アドヴァンスド燃料核融合の展望

百 田 弘

(名古屋大学プラズマ研究所)

(1989年1月10日受理)

A Review of Advanced Fuel Fusion

Hiromu Momota

(Received January 10, 1989)

Abstract

Comparative studies of various fusion fuel cycles show that $p-^{11}\text{B}$ and $^3\text{He}-^3\text{He}$ fuel cycles which yield no neutron need more studies before acceptance as fusion fuels. $\text{D}-^3\text{He}$ fuel cycle appears to be most attractive. Because of very rare terrestrial resources, breedings of ^3He were so far studied. The recent discovery of lunar ^3He has changed the whole picture for advanced fuels. A program of studying a $\text{D}-^3\text{He}/\text{FRC}$ fusion is just started as a US-Japan collaboration program. As a result, interdisciplinary collaborations between space and fusion research are strongly recommended to develop advanced fuel fusion.

Keywords :

advanced fuel, helium 3, field-reversed configuration, commercial fusion reactor,

1. はじめに

核エネルギーを人類の将来に役立たせるべく、米国・ソ連・日本・ヨーロッパ共同体などを中心とする世界各国は制御核融合の実現のために過去35年余にわたって多くの努力を払ってきた。この開発は当初に想定されていたよりも困難であり、とくに燃料の超高温プラズマの閉込めを実現するためには数多くの基礎的研究と研究開発との蓄積が必要とされたが、昨今の研究結果はこれら研究が全体として順調に進展していることを示している。事実、米国・日本・ヨーロッパ共同体等で開発されたそれぞれの大型トカマク装置による実験は超高温プラズマの発生とその閉込めに多大の成果を挙げ、なかでもヨーロッパ共同体が開発したトカマク装置：JETでは高密度で摂氏1億度の超高温プラズマを生成し、それを比較的長時間にわたって閉じ込めることに成功した¹⁾。このことは核融合研究が第一のマイル標石たるその科学的実証(核融合反応によっ

て得られるエネルギーが燃料プラズマからのエネルギー損失を上まわり得ることを実験的に確認すること)にあと一步のところにもまで到達したことを意味している。

このような核融合研究の最近の成果にもかかわらず、商用核融合炉の開発のためには克服しなければならない課題が未だに山積している。第一世代の核融合は点火が最も容易なD-T燃料によるものと一般には考えられているが、これによって得られる核融合エネルギーの80%を占める14 MeVの中性子は炉壁材料に脆化やヴォイドによる膨脹その他の悪影響をあたえる^{2,3)}。これらの腐蝕に耐えて、経済的に十分な寿命をもつ炉壁材料の開発がまず必要である。また経済的に電力を供給する核融合炉のためには、例えばトカマク型核融合炉の場合、炉心プラズマのベータ値を10数%程度に向上させることと平方メートル当たり10MW程度もの高い中性子壁負荷に耐えうるトリチウム増殖ブランケットを開発することが必要である^{4,5)}。これらの為の研究と並行して、新たなプラズマ閉じ込め方式を開発することでこれらトカマク型商用核融合炉の諸課題を緩和しようとする、アドヴァンスド閉じ込め方式による核融合の研究が多くの研究機関で研究されている。また他方、種々の課題がD-T核反応に伴う14MeV中性子に起因するところから、D-T核融合を避けて、中性子の発生がより少ない燃料による核融合を開発しようとする、いわゆるアドヴァンスド燃料核融合の研究が遂行されている。とくに後者の研究は最近の月表面でのヘリウム3の発見に刺激されて急速に活気をおびてきた。以下、このアドヴァンスド燃料核融合の研究を概観し、今後の展望を試みる。

2章では考え得る核融合反応について、それぞれの商用核融合炉としての特長とそれを実現するために必要とされるプラズマの点火条件を比較する。重水素-ヘリウム3燃料サイクルは最も魅力的と考えられる。陽子-ボロン11や陽子-リチウム6核融合はヘリウム3-ヘリウム3核融合と同様に14 MeV中性子を発生しないので魅力的ではあるが自己点火せず、これらを炉として役立たせるには何等かの抜本的な手法の開発が必要とされる。地球上でのヘリウム3資源は実用化には余りにも稀少なので、これまで何等かの方法でヘリウム3を増殖する燃料サイクルが検討されてきた。3章では、これらの検討結果を紹介し、そこに現れたアドヴァンスド燃料核融合の特長と問題点を概観する。最近の月表面ヘリウム3資源の発見はアドヴァンスド燃料核融合の研究を大きく変化させた。4章ではこの月表面ヘリウム3資源とその経済性を紹介し、このヘリウム3を燃料とする商用核融合炉の可能性と今後の検討課題を5章で論じる。

