

核融合発電は炭素中立の切り札となるか

◆100年前に提案された核融合発電の原理と現状

1920年、英国の物理学者エディントン博士は、太陽の輝きは核反応による、と考えた。水素の原子核同士が融合してヘリウムの原子核となる際の質量欠損をアインシュタインの公式「 $E=mc^2$ 」によってエネルギーに変換すれば、太陽を光り輝かせることができる、との仮説を立てた。この推測は正しく、その後の核融合利用の原理となった。

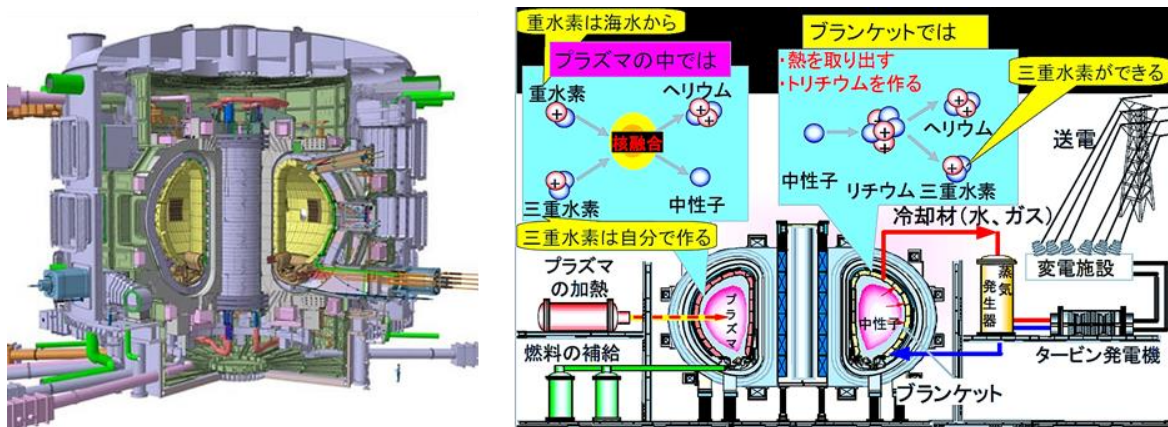
核融合発電とは、プラズマ状態となった重水素や三重水素などの同位体水素による核融合を人工的に作り出す技術である。水素を高温にすると、原子核（正電荷イオン）から電子（負電荷）が分離してプラズマとなる。さらに温度が上昇して原子核イオンが素早く動くようになると、静電力に打ち勝った原子核同士が融合する距離にまで近づく。その結果、エネルギーが放出される。5,000万℃の極高温と $10^{20}/\text{m}^3$ の高密度のプラズマ状態を1秒以上、安定維持し（ローソン条件）、核融合によって放出される熱量が、プラズマに注入されるエネルギーを上回ることができれば、発電設備となる。燃料である同位体水素の入手は比較的容易であり、核融合発電が実現すれば、継続的な経済成長に伴うエネルギー需要を満たすことができる。また、運転時に温暖化効果ガスを排出しないため、従来の発電方法に比べて環境負荷を大幅に軽減できる。さらに、核分裂発電のような危険性はなく、故障があれば、速やかに設備を停止できる。

旧ソ連によるトカマク炉の開発のブレイクスルーを受けて、核融合発電の研究は70年代の「ビックサイエンス」となった。現在では、EU、米国、ロシア、中国、日本を筆頭に、ブラジル、カナダ、韓国などでも研究が行われている。発電炉の構造材料や設計には極めて難度の高い工学的課題が多く、巨額な費用を分担するための国際的な協力体制も構築されているが、実現には、常に「あと10年」と言われ続けてきた。ところが、ここ数年で欧米を中心に40から50社の核融合関連の企業が生まれつつある。特に、北米では、数億ドルの投資を受けたベンチャー企業が、米国政府や大学との協業の下で、開発を加速している。

◆核融合発電の技術体系

核融合発電の現在の技術水準では、重水素（D）とトリチウム（T）の2つの同位体水素を利用する。核融合炉内で生じる、D-T核融合反応で発生した中性子が、炉心を囲むブランケットに吸収される。このとき、ブランケットは、中性子の運動エネルギーを吸収することで加熱される。ブランケット内を流れる冷却材（水、ヘリウム、リチウム鉛共晶）によって熱エネルギーが回収され、従来型の発電機によって電力が得られる。

重水素は30g/m²の濃度で海水中に存在し、他のエネルギー燃料に比べて豊富な資源である。一方、トリチウムは、半減期が約12年と比較的に短時間で消滅する放射性物質であるため、自然界には微量しか存在しない。そこで、リチウムと中性子との核反応によってトリチウムが得られることを利用し、ブランケットにリチウムを含ませることで、燃料を自己完結的に製造する方法が検討されている。

