

JAERI - M  
91-035

TVトムソン散乱(TVTS)用高出力・高品位  
ルビーレーザー発振装置の開発

1991年3月

山内 俊彦・John DAVIS<sup>\*1</sup>・椎名 富雄  
Dirck DIMOCK<sup>\*2</sup>・高橋 明<sup>\*3</sup>・猪俣 新次

JAERI-M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。  
入手の問い合わせは、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）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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, 1991

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株式会社原子力資料サービス

TVトムソン散乱 (TVTS) 用高出力・高品位  
ルビーレーザー発振装置の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部  
山内 俊彦・John DAVIS<sup>\*1</sup>・椎名 富雄  
Dirck DIMOCK<sup>\*2</sup>・高橋 明<sup>\*3</sup>・猪俣 新次<sup>+</sup>

(1991年2月5日受理)

日米協力で開発中の JFT-2M 用 TVTS 装置では、入射光としてルビーレーザー光を用いる。このレーザー装置の最大の特徴は高出力 (20 J, 20 ns) 及び高品位 (TEM<sub>00</sub> モード, 0.3 mrad 以下の発散角) である。このレーザーは安定に発振し、TVトムソン散乱に必要な条件を満足した。特に共振器中に特別のフィードバック光学系を作って異なった縦モードを励起しエネルギーの増大を図った。

---

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ 東海研究所技術部

\*1 コンティニューム (株)

\*2 プリンストン大学プラズマ物理研究所

\*3 東洋電子計測 (株)

Development of a High-Quarity, High-Power Ruby Laser System  
for a TV Thomson Scattering System

Toshihiko YAMAUCHI, John DAVIS<sup>\*1</sup>, Tomio SHIINA  
Dirck DIMOCK<sup>\*2</sup>, Akira TAKAHASHI<sup>\*3</sup>  
and Shinji INOMATA<sup>+</sup>

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

(Received February 5, 1991)

A ruby laser has been constructed recently for use as the incident light source in a TV Thomson scattering system which is being developed under a US-JAPAN cooperative program for use in diagnosing the JFT-2M plasma. The laser has excellent characteristics for this purpose including high power (20 Joules in 20 ns) and high beam quality (TEM<sub>00</sub> mode with beam divergence of less than 0.3 mrad). These characteristics along with the good shot to shot reproducibility of the laser satisfy the necessary conditions for Thomson scattering. Especially it is possible to increase the output energy of the system with an extra feedback optic used in conjunction with the output coupler.

Keywords: High Power Laser, Small Beam Divergence, Ruby Laser, TV Thomson Scattering, TEM<sub>00</sub> Mode

---

+ Department of Engineering Service, Toki Research Establishment  
\*1 Continuum K.K.  
\*2 Princeton University Plasma Physics Laboratory, USA  
\*3 Toyo Denshi Keisoku K.K.

## 目 次

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1. はしがき .....                  | 1 |
| 2. ルビーレーザー装置の構成 .....          | 1 |
| 3. トリガーの時系列 .....              | 2 |
| 4. トムソン散乱に必要な特性 .....          | 3 |
| 5. 縦モードと出力特性 .....             | 4 |
| 6. レーザー光のアライメントと散乱データの関係 ..... | 4 |
| 7. あとがき .....                  | 5 |
| 謝 辞 .....                      | 6 |
| 参考文献 .....                     | 6 |

## Contents

|                                                                           |   |
|---------------------------------------------------------------------------|---|
| 1. Introduction .....                                                     | 1 |
| 2. Composition of Ruby laser system .....                                 | 1 |
| 3. Arrangement of successive trigger .....                                | 2 |
| 4. Laser requirements for TVTS .....                                      | 3 |
| 5. Output characteristics by a longitudinal mode .....                    | 4 |
| 6. TV Thomson scattered data connected with<br>laser beam alignment ..... | 4 |
| 7. Summary .....                                                          | 5 |
| Acknowledgements .....                                                    | 6 |
| References .....                                                          | 6 |

## 1. は し が き

本報告書は、平成1年12月～平成2年12月の1年間にわたって、日米国際協力研究 (ANNEX) JFT-2M用テレビトムソン散乱装置の内のレーザー装置に関する中間報告である。

ルビーレーザー発振装置は、1パルス当りのパワーが高いことからトカマクプラズマの電子温度・密度測定用トムソン散乱装置の初期から用いられてきている。これはトムソン散乱断面積が  $6.7 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$  と小さいため、 $\mu\text{W}$  の散乱光を得るためのレーザー強度は…電子密度  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、空間分解能  $1 \text{ cm}$ 、立体角  $10^{-2} \text{ sr}$ 、透過率  $10\%$  に対し  $100 \text{ MW}$  以上必要であるためである。

一方、数年前から入射レーザー光としてYAGレーザーが用いられ始めた。これは繰返しレーザーを発振できるためであり、昭和50年に原研でも山内らによって設計がなされた<sup>1)</sup>。しかしながら、当時YAGレーザー光の波長  $1.06 \mu\text{m}$  付近の散乱光を測定するのに適した検出器に疑問があったため、2次高調波を使うことを主に考察した。それから15年経過した現在は、高感度アバランシェ型光半導体検出器使い散乱光の測定を始めている<sup>2)</sup>。

ルビーレーザーは高繰返し率でYAGレーザーより劣っているが、レーザーエネルギーでは優れている。また、空間分解能はルビーレーザー光では、検出器にCCD素子を使用できるため非常に優れている、これらがまだ依然としてルビーレーザーを使用している理由である。

本TVトムソン散乱装置では、まずルビーレーザーの性質を高品位にし、それをそのまま増幅しエネルギーを高める高出力・高品位レーザー装置を開発・製作した。ここでは、このルビーレーザー光の特性及び縦モード制御によるパルス波形の改善とレーザーエネルギーの増加について述べる。また、レーザー光の性質の重要性を理解する上で、レーザー光のアライメントのずれから生ずる散乱光信号のモジュレーションについて述べる。

## 2. ルビーレーザー装置の構成

ルビーレーザー装置は高出力ばかりでなく高品位にするために、初段の発振エネルギーを  $60 - 80 \text{ mJ}$  に押えている。それで  $20 \text{ J}$  を得るために増幅段は3段構成となった。その構成と写真を図1(a)と(b)に示す。

発振段は全反射ミラー (100%, 曲率  $R = 5 \text{ m}$ )、 $\lambda/4$  板、シャッター、アパーチャ ( $2.5 \text{ mm}$   $\phi$ )、円形断面  $\text{KD}^* \text{P}$  - ポッケルセル Q スイッチ素子、検光子、ルビーロッド ( $6 \text{ mm}$   $\phi$ ,  $122 \text{ mm}$ )、フィードバック光学系の片面反射ガラス板及びエタロンの出力ミラーから成る。アパーチャはその直径で横モードを制御している。実験から発振エネルギーが最大で TEM<sub>00</sub> モードで発振するアパーチャ直径は  $2.5 \text{ mm}$  である。その発振パターンを図2(a)に示す ( $75 \text{ mJ}$ )。そのレーザーをエクスパンダーで広げた後第1増幅段 ( $9 \text{ mm}$   $\phi$ ,  $152 \text{ mm}$ ) に入れ約10倍 ( $750$

## 1. は し が き

本報告書は、平成1年12月～平成2年12月の1年間にわたって、日米国際協力研究 (ANNEX) JFT-2M用テレビトムソン散乱装置の内のレーザー装置に関する中間報告である。

ルビーレーザー発振装置は、1パルス当りのパワーが高いことからトカマクプラズマの電子温度・密度測定用トムソン散乱装置の初期から用いられてきている。これはトムソン散乱断面積が  $6.7 \text{ E}^{-25} \text{ cm}^{-2}$  と小さいため、 $\mu\text{W}$  の散乱光を得るためのレーザー強度は - 電子密度  $1 \text{ E} + 14 \text{ cm}^{-3}$ 、空間分解能  $1 \text{ cm}$ 、立体角  $10^{-2} \text{ sr}$ 、透過率  $10\%$  に対し -  $100 \text{ MW}$  以上必要であるためである。

一方、数年前から入射レーザー光としてYAGレーザーが用いられ始めた。これは繰返しレーザーを発振できるためであり、昭和50年に原研でも山内らによって設計がなされた<sup>1)</sup>。しかしながら、当時YAGレーザー光の波長  $1.06 \mu\text{m}$  付近の散乱光を測定するのに適した検出器に疑問があったため、2次高調波を使うことを主に考察した。それから15年経過した現在は、高感度アバランシェ型光半導体検出器使い散乱光の測定を始めている<sup>2)</sup>。

ルビーレーザーは高繰返し率でYAGレーザーより劣っているが、レーザーエネルギーでは優れている。また、空間分解能はルビーレーザー光では、検出器にCCD素子を使用できるため非常に優れている、これらがまだ依然としてルビーレーザーを使用している理由である。

