



2 アドヴァンスド燃料核融合とその課題

富田 幸博 (核融合科学研究所)

Advanced Fusion Reactor

TOMITA Yukihiro

National Institute for Fusion Science, Oroshi-cho, Toki 509-5292 Japan

Abstract

従来、核融合研究は、その反応のしやすさから $D-T$ 燃料を前提にして進められてきたが、この燃料核融合には、三重水素の取り扱いや $D-T$ 反応で発生する 14 MeV 中性子のために今後開発すべき様々な工学的、技術的課題が残されている。これらの問題を回避すべく $D-D$ 、 $D-^3\text{He}$ 、 $p-^6\text{Li}$ 、 $p-^{11}\text{B}$ などの $D-T$ 燃料以外の燃料を用いたいわゆるアドヴァンスド燃料核融合の研究も進められてきた。

これらの中で、 $D-D$ 核融合は多量の三重水素を扱わず、燃料の D も容易に手に入るが、中性子発生量は $D-T$ 核融合の約半分にしかならず材料に関して抜本的な解決にはならない。中性子をほとんど発生しない $p-^6\text{Li}$ 、 $p-^{11}\text{B}$ は非常に魅力的ではあるが、反応率が小さいために磁場核融合では数 100 keV 以上の高温プラズマ温度が要請され、輻射損失が大きくて自己点火には至らず、高温プラズマ生成などの技術的課題が達成される次々世代の燃料核融合と思われる。

残された $D-^3\text{He}$ 燃料核融合は副反応で中性子を発生するもののその量は $D-T$ 核融合の約 1/40 と少なく、中性子に起因する技術的課題を緩和すると

思われる。しかし、プラズマ温度は約 100 keV の高温が要請され、磁場核融合ではシンクロトロン輻射損失を軽減するために高ベータ・プラズマ配位が必要となる。さらに核融合出力の多くを担う荷電粒子の出力を効率よく直接発電器を用いて電気出力に変換するためにプラズマ外部は開いた磁力線で囲まれていることが望ましい。

これらの要請を満たす配位の一つが磁場逆転配位 (FRC: Field-Reversed Configuration) である。これらの観点から 1 GWe 出力 $D-^3\text{He}/\text{FRC}$ 核融合炉の概念設計 "ARTEMIS" が遂行された。その結果、中性子出力は核融合出力の約 3% と少なく、第一壁への中性子負荷は 0.18 MW/m^2 、($D-T$ 燃料核融合炉: $2-4 \text{ MW/m}^2$) に抑えられており、この燃料核融合の魅力的な点が明確になった。

しかしながら、 $D-^3\text{He}$ 燃料核融合では、 $D-T$ 燃料核融合に比べて約 3 倍の高温プラズマ温度や 1 桁高いプラズマ閉じ込め性能 (プラズマ密度 \times エネルギー閉じ込め時間) が要請され、今後、高ベータ・プラズマの高性能な閉じ込め研究をさらに進める必要がある。

Outline

I. $D-T$ 燃料核融合とアドヴァンスド燃料核融合

1. $D-T$ 燃料核融合
2. $D-D$ 燃料核融合
3. 中性子を発生しない燃料核融合: $p-^6\text{Li}$ & $p-^{11}\text{B}$
4. $D-^3\text{He}$ 燃料核融合

II. $D-^3\text{He}$ 燃料を用いた核融合

1. 1GWe $D-^3\text{He}$ 燃料核融合炉の概念設計
"ARTEMIS"

2. ヘリウム-3 資源

III. まとめ

1. はじめに

これまでの核融合研究は多くの核融合燃料方式のなかで、低いプラズマ温度で反応断面積が大きいという観点から重水素 (D) と三重水素 (T) を燃料とする D - T 核融合を中心に進められてきた。この燃料方式の主燃料のうち重水素は海水中に HDO の形で約 0.03 % 存在しているので海水の蒸留、電気分解による濃縮で比較的容易に入手可能であるが、三重水素は自然界に存在せず [$T(b^{-1})^3He$: 半減期 = 12.3 年]、何らかの方法で生産する必要がある。さらに、 D - T 核融合反応に伴う 14 MeV 中性子による (n, g), ($n, 2n$), (n, p) 等の反応によって炉構造材の放射化や炉材中に水素、ヘリウムなどが作られ構造材の性能劣化が起こる。これらの課題を解決するものとして三重水素を燃料とせず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きた[1]。ここでは D - T 燃料核融合と各種アドヴァンスド燃料核融合の特徴を述べる。次にこれらのアドヴァンスド燃料核融合の中で次世代燃料核融合として有望視されている D - 3He 燃料に焦点を当て、この燃料核融合に適した高温プラズマ閉じ込め方式の一つとして磁場反転配位 (FRC; Field-Reversed Configuration) プラズマ閉じ込め方式による 1 GWe 核融合炉概念設計 'ARTEMIS' を紹介する。最後にアドヴァンスド燃料核融合炉開発のための課題をまとめる。

