

JAERI-M

7635

核融合実験炉のプラズマ停止の検討

1978年4月

真木 紘一*・東 稔 達三・大和 春海**

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停止の検討

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

真木絃一*・東稔達三・大和春海**

(1978年3月17日受理)

核融合実験炉 (JXFR) を対象として、プラズマの停止を検討した。計算モデルは、時間依存性をもつ1点近似拡散モデルで、エネルギーと粒子の閉じ込めに関する比例則は、イオン温度が数 keV 以下では擬古典拡散が、それ以上では捕獲イオン不安定性異常拡散が支配的であるとして用いた。プラズマの停止に要する時間を20秒とし、この間D粒子のみ注入するものとする。前半の10秒間では、プラズマ温度を7 keV から1 keV、電子密度を $1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ から $\sim 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、プラズマ電流を4 MA から1 MA まで下げて、核融合反応出力を下げた。加熱パワーは平衡運転時の値27 MWから直線的に下げて10秒で0とした。後半の10秒間では、それぞれさらに、100 eV、 $\sim 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、100 kA まで下げて残りのプラズマエネルギーを下げた。駆動型の炉では、加熱パワーを徐々に下げればプラズマ電流を下げることによって、核融合反応の停止とプラズマエネルギーの降下が実現できることが示された。

*) 外来研究員：日立製作所 (株)，エネルギー研究所

**) 外来研究員：東京芝浦電気 (株)，総合研究所

Studies on Plasma Shutdown of JAERI Experimental Fusion Reactor

Koichi MAKI^{*}, Tatsuzo TONE and Harumi YAMATO^{**}

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 17, 1978)

Shutdown of the plasma with a time-dependent one-point model is described. The pseudoclassical scaling law plays a role in the plasma diffusion in the low energy region below several keV and the trapped ion scaling law in the higher energy region. In this shutdown model, only deuterium is inserted during 20-second shutdown process. In the first 10 sec, while the plasma temperature, electron density and plasma current decrease from 7 keV to 1 keV, $1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ to 10^{19}m^{-3} and 4 MA respectively the fusion power falls down with gradual decrease of heating power. During the second 10 sec, while the plasma temperature, electron density and plasma current decrease from 1 keV to 100 keV, 10^{19}m^{-3} to 10^{18}m^{-3} and 1 MA to 100 kA respectively, the plasma thermal energy is removed. Plasma one-turn voltages are -4.0 volt and -0.5 ~ -1.0 volt which fall the plasma current down to 1 MA and 100 kA during the first 10 sec and the second 10 sec, respectively. Decrease of plasma current largely lowers plasma density and energy since particle and energy confinement times decrease as plasma current decreases. Deuterium insertion rate below that in the equilibrium operation little lowers plasma density and energy. This plasma shutdown scheme is effective in driven-type reactors.

Keywords: Experimental Fusion Reactor, Plasma Shutdown, One-point Diffusion Model, Pseudoclassical Diffusion, Trapped Ion Diffusion, Electron Density, Ion Temperature, Plasma Current, Heating Power, Driven Type Reactor

* On leave from Energy research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi, Ibaraki

** 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.....	3
2.1 粒子バランスとエネルギーバランス.....	3
2.2 プラズマの拡散と閉じ込め時間.....	5
2.3 加熱パワー.....	6
2.4 輻射損失パワー.....	7
2.5 燃料注入率.....	8
3. 核融合反応出力の降下.....	9
3.1 プラズマ電流の降下.....	9
3.2 D, T 注入率変化の時間遅れの影響.....	12
3.3 結果と検討.....	17
4. 残留プラズマ熱エネルギーの降下.....	21
4.1 プラズマ電流の降下.....	21
4.2 重水素注入率の影響.....	22
4.3 結果と検討.....	26
5. 結 言.....	28
謝 辞.....	28
参考文献.....	29
付 録.....	30

C O N T E N T S

1. Introduction	1
2. Calculational model for plasma	3
2.1 Particle balance and energy balance	3
2.2 Plasma diffusion and confinement time	5
2.3 Heating power	6
2.4 Radiation loss power	7
2.5 Fueling rate	8
3. Decrease of fusion power	9
3.1 Decrease of plasma current	9
3.2 Effect of delayed time of changing in D & T fueling rate .	12
3.3 Results and discussions	17
4. Decrease of remaining plasma thermal energy	21
4.1 Decrease of plasma current	21
4.2 Effect of D fueling rate	22
4.3 Results and discussions	26
5. Conclusion	28
Acknowledgement	28
References	29
Appendix	30

1. 緒 言

トカマク型核融合炉のプラズマ停止に関する検討は、ANL, GA社, ORNLの各研究所から出されている核融合実験炉の設計報告書^{(1),(2),(3)}においては、簡単な記述にとどまっている。国内では、M.Ohta and H.Yamato⁽⁴⁾によって、重水素のみ注入する方法を用いた自己点火型核融合炉のプラズマ停止が検討された。

この報告書では、核融合実験炉のプラズマ停止パターンを決定するために行なった検討結果を記す。この核融合実験炉は、日本原子力研究所の核融合炉設計研究室が1975年4月以来進めてきた第1次予備設計に基づくものである(以下、JXFRと記す)⁽⁵⁾。JXFRの概略は付録に記す(Table A 1参照)。JXFRは、駆動型の炉であり、平衡運転時には常時27 MWの加熱パワーの入射が必要である。このため、加熱パワーの入射がなければ、プラズマのもつ熱エネルギーの変化率は負となる。したがって、駆動型の炉では、外部からの加熱パワーの入射をしないかまたは小さくすれば、プラズマの熱エネルギーは減少するので、プラズマの温度と密度を下げるができる。これに対して、自己点火型の炉では、プラズマの熱エネルギーの変化率はゼロに近いので、そのままでは、プラズマの熱エネルギーは減少しない。そこで、プラズマの内部加熱パワーを小さくするため、前述した文献(4)のように、重水素のみ平衡運転時よりも多量に注入することによって、プラズマ温度を下げる方法を探る。このように、炉のタイプによって、プラズマの停止パターンが異なってくる。JXFRの燃料注入法は、プラズマの周囲に存在する燃料粒子からなる中性ガス層(以下ガスブランケット⁽⁵⁾と記す)とプラズマとの相互作用によって、ガスブランケットを介してプラズマ中に燃料注入を行なう。したがって、重水素、トリチウムは直接プラズマ中に注入されずに、まずガスブランケット中に注入される。そこで、ガスブランケット中に燃料が注入されてからプラズマ中に注入されるまでには時間遅れが生じる。この時間遅れの影響と重水素注入率の影響の検討は、停止過程開始と同時に外部からの加熱パワー入射を停止した場合をベースに進めた。

プラズマ以外の設計側からの要請として、プラズマ停止に要する時間を20秒と設定している。また、核融合反応出力は、前半の10秒間で降下させるものとしている。この報告書では、つぎのような停止過程を探った。前半の10秒間で、プラズマ温度を7 keV(平衡運転時の値)から約1 keVまでに、電子密度を $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (平衡運転時の値)から $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度までに降下させることによって、核融合反応出力を降下させた。後半の10秒間では、さらに、プラズマ温度を100 eVまでに、電子密度を $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度までに降下させることによって、残りのプラズマ熱エネルギーを降下させた。停止過程の間は、ガスブランケットへのトリチウム注入は行なわず、重水素のみ注入し、後半の10秒間は加熱パワーは入射しないものとした。前半10秒間に関して加熱パワーを徐々に減少させた場合を中心に、ガスブランケットへのトリチウム注入を行なった場合も検討し、加熱パワーの入射、トリチウムの注入の必要性を検討した。

解析に用いた計算モデルは、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に関する比例則は、プラズマ温度が数keV以下では、新古典拡散⁽⁶⁾また

は擬古典拡散⁽⁷⁾が、それ以上では捕獲イオン不安定性による異常拡散⁽⁸⁾が支配的であるとして用いた。

プラズマを記述する計算モデルについては第2章で述べ、核融合反応出力の降下については第3章で、残留プラズマ熱エネルギーの降下については第4章で述べ、結言のところでは、結果のまとめ、問題点と今後の課題を述べた。

2. プラズマの計算モデル

プラズマの停止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 α 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) α 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、 α -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} 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} 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} m^{-3}),

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

α -イオン密度 n_α (10^{20} 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} 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燃料注入率 ($10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$),

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_α : α -イオンの混入率 — 燃料中に含まれている α 粒子が燃料注入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, α 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, α 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, α 粒子の3つに分けて記述する。

電子温度 T_e (keV)

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

イオン温度 T (keV)

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

α - 温度 T_α (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_α : α - 加熱パワー ($10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

f_α : α - 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, τ_{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⁽⁹⁾。

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

ただし, A_i は i (D, T, 不純物, α) の質量数であり, $\ell n A$ は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

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

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・輻射損失パワー ($10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$), (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, α 粒子のエネルギー閉じ込め時間

E_{α_0} : 核融合反応によって発生する α 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 τ_i , エネルギー閉じ込め時間 τ_{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。

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

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⁽⁶⁾

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

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⁽⁷⁾

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

ただし, C_P は定数 ($= 2.5 \times 10^{-3}$)

• 捕獲イオンによる拡散⁽⁸⁾

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

ただし, C_T は定数 ($= 1.089 \times 10^2$)

B_i : 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^{(1), (2)}。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。

$$V = L_P \frac{dI_P}{dt} + R_P I_P \quad (2.23)$$

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、 $I_P = I_{P0}$ 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。

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

ただし、 μ_0 は真空の透磁率で $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ である。 R_P はプラズマ抵抗で、

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

と表わされる。ここに、 η は次式で与えられる抵効率である。(文献(13)のP.139)

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

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_{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。

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

(2) α -加熱パワー

α -加熱パワー P_α 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、

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

で与えられる⁽¹⁹⁾。\$\alpha\$-加熱パワーのうち電子の加熱に使われる割合 \$f_\alpha\$ は、つぎの式で示される⁽¹⁴⁾。

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

$$\text{ただし、} X_\alpha = \ell n \left(\frac{r_\alpha + 1}{r_\alpha} \right) \quad (2.32)$$

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

〔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⁽¹⁴⁾。

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

$$\text{ただし、} X_N = \ell n \frac{r_N + 1}{r_N}$$

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

\$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。(文献(13)の P.147)

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

・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⁽⁶⁾。

$$P_S = 1.054 \times 10^{-5} \frac{n_e^{1/2}}{a^{1/2}} B_t^{1/2} T_e^{3/4} \left(1 + \frac{T_e}{204}\right) \cdot (1 - r_{\text{wall}})$$

($10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$) (2.40)

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^{(6), (7)}。

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

(2.41)

