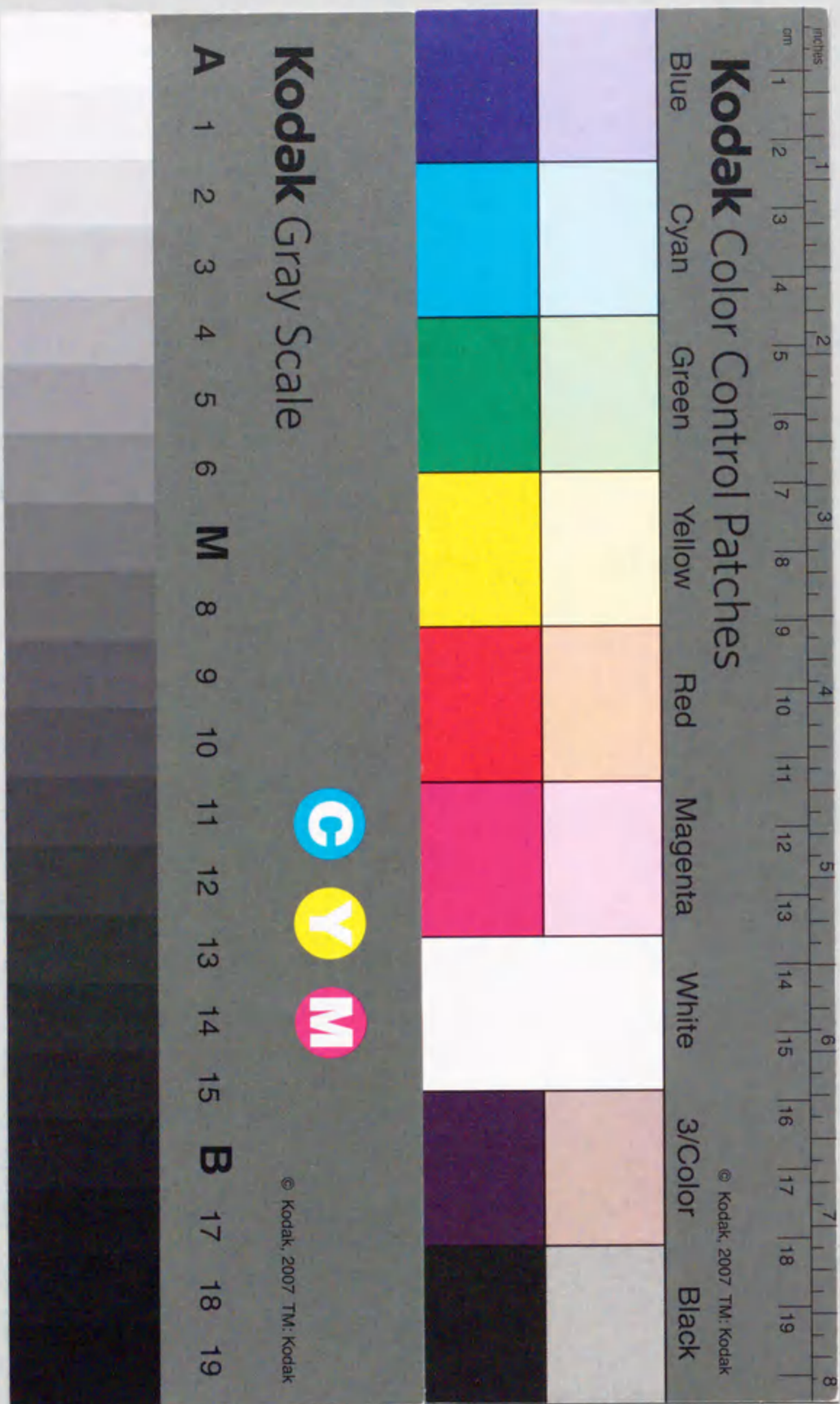


報告番号 乙第 5419 号

高繰り返しエキシマレーザの実用化に関する研究

後藤達美



①

高繰り返しエキシマレーザーの実用化に関する研究

後藤達美

目次

第1章 序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

1.1 レーザ技術概説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

1.1.1 開発経緯と基本技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

1.1.2 従来型ガスレーザー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4

1.1.3 実用化のポイント・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20

1.2 ガスレーザーの開発現状・動向・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22

1.2.1 高ガス圧パルスレーザー技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22

1.2.2 短波長域動作技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23

1.3 エキシマレーザーの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25

1.3.1 研究開発の概況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25

1.3.2 基本技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・27

1.3.3 要求ポイントと実用化の基本技術課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30

1.4 本論文の目的と構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・31

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・33

第2章 エキシマレーザー装置の高繰り返し化基礎技術開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

2.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

2.2 高繰り返し化基礎実験用装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44

2.2.1 技術開発のポイント・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44

2.2.2 装置構成の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47

2.2.3 ガス流特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48

2.3 予備電離・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49

2.3.1 実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・49

2.3.2 結果と検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50

2.4 放電電流の集中化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53

2.4.1 実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53

2.4.2 ダブルパルス動作結果と検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54

2.4.3 100パルス連続点弧動作の結果と検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62

2.4.4 連続高繰り返し動作の結果と検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・64

2.5 繰り返し数の封入ガス依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66

2.6 ガス密度揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69

2.7 放電生成物による出力変動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72

2.8 基礎実験の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75

2.8.1 予備電離の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75

2.8.2 Xeガス分圧の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76

2.8.3 その他ガス条件の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76

2.8.4 放電生成物の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・77

2.9 本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・80

第3章 高繰り返し大出力化モデル1装置の動作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85

3.1 装置の設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85

3.1.1 装置構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・86

3.1.2 ガス流速特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87

3.2 レーザ出力のガス流速依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・90

3.2.1 実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・90

3.2.2 結果と検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91

- 3.3 レーザ出力のガス温度依存性 93
 - 3.3.1 実験条件 93
 - 3.3.2 結果と検討 93
- 3.4 高繰り返し化総合試験 95
 - 3.4.1 基本動作特性 95
 - 3.4.2 高繰り返し化の基本的検討 97
- 3.5 出力増大化 98
 - 3.5.1 ガス条件の最適化 98
 - 3.5.2 放電電極の伸長 100
- 3.6 長時間動作特性 102
- 3.7 高繰り返し動作化の考察 105
- 3.8 本章のまとめ 107
- 参考文献 108

第4章 高繰り返しエキシマレーザ実用化の要素技術開発 113

- 4.1 はじめに 113
- 4.2 高速ガス循環 113
 - 4.2.1 プロアの開発 113
 - 4.2.2 磁気カップリングの開発 116
- 4.3 チャンバ材料の選定 118
 - 4.3.1 試験条件 118
 - 4.3.2 評価結果 119
- 4.4 予備電離方式の検討 124
 - 4.4.1 X線管の設計と線量特性 125
 - 4.4.2 X線予備電離の基礎試験 127
 - 4.4.3 X線予備電離の高繰り返し化 129
 - 4.4.4 X線予備電離による大出力レーザ発振 132
- 4.5 放電技術、その他 136
 - 4.5.1 放電技術 136
 - 4.5.2 衝撃波ダンパ 140
 - 4.5.3 光学素子の評価試験 146
- 4.6 モデル-2装置の動作結果 147
 - 4.6.1 設計概要と製作 147
 - 4.6.2 5 kHz, 500 W 動作結果 150
- 4.7 本章のまとめ 154
- 参考文献 156

第5章 エキシマレーザ装置の半導体スイッチ電源駆動 159

- 5.1 はじめに 159
- 5.2 開発装置の設計コンセプト 159
 - 5.2.1 半導体スイッチング電源化の状況 159
 - 5.2.2 電源回路の基本設計 161
- 5.3 高速半導体スイッチ素子 162
 - 5.3.1 素子構造の基本設計と特性 162
 - 5.3.2 素子の性能向上 166
 - 5.3.3 素子の実用性評価 173
- 5.4 高速半導体スイッチ電源 176
 - 5.4.1 MAGTモジュールの駆動回路 176
 - 5.4.2 磁気圧縮回路 182

- 5.4.3 電源の構成と特性 186
- 5.5 レーザ駆動 188
- 5.6 本章のまとめ 194
- 参考文献 195

第6章 高繰り返しエキシマレーザ実用化の考察 197

- 6.1 開発技術の位置付け 197
 - 6.1.1 本技術分野の開発進展状況 197
 - 6.1.2 本研究開発のポイント 200
 - 6.1.3 実用化の技術課題 202
- 6.2 残留荷電子のシミュレーション 203
- 6.3 実用化の方向付け 208
 - 6.3.1 放電の安定化・均一化 208
 - 6.3.2 本開発技術の応用分野 211
- 6.4 本章のまとめ 211
- 参考文献 213

第7章 結論 219

- 7.1 本研究成果のまとめ 219
- 7.2 高繰り返しエキシマレーザ実用の展開 220

謝辞 223

論文目録 225

第1章 序論

レーザの登場は、先端技術の進展にきわめて大きなインパクトを与え、半導体に続く今世紀の一大技術成果と位置づけられている。エレクトロニクス分野が半導体を核として成長したように、レーザは、光固有の技術分野と、エレクトロニクスと融合した、いわゆるオプトエレクトロニクスと称される新分野の開拓に主役を演じてきた。当初より実用で期待されたのは、産業用加工と医療であり、前者では高精度の微細加工を必要とするエレクトロニクス部品加工に始まり、最近では自動車産業に代表される機械分野などにおいても、大型装置が活躍するまでに至った。後者の医療分野においても、眼科、外科をはじめ各科で幅広く適用されている。これらの実用では、開発初期の'60年代に登場したアルゴンレーザ、炭酸ガス(CO₂)レーザ、Nd:YAGレーザによる独占状態が続いている。いずれも連続発振動作が可能であり、波長域は主に可視・赤外域で、その熱作用による応用が主体となっている。

これら諸レーザの性能向上を目指す研究開発が進む一方、それらを凌駕するような実用性の高い新レーザの実現に向けて、これまでに多くの研究開発が試みられてきた。この長年にわたる念願は、今なお実用の観点では総合的性能において従来レーザに及ばず、その実現には多くの技術課題が立ちだかっている。レーザ技術分野においては、研究開発と実用との距離がきわめて大きいという宿命的な特異性の存在すら痛感する。

しかし、今後の新たな応用展開では、超微細加工用、光化学作用を使う諸プロセス用などで、短波長域発振・高出力レーザに対する強いニーズが出てきた。この対応で、今後もっとも実用が有望視されるのは、紫外域で高効率発振が得られる特徴を持つエキシマレーザであろう。従来の熱作用に対し、このようなプロセス制御はきわめて複雑であり、今後も多くの試行錯誤が続くものと思われが、同時に新しい応用に対応できる実用性の高いレーザ開発が、新分野の開拓を推進する上できわめて重要となってきた。

従来、諸レーザにおいて本格的実用期を迎えるまでに、ほぼ20年を要している。しかしながら、エキシマレーザ装置技術に関しては、高封入ガス圧下での高速立ち上がり・高強度の放電励起を要し、さらに腐食性の高いハロゲンガスを混入させるなどの動作条件から、高信頼化が先天的に難しいと言えよう。筆者は、長年アルゴンレーザ、CO₂レーザを中心にいくつかのレーザ装置実用化を目指す研究開発に携わってきた。これらの経験を基に技術展望をするならば、エキシマレーザはいわば“荒馬”に例え得る。この装置技術を御すことができれば、量りきれない利便性が視野に入ってくるであろう。

本章では、まず実用性の高い主要な諸レーザについて、基本構成、動作原理と条件、これら装置技術の現状、などを概説する。次に、筆者がこれまでに実用化を試みたアルゴン、炭酸ガスなど代表的諸レーザ装置を取り上げ、具体的構成や発振技術、研究開発過程、諸動作特性などを述べ、実用化に際して留意すべき重要な技術ポイントをまとめる。さらに、新たな応用分野の展開が有望とされる短波長域動作の諸レーザに焦点を合わせ、装置技術の現状を概説、これらを基に、今後実用化開発にもっとも期待がかけられているエキシマレーザについて、有用性を示すとともに研究開発課題を整理して開発指針を示し、本論文の目的と位置付けを明らかにする。

1.1. レーザ技術概説

1.1.1. 開発経緯と基本技術

レーザとは、誘導光放出により光の増幅あるいは発振を行うことを言い、“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”の頭文字を並べた造語である。一般には、このような現象、あるいはその装置、これにより得られる光出力を総称している。

この歴史としては、1916年にA. Einsteinが示した、“物質からの光放出には自然放出と誘導放出という二つの異なる過程がある”とした理論的考察に始まる。1950年代になりC. H. Townesらは、上下エネルギー準位間で反転分布（負温度）状態にあるアンモニア分子線を空洞共振器に導入して、マイクロ波（Microwave）域において誘導放出による電磁波の増幅・発振の実証に成功し、メーザ（Maser）と命名された。

同じ考え方で、A. L. SchawlowとC. H. Townesがこの波長域をさらに光領域まで短くする具体的な提案を示し各所で実験が試みられ、1960年にはヒューズ研究所のT. H. Maimanが最初のレーザー発振を実現させた。これにはルビー結晶が使われ、その平行に向かい合う両端面を光学研磨して銀を蒸着、光共振器を構成するようにし、フラッシュランプで励起したもので、レーザー装置の原型となり開発の幕開けを迎えた。

図1-1は、レーザー発振器の基本的な構成を示す原理図、およびレーザー遷移の一例である。構成要素は、レーザー媒質と、これを反転分布状態にする励起源、および光共振器の3つである。媒質の状態は、現在では気体、液体、固体、半導体のすべてに及び、この中でレーザー遷移をする能動媒質としては、各種の原子、イオン、分子、エキシマがある。また、半導体レーザーではエネルギーバンド間での電子遷移、自由電子レーザーでは電子の制動放射などで光増幅が行われる。励起方法には、ランプやレーザー光を照射する光励起、放電励起、電子ビーム励起などがある。光共振器は、通常2枚の鏡を向かい合わせたFabry-Perot形が使われ、間に入れた励起媒質内に光を往復させて、誘導放出により増幅し発振させるようになっている。

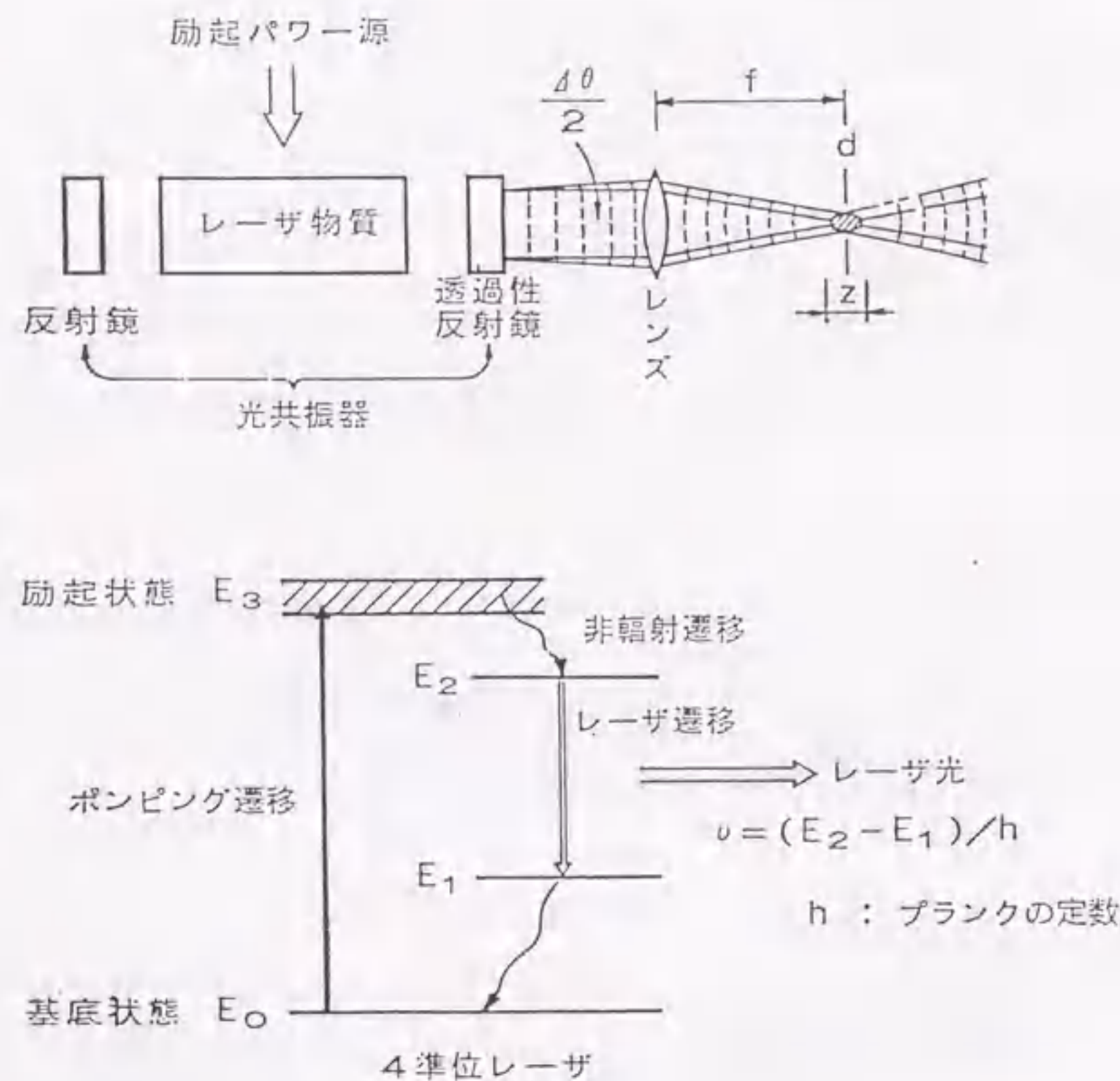


図1-1 レーザー発振器の基本構成を示す原理図とレーザー遷移図例

そこで、名称としては、媒質の状態から、気体（ガス）レーザー、液体レーザー、固体レーザー、とするもの、媒質の名称から、ヘリウムネオン(He-Ne)レーザー、アルゴンレーザー、He-Cdレーザー、CO₂レーザー、XeClレーザー、色素レーザー、ルビーレーザー、YAGレーザー、半導体レーザーなどとするもの、また、レーザー遷移をする準位間から、原子レーザー、イオンレーザー、分子レーザー、エキシマレーザー、などとして分類されている。しかし、実際にはあまり厳格にこれらを区分して呼称することは少ない。

図1-1には、レーザー媒質を高エネルギー準位 E_3 にする通常ポンピングと言われる励起過程、レーザー遷移に関わる上準位 E_2 および下準位 E_1 のエネルギー状態例も示す。レーザー遷移においては、 $(E_2 - E_1) / h$ (h :プランク定数)の周波数で、誘導放出による光増幅が行われることから、特徴としては、光共振器を用いることで位相が揃った高コヒーレンスの単色光が得られる。したがって、微小点に集光できることから、加工用として使う場合には超精密な穴あけや切断加工、情報処理用では高密度記録とその信号ビックアップヘッドなど広範な応用が進展している。

本論文では、これら数あるレーザーでも、とくに大出力化、高コヒーレンス化に優れるガスレーザーを対象にして、研究開発から実用化までの諸過程を明らかにする。その歴史は1961年のA. JavanらによるHe-Neレーザー発振の成功に始まり、HeとNeの混合ガスを放電管に封入して、高周波放電励起により1.15 μm の赤外域にてレーザー発振させた。¹⁾ 続いて1964年には、W. B. Bridgesによるアルゴンレーザー、さらに、C. K. N. PatelによるCO₂レーザーなど、主要な諸レーザーの発振報告が出そろい急展開をした。²⁾⁻⁴⁾ この時期に、きわめて多くのガスをレーザー媒質とし、種々の励起方法により洗いざらいにレーザー発振が試みられ、確認された発振線の総数は500本を越えた。また、波長域は、遠赤外から可視、紫外域におよび、連続(CW:Continuous Wave)発振できるものも多くなった。⁴⁾

一般に、ガスレーザーでは、ガス状態のレーザー媒質を容器（レーザー管）に封入し、直流連続、あるいはパルス状放電を点弧させ、電子衝突を介してこれを励起する。封入ガスには、多くの場合、放電を安定に点弧させたり、レーザー発振効率を高めるために、ヘリウムなどの稀ガスをバッファガスとして混合するが、レーザー発振の適値は、ガスの封入圧、混合比、種類に強く依存し、通常、レーザー動作の適合領域はきわめて狭い。このため、長時間の安定動作が望まれる実用の場合には、これらの封入ガスを一定状態に保つことが、重要な技術ポイントになる。高出力用の大形装置では、容器内部にファンを取り付け、ガスを循環して放電部のレーザー媒質を入れ替えたり、常時高圧ポンプより供給し、かつ真空ポンプで排気して、長時間一定出力を持続できるようになっている。また、常温では液・固体状態の金属などを容器に入れ、加熱、蒸気化してレーザー媒質とするものもある。⁵⁾ これは、きわめて多くの発振線が比較的高効率で得られるので、実用化を検討するべく、国内では筆者らが先行して開発を行った。しかし、金属蒸気の制御が基本的に難しく、実用には致命的問題となることが明らかになり、実用化技術の再検討に迫られた。⁶⁾⁻⁷⁾

励起方法は、研究レベルでは電子ビーム、あるいは固体レーザーのように光、レーザーなども励起に使われるが、実用では、大部分は取扱い易い放電が利用されている。放電には、冷陰極あるいは熱陰極を使った直流連続放電やこの断続、あるいは、コンデンサに充電した電気エネルギーをスイッチング素子で開閉するパルス放電、無電極高周波放電などが使われている。

レーザー発振に必要なもう一つの構成要素は、光共振器である。反転分布状態に励起した媒質をこの中に置き、放出光の一部をフィードバックさせて、媒質の誘導放出による光増幅作用を繰り返し使ってレーザー発振させるので、光周波数領域の電磁波共振器とも言える。もっとも基本的な光共振器構成は、2枚の高反射鏡を対向させて媒質の両端に置き、放出光が高精度で同じ光路を往復するようにしたFabry-Perot形光共振器を使う。通常は、対向する2枚のミラーにより構成、これを直接レーザー管へ媒質ガスに接して取り付ける内部ミラー形と、レーザー管両端部の光路部にウインドウを介して付けた外部ミラー形がある。後者は、ミラー交換がレーザー管の気密を破らず容易にできるが、構造が複雑でコスト高になるなどの欠点もある。このレーザー出力は、通常は一方の鏡に適当な透過率を持たせて共振器から取り出すようになっており、これを出力結合（カップリング）という。ウインドウは、表面反射による損失を少なくするのに、通常はレーザー光軸とブリュースタ角をなすように取り付ける。ガスレーザーの一般的特徴は、空間的・時間的コヒーレンスに優れ、単色性、指向性、集光性が他のレーザーに比べきわめて良いこと、媒質の種類が多く状態の自由度が高いので、動作条件が選び易く、応用範囲が広いことである。

一方、これらのレーザでは、多くの場合封入全ガス圧力は10分の1気圧以下とするが、続いてこれを1気圧以上に設定して動作させるものの開発が行われた。代表例は、1970年に登場したTEA (Transversely Excited Atmospheric-pressure の頭文字) CO_2 レーザであり、ガス圧が高いと電極間に高電圧を印加する必要があるため、一般には光軸と平行に電極を設けて、電極間距離を短くした横方向放電で励起する。10気圧以上での動作例も報告されており、媒質密度が高いので容積を小さくすることができ、また圧力広がり効果により、発振波長帯域を広げられるなどを特徴とする。⁸⁾

しかし、このような動作条件では、通常は主放電に先行させて、放電密度の均一化を図るための予備電離が必要となるが、放電を長時間安定に維持することは難しい。したがって、短パルス動作に限られるが、一方、きわめて高いピーク出力が得られる。予備電離方式としては、主に、コロナ放電、紫外(UV)光、あるいはX線が使われている。後にこの様な方式で動作できるようになったのが、本論文の主題とするエキシマレーザである。⁹⁾

1.1.2. 従来型ガスレーザ

(1) イオンレーザ

一価あるいは多価イオンにおける励起準位間に反転分布を作りレーザ遷移をさせるものを言い、代表例には青緑色波長域でCW発振するアルゴンイオンレーザ (Ar^+ あるいは Ar II レーザ)がある。通常は、直流放電により1価の Ar イオンを励起状態にして遷移させ、早くも1964年に、ヒューズ研究所(米)のBridgesが最初の発振を実現させた。主要な発振線は、514.5、496.5、488.0、476.5、457.9 nmであり、放電電流を増して励起を強めると、大出力発振さらには2価のアルゴンイオン (Ar^{++} あるいは Ar III) 遷移による近紫外域発振も得られる。いずれも、きわめてコヒーレンスの高い安定な連続発振光であり、また、封入ガスをクリプトン (Kr) に交換するだけで、同じレーザ管と励起方法を使って青色から近赤外にわたる広い波長域にて Kr^+ による発振もできる。ネオン (Ne) やキセノン (Xe) においても、同じような発振が可能であるが、効率が低いなどの理由で実用化されていない。これらは、高密度の大電流放電に耐えるベリリア (BeO) 磁器をいち早く放電細管に採用したことで、まだミラーなどコンポーネントほか諸技術が未熟ではあったが、筆者らが国内では最初のレーザ発振を成功させた。¹⁰⁾⁻¹⁴⁾

レーザ管の代表例には、 Ar^+ レーザで単色発振出力が数10 mW程度の空冷方式管と、同じく全色同時発振出力が5 W程度のソレノイド磁界を印加した水冷方式管がある。前者では、放電部での発熱は500 W程度であり、最重要部となる細管に熱伝導率が高きわめて高い BeO 磁器を使って1万時間を越える動作寿命が実現された。

後者の大出力水冷方式レーザ管では、高反射ミラーをプリズムと組み合わせ、波長同調して単色発振させることができる。放電電流、入力、それぞれ最大30 A、10 kW程度と大きく、細管材にはベリリア磁器やタングステンディスクが使われている。また、放電電流を収束させ等価的に電流密度を上げて出力および効率を増大させるために、通常はソレノイドマグネットを用いて間軸方向に、~1,000 Gauss程度の磁界印加をする。現在、出力数10 Wまで多機種の装置が市販され、眼科用コアギュレータなどの医用をはじめ、情報処理用、諸研究用として広く使われている。これらは、出力が放電電流とともに大きく増大するため、放電電流を制御するフィードバック系で出力の高安定化ができる。研究開発では、 Ar^+ レーザにて500 W、効率0.2%、また Ar^{++} の紫外域レーザ発振では20 W程度の記録値報告もあるが、実用には到っていない。¹⁵⁾⁻²⁵⁾

図1-2は、諸レーザの基本的な発振機構を示すために、代表例として Ar^+ のレーザ遷移を示す。この場合には、上準位への励起過程は、基底状態の Ar 原子が、高いエネルギーを持った電子との衝突により一段階直接励起される場合と、基底状態の Ar イオンを経て2段階で励起される場合、あるいは、さらに高い準位からのカスケード遷移による励起などが考えられるが、封入ガス圧の適値が比較的高いCW動作では2段階励起が主体になっている。これより、多モード・全色同時CW発振の Ar^+ レーザでは、出力Pのスケール則が、発振機構モデルの単純化により、

$$P/V = 10^{-5} J^2 \quad (\text{W/cm}^3) \quad \dots \dots \dots (1-1)$$

となり、実測値とも近似的に合う。Vは励起媒質の体積、Jは放電電流密度 (A/cm^2) である。

ここで、筆者が開発し実用化されている、 Ar^+ レーザ単色発振出力数10 mW程度の空冷方式管と、同じく、全色同時発振出力5 W級の磁界を印加する水冷方式管の構造概略図を図1-3に、また、空冷方式装置の外観写真、内部構造概略図を図1-4に示す。²⁶⁾⁻²⁷⁾ 空冷方式装置では、筆者らが国内外で最初の実用化に成功した簡便な内部ミラー形が、今なお標準的な市販製品モデルとなり一般化している。送風をレーザ管軸に対し直角方向と平行方向にするものがあり、それぞれ冷却フィンにいろいろな工夫が加えられており、ミラー支持体となるレーザ管の曲りを最小限にするような冷却構造がポイントとなる。

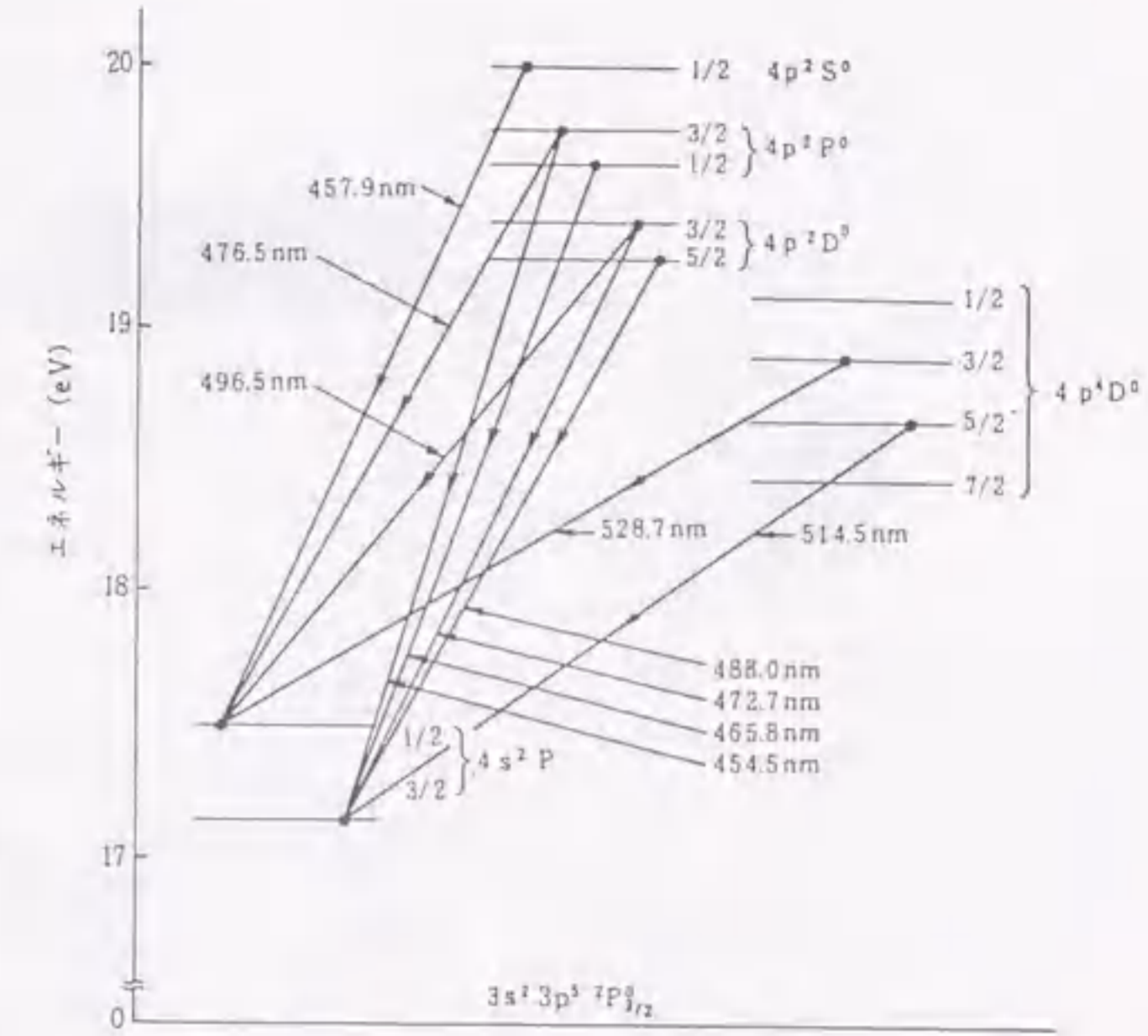


図1-2 Ar^+ レーザのエネルギー準位図

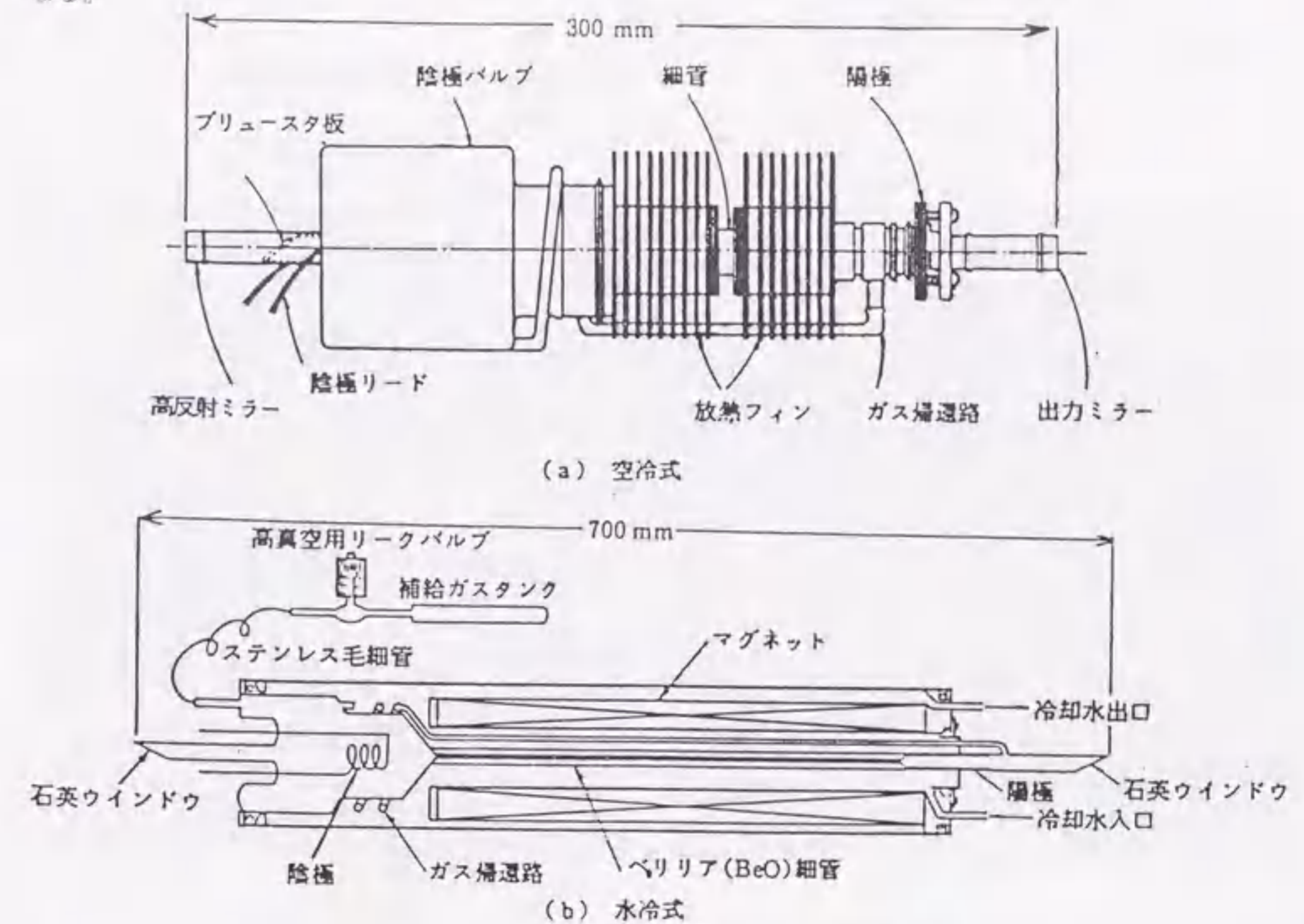


図1-3 空冷方式管と水冷方式管の構造概略図

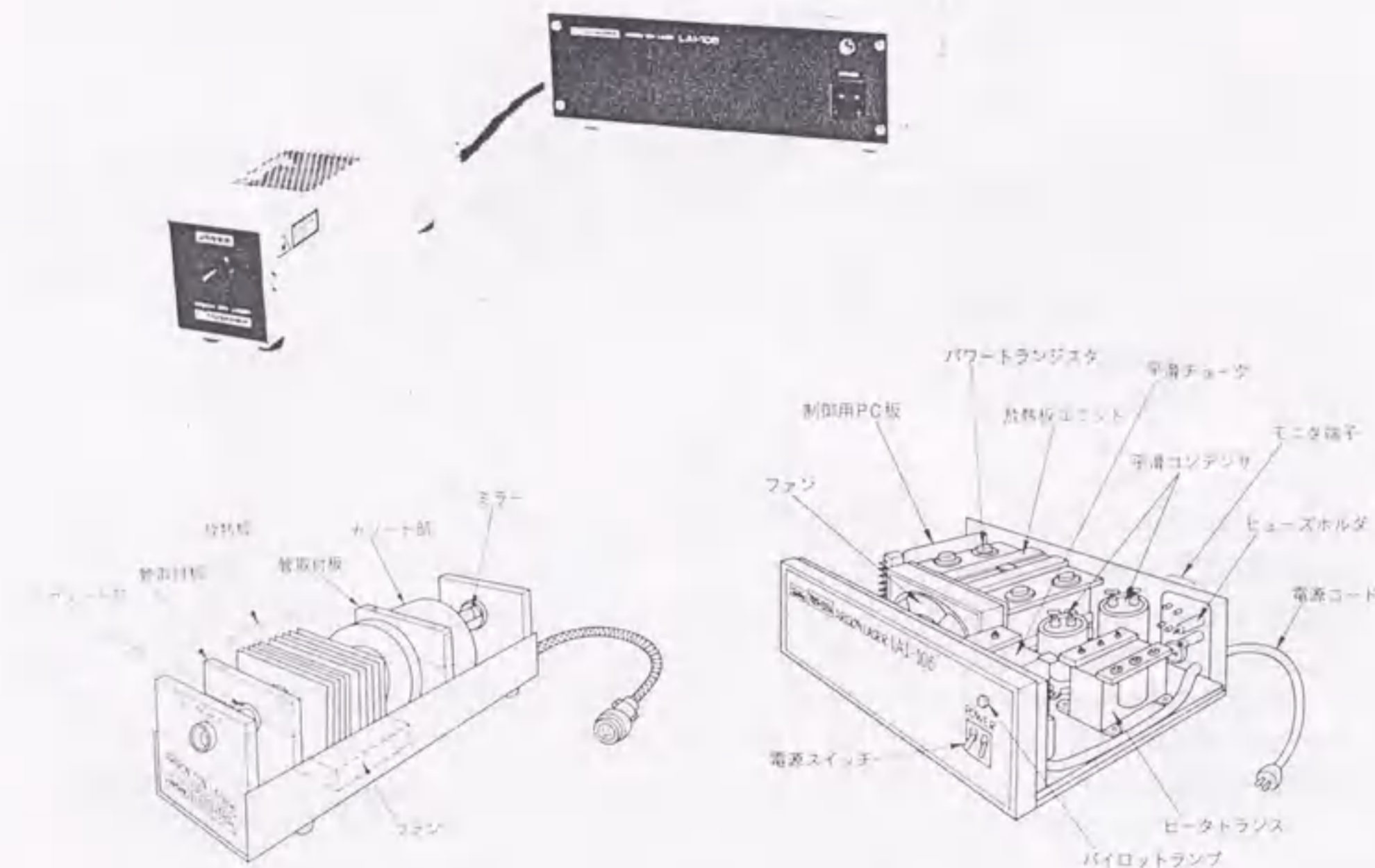


図1-4 空冷アルゴンレーザー装置の外観写真と内部構造概略図

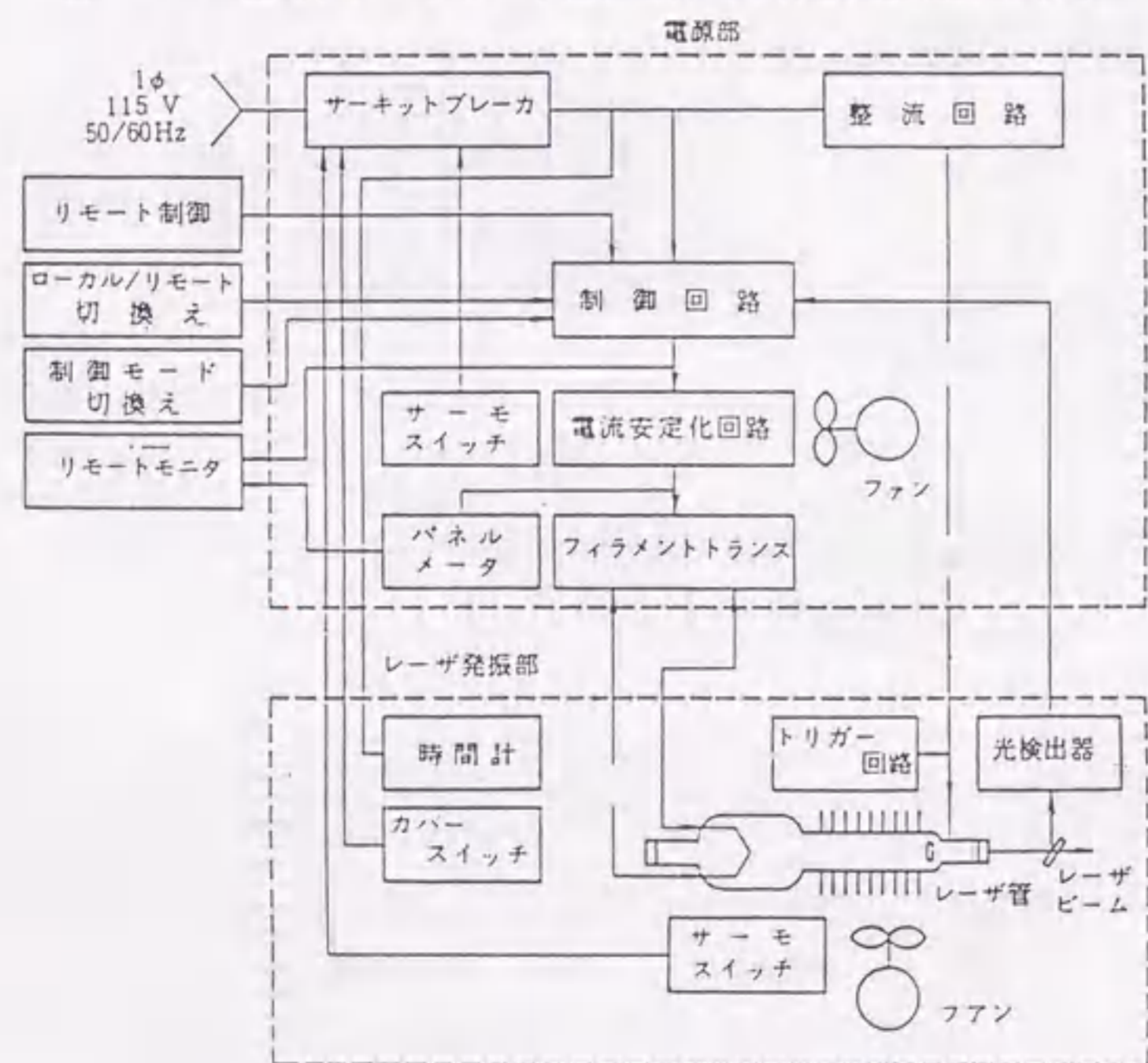


図1-5 空冷方式装置の駆動回路構成図

図1-5は、駆動回路構成図であり、スイッチオンだけで全て自動動作し、取り扱いがきわめて簡便化されている。図1-6は、空冷方式装置による基本的な発振特性として、出力-放電電流特性を示す。内部ミラー形で、プリズムなどの波長分散素子を共振器に入れない一般的な場合の代表例であり、低電流域では488.0 nmの単色発振が得られるが、電流を増やしてゆくと、他の発振線が現われ多色同時発振となる。この状態は、使用するミラーの分光・透過特性に依存する。図1-7に示すように、始動時の出力立上がりは、レーザー管の熱変形により数分程度を要するが、定出力動作モードにすれば瞬時に一定値となり、長時間の出力ドリフトも1%以下にできる。出力ノイズは、リップル成分を含め1 MHz以下で0.5%程度であり、きわめて良質かつ安定なレーザー光源といえる。なお、本章においては、封入ガス圧単位はTorrに統一して用いる。

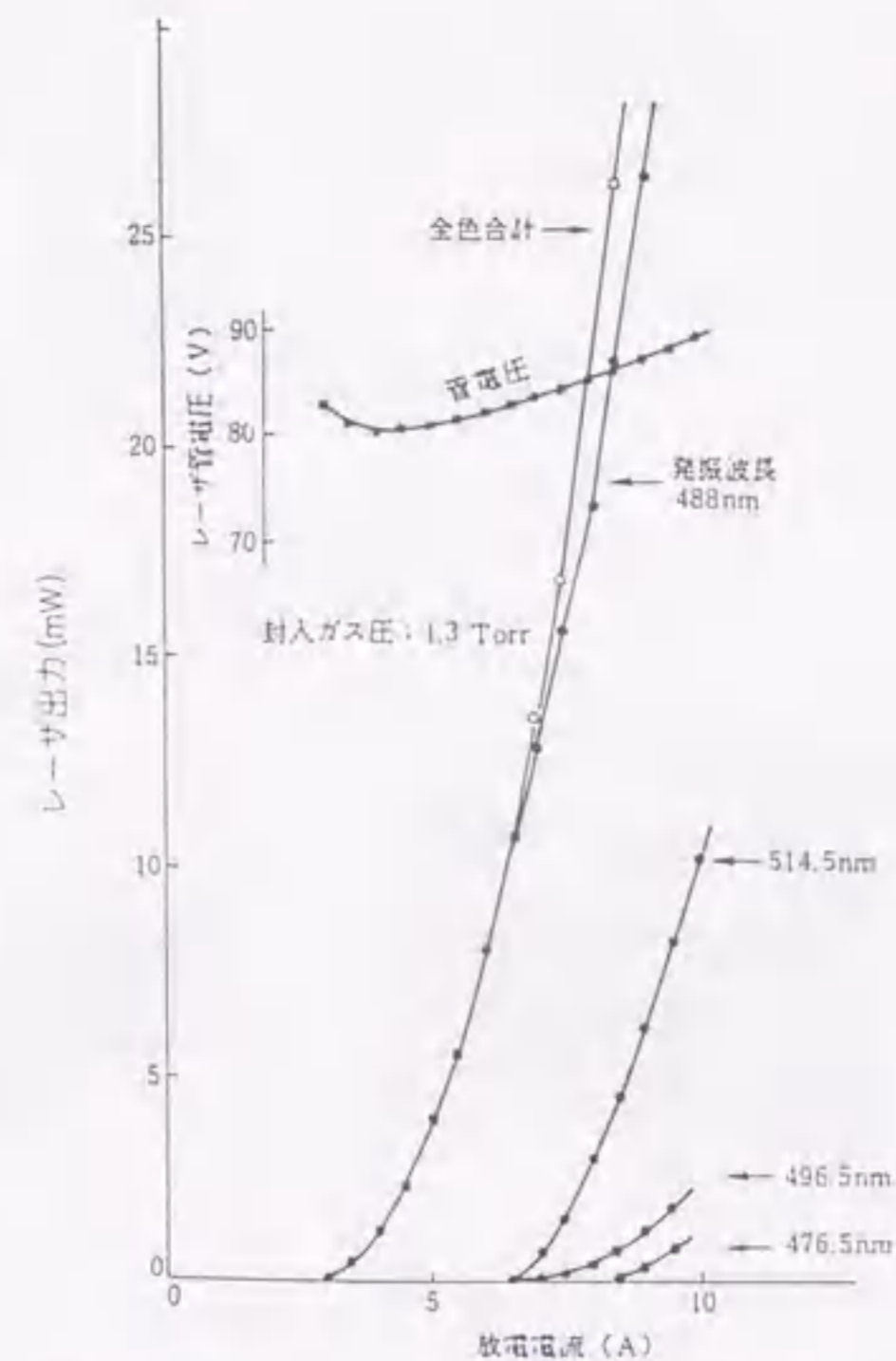


図1-6 空冷方式装置のレーザー出力特性

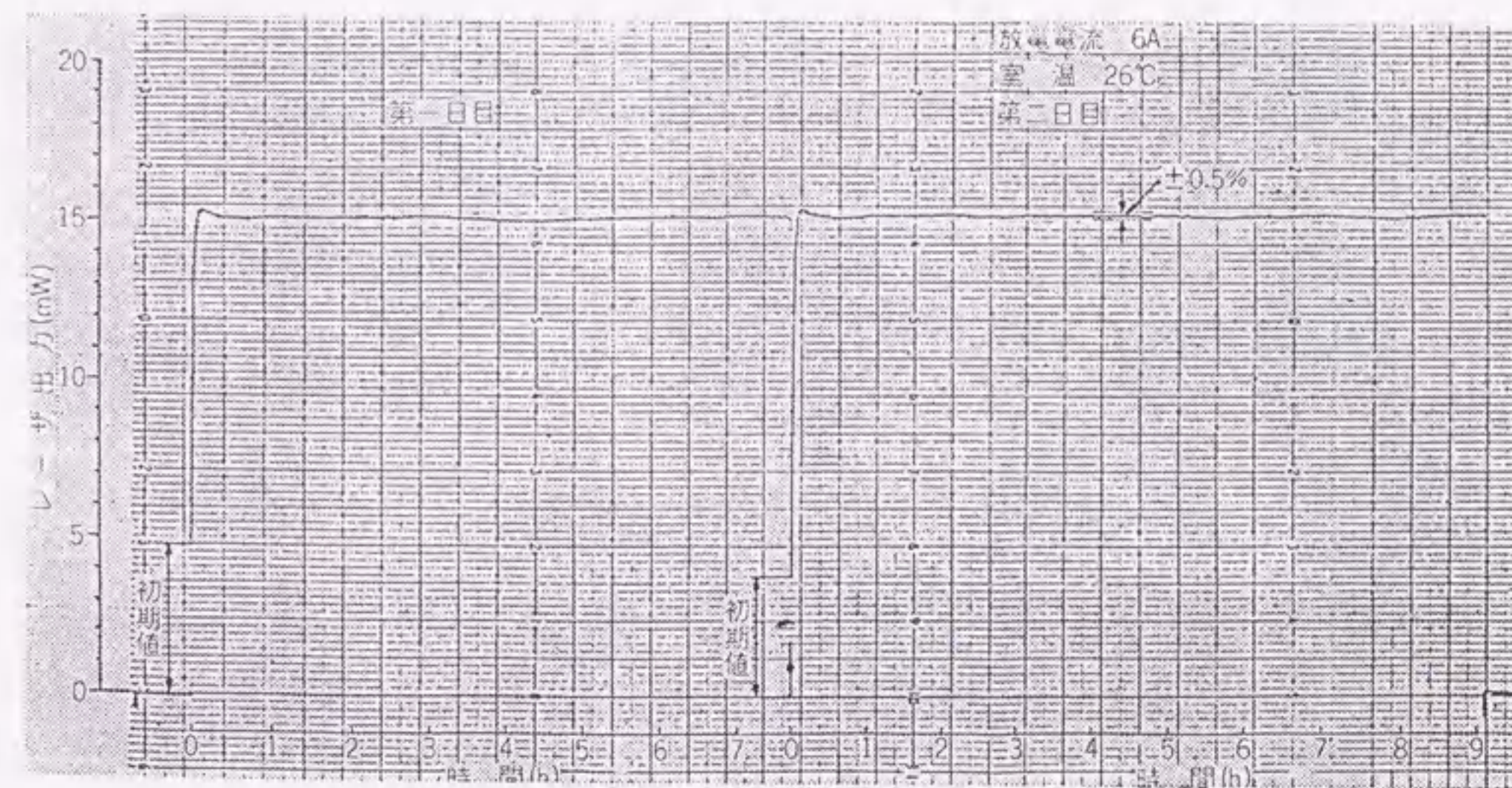


図1-7 レーザ出力安定性試験結果

図1-8は、寿命試験結果であり、まだ開発段階で封入ガスや初期処理など最適条件化が不十分であったが、10,000時間の動作が可能であることが分かり、特別なガス補給機構やミラー角度調整機構を持たず、小形で保守の必要がないので、諸応用装置への組込用としていち早く製品化をし、今なお多くの分野で実用化されている。表1-1は、この製品仕様を示す。

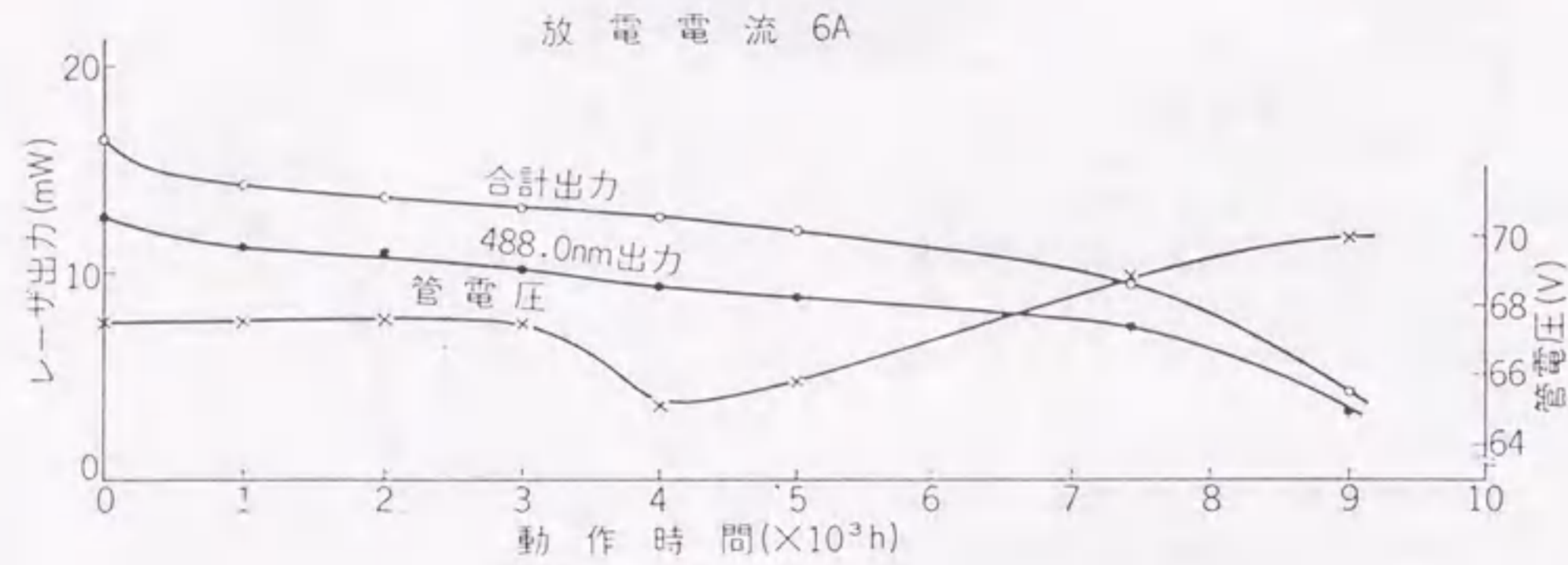


図1-8 空冷方式装置の動作寿命試験結果

表1-1 空冷アルゴンレーザー装置の製品仕様

項目	仕様
出力特性	発振波長 488nm 5 mW 以上 (488nm出力 90%以上)
ビーム特性	横モード TEM ₀₀ モード
	ビーム径 0.8mmφ以下 (1/e ² ポイント)
	拡がり角 約1mrad (1/e ² ポイント)
	方向変動 0.1mrad (発振15分後)
偏光	なし
出力安定特性	光ノイズ 0.6%rms 以下
	出力ドリフト ±3%/h 以下
外形寸法・重量	電源部 430×149×300mm 20kg (コード不含)
	発振部 105×115×392mm 3.5kg (コード不含)
電源	電圧、相数 AC100±10V, 1φ
	周波数 50/60Hz
	消費電流 10A 以下
周囲条件	周囲温度 20±15°C
	周囲湿度 85% (R.H) 以下

一方、後者の大出力水冷方式レーザー装置を図1-9に、発振部および電源部の内部構造図とともに示す。高反射ミラーをプリズムと組み合わせ、この角度を変える波長チューニングにより、各波長線を個別に単色発振させる用途があるので、レーザー管両端に石英ガラスなどのブリースタ窓を取り付けた外部ミラー形にする。レーザー発振効率を高める目的で、細管部には、1,000 ガウス程度の管軸方向磁界を印加するソレノイドマグネットが、水冷ジャケットを兼用するように組み込まれ一体で冷却される。また、放電電流が大きいので、封入ガスが、管内壁に少しずつ吸着され減少していくガスクリーンアップ現象がある。このため、大容積のガスリザーバや、必要に応じバルブを開けて管内ガス圧を一定に保つためのガス補給機構を持っている。

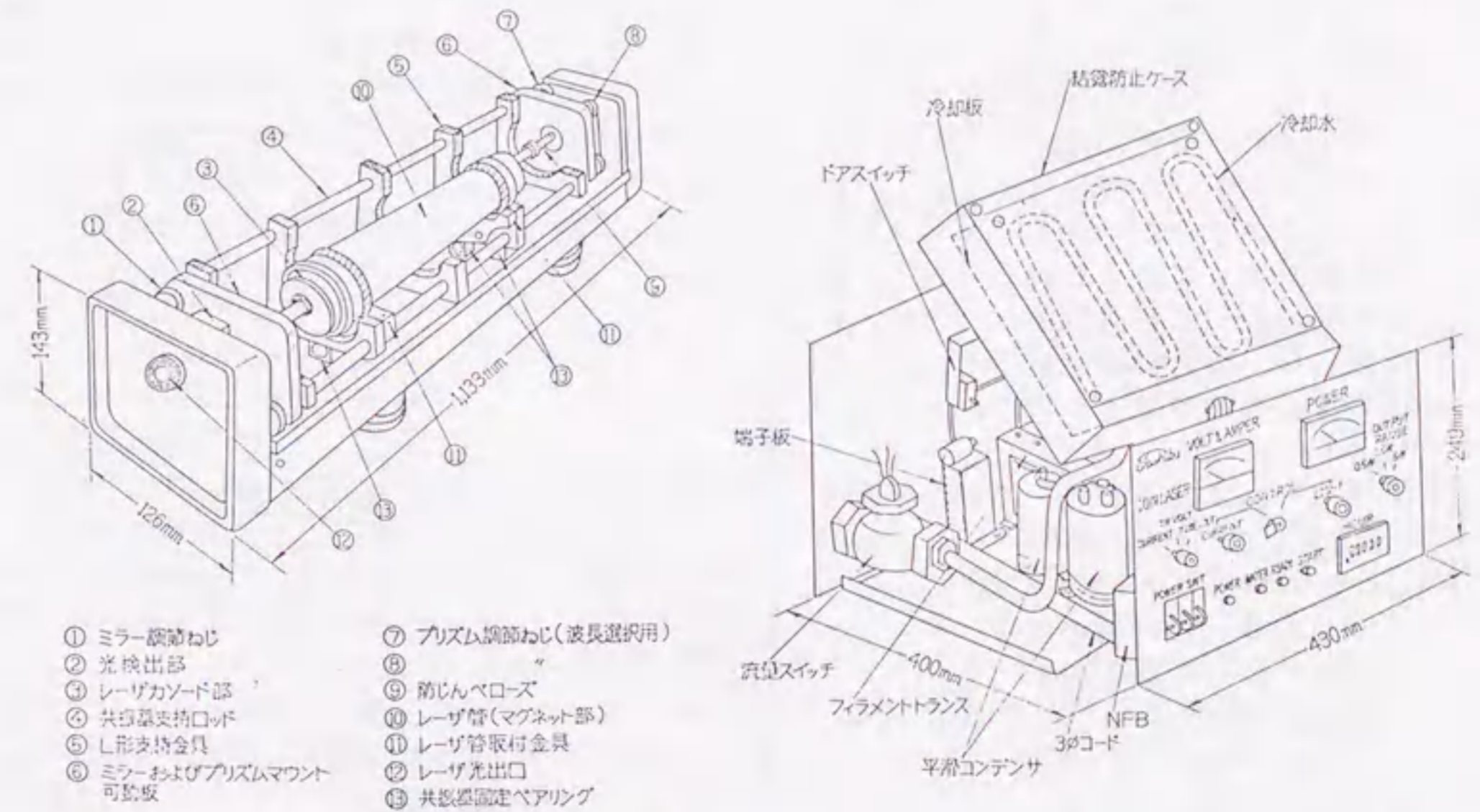
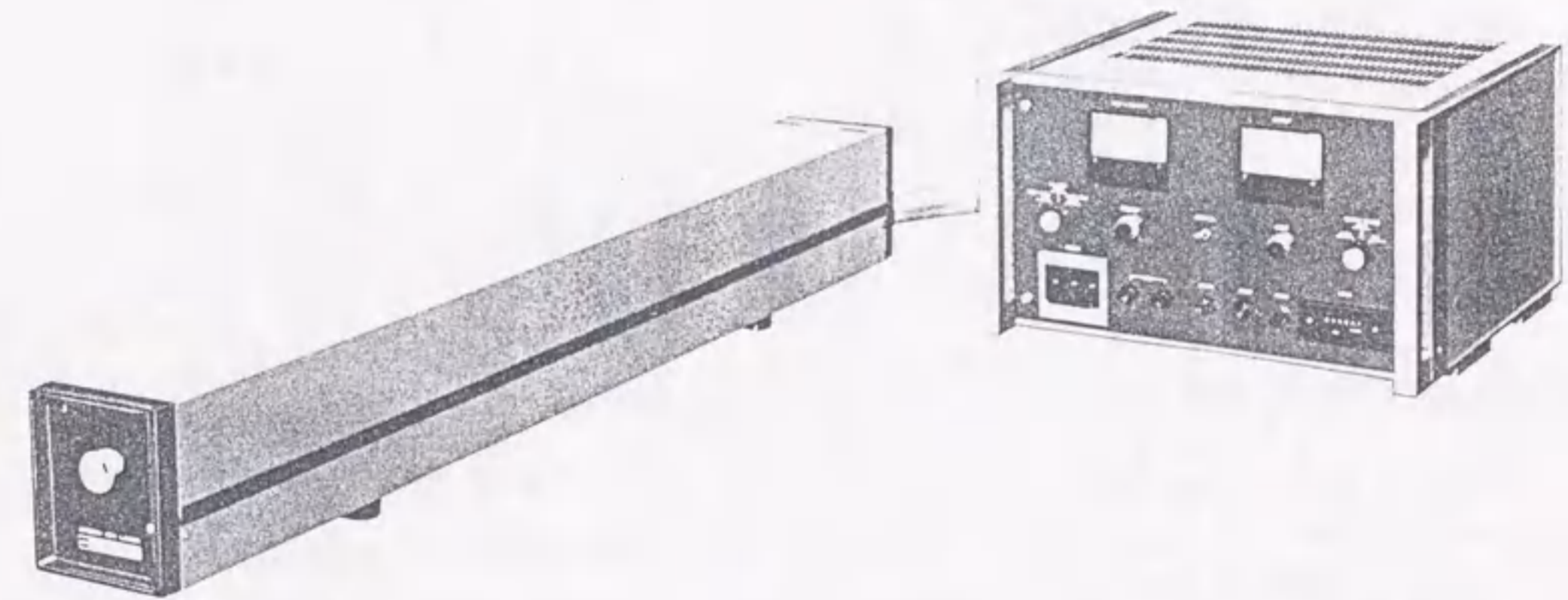