本TVトムソン散乱装置では、まずルビーレーザーの性質を高品位にし、それをそのまま増幅しエネルギーを高める高出力・高品位レーザー装置を開発・製作した。ここでは、このルビーレーザー光の特性及び縦モード制御によるパルス波形の改善とレーザーエネルギーの増加について述べる。また、レーザー光の性質の重要性を理解する上で、レーザー光のアライメントのずれから生ずる散乱光信号のモジュレーションについて述べる。

## 2. ルビーレーザー装置の構成

ルビーレーザー装置は高出力ばかりでなく高品位にするために、初段の発振エネルギーを  $60 - 80 \text{ mJ}$  に押えている。それで  $20 \text{ J}$  を得るために増幅段は3段構成となった。その構成と写真を図1(a)と(b)に示す。

発振段は全反射ミラー ( $100\%$ 、曲率  $R = 5 \text{ m}$ )、 $\lambda/4$ 板、シャッター、アパーチャ ( $2.5 \text{ mm}$   $\phi$ )、円形断面KD\*P-ポッケルセルQスイッチ素子、検光子、ルビーロッド ( $6 \text{ mm}$   $\phi$ ,  $122 \text{ mm}$ )、フィードバック光学系の片面反射ガラス板及びエタロンの出力ミラーから成る。アパーチャはその直径で横モードを制御している。実験から発振エネルギーが最大でTEM<sub>00</sub>モードで発振するアパーチャ直径は  $2.5 \text{ mm}$  である。その発振パターンを図2(a)に示す ( $75 \text{ mJ}$ )。そのレーザーをエクスペンダーで広げた後第1増幅段 ( $9 \text{ mm}$   $\phi$ ,  $152 \text{ mm}$ ) に入れ約10倍 ( $750$

mJ) に増幅する。そのレーザー光を2回ミラーで反射し丁度180度方向転換する。そしてソフトアパーチャ(アポダイザー)を通しファーフィールドパターンを改善する(これは周辺の特に強いレーザー光を散乱させ弱める方法である)。そして第2増幅段(12 mm  $\phi$ , 204 mm)で約8倍(5.7 J)に増幅する。そのレーザー光を広げた後、第3増幅段(25 mm  $\phi$ , 204 mm)で約4倍(21 J)に増幅する。それぞれのロッドを通った後のビームパターンを図2(a)~(d)に示す。その出力光はミラーで上に曲げられた後、床から2200 cmの位置で前方に曲げられる。その後、ミラー3個で曲げられレンズ( $f = 6 \sim 8$  m)でプラズマ中心に細いビームで入射される。プラズマ中のレーザー光の太さは3 mm  $\phi$ 以下である。レーザー発振パターンは、入射ポート(6~7 m長で真空)の2ヶ所に取付けたCCDカメラでモニターすることができる。He・Neレーザー2台のうち1台のレーザーは、発振段の全反射ミラー側から入り装置の光路チェックに使われ、もう1台のレーザーは、出口でルビーレーザー光路と一致しJFT-2M本体とHe・Neレーザー光(ルビーレーザー光)とのアライメントに使われる。そのためにはまず、He・Neレーザー光とルビーレーザー光の両者の合わせを、図1の右側にあるミラー3個を使い行うことが必要である(レーザー発振装置から本体真空容器中心までのレーザー光の飛行距離は約9 m)。

本装置は、レーザー光学系の他にテーブルの下にコンデンサーボックス4台、テーブルの横に冷却器及び制御系ボックスから構成されている。レーザー光学系はビニールハウス内に設置され、さらに空調用冷却器が設置されている(冷却器は入力電圧AC 100 V、レーザー装置の入力電圧はAC 220 Vである)。

レーザー充電及び発振トリガーは、CCDカメラコントローラで発生し光ファイバーを通してレーザー制御系に入る(詳しくは参考文献3に述べられている)。

レーザーパワーのモニターは、第3増幅段の前方にあるミラーの裏側に取付けた光ファイバーを使い、そこからの光をフォトダイオードに入れCAMAC(2250 L)でA/D変換する。一方、発振段の前方のガラス板(BK7)からの反射光はレンズで石英ファイバー端面に集束する。この光は、イメージインテンシファイヤ(II)ゲート用レーザーsparkギャップに入り、光ファイバーの長さに見合った遅れの後IIのゲート動作を行う。

### 3. トリガーの時系列

レーザー発振装置には、まず、コンデンサーバンクに充電を開始させる充電トリガーパルスが入る。このパルスは、CCDカメラコントローラ(AST-286(IBM-PC))から発生しすぐ光パルスに変換されるが、これはレーザー装置のノイズがデータ処理系に入らぬよう電氣的に離してトリガーパルスを入れるためである。一方レーザーの発振トリガー入力も同様の方法により行われる。

さて、レーザー制御系では発振トリガー入力からQスイッチトリガーまで図3のパルス動作をする。レーザー発振トリガー(同図CU551)の入力により、まず、接点入力が働き24 Vから0 Vに変化しトリガーを開始する。つまり、100~1000  $\mu$ sの間で遅延できるXe管フラッシュ



mJ) に増幅する。そのレーザー光を2回ミラーで反射し丁度180度方向転換する。そしてソフトアパーチャ (アポダイザー) を通しファーフィールドパターンを改善する (これは周辺の特に強いレーザー光を散乱させ弱める方法である)。そして第2増幅段 (12 mm  $\phi$ , 204 mm) で約8倍 (5.7 J) に増幅する。そのレーザー光を広げた後、第3増幅段 (25 mm  $\phi$ , 204 mm) で約4倍 (21 J) に増幅する。それぞれのロッドを通った後のビームパターンを図2 (a) ~ (d) に示す。その出力光はミラーで上に曲げられた後、床から2200 cmの位置で前方に曲げられる。その後、ミラー3個で曲げられレンズ ( $f = 6 \sim 8$  m) でプラズマ中心に細いビームで入射される。プラズマ中のレーザー光の太さは3 mm  $\phi$  以下である。レーザー発振パターンは、入射ポート (6 ~ 7 m 長で真空) の2ヶ所に取り付けた CCD カメラでモニターすることができる。He・Ne レーザー2台のうち1台のレーザーは、発振段の全反射ミラー側から入り装置の光路チェックに使われ、もう1台のレーザーは、出口でルビーレーザー光路と一致し JFT-2M 本体と He・Ne レーザー光 (ルビーレーザー光) とのアライメントに使われる。そのためにはまず、He・Ne レーザー光とルビーレーザー光の両者の合わせを、図1の右側にあるミラー3個を使い行うことが必要である (レーザー発振装置から本体真空容器中心までのレーザー光の飛行距離は約9 m)。

本装置は、レーザー光学系の他にテーブルの下にコンデンサーボックス4台、テーブルの横に冷却器及び制御系ボックスから構成されている。レーザー光学系はビニールハウス内に設置され、さらに空調用冷却器が設置されている (冷却器は入力電圧 AC 100 V, レーザー装置の入力電圧は AC 220 V である)。

レーザー充電及び発振トリガーは、CCD カメラコントローラで発生し光ファイバーを通してレーザー制御系に入る (詳しくは参考文献3に述べられている)。

レーザーパワーのモニターは、第3増幅段の前方にあるミラーの裏側に取付けた光ファイバーを使い、そこからの光をフォトダイオードに入れ CAMAC (2250 L) で A/D 変換する。一方、発振段の前方のガラス板 (BK7) からの反射光はレンズで石英ファイバー端面に集束する。この光は、イメージインテンシファイヤ (II) ゲート用レーザーsparkギャップに入り、光ファイバーの長さに見合った遅れの後 II のゲート動作を行う。

### 3. トリガーの時系列

レーザー発振装置には、まず、コンデンサーバンクに充電を開始させる充電トリガーパルスが入る。このパルスは、CCD カメラコントローラ (AST-286 (IBM-PC)) から発生しすぐ光パルスに変換されるが、これはレーザー装置のノイズがデータ処理系に入らぬよう電氣的に離してトリガーパルスを入れるためである。一方レーザーの発振トリガー入力も同様の方法により行われる。

さて、レーザー制御系では発振トリガー入力から Q スイッチトリガーまで図3のパルス動作をする。レーザー発振トリガー (同図 CU 551) の入力により、まず、接点入力働き 24 V から 0 V に変化しトリガーを開始する。つまり、100 ~ 1000  $\mu$ s の間で遅延できる Xe 管フラッシュ

用パルス (+15 V, 30  $\mu$ s 幅で実験での遅延時間は: 発振段: 300  $\mu$ s, 第1, 2増幅段: 325  $\mu$ s, 第3増幅段: 240  $\mu$ s) を発生し, Xe管を15 kVでフラッシュさせる。その放出光は図3中に示したような時間変化を示す。次に, このパルスより400 ~ 800  $\mu$ sの間で遅延できるQスイッチトリガー (実験では480  $\mu$ s) を発生し, それから600 ns後にアバランシェトランジスターに7.5 Vのパルスを出す。その信号より, ポッケリセルに2 kVの電圧を加えて共振器のQを高める。すると同時に, 図3下のレーザーが発振する。

