

JAERI - M  
94-050

磁気流体平衡高速処理装置 FAME の概要

1994年3月

坂田 信也・萩野裕文・鶴岡 貞哉・渡辺 秀人  
青柳 哲雄・齊藤 直之・原田 裕夫・谷 啓二

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課 〒319-11茨城県那珂郡東  
海村 一六、お申し送りください。なお、これはかに財団法人原子力弘済会資料センター  
〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内にて複写による実費配布をおこな  
っております。

JAERI-M reports are issued irregularly

Inquiries about availability of the reports should be addressed to **Information Division,**  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 原子力資料サービス

磁気流体平衡高速処理装置 FAME の概要

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部  
坂田 信也・萩野谷裕文・鶴岡 貞哉・渡辺 秀人\*  
青柳 哲雄・斉藤 直之・原田 裕夫・谷 啓二

(1994年2月14日受理)

**original contains  
color illustrations**

JT-60 の非定常プラズマ輸送解析に必要な 100 点を越える時系列磁気流体平衡の計算を約 20 分のショット間に処理するため、磁気流体平衡高速処理装置 FAME が開発された。

FAME は、多段スイッチで接続された 20 個のマイクロプロセッサから成る MIMD 型の最大理論性能 250 MFLOPS の小規模並列計算機である。そのソフトウェアとして磁気流体平衡解析コード SELENE 及びその入力データ作成コード FBI が並列処理を念頭にチューニングされた。その結果、既存の大型汎用計算機 FACOM M780-10S に比べ 7 倍の計算速度が得られた。

本報告書は、この FAME システムについて、そのハードウェア、ソフトウェア及び周辺装置の概要をまとめたものである。

**original contains  
color illustrations**

Outline of Fast Analyzer for MHD Equilibrium "FAME"

Shinya SAKATA, Hirofumi HAGINOYA, Takuya TSURUOKA  
Hideto WATANABE\*, Tetsuo AOYAGI, Naoyuki SAITOH  
Hiroo HARADA and Keiji TANI

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

(Received February 14, 1994)

The FAME (Fast Analyzer for Magnetohydrodynamic (MHD) Equilibrium) system has been developed in order to provide more than 100 MHD equilibria in time series which are enough for the non-stationary analysis of the experimental data of JT-60 within about 20 minutes shot interval.

The FAME is an MIMD type small scale parallel computer with 20 microprocessors which are connected by a multi-stage switching system. The maximum theoretical speed is 250 MFLOPS.

For the software system of FAME, MHD equilibrium analysis code SELENE and its input data production code FBI are tuned up taking the parallel processing into consideration. Consequently, the computational performance of the FAME system becomes more than 7 times faster than the existing general purpose computer FACOM M780-10s.

This report summarizes the outline of the FAME system including hardware, soft-ware and peripheral equipments.

Keywords: Parallel Computer, MHD Equilibrium

## 目 次

1. FAME システムの概要 .....	1
2. ハードウェアの概要 .....	3
2.1 並列計算機本体 .....	3
2.1.1 ハードウェアの構成 .....	3
2.1.2 CPU ボードの構成 .....	4
2.1.3 スイッチングユニットの構成 .....	6
2.2 並列計算機用フロントエンドワークステーション (EWS) .....	6
2.3 ファイルサーバ .....	6
2.4 動画処理装置 .....	7
2.5 コマ録り装置 .....	7
3. ソフトウェアの概要 .....	9
3.1 MHD 平衡解析ソフトウェア .....	9
3.1.1 FBI コード .....	9
3.1.2 MHD 平衡コード .....	11
3.1.3 MHD 平衡コードの並列化と最適化 .....	11
3.1.3.1 ジョブの制御方法 .....	12
3.1.3.2 入出力の C 言語化 .....	13
3.1.3.3 出力データの圧縮 .....	14
3.1.3.4 入力データ読み込みの改善 .....	14
3.1.3.5 WRITE 文の制御 .....	14
3.1.3.6 画像データ処理 .....	14
3.1.4 並列化の結果 .....	15
3.2 動画処理ソフトウェア .....	17
3.2.1 画像データ .....	17
3.2.2 動画処理 .....	17
3.2.3 コマ録り処理 .....	20
4. あとがき .....	21
謝 辞 .....	21
付 録 A .....	23
付 録 B .....	28

## Contents

1. Outline of FAME System .....	1
2. Outline of Hardware .....	3
2.1 Parallel Processor .....	3
2.1.1 Hardware Composition .....	3
2.1.2 CPU Board Composition .....	4
2.1.3 Switching Unit Composition .....	6
2.2 Frontend Workstation .....	6
2.3 File Server .....	6
2.4 Moving Image Processor .....	7
2.5 Video Processor .....	7
3. Outline of Software .....	9
3.1 Software for MHD Equilibrium Analysis .....	9
3.1.1 FBI Code .....	9
3.1.2 MHD Equilibrium Code .....	11
3.1.3 Parallel Programming and Optimization of MHD Equilibrium Code .....	11
3.1.3.1 Job Control .....	12
3.1.3.2 C Programming of I/O Routines .....	13
3.1.3.3 Output Data Compression .....	14
3.1.3.4 Improvement of Input-data Read .....	14
3.1.3.5 Control of WRITE Statement .....	14
3.1.3.6 Image Data Processing .....	14
3.1.4 Results of Parallel Programming .....	15
3.2 Software for Moving Image .....	17
3.2.1 Image Data .....	17
3.2.2 Moving Image Processing .....	17
3.2.3 Video Processing .....	20
4. Conclusions .....	21
Acknowledgements .....	21
Appendix A .....	23
Appendix B .....	28

## 1. FAME システムの概要

トカマク実験における計測データの解析においては、磁気流体平衡計算の結果をベースに、線積分量として得られている計測情報を局所物理量に写像変換することがまず行われる。JT-60においては、電磁気測定データを用いて磁気流体平衡計算を行い、それをもとに写像変換情報を入力する最外殻磁気面同定コード（以下では、FBI (First Boundary Identification) コードと称す) が整備され利用されている。

計測データの解析は、トカマクコードを中心とする。プラズマ中の熱、粒子の輸送解析を中心とするが、実験の進展、それに伴うコード整備の進展にあわせてデータ解析も高度化しつつあり、従来の定常計算に加え今後非定常解析にその比重が移りつつある。FBIコードは、1タイムスライス毎に1回実行する必要があるが、非定常計算の場合1つのショットのデータ解析に数十回から百数十回のFBIコードをショット間に実行させる必要がある。その計算処理量は、現有のデータ処理大型計算機(スカラー計算機FACOM M780-10)の能力をはるかに超えるものである。また、ベクトル計算機(FACOM VP2600)を用いるには、計算機の運用形態が異なるため実験に即したデータ処理は不可能である。

前述の、数十回、百数十回に及ぶタイムスライス毎のFBIコードの計算は、各々独立に実行可能である。これは、マイクロプロセッサをネットワークで接続し、多数のプロセッサを同時に並列実行させる並列演算技術の応用により、極めて高速に処理することが可能であることを意味している。並列計算機FAMEは、この点に着目し、FBIコード及びMHD平衡コードを高速に処理するために開発されたものである。FAMEの計算結果は、MHD平衡データベースとしてディスク装置に格納され、ネットワークを通じてユーザに提供される。同時に、計算結果は動画処理され、光ディスク上に保存される。FAMEは、図1.1に示す様に、これ等の機能を実現するための24GB(ギガバイト)の専用ハードディスク装置、ビデオコマ録り装置、光ディスク装置などの動画処理装置がシステムとして一体化されている。

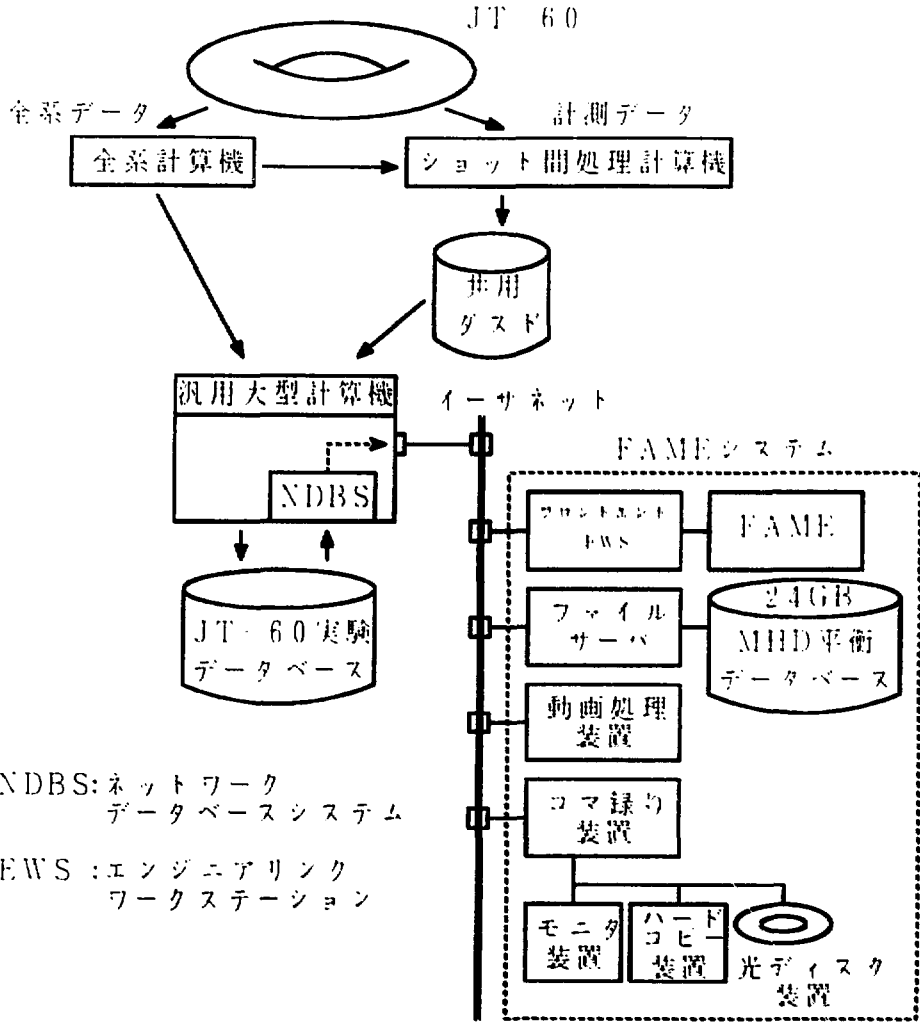


図1.1 FAMEシステムに関連するフロー



## 2. ハードウェアの概要

FAMEシステムは第1章に述べた様に、並列計算機本体、並列計算機用フロントエンド計算機、ファイルサーバ、動画処理装置及び、コマ録り装置により構成されている。以下に各々についてのハードウェア概要を記す。

