

核融合発電の実現に向けた最新の進展

Short Review
2024年4月投資工学研究所
成田 和弥

1. はじめに

CO₂を排出しない次世代クリーンエネルギーとして、核融合発電¹に対する世界各国からの期待が高まっている。米国のTAE Technologies、Helion Energyなどのスタートアップ企業の計画が進展し、核融合発電の実現が現実味を帯びてきた。

我が国では、核融合発電の早期実現を目指した国家戦略として、2023年4月に「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」が制定され、同年6月には核融合を含む「統合イノベーション戦略2023」が閣議決定された。また、「統合イノベーション戦略2023」を踏まえて、核融合発電を一つの新しい産業として、確立・育成することを目的としたフュージョンエネルギー産業協議会が2024年3月29日に設立された。計21社が発起人として役員に就任する（図表1）。最終的には50社以上が同協議会に参加する見込みであり、核融合発電の実現に向けて官民が一丸となって取り組んでいる。

図表1 フュージョンエネルギー産業協議会役員

株式会社アトックス	大和合金株式会社
株式会社EX-Fusion	三井物産株式会社
日揮株式会社	株式会社フジクラ
株式会社Helical Fusion	古河電気工業株式会社
住友商事株式会社	京都フュージョニアリング株式会社
三井不動産株式会社	日本電信電話株式会社
株式会社LINEAイノベーション	三井住友海上火災保険株式会社
株式会社IHI	三菱重工業株式会社
東芝エネルギーシステムズ株式会社	株式会社INPEX
三菱商事株式会社	Blue Laser Fusion 合同会社
清水建設株式会社	

(出所) 内閣府ホームページより日興リサーチセンター作成

¹ 重水素(Deuterium)や三重水素(Tritium)のような軽い原子核同士が融合し、ヘリウムなどの元素に変わる際の質量欠損により発生するエネルギーを利用した発電方法。CO₂を排出しないこと以外にも、資源の豊富さ、エネルギー効率の高さ、原子力発電のように暴走しないという安全性から注目が集まっている。

国際的には、2023年11月から12月にドバイで開催されたCOP28（国連気候変動枠組条約第28回締約国会議）において、ケリー米国大統領特使から、米国が核融合発電の早期実現を目指す旨の説明があった。COPにおいて、核融合発電について言及されたのは初めてのことである。

本稿では、核融合発電の実現に向けた直近の技術開発などの進展について報告する。

2. 核融合発電の実現に向けての直近の進展

2.1. 国際共同プロジェクトおよび各国プロジェクトの動向

はじめに、国際共同プロジェクトであるITERプロジェクトの進展について紹介する。

ITERプロジェクトとは、核融合発電の早期実現に向けて人類初の核融合実験炉を実現しようとする国際的プロジェクトである。同プロジェクトには、日本、欧州、米国、ロシア、インド、中国、韓国の7極が参加している。当初の目標として、2025年にファーストプラズマの達成、2035年に核融合運転を開始することを掲げている。しかし、ファーストプラズマの達成が予定から数年遅れる見込みになっている。その主な原因は、①真空容器の組み立て時における溶接の精度不足、②冷却用配管の亀裂、③真空容器の素材の変更などである。これらの課題のうち、①については技術的な課題だけではない。ITERプロジェクトの実験炉が建設されているフランスでは、原子力発電炉と同じ厳しい規制を核融合実験炉に適用していることが関連している。なお、米国、イギリス、日本では、フランスとは異なり、現在は科学実験などで使用される放射性同位元素を管理する法律に基づいて核融合実験炉を管理している。ITERプロジェクトの実験炉に適用されている規制に比べるとその規制は厳しくない。

続いて国別の進展を紹介する。

米国では、ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）の国立点火施設(NIF)が2022年12月に続いて、2023年7月30日に再び投入エネルギーを上回る核融合点火状態を達成した。投入エネルギーの2.05MJに対して取り出すことができたエネルギーは、3.88MJであり、前回の3.15MJを上回った。2023年においては核融合点火状態を計4回達成し、レーザー核融合による核融合点火状態の再現性を確認することができた。

