

# 「核融合について」

第2 研究部 環境グループ研究員 太田完治

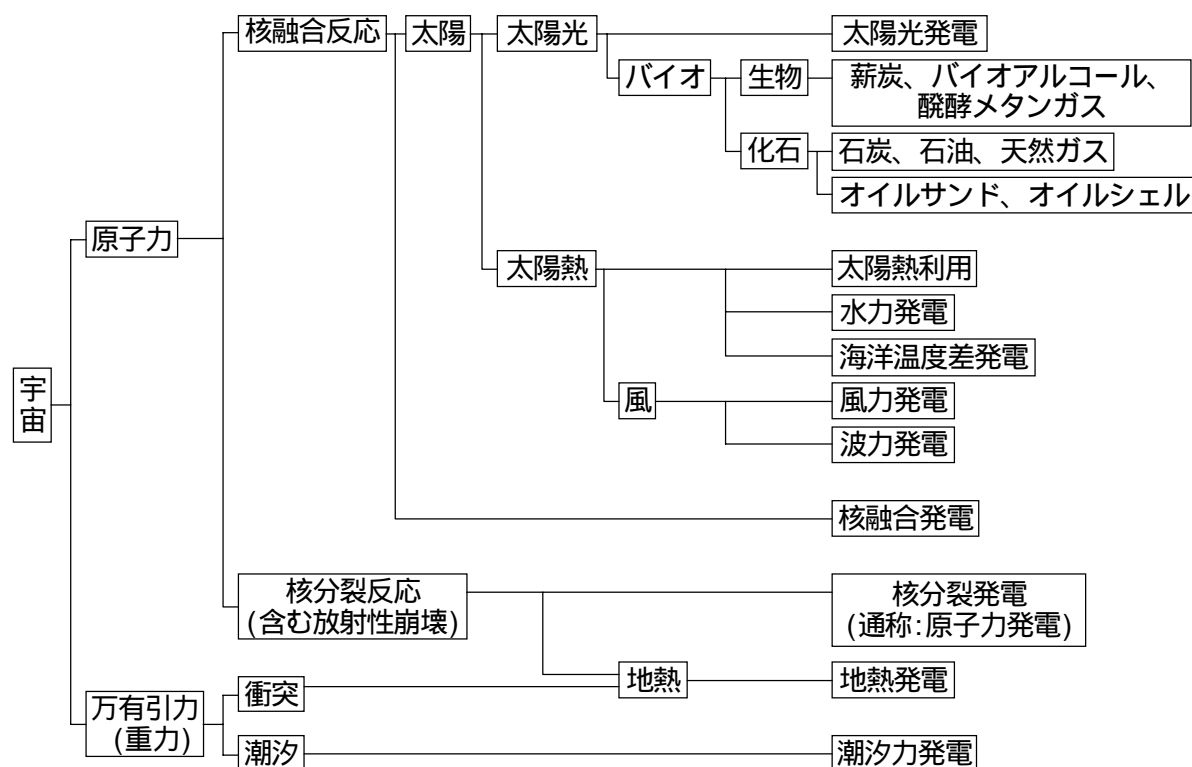
2000年4月12日(水)に玉野輝男前筑波大学教授による所内研究会「核融合について」が開かれたが、この報告はその紹介を兼ねたものである。

この核融合に関する報告は、研究結果ではなく「核融合」というものの解説である。

## 核融合は宇宙根元のエネルギー源の一つ

地上に降り注ぐ太陽のエネルギー、その太陽活動の源が核融合反応である。太陽系が誕生して45億年、その間地球に光と熱のエネルギーを与え続けてきている。今我々人類が生きていくのに使用している石油、石炭、天然ガスなど化石燃料も、過去に地球へ降り注いだ太陽エネルギーの蓄積である。図1にエネルギーのルーツによる分類を示す。この図から、我々が使用しているエネルギーの殆どが原子力エネルギーであり、中でも太陽エネルギーの恩恵を改めて知ることができる。化石燃料資源の枯渇問題と地球温暖化による化石燃料使用制限とから、21世紀以降のエネルギー問題は、省エネルギーの努力と再生可能エネ