### 2.1 並列計算機本体

以下の基本機能を満足する小規模並列計算機である。

- (1) アーキテクチャタイプ

MIMD (Multi Instruction stream / Multi Data stream)型

- (2) 理論性能

250MFLOPS (100万浮動少数点演算/秒)

- (3) プロセッサエレメント数 (並列数)

20

- (4) ネットワーク形態

多段接続方式

- (5) 1プロセッサエレメントあたりのメモリ容量

64MB (メガバイト)

以下にハードウェア構成、CPUボード、スイッチングユニット構成の概要をまとめる。

#### 2.1.1 ハードウェアの構成

並列計算機本体では、4×4のゲートアレイ (スイッチングユニット) を構成要素とする多段接続網を用いてプロセッサを結合する。図2.1 に並列計算機本体の外観を示す。

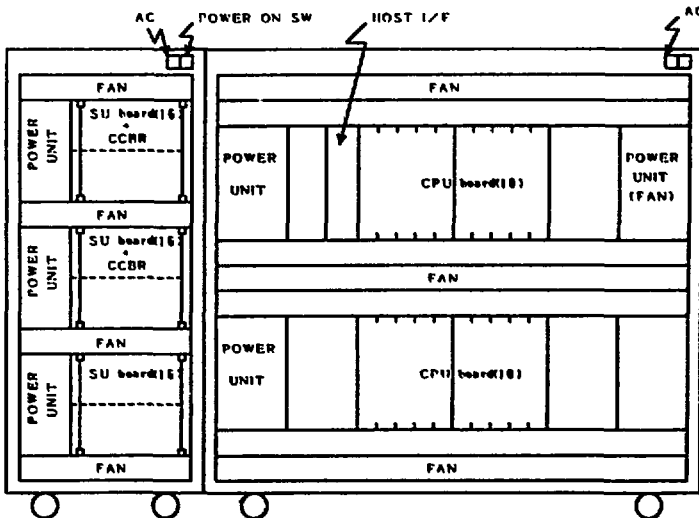


図2.1 並列計算機本体の外観

並列計算機本体は、ネットワーク部とプロセッサ部から構成される。ネットワーク部には、スイッチングユニットボードが4-8枚(1-6枚・3段)装備され、さらにプロセッサ部には、CPUボードが2-0枚(1-0枚・2段)装備されている。各ボードの構成は上段の図から見て左から、プロセッサの物理番号0,1,2,8,9、下段の方向から見て左から、プロセッサの物理番号10,11,12,13となっている。プログラムの実行時には、0からの物理値をこの番号が論理番号として与えられるために、プログラマへの影響はさほどない。しかし、ハードウェアエラーが生じた場合などは、この番号が用いられる。並列計算機用フロントエンド計算機との通信は、任意のプロセッサと通信可能であるが、通常は論理番号0のプロセッサがフロントエンド計算機と通信することが多い。また、プロセッサ間の同期なども全てプロセッサ0が主導権を握って行うため、場合によっては、プロセッサ0をマスタープロセッサ、他のプロセッサをスレーブプロセッサと呼ぶ。

2.1.2 CPUボードの構成

並列計算機の基本部分となるCPUボードは、プロセッサ部、メモリ部からなる。ここではプロセッサ部の構成を示す。

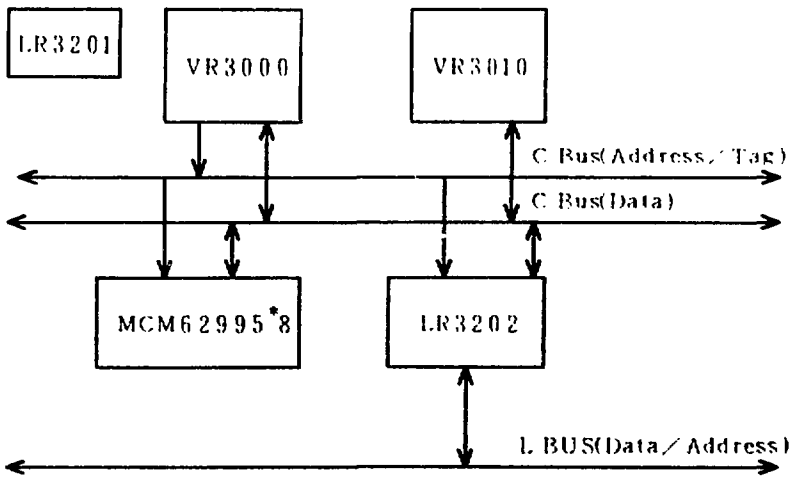


図2.2 プロセッサ部の構成

プロセッサ部では、以下のハードウェアがC-BUSで結合されている

(1) VR3000 (CPU)

32bit RISC (Reduced Instruction Set Computer) 型マイクロプロセッサであり、並列計算機におけるプログラムの実行を行う中核部である

システムクロック 25MHz (メガヘルツ)

理論性能 25MIPS (100万命令/秒)

(2) VR3010 (FPU)

実行プログラム中の浮動少数点命令を実行するコ・プロセッサであり、VR3000 マイクロプロセッサからの指示に基づき、浮動少数点の演算を高速に行う。

システムクロック 25MHz (メガヘルツ)

理論性能 12.5MFLOPS (100万浮動少数点演算/秒)  
単精度、倍精度共

(3) MCM62995 (キャッシュメモリ)

高速プロセッサVR3000の性能を発揮するため、プログラムのメモリアクセスの局所性を利用して、高速SRAMをキャッシュメモリとして8個配置している。

命令用 64KB (キロバイト)

データ用 64KB (キロバイト)

(4) LR3201

電源投入時、及びリセット時にプロセッサを初期化して、プロセッサ動作条件を決定する。

(5) LR3202

プロセッサバスであるC-BUSと、メインメモリ、ネットワーク、I/Oデバイスなどが接続されるL-BUS間でデータ転送を行う場合に、両者のバスを制御し、データを変換する。

また、メモリ部は、以下のハードウェアより構成されている。

(1) LR3203

L-BUSとDRAMを接続するためのDRAMコントローラであり、L-BUSのアクセス要求がDRAMであった場合に、DRAMに対して読み出し、書き込み要求を行う。

また、DRAMのリフレッシュも行う。

(2) LR3204

DRAMとLR3203を接続するためのバッファであり、複数のDRAMを接続するために用いる。

(3) DRAM $\mu$ PD424000

並列計算機に搭載されている主記憶(メインメモリ)であり、各プロセッシングエレメント当たり、64MB(メガバイト)使用している。

高速Dynamic DRAMのモジュール(SIMM)を使用している。

### 2.1.3 スイッチングユニットの構成

並列計算機のプロセッサ間ネットワークは、4×4のスイッチングユニットを構成要素とする多段接続網である。

スイッチングユニットは、4入力4出力のクロスハススイッチを実現するケートアレイであり、並列計算機のネットワークホードには、信号線数の関係から1枚につき1個のスイッチングユニットが搭載されている。基本的には、入力側にFIFOがありデータの行き先となるホードが空いていれば、そのホードにデータを供給する。

スイッチングユニットのハードウェアブロック図を図2.3に示す。

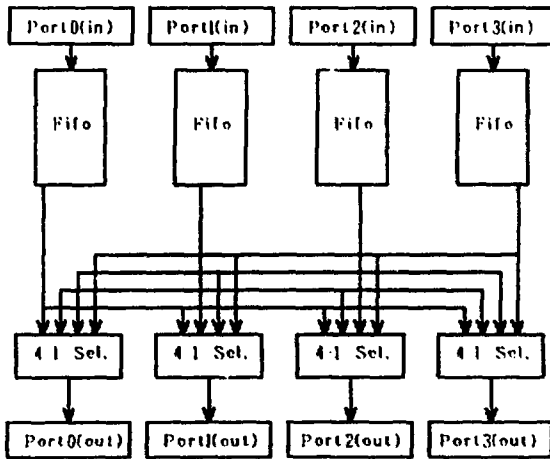


図2.3 スイッチングユニットハードウェアブロック図

## 2.2 並列計算機用フロントエンドワークステーション（EWS）

EWS 4800 230（以下では、フロントエンドEWSと称す）は、FAMEシステムにおいて並列計算機の実行管理、並列プログラムの作成、並列計算機へのファイル環境の提供の役割を果たす。フロントエンドEWS本体には、中央処理装置、64MB（メガバイト）の主記憶部、5インチ662MB（メガバイト）ハードディスク、3.5インチ1MB（メガバイト）フロッピーディスク、RS-232Cインターフェイス、プリンタインターフェイス、BRANCH 4680 4780インターフェイス、SCSIインターフェイスが実装されている。並列計算機本体とは、DR11 W準拠のDMAチャンネルで結合されている。

## 2.3 ファイルサーバ

JT-60の大型計算機上のMHD平衡データベースは、約1000ショット分のデータがディスク上に存在しユーザから自由にアクセスできる形になっている。FAMEシステムとしては、実験データ解析上、これ等とはほぼ同等のショット分のMHD平衡データがデータベースとして利用可能な状態にある必要がある。そのためには、

20MB (メガバイト) ショット × 1200ショット = 24GB (ギガバイト) の容量の磁気ディスクが必要となる。また、実験期間中には多数のクライアントからの大量のデータアクセスがあるため、サーバには極めて高い性能が求められる。そこで、UP4800 (以下では、ファイルサーバと称す) は、以下の機能を有する磁気ディスクシステムを採用している。

プロセッサ処理装置	110 MIPS (100万命令/秒)
主記憶容量	64 MB (メガバイト)
VMEバス	10 スロット
基本インターフェイス	
(1) LANネットワーク	(TCP/IPプロトコル)
(2) SCSIインターフェイス	
(3) パラレルインターフェイス	(セントロニクス準拠)
(4) シリアルインターフェイス	(RS232C)

#### 入力装置

- (1) 3.5インチフロッピーディスク装置
- (2) カートリッジテープ装置 (14インチ)
- (3) 磁気ディスク装置 24GB (ギガバイト)

中央処理装置は、米国MIPS社の高性能RISC (Reduced Instruction Set Computer) チップであるR4000を採用するとともに二次キャッシュを実装することにより高速度の演算処理能力を実現している。主記憶部は16Mbit (メガビット) DRAMを採用し、128MB (メガバイト) の増設単位で主記憶を大容量に拡張できる。

