

JAERI-Tech
98-048



JP9901015



JFT-2MトカマクにおけるTVトムソン
散乱装置の技術開発と運転

1998年10月

椎名富雄・山内俊彦・石毛洋一*・高橋 明**
吉田英俊・小沢皓雄・河村 茂*・秋本宣章*³
Dirck DIMOCK*⁴・Benoit Le BLANC*⁴
Janet FELT*⁴・David JOHNSON*⁴

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。

入手の間合わせは、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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

J F T - 2 M トカマクにおける T V トムソン散乱装置の技術開発と運転

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

椎名 富雄・山内 俊彦⁺・石毛 洋一^{*}・高橋 明^{**}

吉田 英俊・小沢 皓雄⁺⁺・河村 茂^{*}・秋本 宣章^{*3}

Dirck DIMOCK^{*4}・Benoit Le BLANC^{*4}・Janet FELT^{*4}・David JOHNSON^{*4}

(1998 年 10 月 1 日受理)

T V トムソン散乱装置 (T V T S : プリンストン大学と共同で開発した計測器) が完成し、運転を始めてから 6 年 (1993 ~ 1998) が経過した。その間にハードウェア上及びソフトウェア上の問題点が数多く発生し、その都度、装置の改良に迫られた。そして、現象を慎重に検討し、運転をしながら問題点を解決してきた。本報告書では、かくして蓄積された T V T S 装置の運転上のノウハウについて纏めた。又、T V T S の運転方法も記述した。

那珂研究所 : 〒 311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+ 関西研究所光量子科学センター

++ 東海研究所技術部

* (株)ミヤマ

** 東洋電子(株)

*3 新日本科学製作所(株)

*4 プリンストン大学プラズマ物理研究所

Technical Development and Operation of TV Thomson Scattering System on JFT-2M
Tokamak

Tomio SHIINA, Toshihiko YAMAUCHI⁺, Yoichi ISHIGE^{*}, Akira TAKAHASHI^{**},
Hidetoshi YOSHIDA, Teruo KOZAWA⁺⁺, Shigeru KAWAMURA^{*}, Nobuaki AKIMOTO^{*3},
Dirck DIMOCK^{*4}, Benoit Le BLANC^{*4}, Janet FELT^{*4} and David JOHNSON^{*4}

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

(Received October 1, 1998)

Six years have passed since the TV Thomson scattering system (TVTS) was completed and the operation was started on the JFT-2M tokamak. TVTS was developed in collaboration with Princeton Plasma Physics Laboratory. Many troubles on the hardware and the software were encountered. Improvements of the system were needed in each occasion. Phenomena of troubles were carefully analyzed and they have been solved in operating the system. This paper presents thus obtained know-how necessary for the operation of TVTS as well as methods of operation.

Keywords: TVTS, JFT-2M, Electron Density, Electron Temperature, CCD, Image Intensifier,
High Spatial Resolution

+ Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

++ Department of Engineering Services, Tokai Research Establishment

* Miyama Co.

** Toyodensi Co.

* 3 Shinnihonkagaku Co.

* 4 Princeton Plasma Physics Lab.

目 次

1. まえがき	1
2. TVトムソン散乱装置の構成	2
2.1 レーザーサブシステム	2
2.2 真空部品サブシステム	2
2.3 分光及び光学系サブシステム	3
2.4 検出器サブシステム	4
2.5 制御及びデータ収集サブシステム	5
2.6 ソフトウェアサブシステム	5
3. TVTSの主な開発成果	6
4. TVTSの運転方法（通常のルーチン作業）	7
4.1 運転手順	8
4.2 運転時の注意点	11
5. TVTS運転のためのポイント	12
5.1 アライメント	12
5.2 CCDカメラの製作	13
5.3 CCDカメラの冷却	15
5.4 スパークギャップの調整	16
5.5 入射ルビーレーザー光の調整	17
5.6 ビームダンパの交換	18
5.7 データ収集	18
6. おわりに	19
謝 辞	20
参考文献	20
付録 A VAX計算機運転マニュアル	41
B スパークギャップ運転マニュアル	45
C IBM計算機（DELL計算機を含む）運転マニュアル	46

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of TV Thomson Scattering System	2
2.1 Laser Subsystem	2
2.2 Vacuum Subsystem	2
2.3 Optical Subsystem	3
2.4 Detector Subsystem	4
2.5 Data Acquisition Subsystem	5
2.6 Software Subsystem	5
3. Main Development of TVTS	6
4. How to Operate TVTS (Daily Work)	7
4.1 Procedure of Operation	8
4.2 Special Points for Operation	11
5. Point for TVTS Operation	12
5.1 Alignment	12
5.2 Fabrication of CCD Camera	13
5.3 Cooling of CCD Camera	15
5.4 Alignment of Spark Gap	16
5.5 Power of Incident Laser Beam	17
5.6 Exchange of Beam Dump	18
5.7 Data Acquisition	18
6. Final Remarks	19
Acknowledgement	20
References	20
Appendix A Manual of VAX Computer	41
B Manual of Spark Gap Operation	45
C Manual of IBM PC Operation (Including DELL PC)	46

1. まえがき

TVトムソン散乱装置 (TVTS) は、日本原子力研究所とプリンストン大学プラズマ物理研究所との間に締結された日米協力協定に基づいて共同開発された。2年間の協定期間直後の1992年2月26日(水)、JFT-2Mプラズマから最初の散乱光を観測した。本装置の最も大きな特徴は、プラズマの電子密度 (n_e) 及びプラズマの電子温度 (T_e) をJFT-2M本体の大半径方向に0.86cm以下の高分解能で81点もの空間データを取得出来ることである。そして、TVTS設置後、データ収集は、本文で取り上げるような普段の地味な手入れを行うことにより、有効データがたくさん取得出来、プラズマ物理の各種解析に役立っている。

TVトムソン散乱装置のアイデアはプリンストン大学で生まれ¹⁾、その後まもなく、米国GA社のDIIIトカマクでも開発された²⁾。著者の一人(山内)はDIIIでの開発に参加したが、その開発にはプリンストン大学で行ったと同じくらいの努力を要した。それは、主に検出器の違いに依る所が大きいと思われる。当時検出器としてイメージインテンシファイヤの後に、現在のようなCCDカメラではなく、日本製のSIT管を使った。それは感度の低い点ばかりでなく、電子が磁界中を走り、完全にシールドしきれない部分で電子が曲がるという欠点があった。これは、CCDを使うことで解決された。

本TVTSプロジェクトでは、GA社やPPPLとも違った検出器を開発した。それはイメージインテンシファイヤとして大口径(80 ϕ)のものを使い、イメージインテンシファイヤで縮小してから、CCDの受光面(6mmの四角形)に散乱光が入るようにしたことである。つまり、この検出器で像は、80mmから6mmに電氣的に縮小される。

TVトムソン散乱装置は、トムソン散乱断面積 ($\sigma = 6 \times 10^{-29} \text{m}^2$) が小さいことから大きな信号量を得ることが難しく、一般的に小さなS/N比となる。大きなS/N比を得るためには入射レーザー光の強度を高め、立体角を大きくし、ノイズを減らすことが重要である。レーザーの強度を高めるためには、レーザーの増幅段数を3段とし、レーザー発振装置の光学系を調節し、レーザーモードを良くした。立体角を大きくするために、JFT-2Mトカマクの観測フランジに出来る限り大きな窓をつけた。迷光ノイズを減らすために、光学系の周囲を黒色の金属材料で覆ったり、トカマク内で入射レーザーが当たる所には、ビームダンパ及びビューイングダンパを取り付けた。本装置は、協定後においても何回も改良され、質の高いデータの取得が可能となった。しかしながら、光信号(ここではレーザー散乱光)を電気信号に変えるCCDカメラ等は自分達で開発し、DOEとの特許の関係でメーカーに委託出来ない事情があったため、常にTVTS作業者は、メンテナンスのために高いエレクトロニクス技術が求められた。

著者の一人(山内)がアメリカ物理学会 (APS) に参加した時、TVTSソサイアティ (TVTS又は相当のシステムを開発している人々の集まり) の一員として意見の交換を行った。そこでTVトムソン散乱装置は、大学等でも開発されていることが分かった。

又、JFT-2 M用TVトムソン装置の感度は、他のTVTSより数倍高いことが日米間の会合で明らかになった。

ここでは、TVトムソン散乱に携わる測定者のために細かい運転技術及び部品の取り扱い技術等を出来るだけ詳細に公開した（但し、使用する時は原研とPPPLの了解を得ること）。

本論文は、以下の内容から構成されている。2章では、TVTSシステムのハードウェアがどのように構成されているか、又、それぞれのハードウェアはどんな働きをするかを簡単に述べる。3章では、TVTS開発の結果、生まれた成果について記述する。4章では、TVTSの通常の運転方法を作業の順番に従って列挙する。5章では、TVTSの測定をする際、その準備からデータの収集作業に至る迄の運転技術を記述する。

2. TVトムソン装置の構成³⁾

JFT-2 M用TVトムソン散乱装置システムを機能別に分けると図1に示すように、6サブシステムから構成される。以下に、各サブシステムについて詳細に述べる。

2.1 レーザーサブシステム⁴⁾

レーザー装置サブシステムを図2に示す。レーザー装置は基本的に1パルス発振で波長は 6943 \AA である。発振段は不安定型共振器で 2.5 mm の直径のTEM₀₀モードで発振する（ 80 mJ ）。レーザーを安定に発振させるための環境の温度（ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ）及び湿度（ $40 \sim 50 \%$ ）の制御をしている。

発振したレーザー光は第1 Amp、空間モード、特に周辺を滑らかにカットするソフトウェア（アポダイザ）、第2 Amp、リレーレンズ、第3 Ampを通り 20 J 、 20 nS のレーザー光を発生する。アライメント光のHe-Neレーザー光は、本研究で開発した安定駆動ミラーを回すことにより、 10 m 以上離れたJFT-2 Mトカマクに 0.1 mm 以内の誤差で、再現性良く入射できた。

2.2 真空部品サブシステム⁵⁾

図3にJFT-2 Mトカマク断面図と真空部品サブシステムを示す。JFT-2 M真空容器は、非円形断面で固定リミタ（プラズマ境界）までの距離は水平方向 70 cm 、垂直方向 106 cm である。レーザー光を吸収するレーザービームダンパを真空容器内側に設置した。それは、図4に示すようにPPPLの蓄積データを参考に、3枚のアイリスと最大 1 GW のレーザー光を直接吸収出来るパイログラファイト製ビームダンパからなる。

このビームダンパの長さはPPPLのTFTR、PBX-M及びPDXに取り付けられたものの半分以下で7cmである（これはJFT-2Mトカマク装置が、中心に鉄心があるために制限されたことによる）。それだけに迷光除去には一層の工夫が要求され、ここではビームダンパ内部をクロムメッキして黒くし、アイリス（アパーチャ）としてガラスフィルタを初めて挿入し、レーザー光の吸収効率の向上を計った。又、ビームダンパからのレーザー光の反射光が、前方の横フランジ内に収まるようアイリスの直径を1.0mmとした。横フランジには、アライメント用可動プローブ（レーザー光と受光光学系のアライメント用）があり、そのビームダンパ側の面には、レーザー光を吸収するためのグラファイト板（鋸歯状の凹凸で、山や谷の角度は90°）及びその他の横フランジ面にも出来る限り同様のグラファイト板を設置した（ビューイングダンパ）。又、約6mのレーザー入射筒（入射窓をレンズ焦点位置（ $f \sim 8$ cm）から遠ざけ窓のレーザー破壊を防ぐ）の内部には、約50cmおきにアイリスを設置した。入射筒には絶縁フランジ、ゲートバルブ及びアライメント用CCDカメラを取り付けた。レーザー入射窓は、光軸に垂直とブリュスター角の両方を用意した（窓材は、石英に比べ気泡がないBK-7を使用）。上フランジの観測窓のシャッターは水平可動で、窓材はX線に強い石英ガラスを使用した。この窓の上方に図5の光学系サブシステムの一部の受光光学系を設置した。

2.3 分光及び光学系サブシステム

光学系サブシステムは、JFT-2M真空容器の水平方向の中心（プラズマ中心）70cm長（幅3mm）の散乱光を19.1cm長（幅0.9mm；全部で91空間点で81の観測点と10のプラズマ光測定点があり、各点は4×8（又は9）本（250 μ m/本）のファイバで構成）の石英イメージファイバ（ファイバ束）上に集光する（図5参照）。そして、1.1mの石英ファイバを通り、分光器のリレーレンズに入射する（図6参照）。イメージファイバは、適正度を知るために各点のイメージファイバを出力端で90度回して（長さ7.29cm、幅2.25cmに変化）固めた。このアイデアにより、電子密度の分布からレーザー光のアライメントの良さをチェック出来る（文献6）参照）。ファイバから出た光は、ハイパス光学フィルタ（迷光を3桁減少、又角度特性等は文献3）参照）、リレーレンズで拡大され入射スリット（高さ251.5mm、幅7.77mm）を通り、リトロレンズ、回折格子そして同じリトロレンズを通り抜け、分光器出口に2次元の像を作る。これらの配置を図6に示す。2次元像の縦が測定点（散乱光81点と追加プラズマ光10点）及び横が波長（6943Åより短波長側450Å程度まで）である。その像はフィールドレンズ及びカメラレンズを通りイメージインテンシファイヤ（直径80mm）に入射する。

2.4 検出器サブシステム^{3, 6)}

イメージインテンシファイヤからはじまる検出器サブシステム (図6参照) の心臓部を図7と図8に示す。図7の一段目のイメージインテンシファイヤの光電面は、S25であり、蛍光面 (アノード) はP47 (青色を発する蛍光体) である。P47の減衰時間は80nSである。本インテンシファイヤチューブは4つの電極 (カソード: 0kV、フォーカス: 約1kV、ズーム、或いは、ゲート: 約1kV、アノード: 20kV) を持ち、その内の1つ (ズーム) をゲート電極として用いた。ゲート電極は2ヶのスパークギャップ (並列) から来る高圧パルス信号 (9.5kV) で2回動作する。1回目 (散乱光の取得用) は、レーザー発振装置からスパークギャップまでの約10m (1Φ) の石英ファイバを通った約4mJの部分レーザー光 (SHG: 2次高調波 (3471Å)) をスパークギャップに入射し、120nS (又は、80nS) 間ゲート動作を起こす (ゲート動作時の高電圧の安定性は96%以上である)。2回目 (プラズマ光の取得用) は、レーザー光の代わりに補助電極に高圧パルスをかけて同じゲート動作を起こす。1回目に散乱光、2ms後の2回目はプラズマ光を測定する。ここで信号対雑音 (雑音=ショットノイズ+迷光+プラズマ光) = 10を得るために必要な消光比 = 2×10^7 以上を得た (詳細は文献7) を参照のこと。又、コントラスト伝達関数 (MTF) も同様に文献7) を参照のこと。像の縮小率は18/80である。2段目のインテンシファイヤ (カソードとアノード間は20kV) は1段目のファイバ、光学グリース、2段目のファイバを通して受光する。光電面はP47の蛍光に高感度のS20を用い、アノードには、P46 (緑色の光を発する蛍光体) を用いた。この蛍光体の減衰時間は160nSであり、2ms後のデータ収集時には前のデータは十分減衰している。2段目のインテンシファイヤの増幅度は 10^4 以上である。像の縮小率は11/18である。像は、イメージインテンシファイヤを通るとチューブ内に形成された電界によって歪む。これを補正するため前述のように、カメラレンズで樽形の像を前もって作った。その結果、インテンシファイヤの出力像は、設計通り、分光器出力面の像に相似形の像を得ることができた。この像は、7cmのイメージファイバロッドを通して、そのままCCD素子の受光面に入射する。両者の間に空気があると、像は異常に大きくなり不鮮明となるために、イメージインテンシファイヤロッドとCCD素子受光面の間に出来る限り薄く光学グリースをつけて結合した。(この原因の発見から確立までに約1年間を費やした)。

CCD素子は -30°C (変動幅 $\pm 1^{\circ}\text{C}$) に冷却して、ノイズレベルを常温の350カウント/ピクセルを34カウント/ピクセルに低減することが出来た (図9参照、そこでは理論式の定数が未定であるため、温度 10°C で理論値を実験値に一致させた)。窒素ボンベからのガスを電磁バルブと流量コントローラを通し流量を調節した後、液体窒素中を通して冷却した。その冷却されたガスは図10に示したようにアルミニウム製

CCDケースの中を流れ、内部に取り付けたCCD素子に噴き出す。パイプを通過してケースから外に出て暖まった常温の窒素ガスが、検出器全体を覆い空気を遮断するようにした。これではほぼ結露を防ぐことができた。又、イメージファイバロッド（長さ7cm）でインテンシファイヤをCCDから離し、インテンシファイヤの結露を防いだ。又、CCDケースを発泡ポリエチレンの断熱材で覆い、検出器ケース外側の結露を防いだ。特別に改良した副計算機でCCDの出力信号を制御した。又、CCD素子の裏面に接触させた温度素子からの温度を副計算機で読み取っている。本CCD素子の特性を5.2節に示す。