ここで、 Z_{e2} 、 Z_{e3} は、次のように定義される。

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

$$Z_{e3} = \sum_i n_i Z_i^6 / \sum_i n_i Z_i \quad (2.43)$$

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

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

2.5 燃料注入率

D, T 燃料は、プラズマの周囲に配置された中性の D, T から成るガスブランケットに注入され、ガスブランケットとプラズマとの相互作用によってプラズマ内に注入されるものとする。このため、外部からのガスブランケットへの D, T 燃料注入率を変化させても、プラズマ内への燃料注入率が外部からのものとは直ちには同じにならず、ある時間遅れがある。燃料注入率を増加させる場合は、プラズマとガスブランケットの相互作用によるリサイクリングの割合が 1 に近いので、計算上は無視できる時間遅れでプラズマへの燃料注入率が増加するものと考えてよいが、燃料注入率を減少させる場合は、排気系の容量との関係から、注入率減少の時間遅れは無視できないと考えられるので、つぎのようなモデルを用いて考慮する。ある時刻 t_0 までは D, T は一定の燃料注入率 S_D^0 、 S_T^0 であったとし、時刻 t_0 でガスブランケットへの燃料注入率がそれぞれ S_D^1 、 S_T^1 に変化したとすると、時刻 t_0 から時間 t だけ経た時点のプラズマへの燃料注入率 S_D 、 S_T ((2.1)、(2.2) 式中の燃料注入率) は、次式で与えられるものとする。

$$S_D = (S_D^1 - S_D^0) (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_D}}) + S_D^0 \quad (2.44)$$

$$S_T = (S_T^1 - S_T^0) (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_T}}) + S_T^0 \quad (2.45)$$

ただし、 λ_D 、 λ_T は、D, T のプラズマへの注入率変化の時定数で、注入率の変化が半分となる時間 $(\lambda_{1/2})_D$ 、 $(\lambda_{1/2})_T$ は、 $\lambda_{D \text{ or } T}$ で表わすと、

$$(\lambda_{1/2})_{D \text{ or } T} = \lambda_{D \text{ or } T} \ln 2 \quad (2.46)$$

と定義される。

3. 核融合反応出力の降下

プラズマ停止過程の20秒間のうち、前半10秒間は核融合反応出力を降下させる過程である。この章では、平衡運転時のプラズマから核融合反応出力をゼロとするまでの過程を検討する。プラズマ温度を7 keV から1 keV までに、電子密度を $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ から $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに降下させることを目標とする。はじめに、外部加熱パワーを入射せず、ガスブランケットへのトリチウム注入をしない場合について、ガスブランケットへの燃料注入率の変化によるプラズマへの注入率変化の時間遅れの影響を検討する。つぎに、外部加熱パワーを平衡運転時の値から徐々に減少させた場合、さらに、ガスブランケットへのトリチウムの注入を続けた場合を検討し、外部加熱の必要性、トリチウム注入の必要性を議論し、核融合反応出力の降下として適当なプラズマ停止パターンについて考察する。

3.1 プラズマ電流の降下

核融合反応出力を降下させる過程は、プラズマ温度と電子密度を下げる過程であるが、以下に示す理由から、プラズマ電流も下げる必要がある。

まず、プラズマ特性の観点から考える。プラズマの閉じ込めという点では、この実験炉のプラズマ停止過程における温度領域を考えて、捕獲イオン不安定性による異状拡散と擬古典拡散の両方を考慮する必要がある。プラズマ電流 I_p (MA) は、

$$I_p = 5 \frac{B_t R}{qA^2} = 5 a B_p \quad (3.1)$$

ここで、 $A = R/a = 1/\epsilon$ でアスペクト比を示す。拡散係数は、2.2節の式(2.21)を用いて、

$$K_p = C_p \frac{25 a^2 n_e Z_{\text{eff}} \ell n A}{T_e^{1/2} I_p^2} \quad (3.2)$$

となり、プラズマ電流の二乗に逆比例する。捕獲イオン不安定性による異状拡散係数は(2.22)からわかるように、 I_p にはよらない。プラズマの閉じ込め時間 τ は、

$$\tau = \frac{a^2}{4(K_p + K_T)}$$

であるから、プラズマの温度と密度を下げるためには、拡散係数を大きくすればよいが、プラズマ温度を下げると、拡散係数 K_T の方は急激に小さくなる。そこで、プラズマ電流を下げ K_p の方を大きくすることによって、これを相殺しさらには拡散係数 ($K_p + K_T$) を大きくすることが望ましい。この点から、プラズマ電流を降下させることが必要である。これを計算例で示そう。プラズマ電流を4 MAとして一定に保った場合と、4 MAから約1 MAまでほぼ直線的に10秒間で降下させた場合について、それぞれのプラズマ停止過程におけるイオン温度と電子密度の変化をFig. 3.1に示す。このグラフは、重水素の注入率としては平衡運転時と同じ値 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ とし、ガスブランケットへのトリチウムの注入は停止過程の開始と同時に中止し、プラズマへの

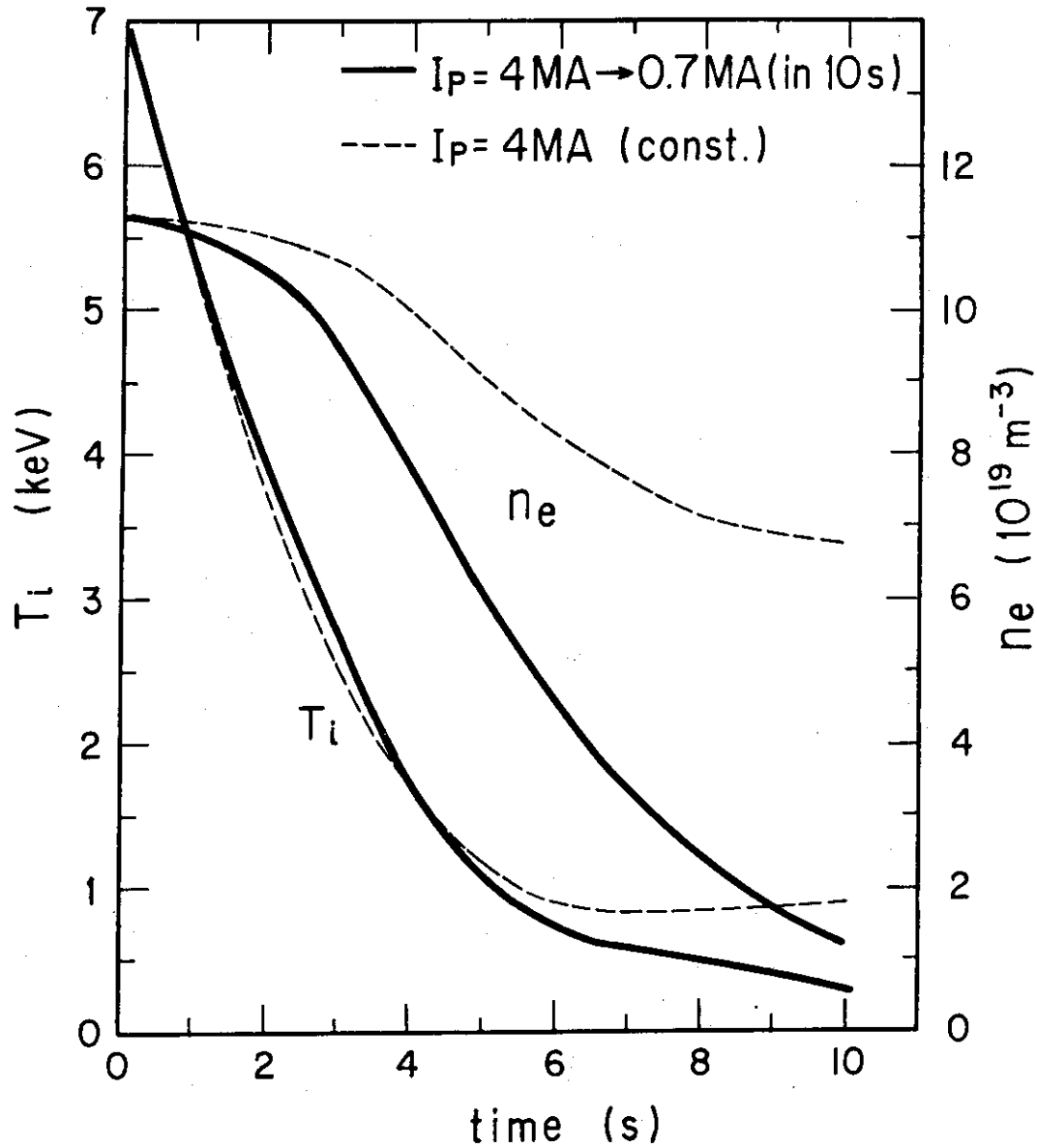


Fig. 3.1 Comparison in ion temperature and electron density of the case where plasma current is kept constant with those of the case where plasma current is fallen down 4 MA to 0.7 MA in 10 s.

注入率変化の時定数 $\lambda_{1/2}$ は 3 秒 ($\lambda = 4.2$ 秒) として計算した結果である。なお、プラズマ電流を 0.7 MA までに低下させた計算例では、プラズマ周回電圧を -4.0 volt とした。この図から、電子密度 n_e は、プラズマ電流を 0.7 MA までに低下させた場合は、10 秒後では、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに低下しているが、プラズマ電流を一定にした場合は、電子密度 n_e は約 $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までしか降下しない。また、イオン温度に関しては、プラズマ電流を一定にした場合と、0.7 MA までに降下させた場合とを比較して、6 秒までは両者ともほとんど同じであるが、それ以後は、後者の場合はゆるやかに低下し、10 秒後では 0.5 keV 以下となる。これに対して、前者の場合は、1 keV 程度で一定となってしまう。前者の場合はジュール加熱パワーが 10 秒の時点で 4 MW の大きさをもっている（後者の場合は 1 MW 以下）ので、このことがプラズマエネルギーが低下しない原因の一つと考えられる。この点から、プラズマ温度と電子密度の降下に応じて、プラズマ電流を降下させる必要がある。

つぎに、変流器コイルの設計上の問題から考えよう。プラズマ電流を一定にしておくとするれば、変流器コイルの電流をさらに大きく変化させていくことによって、磁束変化を維持していかなければならない。その上、プラズマ温度が降下すると、プラズマの抵抗が大きくなるので（式 (2.26)）、プラズマにより大きな起電力を与える必要があり、そのために変流器コイルの磁束変化はさらに大きなものとしなければならない。したがって、変流器コイルには、より大きな電流変化を必要とすることになり、このことは、変流器コイルの最大電流をより大きなものとしなければならないことを意味する。これは、設計上望ましいことではない。炉を停止した時点では、プラズマ電流は零とするのであるから、核融合反応出力を降下させる過程においてプラズマ電流を一定に保つ必要はなく、プラズマ温度と電子密度の降下に応じて、プラズマ特性上許される範囲内でプラズマ電流を降下させることが合理的である。以上の点からも、プラズマ温度と電子密度の降下に応じてプラズマ電流を降下させる停止パターンを採る必要がある。