図1-9 水冷方式装置の外観写真と内部構造概略図

図1-10、11は、同時多色発振で5W級出力が得られる外部ミラー形レーザ管により、プリズムを使って単色発振させた場合のレーザ出力と放電電流および磁界強度の関係を示す。封入ガス圧は、高放電電流域では適値の1.2 Torr、レーザ管軸方向にはソレノイドマグネットにより磁界1,000 Gauss(一定)を印加している。この電流集束効果により、出力は発振波長にも依るが1.5倍程度増大し、さらには管電圧が下がるので、レーザ発振効率は大幅増となる。

また、細管は、内径2.5mm、長さ400mmベリリア磁器であり、光共振器間隔を約1mにして、出力側に曲率半径6m、透過率約5%の凹面ミラーを使い、TEM₀₀モードにて発振させている。プリズムなどを使わずに同時多色発振させる場合には、各発振線でレーザ遷移に関与するエネルギー準位の共有があるため、これらの発振線間に競合現象が見られ、出力は単色発振の場合の加算値より低減する。

同じレーザ管を使い、紫外域の351.1nm、363.8nmでAr⁺のレーザ発振が得られる。この場合には、放電電流の閾値および磁界の適値が高いので、レーザ出力は放電不安定領域に制限されるため、実用が限られる。

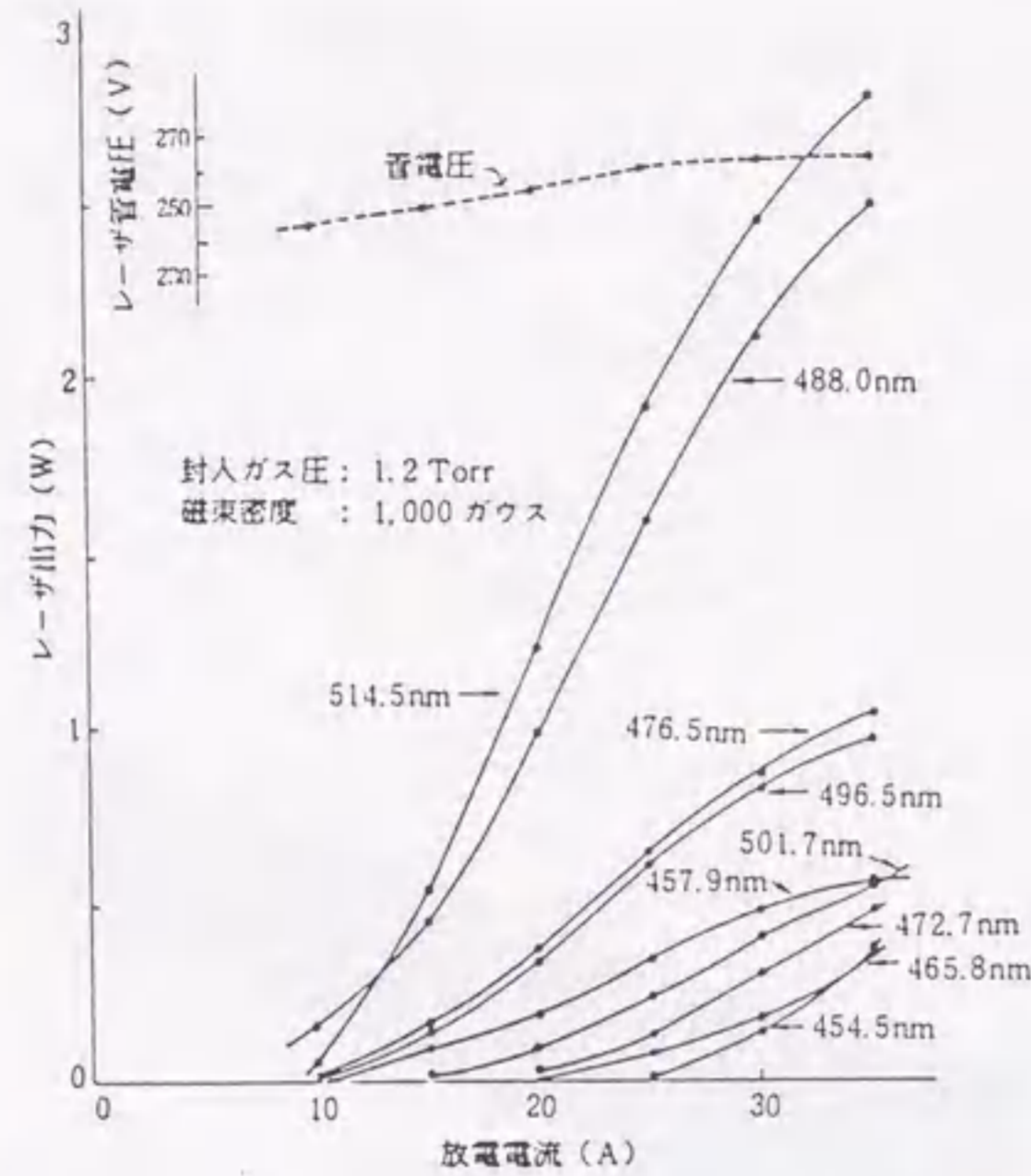


図1-10 水冷方式装置のレーザ出力特性

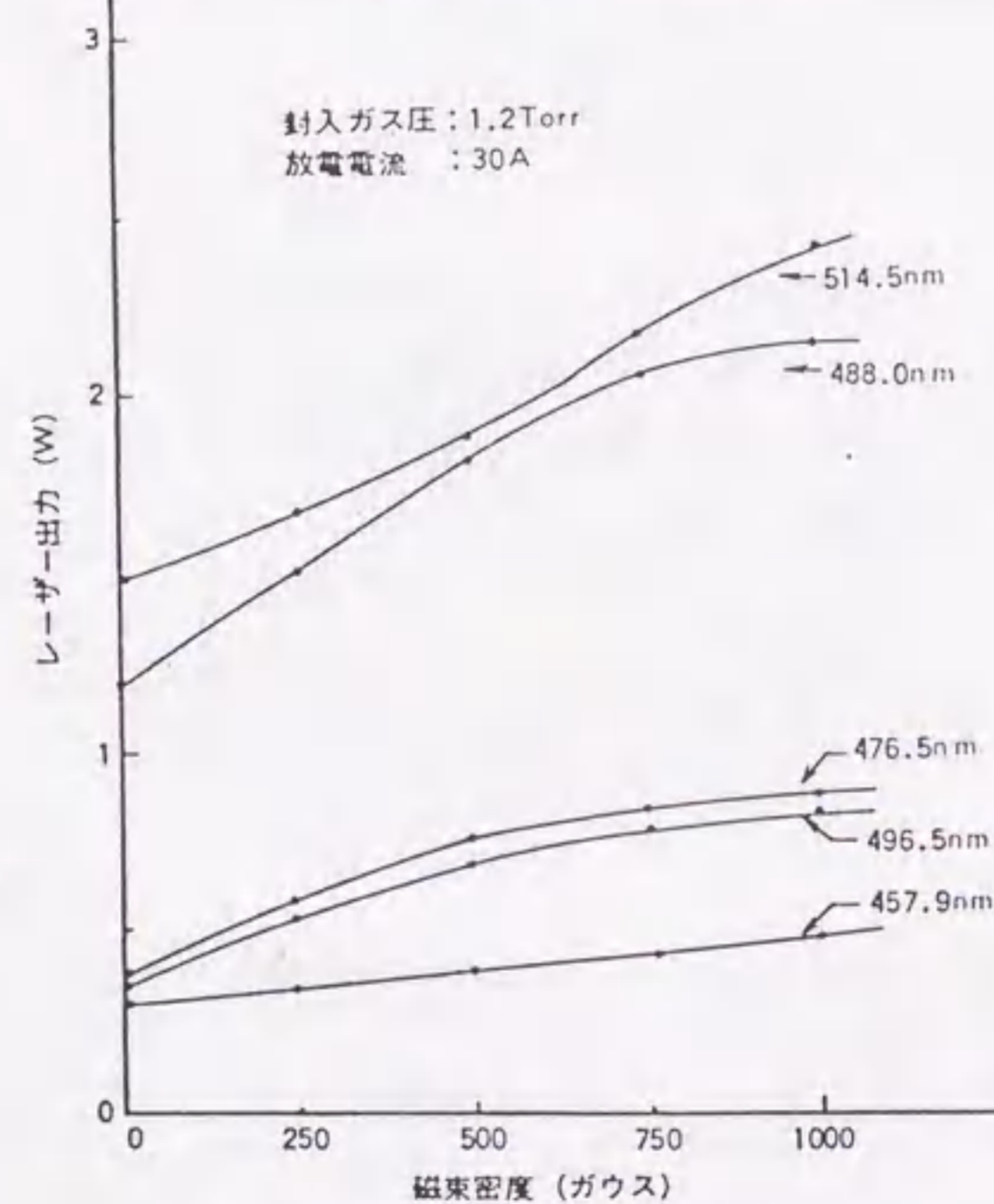


図1-11 レーザ出力の磁界依存性

同じ水冷方式管にて、封入ガスのArをKrに替えて、Kr⁺レーザ発振をさせた場合の単色発振出力特性を図1-12に示す。放電電流とともにレーザ出力が急増するのはAr⁺レーザの場合と同じであるが、発振閾値が全体的に高く出力は少ない。しかし、647.1nm(赤色)や568.2nm(黄色)の、Ar⁺レーザでは得られない発振線で比較的大きな出力が得られる利点がある。KrにArを混合して、可視全域で均等な強さを得るような装置も製品化されているが、全体的に出力が低下するので用途は限られる。

空冷方式の小形レーザ装置および大形の水冷方式レーザ装置のいずれも、基本構成や動作方法は同じで、レーザ出力は放電電流に大きく依存するため、出力変動を小さくするのに定電流動作させる。しかし、光共振器のずれやレーザ管動作状態の変化などでもレーザ出力は変動するので、さらに出力を高安定化するために、出力の一部を検出して、これを一定とするように放電電流を制御するフィードバック系があり、必要に応じ、簡単に動作モードの切換えができる。

表1-2は、水冷方式の大出力装置製品仕様を示し、主要な用途は、眼科用コアギュレータなどの医用に多く実用されているが、また、研究用としても、色素レーザの励起源、半導体光プロセス用光源など、あるいは、共振器内にエタロンを挿入することにより、容易に効率よく単一縦モード(周波数)発振ができるので、超高コヒーレント光源として、ホログラム撮影などに広く使われている。

イオンレーザにおいては、レーザ管の動作寿命を決めているのがベリリア細管壁のプラズマによる侵食であり、実験的には細管製造プロセスとの相関が明らかになった。しかし、ベリリア磁器は、高価で毒性があり国内生産されていないので、熱伝導率が同程度と大きく近年飛躍的に開発が進んでいるAlN、SiCなどのセラミックにこれを代替させることを試みた。この結果は期待に反するもので、数時間台の動作でレーザ発振が停止し、細管壁が変色していることが分かった。各セラミック材の化学結合エネルギーを比較すると、酸化物のBeO、アルミナ(Al₂O₃)では窒化物や炭化物

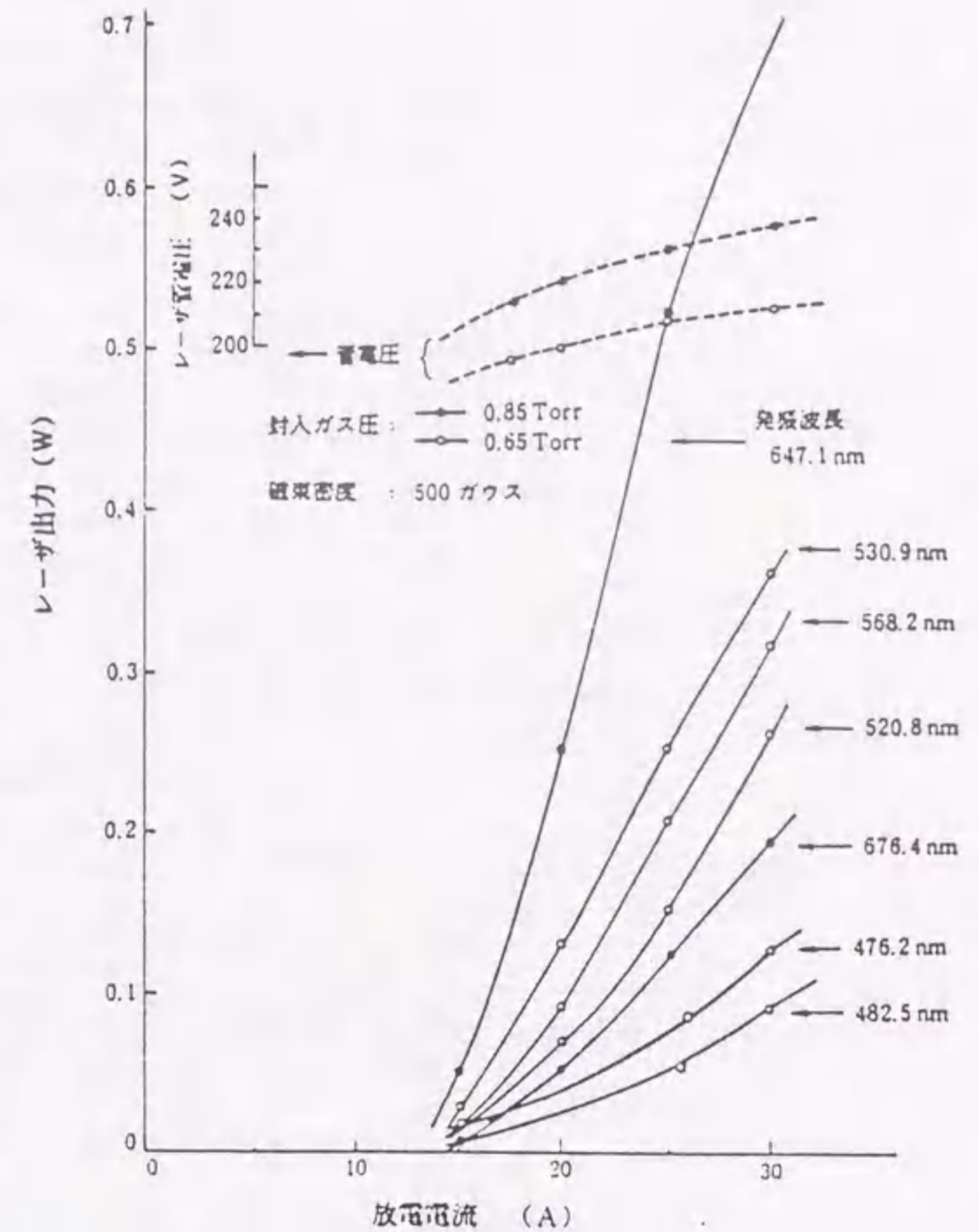


図1-12 Kr⁺レーザの出力特性

表1-2 水冷アルゴンレーザー装置の製品仕様

項	目	仕 様
出力特性	全波長合計	2W以上 (TEM ₀₀)
	単波長	800mW (TEM ₀₀)
	5145 Å	700mW (")
	4880 Å	300mW (")
	4965 Å	300mW (")
	4765 Å	150mW (")
	4579 Å	140mW (")
	5017 Å	60mW (")
ビーム特性	ビーム径	1.5mmφ以下 (1/e ² ポイント)
	拡がり角	0.6mrad以下 (")
光安定特性	ビーム振幅リプル	0.5% rms以下 (定格動作時)
	出力安定度	±0.5%/10h (室温一定)
外形寸法 重量	発振部	126×143×1133mm 約18kg
	電源部	430×249×400mm (取手は別) 約35kg
電 源	電 圧、相 数	AC 200±10V, 3φ
	周 波 数	50/60Hz
	消 費 電 力	40A以下/1φ
周囲条件	動 作 温 度	20±15°C
	動 作 湿 度	85%以下
冷 却 水	流 量	7~10 l/min
	水 温	25°C以下
	水 質 保 全	フィルタ付

系よりほぼ一桁程度も高く、したがってこの原因は、プラズマにより管壁が化学分解されるものと推察している。

これらの研究開発から製品化までにおいて、筆者らが実験を基に先駆的かつ独自の示した諸特性、諸技術問題にたいする対応経験の蓄積はきわめて豊富であり、この本論においては、それらをベースにして実用化の議論をする。しかし、それらの詳細をここで述べることは控えたく、筆者らによるこれまでの諸関連発表資料を参照されたい。^{2.8)-4.8)}

(2) CO₂レーザー

励起媒質としてCO₂を使い、通常は放電で励起し、O-C-Oの分子結合における振動・回転エネルギー準位間の遷移で動作させるガスレーザーで、代表的な分子レーザーである。20%を越すようなきわめて高い変換効率を特長とし、10 μm 付近の中赤外域で多数の発振線が得られる。最近では出力

10 kW 以上の実用装置も登場しており、YAGレーザーと並び諸加工分野への普及が急伸している有力なレーザーである。^{4.9)-5.7)}

図1-13は、CO₂レーザーの励起、発振機構を示すエネルギー準位図である。封入ガスとしては、通常CO₂、N₂、Heを1:1:8程度の混合比で使い、バッファガスのHeは、熱伝導性がよいのでガス冷却、あるいは放電安定化の役目をしている。上準位となるCO₂の振動準位00⁰1は、電子衝突による直接励起か、同じように振動準位ν=1に励起されたN₂分子からのエネルギー移乗により、効率よく励起される。^{5.8)} レーザ遷移の下準位が、この場合には基底状態にきわめて近いので、ガス冷却による緩和作用が反転分布を助長する効果を与える。

また、波長分散素子(グレーティング)などを使い単色発振にすると、図1-14のように振動準位の00⁰1-10⁰0と00⁰1-02⁰0遷移に含まれる各回転準位による多数のP、Rブランチを個別に発振させることができる。実際のレーザー装置においては、CO₂が前述のArレーザーなどの場合と違い、化学的に活性であるため、最適のガス状態を長時間維持することが難しい。このため、封入ガスに対する種々の工夫が行われ、レーザー発振方式も一般にはガスの扱い方で分けている。高出力動作では、上述のようなガス冷却、交換が必要であり、これにより出力の飽和が起こらないようにする。^{5.9)}

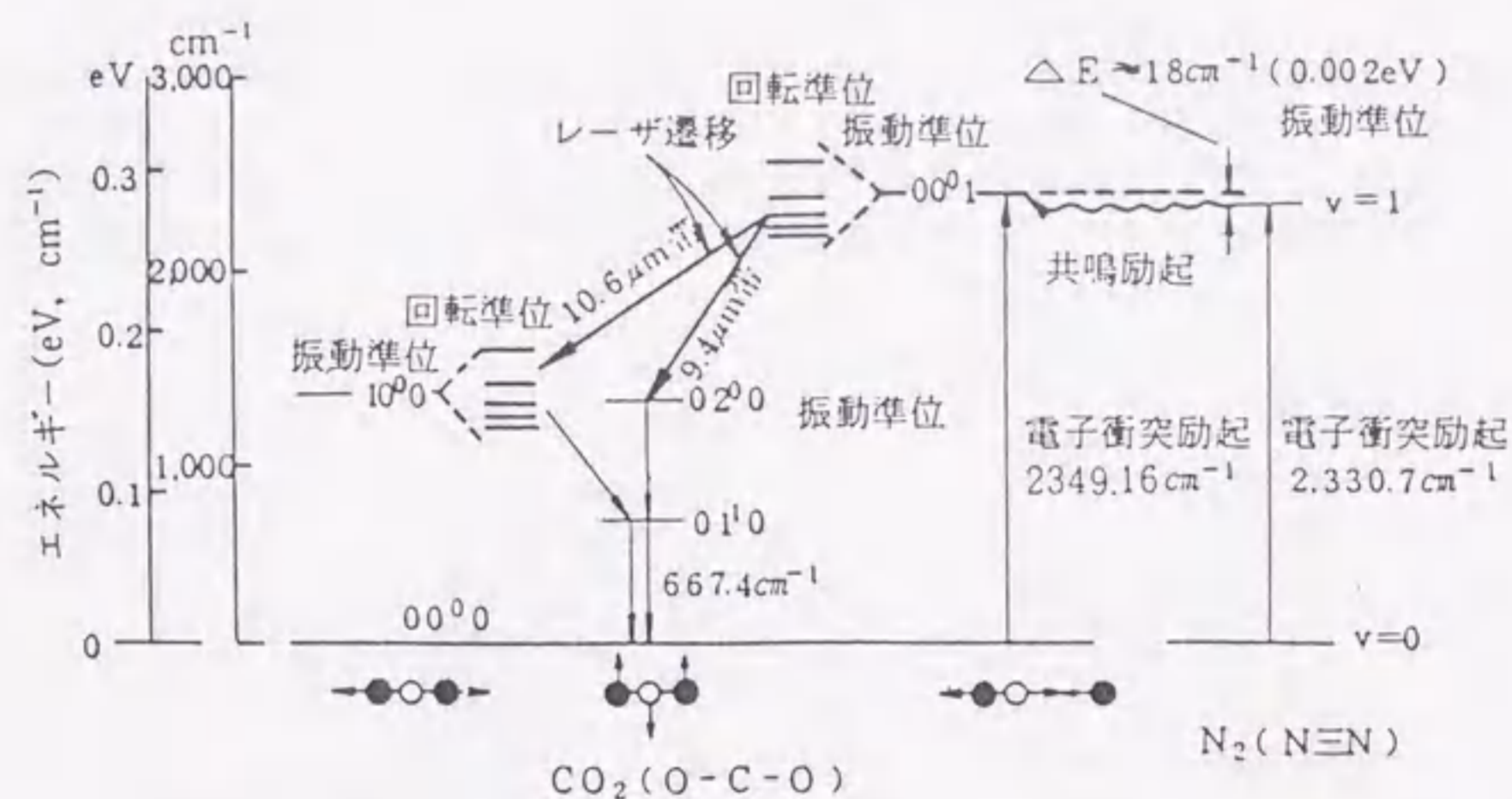


図1-13 CO₂レーザーのエネルギー準位図

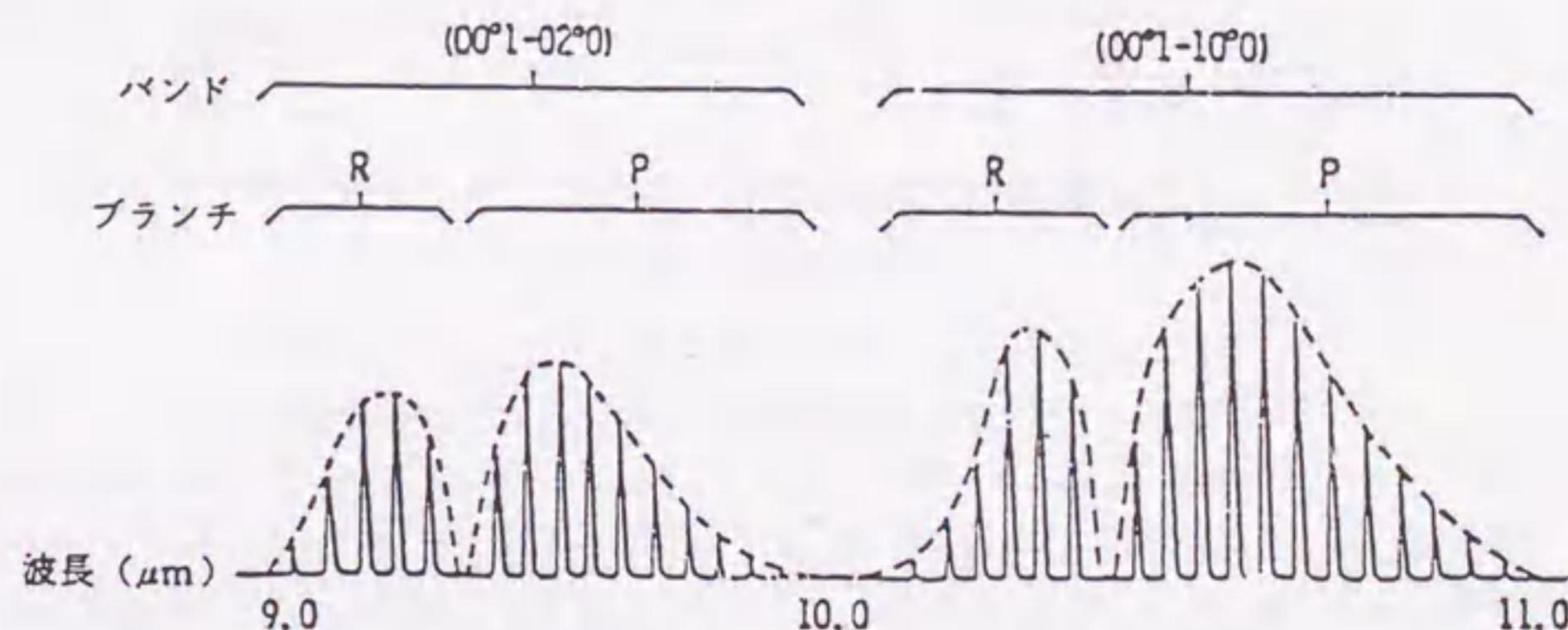


図1-14 CO₂レーザーの発振波長

しかし、最近、100 W 以下の小出力装置では、単位放電長当りの出力は多少低くなるが、ガスポンプや真空ポンプ、ガス循環用送風機などを必要としないガス封止方式が一般化している。ガスの劣化による出力低下は、大部分はCO₂が分解され減少していくためであり、長寿命化には、出力を多少犠牲にして放電電流を適値より下げるか、多少のCOやXeなどを混入させて、この分解反応を抑制する方法と、触媒をレーザ管内に入れ、逆反応を促進させる方法がある。^{60) - 63)} 現在は、このような方法で、1,000 時間以上の寿命を持つガス封止方式管が製品化されている。また高出力機では、媒質の冷却と小容積化をするため、ブローヤや真空ポンプを使ってガスを高速で流す方式となっている。

ここで、とくに注目すべきは、細管を極端に細くして、誘導放出光がここを導波路モードで伝搬するような導波路形レーザの開発である。^{64) - 65)} これには、従来のような軸方向放電とは違い、細管が細くなり、かつ封入ガス圧の適値が増大する分だけ放電維持電圧が高くなるので、管軸に沿ってこの外側面に電極を設け、管軸に直交する横方向で高周波 (RF) 放電させる方法が実用されるようになってきた。^{66) - 67)} 封入ガス圧が高く、また電極を直接管内に入れず、絶縁物の管壁を介して外部に取り付ける無声放電であり、電極損傷の心配がない上に、ガスの劣化も少ないので、長寿命化には有利、RF 放電の維持電圧が低い (数 100 Vrms 程度)、放電特性がその安定化や変調などの制御に適する、電源が小形になり効率が良い、などが特長とされている。

図1-15は、RF 励起導波路形CWCO₂レーザ管の構成を示す概略図例である。一方の電極は、アルミナセラミックス細管の外側に取り付け、他方の電極は細管の側壁になっており、放電の安定化とガスの冷却に適する構造にしてある。放電部とのインピーダンス整合は、可変キャパシタンスにより微調し、また、管軸方向の放電一様性をよくするために、インダクタンスコイルを分布させている。図には書かれていないが、細管両端部にはミラーが、できるだけこれに接近させ取り付けられている。

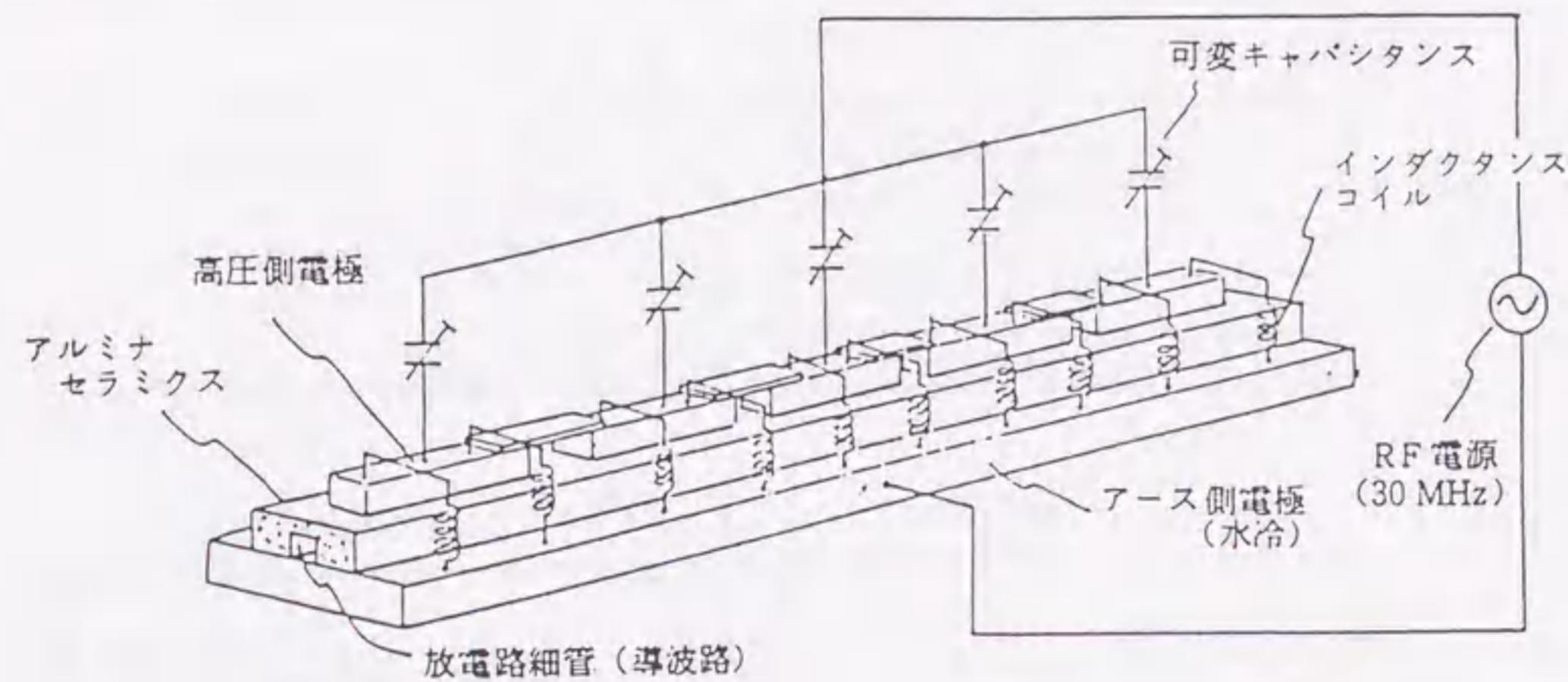


図1-15 RF 励起導波路形CWCO₂レーザ管の概略図

図1-16は、細管導波路の断面を4×4 mm²、長さを540 mm、とした場合のレーザ出力-RF入力特性を示す一例である。ガス混合比を、CO₂:N₂:He=9.0:13.5:77.5 の最適に近い状態にした場合には、封入ガス圧力は100 Torr 付近が適値となり、RF入力300 Wにてレーザ出力25 W程度が得られた。これに、長寿命化と効率増大を目的としてXeを5 Torr 加えると、図点線のように封入

ガス圧の適値である100 Torr 付近では多少出力が増し、効率はほぼ10%となる。比較のため、同じレーザ管にてガスを1 l/min 程度の低速で流した場合には、最大1.5 倍程出力が増す。また、アルミナより熱伝導性の良い材料を細管に使えば、さらに出力増が期待できる。

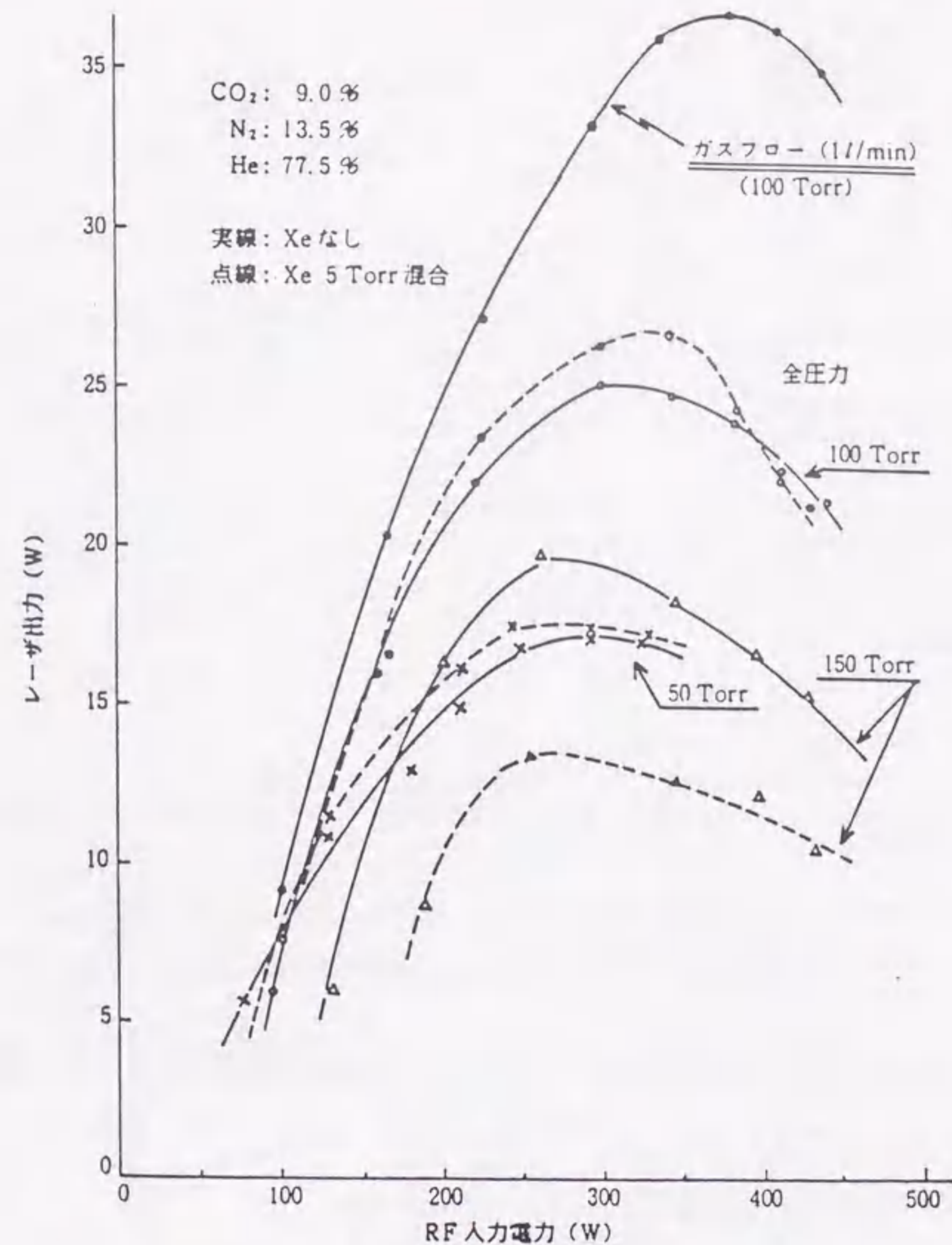


図1-16 RF 励起導波路形CWCO₂レーザの出力特性

従来方式の細管を使った、ガス封止内部ミラー形レーザ管による出力-放電電流特性を、比較のため図1-17に示す。放電入力に対する効率はこの方が高く、TEM₀₀モード発振が得られるので、総合的な評価ではRF 励起導波路形との優劣がつけ難い。いずれにしても、CO₂レーザでは動作パラメータが多いので、最適条件の議論はきわめて複雑になるためここで止める。最近、このようなレーザ製品化が進む一方で、さらに性能向上を目指した研究も活発である。^{68) - 72)}

次に、100 W 以上、数 kW までの中出力域においては、古くより管軸方向に低速でガスを流す、いわゆる低速軸流方式が使われてきたが、放電（細管）単位長で得られる出力の実用的限界が 70 W/m 程度であり、kW 級装置では大形になるため、ルーツポンプを使ってガスを高速で流すようにし、対流冷却する高速軸流方式が主流になってきた。このような方式では、放電長当たりの出力が～600 W/m となり、低次モード発振においても、放電入力に対する効率が約 20% に及ぶので実用性が高い。レーザー出力 P の概算値は、ガス質量流速を dM/dt とすれば、

$$P = 120 \frac{dM}{dt} = 120 \rho V A \dots \dots \dots (1-2)$$

ここで、 ρ : ガス密度 (g/cm^3)、 V : ガス速度 (cm/s)、 A : 細管断面積 (cm^2) である。

図 1-18 は、出力 1 kW 程度の、高速ガス軸流方式 CO_2 レーザ装置の構成を示す一例である。光路を U 字形にして折り返し、発振部を小形にしている。

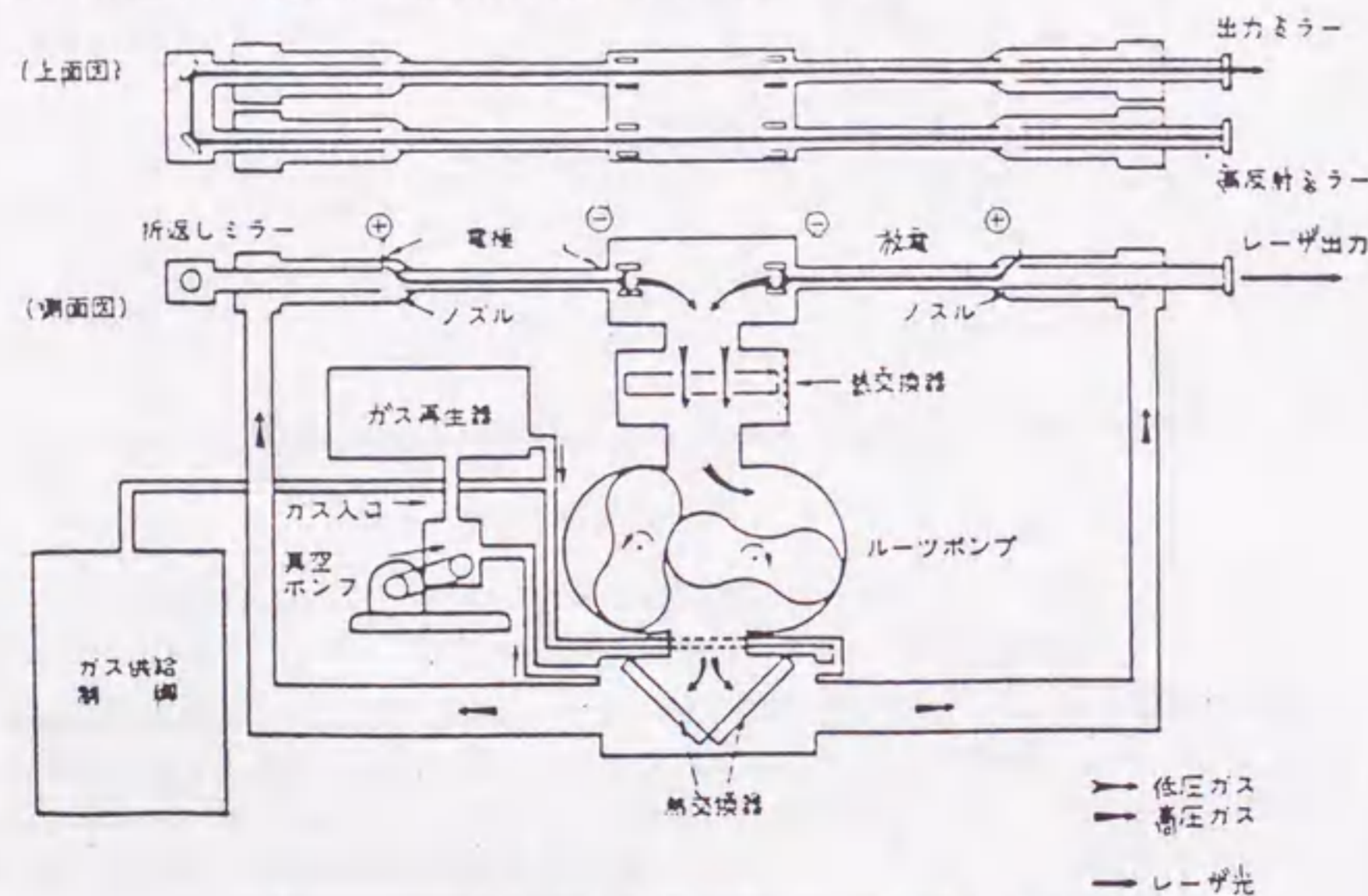


図 1-18 高速ガス軸流 CO_2 レーザ装置の構成概略図

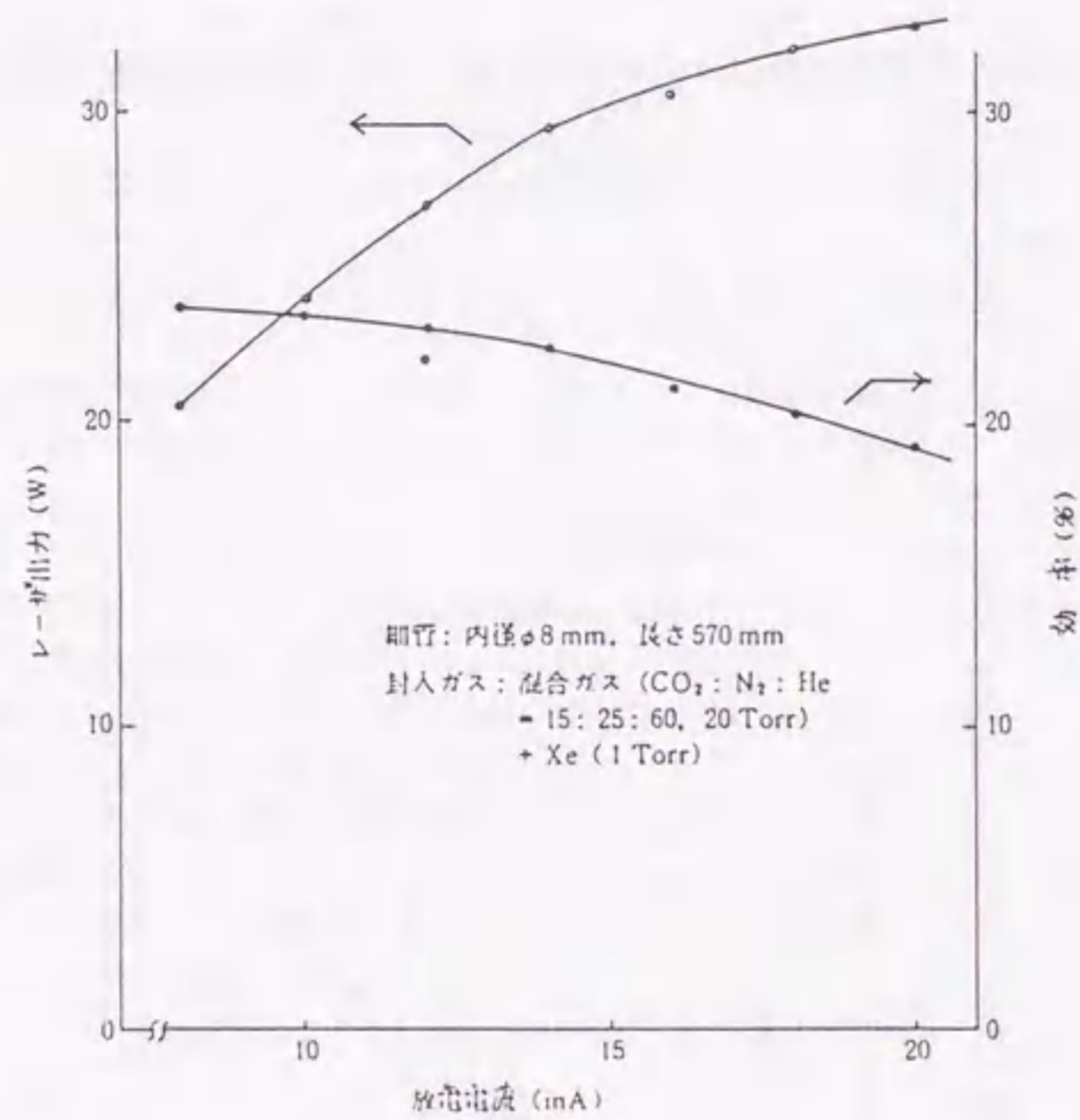


図 1-17 従来方式 CW CO_2 レーザの出力特性

また、図 1-19 は、この方式について、ガス流速をパラメータとした場合のレーザー発振効率を示し、シミュレーションがかなり正確にできることが確かめられた。変形例として、ヘリカルガス流方式も注目されるが、方式の主流となるまでには至っていない。^{5.1) - 5.3)}

次に、出力 1 kW 以上の大出力装置に関しては、主流になっているガス横流方式で、すでに 10 kW 以上の装置が製品化され、工業用を目指した研究試作機では、30 kW に近い出力も得られている。図 1-20 は、この方式による上述の 10 kW 出力の実用装置構成図例である。光路を 2 回折り返すことにより長くして、集光性の良い低次横モード発振となるように設計されている。

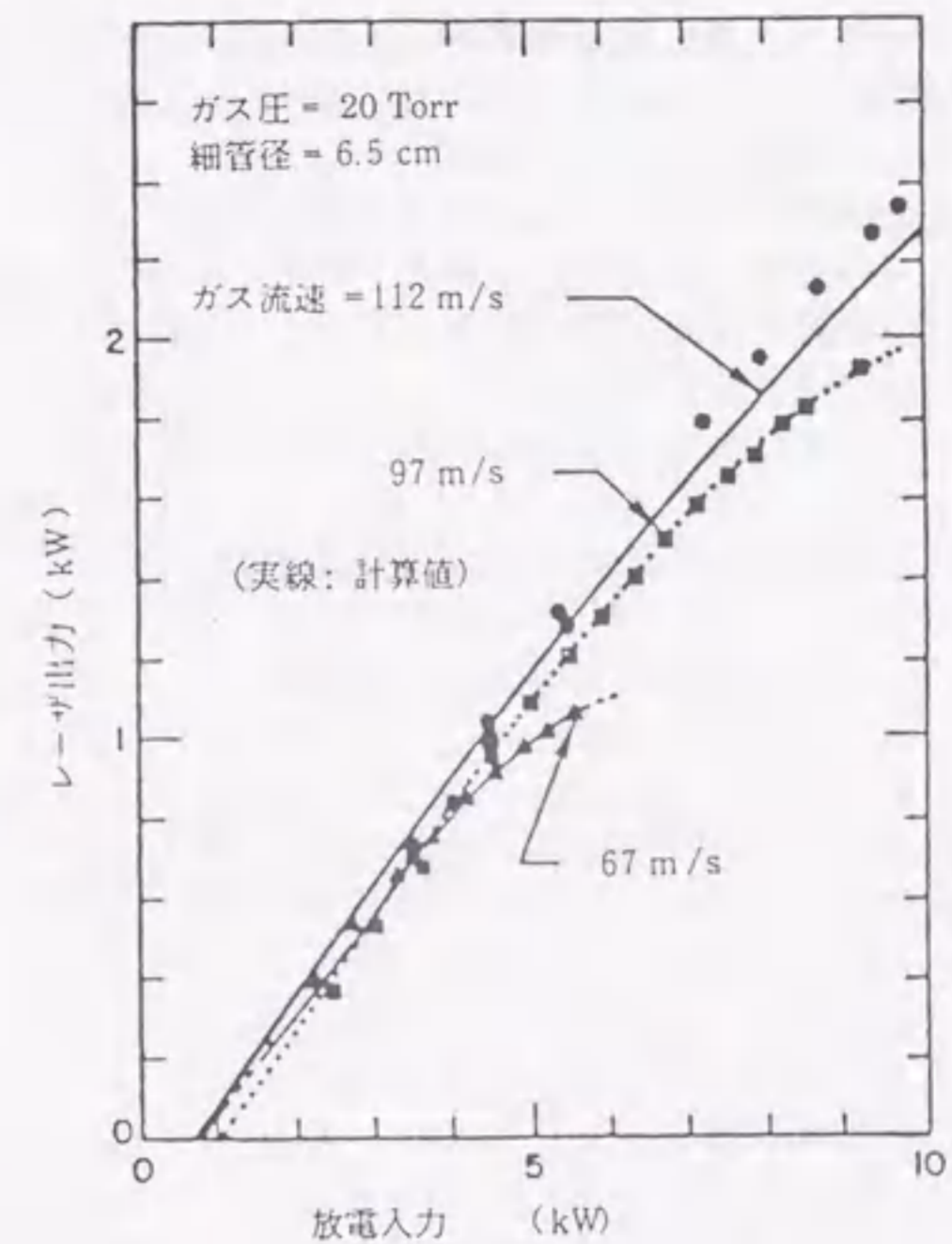


図 1-19 高速ガス軸流 CO_2 レーザ装置の出力特性

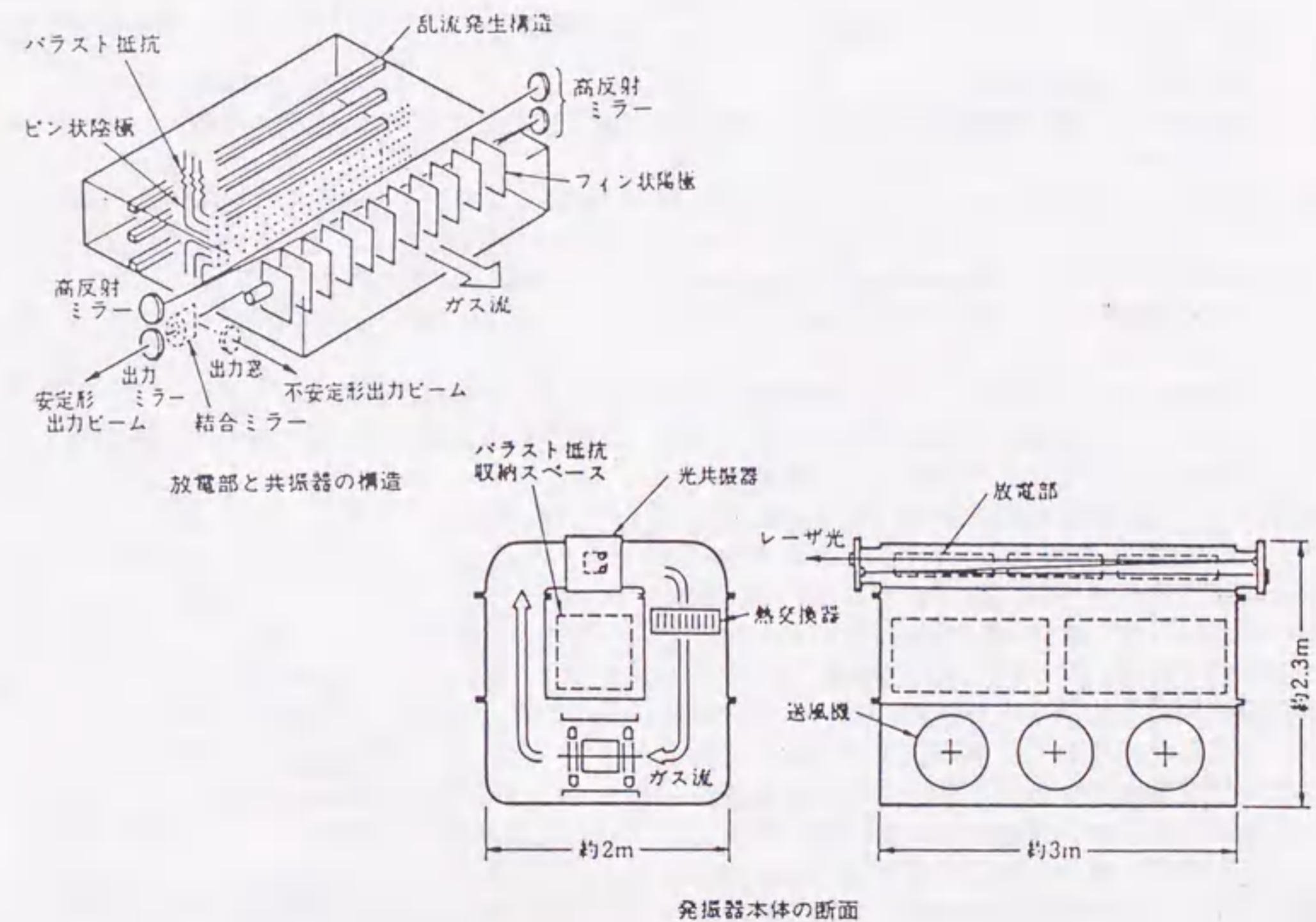


図 1-20 ガス横流方式 CO_2 レーザ装置の構成概略図

図1-21は、この装置のレーザ出力-放電入力特性である。さらに集光性の良いレーザ出力が得られる不安定共振器を用いても、大幅な出力減は見られず、集光性が基本的に良いとされている前述の高速ガス軸流方式と比較し、優劣の評価は難しい。これら大出力装置も、今後応用分野を広げるには、まだ多くの、とくに実用性を向上させるための技術課題が残されている。

高放電電流域における放電安定化は重要な課題であり、これに対する1つの試みとして、PIE(Photoinitiated Impulse enhanced Electrically excited)方式が注目される。UV光を発生し、封入ガスを予備電離するための高電圧高周波電源を、直流主電源に重畳させて放電を安定化させるものである。⁷³⁾⁻⁷⁴⁾

CO₂レーザについては、きわめて高効率の動作ができるので、産業用として実用化がもっとも進んでおり、その方式も多様であり膨大な数の文献報告類がある。筆者も、製品化を目指して用途を含めいくつかの開発を手がけ、これらから多くの技術経験を蓄積してきた。⁷⁵⁾⁻⁷⁷⁾

(3) TEA CO₂レーザ

これは、封入ガス圧を、通常のCO₂レーザより数10倍以上となる大気圧付近、あるいはこれ以上にして動作させる方式であり、1970年に最初の発振が報告され、以後多くの研究が続けられたが、短パルスの発振しか得られず応用が限られるので、実用化開発では一歩遅れている。ガス圧が高いので、レーザ励起に適する一様なグロー放電を得るには高電圧を必要とし、このため光軸と直交する横方向放電で励起することから、TEA(前記)CO₂レーザと称している。^{81), 78)-83)}

したがって、局所的なアーク放電の発生を抑え、安定なグロー放電を点弧することが技術ポイントになり、現在では、予備電離方式がもっとも重要な決め手と考えられている。これは現在、おもに、コロナ、UV、あるいはX線を使う3方式で開発が進んでいる。他にも、電子ビームによる予備電離などが試みられてきたが、繰り返し数を上げることや取り扱いが難しく実用性が低く、マーキングなどに実用が進み始めた市販装置は、構造が簡単なUV方式が多い。これらに関する文献類も無数にあるが、技術的には次に述べるエキシマレーザの場合と共通するので、ここでは、いくつかの参考文献を挙げて詳細説明は省略する。⁸⁴⁾⁻⁹³⁾ 図1-22は、先行している

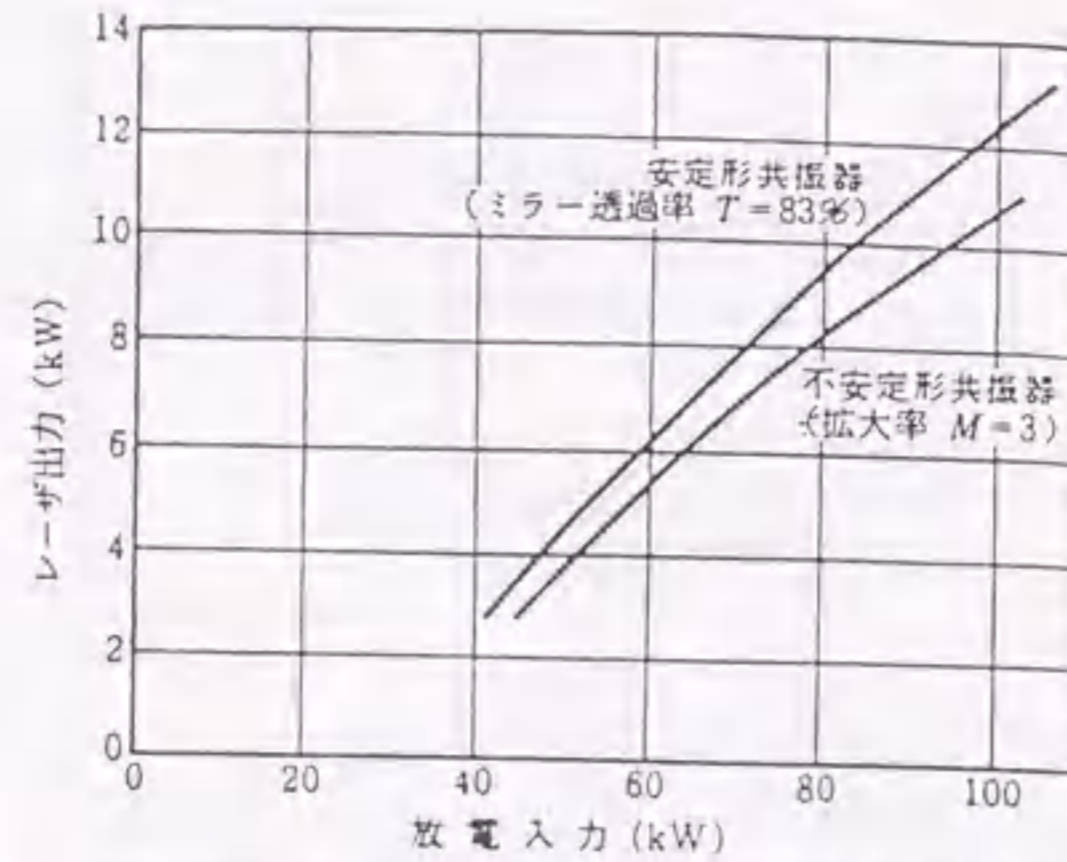
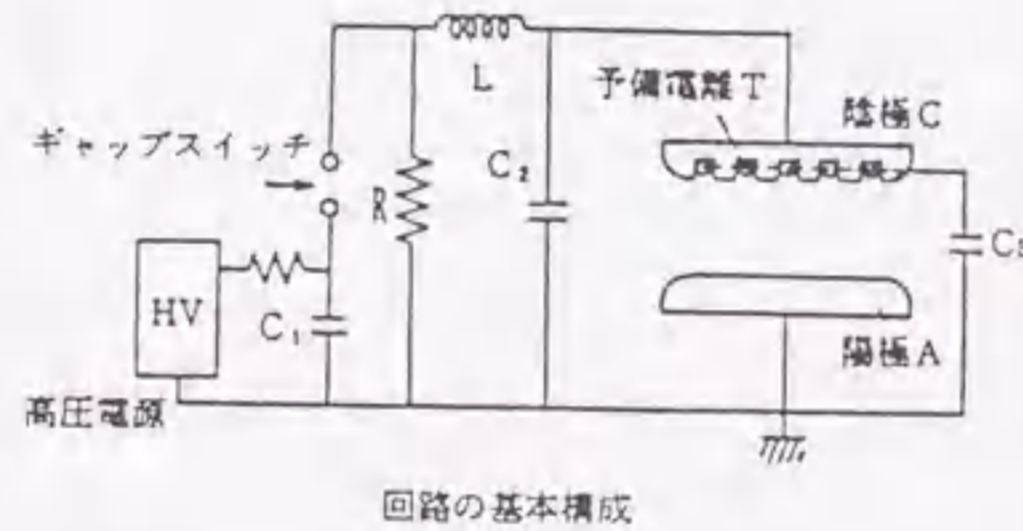


