

臨界プラズマ試験装置(JT-60)の制御

Control System for Japan Tokamak JT-60

臨界プラズマ試験装置の制御の主目標は、核融合システムの特殊性を踏まえて、全設備を安全、かつ有効に制御して、効率よく実験を遂行するにある。制御設備は、計算機制御を中枢とした階層構造の分散化システムを採用し、制御システムのかなめとなる全系制御設備は、多様な機能処理するためマルチコンピュータシステムを中核としたシステムとし、中央コンソールは、ディスプレイ装置を設けた計算機化制御盤で構成している。また、制御方式としては、プラズマ制御で重要な位置形状制御の有効性を、シミュレーションプログラムを開発して確認し、更に、実験効率向上のため、実験データから最適実験パラメータを決定する、学習・最適化制御方式を現在開発中である。

鈴木康夫* *Suzuki Yasuo*
小方 厚** *Ogata Atsushi*
畠山 尚*** *Hatakeyama Takashi*
竹丸浩一*** *Takemaru Kôichi*
村井勝治**** *Murai Katsuji*
射場大造**** *Iba Daizô*
井上孝太郎***** *Inoue Kôtarô*
植田明照***** *Ueda Akiteru*

1 緒 言

日本原子力研究所では、超高温プラズマの閉じ込め法則の実験的検証と、その閉じ込め技術の開発を目標にした臨界プラズマ試験装置(以下、JT-60という)を開発中である。

本装置の制御は、通常プラントと異なり、短時間の高速現象を取り扱い、多様な条件で効率よく実験制御を行なう必要があり、更に、制御対象である装置自体が開発品であるなどの特殊性をもったシステムである。

本稿では、全設備を統括制御する全系制御設備のシステム計画を中心に、研究開発の一端としてプラズマ制御で重要な位置形状制御及び実験効率の向上のために、現在開発中の学習・最適化制御方式について概要を述べる。

2 JT-60の制御の概要

JT-60は、装置の中核をなす本体、トロイダル及びポロイダル磁場コイル電源、第二段加熱装置、計測装置など、機能上密接な多くの設備・機器から構成されている。

制御面で重要、かつ特長のある項目として下記がある。

- (1) 10分周期で約5秒間の放電実験制御を実施するため、全設備の安全、高速、かつ高精度な統括制御
- (2) JT-60のプラズマ制御で重要な位置形状制御
- (3) 実験パラメータ決定のための学習・最適化制御

