固相核融合・核分裂複合炉 (SFCR)

辻 良 夫

(近畿大学)

(1988年4月15日受理)

Solid State Fusion-Fission Combined Reactor (SFCR)

Yoshio Tsuji

(Received April 15, 1988)

Abstract

Thermonuclear fusion with the magnetic confinement of plasma is an explosive combustion in the gas state. This is one of the reasons why the thermonuclear fusion is difficult to be controlled. On the other hand, nuclear fission in the solid state fuel is well controlled and the heat is steadily generated. An idea of solid-state nuclear fusion could be realized by a solid-state nuclear fusion-fission combined reactor (SFCR). The nuclear fuel of SFCR is UD_3 or U_4D_{15} instead of the UO_2 and nuclear fusion of the deuterium nuclei excited by fission fragments break out successively, as the subordination of the former fission reaction. Neutrons produced by the D-D reaction will contribute to the neutron multiplication of this system.

Keywords :

solid state fusion, F-F combined reactor, D-D reaction, fission fragments, neutron multiplication, SFCR, combustion,

1. 緒 言

プラズマ磁気閉じ込め熱核融合反応の燃焼を通常の熱機関の燃焼と比較した。これらは共に気相燃焼であって、例えば、トカマク型は断続的の爆発燃焼(内燃機関)、ミラー型は連続的の爆発燃焼(ボイラー)と対応させることができる。爆発燃焼では反応生成物の種類、エネルギー、位置、時間の検出が困難なため、反応そのものを直接制御することができないので、反応系に送入する燃料の量で巨視的に制御せざるを得ない^{1),2)}。これに対して核分裂反応を用いた原子炉(たとえば軽水炉)は固相燃焼で、煉炭の燃焼が酸素の供給のみによって、制御されるのに類似応し、中性子数のみによって制御される。このように、固相反応では、反応系

に相当量の反応物質を備蓄したまま、徐々に燃焼させることができる。核反応は、反応断面積が非常に小さいので、反応系に相当量の反応物質（臨界量）が存在しないと、連鎖反応が維持できない。このためには、核融合反応も固相反応であることが望ましい。これは、核分裂反応と核融合反応とを組み合わせた、固相燃焼核反応炉によって実現する可能性があり、そのシステムの概要について検討をおこなったので報告する。

2. 固相核融合・核分裂複合炉の理論

2.1 原理

熱核融合反応では、反応系にある全反応物質を、反応温度に相当するエネルギー分布まで加熱し、確率的に反応させる方式であるが、その確率は非常に小さく、また、加熱も非常に難しい。これに対して、固相核融合反応では、微視的な、局所にある限られた数の重水素のみが、核分裂生成物の持つエネルギーによって加速され、標的核を衝撃して、反応断面積に応じた核反応をおこす方式である。粒子加速器によるD-T反応によって、中性子を発生させるのに類似するが、加速のためのエネルギーが、核分裂生成物によって与えられることが異なる。これは、 UD_3 , Th_4D_{15} のように、核分裂物質と核融合物質が微視的に分散している燃料を使用することにより達成可能である。このとき放出される中性子は、核分裂反応炉の中性子増倍率に寄与する。この固相燃焼核反応炉の制御は中性子数のみによって行うことができる。

2.2 模式的反応過程

炉心に挿入された中性子源により、まず、U-235 が核分裂し、反応生成物と中性子 n が発生する。一例として前者はSr-94 およびXe-140、後者の中性子数は2個であったとする³⁾。次式はこの炉の反応過程を模式的に示すものである。

ここで、 D ：重水素， T ：三重水素， p ：陽子，（ ）内数字：粒子1個のエネルギー（MeV）とする。

反応生成物 Sr , Xe は質量数が大きく、完全電離に近い状態で発生するので、周辺の格子間に拡散することなく、結晶を乱し、親物質として存在した周辺にクラスターを作り、エネルギーを失って安定化する。その過程におけるクラスター内部は、超高温プラズマ状態に近いものであると推測される。これを図1に示す。(a)は UO_2 (b)は UD_3 のクラスターを示す。同図中、電離したUはクラスター周辺に存在するもので、周辺の原子O, Dなどもイオン化されてクラスターに含まれる。 UD_3 クラスターでは、さらに核融合反応が発生するので、図2のようなプラズマ状態になっているものと推測される。

Plasma State in Fission Clusters
before Fusion Reaction

図1. 核融合反応発生前の核分裂クラスターのプラズマ状態

図2. 核分裂-核融合複合クラスターのプラズマ状態

核融合反応生成物 T, He は, これら相互間, あるいはこれらと D との間で, さらに核融合反応が発生するかもしれない。これらの反応は次のようなものと推定され, 個々の反応についてはかなり明らかになっている⁴⁾。

ここで、() 内数字は粒子1個のエネルギー(MeV)とする。これらの反応は、前のD-D反応に従属して発生するので、非常に複雑であるが、その発生する確率は小さいものと思われる。クラスター内部に発生したエネルギーは、 γ , x などの放射光、中性子、電子などが放出されることによって、炉心全体に拡散する。また、格子波として結晶内を伝播して、燃料体を加熱する。これら全ての熱は冷却材によって除去され、炉外に輸送される。

2.3 中性子増倍係数

熱中性子炉の無限大媒質の中性子増倍係数は次の式によって示される。

$$k_{\infty} = f p \varepsilon \eta$$

ここに、 f : 熱中性子利用率, p : 共鳴を逃れる確率

ε : 高速中性子分裂効果, η : 中性子再生率

これに対して、固相核融合反応を伴うときは、次のようになる。

$$k_{\infty} = f p \varepsilon \eta + f p \varepsilon \times f_1 p_1 \varepsilon_1 \{ P_{DD} \delta_1 + P_{DHe} (P_{DHe} \delta_2 + P_{DT} \delta_3 + \delta_4) \}$$

