

JAERI-M  
87-112

次期大型装置設計  
(昭和61年度設計報告書)

—プラズマ電流、位置および形状制御—

1987年8月

龜有 昭久<sup>\*</sup>・笠井 雅夫<sup>\*</sup>・小林 武司  
山田 政男・藤沢 登

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, Tokai-mura, 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 日立高速印刷株式会社

次期大型装置設計  
(昭和 61 年度設計報告書)

—プラズマ電流、位置および形状制御—

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

亀有 昭久\*・笠井 雅夫\*・小林 武司  
山田 政男・藤沢 登

(1987年7月9日受理)

核融合実験炉 (FER) のための昭和 61 年度におけるプラズマ電流、位置および形状制御に  
係る設計研究について報告する。本報告においては以下の内容が含まれる。

- 1) FERにおけるプラズマ垂直位置制御の設計手順
- 2) 高橙円プラズマにおける垂直位置制御
- 3) プラズマ電流、位置および形状 (PCPS) 制御系の概念検討
  - a. JT - 60 および JET の PCPS 制御系のサーベイ
  - b. FER の PCPS 制御系の考察
  - c. PCPS 制御系のモデル化

---

那珂研究所 : 〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

\* 三菱原子力工業 (株)

Conceptual Design Study of Fusion Experimental Reactor  
(FY 86 year)

— Plasma Current, Position and Shape Control —

Akihisa KAMEARI\*, Masao KASAI\*, Takeshi KOBAYASHI  
Masao YAMADA and Noboru FUJISAWA

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

(Received July 9, 1987)

Design study of plasma current, position and shape control for Fusion Experimental Reactor (FER) during FY 1986 is reported. This report includes the followings.

- 1) Design procedure of plasma vertical position control in FER.
- 2) Vertical position control of highly elongated plasma.
- 3) Preliminary study of plasma current, position and shape (PCPS) control system.
  - a. Survey of PCPS control system in JT-60 and JET.
  - b. PCPS control system in FER.
  - c. Modeling of PCPS control system.

Keywords: Tokamak, FER, Plasma Current, Position and Shape Control, Feedback Control, Plasma Elongation, Vertical Instability

---

\* Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. プラズマ垂直位置制御 .....	1
2.1 設計手順 .....	1
2.2 高橿円プラズマの垂直位置制御 .....	5
3. プラズマ電流，位置および形状制御 .....	10
3.1 JET および JT- 60 の制御 .....	10
3.2 FER のプラズマ電流，位置，形状制御系 .....	24
3.3 プラズマ，コイルおよび渦電流系のモデル化 .....	28
4. おわりに .....	37
謝 辞 .....	37
参考文献 .....	38

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Control of Plasma Vertical Position Control .....	1
2.1 Design Procedure .....	1
2.2 Control of Highly Elongated Plasma .....	5
3. Control of Plasma Current, Position and Shape .....	10
3.1 Survey of JET and JT-60 .....	10
3.2 Consideration for PCPS control system in FER .....	24
3.3 Modeling of Plasma, Coil and Eddy Current .....	28
4. Concluding Remarks .....	37
Acknowledgment .....	37
References .....	38

## 1. はじめに

核融合実験炉（FER）の61年度におけるプラズマ電流，位置および形状制御検討について述べる。59，60年度における検討作業については，JAERI-M 85-178 [1]，およびJAERI-M 86-134 [2] にそれぞれ報告されている。

59年度においては，主として，プラズマ垂直位置不安定性およびその制御についてのケース・スタディ，上下非対称効果による垂直位置と水平位置の結合に関する定式化と解析を行った。60年度においては，垂直位置制御設計を進めると共に，プラズマ電流，位置，形状制御系の概念検討と問題点の抽出を図った。

61年度FER設計においては，合理化検討が行なわれたが，プラズマ横円度を高め，高ベータ化し装置を小型化することが指向された。この時，高横円プラズマの位置制御性が問題となり，その検討結果を本稿で述べる。また，プラズマ電流，位置，形状制御系について引き続き検討したので報告する。

第2章においては，主として垂直位置制御に関して，2.1節では従来から行なわれている制御設計の手順をまとめ，2.2節では高横円プラズマの制御性について述べる。第3章においては，プラズマ電流，位置，形状制御に関する事項として，3.1節では，JETおよびJT-60の稼動装置における制御系についてサーベイを行ない，3.2節では，FERにおける制御概念検討について述べる。また3.3節においては，制御対象（プラズマ，コイルおよび渦電流系）のモデル化について述べる。

## 2. プラズマ垂直位置制御

### 2.1 設計手順

本節においては，従来FER設計において行なわれて来たプラズマ垂直位置制御の設計手順をまとめた。プラズマ垂直位置制御は，FERの様な縦長断面プラズマ装置においては基本的な問題であり，またプラズマ設計，本体設計，電源設計等と密接に関連しており，垂直位置制御設計をシステムティックに進めて行く必要がある。従来行なわれて来た垂直位置制御系の設計手順をFig. 2.1-1に示す。本手順が必ずしも最適なものとは限らないが，基本的には同様な手順が今後もとられると思われる。

#### (1) プラズマ設計および平衡解析

まず，プラズマ設計により，プラズマの主パラメータ ( $I_p$ ,  $R_p$ ,  $a_p$ ,  $\kappa$ ,  $\delta$ , ダイバータ形状) が決められる。この中で横円度  $\kappa$  は垂直位置制御に本質的にかかわる。次にこれらのパラメータを基に，MHD平衡解析が行なわれ，平衡磁場，PFコイル位置および電流が導出される。これにより，垂直位置制御にかかわるプラズマ・パラメータ（垂直磁場  $B_v$ ，磁場曲率  $n$  値，

## 1. はじめに

核融合実験炉（FER）の61年度におけるプラズマ電流，位置および形状制御検討について述べる。59，60年度における検討作業については，JAERI-M 85-178 [1]，およびJAERI-M 86-134 [2] にそれぞれ報告されている。

59年度においては，主として，プラズマ垂直位置不安定性およびその制御についてのケース・スタディ，上下非対称効果による垂直位置と水平位置の結合に関する定式化と解析を行った。60年度においては，垂直位置制御設計を進めると共に，プラズマ電流，位置，形状制御系の概念検討と問題点の抽出を図った。

61年度FER設計においては，合理化検討が行なわれたが，プラズマ橙円度を高め，高ベータ化し装置を小型化することが指向された。この時，高橙円プラズマの位置制御性が問題となり，その検討結果を本稿で述べる。また，プラズマ電流，位置，形状制御系について引き続き検討したので報告する。

第2章においては，主として垂直位置制御に関して，2.1節では従来から行なわれている制御設計の手順をまとめ，2.2節では高橙円プラズマの制御性について述べる。第3章においては，プラズマ電流，位置，形状制御に関する事項として，3.1節では，JETおよびJT-60の稼動装置における制御系についてサーベイを行ない，3.2節では，FERにおける制御概念検討について述べる。また3.3節においては，制御対象（プラズマ，コイルおよび渦電流系）のモデル化について述べる。

## 2. プラズマ垂直位置制御

### 2.1 設計手順

本節においては，従来FER設計において行なわれて来たプラズマ垂直位置制御の設計手順をまとめた。プラズマ垂直位置制御は，FERの様な縦長断面プラズマ装置においては基本的な問題であり，またプラズマ設計，本体設計，電源設計等と密接に関連しており，垂直位置制御設計をシステムティックに進めて行く必要がある。従来行なわれて来た垂直位置制御系の設計手順をFig. 2.1-1に示す。本手順が必ずしも最適なものとは限らないが，基本的には同様な手順が今後もとられると思われる。

#### (1) プラズマ設計および平衡解析

まず，プラズマ設計により，プラズマの主パラメータ ( $I_p$ ,  $R_p$ ,  $a_p$ ,  $\kappa$ ,  $\delta$ , ダイバータ形状) が決められる。この中で橙円度  $\kappa$  は垂直位置制御に本質的にかかわる。次にこれらのパラメータを基に，MHD平衡解析が行なわれ，平衡磁場，PFコイル位置および電流が導出される。これにより，垂直位置制御にかかわるプラズマ・パラメータ（垂直磁場  $B_v$ ，磁場曲率  $n$  値，

垂直方向と水平方向の結合を表わす  $k$  値等〔1〕) が導出される。

#### (2) 本体設計

プラズマ設計に合わせて、炉本体設計が進められる。垂直位置制御においては、プラズマを安定化するシェル構造、制御磁場をしゃへいするプランケットや真空容器等の導電性構造物、制御コイルの設計が重要である。これらの設計レベルは、設計段階に対応して種々であるが、以下に示す手順をくり返し行ったり、ケース・スタディを行って深められる。

#### (3) 導電構造物モデル化〔3〕

垂直位置制御に関わる導電性構造物として、安定化用シェル、プランケット、真空容器等があり、一般に複雑な構造となっており、これらの構造物を解析に取り込むために、モデル化し、有限要素に分割する。渦電流解析は薄板近似を適用しており、これに対応して構造物は、薄板シェルの集合としてモデル化する。このモデル化の中で、どの構造物をどの程度組込むかは重要であり、各構造がどの程度制御に影響があるかを見積っておく必要がある。また、導体間の接続、絶縁の条件をモデル化し、境界条件を用意する。

#### (4) 渦電流解析

薄板近似有限要素回路法による計算コード〔4〕により、導体内の渦電流を固有モード展開する。また、プラズマ電流およびその変位、コイル電流、渦電流固有モード間の結合定数を求める。プラズマ電流分布は、平衡解析からの分布電流を用い、変位は分布を変えないで起るとする（Rigid モデル）。

#### (5) 周波数領域での解析〔5〕

渦電流の各種の伝達函数 ( $N(s)$ ) : 安定化効果,  $S(s)$  : シールド効果,  $C(s)$  : コイルとの結合効果、等) を導出し、電源や位置計測系の特性を入れ、制御系全体の伝達函数を求める。Open-loop の伝達函数より、その系の安定性を検討し、また、コントローラのゲインや特性（積分、微分時間）を決める。

#### (6) シミュレーション解析〔5〕

制御ループの時間動特性を、その系への外乱（例えば水平磁場外乱やプラズマの  $\beta_p$  や  $\ell_i$  の変化）に対する応答を見ることにより調べる。この結果、プラズマの変位量や制御のための電流、電圧および電力等が算出される。

#### (7) 結果の判断およびフィード・バック

以上の結果を、総合的に判断して、解析された系を採用するかを判断する。判断基準は現状では必ずしも明確ではないが、次の事柄を検討して判断される。

- (i) プラズマ変位量、整定時間
- (ii) 電源容量、応答速度
- (iii) 位置計測系応答速度
- (iv) シェル構造物の製作性、電磁力支持
- (v) 制御コイルの製作性、支持、放射化
- (vi) 炉本体の製作性、組立解体、健全性
- (vii) 超電導コイル支持構造物等の AC ロス

この検討により、設計上困難であったり、より改善が見込まれる場合、これまでの前提を変更

して再び解析を進める。例えば、不安定成長率が大きく、安定化が困難と見られる時は、プラズマ横円度を下げる様、プラズマ設計にフィードバックされる。また、電源容量を下げるために、シェルや制御コイルの設計変更を炉本体設計にフィードバックすることもある。電源や計測系の応答特性や、外乱条件の見直しも行なわれる。

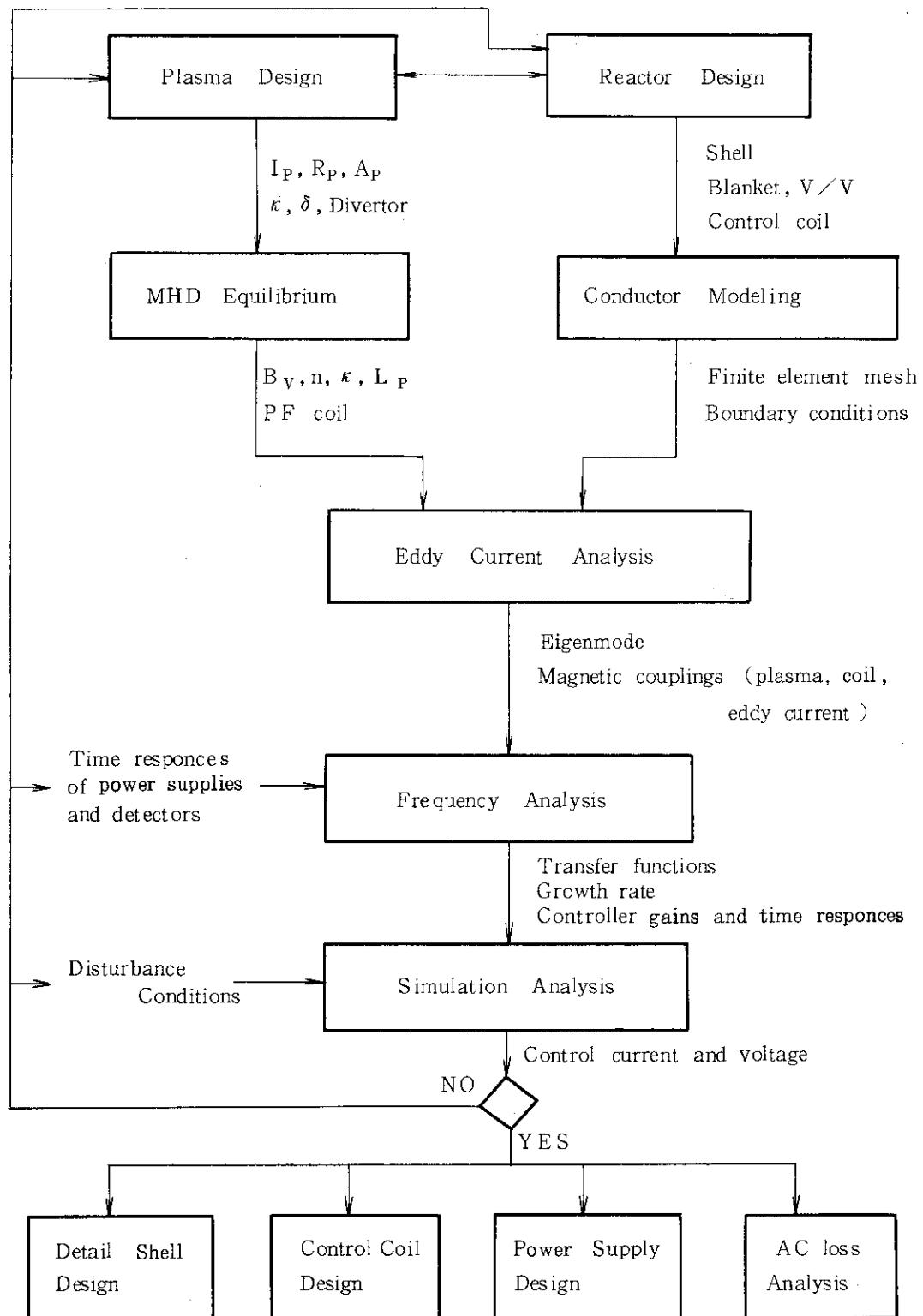


Fig. 2.1 - 1 Design procedure of vertical position control

## 2.2 高橜円プラズマの垂直位置制御

合理化検討においては、プラズマの橜円度を高くし、ベータ値を上げ、そのことにより装置を小型化し低コスト化することが指向された。この時、プラズマの垂直位置不安定性は大きくなり、垂直位置制御が厳しいものとなることが予想される。一般に橜円度を上げると、 $n$  値は負に大きくなる。一方、周辺導体による安定化は、橜円度が大きくなても、大きくは変化しない。むしろ、シェル構造物が上下方向に離れるため、安定化は悪くなると予想される。このため、垂直位置不安定成長率は大きくなり、位置制御のためには、応答速度が速いものが要求され、制御電力も大きくなる。

高橜円度化により、アスペクト比は小さくできる。 $n$  値はほぼアスペクト比の自乗に比例して小さくなる。一方シェル安定化効果指数  $n_s$  も同様にほぼアスペクト比の自乗に比例して小さくなる。このため、垂直位置不安定成長率はアスペクト比にあまり依存しないと考えられる。

