

大出力炭酸ガスレーザーの発生とその熱源的研究

荒田 吉明 大阪大学工学部溶接工学教室
宮本 勇 同大学院

(1) はじめに

レーザー (LASER) は誘導放射現象を利用した光の増幅である。レーザー光の基本的な性質はコヒーレントな平面波である。この分野に関する研究は世界各国で広汎に進められており、既に通信や測定などに実際に応用されているものもある。熱源への応用についてもそのコヒーレントの性質から高エネルギー密度が得られることが予想されていたがこれまで6943Åでパルス発振するルビーレーザーで Table 1 に示すように従来の代表的な

Table 1. 各種熱源の比較¹⁾

熱源		エネルギー密度 (w/cm ²)
レーザー		~10 ⁹
電子ビーム		~10 ⁹
アーク (アルゴン 200アンペア)		1.5×10 ⁴
酸素アセチレン炎		10 ³
酸水素ジェットバーナ		3×10 ³
黒 体 輻 射	6,500°K	10 ⁴
	11,500°K	10 ⁵
	20,500°K	10 ⁶
	36,500°K	10 ⁷
	65,000°K	10 ⁸
	115,000°K	10 ⁹

熱源であったアークの10⁵倍にも及ぶエネルギー密度が得られている。しかしルビーレーザーは連続で大出力を得ることが出来ず効率も非常に低かった。しかし最近炭酸ガス分子の振動回転遷移によって連続発振する波長約10.6μの大出力炭酸ガスレーザー²⁾が開発され高エネルギー密度の連続的な熱源として大気中電子ビーム³⁾と並んで注目されるようになった。

大気中電子ビームは既に著者のひとりによって本誌6月号に述べられたように将来最も有力な材料加工法(溶接, 切断, 穿孔など)のひとつに数えられている。しかしこのような電子ビームの短所としては大気中での到達距離があまり長くないのとビームが高エネルギーであ

るためX線を放出することが考えられる。これに対し、炭酸ガスレーザーは大気中での減衰は殆んどなく簡単なレンズ系で光の方向を変えることもまた容易に高エネルギー密度の小さなスポットにしぼることも可能である。一方このようなレーザーの欠点としては材料の種類, 表面の状況によりレーザー光の吸収率が異なり従って加工の状況が左右されることがあげられる。また効率の問題も電子ビームにくらべて低く一長一短があり、レーザーと電子ビームは将来それぞれの長短を相補なうものと考ええる。炭酸ガスレーザーの研究は各国で盛んに進められておりすでに1kw以上の出力が効率20%近くで得られており熱源としては実用の段階に入ったと考えられる。著者らも昨年より炭酸ガスレーザー発生装置の設計試作を行ない、300~500W程度の出力を得ることができたのでこれを用いてビームの熱源的特性ならびに応用に関する研究を進めておりここにその一端を述べる。

(2) 炭酸ガスレーザーの原理

すでに述べたように最近放電励起による炭酸ガス分子の振動回転遷移による波長約10.6μのレーザー作用が報告されたがこの時の出力は僅か数mW²⁾であった。その後、窒素ガスを添加することにより出力およびその効率が非常に大きくなることがわかった⁴⁾。さらにこのCO₂-N₂ガス系にHe⁵⁾⁶⁾あるいはH₂O⁷⁾を加えることによって益々大きな出力と効率が得られた。CO₂分子は対称中心を有するD_{∞h}の直線分子で、その基準振動はFig. 1に示すように(1)対称伸縮振動, (2)変角振動, (3)逆対称伸縮振動の3つでそれぞれΣ_g⁺, Π_u および Σ_g⁺という別々の対称種々に属する。Fig. 1に示すようにレーザー作用はCO₂分子のΣ_g⁺(00°1)-Σ_g⁺(10°0)のP枝での振動回転遷移によって生ずるがこのときN₂分子を添加するとCO₂のΣ_g⁺(00°1)とN₂の最低振動励起準位N₂⁺(v=1)のエネルギー差がΔE=18cm⁻¹と非常に接近しているので次式で示す第2種の衝突断面積が非常に大きくなり、両者のエネルギー授受が盛んになって上部レーザー準位Σ_g⁺(00°1)にあるCO₂⁺の分布割合が増大する。

