

ITER 計画及び BA 活動の現況と今後の展望



石田 真一
Ishida Shinichi

1 はじめに

核融合反応によって大きなエネルギーが発生するという発見は、今から 80 年余り前の、太陽その他の巨大な天体のエネルギー源を説明するための理論的な考察に端を発している¹⁾。有名なアインシュタインの $E=mc^2$ の公式によれば、燃料 1 g の核融合反応により、失われた質量 m は石油 8 t 分ものエネルギー E に変換される。

核融合を地上のエネルギー源として利用するためには、原子核の激しい熱運動をもたらす数億度の高温プラズマを閉じ込め、制御された方法で十分に頻度の高い熱核融合反応を実現しなければならない。このため、核融合炉の実現には、超伝導やロボットといった世界最先端あるいは未到の技術を結集する必要があり技術的ハードルは高いが、核融合研究開発と共にこうした技術が進歩すれば、社会への還元も大いに期待される。

核融合は、燃料の基となるリチウムと重水素を海水から回収することができるため、豊富で偏在がなく、事実上無尽蔵のエネルギーを得られる技術である。高レベル放射性廃棄物を生成しない、万が一の制御不能時でも核融合反応は速やかに停止する、といった環境適合性や安全性に優れた利点もある。

こうした魅力から核融合は人類の持続的発展を恒久的に支えるエネルギー源として有力な候補であり、早期の実用化が望まれる。このため、日本では、

第三段階核融合研究開発基本計画¹⁾、ITER 協定²⁾、BA 協定³⁾等に基づき、核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発が段階的に推進されている（図 1）。2018 年 7 月に閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画において、核融合は今世紀中葉を見据えた選択肢の 1 つとして研究開発に取り組むこととされた。核融合が実用化できれば、パリ協定（COP21）が掲げる 2℃ 目標の達成にも大きく貢献できる。

文部科学省核融合科学技術委員会は、2017 年 12 月に「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」を取りまとめ、それを基に、2018 年 7 月に「原型炉研究開発ロードマップについて（一次とりまとめ）」を示した。そのロードマップにおいて、JT-60SA が初プラズマを予定する 2020 年頃に、そして ITER が初プラズマを予定する 2025 年頃に研究開発の進捗に関する中間 C&R を行い、ITER が核融合運転を始める 2035 年頃に原型炉の工学設計を終え、建設への移行を判断するという我が国の道筋が明らかになった。それに沿って、(国研)量子科学技術研究開発機構（QST）は、国から ITER 計画及び BA 活

1 平成 4 年 6 月原子力委員会策定

2 イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定（平成 19 年 10 月発効）：日本、米国、欧州、ロシア、中国、韓国、インドが参加極。

3 核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定（平成 19 年 6 月発効）

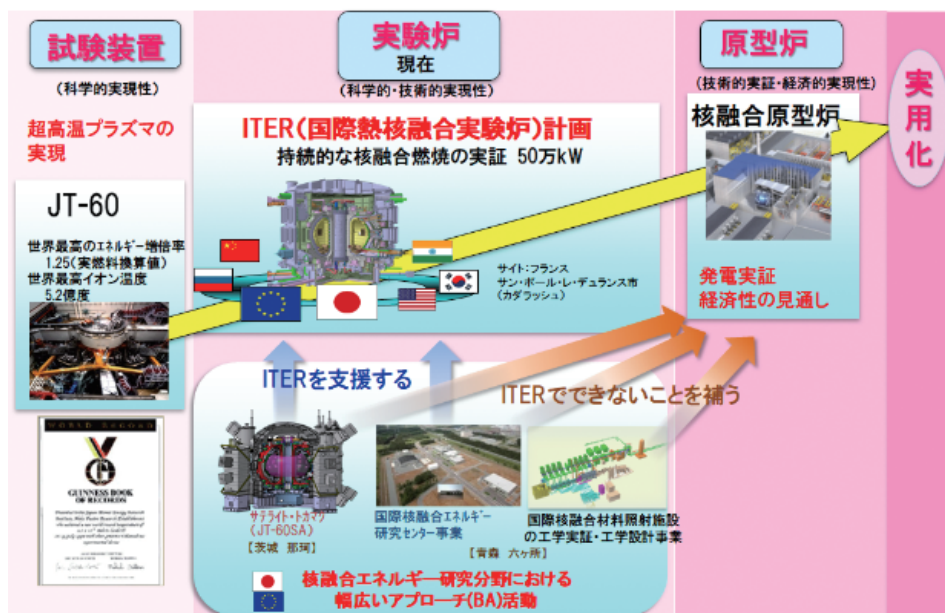


図1 核融合エネルギー実用化への道

動⁴の実施機関の指定を受け、国際約束に基づき ITER（国際熱核融合実験炉）計画及びBA活動を推進している。

2 ITER 計画と JT-60SA 計画

現在、核融合の科学的・技術的実現性を確認するため、7極の国際協力の下、南フランスに実験炉 ITER が建設されており、2025 年の初プラズマを目指し、建設が急ピッチで進んでいる²⁾（図2：写真は ITER 機構提供³⁾）。

