



JP0150886

JAERI-Research

2001-050



炭酸ガスレーザ干渉測定装置のための  
制御・データ処理システムの開発

2001年11月

千葉 真一・河野 康則・土屋 勝彦・井上 昭

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

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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

炭酸ガスレーザ干渉測定装置のための  
制御・データ処理システムの開発

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部  
千葉 真一・河野 康則・土屋 勝彦・井上 昭

(2001年10月1日受理)

炭酸ガスレーザ干渉測定装置は、JT-60Uプラズマの中心部電子密度計測を目的として開発、運転されている。この装置の運転状態監視、JT-60Uの放電シーケンスに従った装置の制御、及び計測データの収集・高速処理・転送という統合的な機能を有する制御・データ処理システムを開発した。本システムは、主として2台のワークステーションを中心とするCAMACシステムから構成し、機能分担を明確にすることで高い信頼性を得ている。本システムにより、炭酸ガスレーザ干渉測定装置はJT-60U実験シーケンスに同期してデータ解析処理を速やかに行い電子密度データをルーチン的に提供する事が可能となった。また、炭酸ガスレーザ干渉測定装置を用いた実時間密度帰還制御を行うための参照用実績密度信号についても、実時間処理機能により出力可能となった。

Development of Control and Data Processing System for  
CO<sub>2</sub> Laser Interferometer

Shinichi CHIBA, Yasunori KAWANO, Katsuhiko TSUCHIYA and Akira INOUE

Department of Fusion Plasma Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-Ken

( Received October 1 , 2001 )

CO<sub>2</sub> laser interferometer diagnostic has been operating to measure the central electron density in JT-60U plasmas. We have developed a control and data processing system for the CO<sub>2</sub> laser interferometer with flexible functions of data acquisition, data processing and data transfer in accordance with the sequence of JT-60U discharges. This system is mainly composed of two UNIX workstations and CAMAC clusters, in which the high reliability was obtained by sharing the data process functions to the each workstations. Consequently, the control and data processing system becomes to be able to provide electron density data immediately after a JT-60U discharge, routinely. The realtime feedback control of electron density in JT-60U also becomes to be available by using a reference density signal from the CO<sub>2</sub> laser interferometer.

Keywords: JT-60U, Electron Density, CO<sub>2</sub> Laser, Interferometer, UNIX Workstation,  
Remote Control, Real Time Process

## 目 次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. はじめに .....                      | 1  |
| 2. 炭酸ガスレーザ干渉測定装置の概要 .....          | 2  |
| 3. 制御・データ処理システムの開発における指針及び経緯 ..... | 8  |
| 4. 炭酸ガスレーザ干渉測定装置の遠隔制御・監視化 .....    | 11 |
| 5. 制御・データ処理システムのハードウェア概要 .....     | 12 |
| 5. 1 制御・データ処理システムの配置及び信号系統 .....   | 12 |
| 5. 1. 1 第1W/S系での信号構成 .....         | 12 |
| 5. 1. 2 第2W/S系での信号構成 .....         | 13 |
| 5. 1. 3 制御系の構成 .....               | 14 |
| 5. 1. 4 標準位相比較器 .....              | 14 |
| 5. 1. 5 高精度位相比較器 .....             | 15 |
| 5. 1. 6 実時間処理系の構成 .....            | 15 |
| 5. 1. 7 タイミング系の構成 .....            | 16 |
| 5. 1. 8 ネットワークの構成 .....            | 17 |
| 5. 1. 9 TMD S 装置 .....             | 17 |
| 5. 1. 10 EDS 装置 .....              | 17 |
| 5. 1. 11 RTP 装置 .....              | 18 |
| 6. 制御・データ処理システムのソフトウェア概要 .....     | 29 |
| 6. 1 第1W/S系ソフトウェアの機能 .....         | 29 |
| 6. 1. 1 制御部のソフトウェア .....           | 30 |
| 6. 1. 2 タイミング部のソフトウェア .....        | 30 |
| 6. 1. 3 データ処理部のソフトウェア .....        | 31 |
| 6. 1. 4 実時間処理用ソフトウェア .....         | 34 |
| 6. 2 第2W/S系ソフトウェアの機能 .....         | 34 |
| 6. 2. 1 データ処理部のソフトウェア .....        | 34 |
| 7. プラズマ計測例 .....                   | 53 |
| 8. まとめ .....                       | 58 |
| 謝 辞 .....                          | 59 |
| 参考文献 .....                         | 59 |

## Contents

|    |  |     |
|----|--|-----|
| 1. | Introduction .....   | 1   |
| 2. | Outline of CO <sub>2</sub> Laser Interferometer Diagnostic .....             | 2   |
| 3. | Policy and Progress of Development .....                                     | 8   |
| 4. | Modification of CO <sub>2</sub> Laser Interferometer for Remote Access ..... | 1 1 |
| 5. | Hardware of Control and Data Processing System .....                         | 1 2 |
|    | 5. 1 Configuration of Control and Data Processing System .....               | 1 2 |
|    | 5. 1. 1 Signal Arrangement in The First W/S System .....                     | 1 2 |
|    | 5. 1. 2 Signal Arrangement in The Second W/S System .....                    | 1 3 |
|    | 5. 1. 3 Machine Control System .....   | 1 4 |
|    | 5. 1. 4 Standard Phase Comparator System .....                               | 1 4 |
|    | 5. 1. 5 High-precision Phase Comparator System .....                         | 1 5 |
|    | 5. 1. 6 Real Time Processing System .....                                    | 1 5 |
|    | 5. 1. 7 Timing System .....  | 1 6 |
|    | 5. 1. 8 Network System .....   | 1 7 |
|    | 5. 1. 9 TMDS Equipment .....   | 1 7 |
|    | 5. 1. 10 EDS Equipment .....   | 1 7 |
|    | 5. 1. 11 RTP Equipment .....   | 1 8 |
| 6. | Software of Control and Data Processing System .....                         | 2 9 |
|    | 6. 1 Software in The First W/S System .....                                  | 2 9 |
|    | 6. 1. 1 Machine Control .....  | 3 0 |
|    | 6. 1. 2 Timing Set Up .....  | 3 0 |
|    | 6. 1. 3 Data Processing .....  | 3 1 |
|    | 6. 1. 4 Real Time Processing .....   | 3 4 |
|    | 6. 2 Software in The Second W/S System .....                                 | 3 4 |
|    | 6. 2. 1 Data Processing .....  | 3 4 |
| 7. | Results from Plasma Measurement .....  | 5 3 |
| 8. | Concluding Remarks .....   | 5 8 |
|    | Acknowledgements .....   | 5 9 |
|    | References .....   | 5 9 |

## 1. はじめに

炭酸ガスレーザ干渉測定装置は、J T - 6 0 U プラズマ中心部における線積分電子密度を計測する装置である<sup>1)~4)</sup>。本装置は、平成元年度から約3年間の開発期間を経て、平成4年度より運転を開始している。ここで、その光源である炭酸ガスレーザ発振器を含め主要機器はJ T - 6 0 実験棟地下P I G電源室内の炭酸ガスレーザ室に設置されており、当初は、本装置の運転操作及び状態監視は現場でしか行うことができなかつた。また、実験放電中にはP I G電源室が入室禁止となるため、装置に異常が発生した際の迅速な対応が不可能であった。さらに、実験データの処理についても、大量のデータの解析に時間を要したことから、実験放電間に電子密度データを表示することが困難であり、実験の円滑な遂行上迅速な処理が望まれていた。

そこで上記の課題を解決するため、U N I X系汎用ワークステーションによる現場機器の遠隔制御・運転状態監視、実験データの処理・解析を行う制御・データ処理システムを平成6年度から9年度にかけて段階的に開発した<sup>5)</sup>。これにより、実験放電間に最新放電の電子密度データの表示、I S P（J T - 6 0 ショット間処理計算機）へのデータ転送、及び実時間信号処理を行えるようにした<sup>6)</sup>。

ワークステーションは、計測-Net（シールドルームI～中央制御室～計算機室間専用ネットワークライン）を利用してことで、計測-Net上の端末より遠隔での利用が可能、汎用言語を用いて多様な解析機能を有するデータ処理ソフトウェアの開発及び更新が容易等の利点を有する。ワークステーションの導入により制御・データ処理にとって有利な環境を整備することができた。

本稿では、炭酸ガスレーザ干渉測定装置の概要について第2章で述べ、制御・データ処理システムの開発における指針及び経緯について第3章で述べる。炭酸ガスレーザ干渉測定装置の遠隔制御・監視化について第4章で述べ、制御・データ処理システムのハードウェア概要及び構成について第5章で述べる。制御・データ処理ソフトウェアの概要及び構成については第6章に記述し、第7章では実際のプラズマ計測例を示す。第8章はまとめとする。

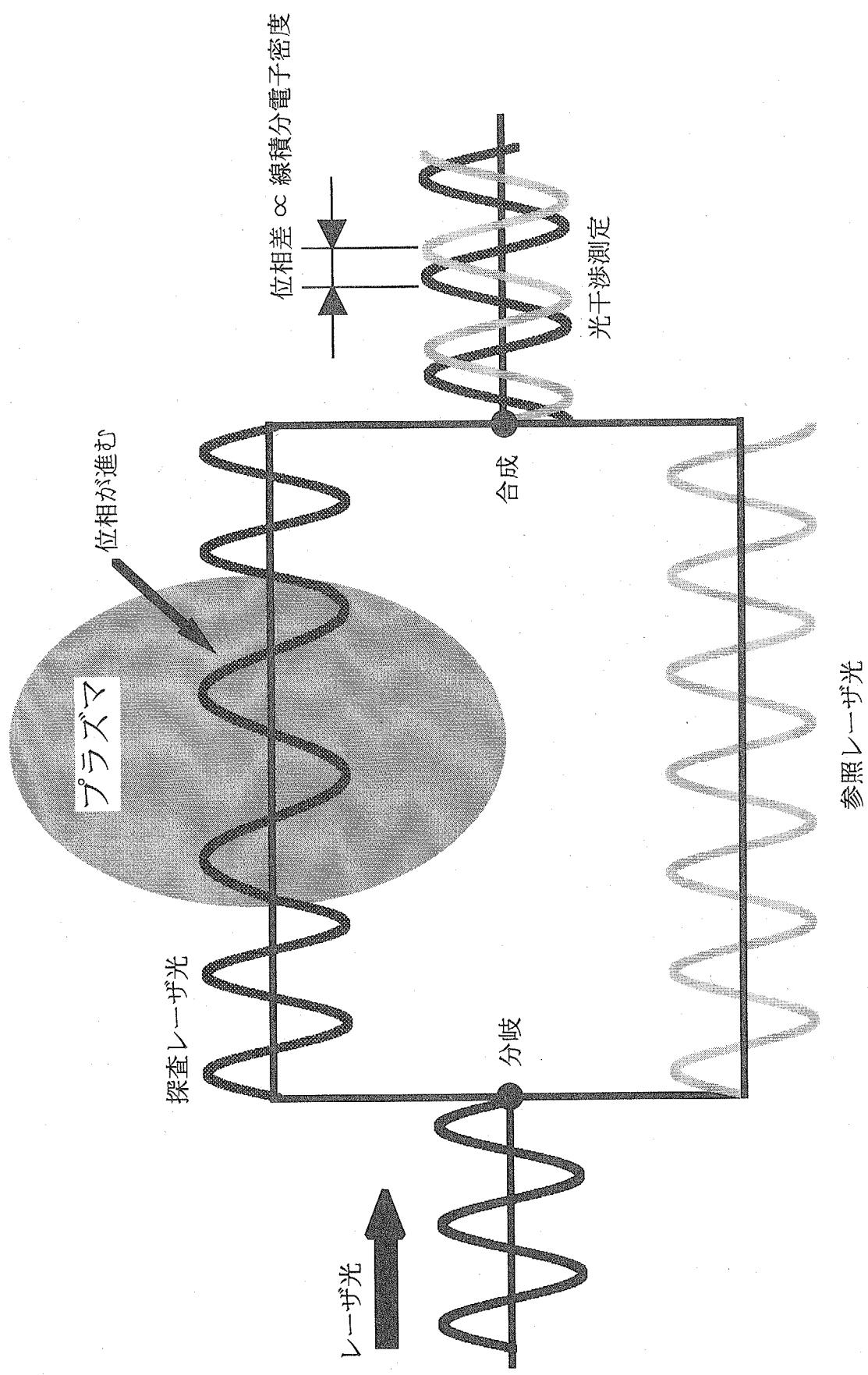
## 2. 炭酸ガスレーザ干渉測定装置の概要

一般にレーザ干渉測定は、第2. 1図に示すようにレーザ光の位相がプラズマ中の電子密度に比例して進む特性を利用して、プラズマ中を通過する探査レーザ光とプラズマ外を通過する参照レーザ光を干渉させ、その位相差を測定することによってプラズマの線積分電子密度を計測するものである。現実の位相差としては、光学機器の機械的振動変位により発生する位相差成分が重畠して測定される。そのため、炭酸ガスレーザ干渉測定装置では、発振波長の異なる2式の炭酸ガスレーザ干渉計（波長： $10.6\mu\text{m}$ 及び $9.27\mu\text{m}$ ）を同じ光路に組み合わせて同時測定することで、機械的振動変位成分を取り除くようにしている。

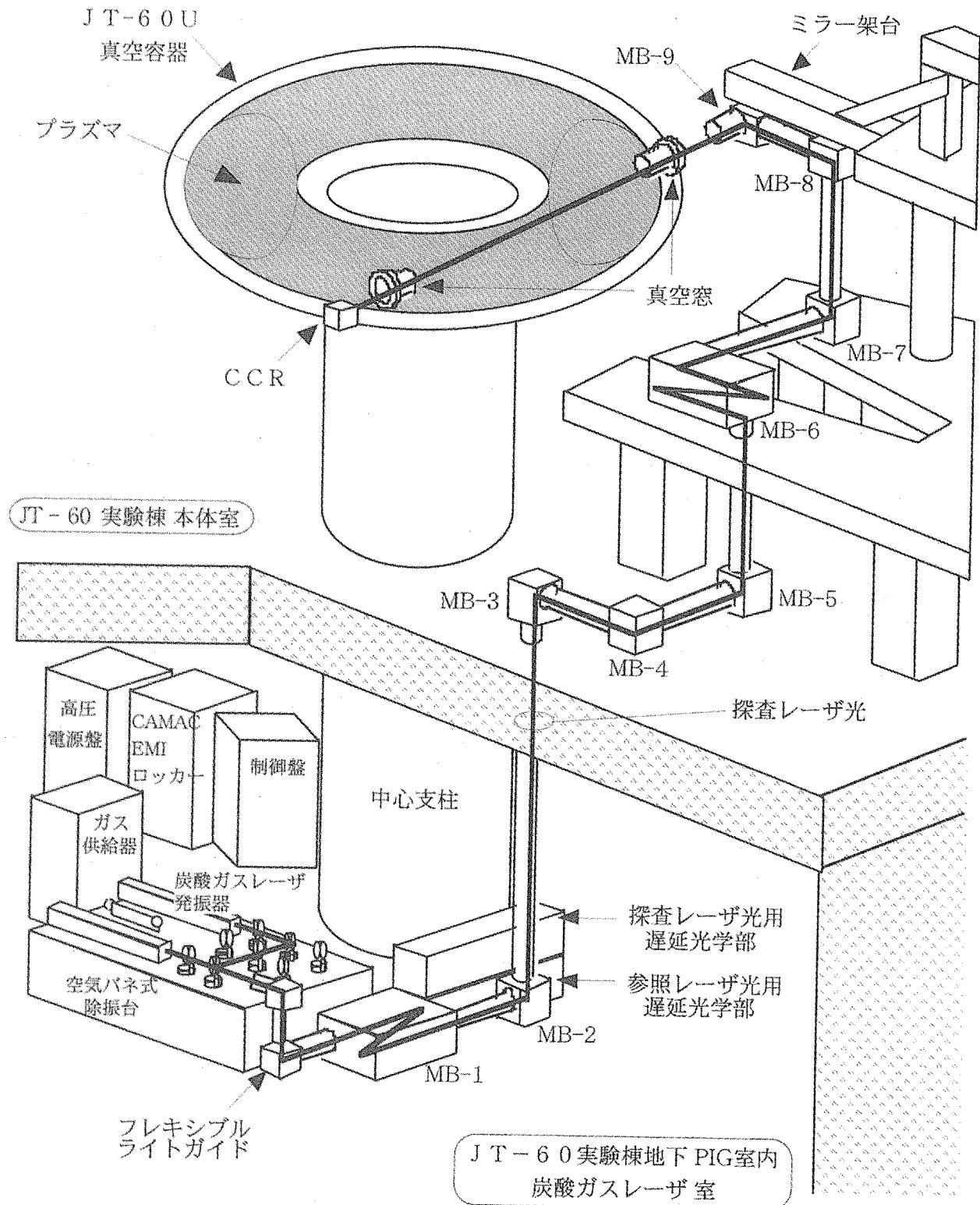
第2. 2図の主要機器配置に示すように、炭酸ガスレーザ発振器をはじめとする主要光学機器は、空気バネ式除振台上に設置され、また実験運転による電磁ノイズの影響を低減するため、JT-60U本体から距離の離れた実験棟地下に設置されている。実験棟地下配置を第2. 3図に示す。また、干渉測定法とは別の手法によって電子密度を測定する炭酸ガスレーザ偏光測定装置も同箇所に構築されている。この装置は、炭酸ガスレーザ干渉測定装置に付加する形で整備され、光源レーザ、伝送光学系、真空部などを両装置で共有している。尚、炭酸ガスレーザ偏光測定装置については本稿では取扱わない。除振台上の機器配置を第2. 4図に示す。干渉測定に係るレーザ光としては、JT-60U真空容器中に入射する探査レーザ光と、遅延光学系に入射する参照レーザ光に分けられる。第2. 2図のように探査レーザ光は各MB（ミラー・ボックス）内に収納された19枚のミラー群で反射され真空容器中に入射される。入射された炭酸ガスレーザ光は、対向面に設置されているCCR（コーナーキューブリフレクタ）で反射/折返され、往復約100mの光路を経て除振台上まで戻される。一方、参照レーザ光は遅延光学系に入射され、探査レーザ光と参照レーザ光の光路差を補償するため、17枚のミラー群で探査レーザ光と同距離を伝搬させられたのち、探査レーザ光と同じく除振台へと戻される。探査レーザ光と参照レーザ光は、干渉光学系で各々の光軸が調整、重ねあわされ、赤外検出器により干渉ビート信号が検出される。各波長での干渉ビート信号は帯域通過フィルタを通したのちE/O変換され、光ファイバケーブルにてシールドルームIに送出される。その後の処理としては、平成5年度までは、標準位相比較器または高精度位相比較器（標準位相比較器の100倍以上の位相分解能を有する）により検出した位相差データはTMD S（大容量データ記憶装置）に格納し、実験放電終了後、ISPにより電子密度の計算を行うというシンプルなものであった。平成6年度以降は、以下本稿で述べる制御・データ処理システムを用いるようになった。主要な機器の基本諸元を第2. 1表に示す。

第2. 1表 主要機器基本諸元

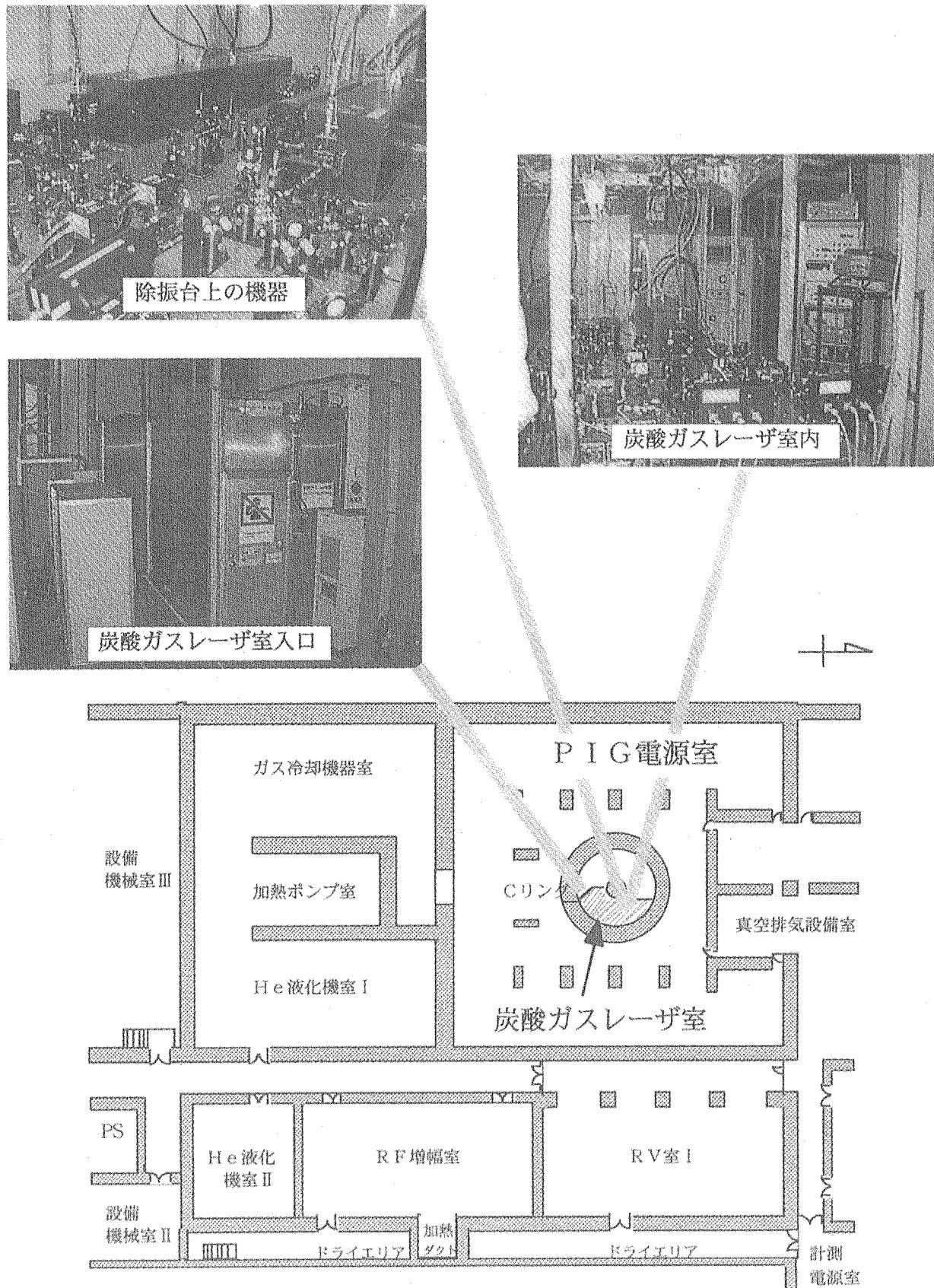
| 機 器 名                 | 基 本 諸 元  |
|-----------------------|--|
| 炭酸ガスレーザ発振器            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・発振出力：DC発振 5W</li> <li>・発振波長：9.27 μm、10.6 μm</li> </ul>   |
| 高压電源盤                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・放電管印加電圧：2kV</li> <li>・放電電流：20mA</li> </ul>   |
| ガス供給器                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス比：<math>\text{He}/\text{N}_2/\text{CO}_2 = 62.5/26.5/11</math></li> <li>・ガス流量：<math>3\text{N l/min}</math></li> <li>・ガスフロー：定流量コントロール</li> </ul>  |
| 赤外検出器<br>(電子冷却型)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・検出器素子材質：水銀カドミウムテルル</li> <li>・検出器素子有効サイズ：1mm × 1mm</li> <li>・検出器素子冷却温度：-80°Cまで可能 (4段電子冷却)</li> <li>・検出器感度：<math>2.00 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}</math> 以上</li> <li>・検出器素子単体時定数：10ns 以下</li> </ul>             |
| 標準位相比較器               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・位相分解能：1/100 フリンジ</li> <li>・デジタルクロック周波数：200MHz</li> </ul>   |
| 高精度位相比較器              | <ul style="list-style-type: none"> <li>・位相分解能：1/12800 フリンジ</li> <li>・デジタルクロック周波数：100MHz</li> <li>・アナログ時間測定精度：1/256</li> </ul>  |
| 伝送光学系                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・伝送距離：片道約50m (往復約100m)</li> <li>・ミラー総数：19枚<br/>(ゼロデュア基板 + 保護膜付き銀コーティング)</li> </ul>  |
| 遅延光学系                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・伝送距離：約39m (MB2～CCRまでの光路長を補償)</li> <li>・ミラー総数：17枚</li> </ul> <p>参照レーザ光路長と探査レーザ光路長の光路差を補償するものである。</p>  |
| 真空部<br>(P 8, P 13 水平) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・真空窓材質：ZnSe (ジンクセレン)</li> <li>・真空窓透過率：波長10.6 μmにて95%以上<br/>：波長9.27 μmにて95%以上<br/>：波長0.633 μmにて80%以上</li> <li>・外径：Φ109mm (有効径Φ90mm)</li> <li>・プラズマ中のビーム径：Φ12mm～Φ16mm</li> <li>・プラズマ中の光路長：プラズマの形状にもよるが典型的には4～6m (片道)</li> </ul> |