## 2.4 動画処理装置

実験計測装置の整備の進展に伴い、あるいは、それ等実験データの解析ツールの進展に伴い、より大量のデータをモニタする必要性が高まりつつある。大量のデータをモニタする最も効率的な方法は、可視化である。SUN SPARK Station 10 (以下では、動画処理装置と称す) は、計測データあるいは、それ等の高レベル処理データを高速に動画処理することを目的とした装置である。動画処理装置のハードウェア構成は、プロセッサ性能がクロックレート35MHz (メガヘルツ)、メインメモリ64MB (メガバイト)、また、Ethernet、SCSI、シリアル/パラレル、ISDN、SBUSのそれぞれのインターフェイスを装備している。記憶装置は、3.5インチフロッピーディスク、400MB (メガバイト) の内蔵ハードディスク、1.3GB (ギガバイト) の外部記憶装置ハードディスク、8mm磁気テープ装置及び、CD-ROMドライブ装置により構成されている。

## 2.5 コマ録り装置

NVS2000 (以下では、コマ録り装置と称す) は、動画処理装置で作成したCG画像

データをネットワークを介してFTP (File Transfer Protocol)で受け、ビデオ信号をビデオテープレコーダに録画するための制御をする機能と、ビデオディスクレコーダを用いて光ディスクに保存する機能を有している。コマ録りの装置は、ビデオディスクレコーダ、カラーモニタ、及び、カラービデオプリンタから構成される。ビデオディスクレコーダは、録画再生性能が動画で24分/面、静止画で43500フレーム/面、アクセス時間が0.5秒である。また、ビデオ記号方式は、NTSCカラー方式でRS-422、RS-232Cのインターフェイスを装備している。

### 3. ソフトウェアの概要

JT-60においては、「実験データベース」と称されるものは、

1. 全系データベース
2. 計測データベース

の2つのデータベースから成っている。前者は、主として、JT-60のシステム制御に係わるデータを収納し、後者は、プラズマ計測装置から出力される信号を変換し、物理データとしてデータベース化したものである。全系データは、図1.1に示す様に全系計算機でデータ収集された後に大型計算機FEPに送られデータベース化される。一方、計測データは、計測データショット間処理装置ISPで収集され、同時にISP-FEP共用ダスト上にデータベース化される。この共用ダスト上のデータベースは、一定の期間後にFEPにおいて実験データベース専用ダストに全系データベースと共に格納される。

通常、JT-60における1ショットのプラズマ放電時間は10数秒であり、これが約20分間隔でくり返される。ショット放電後直ちにデータ収集、データ処理が開始されるが、図3.1に示す様に、全系、計測の各々のデータベース処理が完了するまでに約9分の時間が必要である。一方、全系システムにおける、次ショットの準備は、放電終了後約6分から既に始まっている。FAMEは、実験データベースのデータ取得からその処理が開始される。従って、FAMEの結果を次ショットに反映させることは、もともと不可能である。そこで、FAMEでは、その処理結果を次々回の放電に反映させられる様にソフトシステムの整備を進めている。

現在、FAMEシステムにインストールされているアプリケーション・ソフトウェアは、

- 1) MHD平衡解析ソフトウェア
- 2) 動画処理ソフトウェア

に大別される。前者はFAME本体で動作し、後者は、周辺装置の1つである動画処理専用EWSで動作する。これ等2つのソフトは、実験データベース作成完了の信号をISPよりソケット通信で受けることにより起動し、オンライン的に全ての計算が逐次に処理される。

以下、上記2つのソフトについてその概要をまとめる。

#### 3.1 MHD平衡解析ソフトウェア

FAMEシステムの計算処理ソフトウェアには、フロントエンドEWSで動作するFBIコードと、フロントエンドEWSでジョブ管理し、並列計算機で動作するMHD平衡コード「SELENE」がある。

以下では、二つの計算コードの概要と並列化、並びにそれに関連した最適化について説明する。

##### 3.1.1 FBIコード

FBIコードでは、実験放電で測定したポロイダル磁場、磁束、コイル電流を基に、プラズマ電流を6本のフィラメント電流で仮定し、プラズマの最外殻磁気面を最小自乗法を用いて求めている。また、その結果からプラズマの形状を示す諸パラメタ( $R_E$ ,  $a_E$ ,  $\kappa$ ,  $e_i c$ )や

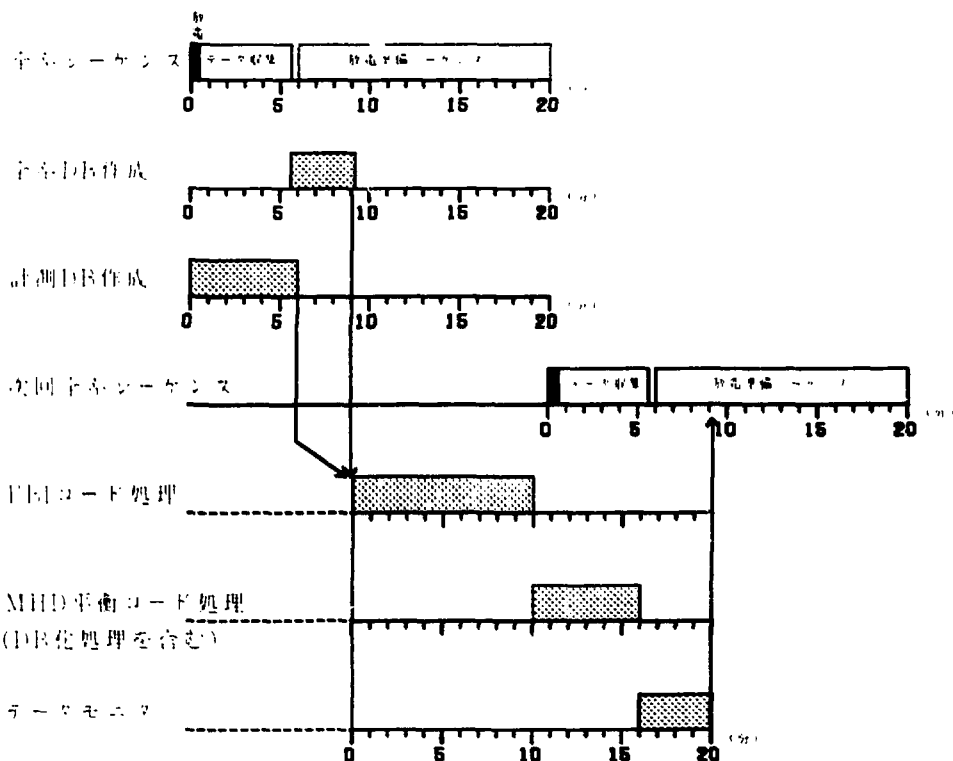


図3. JTR-60運転シーケンスとMHD平衡データベース作成タイミング



安定性を示すパラメータ ( $n_{\text{critical}}$ , etc.), さらに、反磁性測定を基にプラズマの蓄積エネルギー ( $\beta_{\text{crit}}$ ) を求め、最終的には、MHD平衡コード SELENE 用の入力データを出力するものである。

FB I には次にあける2つのバージョンが存在する。

- (1) 準定常プラズマ電流解析バージョン
- (2) 非定常プラズマ電流解析バージョン

トカマク放電においては、何らかの磁気流体的不安定性が原因ではないかと考えられる“ディスラプション”と呼ばれる急激なプラズマ電流の消滅が観測されることがある。このディスラプション時や、急激なプラズマ電流のランフアップ、ランフダウン時には、真空容器導体上に渦電流が流れる。上記(2)は、FB I の SELENE 入力データ生成処理において、磁気フロップ信号に対して、この渦電流の影響を考慮したバージョンであり、(1)は考慮しないバージョンである。本 FAME システムには、上記いずれのバージョンも用意されフロントエンド EWS で簡単にスイッチできる様になっている。

FAME 版の FB I コードでは、後述する MHD 平衡コードの計算を並列計算機によって処理することから、大型計算機版の FB I コードのように一時刻のみの計算だけでなく、数十から数百の時刻について、まとめて計算しておく必要がある。そのため、各時刻について、毎回データベースを初期設定及び終了設定したり、少量の取得データを転送しては効率が悪いため、必要となるデータ全部を一回にまとめて検索・転送できる様になっている。

### 3.1.2 MHD 平衡コード

MHD 平衡コード「SELENE」では、測定したホロイタル磁束を境界条件として、Grad-Shafranov 方程式を直接差分法である Buneman 法を用いて磁気流体平衡配位を求めている。

入力データは、プラズマ電流、コイル電流の実測値と、FB I コードで計算したホロイタル磁場で規格したプラズマ平均圧力  $\beta_p$  と内部インダクタンス  $L$  としている。ただし、プラズマ圧力の非等方性などにより  $L < 0.8$  となる場合には、 $\beta_p$  を  $\beta_p + (L - 0.8)$ ,  $L$  を 0.8 と置き換えて計算し、得られた磁気面関数から、磁気軸位置や正確な垂直磁場の曲率  $\kappa_{\text{vertical}}$  等を求め、実座標から磁気面座標へ変換を行う。

### 3.1.3 MHD 平衡コードの並列化と最適化

一般に、JT-60 に代表される様な大型トカマク装置においては、ある磁気流体平衡から別な平衡に移移する時間は放電時間に比べ十分短いため、磁気流体平衡は、各々の時刻において独立な事象と考えることができる。すなわち、MHD 平衡の時間発展を解く場合各時刻の平衡計算は完全に並列に処理することが可能である。

この特徴を利用し、FAME では SPMD (Single Program Multiple Data stream) モデルを採用した。このモデルでは、全プロセッサに同じプログラムがロードされ、各プロセッサは、自分の論理 ID を基に、自分の担当範囲を決定し計算を行う。

並列数の大きいシステムの場合、上述の各時間の処理に関する粗い粒度の並列化に加え、さ

らに特度の細かいフロクラミングを行うことにより、1時刻の平衡計算を複数のプロセッサで並列処理することも考えられる。しかし、この場合、プログラムの大幅な修正が不可避である。JT-60においては、MHD平衡計算コードSELENEは両用大型計算機に開発されて来ており、今後もこの大型計算機版SELENEを標準バージョンとしてソフトが改良され管理されていく。このことから、FAMEにおいても大型計算機版SELENEとの互換性を確保する必要があり、上述の細粒度並列化は採用しない。但し、3.1.3.1以下で述べる様な最適化を行うことにより、処理時間の短縮を図った。