2.5 制御及びデータ収集サブシステム

制御及びデータ収集サブシステムを図1 1及び図1 2に示す。図1 1はJFT-2Mからのスタートパルス入力からデータを解析及び表示までのデータ収集用機器の結線を示す。図1 2において、準備トリガー T_1 がスタートトリガー T_0 より120秒前にCAMACモジュールに入る。主計算機がそれを感知し、もう一つの200nSのパルスを発生させ副計算機に送る。又、レーザー発振装置に充電信号パルス、全モジュールのイニシャライズ等の前準備を行う。当然副計算機まででTVTS装置を稼働し、生データのチェック、感度特性、及び光学系や検出器のチェック等を行うことが出来る。なお、同図の石英ファイバ（10m）は、第1スパークギャップにルビーレーザー光の2次高調波を導くためのものである。本サブシステムのタイムシーケンスを図1 3に示す。同図は、レーザー発振器から散乱データ収集までの主な機器の稼働時間の推移を示す。その流れは、まずIBM型計算（AST-286）はJFT-2Mからトリガー（図1 3のプラズマ点火前120秒） T_1 及び T_0 （プラズマ点火中の任意の時間）を受け取るとCCDコントローラに動作指令を出す。コントローラはレーザー発振用トリガー、第2スパークギャップのトリガーを発生する。PC計算機はCCDのデータを読み出し、クレート内のCAMACモジュールにデータを転送する。主計算機は（DEC:Vax station 3500）は、他のデータ（レーザーパワー、発振時間）も同時に収集する。それらのデータや計算結果は、光ディスク（1.2GB×2枚）に記録される。

2.6 ソフトウェアサブシステム

収集データ処理のためのソフトウェアサブシステムの構成を図1 4に示す。グローバルセクションにはリアルタイム処理、ホワイト板（タングステンハロゲンランプ用の反射板）による感度較正、及びバッチ処理（リアルタイムと同様の解析処理THIAN、レイリー散乱結果の処理REYLEYGH、及びグローバルセクションパラメータの変更）に必要なパラメーターに関する情報が書き込まれる。又、本セクションはリアルタイム処理

の運転により新しく書き換えられる。さて、リアルタイム処理でT₁信号が主計算機に入ると、THBSジョブがCAMACモジュール等をイニシャライズする。測定時間のTo信号の1つは主計算機、もう1つが副計算機に入り、5秒後にTHASジョブがCAMACモジュールのデータを収集し、光ディスクに書き込む。To信号から4.5秒後THANジョブがスタートする。THANジョブは解析及び結果の表示及び光ディスクへの書き込みを行う。真の散乱光RUNは、得られた信号からCCDの熱雑音(DARK)、プラズマ光を引き感度較正值(SENS, RAYSC)を掛けて得られる。バッチ処理(THIAN)では、データと理論曲線の表示や重みを変えた処理等が出来る。

3. TVTSの主な開発成果³⁾

本開発で得られた主な成果は、以下の通りである。

- 1) 6つのサブシステムをプリンストンの研究所ではなく、日本で初めて完成及び結合させて、その総合試験調整をJFT-2Mプラズマで行った。低い方の電子温度・密度測定限界($T_e \sim 50 \text{ eV}$, $n_e \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)は予定通りであることを確認した。又、誤差はショットノイズで決まる大きさであることが分かった。
- 2) 真空部品サブシステムでは、ビームダンパが浅いため迷光が大きかったが、ハイパスフィルターの適用により迷光量は約3桁減少し、測定時迷光は無視出来る程度になった。
- 3) 光学系サブシステムでは、レーザー光のアライメントの適正度を知るために、連続した81個のイメージファイバを出力端で、個々に90度回転する手法を用いた。その結果、アライメントが悪くなるとクリアな縞模様がモニター上の散乱光に現われた。
- 4) 検出器サブシステムでは、80Φの入射面を持つゲート付き大型イメージインテンシファイヤ管を開発した。このゲートによる消光比は、ズーム電極を使用した結果 2×10^7 以上を得た。又、CCD素子の熱雑音は窒素ガス冷却により、出力値で1桁以上減少した。
- 5) 制御及びデータ収集サブシステムでは、CCD素子上でデータのビンングを行い、2画面を1画面にして収集した。それ故、2画面(散乱信号と背景光)の時間差を2ms以内に出来、データの精度を高くすることが出来た。
- 6) ソフトウェアサブシステムでは、リアルタイム処理の電子温度・密度分布を生データ、感度較正值、電子の圧力分布及びフィッティング曲線(IMSL: 関数のサブルーチン)の情報と共に表示するようにした。又、重みを変えてフィッティングの出来るバッチ処理ルーチンを組み入れた。

- 7) レーザーサブシステムでは、不安定共振器内にエタロン板のミラーを入れることで、高出力TEM₀₀モードレーザーパルスを生成した。

本装置は、1992年1月末から本格的実験を開始し、約1ヶ月後の2月26日に初めて散乱光を観測することができた。そして参考文献21-23)に示す例を初めとした多くの画期的な分布が得られている。TVTSの主たる特性を下記に示す。

用途：JFT-2Mトカマクの電子温度・電子密度計測

測定点数：81点

空間分解能：0.86 cm

測定可能電子温度範囲：50 eV ~ 8 keV

測定可能電子密度範囲： $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

信号対雑音比： ~ 10

4. TVTSの運転方法

運転は、まずCCD素子を -30°C に冷却することから始まる。冷却することによって、CCD素子のダークノイズ等の熱的ノイズが減り、データの質が高まる。そして冷却は、図10に示すように、液体窒素中を通過して冷却された窒素ガスは、CCD素子に吹き付けられ、CCD素子の冷却が行われる。その時、冷却速度は $0.4^\circ\text{C}/\text{分}$ を越えないように行っている。冷却速度があまり速いと熱歪がCCD素子に加わり、壊れたりするのでゆっくり冷却している。又、ガス流量を制御室から、遠隔操作が出来るようにしたため、設定温度が -30°C 付近で揺らぐ温度を、 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内の値から、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に安定化出来た。又、温度が設定温度の -30°C になっても周囲の温度（1日の間の気温の変化等）や液体窒素の量の影響を受ける。そこでCCD素子の温度のばらつきを防ぐため、実験中も温度モニターに注意し、ガス流量を調整している。

次に、He-Neレーザー光を使って、ルビーレーザー光路の調整を行う。合っていない場合は最終段入射ミラーを駆動し、レーザー光がビームダンパの中心に来るようにアライメントを行う。又、レーザートリガースパークギャップ (LTSG) が、ルビーレーザー光の照射によって、放電しているかどうかをTVカメラでモニターする。更に、データを取りながらさまざまな運転情報をノートに記載している。その項目は日付け、ショットナンバー、プラズマのレーザーパルス設定タイミング、CCD素子温度、データ取得時間、収集が正常に行われたかどうか等である。

データ収集作業が終わったら、運転前の作業と逆に電源をオフにし、レーザー入射窓を閉める。

最後に、CCD素子の温度を常温に戻す作業がある。まず、冷却用の配管をデュワーから取り出す。それから、窒素ガス（常温）の流量を5カウント（昇温速度があまり速いと、冷却時と同様に、CCD素子が熱歪で壊れたりする。そこで5カウント（5 ℓ/分）程度でCCD素子を昇温している）に設定する。それから電源のオフタイマーを1時間に設定する。この時間で、CCD素子の温度は10℃以上になり、電源は切れる。

以下、4.1節では運転手順、4.2節では取り扱い上の注意を述べる。

4.1 運転手順

(1) 分電盤内のブレーカーをON

TVTS制御系

TVTSコンティニウムレーザー

アライメント

TVTSレーザークーラー

(2) シールド盤内、レーザー系電源をON

ビン電源ブレーカー

ビン電源

CAMAC電源

アライメント電源ブレーカー

アライメントコントローラー電源

CAMAC冷却用扇風機ON

レーザー電源（冷却器を含む）

CCD素子温度表示電源

CCDカメラ電源

H α 計測用フォトセンサーアンプスイッチON

CCD素子温度コントローラー電源（2ヶ所）

(3) 窒素ポンベの確認

1) スパークギャップ用ポンベ（使用開始時50 kg/cm²以上）

2) CCD素子冷却用ポンベ（使用開始時130 kg/cm²以上）

*ポンベ圧力が低ければ、液体窒素の充填中にポンベの交換を行う。

(4) 液体窒素量の確認（使用開始時35 ℓ以上）

なければ補充する。

- (5) 制御室の電源をON
 - 1) 流量制御電源
 - 2) モニター電源 (2ヶ所)
- (6) 窒素ガスをCCD素子に流す (配管内の氷結を防ぐため)
 - (約10分間、25カウント、ガスボンベ圧力: 3.4 kg/cm^2)
- (7) CCD素子の冷却
 - 1) 冷却配管をデュワーの中にゆっくりと差し込み、封をする。
 - 2) 温度低下が、 $0.4 \text{ }^\circ\text{C/分}$ を越えないように注意しながら、流量コントローラーを調節して、CCD素子の温度を $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ にする (これに要する所要時間は、建家内の温度にもよるが普通100分位である)。
- (8) 主トリガー準備
- (9) VAX計算機の立ち上げ
 - 付録A参照
- (10) LTSGのガス圧及び電圧調整 (CCD素子温度 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ を確認)。
 - 1) 電源をONにする。
 - 2) 高圧を 9.5 kV に設定 (SG放電を確認しながら調整)。
 - ※ガス圧の遠隔制御は付録Bによる。
- (11) IBM計算機の立ち上げ
 - 1) IBM計算機の電源をONにする。
 - 2) モニター電源をONにする。
 - 3) Mを入力 (*が表示され、キーボード入力が可能)
 - 4) UTILITYをクリックする。
 - 5) Powerをクリック (下部のCamera StatusがTSからIDLE Offになる)。
 - 6) もう一度4)、5)を繰り返す (IDLE表示)
 - 7) 再度繰り返す (ウォーミングアップ)。
 - 8) UTILITYをクリックする。
 - 9) Keyboardをクリックする。
 - 10) CDFSと入力する ((11)のSGのガス圧が適当になっているかを確認)。
 - 11) ESCキーを押してストップする。
 - 12) Mを入力する (*を表示)。
 - 13) DISPLAYをクリックする。
 - 14) Show Imageをクリックする。
 - 15) Enter, 75を入力 (温度に依存)、Enter、Enter、Enter (モニターに第2フレームスポットが表示される。白すぎたら入力した数値を増やし、薄すぎたら下げる)。

- 16) UTILITYをクリックする。
- 17) Keyboardをクリックする。
- 18) 200. IS START_DELAYと入力する (OKと表示)。
- 19) TSINITと入力する (OKと表示)。
- ※IBM(AST-286)の遠隔制御は付録による。
- (12) ダークデータを5ショット収集する。
- (13) アライメント
 - 1) レーザー装置を30分程度ウォーミングアップする。
 - 2) He-Neレーザー光とルビーレーザー光の切り換えを確認する。(He-Neレーザー光を出す)。
 - 3) 壁シャッターを開ける。
 - 4) レーザー発振装置からHe-Neレーザー光を真空容器内に入射する。
 - 5) JFT-2M本体のビームダンプ覗き窓を開ける。
 - 6) アライメントコントローラーを使用して、He-Neレーザー光をビームダンプの中心に合わせる。
- (14) レーザー関係作業
 - 1) 本体運転担当者にレーザーの入射を連絡する。
 - 2) レーザー安全表示灯の主スイッチをON、シャッタースイッチを開にする。
- (15) 観測窓のシャッターを開く。
- (16) 迷光を2ショット収集する (OSC電圧: 1.65 kV、1.75 kV)。
- (17) データ収集する (IBM計算機)。
- 1) TSTOPと入力する。
- 2) 90000000. IS START_DELAYと入力する (OKと表示)。
- 3) TSINITと入力する (OKと表示)。
- 4) トリガーボックスのモードをDATAにする。
- (18) H α 計測用オシロスコープ、プロッター電源ON

-----ここより立ち下げ手順

- (19) H α 計測用オシロスコープ、プロッター電源OFF
- (20) トリガーボックスのモードをSTRAYにする。
- (21) IBM計算機を終了させる (付録C参照)。
- (22) 観測窓のシャッターを閉じる。
- (23) レーザー関係作業
 - 1) 本体運転担当者にレーザーの停止を連絡する。
 - 2) レーザー安全表示灯の主スイッチをOFF、シャッタースイッチを閉にする。

- (24) スパークギャップの運転を終了させる（付録B参照）。
- (25) VAX計算機を終了させる（付録A参照）。
- (26) CCD素子の昇温
 - 1) 冷却配管をデュワーの中にゆっくりと取り出す。
 - 2) 窒素ガス流量コントロー電源のOFFタイマーを1時間に設定後ON
- (27) 制御室の電源をON
 - 1) 流量制御電源
 - 2) モニター電源（2ヶ所）
- (28) シールド盤内、レーザー系電源をOFF
 - ビン電源ブレーカー
 - ビン電源
 - CAMAC電源
 - アライメント電源ブレーカー
 - アライメントコントローラー電源
 - CAMAC冷却用扇風機ON
 - レーザー電源（冷却器を含む）
 - CCD素子温度表示電源
 - CCDカメラ電源
 - H_α計測用フォトセンサーアンプスイッチOFF
 - CCD素子温度コントローラー電源（2ヶ所）
- (29) 分電盤内のブレーカーをOFF
 - TVTS制御系
 - TVTSコンティニウムレーザー
 - アライメント
 - TVTSレーザークーラー

4.2 運転時の注意点

本装置を取り扱う際に、人身事故を未然に防ぐための注意事項があるので以下に列挙する。

(1) 液体窒素を容器に補充する場合

液体窒素は、補充の際に液体が飛散し、手や顔について凍傷を起こす恐れがあるので、低温に耐える皮手袋を着用する。又、室内は、蒸発した窒素ガス量の増加により酸欠状態になる恐れがあるため、天井に設置された換気扇が回っているかを確認する。

(2) CCD素子の冷媒用に高圧窒素ガスボンベの運搬は、ボンベの転倒などの危険を避けるため必ず専用ボンベ運搬車を用いる。

- (3) レーザー運転調整をする時には、レーザー光が目に入らないように保護メガネを着用する。
- (4) AC100V又は、AC200V入力で動作する機器及びDC20kVの高圧電圧に注意を払う。電気ショックは、身体を流れる電流に関係するので、取り扱いに注意を払う。又、熱くて湿気の多い時は、服装や環境に気をつけて取り扱う。
- (5) 本装置はJFT-2M本体、その周辺機器の付近で作業することがある。その時は、それらの担当者から運転状態等について打ち合わせ、安全を確認して作業する。又、装置が込み入っているので、接触事故等に十分に注意をする。

5. TVTS運転のためのポイント

2章で述べた6つのサブシステムが全て正常に稼働することによって、プラズマパラメータの収集が可能となる。従って、サブシステムの健全性を保つために、それぞれのサブシステムの日常の点検や機器の調整、予備部品（特に消耗品）の用意が必要であり、且つシステムの定期的な点検保守をすることも必要である。又、アクティブ計測器に通常見られる消耗によって故障が生じたり、突然生ずる故障が考えられる。このような場合TVTS担当者がケースバイケースで対応し、外国のメーカー等も含めて協力を受けて修理を行っている。

本章では、運転をスムーズに行うために必要な技術内容から以下の7点を選択した。

5.1 アライメント

アライメントとは、簡単に言えば、レーザービームと受光系を合致させる作業である。TVTSにおいて具体的には、図1の壁面の貫通孔から出てきたHe-Neレーザー光をJFT-2M真空容器内側に設けられたビームダンパの中心に制御する作業である。ここでレーザービームの光路の調整は、壁面に取り付けられた三軸ミラーをパルスモーターで駆動して行う。しかし、レーザーミラーの光路の変化は、一般には室内の温度変化に依存する。そこで正確な計測を行うには、終始レーザー光路が所定の位置にあるかどうかをチェックする必要がある。それで、レーザー光路が計測光路から外れていればミラーを駆動し、レーザー光路を調整しなければならない。

ところでTVTS運転初期のアライメント特性は、いわゆるエレクトロニクス製品のように一定時間（本システムでは3時間位）経てば安定したレーザー光路になった。それ

以後レーザービーム調整の必要はなかった。その点、初期の運転は大変順調であった。このレーザービームの安定な日々が1年余り続いた。しかし、それ以降はレーザービームの光路が時間的に変動を示すようになった。室温が1日の間に変わるのでレーザー光線の光路が動くこと、地震でミラーの取り付けが動くこと等が考えられた。そして、この2、3年は、実験中もレーザー光線の光路が動くようになった。

そこで、レーザービームの光路調整を現場でする場合、レーザー源は身体の安全のために小出力（1mW以下）のHe-Neレーザー光（波長6328Å）で行い、実際の測定ではルビーレーザー光を用いる。He-Neレーザー光とルビーレーザー光とでは波長が615Å違い、レンズによる焦点位置がそれぞれ違う。それで最終的なアライメントはルビーレーザー光（波長6943Å）で行う。当初はレーザービームの光路に異常が生じた場合、JFT-2M本体を休止し、現場で手動でアライメントを行ってきた。そこで、制御室に遠隔制御器を設け、制御室から現場の三軸ミラーを遠隔操作出来るようにした。こうして、JFT-2M本体を止めなくても、レーザービームの光路を制御室から調整出来るようになった。

