

JAERI-M
86-110

JT-60プラズマ平衡配位のフィードバック制御

1986年8月

二宮 博正・菊池 満・芳野 隆治
細金 延幸・林 和夫*・木村 豊秋
栗原 研一・高橋 実

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。
人手の問合わせは、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、お申しこしてください。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, 1986

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

JT-60 プラズマ平衡配位のフィードバック制御

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

二宮 博正・菊池 満・芳野 隆治
細金 延幸・林 和夫*・木村 豊秋⁺
栗原 研一⁺・高橋 実⁺

(1986年7月7日受理)

JT-60のプラズマ平衡配位フィードバック制御についての検討結果及び実験結果について報告する。JT-60では、プラズマ電流、プラズマ位置(最外殻磁気面の中心)、磁場の曲率 n_{index} 及びダイバースロート幅を5つのポロイダル磁場コイルによりフィードバック制御した。フィードバック演算は1ms毎に計算機で行なっている。これらのフィードバック制御機能をジュールプラズマ実験にて検証した。実験結果のプラズマ制御特性は、簡略化した制御方程式を用いた検討及び渦電流や制御系の遅れ等を考慮したMatrix伝達関数解析、シミュレーション解析と良く一致しており、これらの解析がプラズマ制御系の特性検討手段として有効であることが確認された。

各制御量は目標値に良く制御されており、またプラズマ平衡配位は、磁場測定に基づくプラズマ境界計算コード等によりチェックされ、予備検討の平衡計算結果と良く一致していることが確認された。これらの結果、リミター配位及びJT-60の特色であるダイバータ配位の形成に成功するとともに、最大プラズマ電流1.8MA、実効的安全係数3以下、最大プラズマ密度 $5.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (村上係数4.5)、放電時間5~10秒の安定なダイバータ放電を昭和60年度のOH(I)実験にて得た。

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ JT-60 試験部

* 外来研究員：(株) 東芝

Feedback Control of Plasma Configuration in JT-60

Hiromasa NINOMIYA, Mitsuru KIKUCHI, Ryuji YOSHINO,
Nobuyuki HOSOGANE, Kazuo HAYASHI*, Toyoaki KIMURA†
Kenichi KURIHARA† and Minoru TAKAHASHI†

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

(Received July 7, 1986)

Plasma current, plasma position (center of the outermost magnetic surface), decay index n_{index} and width of the divertor throat are feedback controlled by using 5 kinds of poloidal field coils in JT-60. 5 control commands are calculated in a feedback control computer in each 1 msec. These feedback control functions are checked in ohmically heated plasma. The control characteristics of the plasma are well understood by the simplified control analysis and are consistent with the precise matrix transfer function analysis in the frequency domain and the simulation analysis which include the effects of eddy currents, delay time elements and mutual interactions between controllers. The usefulness of these analyses is experimentally confirmed.

Each controlled variable is well feedback controlled to the command and the experimentally realized equilibrium configuration is checked by the well calibrated magnetic probes. Fast boundary identification code is used for the identification of the equilibrium and results are consistent with the precalculated plasma equilibria. By using this feedback control system of the plasma configuration and the equilibrium identification method, we have obtained the stable limiter and divertor configuration. The maximum parameters obtained during OH(I) experimental period are plasma current $I_p = 1.8$ MA, the effective safety factor $q_{\text{eff}} < 3$, the plasma density $\bar{n}_e = 5.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (Murakami parameter of 4.5) and the pulse length of 5 ~ 10 sec.

Keywords: Feedback Control, Plasma Configuration, Tokamak, JT-60,
Equilibrium Identification, Ohmically Heated Plasma

† Department of JT-60 Facility
* Toshiba Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. フィードバック制御系の構成	2
2.1 全体構成	2
2.2 制御量検出部	2
2.3 制御用計算機	3
2.4 電源, コイル	4
2.5 真空容器の特性	4
3. 制御量の検出	16
3.1 はじめに	16
3.2 R_p, z_p の検出	16
3.3 δ_{30}, δ_t の検出	17
3.4 まとめ	19
4. フィードバック制御系の特性解析	26
4.1 はじめに	26
4.2 簡略化した制御方程式による検討	26
4.3 Matrix 伝達関数解析	28
4.4 シミュレーション解析	31
4.5 まとめ	32
5. プラズマ制御実験結果	39
5.1 はじめに	39
5.2 $I_p - R_p$ 制御	39
5.3 ダイバータ配位制御	41
5.4 まとめ	42
6. まとめ	54
謝 辞	54
参考文献	55

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of feedback control system	2
2.1 Introduction	2
2.2 Detector	2
2.3 Control computer	3
2.4 Power supply and coil system	4
2.5 Characteristics of vacuum vessel	4
3. Measurement of controlled variables	16
3.1 Introduction	16
3.2 Measurements of R_p and Z_p	16
3.3 Measurements of δ_{30} and δ_t	17
3.4 Summary	19
4. Characteristics analysis of feedback control system	26
4.1 Introduction	26
4.2 Simplified control equation analysis	26
4.3 Matrix transfer function analysis	28
4.4 Simulation analysis	31
4.5 Summary	32
5. Experimental results of plasma control	39
5.1 Introduction	39
5.2 $I_p - R_p$ control	39
5.3 Divertor configuration control	41
5.4 Summary	42
6. Conclusions	54
Acknowledgements	54
References	55

1. はじめに

JT-60 は放電時間 5 ~ 10 秒、最大プラズマ電流 2.7 MA のダイバータ付き大型トカマク装置であり、^{1,2)} プラズマが有するエネルギーは最大電磁エネルギーに 25 MJ、熱エネルギーに 10 MJ にも達する。このプラズマを適正な平衡配位、プラズマ電流値及びプラズマ密度に制御することは、高性能プラズマを得るためだけでなく装置の健全性確保のためにも、JT-60 のプラズマ実験において最も重要な機能の 1 つである。

JT-60 装置は加熱装置を除いて 1985 年 3 月に完成し、4 月より 3 カ月間及び 1986 年 3 月に約 1 カ月間のジュールプラズマ実験（以下 OH(I) 実験と呼ぶ）が実施された。^{3,4)} この OH(I) 実験の主な目的の一つは、プラズマ制御系の調整及び制御方法の確立であり、次章以下に述べるように所期の目的を達成した。⁵⁾

本報告は、JT-60 プラズマ平衡配位のフィードバック制御系の構成及び系の特性検討結果についてレビューするとともに、OH(I) 実験に於ける制御結果をまとめたものである。

第 2 章において、JT-60 プラズマフィードバック制御系の概要を述べる。第 3 章において、制御量の検出方法について述べ、第 4 章において制御系の特性検討に用いた簡略化した制御方程式解析、Matrix 伝達関数解析法及びシミュレーション解析法とその結果について簡単に述べる。第 5 章では OH(I) 実験におけるプラズマ平衡配位のフィードバック結果について述べ、第 6 章にてまとめを述べる。

2. フィードバック制御系の構成

2.1 全体構成

JT-60 プラズマ制御系は、高温、高密度のプラズマを真空容器内に保持するという最も重要な機能を実現するために作られている。第 2.1 図に示すように、高温・高密度のプラズマ（図は、プラズマ電流 $I_p = 2.1\text{MA}$ 、体積平均トロイダルベータ値 $\langle\beta\rangle = 2\%$ の平衡形状を示す）を真空容器内に安定に保持するために、真空容器内外に設置された 5 種類のポロイダル磁場コイルに電流を流して平衡配位を制御している。

JT-60 平衡配位制御における特色は、ダイバータ配位の制御である。このダイバータ配位制御において重要な制御量は、第 2.1 図に示すように 30° 固定リミターとプラズマ表面とのクリアランス δ_{30} とセパトリクス線のダイバータコイル表面からのクリアランス（ダイバースロート幅） δ_i である。^{2,6)} 従って JT-60 平衡配位のフィードバック制御量としては、通常のプラズマ電流 I_p 、プラズマ水平位置 R_p 、プラズマ垂直位置 z_p 、及び上記 δ_{30} 、 δ_i を採用している。

JT-60 プラズマ制御系構成上の特色は、TFTR, JET⁷⁾ と異なり全面的な計算機制御の採用である。⁸⁾ 第 2.2 図に示すように、JT-60 プラズマ制御系は多重フィードバックループを形成している。制御系の最上位を占める“実時間制御計算機”は平衡配位制御のため制御目標値を“フィードバック制御計算機”に与えると同時に、プラズマ密度、温度を制御するためガス注入量及び NB I, RF 加熱パワーを制御する。このための制御周期は、上記制御量の特性時間から 10ms とした。フィードバック制御計算機はプラズマ周辺のポロイダル磁場、プラズマ電流、コイル電流を入力し、実時間制御計算機から与えられる制御量の目標値に従うようフィードバック演算を行ない、ポロイダル磁場コイル電源に対して指令値を与える。このループの制御周期は 1msec である。

2.2 節では、プラズマの平衡配位制御パラメータの検出に用いた磁気プローブ、積分器（V/F 変換器）の性能について概説し、2.3 節では、各制御機器に指令を与えるフィードバック制御計算機及び実時間制御計算機の性能と機能について述べる。2.4 節では、ポロイダル電源及びコイルの特性に関してプラズマ制御の観点から概観する。2.5 節では、フィードバック制御の応答特性に大きな影響を及ぼす真空容器の渦電流のもつ特性について述べる。

2.2 制御量検出部

プラズマの平衡配位制御量の検出としては、フラックス・ループを利用する方法^{9,10)} と磁気プローブを利用する方法¹¹⁾ とがあるが、JT-60 ではその構造及び製作上の制約から真空容器内厚肉部に設置されている磁気プローブを用いている。これらの磁気プローブは第 2.3 図に示すように、プラズマ位置 (R_p 及び z_p) の検出用に 12 個の B_ρ （小半径方向ポロイダル磁場）、 B_ω （ ω 方向磁場）プローブ及びダイバータ配位検出用にダイバータ室奥に設置された 4 コの B_ρ 、

B_{ω} プローブである。これらの磁気プローブの設置位置及びその精度を評価することは、プラズマの平衡配位を精度良く制御するために必要不可欠である。磁気プローブの設置位置は第2.3図に示すように、 (ρ, ω, η) によって決まる。第2.1表に各磁気プローブの設置位置と精度を示す。これらは通電試験によって求めた。一方、磁気プローブはインコネルのシースに入った状態で、リミター及びライナーの近傍に設置されているため、周波数特性が劣化する。第2.4図にリミター、ライナーによる磁気プローブの周波数特性を示す。単純なフィルターでは表わせないが、 $500 \mu\text{s}$ 程度の遅れを引き起こす。更に、信号処理回路において、 1ms のフィルターを用いており、磁気測定系としては全体として 1.5ms 程度の遅れをもっている。

次に、プラズマ電流測定用ログスキーコイルは、真空容器渦電流を避けるために真空容器内部にMコイルを囲む形で設置されている。また、コイルリング断面積の乱れ、コイルリング面の傾きを極力抑えてあり、鎖交面内での検出誤差は 1.5% 以内である。第2.5図に電流位置によるログスキーの出力誤差実測値を示す。

磁気プローブ、ログスキーコイルの出力の積分器は放電が長時間(10秒)であるため、極低ドリフトである必要がある。JET, TFTRでは、従来と同様のアナログ積分器を用いているが、JT-60ではV/F(電圧/周波数)変換器とアップダウンカウンタ(UDC)を組合せたデジタル積分方式を採用した。¹²⁾中心周波数 750kHz 、最大周波数 1MHz で電圧に比例した数のパルス列を発生させ、パルス列をカウントするUDCを通して積分出力を得る。自動零補正回路の働きにより、積分ドリフトは、OH(I)実績で $30\text{カウント}/10\text{sec}$ 以下であり、 $I_p = 1\text{MA}$ に対してS/Nは 10sec 当りTプローブが230、Nプローブが40である。

フィードバック制御計算機は、これらプラズマ電流、ポロイダル磁場をCAMACインターフェイスを介して収集する。一方、F-DDCはプラズマ電流処理装置(IPP)により独自にプラズマ電流を得る。

2.3 制御用計算機

フィードバック計算機(Π_0)及び実時間制御計算機(I_0^R)は、16ビットミニコンピュータHIDIC-80E(サイクル時間 $0.48\mu\text{s}$)を用いており、主記憶容量はそれぞれ $448\text{キロ語} \times 2\text{台}$ (+ 64キロ語 共有メモリ)及び 384キロ語 (+ 128キロ語 共有メモリ)である。その入出力には比較的高速なDMA(Direct Memory Access)転送を用いており、入出力の転送処理にはBD(Branch Driver)及びBSD(Bite Serial Driver)が起動される。ドライバー内のコマンドバッファにはあらかじめデータ転送制御命令がセットされており、計算機はただドライバーを起動するだけでドライバーに接続している全CAMACモジュール内のデータを転送することができる。

フィードバック及び指令値演算は倍精度浮動小数点演算を、磁気プローブデータを用いた制御量検出演算は倍精度固定小数点演算を用いている。フィードバック制御計算機は、データの入出力関連に約 $200\mu\text{sec}$ 、制御量検出演算、フィードバック演算、指令値演算等に約 $700\mu\text{sec}$ 、データ保存等に約 $100\mu\text{sec}$ 使用している。P電源DDCは、現状では $960\mu\text{sec}$ 以降よりデータ入力処理を開始するタイミング系にしており、故に Π_0 の遅れ時間は $960\mu\text{sec}$ となっている。

2.4 電源，コイル

ポロイダル電源各DDC（INTEL 8086をマイクロプロセッサとした補助コントローラ）は、 Π_b 計算機から送出された各電流指令値を実現するようにコイル電流のマイナーループフィードバック制御を行ない、高応答の電流制御性を得ている。¹³⁾この方式は、コイル電流が定電流化されるためコイルのシェル効果を打消すように見えるが、 Π_b でコイル電流をマイナーループフィードバックしているためプラズマ制御系としては電圧制御と等価となっている。

V, H, Q電源は第2.6図に示すように、両極性電源であるため、電源内に流れる循環電流とコイルに流れる電流とを分離制御している。また、F, V電源は高応答、低リップル化のため24相整流しており、H, Q, M電源は12相整流である。第2.2表にポロイダル磁場コイル電源の運転性能を示す。

ポロイダル電源の負荷となるポロイダル磁場コイルの負荷定数を第2.3表に示す。一方、プラズマとの相互作用を論ずる上で重要になるポロイダルフラックスと垂直磁場との分布形を第2.4表に示す。

2.5 真空容器の特性

第2.7図に示すように、JT-60の真空容器はMコイルを真空容器中に入れるために卵形形状をしており、8ヶ所にベローセクションをもっている。真空容器に流れる渦電流は垂直磁場やポロイダル磁束の浸透を妨げる。JT-60の本体（真空容器、トロイダル磁場コイル、上下架台）に流れる渦電流は有限要素法を用いた固有関数展開法により詳細に解析されている。^{14,15)}コイル-プラズマ-渦電流の相互作用を記述する方程式から第2.8図のようなブロック線図が導

かれる。¹⁶⁾第2.9図に垂直磁場の浸透係数 $\alpha_w \equiv 1 - \sum_k \frac{\tilde{\nu}_k}{\nu} \frac{s\tilde{M}_{vk}}{1+s\tau_k}$, Fコイルポロイダル磁束の

浸透係数 $\alpha_{Mpf} \equiv 1 - \sum_k \frac{s\tilde{M}_{pk} \tilde{M}_{fk}}{M_{pF}(1+s\tau_k)}$ の周波数特性を示す。ここで、 ν , $\tilde{\nu}$ はコイル電流、渦

電流の垂直磁場変換係数、 \tilde{M} は規格化された相互インダクタンス、 τ は時定数、添字kは渦電流のモード数である。

2.9図の周波数特性からわかるように、渦電流の効果は単一の時間遅れ要素では表わせず、主要な渦電流を選択して解析に考慮する必要がある。

第 2.1 表 磁気プローブの設置位置及び設置精度
 (PBTは B_{ω} プローブ, PBNは B_{θ} プローブを示し,
 番号 1~6 は, 第 2.3 図に示すポロイダル方向の位置)

プローブ名称	磁気プローブ設置位置		傾き	
	ρ [mm]	ω [deg]	η [deg]	
PBT 1	1006.0 \pm 3.8	30.00 \pm 0.22	- 1.5	\pm 0.5
2	999.5	90.58	- 0.5	\pm 0.6
3	997.3	150.09	- 1.9	\pm 0.3
4	998.8	210.09	1.8	\pm 0.3
5	998.0	269.42	0.0	\pm 0.6
6	1006.0	330.00	0.0	\pm 0.5
PBN 1	1006.0	30.00	- 1.6	\pm 0.5
2	997.7	87.44	2.2	\pm 0.2
3	994.7	149.64	- 0.1	\pm 0.3
4	996.2	210.36	0.0	\pm 0.3
5	996.2	272.66	- 1.8	\pm 0.3
6	1006.0 \pm 3.8	330.00 \pm 0.22	- 0.9	\pm 0.3
EIP 1	1455.1 \pm 3.8	19.03 \pm 0.22	47.5	\pm 0.1
3	1456.1	340.90	- 48.3	\pm 0.2
EIN 1	1453.9	18.98	48.6	\pm 0.2
2	1454.9 \pm 3.8	340.95 \pm 0.22	- 47.7	\pm 0.3

第2.2表 JT-60ポロイダル磁場コイル電源の運転性能

コイル名称	コイル電源運転性能		
	コイル励磁時間	プラズマ電流励起時間	プラズマ電流維持時間
空心変流器コイル	92 kA	誘導電圧発生装置 - 25 kV 整流装置 ±2.5kV 92kA	± 1.25 kA - 92 kA
誘導性エネルギー蓄積コイル	92 kA	/	/
垂直磁場コイル	58 kA - 8.7 kA (逆極性通電の時)	10 kV ~ -5 kV 58 kA	+ 2.7 kV ~ - 2.0 kV 58 kA
水平磁場コイル	± 22 kA	± 0.5 kV ± 22 kA	± 0.5 kV ± 22 kA
四重極磁場コイル	± 25 kA	± 1.0 kV ± 25 kA	± 1.0 kV ± 25 kA
磁気リミタコイル	95 kA	± 0.83 kV 95 kA	± 0.83 kV 120 kA

第2.3表 ポロイダル磁場コイルの負荷定数

	F	V	Q	ML (H)	R (Ω)
F	8.525D-03	7.630D-05	1.530D-04	-2.880D-6	1.004D-2
V	7.630D-05	1.016D-02	1.580D-05	-3.100D-4	2.772D-2
Q	1.530D-04	1.580D-05	2.490D-03	1.260D-4	2.827D-2
M	-2.880D-06	-3.100D-04	1.260D-04	1.050D-3	7.030D-3

$$L_H = 0.58\text{mH}, R_H = 16\text{m}\Omega$$

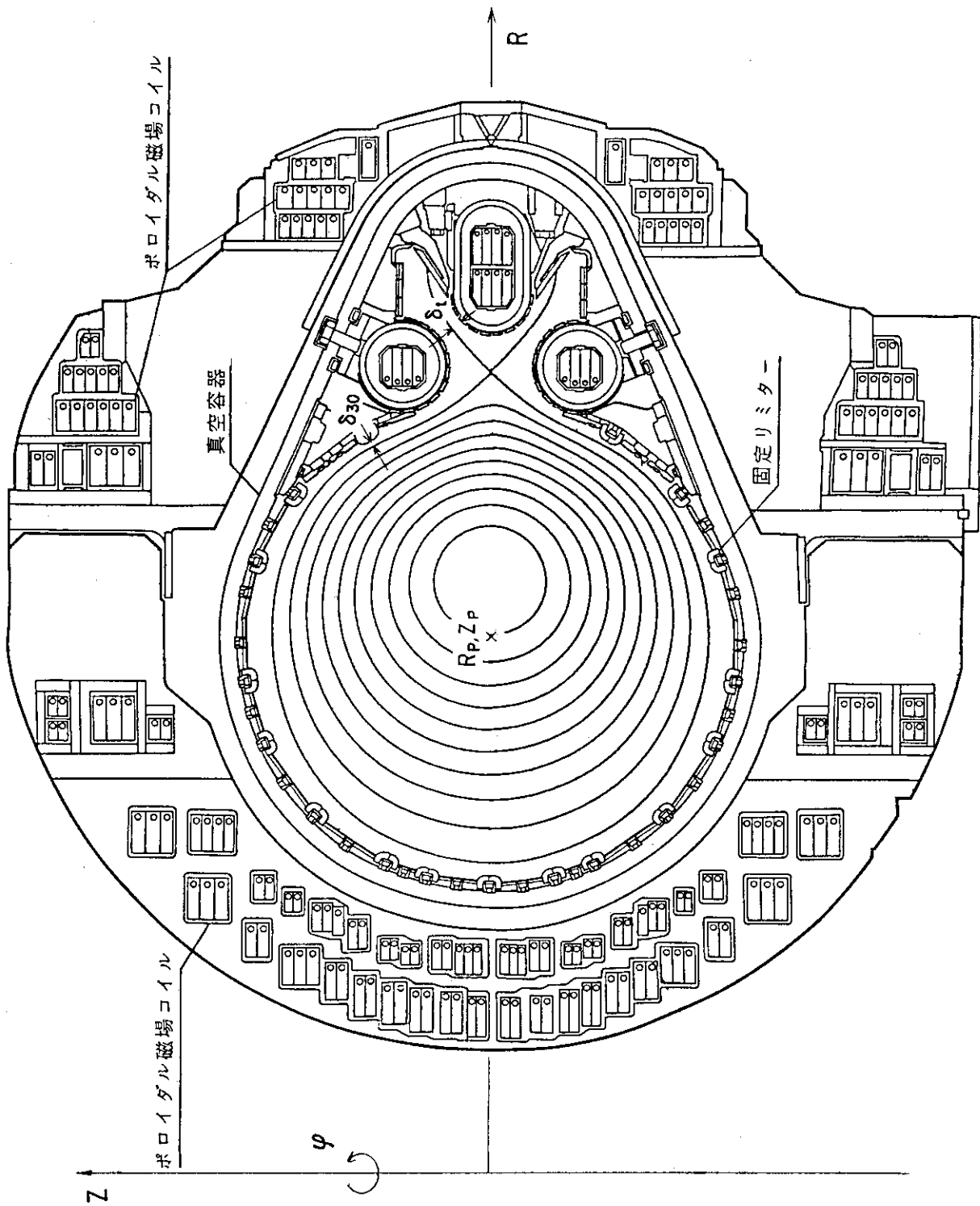
第2.4表 JT-60 ポロイダル磁場コイルが水平軸に作る磁場分布の近似式 (2.2 ≤ R ≤ 3.8)

	I_{MAX} (ターン数)	flux ϕ (Wb/A)	Vertical field B_z (T/A)
F	kA 91.7 (60)	$-7.062 \times 10^{-7} R^2 + 4.339 \times 10^{-6} R + 1.323 \times 10^{-4}$	$2.2 \leq R \leq 3.175$ $-9.063 \times 10^{-8} R^3 + 7.220 \times 10^{-7} R^2$ $-1.960 \times 10^{-6} R + 1.843 \times 10^{-6}$ $3.175 \leq R \leq 3.8$ $1.221 \times 10^{-7} R^3 - 1.266 \times 10^{-6} R^2$ $+ 4.258 \times 10^{-6} R - 4.667 \times 10^{-6}$
V	57.5 (32)	$3.595 \times 10^{-6} R^3 - 4.235 \times 10^{-5} R^2$ $+ 5.094 \times 10^{-5} R + 9.129 \times 10^{-5}$	$2.851 \times 10^{-7} R^2 - 9.255 \times 10^{-7} R - 5.416 \times 10^{-6}$
Q	25.0 (9)	$2.672 \times 10^{-6} R^3 - 8.438 \times 10^{-6} R^2$ $- 2.410 \times 10^{-5} R + 8.011 \times 10^{-5}$	$-1.322 \times 10^{-7} R^2 + 2.508 \times 10^{-6} R - 6.476 \times 10^{-6}$
M	120.0 (8)	$1.856 \times 10^{-7} R^3 - 4.019 \times 10^{-6} R^2$ $+ 1.381 \times 10^{-5} R - 1.477 \times 10^{-5}$	$2.2 \leq R \leq 3.5$ $-7.057 \times 10^{-8} R^2 + 2.209 \times 10^{-7} R - 2.958 \times 10^{-7}$ $3.5 \leq R \leq 3.8$ $1.263 \times 10^{-5} R^3 - 1.333 \times 10^{-4} R^2$ $+ 4.694 \times 10^{-4} R - 5.513 \times 10^{-4}$
H	20.0 (6)	—	$1.490 \times 10^{-7} R^2 - 1.322 \times 10^{-6} R + 3.622 \times 10^{-6}$ *