本節では、前年度までの FER 垂直位置制御検討の結果をまとめ、それと対応させて合理化検討における高橜円プラズマの垂直位置制御の概略検討を行なう。

### (1) 60 年度 FER 垂直位置制御 [2]

前年度設計の FER プラズマは高  $\beta$  時において、 $I_p = 5.9 \text{ MA}$ ,  $R_p = 5.2 \text{ m}$ ,  $a_p = 1.12 \text{ m}$ ,  $\kappa = 1.7$  (95 %) であり  $n$  値は -1.37 であった。この時、可動シールド内トーラス外側に 2 cm 厚のシェルを配置することにより、垂直位置不安定性成長時間を 160 msec 程度に押えることが可能であった。また、不安定性の大きい低  $\beta$  時においても、若干プラズマの橜円度を下げるこことにより、90 msec 程度にすることができた。これに対し、制御コイルを真空容器内側に配置することにより、30 MVA 程度の電源容量で、10 Gauss の水平磁場外乱や、プラズマの内部インダクタンスの変動  $\Delta L_i = 0.1$  に対して安定な制御が可能であった。また、位置計測系や電源系の時間遅れは合わせて 10 msec 程度までは許容でき、それらの設計への裕度を持たせていた。

### (2) 垂直位置不安定成長時間と電源容量

59 年度において、垂直位置制御電力のケース・スタディを行った [1]。低ベータ時と高ベータ時、制御コイル位置 (TF コイル内側と外側), 真空容器抵抗 ( $0.2 \text{ m}\Omega$  と  $10 \text{ m}\Omega$ ), シェル導電率 (Cu 板 2 cm と SUS 板 8 cm) の比較を行った。それらの結果の不安定性成長時間と制御電力の関係を Fig. 2.2-1 に示す。水平磁場外乱 10 Gauss に対して、安定に整定できる電力を示している。合理化検討におけるプラズマや周辺構造は変っており、必ずしも適用できるかは不明であるが、その傾向は明らかである。成長率が  $20/\text{sec}$  (成長時間 50 msec) を超えると、いずれの場合も急激に制御電力が増大する。このことは、真空容器等のシールド効果の時定数が 50 msec 程度のところにあると考えられ、それ以上早い制御は非常に困難であると考えられる。

高橜円度にした場合、成長率が大きくなり、制御電力を押えるためには、制御コイルができるだけプラズマに近い位置におき、真空容器等の抵抗は大きく、かつ充分なシェル構造を用意する必要があると考えられる。

(3) 高橜円度 ( $\kappa = 2.0$ ) の場合

高橜円度 ( $\kappa = 2.0$ ) の垂直位置不安定性成長率について概略検討を行う。これは合理化検討の中の MINI 炉心に相当する。ここでの対象とするプラズマの平衡配位を Fig. 2.2-2 に示す。プラズマ・パラメータは、 $I_p = 8.6 \text{ MA}$ ,  $R_p = 3.63 \text{ m}$ ,  $a_p = 1.0 \text{ m}$ ,  $\kappa = 2.0$  (95 % フラックス) である。 $n$  値は -1.1 となっている。ここでは、周辺導体として、Fig. 2.2-3 に示す安定化用 シェルと真空容器のみを考える。他の構造物も考慮すると安定化は増し、今後詳細化が必要とされる。

真空容器は、SUS 20 cm 厚の等価板で近似し、ワントーン抵抗は  $0.2 \text{ m}\Omega$  となる様高抵抗部を配置している。シェルは、前面板は約 1.5 m 巾、側板は 0.5 m 巾としている。特にことわらない限りそれぞれ 2 cm 厚の Cu としている。またトーラス内側にもシェルを配置した場合は、そのシェルは内側直線部に前面板は全面に、側板は 30 cm 巾で置いている。セクタ数は 12 としている。

Fig. 2.2-4 に種々の場合の安定化函数  $N(s)$  を示す。Gap はセクタ間のシェルのない角度であり、Gap 0 は、シェルがトロイダル方向に連続の場合を示している。Gap の効果は大きく、Gap を 1 度以上とると、成長率は非常に大きくなり、制御は不能であろう。側板を 2 cm 厚から 4 cm 厚にすると低周波側で  $N(s)$  の向上が見られる。本図から判断すると、Gap は 1 度以内とし、シェルは外側および内側に必要と考えられる。また側板の厚みを 4 cm 程度にすることにより、成長率を  $20/\text{sec}$  程度とすることが可能と思われる。

一方、低  $\beta$  時には、Fig. 2.2-5 に示す様になる。この時  $n = -1.43$  である。この場合、トーラス内側にシェルを置き、側板の厚みを 4 cm 程度としても、1 度程度の Gap を見込むと成長率は  $40/\text{sec}$  程度となると見られ、制御は非常に困難なものとなろう。

以上まとめると、 $\kappa = 2.0$  程度の高橜円度プラズマを安定化するためには、以下のことが必要になると考えられる。

- i) シェルはできるだけトーラス方向に連続にあること。12 セクタで Gap は 1 度 ( $R = 5 \text{ m}$  のところで 9 cm) 以下とする必要がある。
- ii) シェル側板は 4 cm 程度の厚みが必要である。
- iii) トーラスのインボード側にもシェルが必要である。
- iv) 低  $\beta$  時の成長率が大きく、橜円度を下げる必要がある。
- v) 成長率が高くなるため、真空容器やシールド構造物の磁気シールド効果をできるだけ下げる必要がある。真空容器のワントーン抵抗は  $0.2 \text{ m}\Omega$  以上が必要と考えられる。
- vi) 位置計測系および電源系の応答速度の向上が必要となろう。

以上の結果は、炉構造を従来の FER の設計と同様のものと考え、制御磁場の浸透時間が  $50 \text{ m sec}$  程度であるとの前提より出ている。このため、もし制御コイルがよりプラズマの近くに置けたり、シールド構造等がより電気抵抗の高い構造とできれば、結論は変ってくる。高橜円プラズマにする場合は、これらの前提自体を見直して行く必要に迫られるであろう。

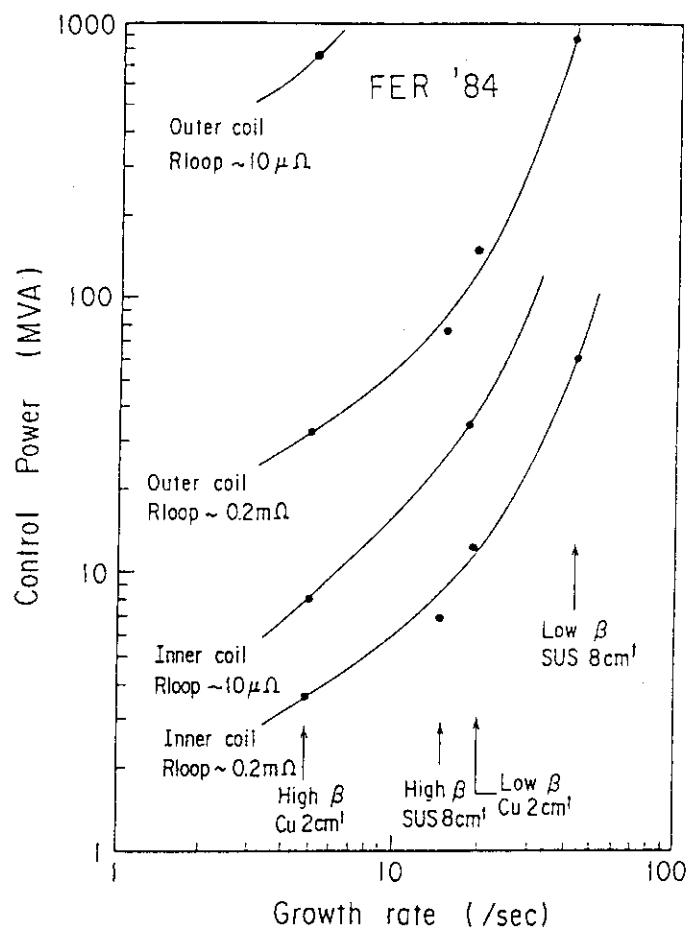


Fig. 2.2-1 Control power vs. growth rate for  
10 Gauss horizontal field disturbance

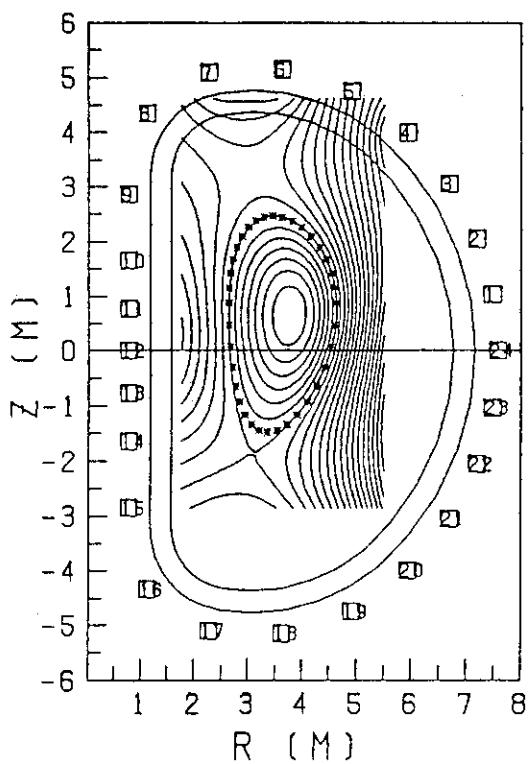


Fig.2.2-2 Plasma configuration  
of  $\kappa = 2.0$

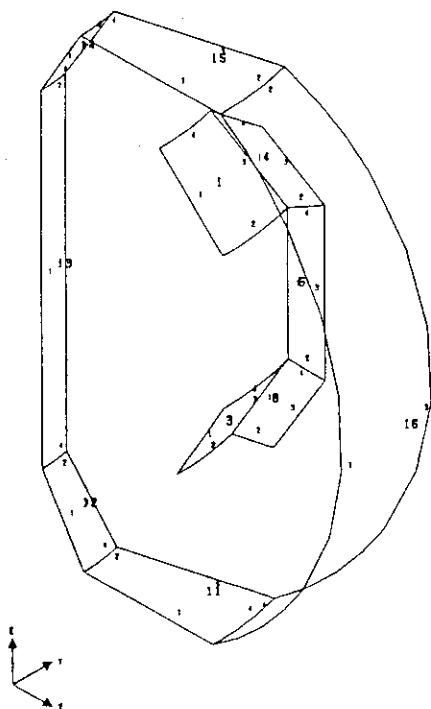
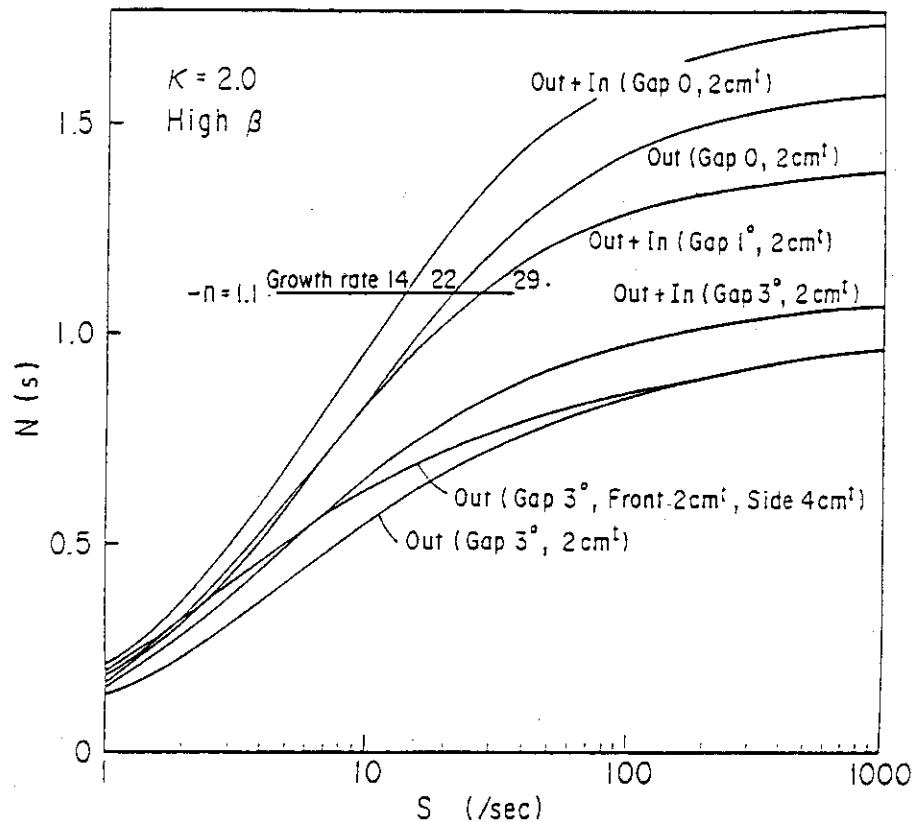
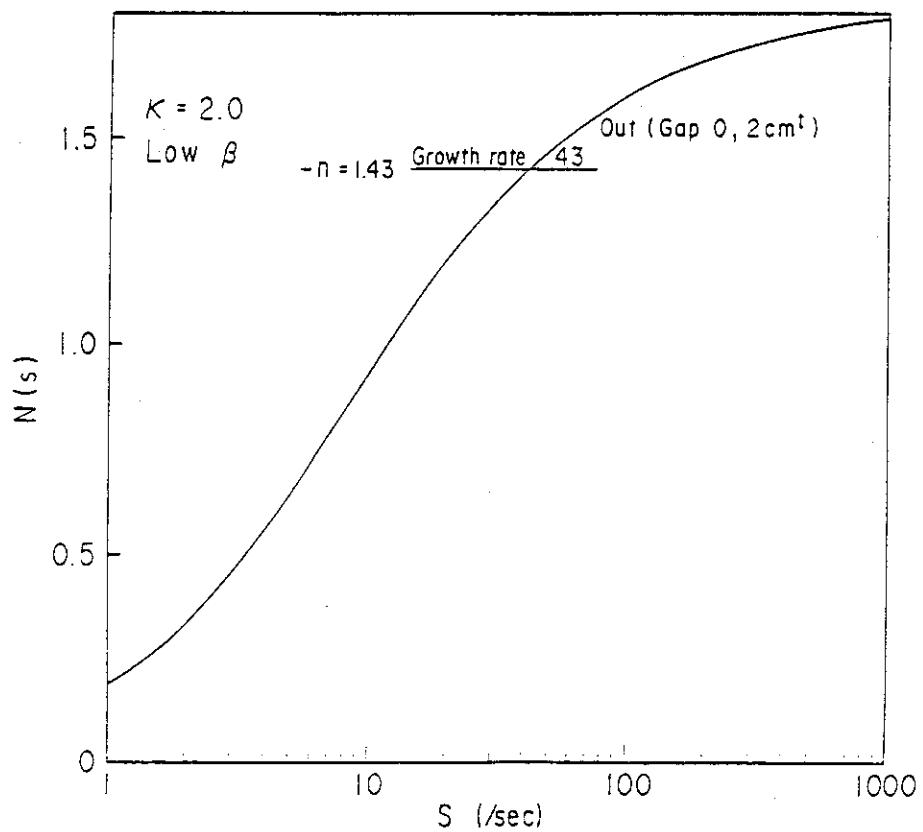


Fig.2.2-3 Model of shell and Vacuum Vessel

Fig. 2.2-4 N-function of  $\kappa=2.0$  plasma at high  $\beta$ Fig. 2.2-5 N-function of  $\kappa=2.0$  plasma at low  $\beta$

### 3. プラズマ電流，位置および形状制御

#### 3.1 JET および JT-60 の制御

現在稼動中の大型トカマク装置（JET, JT-60, TFTR）を、プラズマ電流、位置、形状制御の観点から見ると、ほぼその機能を満足し、充分な制御実績を上げていると考えられる。この成果は、FERの制御系の設計に多いに取り入れて行く必要があろう。また、これらの装置とFERとの相異点を明らかにし、今後の設計において開発すべき要素を明確にしておく必要があろう。

ここでは、JET および JT-60 のプラズマ電流、位置、形状制御についてのサーベイを行なう。主として、PFコイル系、電源系、計測系および制御法について調べる。両装置はほぼ同規模であり共通点も多いが、対称的な面を持っている。JET は D型非円形断面プラズマを有し、一部ハイブリッド・ポロイダルコイル系の考えを採用している。これらは FER と共通しており、その経験は重要である。JT-60 はダイバータ配位の制御を行なっており、FER のダイバータ配位の制御に参考となろう。JET および JT-60 の制御設計については、それぞれ文献[6, 7]に詳しく述べられている。

