マルチプロセッサシステムを用いた核融合 プラズマ位置形状制御システムの開発

正員 近藤 育朗 (原研)・正員 村井 勝治 (日立)
 正員 木村 豊秋 (原研)・正員 松木 勉 (日立)
 非会員 栗原 研一 (原研)・正員 中山 尚英 (日立)
 正員 松川 誠 (原研)・非会員 前田 彰彦 (日立)
 非会員 川俣 陽一 (原研)・非会員 森山 國夫 (日立)

1. 緒 言

核融合実用化にあたって、最も有望視されているトカマク型装置は、現在、核融合炉の前提となる臨界プラズマ条件の達成を目指す大形トカマク装置が、日・米・欧で運転されている段階にある。我が国では、日本原子力研究所那珂研究所において、臨界プラズマ試験装置 JT-60 が昭和 60 年 4 月から運転開始され、1 億 K の世界最高レベルのプラズマ温度達成、高周波によるプラズマ電流駆動実験成功など、数々の成果をあげている。

JT-60 はプラズマを発生させ閉じ込める本体を中心に、閉じ込め磁場コイル電源、加熱装置など多数の設備から構成されており、これらの設備・機器を相互に緊密に連繫運転させて安定なプラズマを生成、維持する必要がある。この役目を担うのが全系制御設備であり、JT-60 を構成する各設備制御システムの中核と

して、全設備を統括監視し、多様な実験運転計画に沿った柔軟な実験制御を司っている。なかでも、プラズマ位置形状制御システムは、プラズマ諸量を観測して、プラズマ放電中これらを所定の値に維持制御するものであり、プラズマ実験研究を遂行するにあたって、その基礎となるプラズマの生成・維持に不可欠な設備である。本システムの主要機能は、(1)プラズマ位置形状検出信号積分処理、検出器信号誤差補正を含む制御状態変数導出、(2)位置形状制御磁界と状態変数の非干渉化や最適制御の導入を考慮した多変数フィードバック制御演算、(3)状態変数や指令値データの保存である。

これらの機能は高速アレイプロセッサと制御用計算機からなる 3 段パイプラインマルチプロセッサシステムによる直接デジタル制御手法により実現した。

本論文では、核融合プラズマ位置形状制御システムの機能、構成および主要開発技術について述べる。

2. プラズマ位置形状制御システムに必要な機能

図 1 はプラズマ位置形状制御システムの開発方針を示す。このシステムは、臨界条件達成を目指す高ベータ (ベータ β = プラズマ圧力/磁界圧力、プラズマ閉込め効率を表す。) プラズマの位置形状を高速、高精度で所定の値に制御することを目指している。そのため、高 β プラズマに対応した位置形状演算、補正演算および状態変数と制御コイル磁界の非干渉化や最適制御などの手法が可能な多変数制御方式を導入した、再現性のよい高速、高精度プラズマ位置形状制御シ

Development of the Plasma Position and Shape Control System with Multiprocessor System. By Ikuo Kondo, Member, Toyooki Kimura, Member, Ken-ichi Kurihara, Non-member, Makoto Matsukawa, Member, Yoichi Kawamata, Non-member (Japan Atomic Energy Research Institute), Katsuji Murai, Member, Tsutomu Matsuki, Member, Takahide Nakayama, Member, Akihiko Maeda, Non-member & Kunio Moriyama, Non-member (Hitachi, Ltd.).

近藤育朗：正員，日本原子力研究所那珂研究所
 木村豊秋：正員，日本原子力研究所那珂研究所
 栗原研一：非会員，日本原子力研究所那珂研究所
 松川 誠：正員，日本原子力研究所那珂研究所
 川俣陽一：非会員，日本原子力研究所那珂研究所
 村井勝治：正員，(株)日立製作所大みか工場
 松木 勉：正員，(株)日立製作所大みか工場
 中山尚英：正員，(株)日立製作所大みか工場
 前田彰彦：非会員，(株)日立製作所大みか工場
 森山國夫：非会員，(株)日立製作所大みか工場

図1 プラズマ位置形状制御システムの開発方針

Fig. 1. Development concept of the plasma position and shape control system.

図2 プラズマ断面および位置形状制御方式

Fig. 2. Structure of position and shape control with a cross-section of plasma.

