

J A E R I - M  
87-116

核融合次期装置設計  
(昭和61年度設計報告書)  
—プラズマ断面形状制御の基礎検討—

1987年8月

阿部 充志<sup>\*1</sup>・竹内 一浩<sup>\*1</sup>・上田 憲照<sup>\*2</sup>・岡野 邦彦<sup>\*3</sup>  
岡崎 隆司<sup>\*1</sup>・笠井 雅夫<sup>\*2</sup>・新谷 吉郎<sup>\*3</sup>・杉原 正芳<sup>\*4</sup>  
畠山 明聖<sup>\*3</sup>・一木 繁久<sup>\*4</sup>・藤沢 登<sup>\*</sup>・溝口 忠憲<sup>\*5</sup>  
山本 新

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

核融合次期装置設計  
(昭和61年度設計報告書)  
プラズマ断面形状制御の基礎検討

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部  
阿部充志<sup>\*1</sup>・竹内一浩<sup>\*1</sup>・上田憲照<sup>\*2</sup>・岡野邦彦<sup>\*3</sup>・岡崎隆司<sup>\*1</sup>  
笠井雅夫<sup>\*2</sup>・新谷吉郎<sup>\*3</sup>・杉原正芳<sup>\*</sup>・畠山明聖<sup>\*3</sup>・一木繁久<sup>\*4</sup>  
藤沢 登<sup>\*</sup>・溝口忠憲<sup>\*5</sup>・山本 新

(1987年7月16日受理)

FERにおけるプラズマ断面形状制御法を検討するため、プラズマ形状制御と閉込め特性に関する従来実験の調査、トカマク装置の制御状態方程式の定式化、及び外乱に対する静的変形の大きさの推定を行った。従来実験は、良好な閉込め特性を保つためにはプラス表面位置を誤差1 cm以内程度で制御することが望ましいことを示している。しかし、平衡状態に対する摂動として計算した結果は、例えばHモードでのHαバーストでは $\beta_p$ の5%変動により2-3 cm変位すると予想している。またこの様なプラズマ形状の変形に対しては、トロイダルコイル内側に置いた位置制御用コイル以外のポロイダルコイルによるプラズマ断面形状制御が必要である。

---

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

\*1 練習日立製作所

\*2 三菱原子力工業

\*3 東芝

\*4 外来研究員 三菱電気（現在 三菱電機）

\*5 外来研究員 練習日立製作所

Preliminary Analysis on Plasma Equilibrium Control

— Conceptual Design Study of FY 86 FER —

Mitsushi ABE<sup>\*1</sup>, Kazuhiro TAKEUCHI<sup>\*1</sup>, Noriaki UEDA<sup>\*2</sup>  
Kunihiro OKANO<sup>\*3</sup>, Takashi OKAZAKI<sup>\*1</sup>, Masao KASAI<sup>\*2</sup>  
Kichiro SHINYA<sup>\*3</sup>, Masayoshi SUGIHARA, Akiyoshi HATAYAMA<sup>\*3</sup>  
Shigehisa HITOKI<sup>\*4</sup>, Noboru FUJISAWA, Tadanori MIZOGUCHI<sup>\*5</sup>  
and Shin YAMAMOTO

Department of Large Tokamak Research,  
Naka Fusion Research Establishment,  
Japan Atomic Energy Research Institute,  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 16, 1987)

Survey of the plasma experiments about dependence of plasma confinement on plasma shaping, prescription of the space state equation for plasma shape control using MHD equilibrium equation and analysis of steady state deformation of plasma cross sectional shape due to plasma parameter disturbances were carried out for the shake of preliminary study of plasma equilibrium control in the Fusion Experimental Reactor (FER). Experiments so far showed that it is desirable to control plasma surface position within 1 cm error, but the analysis here showed that possible disturbance may shift it by 2-3 cm and it is difficult to control plasma whole surface in good accuracy only with the plasma position control coils which is placed at the inner area of the toroidal coils.

Keywords: Tokamak, Plasma Shape Control, Confinement, Divertor Plasma

---

\*1 Hitachi, Ltd.

\*2 Mitsubishi Atomic Power Industries

\*3 Toshiba Corporation

\*4 on leave from Mitsubishi Electric Co.

\*5 on leave from Hitachi, Ltd.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 実験に関する調査 .....	1
2.1 プラズマ表面位置と閉込め特性 .....	1
3. FER における制御法検討のための定式化 .....	3
3.1 プラズマ位置形状のパラメータ .....	3
3.2 制御系の状態方程式 .....	4
3.3 摂動法によるプラズマ変形の解析法 .....	6
4. プラズマパラメータ変化による断面形状の変形 .....	7
5. 結 論 .....	8
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	9

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Survey of experiments .....	1
2.1 Relation between position of plasma surface and confinement .....	1
3. Formulation for study of FER plasma shape control .....	3
3.1 Parameters of plasma position and cross sectional shape ....	3
3.2 Space state equation of plasma equilibrium control .....	4
3.3 Method of analysis of plasma cross sectional deformation ...	6
4. Deformation of plasma cross sectional shape .....	7
5. Conclusion .....	8
Acknowledgement .....	8
References .....	9

## 1. 緒 言

トカマクプラズマに関する研究開発の最終目標は、閉込め特性の良いプラズマを安定に制御する技術を開発し、安価に核融合実験炉を作る事にある。Hモード放電は当初 ASDEX (西独)<sup>1)2)3)</sup>で発見されたが、他の装置でも実現されている<sup>4)-9)</sup>。また最近、大型装置<sup>10)11)</sup>でも見出されており、このため核融合実験炉 FER<sup>12)</sup>でも閉込め特性の良いHモードプラズマでの運転を設計の基礎に置いている<sup>13)</sup>。Hモードはダイバータ配位で実現され、プラズマ表面（セパラトリックス磁気面）とリミッタ間の距離が重要な役割を持っている事が示された<sup>2)-5)</sup>。またプラズマ形状が閉込め特性に影響を与える事も示されている<sup>6)7)</sup>。従って、FERにおいて閉込め特性の良いプラズマを長時間にわたって維持するためには精度良い（プラズマ表面位置で1 cm以下の誤差）プラズマ形状（プラズマ表面位置）制御が必要となる。

そこで、本研究ではまずこれまで各国で行われた実験を調査してプラズマ閉込め特性とプラズマ断面形状制御の関係を明らかにする。次に FER でのプラズマ断面形状制御法を検討するための制御モデルを定式化する。

## 2. 実験に関する調査

### 2.1 プラズマ表面位置と閉込め特性

追加熱中のトカマクプラズマに関し、ダイバータ配位で閉込め特性の良いHモード放電が発見されたことから、プラズマ表面位置とリミッタ間の距離 $\delta$ と閉込め特性の関係についても実験的にあきらかにされている。図1は FER の様な次世代のトカマク装置で重要なと思われるプラズマ表面位置の制御パラメータを示す。以下の議論で重要なパラメータ $\delta_i$ は図1での $\delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) のうち最も小さいものである。従来のプラズマ制御ではプラズマ位置 ( $R_p, Z_p$ ) や断面形状の橿円度 $\kappa$ 等の巨視的の形状パラメータを取り扱っていたが、FER などの次世代のトカマク装置では $\delta_i$ の様なよりきめの細かい制御が必要になる。この事を以下の議論でしめす。

