

放電遅延時間制御によるTEA-CO₂レーザーシステムの実出力制御

1992年7月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1992

放電遅延時間制御によるTEA-CO₂ レーザーシステムの出力制御

宮本 泰明, 谷口 隆幸*, 川上 重秋
長谷川 信, 島崎 善広

要 旨

レーザー光を利用する際に出力エネルギーを制御する方法としては、レーザー装置に投入する励起エネルギーを制御する方法が一般的である。この方法は発振器と増幅器から構成されるMOPAシステムにおいても用いられ、励起エネルギーの制御幅が十分にある場合には簡単で確実な方法であるが、制御幅が狭い場合、出力エネルギーの制御幅も同様となり問題が生ずる。

分子レーザー法ウラン濃縮工学実証試験におけるレーザーシステムとして、TEA-CO₂ レーザーシステムを用いているが、そのスイッチ電源に全固体素子電源を用いているために媒質への放電電圧の制御幅が狭く、ウラン濃縮試験を実施する上で、レーザー出力エネルギーを濃縮試験に必要な幅で制御することが難しかった。そこで、レーザーシステムの出力エネルギー制御方法として、発振器と増幅器の放電遅延時間を制御する方法を考案し、実験的検証を実施した。

その結果、発振器と増幅器の放電遅延時間を制御することによって、レーザーシステムの出力エネルギーを制御可能であることを確認した。また、この方法により出力エネルギーを制御することにより、レーザー発振中に出力調整を行った場合でも媒質に与える熱的な変動を抑えることが可能となると考えられる。

目 次

1. はじめに	1
2. スイッチ電源の評価	2
3. 出力制御方法の概念	4
3-1 炭酸ガスレーザーの基本原理及びレーザー利得の時間変化	4
3-2 放電遅延時間制御による出力制御方法	4
4. 試験方法及び結果	10
4-1 試験機器構成	10
4-2 試験方法及び試験結果	10
5. まとめ	17
参考文献	18

1. はじめに

炭酸ガスレーザー等のMOPAレーザーシステムの出カエネルギーを制御する方法として、通常は媒質に投入する励起エネルギーを調整する方法が一般的である。分子レーザー法ウラン濃縮工学実証試験に用いている解離用炭酸ガスレーザーシステム（TEA-1系列）はレーザーのスイッチ電源に半永久的な寿命を持つ、サイリスタと磁気パルス圧縮回路から構成される全固体素子電源^{〔1〕}〔2〕を採用している。スイッチ電源に全固体素子電源を用いた場合、その原理的な特性から、スイッチングするエネルギーの制御可能範囲が狭く、濃縮試験に必要となる微妙な出力エネルギーの制御が一般的な出力調整方法では難しかった。

全固体素子電源を用いたレーザーシステムにおいてもシステムの出カエネルギーを自在に制御可能とする方法の開発が必要であり、励起エネルギーに依存しない方法として、炭酸ガスレーザーの発振器と増幅器の間の放電遅延時間を制御することによりシステムの出カエネルギーが調整可能となることを見出した。

本報告書では、放電遅延時間を制御することによりシステムの出カエネルギーを調整する方法の概念及びその試験結果を示し、評価を行った。

2. スイッチ電源の評価

TEA-CO₂ レーザーのようなパルス放電型ガスレーザーに用いるスイッチ電源のスイッチング素子としては、ギャップスイッチ、サイラトロン、半導体素子等種々の素子が存在するが、現在最も一般的に使用される素子としてサイラトロンが挙げられる。図1にサイラトロンを用いたスイッチ電源回路として最も簡単な方法の1つである容量移行型電源回路の基本概念図を示す。容量移行型電源回路の特徴は長所として、

- (1) 電源回路の構成が簡単である。
- (2) 放電電圧の範囲が広い。
- (3) 放電パルス幅を変更することが可能。

があり、非常に自由度の大きい電源である。しかし、短所として、サイラトロンにかかる負荷が大きくなり、寿命が短くなるという問題がある。

この短所を補い、かつ、安定的にスイッチングを行うためにLC反転倍電圧電源方式、磁気パルス圧縮回路との組合せ、あるいは、パルストランスとの組合せ等の方法が考えられ、サイラトロンの負荷の小さい領域で使用することができるようになった。しかし、サイラトロンの寿命はこのような条件の下でも $10^8 \sim 10^9$ ショット程度であり^[3]、高繰り返し動作状態では比較的短時間で劣化することが考えられる。

サイラトロンが電子管の一種であり動作回数に応じた寿命を持つのに対して、GATT, SIサイリスタ, GTO, IGBT等の半導体素子は半永久的な寿命を有する。しかし、大パワーのスイッチングは難しく、パルストランス、可飽和リアクタ等との組合せが必要となる。半導体素子とパルストランス及び可飽和リアクタから構成される全固体素子電源回路の基本概念図を図2に示す。全固体素子電源の特徴は、長所として、動作回数による寿命がない、すなわち、半永久的にその性能を維持できること、また、短所として磁気パルス圧縮回路の特性上、移行エネルギー量の変動幅を大きくできないことが挙げられる。

以上に示したように、高繰り返し動作条件下において、その将来性という観点からとらえた場合、全固体素子電源をレーザーのスイッチ電源として採用する必要があるが、その採用に伴う諸問題（出力エネルギーの制御方法の確立等）を解決しなくてはならない。

