

臨界プラズマ試験装置“JT-60”全系制御設備の製作

Manufacturing of Central Control System of “JT-60” a Plasma Feasibility Experiment Device

臨界プラズマ試験装置JT-60を建設する上で、大規模核融合装置を安全かつ円滑に運転し、効率のよい実験の遂行を可能にする新制御システムの開発が必要であった。そのため、マルチコンピュータシステムを中核とし、CAMACシステム、タイミングシステム、保護インタロック盤などの制御装置から構成される全系制御設備を開発した。

本システムは、JT-60の制御系のかなめとして、全設備を統括監視制御し、多様な実験計画に対応した柔軟な運転制御を可能にするとともに、高温、高密度プラズマの高速実時間制御を実施している。

本論文では、全系制御設備のシステム構成、機能及び主要開発内容について述べる。

近藤育朗* *Ikuo Kondô*
 木村豊秋* *Toyoaki Kimura*
 村井勝治** *Katsuji Murai*
 射場大造** *Daizô Iba*
 竹丸浩一*** *Kôichi Takemaru*
 小林朋文**** *Tomofumi Kobayashi*

1 緒 言

日本原子力研究所では、核融合炉の前提となる臨界プラズマ条件の達成と、制御核融合の科学的実証を目標に、臨界プラズマ試験装置JT-60の建設を進めている^{1),2)}。

JT-60はプラズマを閉じ込める本体を中心に、多数の設備、機器から構成されており、臨界プラズマ条件を満足する高温、高密度プラズマを発生させるためには、これらの設備、機器を相互に密接な関係をとって運転するとともに、急速なプラズマの変動を適切に制御する必要がある。

全系制御設備は、JT-60の制御系の中核として、全設備を統括監視制御し、実験計画に対応した多様な放電条件に沿ったプラズマ放電を、安全かつ円滑に制御するシステムであり、最新の計算機制御技術と光信号伝送技術とを駆使して製作されている。

