

核融合エネルギーの展望

宮本健郎 (物理)

1. 序論

核融合エネルギーというとき「夢のエネルギー」という形容詞のついた形で紹介されることがかつては多かった。それはいつになったら実現するのかわからない夢のような話という意味と、もし実現したならば無尽蔵のクリーンなエネルギー資源を手にするかも知れない夢のような期待がこめられていたように思われる。

戦後間もなく始まった核融合研究は紆余曲折をへて、ようやく科学的実証にむけて現実的な展望が開かれるようになってきた。それにともなって核融合に対する夢のような期待も現実的な評価におきかえられようとしている。

よく知られているように世界のエネルギー消費量は19世紀に入って増加の一途をたどり、1975年においてはおよそ0.25 Q/年 (1 Q = 1.05×10^{21} ジュール) の割合になっている。これに対して石油の採掘可能埋蔵量は未発見のものも含めておよそ10 Q程度 (確定量3.6 Q; 6.28×10^9 バレル $\sim 1.0 \times 10^{11}$ m³*)、天然ガスはおよそ10 Qと推定されている。石炭はこれよりやや多くておよそ70 Q程度と見積られている。したがって化石燃料の埋蔵量は90 Q程度と考えられている。¹⁾

次に現在実用化されている熱中性子炉のエネルギー資源を見てみよう。OEC Dおよび国際原子力機関の資料によると共産圏を除く国々のウラン埋蔵量は推定埋蔵量を含めて 4.3×10^6 トンであるが、この内U-235は天然ウランのわずか0.7%を占めるにすぎない。U-235のエネルギー資源は2.4 Q程度 (プルトニウムへの転換率

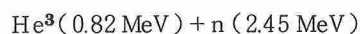
が0.6であることを考慮すると、その2.5倍の量になる) であり、わずかな量である。したがってU-235の核分裂連鎖反応を用いる熱中性子炉では、当面は重要な貢献が期待できても長期的な観点に立てば安心することはできない。

現在開発が進められている高速増殖炉は、U-235の核分裂によってエネルギーを発生しつつ、同時に高速中性子を燃えないU-238あるいはTh-232にぶつけて、燃えやすい核燃料Pu-239、U-233に核変換し、増殖させていくタイプの原子炉である。この高速増殖炉はようやく原型炉から実証炉が建設される段階になってきた。このタイプの炉が実用化されれば、天然ウランの大部分を占めるU-238を全部利用できるようになる。ウラン資源量 4.3×10^6 トンは、350 Q程度、トリウム資源量 1.3×10^6 トンは100 Q程度のエネルギー資源と考えることができる。

しかしながらウランは北アメリカ、オーストラリア、アフリカに、トリウムはインド、ブラジル、アメリカに偏在していて日本には少ないこと、核分裂生成物の処理、プルトニウム核拡散の問題など困難な問題が控えている。さらに450~500 Qというエネルギー資源も何世紀もの長い期間で考えると十分な量とはいえない。

2. 核融合エネルギー資源

核融合炉は軽い原子核の重水素D、あるいは三重水素Tの核融合反応を利用しようというものである。

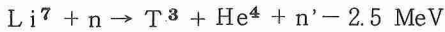
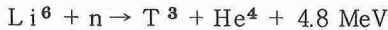


*琵琶湖の水量 2.7×10^9 m³ の3.6倍

ちなみに水素分子 H_2 が燃焼して H_2O になるさいのエネルギーは 2.96 eV である。 $(1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}\text{ ジュール})$ 。

DD反応の核燃料となる重水素はきわめて豊富で、海水中の水素の 0.015% （原子数の割合）である。もしDD炉が実現したとすれば、海水 $1.35\times 10^9\text{ km}^3$ に含まれる重水素のエネルギー資源は $3.7\times 10^9\text{ Q}$ と考えることができる。いいかえれば海水 1 l 中に含まれるDD反応の核融合エネルギーはおよそ石油 76 l のエネルギーに相当する。そして核融合反応それ自体からは放射能生成物は発生しない（ただし、とびだしてくる中性子による炉構造材の誘導放射能の問題はある。）したがって夢の核融合エネルギーという形容詞がつくわけである。しかしながら、このようなDD炉の実現の見通しはまだ立っていない。

現在進めている核融合研究のターゲットはDT炉である。DTの核反応断面積がDDのそれに比べてエネルギーの低い領域で大きいからである。しかし三重水素Tは天然には存在せず、リチウムを利用した人工的増殖を行わなければならない。



そのため上記のような $Li-n$ 反応を利用する。したがって核融合プラズマのまわりにLiのブランケットを置き、DT反応で飛びだしてくる中性子をLiにぶつけて三重水素を増殖する。また一方で高速中性子を減速して熱エネルギーを発生する。そして熱くなったLiまたはLi融融塩から適当な熱交換器によって蒸気を発生させ、発電タービンを回すことが考えられている。（図1）

ではDT炉のエネルギー資源はどのくらいあるかを算定してみよう。これは三重水素に変換されるLiの量によって制約される。Li鉱石資源の調査資料はウラン資源ほど整っていないが、およそ $8\sim 9\times 10^6$ トンと推定されており、 $1,700\text{ Q}$ のエネルギー資源に相当する。なお海水中には、Liは 0.17 g/m^3 と比較的多く 2.3×10^{11} ト