図1 エネルギーのルーツから見た分類



(出所) 日本エネルギー経済研究所

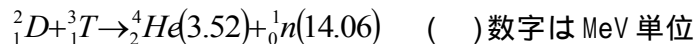
ルギーの更なる開発と 原子力エネルギーの利用増大により解決するしか方法はない。

現在原子力発電所で利用されている核分裂反応は、ウラン(235)を燃料としているが、ウラン鉱石も有限量であり、かつ産出地域も偏在しておりエネルギーセキュリティーの点から問題が残る。一方、地上での核融合反応燃料は水素の同位元素である重水素と三重水素であり、水という形で水素が存在する為、水が得られるところであれば、原則として誰でも燃料は入手可能である。

この燃料の地域普遍性とほぼ無限と考えられる量の存在から、核融合エネルギーは21世紀後半以降の人類究極のエネルギー源として、今から開発が進められている。

### 核融合反応とプラズマ

核融合反応とは、2つ以上の原子核(原子は中心に位置する正の電荷をもった原子核と、その周りに存在する負の電荷をもった電子とからなり、原子としては電氣的に中性)がより大きな原子番号の原子核に変化する反応をいう。一般に、この反応は水素など原子番号の小さい原子核で起こり、反応の際に大きな運動エネルギーを発生させる。地上で最も起こしやすい核融合反応は、重水素(記号D)と三重水素(記号T)の核反応であり、1回の核反応で17.58MeV (=2.816 × 10<sup>-12</sup>J)のエネルギーが放出される。



D - T燃料 1 gの核反応は、約 8 tの石油を燃焼させた熱エネルギーに相当する。

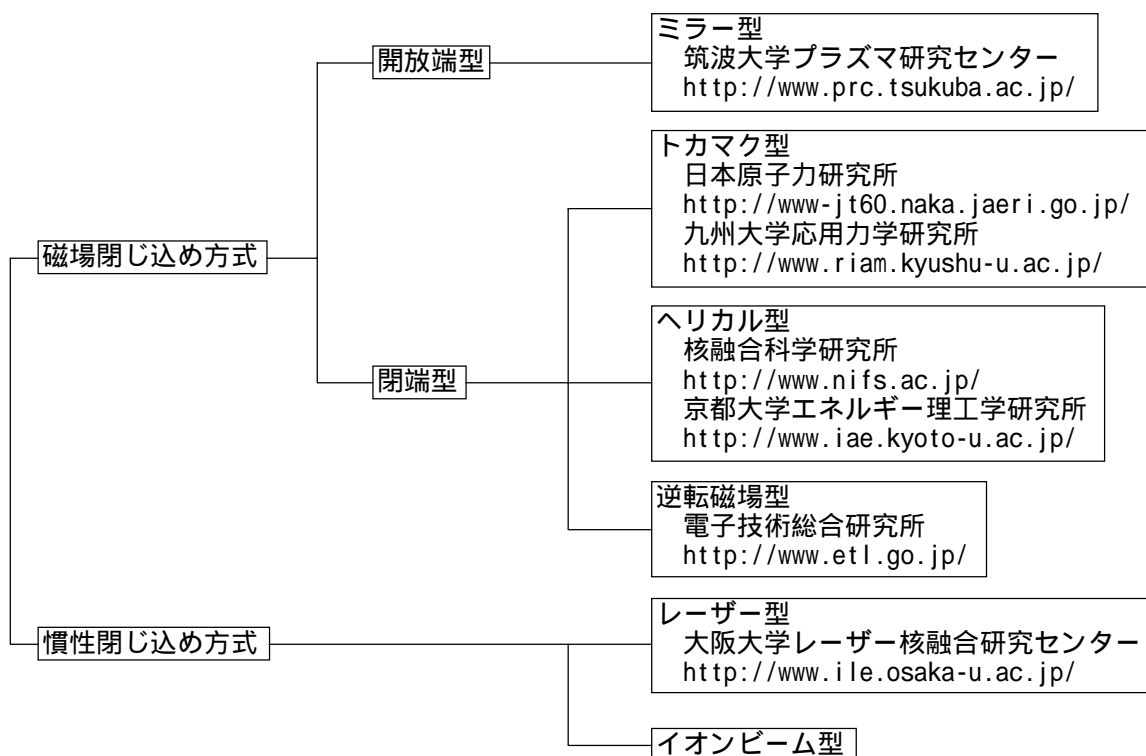
原子核が正の電荷を有す為、2つの原子核を同一時刻に同一場所に存在させようとすると、互いに電気反発力を受け同一場所に存在させることは、大変に難しい(電気ポテンシャルエネルギー)。これを越えて核融合反応を起こさせるには、重水素と三重水素の原子核同士の相対速度を上げ、運動エネルギーが電気ポテンシャルエネルギーより大きくなる様にしてやれば、この核反応が起こる。

