

JAERI-M  
6876

核融合実験炉のプラズマ起動特性の検討

1977年1月

真木 紘一\*・大和 春海\*\*・東 稔達三

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

核融合実験炉のプラズマ起動特性の検討

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

真木紘一\*・大和春海\*\*・東稔達三

(1976年12月20日受理)

核融合実験炉の起動におけるプラズマ特性に関する検討を行なった。計算モデルは、時間依存性を入れた空間依存のない拡散モデルであり、エネルギーおよび粒子の閉じ込め時間の比例則は、プラズマ温度が数 keV 以下では、新古典拡散または擬古典拡散が支配的であるとし、それ以上の温度では、捕獲イオン不安定性による異常拡散が支配的であるとして用いた。10秒間のジュール加熱でプラズマ温度を1 keV まで上げ、さらに10秒間の中性粒子入射加熱で、入射パワー2.8MW、燃料装荷率  $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$  として、プラズマを平衡運転時の状態(プラズマ温度7 keV、電子密度  $1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ ) に持ち上げる事ができた。

---

\* 日立製作所(株)原子力研究所, 外来研究員

\*\* 東京芝浦電気(株)総合研究所, 外来研究員

Study on Plasma Ignition of JAERI Experimental Fusion Reactor

Koichi MAKI<sup>\*</sup>, Harumi YAMATO<sup>\*\*</sup> and Tatsuzo TONE

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

( Received December 20, 1976 )

Heating the plasma in JAERI Experimental Fusion Reactor up to the equilibrium operating state has been studied with a time dependent zero-dimensional model. The neoclassical or pseudoclassical scaling-law plays a leading part of the plasma diffusion in the low temperature region below several keV and the trapped-ion scaling-law does so in the higher region. The plasma temperature is raised to 1 keV by 10 sec Joule-heating. The plasma is heated up to the equilibrium operating state of plasma temperature 7 keV and electron density  $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  by 10 sec neutral beam injection heating with injection power 28 MW and fueling rate  $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

---

\* On leave from Atomic Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kawasaki

\*\* On leave from Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd., Kawasaki

## 目 次

1. 緒 言	1
2. プラズマの計算モデル	5
2.1 粒子バランスとエネルギーバランス	5
2.2 プラズマの拡散と閉じ込め時間	7
2.3 加熱パワー	8
2.4 輻射損失パワー	10
3. ジュール加熱による初期起動	12
4. 中性粒子入射加熱による起動	16
4.1 燃料装荷率と加熱パワーの決定	16
4.2 結果と検討	16
5. 結 言	23
謝 辞	23
参考文献	24

# 1. 緒 言

ここ数年の間に、実験炉規模の核融合炉の設計研究が欧米の各研究所から次々と発表された。<sup>(1)~(6)</sup> 日本原子力研究所の炉設計研究室においても、1975年4月から実験炉の予備設計が進められた。炉心プラズマ設計に関しては、パラメータサーベイによって、設計値が選定された。<sup>(7), (8)</sup> 全体の設計は1976年8月に第一次予備設計中間報告書としてまとめられた。<sup>(9)</sup> その後、設計値の再検討が行なわれ、最終的に第一次予備設計値が決定された。<sup>(10), (11)</sup> 本研究は、このようにして定められた設計値に基づく核融合実験炉のプラズマ起動パターンを決定することを目的として行なわれたものである。

トカマク型プラズマの加熱・起動におけるプラズマ動特性に関する検討は、J. F. Eitzweiler,<sup>(12)</sup> J. Rand McNally, Jr.<sup>(13)</sup>をはじめ、ANL, GA社, ORNLの各研究所から出されている設計報告書<sup>(4), (5), (6)</sup>でも行なわれている。計算モデルは、一点近似のモデルを用いている。最近になって、ANLの研究所から文献(4)をさらに深めた設計報告書が発表された。<sup>(14)</sup> その中には、一次元モデルによる検討も含まれている。このレポートでは、一点近似のモデルを用いて、核融合実験炉の起動におけるプラズマの特性を検討した。

どのような起動パターンを採るかは、核融合炉のタイプおよび目的によって異なるものと考えられる。この研究で対象とした核融合炉は、炉の寸法をできる限りコンパクトなものとするため、自己点火型の炉とはしなかった実験炉である。自己点火型の炉の場合は、外部加熱は自己点火条件に達するまで必要であるが、この場合は、平衡運転に達しても外部加熱が必要となる。まず対象としている実験炉の概略を示そう。Table 1.1 に設計値を、Fig. 1.1 に全体の鳥瞰図を示す。

平衡運転時のプラズマの平均温度は7 keV、平均密度は $1.13 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、加熱パワーは27 MWである。<sup>(10), (11)</sup> 起動の方法としては、初期加熱としてジュール加熱を用い、第2段加熱として中性粒子入射加熱を用いる。プラズマ電流の立ち上がり時間と核融合反応出力の立ち上がり時間は、予じめ設定されている。プラズマ電流は、10秒間で最大電流4 MAまで立ち上げられ、同時にジュール加熱を行ない、プラズマ平均温度を1 keVまで上昇させる。つぎの10秒間で中性粒子入射加熱を行ない、核融合反応出力を全出力100 MWまで上昇させ、同時にプラズマ平均温度を平衡運転時の温度である7 keVまで上昇させる。起動モデルをできる限り簡単にするために、燃料装荷率は、ジュール加熱および中性粒子入射加熱の間それぞれ一定とした。また、ジュール加熱の間は、プラズマの周回電圧を一定とし、中性粒子入射加熱の間は、加熱パワーを一定とするモデルを採った。起動方法として以上のようなパターンを採った。したがって、検討すべき内容は、このようなパターンを満足する起動パラメータを求めることである。具体的には、ジュール加熱の場合は、燃料装荷率とプラズマ周回電圧を定め、イオン温度、電子密度、プラズマ電流の時間的な変動を求めることであり、中性粒子入射加熱の場合は、燃料装荷率と加熱パワーを定め、イオン温度、電子密度の時間的な変動を求めることである。

計算モデルは、時間依存性を入れた空間依存のない拡散モデルであり、エネルギーおよび粒子の閉じ込め時間の比例則として、新古典拡散<sup>(15)</sup>、擬古典拡散<sup>(16)</sup>、捕獲イオン不安定性による異常拡散<sup>(17)</sup>を考慮し、それらを併用して用いた。

Table 1.1 Main design parameters of the JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)<sup>(10)</sup>

Fusion power (MW)	100	SCM irradiation effects	
Reactor dimensions		Max. copper displacement (dpa y <sup>-1</sup> )	1.5×10 <sup>-5</sup>
Major radius (m)	6.75	Max. nuclear heating rate (W cm <sup>-3</sup> )	7.8×10 <sup>-5</sup>
Plasma radius (m)	1.5	Total nuclear heating in SCM (kW)	0.98
First wall radius (m)	1.75		
Plasma volume (m <sup>3</sup> )	300		
Plasma		Toroidal field magnet	
Mean temperature (keV)	7	Number of coils	16
Mean density (10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup> )	1.1	Inner diameter, W/H(m)	7/11
Effective charge	1.6	Max. field strength (T)	11.5
Confinement time (s)		Stored energy (GJ)	50
Trapped-ion	2.9		
Neo-Bohm	2.3	Vertical field magnet	
Pseudoclassical	5.7	Magnetomotive force (MAT)	8
Injection power (MW)	27	Field intensity (T) at plasma center	0.26
(D-particle with 200keV)		Stored energy (GJ)	0.5
Toroidal field (T)	6		
Safety factor	2.5	Primary winding	
Poloidal beta	2.2	Magnetomotive force (MAT)	60
Toroidal beta	0.017	Maximum field intensity (T)	8
Plasma current (MA)	4	Stored energy (GJ)	2.1
Reactor Structure		Flux change (Wb)	140
Reactor module/Reactor	8	Neutral beam injector	
Blanket cells/Reactor module	284	Deuterium beam energy (keV)	200
Injection and evacuation hole/Reactor module	1	Ion beam output (MW)	240
Nominal max.1st wall temp(°C)	540	Injection power (MW)	33
Materials		Neutral beam gas efficiency ( $\Gamma_n/\Gamma_c$ )	0.5
Structural material	316SS	Total power efficiency	0.26
Blanket fertile material	Li <sub>2</sub> O		
Neutronics		Cooling system	
Neutron current at 1st wall (n cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	7.6×10 <sup>12</sup>	Coolant (10 kg/cm <sup>2</sup> )	He
Neutron wall loading (MW m <sup>-2</sup> )	0.17	Inlet/Outlet temp. (°C)	300/500
First wall displacement damage rate (dpa y <sup>-1</sup> )	0.9	Flow rate (kg/s)	143
Max. helium production rate in 1st wall (appm y <sup>-1</sup> )	12	Secondary system	He, air- cooled
Max. hydrogen production rate in 1st wall (appm y <sup>-1</sup> )	36	Tritium inventory	
Tritium breeding ratio	0.92	Fuel recirculating system (kg)	0.3
Nuclear heating per DT neutron (MeV n <sup>-1</sup> )	16.7	Tritium recovery system including blanket (kg)	0.1
Total induced activity at one hour after shutdown (Ci)		Total inventory including storage (kg)	0.5
(after one year operation)	7.5×10 <sup>7</sup>	Operation cycle	
		Operation period(s)	420
		Burn time(s)	300

