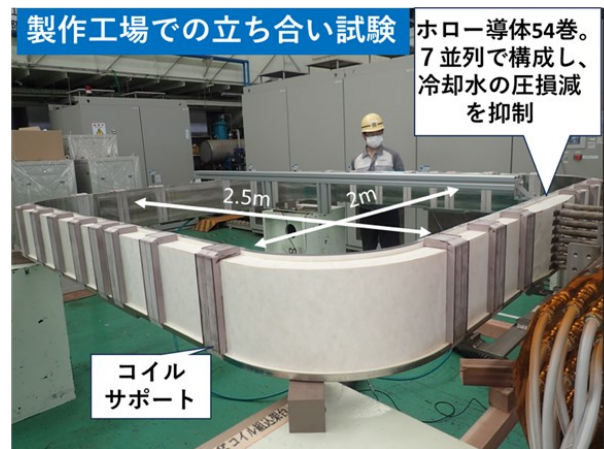


図1 垂直 NBI 打ち消し磁場コイル。

は、20Aを通電して各コイルに発生する電圧を測定し、銅の抵抗からコイルの平均温度を評価することにより、均一に冷却が進んでいることを確認するとともに、超伝導状態への転移をモニターしています。7月末には、全てのコイルが超伝導状態に転移したことを確認しました。統合試験運転では、他にも様々な作業を実施します。真空容器等の表面における水分や不純物を取り除くため、二重壁構造をもつ真空容器に高温窒素ガスを通して真空容器ベーキングを実施し、安定なグロー放電を実現するため、着火条件の探索を実施しました。また、プラズマ運転に向けて、電子サイクロトロン波加熱装置や計測装置の調整運転を継続しています。今後は、超伝導コイル通電試験、プラズマ運転を実施します。

統合試験運転後のプラズマ加熱実験に向けて、装置増強のための機器整備も順調に進めています。図1は、製作が完了した垂直NBIの打ち消し磁場コイルです。本コイルは、磁場計算と1/4スケールモデルを用いた実験に基づき基本設計を行いました。基本設計の際には、JT-60SAの漏洩磁場に適応させた場合、冷却管路が長くなるため、冷却水の圧力損失が課題となりました。そこで、巻線を並列化しそれぞれに冷却水を供給する構造にすることにより課題を解決しました。また、製作精度を確保するために、コイルの形を決めるサポート金具の構造に工夫をしました。以上により、製作精度を満足し、各種試験に合格したコイルを製作できました。統合試験運転の完了後、製作した機器の据付けを実施します。

[1] IFERC Webページ: <https://www.iferc.org/>

(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 (106)

1. 第 33 回 IFERC 事業委員会の開催

2023 年 10 月 11 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）六ヶ所研究所において、第 33 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 7 回目の事業委員会となる今回は、欧州側委員 3 名、日本側委員 2 名が交代となりました。日本側からは委員 3 名と専門家、欧州側からは新議長の GONZALEZ DE VICENTE 氏を含む委員 3 名と専門家、これに矢木事業長、中島副事業長ら事業チーム員、副事業長に就任予定の KAMENDJE 氏と事業委員会アドバイザー、書記が参加しました（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 年概況報告、2024 年作業計画、及び IFERC 事業チームと統合事業チームの更新が報告されました。審議の上、これらを第 32 回 BA 運営委員会（BASC, 2023 年 12 月 14 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、特にプラズマ不安定性と逃走電子発生の統合モデリングシミュレーションやダイバータコードのベンチマーク、安全性における放射性廃棄物に関する検討結果の更新などの各分野において、共同活動が推進されていることが報告されました。また、現在検討が進められている ITER の新しいベースライン計画におけるテストブランケットモジュールの原型炉設計活動に与える影響について議論が開始された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 分析の継続、分析技術開発及び燃料サイクルモデルの進展、構造材料開発及び腐食データベース整備における材料特性ハンドブック整備の進展が順調に進められていることが報告されました。また、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全体計画のリカバリーに向けて、調達取決めの改定が完了し、カザフスタン及びベルギーの研究炉での照射試験に向けた作業が具体的に開始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 機構との協力に関する作業計画に基づき、ITER 機構 CODAC セクションが開発している各種アプリケーションを利用するための CODAC 端末を遠隔実験室に構築する作業が完了して ITER-REC 間の専用広帯域回線（L2 VPN）に接続されたこと、またそれを用いたオペレータインターフェースアプリケーションの試験を開始し、ITER 主制御室でオペレータが利用するものと同等の、自由度の高いインターフェースに基づく ITER プラントのライブモニタリングが REC から可能になったことが報告されました。また IFMIF 事業との協力では、LIPAc 遠隔実験参加環境として遠隔コンピュータアクセス（RCA）方式と遠隔データアクセス（RDA）方式の比較検証試験が行われ、欧州からの遠隔実験参加者は RCA 方式に基づく環境をメインに利用する方針となっ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）活動では、六ヶ所研究所のスパコン JFRS-1 を利用する 2023 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、日欧の核融合計算機の状況、ITER 機構が参画するディスラプションやダイバータシミュレーションに関係するものを含む核融合開発において優先度の高い日欧のシミュレーション研究

