

JAERI-Tech  
2003-038



JP0350219



JT-60U電子サイクロトロン加熱装置用  
入射制御系システムの構築と改良

2003年3月

平内 慎一・篠崎 信一・佐藤 文明\*・鈴木 康夫\*  
横倉 賢治・森山 伸一・池田 佳隆

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所  
2150-22-4

1001-18341  
BCD-2003



研究情報部  
研究情報課

BCD-2003

本レポートは、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。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

JAERI-Tech 2003-038

## JT-60U電子サイクロトロン加熱装置用 入射制御系システムの構築と改良

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部  
平内 慎一・篠崎 信一・佐藤 文明\*<sup>1</sup>・鈴木 康夫\*<sup>2</sup>  
横倉 賢治・森山 伸一・池田 佳隆<sup>+</sup>

(2003年1月31日受理)

JT-60U電子サイクロトロン加熱 (ECH) 装置は、周波数110GHzの高周波によりJT-60Uプラズマに対し局所加熱/電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるものである。本装置は、4ユニットからなり各ユニットは、大電力の高周波を発生する大電力発振管 (ジャイロトロン)、それを駆動するための電源、発生した大電力高周波を伝送する伝送系及びプラズマに入射するアンテナ等から構成される。入射制御系の特徴は、プラズマ性能を向上させるため、アンテナの可動ミラーを駆動してプラズマへの高周波ビームの入射方向を制御し、偏波変換器のミラーを回転して高周波の楕円度や偏波角を任意に制御可能なことである。このシステム的设计、製作と運転経験をもとに行った改良について述べる。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

+ 原研・機構統合準備室

\*<sup>1</sup> 日本アドバンステクノロジー 株式会社

\*<sup>2</sup> 株式会社 原子力資料サービス

JAERI-Tech 2003-038

## Injection Control Development of the JT-60U Electron Cyclotron Heating System

Shinichi HIRANAI, Shin-ichi SHINOZAKI, Fumiaki SATO<sup>\*1</sup>, Yasuo SUZUKI<sup>\*2</sup>,  
Kenji YOKOKURA, Shinichi MORIYAMA and Yoshitaka IKEDA<sup>+</sup>

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

(Received January 31, 2003)

The JT-60U electron cyclotron heating (ECH) System injects a millimetric wave at 110 GHz into the JT-60 Plasma, and heats the plasma or drives a current locally to enhance the confinement performance of the JT-60 plasma. The system consists of four sets of high power gyrotrons, high voltage power supplies and transmission lines, and two antennas that launch electron cyclotron (EC) beams toward the plasma. The key features of the injection control system are steering of the direction of the EC beam by driving the movable mirror in the antenna, and capability to set any combination of polarization angle and ellipticity by rotating the two grooved mirrors in the polarizers. This report represents the design, fabrication and improvements of the injection control system.

Keywords: JT-60U, ECH, Antenna, Polarizers, Injection Control, Real Time Control

---

<sup>+</sup> Preparation office for JAERI-JNC

<sup>\*1</sup> Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

<sup>\*2</sup> Atomic Energy General Service Co., Ltd.

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. JT-60UECH装置.....	2
2.1 JT-60UECH装置の概要.....	2
2.1.1 大電力発振系.....	2
2.1.2 伝送系.....	2
2.1.3 アンテナ.....	2
2.2 JT-60UECH装置制御系の概要.....	3
3. JT-60UECH装置用入射制御系システム.....	6
3.1 入射制御系システムの概要.....	6
3.2 アンテナミラー.....	6
3.3 偏波変換器.....	7
3.4 ミラー制御プログラム.....	7
3.4.1 アンテナミラー制御プログラム.....	7
3.4.2 入射タイミング制御プログラム.....	11
3.4.3 偏波変換器制御プログラム.....	11
4. アンテナミラー駆動制御を用いた事例.....	34
4.1 高周波入射角度スキャン.....	34
4.2 アンテナミラー角度フィードバック制御.....	34
5. 偏波測定.....	36
6. まとめ.....	38
謝 辞.....	39
参考文献.....	39

## Contents

1. Introduction.....	1
2. JT-60U ECH System .....	2
2.1 Outline of the JT-60U ECH System .....	2
2.1.1 High-power Millimetric Wave Generator .....	2
2.1.2 Transmission Line .....	2
2.1.3 Antenna .....	2
2.2 Outline of the Control System for the JT-60U ECH System .....	3
3. Injection Control System for the JT-60U ECH System .....	6
3.1 Outline of the Injection Control System .....	6
3.2 Antenna Mirrors .....	6
3.3 Miter Bend Polarizers .....	7
3.4 Mirror Control Programs .....	7
3.4.1 Control Program of the Antenna Mirror .....	7
3.4.2 Injection Timing Control Program .....	11
3.4.3 Control Program of the Miter Bend Polarizers .....	11
4. Real Time Control of the Antenna Mirror .....	34
4.1 High speed scan of the Mirror Angle .....	34
4.2 Feed back Control of the Mirror Angle .....	34
5. Polarization Measurement .....	36
6. Concluding Remarks .....	38
Acknowledgements .....	39
Reference .....	39

## 1. はじめに

JT-60Uでは、電子サイクロトロン周波帯 (ECRF) のマイクロ波によりJT-60Uプラズマに対し局所加熱/電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるため電子サイクロトロン加熱 (ECH) 装置を用いている。JT-60UECH装置は、周波数110GHzの大電力発振管 (ジャイロトロン)、ジャイロトロン駆動用の各種電源、発生した大電力高周波を伝送する伝送系及びアンテナ等から構成されている。システム制御としては、高周波の発振を制御する大電力制御系と、ジャイロトロンで発生させた高周波を精度良くプラズマに入射させるための入射制御系がある。

この入射制御系システムには、二つの大きな目的がある。一つは、プラズマ入射方向を制御するためにアンテナの可動ミラーの駆動を行うことである。もう一つは、ジャイロトロンで出力される直線偏波を実験目的とプラズマへの入射角度に適した楕円偏波に変化させるための偏波変換器ミラーの回転角制御を行うことである。

本報告は、JT-60UECH装置用入射制御系の構築について記したものである。次章では、JT-60UECH装置の概要について、3章ではJT-60UECH装置用入射制御系の概要、制御方式、制御プログラムについて述べる。4章ではアンテナミラー駆動制御の実例、5章では偏波測定と実際に入射制御システムを使用した結果について述べ、6章でまとめを記す。

## 2. JT-60UECH装置

### 2. 1 JT-60UECH装置の概要

図1にJT-60UECH装置のシステム構成図を示す。JT-60UECH装置は4ユニットで構成されており、各ユニットは、大電力発振系で発生させた大電力高周波を内部を高真空に保たれた伝送系でアンテナまで導き、JT-60Uプラズマへ入射する。

#### 2. 1. 1 大電力発振系

大電力発振系は、周波数110GHz、最大出力1MW、パルス幅5秒の能力をもつジャイロトロン、そのジャイロトロンを駆動するためにジャイロトロン電極に給電を行う主電源及び加速電源、周波数に対応した強力な磁場を発生させるための超電導コイル、出力高周波を低損失な高周波モードに変換する整合器、ジャイロトロン発振出力測定時の模擬負荷等がある。

#### 2. 1. 2 伝送系

伝送系は、大電力発振管からアンテナまでの約60mの経路であり、主に内面に微細溝のあるコルゲート直線導波管、分散強化銅を鏡面仕上げしたミラーにより高周波を90度曲げるマイターバンド、高周波電力のモニタを行う方向性結合器、高周波の偏波（偏波角度、楕円度）を変える偏波変換器、JT-60U真空容器と伝送系との真空境界を形成するための人工ダイヤモンドを使用した真空窓、高周波を効率良く伝送する特殊機能を有した真空ゲートバルブ、伝送系内部を真空排気するための真空排気用導波管、及びジャイロトロンエージング時の模擬負荷等の低損失高周波伝送機器からなる。

#### 2. 1. 3 アンテナ

アンテナは、JT-60UP-17、P-18斜め上ポートに2基のアンテナを備えている。P-17アンテナには3ユニット（#1～3用）、P-18アンテナには1ユニット（#4用）で入射される。各アンテナは、入射系導波管、焦点鏡、平面鏡、駆動機構で構成されており、入射系導波管から導かれた高周波は、焦点鏡で高周波の空間的な拡がりを収束させ、平面鏡によりその入射方向を制御する構造となっている。



## 2. 2 JT-60UECH装置制御系の概要

図2にJT-60U高周波加熱装置の制御系システム構成図を示す。JT-60U高周波加熱装置の制御系システムは、LHRF、ECRF、ICRF設備のシステム制御を行っており、JT-60UECH装置の制御系は、その一部である。

JT-60UECH装置の制御系は、大電力制御系と入射制御系の二つの制御系から構成されている。大電力制御系は、シーケンサによりジャイロトロンを効率良く発振させるため、その周辺機器を制御するものである。一方、入射制御系は、主にPC/Windows2000を使用した独自に開発したプログラムによって、アンテナミラー及び偏波変換器ミラーの制御を行うものである。