2. D - T 燃料核融合とアドヴァンスド燃料核融合

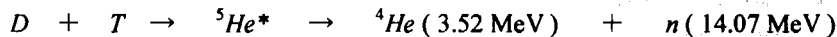
表 1 に D - T 燃料核融合および代表的なアドヴァンスド燃料核融合反応、図 1 にそれらの核融合反応断面積及びマックスウエル平均核融合反応率係数を示す。ここでは、 D - T 燃料核融合と各種アドヴァンスド燃料核融合の特徴を述べる。

$\cdot D$	+	T	\rightarrow	n	+	4He	+	17.59 MeV
$\cdot D$	+	3He	\rightarrow	p	+	4He	+	18.35 MeV
$\cdot D$	+	D	\rightarrow	p	+	T	+	4.03 MeV
D	+	D	\rightarrow	n	+	3He	+	3.27 MeV
$\cdot p$	+	6Li	\rightarrow	3He	+	4He	+	4.02 MeV
$\cdot p$	+	^{11}B	\rightarrow	3^4He			+	8.7 MeV

表 1 D - T 燃料核融合とアドヴァンスド燃料核融合反応

2-1. D - T 燃料核融合

D - T 燃料核融合は 5He の複合核を経て中性子とヘリウム 4 を発生する核融合反応である。



この反応は複合核 5He の共鳴反応であるために、図 1 で明らかなように他の燃料核融合反応に比べて低プラズマ温度で大きな反応率を持っており、従来からの研究対象となっている。主燃料の中で重水素 (D) は海水中に HDO の形で約 0.03 % 存在しており、海水の蒸留、電気分解による濃縮で比較的容易に入手可能であるが、一方の三重水素 (T) は半減期 12.3 年で b 崩壊する [$T(b^{-1})^3He$: 半減期 = 12.3 年] ために自然界に存在せず、何らかの方法で生産する必要がある。その方法の一つは D - T 核融合反応で発生する 14 MeV 中性子とリチウムを用いて三重水素を生成するものである。しかしながら、三重水素は水素の同位体であるために人体に容易に吸収され、その b 崩壊によって 1 g あたり $9.6 \times 10^3 \text{ Ci} (= 3.6 \times 10^{14} \text{ Bq})$ の放射線を出す。さらに発生する 14 MeV の中性子の (n, g), ($n, 2n$), (n, p) 等の反応によって炉構造材の放射化や炉材料中に水素やヘリウムを生成して構造材の性能を劣化させて炉の寿命を短くする。既存のオーステナイト鋼、フェライト鋼では炉の実用稼働約 30 年の間に数回の構造材の交換が必要となる。これらの理由で