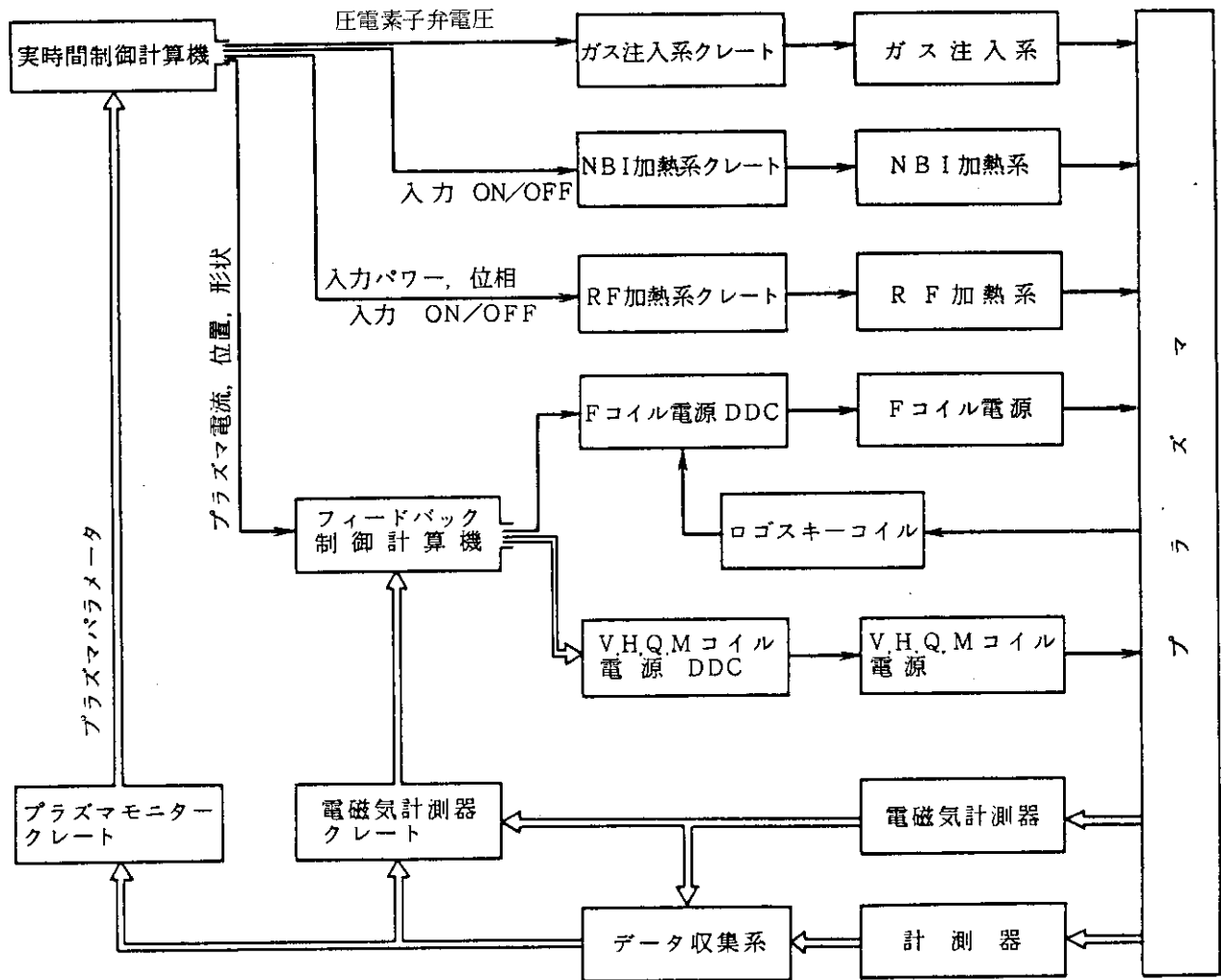
(R, φ , z) 座標, $\phi = 2\pi R A_\varphi$, $B_z = \frac{1}{2\pi R} \frac{\partial \phi}{\partial R}$

* $B_R = -\frac{1}{2\pi R} \frac{\partial \phi}{\partial z}$

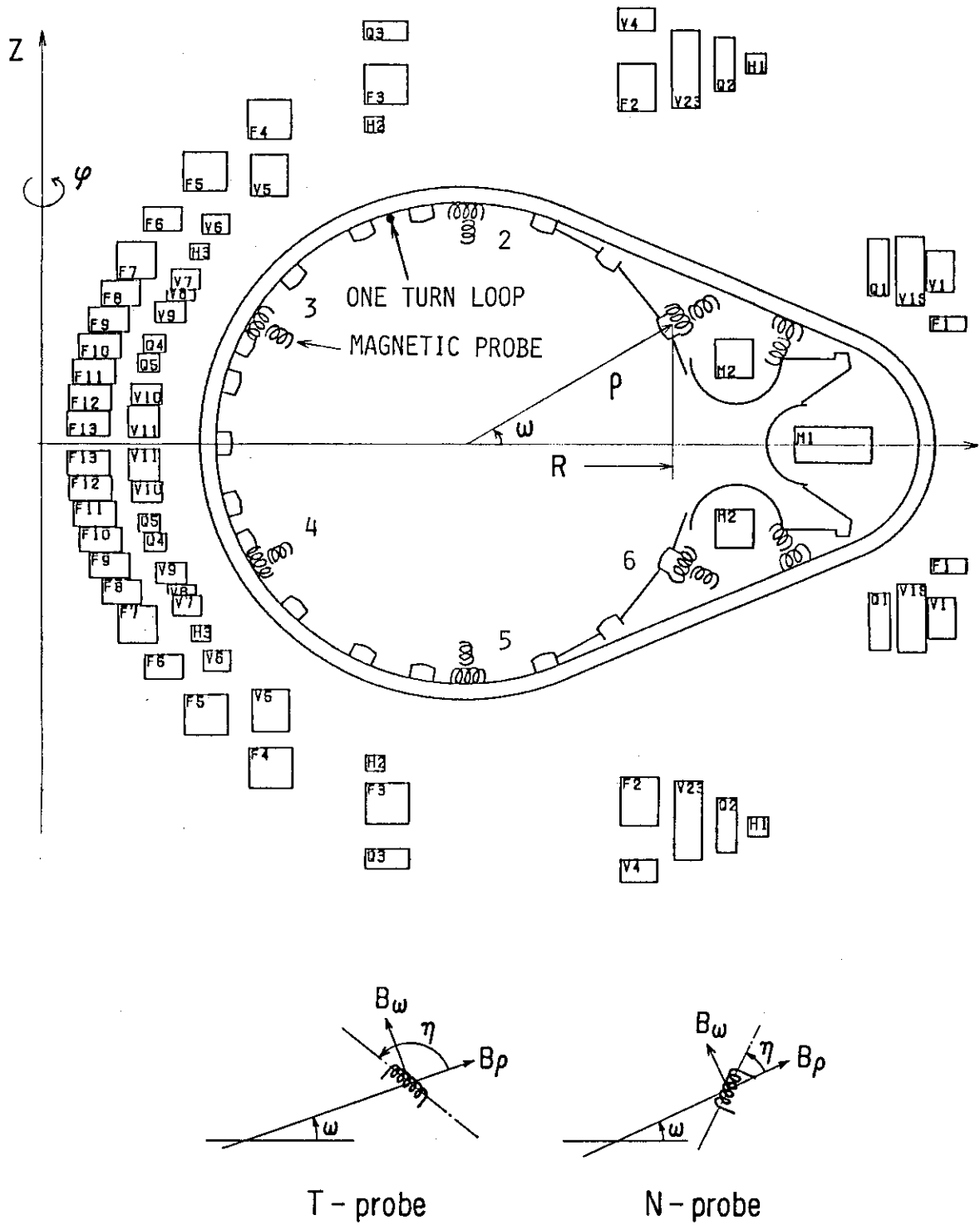
** 左欄 ⊗ ⊙ は各磁場コイルの電流分布を概念的に示したものである



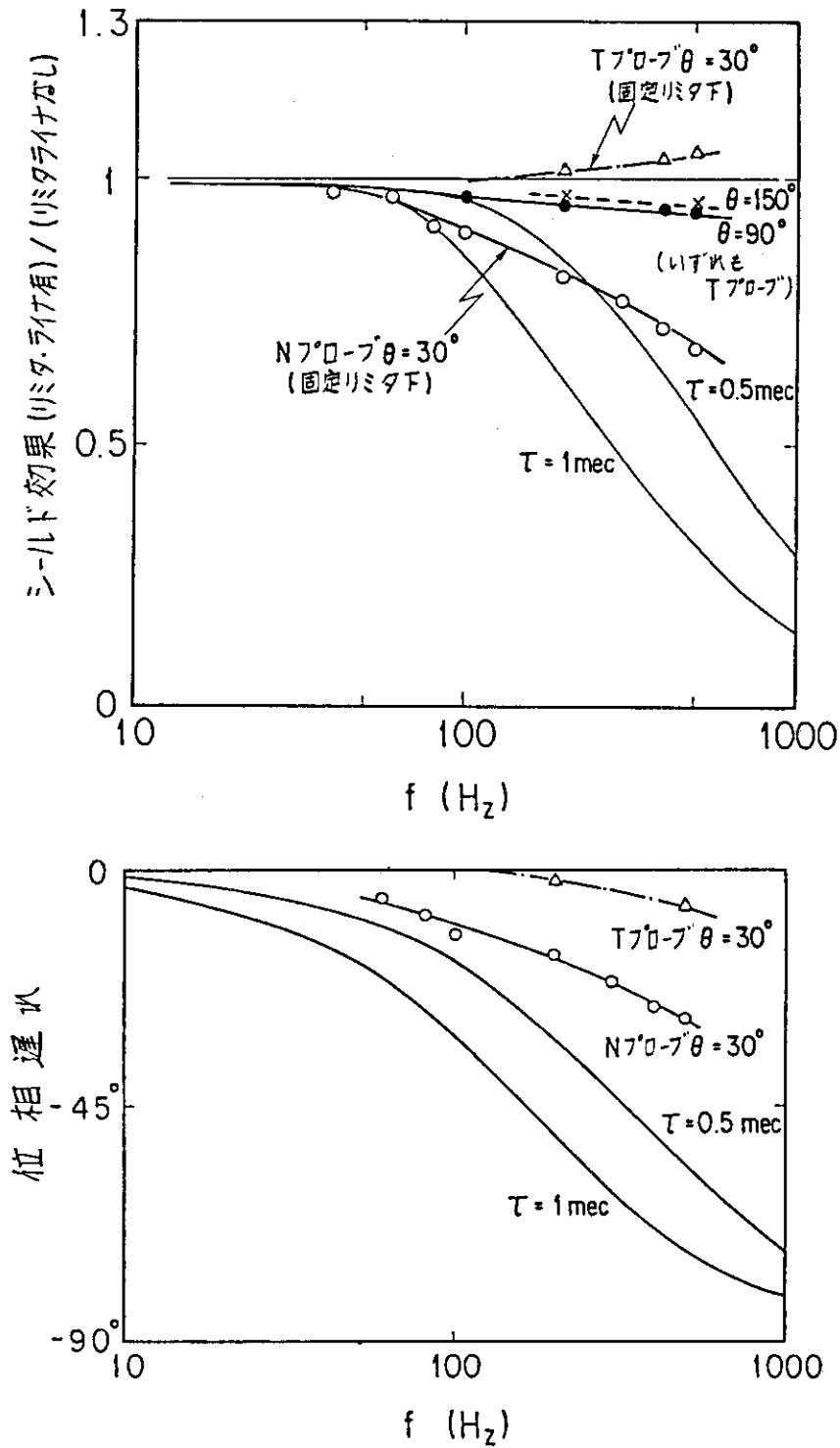
第2.1図 JT-60断面図及び平衡配位のフィードバック制御量。図中のプラズマ平衡配位は
 プラズマ電流 $I_p = 2.1$ MA, 体積平均トロイダルベータ値 $\langle \beta \rangle = 2\%$ の場合。



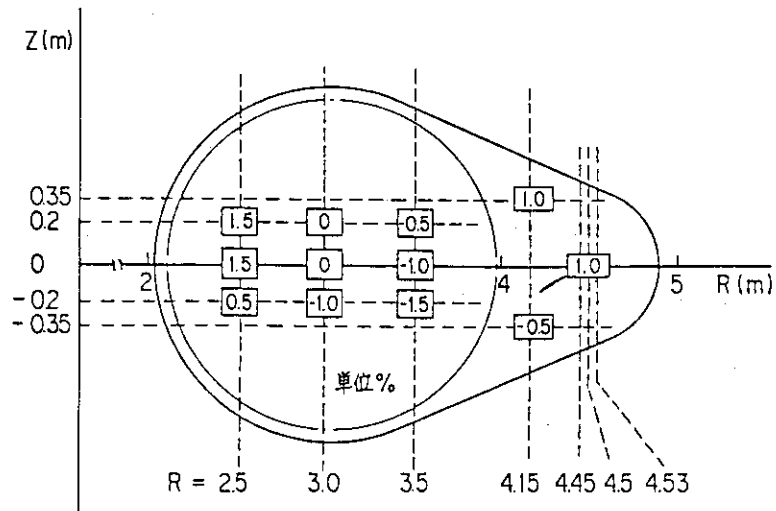
第 2.2 図 JT-60 プラズマ制御系のシステム構成図⁸⁾



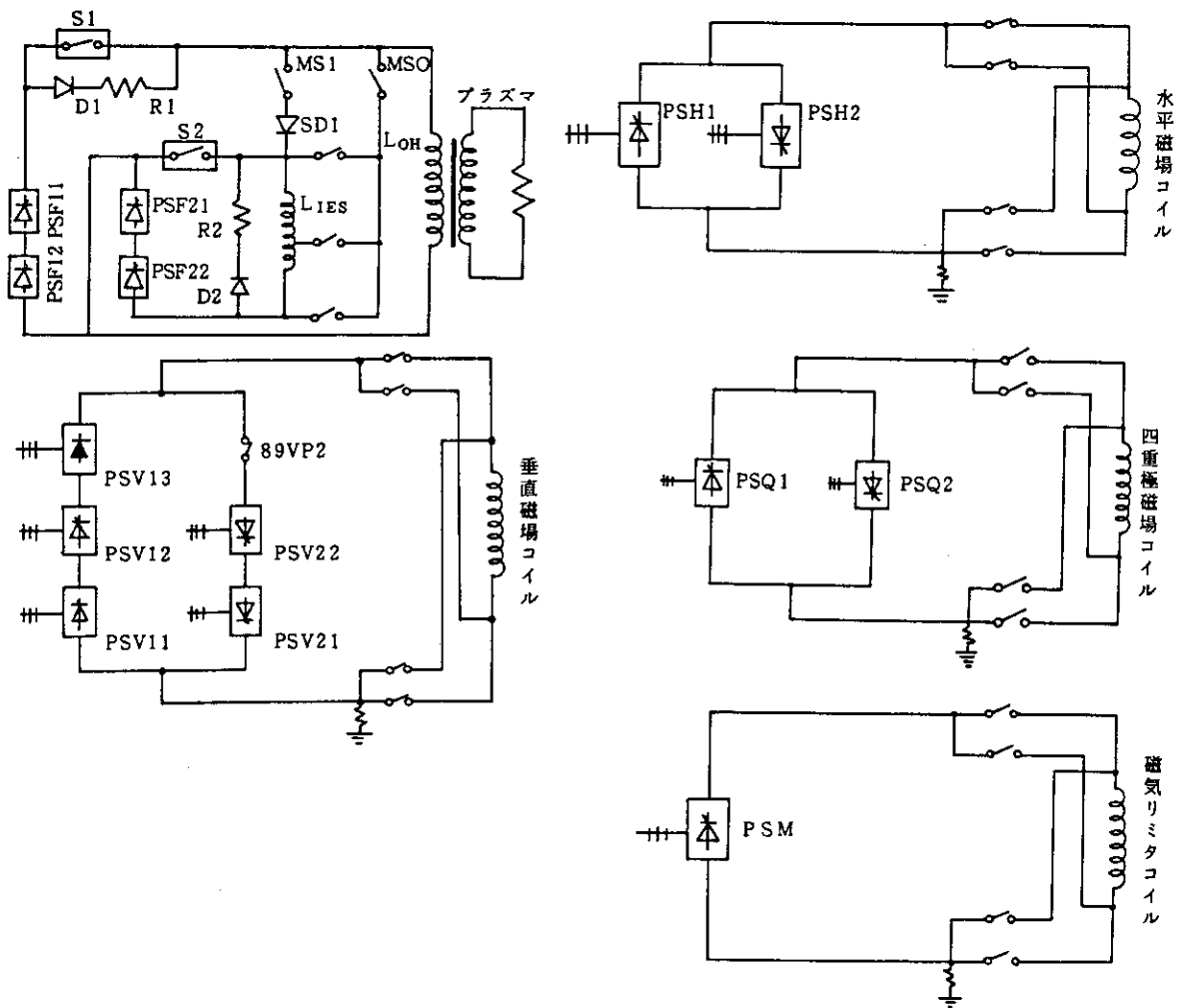
第 2.3 図 フィードバック制御量検出用磁気プローブの設置位置及び座標系



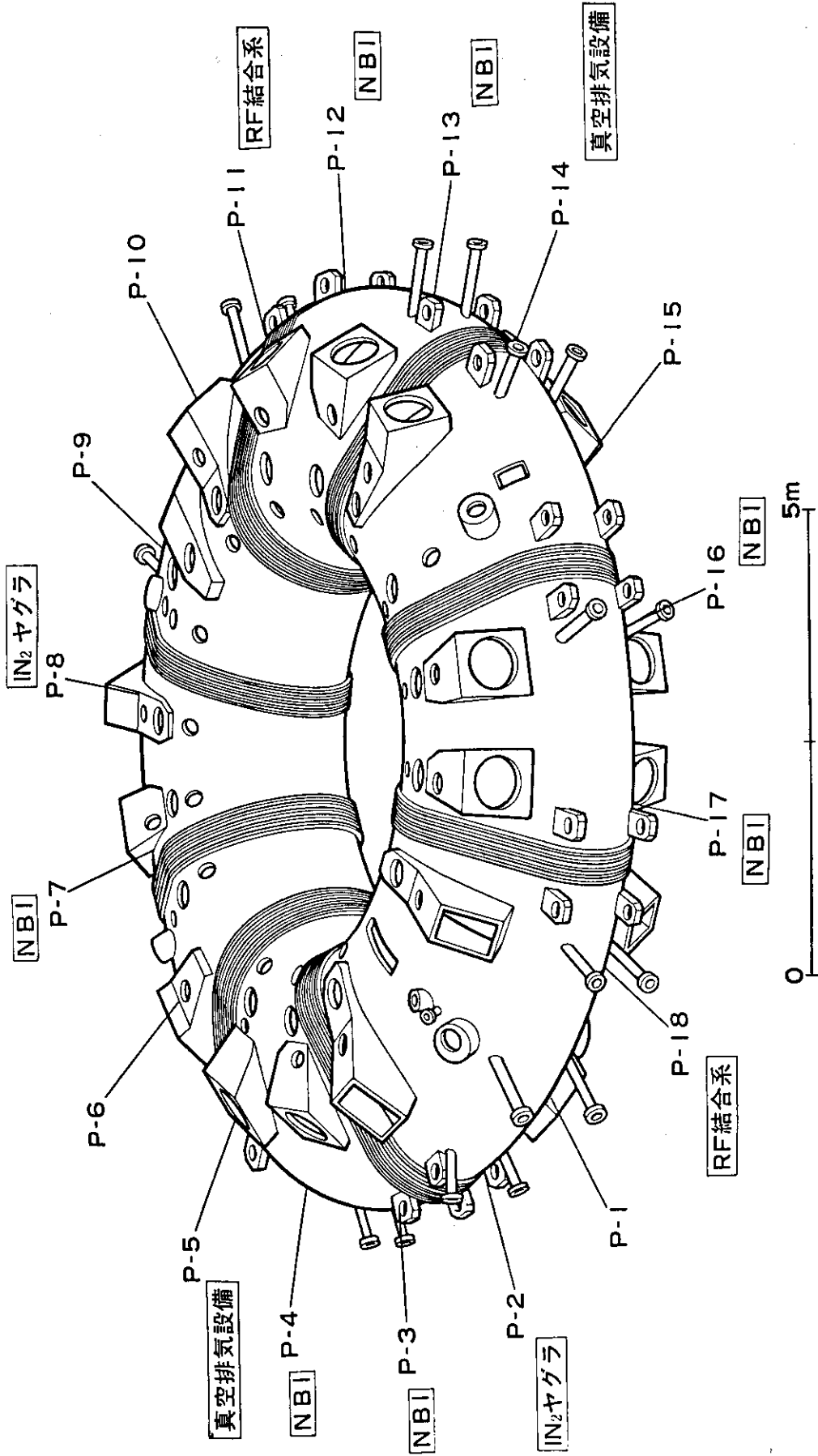
第2.4図 フィードバック制御用磁気プローブの周波数特性
 ○●△×印はP-7セクター(第2.12図参照)の模型を用いた実測データ。実線は、 $\tau=0.5\text{msec}$, 1.0msec のフィルターを取り付けた場合の計算値



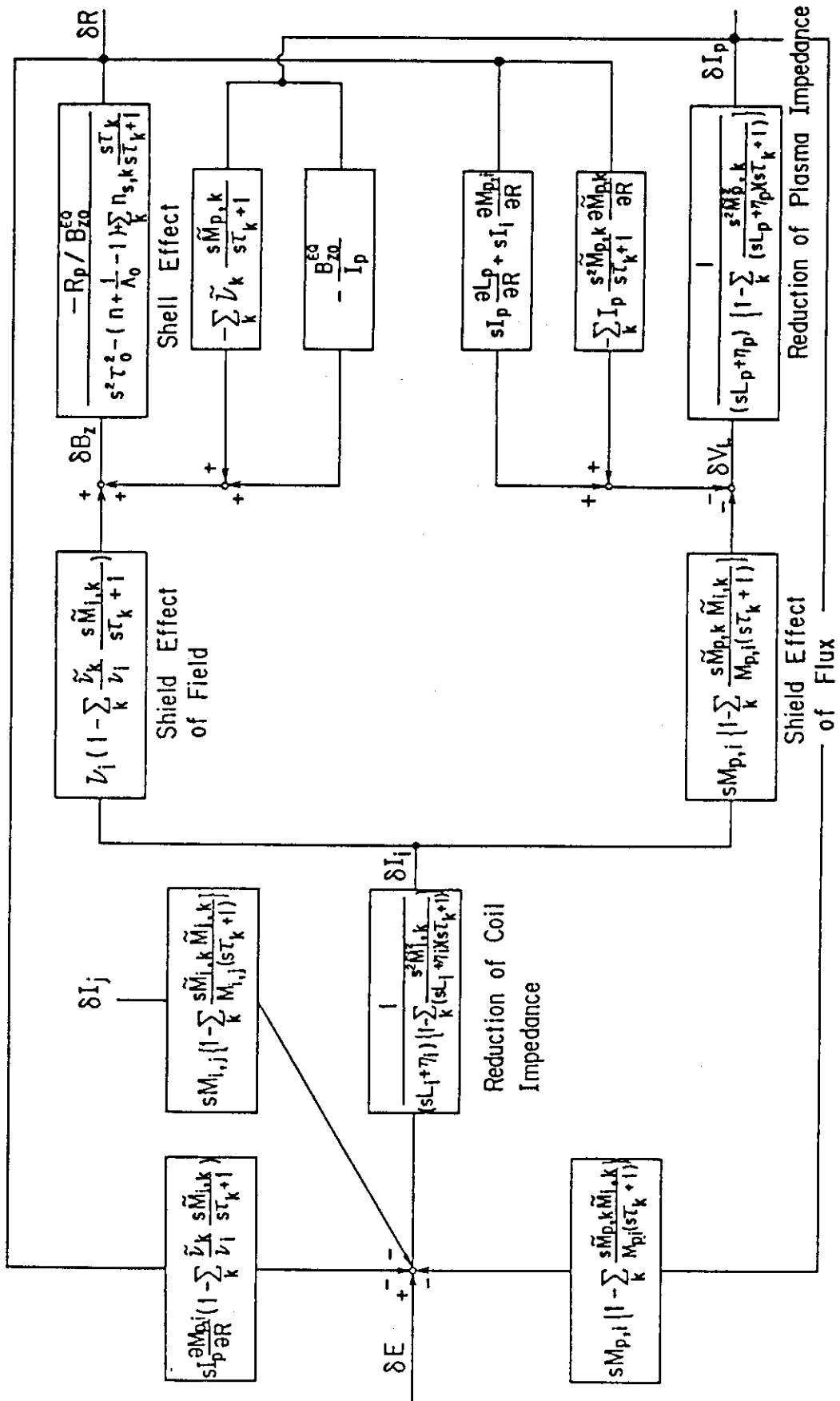
第2.5図 ログスキーコイルの精度。図中、口の中の値は $R=3.0\text{m}$, $Z=0\text{m}$ の位置の L/N を基準とした場合の各模擬コイル位置における L/N の誤差。ここで L はログスキーコイルの自己インダクタンス, N は総巻数である。



