

高温熱エネルギーによる直接発電

—クローズドサイクルMHD発電—

Direct Energy Conversion from High Temperature Heat

—Closed Cycle MHD Power Generation—

塩 田 進

Susumu Shioda

1. 高温熱エネルギーと熱機関

—プロペラからロケットへ—

化石燃料を空気燃焼させると約2,000°Cの燃焼ガスが得られることは良く知られている。これに熱機関を組み合わせて電力を得ようとするとき、現在のガスタービン複合サイクルではタービン入口温度が約1,200°C、蒸気タービンでは560°C程度であり、燃焼ガス温度との隔たりは大きい。将来は高温ガスタービンの出現により1,300~1,600°Cが期待されているもの、2,000°Cには届かない。火炎温度から大気温度までの温度領域を充分に使いきなすことは、エクセルギーの有効利用に極めて効果的であるとは言うまでもない。しかし、人類はまだ2,000°C近くの高温度領域での発電用の熱機関を手にしていない。

高温ガスタービンでは、金属を翼材料として使用するが、翼の冷却が一番の問題となる。空気冷却の場合には、新しい冷却方法を取り入れても、高温とともに冷却空気量が増大し、1,350°C程度が最適とされる。水冷の場合には、冷却熱量が増大するので、さらに1,500°C以上にまで上げ冷却による損失を補償することが考えられている。セラミック翼を使えば冷却損失が大幅に減ることが期待されるが、セラミック特有の困難があり大型のガスタービン用としては実用化が難しい。

ガスタービンでは、動翼は燃焼ガス中にさらされる。燃焼ガスと接触するのはミクロに見れば翼表面であるが、多数のタービン翼が燃焼ガス中を回転するので、マクロに見れば、“体積的”な接触をしていると見ることが出来る。そこでは翼に発生する揚力を介して燃焼ガスのエンタルピーを仕事に変えている。言いかえれば、冷却と仕事への変換の双方が“体積的”に行なわれている。

ガスタービンの温度領域を超えるためには、固体を空間を回転させず、体積的役割から開放させなければならぬ。ここにMHD発電の必然性がある。電極を含む固体壁は作動気体を所定の空間に流し、“面積的”な役割をする。これは、全冷却熱量の相対的減少をもたらす、上記の高温領域への進出を可能にするわけである。この事情はちょうどプロペラの揚力による推力からロケットの推力への飛躍と相似している。

2. 熱源と熱交換器

固体を使わないで燃焼ガスの持つエンタルピーを仕事に変えるには、電磁気学の教えるところから従えばよい。磁界をかけて作動気体中に起電力を起し、電流を流し、ローレンツ力を働かせる。そのためにはまず、作動気体に電気伝導性を持たせなければならない。電離ポテンシャルが小さく電離しやすい物質にセシウムやカリウムがある。しかし、これらの原子の半径が非常に大きい自由電子との衝突断面積が大きくなり、多量の存在はかえって電気伝導度を下げる。そこでわずかな量のカリウム(あるいはセシウム)を作動気体の中に入れ、これをできるだけ電離させることにする。これをシードと言う。

次に、これをどうやって電離させるかが問題となる。温度が3,000K程度になればこれらシード物質の熱電離によって十分な電気伝導度が得られる。しかし火炎温度は3,000Kには達しない。これを解決するのに2つの道が考えられた。ひとつは、燃焼用の空気をあらかじめ高い温度に予熱して燃焼器に導く方法である。しかもMHD発電機を出たあとの排熱を使って予熱すれば、都合がよい。これがオープンサイクルMHD発電の出発点である。もうひとつは、希ガス(アルゴンやヘリウム)を作動気体とする道である。希ガスは単原子分

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻 教授

〒227 横浜市緑区長津田町4259

子であり、電子温度が気体温度より容易に上昇するので、2,000C以下の気体温度であっても十分なシード物質の電離が期待できる(これを非平衡電離と呼ぶ)。これがクローズドサイクルMHD発電*の出発点である。