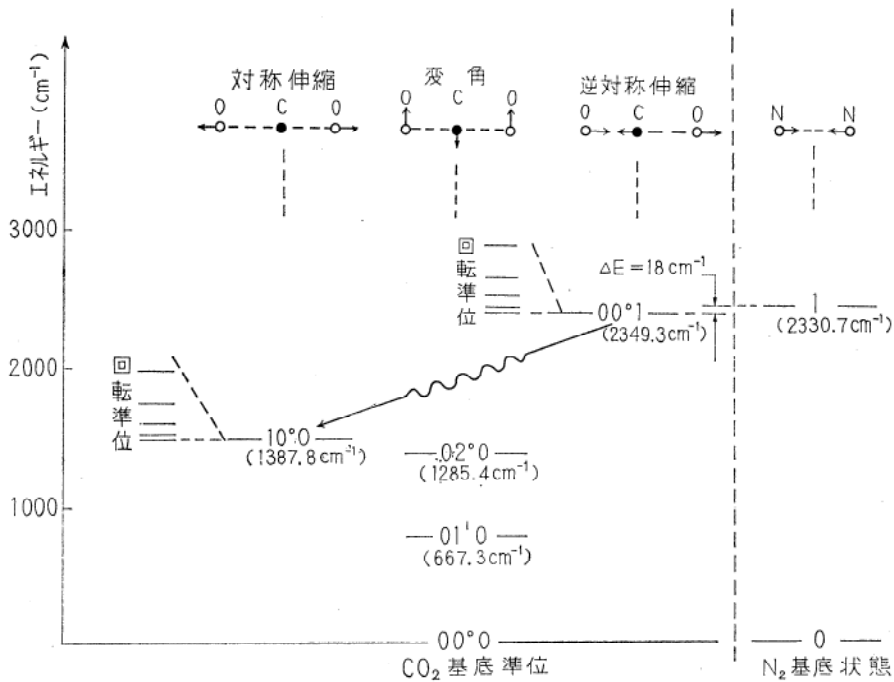
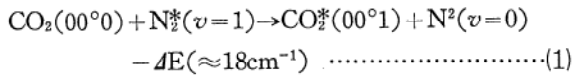


Fig. 1. CO₂ と N₂ 分子の振動準位図



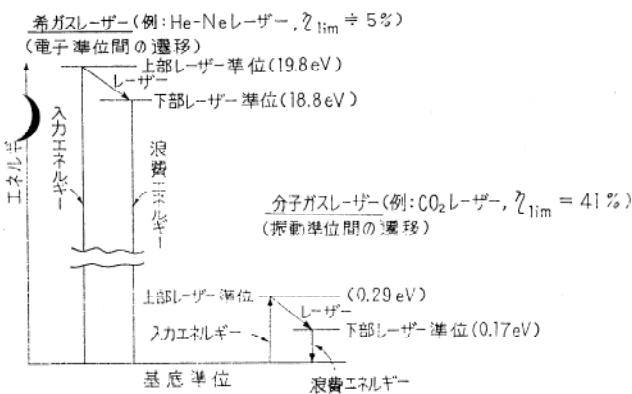
低圧窒素中での放電は N₂^{*}(v=1) をつくるのに非常に有効⁸⁾で CO₂ と N₂ を適当に混合して放電すれば CO₂ 分子は(1)式によって Σ_g⁺(00⁰1) の上部準位への有効に選択励起される。またこの上部レーザー準位の有効寿命が下部レーザー準位 Σ_g⁺(10⁰0) のそれより長いので Σ_g⁺(100⁰1) - Σ_g⁺(10⁰0) 間でのレーザー発振に対しては必要な条件が満足されているということがいえる。

すでに述べたようにこのような CO₂-N₂ 混合ガス系

に H₂O, He などのガスを添加すると益々よい結果が得られている。すなわち CO₂-N₂ 系に H₂O を添加することにより出力は H₂O のない場合にくらべて約2倍、効率20%が報告されている。また He を CO₂-N₂ 混合ガスに添加することにより出力は飛躍的に増大し、これまでの最大連続発振の出力は CO₂-N₂-He レーザーによって得られておりその効率は17%に達している。

炭酸ガスレーザーの特徴は大出力が連続に発振されることと更に変換効率が非常に高いことである。Fig. 2 は電子準位を利用するレーザーと振動準位を利用するレーザーのエネルギー準位を比較したものである。電子準位を利用するレーザーでは浪費エネルギーが非常に大きいので入力エネルギーに対するレーザー発振のエネルギーの割合は小さい。しかし分子の振動準位間の遷移を利用する CO₂ ガスレーザーなどではこの見地からの変換効率は約40%と大きい値を示す。従って電子準位を利用する He-Ne レーザーなどにくらべて非常に高い効率が得られるのである。

このレーザー光は CO₂ 分子の Σ_g⁺(00⁰1) - Σ_g⁺(10⁰0) 間の遷移では Fig. 3 に示すようにPおよびR両枝があるが実際にはP枝のみで観察されR枝では観察されない。これは次の理由によるものと考えられる⁹⁾。かんたんのために温度 T°K での各振動帯における各々の回転準位の粒子数の分布がボルツマン分布で記述されると仮定すると、CO₂ 分子の上部レーザー準位(00⁰1)と下部レーザー準位(10⁰0)の夫々の粒子数 N_{00⁰1} および N_{10⁰0} の比 N_{00⁰1}/N_{10⁰0} に対する利得は Fig. 4 に示すようになる。