テムを計画した。しかし、これらの制御を行うためには、膨大な制御演算を厳密に管理された制御周期の中で行う必要があり、従来の制御用計算機では必要な制御周期 1ms を維持できない。そのため、アレイプロセッサを制御状態変数導出の前処理システムとするマルチプロセッサによる 3 段パイプラインおよび高精度タイミングシステムからなる制御システムを開発することとした。ここに開発した制御方式は、プラズマ断面が円形の場合のみでなく、非円形、BEAN 形状の場合にも基本的に適用することができる。プラズマパラメータが異なる場合は、そのパラメータに対応して演算式を変換すればよい。また、プラズマと真空容器間隙の制御については、統計的手法を用いているため、システムに応じたシミュレーション検討が必要である。

以下にプラズマ位置形状制御に必要な状態量算出および制御方式について述べる。

図2はプラズマ断面および位置形状制御方式を示す。

(2・1) プラズマ位置形状検出 プラズマ位置形状はトカマクプラズマ中を流れるプラズマ電流がつく

る磁界を磁気プローブで検出することによって検出することができる。JT-60 のプラズマ制御には、当初電流密度の多重極モーメントと電流の作る磁界との間の関係を利用する多重極モーメント法⁽¹⁾として知られる方法を採用した。しかし、臨界プラズマの発生を目指して、中性粒子入射や高周波加熱により高温、高密度プラズマの制御を行う場合、以下の問題点がある。

(1) 多重極モーメント法で求めたプラズマ電流中心位置は、プラズマの高β化に伴い、プラズマの幾何学的中心(最外殻磁気面の中心)よりトロイダル効果以上に外側方向に移動する。(図2 ΔR 参照)

(2) プラズマ中心位置の制御に加えてより本質的なプラズマと真空容器との間隙を制御するため、新たな状態変数とその検出式が必要である。(図2 Δ52, Δ30, Δt 参照)

そこで、本システムではプラズマ水平位置検出方法として多重極モーメント法に換えてβ依存性を持たないシャフラノフモーメント法⁽²⁾を新しく適用する。なお、プラズマ垂直位置 ΔZ の算出には、このようなβ値の効果はないので多重極モーメント法を使用する。シャフラノフモーメント法では、プラズマの幾何学的中心の水平位置 R を次式により求める。

$$R = (r_p^2/4R_m) \{ (r_m^2/r_p^2 - 1) - 2 \ln(r_p/r_m) \} + (r_m/2) \{ \lambda_1 (1 - r_p^2/r_m^2) - \mu_1 (1 + r_p^2/r_m^2) \} + C_M I_M / I_p + R_m \dots (1)$$

ここで、 R_m : 真空容器中心水平位置、 r_p : プラズマ小半径、 r_m : R_m から磁気プローブまでの小半径

$$\lambda_1 = (\pi r_m / \sqrt{3} \mu_0 I_p) (B_{t1} - B_{t3} - B_{t4} + B_{t5}) - I / 2 I_p$$

$$\mu_1 = (\pi r_m / 3 \mu_0 I_p) \{ B_{n1} - B_{n3} - B_{n4} - B_{n6} + 2 (B_{n2} - B_{n5}) \} - 3 I_M / 2 I_p$$

I_p : プラズマ電流、 I_M : ダイバータコイル電流、 C_M : 定数、 B_{t1-6} : ポロイダル磁界接線方向成分、 B_{n1-6} : ポロイダル磁界法線方向成分、 μ_0 : 真空透磁率である。(図2 参照)

次に、プラズマと真空容器間隙の制御については、MHD 平衡解析によるプラズマ平衡配位の状態変数 ΔY、磁界測定量 B_j および補正項 X を

$$\Delta Y = \sum_{j=1}^N (C_{1j} + C_{2j} X) B_j \dots (2)$$

のように多項式の形で結合し、係数 C_{1j} および C_{2j} をプラズマの平衡データベースから重回帰分析により求めた統計処理法⁽³⁾を用いる。ここで、 B_j は B_{t1-6} 、 B_{n1-6} 、X は I_M/I_p または I_q/I_p であり、ΔY としてダイバータ部セパトリクス位置 Δt、30° リミタ間

隙 $\Delta 30$, 50° リミタ間隙 $\Delta 52$ を採る。これら各プラズマの状態は図2に示すように制御用磁界がプラズマ電流に与えるローレンツ力を利用して所定の値に制御される。

