

JAERI-M

7931

ルビーレーザ光散乱計測用
レーザ発振装置の改良

1978年10月

山内 俊彦・熊谷 勝昭・河上 知秀
的場 徹・船橋 昭昌

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

ルビーレーザ光散乱計測用レーザ発振装置の改良

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

山内 俊彦・熊谷 勝昭・河上 知秀
的場 徹⁺・船橋 昭昌

(1978年9月30日受理)

JFT-2 および JFT-2 a (DIVA) トカマクプラズマの電子温度測定に使用されているルビーレーザ発振装置のこれまで行なわれた改良、ならびにルビーロッドおよびQスイッチ素子結晶のレーザー光による破壊について述べる。改良の主な点は発振段の直線形のキセノンランプをヘリカル形に交換したこと、およびQスイッチの電気回路を改良したことなどである。レーザの光学素子破壊については破壊原因を明確にするまでに至ってはいなが重要な問題点であり、実際の破壊のデータを中心によとめた。

+）大型トカマク開発部

JAERI-M 7931

Improvements of the Ruby Laser Oscillator System for Laser Scattering

Toshihiko YAMAUCHI, Katsuaki KUMAGAI, Tomohide KAWAKAMI, Tohru MATOBA⁺
and Akimasa FUNAHASHI

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 30, 1978)

A ruby laser oscillator system is used to measure electron temperatures of the Tokamak plasmas(JFT-2 and JFT-2a). Improvements have been made of the laser oscillator to obtain the correct values. Described are the improvements and the damages of a ruby rod and a KD*P crystal for Q-switching by laser beam. Improvement are the linear Xe lamp replaced by a helical Xe lamp and in the electrical circuit for Q-switching. The damage of an optical component by a laser beam should be clarified from the damage data; the cause is not found yet.

Keywords: Q-switching Circuit, Ruby Rod, KD_2PO_4 -Crystal, Helical Xenon Lamp, Delay Time, Ruby Laser Oscillator System, Optical Component Damage, System Improvement

+) Division of Large Tokamak Development

目 次

1. 序 言	1
2. 散乱計測用ルビーレーザ発振装置の改良	1
2.1 Qスイッチ駆動回路	1
2.2 発振段キセノン管の形式変更	3
2.3 冷却水温度安定化	3
2.4 防湿, 防塵対策	4
3. ルビーレーザ発振装置の光学素子破壊	4
3.1 ルビーロッド破壊	5
3.2 KD*P 結晶破壊	6
4. 検討および問題点	6
5. 謝 辞	7
参照文献	7
付 錄	9

C O N T E N T S

1. INTRODUCTION	1
2. IMPROVEMENTS OF LASER OSCILLATOR SYSTEM FOR RUBY LASER SCATTERING	1
2.1 ELECTRICAL CIRCUIT FOR Q-SWITCHING	1
2.2 EXCHANGE OF Xe LAMP TYPE	3
2.3 STABILIZATION OF COOLING WATER TEMPERATURE	3
2.4 COUNTERPLANS OF DAMPROOFING AND DUSTPROOFING	4
3. DAMAGE OF OPTICAL COMPONENTS IN RUBY LASER OSCILLATOR.....	4
3.1 DAMAGE OF RUBY ROD	5
3.2 DAMAGE OF KD*P CRYSTAL.....	6
4. DISCUSSION AND PROBLEM.....	6
5. CONCLUSION	7
ACKNOWLEDGMENT	7
REFERENCES	8
APPENDIX «DELAY TIME CHARACTERISTICS FROM LASER PULSE TILL Q-SWITCHING BECAUSE OF LASER CAVITY LOSS»	9

1. 序 言

原研トカマク装置 JFT-2 および JFT-2 a (DIVA) の電子温度分布の測定には、ルビーレーザ光散乱計測装置 (以下散乱装置と略す) ¹⁾が使用されている。この散乱装置は 1973 年 3 月に完成し、その後現在に致るまで JFT-2 および JFT-2 a 装置計測用にほぼ順調に稼動しており、両核融合実験装置における閉じ込めおよび加熱特性に関して有用な情報を提示している。その間、JFT-2, -2 a の計測と併行して、レーザ発振部、光学系信号処理系、JFT-2 および JFT-2 a の真空容器内部品 (ビューアングダンプ、スペッタリング防止用シャッター) の改良を図ってきた。このうちこの報告では、レーザ発振部に関して行なわれた改良について言及するものである。次章以下で述べる改良により、ノーマル発振の防止、発振レーザ光のジッターの減少、レーザ光のモード制御に関して目的を達した。

2. レーザ発振装置の改良

改良を行ったのは 4 点に分けられ、(1) Q スイッチ駆動回路、(2) 発振段の改良、(3) 冷却水温度安定化、(4) 防湿、防塵対策である。以下順次具体的に述べる。

2.1 Q スイッチ駆動回路

KD^{*}P 結晶にかかる $\lambda/4$ 電圧を瞬時に 0 V にし ジャイアントパルスを発生させる Q スイッチ駆動回路の、重要なポイントとして次の 4 つの項目を指摘することができる。

- (1) Q スイッチ時間のジッターが少ないこと。
- (2) Q スイッチ動作状態の時、KD^{*}P 結晶にかかる電圧が正確に 0 V になっていること。
- (3) ジャイアントパルス発生前後にノーマル発振パルスが生じないこと。
- (4) Q スイッチ駆動回路から電気的ノイズを発生しないこと。

本レーザ発振器は最初サイラトロンを使ったスイッチング回路を採用していたが、上記(4)の電気的ノイズが大きすぎ散乱光の信号処理回路が満足に働かなかった。またジャイアントパルス発生後に(3)のノーマル発振パルスが生じ、ジャイアントパルスのエネルギー測定に誤差を含んだ。そのためサイリスタによるスイッチング回路に変更し、一応電気的ノイズを減少させることができ、充分な信頼度を持ってレーザ散乱測定を行えるようになった。しかし(1)の発振パルスのジッターが大きく (約 600 nsec)、既設のデータ処理装置 (沖電気製)²⁾との結合に問題があるので、クライトロンによるスイッチング回路に更に変更した。その結果上記(1)から(4)までの性能を満足することができた。第 1 図(a), (b), (c) に今まで使用した 3 方式の回路を示し、

1. 序 言

原研トカマク装置 JFT-2 および JFT-2 a (DIVA) の電子温度分布の測定には、ルビーレーザ光散乱計測装置 (以下散乱装置と略す) が使用されている。¹⁾ この散乱装置は 1973 年 3 月に完成し、その後現在に致るまで JFT-2 および JFT-2 a 装置計測用にほぼ順調に稼動しており、両核融合実験装置における閉じ込めおよび加熱特性に関して有用な情報を提示している。その間、JFT-2, -2 a の計測と併行して、レーザ発振部、光学系信号処理系、JFT-2 および JFT-2 a の真空容器内部品 (ビューフィングダンプ、スパッタリング防止用シャッター) の改良を図ってきた。このうちこの報告では、レーザ発振部に関して行なわれた改良について言及するものである。次章以下で述べる改良により、ノーマル発振の防止、発振レーザ光のジッターの減少、レーザ光のモード制御に関して目的を達した。

2. レーザ発振装置の改良

改良を行ったのは 4 点に分けられ、(1) Q スイッチ駆動回路、(2) 発振段の改良、(3) 冷却水温度安定化、(4) 防湿、防塵対策である。以下順次具体的に述べる。

2.1 Q スイッチ駆動回路

KD^{*}P 結晶にかかる $\lambda/4$ 電圧を瞬時に 0 V にし ジャイアントパルスを発生させる Q スイッチ駆動回路の、重要なポイントとして次の 4 つの項目を指摘することができる。

