

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用

山崎 耕造

(1991年12月27日受理)

NIFS-MEMO-5

1992年2月

RESEARCH REPORT
NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用

山崎耕造
(核融合科学研究所)

Fuzzy Logic Application to Toroidal Plasma Control

Kozo Yamazaki

要約

ファジー推論にもとづく制御方式の環状プラズマへの適用の試みとして、大型ヘリカル装置(LHD)プラズマの電流制御解析を行い、古典的なPID制御との比較を行った。LHDでは3対のポロイダルコイルにより位置・形状・電流制御のハイブリッド制御が可能であり、制御手法はトカマク型と同等である。古典的なPID制御と比較して、ファジー制御ではその非線形制御性により良好な制御結果が得られ、必要コイル電圧や電源電圧を10%程度減少できる。また、将来の種々の制約条件の追加等の柔軟な制御が可能である。

The fuzzy logic control is applied to toroidal plasmas, especially the plasma current control of the Large Helical Device(LHD) plasma, and the comparisons between fuzzy and PID methods are carried out. In the LHD system, 3-pair poloidal coils are utilized for the control of plasma position, shaping and current by means of a hybrid control scheme, which is applicable to the tokamak control system. The fuzzy control leads to the better controllability due to its non-linear feedback properties than the PID scheme, and gives rise to about 10% reduction of the required voltages of coils and power supplies. Moreover, flexible modifications for adding various feedback constraints can be performed using fuzzy control schemes.

KEYWORDS:

plasma control, fuzzy control, PID control, magnetic configuration, helical system, LHD

National Institute for Fusion Science, Chikusa-ku, Nagoya 464-01.

1. はじめに

トカマクのプラズマ柱の位置やプラズマ電流のフィードバック等には、従来古典的なPID（比例・積分・微分）制御が用いられてきた。このPID制御は数十年来の歴史と実績があり線形制御理論としての最適調整論も確立している。しかし、非線形システムでの最適制御や多変数システムでの柔軟な制御のためには更に発展した制御系が必要である。核融合炉システムでは核融合出力（中性子出力）のフィードバック制御を磁場配位・プラズマ密度・加熱パワー等の調整をとおして行われる。漏洩放射線・漏洩磁場・第一壁温度上昇等の種々の制約条件をも考慮した柔軟かつ安全な装置の起動・運転・停止制御も必須である。その様な制御では必然的に多変数最適化制御となる。かつ、漏洩磁場や機器温度の制約条件の様にon/offの二値で割り切れない柔軟な制御が要求され、新しい制御概念が必要である。

多変数最適化制御のためには、ある関数形を定めて多次元マトリックスをスカラー問題に帰着させ、その値を最適化する方法が簡便である。例えば、規格化された漏洩磁場と機器温度の和を最小化するという制約条件を用いることができる。しかし、この方法では、正確なモデルと適切なスカラー化関数が必要である。また、運転の経験を生かしながらシステムを改良する様な学習制御としての柔軟性も得られにくい。このための制御理論としては、二値論理に基づく「クリスプ集合」よりも曖昧さを扱う「ファジー集合」が適しており、「IF～THEN・・・」の言語ルールが有用である。

ファジー集合論は1965年カリフォルニア大学バークレー校のザディー教授により提唱され¹⁾、最初に1974年にロンドン大学マングニ教授によりスチームエンジンに対してファジー推論を適用した制御法が解析・実験された²⁾。一昨年、日本では「ファジーフィーバー」が到来し、数多くの家電製品がファジー及びニューロファジーと銘うち発売されてきた。大型設備としてはデンマークでのセメントキルンや仙台の地下鉄にファジー制御が使われたのをはじめ、エレベーター・工作機械・高炉・原子炉等の多様な大型設備にも応用が解析・実施されてきている³⁾。このファジー制御法やニューラルネット制御法をプラズマ核融合に適用しようとする動きは現在はいまのところである^{3,4)}。

本論文では、ファジー論理をトロイダルプラズマの制御に適用することを考え、具体的な一例として現在設計製作中のLHD（大型ヘリカル装置）⁵⁾のプラズマ電流制御への適用について述べ、古典的なPID制御との比較を試みる。

2. ファジー制御アルゴリズム

ここでは本解析に用いたファジー推論法の概念について述べる。入力として位置型偏差 ΔX と速度型偏差 $\Delta(dX/dt)$ の2つの量を用いる。本論文ではプラズマ電流 I_p の制御解析に焦点を絞っており、 ΔI_p 及び $\Delta(I_p/dt)$ を用いる（図1）。これらの値は目標値からのずれであり、ある明確な値であるが、

これをファジー化して評価する。ファジー集合としては、 ΔX および $\Delta(dX/dt)$ に関連してファジーラベルとしてNB（負の大きなずれ）、NS（負の小さなずれ）、ZR（ずれ無し）、PS（正の小さなずれ）、PB（正の大きなずれ）の5個を、従って組合せとして合計25個を用いる。メンバーシップ関数としては図2に示す様な三角形型を想定する。ファジー集合の個数を増やしたりメンバーシップ関数の形を台形型や指数関数型に変更しても本質的な制御性は不変であることが知られている⁽³⁾。これらの25個の場合について「IF～、THEN～」の言語ルールによりファジー推論を行う。たとえば、ファジールールとして

「IF ΔX is NB and $\Delta(dX/dt)$ is NB, THEN ΔY is NB」

「IF ΔX is NB and $\Delta(dX/dt)$ is NS, THEN ΔY is NB」

「IF ΔX is NB and $\Delta(dX/dt)$ is ZR, THEN ΔY is ZR」

.....