##### (1) ポロイダル・コイル系

JET および JT-60 の PF コイル配置を Fig. 3.1-1, 3.1-2 にそれぞれ示す。両装置の PF コイル設計の考え方は大きく異っている。JETにおいては、PF コイルは TF コイルの外側に配置され、大きく分けて 4ヶ所の P1～P4 コイルよりなる。各コイルが総合して、OH 磁場および平衡磁場を発生する、いわゆるハイブリッド方式となっている。しかし、主として、P1 コイルは OH 磁場、P4 コイルは垂直磁場、P2, P3 が四重極磁場を発生する機能を有している。また P2, P3 コイルの一部は水平磁場発生用に使用されている。P3 コイルの一部は P1 コイルと直列に結線され OH 磁場補正を行なっている。P1 コイルは二並列コイルとしても結線できる。また P2～4 コイルはある程度のターン数や結線の変更に対応できる様になっている。P1 コイルの内側には鉄心があり、プラズマへの供給磁束の増大を図っている。

JT-60においては、PF コイルは TF コイルの内側に配置され、ほぼ独立の機能を有するコイル群から構成され、機能別コイル方式と言える。OH 磁場を発生する F コイル、垂直磁場を発生する V コイル、四重極磁場を発生する Q コイル、ダイバータ磁場を発生する M コイルおよび水平磁場を発生する H コイルより成る。各コイルは、それぞれ目的とする磁場を高精度に発生し得るように配置され、このため、多数の分散したコイルとなったと考えられる。このことは一つには、コイル系がプラズマに近いことによるが、他はプラズマの制御性に重点を置いた結果と思われる。

JET および JT-60 の PF コイル容量を Table 3.1-1 に示す。これらの容量が全てフル定格で発生できるかは、電源にもかかわり不明であるが、設計値として示されているものである。カッコ内には、フル定格における発生磁場の大きさを示している。JET の PF コイルは TF コ

ルの外側にあり、電流容量が大きいのは当然であるが、発生する磁場においても、JETはJT-60の3倍近い容量を備えている。このことは一つにはJT-60においては、TFコイルの内側に配置したために、充分なPFコイルのための空間が確保できなかったこと、他には機能別コイルとしたことにより余分の電流を流す必要があったことによると考えられる。

JETにおいて例えば水平磁場電源は現在のところ3kAの容量しかもっておらず、コイル容量の20kAを流すことはできない。このことは、JETにおいては、コイル容量は充分大きく設計しておき、必要に応じ電源を増強して行く考えに立ったのではないかと推察される。水平磁場コイル容量は、垂直位置制御上重要であるが、不確定性が大きく、この様な裕度を持った設計が必要であろう。

## (2) ポロイダル電源系

JETおよびJT-60のPF電源系の構成をFig. 3.1-3, 3.1-4にそれぞれ示す。両装置とも各コイル系に対してそれぞれ独立の電源を備えている。JETは4系統、JT-60は5系統の電源からなる。Table 3.1-2に両装置の電源容量を示す。JETの場合は短時間定格の方を示した。

F(OH)電源としては両装置とも遮断回路を用い高電圧を発生している。JETではP1コイルを並列とした場合、ワンターン当り280V、JT-60では400Vの電圧を発生することができる。実際の実験においては、プラズマは20～30Vで立上がっており、設計当時は不明であったとしても、厳しい仕様となっている。運転においては発生電圧を下げるために、遮断抵抗を下げたり、JETにおいては、P1コイルを直列結線にして対応している。初期電圧の評価は、電源容量を大きく左右し、FERにおいても充分の検討が必要とされる。遮断以後は、JETにおいては発電機とダイオード整流電源、極性切換はスイッチングによって行なう。JT-60においては、サイリスタ電源で両極性電源となっている。JT-60においては、設計はインダクタンスの貯蔵エネルギーを抵抗遮断することにより二段立上がり採用されているが、実際の実験では普通は使用されていない模様である。遮断以後、JETにおいてはワンターン～10V(P1直列)、JT-60において40V程度発生できる。JETにおける発電機とダイオード整流電源は、サイリスタ電源に比べ応答性が悪く、JETのプラズマ電流制御応答はJT-60ほど良くない。

次に、垂直磁場電源であるが、ここではJT-60の電源の大きさが目立ち、一部ダイオードを用いているが、JT-60 PF電源の約半分(遮断電源を除いて)を占める。このことは、前述の高電圧遮断以後の急速電流立上に、垂直磁場を追随させる様にしたことに主としてよっていると考えられる。立上電圧が小さくて良いと分った現在、この様な大電源は不必要と考えられる。また、立上時にMコイル磁場を打消すため、逆電流が必要であり、この增加分もある。一方、JETにおいては、最初は、Fig. 3.1-5の様な結線が考えられていた。この様な回路においては、遮断時には遮断回路から垂直磁場コイルに電流が流れ込み、自動的にプラズマ電流に同期して電流が立上がり、垂直磁場電源としては高電圧を発生させる必要がなく、電源も小さなもので良かった。

興味深いのは、JETにおいて、初期にはFig. 3.1-5に示される、OHコイルとVコイルの並列結線が予定されていたのが、運転経験を通じてFig. 3.1-3に示した独立な電源構成となつたことである。このことは主としてOH電源に流れ込む電流を小さくするためであるが、立上

電圧が下げられたことも大きい。結果的には、OHコイルに流し得る電流が増え、その機能を高めている。

Qコイル電源は、JETにおいては、非円形プラズマを得るために、JT-60よりかなり大きなものとなっている。JETのQコイル電源はVコイル電源と同仕様のものであり、また片極性である。JT-60では両極性電源を用いている。

Hコイル電源は両装置とも両極性電源を用いている。JETにおいては、垂直位置不安定性があるにもかかわらず、JT-60の電源よりも小さい。

JT-60においては、この他にMコイル電源が加わる。両装置の電源を、遮断電源を除いて単純に加算すると、JETで450 MW、JT-60で1200 MWとなる。コイル系および電源系を総合して見ると、JETは発生電流および磁場が高く、JT-60は発生電圧および磁場変化が高い。例えば、V電源を見てみると、コイル間の結合を無視し、 $I_V = V_V / L_V$ で評価すると、与えられる垂直磁場変化率は、JETで0.17 T/sec、JT-60で2.8 T/sec (5 kV)となる。このことは結果として、JETにおいてはプラズマ電流や橜円度を高くとれることとなり、JT-60においては、高精度、高速の制御が可能なものとなったと考えられる。

### (3) 計測系

フィードバック制御に用いられるプラズマ電流、位置、形状計測系を見る。Table 3.1-3に計測手段とそれらの信号からの位置、形状の決定法を両装置について示す。両装置とも磁気計測手段を用いている。JETの計測系の配置をFig. 3.1-6に示す。JT-60に対しては、Fig. 3.1-2に示されている。

JETのプラズマ電流計測は、真空容器内の18ヶの磁気プローブ ( $\theta$ 方向)によって行っている。各プローブの信号に、プローブ間の距離の重みを掛け加え合わせることにより、プラズマ電流としている。位置、形状に対しては、基本的にはサドル・ループと磁気プローブ ( $\theta$ 方向)により、二点間の磁気フラックスの差を求め変位、変形を求めている。その様子をFig. 3.1-7に示す。位置および形状計測用にそれぞれ専用のサドル・ループを備えている。

JT-60においては、プラズマ電流はロゴスキー・コイルにより、位置形状はポロイダル方向に60°ごとに、ダイバータ室内的計8ヶ所の磁気プローブ ( $\theta$ ,  $\phi$ 方向)によって計測を行なっている。プラズマ位置、形状を表わすパラメータとして、Fig. 3.1-8に示す。 $R_p$  (R位置),  $Z_p$  (Z位置),  $\delta_{30}$  (30°リミタとの距離),  $\delta_t$  (ダイバータ・スロート部の壁からの距離)をとっている。 $R_p$ を検出するロジックとしては、多重極モーメント法、シャフランフ・モーメント法が用いられる [10]。多重極モーメント法は、分布電流の電流中心を求めるもので、正確には最外磁気面の幾何学中心とは一致しない。特に  $\beta_p + \ell_i / 2$  が大きくなった場合に差が大きい。シャフランフ・モーメント法は、高アスペクト比で円形プラズマの磁気面形状を近似的に決定し、 $\beta_p + \ell_i / 2$  の依存性はない。いずれの場合も、磁気プローブ信号の線形和により、プラズマ位置を検出する。磁気プローブは近傍のコイル磁場により影響され、その補正を加えている。JT-60プラズマの断面は円形に近く、解析手法が適用でき両検出方法は有効な手段となっている。非円形効果やプローブ設置誤差により、 $R_p$ の絶対位置は、固定リミタ配位時には1~2 cm、ダイバータ配位時には2~4 cmの誤差が見積られている。 $Z_p$ に関しては、多重極モーメント法が用いられているが、0~1 cmの誤差が見積られている。

JT - 60においては、ダイバータ配位制御が行なわれ、その配位形状を特徴づける計測量（制御変数）が必要である。この計測量として、JT - 60では $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ の二つの量を用いている。この二量が選択された理由は、物理的に重要な量であること、他の量（例えばセパラトリックス磁気面がダイバータ板に当る位置）が、 $R_p$ ,  $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ で表現できること、およびFig. 3.1 - 9に示される様に、これらの量がほぼ独立にV, Q, Mコイル電流の制御により制御し得ることによると考えられる。

さて、 $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ の決定法であるが、JT - 60においては回帰解析手法を用いている〔11〕。すなわち、多数の平衡解析データ・ベースより、 $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ とプローブ信号、コイル電流およびプラズマ電流との相関を調べ、数式化し検出に用いる。Fig. 3.1 - 10に、データ・ベースでの $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ と回帰解析の近似式による $\delta_{30}$ ,  $\delta_t$ の比較が示される。この結果で行くと、原理的には1 mm以下の精度を得ることができる。JT - 60の実験初期においては、より単純な近似式が用いられており、誤差は1 cm程度あった。信号点数や近似式の複雑さは、計算速度と必要とされる精度のかね合いから決定されることとなろう。

制御系を考える上で、プローブ類の計測精度、速度が重要である。JT - 60の報告〔7, 10〕によれば、プローブの設置の位置精度は±3.8 mm、角度精度は±6°以下である。この誤差により1~2 cmの $R_p$ の誤差があるとしている。周波数特性は、リミタ、ライナによるシールドにより0.5 ms、信号処理回路のフィルタにより1 ms、計1.5 ms程度の遅れを見積っている。ロゴスキー・コイルによるプラズマ電流計測において、積分器のドリフトは10秒放電で1.5%程度としている。JT - 60ではデジタル積分方式を用いているが、この程度のドリフトが発生することは、FERにおける1000秒オーダの放電を考えると深刻な問題となる。

#### (4) フィードバック制御

両装置のフィードバック・ループのブロック図をFig. 3.1 - 11, 3.1 - 12に示す。JETにおいては4系統、JT - 60においては5系統のフィードバック・ループがあり、各々コイル系および電源系と対応している。

JETにおいては、F(OH)系による $I_p$ 制御、V系による水平位置 $R_p$ 制御、Q系による形状(橢円度)制御、H系による垂直位置 $Z_p$ 制御の各ループがある。JT - 60においては、F系による $I_p$ 制御、V系による $R_p$ 制御、H系による $Z_p$ 制御およびダイバータ配位を制御するQ系による $\delta_{30}$ 制御、M系による $\delta_t$ 制御からなる。コントローラはJETはアナログ方式、JT - 60はデジタル方式を採用しており、制御計算機(II<sub>b</sub>)の時間遅れは0.96 m secとなっている。

JETの $I_p$ 制御においては、PIDコントローラを用いているが、制御応答は遅く~0.5 sとなっている。これは主として、発電機とダイオード電源を用いた応答性の悪い電源を用いたことによると思われる。フラット・トップで3%程度の精度を得ている。 $R_p$ 制御においては、PDコントローラ(微分時間 $T_D = 6.8$  ms)を用いており、振動が発生しない程度のゲインを選んでおり、応答時間は、31 ms程度以上となっている。真空容器への磁場浸透遅れ~3 ms、電源の応答遅れ5.7 msがあるが、この程度の緩やかな制御では問題は少ない。Slow rise時およびフラット・トップ時に精度が1 cm以下の制御が可能となっている。形状(橢円度)の制御は具体的にはプラズマの高さ(Z方向巾)を制御することにより行なっており、応答時間~20

ms でフラット・トップにおいて楕円度で 5 % の精度を得ている。~ 20 ms は電源の応答時間で決っている模様である。 $Z_p$  制御であるが、JET プラズマは垂直方向に不安定であり、制御の無い場合、代表的には不安定性成長率は  $\gamma = 50 \sim 150/\text{s}$  となる。これに対し PD コントローラ（微分時間 80 ms）を用い制御している。真空容器磁場浸込遅れ ~ 3 ms、電源応答時間 ~ 2 ms、コントローラのフィルタによる遅れ ~ 1.5 ms があるが、楕円度 1.9 のプラズマが安定に制御された。楕円度とプラズマ電流の上限値は、制御容量よりも、垂直不安定性成長時の真空容器にかかる電磁力によっている模様である。このことは、ディスラプション時の様な急激な変動時に、垂直不安定性を押えきれないことがあることによると思われる。

JT - 60 の  $I_p$  制御においては、P(比例)制御がとられ、プラズマ電流に 1% 程度のドリフトが発生した。これは PI 制御を行なうことにより解決できるとしている。代表的な制御周波数は  $f_p \approx 6 \text{ Hz}$  であり、制御時定数は 27 msec である。 $R_p$  制御においては、PD 制御（微分時間 3 ms）を用い、± 2 mm (フラット・トップ時) の精度で制御されている。積分制御を行なっていなければ、5 mm のオフセットが発生している。代表的な制御周波数は 63 Hz (制御時定数 2.5 ms) となっている。JT - 60 においては、ダイバータ配位で  $q_{\text{eff}} < 3$  の放電が可能となっているが、 $q_{\text{eff}}$  が整数を切る所で MHD の activity が発生し、 $I_p$ 、 $R_p$  に変動が見られ、この大きさは、 $I_p$  で 35 kA、 $R_p$  で 2 cm 程度である。 $Z_p$  の制御は、JT - 60 では垂直位置に関しては安定であり、P 制御で ± 1 mm 程度の精度で制御されている。その制御周波数は 13 Hz (制御時定数 12 ms) 程度である。ダイバータ配位制御のため、 $\delta_{30}$ 、 $\delta_t$  が制御される。制御変数として、 $\delta_{30}$  にかわりに  $n_{\text{index}}$  が用いられた。これは Fig. 3.1 - 9 に示す様に、 $\delta_{30}$  より  $n_{\text{index}}$  が  $\delta_t$  に対して独立度が高く、また、Qコイル電流依存性が高いためと思われる。この制御により、セパラトリックスがダイバータ板に当る位置を 5 Hz で 5 cm 振る実験に成功している。この時  $R_p$ 、 $\delta_t$  に対する干渉のために、 $R_p$  で -7.5 mm ~ 5 mm、 $\delta_t$  で ± 5 mm の変動が見られている。制御周波数は、 $n_{\text{index}}$  制御が 40 Hz (制御時定数 4 ms)、 $\delta_t$  制御が 20 Hz (同 8 ms) ととなっている。以上の様に、JT - 60 の制御時定数は、JET の応答時間に比べ垂直位置制御を除き、格段に小さく高速の制御を行なっており、制御精度もかなり良いと見られる。

両装置において、制御ループ間の若干の干渉が発生しており、JETにおいては楕円度を変えた時、 $I_p$ 、 $R_p$  に変動がみられ、JT - 60 においても上に述べた  $R_p - \delta_{30} - \delta_t$  間の干渉がみられる。これに対し、非干渉化の検討も進められている [12]。この様に干渉はあるものの、全体の制御系 (コイル、電源、制御量等) は互に干渉の少ない系となっており、ほぼ独立に制御でき、古典的なスカラ制御で充分と思える制御を達成している。FERにおいて同様な設計思想がとれるかどうかは不明ではあるが、検討に値する。