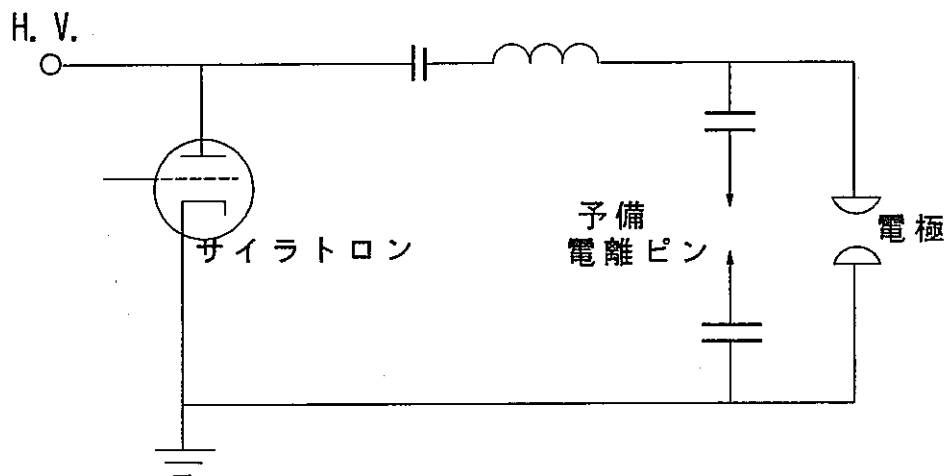


図1 容量移行型電源回路

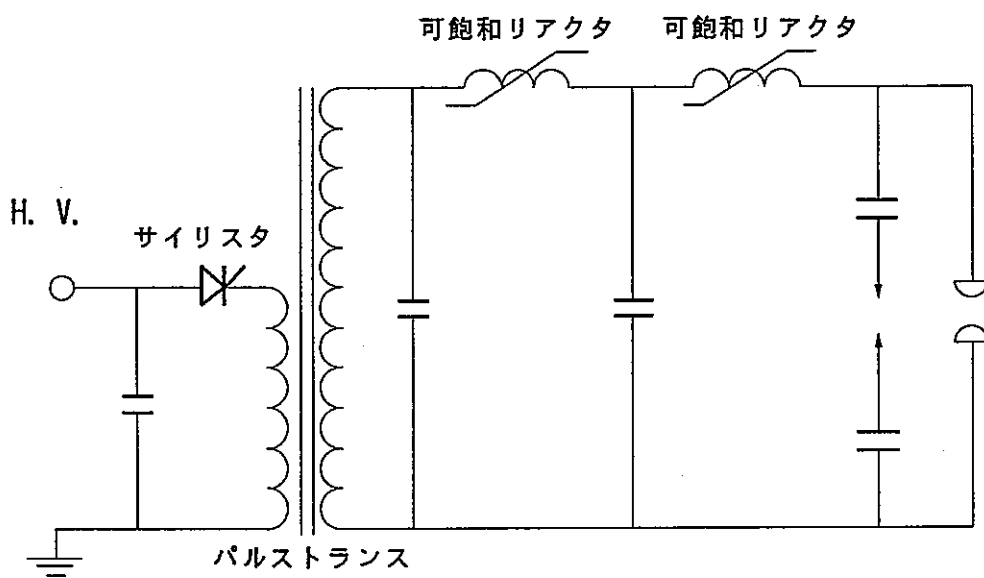


図2 全固体素子電源回路

3. 出力制御方法の概念

3-1 炭酸ガスレーザーの基本原理^[4] 及びレーザー利得の時間変化

炭酸ガスレーザーの発振に係わる分子の振動準位概念を図3に示す。CO₂分子は直線状対称3原子分子であり、対称伸縮、屈曲及び非対称伸縮の3つの振動モードを有する。これらの3つのモードの量子数を、それぞれ、 ν_1, ν_2, ν_3 とし、これらによって決まる振動準位を (ν_1, ν_2, ν_3) で示す。CO₂分子は放電により基底準位(0 0 0)から(0 0 1)に励起され、(1 0 0)への誘導緩和で10.6 μm 、(0 2 0)への誘導緩和で9.6 μm のレーザー光をそれぞれ発生する。

通常炭酸ガスレーザーのレーザーガスにはCO₂のみでなくN₂、Heとの混合ガスを用いる。N₂分子は放電により励起されると振動励起状態は $\nu = 1$ の準安定状態となる。N₂分子の $\nu = 1$ の振動エネルギーはCO₂分子(0 0 1)の振動エネルギーと18 cm^{-1} しか差がないため、共鳴的にエネルギー移乗が起こり効率的な励起が行われる。さらに、分子の振動準位はほぼ等間隔であるから、CO₂分子とN₂分子の高次振動準位においても同様なエネルギー移乗過程が存在し、炭酸ガスレーザーがエネルギー効率の非常に良いレーザーである要因の1つとなる。He分子は主に放電を安定にする作用をもち、レーザー遷移の下準位(1 0 0)及び(0 2 0)に存在する分子を基底準位へ緩和する。

放電により励起された分子は誘導放出が起こらない場合、時間とともに下準位へ熱的に緩和してゆく。レーザーの発振原理を考えた場合、レーザー遷移準位の上準位と下準位の分子数密度差、すなわち、反転分布強度がレーザー利得を決定する。したがって、放電による励起が起こってからの時間差により反転分布強度が変化し、それに伴いレーザー利得も変化することがわかる。図4にTEA-1系列の炭酸ガスレーザーシステムを用いた実験により得られた放電からのレーザー光増幅率の時間変化を示す。この図から、放電が起こった直後からレーザー利得が立ち上がり、急速に増加していることがわかる。さらに、レーザー利得は放電から約2 μs 後に最大となり、その後は約20 μs 程度まで徐々に減少し続けることがわかる。

3-2 放電遅延時間制御による出力制御方法

レーザー利得は3-1で示したように励起からの時間経過とともに変化する。全固体素子電源を用いたレーザーシステムのように励起エネルギーを自在に調整不能なシステムにおいてはこの利得の時間変化を利用することにより、システムの出エネルギーを制御することが可能と考えられる。