の様な出力変化量 ΔY のファジー集合を定める。これら2次元のファジー関係を図3に示した。この場合、各ルールについての前件部の ΔX および $\Delta(dX/dt)$ に対する積集合としてメンバーシップ関数から得られるグレード値の最小値を、後件部のファジー集合上で ΔY のグレード値とする(Min演算)。入力1個にたいして2個のファジー集合が定まるので、以上の2次元量にたいしては4個の頭切りした出力ファジー集合が対応する。この4つの集合の和集合がもとめるものであるので、ファジー集合論に基づいて最大グレード値の集合をとる(Max演算)。このファジー化した和集合を非ファジー化して最終的な確定出力 ΔY がもとめられる。非ファジー化には重心法を用いる。

以上の「Min-Max-重心法²⁾」(図4)は補間が非線形になるのにたいして、線形補間が可能である「代数積-加算-重心法」も提案されている³⁾。更に、このようなファジー制御法に目的値の予見ルーチンを組み込んだり、PIDの長所を生かし発展させるためにPIDの係数をファジー制御で決めたり等、種々の方式がある。現在、ファジー推論法は従来の古典制御を包含する新しい制御法として確立しつつある。

3. LHDプラズマへの適用例

(1) 解析モデル

大型ヘリカル装置(LHD)⁵⁾では3層ブロックで1対の超伝導ヘリカルコイルと3対の超伝導ポロイダルコイルを用いて多様な磁場閉じ込め配位を形成することができる。これは、トカマク装置におけるハイブリッド制御に相当する。したがって、以下の解析はトカマクの制御にもそのまま適用可能である。

LHDプラズマの制御対象としては、ヘリカルコイルの位置 $R=R_0$ での磁場 $B=B_0$ の運転において、プラズマの位置 Δ_0 、プラズマ断面平均楕円度 κ_0 、プラズマ電流 I_0 が挙げられる。これらプラズマの制御諸量は図5に概念的に示した様に

プラズマ制御・真空磁場制御・コイル電流制御の3層レベルの帰還制御が必要である。コイル電流制御とプラズマ制御を一体化した非干渉制御方式も考えられるが、システムの柔軟性、製作年度の制約や必要な制御時定数が比較的長い事等から図のような階層構造を主に考える。独立電源がヘリカル及びポロイダル3個の合計4系列あるとして模式的にPID帰還制御を組み入れたダイアグラムを図5に示した。

コイル電流の帰還制御は高速で応答可能とし、この制御ループの解析は省略する。今回の解析にはコイルや構造材を多数の円環線電流で近似し、コイル系としてヘリカル(HF)及びポロイダルコイル(OV、IS、IV)の計4本、プラズマ電流、真空容器(VV)、コイル支持用シェル構造は16本、ベルジャーは32本の合計52本である。図6にその位置を示した。インダクタンス等は有限体積での正確な計算値を可能な限り用いた。回路方程式は、プラズマをも含めて52個の連立方程式

$$\sum M_{ij} dI_j / dt + R_i I_i = V_i \quad (i = 1 \sim 52) \quad (1)$$

で記述される。支持シェル上の誘起電流分布の変化によるシステムの時定数の変化も、この解析モデルで扱われている。

ヘリカル装置はトカマクと異なりプラズマ電流帰還として速い制御が不要である。また、LHDでは超伝導システムでありヘリカル特有の準定常的実験に主眼がおかれており、極低温の支持シェル等にトロイダルやポロイダル方向の絶縁カットを入れていない。したがって、システムの時定数が非常に長いという特徴がある。この様な系での制御性を確認することも本論文の課題の一つである。

現在建設中のLHD装置の諸元は表.1~3に示した。第1実験期では磁場が3Tでありポロイダル磁場の変化も5分間である。5秒間でのプラズマ形状制御実験は磁場4Tの第2期である。準定常及び時間変化の典型的な放電モードを表.4にまとめた。ここで、ポロイダルコイル磁場及びヘリカルコイルの平均磁場の垂直成分 B_z を以下の様に成分に分解して

$$B_z(R, Z=0) = B_0 + X B_2 + X^2 B_4 + \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$X = (R - R_0) / R_0$$

とした。 B_0 、 B_2 、 B_4 は二重極、四重極、及び、六重極磁場成分である。また、各ポロイダルコイルの電流値は、 B_0 、 B_2 、および、プラズマポロイダル磁束 ϕ を与えれば以下に示す4×4の磁場マトリックスMより定まる。

まず、ヘリカルコイルの磁場を多極成分に展開する。ヘリカルコイルによる中心磁場 B_0 ・プラズマポロイダル磁束 ϕ ・装置漏洩磁場 $B_z(4R_0)$ は

$$\begin{aligned} B_0[T]/4 &= I_H[MA]/7.8 \\ \phi(HF) [Wb] &= 113.361*(B_0[T]/4) \\ B_z(4R_0)[T] &= -986.8*(B_0[T]/4) \end{aligned} \quad (3)$$

であり、ヘリカルコイルの多極磁場成分は

$$\begin{aligned} B_D(\text{HF})/B_0 &= 0.25581 \\ B_\alpha(\text{HF})/B_0 &= -0.15922 \\ B_H(\text{HF})/B_0 &= 0.10906 \end{aligned} \quad (4)$$

である。

ポロイダルコイルの磁場は、ヘリカルコイル成分のポロイダルコイルによるキャンセル率を f として

$$\begin{aligned} f_D &= -B_D(\text{PF})/B_D(\text{HF}) \\ f_\alpha &= -B_\alpha(\text{PF})/B_\alpha(\text{HF}) \\ f_H &= -B_H(\text{PF})/B_H(\text{HF}) \end{aligned} \quad (5)$$

を用いて表すと、制御マトリックスは磁場配位ベクトルを B 、ポロイダルコイル電流ベクトルを C として、

$$B \equiv \begin{vmatrix} -0.25581*(B_0[\text{T}]/4)*f_D \\ 0.15922*(B_0[\text{T}]/4)*f_\alpha \\ \phi[\text{Wb}] - 113.361*(B_0[\text{T}]/4) \end{vmatrix} = M \times C \quad (6)$$

$$C \equiv \begin{vmatrix} I_{0v}[\text{MA}] \\ I_{1s}[\text{MA}] \\ I_{1v}[\text{MA}] \end{vmatrix} = M^{-1} \times B$$

$$M = \begin{vmatrix} 0.05854 & 0.00195 & -0.00833 \\ -0.00519 & -0.04324 & 0.02252 \\ 10.729 & 5.342 & 3.278 \end{vmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{vmatrix} 14.1881 & 2.7555 & -0.01712 \\ -14.0033 & -15.2290 & 0.06904 \\ -23.6176 & 15.7993 & 0.13651 \end{vmatrix}$$

である。この場合、漏洩磁場は

$$\begin{aligned} &| B_z(4R_0)[\text{T}] + 986.8*(B_0[\text{T}]/4) | \\ &= | -0.00519 \quad -0.04324 \quad 0.02252 | \times \begin{vmatrix} I_{0v}[\text{MA}] \\ I_{1s}[\text{MA}] \\ I_{1v}[\text{MA}] \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