図1-21 ガス横流方式CO₂レーザ装置の出力特性



回路の基本構成

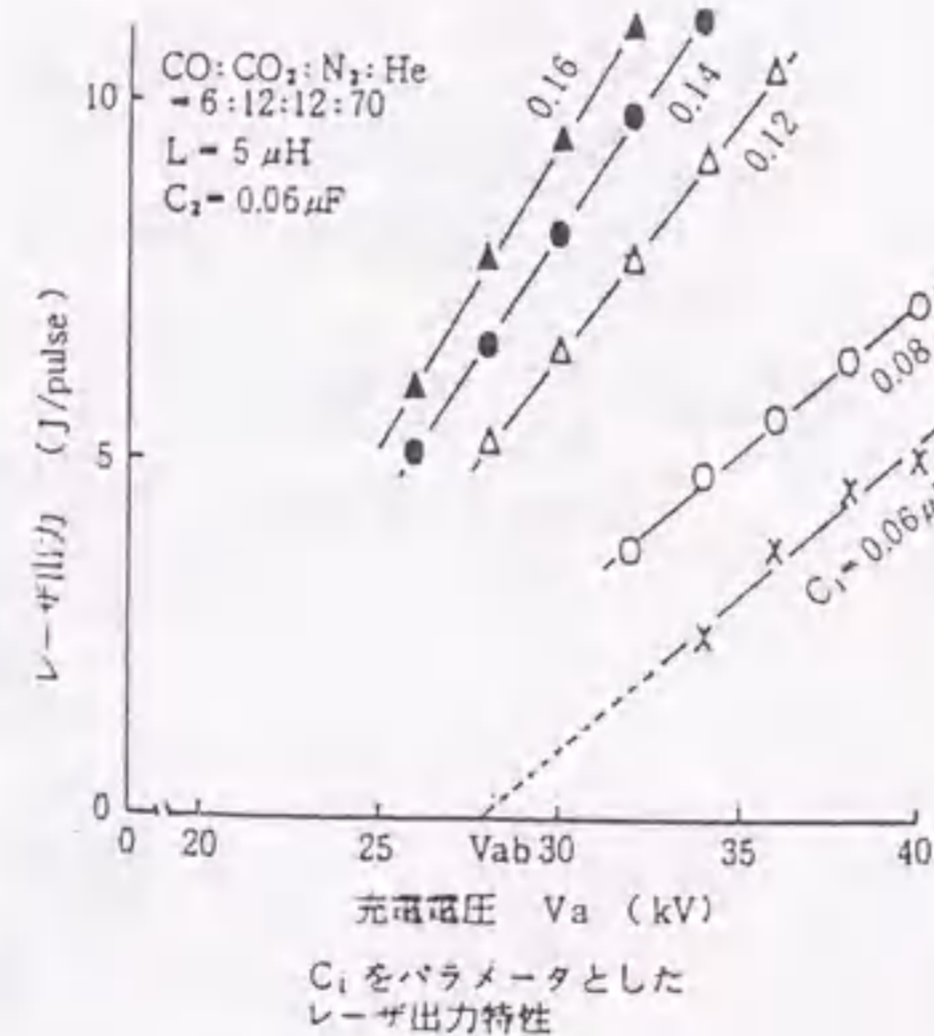


図1-22 コロナ予備電離方式TEACO₂レーザ装置の基本回路構成と出力特性

UV方式に続き、筆者らが製品レベルでこれを凌駕する性能が得られるようにした、コロナ方式によるTEA CO₂レーザ装置の基本回路構成とレーザ出力特性を、実用例として示す。この場合には、予備電離用の電極はガラスパイプに通した細い金属線であり、これを、図のように陰極面の溝に管軸方向に沿って並べてある。ギャップスイッチを閉じると、陽極と陰極間に高電圧が印加され始め、まずC₂を通し陰極と予備電離電極間に流れる電荷により、陰極面に一様なコロナ放電が発生する。この荷電粒子により主電極間のインピーダンスが下がり、均一なグロー放電の点弧が可能となる。主電極の両側に多数のスパークギャップを設け、そのアーク放電で発生するUV光により、主電極間を予備電離しグロー放電を点弧するUV方式と比較し、予備電離の効率は高く、構造は同じ程度に簡単であり、アーク放電でのガス劣化も少ないので、実用性ではむしろ優れている。

これをガス封止状態で連続運転させた場合の出力変化は図1-23のようになり、レーザ管設計の工夫などにより、長時間のガス封止動作が可能になってきた。⁹⁴⁾⁻¹⁰⁷⁾

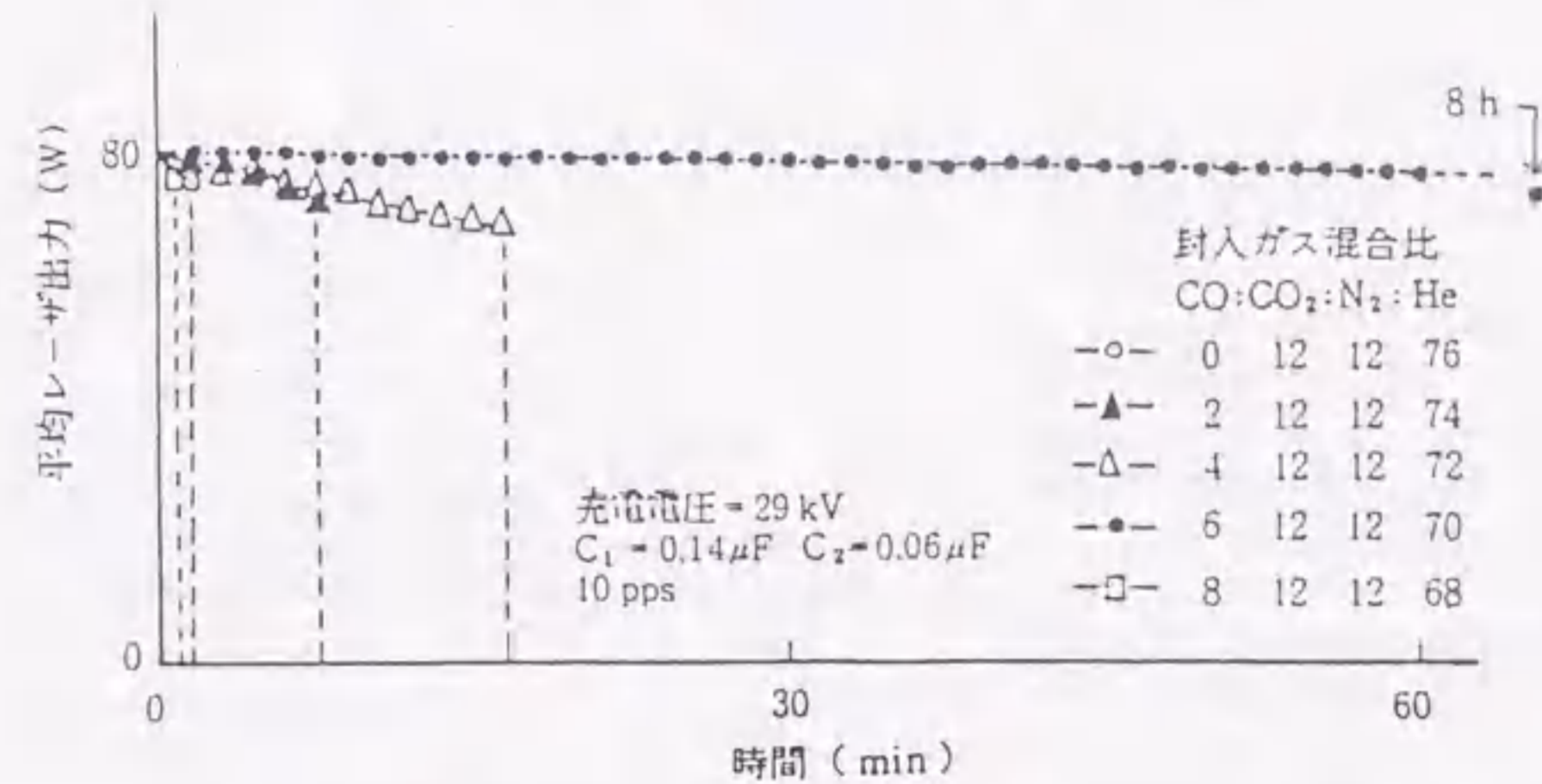


図1-23 コロナ予備電離方式TEACO₂レーザ装置の連続動作特性

一方、研究開発では、とくに封入ガスを10気圧、あるいはこれ以上にして、利得波長帯域を広げることにより、広域のチューナブル発振を得る、おもに同位体分離用光源とするものが注目される。¹⁰⁸⁾ この実用化には、1 kHz以上の高繰り返し化が必要とされるので、改めて予備電離方式の比較検討をしなければならない。X線方式はとくに有望視され、専用の線源開発を含め基礎研究が進んでいる。¹⁰⁹⁾⁻¹¹¹⁾

高封入ガス圧下で動作させる技術は、そのまま放電励起のエキシマレーザに転用されるので、これらの研究開発で体得できた諸知見は有益である。

(4) フッ素(F₂)レーザ、ほか

F₂レーザは、ほとんどエキシマレーザと同じ設定で、簡便な放電励起動作が可能であり、これと並行して開発を進めた。図1-24にエネルギー準位図を示し、F₂分子の電子励起準位D'、A'間における遷移で、真空紫外域の157 nmにてレーザ発振する。このような短波長域で発振可能なレーザはほとんどなく、実用化への期待は大きい。図1-25に、筆者らの研究装置で得られた出力特性を示す。放電容積は1×1×100 cm³であり、コンパクトな装置で高出力の得られる可能性が明らかになりつつある。問題は、短時間の動作で出力エネルギーが低下することで、封入ガス純度の影響がきわめて大きいと推察される。¹¹²⁾⁻¹¹⁴⁾

同様に、励起媒質として窒素ガス(N₂)を使い、通常はN₂分子の電子励起準位間遷移C→Bで動作させるN₂レーザも実用化が期待できる。これは、1963年にHeardが最初の発振に成功し、He-N₂レーザに次ぐ歴史を持つ。もっとも強い発振線は紫外域の337.1 nmであり、下準位の寿命が上準位に比べて長いので定常的に反転分布を維持できず、~10 nsの短パルス発振に限られる。これも、簡便な放電励起が可能であるが、できるだけ急峻な電流立ち上がりをする必要があり、スパーク

ギャップやサイラトロンなど高速スイッチと低インダクタンスのブルームライン回路、LC反転回路などを使う。有効放電長1 m程度で数 MW のピーク出力が得られ、効率は1%以下で低いが、安定で扱い易い紫外域レーザー光源として、分光研究用、計測用などに多く実用される可能性がある。¹⁾

1.1.3 実用化の技術ポイント

筆者は、1966年以來、長年にわたり主にガスレーザー装置の研究開発に携わってきた。言うまでもなく、この目指すところは装置や応用技術の実用化・事業化である。当初より、レーザー技術分野では米国、旧ソ連、欧州各国が諸技術で先行し、全体的に見て今なおこの状態が続いていると言えよう。これは、レーザー技術が光エネルギー利用、情報処理、計測など広範な軍事的目的の用途を期待されたことが一要因となっている。このため、先進各国においては、レーザー技術に絡んで巨大な研究投入が行われてきた経緯があり、残念ながら基礎研究から実用化に至るまで、それらの後塵を拝することが多いのは否定できない。独創的、先駆的研究開発と事業化との一致を願うのは言うまでもないが、上述の成果を反映させた高性能で安価な関連製品が手軽に入手できるまでの期間は短く、この現状に対抗するのは極めて難しい。部分的、あるいは周辺的な実用化技術で独自性を示すのが現実である。

実用レーザーにおいて、一方の旗頭は固体レーザーであるが、上述の技術背景から、レーザー結晶、励起ランプ、波長変換非線形結晶などキーコンポーネントの多くは外国製品依存を避けられない。これに対して、ガスレーザーでは、媒質の選定・設定に技術的制約が少ない

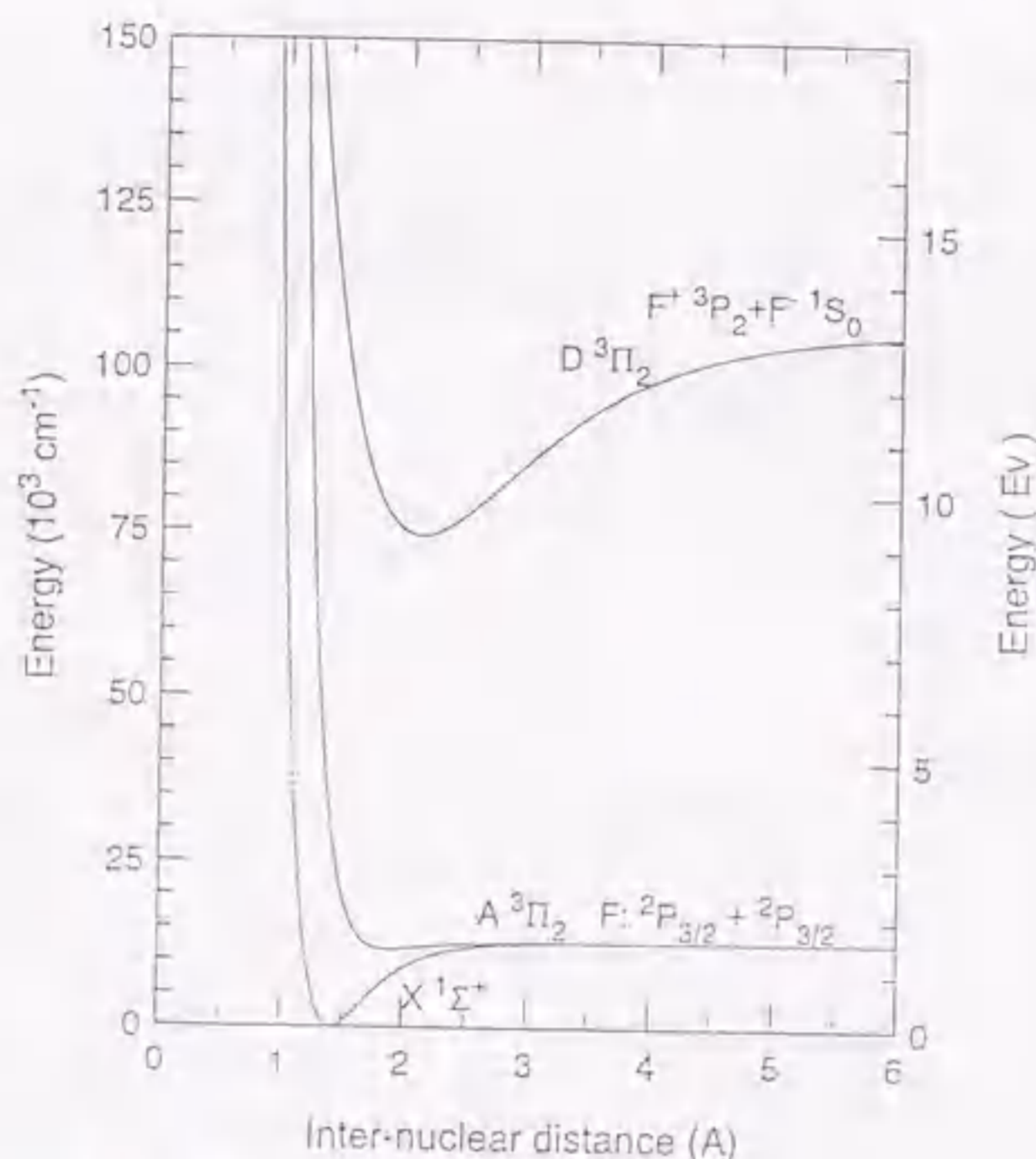


図1-24 F₂レーザーのエネルギー準位図

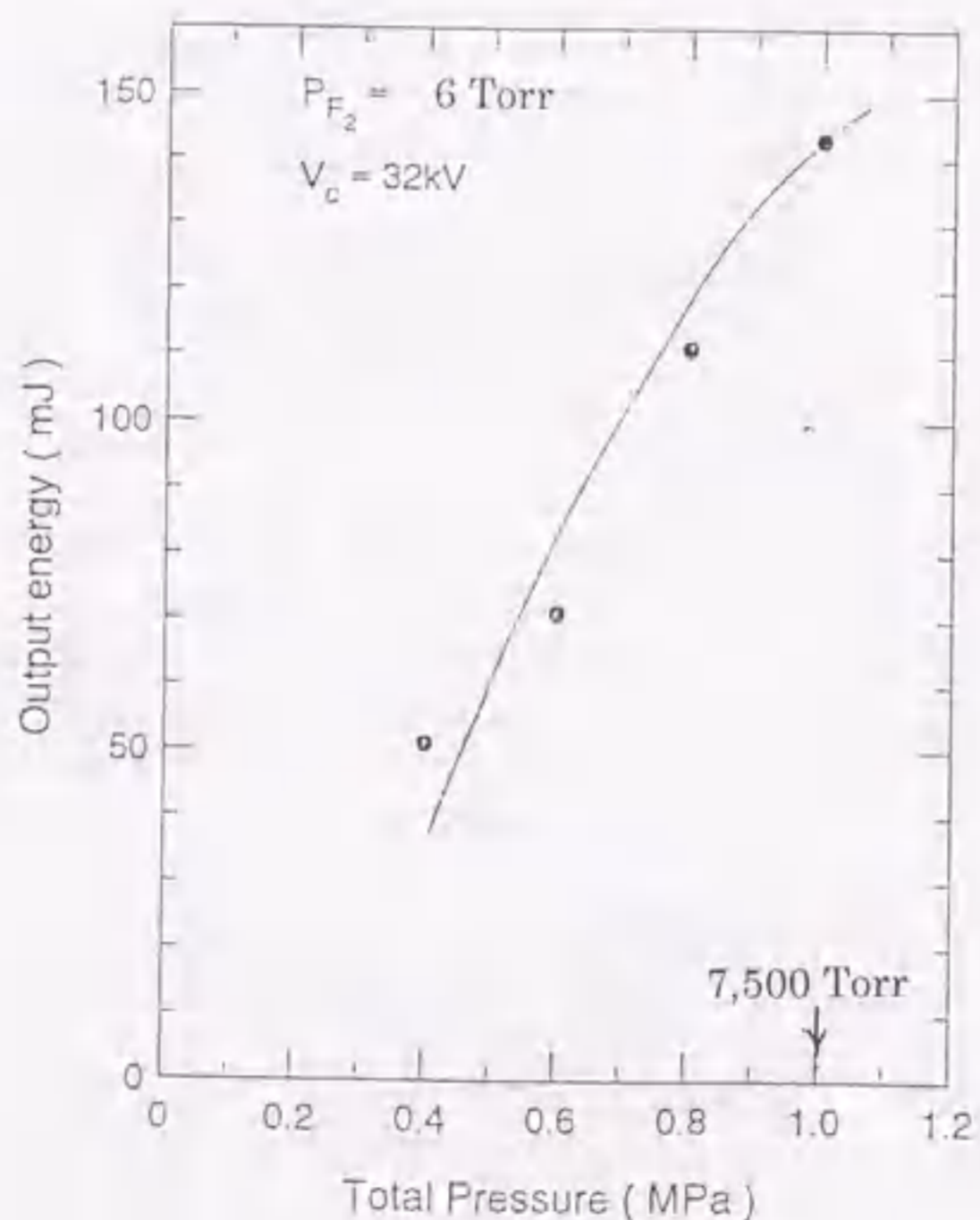


図1-25 F₂レーザー装置の出力特性

ので、独創性の高い装置が開発できる余地は多い。とくに、用途との適合性が強く要求されるOEM (Original Equipment of Manufacturers) 用には、多様な対応ができるガスレーザーの適用で、多くの成果が実現されている。

レーザーの基本構成は、レーザー媒質、この励起源、光共振器の3つである。ガスレーザーでは、この内でレーザー媒質に因る分がきわめて大きいと思われる。放電を安定に点弧させる条件と同時に、レーザー発振を最適にする条件を満たすように整合させることが、重要な技術ポイントとなり、電流密度、電子温度、密度などの放電パラメータと、レーザー励起とは直接的に関係するので、安定でレーザー発振に適する放電方式や条件を満たすことがレーザー設計の基になる。

レーザー媒質については、固体レーザーでは結晶化において多くの困難な技術問題が伴うが、良品として仕上がれば動作段階で発生する問題は比較的少なく、通常では長時間にわたり安定状態が維持できる。これに対しガスレーザー媒質では、最初の設定は容易であるが、最適レーザー発振条件の封入ガス圧、ガス種や混合比への依存性が一般にはきわめて高く、その範囲は狭い。さらには、これが放電を安定に点弧できる領域と多くの場合一致せず、また、動作に伴いその経時変化も大きい場合がある。前述のようなイオンレーザーの場合には、不活性ガスのみを封入するので、最適条件の維持がもっとも容易である。しかし、管内壁からの不純ガス放出、レーザーガスの吸着(ガスクリーンアップ)、管材の荷電粒子あるいは短波長放電光によるエロージョンなどで、管構造の設計、製造時の処理方法、管材の選定に細心の注意を払う必要があることを多く経験から知った。

次のCO₂レーザー開発では、レーザー媒質そのもののCO₂がCOとO₂に分解すること、O₂は化学的に活性で触媒を使っても完全には再生できないことで、ガス封止管ではイオンレーザー管に及ばない。したがって、とくに大型装置では、ガス交換機構を装着することで実用に供しているが、この酸化物生成はレーザー管状態を悪化させる恐れもあるので、管構造の設計、材料の選定にはさらなる留意が必要と思われる。同様に、前述のF₂レーザーも含め、本研究の主題であるエキシマレーザーについては、もっとも化学的に活性なハロゲンガスをきわめて少ない構成比で封入する必要があり、最適ガス状態の保持に大きな問題が潜んでいることは疑いの余地がない。

TEACO₂レーザーに端を発した高ガス圧パルスレーザーでは、通常の条件下では放電を安定に点弧できないのを、予備電離、電極プロファイリングなどの工夫で、短時間においてのみレーザー発振に適する状態を維持させていると言える。したがって、上記に加えてパルス動作に伴う多くの難しい、とくに非定常という時間的問題に新たな対応を迫られることになる。また、励起源についても、スイッチ素子をはじめとする諸電気回路・素子などにも、定常放電励起では見られない問題も加わり、それらが放電安定化、最適レーザー動作と密接な関わりを持つので問題はきわめて複雑となる。

一方、レーザー装置に対するもう一つの要求は、ビームコヒーレンスである。これは、当然のことながら、装置をいかに利用するかで決まる場合が多い。表1-3は、一般的なレーザー装置製品に明記される仕様項目であり、実用を論ずる場合の基本的指標となる。さらに、これらがどのような使用状況下で持続できるかの信頼性、価格、維持費、大きさ、なども重要な決め手になることは言うまでもない。研究開発段階では、出力値やその安定性だけが評価される場合が多いが、実用では、それらに加えコヒーレンスに関わる出力モードなどが装置の同じレベルで重要な評価項目となる。また、これもレーザーの3構成要素、媒質、励起源、光共振器、に強く依存すると共に、応用に際し加工性を決める基本条件になる。ビーム広がり角も、単一横モードの場合、全角: $\theta = 2\lambda/\pi\omega$ (λ : 波長、 ω : ビームウエストのビーム半径) で定義されが、加工では集光性に関与する実用上重要なパラメータになる。もちろん、ビーム品質を問わない、大面積・容積部への量的な照射による応用もある。

従来の主要な実用レーザーは、CW動作が可能であるが、そのようなレーザーは少数に限られている。また、エキシマレーザーを代表とし今後の実用化を目指す多くのレーザーは、大半パルス動作に限られる。しかし、用途によってはパルス動作で使う方が効果的となり、アブレーションなどの表面処理加工用がその好例となろう。パルス動作では、出力仕様はきわめて多様となり、出力ピーク値、パルス幅、繰り返し数が、装置側と応用側とで制約を受ける。これらの他に、雑音、出力安定度、ビーム方向変動、波長、スペクトル幅などが評価の対象となり、機械的振動、温度や大気揺らぎなどの環境変化、励起源の変動などに起因するので、実用化での重要な留意点となる。

いずれにしても、実用レベルではこれらの全て、あるいはいくつかを同時に満たすことが必要条件となり、部分的性能を議論しがちな研究開発とは別に、高度な技術が要求される。言うまでもなく、実用では高信頼化、小形化、低価格化なども性能のうちと考えることが、強い要求として加わる。

表1-3 一般レーザー装置の製品仕様

	測定項目	単位	留意点, 問題, 他
製品仕様	出力値	ワット(連続) ジュール(パルス)	検出器の応答感度, 波長依存性, 一般に絶対値精度は低い。
	出力モード(横)	TEM ₀₀	共振条件で変化する, ビート検出が最も精度が良い。
	ビーム直径	mm	TEM ₀₀ モードの場合強度1/e ² 点における直径で示す。
	ビーム広がり角	mrad	ビーム直径と共に加工応用などでは重要なパラメータ。
	縦モード間隔	MHz	掃引型干渉計を使う。
	出力変動	%(p-p) (rms)	検出器の精度(感度の受光点, 温度依存性など)が問題。
	ビーム方向変動	mrad	動作開始時の変化が大きい。 大気ゆらぎの影響分を考慮する。
偏光状態	直線 ランダム	ブリュースタフェースを共振器内に入れると直線偏光となる。	

1.2. ガスレーザーの開発現状・動向

ガスレーザー装置技術では、イオンレーザーに続き、実用性の高いCWCO₂レーザーの実用化が、大出力・高効率動作のできることを特長として進むなかで、高ガス圧下でのパルス動作が実現した。これは、少容積のレーザー媒質から大出力を得る目的で開発され、まずTEACO₂レーザーが実現し、マーケティング用、核融合用などの応用が有望と期待された。しかし、期待に反して画期的な用途の展開は見当たらず、実用化の関心も薄れかけたが、このパルス放電技術を流用することで、それまでは電子ビーム励起で試みられていたエキシマレーザーの放電励起が実現した。

前者の共振波長域が赤外なのに対し、エキシマレーザーでは紫外域で大出力・高効率動作が可能とされ、用途が、従来の熱作用を使うものから光化学作用を使う新分野に大きく展開する期待から、その実用化に向けての研究開発が急加速されるようになった。

1.2.1. 高ガス圧パルスレーザー技術

ガスレーザーでは、多くの場合封入ガス圧力は10分の1気圧以下であるが、これを1気圧以上に設定して動作させる方式のものが、前記のようにTEACO₂レーザーとして1970年に登場、実用化の

関心を高めた。ガス圧が高いと電極間に高電圧を印加する必要があるため、通常は光軸と平行に電極を設けた横方向放電で励起する。しかし、このような動作条件では、主放電に先行させて予備電離をし放電密度の一様化を図ることが必要となり、これにより長時間安定に放電維持させるのに伴う基本的な技術課題が浮上した。この決め手とも言えるほど重要な予備電離方式には、主にUV方式とコロナ方式がもっともよく使われるようになったが、研究レベルではX線方式の開発も一部で行われるようになった。

これらの放電技術は、多様な新しい応用の展開が見込まれることで関心の高いエキシマレーザーに適用された。なかでも、大出力が得られ発振効率の高い希ガスハライドエキシマレーザーが、実用性で注目されている。これは、希ガス原子とハロゲン原子(分子)で構成されるエキシマからの誘導放光によるもので、代表例ではXeCl, KrF, ArFがある。通常数気圧のHeやNeをバックガスとし、代表的なXeClエキシマレーザーでは、これに数%程度のXeと、さらに桁程度低い比率のClを混入させている。ハロゲンガスはきわめて化学的に活性であり、これに触れる管材は化学反応により腐食しやすい。したがって、ガスの制御は前述のイオンレーザー、CO₂レーザーなどに比べて格段に難しくなる。また、高ガス圧下での放電では、電流を局所的に集中させず均一に点弧させることは、レーザー出力変動の低減のみならず電極の損傷、ガスの劣化を減速させることにもなる。

しかしながら、このような高速パルス放電の進展メカニズムは、まだよく解明できていない状況にあり、単純化したシミュレーションに基づく放電の解明が試みられているが、実際には実験結果を基にした試行錯誤に依るところが大きい。^{1) 10) - 1) 11)}

1.2.2. 短波長域動作技術

レーザーの短波長化は、発振しきい値入力が波長の4乗で増大する関係にあり、励起が技術的に難しくなる。一方、用途から見ると、高コヒーレント性や高光子エネルギー性を使うことにより、多くの新たな展開が期待できるので、最近では研究開発の関心がX線も含めた短波長領域まで波及している。そこで、まず紫外波長域レーザーの全般的開発動向を述べ、とくに'80年代になり、電子・半導体、材料・化学など基幹産業分野への光化学作用を使う応用研究を急速に進ませる動機をもたらしたエキシマレーザー開発の位置付けをする。

一般に、紫外(UV)域は~200nm以上で、これ以下は真空紫外(VUV)域とされているが、現在この領域までの動作には、比較の実用性の高いレーザーが開発されつつあり、これらの状況を実用化の視点でまとめる。まず表1-4は、紫外域レーザーの種類として、これまでの文献報告によりレーザー動作が確認された媒質を、発振機構の類似性から原子・イオン系、エキシマ系、分子系、その他、に大別してまとめたものである。最近では、非線形光学技術の開発も進み、高調波発生、光混合、誘導ラマン効果を使った波長変換により、高効率の安定な紫外レーザー光源が比較的容易に得られるようになった。しかし、直接レーザー動作をさせるものは一線を画し、利用者にとっては光源として同じものとも言えるが、レーザー装置から見れば2次の技術であり、この分類には入れていない。

希ガスレーザーでは、大部分のレーザー発振線について、1970年代までに理論計算が行われ、実験的に確認されている。希ガスは、一般に動作が安定であり実用性が高いという利点があり、代表例として、Ar⁺遷移による青-緑色域の発振装置が広く実用されている。これらは、1価イオンでは少ないが、2価イオン以上の遷移によるレーザー動作をさせるように強励起すれば、きわめて多くの紫外域発振線が得られる。イオンの遷移を使うため、一般には高効率化は原理的に難しいが、高コヒーレンスで出力変動は少なく、レーザー光源としては理想的性能を持っている。表1-5に、これらについてレーザー発振が確認されているものの波長を示すが、大部分は微弱で実用の可能性はほとんどない。

希ガス以外では、金属蒸気を除きB, C, Nなどがあるが、今なお基礎実験の域をでるものはない。金属蒸気レーザーは、一般に電離電圧が低いので高効率で励起状態が生成され、種々の金属できわめて多くのレーザー発振が報告されている。現在、製品レベルでは、325nmでCW出力50~100mW程度のHe-Cdレーザーがある。高温加熱を必要とし、金属蒸気が拡散して管壁に付着し故障原因になるという基本的な難点があり、高出力装置の実用化には適さないと思われる。エキシマ系レーザーは、後述するのでここでは省略する。^{1) 20) - 1) 21)}

表1-4 各種紫外域発振レーザー一覧

原子・イオン系	希ガス	Ne, Ar, Kr, Xe
	一般ガス	B, C, N, O, F, P, S, Cl, Br
	金属蒸気	Be, Al, Ca, Cu, Zn, Ag, Cd, Au, Tl, In, Pb
エキシマ系	希ガスハライド	ArF, KrF, XeF ArCl, KrCl, XeCl XeBr
	希ガス, 他	Ar ₂ , Kr ₂ , Xe ₂ , XeRb, XeC ₄
分子系	同原子分子	H ₂ (D ₂ , DH, p-H ₂ を含む), N ₂ F ₂ , Cl ₂ , Br ₂ , I ₂ , S ₂
	異原子分子	CLF, BrF, CO
その他	色素	BM-terphenyl, p-terphenyl, butyl PBD, polyphenyl, BBQ,他
	固体	Ce ³⁺ : LiYF, LuF, LaF Nd ³⁺ : LiYF, LuF, LaF, YF, 他

表1-5 各種紫外域発振希ガスレーザー波長一覧

媒質 (原子番号)	波長 (nm)	遷移	動作	備考
Ne (10)	332.0 *332.4 332.7 332.9 *334.6 *337.8 *339.3 *371.3	Ne II	APD	*: CW 放電維持電圧が高い。
	206.5 217.8 218.1 247.3 261.0 261.3 267.8 267.9 277.8 286.7 333.1	Ne III		
	201.8 202.2 228.6 235.3 235.8 237.3	Ne I V		
	226.6	Ne V		
	357.7	Ar II		
Ar (18)	275.4 288.4 300.3 302.4 305.5 **333.6 **334.5 **335.9 **351.1 *351.4 **363.8 *379.5 **385.8	Ar III	APD	*: CW *: CW, 製品化 351.1nm, 363.8nmで61Wの記録値**
	211.4 224.9 251.3 262.1 262.5 291.3 292.6	Ar IV		
	184.3	Ar V		
	264.9 377.1	Kr II		
	305.0 312.4 324.0 **337.5 **350.7 **356.4	Kr III		
Kr (36)	175.6 195.0 196.8 205.1 219.2 225.5 233.8 241.8 264.9 266.4 274.1	Kr IV	APD	*: CW *: CW, 製品化 350.7nm, 356.4nmで19Wの記録値**
	183.2	Kr V		
	351.0 354.2	Xe II		
	247.7 269.2 308.0 332.0 337.9 *345.4 *359.7 *366.9 *374.6 *378.1 *384.1 *399.3	Xe III		
Xe (54)	223.2 231.5 252.1 298.4 324.7 330.7 *333.1 335.0 348.3 364.6 376.0 380.3 397.3	Xe IV	APD	*: CW 大電流域で放電不安定。

<注>

APD: Axial Pulse Discharge

CW: Continuous Wave

分子系、その他のレーザーは、分子状態の遷移によりレーザー動作させるものとしたが、エキシマレーザーも広い意味では、この分類に含まれるともいえる。ここで、実用上注目すべきは、337 nmのN₂レーザーと、157 nmのF₂レーザーであり、前者はすでに市販製品になっているが、一部で研究用光源として使われているだけで、効率ではエキシマレーザーに及ばず、実用への関心は低い。一方、後者は真空紫外域で動作し、比較的高効率で大出力発振の可能性が明らかにされつつあり、注目すべきレーザーと思われる。これらは、いずれもパルス発振に限られ、高速立ち上がりの励起が、高効率動作に有効である。

このような技術状況から、実用を目指す紫外域レーザーとして、紫外域で動作するものが多いエキシマレーザーの研究が活発に進められ、このうち、希ガスとハロゲンとで生成されるエキシマは、簡便な放電励起で高効率発振が得られるので、実用化がもっとも有望とされ多くの期待が寄せられている。

1.3. エキシマレーザーの開発

1.3.1. 研究開発の概況

1960年代に登場し、すでに諸産業分野で加工用として多用されるようになったYAGレーザー、CO₂レーザーに続くものとして、最も実用化が期待されているのがエキシマレーザーである。比較的装置開発の歴史は浅く、多くの応用研究が進められているが、その大部分はまだ技術確立までに至らず、これから本格的な実用化期を迎えるものとして装置技術の向上が必要とされている。エキシマレーザーは、主に短波長の紫外域で高効率の大出力発振が得られるので、実用化に対する期待がきわめて大きい。現在、産業分野で加工処理用として、急速な実用化が進んでいるYAGレーザーやCO₂レーザーは、大部分その熱作用を使うものであるが、エキシマレーザーでは光子エネルギーが高く、短パルスでCW発振動作はできないものの、光化学作用を使う新たな応用分野への展開が期待できるので実用化技術の開発が注目されている。

エキシマとは、励起状態の原子や分子に、これと同種あるいは異種の基底または励起状態にある原子、分子が結合して作る励起分子の通称であり、excited dimerが語源となっている。これは、励起状態でのみ分子結合を成して固有のエネルギー準位を持ち、光子を放出して元の原子、分子に解離する。この遷移を利用してレーザー動作させたものがエキシマレーザーであり、原理的に下位準位が存在しない。反転分布状態が容易に作られるので高効率のレーザー動作が得られ、これに起因する出力飽和はない。^{1)2) - 1)2)3)}

最初のレーザー発振は1970年に確認されており、これはXeを電子ビームで励起し172 nmの発振に成功したもので、以後、各種の希ガスあるいは希ガス-酸素(XeO)などのエキシマレーザーが続いて登場した。しかし、これらはいずれも大形で高繰り返し化に適さない電子ビーム励起によるもので、実用性が低くあまり注目されなかった。これに対し、1976年になって、希ガス-ハロゲン原子の結合によるパルス放電励起方式の簡便なエキシマレーザー装置が初めて登場し、一般産業用に向けての実用化研究が急速に進み出し、比較的歴史が浅い。^{1)2)4) - 1)3)0)}しかし、すでに一歩先行して開発が進んでいたTEACO₂レーザーと、高気圧パルス放電を安定に点弧するところで技術的に共通する部分が多いので、研究から製品レベルへの進展は意外に早く、'80年代を待たずに、これを使った諸応用研究が各所で始まった。

表1-6は、レーザー発振が確認されている各種エキシマを示す。また、各種希ガスハライド系については、エキシマ遷移による放出光の波長を表1-7に示す。このうち、安定で高出力が得られ比較の実用性が高いと言えるのは、351 nmのXeF、308 nmのXeCl、248 nmのKrF、222 nmのKrCl、193 nmのArFである。放電励起の場合でも、効率は実験レベルで4%以上が得られたと報告され、パルス動作に限られるが、平均出力やパルス繰返し数としては、それぞれkW、kHz台での動作も可能とされた。

このため、エレクトロニクス、エネルギー、化学、材料など、主要な先端産業分野では、エキシマレーザーを適用して新プロセスによる高性能、高機能製品を開発しようという意欲はきわめて高く、

実際の放電励起希ガスハライドエキシマレーザ装置は、高電圧大電流の電気エネルギー注入を短時間に行い、通常3気圧程度の封入ガス中で均一なグロー放電を点弧させるため、励起電源方式や放電部の構造は、基本的には前述TEACO₂レーザの場合と同じである。

図1-27は、UV予備電離方式による放電励起エキシマレーザ基本構成図であり、この方式がもっとも一般化している。まず、充電用コンデンサC₁に高圧電源H.Vより充電し、次にサイラトロンスイッチTHを導通させることにより、C₁の電荷を高速立ち上がり放電点弧させるためのピーキングコンデンサC₂に移行させるが、これと同時に、主電極の両側に設けた間隙を数mmにした多数のスパークギャップにアーク放電が点弧し、主電極間にUV光を照射して予備電離が行われる。この結果、C₂の充電が進むと主電極間で自動的に主放電が点弧する。

放電エネルギーの大部分は、C₂を介する低インダクタンス回路により供給されるので、高速立ち上りの高電流密度パルス放電となり、予備電離によりできるだけ均一な初期電子を10⁸/cm³程度主放電部に発生させれば、レーザ発振に適した均一な放電励起ができる。初期電子は、レーザガス中に含まれる微量の低電離電圧不純ガスが、UV光吸収により電離されることによる。一方、主電極形状についても、放電が均一で電流集中しないように、特殊な関数式に基づく加工を行う。

パルス繰り返し数を上げるには、チャンバ内部にファンを入れて、封入ガスを循環し電極間で放電させたガスを置換するとともに、これを熱交換器で同時に冷却して、安定な繰返し放電・レーザ発振を持続させている。

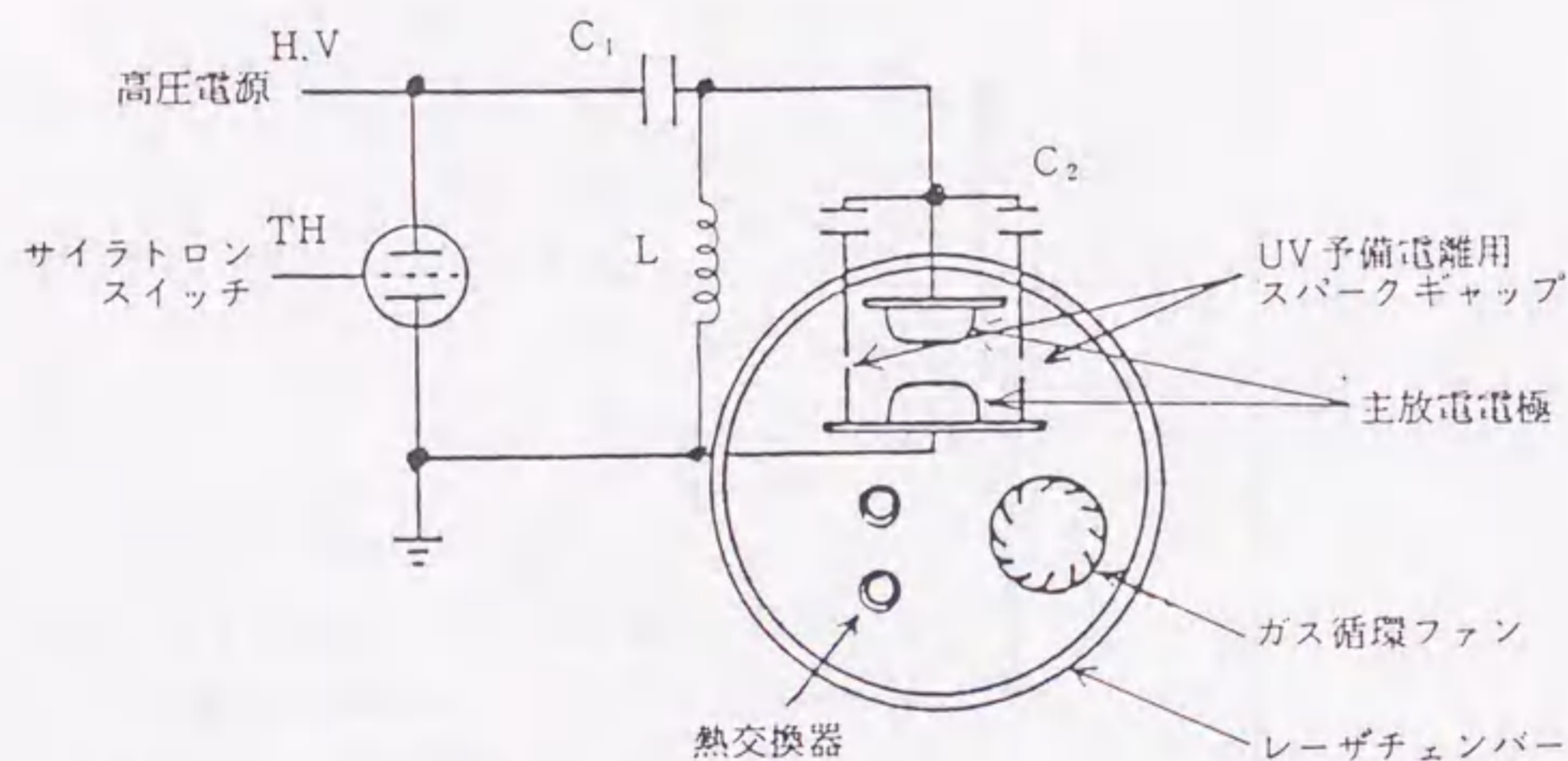


図1-27 UV予備電離方式エキシマレーザ装置の基本回路構成図

図1-28、29は、もっとも動作が安定で、出力、効率ともに高いXeClエキシマレーザの基本的な発振特性を代表例として示す。この場合のバッファガスは、それぞれ、He、Neとして特性比較をした。動作条件は、いずれも電極の間隔2cm、放電幅1cm、長さ28cm、有効放電体積は56cm³であり、C₁への充電電圧を増すと、レーザ出力は急増するが、効率は適値を持ち高電圧域では減少する。これは、C₁の充電電圧に対し主放電が自動的に開始されてしまうもので、この方式では避けられない特性である。封入ガス圧を増せば放電開始電圧が上がるので効率は高くなる。ガスを交換し、同じように各KrF、ArFエキシマレーザを発振させた場合の出力特性も、XeClエキシマレーザとほぼ同じ傾向を示す。¹³²⁾⁻¹³³⁾

また発振パルス幅を長くする研究では、X線予備電離方式でパルス幅250ns、出力1J/pulsを、XeClにて得たとの報告などが注目される。¹³⁴⁾⁻¹³⁵⁾一方、高効率化では、放電電流の立ち上りを良くすることにより、比較的高い値を得ている。さらに、高電圧高インピーダンス回路と低電圧低インピーダンス回路を組合わせた、スパイカー/サステイナ方式の電源にて、4%の高効率を記録した報告も注目されている。¹³⁶⁾エキシマレーザでは、ほかにも封入ガスの劣化による出力低下や、ハロゲンガスによるレーザ管構造物の腐食などの問題を解決することが、実用化の鍵となっている。

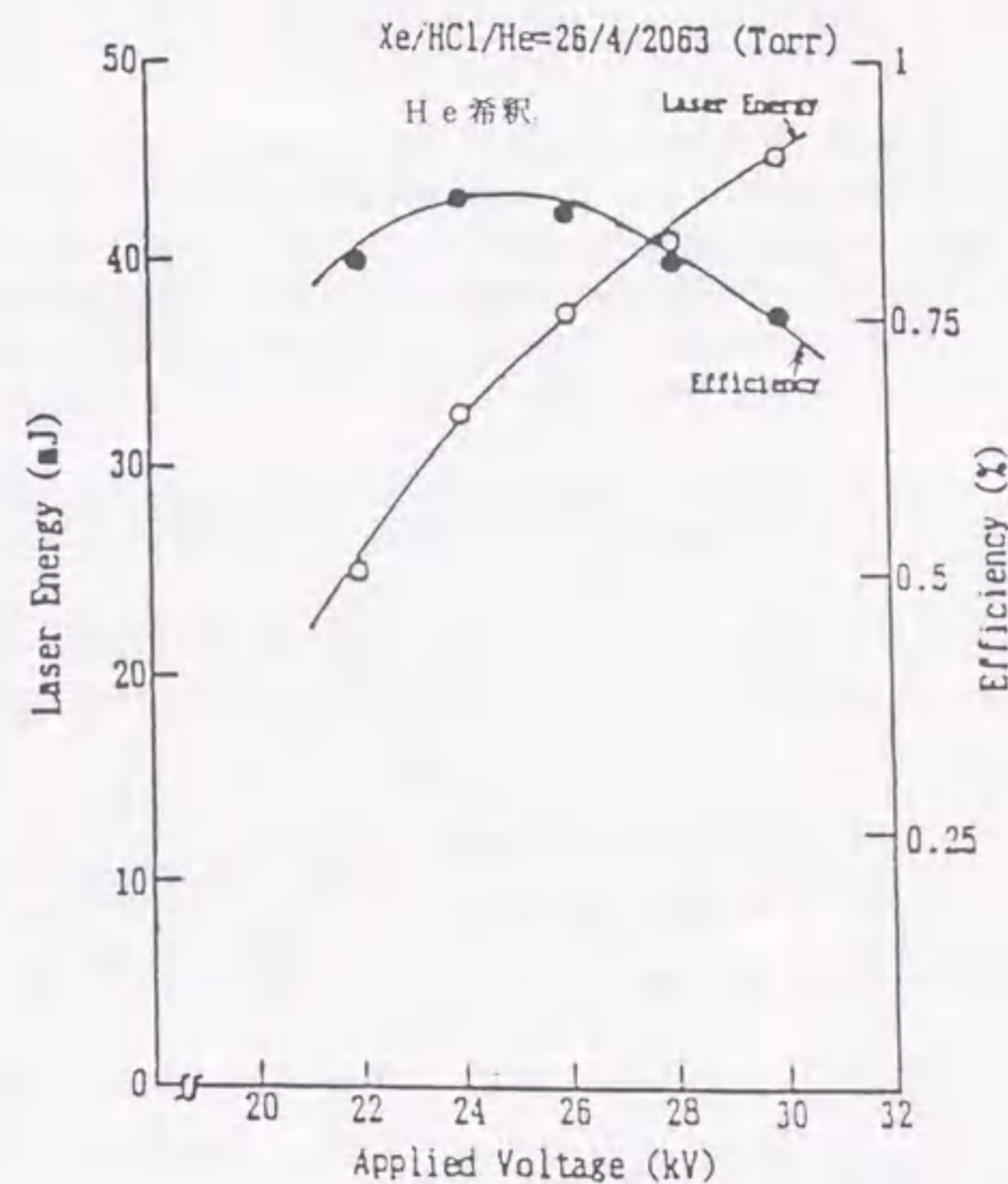


図1-28 UV予備電離方式XeClエキシマレーザの出力特性

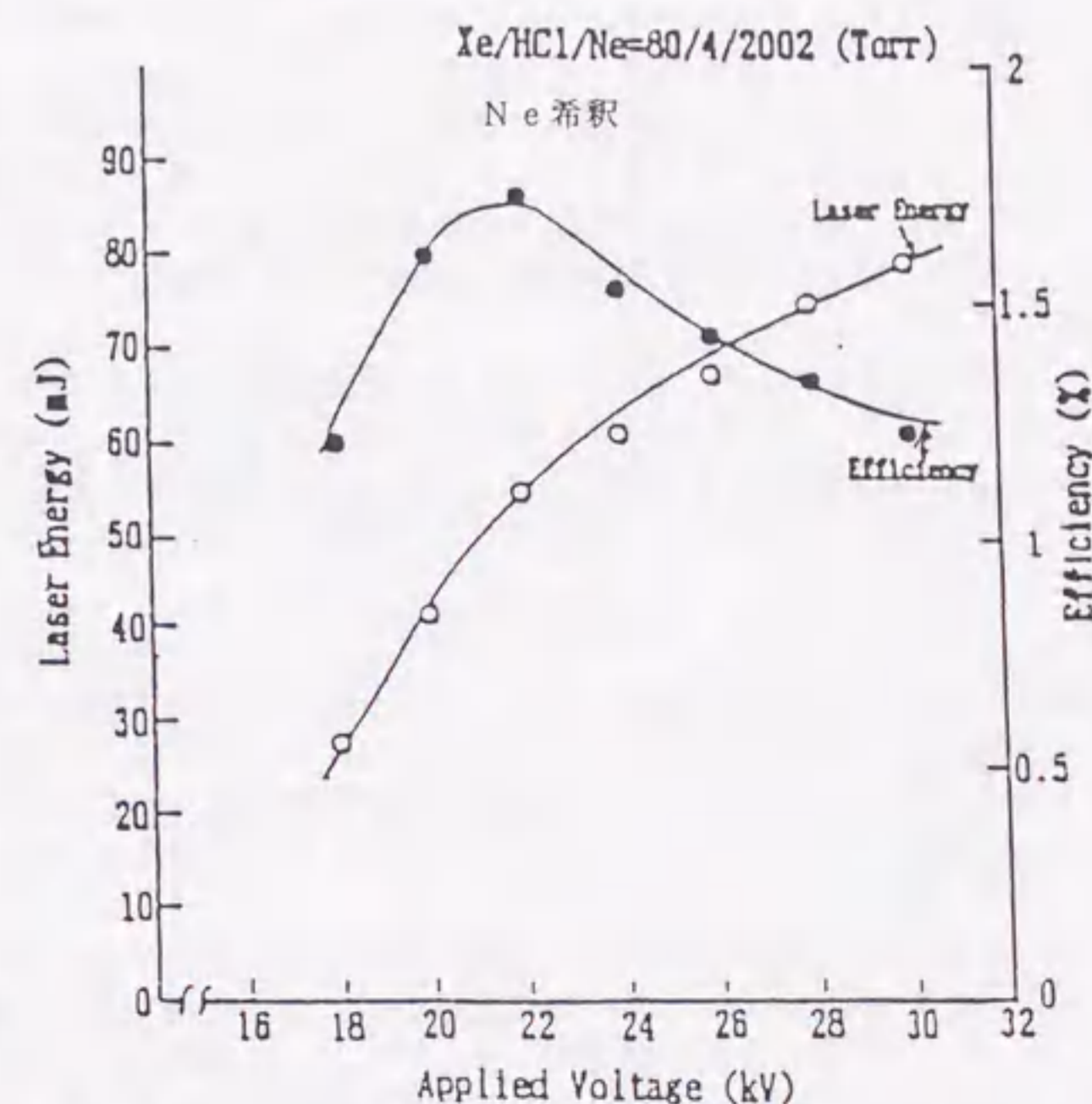


図1-29 UV予備電離方式XeClエキシマレーザの出力特性

1.3.3. 要求ポイントと実用化の技術課題

実用装置に対する個別の要求は、用途への適合性により決められる。これには、出力値、繰り返し数、ビーム品質などがある。一方、共通する要求ポイントとしては、小型、高効率、安価に加え、高信頼、無（簡便）保守、長寿命などがあり、とくにエキシマレーザでは、これらが実用化への弱点になっている。図1-30は、諸要求ポイントに対し、装置を構成する各部の要素技術との関連を示した。高繰り返し化には、全ての要素技術にわたる改善や相互の整合が必要とされる。ここでは、この開発現状や課題などについてまとめてみる。

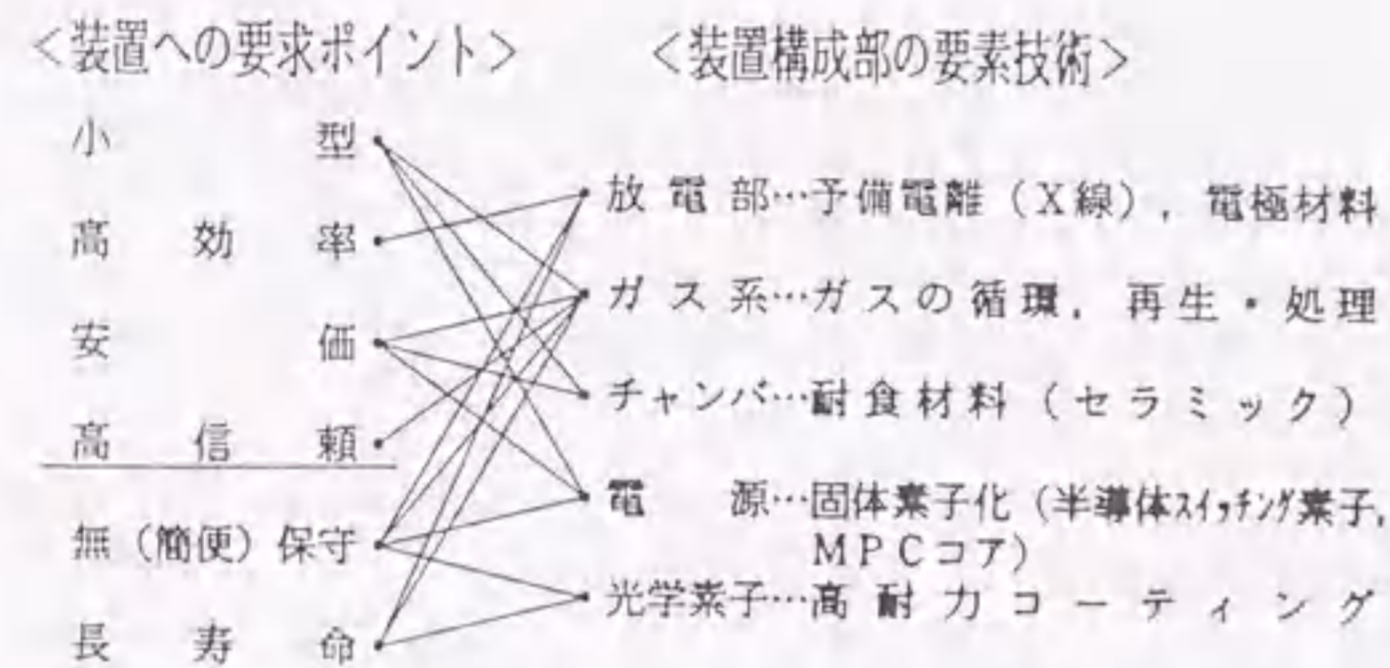


図1-30 エキシマレーザに対する諸要求ポイント

(1) 放電部

エキシマレーザの主要な技術ポイントは、放電部にある。まず、アーク状、あるいはフィラメント状の局所的な放電集中がない均一な放電を点弧させることが必要であり、予備電離が決め手になる。一般に使われているのは、UV方式、コロナ方式、X線方式に大別されるが、製品レベルでは大部分が、簡便なピン電極放電によるUV方式を採用している。しかし、産業用には、スパッタリングで電極が消耗し、また、これがレーザ管内を汚すため、短時間で部品交換やオーバーホールが必要となるので、この改善が不可欠である。有力候補としてX線方式が研究レベルで種々検討され、10 mR程度の照射量で、均一放電に必要な予備電離ができることが明らかにされている。そこで、本研究開発においても、保守が簡単で高繰り返し動作ができる実用性の高い独自方式のX線源を試作することにした。

放電の安定化には、言うまでもなく予備電離の他に、電極の形状や材料、ガス流の状態、放電で発生する音波・衝撃波の処理、電気回路のインピーダンス整合などを最適化する必要がある。とくに、kHz台の高繰り返し動作では、パルス間の相互作用が強くなり、安定動作の持続がきわめて難しい。これらに関しても、総合的に基礎技術の確立を図る必要がある。

(2) ガス系

ガス系としては、パルス繰り返し数を上げるためのガス循環系と、ガスの状態を一定に保ち長時間安定な出力を維持するガス再生・処理系がある。化学的に活性なCl, Fなどのハロゲンガスを使うために、この取扱い方法が決め手になる。ガス循環は、動作条件にもよるが、通常は放電部でのガス置換指標となるCR値（詳細は次章）を2以上にする必要があり、強力なブローをチャンバ内に封入し、耐ハロゲン性を保つため、永久磁石による磁気カップリングを介してチャンバ外部から駆動するのが一般である。

高繰り返しで長時間動作をさせる実用には、ガス循環に関わる問題が多く残されている。放電が点弧した瞬間におけるガスの動的状態などについては、音波・衝撃波の状態はある程度調べられているものの、基礎データの蓄積がほとんどない。短時間に大エネルギーの放電入力が入力されるので、ガスに対する物理的作用のみならず化学的作用も大きく、また、これらは放電状態とも相関するため、最適化が難しい。このように、ガス系の検討は、レーザ装置の基本性能において重要であるのみならず、

が、ガス処理・再生を含めた装置の大きさ、価格、使いやすさという実用面の問題に対しても重要な要求ポイントとなる。

(3) チャンバ

通常は、ハロゲンガスの混合比率を1%以下に設定するので、これに接するチャンバの内壁や諸部品を、化学反応しないように表面処理するか、使う材料を厳選するかしないか、安定な動作はできない。また、励起効率を上げるために、放電回路のインダクタンスを構造的限界まで低減させるので、電極の近傍にコンデンサや予備電離部を取り付ける。これらが、放電からの短波長発光に晒され劣化する恐れがある。チャンバ設計には、この防御に対する配慮が重要で、できるだけセラミック化するような検討が必要と思われる。

(4) 電源、他

高速立ち上がりのパルス放電励起を行うのに、スイッチングにサイラトロンを使っている。しかし、この寿命が $10^8 \sim 10^9$ ショット程度で交換も容易ではない。そこで、高速半導体スイッチング素子に置き換える試みが行われているが、サイラトロンと同等の高速大電力スイッチング素子が現存しない。このため、本大プロ研究開発では専用の半導体スイッチング素子とその駆動回路技術を開発し、実際にサイラトロンと置き換えた電源を試作し、レーザ駆動することで性能実証することにした。

この他に、重要な構成部品として、ミラー、ウインドウなどの光学素子がある。これらは、性能の改善が進み、また、比較的交換が容易にできることもあり、今のところあまり問題にされていない。しかし今後、大出力装置が長時間使われる場合には高耐久化が必要になると予測されるので、これも技術課題となる。

最終的には、研究モデルレーザ装置を実際に動作させて性能評価をし、総合的に実用性の検討をする必要がある。

1.4. 本論文の目的と構成

筆者は、内部ミラー方式の空冷アルゴンイオンレーザ装置を、世に先駆けて独自製品とし事業化に成功した。基礎研究的な独創性は低い、実用化ではきわめて困難な技術的問題を克服し、多くの貴重な技術資料・経験が蓄積できた。一方、エキシマレーザの動作には高励起を必要とし、高ガス圧下で化学的活性な媒質ガスを使い、高速立ち上がりのパルス放電励起をするため、従来のガスレーザより格段に難しい研究開発課題も抱えているが、実用化技術開発では共通する部分が多くある。

本論文では、アルゴンレーザを中心とするガスレーザの研究開発・実用化で長年培った技術経験をベースにして、今後画期的な諸応用が期待されるエキシマレーザの、実用化を主眼にして行った技術開発の結果を明らかにすることを目的とし、諸技術の開発結果をまとめた。本研究開発は、前述の通産大プロとして進められ、筆者は主にkHz台で動作させる高平均出力の高繰り返しエキシマレーザの実用化に焦点を合わせている。将来ももっとも有効な応用分野と考えられる半導体や化学関係からは、高繰り返し動作の要求がきわめて強く、化学応用では、とくに光子コストの低下、すなわち高効率化により用途が広がるとの試算があり、このような装置の必要性はきわめて高い。

本論文は、序論および結論を含み7章で構成されている。

第1章では、従来の主要なガスレーザ開発の経緯と基本技術について実用化を目指す視点で述べ、続いて筆者がこれまでに実用化を実現してきた諸レーザ装置について、開発段階での技術課題と、その対応結果をまとめる。これを基に、今後実用化の要求が強いエキシマレーザ開発の位置付けをするため、とくに高ガス圧動作、短波長域動作のガスレーザについて技術現状を示し、その開発課題をまとめる。

第2章では、エキシマレーザにおいて、とくに産業応用ではもっとも必要性の高い技術として、kHz台の高繰り返し化を実現するために多くの基礎実験を行ったので、それらの詳細についてまとめる。

第3章では、この基礎実験結果を基に、高繰り返しエキシマレーザー動作を実証するモデル装置の設計値を明らかにし、1次試作装置による短時間の高繰り返し動作実験結果を示して、装置化に伴う技術課題をまとめる。

第4章では、5 kHz レーザ動作を実証するモデル装置試作に向けての、諸要素部品、要素技術の開発結果をまとめて長時間の技術見通しを示す。また、この装置による国内外を通しての記録値となる5 kHz, 500 W までの動作について実験結果を示す。

第5章では、従来のエキシマレーザー装置で電源のスイッチングに使われているサイラトロンを、専用に開発した半導体素子化するための性能実証結果を示す。高繰り返し装置では、スイッチング素子の寿命が実用化においては致命的となり、この開発はきわめて重要と位置づけ、その実用性を明らかにする。

第6章では、これら一連の高繰り返しエキシマレーザー開発結果から、実用性の総合的な評価と考察をし、実用化の展望を論じる。

第7章では、この研究結果の全体まとめをして、ガスレーザー全般にわたり実用化技術の総括をする。

参考文献

- 1) A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a helium neon mixture," *Phys. Rev. Lett.*, 6, 106-110(1961).
- 2) W. B. Bridges, "Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum," *Appl. Phys. Lett.*, 4, 128-130(1964).
- 3) C. K. N. Patel, "Continuous wave laser action on vibrational transition of CO₂," *Phys. Rev.*, 136, A1187-A1193(1964).
- 4) M. Bass and M. L. Stitch, "Laser Handbook", Vol. 5, North Holland Physics Publishing, Amsterdam(1985).
- 5) D. C. Gerstenberger, R. Solanki, and G.J. Collins, "Hollow Cathode Metal Ion Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16, 820-834(1980).
- 6) 後藤達美, 高橋 忠, "He-Cd レーザの発振特性," 第17回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31a-E-10, 117(1970).
- 7) 高橋 忠, 後藤達美, 藤田秀夫, "He-Ne レーザの連続発振特性," 昭和46年電気四学会東海支部連合大会予稿集, 14p-H-6, 143(1971).
- 8) A. J. Beaulieu, "Transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser," *Appl. Phys. Lett.*, 16, 504-505(1970).
- 9) R. Burnham, "Xenon fluoride laser excitation by transverse electric discharge," *Appl. Phys. Lett.*, 28, 86-87(1976).
- 10) H. Marantz, R. I. Rudko, and C. L. Tang, "The singly ionized krypton ion laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-5, 38-44(1969).
- 11) 高橋 忠, 後藤達美, "クリプトンイオンレーザーの連続発振特性," 量子エレクトロニクス研究会資料, QE68-16, 1-10(1968).
- 12) W. B. Bridges and A. N. Chester, "Ionized gas lasers," *Handbook of Lasers*, Edited by R. J. Pressley, USA, CRC Press, 242-297(1977).
- 13) 後藤達美, 高橋 忠, "Xe II レーザの連続発振特性," 第29回応用物理学学会学術講演会予稿集, 18p-E-12, 98(1968).
- 14) 後藤達美, 高橋 忠, "連続Xe II レーザの磁界効果," 第16回応用物理学関係連合講演会予稿集, 3p-GH-2, (1969).
- 15) W. B. Bridges, A. N. Chester, A. S. Halsted, and J. V. Perker, "Ion laser plasmas," *Proc. IEEE*, 59, 724-737(1971).
- 16) V. F. Kitaeva, A. N. Odintsov, and N. N. Sobolev, "Continuously operating argon ion lasers," *Sov. Phys. Uspekhi*, 99, 669-730(1970).(Translation)
- 17) H. R. Luthi and W. Seelig, "Stability limits of high power ion laser discharge," *J. Appl. Phys.*, 48, 4992-4927(1977).
- 18) C. P. Wang and Shao Chi Lin, "Experimental study of argon ion laser discharge at high current," *J. Appl. Phys.*, 43, 5068-5073(1972).