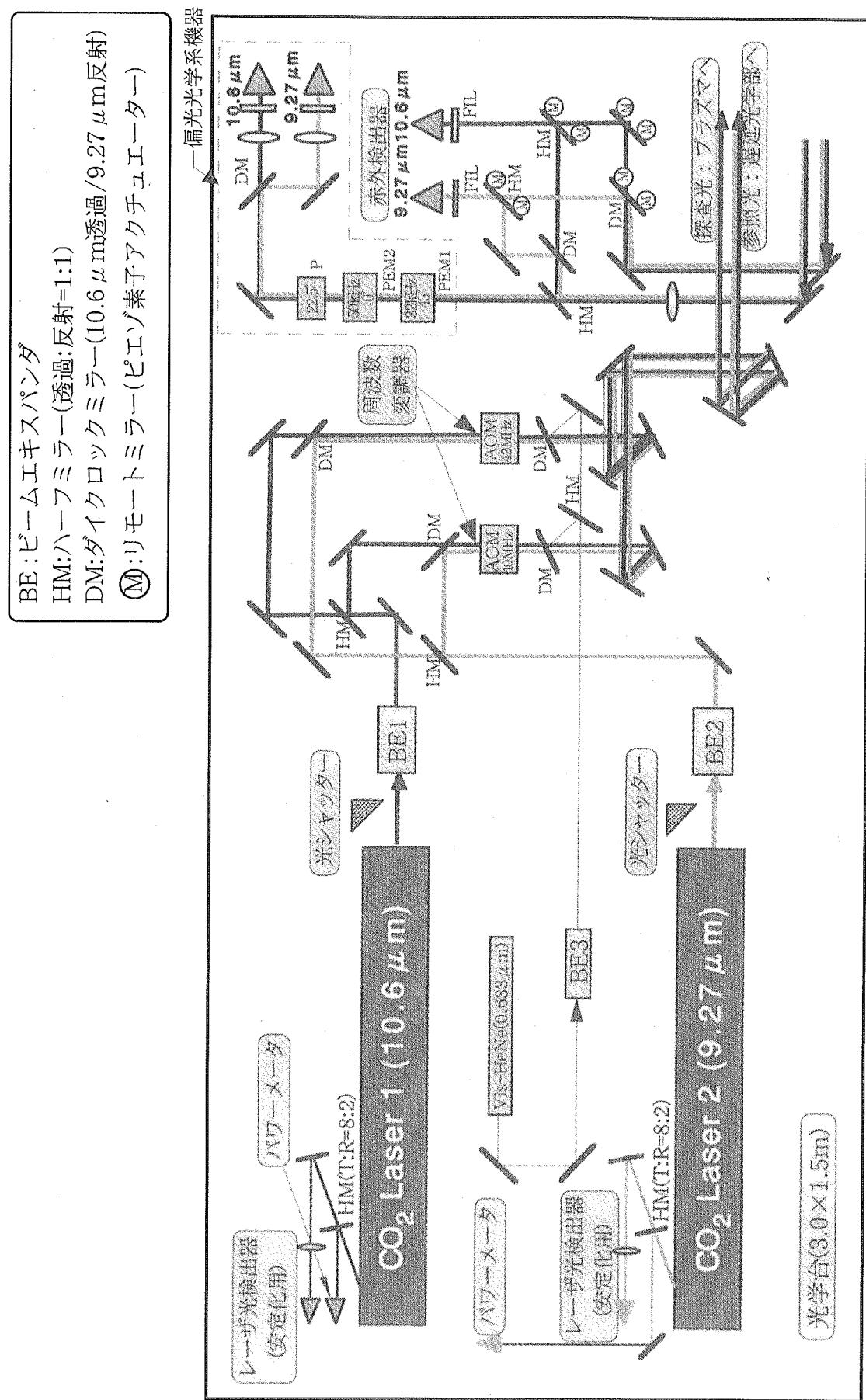
第2.1図 干渉測定の概念



第2. 2図 主要機器配置



第2・3図 JT-60実験棟地下配置



第2. 4図 干渉光学系機器配置

### 3. 制御・データ処理システムの開発における指針及び経緯

J T - 6 0 Uにおいて干渉法による安定な密度計測を行うためには、炭酸ガスレーザ発振器を含む主要機器が高度に調整の上運転されていることが必要である。しかし、平成5年度までは運転操作及び状態監視は現場でしか行うことができず、実験放電中にはP I G電源室が入室禁止となるため、装置に異常が発生した際の迅速な対応が不可能であった。さらに、実験データの処理についても、標準位相比較器または高精度位相比較器により検出した位相差データはT M D Sに格納し、実験放電終了後、I S Pにより電子密度の計算を行うというシンプルなものに留まっていたため、大容量のデータ解析に時間を要し、実験放電間に電子密度データの表示ができず、実験の円滑な遂行上迅速な処理が望まれていた。

#### 3-1 開発指針

上記の課題を解決するための新システムを開発するに当たり、以下に示すような開発指針を策案した。

- ・遠隔にて現場機器の制御、運転状態の常時監視を行う。
- ・開発及び更新等が容易に行えるよう、UNIX系汎用ワークステーション及び汎用言語であるC言語を用いたシステムとする。
- ・ネットワークを積極的に利用し、放電情報や計測データなどの信号を迅速に授受する。
- ・高時間分解能 ( $10\ \mu s$ ) のため大容量データを扱うことから解析処理に時間を要するものの実績のある既存TMDS系とは別に、新たに低時間分解能 ( $\sim 1ms$ ) としてデータ量を削減した高速解析処理系を付加する。
- ・実験放電後速やかにデータ解析・結果表示・転送が可能な高速データ解析処理用、及び解析処理に時間を要する大容量及び高精度なデータ解析処理用、それぞれ独立した分散化処理形態とする。
- ・炭酸ガスレーザ干渉測定装置を用いた実時間密度帰還制御を行うための参考用実績密度信号を生成する。

#### 3-2 開発経緯

3-1項の開発指針を基に、UNIX系汎用ワークステーションSPARCstation20（以下「第1W/S」と略称）及びAdvan-TeckWorkstation（以下「第2W/S」と略称）の2式を使用した制御・データ処理システムを平成6年度から9年度にかけて段階的に開発した。以下にその開発経緯を簡略に示す。

<平成 6 年度>

- ・主要機器に遠隔制御化対策を施し、遠隔での制御・運転状態監視に対応可能とした。
- ・第 1 W/S 及び C A M A C クレート群の整備により、遠隔での現場機器の制御・運転状態監視を可能とした。
- ・ネットワークの整備により、計測-Netを利用した X 端末からの遠隔での制御・運転状態監視を可能とした。

<平成 7 年度>

- ・第 1 W/S における解析処理機能の整備により、標準位相比較器によって検出された位相差データの高速解析処理、放電終了直後の処理結果出力を可能とした。

<平成 8 年度>

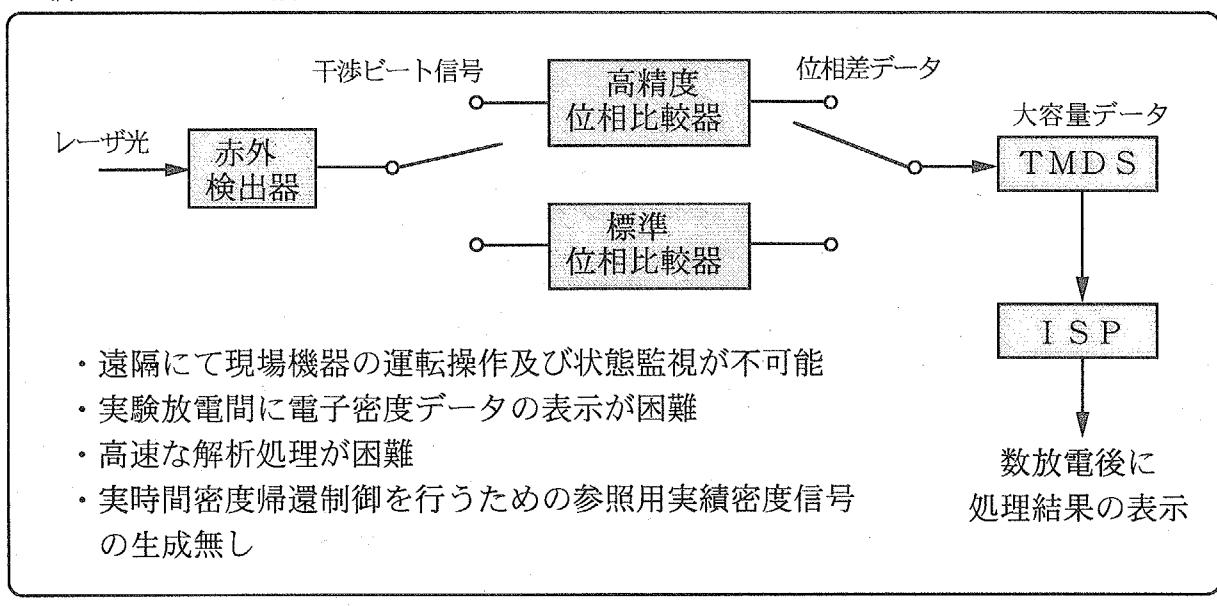
- ・大容量・高精度処理用に第 2 W/S を整備し、標準位相比較器からの大容量データ：T M D S（大容量データ記憶装置）格納データ、及び高精度位相比較器からの高精度データ：E D S（簡易データ収集装置）格納データの解析処理、放電終了後の処理結果出力を可能とした。また、第 1 W/S と同様に X 端末からの操作を可能とした。

<平成 9 年度>

- ・実時間処理機能を開発し、第 1 W/S に付加した。これにより J T - 6 0 U 実験放電において電子密度を実時間帰還制御するための参照用実績密度信号の生成を可能とし、R T P（実時間処理計算機）への信号送出を開始した。

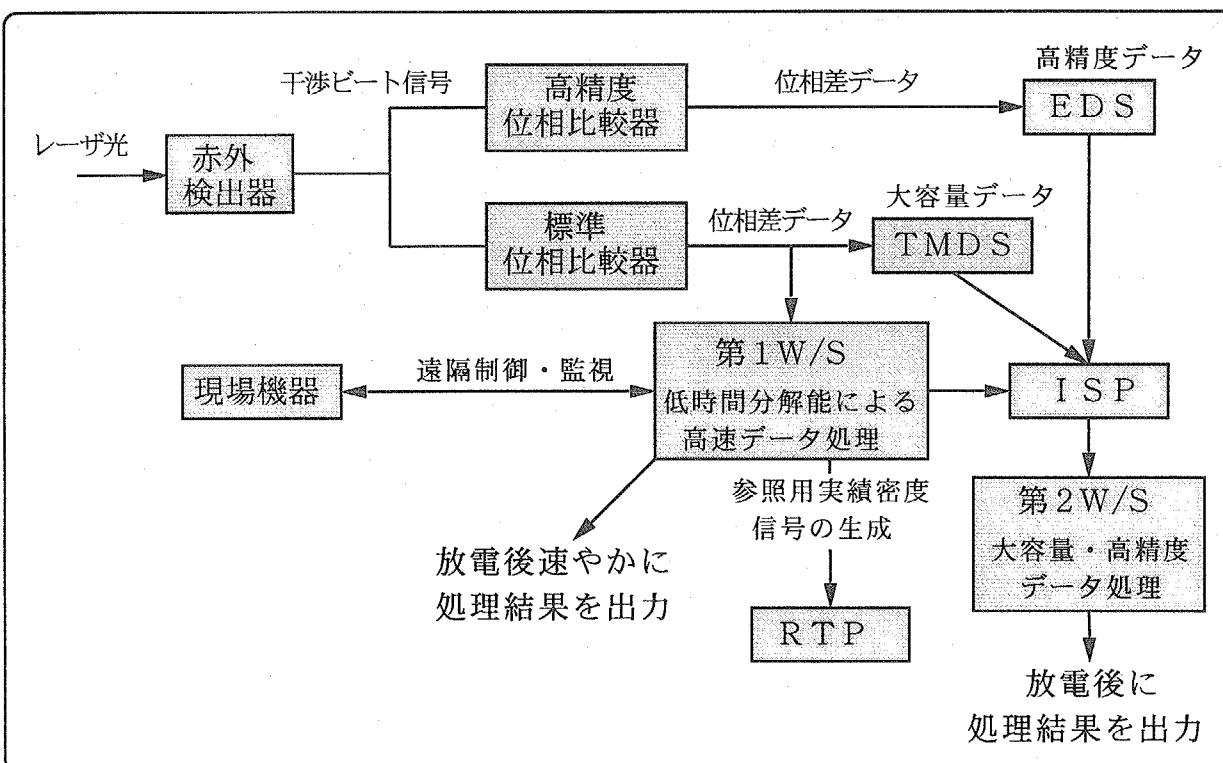
このような経緯にて開発した制御・データ処理システムの概略構成を第 3. 1 図に示す。

## 当初のシステム構成



平成 6 年度から 9 年度にかけて段階的に開発

## 新システム構成



第 3. 1 図 制御・データ処理システムの概略構成

## 4. 炭酸ガスレーザ干渉測定装置の遠隔制御・監視化

炭酸ガスレーザ干渉測定装置の遠隔制御・監視化は、炭酸ガスレーザ発振器を含む主要機器をシールドルームⅠや中央制御室などの離れた位置より制御及び監視するために、主要機器側において必要となる改造・新規製作を行い、遠隔制御・監視化に対応するものである。主な内容を以下に記述する。

### <高圧電源盤の改造>

- ・ON/OFF操作、状態表示などを遠隔制御・監視できるようリレー回路の追加を行う。

### <冷却水循環装置の改造>

- ・ON/OFF操作、各種アラーム、循環水温度などを遠隔制御・監視できるようリレー回路の追加を行う。

### <周波数安定器の製作>

- ・出力ミラーとグレイティングミラーの距離をアクチュエータで微小変化を行うことにより発振周波数の安定化制御を可能とする。
- ・安定化用レーザ光検出器からの信号を、周波数安定器へ送出する。一方共振器長を変化させるアクチュエータ（ピエゾ素子による駆動）にはバイアス電圧とモジュレーション電圧がかかっており、モジュレーションに合わせて出力変動信号（微分信号）を検知し、この微分信号が0になるようレーザ共振器長の実時間帰還制御をおこないバイアス電圧を変化させる。この一連の調整を500Hzで連続的に実施する。
- ・C A M A C 経由ワークステーションとの交信信号形態としては、R S - 2 3 2 C インターフェースを介した信号形式で行う。
- ・モジュレーションブランкиング機能を有し、ブランкиング持続時間の下限は30秒とする。

### <インターロック制御盤の製作>

- ・漏水などによる設備機器保護のための各種保護インターロックなど、安全を確保するための保護動作、緊急停止機能を備えた制御盤である。
- ・ワークステーションと主要機器間との中間に位置し、主要機器の動作信号を集約し、ワークステーションに出力できる信号形態に整える機能、及びワークステーションから送られてくる信号に従って主要機器を制御する機能を有する。これによりC A M A C 経由にてワークステーションと主要機器間との接続が可能となる。
- ・C A M A C 経由ワークステーションとの交信信号形態としては、R S - 2 3 2 C 、シーケンサを介したT T L 信号、A D C を介した0～1 0 V アナログ信号の形式で行う。

## 5. 制御・データ処理システムのハードウェア概要

第5.1図のシステム全体構成に示すように、本システムは計測-Netで接続された2台のワークステーションとV I C-B u sシステム、及び光ファイバケーブルでリンクされたC A M A C クレート群で構成されている。主処理装置であるワークステーションは、第1W/S及び第2W/Sの2式を使用し、それぞれ10B A S E-T、H U Bにより計測-Netへ接続され、I S Pとのデータ交信を行なっている。

第1W/SとC A M A C クレートとの通信にはS-B u s-V M V/V I C/V M Eインターフェイス及びV I C-B u s クレートコントローラを用いて行っている。

制御・データ処理システムは、第1W/Sでの高速処理系、第2W/Sでの大容量及び高精度処理系、第1W/Sと各機器間との交信制御を行う制御系、標準位相比較器を用いた高速及び大容量データ収集系、高精度位相比較器を用いた高精度データ収集系、実時間処理系、更に各C A M A C モジュールに対しタイミング信号を生成するタイミング系などから構築されている。

### 5. 1 制御・データ処理システムの配置及び信号系統

実験棟3階の配置図を第5.2図に示す。本システムは第5.3図に示すように分散化処理形態を基本とする2台のワークステーションを中心として構成した。すなわち、標準位相比較器で検出されたデータを直接に収集・処理・転送する高速処理機能及び実験放電と同期しながら電子密度を算出・R T Pへ転送する実時間処理機能、及び炭酸ガスレーザ設備機器の制御・状態監視機能などは、すべて第1W/Sが分担する機能である。一方、標準位相比較器の大容量データ：T M D S（大容量データ記憶装置）格納データ及び高精度位相比較器の高精度データ：E D S（簡易データ収集装置）格納データの収集・処理・転送といった大容量及び高精度処理機能は第2W/Sが分担するものとした。転送するデータは種別としてC A M（計測データ）、S E S（計測器状況データ）、T M P（物理データ）である。

#### 5. 1. 1 第1W/S系での信号構成

第1W/Sでは、1msサンプリング処理及び実時間処理などの高速データ処理を行っている。第5.4図のように赤外検出器からの干渉ビート信号及びミキサー（40MHz/42MHzの信号源より2MHzを抽出）からの基準ビート信号は、実験棟地下P I G電源室内の炭酸ガスレーザ室に設置されている帯域フィルター、アンプ、E/Oモジュールを通し光変換され、シールドルームIまで送出された後O/Eモジュールにて変換され標準位相比較器へ入力される。標

準位相比較器にて検出された位相差データは、順次第1W/Sへ転送され処理される。第5.3図に示すように1msサンプリング処理では、収集された位相差データに必要に応じて各種補正処理を施し実験放電終了後、物理データ(TMP)である電子密度データとして計測-Net経由でISPへ転送を行う。また、実時間処理においては、プラズマ電子密度の実時間帰還制御に使用するため、第1W/Sにて収集された位相差データに各種補正処理を施しながらも、実時間にて RTPへ参照用実績密度信号(電圧値)の転送を行う。第1W/Sの主要諸元を以下に示す。

## &lt;SPARCstation20&gt;

Model 50 Turbo GXplus (Sun Microsystems製)

- Main Memory : 128MB
- Internal Hard Disk : 20GB
- CPU: Super SPARC 50MHz
- OS: UNIX (日本語Solaris2.3)
- 入出力: イーサネット
- 周辺機器: 外部光磁気ディスク装置 (TAHITI-3000)  
無停電電源装置 (Smart-UPD1250)  
S-Bus/VICインターフェイス (SVIC7213)

## 5. 1. 2 第2W/S系での信号構成

第2W/Sでは、 $10\mu s$ サンプリングのTMD S大容量データ、及び $500\mu s$ サンプリングのED S高精度データの処理を行っている。TMD SからISPへ転送されたTMD S格納データは、計測-Net経由にてISPから第2W/SにTMD Sデータを収集、必要に応じて各種補正処理を行い電子密度データとして再度ISPへ転送を行う。一方ED S格納データについても同様な処理を行う。第2W/Sの主要諸元を以下に示す。