(1)式の B_{t1-6} , B_{n1-6} と(2)式の B_j は、磁気プローブ信号より、(1)式の I_P はログスキークoil信号より各々測定される。しかし、実際には各検出器信号に種々のエラー成分が含まれている。例えば、図2に示すように、法線方向成分 B_{n1} 用磁気プローブ軸が、真の設定位置に対しある傾きをもって取付けられたとすれば、磁気プローブ出力信号 B_{n1}^* は、接線方向成分 B_{t1} および B_{n1} と B_{t1} に対して独立なトロイダル磁界 B_T ($\propto$ トロイダルコイル電流 I_T) を受ける。これはすべての磁気プローブ出力信号 $B_{n1}^* \sim B_{n6}^*$ および $B_{t1}^* \sim B_{t6}^*$ に対して同様であり、逆に真の磁界成分 $B_{n1} \sim B_{n6}$, $B_{t1} \sim B_{t6}$ は、

$$B_{n1} = a B_{n1}^* + b B_{t1}^* + c \Delta I_T \dots\dots\dots (3)$$

の形で補正する必要がある。これら a , b , c の値はプローブごとに構造的に決まる定数である。一方、プラズマ電流計測用ログスキークoil出力 I_{ROG} には各制御磁界発生用コイル電流の影響が含まれている。

そこで真のプラズマ電流 I_P を求めるため、次の補正が必要となる。

$$I_P = I_{ROG} + K_V I_V + K_H I_H + K_Q I_Q + K_M I_M + K_T \Delta I_T \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 I_V は垂直磁界コイル電流、 I_H は水平磁界コイル電流、 I_Q は四重極磁界コイル電流、 I_M はダイバータコイル電流、 K_V , K_H , K_Q , K_M , K_T は各コイル電流に対する補正係数である。

プラズマ状態変数は、(3), (4)式による補正演算を行った後、補正された検出器信号を用いて(1), (2)式に基づいて制御周期ごとに算出しなければならない。これらの演算は、通常のプロセス制御用計算機では1ms以上かかるため、高速のアレイプロセッサを導入して演算処理時間の短縮を図ることとする。

〈2・2〉 プラズマ位置形状多変数制御 プラズマ位置形状制御において、制御目標値は上位計算機システムから実時間で与えられる。その後、図2に示すように位置形状制御計算機は、これらの目標値に対し、前項に示した前処理システムで求めた状態変数を帰還値として、それらの偏差に基づいてプラズマ制御コイルへの電流指令値の演算を行いポロイダル磁界コイル電源設備へ送出する。

従来のシステムでは、1個の制御コイル電流指令値には1個のプラズマ状態変数を対応させていた。すなわち、(1), (2)式によって算出した帰還値である各

プラズマ状態変数と制御目標値との偏差 ΔY に基づき、制御コイル電流指令値 I_j^{ref} を次のように決定する。

$$I_j^{ref} = I_j^{base} + \Delta I_j \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta I_j = C \{ \Delta Y_j + D (\Delta Y_j - \Delta Y_{j-1}) \}$$

ここで、 I_j^{base} は時刻 j における解析的あるいは運転実績によって定めるプレプログラムコイル電流値またはコイル電流現状値、 C は比例制御ゲイン、 D は微分制御ゲインである。 I_j^{base} はシミュレーションコードによって解析的に求めることは可能であり、解析的に求めたプレプログラム値によって運転し、その運転実績に基づいて補正を行っている。 I_j^{ref} と ΔY は、垂直磁界コイル電流 I_V とプラズマ水平位置偏差 ΔR , 水平磁界コイル電流 I_H とプラズマ垂直位置偏差 ΔZ , 四重極磁場コイル電流 I_Q と 30° リミタ間隙 $\Delta 30$, ダイバータコイル電流 I_M とダイバータ部セパトラトリクス位置 Δt のように1対1に対応する。

しかし、実際のシステムにおいては、各コイル電流値とプラズマ状態変数との関係は必ずしも1対1になっていない。従って、プラズマの位置形状平衡制御をより精度よく行うためには、非干渉化や最適制御などの手法が適用できる多変数フィードバック制御方式を導入する必要がある。