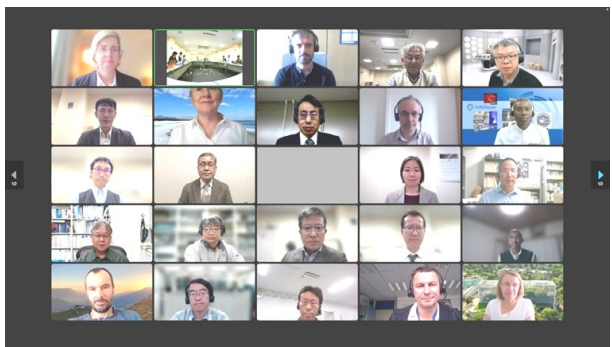


図 1 第 33 回 IFERC 事業委員会における現地及びオンライン参加の様子。

が進展していることなどが報告されました。

今回の事業委員会は、六ヶ所研究所において原型炉設計活動技術会合又は原型炉設計活動タスク会合と合同で2024年3月22日（金）に開催される予定です。

2. 第32回 IFMIF/EVEDA 事業委員会の開催

2023年10月24日（火）～25日（水）に青森県六ヶ所村の量研六ヶ所研究所において、第32回 IFMIF/EVEDA 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3名と専門家8名、日本側が林議長を含む委員3名と専門家4名、これに関係者34名の計53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2）。

今回の事業委員会では、2023年作業計画に基づき事業の進捗状況を確認し、IFMIF/EVEDA 事業の2024年作業計画案について審議しました。審議結果を踏まえ、第32回 BASC に対する勧告をまとめるとともに、IFMIF/EVEDA 事業の2024年作業計画案を承認のため BASC に提出するとの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）で使用していた高周波入力結号器（カプラ）の信頼性と連続運転に向けた性能の向上のため、冷却能力を改良した部品に取り換えました。その後 RFQ への取付と導波管の取付を行い、高周波源と接続しました。調整の結果、2023年8月1日にビーム運転を再開し、9月7日に0.1%のデューティサイクル*で113 mA の電流のビームを、ビームダンプまで高い安定性をもって輸送することに成功しました。今後、定格電流125 mA を目指した調整を行い、かつ、大電力高周波投

入試験の結果を反映し、デューティサイクルも向上させる予定です。

- RFQ の大電力高周波の投入試験では、2023年9月7日に定格の電圧（132 kV）で8%のデューティサイクルに到達しました。今後、調整を継続し、さらにデューティサイクルを向上させる予定です。
- 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主要機器の製作がほぼ完了し、また、リチウム燃焼試験などが予定通り進捗しています。

次の事業委員会は2024年3月21日（木）～22日（金）に六ヶ所研究所で開催することとしました。

3. サテライト・トカマク（JT-60SA）計画の進展

那珂研究所では、JT-60SA の統合試験運転を日欧で協力して進めています（運転中の中央制御室の様子を図3に示します）。5月末から開始した真空排気運転を経て、7月に超伝導コイルの超伝導状態への遷移を確認し、極低温でのコイル耐電圧性能を確認した後にトロイダル磁場コイルの通電試験を実施しました。

まず、コイルの急速な常伝導遷移を検出するクエンチ検出器の感度調整の後に、ヘリウム冷凍機の動作を制御してコイルの温度を上げて意図的に常伝導に変化させ、それをクエンチ検出器で検出する機能試験を行いました。クエンチが検出されると、クエンチ保護回路が作動し、コイルの電源が遮断され、バイパススイッチが開いて大きな抵抗器に強制的に電流を流し、コイルに蓄えられた磁気エネルギーを急速に放出します。

トロイダル磁場コイルの通電試験では、定格値の25.7 kA の長時間通電を実施しました。また、平衡磁場



図2 第32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。



図3 統合試験運転中の中央制御室の様子。

コイルと中心ソレノイドの通電試験も行い、同様にクエンチ検出器の感度調整やクエンチ保護回路の試験を実施し、正常な機能を確認しました。

次に、複数の超伝導コイルに同時通電する複合通電試験を行いました。複数の平衡磁場コイルの同時通電から始まり、コイルにかかる電磁力に注意しながら、最終的には中心ソレノイドとトロイダル磁場コイルも加えた通電を実施し、装置に異常が無いことを確認しました。

並行して、ベーキング及びグロー放電洗浄を実施

し、真空容器内壁の不純物を除去するとともに、プラズマ着火を支援する高周波加熱装置の入射調整も継続しました。それらの結果、10月23日、ついに初トカマクプラズマの生成に成功し、JT-60SAは現時点で稼働している世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置となりました。本成果は、12月1日に那珂研究所で開催するJT-60SA運転開始記念式典にて、日欧関係者に報告する予定です。