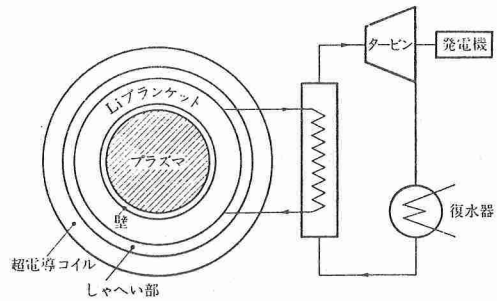


図1 核融合炉の概念図

ン存在し、 $4.7\times 10^7\text{ Q}$ 程度のエネルギー資源と考えることができる。すなわち海水 1 l 中のLiは石油 1 l に相当する。

比較のため海水中に含まれるウランについてみると 3 mg/m^3 の割合で存在し、 4×10^9 トン、 $3\times 10^5\text{ Q}$ のエネルギーは対応する。すなわち海水 1 l 中のウランの核分裂エネルギーは、石油 6.4 cm^3 に相当する。（もちろん海水からの重水素、リチウム、ウラン採取等に必要なエネルギーはこれから差し引かれなくてはならない）。

3. 核融合炉の展望

一般に物体は温度が高くなるにしたがって固体から液体、気体に変化していくが、さらに高温にしていくと、やがて中性粒子がイオンと電子に分かれ電離する。このようにイオンと電子が、それぞれの電荷がほぼ等しい状態で集まっている高温の状態をプラズマという。核融合研究において対象となるプラズマは温度が高く、イオン間にはたらくクーロン反発力に抗して互いに衝突し、核融合反応が起りうるものでなくてはならない。DT炉の場合イオン温度は数千万度から1億度の高温でなくてはならない。

さらに核融合反応によって得られるエネルギーは、その効率を考慮した上で、その高温プラズマ

を保つために必要なエネルギーより大きいことが条件となる。そのためには、プラズマの密度 n とエネルギー閉じ込め時間 τ との積 $n\tau$ が $10^{14} \text{cm}^{-3} \text{sec}$ 程度以上でなくてはならない。

制御熱核融合に関する研究は第2次大戦後アメリカ、ソ連、イギリスなどで極秘裡に進められていた。やがて核融合の研究は最初の期待に反して多くの困難にぶつかった。高温プラズマが激しい不安定性のために磁場を横ぎって逃げてしまい短時間しか閉じ込めることができなかった。核融合炉の実用化はほど遠く、国際的な研究情報の交換および協力の必要性が認識されるにいたった。

1958年原子力平和利用国際会議の分科会で、それまで秘密のベールの中で進められていた研究内容が堰をきったように発表された。かくして核融合に関する国際協力と競争が始まった。それ以来さまざまな実験が積み重ねられ、実現したイオン温度 τ と $n\tau$ 値は炉心プラズマの条件に肉薄しつつある。(図2)

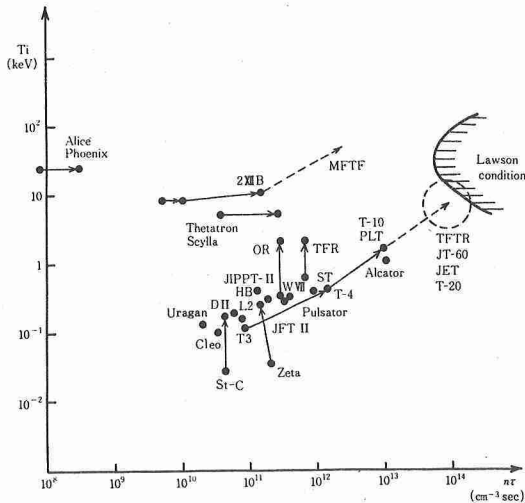


図2 $n\tau - T$ ダイアグラムにおける核融合研究の進展

現在アメリカ、ヨーロッパ、日本、ソ連において大型トカマク装置が建設されつつあり、1982

～1983年に完成予定で炉心プラズマ条件の実現を目指している。

核融合炉に対する評価や展望は立場によって必ずしも一致しているとは限らないし、研究の進展につれて変わっていくこともありうるが、おおよそつぎのように考えられる。

- i) 核融合炉は原理的に核暴走することは考えられず、高速増殖炉より安全である。
- ii) プルトニウムなど核拡散の危険はない。
- iii) 放射能の問題は核分裂炉よりも少ない。
- iv) DT炉によるエネルギー資源は核分裂炉のそれよりかなり大きい。
- v) DT炉の建設費は、高速増殖炉よりコスト高であろう。(1.5倍以上)
- vi) 核融合炉に至るまでには、炉心プラズマの実現、技術的諸問題(特にプラズマに面する第1壁の材料)等、多くの難問が控えている。

DT炉の炉心プラズマに関してはトカマクの開発が先行している。トカマクの開発は大型トカマク実験装置(現在建設中)、工学テスト炉、原形炉、実証炉、商用炉の段階を経て進んでいくシナリオが考えられる。1段階進むのに要する期間は少なくとも6～8年程度と思われる。核融合の研究はトカマク炉の他にミラー炉、あるいは慣性閉じ込め炉等の研究が後を追っているが紙面の都合上割愛する。核融合エネルギーの開発研究は理学、工学の広い分野に関連した息の長い長期的なものである。1980年代の代替エネルギーの役割は期待できないが、21世紀以降の長期的展望に立つならば、今から着実に研究開発努力を続けていかなければならない。

参考文献

- 1) C. L. Wilson: Energy; Global Prospects 1985-2000, McGraw-Hill 1977.
- 2) K. Miyamoto; Plasma Physics for Nuclear Fusion, MIT Press 1980.