これらの機能を実現するため、図1に示すように制御設備を階層構成とし、各層に計算機を導入して、運転・実験に即した柔軟性のあるシステムとしている。

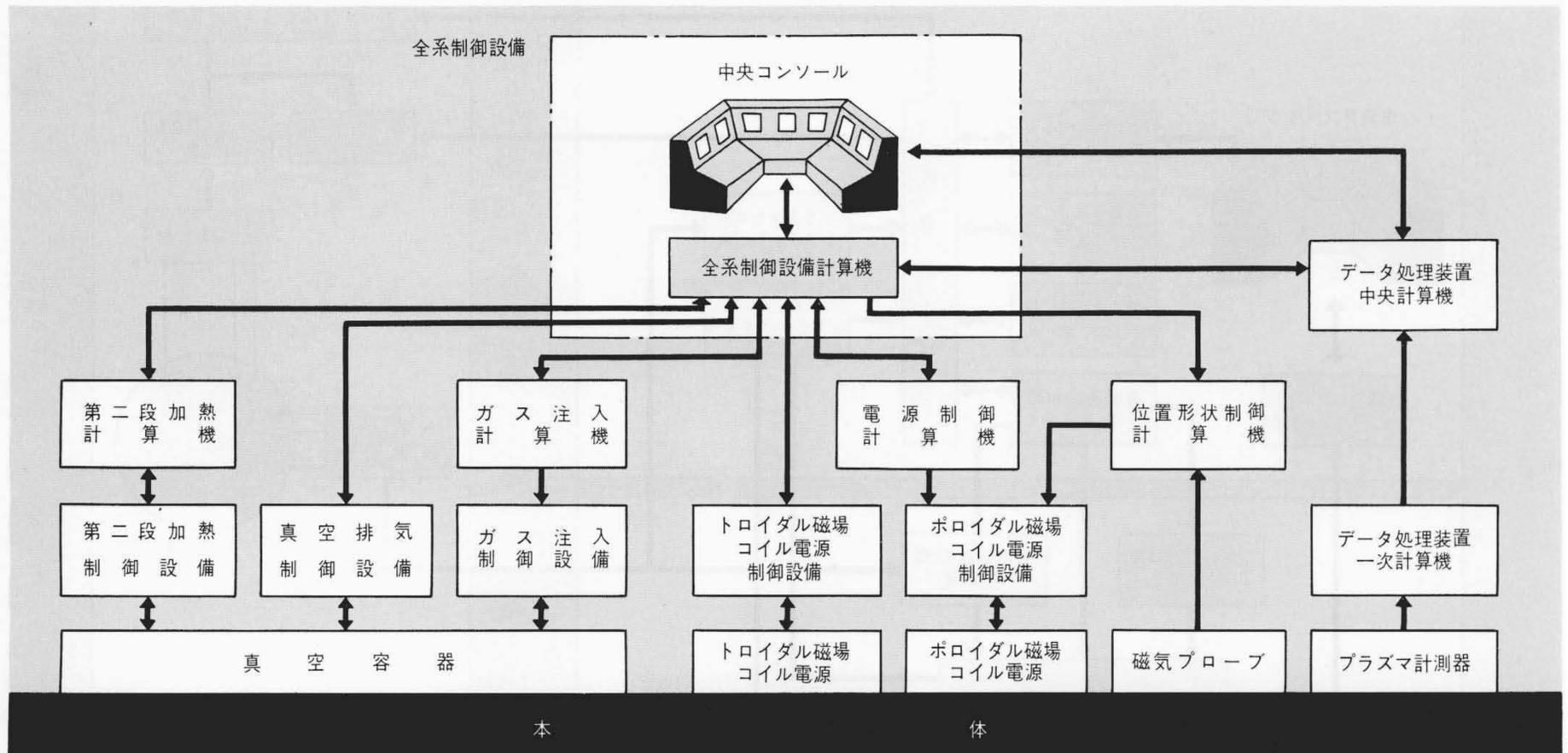


図1 JT-60制御システム構成図 全系制御設備を中枢として、数多くの制御設備を階層的に構成するとともに、データ処理装置と有機的に結合している。

* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 理学博士 ** 日本原子力研究所大型トカマク開発部 工学博士 *** 日立製作所電力事業本部
**** 日立製作所大みか工場 ***** 日立製作所原子力研究所 工学博士 ***** 日立製作所日立研究所

3 全系制御設備

3.1 位置付け

全系制御設備は、JT-60制御システム全体を統括、管理、運転するとともに、プラズマデータの収集、解析、保管及び実験パラメータの解析を行なうデータ処理装置と有機的に結合している。多様な実験計画に従って、設備間の協調をとり、かつ高速、高精度な制御を行なう必要のあるプラズマ実験装置において、それらを統括する全系制御設備は実験システムの中核機能をもっている。

3.2 制御方式

JT-60の制御目的は、安定したプラズマ放電を行なうことであるが、その制御内容は非常に自由度があり、任意のパターンで実験されるものである。また、プロセスの応答が速いため、単なるシーケンス制御やフィードバック制御だけでは十分な制御を行なうことができないため、プレプログラム制御などの高度な機能が要求される。更に、目標とするプラズマの状態を実現するための実験条件の探索や、放電前のチェック機能が必要である。また、10分周期で5秒間のプラズマ放電を行なうJT-60では、約4,000点の設備データと、1放電当たり約100万個のプラズマデータを収集し、それらの情報を効率よく運転員に提供することが要求される。これに対処した本設備の多岐にわたる機能を表1に示す。また、システム構成は、図2に示すように計算機主体のシステムとし、中央コンソールは用途別に多種類のディスプレイ装置を設けた計算機化制御盤として各設備を集中制御する。