5.2 CCDカメラの製作

TVTS用CCDカメラシステムは市販されていない。そして、日本での市販のCCD（デジタルカメラ等に使用）は性能（画素数、感度等）が劣るのでTVTS用CCDカメラには使えない。CCDカメラは何度も冷却されたり、常温に戻されたりするため、熱ストレスを受ける。そのためファイバ、CCD素子間の接着面が剥がれたり、CCD素子に亀裂が入ったりして、使用に耐えなくなることがある。そこで、測定をするためにはCCDカメラを製作する必要が生じる。しかし、メーカーは技術的、経済的事情から作りたがらない。それで、CCDカメラの製作は手作りせざるをえなくなった。さて、製作の方法であるが、写真1(a)のような拡大鏡を作り、その下にCCD素子を設置する。そして、作業中、塵や埃がCCD面に着かないよう、室内をクリーンに保つ。作業場所をパーティクルカウンタなどで作業場の粒子量をチェックする。又、CCD素子を扱う時に、静電気を避けるよう注意しなければならない。特に空気が乾燥する冬期に、知らないうちに体に何万ボルトもの静電気が帯電していることがある。CCD素子は高電圧に非常に弱いので、体が帯電した状態で指を触れると、CCD素子は静電気で壊れることがある。外観の変化はなくても内部の回路が破壊され、CCDカメラに装着しても動作しない。当然、CCD素子は修理することも出来ないため、新しいCCD素子に変えなければならない。CCD素子は安価でないので、慎重に扱う。CCD素子を扱う前に、アースに手を触れるなどして静電気を逃がすとよい。又、服装は、静電気を発生させやすい化繊のものを避ける。又、予備のCCD素子は、静電気の影響を受けにくいように、導電性のある袋等に保存する。そして作業に当って、アースが取れるところ（CCDカメラケース、半田こて等）は出来るだけアースを取って同電位に保つよう心がける。

CCD素子は、AレジスタとBレジスタから構成されており、メモリ用で不必要なBレジスタを覆う必要がある。それで、写真で使うカラーフィルムをBレジスタの大きさに切り取り、瞬間接着剤を用いてBレジスタの上に固定する。又、電線の融着部を固定するためにGE社製のシリコーンゴムを電線部位に注意して丁寧に塗る。加工後のCCD素子を写真1 (b) に示す。写真中程の白い丸は、拡大レンズ表面からの反射光で、特に問題ではない。同写真の白い線で囲まれた青黒い色の四角の部分が、散乱光の受光面である。それから加工したCCD素子をソケットに取り付ける。そして、CCD素子の受光面とイメージファイバロッドの間に光学グリース（オプトシール：信越化学工業株式会社製、シリコーングリース）を楊枝の先端に小指の先程着け、出来る限り薄くつけて結合する。これは両者の間に空気があると、像が異常に大きくなり、不鮮明な像が生ずるのをなくすためである。この後、CCD素子の光学グリース接着面に空気や異物等が含まれていないかどうか確認するために、ファイバの端面を見る。出来れば、TVカメラで端面の接着具合を拡大して観察すると、接着面の状態が詳細に見られる。このように製作されたCCDカメラがTVTSの検出器として、動作するかどうかはまだ分からない。それで、CCDカメラを光学系に組み込んで、データ取得動作をさせてみる。常温でCCDカメラはデータ取得が出来ても、続いてCCDカメラを -30°C に冷却するとデータ収集が出来ないことがある。これには幾つかの原因が考えられる。第1にCCD素子が冷却の過程で破損してしまった。第2に冷却前にデータの取得が出来ない場合があるが、これはCCDカメラの製作に失敗した時である。その他にもいろいろ原因はあるが、担当者は充分注意して作業を行い、経験を積む努力を行った。

なお、CCD素子の特性を以下に示す。

1) CCD素子の特性

モデル名：CCD 02-06-1-014 (EEV社)

分光感度：350～1000nm

素子数：385 (V) × 288 (H) ピクセル、6.3 × 8.5mm

像の大きさ：6.4 × 8.5mm

1チャンネル：4 × 9 ピクセル

ダイナミックレンジ：～4000/ピクセル

冷却法：液体窒素温度冷却窒素ガス吹き付け、 -30°C ～ -40°C

画面制御：IIのゲート作用

データ取得：AST-286 (IBM型PC計算機) → VAX計算機でデータ取得

特徴：フレームトランスファ型

イメージインテンシファイヤ管(II)のP46 (530nm) の蛍光に対し量子

効率は40～50%

窒素ガスによる冷却型CCD (−30℃)

2) CCD素子の結合問題

問題点：イメージインテンシファイヤ管(II)の高圧が静電的結合でCCDを破壊しないこと、及びイメージ管に対し熱的絶縁を取ること。

開発点：イメージファイバ(長さ7cm、断面積6mm×8mm)でイメージ管(II)とCCD素子を離して結合を行い、CCD素子の結露を防いだ。

3) 雑音の種類とその減少方法

※読み取り雑音(増幅器)

バンド幅の平方根——遅い読み取り時間

※ダーク電流雑音

温度の関数——素子の冷却

※一定パターン雑音

CCDの製作——ランクの高いものを選択

5.3 CCDカメラの冷却

初期にはCCD素子冷却については、次の注意点が必要であった。外気の湿度が70%以上で冷却を4～5時間以上続けていると、CCDアルミケースの外側に水滴が付き、CCD素子破壊の可能性があった。又、解凍の時、CCD検出器のアルミケース及び冷却用チューブ等に凍結した氷が溶け大量の水滴が出て、前と同様の可能性があった。大切なことは、CCDコネクタに露が付かないよう注意することであった。現在、CCD検出器のアルミケースを窒素雰囲気中に置くことで、この問題は少なくなっている。このCCD素子冷却により、熱雑音は出力値(カウント)で1桁以上減少した。

CCD素子は図15に示すように、素子の温度をおよそ−30℃以下に保てば、ノイズは一定値になり、概ね激減出来る。それでTVTSシステムが測定状態に入るまでに、CCD素子の温度を−30℃位にもってゆく必要がある。ここで問題となるのは冷却速度である。冷却速度があまり速いとCCD素子に亀裂が生じ使い物にならなくなる。CCD素子の冷却速度の限界はおよそ0.4℃/分なので、この冷却速度を超えないように温度をモニターし、冷却する必要がある。図16は、1996年4月25日の冷却の様子を示している。同図から、CCD素子の冷却速度は0.4℃/分(24℃/時)以内に保ちながら、冷却をしていることが分かる。冷却の初期(一定の遅れ時間を経て冷却が始まる時)にCCD素子の温度の冷却特性が幾分急な下降を示すのは、最初CCD素子の温度(常温)と冷媒ガス(液体窒素を通った高純度乾燥窒素ガス)との温度差が大きいことと冷却窒素ガスの流量が急変したためである。冷却媒体の流量の変化は、CCD素子の冷却の

初期に25 ℓ/分程度（CCD素子を壊さないで許容される冷却窒素ガスの流量）である。目標とする温度（-30℃付近）では、デュワー内の液体窒素の量及び初期のCCD素子の温度にもよるが、約38 ℓ/分である。なお、この温度制御は手動で行っている。

5.4 スパークギャップの調整

2個のスパークギャップ（SG、写真2参照）は、イメージンテンシファイヤに高圧パルス信号（9.5 kV）を2回送り、イメージンテンシファイアをJFT-2Mの放電1ショット当たり2回動作させるものである。1回目は、レーザー発振装置からの約4 mJの分割レーザー光をスパークギャップまでの約10 m（1 mmΦ）の石英ファイバに通してスパークギャップに入射し、120 nS間ゲート動作を起こす。2回目は、補助電極に高圧パルスをかけて120 nS間ゲート動作を起こす。こうして、1回目には散乱光、約2 ms後にはプラズマ光を測定する。それで、データの有効ショット獲得率を上げるために、スパークギャップは測定信号（レーザー光（写真3参照）がスパークギャップ内の高純度乾燥窒素ガス内に入射される）が入ると必ず放電し、イメージンシファイヤを動作させる必要がある。主として、スパークギャップの放電動作に影響を与える要素は、先端が半円球のタングステン製の電極の変形度、スパークギャップ内の充填ガスの種類、充填圧力、及び室内の温度、湿度等である。さて放電回数（測定回数）が増すと、電極の表面が汚れ電極の表面形状が滑らかな半円球でなくなり、放電が起こりやすくなる。それで、SGの放電が3ショット位続いて起こらなかった時は、JFT-2M本体の運転を止めてもらい、実験室に入り、スパークギャップを取り外す。そして別の作業室で電極を取り出して、電極ロッドの先端を荒さ2000メッシュ以上の細かいエメリーパーで丹念に磨く。放電電極表面が鏡のように滑らかになったら、研磨で生じた金属粉や作業中に付着した塵・埃を乾燥ガス（当TVTSでは、ハクバ写真産業株式会社製、型式NC-E450を使用：品名ニュークリーンエース）で吹き飛ばす。それから、電極表面をエタノール等を含ませたガーゼを使って、電極表面に付着する油脂分、塵や埃等を拭きとる。更に、もう一度電極表面を見て、金属表面に亀裂や埃がないか、目に見える大きな凹凸がないか等注意した後、電極を組み立て、TVTSシステムに戻す。

充填ガス圧力の制御は最近、制御室より容易に出来るように改良した。高純度乾燥窒素ガス圧力と放電破壊電圧の関係は直線的に上昇する（図17参照）。放電が頻繁に起こる場合は充填圧力を高め、逆に放電が殆どしない場合は充填圧力を低めるようにすればよい。通常、適当な充填ガス圧力は高純度乾燥窒素ガスの場合、ゲージ圧力で凡そ6 kg/cm²（図17より、自己点火電圧にして9.5 kV相当）である。

どんなに各所を調整しても、約100%のスパークギャップの放電が生じない場合がある（図18参照）。それは室内の温度、湿度が外気の影響を受け、スパークギャップの放電が不安定になったためである。それ故、スパークギャップ調整をしても、有効デ

ータの取得率が上がらない。そこで温度、湿度の制御を実験室全体、又はTVTS装置全体で行うようにすることも考えたが、膨大な予算を考えなければならず、不適當であった。その他、どんなに調整しても、放電しない事例として、ルビーレーザー光をスパークギャップに入射する時、トリガーシステムのセッティングがなにかの拍子に規定の配置から外れる場合である。その時はJFT-2Mを休止し、ファイバをスパークギャップに対して、正規の配置になるように調整をする。

5.5 入射ルビーレーザー光の調整

入射ルビーレーザー光は、プラズマの測定箇所（大半径方向）に打ち込んで、散乱光を得るのに用いられる。この散乱スペクトルは、プラズマの電子温度及び電子密度に依存する。そこでこの散乱光を測定し、解析することによって、逆にプラズマの電子温度及び電子密度を知ることが出来る。又、レーザー光源（図2参照）の発振素子にはルビーロッドを用い、その性能は、発振器出力エネルギー約80mJ、3段増幅（第1段増幅約10倍、第2段増幅約8倍、第3段増幅約4倍）、波長6943Å、パルス幅20nS、出力エネルギー20J、モードパターンTEM₀₀である。レーザーの印加電圧に対する出力特性を図19に示す。本レーザー設置空間は、外気の影響を受けないよう、恒温槽構造にして、温度は20℃、湿度は30～50%に制御している。

レーザー光の出力並びにレーザー光路の調整試験を行う場合、大実験室をレーザー管理区域に指定し、担当者以外の出入りを制限する。次に、ルビーレーザービームを発射し、ビームパターンを感光紙に撮る。感光パターンが円形に感光していて、特に強度の強い所がないか確認する。部分的にレーザー強度の強い所がなければ、レーザー入射系の窓等の破壊の危険はないと考えられる。

次に、ミラーをレーザー光の出口に設置する。感光紙をビームダンパと同じ距離にセットして、ミラーで反射したルビーレーザーのパターンを取る。そして、He-Neレーザーに切り換えて、ルビーパターンとのズレを確認する。それから、He-NeレーザーをJFT-2M本体のビームダンパに入射し、TVTSのアライメントを開始する。

この節の最後にTVTS用レーザー発振装置の特性を以下に示す。

エネルギー：21J

安定性：±4.75%

パルス幅：19±2nS

ジッター：±5nS

ビームの直径：24mm

ビームの広がり：0.29mrad

ポーラリゼーション：92% (21J)

増幅数：3段

最大繰り返し率：1パルス/分

5.6 ビームダンパの交換

ビームダンパは、プラズマを通過してきた入射レーザー光を完全に吸収することが理想的である。ビームダンパは、JFT-2Mトカマク本体の真空容器の内側中央部に取り付た。ビームダンパは、図4に示すように、3枚のアーチャと円柱状のパイログラファイト (PG) からなり、最大1GWのレーザー光を直接吸収出来る。このビームダンパの長さは出来るだけ長く取りたいが、JFT-2Mトカマクの中心に鉄心があるため、7cmに制限された。ビームダンパが入射レーザー光をある程度は乱反射して、それ(迷光)が容器内で反射し、受光系に入り、測定精度を悪くする現象が生ずる。そこで、迷光除去には一層の工夫が要求され、ここではビームダンパ内部をクロムメッキで黒くした。又、測定が進むにつれて、入射レーザー光がビームダンパを削ってゆき消耗し、適当なところで新しいビームダンパに交換しなければならない。

パイログラファイト (PG) で出来ているビームダンパの使用ショット数を考える。パイログラファイト (PG) を封じきりのガラス管内に取り付け、照射後のカーボン気体の膨張の様子を調べた。レーザー光を2Jに限定したため、レーザー生成気体は、弱电離気体及びクラスターからなる⁸⁾。この時の蒸発によりできた深さを測定した。米国PPPLのトカマク装置に装着したビームダンパの蒸発深さと、その時のレーザーのショット数から推定したエネルギーの関係より、ビームダンパの耐えるショット数は、レーザーエネルギー15J/ショットに対して1.5~3万ショットとなる。TVTS用入射レーザーのエネルギーはおよそ20Jなので、使用可能ショット数は1.1~2.2万ショット、大体1、2万ショット位使用出来ると推定される。又、TVTS用ビームダンパのレーザー入射方向の厚さは約15mmである(図4参照)。従って、先の検討結果より、ビームダンパの有効使用厚さを10mmに採り、使用可能回数はビームダンパの安全を考えると、1万ショット位が使用限度と考えるのが適当である。例えば、JFT-2M本体を5分サイクルで運転すると、 $60/5 \times 10 \text{時間} \times 4 \text{週間} \times 12 \text{ヶ月} = 5760$ ショットである。依って、この運転サイクルなら、1年に1回程度ビームダンパを新品と交換すればよいことが分かる。しかし、JFT-2M本体の真空を破るのが6ヶ月位なので、それに併せてビームダンパを交換している。

5.7 データ収集

ここでデータ収集の流れを簡単に述べる(図11及び図12参照)。まずJFT-2M本体制御盤に設けてある接点(プラズマが着火する120秒前に閉じるリレーのメイク接点)信号(接点が開から閉に変わる信号)がCAMACモジュール(CAMAC3473)

を経て主計算機（VAX3500計算機）に入り、主計算機のソフトが取得シーケンスの最初の動作を開始する。次に主計算機が別のモジュール（CAMAC 3 6 5 5）で200 nS幅のパルスを発生する。そのパルスがOR回路（TTL回路で構成）で矩形に波形整形され、副計算機（IBMPC AST286）に入り、次の動作信号が出る。つまりレーザーの充電が開始され、同時にCCD素子の初期化が行われる。次にプラズマ着火信号（測定用トリガー）がOR回路を経て副計算機に入る。副計算機はレーザー発振用トリガーを発生し、ルビーレーザーが発振を始める。そしてスパークギャップの第1ゲート、第2ゲートを開き、散乱光及びプラズマ光の測定準備が終る。それから約0.7 ms後に散乱信号はCCD受光面に入射する。そして、副計算機がこのデータを1秒程でCCDから読み出し、モニター画面に散乱光が表示される。ここで得られたデータは、感度較正等の処理を施し、正しい電子温度、電子密度及び電子分圧となる（図20参照）。なおリアルタイムで表示するデータ処理は、データ収集から表示まで2分位の時間がかかる。

一方、毎日のCCD素子の冷却温度の変化を窒素流量の値とともに記録する。次に散乱データ収集の記録は取得年月日、ショットナンバー、取得した時間、取得時のCCD素子の温度、冷却用窒素ガスの流量、データが正常に取得されたかどうか、入射ルビーレーザーのエネルギー、測定したプラズマの時間（取得時間は遅延パルサーによって任意に変えられる）、レーザー光路を調整したなら、どの方向（上下左右）に何カウント動いたか等、逐一記録する。

6. おわりに

本報告では以下の事柄を述べた。

- 1) JFT-2 M用TVTS装置がどんな経緯で作られたか。
- 2) 本システムはどんな構成になっているか。
- 3) 本システムはどんな性能を持っているか。
- 4) 本システムの開発でどんな成果があったか。
- 5) 本システムの運転はどのようにするか。
- 6) 本システム運転上のポイントは何か。

TVTS計測装置はプラズマの研究に利用され、重要な役割を果たしている。今後、更に省力化を図り、利用効率を一層上げるための装置の改良を進める必要がある。

謝辞

本報告書をまとめるに当り、御教示と御鞭撻を下されたプラズマ物理実験研究室故前田元室長、故鈴木前室長、木村現室長、炉心プラズマ研究部船橋部長に感謝致します。またCCDカメラの製作には同研究室星野主任研究員、川島副主任研究員、小川（俊）研究員に御助力いただいている。あわせて感謝致します。

参考文献

- 1)N.Bretz et al;Appl.Opt. 17 (1978) 192.
- 2))M.P.Thomas et al;"The DIII-D Multipulse Thomson Scattering Diagnostic"
APS, Tampa(USA), Vol.36 8S17 (1991).
- 3)T.Yamauchi et al; J. of Plas. and Fus. Res.
72,No.7(1996) 692.
- 4)T.Yamauchi et al,J of Plas. and Fus. Res. 72(1996)692.
- 5)椎名他；「JFT-2MにおけるTVトムソン散乱(TVTS)用真空部品の
開発・製作」JAERI-M91-030 (1991).
- 6)T.Yamauchi et al;Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) 1345.
- 7)T.Yamauchi et al; J. of Plas. and Fus. Res. 71 (1995) 1011.
- 8)T.Yamauchi et al;Trans. Inst. Electr. & Comm. Eng. Jpn. 46-C (1975) 730.