相対速度を上げるには、高エネルギー物理の加速器を用いる手段もあるが、エネルギー収支が悪く、エネルギー取出しを目的とする場合には採用できない。エネルギー取出しを考慮して相対速度を上げるには、燃料全体を高温にし、原子核の熱運動で相対速度を上げる方法がある。地上では、D、T燃料を約1億度にする必要がある。

1億度の状態にある物質は、原子核と電子とが電氣的な引力で拘束し合った原子という形を保てず、それらがばらばらになった状態となる。物質には、低温領域から「固体」、「液体」、「気体」の3形態があるが、これらは、全て原子の状態を保ったままのもので、原子と原子がどのように拘束されているかにより、物質は3形態の一つをとることになる。原子は電氣的に中性なので、この3形態を取っているものには電磁氣的な力が働かない。しかし、気体より更に高温にし、原子という状態から原子核と電子をバラバラにした状態にすると、原子核、電子ともに電荷を持っているので、電磁気場より力を受けるようになる。この新たな性質を持った形態を第4の状態とし、「プラズマ」と呼ぶ。

DT燃料をプラズマ状態にし、プラズマを有限時間閉じ込める方法として、いくつかの装置が考えられている。図2にプラズマ閉じ込め方式の分類と国内での主な研究機関を示す。1億度というプラズマに接して閉じ込める材料は無い。そこで、プラズマが電磁場から力を受ける性質を利用して、磁場により容器壁から浮かした状態でプラズマを閉じ込める「磁場閉じ込め方式」と、DT燃料には質量がある為、高温になって膨張飛散するまでに時間が掛かることを利用した「慣性閉じ込め方式」とがある。閉じ込め方式の詳しい説明は、各研究機関のホームページを参照されたい。これらの種々の方式の中で最も高温、高密度のプラズマを作り出しているのがトカマク型である。