希ガスを作動気体とするならば、原子炉と組み合わせるのが最適ではないか。高温ガス炉ではヘリウムを冷却材としているのだからこれをそのままMHD発電すれば原子力の高効率発電が実現しよう。この考えは現在の高温ガス炉のヘリウム出口温度がせいぜい950Cどまりという現実の壁にはばまれ、核融合の時代が来れば可能性が検討されるのではないかとこの遠い夢に変わっている。

クローズドサイクルMHD発電の作動温度が火炎温度に近いという利点に注目して、むしろ化石燃料との組み合わせを考えようとの動きが70年代になると支配的になった。高温の燃焼ガスの熱を希ガスに移せばよい。このような高温域での熱交換器として、セラミック(アルミナ、ジルコニア、マグネシアなど)を蓄熱体とする蓄熱型の例がある。クローズドサイクルMHD発電プラントにこの蓄熱型を使うばあい、いったん燃焼ガスで蓄熱体を加熱し、蓄熱体中に残った燃焼ガスを追い出したあと、希ガスを蓄熱体中に導いて加熱する。このとき、希ガス中に燃焼ガス成分が不純物として混入しないかとの懸念が生じる。希ガスMHD発電の基礎実験によると、2原子分子である窒素では500ppm以下、3原子分子である炭酸ガスでは50ppm以下に押えないと、十分な電気伝導度が得られない。こんなことができるかどうか・燃焼ガスでアルゴンの加熱の実験を初めて行なったのが、フランスのサックレー研究所で1970年代初めであった¹⁾。予想外に低い不純物レベルであることが報告されている。この実験は途中で中止されたが、その後1980年までGEで続けられ、同様に不純物は充分低くなることが報告された²⁾。GEでは、微粉炭の燃焼による実験も行ない、スラッグの一部が熱交換器に入る条件下でも、不純物濃度が低くなることを観測している。これらは不純物量に対して、希ガス流量が圧倒的に大きいため、相対的に不純物の濃度が小さくなるという単純な事柄に基いている。1980年代に入って、オランダのアイントホーヘン工大と東工大の5-6MW熱入力のブローダウン実験装置が運転され^{3),4)}、不純物濃度が測定されたが、上記

* 正確にいうと液体金属を使うMHD発電もクローズドサイクルのひとつである。しかし他に比べて基礎的研究段階にとどまっている。

の結果を裏づけている。このようにして、クローズドサイクルMHD発電の目標と手段に見通しが与えられたが、なお研究開発の課題が多い。それについて以下述べることにしたい。

3. 利点と欠点

ここであらためてクローズドサイクルMHD発電の利点と問題点を整理してみる。まず利点として、

(1) 作動温度が火炎温度に近いこと。

(2) 作動気体として化学的に安定な希ガスを使い、シード率は10ppm程度と低くとる選択もあり、材料の耐熱性や腐食性の面で信頼性が高くなること。

(3) 発電システムは、図-1に示すごとく、高温熱交換器、MHD発電機、ボイラー、圧縮器より構成され、比較的単純であること。

(4) 出力容量が小さくても(100MWe程度でも)高い発電効率が期待できること。

(5) 作動気体の電気伝導度が高く、コンパクトな発電回路の可能性があること。したがって起電導電磁石も小さくなり得ること。

などである。

欠点としては、燃焼ガスの熱をすべて熱交換器を通して希ガスに移すため、熱交換器の容量が大きくなり、経済性が悪くなる可能性のあること、希ガス中の不純物を常時除去する装置を付属させなければならないこと、である。いずれも熱交換器にからんでいる。

利点を生かし、欠点を補う発電システムの構成が望まれる。そのひとつとして現在我々が考えているシステム⁵⁾を説明して参考にしていただく。MHD発電、ガスタービン、蒸気タービンの3つを組み合わせるサイクルである。2,000°C近くの高温領域をMHD発電が負担し、それ以下の温度領域をガスタービン-蒸気タービン複合サイクルが負担する。ガスタービンの断熱効率は85%程度でMHD発電に期待されている70~75%より大きい。したがって、中温度領域はガスタービ