表1 全系制御設備の機能 全系制御設備のシステム分類とその主な機能を示す。

No.	項目	主な機能
1	中央コンソール	マンマシンインタフェース (1) 実験操作, 実験条件の設定 (2) 設備データ, プラズマデータの表示
2	グラフィックパネル	ハードワイヤード方式による設備の運転状態表示, 各設備の故障状態集約表示
3	保護インターロック盤	ハードワイヤード方式による設備間の保護協調
4	計算機	モニタ及びデータロガーシステム 設備データの取込み及びデータ処理
	システム	運転制御システム 各ブロック設備の状態モニタによるシーケンス制御
	システム	運転用マンマシンコミュニケーションシステム 設備運転上必要な情報の表示及びリクエスト処理
	システム	プラズマモニタシステム プラズマデータの高速度取込み及びそのモニタ
	システム	実験制御システム プラズマ放電時のシーケンス制御
	システム	実験用マンマシンコミュニケーションシステム プラズマ情報の表示及び実験条件設定受け付け
	システム	非標準事態診断システム 非標準事態の原因解析 プラズマ放電事前チェック
	バックアップシステム	バッチ処理及びプログラム開発 故障計算機のバックアップ

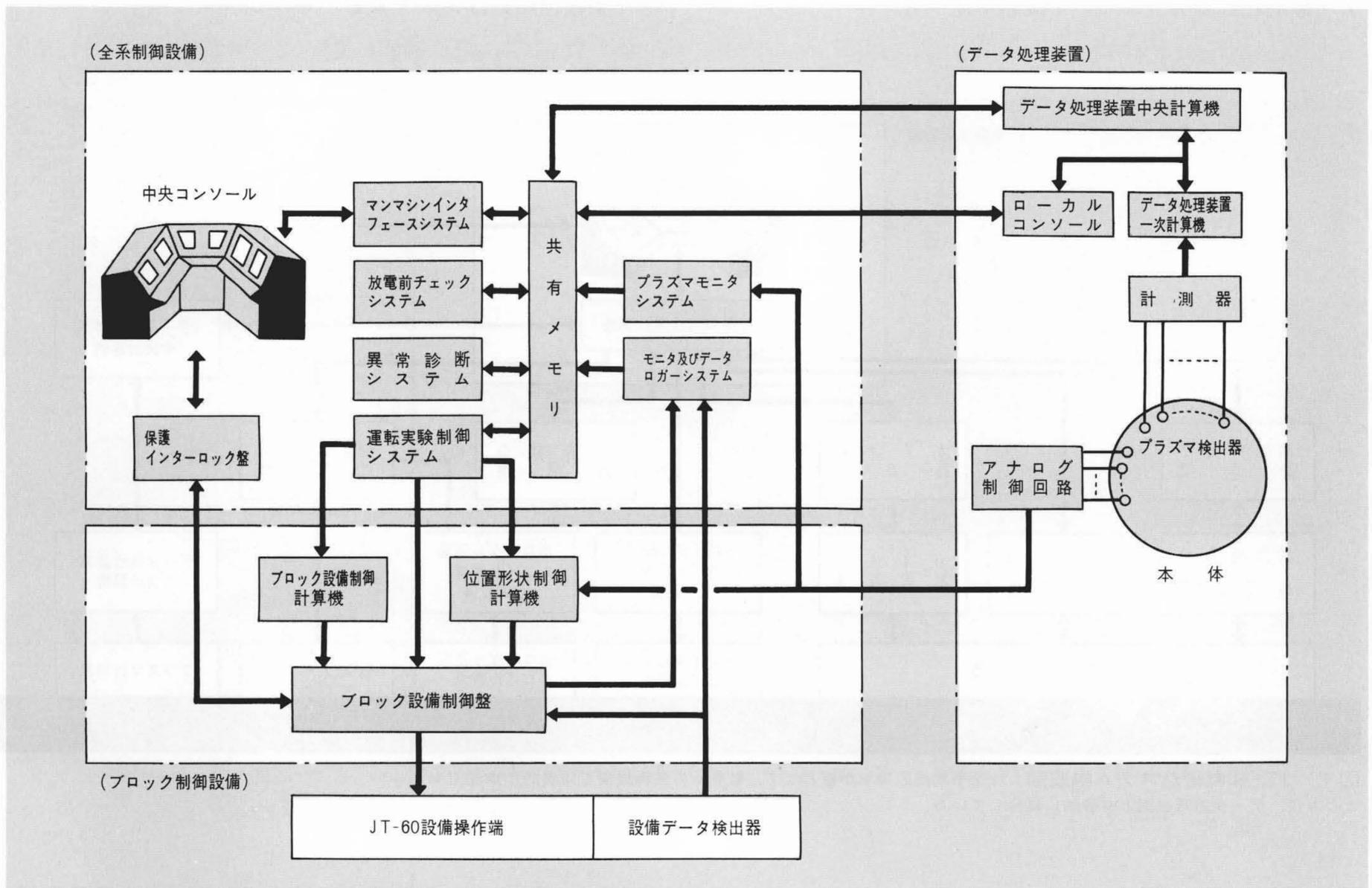


図2 全系制御設備構成図 多岐の機能を果たすために、計算機主体のシステムとし、中央コンソールを計算機化制御盤で構成して全設備を集中制御する。

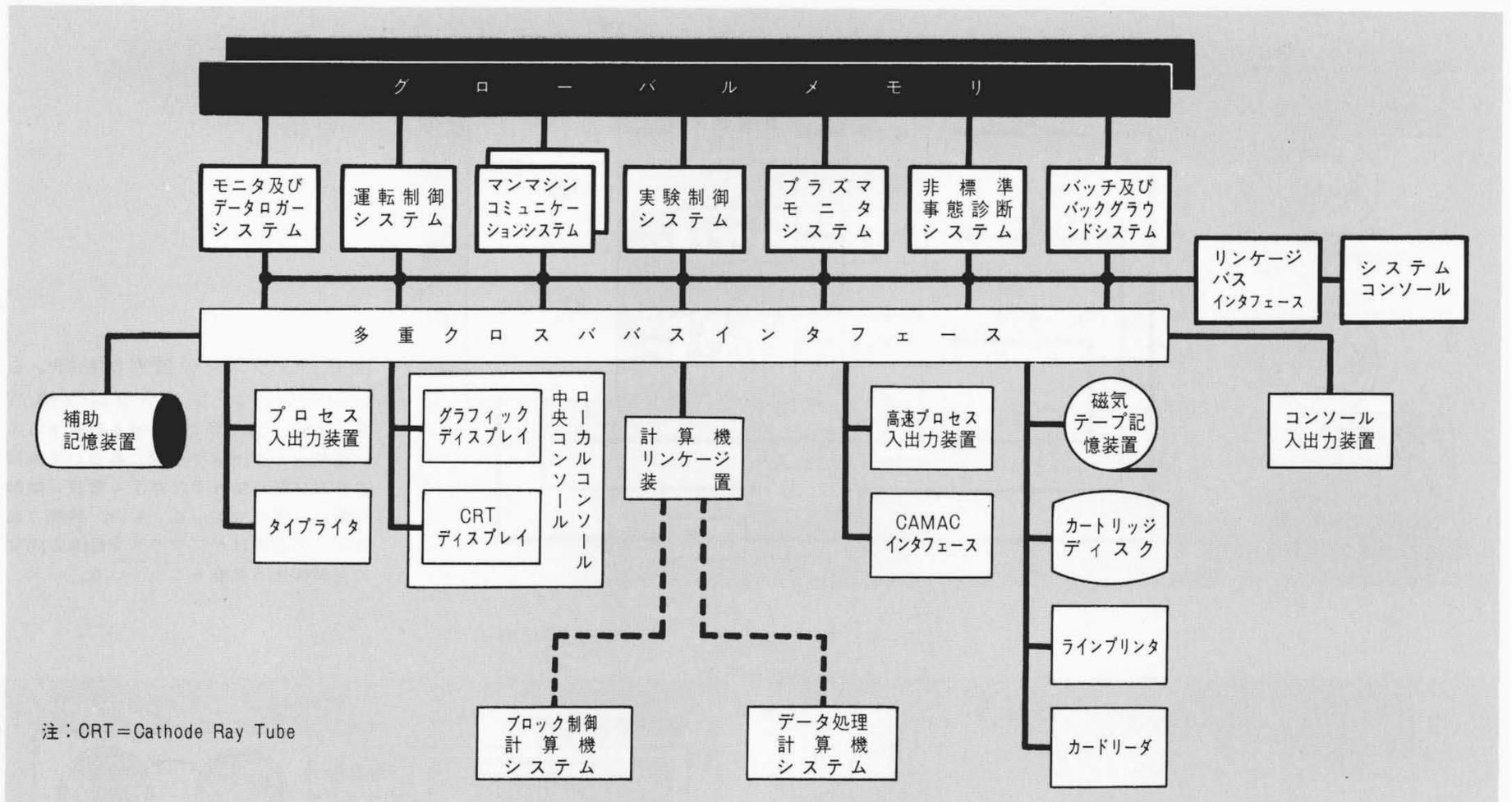


図3 全系制御計算機システム構成図 グローバルメモリを中核として、8台の中央処理装置がロードシェアを基本に $n:1$ バックアップのマルチコンピュータシステムを構成している。

3.3 計算機システム

全系制御設備では、応答性・信頼性〔MTBF (平均故障間隔)の大きさ〕が強く要求される保護インターロック盤を除いては、制御の特殊性から計算機を積極的に導入している。

計算機システムの構成に当たっては、次の点に留意し複数台の制御用計算機より成る $n:1$ バックアップのマルチコンピュータシステムとしている。

- (1) 実験時は、大量の情報を高速で処理する必要があるため、ロードシェアを基本としたマルチコンピュータシステムとする。
- (2) 複数台の計算機のそれぞれに独立性をもたせる一方、グローバルメモリにより情報を共有し、一体化したシステムとする。
- (3) 複数台の計算機に共通のバックアップシステムを設け、経済的で、かつ信頼性の高い計算機システムとする。

図3にシステム構成を示す。

4 プラズマ位置形状制御

4.1 位置形状制御の概要

JT-60では放電時間が長くなるため、プラズマ位置形状のフィードバック制御が行なわれる。プラズマの位置形状を制御することは、真空容器の中の容積を有効に利用するため、また、高温プラズマが真空容器にあたってこれを蒸発させないために重要である。このため、JT-60では水平位置、垂直位置及び断面形状を制御するために、それぞれ垂直磁場コイル、水平磁場コイル及び四重極磁場コイルを設け、これらのコイル電流をプラズマの位置のずれや変形量に従ってフィードバック制御する。特に、臨界プラズマ試験を目的とする世界のトカマク装置のうちで、断面形状制御まで可能な設計を行なっているのはJT-60だけである。プラズマの挙動を把握して、制御方法、制御装置設計を進めるためにデ

