

第10章「地上の太陽」を人類の手に

10 1 核融合発電の役割

(1) 人類の存続とエネルギー源

われわれが文化的な生活を営み、文明を育むにはエネルギーが不可欠である。人類は火を使い始めて以来、必要なときに必要なエネルギーを得るための仕組みを追求してきた。今では様々な方法で大量のエネルギーを生産し、いつでもどこでもエネルギーを利用するための技術を手に入れている。

一方では、エネルギー利用に関わるいろいろな心配や問題が出てきた。第一にエネルギーを使いすぎて、その源が枯渇するのではないかとという心配がある。江戸時代あたりまでは、身の回りの自然から調達できる薪などを燃やしてエネルギーを得ていたが、人口が増え、文明が進歩するとそれでは足りなくなり、現在では化石燃料の燃焼エネルギーや原子力エネルギーが使われるようになった。世界の人口は今後増え続けて2050年に100億人程度になると推測されている。その中で、我が国の人口は2006年頃をピークにゆるやかに減り始め、2050年には現在の8割前後になると予測されている¹。我が国をはじめとする先進国の人口は飽和するか減少に転じるかであるが、発展途上国の人口は増大してゆく。しかるに、発展途上国の人々の生活レベルが向上して先進国並にエネルギーを使うようになれば、当然のことながらエネルギー需要は飛躍的に増大する。そのとき、これに応えられるエネルギー源があるのかどうかは大きな心配である。

実際には、エネルギー源の枯渇自体についてはそれほど心配しなくてもよい。化石燃料は、採掘の難しさは次第に増すものの、埋蔵量は今後数百年の使用に耐えるものである。原子力エネルギーも高速増殖炉技術が確立されれば、それ以上に長く利用できる。むしろ現在は、地球温暖化問題に見られるように、エネルギー源の使用が生物の棲息環境を脅かすおそれの方が強く意識されるようになった。この問題は、人々の意識改革や、エネルギー技術の革新、あるいは開発によって解決されようとしている。

エネルギー源の中でも、太陽エネルギー、地熱エネルギー、潮汐エネルギーなどは、いわゆる再生可能エネルギーと呼ばれ、クリーンで枯渇のない無尽蔵のエネルギーとされている。太陽エネルギーに起因する水力発電、バイオマス発電、波力発電なども再生可能エネルギーに属する。再生可能エネルギーの利用技術は日進月歩であり、人々がそれのみで生活していた江戸時代に比べて格段に進歩した。では、現代社会が再生可能エネルギーだけで維持できるかと言えば、それは現実的でない。例えば、百万キロワットの原子力発電と同等の電力を出すには、1000本以上の大型風力発電設備で膨大な敷地を埋め尽くさなければならない。しかも風任せの不安定な電力しか得られない。太陽光発電にしても同様である。こうした再生可能エネルギーの問題点の多くは、ほかのエネルギー源と組み合わせることで使うことにより克服することができる。

さて、エネルギー源には利点欠点があり、それらは次のような要件に照らして評価される。燃料資源が豊富で採掘が容易であること、資源はどの国でも入手しやすく安価で

¹ 国立社会保障・人口問題研究所報告(2002年)による。

あること、資源の産出地域が政治的に安定であること、環境に大きな負荷を与えないエネルギー源であること、途切れたり変動したりすることなく安定に供給できるエネルギー源であること、暴発など制御困難に陥らないエネルギー源であること、そのエネルギー源を使用することが他国の脅威にならないこと、などである。コストに関しては、燃料代を含む運転コストに加えて、設備の建設コスト、運転により生じる廃棄物の処理コストも考慮に入れた総合コストをもとに評価しなければならない。また、エネルギー生産設備を建設するにあたってはさまざまな形でエネルギーが使われる。その量よりも、設備の寿命中に生産する全エネルギー量が十分大きくなければ、エネルギー源として失格である。地球温暖化ガスについても同じような計算がなされる。

いずれにしても、これらの要件のすべてを満足できるエネルギー源はない。しかし多くのエネルギー源は、社会の機能不全を回避するために、多少の問題があっても使われざるをえない状況である。

それぞれのエネルギー源には得手不得手があって、いくつかのエネルギー源を組み合わせで適材適所で使い分ける必要がある。そのことをエネルギーのベストミックスと言う。運転コストが安く大電力定常発電に適した原子力発電、コストは高くつくが起動停止が簡単な水力発電、両者の中間の特性を持つ火力発電を需要にあわせて臨機応変に需要に応えるようなことである。一カ所に集中した大規模発電設備と、広い地域に分散した小規模発電設備を特性に応じて使い分けることもベストミックスの一環である。未来の社会がどのようなエネルギー源を必要とするのか、今から予測することは困難である。その観点から、新たなエネルギー源を開発するなどして多様なオプションを準備しておくことが、人類の繁栄と存続を確実にするために不可欠である。

(2) 核融合発電とその位置づけ

ここでは、上で指摘した評価項目に照らし合わせて核融合発電の特徴と位置づけについて述べ、詳細については後に解説する。最近話題に上る国際熱核融合実験炉 ITER については第 10 章の最後に述べているので、ITER の進捗状況に関心がある読者は、そちらから読まれてもよい。

核融合発電の中心をなす核融合炉の燃料は、海水などの水から採れる。したがって、燃料資源としては無尽蔵である。水は世界に広く分布するから、どの国にとっても入手は難しくない。このことは、エネルギー資源を巡る国際緊張の回避にもつながる。四方を海に囲まれた我が国にとっては、核融合エネルギーは文字通り国産エネルギーとなり、核融合発電の実用化により我が国のエネルギーセキュリティは著しく改善される。我が国は年間あたり 8 兆円を超える化石燃料を輸入しており、核融合発電が実現すれば電力分野における化石燃料比率は大幅に軽減される。また、多量の放射性物質の輸送や石油の海上輸送に見られるような、海難事故の心配や警備の必要もなくなる。

環境安全面では、核融合発電は原子力発電と同じく、運転に伴う地球温暖化ガスの発生はほとんどない。しかし、核融合炉の燃料は放射性物質であり、また核融合炉を運転すると放射性物質が発生するので、安全対策が必要である。核融合炉は、運転中予定外の事象が起こると直ちに自動停止するので、暴走などは起こらない。このため、予想される事故に際して発電所敷地周辺の住民に避難を要請しなくてすむように、安全対策を施すことが

できる。また、運転によって生じる放射性物質は既存技術で処理できる。

核融合炉の世界的普及については、核不拡散条約に抵触するなど、その妨げとなる要因は特にはない。核融合炉では原子爆弾の原料となる物質は使われない。核融合炉の燃料は水爆でも使われるが、水爆は原爆がなければできないし、逆に原爆があれば核融合炉の燃料でなくほかの材料を使うことにより水爆ができる。したがって、核融合炉の普及と大量破壊兵器の普及は直結するものではない。

核融合炉は高度技術の集積した大型設備であるため、建設コストが比較的高くなる。一方、燃料は処理費用も含めて安いので、運転コストは安くなる。このため、原子力発電と同じく、最初に投資する建設コストを早期に回収するために、できるだけ高い稼働率で運転する必要がある。こうした事情により、エネルギー源の中では定常大電力の発生に適した集中型の基幹エネルギーとして位置づけられる。