本設備は昭和58年3月に工場完成し、現在昭和60年4月からのプラズマ実験開始を目指して、試験運転を進めている。

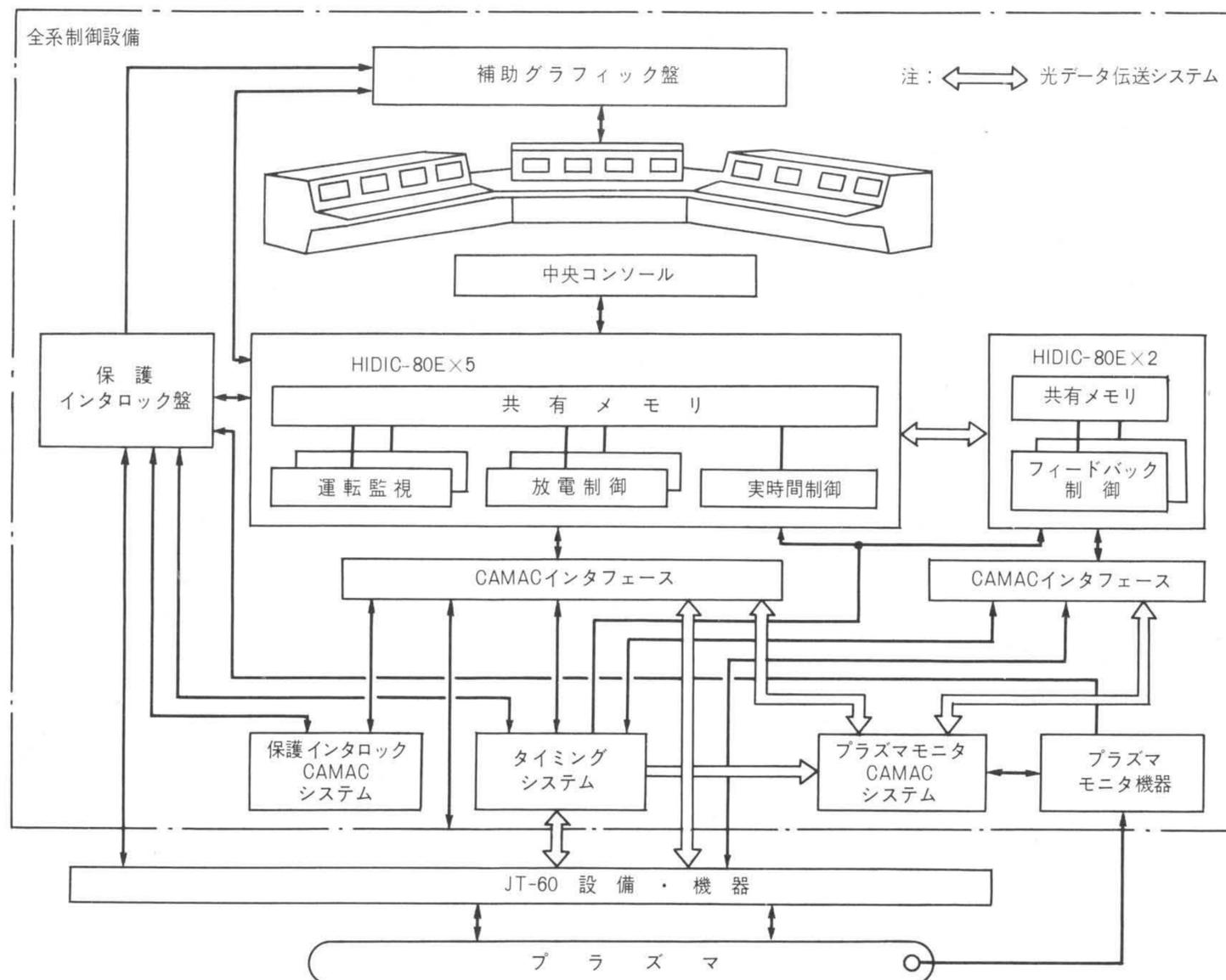


図1 全系制御設備のシステム構成 計算機システムを中核としたシステムであり、JT-60全設備を統括制御し、プラズマ実験の中核機能を果たすものである。

注：略語説明 CAMAC(Computer Automated Measurement and Control)

* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 工学博士 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立工場
 **** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士



図2 全系制御設備の外観 JT-60の運転及び実験は、中央制御室の計算機化制御盤による集中制御方式で行なわれる。手前から、総括コンソール、中央コンソール、補助グラフィック盤を示す。

2 全系制御設備の構成と機能

図1に全系制御設備のシステム構成を、また、図2に中央コンソールを中心とした全系制御設備の外観を示す。

全系制御設備は、運転監視、放電制御、実時間フィードバック制御を行なう計算機システムを中核とし、操作監視機能を集中した中央コンソールと補助グラフィック盤、高速、高精度のタイミング制御を行なうタイミングシステム、保護機能を集約した保護インタロック盤などから構成されている³⁾。

JT-60は多数の設備で構成されるため、設備間のインタフェースには国際規格であるCAMAC(Computer Automated Measurement and Control)規格を採用し、CAMACシステムによって各設備・機器との信号取合を行なっている。

また、強電磁場環境での耐ノイズ性能を確保するため、信号線には光ファイバケーブルを採用している。更に、プラズマの特性データを高速、高精度で収集するためのプラズマモニタ機器を備えている。このため、本システムではマイクロコンピュータ内蔵CAMACシステム、タイミングシステム、プラズマモニタ機器などを新しく開発し適用している。

表1に全系制御設備の主要機能を示す。

全系制御設備は、JT-60を構成するブロック設備を統括監視制御するものであり、運転監視、放電制御、実時間フィードバック制御、プラズマモニタ、保護インタロックなどの各機能をもっている。

