

5kW 炭酸ガスレーザ装置の開発

Development of 5kW CO₂ Laser System

高密度エネルギー加工の一つに、炭酸ガスレーザ加工が注目されている。その特長とするところは、空气中を伝搬し非接触でビーム集光できることと、溶接・切断・熱処理加工が同一レーザビームでできる多様な加工性にある。

高速軸流形レーザ発振器の1～5kW シリーズ化と各種加工ヘッドとから成る日立炭酸ガスレーザ装置を開発・製品化した。

本装置は、5kW 連続出力・発振効率22%・ビーム回折角(半角)1.2mradの安定良質なレーザビームを発生させ、加工ヘッドでビームを絞り、例えば鋼板厚み5mmの高速溶接も確認した。今後、レーザビーム分配技術により多ワークステーション加工も可能となり、ファクトリーオートメーション的な加工現場導入が期待できる。

岩木清栄* Kiyoei Iwaki

小寺正雄* Masao Kotera

菅原宏之** Hiroyuki Sugawara

1 緒 言

LASERは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字を採ったもので、「光の増幅器」である。1960年、Maimanがルビーでパルスレーザを実現して以来、コヒーレント(単一波長)な光であるがために、微細なビームに絞れる熱源として、多種のレーザ発生媒質が発見され製品化されている。大別すると、固体レーザ・色素レーザ・半導体レーザ・気体レーザであり、加工用大出力用としては、気体レーザが主流である。

気体レーザのうち、特にCO₂ガスを用いたレーザが数キロワット以上の出力が得られることが知られている。CO₂レーザは図1に示すように、封入ガス、放電電極及び光共振鏡の配置構造によって、軸流形と直交形に大別される。

日立製作所は、レーザ出力が安定で、コンポーネントの組合せだけで大出力が得られる高速軸流形を採用し、連続出力5kW機を開発し、1号機を昭和56年3月、通商産業省工業技術院四国工業試験所に納入した。

以下、5kW出力の高速軸流形CO₂レーザ装置について述べる。

2 高速軸流形CO₂レーザ装置

図2に、CO₂レーザ装置の構成を示す。すなわち、発振器の放電管を駆動するDC電源盤(DC 28kV, 1.4A)・発振器内に封入するレーザガスボンベ(CO₂・N₂・Heの混合ガス)・封入ガス冷却のためのチラー装置とクーリングタワー・封入ガスの強制循環用インペラ付電動機とインバータ(電動機回転数制御)・全体制御用の操作盤・発振器本体及び加工室から成る。加工室は発振器の出力鏡から大気中に出力されたレーザビームをガイドし、45度に方向変更した後、加工ヘッド部のレンズで集光し、加工テーブル上のワーク対象物に微細スポット熱源を与える。

レーザ発振の原理は、図2で放電管の両端に放電電極を設け、その中に、高速に混合ガスを循環させる。放電によって励起された放電ガスから10.6μmのCO₂レーザ光は両端に配置された反射鏡と出力鏡から成る光共振器によって強め合い、一部が出力鏡から外部(図2の右側)へ放出される。一方、混合ガスはインペラ付電動機で強制循環されているが、放電励起後の混合ガス温度上昇に伴う発振効率低下を防ぐために、

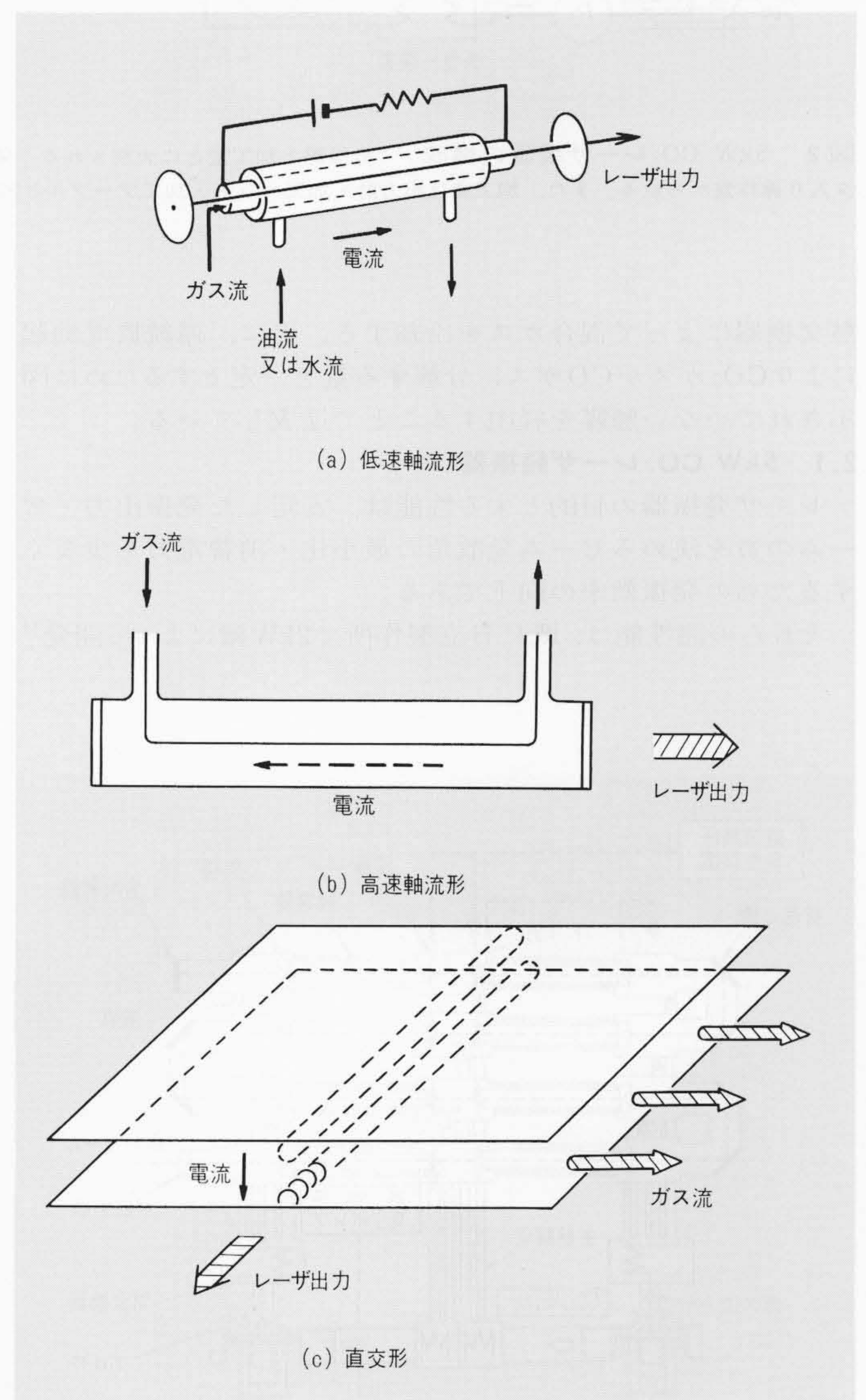


図1 CO₂レーザ方式比較 1kW以上の連続で安定な出力を得る方式として高速軸流形を採用し、1～5kW シリーズのコンポーネントユニットの共用化を図った。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