- 19) G. N. Alferov, V. I. Donin, and B. Ya. Yurshin, "CW argon laser with 0.5 kW output power," JE TP Lett., 18, 369-370(1973).
- 20) H. Muuss and W. Skolaut, "Continuous 250 W argon ion laser," Appl. Phys., 17, 417-419(1978).
- 21) V. I. Donin, A. F. Shipilov, and V. A. Grigorev, "High power CW ion lasers with an improved service life," Sov. J. Quantum Electron., 9, 210-212(1979).
- 22) H. R. Luthi, "Continuous high-power uv laser," J. Appl. Phys., 48, 664-666(1977).
- 23) 笠松充男, "大出力Arイオンレーザーとその問題点," 電子技術総合研究所彙報, 41, 938-944(1977).
- 24) 小林 功, "高出力アルゴンイオンレーザー," レーザー研究, 10, 451-460(1982).
- 25) J. Hecht, "Ion laser in review, Ion laser product matrix," Lasers & Applications, 3, 55-61, 63-67(1984).
- 26) 後藤達美, 高橋 忠, 松田昌康, 嶋田隆司, "空冷アルゴンイオンレーザー装置," 東芝レビュー, 33, 425-428(1978).
- 27) 後藤達美, 高橋 忠, 松田昌康, 坂本嘉男, 山本 勉, "アルゴンイオンレーザー装置," 東芝レビュー, 28, 1148-1152(1973).
- 28) 後藤達美, 溝淵靖夫, "DC励起Ar⁺レーザーの諸特性," 昭和43年電気四学会連合大会予稿集, 1446, 1700(1968).
- 29) 後藤達美, 溝淵靖夫, "Ar⁺レーザーのスペクトル磁界効果," 第15回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31a-F-9, 69(1968).
- 30) 高橋 忠, 後藤達美, "イオンレーザーにおける共振器の熱変形," 昭和44年電気四学会連合大会予稿集, 1676, 1965(1969).
- 31) 高橋 忠, 後藤達美, "イオンレーザーの単一周波数化," 第30回応用物理学学会学術講演会予稿集, 11p-N-8, 208(1969).
- 32) 後藤達美, 高橋 忠, "Ar⁺レーザーの進行波発振," 第18回応用物理学関係連合講演会予稿集, 1p-C-13, 109(1971).
- 33) 後藤達美, 林 俊治, "単一周波数リングレーザー発振," 第32回応用物理学学会学術講演会予稿集, 2a-C-7, 103(1971).
- 34) 後藤達美, 高橋 忠, 林 俊治, "稀ガスイオンレーザーの連続紫外発振特性," 昭和47年度電子通信学会全国大会予稿集, 881, 953(1972).
- 35) 後藤達美, 松田昌康, 坂本嘉男, 原田秀夫, "アルゴンイオンレーザー装置," 昭和48年電気四学会東海支部連合大会予稿集, 26p-F-1, 105(1973).
- 36) 後藤達美, 松田昌康, "アルゴンイオンレーザー装置の安定度," 昭和48年電気四学会関西支部連合大会予稿集, G10-13, G271(1973).
- 37) 後藤達美, 松田昌康, "単一周波数発振アルゴンイオンレーザー装置の周波数安定度," 昭和49年度電子通信学会全国大会予稿集, 1073, 1076(1974).
- 38) 後藤達美, 林 俊治, "小形アルゴンイオンレーザーの利得特性," 昭和53年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 749, 4-6(1978).
- 39) 兼子 峻, 片桐修平, 嶋田隆司, 後藤達美, "内部鏡形アルゴンレーザー管 LG-2211," 昭和53年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 750, 4-7(1978).
- 40) 後藤達美, 藤田秀夫, "円筒状内部ミラー形空冷Ar⁺レーザー管," 昭和56年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 901, 4-96(1981).

- 41) 藤田秀夫, 後藤達美, "空冷アルゴンレーザーの出力安定化," レーザー学会学術講演会第2回年次大会予稿集, 21a I 2, 15(1982).
- 42) 佐藤三郎, 藤田秀夫, 後藤達美, 松田昌康, "空冷Ar⁺レーザーのスイッチング特性," 第44回応用物理学学会学術講演会予稿集, 26a-Q-3, 128(1983).
- 43) T. Goto, T. Hayashi, S. Kobayashi, and T. Kamiya, "Highly efficient argon ion laser," Proc. International Conf. Laser '84, 280-282(1984).
- 44) 林 俊治, 高須克二, 後藤達美, "アルゴンイオンレーザーにおける磁界効果," レーザー学会学術講演会第4回年次大会予稿集, 10p II 4, 69(1984).
- 45) 小林重昭, 神谷武志, 林 俊治, 後藤達美, "小形アルゴンレーザーの高効率化(横方向磁界効果)," レーザー学会学術講演会第5回年次大会予稿集, 30a II 10, 100(1985).
- 46) Shigeaki Kobayashi, Takeshi Kamiya, Toshiharu Hayashi, and Tatsumi Goto, "Power enhancement for argon II narrow tube lasers by a transverse magnetic field," Appl. Phys. Lett., 46, 925-927(1985).
- 47) 林 俊治, 後藤達美, 小林重昭, 神谷武志, "超小形・高効率アルゴンレーザー管," 第46回応用物理学学会学術講演会予稿集, 3a-K-3, 132(1985).
- 48) 小林重昭, 神谷武志, 林 俊治, 後藤達美, "小形アルゴンレーザーの横方向磁界効果," 第46回応用物理学学会学術講演会予稿集, 3a-K-4, 132(1985).
- 49) W. B. Tiffany, R. Targ, and J. D. Foster, "Kilowatt CO₂ gas transport laser," Appl. Phys. Lett., 15, 91-93(1969).
- 50) T. F. Deutsch, F. A. Horrigan, and I. Rudko, "Operation of high pressure flowing CO₂ lasers," Appl. Phys. Lett., 15, 88-91(1969).
- 51) M. W. Sasnett, "Comparing industrial CO₂ lasers," Lasers & Applications, 3, 85-90(1984).
- 52) R. E. Beverly III, "Kinetic modeling of a fast-axial-flow CO₂ laser," Opt. Quantum Electron., 14, 25-40(1982).
- 53) M. Yessik, and J. A. Macken, "Helical-flow CO₂ laser," J. Appl. Phys., 54, 1693-1698(1983).
- 54) 高橋 忠, 柿崎克行, 中村 英, "加工用10kW CO₂レーザー," 東芝レビュー, 40, 959-962(1985).
- 55) N. Tabata, H. Nagai, H. Yoshida, M. Hishii, M. Tanaka, Y. Myoi, T. Akida, and T. Takahashi, "High power CO₂ Lasers for FMS," ICALEO'84 Digest, Laser Inst, America, 44, 238-245(1984).
- 56) N. G. Basov, E. P. Gletov, V. A. Danilychev, O. M. Kerimov, M. M. Malyshev, and A. M. Soroka, "High-power electroionization CO₂ and CO lasers for industrial applications," IEEE J. Quantum Electron., QE-21, 342-358(1985).
- 57) V. E. Merchant, "Development of a new 20 kW CO₂ laser," Laser Focus, 21, 162-166(1985).
- 58) A. J. Demaria, "High power CO₂ lasers," Proc. IEEE, 61, 731-748(1973).
- 59) 松田昌康, 後藤達美, "100 W級炭酸ガスレーザー装置 LAC-203形," 昭和56年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 902, 4-97(1981).
- 60) P. O. Clark, and J. Y. Wada, "The influence of xenon on sealed-off CO₂ lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-4, 263-266(1968).
- 61) F. M. Taylor and A. Lombardo, "Effect of a heated platinum wire on a sealed CO₂ laser system," Appl. Phys. Lett., 11, 180-182(1967).

- 62) 佐藤三郎, 後藤達美, "CO₂ レーザ管の長寿命化," 第 43 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 30a-A-6, 110(1982).
- 63) 佐藤三郎, 後藤達美, "30 W クラス内部鏡方式ガス封止CO₂ レーザ管の特性," 第 30 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 4a-1-6, 147(1983).
- 64) J. J. Degan, "The waveguide laser: a review," Appl. Phys., 11, 1-13(1976).
- 65) R. L. Abrams, "Waveguide gas lasers," Laser Handbook, 3, North-Holland Publishing Comp., 43-8(1979).
- 66) J. J. Lachambre, J. Macfarlane, G. Otis, and P. Lavigne, "A transversely rf-excited CO₂ waveguide laser," Appl. Phys. Lett., 32, 652-653(1978).
- 67) P. W. Smith, O. R. Wood, II, P. J. Maloney, and C. R. Adams, "Transversely excited waveguide gas lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-17, 1166-1181(1981).
- 68) A. L. S. Smith, H. Shields, and A. E. Webb, "Cathode materials for sealed CO₂ waveguide lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-19, 815-820(1983).
- 69) D. He and D. R. Hall, "A 30W radio frequency excited waveguide CO₂ laser," Appl. Phys. Lett., 43, 726-728(1983).
- 70) 佐藤三郎, 林 俊治, 藤田秀夫, 後藤達美, "導波路形CO₂ レーザの特性—細管断面積の効果—," 第 30 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 4a-1-7, 148(1983).
- 71) 佐藤三郎, 林 俊治, 藤田秀夫, 後藤達美, "導波路形CO₂ レーザの特性—Xe 混合効果—," 第 44 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 25p-Q-9, 125(1983).
- 72) L. A. Newman, R. A. Hart, J. T. Kennedy, A. J. Cantor, and A. J. Demaria, "High Power coupled CO₂ waveguide laser array," Appl. Phys. Lett., 48, 1701-1703(1986).
- 73) V. A. Seguin, H. J. J. Seguin, and C. E. Capjack, "Electrical characteristics of a MAGPIE coaxial laser discharge system," Appl. Opt., 24, 1265-1269(1985).
- 74) A. K. Nath, H. J. J. Seguin, and V. A. Seguin, "Optimization studies of a multikilowatt PIE CO₂ laser," IEEE J. Quantum Electron., QE-22, 268-274(1986).
- 75) 後藤達美, 木村盛一郎, "50W 級炭酸ガスレーザと加工応用," 東芝レビュー, 35, 37-41(1980).
- 76) レーザ装置調査専門委員会編, "レーザ装置とその応用技術の現状," 電気学会技術報告, (II 部) 第 160 号, (1983). <委員, 分筆>
- 77) 今川 宏, 安斉和雄, 佐藤三郎, 後藤達美, "赤外ファイバパワー伝送路の放熱設計検討," 第 30 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 6p-X-12, 81(1983).
- 78) A. K. Laflamme, "Double discharge excitation for atmospheric pressure CO₂ lasers," Rev. Sci. Instrum., 41, 1578-1581(1970).
- 79) J. A. Beaulieu, "High peak power gas lasers," Proc. IEEE, 59, 667-674(1971).
- 80) H. M. Lambertson and P. R. Pearson, "Improved excitation techniques for atmospheric pressure CO₂ lasers," Electronics Letters, 7, 141-142(1971).
- 81) P. R. Pearson and H. M. Lambertson, "Atmospheric pressure CO₂ lasers giving high output energy per unit volume," IEEE J. Quantum Electron., QE-8, 145-149(1972).
- 82) R. Dumanchin, M. Michon, J. C. Francy, G. Boudient, and J. Rocca-Serra, "Extension of TEA-CO₂ laser capabilities," IEEE J. Quantum Electron., QE-8, 163-165(1972).
- 83) O. P. Judd, "An efficient electrical CO₂ laser using preionization by ultraviolet radiation," Appl. Phys. Lett., 22, 95-96(1973).

- 84) M. C. Richardson, A. J. Alcock, K. Leopold, and P. Burtyn, "A 300 J multigigawatt CO₂ laser," IEEE J. Quantum Electron., QE-9, 236-243(1973).
- 85) Shao-Chi Lin and J. I. Levatter, "X-ray preionization for electric discharge lasers," Appl. Phys. Lett., 34, 505-508(1979).
- 86) N. Menyuk and P. F. Moulton, "Development of a high-repetition-rate mini-TEA CO₂ laser," Rev. Sci. Instrum. 51, 216-220(1980).
- 87) V. Yu. Baranov, S. A. Kazakov, D. D. Malyuta, V. S. Mezhevov, A. P. Napartvich, V. G. Nisiev, M. Yu. Orlov, A. I. Starodubtev, and A. N. Starostin, "Average power limitations in high-repetition rate pulsed gas lasers at 10.6 and 16 μm," Appl. Opt., 19, 930-936(1980).
- 88) K. Matsumoto, K. Sueoka, M. Obara, and T. Fujioka, "A UV-preionized high-repetition-rate TEA CO₂ laser," Jpn. J. Appl. Phys., 19, 1959-1968(1980).
- 89) K. R. Rickwood and J. McInnes, "High repetition rate mini TEA CO₂ laser using a semiconductor preionizer," Rev. Sci. Instrum. 53, 1667-1669(1982).
- 90) R. T. Brown, "Mini-TEA 1,000-Hz CO₂ laser," Appl. Opt., 23, 2485-2487(1984).
- 91) V. Yu. Baranov, G. F. Drovok, V. A. Kuz'menko, D. D. Malyuta, and V. S. Mezhevov, "Pulse periodic CO₂ laser with a 1.5kHz pulse repetition frequency," Sov. J. Quantum Electron., 14, 574-575(1984).
- 92) K. Jayaram and A. J. Alcock, "X ray preionization of self-sustained, transverse excitation CO₂ laser discharge," J. Appl. Phys., 58, 1719-1726(1985).
- 93) K. Midorikawa, M. Okada, H. Tashiro, and S. Namba, "Measurements of x-ray dose required for multi-atmospheric pressure CO₂ laser discharge," Appl. Phys. Lett., 48, 1237-1239(1986).
- 94) 佐藤三郎, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザの発振特性," 第 44 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 25p-Q-13, 127(1983).
- 95) 佐藤三郎, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザの性能向上," レーザー学会学術講演会第 4 回年次大会予稿集, 9a II 4, 54(1984).
- 96) 佐藤三郎, 後藤達美, "マーカー用TEA CO₂ レーザ," 第 31 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-L-3, 137(1984).
- 97) 佐藤三郎, 石田修一, 森田 昇, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザの性能向上—放電安定化対策—," 第 45 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 12p-M-4, 131(1984).
- 98) 後藤達美, 佐藤三郎, 石田修一, "TEA CO₂ レーザ装置," 東芝レビュー, 39, 1059-1062(1984).
- 99) 佐藤三郎, 石田修一, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザマーカー," レーザー学会学術講演会第 5 回年次大会予稿集, 29a II 6, 68(1985).
- 100) 佐藤三郎, 大熊慎治, 後藤達美, "紫外線予備電離TEA CO₂ レーザの特性 (I) —予備電離特性—," 第 32 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-ZC-6, 167(1985).
- 101) 大熊慎治, 伊藤弘, 佐藤三郎, 石田修一, 藤森康朝, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザの封じ切り特性," 第 32 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-ZC-7, 167(1985).
- 102) 佐藤三郎, 大熊慎治, 高木茂行, 後藤達美, "TEA CO₂ レーザの封じ切り動作特性 (II)," 第 46 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 3p-K-4, 135(1985).
- 103) 佐藤三郎, 大熊慎治, 後藤達美, "TEA-CO₂ レーザの開発動向とその応用," 電気学会光応用・視覚研究会資料, LAV-90-43, 31-40(1985).

- 104) 佐藤三郎, 後藤達美, 石田修一, 藤森康朝, 大熊慎治, 高木茂行, 伊藤 弘, "TEACO₂ レーザマーカー," 電気学会 光・量子デバイス研究会資料, OQD-85-68, 31(1985).
- 105) 佐藤三郎, 大熊慎二, 高木茂行, 内田 裕, 石田修一, 後藤達美, "80W TEACO₂ レーザの開発," レーザー学会学術講演会第6回年次大会予稿集, 20p 1 B1, 42(1986).
- 106) 内田 裕, 大熊慎治, 佐藤三郎, 後藤達美, "TEACO₂ レーザの封じ切り特性 (III)," 第33回応用物理学関係連合講演会予稿集, 1p-L-14, 182(1986).
- 107) 佐藤三郎, 後藤達美, "TEACO₂ レーザ発振器," 電気・情報関連学会連合大会予稿集, 10-4, 2-63(1986).
- 108) 田代英夫, 緑川克美, 長坂啓吾, 豊田浩一, 難波 進, "CO₂ レーザと励起赤外水素ラマンレーザ," レーザー学会研究会報告資料, RTM-86-12, (1986).
- 109) J. I. Levatter and Z. Li, "Low energy x-ray preionization source for discharge excited lasers," Rev. Sci. Instrum., 52, 1651-1654(1981).
- 110) K. Jayaram and A. J. Alcock, "X-ray preionization of self-sustained, transverse excitation CO₂ laser discharges," J. Appl. Phys., 58, 1719-1726(1985).
- 111) P. E. Dyer and D. N. Raouf, "Axial X-ray preionization of a 10 atmosphere pressure TE CO₂ laser," Optics Commun., 53, 36-38(1985).
- 112) 川畑 剛, 山田家和勝, 笠松充男, 内田 裕, 後藤達美, "放電励起F₂ レーザの実用化 (1)," 第37回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28p-L-12, 836(1990).
- 113) 内田 裕, 山田家和勝, 笠松充男, 中牟田浩典, 後藤達美, "放電励起F₂ レーザの実用化 (2)," 第51回応用物理学学会学術講演会予稿集, 28p-L-10, 875(1990).
- 114) M. Kakehata, T. Uematsu, F. Kannari, and M. Obara, "Efficiency characterization of vacuum ultraviolet molecular fluorine(F₂) laser (157nm) excited by an intense electric discharge," IEEE J. Quantum Electron., 27, 2456-2464(1991).
- 115) H. G. Heard, "Ultra-violet gas laser at room temperature," Nature, 200, 667(1963).
- 116) A. W. Ali, A. C. Kolb, and A. D. Anderson, "Theory of the pulsed molecular nitrogen laser," Appl. Opt., 6, 2115-2119(1967).
- 117) J. P. Singh and S. N. Thakur, "Nitrogen laser-A review," J. Sci. Industrial Res., 39, 613-624 (1980).
- 118) H. Hokazono, K. Midrikawa, M. Okada, and T. Fujioka, "Theoretical analysis of a self-sustained discharge pumped XeCl laser," J. Appl. Phys., 56, 680-690(1984).
- 119) J. Coutts and C. E. Webb, "Stability of transverse self-sustained discharge-excited long-pulsed XeCl lasers," J. Appl. Phys., 59, 704-710(1986).
- 120) H. R. Luthi, W. Seeling, and J. Steinger, "Power Enhancement of Continuous Ultraviolet Lasers," Appl. Phys Lett., 31, 670-672(1977).
- 121) M. S. Chiu, C. C. Chou, and J. R. Niu, "New UV and Visible Laser Oscillation in Chlorine, Oxygen, Nitrogen, and Titanium," IEEE J. Quantum Electron., QE-18, 1131-1137(1982).
- 122) C. K. Rhodes, (Ed) "Topics Applied Physics Excimer Lasers," 30, Springer-Verlag, Tokyo(1984).
- 123) 豊田浩一, 村原正隆, (監修) "エキシマレーザ最先端応用技術," シー, エム, シー出版, (1986).
- 124) N. G. Basov, V. A. Danilychev, Yu. M. Popov, and D. D. Khodkevich, "Laser operating in the vacuum region of the spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam," Soviet Phys. JETP Lett., 12, 329(1970).
- 125) P. W. Hoff, J. C. Swingle, and C. K. Rhodes, "Observation of stimulated emission from high-pressure krypton and argon/xenon mixtures," Appl. Phys. Lett., 23, 245(1973).
- 126) W. M. Hughes, J. Shannon, and R. Hunter, "126.1 nm molecular argon laser," Appl. Phys. Lett., 24, 488-489(1974).
- 127) C. W. Werner and E. V. George, "Dynamic model of high pressure rare gas excimer lasers," Appl. Phys. Lett., 25, 235-238(1974).
- 128) S. K. Searles and G. A. Hart, "Stimulated emission at 281.8 nm from XeBr*," Appl. Phys. Lett., 27, 243-245(1975).
- 129) R. Burnham and N. Djeu, "Ultraviolet preionized discharge pumped lasers in XeF, KrF, and ArF," Appl. Phys. Lett., 29, 707-709(1976).
- 130) 佐藤卓蔵, "希ガスハライドエキシマレーザの開発動向," レーザー研究, 13, 927-938(1985).
- 131) 短波長レーザ技術調査専門委員会編, "短波長レーザ技術の現状," 電気学会技術報告, (II部) 第217号, (1986).
- 132) 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "放電励起エキシマレーザの発振特性," レーザー学会学術講演会第5回年次大会予稿集, 21a 1 2, 52(1985).
- 133) 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "放電励起エキシマレーザの発振特性," 第32回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31p-ZC-4, 174(1985).
- 134) M. R. Osborne and H. R. Huchinson, "Long Pulse operation and premature termination of a high-power discharge-pumped XeCl laser," J. Appl. Phys., 59, 711-715(1986).
- 135) R. S. Taylar and K. E. Leopold, "Microsecond duration optical pulses from a UV-preionized XeCl laser," Appl. Phys. Lett., 47, 81-83(1985).
- 136) C. H. Fisher, M. J. Kushner, T. E. DeHart, J. P. McDaniel, R. A. Petr, and J. J. Ewing, "High efficiency XeCl laser with spiker and magnetic isolation," Appl. Phys. Lett., 48, 1574-1576(1986).

第2章 エキシマレーザの高繰り返し化基礎技術開発

2.1. はじめに

エキシマレーザは、実用レベルでの高繰り返し化が実現できれば、アブレーションなどにおいて高速微細加工を可能にし、半導体の超微細加工用、光化学反应用、同位体分離用、医療用などへの飛躍的展開が期待できる。しかし、通常の動作条件下では、出力パルス幅が数10 nsときわめて短い、すなわち作用時間が短いことが欠点と思われる。そこで、産業応用を考えると、多くの場合生産性や経済性を上げることが重要であり、したがって高繰り返し化がもっとも有効な方策の一つとなる。

このため、エキシマレーザの開発で先行した欧米において、早くよりこの実現を目指した研究的試みが続けられてきた。しかし、前記通産大プロに着手した時点では、それまでの国内外研究経過から見て、kHz台の高繰り返し動作は絶望的とも言える状態であった。繰り返し数を増大させていくと、先行パルス放電による種々の生成物が、後続のパルス放電時まで放電部やその近傍、電極表面などに残留する。この影響で放電電流の局所的集中が発生して、放電空間でレーザ励起に有効な均一でグロー状の放電維持ができなくなる。これには、電力用の大電流遮断器と同じように、放電に晒されたガスを強制的に放電部から吹き飛ばして置換する方法が、経験的にもっとも有効とされてきた。

表2-1 高繰り返し化技術の現状・動向

発表年	研究機関	動作条件	結果
1979	C. P. Wang, Aerospace Corp. (米)	XeF, (UV, 25m/s) 1.4×0.4×30 (cm)	2 kHz, 0.1 Sec. 12 mJ/パルス
1980	T. S. Fahren G T E (米)	KvF, (コロナ, 50m/s) 2×1×77 (cm)	1 kHz, 数分間 平均出力 200W
1982	I. Smilanski M S N M (米)	XeCl, (UV) サイラトロン+1段MPC	750Hz, 数時間 平均出力 3.5W
1984	V. Yu. Baranov kvan. Elect. (ソ連)	XeCl, (UV, 90m/s) 3×0.8×70 (cm) 2段	0.6~1 kHz, 平均出力 80W
1986	B. L. Fontaine I F M M (仏)	XeCl, (X線, 80m/s) 2.5 × 30 (cm)	2 kHz, 0.1 Sec. 150mJ/パルス (Max.)
1986	R. R. Butcher X M R I n c. (米)	XeCl, (コロナ) 2.5 × 75 (cm)	500Hz, 平均出力 300W
1987	B. Mass X M R I n c. (米)	XeCl, (コロナ) SCR + 4段MPC	500Hz, 平均出力 150W
1987	C. P. Christensen Univ. Maryland (米)	XeCl, (0 m/s) μ波励起, WG細管	8 kHz, 平均出力 11 mW

(動作条件の()内は予備電離方式、ガス流速)

表2-1は、1987年時点での海外における高繰り返しエキシマレーザの研究状況をまとめたものである。高繰り返しの記録値を狙う最初の研究は、まず米国において1970年代末に始まった。

最初のkHz台動作は、早くも1978年初にGTE Sylvania Inc. (米)のFahlenが、放電チャンバ内に送風機を入れてガスを強制的に70 m/sの高速で循環させ、放電部のガスを置換することにより、KrFエキシマで1 kHz、平均出力10 Wを実現した。¹⁾ 続いて、Aerospace Corp. (米)のWangらは、高压タンクからノズルを通し放電部に流速25 m/sでガスを供給し、XeFエキシマで、2 kHz、0.1秒間の動作を行った。この出力は12 mJ/パルスで、50%程度のパルス毎出力変動があり、発振効率は約0.2%ときわめて低いものである。²⁾

さらに、Fahlenは1980年に、大出力ガス循環型CO₂レーザ様の装置にて、数分間程度の短時間動作ではあるが、KrFエキシマレーザ(248 nm)にて1 kHz、200 Wの大出力化を達成したと発表し、実用化への意欲を示した。しかし、これ以後には顕著な研究レベルの進展は見られない。^{3) - 7)}

一方、欧州においても、産業応用への展開に適応できる規模の高繰り返し大出力装置開発が始まった。とくに、これらの研究機関では、旧ソ連のK I A E (I. V. Kurchatov Inst. of Atomic Energy)が先行し、Baranovらの研究報告が相次ぎ、ガス流や電極材料、予備電離などと放電安定性との関係が部分的には明らかにされ、'80年代後半には繰り返し数500 Hz、400 W程度を定常動作で得られたという状況となった。^{8) - 16)}

同様に他の諸研究機関でも、まずはkHz台の安定動作を目指した開発が始まり、^{17) - 20)}これが発展して、欧州各国の研究協力によるEUREKA計画の一環とし、継続的開発が進められるようになった。この段階では、IMFM (Institut de M'ecanique des Fluides de Marseille, (仏))で、Sentisらの研究グループが、主にガス流の乱れの影響を詳細に検討し始めた。

このような研究開発の背景から、前述のように、通産大プロ研究開発の目的は、kHz台でのエキシマレーザ高繰り返し動作技術を確立し、部材加工への早期実用化を世界に先駆けて推進すると共に、多くの主要産業分野において、新しい応用対象の開拓を可能にすることとした。開発目標値は、これまでの記録値を飛躍的更新する5 kHz以上と設定されたが、用途からすればレーザ出射時間比率では10⁴程度であり、必ずしも目的に十分答えるものとは思われない。

しかし、高繰り返し動作域での放電不安定性や出力飽和現象などについて、まだ研究レベルにおいてさえ、原因の究明が進んでいるとは思えない状況にあり、目標達成までには多くの困難な技術課題が山積している。そこで、この突破口を開くため、まず高繰り返し化阻害要因の解明に焦点を合わせて、以下のように高繰り返し化に向けた諸基礎技術検討、実験を順次進め、技術の蓄積を図った。^{21) - 58)}

一方、この時点では、磁性材料の飽和現象を使って放電電流のパルス幅を圧縮し、レーザ発振の効率を向上させたり、サイラトロン電流立ち上がり速度を遅くしてその長寿命化を図る、磁気パルス圧縮(MPC: Magnetic Pulse Compression)、あるいは磁気パルスアシスト(MPA: Magnetic Pulse Assist)回路方式などの実用的新技術が、多数の欧米企業により製品に組み込まれ始めていた。出力の低いものでは、最大繰り返し数が500 Hzの市販製品も登場してきた。古くには、駆動回路に必要なスイッチ素子として、高電圧を印加した電極間に外部信号で放電を点弧させるギャップスイッチが使われていたが、高繰り返し化には寿命や保守性が問題で、サイラトロンがこれに代わってきた。

しかし、サイラトロンの許容動作域は、電流立ち上がり速度、最大印加電圧、および繰り返し数の積を一定指標値以内にする条件で限定される。したがって、市販製品1本当たりでは、レーザ平均出力50 W程度が限界とされており、高繰り返しかつ大出力レーザ装置では多数本を同時に駆動する必要がある。また、サイラトロンの寿命は10⁸ショット程度とされていたので、多数本を同時に使うことは、信頼性、コスト、保守性などから実用の難点になる。

一方、高速・大電力スイッチ用のサイリスタなど従来の半導体素子は、スイッチング速度がサイラトロンに比較して1~2桁以上遅いため、この代替ができなかった。しかし、前述のMPC回路方式を使い、3段程度の多段MPCにしてこれと組み合わせることにより、パルス立ち上がりを1桁以上高速化できることが実証され、電源の"全固体化"に対する実用化の期待が高まった。^{59) - 63)}

そこで、本研究開発では、着手時に5 kHz発振を実現させるための要素技術ポイントを、図2-1のようにまとめた。各要素技術は、互いに強い相関があるため独立には開発検討を進められないので、それらの有機的集積化を図り、総合的に適合化することが最終的ポイントになるであろう。

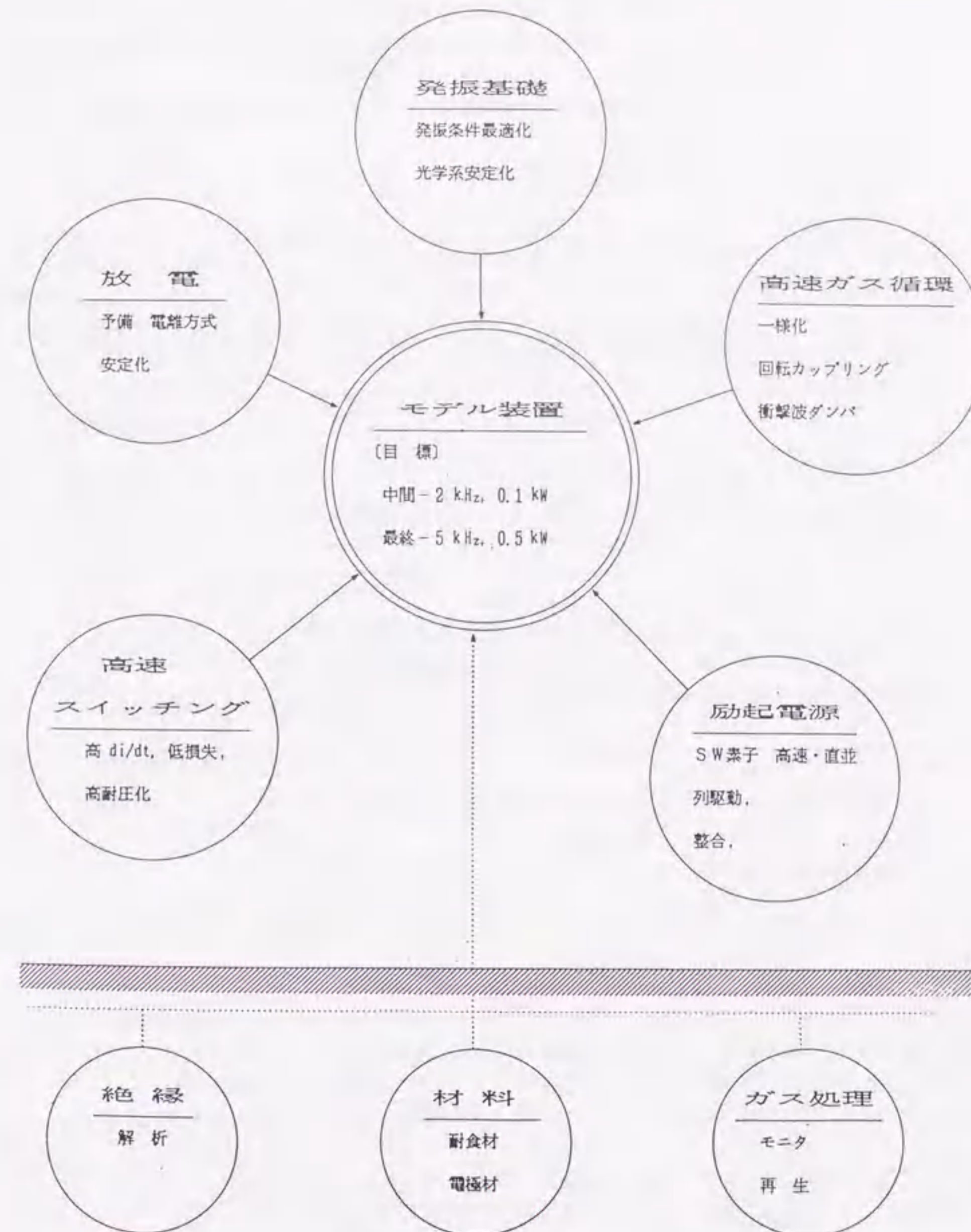


図2-1 高繰り返し化に必要な要素技術

2.2. 高繰り返し化基礎実験用装置

上述の諸文献報告による開発結果を技術分析して、目標の5 kHz以上、500 W高出力エキシマレーザを開発するには、改めて基礎技術から検討する必要があることを強く感じた。そこで筆者らは、プローブ法によるUV予備電離電子密度の測定、ダブルパルス放電動作での先行パルスによる影響、放電中でのガス密度揺らぎ、高繰り返し放電での局所電流集中などを調べて、放電不安定化の原因究明を主体にした諸研究を積み上げた。また、研究に止めるのではなくその本格的実用化を主目的にしているため、予測が困難な問題の発生までも考えておく必要がある。^{9)・10)・11)} その主要なものを挙げると次のようになり、レーザ動作に先行あるいは並行して基礎実験による検討を進めた。

2.2.1. 技術開発のポイント

(1) 予備電離

エキシマレーザの主要な技術ポイントは、放電部にある。まず、アーク状、あるいはフィラメント状の局所的な放電集中がない均一な放電を点弧させることが必要であり、これには、まず予備電離が決め手になる。一般に使われているのは、紫外線(UV)方式、コロナ放電方式、X線方式に大別され、図2-2にそれらの典型的な構成概略図を示す。

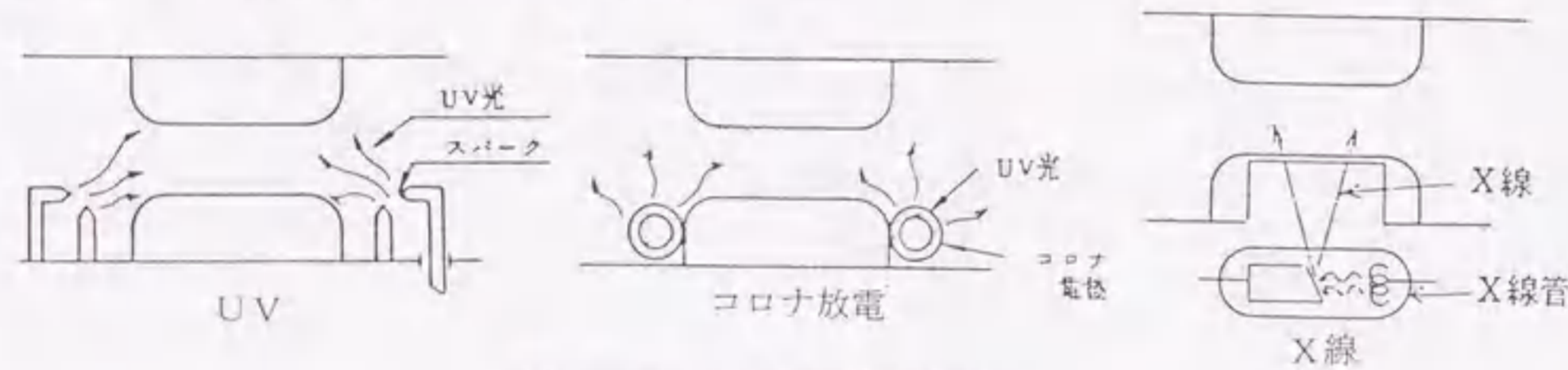


図2-2 代表的予備電離方式
表2-2(a) 予備電離方式の相違点

	コ ロ ナ	UV	X 線
予備電離 注入エネルギー(J)	0.2	0.3	75
主放電注入エネルギー との比(%)	0.1	1.1	5.8
照射方向	側面	側面	陰極背面
電極中央までの距離(mm)	25	45	35
吸収係数(cm ⁻¹)	0.3	0.3	0.1
生成電子対数(cm ⁻³)	~10 ⁹	10 ⁸ ~10 ⁹	~10 ⁸
使用ガス	Xe : 0.5% HCl : 0.1% Ne : 3 atm	Xe : 1.5% HCl : 0.15% Ne : 3 atm	Xe : 0.65% HCl : 0.13% Ne : 3 atm
レーザ出力(mJ)	300	240	1500
レーザ出力効率(%)	1	1.8	0.1
その他	water line		X線管線量 85 mR

表2-2(a), (b)は、開発着手当初に、各予備電離方式について、特徴や動作値などを比較したものである。製品レベルでは、大部分が簡便なピン電極放電によるUV方式を採用している。しかし、産業用には、スパッタリングで電極が消耗し、また、これがレーザ管内を汚すため、短時間で部品交換やオーバーホールが必要となり、この改善が不可欠である。他にも致命的とも言える欠点をもつことが予測され、これに代わる有力候補として、X線方式が研究レベルで種々検討され始めた。

とくに、高繰り返し動作を狙う本研究開発では、一般的なUV方式などが有効に作用するかは未知であり、独自のX線源を並行して試作することにした。それらの優位性比較諸実験の過程で、10 mR以下の低照射量で均一放電に必要な予備電離ができることなど、有力な実証結果を明らかにした。この研究結果については、別に第4章にて詳細を述べることにする。5 kHzという未知の高繰り返し領域においては、いずれの方式が適するかは検討がきわめて重要なポイントとなる。

表2-2(b) 予備電離方式の数値的比較

方式 項目	U V 光	コ ロ ナ 放 電	X-ray
予備電離強度	中程度、二重放電では強度可変	弱~中程度、強度固定(放電面積可変)	強、強度、面積共可変 高ガス圧でも可
空間密度分布	中程度の均一性	中程度の均一性	大容積でも均一
時間制御 (高繰り返し 化の容易性)	容量移行方式では容易	容易	制御クリチカル 高繰り返し化むずかしい
放電管形状 の自由度	予備電離電極の配置などに制約が多い	比較的自由	自由度大
レーザ管等 寿命	ガス寿命、予備電離電極などの消耗大	UV方式よりも長寿命	放電部、ガスの寿命大 X線管の寿命に問題あり
周辺技術等 問題点	・低スパッター長寿命の予備電離電極の開発 ・予備電離電極最適配置(空気力学的に)	・高ガス圧下でのコロナ発生効率改善	・高繰り返し、大面積のX線管の開発 ・低ジッター、高繰り返し放電回路素子

(2) 放電の均一化

一般に放電現象では、ガスの種類、組成比、圧力、印加電圧、電界分布、予備電離など種々の条件が相互に非線形的な作用をする。したがって、放電の安定化には、言うまでもなく予備電離の他に、ガスの構成、ガス流の状態、放電で発生する音波・衝撃波の処理、電極の形状や材料、電気回路のインピーダンス整合、などを最適化する必要がある。しかも、レーザ発振に適する安定な放電を点弧させるには、それなりの新たな技術的工夫を加えることが必須となる。

とくに、kHz台の高繰り返し動作では、パルス間の相互作用が強くなり、安定動作の持続がきわめて難しい。これらについても、総合的に基礎技術の確立を図ることが必要である。2.3節以下に、これらに関して行った諸基礎実験と検討結果を示す。

(3) ガス循環

放電の安定化は、低繰り返し時に安定な状態が維持されていれば、高繰り返し動作時においても、先行するパルス放電による後続放電に対する作用を新しいガスに放電に晒されたガスを置換し低減さ

せれば、基本的には可能となる。しかし、駆動モータの入力電力はガス流速の3乗に比例して大きくなるので、実用性からこのガス置換量をできるだけ少なくすることが重要ポイントとなる。また、ガス置換の限界値は、放電メカニズムが kHz 台の高繰り返し動作領域においてまだ研究的に未知であり、その解明が課題である。

高速・大容量のガス流をチャンバ内で循環させるには、通常の低速回転送風機では、ガス流路において放電部上・下流部間の差圧を高くできず、必要なガス流速を得るに足る吐出圧力が得られないので、専用の高速回転軸流ブロア開発が必要となる。従来の研究報告では、繰り返し数 1 kHz 動作の場合、実験的にはガス循環による放電部のガス流速は 50~90 m/s としているが、これも安定性は悪い。

したがって、第1段階の目標値とした 2 kHz には、まず単純な推測でも 100 m/s 以上の均一な高速ガスを放電部に流すことが必要条件となる。さらに、ガス流を増大させれば高繰り返し化が可能との仮定が成り立っても、5 kHz では音速を越す流速が必要となる。しかし、ブロアの電気入力に前述のようにガス流の累乗に比例して増大するので、実用的な限界も考慮しなくてはならない。

また、チャンバ内のガスには腐食性の強いハロゲンガスが含まれているので、ブロア回転翼のみチャンバ内に入れ、外部からモータで高速に回転駆動する必要があり、また、この駆動力伝達方法の開発もポイントとなる。これには、永久磁石による磁気カップリングを介して、チャンバ外部からブロアを駆動するのが好ましい。

しかし、高繰り返しで長時間動作をさせる実用においては、これに関わる問題もきわめて多く残されている。磁気カップリングでは、完全非接触で、大トルク伝達を可能とする最適磁気設計が必要である。同時に、高速回転させる要求から、一般的な磁気カップリングとは比較にならないほど高度な技術に基づく、耐遠心力構造設計、耐高速回転軸受け設計を必要とし、高速回転による風損、ベアリングの信頼性、永久磁石自身の強度（飛散・破損）、内転・外転ロータの強度、振動などが大きなポイントとなる。磁気カップリングについては、前もって静特性試験（伝達トルク対回転角度特性）を行い、磁界解析・構造解析手法を用いた設計法の精度が、十分に高いことを確認し、モデル装置への適用性を明かにした。

(4) ガス条件、チャンバ材料

ガス系としては、パルス繰り返し数を上げるためのガス循環系と、ガスの状態を一定に保ち長時間安定な出力を維持するガス再生・処理系がある。化学的に活性な Cl, F などのハロゲンガスを使うために、この取扱い方法が決め手になる。放電が点弧した瞬間におけるガスの動的状態などについては、音波・衝撃波の状態はある程度調べられているものの、基礎データの蓄積がほとんどない。短時間に大エネルギーの放電入力が入力されるので、ガスに対する物理的作用のみならず化学的作用も大きく、また、これらが放電状態とも相関するため、最適化は複雑で難しい。

通常は、ハロゲンガスの混合比率を 1% 以下に設定するので、これに接するチャンバの内壁や諸部品が化学反応によりハロゲンを取り込まないように、表面処理するか、使う材料を選別するかしないと、安定な動作はできない。また、励起効率を上げるために、放電回路のインダクタンスを構造的限界まで低減させるので、電極の近傍にコンデンサや予備電離部を取り付ける。これらが、放電からの短波長発光に晒され劣化する恐れもあり、チャンバ設計には、この防御に対する配慮も重要なポイントである。

チャンバ内では、放電により生成される励起種も複雑な化学反応を行う。そこで、実際のレーザ装置内に諸材料試験片を封入し劣化試験を並行して続け、そのプロセスを解明、放電の安定な長時間動作を可能とする新しい材料を探し、あるいは処理方法の検討を行った。また、結果的には、できるだけセラミック化するような設計とした。一方、ガス系の検討は、レーザ装置の基本性能において重要であるのみならず、ガス処理・再生を含めた装置の大きさ、価格、使いやすさというような実際面の問題に対しても重要ポイントとなる。

(5) 発振技術

放電が安定に点弧できても、これがレーザ発振に適する条件を満たすかは別問題である。一般に、エキシマレーザでは大気圧以上の高封入ガス圧下での動作がレーザ発振には適するが、このようなガス圧下では、放電はアーク状に集中しやすくなる。これを一様に点弧させることが、レーザ動作の重要な技術ポイントの一つになっている。

また、多くはレーザの本質的特長とされる高コヒーレンス性が、高安定化、高効率化などと同時に要求されるので、用途に応じてこれらを最適化するべく、光学的技術を含めての開発検討が必要になる。そこで、重要な構成部品として、ミラー、ウインドウなど光学素子の高性能化を図ることも不可欠である。これらは、性能の改善が進み、また、比較的交換が容易にできることもあり、今のところあまり問題にされていない。しかし、大出力装置が長時間使われるようになれば、高耐久化が重要ポイントになると予測される。

(6) 半導体スイッチ素子と電源

高繰り返し化が実現しても、従来のようにスイッチングにサイラトロンを使うと、その寿命、保守性が問題となり、実用において致命的な阻害要因になる。高速立ち上がりのパルス放電励起を行うのに、現在はサイラトロンスイッチに勝るものはない。しかし、この寿命が $10^8 \sim 10^9$ ショット程度で交換も容易ではない。そこで、高速半導体スイッチ素子に置き換える試みが行われているが、サイラトロンと同等の性能を持つ高速大電力スイッチ素子が現存しない。

このため、それらに代替できる性能で半永久的寿命を持つ、高速・大電力半導体スイッチ素子を使ったパルス電源実用化の可能性を検討することが不可欠なポイントである。しかし、実状はまだ性能的にエキシマレーザ駆動が直接できるまでにはかなりの距離がある。そこで、本研究開発では、専用の高速半導体スイッチ素子を開発して、サイラトロンと置き換えられるかどうか実証・確認することを重要目標の一つとした。これについては、第5章で詳細を説明するので、本章では省略する。

2.2.2. 装置構成の概要

高繰り返しレーザ動作の基礎実験用として、第1段階の目標値 2 kHz を実証する目的で試作する実用モデル装置に先行し、基本的諸設計値を求めるために、高速ガス循環ができるブロアを備えた機能試作機を準備した。これを、以下ではモデル-0装置と称する。

高繰り返し化開発は欧米が先行していたが、本開発着手時点では 1 kHz 程度が研究実証の上限となっていた。筆者らも、これらについての報告文献を参考にして、同程度の繰り返し動作を可能とするガス循環ブロアをモデル-0装置に装備し、まず追試的基礎実験から始めた。しかし、これらの諸データから、本開発で目指す 5 kHz レーザ動作の実証には、かなりの開発ギャップがあり段階的解決の必要性が予測されたので、まず 2 kHz を目指すモデル-1装置を試作することにした。さらに、この諸実験結果を基に、最終段階として 5 kHz を目指したモデル-2装置製作を行うとともに、実用化に必要な要素技術開発を並行して進めることにした。

図2-3、モデル-0装置の外観写真、および本体（チャンバ）断面略図を示す。チャンバの大きさは、長さ 2,000、高さ 1,500、幅 1,000 mm で、総重量は、3,000 kg である。なお、本体上部には、

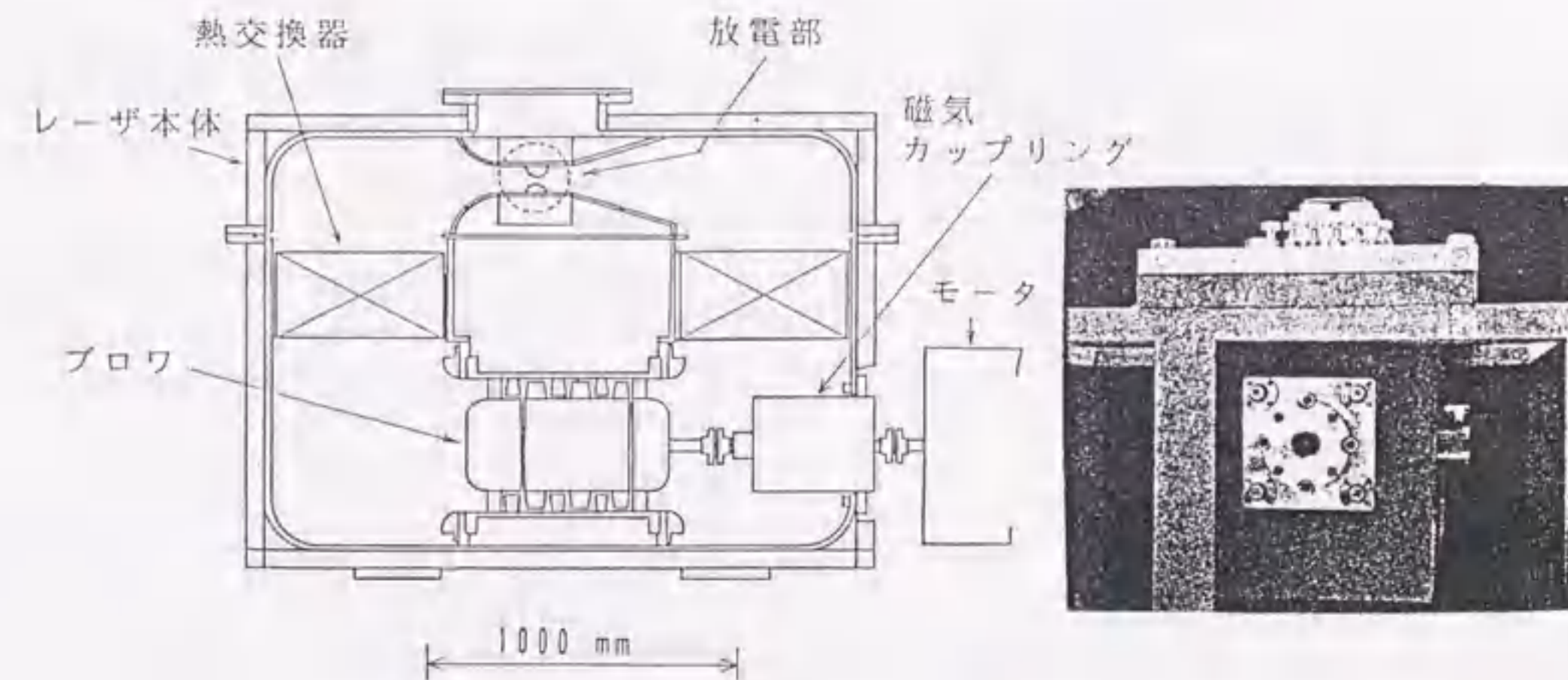


図2-3 モデル-0装置の外観写真と断面略図

サイラトロンスイッチが設置されるので、最終的な高さは 1,800 mm 程度となる。また、本装置は、レーザー発振器として稼働させるのに、モータ可変速用インバータ盤、ガスの供給・排気装置、高速スイッチング回路充電電源盤、サイラトロン制御盤等で全体構成される。^{71)~74)}

表 2-3 には、モデル 0 装置の主要な設計仕様値をまとめた。この本体は、風洞、主放電部、UV 予備電離部、熱交換器、ブロー、磁気カップリング、可変速モータシステム、光共振器、また図示されていないが、諸測定系などから構成されている。

表 2-3 モデル 0 装置の設計仕様値

[項目]	[仕様値]
・レーザーのタイプ	: UV 自動予備電離 XeCl エキシマレーザー
・レーザー出力	: 30 mJ/パルス以上
・繰り返し数	: 短時間 2 kHz 以上
・使用ガス	: Xe, HCl, He/Ne (Xe: 1.25, HCl: 0.15, He/Ne: 98.6%)
・圧力	: 絶対圧力 2.95 atm
・ガス流速	: 最大 100 m/s
・モータ	: 50 kW (空冷式)、インバータ: 100 kVA
・ガス温度	: 40 °C (放電部入口)、90 °C (同出口)
・注入電力	: 15 kW (7.5 J x 2 kHz)
・有効放電体積	: 280 L x 20 gap x 10 W (mm ³)
・通風間口	: 500 L x 20 gap (mm ²)
・送風機	: 3 段軸流ブロー (N=8000 min ⁻¹)
・送風流量	: 2.7 m ³ /s
・磁気カップリング	: 20 kgm-8000 min ⁻¹ (Sm-Co)
・電極、材質	: Ni 無垢棒加工
・風洞	: Ni クラッド SUS 304
・パッキング	: バイトンゴム
・熱交換器	: Cu+Ni メッキ
・絶縁物	: PVDF
・その他	: 流速測定ポート、観測窓、リリースバルブ等

2.2.3. ガス流特性

このモデル 0 装置の放電部におけるガス流特性は、高繰り返し動作において装置性能を決める基本的条件となる。これには、3 段軸流ブローが組み込まれており、磁気カップリングを介して、外部のインバータモータより駆動される。最大の放電部ガス循環流速は、短時間では 100 m/s 程度が得られる。また、ハロゲンガスへの耐食性をもたせるために、本体内部にはテフロンコーティング、あるいは、ニッケルメッキを施したが、まだ不完全な部分が多い。

図 2-4 は、ブロー回転数をパラメータとした主放電部でのガス流速分布であり、図に示す電極に対して端部の流速低下が 10% 程度で、比較的良い空間的均一性が得られるような構造となっている。腐食性のガスを含むレーザーガスを使用した測定を行うのは難しいため、特性測定は He ガスを使用した。ブローの性能は、マッハ数によって異なってくるが、He でもその性能が大きく変わらないことは確認している。

ガス流速の空間分布測定では、センサーとして熱線プローブとピトー管を用いて、高精度の測定をした。熱線プローブのセンサー部は、外径 6 mm の中空パイプで支持されているため、ガス流速が 100 m/s を越えると、風圧でパイプが曲がり流速を過大検知する可能性がある。ブロー特性としては、どれも非常に狭い放電電極間にレーザーガスを高速で流すのに適した特性が得られた。^{28), 30)}

一方、磁気カップリングは、一対の強力なサマリウムコバルト (Sm-Co) の永久磁石と、両磁石間にあり高速回転力を効率よく伝達できる高耐食・高耐ガス圧の隔壁とで構成され、非接触で高トルクを伝達する必要がある。結果としては、軸受部温度および振動変位量も許容範囲でとくに異常はみられず、高速回転で安定したトルクの伝達を確認できた。

2.3. 予備電離

高繰り返しレーザー動作域での最適条件を明らかにするには、前述のポイントとなる諸技術との相関があるので、できるだけ個別に検討して諸データを集積し整合する必要がある。ここでは、均一な放電を点弧させるのに、きわめて重要な役割を果たしている予備電離に関する基礎研究の結果を示す。

従来の市販装置では、主電極の近傍に配置したピン電極ギャップ間で自動的に放電を点弧させ、その UV 発光で主放電部を予備電離する、いわゆる UV 自動予備電離方式が主流となっている。これは、とくに高繰り返し動作ではピン電極の消耗に対する保守性に実用上の問題があり、その代替方式として、将来的には X 線予備電離方式などの新方式開発が不可避と思われる。しかし、これに関する実績データはほとんど無いという状況であり、このため、まずは一般的な UV 方式を高繰り返し動作領域にも適用することを基本方針とし、その機能をできるだけ明らかにする諸実験・検討をした。

2.3.1. 実験条件

第 1 段階では、単一パルス動作状態において電子密度の空間分布をより正確に測定するため静電プローブ法を用い、実際の自動予備電離式エキシマレーザー放電部において、プローブ位置を変えて電子密度の定量値を求めた。次には、高繰り返し状態での予備電離作用を明らかにして、モデル装置主放電部の最適設計を行うための予備実験をした。

これには、モデル 0 装置を用い、この放電部回路構成を図 2-5 に示す。通常の容量移行 UV 自動予備電離型で、主コンデンサ $C_s = 13.3$ nF、ピーキングコンデンサ $C_p = 11.9$ nF、充電用コイル L は 126 μ H、サイラトロンは EEV 社製 CX1625 を用いた。放電体積は放電長 280、電極間隔 20、放電幅 10 mm で、以下の実験では、レーザー出力はパイロ型パワーメータ (Moletron Inc. J50HR) と、デジタルオシロスコープ (HP 社 54111D) により測定した。この詳細な測定条件などは、すでに筆者らが報告した文献を参照されたい。^{24), 26), 38), 58)}

