

工学実証段階にきた核融合発電研究の現状と課題

名古屋大学大学院 工学研究科 電気工学専攻 教授 大野 哲靖

Professor Noriyasu Ohno
Department of Electrical Engineering,
Graduate School of Engineering, Nagoya University



1.はじめに

太陽が地球にもたらすエネルギーの源は核融合反応である。太陽中心では水素の原子核（陽子）4つが核融合反応を起こし、ヘリウム原子核が作られる。この時、反応前と反応後では質量が減少し、アインシュタインの特殊相対性理論から導き出される質量とエネルギーの等価性により、この質量減少分が膨大なエネルギーとして放出される。太陽は、この核融合エネルギーで輝き続けている。

太陽を地球上に創り、究極の新エネルギー源を実現する核融合発電の研究が始まったのは約50年ほど前である。地球上では、比較的核融合反応が起こりやすい重水素と三重水素を燃料とした核融合反応を利用する。この核融合反応により、ヘリウムと中性子が生成される（第1図）。1グラムの燃料から石油約8トン相当のエネルギーを取り出すことができる。さらに、発電時に二酸化炭素を放出しない。核融合発電は、地球温暖化、エネルギー資源の枯渇問題を根本から解決できる発電方式として期待され、各国で研究開発が行われている。本稿では、核融合研究の現状と課題について紹介する。



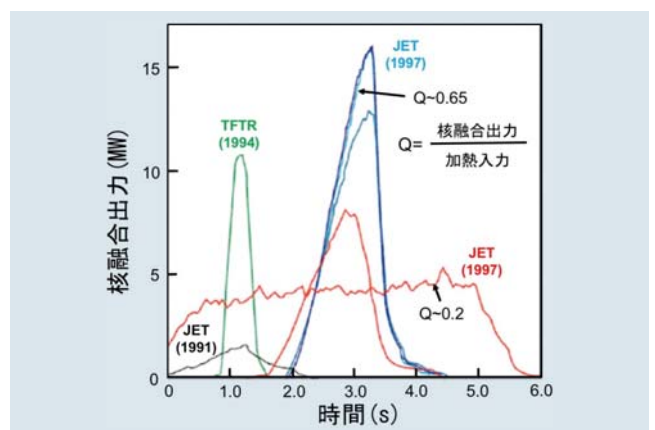
第1図 重水素と三重水素を用いた核融合反応

2.核融合発電研究の現状

原子核は正の電荷を帯びているために原子核間にはクーロン斥力が働く。クーロン斥力に打ち勝って核融合反応を起こすためには、原子核同士を高速で衝突させる必要がある。そのため燃料ガスを一億度以上に加熱し、原子核に大きな運動エネルギーを与える。このような高温状態のガスは電子とイオンに電離しプラズマ状態となるため、核融合研究の目標は、地球上で高温プラズマを生成・維持することとなる。目標とするプラズマの温度は1億

2000万度以上、密度は 1cm^3 あたり100兆個以上、また（保温性能に対応する）閉じ込め時間は1秒以上である。

第2図は、1990年代に行われた欧州のトカマク型磁場閉じ込め核融合装置JET (Joint European Torus) と米国のTFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) の実験結果である。実際に重水素と三重水素を用いた高温プラズマを発生させて、最大15MWの核融合反応によるエネルギー出力（核融合出力）を得ている。図中のQは、高温プラズマを生成するために必要なエネルギー（加熱入力）と核融合出力の比を表し、 $Q = (\text{核融合出力}) / (\text{加熱入力})$ で定義され、核融合エネルギー増倍率と呼ばれている。このように、高温プラズマを用いた核融合反応の可能性の科学的実証という点では、既に核融合研究は終了している。一方、発電炉という点では、Qが1以下では意味がなく、核融合出力が得られている時間も数秒間で不十分である。そのため現在の核融合研究は、Qが高いプラズマを長時間維持するという工学的実証の段階にあり、継続的な研究開発が進められている。



第2図 JET、TFTRトカマク型核融合装置での重水素・三重水素プラズマを用いた核融合反応実験(J. Jacquinot, Nuclear Fusion 50 (2009) 014001のFig. 8を改変)

3.国際熱核融合実験炉ITER計画

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 計画は、1985年にジュネーブで行われたレーガン、ゴルバチョフによる米ソ首脳会議をきっかけに開始された。日本、欧州 (EU) も参加し、2001年まで行

れた工学設計活動後、日本とEUのどちらにITERを建設するかという大激論が交わされ、様々な外交的努力の結果、2005年にニースやマルセイユに近い南仏のサン・ポール・レ・デュラス（地元呼称：カダラッシュ）に建設サイトが決定した。