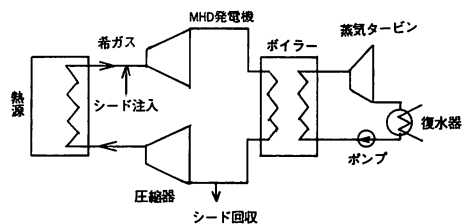


図-1 クローズドサイクルMHD発電複合サイクルの基本構成

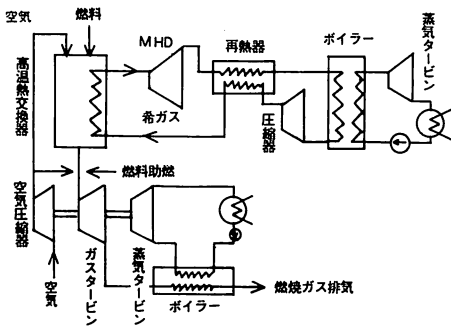


図-2 MHD・ガスタービン・蒸気タービン
複合サイクル（クリーン燃料）

ンによった方が発電効率が高くなる。図-2に示したのがそのシステムである。MHD発電-蒸気タービンの系列とガスタービン-蒸気タービンの系列を接続させ、MHD用の高温熱交換器を出た排ガスをガスタービンに導く。すべての熱を希ガスに移すわけでなく、熱交換器の容量の大幅な減少がもたらされる。このとき、別途の燃料をガスタービン入口で注入し、助燃を行ない排ガスの温度を上昇させる。これは全体の効率を上げる意味と二段燃焼による窒素酸化物の生成の低減をねらっている。熱交換器の蓄熱体の容量をさらに小さくするため、ペブルを蓄熱体として選択することが望ましい。ペブルは高純度で気孔率の小さいものが、分子不純物の混入の減少のためとダストの発生を少なくすることで望ましいことが基礎実験により明らかになっている。

このシステムは、必ずしもMHD発電機に対して高い性能を要求することがなく（エンタルピー抽出率25%程度、断熱効率65~70%でも充分な発電効率が得られる）、この点からも実現性が高くなる。また、高温ガスタービンが実現して、ガスタービン複合サイクルの効率が上がれば、このシステムの効率も上昇するという利点があり、MHD発電とガスタービンの共存共栄が実現する。このシステムにおいてはMHD発電部の導入により、ガスタービン複合サイクルにおける発電効率より3~4%の上昇が期待される。

ガスタービンの制約から天然ガスなどのクリーン燃料が対象となる。石炭に対しては石炭をガス化するか、あるいはクローズドサイクルガスタービン用の隔壁型熱交換器の実用化に期待したい。3つの熱機関の複合は、運転の柔軟性と同時に複雑さを持ち込む。起動特性や部分負荷運転などの検討が残っている。一方、MHD発電機の性能が上がり、熱交換器のコストが下

がれば図-1のようなMHD-蒸気タービンの複合サイクルが浮上しよう。

ヘリウムを作動気体として使うと、ボイラーなどの熱交換器の大きさを小さくし、発電回路や超電導電磁石をコンパクトにして経済性を上げるのに効果的である⁶⁾。ヘリウムは軽く、熱伝導率が大きく、流速が大きいことがその理由である。熱交換器の容量はアルゴンに比べ約半分に減じ、試算によると超電導電磁石の容量も0.5~1GJ(従来、MHD発電で言われていた容量の2分の1以下)になる可能性がある。分子不純物の除去に関しても、アルゴンを作動気体とするときには窒素の除去が問題となるが、ヘリウムを使えば深冷活性炭の利用によりこれが容易になる。不純物除去は、圧縮器直前で作動気体が低温になったとき、その一部(200分の1程度)を別ループに抜き出して行なわれ、純化したあと主ループに戻される。必要とする純化装置の大きさが計算されたが適切な規模に収まる。シード物質は、一部は不純物分子と化合して粉になって除去されるが、残りは、例えばフィルターで回収される。シード率が小さい場合には回収したシード物質化合物の量が少ないので再生の必要はなく、そのまま市場に流せばよい。

このように、MHDやガスタービンの開発の発展の度合いや燃料の種類(クリーンかダーティーか)によってシステムが変わってくる。クローズドサイクルであることの利点を生かして状況に応じて最適なシステムの構成を考えてゆけばよい。