欧州では、イギリスにあるトカマク型核融合実験炉の欧州トラス共同研究施設（JET）が2023年12月に、これまでの核融合実験で最大のエネルギー出力である約69MJを0.2mgの燃料から生成することに成功した。JETは本実験を最後に運用停止となるが、英国原子力公社（UKAEA）による次の開発プログラム「STEP」に、これまでの研究によって得られた知見が引き継がれる。

中国では、全超伝導トカマク核融合実験装置（EAST）がITERプロジェクトで採用されている標準的なプラズマの定常閉じ込めモードであるHモード²を403秒維持することに成功した。これはEAST自身が2017年に達成した世界記録である101秒を300秒以上更新した。また、中国では2025年完成

² 加熱入力があるしきい値を越えた時にプラズマ表面付近で急激に温度・密度が高い分布に遷移し、エネルギー閉じ込め時間が改善する閉じ込め状態（国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構ホームページより引用）。

予定の核融合総合研究施設群「CRAFT」の建設が進められている。「CRAFT」は2030年に発電実証予定のトカマク型実験炉「CFETR」に使用される材料、部品の開発や基礎的な研究を行う研究施設の集まりである。

日本では、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構（QST）那珂研究所のJT-60SA³が当初予定から2年以上遅れたものの、2023年10月にファーストプラズマの生成実験に成功した。今回の実験から得られた知見は、ITERプロジェクトや今後の核融合発電の実証研究に用いる原型炉に活かされる予定である。また、JT-60SAは、高圧力のプラズマを100秒以上維持することを次の目標にしている。

2.2. スタートアップ企業の動向

次に民間のスタートアップ企業の動向について紹介する。

はじめに最近のスタートアップ企業への資金動向について確認する。米核融合産業協会（Fusion Industry Association、以下FIA）の2023年版のレポートなどによると、2023年現在、全世界の核融合スタートアップ企業の資金調達額は累計で62.1億ドルを超えている。2022年の累計調達額（約48.6億ドル）から約13.5億ドルの増加である。2022年の年間資金調達額（約28.3億ドル）と比較すると、年間資金調達額は半減した。FIAの2023年版レポートによれば、2023年は世界的なインフレ率の上昇や銀行破綻の懸念により、投資家にとってネガティブな環境だったことも影響していると述べられている。

FIAの2023年版レポートによると、直近1年間で最も資金調達を行ったスタートアップ企業は、米国のTAE Technologyであり、その金額は2億5,000万ドルであった（図表2）。日本企業としては、京都フュージョンアリングが7,900万ドルの資金調達を行った。これは世界の核融合スタートアップ企業の中で3番目に多い金額である。

³フュージョンエネルギーの早期実用化を目指し、イーター計画と並行して日欧が共同建設した世界最大のトカマク型超伝導プラズマ実験装置（国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構ホームページより引用）。

図表 2 核融合技術のスタートアップ企業（直近 1 年間の調達金額上位 10 社）

会社名	所在国	設立年	調達金額 (万ドル)	核融合方式
TAE Technology	米国	1998	25,000	磁場閉じ込め
ENN	中国	2018	20,000	磁場閉じ込め
京都フュージョニアリング	日本	2019	7,900	—
Focused Energy	米国/ドイツ	2021	6,700	慣性閉じ込め
ENERGY SINGULARITY FUSION POWER TECHNOLOGY	中国	2021	5,500	磁場閉じ込め
SHINE Technologies	米国	2005	5,000	慣性閉じ込め
Avalanche ENERGY	米国	2018	4,100	磁場閉じ込め
THEA Energy	米国	2022	2,300	磁場閉じ込め
nT-Tao	イスラエル	2019	2,200	磁場閉じ込め
General Atomics	米国	2022	2,000	磁場閉じ込め