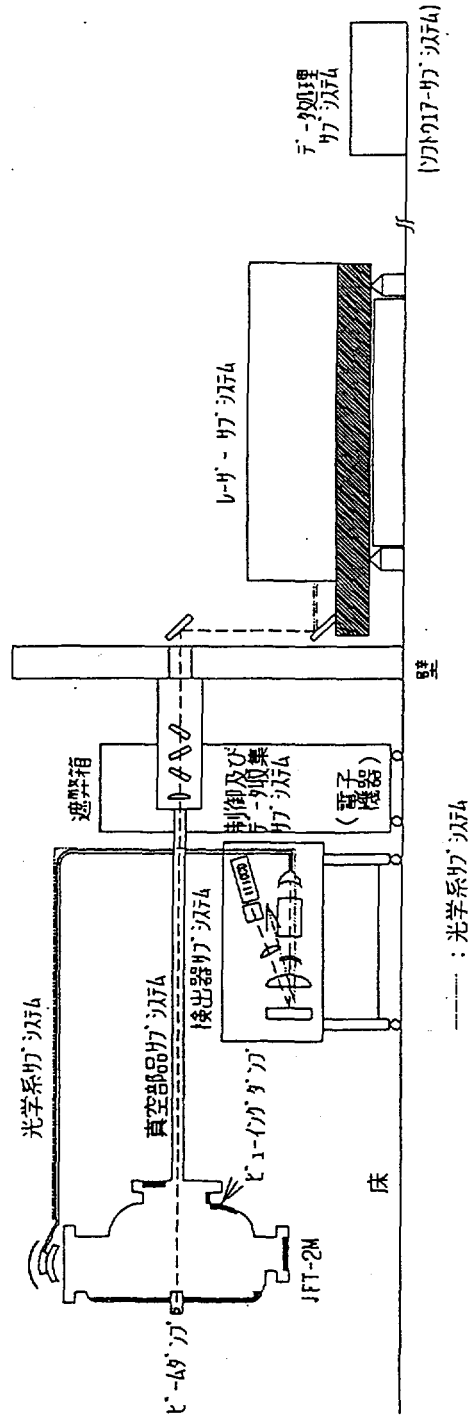


図1 TVTST Thomson散乱システム概略図

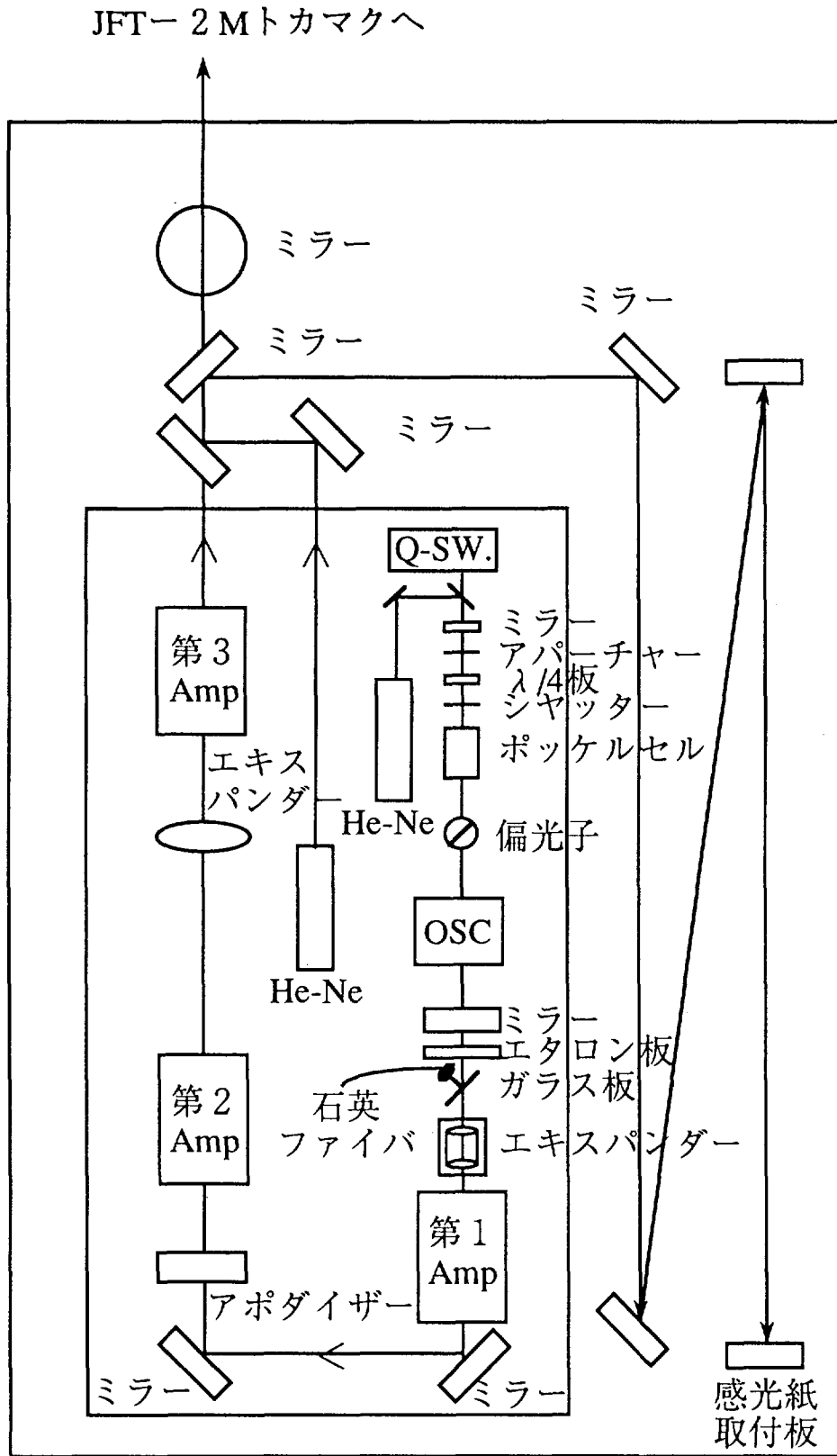


図2 TVTS用レーザー発振装置

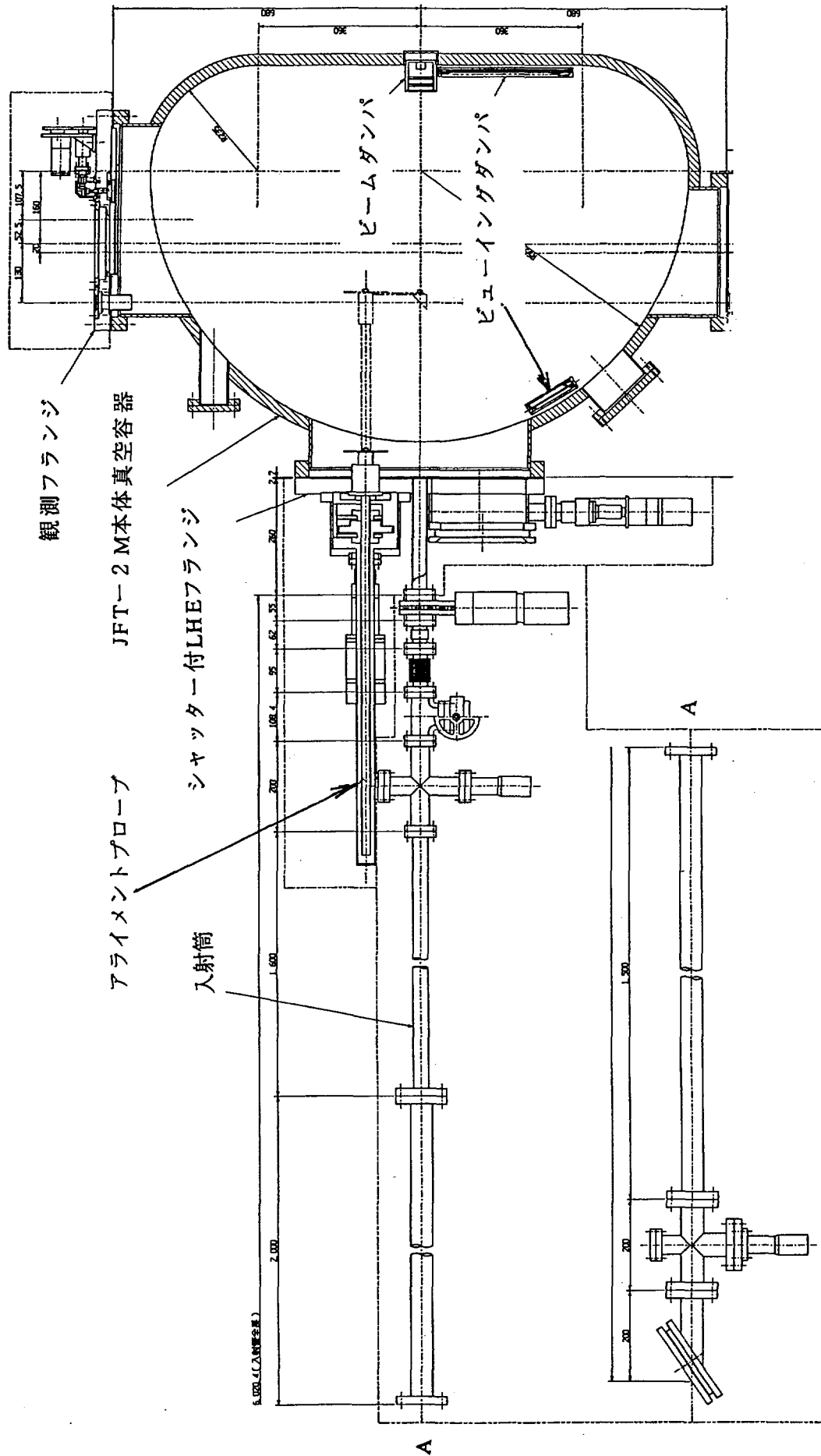


図3 真空部品サブシステム

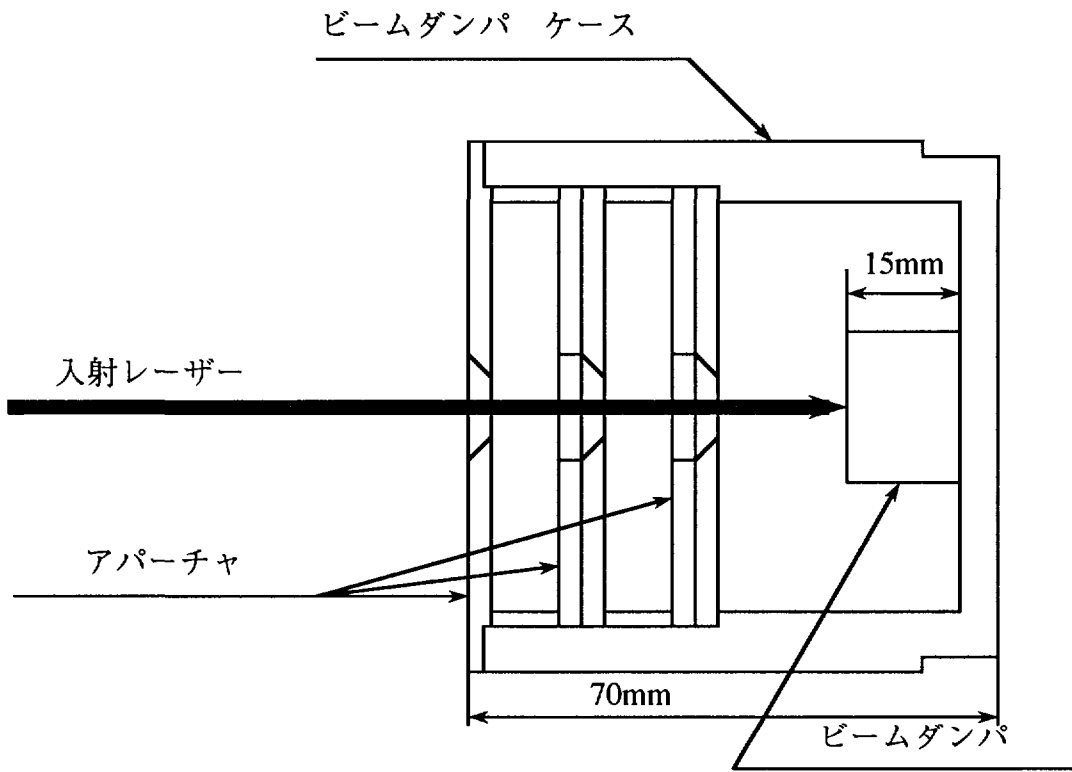


図4 ビームダンパの断面原寸図

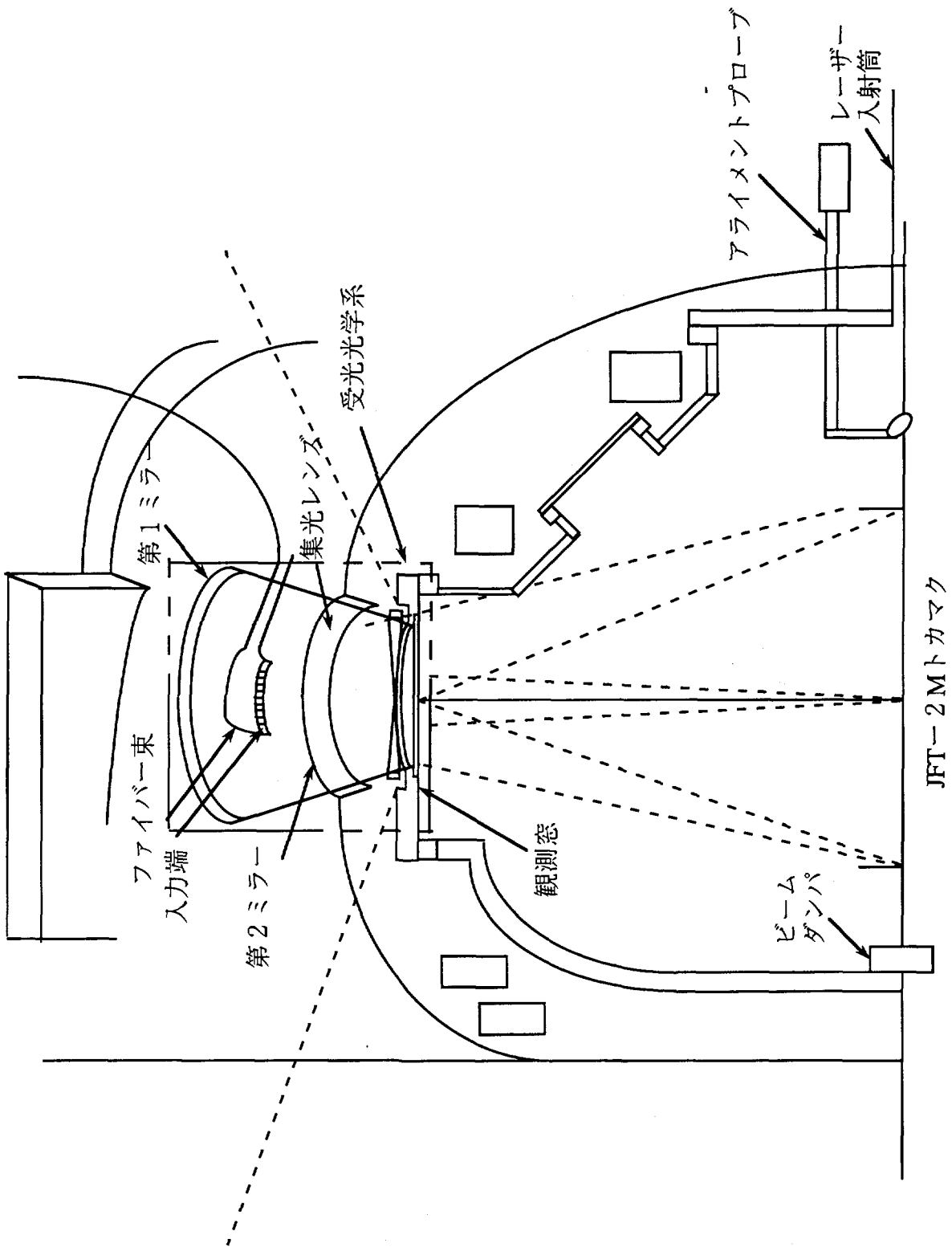


図5 光学系サブシステム

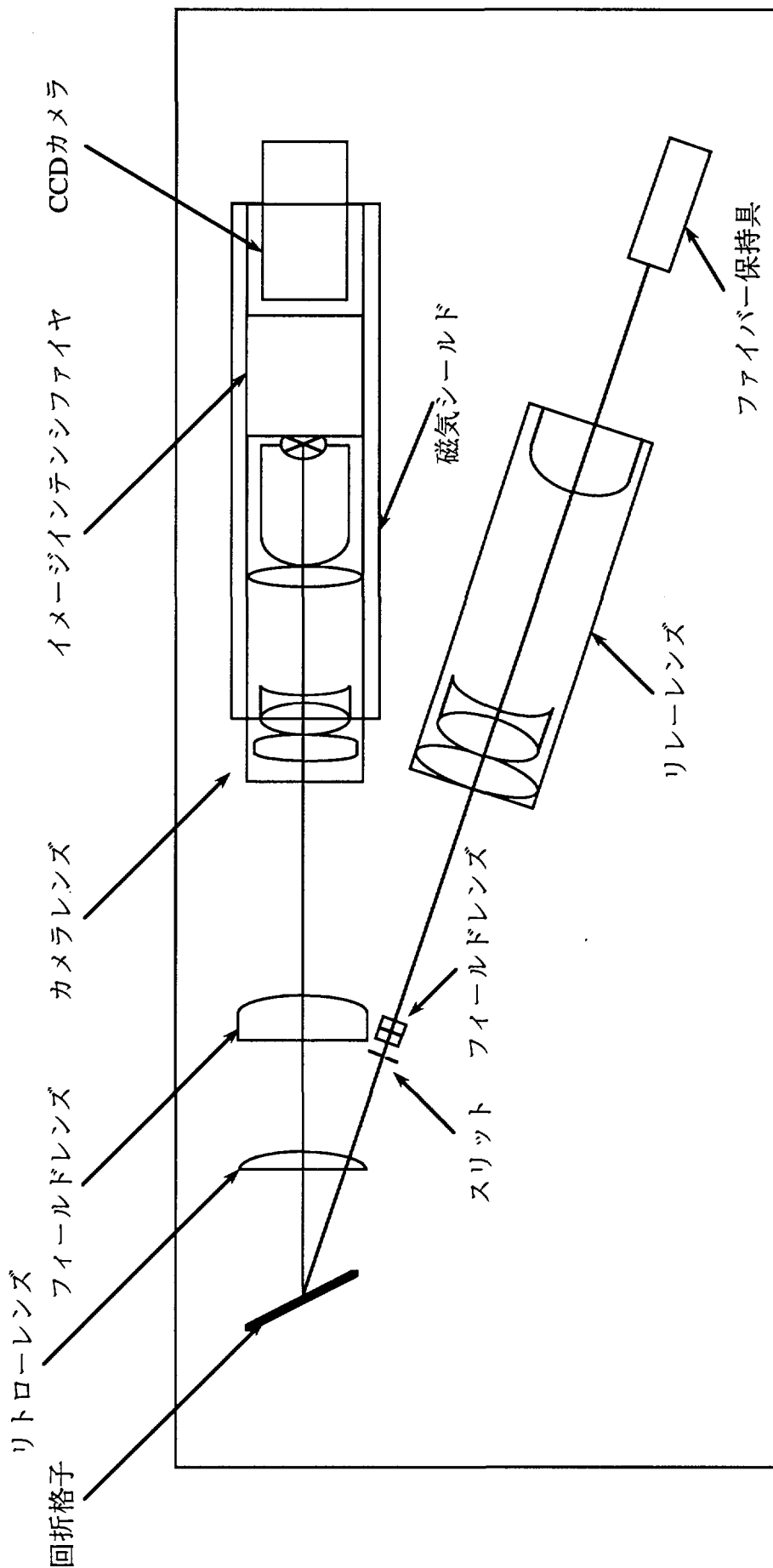