Table 3.1-1 Main Data of the PF coils

Coils	Turns	JET [6]		JT - 60 [7]	
		Maximum Current ( kA)	( MAT )	Turns	Maximum Current ( kA )
F Magnetizing OH	P1 : 568 P3 : 20	40	23.5 ( 20.1 V•s )	60	92 ( 12.3 V•s )
V	P4 : 122	45	5.5 ( 1.13 T )	64	58 ± 1.9 ( 0.33 T )
Q Quadrupole Shaping	P2 : 40 * P3 : 20	40	- 1.6 0.8 ( 0.12 T/m )	36	20 ± 0.36 ( 0.034 T/m )
M Magnet Limiter				16	120 ± 0.96
H Radial Horizontal	P2 : 32 P3 : 40	20	± 0.72	12	25 ± 0.15 ( 0.025 T )
Total				32.8	12.2

\* Typical connection ( $n = -2.6$ )

Table 3.1-2 Main Data of the PF Power Supplies

	JET [ 6 ]				J T - 6 0 [ 8 ]			
Power Supply	Current (kA)	Voltage (kA)	Power (MW)	Pulses	Current (kA)	Voltage (kA)	Power (MW)	Pulses
F	100 (5 s) <sup>1)</sup>	3	300	6	92	2.5	$230 \times 2^3)$	24
Circuit Breaker	80	40	3200		92	25	2500	
V	35 (12.5 s)	-1.6 ~ 2.0	-56 ~ 70	24	41 <sup>2)</sup> 58 -14.5	5 5 5	205 290 73	24
Q	35 (12.5 s)	-1.6 ~ 2.0	-56 ~ 70	24	$\pm 20$	0.5	$10 \times 2^3)$	12
M	—	—	—	—	120	0.84	100	12
H	3 (12.5 s)	2	$6 \times 2^3)$	$12 / 24$	$\pm 25$	1.0	$25 \times 2^3)$	12

- 1) Generator and diode converter
- 2) Diode
- 3) By-polarity

Table 3.1-3 Plasma current, position and shape measurements

	JET [ 6 ]	J T - 60 [ 7 ]
Plasma Current	Magnete Probes	Rogowski loop
Position and Shape	Saddle coils Magnetic probes ( $B_\theta$ )	Magnetic Probes ( $B_\theta$ , $B_\rho$ )
Method	Flux difference	Multipole moment Shafranov moment Regression

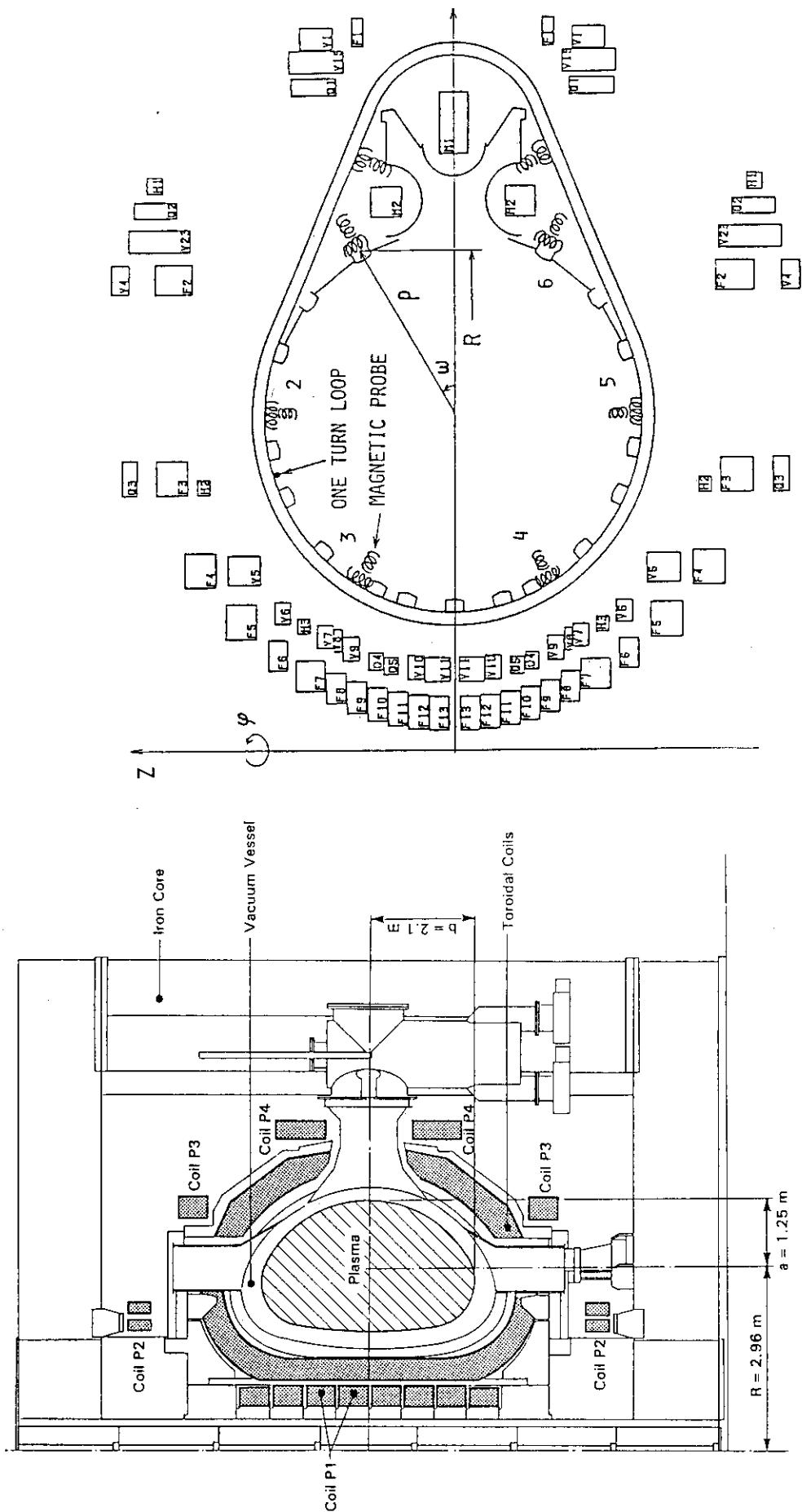
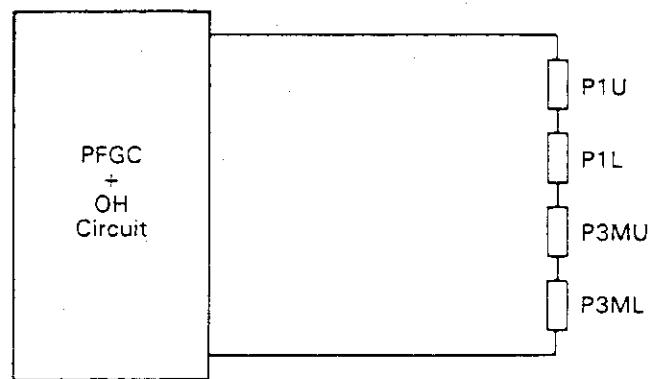


Fig. 3.1-2 JT-60 PF coils and magnetic probes[7].

Fig. 3.1-1 JET PF coils[6].



U = Upper  
L = Lower

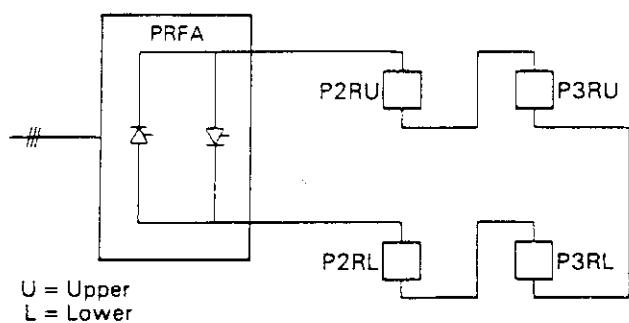
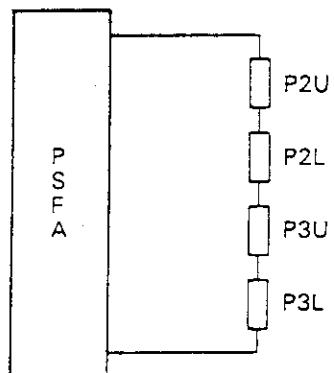
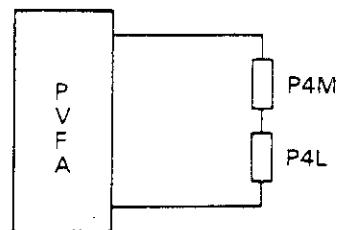


Fig. 3.1-3 JET PF power supplies[6].

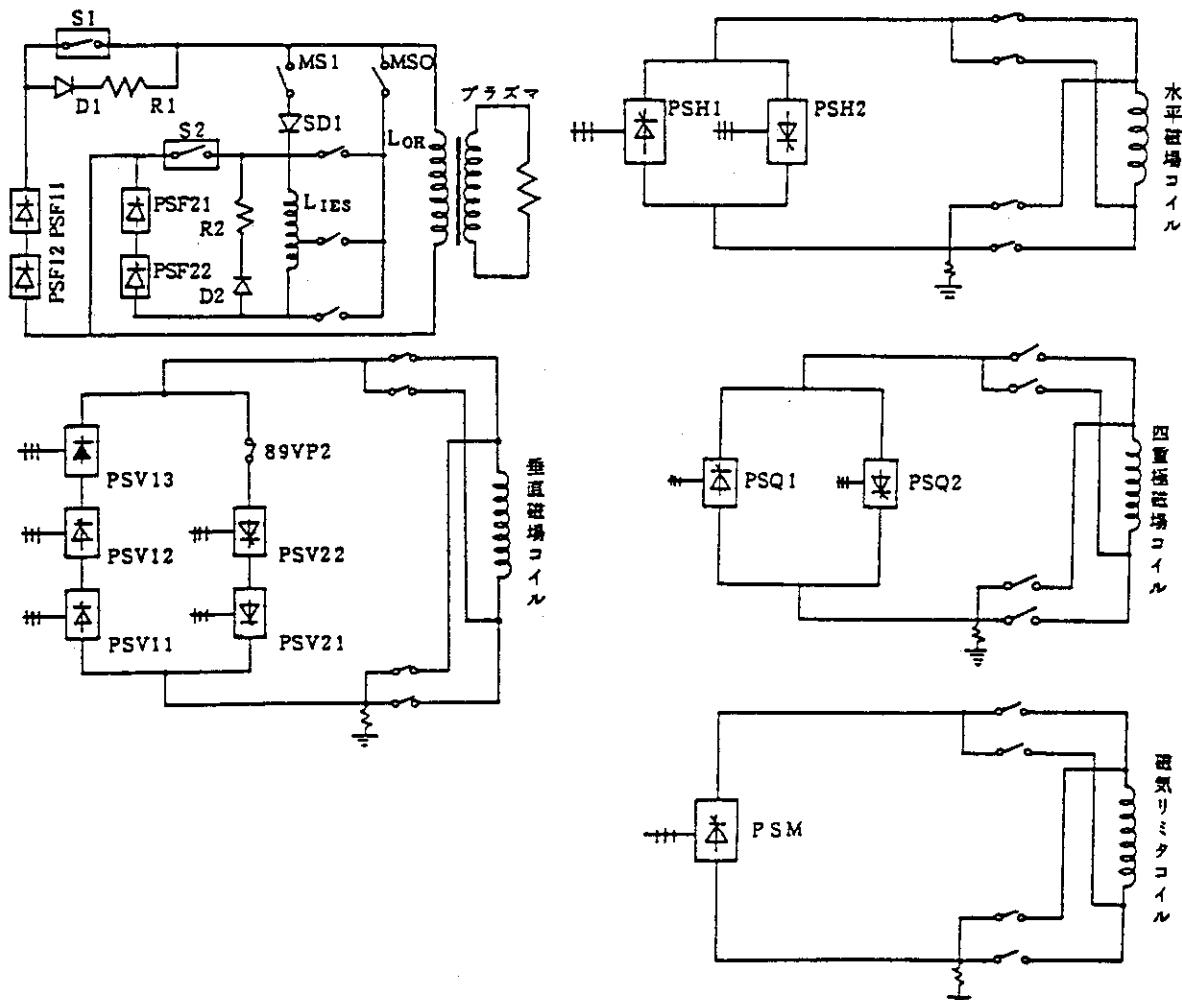


Fig. 3.1-4 JT-60 PF power supplies[7].

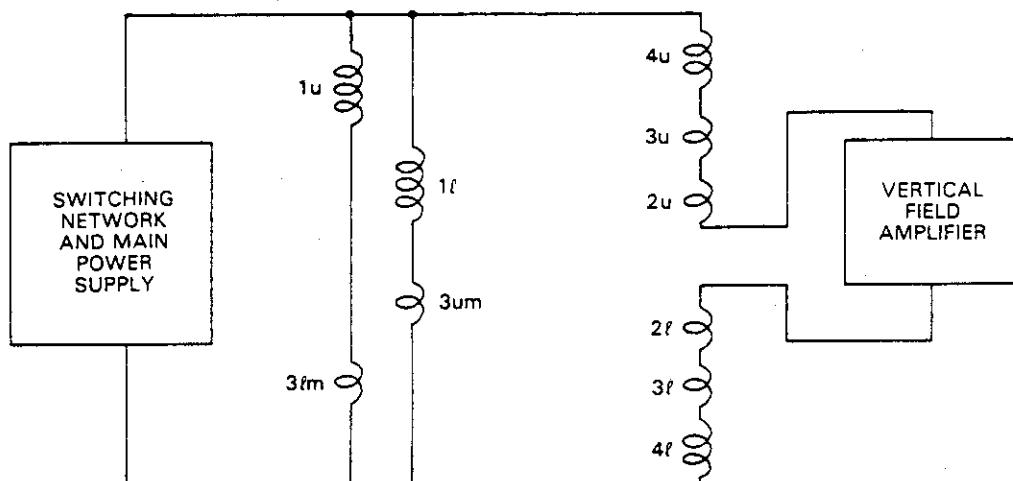


Fig. 3.1-5 Original PF coil circuit in JET[9].

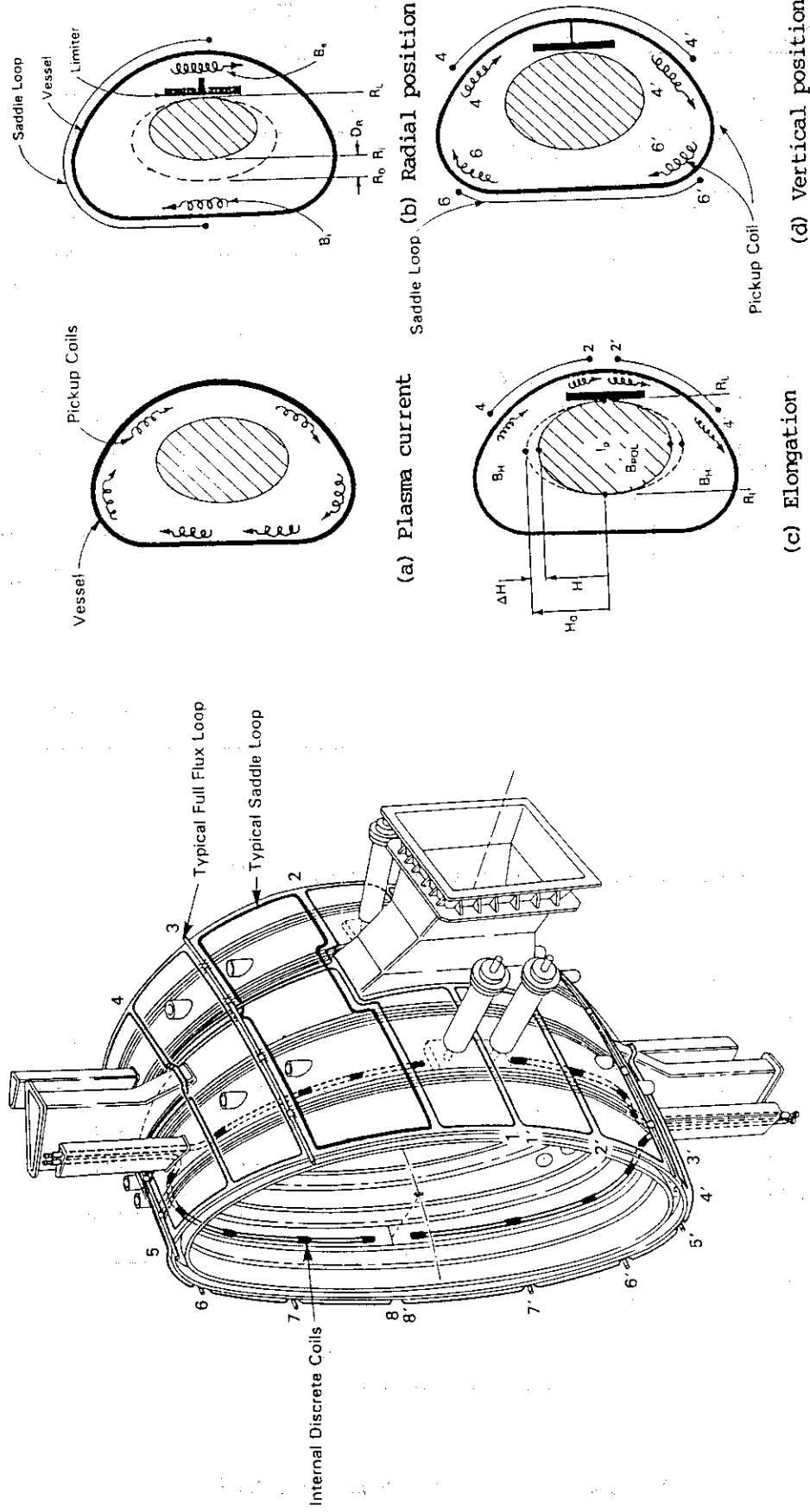


Fig. 3.1-6 Layout of the plasma position and plasma current measurements in JET[6].