核融合炉では高温の熱エネルギーが得られるので、コンビナートや海水淡水化などの多目的利用が可能となる。また、発電のみならず水素製造にも応用できる。将来は、燃料電池や水素燃料で動く輸送システムのための水素供給源として利用されることになる。

核融合開発は、我が国を含む世界の先進国で推進されている。とくに ITER と呼ばれる大型実験装置が、日本、欧州、ロシア、米国、中国、韓国の国際協力で建設されようとしており、そのための国際交渉が行われている。核融合発電は ITER の研究成果をもとに実現され、次に実用化されることになる。実現と実用化の時期については、核融合のみならず、エネルギーや環境問題の専門家からなる原子力委員会もとの分科会で検討されており、近く報告書が出される予定である。並行して、欧米でも核融合開発計画の加速化が検討されている。

10 - 2 核融合発電の仕組み

(1) 核融合炉の燃料

太陽は約 46 億年以上にもわたり光り輝いてきた巨大な天然の核融合炉である。太陽では、わずか 1 秒間の間に全人類が 1 年間に使うエネルギーの 100 万倍もの核融合エネルギーが生まれている。核融合反応により解放されるエネルギーが太陽や恒星のエネルギーの源であることを最初に予言したのは、ドイツ生まれの米国人ハンス・ベークで、1939 年のことであった。その後、核融合反応が実際に起こることが実験室で検証された。太陽の中心では水素やヘリウムなどの軽い原子核同士の衝突による核融合反応が起こって、エネルギーが大量に発生している。そのエネルギーは紫外線や可視光線、あるいは赤外線として宇宙空間に放射されてわれわれのところにも届く。

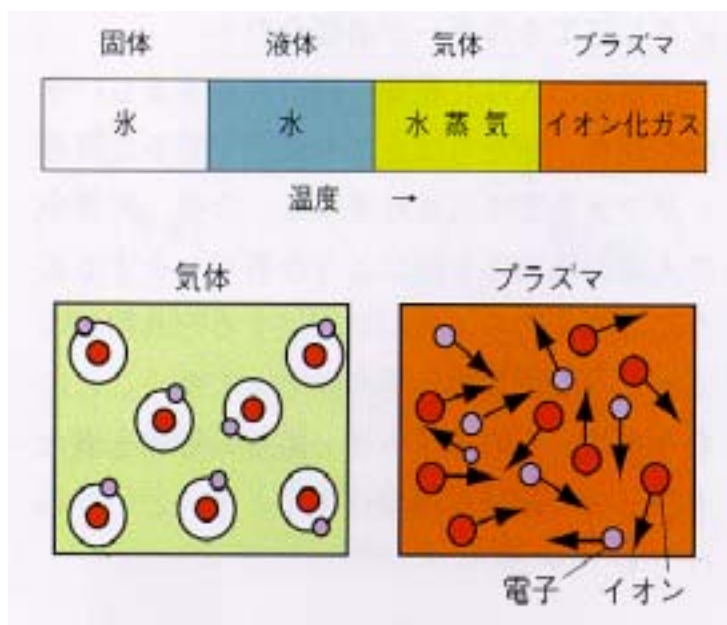
核融合反応を効率よく起こすには、燃料を高温のプラズマ状態にして一定の空間領域に閉じ込める方法が最も適している。プラズマ²というのは、固体、液体、気体に次ぐ物質の第 4 の状態であり、図 10.2.1 のように原子核と電子がばらばらになった状態を言う。宇宙空間の物質は、太陽をはじめ殆どがプラズマ状態になっているが、地上ではプラズマはまれにしか見られず、オーロラや稲妻などが自然界のプラズマである。人工のプラズマとし

² もともと「血漿」を意味する医学用語であったが、米国の物理化学者アービング・ラングミュアが導電性の気体をプラズマと呼び、普及するところとなった。

では、ネオンサイン、蛍光灯、溶接のトーチなどがある。テレビのブラウン管に代わるプラズマディスプレイは、極めて小さいプラズマの集まりである。

プラズマは気体に似ているが、電気を通したり磁場の作用を受けたりするなど、気体にはない性質を持っている。プラズマを加熱してその温度が上がると、それを構成する原子核と電子の運動が激しくなり、互いに高速度で衝突するようになる。そして原子核同士が何回も衝突するうちに核融合反応が起こる。核融合反応の頻度はプラズマの温度と密度(濃度)が高くなると飛躍的に高まり、十分な量の核融合エネルギーが出てくるようになる。このように、熱いプラズマの中で起こる核融合反応をとくに熱核融合反応と呼ぶ。太陽や恒星の中でも熱核融合反応が起こっている。

図 10.2.1 プラズマの概念図



[出典] 日本原子力研究所

核融合炉は地上で熱核融合反応を起こす装置である。太陽の燃料は大部分が水素の原子核であるが³、水素の原子核が起こす核融合反応は極めて起こりにくいので、核融合炉に利用するのは難しい。核融合炉の燃料は同じ水素の仲間であるが、質量数が 2 の重水素と、質量数が 3 の三重水素の原子核である。三重水素はトリチウムとも呼ばれている。重水素とトリチウムが核融合反応を起こすと、図 10.2-2 のようにエネルギーが高い中性子とヘリウム核(アルファ粒子と呼ばれる)が出て来る⁴。中性子はその名の通り電氣的に中性であ

³ 太陽の中では、いくつかの核融合反応過程を経て 4 個の水素原子核からヘリウムができる。その過程でエネルギーや陽電子、ニュートリノ、ガンマ線などが放出される。

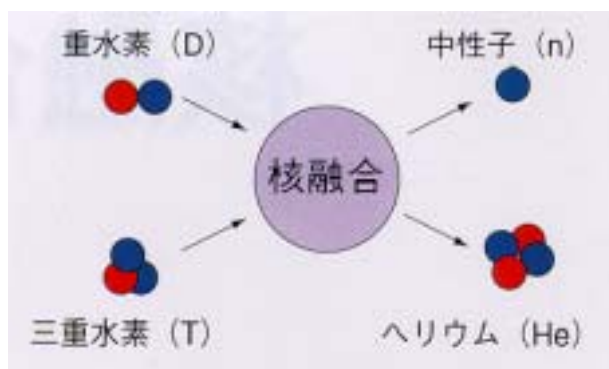
⁴ 図 10.1.2 に示した原子核の記号を使うと、重水素とトリチウムが起こす核融合反応は



と表される。単位 MeV は Million electron Volt を意味する。1 MeV は電子が 100 万ボルトの電位差で加速されたときに受け取るエネルギーであり、ジュールで表せば 1.6×10^{-13} ジュールである。