現在レーザーはトリガーパルス入力時間より約0.5 ms遅れて発振している。この発振時間はプラズマの電子温度・密度の測定時間となる。

#### 4. トムソン散乱に必要な特性

TVトムソン散乱においてレーザーに対して必要な条件は,

- イ. 波長 : 可視域 (ルビーレーザーは6943 Å)
- ロ. レーザーパワー : 100 MW ~ 数GW (数GWは窓ガラスの破壊しきい値)
- ハ. 出力安定性 : 10%以内 (レーザースパークギャップの安定な動作, パワーモニターについては電子密度の揺らぎに影響を与える)
- ニ. パルス幅 : 50 ns以内 (狭い方が背景光強度が小さい, IIのゲート時間80 ~ 200 ns)
- ホ. ビーム発散角 : 0.3 mrad以下 (プラズマ中のビーム径を3 mm以下にする)
- ヘ. 偏光度 : 水平で90 ~ 100% (水平成分のみが散乱に寄与する)
- ト. パルス数 : 1パルス以上

等である。ここで実際測定したルビーレーザー発振装置の特性を表1に示す。同表にはJT-60で使われているレーザーの特性と比較して示してある<sup>4)</sup>。同表の出力エネルギー21 JはXe管にかかる電圧 (発振段2.05 kV, 第1, 2増幅段1.90 kV, 第3増幅段2.10 kV) の時で出力エネルギーが入力電圧に対し, まだ飽和していないことからまだ出せる余裕がある (15 Jの出力エネルギーの印加電圧はそれぞれ2.05 kV, 1.90 kV, 1.94 kVである)。また, ビーム発散角0.3 mrad以下はプラズマ中の70 cmにおいて最小ビーム径  $(2LDd)^{0.5} = 3.2$  mmとなる (上述の条件を満たす事は容易である。例えば, アパーチャでD = 22 mm (エネルギーは16 Jとなる) にする)。ここでLはプラズマ中の測定長 (70 cm), Dはレーザービームの直径 (25 mm), dはビーム発散角である。第3増幅段からの21 Jを弱めて測定したレーザー光の偏向は水平で, 偏光度は21 Jの出力段で0.92である。出力安定性は周囲の条件 (湿度・温度, 防振) に大きく関係する。それはエアコンディショニングされたコンクリートの部屋が望ましいが, 今回は空間的条件から防塵用のビニールハウスにとどめ内部を冷却している。第3増幅段からのレーザー発振パルス波形は図4の様に約20 nsであるが, この波形には微妙にスパイクが現れている。これについては次章で述べる。

用パルス (+15 V, 30  $\mu$ s 幅で実験での遅延時間は: 発振段: 300  $\mu$ s, 第1, 2増幅段: 325  $\mu$ s, 第3増幅段: 240  $\mu$ s) を発生し, Xe管を15 kVでフラッシュさせる。その放出光は図3中に示したような時間変化を示す。次に, このパルスより400 ~ 800  $\mu$ sの間で遅延できるQスイッチトリガー (実験では480  $\mu$ s) を発生し, それから600 ns後にアバランシェトランジスターに7.5 Vのパルスを出す。その信号より, ポッケリセルに2 kVの電圧を加えて共振器のQを高める。すると同時に, 図3下のレーザーが発振する。

現在レーザーはトリガーパルス入力時間より約0.5 ms遅れて発振している。この発振時間はプラズマの電子温度・密度の測定時間となる。

#### 4. トムソン散乱に必要な特性

TVトムソン散乱においてレーザーに対して必要な条件は,

- イ. 波長 : 可視域 (ルビーレーザーは6943 Å)
- ロ. レーザーパワー : 100 MW ~ 数GW (数GWは窓ガラスの破壊しきい値)
- ハ. 出力安定性 : 10%以内 (レーザースパークギャップの安定な動作, パワーモニターについては電子密度の揺らぎに影響を与える)
- ニ. パルス幅 : 50 ns以内 (狭い方が背景光強度が小さい, IIのゲート時間80 ~ 200 ns)
- ホ. ビーム発散角 : 0.3 mrad以下 (プラズマ中のビーム径を3 mm以下にする)
- ヘ. 偏光度 : 水平で90 ~ 100% (水平成分のみが散乱に寄与する)
- ト. パルス数 : 1パルス以上

等である。ここで実際測定したルビーレーザー発振装置の特性を表1に示す。同表にはJT-60で使われているレーザーの特性と比較して示してある<sup>9)</sup>。同表の出力エネルギー21 JはXe管にかかる電圧 (発振段2.05 kV, 第1, 2増幅段1.90 kV, 第3増幅段2.10 kV) の時で出力エネルギーが入力電圧に対し, まだ飽和していないことからまだ出せる余裕がある (15 Jの出力エネルギーの印加電圧はそれぞれ2.05 kV, 1.90 kV, 1.94 kVである)。また, ビーム発散角0.3 mrad以下はプラズマ中の70 cmにおいて最小ビーム径  $(2LDd)^{0.5} = 3.2$  mmとなる (上述の条件を満たす事は容易である。例えば, アパーチャでD = 22 mm (エネルギーは16 Jとなる) にする)。ここでLはプラズマ中の測定長 (70 cm), Dはレーザービームの直径 (25 mm), dはビーム発散角である。第3増幅段からの21 Jを弱めて測定したレーザー光の偏向は水平で, 偏光度は21 Jの出力段で0.92である。出力安定性は周囲の条件 (湿度・温度, 防振) に大きく関係する。それはエアコンディショニングされたコンクリートの部屋が望ましいが, 今回は空間的条件から防塵用のビニールハウスにとどめ内部を冷却している。第3増幅段からのレーザー発振パルス波形は図4の様に約20 nsであるが, この波形には微妙にスパイクが現れている。これについては次章で述べる。

## 5. 縦モードと出力特性

本レーザー装置には発振器の共振器内部に横モードを TEM<sub>00</sub> モードに制御するアパーチャが挿入され、その結果ビーム発散角はほぼ理論どおり 0.3 mrad 以下の結果を得た。この時共振器中のアパーチャのため発生する縦モード数が少なく（それだけレーザーエネルギーが少ない）、それで共振器中にミラー（片面だけ反射のガラス板）を入れた。そして基本のものの中に入る縦モードを発生させることでレーザーエネルギーを高めパルス波形を良くすることを考えた。

縦モードは、発振幅  $f = c/2L$  ( $c$ : 光速,  $L$ : 共振器長) ごとに存在する。本装置は、エタロン出力ミラーと内部ガラス板（片側に反射防止膜）からなる 2 種類の共振器長の重ね合わせであり、それらの共振器長を  $L_1$  と  $L_2$  とすれば縦モードの発振幅はそれぞれ、

$$f_1 = c/2L_1, f_2 = c/2L_2$$

となる。この時 2 本の主となる縦モードの他に、その近くにはそれぞれ複数本の軸外縦モードが共振器中の利得 1 を越えて発振するが、それはアパーチャおよび励起入力の手御で制限できる。しかし、レーザーエネルギーが必要な TVTS のためには、むやみに発振を押えモードを良くすることは考えものである。

まず、共振器長  $L_1$  ( $= 96$  cm) で発振した時の発振段の出力波形を図 5 に示す。7 ~ 10 ns のパルス（パルス幅から数本の縦モードが存在すると考えられる）が、約 9 ns の間隔で数パルス発振しその包絡線はガウス形である。このパルスは主に  $f_1$  の周期で発振している。この変調によりレーザーエネルギーが少なくなっているばかりでなく、個々のパルスのレーザーパワーは高くなり、光学部品の破壊の危険性が生じた。それでこのパルス（モード 1）の間に適したパルス（モード 2）を発生させ重ね合わせることで高品位・高出力のレーザーを製作した。モード 2 は  $f_2$  の周期での発振であり、 $L_2$  は実験から 63 cm である。 $f_1$  と  $f_2$  で発振した時のレーザーパルス波形を図 6 に示す。このパルス波形は図 5 の谷を埋めており、そのパルス波形はガウス形である。また、図 5 と比べ半値幅が狭くなっているが、これは共振器中にガラス板を入れたため損失が増え逆に利得が減り、利得曲線に含まれる  $f_1$  と  $f_2$  の数が減ったためであると考えられる。

## 6. レーザー光のアライメントと散乱データの関係

本章はレーザー装置そのものからずれるが、レーザー径と測定データの関係を知る上で非常に面白く、つまりレーザー光のビーム径の重要性を知るためにここで述べる<sup>6)</sup>。

散乱光はレンズ及びミラー（受光光学系）を通った後、コヒーレントファイバー入射端面上に 0.3 倍のレーザー光と同じ形の像に変わる。次に図 7 (イ) に示すように、1 測定点 (0.86 cm) ほどのファイバー束を 90 度回して重ね、つまり、各測定点の散乱データが横になるようにして縦