一般的にレーザーでは、発振器と増幅器に同時に放電をかけた場合、発振器の共振器内での増幅

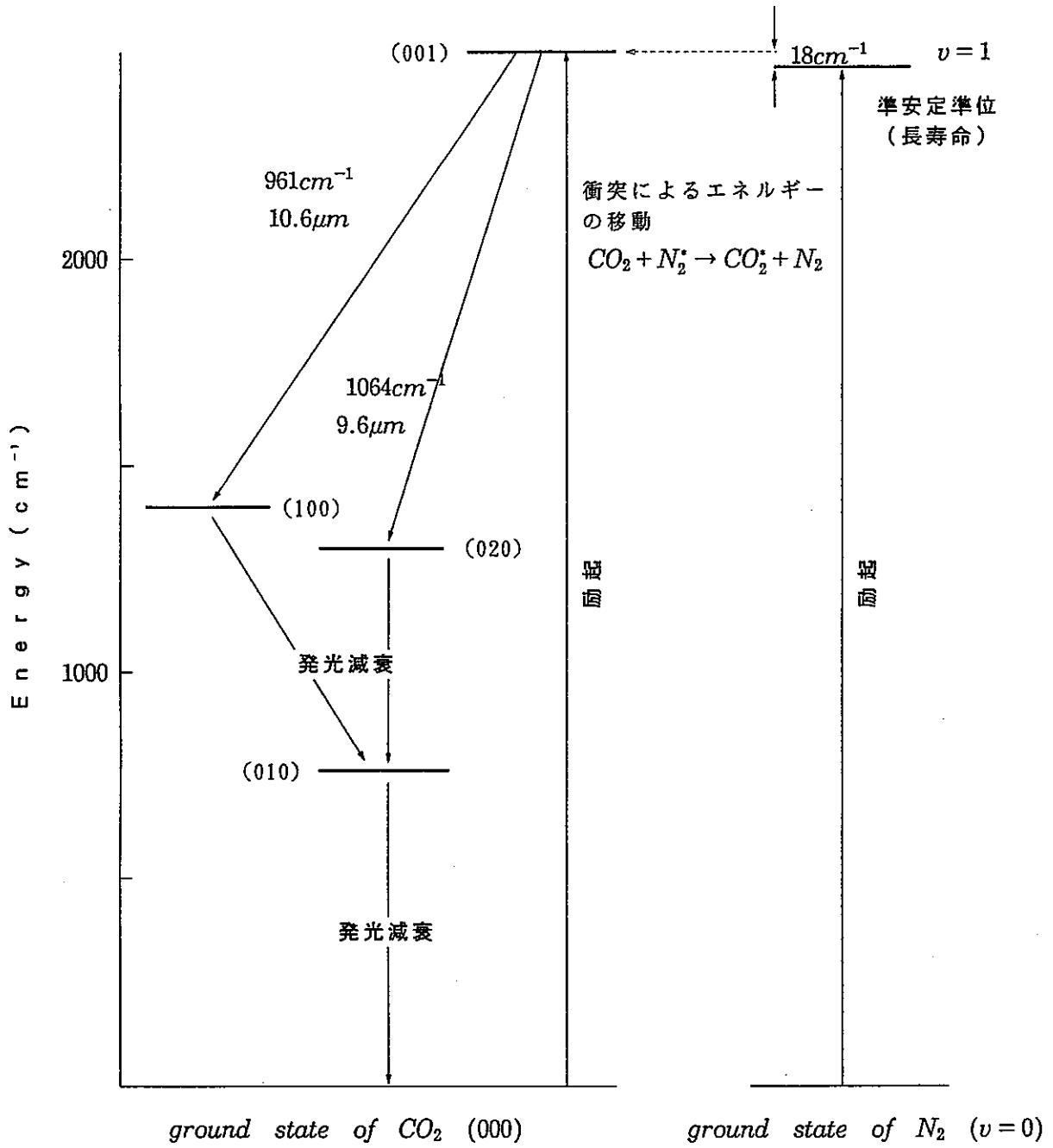


図3 炭酸ガスレーザーにおける振動準位概念図

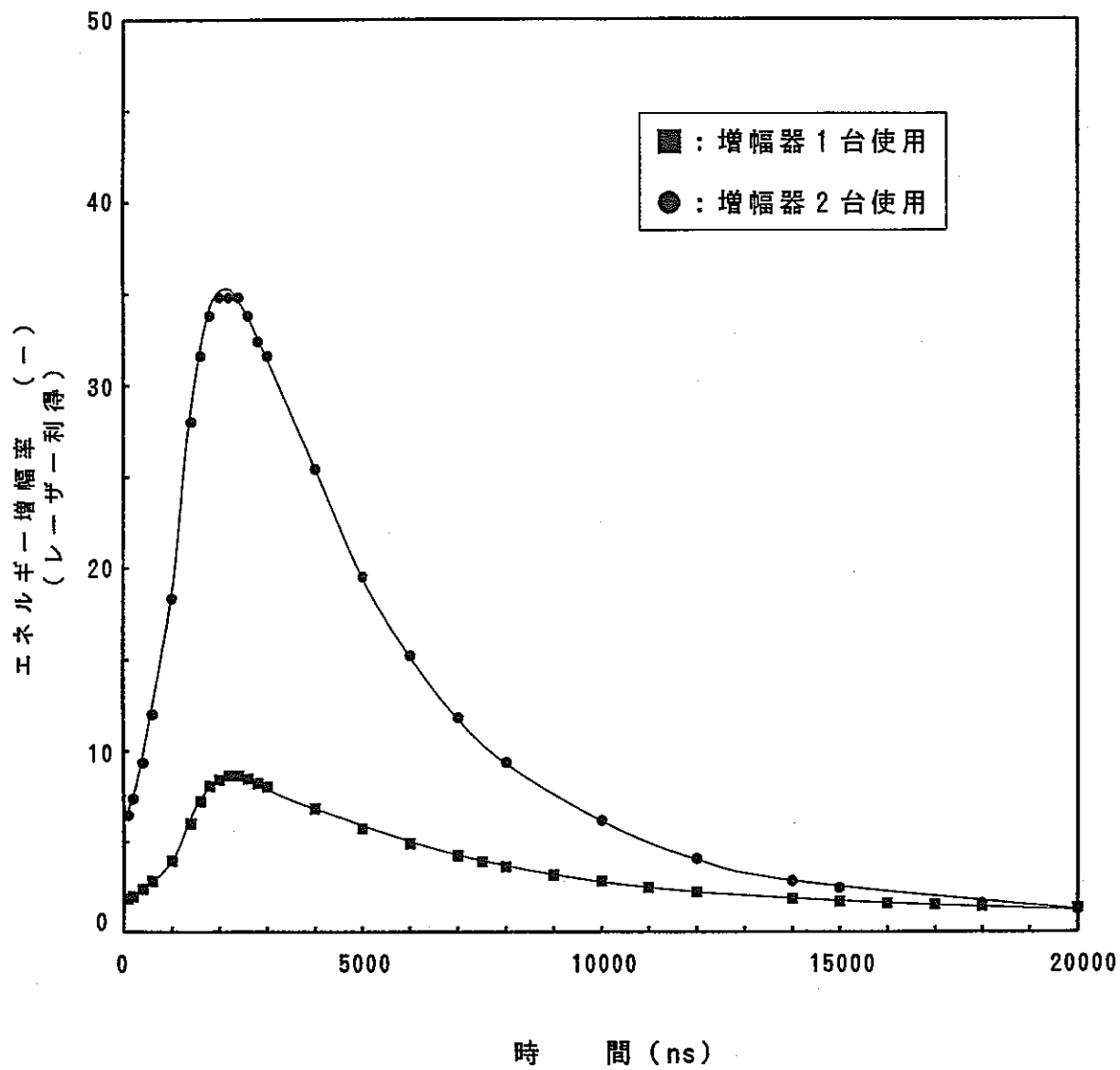


図 4 レーザー利得の時間変化

過程と増幅器の利得の立ち上がりを比べると発振器の方が早いために、増幅器を先に放電するよう放電遅延時間を設定する。レーザーシステムの効率を最大にするために、MOPAシステムでは図5に示すようにレーザー光が増幅器を通過するときに増幅器のレーザー利得が最大になるようにする。

図5からわかるようにレーザー利得の時間変化は、立ち上がりで早く、ピーク以降は緩やかに減衰するため、利得の時間変化を出力制御に適用する場合、図6に示すように、ピーク以降の変化が緩やかな部分を使用した方が出力安定性及び精度は良くなる。