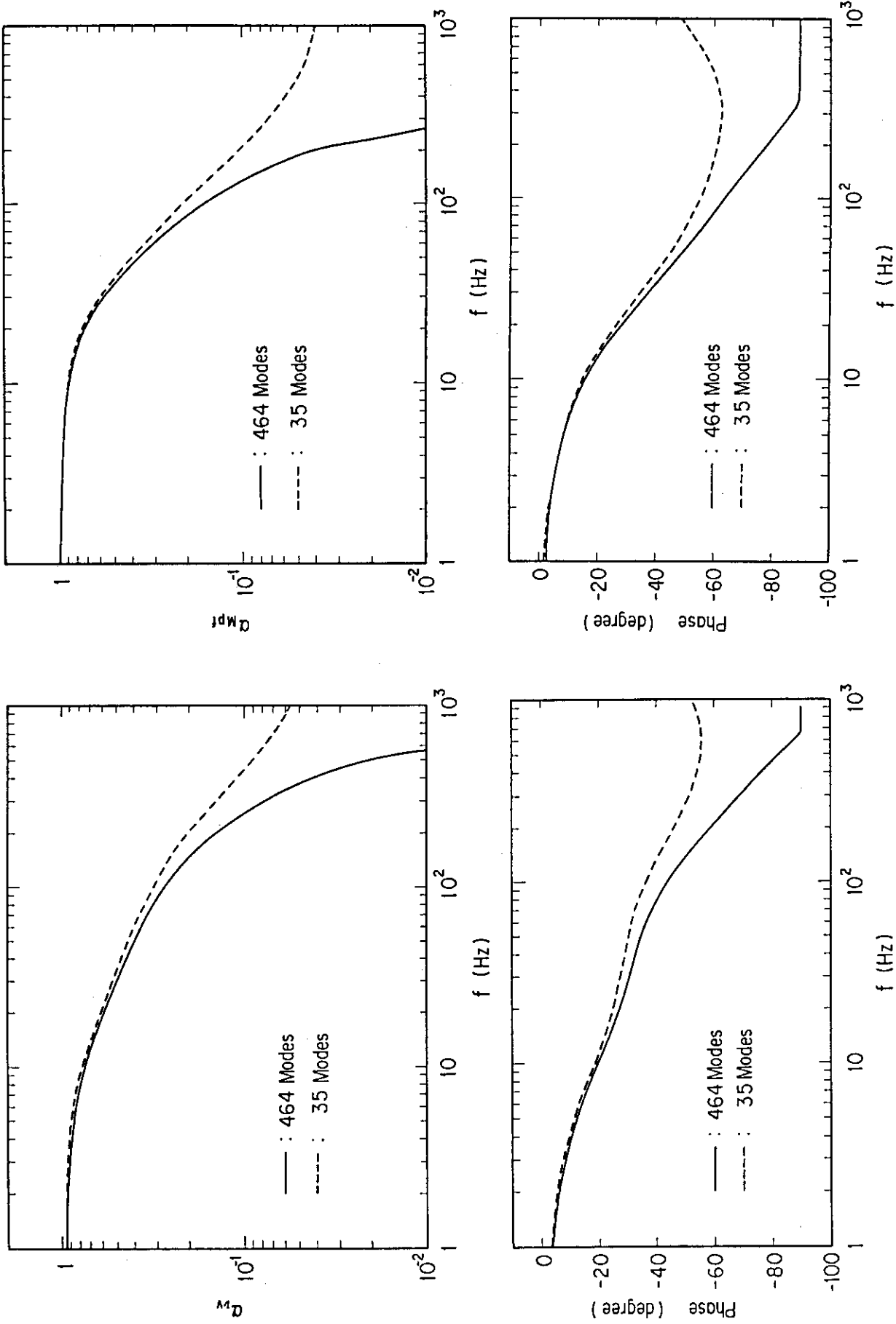
第2.6図 ポロイダル電源回路図



第2.7図 JT-60の真空容器概要図



第 2.8 図 コイル, プラズマ, 渦電流間相互作用を示すブロック線図¹⁶⁾



第 2.9 図 V コイルの作る垂直磁場の浸透係数 α_{Mpv} 及び F コイルポロイダル磁束の浸透係数 α_{Mpf} の周波数特性¹⁶⁾

3. 制御量の検出

3.1 はじめに

本章では、フィードバック制御計算機において実行される制御量の検出方法について述べる。

JT-60 制御量検出において従来と異なる問題点は

- i) ダイバータ配位におけるクリアランス δ_{30} 及びスロート幅 δ_t の検出
- ii) 水平位置 R_p 検出時におけるダイバータコイルの作る局所的磁場の影響

である。

以下、3.2節において R_p , z_p の検出方法を、3.3節において δ_{30} , δ_t の検出方法について、3.4節にまとめを述べる。なお特に断わらない限り、本章ではMKS単位系を用いている。

3.2 R_p , z_p の検出

JT-60での R_p , z_p の検出は、真空容器中心 ($R_m, 0$) からの水平方向変位 Δ_R 及び垂直方向変位 Δ_z を用いて

$$R_p = R_m + \Delta_R \quad (3.1)$$

$$z_p = \Delta_z \quad (3.2)$$

より求める。この Δ_R 及び Δ_z の検出方法としては、以下に示す多重極モーメント法^{17,18)}を用いる。

$$\Delta_R = \frac{r_m}{2} (\lambda_1 - \mu_1) + \frac{r_m^2}{4R_m} \quad (3.3)$$

$$\Delta_z = \frac{r_m}{2} (\delta_1 + \kappa_1) \quad (3.4)$$

ここで、 R_m , r_m は第3.1図に示すように磁気プローブが置かれている円周 Γ の主半径、小半径である。 λ_1 , μ_1 , δ_1 , κ_1 はポロイダル磁場 B_ω , B_ρ を以下のような空間フーリエ分解した場合の各一次のフーリエ係数である。

$$B_\omega = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r_m} \left\{ 1 + \sum_n (\lambda_n \cos n\omega + \delta_n \sin n\omega) \right\} \quad (3.5)$$

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r_m} \sum_n (\mu_n \sin n\omega + \kappa_n \cos n\omega)$$

JT-60では第2.3図に示す B_ω , B_ρ 各6ケの磁気プローブ出力の和として

$$\lambda_1 = \frac{4\pi r_m}{\mu_0 N I_p} \sum_{m=1}^N B_\omega(\omega_m) \cos \omega_m$$

$$\mu_1 = \frac{4\pi r_m}{\mu_0 N I_p} \sum_{m=1}^N B_\rho(\omega_m) \sin \omega_m \quad (3.6)$$

$$\delta_1 = \frac{4\pi r_m}{\mu_0 N I_p} \sum_{m=1}^N B_\omega(\omega_m) \sin \omega_m$$

$$\kappa_1 = \frac{4\pi r_m}{\mu_0 N I_p} \sum_{m=1}^N B_\rho(\omega_m) \cos \omega_m$$

となる。ここで $N=6$ である。

以上のようにして多重極モーメント法により求めたプラズマ主半径 R_p は、プラズマの最外殻磁気面の中心を意味しておらずに電流の重心を意味しているため $\Lambda (= \beta_p + \theta_i/2)$ 依存性をもつ。しかし、OH(I) 実験では β_p が低くこの Λ 依存性は特に大きな問題とはならないが、加熱実験では問題となってくるため文献19)に示す Λ 依存性のないシャフラノフ・モーメント法を採用する予定である。

また JT-60 ダイバータ配位の場合は、ダイバータコイル電流が 30° 磁気プローブ付近に第 3.2 図に示す様な局所的な磁場を作ること、及び B_ω , B_ρ 各 6 個の磁気プローブによるフーリエ係数はこの局所的磁場の影響を強く受けることより、(3.6) 式より求まる λ_1 , μ_1 に以下の補正を行なう。

$$\lambda_1 = \lambda_1(N=6) - 0.5 \frac{I_M}{I_p}$$

$$\mu_1 = \mu_1(N=6) - 1.5 \frac{I_M}{I_p}$$
(3.7)

この補正の結果、リミター配位、ダイバータ配位共通に(3.1)式が利用できる。

なお、2.3 節で述べたようにフィードバック制御計算機内で実際に制御しているのは R_p , z_p ではなく Δ_R , Δ_z であるが、両者は同じことを意味している。

最後に、2.2 節で議論した磁気プローブの設定誤差及びデジタル積分器のドリフトが Δ_R , Δ_z 検出に与える影響を検討した結果を簡単に述べる。第 2.1 表に示されている磁気プローブの設定誤差のうち、 ρ , ω , η の理想形状 ($\rho=1000\text{mm}$, ω は 60° おき, $\eta=0$) からのずれにより生じる Δ_R , Δ_z の誤差は簡単に評価でき、測定結果の Δ_R , Δ_z からこの誤差を除去できる。問題は設定誤差の不確定性に起因する誤差である。この評価は、第 2.1 表の設定誤差の不確定性の範囲で磁気プローブの位置と傾きを変化させて Δ_R , Δ_z に生じる誤差の大きさを確率的に見積もる方法により行なった。JT-60 の標準的プラズマ ($R_p = 3.0 \sim 3.15 \text{ m}$, $r_p = 0.93 \sim 0.83 \text{ m}$) に対して、この設定誤差の不確定性に起因する Δ_R , Δ_z の誤差は $\pm 0.2 \text{ cm}$ である。また、デジタル積分器のドリフトによる誤差は、 $I_p = 1 \text{ MA}$ の場合最大 $\pm 0.6 \text{ cm}$, $I_p = 2 \text{ MA}$ の場合最大 $\pm 0.3 \text{ cm}$ である。従って、全体としての Δ_R , Δ_z の誤差は、最大 $\pm 0.8 \text{ cm}$ となり、この誤差が最も大きくプラズマ小半径 r_p からみると 1% 程度の誤差となる。

3.3 δ_{30} , δ_t の検出

δ_{30} , δ_t 等の局所的なセパトリックス面の位置検出に関しては、前述のシャフラノフ・モーメント法等の解析的手段が利用できない。そこで R_p , δ_t , δ_{30} 等の制御量と磁気プローブ信号等の測定量との間の相関を調べ、制御量の検出アルゴリズムを測定量の簡単な多項式の形で導

く回帰法を利用した方法を開発した。²⁰⁾この方法は、様々なMHD平衡条件(k)で得られるプラズマ制御量 Y^k と電磁気計測量(ポロイダル磁場, プラズマ電流, 外部磁場コイル電流, 以後簡単に測定量と呼ぶ)($X_1^k, X_2^k, \dots, X_N^k$)の間に適当な関数形

$$Y^k = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

で表わせるような相関が存在することを仮定して, 回帰法により(1)式の関数形や係数を定める手法である。実際には, (1)式は, 単純な多項式

$$Y = \sum_{j=1}^N C_j X_j \quad (3.8)$$

又は, 係数を補正した多項式

$$Y = \sum_{j=1}^N (C_{0j} + C_{1j} Z_1) X_j \quad (3.9)$$

$$Y = \sum_{j=1}^N (C_{0j} + C_{1j} Z_1 + C_{2j} Z_2) X_j$$

但し, $Z_1, Z_2 \in (X_1, X_2, \dots, X_N)$

を使用し, 係数 $C_j, C_{0j}, C_{1j}, C_{2j}$ を最小2乗法によって求める。

検討の結果, δ_{30}, δ_t の検出式として以下の結果を得た。

$$\delta_{30} = \sum_{j=1}^6 C_j X_j + C_7 (B_\rho^{\text{div}} / B_\omega^{\text{div}}) + C_8 (B_\rho^{\text{div}} / B_\omega^{\text{div}})^2 \quad (3.10)$$

又は,

$$\delta_{30} = \sum_{j=1}^6 (C_0 + C_{1j} \frac{I_M}{I_p}) X_j \quad (3.11)$$

$$\delta_t = \sum_{j=1}^6 (C_0 + C_{1j} \frac{I_M}{I_p}) X_j \quad (3.12)$$

但し, $X_j = B_\rho(\theta_j), B_\omega(\theta_j)$

$\beta_p \leq 1.0$ のダイバータ配位データベースに対して得られた C_j の値を第3.1表に, (3.10)~(3.12)式を用いた δ_{30}, δ_t の検出特性を第3.3図に示す。またOH(I)実験結果と本検出演算式との比較を第3.4図に示すが, 両者は良く一致している。

なお, この統計処理法は δ_{30}, δ_t のみでなく $R_p, \beta_p + \ell_i / 2$ 等の検出にも有効である。

但し, この統計処理法は本処理法の開発時期及びフィードバック制御計算機の演算時間の関連でOH(I)実験では利用しておらず, OH(I)実験では以下の方法を採用している。

δ_{30} に関しては, 適用可能な検出方法がなかったため, Qコイル電流 I_Q 又は真空容器中心における垂直磁場曲率 n_{index} の制御により間接的に δ_{30} を制御した。

δ_t に関しては, ダイバータ室内の磁力線方向と δ_t の関係に着目し, JT-60平衡配位データベースを使用して, ダイバータ室内の2つの磁気プローブの信号の比と δ_t の関係を調べ, δ_t の検出式を導く方法を採用した。第3.5図に δ_t と磁気プローブの信号よりQコイル電流の作る磁場の影響を除去した磁場の比との関係を示す。この結果を δ_t の制御領域($0.03 \leq \delta_t \leq 0.06$)に重点をおいて数式化すると,

$$\delta_t = -0.04 \frac{B_{\rho,div} + 2.30 \times 10^{-6} I_Q}{B_{\omega,div} + 1.42 \times 10^{-6} I_Q} - 0.25 R_p^2 + 1.505 R_p - 2.239 \quad (3.13)$$

を得る。

なお δ_t の制御領域は、第 3.6 図に示すようにダイバータ板上の熱負荷の許容領域から決まっている。

3.4 ま と め

JT-60 平衡配位フィードバック制御量の検出についての検討を行ない以下の結論を得た。

- i) ダイバータ配位における δ_{30} , δ_t のような局所的なセパトリックス面の位置検出には、回帰法を利用して導出した演算式（制御量を測定量の多項式で表現）が有効であることが判明した。
- ii) 上記方式は、 R_p , $\beta_p + \ell_i/2$ 等の検出にも有効であることがわかった。
- iii) R_p 検出時におけるダイバータコイルの作る局所的磁場の影響は、磁気プローブ信号より得られたフーリエ係数から同局所的磁場による誤差分を補正することで除去できることがわかった。

第 3.1 表 δ_{30} , δ_t 検出アルゴリズムの係数

(a) $\delta_{30} = \sum_{j=1}^6 C_j X_j + C_7 (B_\rho^{div}/B_\omega^{div}) + C_8 (B_\rho^{div}/B_\omega^{div})^2$ 型

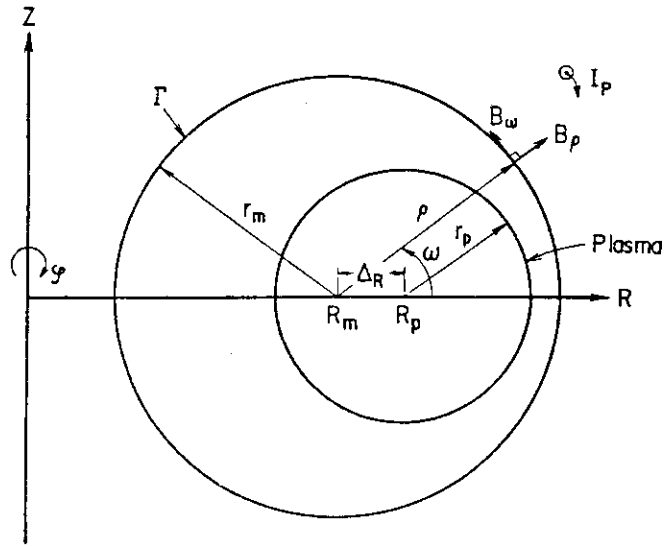
C_j	X_j, Z	係 数
C_1	$B_\rho(30^\circ)/I_p$	- 0.2170
C_2	$B_\rho(90^\circ)/I_p$	- 0.2895
C_3	$B_\rho(150^\circ)/I_p$	0.1349
C_4	$B_\omega(30^\circ)/I_p$	0.1322
C_5	$B_\omega(90^\circ)/I_p$	- 0.2044
C_6	$B_\omega(150^\circ)/I_p$	- 0.1507
C_7	$B_\rho^{div}/B_\omega^{div}$	- 0.07268
C_8	$(B_\rho^{div}/B_\omega^{div})^2$	- 0.01181

(b) $\delta_{30} = \sum_{j=1}^6 (C_{0j} + C_{1j}Z) X_j$ の型

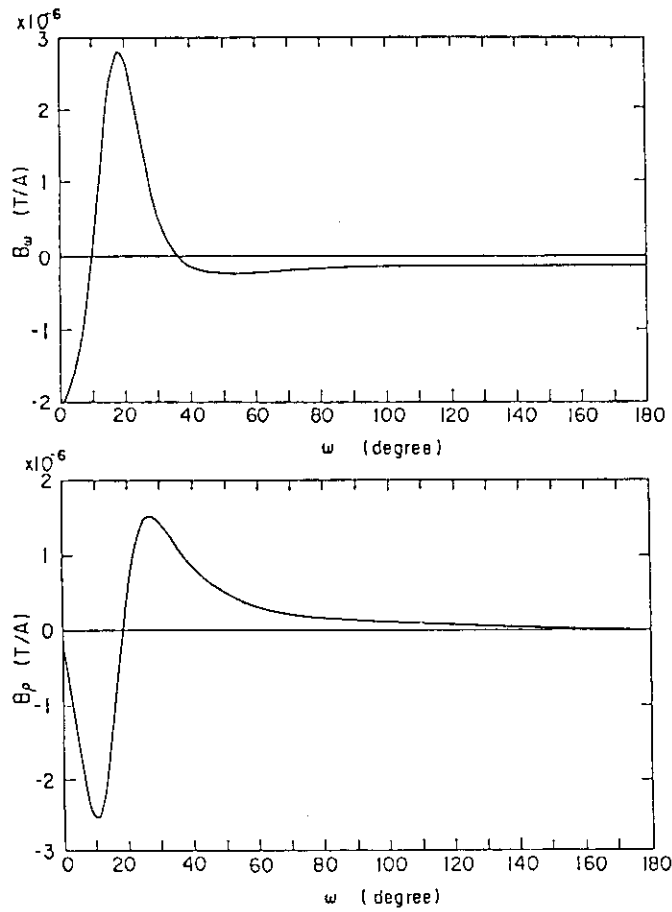
Z	X_j	C_{0j}	C_{0j} の値	C_{1j}	C_{1j} の値
I_M/I_p	$B_\rho(30^\circ)/I_p$	C_{01}	0.4635	C_{11}	- 20.66
	$B_\rho(90^\circ)/I_p$	C_{02}	- 1.810	C_{12}	26.18
	$B_\rho(150^\circ)/I_p$	C_{03}	2.261	C_{13}	- 30.01
	$B_\omega(30^\circ)/I_p$	C_{04}	- 0.3808	C_{14}	4.451
	$B_\omega(90^\circ)/I_p$	C_{05}	- 0.4574	C_{15}	9.786
	$B_\omega(150^\circ)/I_p$	C_{06}	0.1979	C_{16}	4.256

(c) $\delta_t = \sum_{j=1}^6 (C_{0j} + C_{1j}Z) X_j$ 型

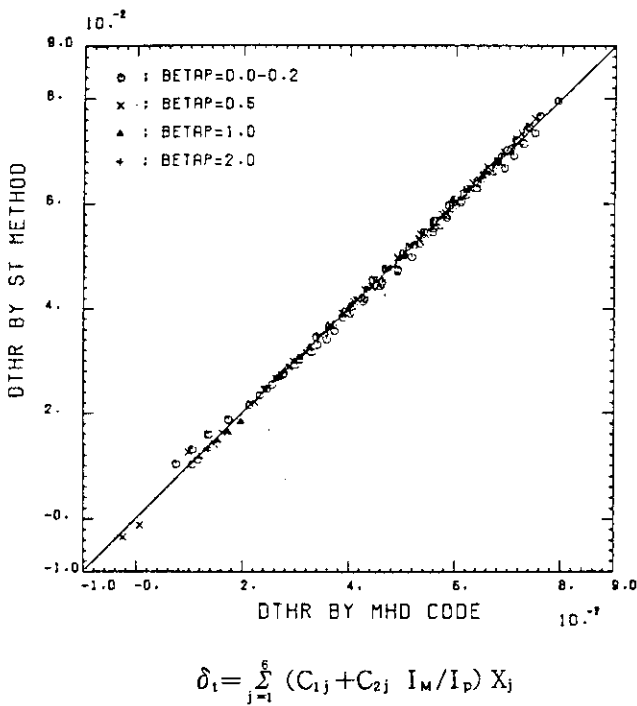
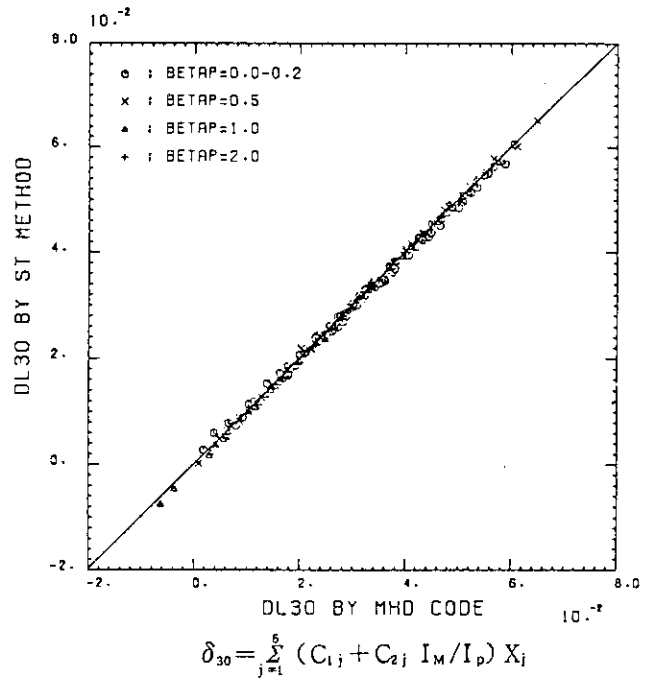
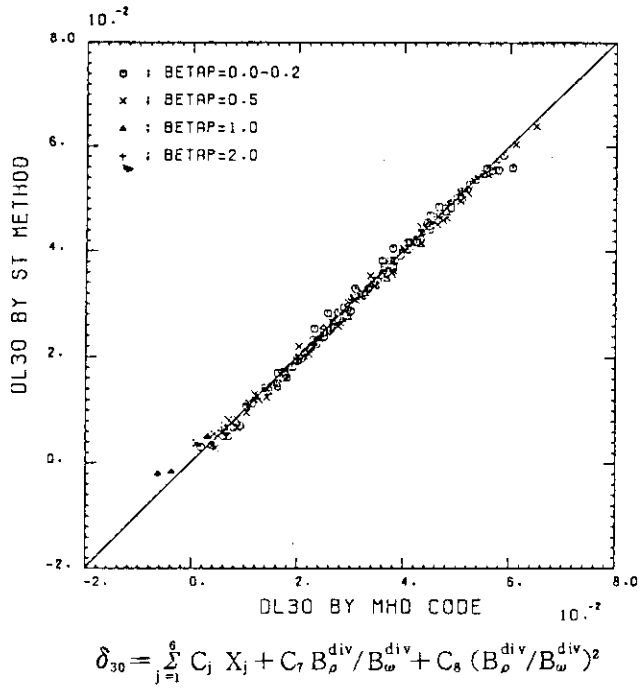
Z	X_j	C_{0j}	C_{0j} の値	C_{1j}	C_{1j} の値
I_M/I_p	$B_\rho(30^\circ)/I_p$	C_{01}	1.348	C_{11}	- 23.36
	$B_\rho(90^\circ)/I_p$	C_{02}	- 1.401	C_{12}	23.03
	$B_\rho(150^\circ)/I_p$	C_{03}	1.698	C_{13}	- 25.87
	$B_\omega(30^\circ)/I_p$	C_{04}	- 0.3518	C_{14}	2.670
	$B_\omega(90^\circ)/I_p$	C_{05}	- 0.2019	C_{15}	7.490
	$B_\omega(150^\circ)/I_p$	C_{06}	0.1433	C_{16}	3.621



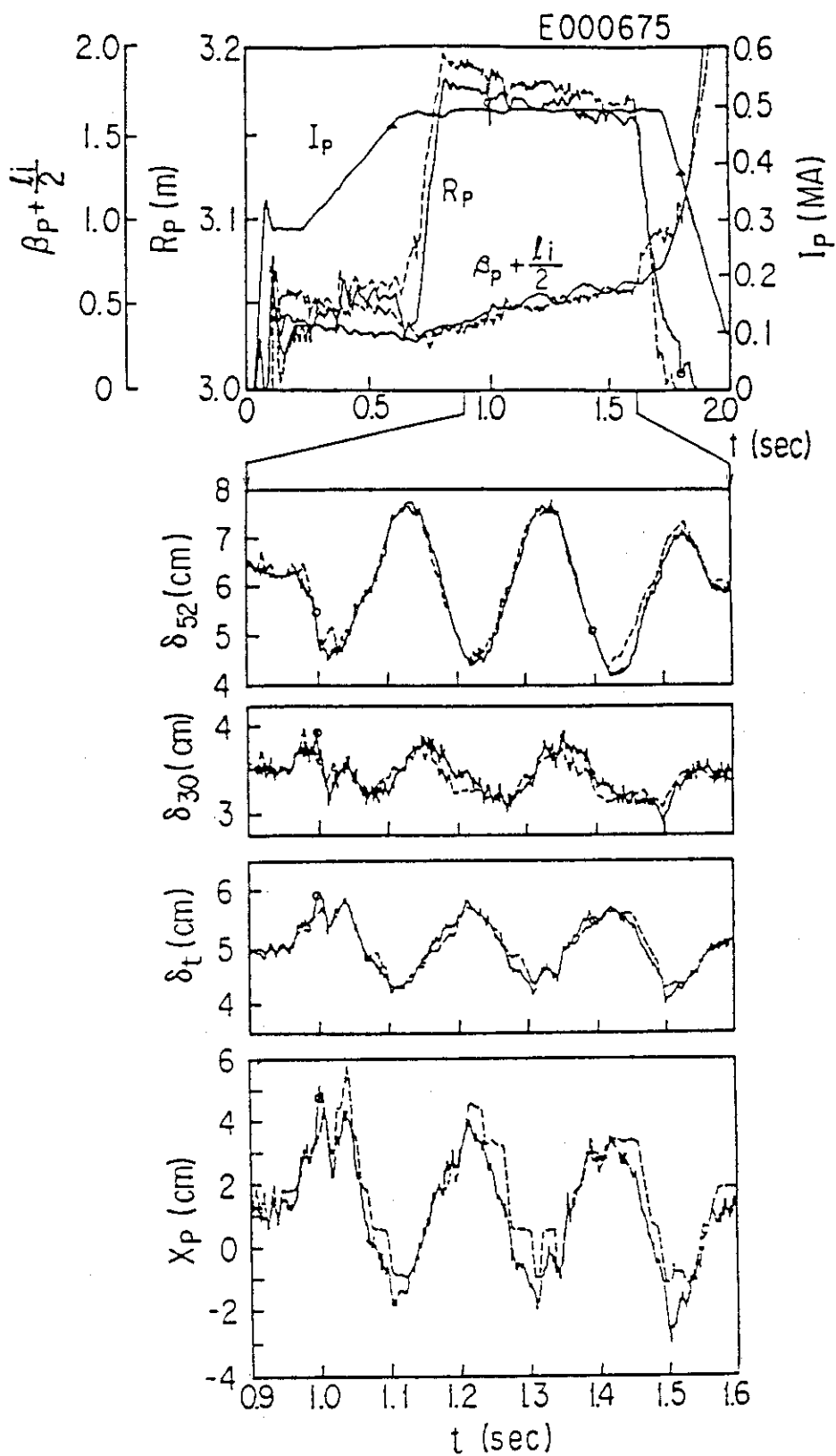
第 3.1 図 本報告で使用する座標系（円柱座標 (R, Z, φ) ）及び擬トロイダル座標 (ρ, ω, φ) ）及びプラズマと磁気プローブ設置面（ Γ 面）との関係