## 5. 縦モードと出力特性

本レーザー装置には発振器の共振器内部に横モードを TEM<sub>00</sub> モードに制御するアパーチャが挿入され、その結果ビーム発散角はほぼ理論どおり 0.3 mrad 以下の結果を得た。この時共振器中のアパーチャのため発生する縦モード数が少なく（それだけレーザーエネルギーが少ない）、それで共振器中にミラー（片面だけ反射のガラス板）を入れた。そして基本のものの中に入る縦モードを発生させることでレーザーエネルギーを高めパルス波形を良くすることを考えた。

縦モードは、発振幅  $f = c/2L$  ( $c$ : 光速,  $L$ : 共振器長) ごとに存在する。本装置は、エタロン出力ミラーと内部ガラス板（片側に反射防止膜）からなる 2 種類の共振器長の重ね合わせであり、それらの共振器長を  $L_1$  と  $L_2$  とすれば縦モードの発振幅はそれぞれ、

$$f_1 = c/2L_1, f_2 = c/2L_2$$

となる。この時 2 本の主となる縦モードの他に、その近くにはそれぞれ複数本の軸外縦モードが共振器中の利得 1 を越えて発振するが、それはアパーチャおよび励起入力 of 制御で制限できる。しかし、レーザーエネルギーが必要な TVTS のためには、むやみに発振を押しモードを良くすることは考えものである。

まず、共振器長  $L_1$  ( $= 96$  cm) で発振した時の発振段の出力波形を図 5 に示す。7 ~ 10 ns のパルス（パルス幅から数本の縦モードが存在すると考えられる）が、約 9 ns の間隔で数パルス発振しその包絡線はガウス形である。このパルスは主に  $f_1$  の周期で発振している。この変調によりレーザーエネルギーが少なくなっているばかりでなく、個々のパルスのレーザーパワーは高くなり、光学部品の破壊の危険性が生じた。それでこのパルス（モード 1）の間に適したパルス（モード 2）を発生させ重ね合わせることで高品位・高出力のレーザーを製作した。モード 2 は  $f_2$  の周期での発振であり、 $L_2$  は実験から 63 cm である。 $f_1$  と  $f_2$  で発振した時のレーザーパルス波形を図 6 に示す。このパルス波形は図 5 の谷を埋めており、そのパルス波形はガウス形である。また、図 5 と比べ半値幅が狭くなっているが、これは共振器中にガラス板を入れたため損失が増え逆に利得が減り、利得曲線に含まれる  $f_1$  と  $f_2$  の数が減ったためであると考えられる。

## 6. レーザー光のアライメントと散乱データの関係

本章はレーザー装置そのものからずれるが、レーザー径と測定データの関係を知る上で非常に面白く、つまりレーザー光のビーム径の重要性を知るためにここで述べる<sup>5)</sup>。

散乱光はレンズ及びミラー（受光光学系）を通った後、コヒーレントファイバー入射端面上に 0.3 倍のレーザー光と同じ形の像に変わる。次に図 7 (イ) に示すように、1 測定点 (0.86 cm) ほどのファイバー束を 90 度回して重ね、つまり、各測定点の散乱データが横になるようにして縦

方向に積み重ねた。この出射面のファイバー束は、同図に矢印で示したように一つおきに方向を逆にして重なっている。それがファイバー端面 (0.9 mm × 193 mm) の中央にある時、つまり、アライメントが良く像も良い図 7 (ロ) の規則正しいモジュレーションができる時、測定データは図 8 の (a) のようにプラズマ中心で高く (プラズマの温度が高いため短波長までドプラー広がりした散乱光が存在する)、周辺で低い (温度が低いためドプラー広がりが小さい) 散乱光分布が見られる。一方、アライメントがずれてファイバー端面の端に像ができた時、つまり、図 7 (イ) のモジュレーションの周期が (イ) の半分になった時、測定データは図 8 の (b) のように縦の縞がはっきり見られる。次にレーザー光のアライメントが悪くなくかつ漏れ磁界が II に入り CCD カメラで得られた像が歪んだ時、つまり、図 7 (ニ) のモジュレーションの周期が (イ) と同じで位相がシフトした時、測定データは図 8 (c) のように電子密度分布に振動または 2 種類の分布が得られる (同図では 260 から 300 cm の間で見られる。しかし、電子温度には見られない)。これは位相がシフトしたため、ある CCD 上で決めた測定点に入る信号量が多くなったり、あるいは少なくなったりしたためである。

実験時はこのようなデータを見ながら、ミラー駆動システムを使って光路のアライメントを最適にする。

## 7. あとがき

現在ルビーレーザー以外に、YAG レーザーがトムソン散乱のための入射レーザー光として用いられている。しかし、ルビーレーザーは、YAG レーザーと異なり高エネルギーが出せることおよび発振波長が可視光であること等の重要な特徴を持つため、本 TV トムソン散乱装置に採用した。この TVTS 用高出力ルビーレーザーを開発するにあたり、候補として主に A 社と B 社の二社について検討した。両社とも高出力ルビーレーザーについては同程度の性能を出せる技術力を持っている。しかし、B 社では 2 段増幅段で済むコンパクトな装置にできる利点はあるが、第 1 増幅段と第 2 増幅段で同じルビーロッドを使用するため、発振に中抜けが起る等モードパターンの点で疑問があった。それで我々は A 社の高出力ルビーレーザーを基に共同開発を行うこととした。

本研究の途中で、第 2 増幅段 12 mm φ のルビーロッドが出力側にあるエクスペンダーの凹面レンズからの反射光を受け破壊した。これは凹面の焦点がロッド端面付近にあったためであり、凹面の向きを第 3 増幅段の方向に変えた。また、第 3 増幅段の 25 mm φ のロッドは発注して約 8 ヶ月もかかったのには注意を要する。

本レーザー装置の Q スイッチ方式は、これまでと異なり Q スイッチ時 KD\*P 結晶に電圧を印加する。これはこれまでの 0V にする Q スイッチ方式より安全性の点で優れている。また、JT-60 のトムソン散乱で使用するルビーレーザー装置より 1 パルス / 分の使用で優れているとも劣っていない。また、これは PPPL のレーザーシステムより高出力システムである。

発振モードを良くしビーム拡がりを押さえるために、発振段でレーザー径をアパーチャで絞る

方向に積み重ねた。この出射面のファイバー束は、同図に矢印で示したように一つおきに方向を逆にして重なっている。それがファイバー端面 (0.9 mm × 193 mm) の中央にある時、つまり、アライメントが良く像も良い図 7 (ロ) の規則正しいモジュレーションができる時、測定データは図 8 の (a) のようにプラズマ中心で高く (プラズマの温度が高いため短波長までドプラー広がりした散乱光が存在する)、周辺で低い (温度が低いためドプラー広がりが小さい) 散乱光分布が見られる。一方、アライメントがずれてファイバー端面の端に像ができた時、つまり、図 7 (ハ) のモジュレーションの周期が (イ) の半分になった時、測定データは図 8 の (b) のように縦の縞がはっきり見られる。次にレーザー光のアライメントが悪くなくかつ漏れ磁界が II に入り CCD カメラで得られた像が歪んだ時、つまり、図 7 (ニ) のモジュレーションの周期が (イ) と同じで位相がシフトした時、測定データは図 8 (c) のように電子密度分布に振動または 2 種類の分布が得られる (同図では 260 から 300 cm の間で見られる。しかし、電子温度には見られない)。これは位相がシフトしたため、ある CCD 上で決めた測定点に入る信号量が多くなったり、あるいは少なくなったりしたためである。

実験時はこのようなデータを見ながら、ミラー駆動システムを使って光路のアライメントを最適にする。

## 7. あとがき

現在ルビーレーザー以外に、YAG レーザーがトムソン散乱のための入射レーザー光として用いられている。しかし、ルビーレーザーは、YAG レーザーと異なり高エネルギーが出せることおよび発振波長が可視光であること等の重要な特徴を持つため、本 TV トムソン散乱装置に採用した。この TVTS 用高出力ルビーレーザーを開発するにあたり、候補として主に A 社と B 社の二社について検討した。両社とも高出力ルビーレーザーについては同程度の性能を出せる技術力を持っている。しかし、B 社では 2 段増幅段で済むコンパクトな装置にできる利点はあるが、第 1 増幅段と第 2 増幅段で同じルビーロッドを使用するため、発振に中抜けが起る等モードパターンの点で疑問があった。それで我々は A 社の高出力ルビーレーザーを基に共同開発を行うこととした。

本研究の途中で、第 2 増幅段 12 mm φ のルビーロッドが出力側にあるエクスペンダーの凹面レンズからの反射光を受け破壊した。これは凹面の焦点がロッド端面付近にあったためであり、凹面の向きを第 3 増幅段の方向に変えた。また、第 3 増幅段の 25 mm φ のロッドは発注して約 8 ヶ月もかかったのには注意を要する。

本レーザー装置の Q スイッチ方式は、これまでと異なり Q スイッチ時 KD\*P 結晶に電圧を印加する。これはこれまでの 0V にする Q スイッチ方式より安全性の点で優れている。また、JT-60 のトムソン散乱で使用するルビーレーザー装置より 1 パルス / 分の使用で優れているとも劣っていない。また、これは PPPL のレーザーシステムより高出力システムである。