- (1) Q スイッチ時間のジッターが少ないこと。
- (2) Q スイッチ動作状態の時、KD^{*}P 結晶にかかる電圧が正確に 0 V になっていること。
- (3) ジャイアントパルス発生前後にノーマル発振パルスが生じないこと。
- (4) Q スイッチ駆動回路から電気的ノイズを発生しないこと。

本レーザ発振器は最初サイラトロンを使ったスイッチング回路を採用していたが、上記(4)の電気的ノイズが大きすぎ散乱光の信号処理回路が満足に働かなかった。またジャイアントパルス発生後に(3)のノーマル発振パルスが生じ、ジャイアントパルスのエネルギー測定に誤差を含んだ。そのためサイリスタによるスイッチング回路に変更し、一応電気的ノイズを減少させることができ、充分な信頼度を持ってレーザ散乱測定を行えるようになった。しかし(1)の発振パルスのジッターが大きく (約 600 nsec)²⁾、既設のデータ処理装置 (沖電気製) との結合に問題があるので、クライトロンによるスイッチング回路に更に変更した。その結果上記(1)から(4)までの性能を満足することができた。第 1 図(a), (b), (c) に今まで使用した 3 方式の回路を示し、

第1表にそれぞれの比較を示す。次に最終的に採用したクライトロン方式の回路の特徴について述べる。

<クライトロン方式の回路>

本回路は第1図(c)に示すようにコンデンサー($0.011\mu F$)に充電した電荷をクライトロン(EG&G社製KN-6B)で放電させ、終端を短絡した遅延用同軸ケーブル(RG-188A/U)と負荷抵抗(50Ω)に電流を流す。遅延用同軸ケーブルの入力端A,Bには同軸ケーブル中を電流が往復する時間だけ電圧がかかる。一方、Qスイッチ素子のKD^{*}P結晶には常に電圧が印加($V_{A/4}=1.8\text{ kV}$)してあるが、同軸ケーブルA,B間に発生する逆方向の電圧で打ち消すことにより0Vにし、Qスイッチングする。このスイッチング電圧を正確に0Vとするにはクライトロンに常にかける電圧を調整して行うが、本回路ではさらにQスイッチ素子にダイオードを並列に結線しておいて、遅延用同軸ケーブルから発生する逆電圧を、少々マイナス方向に振り込む。その過大な振り込み分をダイオードの順方向抵抗で短絡することで0Vにしている。

本方式では、KD^{*}P結晶は遅延用同軸ケーブルの長さで決まる時間(ケーブルの遅延特性は $5\text{nsec}/\text{m}$ であり、ここでは約 200nsec)だけ0Vになり、共振器の尖鋭値Qを大きくできるので、ジャイアントパルス発生後のノーマル発振パルスが全く生じなくなった。このことはジャイアントパルスのエネルギー測定だけでなく、レーザ散乱測定においてレーザ光散乱測定直後(100nsec程度)のプラズマ光の測定(測定時間:100nsec~1μsec程度)にも非常に有用なことである。

クライトロンはキープアライブ放電をしている他に、⁶⁴Niのβ線を予備電離に使用しているので、放電の立ち上がりが非常に良い。このためQスイッチングのかかりが鋭くなり、発振のジッターが約30nsec以下と極めて小さくなった。第2図(a)にサイリスタを使った時のQスイッチングの電圧波形とレーザ発振波形を示し、同図(b)に本方式でのQスイッチングの電圧波形とレーザ発振波形を示す。第2図(b)においてKD^{*}P結晶にかかる電圧が0Vになってから約50nsec遅れジャイアントパルスが現われているが、この遅れは付録で後述するが、発振器の共振系で決まるパルスの成長時間でQ値の大小により変わる値である。この遅れの値は共振器内での反射及び光学素子のキズや焼けなどの損失項により増え、他方励起量の増大により減る。このためある程度のジッターは本質的に避けられないが、本方式では先に述べたクライトロンの立ち上がりが良いこと、Qスイッチング時、KD^{*}Pにかかる電圧が正確に一定時間0Vになっていることなどにより安定な発振特性が得られている。

次に本回路の電気ノイズ対策について述べる。電気ノイズはクライトロンの放電により発生する。このノイズを外部に出さないため次の処置をした。

- (1) Qスイッチ回路部を厚さ2mmの銅板で作ったシールドケースに入れた。また電源などの入出力部は2重シールドの構造にした。
- (2) Qスイッチ回路に導入する電源は貫通型コンデンサーとトロイダルコイルを使ったフィルターを通した。
- (3) Qスイッチングのためのトリガーを光入力とし、長さ20cmの光ファイバーを通じて行うこととした。
- (4) KD^{*}P結晶への配線は2重被覆線を使い、この配線からの電磁輻射を極力小さくした。

以上のシールド対策の結果、電気ノイズは約1/70に減少した。ここで残留電気ノイズの周波数は1~20MHzの間であり、KD^{*}P結晶の電極部から輻射していることが判った。このノイズレベルはレーザ散乱計測でほとんど問題にならない値である。

2.2 発振段の改良

以下に示す理由により、発振器のキセノン管を直管型からヘリカル型に変更した。

従来、第3図(a)に示すように直管型キセノン管と楕円形反射筒を使ってルビーロッドを励起していたが、キセノン管とルビーロッドを正確に反射筒の楕円焦点へ設置することが機構的に難かしく、ルビーロッドを均一に励起することが困難であった。そのため例えば第4図(a)に示すように発振パターンはあまり良くなかった。同図のようにレーザエネルギーの空間的不均一が生じていると、エネルギーの集中した箇所でルビーロッド端面が破損したり、レーザ光をプラズマまで導くレンズやプリズムの無反射コーティングの焼けがたびたび生じるので装置の運転保守上大きな問題となった。

改良後の発振器を第3図(b)に示す。キセノン管をヘリカル型(型式: FX-96C)に変え、ルビーロッドも従来の $10\phi \times 100\ell$ から $12.5\phi \times 150\ell$ と変えた。また、ルビーロッドと偏光子の間に 9ϕ の円形開口を入れた。

この改良により発振パターンは第4図(b)に示すごとく良くなり、空間的に均一に発振するようになった。これはキセノン管をヘリカル型に変えたため、改良前より太いルビーロッドでも均一に励起することができるようになったためと、円形開口により横モードを制御しルビーロッド中心部の励起の一様な部分を使用しているためである。この改良の結果、ルビーロッドの破損、レンズやプリズムの焼けは生じなくなった。

なおこの改良でヘリカル型キセノン管に変えたが、トリガーとして非常に高い電圧(約10KV)をかける必要があるため、点灯時に大きな電気ノイズが発生する。この電気ノイズに対しては散乱装置のシーケンスや散乱計測上有効な対策が行なわれ、実際の計測上に問題は生じていない。しかし、他の計測装置に影響を与えた場合、レーザ散乱の計測システムをより複雑にしているので、できるだけ電気ノイズを減少させるよう今後対策を立てる必要がある。第2表に今回行った改良点をまとめて示す。

2.3 冷却水温度安定化

冷却水の温度および水圧の変化がレーザパルスのエネルギー、パターンおよび半値幅に影響することが判った。このメカニズムとして、(1)ルビーロッド自身の温度変化によるもの、(2)水温および水圧の変化によりルビーロッドを保持しているもの、たとえばデルリン製のケースが歪みルビーロッドの整合位置からのずれが生ずる、等が考えられる。この対策として今回、冷却水の温度を安定化させるために、冷却水入口部に温度制御用補助ヒーターを取り付ける改良を行った。

冷却水は常に20°Cで使用するように設計されているが、冷却器ヒーターの容量不足や冷却器

からレーザ発振器までの配管が約30mと長いことなどで、冷却水温度が規定値まで上がらないことがたびたびあった。また同様の理由により温度の安定度が悪かった。補助ヒーターはシースヒータ型で200V, 2kWの容量があり、温度検出器は白金抵抗素子を使っている。温度制御器はユーロサム・ジャパン製(021型)であり、冷却水を±0.5°Cで制御することが可能となった。そして、この改良により冬期の冷却水温度低下による発振不能が無くなり、発振パターンも安定になった。