3 設備統括運転監視システム

図3に設備統括運転監視システムの構成を示す。このシステムはJT-60を構成する全設備の統括監視と、円滑な運転制御を行なうものであり、中央コンソール及び補助グラフィック盤により集中運転監視ができるようにしている。

3.1 設備統括監視

JT-60各設備からの設備プロセスデータ、警報データ、統計処理データを定周期又はイベント発生時に収集し、中央コンソールのCRT(Cathode Ray Tube)に系統図表示、設備運転状態表示、警報監視表示を行ない、JT-60全設備を効率よく統括監視できるようにしている。

また、各設備の時刻を、全系制御設備の時刻で統一管理し、非標準事態発生時の各設備からのデータを用いて、原因解析、波及設備などの非標準事態診断を行なうことにより、設備異常に対する迅速な対応ができるようにしている。

3.2 全体運転制御

全体運転制御では、設備の起動から停止に至る一連の運転を、9種類の運転モードに分けて管理し、その結果を各設備運転のインタロック信号として与え、JT-60全体の放電実験準備の多様なステップを制御する新しい方式を開発し、適用

表1 全系制御設備の主要機能 全系制御設備のシステム分類と、その主な機能を示す。

項目	機能概要	
運転監視システム	プロセスデータ収集・加工	各設備からアナログ、デジタルのプロセスデータを定周期的又はイベントで収集し、工学単位変換し、データの監視、トレンド記録及びデータの統計処理を行なう。
	状態監視及び検査	運転モード、運転条件及び運転監視収集データを照合し、JT-60全体としての状態の検査を行ない、異常時には中央コンソールに表示する。
	運転モード及び設備運転の許可、禁止	運転モード、各設備の状態及び運転監視収集データを照合し、運転モード移行のための検査及び各設備の運転開始の許可、禁止を行なう。
	設備情報提供	運転モード、他設備関連情報など、設備が運転のために必要とする情報を提供する。
	非標準事態診断	放電中止など、非標準事態が発生したとき非標準事態の内容を検出、診断し、原因解析及び運転員に対する指示を行なう。
	記録作成	定周期記録、日報、月報、運転操作記録、警報記録及び放電記録を行なう。
放電制御システム	放電条件設定入力	放電を行なうための放電条件を、キャラクタCRT及びグラフィックCRTにより設定入力する。また、設定結果の合理性検査を行なう。
	放電条件設定出力	放電に先立って、各設備に放電条件及びプレプログラムの設定出力を行なう。
	放電前後検査	放電前に、放電条件の設定出力結果、設備の状態検査を行なう。放電後は、放電結果に対する検査を行ない、放電継続の可否を判断する。
	放電実時間制御及び監視	操作員の放電開始指令を受けて、各設備へのタイミングの指令出力、タイミングシステムのシーケンス監視など、放電シーケンスの実時間制御と監視を行なう。
	放電データ収集	放電時の各種時系列データ、タイミングデータなどを収集し、データの管理を行ない、グラフィックCRTなどに結果の表示を行なう。
実時間制御システム及びフィードバック制御システム	実時間制御システムは、プラズマの温度・密度の制御を行ない、フィードバック制御システムは、プラズマの電流・位置形状を制御する。	
プラズマモニタ	プラズマデータを、高速かつ高精度に取り込むシステムであり、その収集したデータはプラズマ制御に使用する。	
保護インタロックシステム	ハードワイヤード方式により、JT-60を構成する複数の設備間の保護協調をとる。	

注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

している。

この運転モードの安全円滑な移行と、移行後の安全運転維持を図ること、及びモード外運転設備の総合監視を目的として、各設備から収集した状態データを用いて、(1)運転モード移行検査、(2)運転モード維持検査、(3)装置・機器運転管理を行ない、JT-60設備全体の安全、円滑かつ柔軟な運転ができるようにしている。

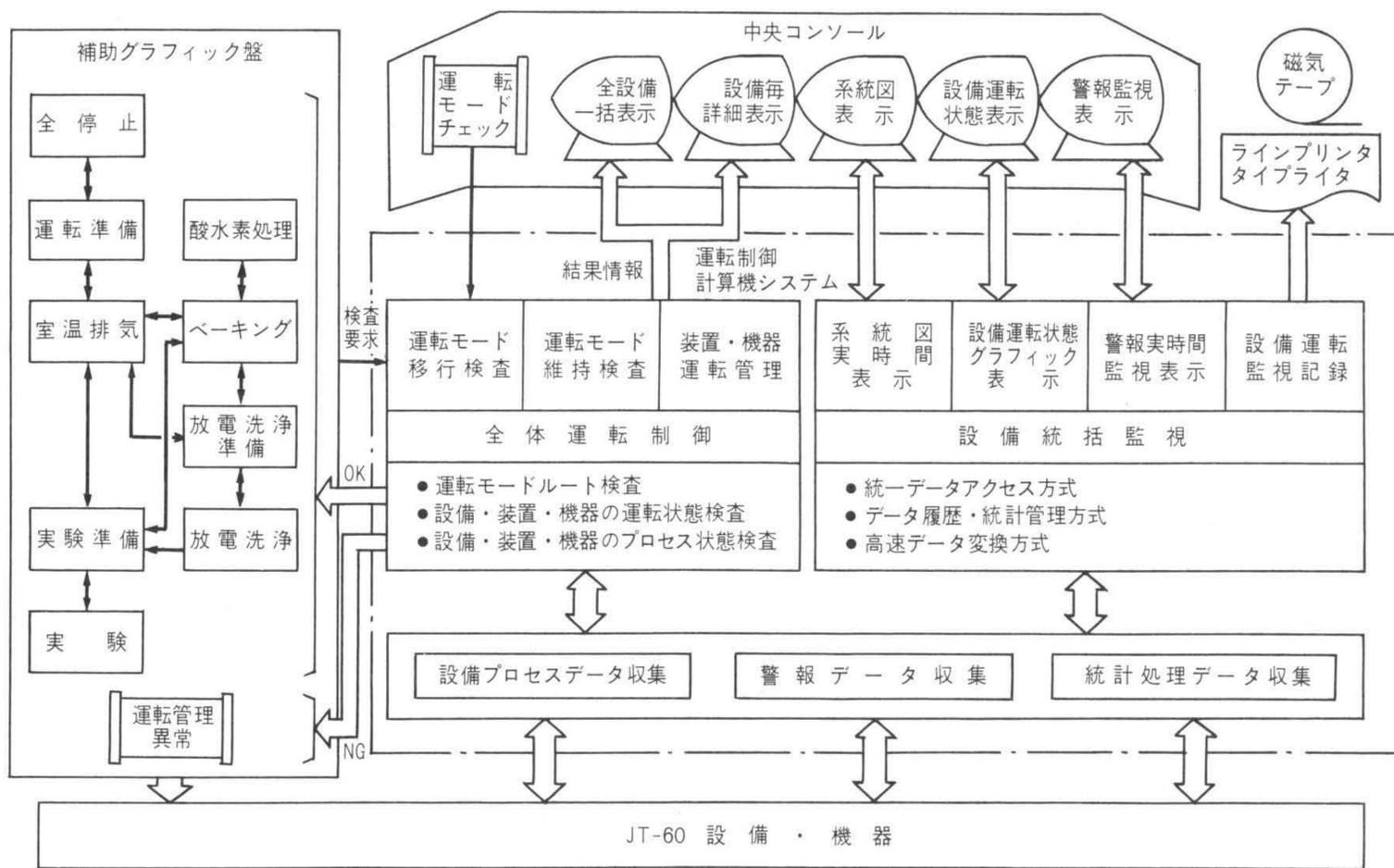


図3 設備統括運転監視システム構成
運転制御計算機システムと補助グラフィック盤を用いて、JT-60全設備の運転制御、統括監視を行なう。

4 プラズマ放電制御システム

図4にプラズマ放電制御システムの構成を示す。

JT-60の放電制御は、多面的なプラズマ放電実験を実現するため、多様な放電方式、設定パラメータに柔軟に対応する制御を行なう必要がある。そのため、放電に先立って、CRTより各種パラメータを放電条件として設定し、これに従って放電制御を行なうようにしている。

放電制御は、プラズマ放電に直接かかわる高精度のタイミング制御を必要とする制御と、放電前後の放電周期に基づく大局的なシーケンス制御の2種類に分けられ、前者をタイミングシステムが、後者を放電制御計算機が行なう2階層の制御システムを開発し適用している。

タイミングシステムは、再現性のあるプラズマ放電を実現するため、制御指令の時間精度の確保を目的として新しく開発したものであり、あらかじめ放電制御計算機から、時間条

件、論理判断条件を放電条件に従って設定しておき、ブロック設備の状態と時間条件を総合判断して、制御指令を出力することにより、JT-60全設備を高精度のタイミングでシーケンス制御している。

また、放電制御計算機は大局的な放電シーケンス制御を行なうとともに、制御の進行状況を実時間で補助グラフィック盤及びキャラクタCRTに表示し、また、放電後は収集した放電結果データを直ちにグラフィックCRTに表示して、円滑かつ確実な実験放電を可能にしている。

5 プラズマ実時間制御システム

5.1 プラズマ実時間制御方式

JT-60では、高温、高密度のプラズマを安定に維持するため、プラズマ電流、位置形状、温度及び密度の実時間制御を行なう。これらのプラズマパラメータは相互に密接な関係があり、また制御の操作量も、プラズマ制御用コイル電流、ガ

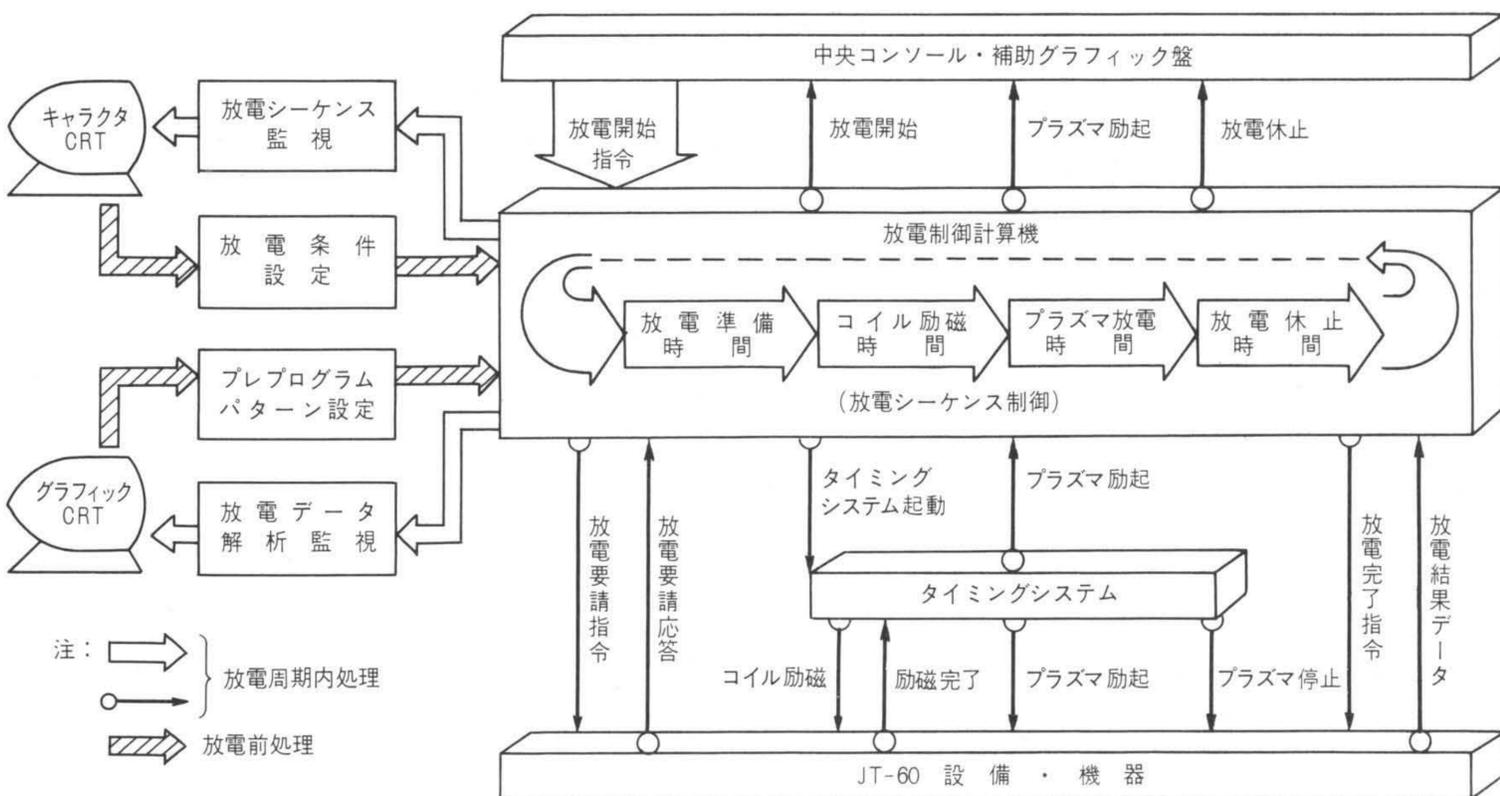


図4 プラズマ放電制御システム構成
放電制御計算機とタイミングシステムを用いて、柔軟性のある高精度シーケンス制御を行なう。

ス注入量及び第2段加熱出力(中性粒子入射加熱出力及び高周波加熱出力)から成るため、多変数制御方式による新しい制御を計画している。

図5にプラズマ実時間制御系の説明図を示す。

プラズマの制御特性は、回路方程式、プラズマ平衡方程式及び粒子・エネルギーバランス方程式を連立させることにより解析できる。これらの基本方程式は、非線形方程式であるため、線形化、簡素化し精度のよい簡易制御モデルを作成して、実時間制御に適用する。

なお、プラズマの制御特性は、不純物密度などのプラズマ状態によって影響を受け、不確定要素が多いため、実験データを評価し、制御モデルを逐次改良してゆく予定である。

5.2 プラズマ実時間制御システム構成

図6にプラズマ実時間制御システムの構成を示す。

プラズマ実時間制御は、フィードバック制御計算機によりプラズマの電流・位置形状を安定に維持制御するための高速制御を行なうマイナ制御ループと、実時間制御計算機により多数のプラズマパラメータを用いて、高度の制御アルゴリズムによりプラズマ温度、密度などのプラズマ特性を制御するメジャー制御ループから成るカスケード制御方式を新しく開発し、適用している。

また、タイミングシステムより、これらの制御ループを構成する多数の制御装置に対して、制御クロック信号あるいは制御タイミング信号を送出し、各装置間の同期のとれた制御を実現している。

プラズマ実時間制御では、プラズマ電流励起、第2段加熱、プラズマ電流低減などの時間帯(以下、フェーズと称する。)によりプラズマの制御内容が異なるため、プラズマ制御の進行状態に応じた制御を行なう必要がある。このため、各装置の制御状態、プラズマ状態及び制御進行情報を総合的に判断して、プラズマ制御状況のフェーズ管理を行ない、このフェーズ管理に基づいたプラズマ制御を行なうようにしている。

また、実時間制御計算機はプラズマ特性制御を行なう外に、不安定現象回復制御を行なっており、プラズマ不安定現象の発生を検知すると、タイミングシステムの制御クロックを高速に切り替えて、高速の不安定現象回復制御を行ない、不安定現象が回復すると、制御クロックを通常に復帰しプラズマ特性制御を再開するようにしている。

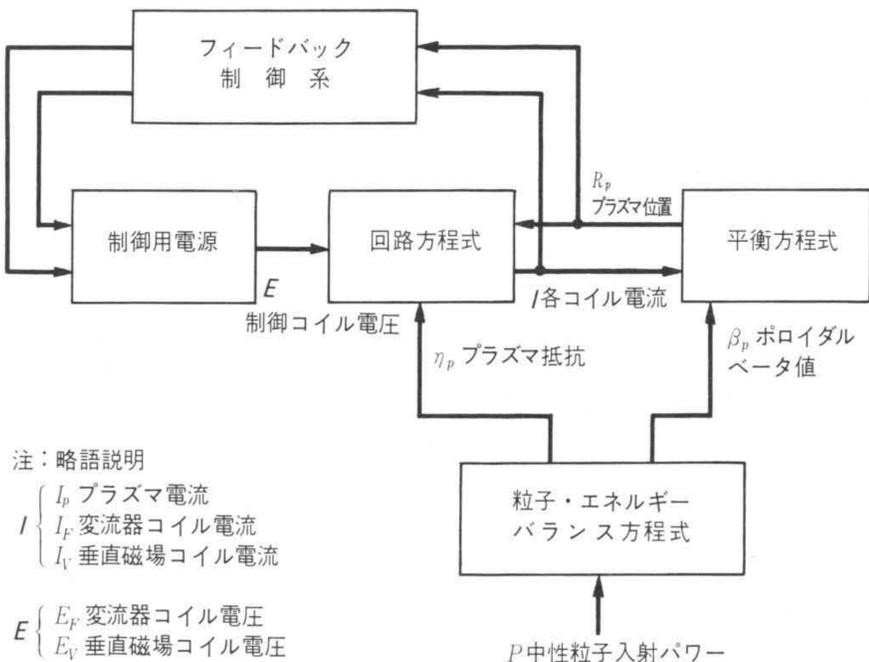


図5 プラズマ実時間制御方式説明 回路方程式は、等価回路で表わしたプラズマ及びポロイダル磁場コイル系を含む。平衡方程式はプラズマ位置、断面形状を解析し、粒子・エネルギーバランス方程式は、プラズマの温度・密度を解析するものである。

