

## 研究最前線 新たな宇宙開発を拓く核融合技術

# 6. 核融合ロケットの開発へ向けて

## 6.3 地上用核融合炉概念設計との比較からの考察

岡野 邦彦

財団法人電力中央研究所

(原稿受付：2006年11月10日)

地上での核融合プラントの設計研究の視点から、宇宙推進用核融合ロケットの技術的特徴をまとめている。コスト競合する対象技術がない点、燃料の増殖・循環システムを必須としない点などで、宇宙推進での核融合利用は地上用より有利な点もある一方、遮蔽や冷却、放熱などにおいては、地上プラント以上の困難がある。船内循環電力の供給に、熱電変換素子の利用の可能性もあることも指摘している。

### Keywords:

plasma propulsion, laser propulsion, thermo-electric converter, fusion plant, conceptual design, magnetic nozzle, MHD stability

### 6.3.1 はじめに

核融合の宇宙推進への応用は、核融合技術の将来展開として大いに有望である。宇宙推進に核融合技術を用いる場合、地上用の発電プラントとは異なる条件が数多くあり、そのあるものは核融合技術にとって地上用より有利であるし、あるものは地上プラントにない大きな技術制約を課すものもある。本節では、これまでいろいろ実施されてきた様々な核融合プラントの概念設計やその評価の視点から見た場合の、宇宙推進用の核融合技術の特徴を述べたい。改めて言うまでもないことが多いかもしれないが、一度まとめておくことは核融合炉設計の研究者と宇宙推進の研究者の間の共通認識を確認する意味から重要と考えている。

### 6.3.2 宇宙利用であることが有利となる点

はじめに核融合を発電プラント等として地上で利用するのに比べて、宇宙での利用が有利になる点から考えてみたい。

#### 1) コスト競合の視点

地上での発電においては、エネルギー源は他にも数多くあり、核融合はその中の候補のひとつとなる。核融合は環境性能、膨大な資源量や安心感など利点も多いが、弱点がない完全無欠なオプションなわけでもなく、コストでまったく競合できなくても核融合が選ばれるはずだと考える理由はみつからない[1]。このコスト競合の視点は、核融合開発において非常に厳しい制約になっている。コスト高でもとにかく正味電力を発電するだけでよいなら、核融合プラントは経済性を重視した場合よりかなり楽なパラメータで実現可能である[2]。

一方、宇宙推進の視点においては、木星以遠に有人船を

送り込む推進技術として、ある程度の技術見通しがある範囲での候補は、核融合推進は比推力などの視点から非常に有利なオプションになるとされている。これはコスト競合で大いに有利であろう。無制約に高額であってよいわけではないが、地上での電力供給のように、技術で大きな付加価値がつけられない場合に比べれば、特に投入初期における経済性の制約を大いに軽減するだろう。

#### 2) エネルギーゲインと熱電変換器の適用

電力供給用であれば、最低でも電気出力と循環電力の比  $Q_e$  値で10倍程度が必要である。宇宙用であれば船内消費電力（推進に使う分を含む）を供給可能であればよいので  $Q_e$  値は1でよい（逆に余っても困るので負荷追従性は重要）。これは、電気への効率が10%程度でも構造が単純な発電方式、たとえば熱電変換器などを採用できる可能性があることを意味する。現状の熱電素子の効率と出力密度はそれぞれ10%、16 kW/m<sup>2</sup>程度である[3]。100 MWの発電出力に対して、必要入熱は1,000 MW、必要面積は約6,250 m<sup>2</sup>となる。

この面積が、6.3.3節3)で述べる「1,000℃の黒体放射で1,000 MWを放出するのに必要な面積」とほぼ一致しているのは注意する価値がある。1,000℃で動作する熱電素子も存在するので、放熱用冷却フィンに並べた熱電素子だけで発電することは可能かもしれない。熱電変換発電はゼロ出力からの負荷追従が可能であり、宇宙用のような孤立したシステムにはもっとも望ましい特性を持っている。

#### 3) プランケットシステム

D-<sup>3</sup>He燃料の場合はもちろんであるが、VISTA（レーザー核融合推進）[4]のようにD-T燃料方式を採用した場合であっても、燃料はすべて積載しているのが基本である。

したがって、D-T 燃料であっても増殖ブランケットやトリチウム循環・回収系は不要となる。この点は設計上で大いに有利といえよう。

中性子等の生体遮蔽に関しても、搭乗室のみでよい可能性があり、部分的な遮蔽のみの設計も可能になる。レーザー方式のように炉心に多数の穴が開かざるを得ないシステムにおいて、これは遮蔽設計上、非常に楽になるはずである。