で与えられる。従って、 B_0 、 f_0 、 f_a 、 ϕ の4つの変数を与えれば I_H 、 I_{0v} 、 I_{1s} 、 I_{1v} の4つが定まり、制御が可能である。ファジー制御では、5番目の制御入力変数 B_z ($4R_0$)をも制約条件として言語ルールで追加可能であるが、ここでは省略する。解析で用いた主要部のインダクタンスマトリックス及び抵抗・時定数を表3に示した。プレプログラムのLHDの運転は表4に示した。プラズマ周回電圧を印加せずにプラズマ柱の位置や形状を時間的に変化させるモードは#2及び#3モードとして規定しているが、現実のシステムでは種々の回路的なカップリングによりプラズマ電流が誘起されるのでフィードバック機構が必要である。また、積極的にワンターン電圧を印加してプラズマ電流の誘起・抑制実験を行う#4の運転においてもプラズマフィードバックシステムは必須である。以下の解析では、 f_0 、 f_a の2変数のプログラム制御と1変数の磁束 ϕ をとおしてのプラズマ電流フィードバック制御に関するシミュレーション結果を示す。

(2) PID制御とファジー制御方式

一例としてプラズマ電流のフィードバック制御の解析を行う。図7にそのブロックダイアグラムを示した。いわゆる「無電流配位」を特徴とするヘリカル型装置でも、ブートストラップ電流が流れるのでこの電流の制御は実験的に極めて重要である。古典的なPID方式では、目的値 I_{p0} と実際の値 I_p との差 $\Delta X = I_p - I_{p0}$ を用い、

$$K_p \Delta X + K_i \int \Delta X dt + K_d d \Delta X / dt$$

の量をコイル電圧に帰還制御するものであるが、本システムでは制御変数として磁束 ϕ を用いるので積分操作がはいり、実質上PI制御となる。

一方、ファジー制御については2章で述べた手法(図2)をプラズマフィードバック部に適用する。プラズマ電流のみならず、プラズマの位置・形状のフィードバック制御が必要であるが、本論文では省略した。

(3) 解析結果の比較

PID制御とファジー制御の比較を図8及び9に示した。 $t = 1$ sにおいて0.5 s立ち上げの応答の目標値(100 kA)に対して、時間遅れのプラズマ電流の応答が示されている。ブートストラップ電流やビーム駆動電流の誘起・消滅の際にも無電流配位を電流フィードバックシステムで維持する事を想定した解析である。ここで、PID制御のゲインは種々の調整を試み $K_p = 50 \text{ Wb/A}$ 、 $K_i = 0$ 、 $K_d = 5 \text{ Wb/A}$ とし、ファジー制御のグレード値は $-0.3 \leq \Delta X [\text{MA}] \leq 0.3$ 、 $-3 \leq \Delta (dX/dt) [\text{MA/s}] \leq 3$ に対して最大10 Wb/Aとした。この図でプラズマ電流が最初に逆転するのは、シェルに分布電

流が流れ、プラズマ中心で逆電圧がかかるからである。シェルの抵抗を上げて時定数を短くすれば逆電流は流れなくなり、応答は主にプラズマの時定数で定まることになる。

図8よりファジー制御の方がほぼ最適化されたPID制御よりも応答性が良好である事がわかる。応答を同程度に設定すると必要な最大コイル電圧が数十%程度減少可能であり、電源設計におけるメリットは大きい。ファジー制御の電圧のパターンはPID制御と異なり非線形性が顕著に現れている。何れにせよ、ファジー制御が古典的なPI制御と同等またはそれ以上の性能を発揮できることが証明された。

以上の解析結果では、ファジー固有の特徴ある制御が確認されたわけではなく、非線形ゲインを用いた制御がPID制御と同程度あるいは優る性能を確認できたにすぎない。現在は、多入力変数／小出力項目型のファジー制御の特長を生かした柔軟な制御システムとしてのモデル化を進展させ、LHDプラズマの位置・形状制御や核融合炉での燃焼制御解析にファジー推論制御の適用を解析中である。

4. おわりに

ファジー集合論に基づく推論を環状プラズマ制御に適用を試み、古典的なPID制御結果と比較を試みた。具体例としてLHD（大型ヘリカル装置）のプラズマ電流制御法を解析し、ファジー制御の有効性を確認した。この解析モデルは基本的にトカマクの電流フィードバック制御として適用可能である。多数の入力変数を用いての小数の出力項目を得るファジー特有の制御法は現在解析中である。

ファジー制御には、最近、高速のファジーチップが多数製造されており安価に使用可能であるが、LHDのような実験システムでは極端な高速性が要求されないこと（数百ms）やルール数が少ない（百以下）ことより、従来PID法を包含する形でC言語等を用いてソフト的に構築するのがよいと思われる。今後、プラズマファジー制御法として、更なる柔軟な制約条件の追加や試行錯誤的な学習制御を有機的に組み込んで発展させることが可能である。また、ニューラルネットワークやエキスパートシステムとの組合せによるニューロファジー、ファジーエキスパートシステム等のプラズマ装置制御への適用も検討中である。

謝辞

大型ヘリカル装置の設計に関連する制御システム検討は、LHDプロジェクト会議、LHD本体設計グループとの作業・討論に負うところが多い。また、ファジー制御については、東京工業大学原子炉研究所嶋田隆一教授及びその研究室の方々との討論が役立ちました。ここに感謝致します。

文献

- 1) L.A.Zadeh: Information & Control 8, 338-353(1965).
- 2) E.A.Mamdani: Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588(1974).
- 3) 菅野道雄、他：計測と制御（計測自動制御学会誌）28巻11号
943～986頁（1989年）
- 4) 藤後努、筒井広明、中野久雄、嶋田隆一：プラズマ・核融合学会第7回秋季
講演回予稿集（1990年10月九州大学）p.51
- 5) New Scientist 12 October (1991) p.19
- 6) A.Iiyoshi, M.Fujiwara, O.Motojima, N.Ohyabu, K.Yamazaki:
Fusion Tech. 17(1990)169.