発振モードを良くしビーム拡がりを押さえるために、発振段でレーザー径をアパーチャで絞る

が、エネルギーがそれだけ小さくなる。この時、発振波形に軸方向の縦モードに対応したスパイクが見られた。それでスパイクの間に来る異なった縦モードを作りエネルギーを高めた。それには縦モード用ガラス板（片面に反射防止膜）を共振器内に入れ、発振波形からモードロックのスパイクが消えガウス分布波形になるように設定位置を変えた。その結果、96 cm の共振器長に対し 63 cm の位置でガウス波形の出力パルスが得られた。しかし、温度変化によりモードのずれが生じパルス波形が変化するので、 $\pm 2^\circ\text{C}$  程度の温度制御が必要である。しかしながら、トカマクプラズマの実験に使用するレーザー装置の置かれた環境はこれまで必ずしも良くなく、それに対応した技術開発の必要性があると思われる。

## 謝 辞

本日米協力研究に絶えず御支援下さっている米国 Dr. K. Young, Dr. Benoit LeBlanc, Dr. David Johnson, 装置技術管理室 鈴木室長, プラズマ実験研究室 前田室長, 核融合研究部 島本部長, 那珂研究所 飯島所長および吉川理事に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 山内 その他：「10 パルス高出力レーザー発振装置設計の一般的考察」  
JAERI - M 6587 (1976) .
- 2) H. Rohr etc. : Nuclear Fusion 22, 1099 (1982) .
- 3) 山内 その他：「TV トムソン散乱 (TVTS) 光測定用冷却型 CCD カメラシステム」  
JAERI Internal Report (1991) .
- 4) 横溝 その他：核融合研究別冊「JT - 60 のトムソン散乱計測システム」  
Vol. 59, p. 72 ~ 90 (1988) .
- 5) D. Johnson etc. : Rev. Sci. Instrum. 56, 1015 (1985) .



が、エネルギーがそれだけ小さくなる。この時、発振波形に軸方向の縦モードに対応したスパイクが見られた。それでスパイクの間に来る異なった縦モードを作りエネルギーを高めた。それには縦モード用ガラス板（片面に反射防止膜）を共振器内に入れ、発振波形からモードロックのスパイクが消えガウス分布波形になるように設定位置を変えた。その結果、96 cm の共振器長に対し 63 cm の位置でガウス波形の出力パルスが得られた。しかし、温度変化によりモードのずれが生じパルス波形が変化するので、 $\pm 2^\circ\text{C}$  程度の温度制御が必要である。しかしながら、トカマクプラズマの実験に使用するレーザー装置の置かれた環境はこれまで必ずしも良くなく、それに対応した技術開発の必要性があると思われる。

## 謝 辞

本日米協力研究に絶えず御支援下さっている米国 Dr. K. Young, Dr. Benoit LeBlanc, Dr. David Johnson, 装置技術管理室 鈴木室長, プラズマ実験研究室 前田室長, 核融合研究部 島本部長, 那珂研究所 飯島所長および吉川理事に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 山内 その他：「10 パルス高出力レーザー発振装置設計の一般的考察」  
JAERI - M 6587 (1976) .
- 2) H. Rohr etc. : Nuclear Fusion 22, 1099 (1982) .
- 3) 山内 その他：「TV トムソン散乱 (TVTS) 光測定用冷却型 CCD カメラシステム」  
JAERI Internal Report (1991) .
- 4) 横溝 その他：核融合研究別冊「JT - 60 のトムソン散乱計測システム」  
Vol. 59, p. 72 ~ 90 (1988) .
- 5) D. Johnson etc. : Rev. Sci. Instrum. 56, 1015 (1985) .

が、エネルギーがそれだけ小さくなる。この時、発振波形に軸方向の縦モードに対応したスパイクが見られた。それでスパイクの間に来る異なった縦モードを作りエネルギーを高めた。それには縦モード用ガラス板（片面に反射防止膜）を共振器内に入れ、発振波形からモードロックのスパイクが消えガウス分布波形になるように設定位置を変えた。その結果、96 cm の共振器長に対し 63 cm の位置でガウス波形の出力パルスが得られた。しかし、温度変化によりモードのずれが生じパルス波形が変化するので、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$  程度の温度制御が必要である。しかしながら、トカマクプラズマの実験に使用するレーザー装置の置かれた環境はこれまで必ずしも良くなく、それに対応した技術開発の必要性があると思われる。

## 謝 辞

本日米協力研究に絶えず御支援下さっている米国 Dr. K. Young, Dr. Benoit LeBlanc, Dr. David Johnson, 装置技術管理室 鈴木室長, プラズマ実験研究室 前田室長, 核融合研究部 鳥本部長, 那珂研究所 飯島所長および吉川理事に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 山内 その他：「10 パルス高出力レーザー発振装置設計の一般的考察」  
JAERI - M 6587 (1976) .
- 2) H. Rohr etc. : Nuclear Fusion 22, 1099 (1982) .
- 3) 山内 その他：「TV トムソン散乱 (TVTS) 光測定用冷却型 CCD カメラシステム」  
JAERI Internal Report (1991) .
- 4) 横溝 その他：核融合研究別冊「JT - 60 のトムソン散乱計測システム」  
Vol. 59, p. 72 ~ 90 (1988) .
- 5) D. Johnson etc. : Rev. Sci. Instrum. 56, 1015 (1985) .

表1 JT-60用とJFT-2M用ルビレーザー装置の性能比較表

|        | JT-60                   | JFT-2M                   |
|--------|-------------------------|--------------------------|
| エネルギー  | 22 J                    | 21 J                     |
| 出力安定性  | ±1.2 %                  | ±4.75 %                  |
| パルス幅   | 28 nS                   | 19±2 nS                  |
| ジッター   | ±5 nS                   | ±5 nS                    |
| ビーム径   | 26 mm                   | 24 mm                    |
| ビーム発散角 | 1 mrad (93.8 %以上のエネルギー) | 0.29 mrad (80 %以上のエネルギー) |
| 偏光度    | 99.0 %                  | 92 % (出力21Jで測定)          |
| 増幅段数   | 4                       | 3                        |
| パルス数   | 1 (低エネルギーでは4)           | 1                        |