ASDEX では外側の “Poloidal wing limiter” をプラズマ表面に近づけ、閉込め特性の変化を調べるため、プラズマ表面とリミッタの距離 $\delta$ の関数として周辺部の電子温度 ( $T_e$  ( $r = 31$  cm)) を計測した<sup>2)</sup> (但し小半径 $a_p$ は40 cm)。この結果、 $\delta < 2.5$  cmとなると、 $T_e$  ( $r = 31$  cm) は、急に低下することがわかった。つまり、 $\delta = 2.5$  cmで約 600 eV のものが、 $\delta = 0$  cmで 200 eV 程度となる。 $T_e$  ( $r = 31$  cm) が低いものはLモード放電であり、ASDEX では $\delta > 2.5$  cm がHモード放電のための必要条件であると言える。

一方、Doublet III (DIII)<sup>4)</sup> では、低加熱量 ( $P = 1.9 - 2.5$  MW) ではあるが $\delta$ とエネルギー閉込め時間 $\tau_E$ の関係について調べている。この場合 $\delta$ はセパラトリックス磁気面とリミッタ間の距

## 1. 緒 言

トカマクプラズマに関する研究開発の最終目標は、閉込め特性の良いプラズマを安定に制御する技術を開発し、安価に核融合実験炉を作る事にある。Hモード放電は当初 ASDEX (西独)<sup>1)2)3)</sup>で発見されたが、他の装置でも実現されている<sup>4)-9)</sup>。また最近、大型装置<sup>10)11)</sup>でも見出されており、このため核融合実験炉 FER<sup>12)</sup>でも閉込め特性の良いHモードプラズマでの運転を設計の基礎に置いている<sup>13)</sup>。Hモードはダイバータ配位で実現され、プラズマ表面（セパラトリックス磁気面）とリミッタ間の距離が重要な役割を持っている事が示された<sup>2)-5)</sup>。またプラズマ形状が閉込め特性に影響を与える事も示されている<sup>6)7)</sup>。従って、FERにおいて閉込め特性の良いプラズマを長時間にわたって維持するためには精度良い（プラズマ表面位置で1 cm以下の誤差）プラズマ形状（プラズマ表面位置）制御が必要となる。

そこで、本研究ではまずこれまで各国で行われた実験を調査してプラズマ閉込め特性とプラズマ断面形状制御の関係を明らかにする。次に FER でのプラズマ断面形状制御法を検討するための制御モデルを定式化する。

## 2. 実験に関する調査

### 2.1 プラズマ表面位置と閉込め特性

追加熱中のトカマクプラズマに関し、ダイバータ配位で閉込め特性の良いHモード放電が発見されたことから、プラズマ表面位置とリミッタ間の距離 $\delta$ と閉込め特性の関係についても実験的にあきらかにされている。図1は FER の様な次世代のトカマク装置で重要なと思われるプラズマ表面位置の制御パラメータを示す。以下の議論で重要なパラメータ $\delta_i$ は図1での $\delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) のうち最も小さいものである。従来のプラズマ制御ではプラズマ位置 ( $R_p, Z_p$ ) や断面形状の橿円度 $\kappa$ 等の巨視的の形状パラメータを取り扱っていたが、FER などの次世代のトカマク装置では $\delta_i$ の様なよりきめの細かい制御が必要になる。この事を以下の議論でしめす。

ASDEX では外側の “Poloidal wing limiter” をプラズマ表面に近づけ、閉込め特性の変化を調べるため、プラズマ表面とリミッタの距離 $\delta$ の関数として周辺部の電子温度 [ $T_e$  ( $r = 31$  cm)] を計測した<sup>2)</sup> (但し小半径 $a_p$ は40 cm)。この結果、 $\delta < 2.5$  cm となると、 $T_e$  ( $r = 31$  cm) は、急に低下することがわかった。つまり、 $\delta = 2.5$  cm で約 600 eV のものが、 $\delta = 0$  cm で 200 eV 程度となる。 $T_e$  ( $r = 31$  cm) が低いものは L モード放電であり、ASDEX では $\delta > 2.5$  cm が H モード放電のための必要条件であると言える。

一方、Doublet III (DIII)<sup>4)</sup> では、低加熱量 ( $P = 1.9 - 2.5$  MW) ではあるが $\delta$ とエネルギー閉込め時間 $\tau_E$ の関係について調べている。この場合 $\delta$ はセパラトリックス磁気面とリミッタ間の距

離で定義している。 $\delta < 0\text{ cm}$  は、リミッタ放電で  $\tau_E$  は小さい、しかし  $\delta$  を  $0\text{ cm}$  から  $4\text{ cm}$  と大きくすると  $\tau_E$  は直線的に向上した。 $\delta = 4\text{ cm}$  ではリミッタ放電と比較して約二倍の  $\tau_E$  となり H モード放電が得られた。 $\delta$  をさらに大きくすると、 $\tau_E$  がさらに向上することを示唆するデータであるが、 $\delta > 4\text{ cm}$  での実験はなかった。ASDEX の実験と比較して異なる点は、H モードと L モードの間で明確な区別がない点である。ASDEX の実験では L-H の明確なモード遷移が観測されているが、D III ではこの遷移が観測されてないことも関連する。これは、プラズマの形状及びプラズマ表面とリミッタ間の距離  $\delta$  が 2 つの装置で大きく異なっていることが原因であると考えるのが妥当であろう（つまり、ASDEX では  $\delta$  が大きい）。いずれにせよ、プラズマの閉込め特性が、プラズマとリミッタの相対位置関係により大きく影響を受けることは事実である。

報告者は、同じ D III で実験を行い  $\delta$  と  $\tau_E$  の関係をさらに高加熱領域まで明らかにした。<sup>5)</sup> 高加熱領域でも  $\delta$  が大きくなると閉込め特性が良い事に変わりないが、 $\delta$  の大きな放電 ( $2\text{ cm}$  以上) は、加熱量が大きくなると水素のリサイクリング光が間欠的に増大する  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストが激しく  $\tau_E$  が著しく低下して、 $\delta$  に対する  $\tau_E$  の依存性が非常に弱くなることが判った。つまり、 $H_\alpha/D_\alpha$  バーストを抑えることが H モードで  $\tau_E$  をさらに向上させる鍵である。また  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストは  $\delta$  を適切に制御する事により、ある程度抑えられる可能性があることを示唆した。またイオンの加熱効率も  $\delta$  に大きく依存することも示した。

最近大型装置 (JET<sup>10)</sup>, Doublet III-D (D III-D)<sup>11)</sup> でも H モード放電が実現されている。特に D III-D では、プラズマ表面位置を誤差  $1\text{ cm}$  以内で制御している事、及び  $\tau_E$  が  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストにより劣化する事を報告している。