そこで(5)式のスカラー量1個の状態変数と目標値の偏差 ΔY_j のかわりに、複数の状態変数と制御目標値との偏差ベクトル $\Delta \vec{Y}_j$ を定義する。

$$\Delta \vec{Y}_j = \begin{bmatrix} \Delta R_j^{ref} - \Delta R_j^{obs} \\ \Delta Z_j^{ref} - \Delta Z_j^{obs} \\ \Delta 30_j^{ref} - \Delta 30_j^{obs} \\ (\text{または } \Delta 52_j^{ref} - \Delta 52_j^{obs}) \\ \Delta t_j^{ref} - \Delta t_j^{obs} \end{bmatrix} \dots\dots (6)$$

ここで添字 ref は指令値, obs は観測値を表す。

一方、JT-60において制御可能な操作量、すなわちポロイダルコイル電流は、 I_V , I_H , I_Q , I_M の4種類であり $\vec{I}$ と定義する。

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} I_V \\ I_H \\ I_Q \\ I_M \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

操作量の次元は4のため、(7)式の状態変数ベクトルのうち、独立に制御可能な要素は最大4個である。

そのため、実機においては 30° リミタ間隙 $\Delta 30$ と 50° リミタ間隙 $\Delta 52$ のうち1個を選択して制御を行う。プラズマ位置形状制御計算機で実行する制御演算式を次に示す。

$$\vec{I}_j = \vec{I}_j^{base} + \Delta \vec{I}_j$$

$$\Delta \vec{I}_j = \vec{C}(\vec{K}_1 + \lambda \vec{K}_2) \{ \Delta \vec{Y}_j + \vec{D}(\Delta \vec{Y}_j - \Delta \vec{Y}_{j-1}) \} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $\vec{I}_{j, \text{base}}$ は(5)式の場合と同様プレプログラムによる電流指令値であり、 $\vec{C}$ は4行4列比例制御ゲイン行列、 $\vec{K}_1$ と $\vec{K}_2$ は4行4列の補正係数行列、 $\vec{D}$ は4行4列微分制御ゲイン行列である。補正係数行列は、高 β プラズマ生成時のプラズマ β 値に対する各状態変数の依存性をシャフラノフラムダ λ によって比例制御係数に反映させるものである。なお、比例制御ゲイン行列の第3列は、状態変数 $\Delta 30$ または $\Delta 52$ に対応しており、選択することができる。

なお、(8)式の運用にあたっては、1放電の間にプラズマ状態が大幅に変化するため、プラズマの制御を最適に行うようにプラズマの条件に応じて各制御ゲインを実時間で変更することを可能とすることが必要である。

3. プラズマ位置形状制御システムの構成

図3は臨界プラズマ試験装置 JT-60 のシステム構成を示す。JT-60 はプラズマを発生させ閉じ込める本体を中心に、閉じ込め磁界コイル電源、加熱装置など多数の設備とこれらの設備を統括する全系制御設備からなる。全系制御設備は、標準化インターフェース CAMAC およびタイミングシステムを通して全設備を監視制御するとともに、プラズマ位置形状や温度、密度の制御を行って、安定なプラズマ生成、維持を司っている。

図4はプラズマ制御システムの構成を示す。プラズマ特性制御計算機は、後述する位置形状制御のための目標値を位置形状制御計算機に与えると同時に、プラズマ温度、密度の特性演算を行って、ガス注入量や加熱入力量の指令値を与えプラズマ温度、密度のフィードバック制御を行う。プラズマ位置形状制御は、前処

図3 JT-60 システム構成図

Fig. 3. System configuration of JT-60.

図4 プラズマ制御システム機能構成

Fig. 4. Block diagram of the plasma control system.

図5 プラズマ位置形状制御システムへのアレイプロセッサの適用概念図

Fig. 5. Application of an array processor to the plasma position and shape control system.