2. アドヴァンスド燃料サイクルとその物理的要請

アドヴァンスド燃料核融合はD-T核融合が遭遇する種々の課題を緩和すべく表1に示すような発熱核反応を利用する。これらのうちの代表的な核反応全断面積： σ と熱核反応率パラメーター： $\langle\sigma v\rangle$ をそれぞれ図1と図2に示す⁶⁾。比較のために掲げたD-T核反応は108 keVに第一エネルギーをもつ複合核反応で、低いエネルギーで大きな核反応全断面積をもっている。D-D核反応は障壁因子が小さいので比較的ひくいエネルギーでもある程度の値の核反応断面積であるが、大きな共鳴は認められず、したがって核反応断面積

表 1. アドヴァンスド核融合に役立ちうる種々核反応

Fusion Reactions	
Deuteron-Based Fusion Fuels	
Primary Reactions	
$D + T \rightarrow n + {}^4\text{He} + 17.586 \text{ MeV} (3.517 \text{ MeV})$	
$D + D \rightarrow p + T + 4.032 \text{ MeV} (4.032 \text{ MeV})$	
$D + D \rightarrow n + {}^3\text{He} + 3.267 \text{ MeV} (0.817 \text{ MeV})$	
$D + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} + 18.341 \text{ MeV} (18.341 \text{ MeV})$	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 22.374 \text{ MeV} (22.374 \text{ MeV})$	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow p + {}^7\text{Li} + 5.026 \text{ MeV} (5.026 \text{ MeV})$	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be} + 3.380 \text{ MeV} (0.473 \text{ MeV})$	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow p + T + {}^4\text{He} + 2.561 \text{ MeV} (2.561 \text{ MeV})$	
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow n + {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 1.796 \text{ MeV} (\sim 1.134 \text{ MeV})$	
Secondary Reactions	
$p + T \rightarrow n + {}^3\text{He} - 0.765 \text{ MeV} (-)$	
$T + T \rightarrow 2n + {}^4\text{He} + 11.327 \text{ MeV} (\sim 1.259 \text{ MeV})$	
$T + {}^3\text{He} \rightarrow n + p + {}^4\text{He} + 12.092 \text{ MeV} (\sim 6.718 \text{ MeV})$	
$T + {}^3\text{He} \rightarrow D + {}^4\text{He} + 14.319 \text{ MeV} (14.319 \text{ MeV})$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 2p + {}^4\text{He} + 12.861 \text{ MeV} (12.861 \text{ MeV})$	
Proton-Based Fusion Fuels	
Primary Reactions	
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 4.022 \text{ MeV} (4.022 \text{ MeV})$	
$p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^6\text{Li} + 2.125 \text{ MeV} (2.125 \text{ MeV})$	
$p + {}^9\text{Be} \rightarrow D + 2 {}^4\text{He} + 0.652 \text{ MeV} (0.652 \text{ MeV})$	
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8.664 \text{ MeV} (8.664 \text{ MeV})$	
Secondary Reactions	
${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow p + 2 {}^4\text{He} + 16.880 \text{ MeV} (16.880 \text{ MeV})$	
${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow D + {}^7\text{Be} + 0.113 \text{ MeV} (0.113 \text{ MeV})$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 2p + {}^4\text{He} + 12.861 \text{ MeV} (12.861 \text{ MeV})$	
${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow n + {}^{12}\text{C} + 5.702 \text{ MeV} (0.439 \text{ MeV})$	
${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow n + 3 {}^4\text{He} - 1.573 \text{ MeV} (-)$	
${}^4\text{He} + {}^{11}\text{B} \rightarrow p + {}^{14}\text{C} + 0.784 \text{ MeV} (0.784 \text{ MeV})$	
${}^4\text{He} + {}^{11}\text{B} \rightarrow n + {}^{14}\text{N} + 0.158 \text{ MeV} (0.011 \text{ MeV})$	
$p + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Be} + 1.147 \text{ MeV} (1.147 \text{ MeV})$

図 1. アドヴァンスド核融合に役立ちうる種々核反応の全断面積

図 2. 種々核反応の熱核反応率パラメータ

の最大値はそれほど大きくはない。 $D-^3\text{He}$ 核反応は400keVに鋭い共鳴があり、核反応全断面積が比較的大きなものになっている。これらの他の高Zの核反応、たとえば $p-^{11}\text{B}$ や $^3\text{He}-^3\text{He}$ などはいずれも障壁因子が大きく、したがって核融合反応率をあるていど大きくするためにはより高い粒子エネルギーが必要とされる。