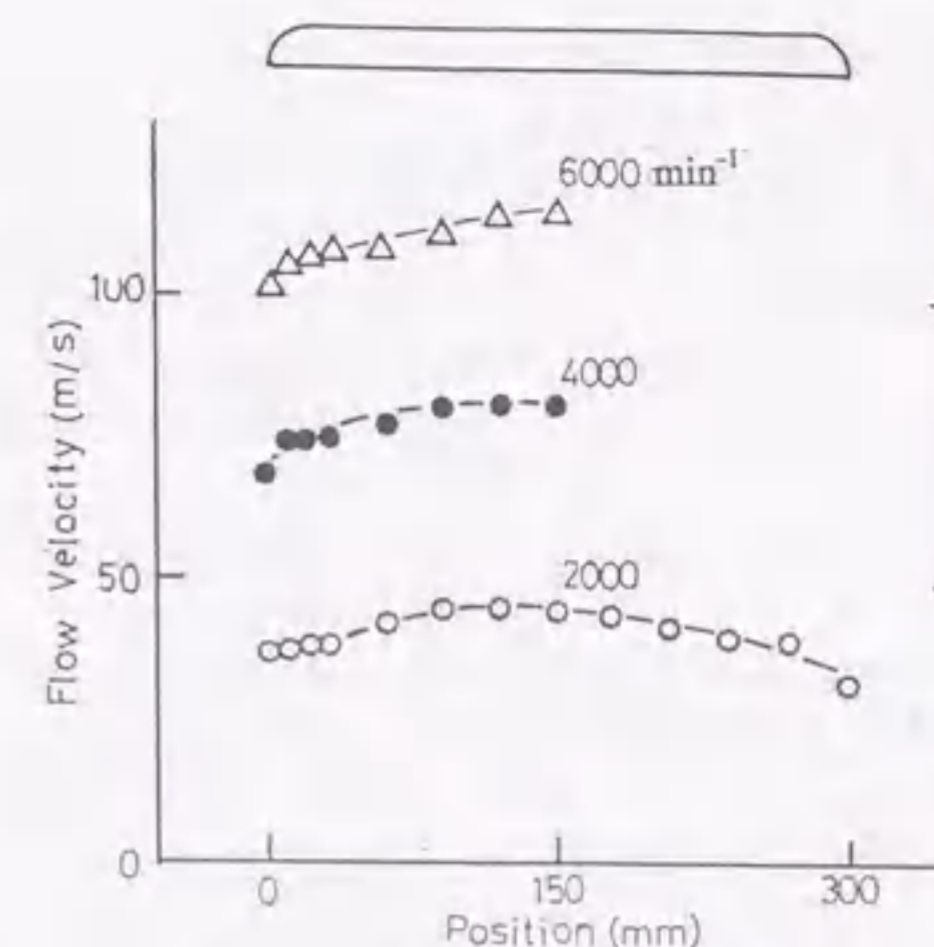


図 2-4 ガス流速の空間分布

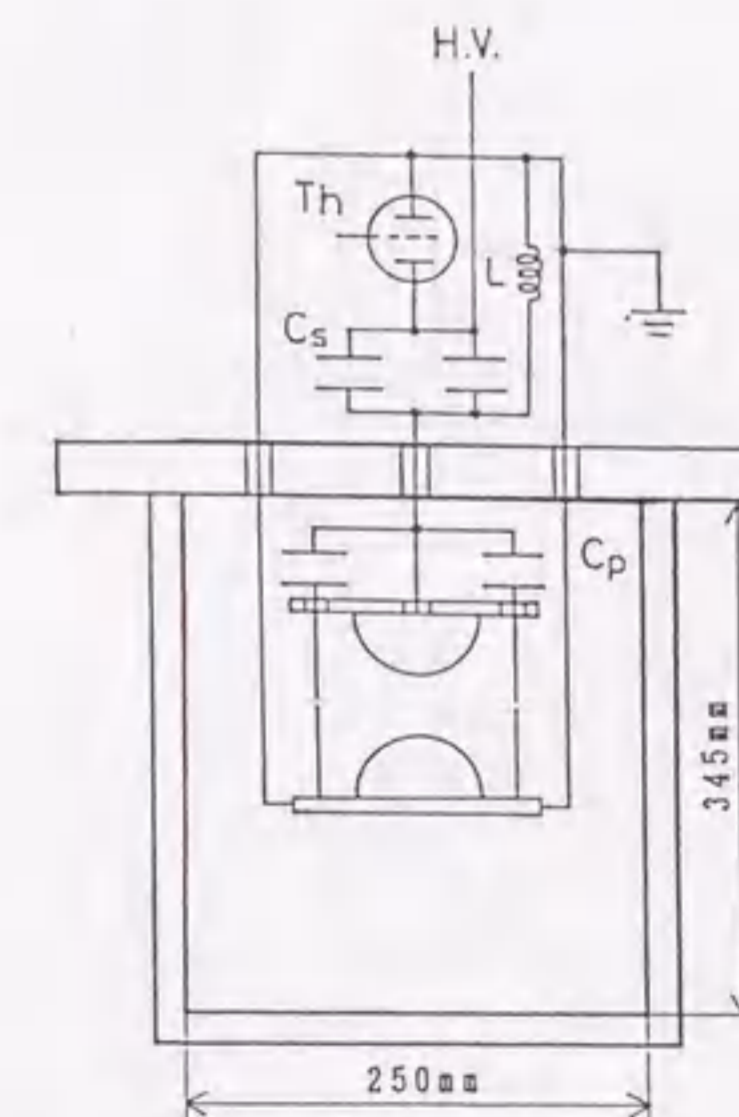


図 2-5 放電部概略図

2.3.2. 結果と検討

単一パルスによる主要な実験結果として、ピン電極放電位置からの距離に対する電子密度の減少状態を図2-6に示す。電子密度はほぼ指数関数的に減少しており、したがって、UV光は1光子吸収が支配的と考えられ、次式より吸収係数 α を求めた。

$$N_e = I \cdot Q \cdot N \exp(-\alpha \cdot P \cdot r) / r^2 \dots \dots \dots (2-1)$$

N_e : 電子密度、 I : 実効光電流、 Q : 光電離衝突断面積、 N : ガス密度、 r : UV光源からの距離、 P : 全ガス圧、 ガス混合比: Xe/HCl/He=1.5/0.2/98.3%

なお、本章以降においては、エキシマレーザに関する実験結果が主体となるので、圧力の単位は atm、あるいは kPa に統一して用いることにする。

このカーブフィティングから α を求めると、 $0.9 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ となる。そこで、 P を 2.5 atm として主電極間の光軸上での電子密度を、2種類のピン電極配置について計算し比較した。図2-7(a),(b)は、この配置を、主電極を挟んで同位置の場合、および中間にずらした場合それぞれについての結果を示す。パラメータはピン電極間隔 D であり、ピン電極-主電極(光軸)間の距離は 45 mm 一定とした。

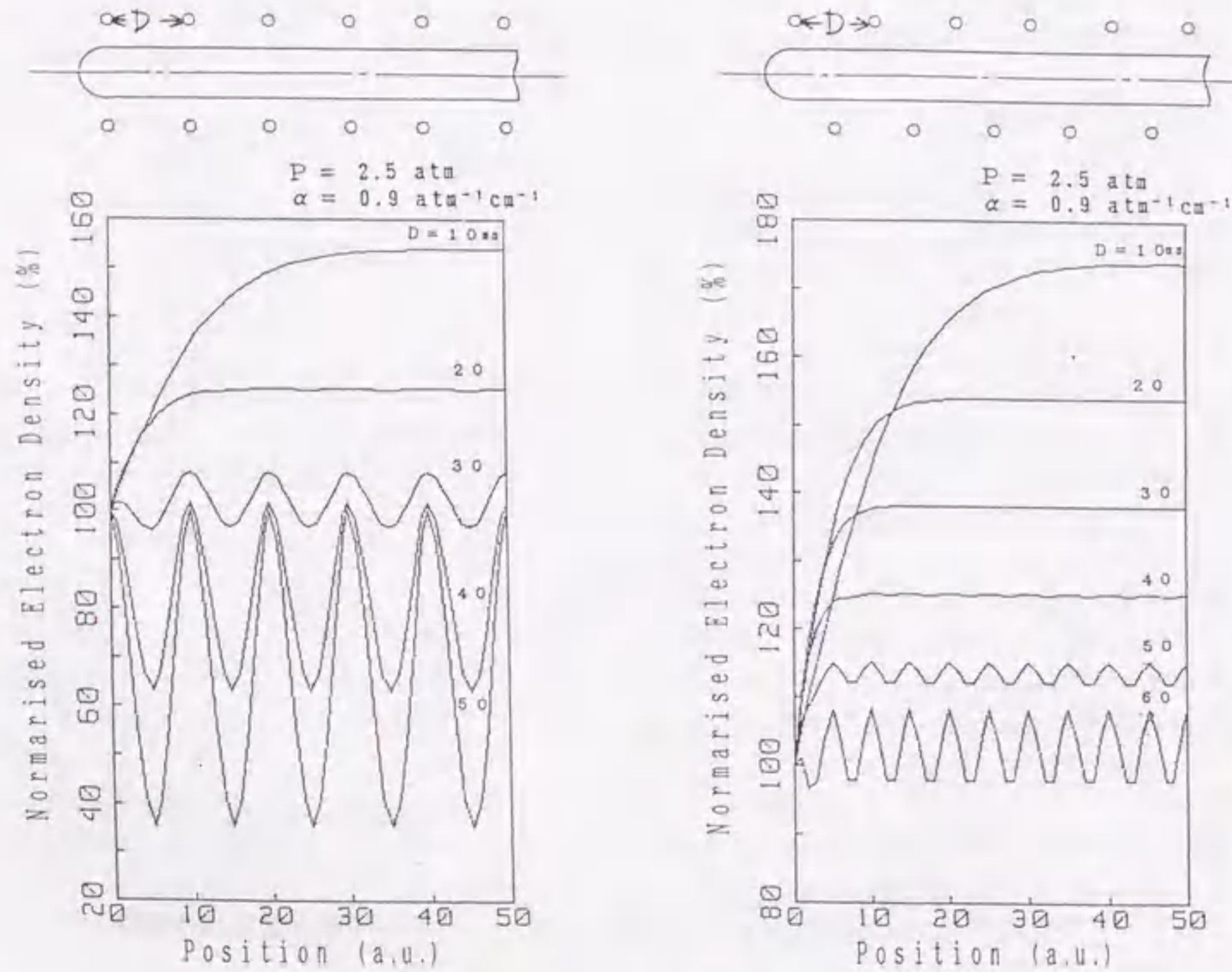


図2-7 電子密度の空間分布 (左:(a)、右:(b))

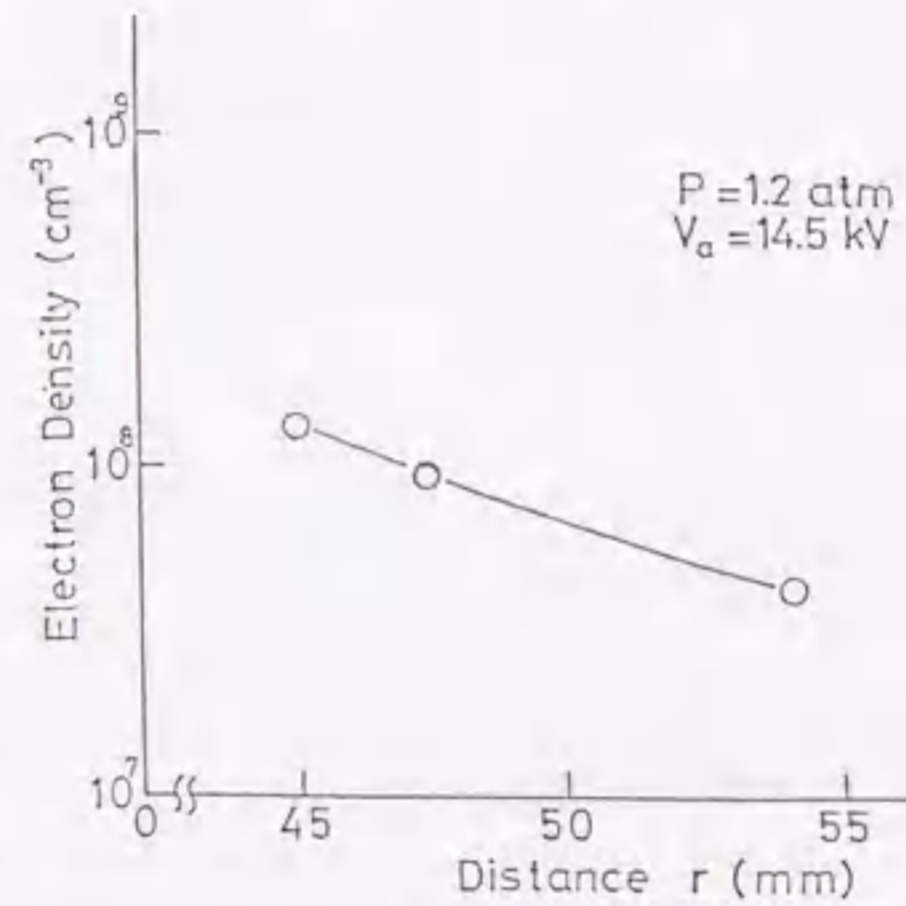


図2-6 UV源からの距離と電子密度

Position 0 は、左端のピン電極位置に対応し、縦軸は、全ての D 値に対して、左端部で電子密度を100%とする相対値で示してある。結論としては、図2-7(b)の場合が、電極端部と中央部との密度差、中央部での分布不均一性がともに小さいことが明らかであり、以後のモデル装置にはこのようにピン電極を配置することにした。

一方、高繰り返し状態での予備電離作用については、これが放電の不安定化にいかなる影響を与えるか明らかにするため、まず高繰り返し動作における主電極間破壊電圧の波形測定を行った。結果を図2-8に示す。縦軸は電圧、横軸は時間であり、印加電圧 V_a は 24 kV 、 1 Hz 動作の場合には最上段に示す電圧波形が得られた。

ここで、次のようにCR値(Clearance Ratio)を定義した。すなわち、

$$CR = v / (w \times f) \dots \dots \dots (2-2)$$

v : ガス流速 (m/s)、 w : 放電幅 (m)、 f : 繰り返し数 (Hz)

$CR=3$ の条件で繰り返し数を高くしていくと、主放電の破壊電圧(負の最大値)は変化しないのに対し、負のファーストピーク値(図中破線で示す)が減少していくことが分かった。このピーク値は、ピン電極での予備電離放電破壊電圧に対応する。

図2-9に繰り返し数に対する予備電離放電の破壊電圧およびレーザ出力特性を示す。ピンギャップ間隔が $1 \sim 2 \text{ mm}$ の場合、 1 Hz 動作では約 18 kV であった破壊電圧は、繰り返し数の増加とともに急激に低下して、 1 kHz で 11 kV となり、その後も低下し続けている。また、Neパuffaガスでも同様な結果が得られ、比較のため図2-10にこれを示した。

図2-9、10において注目すべきは、予備電離放電の破壊電圧とレーザ出力に相関があると推察されることである。破壊電圧が低下していくと、予備電離に必要な発光量あるいは光子エネルギーの高い短波長の発光成分が減少し、生成される初期電子数があるしきい値($\sim 10^8$ 個/ cm^3)より少なくなるため放電状態が悪くなり、レーザ出力を低下させるためと推測できる。

たとえば、Heパuffaの場合には 11 kV 以下、同様の条件で実験を行った図2-10に示すNeパuffaの場合には 3 kV 以下で、初期電子数がレーザ出力低下のしきい値以下になっていると推定できる。このような場合には、予備電離不足により放電の均一性が悪くなり、これに対応してレーザ出力が変動している。

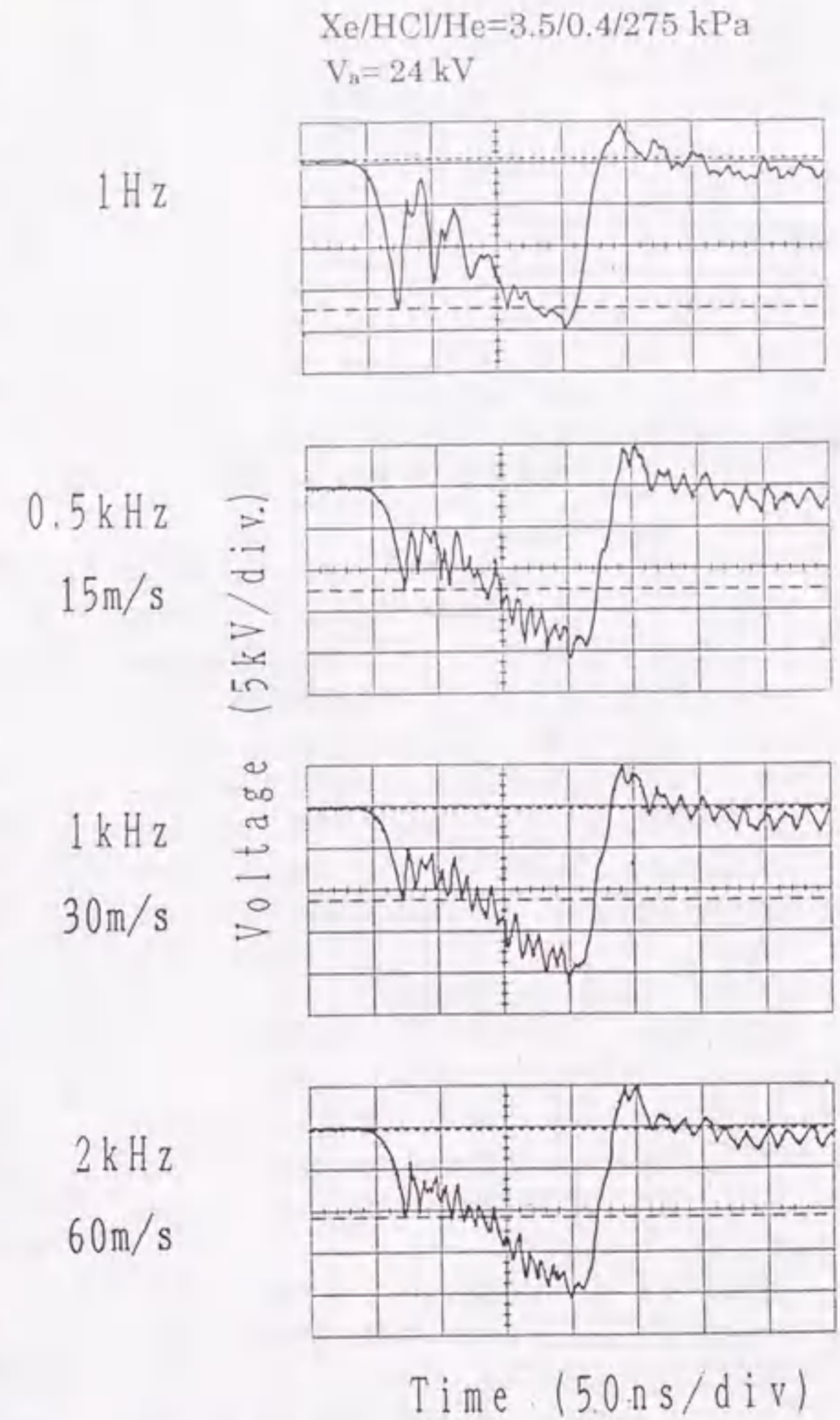


図2-8 破壊電圧波形 (破線間は予備電離破壊電圧)

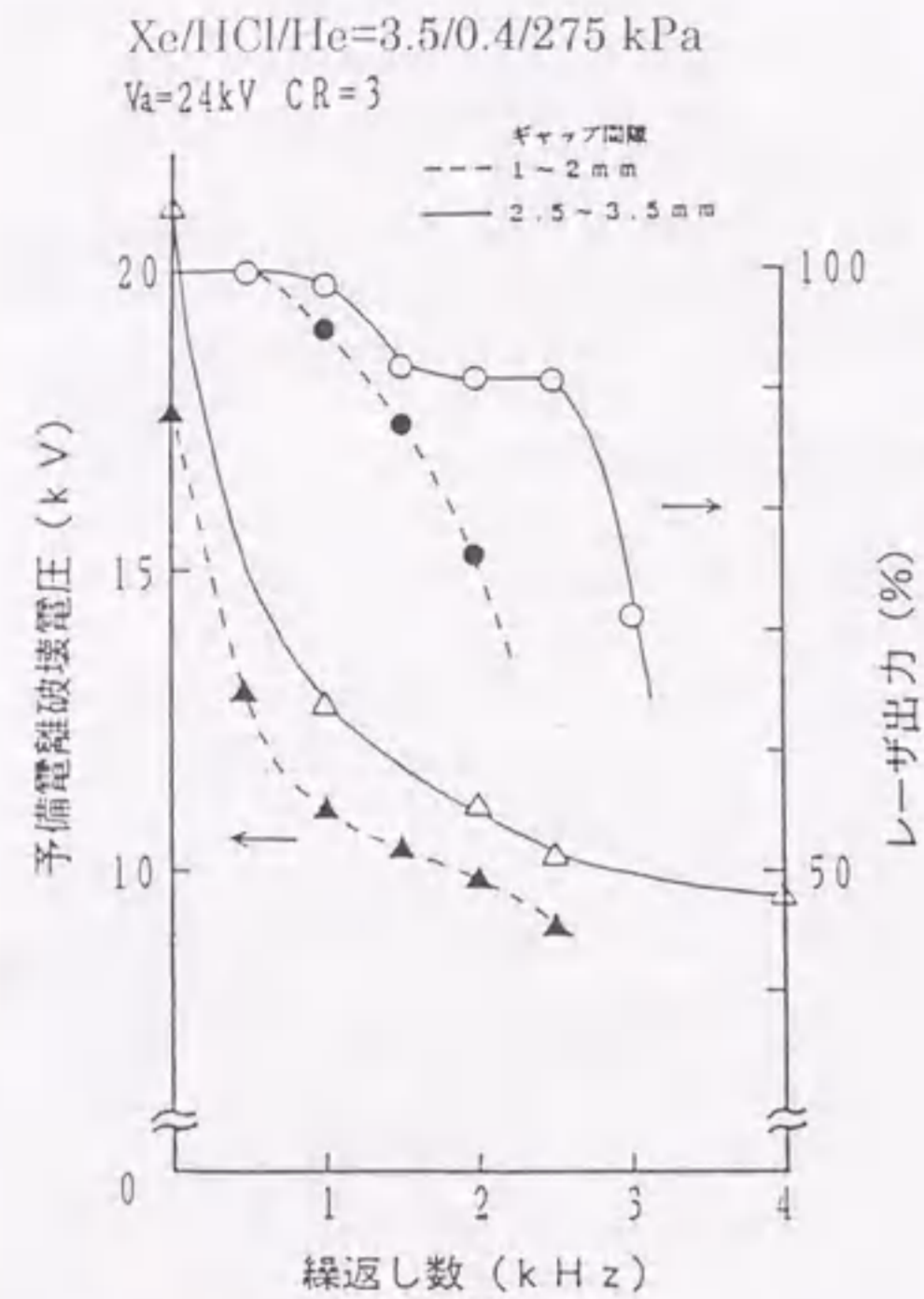


図2-9 予備電離電極間隙の拡大効果

また、図2-11のように、連続パルスとダブルパルスとの電離電圧低下状態にも違いがある。高繰り返し動作における予備電離破壊電圧低下の一因としては、ピン電極先端部の温度上昇や、ピン電極間のガス流速が減速されることによる放電生成物の残留などが考えられる。この破壊電圧の低下を軽減する手段として、ピン電極ギャップ間隙の拡大、ピン電極先端部の形状の改変などにより、破壊電圧を高める方法が考えられる。ここでは、もっとも簡単に行うことができるギャップ間隙の拡大を行った。当初この間隙は、1 Hz 動作における適値によって1~2 mm に定めていた。そこで、これを2.5~3.5 mm に拡大することにより、破壊電圧が高くなる効果と、電極間の放電生成物の流れが良くなり、破壊電圧の低下が弱まる効果の両方が期待される。

図2-9には、2種類のギャップ間隙における比較結果も示してあり、破線は拡大前、実線は拡大後の結果である。間隙を拡大したことにより、1 Hz 動作時の予備電離破壊電圧は17.5 kV から21.1 kV に上昇した。また、高繰り返し動作においても、3 kHz まで10 kV(拡大前は2 kHz)を維持した。このときのレーザー出力をしてみる

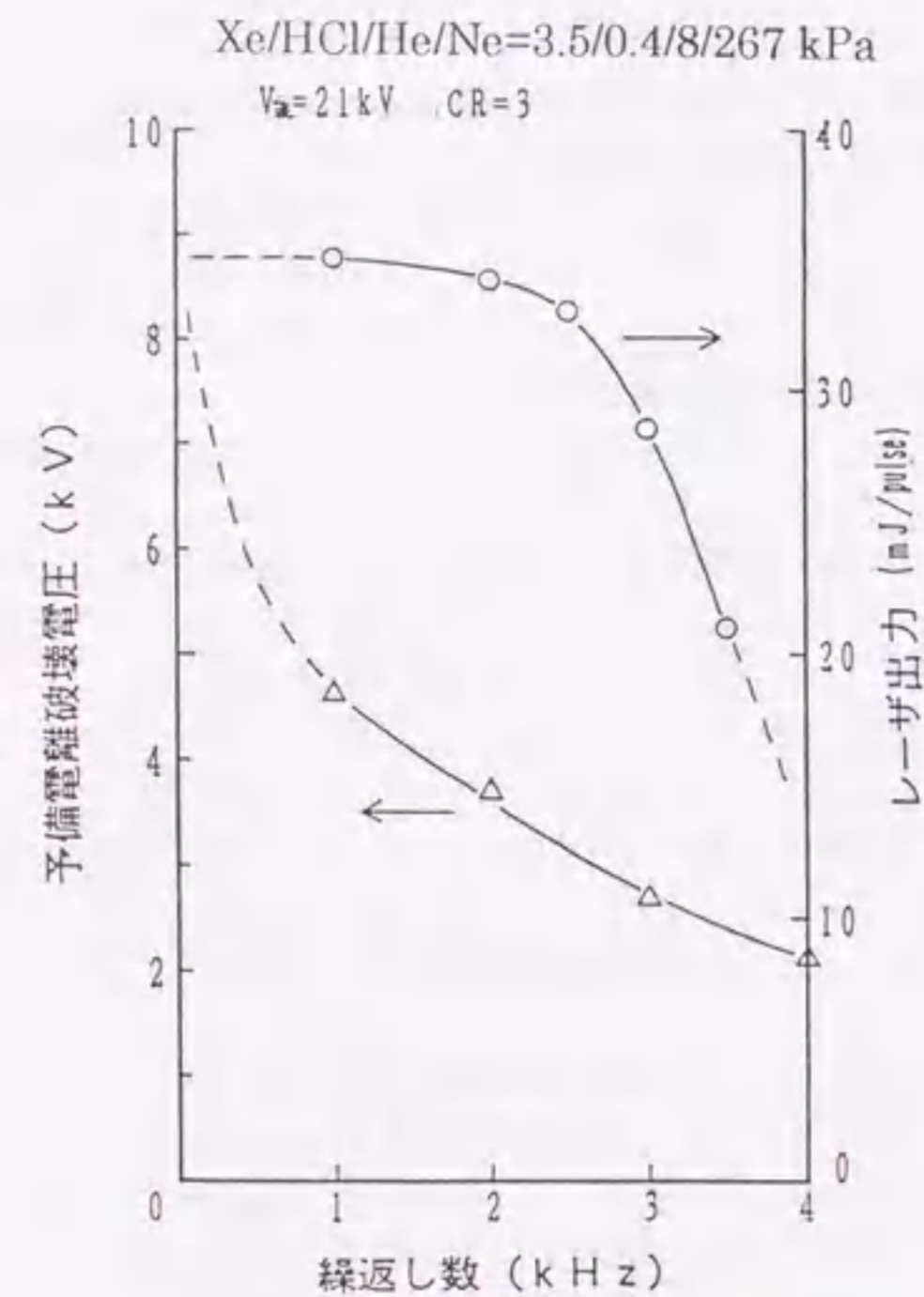


図2-10 予備電離破壊電圧とレーザー出力

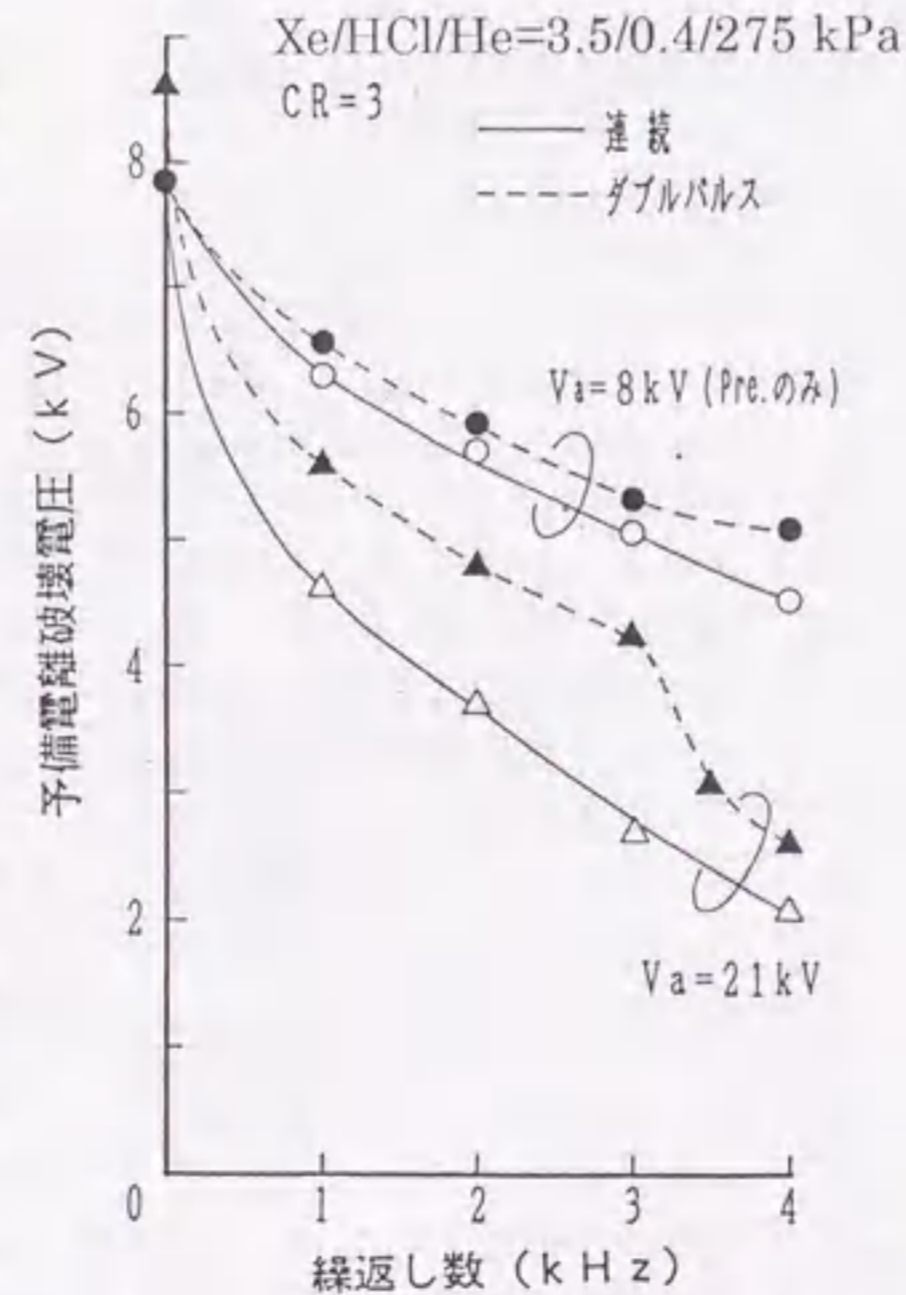


図2-11 予備電離破壊電圧の低下

と、2.5 kHz までは90%以内であり、3 kHz までは安定発振が得られた。この結果は、10 kV 以下でレーザー出力が不安定になるという結果と対応する。

Ne バッファガスにおいても、同様にギャップ間隙を拡大して実験を行った。しかし、1 Hz 動作ですでにレーザー出力が不安定になり、この場合においては、ピン電極のギャップ間隙を大きくし過ぎたことが分かった。ただし、高繰り返し動作では拡大前と同等の結果が得られ、このとき破壊電圧は6 kV 以上を維持していた。

さらには、ピン電極間のガス流の影響について調べるため、He バッファガスにおける繰り返し周波数に対する予備電離破壊電圧を測定した。放電は予備電離のみ点弧した結果、図2-12のようにCR値に対する違いが明らかとなった。CR=0、つまりギャップ間にガスの流れが無いときには破壊電圧の低下が大きい。これは放電生成物がギャップ間に残留することや、ピン電極がガスによって冷却されないためと考えられる。ギャップ間隙が小さい場合には、ギャップ間のガス流速が小さくなるので、同じ理由で破壊電圧が低下すると推察される。

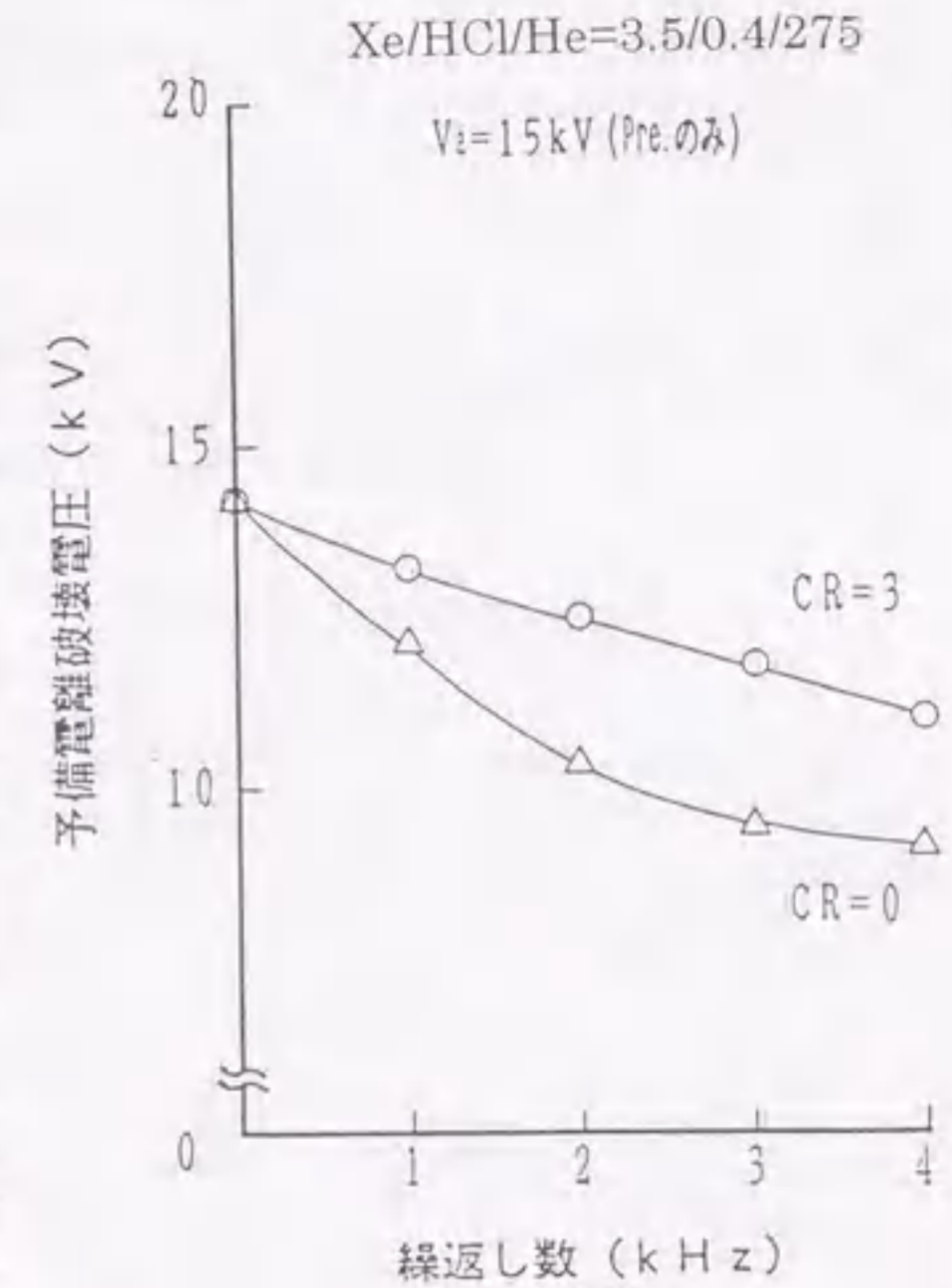


図2-12 ガス流の予備電離破壊電圧への影響

2.4. 放電電流の集中化

2.4.1. 実験条件

放電集中化のメカニズムを明らかにする目的で、まず以下のような2パルス(ダブルパルス)動作で間隔を変えて、後続パルスで放電集中が発生する場合のパルス時間間隔を調べた。この逆数は換算繰り返し数とし、パルス相互の時間依存性を、レーザー出力エネルギーと放電状態とを観測することにより究明した。

図2-13は、2系統のパルスジェネレータとギャップスイッチにより、任意の時間間隔で放電を点弧させるようにした初期の実験回路で、後には、図2-5の回路においてサイクロトロントリガーでパルス間隔を制御した。放電は、光軸方向から目視観測し、100 回放電でのアーク状放電発生回数をアーキング発生率として示し、ガス流をパラメータとした。電気回路系の構成は、前2, 3節と同じである。

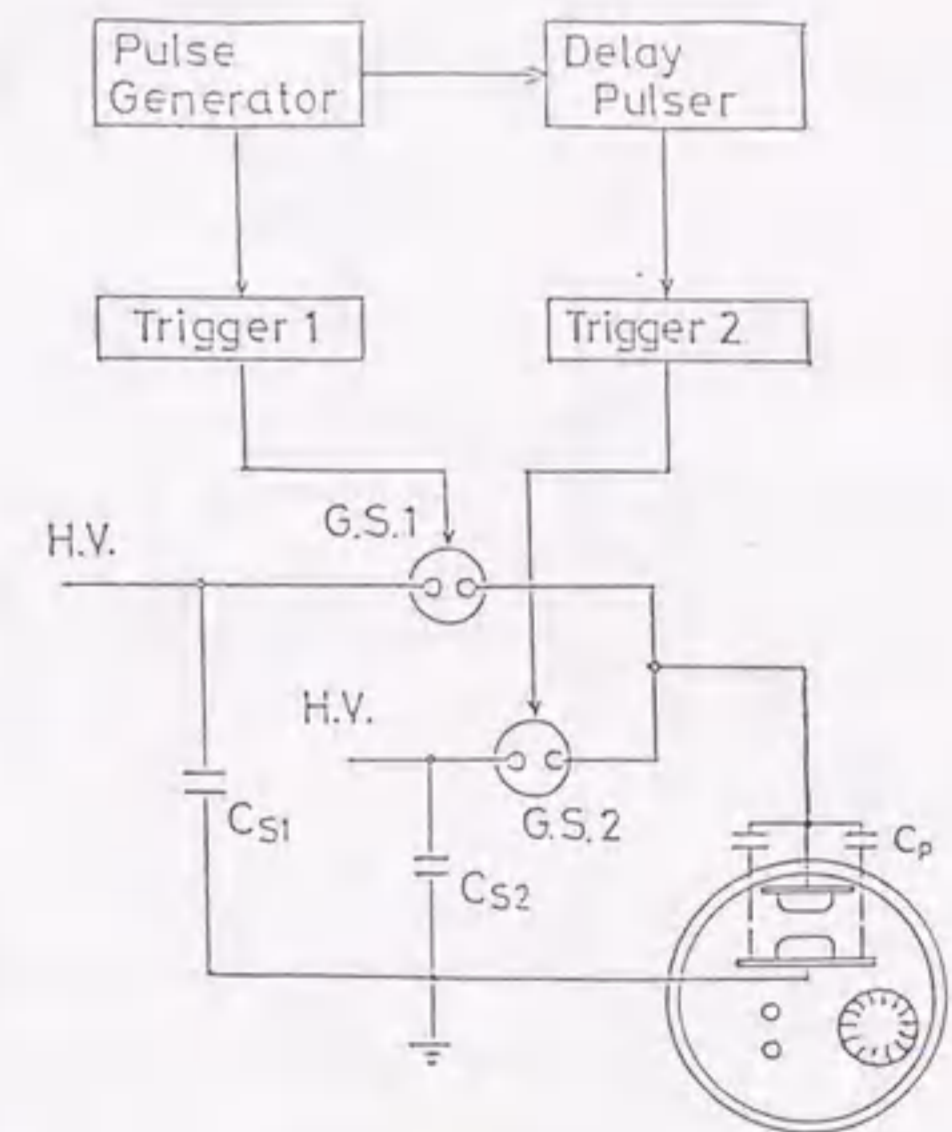


図2-13 ダブルパルス回路構成図

一方、ダブルパルス動作のガス流依存性を調べるにも、モデル0装置を用いた。ただし、予備電離用ピン電極は、シュミレーション実験の結果、電極間隙2 mm、間隔20 mmで、千鳥足状に配置したのは同じであるが、後半で3 kHz以上における特性を示す実験では、ピン電極を、ガス流による間隙での渦発生を抑えるため流線形に仕上げるなど、部分的改良を加えている。また、ピーキングコンデンサ C_p は、11.9 nFで、充電用コイルは126 μ H、サイラトロン T_h にはEEV社製CX1625を用いたのも変わらないが、充電用主コンデンサ C_s は、高繰り返し域では電源容量が足りず、必要に応じて13.3 nFを6.7 nFとした。さらに、レーザ発振効率を向上させるため、放電部を含む放電回路は、低インダクタンス化に留意し7 nH以下にした。最終的には、パルス数を連続100ショット、さらには連続パルス動作へと順次進展させた。(27)、(29)、(31)~(33)、(35)、(36)、(41)、(44)、(47)

2.4.2. ダブルパルス動作結果と検討

図2-14(a)、(b)は、もっとも単純な場合として、Heガスのみを封入してアーキング発生率を調べたもので、ガス流は0 m/s、それぞれパラメータを充電電圧、全ガス圧とした。これらから、充電電圧が高いほど、また全ガス圧は低いほど、アーキングは低い繰り返し数から発生する顕著な傾向が明

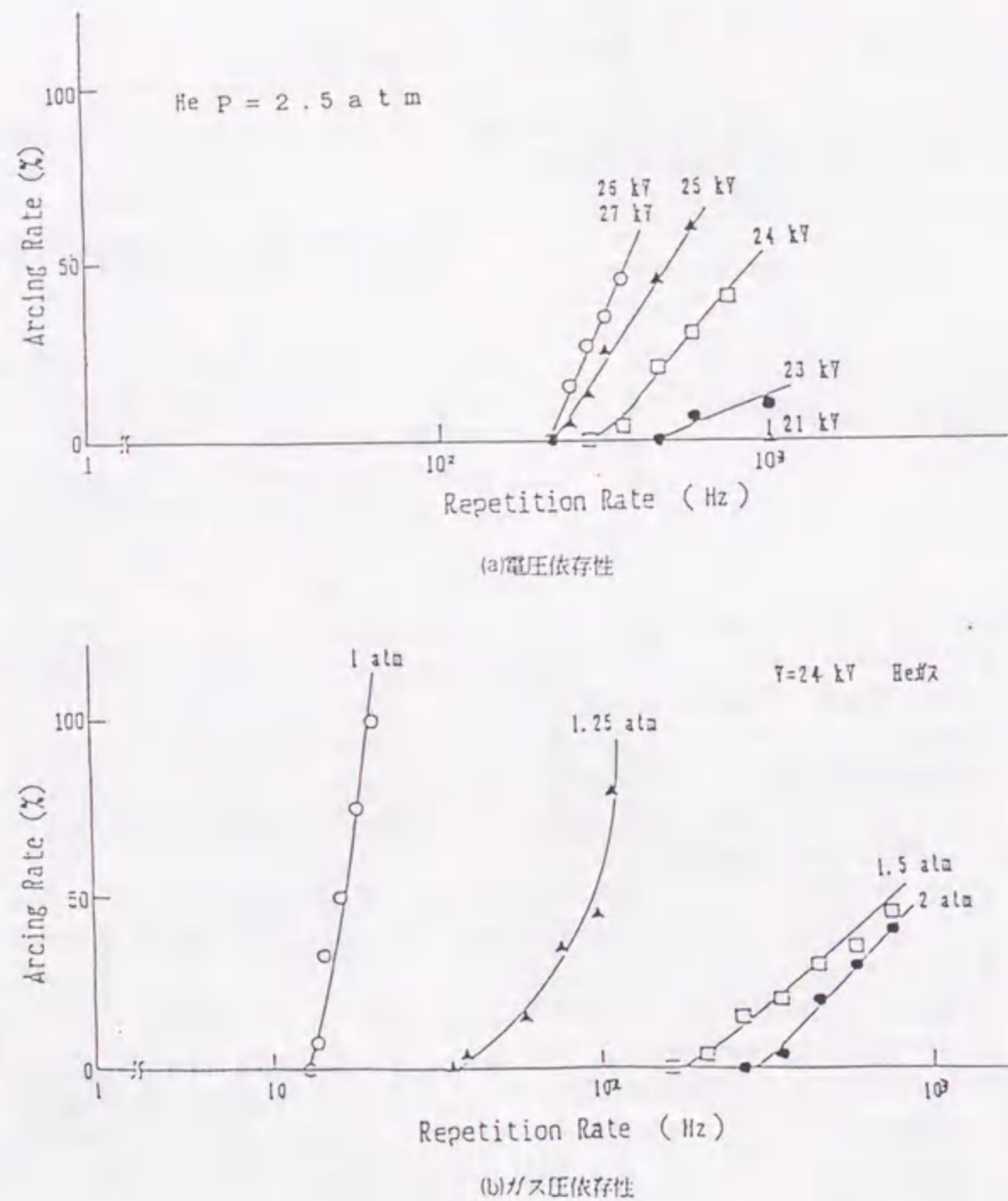


図2-14 Heガスでの繰り返し数とアーク状放電発生率(電圧、ガス圧、パラメータ)

らかとなった。

次には、繰り返し数を上げる前に、単一パルス動作でのレーザ出力エネルギー、発振効率を、ガス構成条件や充電電圧を変え、あるいはパラメータとして、諸レーザ動作の基礎となる特性を詳細に調べた。図2-15(a)~(d)には、封入全ガス圧条件をパラメータとした場合の、充電電圧に対するレーザ出力エネルギーと発振効率を、Heバッファガスについては(a)、(b)、Neバッファガスについては(c)、(d)に示す。同様に、図2-16(a)~(d)には、充電電圧をパラメータとした場合の、封入ガス構成条件に対する出力エネルギーを示す。これらから、それぞれのバッファガスについて、適宜に近いガス構成条件として、充電電圧に対する出力エネルギーおよび効率特性をまとめて示すと、図2-17(a)~(d)のようになる。

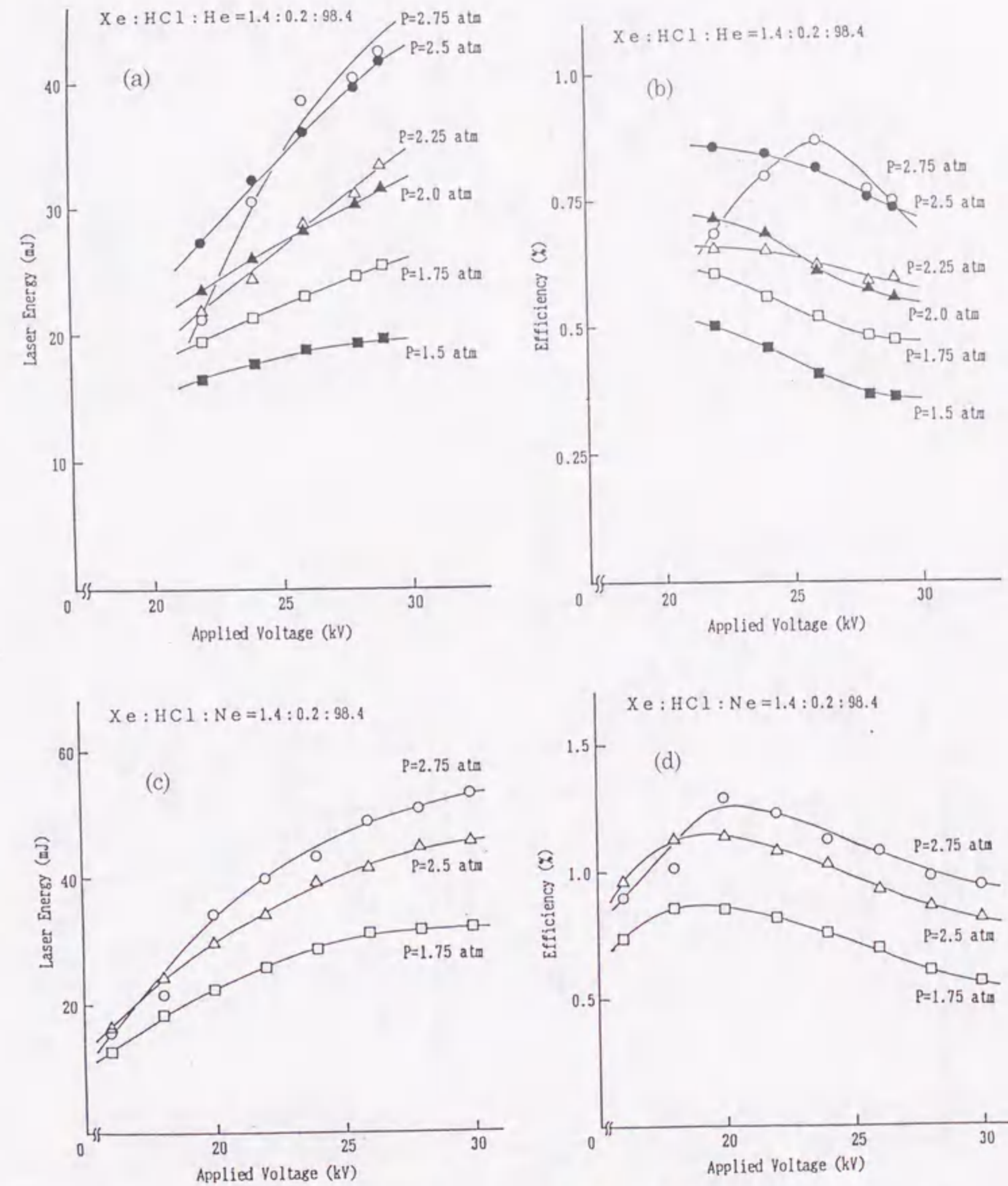


図2-15 充電電圧—出力エネルギー・発振効率特性(全封入ガス圧パラメータ)

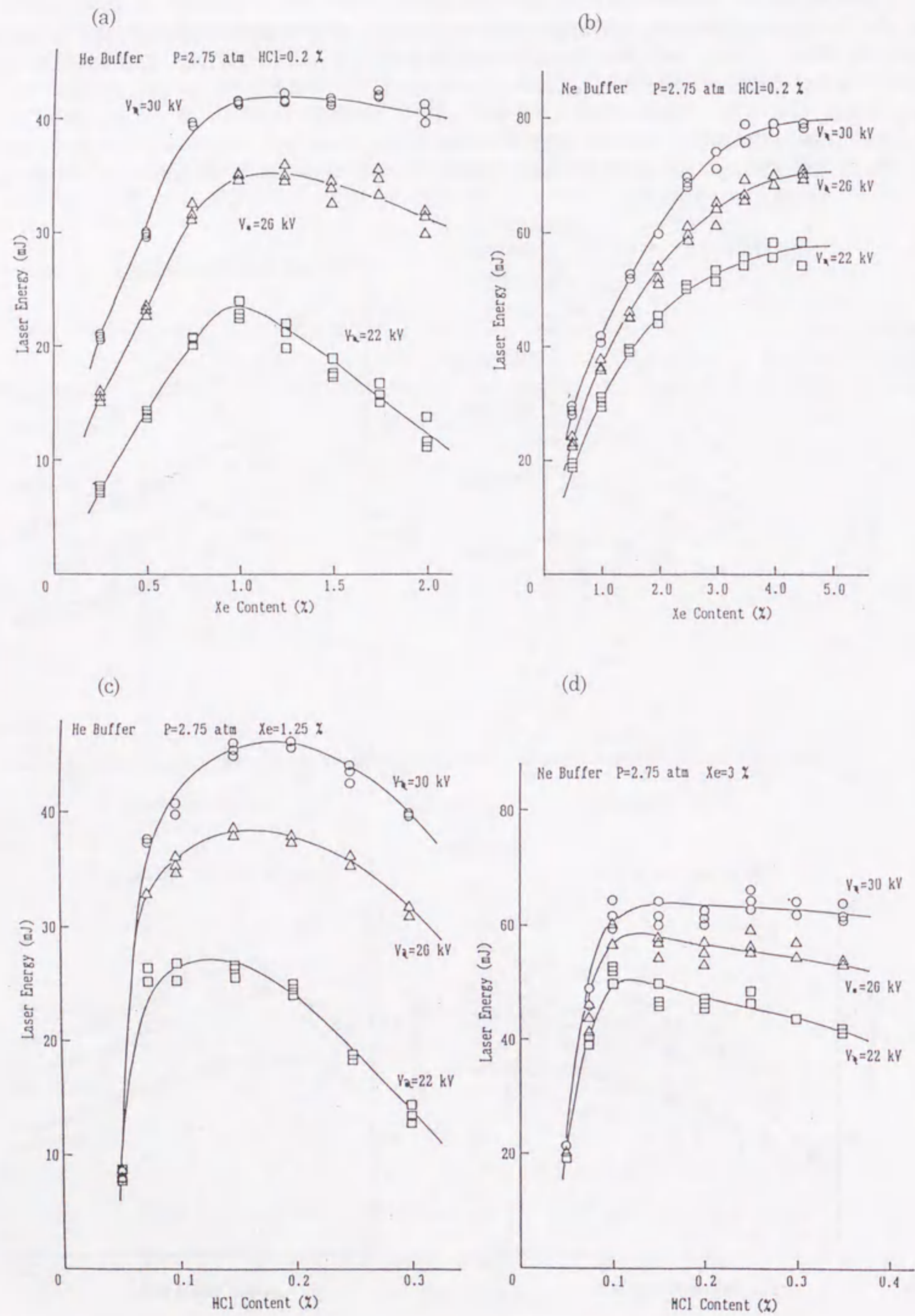


図2-16 封入ガス構成—出力エネルギー特性 (充電電圧パラメータ)

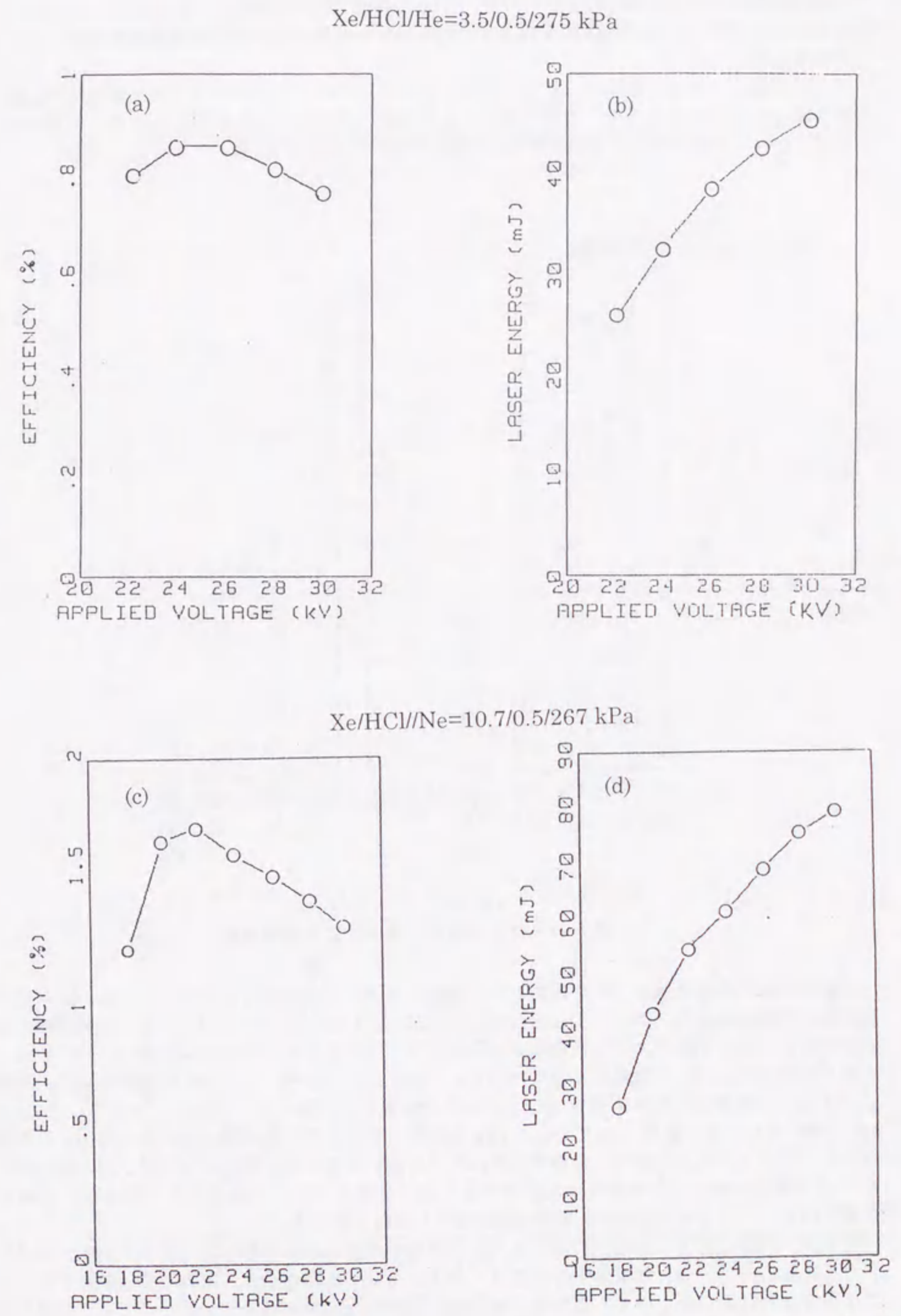


図2-17 適値ガス構成条件における充電電圧—出力エネルギー・発振効率特性

HeおよびNeバッファガスについて、それぞれ最大出力と最大発振効率、46.2 mJ(30 kV), 0.84%(24 kV), および 79.2 mJ(30 kV), 1.72%(22 kV)となり、ほぼ一般的な特性値が得られていることを確認した。

さらには図2-14と同様に、混合ガスにした場合についてもアーキング状放電発生率を調べた。これを図2-18に示し、均一放電が得られる領域が、XeやHClを混入させると顕著に狭くなることが分かり、放電集中化の原因究明に有力な手がかりの一つとなる。

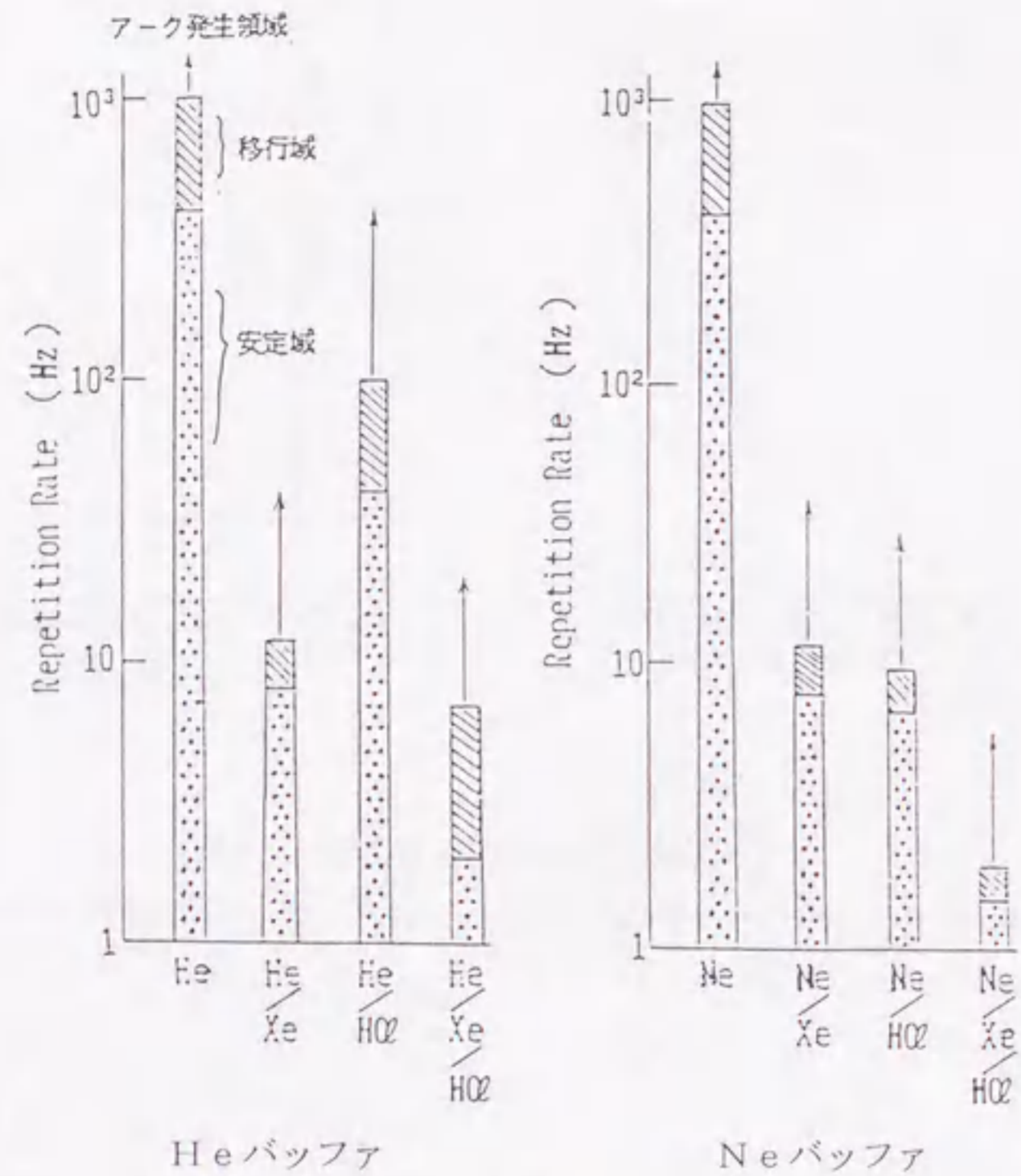
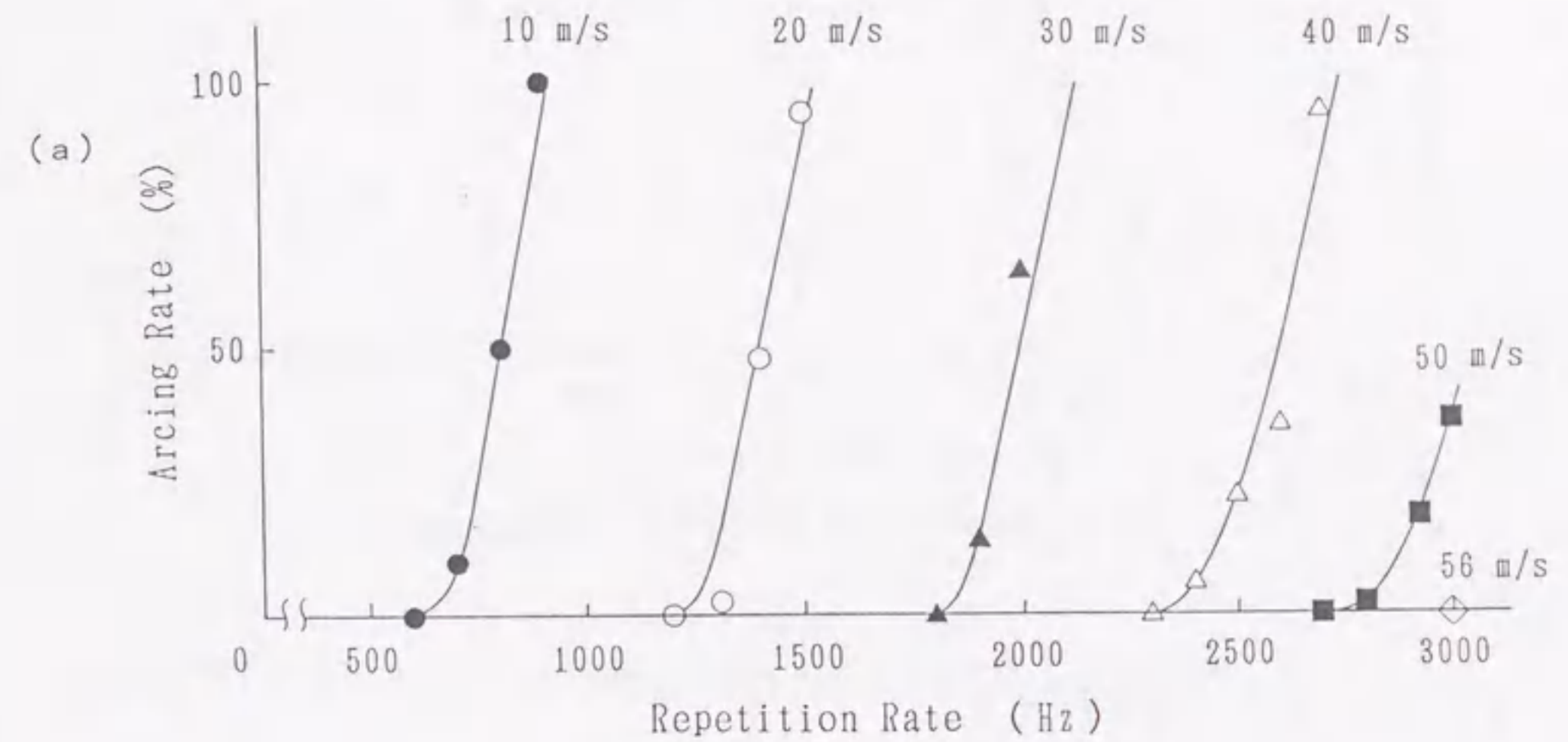