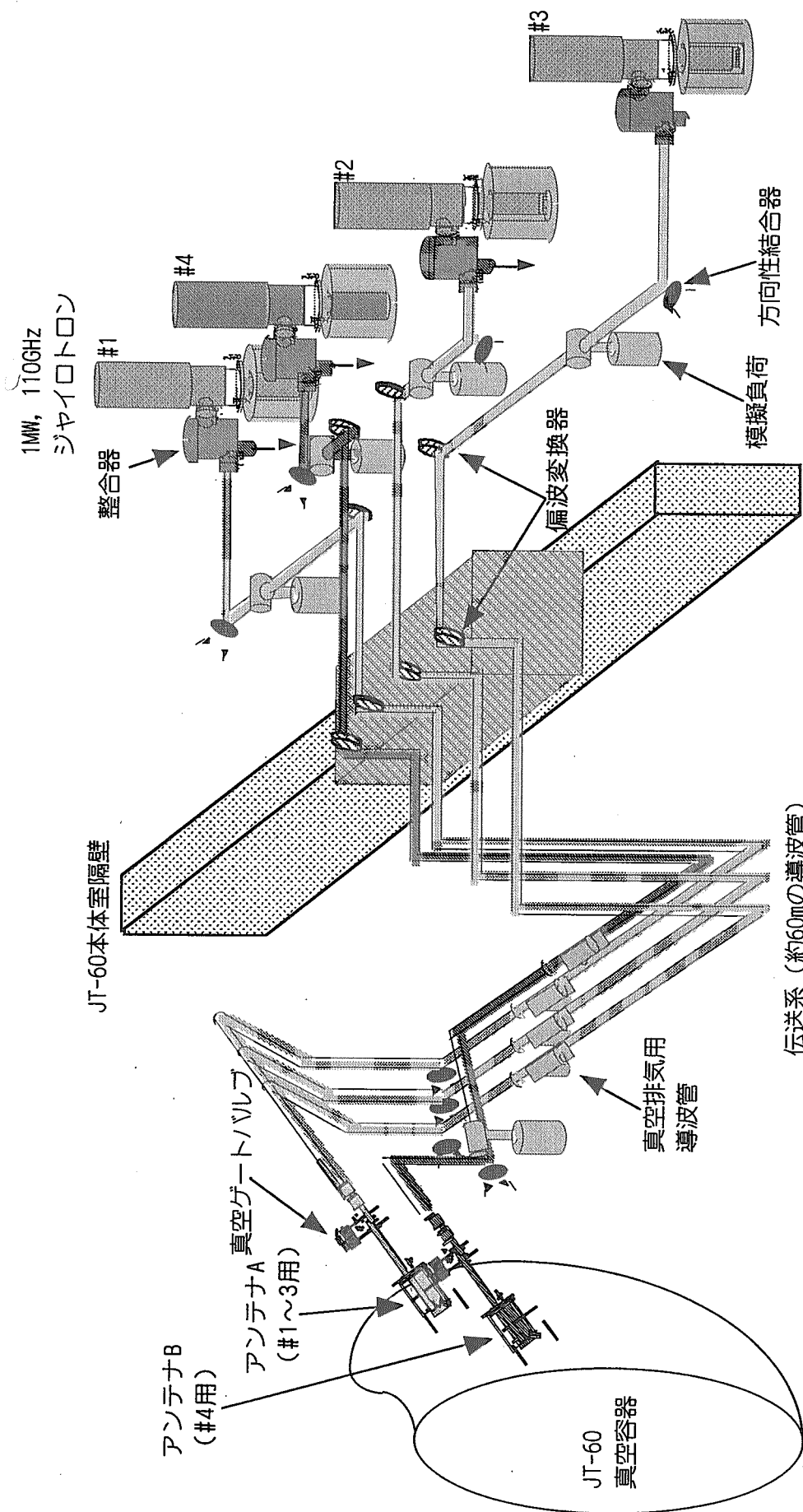


図1 JT-60U電子サイクロトロン加熱装置システム構成図

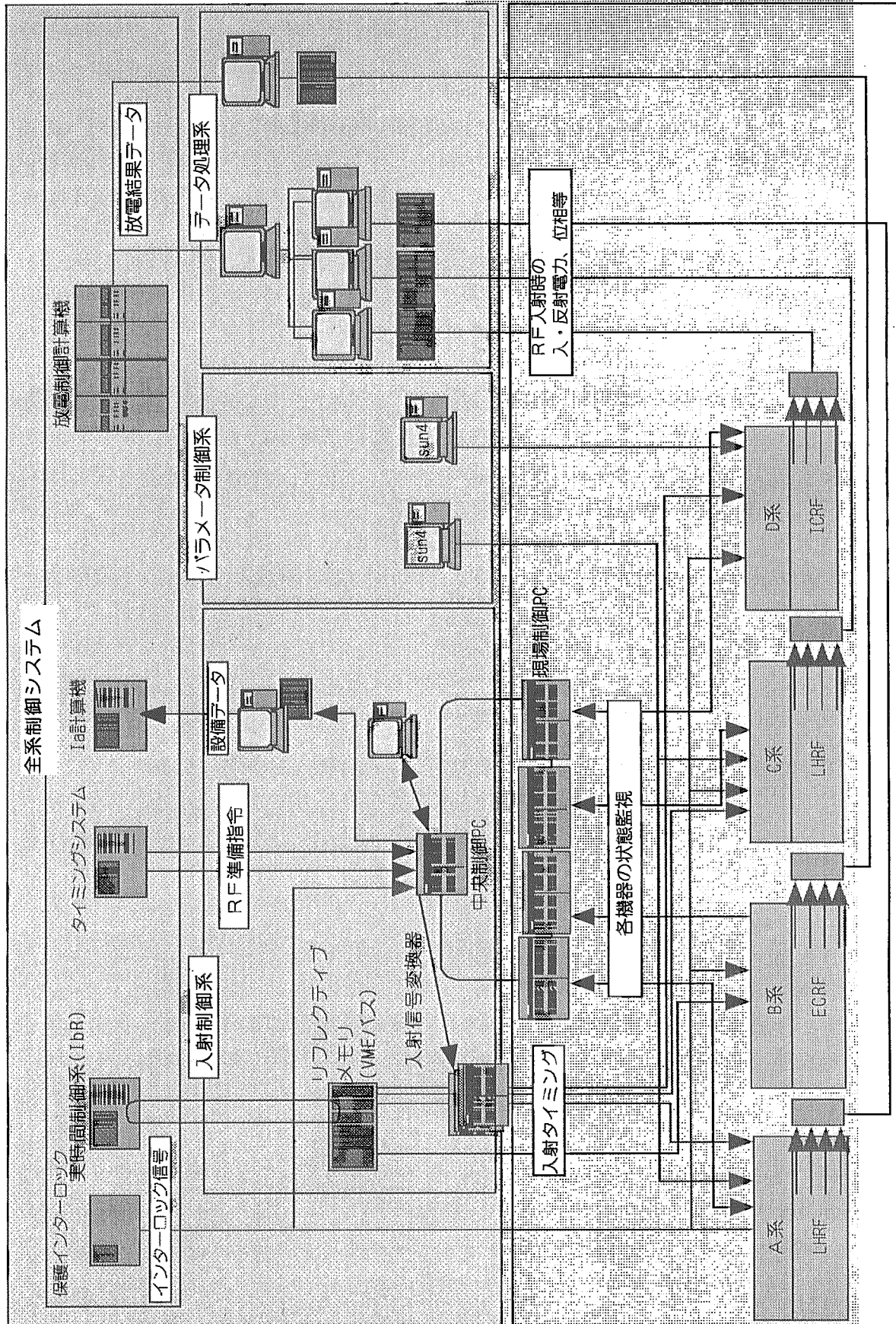


図2 JT-60U高周波加熱装置の制御システム構成図

### 3. JT-60UECH装置用入射制御系システム

#### 3.1 入射制御系システムの概要

図3にJT-60UECH装置用入射制御系システムの構成図を示す。JT-60UECH装置用入射制御系システムは、ジャイロトロンで発生させた大電力高周波を精度良くプラズマに入射させるためのものである。そのために、アンテナミラーの駆動を行ったり、偏波変換器ミラーの回転を行う制御システムである。

アンテナミラー及び偏波変換器ミラーの制御は、全てミラー制御装置(PC/Windows2000)にインストールされているアンテナミラー制御プログラム及び偏波変換器制御プログラムで行っている。ミラー制御装置と機器との取合いは、RS-232C通信としており、アンテナミラー制御用VMEコントローラ、焦点鏡制御器及び、偏波変換器制御用コントローラの各機器へ制御信号を出力して制御を行っている。図4にアンテナミラー制御用VMEコントローラ、図5にアンテナミラー現場制御部、図6に偏波変換器制御用コントローラを示す。

更に、本入射制御系の中心となるミラー制御装置は、RF増幅室Ⅱに設置してあるため中央制御室の操作用端末からTCP/IP通信を用いて遠隔操作を可能としている。表1にTCP/IP通信部の基本仕様を示す。

表1 TCP/IP通信部の基本仕様

	IPアドレス	ポート番号
ミラー制御装置	157.111.180.230	自動 (WINDOWS準拠)
操作用端末	157.111.180.231	自動 (WINDOWS準拠)

#### 3.2 アンテナミラー

アンテナミラーは、2枚の準光学鏡とその駆動装置を有している。準光学鏡の一つは入射した高周波の空間的な拡がりを凹面鏡で収束させる焦点鏡、もう一つは焦点鏡で反射させた高周波の入射方向を可変制御する平面鏡である。図7にアンテナA、アンテナBの構造を示す。

P-17アンテナ(アンテナA)では、トロイダル方向のビームを制御する焦点鏡は、20度固定とし、ポロイダル方向のビームを制御する平面鏡を可動している。アンテナAの焦点鏡は、JT-60Uのポートの空間的な制約から固定となっている。P-18アンテナ(アンテナB)は、焦点鏡、平面鏡共に可動し、トロイダル、ポロイダル方向のビームを制御する。

平面鏡は、両アンテナともにリンク機構を用いて可動軸を直線運動させることで

ミラーを回転させる方式で、駆動部にはACサーボドライバを使用している。アンテナBの可動焦点鏡は、電磁弁の指令値により駆動用のエアシリンダーに圧空を供給し、+20度から-20度まで回転させる構造になっている。図8にアンテナBの焦点鏡の構造を示す。

図9にアンテナA、アンテナBから入射される高周波軌道を示す。

### 3. 3 偏波変換器

JT-60UECH装置において、実験の目的に応じた偏波をもった高周波をプラズマ中に入射する必要があり、ジャイロトロンから出力される直線偏波を所定の楕円偏波に変換する偏波変換器が不可欠である。偏波変換器は、ジャイロトロンからアンテナまで伝搬させる経路に使用している。4ユニットで各2台ずつ使用し、計8台設置している。

偏波変換器は、溝付きミラーを回転させ、高周波の電場の向きと溝の向きの関係を変化させる事により直線偏波を任意の楕円偏波に変えることのできる機器で、モータを備えた回転ステージが組み込まれており、専用コントローラによってミラーの回転角を制御するものである。図10に偏波変換器の構造を示す。

### 3. 4 ミラー制御プログラム

#### 3. 4. 1 アンテナミラー制御プログラム

アンテナミラー制御には、一点制御及び全系プレプロ制御があり、選択することでその機能が使用できる。図11-1、11-2、11-3にアンテナミラー制御プログラムのフローチャートを示す。図12にアンテナミラー制御プログラムの制御選択画面を示す。

一点制御では、アンテナミラー制御用VMEコントローラ及び焦点鏡制御器へ制御信号を出力することで、指定角度へ駆動される。図13にアンテナミラー制御プログラムの一点制御画面を示す。

一方、全系プレプロ制御では、本入射制御系の上位制御系である全系制御設備（実時間制御系）からリアルタイムで出力されるアンテナミラー角度指令値をリフレクティブメモリより取得して、JT-60UECH装置と全系制御設備の取合いとなるVMEバス（ECH計算機）を介してミラー制御装置へ入力し、アンテナミラー制御用VMEコントローラ及び焦点鏡制御器へ制御信号として出力している。その際、全系から出力される角度指令値の周期10msは、ミラー駆動系の慣性重量とあそびを考慮して調整したサーボモータ系のフィードバック時定数に比べると短すぎるため、誤動作の原因となる。そこで、ミラー制御装置においてサーボモータが安定に動作することのできる100ms周期で角度指令値の検出を行い、アンテナミラー制御用VME

コントローラ及び焦点鏡制御器へ制御信号出力している。図14にアンテナミラープログラムの全系プレプロ制御画面を示す。表2-1、2-2にVMEコントローラとの通信仕様を示す。

表2-1 通信設定

通信ポート	ポートNO.1 (1~3P) . ポートNO.2 (4P)
通信速度	19200bps
文字長	8bit
パリティ	無し
ストップビット	1bit
ハンドシェイク	無し
RTSライン	有効
DTRライン	無効

表2-2 通信書式

コマンド	機能	応答	例
xx.x,	目標角度 設定	無し	00.0,
angl,	現在角度の 回答要求	xx.x,	angl, (xx.x,)
targ,	設定角度の 回答要求	xx.x,	targ, (xx.x,)
comp,	制御完了 回答要求	comp,	comp,
enab,	サーボモータ 起動	無し	enab,
disb,	サーボモータ 停止	無し	disb,

アンテナミラー制御プログラムの制御機能を以下に示す。

- (1) 角度指令値及び実測値の表示を行う。
- (2) 制限角度の設定、表示及び制限角度外の設定防止を行う。  
アンテナミラーの駆動範囲は、機器側でも設定しているが制限角度設定機能により運転可動範囲を制限する。表3にアンテナミラーの可動範囲を示す。
- (3) 全系から伝送されるアンテナミラー角度指令値をデジタルボードより検出を行う。表4にデジタルボードの通信仕様を示す。
- (4) アンテナ角度指令値のログ保存を行う。(全系プレプロ制御時)

表3 アンテナミラー可動範囲

	真空容器 温度	設定可能な 最小値	設定可能な 最大値
P-17平面鏡 (1~3P)	—	23.0度	52.2度
P-18平面鏡 (4P)	300℃	7.0度	20.0度
	150℃	7.0度	16.5度
P-18焦点鏡 (4T)	—	-20.0度	20.0度

表4 デジタルボード通信仕様

可動鏡	角度 (度)	インターフェイス コネクタ ピン番号	備考
1~3P	0.1	2	
	0.2	3	
	0.4	4	
	0.8	5	
	1.6	6	
	3.2	7	
	6.4	8	
	12.8	9	
	25.6	10	
	51.2	11	
-	-	12	予備
-	-	13	予備
-	-	14	予備
-	-	15	予備
-	-	16	予備
-	-	17	予備
4P	0.1	21	
	0.2	22	
	0.4	23	
	0.8	24	
	1.6	25	
	3.2	26	
	6.4	27	
	12.8	28	
	25.6	29	
	51.2	30	
4T	20	31	false:-20.0,true:20.0
偏波変換器	-	32	
-	-	33	予備
-	-	34	予備
-	-	35	予備
-	-	36	予備



### 3. 4. 2 入射タイミング制御プログラム

入射タイミング制御プログラムは、ECH計算機にインストールされ、全系制御設備（実時間制御系）からリフレクティブメモリに書き込まれるアンテナミラー角度位置を読み取り、ECH計算機上のデジタル出力に出力する。図15に全系制御設備とJT-60UECH装置制御系の信号取合いを示す。図16にリフレクティブメモリのメモリマップを示す。図17にECH計算機を示す。

### 3. 4. 3 偏波変換器制御プログラム

偏波変換器の制御においても、一点制御及び実時間プレプロ制御があり、それぞれ別プログラムで制御が行われる。図18に偏波変換器制御プログラムのフローチャートを示す。

一点制御では、偏波変換器制御用コントローラへ制御信号を出力し、指定角度へ偏波変換器ミラーを制御する。偏波変換器は、5章で述べるがプラズマ加熱及び電流駆動の効率を高めるために、主に実験で使用するOモード及びXモード時の偏波の最適化（偏波測定）が行われる。以前は、その最適化された偏波角を手入力により個々に設定し駆動していたが、実験でショット毎に変更するためショット間の短い時間で変更するのは時間も費やし、入力ミスも少なくなかった。対策として、偏波変換器制御プログラム上にOモード、Xモード時の角度として予め設定しておき、そのモード選択することにより設定された角度へ同時に8台の偏波変換器ミラーを制御することを可能とした。図19に偏波変換器制御プログラムの一点制御画面を示す。

一方、実時間プレプロ制御では、各時刻における偏波変換器の楕円度、偏波角が記述されたパラメータファイルを作成し、それを読取り指令値として偏波変換器コントローラへ制御信号を出力し、任意の偏波変換器を制御する。パラメータファイルの作成には、Microsoft Excel (\*.csv カンマ区切りファイルとして保存)を使用している。図20に偏波変換器制御プログラムの実時間プレプロ制御画面を示す。表5-1、5-2に偏波変換器コントローラの通信仕様を示す。

表 5 - 1 通信設定

通信ポート	ポートNO.3. NO.4. NO.5
通信速度	19200bps
文字長	8bit
パリティ	無し
ストップビット	1bit
ハンドシェイク	無し
RTSライン	有効
DTRライン	無効