レーザー遷移が電子準位を利用するときは大きなエネルギー浪費を伴うが、振動準位のときは浪費エネルギーの割合は小さいので効率が低い。

Fig. 2. 電子準位を利用するレーザーと振動準位を利用するレーザーのエネルギー準位の比較

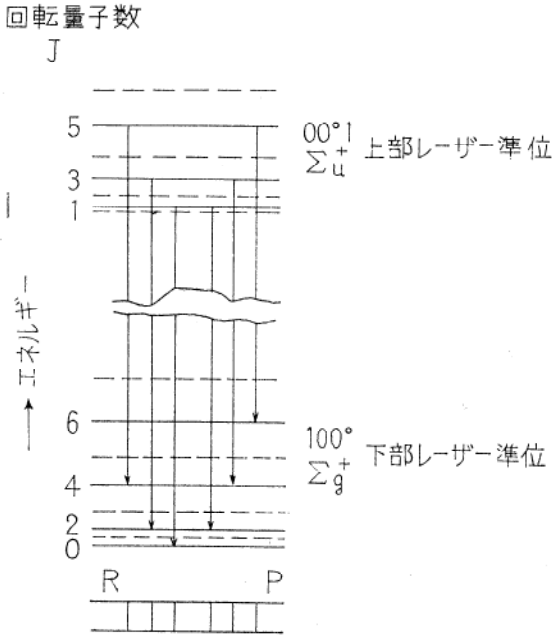


Fig. 3. 炭酸ガスレーザーの00⁺1-10⁺0振動帯間の遷移

縦軸の利得は

$$\frac{8\pi^3 C^4 K_{12}}{3kT(2\pi kT/M)^{1/2}} N_{00^+1} \dots \dots \dots (2)$$

で規格されている。横軸は上部レーザー準位の回転量子数 J で温度は T = 400°K と仮定している。ここで C は光速、k はボルツマン定数、M は CO₂ 分子の質量、K₁₂ は遷移のマトリックス要素の J に依存しない部分である。これによれば上部レーザー準位の同一 J 値に対しては R 枝よりも P 枝の方が利得が大きく特に P 枝のみに着目すれば N_{00⁺1}/N_{10⁺0} < 1、つまり逆転分布が起っていないときでも利得があるという興味ある結果が得られる。従って R 枝のみられないのは励起により逆転分布になっても P 枝の遷移がこれに代って優先的に起るためと考えられる。

この種のレーザーではレーザーガスの圧力が低いためスペクトル線の主な広がりの原因は気体の分子運動に起因するドップラー効果によるものであるが一般にドップラー幅 Δν_D は分子温度が T°K のとき次式が与えられる。

$$\Delta\nu_D = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M} \ln 2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで T = 400°K と仮定すれば Δν_D ≈ 52 Mc/sec となる。これに対し共振器の縦モード間隔は共振器の長さを L としたとき(4)式で与えられる。

$$\text{縦モード間隔} = C/2L \dots \dots \dots (4)$$

ここではレーザー発振波長 10.6 μ にくらべて共振器の曲率半径が数 m ~ 数十 m とはるかに大きいので Fabri-Perrot 共振器で近似されている。例えば著者らが初期

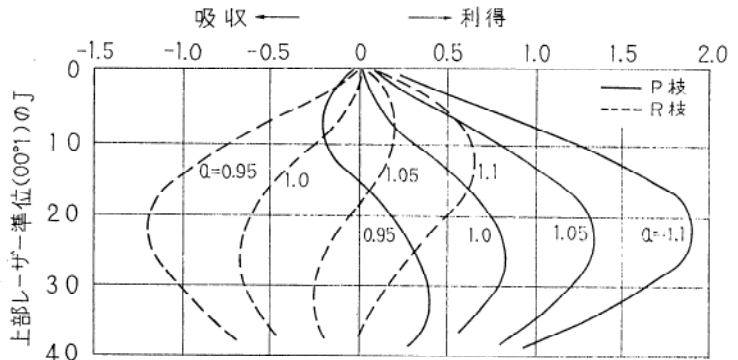


Fig. 4. 上部レーザー準位の回転量子数・J の関数として表わした規格化された利得 (計算値)

$$a = N_{00^+1}/N_{10^+0}$$

分子温度 T = 400°K

に設計したレーザー発生装置では L = 2.5m であるがこのときの共振器の縦モード間隔は 60 Mc/sec となり、ほぼ単一モードで発振する。従ってレーザー共振器の長さが何らかの原因で少し変化したとすれば個々の P 枝遷移の強度に大きな変化が生ずることが予想される。しかし実際には幾本かの P 枝遷移でレーザー発振するので共振器の長さの変動に伴う出力の変化は殆んどないものと考えられる。更に共振器の長さを 10m, 20m と長くすると縦モード幅が狭くなってドップラー幅の中に含まれる数は多くなりその結果共振器の長さの変化に伴う出力の変動は更に小さくなる。