4. 発電実験

1960年代より、アークジェットや衝撃波管、あるいは電気ヒーターを使って希ガスを加熱した基礎実験が各国で数多く行なわれてきた。当初は、発電回路内ではたして電子温度が上がって電離が促進し、電気伝導度の上昇が認められるか、に興味が集出し、肯定的な結果を得た。65年頃になると、そこでの不安定性が論じられ、なかでも電離不安定という電離がからんだ不安定について研究され、そのためにどの程度電気伝導度やホール係数が実効的に小さくなるかが測定された。なかでもソ連のクルチャフ研究所、西独のマックス・プランク研究所、イタリアのフラスカッチ原子力研究所での研究は有名である。またこの間に、出力として数KWを得ている。

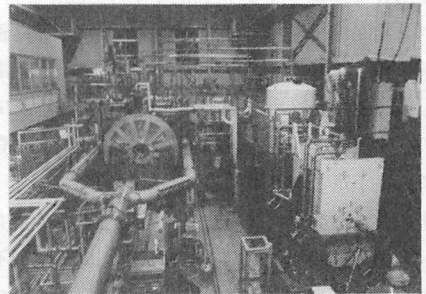
当初これらの研究所では高温ガス炉との組み合わせを考えていたが、前に述べた高温ガス炉の事情からこ

れら原子力関係の研究所では1973年頃までには研究を中断したり、縮少してしまっただけでなく、

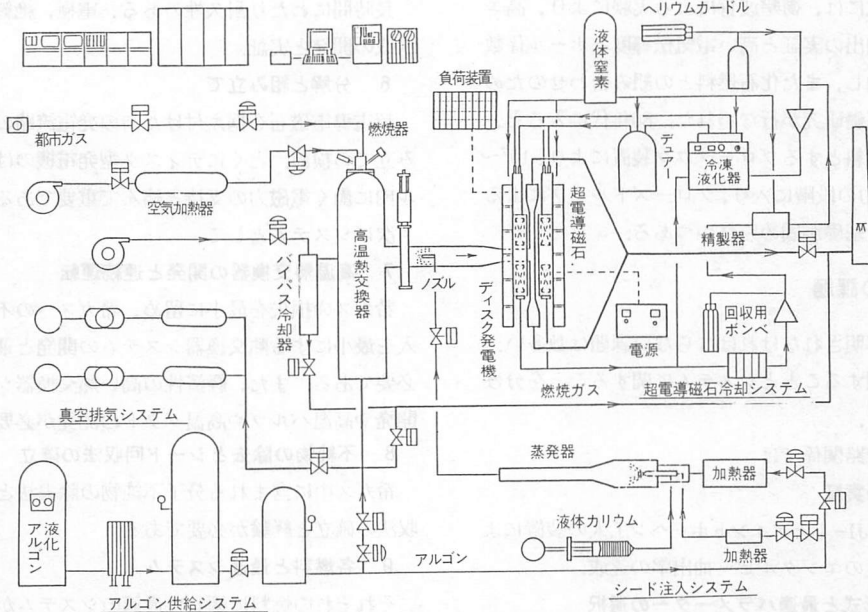
一方、化石燃料との組み合わせの可能性に注目し、研究を続けたのが、GE、オランダのイントホーヘン工大、東工大などである。1973～5年の間に主に衝撃波管を使った実験が行なわれ、1ミリ秒程度の短時間ながら、熱入力2～5MWで100KW～1MWの出力最高20%エンタルピー抽出率を得ている^{7),8)}(GE, アイントホーヘン工大)。また東工大においては、シード率を10～100ppmに下げて、これを完全電離すると電離不安定が減少して一様な放電となり、出力が上昇することが見出され⁹⁾(ディスク発電機, 1973年)、電気伝導度が200S/m、ホール係数8.5という大きな値が実現した¹⁰⁾(1979年)。