図2 核融合プラズマ閉じ込め方式の分類と代表的な研究機関



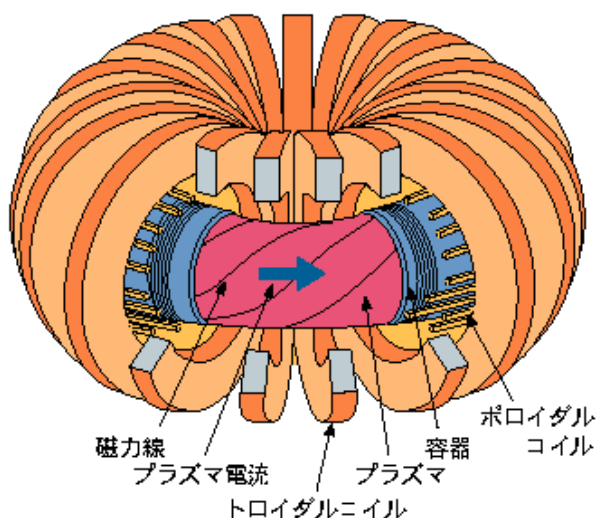
(出所) 日本エネルギー経済研究所

### トカマク装置と国際核融合実験炉(I T E R)

核融合炉に最も近いと思われるトカマク装置について解説する。

トカマク装置の原理を図3に示す。プラズマはドーナツ状の形をしている。ドーナツプラズマと直交して取り囲むようにトロイダルコイルが配置されており、プラズマに並行してプラズマ周囲にポロイダルコイルが配置されている。トロイダルコイルはドーナツの大円方向(トロイダル方向)の磁場を作るものであり、ポロイダルコイルはドーナツの小円方向(ポロイダル方向)の磁場を作るコイルである。ポロイダルコイルの内側にプラズマを包むように真空容器が置かれ、プラズマはこの真空容器の中で作られる。

図3 トカマク装置概略



(出所) 日本原子力研究所ホームページより引用  
(参考) <http://inisjp.tokai.jaeri.go.jp/2/2-1.htm>

プラズマを発生させる方法は、真空容器内を十分にクリーンな状態にまで真空に引く。トロイダルコイルに直流通電。燃料(ガス)を注入。プラズマの種火となる電子を入射(或いは燃料ガス中に電子を発生させる)。ポロイダルコイルにランプアップ通電(単位時間当たりの電流増大を一定にする通電)。ポロイダルコイルのランプアップ通電は、トランスの原理に従い2次側回路(今の場合はプラズマ)のトロイダル方向に起電力を発生させる。種火の電子は、この起電力を感じ、トロイダル方向に動き始める。動き出した電子は中性の燃料ガスと衝突し、燃料原子から電子を弾き出し電離させる。弾き出され自由になった電子も起電力を感じ元の電子と一緒に加速され走行する。この電離電子雪崩(=放電)により、燃料ガス全体が電離する。銅線(導体)中を電流が流れると電気抵抗で銅線が発熱することは日常経験するが、トカマクプラズマも同じで、プラズマ(導体)中を電子が走行するのでプラズマ自身が発熱する(加熱される)。プラズマにトロイダル方向の電流が流れることになる為、プラズマはポロイダル方向に磁場を作る。この磁場とトロイダルコイルが作るトロイダル方向の磁場とを重ねると、磁力線はプラズマを包む様に螺旋状の磁力線(理解しやすい様に離散化された線と呼ばれるが、実際は磁気的面)ができ、高温プラズマは真空容器内壁に接触することなく閉じ込めることができるようになる。

トカマクプラズマで核融合炉を実現するには、2つの限界がある。まずプラズマ電流をポロイダルコイルのランプアップ通電により発生させていることである。ポロイダルコイル電源の電流を無限にできないので、トランス原理によるトカマク通電はパルス運転とならざるを得ない。他の一つはプラズマの加熱にプラズマの抵抗加熱を用いているが、プラズマの温度が上がってくると、プラズマに更に入るパワーが飽和することである。つまり、それ以上温度が上がらなくなる。これら2つの限界に関し同時に解決する方法とし

て、プラズマイオンを波乗りの原理で駆動加熱する高周波(進行波)の使用や、プラズマに電流方向の運動量を与えつつ加熱するために高エネルギーに加速された燃料粒子の入射等が試行されている。