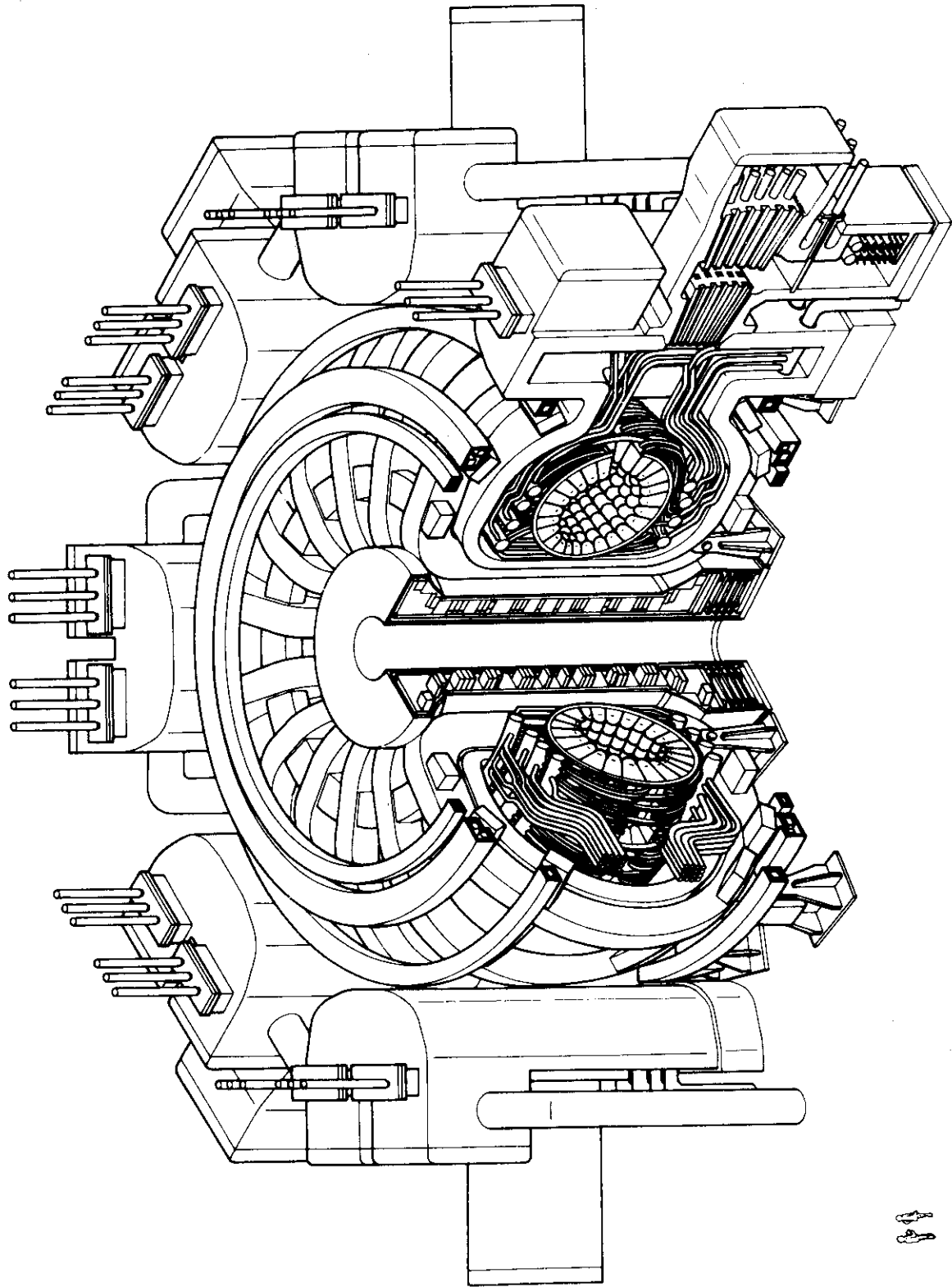


Fig. 1.1 Overview of the reactor (10)



計算モデルに関しては、第2章で詳細に述べた。ジュール加熱に関して検討した結果を第3章で述べ、第4章では、中性粒子入射加熱に関して検討した結果を述べた。

## 2. プラズマの計算モデル

プラズマの起動を解析するための計算モデルを記述する諸式を示す。ここで採り挙げるモデルは、空間依存性のない時間依存性を考慮した拡散モデルであり、つぎのような近似および仮定に基づいたものである。

- (1) 入射粒子とプラズマ中の粒子との核融合反応を無視する。
- (2) 入射パワーは、加熱に100%有効に用いられるものとする。
- (3) 融合反応で発生した $\alpha$ 粒子は、熱化されるまでプラズマ内に完全に閉じ込められていて、そのエネルギー(=3.52 MeV)は、field particleに全て与えられるものとする。
- (4)  $\alpha$ 粒子を除いたイオンは、すべて同じ温度にあるものとする。
- (5) プラズマ中の粒子はMaxwell分布をしているものとする。

### 2.1 粒子バランスとエネルギーバランス

D-イオン、T-イオン、 $\alpha$ -イオン、不純物イオンおよび電子をそれぞれ個別に記述する。まず、粒子バランスの式を示す。

D-イオン密度  $n_D$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ),

$$\frac{dn_D}{dt} = S_D - n_D n_T \langle \sigma v \rangle - \frac{n_D}{\tau_D}, \quad (2.1)$$

T-イオン密度  $n_T$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ),

$$\frac{dn_T}{dt} = S_T - n_D n_T \langle \sigma v \rangle - \frac{n_T}{\tau_T}, \quad (2.2)$$

不純物イオン密度  $n_I$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ),

$$\frac{dn_I}{dt} = S_I - \frac{n_I}{\tau_I}, \quad (2.3)$$

$\alpha$ -イオン密度  $n_\alpha$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ),

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = S_\alpha + n_D n_T \langle \sigma v \rangle - \frac{n_\alpha}{\tau_\alpha}, \quad (2.4)$$

電子密度  $n_e$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ),

$$n_e = \sum_{i=D, T, I, \alpha} n_i Z_i \quad (2.5)$$

ここで、 $S_D, S_T$  : DおよびT燃料装荷率 ( $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ),

$S_I$  : 不純物の混入率——プラズマと壁表面との相互作用によって生成された不純物のプラズマへの混入率 ( $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ),

$S_\alpha$  :  $\alpha$ -イオンの混入率——燃料中に含まれている $\alpha$ 粒子が燃料装荷時にプラズマ中に混入する率 ( $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ),

$\tau_D, \tau_T, \tau_I, \tau_\alpha$ : D, T, 不純物,  $\alpha$ 各イオンの閉じ込め時間 (詳細は, 2.2 で述べる),

$Z_i$  : D, T, 不純物,  $\alpha$ の電荷数

$\langle \sigma v \rangle$  : 熱的核融合反応率係数 ( $10^{-20} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )

つぎに, エネルギーバランスの式を示す。ここでは, 電子, イオン,  $\alpha$ -粒子の3つに分けて記述する。

電子温度  $T_e$  (keV)

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (n_e T_e) = & P_\alpha f_\alpha + P_{Ne} + P_{OH} - P_{ei} - P_{Br} \\ & - P_S - P_L - \frac{3}{2} \frac{n_e T_e}{\tau_{Ee}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

イオン温度  $T$  (keV)

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{d}{dt} \left( T_i \sum_{i \neq \alpha} n_i \right) = & P_\alpha (1 - f_\alpha) + P_{Ni} + P_{ei} \\ & - \frac{3}{2} T_i \sum_{i \neq \alpha} \frac{n_i}{\tau_{Ei}}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$\alpha$ -温度  $T_\alpha$  (keV)

$$\frac{d}{dt} (n_\alpha E_\alpha) = E_{\alpha 0} n_D n_T \langle \sigma v \rangle - P_\alpha - \frac{n_\alpha E_\alpha}{\tau_{E\alpha}}, \quad (2.8)$$

ここで,  $P_\alpha$  :  $\alpha$ -加熱パワー ( $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

$f_\alpha$  :  $\alpha$ -加熱パワーのうち, 電子の加熱に使われる場合,

$P_{Ne}$  : 電子に対する中性粒子入射加熱パワー ( $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

$P_{Ni}$  : イオンに対する中性粒子入射加熱パワー ( $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

$P_{OH}$  : ジュール加熱パワー ( $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

(加熱項については, 2.3節で述べる)。

$P_{ei}$  : 電子からイオンへの交換エネルギーで, 次式で与えられる,

$$P_{ei} = \frac{3}{2} n_e \frac{(T_e - T_i)}{\tau_{eq}} \quad (2.9)$$

ここで,  $\tau_{eq}$  は電子とイオンのエネルギー緩和時間で次式で与えられる<sup>(18)</sup>

$$\frac{1}{\tau_{eq}} = 10.01 \frac{\nu n A}{T_e^{3/2}} \sum_{i \neq \alpha} \frac{Z_i^2}{A_i} n_i \quad (2.10)$$

ただし、 $A_i$  は  $i$  (D, T, 不純物,  $\alpha$ ) の質量数であり、 $\ln A$  は次式で与えられる<sup>(9)</sup>

$$\ln A = 16.09 - 1.15 \log_{10} n_e + 2.30 \log_{10} T_e, \quad (2.11)$$

$P_{Br}$  : 制動輻射損失パワー (  $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  )

$P_S$  : シンクロトロン輻射損失パワー (  $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  )

$P_L$  : ライン・ラディエーション損失パワー (  $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  ), (損失パワーについては、2.4節で述べる)。