（出所）FIA の 2023 年版レポートより日興リサーチセンター作成

実際、2023 年 5 月に京都フュージョニアリングは、三菱商事や関西電力、政府系ファンドである JIC ベンチャー・グロース・インベストメンツなど 16 社から総額 105 億円の資金調達を行っていることを公表している。国外では、青色発光ダイオード（LED）の開発でノーベル物理学賞を受賞した中村修二氏が最高経営責任者（CEO）を務める米国のブルー・レーザー・フュージョンが、ソフトバンクと伊藤忠商事からそれぞれ数億円の資金調達を行った。また、イギリスのトカマクエナジーも古河電気工業から約 18 億円の資金調達を行うなど、日本企業からの国境を超えた資金調達が積極的に行われていた。

また、新しいスタートアップ企業である LINEA イノベーションが、日本大学と筑波大学の研究者によって、2023 年 9 月に設立された。LINEA イノベーションは、FRC（Field-Reversed Configuration／磁場反転配位）とタンデムミラー方式の複合による核融合方式を採用している。放射化⁴といった反応を引き起こす中性子の生成が少ない核融合燃料（重水素—ヘリウム 3(D-3He)および軽水素—ホウ素 11(pB11)) による発電の実現を目指しており、2024 年 1 月には 7,000 万円の資金調達を行った。軽水素とホウ素 11 を燃料とした核融合反応は、ITER プロジェクトの実験炉や他の多くの核融合炉で用いられている重水素—三重水素（DT）燃料による核融合と異なり、核融合反応によって放射線である中性子が発生しない。したがって、よりクリーンな核融合と言われており、注目を集めている。

技術的な進展に関しては、米国の TAE Technologies が日本の核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）を使用して、軽水素とホウ素 11 を燃料とした核融合反応の実証に世界で初めて成功した。また、同じく米国の Commonwealth Fusion Systems は、自己点火条件の達成と 50～100MW の核融合電力の生成を目標にした小型核融合炉（SPARC）を現在建設中であり、2025 年に稼働する見込みで

⁴ 元々は放射能が無い物質を放射性物質に変化させる反応。

ある。

商業化に向けた動きとして、2023年5月に Helion Energy がマイクロソフトと 2028 年からの電力供給契約を締結したことが発表された。これは核融合発電による電力の契約としては世界初であり、このニュースは世界中から注目された。

日本のスタートアップ企業に関しては、京都フュージョニアリングが海外の公的機関や民間企業から実験炉に使用する装置の受注契約を締結し、ドイツのカールスルーエ工科大学と技術開発について協力協定を締結するなど、国内外で同社の技術力の高さが評価されている。また、EX-FUSION がオーストラリアの EOS Space Systems と技術協力の覚書を締結した。この技術協力の目的は、EX-FUSION がこれまで核融合研究で得たレーザー技術の知見を活かして、地上からレーザーを宇宙ゴミ⁵に照射して、宇宙ゴミを大気圏に落とすことによって除去する技術の開発である。このように、核融合研究はその過程において派生する技術によって異なる分野の問題解決や産業の発展に貢献することも期待されている。

3. まとめ

本稿では、直近の核融合発電に関する主な進展と現状について確認した。

ITER プロジェクトが当初の計画より遅れているものの、他の公的機関やスタートアップ企業は核融合発電の実現に向けて着実に進展している。また、日本では装置の開発などのハード面だけでなく、核融合発電を産業として育成・確立するための核融合産業協議会の設立など、ソフト面でも前進している。

核融合発電の実現にはまだ多くの課題が残っているが、日本のスタートアップ企業への継続的な投資、逆に日本企業による海外のスタートアップ企業への投資など核融合発電の実現に向けて活発な動きが続いている。Helion Energy とマイクロソフトによる電力契約が締結されるといった報道もあった。2030 年代から 2040 年代に商用核融合発電を目標に掲げるスタートアップ企業もあり、今後も着実な進展を続け、核融合発電が少しでも早く実現することが期待される。

参考文献

中澤・成田（2023）「【Research Report】核融合発電技術の展望と課題」

<https://www.nikko-research.co.jp/library/12297/>

(END)

⁵ 宇宙空間に残留している運用が終了した人工衛星やロケットの破片など。非常に高速で移動しているため、人工衛星などに衝突すると致命的な影響を与える可能性がある。2023年12月時点で1mm以上の宇宙ゴミの数は1.3億個以上と推計されている。