イントホーヘン工大では、プロパンガス燃焼の熱入力5MWのアルゴンを作動気体とするブロードダウン装置³⁾(発電時間10秒)を1975～80年にかけて建設した。発電機は線形のファラデー型で、液体窒素冷却の常電導電磁石を持ち、5.3Tの磁界が可能である。1981年の実験¹¹⁾で、アルゴン最高温度2,000K、出力(ピーク)360KW、エンタルピー抽出率7.5%を得ている。流路内では、電離不安定を許し、数多くのひも状の放電が作動流体とほぼ同じ速度で下流に走ってゆく状態で発電している。ひもの数はシード率を上げると増えてゆくことが観測され、 3×10^3 ppm程度のシード量で発電している。

東工大の装置⁴⁾(FUJI-1)では、シード率を下げて100ppm程度以下とし、ディスク型発電機を採用している。低いシード率は、技術的な利点からだけでなく、これを完全電離させて放電をできるだけ一様にして効率のよい発電機の実現をめざすという意味がある。ディスク発電機の採用は円板で円周方向に対称で、電極の分割がなく、一様な放電の実現がしやすく、またホール効果を使うので、高いホール係数をそのまま使えるという理由からである。実際、この10数年にわたる衝撃波管を使った一連の実験において、2,000K程度の気体温度では、ディスク型の方が大きい出力が得られ、一様な放電が実現しやすいことが確かめられている。1981年度より3箇年でアルゴンを作動気体とする熱入力6MW(最終的にはヘリウム10MWにまで上昇させることを考えている)のFUJI-1装置(写1)を建設し、1984年3月に一応の完成をみた。そのシステムを写3



写1 FUJI-1実験装置



写3 FUJI-1の主要システム

	1960年代	1970年代	1980年代前半	1980年代後半	1990年代
発電流路	<ul style="list-style-type: none"> 非平衡電離の実現 不安定性の解明 数KWの発電 	<ul style="list-style-type: none"> 高エンタルピー抽出率の実証(20%) 高い電気伝導度の実現 (200Ω/m) 高いホール係数の実現 (8.5) 	<ul style="list-style-type: none"> ブローダウン装置による$10^2 \sim 10^3$kwの発電(1分間) 	<ul style="list-style-type: none"> クローズドループによる長時間運転(10^3時間-10^3KW出力) 	<ul style="list-style-type: none"> 10^2MW熱入力実験プラント
熱源と熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> 高温ガス炉 	<ul style="list-style-type: none"> 化石燃料に転換 蓄熱型熱交換器における不純物量の測定 	<ul style="list-style-type: none"> 5~10MW熱入力熱交換器の実験 不純物除去とシード回収法の検討と基礎実験 	<ul style="list-style-type: none"> 熱交換器連続運転 不純物除去とシード回収の実証 	

図-4 クローズドサイクルMHD発電の研究の経過と展望

に示す。超電導電磁石(4.67テスラ)を持ち、実験時間1分のブローダウン装置である。建設をしながら、熱入力2MWの実験を行ない(1982年7月~83年2月)、アルゴン温度1900~1950K、2.6テスラの常電導電磁石で、50KW(ピーク)の出力を得ている¹²⁾。現在超電導電磁石の試運転を終え、熱入力を6MWに上げたアルゴンのブローテストを続行しつつあり、間もなく発電実験に入る予定となっている。

以上のような発電に関する研究成果をまとめたものが図-4である。60年代においては、非平衡電離や不安定などのプラズマ物理を中心とした基礎研究が行なわれ、高温ガス炉からの熱を直接発電することが考えられた。70年代には、衝撃波管による実験により、高エンタルピー抽出の実証と高い電気伝導度とホール係数の実現に成功し、また化石燃料との組み合わせのため熱交換器の基礎研究が行なわれた。80年代に入ると、天然ガスを燃料とするブローダウン装置により、 $10^2 \sim 10^3$ KWの出力の段階に入り、クローズドループによる連続運転への基礎が固められつつある。

5. 今後の課題

これから解明されなければならない課題は数多い。発電流路に関することとシステムに関することを分けて列挙しよう。

まず発電流路関係では

1 出力の実証

東工大FUJI-1とアイントホーヘン工大の装置による、10%程度のエンタルピー抽出率の達成。

2 流路形式と最適パラメータの選択

ディスク型かファラデー型かの選択。また、作動気

体の種類や圧力、流速、シード率などのパラメータの選択。

3 設計データの確立

発電流路、電極、電磁石などを設計するため、流路内のプラズマと放電現象、境界層内の現象と影響、電磁流体力学的諸現象などについての基礎研究を、上記2つの装置と衝撃波管によって続ける必要がある。