図の説明文

- 図1 ファジー制御アルゴリズム
- 図2 メンバシップ関数
- 図3 ファジールール表
- 図4 ファジー推論法（Min-Max-重心法）
- 図5 プラズマ制御概念図
- 図6 LHD装置と電流ループモデル
- 図7 LHDプラズマ制御ブロックダイアグラム（PID制御用）
- 図8 PIDとファジー制御の比較
- 図9 シミュレーション結果
右上：プラズマ電流の目標値 $I_p(\text{target})$ 、制御値 I_p と真空容器電流 I_{vv}
右下：コイルからの周回印加電圧 $V_p(\text{coil})$ と実際の電圧 $V_p(\text{total})$
左上：ポロイダルコイル電流 I_{iv} 、 I_{is} 、 I_{ov} 。
ヘリカル電流は7.8MAの一定値。
左下：ポロイダルコイル電圧 V_{ov} 、 V_{is} 、 V_{iv} とヘリカルコイル電圧 V_{HF}
(a) PID法
(b) ファジー法

表1 LHD基本パラメータ

実験期	第I期	第II期
磁場配位		
ℓ 値	2	←
m 値	10	←
γ。(ビッチパラメータ)	1.25	←
α。(ビッチ変調)	0.1	←
装置規模		
装置主半径	3.9 m	←
プラズマ小半径	0.6-0.65 m	←
プラズマ体積	30 m ³	←
磁場強度	3.0 T	4.0 T
ヘリカルコイル		
起磁力	5.85 MA	7.80 MA
電流密度	40 A/mm ²	53.3A/mm ²
冷却温度	4.2 K	1.8 K
最大磁場	7.2 T	9.6 T
ポロイダルコイル		
時間変化	5 min	5 s
真空容器		
厚み	15 mm	←
内円半径	667 mm	←
外円半径	1600 mm	←
支持シェル		
厚み	100 mm	←
ベルジャー		
上側厚み	50 mm	←
下側平板厚み	100 mm	←
プラズマパルス幅	10 秒	←
パルス運転周期	5 分	←
定常運転	>1 時間	←

表2 コイルの電流中心位置・幅・ターン数N及び最大起磁力

コイル名	電流中心位置(mm)		幅 (mm)		ターン数	起磁力
	R	Z	ΔR	ΔZ	N (NRxNZ)	MA
HF	ヘリカルコイル中心 3900		断面 326x503		276 (3x92)	7.8
OV	5550	± 1550	288.5	516.5	144 (9x16)	-4.5
IS	2820	± 2000	336.5	436.5	208(13x16)	-4.5
IV	1800	± 800	372.5	444.3	240(15x16)	5.0

表3 主要コンポーネントの抵抗・自己インダクタンスおよび時定数

	インダクタンス (μH)	抵抗 ($m\Omega$)	時定数 (s)
プラズマ (1keV)	6.7	0.0016	4.3
真空容器 (常温-100C)	8.5	0.110	0.077
支持シェル (4K)	5.1	0.0035	1.4
ベルジャー (常温)	3.3	0.011	0.30

表4 各運転モードでのコイル電流値（第2期仕様）

モード	準定常モード（#1）				
	#1-o 準円形	#1-a 縦長	#1-b 横長	#1-c 外変位	#1-d 内変位
B_0 (T)	4	4	4	4	4
f_D (%)	102	105	99	96	108
f_ϕ (%)	100	0	200	100	100
Δ_{ax} (cm)	~ -15	~ -16	~ -13	~ 0	~ -30
ϕ (Wb)	75	81	68	71	75
HF(MA)	7.80	←	←	←	←
OV(MA)	-3.92	-4.36	-3.49	-3.76	-4.08
IS(MA)	-1.43	1.56	-4.42	-1.88	-0.97
IV(MA)	3.42	1.99	4.85	2.59	4.26

モード	時間変化モード					
	#2（磁気軸変位）		#3（断面変形）		#4（電流制御）	
時間(s)	0	5	0	5	0	5
B_0 (T)	4	4	4	4	4	4
f_D (%)	96	108	102	102	102	102
f_ϕ (%)	100	100	50	150	100	100
ϕ (Wb)	75	75	75	75	70	80
Δ_{ax} (cm)	~ 0	-30	~ -15	-15	~ -15	~ -15
HF(MA)	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80
OV(MA)	-3.70	-4.14	-4.14	-3.70	-4.00	-3.83
IS(MA)	-1.63	-1.20	-0.21	-2.63	-1.76	-1.07
IV(MA)	3.08	3.80	2.18	4.70	2.76	4.12