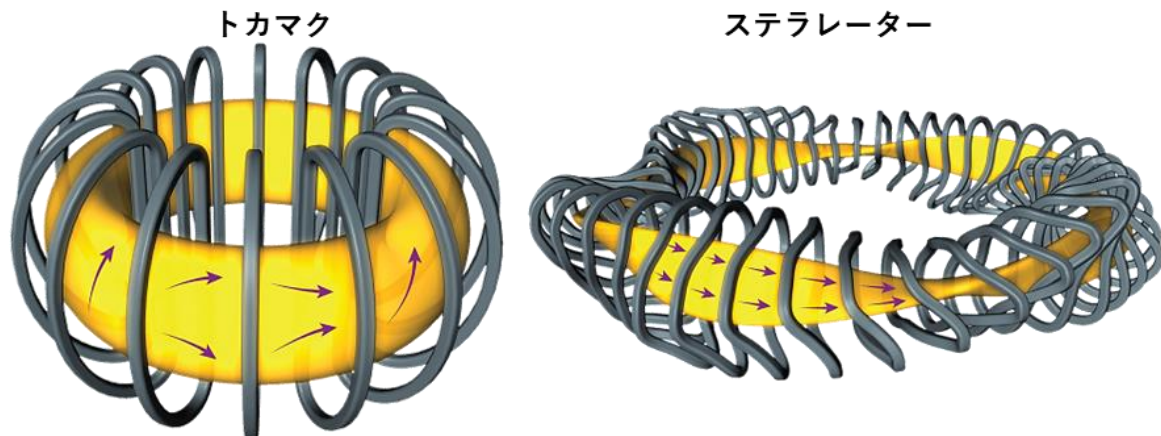


左図：トカマク核融合炉「ITER」のモデル図。中央の黄色部でプラズマを生成する。
 右図：水素プラズマ中の核融合によって中性子が生成し、ブランケット内で中性子の運動エネルギーを熱に変換し、リチウムとの核反応でトリチウムを再生する。
 （量子科学技術研究開発機構のHPから引用）

核融合炉の設計思想は、プラズマの封じ込めの方法によって、磁場閉じ込め、慣性閉じ込め、磁化標的核融合に分類される。

磁場閉じ込め方式では、ドーナツ型に配置された電磁石を用い、ループ状の磁場によってプラズマを数気圧の圧力で閉じ込め、核融合温度まで加熱する。プラズマ自体は高温となるが、磁場によって原子炉の壁面には接触しない。磁場の形状や方向によって、トカマク、ステラレーター、逆磁場ピンチの設計が開発されている。トカマクでは、炉の周囲に等間隔で配置されたコイル群でドーナツ型磁場が形成される。最も有望な設計であり、世界各地でトカマクの研究が行われて

いる。ステラレーターでは、らせん状の磁場を用いている。炉と電磁石の形状が複雑なため、トカマクに比べて設計・製作が非常に難しいが、燃焼プラズマの制御と監視が容易であり、定常状態での連続運転が可能である。逆磁場ピンチは、トカマクに類似する配置であるが、ドーナツの中心と外側で逆向きの磁場分布を用いる。磁場符号の空間分布が逆転することで、プラズマ電流が強力となる。



磁場閉じ込め方式における電磁石の配置（灰色）、プラズマの分布と流れ（黄色）。逆磁場ピンチは、トカマクのドーナツの中心と外側で逆向きの磁場分布を用いる。
(Simmons Foundation Annual Report 2019より引用)

慣性閉じ込め方式は、新しい研究分野である。直径数ミリのD-T混合燃料のペレットの表面にレーザーやイオンビームを照射し、内層部が圧縮されて加熱されることを利用する。ペレットの中心部は液体密度の1,000倍にまで圧縮され、核融合が生じ得る状態となる。一度、核融合が始まると、放出エネルギーによって周囲の燃料が加熱され、さらに核融合を起こし、ペレットの中心から外側に向かって連鎖反応が広がる。大阪大学が行った最近の研究によれば、高さ1ミリの円錐形に圧縮された燃料に高強度のレーザーパルス照射することで、より低温での連鎖反応が可能になることが報告された。燃料圧縮と連鎖反応発生とを分離できれば、より実用的なプロセスとなることが期待される。

磁化標的核融合は、慣性核融合の圧縮型加熱と磁場によるプラズマ閉じ込めを組み合わせた方法である。レーザー、電磁氣的、機械的な手段で圧縮加熱を複合的に行い、適切なプラズマを形成して核融合条件まで加熱する。磁場閉じ込め方式に比べてプラズマの閉じ込め時間や圧縮速度の条件を緩和できるため、低コストでシンプルな方法となるものと考えられている。米国のロスアラモス研究所やカナダのGeneral Fusion社などで検討が進められている。