図6 分光及び検出器サブシステム

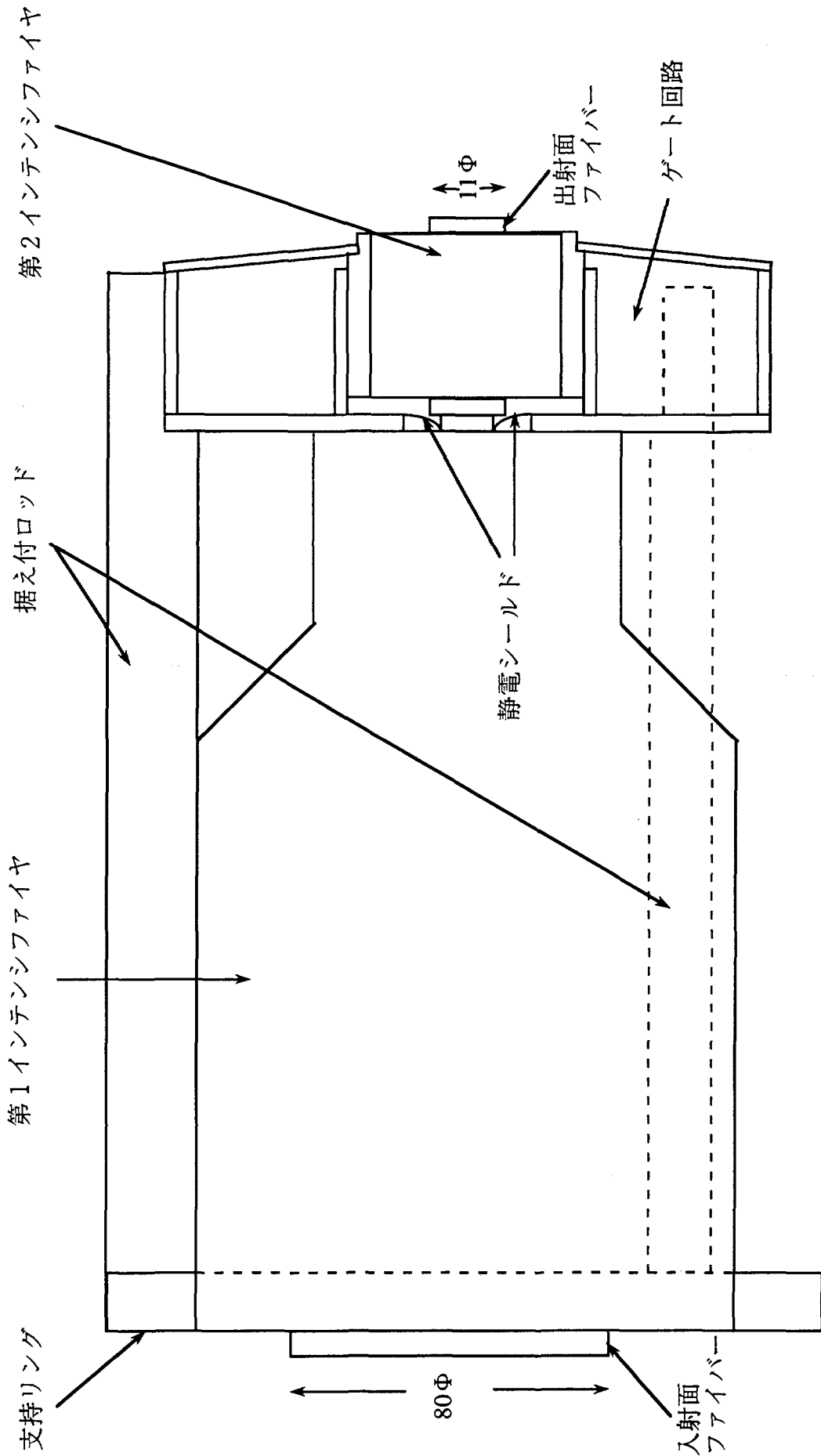


図7 イメージインテンシファイヤ

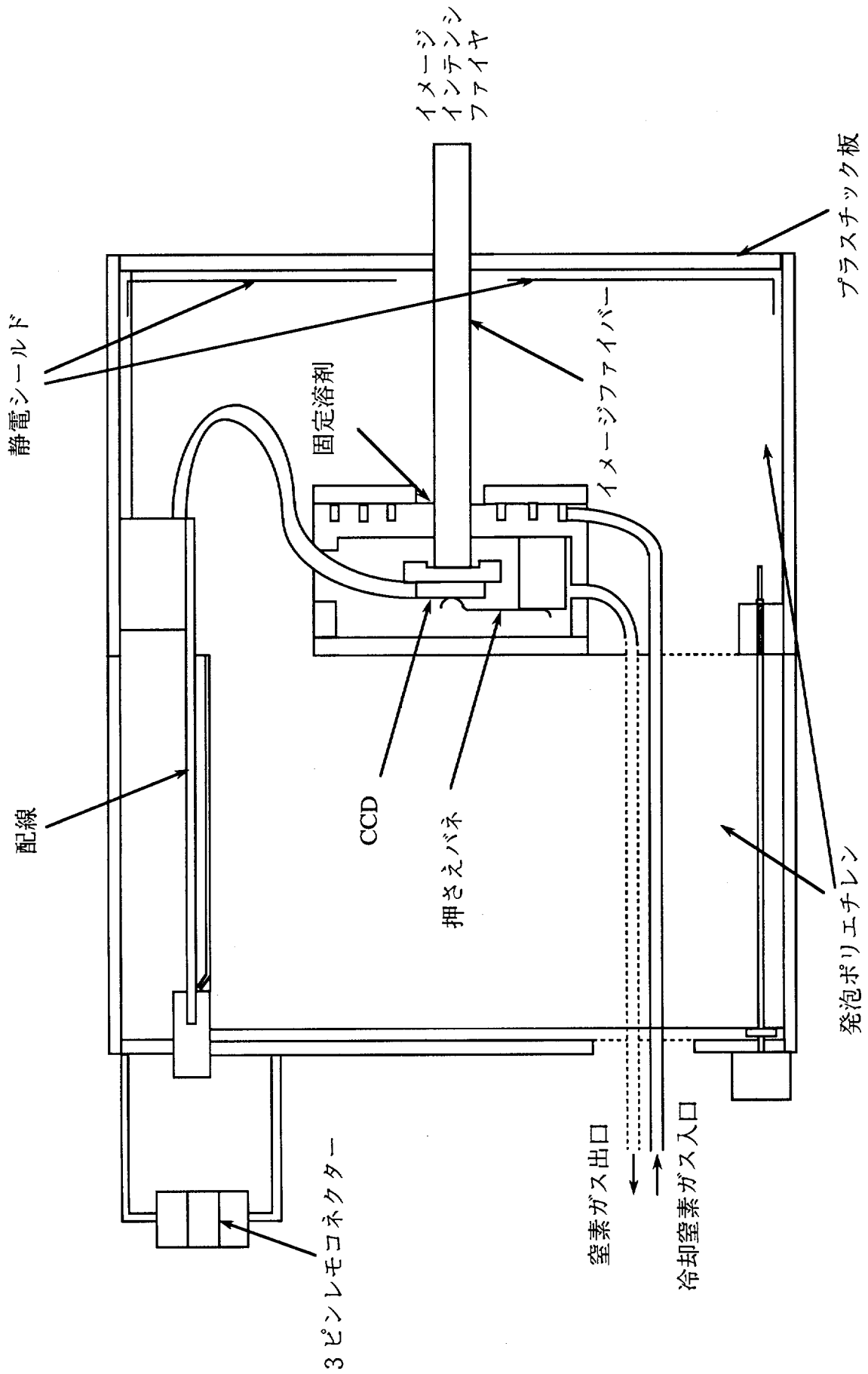


図8 CCDカメラ

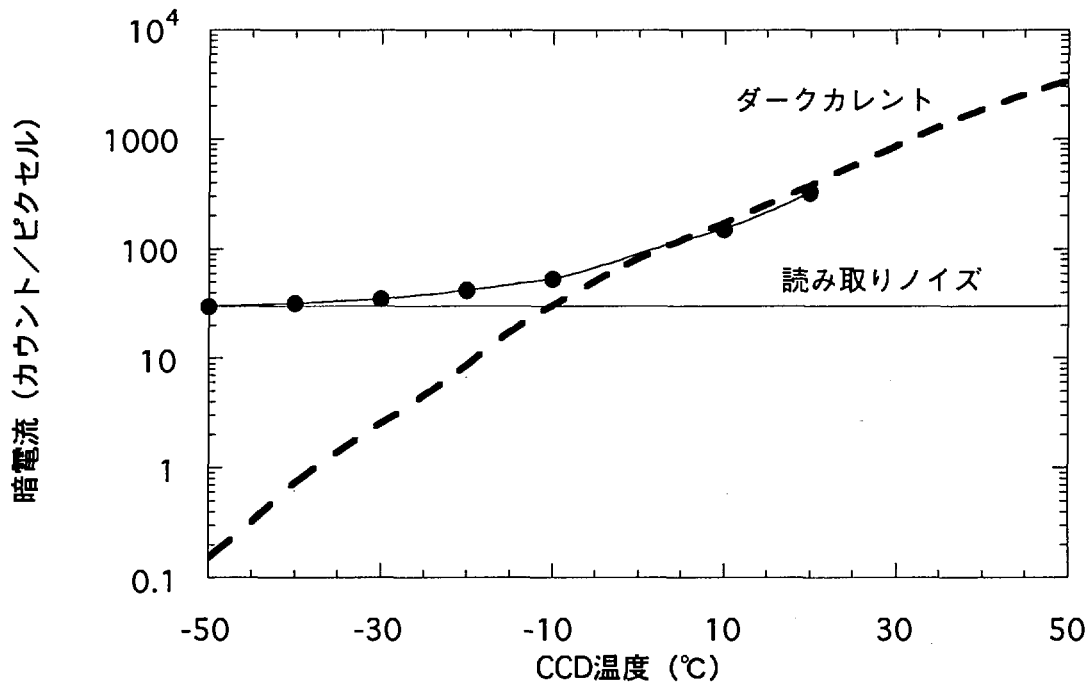


図9 暗電流のCCD素子温度依存特性

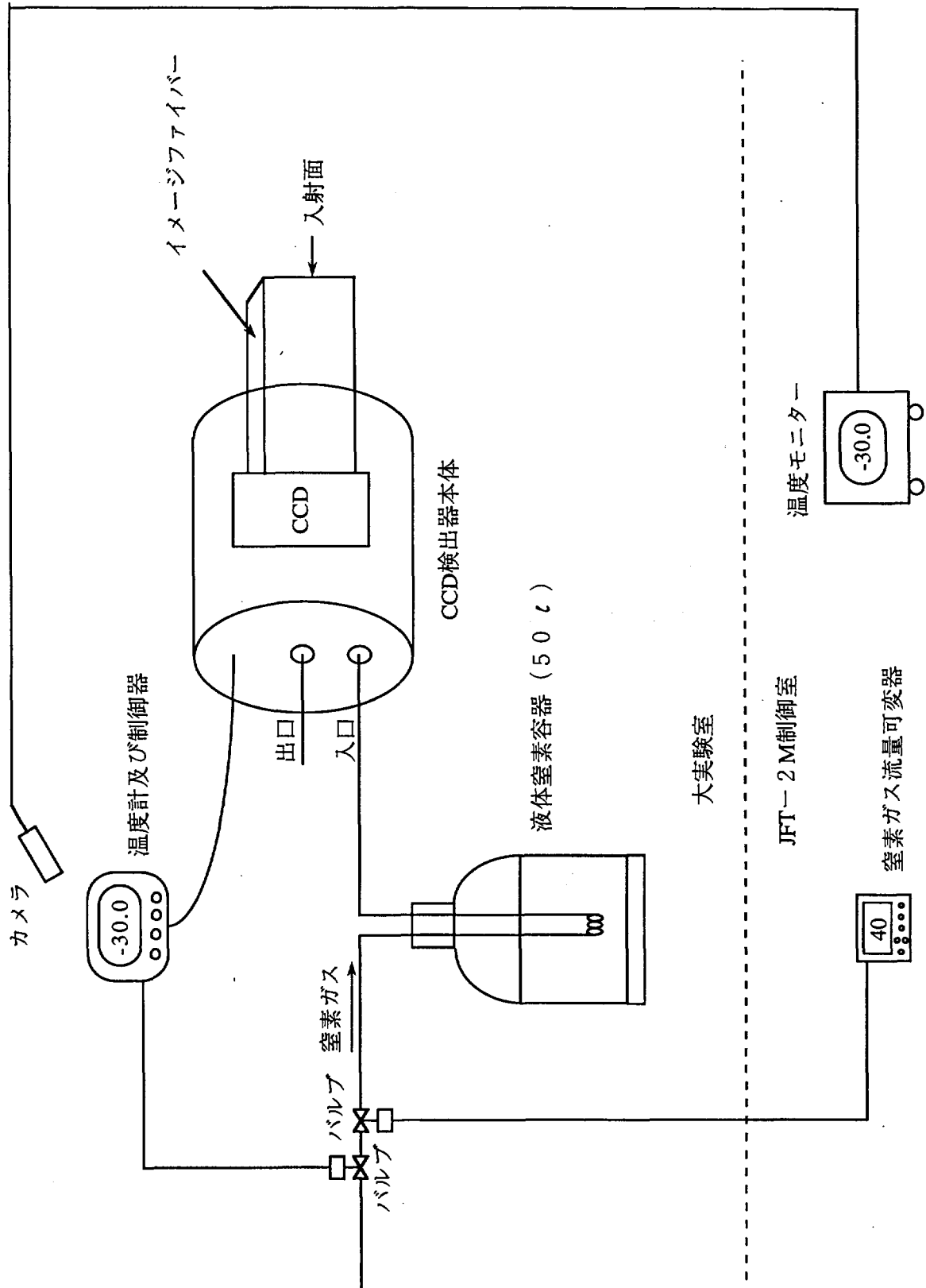


図 10 CCD冷却系構成図

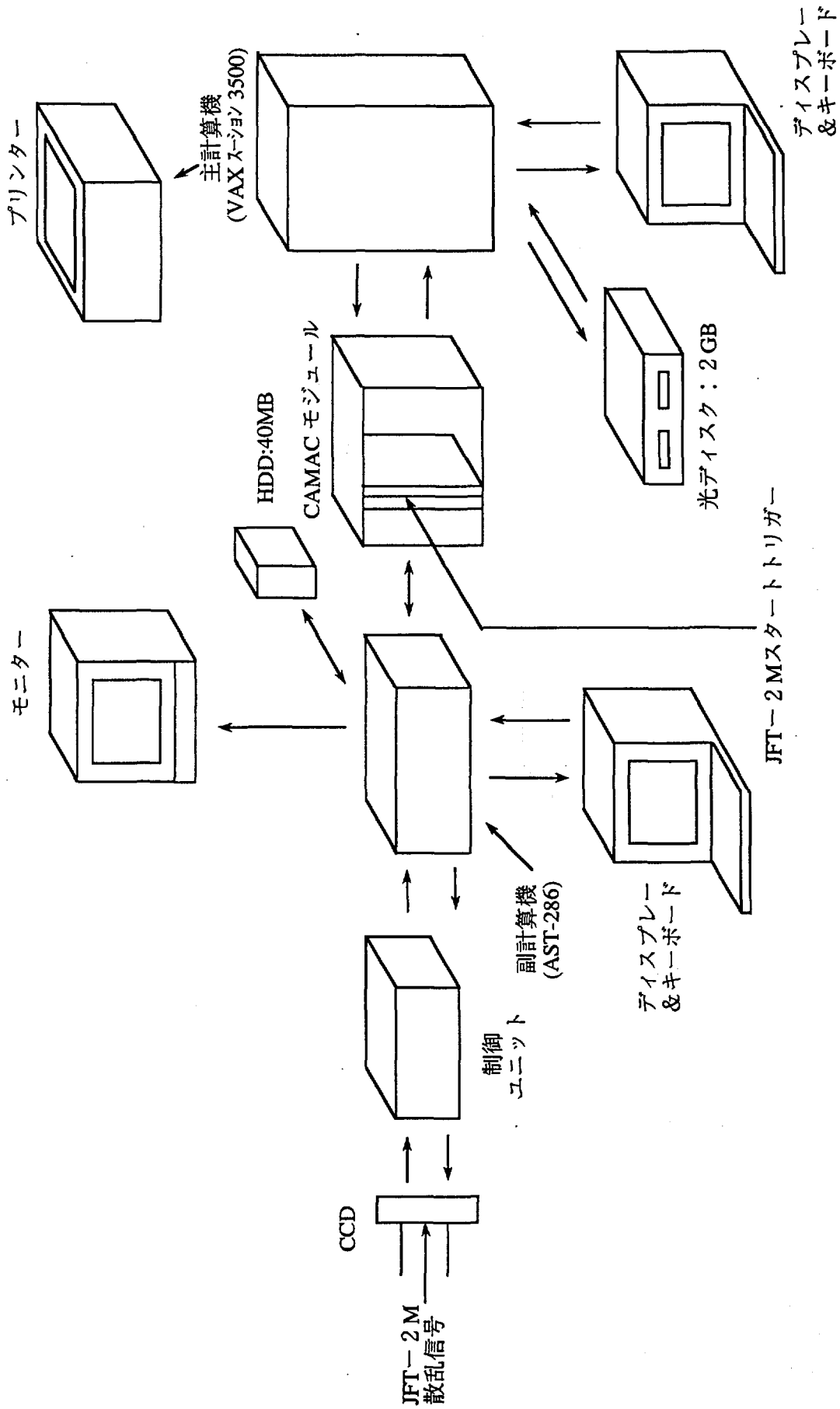


図 1 1 データ収集システム