一方、前節2.2で述べた発振段の改良で、ルビーロッドとキセノン管が冷却水に囲まれる形式となった。そのため発振段部の冷却水容量が増え、さらに冷却水の流量が配管抵抗などあまり大きくなること($2\ell/\text{min}$)もあって発振段の冷却水出口温度が、レーザ発振後元にもどるまでに約2分間はかかっている。その1例を第4図に示す。このためレーザ発振間隔を2分以上あける必要がある。この対策としては、冷却器をレーザ発振器の近くにもってきて配管抵抗を小さくすることである。

現在は、JFT-2建屋大実験室内諸設備との空間的取り合いのため、冷却器は発振器から約20m離れた場所に置かれている。冷却器を発振器により近づけることにより、夏期の冷却能力不足にも役立つものと思われる。

2.4 防湿・防塵対策

レーザ装置専用の実験室は普通、空調された無塵の部屋が使われる。よく知られているように冷却水温度より部屋の温度が高いと、ルビーロッド端面が結露して損失が増加し、発振不良や発振パターンが悪くなる。また高電圧部の絶縁も悪くなる。また塵はルビーロッド端面やレンズ等に付着して、それらのレーザ光吸収による光学素子の焼けや破損の原因となる。

レーザ散乱測定装置はJFT-2建屋大実験室に設置してあるが、この部屋はかなり大きく、多くの各種装置が密集し、空調や防塵効果は不十分である。そのためレーザ発振器を透明硬質塩化ビニールおよびアルミニウム製の密閉容器(高さ: 30cm, 幅: 40cm, 長さ: 200cm)に入れることにした。容器内にはシリカゲルを入れ、湿度を下げるようにした。

この防湿・防塵対策により、梅雨期でも安定したレーザ発振が行なえるようになり、またルビーロッドの破壊の減少にも役立った。

3. ルビーレーザ発振装置の光学素子破壊

高出力レーザにおける光学素子の破壊は非常に深刻な問題であるが、その破壊機構に対する詳しい理論はほとんど未知と言える。破壊は2.4節でもふれたように、共振器ミラー、非線形光学素子、ルビーロッド、ビームスプリッターおよびレンズなど全ての光学素子に生じている。しかし、その破壊現象の究明が進展しない理由として、1.均一な品質の光学素子を得にくいこと、2.実験室を完全に無塵化することが困難なこと、3.レーザ光のモードを TEM_{00} モードおよび単一縦モードで行う等の実験的配慮に欠けるため再現性の良い実験ができないこと、4.破壊

からレーザ発振器までの配管が約30mと長いことなどで、冷却水温度が規定値まで上がらないことがたびたびあった。また同様の理由により温度の安定度が悪かった。補助ヒーターはシースヒータ型で200V, 2kWの容量があり、温度検出器は白金抵抗素子を使っている。温度制御器はユーロサム・ジャパン製(021型)であり、冷却水を±0.5°Cで制御することが可能となった。そして、この改良により冬期の冷却水温度低下による発振不能が無くなり、発振パターンも安定になった。

一方、前節2.2で述べた発振段の改良で、ルビーロッドとキセノン管が冷却水に囲まれる形式となった。そのため発振段部の冷却水容量が増え、さらに冷却水の流量が配管抵抗などあまり大きくないこと(2ℓ/min)もあって発振段の冷却水出口温度が、レーザ発振後元にもどるまでに約2分間はかかっている。その1例を第4図に示す。このためレーザ発振間隔を2分以上あける必要がある。この対策としては、冷却器をレーザ発振器の近くにもってきて配管抵抗を小さくすることである。

現在は、JFT-2建屋大実験室内諸設備との空間的取り合いのため、冷却器は発振器から約20m離れた場所に置かれている。冷却器を発振器により近づけることにより、夏期の冷却能力不足にも役立つものと思われる。

2.4 防湿・防塵対策

レーザ装置専用の実験室は普通、空調された無塵の部屋が使われる。よく知られているように冷却水温度より部屋の温度が高いと、ルビーロッド端面が結露して損失が増加し、発振不良や発振パターンが悪くなる。また高電圧部の絶縁も悪くなる。また塵はルビーロッド端面やレンズ等に付着して、それらのレーザ光吸収による光学素子の焼けや破損の原因となる。

レーザ散乱測定装置はJFT-2建屋大実験室に設置してあるが、この部屋はかなり大きく、多くの各種装置が密集し、空調や防塵効果は不十分である。そのためレーザ発振器を透明硬質塩化ビニールおよびアルミニウム製の密閉容器(高さ: 30cm, 幅: 40cm, 長さ: 200cm)に入れることにした。容器内にはシリカゲルを入れ、湿度を下げるようとした。

この防湿、防塵対策により、梅雨期でも安定したレーザ発振が行なえるようになり、またルビーロッドの破壊の減少にも役立った。

3. ルビーレーザ発振装置の光学素子破壊

高出力レーザにおける光学素子の破壊は非常に深刻な問題であるが、その破壊機構に対する詳しい理論はほとんど未知と言える。破壊は2.4節でもふれたように、共振器ミラー、非線形光学素子、ルビーロッド、ビームスプリッターおよびレンズなど全ての光学素子に生じている。しかし、その破壊現象の究明が進展しない理由として、1.均一な品質の光学素子を得にくいこと、2.実験室を完全に無塵化することが困難なこと、3.レーザ光のモードをTEM₀₀モードおよび単一縦モードで行う等の実験的配慮に欠けるため再現性の良い実験ができないこと、4.破壊

の現象が本来確率的なものであり信頼性のある実験データを得るために非常に多くの実験データを積重ねる必要があること等が考えられる。

光学素子の破壊は表面に生ずる時と内部に生ずる時があり、それを表面破壊および内部破壊と呼ぶ。表面破壊は電子なだれ破壊により生じ、内部破壊は含有不純物、レーザ光の self-focusing および電子なだれ破壊により生ずると一般的に考えられている。

3.1 ルビーロッド破壊

本レーザ装置は発振段、增幅段Ⅰ、増幅段Ⅱで構成されている。その中で破壊の回数が多いのはルビーロッドである。それはレーザ散乱の実験終了時に発見されるロッド端面の焼けや小さい穴ができる破壊、実験途中でレーザ発振が不能になるようなロッド端面の大きな穴や亀裂ができる破壊がある。前者の焼けや小さい穴はロッドが発振段の場合は発振パターンの悪化となるが破壊の進展は遅いようである。増幅段の場合は発振段と同様発振パターンの悪化となる。その上破壊は急速に進展する。後者の大きな破壊は前者の小さい破壊から進展した場合と单一の高出力レーザ光の吸収による場合がある。单一の場合はレーザ光が最も強い最終段で生ずることが多い。これらは表面破壊に相当する。その他にロッド内部に白いすじができる破壊がある。それは内部破壊に相当するが破壊しきい値は表面破壊より高いと思われる。やや特異な例として、第6図に破壊した増幅段Ⅰのルビーロッド端面の写真を示す。同図からルビーロッドの周囲の一部に破壊が生じているが、この様な破壊の仕方は今回が初めてである。これは前述の表面破壊に相当するが、原因として、ロッド支持金具へのレーザ光照射によるルビー棒端面への金属粒子付着が考えられる。その金属粒子はレーザ光を吸収してプラズマ化し、次いでロッドに破壊が及ぶ表面破壊である。しかし入射レーザ光の周囲でもあるのでレーザエネルギーも弱く一般的にはこの様な破壊が生じないものと思われるが、チルト角を取っている端面からの反射光が上述の作用をしていると考えられる。さらに他の原因として表面研磨の不十分さが考えられる。ロッドは焼けや破壊が生ずると研磨するが、その時端面の中央部はきれいに仕上げても、周囲に目に見えないようなキズが生じていることがある。また研磨のくり返しにより周囲に歪が生成し破壊しやすくなっていた可能性が考えられる。