10 秒後のプラズマ電流値をどのように設定するかを考察する。プラズマ電流値を制約するものとして、上述したように、変流器コイル側からの要請としては低い方が望ましいと言える。プラズマの平衡という点から考えると、ポロイダルベータ値からの制約がある。ポロイダルベータ値 β_p は、次式で与えられる。

$$\beta_p = \frac{P}{\beta_p^2 / 2\mu_0} \quad (3.3)$$

P はプラズマ圧力で $P = \sum_i n_i T_i$ ($i = e, D, T$, イオン), ポロイダル磁場 B_p は (2.5.46) より $B_p = 0.2 I_p / a$ だから

$$\beta_p = 2\pi \times 10^{-5} a^2 \frac{\sum_i n_i T_i}{I_p^2} \quad (3.4)$$

ただし、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ である。前半の 10 秒間では、イオン濃度を 7 keV から 1 keV までに、電子密度を $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに降下させるので、10 秒後の時点でのプラズマ圧力 P_{10} は、平衡運転時のプラズマ圧力 P_0 と比べて、

$$P_{10} \sim \frac{1}{70} P_0$$

である。従って、ポロイダルベータ値 β_p が平衡運転時の値よりも大きくならないためのプラズ

マ電流の下限は、

$$I_p > \frac{4}{\sqrt{70}} \sim 0.5 \text{ (MA)}$$

である。プラズマ周回電圧を一定にすれば、プラズマ電流はほぼ直線的に降下するが、イオン温度と電子密度は直線的には降下しない。そこで、停止過程の途中でも、ポロイダルベータ値が平衡運転時の値を越えないために、10秒後の時点のプラズマ電流をその下限の2倍の値である1MAに設定する。ポロイダルベータ値としては、平衡運転時の値の1/4の値である。このように設定すれば、停止過程の途中でも、 $\sum_i n_i T_i$ の降下の仕方が、前半10秒後の値($\sum_i n_i T_i)_{t=10}$ と停止過程開始時点の値($\sum_i n_i T_i)_{t=0}$ とを結んだ直線からずれても、その4倍までのずれが許されることになる。

停止過程開始後10秒の時点で、プラズマ電流を1MAに降下させるために必要なプラズマ周回電圧の目安を求めよう。(2.24)より、

$$L_p = 1.257 \times 10^{-6} \times 6.75 \times \{ \ln(4.5 \times 8) - 1.75 \} = 15.65 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

(2.25), (2.26)より、

$$R_p = 1.621 \times 10^{-9} \frac{1.6 \times 16}{T_e^{3/2}} \times \frac{2 \times 6.75}{1.5^2} \approx 2.5 \times 10^{-7} / T_e^{3/2} \text{ (\Omega)}$$

ただし、 $\ln A \approx 16$, $Z_{\text{eff}} \approx 1.6$ (C不純物2%)とした。前半10秒間の停止過程においては、 $T_i^{3/2}$ の平均として、 $T_i^{3/2} \approx 4 \text{ keV}$, $I_p \approx 2.5 \text{ MA}$ とすれば、

$$R_p I_p \approx \frac{2.5 \times 10^{-7}}{4} \times 2.5 \times 10^6 \approx 0.16 \text{ (Volt)}$$

また、 $\Delta t = 10 \text{ s}$, $\Delta I_p = -3 \text{ MA}$ だから、

$$L_p \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \approx 1.5 \times 10^{-5} \times \frac{-3 \times 10^6}{10} \approx -4.5 \text{ (Volt)}$$

(2.23)より、 $V_p \approx -4.3 \text{ Volt}$ となる。 $V_p = -4.3 \text{ Volt}$ を目安として、実際に停止過程10秒間のサーベイ計算をした結果から、 $V_p = -4.0 \text{ Volt}$ を得た。以下の前半の停止過程では、 $V_p = -4.0 \text{ Volt}$ を用いる。

3.2 D, T注入率変化の時間遅れの影響

前半の停止過程の初期値をTable 3.1にまとめておく。この条件のもとで、外部加熱パワー入射をプラズマ停心過程開始と同時に停止した場合をベースに、重水素とトリチウムの注入率の違いによる影響およびプラズマへの注入率変化の時間遅れの影響を検討する。

プラズマ停止過程が開始されると同時に、ガスブランケットへのトリチウムの挿入を止め、重水素の注入率を減少させた場合、プラズマへのトリチウムと重水素の注入率がどれだけの時間遅れを伴うかという点については、現時点では不明である。真空ポンプの容量、プラズマとガスブランケットの相互作用が大きな因子となっているが、時間遅れに関する定量的な評価はここではしない。ここでは、数個の時定数に対して、その違いがプラズマの停止にどのような影響を与えるかを検討する。時定数の違いの影響は、ガスブランケットへの重水素の注入率をどこまで低

下させるかによって当然異なるので、重水素の注入率と時定数 $(\lambda_{1/2})_{D \text{ or } T} (= \lambda_{D \text{ or } T} * \ell n 2)$ をパラメトリックに変化させて、それぞれの場合のイオン温度、電子密度、プラズマ電流の変化を調べてみよう。なお、重水素とトリチウムの注入率減少の時定数は等しいものとして取り扱う。すなわち、 $(\lambda_{1/2})_D = (\lambda_{1/2})_T = \lambda_{1/2}$ とする。時定数 $\lambda_{1/2}$ として、1秒、3秒、6秒（時定数 λ で、それぞれ、1.4秒、4.3秒、8.7秒）の3種類を設定し、Table 3.2に6つの場合を示す。ケースa～cは、燃料注入率変化の時定数の違いによる影響を検討するためのもので、ケースdは、a～cと比較することによって、トリチウムの注入が必要かどうかを検討するためのものである。さらに、ケースe, fは、a～cと比較することによって、中性粒子入射加熱が必要かどうかを検討するためのケースである。重水素の注入率が $0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ということは、停止過程が開始されると同時にガスブランケットへの重水素の注入を停止することであるが、プラズマへの注入は、ガスブランケット中に残っている重水素がリサイクルされることによって、直ちには停止されずに、時定数 $\lambda_{1/2}$ で減衰していく。また、重水素の注入率が $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ということは、フラットトップ運転時の注入率をそのまま引き続けることに相当する。加熱パワーとしては、10秒間で27 MW から 0 MW まで直線的に減少させた場合を考える。

以上の6ケースについて、イオン温度、電子密度、核融合反応出力の変化について、それぞれ Fig. 3.2, Fig. 3.3, Fig. 3.4 に示す。

最初に、燃料注入率変化の時定数の違いによる影響を考察しよう。Fig. 3.2, Fig. 3.3をみると、10秒後の時点では、ケースa～cともほぼ同じ値となるが、時定数 $\tau_{1/2} = 1$ 秒のケースCは、4秒後の時点で、イオン温度が9 keVまで上昇して極大値をとり、電子密度も4秒後までは、ケースa, bよりも急激な減少をみせる。また、ケースCは、核融合反応出力の減少の仕方も、ケースa, bと比較して、3～4秒の間で急激な減少を示す。ケースa, bは、イオン温度、電子密度、核融合反応出力の減少の仕方に、とくに大きな相異はない。このことから、燃料注入率変化の時定数が数秒以上であれば、プラズマ停止過程におけるプラズマ特性への影響は小さいと言える。

つぎに、トリチウムの注入の必要性については、トリチウムの注入率と重水素の注入率を同じとしたケースdと、ケースa（時定数 $\tau_{1/2} = 6$ 秒はケースdと同じ）を比較すると、イオン温度、電子密度、核融合反応出力の減少の仕方に大きな相異はない。核融合反応出力の減少の仕方については、1～2秒で、フラットトップ時の出力のほとんどを失うような急激な減少の仕方は、第1壁やブランケット容器に過大な熱応力を荷する原因となる。すなわち、核融合反応出力の減少に対応して、第1壁やブランケット内の冷却材の流量を調整して、壁内外の温度差の変化を極力抑えることが必要であるが、この場合の流量調整の応答性として、1～2秒で全反応出力のほとんどを失うような急激な変化に反応することは困難である。流量調整の応答性という観点からは、できる限り緩慢な変化が望ましいが、5秒～10秒程度なら反応できるものと考えられる。以上の点から、核融合反応出力の減少がケースa, b程度ならトリチウムを注入する必要はないと考えられる。

最後に、中性粒子入射加熱の必要性について検討しよう。中性粒子入射加熱をしないケースe, fとケースa, bを比較する。時定数と重水素注入率が同じであるケースeとaをみると、電子密度の減少の様相は大差ないが（Fig. 3.3）、ケースeは、イオン温度が5秒間で1 keVまで降

Table 3.1 Initial conditions for the first 10 second shutdown process.

Ion temperature (keV)	7.0
Electron density (10^{20}m^{-3})	1.13
Deuterium density (10^{20}m^{-3})	0.5
Tritium density (10^{20}m^{-3})	0.5
Impurity (%)	2.0
Z_{eff}	1.6
D insertion rate ($10^{19} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)	1.5
T insertion rate ($10^{19} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)	1.5

Table 3.2 Parameters in case a ~ f.

case	time constant (s)	d insertion rate ($\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)	t insertion rate ($\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$)	heating
a	6.0	1.5×10^{19}	0.0	with NBI
b	3.0	1.5×10^{19}	0.0	with NBI
c	1.0	1.5×10^{19}	0.0	with NBI
d	6.0	8.0×10^{18}	8.0×10^{18}	with NBI
e	6.0	1.5×10^{19}	0.0	without NBI
f	1.0	0.0	0.0	without NBI

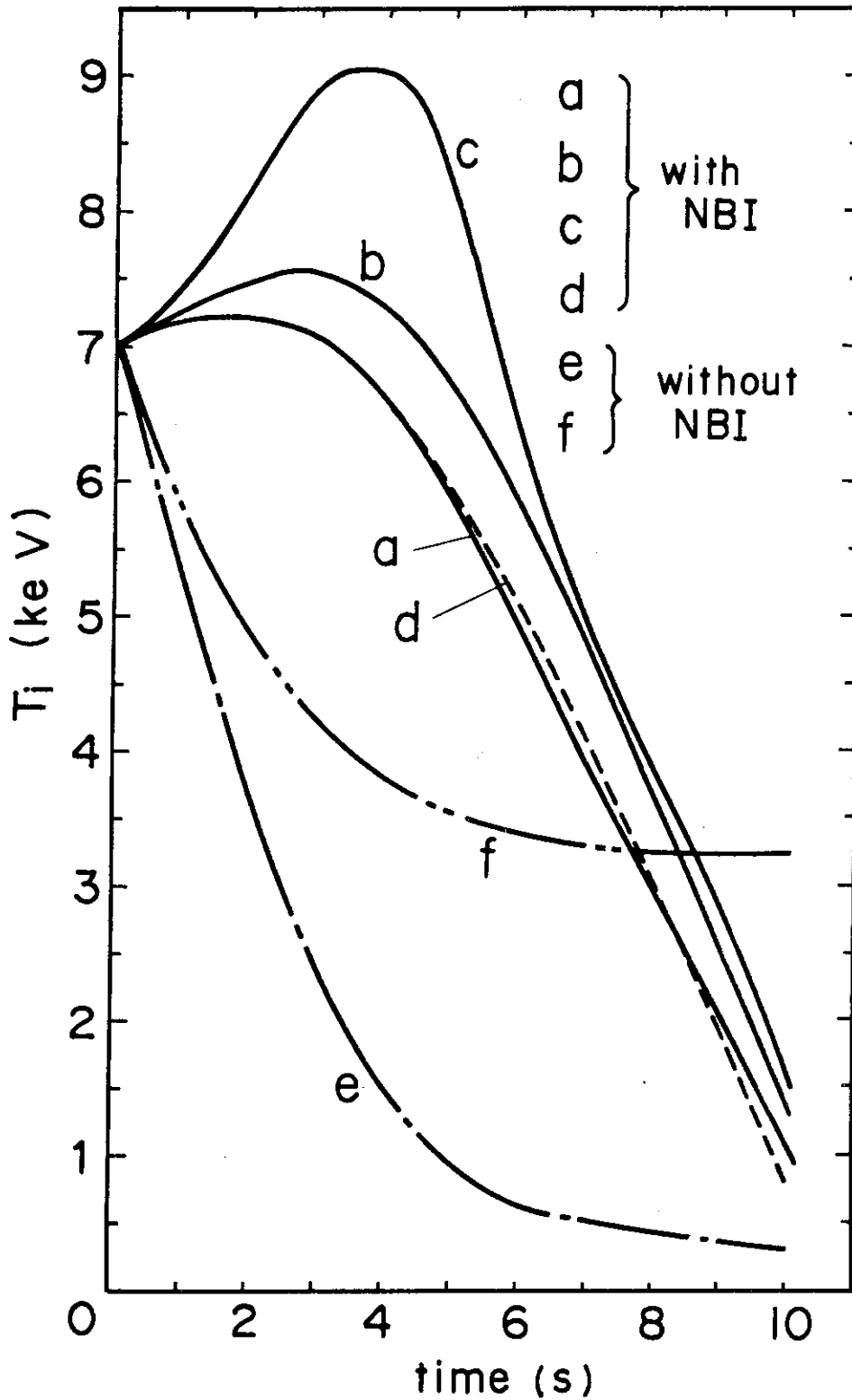


Fig. 3.2 Comparison in changes of ion temperature T_i in following cases;