### 6.3.3 宇宙利用で困難が増大する点

宇宙における核融合利用では、当然、技術上の困難が地上より増大すると思われる事項も多数存在する。そのいくつかを説明しておきたい。

#### 1) 超伝導コイルの中性子遮蔽

超伝導コイルの中性子遮蔽への要請そのものは、地上でも宇宙でも条件は同じといえる。稼働率の低い ITER では超伝導コイルの常電導転移（クエンチ）を避けて安定に運転することが遮蔽条件を決め、内部発熱が 5 mW/cc 程度になるように設計されている。一方、実用プラントではコイル内部の絶縁材の中性子照射に対する寿命が律則となり、ITER よりさらに 1 桁小さい中性子束に抑さえねばならない。

宇宙用の場合は地上プラントほどの長寿命を要請されないので、遮蔽は ITER の基準を参考とできよう。その場合、DT 燃料で 1,000 MW 級の熱出力とすると、遮蔽構造にいろいろ工夫を凝らし、さらに燃料増殖は不要であることを考慮しても、80 cm 程度の遮蔽厚みは必須となる。

さらに注意すべきは、D-<sup>3</sup>He を燃料とした場合にも、この遮蔽厚みはあまり減らないという点である。

D-<sup>3</sup>He 燃料であっても、並行して起こる DD 反応ならびにそこから発生するトリチウムの燃焼があるため、中性子が発生する。FRC 型 D-<sup>3</sup>He 炉 ARTHEMIS の設計 [5] を参照すると、中性子発生量は、エネルギーにして DT 燃料の 7% 程度ということである。1 桁以上少ないが、一方、中性子フラックスを 1 桁下げるために必要な遮蔽厚さの増加は 10 cm 程度である。つまり、超伝導コイルの遮蔽条件を満たすための厚みは DT 反応の場合に比べて D-<sup>3</sup>He 反応でも 10~20 cm 減らせるに過ぎないと思われ、最低でも厚さ 60 cm 程度の重量物でできた遮蔽が必要ということになる。重量が大きな課題の宇宙推進においては、これは地上用プラントよりずっと大きな問題を課すに違いない。

#### 2) 第一壁の必要性と冷却

真空の宇宙空間であってもプラズマを取り囲む容器（第一壁）が不要というわけにはいかない。磁場閉じ込めの核融合装置において、炉心の燃料粒子は、粒子輸送によって炉心プラズマから排出されても、その多くは第一壁に一旦吸着され、再度放出されてからまた炉心プラズマに入るサイクルを繰り返している。これによって真空容器内における実効的粒子閉じ込め時間は、プラズマ内の輸送における粒子閉じ込め時間の 10 倍程度の大きさになっているのが普通である。これに伴い真空容器内の燃料が燃焼に寄与する時間も 10 倍以上となり、実効的な燃焼率が高く維持される。

宇宙においても、磁場閉じ込めにおいては炉心プラズマがなんらかの壁で覆われていなければ燃焼率は数%にしかならず、ほとんどの燃料は燃焼しないまま宇宙に捨てることになってしまう。また、D-<sup>3</sup>He 燃料の場合には、シンクロトロン放射光の 99% 以上を反射してプラズマに戻さなければパワーバランスが取れないはずである。この視点からも第一壁は必須となる。

なお、レーザー方式においては、第一壁でのリサイクリングは各単パルスの燃焼率に寄与しないので、部分的にプラズマ対抗壁を備えただけの構造もありえる。

宇宙において第一壁の最大の問題は、寿命よりはその冷却であろう。遮蔽やプラズマに対抗した壁を置く以上、それらは少なくとも構造の健全性が維持される温度を保つように冷却しなければならないが、その設計は地上用 DT 燃料プラントでも難しい。D-<sup>3</sup>He を燃料に用いる場合には、その出力のほとんどは荷電粒子であるため壁表面に負荷が集中することになる。すなわち、第一壁表面の冷却は、熱が奥まで拡散する中性子負荷が主の DT プラントの場合より D-<sup>3</sup>He のほうが厳しい条件になる可能性もある。

DT 燃料プラントの設計での数字をあげると、中性子負荷を除いた荷電粒子や放射光による第一壁の表面入熱が 1 MW/m<sup>2</sup> を超えるような領域での設計はかなり困難である。ただし、冷却材を発電に使う必要がないのであれば媒体の温度を下げられるので、設計上の余裕はできる。たとえば、ITER のダイバータ設計においては 10 MW/m<sup>2</sup> 程度の熱が除去できている。

#### 3) 熱エネルギーの放熱

船内で発生する熱は、遮蔽や第一壁から除去した熱や超伝導コイル用冷凍機からの熱などがあるが、それらの処分は、地上の場合のように冷却塔や海水による放出はできないわけで、宇宙空間に黒体輻射のみで放出せねばならない。例えば、1,000 MW を黒体輻射で宇宙空間に放出するために必要な面積は、仮に表面温度を 1,000°C とすると、6,700 m<sup>2</sup> 程度である。したがって、多くの核融合ロケットの設計にもあるとおり、ロケット本体よりはるかに大きなフィン状の冷却板を持つ構造とならざるを得ない。これはよく知られた事実ではあるが、この熱処理の問題が、宇宙用核融合装置が地上用より困難な最大のポイントのように思われる。