ィジタルシミュレーションを行なったので、その概略を以下に述べる。

4.2 トカマク回路論によるシミュレーション方法

トカマク装置は一種のトランスであるが、二次回路にあたるプラズマは導電性をもったガス体であり、その挙動は複雑である。しかし、プラズマと磁場との相互作用を電気回路的に扱い、集中定数化し、等価回路に置き換えることによって他の磁場の相互作用を表わす電気回路方程式と組み合わせた「トカマク回路論」¹⁾により記述される。これに基づいて、プラズマ位置形状制御特性のシミュレーションプログラムを開発した。図4にプログラム構成を示す。プログラムは、主回路部分と電源制御回路部分から成り、主回路部分では、回路方程式によって各磁場コイル電流、プラズマ電流、真空容器のうず電流などを計算し、更に、プラズマ運動方程式によりプラズマの位置形状を計算する。電源・制御回路部分では、主回路部分で計算されたプラズマの状態に基づいて制御演算を行ない、サイリスタ電源の出力電圧を計算する。電源・制御回路部分は、その構成を種々変更して解析できるようになっている。

4.3 シミュレーション結果

フラットトップ時に、平衡状態にあったところへ突然外乱磁場が印加された場合のシミュレーション結果の一例を図5に示す。同図よりフィードバック制御の有効性が分かる。

5 学習・最適化制御

本制御は、不確定要素の多いプラズマ実験の効率向上を図るために計画されている。本機能は、目的とするプラズマの状態量(プラズマ温度、密度、閉じ込め時間など)を実現するために、過去の運転・実験データを評価し、あらかじめ用意したプラズマ制御モデルを逐次改良して、将来の最適な実験パラメータを決定することにある。図6に本制御方式の概要