るが、アルファ粒子はプラスの電荷を持つ。このため、両者は核融合炉で異なる働きをする。

図 10.2.2 核融合反応



[出典] 日本原子力研究所

重水素は水の中に水素に対して 1/6500 の割合で含まれ、海水をはじめとする地上の水から無尽蔵に採れる。一方のトリチウムは放射性物質であって、半減期約 12 年で自然崩壊して別の元素に変わるので、地上には殆どない。このために、トリチウムを人工的に作る方法が考えられた。核融合炉の燃料用のトリチウムは、はじめは原子炉等で作られたものを使用するが、一旦核融合炉が起動すると、トリチウムが自己再生産される仕組みである。それには、リチウムが用いられる。重水素とトリチウムの核融合反応で出てくる中性子は、リチウムと核反応を起こしてトリチウムを作る⁵。このため、炉心の周りをリチウムで取り囲んでおけば、核融合炉を運転することによりトリチウムを生産できる。これが核融合炉のトリチウム自己再生産の原理である。

(2) 炉心プラズマの閉じ込め

核融合炉で熱核融合反応を起こすには、高温プラズマを、炉心に閉じ込める必要がある。炉心プラズマの温度は約 1 億度、1 立方センチメートルあたりに含まれる重水素とトリチウムの数は約 100 兆個である。100 兆個という大きいようであるが、われわれのまわりの空気中に含まれる窒素分子や酸素分子の個数は 1 立方センチメートルあたりその 10 万倍もあることを考えると、核融合炉の炉心プラズマは真空とも言えるほど薄い。1 立方センチメートルあたりの原子核や電子の個数のことを密度と呼んでいる。一方の 1 億度という温度は確かに高く、炉心プラズマが周りの壁に触れれば最初は壁の一部が溶ける。しかし、今述べたように炉心プラズマの密度が低いために、プラズマには壁全体を融かすほどの熱エネルギーは含まれていない。それどころか、プラズマの方が壁に冷やされて急激に温度が下がり、熱核融合反応はすぐに止まってしまう。ネオンサインや蛍光灯のプラズマ

⁵ 天然のリチウム(Li)は質量数が 6 の同位体(⁶Li)が 7.4%、質量数 7 の同位体(⁷Li)が 92.6%の割合で含まれている。トリチウムを発生する核反応は

⁶ $\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{T} + \text{He} + 4.8 \text{ MeV}$ $\text{^7Li} + \text{n} \rightarrow \text{T} + \text{He} + \text{n}' - 2.5 \text{ MeV}$ の二つがある。

の温度は数千度であるが、ガラス管に触れてもさほど熱くないのも、プラズマの密度が低いためである。これに対して、普通の物質は摂氏 100 度でもさわると大やけどする。

地上で高温プラズマを周囲の壁から離して真空中に浮かすには、二つの方法がある。一つはプラズマが磁場の作用を受けることを利用して、磁場の圧力で真空容器の中に浮かす方法である。これをプラズマの磁気閉じ込めと称する。いま一つは、小さい固体燃料を強力なレーザー光線で照射して短時間に一挙に高温プラズマを発生させるとともに、爆縮させてプラズマが広がる前に十分な量の熱核融合反応を起こす方法である。この方法は慣性の法則を利用するので、慣性閉じ込めと呼ばれる。慣性の法則とは、突然力を加えてもすぐには運動状態を変えられないという物体の力学的性質のことであって、電車やバスの乗客が、急に動いたり止まったりする時によろけたり倒れたりするのはこの法則による。磁場閉じ込め核融合では燃料を定常的に燃やして発電するのに対して、慣性閉じ込め核融合では自動車のレシプロエンジンのように、短時間の燃焼を高頻度で繰り返しながら、定常電力を出す。ちなみに、太陽は巨大な空間に重力でプラズマを閉じ込めている。しかし、地上での高温プラズマ閉じ込めには、重力は弱すぎて応用できない。

さて、持続的に熱核融合反応を起こすには、高温で密度が十分高いプラズマを超高真空中に保持する必要がある。高温のプラズマからは、放射冷却や熱伝導、あるいは対流などによる激しいエネルギー損失が起こる。この損失を補わなければ、プラズマの温度はすぐに下がって熱核融合反応が起こらなくなってしまうので、プラズマを加熱し続ける必要がある。その際エネルギー損失があまりにも大きければいくら加熱しても追いつかないので、プラズマ閉じ込め装置はエネルギーの閉じ込め性能がよくなければならない。それは穴が空いたバケツに水を注ぎ込むようなもので、穴が大きいと、いくら注ぎ込んでもバケツに水は殆ど溜まらない。

プラズマ閉じ込め装置のエネルギー閉じ込め性能を表す指標にエネルギー閉じ込め時間がある。エネルギー閉じ込め時間はガス風呂の場合を例にとりて考えるとわかりやすい。風呂の湯の温度は、ガス加熱を止めて放置すると熱が逃げて下がってゆく。このとき、温度がはじめの温度から一定の割合まで（専門的には 37%までとしている）下がるのにかかる時間を、エネルギー閉じ込め時間とする。もし風呂桶を保温材で囲めば、湯の温度は下がりにくくなるから、エネルギー閉じ込め時間が長くなる筈である。湯の温度を一定に保ちたいければ、熱の損失を補うためにガスで加熱し続けなければならない。エネルギー閉じ込め時間が短ければ、大きなガス流量を必要とするし、長ければ小さな流量ですむ。

核融合装置では、はじめに電気放電で低温度のプラズマを作り、次に大電力の粒子ビームや電波でプラズマを加熱する。粒子ビームで加熱するのは、お湯に熱湯をそそいで温度を上げるのに似ている。また電波で加熱するのは、電子レンジでお湯をわかすことに似ている。

プラズマの温度が十分上がると核融合反応が起こるようになり、高エネルギーのアルファ粒子が発生する。アルファ粒子は電荷を持つので、プラズマを構成する原子核や電子と衝突してそれらにエネルギーを与え、その結果プラズマは加熱される。これをアルファ粒子加熱と呼ぶ。内部で核融合反応が起こっているプラズマは、アルファ粒子加熱によって自分自身を加熱するのである。したがって、十分な量のアルファ粒子加熱が起こると、外から粒子ビームや電波で加熱しなくてもプラズマの温度は下がらず、核融合反応が持続で

きるようになる。この状態を自己点火と言う。

(3) 高性能プラズマ閉じ込め装置トカマク

ここで述べたようなプラズマ加熱シナリオが成り立つためには、装置のエネルギー閉じ込め時間がある程度長くなければならない。そうでなければ加熱パワーが追いつかず、核融合反応が起こる温度に到達できないからである。核融合装置の性能は、閉じ込めることのできるプラズマの温度、密度、エネルギー閉じ込め時間の3つのパラメータで表される。核融合炉では、温度が約1億度、密度が1立方センチメートルあたり約100兆個のプラズマを、数秒間のエネルギー閉じ込め時間で炉心に閉じ込めなければならない。現在、高い科学的信頼度でこのような条件を満たすことができるのは、旧ソビエト連邦で考案されたトカマク⁶という磁場閉じ込め装置である。

