

核融合プラズマの粒子性と波動性

理学博士

石井 亀 男

経歴：1971年 東京工業大学大学院理工学研究科 物理学専攻
博士課程修了 筑波大学勤務

2006年 筑波大学大学院数理物質科学研究科 定年退職
物理学全般、プラズマ物理学、核融合関係が専門。

1. はじめに

よく知られているように、石炭や石油の化石燃料のおよそ100万分の1程度の燃料で、同程度のエネルギーを取り出せることが出来るとして、原子力エネルギーの利用が考えられています。原子力エネルギーの利用は、原子核の周りを囲んでいる電子の結合エネルギーとは異なり、原子核内部の核子（陽子、中性子）の結合エネルギーを利用するものです。原子力エネルギーを取り出す方法として、核分裂反応を利用する方法と、核融合反応を利用する方法が考えられていますが、ここでは、東日本大震災で問題になった核分裂反応による原子炉とは別ルートの、核融合反応を利用してエネルギーを取り出す基本的な事柄について述べたいと思います。

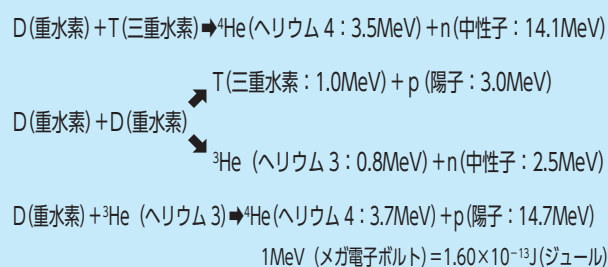
2. 原子核の結合エネルギー差

現在、名前が付けられている最も重い原子核は、原子番号が116のリバモリウム (Lv) であることから知るように、不安定な原子核を含む実に多くの原子核の存在が認められています。原子核は、陽子と中性子が結びついて成り立っていますが、原子核の結合エネルギーを陽子と中性子の数の和で割った、核子1個当りの結合エネルギーを比較して見ますと、原子番号26の鉄 $^{56}_{26}\text{Fe}$ （陽子数：26、中性子数：30）が最も大きくなります。すなわち、原子核が最も固く結びついており、エネルギー的には最も低い状態になっています。横軸を中性子の数、縦軸を陽子の数にとり、立体方向を核子1個当りのエネルギー状態にとって核図表を描くと、鉄 $^{56}_{26}\text{Fe}$ が最も低くなり、安定な原子核が低い場所に集まっている船底に似た形になっています。例えば立体方向から水を流すと、鉄よりも小さい原子番号を持つ原子核からも、また大きい原子番号を持つ原子核からも、谷川の水のよ

うに鉄に向かって流れ込む状態になります。この谷はハイゼンベルクの谷と呼ばれていますが、原子番号の大きな原子核を幾つかの小さな原子核を含む状態にして、そのエネルギー差を利用する核分裂とともに、原子番号の小さな原子核を集めて大きな原子核を含む状態にかえる核融合で、エネルギーを取り出すことが出来ます。

3. 核融合について

核融合反応を起こさせる方式は多種ありますが、ここでは磁場閉じ込め方式に注目します。多くの核融合反応のうち、利用されやすい反応は、重水素と三重水素が核融合反応して、ヘリウム4と中性子になる反応ですが、重水素と重水素との核融合により、三重水素と陽子およびヘリウム3と中性子になる反応、そして重水素とヘリウム3の核融合によりヘリウム4と陽子になる反応も考慮されています（図1）。



■ 図1 核融合反応の例

エネルギー差は、反応後の粒子の莫大な運動エネルギーとして表れ、幾多のエネルギー変換が行われて最終的には電気エネルギーに変えられます。これらの核融合は、原子炉内の核分裂に見られるような連鎖反応が無いのが特徴です。

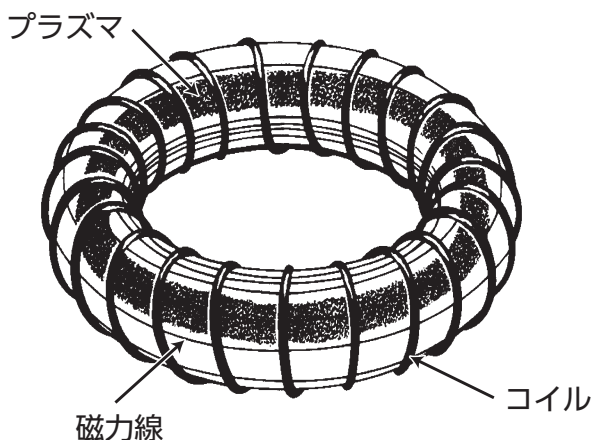
核融合を起こすためには、原子核同士を核力が及ぶ範囲 ($< 10^{-15}\text{m}$) にまで、近づけなければなりません。原子核は陽子を含んでいるため、プ