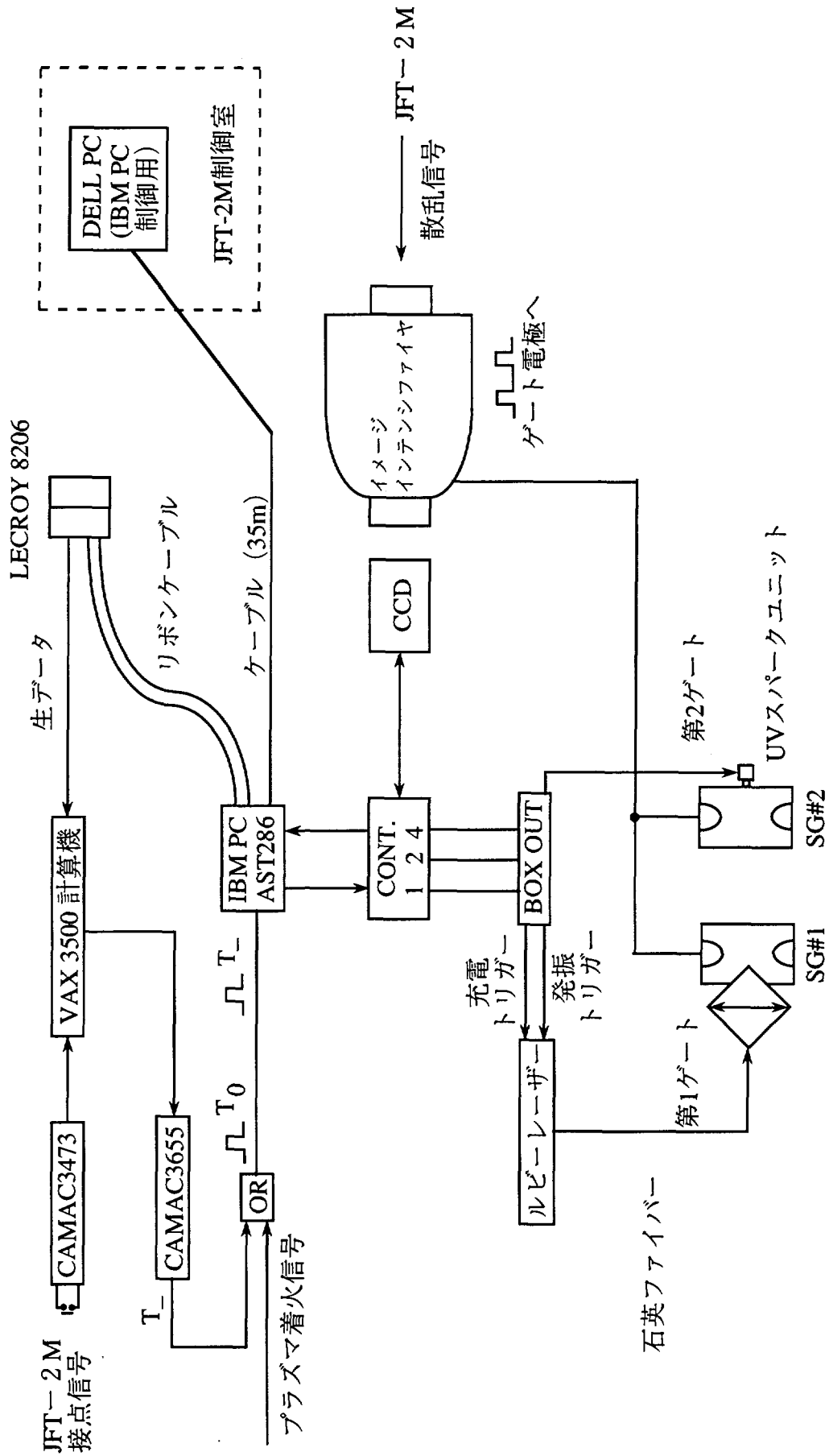


図12 データ収集用トリガー信号フローチャート

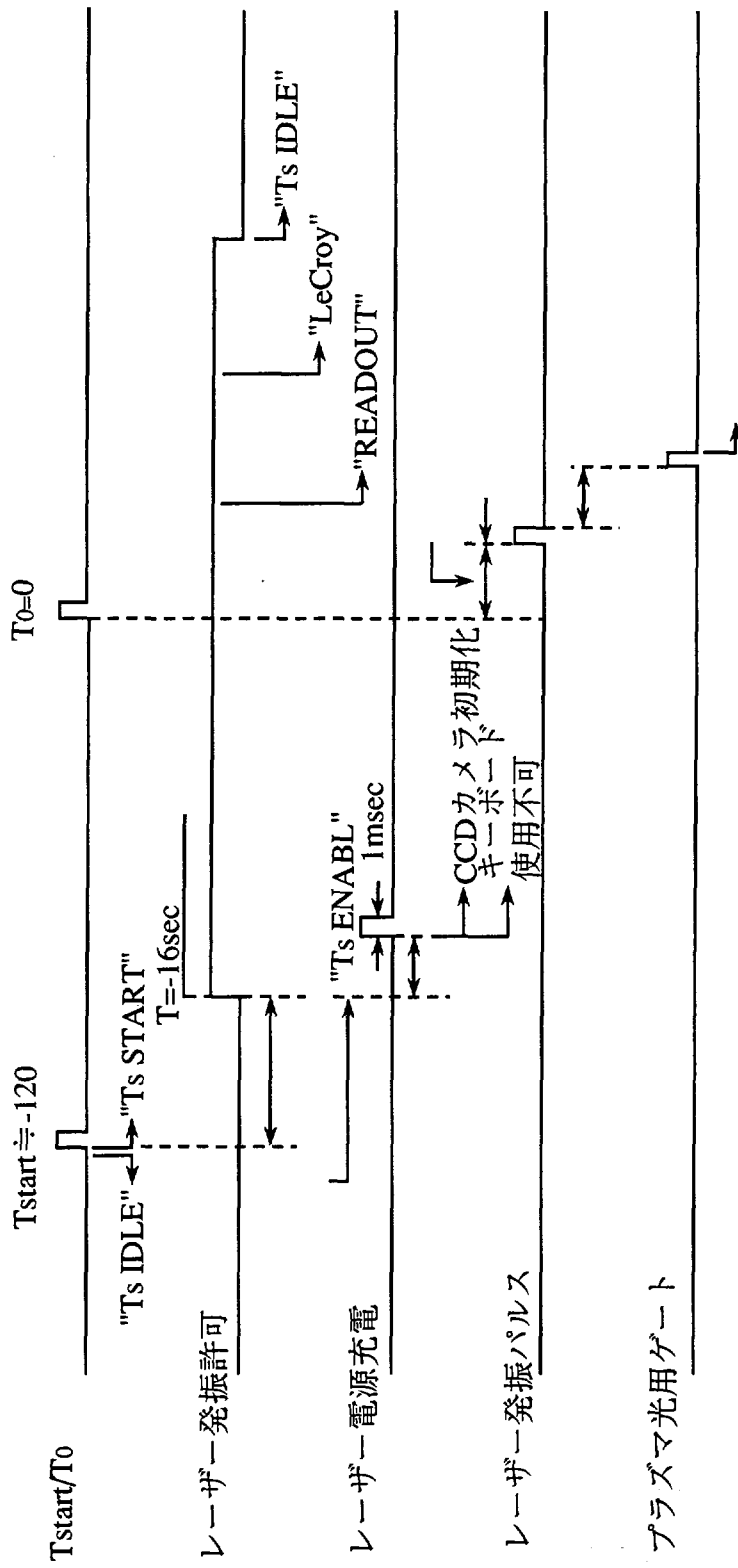


図13 タイムシーケンス

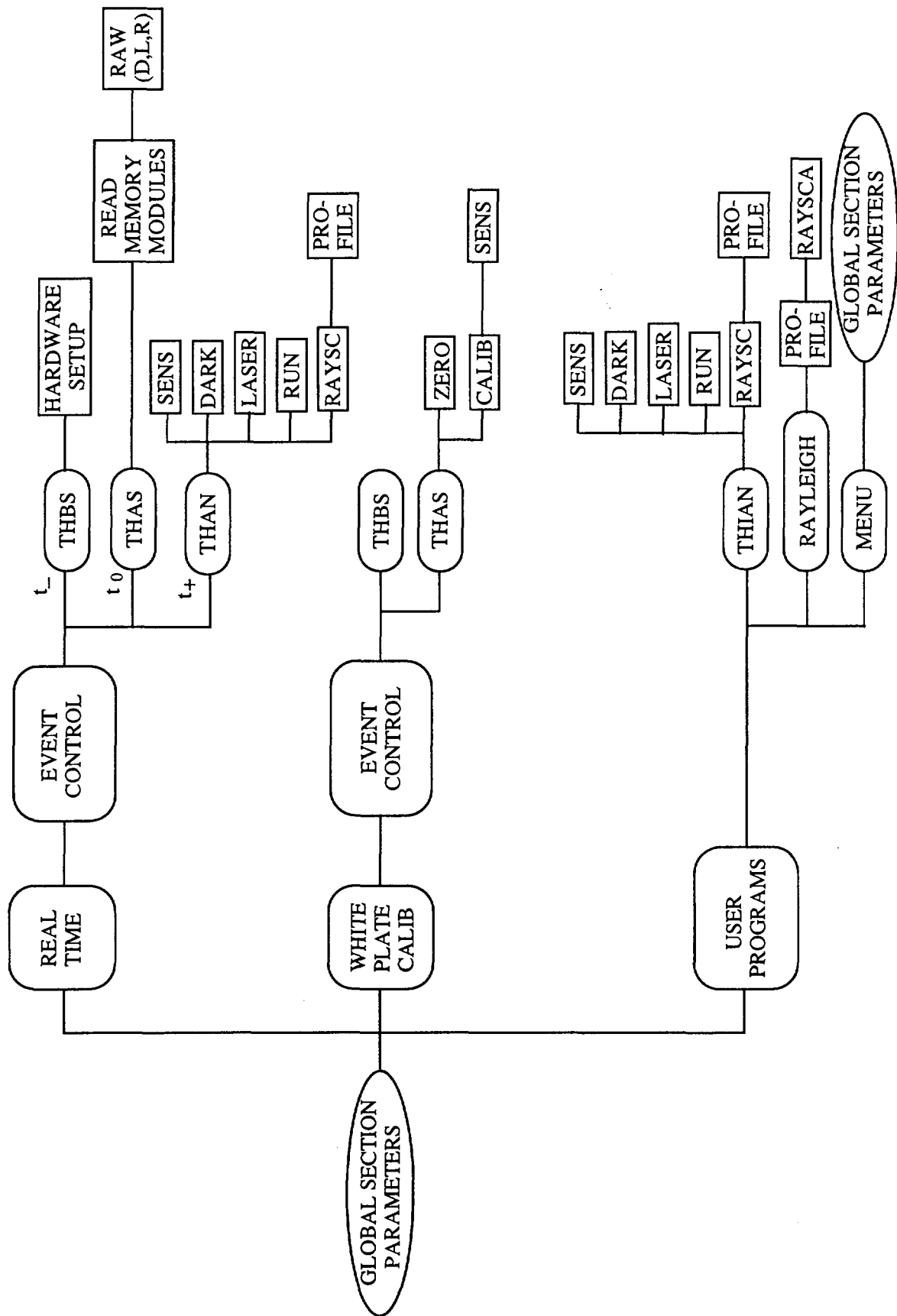


図 14 ソフトウェア・サブシステム

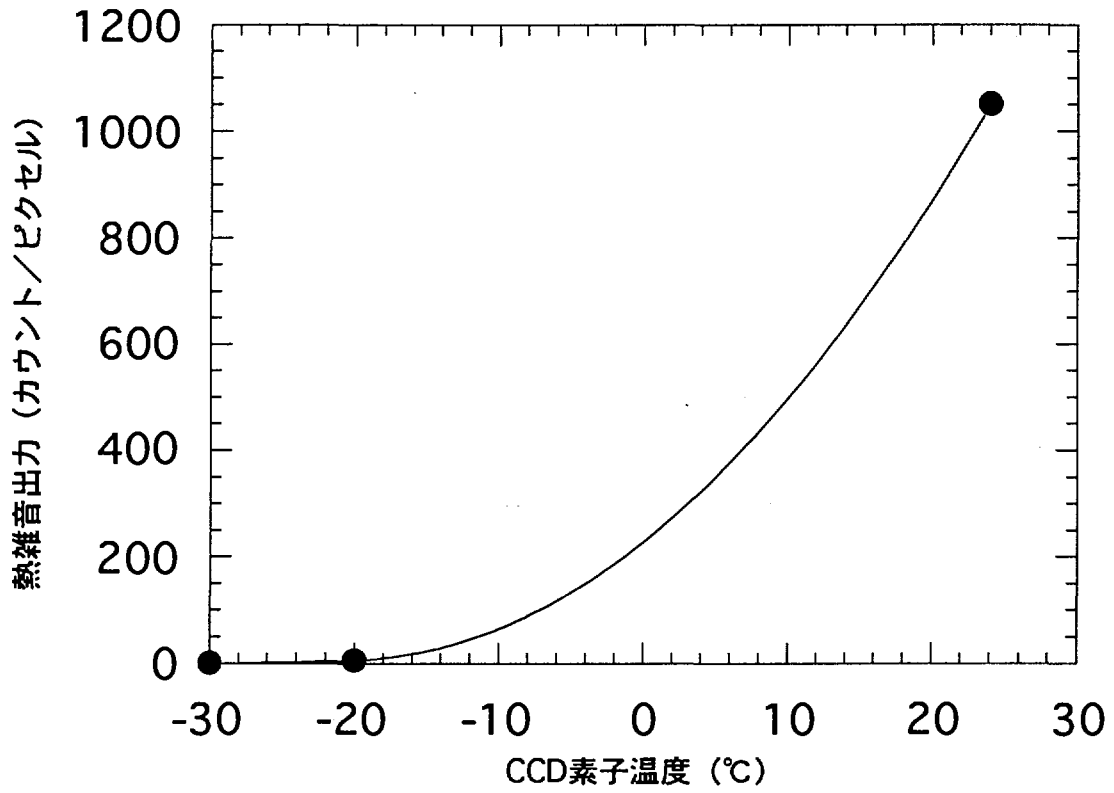


図15 CCD冷却温度に対する熱雑音出力特性

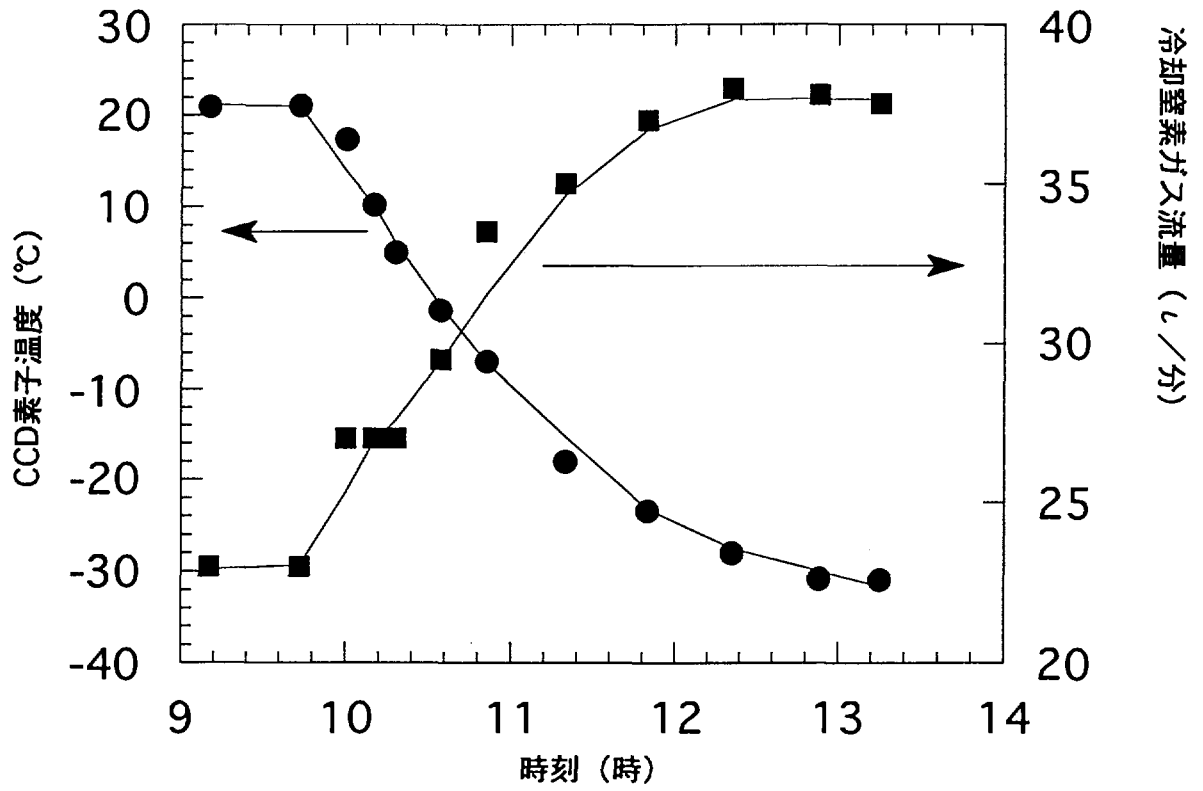


図16 CCD冷却時間に対するCCD素子温度特性