### 3.1.3.1 ジョブの制御方法

FAMEで動作するMHD平衡コードの構成と処理の流れを以下の図3.2に示す。

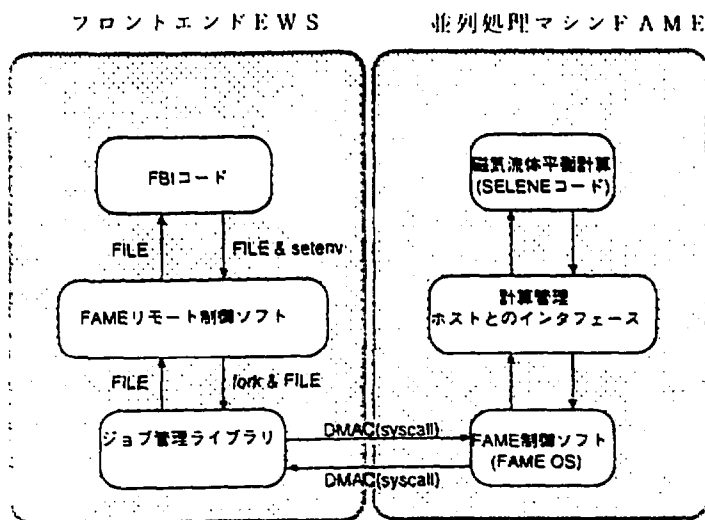


図 3.2 並列計算用MHD平衡コードの構成と処理の流れ

このように、FAMEシステムで動作するMHD平衡コードでは、フロントエンドEWSでジョブ管理を行い、その指示に基づき、バックエンドで並列計算機が動作する仕組みになっている。フロントエンドEWSと並列計算機との間の制御・通信は、基本的にフロントエンドEWSのディスク上に作成されるファイルを介して行われる。そして、フロントエンドEWS上で、並列計算機リモート制御ソフトを実行すると、自動的に並列計算機上で、MHD平衡コードが並列に動作するので、並列計算機の使用を意識する必要はない。

図3.1の制御シーケンスを以下に示す。

#### (1) FAMEの初期化

並列計算機リモート制御ソフトを起動すると、まずFAMEの各プロセッサに対して専用のオペレーティングシステムの常駐が行われる。その後、初期化ルーチンが実行さ

れ、MHD平衡コードのロードモジュールの常駐が行われる。

#### (2) ジョブの待機

フロントエンドEWSからジョブが投入されない限り、並列計算機の各プロセッサは待ち状態を保つ。

#### (3) FAMEへのジョブの投入

フロントエンドEWSでは、並列計算機の各プロセッサに対して、入力データファイルの名前が書き込まれたジョブ制御用のファイルをディスク上に作成する。そして、この時点では、既に並列計算機の各プロセッサに常駐しているMHD平衡コードは、このファイルの存在を5秒毎に確認している。制御ファイルの存在が判明した時点でその内容を読み取って、指示された入力データファイルによるMHD平衡計算を開始する。

#### (4) 計算時間の計測

フロントエンドEWSでは、並列計算機の各プロセッサ上で動作しているMHD平衡コードの計算時間を計測している。

#### (5) ジョブの終了通知

並列計算機の各プロセッサは計算が終了すると、その結果をフロントエンドEWSのディスクに書き込み、ジョブの終了をフロントエンドEWSに通知するための制御ファイルを作成する。フロントエンドEWS側で動作している並列計算機リモート制御ソフトは、MHD平衡コードが動作している間、このファイルの存在を定期的に確認している。そして、その存在が判明した時点で、引き続いて計算するための入力データが存在する場合には、(3)の処理を実行し、入力データが存在しない場合には、他のプロセッサの終了を待って、(1)の状態に戻る。

#### (6) 計算時間の制限について

並列計算機リモート制御ソフトでは、指定された時間内に計算が終了しないプロセッサが見つかった場合には、そのプロセッサだけでなく、全てのプロセッサの計算を止め、メッセージ出力を行い、ジョブが停止される。

### 3.1.3.2 入出力のC言語化

並列計算機における入出力は、オペレーティングシステムによって、1回に32KB(キロバイト)までに制限されている。そこで、この制限を越えるデータの入出力を行う部分の処理を、C言語で書き換えることによって対応した。また、この修正では、入出力処理がFORTRANで行う場合よりも簡略化されているため、データの入出力にかかる時間が短縮されている。

### 3.1.3.3 出力データの圧縮

FAMEシステムにおけるファイルサーバの容量は2.4GB(ギガバイト)であるが、一回のショットについて、約20MB(メガバイト)の計算結果が出力されるので、1200ショット分のデータしか格納出来ない。そこで、出力の大半を占める平衡データを、MHD平衡コード内で圧縮して出力されている。

圧縮方式のアルゴリズムについて簡単に説明すると、まずデータの最大値と最小値を求めて、その間を1024区間に等分し、量子化する。そして、量子化したデータの差分をとり、エントロピを減少させる。最後に、Huffman法により符号化する。

その結果、ファイル容量は10分の1に圧縮されると共に、データ転送時間の短縮にも有効である。また、この時の有効数字は三桁まで保証されているが、計測器の精度を基に考えると、この精度は十分妥当と言える。

### 3.1.3.4 入力データの読み込みの改善

MHD平衡コードにおいて論理機番4から読み込まれるキロイタル・コイラの磁場データは、600KB(キロバイト)程度の大きさで、時刻に依らず一定であるため、このデータを毎回フロントエンドEWSから並列計算機に転送するのは無駄である。そこで、並列計算機の各プロセッサにおいて、一回目の計算時のみデータを読み込み、かつ、それと同時に内容を作業領域に格納し、二回目以降の計算では、作業領域の参照を行うだけで済むように工夫されている。

### 3.1.3.5 WRITE文の制御

大型機で動作しているMHD平衡コードでは、論理機番6から計算経過をリスト出力していたが、並列計算機で動作するMHD平衡コードにおいては、計算時間の短縮のために省略している。これは、以下のようにソースコードを修正し、Cのプリプロセッサを利用することで実現している。

```
#ifdef WRITED
WRITE(6,*)
#endif
```

この修正により、コンパイルオプションを追加して、ソースコードを再コンパイルするだけで、フロントエンドEWSの画面上に出力リストを表示させることが出来る。但し、この場合、二個以上のプロセッサを用いた計算を行うと、各プロセッサの出力のタイミングがまちまちであるため、表示される計算経過の判読は不可能となる。

### 3.1.3.6 画像データ処理

FAMEシステムにおけるMHD平衡コードの計算結果は、数値データとしてだけでなく、動画処理装置上で、静止画や動画として確認することが出来る。

まず、FAMEで画像データを作成する。画像データ処理は、MHD平衡コードの中に組み込まれており、ロジックとしては、1時刻の平衡計算が終了した直後に、その結果を図形処理（カルコンフ-GKSインターフェイス）プログラムを介してベクターデータ（GKSメタファイル）に変換しフロントエンドEWSのファイルへ出力するというものである。

次に、動画処理装置でフロントエンドEWSのファイル中のベクターデータをメモリへ読み込ませ、それをダブルバッファ機能を用いて表示させる。これについての詳細は、3.2 動画処理ソフトウェアを参照されたい。

### 3.1.4 並列化の結果

以下では、今回の最適化を含めた並列化によって向上が見られた計算時間、及び計算結果に対する考察を述べる。

FAMEシステムにおける、FBIコードとMHD平衡コード、及び動画処理ソフトの処理時間と、大型計算機において二つの計算コードを動作させ、結果を図形端末上に画像表示させた時の処理時間を表3.1に示す。

表3.1 FAMEと大型計算機との処理時間の比較（単位：秒）

使用計算機 \ コード	FBI	MHD平衡	作図及び表示	合計
FAME	578	310 (画像データ作成を含む)	191 (作図181 表示10)	1079
汎用大型計算機	2575	4635		7210

#### 使用データ

ショット番号 : E019470

メッシュサイズ : 128

ポイント数 : 1.1秒 ~ 11.3秒 103ポイント

注) 大型計算機のデータは、1.1秒での計測値を103倍したものである。

また、その時間は経過時間である。

FBIコード、及びMHD平衡コードの大型計算機における計算結果とFAMEにおける計算結果は、入力データが全く同じのものであっても完全には一致しない。

これには二つの理由が挙げられる。まず一つは、数値の内部表現の違いにより、実数にお

ける仮数部の有効桁数に違いがあることである。もう一つは、FORTRANの仕様において、実数の精度を上げる時に、大型計算機では桁上げされる数値が保証されているのに対して、フロントエンドEWSでは保証されていることが挙げられる。

しかし、大型計算機での計算結果とFAMEでの計算結果の違いの大きさは、有効数字3桁未満であり、測定器の測定精度を考えると十分妥当なものといえる。

### 3.2 動画処理ソフトウェア

動画処理ソフトウェアは、並列計算機による計算結果として出力される画像データの入力を行い、動画処理装置のウィンドウに動画として再生したり、再生した内容について保存する必要のある画像については、ネットワークによって接続されているコマ録り装置に転送及び保存することを目的として全体システムに位置づいている。

以下に画像データ、動画処理及びコマ録り処理について説明する。

#### 3.2.1 画像データ

画像データは、動画処理がモニタに出力する動画画面の各画面の情報構成するデータ群であり、画面の開始、画面内の作画データ列及び画面の終了を意味する内容で構成される。FAMEシステムでの画像データは、FBIコード及びMHD平衡コードに組み込んだ画像データ生成用のインターフェイスライブラリを経由することによって並列計算機からフロントエンドEWSのハードディスクに出力される。画像データの容量は全データをバイナリとして保存することによって極力最小となるよう工夫し、1画面あたり約68KB（キロバイト）の容量で保存される。その結果コマ録り装置の保存単位である648×480ピクセルのデータ容量と比較した場合、ラスタデータ（画面内容をRGB画素で表現したデータ）で保存する場合と比較して1画面あたり約250KB縮小された。

インターフェイスライブラリのFAMEによる並列処理への対応に伴い、出力処理部分をFORTRAN言語からC言語に書き換えることにより、画像データの出力に要する時間を短縮した。

#### 3.2.2 動画処理

動画処理は、起動コマンドを入力することによって図3.3の画面を表示する。

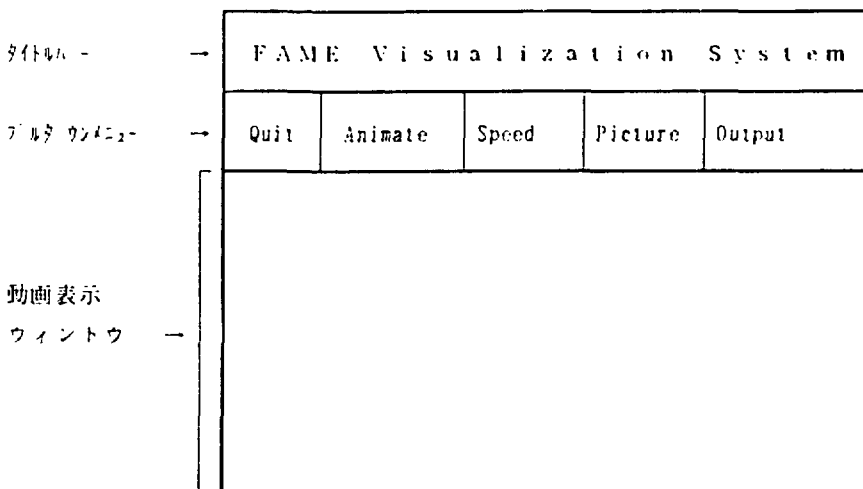


図3.3 動画処理画面

次にFBIコード及びMHD平衡コードによって事前には作成された画像データを入力し、各画面の情報を連続的にウィンドウに表示することによって全画像データを動画として再生する。再生された動画は、ウィンドウに用意されたボタン内のオプションを選択することにより、表3.2に示す機能が選択可能である。各ボタンは、メニューに入力可能なボタンメニューとなっており、マウスにより選択を行う。