- a : $\lambda_{1/2}=6s$, $SD1=1.5 \times 10^{19} m^{-3} s^{-1}$, $ST1=0.0 m^{-3} s^{-1}$ with NBI
- b : $\lambda_{1/2}=3s$, $SD1=1.5 \times 10^{19} m^{-3} s^{-1}$, $ST1=0.0 m^{-3} s^{-1}$ with NBI
- c : $\lambda_{1/2}=1s$, $SD1=1.5 \times 10^{19} m^{-3} s^{-1}$, $ST1=0.0 m^{-3} s^{-1}$ with NBI
- d : $\lambda_{1/2}=6s$, $SD1=ST1=8 \times 10^{18} m^{-3} s^{-1}$ with NBI
- e : $\lambda_{1/2}=6s$, $SD1=1.5 \times 10^{19} m^{-3} s^{-1}$, $ST1=0.0 m^{-3} s^{-1}$ without NBI
- f : $\lambda_{1/2}=1s$, $SD1=ST1=0.0 m^{-3} s^{-1}$ without NBI

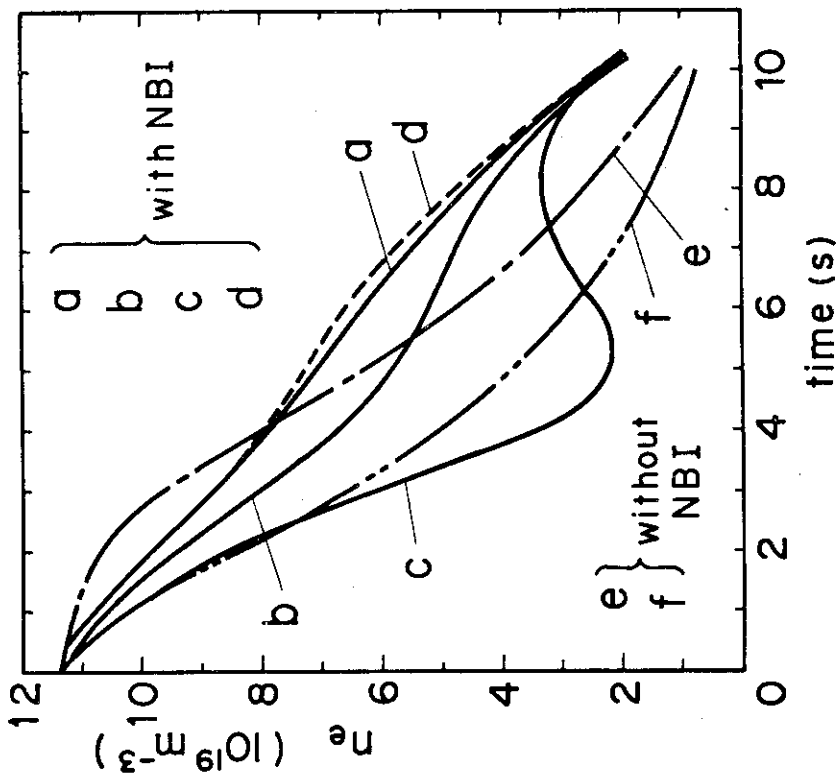


Fig. 3.3 Comparison in changes of electron density n_e in following cases;

- a : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- b : $\lambda_{1/2}=3s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- c : $\lambda_{1/2}=1s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- d : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=STI=8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- e : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ without NBI
- f : $\lambda_{1/2}=1s$, $SDI=STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ without NBI

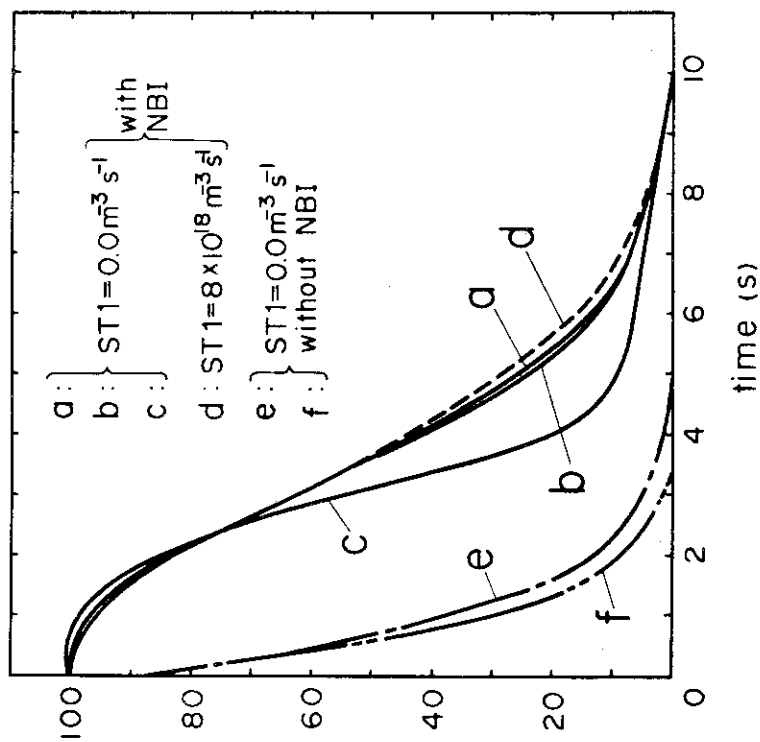


Fig. 3.4 Comparison in change of fusion power with NBI to that without NBI.

- a : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- b : $\lambda_{1/2}=3s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- c : $\lambda_{1/2}=1s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- d : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=STI=8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ with NBI
- e : $\lambda_{1/2}=6s$, $SDI=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ without NBI
- f : $\lambda_{1/2}=1s$, $SDI=STI=0.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ without NBI

下する (Fig. 3.3)。このことから当然予想されるように核融合反応出力は、急激な減少を示す (Fig. 3.4)。ケース f は、プラズマへの燃料注入変化の時定数が 1 秒で、重水素とトリチウムのガスブランケットへの注入率を 0 とした場合であるが、このケースも、ケース e と同様、核融合反応出力の急激な減少を示す。以上の点から、核融合反応出力の緩やかな減少ということを考慮して、中性粒子入射加熱パワーを停止過程開始と同時に零にしないで、停止過程においても加熱が必要であり、加熱パワーとしては徐々に減少させることが必要である。

ここで、以上の 6 ケースの中で、代表的な例として、ケース a, d, e について、プラズマ電流の変化を比較しよう。Fig. 3.5 に 10 秒間のプラズマ電流 I_p の変化を示す。ケース a, d, e も大きな相異はなく、10 秒後に約 1 MA まで減少していることがわかる。

以上の検討をまとめると、プラズマへの燃料注入変化の時定数は数秒以上ならその影響を考慮する必要はない。この範囲の時定数では、トリチウムの注入も必要なく、中性粒子入射加熱パワーとしては徐々に減少させ、プラズマ電流を 4 MA から 1 MA まで減少させることによって、イオン温度を 1 keV までに、電子密度を $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに 10 秒間で降下させる停止過程を採ることが可能である。

3.3 結果と検討

ここで、典型的な例として、ケース a を採り挙げて、そのパワーバランスを考察しよう。はじめに、ケース a について、イオン温度、電子密度、重水素密度、トリチウム密度の降下の様子を Fig. 3.6 に示す。このような降下の状況のときの加熱パワーと損失パワーの変化を Fig. 3.7 に示す。この図に示した物理量は、中性粒子入射加熱パワー P_{NBI} 、アルファ加熱パワー P_{α} 、ジュール加熱パワー P_{OH} 、制動輻射損失パワー P_{Br} 、ライン輻射損失パワー P_{L} 、拡散によって体系から逃がれるパワー P_{D} 、これらの損失パワーの総和である全損失パワー P_{TL} 、さらに全損失パワーから全加熱パワーを差し引いた正味の損失パワー P_{NL} である。正味の損失パワー P_{NL} は、プラズマのもつ熱エネルギー減少率 $\Delta E_p / \Delta t$ を表わす。 $t = 0 \text{ s}$ では、 $P_{\text{NL}} = 0 \text{ MW}$ となり、 $P_{\text{TL}} = P_{\text{NBI}} + P_{\alpha} + P_{\text{OH}}$ が成り立っている。駆動型の炉では、外部加熱パワーを定常運転時の値より小さくすれば、 $P_{\text{NL}} > 0$ となる。すなわち、 $\Delta E_{\text{pth}} / \Delta t < 0$ となる。したがって、駆動型の炉の場合は、外部加熱パワーを減少させれば、プラズマ熱エネルギーは降下することになる。これに対して、自己点火型の炉の場合は、停止過程初期においては全損失パワーが、内部加熱パワー（主としてアルファ加熱パワー）よりも大きくはないので、初期においては、プラズマ熱エネルギーを減少させることはできない。このため、初期においては、直接にプラズマ熱エネルギーを減少させることはしないで、まず、アルファ加熱パワーを減少させるためにプラズマ温度を降下させる。そのために、1つの方法としては、重水素を平衡運転時よりも大量に注入することによって、電子密度を増大させ、プラズマ温度を下げる。この過程を経ることによって、内部加熱パワーを全損失パワーよりも小さくできるので、プラズマ熱エネルギー変化率 $\Delta E_{\text{pth}} / \Delta t$ を $\Delta E_{\text{pth}} / \Delta t < 0$ とすることができる。以上の点から、自己点火型の炉と比較して、駆動型の炉の核融合反応の停止は容易であると言える。