## &lt;Advan-Tech Workstation&gt;

Labo Mate 5000 (日本アドバンストテクノロジー製)

- Main Memory : 64MB
- Internal Hard Disk : 2.4GB
- CPU : Intel Pentium 166MHz
- OS : UNIX (Solaris2.5 for x86)
- 入出力: イーサネット

### 5. 1. 3 制御系の構成

制御系は、第1W/Sと現場機器類及び標準位相比較器との交信をになうインターフェースである。V I C-B u s クレートコントローラは、第1W/S (S-Bus-V M V/V I C/V M E インターフェイス使用) とC A M A Cとの交信を行うものであり、D I モジュールを通じて標準位相比較器からの位相差データを第1W/Sに取り込んでいる。更に、第5. 5図に示すようにV I C-B u s クレートコントローラ、B U A O を介し光リンクにて第1W/Sより実験棟地下P I G室内の炭酸ガスレーザ室に設置されている現場機器の遠隔制御及び動作状態監視を行っている。現場機器としては、炭酸ガスレーザ発振器、ガス供給器、高圧電源盤、C A M A C 盤、インターロック制御盤、発振周波数安定部等の主要機器、光シャッター、レーザ発振器用冷却水循環器、干渉光学機器用小型冷却器などの補器類である。上記主要機器の内、発振周波数安定部及びガス供給器については、R S-2 3 2 C I/F を用いて交信を行っている。また、レーザ出力発振パワーや温湿度計等のアナログ信号はD C アイソレータを経てA D C に入力される。その他機器のO N/O F F コントロール信号、アラーム信号等は、シーケンサを介してD O、D I モジュールに接続される。第5. 6図に示すように、制御系の主要なモジュールは以下の通りである。

#### < C A M A C クレート#1 >

- ・ V I C-B u s クレートコントローラ : VCC2117/B (CEC製)
- ・ D I モジュール : 3470-PIA (東陽テクニカ製)

#### < C A M A C クレート#5 >

- ・ B U A O : LM-2132 (NEC製)
- ・ D O : 3074 (Kinetic製)
- ・ D I : 3472 (Kinetic製)
- ・ A D C : 3514 (Kinetic製)
- ・ R S-2 3 2 C I/F : 3344 (Kinetic製)

### 5. 1. 4 標準位相比較器

標準位相比較器は、干渉ビート信号の位相差を検出するC A M A C型式モジュールであり、その位相差データは高速データ及びT M D S大容量データとして収集されている。本モジュールは、基準ビート信号2 M H zに対する干渉ビート信号の位相差をデジタルクロック周波数2 0 0 M H z でカウントし、デジタルデータとして出力する。標準位相比較器の主要諸元を以下に示す。

#### < 標準位相比較器 >

LM2144 CMPF (日本電気製)

- ・位相分解能：1/100フリンジ（2MHz信号入力時）
- ・デジタルクロック周波数：200MHz
- ・位相差データ出力：整数部8ビット（ALMビット含む）
  - 小数部8ビット
- ・サイズ：CAMAC6幅

### 5. 1. 5 高精度位相比較器

高精度位相比較器は、標準位相比較器と同様に赤外検出器からの干渉ビート信号及びミキサーからの基準ビート信号の位相差を高精度に検出するCAMAC型式モジュールであり、その位相差データはEDS高精度データとして収集されている。標準位相比較器の100倍以上の精度（位相分解能）を有することが大きな特徴である。本モジュールは、基準ビート信号2MHzに対する干渉ビート信号の位相差に対し、デジタルクロック周波数によるデジタルカウント、及びデジタルカウント間のアナログ時間測定を組み合わせて高精度を実現している。高精度位相比較器の主要諸元を以下に示す。

#### ＜高精度位相比較器＞

- FRC-50（日本アドバンストテクノロジー製）
- ・位相分解能：1/12800フリンジ（2MHz信号入力時）
  - ・デジタルクロック周波数：100MHz
  - ・アナログ時間測定精度：1/256
  - ・位相差データ出力：整数部16ビット
    - 小数部26ビット（ALMビット含む）
  - ・サイズ：入力モジュール CAMAC2幅  
電源モジュール CAMAC3幅  
測定モジュール CAMAC5幅

### 5. 1. 6 実時間処理系の構成

実時間処理系は、JT-60U実験放電において、電子密度を実時間帰還制御するための参照用実績密度信号を生成するものである。第5.7図に示すように、本システムは実験放電と同期して標準位相比較器からの位相差データを第1W/Sへ取込み、電子密度の算出・各種補正処理を施したのち12ビットのデジタルデータを生成する。更に処理パラメータとして設定した電子密度跳びのしきい値を越えた場合のアラームデータ認識用としてアラームビットを設けている。これらのデータは、送信器ユニットにて光変換されたのち受信器ユニットへ出力され、アナログデータ（電圧値）に変換後、RTPへ出力される。このアナログデータは±10Vとし、0～+10Vにて0～ $2 \times 10^{21} \text{ m}^{-2}$ の密度

に対応させている。

このとき、密度分解能は  $9.8 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2}$  ( $20\text{V}/2^{12} = 4.88 \text{ mV/bit}$ ) となる。更に、実時間電子密度データの監視用として中央制御室のオシロスコープへもアナログ出力を行っている。実時間処理系の主要諸元を以下に示す。

#### <送信器ユニット>

- ・入力部：TTLレベル  
(12ビットデータ、アラームビット：正常時1・異常時0)

- ・出力部：光出力

#### <受信器ユニット>

- ・入力部：光入力
- ・出力部：アラームビットが“1”（正常）の場合、  
アナログデータ出力（12ビットDA出力） $0 \sim +10\text{V}$   
アラームビットが“0”（異常）の場合、  
アナログデータ出力 $-10\text{V}$

### 5. 1. 7 タイミング系の構成

タイミング系は、測定に必要なクロックやタイミング信号などを発生させる部分であり、第5. 6図、第5. 8図に示すように次のモジュール群で構成される。

#### <CAMACクレート#1>

- ・TTR : F7824DA (富士通製)

#### <CAMACクレート#3>

- ・CME : LM-2141A (日本電気製)

#### <CAMACクレート#4>

- ・TGR : F7824EA (富士通製)
- ・TFO : 429 (東陽テクニカ製)
- ・TDL : F7824GA (富士通製)
- ・TMG : F7824FA (富士通製)
- ・FOM : F7824CA (富士通製)

タイミング信号は第5. 9図に示すように、シールドルームIの親タイミングクレートからコード化信号で発せられる。これをTTRモジュールを介して、TGRモジュールで受信する。TGRモジュールには予めコードを設定しており、親タイミングクレートからのコード化信号と一致した場合、パルス信号を発生させ、TFO、TDLモジュールに送信する。TDLモジュールでは予め設定された遅延時間後にパルス信号を発生し、CME、FOMモジュールを

介して、IMDRモジュールでのTMDS、EDSへのデータ送信の起動・停止をかける。TMGモジュールは、TGRモジュールからのスタート信号を受信すると予め設定しておいたサンプリングパルスを標準位相比較器及び高精度位相比較器へ発生する。これらTGRモジュールのコード及びTDL、TMGモジュールの遅延・パルス時間の設定は第1W/Sを用いて行う。

### 5. 1. 8 ネットワークの構成

本システムは、第5. 1図に示すようにシールドルームⅠ（実験棟3F）に設置され計測-Netに2台のワークステーションを接続している。これは、実験放電シーケンスに従った放電1分前信号や放電番号といった各種指令/応答などの放電情報をネットワークから授受するとともに、解析結果データの送信や制御棟1F中央制御室内に設置されているネットワーク上のX端末への表示、プリンタへの出力を行うためである。制御棟1Fの配置図を第5. 10図に示す。

炉心プラズマ研究部 炉心プラズマ解析室にて構築したJT-60データ処理設備の一部であるTMDs、EDS、RTP装置について簡略に紹介する。

### 5. 1. 9 TMDs装置

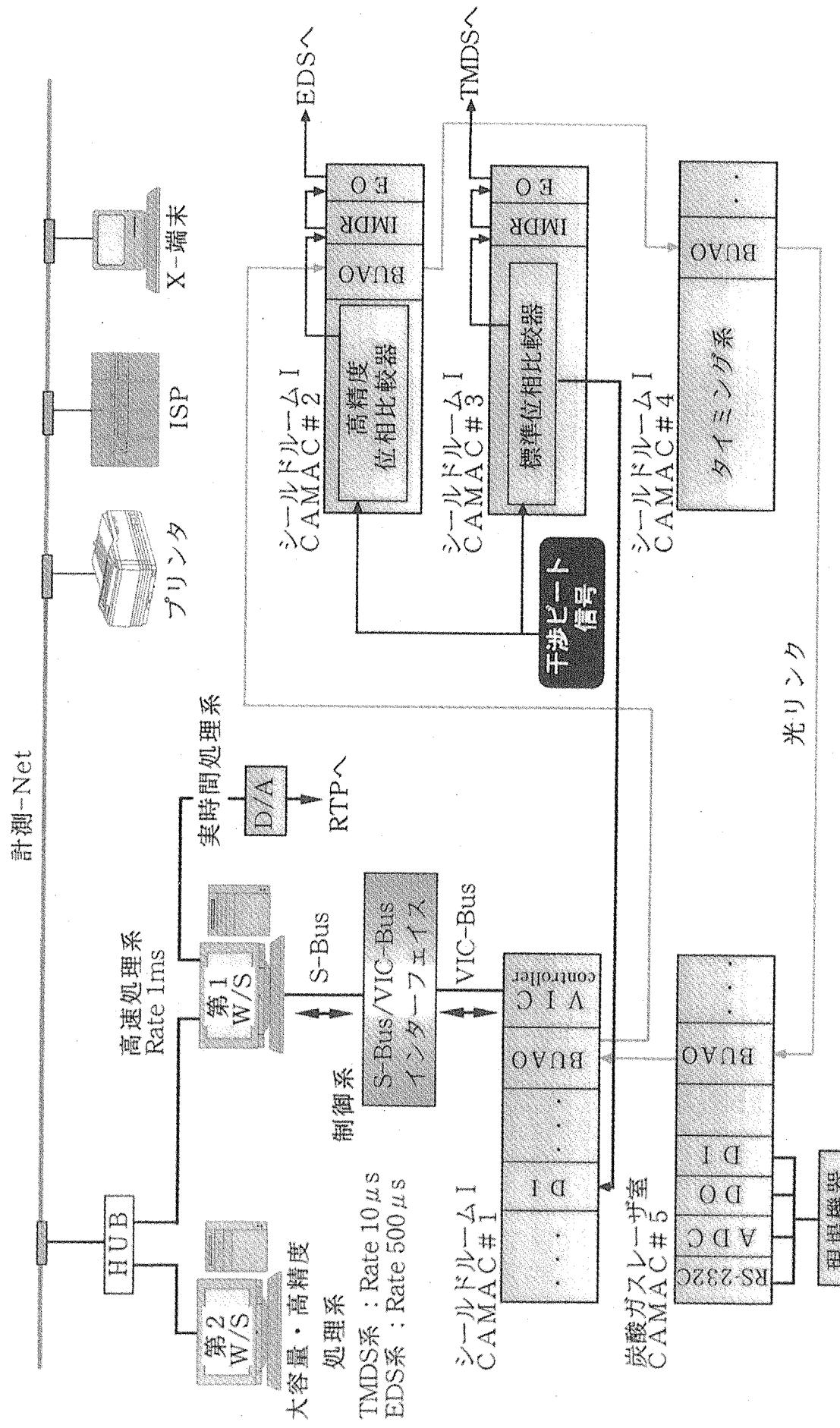
大容量データ記憶装置 (TMDS:Transient Mass Data Storage System)は、最高 $5\mu s$ のサンプリング時間で15秒間のプラズマ放電のデータ収集を行うものである。TMDsは、W/SとVMEメモリーモジュールから構成され、最大で76チャンネル分の容量をもち、1チャンネルあたり6MBまでのデータ取得が可能である。このようなあわせて約450MB/放電の各種計測データはギガビットイーサネットスイッチでデータサーバ及びISPへ転送されるようになっている。

### 5. 1. 10 EDS装置

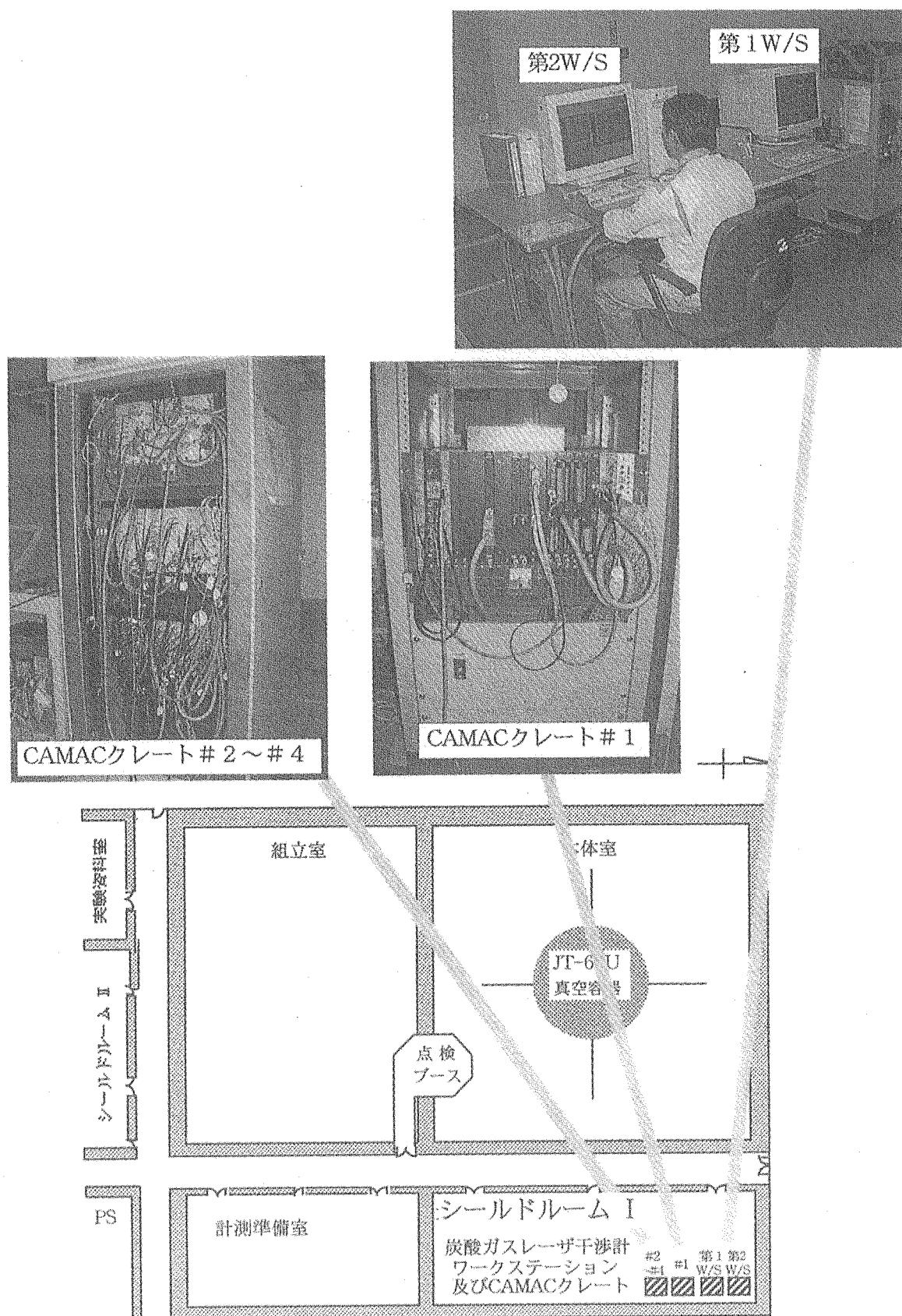
簡易データ収集装置 (EDS:Easy Data System)は、最高 $250\mu s$ のサンプリング時間で15秒間のプラズマ放電のデータ収集を行うものである。TMDsと同様、W/SとVMEメモリーモジュールから構成され、最大で50チャンネル分の容量をもち、1チャンネルあたり128KBまでのデータ取得が可能である。格納された各種計測データはデータサーバ及びISPへ転送されるようになっている。

### 5. 1. 11 RTP 装置

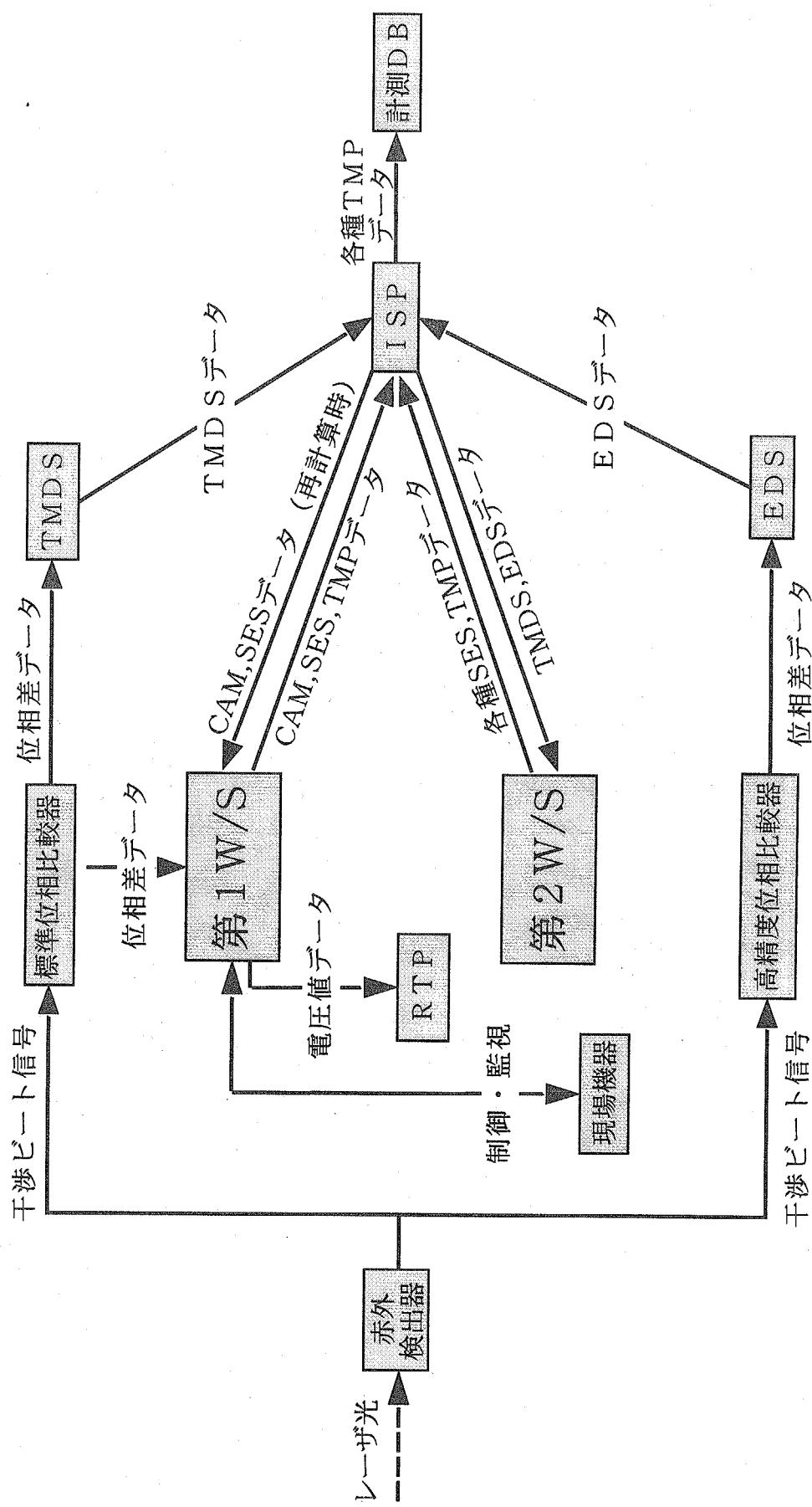
実時間処理計算機 (RTP:Real Time Processor)は、JT-60U実験放電において、実時間帰還制御を行うためのパラメータとなる複数の計測データを収集し、収集した各計測データに任意の演算処理を実施した後、全系へ転送するという一連の処理を 1 ms の周期で実施している。