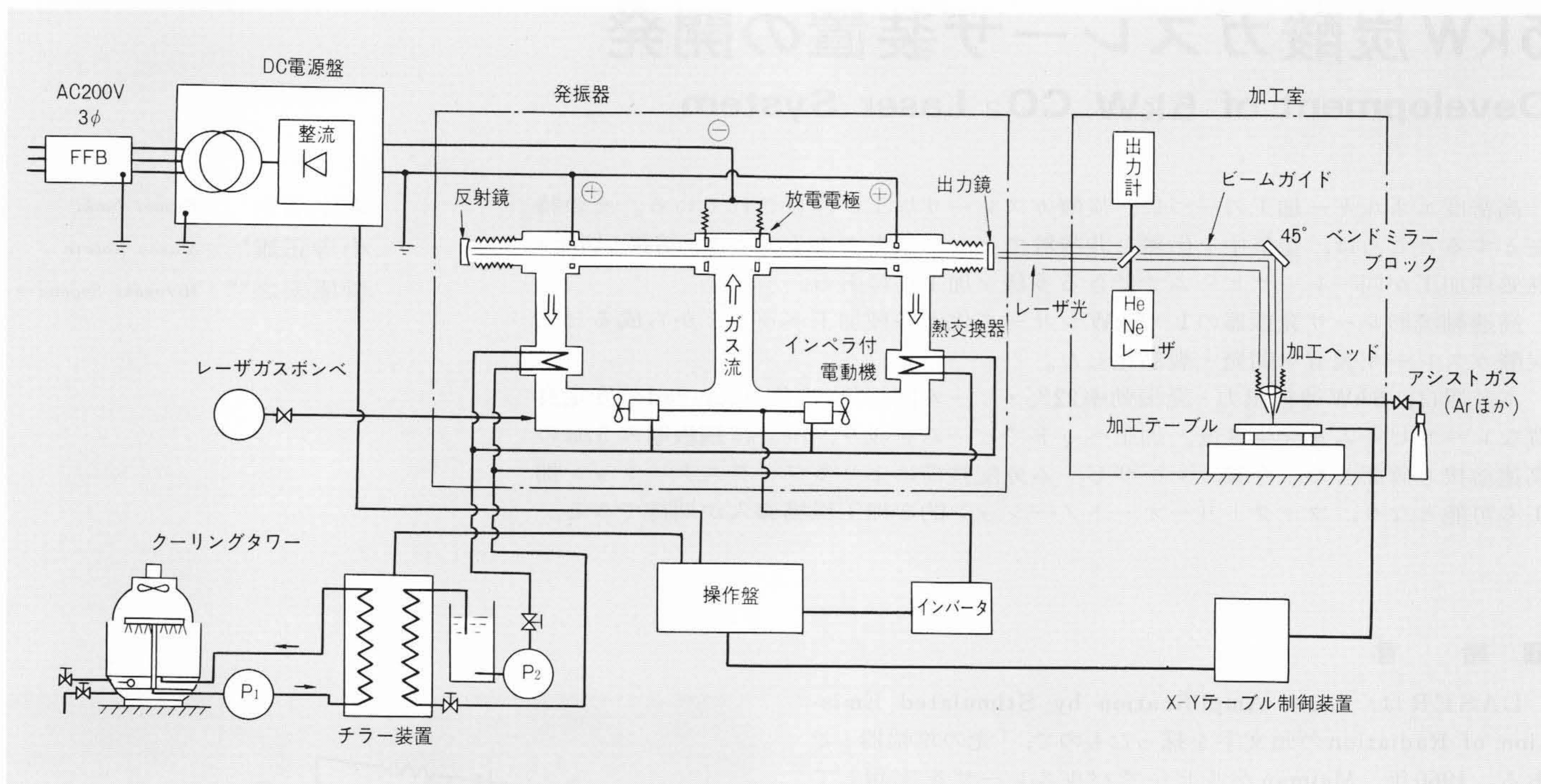


図2 5kW CO₂レーザ装置の構成 発振器と加工室とに大別される。発振器は本体・DC電源盤・レーザガスポンペ・チラー/クーリングタワー・インバータ入り操作盤から成る。また、加工室は出力計・加工ヘッド・加工テーブルと制御装置から成る。

熱交換器によって混合ガスを冷却する。更に、連続放電励起によりCO₂ガスがCOガスに分解する量を一定とするために図示されていない触媒を経由することで達成している。

2.1 5kW CO₂レーザ発振器

レーザ発振器の目的とする性能は、安定した発振出力・ビームの質を決めるビーム発散角の最小化・消費電力を少なくするための発振効率の向上である。

それらの諸性能は、既に日立製作所で2kW機によって開発¹⁾

されており、更に3kW機の試作によって製品設計の諸データをベースに、5kW機を開発製品化した。

図3に5kW CO₂レーザ発振器の構成を示す。

(1) 安定した発振出力

円筒均一放電するための陰極電極構造・放電管内に最適流量を得るためのガス循環系の構造・光共振器のアライメント（光軸）の安定性を維持するための熱膨脹吸収と耐振構造、及び最適ガス混合比(CO₂・N₂・Heレシオ)により達成した。

本構造の特長は、図3に示すように、5kW出力の場合は放電管数を8本とし、2.5kW出力の場合は放電管数を4本にすればよいことで、かつ放電管・電極・鏡は各々同一の部品でよいことにある。

(2) ビームの質

レーザ光の出力ビームは、光の性質から必ず広がり角（発散角）をもっているが、発散角の小さいビームは、長く気中伝搬しても広がり角が少なく、かつ加工ヘッドで集光する場合にビームスポット径を小さくできる、すなわち単位面積当たりのエネルギー密度を高くとれることで、極めて重要なファクターである。

その実現手段として、キャビティ長（光共振器としての全反射鏡と出力鏡間の距離）を長くとり、全反射鏡の曲率を大きくして内部アパーチャを入れることで解決した。

しかし、図4に示すように、リターン光変位がデリケートとなる欠点を生ずる。例えば、2.5kW機の2回折り返し数に対し5kW機では4回折り返し数になる、すなわち8枚の鏡の傾き α (rad)が2.5kW機よりも4.7倍敏感にアライメント性に効くことになる。

これは、光共振器の鏡固定化基準架台が、温度変化に伴う熱膨脹変化や振動変位に耐えなければならないことを意味する。したがって、光共振器構造は鏡対称配置構造とし、かつ下部構造架台とベローズ及びベアリグによる膨脹・振動変位しゃ断構造とすることで解決した。