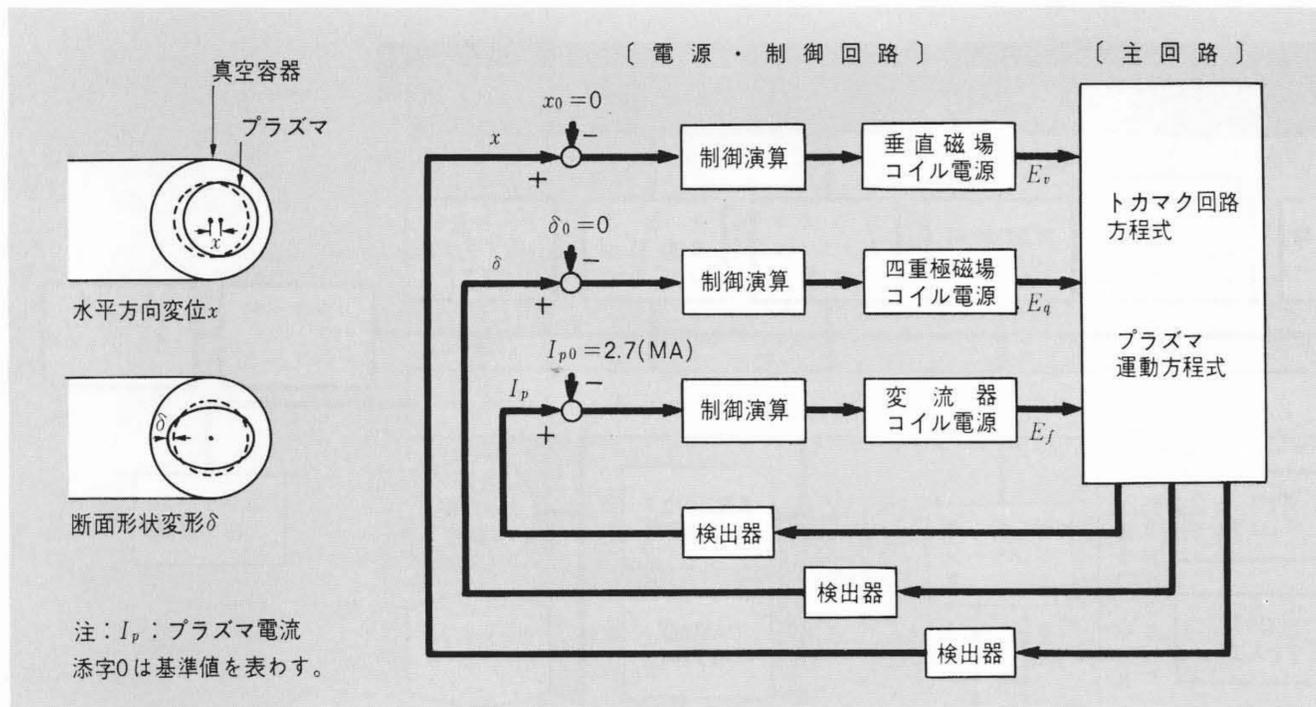


図4 プラズマ位置形状制御シミュレーションプログラムの構成
真空容器、プラズマの特性を計算する主回路部分とプラズマ状態に基づいて制御演算及び電源特性を計算する電源・制御回路から構成している。なお、実際の装置はこの図のほかにプラズマ垂直方向変位を制御する機能も持っている。

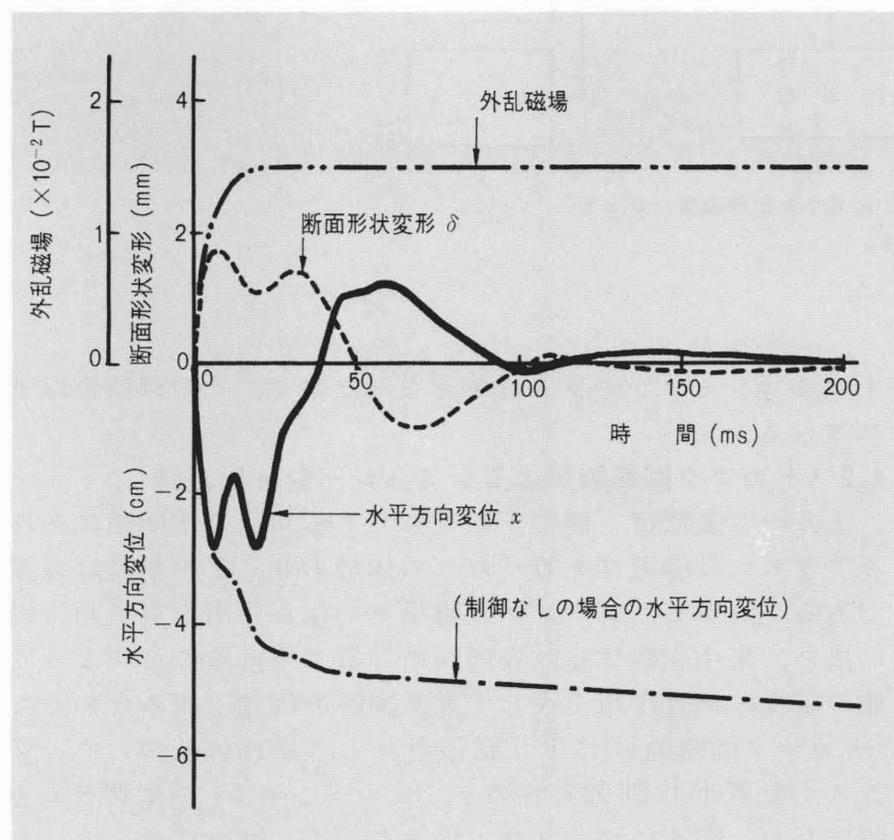


図5 垂直磁場外乱印加時のプラズマ位置形状制御のシミュレーション結果
制御がない場合にはプラズマは徐々に動き、水平方向変位は最終的には15cmに達するが、フィードバック制御により100ms程度で元に戻っている。

を示す。なお上記のプラズマ制御モデルは、プラズマ自体の特性とその挙動に関する制御系、電源、コイル、真空容器などを含む外部回路系のモデルを含めた、プラズマ制御動特性シミュレーションプログラムを単純化したものである。なお、プラズマ制御動特性シミュレーションプログラムは、次のような重要な目的を目指して現在開発中である。