ここに、 f_1, p_1, ε_1 : それぞれ f, p, ε に対応し、DD反応によって生まれた中性子に関するもので、他の核融合反応によって生まれたものの効果を含む。

P_{DD} : 核分裂片によって発生するD-D反応の確率

P_{DHe}, P_{DT} : それぞれD-He, D-T反応の発生する確率

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$: それぞれD-D, D-He, D-T反応によって発生する中性子数

δ_4 : $(n, 2n)$, T-T反応などによって発生する微量の中性子数

$$\zeta = f p \varepsilon, \quad \zeta_1 = f_1 p_1 \varepsilon_1 \quad \text{とすると}$$

$$k_{\infty} = \zeta \eta + \zeta \zeta_1 \{ P_{DD} \delta_1 + P_{DHe} (P_{DHe} \delta_2 + P_{DT} \delta_3 + \delta_4) \} \quad (1)$$

実効増倍率を k_{eff} とすると

$$k_{eff} = k_{\infty} L_f L_t$$

ここに、 L_f, L_t : それぞれ高速中性子、熱中性子が反応系外に洩れる確率

臨界状態を保つためには $k_{eff} = 1$ でなければならないので ζ をできるだけ大きくする必要がある。このため、天然ウラン炉では減速材に黒鉛や重水が使用され、軽水炉では燃料に3~5%の濃縮ウランが使用さ

されている。(1) 式の第 2 項が寄与する固相核融合反応炉では、軽水炉の濃縮度を小さくするか、または、天然ウラン軽水炉の可能性も考えられる。さらにトリウムを使用する軽水炉にも希望がもてる。

3. 固相核融合・核分裂複合炉のシステム

3.1 燃料

天然ウランまたはトリウムの重水素化物に起動用 (マッチ) として微濃縮ウランを使用する。被覆管はステンレス鋼とし、焼結体または粉末燃料を充填する。管内部の雰囲気は重水素または、これに He を若干加えたものとする。ウランとトリウムの水素化物は、それぞれの窒化物燃料の開発過程でよく研究されており^{5,6)}、この雰囲気圧力 10 kg/cm^2 程度であれば 1000°C 位までは安定であると考えられる。これ以上の温度については今後の研究を待たねばならない。なお被覆管にステンレス鋼を使用するのは、核融合反応による中性子寄与が十分と考えられる場合である。

3.2 臨界と制御

(1) 式における P_{DD} がこのシステムの鍵であり、今後の研究によって明らかにされなければならない。その他の P_{DHe} 、 P_{DT} などは単独で解明することは難しいと考えられるが、 P_{DD} に従属しているので、一括して実験的に求めることになる。これらが明らかになれば U-235 や重水素の量を調整して、臨界量、余剰反応度を決定することになる。

核融合反応は核分裂反応に従属して発生するので、中性子によって核分裂反応を制御することにより、システム全体を制御できる。中性子の制御は、軽水炉と同じように、制御棒によって行う。

3.3 減速・冷却系

中性子の減速には軽水を使用できると考えられる。従って現在の軽水炉と同様に減速材と冷却材には軽水を使用する事ができる。しかし、燃料棒雰囲気中の重水素や三重水素の漏洩を考慮して、He 冷却と軽水冷却を併用することが望ましい。図 3 に示すように、燃料棒を直接 He で冷却し、その外を熱遮蔽材を隔てて軽水で冷却する。図 4 はこの原子炉システムの全容を示す。このシステムにおいては、He、軽水の原子炉出口温度はそれぞれ 500°C 、 150°C とし、炉外に蒸気発生器、蒸気加熱器を設け、熱効率の向上を計る。蒸気発生器は炉外において、蒸気加熱器を出た He によって、 200°C に加熱

Schematic Nuclear Fuel Arrangement

図3. 核燃料配置図

Schematic Diagram of Solid State Fusion Fission Combined Reactor

図4. 固相核融合・核分裂複合炉システム概念図

されて蒸気を発生する。炉内の軽水は加圧されているため上記の運転条件下ではボイドをほとんど発生しない。

4. 結 言

固相核融合反応を伴う核分裂炉を提案し、原理、システムの概要をのべたが、実現までには、解決しなければならない多くの問題がある。特に重要な事は

- (1) 核分裂反応に従属して発生する核融合反応の確率 P_{DD}
- (2) クラスタ内のプラズマ状態にあると推測される高エネルギー粒子のふるまい。
- (3) ウラン、トリウムの水素化物の高温における安定性

などである。しかし、それ以外は既存の原子炉の技術がそのまま使用できるため、実現の可能性は高いものと考えられる。今後、これらの問題点を解明して、より確実な設計及び評価を行う必要がある。

この論文を書くに当たって資料を集めて頂いた近畿大学渥美助手、トリウム水素化物に関する情報を提供して頂いた大阪大学桂助教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Semenov, N. N. : *Chemical Kinetics and Chain Reaction*, Oxford Univ. Press (1935).
- 2) Frank-Kamenetskii, D. A. : *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*, Dlenum Press (1969).
- 3) 影山誠三郎 : 原子核物理, 朝倉書店, (1983).
- 4) J. R. McNALLY : *Nuclear Technology/Fusion* 2・1 (1982) 9.
- 5) 菅野昌義 : 原子炉燃料, 東大出版会 (1976).
- 6) R. Caton, C. B. Satterthwaite : *J. Less-Common Metals*, 52 (1977) 302.