以上の検討では、ブランケット内の流量調整の応答性という観点から、核融合反応出力の急激

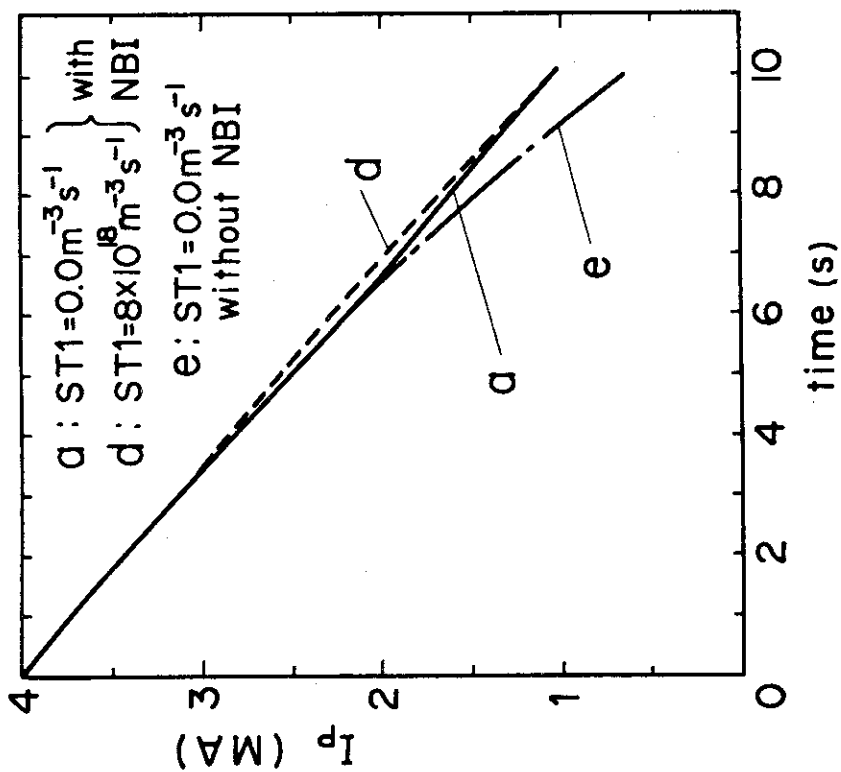


Fig. 3.5 a : $\lambda_{1/2}=6\text{s}$, $SDI=1.5\times 10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$, $ST1=0.0\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ with NBI
 b : $\lambda_{1/2}=6\text{s}$, $SDI=8\times 10^{18}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ with NBI
 e : $\lambda_{1/2}=6\text{s}$, $SDI=1.5\times 10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$, $ST1=0.0\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ without NBI

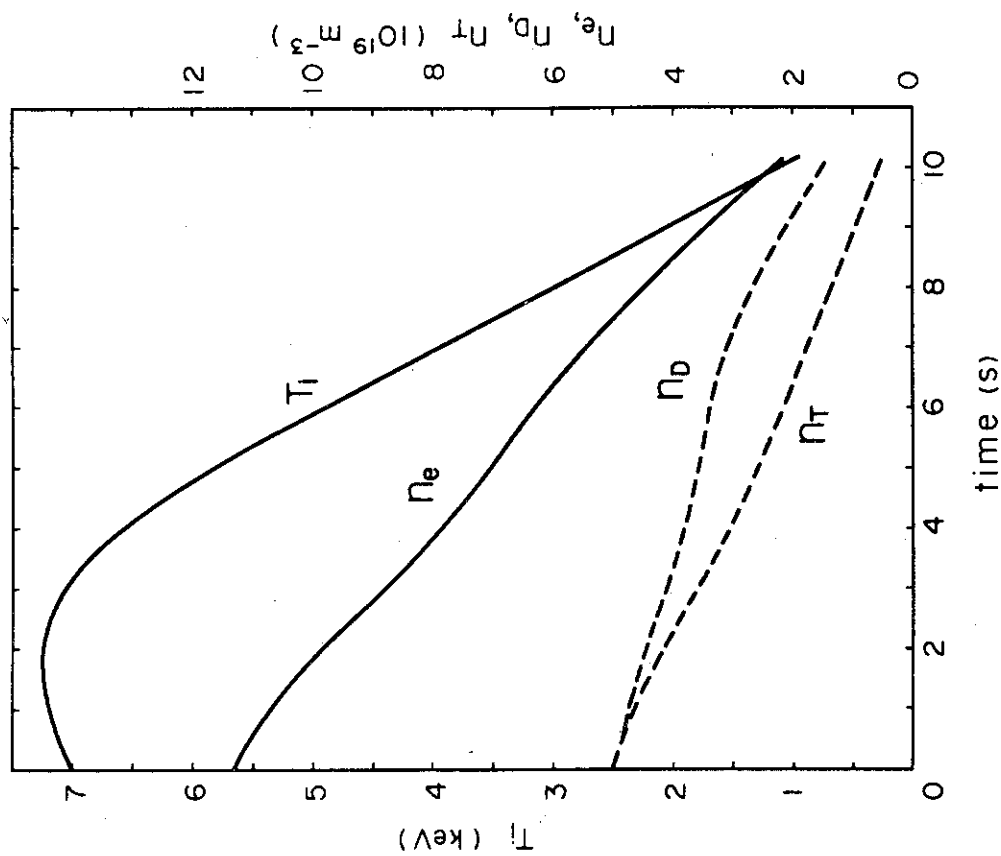


Fig. 3.6 Changes of ion temperature, deuterium density, tritium density and electron density in the case where neutral beam injection heating power is linearly fallen down in 10 seconds.

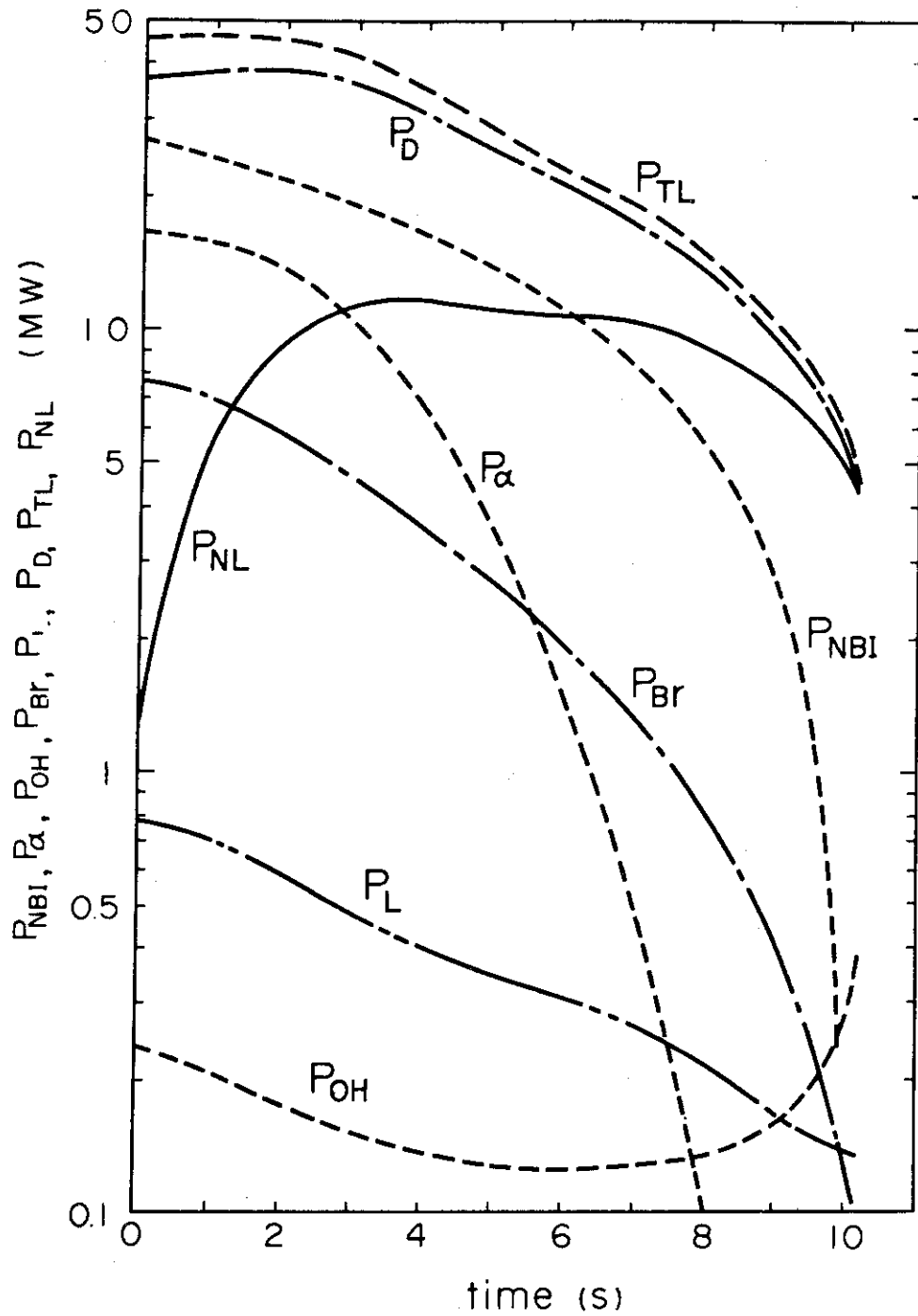


Fig. 3.7 Changes of heating powers and loss powers in the case where neutral beam injection heating power is linearly fallen down in 10 seconds.

P_{NBI} : Neutral beam heating power	P_{α} : α -heating power
P_{OH} : Joule-heating power	P_{Br} : Bremsstrahlung loss power
P_L : Line radiation loss power	P_D : diffusion loss power
P_{TL} : Total loss power	P_{NL} : net loss power

な減少は望ましくないと考えて、停止過程においても外部加熱が必要であると結論した。第1壁の前面にプロテクション壁を設けるような構造の炉を考える場合は、ブランケット内の流量調整によって第1壁の温度変化を調整する必要があるないので、核融合反応出力の減少は必ずしも緩やかである必要はない。Fig. 3.4で示したケースe, fの場合でも停止パターンとしては可能であり、停止過程においては中性粒子入射加熱を必要としない。

4. 残留プラズマ熱エネルギーの低下

前半の10秒間で核融合反応を停止させた。この時点では、プラズマの残留熱エネルギーは約1 MJ (Fig. 3.4) であり、イオン温度は1 keV, 電子密度は $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, プラズマ電流は1 MA である。後半の10秒間で、イオン温度を100 eV 程度, 電子密度を $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度までに降下させ、残りのプラズマ熱エネルギーを降下させる。

4.1 プラズマ電流の降下

まず、プラズマ電流を後半10秒間でどの値まで降下させるかを決定する。プラズマ電流を制約するものとしては、前半の場合と同様で、変流器コイルの設計上からの要請としては、できるだけ低い値の方が望ましい。また、プラズマの平衡という点から考えると、やはり、ポロイダルベータ値が平衡運転時の値よりも大きくはならないようにプラズマ電流を設定することが必要である。後半の10秒後の時点におけるプラズマ圧力 P_{20} は、イオン温度を100 eV, 電子密度を $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ とすると、平衡運転時のプラズマ圧力 P_0 と比べて、

$$P_{20} \sim \frac{1}{7000} P_0$$

である。ポロイダルベータ値が平衡運転時の値よりも大きくならないためのプラズマ電流の下限は、

$$I_p > \frac{4}{\sqrt{7000}} \sim 0.05 \text{ (MA)}$$

である。前半と同様の理由から2倍して、0.1 MA と設定する。

停止過程の後半10秒間で、プラズマ電流1 MA から0.1 MA まで降下させるために必要なプラズマ周回電圧の目安を求めよう。(2.24) より、

$$L_p = 1.565 \times 10^{-5} \text{ (H)}$$

また、(2.25), (2.26) より、プラズマ抵抗 R_p は、 $\ln A = 16$, $Z_{\text{eff}} = 1.6$ として、

$$R_p \approx 2.5 \times 10^{-7} / T_e^{3/2} \text{ (}\Omega\text{)}$$

であるから、 $T_e^{3/2}$ の平均として、 $T_e^{3/2} \approx 0.35$, I_p の平均として $I_p \approx 0.6 \text{ MA}$ とすると、

$$R_p I_p \approx \frac{2.5 \times 10^{-7}}{0.35} \times 0.6 \times 10^6 \approx 0.43 \text{ (Volt)}$$