炉心プラズマに関する研究の他、核融合炉を実現するには多くのハード/ソフトの課題が残されている。

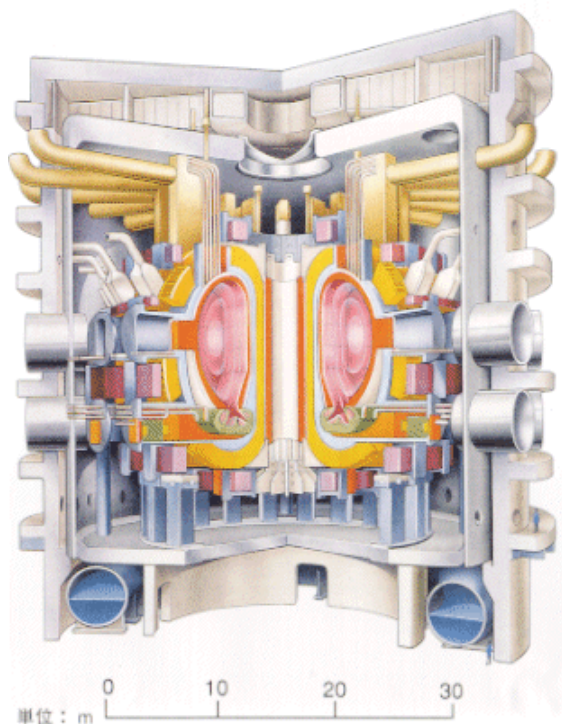
炉工学技術 : 超伝導コイル、 加熱・電流駆動、 炉壁/ブランケット、  
炉構造/遠隔操作、 ダイバータ/灰処理、 トリチウム閉じ込め、  
中性子遮蔽、 耐高中性子束材料、 大型化/高性能化/総合化  
炉安全性設計 : トリチウム閉じ込め、 低温エネルギー閉じ込め、  
耐震、 機器保全

現在は、これらの諸課題を解決すべく、個々に開発が進められている。

日本、欧州連合、ロシア、及び米国(1998.07まで)の4極が、現在共同で設計を勧めている国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor)の鳥瞰図を図4に示す。

核融合開発研究はもはや一国だけの予算で対応できなくなっており、1985年の米ソ首脳会談の核融合開発協力に関する共同声明を切掛に、IAEAの下で4極が人材と予算とそれぞれ

図4 国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor)鳥瞰図



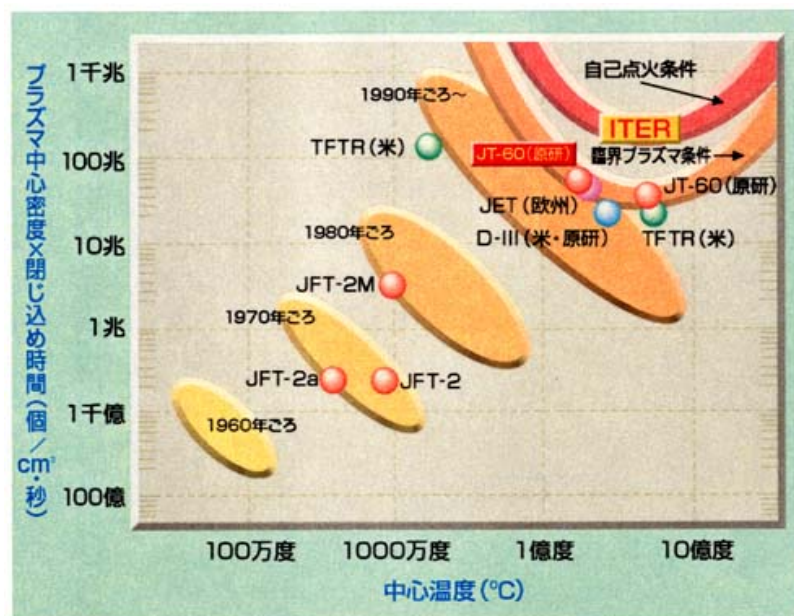
(出所) 科学技術庁ホームページより引用

(参考) <http://sta-atm.jst.go.jp/jicst/nc/hakusho10/siryu2104.htm>

れに積上げてきた実績とを出し合って、概念設計(1988-1990)、工学設計(1992-2001)を行って来ている。

核融合炉における自己点火が成立する為の必要条件には2つある。(図5)  
 プラズマの中心温度が1億度以上  
 プラズマ中心における原子核の数密度とエネルギー閉じ込め時間<sup>1</sup>の積が100兆個/cm<sup>3</sup>・秒以上  
 これをローソン条件と呼ぶが、当然ITERは、この2つの条件を満たし、自己点火を実証してみせることが最大の使命である。他にITERが実証しなければならない命題は、炉の定常運転に近づくための長時間燃焼と 個々に開発されてきた炉工学技術の総合化である。