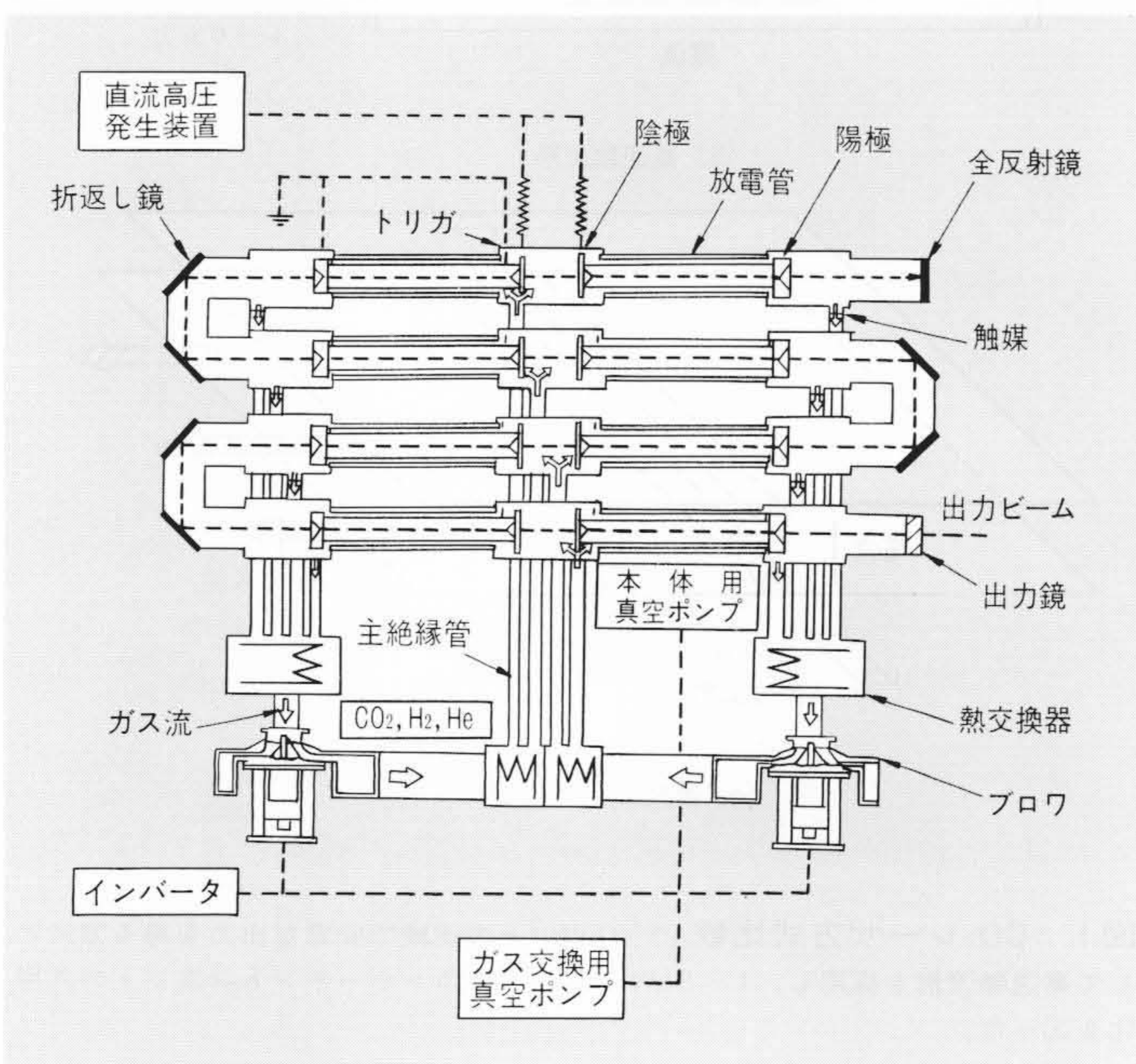


図3 高速軸流形5kW CO₂レーザ発振器の構成 放電管を8本直列に配置し、キャビティ長（全反射鏡と出力鏡間距離）を長くすることによってビーム質を向上している。

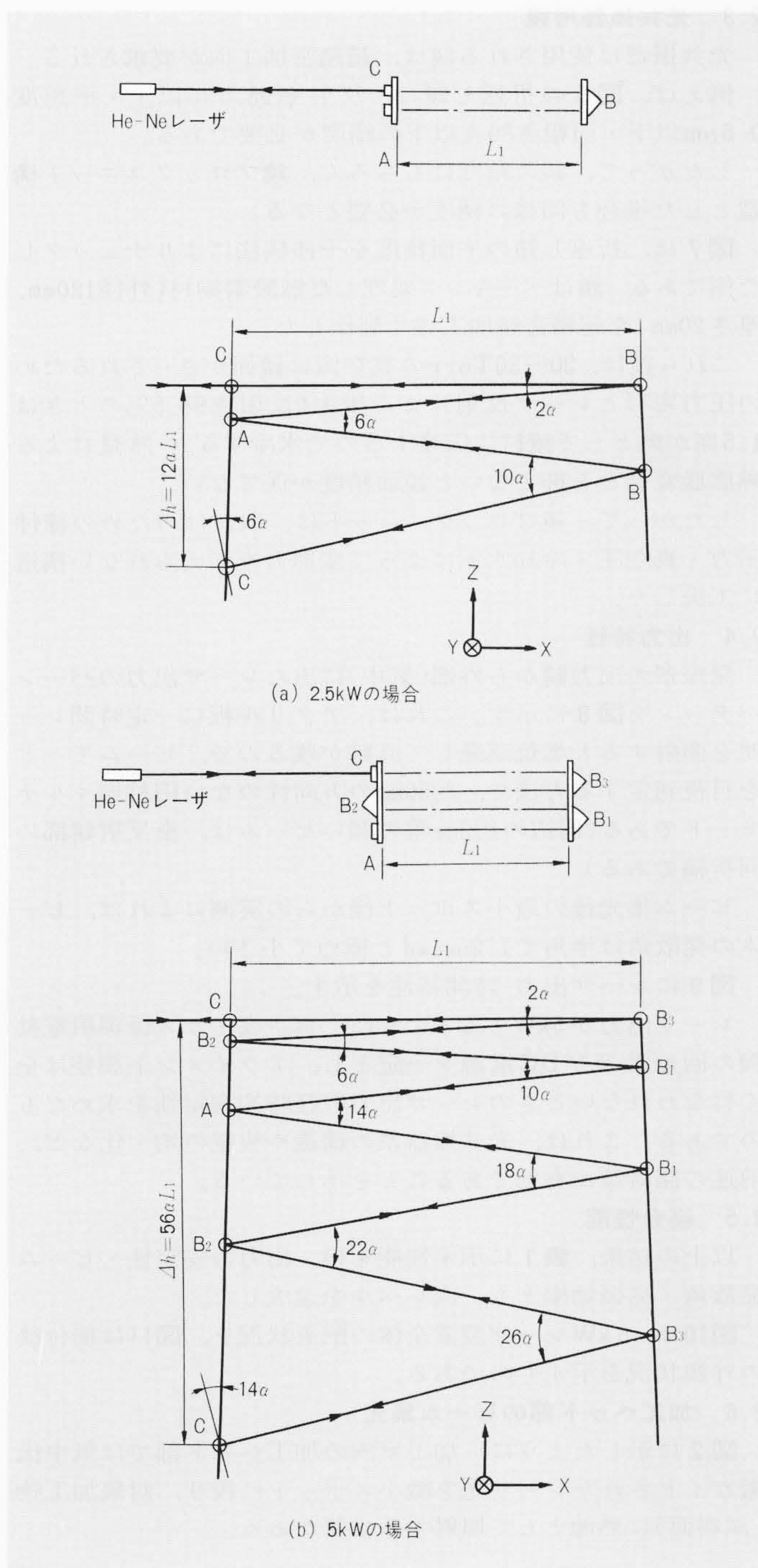


図4 リターン光変位 5kWでは折返し数が4回であり、わずかな構造物の変形が2.5kW時の4.7倍に拡大されるため、ミラー支持は特に工夫を施している。

(3) 消費電力の低減

消費電力のほとんどはDC電源であり、消費電力は入力電力に対し、いかに大きなレーザー出力(kW)を得るかにある。

すなわち、放電励起された混合ガスから効率良くレーザー光を取り出すことにある。

図5に、入力電流と出力特性を示す。定格5kW出力時に発振効率 η は21.7%を得た(3.4kW出力時は効率24%)。これは、放電管内の放電を均一とし、混合ガス流量を高速に流して、放電軸と光共振器軸を同軸にすることでポンピング励起したレーザー光を漏れなく共振させたために、ほぼ理論的効率値に近い値を得ている。

2.2 ガス循環系の構造

前述のように、放電管内に高速で多量の混合ガスを循環できることが高速軸流形発振器設計のベースとなっており、しかも、20~30Torrという真空中での高速回転機が必要となる。

図6に製品化した高速ブロワ特性を示す。

必要な Q (流量)- H (ヘッド)特性は、放電管サイズ及び熱交換機など混合ガス循環系のガス流体構造で決まる。したがって、効率の良いターボファンを設計するとともに真空中での高速電動機と組み合わせた高速ブロワ²⁾を開発製品化した。