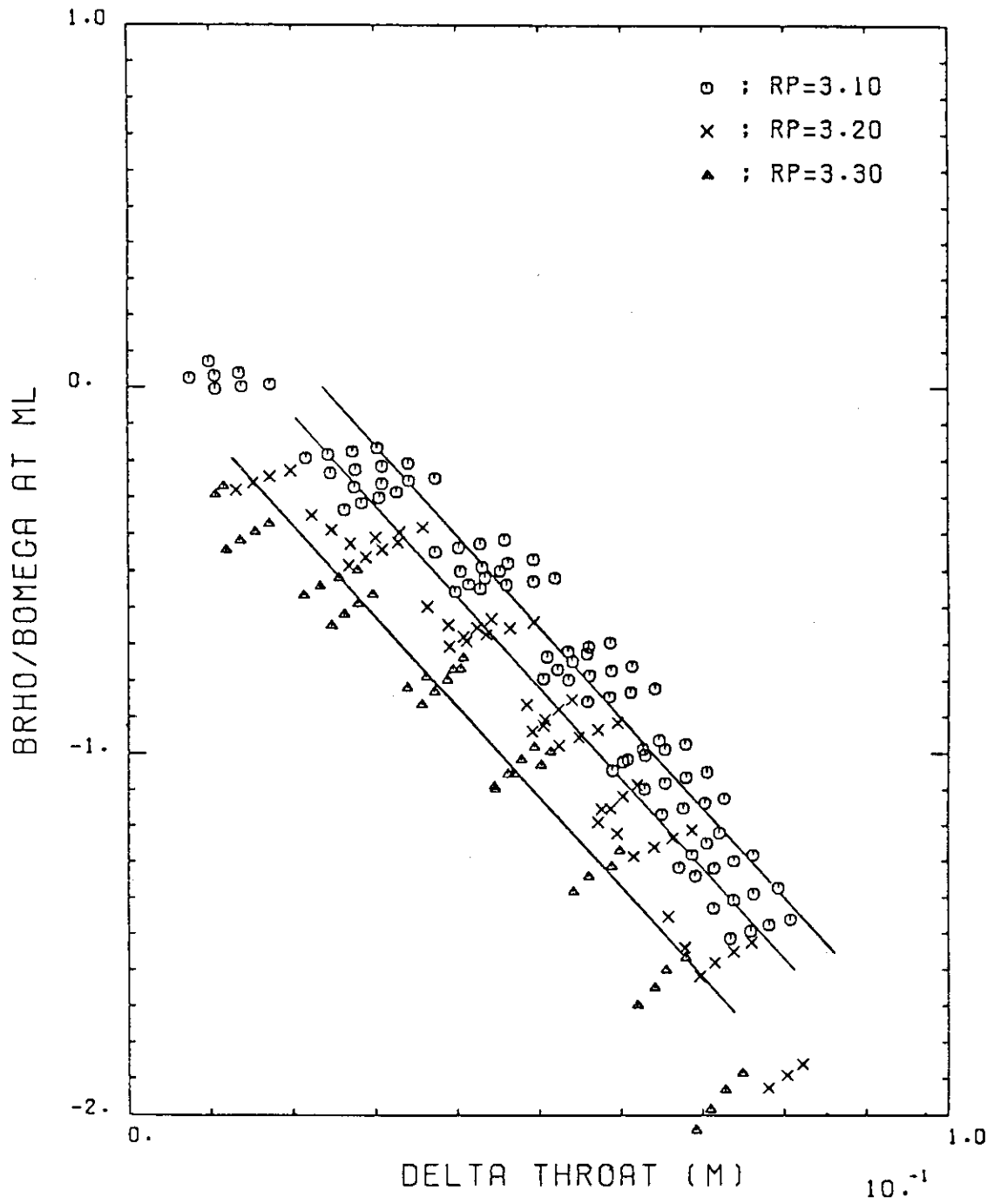
第 3.2 図 ダイバータコイル電流 I_M が Γ 面上に作る磁場分布



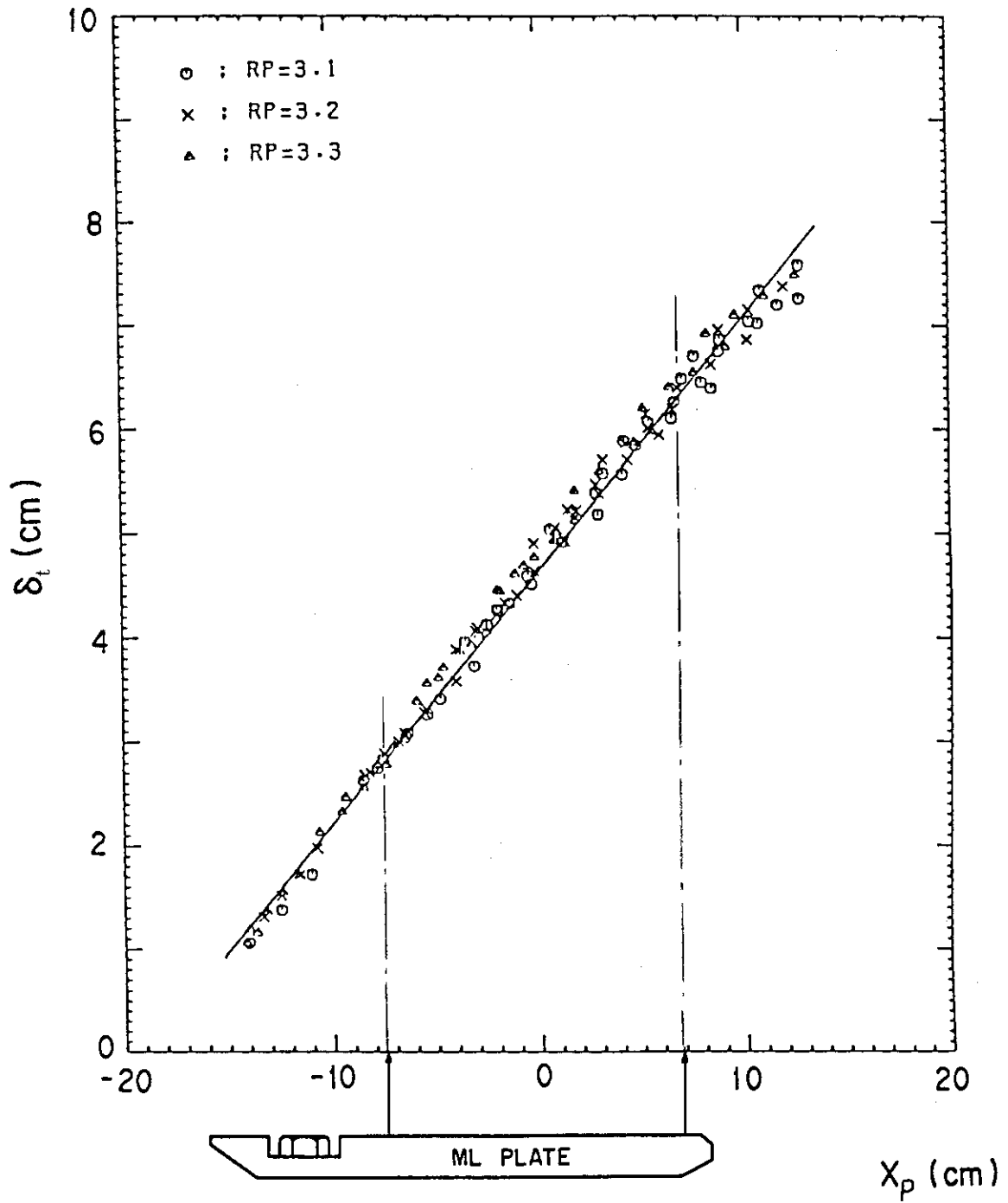
第 3.3 図 回帰法を利用した検出演算式による δ_{30} , δ_t の検出特性²⁰⁾



第 3.4 図 回帰法を利用した検出演算式の実験結果への応用例²⁰⁾
 実線：回帰法より求めた検出演算式を用いた結果
 破線：磁場測定に基づく平衡解析結果²¹⁾
 δ_{52} ：52° 固定リミターとプラズマ表面のクリアランス
 X_p ：ダイバータ板上でのセパトリス・ラインの位置



第 3.5 図 I_Q の補正をした場合のダイバータ室奥磁場の比と δ_t の関係



第 3.6 図 ダイバータ板上でのセパトトリクス・ラインの位置 X_p とダイバータスロート幅 δ_t との関係、及びその許容範囲

4. フィードバック制御系の特性解析

4.1 はじめに

JT-60 プラズマフィードバック制御系の特性の検討は以下の手順で行なわれた。

- i) 簡略化した制御方程式を用いた概略の制御系特性の評価
- ii) JT-60 構造物に誘起される渦電流や検出系、制御系の特性をモデル化したMatrix伝達関数解析及びシミュレーションを用いた制御系特性の詳細な評価

これらの検討を行なう際、まず最初に問題となるのはその制御系のモデル化である。JT-60の場合、その特色であるダイバータ配位における制御量 δ_{30} 、 δ_t の状態方程式のモデル化が第1の問題であり、JT-60 構造物に流れる渦電流のモデル化が第2の問題である。本章では、JT-60において実施されたフィードバック制御系のモデル化について概説するとともに、そのモデルを用いて得たフィードバック制御系の特性解析結果について述べる。

4.2節に、回帰法を利用した δ_{30} 、 δ_t の状態方程式の導出法、及び同状態方程式を用いた簡略化した制御方程式による制御系特性の評価結果を示す。また4.3節ではMatrix伝達関数解析の定式化及び検討結果を述べ、4.4節にてシミュレーションコードについての検討結果を述べる。4.5節ではまとめを述べる。

4.2 簡略化した制御方程式による検討

制御対象となる系の基礎方程式はプラズマ電流、コイル電流、渦電流に対する回路方程式と、プラズマ位置、クリアランスに対する状態方程式、及び検出系、フィードバック制御計算機中の演算、サイリスタ電源の特性を考慮した電圧制御式である。これらの基礎方程式による制御系特性の評価は次節以降に譲り、本節では渦電流、検出系及び制御系の遅れを無視した簡略化した制御方程式を用いた制御系のゲイン及び制御周波数の評価について述べる。制御系のゲイン及び特性は以下の議論で概略の評価ができる。

まず始めに、簡略化した制御方程式を作成するためには制御量の状態方程式が必要となる。プラズマ電流 I_p の状態方程式は I_p の回路方程式より求まる。また、プラズマ水平位置 R_p の状態方程式としては良く知られたShafranovの平衡の式が利用できるが、ダイバータ配位におけるクリアランス δ_{30} 、 δ_t の状態方程式の導出には δ_{30} 、 δ_t の検出と同様解析的手法が利用できない。そこでJT-60では、平衡配位データベースをBuneman法を用いた高精度平衡コード²²⁾より作成し、第4.1図に示すように $(I_Q/I_p, I_M/I_p)$ 平面に於ける (δ_{30}, δ_t) 依存性を $3.10 \leq R_p \leq 3.30$, $0.10 \leq \beta_p \leq 1.0$ の領域で求めるとともに、回帰法を利用して以下に示す δ_{30} 及び δ_t の状態方程式を求めた。

$$\begin{pmatrix} \delta_{30} \\ \delta_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2.28 & 2.28 \\ -20.5 & 2.34 & 0.82 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_V/I_p \\ I_Q/I_p \\ I_M/I_p \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

簡略化した制御方程式は、上記状態方程式と第 4.2 図に示す JT-60 フィードバック制御系のブロック線図より求まる。

I_p 制御系に対しては、以下の簡略化した制御方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{dI_p}{dt} &= 2\pi f_p (I_p^{ref} - I_p) \\ f_p &= \frac{-k_{FP}^2}{2\pi(1-k_{FP}^2)} \frac{K_P}{M_{PF}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで、 f_p は I_p 制御系の折点周波数、 K_p は制御ゲイン、 k_{FP} は F コイルとプラズマの結合係数である。OH(I) 実験では f_p を 6~9 Hz になる様に $K_p = -10 \sim -15 \Omega$ を選んだ。

R_p 制御系に対しては、Shafranov の平衡の式、V コイルの回路方程式から以下の簡略化した制御方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta_R &= 2\pi f_v (\Delta_R^{ref} - \Delta_R) \\ f_v &= \frac{-2R^2 \nu_v (K_v + 1) G_{VP} C_v}{\Lambda_0 (1.5 + n_{SV} - n_{index}) \tau_v} \\ n_{sv} &= \frac{2R \left(\frac{\partial M_{pv}}{\partial R} \right)^2}{\mu_0 \Lambda_0 L_v}, \quad \tau_v = \frac{L_v}{\Omega_v} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで、 f_v は Δ_R 制御系の折点周波数、 G_{vp} は比例制御ゲイン、 K_v は V-DDC の制御ゲイン、

C_v は Δ_R 制御式の規格化定数 (-4.4×10^{-3})、 $\Lambda_0 = \ell n \frac{8R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2}$ である。JT-60

OH プラズマの典型的ダイバータ配位の場合、 $R_p = 3.15 \text{ m}$ 、 $\nu_v = 5.5 \times 10^{-6}$ 、 $\Lambda_0 = 2.28$ 、 $n_{index} = 0.7$ 、 $L_v = 10.2 \text{ mH}$ 、 $n_{sv} = 2.56$ 、 $\tau_v = 0.367$ 、 $K_v = 92$ であり、 $f_v = 30 \text{ Hz}$ の場合は $G_{vp} = 2.5$ 、 $f_v = 60 \text{ Hz}$ の場合は $G_{vp} = 5.0$ である。なお、 R_p の制御特性の低下を防ぐためには $f_p < f_v$ の必要がある。

δ_t の簡略化した制御方程式は下式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta_t &= 2\pi f_M (\delta_t^{ref} - \delta_t) \\ f_M &= C \frac{G_M (K_M + 1)}{\tau_M} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ここで、 f_M は δ_t 制御系の折点周波数、 G_M は比例制御ゲイン、 K_M は M-DDC の制御ゲイン、 $\tau_M = L_M / \Omega_M$ は M コイルの時定数、 $C (= 1.43)$ は δ_t と I_M の関係を表わす係数であり (4.1) 式より求めた。

なお、 δ_{30} についても (4.4) 式と同様である。

この簡略化した制御方程式により求めたゲインの妥当性，JT-60の場合の適用限界については次節以降で述べる。

4.3 Matrix 伝達関数解析²³⁾

本解析法は，プラズマ電流 I_p ，プラズマ位置 R_p ，クリアランス δ_{30} ，ダイバースロット幅 δ_i の制御性の周波数特性を解析し，適正なゲイン，応答限界，プラズマのパラメータ変動による外乱応答及び制御系相互間の干渉の定量的評価を目的としている。

まず始めに，フィードバック制御系のモデル化について述べる。

プラズマの平衡の方程式（Shafranovの平衡の式），ポロイダルコイルとプラズマの回路方程式から，互いに直交する渦電流¹⁴⁻¹⁵⁾を消去することにより，次式を得る。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial B_z}{\partial R}\right)\tilde{R} + \left(\frac{\partial B_z}{\partial \Lambda}\right)\left(\tilde{\beta}_p + \frac{\tilde{\ell}_i}{2}\right) + \left(\frac{\partial B_z}{\partial I_p}\right)\tilde{I}_p + \sum_j \left(\frac{\partial B_z}{\partial I_j}\right)\tilde{I}_j = 0 \\ & \sum_j Z_{ij}\tilde{I}_j + \left(\frac{\partial V_i}{\partial I_p}\right)\tilde{I}_p + \left(\frac{\partial V_i}{\partial R}\right)\tilde{R} = \tilde{V}_i \quad (4.5) \\ & Z_p\tilde{I}_p + I_p\tilde{\Omega}_p + \sum_j \left(\frac{\partial V_p}{\partial I_j}\right)\tilde{I}_j + \left(\frac{\partial V_p}{\partial R}\right)\tilde{R} + \left(\frac{\partial V_p}{\partial \ell_i}\right)\tilde{\ell}_i = 0 \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial B_z}{\partial R}\right) &= \frac{B_z}{R} \left(1 - n_{\text{index}} - \frac{1}{\Lambda_0} \left(1 - \frac{R}{a} \frac{\partial a}{\partial R}\right) + \sum_e n_{se} \frac{s\tau_e}{1+s\tau_e}\right) \\ \left(\frac{\partial B_z}{\partial \Lambda}\right) &= \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \\ \left(\frac{\partial B_z}{\partial I_p}\right) &= -\left(\frac{B_z}{I_p} + \sum_e \nu_e \frac{sM_{pe}}{1+s\tau_e}\right) \\ \left(\frac{\partial B_z}{\partial I_i}\right) &= \nu_i \left(1 - \sum_e \frac{\nu_e}{\nu_i} \frac{sM_{ie}}{1+s\tau_e}\right) \\ Z_{ij} &= sM_{ij} \left(1 - \sum_e \frac{sM_{ie}M_{ej}}{M_{ij}(1+s\tau_e)}\right) + \delta_{ij}\Omega_j \\ \left(\frac{\partial V_i}{\partial I_p}\right) &= sM_{pi} \left(1 - \sum_e \frac{sM_{ie}M_{ep}}{M_{pi}(1+s\tau_e)}\right) \\ \left(\frac{\partial V_i}{\partial R}\right) &= sI_p \frac{\partial M_{pi}}{\partial R} \left(1 - \sum_e \frac{\nu_e}{\nu_i} \frac{sM_{ie}}{1+s\tau_e}\right) \\ \left(\frac{\partial V_p}{\partial I_j}\right) &= sM_{pj} \left(1 - \sum_e \frac{sM_{pe}M_{ej}}{M_{pj}(1+s\tau_e)}\right) \\ \left(\frac{\partial V_p}{\partial R}\right) &= sI_p \left(\frac{\partial L_p}{\partial R} - \sum_e \frac{sM_{pe}}{1+s\tau_e} \frac{\partial M_{pe}}{\partial R}\right) + s \sum_j \frac{\partial M_{pj}}{\partial R} I_j \\ \left(\frac{\partial V_p}{\partial \ell_i}\right) &= sI_p \frac{\partial L_p}{\partial \ell_i} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$Z_p = sL_p + \Omega_p - \sum_e \frac{s^2 M_{pe}^2}{1 + s\tau_e}$$

$$\Lambda_0 = \ell n \frac{8R}{a} + \beta_p + \frac{\ell_i}{2} - \frac{3}{2}$$

$$n_{\text{index}} = -\frac{R \frac{\partial B_z}{\partial R}}{B_z},$$

$$n_{se} = \frac{2R \left(-\frac{\partial M_{pe}}{\partial R} \right)^2}{\mu_0 \tau_e \Lambda_0},$$

$$\nu_e = \frac{\partial M_{pe}}{2\pi R} \quad \nu_i = \frac{\partial M_{pi}}{2\pi R},$$

各項のもつ意味はほぼ自明であるが、 n_{se} は渦電流のもつシェル効果を表わし、 $\left(\frac{\partial B_z}{\partial I_i} \right)$ の右辺は渦電流による外部磁場のシールド効果を表わしている。

\vec{R} を消去することにより、(4.5)式は次のように変形できる。

$$Z \vec{I} = \vec{V} + B \vec{U}_d \quad (4.7)$$

但し、 $\vec{I} = (\vec{I}_p, \vec{I}_i)^t$ 、 $Z = \{ Z_{ij} \}$ (渦電流、プラズマの運動を考慮した等価的なインピーダンス行列)、 $\vec{U}_d = (\vec{\beta}_p, \vec{\ell}_i, \vec{\Omega}_p)^t$ 、 $B = \{ B_{ij} \}$ (外乱 \vec{U}_d に伴う誘起電圧行列)である。

一方、JT-60の場合モデル化で特に問題となる、 δ_{30} 及び δ_t の従う状態方程式は、次のように表わされる。

$$\tilde{\delta}_{30} = -\frac{\tilde{\Psi}(\vec{R}_{30}) - \tilde{\Psi}(\vec{R}_x)}{\frac{\partial \Psi}{\partial x_{30}}(\vec{R}_{30})}$$

$$\tilde{\delta}_t = \frac{\tilde{\Psi}(\vec{R}_t) - \tilde{\Psi}(\vec{R}_x)}{\frac{\partial \Psi}{\partial x_t}(\vec{R}_t)} \quad (4.8)$$

$$\tilde{\Psi} = \frac{\partial \Psi_p}{\partial R} \vec{R} + \frac{\partial \Psi_p}{\partial I_p} \vec{I}_p + \sum_e \frac{\partial \Psi_j}{\partial I_j} \vec{I}_j + \sum_e \frac{\partial \Psi_e}{\partial I_e} \vec{I}_e$$

ここで、 Ψ_p 、 Ψ_i 及び Ψ_e はそれぞれプラズマ電流、コイル電流、渦電流によって作られたポロイダル磁束である。この式から渦電流を消去し、 R_p 、 I_p と組合わせて、4制御量の状態方程式が得られる。

$$\vec{X} = C \vec{I} + C_D \vec{V}_d \quad (4.9)$$

ここで $\vec{X} = (\vec{R}_p, \vec{I}_p, \tilde{\delta}_{30}, \tilde{\delta}_t)^t$ 、 $C = \{ C_{ij} \}$ 、 $C_D = \{ C_{Dij} \}$ である。以上の定式化は JT-60 のみならず、一般に利用できる。

更に、JT-60 のポロイダルコイル制御系は第 4.2 図のようになっており、 Π_p 、DDC、サイ

リスタ電源での遅れ時間，サンプル・ホールドの効果を考慮する必要がある。これらを考慮してコイル電圧の制御式は次のように表わされる。

$$\vec{V} = G (\vec{X}_{ref} - P\vec{X}) + \Omega_c \vec{I} \quad (4.10)$$

ここで， G ， P ， Ω_c はそれぞれ，電圧制御行列，検出系のフィルター，コイル抵抗損失の補償行列である。

(4.7)，(4.9)及び(4.10)を組み合わせると，

$$\vec{X} = H(\vec{X}_{ref} - P\vec{X}) + H_d \vec{U}_d \quad (4.11)$$

ここで

$$H = C(Z - \Omega_c)^{-1} G$$

$$H_d = C(Z - \Omega_c)^{-1} B + C_D$$

を得る。(4.11)式は，標準的なベクトルブロック線図第4.3図のように表わされる。

制御系の閉ループ伝達関数(H_c)及び外乱応答(D)は次式で表わされる。

$$H_c = (1 + HP)^{-1} H \quad (4.12)$$

$$D = (1 + HP)^{-1} H_d \quad (4.13)$$

次に前節簡略化した制御方程式より求めた制御ゲインの妥当性を，Matrix伝達関数解析を用いて評価する。 $I_p - R_p$ 制御系の場合の電圧制御行列 G 及びACR制御行列 Ω_c は第4.2図より以下の様に求まる。

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\Omega_c = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & 0 \\ 0 & \Omega_{22} \end{bmatrix}$$

ここで

$$g_{11} = K_p e^{-s(T_{th} + T_D)} G_{SH}$$

$$g_{22} = \Omega_v I_p (K_v + 1) G_v (1 + s\tau_D) e^{-s(T_{th} + T_D + T_E)} G_{SH}$$

$$\Omega_{11} = \Omega_p e^{-s(T_D + T_{th})} G_{SH}$$

$$\Omega_{22} = \Omega_v (K_v + 1) e^{-sT_H - K_v} e^{-s(T_D + T_{th})} G_{SH}$$

$$G_{SH} = \frac{1 - e^{-sT_S}}{sT_S}, \quad G_v = C_v G_{vp}$$

$$T_{th} \text{ (24相サイリスタ変換器の遅れ時間)} = 0.35 \text{ ms}$$

$$T_D \text{ (DDCの遅れ時間)} = 0.2 \text{ ms}$$

$$T_{\parallel} \text{ (フィードバック計算機の遅れ時間)} = 0.96 \text{ ms}$$

$$T_S \text{ (制御周期(サンプル時間))} = 1 \text{ ms}$$

である。(4.14)式制御ゲインに前述の簡略化した制御式から求めたゲイン($K_p = -10$ ， $G_{vp} = 2.5 \sim 5.0$)を用いて検討した結果の R_p 制御特性を第4.4図に示す。図中波線は $G_{vp} = 2.5$ ， $\tau_D = 0$ (ms)の比例制御の場合，図中実線は $G_{vp} = 5.0$ ， $\tau_D = 3$ (ms)のP-D制御の場合である。JT-60では，制御系の遅れ時間(~ 2 ms)と検出系の遅れ時間(~ 1.7 ms)のために，比例

