



## 6. 核融合ロケットの開発へ向けて

### 6.2 磁場核融合ロケット

富田 幸博

核融合科学研究所 理論・シミュレーション研究センター

(原稿受付：2006年12月17日)

重水素とヘリウム3燃料を用いた核融合炉では中性子の発生が少なく、壁材料の寿命や安全性の観点から魅力ある発電炉である。また、核融合反応生成物のほとんどが荷電粒子であり、これらはロケットの大きな推進力になる。ここでは、重水素とヘリウム3燃料による核融合発電炉の概念設計を参考にして、球状トーラス配位によるプラズマ閉じ込めを用いた核融合ロケットを紹介する。

#### Keywords:

fusion reactor, D-<sup>3</sup>He fueled fusion, high beta plasma

#### 6.2.1 D-<sup>3</sup>He 燃料核融合

これまで核融合エネルギー開発は、核融合反応の起こり易さからD(重水素)-T(三重水素)燃料核融合を中心に推進されている。核融合ロケットを考える場合、燃料の放射性同位元素であるTや、D-T反応で発生する14 MeV中性子による材料損傷などの点で、これらが少ないアドヴァンスド燃料核融合の利用は魅力あるものである。その中で、D-<sup>3</sup>He燃料核融合は燃料として三重水素が不要で、発生する中性子出力もD-T燃料核融合の約1/25と少ない。さらに、核融合反応による出力のほとんどが荷電粒子(15 MeV陽子と4 MeV <sup>4</sup>He)である。これらの核融合生成荷電粒子を用いれば、ロケットの大きな推進力が期待できる。

上記の利点を確認すべく、D-<sup>3</sup>He燃料核融合を用いた核融合炉設計が行われた。この核融合では燃焼のために高温のプラズマ温度(~100 keV)が要請される。そのような磁場閉じ込めプラズマではシンクロトロン輻射損失が大きくなって、磁場が強い閉じ込め方式では燃焼が持続できない。炉概念設計からプラズマ・ベータ値(磁場エネルギーに対するプラズマエネルギーの比)が30~40%以上であれば、炉として成立することが明らかにされた。現在、この条件を満たすプラズマ閉じ込め配位は直線型の磁場反転配位(FRC: Field-Reversed Configuration)、ミラー配位が挙げられ、トーラス型では球状トーラス(ST: Spherical Torus)がコンパクトで高プラズマ・ベータ値が得られている。

##### 1) 磁場反転配位(FRC)

FRC配位を利用したD-<sup>3</sup>He燃料1 GWe核融合炉概念設計“アルテミス”が行われた[1, 2]。この配位では燃焼プラズマ閉じ込め領域の外部は開いた磁力線で囲まれており、核融合出力の多くを担う荷電粒子を効率よく直接発電器に

導くことが容易である。この炉設計では中性子パワーの核融合出力に対する比が最小になるように最適化されており、1 GWe炉に年間64 kgの<sup>3</sup>Heが必要となることが明らかになった。FRC配位は炉本体の軽量化が可能であり魅力的ではあるが、今までのところ十分な実験データが得られていない。

##### 2) 球状トーラス(ST)

近年、ST配位によるプラズマ閉じ込め実験が進展している。これらを背景にして、D-<sup>3</sup>He燃料/ST配位による核融合ロケットの概念設計が行われた[3]。これは、片道204日間の土星の衛星タイタン探索を目的として、108トンペイロード、1630トンIMLEO(Initial Mass in Low Earth Orbit)を目標に設計されている。そこでは、炉質量を最小にし、推進力となる荷電粒子出力を最大にするように設計されている。核融合炉の主要パラメータを表1に示した。そこでは燃料として核スピン偏極燃料が考えられているが、磁場摂動による脱偏極や再結合による無偏極プラズマの生成など考慮されるべき点が多い。この配位での地上用発電核融合炉では漏洩する高熱流束プラズマを受ける材料(ダイバータ板)の開発が課題の一つであるが、核融合ロケットではその課題がなくなる。しかし、この設計研究では、ダイバータ部は概念設計のみであり、推進高性能化のための水素推進材と排出プラズマの混合や、推進制御のためのヘリシティー排出が挙げられているが、今後詳細な設計が必要と思われる。さらに、最近提案された poloidal-bundle divertor[4]などの新概念の検討も必要となるであろう。図1に核融合ロケットの核融合炉と磁気ノズルおよび各部の物理量を示した。

表1 D-<sup>3</sup>He/ST 核融合炉の特性[3].