図 10.2.3 トカマクの原理図



[出典] 日本原子力研究所

図 10.2.3 はトカマクの原理図である。トカマクのプラズマはドーナツ形状をしており、真空容器の中に磁場で閉じ込められる。ドーナツの大きい半径はおよそ 6~10m、小さい半径はおよそ 2~3m である。プラズマの断面は図では円形であるが、実際には後の図に示すようにやや三角で縦長形状である。プラズマは2種類の強い磁場で閉じ込められている。一つ目はドーナツに沿った磁場で、5万から10万ガウス⁷の磁場がトロイダル磁場コイルと称する多数の超伝導コイルによって作られている。ドーナツに沿ってはプラズマ自身に一千万アンペアもの大きな電流が流され、この電流がつくる磁場が二つ目の磁場である。二つの磁場を合成してできる磁力線は目には見えないが、ドーナツ状の籠の形をしていて、その中にプラズマを閉じ込めるのである。プラズマに電流を流すには変流器の原理が利用され、図のソレノイドコイルが変流器の一次巻き線、プラズマが二次巻き線となる。

図 10.2.4 はトカマク装置の断面図である。トロイダル磁場コイルの隙間を通してプラズマを加熱する装置や測定装置、燃料入射装置、あるいは真空排気装置がとりつけられている。プラズマに燃料を注入するには、ガスを流し込んだり、ガスを極低温に冷やして作った氷の塊を高速度でプラズマに打ち込んだりする。

⁶ トカマク(tokamak)はロシア語の合成語で、トロイダル形状(ドーナツ形状)の容器で磁場が加わったものを意味する。

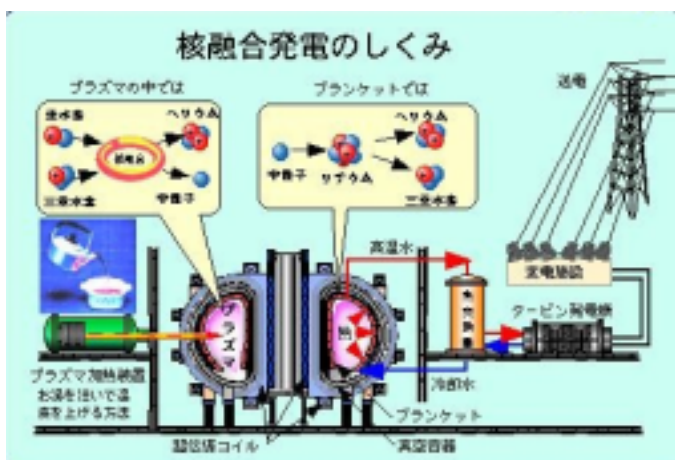
⁷ 最近は磁場の大きさを表す単位はガウスでなくテスラが用いられる。1テスラは1万ガウスに等しい。

プラズマのまわりはブランケット⁸(毛布)と呼ばれる構造物で取り囲まれている。炉心で起こる核融合反応によって高エネルギーの中性子とアルファ粒子ができ、中性子は電荷を持たないので磁場の作用を受けずにプラズマから飛び出し、さらに真空容器の壁を通り抜けて、ブランケットで受け止められる。一方のアルファ粒子は電荷を持つのでプラズマと一緒に磁場で閉じ込められて、アルファ粒子加熱を起こす。ブランケットには3つの役割がある。一つ目はトリチウム燃料の生産であり、炉心からくる中性子との核反応でトリチウムを作るために、ブランケットにはリチウムが含まれる。二つ目は中性子の遮蔽である。中性子は材料の照射損傷や放射化を引き起こすので、外側にある超伝導コイルなどに達しないようブランケットで受け止める。三つ目は熱の回収であり、中性子が持ち込んできた運動エネルギーから変換した熱や、ブランケット内部で中性子が起こす核反応で発生した熱を冷却材で集める。

磁力線の籠に閉じ込められたプラズマからは絶えず粒子がもれてくる。とくに、プラズマ加熱の役割を終えた後のアルファ粒子はいわば核融合燃焼の灰であり、プラズマ中にたまると今度はプラズマを冷やしたり、燃料を薄めてしまったりするので、できるだけ早く取り除く必要がある。このため、籠からもれ出てくるアルファ粒子を含んだプラズマを、装置の下部にあるダイバーターと呼ばれる部分に磁力線に沿って導いて、そこで冷やしてガスにもどして排気する。ダイバーターはまた、籠の外から不純物がプラズマに入るのを防いで、装置の外へ排気する役目も果たす。

図 10.2.4 は核融合発電のしくみを示す。高温高压の冷却水を通してブランケットで集められた熱エネルギーは、熱交換器で蒸気に変換され発電機のタービンに送り込まれる。蒸気で発電する過程は、火力発電や原子力発電に共通する。

図 10.2.4 核融合発電のしくみ



[出典] 日本原子力研究所

⁸ blanket

10 3 核融合発電の長所と短所

核融合発電には他のエネルギー源と同様に一長一短があり、エネルギー市場に受け入れられるためにはその長所を活かし、短所を補う方策が必要となる。ここでは、社会的受容性の観点から核融合発電の特質について考えよう。

(1) 核融合炉の安全確保

核融合炉では放射性物質であるトリチウムが使われる。また、核融合反応の結果エネルギーの高い中性子が多量に発生し、炉心周りの材料を放射化して放射性物質を発生する。このため、核融合炉でも放射性物質の安全管理が重要である。

原子炉の安全管理では「止める」「冷やす」「閉じ込める」という三つの要件を満たす必要がある。これを核融合炉にあてはめると、まず「止める」ことについては、核融合炉の炉心は異常事態が生じると止めなくても自動的に止まる。不測の事態により炉心の高温プラズマが壁に接触したとして、その構成物質のごく少量が融けてプラズマに混入するならば、プラズマ温度は急速に下がり核融合反応は即座に停止する。このことから、核融合炉が暴走することはない。つぎに「冷やす」ことについては、炉の停止後炉心まわりの真空容器などに蓄積された熱や、構造物(主にステンレス製)が放射化された物質の崩壊熱⁹が冷却の対象となる。ただし、崩壊熱はコバルト60、クロム24、マンガン54などの高々数種の放射性核種によって生じるものであり、また真空容器が巨大構造物であるため、崩壊熱密度は原子炉等に比べて遙かに小さい。このため核融合炉では能動的な冷却¹⁰を要せず、容易に材料の温度を溶融温度以下に抑えることができる。また、核融合炉の中で冷却用配管の破断事故が起こって冷却水が高温物体に接触して蒸気が発生し、炉内の圧力が上がるうとしても、圧力逃がし弁の働きにより放射性物質を内蔵する真空容器の破損は防止される。すなわち、冷却系の故障が起きたとしても、核融合炉の構造物が温度や圧力の上昇により放射性物質内蔵機器が破損する事故を防ぐことは容易である。

トリチウムと放射化物質の「閉じ込め」については、放射性物質取扱施設として当然厳重な対策を施すことになる。トリチウムは放射性物質の中では比較的取り扱いが容易であり、放出する放射線も弱い、それでも取り扱いには適切な配慮を要する。トリチウムの生体への影響としては、次のようなことが分かっている。トリチウムは酸素と結合してトリチウム水¹¹になると、水分として人の体内に入りやすくなり、気体状のトリチウムに比べて毒性が3桁増大する。水として体内に入ったトリチウムは特定の臓器に選択的に滞留・濃縮されることはなく、約10日で新陳代謝により大部分が体外に排出される。