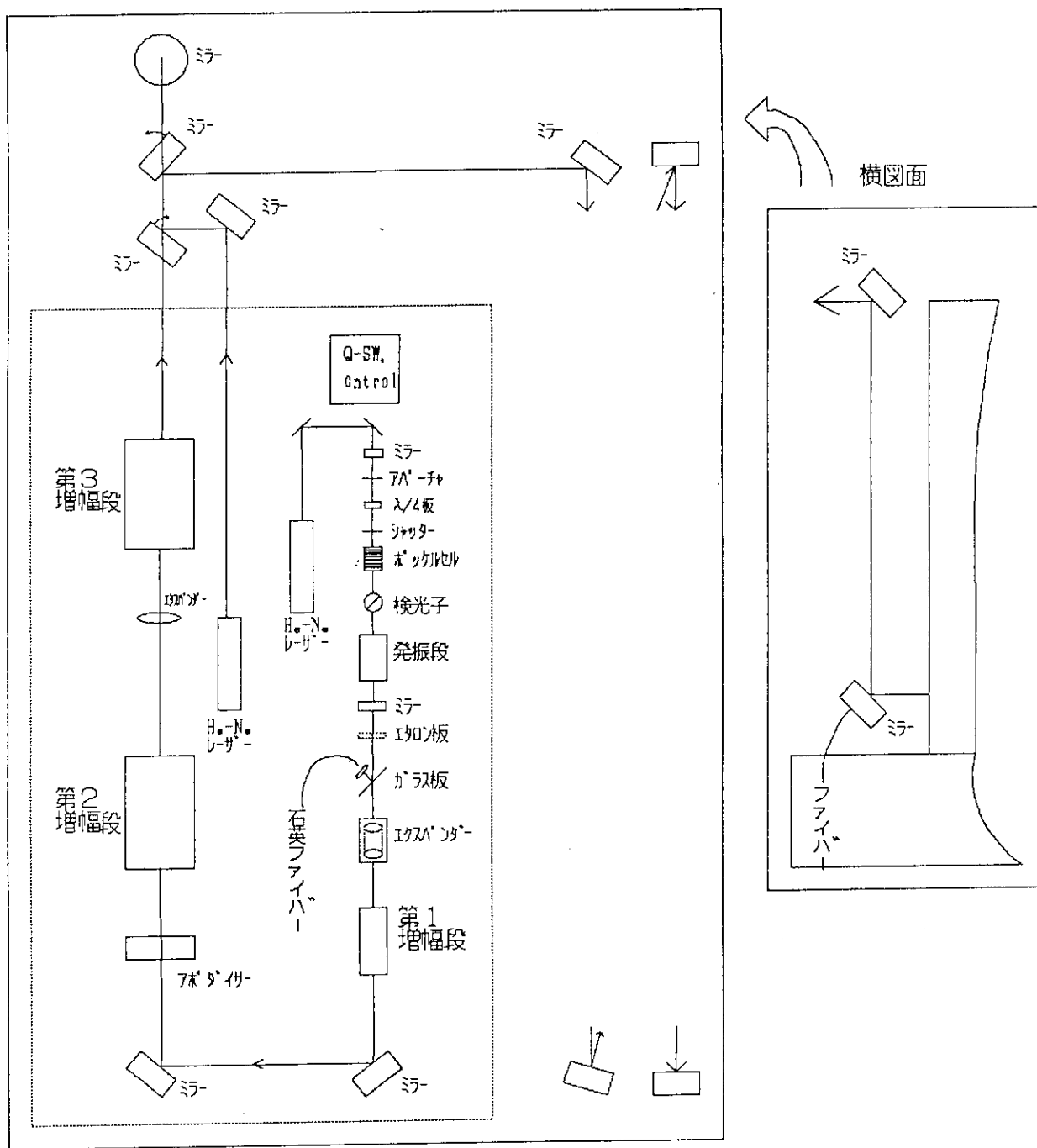
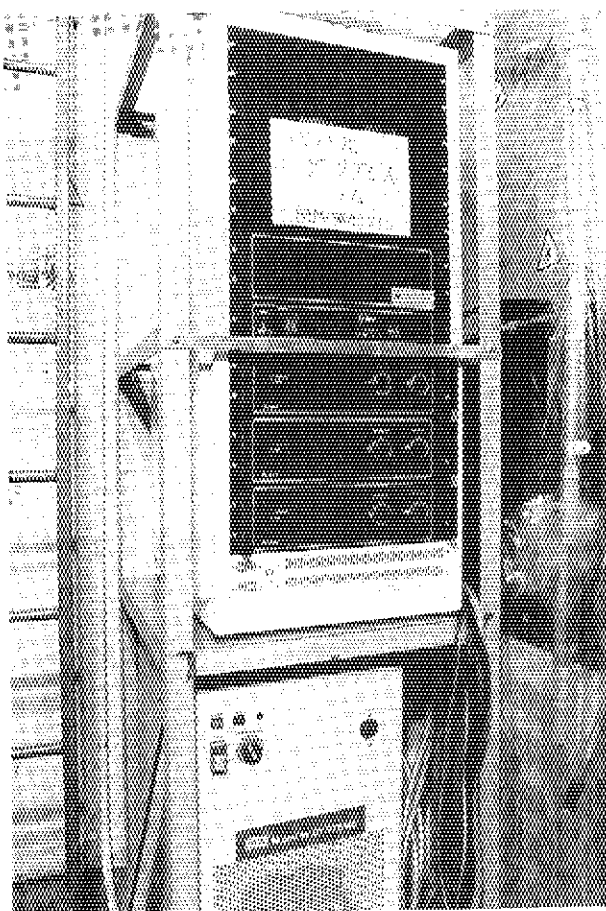
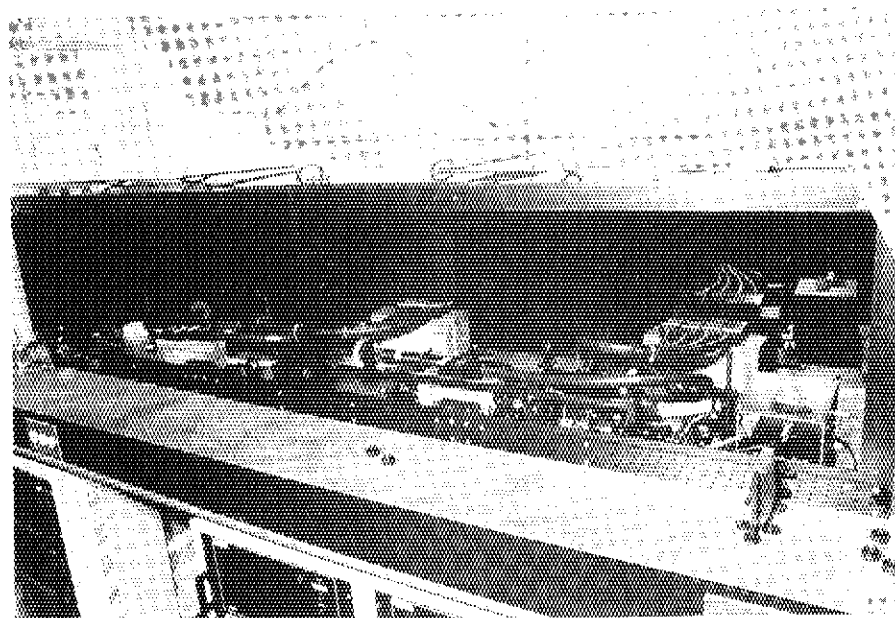