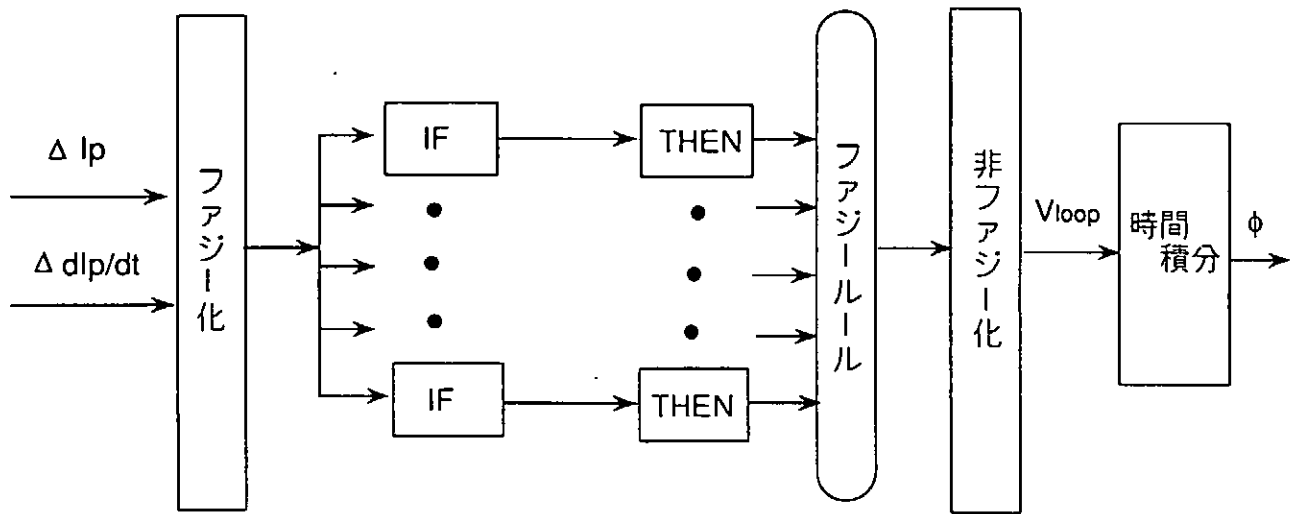


図 1

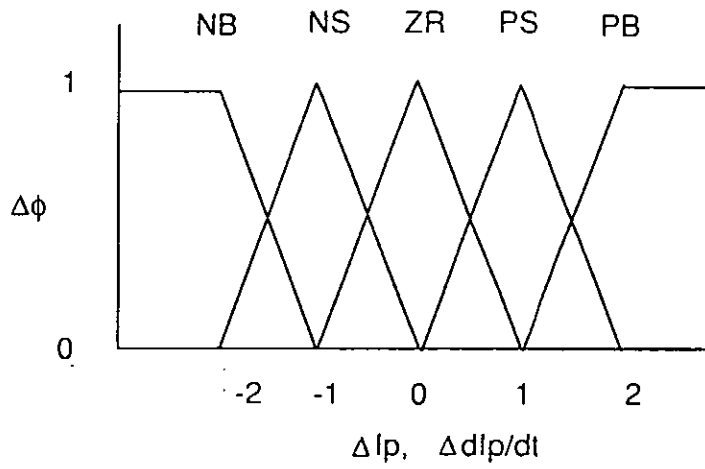


図 2

		$\Delta dlp/dt$				
		NB	NS	ZR	PS	PB
Δlp	NB	NB	NB	NS	NS	NS
	NS	NB	NS	NS	ZR	ZR
	ZR	NS	NS	ZR	PS	PS
	PS	ZR	ZR	PS	PS	PB
	PB	PS	PS	PS	PB	PB