核融合炉の炉内や燃料系統(燃料供給装置、回収装置、純化装置)には、重量にして数グラムからキログラム台のトリチウムが、トリチウム水の状態ではなく気体または金属に吸蔵された状態で含まれている。トリチウムに対する防護は、装置とそれを囲む建物からなる多重壁構造と、建物の内部の気圧を外部より下げるなどして外部への漏洩を防ぐとともに、平常時および事故時に装置外部の雰囲気から漏れ出たトリチウムを除去することを基本としている。

⁹ 放射性物質が崩壊するときに出る熱。

¹⁰ 原子炉にとりつけられた緊急炉心冷却装置など。

¹¹ 科学記号で T₂O、THO、TDO で表される水。

核融合炉は原子炉と同じく二酸化炭素や硫黄酸化物の排出はないが、核融合炉の解体や部品交換の際には、放射性固体廃棄物の発生が予想される。実用核融合炉の実現までには、この量は材料の進歩や設計の工夫により大幅に減らすことができる見通しである。核融合炉の放射性廃棄物は、低レベル廃棄物に相当するものであり、廃棄物中の放射能濃度に応じて深さ数mから50mほどの地中に安定に保管管理して、放射能のレベルが低下するのを待つ。ただし、数年から数十年で放射能が安全な水準まで減衰するようなものであって、かつ再利用が可能なものについては、廃棄物とはせずに施設内に安全に保管することによって、放射性固体廃棄物としての総量を低減できる。

燃料のトリチウムは、核融合炉が一旦動き出すとトリチウムブランケットにより自己生産されるが、最初だけはトリチウムを外部から供給する必要がある。我が国にはトリチウムの製造設備がないので、これまでカナダなどから輸入されている。その際にはトリチウムを吸蔵させた特殊金属を、堅固な容器に入れて安全に空輸してきている。トリチウムの輸送技術は既に確立されたものである。

現段階で予想される核融合炉は、内包する放射性核種の比較的低い毒性および放出エネルギー、固有の反応終息性から、考え得るあらゆる自然現象や事故等を考慮しても、安全規制上その立地に際して周辺住民の避難を要求するものではない。これが核融合炉の安全上の大きな利点であろう。

(2) 核融合炉のその他の特質

核融合炉の普及に関しては、現在核融合開発はわが国など先進国で進められているが、実際に将来大量の核融合エネルギーを必要とするのは、むしろ多くの人口を抱えつつ先進国並の生活水準を達成しようとしている発展途上国である。その際、核融合炉が核不拡散条約の制約にとらわれず、人類共通のエネルギー源として普及できることは極めて重要であり、ひいては世界の平和と安定への貢献が可能となる。

経済性の観点から核融合炉をとらえると、核融合炉は超伝導マグネット技術、超高真空技術、大電力ビーム技術、大電力高周波電力技術、耐高熱負荷、耐強放射線材料技術など、先端技術が詰め込まれた大型装置であることから、発電所の建設コストは必然的に高くなる。一方燃料が豊富で遠距離運搬の必要がないことや、燃料の再処理が簡単であることなどから、運転コストは比較的安い。このため、初期投下資本をできるだけ早く回収するためには、高い稼働率で運転する必要がある。この点は原子力発電と同じである。

核融合炉はおよそ摂氏500度の比較的高品位の熱源となるので、現在化石燃料を使用している熱プロセスに代替して、コンビナートにおける多目的、カスケード利用¹²が可能となる。こうした高温水は紙パルプ製造や海水淡水化などにも利用できる。海水淡水化は砂漠の緑地化にも応用でき、ひいては地球温暖化防止にも役立つ。将来、自動車をはじめ航空機、船舶などの交通・運輸機器が石油燃料から脱却して水素燃料で運行される時が来ることは確実な状況であるが、その中で核融合炉は発電のみならず水素製造にも利用されることになる。

¹² 熱利用では高い温度の熱でなければならないこと、比較的低い温度の熱でもできることがあるので、高い温度からはじめて低い温度になるまで、目的に応じて継続的に利用すること。

以上を要するに、核融合発電が社会からエネルギー源として受け入れられるかどうかは、それが実現する未来時点での資源、環境、安全性、経済性、多目的利用価値等についての総合的判断次第である。未来の状況が予測困難であり不確定であることから、核融合開発への現在の投資は保険であるとする考えもある。核融合炉は、持続的発展に必要な安定した基幹エネルギー源としての役割が期待される。

10 4 核融合開発の進歩と実用化へのマイルストーン

(1) 核融合炉開発への取り組み

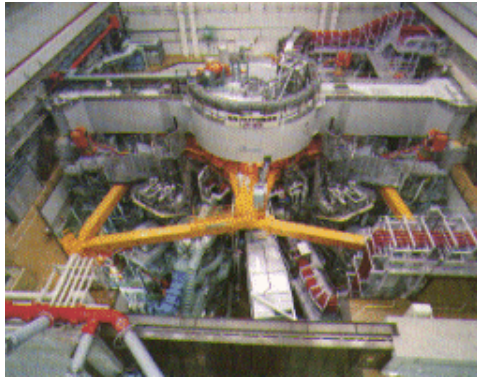
核融合開発は1940年代に始まり、はじめは米、英、ソ連などで秘密裏に行われていた。1955年にアイゼンハワー米国大統領の主導によりジュネーブで開催された、IAEA主催の第一回原子力平和利用国際会議で、議長を務めていたインドのバーバー博士が、核融合エネルギーを制御し利用する方法が20年以内に見つかるであろうと予言した。残念ながらプラズマの複雑な挙動の解明に時間がかかり、博士の予言は当たらなかったが、研究は着実に進歩した。その会議のメインテーマは核分裂の平和利用であったが、1958年に再びジュネーブで開かれた第二回原子力平和利用会議では、核融合研究の成果が多数報告されて、国際協力と競争が華々しくスタートした。以後今日に至るまで、冷戦時代を経て東側諸国の崩壊や再編等、世界史を揺るがす様々な出来事があったが、核融合開発では一貫して国際協力が続いてきた。その後この国際会議からやはりIAEAが主催する核融合専門の国際会議が分立し、開催地も日、米、欧、ソ連(後のロシア)の各地をまわり、間隔も3年から2年に縮まるなどして継続的に開かれてきた。第二回会議から50年目にあたる2008年には、第22回会議がゆかりの地ジュネーブで開かれる予定である。近年の会議では世界40カ国から700人以上が参加しており、その中で、我が国からの論文発表数は一位か二位を占める。中国、韓国、インド等、アジア地域からの参加者も増えつつある。

我が国では原子力委員会が定めた段階的核融合研究開発計画に沿って、大学等、日本原子力研究所、国立試験研究機関、産業技術総合研究所、企業で核融合の研究開発が行われている。中でも日本原子力研究所の装置JT-60は、EUのJETとともに世界最大の磁場プラズマ閉じこめ実験装置である。これら二つの装置は、炉心プラズマにつぎ込むエネルギーと核融合反応で生じるエネルギーが等しい、核融合で言う臨界条件を達成した。これらはトカマクと呼ばれる旧ソビエト連邦で発明された磁場プラズマ閉じこめ装置であり、閉じこめ性能が格段に優れていることから、世界的に研究開発が普及した。