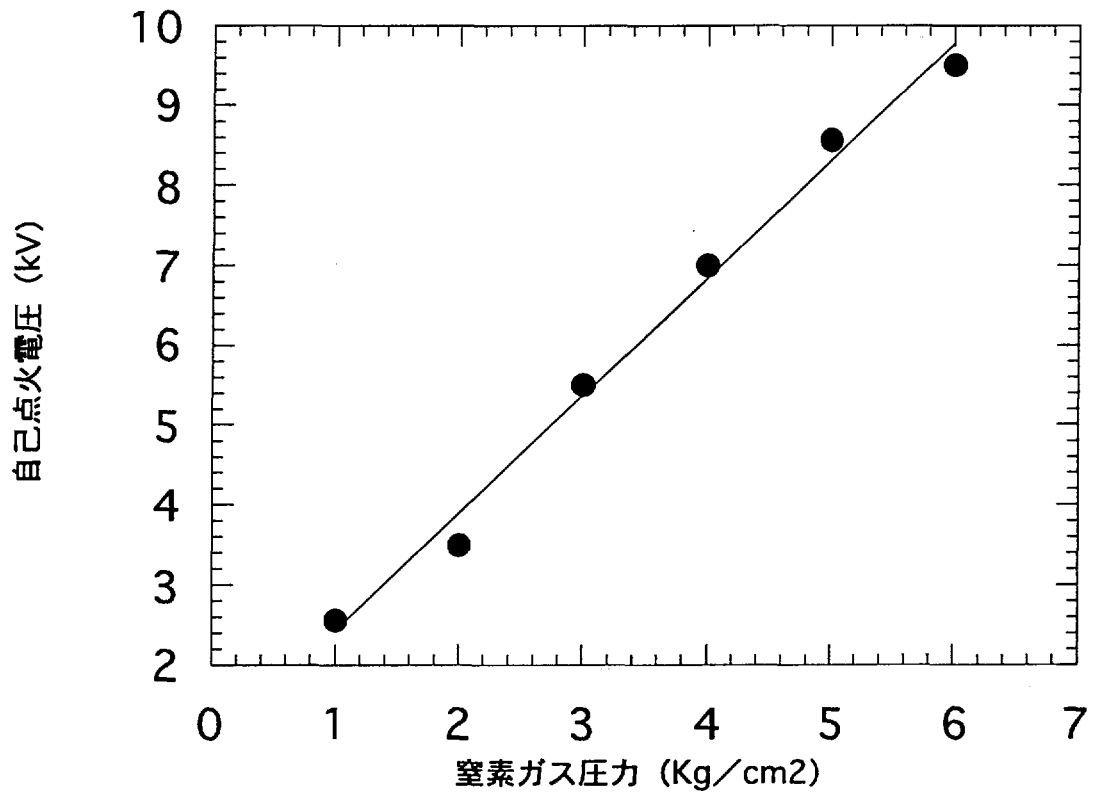


図17 LTSGの封入ガス圧に対する自己点火電圧特性

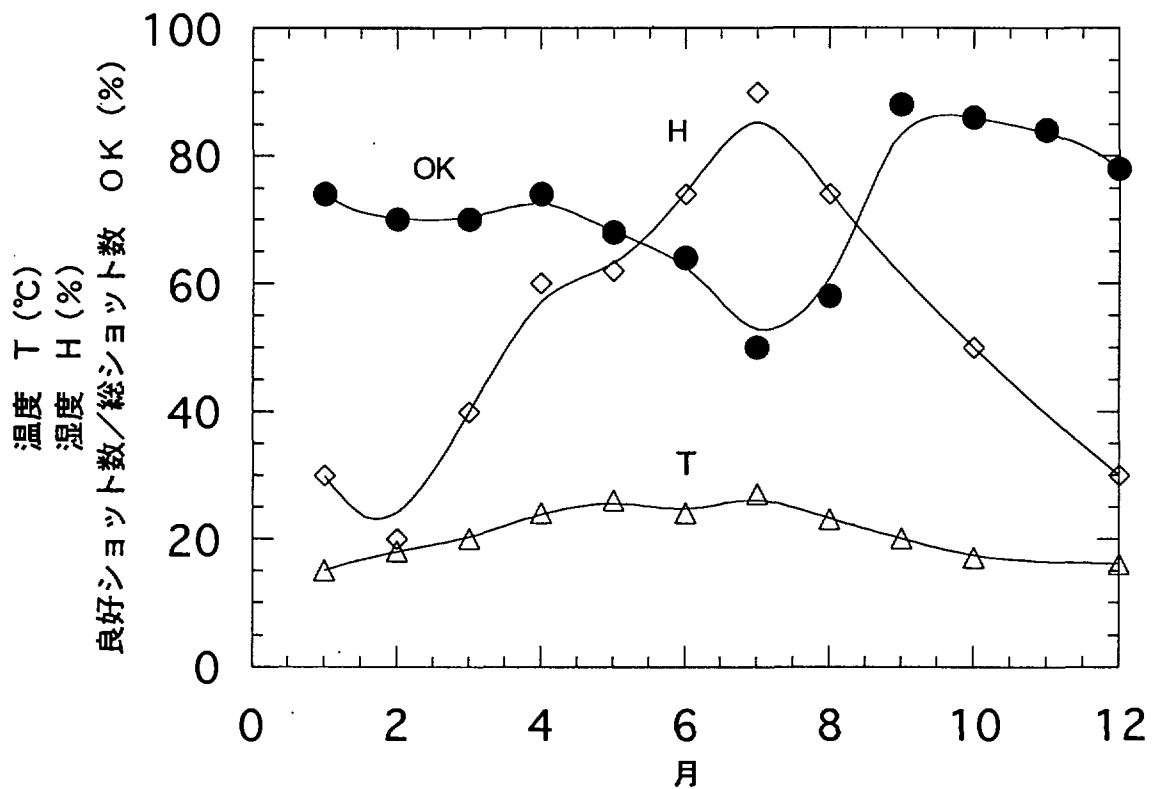


図18 データ取得率、温度、湿度の月別変化
(1992年から1995年迄の平均)

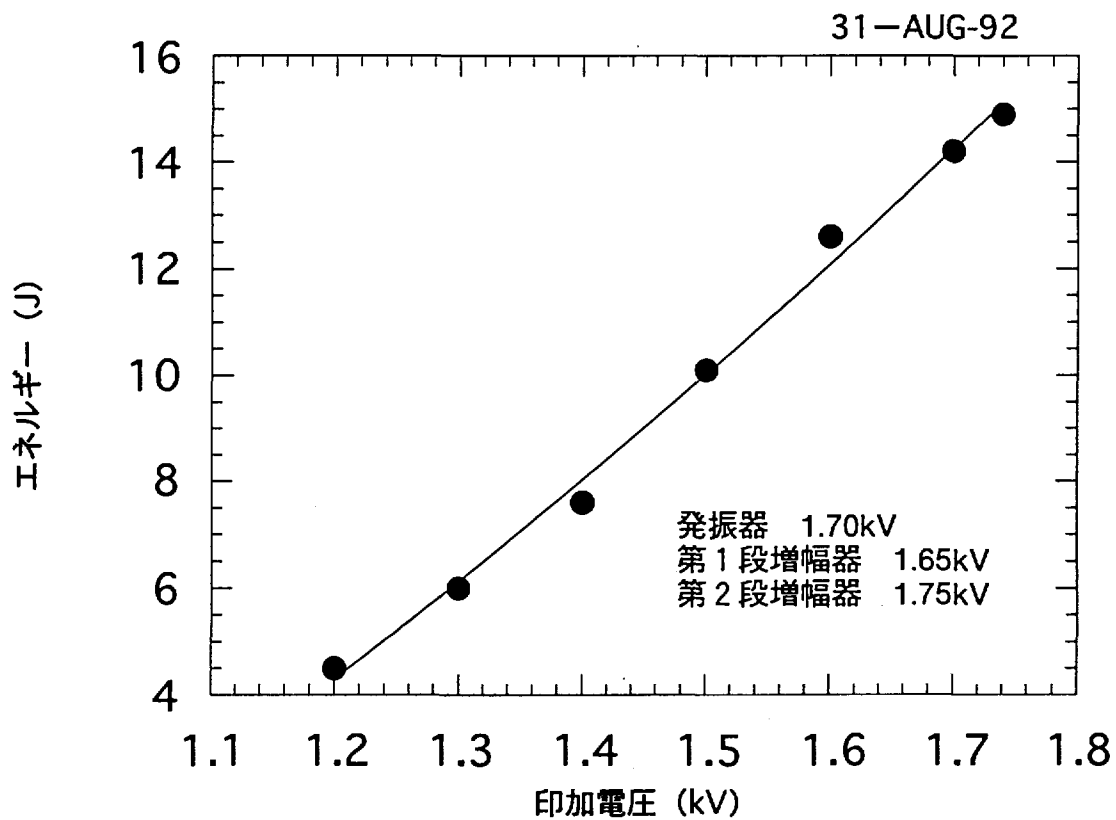


図19 第3段印加電圧対レーザー出力特性

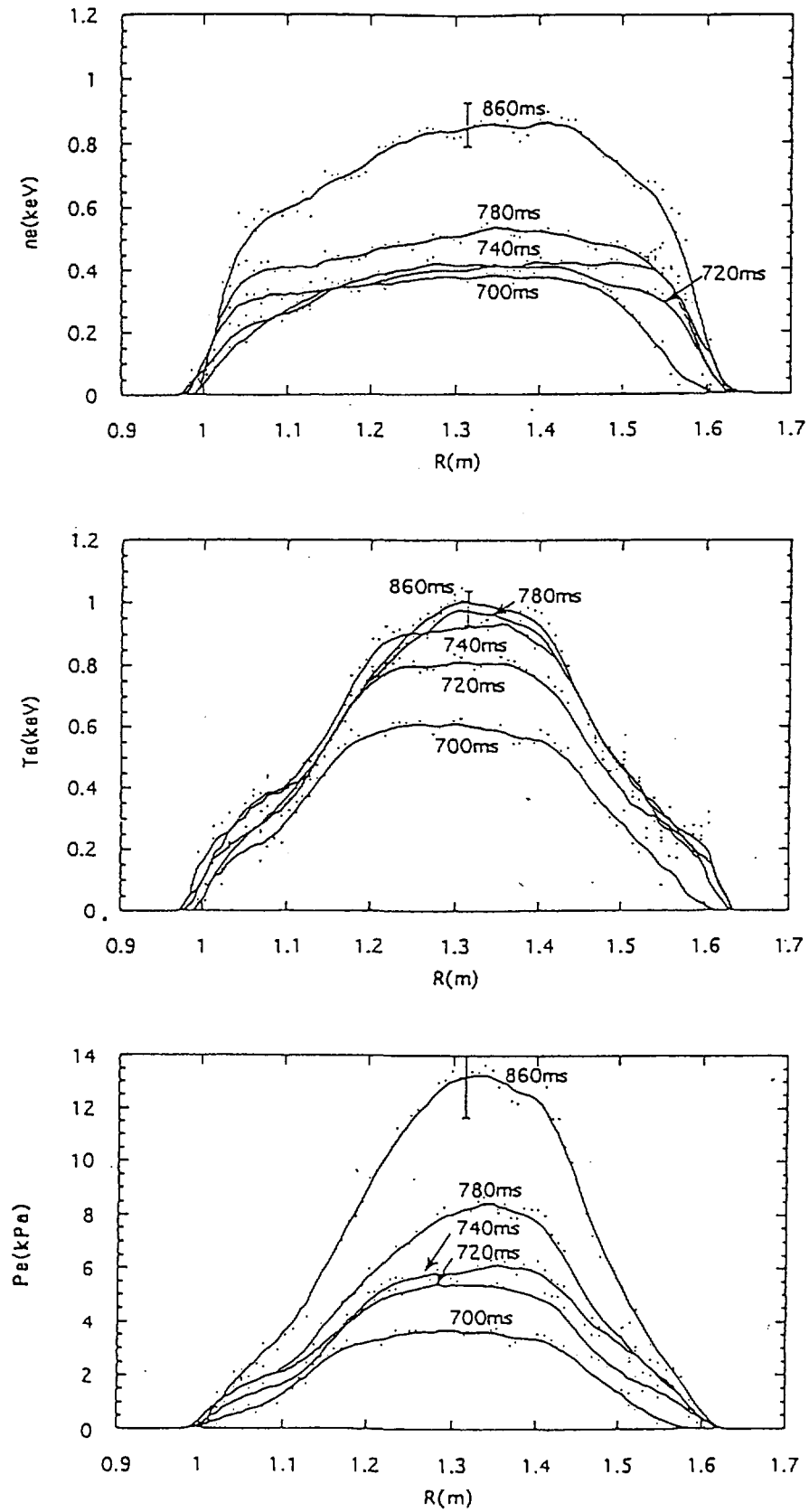


図20 NBI加熱中の n_e , T_e 及び P_e 分布
(シングルヌルダイバータ放電で720msからHELM_yモード)