表3.2 動画処理オプションボタン機能

ボタン名称	オプション	機能概要
Quit		プログラムの終了
Animate	Forward	前方向への再生
	Back	後方向への再生
Speed	Farst	通常速度の再生
	Slow	低速度の再生
	Strobo	1/100単位での再生
Picture	Start-P	開始画面へのジャンプ
	Stop-P	終了画面へのジャンプ
Output	Sun-Vision	市販動画処理プログラムのデータ作成
	Nvs-2000	コマ録り装置のデータ作成
	Post-Script	ホストスクリプトのデータ作成

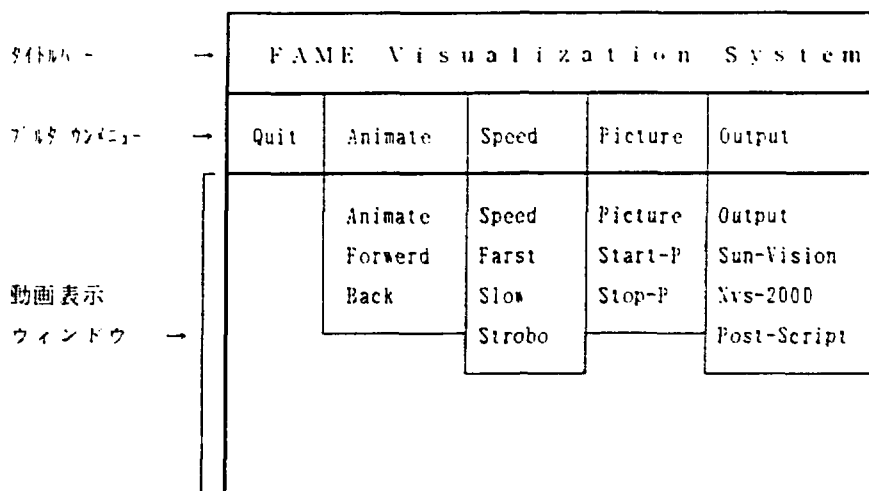


図3.4 プルダウンメニュー



コマ録り処理を行う場合は、動画処理に於けるフルタウンメニュー内のNvs-2000を選択することによって出力されるラスターデータファイルをコマ録り装置用のファイル形式に変換し、ネットワークを介してコマ録り装置に転送及び光ディスクに保存する。

フルタウンメニューOutput内のPost-Scriptを選択することによってホストスクリプト用データ作成が可能であり、当該メニューが選択された時点で図3.5に示すようなホストスクリプト出力対象ファイル選択用の画面が表示される。出力結果を付録Aに示す。

タイトル	→	PostScript File Select
対象ファイルリスト (スクロール付き)	→	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">             File-1              File-2              .              .              .              File-n           </div>
入力パス名	→	Input Path _____
出力パス名	→	Output Path _____
出力ファイル名	→	Out File _____
実行ボタン	→	<input type="button" value="Ok"/>
終了ボタン	→	<input type="button" value="Quit"/>
メッセージ	→	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

図3.5 ポストスクリプト出力操作画面

特に動画のような大量の画像を取り扱う場合は、実装メモリ容量を追加し、さらに高速なフレームバッファ（画像を表示するための転送バッファ）処理が必要になるため、当該動画処理装置では、実装メモリに64MB（メガバイト）（約140画面の許容量）を用意し、フレームバッファには、ダブルバッファ装置を実装している。これにより画像データのメモリ蓄積を可能とし、かつダブルバッファによる高速な画像転送処理を実現した。またネットワークを経由して動画処理を利用する場合でも高速な動画処理が可能となるよう考慮し、画

像データのメモリ蓄積は利用者側のワークステーションにすることとした。これにより一度利用者側に転送された画像データは利用者側のワークステーションに蓄積されるため、十分なメモリ容量を実装しているワークステーションであれば、ネットワークを経由した動画処理であっても動画処理装置を利用する場合と遜色のない利用を可能とした。

### 3.2.3 コマ録り処理

コマ録り処理は、前述の手順で作成した動画データの保存を目的として行うものであり、ネットワークを介してデータを転送することによって、付属の光ディスクに画像データの保存が可能となる。光ディスクの容量は、片面43500フレームの保存量であり、両面で87000フレームの画像データが保存可能である。

光ディスクに保存された画像データは、並列計算機及び動画処理装置とは無関係に任意の時点で再生が可能であり、再生した画像はビデオプリンタ及び市販のビデオテープレコーダに出力することが可能である。出力結果を付録Bに示す。以上のコマ録り処理は、ネットワークに接続されたワークステーションからのコマンド入力によって利用できる機能であり、この他に画像データの検索及びモニタ表示等に関連する光ディスクの管理機能も有している。

#### 4. あ と が き

JT-60の非定常プラズマ輸送解析に必要な100点を越える時系列磁気流体平衡の計算を約20分のショット間に処理するため、磁気流体平衡高速処理装置FAMEが開発された。

FAMEは、CPUの性能が12.5MFLOPS(100万浮動小数点/秒)のマイクロプロセッサが、4×4のゲートアレイを構成要素とした多段接続網で20個結合されている並列計算機で、最大性能が250MFLOPS(100万浮動小数点/秒)である。また、周辺装置にはFAMEのジョブ管理を行うためのフロントエンドEWS、平衡データを保存するための24GB(ギガバイト)の容量を持つファイルサーバ、計算結果を動画として表示するための動画処理装置、そして、その画像を記録するためのコマ録り装置がある。

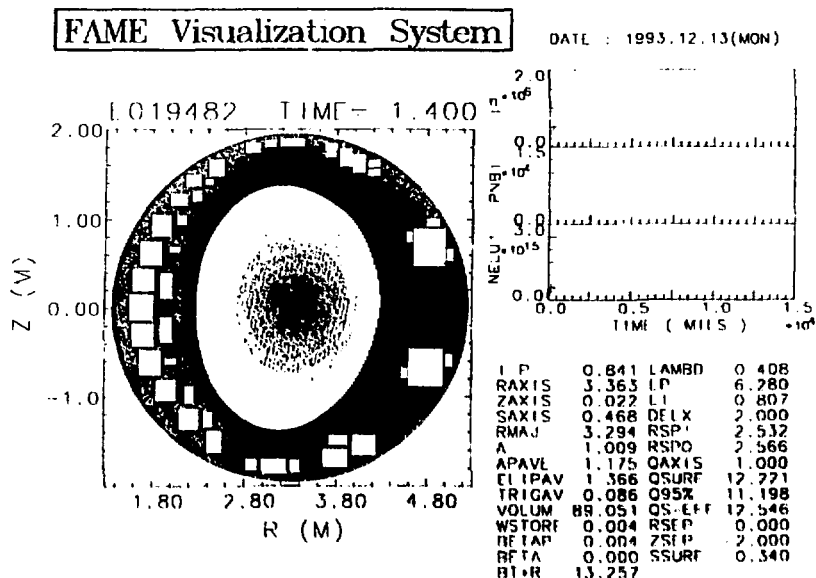
ソフトウェアでは、FBIコードがフロントエンドEWSで、並列化されたMHD平衡コードがFAMEで動作するようにインストールされている。また、両計算コードの結果を動画表示するためのプログラムが開発された。さらに、各コードの処理時間の短縮を図るために種々の最適化が施された。その結果、従来の大型計算機による処理に比べて、飛躍的な処理時間の短縮が行えるようになった。

現FAMEにおける磁気流体平衡解析に要する経過時間は表3.1に示す様に約18分である。ショット間の時間は約20分であるが、前述の様に、FAMEによる解析結果を次々ショットに反映させるためには、全ての計算処理をこのショット間に終了させる必要がある。このためには、データベース作成に要する時間9分を差引けば、FAMEの処理時間としては12分か残されていない。今後、現バージョンの処理でオーバーヘッドとなっているFBI計算をフロント・エンドEWSから並列計算機に移し、時間短縮を図っていく予定である。

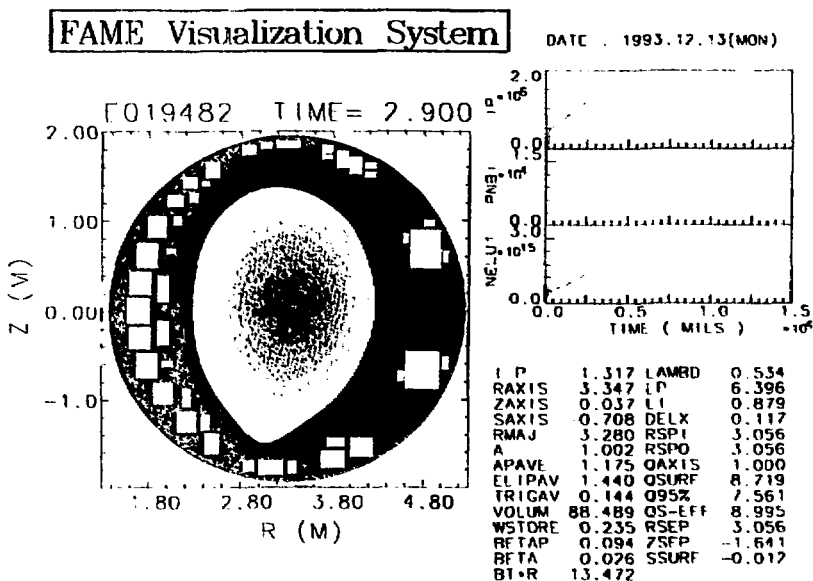
#### 謝 辞

FAMEシステムは、1988年より約5年間プラズマ理論研究室において実施されたプラズマシミュレータMETISの開発研究の成果を基本的に継承したものです。そのシステム開発は、ハードウェアソフトウェア両面にわたり日本電気株式会社C&Cシステム研究所コンピュータシステム研究部小池部長、中田氏、松下氏、鳥居氏その他多数の方々の努力に負うところが大きく、ここに、感謝の意を表します。また、METISで蓄積されたノウハウの利用を快く了承していただいたプラズマ理論研究室の竹田室長、さらには、本システム開発を終始支援していただいた炉心プラズマ解析室の安積室長、情報システムセンターの秋元室長に心より感謝いたします。