実験上非常に問題となっているロッドの破壊に対する対策は以下に述べる4点が考えられる。
 1. 空気中の浮遊粒子の吸着による焼けや破壊を防ぐためにレーザ装置を清浄な場所に設置すること。これは2.4節で述べたように密封容器にレーザ装置を入れることにより多少満足されている。しかしキセノン管交換時等には浮遊粒子が付着する欠点がある。2. レーザ光が局的に強い発振を示さないようにすること。これはレーザ装置のアライメントの取り方、および発振パターンの検出によるキセノン管入力の調整により改善される。3. ルビーロッド以外の場所にレーザ光が照射されないこと。発振段は虹彩型円形開口を入れてロッドの中心部分だけを使いビームを絞って発振させ円形でかつ空間的に均一な発振パターンを作っている。また増幅段Ⅰ、Ⅱのロッドの入口にも色ガラス製の円形開口をつけレーザ光がロッドの周辺部に入射しないようにした。4. ロッドの選択および研磨に注意を払うこと。ロッドの選択時には歪や空間的均一性に心を配り、研磨した端面は平面度の検定やキズ等の顕微鏡観察をするようにしなければならない。

らない。

3.2 KD^{*}P結晶破壊

光学素子破壊で重要なものの一つに前述のもの以外にQスイッチ素子破壊がある。本装置で現在使用されているQスイッチ素子はKD^{*}P結晶である。この結晶は吸水性があり取扱いには十分な注意が必要である。手でふれることはもちろんできず、発振段に設置する時には乾燥した部屋で息をふきかけないよう注意して、シリカゲルの入った箱に入れ共振器内に取り付ける。この素子はジャイアントパルスを作り出す重要な役目をしている。KD^{*}P結晶を動かす電源については2.1節で述べた。

KD^{*}P結晶の損傷の特徴としては両端面が焼けること、および結晶中に破壊の白いすじができることがある。ロッドの表面破壊と同様、両端面の焼けがより生じやすい。だが焼けから破壊に移ったことはまだない。内部に生じた細い白いすじは、マルチモード発振における多くのフィラメント発振の中に強いフィラメント発振が1本程度存在したために生じたように思われる。この内部破壊から結晶がこわれてしまい使用不可になったことはないが、そこでフィラメント発振ができないために発振パターンは悪化する。また表面などの損傷は共振器内部の損失を増加させることになり、レーザ光発振の時間を遅らせる結果となる。これについては付録で述べる。

この破壊を防ぐ方法として3.1節の1.2.4が同様に実行されている。その他に結晶表面を空気中にさらさぬよう、屈折率の整合のとれたオイル中にKD^{*}P結晶を取り付けることも考えている。

4. 検討および問題点

レーザ発振器の改良の結果、レーザ散乱測定による電子温度の精度ばかりでなく実験の稼動率も向上させることができた。それゆえJFT-2, -2aトカマクプラズマの電子温度の測定を順調に行っている。それぞれの節で検討を行っているので、本章では問題点だけを列挙し、それについて検討する。

- (1) モードを改善するためにKD^{*}P結晶を現在の短形から円柱型に変更すること。
3)
(CRE方式)

この変更は結晶中の電界分布をより均一にするため、光子の立上がりを良くしモードが良くなると思われる。

- (2) 表面破壊、内部破壊の現象を明確にすること。

ロッドに多種の損失やキズを付け、破壊現象を調べることが必要である。そして破壊したものを分類し比較検討して対策を考える必要があろう。

- (3) 破壊素子検出の必要性

ロッド等、光学素子は破壊初期に発見できればわずかな研磨で再利用できる。しかし遅れるとなれば表面破壊から内部に破壊が進展し端面からかなりの長さにわたって切断しなければならなくなる。

らない。

3.2 KD^{*}P 結晶破壊

光学素子破壊で重要なものの一つに前述のもの以外にQスイッチ素子破壊がある。本装置で現在使用されているQスイッチ素子はKD^{*}P結晶である。この結晶は吸水性があり取扱いには十分な注意が必要である。手でふれることはもちろんできず、発振段に設置する時には乾燥した部屋で息をふきかけないよう注意して、シリカゲルの入った箱に入れ共振器内に取り付ける。この素子はジャイアントパルスを作り出す重要な役目をしている。KD^{*}P結晶を動かす電源については2.1節で述べた。

KD^{*}P 結晶の損傷の特徴としては両端面が焼けること、および結晶中に破壊の白いすじができることがある。ロッドの表面破壊と同様、両端面の焼けがより生じやすい。だが焼けから破壊に移ったことはまだない。内部に生じた細い白いすじは、マルチモード発振における多くのフィラメント発振の中に強いフィラメント発振が1本程度存在したために生じたように思われる。この内部破壊から結晶がこわれてしまい使用不可になったことはないが、そこでフィラメント発振ができないために発振パターンは悪化する。また表面などの損傷は共振器内部の損失を増加させることになり、レーザ光発振の時間を遅らせる結果となる。これについては付録で述べる。

この破壊を防ぐ方法として3.1節の1.2.4が同様に実行されている。その他に結晶表面を空気中にさらさぬよう、屈折率の整合のとれたオイル中にKD^{*}P結晶を取り付けることも考えている。

4. 検討および問題点

レーザ発振器の改良の結果、レーザ散乱測定による電子温度の精度ばかりでなく実験の稼動率も向上させることができた。それゆえJFT-2, -2aトカマクプラズマの電子温度の測定を順調に行っている。それぞれの節で検討を行っているので、本章では問題点だけを列挙し、それについて検討する。

- (1) モードを改善するためにKD^{*}P結晶を現在の短形から円柱型に変更すること。
3)
(CRE方式)

この変更は結晶中の電界分布をより均一にするため、光子の立上がりを良くしモードが良くなると思われる。

- (2) 表面破壊、内部破壊の現象を明確にすること。

ロッドに多種の損失やキズを付け、破壊現象を調べることが必要である。そして破壊したものを分類し比較検討して対策を考える必要があろう。

- (3) 破壊素子検出の必要性

ロッド等、光学素子は破壊初期に発見できればわずかな研磨で再利用できる。しかし遅れると表面破壊から内部に破壊が進展し端面からかなりの長さにわたって切断しなければならなく

なり、高価なロッドが短かくなってしまう。現在は発振パターンの悪化検査や、神経質なほどの点検で極力ロッド破壊を防いでいる。しかし発振パターンが悪化する時には中期的症状と考えなければならない。

破壊初期検出の方法としてはHe-Neレーザ光を各段のロッドに通しその透過率及び表面での散乱を測定することが考えられるが装置全体が複雑化する欠点がある。

さらにTEM₀₀モード発振、単一縦モード発振を行うことは破壊の減少に加えてビームパターンの改善、ビーム発散角の減少等レーザ装置全体に良い結果をもたらすことが考えられる。⁴⁾

5. 結 言

本報告で述べたレーザ装置の改良により、改善された点は次の通りである。

- (1) レーザ光の発振パターンが良くなつたこと。
- (2) 発振が安定し、ミスショットがなくなつたこと。
- (3) 雑音が減少できしたこと。
- (4) 発振段の出力が高くなつたこと。
- (5) ルビーロッドなど光学素子の破壊が減ったこと。