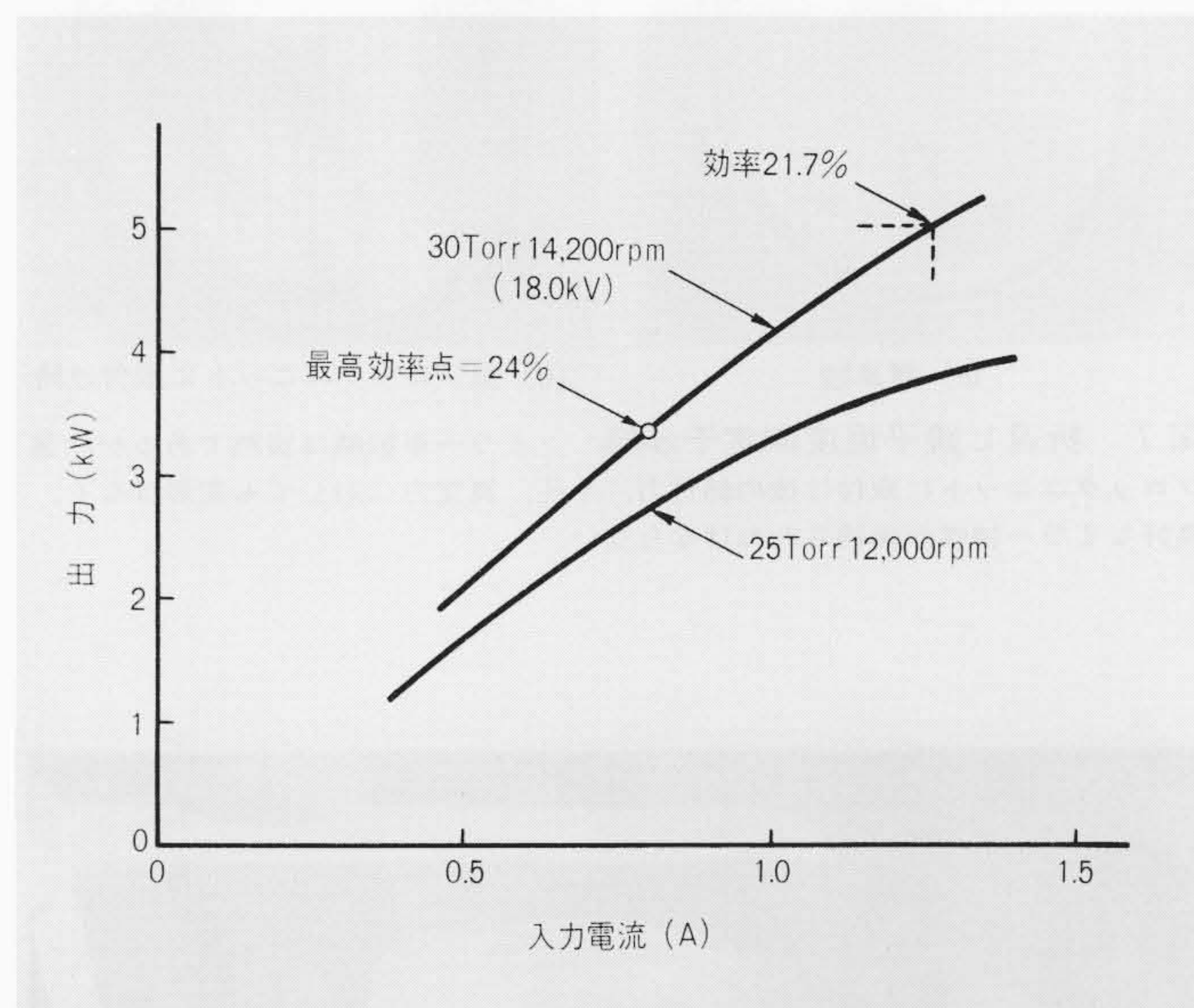


図5 入力電流-出力特性 最高効率が24%、定格出力では21.7%の高効率であり、それは良好なブロワに負うところが多い。

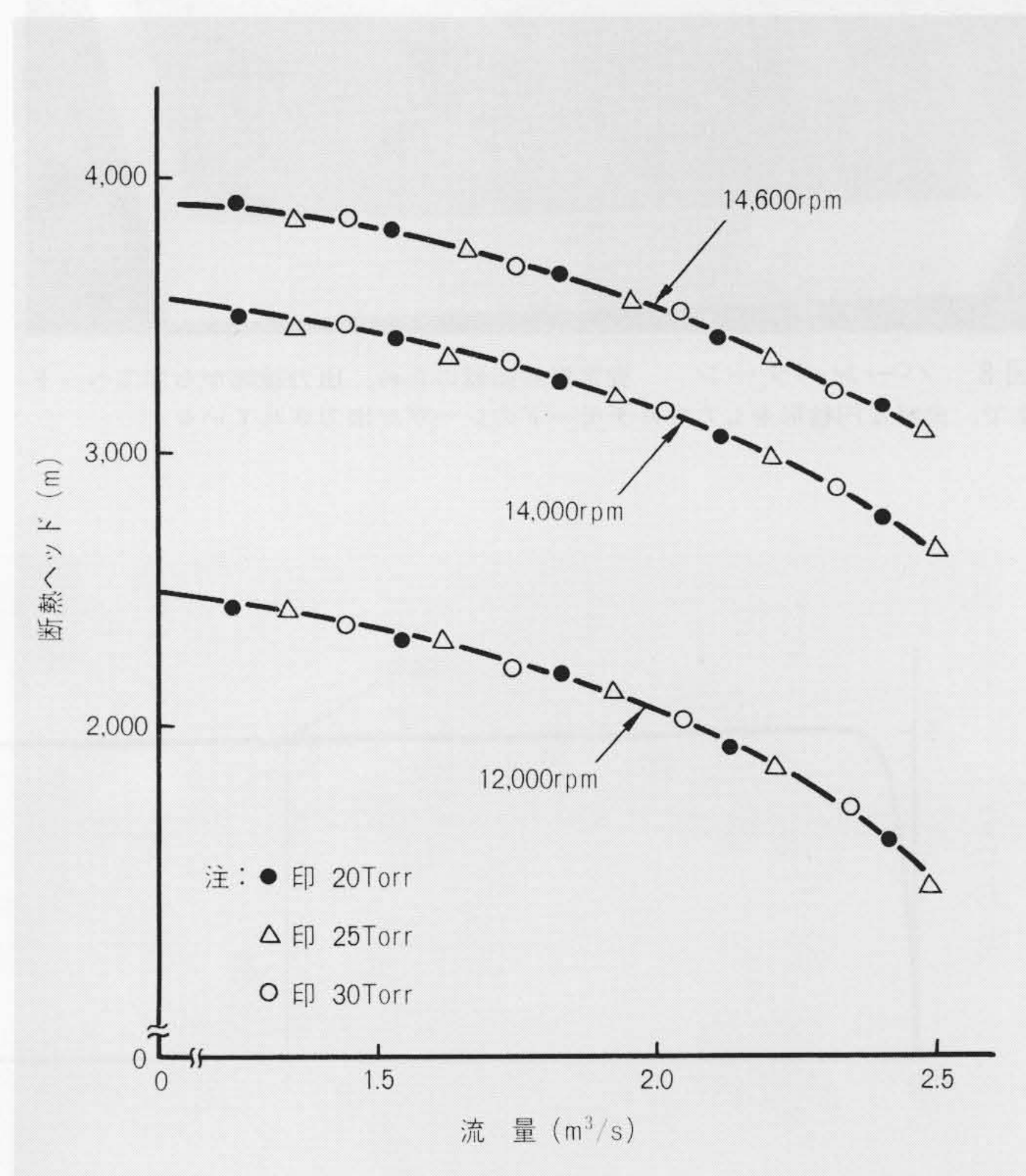


図6 高速ブロワ特性 定格の14,600rpmで断熱ヘッドを3,500~4,000mまでとれる高性能である。また、オーバースピンテストは、17,520rpmに耐えている。

種々の特性試験から、放電管内は約180m/sの高速流速を達成した。

なお、ターボファンは軽量化するために、遠心形流体機械設計解析プログラムを用いて、寸法の最適化を図り、材料はアルミニウム合金材を不活性ガス低圧精密鑄造法³⁾によって製作した。

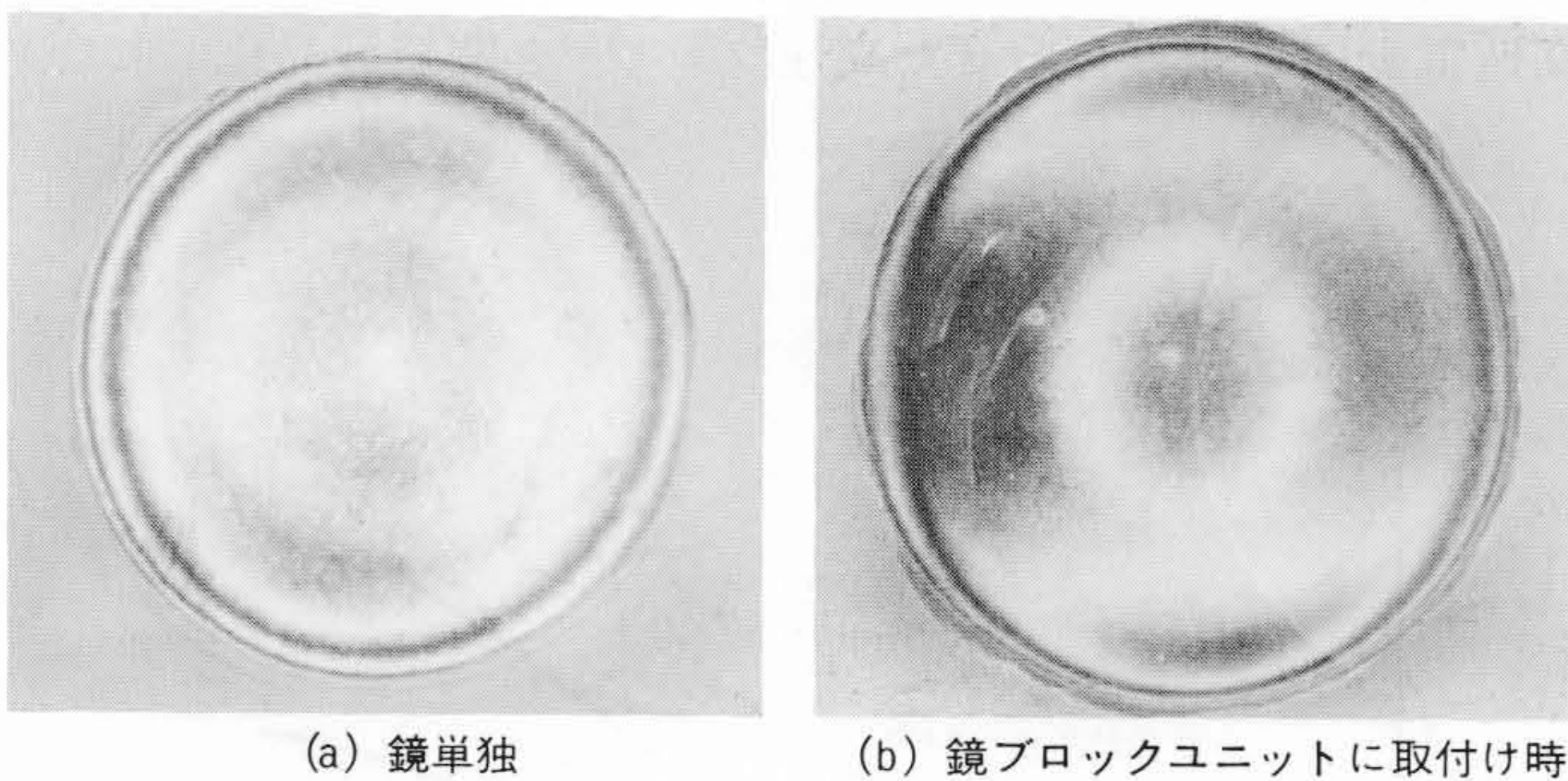


図7 折返し鏡平坦度測定干渉縞 ミラー単独時は当然であるが、鏡ブロックユニットに取付け後の締付力、水圧、真空力に対しても変形はなく、良好なミラー特性が保持されねばならない。



