2

フュージョン（核融合）の原理と仕組み

先ごろ公表されたエネルギー基本計画の素案では、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー政策の道筋が示されるなか、フュージョン（核融合）エナジーについては、実現に向けて研究を推進していくことが示された。本稿では、核融合反応の原理や、地球で核融合反応を連続的に起こすための仕組みや工夫、各種方式や発電について解説する。

核融合の原理

我々人類を含めた地球上の生命の源である太陽や、夜空に瞬く星々のエネルギーの源は核融合反応である。核融合反応とは、軽い原子核同士が結合（融合）して重い原子核になる反応で、非常に大きなエネルギーが発生する。核融合反応が起きる前の粒子の合計質量に比べて、起きた後の粒子の合計質量はわずかに軽くなり、その質量差がエネルギーに変わる。これは、アインシュタインのエネルギーが質量と等価であるという原理（$E=mc^2$）により、わずかな質量が非常に大きなエネルギーに変わることを示している。太陽の中心では、4つの水素原子から1つのヘリウム原子を作る反応が起こっているが、地球では、より核融合反応しやすい、水素の同位体である重水素と三重水素（トリチウム）を用いている。図1に核融合反応の模式図を示す。核融合反応の前後で合計質量が約 0.4% 程度軽くなることから、燃料 1g が核融合反応を起こした際に得られるエネルギーは、石油に換算すると約 8 t 分のエネルギーに相当する莫大なものとなる。

一方、原子力発電は、核分裂反応を利用しており、ウランなどの重い原子核がより軽い原子に核分裂する際の質量差からエネルギーを得ている。図2に核分裂反応の模式図を示す。

地球で核融合反応を起こす

核融合反応を起こすには、原子核同士を衝突させなければならないが、原子核はプラスの電荷を帯びているため、原子核同士は反発してしまう。この反発に打ち勝つには、原子核のスピードを上げる必要があり、それには温度を上げることになる。物質は温度を上げていくと固体、液体、気体となるが、さらに温度を上げると原子核と電子がバラバラなプラズマとなる。このプラズマ状態では原子核は超高速で飛び回るため、原子核同士が衝突する確率が上がる。プラズマを保持するには高温・高圧環境が必要であるが、定常的に核融合反応が起きている太陽の中心は、重力により圧力が 2400 億気圧と超高圧であるため、比較的低い温度（1600 万度）でも核融合反応が起こる。一方、地球は重力が太陽に比べて極めて小さいため、核融合反応を起こすには数億度の温度に上げる必要がある。さらに核融合反応を連続的に起こすには、プラズマを高温・高密度で長い時間一定の領域に閉じ込めておく必要がある。

NTT 宇宙環境エネルギー研究所
環境負荷ゼロ研究プロジェクト
（左）プロジェクトマネージャ　**田中 徹**氏
（右）グループリーダ　**秋山 一也**氏

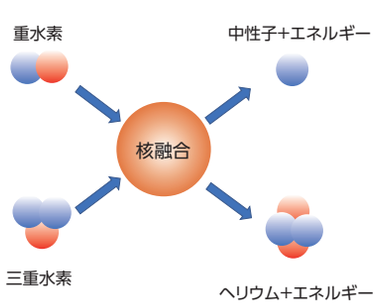

図1　フュージョンエナジーの核融合反応

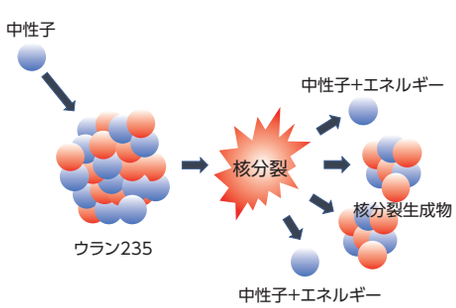

図2　原子力発電の核分裂反応

プラズマの閉じ込め方式

プラズマ状態では、原子はプラスの電荷を持つ陽イオンとマイナスの電荷を持つ電子に分かれて運動しているが、このままでは、原子核同士が衝突する確率は非常に低い。そこで、電荷を持つ粒子は磁力線に沿って運動するという性質があるため、磁場を使って粒子を磁力線に巻き付けることでプラズマを閉じ込める。図３に模式図を示す。さらに磁力線をドーナツ状のかごのような形状とすることでプラズマの閉じ込め性能を向上させている。図４に磁力線のイメージ図を示す[1]。