$\tau_{Ee}, \tau_{Ei}, \tau_{E\alpha}$  : 電子, イオン,  $\alpha$  粒子のエネルギー閉じ込め時間,

$E_{\alpha 0}$  : 核融合反応によって発生する  $\alpha$  粒子のエネルギー ( 3.52 MeV )。

## 2.2 プラズマの拡散と閉じ込め時間

粒子閉じ込め時間  $\tau_i$ , エネルギー閉じ込め時間  $\tau_{Ei}$  と拡散係数との関係は、プラズマ半径を  $a$  ( m ) とすれば、つぎのように表わされる。

$$\tau_i = \frac{a^2}{4 D_i} \quad (i = \text{D, T, 不純物 or } \alpha) \quad (2.12)$$

および

$$\tau_{Ei} = \frac{a^2}{4 K_i} \quad (2.13)$$

拡散係数  $D_i$  および  $K_i$  は、つぎのように与える。

$$D_i = K_P + \xi_i K_T, \quad (2.14)$$

$$K_i = K_{Ni} + \xi_i K_T. \quad (2.15)$$

$$\text{ただし, } \xi_i = \begin{cases} 1 & \text{for } i \neq \alpha \\ 0.5 & \text{for } i = \alpha \end{cases}$$

また、電子に対して、

$$K_e = K_P + K_T. \quad (2.16)$$

ここに、 $K_{Ni}$ ,  $K_P$ ,  $K_T$  は、つぎに示す比例則に従う拡散係数である。

・新古典拡散<sup>(15)</sup>

$$K_{Ni} = C_{Ki} \frac{n_e Z_{\text{eff}} \epsilon^{1/2}}{T_e^{1/2} B_P^2} \ln A \quad (2.17)$$

ただし、 $C_{Ki}$  は定数 (  $= 2.5 \times 10^{-3}$  ),

$$\epsilon = a/R \quad R: \text{主半径 ( m )} \quad (2.18)$$

$$B_P = 0.2 \frac{I_P}{a} \quad : \text{ポロイダル磁場 ( T )} \quad (2.19)$$

$I_P$  : プラズマ電流 (MA) (2.3節で述べる)

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i} \quad \text{: 実効荷電} \quad (2.20)$$

• 擬古典拡散<sup>(16)</sup>

$$K_P = C_P \frac{n_e Z_{\text{eff}}}{T_e^{1/2} B_t^2} \ln A \quad (2.21)$$

ただし,  $C_P$  は定数 ( $= 2.5 \times 10^{-3}$ ),

• 捕獲イオンによる拡散<sup>(17)</sup>

$$K_T = C_T \frac{\epsilon^{1/2} T_e^{7/2}}{R^2 B_t^2 n_e Z_{\text{eff}} \ln A} \frac{1}{(1 + T_e/T_i)^2} \quad (2.22)$$

ただし,  $C_T$  は定数 ( $= 1.089 \times 10^2$ )

$B_t$  : トロイダル磁場 (T).

平衡状態におけるプラズマの粒子とエネルギーバランスの計算では, 捕獲イオンによる拡散のみを考慮した閉じ込め時間を用いている。<sup>(10,11)</sup> 起動モデルとしては, プラズマ温度の低い場合は, 新古典拡散または擬古典拡散が支配的で, プラズマ温度の高い場合は, 捕獲イオンによる拡散が支配的であるようなモデルを採る必要がある。この報告書のモデルでは, (2.14) ~ (2.16) の拡散係数を用いる。そこで, イオン温度 7 keV の平衡時点で, 起動に用いた閉じ込め時間と平衡計算に用いた閉じ込め時間を継ぐ必要があるので,

$$K_T = K_P + C' K_T$$

として,  $C'$  を求める。  $C' = 1 - K_P/K_T$  だから,  $T_e \sim T_i = 7 \text{ keV}$ ,  $n_e = 1.13 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,  $\ln A = 20$ ,  $Z_{\text{eff}} = 1.6$  として,  $K_P/K_T$  を求めると,  $K_P/K_T \sim 0.62$ , したがって,  $C' \sim 0.38$  となる。  $C'_T = C' C_T$  とすると,  $C'_T \sim 41.5$  となる。このモデルでは,  $C_T$  の代用として,  $C'_T = 41.5$  を用いるものとする。

## 2.3 加熱パワー

### [1] ジュール加熱

プラズマ電流  $I_P$  は, つぎの式で与えられる。

$$V = L_P \frac{d I_P}{dt} + R I_P \quad (2.23)$$

ただし,  $V$  はプラズマ周回電圧で, つぎのように与えられる。  $I_P < I_{P0}$  ( $I_{P0}$ : 最大プラズマ電流) のとき,  $V = V_0$  ( $V_0$  は一定) をとり,  $I_P = I_{P0}$  に達したとき,  $I_P = I_{P0}$  とし, (2.23) を満足する  $V$  をとる。  $L_P$  は, プラズマインダクタンスで, 次式で与えられる。

$$L_P = \mu_0 R \left( \ln \frac{8}{\epsilon} - 1.75 \right) \text{ (H)} \quad (2.24)$$

ただし、 $\mu_0$  は真空の透磁率で  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  である。 $R$  はプラズマ抵抗で、

$$R = \eta \frac{2R}{a^2} \quad (2.25)$$

と表わされる。ここに、 $\eta$  は次式で与えられる抵抗率である。<sup>(20)</sup>

$$\eta = 1.621 \times 10^{-9} \frac{Z_{\text{eff}} \ln A}{T_e^{3/2}} (\Omega \cdot \text{m}). \quad (2.26)$$

プラズマの電流密度  $j$  は、つぎのように与えられる。

$$j = \frac{I_P}{\pi a^2} \quad (2.27)$$

これを用いて、ジュール加熱パワー  $P_{\text{OH}}$  を示すと、 $P_{\text{OH}} = \eta j^2$  だから、つぎのように表わされる。

$$P_{\text{OH}} = 1.012 \times 10^{-1} \frac{j^2 Z_{\text{eff}} \ln A}{T_e^{3/2}} (10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}) \quad (2.28)$$

(2)  $\alpha$ -加熱パワー

$\alpha$ -加熱パワー  $P_\alpha$  は、

$$P_\alpha = \frac{n_\alpha E_\alpha}{\tau_{S\alpha}} \quad (2.29)$$

で与えられる。 $E_\alpha$  は  $\alpha$  粒子のエネルギー (keV) で、 $\tau_{S\alpha}$  は、 $\alpha$ -粒子と電子の間のエネルギー緩和時間で、

$$\frac{1}{\tau_{S\alpha}} = 10.01 \frac{Z_\alpha^2}{A_\alpha} \frac{n_e}{T_e^{3/2}} \ln A \quad (2.30)$$

で与えられる。<sup>(18)</sup>  $\alpha$ -加熱パワーのうち電子の加熱に使われる場合  $f_\alpha$  は、つぎの式で示される。<sup>(21)</sup>

$$f_\alpha = \frac{2}{3} \int_0^{X_\alpha} \left[ (1+r_\alpha) e^{-x} - r_\alpha \right]^{2/3} dx \quad (2.31)$$

ただし、 $X_\alpha = \ln \left( \frac{r_\alpha + 1}{r_\alpha} \right)$ ,  $(2.32)$

$$r_\alpha = 56.96 \frac{A_\alpha}{n_e} \left( \frac{T_e}{E_\alpha} \right)^{3/2} \sum_{i \neq \alpha} \frac{n_i}{A_i} Z_i^2 \quad (2.33)$$

(3) 中性粒子入射加熱パワー

中性粒子入射率を  $S_N$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ )、入射粒子のエネルギーを  $E_N$  (keV) とし、プラズマ内に入射された中性粒子のエネルギーは、すべてプラズマ加熱に使われるものと仮定すれば、中性粒子入射加熱パワー  $P_N$  ( $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) は、つぎのように表わされる。

$$P_N = S_N \cdot E_N \quad (2.34)$$

そのうち電子の加熱に使われるパワーの割合を $f_N$  とすると、中性粒子入射による電子の加熱パワー $P_{Ne}$  は、

$$P_{Ne} = f_N \cdot P_N, \quad (2.35)$$

イオンの加熱パワー $P_{Ni}$  は、

$$P_{Ni} = (1 - f_N) P_N \quad (2.36)$$

と表わされる。ここで、 $f_N$  は次式で与えられる。<sup>(21)</sup>

$$f_N = \frac{2}{3} \int_0^{X_N} \left[ (1 + r_N) e^{-x} - r_N \right]^{2/3} dx \quad (2.37)$$

ただし、 $X_N = \ln \left( \frac{r_N + 1}{r_N} \right)$ 、

$$r_N = 56.96 \frac{A_N}{n_e} \left( \frac{T_e}{E_N} \right)^{3/2} \sum_i \frac{n_i}{A_i} Z_i^2 \quad (2.38)$$

$A_N$  は 2 または 2.5 とする。

## 2.4 輻射損失パワー

この報告書では、制動輻射損失パワー、シンクロトロン輻射損失パワー、ライン輻射損失パワーの3つについて述べる。

### ・制動輻射損失

制動輻射損失パワー $P_{Br}$  は、次式で与えられる。<sup>(22)</sup>

$$P_{Br} = 0.2996 Z_{eff} n_e^2 T_e^{1/2} (10^{20} \text{keV m}^{-3} \text{s}^{-1}) \quad (2.39)$$

### ・シンクロトロン輻射損失

シンクロトロン輻射損失パワー $P_S$  は、次式で与えられる。<sup>(23)</sup>

$$P_S = 1.054 \times 10^{-5} \frac{n_e^{1/2}}{a^{1/2}} B_i^{5/2} T_e^{1/4} \left( 1 + \frac{T_e}{204} \right) \cdot (1 - r_{wall}) \quad (2.40)$$