4 流体と出力の制御

直交変換系を含む外部回路の決定や事故時や負荷変動時に流体がどのような振舞をするか、それを制御するにはどうしたらよいかなどの検討。

5 長時間耐久性

長時間にわたり耐久性のある、電極、絶縁壁、流路構成の開発と実証。

6 分解と組み立て

超電導電磁石を据え付けた時の発電流路の分解と組み立ての検討。とくにディスク型発電機のばあいコイル内に働く電磁力の支持と絡んで重要である。

次にシステムとして、

7 高温熱交換器の開発と連続運転

希ガスの損失を最小に留め、希ガスへの不純物の混入を最小にする熱交換器システムの開発と運転経験が必要である。また、経済性の高い熱交換器システムの開発や高温バルブや高温ダクトの開発が必要である。

8 不純物の除去とシード回収法の確立

希ガス中に含まれる分子不純物の除去法とシード回収法の確立と経験が必要である。

9 各燃料と最適システム

それぞれの燃料に適した最適のシステムが検討され、他の発電技術と比較されるべきであろう。

以上のような多くの課題をかかえている。FUJI-1とアイントホーヘン工大の装置とにより、今後2年程度のうちに、発電回路に関する課題(1)~(3)についてはかなりの知見が得られよう。残る課題についても、基礎実験によるなどして一部検討に入っているが、最終的には熱入力5~10MW程度のクローズドループによる連続運転に進まないと結着しない。その後は、100MW級の熱入力をもつ実験プラントの検討の段階に入ろう。

参考文献

- 1) Azalbert, J.P., et al, Theoretical Calculations on the Noble Gas Closed MHD Loop Fired with Fossil Fuels and First Experimental Results with This Scheme, *Energy Conversion*, **10**, 1970, p.177-183.
- 2) Cook, C. S., An Experimental Evaluation of a Ceramic Regenerative Heat Exchanger for Fossil Fuel Fired Closed Cycle MHD, 6th Int'l Conf. on MHD, 1975, date Papers Volume.
- 3) Blom, J. H. et al., First Experiments with Eindhoven 5MW Thermal MHD Blow-down Experiment, *Proc. of 18th Symp of Eng. Asp. of MHD*, 1979.
- 4) Yamasaki, H. et al., First Experiments of Closed Cycle MHD Power Generation Experiment with FUJI-1, *Proc. of 8th Int'l Conf. on MHD*, 1983.
- 5) Yoshikawa, K. et al., Closed Cycle MHD Power Generation System Combined with Gas and Steam Turbines, to be Published in the *Proc the Second Workshop of NFS/JSPS CO-operative Pogram on MHD*, 1984, Montana.
- 6) Yoshikawa, K. et al., Conceptual Design Studies of 1000MWt Helium Closed Cycle MHD Power Plant, *Proc. of 22nd Symp. on Eng. Asp. of MHD*, 1984.
- 7) Marston, C. H. et al., Large Enthalpy Extraction Results in a Non-equilibrium MHD Generator, *Proc. of 6th Int'l Conf. on MHD*, 1975.
- 8) Blom, J. et al. High Power Density Experiments in the Eindhoven Shock Tunnel MHD Generator, *Proc. of 6th Int'l Conf. on MHD*, 1975.
- 9) Shioda, S. and Yamasaki, H., Sappression of Ionization Instability in an MHD Disk Generator, *AIAA J.* **12**, 1974, pp.1763.
- 10) Shioda, S. et al., Power Generation Experiments and Prospects of Closed Cycle MHD with Fully Ionized Seed, *Proc. of 7th Int'l Conf. on MHD*, 1980.
- 11) Masee, P. et al., Gasdynamis Performance in Relation to the Power Extraction of the Eindhoven MHD Blow-down Facility, *Proc. of 19th Symp, on Eng. Asp. of MHD*, 1981.
- 12) Yamasaki, H. et al., Recent Results of Power Generation Experiments with the FUJI-1 facility, *Proc. of 22nd Symp. on Eng. Asp. of MHD*, 1984.