図8 バーンパターン 安定形共振器のため、出力鏡端から加工ヘッドまで、良好な円柱形をしたマルチモードのレーザーが出力されている。

2.3 光共振器用鏡

光共振器に使用される鏡は、超精密加工面が要求される。

例えば、図3の折返し鏡は、反射率98.5%以上・平坦度 $0.5\mu\text{m}$ 以下・面粗さ $30\text{\AA}$ 以下の精度が必要である。

したがって、鏡の精度はもちろん、鏡ブロックユニット構造とした場合も同様の精度が必要となる。

図7は、折返し鏡の平面精度を干渉縞法によりチェックした例である。鏡はベーキング処理した無酸素銅材(外径120mm, 厚さ20mm)を超精密鏡加工機で製作した。

これら鏡は、20~30Torrの真空側に鏡面がさらされるための圧力変形とレーザー反射による損失(反射率98.5%のときは1.5%が熱として鏡材に伝達するので水冷する。)熱量による熱膨脹変形を抑えないと鏡面精度が保てない。

したがって、鏡ブロックユニットは、取付けのための締付圧力・真空圧・冷却水圧によって変形力を与えられない構造に工夫した。

2.4 出力特性

発振器の出力鏡から外部(気中)に出たレーザー出力のバーンパターンを図8に示す。これは、アクリル板に一定時間レーザーを照射すると燃焼蒸発して痕跡が残るので、ビームモードを目視判定する方法で、約50mmの方向性のない円柱形マルチモードである(周辺の約2mm幅の弱いビームは、全反射鏡部の回折縞である)。

ビーム集光後の最小スポット径からの実測によれば、ビームの発散角は半角で 1.2mrad と極めて小さい。

図9にレーザー出力-時間特性を示す。

レーザー出力が5kWとなるように、真空度・ガス循環用電動機の回転数及びDC電源を一定とし、アライメント調整は全く行なわれないときのレーザー出力の経時的安定性を求めたものである。これは、光共振器系の構造や放電の均一化など、前述の諸対策が有効であることを示している。

2.5 総合性能

以上の結果、表1に示す性能を得、出力の安定性・ビーム発散角・発振効率とも一流レベルを達成した。

図10は、5kWレーザー装置全体の配置状況を、図11は据付後の外観状況を示すものである。

2.6 加工ヘッド部のビーム集光

図2に示したように、加工室内の加工ヘッド部では気中伝搬ガイドされたレーザー光を微小スポットに絞り、対象加工物(試料面)に熱源として照射する必要がある。

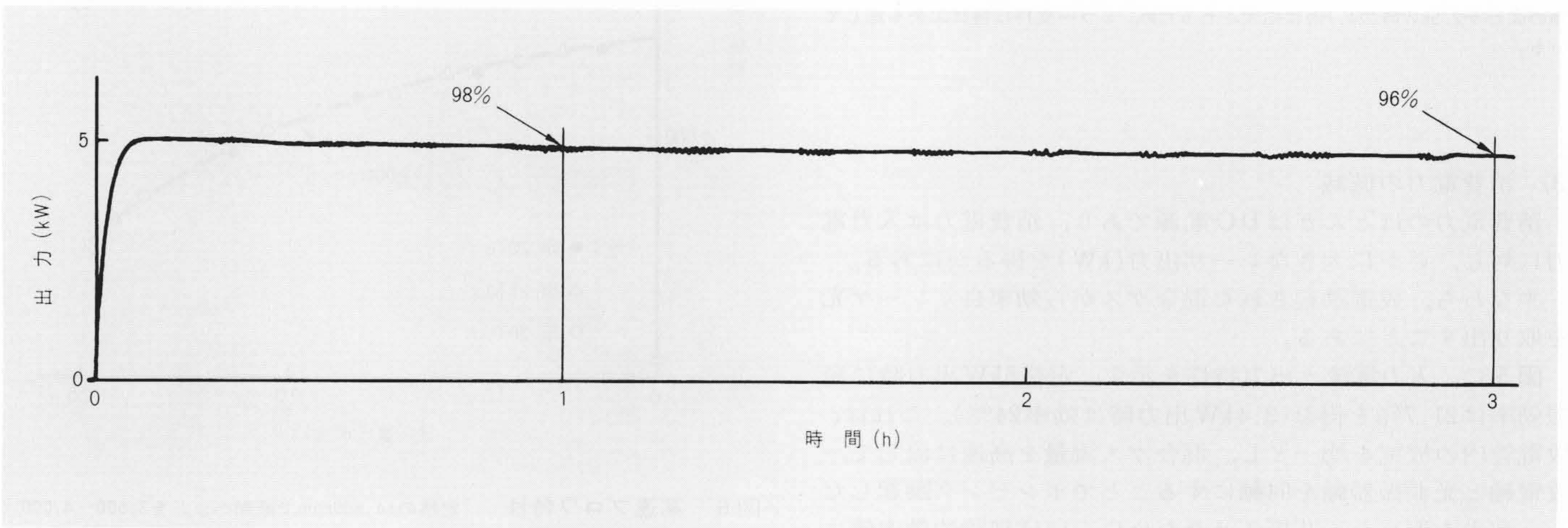


図9 出力-時間特性 良好な光学系構造及び触媒作用により、安定した出力特性を得られる。

表1 5kW CO₂レーザ発振器仕様 5kWを安定形共振器で構成し、回折角1.2mrad、発振効率21.7%を達成した高性能なレーザ発振器である。

項 目	仕 様
レ ー ザ 出 力	定格 5 kW
出 力 変 動 率	± 5 % / 8 h以下
ビ ー ム 直 径	52mm
回 折 角	約1.2mrad
発 振 効 率	定格出力時21.7%(最大効率24%)
放 電 体 積	φ65×750×8本 mm ³
電 極 構 成	カソード：内径65mm窓付オリフィス電極 8 個 アノード：内径65mm水冷Cuパイプ
レ ー ザ ガ ス	CO ₂ -N ₂ -He 混合ガス、圧力20～30Torr
ガ ス 流 速	放電部で最大180m/s
送 風 機	ターボブロワ、14,600rpm max, 2 台
共 振 器 構 成	4 光路折返し安定形、出力ミラー透過率83%
運 転 所 要 電 力	約40kW (定格出力時)
発振器本体寸法	4.2×1.7×2.21Hm ³