図2-18 各種ガス構成による放電状態

以上の予備的実験を基に、次の段階として同様にモデル装置を用いて、ダブルパルス動作による詳細な実験を進めた。図2-19(a), (b)は、それぞれHeおよびNeバッファでの換算繰り返し数に対するアーキング発生率を、放電部ガス流速をパラメータとして示す実験結果で、いずれも、全封入ガス圧は2.75 atm、充電電圧 V_a は25.5 kVである。この場合、アーク状放電は、常に主電極に対しガス流の下流側に円弧状に発生した。これらの結果をまとめると、Heバッファではガス流速56 m/s、Neバッファでは60 m/sにて、3 kHzにおいてアーキング状放電発生のない均一な安定放電が得られ、両バッファガスの間で顕著な差異は見られないと言える。図2-20は、繰り返し数に対する2パルス目の相対レーザー出力エネルギーを、ガス流速をパラメータとして、図2-19(a)に対応させて示す。ここでの100%は、実際の出力値では35 mJである。

出力が、急激に低下し始めるのは、アーク状放電が発生し始める繰り返し数より100~200 Hz高いところにある。これは、放電集中の程度がこのようなレベルになると、出力に顕著な低下をもたらすことを定量的に示したもので、注目すべき結果と思われる。Neバッファについても、同様な結果が得られている。

Xe/HCl/He=1.25/0.2/98.55 (%) P=2.75 atm
Va=25.5 kV



Xe/HCl/Ne=1.25/0.2/98.55 (%) P=2.75 atm
Va=24.5 kV

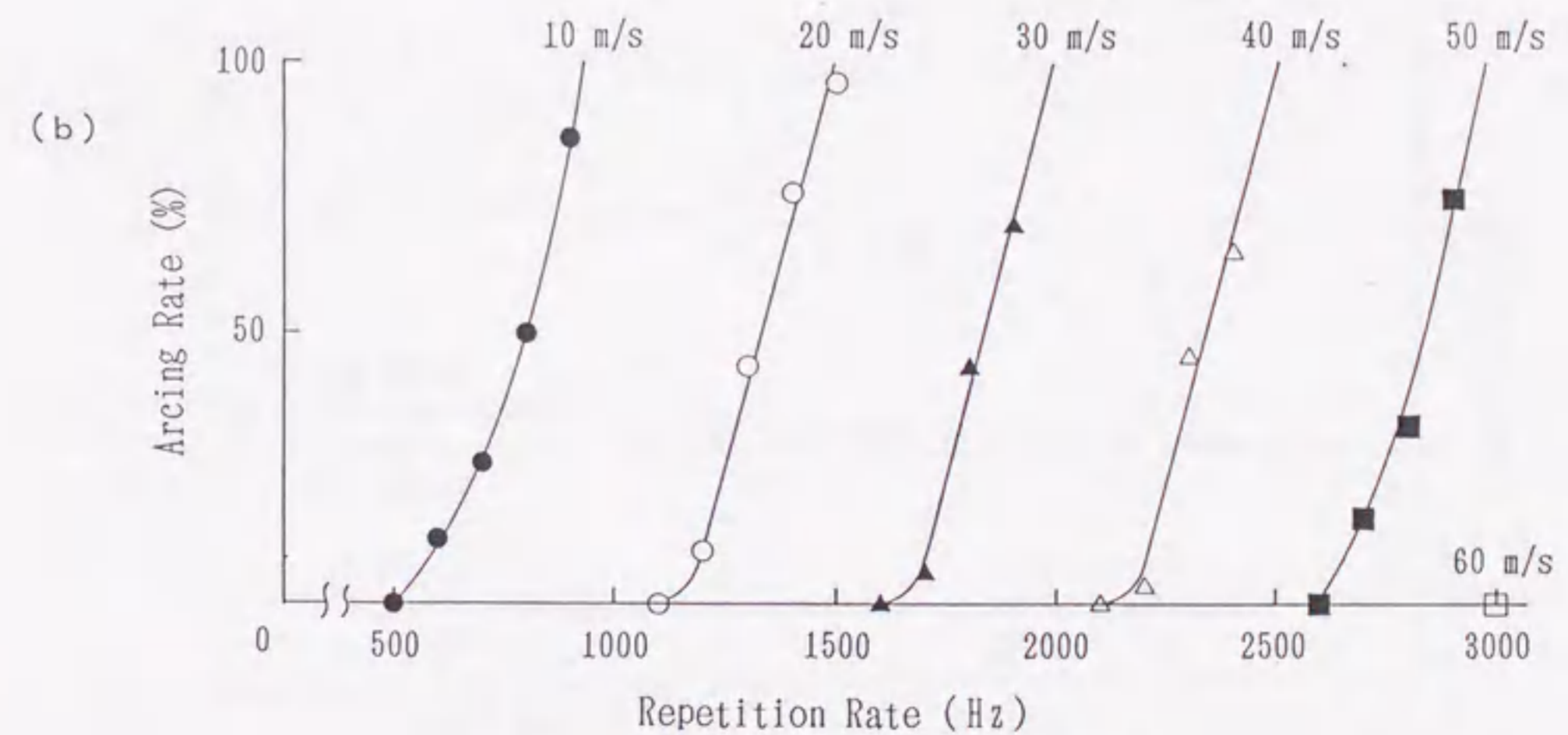
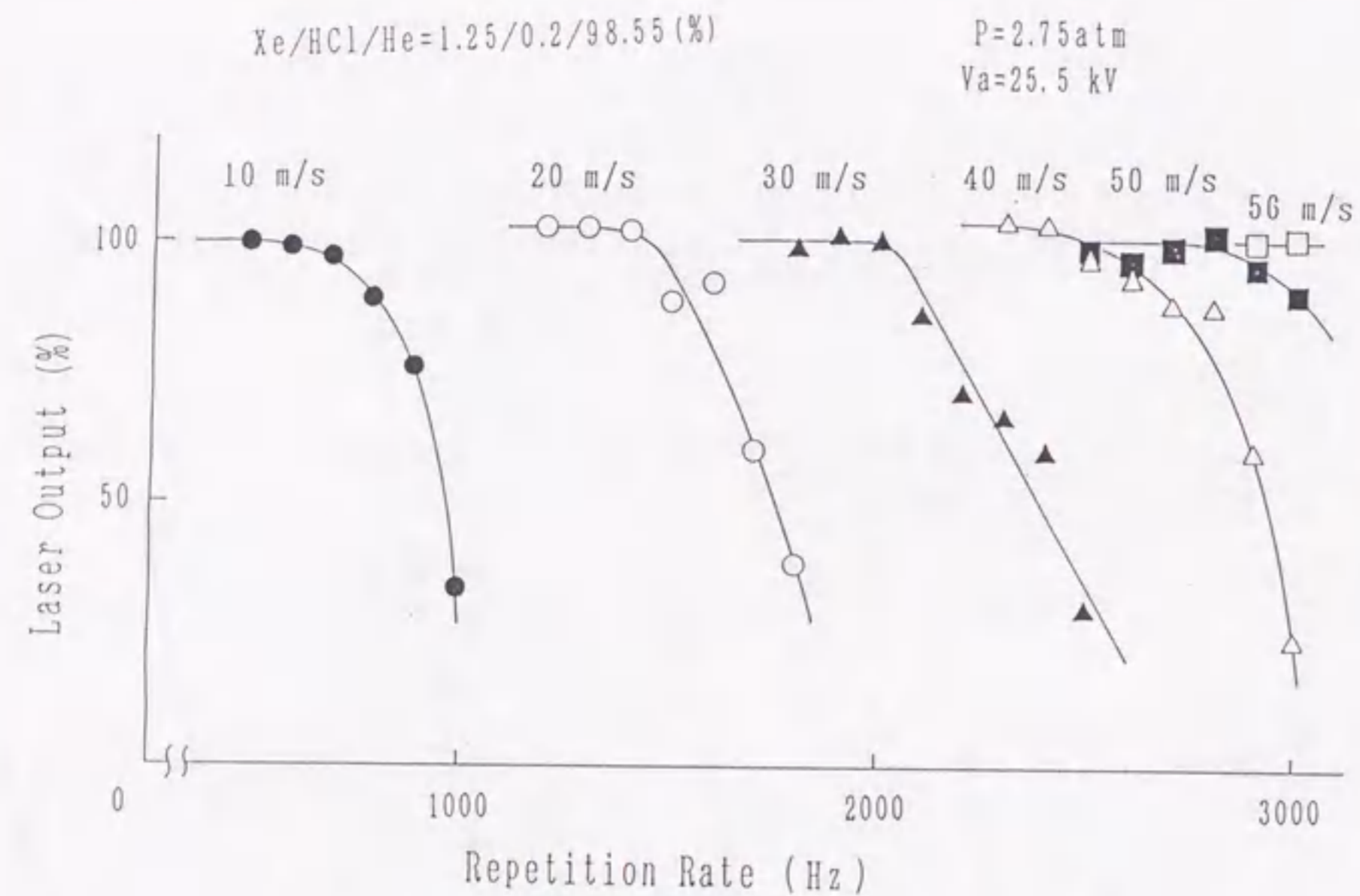


図2-19 繰り返し数に対するアーク状放電発生率



レーザーエネルギーは、測定 10 回の平均値を、1 Hz 動作でのレーザーエネルギー 16 mJ を 100 % として示したものである。ガス流速は、下流アーク状放電が発生しないよう、徐々に増加させており、その代表する値を图中に示した。繰り返し数が 2.5 kHz (ガス流速 40 m/s) までは、ほぼ 100 % (16 mJ) のエネルギーが得られているが、2.5 kHz では、アーク状放電が発生していないにも拘わらず、レーザーエネルギーは低下傾向にある。この傾向は、繰り返し数を 3 kHz 以上に上げるとさらに顕著になっている。

なお、電源容量により制限される最大繰り返し数 4.6 kHz では、ガス流速を 90 m/s にすることで、74 % (12 mJ) の安定なレーザーエネルギーが得られた。ここで、2.5 kHz 以上の領域では、レーザーエネルギーの低下に対して、ガス流速の乱れによる不均一性が関与していることも考えられる。これを確認するため、レーザー発振を 1 Hz に固定し、ガス流速のみを変化させた。このとき、レーザーエネルギーは、ガス流速によらずほぼ一定であった。このことから、ガス流速そのものがレーザーエネルギーに影響を与えていることは、きわめて少ないと考えられる。

2.4.3. 100 パルス連続点弧動作の結果と検討

ダブルパルスを用いた評価方法では、放電現象やレーザー発振現象を、時間的に近接した 2 パルス間の相互作用のみを考慮した単純な現象として捉えることができる。これに対し、100 パルス連続点弧による評価方法は、ガスの加熱やガスの劣化をある程度無視すれば、複数パルスによる蓄積効果が示される評価方法であり、高繰り返し化に向けての有力な手がかりが得られると予測される。

図 2-24 (左)、(右) は、それぞれ、He、Ne バッファガス中における繰り返し数と、円弧状のアーク状放電の発生がない安定放電に必要なガス流速 (以下：臨界ガス流速) の関係を示す。なお、比較のため前述のダブルパルスによる結果も併せて示し、また、Ne バッファガスの場合には、高い繰り返し域まで上げられるので電源容量が足りず、充電電圧を 18 kV と少し低い条件にて測定したが、その差異はほとんど無視できる。

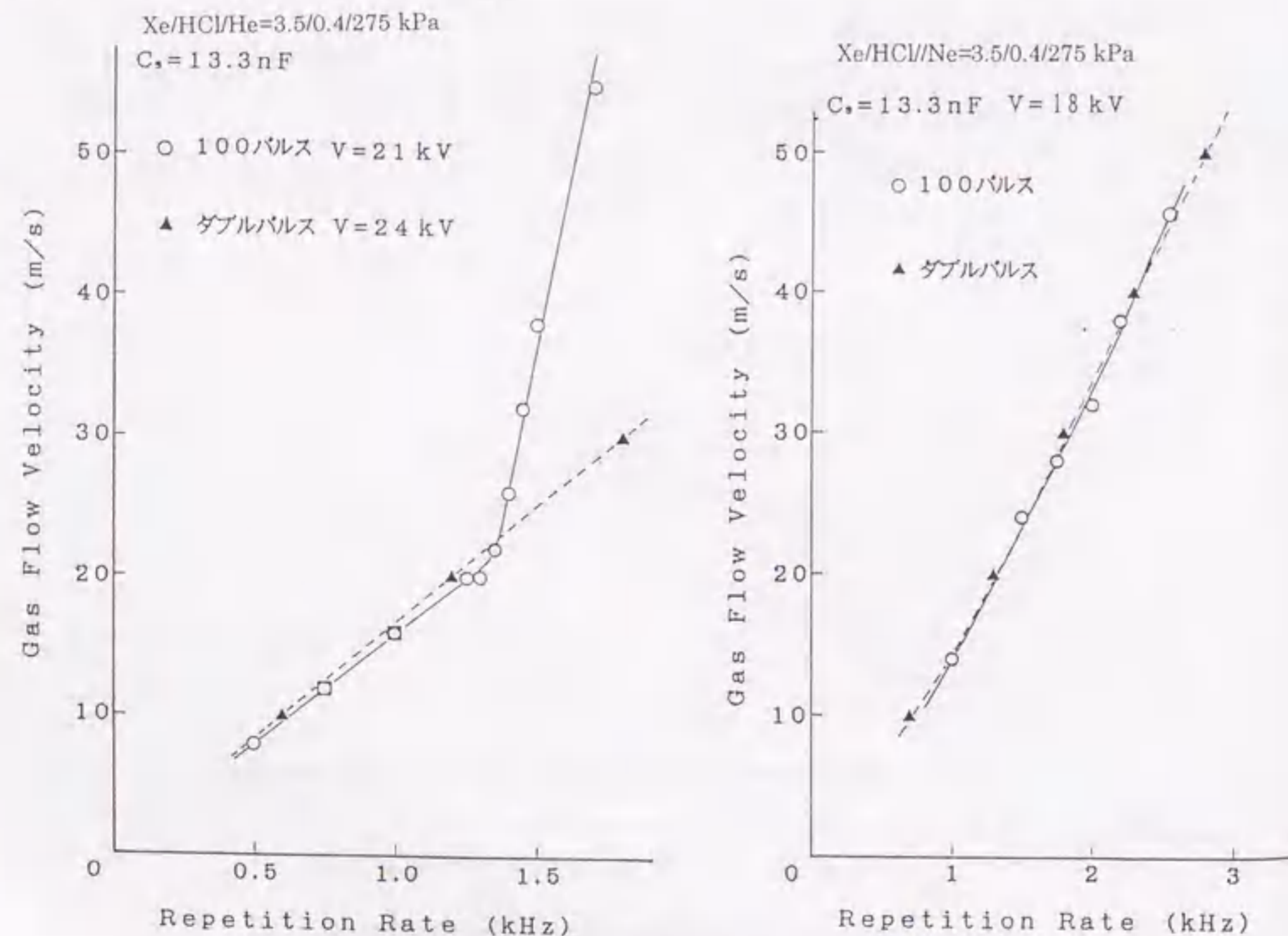


図 2-24 繰り返し数と臨界ガス流速

図 2-24 (左) に示すように、He バッファガスにおいて、ダブルパルス動作での臨界ガス流速は、繰り返し数を上げるにしたがって直線的に増加している。これに対し、100 パルス連続動作における臨界ガス流速は、1.4 kHz まではダブルパルス動作と同じように直線的に増すが、それ以上では急激な増加傾向を示す。これは、この繰り返し数以上では、連続パルスによる何らかの蓄積効果が影響しているものと推察できる。

これに対し、Ne バッファガスの場合では、図 2-24 (右) に示すように、臨界ガス流速は、ダブルパルス動作、100 ショット連続パルス動作共に、ほぼ同一直線上に乗っている。これらバッファガスによる顕著な相違は、放電状態 (放電パラメータ) の違いやガス比重量によるガス密度揺らぎ伝搬速度、蓄積時間の違い、などに起因すると当初は推測していた。ところが、その後の実験で、2.4 節で示した予備電離ピン電極の適切な間隔がバッファガスに大きく依存することが明らかとなり、2.6 節以後の実験では、繰り返し動作域とバッファガスに応じてその間隔を適宜に設定するような考慮をした。

図 2-25 (a), (b) は He バッファ、図 2-26 (a), (b) は Ne バッファの場合について、臨界ガス流速の上下で、連続 100 パルスのレーザー出力エネルギーを、各 5 パルス毎に間を間引きして示す。臨界ガス流速以下 (b) の場合) においては、He バッファではショットとともに出力エネルギーが顕著に減少し、50 ショット以後はほとんど 0 となるのに対して、後者の Ne バッファでは、間欠的にレーザー発振を回復するという顕著な違いのあることが明らかとなった。これは、放電生成物の種類や蓄積状態などが複合的に影響していると思われ、同様に高繰り返し化に向けての有力な手がかりを与えられると思われるが、取りあえずこの実験は開発スケジュールの関係からここで終了とした。

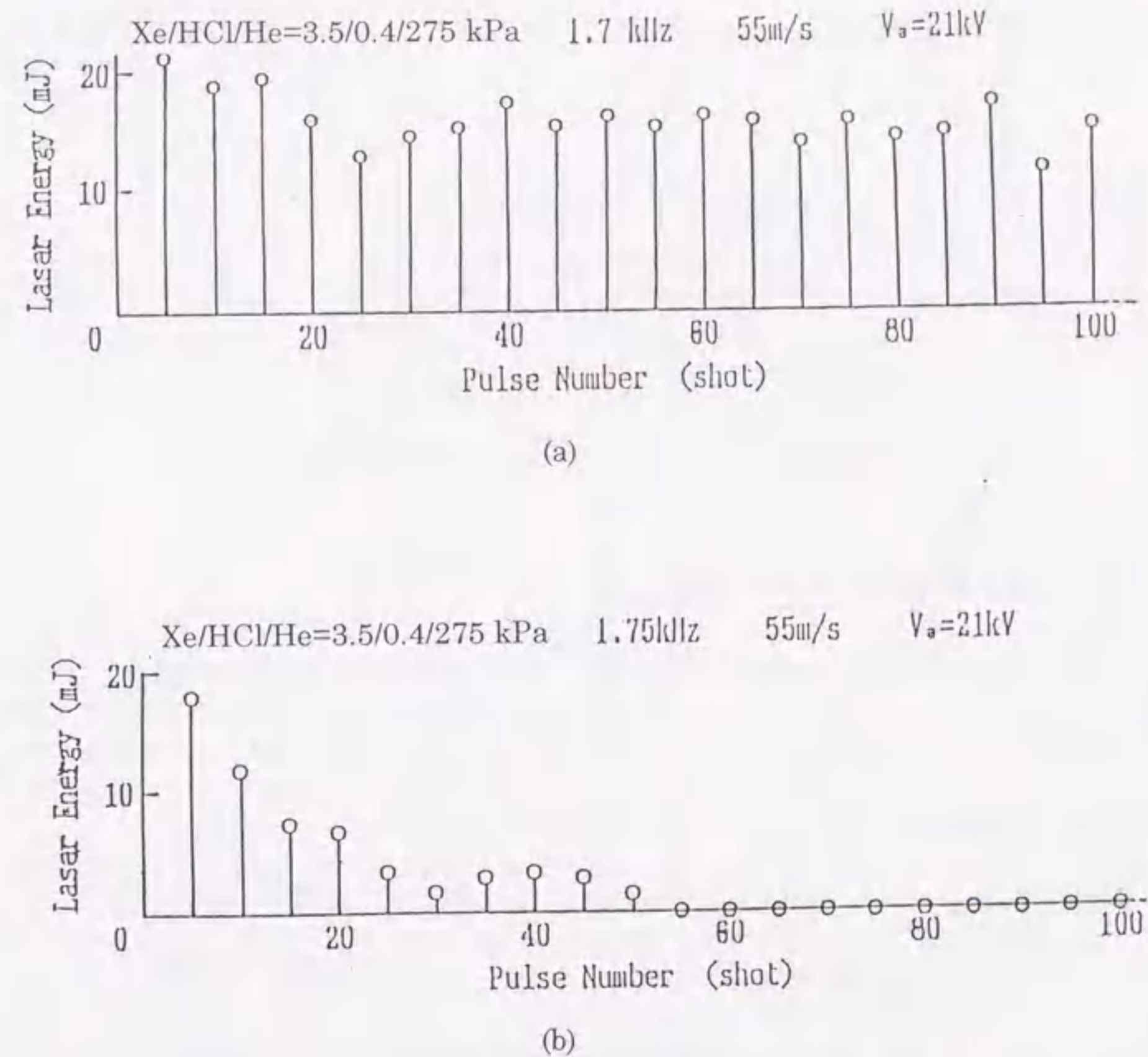


図 2-25 100 ショット動作レーザー出力特性 (He バッファ)

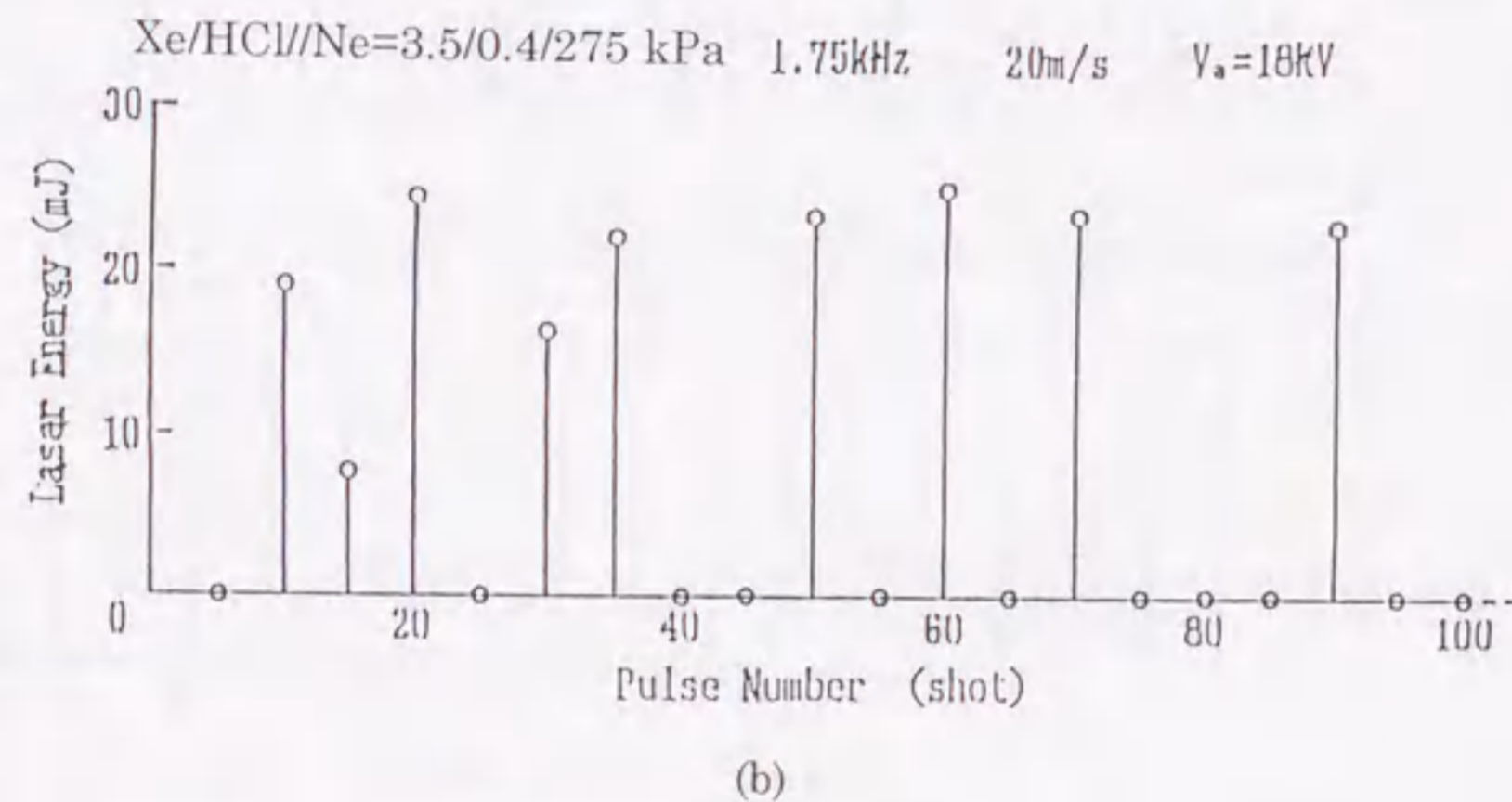
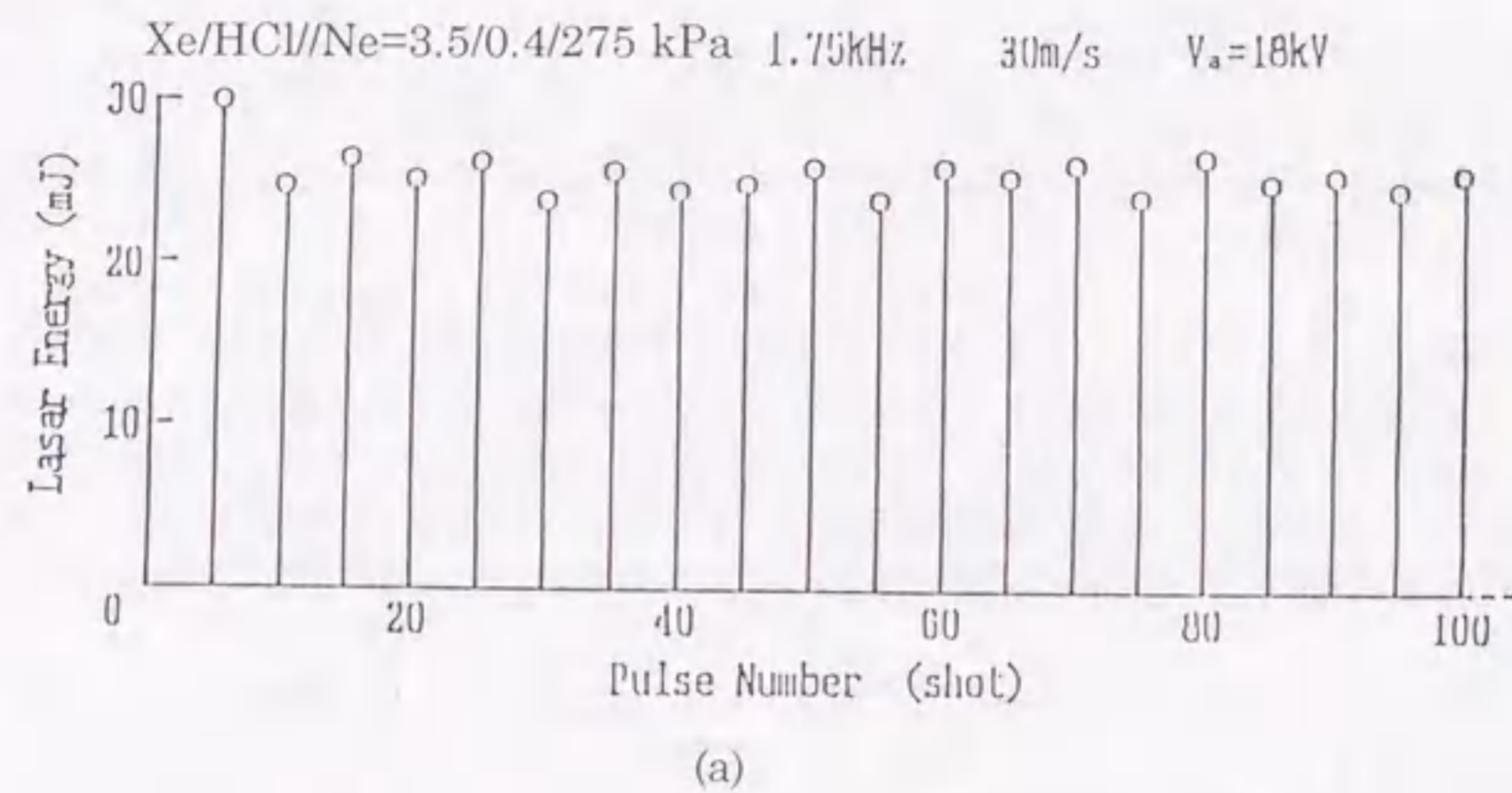


図2-26 100ショット動作レーザー出力特性 (Neバッファ)

2.4.4. 連続高繰り返し動作の結果と検討

100ショット連続パルス動作実験に引続き、さらに連続高繰り返し動作実験を行った。図2-27に、Heバッファガスにおける、繰り返し数に対する平均レーザー出力特性の結果を示す。繰り返し数1.4 kHzにおいて最大20 Wが得られたものの、これ以上ではガス流速をいくら増加させても、平均レーザー出力は低下する。この繰り返し数は、図2-24(左)の100パルス連続動作における変曲点の繰り返し数とはほぼ一致しており、その原因は同じと思われる。

一方、Neバッファガスの場合では、2.5 kHzまで安定なレーザー発振が続き、充電電圧24 kVにおいて最大平均出力87 Wが得られた。そのときのガス流速は、56 m/sであった。図2-28は、それぞれ、充電電圧をパラメータとした、繰り返し数と平均レーザー出力の関係、および安定放電を維持するための臨界ガス流速特性である。平均レーザー出力、臨界ガス流速は、いずれも、2.5 kHzまでは繰り返し数と共に直線的に増加している。これに対し、3 kHz以上では、臨界ガス流速は同一直線上にあるにもかかわらず、平均レーザー出力は減少する傾向を示した。これらの結果は、充電電圧に依らず同様の傾向を示す。

この原因を調べるため、平均レーザー出力が減少する2.5~3 kHzにおいて、放電の様子を目視により観測した。この結果、2.5 kHzまでは、陰極表面に小さな輝点がみられるものも、放電は全体的にはほぼ均一であるが、3 kHz付近では、陰極表面の輝点が1 mm程度まで成長し、中には、電極間中央付近まで伸びているものも見られ、注視すればかなり放電が不均一になってきた様子が分かった。しかし、3 kHzにおいてもガス下流アーク状放電は発生していない。さらに、繰り返しを上げ4 kHz程度にすると、一層放電が不均一となっていく様子が顕著となった。すなわち、3 kHz以上で平均レーザー出力が低下するのは、下流アーク状放電の発生ではなく、主放電そのものが不均一となり、レーザー発振に適する有効起体積が等価的に減少したのが主因と考えられる。

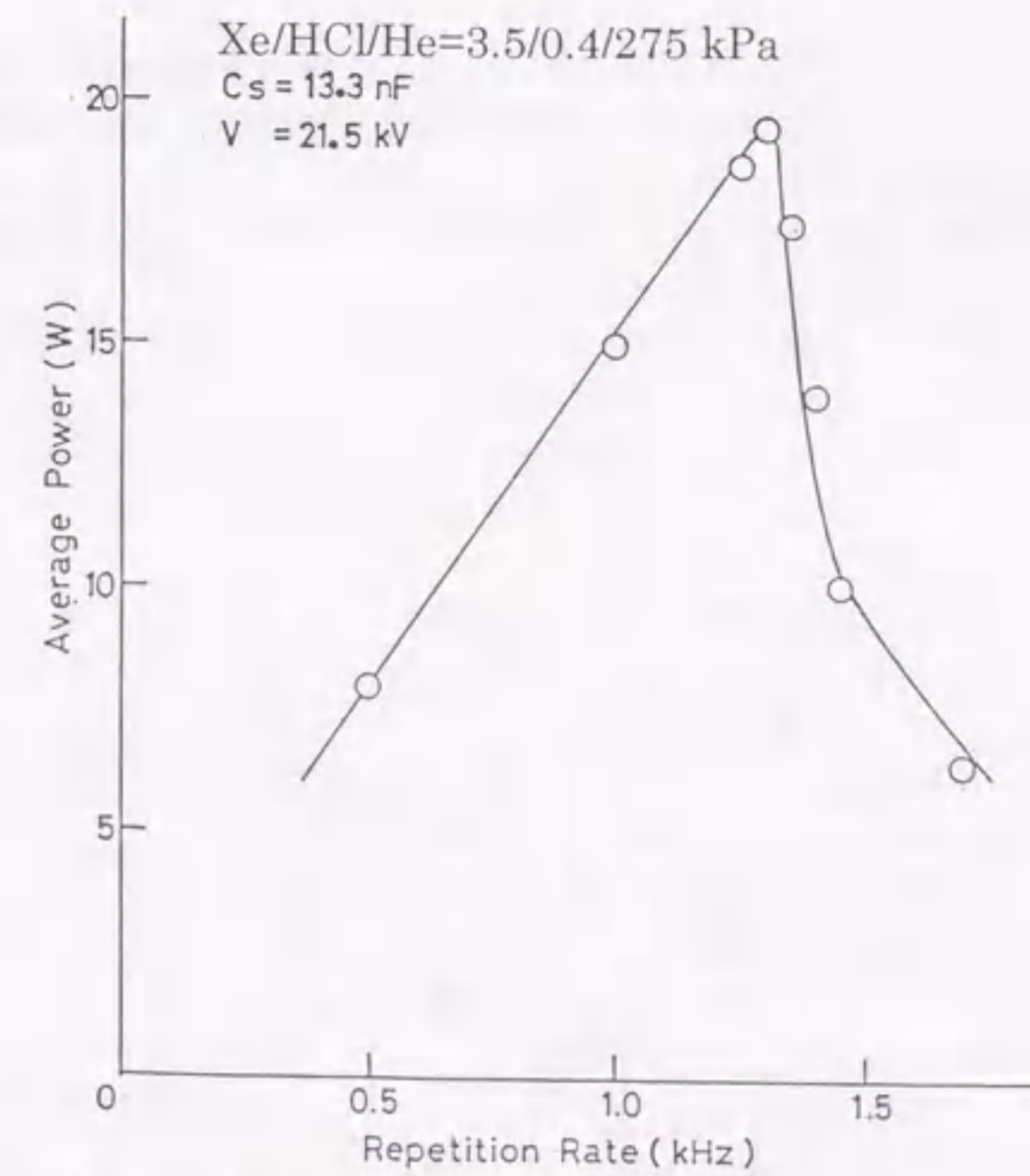


図2-27 連続動作レーザー出力特性 (Heバッファ)

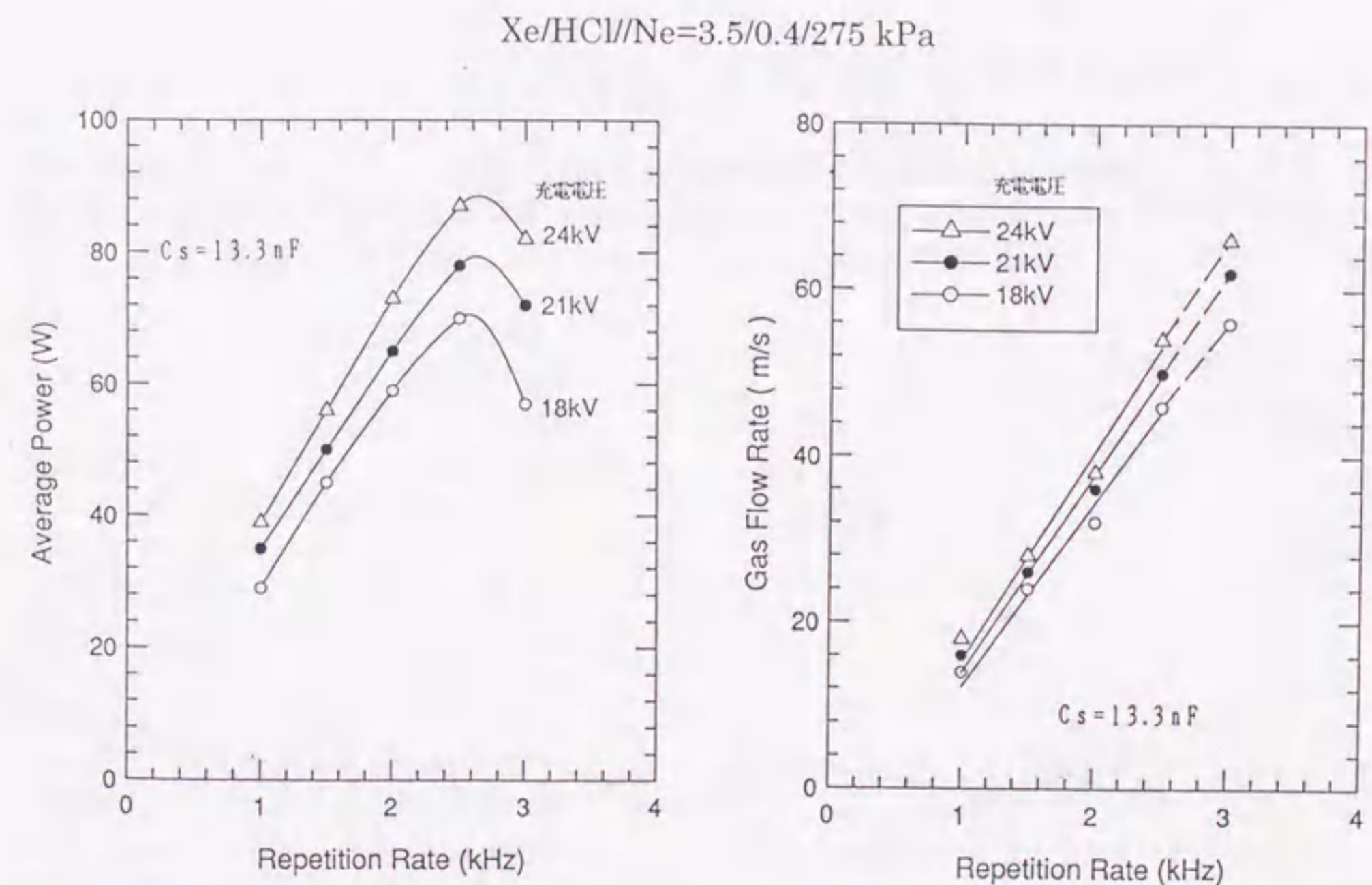


図2-28 繰り返し数に対するレーザー出力、臨界ガス流速特性 (Neバッファ)

一方、ここで充電エネルギーを一定にして、主コンデンサの容量を従来の1/2とし、電圧を主体とするエネルギー注入方式を試みた。その結果を図2-29に示し、 $C_s=6.7$ nFでは、3 kHzまで安定なレーザ発振が得られた。平均レーザ出力は、2.5~3 kHzではやや飽和傾向を示したものの、3 kHzにおいて最大60 Wとなった。 C_s が小さくなった分、 C_p への電荷移乗が低下して出力減になったと思うが、電圧注入方式の方が、コンデンサエネルギー注入方式より安定な放電が得られ、従来よりTEA CO₂レーザでも見られたものと同じと推察する。一つの理由として、充電回路のインダクタンスが下がり、放電開始電圧が上昇して、有効に入力エネルギーが放電部に注入されるものと考えられる。

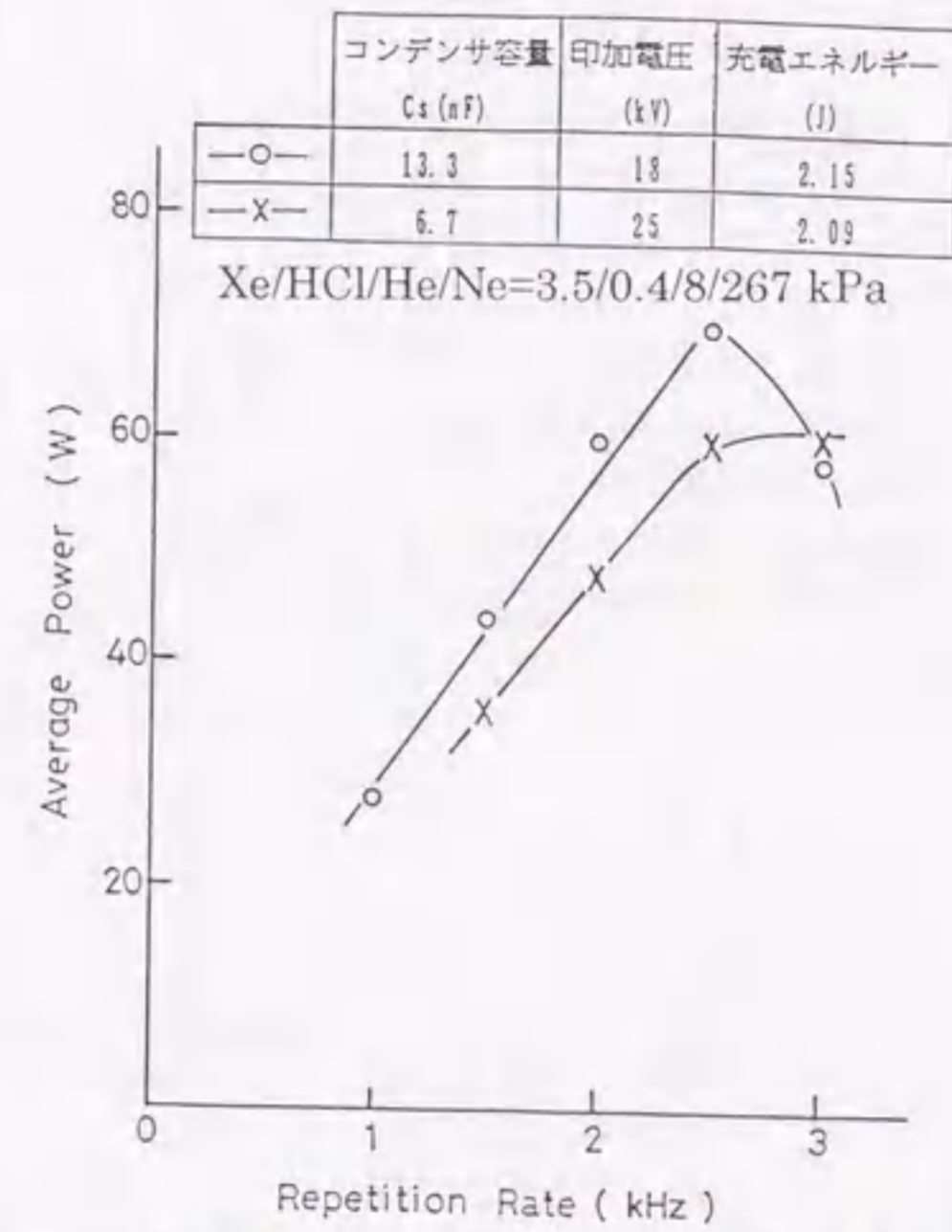


図2-29 繰り返し数に対するレーザ出力特性

2.5. 繰り返し数の封入ガス依存性

高繰り返し動作における放電の安定性を検討するため、各種ガス条件下における臨界ガス流速、CR値特性を測定した。それらのうち、Heバッファガスにおける特性を図2-30、31に示す。

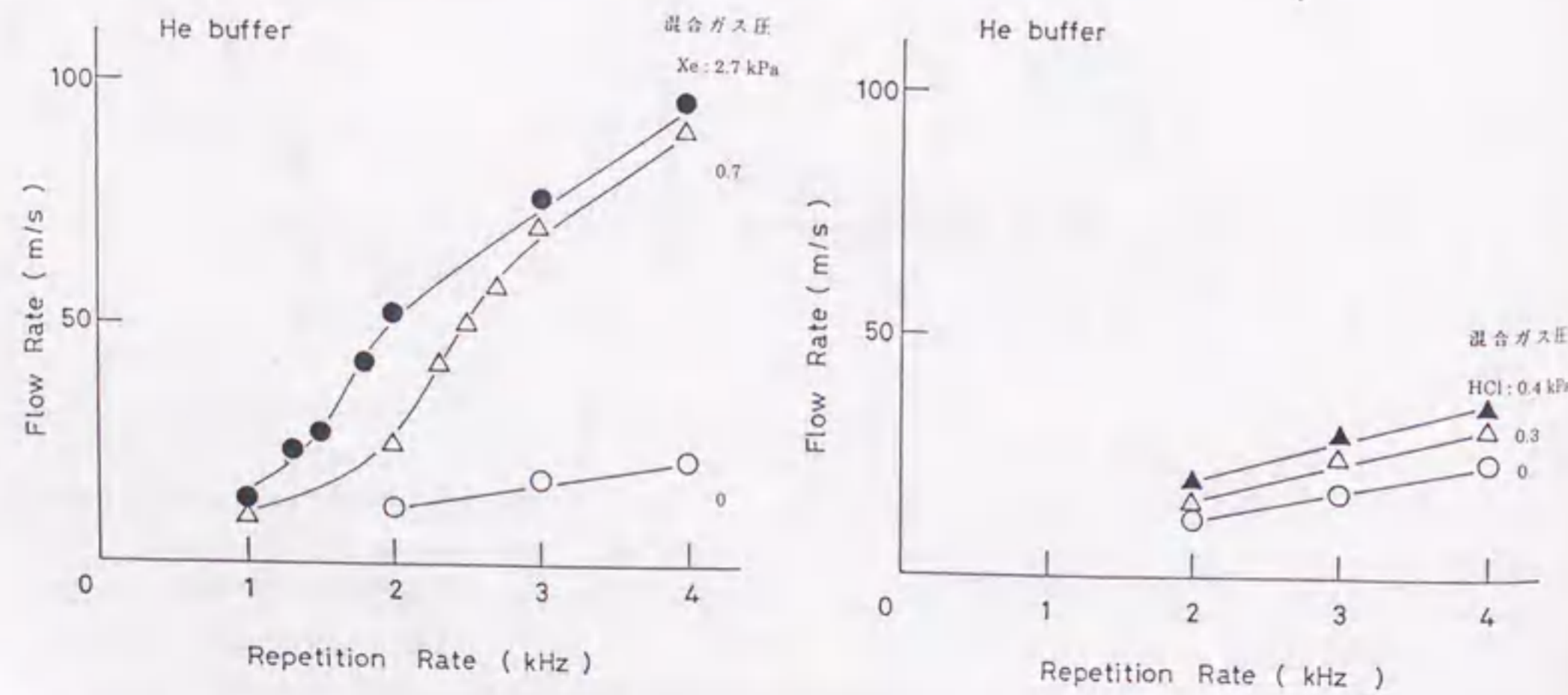


図2-30 Heバッファ臨界ガス流速特性 (左: Xe分圧, 右: HCl分圧 パラメータ)

ここでいう臨界ガス流速も、前節と同じものを言う。図2-30 (左)は、Heガス266 kPaにXeガスを混合した場合の臨界ガス流速特性である。Heガスのみの場合(Xe:0 kPa)では、4 kHzにおいてもガス流速は22 m/sもあれば十分である。これに対し、本装置でレーザ発振が可能な最少限のXe分圧、0.7 kPaにおいては、4 kHzのとき、92 m/sのガス流速が必要となる。また、臨界ガス流速は、2 kHz以上で急激に増加していることもよく分かる。一方、HCl分圧を変化させた場合を図2-30 (右)に示すが、Xeの場合ほどの顕著な特性はみられてない。また、図2-31には、Heバッファの各種ガス条件下における臨界ガス流速特性、およびCR値特性を示す。ここで、Xe:3.5 kPaは、レーザ発振において最適なXeガス分圧である。

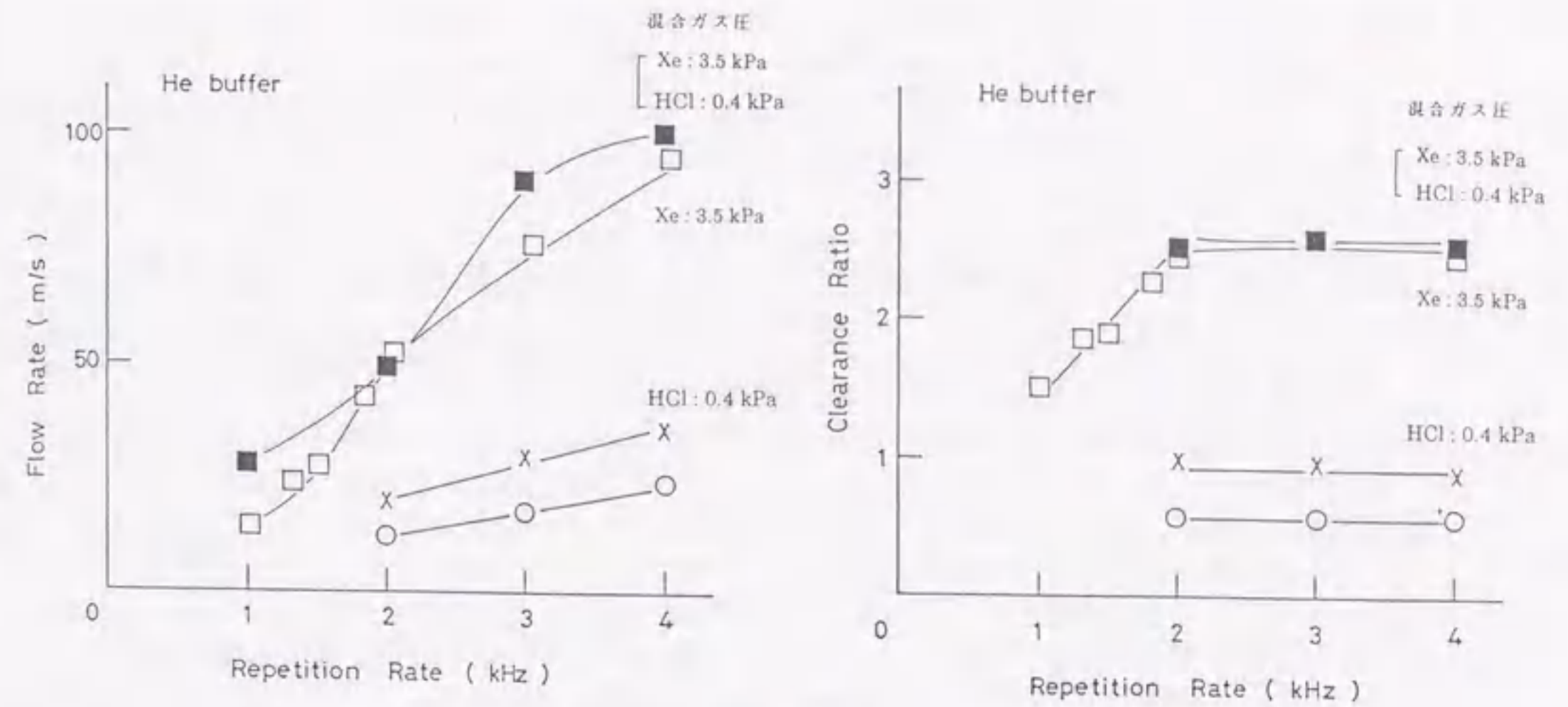


図2-31 Heバッファ臨界ガス流速特性 (左)とCR値特性 (右) (各種ガス構成)

同様な検討を、Neバッファガスについても行った。その結果を、図2-32、33に示す。この場合は、Xe分圧の影響がHeバッファの場合に比べて比較的緩やかである。ただし、3 kHz以上では、その影響は顕著に表れており、図2-28 (左)に示す出力特性の結果と多くの共通性が見られる。

また、レーザ用混合ガスにおいては、Heバッファガスの場合と異なり、HClとXeの相互作用によって見られる影響が顕著に現れており、CR値は、繰り返し数に対し直線的に増加している。

以上から、放電とレーザ発振の安定性/繰り返し性には、Xeガス分圧がもっとも大きな影響を与えているものと結論できる。そこで、Xe分圧を変化させ、下流アーク状放電が発生しない流速条件において、高繰り返し動作におけるレーザ発振状態を調べた。繰り返し数の上昇に伴い、レーザ出力エネルギーが低下し変動するのは、NeおよびHeバッファガスに共通して観測されている。3 kHzまでの高繰り返し動作では、レーザ出力

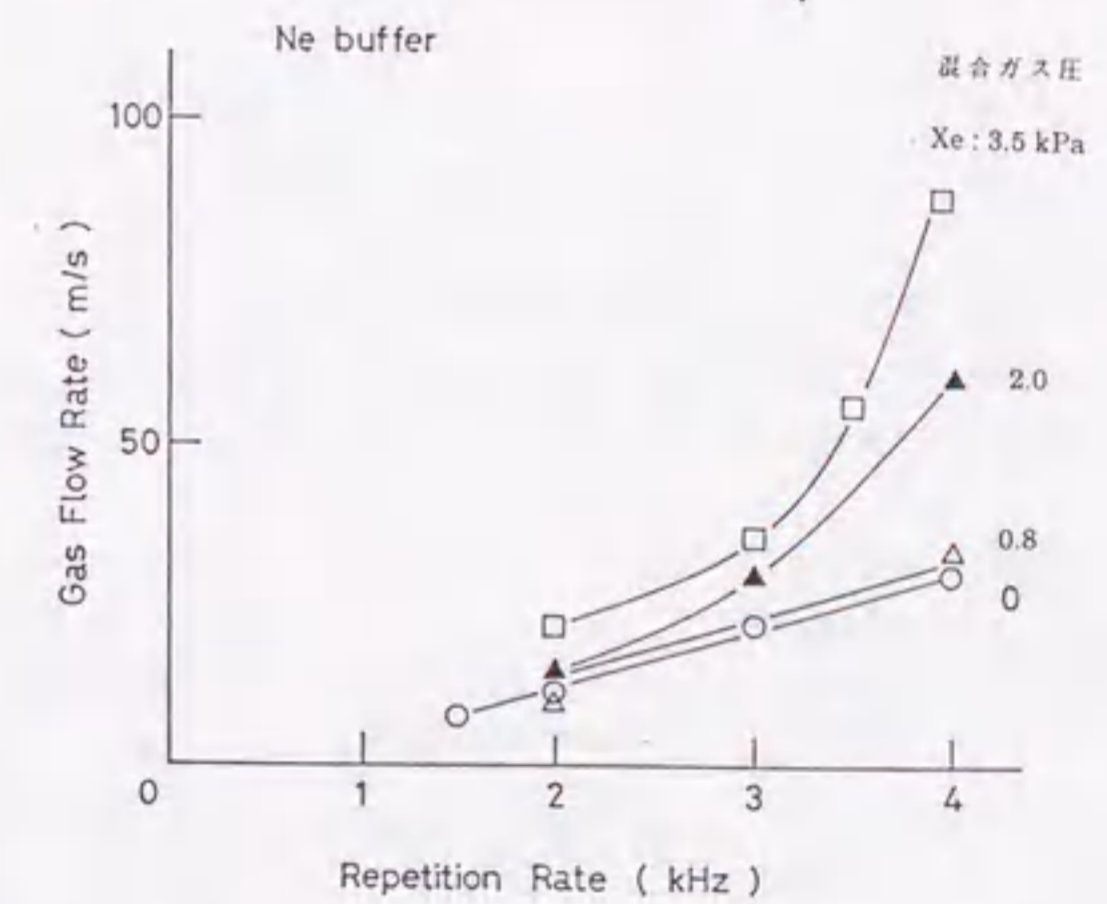


図2-32 Neバッファ臨界ガス流速特性

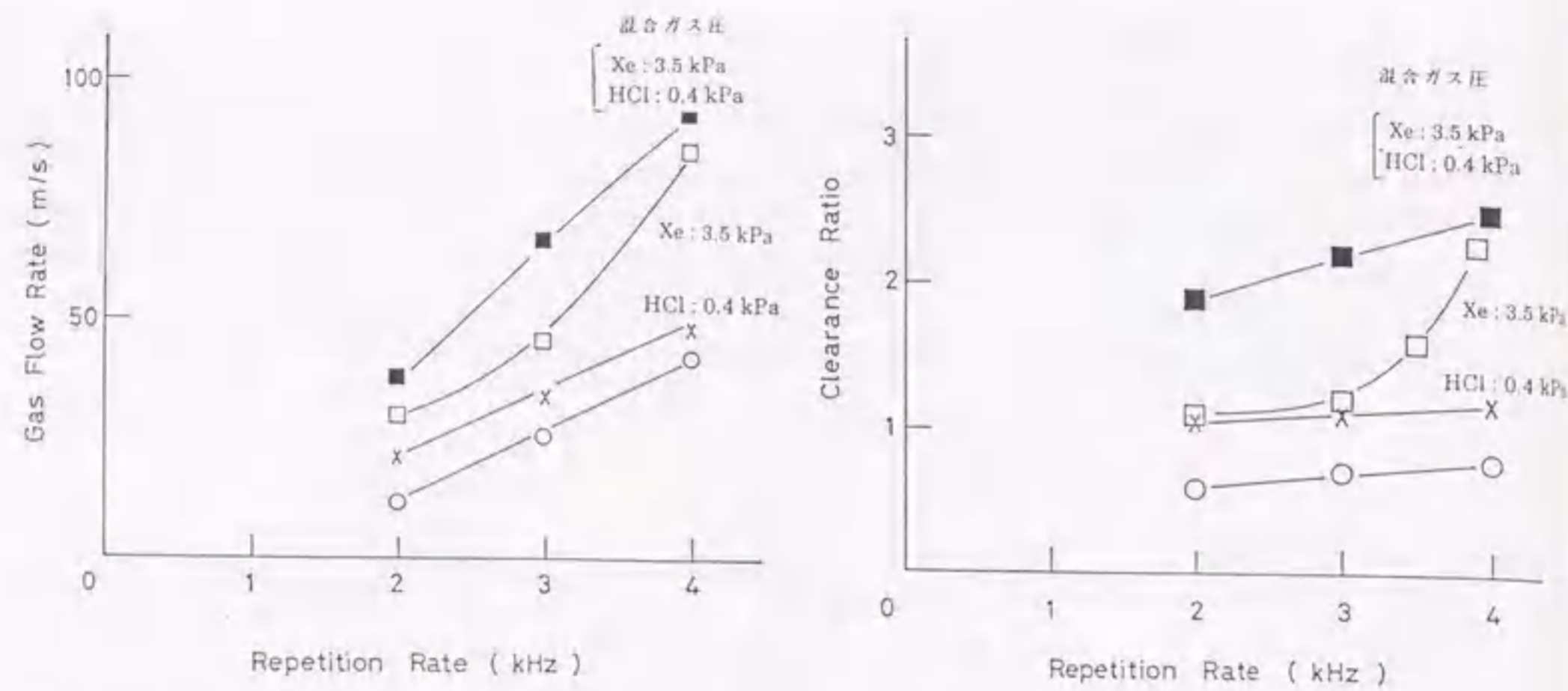


図2-33 Neバッファ臨界ガス流速特性(左)とCR値特性(右) — (各種ガス構成)