Fig. 3.1-7 Measurements of the plasma current, position and shape in JET[6].

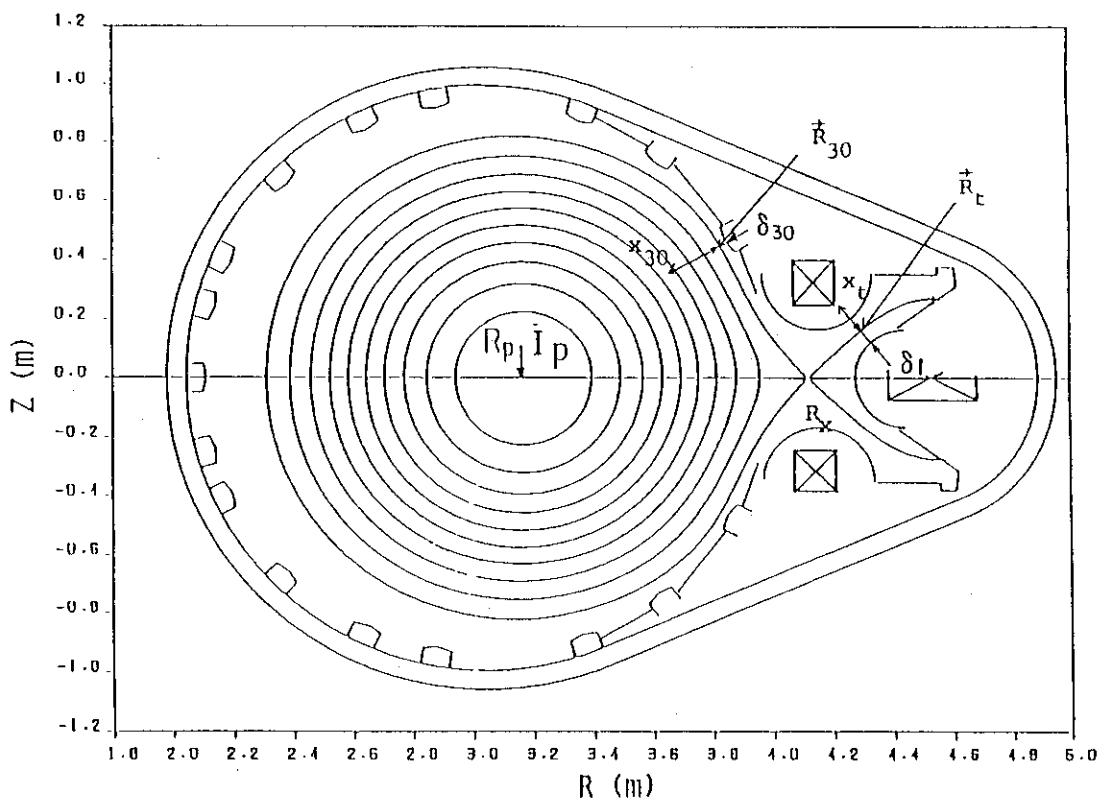
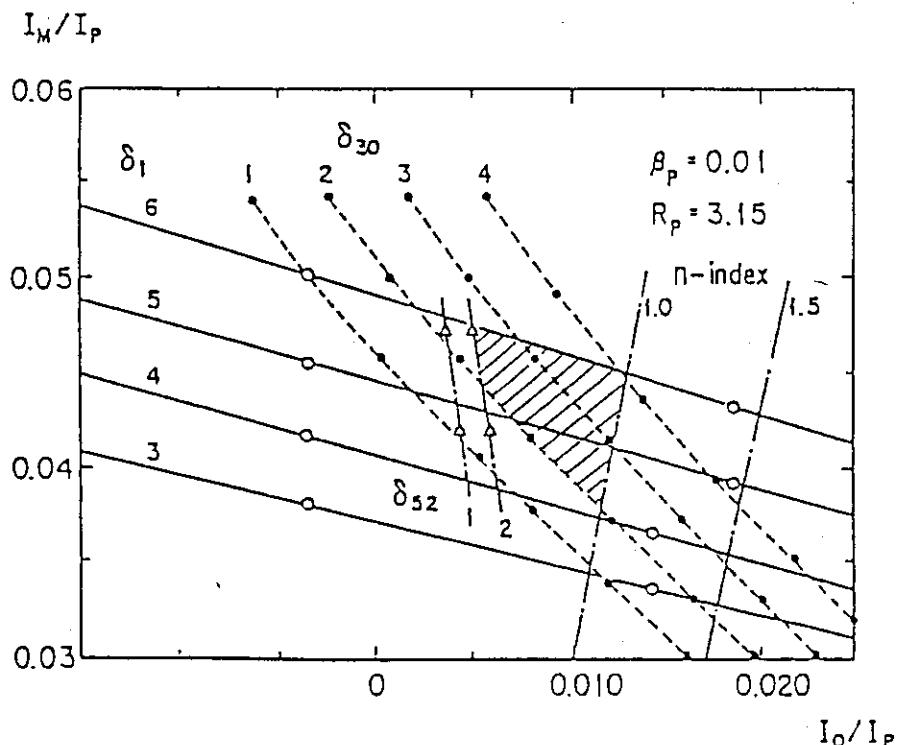


Fig. 3.1-8 Control variables in JT-60[12].

Fig. 3.1-9 Dependence of  $(\delta_{30}, \delta_t)$  on  $(I_Q/I_p, I_M/I_p)$  at  $R_p=3.15\text{m}[7]$ .

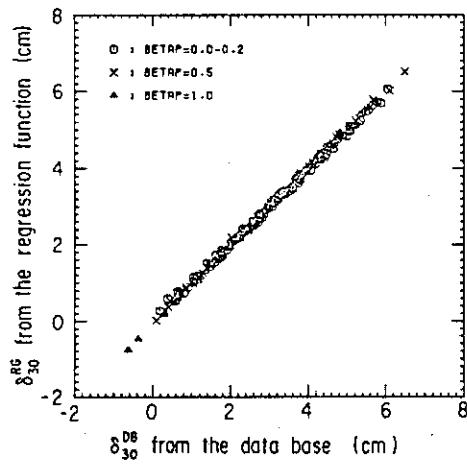


FIG. 2. Relation of values of  $\delta_{30}^{RG}$ , obtained from regression function to those from database,  $\delta_{30}^{DB}$ .

$$\delta_{30}^{RG} = \sum_{j=1}^6 (C_{pj}^{(1)} + C_{pj}^{(2)} I_M / I_P) B_{pj} / I_P + \sum_{j=1}^6 (C_{\omega j}^{(1)} + C_{\omega j}^{(2)} I_M / I_P) B_{\omega j} / I_P$$

Square root of variance is 0.07 cm.

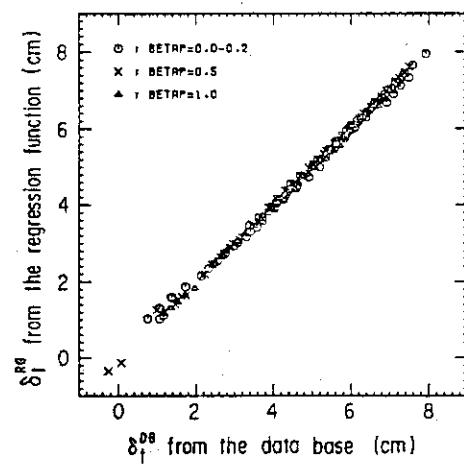


FIG. 3. Relation of values of  $\delta_t^{RG}$ , obtained from regression function to those from database,  $\delta_t^{DB}$ .

$$\delta_t^{RG} = \sum_{j=1}^6 (C_{pj}^{(1)} + C_{pj}^{(2)} I_M / I_P) B_{pj} / I_P + \sum_{j=1}^6 (C_{\omega j}^{(1)} + C_{\omega j}^{(2)} I_M / I_P) B_{\omega j} / I_P$$

Square root of variance is 0.08 cm.

Fig. 3.1-10 Regression method determining  $\delta_{30}$  and  $\delta_t$  in JT-60[11].

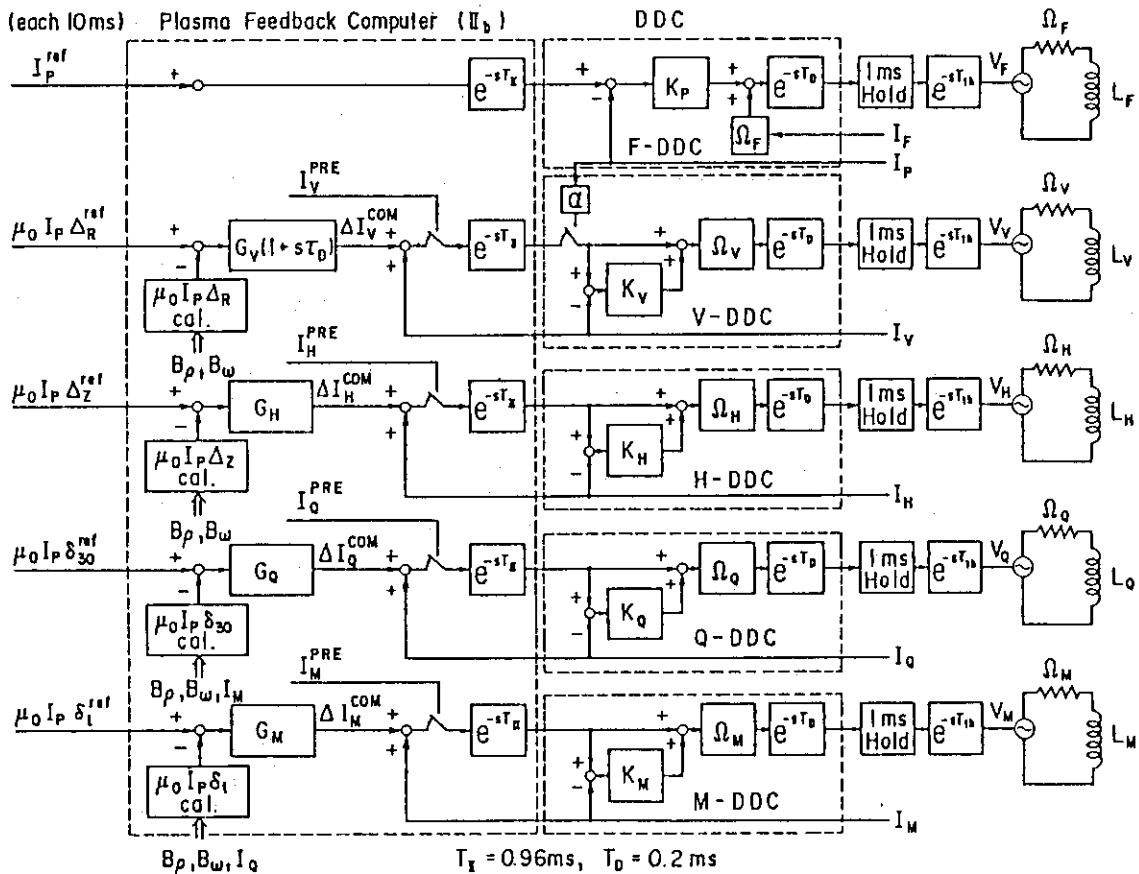


Fig. 3.1-12 Block diagrams of feedback control in JT-60[7].

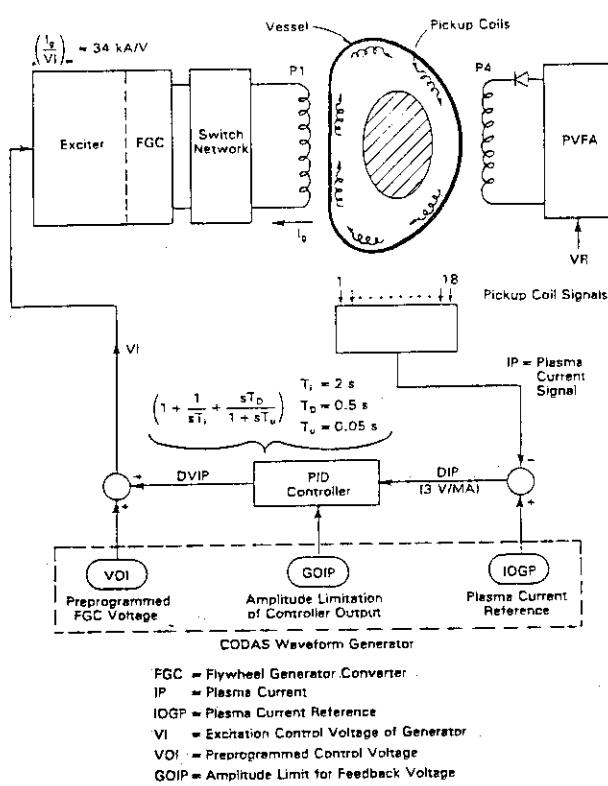


Fig. Block diagram of the plasma current control.

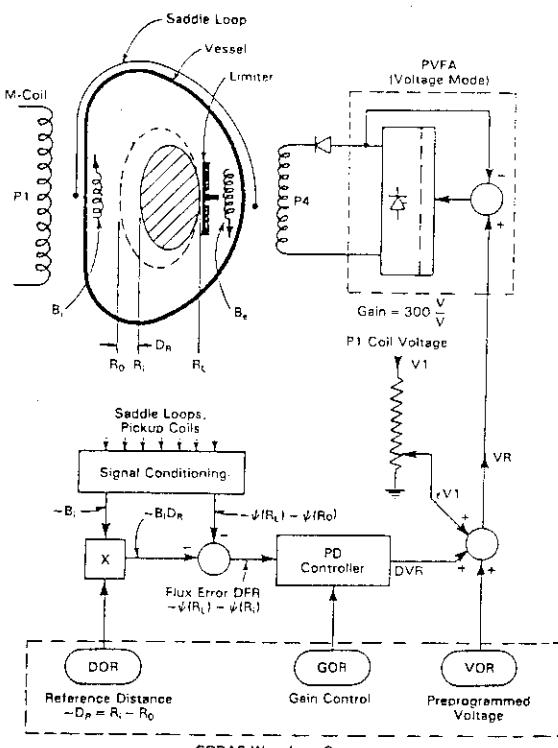


Fig. Block diagram of the radial position control.