(3) 実験結果

Fig. 5 は著者らが設計試作した大出力炭酸ガスレーザー発生装置を示す。Fig. 5(b) は放電長さが 2m の場合で Fig. 5(c) は 8m の場合である。これらはいずれも内部反射鏡型で共振器は 2 枚の凹面鏡で構成されている。凹面鏡の表面精度は λ/10 程度に仕上げられ、その表面は波長 10.6 μ のレーザー光に対して低い吸収率 (約 1.5%) とすぐれた化学的安定性を有する金の真空蒸着がなされている。2 枚の反射鏡のうち一方の中心には出力を取出すための孔があげられておりこの径は 5, 10, 15, 18 および 20 mm が用いられこの孔を通して取出されるレーザー光は NaCl の窓を通して大気中に取り出される。放電管の内径は約 7.5 cm の硬質ガラスで構成されており、そのまわりは管壁の温度を下げるために水冷されている。このように放電管を冷却することによってレーザー出力は冷却せぬときにくらべて約 2 倍ぐらいになるといわれている。放電は距離 2m におかれたリング状冷電極間で行なわれ、Fig. 5(c) の 8m の放電管は 4 つに放電領域が分割されている。レーザーガスは CO₂, N₂ および He の混合ガスであらかじめ混合タンクに適当な割合で混合されたものが共振器中に導入されレーザーガ