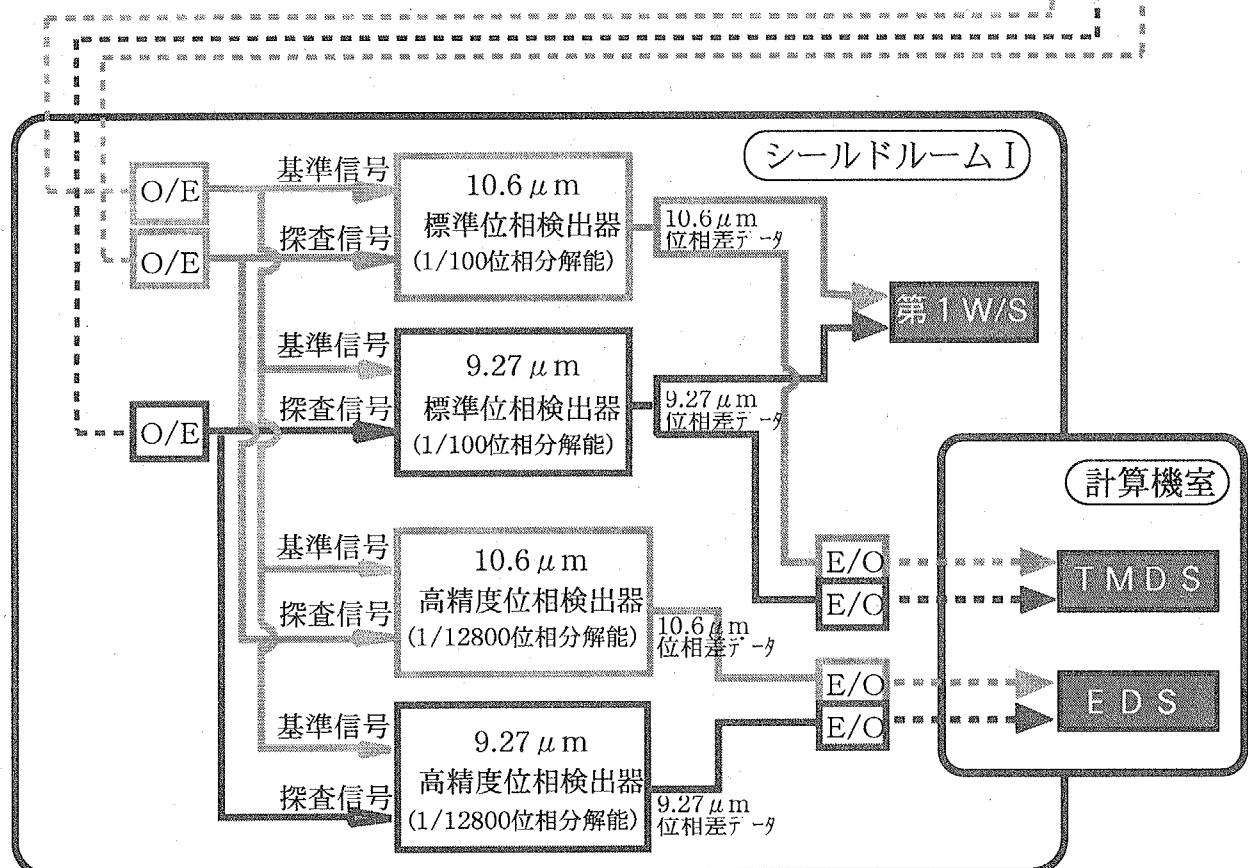
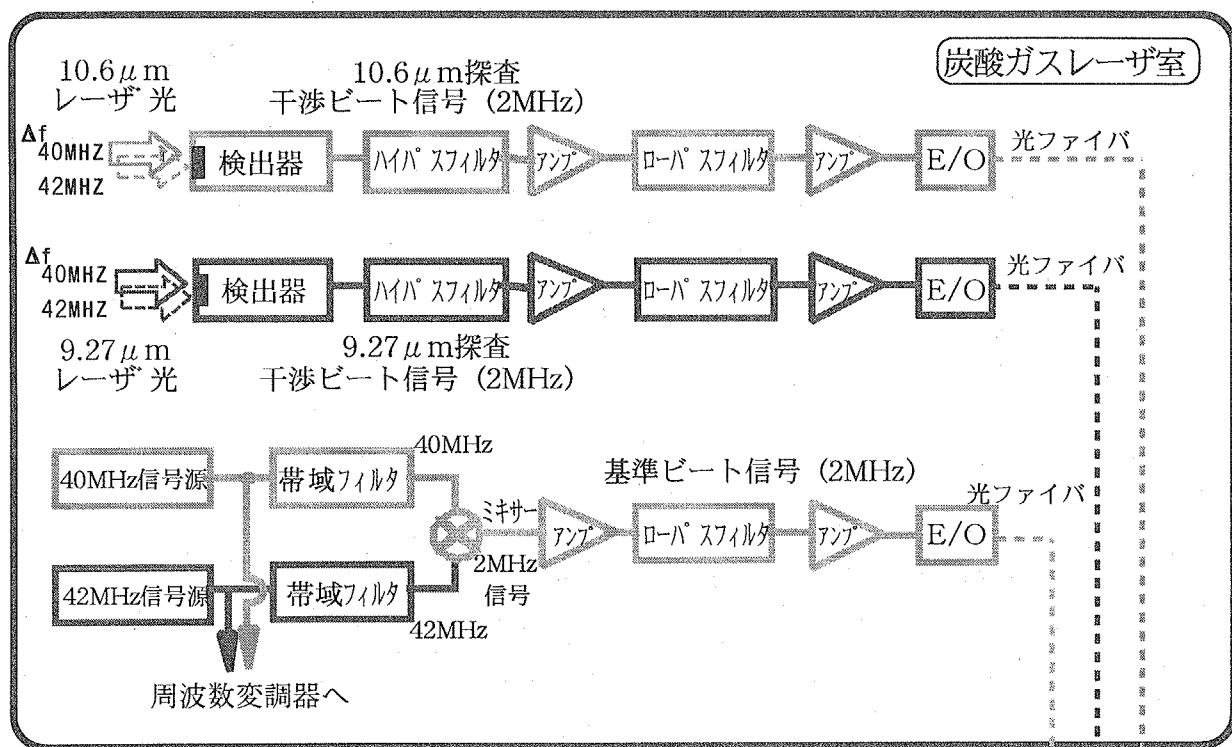
第5.1図 制御・データ処理システムの全体構成



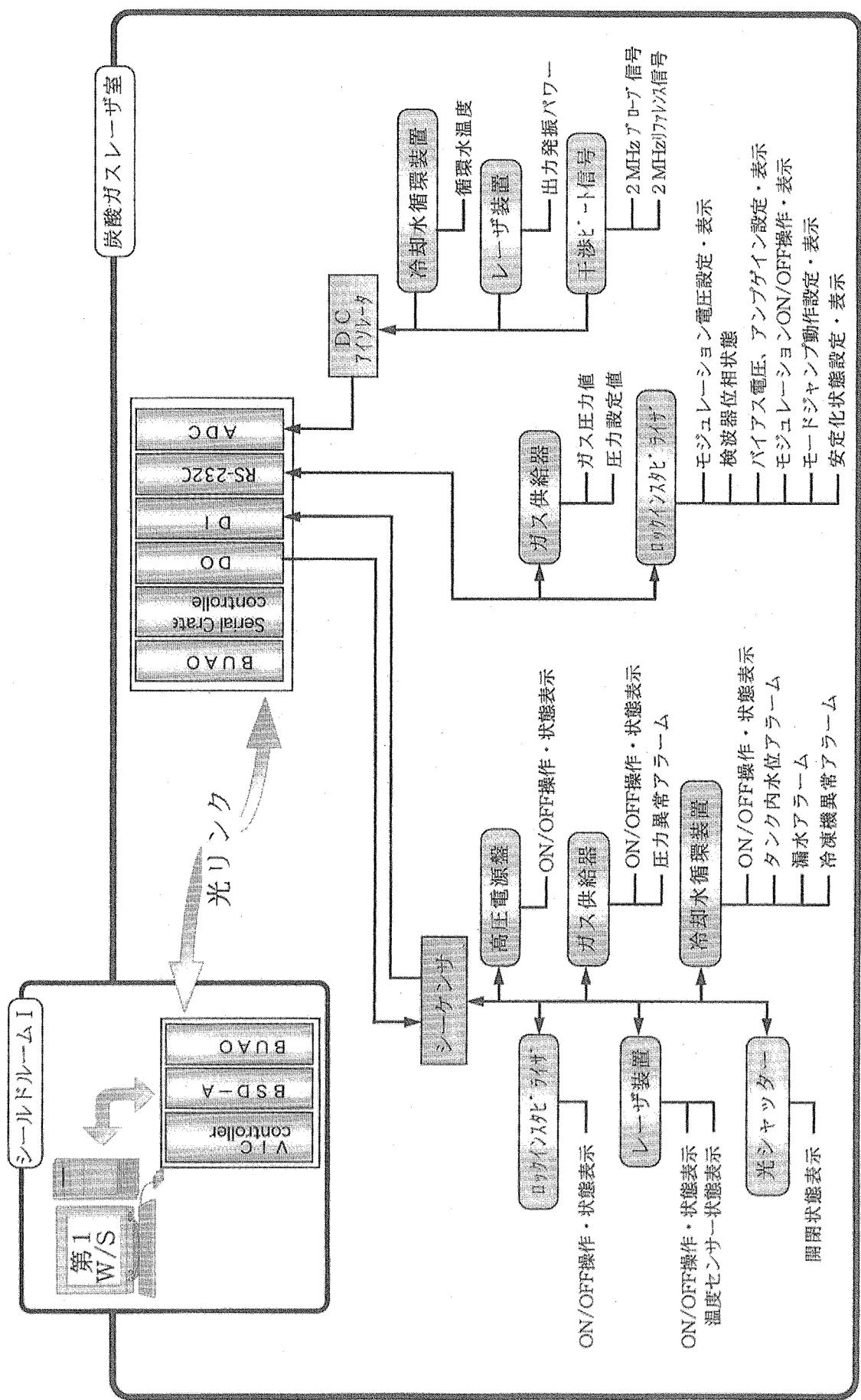
第5. 2図 JT-60実験棟3階配置



第5. 3図 各種信号系統



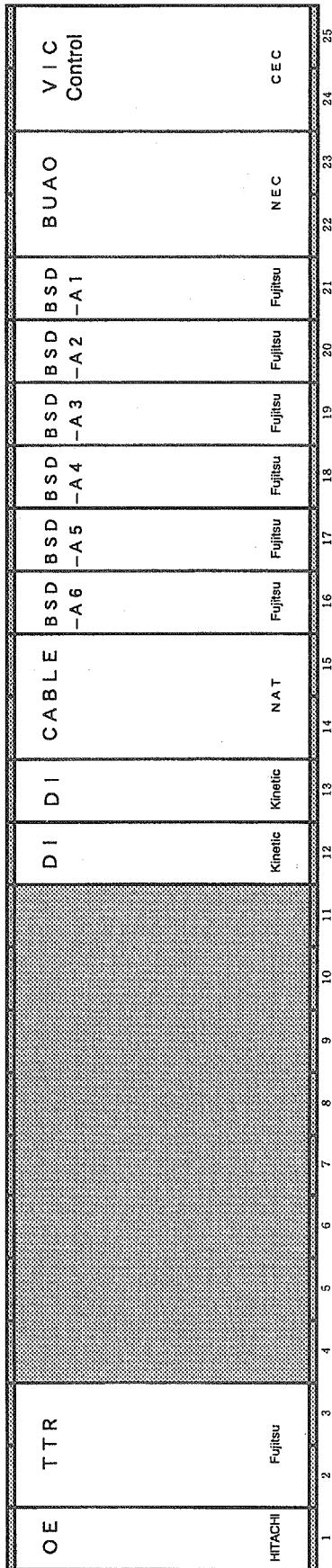
第5. 4図 干渉信号経路



監視遠隔制御・第5回

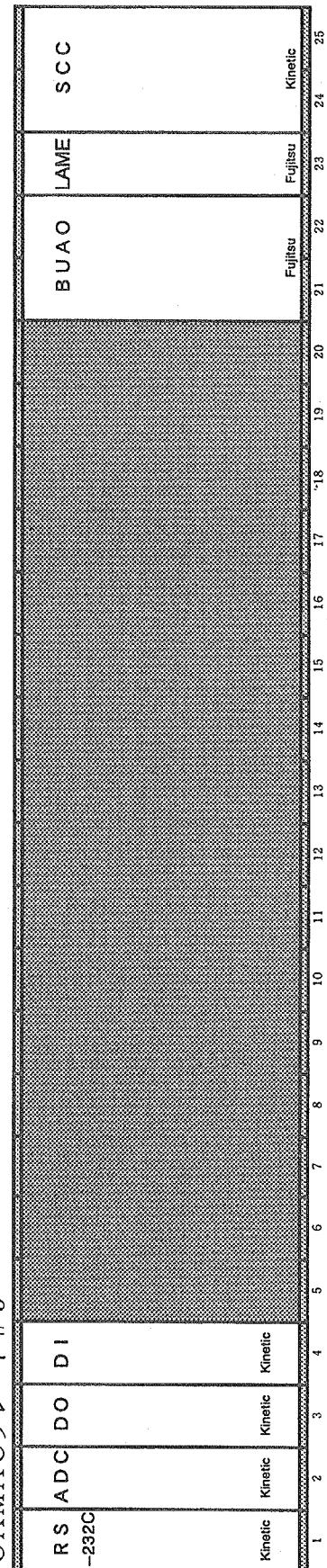
シールドルーム IEMI (ハーフ) ロックバー

CAMACクレート#1

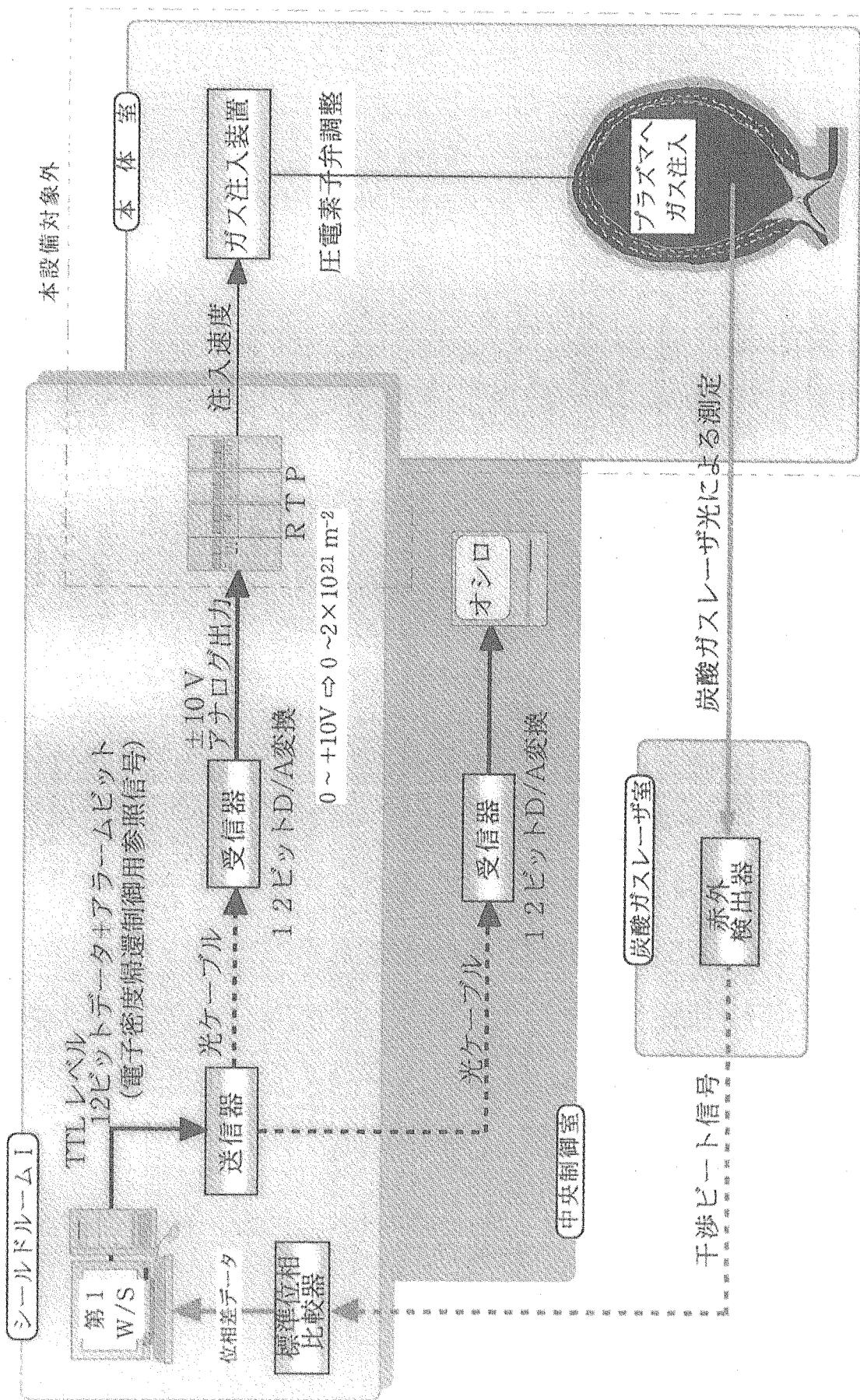


炭酸ガスレーザ室EMIロッカー

CAMACケーブル#5



第5. 6 図 CAMAC モジュール構成



第5.7図 美時間処理系の構成

# シールドルーム I EMI 口ツカ一

JAERI-Research 2001-050

CAMAC クレート # 2

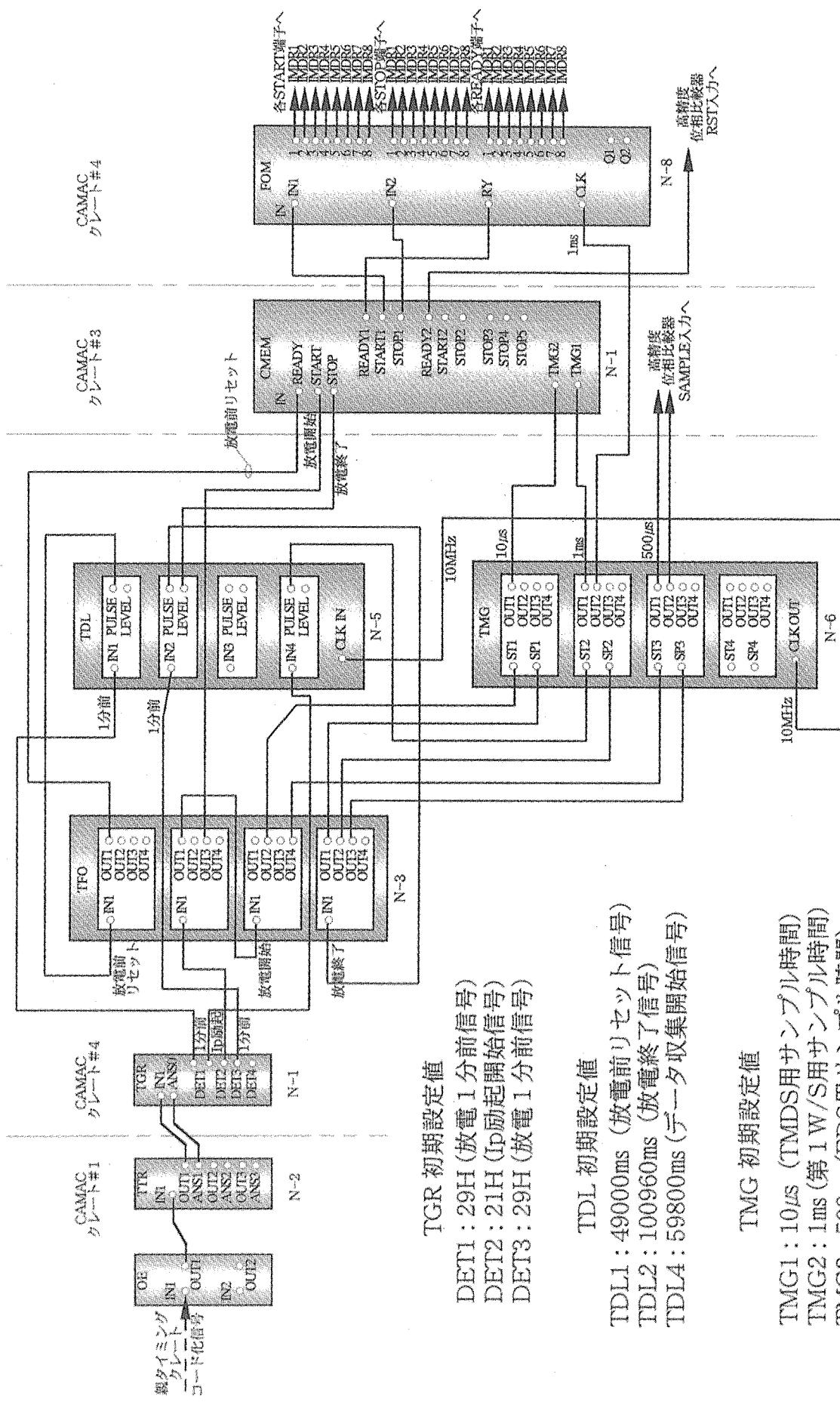
| INPUT |     | PHASE MEASURE |     | POWER SUPPLY |     | INPUT |     | PHASE MEASURE |     | POWER SUPPLY |     | BUAO |     | LAME |         | S C C   |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|-----|---------------|-----|--------------|-----|-------|-----|---------------|-----|--------------|-----|------|-----|------|---------|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| NAT   | NAT | NAT           | NAT | NAT          | NAT | NAT   | NAT | NAT           | NAT | NAT          | NAT | NAT  | NAT | NAT  | Fujitsu | Kinetic |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 1     | 2   | 3             | 4   | 5            | 6   | 7     | 8   | 9             | 10  | 11           | 12  | 13   | 14  | 15   | 16      | 17      | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |

CAMAC クレート # 3

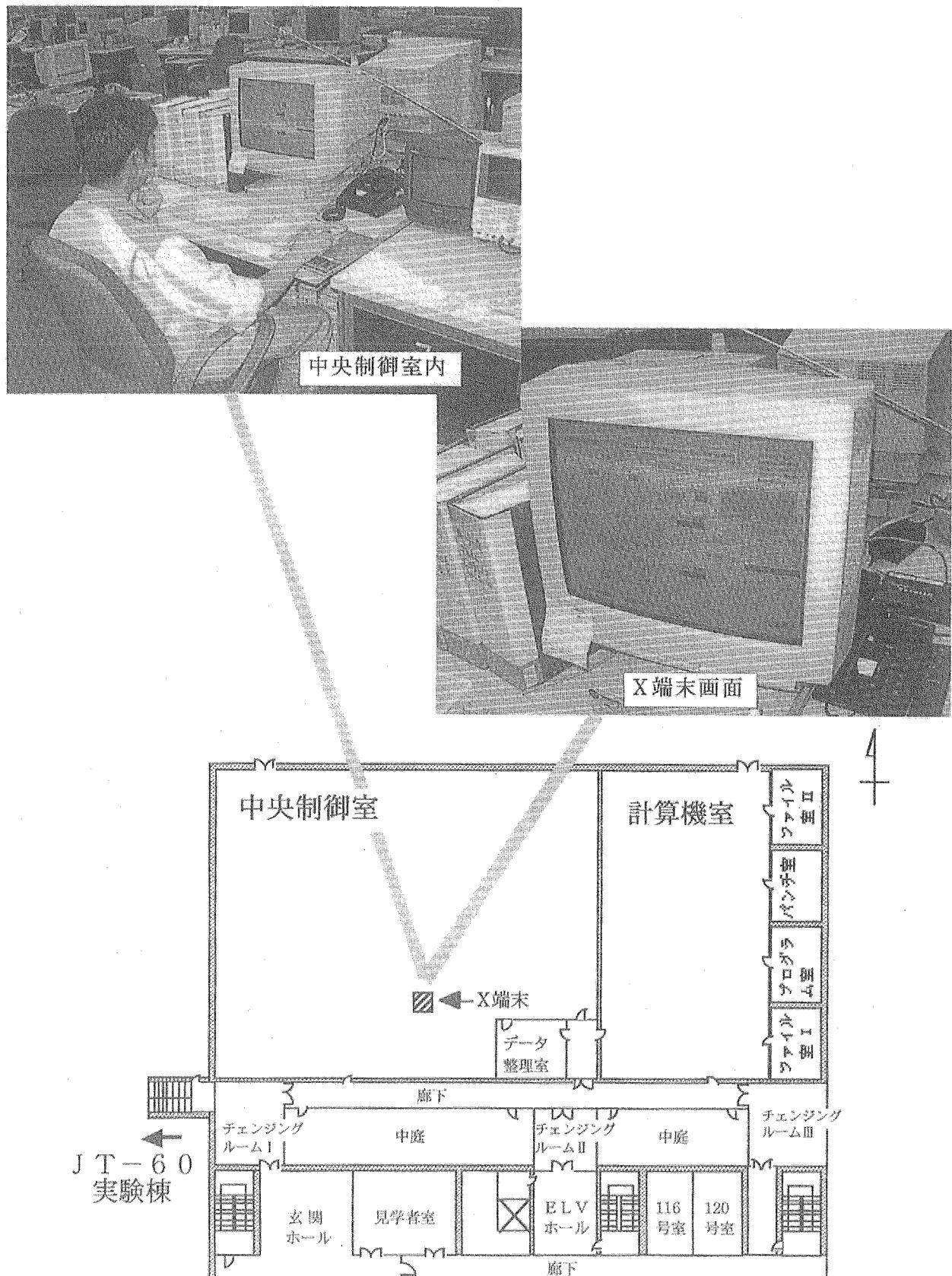
| CMM |     | CMPP |     | IMDR |     | CMPP |     | IMDR |     | EOH     |         | OE  |     | EOH     |     | CABLE   |     |    |    |    |    |    |    |    |
|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|---------|---------|-----|-----|---------|-----|---------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| NEC | NEC | NEC  | NEC | OKI  | OKI | NEC  | NEC | OKI  | OKI | Fujitsu | Fujitsu | NAT | NAT | Fujitsu | NAT | Fujitsu | NAT |    |    |    |    |    |    |    |
| 1   | 2   | 3    | 4   | 5    | 6   | 7    | 8   | 9    | 10  | 11      | 12      | 13  | 14  | 15      | 16  | 17      | 18  | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |

CAMAC クレート # 4

| TGR     |      | TFO     |         | TDL |     | TMG   |       | FOM     |       | IMDR    |       | IMDR    |       | IMDR  |       | IMDR |         | S C C |    |    |    |    |    |    |
|---------|------|---------|---------|-----|-----|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|------|---------|-------|----|----|----|----|----|----|
| Fujitsu | TOYO | Fujitsu | Fujitsu | NAT | NAT | Kaizu | Kaizu | Fujitsu | Kaizu | Fujitsu | Kaizu | Fujitsu | Kaizu | Kaizu | Kaizu | NEC  | Fujitsu | Kaizu |    |    |    |    |    |    |
| 1       | 2    | 3       | 4       | 5   | 6   | 7     | 8     | 9       | 10    | 11      | 12    | 13      | 14    | 15    | 16    | 17   | 18      | 19    | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |



第5. 9 図 タイミング信号経路



第5. 10図 JT-60制御棟1階配置

## 6. 制御・データ処理システムのソフトウェア概要

制御・データ処理システムのソフトウェアを開発するに当たり、以下に示すような開発指針を策案した。

### <開発指針>

- ・ 基本画面に現場機器類の情報を集約表示し、運転状態が一目して確認できるよう制御・監視機能の一元化を図る。
- ・ 処理機能の追加・変更等が生じた場合でも、他機能への波及効果を最小限に抑えられるよう分散化処理形態とする。
- ・ 汎用言語を用いたソフトウェアの開発とする。
- ・ ポップアップメニューによる階層化表示により操作性の向上を図る。
- ・ グラフィックスによる運転状態の正常・異常、レーザ発振光路などを明瞭に表示し、オペレータが一目して確認できるようにする。
- ・ データ収集・解析・転送といった一連の処理行程を、可能な限り自動処理化することで、オペレーションの簡素化を図る。

これらの開発指針を基に第1W/S及び第2W/Sの2式を使用した制御・データ処理システムのソフトウェアを構築した。

制御・データ処理システムのソフトウェアはC言語で書いたもので、データ収集、データ収集系のタイミング設定、データ解析、データ転送、解析結果格納、機器の制御・状態監視など全ての処理を行うものである。

データ収集・処理のプロセスとしては、まず実験放電と同期して標準位相比較器・ISPより順次データを収集し、W/S内のデータ領域に格納する。データ収集完了後、予め設定されたパラメータに従い解析プロセスにより自動的に解析を行い、解析データを計測-Net経由でISPへ転送、同時にプリンターへも自動出力している。また、第1・第2W/Sの各種パラメータの設定はX端末により遠隔にて行うこともできる。

### 6. 1 第1W/S系ソフトウェアの機能

第1W/Sでの処理ソフトウェアは、制御部、タイミング設定部、データ処理部の3つの処理部から構成される。制御部は遠隔によりレーザ発振器を含む主要機器の状態の常時監視・制御を行う。タイミング設定部はTGR・TDL・TMGモジュールにおいて、初期化及びタイミングコードの設定を行う。データ処理部は標準位相比較器からのデータの収集、自動的な解析・加工・データ転送・印刷を行う。

### 6. 1. 1 制御部のソフトウエア

制御部は、第1W/S内監視タイマーのタイムアウト毎にCAMA Cモジュールの光リンクを通して、各種現場機器の監視データを読み込み、監視情報を基本画面に表示する。また、第1W/S及びX端末より機器制御の要求を受けた場合もCAMA Cモジュールの光リンクを通して各種現場機器へ制御情報の送信を行う。基本画面を第6. 1図に示す。第6. 1表の制御項目一覧に示すように高圧電源盤のON/OFFや光シャッター開閉など約20点の機器制御は、基本画面からの選択により制御・設定することができる。制御・設定画面の一例を第6. 2図に示す。また、第6. 2表の監視項目一覧に示すようにレーザ出力発振パワー・光シャッター開閉状態・漏水アラーム・混合ガス圧力値など約60点の監視項目については、各機器の状態及びモニタ値を周期的に基本画面へ反映することで常に最新情報を表示させている。状態監視画面の一例を第6. 3図に示す。更にメニュー画面とは関係なく常にアラーム表示領域が確保されており、機器に異常が発生した場合には第6. 4図のようにアラーム表示を出すようにしている。

### 6. 1. 2 タイミング部のソフトウエア

第1W/Sのシステム起動時にCAMA Cモジュールの初期化、タイミングコードの設定を行う。これらの設定値は、第1W/Sより隨時可変可能となっている。第6. 5図にタイミング設定画面を示す。タイミングに関する主な設定値は以下の通りとなる。

#### < T G R >

- ch 1 : 29H (放電1分前信号)
- ch 2 : 21H ( $I_p$ 励起開始信号)
- ch 3 : 29H (放電1分前信号)

#### < T D L >

- ch 1 : 49000ms (放電前リセット時間)
- ch 2 : 100960ms (放電1分前受信から放電終了までの時間)
- ch 4 : 59800ms (1msサンプリング処理用：放電1分前受信  
からデータ収集開始までの時間)

#### < T M G >

- ch 1 : 10μs (TMD S用サンプリング時間)
- ch 2 : 1ms (第1W/S用サンプリング時間)
- ch 3 : 500μs (EDS用サンプリング時間)

### 6. 1. 3 データ処理部のソフトウェア

#### (1) データ収集

親タイミング信号 (T G R : 放電 1 分前) の受信後、実験放電数秒前 (T D L の設定時間) より標準位相比較器からのデータ読み込み準備を行う。実験放電が開始 ( $I_p$  励起) されると、標準位相比較器からの位相差データが D I モジュールへ書き込みを開始すると共に、第 1 W/S にても D I モジュールのデータを読み始め、あらかじめ設定されたデータ数を読み込むと収集完了と判断し、自動的にデータ処理を開始する。データ数は、放電時間・サンプリング時間から計算した 2 倍数にセットする。第 6. 3 表に各収集速度での位相差データ収集について示す。

#### (2) データ解析

収集した位相差データを解析・加工・処理し、電子密度を算出、各種データファイルの創成を行う。創成されるデータファイルは、計測データである位相差データ (C A M) 、計測器状況データである設定条件データ (S E S) 、物理データである電子密度データ (T M P) となっている。創成された C A M ファイルは、第 1 W/S のハードディスク内に格納保存されるが、ハードディスクの容量制限により 150 放電分に限られる。その後の実験放電データについては既に格納済みのファイルに順次上書きすることになる。第 6. 6 図に補正パラメータ設定画面を示す。データ解析及びデータファイルの創成手順は以下の通りである。

#### <位相差データの収集>

##### ①データファイルの創成

C A M 信号 2 系統 (波長:  $10.6 \mu m$  及び  $9.27 \mu m$  の各位相差データ) のデータファイル

- ・データ加工なし
- ・2 byte × サンプリング数 × 2 系統

##### ②データファイルの創成

計測器状況 S E S データファイル

- ・放電番号、日付け、演算パラメータ情報、データ収集情報等

#### <位相差データ解析>

##### ③位相差データの連結

実験放電において機械的振動変位によるレーザ光路長変化が大きい場合には、位相変化整数分がカウントアップまたはカウントダウンし零リセットされ、ノコギリ波状の位相出力となる。このような零リセット発生時の前後で位相差データを連結する。

#### ④位相差データの原点設定

時刻-0.2秒からデータの測定を開始しているが、データ取り込みを開始した時点ではプラズマが無い状態にも関わらず、原点ドリフトなどによって位相差データが0になっていない場合がある。これを修正するため放電開始直前の複数データ点の平均値を原点（零点）とし、位相差データ全体から算出値を減算する。

#### ⑤位相飛びの補正 (Sync/Async/OFF選択可)

1サンプリング時間で設定値を越える位相変化を検出した場合、検出前の数データの平均値と検出後の数データの平均値を算出し両方のデータの差分だけ検出後のデータをシフトする。モードとしては、Sync（どちらか片方の系統にて位相飛びを検出した場合でも、2系統とも同期して補正する）、Async（どちらか片方の系統にて位相飛びを検出した場合、その系統のみ独自に補正する）がある。

#### ⑥平滑化処理 (Triangle/Rectangle/Sin/FFT/OFF選択可)

平滑化処理モードには、移動平均法と周波数領域法とがある。移動平均法では、三角形・矩形・放射物の重み関数を使用したモードを選び、複数データ点の平滑化処理を行なう。また、周波数領域法ではFFT（高速フーリエ変換）を用いた設定周波数成分での平滑化を行なう。

#### ⑦データファイルの創成

##### 位相差データ 2 系統のデータファイル

- ・データ加工あり (③～⑥) : データ点平滑化
- ・4 Byte × サンプリング数 × 2 系統

#### <電子密度データ解析>

#### ⑧電子密度飛びの補正 (ON/OFF選択可)

⑦項の2系統データから電子密度計算を行い、設定値を越える電子密度飛びを検出した場合、検出前の数データの平均値と検出後の数データの平均値を算出し両方のデータの差分だけ検出後のデータをシフトする。

#### ⑨データファイルの創成

##### 電子密度のデータファイル

- ・データ加工あり (③～⑥、⑧) : データ点平滑化+電子密度飛び
- ・4 Byte × サンプリング数

#### ⑩ベースラインドリフト補正 (Linear/Fringe/OFF選択可)

放電終了以降の時点での原点を計算しそれがずれていた場合には、ドリフトとみなしはデータ全体に補正を施す。原点の計算は、放電終了後の複数データ点の平均値を原点（零点）とする。モードには、Linear（始点から終点までを直線的に補正する）、Fringe（位相差データの変化量に比例して補正する）がある。

## ⑪データファイルの創成

### 電子密度のデータファイル

- ・データ加工あり（③～⑥、⑩）：データ点平滑化+ベースラインドリフト
- ・4 Byte×サンプリング数

## ⑫データファイルの創成

### 電子密度のデータファイル

- ・データ加工あり（③～⑥、⑧、⑩）：データ点平滑化+電子密度飛び  
+ベースラインドリフト
- ・4 Byte×サンプリング数

## （3）データ転送

J T - 6 0 U 実験放電シーケンスに同期して第 1 W/S にて解析・処理したデータファイルを放電直後に I S P へ転送する。更に、過去のデータ再計算結果についても同様に転送することができ、I S P 内に同放電番号がある場合には上書きされる。第 6. 4 表は I S P へ転送するファイルサイズを示したものである。転送するデータファイルは、位相差データ（C A M）、算出した電子密度物理データ（T M P）、計測器状況データ（S E S）の 3 種類である。T M P データは一般利用のため計測 D B にてデータベース化され D A I S Y などで解析・評価が行えるようになっている。第 6. 5 表に T M P データの転送リストを示す。

- ① C A M ファイルは、2 バイト長の整数型データの列となり、2 系統の計測データ列が時刻進展の順に転送される。
- ② T M P ファイルは、計測データである位相差データ、及び算出した電子密度物理データに各種補正処理を施したデータが転送される。
- ③ S E S ファイルは、計測機器の詳細な設定値が転送される。

## （4）グラフ表示

実験放電が終了するとほぼ同時期に電子密度の計算結果を表示することが可能である。第 6. 7 図に示すように、グラフ波形は 1 画面中に位相差 1 及び位相差 2 の補正なしデータ及びデータ点平滑化補正後のデータ波形、電子密度波形が表示される。更に、各種補正のデータ処理情報なども同画面にて表示される。画面への表示情報は以下の通りである。

- ①位相差 1 及び位相差 2 の位相飛び情報
- ②データ点平滑化の処理モード及びデータ点数
- ③電子密度飛び情報
- ④位相飛び補正の設定値及び飛び発生回数情報
- ⑤電子密度飛び補正の設定値及び飛び発生回数情報

#### ⑥ベースライン補正のモード及び設定値情報

#### 6. 1. 4 實時間処理用ソフトウェア

実時間処理ソフトウェアは、第1W/Sにて収集される位相差データを実時間にて解析・補正加工・RTPへの転送を行い、電子密度を実時間帰還制御するための参照用実績密度信号を生成するものである。特徴としては、位相飛び・電子密度飛び・データ点平滑化の各種補正を行なながらも十分に速い周期にて処理を実現している点が挙げられる。時間周期1ms毎に1回 RTPへデータ出力が行えるよう、下記のデータ演算時間を最適化している。

(※1に関しては第6. 6表、※2に関しては第6. 7表に示す。)

データ演算時間 = (収集速度と移動平均処理点数による演算待ち時間) \* 1  
   + (位相差データの連結及び演算時間)     --- 1 \* 2  
   + (位相差データの原点設定による演算時間)  
   + (移動平均による平滑化処理の演算時間)  
   + (電子密度算出の演算時間)  
   + (電子密度飛び補正処理の演算時間)  
   + (ベースラインドリフト補正処理の演算時間)  
   + (実時間データの変換時間)     --- 1

## 6.2 第2W/S系ソフトウェアの機能

第2W/Sにおける処理ソフトウェアは、標準位相比較器のTMD S大容量位相差データ及び高精度位相比較器にて検出されたEDS高精度位相差データをISPから読み、自動的に解析・加工・データ転送・印刷を行う機能を有する。

### 6. 2. 1 データ処理部のソフトウェア

### (1) データ収集

各位相比較器からT M D S 及びE D S へ転送、格納されたデータが、実験放電終了後更にI S P に格納されるまで約5～6分程度の時間を要する。T M D S へ転送している位相差データの格納トラック番号は3トラック（位相差1データ、波長：10.6 μm）、7トラック（位相差2データ、波長：9.27 μm）である。また、E D S に転送している位相差データの格納トラック番号は、1～4トラック（位相差1データ、波長：10.6 μm）、5～8トラック（位相差2データ、波長：9.27 μm）となり、さらに内訳として1～4、5～8トラックとも順に整数部、小数部上位、小数部下位、ディレイデータとなっている。第2W/Sでは放電1分前信号受信からI S P に格納されるまでの目安時間を事前

に設定し、タイムアップ後、自動的にISPからTMDS及びEDSの計測データの収集を開始し、データ処理を開始する。各収集速度での位相差データ収集について第6. 8表、及び第6. 9表に示す。

### (2) データ解析

収集した位相差データを解析・加工・処理し、電子密度を算出、各種データファイルの創成を行う。創成されるデータファイルは、計測データであるTMDS及びEDSデータ(TMDS・EDS)、計測器状況データである設定条件データ(SES)、物理データである電子密度データ(TMP)となっている。創成したTMDS・EDSデータは、第2W/Sのハードディスク内に格納保存されるが、ハードディスクの容量制限により150放電分に限られる。その後の実験放電データについては既に格納済みのファイルに順次上書きすることになる。データ解析及びデータファイルの創成手順は6. 1. 3の(2)項と同様である。第6. 8図に補正パラメータ設定画面を示す。

### (3) データ転送

データの転送については、6. 1. 3の(3)項と同様である。ISPへ転送するファイルサイズを第6. 10表、及び第6. 11表に示す。第5. 3図に示すように、転送するデータファイルは、算出した電子密度物理データTMP、計測器状況データSESの2種類である。更にTMPデータは計測DBにてデータベース化されDAISYなどで解析・評価ができる。第6. 5表にTMPファイル転送リストを示す。

- ① TMPファイルは、計測データである位相差データ、及び算出した電子密度物理データに各種補正処理を施したデータが転送される。
- ② SESファイルは、計測機器の詳細な設定値が転送される。

### (4) グラフ表示

第2W/Sでの処理結果は、第6. 7図と同様なスタイルにてグラフ表示される。更に、各種補正のデータ処理情報なども同様に表示される。

## 第6. 1表 制御項目一覧

| 装置名             | 信号名              | 信号形態    |
|-----------------|------------------|---------|
| AOM用冷却水循環装置     | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| ロックインスタビライザNo.1 | 電源OFF操作          | RS-232C |
|                 | アンプゲイン設定         | RS-232C |
|                 | モジュレーション電圧設定     | RS-232C |
|                 | バイアス電圧設定         | RS-232C |
|                 | モジュレーションON/OFF設定 | RS-232C |
|                 | モードジャンプ動作設定      | RS-232C |
|                 | 掃引速度設定           | RS-232C |
|                 | 安定化状態設定          | RS-232C |
| ロックインスタビライザNo.2 | 電源OFF操作          | RS-232C |
|                 | アンプゲイン設定         | RS-232C |
|                 | モジュレーション電圧設定     | RS-232C |
|                 | バイアス電圧設定         | RS-232C |
|                 | モジュレーションON/OFF設定 | RS-232C |
|                 | モードジャンプ動作設定      | RS-232C |
|                 | 掃引速度設定           | RS-232C |
|                 | 安定化状態設定          | RS-232C |
| ガス供給器           | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| 発信器用冷却水循環装置     | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| 高圧電源 I          | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| 高圧電源 II         | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| インターロック制御盤      | 電源OFF操作          | 無電圧接点   |
| 光シャッター1, 2      | シャッタ開閉設定         | 無電圧接点   |

第6. 2表 監視項目一覧 (1 / 3)

| 装置名             | 信号名              | 信号形態    |
|-----------------|------------------|---------|
| ガス供給器           | 電源ON/OFF状態       | 無電圧接点   |
|                 | 供給ガス(1)圧力値       | RS-232C |
|                 | 供給ガス(1)圧力上限設定値   | RS-232C |
|                 | 供給ガス(1)圧力上限アラーム  | 無電圧接点   |
|                 | 供給ガス(1)圧力下限設定値   | RS-232C |
|                 | 供給ガス(1)圧力下限アラーム  | 無電圧接点   |
|                 | 供給ガス(2)圧力値       | RS-232C |
|                 | 供給ガス(2)圧力上限設定値   | RS-232C |
|                 | 供給ガス(2)圧力上限アラーム  | 無電圧接点   |
|                 | 供給ガス(2)圧力下限設定値   | RS-232C |
|                 | 供給ガス(2)圧力下限アラーム  | 無電圧接点   |
| ロックインスタビライザNo.1 | 電源ON/OFF状態       | 無電圧接点   |
|                 | モジュレーション電圧表示     | RS-232C |
|                 | 検波器位相状態          | RS-232C |
|                 | バイアス電圧表示         | RS-232C |
|                 | モジュレーションON/OFF表示 | RS-232C |
|                 | 安定化状態表示          | RS-232C |
| ロックインスタビライザNo.2 | 電源ON/OFF状態       | 無電圧接点   |
|                 | モジュレーション電圧表示     | RS-232C |
|                 | 検波器位相状態          | RS-232C |
|                 | バイアス電圧表示         | RS-232C |
|                 | モジュレーションON/OFF表示 | RS-232C |
|                 | 安定化状態表示          | RS-232C |
| 高圧電源Ⅰ           | 電源ON/OFF状態       | 無電圧接点   |
| 高圧電源Ⅱ           | 電源ON/OFF状態       | 無電圧接点   |

