

インフォメーション

■会議報告

30th IEEE Symposium on Fusion Engineering (SOFE2023) 報告

野澤貴史, 谷川博康, 坂本宜照, 森田健司, 管文海
(量子科学技術研究開発機構)

1. 概要

IEEE Symposium on Fusion Engineering (SOFE) は、核融合工学に焦点を当てた国際会議で、隔年開催を原則とし、1965年のカルフォルニア州リバモアでの第1回会合から58年に及ぶ長い歴史を有する国際会議です。第30回のSOFE2023は英国オックスフォードで2023年7月9日から13日まで開催され、欧州で開催される初めての会合でした(米国以外で開催されるのは2度目)。このイベントは英国原子力庁(UKAEA: UK Atomic Energy Authority)が主催し、合計12のトピックス(A.加熱・電流駆動, B.ダイバータ・プラズマ対向機器, C.診断・計測, D.トリチウム増殖ブランケット, E.次世代装置, 原型炉, 発電所, 社会経済研究(設計研究), F.安全性, 規制, 核工学, G.材料(プラズマ対向, マグネット, 構造, 機能, 適格性評価プロセス), H.トカマク・非トカマク核融合実験(運転, プラズマ, マグネット工学を含む), I.プラント効率, 電力管理, 制御, J.運転・保守, 遠隔操作とRAMI, K.バーチャル工学, システム工学, プロジェクトマネジメント, L.トリチウム, 燃料サイクル, 燃料供給, 排気, 真空システム)は、世界の核融合コミュニティが一堂に会する会合目的において十分な分野の拡がりを見せました。今回、オックスフォードで開催された経緯もあり、UKAEAに限らず、大学やスタートアップ(SU)を含めて英国からの多数の発表があり、国を挙げての勢いが強く感じられるものでした。全体としてプレナリー講演11件、受賞記念講演2件、特別講演1件、招待講演18件、一般講演71件、ポスター発表約400件に加え、原型炉開発とスタートアップに関する2つのパネルセッションや企業展示を含めて、非常に盛大な会合でした。(図1, 2)



図1 オックスフォード市内のExamination Schools (会場)の様子。

2. 原型炉開発の動向

英国の核融合開発において、UKAEAが主導する球状トカマク炉の開発が焦点となっています。このプロジェクトは、球状トカマク炉のSTEP (Spherical Tokamak for Energy Production)を中心に展開されており、Tokamak EnergyなどのSUとも連携して開発が進められています。具体的な施設として、球状トカマク実験装置(MAST)、工学試験施設(FTF)、材料関連施設(MRF)、遠隔保守施設(RACE)、燃料サイクル試験施設(H3AT)などが整備され、これらの施設を活用した研究開発が進展しています。さらに、高磁場下熱負荷試験装置(CHIMERA)の開発も進行中で、2025年の稼働を目指しています。また、人材育成も重要な要素であり、約160人以上の博士課程の学生が核融合関連のプログラムに参加しています。UKAEAは博士の訓練プログラム(CDT: Centre for Doctoral Training: <https://fusion-cdt.ac.uk/>)を組織し、若手研究者の育成に力を入れています。さらに、核融合プロジェクトの中でも、Li自己冷却増殖システムを増殖ブランケットとして検討していること、構造材料としてODS系を650℃で使用し、インボード側では水冷却を併用するなどの具体的な設計概念も報告されています。同様に、Tokamak EnergyもHe冷却Li増殖ブランケットの設計検討や増殖材として Li_6PbO_6 の検討を行っており、英国内のその他のSUもUKAEAの支援を受けつつ、各々のプロジェクトを推進しています。

欧州はEUROfusionを中心に、現在12の項目に関する評価を進行中です。具体的には、目標設定規則や緊急基準レベルのクライテリアの規制、環境基準の拡充、放射性廃棄物の取り扱い、核融合動力炉の加圧システムの規制、国際データベース、核融合コードと標準、段階的な安全実証、確定的・確率的アプローチ、核融合動力炉の規制枠組みの合意形成、法的・規制的枠組みの整備、規範的な規制の枠組みに関する評価が行われています。評価の中で、特に高磁場化がコイル構造において小型化に必ずしも繋がらない点が示されました。また、ダイバー