那珂核融合研究所は、ITER の日本分担機器（図3）を国際約束に従い調達する重責を担い、超伝導体、超伝導コイル及び中性粒子入射加熱装置実験施設用機器、高周波加熱装置、遠隔保守装置等の製作を進めている。

現在、プラズマを閉じ込めるためのトロイダル磁場 (TF) コイルの製作では、我が国が分担する全9機分の製作を継続しつつ、第1号機巻線部の冷却試験を完了、巻線部と構造物の一体化の作業に着手した。各 TF コイルを固定する構造物の製作では、分担する全19機分の製作を継続しつつ、新たに欧州向け1機分、日本向け2機分の製作を完了させた⁴⁾。

高周波加熱装置の製作では、ジャイロトロン1機



図2 南フランスで建設が進む ITER サイト

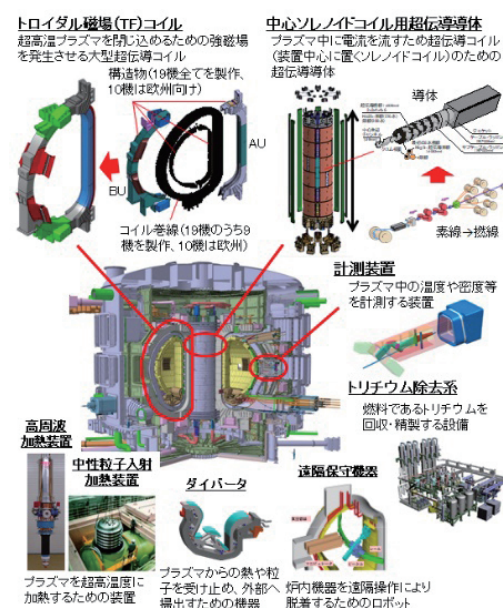


図3 ITER 計画における日本の調達分担機器

4 核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ活動



図4 BA活動を担う3事業の概要

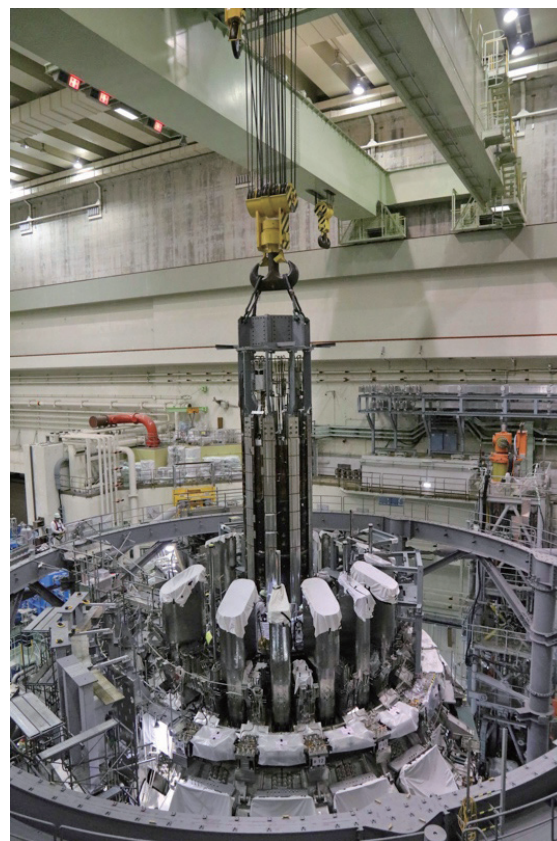


図5 茨城県那珂市で本体組立が大詰めを迎える JT-60SA 本体室

目の完成試験を行い、出力1 MWで300秒の長パルス動作を含め要求条件をすべて満足することを確認した。また、中性粒子入射加熱装置(NB)の製作では、北イタリアにあるNB実機試験施設において、日本が調達する高電圧電源の高電圧部機器と欧州調達機器との接続を行い、サイト受入試験である耐電圧試験を開始した。