H モード放電で  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストを抑えて閉込め特性を改善させた例も報告されている<sup>3), 7)</sup>。 ASDEX では、プラズマ中心位置を  $1.65\text{ m}$  から  $1.70\text{ m}$  に移して  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストを無くし、 $\tau_E$  を向上させた。<sup>3)</sup> D III では、ヌル点位置を通常の位置<sup>6)</sup> から外側（主半径大）に移した場合  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストが無くなり、 $\tau_E$  が高加熱時に向上した。何れの場合もプラズマ位置形状制御がプラズマの閉込め特性と密接に関連している事を示している。

以上の各装置での実験結果をまとめると次の事が言える。

- (1) 加熱時に閉込め特性の良い放電 (H モード) の出現はセパラトリックス磁気面とリミッタ間の距離  $\delta$  に依存する。
- (2) エネルギー閉込め時間  $\tau_E$  は、 $\delta$  が大きくなると共に改善するが、大きな  $\delta$  の放電は水素リサイクリング光が間欠的に大きくなる  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストにより  $\tau_E$  が劣化しやすい。
- (3) プラズマ形状制御により  $H_\alpha/D_\alpha$  バーストを抑えられる可能性がある。

従って精度良いプラズマの断面形状制御は、閉込め特性に直接影響を与える得るもので、プラズマを安定に閉込め核融合出力を取り出すために、最も重要な研究開発項目である。

ところで、従来プラズマ位置形状制御は、機能別ポロイダルコイルによって行われてきた。しかし FER ではハイブリッド型のポロイダルコイルが使用される計画である。ハイブリッド型のコイルでは電源構成及び制御方法は複雑になるものの、制御の自由度は多くなり、ポロイダル断面全体にわたって表面位置を管理できる。したがってプラズマを閉込め特性の良い状態に保つ事に対しハイブリッド型のポロイダルコイルは有利である。

実際に現在運転されているトカマク装置でハイブリッド型ポロイダルコイルが使われているも

のは、JET<sup>10)</sup> 及びDIII-D<sup>11)16)</sup>である。しかしいずれの場合もプラズマ表面位置を計測し積極的に制御するまでには至っていない。つまり各コイルが各々、プラズマ位置とかコイル近傍の磁束関数値を制御する方式で、ハイブリッド方式と機能別方式の中間的な方式である。

そこで、FERで精度良いプラズマ断面形状制御を行うためには、(1)プラズマ表面位置の高精度計測法の開発、(2)プラズマ表面位置の動きをシミュレーションできる制御モデルの開発、を行う必要がある。

### 3. FERにおける制御法検討のための定式化

プラズマの形状を決める方程式は、MHD 平衡方程式で次式の様になる<sup>12)</sup>。

$$L(\phi) = -\mu_0 R [j_\phi(I_p, W_k, W_m) + \sum_{i=1}^{N_c} I_i \delta(R-R_i, Z-Z_i)] \quad (1)$$

但し、 $L = \partial^2/\partial R^2 - \partial/R \partial R + \partial^2/\partial Z^2$ ,  $I_p$ : プラズマ電流 (A),  $W_k$ : プラズマ中の熱エネルギー (J),  $W_m$ : プラズマ中の磁気エネルギー,  $\phi$ : ポロイダル磁束関数 (Wb/2π),  $j_\phi$ : プラズマ電流密度 (A/m<sup>2</sup>),  $R$ : 主半径方向位置 (m),  $\mu_0$ : 真空中の透磁率 (H/m), である。プラズマ電流密度  $j_\phi$  は次式で表される。

$$j_\phi = R dP(\phi)/d\phi + dI(\phi)^2/d\phi \quad (2)$$

ここで、 $P$  はプラズマ圧力,  $I$  はポロイダル電流の流れ関数である。

本研究では(1)及び(2)式で求めたプラズマ平衡を基準として、その回りの運動を次式の様な標準形の状態ベクトル微分方程式に線形化して検討するための定式化について検討する。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{AX} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{CX} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{X}$  はコイル電流値等の状態ベクトル,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  はそれぞれ定数マトリックス,  $\mathbf{u}$  はシステムへの入力ベクトル (コイルへの印加電圧等),  $\mathbf{y}$  はシステムの出力ベクトル (プラズマ位置形状のパラメータ) である。

#### 3.1 プラズマ位置形状のパラメータ

従来、プラズマの位置形状制御では制御対象として、プラズマの位置及び橿円度などのマクロなパラメータの注目していた。しかし第二章で述べたように、最近の実験においては、閉込め特性の良いHモードプラズマはセパラトリックス磁気面とリミッタ間の距離 $\delta$ に大きく依存することが明らかになった。したがってプラズマ表面位置を積極的に制御することが重要となる。そこで制御パラメータとしては図1に示した様な項目となると考えられる。そこで(3)式の  $\mathbf{y}$  は次の様になる。

$$\mathbf{y}^t = [\delta, R_x, Z_x, R_p, Z_p, \kappa] \quad (4)$$

のは、JET<sup>10)</sup> 及び DIII-D<sup>11)16)</sup> である。しかしいずれの場合もプラズマ表面位置を計測し積極的に制御するまでには至っていない。つまり各コイルが各々、プラズマ位置とかコイル近傍の磁束関数値を制御する方式で、ハイブリッド方式と機能別方式の中間的な方式である。

そこで、FERで精度良いプラズマ断面形状制御を行うためには、(1)プラズマ表面位置の高精度計測法の開発、(2)プラズマ表面位置の動きをシミュレーションできる制御モデルの開発、を行う必要がある。

### 3. FERにおける制御法検討のための定式化

プラズマの形状を決める方程式は、MHD 平衡方程式で次式の様になる<sup>12)</sup>。

$$L(\phi) = -\mu_0 R [j_\phi(I_p, W_k, W_m) + \sum_{i=1}^{N_c} I_i \delta(R - R_i, Z - Z_i)] \quad (1)$$

但し、 $L = \partial^2/\partial R^2 - \partial/R \partial R + \partial^2/\partial Z^2$ ,  $I_p$  : プラズマ電流 (A),  $W_k$  : プラズマ中の熱エネルギー (J),  $W_m$  : プラズマ中の磁気エネルギー,  $\phi$  : ポロイダル磁束関数 ( $Wb/2\pi$ ),  $j_\phi$  : プラズマ電流密度 ( $A/m^2$ ),  $R$  : 主半径方向位置 (m),  $\mu_0$  : 真空中の透磁率 ( $H/m$ ) である。プラズマ電流密度  $j_\phi$  は次式で表される。

$$j_\phi = R dP(\phi)/d\phi + dI(\phi)^2/d\phi \quad (2)$$

ここで、 $P$  はプラズマ圧力,  $I$  はポロイダル電流の流れ関数である。

本研究では(1)及び(2)式で求めたプラズマ平衡を基準として、その回りの摂動を次式の様な標準形の状態ベクトル微分方程式に線形化して検討するための定式化について検討する。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{AX} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{CX} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{X}$  はコイル電流値等の状態ベクトル,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  はそれぞれ定数マトリックス,  $\mathbf{u}$  はシステムへの入力ベクトル (コイルへの印加電圧等),  $\mathbf{y}$  はシステムの出力ベクトル (プラズマ位置形状のパラメータ) である。