この磁場閉じ込め方式は、トカマク方式とヘリカル方式が代表的であり、図５に各方式の特徴を示す[2]。また、磁場を使わない方法としてレーザー方式も合わせて示す。

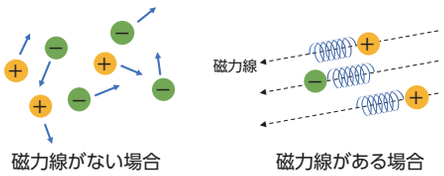

図３　磁力線の有無によるプラズマ粒子の動き

© National Institutes for Quantum Science and Technology

図４　ドーナツ状の磁力線のイメージ

1）トカマク方式

トカマク方式では、アルファベットのＤの形をしたコイルを円状に並べ、コイルの中にドーナツ状の磁場を発生させる。さらに、ドーナツの中心にある中心ソレノイドコイルでプラズマに電流を流し、このプラズマ電流によりドーナツの断面を回るような磁場を発生させる。これら２つの磁場の重ね合わせによりねじれた磁場を形成し、プラズマの閉じ込めを行う。ただし、プラズマ電流を流し続けるには別途電流を駆動させる外部装置が必要になる。

トカマク方式は、他の方式に比べて閉じ込め性能の実績が高く、現在主流の方式である。南フランスのエクサン・プロヴァンス近郊で構築が進められている核融合実験炉 ITER や、茨城県那珂市にある国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（QST）の JT-60SA がトカマク方式の代表例である。

2）ヘリカル方式

トカマク方式と同様に、ドーナツ状のねじれた磁場によってプラズマを閉じ込めるが、磁場を作るために、ヘリカルコイルというあらかじめねじれたコイルを使用するところが、大きな特徴である。ヘリカルコイル

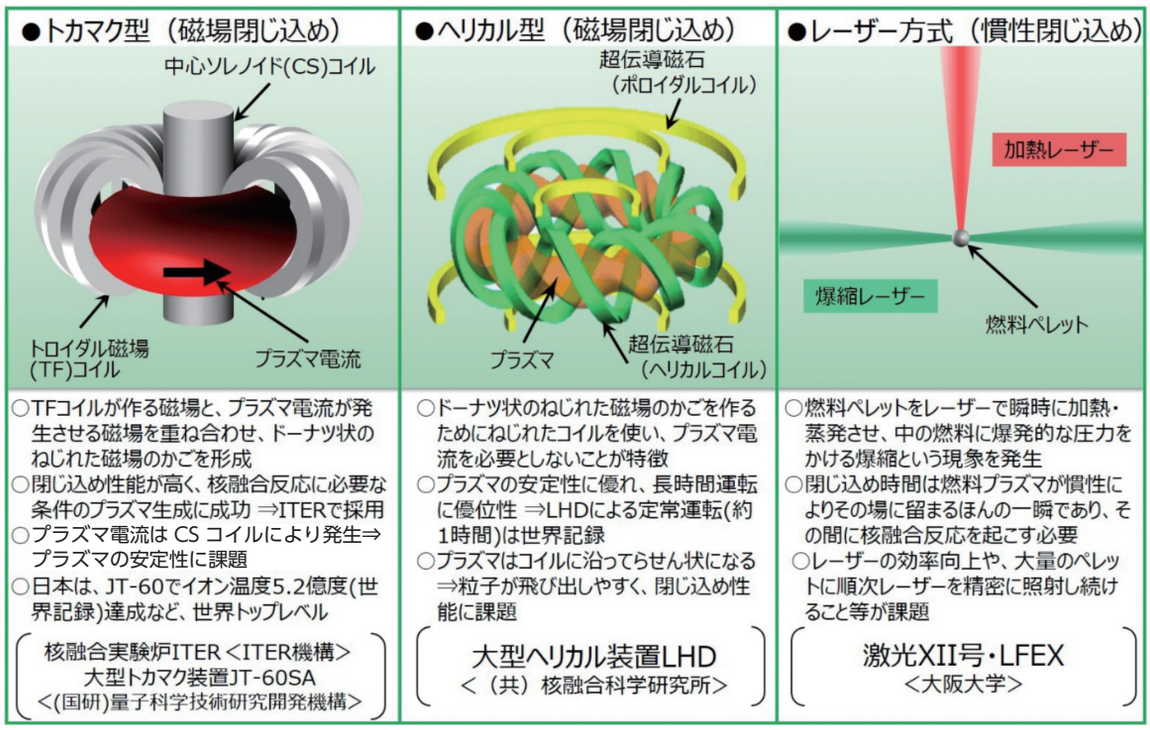

図５　核融合炉の各方式

は複雑な形状であるため製作の難易度が高い一方、トカマク方式と異なり、運転時にはプラズマに電流を流す必要がないため、電流崩壊が起こらないことや、プラズマ電流駆動用の外部装置が不要であるといった特徴がある。またプラズマの安定性に優れるため、トカマク方式と比べると長時間の運転という点では有利であるが、プラズマの閉じ込め性能には課題がある。