那珂核融合研究所では、ITERの建設と並行して、ITER計画を支援・補完し、原型炉の建設判断に必要な技術基盤を構築するため、BA協定の下、サテライトトカマク(JT-60SA)計画を進め、2020年3月の本体完成、同年9月の初プラズマを目指している³⁾。JT-60SAの超伝導コイル等の我が国が分担する機器の製作が順調に進展し、JT-60SA本体室では日欧で調達した機器の組立が大詰めを迎えている(図4)。

1万分の1以下の精密な製作・据付調整が必要なJT-60SA本体の組立てでは、2018年に、最終18体目のTFコイルを最終セクターの真空容器や熱遮蔽体と一体化して本体に取り付け、組立工程上の大きなマイルストーンを達成した。2019年5月には超

伝導コイルの1つである中心ソレノイドがJT-60SA本体中心部に挿入された(図5)。

3 核融合原型炉に向けた研究開発

ITERは基本的に燃焼実験を行うところまでで、発電は行わない。実際に発電する核融合原型炉の開発も並行して進めていく必要があり、BA協定の下、六ヶ所核融合研究所も大きな役割を担っている。

2015年6月、我が国の原型炉開発の司令塔として原型炉設計合同特別チームが六ヶ所核融合研究所に設置された。QST、大学を含む研究機関、産業界から100名以上が参加し、オールジャパン体制の下に、電気出力数10万kWを持つ、技術的确实性を重視した炉の概念設計を進めている。

ITERを十分活用し、その成果を我が国の原型炉の設計に速やかに反映させるため、六ヶ所核融合研究所にITER遠隔実験センターが完成した。日本からITERの遠隔実験を行うための準備として、2018年11月、ITERと同じ南フランスにある超伝導プラズ

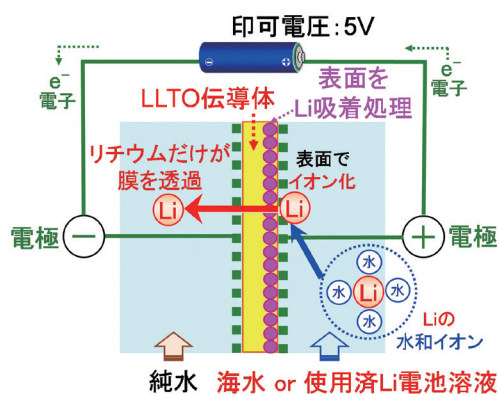


図6 海水等からのリチウム回収の原理

マ実験装置 WEST の遠隔実験を行い、その技術的実証に成功した。この成果は、新聞・TV・Web ニュース等で報じられ、ITER を始めとする海外からも大きな反響があった。

計算機シミュレーションセンターでは、大学等にも資源配分し、スーパーコンピュータを駆使した燃焼プラズマ予測のための大規模理論シミュレーション等の研究を行っている。2018 年 6 月には、新しい核融合専用スーパーコンピュータ（JFRS-1、愛称「六ちゃん-II」）の運用を開始した。4.2 ペタフロップスの性能は、2018 年 6 月のスパコンランキングで世界 61 位、国内 11 位だ。

ブランケット技術、即ち核融合エネルギーを取り出す技術の構築は、ITER から原型炉へ移る際の難関の 1 つである。原型炉の建設判断には、ブランケットの機能（冷却水の加熱及び燃料の増殖）の実証、及び構造材料特性（高速中性子が材料に与える影響）の検証が必要となる。このため、ITER にテストブランケットモジュール（TBM）を装着し、ブランケット技術を実証することを目的とする ITER TBM 計画を進めている。日本独自の技術を集積した TBM を開発・製作し、2028 年に第 1 号機を ITER へ持ち込む。2022 年までに最終設計承認を得るため、ブランケット工学試験棟を 2019 年度から 2 年間で建設し、安全実証試験を実施する予定である。

ブランケットで増殖させる燃料の安定確保のためには、燃料の基となるリチウムの資源回収と同位体分離技術の開発が必要となる。このため、リチウム伝導体を用いた海水及び使用済みリチウム電池溶液からのリチウム回収技術の開発を進めている（図 6）⁶⁾。ブランケットに必要なリチウム同位体 ${}^6\text{Li}$ は、天然

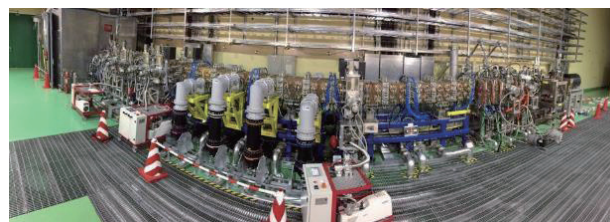


図7 青森県六ヶ所村で据付及び試験が本格化する IFMIF 原型加速器

の ${}^6\text{Li}$ に約 7.8% しか含まれないため、 ${}^6\text{Li}$ の割合を約 90% まで高める必要がある。 ${}^6\text{Li}$ がイオン伝導体内を ${}^7\text{Li}$ より早く移動することを発見し、2018 年に ${}^6\text{Li}$ の割合を 8.0% まで高めることに成功したことで、量産化への道筋が見えてきた。