制御のみでは制御特性が悪く、P-D制御による位相補償が必要となっている。なお、この位相補償により、当所の目的の $f_{vp} = 50 \text{ Hz}$ の特性を得ている。なお、 δ_{30} 、 δ_1 についてはこの遅れは特に問題とならない。

次に、JT-60では他のトカマク装置と異なり、ダイバータ配位を制御するために δ_{30} と δ_1 を制御量としている。この場合、 R_p を I_v で、 δ_{30} を I_Q で、 δ_1 を I_M で制御した場合には、第4.2図より明らかなように制御系間の相互干渉が大きくなる。第4.5図の破線に相互干渉の周波数特性を示す。この相互干渉を除去するには、開ループの行列伝達関数 H を対角化すればよく、同図実線に、近似的に対角化を実現するような電圧制御行列に対する R_p 、 δ_{30} 、 δ_1 の制御特性を示す。このように、電圧制御を行列化することにより、ダイバータ配位を含む制御が可能となる。

4.4 シミュレーション解析^{24,25)}

前節で述べたMatrix伝達関数解析は制御系の特性検討に有効であるが、周波数領域の検討である。これに対し、本解析は時間領域における検討であり、プラズマの挙動を直観的に把握できるとともにプラズマや制御系の非線型性までも考慮している点に特徴がある。すなわち、プラズマ小半径の変化の非線形性（最外殻磁気面の中心が真空容器中心の外側か内側かで変化の仕方が異なる）、ポロイダル磁場コイルのサイリスタ電源のモデル及び上下限リミットなどの非線型性をとり込んでいる。

本コードで用いている方程式は、前節で述べた(4.5)式と同じである。 δ_{30} 、 δ_1 に関してはMatrix伝達関数解析と少し異なり以下のモデル化を行なっている。

null pointの Ψ 値を求め、ダイバータスロート部及び 30° リミタ部にて同一の Ψ 値をもつ場所を探せば、 δ_{30} 、 δ_1 が求められる。すなわち、null point部、スロート部、 30° リミタ部における Ψ の表現式が求められれば、 δ_{30} 、 δ_1 が計算できる。 Ψ はプラズマ電流のつくる Ψ_p とポロイダル磁場コイル電流及び渦電流のつくる Ψ_j の和で表わすことが出来る。 Ψ_p は、プラズマ電流値、プラズマ電流の位置(R_J)、及び計算場所の関数となる。ここでプラズマ電流を1本の線電流により近似し、 R_J としてはShafranovの近似式で求められる最外殻磁気面の中心より外へ $a_p^2(\Lambda + \frac{1}{2})/2R_p$ シフトした位置を用いる。一方、 Ψ_j は、計算場所と、コイル電流値又は渦電流の関数となる。

null point位置 R_x での Ψ 値を Ψ_x とすると

$$\begin{aligned} \Psi_x &= \Psi_x^p + \Psi_x^j & (4.15) \\ \Psi_x^p &= \left(\sum_{\ell, k} a_k^\ell R_J^{\ell-1} R_x^{k-1} \right) I_p \\ \Psi_x^j &= \sum_j \left(\sum_k b_k^j R_x^{k-1} \right) I_j \end{aligned}$$

a_k^ℓ, b_k^j : 定数

null pointでは Ψ は極小値をとるため、

$$0 = \left(\sum_k a_k R_J^{-1} (k-1) R_x^{k-2} \right) I_p + \sum_j \left(\sum_k b_k^j (k-1) R_x^{k-2} \right) I_j \quad (4.16)$$

I_p , I_{ij} , R_J は既知のため, (4.16) は R_x の多項式となっている。従って, (4.16) より R_x が求まり, それを (4.15) へ代入して Ψ_x を計算する。ダイバースロート部, 30° リミター部の Ψ も, (4.15) 式と同様に多項式近似しておけば, Ψ_x が与えられるので, δ_{30} , δ_t が求められる。

なお, 制御系の制御周期, フィードバック制御計算機, DDC の時間遅れ等は実機に対応して組み込んである。

本シミュレーション解析法は時間領域での解析のため, 次章で一例を示すが実験結果の検討に有効であるとともに, Matrix 伝達関数解析で指針を得た後非線形性の影響を検討する問題に有効である。参考例として, 第 4.6 図にプラズマ小半径の非線形性を考慮した場合としない場合 (小半径一定のモデル) の R_p レファレンス応答のシミュレーション結果を, 第 4.7 図に R_p レファレンス応答時に電源電圧上下限リミットの値が制御に与える影響を示す。第 4.6 図では, プラズマ小半径一定のモデルの場合は容器中心より外側にプラズマを移動する場合と内側に移動する場合に差が見られないが, プラズマの変位とともにプラズマ小半径も変化するモデルの場合は外側にプラズマを移動する場合と内側に移動する場合で明らかな差異があるのがわかる。またこの結果より, プラズマのモデル化次第で制御項の最適ゲインが異なってくる場合があるので, 現実のプラズマとモデル化されたプラズマとの相違点に充分考慮する必要があることがわかる。また第 4.7 図は, F コイル及び V コイルの電圧制御行列 G の非対角要素を考慮することにより R_p の制御速度を向上する場合を例にとり, F コイル電源の電圧リミットの効果を示したものである。F コイル電源電圧リミットが大きい場合は R_p 制御速度の向上が見られるが, 電圧リミットが低い場合は G の対角項のみを考慮した従来の R_p 制御特性とあまり差がないことがわかる。

4.5 ま と め

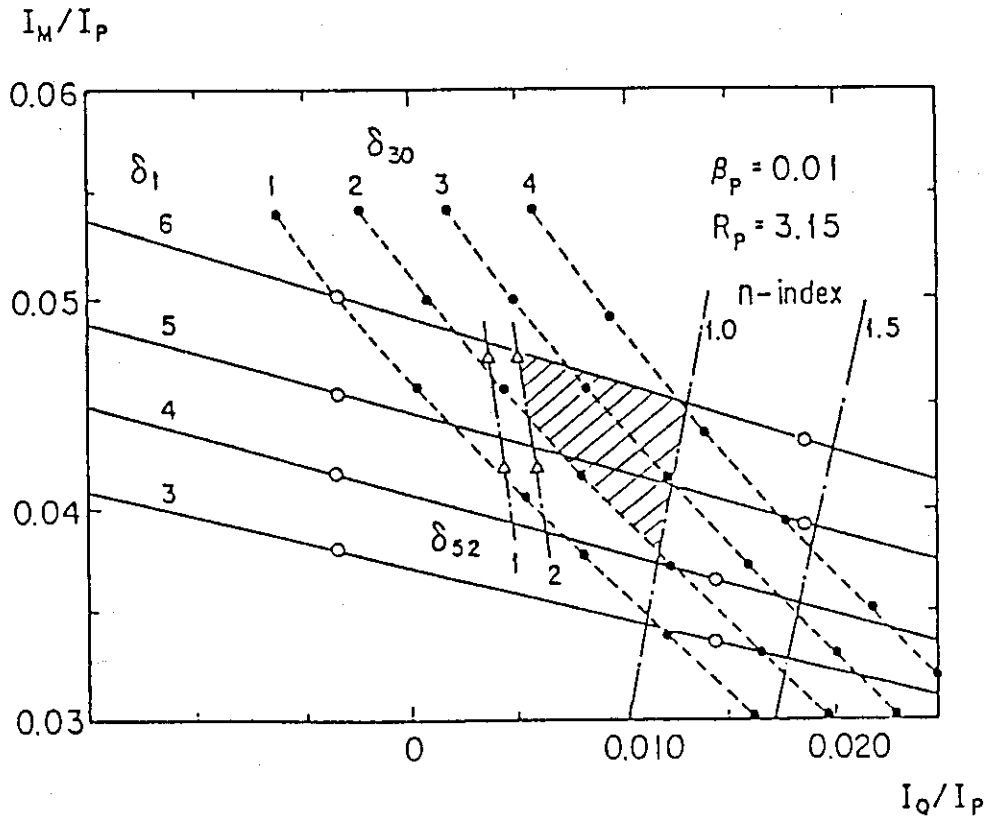
JT-60 フィードバック制御系の特性を

- i) 簡略化した制御方程式を用いた制御系特性評価法
- ii) Matrix 伝達関数解析法及びシミュレーション解析法を用いて行なった。

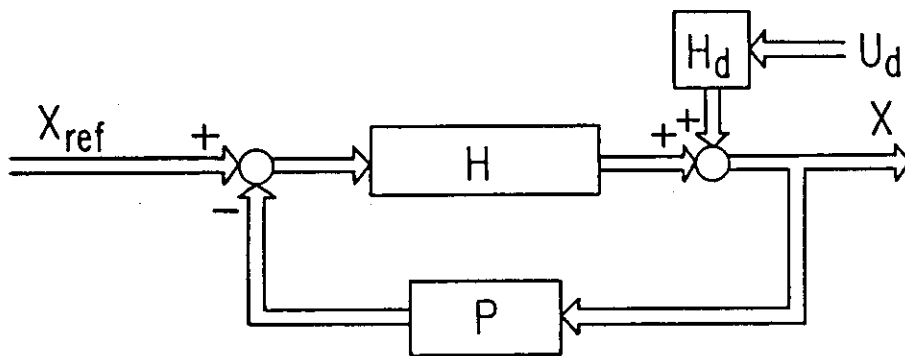
i) の方法は, 渦電流や制御系の遅れ等を全て無視した制御方程式を用いる方法であり, 簡単に制御系のゲイン及び特性を評価できる点に特色がある。なお i) の検討においては, JT-60 の特色である δ_{30} 及び δ_t の状態方程式は回帰法を用いて導出した。

Matrix 伝達関数解析は, 一般の一変数制御ループの伝達関数解析を多変数に拡張したものであり, JT-60 構造物に流れる渦電流や検出系, 制御系の遅れ等も含んだ線形化モデルを利用している。Matrix 伝達関数解析の結果, JT-60 の場合, R_p 制御系は比例制御のみの場合検出系, 制御系の遅れが問題となり, 微分項の付加による位相補償が必要と予測されている。

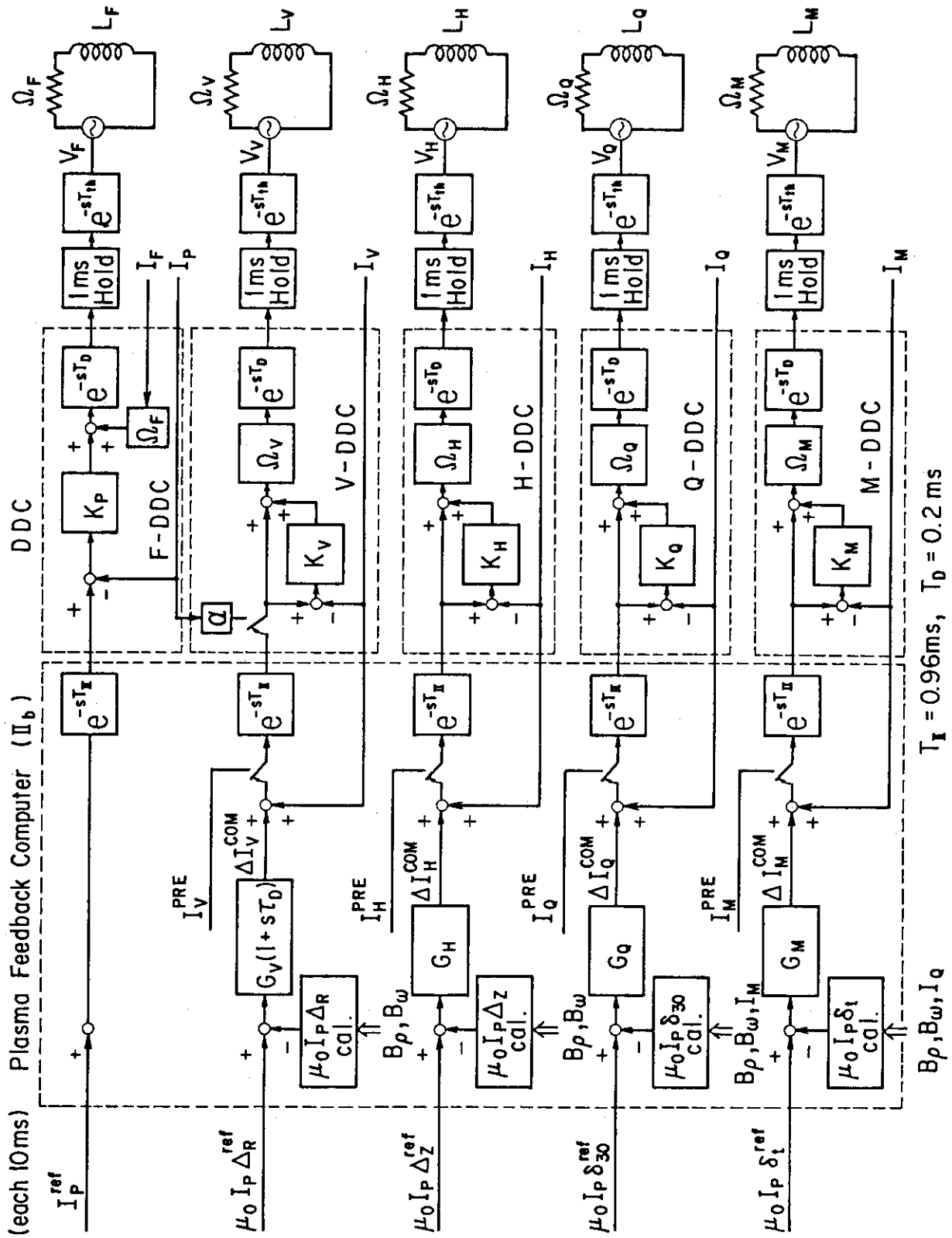
シミュレーション解析法は, プラズマや系の実時間での挙動把握に有効であるとともに, 各種の非線形性を考慮できる点に特色がある。



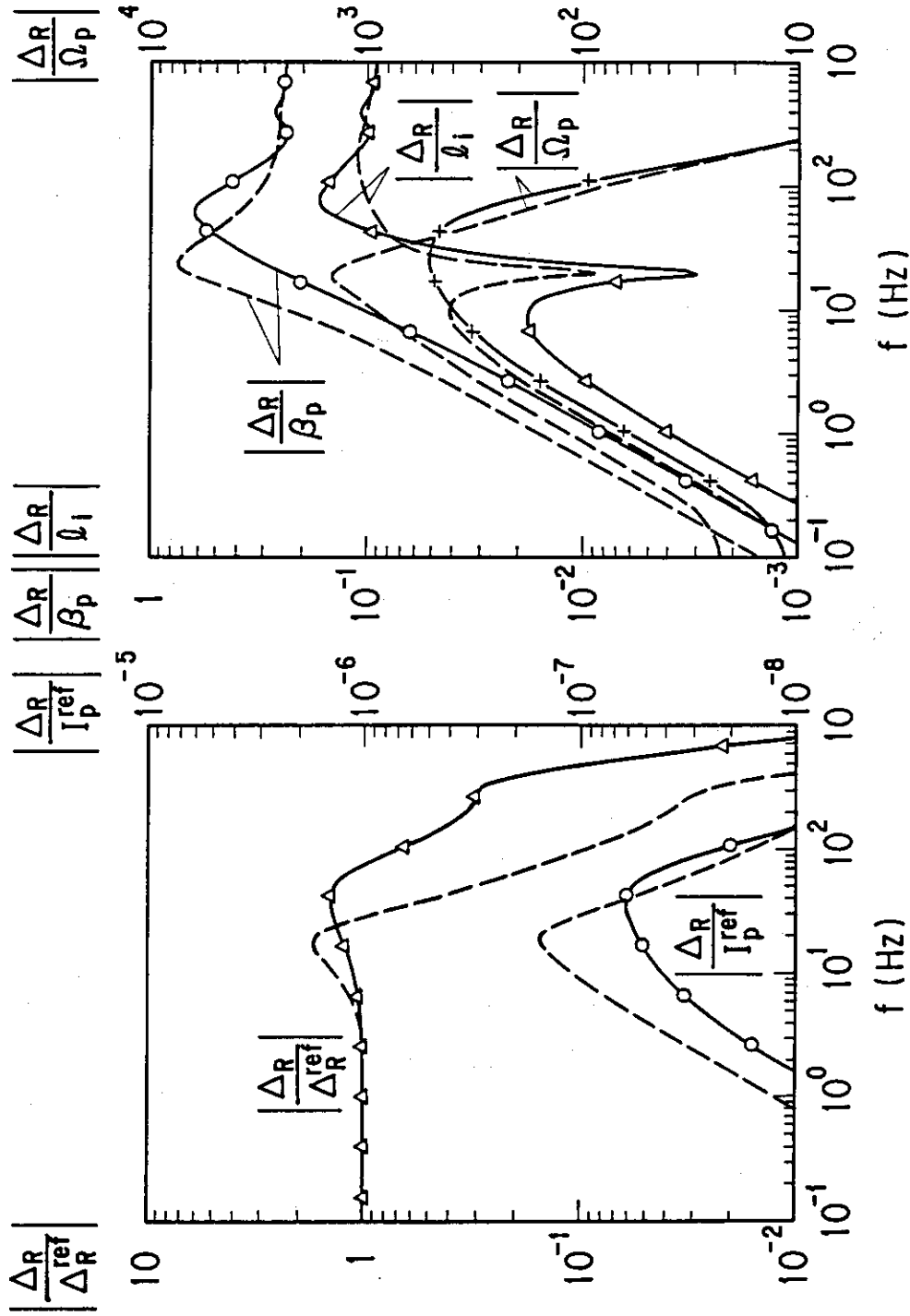
第 4.1 図 $R_p = 3.15$ m における (δ_{30}, δ_t) と $(I_Q/I_P, I_M/I_P)$ との関係



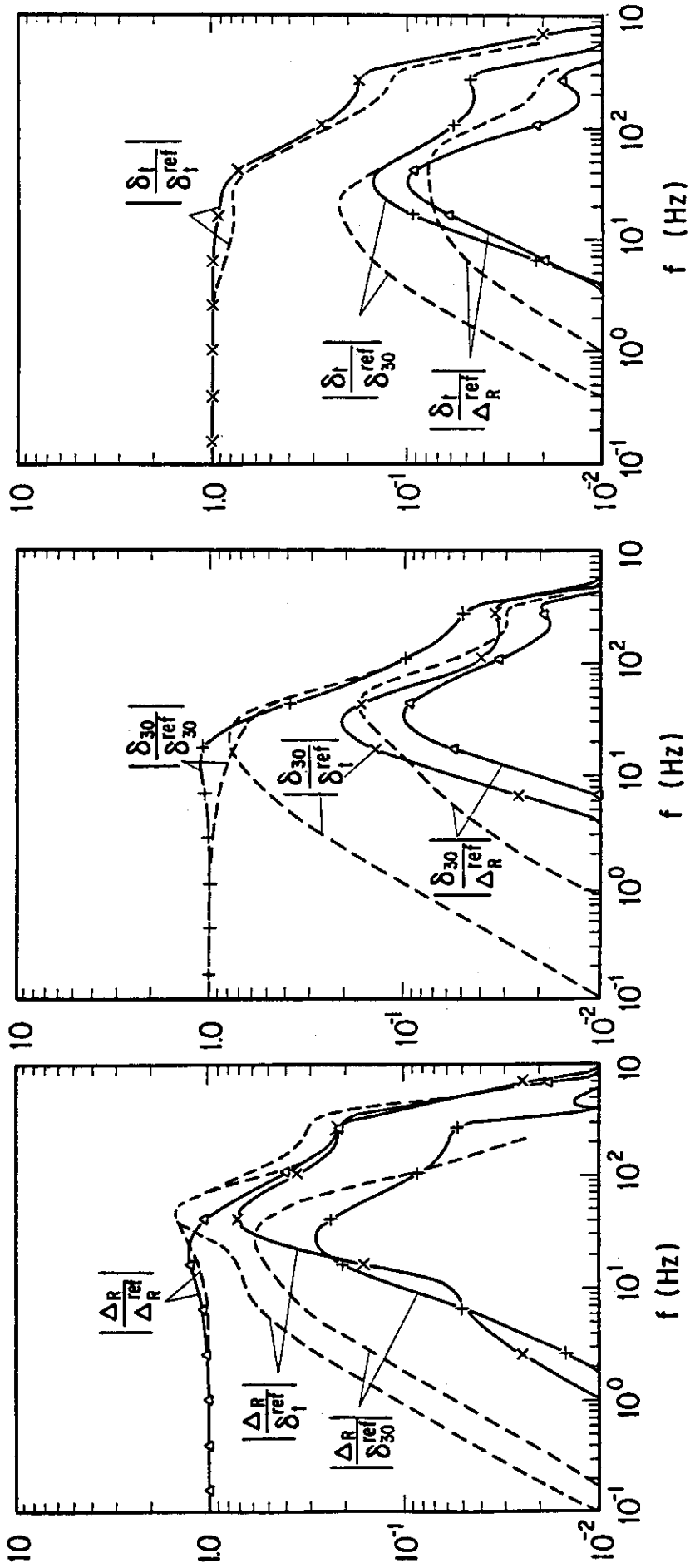
第 4.3 図 ベクトルブロック線図



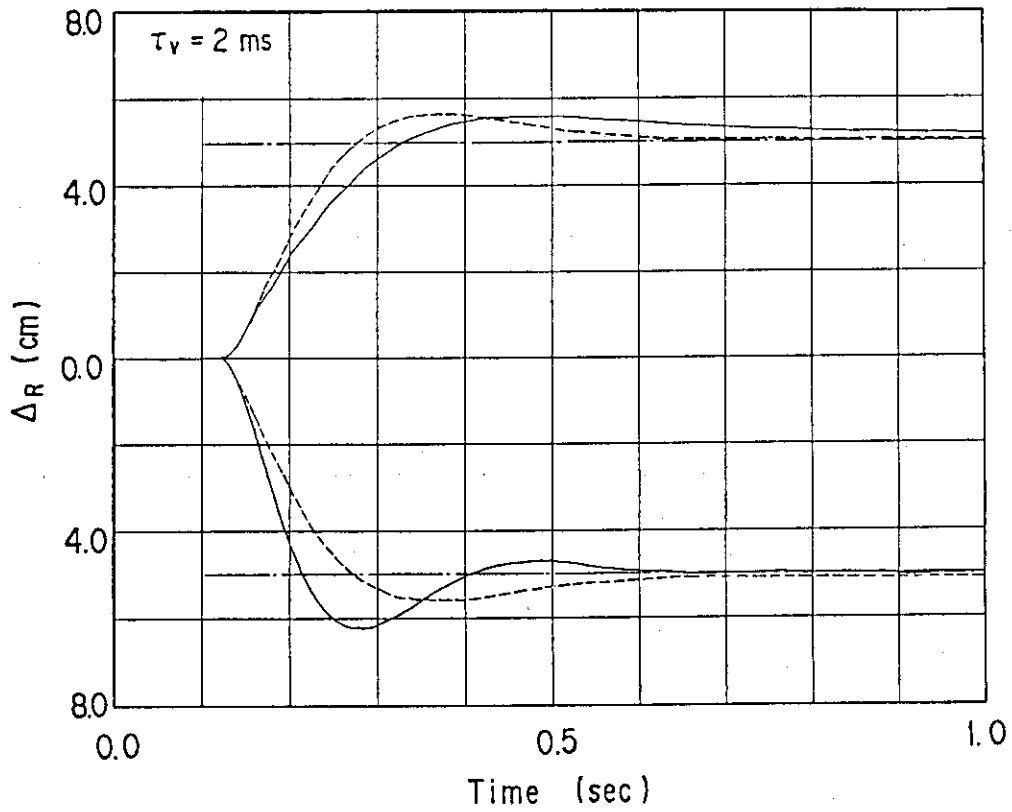
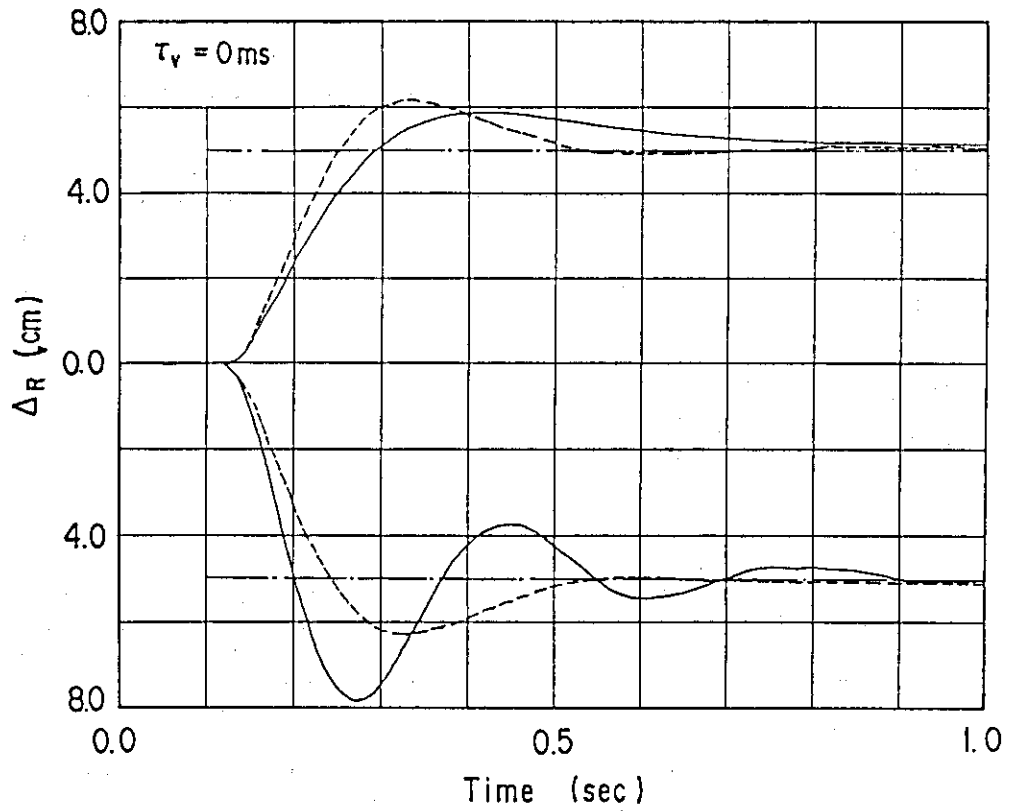
第 4.2 図 JT-60 フィードバック制御計算機 - DDC のブロック線図