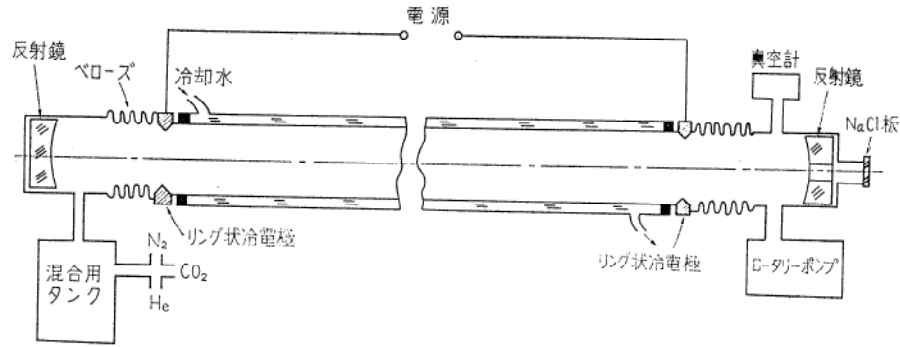


Fig. 5(a). 大出力炭酸ガスレーザー発生装置と略図

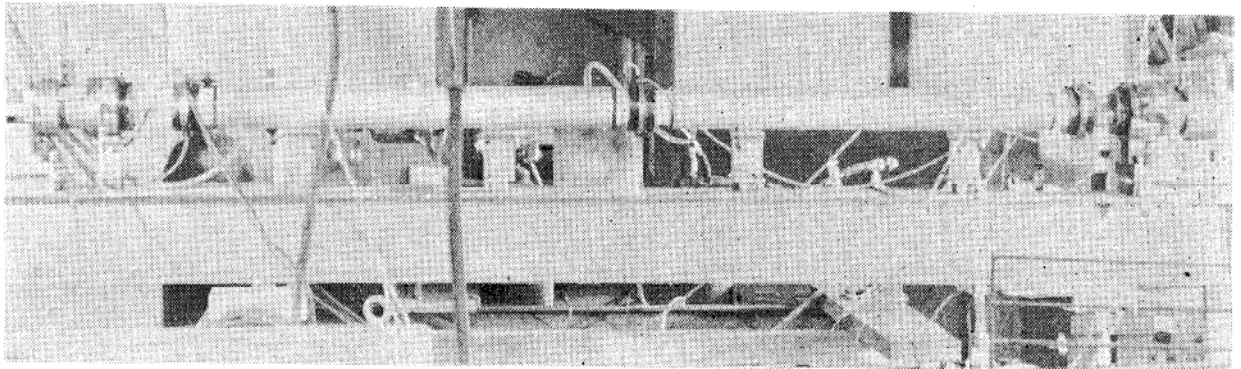


Fig. 5 (b). 放電長さ2mの炭酸ガスレーザー発生装置

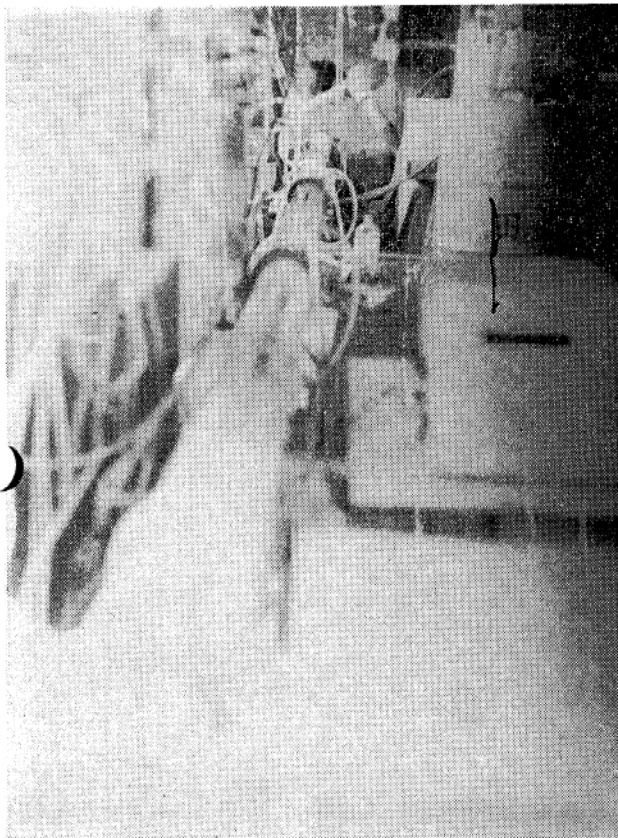


Fig. 5 (c). 放電長さ8mの炭酸ガスレーザー

スの排気にはメカニカルポンプ (450 l/min) が用いられた。真空測定にはマクロドゲージが採用された。レ

ーザー出力の測定には Fig. 6 に示すカロリメータが用いられた。カロリメータの内面はレーザー光の吸収率をよくするためにカーボンを薄く塗布して黒体化されており、更にレーザー光を直接受ける面はレーザー光に対して約 30° 傾斜に取り付けられている。このようにしてレーザー光の反射による出力測定の誤差を少なくする工夫がなされた。カロリメータの水の温度測定には 0.05°C まで読取可能な水銀温度計が用いられた。

レーザー光の出力特性に対する実験が Fig. 5(b) の 2 m の放電長さの装置を用いておこなわれた。以上この装置を用いておこなった結果を示す。

$\text{CO}_2\text{-N}_2$ 2元混合ガスのビーム取出口の径15 mm の共振器を用いたときの最大出力は約 5 W が得られ、このときのガスの混合比は $\text{N}_2/\text{CO}_2 \approx 5$ であった。Fig. 7 は $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 2元混合系での最適混合比 $\text{N}_2/\text{CO}_2 = 5$ の状態に He を添加したときの He の混合比とレーザー出力の関係を示す。He 量をゼロから増大させていくと $\text{He}/\text{CO}_2 = 10$ ぐらいまでは He 添加量と共に出力は急激に増大しその後は He の添加によりあまり出力は増大せず最大出力は $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1 : 5 : 40$ で平均約 70 W が得られた。Fig. 8 は最適混合比での放電々流と出力の関係をいろいろのレーザーガス圧力についてプロットしたもので最大出力は放電々流、放電々圧が夫々 100 mA, 7800 V のときに得られた。このときのガス圧力は

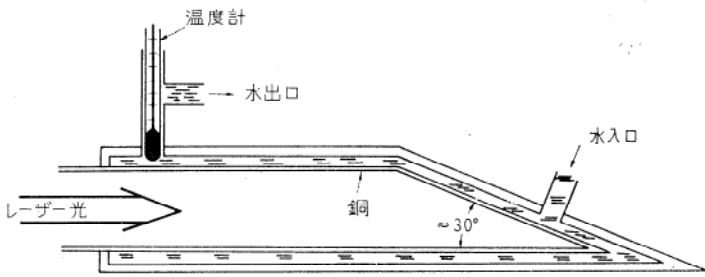


Fig. 6. カロリメーターの原理図

カロリメーターの内面は反射を防ぐためにカーボンが塗布されている。

約10 torr で電気入力からレーザー出力への変換効率は約9%であった。

Fig. 5(c) の放電領域 8 m のレーザー装置を用いてレーザー出力は約300 W が得られた。このとき用いられたレーザー光の取出口の径は15 mmφ であった。取出口の径を更に大きくすることにより出力はもっと大きくなると予想される。このように CO₂-N₂ 系に He を加えることにより出力は飛躍的に増大する。

このようにして He を添加することにより出力と効率は非常によくなる。He の効果についてはこれまで多くの議論がなされている。G. Moeller と J.D. Rigden⁵⁾ は内径21 mm の放電管を用いて実験をおこない He を

加えることにより出力が増大する理由を次のように説明している。この大きさの放電管の CO₂=1torr の CO₂ の壁への拡散時間は上部レーザー準位の有効寿命より幾分長いので CO₂(00⁰1) に励起された分子の殆んどはレーザー遷移する前に器壁まで拡散して冷却される。従って He を加えると器壁への拡散時間が長くなりその結果、