これらの核反応を利用したアドヴァンスド燃料サイクルを表2に掲げる。この表の第一のグループは重水素燃料を基礎としたもので、触媒 $D-D$ ⁷⁾、 $DD-^3\text{He}$ ^{8,9)}や $D-^3\text{He}$ 乃至はこれらを組合せた共生系¹⁰⁾等は比較的現実的なアドヴァンスド燃料サイクルの可能性があると考えられた。図3は触媒 $D-D$ と $DD-^3\text{He}$ 燃料サイクルを図示したものである。触媒 $D-D$ 燃料サイクルは $D-D$ 反応で発生するトリチウムとヘリウム3とを炉心プラズマからの排ガスから分離して、核融合反応を増加させるべく炉心プラズマに再注入する。 $DD-^3\text{He}$ 燃料サイクルは14 MeV 中性子の発生を抑えるためにトリチウムの再注入を止め、これを貯蔵にまわして、半減期が12.6年のベータ崩壊によって貯蔵器で得られるリチウム3を炉心プラズマに注入する、いわば触媒 $D-D$ 燃料サイクルの改良型である。アドヴァンスド燃料サイクルの第二のグループは陽子またはヘリウム3を基礎としたもので、これらの中で $p-^{11}\text{B}$ と $^3\text{He}-^3\text{He}$ 燃料サイクルは中性子を全く発生しないという利点があり、究極の核融合燃料サイクルと目されている。

表2. 各種燃料サイクル

- (1) $D-T$ Cycle
 $D + T = n + \alpha + 17.6 \text{ MeV}$
- (2) Cat. DD Cycle
 $D + D = p + T + 4.03 \text{ MeV}$
 $= n + ^3\text{He} + 3.27 \text{ MeV}$
 $D + T = n + \alpha + 17.6 \text{ MeV}$ or $T = ^3\text{He} + \beta^-$
 $D + ^3\text{He} = p + \alpha + 18.4 \text{ MeV}$
- (3) $p-^{11}\text{B}$ Cycle
 $p + ^{11}\text{B} = 3\alpha + 8.7 \text{ MeV}$
- (4) $p-^6\text{Li}$ Cycle
 $p + ^6\text{Li} = ^3\text{He} + \alpha + 4.02 \text{ MeV}$

図3. 触媒 $D-D$ (a)と $DD-^3\text{He}$ (b)燃料サイクル

さて、定常核燃焼プラズマにあっては、燃料プラズマへの単位時間あたりの加熱エネルギー（荷電粒子によって運ばれる核融合エネルギーとプラズマ外からの加熱入力）は燃料プラズマからのエネルギー損失（プラズマ・エネルギーの放射損失と伝導損失）と釣り合っている。D-T 熱核融合の場合、熱核反応率パラメータ： $\langle\sigma v\rangle$ を用いて単位時間あたりの核融合エネルギーを評価し、プラズマからの放射損失を制動放射で近似することによってこの条件はプラズマが自分自身で反応を維持する条件、いわゆる点火条件¹¹⁾となる。プラズマ外からの入力エネルギーの助けで核燃焼を維持するいわゆるビーム駆動核融合の場合には、ビームのエネルギーを最適化し、いわゆる二成分効果を利用して、核融合エネルギーの増倍をはかることが可能である¹²⁾。核融合出力とプラズマ外からの加熱入力との比： Q_p 、炉心プラズマの電子密度： n 、エネルギー閉じ込め時間： τ 、平均温度： T を導入し、 Q_p を最大にすべく他のプラズマ・パラメータ等を最適化してえられる Q_p を三重積： $n\tau T$ の関数として図示したものが図4である¹³⁾。 Q_p が比較的小さいときは二成分効果が顕著で核融合出力が大幅に増大するが、この値がある程度大きくなると二成分効果は実質的には無効となる。アド