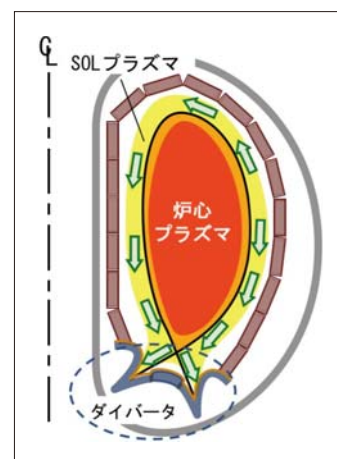
ITERは、まさに発電炉への道筋をつけるための工学的な実験炉である。ITERは核融合出力500MW（50万kW）が予定されている。プラズマを閉じ込めるための超伝導磁場コイルがつくる最大磁場は11.8 T、プラズマの加熱電力73MWであり、装置サイズとしては直径30m、高さ30mの巨大なトカマク型核融合装置となる。ITERのミッションは、Qが10以上の性能をもつ重水素・三重水素のプラズマを約400秒維持することである。またQが5程度の定常運転も目標に掲げている。その過程の中で、超伝導磁場コイルやプラズマ加熱装置などの核融合工学技術の確立が行われる。

ITER計画の現在の参加国は欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インドであり、欧州が45.5%、その他の国が9.1%を分担することになっている。参加7極の総人口は37億人以上となり、世界人口の約半分が参加しているプロジェクトである。ITERの建設・運転は、共同事業体であるITER機構が責任を持つが、装置建設においては、各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組みが取られている。同様の国際協力としては、国際宇宙ステーションがあるが、ITERの構造は遥かに複雑であり、ITERの建設は極めて挑戦的な国際共同作業であるといえる。現在ITERの建設は順調に進んでおり、2025年に最初のプラズマが生成され、2035年重水素-三重水素を用いた核融合燃焼プラズマが生成される予定である。ITERの成功は、核融合発電炉実現のマイルストーンになる。

4.喫緊の課題：ダイバータと熱・粒子の制御

第3図はトカマク型核融合装置の断面図である（ドーナツの真空容器を輪切りにした断面）。下部に設置されるダイバータは、核融合反応の反応生成物であるヘリウム及びプラズマ中の不純物を減少させる役割を担っている。このダイバータの設計が、ITERから原型炉、発電炉に至る研究開発で最も難しい課題だと認識されている。核融合反応を起こす高温の炉心プラズマから周辺に流出したプラズマ（SOLプラズマ）は矢印のように磁力線に沿って輸送され、ダイバータ領域にある高耐熱壁（ダイバータ板）に流入する。100万kWの電気出力の発電炉を考えた場合、発電効率は30-40%であるので、核融合出力としては3 GWが必要である。核融合出力の4/5のエネルギーは中性子として放出され、中性子は磁場の影響を受けないため、プラズマの周りに配置されたブランケット

と呼ばれる構造体に到達し、そこで熱となり発電に用いられる。一方、1/5のエネルギー（約600MW）はヘリウムイオンとして放出されるために、プラズマの加熱に寄与し、最終的には周辺領域に流出しダイバータ板へ流入する。プラズマは磁力線に束縛され、あまり広がらないため、ダイバータ板の受熱面積は



第3図 トカマク型核融合装置の断面図（ポロイダル断面）

約 1m^2 程度である。よって、ダイバータ板への熱負荷は数百 MW/m^2 と想定される。地球上で最も融点が高いタングステンダイバータ板材料として用いた場合でも、 $20\text{MW}/\text{m}^2$ が工学的除熱性能限界と考えられており、極めて大きなギャップが存在する。

この難題を解決するために、プラズマ-ガス相互作用を利用してダイバータ板前面で熱流束を低減させる「非接触プラズマ」が考えられている。非接触プラズマでは、プラズマ-ガス相互作用によりプラズマを冷却し、プラズマを低温高密度状態とすることで、最終的には電子・イオン再結合過程によりプラズマを気相中で消失させるというものである。本手法の原理実証は、当研究室の試験装置などで行われている。第4図は著者の実験装置で観測された非接触プラズマである。ガス圧を上昇させると、ダイバータ板前面でプラズマが消失していることが分かる。この非接触プラズマを用いた熱負荷制御方法の工学実証が核融合発電炉の実現の鍵となるため、現在精力的に研究が行われている。



第4図 非接触プラズマ生成実験の写真

大野 哲靖（おおの のりやす）氏 略歴

昭和63年 4月 長崎大学助手(工学部)
平成2年10月 名古屋大学助手(工学部)
平成5年10月 名古屋大学講師(工学部)
平成13年 2月 名古屋大学助教授(工学研究科)
平成20年 4月 名古屋大学教授(工学研究科)
平成27年 4月 名古屋大学工学研究科附属プラズマナノ工学センター長