#### 3.1 プラズマ位置形状のパラメータ

従来、プラズマの位置形状制御では制御対象として、プラズマの位置及び橿円度などのマクロなパラメータの注目していた。しかし第二章で述べたように、最近の実験においては、閉込め特性の良い H モードプラズマはセパラトリックス磁気面とリミッタ間の距離  $\delta$  に大きく依存することが明らかになった。したがってプラズマ表面位置を積極的に制御することが重要となる。そこで制御パラメータとしては図 1 に示した様な項目となると考えられる。そこで(3)式の  $\mathbf{y}$  は次の様になる。

$$\mathbf{y}^t = [\delta, R_x, Z_x, R_p, Z_p, \kappa] \quad (4)$$

ここで、 $\delta$ ：プラズマ表面位置とリミッタの間の距離ベクトル、 $(R_x, Z_x)$ ：ヌル点位置、 $(R_p, Z_p)$ ：磁気軸位置、 $\kappa$ ：楕円度、である。定常状態での(1), (2)式の解を、

$$\phi(R, Z) = \phi_0(R, Z) \quad (5)$$

とし、その近傍での摂動  $\psi^1(R, Z)$  を考えると、 $\psi^1$  は、次式で書ける。

$$\psi_i^1 = \sum_j I c_j^1 \frac{\partial \phi_i}{\partial I c_j} + W_k^1 \frac{\partial \phi_i}{\partial W_k} + W_m^1 \frac{\partial \phi_i}{\partial W_m} + I_p^1 \frac{\partial \phi_i}{\partial I_p} \quad (6)$$

ここで、 $^1$  は摂動項で、 $i$  は  $i$  番目の点であることをしめす。(6)式から、

$$\delta_i = -\psi^1 / R_i B_{\tau i} \quad (7)$$

で表される。ここで  $B_{\tau i}, R_i$  はリミッタとプラズマ表面が接近した位置  $i$  での平衡磁場の接線方向成分及び大半径位置である。(4)式の  $\delta$  以外のパラメータ  $y_i$  は、

$$y_i^1 = \sum_j I c_j^1 \frac{\partial y_i}{\partial I c_j} + W_k^1 \frac{\partial y_i}{\partial W_k} + W_m^1 \frac{\partial y_i}{\partial W_m} + I_p^1 \frac{\partial y_i}{\partial I_p} \quad (8)$$

で求められる。 $\partial y_i / \partial I c_j^1$  及び  $\partial \phi_i / \partial I c_j^1$  を求める方法については次節で述べる。(4)–(8)式をまとめると次式のようになる。、

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{X} \quad (9)$$

$$\mathbf{X} = [ I_p^1, I c^1, W_k^1, W_m^1 ]$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} : & : & : & : \\ \frac{-1}{R_i B \tau_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial I_p} & \dots & \frac{-1}{R_i B \tau_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial I c_j} & \dots & \frac{-1}{R_i B \tau_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial W_k} & \frac{-1}{R_i B \tau_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial W_m} \\ : & : & : & : \\ \frac{\partial R_x}{\partial I_p} & \dots & \frac{\partial R_x}{\partial I c_j} & \dots & \frac{\partial R_x}{\partial W_k} & \frac{\partial R_x}{\partial W_m} \\ : & : & : & : \\ \frac{\partial \kappa}{\partial I_p} & \dots & \frac{\partial \kappa}{\partial I c_j} & \dots & \frac{\partial \kappa}{\partial W_k} & \frac{\partial \kappa}{\partial W_m} \end{bmatrix}$$

### 3.2 制御系の状態方程式

コイル電流、プラズマ電流の変動分に対する方程式は、次式で表される。

$$\mathbf{M}^0 \frac{d \mathbf{I}^1}{dt} + \frac{d \mathbf{M}^1}{dt} \mathbf{I}^0 + [\varrho_i \mathbf{I}_i^1] = \mathbf{V}^1 \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{M}$  はインダクタンスマトリックス、 $\mathbf{I} = [I_p, I_c]$ 、 $\varrho_i$  は抵抗値、 $\mathbf{V}$  は印加電圧のベクトル、である。また添字  $0$  は定常分の値であることを示すが以下では略す。(10)式を状態方程式(3)式と比較して未知な項は  $\mathbf{M}^1$  に関するものである。そこで  $\mathbf{M}^1$  も次式のように表されると考える。但し、 $\mathbf{M}^1$  はプラズマに関するもの以外は 0 である。

$$M_{pi}^1 = \sum_j I c_j^1 \frac{\partial M_{pi}}{\partial I c_j} + W_k^1 \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_k} + W_m^1 \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_m} + I_p^1 \frac{\partial M_{pi}}{\partial I_p} \quad (11)$$

$$\mathbf{M}^1 = [M_{pi}] = \begin{bmatrix} : & : & : & : \\ \frac{\partial M_{pi}}{\partial I_p}, \dots, \frac{\partial M_{pi}}{\partial I c_j} & \dots & \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_k} & \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_m} \\ : & : & : & : \\ : & : & : & : \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p^1 \\ I c_j^1 \\ W_k^1 \\ W_m^1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{d \mathbf{M}^1}{dt} \mathbf{I}_0 = \mathbf{D} d \mathbf{I}^1 / dt + \mathbf{F} (\dot{W}_k^1, \dot{W}_m^1)^t \quad (13)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} I_p & \frac{\partial M_{pp}}{\partial I_p} \dots & I_p & \frac{\partial M_{pp}}{\partial I c_j} \dots \\ : & : & : & : \\ I c_i & \frac{\partial M_{pp}}{\partial I_p} \dots & I c_i & \frac{\partial M_{pp}}{\partial I c_j} \dots \\ : & : & : & : \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} I_p & \frac{\partial M_{pp}}{\partial W_k} & I_p & \frac{\partial M_{pp}}{\partial W_m} \\ : & : & : & : \\ I c_i & \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_k} & I c_i & \frac{\partial M_{pi}}{\partial W_m} \\ : & : & : & : \end{bmatrix}$$

また、

$$\Omega = \begin{bmatrix} \varrho_p & \mathbf{0} \\ : & : \\ \mathbf{0} & \varrho_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

と置く事により、(10)と(13)式から次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{I}}^1 = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \dot{\mathbf{I}}^1 - \mathbf{M}^{-1} \Omega \mathbf{I}^1 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F} \begin{bmatrix} \dot{W}_{k1} \\ \dot{W}_{m1} \end{bmatrix} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{V}_1 \quad (15)$$