第6. 2表 監視項目一覧 (2 / 3)

| 装置名     | 信号名                             | 信号形態    |
|---------|---------------------------------|---------|
| レーザ I   | レーザ出力発振パワー                      | 0~1V DC |
|         | 漏水アラーム表示                        | 無電圧接点   |
|         | 温度センサ状態表示                       | 無電圧接点   |
| レーザ II  | レーザ出力発振パワー                      | 0~1V DC |
|         | 漏水アラーム表示                        | 無電圧接点   |
|         | 温度センサ状態表示                       | 無電圧接点   |
| 機器信号端子盤 | レーザ I<br>リモート/ローカル状態表示          | 無電圧接点   |
|         | レーザ II<br>リモート/ローカル状態表示         | 無電圧接点   |
|         | 高圧電源 I<br>リモート/ローカル状態表示         | 無電圧接点   |
|         | 高圧電源 II<br>リモート/ローカル状態表示        | 無電圧接点   |
|         | ガス供給器<br>リモート/ローカル状態表示          | 無電圧接点   |
|         | 発振器用冷却水循環装置<br>リモート/ローカル状態表示    | 無電圧接点   |
|         | AOM用冷却水循環装置<br>リモート/ローカル状態表示    | 無電圧接点   |
|         | ロックインスタビライザ I<br>リモート/ローカル状態表示  | RS-232C |
|         | ロックインスタビライザ II<br>リモート/ローカル状態表示 | RS-232C |
|         | 2 MHzプローブ信号(1)                  | 0~5V DC |
| 干渉ビート信号 | 2 MHzプローブ信号(2)                  | 0~5V DC |
|         | 2 MHzリファレンス信号(1)                | 0~5V DC |
|         | 2 MHzリファレンス信号(2)                | 0~5V DC |
|         |                                 |         |

第6. 2表 監視項目一覧 (3 / 3)

| 装置名         | 信号名         | 信号形態    |
|-------------|-------------|---------|
| AOM用冷却水循環装置 | 電源ON/OFF状態  | 無電圧接点   |
|             | 循環水温度       | 0~5V DC |
|             | タンク内水位アラーム  | 無電圧接点   |
|             | 漏水アラーム      | 無電圧接点   |
|             | 冷却器異常アラーム   | 無電圧接点   |
| 発振器用冷却水循環装置 | 電源ON/OFF状態  | 無電圧接点   |
|             | 循環水温度       | 0~5V DC |
|             | タンク内水位アラーム  | 無電圧接点   |
|             | 漏水アラーム      | 無電圧接点   |
|             | 冷却器異常アラーム   | 無電圧接点   |
| インターロック制御盤  | 電源ON/OFF状態  | 無電圧接点   |
|             | インターロック制御状態 | 無電圧接点   |
| 光シャッター1     | シャッター開閉状態表示 | 無電圧接点   |
| 光シャッター2     | シャッター開閉状態表示 | 無電圧接点   |
| 漏水センサー1     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |
| 漏水センサー2     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |
| 漏水センサー3     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |
| 漏水センサー4     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |
| 漏水センサー5     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |
| 漏水センサー6     | 漏水アラーム表示    | 無電圧接点   |

第6. 3表 第1W/Sでの位相差データ収集

| サンプリング時間 | データ収集範囲        | データ収集時間   | データ収集点数    |
|----------|----------------|-----------|------------|
| 1 m s    | -0.2~20.28 (秒) | 20.48 (秒) | 20,480 (点) |
| 2 m s    | -0.2~40.36 (秒) | 40.96 (秒) | 20,480 (点) |
| 4 m s    | -0.2~40.36 (秒) | 40.96 (秒) | 10,240 (点) |

※1 データ収集点数は、位相差データ1系統あたりのデータ数とする。

※2 データ収集範囲は、 $I_p$ 励起を0秒とした経過時間とする。

第6. 4表 第1W/Sデータ処理結果の  
転送ファイルサイズ

| データ項目名                 | データ収集速度 | CAMファイルサイズ<br>点数×2系統×データ長 | TMPファイルサイズ<br>点数×データ数×データ長 | SESファイルサイズ |
|------------------------|---------|---------------------------|----------------------------|------------|
| A 6 D<br>(CAM/<br>SES) | 1 m s   | 20,480×2×2 (Byte)         | 20,000×8×4 (Byte)          | 4,096Byte  |
|                        | 2 m s   | 20,480×2×2 (Byte)         | 20,000×8×4 (Byte)          |            |
| A 1 C<br>(TMP)         | 4 m s   | 10,240×2×2 (Byte)         | 10,000×8×4 (Byte)          |            |

第6.5表 TMPデータ転送リスト

| 項目  | P I D番号        | 内容                                | D A I S Y略称   | 処理内容  |
|-----|----------------|-----------------------------------|---|---|
| 1AC | DP2110<br>I012 | 線積分電子密度<br>第1W/S用<br>(1msサンプリング)  | NELCO2<br>NELT<br>NELB<br>NELTB<br>FR1<br>FR2<br>CM1<br>CM2         | 処理なし<br>平滑化+飛び補正<br>平滑化+ベースライン補正<br>平滑化+飛び補正<br>+ベースライン補正<br>平滑化<br>平滑化<br>CAM1<br>CAM2 |
| 1AD | DP2110<br>I013 | 線積分電子密度<br>TMD S用<br>(10μSサンプリング) | TNELCO2<br>TNELT<br>TNELB<br>TNELTB<br>TFR1<br>TFR2<br>TCM1<br>TCM2 | 同上  |
| 1AE | DP2110<br>I014 | 線積分電子密度<br>EDS用<br>(500μSサンプリング)  | ENELCO2<br>ENELT<br>ENELB<br>ENELTB<br>EFR1<br>EFR2<br>ECM1<br>ECM2 | 同上  |

第6. 6表 収集速度と移動平均処理点数の  
違いによる演算待ち時間

| 収集速度   | 移動平均処理<br>点数 | 3点    | 5点    | 7点    | 9点    | 11点   | ..... | 99点    |
|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 10 μs  |              | 10μs  | 20μs  | 30μs  | 40μs  | 50μs  | ..... | 490μs  |
| 20 μs  |              | 20μs  | 40μs  | 60μs  | 80μs  | 100μs | ..... | 980μs  |
| 50 μs  |              | 50μs  | 100μs | 150μs | 200μs | 250μs | ..... | 2.45ms |
| 100 μs |              | 100μs | 200μs | 300μs | 400μs | 500μs | ..... | 4.9ms  |
| 200 μs |              | 200μs | 400μs | 600μs | 800μs | 1ms   | ..... | 9.8ms  |

第6. 7表 実機による各種演算処理時間の評価結果

| 演 算 項 目             | 演 算 時 間          |               |
|---------------------|------------------|---------------|
|                     | m i n.           | m a x.        |
| 位相差データの連結及び演算時間     | 10.5μs           | 10.8μs        |
| 位相差データの原点設定による演算時間  | 2.5μs            | 2.5μs         |
| 移動平均による平滑化処理の演算時間   | 14.1μs (3点)      | 180.0μs (99点) |
| 電子密度算出の演算時間         | 4.2μs            | 4.2μs         |
| 電子密度飛び補正処理の演算時間     | 6.3μs            | 7.1μs         |
| ベースラインドリフト補正処理の演算時間 | 1.6μs            | 1.6μs         |
| 実時間データの変換時間         | 3.3μs            | 3.8μs         |
| 合 計                 | 42.5μs ~ 210.0μs |               |

第6. 8表 TMD S大容量位相差データ収集

| 収集速度  | データ収集範囲      | データ収集点数       | 第2W/Sでの解析点数        |
|-------|--------------|---------------|--------------------|
| 10 μs | 0.0~17.0 (秒) | 1,700,000 (点) | 170,000点 (収集点数/10) |

- ※1 データ収集点数は、位相差データ1系統あたりのデータ数とする。
- ※2 データ収集範囲は、 $I_p$ 励起を0秒とした経過時間とする。
- ※3 第2W/Sでの解析点数は、ワークステーションのメモリ容量による制約のためデータ収集点数の1/10となっている。

第6. 9表 EDS高精度位相差データ収集

| 収集速度   | データ収集範囲                    | データ収集点数    | 第2W/Sでの解析点数 |
|--------|----------------------------|------------|-------------|
| 5 μs   | $s \sim (s + 0.32768)$ (秒) | 65,536 (点) | 65,536 (点)  |
| 10 μs  | $s \sim (s + 0.65536)$ (秒) | 65,536 (点) | 65,536 (点)  |
| 50 μs  | $s \sim (s + 3.2768)$ (秒)  | 65,536 (点) | 65,536 (点)  |
| 100 μs | $s \sim (s + 6.5536)$ (秒)  | 65,536 (点) | 65,536 (点)  |
| 500 μs | $s \sim (s + 32.768)$ (秒)  | 65,536 (点) | 65,536 (点)  |

- ※1 データ収集点数は、位相差データ1系統あたりのデータ数とする。
- ※2 データ収集範囲の  $s$  は任意に設定が可能な収集開始時間とする。  
収集速度を  $r$  ( $\mu s$ ) とすると、 $I_p$ 励起を0秒とした収集時間は下記の様に表すことが出来る。

$$s \sim (s + (r \times 65536 \times 10^{-6})) \quad (\text{秒})$$

第6. 10表 TMD S大容量データ処理結果の  
転送ファイルサイズ

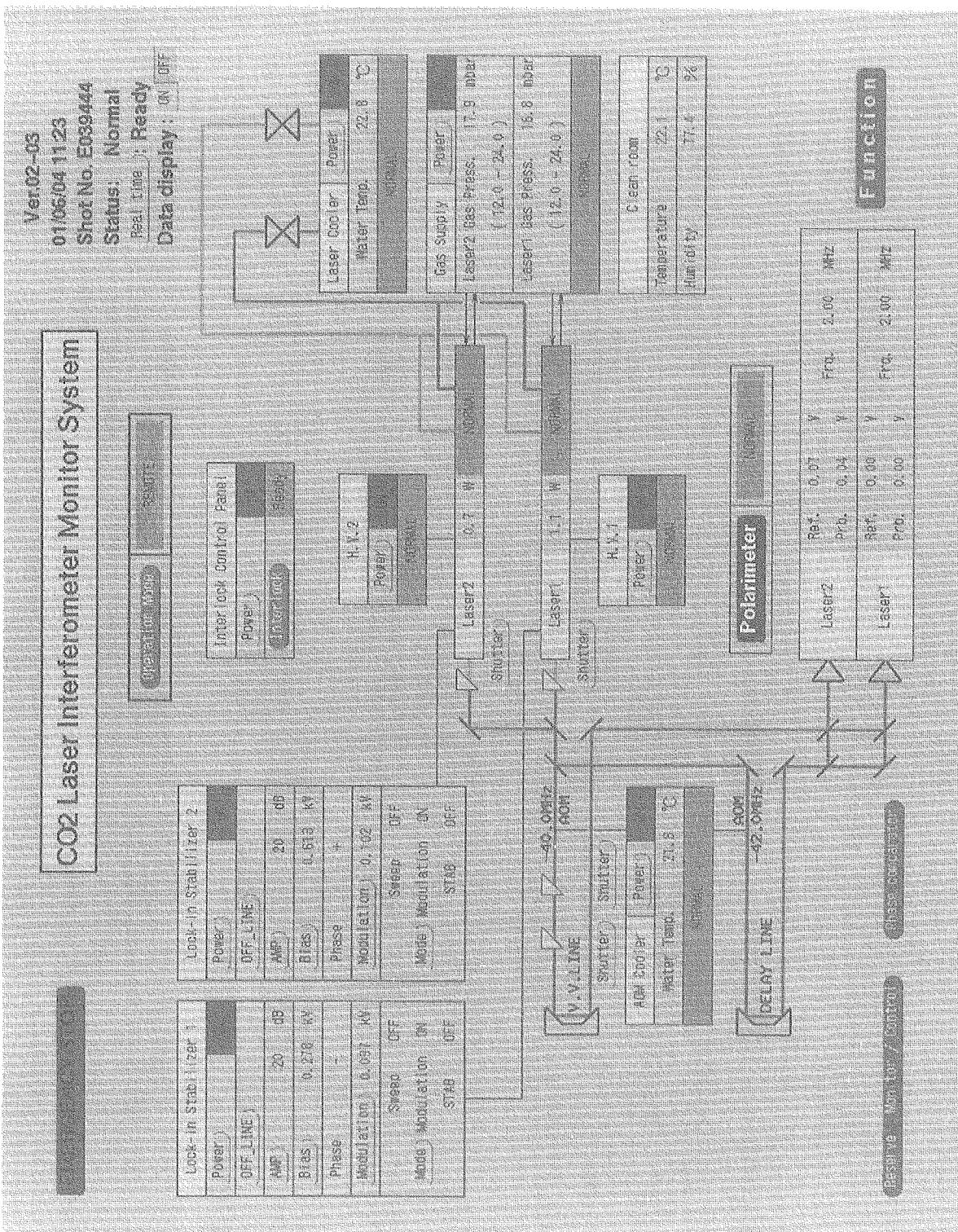
| データ項目名                | データ収集速度     | T M P ファイルサイズ<br>点数×データ数×データ長 | S E S ファイル<br>サイズ |
|-----------------------|-------------|-------------------------------|-------------------|
| 3、7 トラック<br>(T M D S) |             |                               |                   |
| C O B<br>(S E S)      | 1 0 $\mu$ s | 17,000×8×4 (Byte)             | 4,096 Byte        |
| A 1 D<br>(T M P)      |             |                               |                   |

※1 T M P ファイルのデータ点数は、D A I S Y のデータ処理点数による制約のため、第2W/Sでの解析点数の1/10となっている。

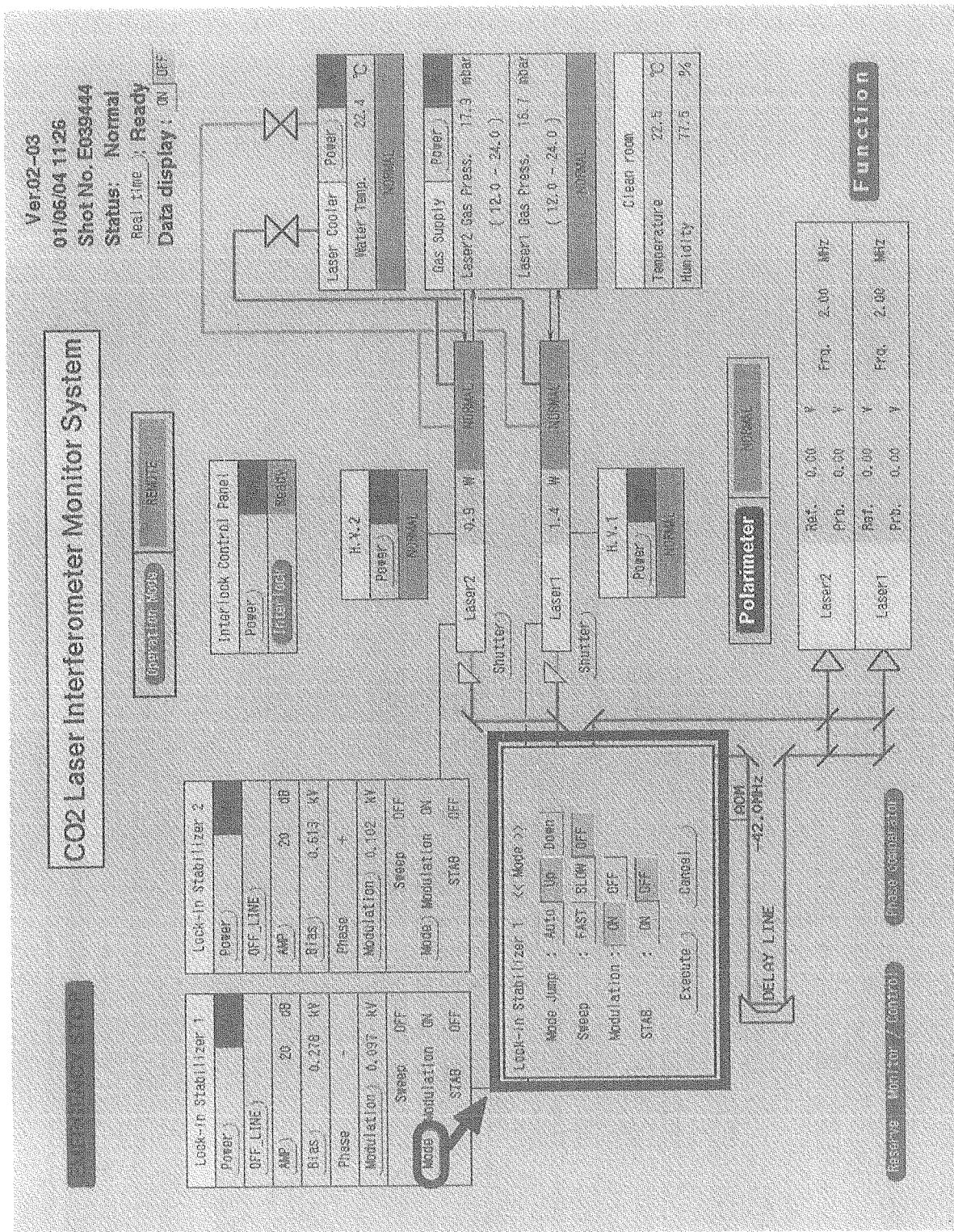
第6. 11表 E D S高精度データ処理結果の  
転送ファイルサイズ

| データ項目名                | データ収集速度       | T M P ファイルサイズ<br>点数×データ数×データ長 | S E S ファイル<br>サイズ |
|-----------------------|---------------|-------------------------------|-------------------|
| 1 ~ 4                 | 5 $\mu$ s     |                               |                   |
| 5 ~ 8 トラック<br>(E D S) | 1 0 $\mu$ s   |                               |                   |
| C O A<br>(S E S)      | 5 0 $\mu$ s   | 32,768×8×4 (Byte)             | 4,096 Byte        |
| A 1 E (T M P)         | 1 0 0 $\mu$ s |                               |                   |
|                       | 5 0 0 $\mu$ s |                               |                   |

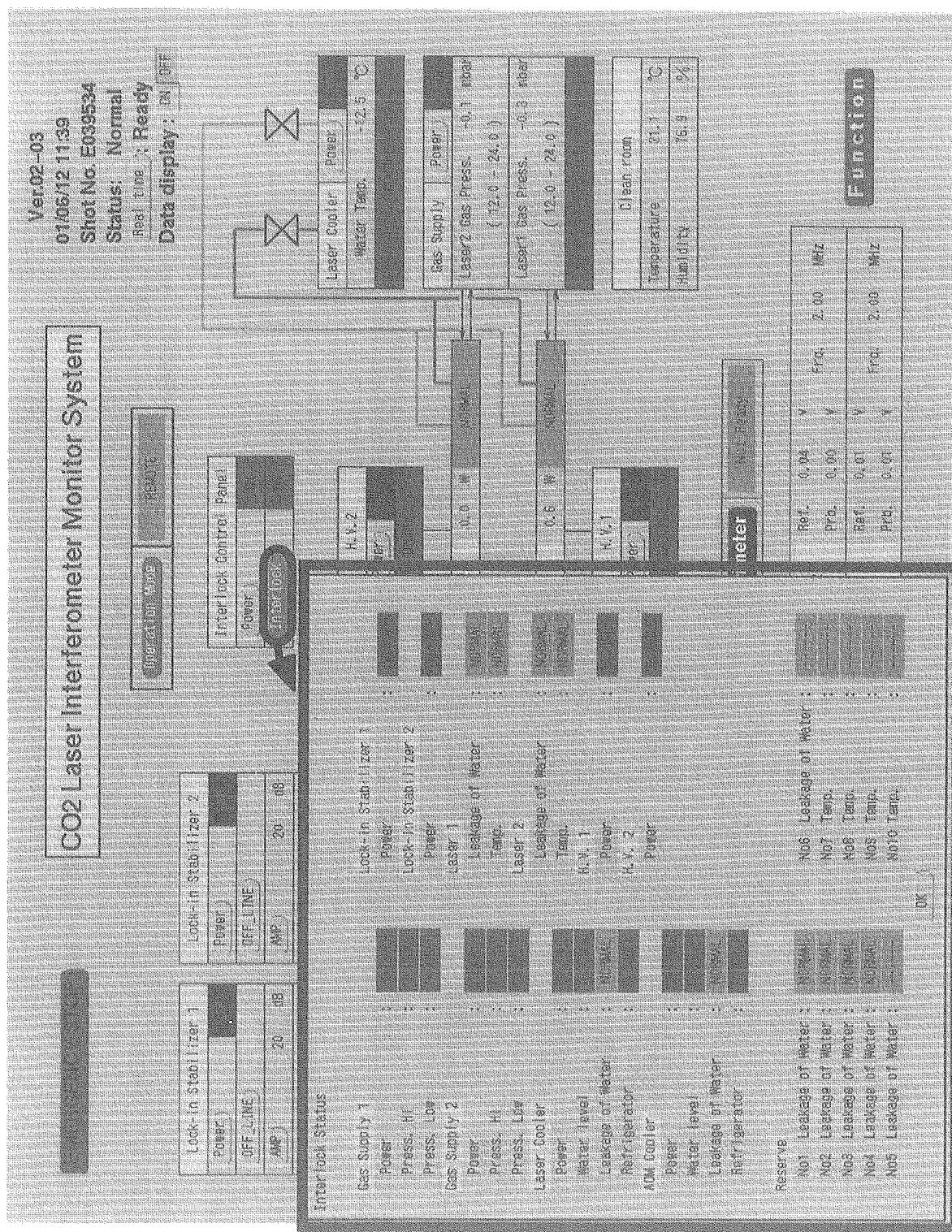
※1 T M P ファイルのデータ点数は、D A I S Y のデータ処理点数による制約のため、データ収集点数の1/2となっている。