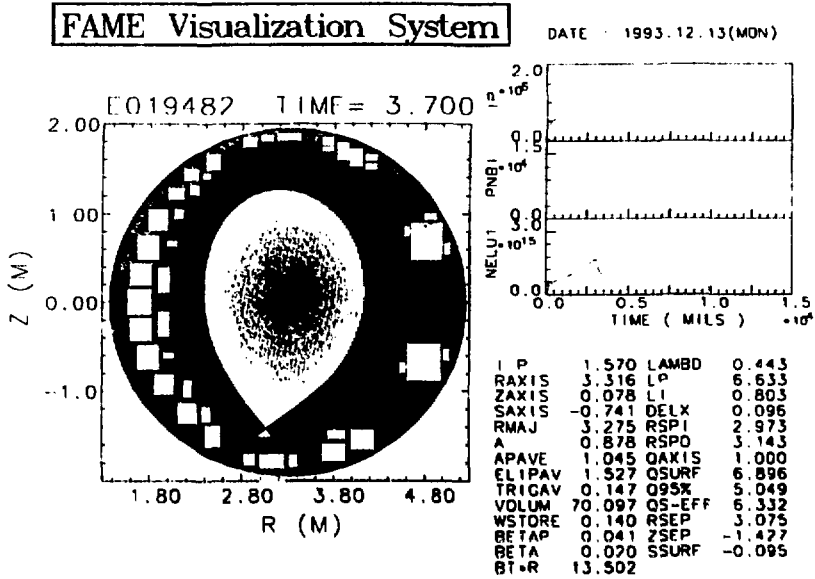
付 録 A



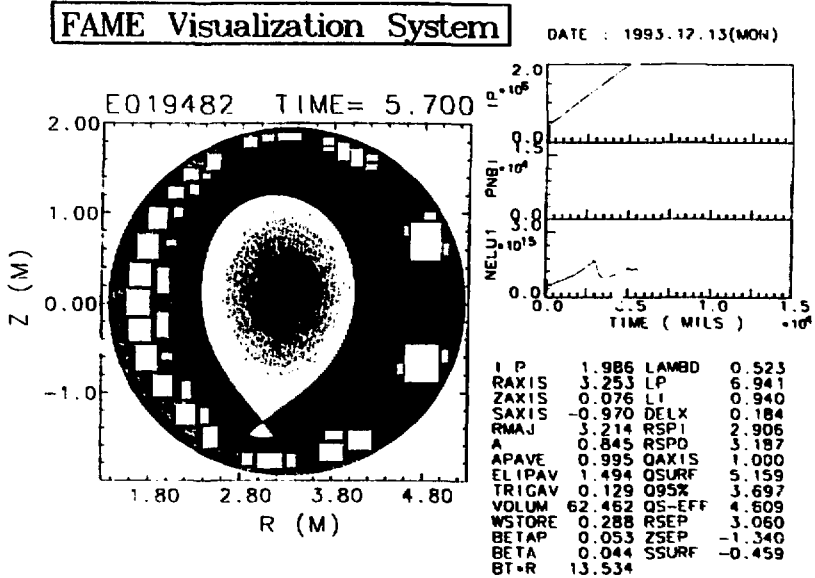
図A-1 ポストスクリプト出力による放電1. 4秒後の計算結果



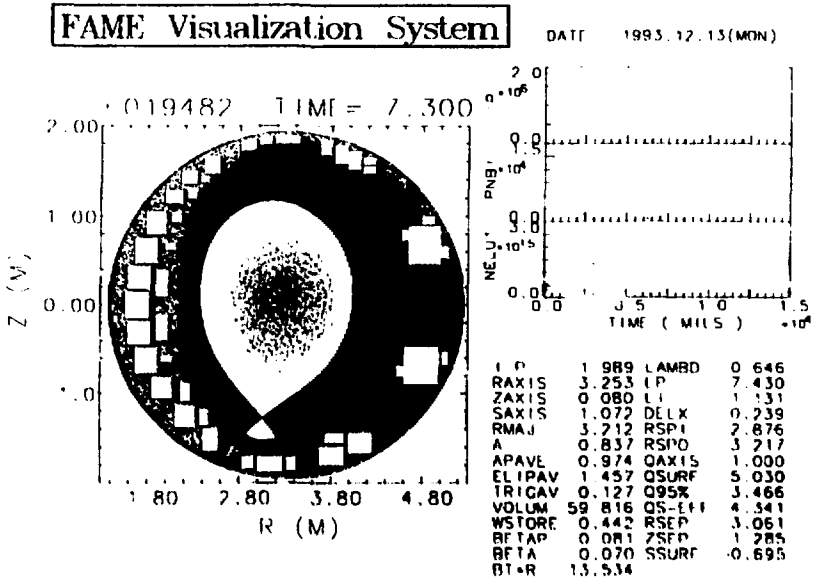
図A-2 ポストスクリプト出力による放電2. 9秒後の計算結果



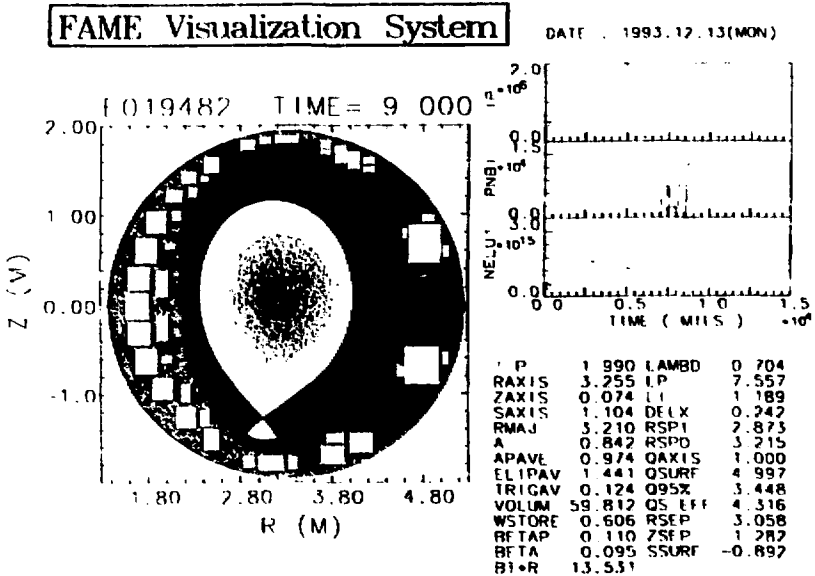
図A-3 ポストスクリプト出力による放電3.7秒後の計算結果



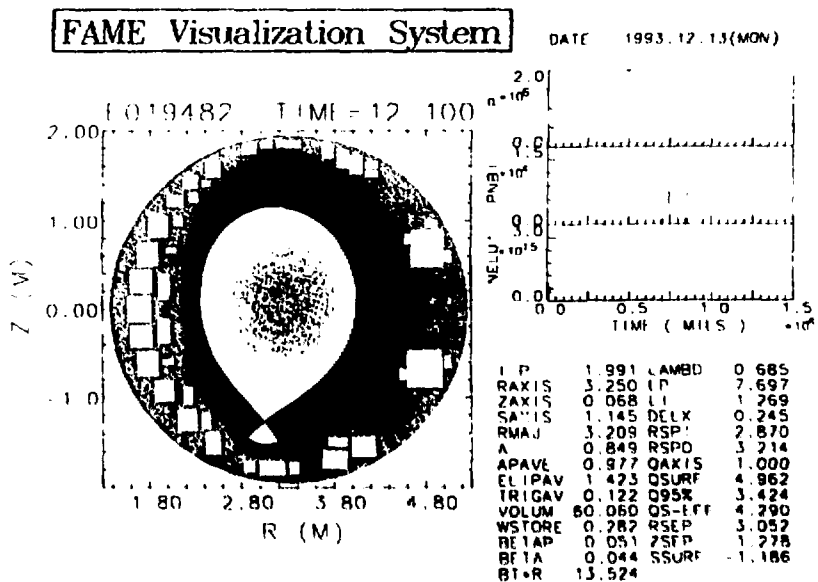
図A-4 ポストスクリプト出力による放電5.7秒後の計算結果



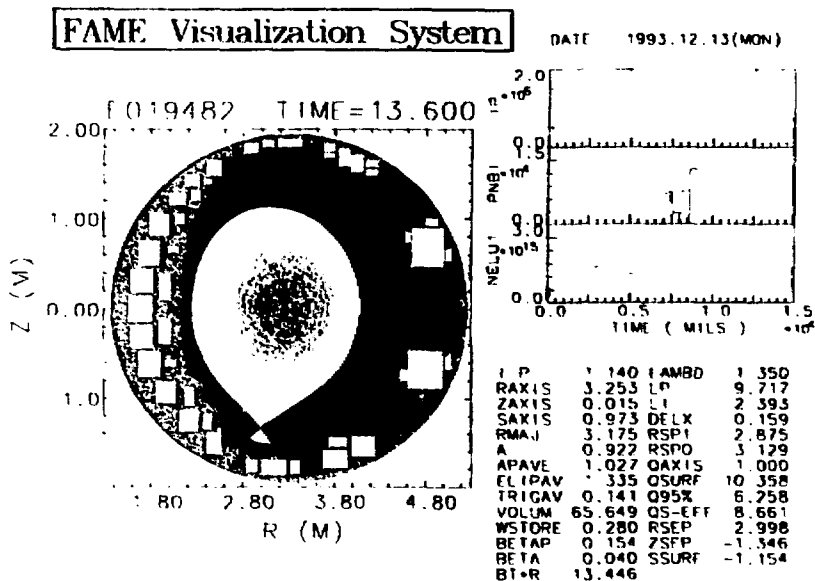
図A-5 ポストスクリプト出力による放電7.3秒後の計算結果