原型炉の建設判断の前に、核融合炉から生じる高速中性子が炉の材料に与える影響を調べるための中性子源が必要である。このため IEA 協定の下に国際核融合材料照射施設（IFMIF）⁵⁾ の概念設計が実施され、そこで構想された加速器中性子源のための原型加速器の開発を、BA 活動の一環として進めている。この加速器開発の難しいところは、加速器としては桁違いに大きな電流（125 mA）、そして数か月の連続運転が可能でなければならないところだ。IFMIF 原型加速器開発では、日欧で機器製作を分担し、共同で据付調整及び統合試験を行い、2025 年までに重陽子ビーム（9 MeV、125 mA）の連続加速を実証するとともに、加速器の信頼性・耐久性を向上させることを目指している⁷⁾。

2018 年 6 月、世界に類のない高周波パワーを 8 系統同時入射する高周波四重極加速器による陽子ビーム（2.5 MeV）の初加速に成功、2019 年 3 月には重陽子ビーム（5 MeV）の初加速に成功した（図 7）。

2014 年 12 月に、重陽子ビームのターゲットとなる液体金属リチウムループの連続安定運転を実証した。このターゲット技術と現在開発中の原型加速器の技術を基に、核融合中性子源 A-FNS（40 MeV、125 mA、連続運転）計画を立ち上げ、2020 年頃より工学設計を進め、2025 年頃より建設に着手、2035 年頃までに材料照射データを取得することに

5 国際エネルギー機関 IEA 協力のひとつである「核融合炉材料の照射損傷に関する研究開発の実施取り決め」の付属書 II「核融合材料の照射損傷に関する実験」に基づき実施されている国際核融合材料照射施設（International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF）の活動



図8 A-FNSを中心とするニュートロンフォレスト構想

より，原型炉の建設判断に資する⁸⁾。

4 産業応用ポテンシャル

原型炉の建設判断を行う前に社会への還元が期待される核融合研究開発の産業応用ポテンシャルとして、「グリーンイノベーション」と「ニュートロンフォレスト」の2つを構想している。「グリーンイノベーション」は，リチウム資源を海水等から回収する研究の実用化に向け2022年頃までにリチウム回収パイロットプラントを整備し，そこで得られたデータを基に，海水リチウム回収，電気自動車等用リチウム電池リサイクルの社会実装を加速させ，新リチウム産業の創生につなげる構想である。

A-FNSは，連続的に高速中性子を生み出すことから，核融合目的に加え，基礎研究から産業・医療・エネルギー応用に至るまで広く網羅する汎用性の高い高速中性子照射場を提供できる施設としたい。「ニュートロンフォレスト」は，このA-FNSを中心

に据え，製薬・医療・農業・材料といった中性子を活用する研究施設や関連産業の集積につなげる構想である(図8)。日本は，医療用の放射性同位元素(RI)(診断用テクネチウム-99mの親核であるモリブデン-99等)を海外からの輸入に依存しており，安定供給のための国産化に課題がある。A-FNSでは200種類以上のRI生成が可能であり，将来のRI産業創生への展開が期待される。

以上2つの構想の実現も経て，長期的には，核融合原型炉の拠点となる地域が，それを中核とするエネルギー産業都市に変貌することを期待している。

参考文献

- 1) 日本物理学会編：プラズマと核融合，丸善(株)，147頁(昭和51年)
- 2) B. Bigot, *Progress toward ITER's First Plasma.*, Proc. 27th IAEA Fusion Energy Conf. 2018 (Ahmedabad, India, 2018), IAEA-CN-259/OV1-2
- 3) <https://www.iter.org/>
- 4) N. Koizumi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.29, no.5, Aug. 2019
- 5) H. Shirai, *et al.*, Nucl. Fusion., **57**, 102002 (2017)
- 6) 星野毅, 日本原子力学会誌., **59**, 510 (2017)
- 7) K. Kondo, *et al.*, Fusion Eng. Des., **136**, 252-257 (2018)
- 8) K. Ochiai, *et al.*, Design Progress of Advanced Fusion Neutron Source for JA/DEMO Fusion Reactor., Proc. 27th IAEA Fusion Energy Conf. 2018 (Ahmedabad, India, 2018), FIP/P3-6

((国研)量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門)