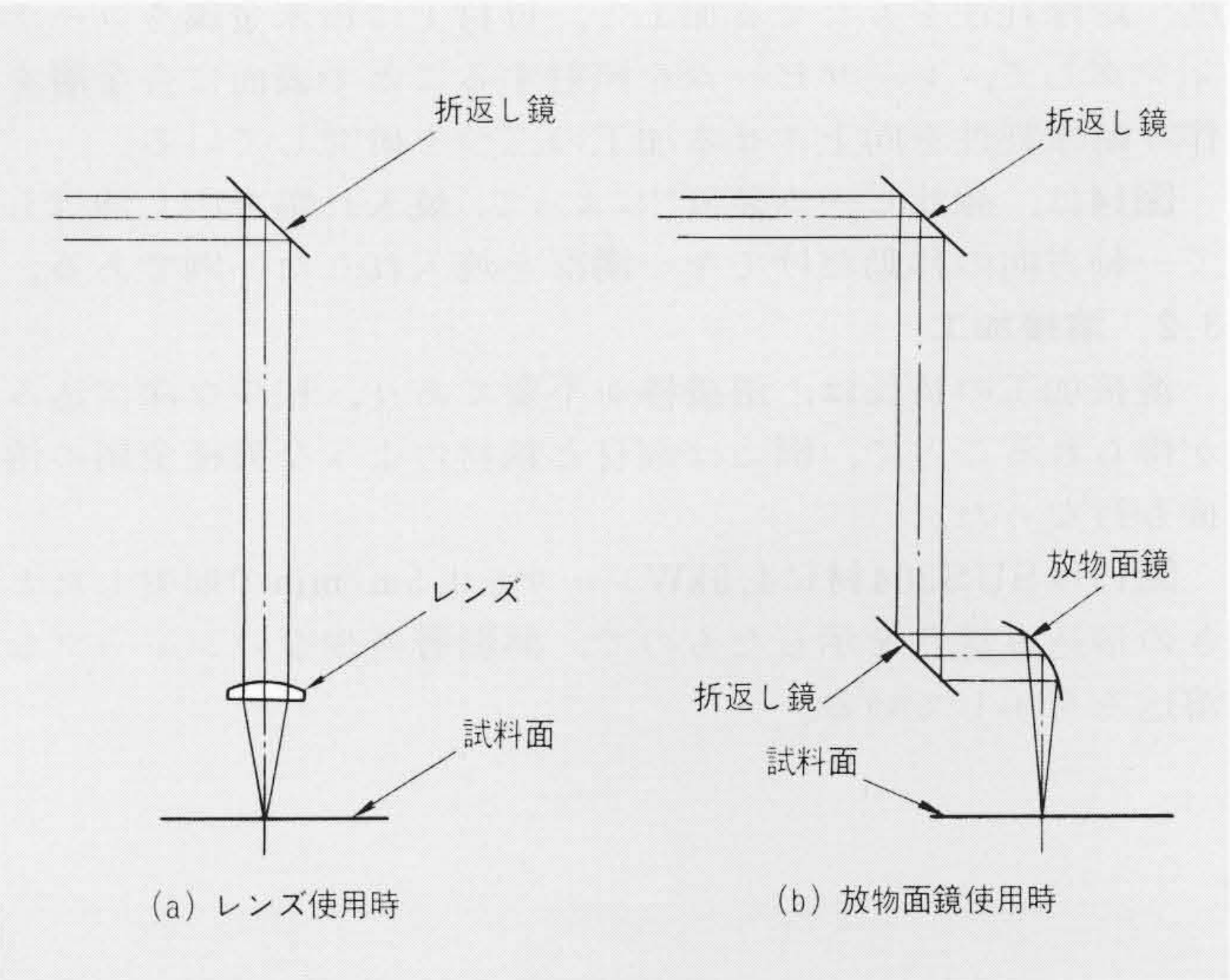


図12 加工ヘッド部のビーム集光法 レンズ及び放物面鏡による方法があるが、大出力時及び短焦点時は放物面鏡のほうが良い。

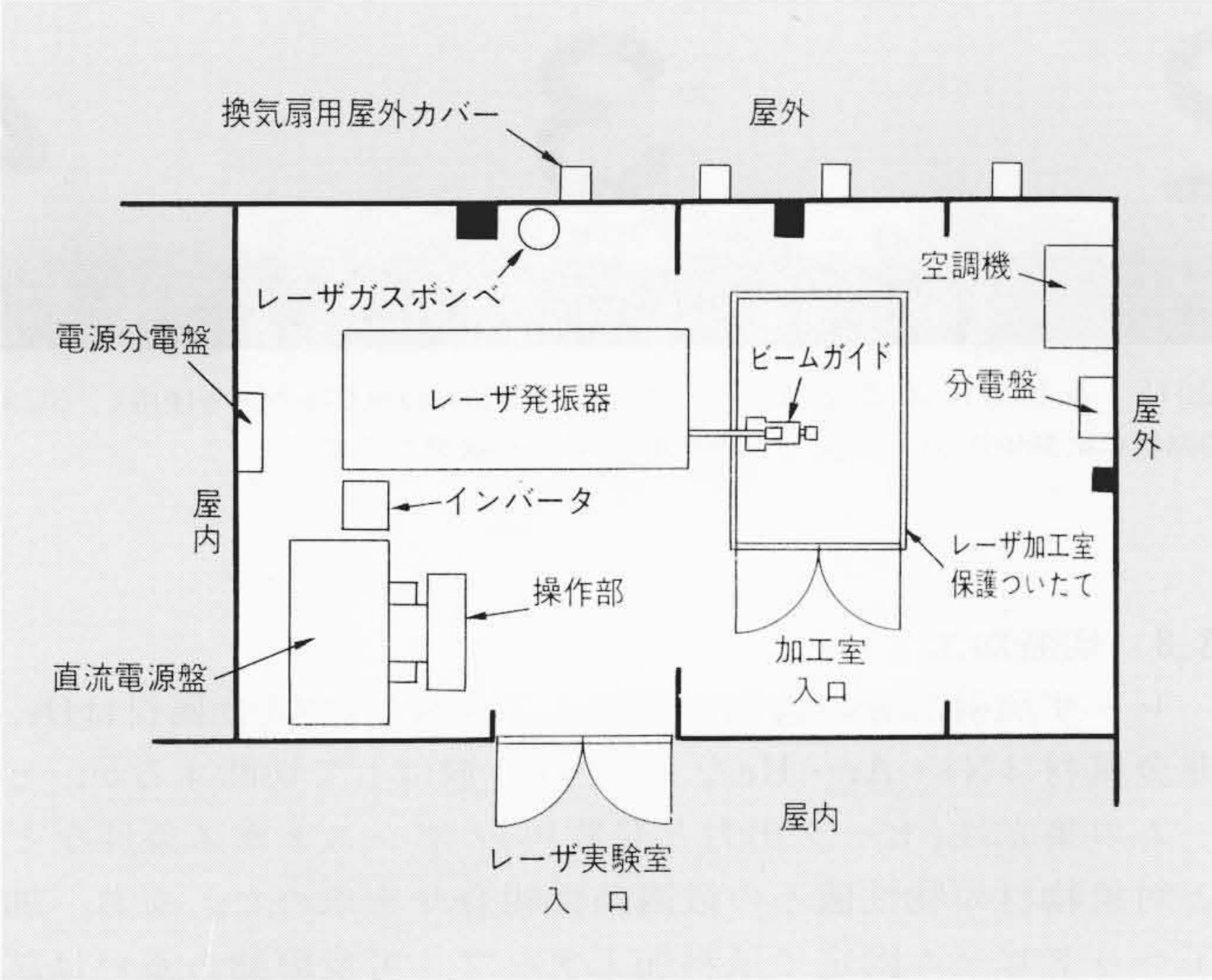


図10 5kW CO₂レーザ装置の全体配置状況 レーザ発振出力はビームガイドによって加工室に導かれ、発振中は安全のために、加工室内に入れないようなインタロックがとられている。