したがって次のように  $\mathbf{A}'$ ,  $\mathbf{B}'$  を置く。

$$\mathbf{A}' = -[\mathbf{E} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{M}^{-1} \Omega \quad (16)$$

$$\mathbf{B}' = -[\mathbf{E} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{E}, \mathbf{F}] (\mathbf{V}_1, \dot{W}_k^1, \dot{W}_m^1)^t \quad (17)$$

但し、(3)式での  $\mathbf{u}$  は  $\mathbf{u} = [\mathbf{V}_1, \dot{W}_k^1, \dot{W}_m^1]^t$  で(15)式は、

$$\dot{\mathbf{I}}^1 = \dot{\mathbf{A}}' \mathbf{I}^1 + \mathbf{B}' \mathbf{u} \quad (18)$$

となる。そこで  $\mathbf{X} = [\mathbf{I}^1, \dot{W}_k^1, \dot{W}_m^1]^t$  とすれば、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \cdots & 0 & 0 \\ : & & : & : \\ 0 & -\tau_{Ek} & & \\ 0 & -\tau_{Em} & & \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}' \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

と置き替えることにより(18)式は、

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{Bu} \quad (20)$$

となる。(9)式と(20)式で1組の制御系の状態方程式となる。但し、 $\tau_{Ek}$ 、 $\tau_{Em}$ はそれぞれ熱、磁気エネルギーの損失の時定数である。

### 3.3 摂動法によるプラズマ変形の解析法

状態方程式(20)、(9)式で制御特性を検討するためには(9)及び(13)式におけるマトリックス  $C$ ,  $D$ ,  $F$  を数値的に求める必要がある。そこで平衡方程式(1)、(2)の解に対して  $X$  のうちの1ヶの変数について微小な外乱を考え、もとの解との差から  $C$ ,  $D$ ,  $F$  の各項の値を求める。この方法を以下に説明する。

磁束関数  $\phi$  を定常状態での値  $\phi^0$  と摂動項の和と考えると次式が成り立つ。

$$\phi(R, Z) = \phi^0(R, Z) + \phi^1(R, Z) \quad (21)$$

$$L(\phi^0) = -\mu_0 R \{ j_\phi(I_p^0, W_k^0, W_m^0) + \sum_{i=1}^{N_c} I c_i^0 \delta(R - R_i, Z - Z_i) \} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L(\phi^1) = & -\mu_0 R \left\{ \frac{\partial j_\phi}{\partial \phi} \phi^1 + \frac{\partial j_\phi}{\partial W_m} W_m^1 + \frac{\partial j_\phi}{\partial W_k} W_k^1 + \frac{\partial j_\phi}{\partial I_p} I_p^1 \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{N_c} I c_i^1 \delta(R - R_i, Z - Z_i) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

(23)式のうち右辺{}内の第2-4項がプラズマパラメータ変動による外乱で、第5項はコイル電流値の変動による外乱である。マトリックス  $C$ ,  $D$ ,  $F$  の係数は(23)式をある小さな外乱に対して解き、得られた物理量の変動分から求める。例えば、(13)式の  $F_{11}$  は、(23)式で  $W_k^1$  のみを0でない外乱とし、新しいプラズマの自己インダクタンス  $M'_{pp}$  を求め、もとの平衡状態での値  $M_{pp}$  とから、

$$F_{11} = \partial M_{pp} / \partial W_k \approx (M'_{pp} - M_{pp}) / W_k^1 \quad (24)$$

で求める。他の係数も同様な求めかたをする。

#### 4. プラズマパラメータ変化による断面形状の変形

前節の(21)式を解きプラズマ形状の変化を定量的に検討する計算コードを開発した。但し渦電流等のシェル効果が含まれていないため実際より大きめの変位が output されている。

基準形状を図 2 (Option-C) のものとし、プラズマの熱エネルギー、磁気エネルギー、電流値の変化がそれぞれ独立に起こった時の形状変化を図 3, 4, 5 に示す。これらの図では基準形状を破線で、変形後の形状を実線で示す。また、基準のプラズマパラメータを表 1 に示し、形状制御のパラメータを表 2 にしめす。

図 3 はプラズマ熱エネルギー  $W_k$  変化に対応するプラズマ形状の変化を (つまり(21)式の解) を示した図である。 $\Delta W_k / W_k = +5\%$  としているが、図中の変位は 10 倍にして示している。 $5\%$  の熱エネルギー変化は、閉込め特性の良い H モード放電では  $H_\alpha / D_\alpha$  バーストで通常観測されているものである (但し、 $H_\alpha / D_\alpha$  バーストでは  $W_k^1 < 0$ )。 $\Delta W_k$  が  $+5\%$  の変化により、プラズマは外側 (主半径大) に動き、かつ楕円度が小さくなる。表面位置の変化は  $Z = 0.5 \text{ m}$  付近の  $\Delta R_{in}$ ,  $\Delta R_{out}$  (図 2 参照) で約 3 cm と大きい。ヌル点は約 2 cm 動いている。この大きさはスクリュープローフ層を約 10 cm としている現状の設計と比較して、無視できる大きさではない。

図 4 は  $\Delta W_m / W_m = 5\%$  として、プラズマ中の磁気エネルギー変化による断面形状の変形を示す。図中の変形は実際の 10 倍にして示している。磁気エネルギー変化は内部インダクタンス変化を起す saw-tooth 振動等により起こり得る。プラズマ表面位置の変位としては  $\Delta W_k / W_k = +5\%$  とほぼ同程度の大きさであるが、図 4 の場合はプラズマが円形になろうとする変形をしている点が図 3 と異なる。これは、 $W_m$  増加によりプラズマ電流がピーキングした分布となるためである。ところでヌル点位置は  $W_k$  変化に比較して小さい。

図 5 はプラズマ電流が増加したとき ( $\Delta I_p / I_p = 5\%$ ) の断面形状変化を示した。 $W_k, W_m$  は変化がないとしている。 $I_p$  の増加により、電流分布が平坦になる ( $W_m$  は固定している) ため、プラズマは縦長の形状に変形する。最上部と最下部で (ヌル点) で変位が大きく、12–16 cm それぞれ上下に伸びる。主半径方向のプラズマ移動は小さい。 $W_m$  と  $I_p$  の変化は通常独立には起こらない。つまり、回路方程式と連立させた(9), (20)式にしたがって変形を調べる必要がある。

ところで、プラズマ位置制御用に、制御コイルをトロイダルコイル内側に置く計画となっている。<sup>13)</sup> そこで  $W_k$  変化に対して起こったプラズマの位置変化を制御コイルで磁気軸をもとの位置にもどした時のプラズマ形状を  $\Delta W_k = 0$  の場合と比較した。変形が小さいため、図では示せない。そこで表 3 に変位の大きさを数値で示した。対応する部位は図 2 に示している。表から顯かなよう、制御コイルのみで  $W_k$  変化によるプラズマ変位を制御した場合ヌル点位置の変位が大きくなることが判る。これは制御コイルにはプラズマ形状を制御する自由度がないためで、制御コイル以外のポロイダルコイルによるプラズマ断面形状制御が必要なことがわかる。図 6 は垂直位置制御に関連して、磁気軸の位置を 5 cm 上下に動かす場合のプラズマ断面形状変形を示した。この場合もプラズマ断面の変形が大きいことがわかる。