表 5 - 2 通信書式

コマンド	機能	応答	例
(axis) MO	電源 ON	無し	1MO
(axis) MF	電源 OFF	無し	1MF
(axis) TP	現在角度 回答要求	xxx.xxx	1TP (xxx.xxx)
(axis) PAxx	目標角度 設定	無し	1PA30.5
(axis) QM?	モーター種別 回答要求	x	1QM? (x)
(axis) SLxx	左方向 角度制限	無し	1SL0
(axis) SRxx	右方向 角度制限	無し	1SR360
(axis) VAxx	モーター 速度設定	無し	1VA2.5

\*モーター速度については、機器側の仕様により「2.5度/秒」としている。

偏波変換器制御プログラムの制御機能を以下に示す。

- (1) 偏波変換器コントローラの適切な初期化を行う。
- (2) 使用可能な偏波変換器をプログラム起動時に自動検出を行う。
- (3) 制御実行開始信号として高周波電流駆動装置制御系の同期信号をデジタルボードより検出を行う。デジタルボードは、アンテナミラー制御信号入力ボードを使用している。(表4)
- (4) 角度指令値及び実測値の表示を行う。  
実測値の取得周期については、1msec~14999msecの間で設定することが可能である。
- (5) 制御ログの保存を行う。表6に実際に取得され制御ログを示す。

表6 取得された制御ログ

日付 (week, month, day, time, year)									
経過 (msec)	#1 増幅室	#1 本体室	#2 増幅室	#2 本体室	#3 増幅室	#3 本体室	予備	#4 増幅室	#4 本体室
}	}	}	}	}	}	}	}	}	}

Fri Sep 21 15:07:11 2001									
188	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
304	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
408	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
512	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
616	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
722	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
827	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
930	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
1075	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
1224	0	0	0	0	0	0	*****	0	0
1338	0	0	0	0.1	0.1	0.1	*****	0.1	0.1
1445	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	*****	0.2	0.2
1553	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	*****	0.4	0.4
1661	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	*****	0.7	0.7
}	}	}	}	}	}	}	}	}	}
10203	19.5	19.5	19.5	19.5	19.6	19.6	*****	19.6	19.6
10304	19.7	19.7	19.7	19.7	19.8	19.8	*****	19.8	19.8
10405	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	*****	19.9	19.9
10512	20	20	20	20	20	20	*****	20	20
10617	20	20	20	20	20	20	*****	20	20
10723	20	20	20	20	20	20	*****	20	20
10828	20	20	20	20	20	20	*****	20	20
10933	20	20	20	20	20	20	*****	20	20