Major radius (m)	2.48
Minor radius (m)	1.24
Aspect ratio	2.0
Elongation	3.0
Plasma volume (m <sup>3</sup> )	225.8
Safety factor (edge)	2.50
Safety factor (axis)	2.08
Fuel ion density (10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> )	5.0
Electron density (10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> )	7.5
Plasma temperature (keV)	50
Volume average β	0.318
Confinement time (sec)	0.552
Average neutron wall load (MW/m <sup>2</sup> )	1.03
Average radiation wall load (MW/m <sup>2</sup> )	5.20
Toroidal magnetic field (center) (T)	8.9
Maximum magnetic field (coil surface) (T)	32.3
Gain factor (Q)	73.1
Plasma current (MA)	66.22

6.2.2 <sup>3</sup>He 資源

D-<sup>3</sup>He 燃料のうち、重水素 (D) は海水中に HDO の形で約 0.03% 存在しており、海水の蒸溜、電気分解による濃縮で比較的容易に入手可能である。一方、<sup>3</sup>He は地球上大気、地殻、天然ガス中にごくわずかし存在せず (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He=1.38×10<sup>-4</sup>)、人工的にはカナダの重水炉 (CANDU) を用いて年間 2 kg 程度製造でき、劣化した核弾頭の三重水素からベータ崩壊によって年間 15 kg (米国) が得られるが十分な量ではない。しかし、1970年代に米国、旧ソ連の月探査ロケット月表面の泥サンプルの分析の結果、月面深さ

2 m までに少なくとも100万トンの経済的に採掘可能な<sup>3</sup>He が埋蔵されていることが明らかになった[5]。米国ウイコンシン大学の研究グループは月面で採取可能な<sup>3</sup>He を100万トン以上と推測しており初期の燃料として十分な量である。さらに、木星、土星などのガス状惑星には 10<sup>26</sup> kg 程度の<sup>3</sup>He が存在しており、タイタンでの D-<sup>3</sup>He 推進ロケットの燃料充填が可能である。

6.2.3 おわりに

核燃焼プラズマの観点から、D-<sup>3</sup>He 燃料を用いた核融合炉および磁場核融合ロケットの概念設計を紹介した。この燃料核融合では反応生成物の多くが荷電粒子であるために、ロケットの推進材として魅力的である。D-<sup>3</sup>He 燃料核融合では 100 keV 近い高温のプラズマ温度が要請される。それ故に、わずかな不純物の混入で核燃焼が生じなくなる。これまでの研究で、炭素原子に換算してその密度がプラズマ密度の 2% 以上で自己点火しなくなることがわかっている。これからもわかるように、D-<sup>3</sup>He 燃料に代表されるアドヴァンスド燃料核融合は中性子発生が少ないという点から、安全性、経済性で魅力ある核融合ではあるが、その実現のためには多くの課題を解決する必要がある。しかし、近年、核融合プラズマの性能向上が見られており、これまで以上に共同での研究開発を推進していくべきと考えられる。

参考文献

- [1] H. Momota *et al.*, *Proc. Seventh Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems*, Makuhari, Japan, Sep. 1993, p.6 (1994).
- [2] H. Momota *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.*71, 469 (1995).
- [3] C.H. Williams *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 43,91 (2003).
- [4] Y. Ogawa *et al.*, *Fusion Eng. Des.* 48, d339 (2000).
- [5] L.J. Wittenberg *et al.*, *Fusion Technol.* 10, 167 (1986).

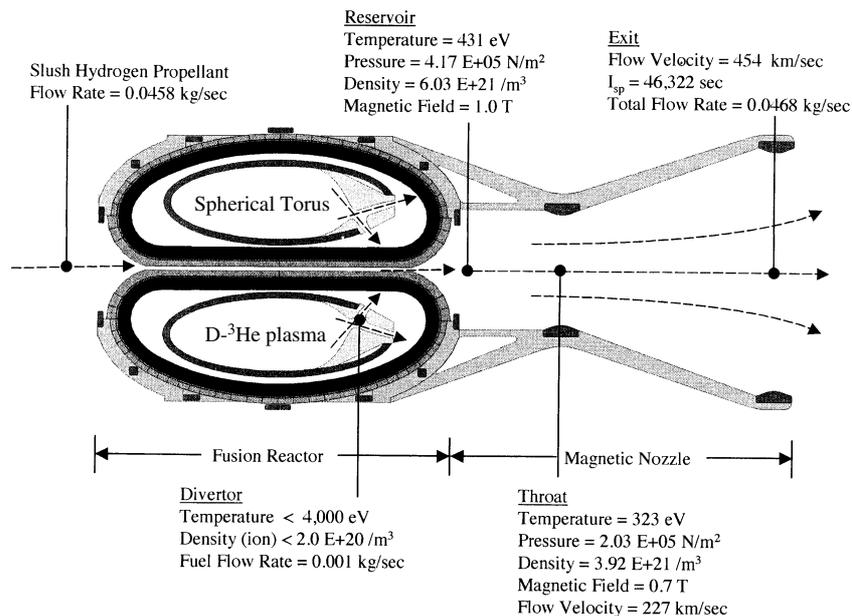


図1 磁気ノズルでのプラズマ物理量[3].