## 5. 結論

FERにおけるプラズマ断面形状制御法を検討する準備として、プラズマ形状制御と閉込め特性の関係に関する従来実験の調査、トカマク装置のプラズマ制御状態方程式の定式化及び外乱に対するプラズマの静的変形の平衡計算に基づく検討を行った。この結果次のことが判った。

- (1) Hモード放電の閉込め特性はプラズマ表面とリミッタ間の距離に依存するため FERにおいてもプラズマ表面位置を 1 cm 程度の精度で制御する必要がある。
- (2) プラズマ変形を平衡状態に対して入力される外乱による摂動として計算することを基礎に、トカマク装置の制御方程式を定式化した。
- (3) プラズマ表面位置の変位は考えられる外乱に対し、2-3 cm の大きさになる。この変位をプラズマ全体にわたって抑えるためには、位置制御コイル以外のポロイダルコイルによるプラズマ断面形状制御が必要である。

### 謝辞

本検討を行うにあたり、FER 設計チームメンバーから多くのコメントや示唆をいただいた。記して感謝いたします。また、田村早苗臨界プラズマ研究部次長、吉川允二臨界プラズマ研究部長、苦米地顕那珂研究所長に多くのご支援いただいたことを感謝致します。また、執筆者のうち阿部、竹内、岡崎は、山田周治日立製作所エネルギー研究所長、尾崎典彦同第二研究部長に多くのご支援いただいたことを感謝致します。

## 5. 結 論

FERにおけるプラズマ断面形状制御法を検討する準備として、プラズマ形状制御と閉込め特性の関係に関する従来実験の調査、トカマク装置のプラズマ制御状態方程式の定式化及び外乱に対するプラズマの静的変形の平衡計算に基づく検討を行った。この結果次のことが判った。

- (1) Hモード放電の閉込め特性はプラズマ表面とリミッタ間の距離に依存するため FERにおいてもプラズマ表面位置を 1 cm 程度の精度で制御する必要がある。
- (2) プラズマ変形を平衡状態に対して入力される外乱による摂動として計算することを基礎に、トカマク装置の制御方程式を定式化した。
- (3) プラズマ表面位置の変位は考えられる外乱に対し、2~3 cm の大きさになる。この変位をプラズマ全体にわたって抑えるためには、位置制御コイル以外のポロイダルコイルによるプラズマ断面形状制御が必要である。

### 謝 辞

本検討を行うにあたり、FER 設計チームメンバーから多くのコメントや示唆をいただいた。記して感謝いたします。また、田村早苗臨界プラズマ研究部次長、吉川允二臨界プラズマ研究部長、苦米地顕那珂研究所長に多くのご支援いただいたことを感謝致します。また、執筆者のうち阿部、竹内、岡崎は、山田周治日立製作所エネルギー研究所長、尾崎典彦同第二研究部長に多くのご支援いただいたことを感謝致します。

## 参考文献

- [1] WAGNER, F., BECKER, G., BEHRINGER, K., CAMPBELL, C., EBERHAGNE, A., et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, (Proc. 9th Int. Conf. Baltimore, 1982) Vol.1, IAEA, Vienna (1983) 43.
- [2] WAGNER, F., KEILHACKER, M., and the ASDEX and NI Team, J. Nucl. Mater. 121 (1984) 103.
- [3] WAGNER, F., FUSSMANN, T., GARVE, T., KEILHACKER, M., KORNHERR, M., et al., Phys. Rev. lett. 53 (1984) 1453.
- [4] OHYABU, N., BURREL, K.H., DEBOO, J., EJIMA, S., GREOBNER, R., et al., Nucl. Fusion 25 (1985) 49.
- [5] ABE, M., KAMEARI, A., KITSUNEZAKI, A., KONOSHIMA, S., NAGAMI, M., et al., "Energy Confinement Characteristics of Neutral Beam Heated Plasmas with Divertor Configuration in Doublet III", to be submitted to Nucl. Fusion.
- [6] YOKOMIZO, H., KONOSHIMA, S., AIKAWA, H., KASAI, M., NINOMIYA, H., et al., Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1984) 316.
- [7] KAMEARI, A., KONOSHIMA, S., ABE, M., ITOH, K., KITSUNEZAKI, A., et al., Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 598.
- [8] KAYE, M., BELL, M.G., BOL, K., BOYD, D., BRAU, D., et al., J. Nucl. Mater. 121 (1984) 115.
- [9] SENGOKU, S., and the JFT-2M Team, J. Nucl. Mater. 145-147 (1987) 556.
- [10] REBUT, P.H., and the JET Team, in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, (Proc. 11th Int. Conf. Kyoto, 1986) Vol.1 IAEA (1987).
- [11] LUXON, J., ANDERSON, P., BAITY, F., BAXI, C., GRAMSON, G., et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, (Proc. 11th Int. Conf. Kyoto, 1986) Vol.1 IAEA (1987).
- [12] 臨界プラズマ研究部FER設計チーム, 核融合実験炉(FER)概念設計(昭和59, 60年度) JAERI-M 86-134 1987年11月。
- [13] GREEN, J.M., JOHNSON, J.L., WEIMER, K.E., Phys. Fluids 14 (1971) p.671.

表1 FERのプラズマパラメータ (Option C)

主半径	$R_p = 4.9\text{m}$	副半径	$a_p = 1.3\text{m}$
楕円度	$\kappa = 1.7$	トロイダル磁場	$B_T = 4.7\text{T}$
プラズマ電流	$I_p = 8.7\text{MA}$	ポロイダルベータ	$\beta_p = 1.2$
内部インダクタンス	$l_i = 0.7$		

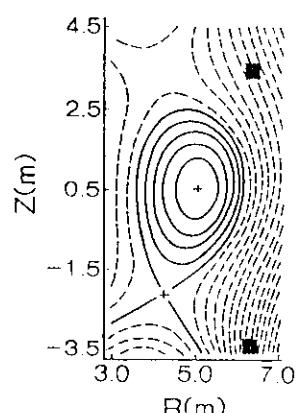
表2 基準形状のプラズマ表面位置と特長的物理量

磁気軸	$R_p = 5.02\text{m}$	$Z_p = 0.50\text{m}$
主半径方向位置	$R_{in} = 3.56\text{m}$	$R_{out} = 6.14\text{m}$
高さ方向位置	$Z_{top} = 4.71\text{m}$	$Z_{bot} = -2.14\text{m}$
ヌル点	$R_x = 4.25\text{m}$	$Z_x = -2.14\text{m}$
磁気エネルギー	$W_m = 76\text{MJ}$	
熱エネルギー	$W_k = 104\text{MJ}$	

表3 制御用コイルによるプラズマ位置制御と変形

項目	値	項目	値
$\Delta R_{in}$	-0.9cm	$\Delta R_{out}$	-0.4cm
$\Delta R_{top}$	-0.4cm	$\Delta R_p$	0cm
$\Delta R_x$	+0.6cm	$\Delta Z_p$	0cm
$\Delta Z_x$	-1.6cm		