以上の結果、信号処理系のS/N比が改善し、測定データの信頼度が向上した。⁵⁾

また、ロッド破壊に対する注意点として以下のことが考えられる。

- (1) 発振パターンを安定させ、エネルギーの局部集中を防ぐこと。
- (2) ロッドの周囲に強いレーザ光が当らないようにすること。
- (3) ロッドの端面研磨を注意深く行うこと。
- (4) 作業は清浄な部屋で行うこと。および清浄な空間にレーザ装置を設置すること。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり暖かい御支援をいただいた核融合推進センター森 茂センター長、核融合研究部小幡行雄部長に感謝いたします。また、プラズマ実験研究室田中裕二室長には多大な御助言をいただき感謝いたします。当実験研究室計測グループ莊司照朗氏にはデータ処理装置との接続に関して有益な御助言をいただきました。さらにNEC川崎工場、量子装置部米川氏、磯部氏にはおしみない御助力をいただきました。

なり、高価なロッドが短かくなってしまう。現在は発振パターンの悪化検査や、神経質なほどの点検で極力ロッド破壊を防いでいる。しかし発振パターンが悪化する時には中期的症状と考えなければならない。

破壊初期検出の方法としてはHe-Neレーザ光を各段のロッドに通しその透過率及び表面での散乱を測定することが考えられるが装置全体が複雑化する欠点がある。

さらにTEM₀₀モード発振、単一縦モード発振を行うことは破壊の減少に加えてビームパター⁴⁾ーンの改善、ビーム発散角の減少等レーザ装置全体に良い結果をもたらすことが考えられる。

5. 結 言

本報告で述べたレーザ装置の改良により、改善された点は次の通りである。

- (1) レーザ光の発振パターンが良くなつたこと。
- (2) 発振が安定し、ミスショットがなくなつたこと。
- (3) 雑音が減少できしたこと。
- (4) 発振段の出力が高くなつたこと。
- (5) ルビーロッドなど光学素子の破壊が減ったこと。

以上の結果、信号処理系のS/N比が改善し、測定データの信頼度が向上した。⁵⁾

また、ロッド破壊に対する注意点として以下のことが考えられる。

- (1) 発振パターンを安定させ、エネルギーの局部集中を防ぐこと。
- (2) ロッドの周囲に強いレーザ光が当らないようにすること。
- (3) ロッドの端面研磨を注意深く行うこと。
- (4) 作業は清浄な部屋で行うこと。および清浄な空間にレーザ装置を設置すること。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり暖かい御支援をいただいた核融合推進センター森茂センター長、核融合研究部小幡行雄部長に感謝いたします。また、プラズマ実験研究室田中裕二室長には多大な御助言をいただき感謝いたします。当実験研究室計測グループ莊司照朗氏にはデータ処理装置との接続に関して有益な御助言をいただきました。さらにNEC川崎工場、量子装置部米川氏、磯部氏にはおしみない御助力をいただきました。

なり、高価なロッドが短かくなってしまう。現在は発振パターンの悪化検査や、神経質なほど
の点検で極力ロッド破壊を防いでいる。しかし発振パターンが悪化する時には中期的症状と考
えなければならない。

破壊初期検出の方法としてはHe-Neレーザ光を各段のロッドに通しその透過率及び表面で
の散乱を測定することが考えられるが装置全体が複雑化する欠点がある。

さらにTEM₀₀モード発振、単一縦モード発振を行うことは破壊の減少に加えてビームパタ
ーンの改善、ビーム発散角の減少等レーザ装置全体に良い結果をもたらすことが考えられる。⁴⁾

5. 結 言

本報告で述べたレーザ装置の改良により、改善された点は次の通りである。

- (1) レーザ光の発振パターンが良くなつたこと。
- (2) 発振が安定し、ミスショットがなくなつたこと。
- (3) 雑音が減少できしたこと。
- (4) 発振段の出力が高くなつたこと。
- (5) ルビーロッドなど光学素子の破壊が減ったこと。

以上の結果、信号処理系のS/N比が改善し、測定データの信頼度が向上した。⁵⁾

また、ロッド破壊に対する注意点として以下のことが考えられる。

- (1) 発振パターンを安定させ、エネルギーの局部集中を防ぐこと。
- (2) ロッドの周囲に強いレーザ光が当らないようにすること。
- (3) ロッドの端面研磨を注意深く行うこと。
- (4) 作業は清浄な部屋で行うこと。および清浄な空間にレーザ装置を設置すること。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり暖かい御支援をいただいた核融合推進センター森 茂センター長、
核融合研究部小幡行雄部長に感謝いたします。また、プラズマ実験研究室田中裕二室長には多
大な御助言をいただき感謝いたします。当実験研究室計測グループ莊司照朗氏にはデータ処理
装置との接続に関して有益な御助言をいただきました。さらにNEC川崎工場、量子装置部米川
氏、磯部氏にはおしみない御助力をいただきました。

参 考 文 献

- (1) 的場, 船橋, 安藤: JAERI-M 5515 (1974)
- (2) 荘司, 河上, 船橋, 嶋田: JAERI-M 7456 (1978)
- (3) L. L. Steinmetz, T. W. Pouliot and B. C. Johnson: Appl Optics, 12, 1468 (1973)
- (4) 山内, 的場, 船橋: JAERI-M 6587 (1976)
- (5) DIVA Grop : To be published in Nucl. Fusion, 18 (1978) No. 11 or No. 12.
· YAMAMOTO, S., MAEDA, H., SHIMOMURA, Y., ODAJIMA, K., NAGAMI, M., et al.: in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 8 th Europ. Conf., Prague, 1977), 1, 33 (1977).
· MAEDA, H., et al.: The 7 th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (1978), Innsbruk, paper IAFA-CN-T-3-1
· KONOSHIMA, S., et al.: The 7 th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (1978), Innsbruk, paper IAEA-CN-A-4-2.

付 錄

《共振器内の損失増加による発振パルスの遅れ特性》

レーザ共振器内における損失の増加により発振パルスの遅れ現象が実験的に確かめられたので報告する。また、NEC府中工場、葉王氏らのYAGレーザ装置を使っての実験から、励起電圧を上げると発振パルスが早く生ずることが確かめられている。

実験方法は、ガラス板を用意してそれを1枚ずつ共振器内に挿入し、Qスイッチングしてから発振パルスの立上がりまでの時間を測定した。Qスイッチングは140nsecの間しており、ルビーロッドは $100\ell \times 10\phi$ の交換前の細いロッドを使用した。得られた結果を図7に示す。同図からガラス板の挿入により発振パルスは順次遅延するのが見られる。ガラス板の挿入0枚で検光子やKD*P結晶などによりガラス板は13枚入っていることに相当している。それゆえ挿入0枚でも遅れて発振パルスが発生している。

ところでキセノン管での励起によりルビーロッドの粒子分布は逆転する。

逆転比 η 、共振器内の光子密度 ϕ に対する基本式は

$$\frac{d\eta}{dt} = \omega_p (1 - \eta) - \omega_s (1 + \eta) - \omega_i \phi \eta \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\phi (\gamma_s + \gamma_o(t)) + \omega'_s (1 + \eta) + \omega_i \phi \eta \quad (2)$$

である。ここで ω_p 、 ω_s 、 ω_i 、 γ_s 、 $\gamma_o(t)$ そして ω'_s はそれぞれ励起確率、自然放出確率、誘導放出確率、回折や散乱や吸収などの損失比、出力側ミラーを通して放出されるエネルギーによる損失比、そして準位2からの自然放出 ω_s のうちレーザ光に加わる割合を示す。解析は $t > 0$ を行う。それより以前の状態は逆転比の最終状態 $\eta = \eta_0$ を作るのみである。 ω_p 、 ω_s 、 ω'_s に対しジャイアントパルスは十分早く生ずる。ゆえに上式は

$$\frac{d\phi}{dt} = -\omega_i \phi \eta \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\phi (\gamma_s + W_2) + \omega_i \phi \eta \quad (4)$$