図4. 三重積： $n\tau T$ と最大エネルギー利得： Q_p

ヴァンスド燃料核融合の場合、炉心プラズマの動作温度が高いので核反応生成荷電粒子と電子との衝突にたいして燃料原子核との弾性核散乱が比較的顕著になって燃料プラズマに高エネルギー成分が形成され、これによって核融合反応率が熱核反応の場合よりも増加する¹⁴⁾。動作温度が高いことはプラズマからのシンクロトロン放射損失を増大させ¹⁵⁾、さらに電子の相対論的效果にもとづく四重極放射の寄与が無視できなくなり制動放射損失が増大する¹⁶⁾。これらの効果を取り入れ、種々のアドヴァンスド燃料核融合で得られる Q_p の最大値を三重積： $n\tau T$ の関数として、さきと同様に図示したものが図4に与えられている¹⁷⁾。触媒D-D、DD- ^3He とD- ^3He はいずれも自己点火に達しうるが、そのための条件はプラズマのベータ値に依存する。例えばベータ値が90%のばあい自己点火のための三重積： $n\tau T$ は 10^{23} 秒・keV/ m^3 程度であるが、10%のベータ値では一桁程度大きな三重積が要求される。これは超高温のアドヴァンスド燃料核燃焼プラズマはシンクロトロン放射損失が大きいので、高ベータ・プラズマの生成・閉じ込めを実現してこの放射エネルギーをプラズマに再吸収させることの重要性を示唆するものである。単純なD-Dは核融合エネルギーがこれらのものに比べて数分の一であり、自己点火のための三重積： $n\tau T$ も数倍大きな値が要請される。D- ^6Li 、p- ^6Li 、p- ^{11}B 、や ^3He - ^3He 等の燃料サイクルは超高温の核反応プラズマを必要とし、しかもプラズマの実効的Z値が大きいので制動放射によるエネルギー損失が大きく、自己点火を実現するためには何等かの根本的な手法の開発を必要とする。

これらの燃料サイクルで核融合の自己点火が実現したとき、それが実際にD-T核融合で直面する諸課題を回避して魅力的なものになり得るかどうかを予め解析しておくことは大切である。この目的で燃料サイクルにたいする評価関数として、中性子の割合(中性子で運ばれるエネルギーの核融合エネルギーに対する割合)： f_n 、および放射パラメータ(荷電粒子によって直接エネルギー変換器に導入されるエネルギー

図5. 各種燃料サイクルの中性子の割合 (a) と放射パラメータ (b)

の核融合エネルギーに対する割合): Ψ_f を導入する¹⁸⁾。アドヴァンスド燃料核融合は超高ベータのプラズマを前提としており、低ベータ・核燃焼プラズマで問題になる核融合のエネルギー密度はこのばあいには十分に大きいので、結果として核融合のエネルギー密度が核融合炉の経済性を支配する重要な因子にならない。

図5は触媒D-D, DD-³HeとD-³Heそれぞれの燃料サイクルについて、中性子の割合: f_n , および放射パラメータ: Ψ_f をプラズマの平均温度: T の関数として与えたものである。図6はこれらの燃料サイクルによって自己点火に達するために要請されるプラズマの閉じ込めパラメータ: $n\tau$ である。これらの図においてもD-T核融合燃料サイクルでの値が比較のために与えられている。図5によれば、中性子の割合は触媒D-D, DD-³He, およびD-³Heなどの燃料サイクルではそれぞれ30%, 15%, および1%程度である。また放射パラメータはそれぞれの燃料サイクルにおいて、およそ50%, 70%, および83%である。これらの値は、これらの燃料サイクル

を利用することでトリチウム増殖その他中性子に起因する課題を大幅に軽減し、しかも高効率の直接エネルギー変換器の利用の割合が大きく、従って超高プラント効率の核融合炉を構築する可能性を示唆するものである¹⁹⁾。表3はこれらの燃料サイクルによる上記の解析結果に基づく電気出力百万kWの核融合炉の特徴的パラメータの一例である。なかでも、D-³He燃料サイクルは中性子による炉壁材料の腐蝕が全く問題にならない程度にまで中性子を減少させ、かつ78%程度もの非常に

図6. 各種燃料サイクルの自己点火のための閉じ込めパラメータ

表3. 各種燃料核融合の特徴的パラメータ (1 GW)

	DT	Cat. D	DD ³ He	D ³ He
T (keV)	13	40	100	100
$n\tau$ (sm ⁻³)	2×10^{20}	2×10^{21}	1×10^{21}	1×10^{21}
Plant Efficiency (%)	45	65	70	78
14 MeV Neutrons (MW)	1800	550	215	13
Engineering Requirement	T Breeding		300 kg T Bank	50 kg/y He Fuel

高いプラント効率をもたし得るもので、非常に魅力的である。が、温度が100keVの超高ベータの重水素-ヘリウム3プラズマを 10^{21} 秒/ m^3 程度閉じ込めることがその前提である。