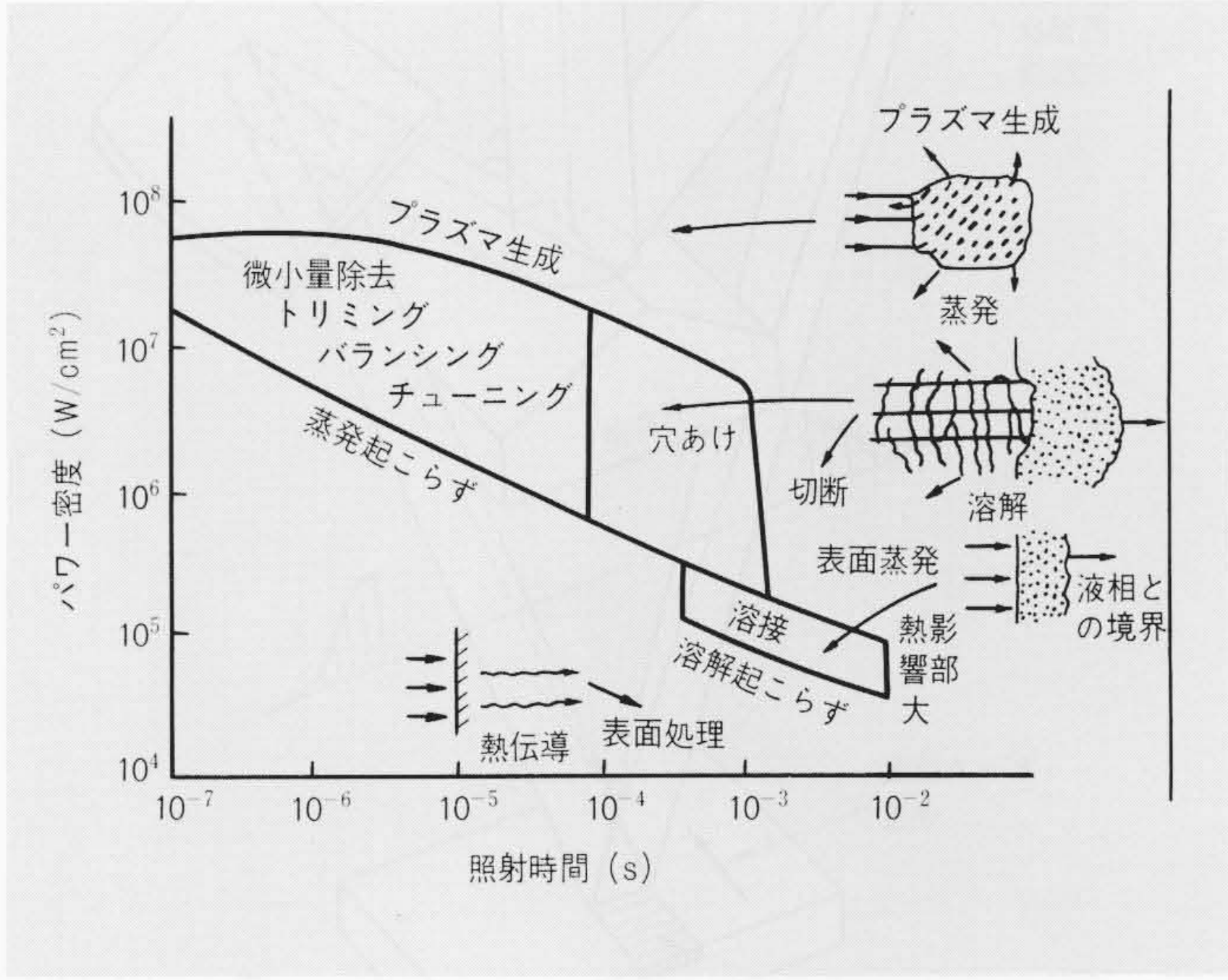


図13 照射時間とパワー密度の組合せで与えられるレーザ加工の種類 基本的には、レーザ出力、集光スポット径及び加工スピードを調整すれば種々の加工ができる。



図11 5kW CO₂レーザ装置の外観 加工室入口側から見た加工室・発振器、制御盤などの状況を示す。

その方法は、図12に示すように、(a)レンズ(KCl材又はZnSe材)で焦光する方法と(b)放物鏡(金属材)で集光する方法がある。

前者は一般的であるが、後者は短焦点集光や大出力時のレンズ消耗防止のときに好適であり、両方法が可能な構造とした。

3 CO₂レーザ加工の応用例

CO₂レーザ加工は微小な非接触熱源として、表面処理・溶接・切断・トリミング加工などができる。

図13は、レーザ光の照射時間とパワー密度の関係から、加工の種類が変えられることを示す。したがって、金属材・非金属材を問わずレーザ光が入熱し熱伝達されれば、各種加工が可能である。

3.1 表面処理加工

表面処理加工としては、SK材のような焼入れ材にレーザビームを照射し、必要箇所だけを表面層部分焼入れして耐強

度・耐摩耗性をもたせる加工と、母材上に粉末金属をコーティングして、レーザビームを照射することで表面に合金層を作り耐摩耗性を向上させる加工の二つを研究している。

図14は、線状ビーム装置⁴⁾によって、焼入れ幅を広く伸ばして一軸方向の移動だけでキー溝部を焼入れした一例である。

3.2 溶接加工

溶接加工の特長は、溶接棒が不要であり、狭少な深溶込みが得られることで、例えば銅材と鉄材のような異種金属の溶接も行なった。

図15はSUS304材に4.5kWレーザを0.5m/minで照射したときの溶込み深さを示したもので、熱影響の少ないシャープな溶込みを示している。

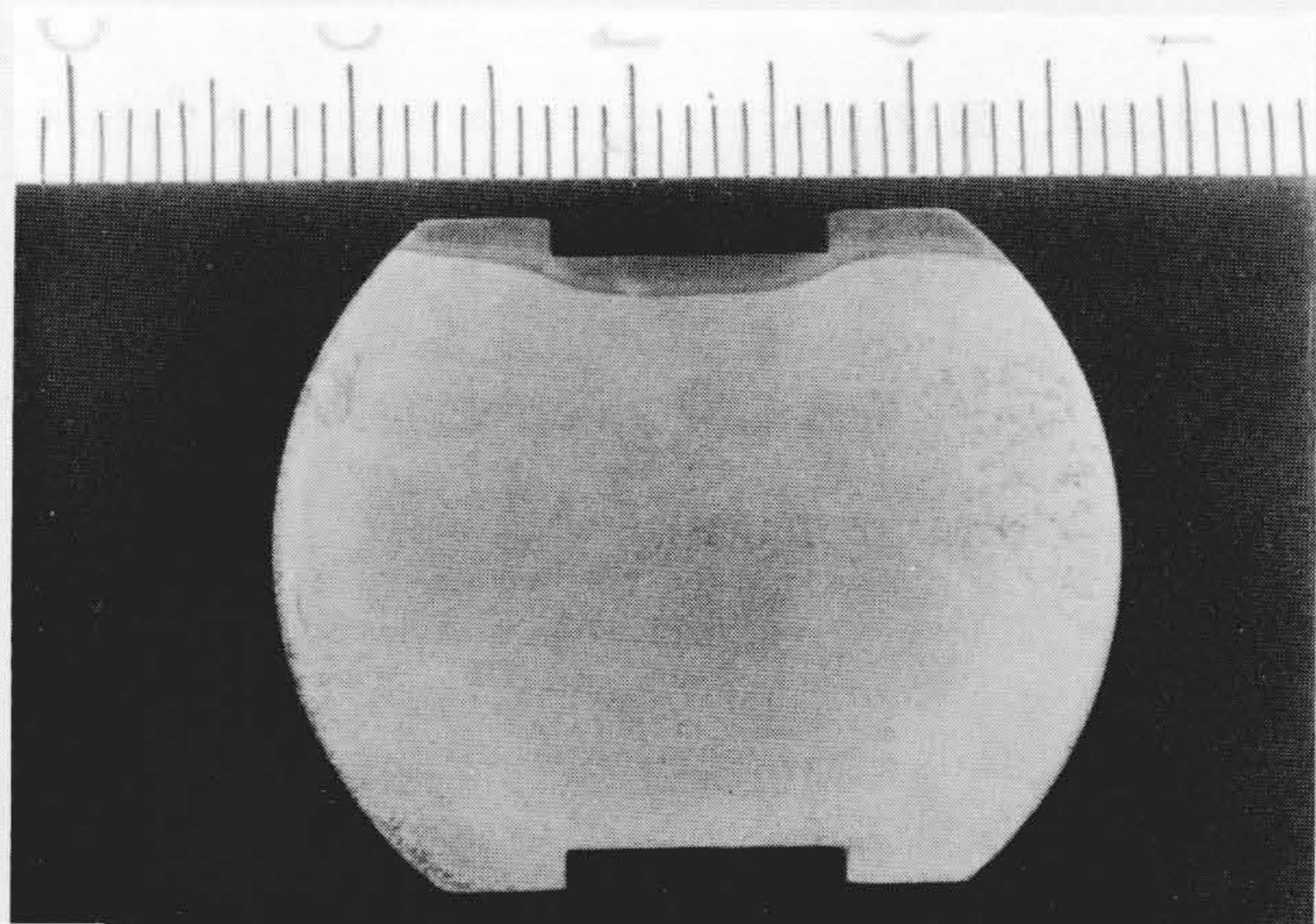
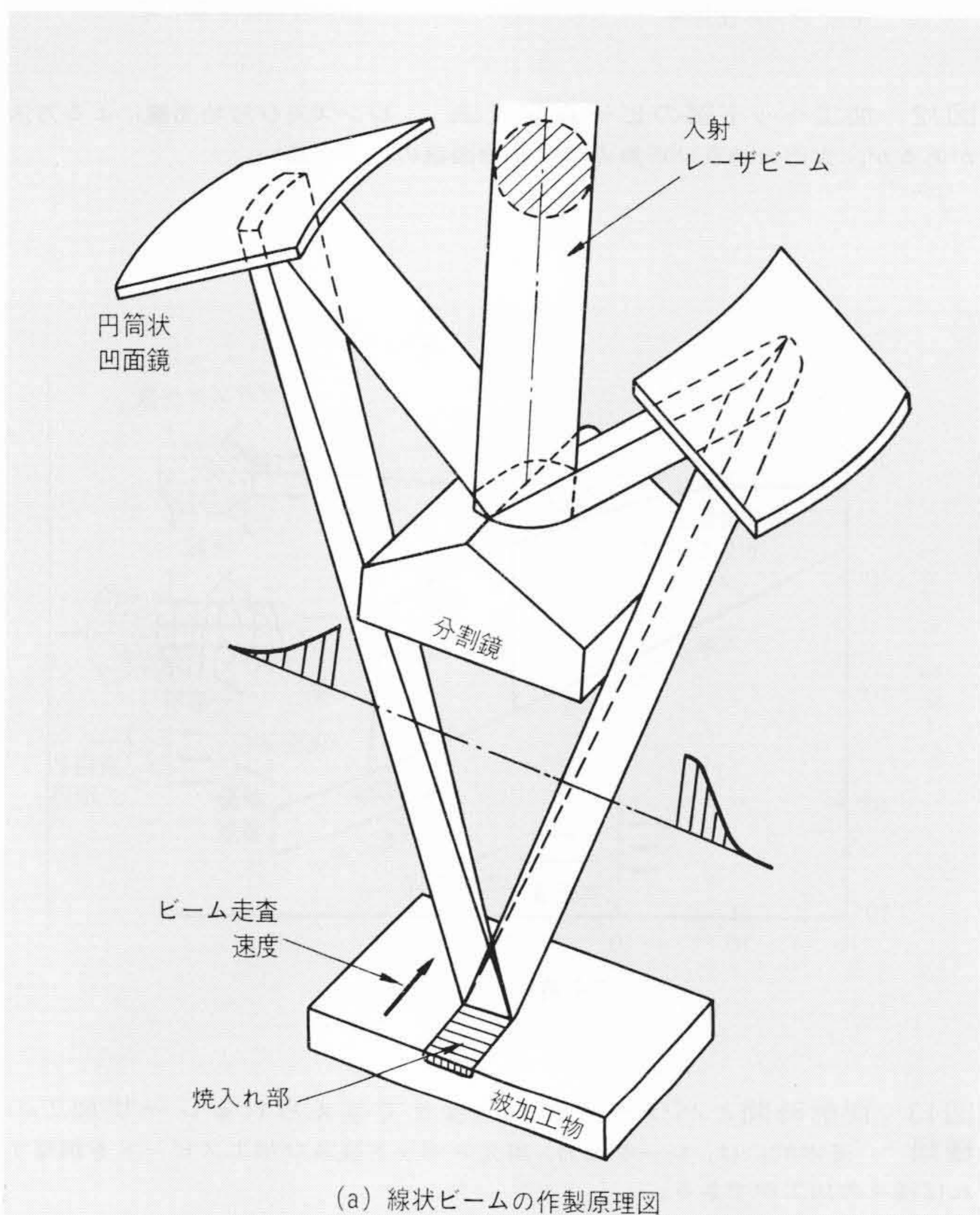