核融合発電の研究開発例（各種資料よりARC作成）

研究・実験炉の名称	運営機関	核融合の方式	経緯、現状、予定
ITER	中国、インド、日本、ロシア、韓国、米国、EUによる国際連携	次世代トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・88年より設計開始、13年より建設開始、計220億ドルを投資。 ・25年に水素-水素燃料、35年にD-T燃料での核融合実験を予定。 ・50M W の投入電力で500M W -400秒の連続プラズマ発生を目指す。
JET	欧州共同体が建設、英国が運営中	トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・ITERの準備設備として、78年から計画開始。 ・91年にD-T燃料で核融合電力を生成、20年から追試中。 ・24M W の投入電力で16M W -1秒のプラズマ生成の実績あり。
KSTAR	韓国・核融合研究所	トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・ITERのサテライト研究設備として建設。 ・08年に初のプラズマを生成、20年に1億℃で20秒以上のプラズマ運転に成功。 ・23年より原型炉の先行試験を予定（D-T燃料は使用せず）。 ・ITERの次の商業発電炉となる計画。
K-DEMO tokamak	米国・プリンストンプラズマ物理研究所と韓国・核融合研究所による協同研究計画	大口径トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・1G W の出力で数週間の連続運転を目指す。 ・9.4億ドルを投資し、37年から初期運用の予定。 ・高温超電導磁石による小型化技術を開発。
ST25 HTS, ST40	英国・Tokamak Energy社	球形トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・15年に初号機「ST25 HTS」で29時間の連続プラズマ発生を実現。 ・19年に2号機「ST40」で1,500万℃のプラズマ温度を達成。 ・2030年までに電力供給の商業化を予定。
ALCATOR	米国・マサチューセッツ工科大学	高磁場トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・93年から16年まで小型炉を稼働。 ・16年に4M W の投入電力で3,500万℃のプラズマを2秒間維持。 ・21年から次世代実験炉を建設予定。
EAST	中国・科学院合肥物理科学研究所	超電導トカマク	<ul style="list-style-type: none"> ・18年に5,000万℃の水素プラズマで102秒を維持。 ・18年に1億℃の水素プラズマで10秒を維持。
Large Helical Device	日本核融合科学研究所	ステラレーター	<ul style="list-style-type: none"> ・98年に初回プラズマを生成、大型核融合炉と同等のプラズマ閉じ込め特性を実現。 ・約1億6000万度の温度、144M Jのプラズマ蓄積エネルギーを達成。
Wendelstein 7-X	独国・マックスプランク研究所	ヘリカル型ステラレーター	<ul style="list-style-type: none"> ・16年に2M W の投入電力で8,000万℃のプラズマを0.25秒間維持。 ・将来は30分の連続運転を計画。投資額は10億ユーロ。
General Fusion	カナダ・General Fusion社	磁化標的核融合	<ul style="list-style-type: none"> ・02年に設立、計1億ドルの投資を獲得。 ・300eVのプラズマを生成し、0.5秒の封じ込めに成功。
National Ignition Facility	米国・ローレンスリバモア国立研究所	レーザー慣性閉じ込め	<ul style="list-style-type: none"> ・12年に1.85M Jの紫外線レーザー光を直径2mmの燃料ターゲットに照射。 ・13年に核融合による発生エネルギー量が、燃料に吸収される量を上回る。
LPP Fusion	米国・LPP Fusion社	高密度プラズマ集中法	<ul style="list-style-type: none"> ・水素-ホウ素燃料による非中性子系核融合を開発。 ・400keVの電子エネルギーの取り出しに成功。

◆国際連携による大型実験炉の開発状況

2020年12月、英国のトカマク核融合実験炉「JET」で、トリチウム燃料を用いた実験が開始された。さらに、21年6月には、D-T混合燃料による実験も予定されている。トカマクによるトリチウム実験の実施は、実に1997年以来である。JETは、国際連携実験炉「ITER」の1/10の規模の準備設備であり、過去の実験では、24MWの投入電力から最大で16MW、持続的に5MWの核融合出力が得られた。今回の一連の実験では、核融合出力を5秒以上持続させることを目標としており、結果は、ITERのプラズマの挙動を予測し、運転設定を行うために活用される。

ITERは、中国、インド、日本、ロシア、韓国、米国、欧州連合の7つの加盟国が協定し、220億ドルを投じてフランスのカダラッシュに建設された、世界最大の核融合炉である。13年から建設が始まり、18年から水素のみを用いた低出力での実験が開始される予定であったが、25年に延期された。D-T混合燃料による実験は、35年から行われる予定である。50MW以下のプラズマ加熱の電力入力で500MWのプラズマ熱出力を少なくとも400秒間連続で運転することを目標としている（電力は発生しない）。ITERの連携国として、日本は多くのハイテク部品を提供し、量子科学技術研究開発機構が、約10億ユーロの材料試験施設を建設した。