図2 原型炉に関するパネルディスカッションの様子。

タ開発において技術成熟度レベル(Technology Readiness Level, TRL)の5-6段階の試験施設が必要であることから、照射後高熱負荷試験施設(JUDITH-3)の整備が進行中であり、小型原型炉の体積中性子源も検討されていることが報告されました。欧州では、水冷却LiPb増殖ブランケットやHe冷却固体増殖ブランケットの開発が進んでいますが、ブランケットの技術的成熟度が低いことが指摘され、リスク低減のために体積中性子源(Plasma-based Volumetric Neutron Source)の検討が始まっていることも報告されました。

米国は、特定の原型炉の形は確定していないものの、民間主導による核融合発電炉開発を多角的なアプローチで進める方針を示しました。Fusion Industry Association(FIA)を中心に、官民協力、規制、国際的な核融合産業のインセンティブに関する議論が行われています。また、ミシガン大学のHIDRAなどの研究を通じて、液体Liブランケット・ダイバータ技術の開発が進展しており、産学連携が盛んです。国立研究所も、MPEX(Material Plasma Exposure eXperiment)プロジェクトや核融合中性子源の開発などを計画し、核融合技術の開発を推進しています。さらに、米国では、SpaceXの成功事例を受けて、国立研究所の支援を基にした核融合ベンチャー活動を推進する「INFUSE」計画が進行中であり、炉形式に制限を設けずにトカマク以外のアプローチ(慣性核融合、ステラレータ、ミラーなど)に対しても積極的な支援が行われています。これらのベンチャー企業の活動を強化するため、国立研究所が研究開発センターの設立を検討していることも報告されました。米国内では、核融合ベンチャー企業のR&D活動が盛んであり、Commonwealth Fusion System(CFS)は2033年に稼働を目指すパイロットプラントARCを計画していますが、熔融塩増殖ブランケットの腐食課題など、材料関連の課題が多く存在し、現時点ではブランケット構造材料が確定していないことが課題となります。また、輸出規制に関しても議論が進行中であり、特に慣性核融合の場合、レーザー技術が輸出規制の対象となる可能性が高いことが指摘されました。

中国は国策として、大規模な資金と人材を投入して核融合開発を進めており、最も野心的なアプローチで開発を加速させています。中国は原型炉であるCFETR(Chinese Fusion Engineering Test Reactor)のための工学活動を進行中であり、CFETRのための工学R&D施設であるCRAFT(Comprehensive Research Facility for Fusion Technology)は、20のR&D施設から構成され、整備が進行中であり、2023年から一部の施設が稼働する予定です。CFETRは2027年の建設完了、2035年のファーストプラズマの実現を目指しており、水冷却ブランケットの採用や過剰に厳しい規制とならない考えが明確にされています。さらに、中国はITERの遅れを補完するために、小型のDT実験炉である燃焼プラズマ実証装置(BEST)の建設を2023年初頭に開始しました。BESTは、主半径3.6 m、小半径1.1 m、トロイダル磁場6.14 Tの小型炉であり、2027年末までにファーストプラズマを達成し、

$Q > 5$ の燃焼プラズマを実証する第I期、さらに $Q > 1$ の定常運転を実現する第II期が計画されています。これにより、CFETRへのプラズマ制御のフィードバックを得ることを狙っています。中国では、同時に、核融合中性子源装置であるHINEG(High Intensity Neutron Source Experiment)の建設と運用も進められており、異なる規模の中性子源を提供するための5つの装置の開発が進められています。その中でも、GDT型のHINEG-GDTは高い照射能力を持ち、体積照射場としての期待が示されています。

韓国では、2023年1月に原型炉設計タスクフォースが開催され、同年2月にK-DEMO(Korea Demonstration Fusion Power Plant)の基本概念が承認されたとの報告がありました。同時に、核融合シミュレータの開発においても重要な進展が見られており、デジタルツイン技術を活用した核融合シミュレータが開発されました。これにより、ITERのプラズマシミュレーションが成功裏に実現され、その成果を受けてITER機構との協力取決めが締結されたと報告されました。さらに、韓国は2032-35年頃に増殖ブランケットシステム(V-BBS: Virtual-Breeding Blanket System)の開発を進め、2036-40年頃には原型炉(V-DEMO: Virtual-DEMO)の開発を進める計画を示しています。これにより、韓国は核融合技術の発展に向けて重要なステップを進めていることが報告されました。