一方大学等ではいろいろな方式の研究が行われており、核融合科学研究所の磁場閉じこめ装置LHDは、京都大学のヘリオトロンと呼ばれる装置が発展した大型装置である。この装置はヘリカル方式と呼ばれるトカマクと異なる磁場プラズマ閉じこめ方式を採用したものであり、トカマクにない利点を活かすために研究されている。大阪大学レーザー核融合研究所の激光号は、慣性閉じこめ方式を採用している。この方式は小さな燃料球に強力なレーザー光線を短時間に照射して、一千万分の一以下の短い時間に大量の核融合反応を一挙に起こしてエネルギーを取りだそうとするものであり、10-2(1)で述べたように磁場閉じこめ方式とは原理が全く異なる。ここでも我が国独自のアイデアが盛り込まれており、レーザー照射を時間的に制御してエネルギー効率を高める方法が採用された。この他にも国内の大学では多数の研究グループが活動しており、先駆的研究と人材育成で成果を

あげている。

写真 10.4.1 JT - 60 と LHD

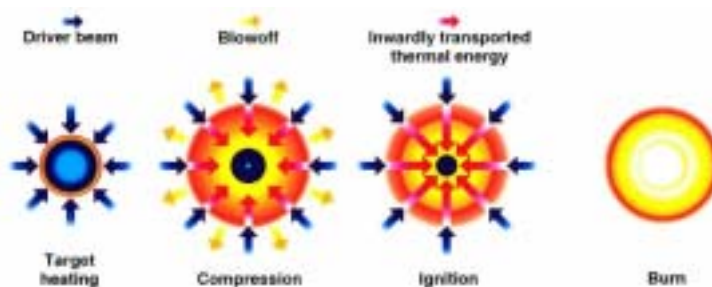


[出典] 日本原子力研究所及び大阪大学のホームページ

写真 10.4.1 は JT-60 と LHD である。いずれもドーナツ形状のプラズマを強力な磁場に閉じこめている。トカマクでは前述のようにプラズマに大電流を流して、それが発生する磁場も閉じこめに利用する。一方のヘリカル方式ではプラズマのまわりを取り囲む螺旋状のコイルで閉じこめ磁場を発生し、プラズマには電流を流さない。プラズマに電流を流すには余分の設備が必要であるし、電流が流れることによるプラズマの不安定現象が起こり得るので、プラズマ電流を流さないヘリカル方式はこれらの点で有利である。しかし閉じ込め性能はトカマクが優れており、また電流が流れることによる問題点は殆ど克服されており、トカマクの優位は動かない。

図 10.4.1 は慣性核融合装置の原理図である。燃料球を四方八方からレーザー光線で照射すると、光の圧力で燃料球が圧縮される。それと同時に、表面に発生するプラズマが外向きに飛び散るため、その反作用により燃料球はますます圧縮される。この過程は爆縮と呼ばれる。爆縮によって燃料球の密度が固体密度の数千倍から一万倍になると、中心で熱核

図 10.4.1 慣性核融合の原理



[出典] Lawrence Livermore National Laboratory ホームページ

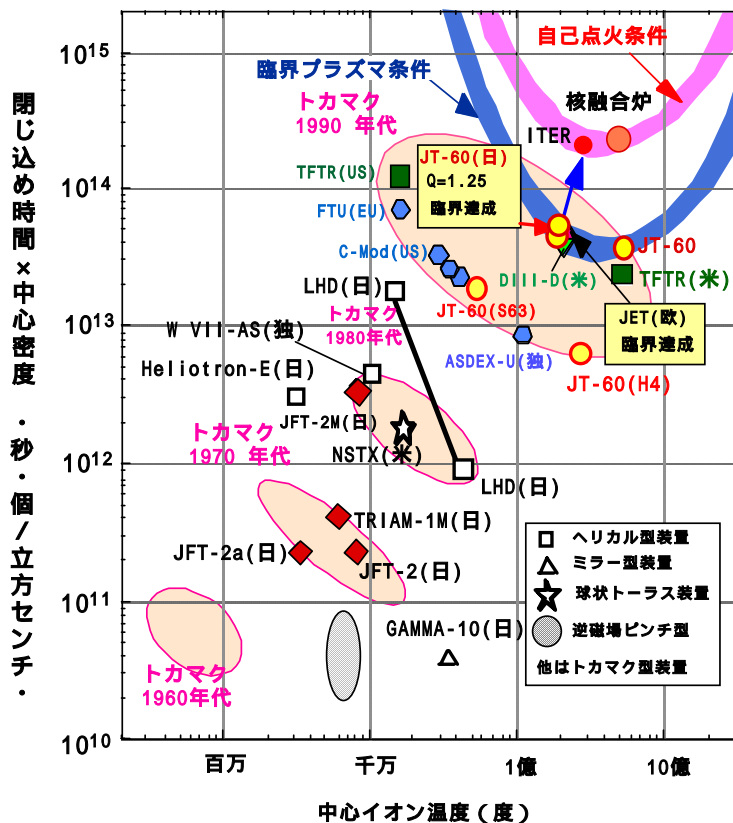
融合反応が起こって燃料球が一挙に燃え出す。慣性核融合炉は安全な小型水爆を爆発させるようなものである。発電のためには、このようなプロセスを 1 秒間に数回以上の頻度で

繰り返す必要がある。

核融合研究の初期には多様なプラズマ閉じこめ方式が考案され、研究されていたが、その後の自然淘汰により残ったものがここで紹介した方式である。ただし、いくつかの方式については純粋科学としての研究意義が認められてなお基礎研究が続けられているほか、人材育成の上でも大きな成果があがっている。

図 10.4.2 はローソン¹³図と呼ばれるものであり、磁場プラズマ閉じこめ装置の性能を表すものである。縦軸はプラズマ密度とエネルギー閉じこめ時間の積、横軸はプラズマ温度である。図の右上には臨界条件と自己点火条件を表す曲線が描かれており、実験で同時に得られたパラメータを装置ごとに点で記入してある。この図から、トカマクの閉じこめ性能が格段に優れていることがわかるであろう。臨界条件の達成はひとつのマイルストーンであったが、それが達成された今、今度は自己点火条件の達成が次のマイルストーンである。ただし自己点火条件については次節で具体的に述べるように、核融合炉では厳密な自己点火条件を満たす必要はない。現在自己点火に近い条件を高い信頼度で達成できる装置はトカマク方式であり、後の節でのべる ITER はトカマク方式である。

図 10.4.2 ローソン図



¹³ 英国の核融合研究者。

(2) 核融合炉工学の発展

ここまでは核融合炉の炉心プラズマの研究開発について述べてきたが、それと車の両輪の関係にある核融合炉工学と呼ばれる学術分野も共に発展してきた。核融合炉工学の開発対象は、例えば、磁場閉じこめ核融合で不可欠な大型強磁場超伝導コイル、高強度の中性子照射にさらされても劣化や放射化が激しくない材料、トリチウム増殖と集熱機能を備えたブランケット、炉心プラズマから溢れてくる粒子や熱の処理や不純物処理を目的とするダイバーター、放射線環境下で重量物を高精度で分解組み立てするための遠隔保守装置、燃料入射・処理装置、プラズマ加熱装置など多様である。そして、これらの要素機器を全体として統合的に機能させ、安全を保証しながらコストの低減をはかる研究も炉工学の重要課題である。