図14 線状ビーム装置 ビーム走査方式やセグメントミラー方式に比べて、簡単な原理と構造で焼入れや合金化に適したビームが得られる。

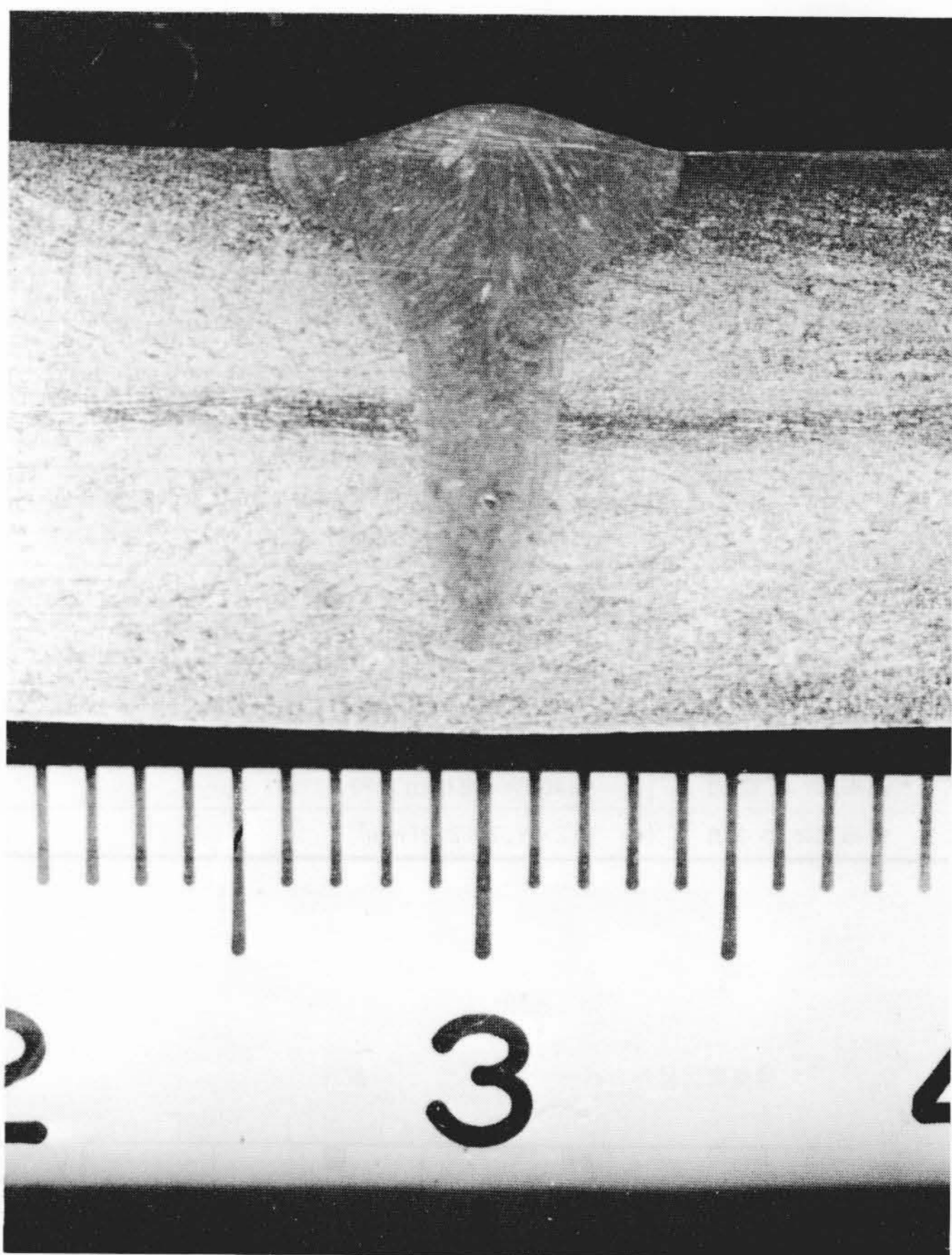


図15 4.5kWによる溶接例 焦点距離300mmのKClレンズを使用し、SUS304材に4.5kW 0.5m/minレーザ照射した溶込み状況を示す。

3.3 切断加工

レーザ照射部分の熔融蒸発部をアシストガス(金属材は O_2 、非金属材は $N_2 \cdot Ar \cdot He$ など)で吹き飛ばして切断するが、ビームの集光性(ピーク出力と発散角)とアシストガス条件などと対象物材の物性値との最適条件組合せを求めた。なお、加工ヘッドビーム固定で試料加工テーブル可変駆動あるいは試料固定で加工ヘッド可変駆動の2方式があり、可変駆動をNC(数値制御)と連結することによって複雑形状加工が可能である。

4 結 言

高速軸流形 CO_2 レーザ発振器のコンポーネント技術を確立し、 $5kW \pm 5\%$ の安定性・ビーム発散角(半角) $1.2mrad$ ・発振効率22%を達成し、製品化のうえ納入した。また、加工法についても各種最適条件を求めた。今後、新加工法としてレーザ装置の導入が進むものと確信する。

終わりに、本装置の製品化に当たり、種々御教示をいただいた通商産業省工業技術院四国工業技術試験所・機械金属部長浜崎正信工学博士に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 菅原, 外: 高効率高速軸流形 CO_2 レーザの開発, レーザ研究, p. 21~30 (1981-1)
- 2) 三階, 外: 遠心圧縮機の高速小型化, 日立評論, 58, 7, 553~558 (昭51-7)
- 3) 大西, 外: 機械部材としてのアルミニウム合金とその圧力製造技術の動向, 総合鋳物, p. 13~18 (1981-5)
- 4) 神保, 外: レーザ熱処理技術, 熱処理, 口絵 (1981-5)