#### 4) レーザー核融合推進用磁気ノズルの MHD 安定性

磁気ノズルをレーザー核融合推進に使う場合には注意が必要である。磁場方式の場合は、ノズル部でのベータ値は相当に低いが、レーザー炉の場合、パルスごとに非常に大きなエネルギーを持ったプラズマが磁気ノズルを通過する。

プラズマが押しつけた磁場の磁気エネルギーがプラズマのエネルギーに等しいと仮定すれば、プラズマの拡がりがある直径に押しとどめるのに必要な最小の磁場強度は簡単に計算することができる [6]。プラズマのエネルギーを  $E_0$ 、押し広げて平衡したところでの直径を  $r_x$ 、押し広げる前の磁場強度を  $B_0$  とすると、その関係は以下のように書ける。

$$E_0 = \frac{4}{3} \pi r_x^3 \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

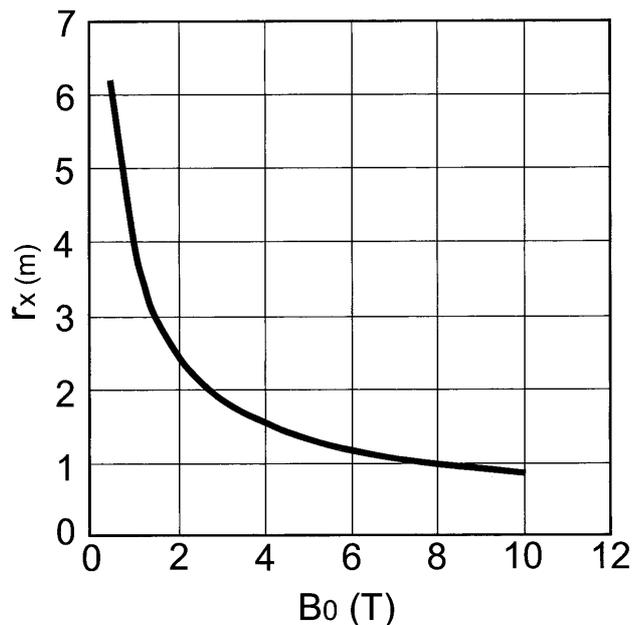


図1 100 MJ のプラズマパルスを受け止めるために必要な最小磁場強度.

100 MJ のプラズマパルスを受け止めるための磁場強度を計算した結果は図1のようである。この図から磁場は  $r_x$  が 4 m 程度であれば 1 テスラ以下でよいようにも見える。しかし、上記の条件はベータ値 100% を仮定したのに相当することに注意されたい。安定に動作するベータ値が多くの磁気閉じ込め装置と同様に数%程度であるとすれば、磁気ノズルに必要な磁場強度は 10 テスラ以上になるかもし

れない。地上用の炉を含め、レーザー核融合のプラズマの拡がりを磁場で制御するのは、磁場閉じ込めと同様の困難に直面する可能性が高いのではないだろうか。

### 6.3.4 おわりに

最近は地上用の動力炉概念設計もずいぶんと進展したので、それらの知見をうまく宇宙推進に反映していけると、さらに実現性の高い宇宙推進システムが設計できるのではないだろうか。本稿がそのきっかけのひとつにでもなれば幸いである。

### 参考文献

- [1] 岡野邦彦, 奥村憲博, 小川雄一 他: 小特集「核融合炉の経済性と環境負荷 - その解析と今後の課題 -」プラズマ・核融合学会誌 78, 1165 (2002).
- [2] R. Hiwatari, K. Okano, Y. Asaoka, K. Tokimatsu, S. Konishi and Y. Ogawa, J. Plasma Fusion Res. 81, 903 (2005).
- [3] 核融合総合システム技術調査専門委員会編: 電気学会技報 第934号, 「核融合を支える要素技術とシステム統合」, p.74, 5.1高性能熱電変換システムの開発, 2003年9月, 電気学会.
- [4] C.D. Orth, "VISTA - A Vehicle for Interplanetary Space Transport Application Powered by Inertial Confinement Fusion", UCRL-TR-110500, Lawrence Livermore National Laboratory, May 2003.
- [5] 富田幸博: D-3He/FRC 炉, 核融合炉心システム解析研究会資料集, 1997年9月25日, 核融合科学研究所
- [6] H. Shoyama, H. Nakashima and Y. Kanda, J. Plasma Fusion Res. 69, 1250 (1993).