(3) 今後の核融合開発計画

核融合開発の次のマイルストーンである自己点火条件の達成に挑戦するのは、国際協力による ITER 計画である。ITER 計画については次節で詳しく説明する。ITER 計画のその次のマイルストーンは、核融合発電を工学的に実証し、安定した電力を送電線に給電することである。そのための装置は原型炉、あるいはデモ炉¹⁴と呼ばれている。原型炉の次は経済性実証炉であり、核融合発電が経済的に成り立つことを実証して、核融合発電の実用化をはかる。経済性実証炉段階では、炉の小型化、単純化、高効率化、合理化、技術の標準化など、核融合炉の市場競争力を高めるための技術開発が行われることになる。発電技術を確立する原型炉までは国が主導して研究開発を重ね、経済性実証炉は民間が主導して原型炉の成果をもとに技術に改良を重ねながら核融合発電の実用化をはかる計画である。

しかしながら、地球温暖化対策など緊急課題の解決に間に合わせるためには、核融合発電の実用化が遅ればそれだけ開発意義が失われることになる。上で述べたように、実験炉、原型炉、経済性実証炉というステップで開発を進めたのでは、はたして問題の解決に間に合うかどうか危ぶまれるところである。こうした状況に鑑み、開発計画を加速する案が浮上してきた。現在原子力委員会で、開発計画の加速化も含め核融合研究開発の基本計画が検討されているところである。この検討作業では核融合開発の二つの面を見極める必要がある。一つは技術の進歩であり、今ひとつは前節の終わりに述べたとおり、核融合発電が実用化される未来時点の社会的、経済的状況である。前者は比較的予測がつきやすいところがあるが、後者の予測は精度が悪いばかりか不可能に近いこともある。不確定な未来に備えて、核融合炉のような潜在性のあるエネルギーオプションを増やしておくことは不可欠であり、そのために今投資しておくことは人類存続の立場から有意義であるとする観点もある。核融合開発計画は、明確な目標を掲げた科学技術の研究開発である一方、社会との連携を維持するために、常に柔軟性が求められるものである。

10-5 大型プロジェクト「国際熱核融合実験炉 (ITER)」への期待 - 重要な日本の役割 -

1985年11月にジュネーブで開かれた米ソ首脳会談の席上、ソビエト連邦のゴルバチョ

¹⁴ Demonstration reactor

フ書記長が米国のレーガン大統領に対して、次世代のトカマクによる核融合実験を世界の核融合開発主要国による協力体制のもとで実施することを提案した。レーガン大統領はこれに賛同して、日本と欧州にも参加を呼びかけることとなり、国際熱核融合実験炉 ITER 計画がスタートすることになった。日、米、欧、ソ連はそれぞれ極と呼ばれ、4 極で ITER の設計作業にとりかかったのである。ITER とはラテン語で「道」を意味する。ITER 計画の目標には、「平和目的のための核融合エネルギーの科学的、技術的成立性を示すこと。」と謳われている。

(1) エネルギー増倍率 Q

ITER のミッションについて述べる前に、核融合炉の炉心のエネルギー増倍率 Q について説明しておく必要がある。Q は、炉心で起こる核融合反応から出てくるパワーを炉心プラズマへの加熱入力パワーで割ったものである。前に述べた JT-60 や JET が臨界条件を達成したことは、 $Q=1$ を実現したことを意味する。 $Q=$ は、プラズマに加熱入力を入れなくてもアルファ粒子加熱だけで炉心が燃え続けるのであるから、自己点火条件を意味する。

ところで Q はあくまで炉心だけのエネルギー増倍率であり、発電所全体のエネルギー増倍率ではない。核融合発電所は電気入力で運転して電気出力を生産する設備であるから、入力に対する出力の比、つまり電気エネルギー増倍率が十分大きくなければ経済性が成り立たない。発電所の電気エネルギー増倍率は、炉心のエネルギー増倍率 Q のほかに発電機のエネルギー変換効率や発電所内で照明やポンプの運転などに使われる電力にも依存する。炉心で $Q=$ が満たされれば、発電所のエネルギー増倍率は当然大きくなる。しかしながら、Q を上げると建設コストが上がることと、Q をいたずらに大きくしても発電所のエネルギー増倍率はそれほど上がらないことから、核融合発電所の設計では 20~60 の範囲の Q が選ばれる。

さて、ITER は実験炉であるから、最小限の建設・運転コストで次の原型炉の設計に必要なデータが十分採れればよい。その要請から、通常運転時の Q は 10 であるが、運転条件によっては 50 以上の Q が達成されるように設計されている。Q が 10 であれば、外部からのプラズマ加熱入力に比べて、核融合反応で出てくるアルファ粒子による加熱パワーが大勢を占めるようになる。前に述べたとおり、炉心プラズマはエネルギーで制御するのであるが、この状況では、プラズマの閉じ込め状態を決めるのはそれ自身が出すエネルギーであり、外からの制御に使えるエネルギーの割合は小さい。すなわち、プラズマは自律的になり、さらに換言すれば、生き物のように自分の意志をもって振る舞うようになる。しかしながら、わがままなプラズマの制御に成功しなければ、核融合炉は実現できない。それを確かめるのが ITER であり、核融合発電の実用化までには ITER またはこれと等価な装置による研究が不可欠である。

ITER の役割はそればかりではない。核融合燃焼が起こるプラズマ閉じ込め実験装置には、これまでの装置になかった工学技術が必要になる。ITER には前節で述べた大型超伝導コイル、トリチウム増殖、遠隔操作技術等、核融合炉に必要な機器の全てが備わっている。次の原型炉の設計に備えて、これら一つ一つの機器の工学技術を完成し、しかもそれらが総合的に機能することを確認することも ITER の重要なミッションである。

(2) ITER計画の歴史

ITER 計画の必要性については、日、米、欧、露の代表者が集まって検討を重ねた。その結果、ITER 計画以外の研究開発路線を選択すれば、核融合炉の実用化は大幅に遅れ、しかも総合開発コストも増大するとの結論に達した。

ITER は世界の核融合研究者の英知が集積されたものであり、その設計には、JT-60 をはじめとする世界中のトカマクの最新データ、ならびに炉工学研究で得られた最先端の技術が導入され、反映されている。設計の信頼性を保証するための工学 R&D も設計と並行して実施された。その結果、超伝導コイルの巻き線技術、巨大な真空容器の溶接技術、遠隔操作技術など多くの技術が新しく開発され、ITER 設計に寄与した。

ITER の設計活動は 1988 年 12 月より始まり、13 年近くをかけて 2001 年 7 月に終了した。途中米国は、コストが高み、建設の見通しが立たないなどの理由をあげて計画から撤退した。一方他の 3 極はミッションを達成しながらコストを約半分に下げた ITER を再設計した。それが上に述べた ITER である。