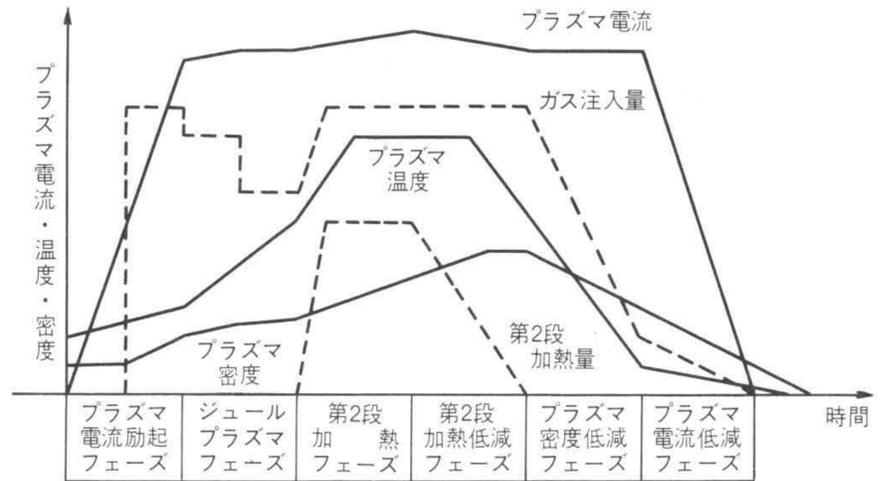
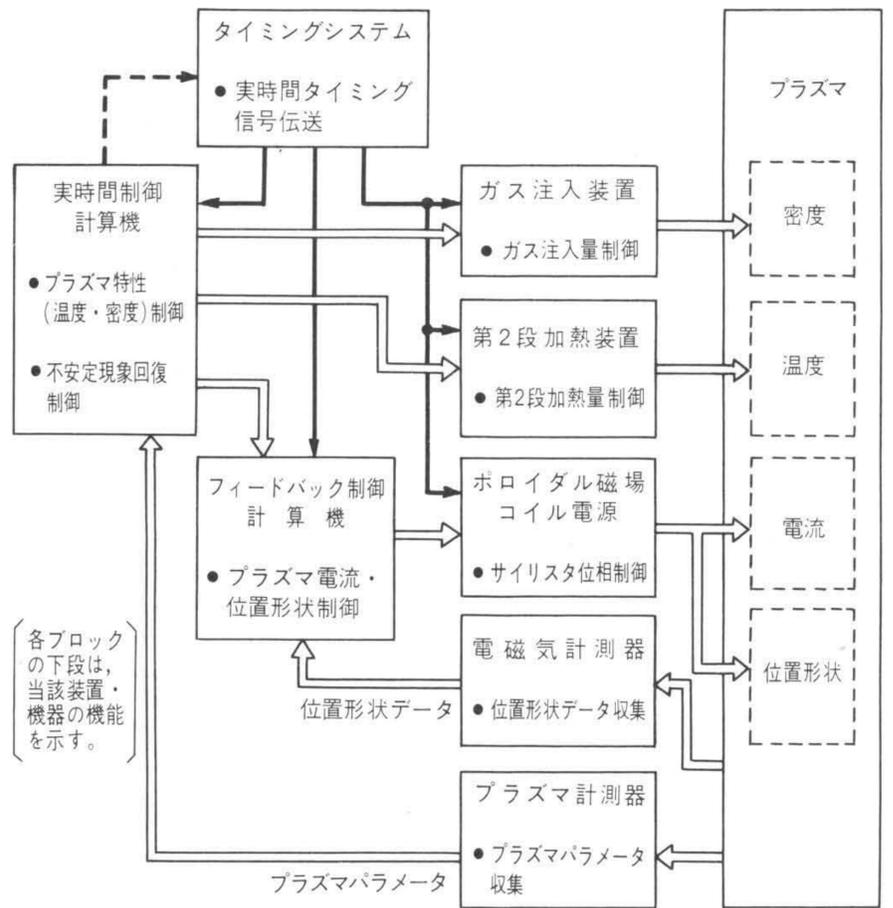


図6 プラズマ実時間制御システム構成 実時間制御計算機とフィードバック制御計算機を用いて、プラズマの電流・位置形状、温度・密度制御を行なう。

6 結 言

臨界プラズマ試験装置JT-60を統括監視制御する全系制御設備を開発し、昭和60年4月のプラズマ実験開始を目指して試運転を進めている。JT-60全系制御設備は将来の経済的な実用炉を志向した高β運転(β=プラズマ圧力/磁場の圧力)を行なうためのプラズマ実時間制御を計画しており、その成果が期待される。

本システムで開発した技術は、核融合制御の基本となるもので、その開発成果を踏まえて、次期装置を目指した核融合制御技術の開発に取り組んでゆく考えである。

終わりに、本システムの開発に当たり、御指導及び御協力いただいた関係各位に対し心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 鈴木, 外: 臨界プラズマ試験装置(JT-60)の制御, 日立評論, 60, 2, 91~94(昭53-2)
- 2) 斉藤, 外: 臨界プラズマ試験装置“JT-60”の製作, 日立評論, 62, 5, 349~354(昭55-5)
- 3) Y.Suzuki, et al.: in Proc. of the 9th Symposium on Engineering Problems on Fusion Research, San. Nov.'81