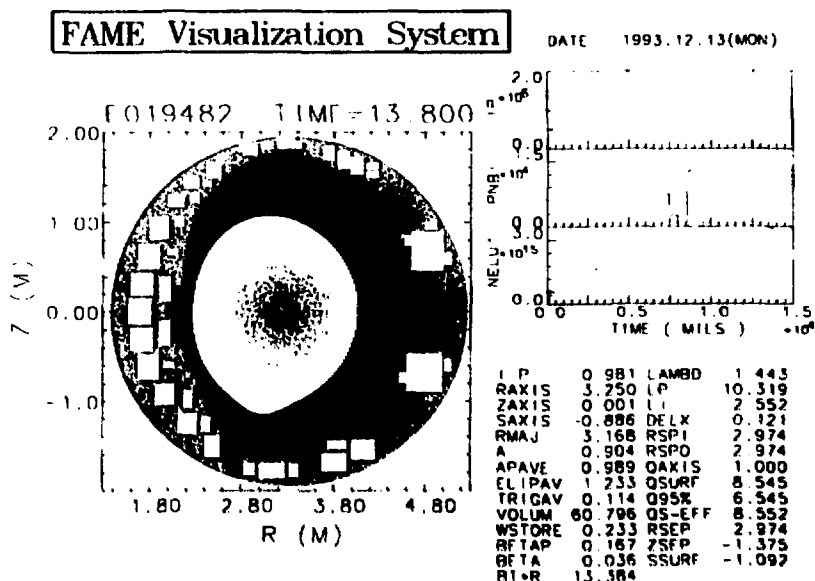
図A-6 ポストスクリプト出力による放電9.0秒後の計算結果



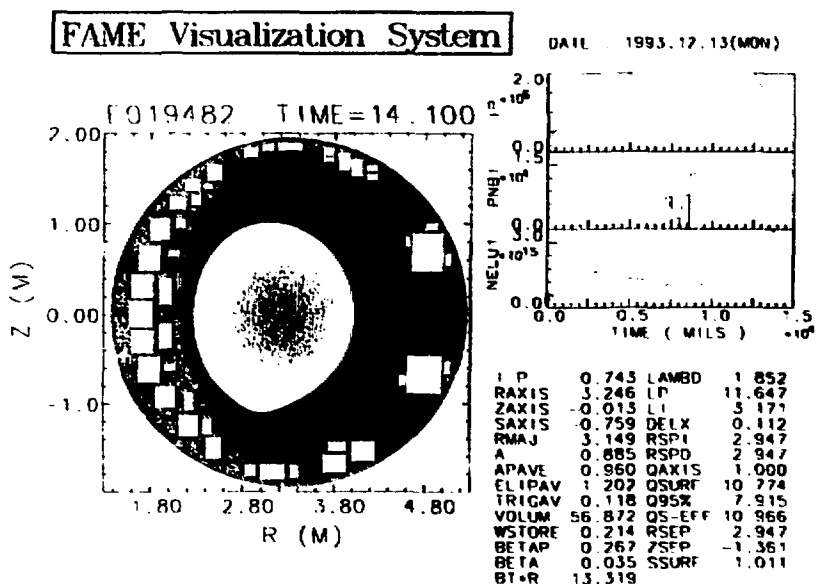
図A-7 ポストスクリプト出力による放電12.1秒後の計算結果



図A-8 ポストスクリプト出力による放電13.6秒後の計算結果



図A-9 ポストスクリプト出力による放電13.8秒後の計算結果



図A-10 ポストスクリプト出力による放電14.1秒後の計算結果



付 録 B

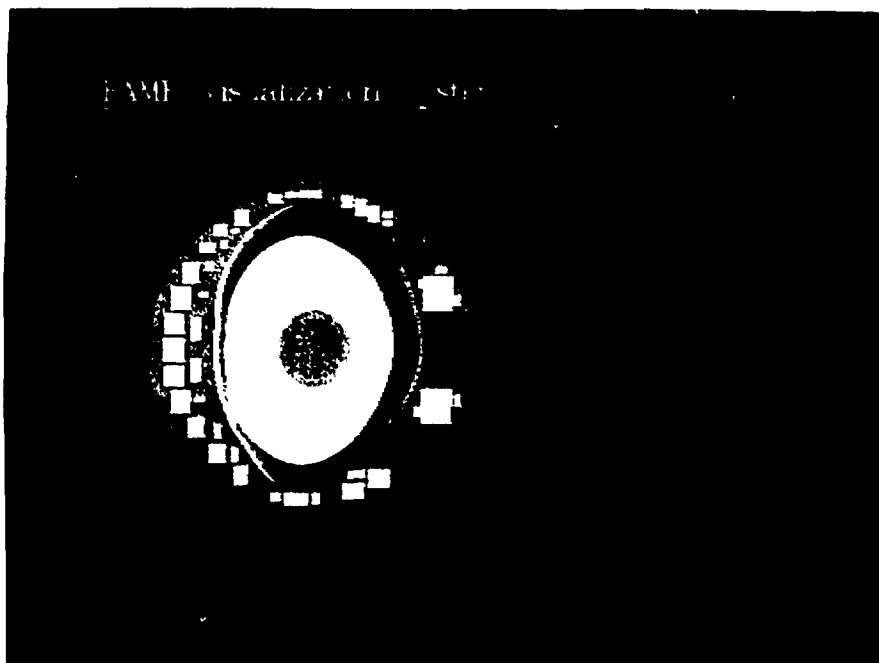


図 B-1 コマ録り装置に出力した放電1、4秒後の計算結果

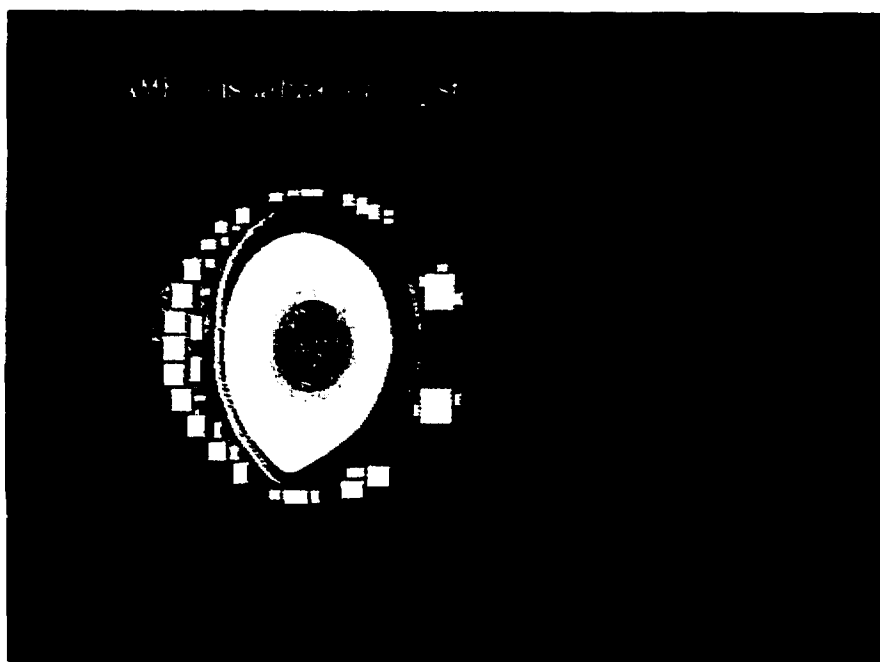
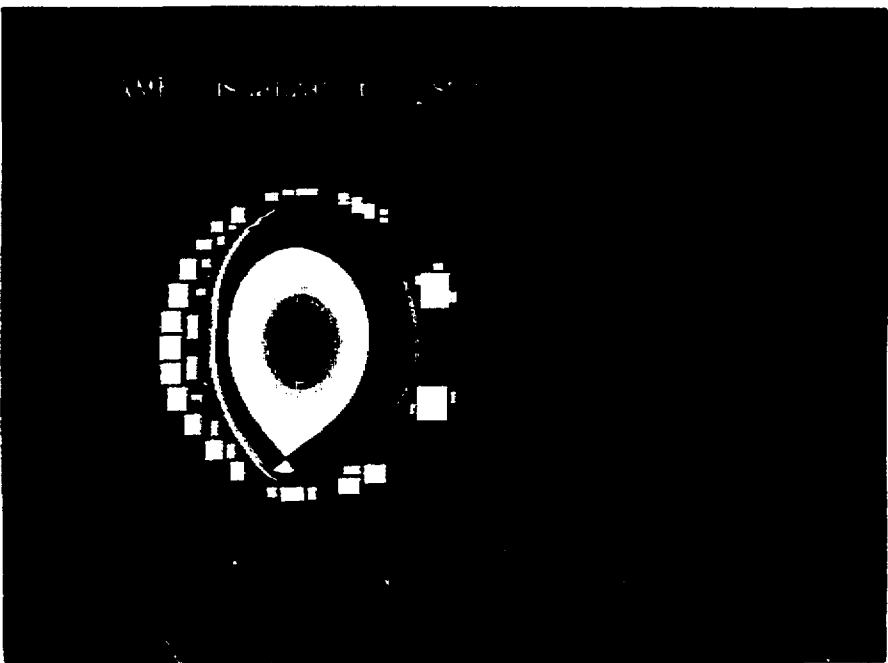