3. アドヴァンスド燃料核融合炉概念

前節で種々のアドヴァンスド燃料サイクルを紹介し、それらの物理的要請を論じた。そして、結果として、 $\text{D}-^3\text{He}$ 燃料サイクルが商用核融合炉として最も魅力的なものの一つであることを知った(表3)。燃料のヘリウム3は1 kgあたり1 M\$程度(トリチウムの十分の一)の価格で購入することが可能であるが、その生産量は非常にわずかである。例えばマントルからのヘリウムガスからのヘリウム3はせいぜい年間3 kg程度、また核兵器のトリチウムのベータ崩壊から得られるヘリウム3も年間15kg程度のものである。表3にみられるように、百万kWの発電炉は年間50 kgのヘリウム3燃料を消費するという視点からは、ヘリウム3燃料は地球上には事実上存在しないと言っても間違いではない。いっぽう触媒D-D燃料サイクルは重水素のみを燃料とするので燃料資源に関しては全く問題はない。トリチウム増殖ブランケットも不必要なので、ブランケット構成の自由度がふえるという大きな利点は失われない。この触媒D-D燃料サイクルを用いるトカマク型核融合炉はワイルドキャットの設計²⁰⁾において検討された。また、トカマク型及び反転磁場ピンチでD-T燃料サイクルを用いる場合と触媒D-D燃料サイクルを用いる場合との経済性や技術的課題等についての評価がおこなわれた²¹⁾。低ベータ・トカマクに触媒D-D燃料サイクルを用いたとき、トリチウム増殖ブランケットが不要という利点がある反面、核融合の出力密度が低いので、核融合炉は相対的に大型になり商用核融合炉としての経済性が損われる。比較的ベータ値の大きな反転磁場ピンチに触媒D-D燃料サイクルを用いたものは、D-T燃料の場合よりも強い磁場と大電流駆動が必要ではあるが、商用核融合炉としてはより経済性に富むことが示された。この核融合炉の課題は14MeV中性子が三分の一に減少するとはいうものの、プラズマからの放射と荷電粒子の第一壁への負荷が非常に大きくなるということである。第二安定領域で作動するトカマク型のアドヴァンスド燃料核融合²²⁾は反転磁場ピンチの場合と類似しているものと思われる。

$\text{D}-^3\text{He}$ 燃料サイクルは触媒D-D燃料サイクルに比べてより理想に近いものではあるが、地上での燃料資源は望みえない。そこで方策として、ヘリウム3を増殖することが考えられる。その一つが先に紹介した $\text{DD}-^3\text{He}$ 燃料サイクルである。重水素-ヘリウム3超高ベータ・プラズマの温度を70~100keV程度まで高くすると、 $\text{D}-^3\text{He}$ 核反応がD-D核反応より優位になるので、図5に示されたように放射パラメータは40~70%もの高い値を示し中性子の割合は13~15%程度にまで減少する。このとき核融合パワーの半分程度かそれ以上のパワーを処理しうる大容量の直接エネルギー変換器の設置が可能でなければならない。このため、この燃料サイクルにとってミラー型や磁場反転配位などの直線型プラズマ閉じ込めは必至である。磁場反転配位はこの要件を満たしており、研究は未だ初等的とはいえ実験室では50~100%もの超高ベータ・プラズマが得られている²³⁾ことから、これと $\text{DD}-^3\text{He}$ 燃料サイクルとを組合せた商用核融合炉の概念設定²⁴⁾がおこなわれた。表4は核融合出力1 GWの核融合炉の主要パラメータである。プラズマの体積は約30立

表 4. 1 GW DD-³He/FRC 核融合の特征的パラメータ

プ ラ ズ マ		パ ラ メ タ ー	
プ ラ ズ マ 温 度	$T_i = T_e = 100 \text{ keV}$	平 均 ベ ー タ	$\langle \beta \rangle = 0.95$
電 子 密 度	$\bar{n}_e = 8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	セバトロクスベータ	$\beta_s = 0.2$
成 分 比	$\gamma_D = 0.748$	セバトロクス半径	$r_s = 1 \text{ m}$
	$\gamma_T = 0.005$	軸 長	$2L = 10.1 \text{ m}$
	$\gamma_{^3\text{He}} = 0.085$	体 積	$V = 32 \text{ m}^3$
	$\gamma_p = 0.025$	第 一 壁 磁 場	$B_w = 8 \text{ T}$
	$\gamma_\alpha = 0.026$	プ ラ ズ マ 電 流	$I_p = 114 \text{ MA}$
閉 じ 込 め 時 間	$\tau = 2.4 \text{ s}$	シ ー ド 電 流	$I_* = 680 \text{ kA}$
閉じ込めパラメータ	$\bar{n}_e \tau = 1.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s}$	異 常 拡 散 比	$\tau_N^{cl} / \tau = 160$
出 力			
核 融 合 出 力	$P_f = 1 \text{ GW}$	放 射 損 失	$P_r = 143 \text{ MW}$
荷電粒子出力	$P_c = 787 \text{ MW}$	制 動 輻 射	136 MW
中 性 子 出 力	$P_n = 213 \text{ MW}$	シンクロトン放射	7 MW
2.45 MeV	62 MW	直 接 損 失	$P_{dl} = 161 \text{ MW}$
14.1 MeV	151 MW	プラズマ直接発電器への入力：	644 MW