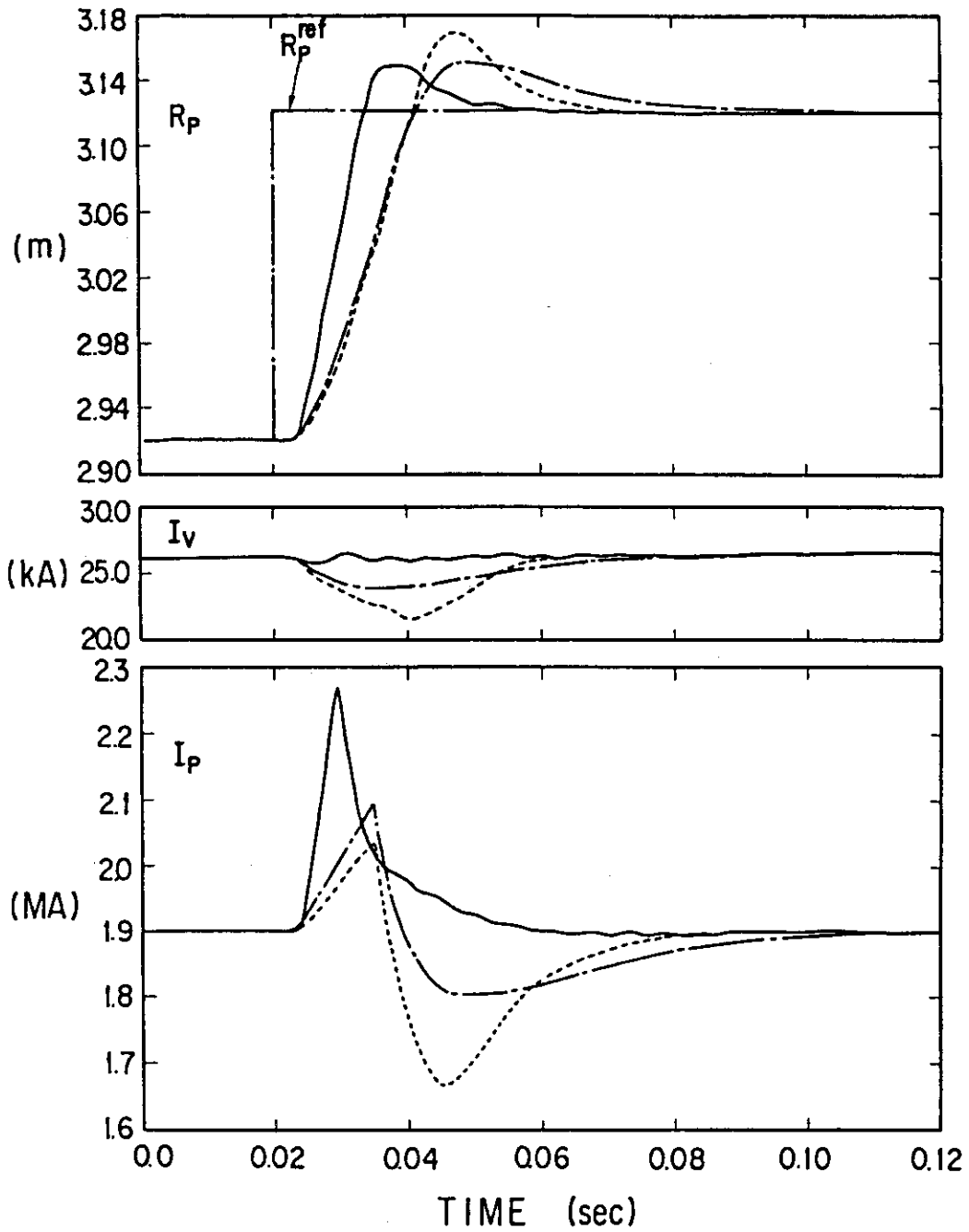
第4.4図 閉ループ R_p 制御特性と外乱応答特性²³⁾



第 4.5 図 $R_p - \delta_{30} - \delta_t$ 制御特性²³⁾



第 4.6 図 プラズマ小半径の非線形性の影響
 実線：プラズマ小半径一定のモデル
 破線： Δ_R の変化に対応してプラズマ小半径が変化するモデル
 一点鎖線： Δ_R の目標値



第 4.7 図 電源電圧のリミットが制御に与える影響²⁵⁾
 実線: G の非対角項を考慮した場合, $V_{\dagger}^{max} = \pm 10$ K V
 一点鎖線: " " , $V_{\dagger}^{max} = \pm 1.25$ K V
 点線: G の対角項のみの場合 (従来の制御方式)

5. プラズマ制御実験結果

5.1 はじめに

JT-60OH(I) 実験で制御した制御量は、既に述べたようにプラズマ電流 I_p 、水平方向位置 R_p 、垂直方向位置 z_p 、容器中心における垂直磁場曲率 n_{index} 、ダイバータスロート位置 δ_l であり、これらの制御量は F コイル電流 I_F 、V コイル電流 I_V 、Q コイル電流 I_Q 、M コイル電流 I_M 、H コイル電流 I_H により制御される。第 5.1 図に OH(I) で得られた典型的な放電波形を示す。プラズマ電流 I_p は、F コイル電流の遮断後 100 ms 程度で 650 kA に達し、以後はプラズマ電流のプレプロ波形になるようにフィードバック制御される。プラズマ変位 Δ_R 、 Δ_z は、 I_p 着火の 60 ms 程度後からフィードバック制御が開始される。フィードバック制御開始以前は、 Δ_R は αI_p 制御（文献 5 参照）又 I_H は一定値である。ダイバータ放電の場合は、M コイル電流及び Q コイル電流はおもに $t=0.2$ sec から立ち上げ始め、ダイバータ配位の形成が可能となったところで水平方向位置を 8 cm 程度外側にずらしてダイバータ配位を形成する。JT-60 では、主半径 R_p が 3.04 m 以下ではダイバータ配位は形成されず、主半径 R_p が大きい程ダイバータ配位が形成される (I_M/I_p 、 I_Q/I_p) ダイアグラム上の運転領域は広い。OH(I) ではリミター配位でプラズマを形成した後、主半径を外側に移動（典型的には $R_p = 3.15$ m）して、ダイバータ配位を作ったが、第 4.1 図で予想した結果と実験結果は良く一致している。通常は、 $I_M/I_p = 0.042$ 、 $I_Q/I_p = 0.01$ ($n_{index} = 0.7$ 、 $\delta_{30} = 2.5$ cm、 $\delta_l = 5.0$ cm) を用いて実験を行なった。第 5.2 図に、ダイバータ放電におけるプラズマ平衡配位の時間変化を示す。

以下、5.2 節で I_p-R_p 制御系の結果を、5.3 節でダイバータ配位制御の結果を、5.4 節にまとめを述べる。

5.2 I_p-R_p 制御

第 4 章で述べたように、JT-60 制御系各要素の遅れ時間を考慮すると、 R_p 制御系には P-D 制御による位相補償が必要であることが予測されていた。第 5.3 図に実験結果を示すが、 $G_{vp} = 2.5$ の比例制御のみの場合は電源系の外乱によって Δ_R が振動を起し、位相特性の悪さを示しているが、 $G_{vp} = 5.0$ 、 $\tau_D = 3$ ms の P-D 制御を行なうと良好な制御結果を得ており、Matrix 伝達関数解析の予測と良く一致している。次に、この P 制御と P-D 制御の整定時間の比較を行なう。第 5.4 図は放電初期における R_p 制御結果であり、 $t=80$ ms より R_p のフィードバック制御が開始されている。P-D 制御の場合、フィードバック制御開始後 40 ms 程度の整定時間で Δ_R が目標値に制御されているが、比例制御のみの場合は 60 ms 程度の整定時間を要している。

また R_p は固定リミター配位からダイバータ配位に移行する際、100 ms 間に Δ_R を外側に 8 cm 程度移動する必要がある。この Δ_R 移動制御の一例として、不純物の閉じ込め時間の測定のため放電途中にリミター配位、ダイバータ配位、リミター配位と平衡配位を迅速に移行した実験結

果を第 5.5 図に示す。本例では 50ms 間に Δ_R を 7.5 cm 移動しているが、 Δ_R は制御目標値 Δ_R^{ref} によく追従している。ダイバータ配位の確認は、磁気プローブによる磁場測定に基づく平衡解析²¹⁾ (第 5.2 図参照)、第 5.5 図に示す可視 TV 結果及び第 5.6 図に示す主プラズマ及びダイバータ室からの放射損失、 H_α の結果による。第 5.5 図の可視 TV 結果は、リミター配位の時は TV 視野の中にある固定リミターが光っているのに対し、ダイバータ配位の時は固定リミターとの相互作用がほとんどないため全体に暗くなっている。また第 5.6 図より、ダイバータ配位になると主プラズマからの放射損失、 H_α が減少し、ダイバータ室の放射損失、 H_α が観測されることがわかる。

次に実効的安全係数 q_{eff} ($=q_0 [1 + (r_p/R_p)^2 \{1 + (\beta_p + \ell_i/2)^2/2\}]$) が 3 以下の放電時における R_p 制御性について議論する。

JT-60 において臨界プラズマの β 値 ($\sim 2\%$) が経験則の示す β 限界値 (Troyon limit) 以下であるためには、 $I_p = 2\text{MA}$ の放電が必要となる。 $B_T = 4.5\text{T}$, $R_p = 3.15\text{m}$ のとき、これは $q_{eff} = 2.7$ の放電の安定性を必要とする*。そこで q_{eff} が 3 を切った安定なダイバータ放電が可能かどうかを OH(I) 実験でチェックした。第 5.7 図に $I_p = 1.8\text{MA}$, $B_T = 4.0\text{T}$, $q_{eff} = 2.7$ のダイバータ放電の結果を示す。この結果からわかるように、JT-60 では $q_{eff} < 3$ の安定なダイバータ放電が比較的容易に得られることがわかった。但し、 q_{eff} が整数を切る付近で強い MHD activity が発生しており²⁶⁾ この外乱により特にプラズマ電流 I_p 及びプラズマ水平位置 R_p に強い変動が生じている。第 5.7 図下図に $q_{eff} = 3$ を切るあたりの最も大きな MHD activity が発生した場合の I_p , Δ_R , V_{loop} の変動を示す。外乱により I_p は 35kA 程度、 Δ_R は 2cm 程度の変動を受けるが、その後フィードバック制御により目標値に整定されている。他の制御量は外乱の影響も少なく、フィードバック制御により目標値に制御されており、これらの結果は $q_{eff} < 3$ の安定なダイバータ放電達成の一つの大きな要因と考えられる。

但し、OH(I) 実験ではフィードバック制御計算機の演算時間の関係で積分制御を行っていないため、 Δ_R は第 5.3 図からも明らかなように 5mm 位のオフセットを生じている。またこのオフセットに対する Δ_R の変動は、 $I_p = 1 \sim 1.8\text{MA}$ の場合 $\pm 2\text{mm}$ 程度である。この原因の一つとしては、フィードバック制御計算機の中の電流増加分の指令値 ΔI_v^{COM} が小さくなりすぎ、デジタル化したときのコマンド数が極めて小さくなることが考えられ、今後 G_{vp} を上げ DDC のゲイン K_v を下げ制御性を向上する予定である。

次にプラズマ電流 I_p のフィードバック制御結果について述べる。

プラズマ電流のフィードバック制御は、第 4.2 図に示されている様に F-DDC にて実行している。F-DDC では、通常の P 制御を行なっている。P 制御のため、 I_p 立上げ、 I_p 立下げ時に、目標値との間にオフセットを生じている。又、フラットトップでは、オフセットがドリフトしており、目標値を超える場合がある。第 5.8 図に典型的な例を示す。

このオフセット発生の原因は以下の通りである。プラズマ電流のオフセットは、次式で示すことができる。

$$I_p^{ref} - I_p = M_{PF} \frac{1-k^2}{k^2} \frac{\dot{I}_p}{K_F} + \frac{L_F}{M_{PF}} \frac{\eta_p I_F}{K_F} + \frac{\Delta \eta_F I_F}{K_F} \quad (5.1)$$

* Doublet III, PDX, ASDEX 等の中型装置では、ダイバータ配位のとき $q_{eff} < 3$ の放電はかなり困難であった。

$$k^2 \equiv \frac{M_{PF}^2}{L_P L_p} \quad K_F = 10.32 \text{ V/A} \quad \Delta \eta_F \equiv \Omega_F' - \Omega_F$$

第1項は、 \dot{I}_p により生じるオフセットであり、第2項は、プラズマ抵抗により生じるオフセット、第3項は、F-DDCにて設定しているFコイル抵抗値(Ω_F')と実際値(Ω_F)の差により生じるオフセットである。フラットトップでは、 $\dot{I}_p \sim 0$ のため、 I_p ドリフトの原因として第2項、第3項が考えられる。 $I_p^{ref} - I_p$ と I_p の関係の典型的な例を第5.9図に示す。 $\Delta \eta_F = 2.5 \text{ m}\Omega$ のとき、 $\eta_F I_p = 1.5, 1.0, 0.5 \text{ V}$ の各ケースを(5.1)式で計算して示すとフラットトップ時のドリフトとよく一致する。従ってドリフトの原因として、プラズマ抵抗の低下と、F-DDCでの設定抵抗値が考えられる。

上記 I_p 制御特性の改善のためには、F-DDCにP-I制御を導入する必要がある、今後P-I制御導入の方向で検討してゆく予定である。

5.3 ダイバータ配位制御

既に述べたようにOH(I)のダイバータ配位制御では、クリアランス δ_{30} のかわりに n_{index} のフィードバック制御を行なった。 δ_{30} と n_{index} の関連は第4.1図に示される($I_Q/I_p, I_M/I_p$)平面上での($\delta_t, \delta_{30}, n_{index}$)等高線に基づいている。第5.10図に δ_t, n_{index} のフィードバック制御を行なった結果を示す。制御目標値に対して良く制御されており、外側にヌル点をもつ安定なダイバータ配位を得ている。

JT-60 ダイバータ配位において特に要求される制御方法としては以下のものがある。

- i) 高パワー追加熱時におけるダイバータ板上熱負荷低減のためのセパトリスラインのスイング。
- ii) 粒子排気検討のための δ_{30} のスキャン

以下にこれらの制御結果について述べる。

- i) δ_t のスイング

JT-60では高パワーの追加熱時にはダイバータ板上の熱負荷低減のために、セパトリスラインをダイバータ板上でスイングすることが想定されている。²⁷⁾この予備実験として、 δ_t と n_{index} をフィードバック制御してダイバータ板上のセパトリスライン(X_p)をスイングする制御を行なった。制御方式は、第4.1図をもとにして δ_{30} を一定に保ちつつ δ_t を5 Hzで $\pm 8 \text{ mm}$ スイングするように、 I_M 及び n_{index} の目標値を決めている。第3.6図よりわかる様に、 δ_t を $\pm 8 \text{ mm}$ スイングすることによりダイバータ板上でのセパトリスライン X_p は $\pm 3 \text{ cm}$ スイングできる予定である。第5.11図に実験結果を示すが、ほぼ所期の制御結果を得た。但し、第4章の検討からも予想されたとおりそれぞれの制御量を独立に制御しているため制御系相互間の干渉が発生し、 δ_{30}, R_p に $\pm 5 \text{ mm}$ 程度の変動が見られる。この変動量は、第5.12図に示すシミュレーション解析の予想とほぼ一致している。但し、 δ_{30} の位相に関しては実験結果とシミュレーション結果に差が生じているが、この原因はシミュレーション解析の n_{index} としてプラズマ中心の値を用いたためである。

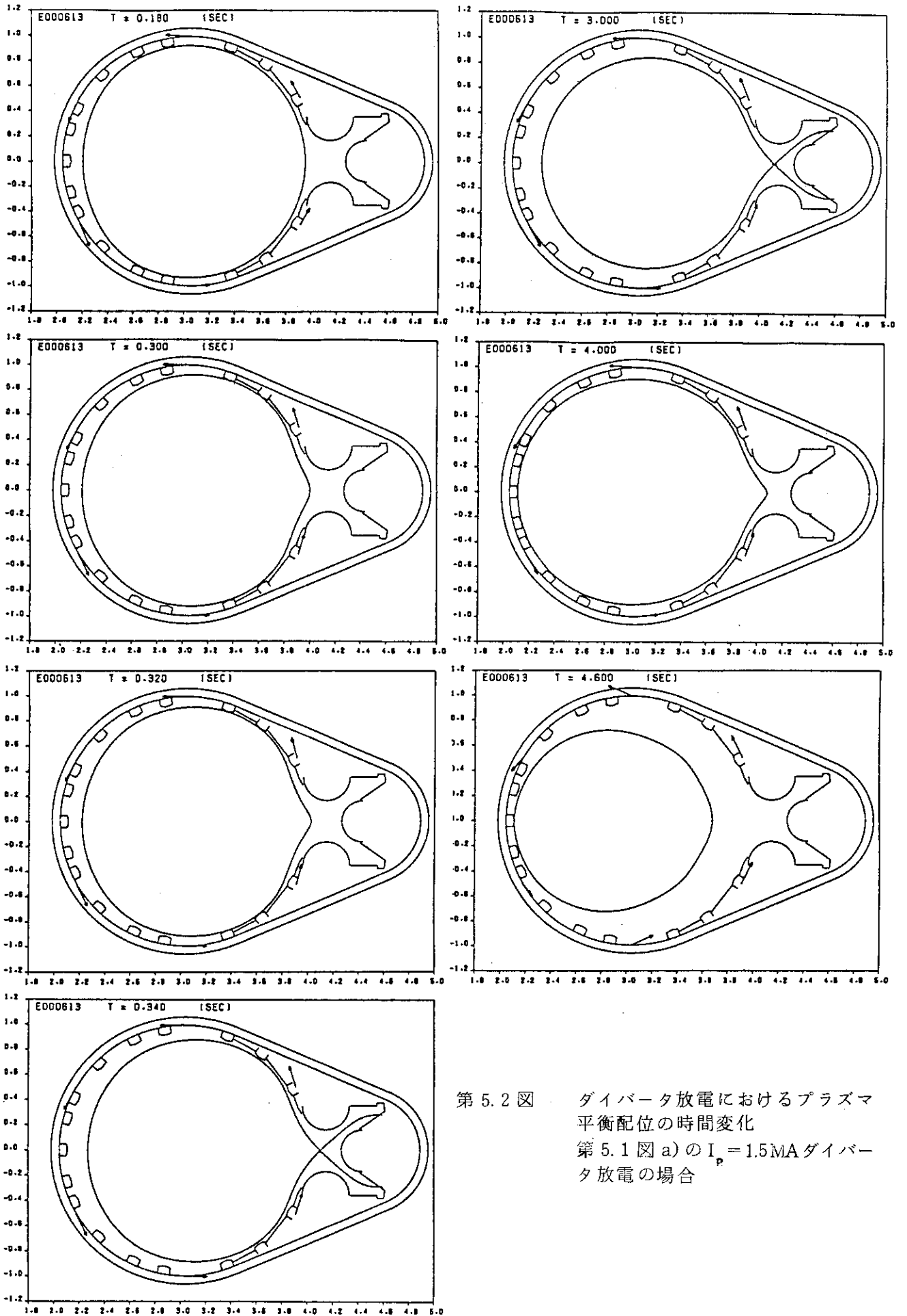
II) δ_{30} のスキャン

次にOH(I)では良好な粒子排気に必要なクリアランス δ_{30} の評価のために、 δ_{30} を除くパラメータは一定値を保持する条件下で δ_{30} を4 cmから1.5 cmまで変化させた。このスキャンは第5.13図に示すように I_Q のプレプログラム波形を変化させることにより行なった。第5.13図に実験結果も示すが、 δ_t 、 R_p をほぼ一定に保ったまま δ_{30} のみ1.5 cmから4 cmに目的通りに制御されているのがわかる。また δ_{30} の変化にともないダイバータ室の H_a が変化し、この結果を整理することによりJT-60 ジュールプラズマの粒子排気のためには $\delta_{30} \geq 2.5$ cmが必要なことがわかった²⁸⁾。

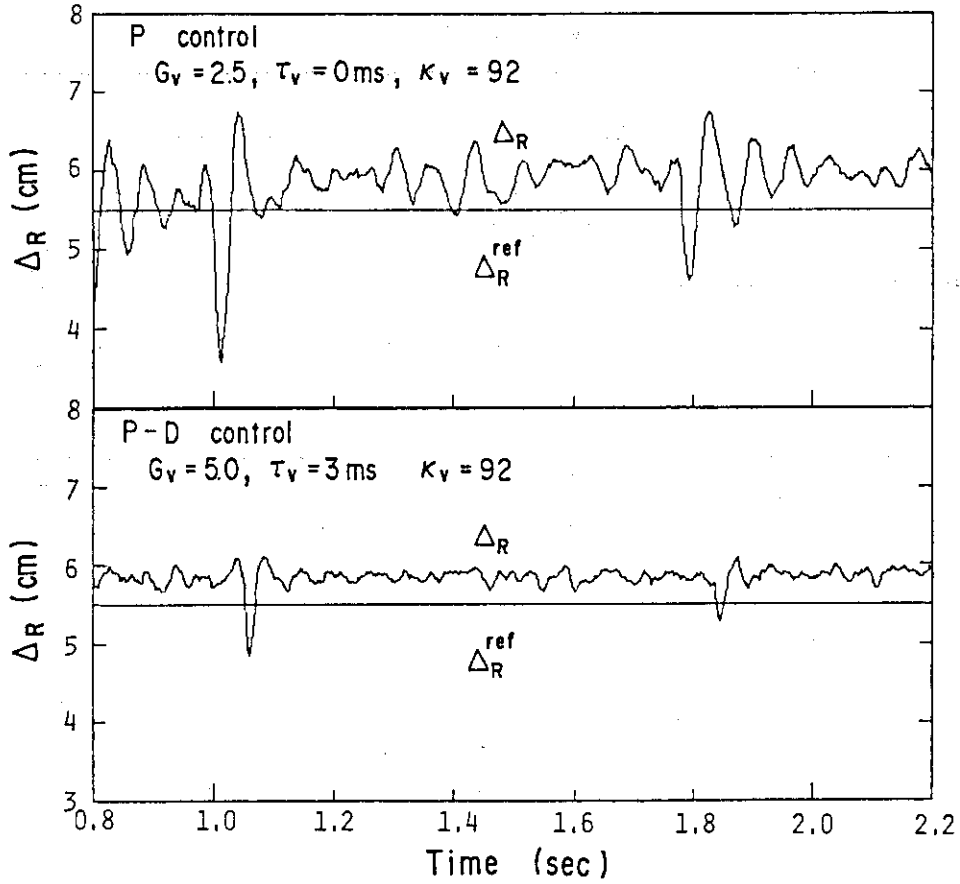
5.4 ま と め

OH(I)実験において I_p 、 R_p 、 z_p 、 n_{index} 、 δ_t の5つの量のフィードバック制御を行ない、以下の結論を得た。

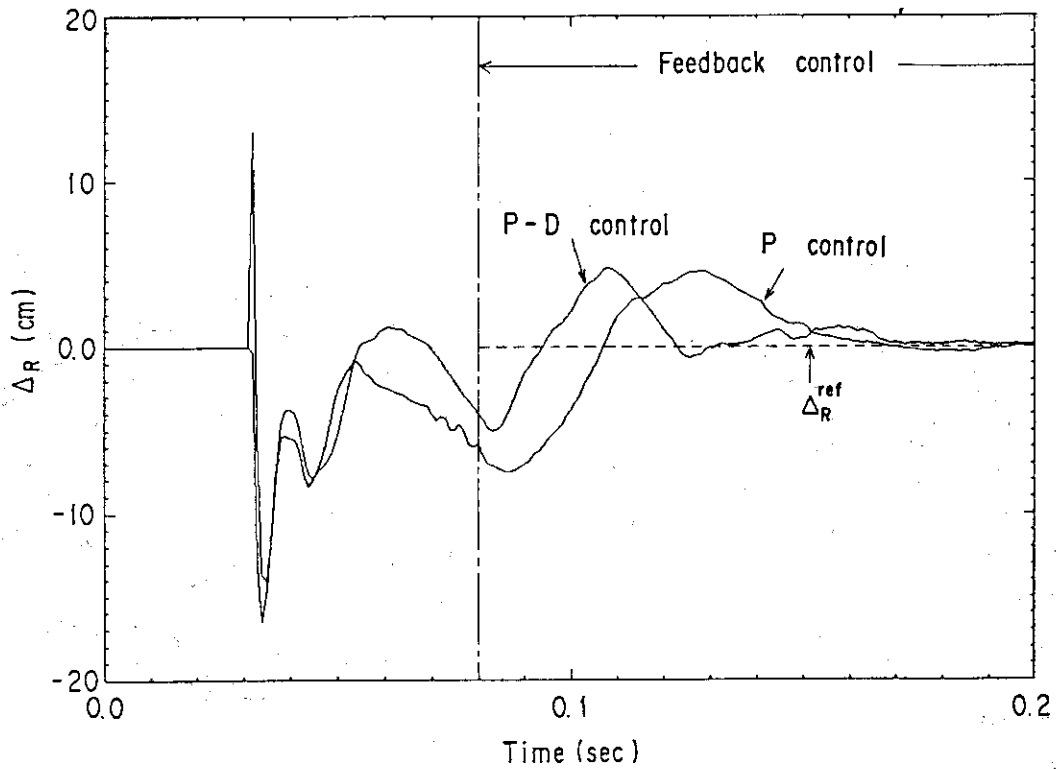
- i) 5種類のフィードバック制御は、フィードバック制御計算機及びポロイダル電源DDCに適切なゲインを与えることにより良好な制御特性を得た。 R_p 制御系を除いた制御量に対しては、簡略化した制御方程式を用いて評価したゲインを用いた。 R_p 制御系に関しては、Matrix伝達関数解析の予測通り比例制御のみでは位相遅れが大きく、位相補償のためにP-D制御を用いた。
- ii) 外側にヌル点をもつダイバータ配位においても位置不安定性に対し安定な放電を得るとともに、実効的安全係数 q_{eff} が3以下の安定なダイバータ放電を得た。
- iii) ダイバータ配位時に要求される δ_t のスイングや δ_{30} のスキャン等の制御機能が有効に働くことを確認した。また、 δ_t スイング時の平衡配位の変化はシミュレーション解析の結果と良く一致していた。
- iv) 以上の結果より、第4章で述べた簡略化した制御方程式による解析、Matrix伝達関数解析及びシミュレーション解析の有効性が確認された。



