ベータ値及び閉じ込め則を考慮した核融合炉最適温度

正員 小越 澄雄 (東京理科大)

非会員 岡本 興介 (東京理科大)

非会員 岡本 吉広 (東京理科大)

Optimal temperature for nuclear fusion reactors with considerations of a beta limit and a energy confinement law

Sumio Kogoshi, Member, Kousuke Okamoto, Non-member, Yoshihiro Okamoto, Non-member
(Science University of Tokyo)

キーワード：核融合炉，最適プラズマ温度，閉じ込め則，核反応，限界ベータ値

核融合発電炉を目指した最近の研究により，臨界炉心プラズマ条件 ($Q = 1$) がほぼ達成され⁽¹⁾，核融合炉の設計研究も多数行われている^{(2), (3)}。通常こうした炉設計では，プラズマ温度は最適化した値ではなく，ある程度の自由度のあるパラメータとして扱われてきた。本研究では， Q 値 (= (核融合出力) / (加熱入力)) 及び出力密度 P を評価関数として，ベータ値 (= (プラズマ圧力) / (磁気圧力)) 一定とした場合の最適プラズマ温度を求めている。

平均核融合反応率 $\langle \sigma v \rangle$ は，重水素 (D) と三重水素 (T) の反応で，温度 $T = 70$ keV 近辺のとき最大値となり，その値は約 $9 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$ である。ところが，磁気閉じ込め核融合装置では，閉じ込め得るプラズマ圧力に限界が存在する。すなわち，限界ベータ値が存在する。従って，核融合炉プラズマのベータ値を限界値近辺の一定値で運転することが予想される。こうした場合には，プラズマ条件として，新たに，(温度) $\times$ (密度) = 一定が課されるため，単位体積当たりの核融合出力 P は $\langle \sigma v \rangle / T^2$ に比例する。この結果，分母の温度の二乗が影響して最適温度は 70 keV より下がることが予想される。また，エネルギー閉じ込めを考慮すると，定常運転の核融合炉では，エネルギー損失に見合うだけのエネルギーを外部から入力する必要がある (アルファ粒子加熱の寄与が小さいとしてこれを無視した場合)。単位体積当たりの核融合出力 P と，この外部入力 P_{aux} との比である利得 Q を最大にするプラズマ温度は上記の最適温度ともまた異なることが予想される。

図1にベータ値一定のもと，単位体積当たりの出力 P ($\langle \sigma v \rangle / T^2$ に比例) のプラズマ温度依存性を示した。平均核融合反応率の値は，文献 (4) および (5) の図より読みとった。図1より P を最大にするプラズマ温度は，DT, DD, D^3H 反応で各々， 10 keV, 15 keV, 80

keV となっていることがわかる。

図1 核融合出力密度 P のプラズマ温度依存性

Fig. 1. Nuclear fusion output density v.s. plasma temperature

次に，エネルギー閉じ込め則を考慮した場合の Q 値の最適化について考察する。核融合炉としてはトカマク形を想定し，エネルギー閉じ込め則として次式で表さるゴールドストーン則⁽⁶⁾を採用する。

$$\tau_E = 1.0 \times 10^{-21} n a^{1.04} R^{2.04} q_a^{0.5} \dots (1)$$

ここで， a はプラズマ小半径， R はプラズマ大半径， q_a はプラズマ端での安全係数であり，各々 $a = 2$ m, $R = 8$ m, $q_a = 4$ を，以下の計算では採用した。この場合，定常運転を想定した時の単位体積当たりの外部入力 P_{aux} の値及び利得 Q は，

$$P_{aux} = (1.5 n T) / \tau_E \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$Q = P / P_{aux} \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。式(3)を整理すると、ベータ値一定、ゴールドストーン則のもとでは、Q値は $\langle \sigma v \rangle / T^3$ に比例することがわかる。利得Q値のプラズマ温度依存性を図2に示す。図1と比べ、さらに最適温度が低下していることがわかる。

図2 利得Qのプラズマ温度依存性

Fig.2 Dependence of gain Q on plasma temperature

表1 最適プラズマ温度における各種パラメータ

Table 1. Various parameters at the optimal temperature

	D T反応			D D反応		D ³ H-反応	
β(%)	5			5	10	5	10
B(T)	5			5	9	5	9
T(keV)	7	10	70	6	6	40	40
n ($\times 10^{20} \text{m}^{-3}$)	2.2	1.6	0.22	2.6	17	0.39	2.5
P ($\times 10^5 \text{W/m}^3$)	16	20	3.1	0.026	1.1	0.27	11
P _{aux} ($\times 10^5 \text{W/m}^3$)	5.9	8.4	59	0.050	10	0.33	67
Q	270	240	5.3	0.52	11	0.84	16

R=8m, a=2m

最後に、Q値を最大にする温度での、P、P_{aux}、Q値を表1にまとめる。比較のため、D T反応については、平均核反応率が最大となる温度70 keV、およびベータ値一定の条件下で単位体積当たりの出力Pが最大になるときの温度10 keVでの値も示した。ベータ値(β)、磁束密度(B)

の値はβ=5%, B=5 Tとしたが、D D、D³H-反応ではこの値だとQ値が1以下となり発電炉として成立しないので、β=10%, B=9 Tでの値も同時に示した。これらの反応は次世代の核融合炉で用いるものであり、技術の進展により将来はこの値が達成できると想定した。

以上の解析から、ベータ値一定、かつゴールドストーン則を考慮すると核融合炉の最適プラズマ温度は平均核反応率が最大になる温度よりかなり低下することがわかった。これは、ベータ値一定のもとでは、温度の上昇は密度の低下を招き、結果として核融合出力が低下することおよび、ゴールドストーン則では密度の低下がエネルギー閉じ込めを劣化させることのためである。今回求めた最適温度の採用により、既設計炉のQ値等が改善されと考えている。この研究の一部は、財団法人中部電力基礎技術研究所の助成により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

(平成7年10月26日受付)

文献

- (1) A. Gibson; "EXPERIMENTS USING DEUTERIUM-TRITIUM PLASMAS IN THE JET TOKAMAK", IAEA-CN-56/A-2-1 (Washington, 1-6 October 1990)
- (2) M. Kikuchi; "Steady state tokamak reactor based on the bootstrap current", Nucl. Fusion 30, 265(1990)
- (3) R. W. Conn, F. Najmabadi et al.; "ARIES-I, A STEADY-STATE, FIRST-STABILITY TOKAMAK REACTOR WITH ENHANCED SAFETY AND ENVIRONMENTAL FEATURES", IAEA-CN-53/H-1-4 (Washington, 1-6 October 1990)
- (4) 関口忠: 「現代プラズマ理工学」(1979) オーム社
- (5) 宮本健郎: 「核融合のためのプラズマ物理」(1973) 岩波書店
- (6) R. J. Goldston; "ENERGY CONFINEMENT SCALING IN TOKAMAKS: SOME IMPLICATIONS OF RECENT EXPERIMENTS WITH OHMIC AND STRONG AUXILIARY HEATING", J. Plasma Physics and Controlled Fusion 26, 87(1984)

小越 澄雄 (正員) (電学論A, Vol. 115, No. 9 参照)

岡本 興介 (非会員) 昭和44年12月3日生。平成5年3月東京理科大学理工学部電気工学科卒業。平成7年3月同大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程終了。同大学情報処理センター勤務。

岡本 吉広 (非会員) 昭和47年1月15日生。平成7年3月東京理科大学理工学部電気工学科卒業。現在、株式会社三菱重工業勤務。