は低下するものの連続パルス発振が得られる。しかしながら、間欠的な周期変動状態が発生すると、レーザー発振が起きないパルスがあるため、等価的に繰り返し数は低下していることになる。このため、レーザー装置の最大繰り返し数は、間欠的な周期変動が発生しない最大繰り返し数と定義した。

図2-34に、Xeガス分圧をパラメータとした、繰り返し数と平均出力との関係を示す。この測定で、ガス流速は、CR=3を保ちながら繰り返し数と共に上昇させた。各Xe分圧において、平均出力は、ある繰り返し数まで直線的に増加し、その後飽和あるいは低下する。Xe分圧が低いほど、直線的に増加する最大の繰り返し数は高くなっている。また、Xe分圧が高くなるほど、飽和後の出力低下は大きくなっている。Xe=1.3 kPa、4.4 kHzで、約40 Wのレーザー発振が得られたほか、Xe=1.9 kPa、4 kHzで60 Wのレーザー発振が得られた。Xe分圧が高くなると、間欠的な周期変動開始の繰り返し数は低くなり、Xe=3.5 kPaでは、3.5 kHzまでの動作となる。

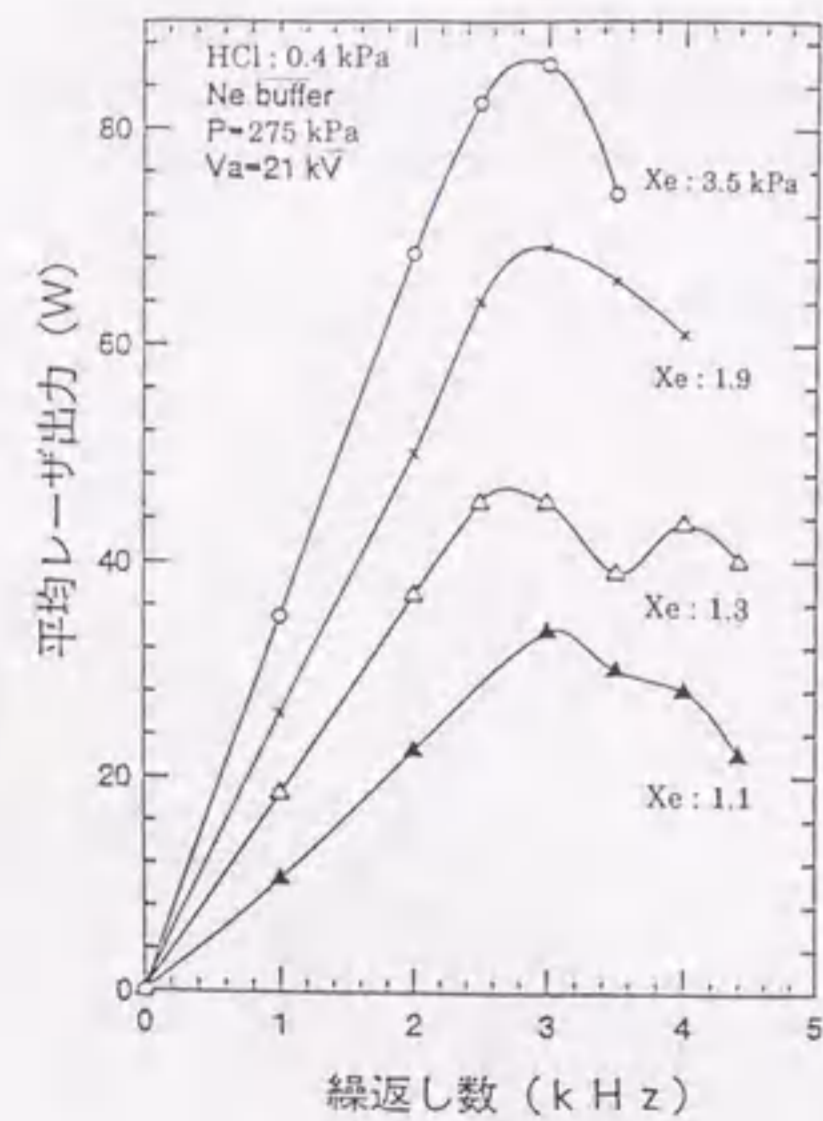


図2-34 繰り返し数に対するレーザー出力

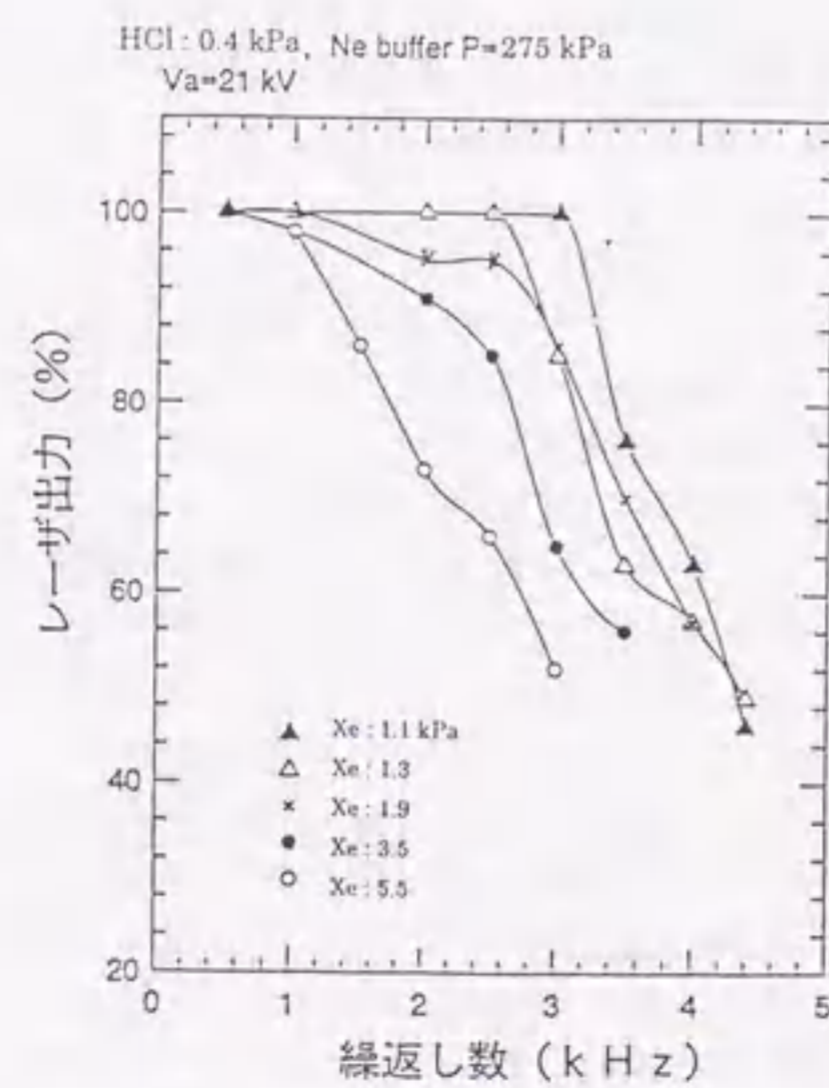


図2-35 繰り返し数に対する出力減少率

図2-35は、連続動作における出力低下をパルス毎のレーザーエネルギーで表示したもので、1 Hzでの値を100%とした。Xe分圧が1.1 kPaでは、3 kHzまでレーザーエネルギーは低下しない。Xe分圧が高まるにつれて、低い繰り返し数から低下が始まり、その低下割合が大きくなっている。レーザー発振の結果としては、Xe分圧を低め、かつ高速充電型の改良電源を用いることにより、4.4 kHzの高繰り返し動作を実証できた。

2.6. ガス密度揺らぎ

ピン電極間、あるいは主電極間に放電が発生すると、ガス媒質は、一瞬にして加熱され、断熱膨張の状態となる。このとき、ガスは、音響波、あるいは衝撃波を伴って膨張し、ガス密度揺らぎができる。このガス密度揺らぎの大きさ、伝搬速度、減衰時間などのパラメータを分析すれば、2.5 kHz以上における放電不安定性の原因や、レーザー発振の波打ち現象などを解明する手掛かりをつかめる可能性がある。(40)、(43)、(75)、(76)

図2-36は、He-Neレーザーを用いたガス密度揺らぎの測定光学系を示す。He-Neレーザービームは、2枚の鏡を使って、電極に対し上下方向、水平方向に平行移動させる。放電部を透過し加熱ガスより偏向されたレーザービームは、高速応答が可能なピンフォトダイオードP.D.により位置検出される。なお、揺らぎの空間分解能を上げるため、P.D.の前にピンホールを配置している。

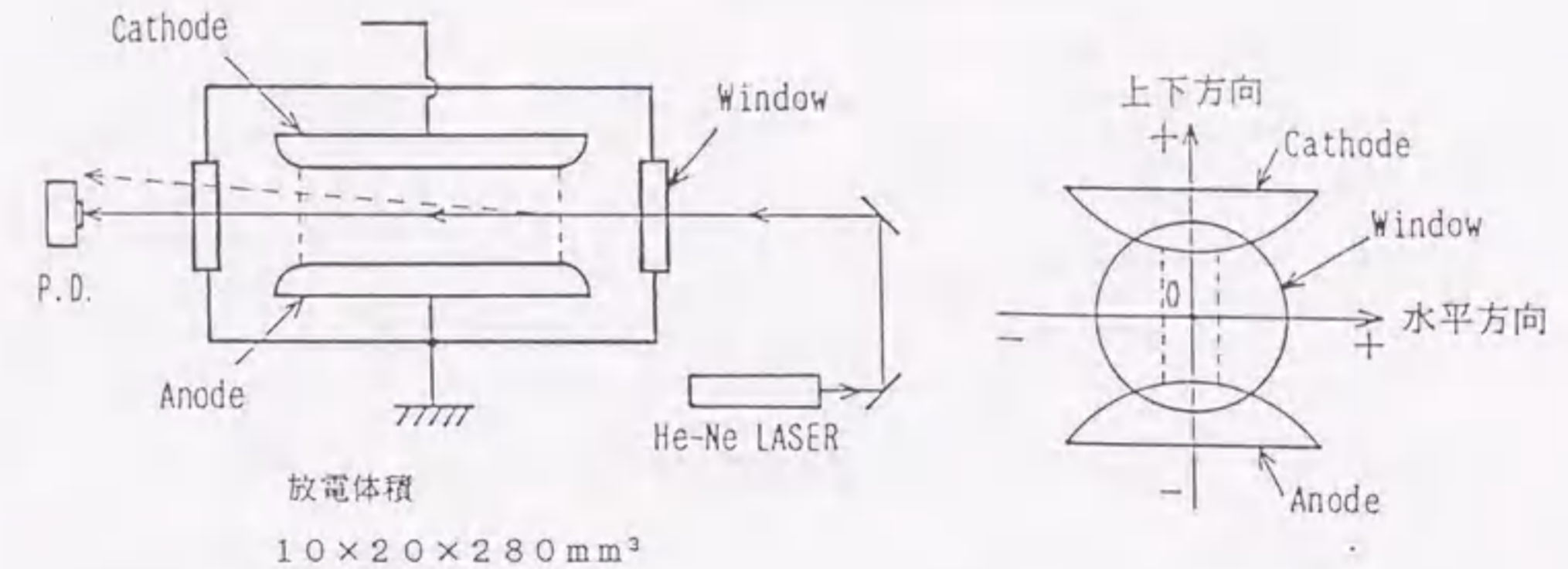


図2-36 ガス密度揺らぎ測定の原理図

図2-37(左)は、He-Neレーザービームを主電極間の上下方向に移動させて測定した結果である。これから、陰極(Cathode)、陽極(Anode)間を、互いに逆方向に伝搬する揺らぎが観測された。これに対し、主電極の水平方向には、図2-37(右)示すように非常に速く伝搬する2つの揺らぎが観測された。

これら二つの揺らぎを、位置と時間の関係で表すと図2-38(左)となる。早い時間より観測される大きな揺らぎは、1,000 m/sを越える非常に速い伝搬速度を持つ。一方、後半の小さな揺らぎの伝搬速度は、約850 m/sであった。さらに、予備放電のみを点弧し、水平方向に伝搬する揺らぎを観測した。これは、図2-37(左)において90~100 μs付近に観測された揺らぎと一致している。これら予備放電による揺らぎを、位置と時間の関係で表すと図2-38(右)となる。直線の傾きは、揺らぎの伝搬速度を示しており、方向は互いに逆となるが、いずれも約850 m/sで伝搬し、その切片の値は、予備放電用ピン電極の位置に一致していた。

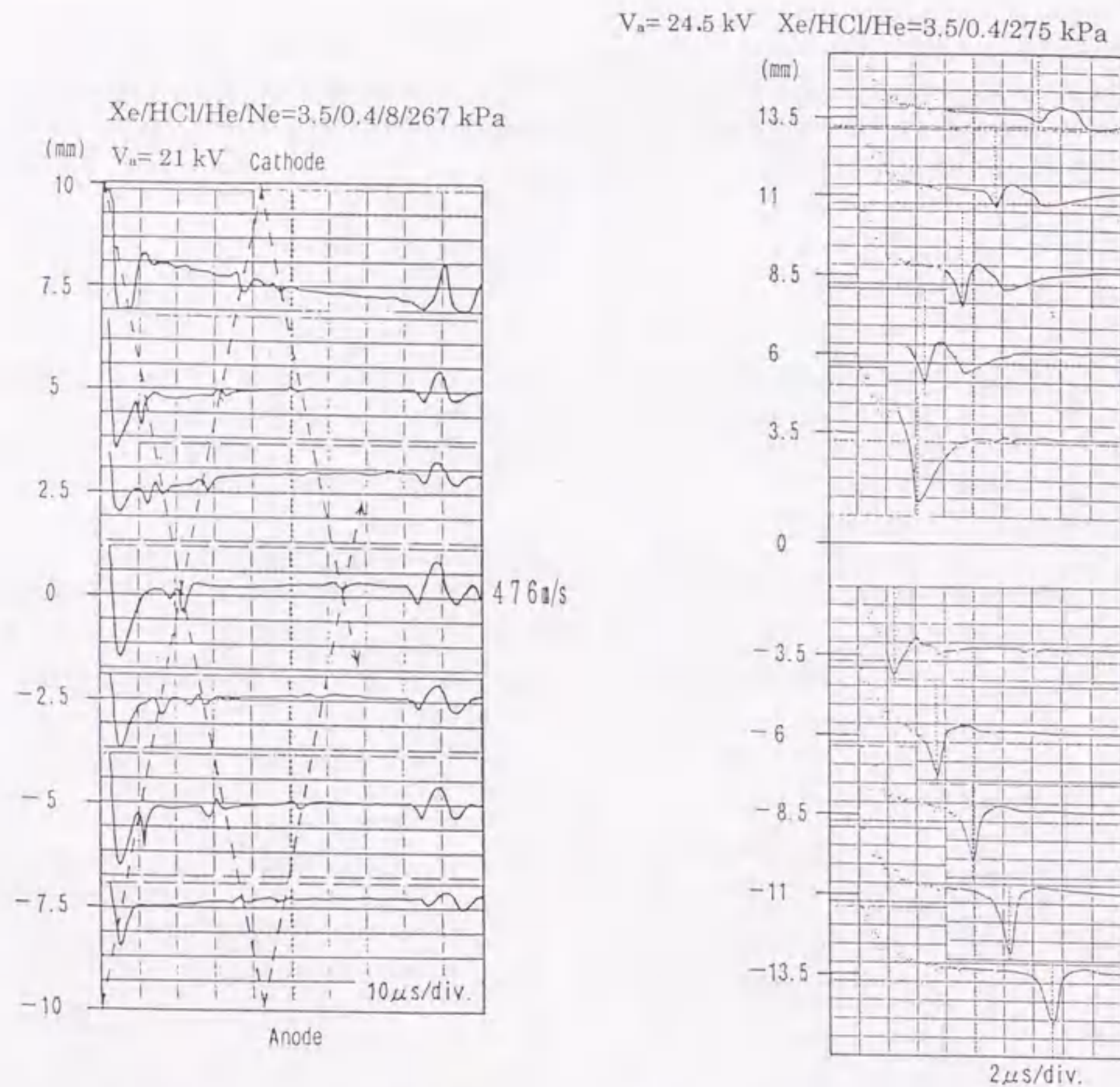


図2-37 電極間を伝搬する揺らぎの測定結果 (左: 上下方向、右: 水平方向)

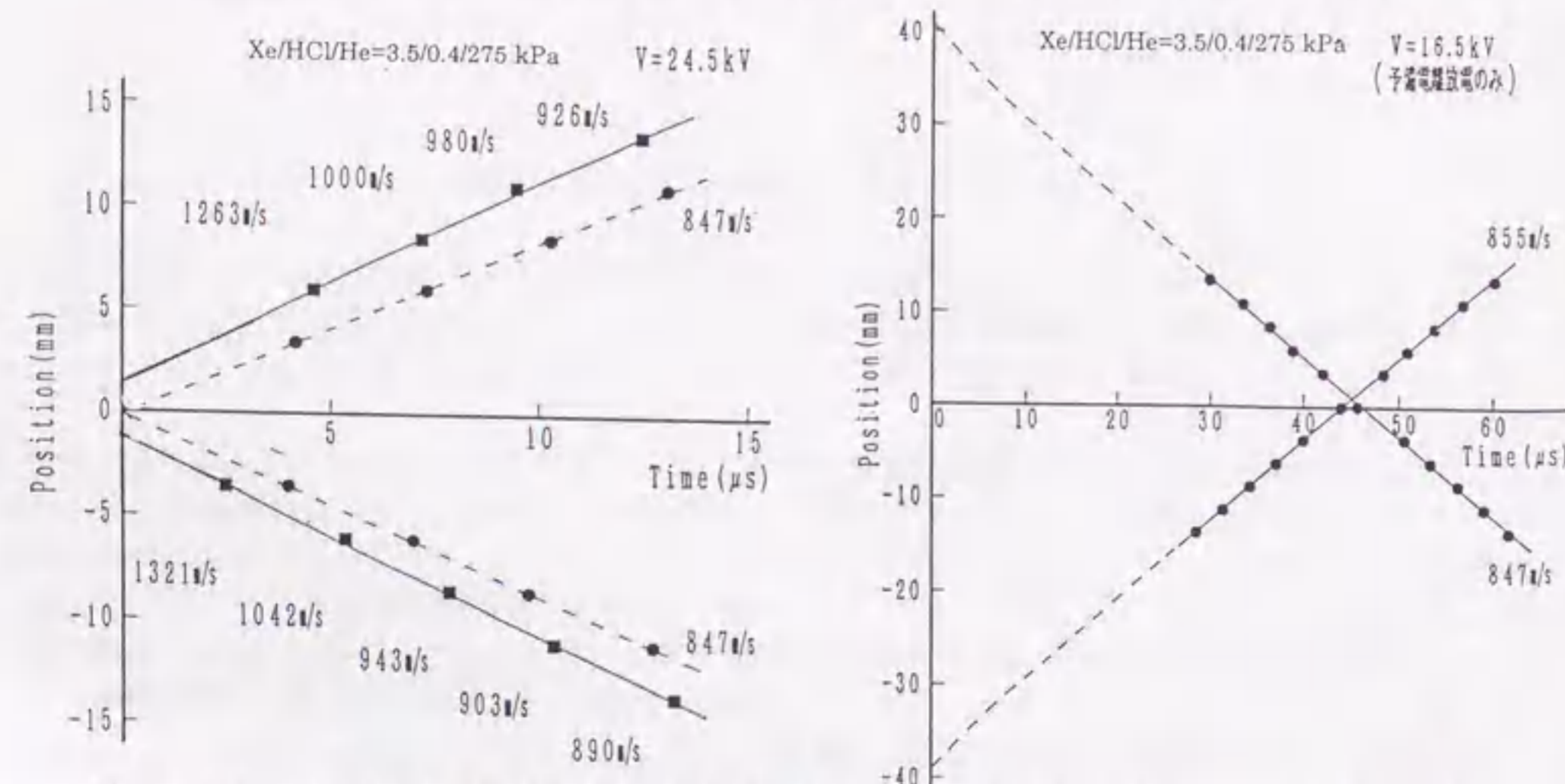


図2-38 水平方向の揺らぎ (左) と予備電離放電による揺らぎ (右) の位置-時間特性

以上の測定結果を、模式図的にA, B, Cの揺らぎとして表すと図2-39となる。理想気体では、定圧比熱と定積比熱の比を γ 、気体定数をR、絶対温度をT、1 mol 当りの気体質量をmとすれば、そこでの音速は、 $\sqrt{\gamma RT/m}$ の2乗根で表される。したがって、ガス揺らぎの伝搬速度は、ガス温度やガスの種類・混合条件によって異なるが、Cの揺らぎは、ガス温度を室温と仮定すると、ほぼ音速で伝搬していることになる。

一方、Bの揺らぎについてもガス温度を室温と仮定することができ、このときの伝搬速度は、音速の1.0~1.6倍であった。また、Aの揺らぎの伝搬速度を音速と仮定すると、放電開始後5~80 μs の時間における電極間のガス温度は、75~95 $^{\circ}\text{C}$ と推定することができる。

表2-4に、HeおよびNeパuffaガスについて、代表的レーザ動作条件でのガス混合条件における各揺らぎの伝搬時間を測定し、上記音速の特性を基に伝搬速度、音速(20 $^{\circ}\text{C}$ を仮定)、ガスの推定温度、および倍率(伝搬速度/音速)を計算して示した。

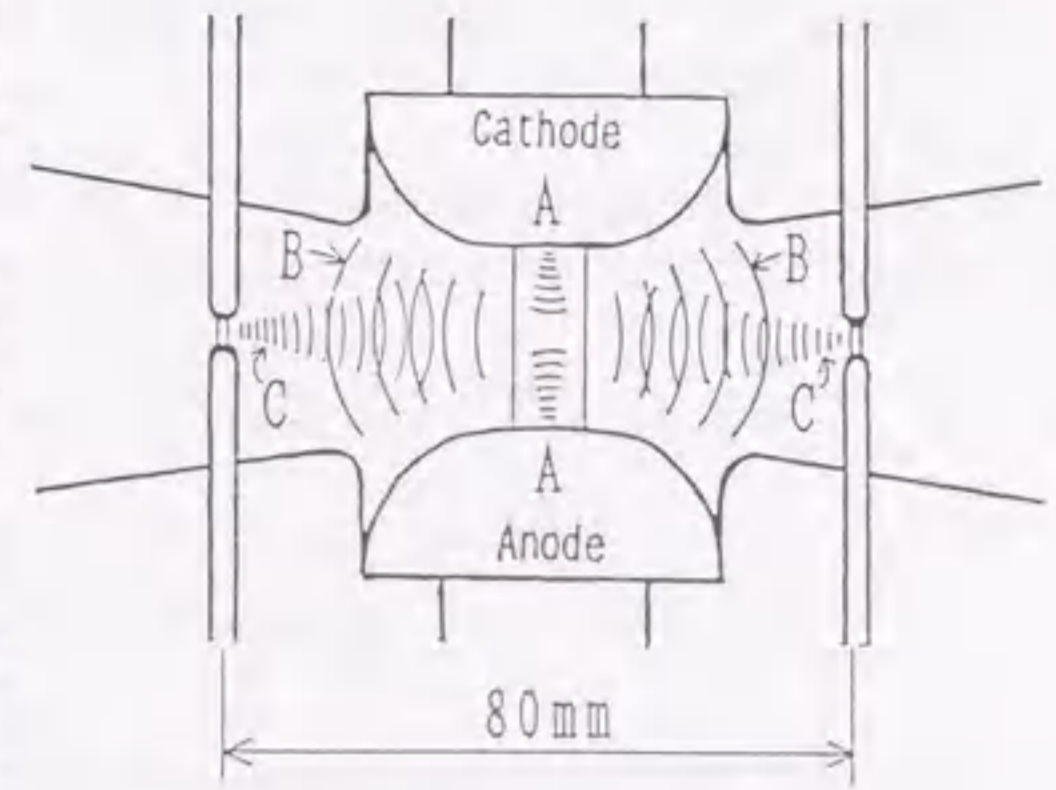


図2-39 ガス揺らぎの模式図

表2-4 ガス条件と伝搬速度の関係

ガス混合条件 (kPa)	揺らぎの種類	伝搬速度 (m/s)	音速(20 $^{\circ}\text{C}$) (m/s)	推定温度 ($^{\circ}\text{C}$)	倍率
Xe/HCl/He=3.5/0.4/275	A	925, 952	850	75, 95	—
	B	890~1321		—	
	C	847, 855		—	
Xe/HCl/He/Ne=3.5/0.4/8/267	A	476	437	75	—
	B	495~711		—	
	C	449		—	

しかし、この方法では光軸方向の揺らぎは測定することができない。そこで、別に piezo素子 (NF回路社 AE904S、以下AEセンサー) を使用し、光軸方向へ伝搬する揺らぎを測定した。これは、レーザ装置の出力ミラー面から主電極方向(光軸方向)へ挿入してあり、放電端部からAEセンサーまでの距離は139 mmとした。また、AEセンサーに機械的振動が伝わるのを防ぐために、レーザ装置とAEセンサーを取り付けるフランジとの間に、振動を吸収するシリコンゴム板を入れた。

また、機械的振動がAEセンサーに伝わっていないことを確認するため、AEセンサー前面に、吸収材(ダンボール紙)を挿入し、放電時にも信号のないことを確かめた。放電時に発生する密度揺らぎの測定は、AEセンサーからの出力信号をデジタルオシロスコープ(HP社54111D)に入力して行った。

表2-5に、He系統ガス(He, Xe/He, HCl/He, HCl/Xe/He)中における揺らぎについて伝搬時間を測定し、伝搬速度、音速(20 $^{\circ}\text{C}$ を仮定)、および倍率(伝搬速度/音速)の計算結果を示した。また、Ne系統ガス(Ne, Xe/Ne, HCl/Ne, HCl/Xe/Ne)中での揺らぎの伝搬特性についても測定結果を示す。この場合、エキシマレーザ用ガス中での

信号レベルがもっとも大きく、300 mVに達した。これに対し、他のガス中での信号レベルは100 mV以下であった。

今回、測定に用いたAEセンサーの感度は0.1 mV/ μ barであり、信号の大きさから圧力変動 $\Delta p/P$ を計算すると、エキシマレーザ用ガス(Neバッファ)では0.1%の圧力変動があり、他のガスでは0.04%であることが分かった。また、表2-5には各種ガスの揺らぎの伝搬速度と音波の速度を合わせて示すが、いずれのガスにおいても、揺らぎが音速より11~15%ほど速く伝搬していることが分かる。

表2-5 各種ガスの伝搬速度

ガス種	伝搬時間 (μ s)	伝搬速度 (m/s)	音速 (m/s)	倍率
He	122.4	1136	1008	1.13
Xe/He	145.6	955	850	1.12
HCl/He	124.8	1114	1002	1.11
エキシマ(He)	142.8	973	850	1.15
Ne	274	507	447	1.13
Xe/Ne	278	500	432	1.16
HCl/Ne	269.6	516	452	1.14
エキシマ(Ne)	279	498	437	1.14

全ガス圧: 275 kPa

圧電素子までの距離: 139 mm

2.7. 放電生成物による出力変動

高繰り返し動作においてガス流速が不足すると、電極に対しガス流下流側にアーク状の放電が発生し、レーザ出力は低下する。ガス流速が十分に足りている状態では、ガス流速を増加させても出力は変化しないと考えられていた。しかし実際には、図2-40(左)に示すようにガス流速に対して、レーザ出力は変化し、1.5 kHzの場合、ガス流速24 m/s未満ではアーク状放電が発生し、30 m/sと60 m/s付近でレーザ出力が低下していることが分かる。そこで、同様の実験を繰り返し数を変化させて行い、ガス流速とレーザ出力の関係を調べ、(2-2)式で定義したCR値によって整理した。図2-40(右)に、Neバッファガス、印加電圧21 kV、におけるレーザ出力のCR値依存性を示す。

縦軸のレーザ出力は、1 Hz時の出力35 mJを100%としている。本図より、各繰り返し数においてCR=2、および4付近で出力が低下し、その度合いは繰り返し数の増加とともに大きくなっていることが分かる。

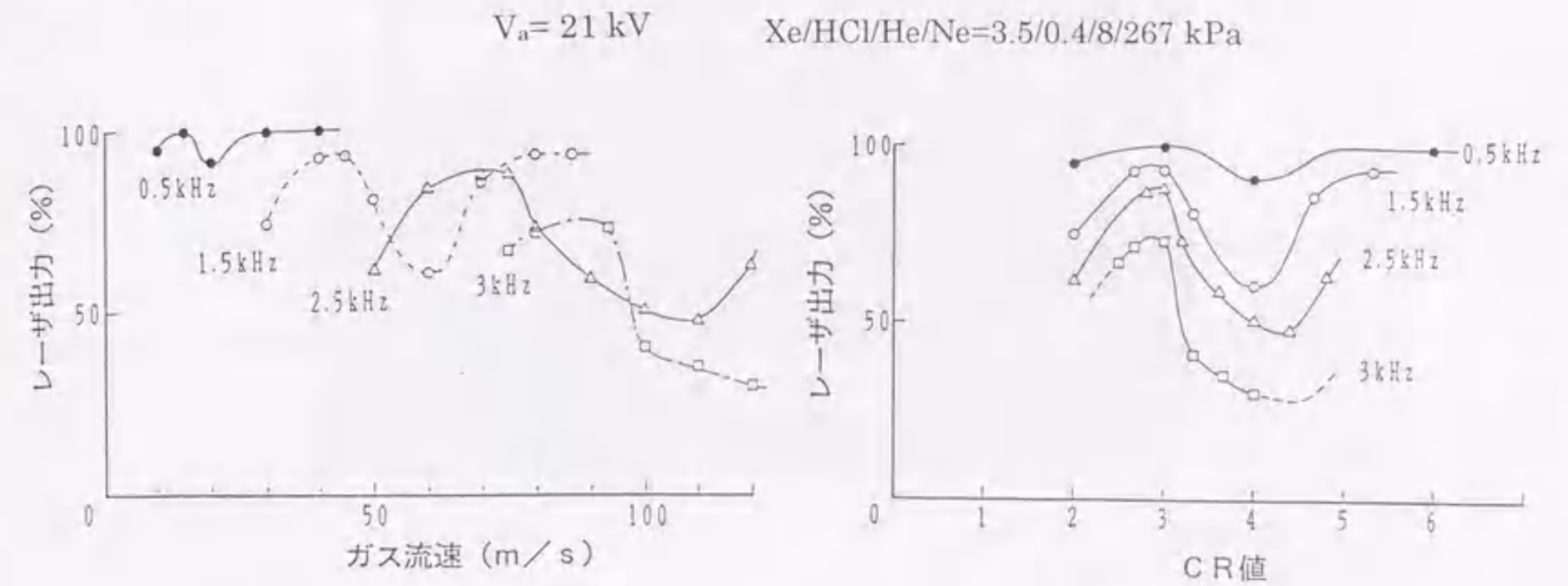


図2-40 レーザ出力のガス流速とCR値依存性(Neバッファ)

Heバッファガス、印加電圧24 kV、における結果を図2-41に示す。この場合、レーザ出力100%は34 mJである。Neバッファガスの場合とほぼ同様なことが言えるが、レーザ出力の低下の度合いがより大きいことが分かる。なお、CR=2未満ではガス下流のアーク状放電が発生し、出力が不安定になるのでここでは示していない。

CR=2における出力低下の原因としては、一つ前の主放電の発光による生成物のほかに、二つ前の予備電離放電による生成物も考えられる。これは、CR=2の条件では、二つ前の放電時のガス上流側ピン電極付近のガスが、主放電空間に位置的に到達することによる。これらを明らかにするため、3ショットのパルス放電を点弧するトリプルパルス動作を行った。2ショット目に注目すれば、これまで用いてきたダブルパルス動作と同じである。パルス間隔1 ms、つまり、換算繰り返し数1 kHz、Heバッファガスの場合を図2-42に示す。印加電圧は電源の容量により変化するので、各パルスごとに図中に示した。

ここで、まず1ショット目の出力がガス流速に対してほぼ一定値を示している

ことから、ガス流速を増加させた場合に発生するガス流の乱れ、およびガス温度上昇による条件の変化等の影響がないことが分かる。次に2ショット目の出力を見ると、CR=2(ガス流速20 m/s)では低下していない。この結果は、CR=2における出力低下の原因が、一つ前の放電による生成物ではなかったことを明確に示している。また、CR=4をピークに出力が低下していることは、一つ前の予備電離放電による生成物の影響であるという推測を肯定するものである。さらに、3ショット目においてはCR=2で出力が低下しており、その原因が二つの予備電離放電による生成物であることを示している。

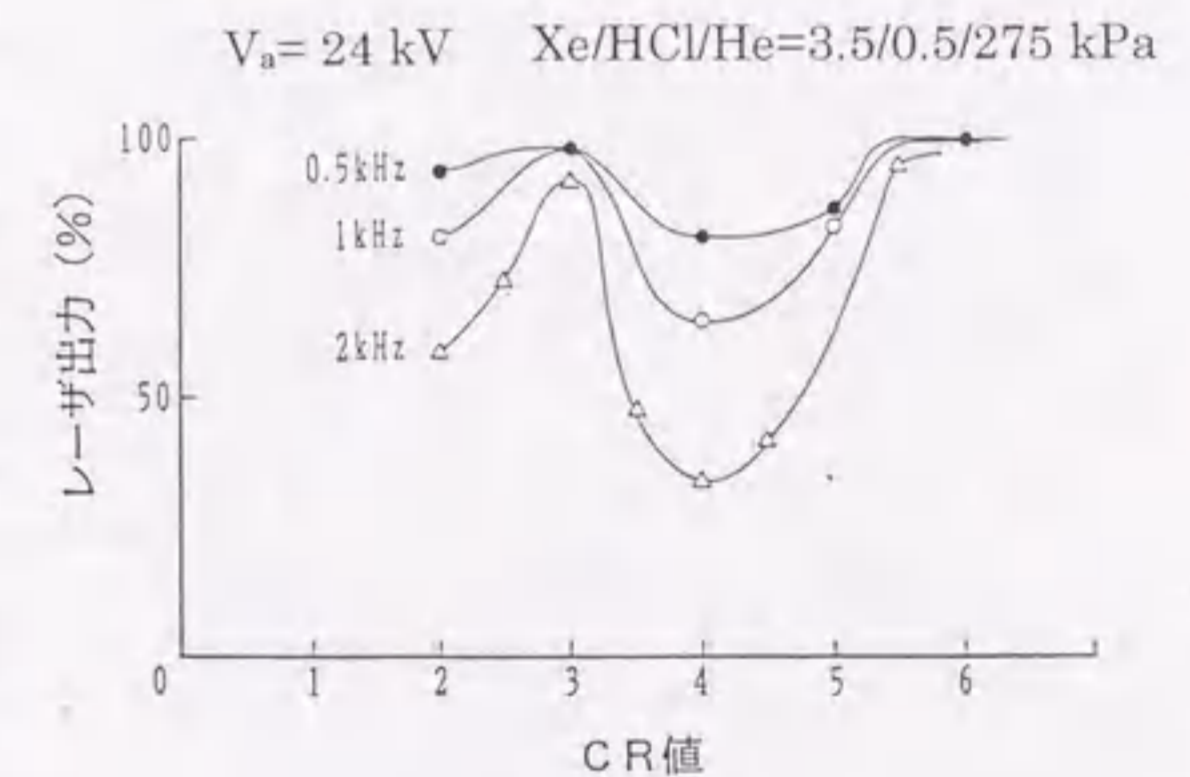


図2-41 レーザ出力のCR値依存性(Heバッファ)

以上の結果から、レーザー出力がCR値に依存して変化する現象は、ガス上流側の予備電離放電による生成物に起因することがほぼ明らかになった。図2-43の放電電極部概略図で示すように、ガス上流側の予備電離放電によって発生した生成物が、それ以降の主放電点弧時に放電空間に流れ込む条件、つまりCR=2、および4において、レーザー出力を低下させる原因になっていると考えられる。

さらに、この裏付けをするため、ガス上流側の予備電離用ピン電極を取り除き、CR値に対するレーザー出力を測定した。このとき、ピーキングコンデンサの容量は変化しないようにした。予備電離ギャップ数は下流側のみとなるため半分になり、予備電離ギャップ間隙にレーザー出力が依存する可能性があるため、二通りのギャップ間隙で行った。Neバッファガスについては、予備電離ギャップ間隙が2~3mmの場合の結果を同図に示す。レーザー出力100%は41mJであり、レーザー出力のCR値依存性は全く見られず、これまでの推察の正しかったことが実証された。ただし、繰り返し数の増加にともなうレーザー出力の低下はまだ存在している。この繰り返し数に対する出力低下の度合いは、図2-40におけるCR=3のときとほぼ等しく、この条件では予備電離放電による生成物がまったく影響していないことが分かる。(40)・55)・56)・77)

したがって、この出力の低下については、ほかの原因を考えなければならない。予備電離ギャップ間隙を1~1.5mmと小さくした場合には、このレーザー出力の低下度合いは大きくなっている。これについては、すでに2.3節で検討している。また、CR=3におけるレーザービームの空間分布を図2-44に示す。同図は高速光ビームモニター(エステック社265G(UV))を用いて測定した結果である。左上から、1、2、3、4kHzの順に、ダブルパルス動作モードにおいて、2ショット目を取得したものである。繰り返しが高くなるにつれて、ピーク値が順次減少すると共にビームの幅が狭くなっているが、ビームの空間分布は比較的良く、ガス密度揺らぎなどによる不均一性は発生していない。

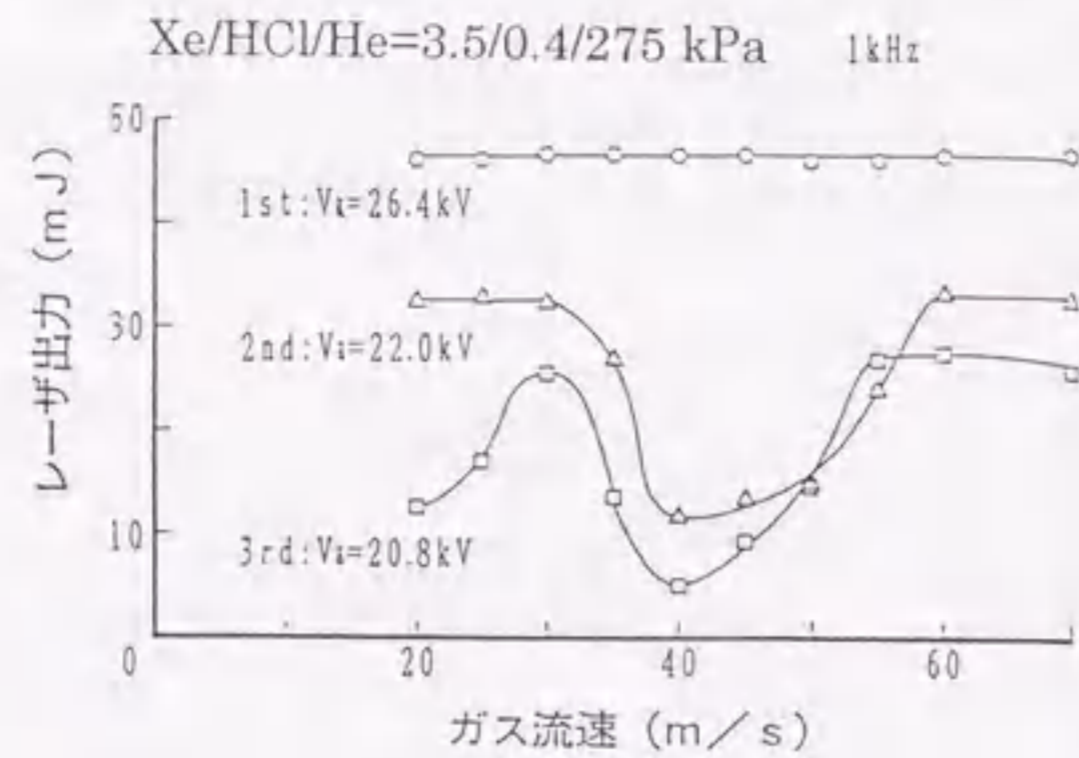


図2-42 トリプルパルス動作特性

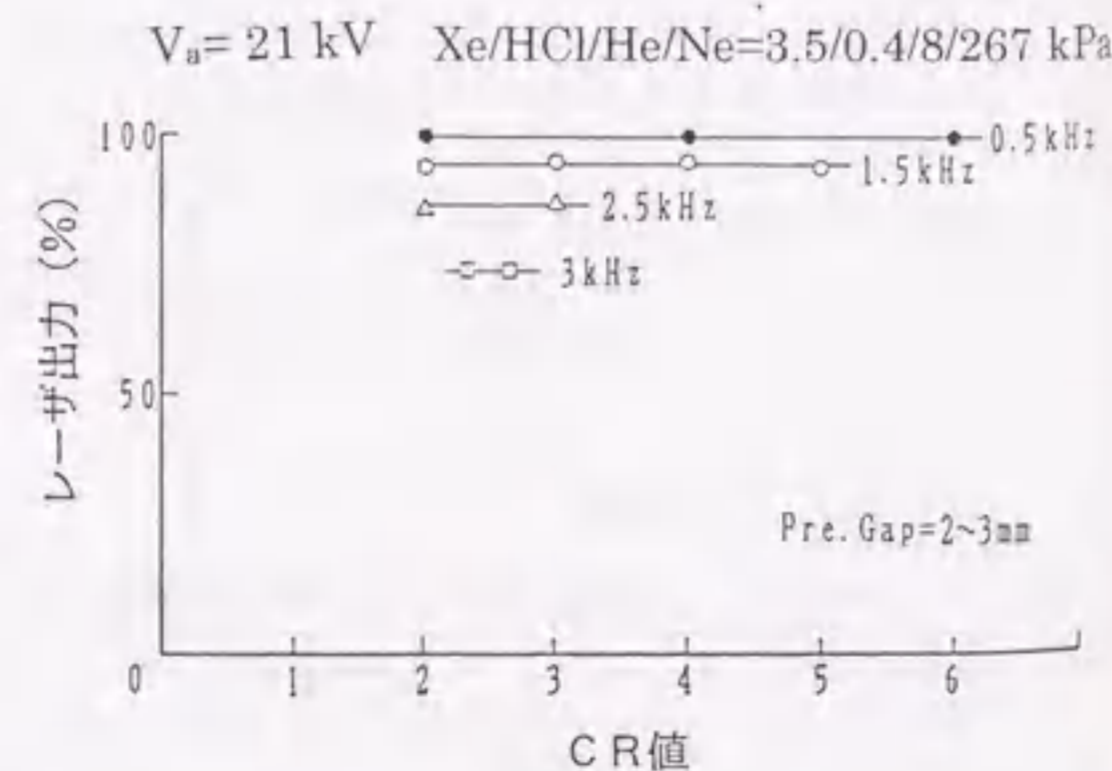
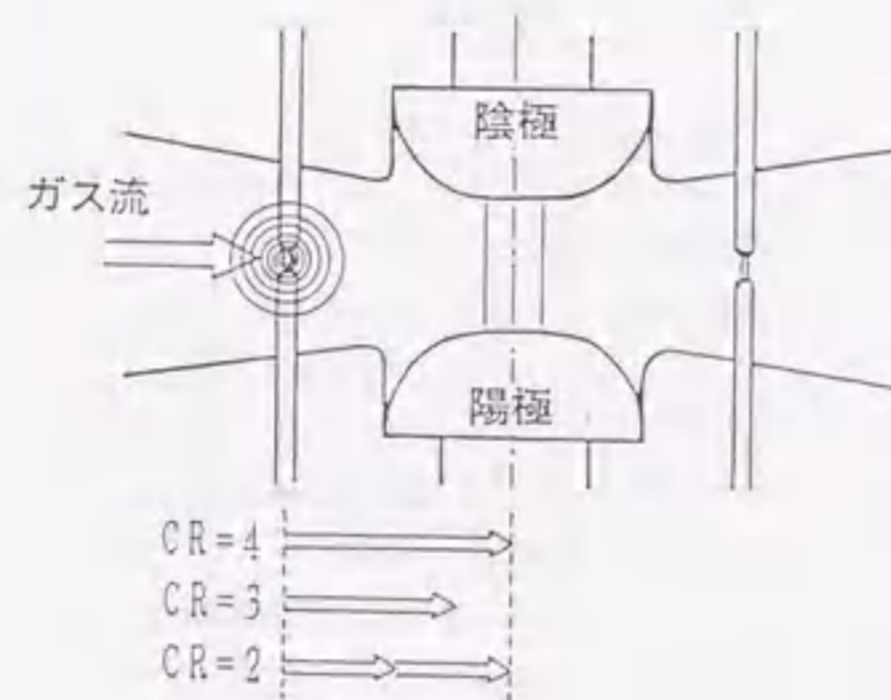


図2-43 レーザ出力のCR依存性説明図とガス上流側ピン電極放電の影響

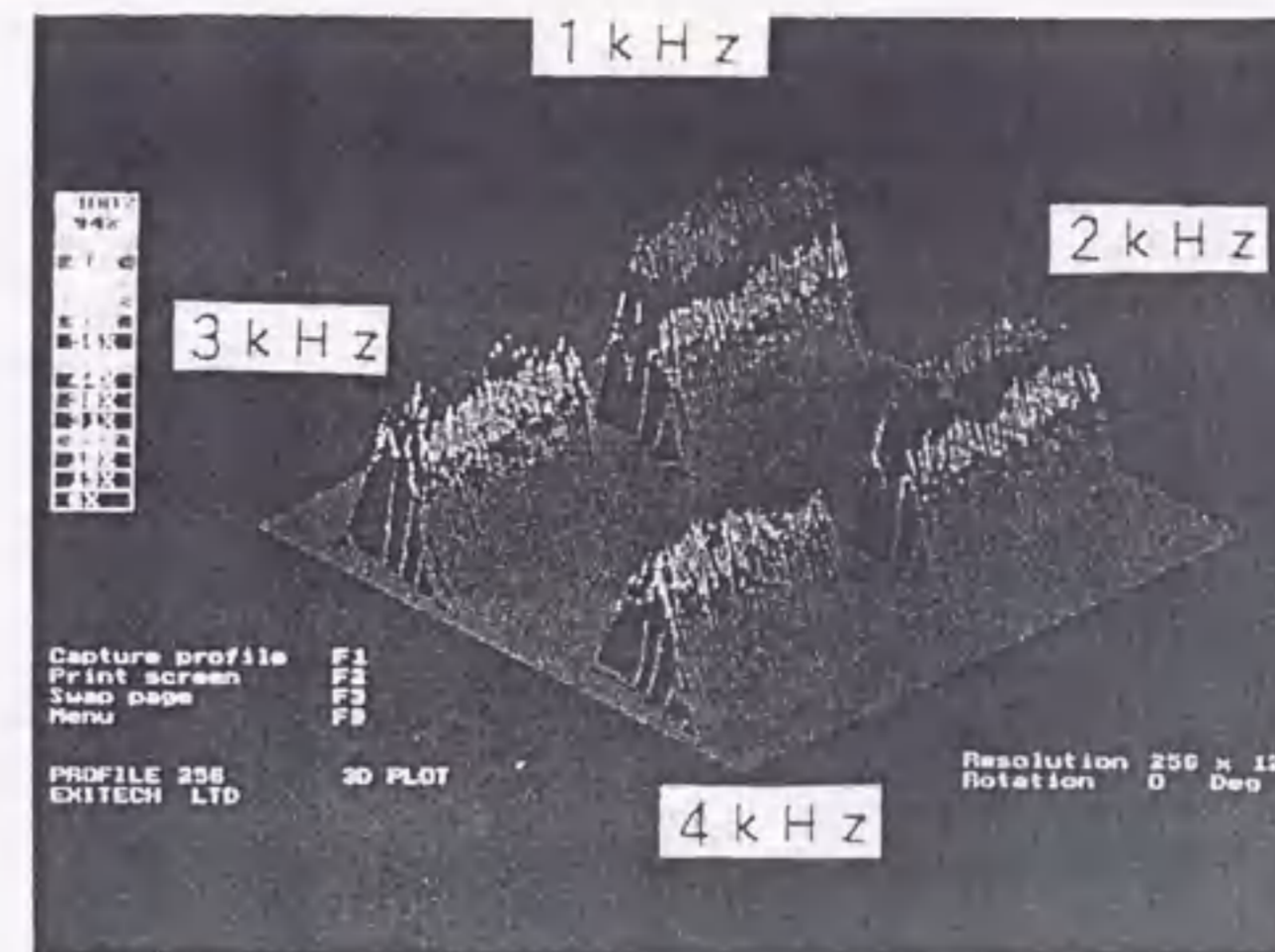


図2-44 高速光モニターによるビーム空間分布

2.8. 基礎実験の考察

2.8.1. 予備電離の影響

まず、HeおよびNeバッファガスの高繰り返し特性の相違について考察する。Heバッファガスでは、予備電離破壊電圧を高くすることにより、安定に発振できる繰り返し周波数が高くなった。これは、今までのレーザー装置が、Heバッファガスにおいては予備電離不足であったことを示し、その結果、繰り返し数を高くできなかったと考えられる。

これに対し、Neバッファガスでは、繰り返し特性が予備電離破壊電圧に依存しなかった実験結果から、十分な予備電離がすでに行われていたことが推測され、2.5 kHzまでの高繰り返し動作が可能であったと考えられる。したがって、3 kHz以上での出力低下については、他の要因を考える必要がある。また、Neバッファでは1 kHzで出力が不安定になっているので、明らかにギャップ間隙を大きくし過ぎている。高繰り返し動作に対する最適値は、1~2 mmと2.5~3.5 mmの間にあると思われる。一方、Heバッファでは、さらにギャップ間隙を拡大したほうが良くなる可能性がある。

次に、HeおよびNeバッファガスにおける予備電離強度の差異について考察する。HeやNeの最低電離電圧はそれぞれ24.6, 21.6 eVであり、光電離させるためには、それぞれ50、および57 nmのVUV光が必要になる。したがって、バッファガスは直接電離されないはずである。しかし、実際に予備電離電子密度を測定し、Neバッファの方が10倍大きいという結果が得られた例もあり、本実験結果もそれを肯定する。

このことは、“不純物の光電離”を考慮すると説明することができる。本実験で使用したHeの純度は99.9999%であり、Neは99.99%である。これはそれぞれ最高純度のものであり、一般に使用されているものと考えられる。予備電離によって生成される初期電子が、主に構成ガス中の電離電圧の低い不純物から発生すると仮定すると、Neのほうが100倍不純物が多いことになり、初期電子数は当然Heより多くなる。レーザー動作により、チャンバ内部構造材から発生する多様な不純物ガスも考慮に入れる必要があり、これらを同定するために多くの研究が行われているが、ここではその議論には触れない。いずれにしても、バッファガスにより最適予備電離条件の違うことが明らかになったので、今後のモデル装置設計にはこれを反映させる。

2.8.2 Xeガス分圧の影響

Xe分圧を1.9, および3.5 kPaとし、ダブルパルス動作、連続動作における繰り返し数とレーザーエネルギーの低下について調べた。図2-45にこの結果を示す。図中破線は連続動作、実線はダブルパルス動作である。ダブルパルス動作と比較すると、すべての繰り返し数において、Xe=1.9 kPaのほうが低下が少なくなっている。また、Xe=1.9, 3.5 kPaともに、ダブルパルス、連続動作はほぼ同じ値であるが、ある値以上の繰り返し数では、連続動作の出力が大きく低下している。この値は、Xe=3.5 kPaでは2.5 kHz, 1.9 kPaでは3 kHzとなっており、Xe分圧が高いほどその低下繰り返し数は低くなっている。Xeによる高繰り返し動作特性が異なる原因に関しては、次の3点が考えられる。

(a) Xe混入による放電生成物の発生

下流アーク状放電発生の実験では、Xe量が多くなると発生しやすくなった。これは、放電生成物が種となっており、Xeの増加により放電生成物の発生が多くなっていることが推測される。これが、高繰り返し動作で放電の不安定性に影響する。

(b) Xeによる放電の不安定性

Xeガスは、バッファガス中に混入させると、低繰り返し動作においても放電幅が狭くなり、放電集中が発生しやすくなる。これが、高繰り返し動作になるとさらに顕著となり、空間的不均一性の発生が観測される。これは、Xeガスが電離しやすい上に、電離状態で長時間局在して残留するためと推察される(第6章参照)。

(c) Xe混入によるガス密度揺らぎの増大

He-Neレーザー、ビエゾ素子による揺らぎの測定では、Xeガス量を多くすると、放電時に発生する揺らぎが大きくなることが報告されている。したがって、揺らぎが反射して放電部に戻るなど、その影響を受ける時間が長くなり、高繰り返しではさらにその影響が加算され大きくなる。

実際の動作では、これら3種類の要因が複雑に絡んで作用していると考えられる。

2.8.3 その他ガス諸条件の影響

Neバッファガスにおいても、3 kHz以上の高繰り返し動作では、レーザー出力が減少する現象がみられた。この原因を解明するため、連続する200ショット全てのレーザー出力パルス列を、デジタルメモリに取込み、それらと比較・検討した。図2-46にその結果を示す。このとき使用したディテクタは、モレクトロン社製パイロ型センサJ50HRである。2.5 kHzでは、初めの数10ショットまでは電圧変動の影響で、レーザーエネルギーが多少変動しているものの、ほぼ一定である。これに対し、3 kHz, 4 kHzでは、パルス毎のレーザーエネルギーが全体的に減少すると共に、ピーク値が変動

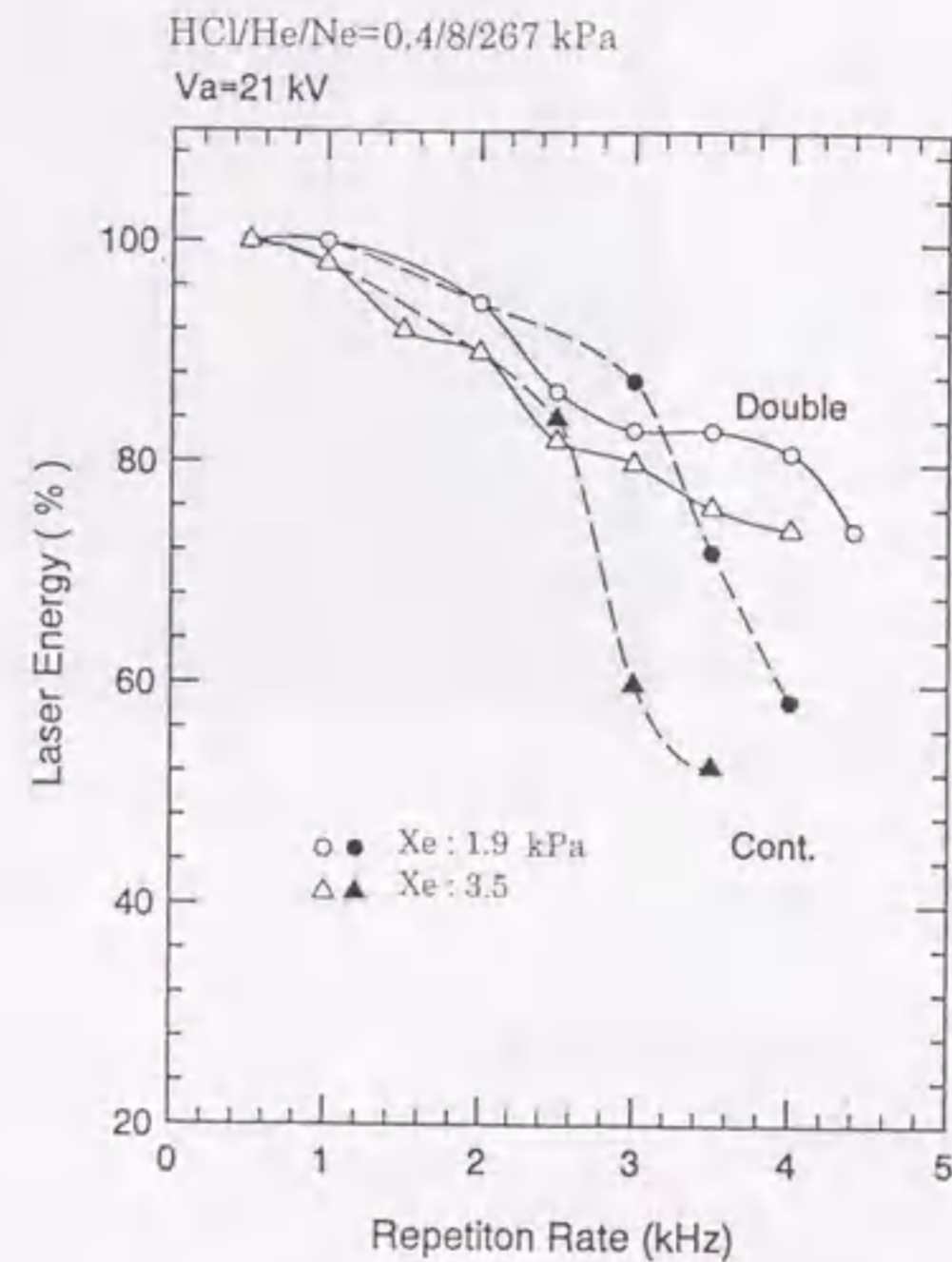


図2-45 ダブルパルスと連続パルス動作との比較

し、周期的な波打ち現象が現れている。なお、同図に示すガス流速では、いずれの場合においても、流れの下流側に発生する円弧状のアーク状放電は発生していない。

図2-47には、Xe: 3.5, Ne: 267 kPaの混合ガスにおいて、放電部の様子を観測した写真を示す。モデル0装置には、放電部を横方向から観測するための窓があり、そこよりボラロイドカメラにて撮影した。同図において、輝点の多く見える上方の電極が陰極、下方が陽極であり、手前と奥に強く輝いている部分は、予備電離用スパーク放電である。ここでは、陰極輝点を強調するため、ガス流速0 m/s, 8 Hzで多重露光し撮影した。このように、放電が不安定となる前兆として、陰極表面に輝点が多く現れる現象は、TEA CO₂レーザーにおいても観測されている。

一方、図2-46と同条件の高繰り返し実験において、放電の様子を目視にて観測した。この場合、2.5 kHz近辺では、陰極表面に小さな輝点のみみられるものの、全体的に放電はほぼ均一である。3 kHzにすると、陰極表面の輝点はかなり成長してくる。さらに4 kHzでは、陰極輝点が陽極まで達し、ストリーマ状の放電が数本見られるようになり、一見して放電が不均一になってきたのがよく分かる。以上の結果から、3 kHz以上においてレーザー出力が低下してくるのは、陰極輝点が見れ、放電が不均一となり、レーザー発振に必要な有効起媒質体積が低下したものと考えられる。一方、4 kHz時におけるレーザー出力の波打ち現象は、2.6節に述べたガス密度揺らぎが関係しているものと考えられるが、詳細は、未解明である。

2.8.4 放電生成物の影響

予備電離放電による生成物が、主放電の点弧時に放電空間に到達すると、主放電中に電流集中を発生させ、レーザー出力を低下させることが明らかとなった。まず、この生成物には、予備電離放電中で生成されるものと、その放電発光によって生成されるものがある。前者としては、ピン電極材料であるニッケルの蒸気、後者としては、各種イオン、準安定状態原子が主に考えられる。