3）レーザー方式

強力なレーザーを、燃料を封じ込めたペレットに照射し、表面を爆発的に蒸発させ、その爆発的な圧力でペレットに封じられた燃料を瞬時に圧縮（爆縮）して核融合反応を発生させる。レーザー方式では、プラズマを閉じ込めるための強力な磁場が不要であり、不純物による影響も少ないので、超高真空状態にする必要がないという利点を有するが、レーザーの効率向上や精密照射等の課題がある。

核融合発電

図６に核融合発電システムの模式図を示す[3]。核融合炉はトカマク型で示してある。燃料である重水素と三重水素（トリチウム）を真空容器の中で１億度以上に加熱し、プラズマ状態にして核融合反応させる。この反応で生成されるヘリウム粒子と中性子のうち、発生したエネルギーの約 80％を持つ高速中性子をブランケットと呼ばれる装置でとらえて運動エネルギーを熱エネルギーに変換する。ここで得られた熱エネルギーによって冷却水を加熱し、発生した水蒸気でタービンを回転させることによって電気エネルギーとして取り出すことができる。

この際に核融合反応から得られるエネルギーは、さきに述べた通り燃料 1g で、石油 8 t 分に相当し、出力 100 万 kW の発電所を 1 年間運転するために必要な燃料はおよそ 0.2t で十分である。

核融合炉を経済的に成立させるためには、プラズマからの核融合出力がプラズマの外部加熱入力を大きく上回ることが必要である。核融合出力とプラズマの外部加熱入力の比であるエネルギー増倍率が 1 となる条件と臨界プラズマ条件と呼んでおり、これまでの核融合実験装置では達成している。ITER ではこの増倍率を 10 程度の達成を目標としており、さらに次の原型炉では 20 以上が目標になると考えられる。

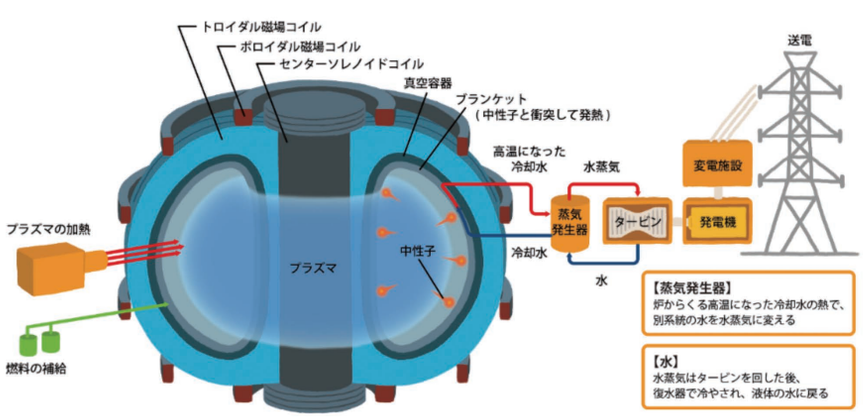

図６　核融合発電システムの模式図

核融合炉の特徴と安全性

核融合炉は、暴走しない（固有安全性）、高レベル放射性廃棄物が無い、燃料は事実上無限であることが特徴である。

原子力発電を行う原子炉の中では核分裂反応が連鎖的に起こることから、制御棒などを用いて反応が暴走しないように制御する必要があるが、核融合発電の場合は、核融合反応に必要な燃料、例えば重水素や三重水素（トリチウム）などの供給をストップさせれば反応はすぐに停止してしまうので、暴走などの危険はない。さらに、核融合反応を持続させるためには、高度な制御が必要であり、正常状態から逸脱した場合は反応が自動で停止してしまうことから、原理的に暴走が起こらない仕組みとなっている。

また、核融合反応では中性子が発生し炉材料を放射化するが、この際に生じる放射性廃棄物は低レベル放射性廃棄物に区分される。従って、環境に与える影響を低く抑えることができる。

燃料においては、重水素は海水 $1m^3$ 中に約 33g 存在し、三重水素（トリチウム）は、海水 $1m^3$ 中に約 0.2g と豊富に存在していることから、ほぼ無尽蔵に取り出すことができるといえる。

[1] https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/images/page/112/Q&A15.png
[2]（https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm）を一部加工して作成
[3] https://www.toshiba-energy.com/nuclearenergy/topics/clip_nuclear_fusion.htm