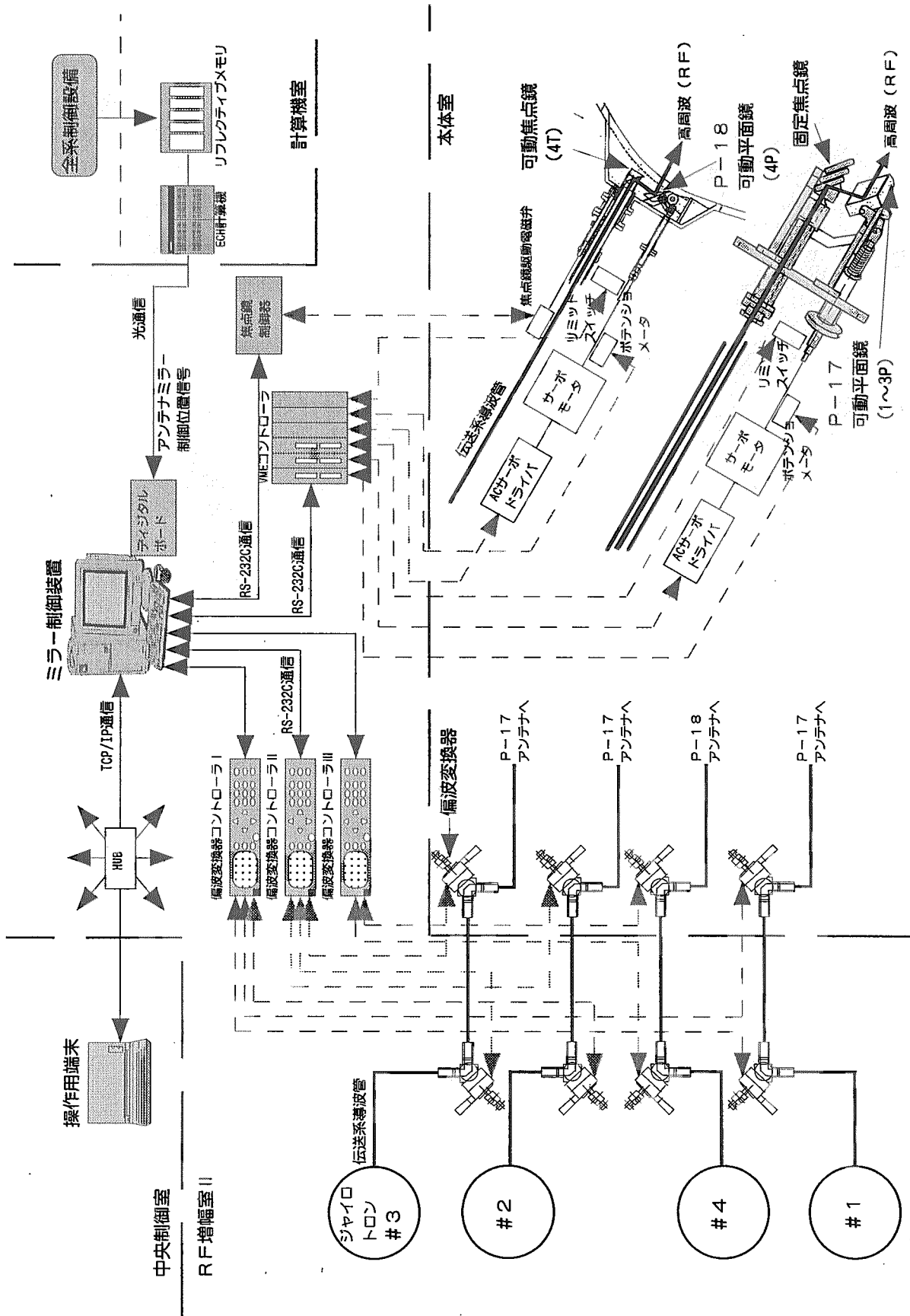


図3 JT-60U ECH装置用入射制御システム構成図

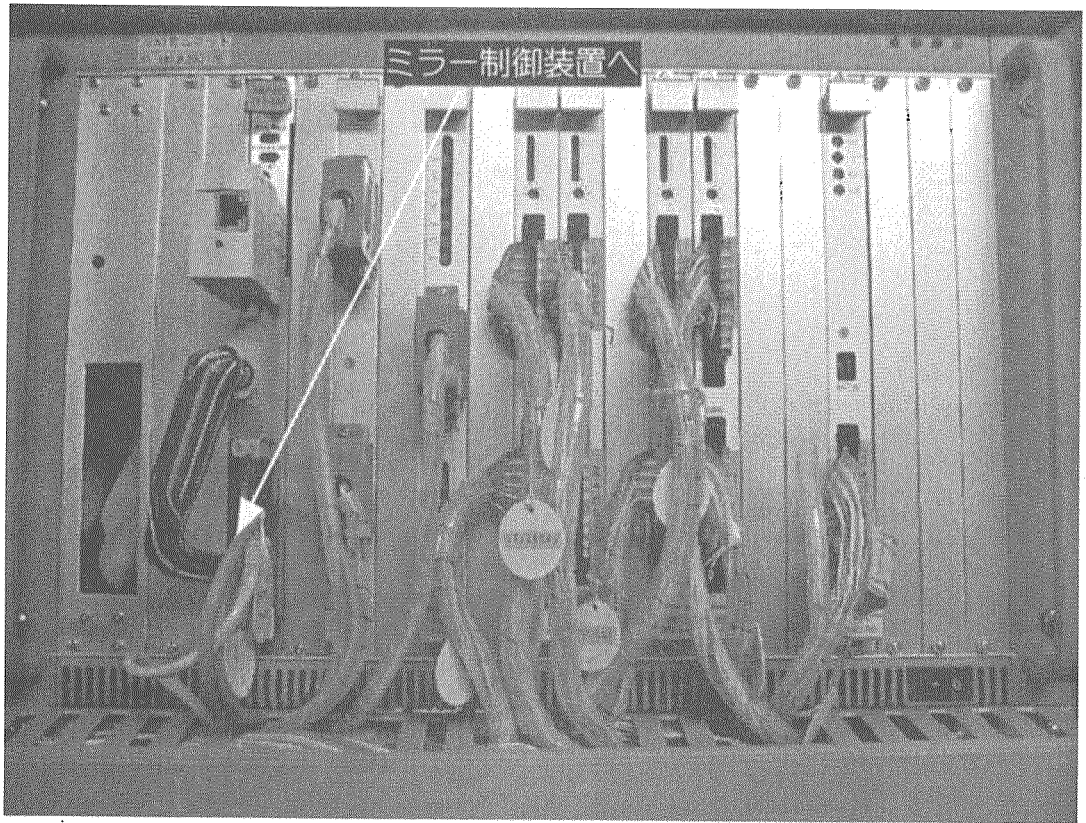


図4 アンテナミラー制御用VMEコントローラ

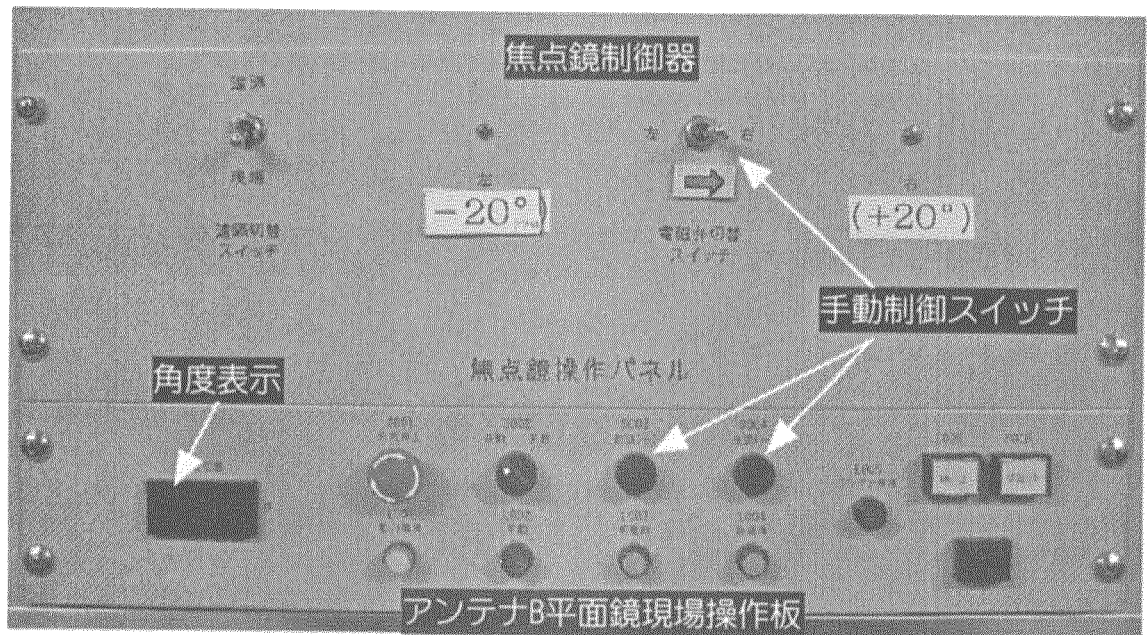


図5 アンテナB現場制御部

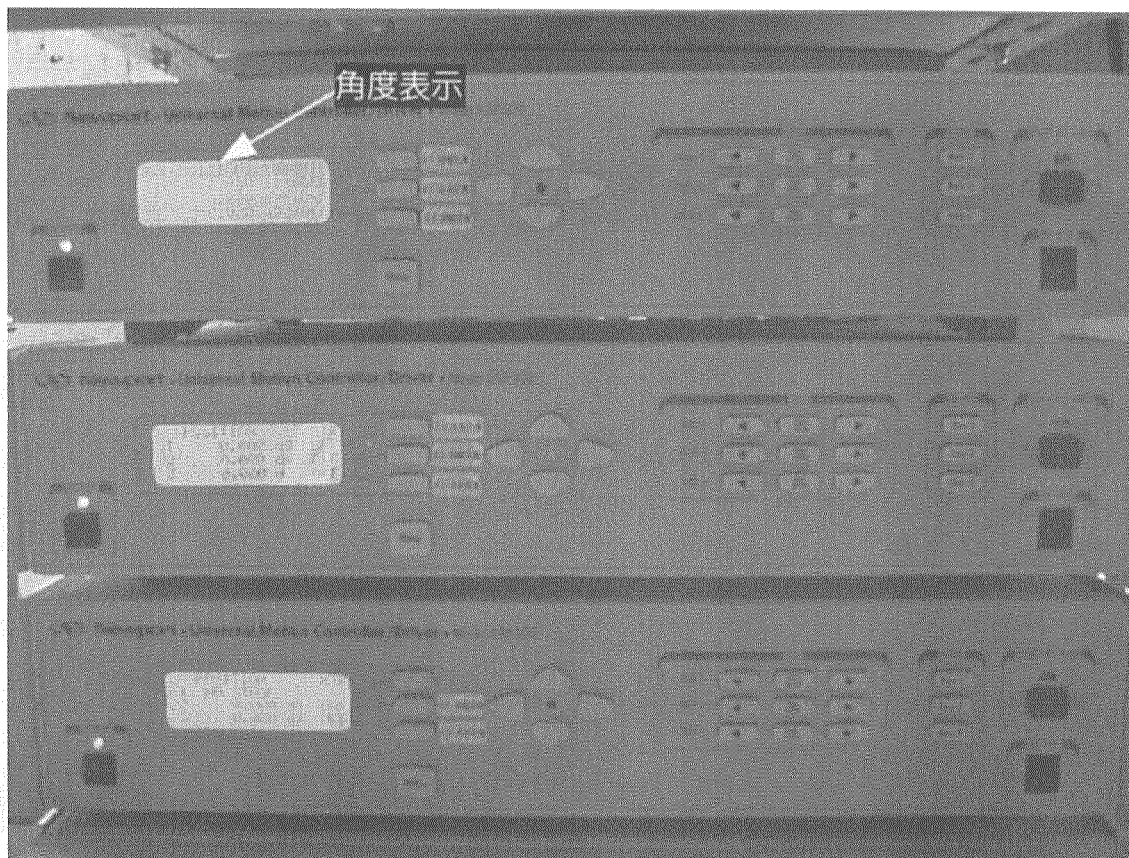
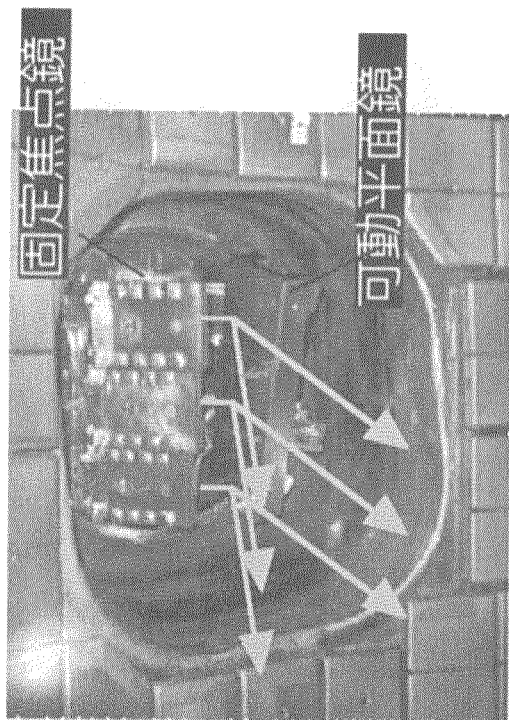


図6 偏波変換器制御用コントローラ

アンテナA



アンテナB

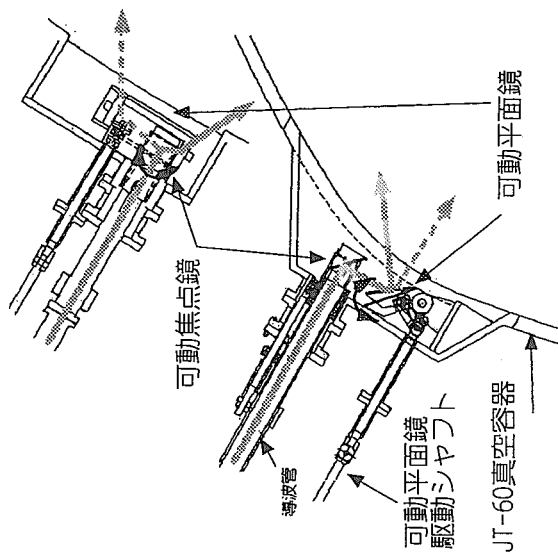
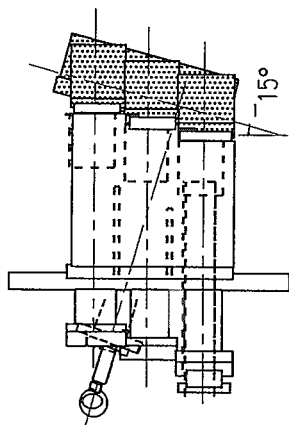
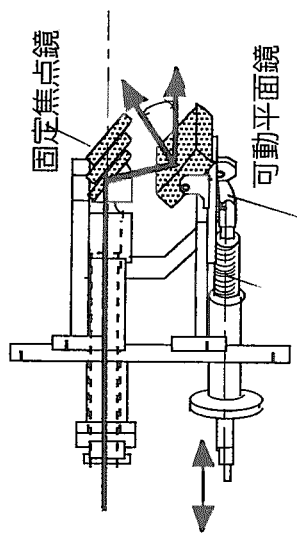
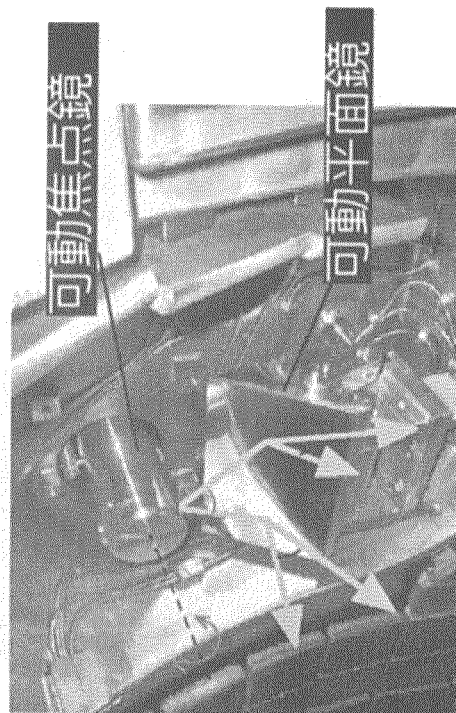