核融合の開発と将来

Fusion Development and Future

磯 康 彦*

Yasuhiko Iso

1. はじめに

「エネルギー・資源」という言葉は極めて経済的な概念であって、「核融合」が、経済的な意味で本当に「エネルギー」となり「資源」の問題の対象となり得るのは、恐らく21世紀の半ば頃であろうといわれる。しかし、基礎的な物理の研究段階でありながら、最も先端的な技術の開発を必要とし、それ丈大きな投資が必要なこと、そして又、実用化の暁に期待される「エネルギー・資源」的メリットの大きさから、核融合の開発は早くから注目されて来た。核融合は将しく、21世紀のエネルギー・資源の目玉となるにちがいない。

この意味で、世界の先進国はこぞって核融合の研究開発に力を注ぎ、そのレベルも急速に高まってきており、物理的研究の段階から工学的段階に移りつつある。以下、エネルギー源としての核融合の特質とその研究開発の現状ならびに今後の展望についてのべる。

2. エネルギー源としての核融合

エネルギー源としてみたときの核融合の最大の魅力はその燃料にある。核融合炉の燃料は、重水素と三重水素で、いずれも究極的には海水中から供給できるという点で、量的にも、又偏在しないという点でも極めて有利である。

重水素(D)は天然水1m³当り約34gの割合で存在するのでこれを分離して容易に豊富に入手することができる。この重水素だけでも核融合反応は起るが、当面は反応条件の易しい重水素と三重水素(トリチウム, T)の混合燃料が使用される。トリチウムの親物質はリチウム(Li)で、中性子との反応でトリチウムを生成する。

リチウムは鉱石としても世界各地で採掘されているが、大量になれば、海水中に0.17ppm含まれている

ものを利用することも可能である。大まかに言って、天然リチウム1gから出来るトリチウムと重水素の反応によって発生する核融合エネルギーはほぼ1MW日に相当する。石油2kl, 1.8トンと同等である。即ち約2百万分の1で足りる。核分裂原子力と比較すると、1MW日は分裂性ウラン235,1gの分裂エネルギーに相等し、天然ウランに換算すると約100gと同等である。海水中から採取する場合を比較すると、天然ウランの混入率3.3ppbは、海水中リチウム混入率の約50分の1であるから、リチウムの方がさらに楽である。

リチウムの量は消費量よりもむしろブランクセット中のインベントリーの方が大きく、1基当り500tとして¹⁾、世界で1,000基の核融合発電所を作るとすると、約50万トン要る。世界のリチウム鉱石埋蔵量は約8百万ト²⁾ンともいわれているので、海水まで手をつけなくとも足りると思われる。

核融合の第二の利点は反応生成物の点である。核融合反応によって出来る生成物は図-1のように、ヘリウムと中性子であって、核分裂の場合出来る核分裂生成物のような放射性の灰が出来ないことが特徴である。では核融合の場合放射線、放射能の問題はないのかという点必ずしもそうではない。中性子は放射線であり、その遮蔽と、材料の放射化の問題がある。放射化された材料は交換されれば放射性廃棄物となる。但し、固体であるから始末はし易いし、又崩壊熱は少ないから、

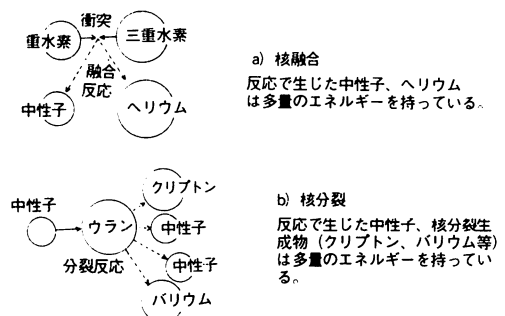


図-1 核融合反応と核分裂反応

* 日本原子力研究所核融合研究センター 所長

〒311-02 茨城県那珂郡那珂町向山