制御コイル位置(右図)  
 $R=6.3\text{m}$   $Z=\pm 3.4\text{m}$



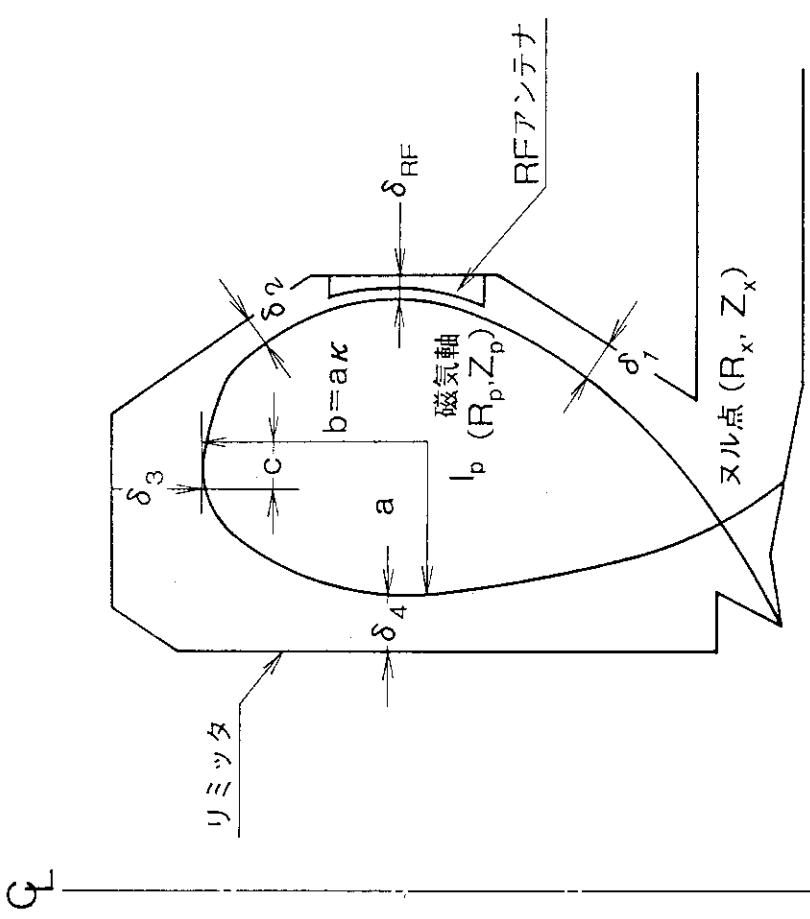


図 1 FER でのパラズマ断面形状制御パラメータ

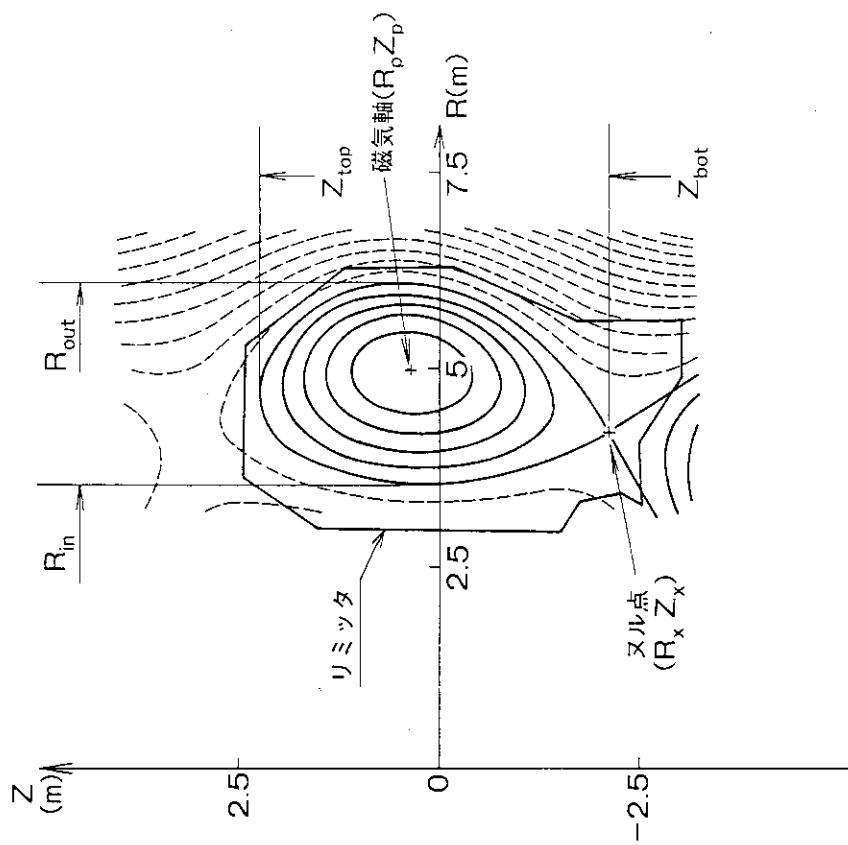


図 2 パラズマ断面形状のパラメータ (Option C)