(  $10^{20} \text{keV m}^{-3} \text{s}^{-1}$  )

ここで、 $r_{wall}$  は、シンクロトロン輻射に対する壁の反射率で、約 90 % と考えられる。

### ・ライン輻射損失

ライン輻射損失パワー $P_L$  は、次式で与えられる。<sup>(24, 25)</sup>

$$P_L = \left( 1.16 \times 10^{-2} Z_{e2} + 2.578 \times 10^{-4} \frac{Z_{e3}}{T_e} \right) \frac{n_e^2}{T_e^{1/2}} (10^{20} \text{keV m}^{-3} \text{s}^{-1}) \quad (2.41)$$

ここで、 $Z_{e2}$ 、 $Z_{e3}$  は、次のように定義される。

$$Z_{e2} = \sum_i n_i Z_i^4 / \sum_i n_i Z_i \quad (2.42)$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i} \quad (2.42)$$

なお、 $Z_{\text{eff}}$  は、(2.20)で示したように、つぎの式で定義される。

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i}$$



## 3. ジュール加熱による初期起動

初期加熱として、ジュール加熱を用いる。ジュール加熱の初期条件をTable 3.1に示す。

Table 3.1 Initial conditions for Joule-heating

Ion temperature (keV)	0.01
Electron density ( $10^{18}\text{m}^{-3}$ )	1.06
Plasma current (MA)	0.0001
$Z_{\text{eff}}$	1.3
Impurity (%)	1.0

JAERI-Experimental Fusion Reactor の設計では、初期加熱時間は 10 秒間と設定されている。<sup>\*</sup>この時間で、プラズマ電流を初期値から 4MA まで立ち上げなければならない。ここでは、初期加熱モデルとして、プラズマ電流が 4MA に達するまでは、プラズマ周回電圧を一定としているので、その電圧を算出する。まず、プラズマのインダクタンス  $L_p$  と、レジスタンス  $R$  を求める。式(2.24)より、インダクタンス  $L_p$  は、

$$L_p = 1.257 \times 10^{-6} \times 6.75 \times (\ln 45 \times 8 - 1.75) = 15.56 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

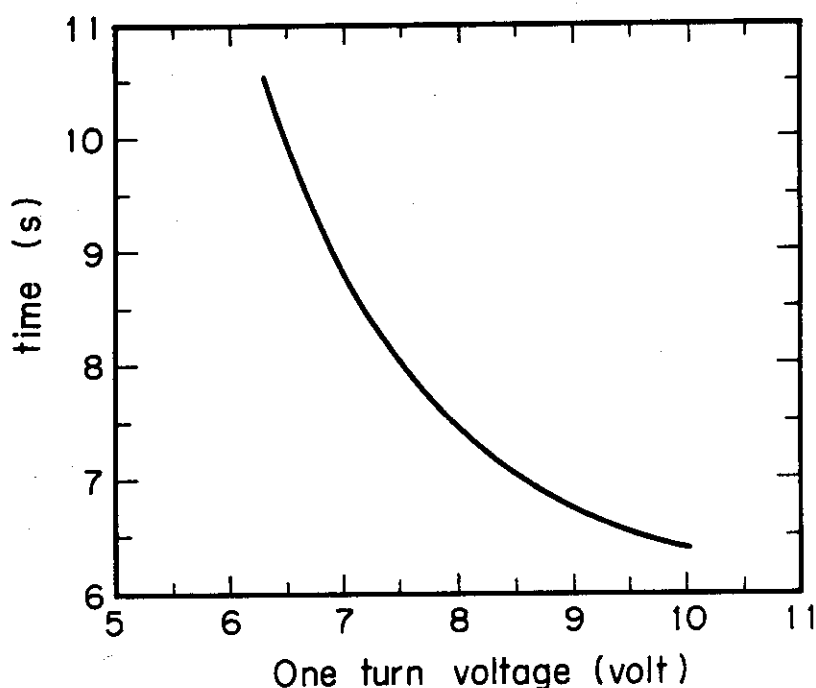


Fig. 3.1 The relation between one turn voltage and Joule-heating time to make the plasma current reach full current of 4MA.

\* 核融合実験炉の設計において、プラズマ電流の立ち上がり時間は、加熱パターンの検討を行なう以前に設定され、電源系の設計値として予じめ定められたものである。

また、 $R$ は式(2.25)、(2.26)より、

$$R \approx 1.621 \times 10^{-9} \frac{1.3 \times 16}{T_e^{3/2}} \frac{2 \times 6.75}{1.5^2} \approx 2.0 \times 10^{-7} / T_e^{3/2} \quad (\Omega)$$

ただし、 $n \approx 16$ とした。

ジュール加熱においては、平均として $T_i \sim 0.5 \text{ keV}$ 、 $I_p \sim 2 \text{ MA}$ とすれば、 $R I_p \sim 1 \text{ volt}$ となるので、(2.23)において、第2項を無視すると、 $\frac{dI_p}{dt} \approx V/L_p$ となる。そこで、 $V \approx I_p L_p/t$ だから、 $I_p = 4 \text{ MA}$ 、 $L_p \sim 16 \times 10^{-6} \text{ H}$ 、 $t = 10 \text{ s}$ とすると、 $V \sim 6.5 \text{ volt}$ となる。すなわち、ここでは、プラズマ周回電圧を $V = 6.5 \text{ volt}$ としてジュール加熱を検討した。試みに、プラズマ周回電圧をパラメトリックに変化させた場合のプラズマ電流4 MAまでの起ち上げ所要時間の変化をFig. 3.1に示す。この図は、第2章で示した計算モデルによって求めたものである。この図から、前記した $Vt \approx I_p L_p$ の関係が近似的に成立していることがわかる。また、プラズマ周回電圧は $V = 6.5 \text{ volt}$ が適当であることもこの図から示される。

この周回電圧を用いて、10秒間加熱後のイオン温度 $T_i$ および電子密度 $n_e$ と燃料装荷率との関係をFig. 3.2に示す。10秒間の加熱後のイオン温度 $T_i$ が1 keV以上で、電子密度 $n_e$ が $4.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ \*\* (中性粒子入射加熱の初期値一次章参照)近傍に達するような燃料装荷率として、 $S_D = S_T = 5.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ を用いる。

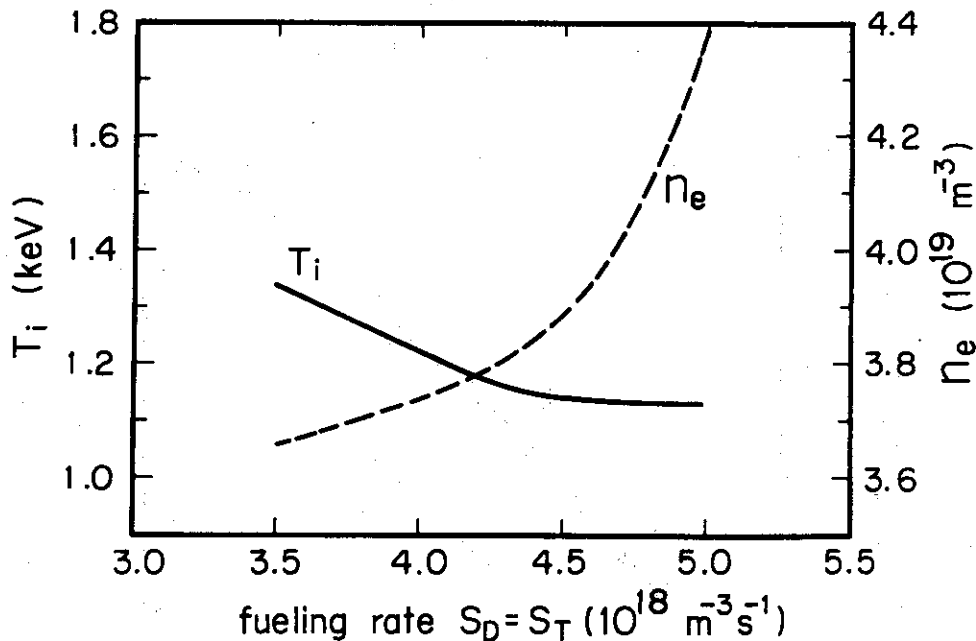


Fig. 3.2 Ion temperature and electron density after 10 second heating with various fueling rates

\*\*  $n = 4.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ という値は、 $n_D = n_T = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、炭素不純物を1%とした場合に相当する電子密度であり、中性粒子入射加熱の初期密度として設定したものである。中性粒子入射加熱によって、プラズマの不安定性が生じない電子密度は、 $\sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上であればよい。ここで採用した値は、この条件を満足し、かつジュール加熱によってプラズマ温度を1 keVまで上昇させた場合に可能な電子密度の上限 $\sim 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以下の値である。

以上の議論に基づいて計算した結果を図示する。プラズマ電流  $I_p$  の立ち上りを Fig. 3.3 に、イオン温度  $T_i$ 、電子温度  $T_e$  と電子密度  $n_e$  の立ち上りを Fig. 3.4 に示す。初期加熱の 10 秒後の最終値を Table 3.2 に示す。