また、一般的にレーザー媒質に励起エネルギーを投入するとその一部はレーザー媒質である分子・原子を励起するのに寄与するが、残りの大半は熱エネルギーとなり、レーザー媒質の温度変化を誘発する。励起エネルギーを変化させレーザー出力の調整を行った場合、レーザーの発振中に媒質の温度変化が起こることになり、固体レーザーにおいては熱レンズ効果等の形状的变化及び屈折率の変化が起こりレーザー光発振の安定性に問題が生ずる可能性がある。また、気体レーザーでは媒質の電氣的負荷の変化により放電状態が不安定になることが考えられる。しかし、発振器と増幅器の間の励起エネルギーの投入遅延時間を制御して出力エネルギーを制御する方法を用いると、レーザー発振中に出力調整を行っても媒質の熱的变化がなくなり、レーザー発振の安定性を向上することが可能と考えられる。

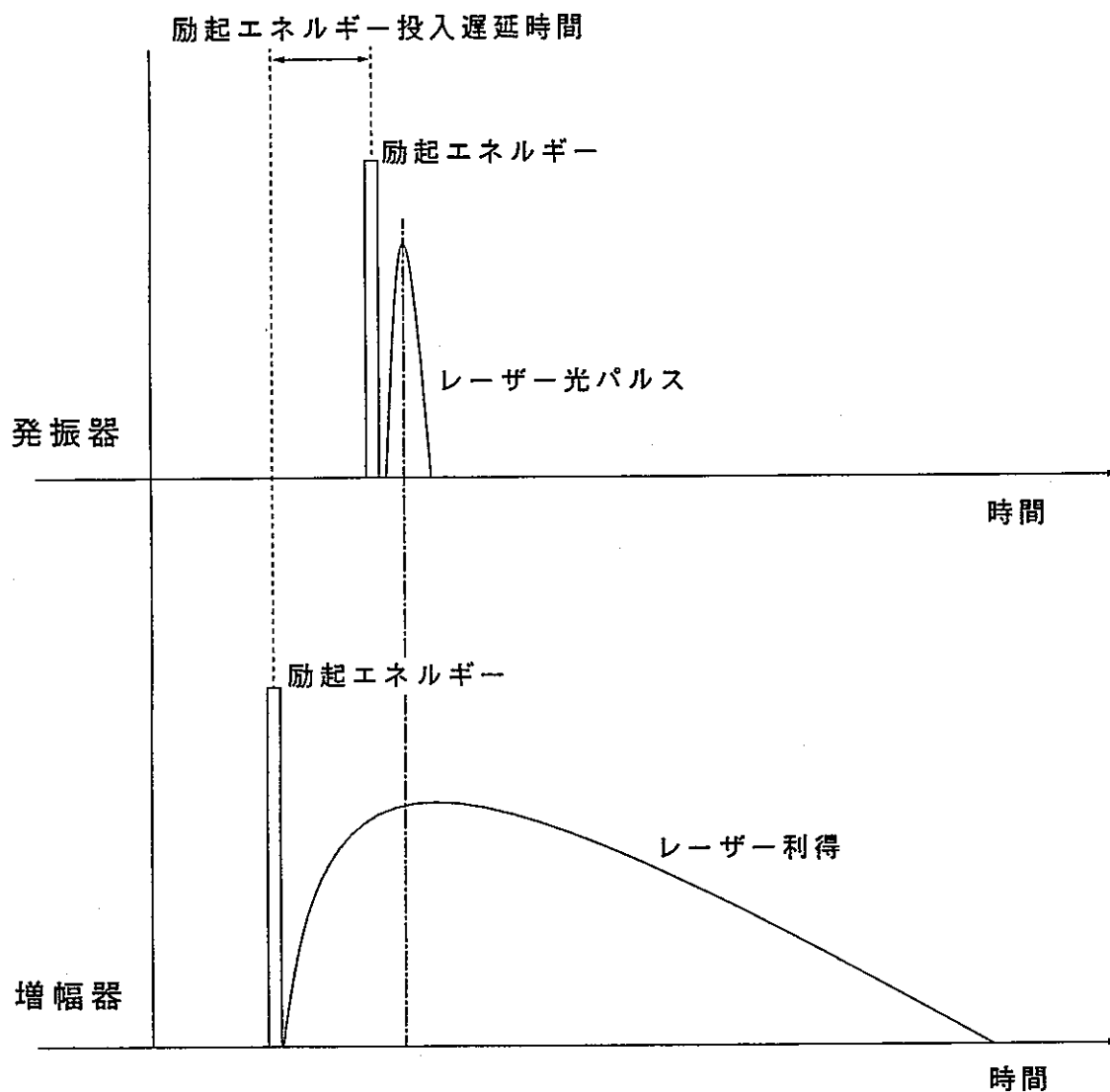


図5 発振-増幅のプロセス

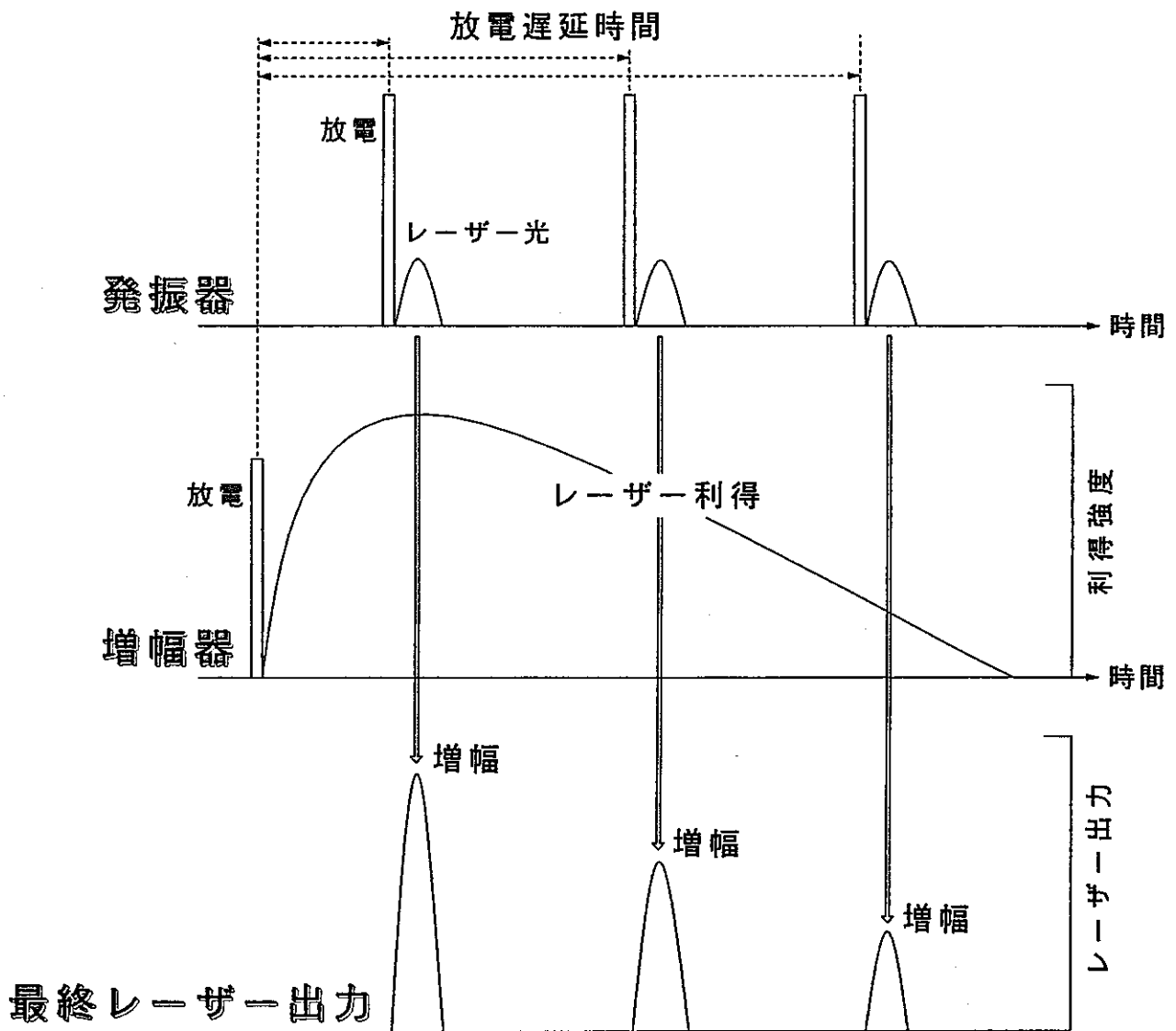


図6 出力エネルギー制御方法の概念

4. 試験方法及び結果

4-1 試験機器構成

TEA-1 炭酸ガスレーザーシステムを用いて試験を実施した。このレーザーシステムは図7に示すように発振器1台と増幅器3台から構成されるが、本試験は増幅器1のみを用いた場合と増幅器1, 3の2台を用いた場合について実施した。