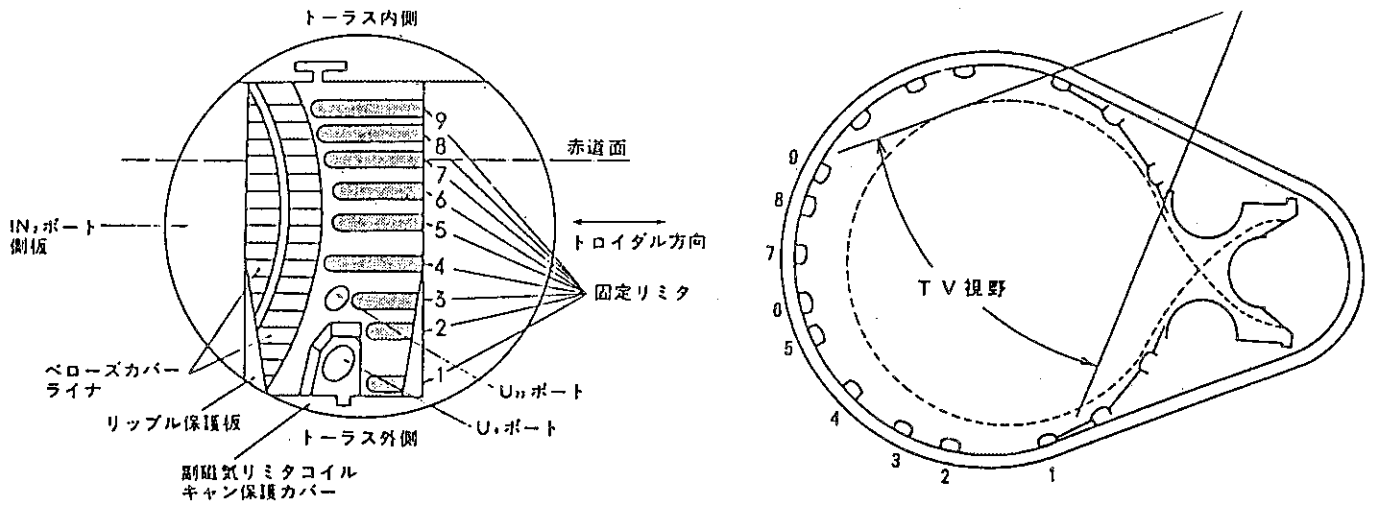
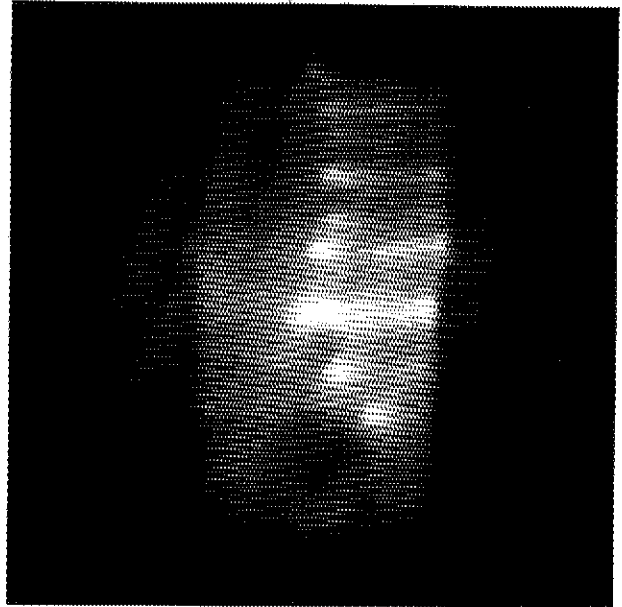
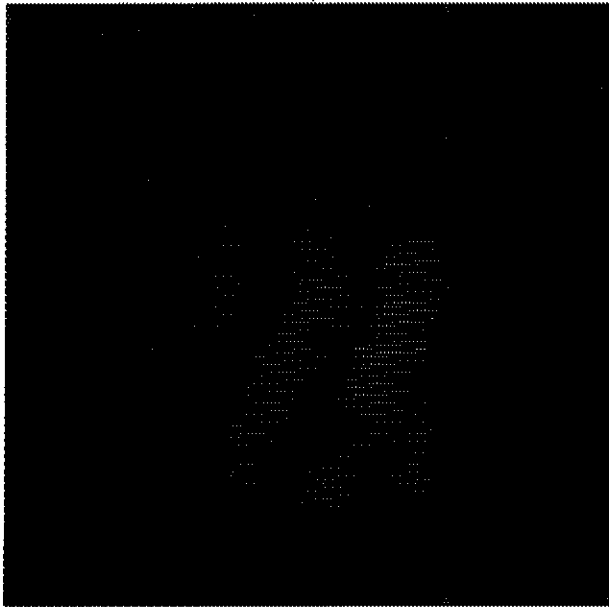
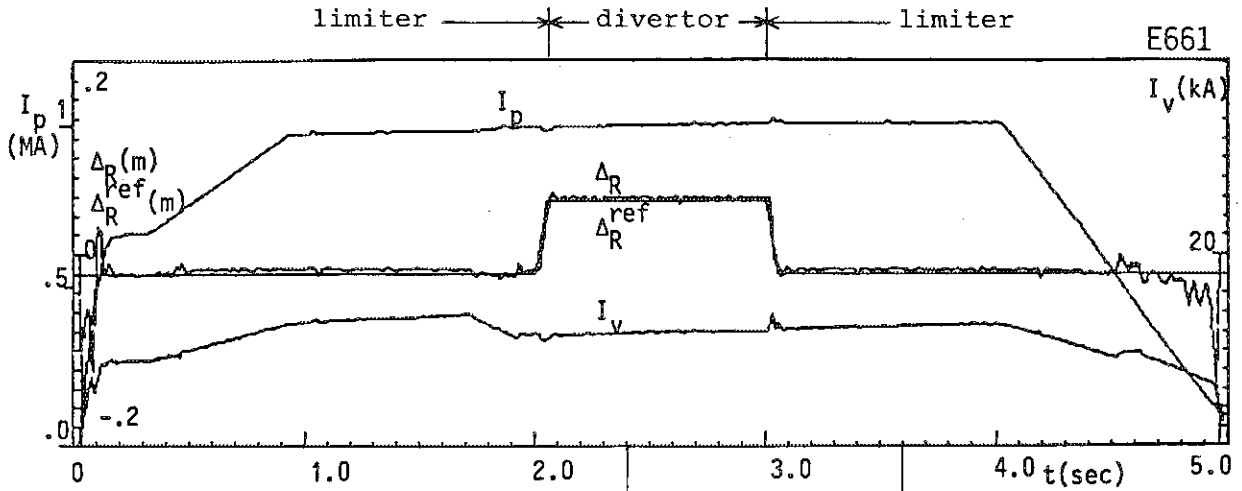
第 5.2 図 ダイバータ放電におけるプラズマ
平衡配位の時間変化
第 5.1 図 a) の $I_p = 1.5\text{MA}$ ダイバー
タ放電の場合



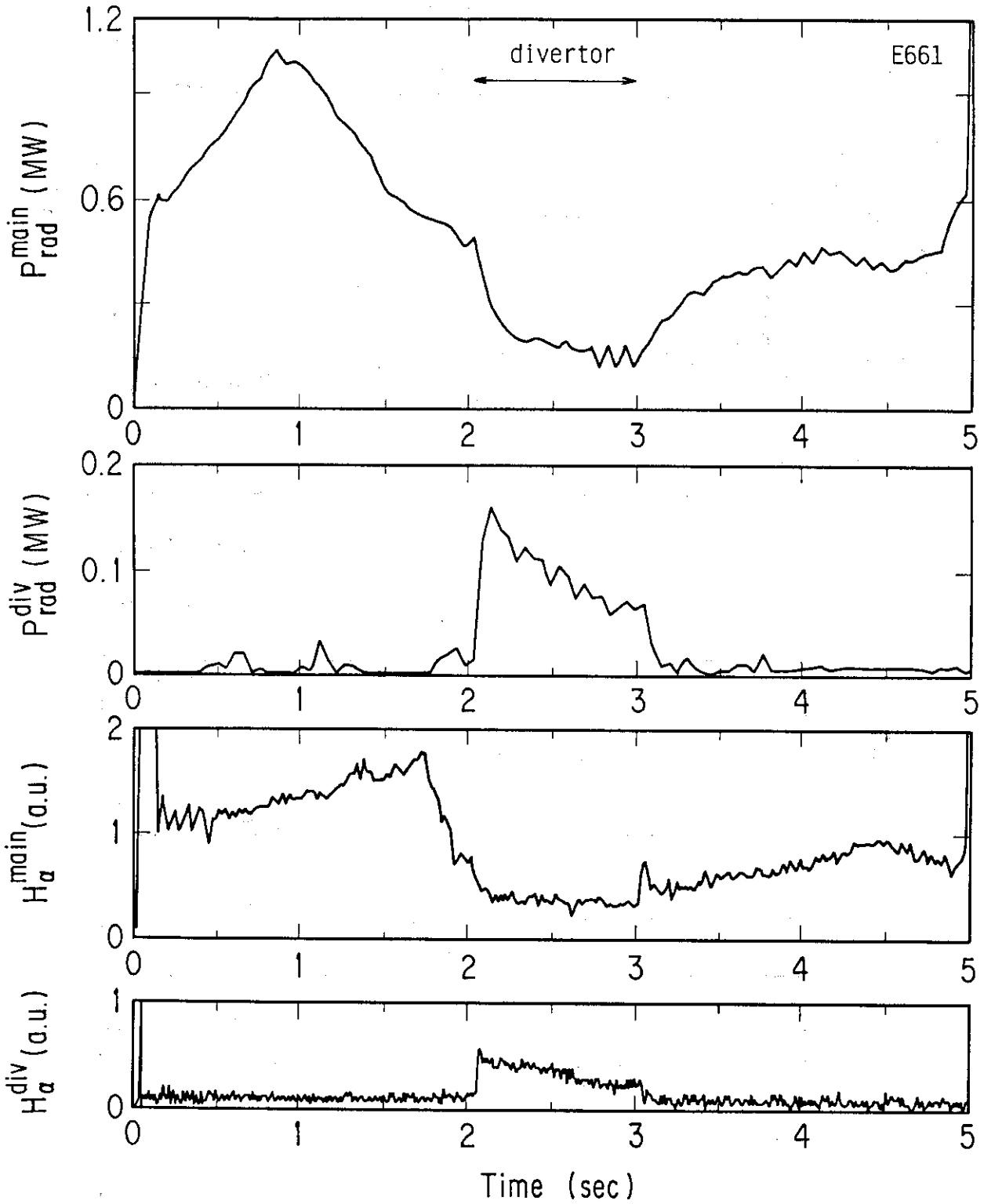
第 5.3 図 R_p 制御結果⁵⁾



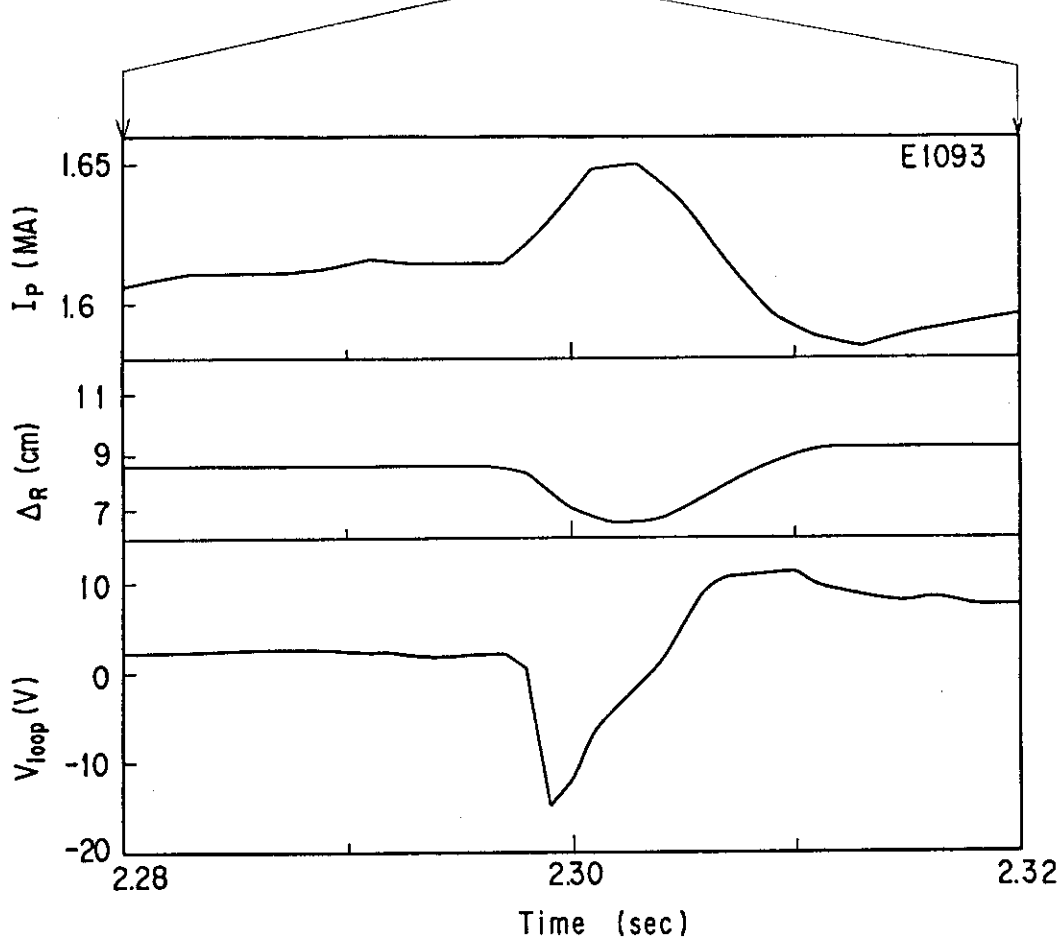
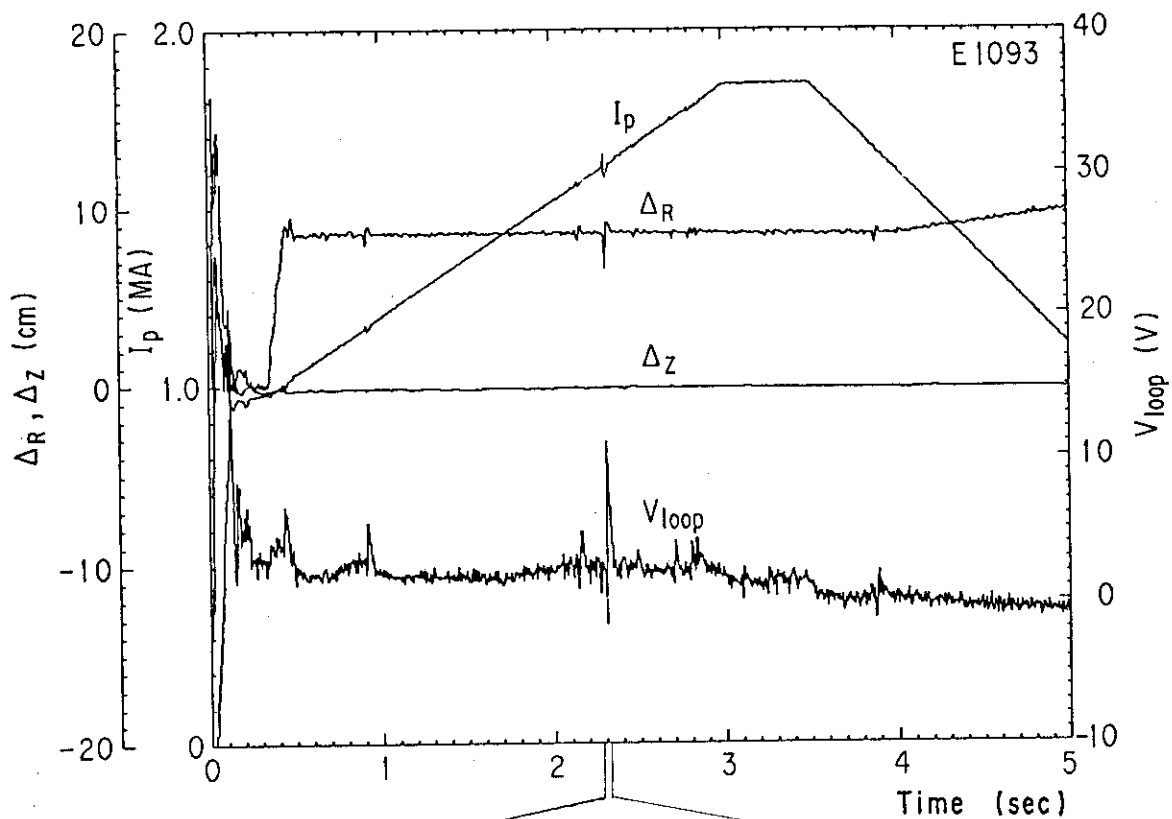
第 5.4 図 放電初期における R_p 制御結果



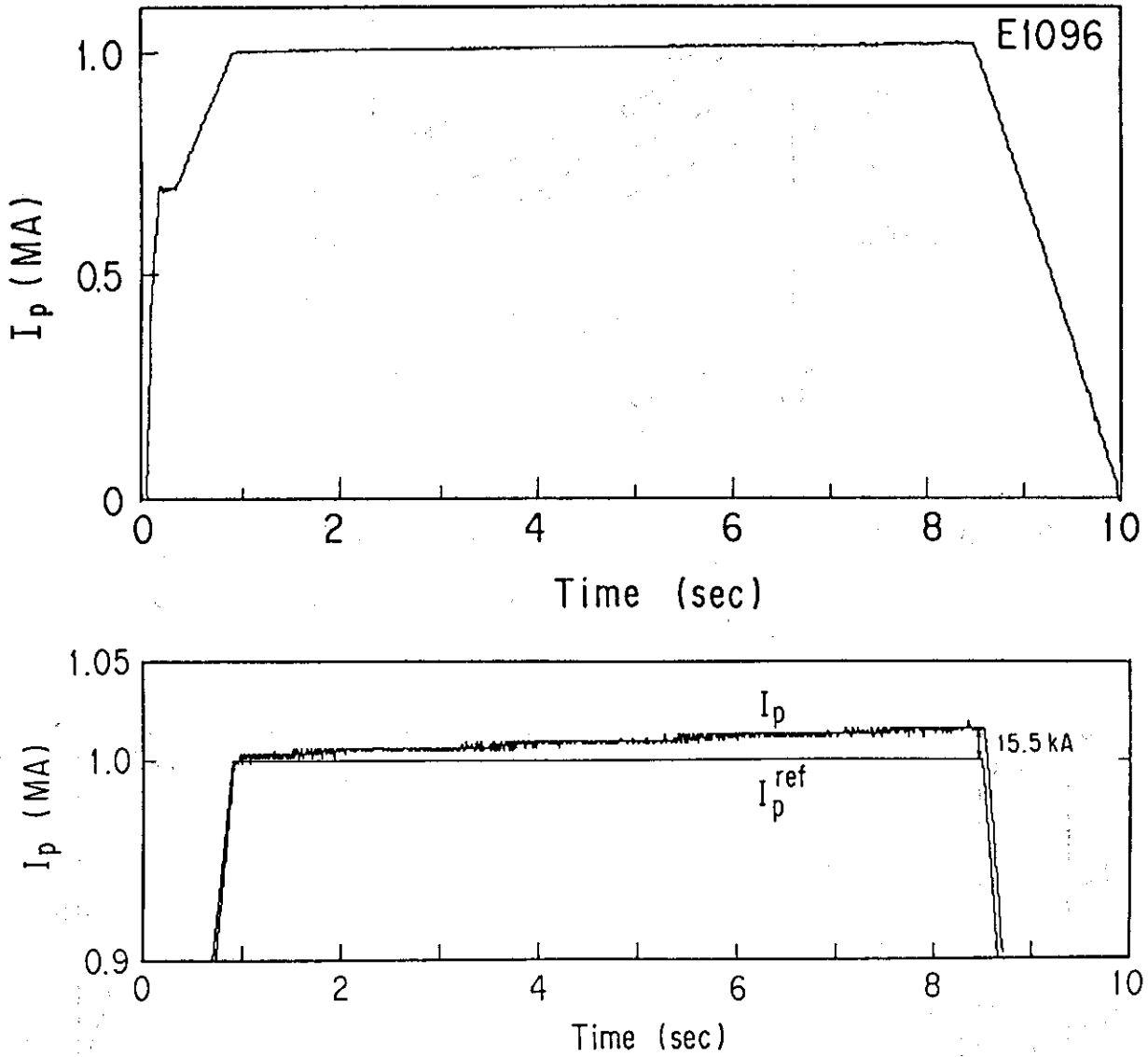
第 5.5 図 リミター配位→ダイバータ配位→リミター配位への移行実験における水平位置制御特性及び可視TV結果。下段図は可視TVの視野。



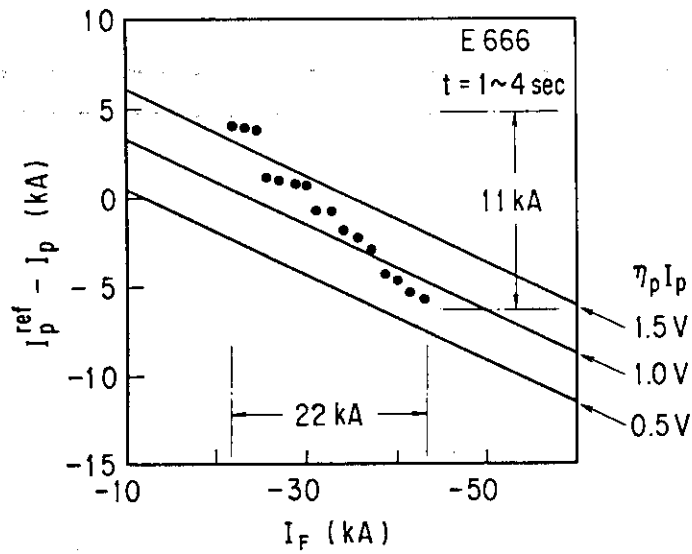
第 5.6 図 第 5.5 図に示した放電における主プラズマ及びダイバータ室からの放射損失 P_{rad} 及び H_α