- (1) JT-60の性能予測と実験計画の立案
- (2) 制御用ソフトウェアの開発
- (3) 本体、電源及び全系制御設備の設計データ作成

6 結 言

JT-60の制御で重要項目を要約すると下記のようなになる。

- (1) 大規模な実験装置のため、運転・実験のニーズから、計算機制御を中枢とした階層構造の分散化システムを採用する

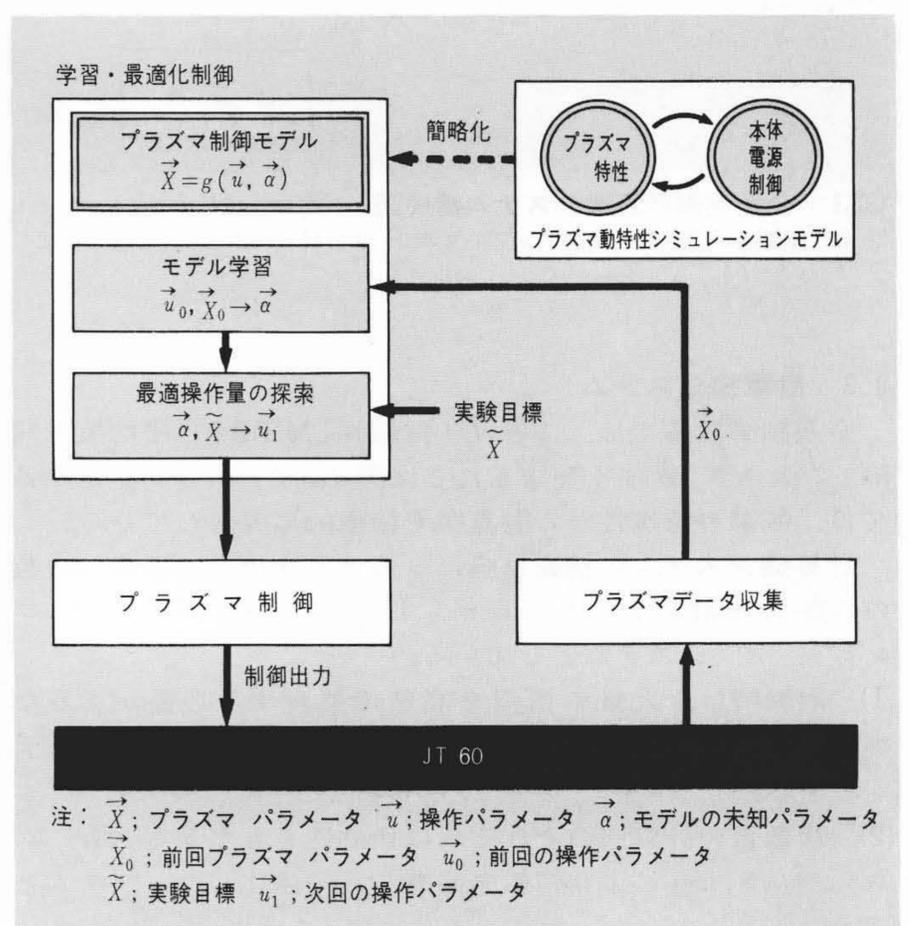


図6 学習・最適化制御方式の概要
過去の実験データからプラズマ制御モデルを改良し、次回の最適操作量を決定する。

- とともに、計算機化制御盤をもつ設備とする。
- (2) 海外の同規模の装置と比較しても、学習・最適化制御、プラズマの形状制御など斬新な機能をもっている。
 - (3) プラズマ位置形状制御のシミュレーション結果から、その有効性を確認し、引き続き制御方式を現在開発中である。
 - (4) JT-60制御の総合的な機能の検討と検証に有効な、プラズマ制御動特性シミュレーションプログラムの開発を進めている。

なお、引き続き世界のトップレベルを目指す本装置の性能を十分に引き出すために、全体の調和を図り合理的な制御システムの確立に努力したいと考える。

参考文献

- 1) Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata, A. Kameari and H. Aikawa : Japan. J. Appl. Phys. 16, 2237 (1977)