図7 アンテナA、アンテナBの構造



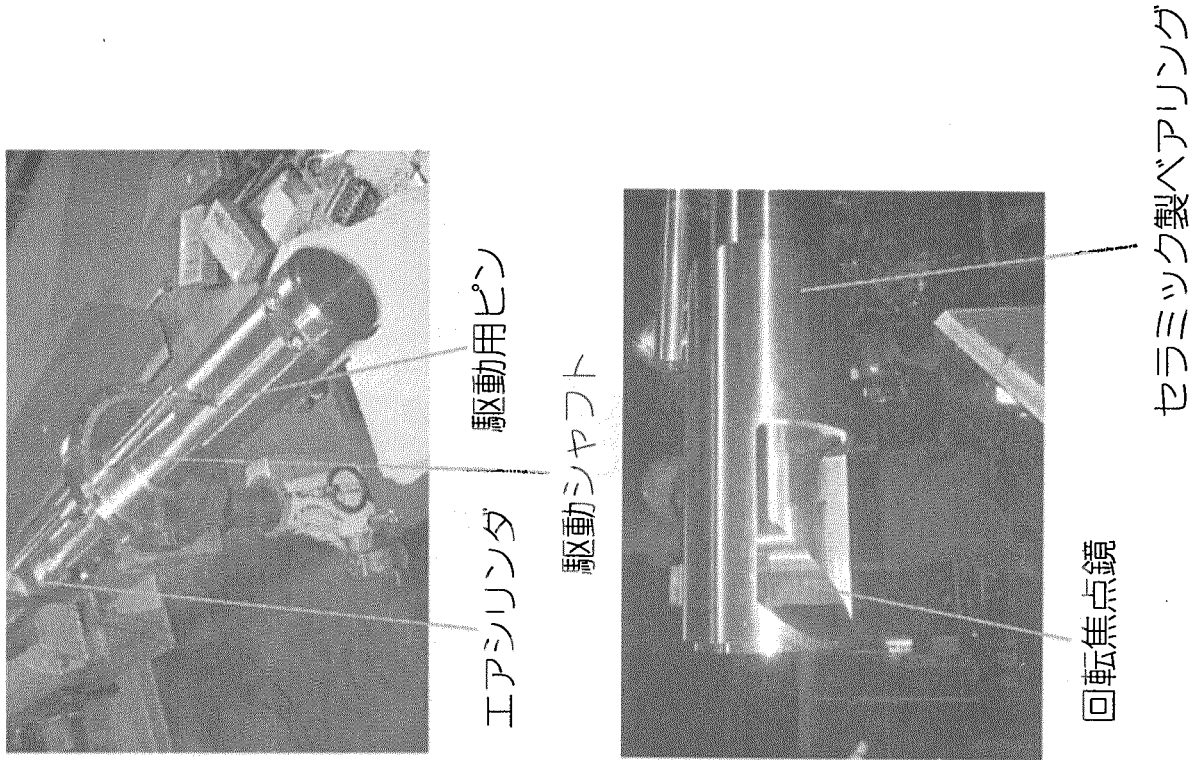


図8 アンテナB焦点鏡の構造

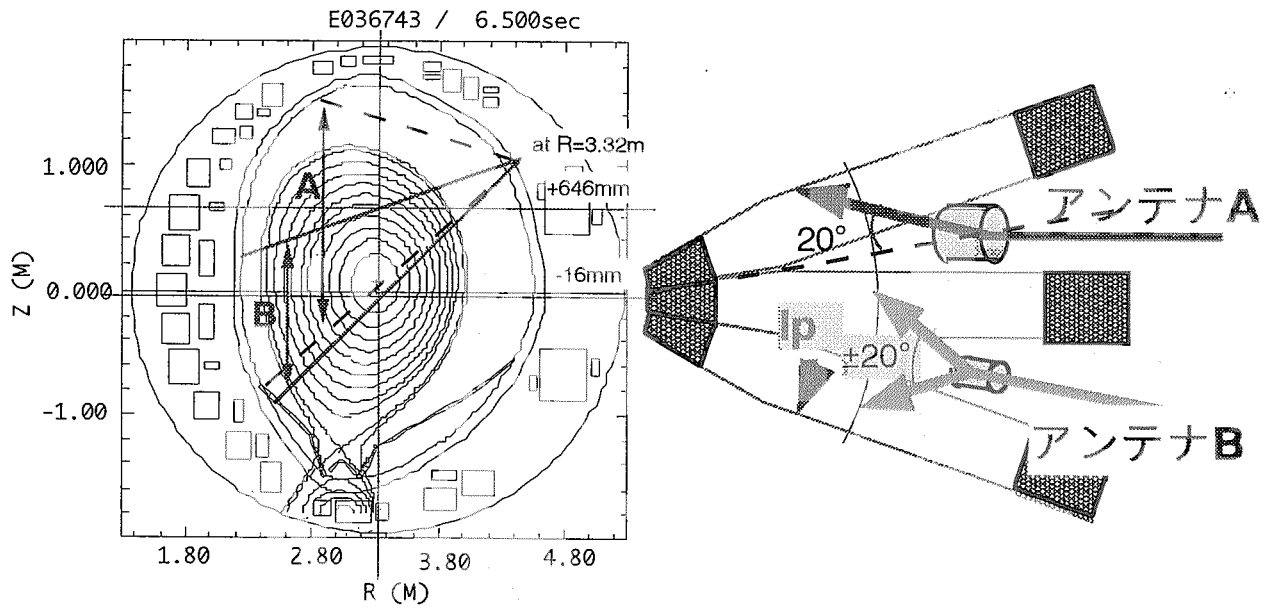


図9 アンテナA、アンテナBからの高周波入射軌道



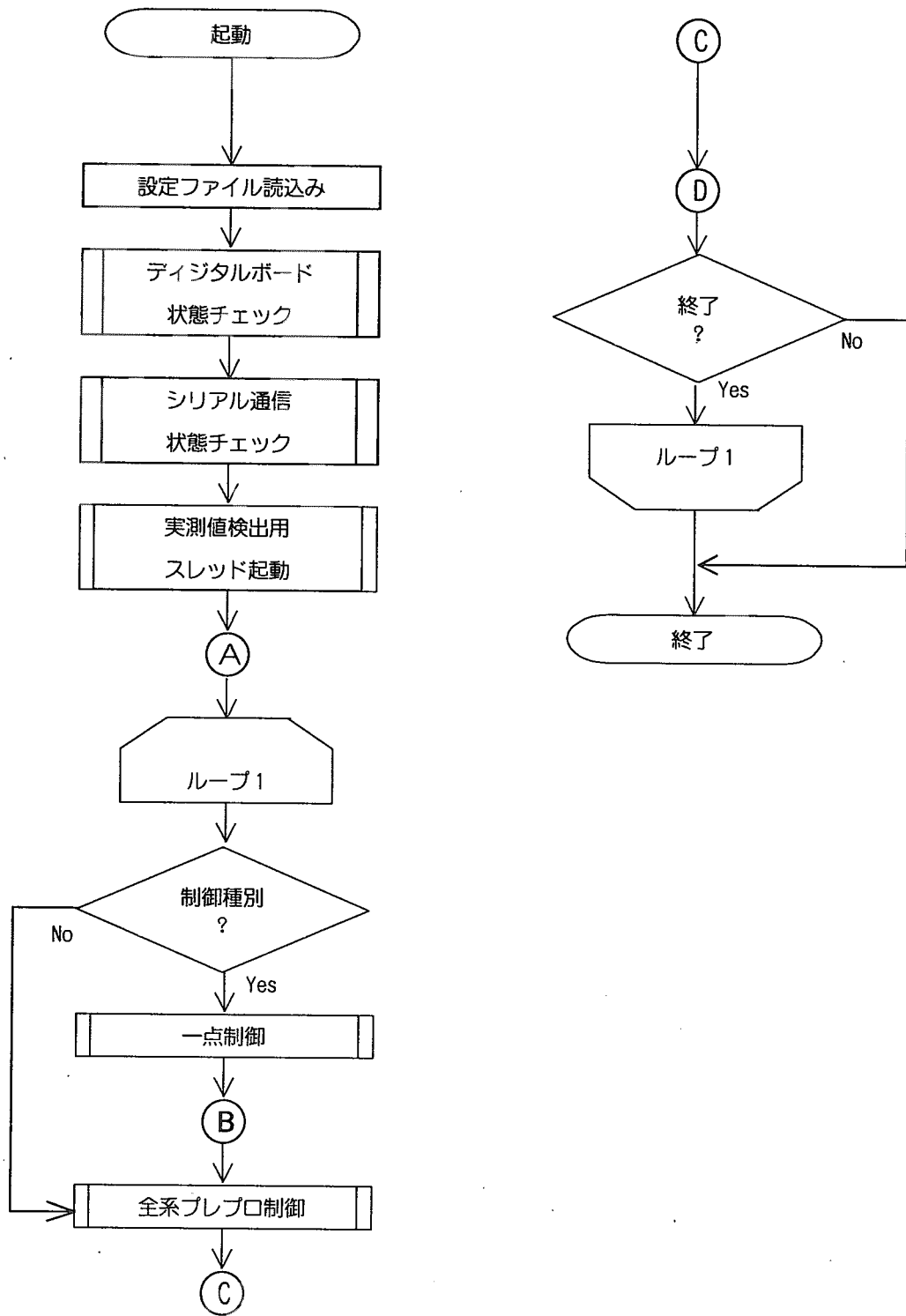


図 11-1 アンテナミラー制御プログラムフローチャート

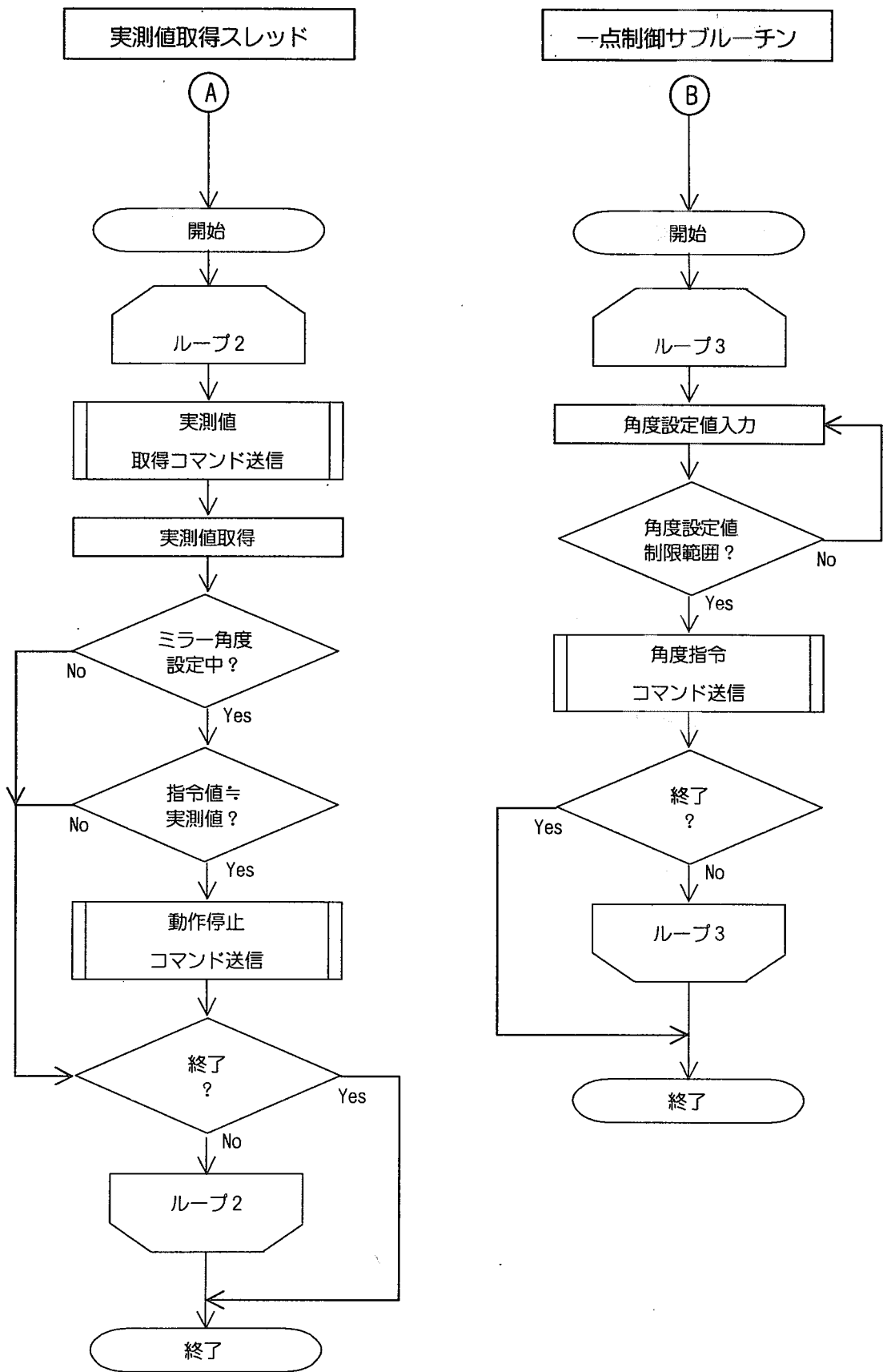


図11-2 アンテナミラー制御プログラムフローチャート

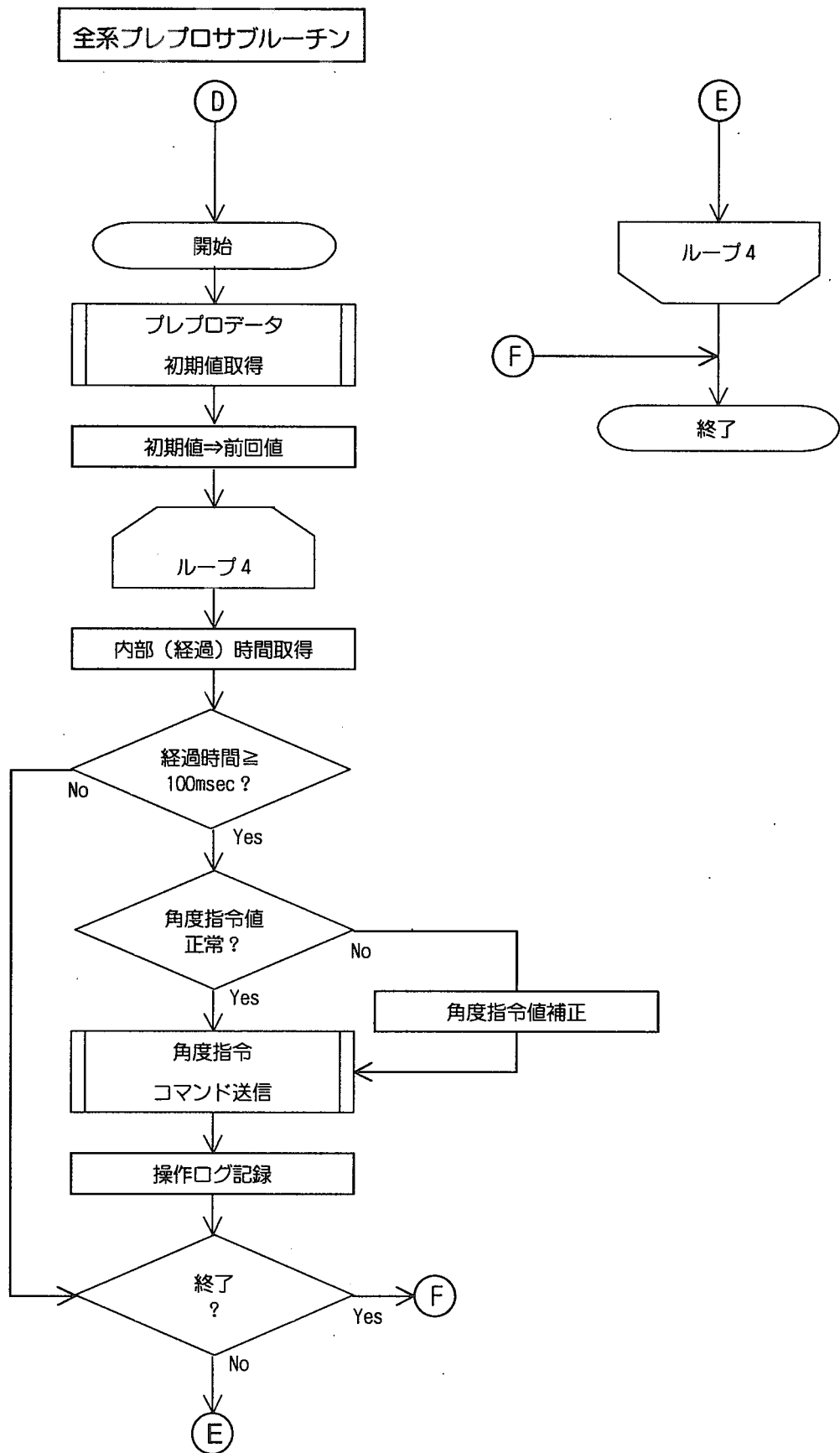


図 1 1 - 3 アンテナミラー制御プログラムフローチャート

A. 制御種別の選択  
制御種別の選択を行う。  
選択できる項目は、一点制御、全系プロ制御の2点とする。

B. 現在角度の表示  
現在のアンテナミラーの角度表示を行う。

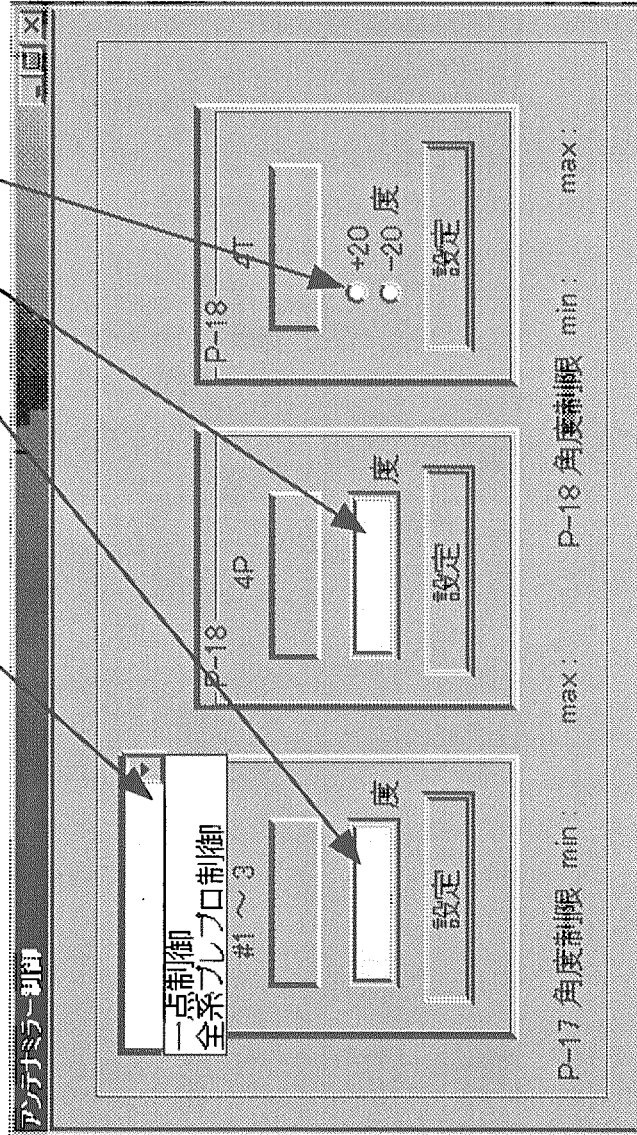
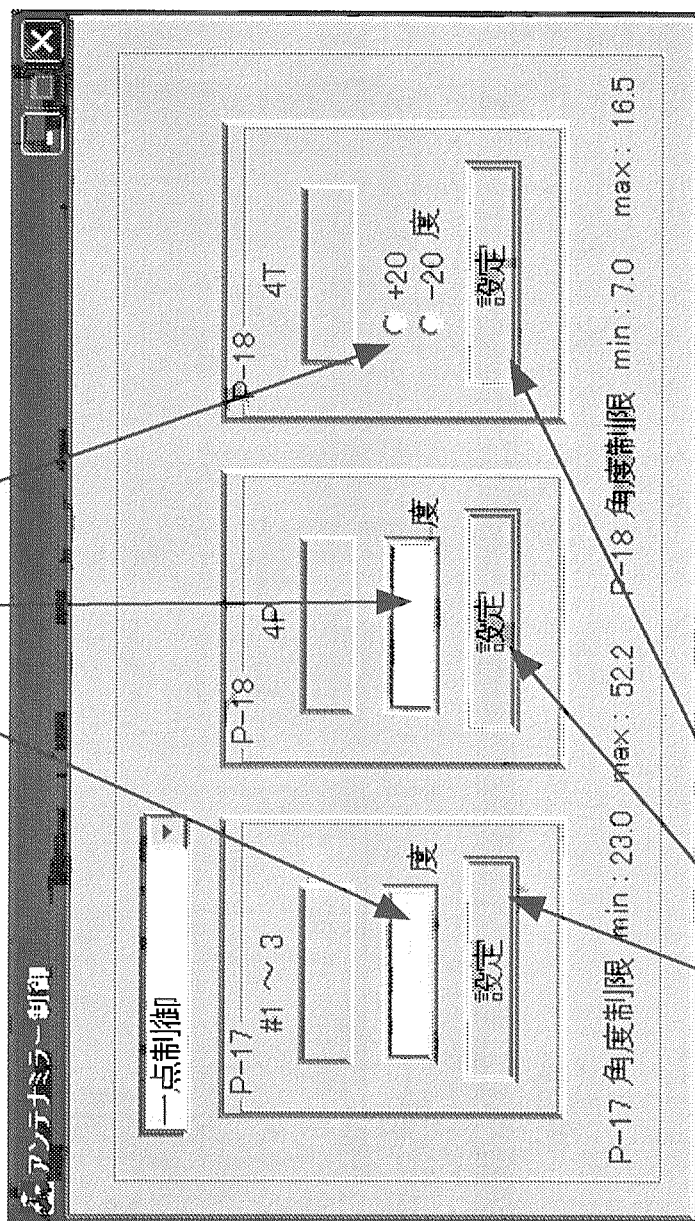