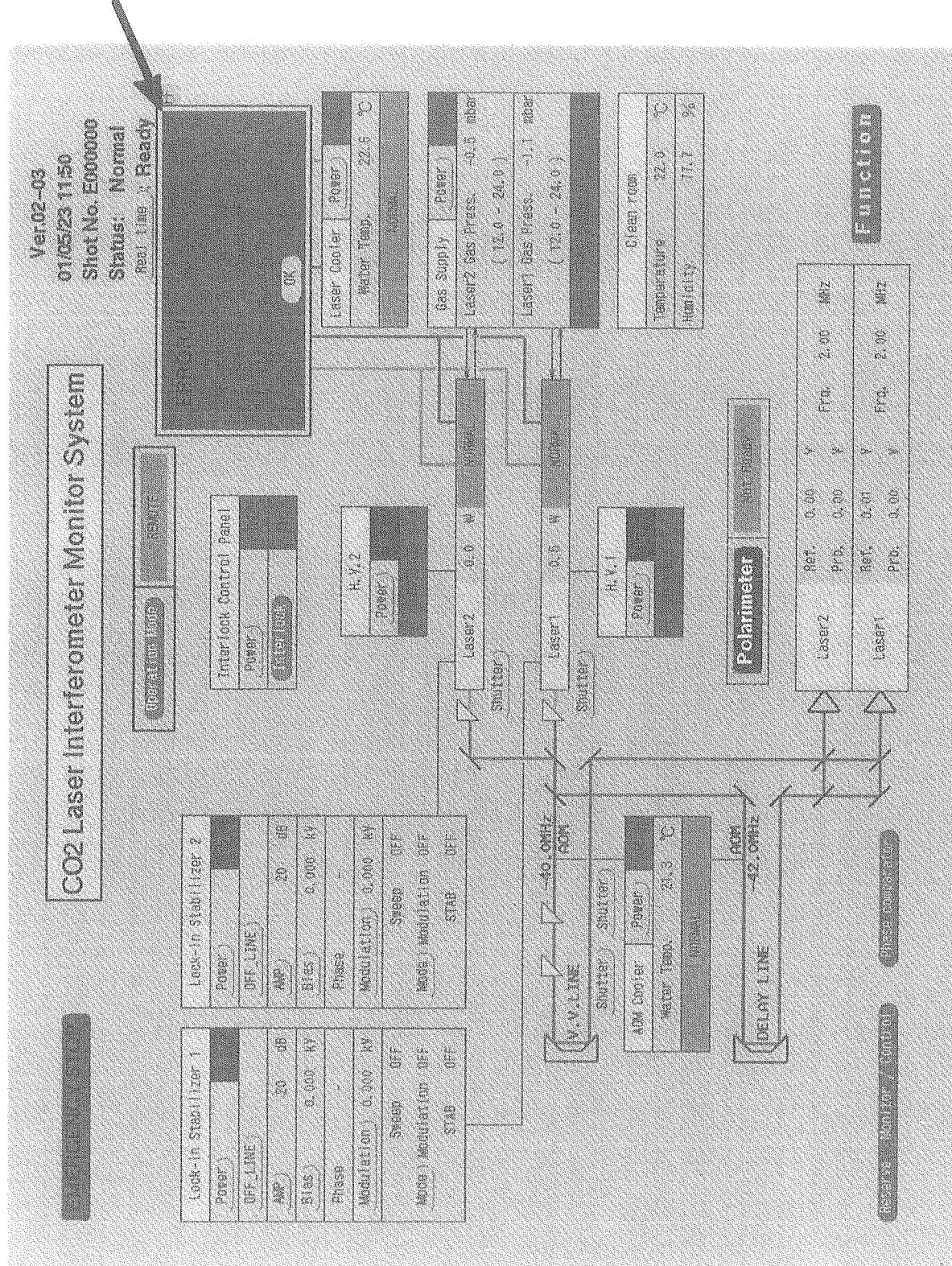
第6 . 1 図 第1W/Sでの基本画面



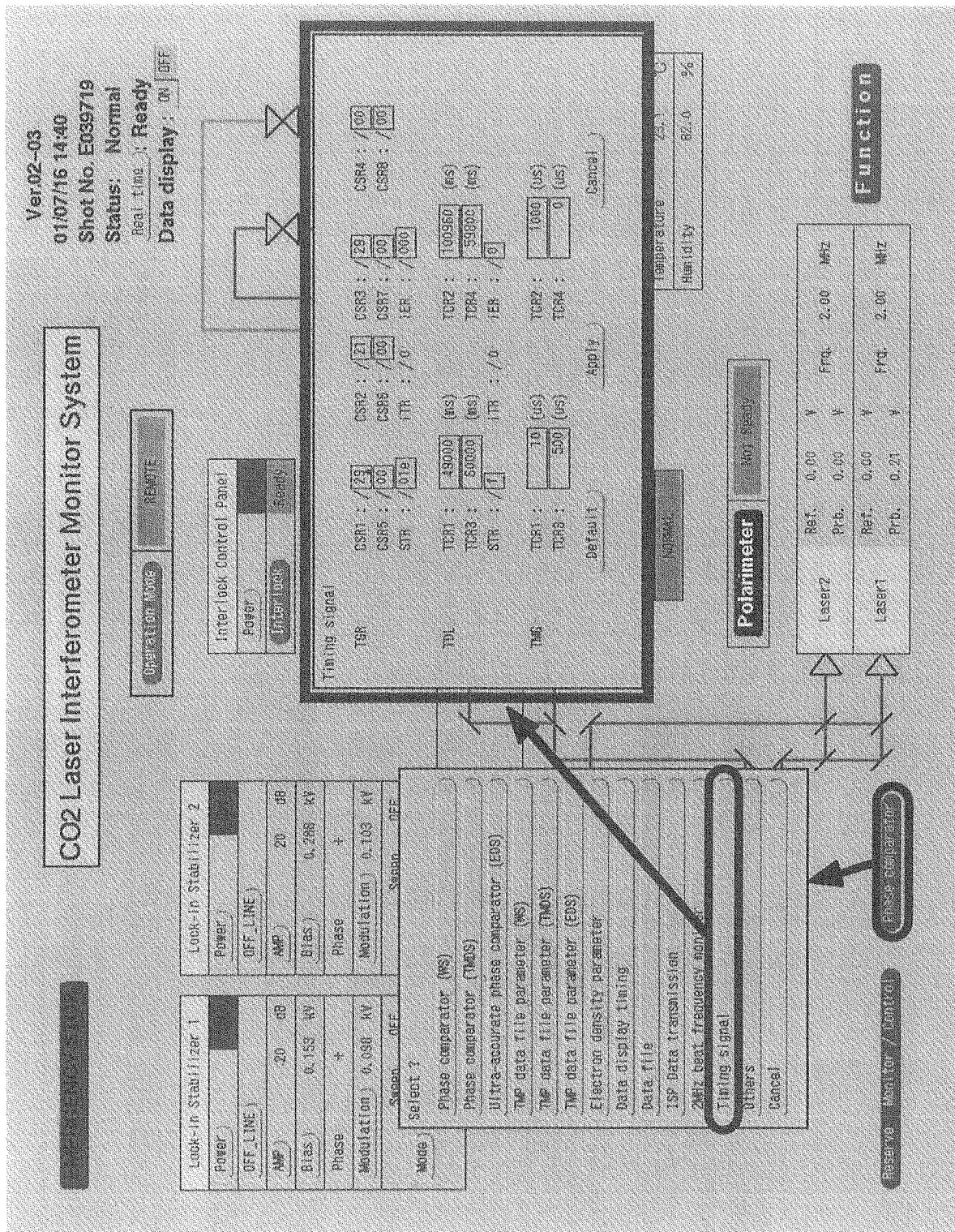
第6. 2 図 第1W/Sでの制御・設定画面例



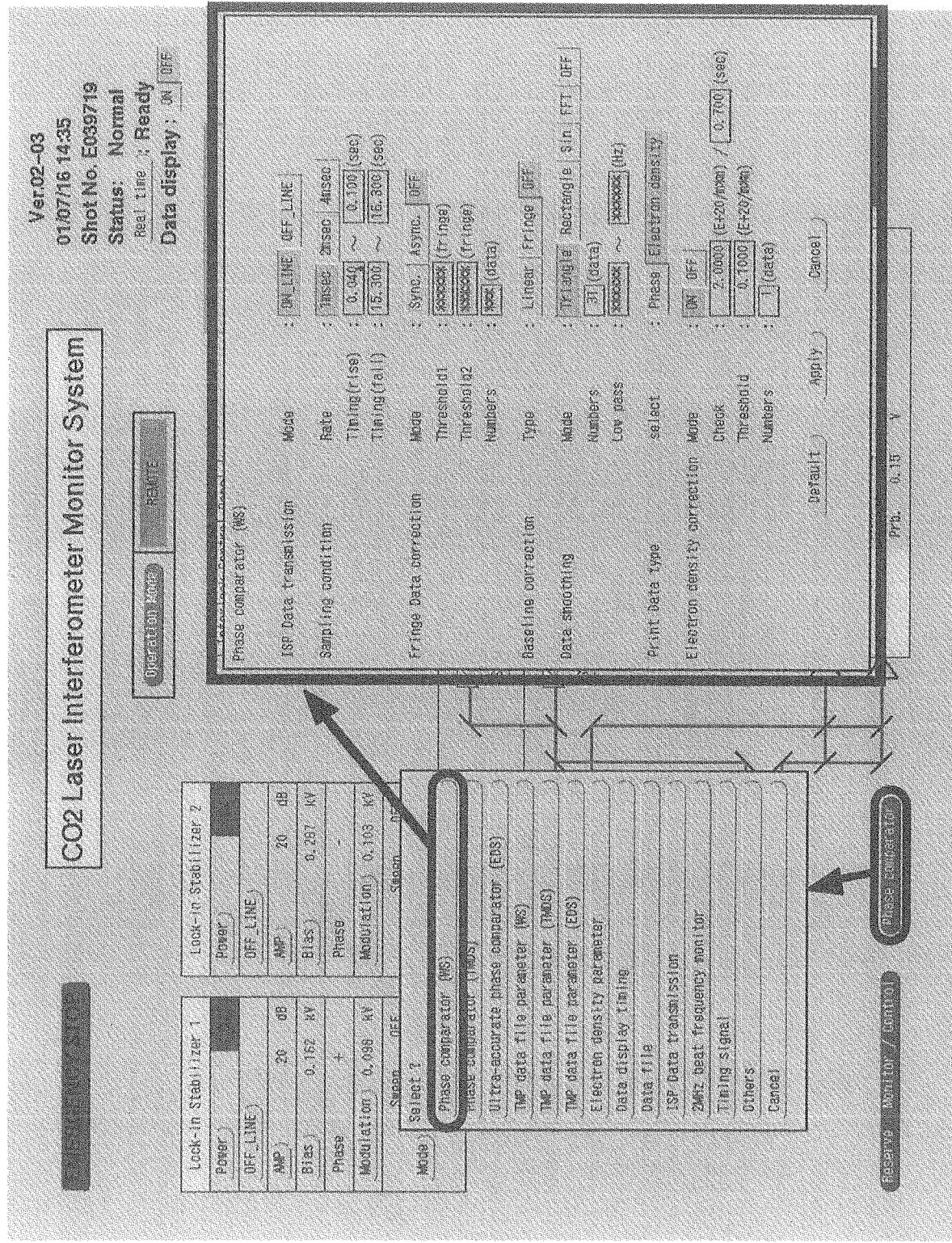
第6. 3 図 第1W/Sでの状態監視画面例



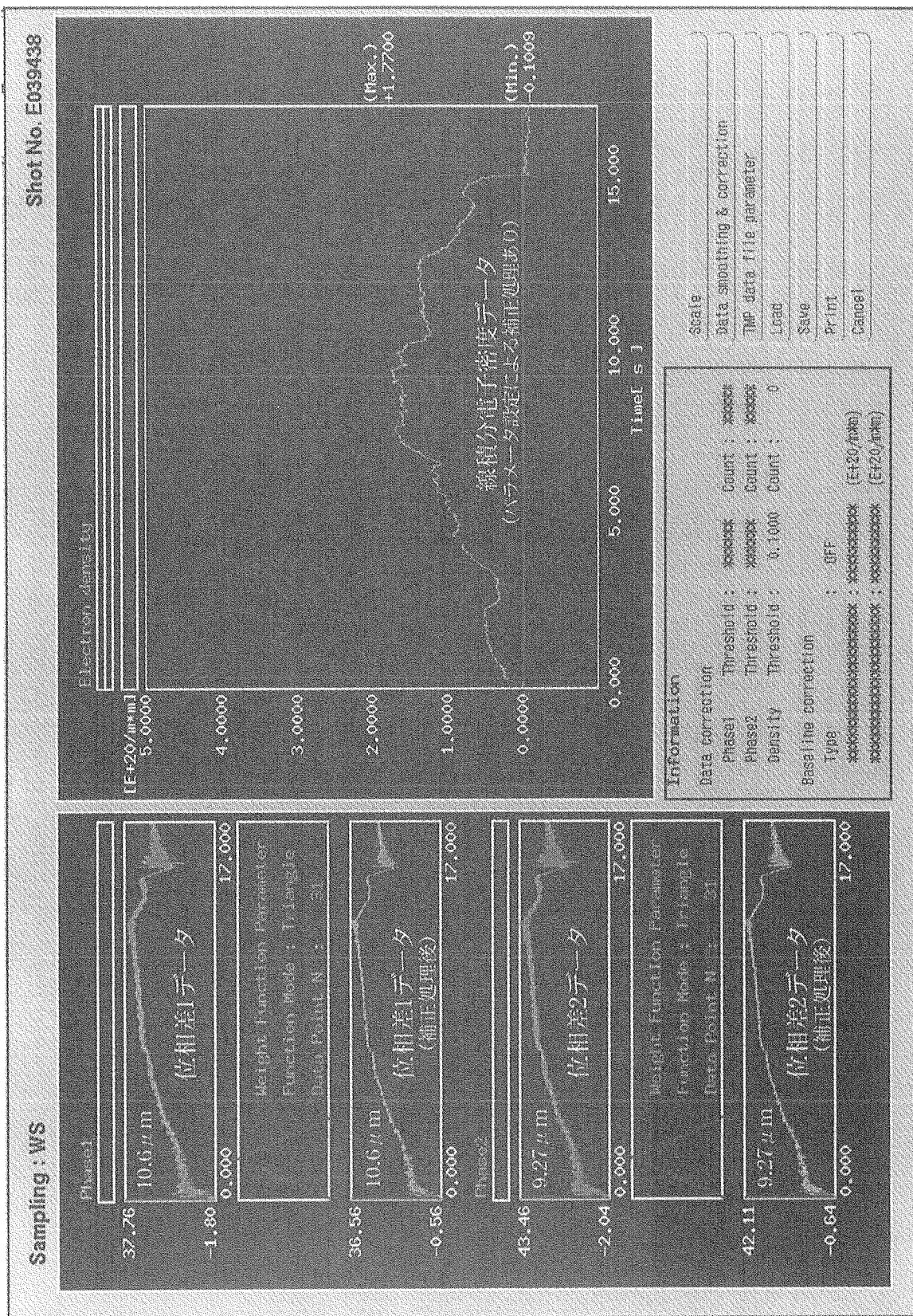
第6.4図 第1W/Sでのエラーメッセージ表示画面



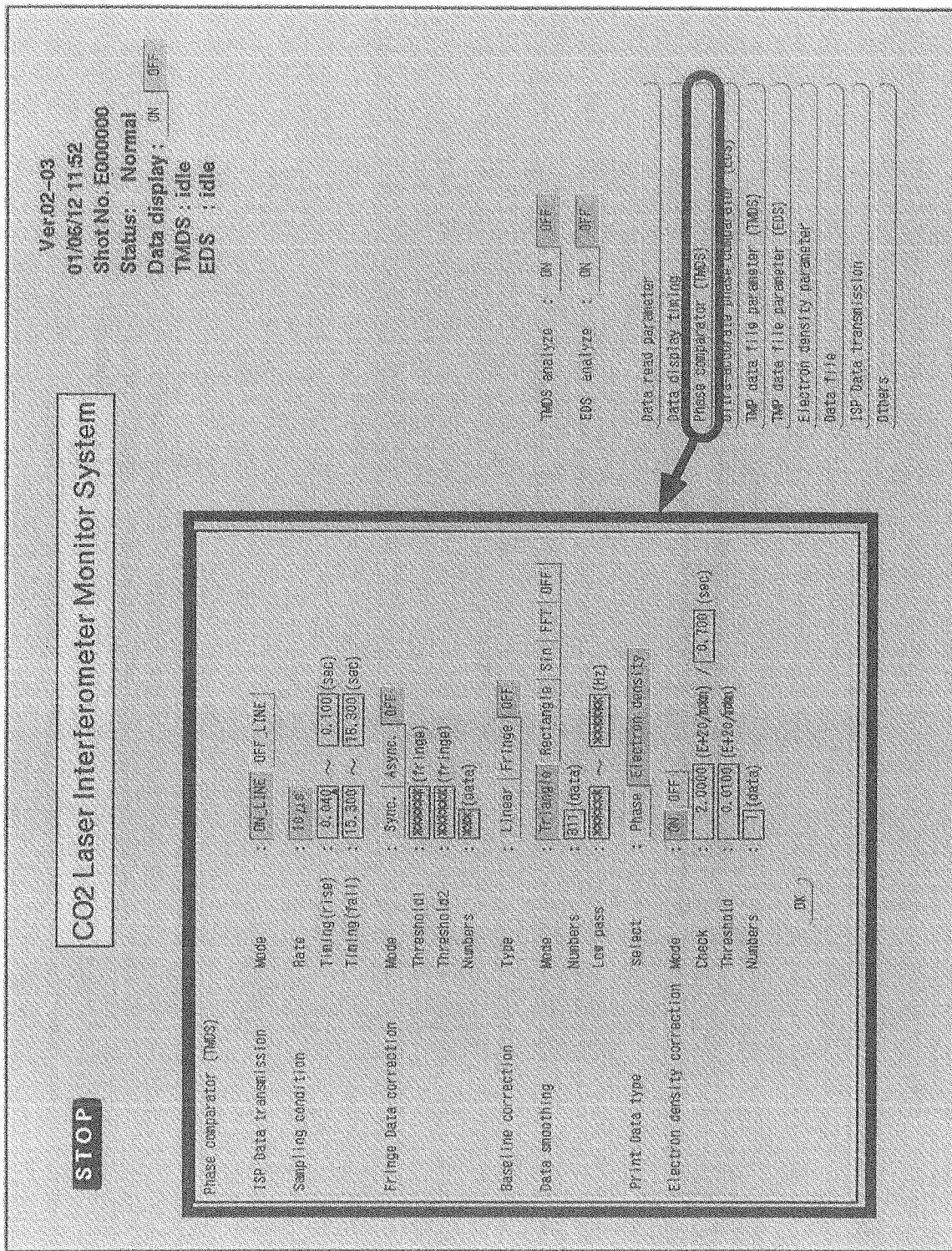
第6.5図 第1W/Sでのタイミング設定画面



第6図 第1W/Sでの補正パラメータ設定画面



第6.7図 第1W/Sでの算出データ波形画面例



第6. 8図 第2W/Sでの補正パラメータ設定画面

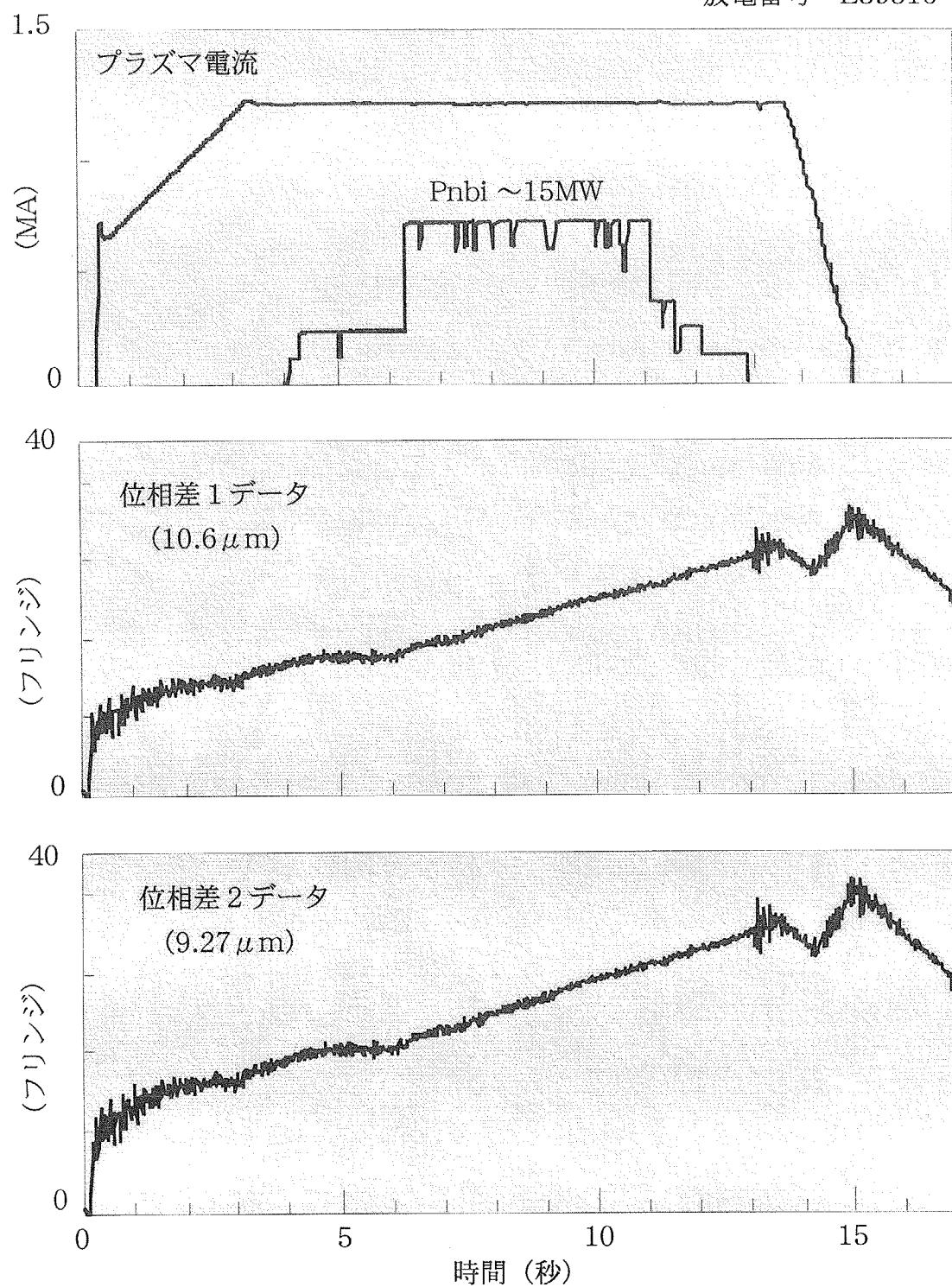
## 7. プラズマ計測例

ここでは実際の J T - 6 0 U 放電における計測例を示す。

まず、第 7. 1 図に中性粒子ビーム (N B) 加熱実験 (放電番号 E 39516) における計測結果を示す。プラズマの主なパラメータは、プラズマ電流  $I_p = 1.2$  MA、トロイダル磁場  $B_t = 2.5$  T、また軽水素 N B が 4.0 秒から 13.0 秒まで入射されている。このとき、炭酸ガスレーザ干渉測定装置による線積分電子密度 (N E L T) が制御・データ処理システムを用いて正常に処理・出力されていることがわかる。また、各種補正処理を行った場合の線積分電子密度出力例 (放電番号 E 39438) を第 7. 2 図に示す。所定の処理 (平滑化及びベースライン補正) が正常に行われていることが示されている。