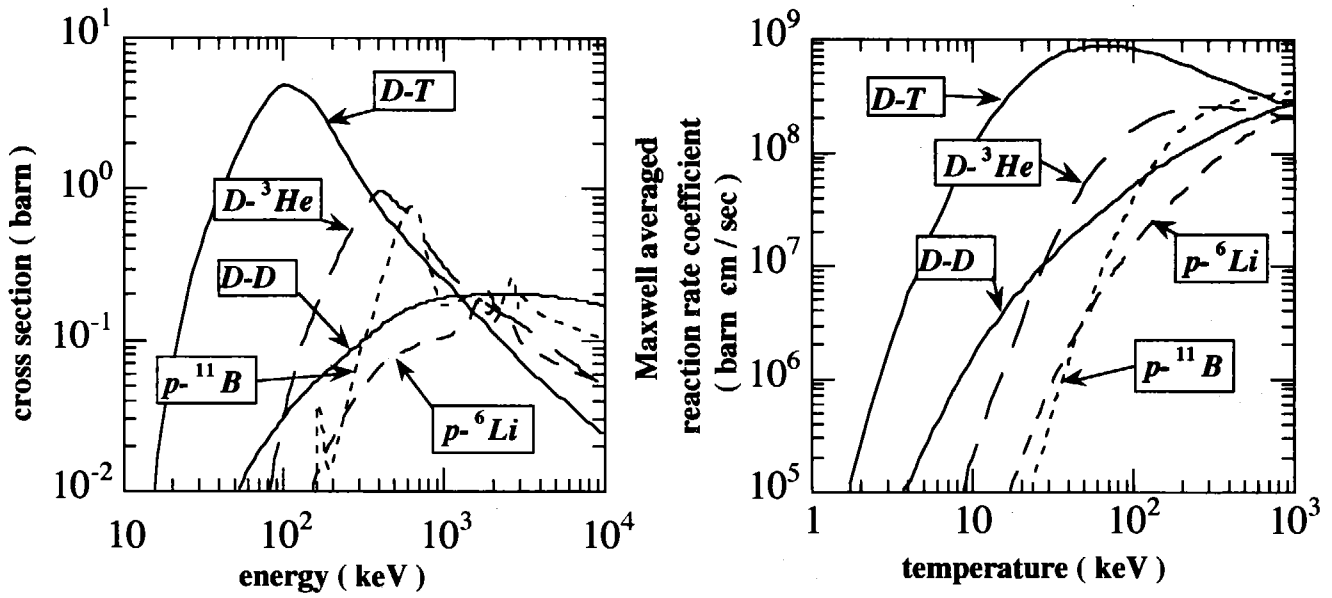


図1 (a) 核融合反応断面積及び (b) マックスウエル平均核融合反応率係数

現在、ヴァナジウム (V) やケイ素 (Si) などの低放射化材料の開発が精力的に進められている。

2-2. D-D 燃料核融合

D-D 燃料核融合は燃料の重水素が海水中に豊富に存在し、D-T 核融合のように三重水素増殖が不必要なために炉構造が簡単になる利点がある。しかしながら、この反応は D-D 反応による 2.45 MeV の中性子のみならず、daughter reaction D-T 反応によって 14 MeV の中性子を発生する。発生する中性子の量をパワー・バランスおよび粒子バランスから求めた結果を図2に示す。ここでは閉じこめパラメータを同時に示してあり、比較のために D-T 燃料核融合の結果も示してある。

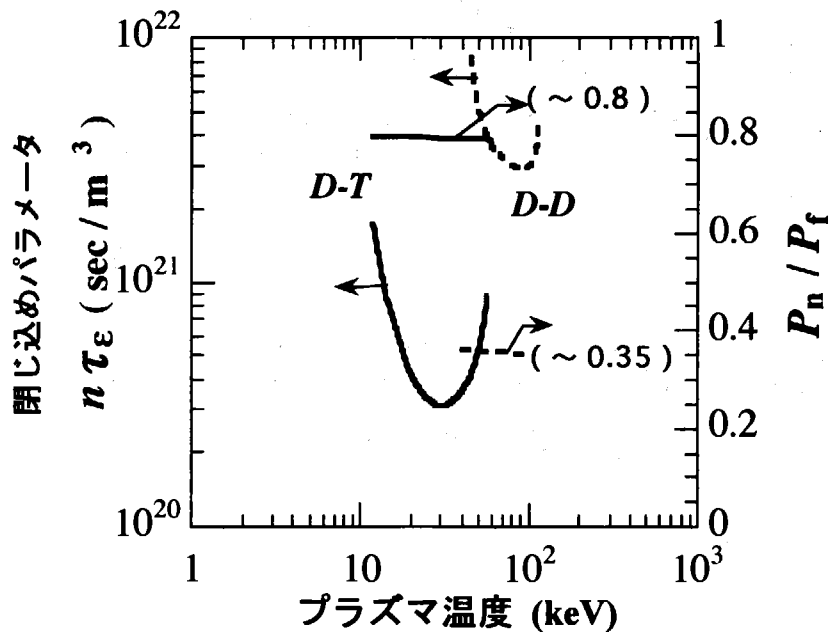


図2. D-D 燃料核融合における自己点火条件における閉じこめパラメータと核融合出力に対する中性子出力。

この図から明らかなように D-D 燃料核融合は D-T 燃料核融合に比べて数倍の高温プラズマ温度、および一桁高いプラズマ閉じ込めが要請されるが、中性子の発生量は D-T 核融合の約半分に減少するだけで、中性子に対する課題の根本的な解決にはならない。

2-3. $p\text{-}^6\text{Li}$ 及び $p\text{-}^{11}\text{B}$ 燃料核融合

これらの燃料核融合は主反応、daughter reaction から中性子をほとんど発生しない点で非常に魅力のある燃料核融合である。しかしながら反応断面積が小さく高温のプラズマ温度が要請され、その高温では燃料の原子番号が大きいため輻射損失（制動輻射、シンクロトロン輻射）が大きくなる。図3に要請されるプラズマ温度とプラズマ Q 値（入力に対する出力の比）をプラズマ閉じこめ三重積の関数として示した。これらの燃料核融合では 100 keV 以上のプラズマ温度が要請され、それでも入力パワーが出力パワーを上回ることは現在の段階では困難である。

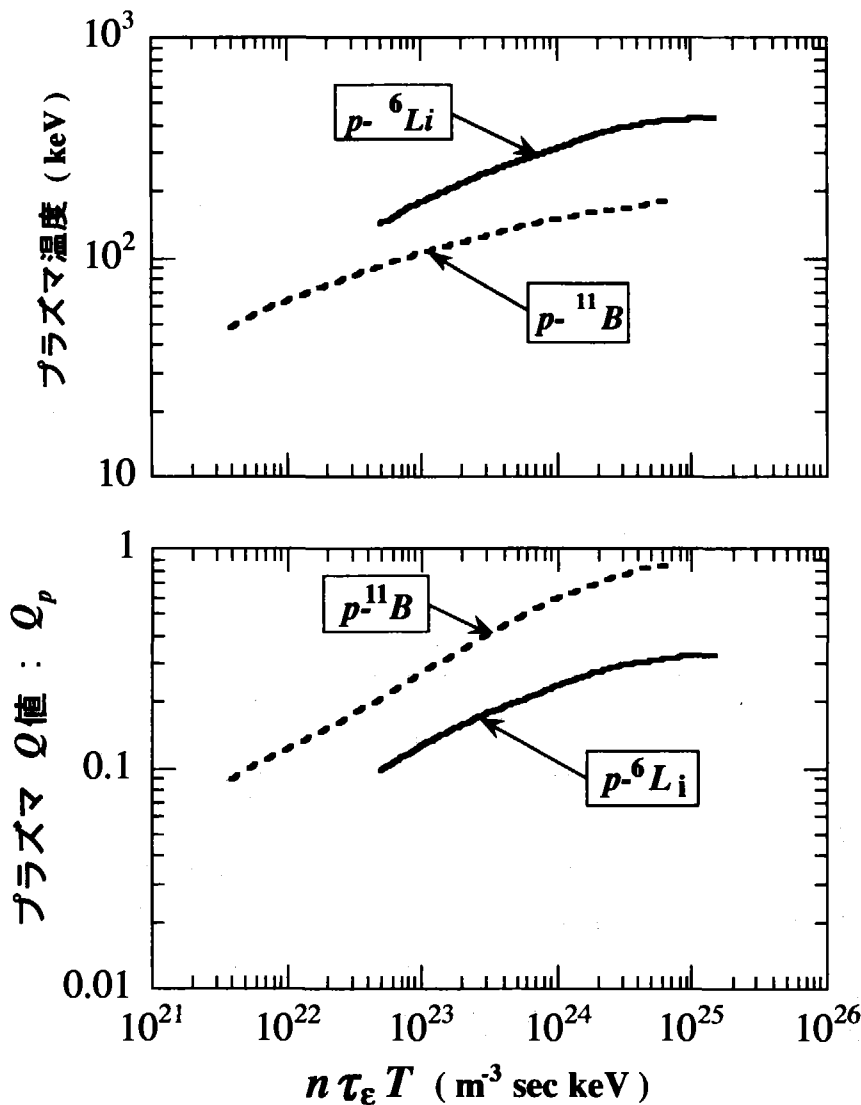


図3. $p\text{-}^6\text{Li}$, $p\text{-}^{11}\text{B}$ 燃料核融合において要請されるプラズマ温度とプラズマ Q 値のプラズマ閉じこめ三重積依存性。

2-4. $D-^3He$ 燃料核融合 [2]

この燃料核融合は $D-T$ 核融合のミラー反応で、 5Li 複合核の共鳴反応であるために比較的大きな反応断面積を持っている。さらに三重水素を燃料としないので増殖の必要がなく炉構造が簡単になる。燃料の重水素は海水中に十分存在するがヘリウム3燃料は地球上にはわずかしかな存在しないが、月面上や木星などのガス惑星には十分多量に存在する。

$D-^3He$ 燃料核融合で要請される閉じこめパラメータと中性子発生量をプラズマ温度の関数として図4に示した。ここには参考として $D-T$, $D-D$ 燃料核融合の値も示した。

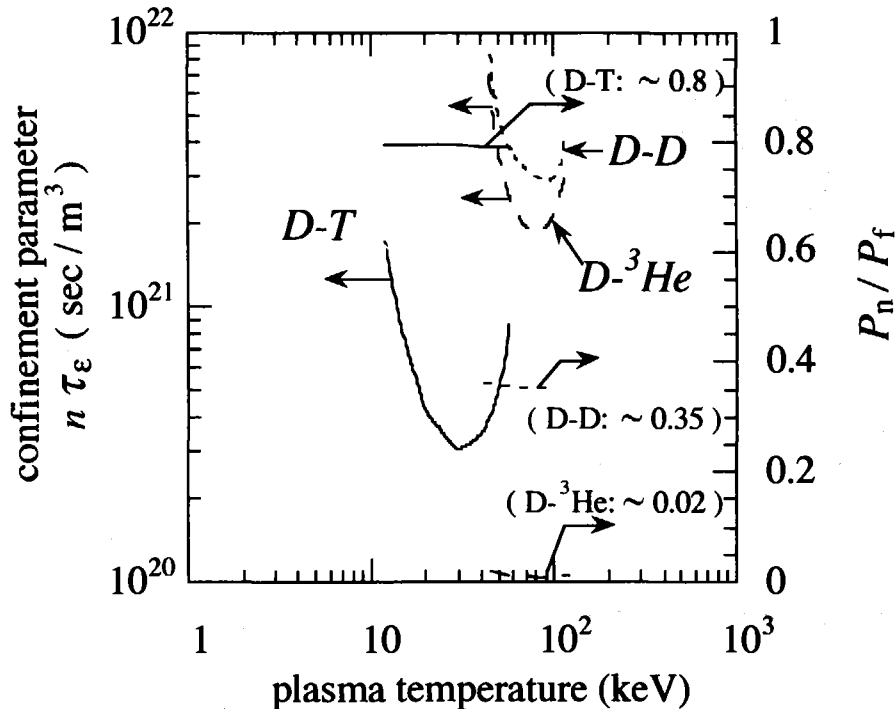


図4. $D-^3He$ 燃料核融合で要請される閉じこめパラメータと中性子出力のプラズマ温度依存性。

この燃料核融合は $D-T$ 核融合に比べてより高温 (30 keV → 80 keV) で、より高い閉じこめ性能 ($3 \times 10^{20} \rightarrow 2 \times 10^{21}$ sec/m³) が要請されるが、発生する中性子は $D-T$ 核融合の約 1/40 と非常に少ない。このために中性子に起因する多くの課題が緩和される。

3. 1 GWe $D-^3He$ 燃料核融合炉概念設計 'ARTEMIS'

$D-^3He$ 燃料を用いた逆転磁場配位 (FRC : Field-Reversed Configuration) による 100 万 kW 電気出力核融合炉概念設計 "アルテミス" [3] の概念図を図5に示した。ここでは核融合出力に対する中性子出力を最小にすることで最適化が行われた。図6に "アルテミス" の plasma parameters を示した。1 GWe 電気出力に対する中性子出力は約 3% と非常に少ない。しかし、必要なプラズマ温度が約 100 keV と高温になることもさることながら、約 6 秒と非常に長いエネルギー閉じ込め時間が要請される。同様の engineering parameters を図7に示した。約 1.8 GW の核融合出力の 1/3 が従来の熱変換器を、1/3 が閉じ込め部から漏洩する熱的成分の直接エネルギー変換器を用いて電力に変換される。残りの 1/3 は核融合反応で発生する 15 MeV 陽子で直接エネルギー変換器で電力に変換し、全体として 57% の高発電プラント効率を得られている。プラズマ閉じ込め第一壁への中性子負荷は従来の $D-T$ 燃料核融合の 1 桁以上小さい 0.2 MW/m² となっている。 $D-^3He$ 核融合で問題となるのは一方の燃料である 3He である。"アルテミス"での粒子流れ図を図8に示す。100 万 kW $D-^3He$ 核融合炉では年間約 64 kg の 3He が必要となる。地上の 3He は非常に希薄 (大気中体積比: 7.3×10^{-12}) であるために回収して利用するのは困難である。しかし、月面上には 100 万トン、その他木星や土星等のガス惑星には約 10^{23} kg のヘリウム3の存在が見積もられている。

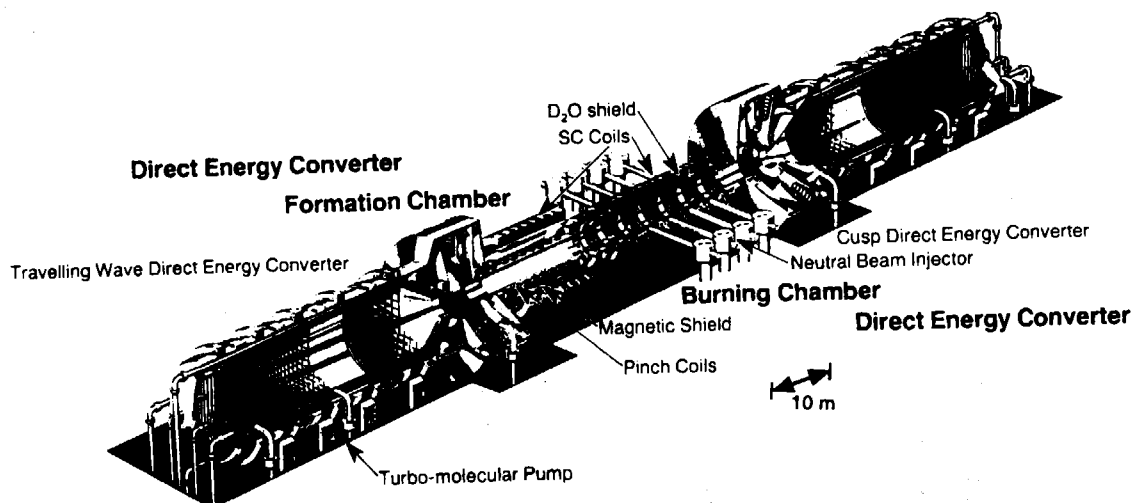


図5. $D-3He$ / FRC 100 万 kW 電気出力核融合炉概念設計”アルテミス”の概念図。

◇ プラズマ密度 :	$n = 5.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
◇ 燃料イオン密度比:	$n_{3He} / n_D = 1.35$
◇ プラズマ温度 :	$T = 83.5 \text{ keV}$
◇ 印加磁場 :	$B_{ext} = 5.36 \text{ T}$
◇ 平均 β 値 :	$\langle \beta \rangle = 0.98$
◇ エネルギー閉じ込め時間 :	$\tau_e = 6.9 \text{ sec}$
◇ 核融合出力 :	$P_f = 1757 \text{ MW}$
◇ 電気出力に対する 中性子出力 :	$P_n / P_{net} = 0.032$
◇ プラズマ半径 × プラズマ長 :	$r_s = 1.68 \text{ m}$ $\times l_s = 22.2 \text{ m}$
◇ プラズマ電流 :	$I_p = 189 \text{ MA}$

図6. 炉概念設計”アルテミス”の plasma parameters 。

◇ 核融合出力：	1,757 MW
○ 熱変換器：	668 MW
○ 直接エネルギー変換器	
(15 MeV 陽子)：	526 MW
○ 直接エネルギー変換器 (熱的成分)：	563 MW
◇ 電気出力：	1,000 Mwe
○ 発電プラント効率：	57 %
◇ 全重量：	4,900 tons
◇ 全長：	160 m
◇ 第一壁の半径：	2.28 m
○ 第一壁への熱負荷：	2.0 MW / m ²
・ 制動輻射	= 1.987 MW / m ² (99.3 %)
・ シンクロトロン輻射	= 0.013 MW / m ² (0.7 %)
○ 第一壁への中性子負荷：	0.18 MW / m ²
・ D-T	: 0.118 MW / m ² (65.6 %)
・ D-D	: 0.062 MW / m ² (34.4 %)
・ 参考：D-T 燃料核融合の 14 MeV 中性子壁負荷	
	= 2~4 MW / m ²