図 12 アンテナミラー制御プログラム制御選択画面

A. 目標角度の入力  
目標角度の入力を行う。  
トロイダル方向への角度設定は、+20、-20度のみの設定が可能となっている。



B. 目標角度の設定  
目標角度への制御を行う。

図 13 一点制御画面



A. 全系の角度要求  
全系制御設備から送信される目標角度の表示を行う。  
\* 目標角度への制御は、制御種別として全系プロ制御を選択した時点から自動的に行われる。ただし、選択後の初期値での駆動は行わないものとする。

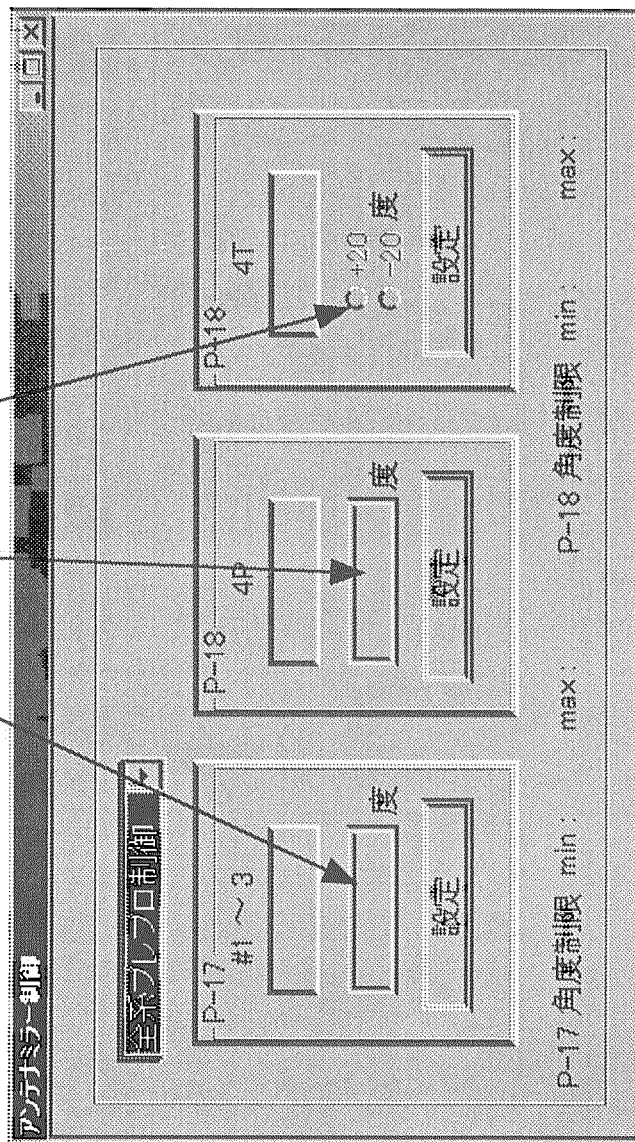


図 14 全系プロ制御画面

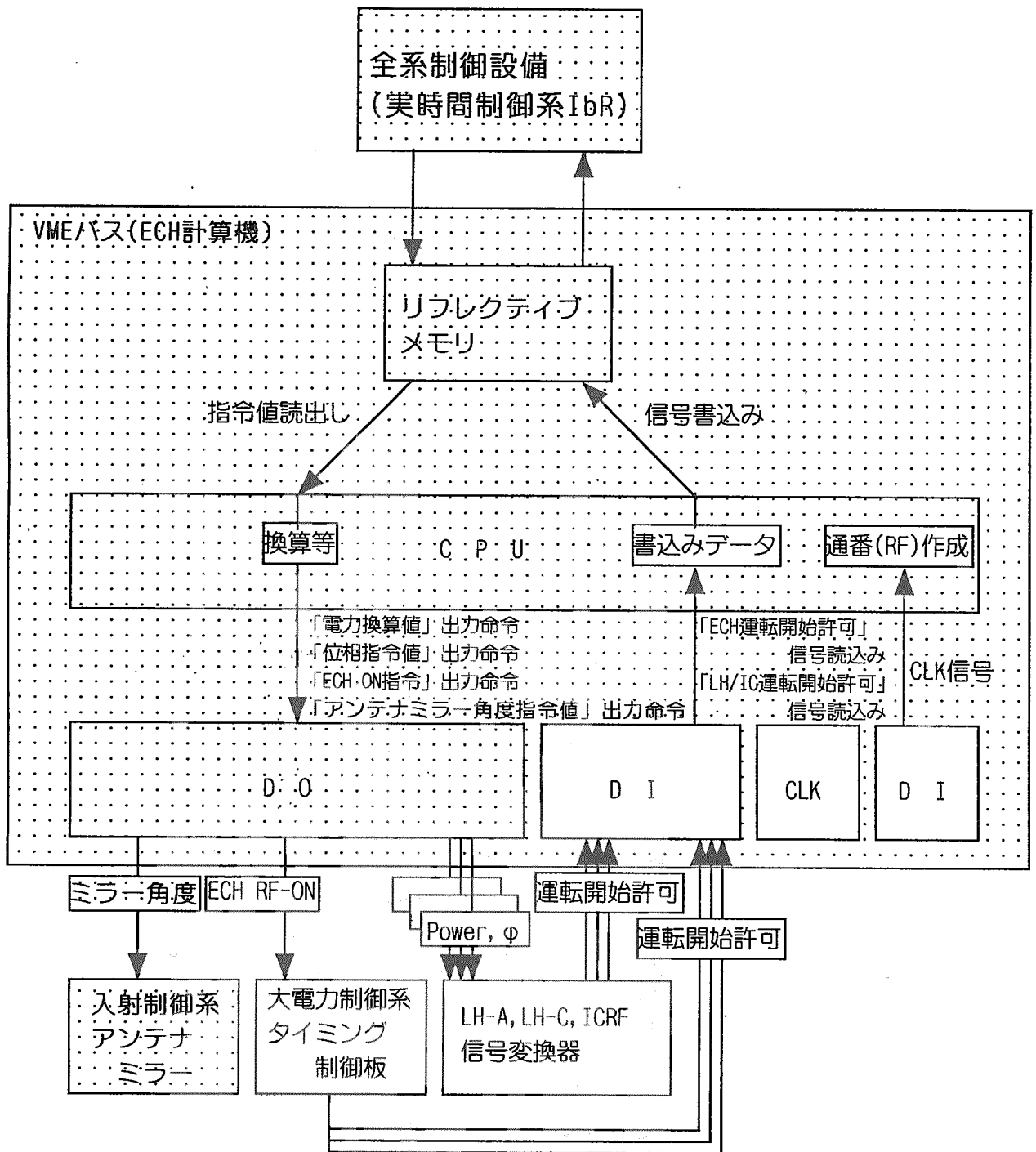
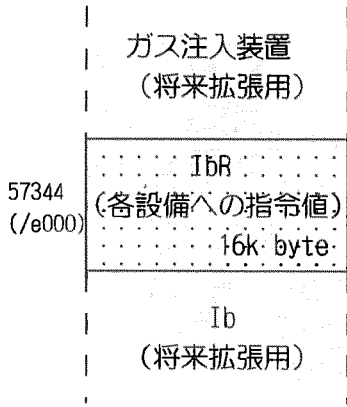


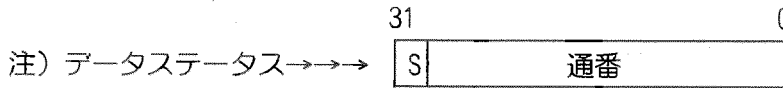
図15 全系制御設備との信号取合い

IbR書き込みエリア



ECH(RF)指令値	4kbyte
ガス注入装置指令値	4kbyte
タイミング指令値	4kbyte
予備	4kbyte

31	0
データステータス (int)	
ECH #1 入射ON/OFF指令値 (1/0)	
ECH #2 入射ON/OFF指令値 (1/0)	
ECH #3 入射ON/OFF指令値 (1/0)	
ECH #4 入射ON/OFF指令値 (1/0)	
可動鏡位置 (deg) (int)	
可動鏡位置 4T (deg) (int)	
可動鏡位置 4P (deg) (int)	
LH-A入射電力 (kW) (int)	
LH-C入射電力 (kW) (int)	
IC入射電力 (kW) (int)	
LH-A位相差 (deg) (int)	
LH-C位相差 (deg) (int)	
IC位相差 (deg) (int)	
予備	



S=1 : データ異常、=0 : データ正常

・イニシャル時データ未完を判別するため、データステータスを”/FFFFFFF”とする。

図 16 リフレクティブメモリ メモリマップ

リフレクティブメモリ

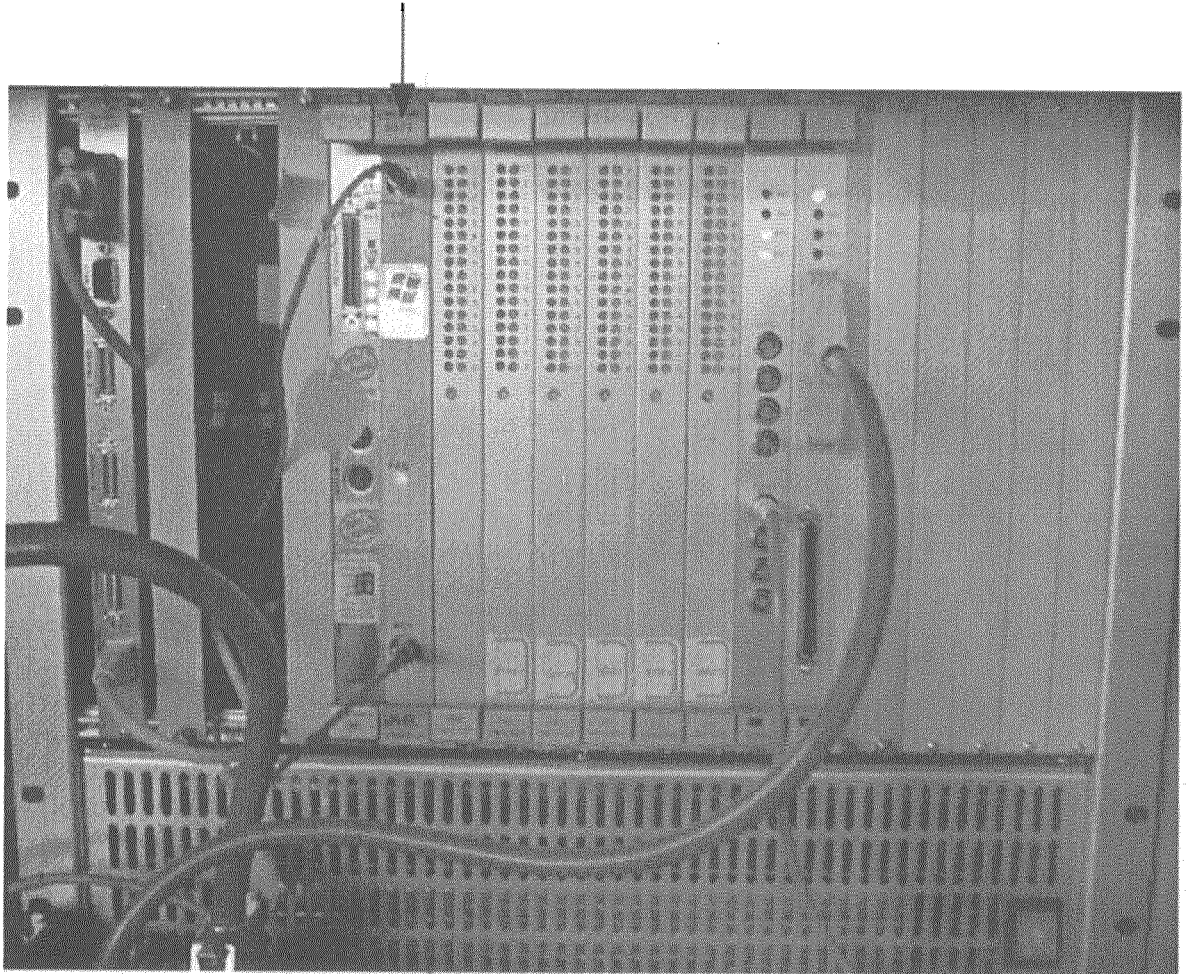


図17 ECH計算機 (VMEバス)