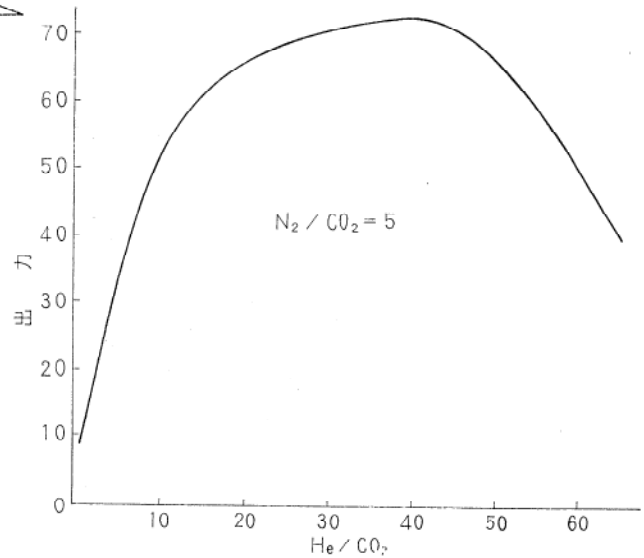


Fig. 7. CO₂-N₂ 混合系に He を加えた場合の出力の変化

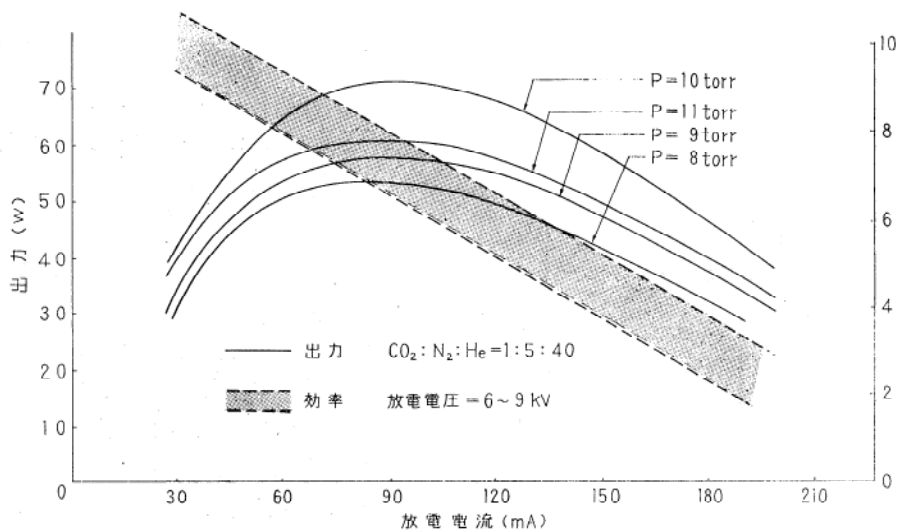


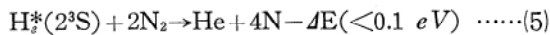
Fig. 8. CO₂-N₂-He 混合系の最適混合比での放電電流と出力の関係 (P はレーザーガス圧力)

励起された CO₂(00⁰1) の器壁での損失を減じ逆転分布が長く保たれるとしている。

これに対して C. K. N. Patel⁶⁾ は本実験に用いたと同じくらいのレーザー管 (約7.7 cmφ) を用い実験したがこの場合では CO₂(00⁰1) の有効寿命に器壁への拡散

時間が匹敵するのでこのような大型のレーザー管では少なくとも He による CO₂(00⁰1) の拡散係数を減ずる効果はあまり重要ではないと考えられる。そこで彼は放電により発生した準安定状態の He(2³S) 原子から N₂ 分子へのエネルギー遷移の可能性から次のような3体衝突

を提案した。



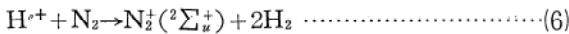
このようにして生じた原子状の窒素は再結合して高い振動準位 $N_2^*(v)$ に励起され、これが振動準位をひとつ落ちるたびに、

(a) $CO_2(00^0)$ を $CO_2^*(00^1)$ におよび

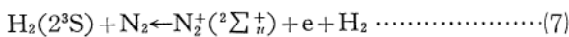
(b) $N_2(v=0)$ を $N_2^*(v=1)$

に各々励起する。(b)の $N_2^*(v=1)$ は(1)の衝突により $CO_2^*(00^1)$ を生ずるので上部レーザー準位 (00^1) への励起速度は非常にはよくなる。このような効果は他のガスの添加 Ne, Ar 等によっては生じない。この説明に依れば、He の効果は N_2 分子を介して CO_2 分子の上部レーザー準位への励起速度をはやくすることであるが我々の得た実験結果からは N_2 のないとき即ち、 CO_2-He 2元混合系でも約25W (CO_2-N_2 2元混合系では約5W) のかなりの出力を示しているところから必ずしも十分な説明とはいえない。

N_2 と励起状態の He のエネルギー交換に対する C. K. N. Patel の3体衝突による説明の代りに Collins Robertson¹⁰⁾ は次のような反応を新しく提案した。即ち比較的高圧の He に対しては次の反応が起り、