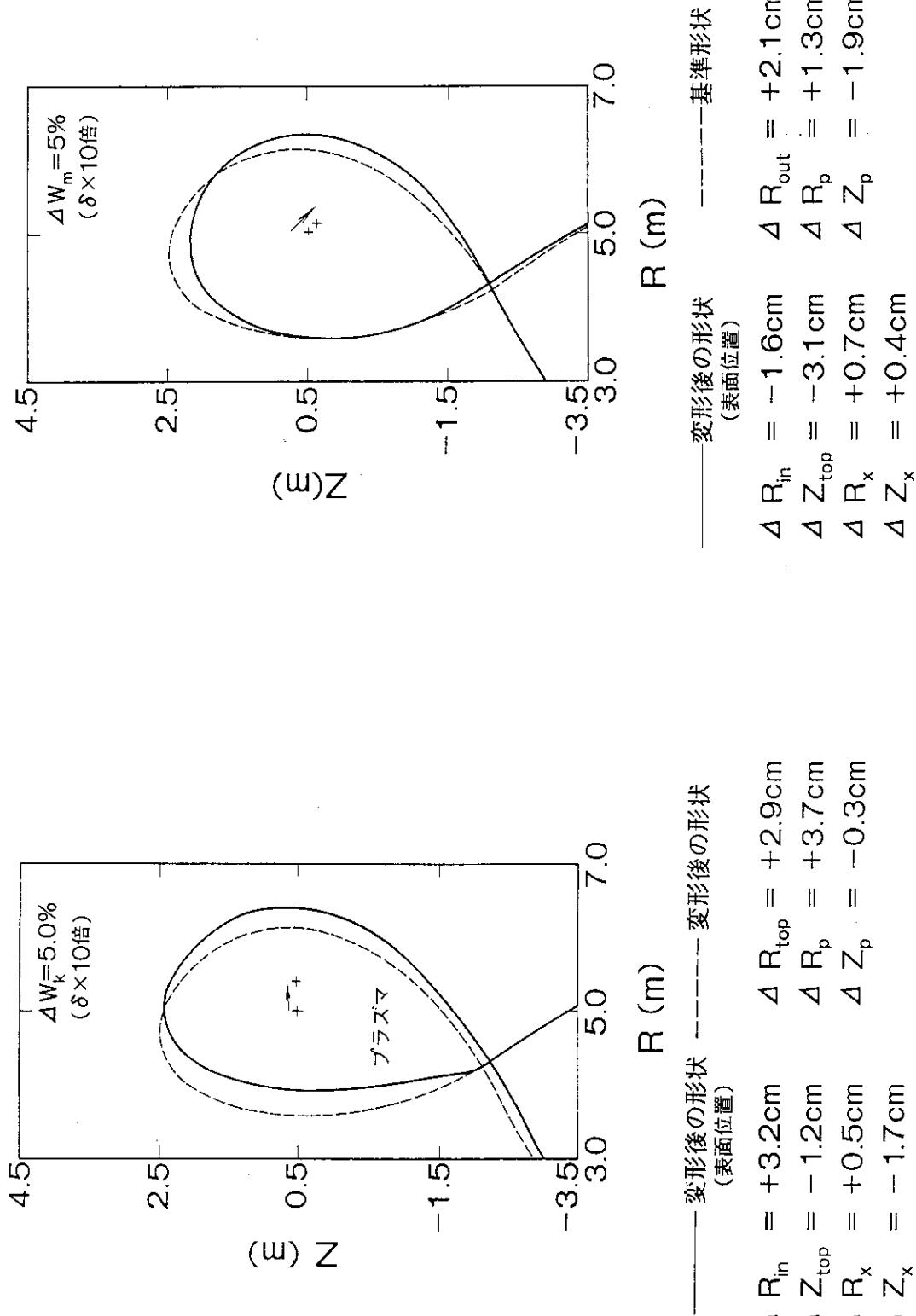
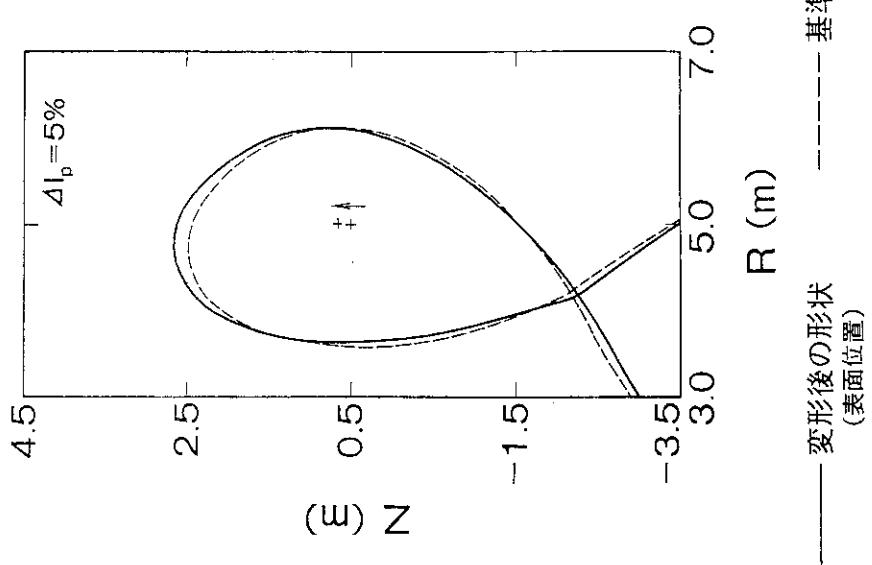
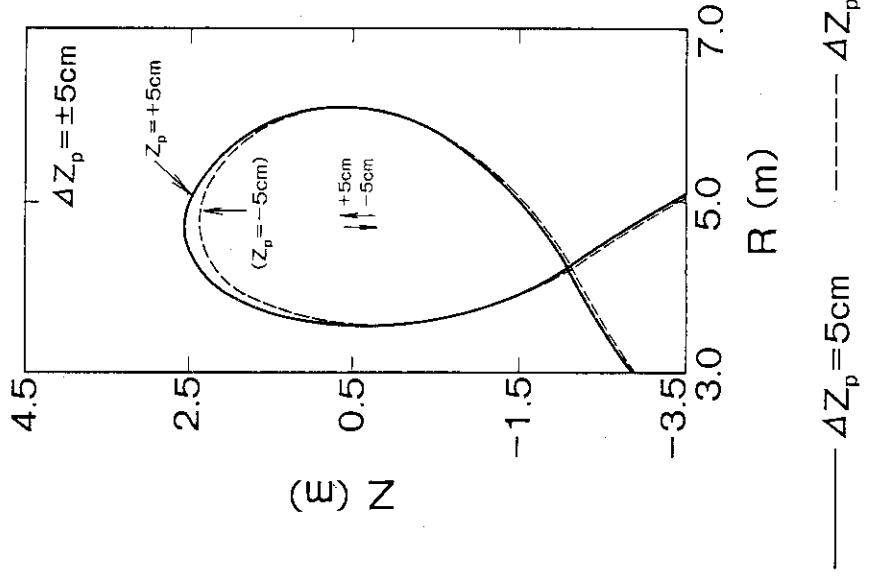


図3 热エネルギー変化 ( $\Delta W_k = 5\%$ ) に伴うプラズマの形状変化。  
変位の大きさは10倍として図示した。

図4 磁気エネルギー変化 ( $\Delta W_m = 5\%$ ) に伴うプラズマの形状変化。  
変位の大きさは10倍にして図示した。



$$\begin{aligned}
 \Delta R_{in} &= +5.6 \text{ cm} & \Delta R_{out} &= -0.9 \text{ cm} \\
 \Delta Z_{top} &= +16.3 \text{ cm} & \Delta R_p &= +0.6 \text{ cm} \\
 \Delta R_x &= -3.1 \text{ cm} & \Delta Z_p &= +16.2 \text{ cm} \\
 \Delta Z_x &= -12.8 \text{ cm} & &
 \end{aligned}$$

図5 プラズマ電流変化 ( $\Delta I_p = 5\%$ ) に伴うプラズマの形状変化。

$$\begin{aligned}
 \Delta R_{in} &= -1.7(+0.9) \text{ cm} & \Delta R_{out} &= -0.4(+0.5) \text{ cm} \\
 \Delta Z_{top} &= +9.0(-8.4) \text{ cm} & \Delta R_p &= -1.1(+0.4) \text{ cm} \\
 \Delta R_x &= +0.1(-0.6) \text{ cm} & \Delta Z_p &= +5.0(-5.0) \text{ cm} \\
 \Delta Z_x &= +2.8(-2.6) \text{ cm} & &
 \end{aligned}$$

図6 磁気軸変位 ( $\Delta Z_p = \pm 5 \text{ cm}$ ) に伴うプラズマの形状変化。