ラスの電荷を持っており、原子核同士はプラスとプラスでクーロンの斥力が働いています。クーロンの斥力に打ち勝つためには、原子核同士に大きな運動エネルギーを与えて衝突させ、近づける必要があります。原子は、原子核の周りを電子が囲んでいる状態ですが、その原子から構成されている気体分子は温度が極めて高くなると、分子間の衝突により電子が原子核から離れ、電子とイオンが混合した状態になります。この状態を第4の物質状態、すなわちプラズマと呼ばれていますが、核融合はこの状態で起こります。核融合を起こさせてエネルギーを有効に取り出す条件（ローソン条件）として、 1m^3 あたり ($>10^{20}$) 個の密度のプラズマを、(>1 億度) の温度にして、(>1 秒間) 閉じ込める必要があると考えられています。

4. 核融合プラズマの粒子性と波動性

1億度のプラズマをどの様に閉じ込めたら良いのでしょうか。その様な高温に耐える物質は存在しませんので、荷電粒子が磁力線に巻きつく性質を利用して、言わば磁力線のかごを作り、その中にプラズマを閉じ込める方式が考えられています。多くの磁力線のかごが考えられていますが、トカマク方式と呼ばれている磁力線のかごが広く用いられています。

大雑把に言いますと、導線を円柱の周りに巻いてソレノイドコイルを作り、円柱を取り除いて、ソレノイドコイルを円周に沿って曲げ、初めと終わりを一致させドーナツ状（トーラス）にします（図2）。



■図2 トーラス型磁場閉じ込め

コイルに電流を流しますと、コイル内の空洞部分に円周に沿った磁力線が発生します。ドーナツ

の内側の導線の方が、外側の導線よりも密に巻かれていますので、半径の小さな内側の円周部分の磁場の強さは、半径の大きな外側の磁場よりも強くなります。荷電粒子は、磁力線に巻きつく性質がありますが、巻きつくときの半径は磁場が強いほうが小さく、磁場が弱い方が大きくなりますので、磁場が変化している場合は、厄介なことに磁場のかごから飛び出るドリフト現象が現れます。電子とイオンは電荷の違いにより逆向きに回り、その結果ドリフト現象により電子とイオンの荷電分離が起こって、プラズマ内に電場が生じます。プラズマ内に電場が発生しますと、やはり荷電粒子が電場により加速や減速を受け、巻きつく半径が変わる結果、かごから飛び出るドリフト現象が生じ、プラズマを長時間閉じ込めておくことは出来ません。トカマク装置では、プラズマ内にドーナツに沿った電流を流すことにより、磁力線を振じらせ荷電分離を解消しドリフト現象を抑えることに成功しています。

電子とイオンから構成されているプラズマは、言わば柔らかく常に集団的にも動ける状態にあります。プラズマ加熱の際に伴うプラズマの分布関数の変動や電子、イオンの密度変動が起こると、プラズマ内に変動電場が生じ、その電場に電子やイオンが反応して新たな変動電場や変動磁場が発生します。その結果、プラズマ内には集団運動をする多様な波動が生じます。これらの波動は、プラズマ粒子を磁場のかごから飛び出させる場合もありますので、プラズマ閉じ込めの観点からどの様に制御するかが極めて重要な課題です。

核融合を達成させるために、多くの加熱系が使われています。マイクロ波や高周波を入射し電子やイオンのサイクロトロン共鳴現象等を利用して、電磁波のエネルギーをプラズマに与えたり、またプラズマの粒子性に注目して、高エネルギーの中性粒子を入射して粒子衝突によりプラズマを加熱させる等、様々な方法がとられています。プラズマは、個々の粒子として運動する側面と、集団運動をする波動性を併せ持っており、その性質を巧に使い分けて、核融合プラズマ実現の研究が進められています。

最後に、現在フランスのカダラッシュで、トカマク型の国際熱核融合実験炉（ITER）が建設途上にあり、日本の研究者の人達も多く参加していることを申し添えておきます。

■この「つくばのシニア人材紹介コーナー」は、つくば市が2008年度から推進している「つくば市OB人材活動支援事業」に登録されている研究者・教育者の方々より寄稿を受けて作成しています。現役を一旦引退されてもいつまでも社会発展の牽引力となって活躍をされている方々の研究実績や業務経験の一端をご紹介させていただくものです。