图 3

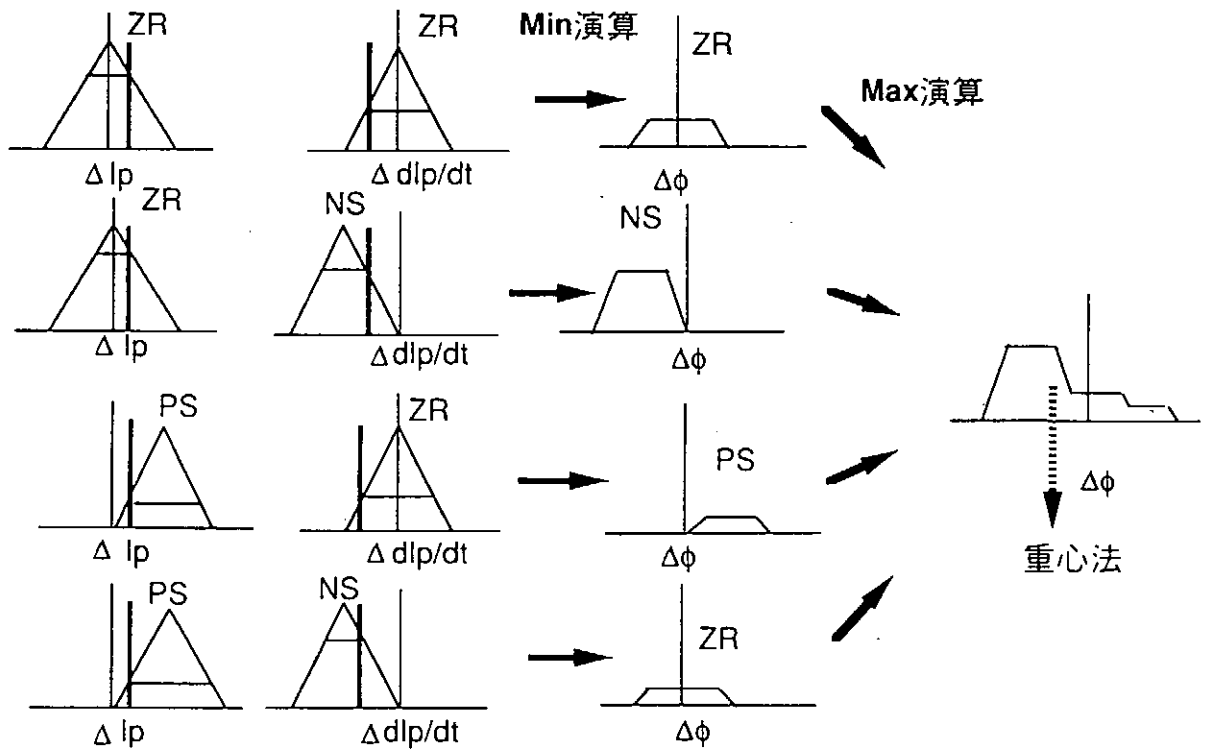


图 4

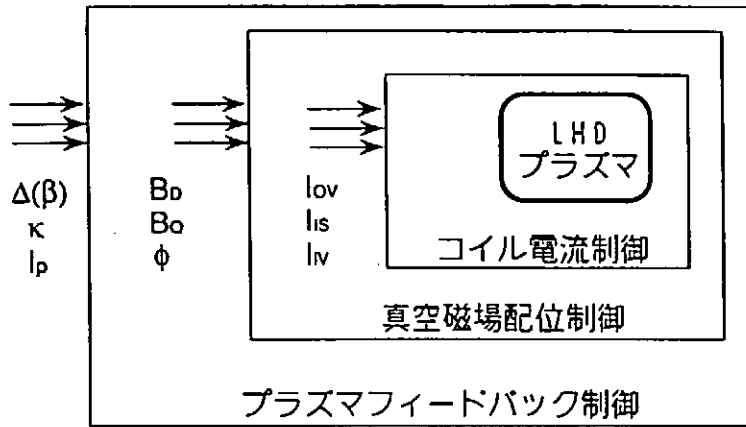


図 5

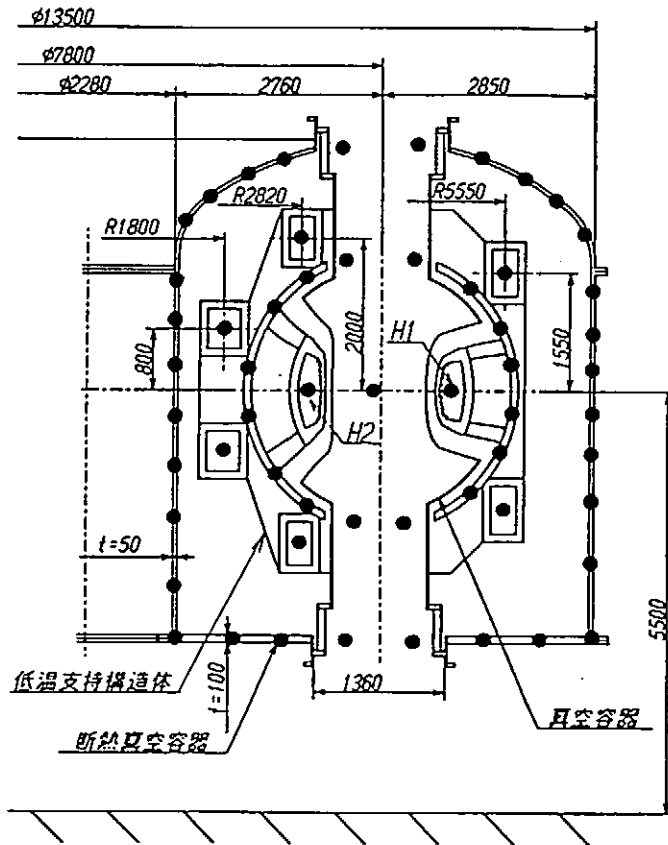


図 6

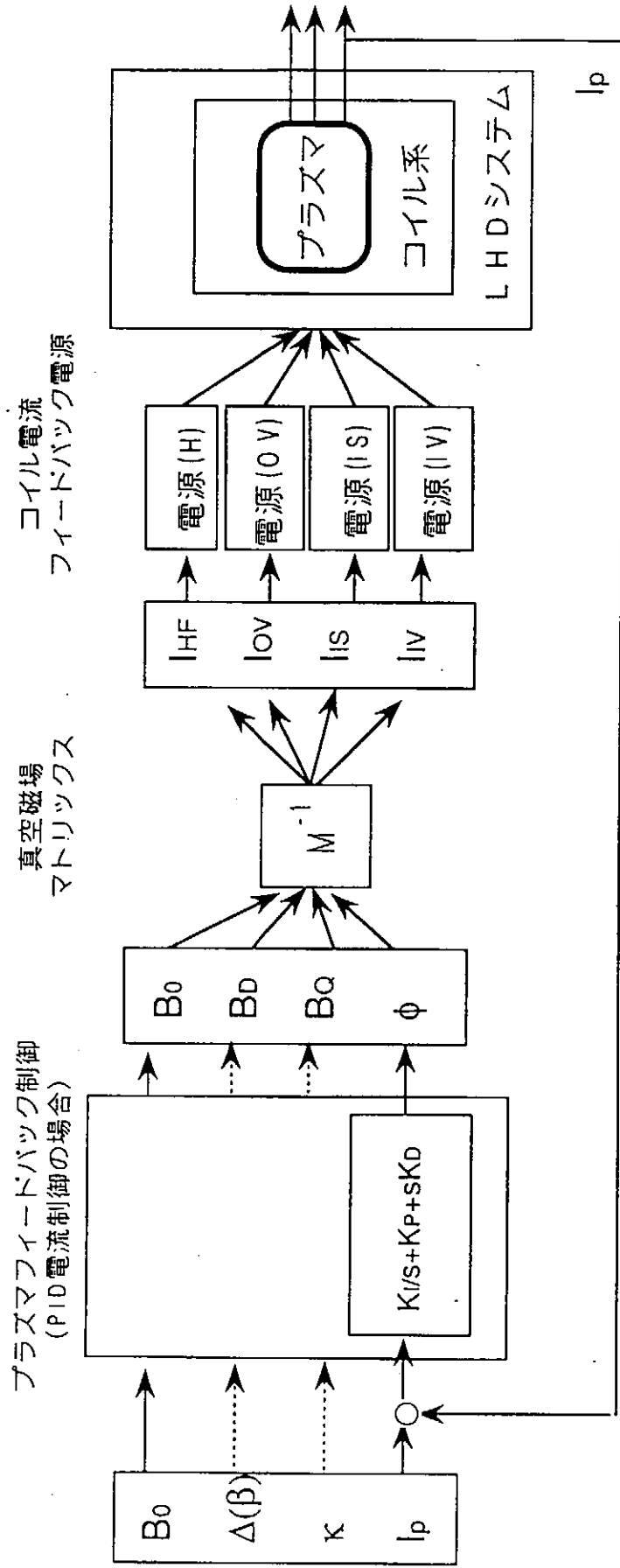
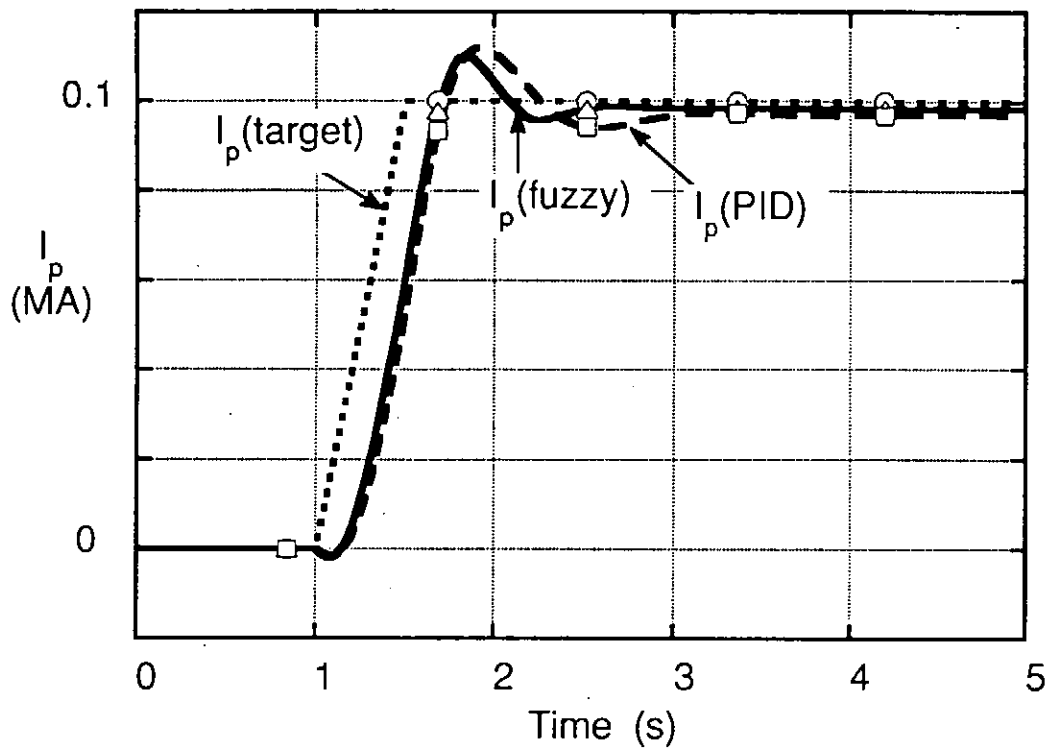


図7



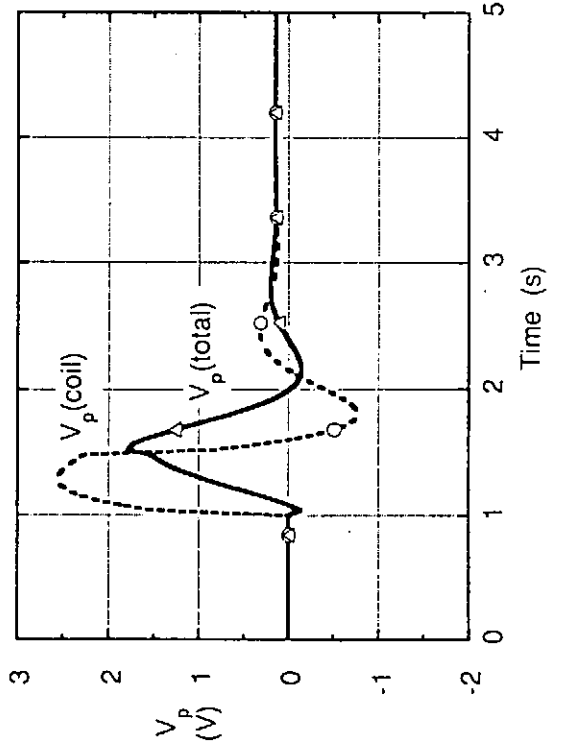
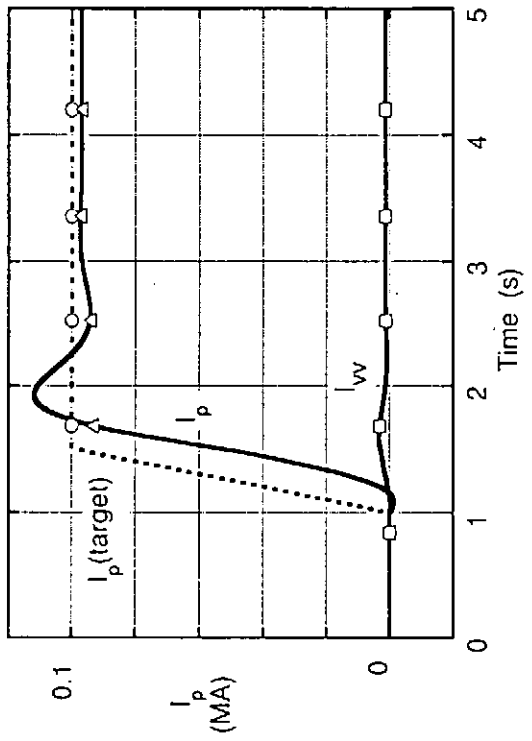
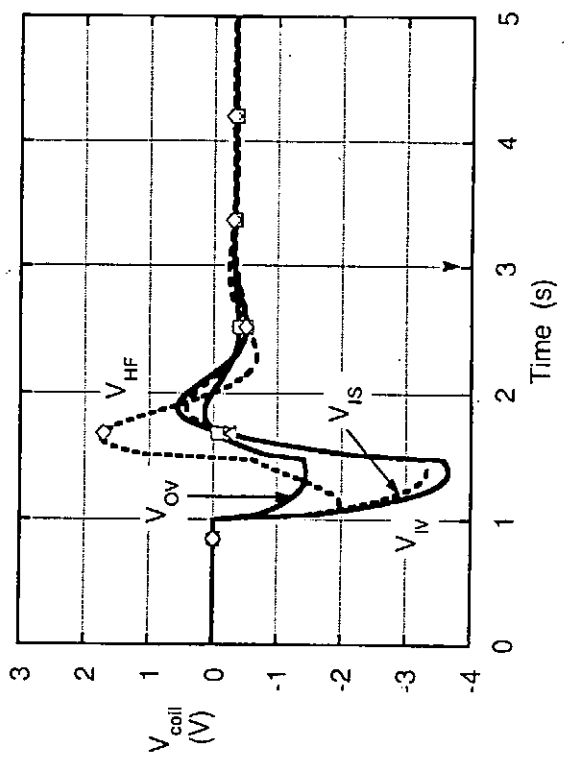
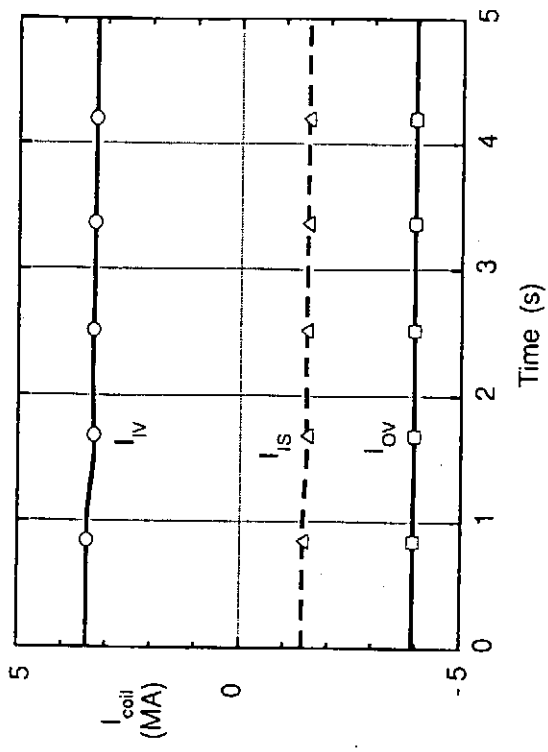