理システムによって磁気プローブ信号の積分やその誤差補正およびプラズマ位置形状演算を行い、位置形状制御計算機でプラズマ位置形状フィードバック制御演算を行ってポロイダル磁界コイル電源に指令を与えることによって実現する。更に、これらの制御の再現性を高度に維持するための高精度タイミングシステムによって、全システムの同期運転を行っている。

以下、これらプラズマ制御の中核となる位置形状制御を司る本システムの開発内容を述べる。

〈3・1〉 プラズマ位置形状制御前処理システム

(1) 前処理システムへのアレイプロセッサの適用 プラズマ状態変数の算出を高速で行うため、前処理システムへアレイプロセッサを導入して演算処理時間の短縮を図った。

図5は前処理システムへのアレイプロセッサの適用概念図である。前処理システムにアレイプロセッサ (ZIP 3216) を適用し、〈2・1〉節に述べた演算にアレイプロセッサの有する乗算および加算 100 ns という高速性能を十分活用するためには、二つの課題を解決

する必要があった。その第1は、アレイプロセッサには位置形状検出のための磁気プローブ信号やロブスキークール信号を直接高速入力する必要がある、また、磁気プローブなどの出力信号は、検出器の原理上微分された信号であるため、高速入力装置において積分処理を行い元の磁界成分を求める必要があった。第2は、アレイプロセッサは位置形状制御計算機と共に、外部のタイミングシステムによって生成された制御クロックに厳密に同期して動作する必要があった。以下、これらの解決策について述べる。

(2) 高速入力装置 図6は高速入力装置におけるデジタル積分方式を示す。磁気プローブは、プラズマ電流による磁界 B の変化分すなわち微分値を信号として出力する。そのため、積分処理を行って元の磁界信号を求め、プラズマ状態変数演算を行う必要がある。ここでは、積分結果のドリフトがなく、データ処理が容易な見地から電圧周波数(VF)変換器とパルスカウンタを組合わせたデジタル積分方式を開発した。

磁気プローブからの信号はVF変換器によりパルス列に変換される。ここで応答性向上のため、出力パルス最大周波数を1MHzに選択した。更に、負側の信号も積分できるようにするため、バイアスを重畳してアップダウンカウンタのアップ側に入力して積分する。

一方、バイアス分も同時に積算されるため、バイアス分に相当するパルスを常時ダウン側に入力して互いに相殺して積分動作させるようにした。積分結果は制御クロックごとにアレイプロセッサから直接読み出す。

この方式により、フルスケールに対して0.1%の高

図6 高速入力装置におけるデジタル積分方式

Fig. 6. Digital integration method with the high-speed signal input device.

精度、 $2\mu\text{s}$ の高速応答を有するデジタル積分が可能となり、高精度アルゴリズムと合せて位置形状演算精度0.1%を実現した。

(3) アレイプロセッサへの高速割り込み処理 図7は制御クロックのアレイプロセッサへの高速割り込み処理方式を示す。アレイプロセッサは位置形状制御計算機と共に厳密に同期して実時間制御を行う必要がある。そのため、アレイプロセッサはタイミングシステムによって厳密に管理された1ms制御クロックに基づいて繰返し処理を起動するようにした。アレイプロセッサは、一般の制御用計算機のような割り込み信号に対するベクタリング処理機能をもたないため、実時間処理中は常時DMAリクエスト待ち状態としており、制御クロックにより入力装置からアレイプロセッサを直接起動するようにした。そのため、高速入出力装置やアレイプロセッサ間のデータ転送を制御するコントローラボードを開発し、制御クロックを直接高速入力装置に入力してデータラッチさせた後、DMAリクエストを発行させるようにした。一方、アレイプロセッサは、実時間処理を開始した後はデータによって起動される状態、すなわち、DMAリクエスト待ち状態となっている。この状態で高速入力装置にデータが用意され、DMAリクエストが発行されるとアレイプロセッサはデータ入力を行い、補正演算、プラズマ状態変数演算の一連の処理を行い、その結果を出力する。

以上、述べたようにアレイプロセッサへの制御クロックの高速割り込みを実現し、制御クロック入力からプラズマ状態変数出力までの処理時間を $210\mu\text{s}$ とすることができた。

〈3.2〉 プラズマ位置形状制御計算機システム

図8はプラズマ位置形状制御を高速で行うための、

図7 アレイプロセッサへの高速割り込み処理

Fig. 7. Interruption procedure in the array processor.

図 8 多変数フィードバック制御高速演算処理方式

Fig. 8. High-speed calculation for the multivariable feedback control.