図 B-2 コマ録り装置に出力した放電2、9秒後の計算結果



図B-3 コマ録り装置に出力した放電3. 7秒後の計算結果



図B-4 コマ録り装置に出力した放電5. 7秒後の計算結果

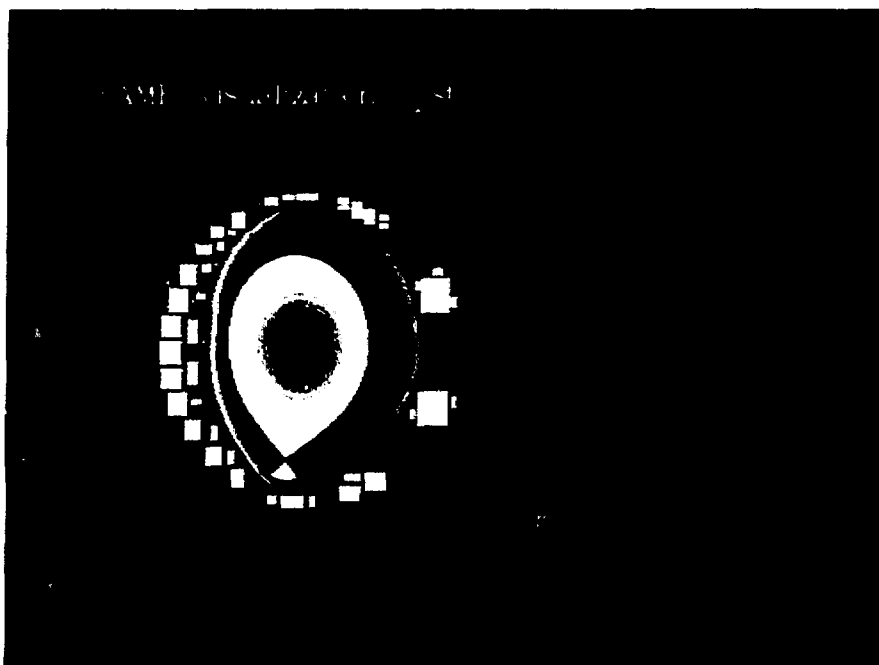


図 B-5 コマ録り装置に出力した放電7、3秒後の計算結果

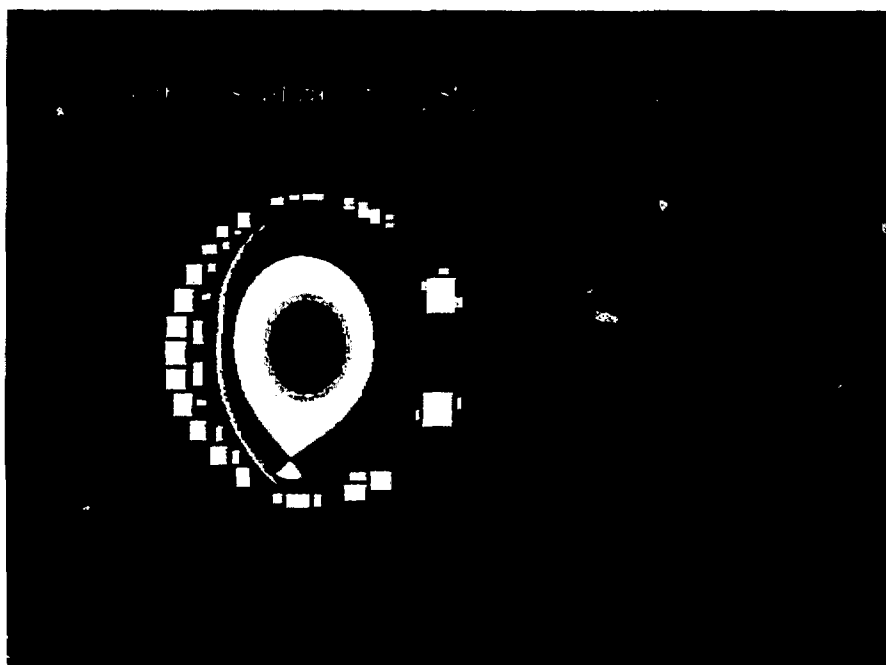
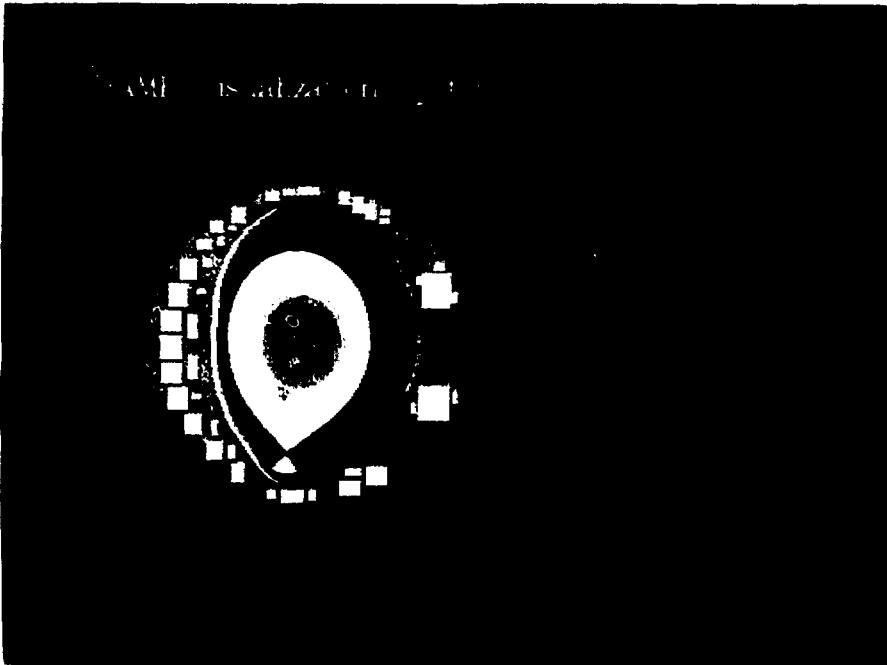


図 B-6 コマ録り装置に出力した放電9、0秒後の計算結果



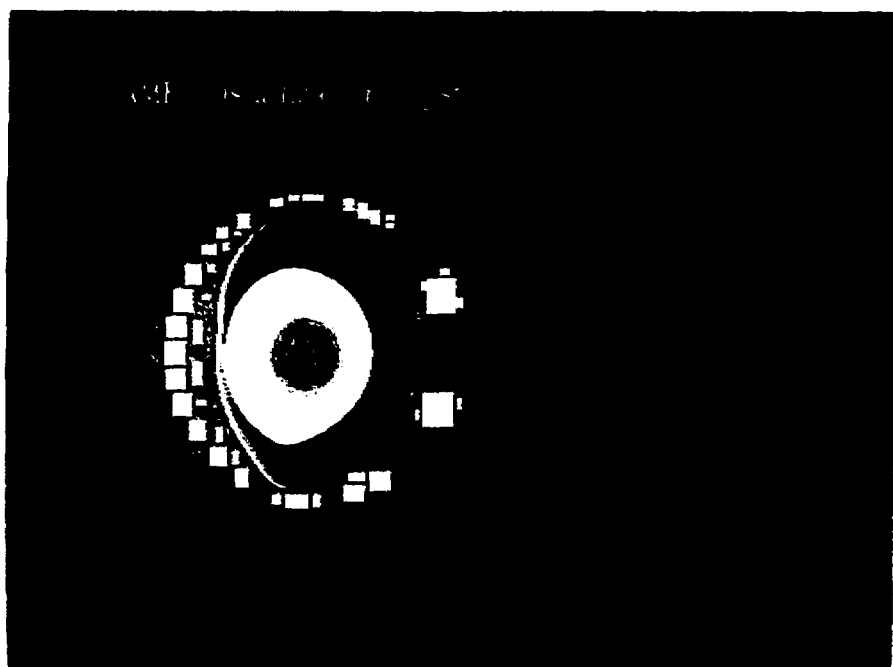
図B-7 コマ録り装置に出力した放電12、1秒後の計算結果



図B-8 コマ録り装置に出力した放電13、6秒後の計算結果



図B-9 コマ録り装置に出力した放電13.8秒後の計算結果



図B-10 コマ録り装置に出力した放電14.1秒後の計算結果

# 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
物質の量	モル	mol
光強度	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	パスカル	Pa	N·m <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
仕事率、放射能	ワット	W	J·s <sup>-1</sup>
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 <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C·V <sup>-1</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V·A <sup>-1</sup>
導電率	シーメンス	S	A <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup>
磁気誘導	ウェーバ	Wb	V·s
磁気場	テスラ	T	Wb·m <sup>-2</sup>
磁気モーメント	アンペアメートル	A·m	A·m
熱伝導率	ワットメートル <sup>2</sup> パーセル	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J·kg <sup>-1</sup>
放射線当量	シーベルト	Sv	J·kg <sup>-1</sup>

表2 SIに併用される単位

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 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIに併用される単位

名称	記号
アンペア/メートル	A·m <sup>-1</sup>
ヘクト	h
バール	bar
ガリ	Gal
グレイ	Gy
ラジアン	rad
レム	rem

1 A = 0.1 nm<sup>-1</sup> · 10<sup>9</sup> m<sup>-1</sup>  
1 h = 100 fm · 10<sup>15</sup> m<sup>-1</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm·s<sup>-2</sup> = 10<sup>-2</sup> m·s<sup>-2</sup>  
1 Gy = 1.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>4</sup> C·kg<sup>-1</sup>  
1 rad = 1 cGy = 0.01 Gy  
1 rem = 1 cSv = 0.01 Sv

表5 SI接頭語

位数	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>0</sup>	なし	d
10 <sup>-1</sup>	センチ	c
10 <sup>-2</sup>	ミリ	m
10 <sup>-3</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-6</sup>	ナノ	n
10 <sup>-9</sup>	ピコ	p
10 <sup>-12</sup>	フェムト	f
10 <sup>-15</sup>	アト	a

注1)

- 表1、5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局(1985年)の定める「1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J」の値はCODATAの1986年推奨値の1.602177 × 10<sup>-19</sup> Jに改定されているが旧来の単位なのでここでは省略した。
- 表3には海軍、空軍、原子力、航空の各分野で使われているが旧来の単位なのでここでは省略した。
- 1 barは、JISでは液体の圧力を表わす場合の限り表2の「bar」で分類されている。
- 「国際物理学会」は bar、barn、rad、rem の単位 mndlg 表 2 のように分類されている。

表6 圧力換算表

1 MPa = 10 bar	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg Torr	lbf/in <sup>2</sup> psi
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10	145.038
0.000000665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.31322 × 10 <sup>-7</sup>	1.33322 × 10 <sup>-7</sup>	1.31578 × 10 <sup>-7</sup>	1	1.93388 × 10 <sup>-7</sup>
0.904024 × 10 <sup>-7</sup>	0.92025 × 10 <sup>-7</sup>	0.90016 × 10 <sup>-7</sup>	0.714149	1

N · 10 <sup>9</sup> dyn	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809
0.0001	1	2.20462
4.44822	1.00000	1

1 Pa = N · s <sup>-2</sup> · m <sup>-2</sup>	1 P = 10 <sup>12</sup> Pa	1 g · cm <sup>-1</sup> · s <sup>-2</sup>
1	10 <sup>12</sup>	10 <sup>-5</sup>
10 <sup>12</sup>	1	10 <sup>17</sup>
10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-17</sup>	1

J · l · erg	kgf·m	kW · h	cal (3.41 J)	Btu	ft · lbf	eV	1 eal	4.18605 J (3.41 J)
1	0.101972	0.277778 × 10 <sup>-3</sup>	0.238846	0.478149 × 10 <sup>-3</sup>	0.737562 × 10 <sup>-3</sup>	6.24150 × 10 <sup>17</sup>	1	4.184 J (熱化学)
0.8006	1	2.74978 × 10 <sup>-3</sup>	0.371556	0.748351 × 10 <sup>-3</sup>	1.13300 × 10 <sup>-3</sup>	6.12082 × 10 <sup>17</sup>	1	4.1855 J (15 °C)
0.0001	0.000980665	0.000277778	0.00041868	0.000819144	0.00125489 × 10 <sup>3</sup>	6.094 × 10 <sup>17</sup>	1	4.1868 J (国際表)
4.1868	4.1868 × 10 <sup>-3</sup>	1.19997 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.98779 × 10 <sup>-3</sup>	2.98321 × 10 <sup>-3</sup>	6.017 × 10 <sup>17</sup>	1	1 JPS (15.0 °C)
1.0 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-6</sup>	2.77778 × 10 <sup>-6</sup>	3.41 × 10 <sup>-6</sup>	6.77 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-6</sup>	6.08 × 10 <sup>15</sup>	1	75 kgf·m · s
1.0 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-6</sup>	2.77778 × 10 <sup>-6</sup>	3.41 × 10 <sup>-6</sup>	6.77 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-6</sup>	6.017 × 10 <sup>15</sup>	1	35.499 W

Bq	Ci	Gy	rad	C · kg <sup>-1</sup>	R	Sv	rem
1	2.7027 × 10 <sup>-11</sup>	1	100	1	0.75	1	100
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	1	2.58 × 10 <sup>-5</sup>	1	0.01	1