图 9 (a)

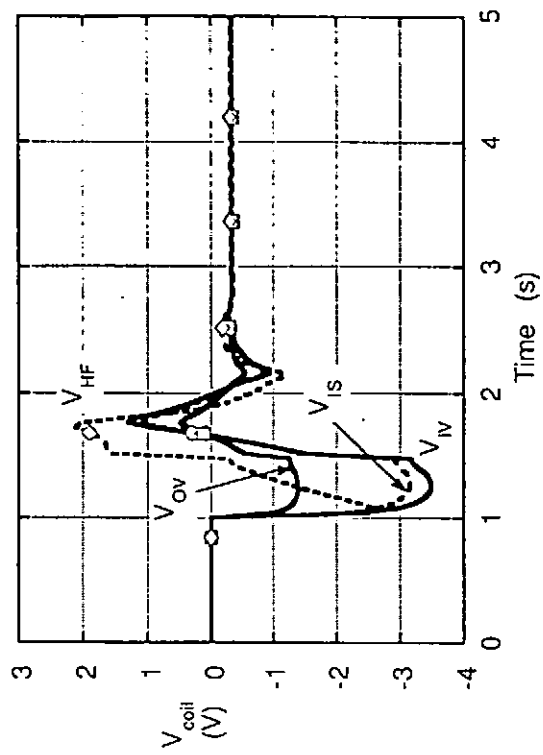
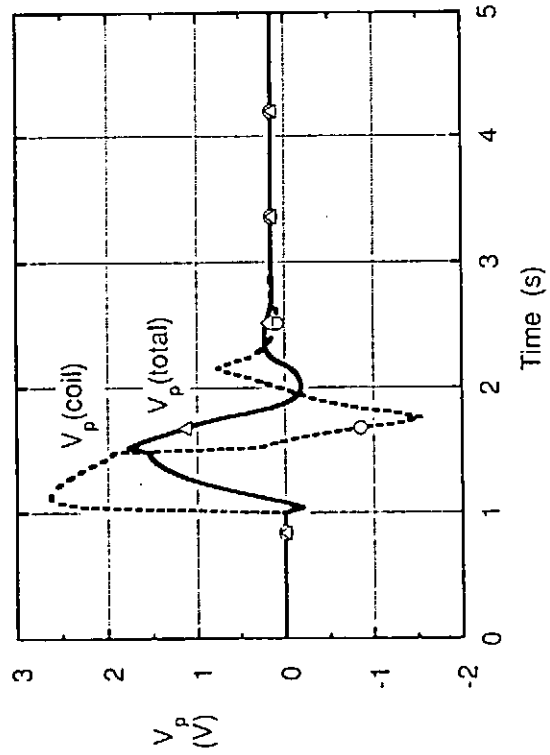
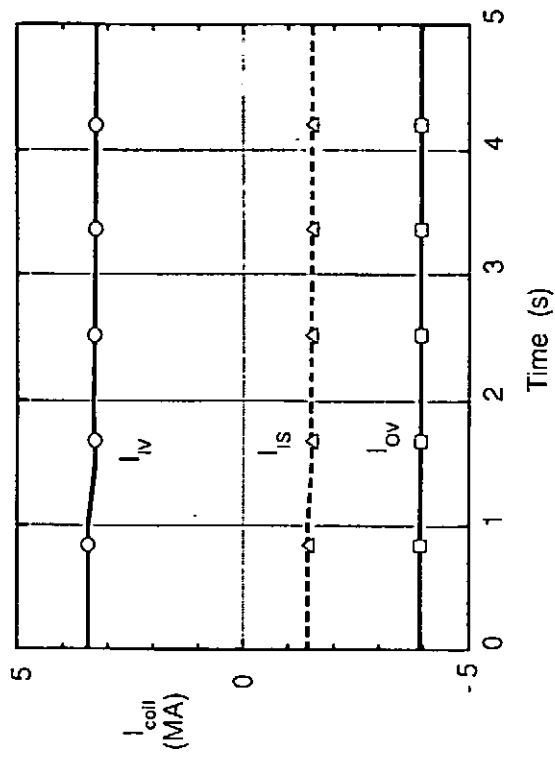
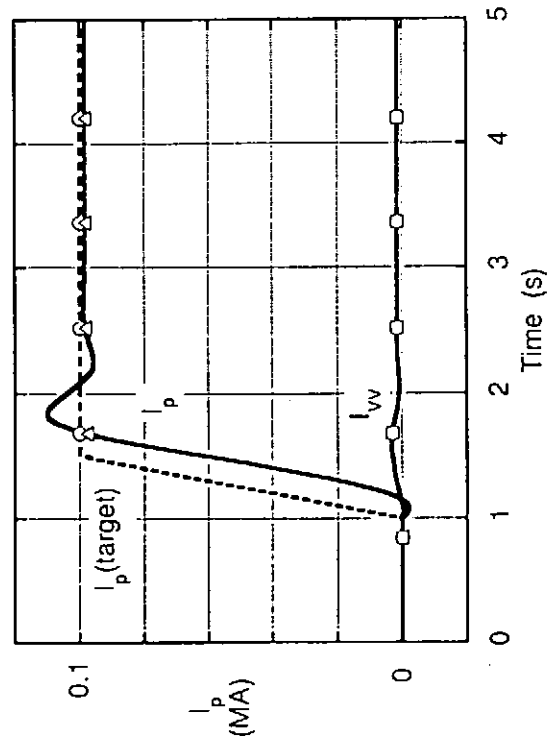


图 9 (b)

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置
フィードバック制御」1991年4月
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, “Feedback Control of Plasma
Equilibrium with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP
T-IIU Tokamak” ; Apr.1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-2 久保田雄輔、大林治夫、宮原 昭、大野和子、中村光一、堀井憲爾、「環境磁界の
研究 (I) 三次元積分磁束計の開発」1991年7月
Y.Kubota, H.Obayashi, A.Miyahara, K.Ohno, K.Nakamura and K.Horii,
“Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for
Environmental Magnetic Field Monitoring” ; July,1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-3 「核融合科学研究所技術研究会;1991年3月19,20日 土岐文化プラザ」1991年8月
“Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories; Mar. 19, 20, 1991”
Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-4 「プラズマ中におけるカオス現象」1991年8月
“Chaotic Phenomena in Plasmas ” ; Aug. 1991(In Japanese)