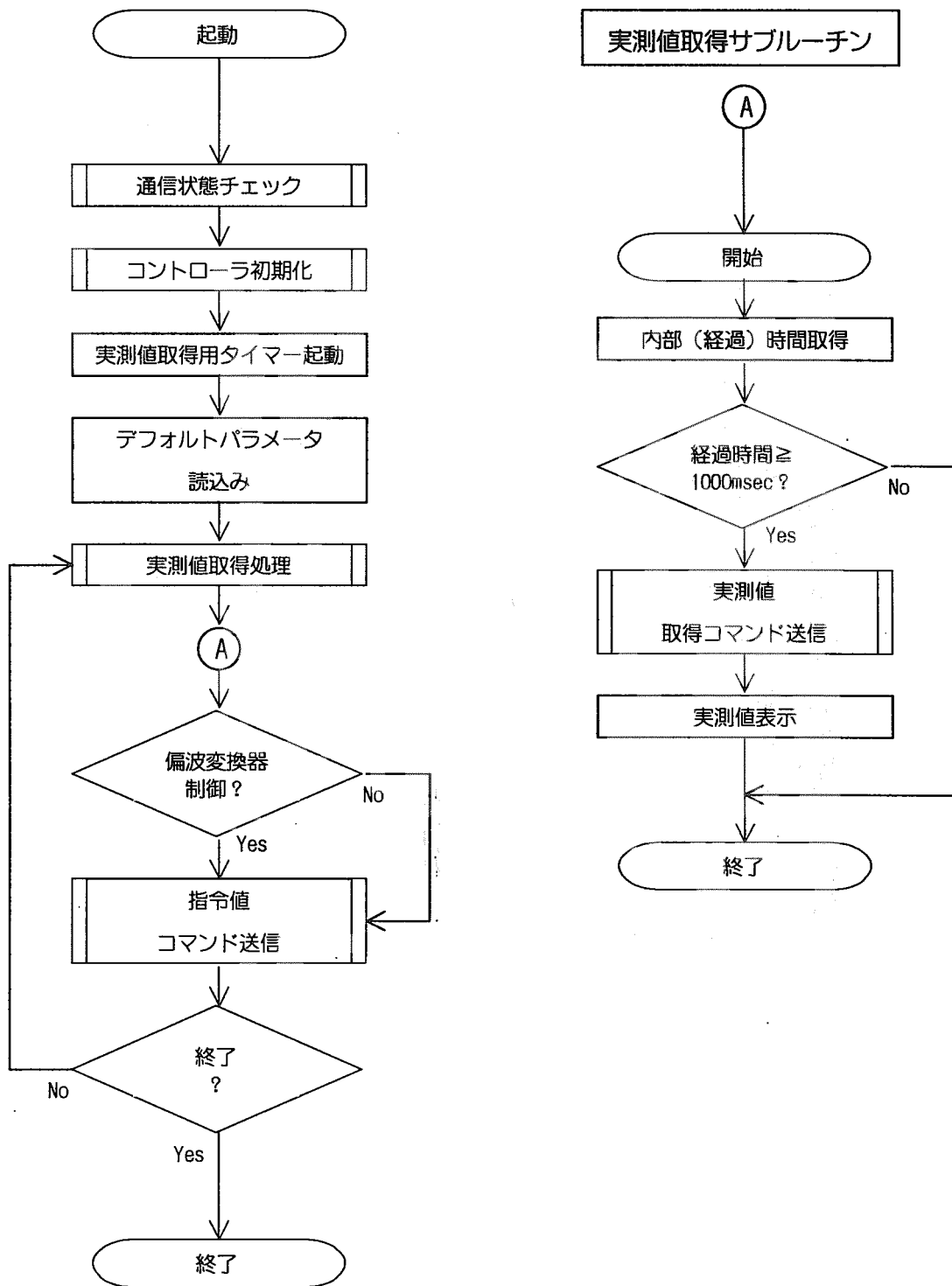


図 18 偏波変換器制御プログラムフローチャート

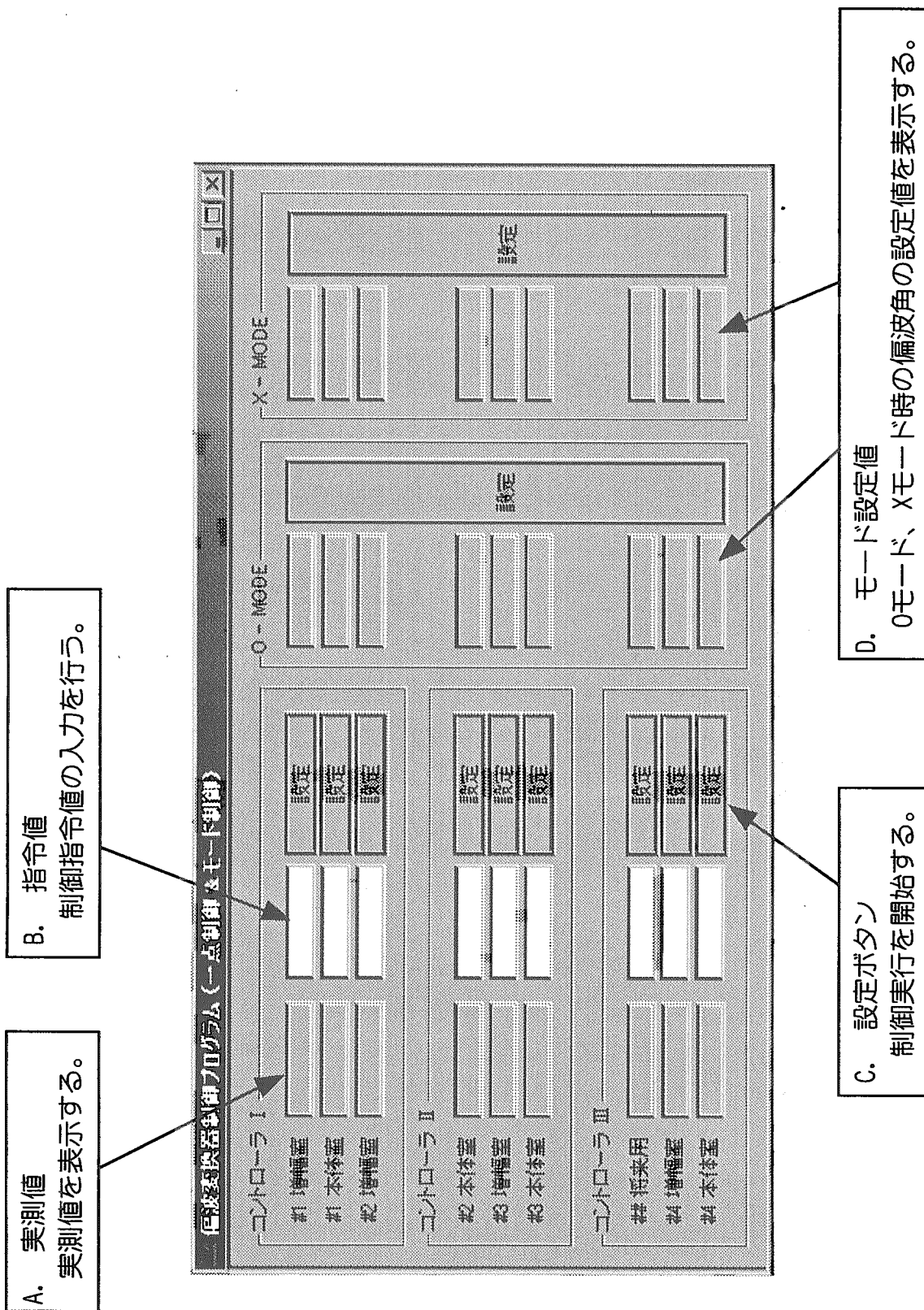


図 19 一点制御画面

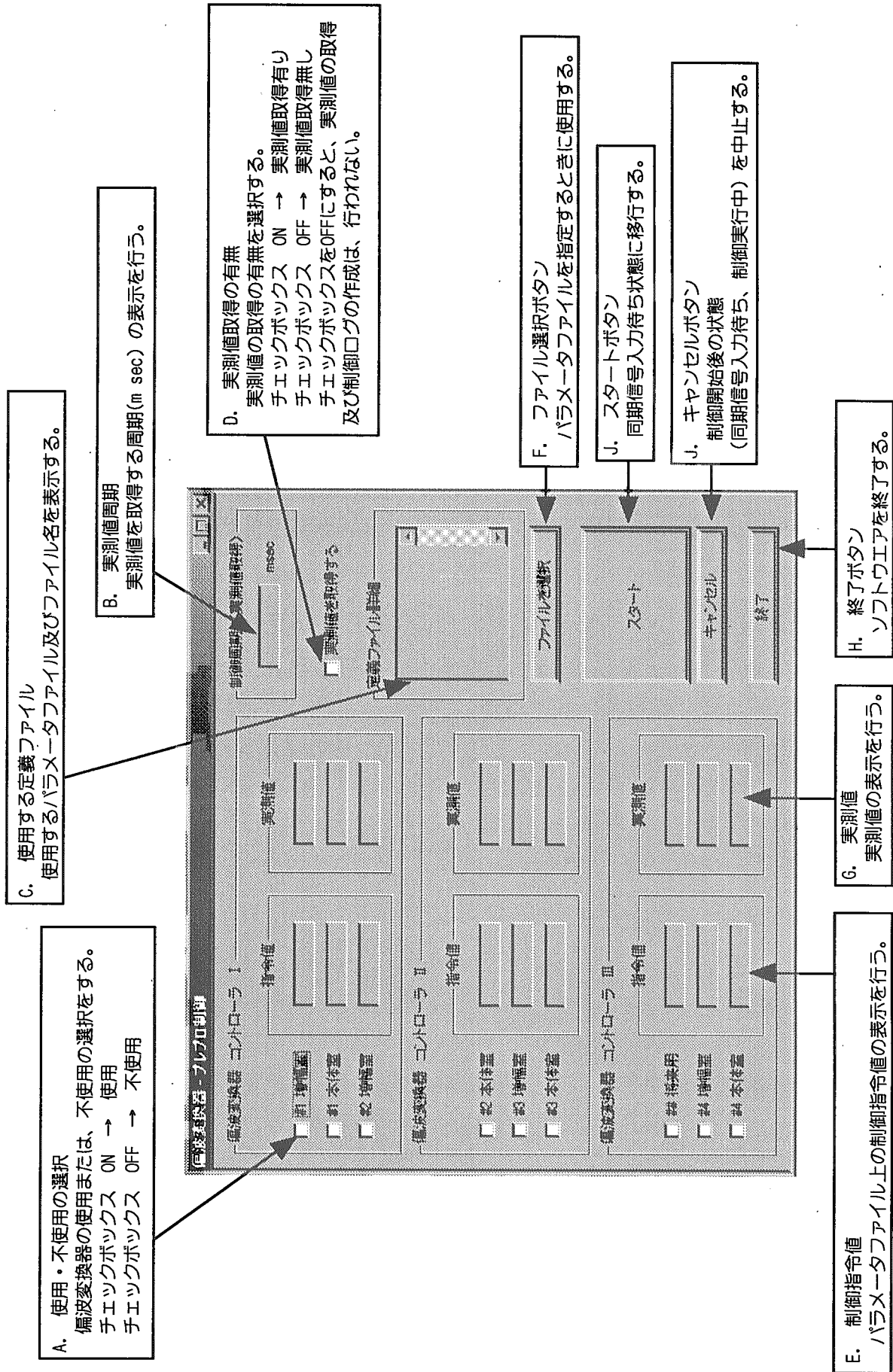


図 20 実時間プレプロ制御画面

## 4. アンテナミラー駆動制御を用いた実例

### 4. 1 高周波入射角度スキャン

長パルス高周波のプラズマ入射中に2基のアンテナミラーを図2-1に示すように駆動して、高周波入射角度を独立にスキャンした。図2-2にアンテナミラー入射角度スキャン時におけるプラズマ電子温度分布を示す。アンテナミラー駆動を行うことにより、プラズマ電子温度の実時間分布制御をが可能であることが示された。