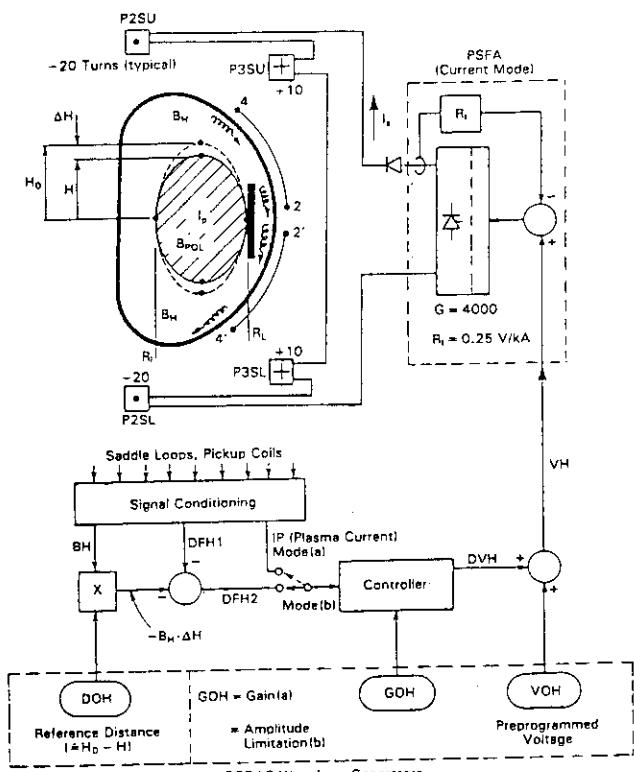


Fig. Block diagram of the plasma shape control.

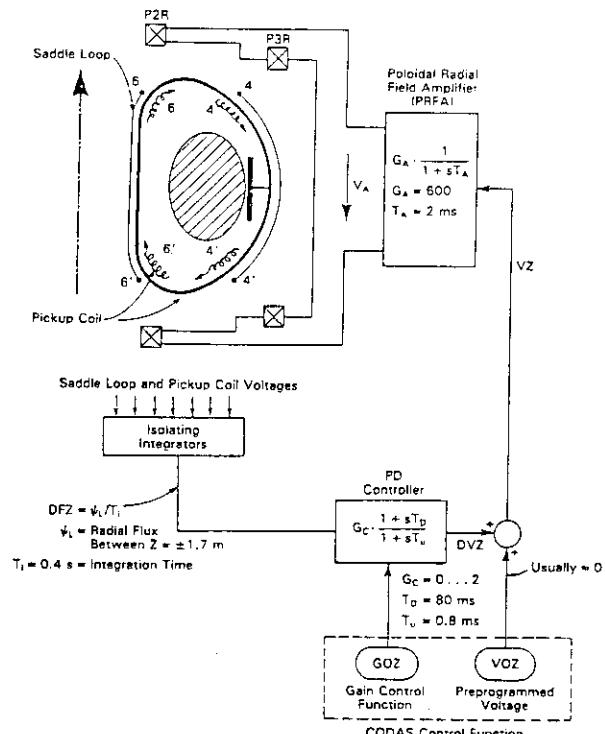


Fig. Block diagram of the vertical position control.

Fig. 3.1-11 Block diagrams of feedback control in JET[6].

### 3.2 FER のプラズマ電流，位置，形状制御系

本節では，前節のサーベイを受けて，FERにおけるプラズマ電流，位置，形状制御設計の方向性を考察してみる。FERのプラズマ電流，位置，形状制御系（PCPS Control System）の概念構想については，既に，JAERI-M 86-134〔2〕に記載した。Fig. 3.2-1にPCPS制御系の概念図を再録する。PCPS制御系は通常の制御系と同様に，電源系，コイル系，計測系，コントロール計算機から構成されている。

PCPS制御系を大きく別けて，PF制御系とCF制御系とから構成される。PF制御系は，トロイダル・コイルの外側のPFコイルを制御し，プラズマ電流の励起，維持のための磁束および平衡磁場を発生し，プラズマの電流，位置，形状を放電全期に渡って所定のものに維持する。PF制御系の特徴は，大電流容量（高磁場容量）を持つが，低電圧系であり，その応答速度は遅く，1秒オーダーの制御速度しか持たないことがある。一方，CF制御系は，トロイダル・コイル内側の制御コイル（CFコイル）を制御し，水平，垂直磁場を発生し，プラズマの垂直，水平位置を制御する。CF制御系の電流容量は小さいが，応答速度は速く（ $\leq 100$  ms），垂直位置不安定性を押えると共に，高速の水平位置制御を行なう。この様な二系統の考え方には，JETやJT-60には見られないが，JFT-2MやTEXTORに見られる。これは主に，TFコイル外側コイルに速答性を持たせると電源容量が過大となり，速答性をTFコイル内側の電流容量の小さいコイルに持たせ，全体的な電源容量を縮小するためと考えられる。

#### (1) コイル系

FERのPFコイル系の設計は，ハイブリッド構成をとっている。また，総ATは100 MAT程度となっている。総合的に各時刻のOH磁場と平衡磁場を発生し，かつ空間的制約および超電導コイルの最大磁場制約のもとでコイル系を最小化するためには，コイル電流間の打消を少なくできるハイブリッド構成のコイル系が最適であろう。しかし，現在のFER設計においては，ほぼ各コイルの電流は独立であるとしており，その自由度は16程度が考えられている。制御の観点からは，恐らくこの様に多くの自由度は不要であり，むしろ制御系を複雑にする可能性がある。自由度を減少させる方法としては，電源あるいは制御計算機により行なうことも考えられるが，コイル系としても若干電流容量を増加させても，PFコイル系を機能別に整理し，簡略化する方が合理的かもしれない。

CFコイル（制御コイル）はTFコイルの内側に配置され，その電流容量は数100 kATである。現在のところ，上下2本のコイルにより水平，垂直磁場を発生し，プラズマの水平，垂直位置を高速に制御するとしている。プラズマ電流および形状の高速制御は困難であり，現時点では不必要と考えている。

#### (2) 電源系

FERのPF電源容量は，遮断回路を除く総電力容量が約1 GW，全供給蓄積エネルギーが6～7 GJ程度となっている。これは，JETやJT-60に比べて，前者が1～2倍，後者が10倍程度と考えられる。この様に，エネルギー量が電力量に比べて大きいことは，FERにおいては，JETやJT-60に比べてプラズマ立上げや立下げの変化速度を小さく，1/10近くにしなければならないことを意味している。電力容量は，主としてプラズマの放電シナリオにより決まり，

RF 加熱および電流駆動によりできるだけ変化率を小さくすることにより、電力容量を極力小さなものとしている。このため、PF 電源系の発生できる磁場変化率は、ワンターン電圧 1 V、水平、垂直磁場がそれぞれ 100 Gauss/sec 程度となっている。これらは、JET や JT - 60 の 1/10 以下であり、非常に弱い電源となっている。

一方、CF 電源系の電力容量は 20 ~ 50 MW 程度であり、JT - 60 や JET の水平磁場電源と同じか数倍の大きさである。CF 電源系は高速制御を目的としているが、プラズマの変位を数 cm 程度の範囲しか押えることができない。急激な大きな外乱が加わった時は制御不能となる。以上の様に、PF および CF 電源は、極小化されているため、この様な電源容量で充分制御できるのか、あるいは、プラズマ運転シナリオや本体構造も含めてこの様な低電源容量で運転可能にするにはどの様なシステムを組んで行くか、今後充分な検討を必要とするであろう。

電源応答速度については、PF 制御系が ~ 1 秒、CF 制御系が ~ 100 msec 程度の制御応答を想定しており、電源応答速度も現在の装置に比べてより速いものが必要とされるとは思われない。

### (3) 計測系

FERにおける計測系の問題として、高熱、高放射線下での磁場計測と、積分器のドリフトが考えられる。プラズマの電流、位置、形状計測を磁場計測により考えるとして、計測法としては、JET の様なサドルコイルと磁気プローブによる方法と、JT - 60 の様な二方向の磁場を磁気プローブにより測定する方法が考えられる。この二方法は原理的に等価であり、いずれを選択するかは装置設計による。JT - 60 の磁気プローブ方式の方が、やや設置精度が厳しいと思われる。計測点数は JET や JT - 60 の程度のポロイダル方向に ~ 10 点 × 2 ( $B_\theta$ ,  $B_\phi$  あるいは,  $\varphi$ ,  $B_\theta$ ) が必要であろう。また、ダイバータ配位を検出するために、他の数点の計測が必要であろう。これらの計測量から制御量を導出する方法としては、JT - 60 等で行なわれている回帰法が有望と思われる。特にダイバータ形状を少ない計測点数で決定するためには回帰法が必須であろう。

FERにおいて、第一壁近傍の磁場計測は、高放射線下にあり、その保護を考えると、相当な時間遅れが予想され、現在の装置の様に高速で計測できるかは疑問である。高放射化でのプローブ等の開発が必要とされると共に、計測遅れを含んだ制御系を考えて行く必要がある。

FER の放電時間は 1000 秒オーダであり、JT - 60 の結果をそのまま延長すると、積分器のドリフトは深刻なものとなる。より精度の高い積分器を開発することが必須である。磁気プローブ等は積分器の問題があるが、ホール素子等により直接磁場を計測すればこの問題は回避できる。これらの素子をプラズマ近傍の放射線の強い領域で使用するのは不可能であろうが、プラズマから相当離れた所では使用可能に思える。また、PF, CF コイルの電流も精度よく計測できるであろう。これらの計測はプラズマ変化に対して時間遅れがあるが、プラズマの電流、位置、形状の情報を持っている。これらの信号より、積分ドリフトを補正する可能性もある様に思える。

### (4) フィードバック制御

FER の PCPS 制御において、フィードバック制御される制御量を考えてみる。まずプラズマ電流  $I_p$ 、水平位置  $R_p$ 、垂直位置  $Z_p$  は必須であろう。次に形状として橙円度  $\kappa$  は必要であろう。

三角度  $\vartheta$  は、必ずしも橿円度と独立して制御できる必要はないかもしれない。ダイバータ配位の制御として、他に一か二の自由度が必要であろう。この様に、制御量としては最低 5 ~ 7 が必要とされるであろう。これだけで充分かどうかは、プラズマ・パラメータ間の相関を調べる必要がある。これらの制御を非干渉化して制御するか、あるいは多変数制御として総合的に制御するかは今後の問題であるが、システムの簡略化や制御の明確化のためには、JET や JT - 60 の様にほぼ非干渉化されたシステムが良い様に思える。

PF および CF 系は、大きさや速度が異なるが、同機能の磁場（水平、垂直磁場）を発生する。従って、PF および CF 系の制御は独立に、あるいは非干渉化によっては考えられない。従来この様なシステムをとっている、JFT - 2 M 等においては、PF 系はプレプログラム制御を行っている。FER の PF 系の水平、垂直磁場発生の機能は、プラズマ位置制御と言うより、CF コイルの電流負担を軽減し、CF 系の位置制御機能を増すことにある。従って、CF 系は通常の高速のプラズマ位置制御を行ない、PF 系は CF コイルの低周波（～ 1 sec）の電流の零からの変動を抑える様に制御することになる。

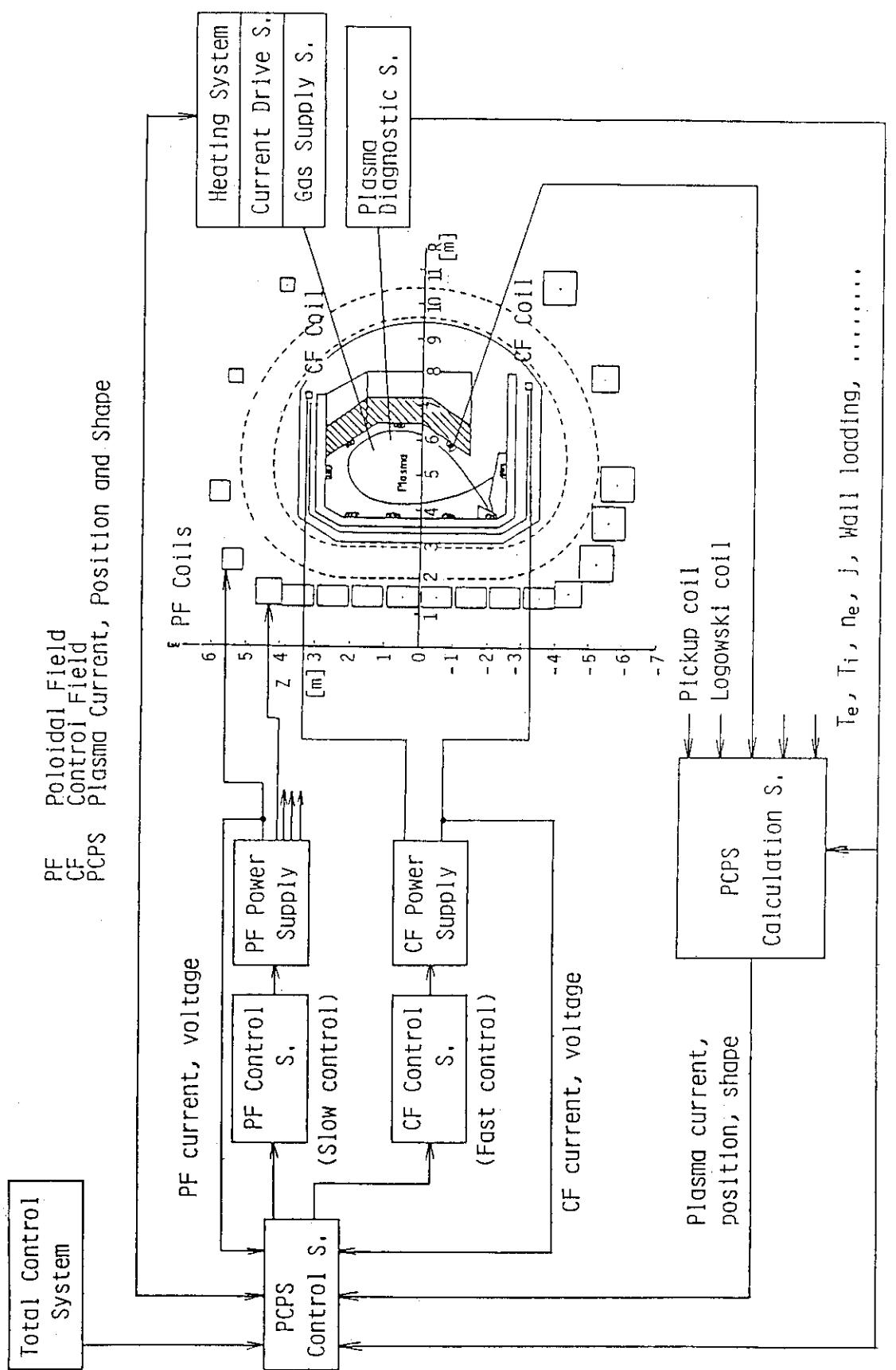


Fig. 3.2 - 1 Plasma Current, Position and Shape (PCPS) Control System [2]

### 3.3 プラズマ、コイルおよび渦電流系のモデル化

PCPS制御系を設計して行くには、プラズマ、コイル系、導体内渦電流、電源系、計測系、制御計算機の特性を明らかにし、それらを全体として組込んだ場合、どの様な動作をするか調べて行く必要がある。このためには、制御ループ全体をモデル化し、それを解析する手法を開発する必要がある。ここでは、上の解析で主要となるプラズマ、コイルおよび渦電流系のモデル化を試みる。

#### (1) 一般的考察

本来プラズマは分布定数系であり、その内部での輸送等を考えると、軸対称性を仮定しても、二次元中での運動を解く必要があり、それに対する計算コードも開発されつつある〔13〕。その中では、流体の運動、磁場の拡散、粒子および熱の輸送等が Self - Consistent に解かれる。この様なコードの開発はプラズマの位置、形状制御の上からも重要と考えられるが、PCPS 制御系を実際的に設計してゆくには、コードが大がかりすぎ、より簡略化したモデルによる解析が妥当であろう。すなわち、プラズマをより少數の集中定数により表現し、その運動を解き、全体の制御ループに組み込むことである。

まず最初に一般的な形でプラズマ、コイルおよび渦電流系のモデルについて考察しその構造を調べる。一般にはプラズマは MHD 的に各時刻で平衡状態にある。この平衡状態は一般的に次の様に表わせる。

$$B = I_p b \quad (S, X) \quad (3.3-1)$$

ここで  $I_p$  はプラズマ電流、 $S$  はプラズマ断面形状を表わすパラメータ、 $X$  はプラズマの内部量を表わすパラメータである。平衡を保持する外部磁場パラメータ  $B$  はプラズマ電流に比例し、プラズマの断面形状および内部パラメータに依存する。ここで  $b$  は一般的には  $S$  および  $X$  に依存する非線型な函数である。