方米とコンパクトであるが直径 30 米の一對の直接エネルギー変換器と 300kg のトリチウム貯蔵庫が必要である。技術面からは大いに魅力的なこの核融合炉も、実現にいたるまでのプラズマ物理の面での多くの研究努力が必要である。

ヘリウム 3 を増殖するいまひとつの方法はヘリウム 3 燃料生産炉と電力生産炉とからなる共生システムを構築することである¹⁰⁾。燃料生産炉としては触媒 D-D 核融合炉を採用し、そこで発生するヘリウム 3 は再注入せずに電力生産のためのサテライト核融合炉に搬入する。重水素-ヘリウム 3 燃料を用いるこの都市型サテライト核融合炉はやはり超高ベータ・プラズマで大容量の直接エネルギー変換器を必要とするところから、磁場反転配位やタンデム・ミラーなどで燃料プラズマを閉じ込める方式が検討された^{25, 26)}。前者はサファイアと名付けられた数千 kW の電気出力小型核融合炉の設計で中性粒子ビーム入射によって定常運転を維持する、いわゆるビーム駆動型である。 Q_p 値は 30 程度であるが、放射パラメータの大きい燃料サイクルと高効率の直接エネルギー変換を採用することによって 50% の高い総合プラント効率を得られており、小型であるにも拘らず他の燃料サイクルによる大型の核融合炉と同程度の経済性が見込まれた。タンデム・ミラーを用いた重水素-ヘリウム 3 燃料サテライト核融合炉の設計では極極核反応を利用²⁷⁾して D-D 核反応を抑えることによって、人間の手による炉の維持を可能にするとともに中性子シールドを無くして磁場コイルを大幅に縮小することが試みられた。これらの炉設計も炉技術の観点からはそれぞれに魅力あるものと考えられるが、燃料生産炉は触媒 D-D 核融合炉の採用が想定されており、主として 14MeV 中性子に起因する本来の問題を解決していないので、グローバルには依然課題がのこされている。

4. 月表面のヘリウム3資源

米国の月探索ロケット：アポロ 10, 12, 17 等の持ちかえった月表面の泥のサンプルとルナ（ソ連）の行ったプローブ測定等の最近の分析結果は月表面の泥に採鉱しうるヘリウム3が大量に含まれていることを明らかにした²⁸⁾。この発見は非常に大切で、これまでヘリウム3の増殖を前提としてきたアドヴァンスド燃料核融合の研究の状況を根本的に変化させる²⁹⁾ものである。

月表面の ^3He の起源は太陽の高重力圏での $D(p, \gamma)^3\text{He}$ 反応である。ここで発生したヘリウム3は平均450 km/秒の速さの太陽風によって放出される。ここでのヘリウム流束は $6 \times 10^{10} \text{ atom/m}^2 \cdot \text{秒}$ 程度、ヘリウム3とヘリウム4の比は480appm程度である。月表面はこのヘリウムを40億年以上の歳月にわたって集収し続けてきた。太陽風の粒子は月表面の泥の表面から0.02 μm 程度以内の深さに注入されるので、泥の粒が微細であるほど単位重量に多量のヘリウムを集収する。この意味で、たえずいん石によって粉砕されて月表面の全域5-15 mの深さにわたって80%の重量比で存在する8-125 μm の超微細粒子の泥は非常に効率的なヘリウムのコレクターである。月表面の泥に含まれるヘリウムの割合はサンプルによってばらついている。サンプルでのヘリウム3とヘリウム4の比は拡散における同位体効果によって10%程度減少している。海の泥の10%を占めているチタン鉄鉱はヘリウム4をより高密度に含んでいるので月表面の20%をしめる海では5 mの深さにわたって平均30 ppm、丘陵では10 mの深さにわたって平均7 ppm程度のヘリウム密度と推定され、月表面全体で、太陽風にたいする幾何学的効果をも考慮にいれて評価した結果、 10^6 トン以上の採鉱しうるヘリウム3が存在するものと結論される。なお、この量は月表面全体のヘリウム3の含有量の1%以下である。地球よりも外軌道の惑星：木星や土星は25 wt%程度のヘリウムがあると考えられている³⁰⁾。従って、そこでのヘリウム3とヘリウム4との比が140appm程度と考えれば、これらの惑星でのヘリウム3資源は 10^{20} トン以上と見積もられる。