また、三菱重工業が、ITER用の世界最大規模の超伝導磁場コイルの初号機を完成させ（20年2月）、NTTが、ITER協定国の30カ所の実験設備を次世代光通信基盤で接続・制御する計画を発表した（同5月）。

さらに、核融合による発電を実証するための、「Demo」と呼ばれる2GWのプラントが期待されている。コンセプト設計は17年に完了しており、24年頃に建設を開始する予定であったが、実際には40年以降に延期された。

◆各国独自による要素開発の状況

20年12月、中国が開発する、次世代トカマク型研究装置「中国還流器2号」が完成し、初の放電に成功したと発表された。また、同国は、ITERに必要な電磁石支持体、補正コイルシステム、ガス注入システムなどの大型部品の開発を受け持ち、20年2月には、超電導磁石や補正コイルがITERに納品されている。

20年11月、韓国は、実験炉「KSTAR」による、1億℃の高温プラズマの20秒以上の連続運転に成功した。過去の記録を2倍以上、上回る実績であり、25年には、300秒以上の運転記録を目指す。

過去にトカマク装置の運転実績を持つ日本では、次世代機である「JT-60SA」が20年を完成させており、21年3月には、コイルの通電実験に成功している。

◆民間企業やベンチャー企業による小型核融合炉の開発状況

20年12月、米国前政権は核融合の開発支援の予算案に署名し、3.25億ドルの財政支出を投入し、国の研究機関と民間の企業による協力体制「INFUSE Program」の認可、および、大規模システム建造の支援などをエネルギー省に指示した。

21年1月、カナダの核融合炉の開発企業であるGeneral Fusionは、ネット通販企業のShopifyの創設者による資本参加を発表した。同社には、AmazonのBezos会長からも10年前に投資がなされており、19年時点での調達額は計1億ドルに達している。General Fusionは、米国海軍研究試験所が提唱した、磁化標的核融合法を開発している。適度に加熱されたプラズマを容器に封じ込め、磁場を高速で圧縮することで超高温に昇温し、核融合を引き起こす方法である。

21年3月、米国のCommonwealth Fusion Systemは、高温超電導体による小型の電磁石を用いた原子炉の建設を21年内から開始すると発表した。同社は、

MicrosoftのGates氏の投資会社から2億ドル以上の資金を得て、3年前に設立されたベンチャー会社である。ITERの炉の重量が5,000トンであるのに対して、同社では、10トンの電磁石による設計を進めている。また、英国のTokamak Energyも同様に高温超電導体を用いた開発を行っている。

21年3月、米国のマサチューセッツ工科大学が、同国のエネルギー省傘下のプリンストンプラズマ物理研究所と協力し、次世代実験炉を6月から建設する、と発表した。同大学では、Commonwealthと連携しつつ、やはり、高温超電導体磁石を用いたトカマク型の最適化設計を行っており、エネルギー増倍率は2～10倍となると見込んでいる。

D-T核融合で放出されるエネルギーは17.6MeVであり、ウラン235の核分裂による200MeVと比べて出力密度が低い。そのため、核融合炉は核分裂炉よりも大型で、コストが高くなることが課題であった。これに対して、上述の3社は、新たな設計技術に挑戦し、ITERよりも桁違いに少額の投資で、25年という早期での商用運転開始を目標とする開発を進めている。

◆核融合発電の課題と期待

本稿で述べたように、核融合発電が実用化されれば、エネルギー経済的に大きな意義があるが、環境面でのリスクは皆無ではない。

核融合炉の運用においては、長寿命の放射性物質は発生しないが、構造材料の放射化による短中期的な放射性廃棄物が発生する。高エネルギー中性子の照射に起因し、一部の構成材料が原子炉の寿命期間中に放射性物質となり、最終的には放射性廃棄物となる。長期的な放射性毒性は核分裂燃料よりも低いが、核分裂炉の構造材廃棄物と同様に取り扱われるものと予想されている。

また、核融合燃料の一種である、トリチウムは放射性物質であり、封じ込めが難しい。水素の同位体であるため、水に溶解しやすく、仮に事故などで高濃度のトリチウムが外部に放出されると、約125年間、環境や健康への影響が残る。この理由から、長期的には、トリチウムを使わない重水素-重水素の核融合発電が期待されている。

100年前にエディントン博士から提出された宿題を解決し、核融合発電が炭素中立の切り札として社会実装される日を期待したい。 【酒向謙太郎】