各レーザー装置のスイッチ電源は図8に示すように全固体素子電源を使用しており、スイッチング素子には $di/dt, dv/dt$ 耐量の大きいGTO (ゲートターンオフサイリスタ) を用いている。また、放電遅延時間を制御するために発振器及び増幅器それぞれにトリガー信号を送信できるように図9に示す構成とし、図10に示すダイアグラムに基づき動作させる。

4-2 試験方法及び試験結果

試験は発振器と増幅器の放電遅延時間を $2\mu s \sim 7\mu s$ の間で変化させた時のレーザーシステムの出エネルギーを測定した。測定は、図11に示すようにエネルギーメータ (GENTEC BD-500)を用い、その出力電圧をディジタイザ(HP54111D)で計測した。GENTEC BD-500 の測定上限範囲は $1 J/cm^2$ であり、システムのエネギーを直接測定することは不可能であり、KC1のビームスプリッタを用い、その反射光のエネギーを測定した。

試験を実施した結果を図12に示す。発振器と増幅器1のみを使用した場合、 $2 J$ から $1.5 J$ の間で出力エネギーの制御が可能であることがわかる。また、発振器と増幅器1, 3を用いた場合、 $5.1 J$ から $2.3 J$ の範囲で制御可能であることがわかる。

また、TEA-1のレーザーシステムの小信号利得測定結果を用いた出力解析結果^[5] からTEA-1の最大出力は約 $8 J$ であるから、増幅器を3台全て使用することにより $5 \sim 8 J$ の間に関しても出力制御可能であると考えられる。