* $\eta = \frac{n_1 - n_0}{n_0 + n_1}$: n_0 …基底準位にある粒子数、 n_1 …励起準位にある粒子数

$\phi = \frac{2\phi}{N}$: ϕ …光子密度 (photons/cm³), $N = n_0 + n_1 \sim 10^{19}$ 個/cm³ (0.05% 重の Cr³⁺)

となる。ここで $\gamma_0(t) = W_2$ は Q スイッチングして高い Q 値になった時の損失である。逆転比のしきい値は(4)式から

$$\eta_t = \frac{\gamma_s + W_2}{\omega_i} \quad (5)$$

となる。初期は $\eta = \eta_0$, $\phi = \phi_i$ とし、誘導放出が盛んになる時の光子密度を $\phi = \phi_d$ とすれば、(4)式を使って ϕ_d になるまでの時間を遅れ時間として解くと

$$t = \frac{\ell_n(\frac{\phi_d}{\phi_i})}{(\eta_0 - \eta_t)\omega_i} \quad (6)$$

となる。ここで ϕ_i と ϕ_d を見積もる。まず、(2)式で $\eta = \eta_0$ で $d\phi = 0$ とすれば

$$\phi_i = \frac{(1+\eta_0)(\omega_s/\omega_i)}{\eta_0 - \eta_t} \quad (7)$$

となる。また次に(1)式から $d\eta/\eta$ を求め、それが ϕ_d で大きな負になっているので

$$\phi_d \gg \frac{1}{\omega_i} [\omega_p(\frac{1-\eta_0}{\eta_0}) - \omega_s(\frac{1+\eta_0}{\eta_0})] \quad (8)$$

となる。

次に損失比を見積もる。前面ミラー R_1 , 後面ミラー R_2 , ルビーピークの吸収による損失, 插入ガラスによる反射損失を考える。ゆえに

$$\eta_t \omega_i = W_2 + \gamma_s \\ = \frac{-c}{2(\mu L_1 + L_2)} (\ell_n R_1 R_2 + \ell_n (T)^{2n} + \frac{\alpha_s c}{\mu}) \quad (9)$$

である。ここで μ はルビーロッドの屈折率, c は真空中の光速度, L_1 , L_2 はルビーピークの長さおよびルビーピークを除いた共振器長である。 n は前に述べたガラス板の枚数, T はガラス板の透過率および α_s はルビーピークの吸収係数である。

まず η_t を求める。 $\mu = 1.5$, $L_1 = 10\text{cm}$, $L_1 + L_2 = 60\text{cm}$, $R_1 = 30\%$, $R_2 = 100\%$, $T = 92\%$, $n = 13$ 枚, $\alpha_s = 0.031\text{ cm}^{-1}$ および $\omega_i = 3.5 \times 10^9 \text{ sec}^{-1}$ を代入して

$$\eta_t = 0.33 \quad (10)$$

となる。初期の逆転比は測定した出力エネルギーが 0.9 J 程度であることから

$$E = \frac{1}{2} N h \nu (\eta_0 - \eta_t) V \quad (11)$$

を使い

$$\eta_0 = 0.41 \quad (12)$$

となる。ここでEは出力エネルギー、Nはクロムイオン濃度、hはプランク定数、vはレーザ光の振動数、およびVはロッドの体積である。

次に ϕ_i と ϕ_d は $\omega_s^2/\omega_i \approx 10^{-15}$ 、 $\omega_p = 540 \text{ sec}^{-1}$ 、および $\omega_s = 230 \text{ sec}^{-1}$ を代入すれば

$$\phi_i = 2 \times 10^{-14} \quad (13)$$

$$\phi_d \gg 1.5 \times 10^{-9} \quad (14)$$

となる。ゆえに(6)式に(10)式、(12)式、(13)式および(14)式の値を代入すると遅れ時間は

$$t = 40 \text{ nsec} \quad (15)$$

となる。次に挿入したガラスはよごれや設置方法により透過率が悪くなっている、65%程度であると考えられるのでその値を代入して計算する。まず1枚の時逆転比のしきい値は

$$\eta_t = 0.36 \quad (16)$$

となる。ここで励起電源の電圧は変化なく前と同様であるので、 η_t は同じ値である。ゆえに遅れ時間は

$$t = 60 \text{ nsec} \quad (17)$$

となる。同様に2枚挿入した時、逆転比は

$$\eta_t = 0.38 \quad (18)$$

となり遅れ時間は

$$t = 123 \text{ nsec} \quad (19)$$

となる。実験結果と理論値を第7図に示す。同図から両者はよい一致を示している。

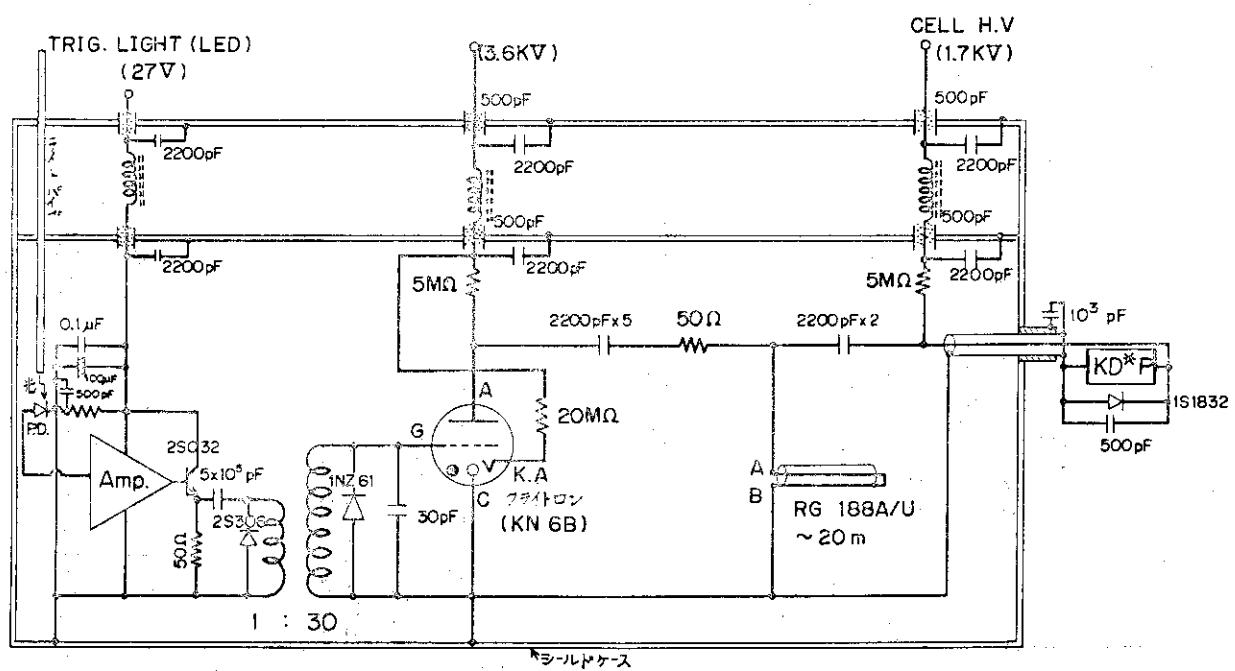
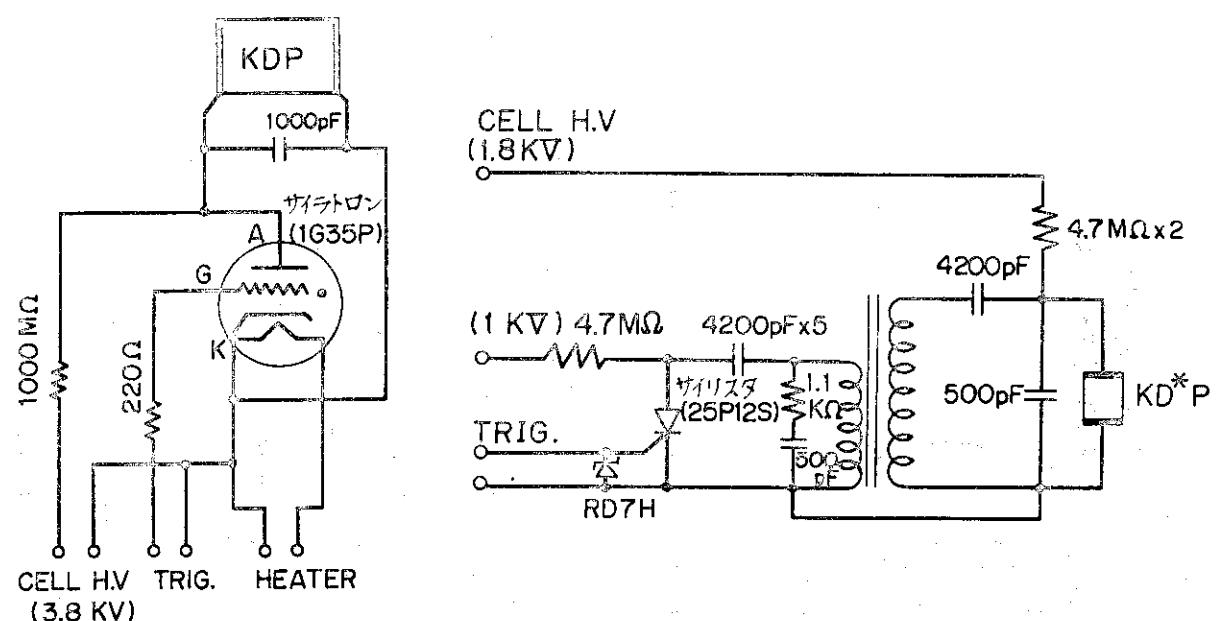
ゆえに(6)式からも判るように、共振器内に損失を入れた時、あるいは損失が増えた時、発振パルスは遅れる。また、(6)式から判るように励起電源の電圧を上げて初期逆転比を高めれば発振パルスは早くなる。

第1表 Qスイッチ回路の比較表

	サイラトロンを 使用した回路	サイリスタを 使用した回路	クライトロンを 使用した回路
Qスイッチ素子	KDP	KD* P	KD* P
スイッチング素子	サイラトロン (1G 35P)	サイリスタ (25P 12S)	クライトロン (KN-6B)
$\frac{\lambda}{4}$ 電圧	3.8 KV	1.8 KV	1.8 KV
スイッチング電圧	3.8 KV	1 KV	3.8 KV
回路方式	$\frac{\lambda}{4}$ 電圧短絡式	減衰波印加 O クロス式 (昇圧トランジスト付)	遅延ケーブルによる矩形波 逆電圧印加式 (O点クラン フダイオード付)
スイッチングノイズ	大	小	小
発振タイミング ジッター	小	大	小
ノーマル発振	有	無	無
性 能	ノイズで発振 しないことが多い	発振パルスのジッター が多く計算機による データ処理が困難である	ノイズ、誤発振がなく、計算機 によるデータ処理で実験ができる

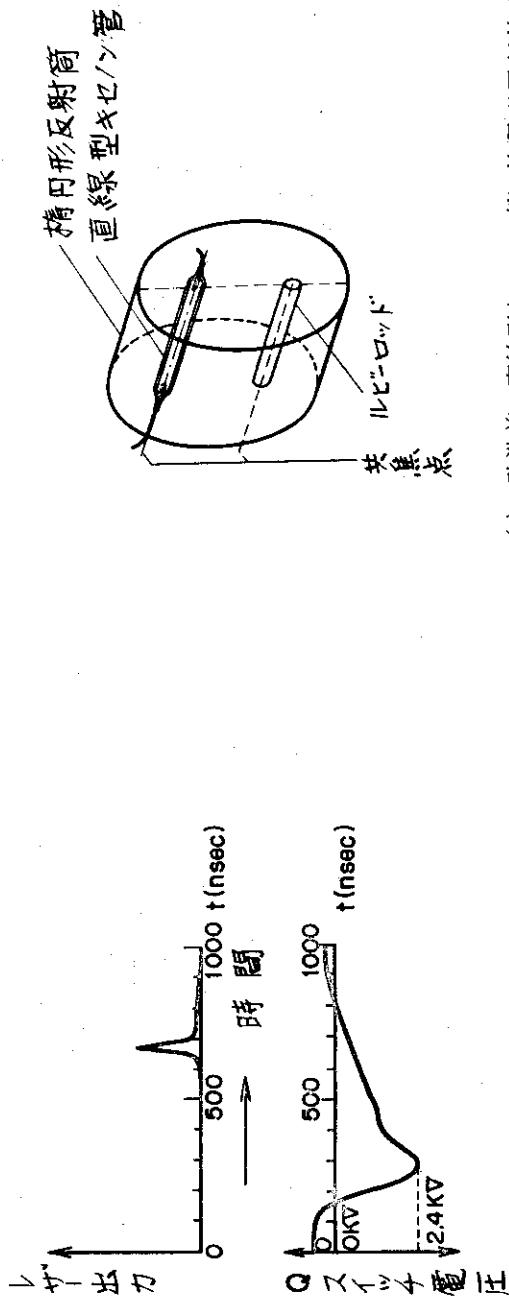
第2表 発振段主要諸元比較表 (3回に渡って順次改造した。)

名 称	1 次 改 造	2 次 改 造	3 次 改 造
1. ルビーロッド	10φ x 100ℓ	10φ x 100ℓ	12.5φ x 150ℓ
2. キセノンランプ	直線型	ヘリカル型	ヘリカル型
3. Qスイッチ素子	KD* P (KDPから)	KD* P	KD* P
4. アイリス	無	無	有
5. 反 射 筒	楕円形	円 形	円 形