その結果励起された窒素 $N_2^*(^2\Sigma_u^+)$ は $v=1$ 準位に落ちる。一方低圧 He 中では



の反応が起る。(7)式の生ずる確率は(6)式のそれよりも低い。実際 X. Ziegler et. Ch. Frapard¹¹⁾ らは実験的に He の高圧および低圧での2つのピークを観察している。この研究も結局 N_2 分子を介しての He の添加効果の説明であるから N_2 分子のない CO_2-He 系の大きな出力に対しての He の効果を説明していないので正しいかどうかには疑問が残る。

He 添加の効果についてはこの他にも2, 3の議論があるが結局まだ詳しいことはよくわかっていない現状である。これらは今後の研究にまたねばならない。

Fig. 9 は共振器中にガスを封じ込んで放電した場合と連続流動させたときの出力の時間的変化を比較したもの

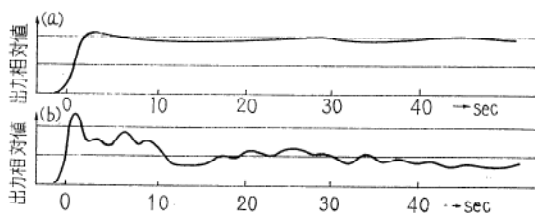


Fig. 9. レーザー出力の時間的変動の例 ((CO_2-N_2-He 混合ガス)
(a) 流動系 (b) 封入系

である。ガスを封じこんだときの出力は時間と共に不安定に変動しかつその平均値も減少する。この原因のひとつとして電極からの不純ガスの混入や放電による炭酸ガス解離の現象も考えられる。このことから大出力レーザー光を安定に発振させるためには絶えずガスを流動させながら放電する必要がある。

この方式の炭酸ガスレーザーでは装置の大きさが与えられるとレーザービームの最大出力には限界がある。従って更に大きな出力が要求される場合は共振器の断面積および長さを大にする必要がある。D. R. Whitehouseによれば特にレーザー管の長さを長くすることによりその効果が強いといわれている。アメリカの Ryttheon 社では20 m のレーザー管を用いて約1.2 KW の出力を報告している。

(4) 応用

設計、試作した装置を用いて2~3加工をおこなった。Fig. 10 は約30Wの出力のレーザー光を凹面鏡で集光させその焦点に材料をおいて加工したときの状況を示す。

Fig. 11は0.3 mm厚さの炭素鋼板の溶接、切断の加工例

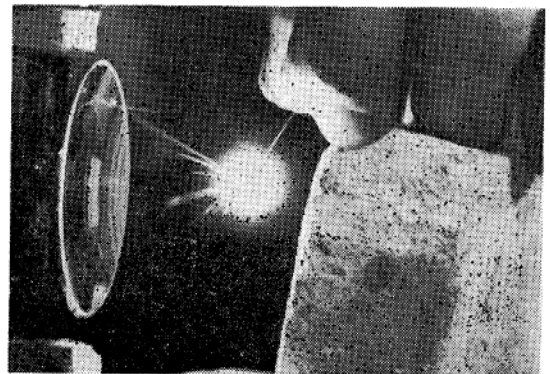


Fig. 10. レーザー光を集光して線材に照射したときの状況 (出力約30W)



Fig. 11. 0.3mm の炭素鋼板の溶接と切断の例 (出力約70W)

を示している。このときの出力は約70Wであった。この他レーザー光は金属の以外にも合成樹脂は勿論耐火レンガの加工も可能である。Fig. 12は耐火レンガに対するレーザービームの穿孔の1例を示す。これは絶縁物質に対

する加工法として将来有力な熱源となることを示している。

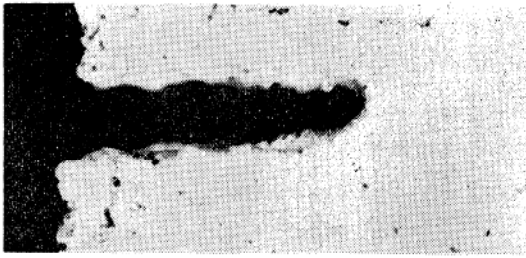


Fig. 12. 耐火レンガの穿孔の例（出力70W）

レーザー出力が更に増して約 300 W ぐらいになれば更に加工性は増大する。Fig 13は 8 m のレーザー管を用いて出力取出口の径が 20 mmφ のときのレーザービームを耐火レンガに集光せずに照射した状況を示す。