図 7. 炉概念設計 "アルテミス" の engineering parameters。

1 GWe 磁場反転配位 / D-³He 核融合炉 "ARTEMIS"
粒子の流れ図

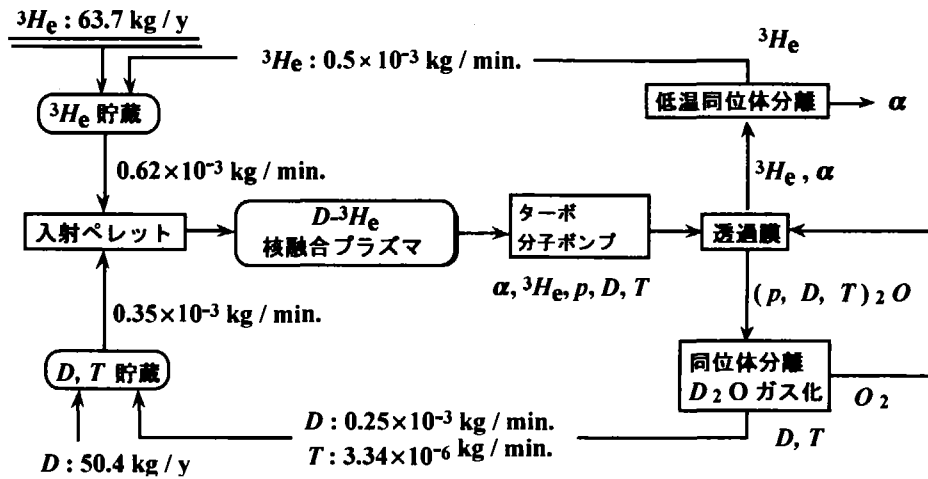


図 8. 炉概念設計 "アルテミス" の粒子流れ図。

4. まとめとアドヴァンスド燃料核融合の課題

以下にまとめとアドヴァンスド燃料核融合の課題を列挙する。

- 1) $D-T$ 燃料核融合は、その反応率の高さゆえこれまでの研究対象であったが、発生する 14 MeV 中性子に起因する工学的な多くの課題が残されている。
- 2) $D-T$ 燃料核融合の次世代と考えられてきた $D-D$ 燃料核融合は、燃料の重水素が容易に手に入り、三重水素の増殖が不必要という利点はあるが、その達成の困難さに比べて中性子は半減するのみで、材料等に課せられた多くの課題は残されたままである。
- 3) $p-{}^6\text{Li}$, $p-{}^{11}\text{B}$ などの中性子をほとんど発生しない核融合は、その達成の困難さから、高温プラズマ生成技術などの技術開発が達成される次々世代の燃料核融合と思われる。
- 4) $D-{}^3\text{He}$ 燃料核融合は、大きな反応率、三重水素増殖の必要性や中性子の発生の少なさから魅力的な点を多く持っているが、燃料の ${}^3\text{He}$ の入手やこの燃料核融合の特徴を生かすための開いた磁力線を持つ高性能な高 b プラズマ閉じ込め配位の開発研究が必要である。

参考文献

- [1] H.Momota, Y.Tomita, and Y.Nomura, IPPJ-460 (Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ., Nagoya, 1980).
- [2] 小特集「 $D-{}^3\text{He}$ 核融合とその開発課題」、百田弘、石田昭男、岡田成文、神前康次、後藤誠一、富田幸博、中尾安幸、西川正史、野木靖之、*J. of Plasma and Fusion Research*, 71 (1995) 481.
- [3] H.Momota, O.Motojima, M.Okamoto, S.Sudo, Y.Tomita, S.Yamaguchi, A.Iiyoshi, M.Onozuka, M.Ohnishi, and C.Uenosono, *Proc. Seventh Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems*, Makuhari, Chiba, Japan 20 - 24 September 1993 (1993) p.16.