また、 $\Delta t = 10 \text{ s}$, $\Delta I_p = -0.9 \text{ MA}$ であるから、

$$L_p \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \approx 1.56 \times 10^{-5} \times \frac{-0.9 \times 10^6}{10} \approx -1.4 \text{ (Volt)}$$

となる。従って、プラズマ周回電圧 V_p は、

$$V_p \approx -1.0 \text{ (Volt)}$$

である。この値を目安として、以下の計算では、 $V_p = -1.0, -0.5 \text{ Volt}$ の2つの場合について

計算する。

4.2 重水素注入率の影響

後半10秒間の停止過程の初期値として、イオン温度、電子密度は先に記したように、それぞれ、1 keV, $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であるが、前半の停止過程終了時点の重水素注入率は、 $0.0 \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ のほぼ中間を採って、 $8.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ を後半の初期値SD0とする。また、後半の停止過程では、重水素注入率の変化の時定数の違いによる計算をすることは止めて、時定数 $\lambda_{1/2} = 3$ 秒として計算する。前半の結果によれば、時定数が3秒以上の計算では、時定数の違いによるプラズマ停止への影響は、とくに考える必要のないことが示されたので、後半でもそのことが当然予想される。もし、時定数の違いによる影響が大きければ、 $\lambda_{1/2} = 3 \text{ s}$ とした場合でも、重水素注入率の違いによる影響が大きく現われるので、時定数の違う計算を行う必要があるかどうかのチェックができる。以上の点を考慮して、後半10秒間の過程の初期値をTable 4.1のように設定する。重水素とトリチウムの密度の値は、前半の停止問題で、 $\lambda_{1/2} = 3 \text{ s}$, $\text{SD1} = 8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ とした場合に前半10秒経過した時点における値に近い値とした。また、重水素とトリチウムの注入率に関しても同様である。

Table 4.1 Initial conditions for the latter 10 second shutdown process.

Ion temperature (keV)	1.0
Electron density (10^{19} m^{-3})	1.12
Deuterium density (10^{19} m^{-3})	0.8
Tritium density (10^{19} m^{-3})	0.2
Impurity (%)	2.0
Z_{eff}	1.6
D insertion rate ($10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)	8.0
T insertion rate ($10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)	2.0

ガスブランケットへの重水素の注入率SD1については、 $8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ の3つの場合を計算する。プラズマ周回電圧を-0.5, -1.0 Voltとした場合のイオン温度の変化をそれぞれFig. 4.1, Fig. 4.2に、電子密度の変化をそれぞれFig. 4.3, Fig. 4.4に、プラズマ電流の変化をそれぞれFig. 4.5, Fig. 4.6に示す。

まず、イオン温度の変化をみると、プラズマ周回電圧が-0.5 Voltの場合(Fig. 4.1)は、重水素注入率の違いによって、20秒の時点では約0.2 keVの拡がりを示すが、-1.0 Voltの場合(Fig. 4.2)は、18秒の時点で、重水素注入率の違う3つの場合とも0 keV近くに降下してしま

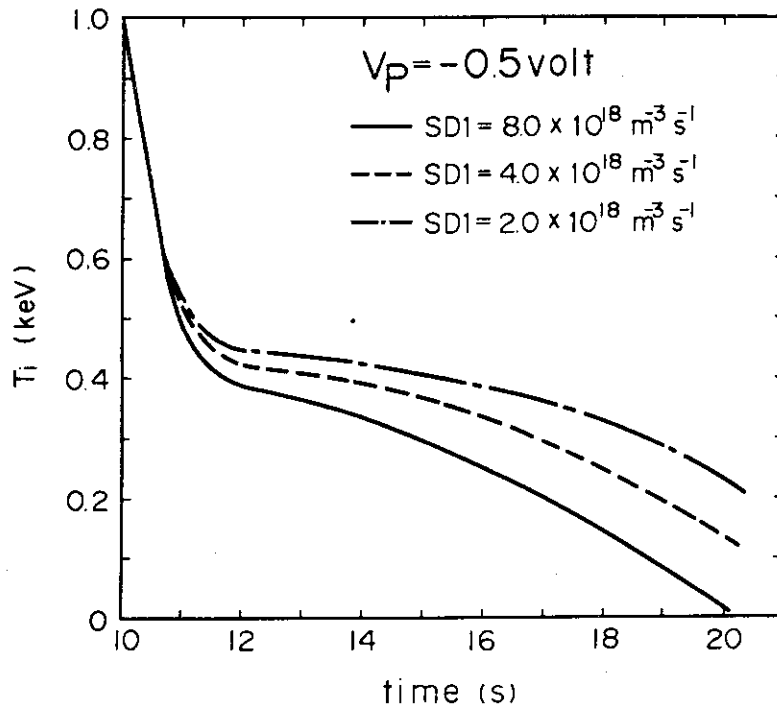


Fig. 4.1 Changes of ion temperatures for various deuterium insertion rates in $V_p = -0.5$ volt.

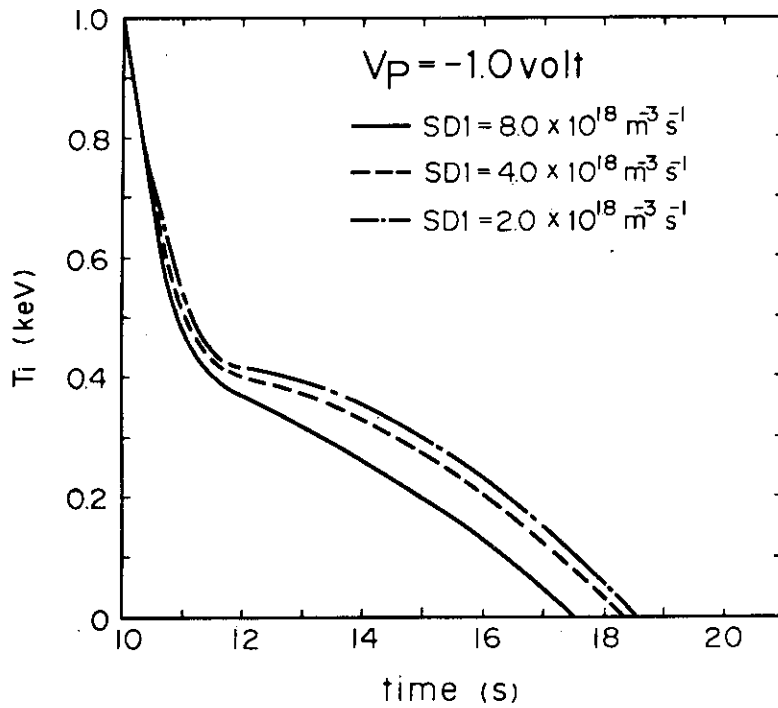


Fig. 4.2 Changes of ion temperatures for various deuterium insertion rates in $V_p = -1.0$ volt.

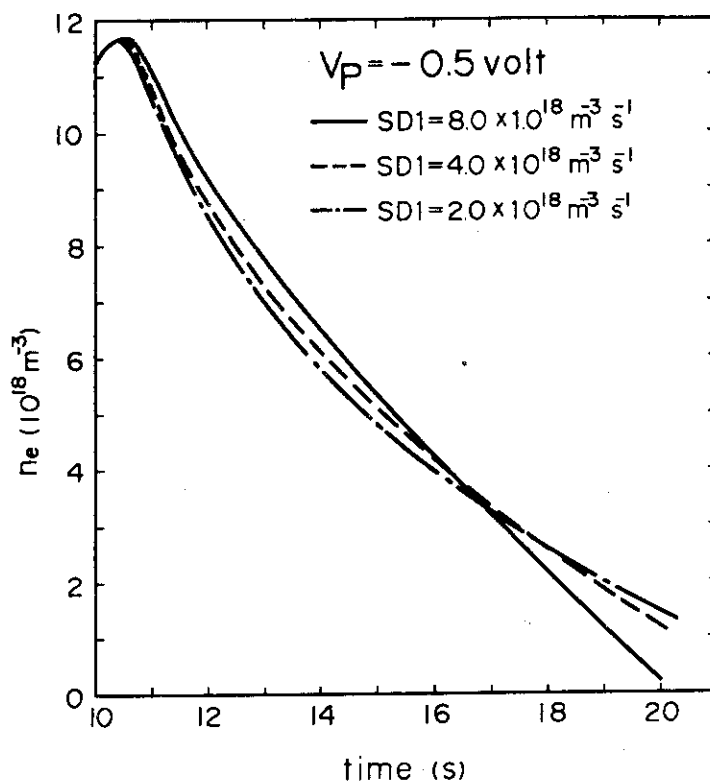


Fig. 4.3 Changes of electron densities for various deuterium insertion rates in $V_p = -0.5$ volt.

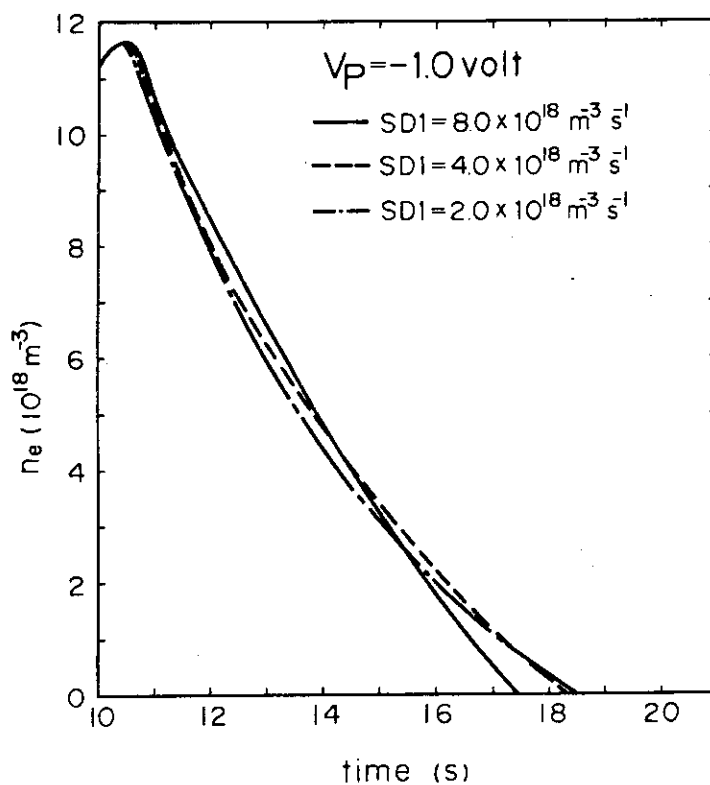


Fig. 4.4 Changes of electron densities for various deuterium insertion rates in $V_p = -1.0$ volt.