図5 n -T 図



(注1) 臨界プラズマ条件：外部加熱入力と核融合反応出力が等しくなる条件  
 (注2) 自己点火条件：外部加熱入力なしで核融合反応が持続する条件

(出所) 日本原子力研究所ホームページより引用

(参考) [http://www.jaeri.go.jp/genken/work/progress\\_j.html](http://www.jaeri.go.jp/genken/work/progress_j.html)

\*1 エネルギー閉じ込め時間

例えば、薬缶で湯を沸かし、火を止めた後室内に放置したとする。すると時間と共に湯の温度はどんどん下がる。放置し始めた最初の湯温から  $1/e$  ( $e$  は自然対数=2.718) の温度に下がる迄の時間を薬缶のエネルギー閉じ込め時間という。エネルギー閉じ込め時間が長いほど、その装置の保温性がよい。物体の冷却には接触伝導伝達冷却、高エネルギー物質逃走冷却、輻射冷却の3過程がある。魔法瓶は容器壁を真空にし伝導を抑えている。風呂に蓋をするのは高エネルギー物質の逃走を抑え、風呂の湯を冷めにくくしている。魔法瓶の内壁が鏡になっているのは輻射(赤外線)反射させ冷却を抑える為である。

一般に、体積に対し表面積の小さいものの方がエネルギー閉じ込め時間は長くなる。例えば、球の場合、表面積/体積=3/半径なので、大きな球ほどエネルギー閉じ込め時間は長くなり、保温性がよくなる。

核融合開発の研究は、「放電の不安定性を抑えエネルギー閉じ込め時間を如何に長くするかという研究であった。」と言っても過言ではない。トロイダル磁場を強くする為にコイル導体を超伝導にしたり、ドーナツ形状のプラズマを大きく太くする為に大きな装置にしたりした。こうして1980年代に作られたのが、世界3大トカマク(JT60[日本]、TFTR[米国]、JET[欧州連合])であった。この3大トカマクで得られたデータを下にITERの設計が行われ、世界中のトカマク実験から得られた『エネルギー閉じ込め時間に関する経験則』から言って、ITERはその経験則の外挿線上にあり、ITERにおいて自己点火が達成されると思われる。自己点火達成の最大要因の一つは、装置を大きくしたことである。

装置を大きくする事は、炉として熱出力が大きくなることを意味する。コンパクトITERで出力50万kWthである。完全自己加熱炉になると数100万kWthの熱プラントになる。

一方、日本国内では、電力業界における電力小売りの自由化、燃料電池発電やマイクロガスタービン発電など消費地近くでの小型分散発電の普及を図り始めるなど、従来の電力事業の様な百万kWの大型発電所を作って、延々と電力消費地へ送電するという構造から変わろうとしている。今までの様な発電プラント効率だけに注目し電力価格を低減するという方法でなく、電力消費地に近い所で小さく発電(オンサイト発電)し、燃料供給コスト、プラント発電効率、送電損失など電力事業全体をみて電力価格を下げるという電力業界の方向と、エネルギー閉じ込め時間を上げるため大型化する核融合発電炉の開発とは全く相容れない方向である。

しかし、オンサイト発電の殆どが化石燃料を使用するものである。21世紀の後半には化石燃料資源の残量がクローズアップされるであろう。核融合炉開発には時間が掛かる。ITER建設には約5,000億円の予算が掛かる。経験則からITERで自己点火が達成されるのは確実と思われるが、確実だからと言って設計で終わってしまってお話で終わってしまう。核融合炉開発研究はサイエンスであり、実証を積上げていく研究である。先ず、ITERを建設し、自己点火を実証し、次のステップに進むしかない。

21世紀後半以降の人類のエネルギー保障を保障する為、先進国は今後も核融合炉開発研究を進めねばならない。

お問い合わせ

info@tky.ieej.or.jp