プラズマ断面形状を表わすパラメータ  $S$  としては、プラズマ中心位置  $R_p$ 、 $Z_p$ 、橿円度  $\kappa$ 、三角度  $\vartheta$  等が考えられる。あるいは、表面磁気面上の点の座標位置やヌル点位置座標をとることも考えられる。プラズマの内部量を表わすパラメータ  $X$  としては、プラズマの内部量を集中定数的に表わす、 $a_p$  (プラズマ小半径)、 $\beta_p$  (ポロイダル・ベータ値)、 $\ell_1$  (規格化インダクタンス) 等が考えられる。すなわち、プラズマの電流分布に關係するパラメータ群である。 $a_p$  は断面形状を表わすパラメータとも考えられるが、トロイダル磁束の保存やりミタとの位置関係などにより決められる量であり、平衡のみよりは決まらず、プラズマの内部パラメータと考へる。次に外部磁場を表わすパラメータ  $B$  は、外部磁場を多重極磁場に展開した場合の各成分 ( $B_V$  ; 垂直磁場、 $B_Q$  ; 四重極磁場、等) の大きさをとることができる。あるいは、これらの磁場がコイルで発生されている場合、コイル電流そのものをとることも可能である。ただし、一定磁束を表わす OH 磁場は、平衡とは關係なく、(3.3-1) 式には現われない。 $S$ 、 $X$  および  $B$  として、どの様なパラメータを選択するかは、問題によるが、いずれにしろ互に独立度の高いパラメータを選択する必要があろう。

外部磁場を表わすパラメータ  $B$  は、外部導体系に流れる電流 (コイル電流、渦電流) によつ

て表現できる。すなわち、

$$\mathbf{B} = \nu \mathbf{I} \quad (3.3-2)$$

となる。ここで  $\mathbf{I}$  はコイル電流や渦電流の大きさを表わすパラメータである。 $\nu$  は各電流により磁場を表わす行列であり、 $\mathbf{B}$  は  $\mathbf{I}$  により線形関係で表わされる。渦電流は一般に、軸対称ではないが、(3.3-2)式の様に表わすには、渦電流の作る磁場をトロイダル方向に平均化する必要がある( $\mathbf{B}$  は軸対称磁場を表現するとする)。(3.3-1, 2)より平衡方程式は、

$$\mathbf{I}_p \cdot \mathbf{b}(\mathbf{S}, \mathbf{X}) = \nu \mathbf{I} \quad (3.3-3)$$

と表現できる。

次に、プラズマ電流の支配方程式(回路方程式)は、次の様に表わせる。

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{L}_p \mathbf{I}_p) + R_p \mathbf{I}_p + \dot{\Phi}_p = 0 \quad (3.3-4)$$

ここで  $\cdot$  は時間微分を表わす。 $\mathbf{L}_p$  はプラズマの自己インダクタンスであり、 $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{X}$  の函数、すなわち  $\mathbf{L}_p(\mathbf{S}, \mathbf{X})$  である。 $R_p$  はプラズマの一一周抵抗であり、プラズマ内部パラメータの一つと考えられる。 $\Phi_p$  はプラズマ柱と鎖交する外部磁場磁束であり、一般に、

$$\dot{\Phi}_p = \mathbf{M}_p^t(\mathbf{S}, \mathbf{X}) \cdot \mathbf{I} \quad (3.3-5)$$

と表現できる。 $\mathbf{M}_p$  はプラズマと外部導体系の相互インダクタンスを表わし、それは、 $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{X}$  に依存している。 $t$  はベクトルの転置を表わしている。(3.3-4, 5)式を合わせて、

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{L}_p \mathbf{I}_p) + \frac{d}{dt} (\mathbf{M}_p^t(\mathbf{S}, \mathbf{X}) \cdot \mathbf{I}) + R_p \mathbf{I}_p = 0 \quad (3.3-6)$$

と表現できる。

一方外部電流系に対しては、次の回路方程式が成立する。

$$\dot{\mathbf{I}} + \frac{d}{dt} (\mathbf{I}_p \mathbf{M}_p) + \eta \mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (3.3-7)$$

ここで  $\mathbf{I}$  は外部電流系間のインダクタンス・マトリックスであり、電流流路を一定とすると一定行列である。第二項はプラズマ変動による起電力であり、 $\eta$  は外部電流系の抵抗を表わし、一般的には行列である。 $\mathbf{V}$  は外部導体系に加わる電源系からの起電力であり、渦電流に対しては一般的に零である。 $\eta$  は時間的に一定であると仮定する。

最後に、プラズマ内部パラメータ  $\mathbf{X}$  の変化を支配する方程式が必要である。これに対しては、プラズマ内部の輸送過程や壁との相互作用、外部よりの加熱等に関連しており、一般的に表現することは困難であるが、磁気量の保存や断熱条件等を加えることにより、簡単な表現を得ることができ次の様な表現が可能とする。

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{S}, \dot{\mathbf{S}}, \mathbf{I}_p, \dot{\mathbf{I}}_p, \mathbf{Y}, \dot{\mathbf{Y}}) = 0 \quad (3.3-8)$$

ここで、 $Y$ は加熱等の外部より加わる作用を表わすパラメータとする。 $(3.3-8)$ 式は一般に内部パラメータの非線形な関係を表現する。 $(3.3-8)$ 式には、多くの変数が陰に含まれる可能性が大きい。

以上、平衡方程式 $(3.3-3)$ 式、プラズマの回路方程式 $(3.3-6)$ 、外部導体系回路方程式 $(3.3-7)$ 式および内部量の支配方程式 $(3.3-8)$ 式を連立して解くこととなる。これらの関係は一般に複雑な非線形関係にあり、制御モデルを簡略化するには、時間と共に緩やかに変動する基準量と、変位変形等の急激な時間変化の微小量に分離し、線形化する。すなわち、各パラメータを次の様に分離する。

$$\begin{aligned} S &= S_0 + s, \quad X = X_0 + x, \quad I_p = I_{p0} + i_p, \quad I = I_0 + i, \\ R_p &= R_p + r_p, \quad Y = Y_0 + y, \quad V = V_0 + v \end{aligned} \quad (3.3-9)$$

基準量は、それぞれ、

$$\begin{aligned} I_{p0} b_0 &= \nu I_0 \\ L_{p0} \dot{I}_{p0} + M_{p0}^t \cdot \dot{i}_0 + R_{p0} I_{p0} &= 0 \\ L \dot{i}_0 + M_{p0} \dot{I}_{p0} + \eta I_0 &= V_0 \\ G_0 &= 0 \end{aligned}$$

を満足している。ここで $X_0, S_0$ の時間変化は無視できるとしている。0の添字をつけたものは、基準量を代入した値である。各式を変動量に対して線形化すると、 $(3.3-3)$ の平衡方程式は、

$$b_0 i_p + b_{s0} s + b_{x0} x = \nu i \quad (3.3-10)$$

となる。ここで $b_{s0}, b_{x0}$ は $b$ の各成分を $S, X$ の成分で微分し、基準量を代入した行列である。 $(3.3-6)$ 式に対しても、

$$L_{p0} \dot{i}_p + M_{p0}^t \cdot \dot{i} + I_{p0} \delta L_p + I_0^t \cdot \delta M_p + r_p I_{p0} + R_{p0} i_p = 0 \quad (3.3-11)$$

となる。ここで

$$\delta L_p = L_{p,s0}^t \cdot s + L_{p,x0}^t \cdot x \quad (3.3-12)$$

$$\delta M_p = M_{p,s0}^t s + M_{p,x0}^t x \quad (3.3-13)$$

と $s$ と $x$ で線型に表わせる。また $(3.3-7)$ 式は、

$$L \dot{i} + M_{p0} \dot{i}_p + I_p \delta M_p + \eta i = v \quad (3.3-14)$$

となる。最後に $(3.3-8)$ 式は、

$$\delta \mathbf{G} = G_{x_0}^t \mathbf{x} + G_{x_0}^{t \cdot} \dot{\mathbf{x}} + G_{s_0}^t \cdot \mathbf{s} + \dots = 0 \quad (3.3 - 15)$$

となる。この様に、解くべき方程式系は、変動量  $i_p, i, v, s, x, r_p, y$  に対する一階線形微分方程式にまとめられる。 $(3.3 - 10)$  式は時間微分項を含まない、代数方程式であり、方程式系より、 $s$  を消却することが可能である。あるいは、 $(3.3 - 10)$  式全体を時間微分し、他の方程式と連立させて解く。

## (2) 逆アスペクト比展開

前項(1)においては、一般的にプラズマ、コイルおよび渦電流系のモデルを考察したが、ここではより具体的にそのモデル化で現われる函数関係の定式化を検討する。この函数関係を求める手法としては主として次の手法が考えられる。

- i) 逆アスペクト比展開等により解析的に求める方法。
- ii) 平衡解析コードにより数値解析を行ない函数関係を求める。多数の平衡解より回帰解析する手法が多くとられる。あるいは、基準平衡状態に対し、微小の変動を加え、その変動分のみを取り出す方法も考えられる。
- i) の方法は、函数関係が解析的に与えられ取扱いやすく、また、定性的に把握しやすい利点がある。しかし、適応できるアスペクト比や、非円形度に限界があり、精度的に ii) の方法より悪い欠点がある。またダイバータ配位のヌル点に対する議論等は困難である。ii) の方法は精度は高いが、大規模な平衡計算コードにより処理する必要がある。

ここでは、i) の解析的に求める方法をとる。将来的には ii) の方法やあるいは i) の補正が必要となろうが、モデルの構造は同じであり、発展は容易であろう。解析的な方法として、円形プラズマに対して逆アスペクト比の二次のオーダまで展開した近似が参考文献 [14] に示されている。しかし、この近似はプラズマ断面変形を議論していない。また文献 [15] においては、逆アスペクト比の一次の展開で、非円形度を考慮しているが、0次として円形を考えているため、非円形度が大きい時には精度が下がる。ここでは、文献 [16] による、逆アスペクト比の一次の展開で、0次として非円形度を含めた方法を採用する。この場合でも、適用できるアスペクト比および非円形度には限界があるが、適用限界がより広いものとなろう。

ここで述べる解析法は文献 [16] に詳しく述べられており、詳細は省略するが、MKSA 単位系で表わし、より物理量を陽的に表わすこととする。また、文献 [16] の通り、プラズマは上下対称とする。上下非対称化は同様な手法により定式化できる。まず、単位系を明確にするために、プラズマの平衡方程式（グラッド・シャフランノフ方程式）を書き下だす。座標系は円筒座標  $(R, \phi, Z)$  とする。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = - \mu_0 R j_\phi \quad (3.3 - 16)$$

$$j_\phi = R P' + \frac{F F'}{\mu_0 R} \quad (3.3 - 17)$$

ここで、 $\mu_0$  は真空透磁率、 $P(\psi)$ ；プラズマ圧力、 $F(\psi)$ ；ポロイダル電流函数、 $\psi$ ；ポロイダル磁束函数である。ダッシュは  $\psi$  による微分を表わす。 $j_\phi$  はトロイダル方向電流分布を

表わす。 $\Psi$ は磁気ベクトル・ポテンシャルにより、 $\Psi = R A_\phi$ と表わされる。また各方向の磁場は、

$$B_R = -\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad B_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R}, \quad B_\phi = \frac{F}{R} \quad (3.3-18)$$

によって表わされる。

今、(3.3-17)式を

$$j_\phi = j_0 \left\{ \frac{R}{R_p} \beta_p + \frac{R_p}{R} (1 - \beta_p) \right\} \left\{ J_{0,\sigma} + (1 - J_{0,\sigma}) \frac{\Psi}{\Psi_0} \right\} \quad (3.3-19)$$

と仮定する。ここでは $\Psi$ のプラズマ表面での値は0とする。 $j_0$ ,  $\Psi_0$ は磁軸(0次の解)における $j_\phi$ ,  $\Psi$ の値である。 $R_p$ はプラズマ中心の主半径,  $\beta_p$ はボロイダル・ベータ値である。 $J_{0,\sigma}$ は0から1の値をとり, 0の時はパラボラ分布電流を表わし, 規格化内部インダクタンス $\ell_i = 1$ となる。また1の時は平坦分布を表わし $\ell_i = 0.5$ となる。 $J_0(x_0) = J_{0,\sigma}$ を満足する $x_0$ を以下用いる。 $J_n(x)$ は以下のベッセル函数を表わす。 $x_0$ は $J_{0,\sigma} = 1 \rightarrow 0$ に対応して $x_0 = 0 \rightarrow 2.4$ ( $J_0(x)$ の一番目の零点)と変わる。 $j_0$ ,  $\Psi_0$ に対して以下の関係がある。

$$j_0 = \frac{x_0 I_p}{2 \pi r_p^2 J_1(x_0)}, \quad \Psi_0 = \frac{(1 - J_{0,\sigma}) \mu_0 I_p}{2 \pi x_0 J_1(x_0) R_p} \quad (3.3-20)$$

(3.3-20)式は $J_{0,\sigma} \rightarrow 1$ ,  $x_0 \rightarrow 0$ (平坦分布)の時,

$$j_0 = \frac{I_p}{\pi r_p^2}, \quad \Psi_0 = \frac{\mu_0 I_p}{2 \pi R_p} \quad (3.3-21)$$

となる。ここで $r_p$ はプラズマ平均小半径である。また,

$$\ell_i = 1 - \frac{J_0 J_2}{J_1^2} \quad (3.3-22)$$

の関係がある。以下の $J_n = J_n(x_0)$ を表わす。

今、プラズマ中心を中心とするトロイダル座標(Fig. 3.3-1)を考える。プラズマの表面形状を

$$\rho_\sigma = r_p (1 + \sum_{n=2}^\infty \epsilon_n \cos n\xi) \quad (3.3-23)$$

で表わされるとする。この座標系で一般の外部磁場は、逆アスペクト比の展開の一次までとると、

$$\Psi_e = \sum_{n=0}^\infty C_n \left( \frac{\rho}{r_0} \right)^n \cos n\xi + \frac{r_0}{R_p} \sum_{n=0}^\infty W_n \left( \frac{\rho}{r_0} \right) \cdot \left( \frac{\rho}{r_0} \right)^n \cos n\xi \quad (3.3-24)$$

で表わされる。ここで

$$W_n(x) = -C_{n+1} \left( \frac{x}{2} \right)^2 \quad (3.3-25)$$

である。 $r_o$ は規格化定数である。 $C_o$ は定数項を表わし平衡とは関係ない。磁場係数  $C_n$ とプラズマの位置  $R_p$ および、変形  $\varepsilon_n$ の関係は以下の様に表わされる。

$$C_1 = \frac{\mu_0 r_p I_p}{4\pi} \left[ \ell_i \frac{8R_p}{r_p} + \beta_p + \frac{\ell_i}{2} - \frac{3}{2} + \frac{x_o J_1}{J_2} \left( \ell_i - \frac{1}{2} \right) \beta_p \varepsilon_2 \right] \quad (3.3-26)$$

$$C_n = \frac{\mu_0 R_p I_p}{4\pi} \left( \frac{r_o}{r_p} \right)^n \frac{x_o}{n} \left( \frac{J_{n-1}}{J_n} - \frac{J_o}{J_1} \right) \varepsilon_n \quad (3.3-26)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{\mu_0 r_p I_p}{4\pi} \left( \frac{r_o}{r_p} \right)^n \left[ \left( \frac{x_o}{4n(n-1)} \left\{ n \frac{J_n}{J_{n-1}} - (n-1) \frac{J_{n+1}}{J_n} + \frac{J_o}{J_1} \right\} \varepsilon_{n-1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x_o}{4} \left( \frac{J_{n-1}}{J_n} - \frac{J_o}{J_1} \right) \varepsilon_{n+1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \beta_p \left\{ \frac{x_o}{2n} \left\{ \frac{J_n}{J_{n+1}} - (n-1) \frac{J_{n+1}}{J_n} \right\} \varepsilon_{n-1} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{x_o}{2n} \left\{ n \frac{J_n}{J_{n+1}} - (n+1) \frac{J_{n-1}}{J_n} \right\} \varepsilon_{n+1} \right\} \right] \right] \end{aligned}$$

$$(n \geq 2) \quad (3.3-27)$$

(3.3-26) 式はいわゆる垂直磁場と水平位置の関係であるが、梢円度の補正が加っている。

(3.3-27) 式は三角度以上の変形と多重極磁場の関係であり、第一項は0次の関係、その後の項は一次の関係であり、変形間の結合が起こることを示している。ベッセル函数を含む係数は、それらが電流分布（すなわち  $\ell_i$ ）に依存していることを示す。