図1(a) ルビーレーザー発振装置全体構成図



(イ) 上は制御盤, 下は冷却器



(ロ) 発振装置内部

図 1(b) ルビーレーザー発振装置

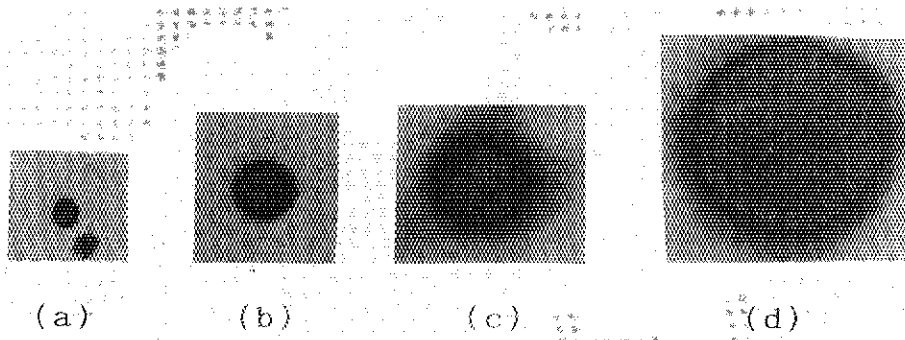


図2 発振段(a), 第1増幅段(b), 第2増幅段(c)及び第3増幅段(d)からのレーザー発振パターン

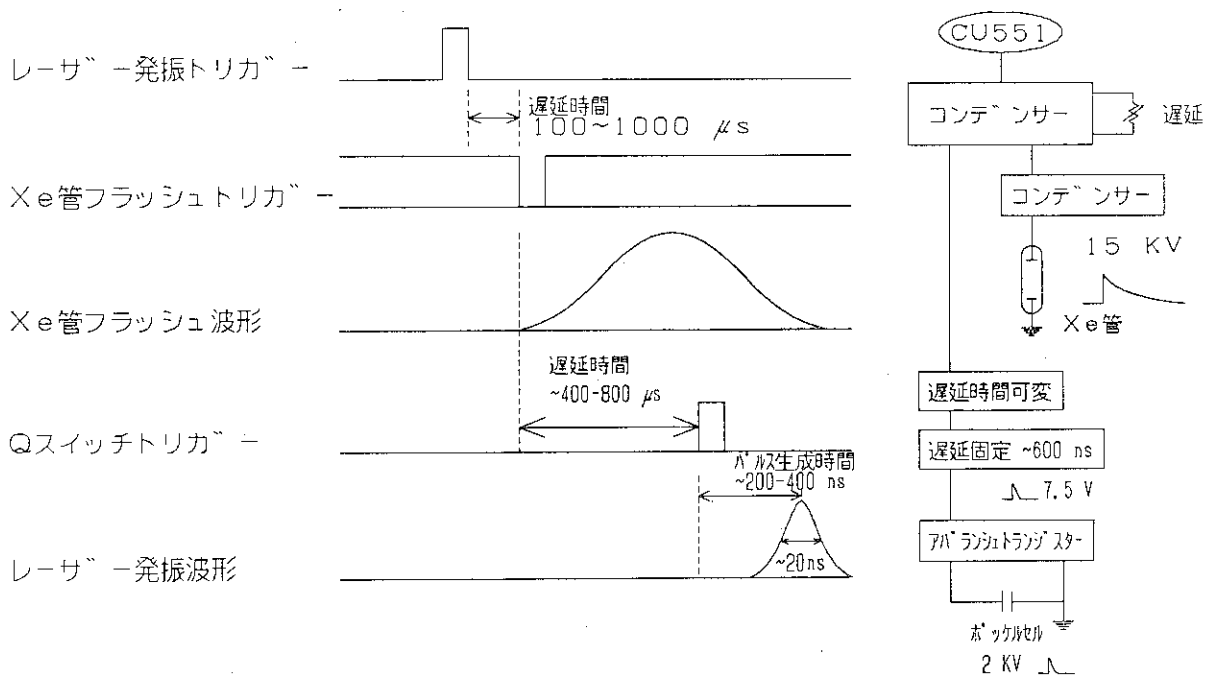


図3 Qスイッチ制御盤におけるトリガー系

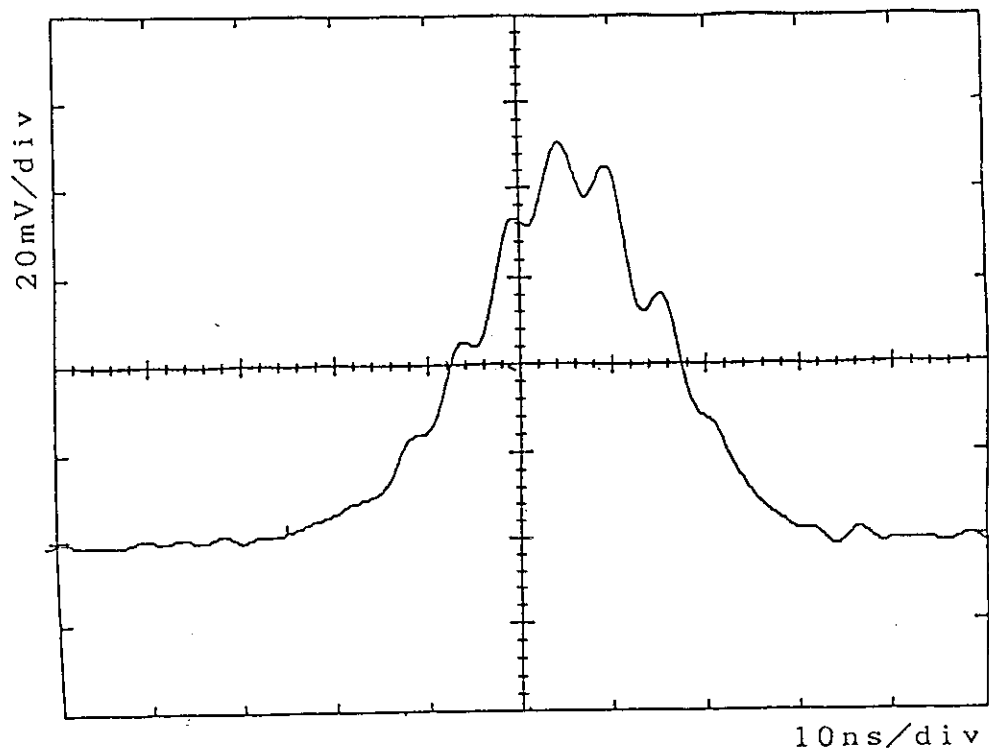


図4 第3増幅段からの発振波形

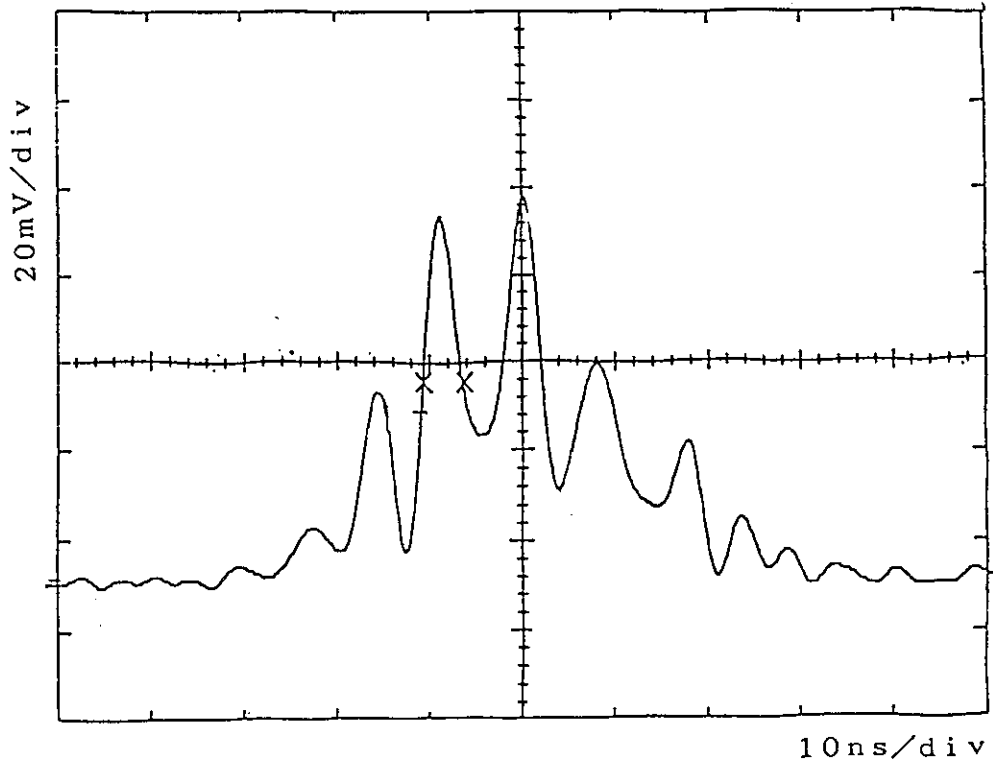


図5 発振段からの発振波形 ( $L = 96 \text{ cm}$ )

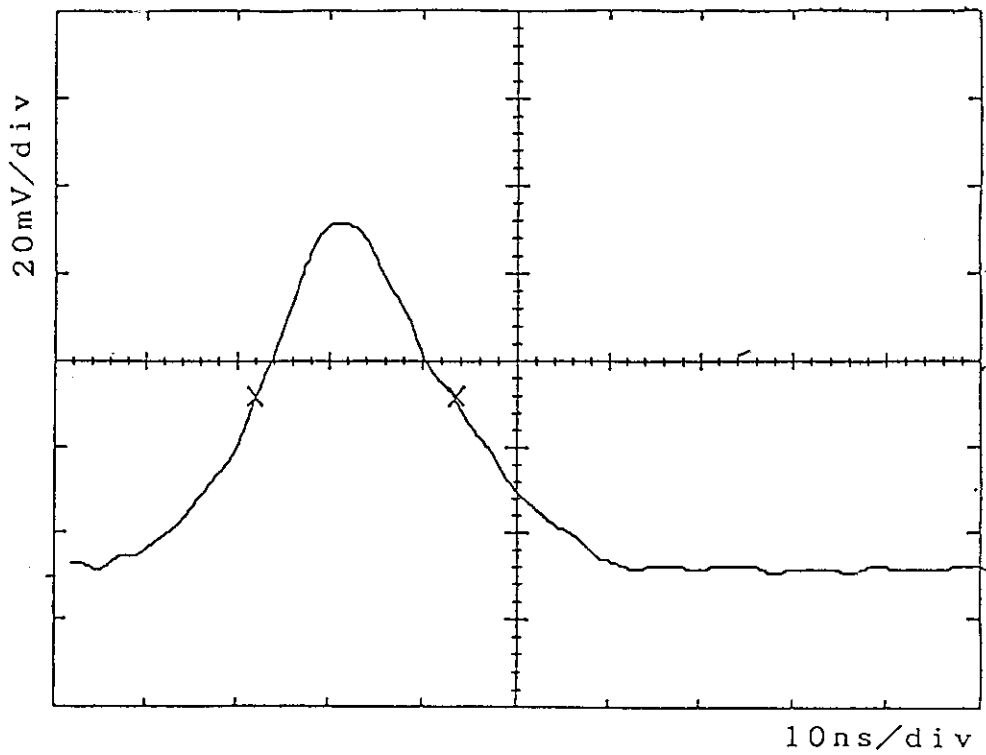
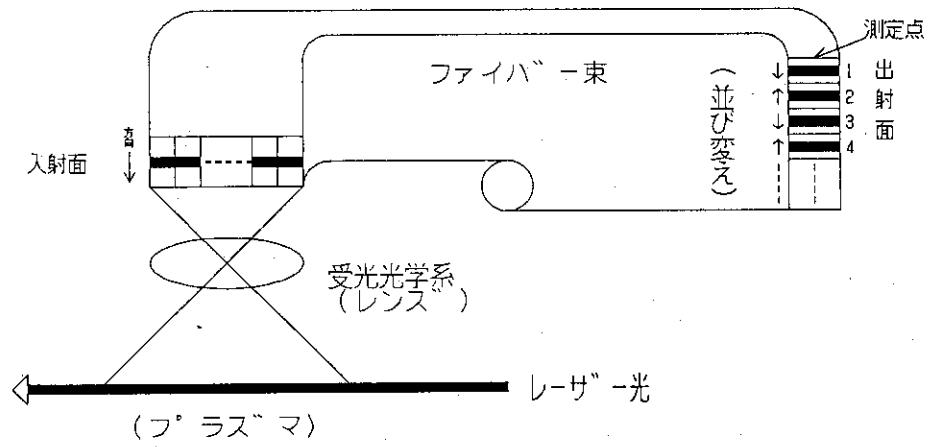


図6 共振中にガラス板を入れた時の発振波形 ( $L_1 = 96 \text{ cm}$ ,  $L_2 = 63 \text{ cm}$ )