21世紀初頭の月面基地を利用した月表面ヘリウム3の採鉱と地球への輸送のシナリオが提案された^{28), 31)}。地球から運搬するプラント機器の耐用年数は10年であると仮定して、ヘリウム3を得るためのプラント機器の運搬、採鉱、昼時間の高温（摂氏130度）を利用する600度での脱ガス、夜時間の低温（零下120度）を利用する蒸溜と超流動によるヘリウ

ム3の分離、シャトルによる地球への輸送などのエネルギーが算定された（表5）。

これによると、1 kgのヘリウム3を地球上で得るために要するエネルギーは2382 GJである。ヘリウム3を燃料として核融合に役立たせることが可能となれば、1 kgのヘリウム3は $6 \times 10^5 \text{ GJ}$ のエネルギーを生産する。これらの試算によれば月表面のヘリ

表5. 月表面ヘリウム3採取・運搬に要するエネルギーコスト

	^3He (GJ/kg)
Mining (120,000 tonnes of soil)	2200
Gas evolution (20,000 tonnes of soil) (100 % solar energy plus 50 % reheat)	180
Isotope separation (superleak plus distillation)	1
Transportation	1
Total	2382

ウム 3 はエネルギー利得が 200 以上という質の高いものであり、その量も 10^7 GW・年という魅力的な資源である。

5. おわりにー アドヴァンスド燃料核融合の展望

アドヴァンスド燃料核融合の展望と題して、歴史を概観してきた。ここで展望を論ずる筈ではあるが、いざとなると筆者自身展望がつかめない。ただアドヴァンスド燃料を用いて人類に役立ちうる核融合エネルギーを開発すべく、研究努力を重ねるのみである。

アドヴァンスド燃料核融合の研究はこれまで主として米国そして若干は日本で遂行され、ソ連やヨーロッパ共同体にはこれといった研究の蓄積はない。その米国でさえ、エネルギー省でアドヴァンスド燃料核融合の研究が支持されるようになったのは 1985 年の末のことである。すでに概観してきた通り、理想的なアドヴァンスド燃料のためのプラズマは 50% 程度かそれ以上に高いベータ値をもった、大容量の直接エネルギー変換器の設置が可能なもので、これを 100 keV 程度の温度で閉込めパラメータ： 10^{21} 秒 / 立方形だけ閉じ込めることが要請される。温度と閉じ込めに関しては今後の研究の進歩に期待することにして、ベータ値と大容量の直接エネルギー変換器の設置の条件にたいして磁場反転配位 (FRC) はこの要請に最も合致したものの一つと考えられる。しかも、重水素－ヘリウム 3 燃料がこの磁場反転配位で点火したときには 14.7 MeV の陽子が選択的に配位内に捕獲されてこれが配位の定常的な維持に大きく寄与しうる³²⁾ことがわかって、定常磁場反転配位による重水素－ヘリウム 3 燃料が多くの研究者に関心を持たれるようになった。この方向で日本と米国との共同研究として、D- ^3He /FRC 商用核融合炉の概念設計を遂行し、これの開発に不可避の課題を明らかにし、そして当面着手すべきプログラムを提案する一連のプログラムが発足した。

炉技術的には課題が軽減するとはいえ、例えば D- ^3He /FRC 商用核融合のためのプラズマ物理はこれまでに多くの成果を挙げてきた磁気流体的または旋回中心的なものと全く異なった側面をもっている。超高ベータのプラズマが対象となり、またここでは高エネルギー核反応生成荷電粒子の振舞いが本質的に現象に影響を与え得る。

トカマクや軸対称ミラー型の配位における重水素－ヘリウム 3 燃料プラズマも今後の研究対象になるものと考えられる。ここではプラズマを比較的低温度で燃焼させ、場合によっては偏極核反応を用いて核反応の分岐を制御すること等も研究の対象とされよう。

これまで慣性閉じ込めによるアドヴァンスド燃料核融合はほとんど研究の対象とされていなかった。が、アドヴァンスド燃料核融合の利点は磁氣的閉じ込めのばあいと同様と考えられる。アドヴァンスド燃料核融合に特有の大容量の直接エネルギー変換器の観点からは慣性閉じ込め方式はより魅力的でさえある。慣性閉じ込めによる D- ^3He 核融合の研究も最近になって、わが日本で着手されるに至った。大いなる進展が期待される。

最後に、これまで述べてきたことで明らかなように、アドヴァンスド燃料核融合の開発は月表面資源の開発とあいまって実用にいたるものと考えられる。その意味では、研究計画の立案、研究情報の交換、両分野