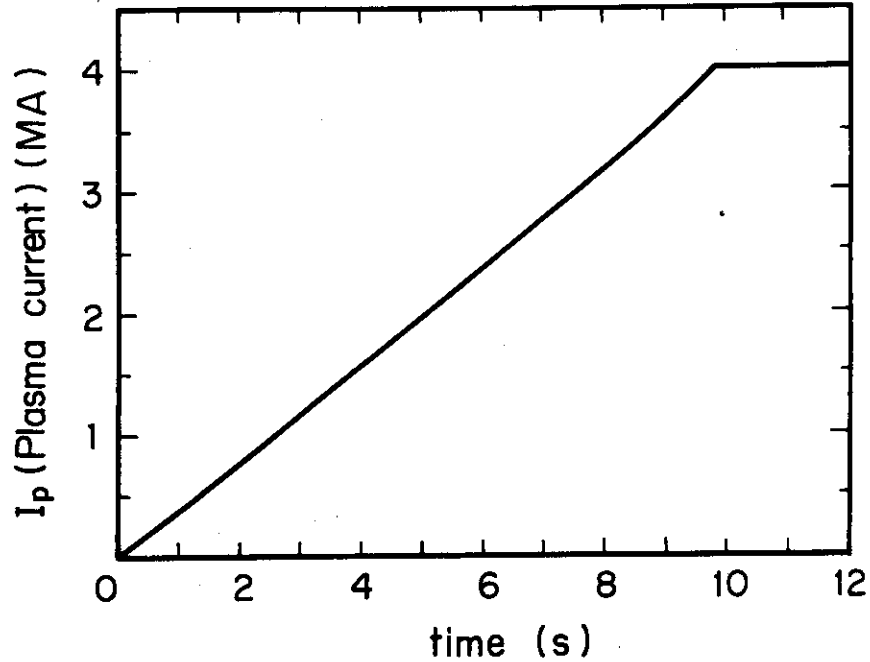


Fig. 3.3 Plasma current during Joule-heating

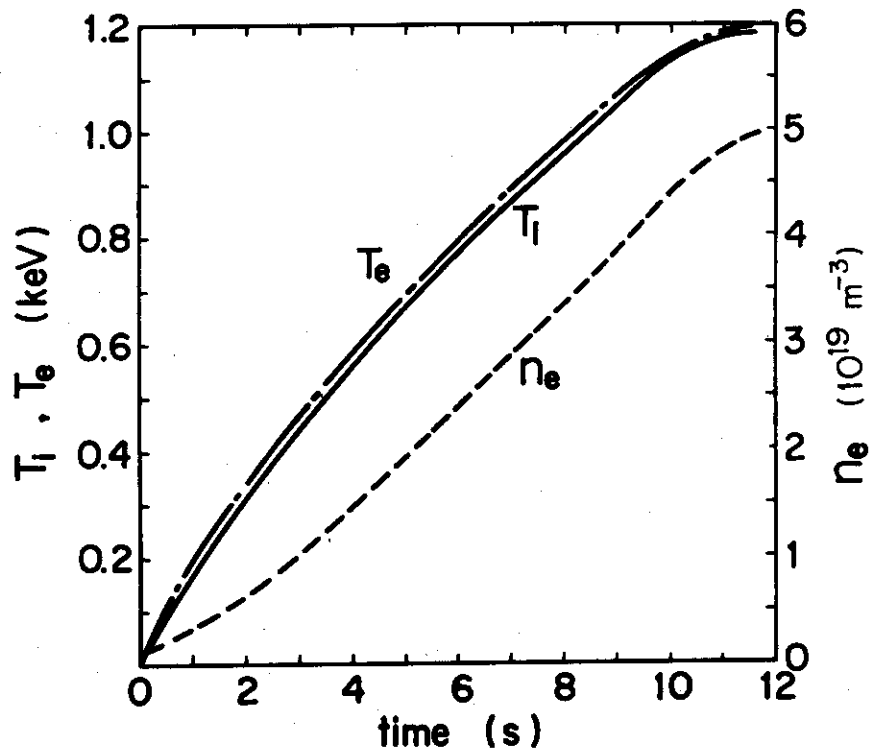


Fig. 3.4 Ion temperature  $T_i$ , electron temperature  $T_e$  and electron density  $n_e$  during Joule-heating

Table 3.2 Final values after 10 second Joule-heating and plasma parameters

---

Ion temperature (keV)	1.1
Electron density ( $10^{19}\text{m}^{-3}$ )	4.4
Zeff	1.3
Impurity (%)	1.0
One turn voltage (V)	6.5
Fueling rate ( $d=t$ ) ( $10^{20}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ )	0.05

---

## 4. 中性粒子入射加熱による起動

前章のジュール加熱の最終値をもとにして、中性粒子入射加熱をする。この加熱によって、プラズマを平衡に到達させる。平衡値は、Table 1.1 で示したように、イオン温度  $T_i$  が 7 keV、電子密度  $n_e$  が  $1.13 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、平衡維持のための加熱パワーが 27 MW である。中性粒子入射加熱の初期条件は、DとTの密度  $n_D = n_T = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  とし、炭素不純物を約 1%とした場合の電子密度  $n_e = 4.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  を初期値とする。また、イオン温度  $T_i = 1 \text{ keV}$  とする。中性粒子入射加熱条件をTable 4.1にまとめる。

加熱モデルとして、燃料装荷率および加熱パワーは加熱の間は一定とし、平衡に達するまでの時間を 10 秒間とする。\*\*\* 初めに、燃料装荷率と加熱パワーを決定するための検討をする。

Table 4.1 Initial conditions for neutral beam injection heating

Ion temperature (keV)	
Deuteron density ( $10^{19} \text{ m}^{-3}$ )	1.0
Triton density ( $10^{19} \text{ m}^{-3}$ )	2.0
Electron density ( $10^{19} \text{ m}^{-3}$ )	4.24
Impurity (%)	1.0
$Z_{\text{eff}}$	1.3

### 4.1 燃料装荷率と加熱パワーの決定

10 秒間の加熱後のイオン温度  $T_i$  と燃料装荷率との関係を加熱パワーをパラメータとして求め Fig. 4.1 に示した。なお、初期電子密度  $n_e^0 = 2.12 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の場合も参考として掲載した。また、10 秒間の加熱における最大電子密度  $n_e$  と燃料装荷率との関係を前と同様に加熱パワーをパラメータとして Fig. 4.2 に示した。参考までに、初期電子密度  $n_e^0 = 2.12 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の場合も掲載した。この2つの図から、10 秒間の加熱で平衡値に達することのできる加熱パワー  $P_I$  と燃料装荷率  $S_D + S_T$  は、それだけ、 $P_I = 28 \text{ MW}$ 、 $S_D + S_T = 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  である。

### 4.2 結果と検討

以上の値を用いて計算した結果を Fig. 4.3 に示す。この図には、加熱パワーを 27 MW および 30 MW とした場合のイオン温度の変化も併記した。電子密度の変化は加熱パワー 28 MW の場合のみ記した。また、その場合の必要な加熱パワー（全損失パワー -  $\alpha$  加熱パワー）の変

\*\*\* この値は、加熱を検討する以前に、プラズマの出力の立ち上がり時間として設計段階で定められたものである。プラズマ起動の検討結果、起動が可能な値なので、ここではそれに従った。

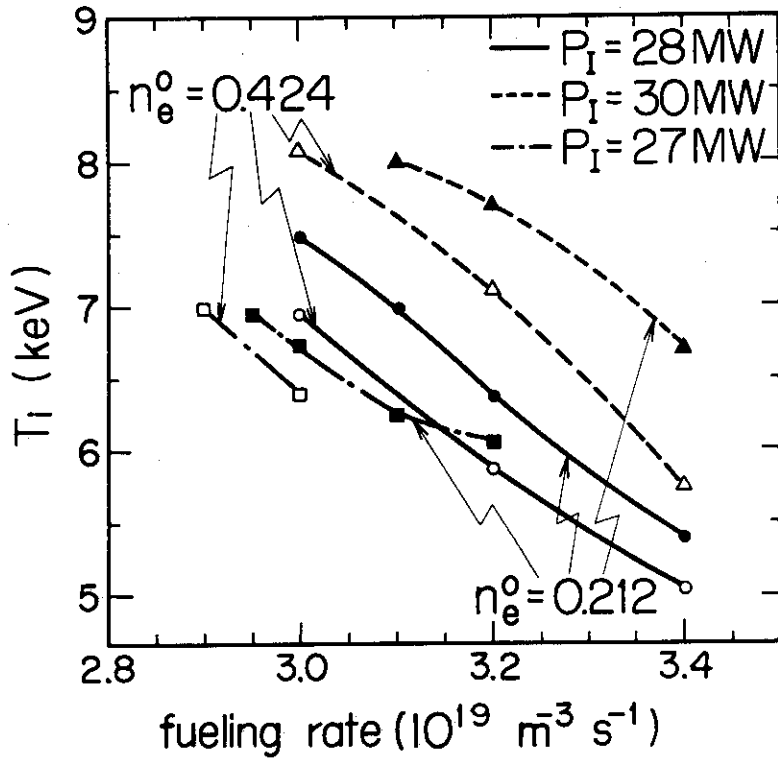


Fig. 4.1 Relation between ion temperature  $T_i$  after 10 second heating and fueling rate of various heating powers  $P_I$  and initial electron densities  $n_e^0$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ )

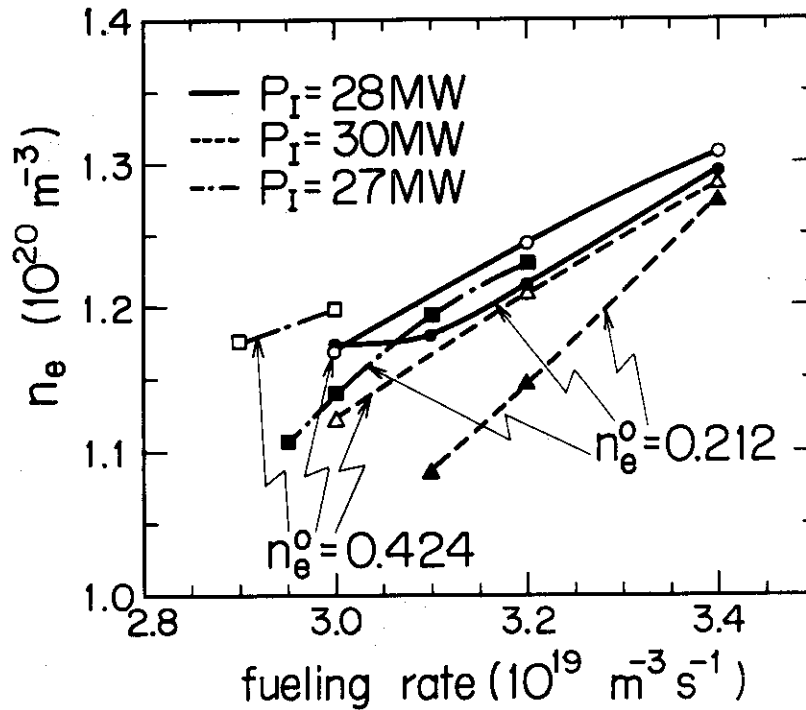


Fig. 4.2 Relation between maximum electron density in 10 second heating and fueling rate for various heating powers  $P_I$  and initial electron densities  $n_e^0$  ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ )

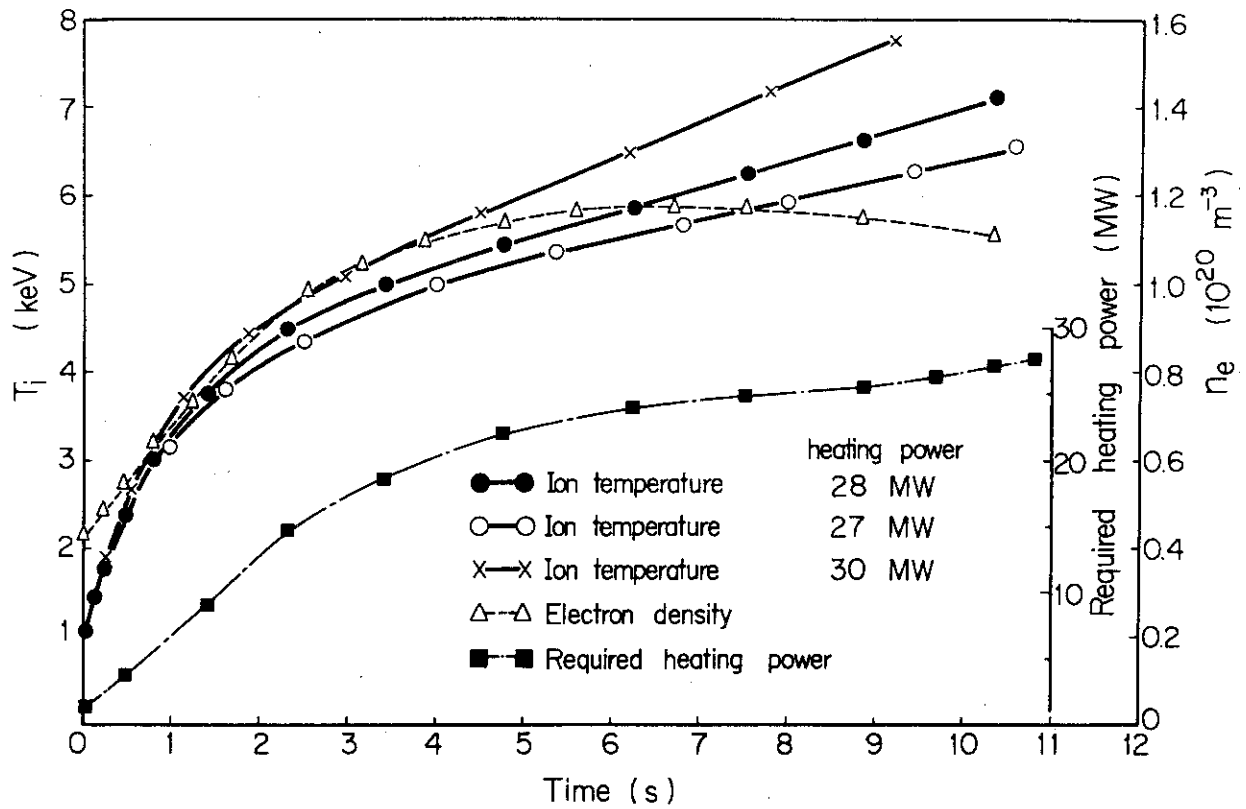


Fig. 4.3 Changes of ion temperature  $T_i$ , electron density  $n_e$  and required heating power

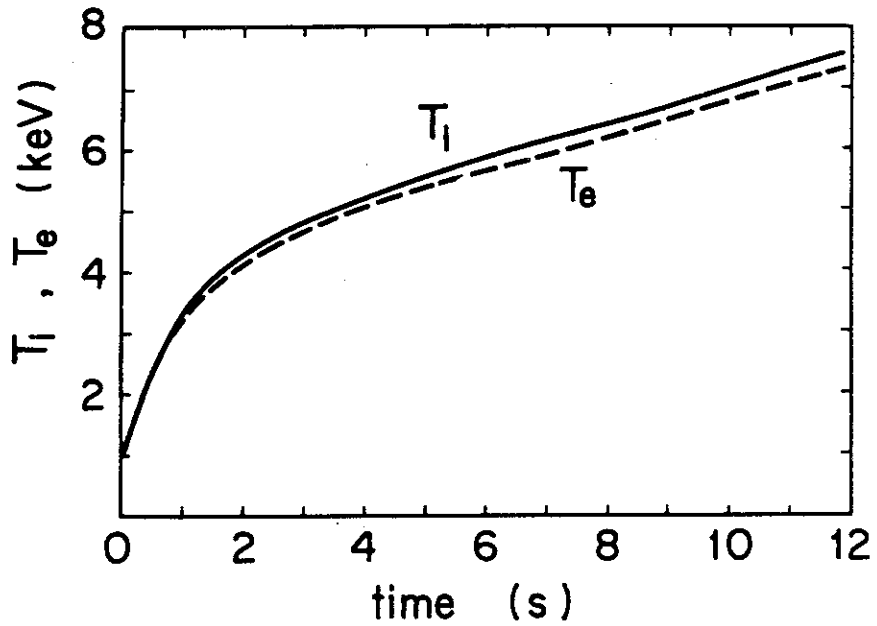


Fig. 4.4 Changes of ion temperature  $T_i$  and electron temperature  $T_e$  during neutral beam injection heating

化を Required heating power の変化として記した。

加熱パワーを 30 MW とすると、7.5 秒の加熱で約 7 keV に達するが、27 MW では、7 keV に達するまでには、約 12.5 秒を要する。加熱パワーを 28 MW とした場合には、約 10 秒でイオン温度 7 keV が達成できる。この場合の電子温度  $T_e$  はイオン温度よりやや低めで、イオン温度と同じような変化を示す (Fig. 4.4)。

つぎに、その場合の Required heating power の変化を調べるため、パワーバランスの変化を検討する。Fig. 4.5 に、Diffusion loss power  $P_D$ 、Bremsstrahlung loss power  $P_{Br}$ 、 $\alpha$ -heating power  $P_\alpha$  と参考までに fusion power  $P_F$  を示す。Required heating power が、最初の数秒間で急激に増大しているのは、 $P_D$  と  $P_{Br}$  が急激な増大を示しているのに対して、 $P_\alpha$  はそれ程大きくないためと考えられる。 $P_D$  は、

$$P_D = \frac{3}{2} \left( \frac{n_e T_e}{\tau_{Ee}} + T_i \sum_{i=D,T} \frac{n_i}{\tau_{Ei}} \right) \quad (4.1)$$

で与えられる。ここでは、 $\tau_{Ee} = \tau_{Ei}$  と仮定して計算したので、

$$P_D = \frac{3}{2} \{ n_e T_e + T_i (n_D + n_T) \} / \tau_E$$

となる。ここで、 $\tau_{Ee} = \tau_{Ei} \equiv \tau_E$  とおいた。 $T_i \simeq T_e$ 、 $n_e \simeq n_D + n_T$  と近似すると、

$$P_D \simeq 3 n_e T_i / \tau_E \quad (4.3)$$

となる。最初の数秒間で、 $n_e$ 、 $T_i$  は急激に増大する。また、Fig. 4.6 からわかるように、 $\tau_E$  は、最初の数秒で急激な減少を示すので、 $1/\tau_E$  は、最初の数秒で急激な増加を示す。このことから、 $P_D$  が最初の数秒で急激に増加し、それ以後は、緩やかに増加することがわかる。なお、 $1/\tau_E$  が最初の数秒で急激な増加を示すのは、つぎのように考えられる。2.2 節より

$$\frac{1}{\tau_E} = \frac{4}{a^2} (K_N + K_T)$$

だから、(2.17)、(2.22) を用いて、

$$\Delta \left( \frac{1}{\tau_E} \right) = \frac{4}{a^2} \left[ K_N \left( \frac{\Delta n_e}{n_e} - \frac{1}{2} \frac{\Delta T_i}{T_i} \right) + K_T \left( \frac{7}{2} \frac{\Delta T_i}{T_i} - \frac{\Delta n_e}{n_e} \right) \right] \quad (4.4)$$