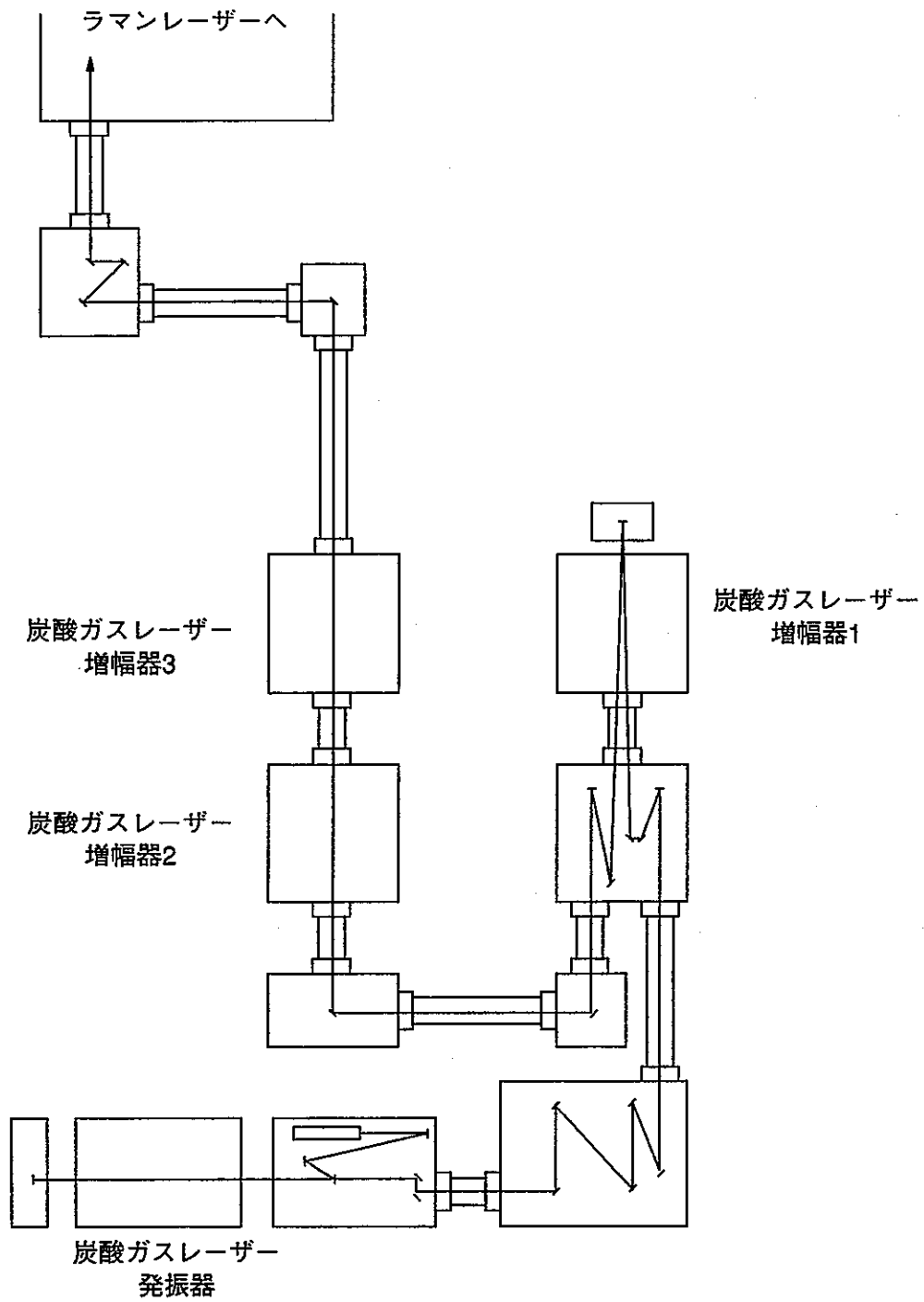


図7 分子レーザー法工学実証試験装置の機器配置図

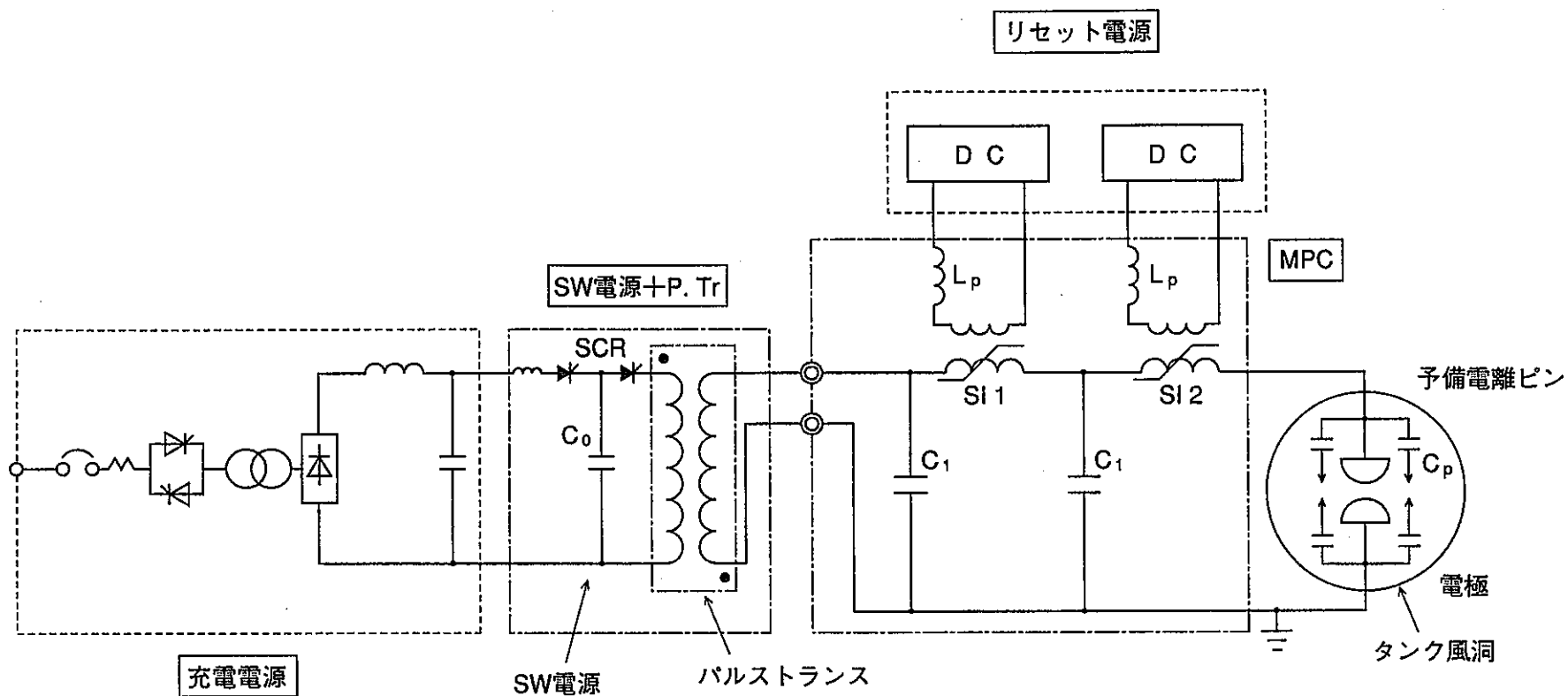


図8 放電励起回路図

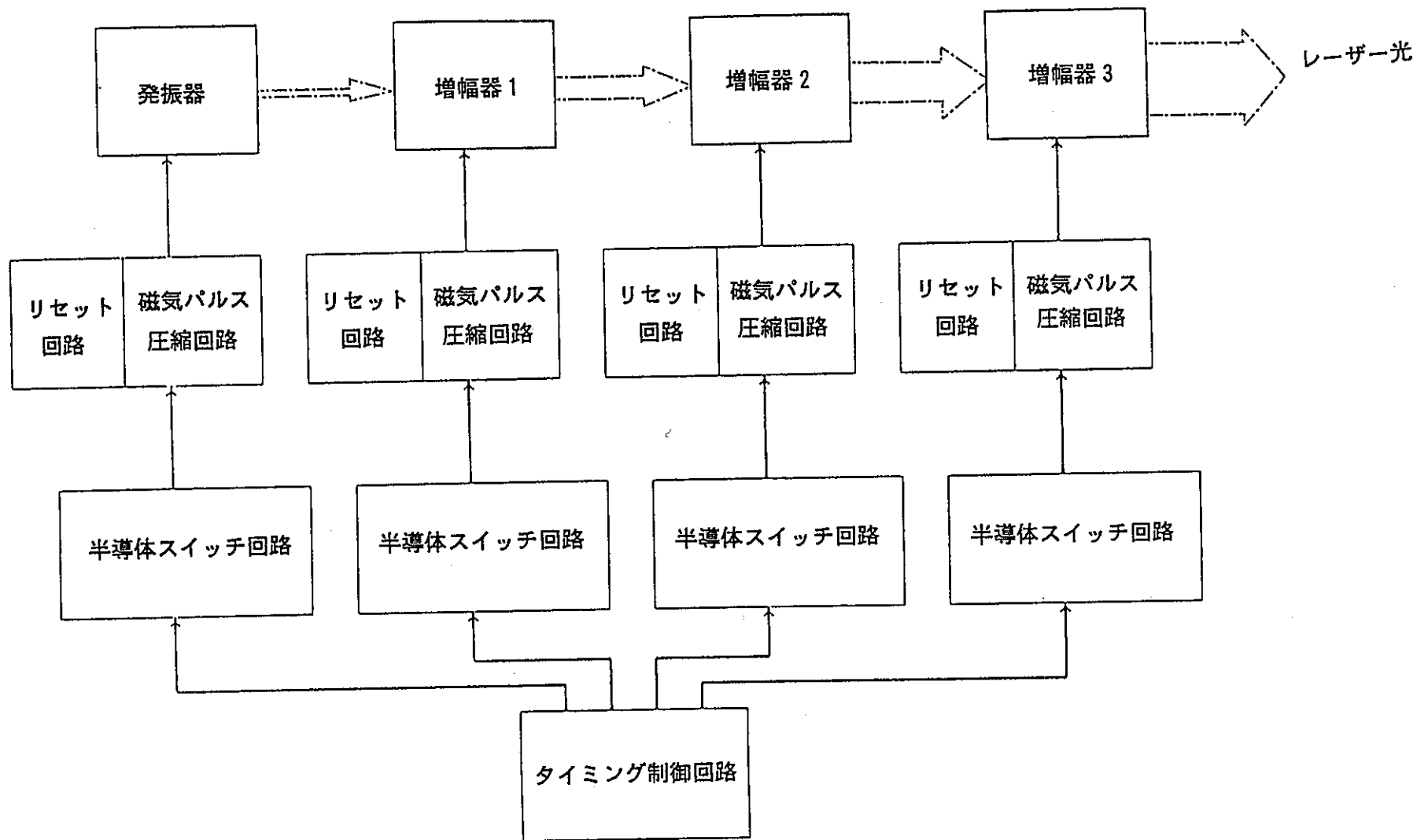


図9 トリガーシステムの構成図

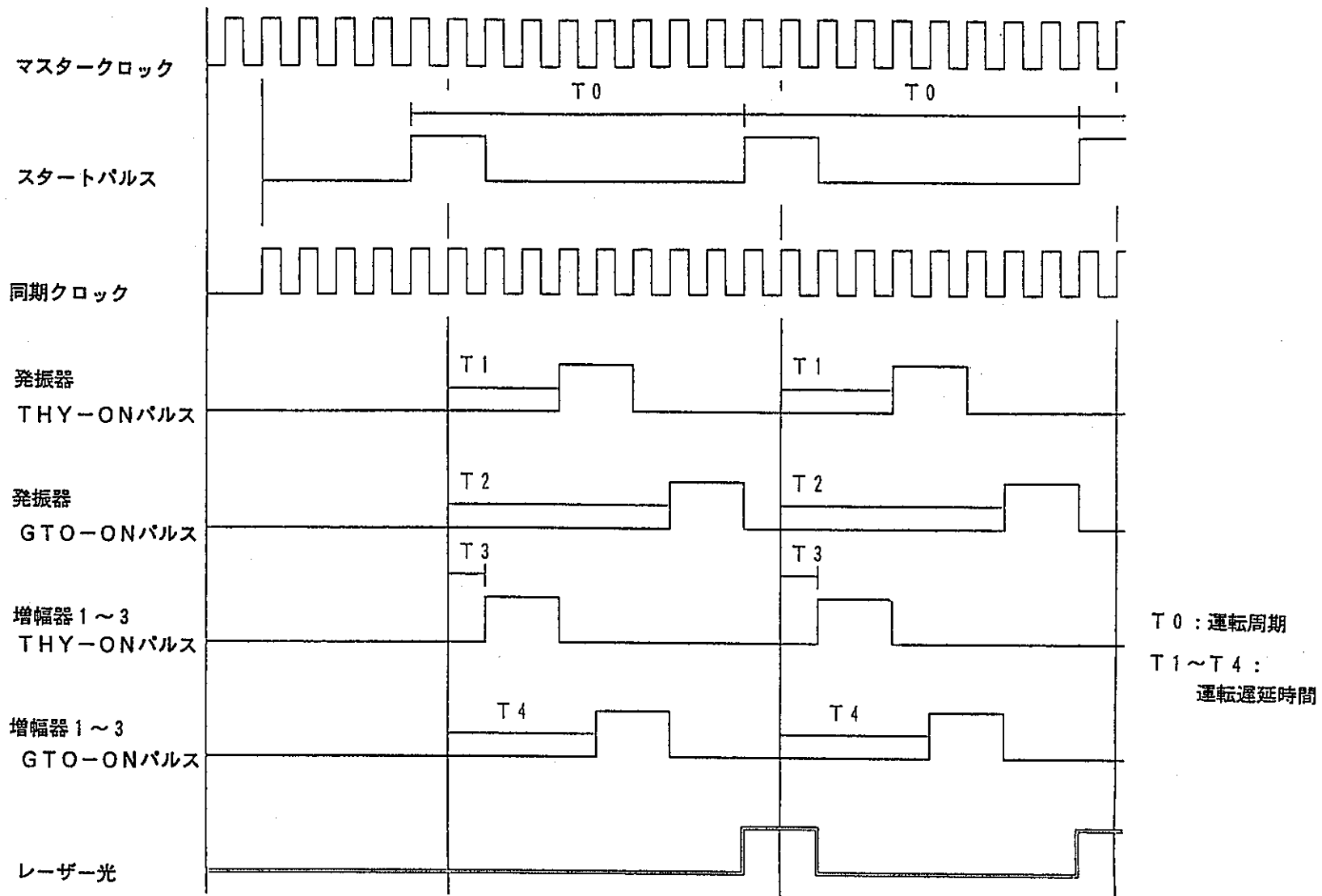


図10 タイミング制御のダイアグラム

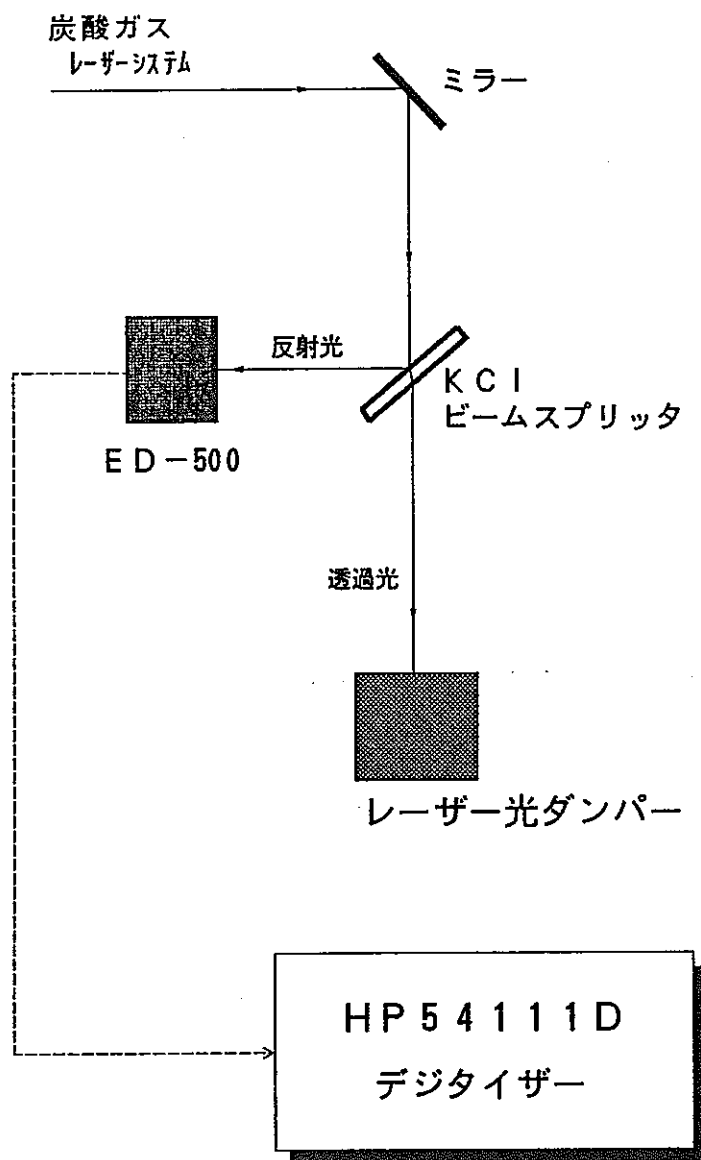