に共通する課題についての共同研究など、核融合研究と宇宙開発の二つの研究分野の協力は、こんど益々密接になることが期待される。

謝 辞

この機会を借りて、筆者にアドヴァンスド燃料核融合の重要性を御教示くださり、有効な御指導を賜った伏見康治先生に心から感謝したい。また秋宗秀夫教授には研究の指針や炉技術の諸課題について、終始御指導を戴いた。岡本正雄助教授をはじめ、富田幸博氏、野村保之氏その他多数の方々にアドヴァンスド燃料核融合の共同研究を通じて種々御協力を戴いた。そして、イリノイ大学のG.H. マイリー教授には研究の遂行に関して種々の御支援と御協力を戴いた。これらの方々にも心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) JET Group : to be published in Proc. IAEA 12th Conf. on CTR.
- 2) G. L. Kulcinski : IAEA CN-33/s 3-1 (1975).
- 3) R. W. Conn : Journ. Nucl. Materials Vol. 76 & 77 (1978) 103.
- 4) A. Dabiri *et al.* : Fusion Technology Vol. 10 (1986) 49.
also see : R. A. Krakowski and J. G. Delene : Journ. Fusion Energy Vol. 7 (1988) 49.
- 5) 宅間 & 山地 : ENERGY 1987-5, 18.
- 6) より詳しくは R. Feldbacher : INDC (AUS)-12/G (IAEA, Austria : 1987) 参照.
- 7) R. G. Mills : PPL-TM-259 (PPPL, Princeton : 1971).
- 8) D. Steiner : Nucl. Sci. Eng. Vol. 58 (1975) 107.
- 9) H. Momota : Fusion Tech. Vol. 11 (1987) 439.
- 10) G. H. Miley *et al.* : Proc. 2nd ANS Topl. Mtg., CONF-760935 (1976) 119.
- 11) J. R. McNally : Fusion Technology/Fusion Vol. 2 (1982) 9.
- 12) J. M. Dowson, H. P. Furth, and F. H. Tenny : Phys. Rev. Letters Vol. 26 (1971), 1156.
- 13) H. Momota, Y. Tomita, and Y. Nomura : IPPJ-460 (IPP, Nagoya : 1980).
- 14) J. J. Devaney and M. L. Stein : Nucl. Sci. Eng. Vol. 49 (1971) 323.
also see : Y. Nakao *et al.* : Nuclear Fusion Vol. 28 (1988) 1029.
- 15) J. M. Dowson : PPG-273 (UCLA, Los Angeles : 1976).
- 16) W. J. Chen *et al.* : Journ. Phys. Soc. Japan Vol. 51 (1981), 1620.
- 17) H. Momota, Y. Tomita, and Y. Nomura : IAEA-TC-392/35 (IAEA, Vienna : 1983) 3.
- 18) G. H. Miley : *Fusion Energy Conversion* (ANS, 1976).
- 19) H. Momota *et al.* : Nucl. Inst. /Meth. in Physics Research Vol. A271 (1988) 7.
- 20) K. E. Evans *et al.* : ANL/FPP-TM-150 (ANL, Argonne : 1981).
- 21) R. L. Hagenson and R. A. Krakowski : LA-9139-MS (LANL, Los Alamos : 1982).
- 22) B. Coppi : private communication.
- 23) R. E. Siemon, *et al.* : Fusion Technology Vol. 9 (1986) 13.
- 24) 岡本 他 : IPPJ-DT-129 (IPP, Nagoya : 1986).
- 25) G. W. Shuy, A. E. Daribi and H. Gurol : Fusion Technology Vol. 9 (1986) 459.
- 26) J. G. Gilligan, *et al.* : ANS Top 1. Mtg., COO-2218-172 (King of Prussia : 1980).
also see : MARS Interim Design Report, UCRL-53480 (LLNL, Livermore : 1984).
- 27) R. M. Kulsrud *et al.* : Phys. Rev. Lett. Vol. 49 (1982) 1248.
- 28) Wittenberg *et al.* : Fusion Technology Vol. 10 (1986) 167.
- 29) J. M. Dowson : Bull. APS 31 (1986) 1498.
- 30) *Landolt-Bornstein Numerical Data, New Series, Vol. 2a-Astronomy and Physics*, p. 135 (Springer-Vergrad, Berlin : 1980).
- 31) R. B. Robert : Bull. APS 31 (1986), 1499.
- 32) H. L. Berk, H. Momota, and T. Tajima : Phys. Fluids Vol. 30 (1987) 3548.