日本からは、JA DEMOの概念設計と関連R&Dの進捗に加えて、2023年4月に内閣府統合イノベーション戦略推進会議において「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が策定されたことが報告されました。従来のITER計画/BA活動から原型炉開発へと続くアプローチに加えて産業化等の多面的なアプローチによりフュージョンエネルギーの実用化の加速、SU支援策の強化等が検討されています。新戦略により、原型炉の発電実証で獲得する技術と商用炉に必要なと想定される技術とのギャップを埋めることで、社会実装を加速する展望が示されました。

3. 核融合スタートアップの動向

この会合では、主要な核融合ベンチャー企業によるパネルディスカッションが注目を集めました。具体的には、Tokamak Energy(TE)、General Fusion(GF)、CFS、Helion、TAEの代表者が参加しました。TEやCFSは、高温超電導を用いた磁場閉じ込めを主なアプローチとし、小型炉の構築が特徴です。ブランケットシステムについては、それぞれ液体リチウムや熔融塩を用いる先進的なシステムを想定しています。TE、GF、CFSはDT運転を前提としており、トリチウム関連技術などは公的な研究機関の技術開発に依存しており、独自の技術開発は行わない方針であることが明らかになりました。これらの企業は、2030年代初頭に実用発電炉を実現する目標を掲げていますが、特にCFSは材料に対する理解が不十分であり、SPARCのようなプロジェクトでもコイル構造材の開発が進行中であり、材料技術において課題があることが示唆

されました。ARC は 2033 年に稼働を目指しており、熔融塩 FLiBe (LiF と BeF₂ の混合塩) を用いた燃料増殖を計画していますが、ブランケット材料の選定がまだ行われておらず、技術的な課題があることが明らかにされました。その他、放射性腐食生成物、液体金属と材料の共存性、ライセンス、機械学習の応用、リスクマネジメントなどが議論されました。

4. 規制の動向

規制について英国を中心とした Agile Nations (参加政府間の革新的な規制の実践に関する協力を促進することを目的とした政府間規制協力ネットワーク) での議論や SU を交えた米国での議論が進む中、本会合でも幾つか講演がありました。基本的には、原子炉とは異なる(より緩い) 規制が妥当との見解で、各国でほぼ一致していました。

5. 研究開発の動向

会議全体を通して、材料開発に関する発表は限られましたが、実験炉を用いて 500 g 近い増殖材を照射し約 1Ci/日のトリチウム生成を実証し、計算値に対して 99.9% のトリチウム生成を確認し、99% の回収に成功したこと、中性子増倍材としては Be₁₂Ti を採用していること、30 dpa/年の独自の中性子源開発を進めていること、英国の STEP 開発に関係して Li との共存性に関する研究や設計データの取得が進展していること、等の報告があ

りました。

核融合の燃料であるトリチウム供給のためには、中性子とリチウムをブランケット内で反応させる必要があります。リチウムの同位体分離を行ってリチウム 6 を濃縮し、効率的にトリチウムを生産します。関連する講演では、同位体濃縮技術のリチウムへの適用状況や原型炉に向けたスケジュールが示されましたが、まだ濃縮技術の解決策は見つかっていないように思われました。また、量研が開発したイオン伝導体分離法 (LiSMIC) に関する講演では、詳細な結果や溶液の適用範囲などに関する多くの質問があり、この問題への関心の高さが感じられました。

6. 終わりに

今回の開催地は米国に戻り、マサチューセッツ工科大学のプラズマ科学核融合センターが主催するボストンでの会議が案内されました (詳細は psfc.mit.edu/sofe2025 をご参照ください)。この会議では、同地域を拠点とする CFS へのサイトツアーが計画されています。また、我が国でも第 2 回チェックアンドレビューが間近に迫っており、重要なまとめのフェーズに入っています。我が国の存在感を示す絶好の機会でもあり、多くの成果が発信されることを期待し、会議報告とさせていただきます。

(原稿受付：2023 年 9 月 3 日)