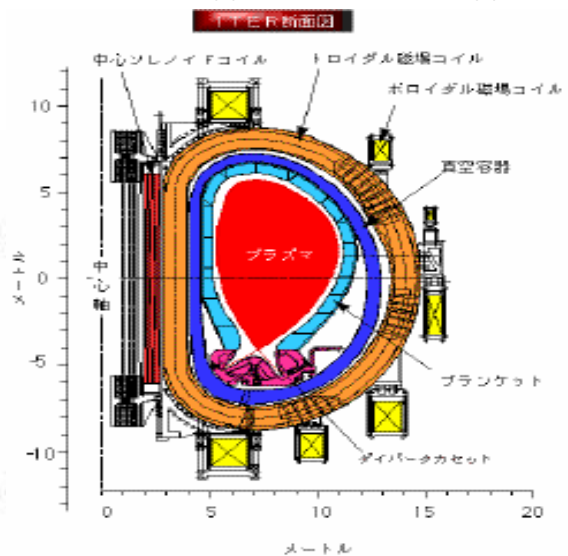
図 10.5.1 は ITER の鳥瞰図、図 10.5.2 は断面図である。装置の高さは 16m、幅は 30m であり、装置全体が地中に設置される。ITER および周辺機器を収納する建物内の気圧は、放射性物質の漏洩を避けるために、外気圧以下に保たれる。プラズマは真空容器の中に磁場で保持され、その断面は縦長である。Q=10 の標準運転の時、ドーナツ状プラズマの大きい半径は 6.2m、小さい半径は 2m、プラズマ体積は 837 立方メートル、プラズマ表面積は 678 平方メートル、プラズマの中心での磁場の強さは 5 万 3 千ガウス、プラズマに流れる電流は 1500 万アンペア、プラズマの温度は 9000 万度である。核融合出力は 50 万キロワットであり、運転の持続時間は 400 秒以上である。

図 10.5.1 ITER 鳥瞰図



[出典] 日本原子力研究所

図 10.5.2 ITER 断面図



[出典] 日本原子力研究所

ITER のスケジュールは建設期間 10 年、基本性能段階 10 年、拡張性能段階 10 年とされている。運転終了後は放射能レベルを減衰させる冷却期間をおき、レベルが十分下がったところで装置を解体する。基本性能段階にはプラズマ閉じこめ性能や工学機器の性能確認、プラズマ制御技術の確立や最適化などが行われる。特に定常運転技術の確立は重要な課題である。拡張性能段階の具体的計画は立てられていないが、各極では様々な実験計画が予定されているほか、小規模かつ短時間ながら人類初の核融合発電も検討されている。

ITER の建設コストはおよそ 5000 億円であり、20 年にわたる運転経費や放射性廃棄物の処分費用を含めれば、総額で 1 兆円を超えるプロジェクトである。参加極間での資金配分については現在国際交渉が行われているところである。資金を分担するにしても、1 極あたりの負担額はかなりのものになるので、我が国の科学技術予算に与えるインパクトは大きい。このため、我が国の ITER 計画への参加の是非についての審議が、内閣府の原子力委員会、総合科学技術会議などで行われた。その結果、いずれの審議でも計画の推進が妥当であるとの結論が出された。小泉内閣は 2002 年 5 月 30 日に開かれた閣議において、総合科学技術会議の結論を受けて、「国際協力によって ITER 計画を推進することを基本方針とし、国内誘致を視野に入れ、青森県下北郡の六ヶ所村を国内候補地として政府間協議に臨むことを了解する。」との閣議了解をまとめた。

ITER の建設については、設計活動の終了前から建設場所、資金分担、物品調達の方法、組織や役割分担などについての政府間交渉が行われ、現在なお続いている。建設場所としては、我が国の青森県六ヶ所村のほか、フランスが南フランスのカダラッシュ、スペインが地中海沿岸のパンデヨス、カナダがトロント郊外のクラリントンを候補地として提案し、それぞれについての国際共同調査が行われた。その結果、技術的にはどのサイトも ITER 建設が可能とされ、現在では各サイト毎の費用分担、主要人事等に基づきサイト選定の交渉が行われており、2003 年には候補地が決まることになっている。政府間交渉には設計作業を完遂した日本、欧州、ロシアに加えて、候補地を申し出たカナダが参加するようになった。2003 年のはじめには一旦撤退した米国が再参加を求めて承認され、続いて中国の新たな参加も認められた。さらに韓国も参加を申し出て、認められたところである。

(3) ITER 計画における日本の役割

最後に ITER 計画における我が国の役割について考えてみたい。核融合開発は人類の共存共栄に必要なエネルギー源として、真の国際協力のもとで研究開発が推進されてきた。ITER の設計活動が始まったのは、世界が半世紀にも及ぶ冷戦構造から脱皮する時期に合致しており、はからずも東西融和の先鞭をつけることとなった。従来の巨大科学プロジェクトの例としては、米国の主導による宇宙ステーションプロジェクトや EU が主導している加速器による素粒子物理学研究があるが、ITER 計画は計画の初めからどの国が主導することもなく対等の立場の国際協力の下に推進されてきた巨大科学プロジェクトである。これまでの日本の国際協力は、専ら他国が主唱、あるいは主導する研究開発の場に参加し、貢献するタイプのものであった。もし ITER が我が国に建設されることになれば、我が国は初めて大規模な国際協力の主催国としての役割を担うことになる。

我が国は核融合開発のフロントランナーとして世界の研究開発を先導している。核融合開発には高度な技術を伴うが、そこでも我が国の技術力が世界に期待されることは大で

ある。我が国は最先端技術の開発を得意とする多数の企業や研究所、大学を擁し、核融合開発を組織的、効率的に推進してきた。先に述べた ITER 設計活動を支援するための工学 R&D においても、日本の成果は際だったものである。こうしたことから、我が国は核融合の国際協力を主導する資格を十分備えている。核融合が原子力平和利用の最たるものであることからしても、核不拡散を保証する核融合エネルギーの実現のために世界に貢献することは、唯一の被爆国である我が国にとり重要な使命と言えるであろう。

ITER の国内誘致は、核融合を我が国の自主技術として根付かせる上でも極めて有用である。我が国に建設されることになれば、システム統合技術の修得や実験炉の建設・試験・運転・保守・管理にかかわる経験を積む機会が、我が国の多くの研究者や技術者に与えられること、核融合炉の安全をはじめとする日本の技術基準が世界の標準になることなど、多数のメリットがある。若手研究者が世界に飛躍する機会を増やすことにもなるうし、核融合のみならず我が国の科学技術の裾野を拡大するにも有効である。ITER による人類初の核融合発電が、我が国で行われることのインパクトも大きいと考えられる。

核融合開発はおよそ半世紀にわたって続いてきたが、核融合反応で燃えるプラズマを発生したことはなく、ようやくそれが可能な段階に達したのである。核融合炉の炉心プラズマの「制御技術」の確立は、燃えるプラズマの理解なくしてはありえない。その意味で、ITER 計画はエネルギー開発であるのみならず、科学の未踏領域に挑戦するものである。ITER に成功すれば、核融合発電の実現は至近なものとなる。