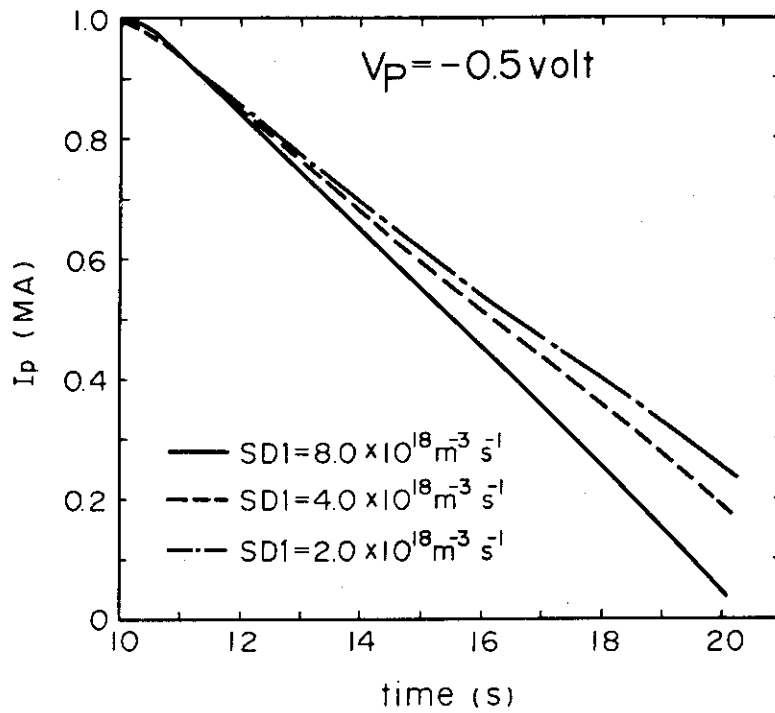


Fig. 4.5 Changes of plasma currents for various deuterium insertion rates in $V_p = -0.5$ volt.

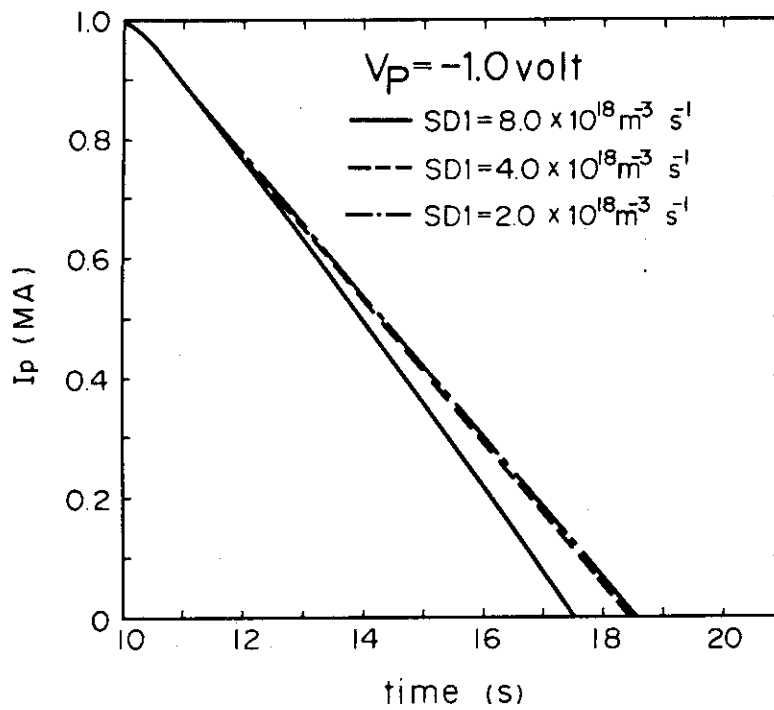


Fig. 4.6 Changes of plasma currents for various deuterium insertion rates in $V_p = -1.0$ volt.

う。この点については、電子密度の場合も同様で、 $V_p = -1.0$ Volt の場合は18秒で0に近くなる。 $V_p = -0.5$ Volt の場合は、重水素の注入率の違いによる影響は、20秒の時点で $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度の拡がりとなるが、その途中での拡がりはいオン温度の場合よりも小さく、 $V_p = -1.0$ Volt の場合の途中の時点における拡がりとは大差はない。プラズマ電流の降下の仕方もやはり同様である。 $V_p = -0.5$ Volt の場合は、重水素の注入率の違いによる影響は、20秒の時点で約0.2 MAの差を生じるが、どの場合も、プラズマの停止という目標は達成しているものと考えてよい。したがって、この項の初めに記した、時定数の違いによる影響を改めて検討する必要はなく、時定数として数秒以上であれば、プラズマの停止には問題となることはない。

4.3 結果と検討

ここで、代表的な場合について、プラズマの熱エネルギーの降下を図示しよう。例として、 $V_p = -1.0$ Volt, $SD1 = 8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ の場合、 $V_p = -0.5$ Volt, $SD1 = 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ の場合、 $V_p = -0.5$ Volt, $SD1 = 8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ の場合について Fig. 4.7 に示す。これらの3つの場合は、それぞれ、計算した結果の中では、プラズマ熱エネルギーが最も除去された場合と、最も除去されない場合、およびその中間の場合である。最も除去されない場合でも、20秒の時点では50 kJ 以下に降下できることが示されている。プラズマの熱エネルギーがこの程度となった時点で、プラズマがリミタ等にあたって消滅したとしても、この熱エネルギーによって、リミタ等が損傷されることはないものと考えられるので、プラズマの停止過程の終了点としては、とくに支障はない。

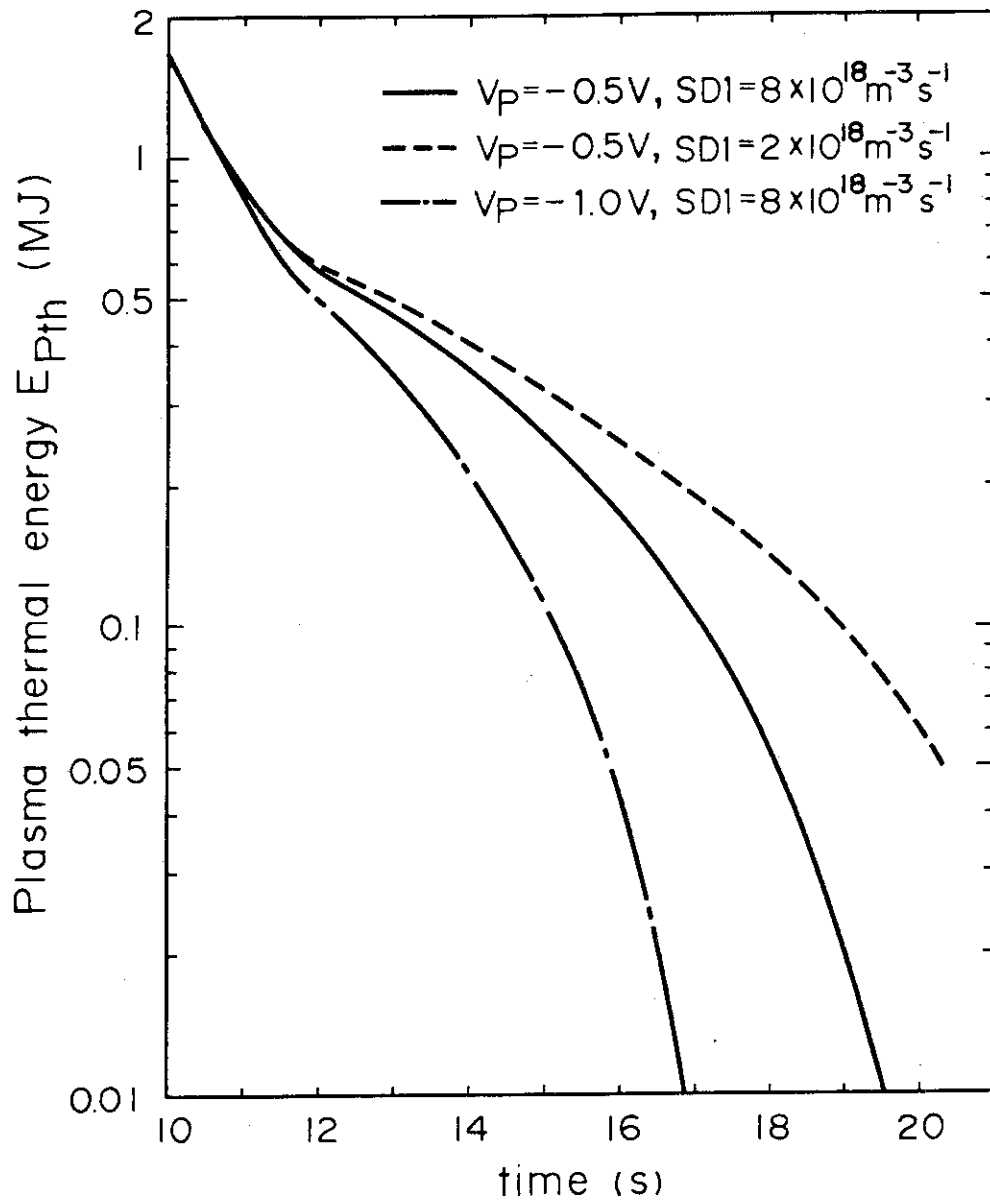


Fig. 4.7 Changes of plasma thermal energies in 3 typical cases.

5. 結 言

以上の検討結果を簡単にまとめ、最後に、問題点と今後の課題を記す。

プラズマ停止過程の検討結果、核融合反応出力の降下については、ガスブランケットへの重水素の注入率は平衡運転時と同じとし、トリチウムの注入は停止過程開始と同時に停止し、プラズマ周回電圧を -4.0 Volt として、プラズマ電流を 4 MA から 1 MA まで降下させ、イオン温度、電子密度を平衡運転時の値からそれぞれ 1 keV, $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに降下させて、核融合反応出力を降下させることができた。この過程で、外部加熱パワーを平衡運転時の値 27 MW から徐々に降下させれば、出力を緩やかに降下できることが示された。第1壁前面にプロテクション壁をもつような炉の場合には、核融合反応出力を急速に減少させてもよく、この場合は停止過程では必ずしも外部加熱を必用としない。また、残留プラズマエネルギーの降下については、プラズマ周回電圧を $-1.0 \sim -0.5$ Volt として、プラズマ電流を 1 MA から 0.1 MA まで降下させ、イオン温度を 100 eV までに、電子密度を $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ までに降下させて、プラズマ熱エネルギーを 50 kJ 以下に降下できることが示された。

以上の解析に用いた計算モデルは、時間依存性を入れた1点近似モデルであり、エネルギーおよび粒子の閉じ込めに関する比例則は、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、それ以上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。プラズマ特性諸量は一点近似の取り扱いとなっているので、停止の全過程にわたって、プラズマ特性諸量を空間的なプロファイルも考慮して取り扱った場合には、プラズマの閉じ込め、粒子およびエネルギーバランスにおけるプラズマ特性量は変更されることが考えられ、入射加熱パワー、燃料注入率は修正されることになろう。しかし、この報告書に示した基本的な考え方は変わらない。これらの諸量を把握するには、1次元モデルによる解析が必要であり、現在、そのための計算コードを開発中であり、第2次設計にその結果を反映したい。また、高速の中性粒子、 α 粒子の減速モデルによる中性粒子入射加熱、 α 加熱を取り扱う必要があり、今後、これをモデル化して計算に導入したい。また、不純物のイオン化、再結合、荷電交換は、プラズマ温度の低い起動時におけるパワーバランスに重要な影響を与えるので、これらをモデル化して計算に考慮できるようにしたい。

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、核融合研究部の方々からも助言を受けた。これらの方々へ深く感謝します。