多変数フィードバック制御高速演算処理方式を示す。
 〈2・2〉節に述べたように多変数フィードバック制御演算は、4行4列のマトリクス演算を含む。この多量の演算を高速処理するため、あらかじめ演算可能な制御定数、工学値変換係数は、制御ゲイン $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ としてプラズマ制御開始前に非実時間処理し、実時間で行うフローティング演算命令を集約して最小化した。また、多変数フィードバック制御演算において、プレプログラム演算、またはデータ保存など2台の計算機で並行処理できる部分があることに着目して、多変数フィードバック制御演算を2台の計算機に機能分割し、前処理システムを含む3段パイプライン構成として並行処理による高速化を計った。

図8において、1段目は前処理システムアレイプロセッサにより、プラズマ状態変数算出を行う。2段目は入力プロセッサとして制御用計算機(H-80E)を用いて位置形状の目標値、帰還値の入力および単位変換を行う。3段目は出力プロセッサにより、多変数フィードバック制御演算を行い、コイル電流指令値を求め、ポロイダル磁界コイル電源設備に出力する。

図9はこれら3段パイプラインシステムの動作をタイムチャートで表したものである。タイミングシステムが発生する1ms制御クロックは、前処理システム用のクロック1、入力プロセッサ用のクロック2、出力プロセッサ用のクロック3よりなる。クロック2は前処理システムの演算終了時間を考慮した時間遅れをもたせ、また、クロック3は入力プロセッサの演算終了時間を考慮した時間遅れをもたせて1ms周期でプラズマ制御中パルス連続発生させている。このようにして、前処理システムの演算結果がむだ時間なく入力プロセッサに入力して演算に利用され、同様に、

図 9 3段パイプラインシステムの動作

Fig. 9. Time chart of the three-step pipelined system.

図 10 プラズマ制御結果

Fig. 10. Result of the plasma position and shape control.

入力プロセッサ演算結果もむだ時間なく出力プロセッサに利用されて、最短時間で前処理システムから出力プロセッサにデータが流れる。また、データ保存や起動処理は、並行処理することができる。このようにして、従来の制御用計算機(H-80E)1台で実行した場合、2.5ms要すると推定された多量の演算処理が、1.2msの高速で実行することが可能となった。更に、出力プロセッサ演算中に前処理システムには次の制御周期の入力が可能であり、システム全体として1ms周期で高速動作させることが可能である。

4. 試験結果

図10は臨界プラズマ試験装置JT-60における本システムを適用したプラズマ位置形状試験結果の代表例を示す。この例は、最大プラズマ電流2.6MA放電におけるプラズマ水平位置 ΔR 制御結果であり、外乱となる中性粒子入射加熱を行っている期間を含み、

放電時間のほとんど全域にわたり制御精度の目標値 1% 以下を十分満足し、安定なプラズマを得ている。

垂直位置 ΔZ , 30° リミタ間隙 $\Delta 30$, 50° リミタ間隙 $\Delta 50$, プラズマ電流 I_p など制御周期 1 ms で制御目標値 1% 以内に制御されている。JT-60 は、昭和 62 年 6 月から本格的なプラズマ加熱実験を開始し、本プラズマ制御システムを用いて、臨界プラズマ条件達成に向けて実験を進めている。

5. 結 言

臨界プラズマ試験装置 JT-60 のプラズマ位置形状制御のため、アレイプロセッサを導入した高精度（精度 0.1% 以下）で、高速（処理時間 210 μ s）の位置形状検出、および多変数フィードバック制御方式による制御周期 1 ms の高精度（精度 1% 以下）位置形状制御システムを開発した。このシステムは、JT-60 に適用して安定で再現性のよい高温、高密度プラズマの

生成に成功し、臨界条件の達成に向けて実験を進めている。また、開発したシステムは、核融合プラズマ制御技術の基本となるものであり、その開発成果を踏まえて、次期実験炉を目指した核融合プラズマ制御技術の開発に取り組んでいく考えである。

終りに、本システムの開発にあたり、御指導および御協力いただいた関係各位に心から謝意を表す次第である。

(昭和 62 年 8 月 25 日受付)

文 献

- (1) 相川・小方・鈴木:「磁気プローブによる位置・断面形状検出」JAERI-M6931 (昭 52-2)
- (2) H. Ninomiya, et al.: "Estimation of Plasma Position and $\beta_p + I_i/2$ Magnetic Measurements under High- β Condition in JFT-2", *JJAP*, **21**, 1323 (1982)
- (3) N. Hosogane, et al.: "Method for Measuring Divertor configuration Parameters for Feedback Control in JT-60", *Nucl. Fus.*, **26**, 657 (1986)