多くの場合、外部磁場はプラズマ中心ではなくて、空間で固定した座標系で与えられる。固定したトロイダル座標系 (Fig. 3.3-1) を  $(r, \theta)$  で表わし、その中心を  $R_o$  とする。

$$A = R_o - R_p \quad (3.3-28)$$

として座標変換をする。すなわち、

$$\begin{aligned} \rho \cos \xi &= r \cos \theta + A \\ \rho \sin \xi &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (3.3-29)$$

で変換する。この座標系で外部磁場が、

$$\Psi_e = \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{C}_n \left( \frac{r}{r_o} \right)^n \cos n\theta + \frac{1}{R_o} \sum_{n=0}^{\infty} W_n \left( \frac{r}{r_o} \right) \left( \frac{r}{r_o} \right)^n \cos n\theta$$

(3.3-30)

で表わされるとする。第二項は一次の補正項である。この時 (3.3-24) 式と (3.3-30) 式の係数の関係は、座標変換により、

$$C_o = \tilde{C}_o + \frac{A}{r_o} \tilde{C}_1 \quad (3.3-31)$$

$$C_n = \tilde{C}_n + (n+1) \frac{A}{r_o} \tilde{C}_{n+1} - \frac{A}{4R_o} \tilde{C}_n \quad (n \geq 1) \quad (3.3-32)$$

となる。(3.3-26) 式と (3.3-32) 式の  $n=1$  を等値したものが水平磁場方向の平衡方程式となり、(3.3-27) 式と (3.3-32) 式を等値したものが変形に対する方程式となる。以上で前項(1)の (3.3-1) の関係式が導出された。

次に、プラズマと外部回路系のインダクタンスを求めるためには、プラズマの作る磁束を求める必要がある。 $R_o$ を中心とするトロイダル座標で、 $A/r_o$ を逆アスペクト比の一次とし、逆アスペクト比の一次まで磁束函数を求めるときの様になる。

$$\begin{aligned} \Psi_p &= \frac{\mu_0 R_o I_p}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r} - 2 \right) \\ &+ \frac{\mu_0 r_o I_p}{4\pi} \left[ -\ell_n \frac{8R_o}{r} + 1 - \frac{r_p^2}{r^2} \left\{ \beta_p - \frac{1}{2} + \frac{\ell_i}{2} - \frac{x_o J_1}{8J_2} \ell_i \varepsilon_2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x_2 J_1}{J_2} \left( \ell_i - \frac{1}{2} \right) \beta_p \varepsilon_2 \right\} + \frac{2R_o A}{r^2} \right] \left( \frac{r}{r_o} \right) \cos \theta \\ &+ \frac{\mu_0 R_o I_p}{4\pi} \left[ \sum_{n=2}^{\infty} (d_{on} + d_{in}) \left( \frac{r}{r_o} \right)^{-n} \cos n\theta \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=3}^{\infty} \frac{r_o d_{on-1}}{4R_o} \left( \frac{r}{r_o} \right)^{-n+2} \cos n\theta \right] \quad (3.3-33) \end{aligned}$$

ここで

$$d_{on} = \left( \frac{r_p}{r_o} \right)^n \frac{x_o}{n} \left( \frac{J_{n-1}}{J_n} + \frac{J_o}{J_i} \right) \varepsilon_n$$

$$d_{in} = \frac{r_p}{R_o} \left( \frac{r_p}{r_o} \right)^n \left[ \frac{x_o}{4n} \left( \frac{J_{n+1}}{J_n} + \frac{J_o}{J_i} \right) \varepsilon_{n+1} \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{x_o}{4n(n+1)} \left\{ n \frac{J_n}{J_{n+1}} - (n+1) \frac{J_{n-1}}{J_n} + \frac{J_0}{J_1} \right\} \varepsilon_{n+1} \\
& + \frac{x_o}{2n} \left\{ -n \frac{J_n}{J_{n-1}} + (n-1) \frac{J_{n+1}}{J_n} \right\} \beta_p \varepsilon_{n-1} \\
& + \frac{x_o}{2n} \left\{ -n \frac{J_n}{J_{n+1}} + (n+1) \frac{J_{n-1}}{J_n} \right\} \beta_p \varepsilon_{n+1} \\
& + \frac{R_o A}{r_p^2} x_o \left( \frac{J_n}{J_{n-1}} + \frac{J_0}{J_1} \right) \varepsilon_{n-1} \quad (n \geq 2)
\end{aligned}$$

(  $\varepsilon_1 = 0$  とおく ) ( 3.3 - 34 )

外部コイルが  $R_o$  を中心とする座標系で  $(r_e, \theta_e)$  である場合、プラズマとの相互インダクタンスは、

$$M_{pe} = \frac{2\pi}{I_p} \Psi_p (r_e, \theta_e) \quad (3.3 - 35)$$

で表わされる。

次に、 $(r_e, \pm\theta_e)$  の上下にあるコイルに  $I_e$  の電流が流れているとすると、その作る磁場は、(3.3 - 30) の表式で表わすと次の様になる。

$$\begin{aligned}
\tilde{C}_0 &= \frac{\mu_o R_o I_e}{\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r_e} - 2 \right) - \frac{\mu_o r_e I_e}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r_e} - 1 \right) \cos \theta_e \\
\tilde{C}_1 &= \frac{\mu_o R_o r_e I_e}{\pi r_e} \cos \theta_e - \frac{\mu_o r_e I_e}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r_e} - \frac{1}{2} \right) - \frac{\mu_o r_e I_e}{4\pi} \cos 2\theta_e \\
\tilde{C}_n &= \frac{\mu_o R_o I_e}{n\pi} \left( \frac{r_e}{r_e} \right)^n \cos n\theta_e \\
&- \frac{\mu_o r_e I_e}{4n\pi} \left( \frac{r_e}{r_e} \right)^n \left\{ \frac{2n-1}{n-1} \cos(n-1)\theta_e + \cos(n+1)\theta_e \right\}
\end{aligned}$$

( 3.3 - 36 )

多数のコイルが有る場合は、上式の線形和となる。上式は  $r \leq r_e$  の領域の磁場を示すが、 $r \geq r_e$  においては、コイルの作る磁場は以下の様に表わされる。

$$\begin{aligned}
\Psi_e (r, \theta, r_e, \theta_e) &= \frac{\mu_o R_o I_e}{\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r} - 2 \right) - \frac{\mu_o I_e}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r} - \frac{1}{2} \right) r_e \cos \theta_e \\
&- \frac{\mu_o I_e}{2\pi} \left( \ell_n \frac{8R_o}{r} - 1 + \frac{r_e^2}{2r^2} \right) r \cos \theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{n=1} \frac{\mu_0 R_o I_c}{n\pi} \frac{r_c^n}{r^n} \cos n\theta_c \cos n\theta \\
 & - \sum_{n=1} \frac{\mu_0 I_c}{4n\pi} \frac{r_c^{n-1}}{r^{n-1}} \left( 1 + \frac{n}{n+1} \frac{r_c^2}{r^2} \right) \cos n\theta_c \cos (n+1)\theta \\
 & - \sum_{n=1} \frac{\mu_0 I_c}{4n\pi} \frac{r_c^{n+1}}{r^n} \frac{2n+1}{n+1} \cos (n+1)\theta_c \cos n\theta
 \end{aligned}$$

(3.3-37)

上式より、 $(r_1, \pm\theta_1)$  のコイル・ペアと  $(r_2, \pm\theta_2)$  のコイル・ペアの間の相互インダクタンスは、 $r_1 \geq r_2$  とした時は、

$$M_{12}^c = 4\pi \frac{\psi_c(r_1, \theta_1, r_2, \theta_2)}{I_c} \quad (3.3-38)$$

となる。 $(3.3-38)$  は  $r_1 = r_2$ ,  $\theta_1 = \theta_2$  で発散するが、これは、コイルを線電流としたことにより、コイルに適当な巾を持たせれば自己インダクタンスも計算可能となる。

以上、プラズマおよびコイルについて平衡方程式およびインダクタンスの関係について述べた。渦電流に対しても、導体系が軸対称であれば、同様な議論を展開できるであろう。

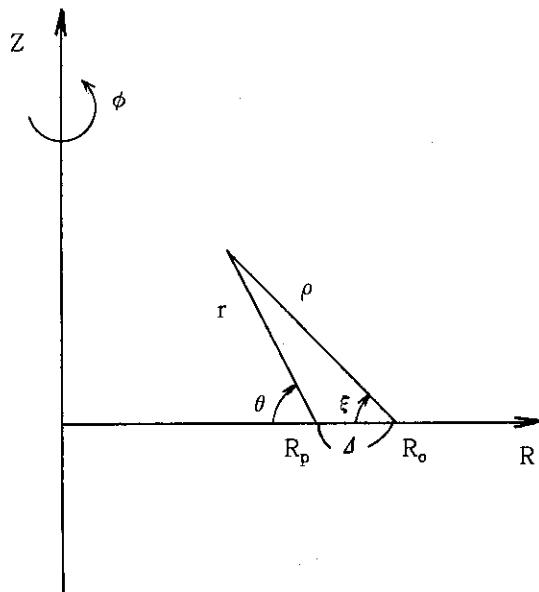


Fig. 3.3-1 Toroidal coordinate system

## 4. おわりに

本稿においては、61年度のプラズマ電流、位置および形状制御検討作業内容について述べた。まず、2.1節において、従来の垂直位置制御検討手順についてまとめた。現在のところ、この手順が必ずしもシステム化されておらず、また各段階の判断基準も明確であるとは言えない。特に今年度の合理化設計の様な、設計パラメータや本体構造が未確定な場合の検討手法に欠けていた。このことは、垂直位置制御が、本体構造に密接に関連しており、その具体的な設計無しには、明確な結論を下せないところにあるためと思われる。今後、よりシステム的に手順を進めて行く手法を開発すべきであろう。

次に2.2節において、本年度の合理化で問題となった高橿円度プラズマの垂直位置制御について述べた。橿円度が2程度のプラズマを安定化することは不可能ではないが、相当の困難を予想させる。特に安定化シェルの条件が厳しい。高橿円プラズマの垂直位置制御を従来のFERと同じ考え方、基準で考えており、その見直しが必要かもしれない。また、より詳細な具体的構造を考えた検討が必要とされる。

第3章は、プラズマ電流、位置、形状制御系について述べており、3.1節ではJETおよびJT-60の制御系のサーベイ、3.2節ではFERの制御系の若干の考察を行っている。JETは大電流容量で比較的低電圧で制御にはJT-60ほどの厳密さは要求していないと思われる。一方、JT-60は高電圧により応答性を速め、厳密な制御を可能としており、このため制御性能はダイバータ配位制御を含めて、非常に良く見える。FERの制御を考えて見ると、装置規模を考えると、電力容量はJETやJT-60に比べて格段に小さく、制御の巾が小さい。また、計測の時間遅れや、炉本体構造の磁気遮蔽効果を考えるとより制御の困難が増す。この様な中で、充分な制御を行なうにはどの様にすれば良いか、またそれは可能かどうか今後詰めて行く必要がある。

3.3節においては、プラズマ電流、位置、形状制御系の解析に必要となる。プラズマ、コイル系および渦電流をプラズマ変形を含んだ形で、初步的な定式化を行った。この様な定式化を発展させ、制御系の特性を把握して行くことは、制約の多い制御系を設計して行く上で不可欠なことであろう。

## 謝　　辞

本検討を行なうにあたり、FER設計チームメンバーに多くのコメントや示唆を頂いた。記して感謝します。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御支援を頂いたこと感謝致します。

#### 4. おわりに

本稿においては、61年度のプラズマ電流、位置および形状制御検討作業内容について述べた。まず、2.1節において、従来の垂直位置制御検討手順についてまとめた。現在のところ、この手順が必ずしもシステム化されておらず、また各段階の判断基準も明確であるとは言えない。特に今年度の合理化設計の様な、設計パラメータや本体構造が未確定な場合の検討手法に欠けていた。このことは、垂直位置制御が、本体構造に密接に関連しており、その具体的な設計無しには、明確な結論を下せないところにあるためと思われる。今後、よりシステム的に手順を進めて行く手法を開発すべきであろう。

次に2.2節において、本年度の合理化で問題となった高橿円度プラズマの垂直位置制御について述べた。橿円度が2程度のプラズマを安定化することは不可能ではないが、相当の困難を予想させる。特に安定化シェルの条件が厳しい。高橿円プラズマの垂直位置制御を従来のFERと同じ考え方、基準で考えており、その見直しが必要かもしれない。また、より詳細な具体的構造を考えた検討が必要とされる。

第3章は、プラズマ電流、位置、形状制御系について述べており、3.1節ではJETおよびJT-60の制御系のサーベイ、3.2節ではFERの制御系の若干の考察を行っている。JETは大電流容量で比較的低電圧で制御にはJT-60ほどの厳密さは要求していないと思われる。一方、JT-60は高電圧により応答性を速め、厳密な制御を可能としており、このため制御性能はダイバータ配位制御を含めて、非常に良く見える。FERの制御を考えて見ると、装置規模を考えると、電力容量はJETやJT-60に比べて格段に小さく、制御の巾が小さい。また、計測の時間遅れや、炉本体構造の磁気遮蔽効果を考えるとより制御の困難が増す。この様な中で、充分な制御を行なうにはどの様にすれば良いか、またそれは可能かどうか今後詰めて行く必要がある。

3.3節においては、プラズマ電流、位置、形状制御系の解析に必要となる。プラズマ、コイル系および渦電流をプラズマ変形を含んだ形で、初步的な定式化を行った。この様な定式化を発展させ、制御系の特性を把握して行くことは、制約の多い制御系を設計して行く上で不可欠なことであろう。

#### 謝　　辞

本検討を行なうにあたり、FER設計チームメンバーに多くのコメントや示唆を頂いた。記して感謝します。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御支援を頂いたこと感謝致します。

## 参考文献

- [1] 臨界プラズマ研究部 JAERI-M 85-178, 第3章
- [2] 臨界プラズマ研究部 JAERI-M 86-134, 第6章
- [3] A. Kameari, S. Niikura, Proc. of 10th Symp. on Fusion Engineering, (1983) PP. 46-50
- [4] A. Kameari, J. of Computational Physics, Vol. 42, (1981) PP. 124-140
- [5] A. Kameari, S. Niikura, N. Fujisawa, Nuclear Engineering and Design/Fusion, Vol. 2, (1985) PP. 365-373
- [6] E. Bertolini, P. L. Mondino, P. Noll, Fusion Technology, Vol. 11, (1987), PP. 71-119
- [7] 二宮博正, 菊地満等, JAERI-M 86-110 (1986)
- [8] JT-60第1試験室, JT-60電源の概要, (1985)
- [9] M. Huguet, K. Dietz, J. L. Hemmerich, J. R. Last, Fusion Technology, Vol. 11 (1987), PP. 43-70
- [10] JT-60チーム, JAERI-M 86-174 (1986)
- [11] N. Hosogane, H. Ninomiya, S. Seki, Nuclear Fusion Vol. 26, (1986) PP. 657-661
- [12] M. Kikuchi, H. Ninomiya, R. Yoshino, S. Seki, Nuclear Fusion, Vol. 27, (1987), PP. 299-312
- [13] S. C. Jardin, N. Pomphrey, J. Delucia, J. of Computational Physics, Vol. 66, (1986), PP. 481-507
- [14] Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata et al., J. of Japan Applied Physics, Vol. 16, (1977), PP. 2237-2244
- [15] 森山伸一, 中村一男, 中村幸男, 伊藤智之, 核融合研究, Vol. 55, (1986), PP. 71-90
- [16] T. Shoji, Nucl. Fusion, Vol. 16, (1976), PP. 829-835