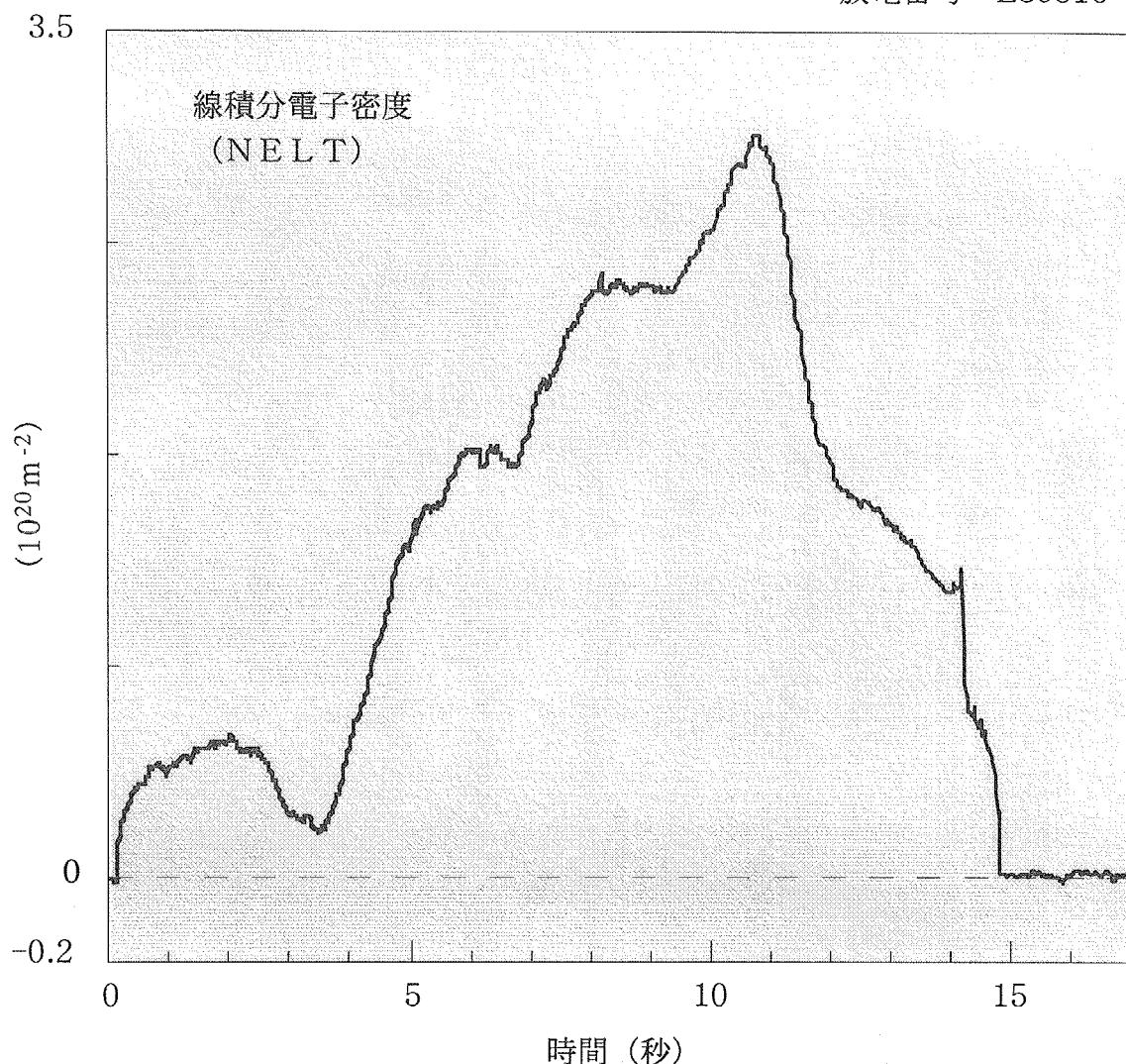
次に、炭酸ガスレーザ干渉測定装置を用いて実時間密度帰還制御を行った例 (放電番号 E 30138) を第 7. 3 図に示す。実時間の処理においても実験放電後の処理データとほぼ一致したデータが得られた。さらにメインプラズマ部でのガスパフ (注入弁 1 L, 1 H) を使用し、ほぼ目標通りに密度を制御することに成功している。

放電番号 E39516

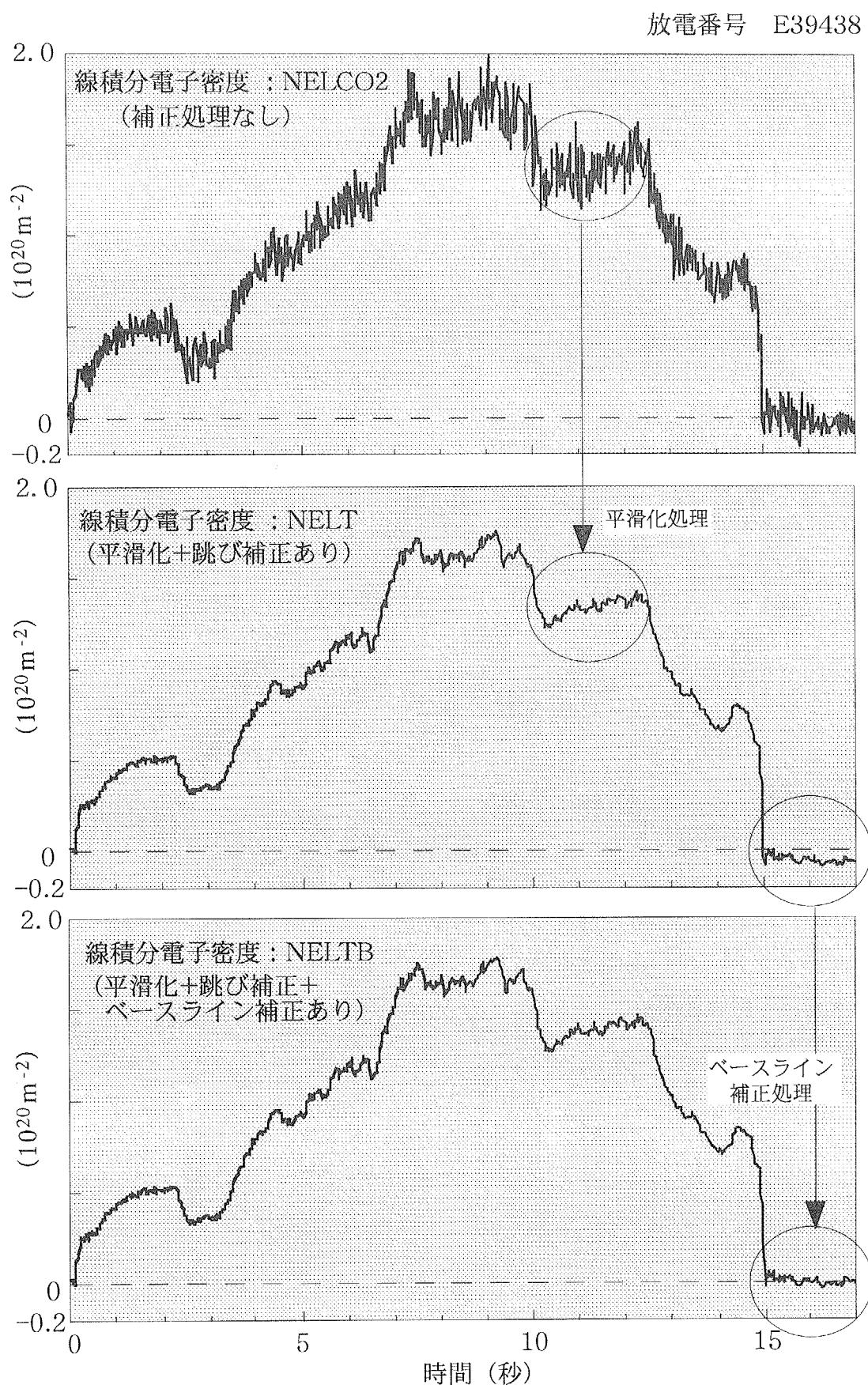


第7. 1図 プラズマ計測例 (1 / 2)

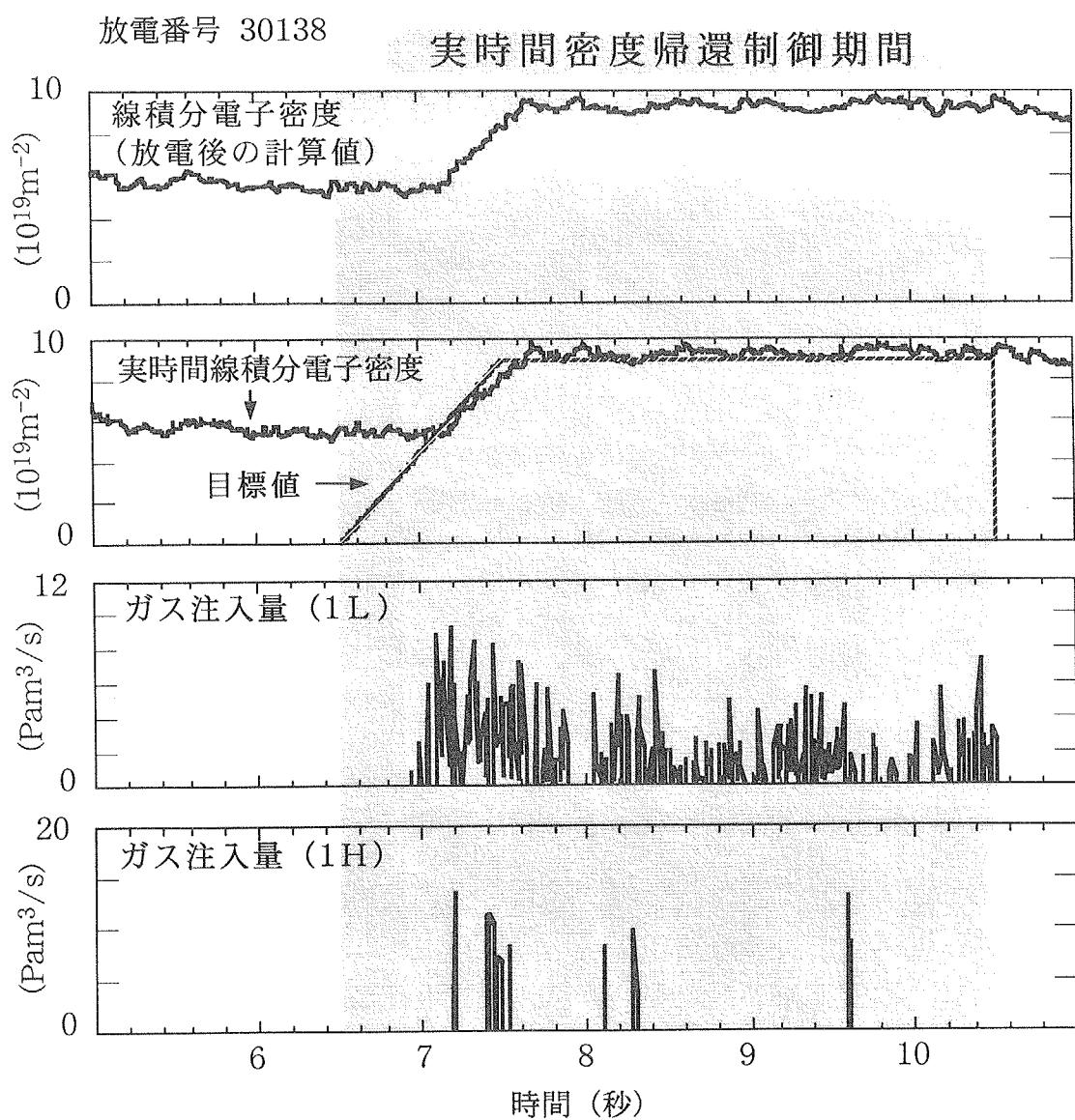
放電番号 E39516



第7. 1図 プラズマ計測例 (2 / 2)



第7.2図 各種補正処理データ



第7. 3図 電子密度の実時間帰還制御例

## 8. まとめ

UNIX系汎用ワークステーションを中心とした炭酸ガスレーザ干渉測定装置のための制御・データ処理システムを開発した。その開発により得られた結果を以下にまとめる。

- ・遠隔からの常時監視機能によって異常時の早期対応が可能となり、該当する機器の保守性が向上した。
- ・各種現場機器の情報を基本画面にグラフィカルに集約表示することで、明瞭かつ容易に機器状態を確認することができ、遠隔からの信頼性の高い運転が可能となった。
- ・高速解析処理機能によって、実験放電直後速やかに電子密度データの表示が可能となった。
- ・大容量・高精度解析処理機能によって、従来 I S P 上のみにて行っていた大容量のデータ解析が、ワークステーション上でも可能となった。
- ・高速処理系、大容量・高精度処理系それぞれを独立した 2 台のワークステーションを用いた分散化処理形態とすることにより、安定かつ効率的に解析処理を行うことが可能となった。
- ・実時間処理機能により生成される参照用実績密度信号を用いたプラズマ電子密度帰還制御時において、ほぼ目標値通りに密度を制御することに成功した。

本制御・データ処理システムの開発により、高い信頼性で炭酸ガスレーザ干渉測定装置を運転し、実験データの解析処理をルーチン的に行うことが初めて可能となった。このことは、J T - 6 0 U におけるプラズマ中心部の電子密度計測、更には電子密度帰還制御を行う上で非常に重要な計測装置である炭酸ガスレーザ干渉測定装置の性能向上に大きく貢献するものである。

## 謝辞

炭酸ガスレーザ干渉測定装置のための制御・データ処理システムの開発に際し、数々の技術的助言及び協力を頂いた青柳哲雄氏\*をはじめとする炉心プラズマ研究部 炉心プラズマ解析室の方々に心から感謝の意を表します。更に、運転・保守に協力を頂いた遠藤安栄氏、会沢 捷氏、深谷和政氏、黒澤卓史氏に厚く御礼申し上げます。また、技術的な協力を頂いた日本電気株式会社、有限会社ストリーム、日本アドバンストテクノロジー株式会社に深く感謝致します。

\* : 現所属 地球シミュレータ開発特別チーム

## 参考文献

- [1] Y. Kawano, A. Nagashima, S. Ishida, T. Fukuda, and T. Matoba, "CO<sub>2</sub> laser interferometer for electron density measurement in JT-60U tokamak", Rev. Sci. Instrum., **63**, 4971 (1992).
- [2] Y. Kawano, A. Nagashima, T. Hatae, and S. Gunji, "Dual CO<sub>2</sub> laser interferometer with a wavelength combination of 10.6 and 9.27 μm for electron density measurement on large tokamaks", Rev. Sci. Instrum. **67**, 1520 (1996).
- [3] Y. Kawano, A. Nagashima, K. Tsuchiya, T. Hatae, and S. Gunji, "Improvement of the dual CO<sub>2</sub> laser interferometer", Fus. Eng. Des. **34-35**, 375 (1997).
- [4] Kawano, A. Nagashima, K. Tsuchiya, S. Gunji, S. Chiba, and T. Hatae, "Tangential CO<sub>2</sub> laser interferometer for large tokamaks", J. Plas. Fus. Res., **73**, 870 (1997).
- [5] 千葉真一, 河野康則, 土屋勝彦, 井上 昭, "JT-60Uにおける炭酸ガスレーザ干渉計の遠隔制御系の開発", プラズマ・核融合学会第14回年会予稿集, 166 (1997).
- [6] S. Chiba, Y. Kawano, and A. inoue, "Realtime processing of CO<sub>2</sub> laser interferometer for density feedback control", JAERI-Research, **98-039**, 14 (1998).

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   |
| 物質量   | モル     | mol |
| 光强度   | 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 | s <sup>-1</sup>     |
| 力           | ニュートン  | N  | m·kg/s <sup>2</sup> |
| 圧力、応力       | パスカル   | Pa | N/m <sup>2</sup>    |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジユール   | J  | N·m                 |
| 功率、放射束      | ワット    | W  | J/s                 |
| 電気量、電荷      | クーロン   | C  | A·s                 |
| 電位、電圧、起電力   | ボルト    | V  | W/A                 |
| 静電容量        | フアラード  | F  | C/V                 |
| 電気抵抗        | オーム    | Ω  | V/A                 |
| コンダクタンス     | ジーメンス  | S  | A/V                 |
| 磁束          | ウェーバ   | Wb | V·s                 |
| 磁束密度        | テスラ    | T  | Wb/m <sup>2</sup>   |
| インダクタンス     | ヘンリー   | H  | Wb/A                |
| セルシウス温度     | セルシウス度 | °C |                     |
| 光束度         | ルーメン   | lm | cd·sr               |
| 照度          | ルクス    | lx | lm/m <sup>2</sup>   |
| 放射能         | ベクレル   | Bq | s <sup>-1</sup>     |
| 吸収線量        | グレイ    | Gy | J/kg                |
| 線量等量        | シーベルト  | Sv | J/kg                |

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      |
| トントン   | t         |
| 電子ボルト  | eV        |
| 原子質量単位 | u         |

1 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J

1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表5 SI接頭語

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

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 | Å   |
| バーン      | b   |
| バルル      | bar |
| ガル       | Gal |
| キュリ      | Ci  |
| レントゲン    | R   |
| ラド       | rad |
| レム       | rem |

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m

1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>

1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa

1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>

1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq

1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg

1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy

1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

(注)

1. 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 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。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

| 力       | N(=10 <sup>5</sup> dyn) | kgf      | lbf |
|---------|-------------------------|----------|-----|
| 1       | 0.101972                | 0.224809 |     |
| 9.80665 | 1                       | 2.20462  |     |
| 4.44822 | 0.453592                | 1        |     |

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストーカス)(cm<sup>2</sup>/s)

| 圧力                       | MPa(=10bar)              | kgf/cm <sup>2</sup>      | atm                      | mmHg(Torr)              | lbf/in <sup>2</sup> (psi) |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 力                        | 1                        | 10.1972                  | 9.86923                  | 7.50062×10 <sup>3</sup> | 145.038                   |
| 0.0980665                | 0.0980665                | 1                        | 0.967841                 | 735.559                 | 14.2233                   |
| 0.101325                 | 0.101325                 | 1.03323                  | 1                        | 760                     | 14.6959                   |
| 1.33322×10 <sup>-1</sup> | 1.33322×10 <sup>-1</sup> | 1.35951×10 <sup>-3</sup> | 1.31579×10 <sup>-3</sup> | 1                       | 1.93368×10 <sup>-2</sup>  |
| 6.89476×10 <sup>-3</sup> | 7.03070×10 <sup>-3</sup> | 6.80460×10 <sup>-2</sup> | 51.7149                  | 1                       |                           |

| エネルギー・仕事・熱量              | J(-10 <sup>7</sup> erg)  | kgf·m                     |                           | kW·h                      |                         | cal(計量法)                 | Btu               | ft·lbf | eV | 1 cal= 4.18605J (計量法) |  |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|--------|----|-----------------------|--|
|                          |                          | 1                         | 0.101972                  | 2.77778×10 <sup>-7</sup>  | 0.238889                |                          |                   |        |    | = 4.184J (熱化学)        |  |
| 9.80665                  | 1                        | 2.72407×10 <sup>-6</sup>  | 2.34270                   | 9.29487×10 <sup>-3</sup>  | 7.23301                 | 6.12082×10 <sup>19</sup> | = 4.1855J (15°C)  |        |    |                       |  |
| 3.6×10 <sup>6</sup>      | 3.67098×10 <sup>5</sup>  | 1                         | 8.59999×10 <sup>5</sup>   | 3412.13                   | 2.65522×10 <sup>6</sup> | 2.24694×10 <sup>25</sup> | = 4.1868J (国際蒸気表) |        |    |                       |  |
| 4.48605                  | 0.426858                 | 1.16279×10 <sup>-6</sup>  | 1                         | 3.96759×10 <sup>-3</sup>  | 3.08747                 | 2.61272×10 <sup>19</sup> | 仕事率 1 PS(仮馬力)     |        |    |                       |  |
| 1055.06                  | 107.586                  | 2.93072×10 <sup>-1</sup>  | 252.042                   | 1                         | 778.172                 | 6.58515×10 <sup>21</sup> | = 75 kgf·m/s      |        |    |                       |  |
| 1.35582                  | 0.138255                 | 3.76616×10 <sup>-7</sup>  | 0.323890                  | 1.28506×10 <sup>-3</sup>  | 1                       | 8.46233×10 <sup>18</sup> | = 735.499W        |        |    |                       |  |
| 1.60218×10 <sup>19</sup> | 1.63377×10 <sup>20</sup> | 4.45050×10 <sup>-26</sup> | 3.82743×10 <sup>-20</sup> | 1.18171×10 <sup>-19</sup> | 1                       |                          |                   |        |    |                       |  |

| 放射能                  | Bq | Ci                       | 吸収線量 | Gy | rad |
|----------------------|----|--------------------------|------|----|-----|
|                      | 1  | 2.70270×10 <sup>-6</sup> |      | 1  | 100 |
| 3.7×10 <sup>10</sup> | 1  |                          | 0.01 | 1  |     |

| 照射線量 | C/kg                  |      | R |
|------|-----------------------|------|---|
|      | 1                     | 3876 |   |
|      | 2.58×10 <sup>-1</sup> | 1    |   |

| 線量当量 | Sv   | rem | 100 |
|------|------|-----|-----|
|      | 1    | 1   |     |
|      | 0.01 | 1   |     |

(86年12月26日現在)

## 炭酸ガスレーザ干涉測定装置のための制御・データ処理システムの開発

R100  
古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています