

側面LD励起Yb:YAGレーザーの開発

(研究報告)

1999年9月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

側面 LD 励起 Yb:YAG レーザーの開発 (研究報告)

環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発グループ

*¹三浦昭彦、萩原正義、上原典文、宮本泰明

*²鈴木美寿、須藤 收、*³船坂英之

要　旨

本報告は、レーザー除染や消滅処理を目的とした単色γ線の発生等に応用が期待される LD 励起 Yb:YAG レーザーの開発を行った結果を示したものである。なお、Yb:YAG 結晶に関して、側面励起方式でレーザー発振に成功したのは本報告が国内初であった。

本研究で使用した側面励起方式では、結晶側面からの励起光を多重反射させる際に、通常は反射板を用いるところを散乱板を用いた。また、通常励起光を集光するために複雑なレンズ系を組み合わせるのが一般的であるが、マイクロシリンドリカルレンズを励起光源の直近におくだけの単純構造とした。

この結果、240 W (40W×6 個) で励起したときに、Yb:YAG レーザー出力 150 mW (発振波長 1048 nm) が得られた。また、Yb:YAG レーザーのスペクトル観察から光強度のピークは 1048 nm にあることが分かった。この際、LD の励起光のスペクトルも同時に分光器に入射したため、930 nm 付近に励起光のスペクトルのピークが見られた。ビームプロファイラーの測定から、ビームプロファイルにおけるガウス分布とのフィッティング率は、鉛直方向およびこれに直交する方向（水平方向）でいずれも 95%以上の高いフィッティング率となっている。すなわち TEM₀₀ モード成分が 95%以上となっていることがわかった。

*1 環境保全・研究開発センター 環境保全部 環境計画課

*2 本社 品質保証推進部

*3 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部

先進再処理技術開発グループ

側面 LD 励起 Yb:YAG レーザーの開発

目 次

1. はじめに	
1.1 装置の特徴	2
1.2 装置構成	2
1.3 動作環境	3
2. 半導体レーザーの動作特性	
2.1 実験装置	5
2.2 LD 入出力特性測定結果	6
3. Yb:YAG レーザー結晶の蛍光特性	
3.1 実験装置	15
3.2 蛍光スペクトル特性	15
3.3 励起強度と蛍光強度の関係	15
3.4 蛍光強度分布	16
4. Yb:YAG レーザーの発振特性	
4.1 実験装置	23
4.2 入力励起パワーと出力パワーの関係	24
4.3 発振スペクトル	24
4.4 ビームクオリティー	24
5. 問題点と改善方針	31
6. まとめ	39

謝 辞

参考文献

付録 A Yb:YAG レーザーの詳細設計図面

付録 B 改良部分の Yb:YAG レーザーの設計図面

1. はじめに

近年の原子力関連研究において、レーザーの役割は年々増しているばかりか、幅広いレーザー応用の分野が期待されている。とくに、レーザークリーニングの技術は、除染に用いることが可能であるため有望である[1]。また、長半減期核種の消滅処理研究においては、レーザーの逆コンプトン散乱を単色 γ 線発生に利用している[2]。両者とも、高出力で可搬型の小型レーザーが必要とされているが、特に前者ではピークパワーの大きいパルスレーザーが、後者ではビーム質の良い連続発振レーザー（CW レーザー）が必要とされている。

こういった応用に半導体レーザー（以降 LD と略す）励起の固体レーザーを用いると、小型で運搬が容易なだけでなく、ロボットのアーム先端への装着や、光ファイバー伝送による遠隔操作が実現可能である。小型可搬型レーザーとしては、このほかに半導体レーザーを直接用いる方法も検討されているが、ビームクオリティーが悪い、ピーク値の高いパルスを取り出すことが難しいといった問題点があり、現在まだ前述の応用には用いられていない。半導体レーザー励起固体レーザーでは、Q-スイッチをかけて高いピークパワーをもつパルスを出力することが可能であり、また本報告書でも実証した通り、高い品質 (TEM_{00}) のビームを出力することが可能である。高いピークパワーのパルスはレーザー除染に適しており[1]、高い品質の CW 光は逆コンプトン散乱を利用した単色 γ 線発生に適している[2]。

また、LD 励起方式を用いると、従来フラッシュランプ励起では難しかった新固体レーザーを発振させることができる。特に Yb:YAG レーザー[3]は、高出力 LD が生産されるようになってから注目されたレーザーで、フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを将来駆逐するのではないかといわれている。この Yb:YAG レーザーに関する詳細な特性・特徴は前年度の報告書[10]に記述したが、主な特徴としては、量子効率が高い、幅広い波長可変域を持つ、レーザー上準位寿命が約 1 ms と Nd:YAG のそれと比べて 5 倍も長いため、高いエネルギー蓄積能力を持つといったことが挙げられる。

このように長所を数多く有する Yb:YAG レーザーは、海外（主に米国）では端面励起[5], [6], [8]、側面励起[7]の両方式で、高出力での発振が報告されている。米国ローレンスリバモア国立研究所では Marshal ら[5]が、レンズダク

ト[4]と呼ばれる特殊設計されたレンズを用いて端面励起で高出力を得ている。また、米国ヒューズ社の Bruesselbach ら[7]は、側面励起方式で高出力を得ている。Bruesselbach らは励起効率を向上させる手段として、励起光が結晶を多重回通過するように結晶周囲に高反射率コーティングしたチューブを配置した。そして、このチューブの側面の 3か所に直線状の無反射コート部分をつくり、この部分から励起光を注入した。この直線状の無反射コート部分に集光するために、大型で非常に複雑なレンズ系を組み合わせて用いた。側面励起方式の Yb:YAG レーザーはまだ完成度が高くはないが、今後ますますの高出力化が期待されるため、注目されつつある。

一方、国内では端面励起方式のみが報告されており[9], [8]、高出力化が期待される側面励起方式による発振の成功例は無かった。そこで、われわれは側面励起 Yb:YAG レーザーを開発し、側面励起方式としては国内で初めて[11]レーザー発振に成功した。本報告においては初めて発振したことなどまったが、今後技術的な完成度が向上すれば、実用的な高効率・波長可変・小型・高出力レーザーとなるため、レーザー除染や単色 γ 線発生など幅広い分野に応用できるものと期待される。

1.1 装置の特徴

われわれの開発したレーザーのオリジナリティーは、次に示す 3 点である。

- (1) 側面励起レーザーでは不可欠な結晶周囲の反射板[7]の代わりに、散乱板を用いてレーザーのビームクオリティーの向上をはかった。
- (2) 複雑なレンズ系[5], [7]を用いずに、マイクロシリンドリカルレンズを励起光源直近において 6 方向から結晶を励起するだけの単純構造で発振を実現した。
- (3) 通常は、連続光を用いて 2 cm 程度の長さの Yb:YAG 結晶で発振させる際には 500 W 以上の高い励起光パワーが必要[5], [7]であるのだが、240 W のパワーの連続光で励起して発振を実現した。

1.2 装置構成

図 1 に、本装置の断面概念図を示す。本装置の中心部には、Yb:YAG 結晶(米国オニキス社製、Yb 濃度 1%、Yb 添加領域の長さ 20 mm、直径 1.5 mm)とそれを冷却するためのフローチューブ(内径 4 mm、外径 6 mm)がある。これらのまわりに、励起光を閉じ込めて励起効率を向上させるための円筒状の散乱

板(内径 10 mm、外径 22 mm)が配置されており、これらがポンプハウスを構成している。さらにこの円筒状散乱板の外部に、結晶の中心から 28 mm の距離に Yb:YAG 結晶を励起するための 6 個の半導体レーザーとこの半導体レーザー光を平行光として Yb:YAG 結晶に照射するためのマイクロシリンドリカルレンズ(米国 Team Technologies Inc. 製、CV-73)が配置されている。マイクロシリンドリカルレンズ CV-73 の材質は ZnS であり、フルアパーチャは 1.7 mm、光軸方向の厚さは、1.13 mm、開口数(NA, numerical aperture)は 0.65、屈折率は 2.31、曲率半径は表面が 5.63 mm、裏面が 0.914 mm である。図 1 の円筒状の装置の軸方向の外部の両側に、高反射ミラーを配置して光共振器を構成すると、Yb:YAG レーザーとして動作する。

1.3 動作環境

動作環境は LD が空気中のダストを嫌うことを踏まえ、レーザー試験棟第 1 実験室内に、クラス 1000 のクリーンブース(日本エアーテック製、型式 ACB-4.2.2C、製造番号 D241329601)を設置し、このブース内ですべての試験を行った。

また、温度環境に関しては、LD 励起チャンバーの加熱防止のために、LD に冷却水を流すだけでなくチャンバーを全体的にファンによって空冷した。また、発振試験の際には冷却水温を 5~10°C に設定する必要があったため、空調設備を利用して、実験室を 15°C 程度にまで冷却し、LD の結露を防止した。

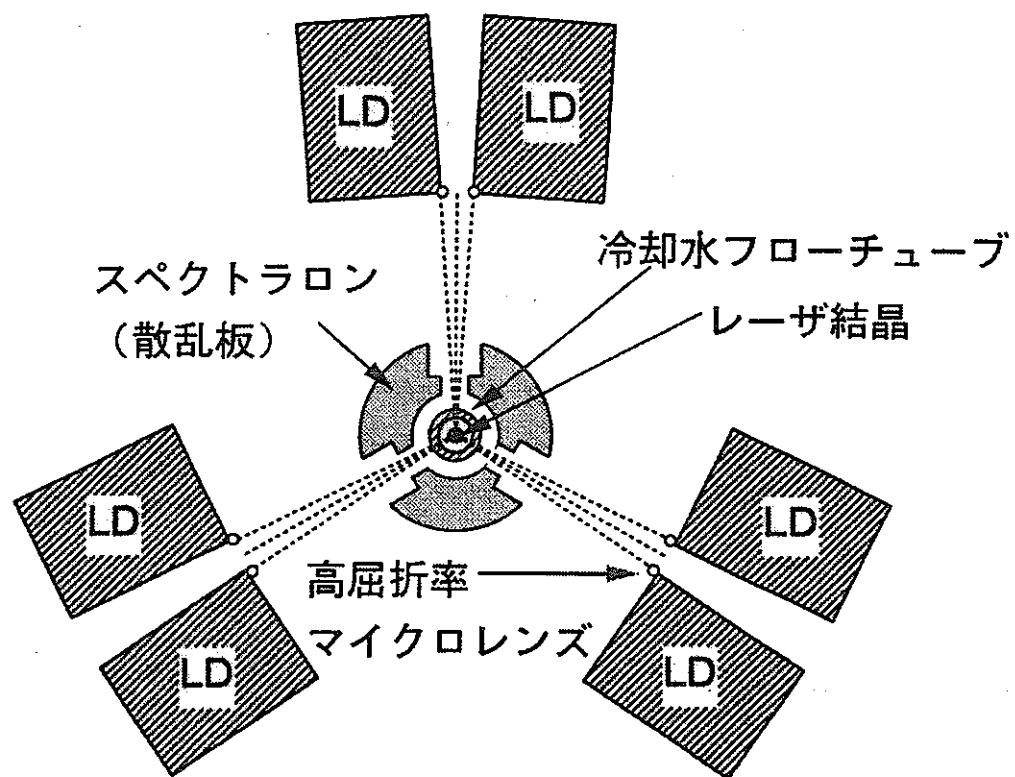


図 1 LD 励起 Yb:YAG レーザー断面図

2. 半導体レーザーの動作特性

2.1 実験装置

Yb:YAG レーザーの励起波長は 941 nm であり、発振波長は 1030 nm である。本装置の開発においては、励起光源として発振中心波長が 940 ± 5 nm の水冷式高出力 LD アレイ（独国イエナ・オプティク社 : JENOPTIK Laserdiode GmbH, JOLD-40-CANC-2L）を使用した。

図 2 に 40 W-LD アレイの図面を示した。この LD アレイは、水平方向に出力 20 W の LD アレイを 2 個接続した形状になっており、最大 40W のレーザー出力が可能である。このレーザーは図 2 に縞み目で示された様に線状ビームが LD 活性層に対し平行方向に左右各 15 度、垂直方向に上下各 50 度の拡がり角をもって出力される。レーザーとは言い難いほどの大きな拡がり角をもったビームであるために、レンズによる集光は困難であった。このような LD アレイの特殊なビームのパワーを測定する方法としては、積分球を用いた上で典型的なパワーメータによって測定する方法か、極端に広い受光面をもったパワーメーターを LD の直近に設置して測定する方法の 2 つの方法が一般的である。われわれは後者の方法を採用した。すなわち、50 mm × 50 mm の広い受光面をもつサーモパイアル型パワーメーター（イスラエル国オフィール社製 : Ophir Optonics Ltd., FL250A-SH [Serial Number 41662]）を LD からの距離 20 mm に置き、LD の出力パワーを測定した。LD の冷却には純水を使用した。

LD の温度測定方法は、LD 用ヒートシンクに接続された水配管（ジュンロン）に銅・コンスタンタン熱電対（助川電気工業製 C-C 热電対, 1 mm ϕ , 型式 T35-ST-0.75-C-1.0-U-170-2-EXD) を挿入する方法と、ヒートシンクあるいはその近傍の金属部品に同熱電対を直接アルミテープで固定する 2 通りの方法をとった。温度の読み取りには、2 台の温度表示・記録装置（横河電機（株）製 LR8100 ; 4 チャンネルモデル 1 台と 1 チャンネルモデル 1 台）および温度表示専用機 1 台（同社製）を使用した。これにより合計 6 か所を同時に温度測定した。冷却水の流量測定は、6 個の LD の冷却パイプを 6 本並列に配管した上で、下流側にて合流後に冷却循環器（米国 NESLAB 製 HX-75, PD-1, 50 Hz）までつながる 1/2 インチ SUS 配管の途中に、水用アクリルテーパー管流量計（巴商会サンクエスト, MI6-6075-01, ACOG-U02-1/2") を設置して LD

6個分の冷却水の流量測定を行った。この流量計は $0.2\sim2\ell/\text{min}$ の流量測定が可能である。

2.2 LD 入出力特性測定結果

図3に典型的な 40 W-LD アレイの入出力特性（電流・パワー特性）を示した。発振しきい値は 7A であり、しきい値を越えるとほぼ線形に出力パワーが増加していることがわかる。また、波長特性や冷却特性は図4～図8に示した。40 W-LD アレイに流れる電流は、定電流源（独国イエナオプティク製、JO DD 24/40）の電流調整ダイヤルを操作し、5分毎に電流値を上昇させて、電流・パワー特性を測定した。ここで、LD ヒートシンクの温度上昇が5分間で飽和し、LD の発振波長と出力パワーが安定することは予め予備実験によって確認した。

図4に 40 W-LD アレイの入力電流と出力パワーの関係を示した。○と△は冷却水温が 15°C のとき、□は冷却水温が 20°C のときの測定結果である。冷却温度を低下させると多少パワーが上昇するが、入出力特性の傾向は変化しないことがわかる。図5に入力電流と LD ヒートシンク温度の関係を示した。○と△は冷却水温が 15°C のとき、□は冷却水温が 20°C のときの測定結果である。冷却温度の差とヒートシンクの温度差はほぼ等しいが、冷却温度が低い方が若干温度上昇率が低いことが分かる。図6、図7に、冷却水温が 15°C、20°C のときの LD 発振波長と LD ヒートシンク温度の関係をそれぞれ示した。水温が変わると同じ波長でもヒートシンク温度は違うことが分かる。例えば 934 nm のときに水温が 15°C のときはヒートシンク温度は 19°C であるが、水温が 20°C のときにはヒートシンク温度は 23°C である。最後に図8に冷却水温を変化させたときの入力電流と発振波長の関係を示した。○は冷却水温が 20°C のとき、□は冷却水温が 15°C のときの測定結果である。冷却水温が低いと波長の絶対値は短くなるが、電流増加に対する波長の増加率は冷却水温によらず一定であることが分かる。

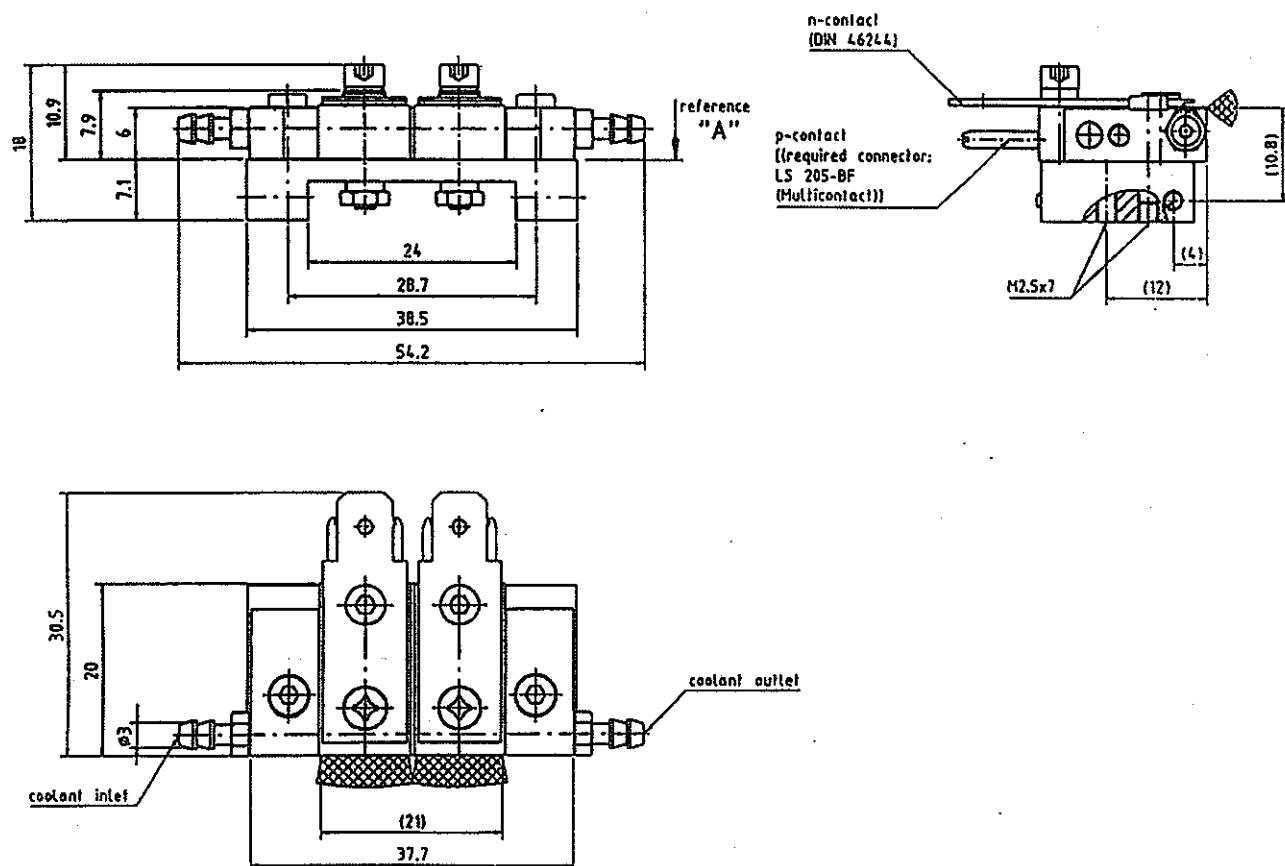


図2 イエナ・オプティック社製デュアルタイプLD
単位 [mm]

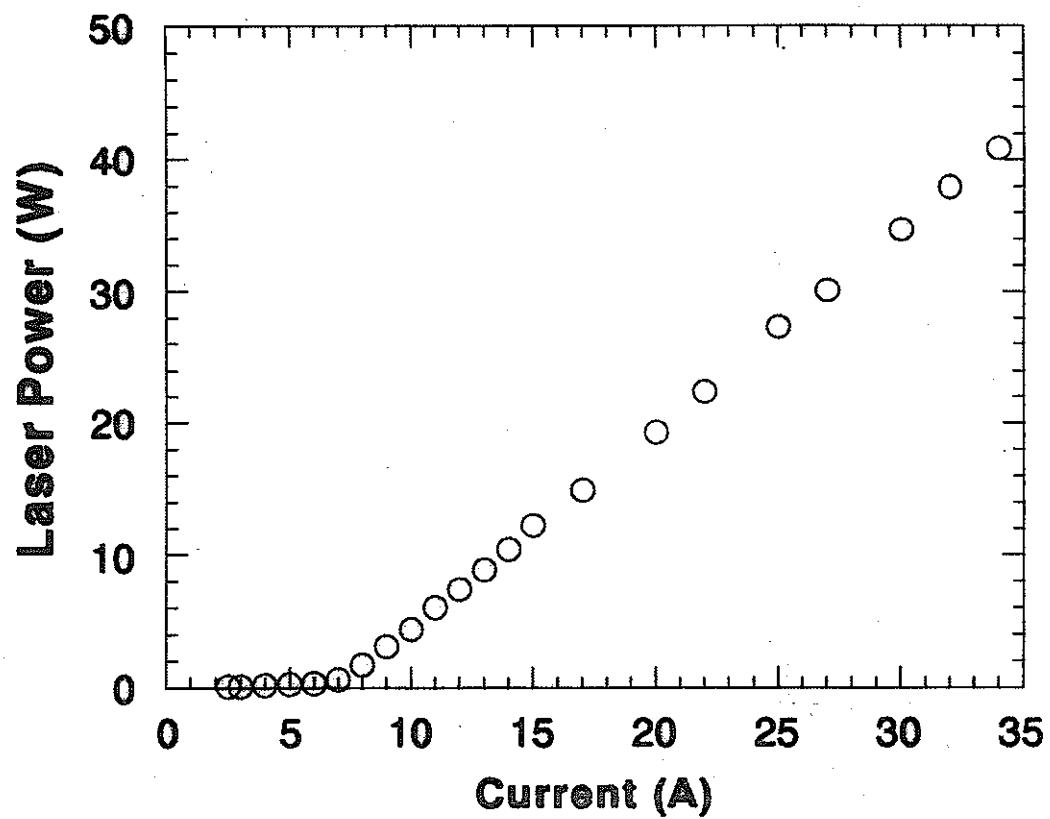


図3 LDに流した電流と出力されたレーザーパワーの関係

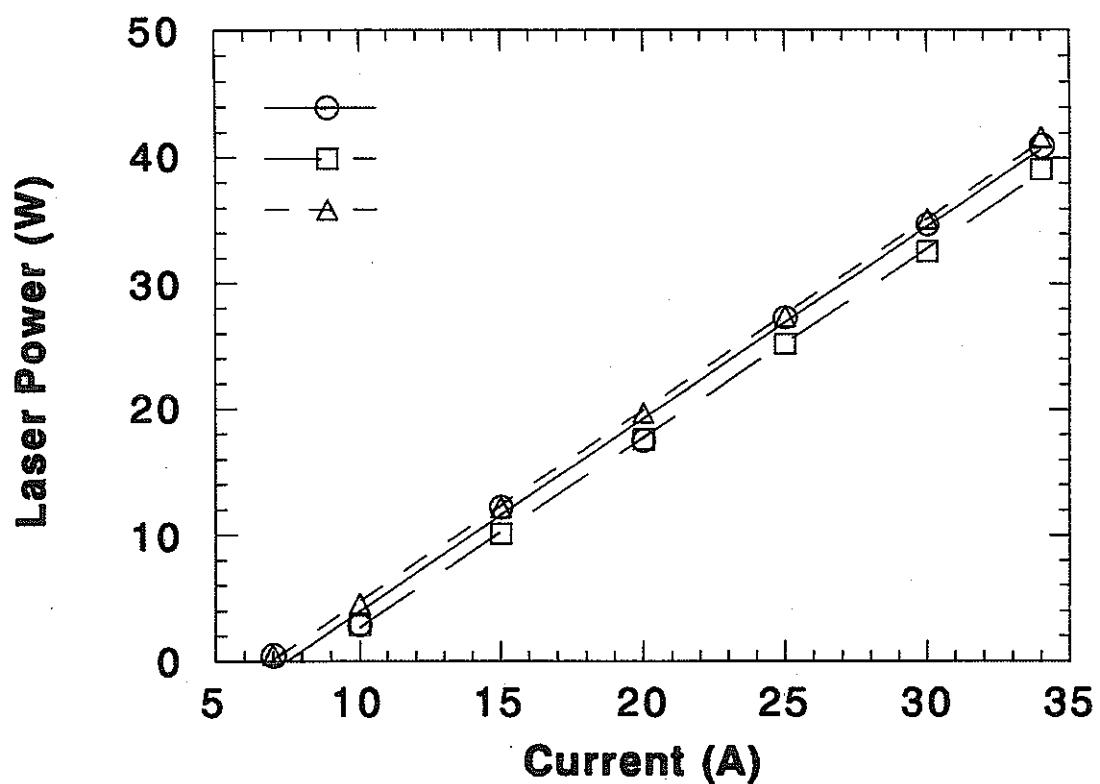


図4 入力電流と出力パワーの関係

○と△は冷却水温が 15°C のとき
□は冷却水温が 20°C のとき

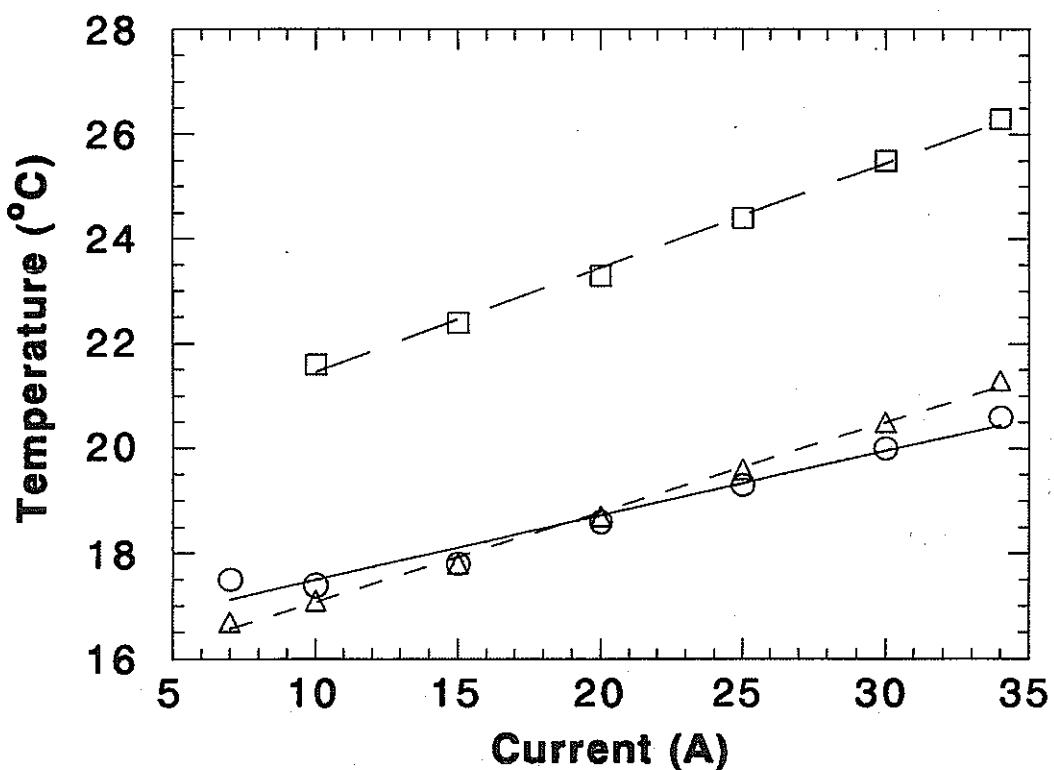


図5 入力電流とLDヒートシンク温度の関係

○と△は冷却水温が15 $^{\circ}\text{C}$ のとき
□は冷却水温が20 $^{\circ}\text{C}$ のとき

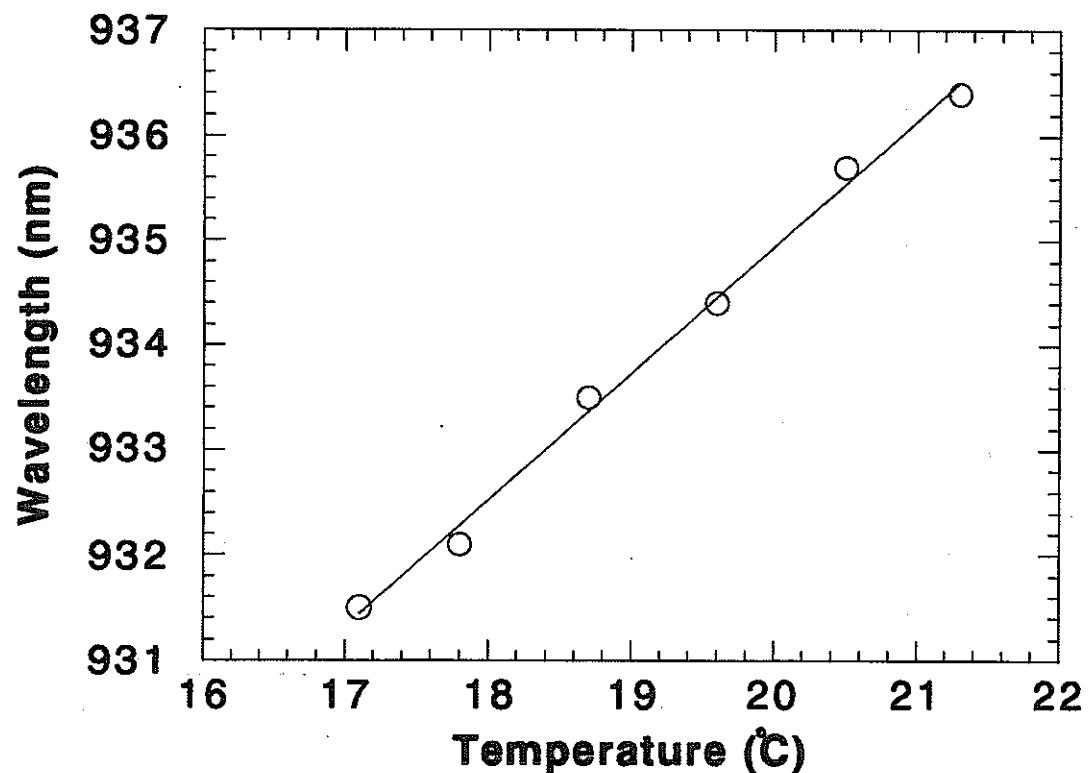


図 6 冷却水温が 15 °C のときの LD 発振波長と LD ヒートシンク温度の関係

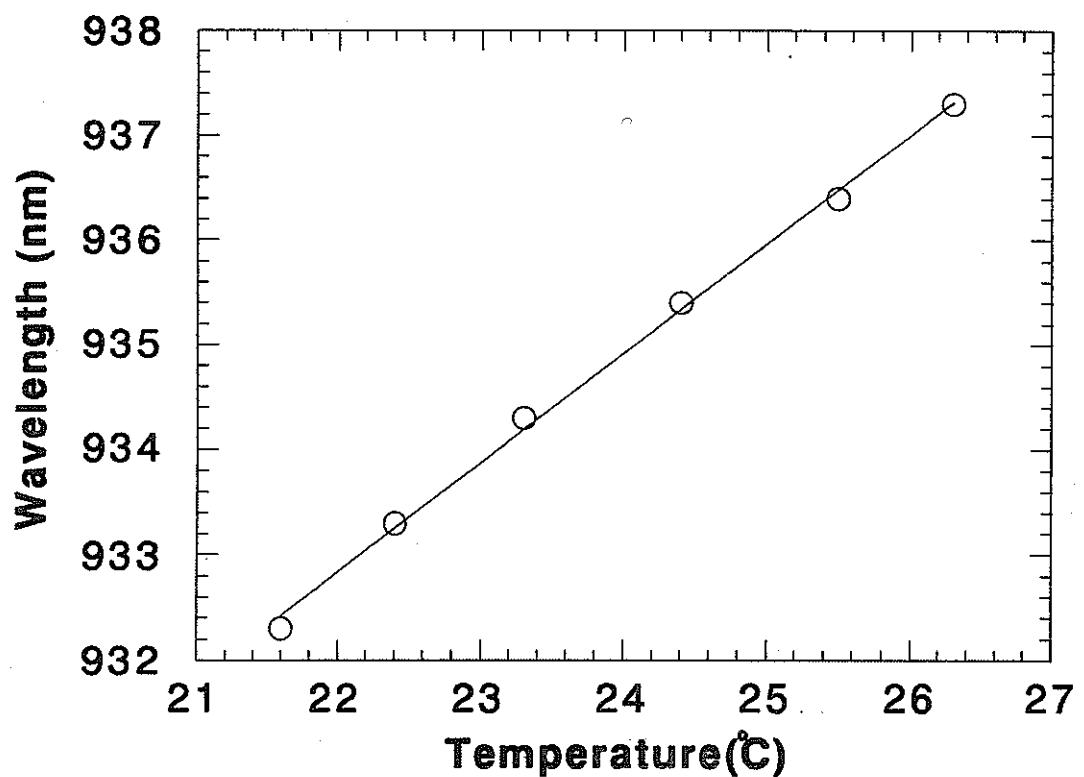


図 7 冷却水温が 20°C のときの LD 発振波長と LD ヒートシンク温度の関係

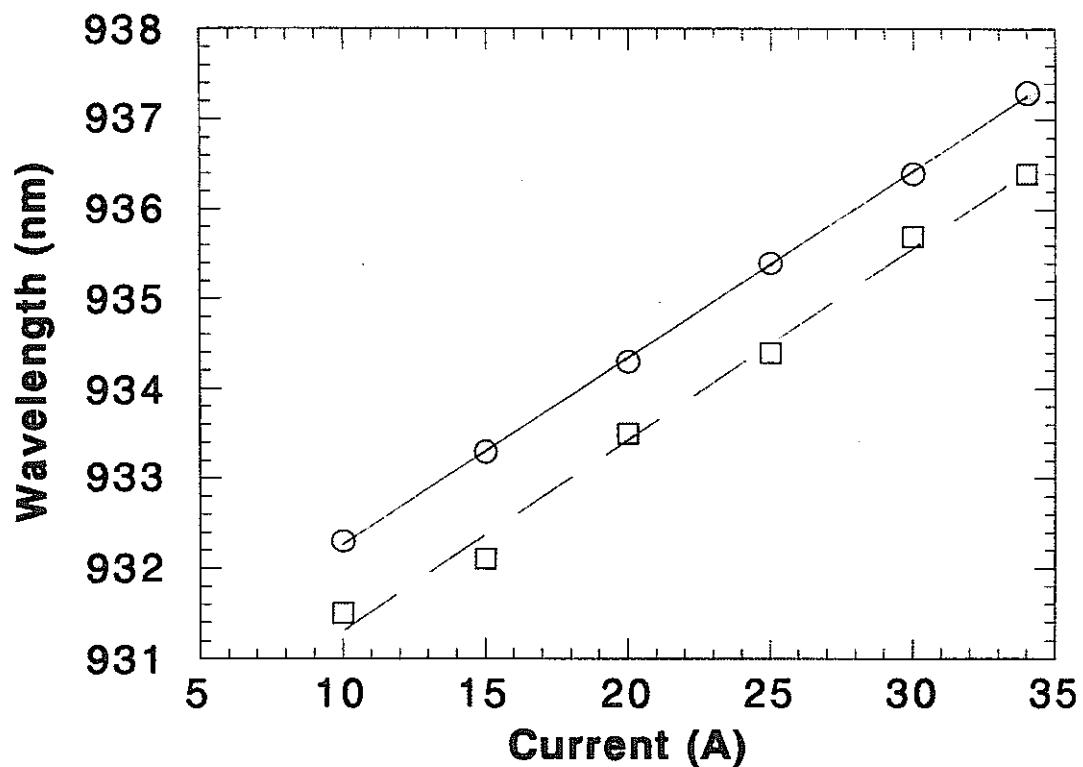


図 8 冷却水温を変化させたときの
入力電流と発振波長の関係

○は冷却水温 20℃のとき
□は冷却水温 15℃のとき

3. Yb:YAG レーザー結晶の蛍光特性

3.1 実験装置

図 9 蛍光装置にレーザー結晶の蛍光スペクトル測定に使用した実験装置を示した。LD 励起チャンバーから放出された蛍光を焦点距離 150 mm の凸レンズ（シグマ光機、凸面平面 CaF_2 レンズ）によって集光し、アッテネータ（フレンド光学製、ND filter）で減光した後、光ファイバーによって分光器に導光し分光した。ここで使用した分光器は、ファイバー結合型の超小型の分光器（米国オーシャンオプティクス社製、型式 S-2000, Serial Number I2D019）である。分光器の仕様については、回折格子のブレーズは波長 $1.0\mu\text{m}$ で 1200 本/mm であり、測定可能波長域は 900–1100 nm、オプションとして Coated Visible Array, L2 Lens, OG550 Filter, 10 μm Slit である。波長分解能は 0.2 nm 以下である。

さらに、このファイバー付き分光器をビームプロファイラーに置き換えることにより、結晶の蛍光強度分布を測定した。

3.2 蛍光スペクトル特性

図 10 の(i), (ii), (iii)に、LD に 34 A, 30 A, 20 A の電流を流して Yb:YAG を励起した時の Yb:YAG の蛍光スペクトルをそれぞれ示した。この測定の際、励起光のスペクトルも同時に分光器に入射したため、930 nm 付近に励起光のスペクトルが重なって見える。図中の a～e は特徴的なピークを示している。a～e の波長はそれぞれ、a 933.56 nm, b 966.28 nm, c 1023.35 nm, d 1027.68 nm, e 1047.46 nm である。ここで、a は励起光である半導体レーザーの発振波長を示しており、b～e が Yb:YAG レーザー結晶の蛍光強度のピークを示している。この図から、d の 1028 nm のピークが最も蛍光強度が高いことが分かる。この d の 1028 nm のピークに対して e の 1047 nm のピークは 14 分の 1 であることが分かった。966 nm のピークは比較的強いが、同じ位置に強い吸収線があるので、利得と吸収が相殺して発振しない。

3.3 励起強度と蛍光強度の関係

図 11 に励起強度と蛍光強度のピーク値との関係を示した。ここで蛍光強度

のピーク波長は 1028 nm である。励起強度は 6 個の LD すべてのパワーを合計したパワーである。電流を調整してパワーの調整を行った。図 11において、白丸が実験値、実線が指數関数による外挿曲線である。励起強度を増加させると指數関数的に蛍光強度が増加することが分かる。このことから、測定されているのは ASE (Amplified Stimulated Emission) であることが分かる。つまり、Yb 濃度 1.0% の結晶では図 11 の励起パワーで利得が生じることが分かる。参考のために図 12 に Yb 濃度 0.5% atm の Yb:YAG 結晶を用いたときの蛍光強度と励起強度の関係を示した。○が実験値であり、実線が外挿直線である。図 12 では、励起強度の増加とともに蛍光強度が線形に増加している。指數関数的増加ではないことから、この結晶では励起強度が不足しており、この励起強度の領域においては利得がないことが分かる。

3.4 蛍光強度分布

図 13 に、軸方向から観測された Yb:YAG レーザー結晶の蛍光強度分布を示した。ガウス分布的な蛍光強度分布となっているが、やや片側に強度が偏っていることが分かる。これは励起光のアライメントがまだ改善の余地があることを示している。結晶に直接的に励起光が照射されている部分と、結晶をかすめて励起光が通り抜け、反対側の散乱材で散乱してから間接的に結晶に照射されている部分があるものと思われる。

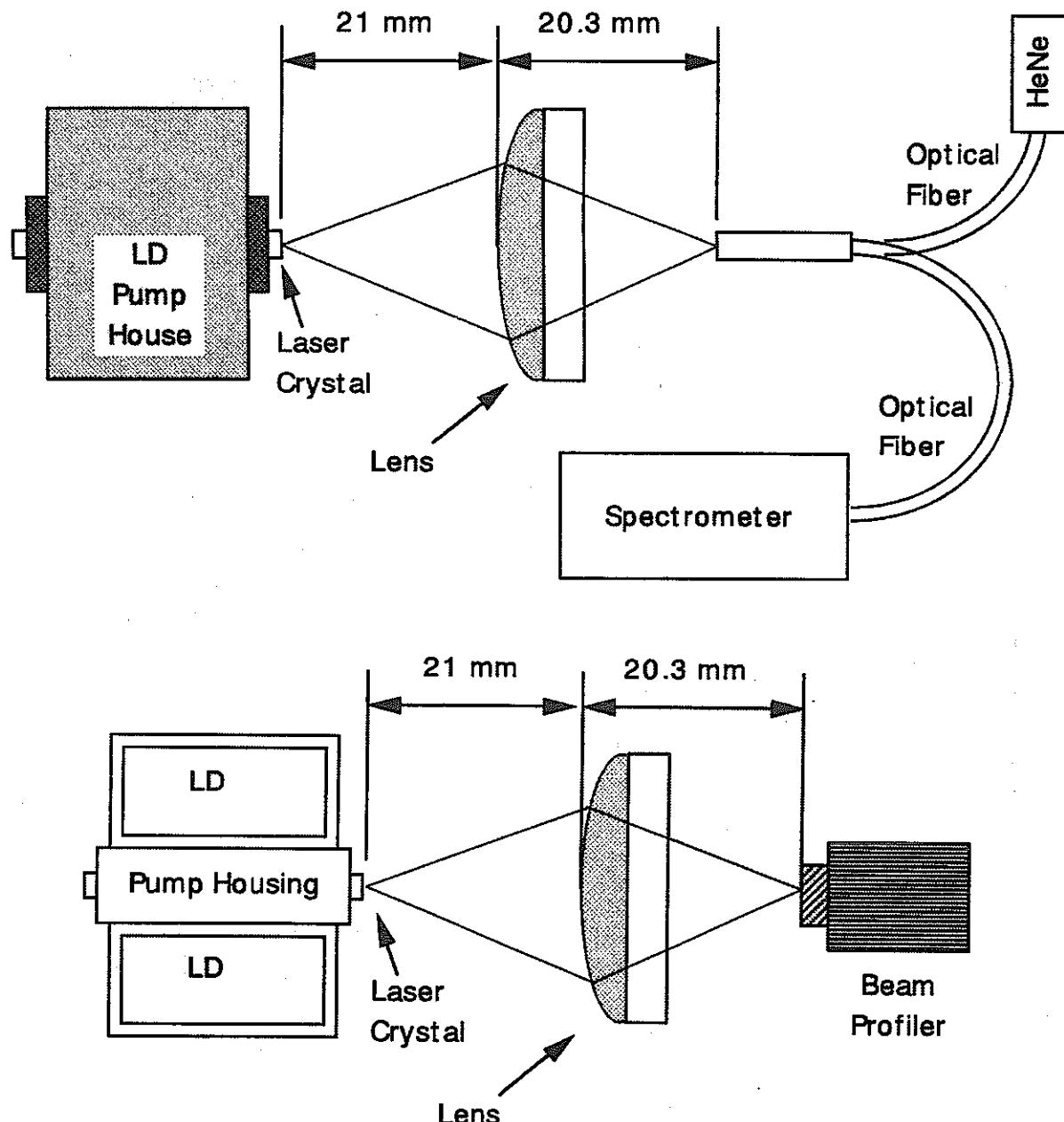


図9 Yb:YAG レーザー結晶の蛍光特性の測定装置

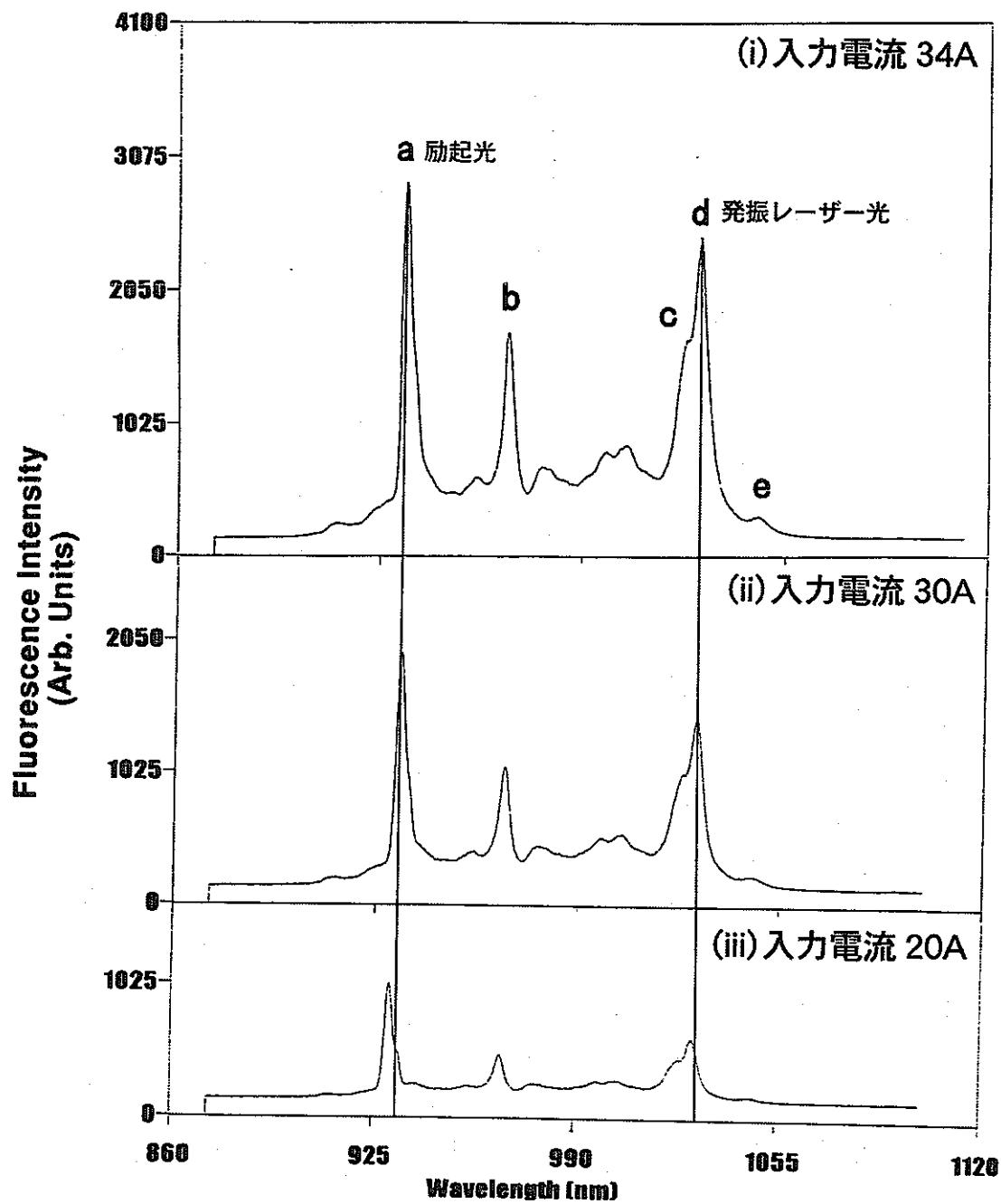


図 10 Yb:YAG レーザー結晶の蛍光スペクトル

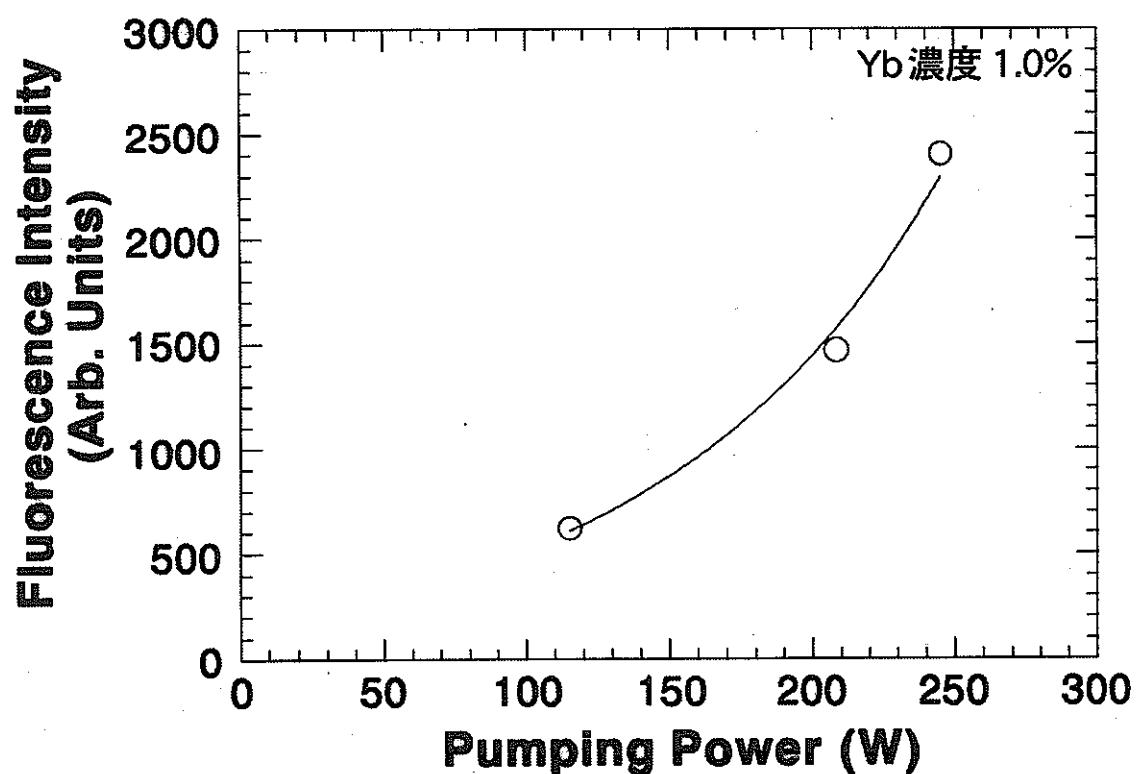


図 11 Yb:YAG のピーク波長における強度と励起強度の関係

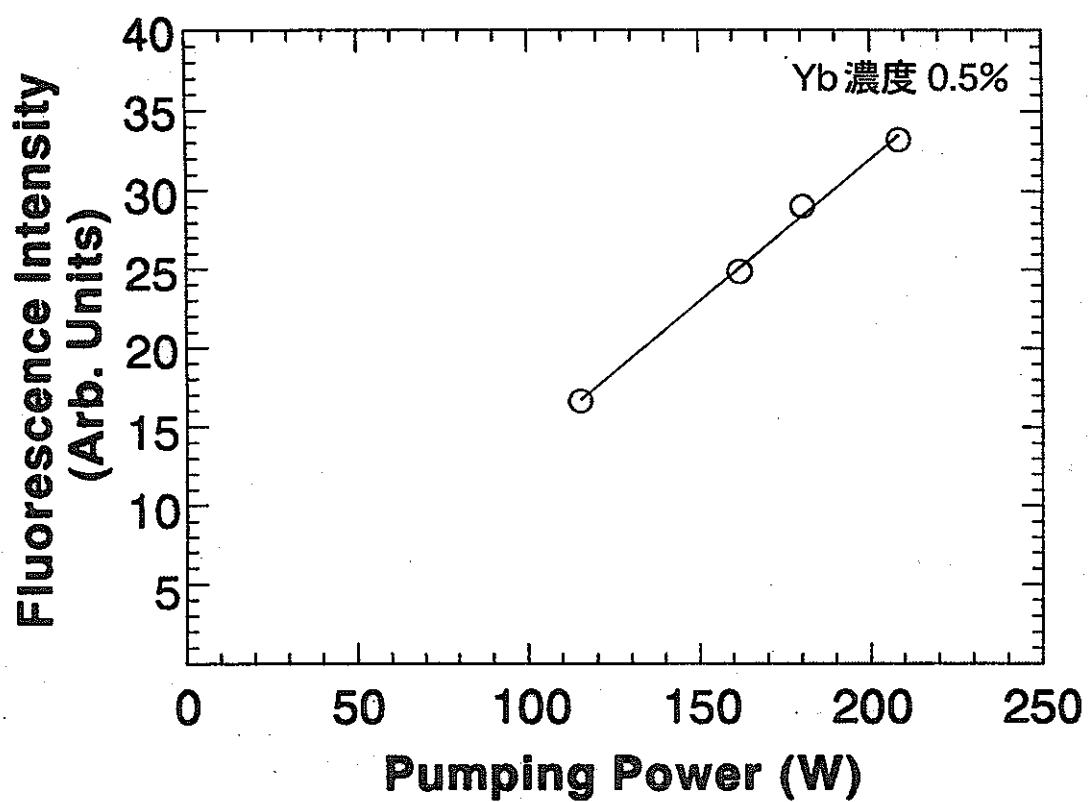


図 12 Yb:YAG 結晶のピーク波長における強度と励起強度の関係

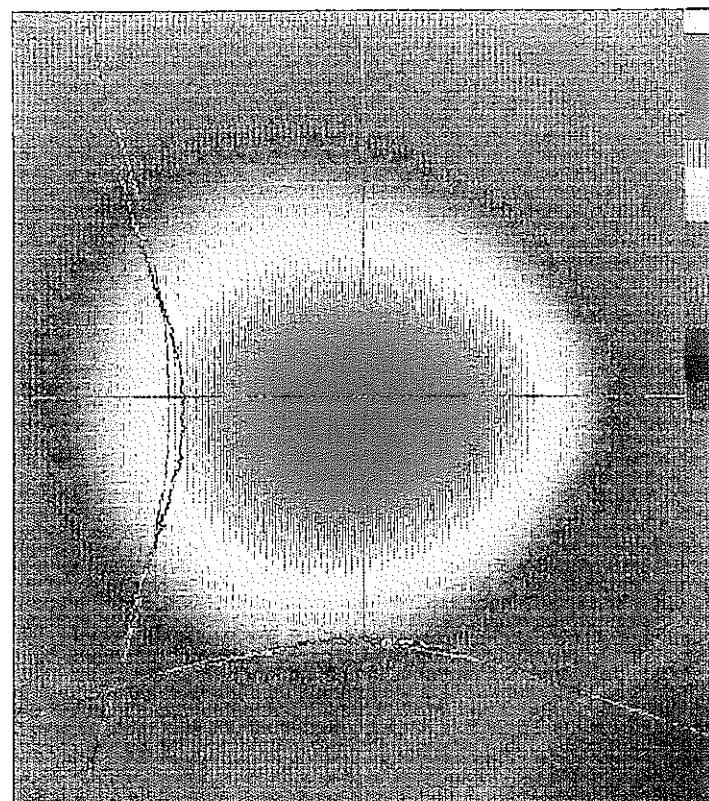


図 13 軸方向から観測された Yb:YAG
レーザー結晶の蛍光強度分布

4. Yb:YAG レーザーの発振特性

4.1 実験装置

図 14 に実験装置を示した。共振器ミラーには、99.5%以上の高反射率凹面-平面ミラー（1030 nm で凹面を HR、裏面を同波長で AR のコーティング）および同じコーティングの平面-平面ミラーを使用した。レーザー結晶は拡散接着方式によって製造された Yb:YAG 結晶（米国オニキス社製）であり、全長 65 mm、Yb 添加領域の長さが 20 mm、直径が 1.5 mm の円柱状で Yb 添加濃度 1atm% の仕様である。この仕様は前年度報告書[10]において検討され、決定されたものに Yb 添加濃度を微修正したものである。発振試験 LD の発振形態は CW 発振とした。

Yb:YAG レーザーの入力励起パワーは 6 個の LD の出力パワーの総和である。前節で述べた LD(JENOPTIK Laserdiode GmbH, JOLD-40-CANC-2L)の出力パワー測定で得られた電流-パワー特性のグラフ（図 3）から 6 個分のパワーを計算して得た。Yb:YAG レーザーの出力パワーは、発振器から 55 cm の距離に、パワーメータを設置して、測定した。また、発振スペクトルの測定に際しては図 14 に示したように、ハーフミラーでビームを垂直方向に反射させ、さらに事務用の A4 の白紙（上質紙）を置き、紙面で後方散乱されたビームを光ファイバーを介して分光器に入射しスペクトルを測定した。

また、蛍光試験までの試験はすべて 1 台の冷却器（米国 NESLAB 製 HX-75, PD-1, 50 Hz）で行ってきたが、発振試験に関しては結晶専用の冷却器（米国 NESLAB 製 HX-150, CP-25, 50 Hz）と LD 専用の冷却器（米国 NESLAB 製 HX-75, PD-1, 50 Hz）の 2 台の冷却装置を用いた。2 台の冷却器を用いた理由は結晶を 10°C 程度、LD を 20°C 程度にコントロールする必要性があったからである。特に LD では内蔵ヒートシンクが 2 bar という高い水圧を必要とするため、ポンプ形式がロータリー型の PD-1 の冷却器を用い、結晶冷却用には流量が稼げるポンプ形式の遠心型ポンプ CP-25 を内蔵したものを用いた。結晶を特別に冷却する理由は、低温になるほど小信号利得が増大するからである [10]。

4.2 入力励起パワーと出力パワーの関係

図 15 に Yb:YAG レーザーを発振させたときの励起入力パワーと出力レーザーパワーの関係を示した。白丸が結晶冷却水温 10°C(設定温度は 5°C)、白四角が冷却水温 12°C(設定温度 10°C) のときの測定結果を示している。240 W (40W × 6 個) で励起したときに、結晶冷却水温が 10°C では、Yb:YAG レーザー出力 150 mW (発振波長 1048 nm) であった。また、図 15 に示した様に、発振しきい値とスロープ効率には温度依存性が存在し、温度が高くなると、発振しきい値が高くなり、出力パワーが低下し、効率が低下することがグラフより分かる。

4.3 発振スペクトル

図 16 に Yb:YAG レーザーを発振させたときのスペクトルを示した。Yb:YAG レーザーの光強度のピークは 1048 nm にあることが分かる。この測定の際、励起光のスペクトルも同時に分光器に入射したため、930 nm 付近に励起光のスペクトルのピークが見える。

4.4 ビームクオリティー

発振したレーザーのビームクオリティーは、レーザー共振器を構成するミラーから 34 cm の距離に、2 次元 CCD アレイを受光装置としたビームプロファイラー(米国コヒーレント社製:COHERENT, BeamView Analyzer PC [Serial Number 0632], camera model COHU64 [Serial Number 260827], Gain value of 175, OFFSET value of 200. PENTIUM) を正対しておき、測定した。測定結果を図 17 に示した。このビームプロファイルにおけるガウス分布とのフィッティング率は鉛直方向およびこれに直交する方向(水平方向)でいずれも 95%以上の高いフィッティング率となっている。すなわち TEM₀₀ モード成分が 95%以上となっていることがわかる。

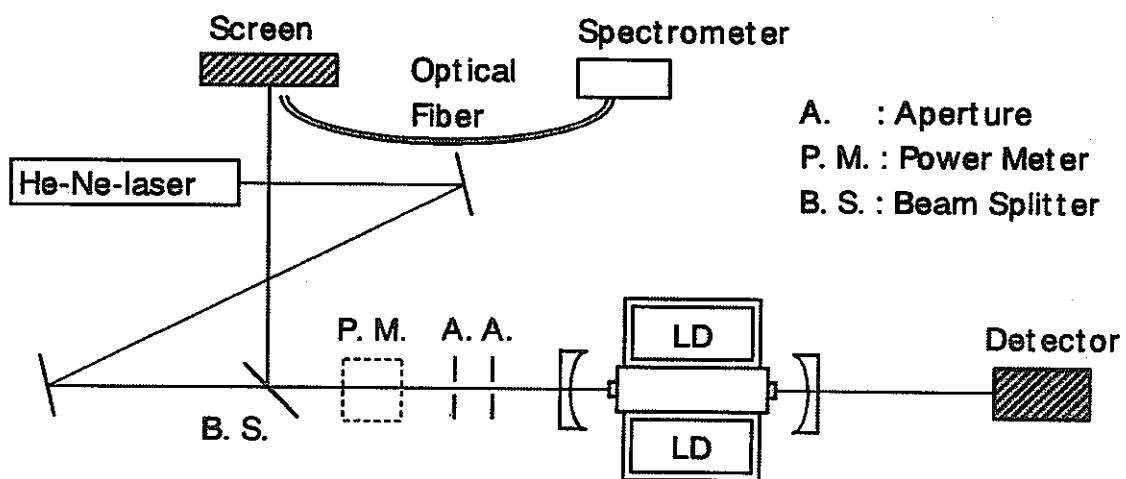


図 14 Yb:YAG レーザーの出力パワーとスペクトルの測定装置

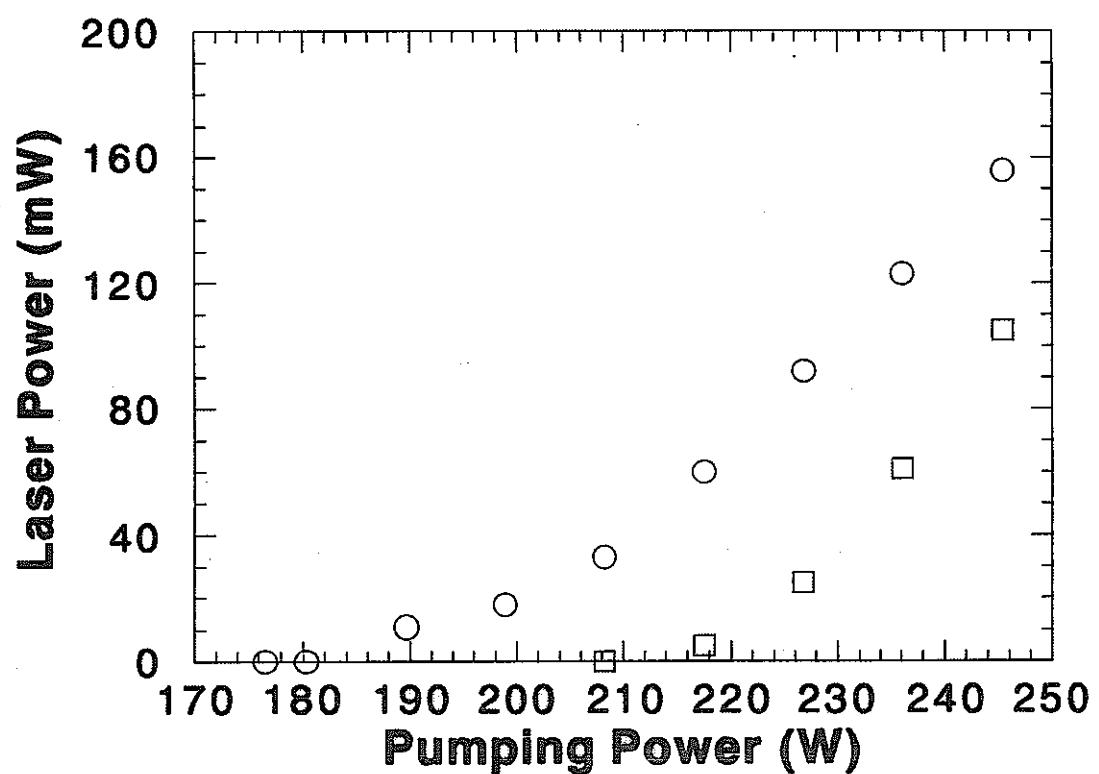


図 15 Yb:YAG レーザーの入力パワーと出力パワーの関係

○ Yb:YAG 結晶の冷却水温 10°C
□ Yb:YAG 結晶の冷却水温 12°C

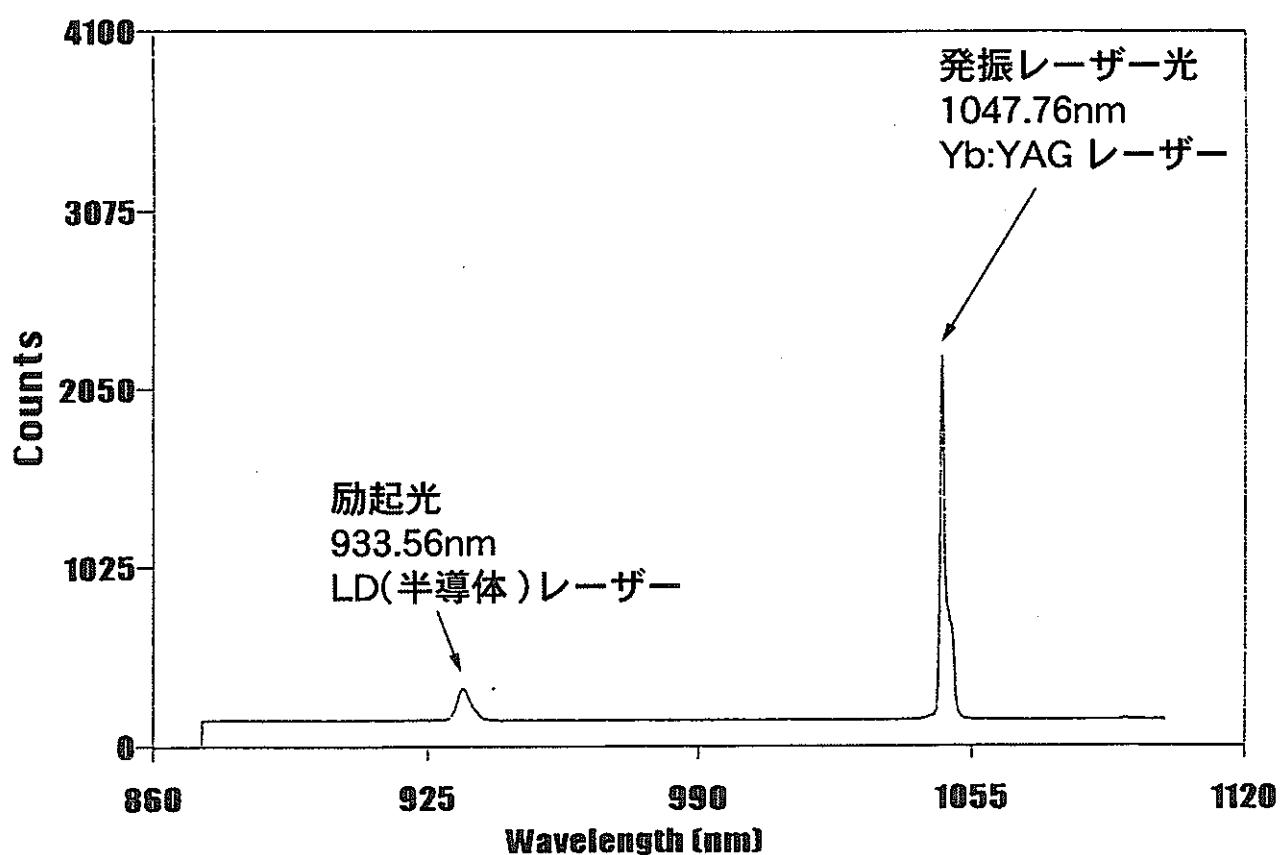


図 16 Yb:YAG レーザーのスペクトル

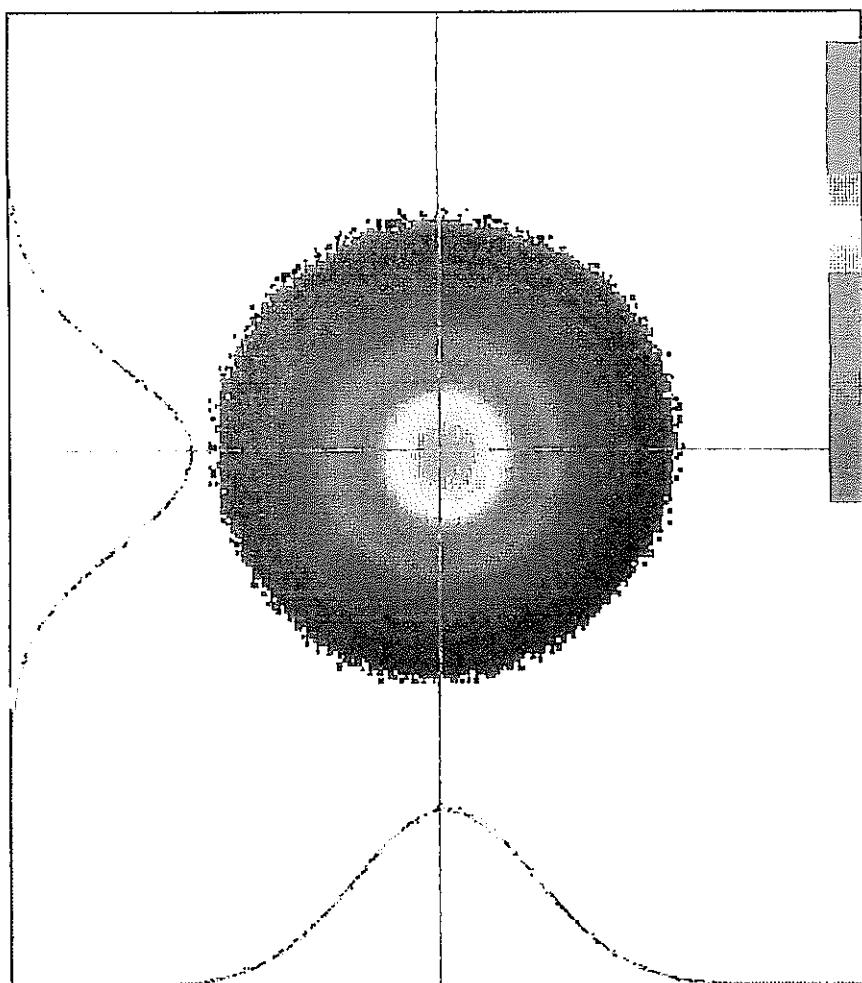


図 17 Yb:YAG レーザーのビームプロファイル

5. 問題点と改善方針

問題点は、パワーが低いこと及び発振波長が 1048 nm であり、最大利得の波長 1029 nm ないことである。この理由は励起強度が低いために、1029 nm の付近では吸収より利得が小さくなっているためと考えられる。また、1029 nm の発振線より 1048 nm の発振線の方が再吸収の効果が小さいために発振しやすいことを Chartier らが報告している[12]。そして Chartier らは 1029 nm では発振させることができなかつたが、微妙にミスアライメントさせれば 1029 nm でも発振が可能であると考察している。しかし、本報告においては、微妙なミスアライメントを行うと横モードがマルチモードになるかあるいは発振が停止してしまい、1029 nm に調整することが出来なかつた。

ここで、図 18 に Yb:YAG の吸収と蛍光スペクトルを示した[3]。1029 nm における吸収係数は 1048 nm における吸収係数の約 10 倍であり、前述の通り吸収損失を考えると 1029 nm より 1048 nm の発振の方が容易であることがこの図からよく分かる。強励起してレーザー下準位を空にすれば、1029 nm における吸収係数は小さくなるので、利得が高くかつ吸収損失が小さい状態をつくることが可能である。つまり高出力レーザー発振が期待できる。一方、1048 nm における Yb:YAG の蛍光強度は最大利得の波長である 1029 nm における蛍光強度の約 7 分の 1 である。したがって、1048 nm では 150 mW が最大出力であったが、1029 nm で発振させることができ可能となれば 7 倍の 1.05 W の出力が期待できる。

しかし、当初計画していた出力に比べると 1.05 W という値は低い。3.3 節で述べたように、結晶の濃度が 1% の時には利得が観測されたが、0.5% の時には利得が観測されなかつたことから、本装置においては適正な濃度が更に高いことも考えられる。まずは本装置を用いた上で、濃度をパラメータとして発振特性を測定し、最適な濃度を求めることが有意義であり、これにより数ワット級の出力パワーも期待される。

さらに、ポンプハウス内にどれくらいの効率で吸収されない励起パワーが閉じ込められているかを実験的に測定する方法が無かつたので、これを単純な計算によって求める。本装置では、開口幅が 3 mm のスリットが 120 度の回転対称で 3 方向に開口している直径 10 mm のスペクトラロンポンプハウスを用

いている。したがってスリットから入射した半導体レーザー光がスペクトラロンポンプハウスにおいて完全散乱して一様にポンプハウス内に散乱されると仮定すれば、1回の散乱毎に被る損失は、円周に対する開口幅が損失となるので以下の通りである。

$$(3 \times 3.0 \text{ mm}) / (10 \text{ mm} \times \pi) = 0.29$$

すなわち、29%が損失となる。散乱の効率が90%と仮定すると、励起光が1パス毎に減衰する割合は、

$$0.90 \times (1 - 0.29) = 0.91 \times 0.71 = 0.65$$

となる。したがって $P_{in} = 240 \text{ W}$ の励起光がポンプハウス内で無限回数散乱された場合に、ポンプハウス内に閉じ込められるパワー P は、

$$\begin{aligned} P &= P_{in} + P_{in} \cdot 0.65 + P_{in} \cdot 0.65^2 + P_{in} \cdot 0.65^3 + \cdots + P_{in} \cdot 0.65^n \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{P_{in} \times (1 - 0.65^n)}{(1 - 0.65)} = 240 / 0.35 = 690 \text{ [W]} \end{aligned}$$

となり、励起光のおよそ3倍程度である。前回の報告書においては、スリット幅を0.5 mmとして励起パワーが約10倍以上になるととき高出力発振が望めると理論的に予測した。本報告においては、スリット幅が大きく、ポンプハウス内に閉じ込められた励起光の強度が予定の3分の1であったため、出力が150 mWと低い値になったものと思われる。スリット幅を大きくしなくてはならなくなつた原因は、図19(a)に示したレンズダクトが入手できなかつたためであり、この特殊レンズで集光することを断念し、幅1.0 mmにコリメートした2本のビームを図19(b)のように斜入射で3 mm幅のスリットを通してから結晶に照射するような構造を取つたためである。幅1.0 mmにコリメートしたビームはコリメートレンズからスペクトラロンのスリットまでの22 mmの距離を伝搬する途中で斜めになつたり、ツインタイプのLDの左右のビームの伝搬方向がずれたりしたため、3 mm幅までスリットを広げざるを得なかつた。

今後の改善策としては、スリットを狭くして励起光閉じ込め効率を高めることが挙げられる。一つの方法は前年度報告書[10]に示したようにレンズダクトを用いて狭いスリットに導光する方法である。もう一つの方法としては、図20、21の様に半導体レーザーの数を3個に減じてスリットに直近に配置する方法である。直近に配置する利点は、半導体レーザーの水平方向の15度の発散角に起因する損失を低減出来ることである。また、LD1個あたりスリット一本とす

れば、スリット幅を狭くすることが可能であり、励起光閉じ込め効率を向上できる。経済的には後者の方法が実現可能と思われるが、光源のパワーが半分になるので、励起強度を3倍にするためには損失を6分の1にしなければならない。

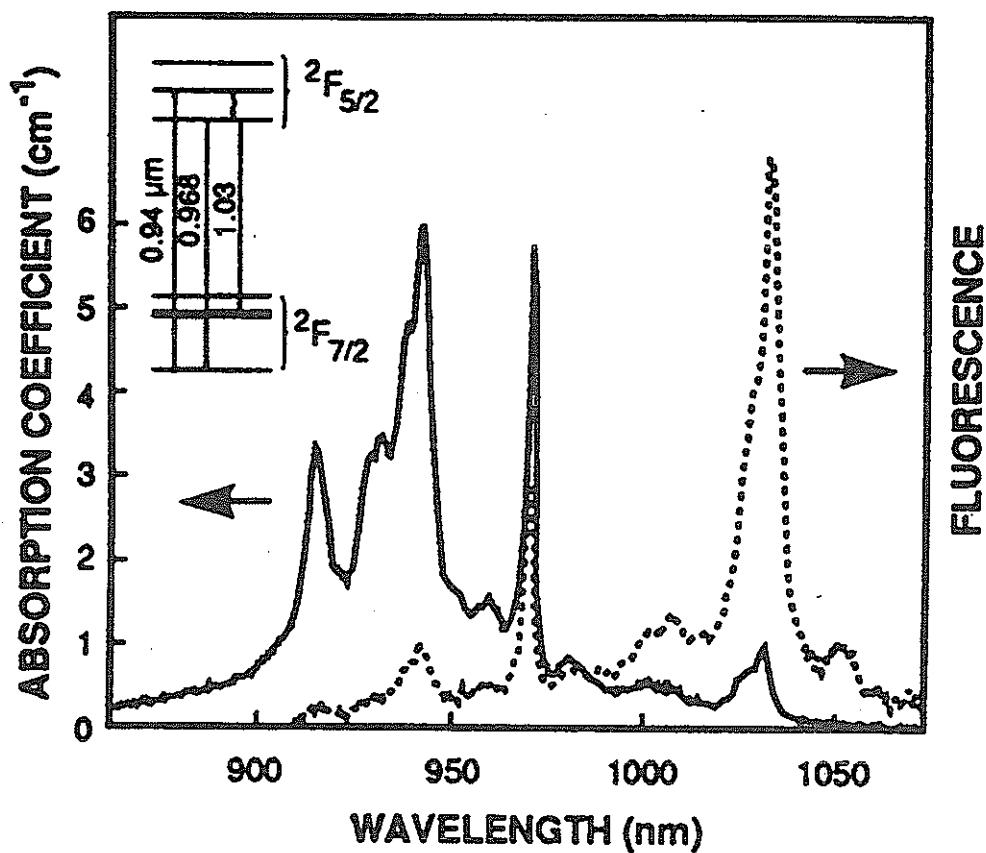
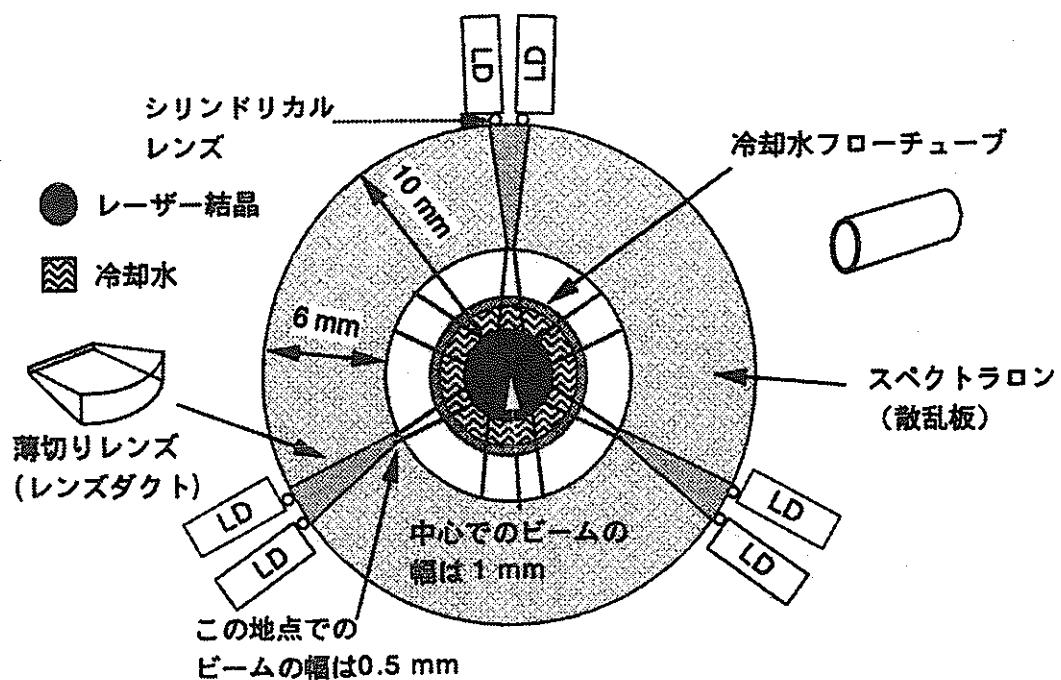
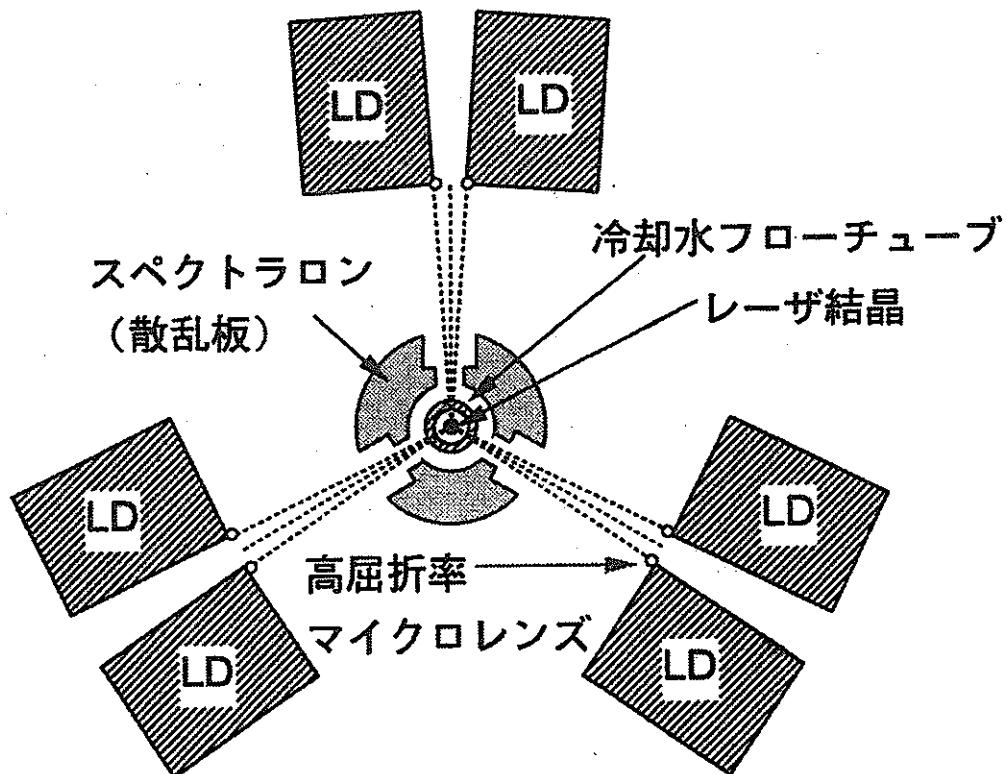


図 18 Yb 濃度 6.5atm% の Yb:YAG レーザーの吸収と
蛍光スペクトル [3]

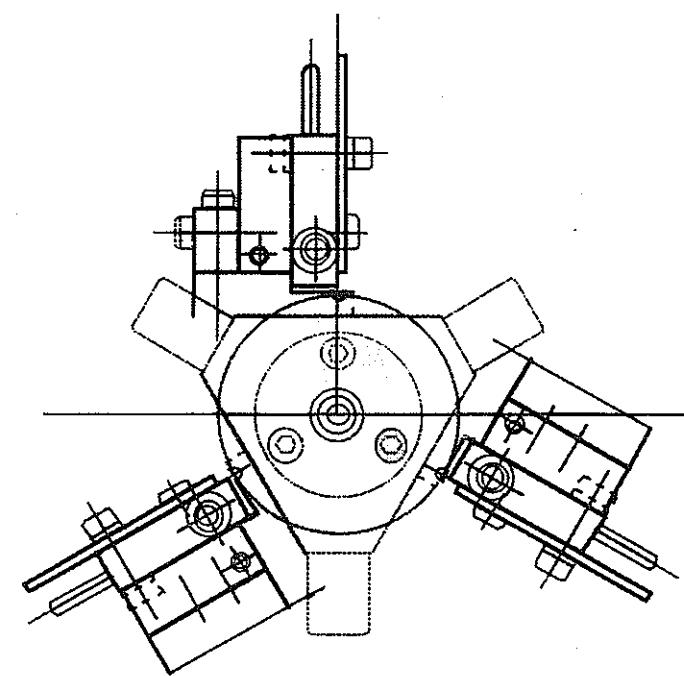


(a) 前回報告書における設計断面図

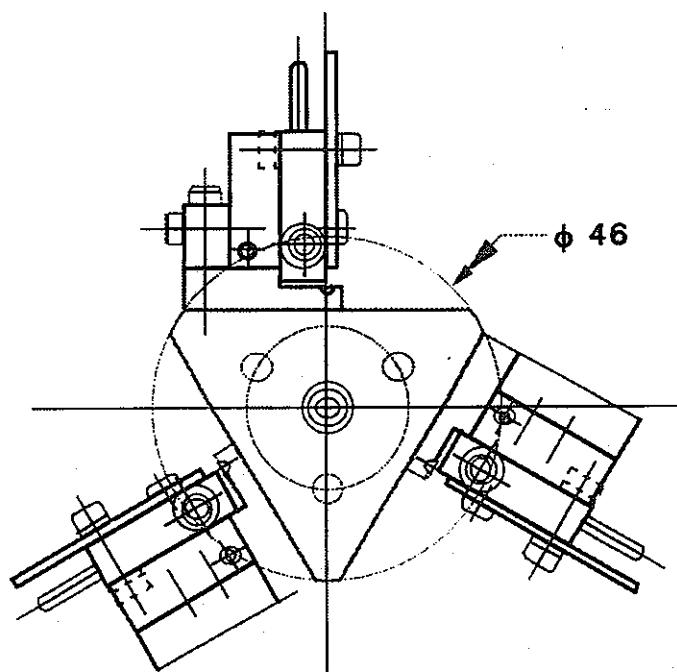


(b) 本報告における完成断面図

図 19 Yb:YAG レーザーの設計断面と完成断面図

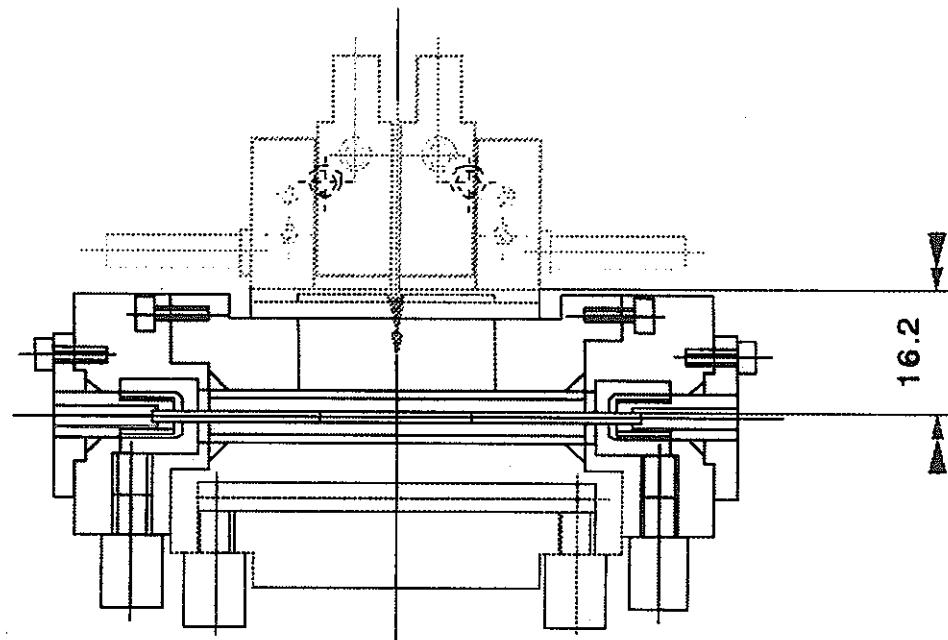


(a)

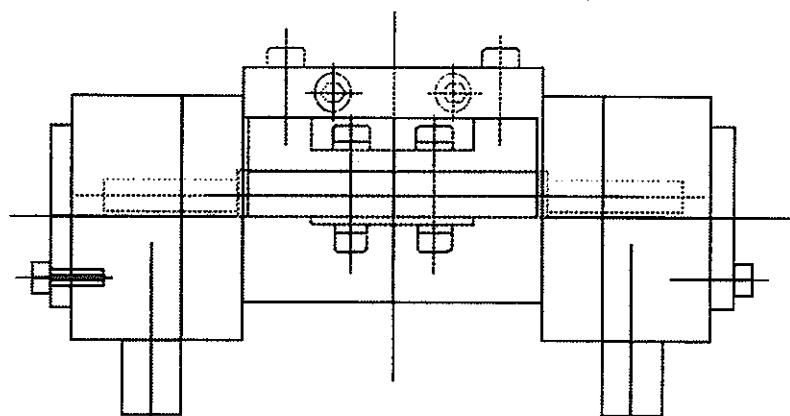


(b)

図 20 3個の LD で励起する Yb:YAG レーザー
(a), (b) とも断面図



(c)



(d)

図 21 3 個の LD で励起する Yb:YAG レーザー
(c) は立面図、(d) は側面図

6. まとめ

本報告は、レーザー除染や消滅処理を目的とした単色 γ 線の発生等に応用が期待される LD 励起 Yb:YAG レーザーの開発を行った結果を示したものである。なお、Yb:YAG 結晶に関して、側面励起方式でレーザー発振に成功したのは本報告が国内初である（平成 10 年 4 月現在）。

本研究で使用した側面励起方式では、結晶側面からの励起光を多重反射させる際に、通常は反射板を用いるところを散乱板を用いた。また、通常励起光を集光するために複雑なレンズ系を組み合わせるのが一般的であるが、マイクロシリンドリカルレンズを励起光源の直近におくだけの単純構造とした。

この結果、240 W (40W×6 個) で励起したときに、Yb:YAG レーザー出力 150 mW (発振波長 1048 nm) が得られた。また、Yb:YAG レーザーのスペクトル観察から光強度のピークは 1048 nm にあることが分かる。この際、励起光のスペクトルも同時に分光器に入射したため、930 nm 付近に励起光のスペクトルのピークが見られた。ビームプロファイラーの測定から、ビームプロファイルにおけるガウス分布とのフィッティング率は、鉛直方向およびこれに直交する方向（水平方向）でいずれも 95%以上の高いフィッティング率となっている。すなわち TEM₀₀ モード成分が 95%以上となっていることがわかった。

通常連続光を用いて 2 cm 程度の長さの Yb:YAG 結晶で発振させる際には、500 W 以上の高いパワーが必要であるが、本研究では 240 W のパワーの連続光で発振を実現することができた。

謝 辞

本報告は、核燃料技術開発部 新型濃縮技術開発室において中村真毅氏（現北海道大学大学院 量子物理工学専攻 波動量子工学講座 極限量子工学 CREST 研究員）が行った LD 励起 Yb:YAG レーザーの開発の成果をまとめたものである。貴重な功績を残されたことに感謝いたします。本研究の上梓に賛同くださった旧核燃料技術開発部 新型濃縮技術開発室 須藤收室長（現環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発グループ グループリーダ）および旧核燃料技術開発部 先端技術開発室室長 船坂英之博士（現環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 先進再処理技術開発グループ グループリーダ）をはじめ、新型濃縮技術開発室、先端技術開発室のみなさまにご協力得られたことに感謝いたします。

平成 11 年 9 月
筆 者

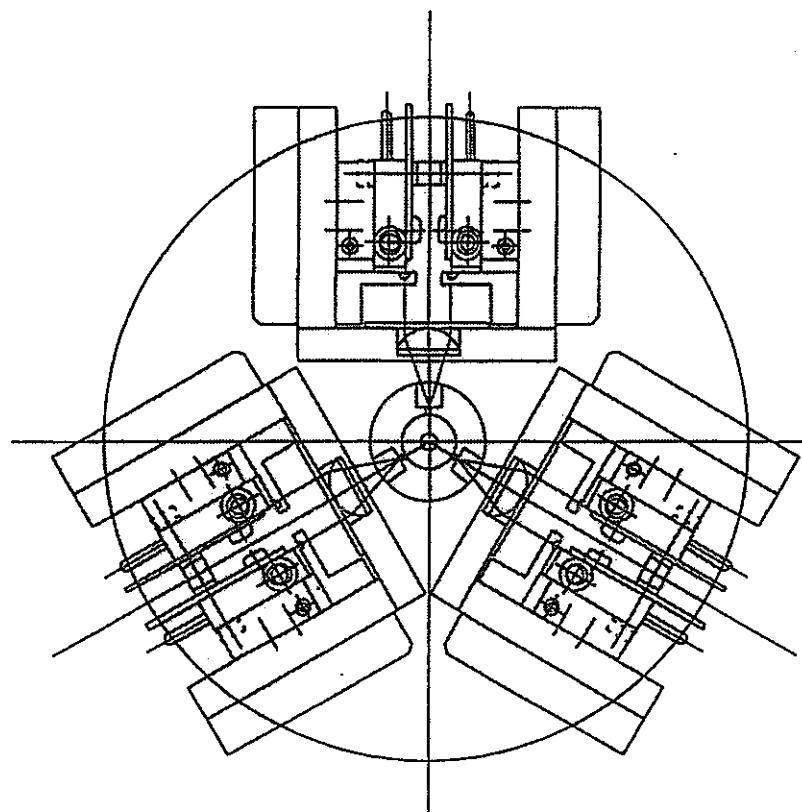
参考文献

- [1] 宮本泰明, 鈴木美寿, 須藤收, “レーザー除染技術に関する調査研究(I)”, “PNC 96BN-3100E-0130X”
- [2] H. Harada et al., "High Energy Resolution Measurement Method of Photonuclear Reaction Cross Section", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.32, No.11, pp. 1189-1191, 1995.
- [3] P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan, "Room-temperature diode-pumped Yb:YAG Laser", *Optics Letters*, vol.16, No.14, pp. 1089-1091, 1991.
- [4] R. Beach, P. Reichert, W. Bennett, B. Freitas, S. Mitchell, A. Volsko, J. Davin, and R. Solarz, "Scaleable diode-end-pumping technology applied to a 100 mJ Q-switched Nd:YLF laser oscillator", *Optics Letters*, vol.18, pp. 1326-1328, 1993.
- [5] S. D. Marshal, L. K. Smith, R. Beach, M. A. Emanuel, K. I. Schaffers, J. Skidomore, S. A. Payne, and B. H. T. Chai, "Diode-Pumped Ytterbium-Doped Sr₅(PO₄)₃F Laser Performance", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.32, No.4, pp. 650-656, 1996.
- [6] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower, "High Energy Resolution Measurement Method of Photonuclear Reaction Cross Section", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.32, No.11, pp. 1189-1191, 1995.
- [7] H. Bruesselbach, D. S. Sumida, "69-W-average-power Yb:YAG Laser", *Optics Letters*, vol.21, No.7, pp. 480-482, 1996.
H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, "Low-Heat High-Power Scaling Using InGaAs-Diode-Pumped Yb:YAG Laser", *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.3, No.1, pp. 105-116, 1997.

- [8] 笠松直史, 関田仁志, 多田昭史, 住吉哲実, 桑野泰彦, " LD 励起アクティブ
ミラー Yb:YAG レーザー", レーザー学会学術講演会第 17 回年次大会,
23aVI8, p.46, 1997.
- [9] T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayashi, and R. L. Byer, "Diode-Pumped Tunable Yb:YAG
Miniture Lasers at Room Temperature: Modeling and Experiment", *Journal of
Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.3, No.1, pp. 100--104, 1997.
T. Taira, W. M. Tulloch, and R. L. Byer, "Modeling of quasi-three-level lasers and
operation of cw Yb:YAG Lasers", *Applied Optics*, vol. 36, No. 9, pp. 1867-1874,
1997.
- [10] 中村真毅, 鈴木美寿, 須藤收, " LD 励起 Yb:YAG レーザーの効率的側面励起
に関する理論的研究", PNC PN8410 97-128
- [11] 平等拓範 (岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 助教授), 私信
- [12] I. Chartier, C. Wyon, D. Pelenc, B. Ferrand, D. P. Shepherd, D. C. Hanna, "High
slope efficiency and low threshold in a diode pumped epitaxially grown Yb:YAG
waveguide laser", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 329,
pp.179-184, 1994.

付録 A Yb:YAG レーザーの詳細設計図面

- 図 A-1 固体レーザチャンバ機構図
- 図 A-2 LD 配置図
- 図 A-3 励起チャンバー詳細図
- 図 A-4 集光器ホルダー
- 図 A-5 ロッド押え図面
- 図 A-6 ロッド押え
- 図 A-7 側面フランジ図面
- 図 A-8 LD スライド台図面
- 図 A-9 励起機構図
- 図 A-10 LD 励起機構図
- 図 A-11 側板
- 図 A-12 ベースプレート
- 図 A-13 2 光線趣向用シリンドリカルホルダー
- 図 A-14 レンズ押え
- 図 A-15 LD 固定台
- 図 A-16 水配管図



LD配置図

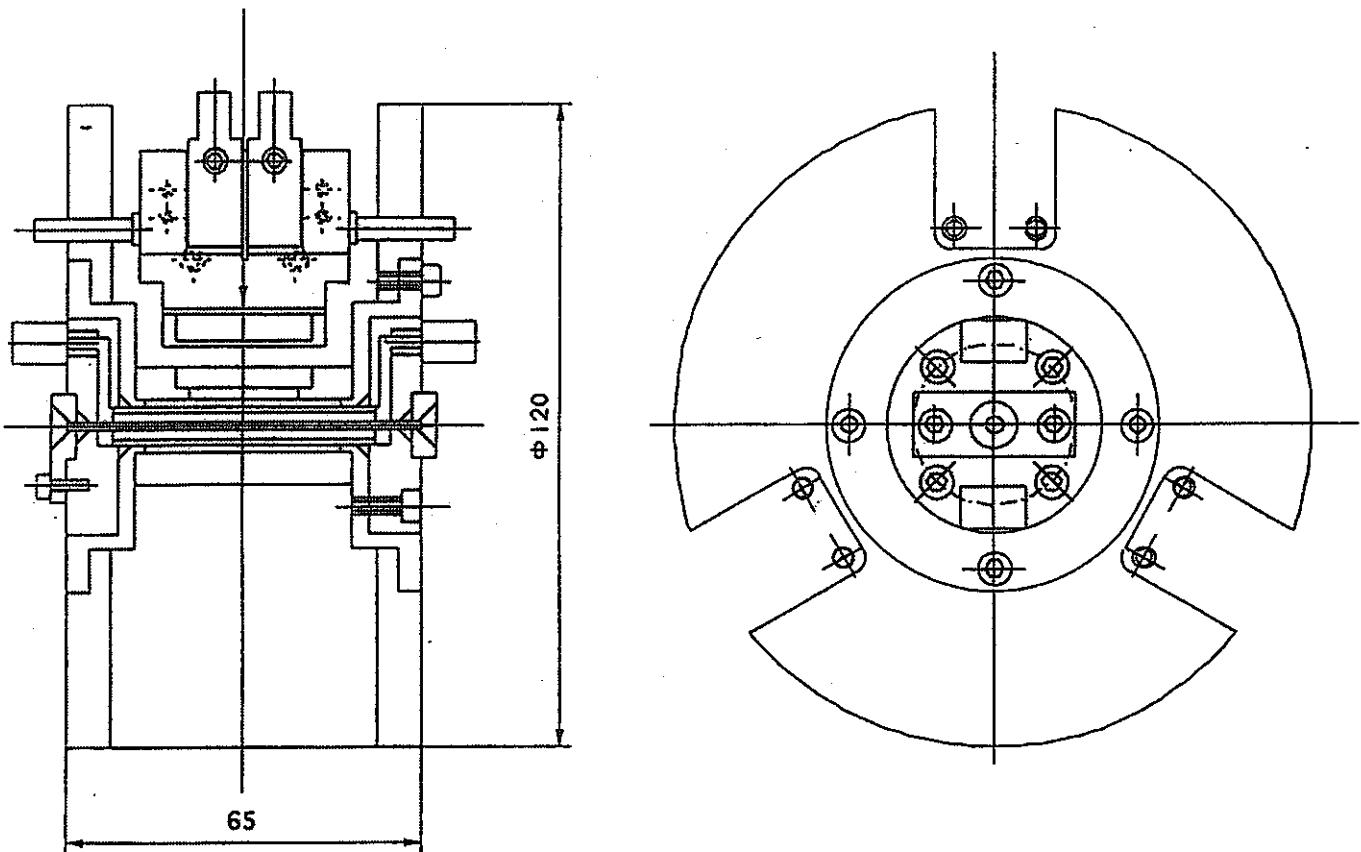


図 A-1 固体レーザチャンバ機構図

単位 [mm]

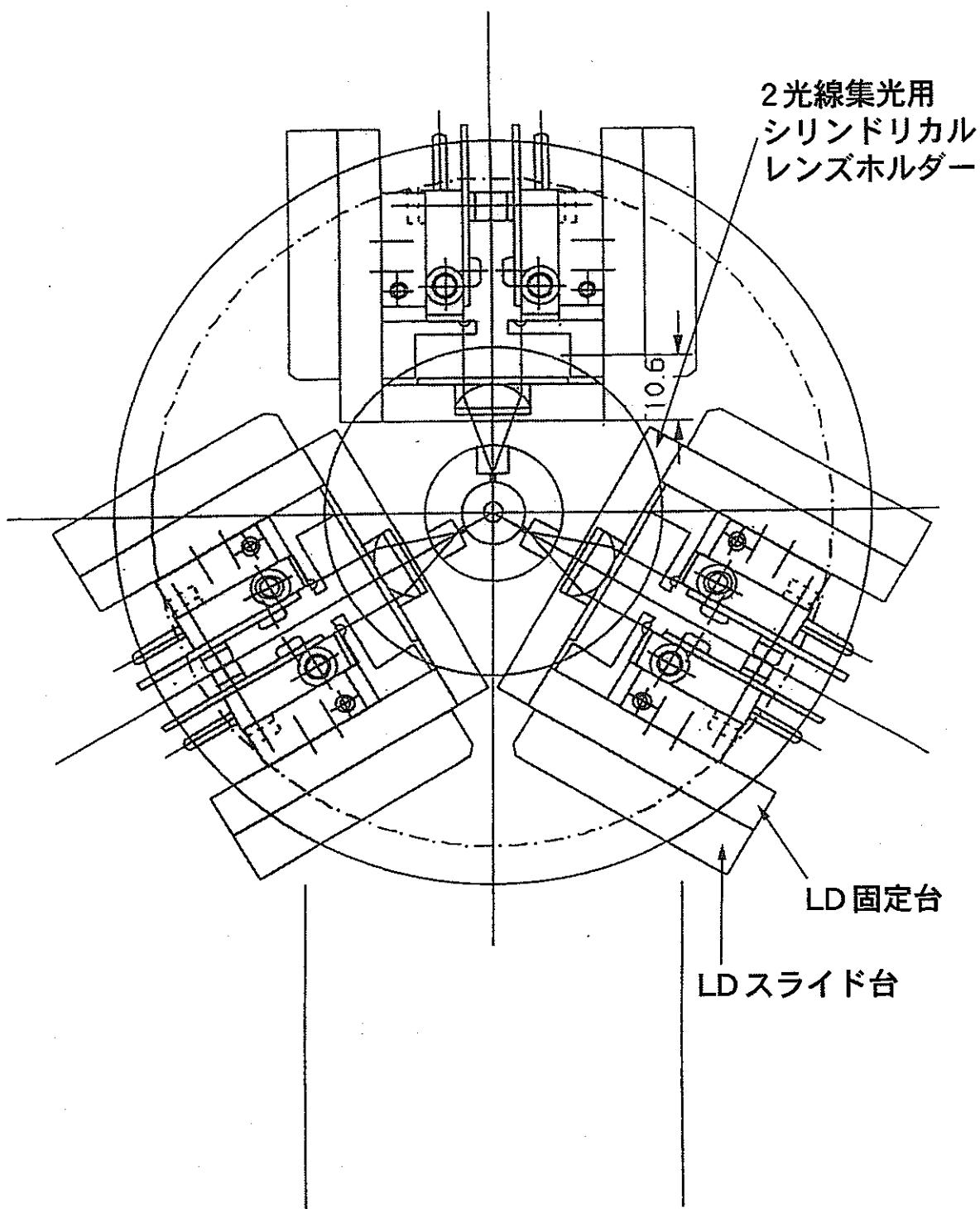


図 A-2 LD配置図
(Yb:YAG 結晶は中央部に配置)

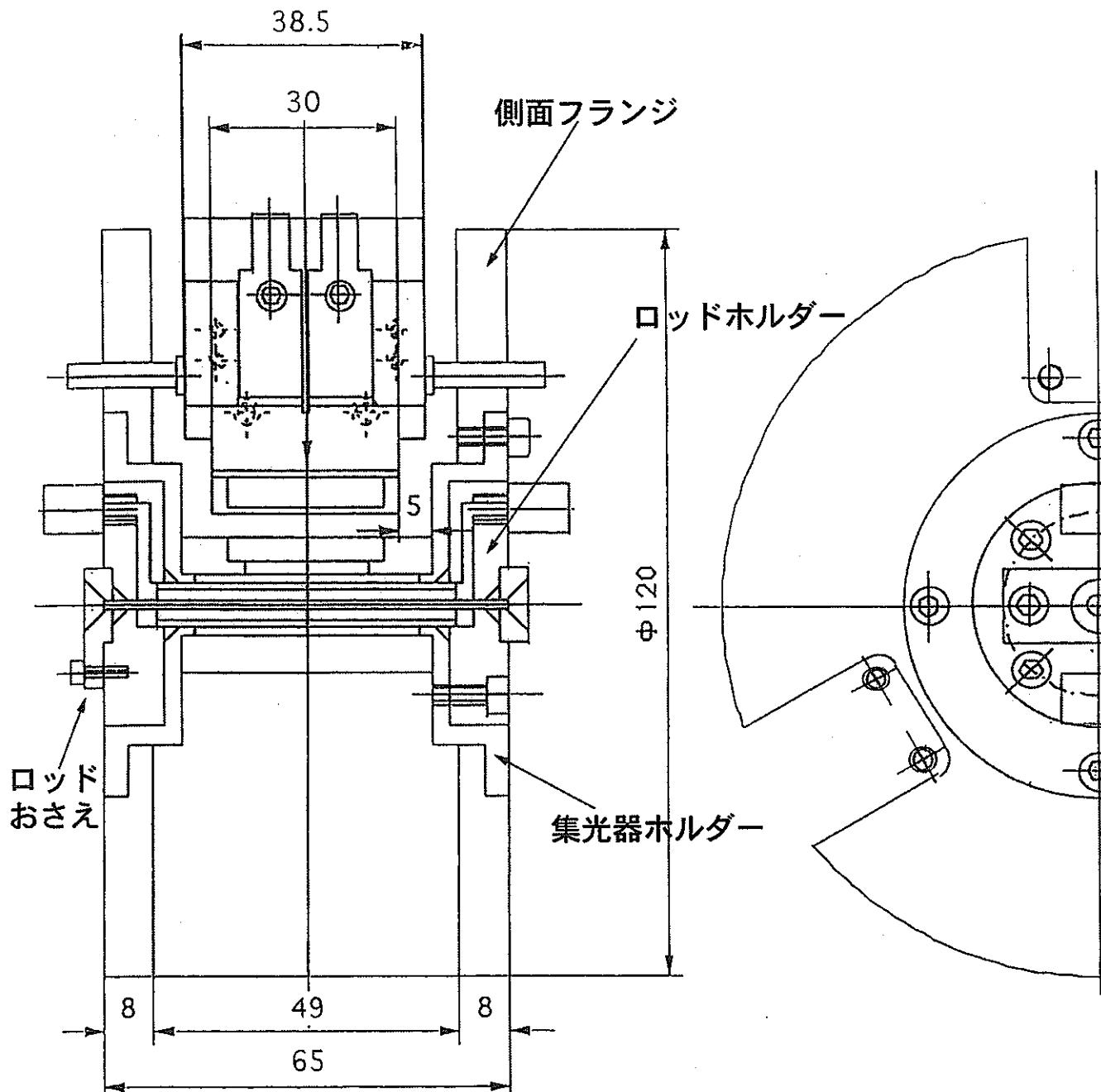


図 A-3 励起チャンバー詳細図
(光軸に平行な断面)

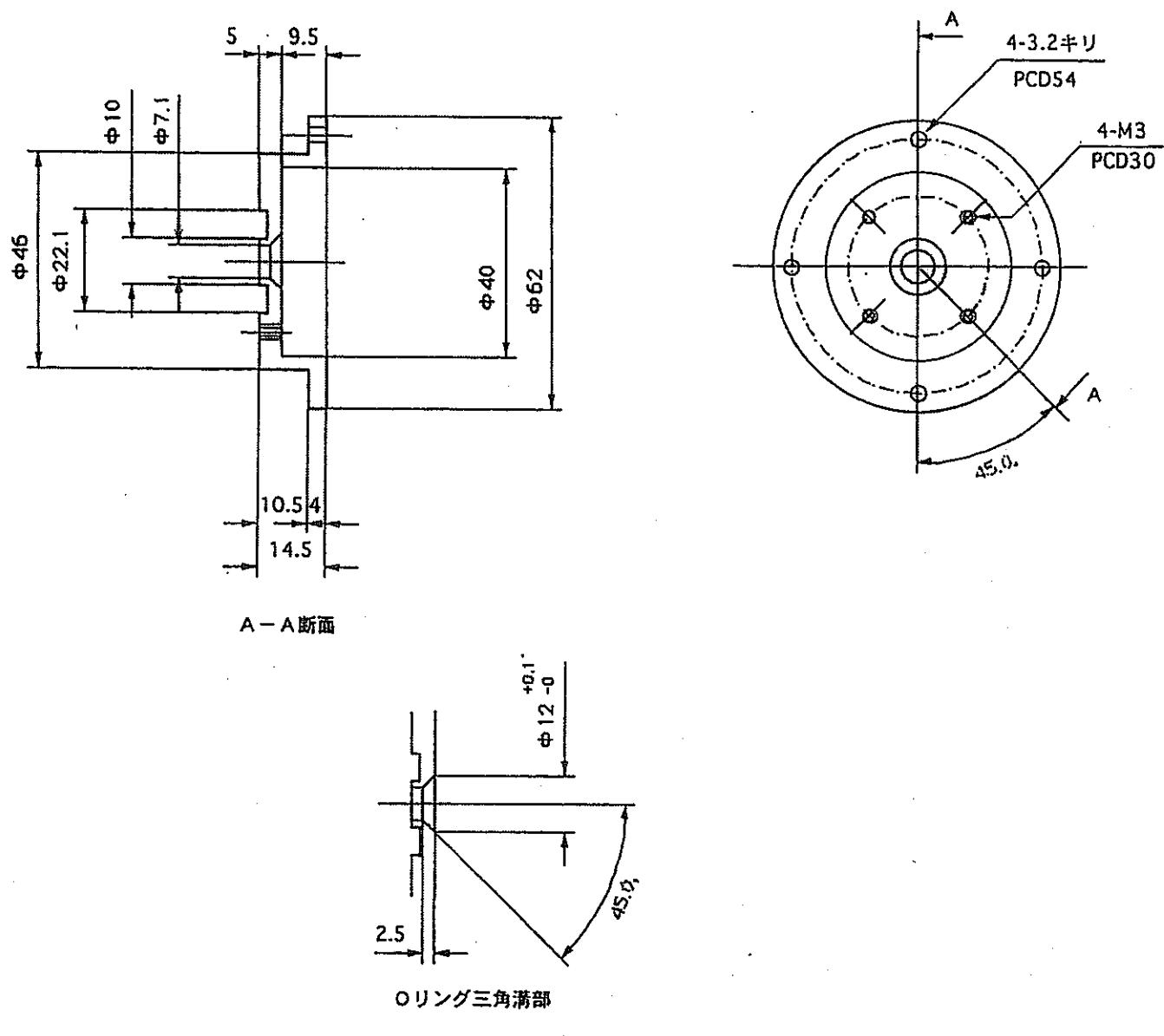


図 A-4 集光器ホルダー

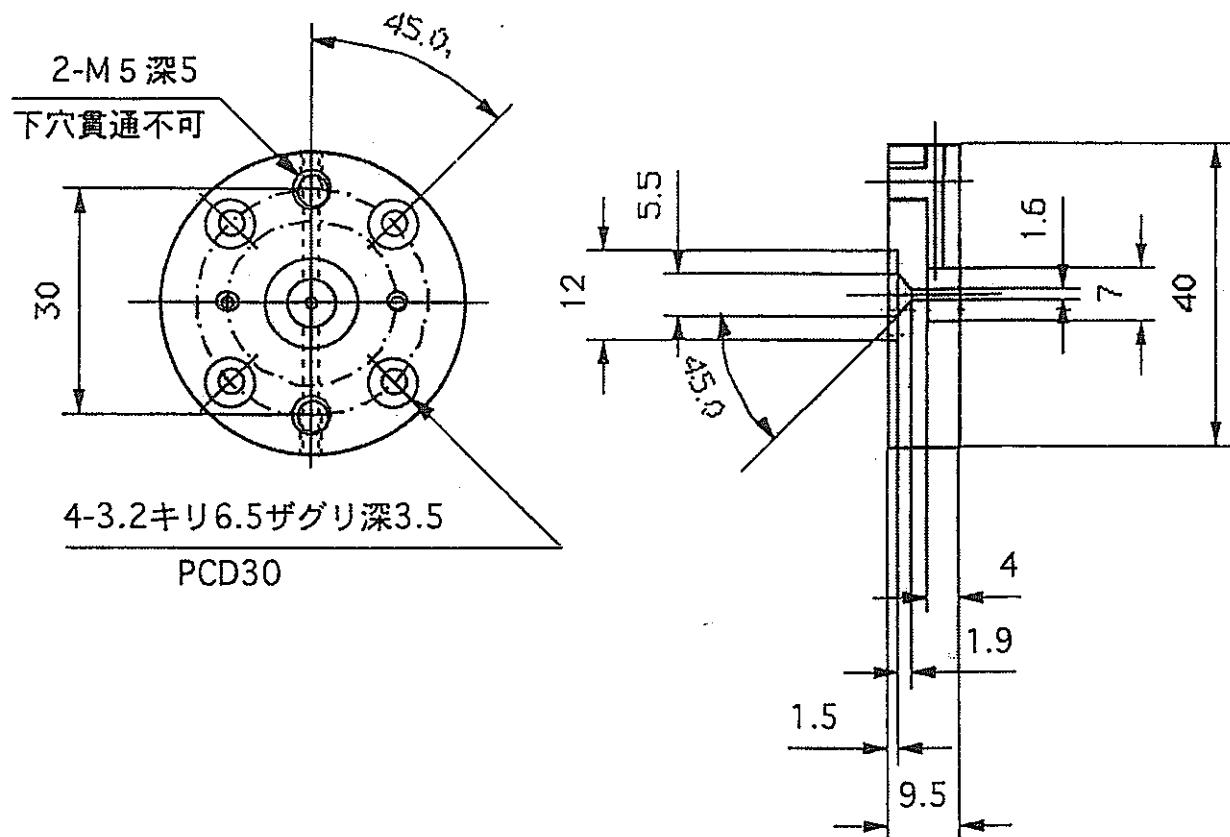
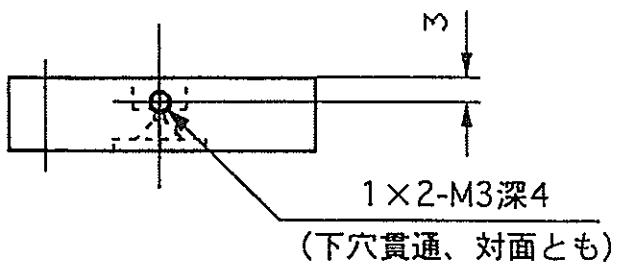


図 A-5 ロッド押え図面

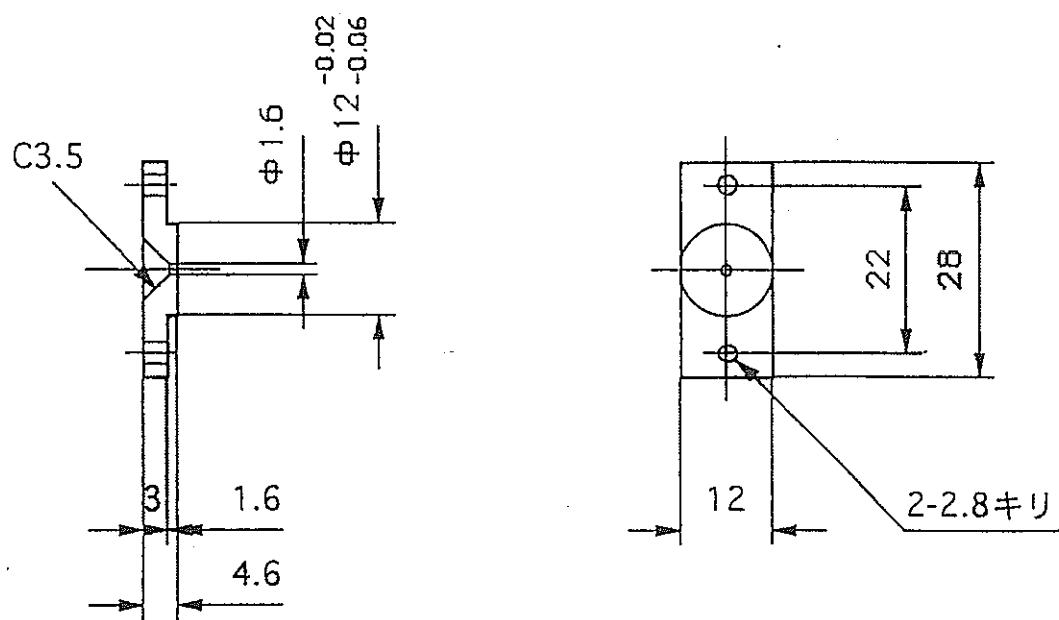


図 A-6 ロッド押え

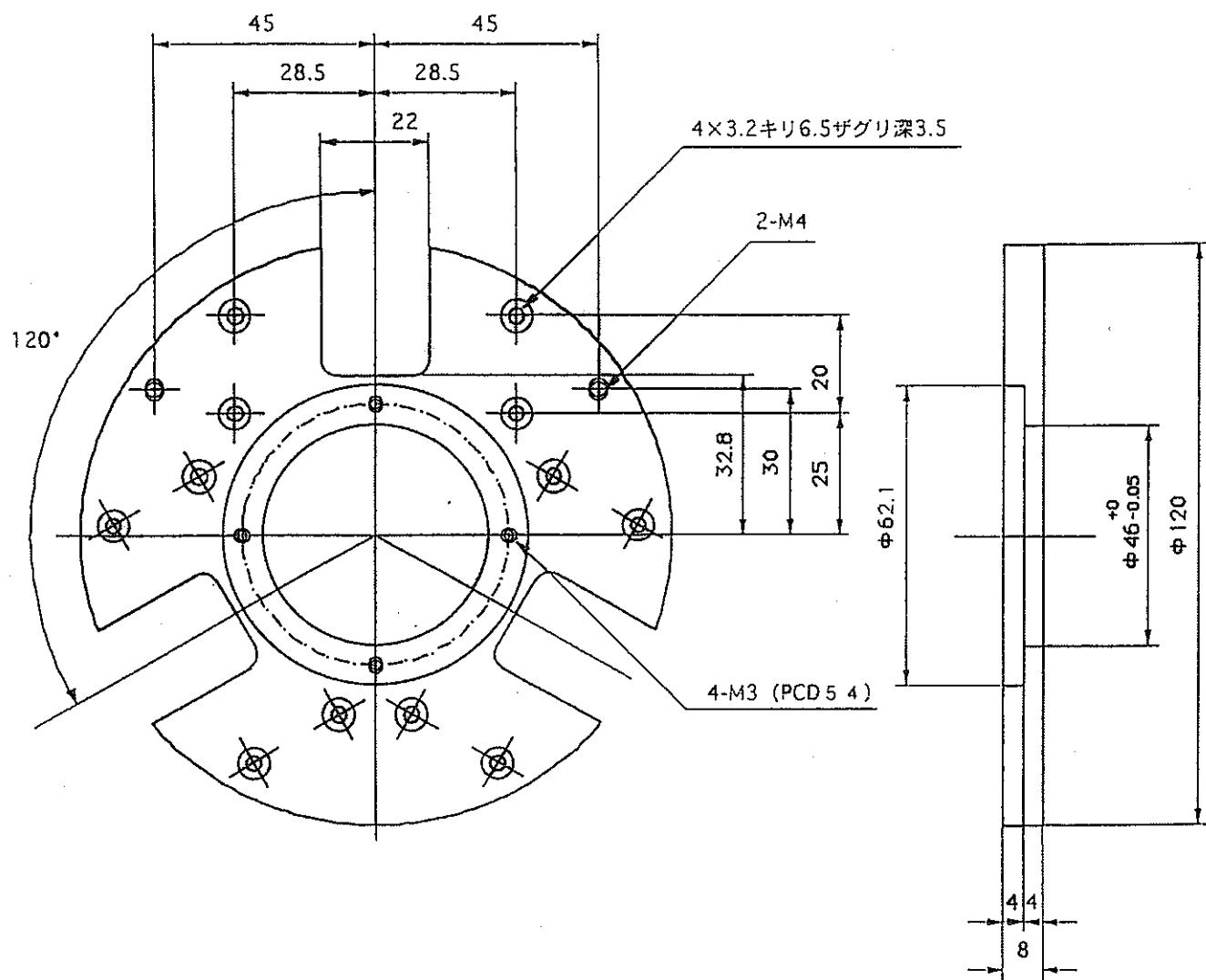


図 A-7 側面フランジ図面

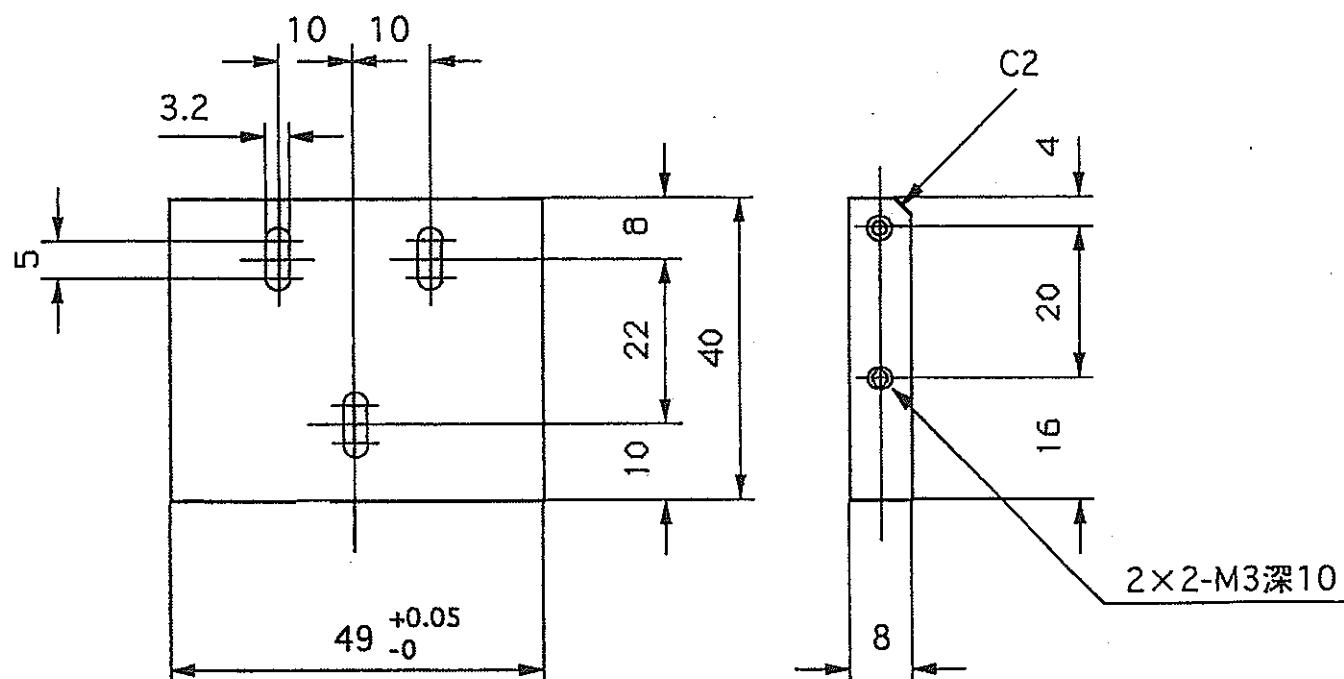


図 A-8 LD スライド台図面

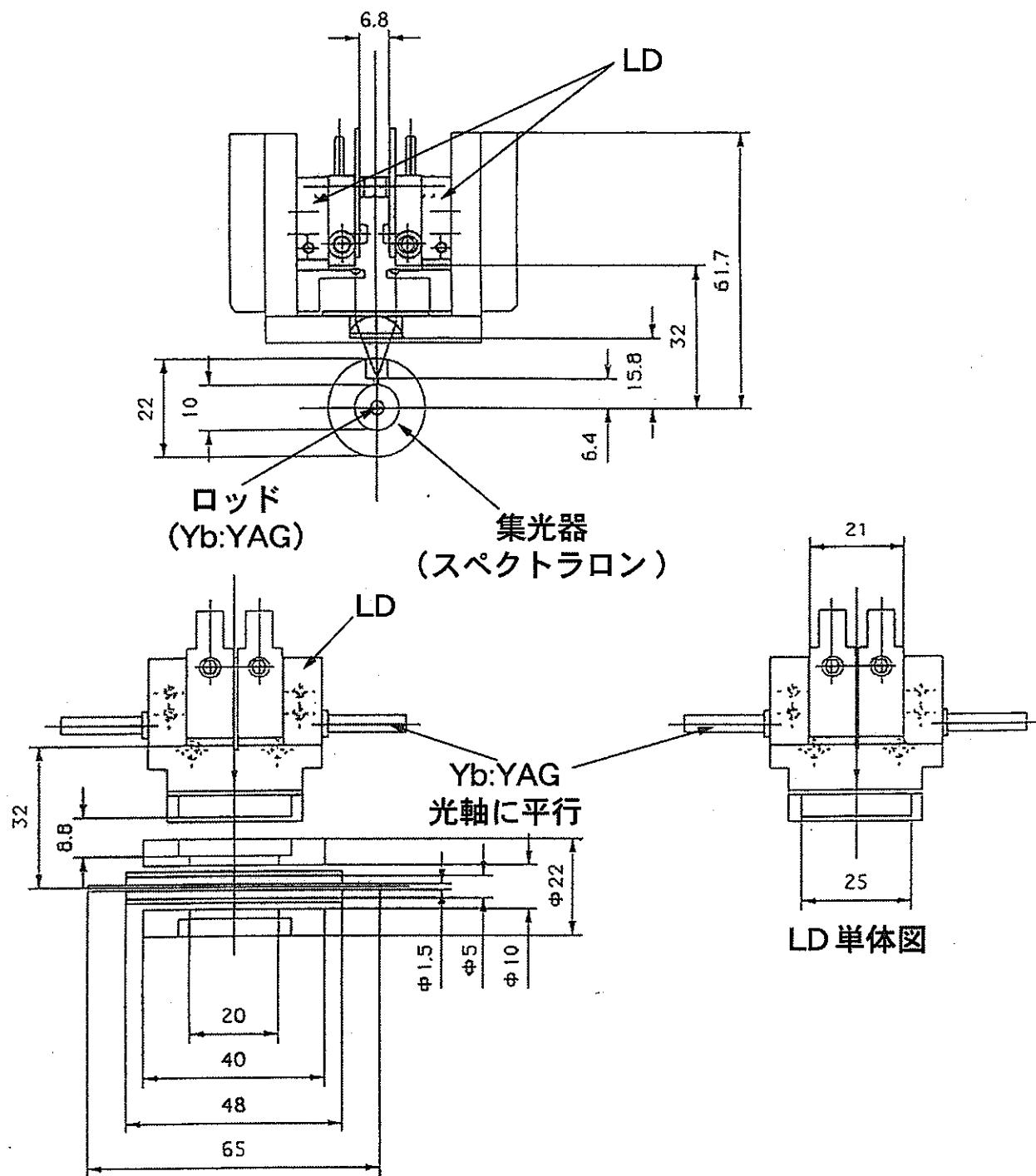


図 A-9 励起機構図

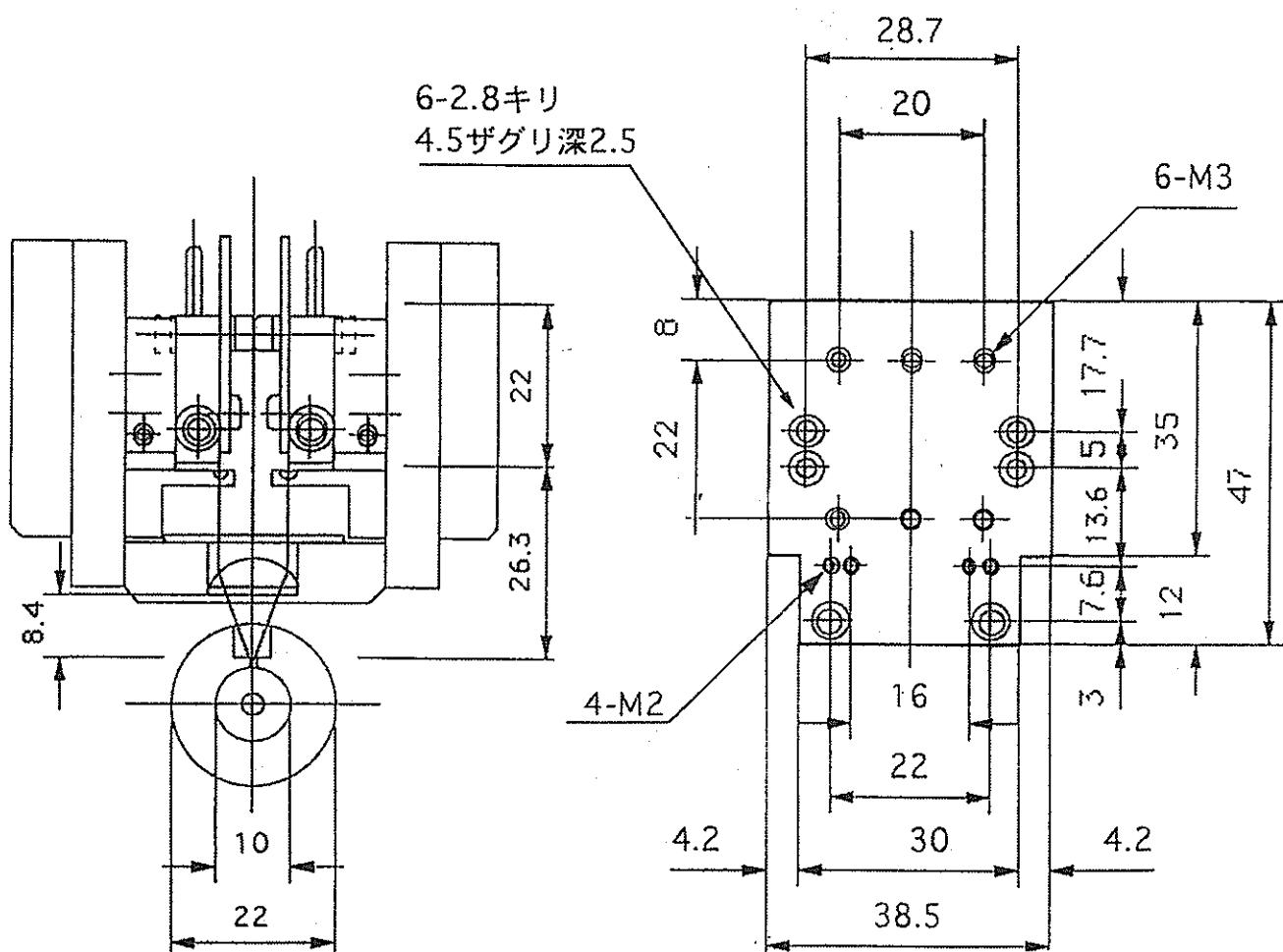


図 A-10 LD 励起機構図
(Yb:YAG 光軸に垂直な断面)

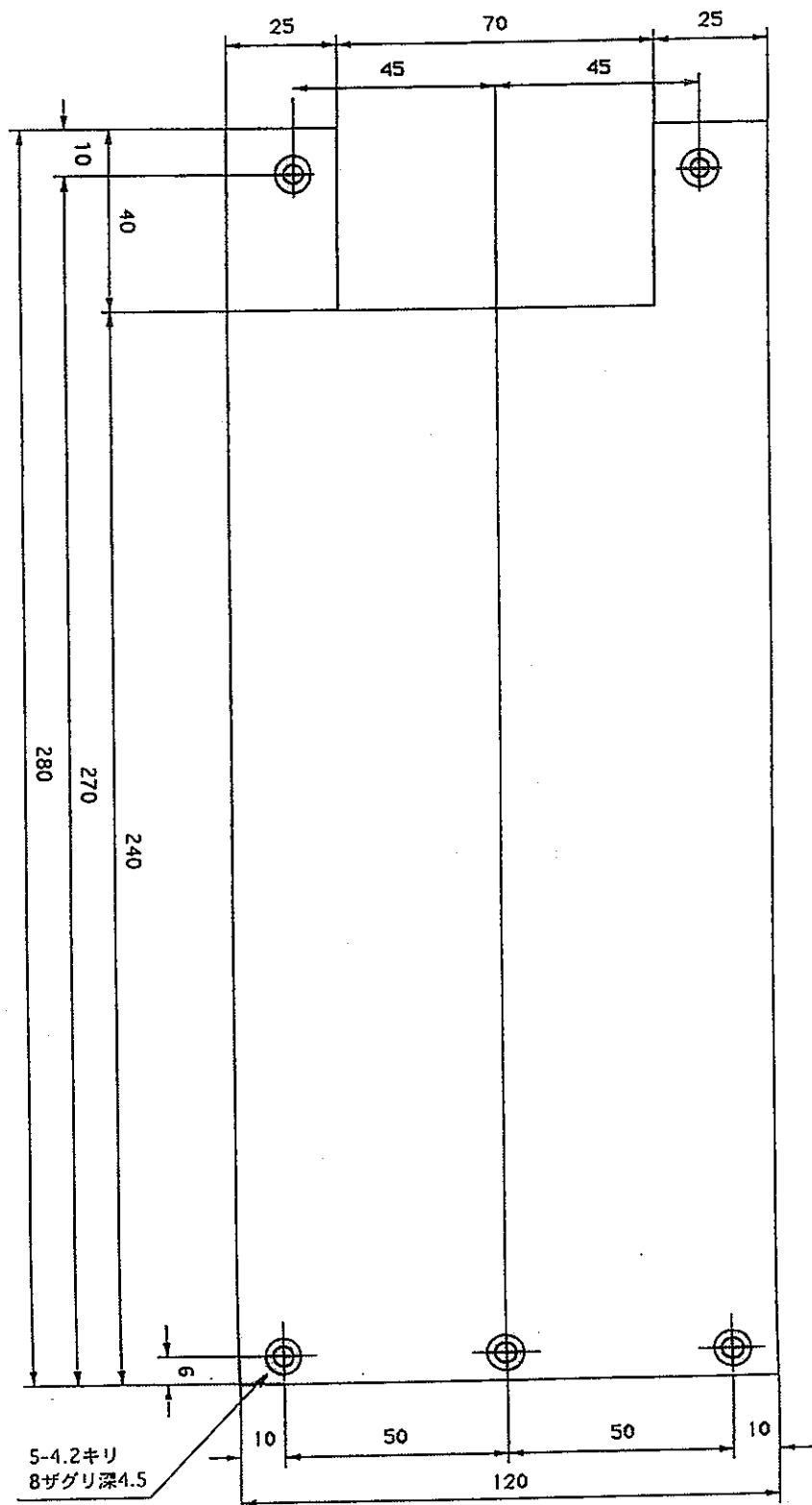


図 A-11 側板

t=12

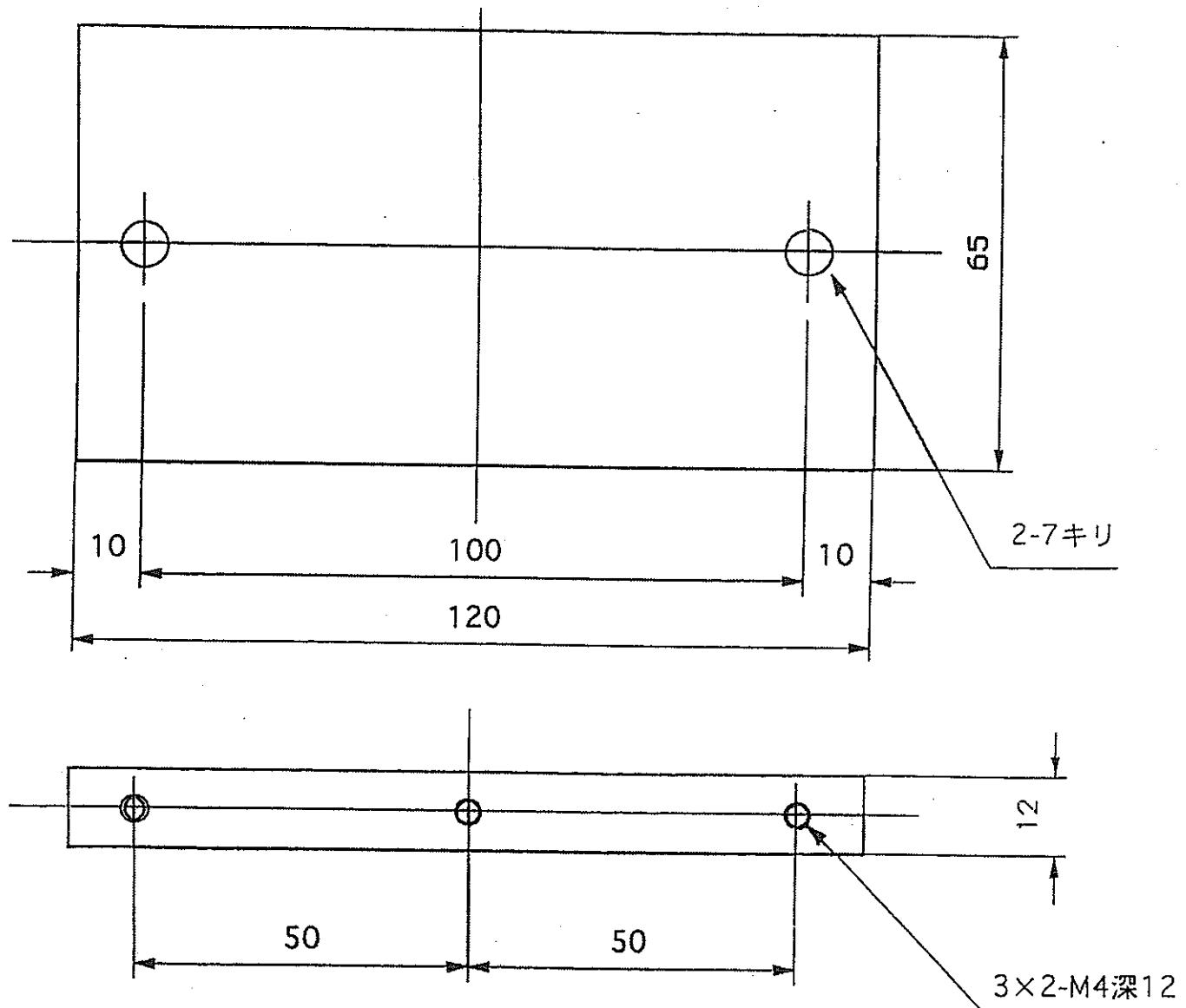


図 A-12 ベースプレート

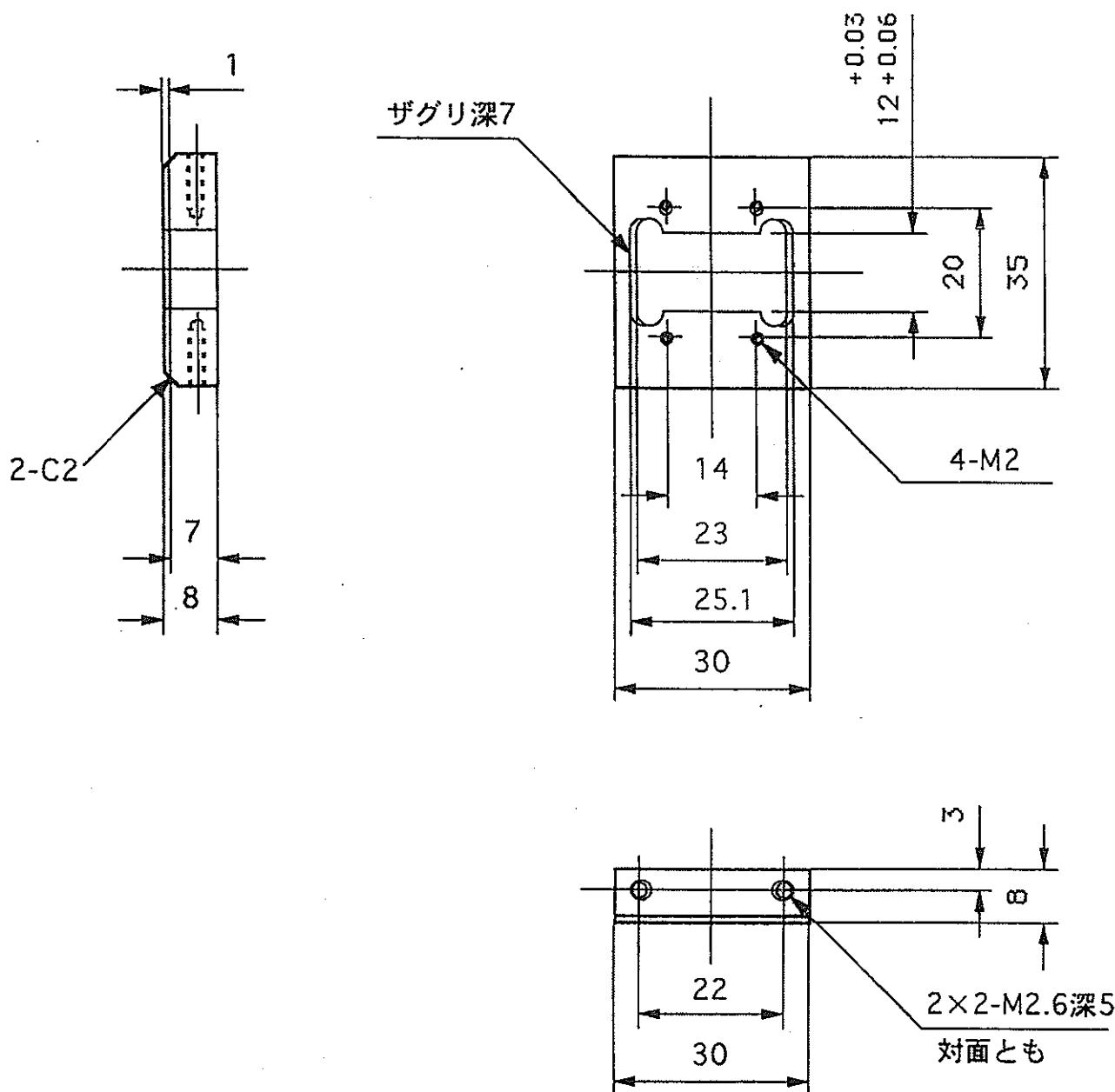


図 A-13 2光線集光用
シリンドリカルレンズホルダー

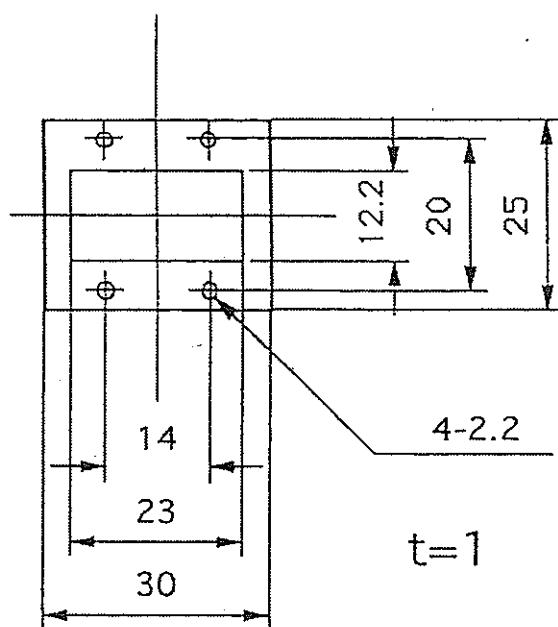


図 A-14 レンズ押え

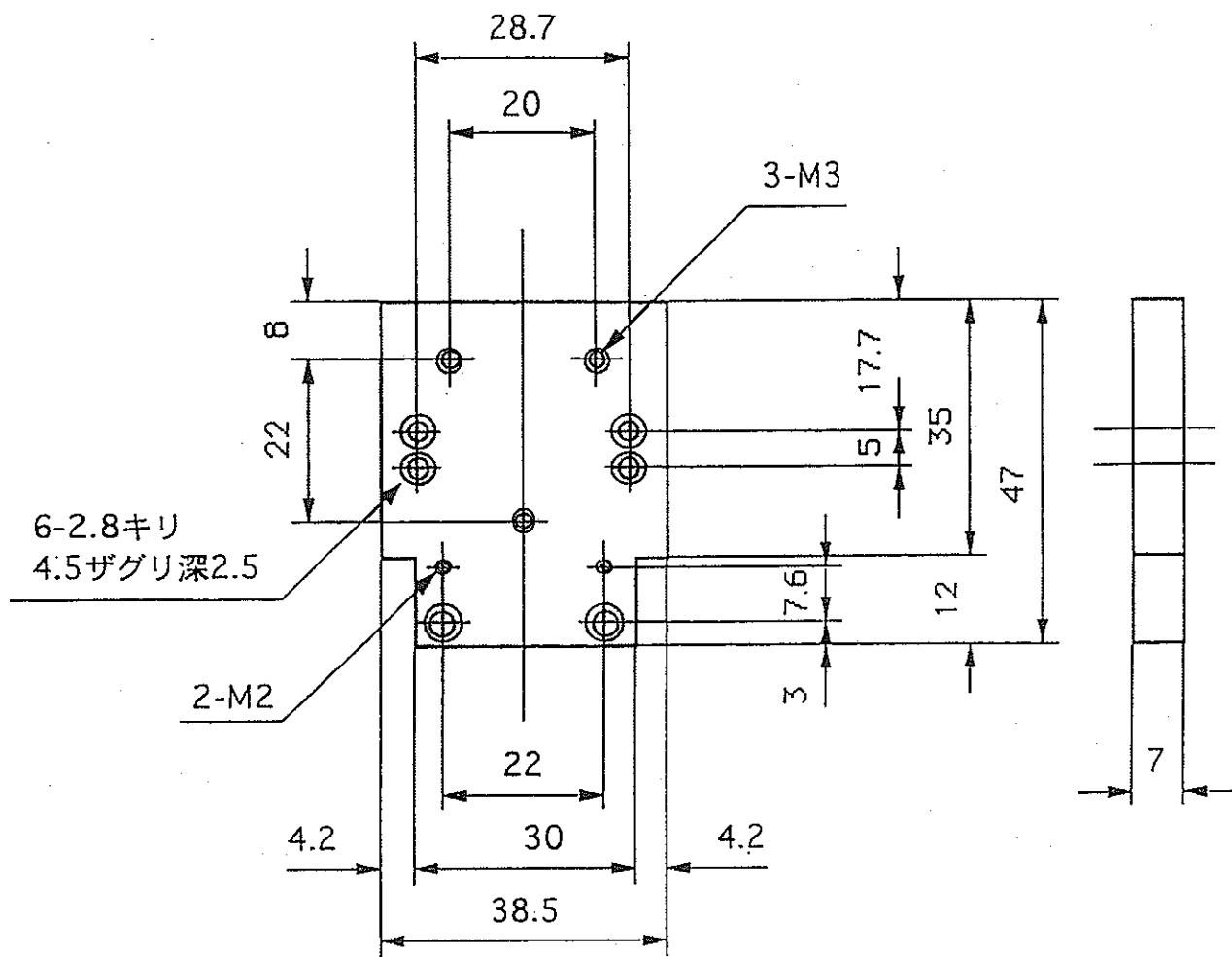


図 A-15 LD 固定台

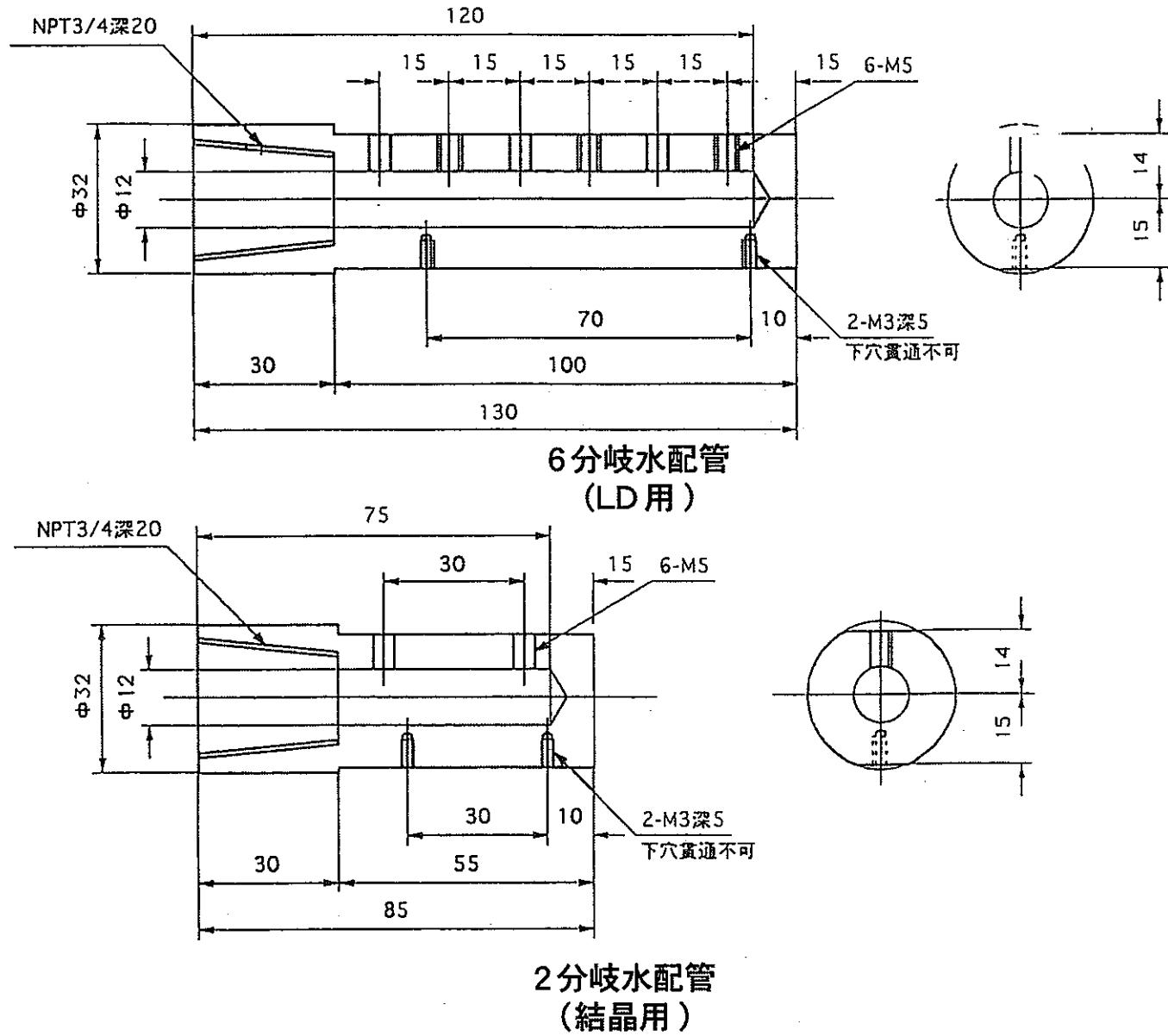


図 A-16 水配管図

付録 B 改良部分の Yb:YAG レーザーの設計図面

- 図 B-1 改造後の側板フランジ
- 図 B-2 改造後の集光器ホルダー
- 図 B-3 励起チャンバー詳細図
- 図 B-4 レーザー発振器
- 図 B-5 外観図（斜め上方より）
- 図 B-6 外観図（上方より）
- 図 B-7 外観図（側方より）
- 図 B-8 LD 冷却用水配管
- 図 B-9 LD 冷却用水配管
- 図 B-10 結晶冷却用水配管

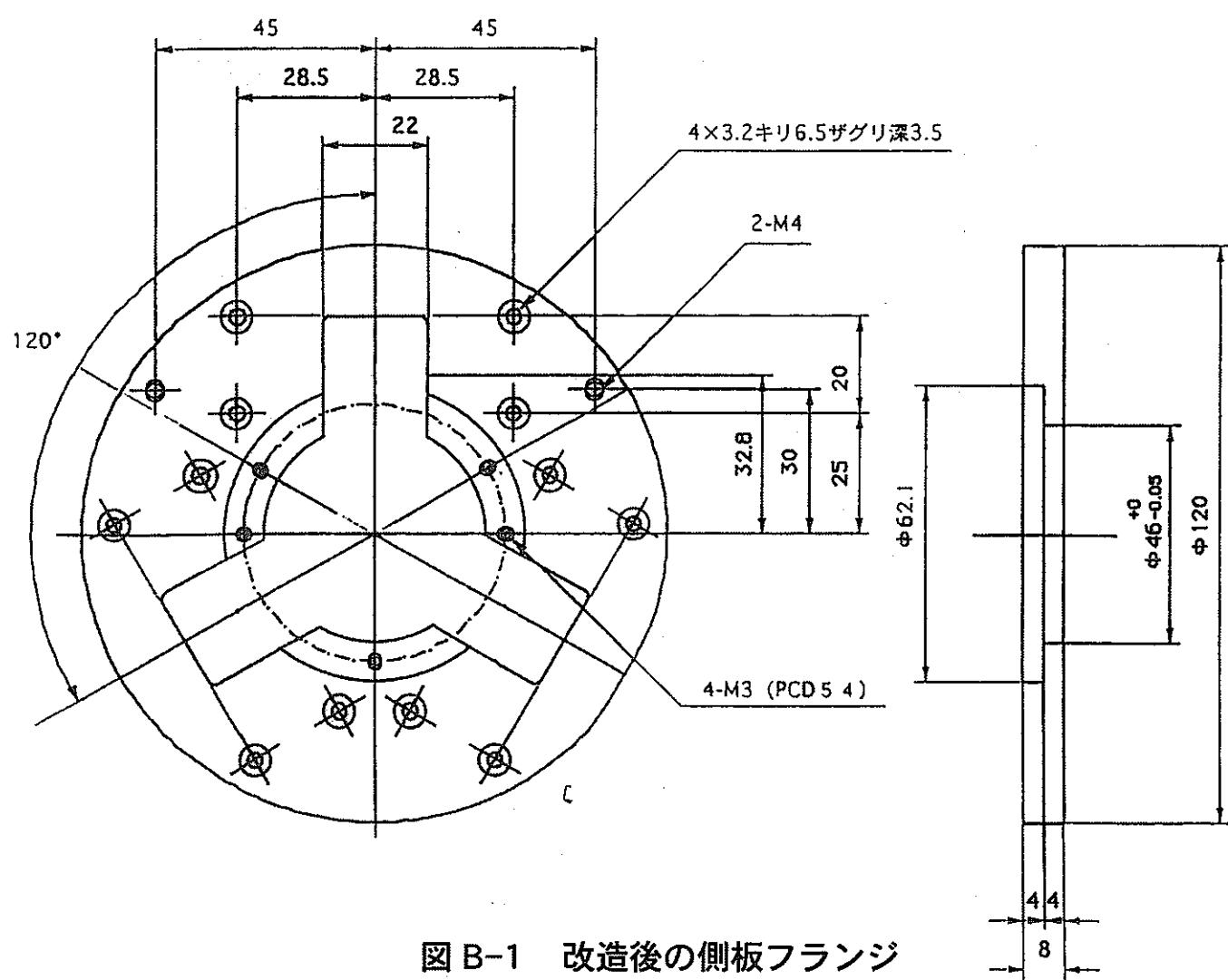


図 B-1 改造後の側板フランジ

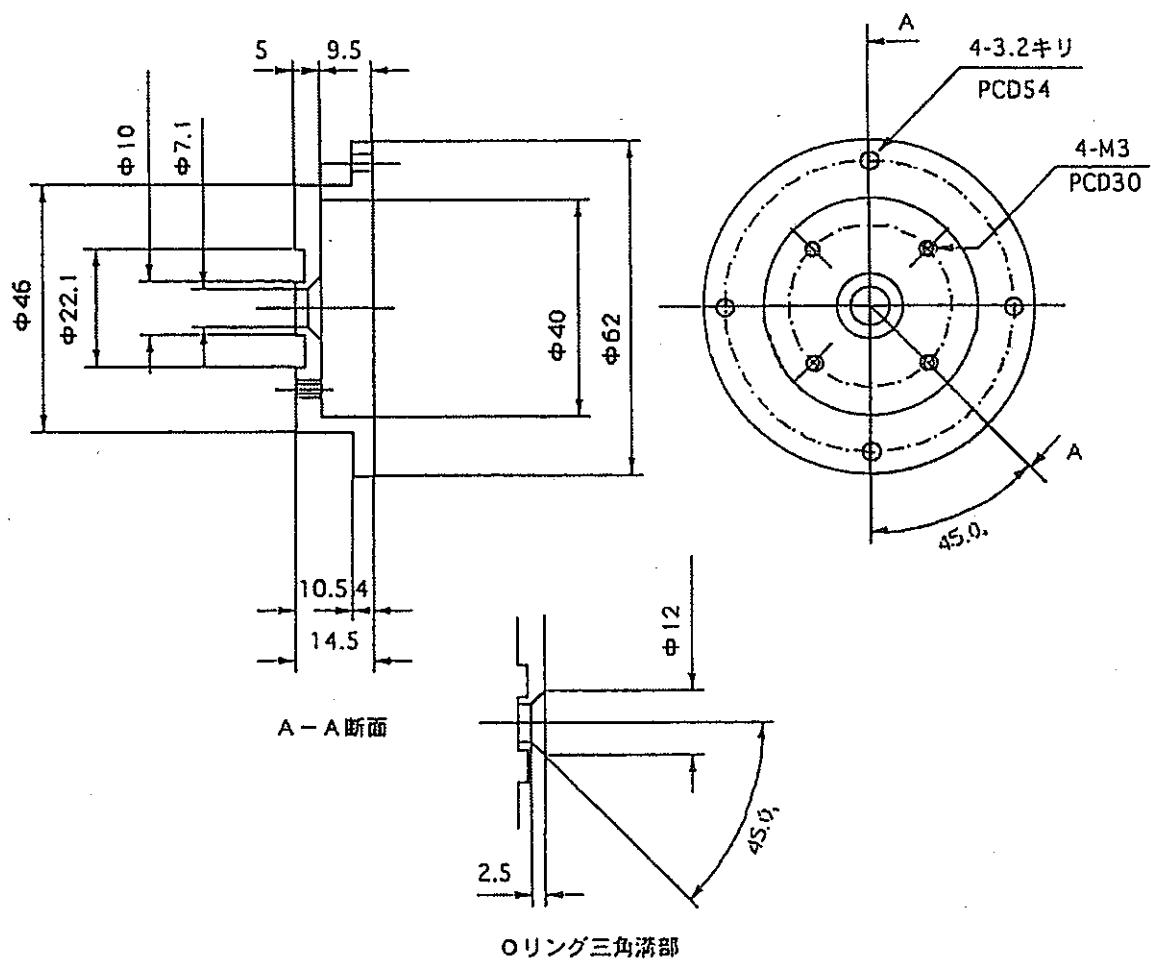


図 B-2 改造後の集光器ホルダー

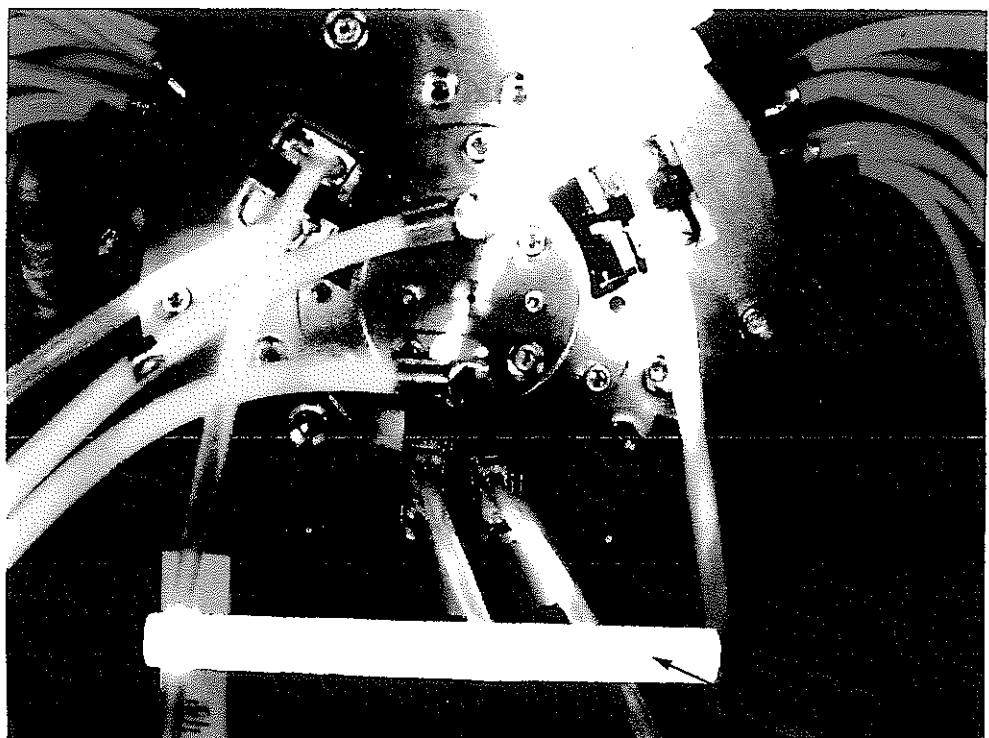


図 B-3 レーザー発振器
(Yb:YAG 光軸方向から)

タバコ

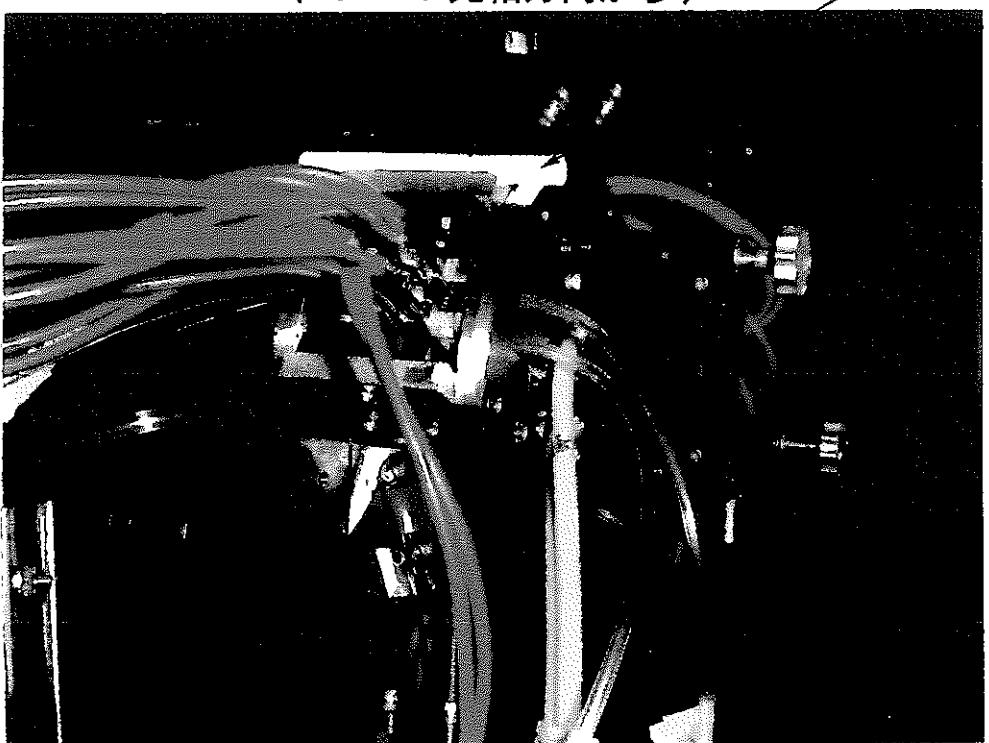


図 B-4 外観図
(斜め上方より)

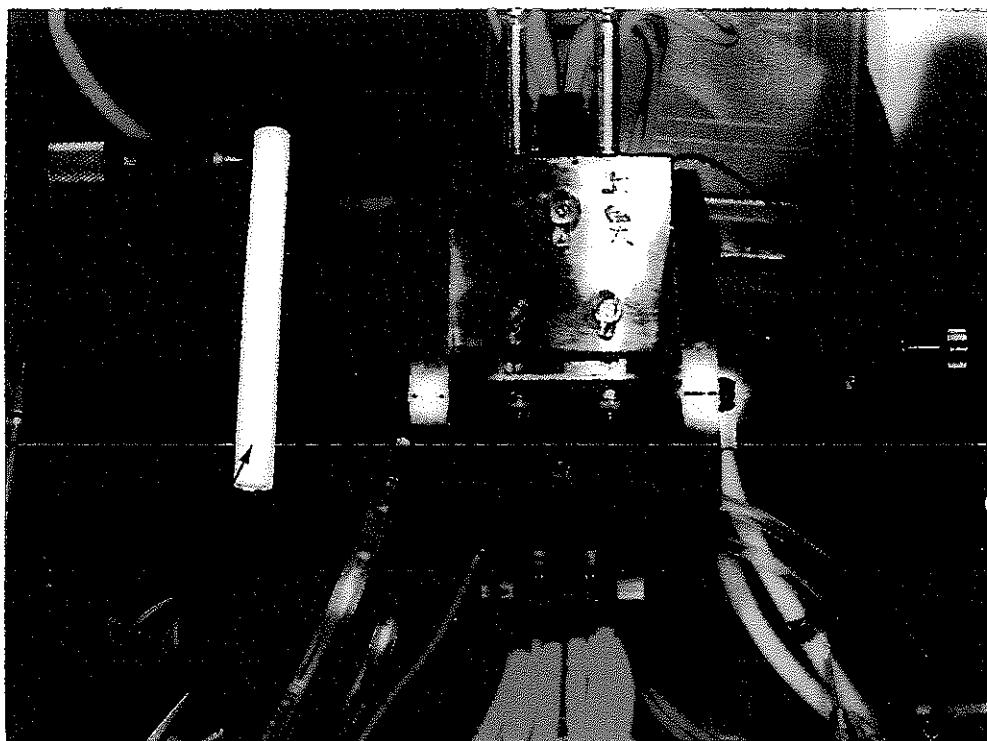


図 B-5 外観図
(上方より)



図 B-6 外観図
(側方より)

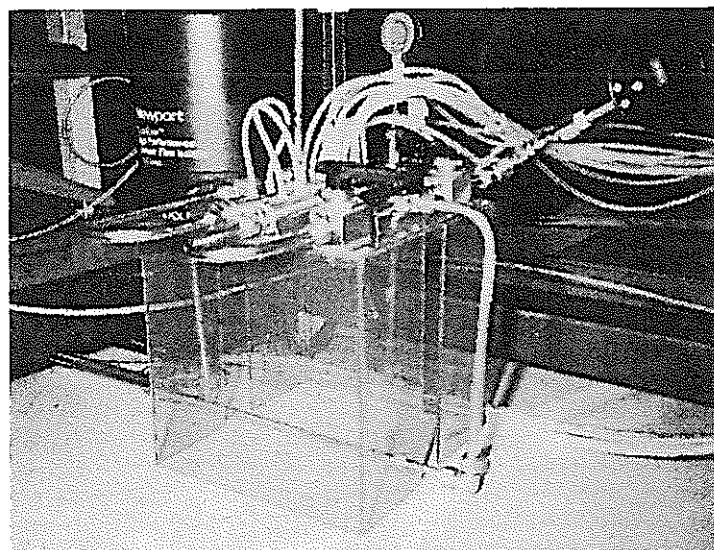


図 B-7 LD 冷却用水配管
(冷却器 HX-75 に接続)

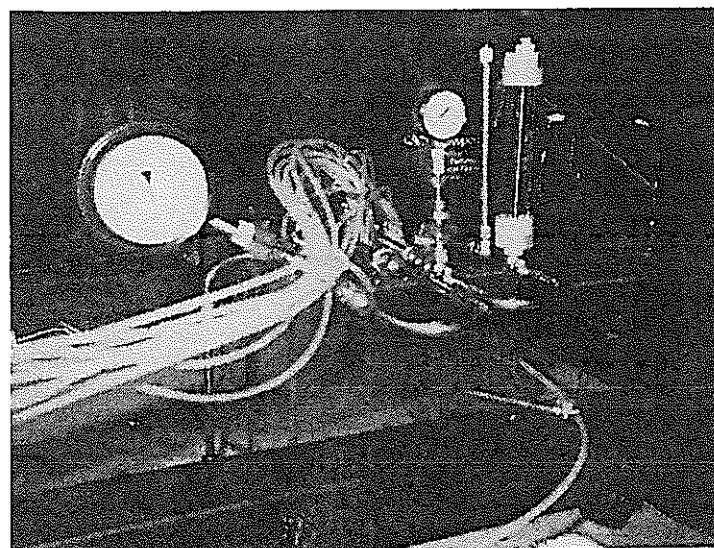


図 B-8 LD 冷却用水配管
(冷却器 HX-75 に接続)

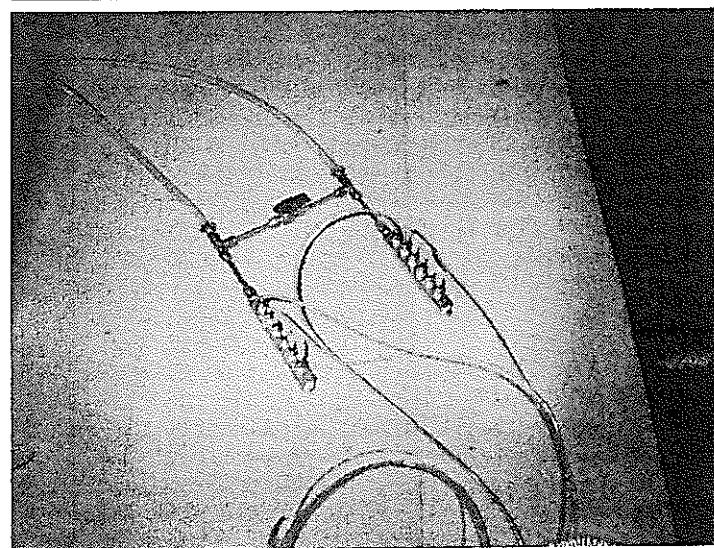


図 B-9 結晶冷却用水配管
(冷却器 HX-150 に接続)