となる。最初の数秒間は、イオン温度が低いので (4.4) 式の第 1 項が支配的であるため、電子密度  $n_e$  の変化が主要な寄与をする。その後は、第 1 項と第 2 項の寄与が同程度となるので、 $n_e$  の変化の寄与は第 1 項と第 2 項で相殺され、イオン温度の変化の寄与が支配的となる。しかし、この段階ではイオン温度の変化は緩やかになるので、 $1/\tau_E$  の変化も緩やかとなる。

Bremsstrahlung loss power の変化は、(2.39) より、

$$\Delta (P_{Br}) = P_{Br} \left( \frac{\Delta Z_{eff}}{Z_{eff}} + 2 \frac{\Delta n_e}{n_e} + \frac{1}{2} \frac{\Delta T_i}{T_i} \right) \quad (4.5)$$



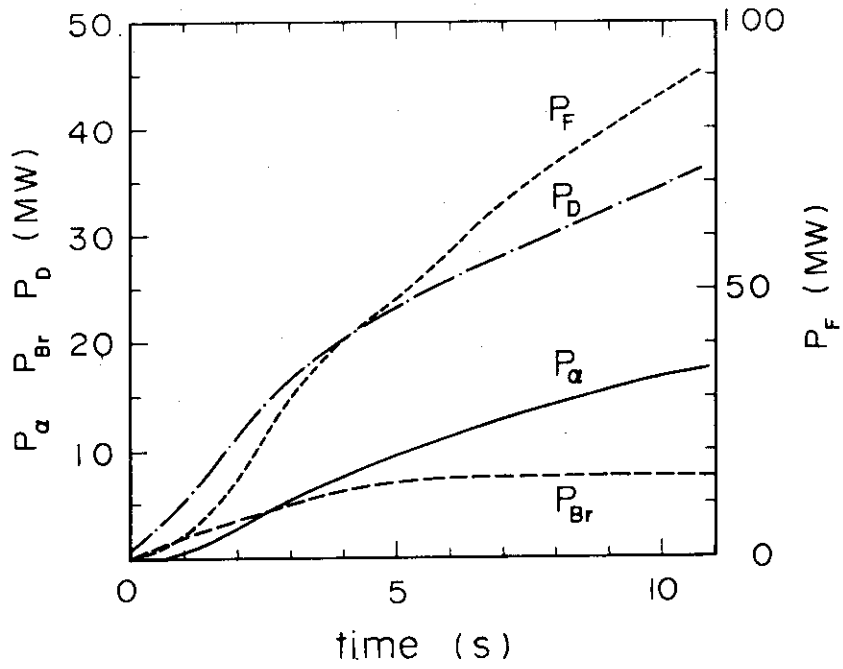


Fig. 4.5 Changes of plasma loss powers and  $\alpha$ -heating power  
 $P_{\alpha}$  :  $\alpha$ -heating power,  $P_{Br}$  : Bremsstrahlung loss power  
 $P_D$  : Diffusion loss power,  $P_F$  : Total fusion power

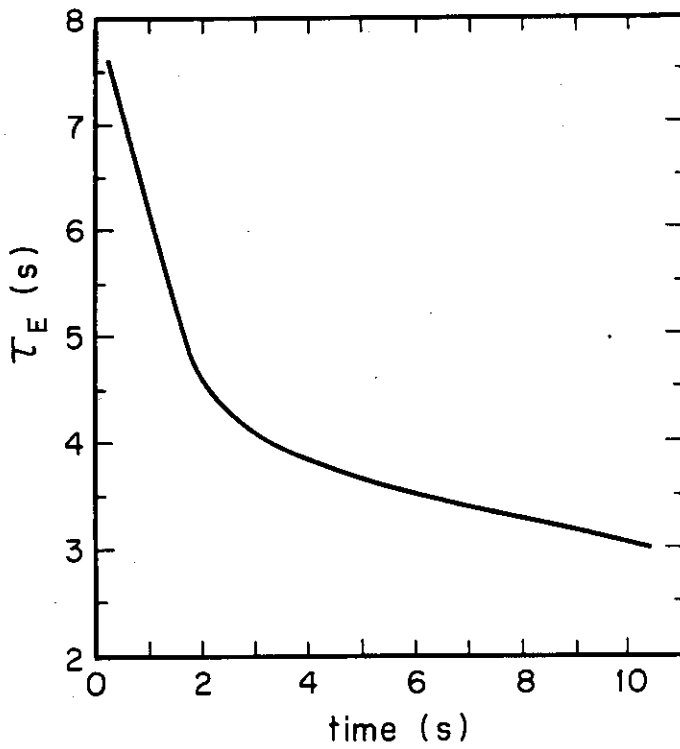


Fig. 4.6 Change of energy confinement time

で与えられる。  $Z_{\text{eff}}$  の変化を図示すると Fig. 4.7 となる。不純物は炭素のみで、初期で約 1%，末期で約 2% である。  $Z_{\text{eff}}$  は、最初の数秒間は急激な増加をする。また、  $n_e$ 、  $T_i$  も同様なので、  $P_{\text{Br}}$  は、最初の数秒間は急激に増大する傾向を示す。その後は、  $P_{\text{Br}}$  がほぼ一定となるのは、  $n_e$  がわずかに減少するが、  $Z_{\text{eff}}$ 、  $T_i$  は緩やかに増加するために、それらの変化量が相殺するからである。

$P_a$  は、(2.29) と (2.30) より、

$$P_a = 10.01 \times \frac{Z_a^2}{A_a} \ell n A \frac{n_e}{T_e^{3/2}} E_a n_a \quad (4.6)$$

となる。  $E_a$ 、  $n_a$  の変化を Fig. 4.8 に示す。ここで用いたモデルでは、  $\alpha$  粒子の生成は核融合反応によるものだけを考慮している。すなわち、(2.4) 式において、  $S_a = 0$  と仮定している。(2.8) と (2.29) から、

$$\frac{d}{dt} (n_a E_a) = E_{a0} n_D n_T \langle \sigma v \rangle - n_a E_a \left( \frac{1}{\tau_{S_a}} + \frac{1}{\tau_{E_a}} \right) \quad (4.7)$$

となる。 Fig. 4.8 で  $E_a$  が約 1 秒の時点で極大になるのは、プラズマ中の  $\alpha$  粒子密度が初期値では、ほぼ零としているため、(4.7) 式からわかるように、核融合反応により生成された 3.52 MeV のエネルギーをもつ  $\alpha$  粒子が、電子にエネルギーを与えること、および体系から逃げるまでに  $1 / \left( \frac{1}{\tau_{S_a}} + \frac{1}{\tau_{E_a}} \right)$  程度の時間を要するためと考えられる。