日欧協力による国際リーダー人材育成の新たな取り組みとして、9月4日から同月15日まで第1回JT-60SA国際ナショナルフュージョンスクール（JIFS）を那珂研究所で開催しました。生徒として日欧からそれぞれ10名の学生及び若手研究者、講師として日欧のトップ研究者24名が来所し、2週間の講義及び実習を行いました。開催初日には、開校式典を行い、日欧両政府からは文部科学省の馬場戦略官と欧州委員会のフォレストイエープロジェクトオフィサー、また先崎那珂市長や鎌田ITER副機構長らからも祝辞をいただきました（図4）。講義や実習では日欧の参加者が協力しながら、真剣に課題に取り組む姿が見られました。参加者からは、充実した内容と評価され、大変好評でした。

（量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門）



図4 JIFSの開校式典の様子。

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

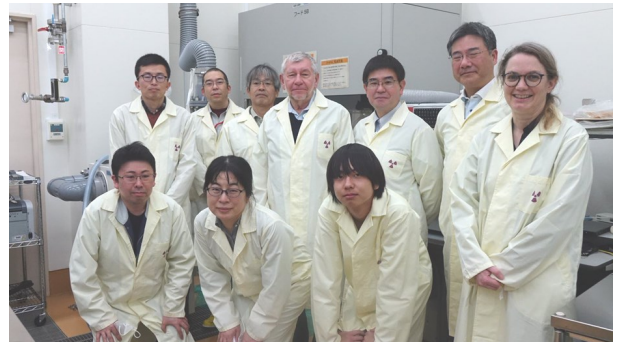


図 2 2023 年 12 月の JET ITER-Like Wall 分析に参加した日欧の関係者。

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

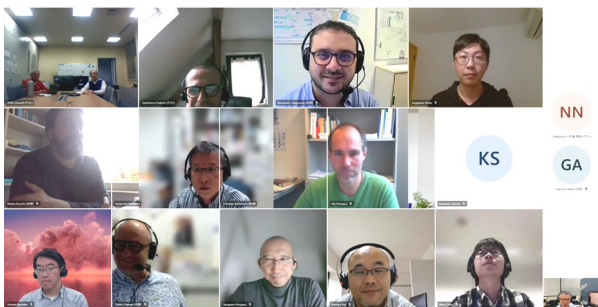


図 1 第 37 回 BA 原型炉設計活動タスク会合の様子 (2023 年 11 月、Web 会議にて開催)。

*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℃で焼結したベリライドの引張強度が 1050℃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℃、640℃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

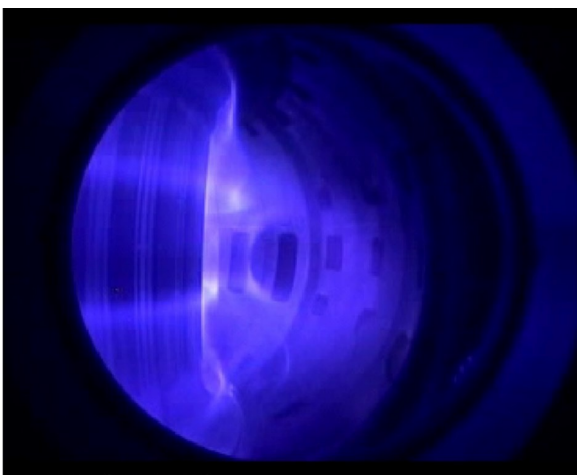


図 3 初トカマクプラズマの可視カメラによる画像。



図 4 JT-60SA 用ダイバータモジュール。

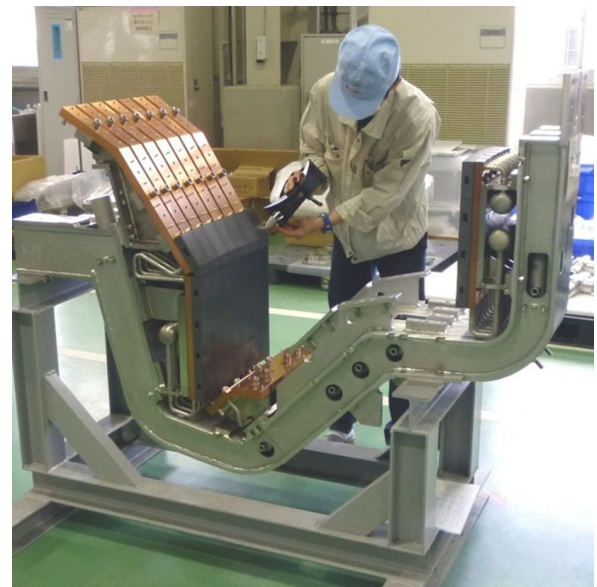


図 5 JT-60SA 用ダイバータモジュールの組立の様子。

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）