### 4. 2 アンテナミラー角度フィードバック制御

高性能プラズマを安定に維持するためには、揺動現象の抑制が重要である。アンテナミラー角度フィードバック制御を用いて電子温度揺動が最小となる位置を狙って高周波を入射し、局所的に電流を流すことで振動を抑制することに成功した。



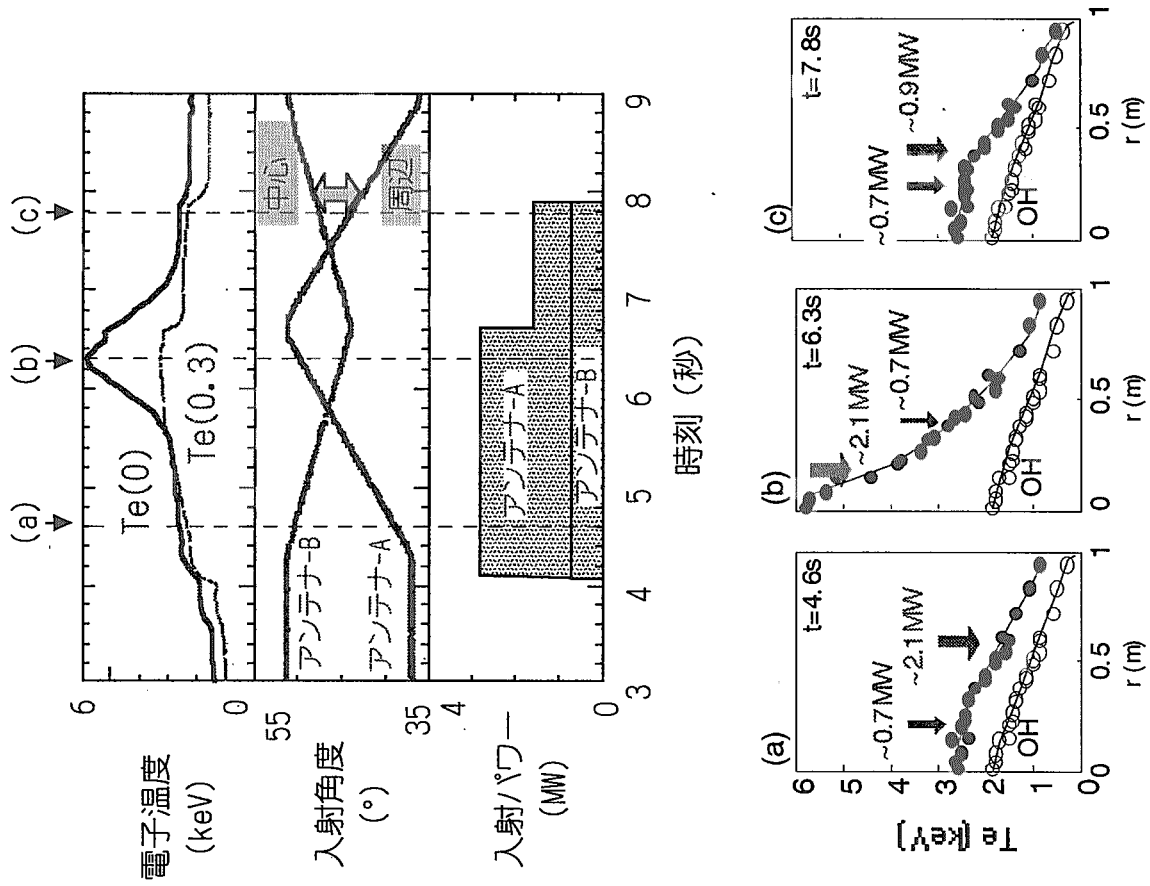


図 2.2 プラズマ電子温度分布

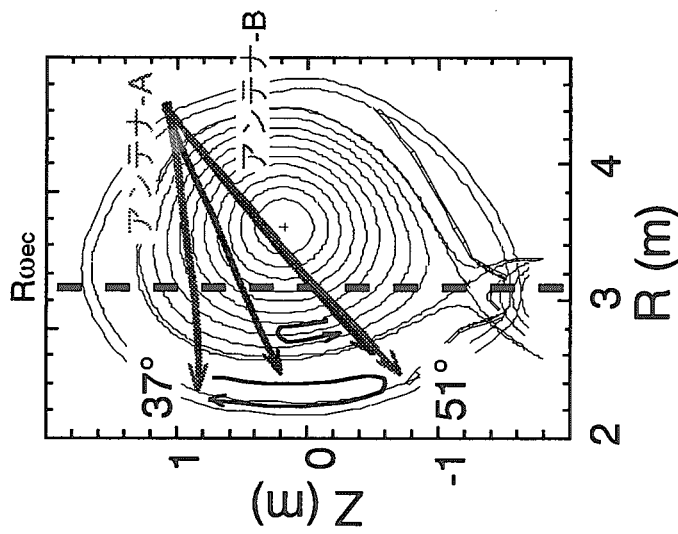


図 2.1 入射角度スキャン時の入射軌道

## 5. 偏波測定

偏波測定は、JT-60 UECH装置において、プラズマの伝搬モードと一致する偏波をもった高周波をプラズマ中に入射することが重要である。そこで、発振器で低パワーの高周波を定常発振させ、各ユニット2台の偏波変換器のそれぞれの回転角度に対して伝送系導波管出口での実際の偏波角、楕円度を測定する必要がある。偏波角、楕円度は導波管出口に設置するホーンアンテナの回転角度を変更した時の検波電圧の測定値から求めることができる。偏波測定は、この検波電圧の測定及びデータ解析を行うものである。図23に偏波測定のタイムチャートを示す。

この測定は、従来全て手作業で行われていたため作業時間が多大に掛かっていたが、偏波変換器制御プログラムの実時間プレプロ制御を使用し、自動化することが可能となり、作業の簡素化、作業時間の短縮が実現できた。また、測定精度が格段に向上した。

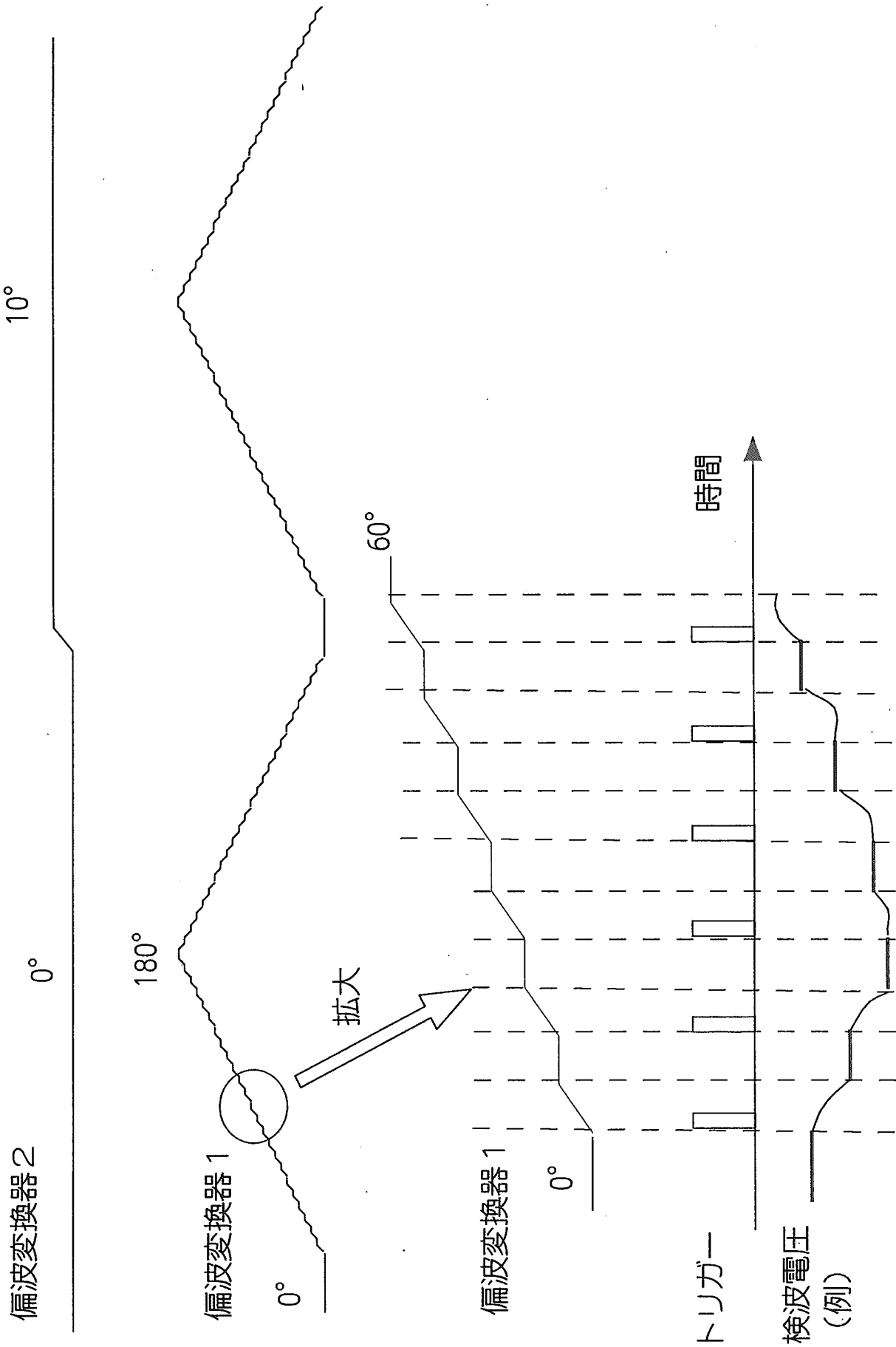


図 2 3 偏波測定タイムチャート

## 6. まとめ

JT-60UECH装置用入射制御系システムの構築により、さまざまな実験に応じたアンテナミラー、偏波変換器の制御を実現した。

### (1) ミラー角度実時間制御の実現

アンテナミラープレプロ制御を使用し、高周波入射中に入射角度のスキャンを行った。これにより、プラズマ電子温度実時間分布制御を実現した。

### (2) フィードバック制御の実現

高性能プラズマを安定に保持するため、アンテナミラー角度フィードバック制御を実現した。これにより、プラズマ中の揺動現象の抑制に成功した。

### (3) 偏波変換器ミラー駆動の改善

ショット毎に変更される偏波角を手入力により個々に設定し駆動していたが、偏波変換器制御プログラム上にOモード、Xモード時の角度として予め設定しておく。そのモードを選択することにより設定された角度へ同時に8台の偏波変換器のミラー角を制御することを可能とした。

### (4) 偏波測定の改善

偏波測定用実時間プレプロ制御を使用し、今まで手作業で行われていた作業を自動化することが可能となり、作業の簡素化、作業時間の短縮が実現できた。また、測定精度が格段に向上した。

今後、入射制御系システムの中心となるミラー制御装置の遠隔操作において、年々進歩する通信技術に対応した制御を実現するために改良等を行い、最先端の実験に対応できる制御システムを開発し、JT-60UECH装置の性能向上にさらに貢献する。

## 謝 辞

本システムの構築に関してシステム設計、製作等に至るまで協力を頂いたR F 装置試験室員の方々に深く感謝致します。

本システムの設計、開発に当たり終始指導、配慮を頂いた核融合装置試験部清水正亜部長、同部二宮博正次長、R F 装置試験室藤井常幸室長に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 池田佳隆 : JAERI-Research, 99-061(1999)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$\text{s}^{-1}$
力	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$\text{N} / \text{m}^2$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	$\text{J} / \text{s}$
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	$\text{W} / \text{A}$
静電容量	ファラド	F	$\text{C} / \text{V}$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$\text{V} / \text{A}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$\text{A} / \text{V}$
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁束密度	テスラ	T	$\text{Wb} / \text{m}^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$\text{Wb} / \text{A}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	
光線照度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
放射線量	ルクス	lx	$\text{lm} / \text{m}^2$
放射線量当量	ベクレル	Bq	$\text{s}^{-1}$
	グレイ	Gy	$\text{J} / \text{kg}$
	シーベルト	Sv	$\text{J} / \text{kg}$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	$\text{\AA}$
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$   
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$   
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$   
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$   
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$   
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$   
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$   
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

力	$\text{N} (= 10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (= \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g} / (\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度  $1 \text{ m}^2 / \text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2 / \text{s})$

圧	MPa (= 10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$\text{J} (= 10^7 \text{ erg})$	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1

$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$   
 $= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$   
 $= 4.1855 \text{ J} (15^{\circ}\text{C})$   
 $= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$   
 仕事率 1 PS (仏馬力)  
 $= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$   
 $= 735.499 \text{ W}$

放射能	Bq	Ci
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JT-60U電子サイクロトロン加熱装置用入射制御システムの構築と改良

**R100**

古紙配合率100%  
白紙度70%再生紙を使用しています。