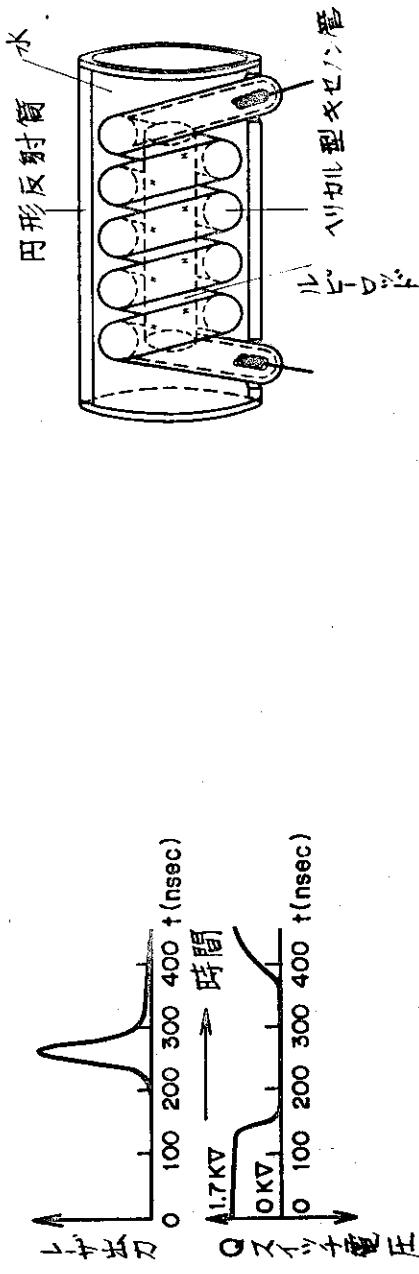
(c) クライトロンを使った改良後のQスイッチ回路

第1図 Qスイッチ回路の比較図



(a) サイリストをもつたQスイッチ回路

(a) 改造前で直線形キセノン管、横円形反射筒を使用

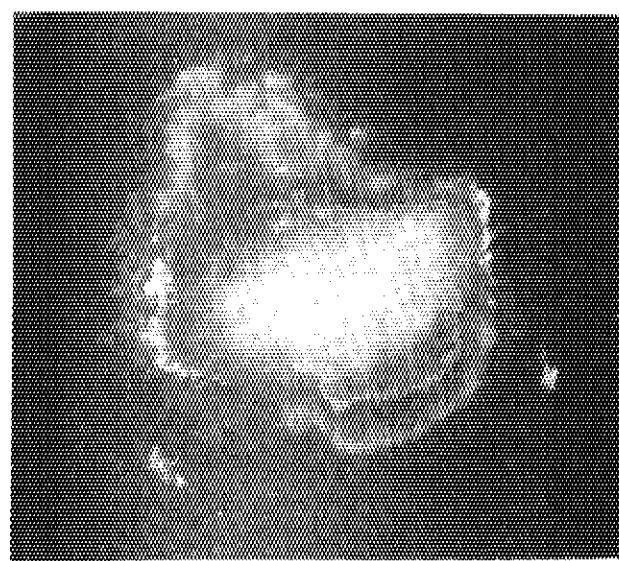


(b) クライトロンをもつたQスイッチ回路

(b) 改造後でヘルカル型キセノン管、円形反射筒を使用

第2図 レーザ発振波形とQスイッチ電圧波形

第3図 発振段比較略図

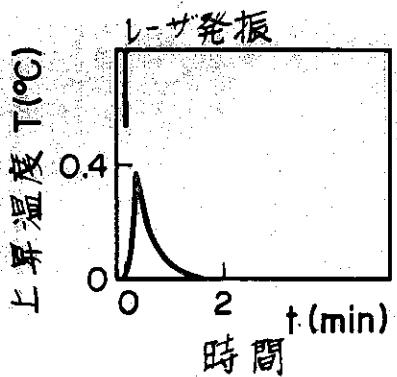


(a) 改造前(2.5 m離れた位置での発振段からの出力パターン)

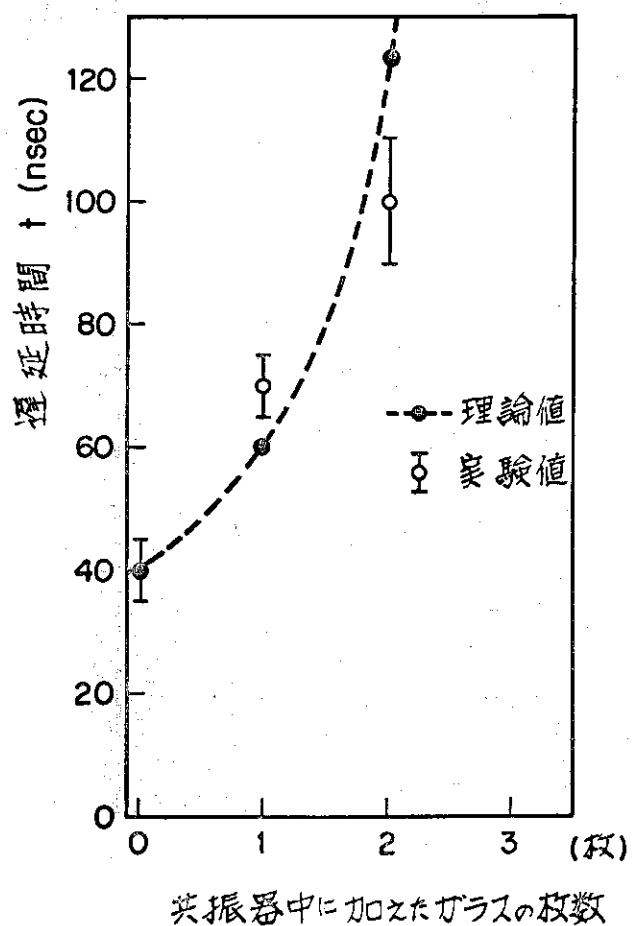


(b) 改造後(30 cm離れた位置での増幅段Ⅱからの出力パターン)

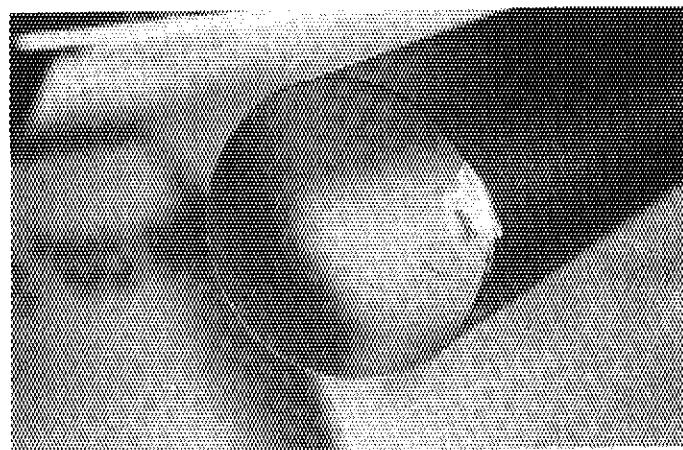
第4図 発振パターン比較



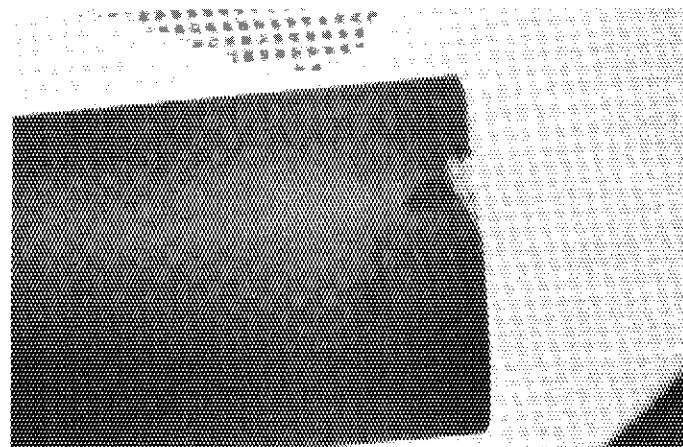
第5図 レーザ発振後の発振段の冷却水出口の水温変化



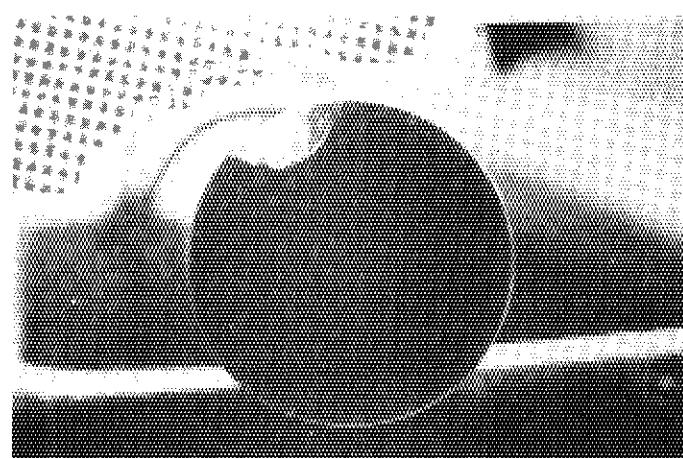
第7図 共振器内の損失の変化とレーザ光の遅延時間特性
 (遅延時間とはQスイッチングしてからレーザ光が立ち上がるまでの時間とする。)



上：斜から見た写真（ロッドの右側に破壊が見られる。）



中：横から見た写真（表面破壊が生じ奥に進行している。）



下：正面から見た写真（上側に破壊が見られ、中と同様に少しづつ進行した様子が見られる。）

第6図 増幅段Ⅰのルビーロッド端面破壊写真（端面直径：12.5mm）