5. 結 言

以上の検討結果を簡単にまとめ、最後に、問題点と今後の課題を記す。

プラズマ停止過程の検討結果、核融合反応出力の降下については、ガスブランケットへの重水素の注入率は平衡運転時と同じとし、トリチウムの注入は停止過程開始と同時に停止し、プラズマ周回電圧を -4.0 Volt として、プラズマ電流を 4 MA から 1 MA まで降下させ、イオン温度、電子密度を平衡運転時の値からそれぞれ 1 keV、 $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までに降下させて、核融合反応出力を降下させることができた。この過程で、外部加熱パワーを平衡運転時の値 27 MW から徐々に降下させれば、出力を緩やかに降下できることが示された。第1壁前面にプロテクション壁をもつような炉の場合には、核融合反応出力を急速に減少させてもよく、この場合は停止過程では必ずしも外部加熱を必用としない。また、残留プラズマエネルギーの降下については、プラズマ周回電圧を $-1.0 \sim -0.5$ Volt として、プラズマ電流を 1 MA から 0.1 MA まで降下させ、イオン温度を 100 eV までに、電子密度を $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ までに降下させて、プラズマ熱エネルギーを 50 kJ 以下に降下できることが示された。

以上の解析に用いた計算モデルは、時間依存性を入れた1点近似モデルであり、エネルギーおよび粒子の閉じ込めに関する比例則は、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、それ以上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。プラズマ特性諸量は一点近似の取り扱いとなっているので、停止の全過程にわたって、プラズマ特性諸量を空間的なプロファイルも考慮して取り扱った場合には、プラズマの閉じ込め、粒子およびエネルギーバランスにおけるプラズマ特性量は変更されることが考えられ、入射加熱パワー、燃料注入率は修正されることになる。しかし、この報告書に示した基本的な考え方は変わらない。これらの諸量を把握するには、1次元モデルによる解析が必要であり、現在、そのための計算コードを開発中であり、第2次設計にその結果を反映したい。また、高速の中性粒子、 α 粒子の減速モデルによる中性粒子入射加熱、 α 加熱を取り扱う必要があり、今後、これをモデル化して計算に導入したい。また、不純物のイオン化、再結合、荷電交換は、プラズマ温度の低い起動時におけるパワーバランスに重要な影響を与えるので、これらをモデル化して計算に考慮できるようにしたい。

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、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。

References

- (1) Stacey, W.M. Jr., et al.: ANL/CTR-76-3
- (2) GAC Fusion Eng. Staff: GA-A13534 (1975)
- (3) Roberts, M., et al.: ORNL-TM-5042 (1975)
- (4) Ohta, M. and Yamato, H.: JAERI-M 5569 (1974)
- (5) 迫 淳, 他: JAERI-M 6670 (1976)
- (6) Rosenbluth, M.N., et al.: Phys. Flds. 15, 116 (1972)
- (7) Yoshikawa, S. and Christofilos, N.C.: Proc. 4th Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Madison 1971), vol. II, IAEA Vienna, 357 (1972)
- (8) Kadomtsev, B.B. and Pogutse, O.P.: Nucl. Fusion 11, 67 (1971)
- (9) Stix, T.H.: Plasma Physics 14, 367 (1972)
- (10) Braginskii, S.I.: Reviews of Plasma Physics, vol. 1, 205 (1965)
- (11) Sako, K. et al.: Proc. of 6th Inter. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-35/I3-1
- (12) Tone, T., Yamato, H. and Maki, K.: Proc. of 2nd ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion (Sept. 1976 Richland)
- (13) Spitzer, L. Jr.: "Physics of Fully Ionized Gases", 2nd Ed. Interscience Publishers, New York, (1962)
- (14) Rose, D.J.: ORNL-TM-2204 (May, 1968)
- (15) Yang, T.F., et al.: UWFDM-49, Nucl. Eng. Dept., Univ. of Wis. (1973)
- (16) Hopkins, G.: GA-A12374, Gulf Gen. At. Co. (Oct. 1972)
- (17) Post, R.F.J.: Nucl. Energy (Part C, Plasma Physics) 3, 273 (1961)

Table A.1 Main design parameters of the JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)⁽⁵⁾

Operation Mode		Toroidal field magnet	
Fusion power (MW)	100	Number of coils	16
Operation period(s)	420	Bore, Width/Height (m)	7/11
Burn time(s)	300	Magnetomotive force (MAT)	203
Load factor	0.5	Max. field strength (T)	12
Duty factor	0.7	Stored energy (GJ)	60
Reactor dimensions		SCM material	Nb ₃ Sn
Major radius (m)	6.75	Refrigerator capacity (MW)	5.4
Plasma radius (m)	1.5	Primary winding	
First wall radius (m)	1.75	Number of coils	22
Plasma volume (m ³)	300	Magnetomotive force (MAT)	60
Plasma		Maximum field intensity (T)	8
Mean temperature (keV)	7	Stored energy (GJ)	2.1
Mean density (10 ¹⁴ cm ⁻³)	1.1	Flux change (Wb)	140
Effective charge	1.6	SCM material	NbTi
Confinement time (s)	2.9	Vertical field magnet	
Injection power (MW)	27	Number of coils	12
Toroidal field (T)	6	Magnetomotive force (MAT)	±8
Safety factor	2.5	Maximum field intensity(T)	8
Poloidal beta	2.2	Field intensity (T)	0.26
Toroidal beta	0.017	at plasma center	
Plasma current (MA)	4	Stored energy (GJ)	0.5
Reactor Structure		SCM material	NbTi
Reactor module/Reactor	8	Neutral beam injector	
Blanket cells/Reactor module	284	Number of ion sources	48
Injection and evacuation hole/Reactor module	1	Deuterium beam energy (keV)	200
Nominal max. 1st wall temp. (°C)	540	Ion beam output (MW)	240
Materials		Injection power (MW)	33
Structural material	316SS	Power efficiency	0.40
Blanket fertile material	Li ₂ O	Power supply (MW)	
Reflector material	Stainless steel	for Toroidal coils	0.6
Neutronics		for Poloidal coils	6
Neutron current at 1st wall (n cm ⁻² s ⁻¹)	7.6×10 ¹²	for Refrigerator of SCM	
Neutron wall loading (MW m ⁻²)	0.17	(Toroidal, Poloidal, IES)	12
First wall displacement damage rate (dpa y ⁻¹)	1.1	for Neutral beam injector	85
Max. helium production rate in 1st wall (appm y ⁻¹)	13	for Vacuum exhaust system	
Max. hydrogen production rate in 1st wall (appm y ⁻¹)	38	(Main pump, NBI pump)	3
Tritium breeding ratio	0.9	for Blanket cooling system	40
Nuclear heating per DT neutron (MeV n ⁻¹)	16.1	for Auxiliary system	13
Total induced activity at one hour after shutdown (Ci) (after one year operation)	7.3×10 ⁷	Total power	160
SCM irradiation effects		Fuel circulation system flow rate(mgs ⁻¹)	
Max. copper displacement (dpa y ⁻¹)	9.0×10 ⁻⁶	Tritium insertion rate	17.5
Max. nuclear heating rate (W cm ⁻³)	6.2×10 ⁻⁵	Deuterium insertion rate	11.7
Total nuclear heating in SCM (kW)	0.68	Helium exhaust rate	0.24
		Cooling system	
		Number of loops	4
		Coolant, Pressure (kg cm ⁻²)	He, 10
		Inlet/Outlet temp. (°C)	300/500
		Flow rate (kg/s)	143
		Secondary system	He, air-cooled
		Tritium inventory (kg)	
		Fuel recirculating system	0.3
		Tritium recovery system including blanket	0.1
		Total inventory	
		including storage	0.5

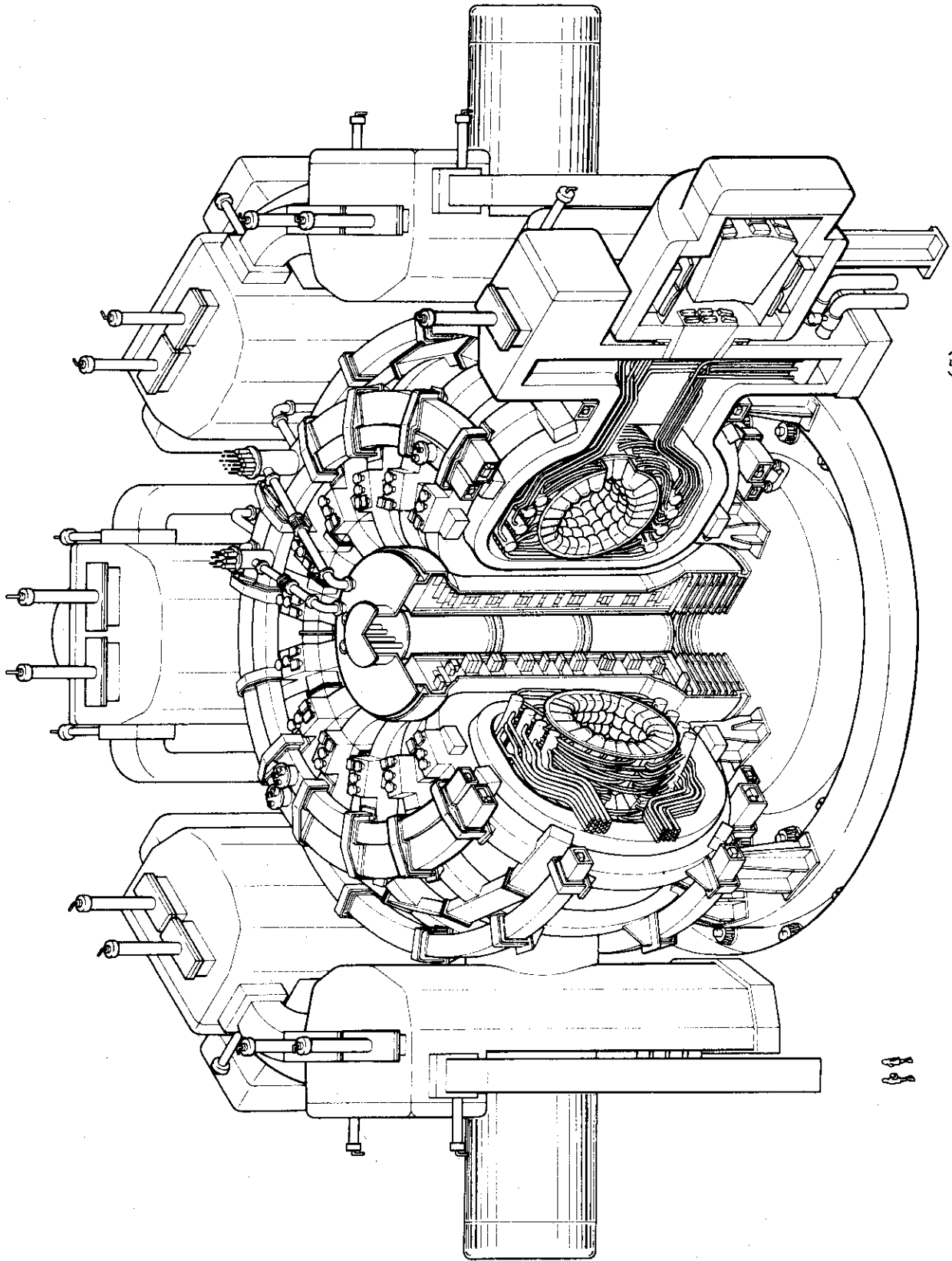


Fig. A.1 Overview of the JXFR (5)