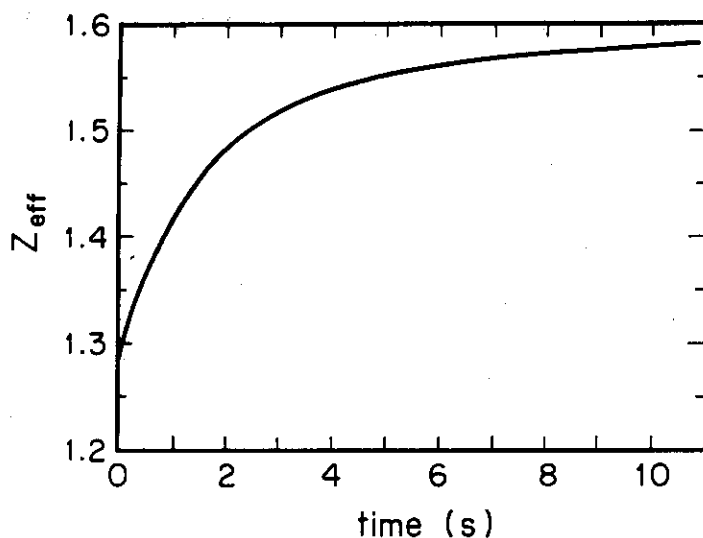


Fig. 4.7 Change of effective charge

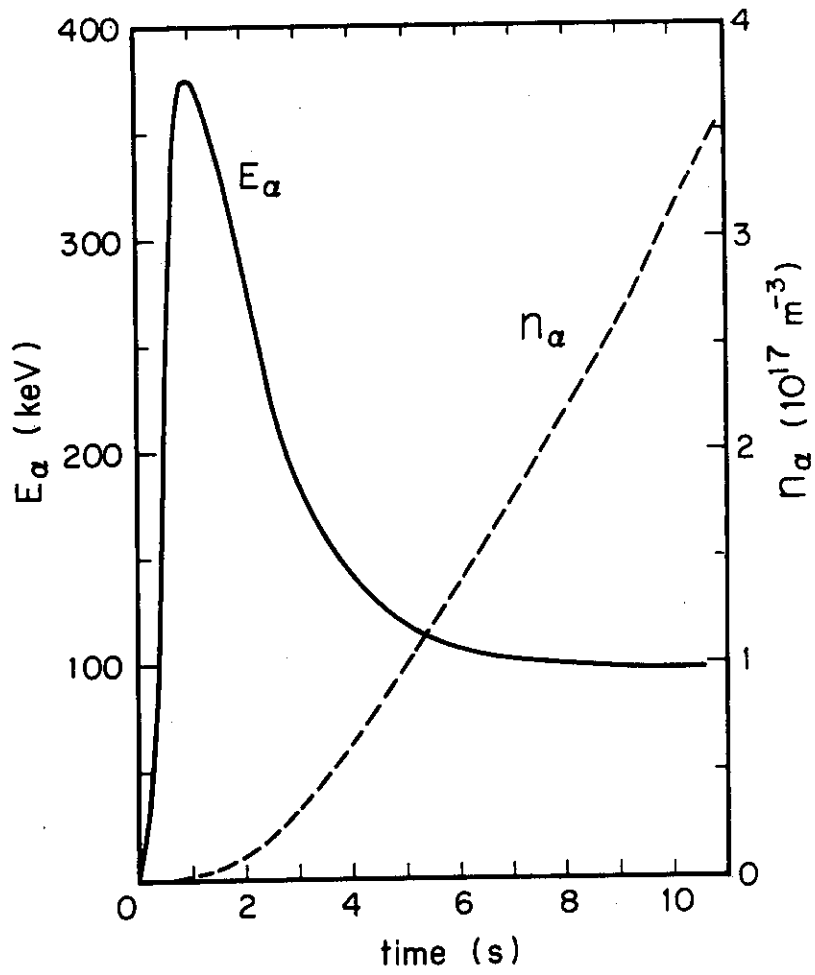


Fig. 4.8 Changes of  $\alpha$ -particle energy and density

## 5. 結 言

第1次予備設計に基づく核融合実験炉の起動におけるプラズマ特性に関する検討を行なった。ジュール加熱によって初期加熱を行ない、つきに中性粒子入射加熱によって平衡運転時のプラズマを実現した。計算モデルは、時間依存性を入れた空間依存のない拡散モデルである。エネルギーおよび粒子の閉じ込め時間の比例則は、新古典拡散、擬古典拡散、捕獲イオン不安定性による異常拡散を併用して用い、プラズマ温度が数keV以下では、新古典拡散または擬古典拡散が支配的であるとし、それ以上の温度では、捕獲イオン不安定性による異常拡散が支配的であるとして用いた。

ジュール加熱の検討結果、初期プラズマ温度 10 eV、初期電子密度  $1.06 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  の条件のもとで、プラズマ周回電圧を 6.5 V、燃料装荷率は重水素と三重水素の和で  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  とし、10秒間の加熱で、プラズマ電流 4 MA、プラズマ温度 1 keV 以上、電子密度  $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  以上を実現できることが示された。

中性粒子入射加熱の検討結果、プラズマ温度 1 keV、電子密度  $4.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  を初期値として、加熱パワー 28 MW、燃料装荷率は重水素と三重水素の和で  $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  を設定して、10秒間の加熱で平衡運転時の値（プラズマ温度 7 keV、電子密度  $1.13 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ）を達成できることが示された。加熱パワー 28 MW は、10秒間の加熱でプラズマを平衡運転時の状態に立ち上がらせるための最少値に近い値と考えられる。

これらの結果は、予じめ設定されたプラズマ電流の立ち上がり時間 10 秒と、核融合反応出力の立ち上がり時間 10 秒という条件を満足するプラズマ起動パターンを与える起動パラメータであり、予備設計値として、とくに電源系の設計、冷却系の設計、加熱装置の設計に反映できるものと考えられる。

以上の結果は、加熱の過程ではプラズマは安定であることを前提として検討したものであり、加熱効率の問題、プラズマ温度の空間分布、プラズマ密度の空間分布等を含めた議論をする必要がある。これらの問題は、1次元の輸送モデルによって検討する必要があり、今後の課題である。

## 謝 辞

この仕事に対して、迫淳室長を始めとする炉設計研究室の諸氏から数多くの教示を載いた。また、森部長を始めとする核融合研究部の方々からも助言を受けた。これらの方々には深く感謝します。

## 5. 結 言

第1次予備設計に基づく核融合実験炉の起動におけるプラズマ特性に関する検討を行なった。ジュール加熱によって初期加熱を行ない、つきに中性粒子入射加熱によって平衡運転時のプラズマを実現した。計算モデルは、時間依存性を入れた空間依存のない拡散モデルである。エネルギーおよび粒子の閉じ込め時間の比例則は、新古典拡散、擬古典拡散、捕獲イオン不安定性による異常拡散を併用して用い、プラズマ温度が数keV以下では、新古典拡散または擬古典拡散が支配的であるとし、それ以上の温度では、捕獲イオン不安定性による異常拡散が支配的であるとして用いた。

ジュール加熱の検討結果、初期プラズマ温度10 eV、初期電子密度 $1.06 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の条件のもとで、プラズマ周回電圧を6.5 V、燃料装荷率は重水素と三重水素の和で $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ として、10秒間の加熱で、プラズマ電流4 MA、プラズマ温度1 keV以上、電子密度 $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上を実現できることが示された。

中性粒子入射加熱の検討結果、プラズマ温度1 keV、電子密度 $4.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を初期値として、加熱パワー28 MW、燃料装荷率は重水素と三重水素の和で $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ を設定して、10秒間の加熱で平衡運転時の値（プラズマ温度7 keV、電子密度 $1.13 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ）を達成できることが示された。加熱パワー28 MWは、10秒間の加熱でプラズマを平衡運転時の状態に立ち上がらせるための最少値に近い値と考えられる。

これらの結果は、予じめ設定されたプラズマ電流の立ち上がり時間10秒と、核融合反応出力の立ち上がり時間10秒という条件を満足するプラズマ起動パターンを与える起動パラメータであり、予備設計値として、とくに電源系の設計、冷却系の設計、加熱装置の設計に反映できるものと考えられる。

以上の結果は、加熱の過程ではプラズマは安定であることを前提として検討したものであり、加熱効率の問題、プラズマ温度の空間分布、プラズマ密度の空間分布等を含めた議論をする必要がある。これらの問題は、1次元の輸送モデルによって検討する必要があり、今後の課題である。

## 謝 辞

この仕事に対して、迫淳室長を始めとする炉設計研究室の諸氏から数多くの教示を載いた。また、森部長を始めとする核融合研究部の方々からも助言を受けた。これらの方々には深く感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) Davis, J.W. and Kulcinski, G.L. : Major Features of D-T Tokamak Fusion Reactor Systems, EPRI472-1 Interim Report (1974)
- 2) Bertolini, E., et al. : Design of a Minimum Size Toroidal DT Experimental Reactor, IAEA-CN-33/G1-1
- 3) Bertolini, B. et al. : Preliminary Design of a Minimum Size of Technical Feasibility Tokamak Fusion Reactor, Proceedings CONF-740402-P1 (1974)
- 4) Stacey, W.M. Jr., et al. : Tokamak Experimental Power Reactor Studies, ANL/CTR-75-2 (1975)
- 5) GAC Fusion Eng. Staff, Experimental Power Reactor Conceptual Design Study, GA-A13534 (1975)
- 6) Roberts, et al. : Oak Ridge Tokamak Experimental Power Reactor Study Reference Design, ORNL-TM-5042 (1975)
- 7) 東稔, 大和 : 核融合実験炉の炉心プラズマのパワーバランス : JAERI-M 6453 (March, 1976)
- 8) 大和, 東稔, 迫 : 核融合実験炉の炉心基本量の選定 : JAERI-M 6484 (March, 1976)
- 9) 炉設計研究室 : 核融合実験炉第1次予備設計 (中間報告書) : JAERI-M 6670 (Aug. 1976)
- 10) K. Sako, et al. : Preliminary Design of a Tokamak Experimental Fusion Reactor : Proc. of Sixth Inter. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-35/I3-1, to be published.
- 11) T. Tone, H. Yamato and K. Maki : Some Considerations on a Plasma in the JAERI Experimental Fusion Reactor : Proc. of the Second ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion (Sept. 1976-Richland) to be published.
- 12) J.F. Etzweiler et al. : Effect of Fuel Injection on a Cyclic  $\beta$ -limited Radiation Dominated Fusion Reactor : ORNL-TM-4083 (June, 1973)
- 13) J. Rand McNally, Jr. et al. : Fusion Dynamics of Lossy Reactor Systems : ORNL-TM-4617 (June, 1974)
- 14) W.M. Stacey, Jr., et al. Tokamak Experimental Power Conceptual Design : ANL/CTR-76-3
- 15) M.N. Rosenbluth, R. Hazeltine and F.L. Hinton : Plasma Transport in Toroidal Confinement Systems : Phys. Flds. 15 116 (1972)
- 16) S. Yoshikawa and N.C. Christofilos, Proc. 4th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Madison 1971), Vol. II, IAEA Vienna 357 (1972)

- 17) B.B. Kadomtsev and O.P. Pogutse : Trapped Particle in Toroidal Systems : Nucl. Fusion 11, 67 (1971)
- 18) T.H. Stix : Plasma Physics 14, 367 (1972)
- 19) S.I. Braginskii : "Reviews of Plasma Physics", Vol. 2, 205 (1965)  
Consultants Bureau, New York.
- 20) L. Spitzer, Jr : "Physics of Fully Ionized Gases", 2nd Ed. Interscience Publishers, New York, P-139 (1967)
- 21) D.J. Rose : On the Feasibility of Power by Nuclear Fusion : ORNL-TM-2204 (May 1968)
- 22) L. Spitzer, Jr. : "Physics of Fully Ionized Gases", 2nd Ed. Interscience Publishers, New York, P-147 (1967)
- 23) T.F. Yang, et al., "The Calculation and Parametric Study of Synchrotron Radiation Loss for Tokamak Reactors", (FDM-49, Nucl. Eng. Dept., Univ. of Wis., July 1973)
- 24) G. Hopkins, "Impurity Radiation Loss Mechanism from Fusion Reactor Plasma", (GA-A12374, Gulf Gen. At. Co., Oct. 1972).
- 25) R.F. Post, J., Nucl. Energy (Part C, Plasma Physics) 3, 273 (1961)