(イ) 入射レーザー光とファイバー中の像のアレンジメント

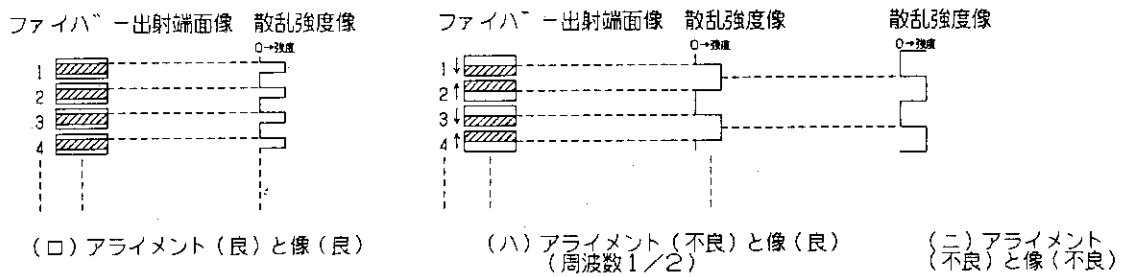


図7 レーザー光のアライメントの良否に対する散乱光のモジュレーション

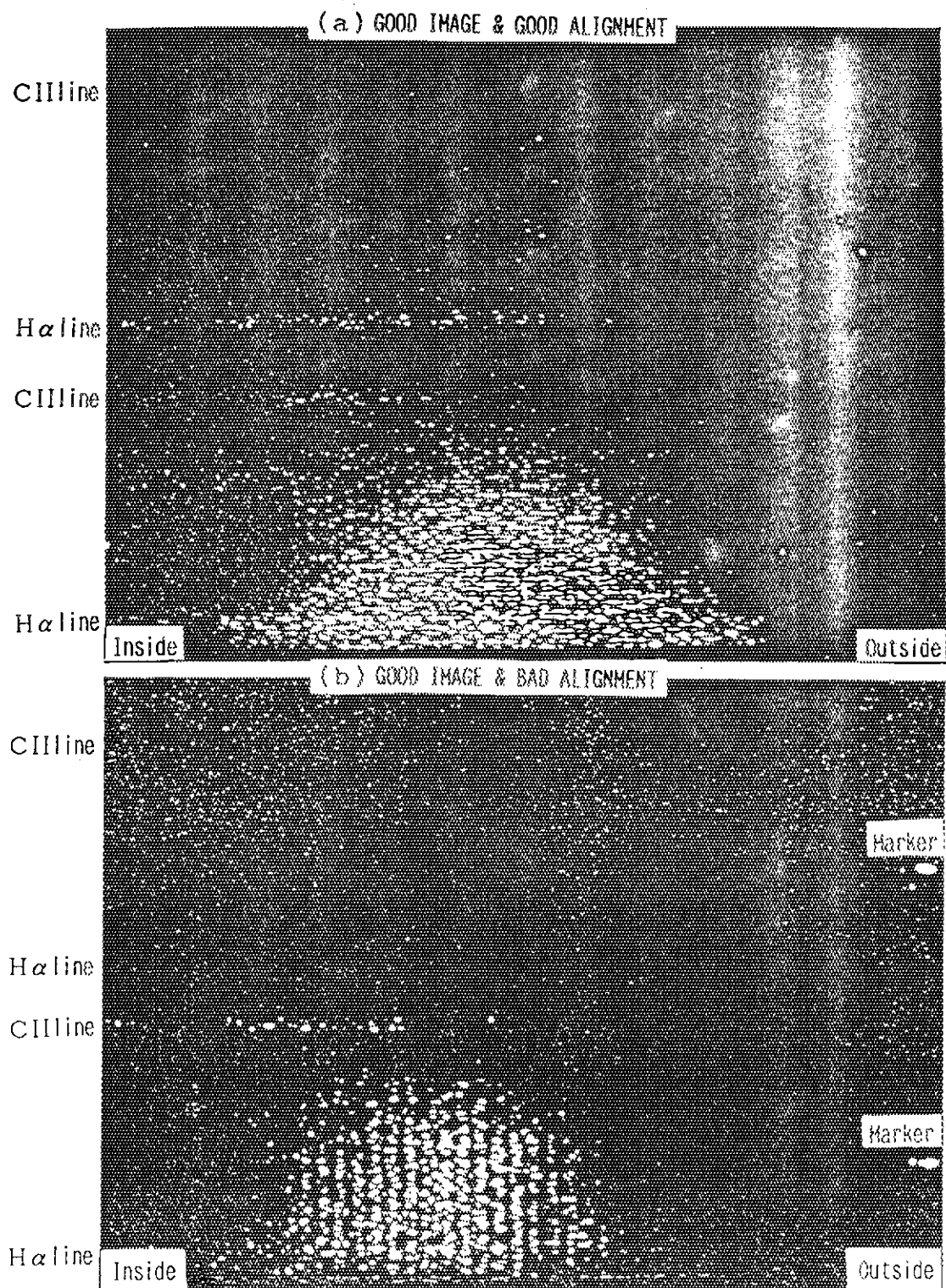


図8 トムソン散乱データ(a)最適時のモニター画面(横方向:プラズマの直径, 縦方向:短波長方向で2画面 -- 上画面:背景光, 下画面:散乱光)  
 (b)アライメントがずれた時のモニター画面, (c)さらに磁界で像がずれた時の電子密度分布(中心付近の分布)

(c) BAD IMAGE & BAD ALIGNMENT

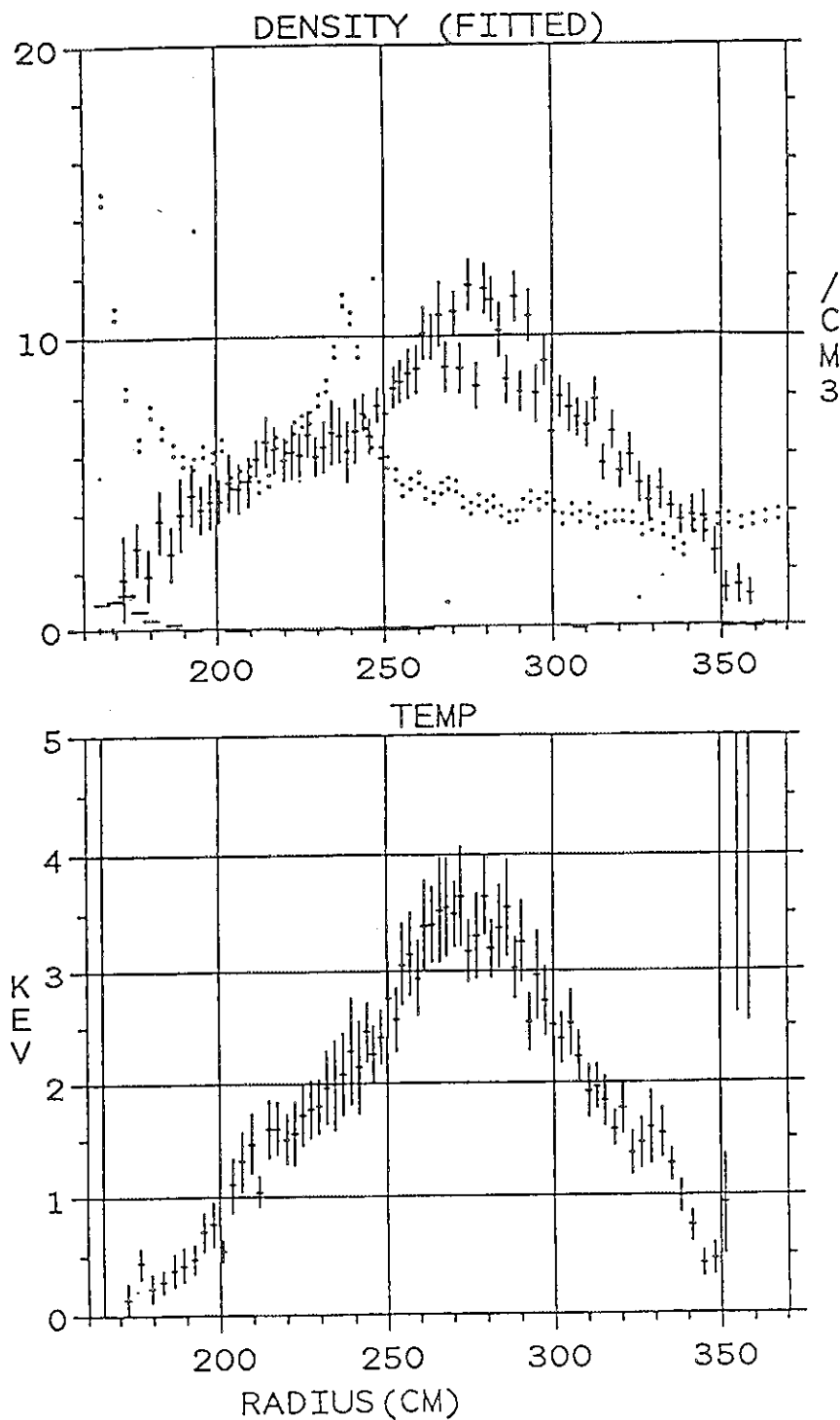


図8 (続 ぎ)