付録

A.VAX計算機運転マニュアル

Welcome to VAX/VMS V5.5-1

Username:JT2M

Password:Jt2m944 (example)

\$ @dua0:[ornl]caminit

\$ @dua0:[ornl]disp

\$ @dua0:[ornl]disp

(光ディスクスイッチON,光ディスク挿入)

\$ mou moa0 tvtsdata

\$ mov jt2m.th.exe

\$ @ts_start_new97as

Return

* Options are:

- 1)Type current parameters
- 2)Set-up for next shot
- 3)Change shot numbers
- 4)Modify analysis parameters
- 5)Update global section
- 6)Asynchronous acquisition
- 7)Real time system control

<0=MO> Main menu options <S>: 7

<1=RT;> Real time system control options <>: 3

<1=RT;> Real time system control options <3>: 1

Acquisition frag turned off

<1=RT;> Real time system control options <1>: 2

Acquisition frag turned on

<1=RT;> Real time system control options <1>; (Return to Main menu)

<0=MO> Main menu options <7>:

* Options are:

- 1) Type current parameters
- 2) Set-up for next shot
- 3) Change shot numbers
- 4) Modify analysis parameters
- 5) Update global section

<0=MO> Main menu options <7>: 2

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <2>:

*Options are:

- 1) Data type selection.....<D,81>
- 2) laser time.....<0.0>
- 3) Time to 2250L dat.....<1>
- 4) JFT-2M machine shot.....<518006>
- 5) THAS start time delay(sec)
- 6) THAN start time delay(sec)
- 7) Laser energy monitor in J/100.....<2110>

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <2>:1

Data type to take (Z,C,D,L,P,R) <D>:, (同じDarkを取る場合 (,) を入力)

D: ノイズの較正用データの取得

L: 迷光の較正用データの取得

R: データの取得

C: VAX計算機の較正用データの取得

<3>Number of shots to take <81>:99 (99ショット、データを取得する場合)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:

*Options are:

- 1) Data type selection.....<D,99>
- 2) laser time.....<0.0>
- 3) Time to 2250L dat.....<1>
- 4) JFT-2M machine shot.....<518006>
- 5) THAS start time delay(sec)
- 6) THAN start time delay(sec)

7)Laser energy monitor in J/100.....<2110>

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:4 (ショットナンバーの変更)

<2> Current shot number <525002>:125000 (今日の日付けをそのままショットナンバーにする。この場合12月5日)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:

*Options are:

1)Data type selection.....<D,99>

2)laser time.....<0.0>

3)Time to 2250L dat.....<1>

4)JFT-2M machine shot.....<125000>

5)THAS start time delay(sec)

6)THAN start time delay(sec)

7)Laser energy monitor in J/100.....<2110>

(11、12) の操作をしてから、Dモードを5ショット収集 ((13) の操作) する。

Lモードへ変更 ((14、15、16) の操作をしてから)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:1

Data type to take (Z,C,D,L,P,R) <D>:L

<3>Number of shots to take <94>:,

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:4 (ショットナンバーを125005から125000に戻す。)

<2> Current shot number <125005>:125000

*Options are:

1)Data type selection.....<L,94>

2)laser time.....<0.0>

3)Time to 2250L dat.....<1>

4)JFT-2M machine shot.....<125000>

5)THAS start time delay(sec)

6)THAN start time delay(sec)

7)Laser energy monitor in J/100.....<2110>

Lモードを2ショット収集 ((17) の操作) する。

データ収集 ((18) から (21) までの操作をしてから)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:1

Data type to take (Z,C,D,L,P,R) <L>:R

<3>Number of shots to take <92>:,

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:4 (JFT-2Mのショットナンバーに変更)

<2>Current shot number <125002>:184582 (6桁を必要とするのでショットナンバーの頭に1を付ける)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:

*Options are:

- 1)Data type selection.....<R,92>
- 2)laser time.....<0.0>
- 3)Time to 2250L dat.....<1>
- 4)JFT-2M machine shot.....<184582>
- 5)THAS start time delay(sec)
- 6)THAN start time delay(sec)
- 7)Laser energy monitor in J/100.....<2110>

実験終了

(22) から (35) までの操作をしてからVAXシャットダウン ((36)の操作)

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:

*Options are:

- 1)Data type selection.....<R,63>
- 2)laser time.....<0.0>
- 3)Time to 2250L dat.....<1>
- 4)JFT-2M machine shot.....<184611>
- 5)THAS start time delay(sec)
- 6)THAN start time delay(sec)
- 7)Laser energy monitor in J/100.....<2110>

<1=AQ;>Select acquisition parameter (; to quit) <1>:Exit

END OF FILE

FORTRAN STOP

\$@fin97as

\$lo

JT2M logged out at 14-FEB-1996

Local -011- Session 1 disconnected from VSJFT2

B. スパークギャップ運転マニュアル

1. 遠隔用（制御室）のコントロールボックスの電源を入れる。
2. 前日の実験時の設定値を合わせておく（初日の場合は、大体、5.0位にセットする）。
3. High Voltage Power Supply Controller、Remote-Local切り替えスイッチをLocal（3つ）に、TVTS Electrical Trigger スwitchをそれぞれONにする。
4. コントロールボックス前の圧力が約6.0 kg/cm²になっていることを確認する。
5. 現場用（大実験室）のコントロールボックスの電源を入れる（Remote-Local切り替えスイッチがLocalになっていることを確認する）。
6. ガス抜きバルブをほんのわずかに開け、前日の実験時の設定値にセット（初日の場合は、大体、5.0位にセットする）。
7. S.G.電圧をS.G.を見ながら、9.5kVにセットする（スパークしだしたら、ガス圧を上げる）。
8. トリガーをかけ、スパークさせてみる（しないようならば、ガス圧を下げる）。
9. 遠隔用（制御室）のコントローラーに現場用（大実験室）のコントローラーで合わせた設定値をセットする。
10. Remote-Local切り替えスイッチ（現場用コントローラー）をRemoteにする。

* 終了時

11. 現場用コントローラーのRemote-Local切り替えスイッチをLocalにする。
12. 電圧を下げる。
13. High Voltage Power Supply Controller、Remote-Local切り替えスイッチをLocal（3つ）に、TVTS Electrical Trigger スwitchをそれぞれOFFにする。
14. ガス抜きバルブを閉める。
15. 減圧バルブの圧力を2.5kg/cm²位にセットする。

C. IBM計算機 (DELL 計算機を含む) 運転マニュアル

1. AST - 286 (IBM) の起動

- 1) 2階制御室とを結ぶ光ファイバーがマウス用シリアルポートに接続されていることを確認してから電源を入れる。
- 2) 次のコマンドを入力する。 C > start (pc ANYWHERE起動)
- 3) AST - 286 (IBM) をHost として立ち上げる為に下記の項目を順次選択、確認する。
 - ①Be a Host . . .
 - ②Begin Host Operation . . .
 - ③Waite For a Connection . . .

2. 遠隔操作用パソコン (DELL optiplex GXi) の起動

- 1) 電源を入れる。
- 2) Windows95 を終了 (選択) させ、Dosモードを再起動 (選択) させる。
- 3) 次のコマンドを入力する。 Windows > start(pcANYWHERE起動)
- 4) AST - 286 (IBM) を遠隔モードとして立ち上げる為に下記の項目を順次選択、確認する。
 - ①Call a pcANYWHERE Host . . .
 - ②Connect to Host . . .
 - ③pcANYWHERE Host via modem
 - ④Call
 - ⑤aw > CCD (このコマンド入力により遠隔操作される。以降、従来通りの操作方法)

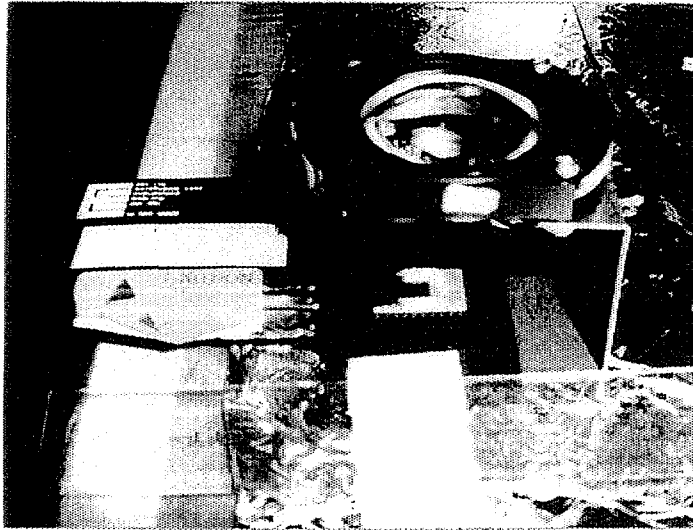
3. AST - 286 (IBM) を終了させる。

- 1) CTL キーと ALT キーを同時に押す (pcANYWHERE 操作メニューが開く)。下記の項目を順次選択、確認する。
 - ①End Session
 - ②Cancel pcANYWHERE
 - ③Yes

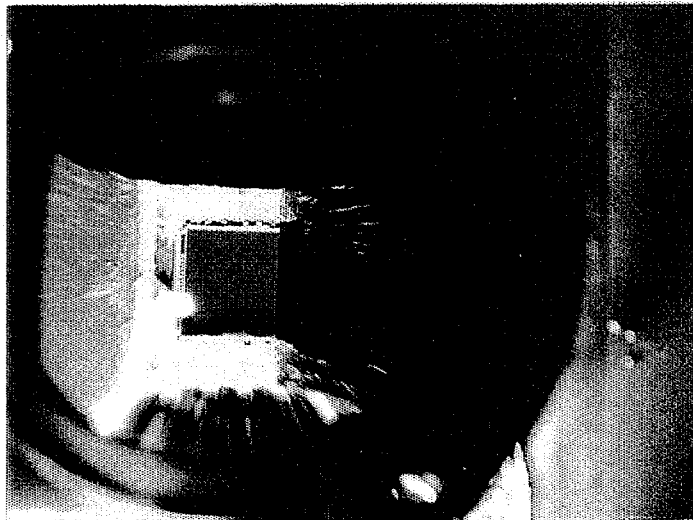
2) 電源を切る。

4. 遠隔操作用パソコン (DELL optiplex GXi) を終了させる。

- 1) CTL キーと ALT キーを同時に押す (pcANYWHERE 操作メニューが開く)。下記の項目を順次選択、確認する。
 - ①Go to Dos
- 2) 電源を切る (復帰したい時は、aw > EXIT コマンドを入力して、ESC キーを押す)。



(a) CCD 素子取り付けのための加工作業



(b) 加工後の CCD
(電極のマスクと B レジスタのカバーが見える)

写真 3 CCD 素子の改造作業

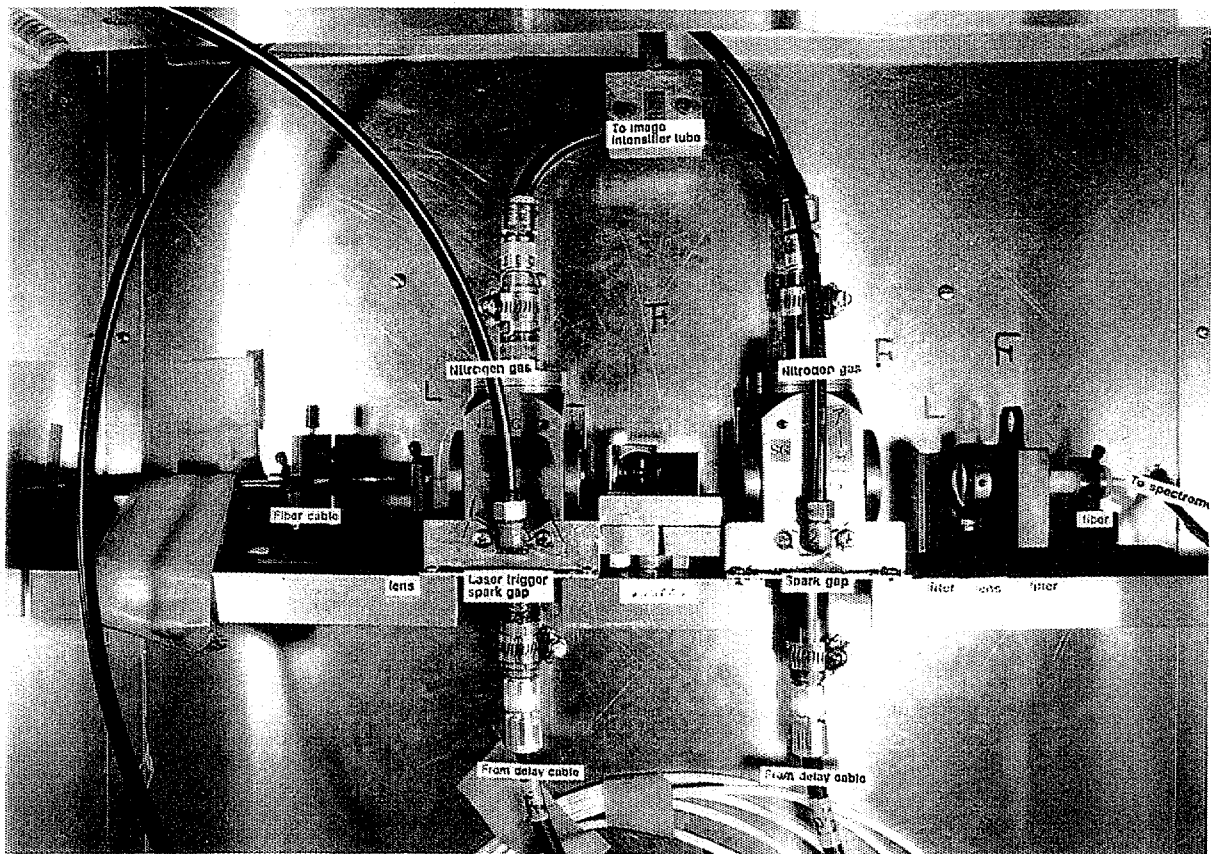


写真2 レーザートリガースパークギャップ系正面写真

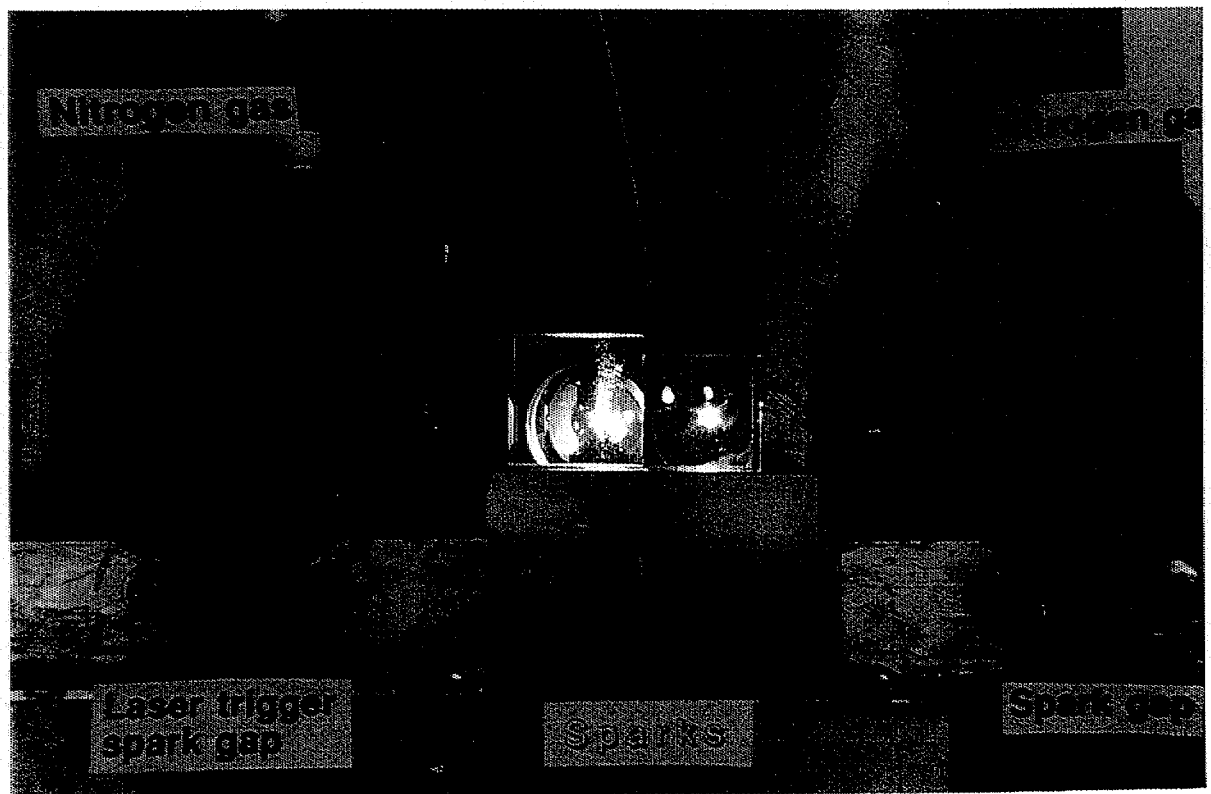


写真3 レーザートリガースパークギャップ系正面拡大写真

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 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	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(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, ヘクト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す場合に限り表2のカテゴリ-に分類されている。
- 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-に入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ 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/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 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 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