これを金属面上に集光したときの状況を Fig. 14 に示

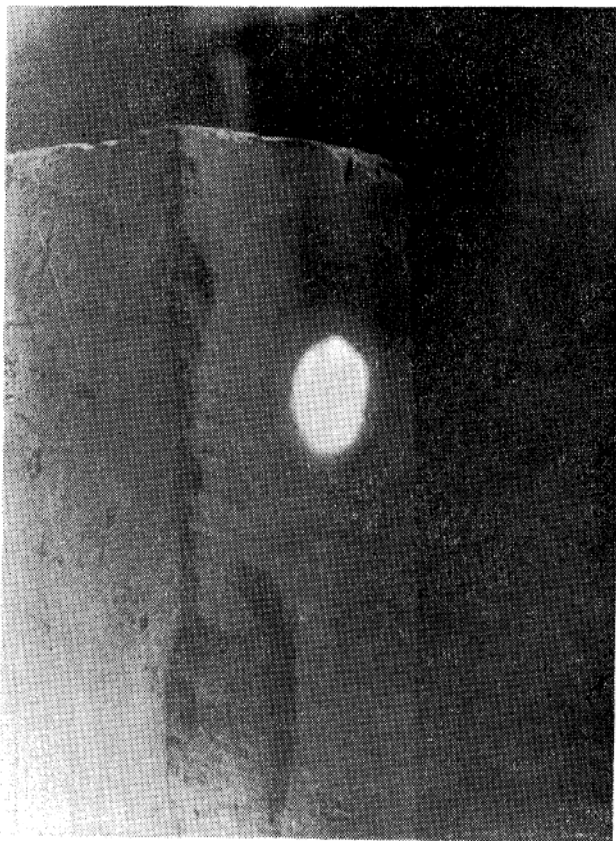


Fig. 13. 放電長さ 8 m のレーザー発生装置を用いて得られたレーザービーム。耐火レンガ上のスポットの大きさは直径 20mm である。この部分はごく短時間にガラス状になった（出力約 300W）。

す。これによれば種々の材料の加工が十分可能であるが

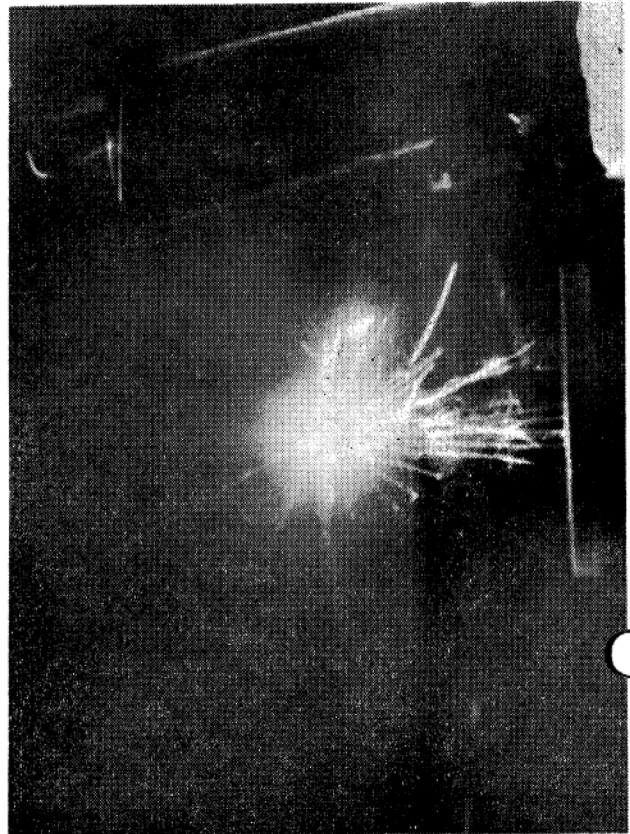


Fig. 14. 出力約 300 W のレーザー光を炭素鋼上に集光したときの状況

これらについての詳しい報告は次回にゆずることとする。

また最近、M. I. T. では約 20m の U 字型のレーザー管を用いて約 1 kW のレーザーの出力を出し、これを用いて興味ある実験を行っている。すなわちこのレーザー光を大理石や火崗岩等の岩石に 3 ~ 5 秒ごく短かい間と集光しないで照射することにより岩石の表面は勿論 10 cm 以上奥深くまでにクラックを生ずることができると報している。これはトンネル工事やハイウェイの工事にさく岩機と併用すれば工事が容易になることを示している。このように大出力レーザーが連続に得られる現在、すでに炭酸ガスレーザーは熱源として実用の段階に達したものと我々は考える。

文 献

- 1) J.E.Anderson and J.E.Jackson: Proceedings of the Electeon and La ser Beam Symposium p.17 (1965).
- 2) C.K.N.Patel: Phys. Rev. 136, A1187 (1964).
- 3) 荒田吉明, 超高温研究, Vol. 4, No. 1(1967), 荒田吉明, 生産と技術, Vol. 19, No. 4(1957), 荒田吉明, エレクトロニクス, (1967).
- 4) C.K.N.Patel: Appl. Phys. Letters 7,15, (1965)
- 5) G.Moeller and J.D.Rigden: Appl. Phys. Letters 7,274 (1965).

—以下14頁に続く—