図11 測定系構成概略図

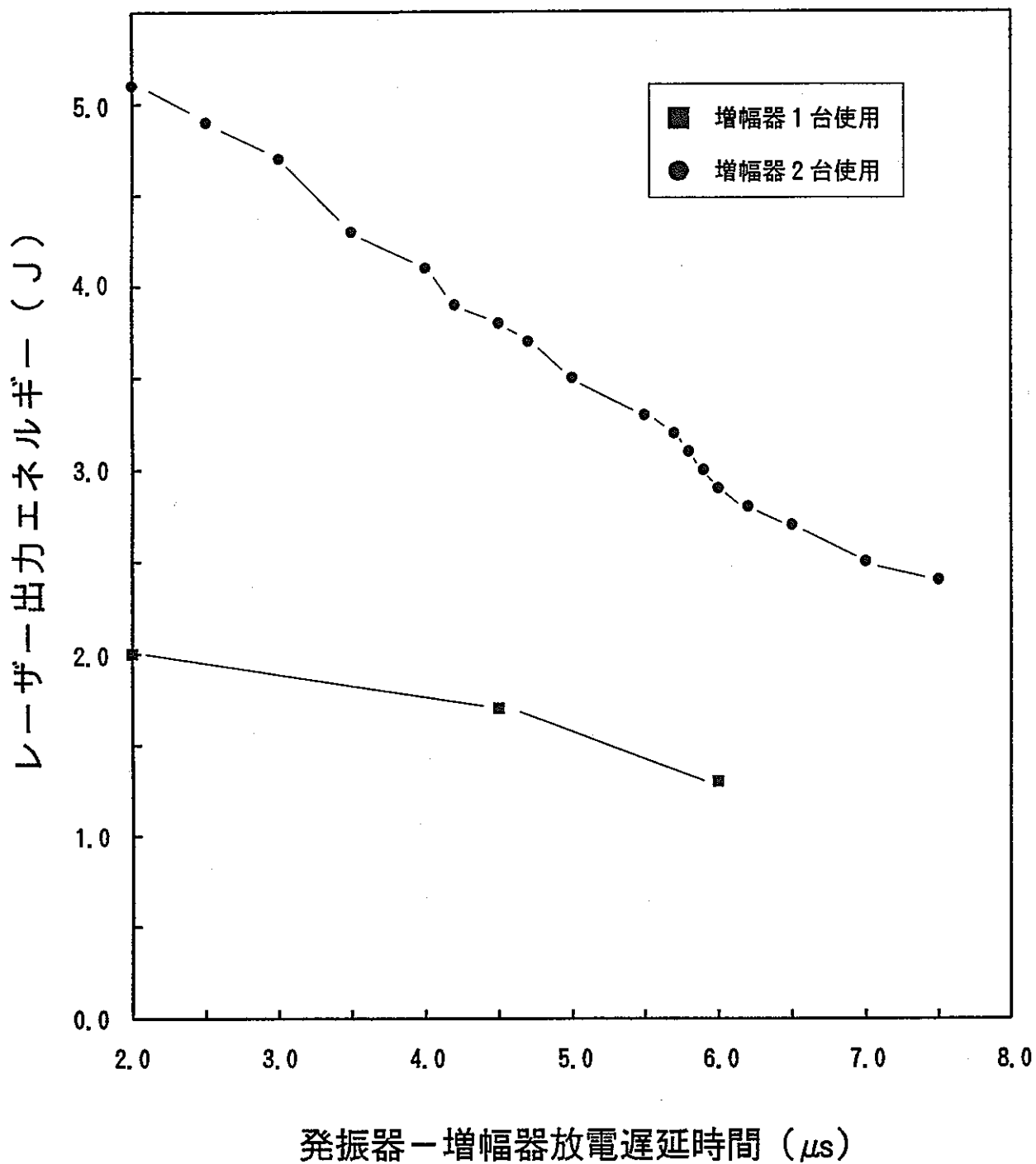


図12 放電遅延時間に対するレーザー出力エネルギー

5. まとめ

- (1) 放電遅延時間を制御することによって、レーザーシステムの出力エネルギーを制御することが可能であることを確認した。

- (2) 放電遅延時間を制御し、レーザーシステムの出力エネルギーを制御することによって、レーザー発振中に出力調整を行った場合でも、媒質に熱的な変動を抑えることが可能となることが考えられる。

参考文献

- [1] H. Tanaka et al.; Rev. Sci. Instrum. 61(1990)1196
- [2] H. Hatanaka et al.; J. Appl. Phys. 68(1990)1456
- [3] 永井 治彦; レーザー学会学術講演会第6回年次大会予稿集 (1986)80
- [4] A. Yariv; "Quantum Electronics 3rd ed." JOHN WILEY & SONS (1988)216
- [5] 新田 秀行, 他; 動燃社内報告書「解離用TEA-CO₂ レーザーの運転評価 増幅器の
利得測定結果」, 91BN-3175E-0010X