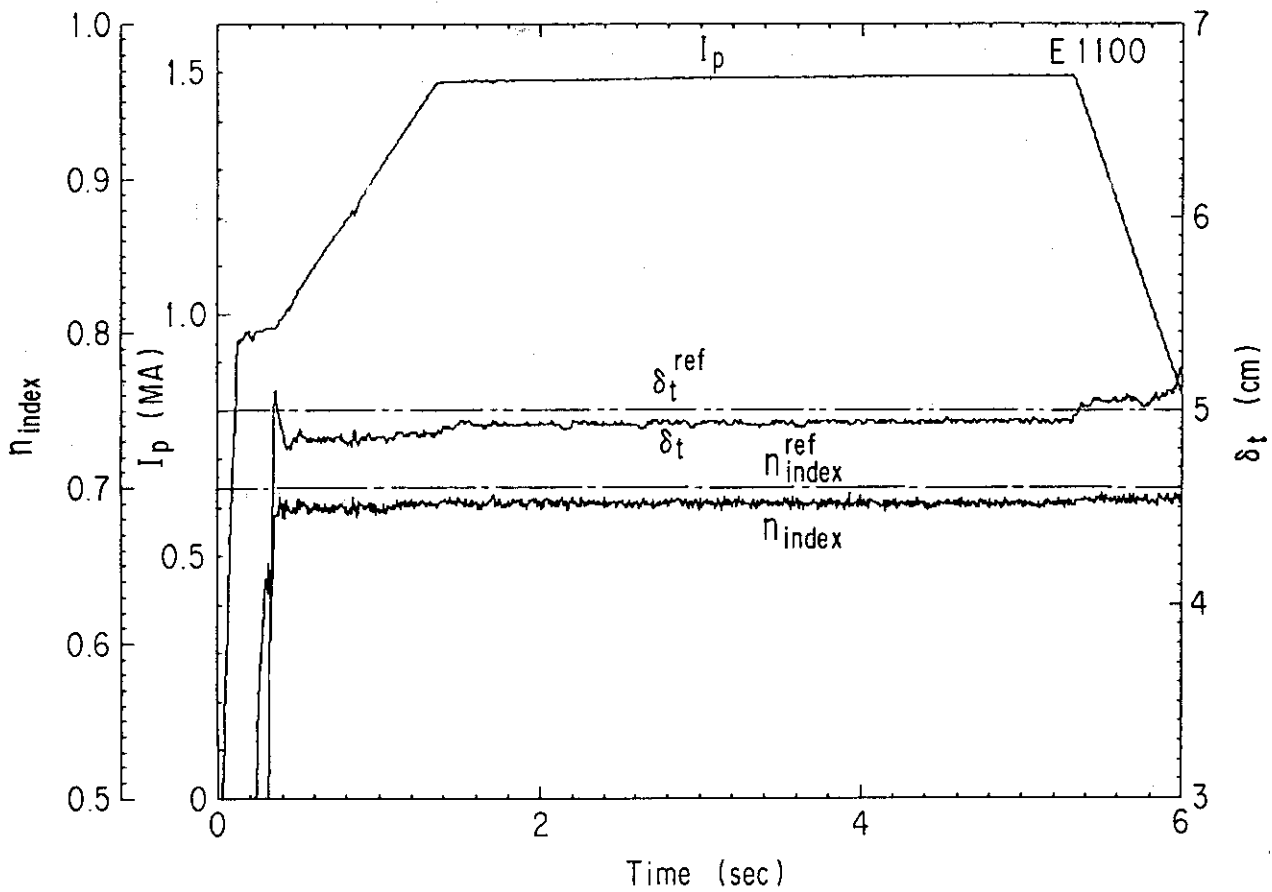
第 5.7 図 $I_p = 1.8 \text{ MA}$, $B_T = 4 \text{ T}$, $q_{\text{eff}} = 2.7$ のダイバータ放電の結果及び $q_{\text{eff}} = 3$ 付近で発生する強い MHD activity による I_p , Δ_R , V_{loop} の変動



第 5.8 図 放電時間 10 秒の放電波形及び I_p 制御特性

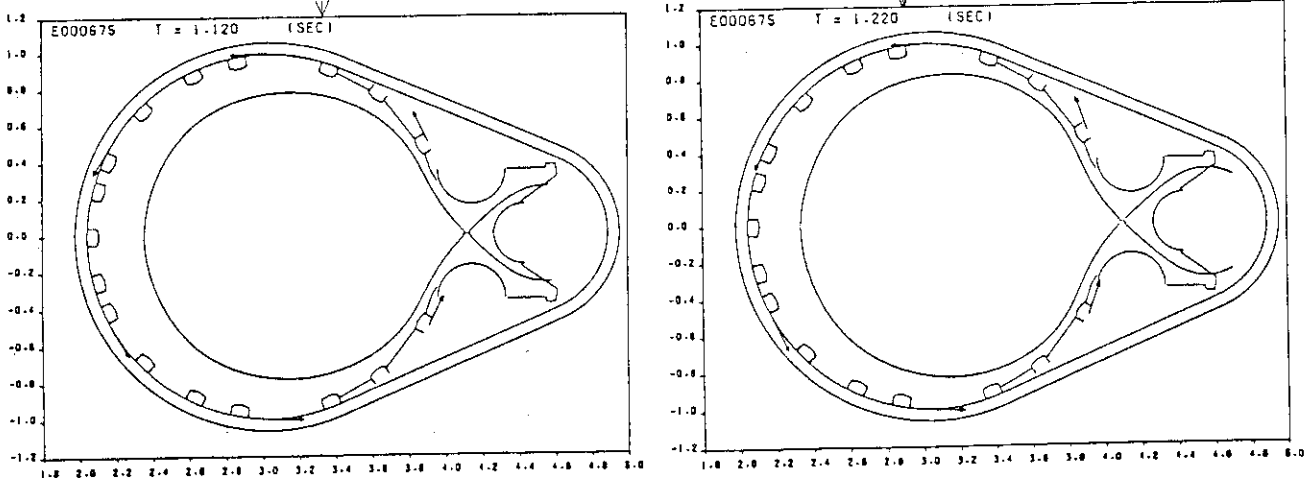
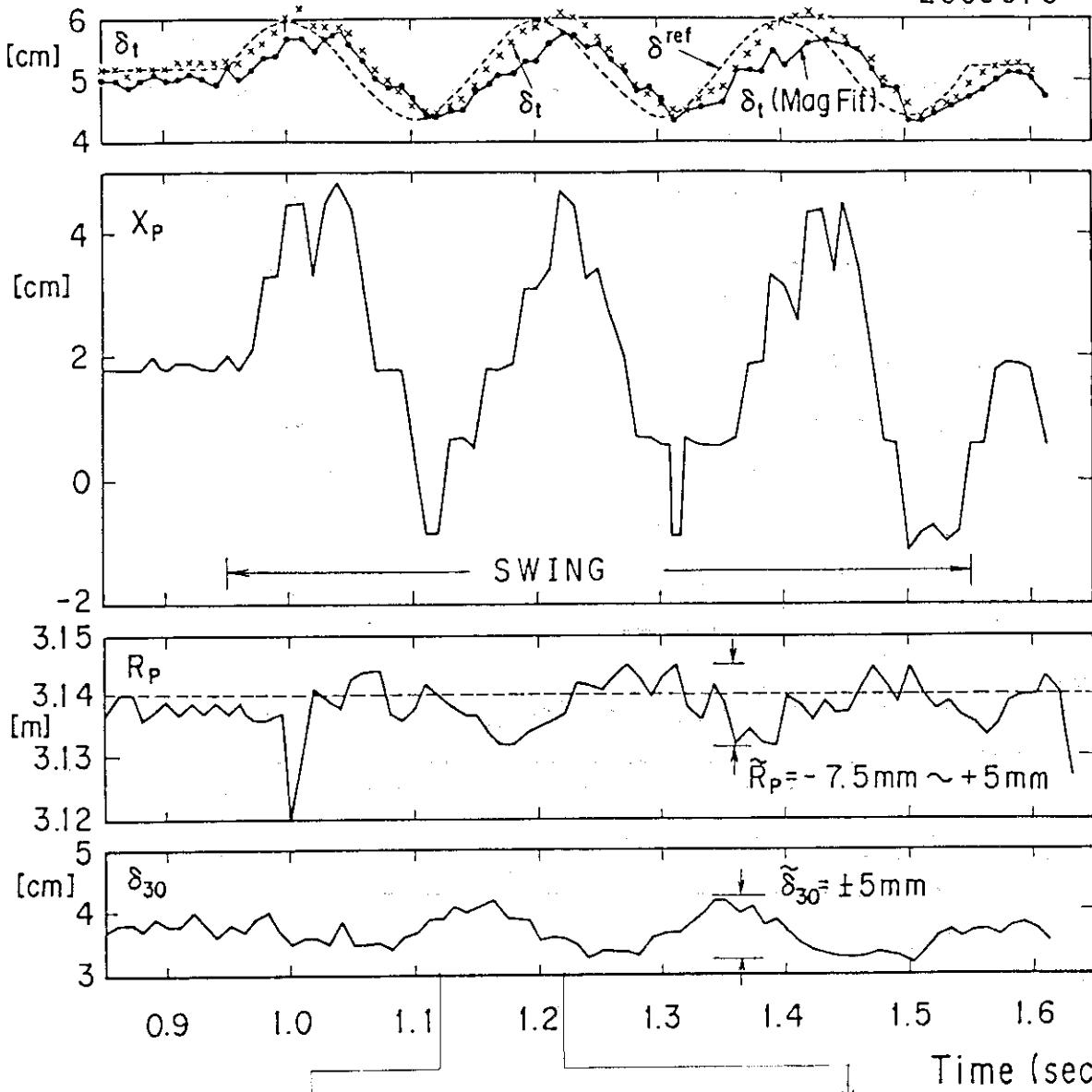


第 5.9 図 プラズマ電流のオフセットと F コイル電流及び $\eta_p I_p$ との関係
 フラットトップにおける、プラズマ電流のオフセットと、F コイル電流及び $\eta_p I_p$ との関係を、実験値と計算値 ((5.1) 式) とで比較している。

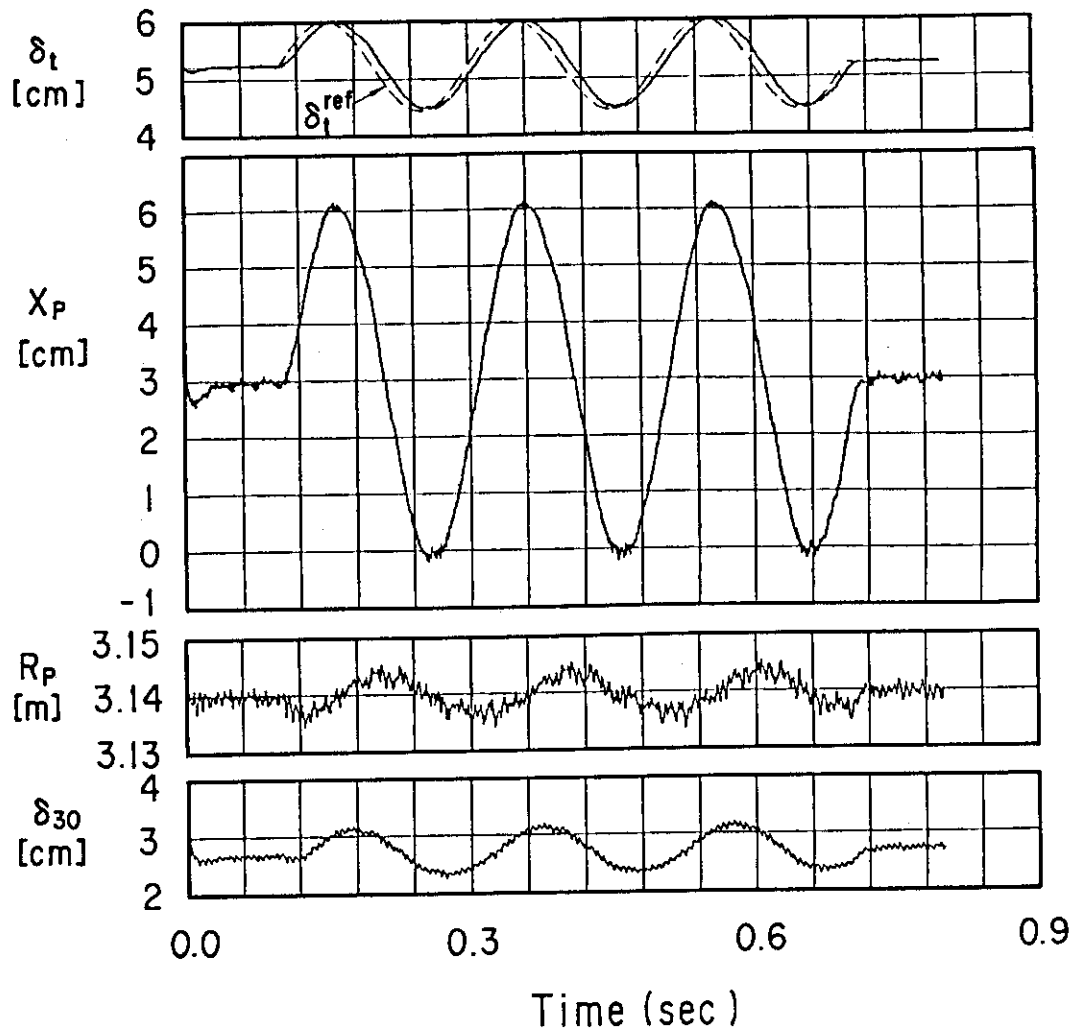


第 5.10 図 δ_t , n_{index} 制御結果

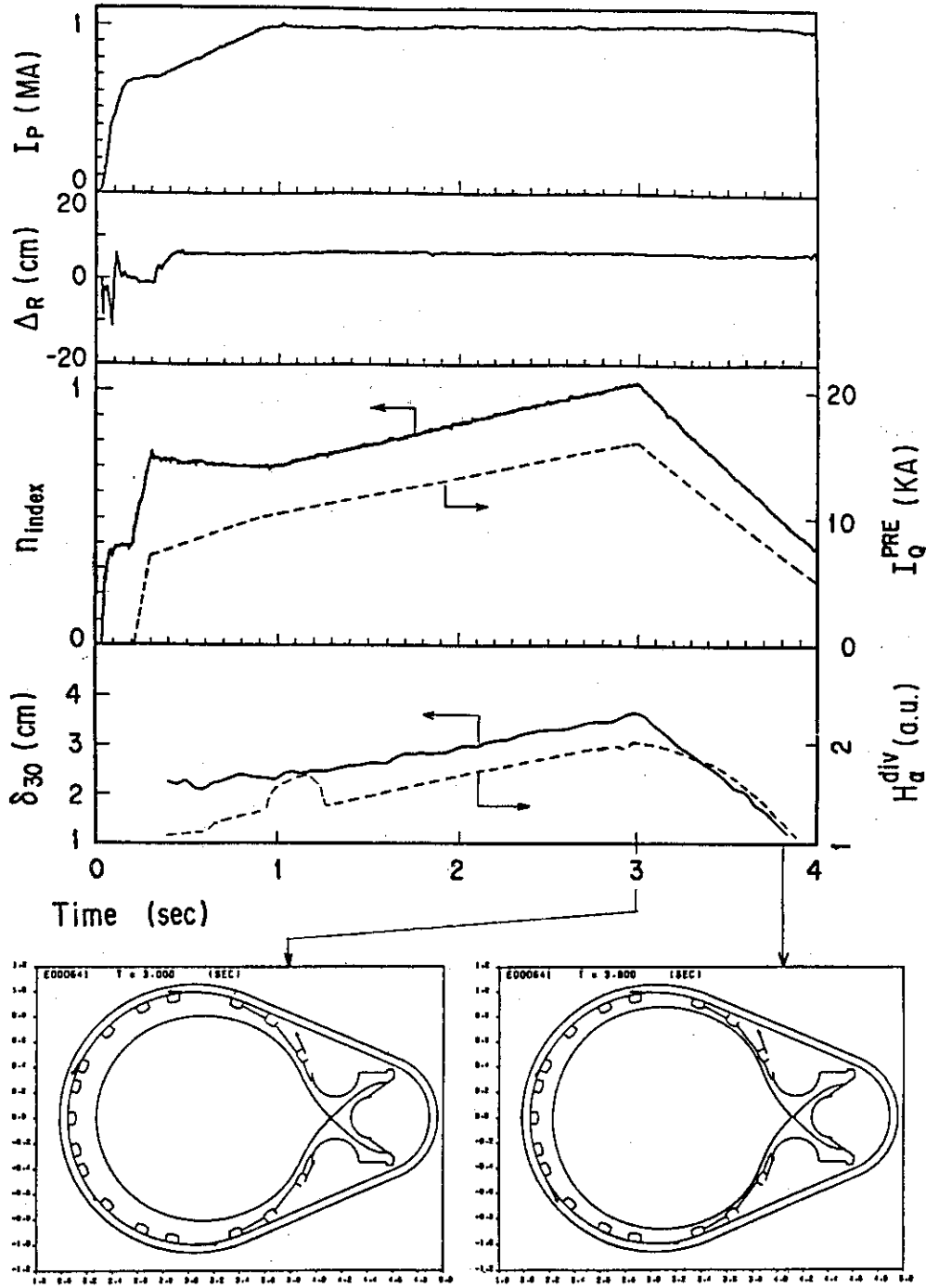
E000675



第 5.11 図 δ_t 及び X_p のスイング実験結果⁵⁾



第 5.12 図 δ_t 及び X_p のスイングシミュレーション結果⁵⁾



第 5.13 図 δ_{30} スキャンによる粒子排気特性実験の制御結果。 δ_{30} は磁場測定による平衡配位計算結果を使用

6. ま と め

JT-60OH(I)実験では、プラズマ電流 I_p 、プラズマ水平位置 R_p 、垂直位置 z_p 、 n_{index} 及びダイバータスロート幅 δ_t の5つの量のフィードバック制御を行ない、フィードバック制御計算機及びポロイダル電源 DDC に適切なゲインを与えることにより良好な制御特性を得た。制御系ゲインや周波数特性の簡単な評価には簡略化した制御方程式による方法が有効であることを示すとともに、渦電流や制御系の遅れ等が問題となる系に対しては、これらのモデルを組み込んだ Matrix 伝達関数解析やシミュレーション解析が有効である。また、プラズマ平衡配位のフィードバック制御結果はこれら解析結果と良く一致し、プラズマ制御系の検討手段としての有効性が実験的に確認された。

JT-60 の特色であるダイバータ配位の確認は、磁場測定に基づくプラズマ境界計算コード、可視 TV 結果及び H_α 、 P_{rad} 等の測定結果より確認された。また、磁場測定に基づくプラズマ境界計算コードの結果は、予備検討の平衡計算結果と良く一致している。また、ダイバータ効果確認やダイバータ板の熱負荷軽減のためにプラズマ制御に要求される機能が満足することを確認した。これらの結果、OH(I)において最大プラズマ電流 1.8MA、実効的安全係数 3 以下、最大プラズマ密度 $5.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (村上係数 4.5)、放電時間 5~10秒の安定なダイバータ放電を得た。

しかし、加熱実験に於いては OH(I)実験より更に精度の良い平衡配位制御が要求される可能性もあるため、現在、高速プラズマ制御装置を 1986年末に追加する予定である。本装置導入により第3章で述べた回帰法による δ_{30} 、 δ_t の高精度、高速な検出、フィードバック制御計算機における電圧制御の行列化及び積分制御が可能となる。

謝 辞

JT-60 実験結果の利用にあたり、JT-60 チームの各氏に感謝いたします。また、JT-60 フィードバック制御系及び実験結果の各種検討において有益な議論をしていただいた下村安夫臨界プラズマ実験室長、近藤育朗第一試験室長、関省吾副主任研究員、嶋田隆一副主任研究員、松川誠氏をはじめ、臨界プラズマ実験室及び第一試験室の各氏に感謝いたします。

6. ま と め

JT-60OH(I)実験では、プラズマ電流 I_p 、プラズマ水平位置 R_p 、垂直位置 z_p 、 n_{index} 及びダイバータスロート幅 δ_t の5つの量のフィードバック制御を行ない、フィードバック制御計算機及びポロイダル電源 DDC に適切なゲインを与えることにより良好な制御特性を得た。制御系ゲインや周波数特性の簡単な評価には簡略化した制御方程式による方法が有効であることを示すとともに、渦電流や制御系の遅れ等が問題となる系に対しては、これらのモデルを組み込んだ Matrix 伝達関数解析やシミュレーション解析が有効である。また、プラズマ平衡配位のフィードバック制御結果はこれら解析結果と良く一致し、プラズマ制御系の検討手段としての有効性が実験的に確認された。

JT-60 の特色であるダイバータ配位の確認は、磁場測定に基づくプラズマ境界計算コード、可視 TV 結果及び H_α 、 P_{rad} 等の測定結果より確認された。また、磁場測定に基づくプラズマ境界計算コードの結果は、予備検討の平衡計算結果と良く一致している。また、ダイバータ効果確認やダイバータ板の熱負荷軽減のためにプラズマ制御に要求される機能が満足することを確認した。これらの結果、OH(I)において最大プラズマ電流 1.8MA、実効的安全係数 3 以下、最大プラズマ密度 $5.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (村上係数 4.5)、放電時間 5~10秒の安定なダイバータ放電を得た。

しかし、加熱実験に於いては OH(J)実験より更に精度の良い平衡配位制御が要求される可能性もあるため、現在、高速プラズマ制御装置を 1986年末に追加する予定である。本装置導入により第3章で述べた回帰法による δ_{30} 、 δ_t の高精度、高速な検出、フィードバック制御計算機における電圧制御の行列化及び積分制御が可能となる。

謝 辞

JT-60 実験結果の利用にあたり、JT-60 チームの各氏に感謝いたします。また、JT-60 フィードバック制御系及び実験結果の各種検討において有益な議論をしていただいた下村安夫臨界プラズマ実験室長、近藤育朗第一試験室長、関省吾副主任研究員、嶋田隆一副主任研究員、松川誠氏をはじめ、臨界プラズマ実験室及び第一試験室の各氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Yoshikawa : Nucl. Fusion 25 (1985) 1081.
- 2) Y. Shimomura, K. Shimizu, T. Hirayama, M. Azumi, et al. : J. Nucl. Materials, 128 & 129 (1984) 19.
- 3) JT-60 Team : Plasma Phys. and Controlled Fusion 28 (1986) 165.
- 4) JT-60 Team : to be published in J. Nucl. Materials (13th Conf. on Plasma Surface Interaction, 1986).
- 5) H. Ninomiya, N. Hosogane, M. Kikuchi, R. Yoshino, et al. : Proc. 11th Symp. on Eng. Prob. Fusion Res. (Austin, 1985) vol. 1, p. 518.
- 6) S. Seki, T. Takizuka, S. Saito, H. Ninomiya, et al. : J. Nucl. Materials, 121 (1984) 402.
- 7) P. Noll, M. Browne, M. Huart, I. Piacentini, et al. : Proc. 13th Symp. on Fusion Tech. (1984) vol. 1, p. 503.
- 8) N. Hosogane, R. Yoshino, K. Kurihara, T. Kimura, et al. : Proc. 9th Symp. on Eng. Prob. Fusion Res. (1981) vol. 1, p. 904.
- 9) R. Stambaugh, S. Adcock, R. Callis, J. deGrassie, et al. : Proc. 11th Symp. on Fusion Tech. (Oxford, 1980) vol. 1, p. 1011.
- 10) F. Schneider : Proc. 10th Symp. on Fusion Tech. (Padova, 1978) vol. 2, p. 1013.
- 11) S.V. Mirnov : Soviet Atomic Energy 17 (1964) 929.
- 12) T. Kimura, M. Takahashi, N. Hosogane, et al. : Proc. 13th Symp. on Fusion Tech. (1984) vol. 2, p. 1177.
- 13) R. Shimada, T. Aoyagi, M. Matsukawa, H. Ikeda, et al. : Proc. 13th Symp. on Fusion Tech. (1984) Vol. 1, p. 945.
- 14) A. Kameari and Y. Suzuki : Proc. 7th Symp. on Eng. Prob. Fusion Res. (1981) vol. 1, p. 904.
- 15) Y. Nakamura and T. Ozeki : Proc. 12th Symp. on Fusion Tech. (1982) vol. 1, p. 339.
T. Ozeki and Y. Nakamura : JAERI-M 83-159 (1983).
- 16) 二宮, 小関, 吉田, 関 : JAERI-M85-215 (1985).
- 17) L.E. Zakharov and V.D. Shafranov : Sov. Phys. Tech. Phys. 18 (1973) 151.
- 18) H. Aikawa, A. Ogata and Y. Suzuki : Jpn. J. Appl. Phys. 15 (1976) 2031.
相川, 小方, 鈴木 : JAERI-M6931 (1977).
- 19) H. Ninomiya and N. Suzuki : Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 1323.
- 20) N. Hosogane, H. Ninomiya and S. Seki : Nucl. Fusion 26 (1986) 657.

- 21) 辻, 林, 吉田, 細金他 : JAERI-M86-006 (1986).
- 22) H. Yoshida, H. Ninomiya, M. Azumi and S. Seki : J. Comp. Phys.
63 (1986) 477.
- 23) 菊池, 二宮, 芳野, 吉田, 他 : JAERI-M84-095 (1984).
- 24) R. Yoshino, M. Kikuchi, H. Ninomiya, H. Yoshida, et al. : Proc. 13th
Symp. on Fusion Tech. (1984) Vol. 1, p. 483.
- 25) 芳野, 二宮, 関, 菊池他 : JAERI-M84-120 (1984).
- 26) K. Ushigusa, M. Kikuchi, N. Hosogane, K. Hayashi, et al. : JAERI-M
86-058 (1986).
- 27) H. Nakamura, et al. : Proc. 10th Symp. on Eng. Prob. Fusion Res.
(1983) Vol. 1, p. 1022.
- 28) Y. Koide, K. Yamada, H. Yoshida, H. Nakamura, et al. : JAERI-M86-056
(1986).