Xe/HCl/He/Ne=3.5/0.4/8/267 kPa Cs=13.3 nF V=1.8 kV

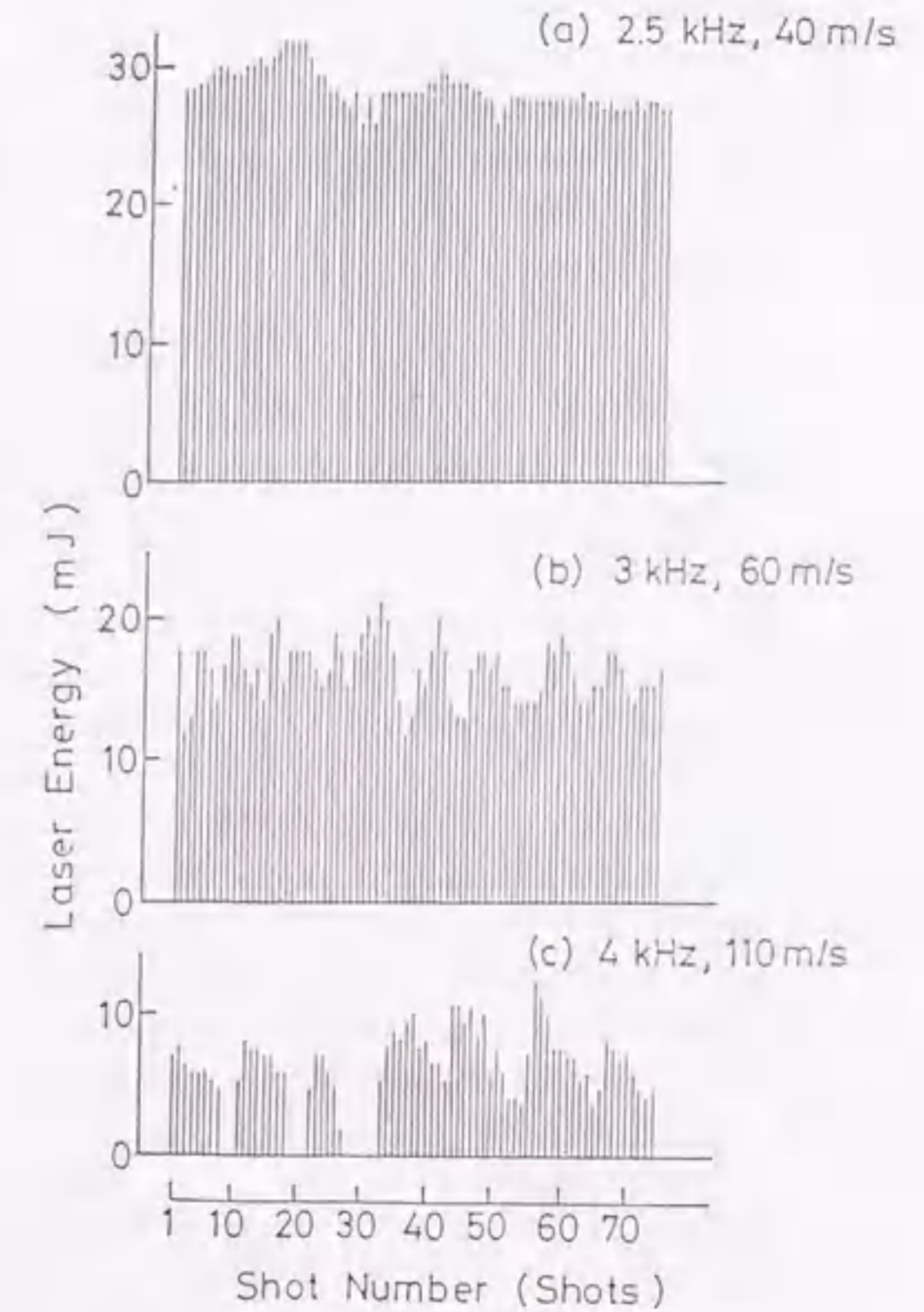


図2-46 連続200ショットの出力パルス列

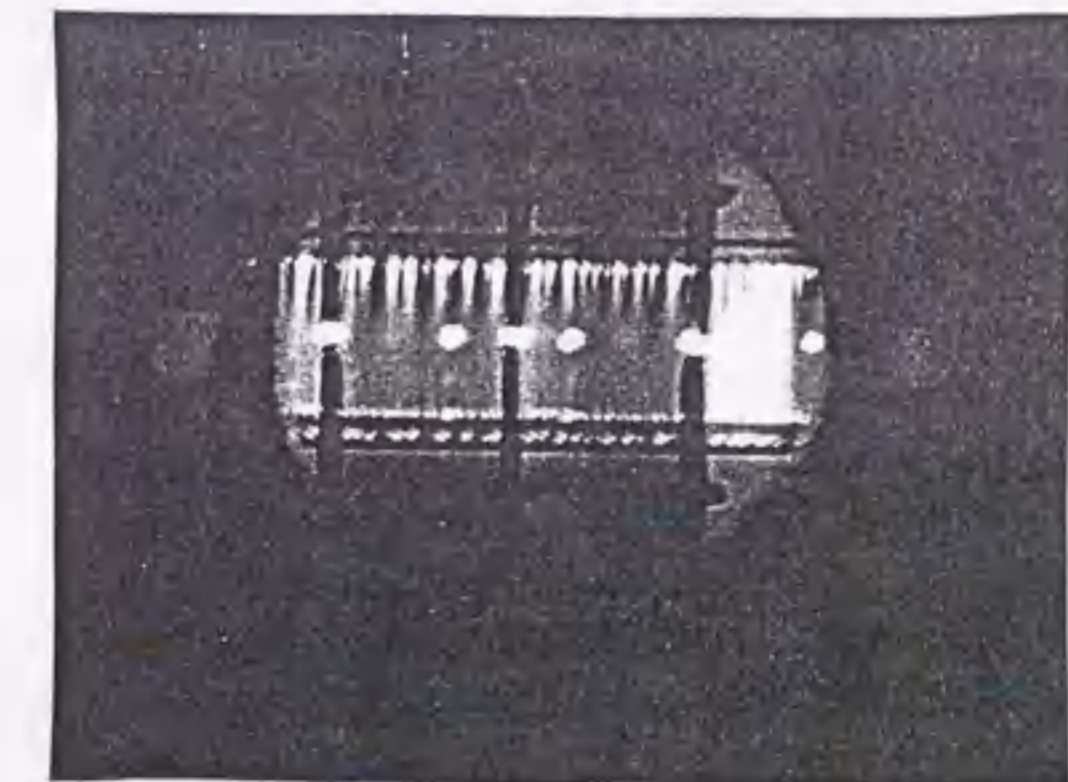


図2-47 放電部観察写真

出力が低下する割合が繰り返し周波数に依存することは、放電発光による生成物が、パルス間隔時間（繰り返し周波数の逆数）程度のライフタイムを有するという仮定から説明できる。図2-48に、パルス間隔時間とレーザ出力の関係を示す。同図は時間が経つにつれレーザ出力を低下させる割合が少なくなる、つまり、放電発光による生成物が減少していくことを示していると考えられる。CR=4の方がCR=2よりレーザ出力が低下することから、予備電離放電の発光の方が主放電の発光より多く生成物を発生させると考えられる。両者の中間であるCR=3では生成物はもっとも少なく、0.4 ms後（2.5 kHz）には出力の低下は10%程度になっている。

放電光により生成され、パルス間隔時間程度のライフタイムを有する物質とし

ては、各種イオン、準安定状態原子が考えられる。予備電離放電は紫外光を発生し、40 mm離れた主放電空間を光電離してイオンを生成する。したがって、予備電離放電の近傍では多量のイオン、準安定状態原子が生成されていると推察できる。主放電も、予備電離放電と同様、ストリーマ様に進展していると考えることができ、電離可能なUV光を発生していると思われる。イオンはクーロン力による衝突で再結合し中性化する。そのライフタイムについては、エキシマレーザガス中、数100 μsの間イオンが十分に存在しているという報告があり、図2-48の結果と一致する。⁷⁸⁾

繰り返し数の増加とともに、出力低下の割合が大きくなっていることから、パルス間隔時間（～ms）程度の寿命を有する物質として、各種イオン、準安定状態原子が考えられ、それらの残留する影響を推察した。しかし、200 Hz程度の繰り返し数でも、CR=4において10%程度の出力低下が測定されている。これは、5 msのパルス間隔時間にイオン、準安定状態原子が残留していることは考えにくく、ニッケル蒸気等の安定粒子による低下分と推察される。繰り返し数が増加してもこの低下分は一定であり、イオン、準安定状態原子等の寿命を持つ粒子による出力の低下分が増大すると推察できる。

CR=4でレーザ出力が低下する原因としては、予備電離放電による生成物のほかに、主放電による生成物がガス下流側のピン電極付近に流れ込み、予備電離強度を減少させることも考えられる。ガス上流ピン電極を除去した装置で、予備電離破壊電圧のCR値依存を測定した結果、CR=4を中心に低下していることが確認された。しかし、レーザ出力は図2-43で示したように、CR値の変化に対して一定値を示している。したがって、主放電生成物は本装置におけるレーザ出力のCR値依存性には、直接的な原因にはなっていないと言える。

2.9. 本章のまとめ

高繰り返し発振基礎実験には、モデル0装置を使い、高繰り返し動作における出力低下の要因として、予備電離強度、Xe分圧の影響、ガス密度揺らぎ、および放電生成物、などについて検討し諸データを集積した。また、これで、電極のガス下流側に発生し放電を不安定にするアーク状放電を、高速でガスを循環し抑止するなどにより、2.5 kHz相当までの高繰り返し動作を実証した。

しかし、3 kHz以上になると、下流側にアーク状放電が発生していないにもかかわらず、パルス毎のレーザ出力が低下し、さらには出力変動が大きくなるなどの問題も分かった。二つの放電パルス

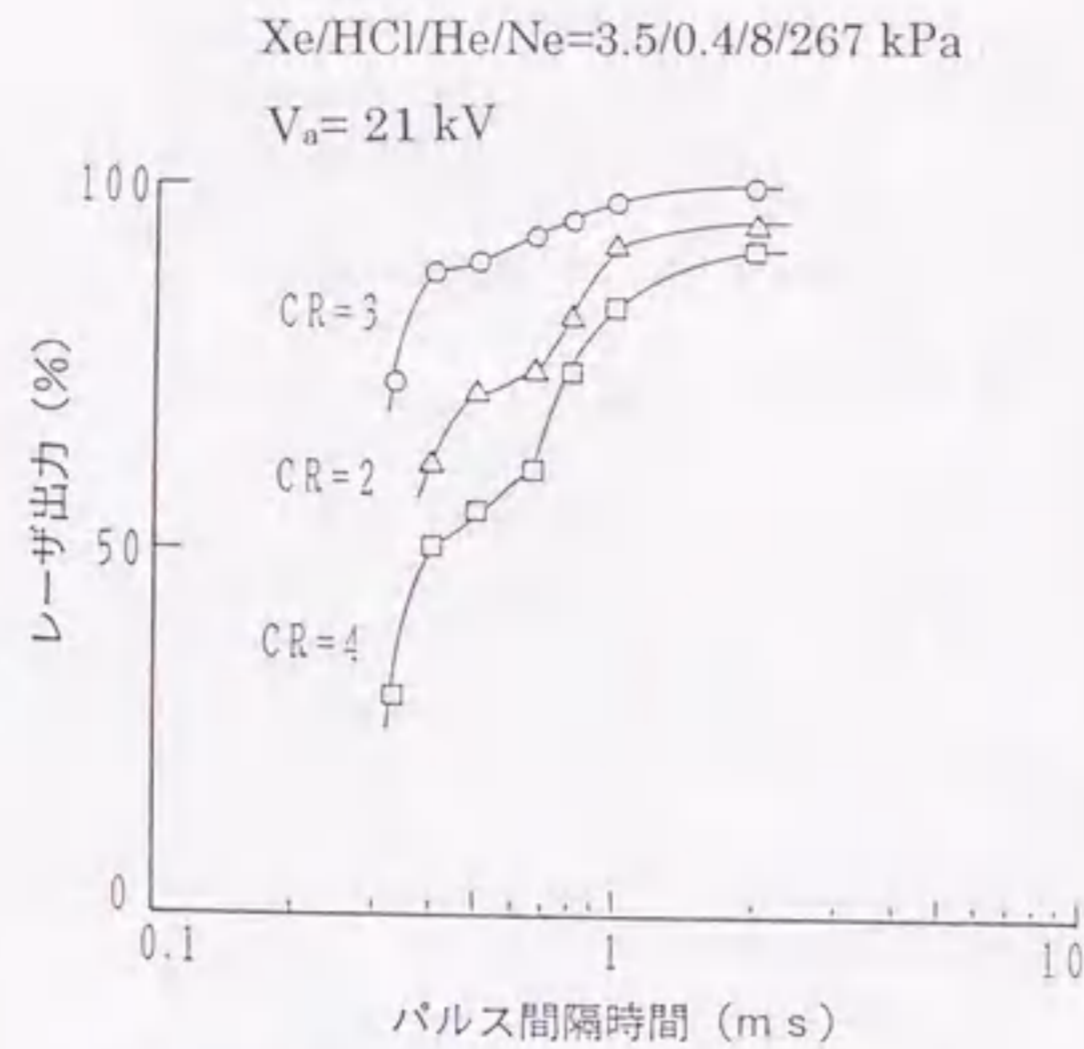


図2-48 パルス間隔時間とレーザ出力

を間隔を変えて点弧し、パルス相互の時間依存性を、レーザ出力エネルギーと放電状態について詳細に調べて、試行錯誤の結果、2.5 kHz相当での平均出力は87 W（有効放電長280 mm）相当であり、安定なレーザ発振条件を実証できた。

また、放電の安定化とレーザ媒質にエネルギーを移乗させるなどの役割を果たし、成分比では封入ガスの大部分を占めるバッファガスには、発振効率が高いことで一般的にはNeが使われていたが、Heについても前例のないkHz台の高繰り返し域において放電状態を調べた。

この結果、両方で繰り返し動作特性に顕著な差異があり、主因が予備電離状態と初期電子量にあることを初めて確認した。これで、安定放電を維持するのに必要なガス流の下限も明らかとなり、放電部のガス流速100 m/sで、第一段階の目標値、2 kHz, 100 Wを達成できる見通しが得られた。⁷⁹⁾

参考文献

- 1) C. P. Wang, "High-repetition-rate transverse-flow XeF laser," *Appl. Phys. Lett.*, 32, 360-362 (1978).
- 2) T. S. Fahlen, "High-pulse-rate 10-watt KrF laser," *J. Appl. Phys.*, 49, 455-456(1978).
- 3) C. P. Wang and O. L. Gibb, "2-kHz repetition rate XeF laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-15, 318-322(1979).
- 4) T. S. Fahlen, "200 W KrF gas transport laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16, 1260-1262(1980).
- 5) R. C. Sze and E. Seegmiller, "Operating characteristics of a high repetition rate miniature rare-gas halide laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-17, 81-91(1981).
- 6) "Mathematical sciences northwest," *Laser Focus*, 18, 34-38(June 1982).
- 7) "Excimer laser product matrix," *Lasers & Applications*, 4, 71-79(April 1985).
- 8) C. P. Christensen, C. Gordon, C. Moutoulas, and B. J. Feldman, "High-repetition-rate XeCl waveguide laser without gas flow," *Optics Lett.*, 12, 169-171(1987).
- 9) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, F. I. Vysikailo, Yu. B. Kiryukhin, and N. Yu. Smirnov, "Optimization of the average power of pulsed-periodic KrF and XeCl excimer lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 11, 1154-1156(1981).
- 10) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Characteristics of the pulse-periodic regime of excimer lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 13, 318-322(1983).
- 11) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Reasons for the fall in the output power of a pulse-periodic XeCl laser during its operation," *Sov. J. Quantum Electron.*, 13, 1518-1521(1983).
- 12) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Increase in the repetition frequency of XeCl laser pulses to 1kHz," *Sov. J. Quantum Electron.*, 14, 558-560(1984).
- 13) V. M. Borisov, F. I. Vysikailo, A. Yu. Vinokhodov, and Yu. B. Kiryukhin, "Establishment of steady-state power level in the pulse-periodic excimer laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 14, 1383-1386(1984).
- 14) R. V. Arutyunyan, V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, and Yu. B. Kiryukhin, "Influence of electrode process on the constriction of a volume discharge in pulse-periodic lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 15, 639-642(1985).
- 15) R. V. Arutyunyan, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, Yu. B. Kiryukhin, and A. N. Morozov, "Electrode effects in a pulse-periodic excimer laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 16, 1589-1592(1986).
- 16) V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, and Y. B. Kiryukhin, "Output energy evolution effects in a pulse-periodic XeCl excimer laser with an average power of ~ 400 W," *Sov. J. Quantum Electron.*, 17, 595-598(1987).
- 17) R. Buffa, P. Burlamacchi, M. Matera, H. F. Ranea Sandoval, and R. Salimbeni, "High repetition rate effects in XeCl TEA lasers," *Optics. Commun.*, 40, 288-293(1982).
- 18) M. Matera, R. Roberto, P. Burlamacchi, and R. Salimbeni, "High repetition rate operation of a closed-cycle rare-gas halide laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 56, 205-207(1985).
- 19) E. Armandillo, G. Grasso, and G. Salvetti, "Simple compact high-repetition rate XeCl laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 56, 674-676(1985).
- 20) J. Andrellos, M. Essary, and H. Pummer, "High average power commercial excimer lasers," *Proc. SPIE*, 710, 2-4(1986).

- 21) 佐藤三郎, 高木茂行, 内田 裕, 後藤達美, "XeClエキシマレーザの発振特性 (IV)," レーザー学会学術講演会第6回年次大会, 予稿集, 21p I B7, 78(1986).
- 22) 高木茂行, 佐藤三郎, 内田 裕, 後藤達美, "XeClエキシマレーザの発振特性," 第33回応用物理学学会連合講演会, 予稿集, 2a-L-10, 185(1986).
- 23) 高木茂行, 佐藤三郎, 内田 裕, 大熊慎二, 後藤達美, "高繰返しエキシマレーザの開発," 第47回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 28p-E-6, 108(1986).
- 24) 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザ予備電離の電子密度評価," 第34回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 29p-ZG-3, 668(1987).
- 25) 高木茂行, 岡本昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザ高繰返し化模擬実験," 第48回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 18p-ZA-16, 668(1987).
- 26) 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザ予備電離の電子密度測定 (II)," 第48回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 19a-ZA-8, 677(1987).
- 27) 高木茂行, 岡本昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザ高繰返し模擬実験," レーザー学会学術講演会第8年次大会, 予稿集, 19p I 3, 84(1988).
- 28) 高木茂行, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, 小杉伸一郎, 長谷川勝也, 大石高志, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (I)," レーザー学会学術講演会第8年次大会, 予稿集, 19p I 4, 85(1988).
- 29) 高木茂行, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザ高繰返し模擬実験 (II)," 第35回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 30p-ZL-11, 785(1988).
- 30) 高木茂行, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, 小杉伸一郎, 長谷川勝也, 大石高志, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (I)," 第35回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 30p-ZL-12, 785(1988).
- 31) 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (II)," レーザー学会学術講演会第9年次大会, 予稿集, 26a I 1, 57(1989).
- 32) 高木茂行, 岡本 昇, 柿崎弘司, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (III)," レーザー学会学術講演会第9年次大会, 予稿集, 26a I 2, 58(1989).
- 33) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (IV)," 第36回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 2p-y-1, 848(1989).
- 34) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz 級高繰返しエキシマレーザの開発 (V)," 第36回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 2p-Y-2, 848(1989).
- 35) 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (I)," 第50回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 29p-ZK-10, 843(1989).
- 36) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 安岡康一, 佐藤三郎, 後藤達美, "5kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (II)," 第50回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 29p-ZK-11, 844(1989).
- 37) S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, and T. Goto, "High repetition rate excimer laser," *CLEO'89, Technical Digest*, WF27, 192-193(1989).
- 38) Shigeyuki Takagi, Saburo Sato, and Tatsumi Goto, "Electron density measurements in UV-preionized XeCl and CO₂ laser gas mixtures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, 2219-2222(1989).
- 39) 高木茂行, 岡本 昇, 柿崎弘司, 佐藤三郎, 後藤達美, 小森田 武, "kHz 級エキシマレーザの開発," 電気学会 光・量子デバイス研究会資料, OQD-89-8, 11-19(1989).
- 40) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (III)," レーザー学会学術講演会第10回年次大会, 予稿集, 26a IV 1, 67(1990).

- 41) 高木茂行, 岡本 昇, 柿崎弘司, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (IV), " レーザー学会学術講演会第 10 回年次大会, 予稿集, 26 IV a2, 68(1990).
- 42) 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (V), " レーザー学会学術講演会第 10 回年次大会, 予稿集, 26 IV a3, 69(1990).
- 43) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (VI), " 第 37 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28a-L-5, 830(1990).
- 44) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (VII), " 第 37 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28a-L-6, 831(1990).
- 45) 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (VIII), " 第 37 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28a-L-7, 831(1990).
- 46) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (IX), " 第 51 回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 29a-L-10, 893(1990).
- 47) Shigeyuki Takagi, Noboru Okamoto, Saburo Sato, and Tatsumi Goto, "Double-pulse operation in XeCl excimer laser for simulation of high-repetition-rate performance," Jpn. J. Appl. Phys., 29, 1108-1111(1990).
- 48) S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, and T. Goto, "2.5kHz high repetition rate XeCl excimer laser," J. Appl. Phys., 68, 5927-5929 (1990).
- 49) K. Ishikawa, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, and T. Goto, "2.5 kHz high repetition rate XeCl excimer laser," 8th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers(GCL'90), Digest, (1990).
- 50) K. Ishikawa, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, and T. Goto, "2.5 kHz high repetition rate XeCl excimer laser," Proc. SPIE, 1397, 55-58(1990).
- 51) S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, and T. Goto, "Laser power saturation in ultra-high repetition rate operation of a XeCl excimer laser," CLEO'90, Technical Digest, CTHB3, 348-349(1990).
- 52) T. Goto, "The outline of AMMTRA's R&D," Int. Conf. on LASER'90, Digest, (1990). [Invited].
- 53) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, 黒田高廣, "エキシマレーザ励起放電によるガス密度揺らぎの測定," 電気学会 プラズマ・放電合同研究会資料, EP-90-77, 55-62(1990).
- 54) 今田 剛, 黒田高廣, 中村博卓, 関本裕治, 増田 渉, 升方勝己, 八井 淨, 玉川 徹, 後藤達美, "超高速ガスフロー方式放電励起型エキシマレーザの開発," 電気学会 プラズマ研究会資料, EP-90-93, 47-56(1990).
- 55) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの開発 (X), " レーザー学会学術講演会第 11 回年次大会, 予稿集, 31p V 4, 88(1991).
- 56) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (X I), " 第 38 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28p-E-1, 889(1991).
- 57) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, 石川 憲, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (X II), " 第 38 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28p-E-2, 889(1991).
- 58) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (X IV), " 第 52 回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 11a-L-5, 939(1991).
- 59) I. Smilanski, S. R. Byron, and T. R. Burkes, "Electrical excitation of an XeCl laser using magnetic pulse compression," Appl. Phys. Lett., 40, 547-548(1982).
- 60) R. S. Taylor and K. E. Leopold, "Magnetically induced pulser laser excitation," Appl. Phys. Lett., 46, 335-337(1985).

- 61) T. Shimada, M. Obara, and A. Noguchi, "An all solid -state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers," Rev. Sci. Instrum., 56, 2018-2020(1985).
- 62) 内田 裕, 佐藤三郎, 寺西利春, 大島巖男, 玉川 徹, 後藤達美, "高繰返しエキシマレーザの開発—固体素子電源の特性," 第 47 回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 28p-E-2, 107(1986).
- 63) B. Mass, R. Butcher, R. Hansen, and T. Fahlen, "All solid-state power conditioning for a 50 W XeCl laser," CLEO'87 Technical Digest, 312(1987).
- 64) M. C. Gower, A. J. Kearsley, and C. E. Webb, "gas composition and lifetime studies of discharge excited rare-gas halide lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-16, 231-235(1980).
- 65) R. Tennant, "Control of contaminants in XeCl lasers," Laser Focus, 17, 65-68(Oct. 1981).
- 66) J. H. Brannon, "Analysis of chemical degradation products in an e-beam pumped rare-gas halide laser," IEEE J. Quantum Electron., QE-18, 1302-1305(1982).
- 67) W. Hans and P. Scott, "Preventing contamination of excimer lasers gases," Laser Focus, 19, 87-92(Oct. 1983).
- 68) J. Hecht, "Excimer laser update," Laser Focus, 19, 43-49(Dec. 1983).
- 69) V. Yu. Baranov, "High repetition rate pulsed gas laser and their application in chemistry and isotope separation," IEEE J. Quantum Electron., QE-19, 1577-1587(1983).
- 70) J. Andrellos, M. Essary, and H. Pummer, "High average power commercial excimer lasers," Proc. SPIE, 710, 2-4(1986).
- 71) 日本機械学会, 技術資料, 流体の熱物性値集, (1983).
- 72) 新版空気機械工学便覧編集委員会, 新版空気機械工学便覧(基礎編), コロナ社, (1979).
- 73) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第 4 版, (1986).
- 74) P. E. Cassidy, "Fluid dynamics in closed cycle pulsed lasers," AIAA, 23, 1922(1985).
- 75) 高木茂行, 柿崎弘司, 後藤達美, 山部長兵衛, 堀井憲爾, "エキシマレーザ放電の密度揺らぎ測定," 電気学会論文誌 A, 111-A 巻, 283-290(1991).
- 76) S. Kosugi et al. "Experimental study on shock waves in the cavity of an excimer laser," Proc. 18th. Int. Symp. Shock Waves (July 1991).
- 77) 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "高繰返しエキシマレーザにおけるレーザ出力のガス流速依存性," 電気学会論文誌 A, 114-A 巻, 445-450(1994).
- 78) M. R. Osborne, "Preionization electron density and ion decay measurements in an X-ray preionized rare-gas-fluoride laser," J. Appl. Phys., 63, 32-37(1988).
- 79) 高木茂行, "高気圧 T E パルスレーザの高性能化および応用に関する研究," 名古屋大学博士論文 (1991).

第3章 高繰り返し大出力化モデル1装置の動作

3.1. 装置の設計

高繰り返しレーザ動作の基礎実験には、第2章で示したモデル0装置を用いた。これらの諸要素実験を基に、さらに高繰り返し化、大出力化、長時間の安定動作化などの高性能化を図ることを目的とした装置設計・試作をした。これをモデル1装置と称し、その性能仕様をモデル0装置と対比して以下に示す。本開発で目指す5 kHzレーザ動作の実証にはかなりの開発要素があり困難さが予測されたので、まずこの装置では、第1段階として繰り返し数2 kHz、平均出力100 Wでの長時間安定動作を目指し、この諸実験結果を基に、第2段階で5 kHz、500 Wを実証するモデル2装置製作を行うとともに、実用化に必要な要素技術開発を並行して進めることにした。^{1) - 19)}

この有効放電容積は、放電長580 mm×放電幅10 mm×電極間隔20 mmであり、モデル0装置より出力を倍増させて目標の100 Wにする必要があるため、放電長のみを2倍にした。また、放電部でガスを100 m/s以上の高速で循環できるように、ガス循環流路の全体設計を行い、最大回転数8,000 min⁻¹の4段翼軸流プロアと、非接触で大トルクの回転力を伝達する磁気カップリングも特別に開発して適用性を確認した。

表3-1には、モデル1装置の主要な設計仕様値をまとめた。この本体は、チャンバ、プロア、磁気カップリング、放電部、可変速モータシステムから構成され、モデル0装置に対して行った具体的変更、改良は以下である。

表3-1 モデル1装置の設計仕様値

[項目]	[仕様値]
・レーザのタイプ	: UV自動予備電離XeClエキシマレーザ
・レーザ出力	: 50 mJ/パルス以上
・繰り返し数	: 長時間2 kHz以上
・使用ガス	: Xe, HCl, He/Ne (Xe:1.25, HCl:0.15, He/Ne:98.6%)
・圧力	: 絶対圧力300 kPa
・ガス流速	: 100 m/s以上
・モータ	: 150 kW (空冷式)、インバータ:200 kVA
・ガス温度	: 40 °C (放電部入口)、90 °C (同出口)
・注入電力	: 30 kW (15 J x 2 kHz)
・有効放電体積	: 580 L x 20 gap x 10 W (mm ³)
・通風間口	: 920 L x 20 gap (mm ²)
・送風機	: 4段軸流プロア (N=8,000 min ⁻¹)
・送風流量	: 2.7 m ³ /s
・磁気カップリング	: 20 kgm-8,000 min ⁻¹ (Sm-Co)
・電極、材質	: Ni無垢棒加工
・風洞	: NiクラッドSUS304
・パッキング	: バイトンゴム
・熱交換器	: Cu+Niメッキ
・絶縁物	: PVDF
・その他	: 流速測定ポート、観測窓、リリースバルブ等

- (a) 電極長を ~ 2 倍にした。(280 \rightarrow 580 mm)
- (b) 放電回路のインダクタンスを減らした。(7 \rightarrow 4 nH)
- (c) 可能な限り多くの耐蝕材 (Ni クラッド SUS 303, Ni メッキ, PVDF) を使った。
- (d) 高ヘッドが得られるように、4 段軸流プロアを開発した。(3 \rightarrow 4 段)
- (e) 放電部ガス流速を上げるため、プロア駆動モータを大型化した (60 \rightarrow 150 kW)

3.1.1. 装置構成

このレーザ装置では、とくに、レーザガス循環用プロア、充電電源回路について、長時間の高繰り返し動作ができるように留意した設計となっている。プロアは、圧力差すなわちヘッドHおよび流量Qが共に大きく取れるように、4 段の軸流タイプとした。図3-1に、モデル-1装置および5 kHz用サイラトロン電源の外観写真を示す。本体(チャンバ)断面略図はモデル-0装置とほぼ同じ構成なので省略する。チャンバの大きさは、長さ3.5、高さ1.8、幅1.5 mで、総重量は、約6,700 kgである。なお、本体上部には、サイラトロンスイッチが設置されるので、最終的な高さは2 m程度となり、この装置は、レーザ発振器として稼働させるのに、モータ可変速用インバータ盤、ガスの供給/排気装置、充電用電源盤、サイラトロン制御盤等で全体構成される。

プロアは、強力なSm-Co永久磁石による磁気カップリングを介して、外部の駆動モータにより最大8,000 min⁻¹にて高速回転されガスを循環し、放電部において、実際には連続運転で120 m/s以上の均一ガス流速が得られた。また、ハロゲンガスへの耐食性を確保するため、レーザチャンバ本体はNiクラディングのSUS 304を使用したが、内部の金属部分にはニッケルメッキを施し、絶縁物部品にはフッ素系樹脂PVDFを用いた。

放電回路には、もっとも研究実績のある容量移行型、UV自動予備電離方式を採用し、主コンデンサC₁、ピーキングコンデンサC₂の値は、それぞれ32, 30 nFとし、充電用のコイルは、126 μ Hである。主電極は高純度Niで、全長720 mm、幅30 mmのErnst型である。予備電離用ピン電極は、主放電部での予備電離が均一に行われるように、ギャップ間隙2 mmとし、20 mm間隔で、主電極に沿って、千鳥足状に対向配置されている。また、ガスの流れを乱さないように、流線型に近似させた形状にしてある。²⁰⁾⁻³³⁾

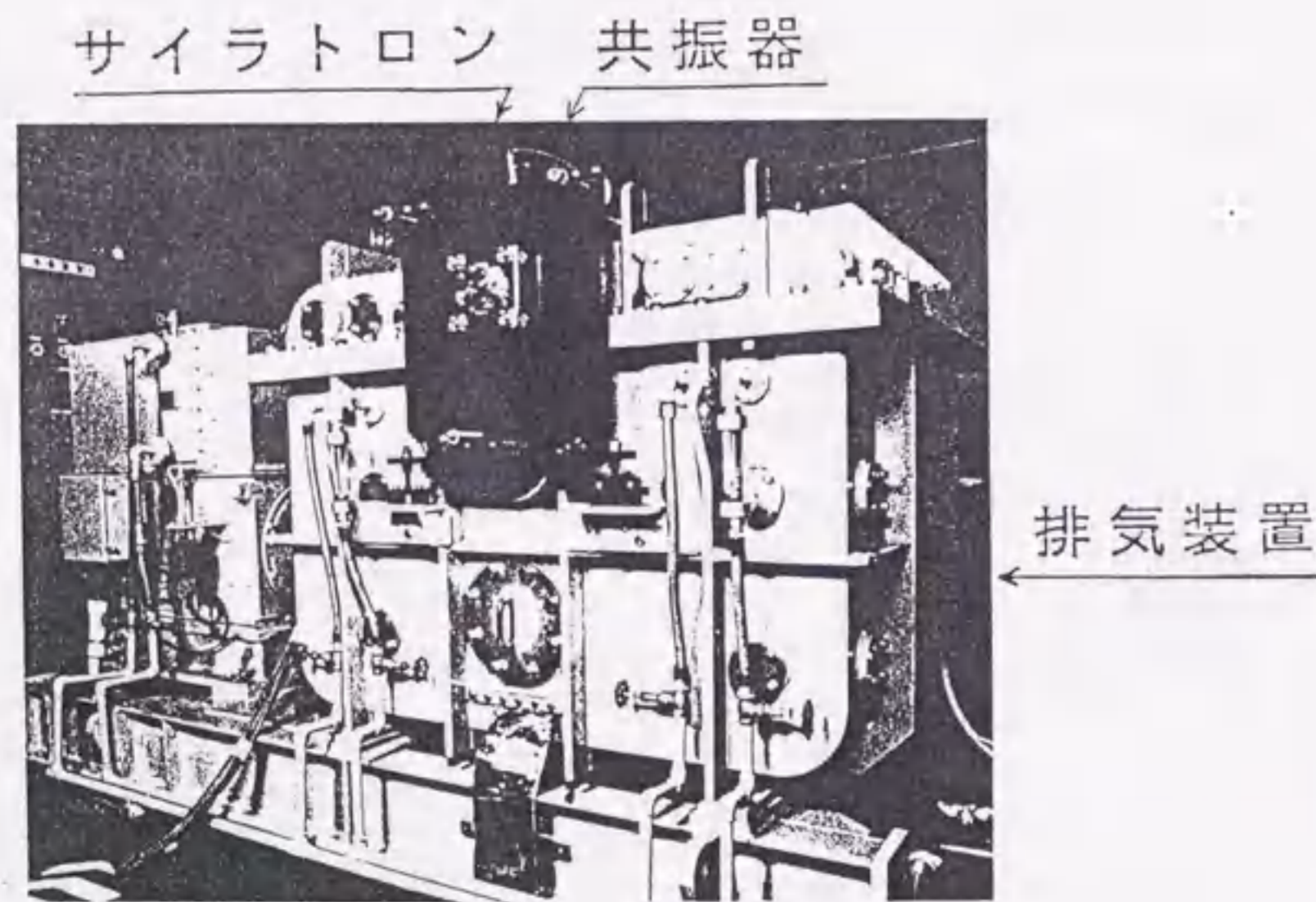


図3-1 モデル-1装置外観写真

実際にレーザ動作させる場合、放電が点弧すると、短時間に大きな電気エネルギーが注入されるためガスが加熱されて膨張し、ガス流の流路抵抗が増加し流量が減少する。しかし、このプロアの特徴は、低流量側ではヘッドが急峻に高くなる特性を持つので、放電部のガス流量は速やかに回復し、高繰り返し動作に適している。

スイッチングには、サイラトロン(EEV Ltd. CX1625)4本を、時系列に順次点弧させるような動作で用いた。レーザガス媒質は、とくにことわりのない限り、HCl/Xe=0.4/3.5 kPaの混合ガスをHeあるいはNeで希釈して用いた。全ガス圧は、低繰り返し動作での安定性を考慮して、Neパuffaで280 kPa、Heパuffaで240 kPaとした。パルス毎のレーザエネルギーは、パイロ型エネルギーメータ(Moletron Inc. J50HR)、平均出力は、パワーメータ(Gentec Inc. PS-1000)で測定した。

高繰り返し動作では、安定放電を維持するため、繰り返し数の増加に伴い、ガス流速を増大させる必要がある。これは、主放電時に生成されたイオン、電子、金属蒸気などの放電生成物を、次の放電が点弧するまでに、主放電部から排出させるためである。高繰り返し動作でのガス流速は、上流側予備電離の影響をなくするのに、大気中で測定された最少ガス流速値で換算して、CR(Clearance Ratio)=2 \sim 3となるようにすることが必要である。これは、第2章ですでに確かめられた適値であり、放電幅に対して何倍のガス交換が必要を示す指標になる。しかし、以下の実験では、放電の安定性が十分に確保されるよう、断わりの無い限り、すべての繰り返し数においてガス流速条件を、CR=3.4として行った。³⁴⁾⁻³⁶⁾

3.1.2. ガス流速特性

このモデル-1装置放電部におけるガス流特性は、高繰り返し動作において装置性能を決める基本的条件となる。図3-2は、これに組み込まれている4段軸流プロアの静翼および動翼の断面図である。エキシマレーザ用ガスには、腐食性のガスが含まれており、これを実際に使用して測定を行うのは難しいため、特性測定はHeガスを使用した。プロアの性能は、マッハ数によって異なってくるが、Heを使用して特性測定を行っても、その性能が大きく変わらないことは確認している。また測定は、圧力106 kPaのHeガス中において回転数4,800 min⁻¹で行った。この結果を図3-3に、翼形状などを変えた4種類の試作プロアにつき流量-ヘッド特性、流量-効率の関係として示す。これらは、比較がしやすいように以下の関係を使用して、回転数を8,000 min⁻¹に換算したものである。

$$\text{圧力ヘッド } H = \alpha N^2, \quad \text{流量 } Q = \alpha N \dots \dots \dots (3-1)$$

ここで、N:回転数、 α :比例定数である。

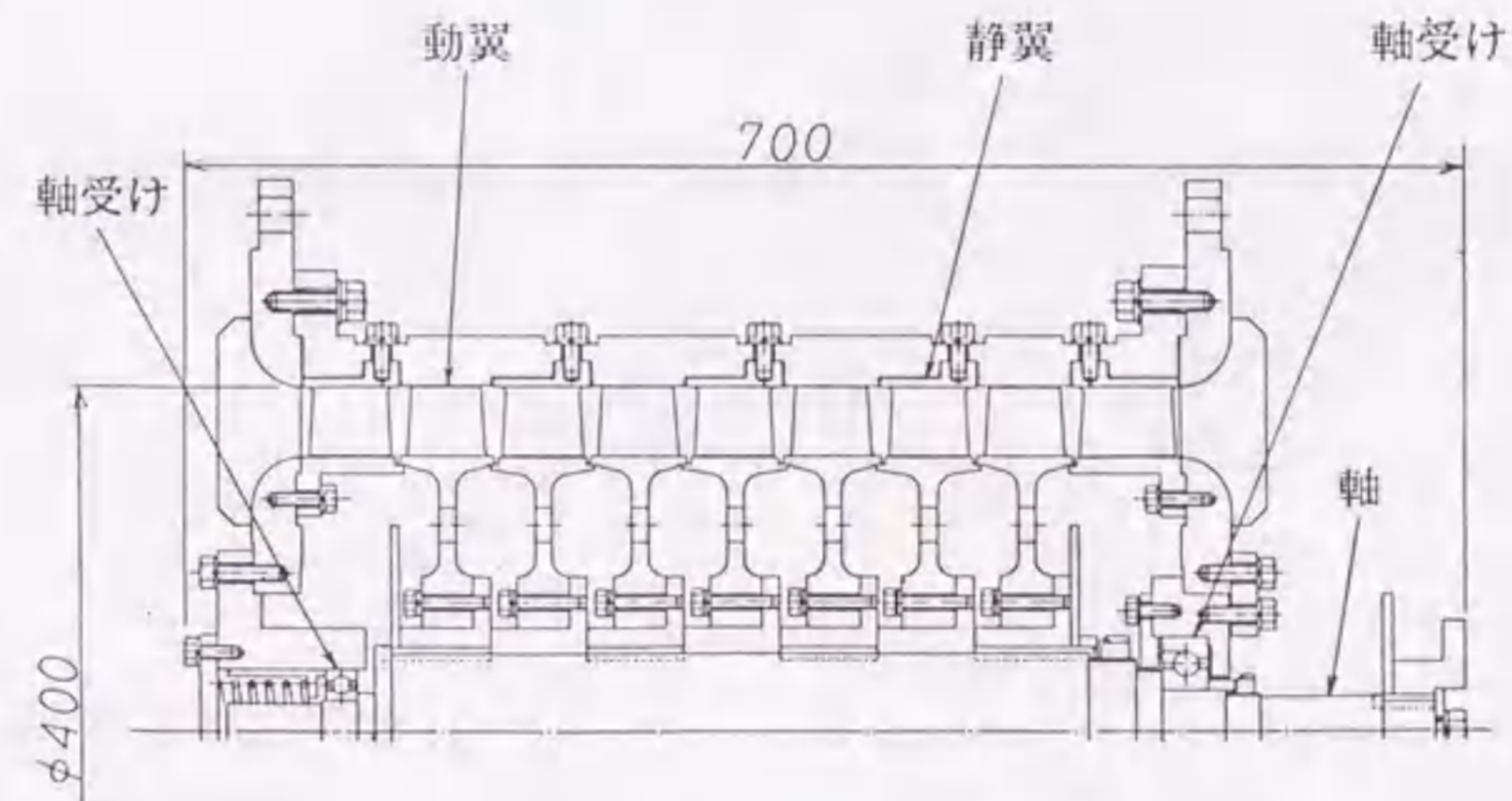


図3-2 4段軸流プロア

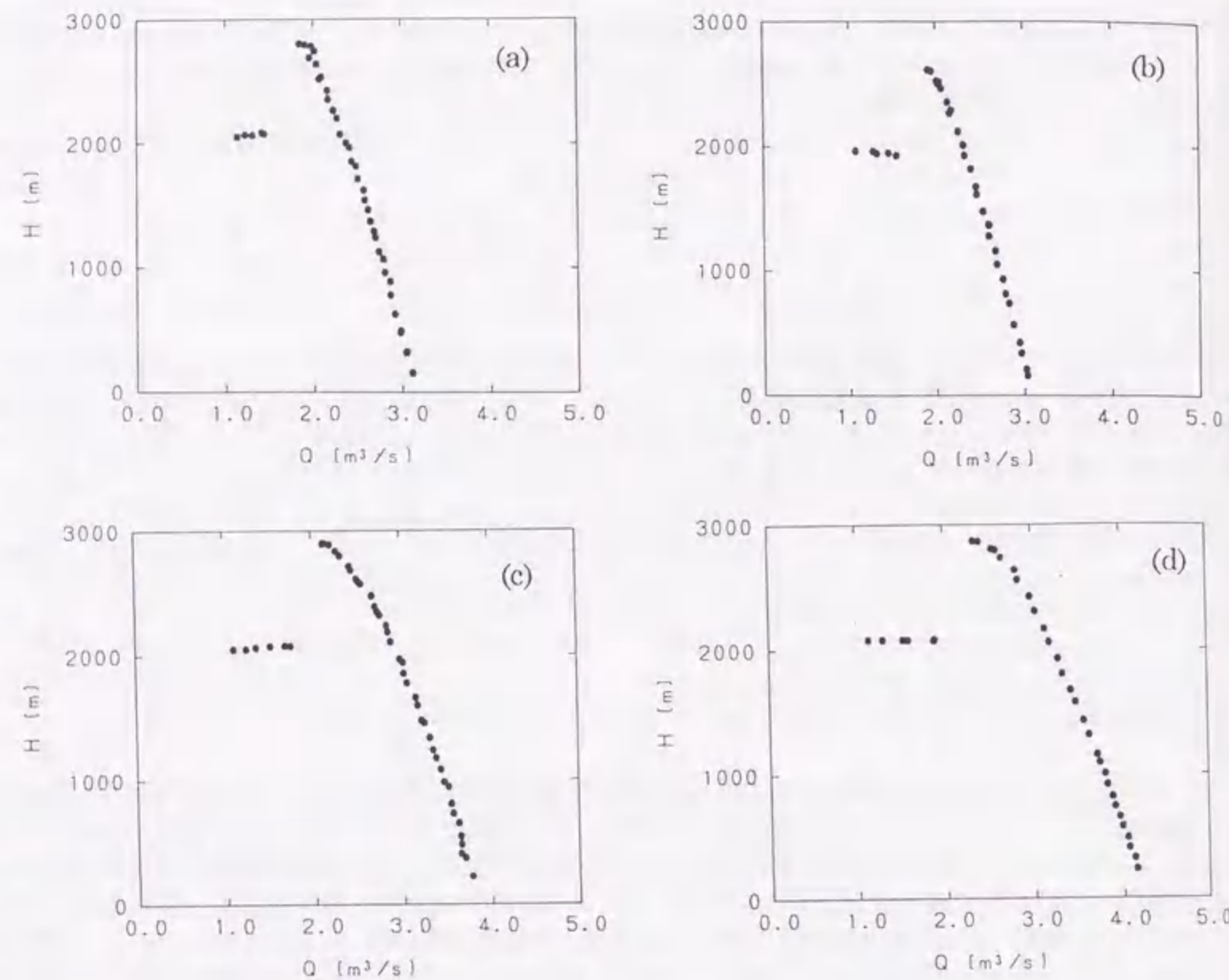


図3-3 各種ブローアの流量-ヘッド特性

図3-4はモータ回転数に対するガス流速特性であり、モータの回転数が $8,000 \text{ min}^{-1}$ の時、最大ガス流速として 125 m/s が得られた。また、ガス流速の空間分布は、図3-5に示すように、電極中央部がやや高速になっているように見える。これは、測定による誤差であると考えている。すなわち、ガス流速の空間分布を測定するため、センサーとして熱線プローブとピトー管を用い高い精度の測定をした。熱線プローブのセンサー部は、外径 6 mm の中空パイプで支持されているため、ガス流速が 100 m/s を越えると、風圧でパイプが曲がり、流速を過大検知したものと考えられる。

ブローア特性としては、どれも非常に狭い放電電極間にレーザーガスを高速で流すのに適した特性が得られたが、効率においては流量のもっとも大きいブローア(d)がよいので、これを選定した。³⁷⁾⁻³⁹⁾

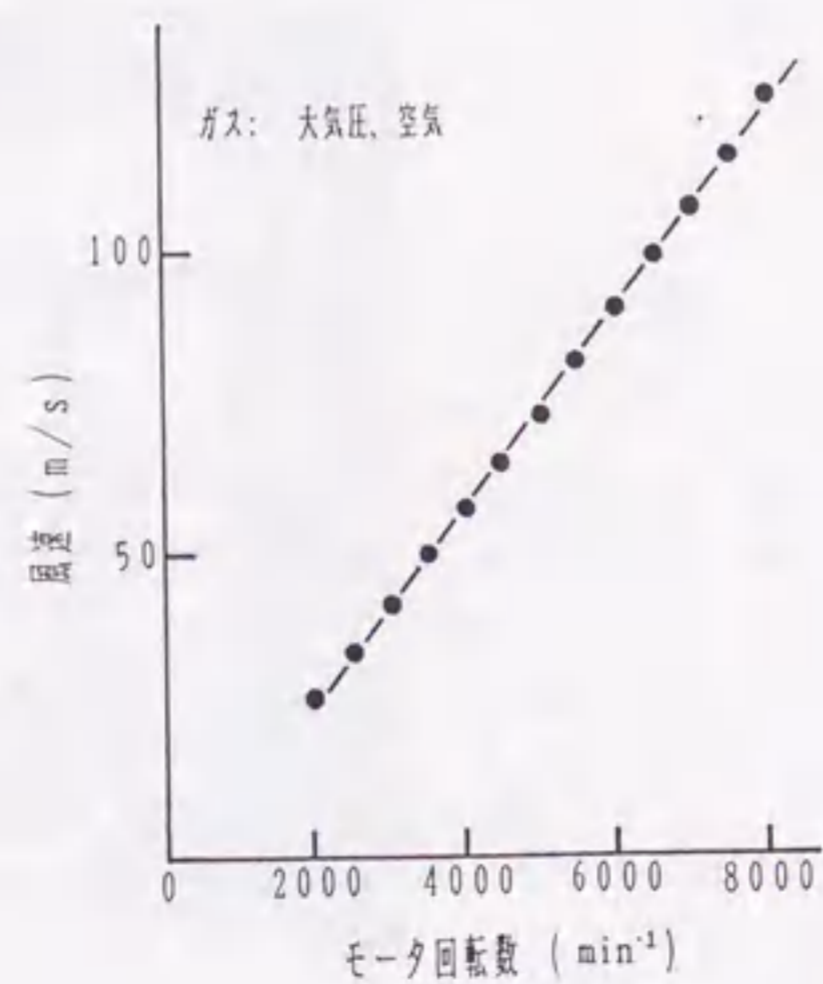


図3-4 ブローア試験結果

一方、磁気カップリングは、一対のSm-Co永久磁石と、両磁石間にあり高速回転力を効率よく伝達できる高耐食・高耐ガス圧の隔壁とで構成され、非接触で高トルクを伝達する必要がある。この設計値は、最大伝達トルク $10.6 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ (構造・機械寸法上は $36 \text{ kgf}\cdot\text{m}$)、最大回転数 $8,000 \text{ min}^{-1}$ で、特性測定は動力計を使い行った。図3-6は、その構成を示す断面略図である。

結果としては、軸受部温度および振動変位量も許容範囲でとくに異常はみられず、高速回転で安定したトルクの伝達を確認できた。また、機械損は約 $1 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以下と推定され、主に風損と微小振動によるトルク低下が原因と思われる。

負荷特性試験時には、磁気カップリングの空隙部に磁気センサーを取り付けて、負荷時の空隙部における磁束密度を測定したが、磁界解析により得られた波形とほぼ同等であった。さらに、 2 kHz 以上の安定動作を目指す次のモデル-2装置搭載用ブローアと磁気カップリングは、本モデル-1装置による基礎実験データを基に、第4章で示すように、入念な設計・製作を目指した。

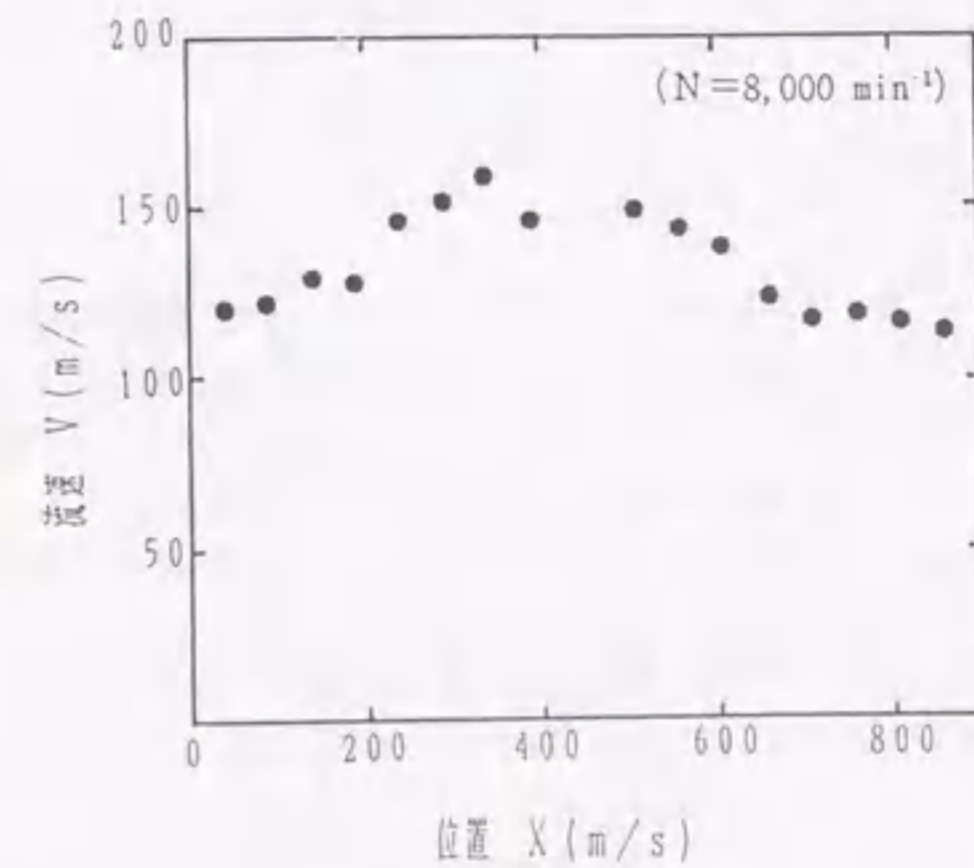


図3-5 流速の空間分布

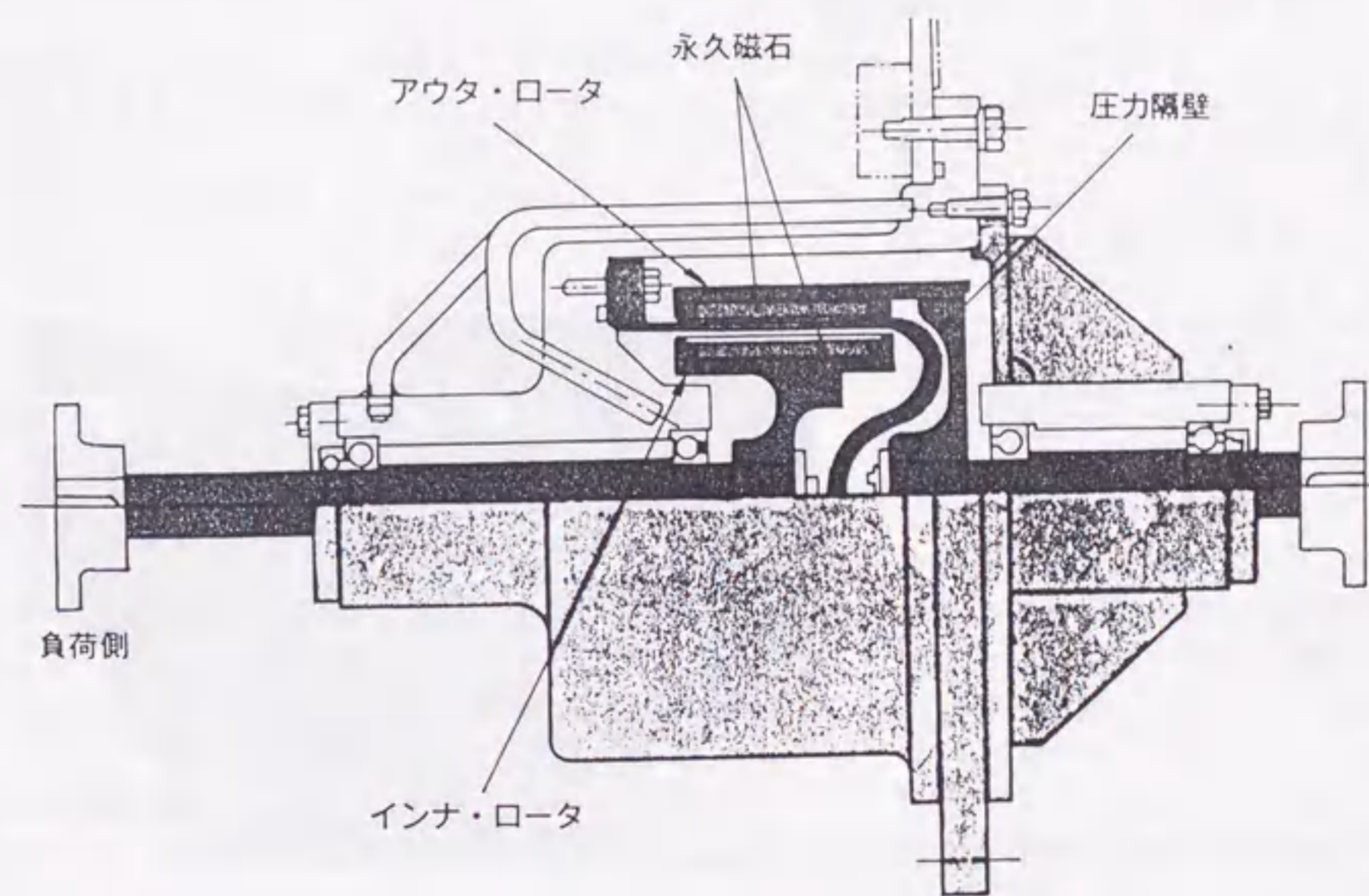


図3-6 磁気カップリング構造図

3.2. レーザ出力のガス流速依存性

3.2.1. 実験条件

ここでは、すでに仕様を示したモデル1装置を動作させ始め、まず、レーザ出力を低下させる原因となるガス下流に発生するアーク状放電について、この抑止に必要な最少ガス流速を測定し、5 kHz までの臨界クリアランスレシオ CR_0 を調べた。これにより、レーザ装置の小形化、プロアの低消費電力化などで重要な低 CR_0 値化に対する検討をした。放電部のガス流速の測定は、第2章に示したガス密度揺らぎの測定で採用したのと同じ光学的方法で行ったが、本測定法は以下のような特徴を持つ。(401-41)

- (a) 非接触であるため、測定によるガス流の乱れがない。
- (b) 放電を点弧させるため、レーザ発振中に測定が可能である。さらに、高繰り返し動作中でも測定できる。

He-Ne レーザビームは、出力ミラー側から見て、主放電部の中心よりガス下流方向へ $L=11$ mm 離れた点から入射させ、これを反射ミラーを通して、フォトダイオード (浜松ホトニクス S1723-01) で受光する。 $t=0$ 秒を放電点弧時とすると、時刻 $t=T_1$ でダイオード出力の変化が始まり、 $t=T_2$ で元の出力へ戻っている。この出力の変化は、放電によってガス密度が変化しガス媒質の屈折率が変わるため、密度の変化部分はガス流とともに移動する。したがって、次の式でガス流速 v (m/s) が求められる。

$$v = 2 \times L / (T_1 + T_2) \dots \dots \dots (3-2)$$

本測定は2点間 (例えば5 mm, 11 mm) でも行い、同じ結果が得られることを確認している。

一方、これまで高繰り返し時における放電不安定性の一因として、ガス密度揺らぎを想定し、He-Ne レーザによる測定や、圧電素子によるガス密度揺らぎの測定試験を行ったが、これに引き続き、AEセンサーおよび静電型マイクロフォンを使用して、光軸方向へ伝搬する密度揺らぎを測定し、圧力変動率 $\Delta p/P$ を詳細に調べた。

図3-7に音響波センサー、および波形解析装置を示す。音響波のセンサーには、高周波振動計 (以下AEセンサー、NF回路 (株)、AE904S-WB、感度: 1 mV/Pa、周波数帯域: 100 kHz~1 MHz) と、静電型マイクロフォン (リオン (株)、UC-29、感度: 4.2 mV/Pa、周波数帯域: 20 Hz~10 kHz) を使用した。センサーは、出力ミラー端面から挿入し、放電端部から130 mmの位置に固定した。また、センサーに振動が機械的に伝わるのを防ぐため、振動を吸収するシリコンゴム板を、レーザ装置とセンサー取り付けフランジとの間に挿入した。ガス密度揺らぎの伝搬を遮断するには、ダンボール紙などを使い、機械的振動がセンサーに伝わっていないことを別に確認している。センサーからの出力信号は、信号波形解析処理装置 (Tektronix Inc. DSA602A) に入力し、周波数解析 (FFT) を行うことにより、周波数スペクトルを求めた。

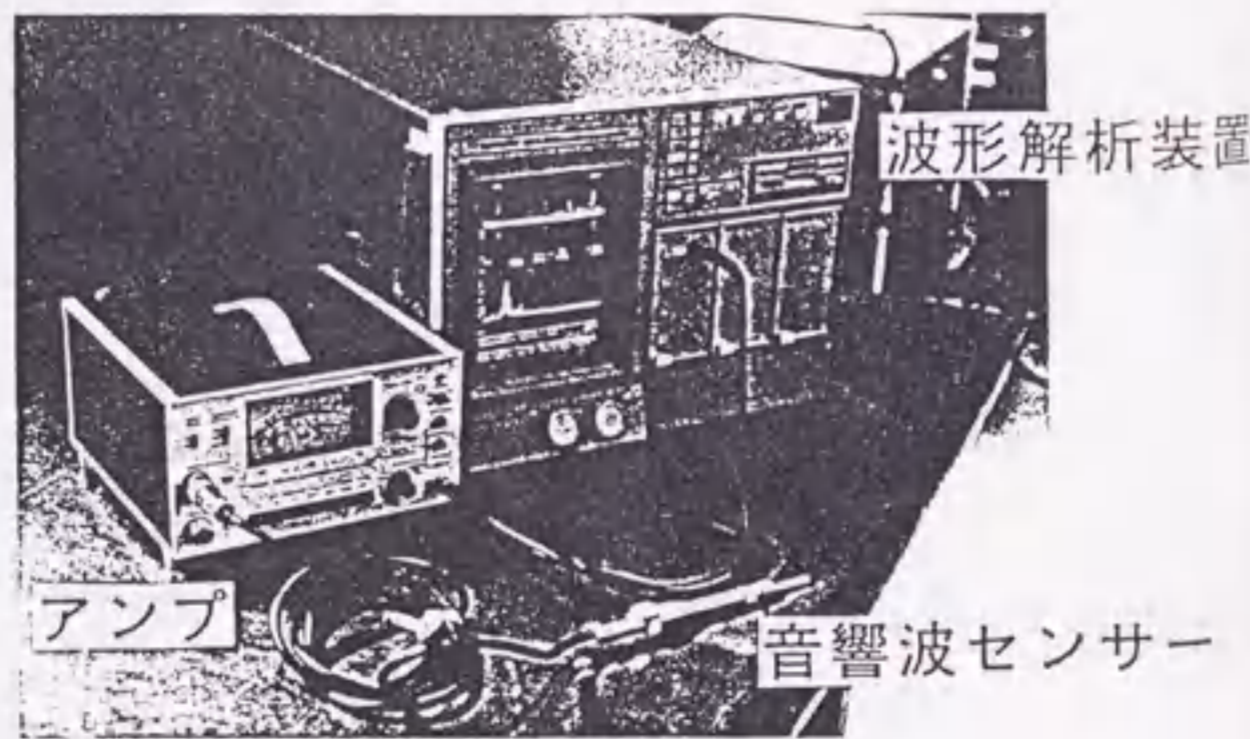


図3-7 音波センサおよび波形解析装置

3.2.2. 結果と検討

ガス流速の測定は、バッファガス (He, Ne)、および全ガス圧を変化させながら、プロア駆動モータの回転数を $6,000 \text{ min}^{-1}$ まで $1,000 \text{ min}^{-1}$ 毎に行った。

図3-8にモータの回転数に対する放電部ガス流速を示す。一般に、プロアにより発生したガス流速は、原理的には、ガスの種類や圧力に依存せず、モータ回転数によってのみ決定される。したがって、これまでは、大気中における測定結果を全てのガス条件に適用してきた。しかし、同図から分かるように、ガスの種類 (NeとHe) やガス圧力 P の変化で、モータ回転数に対するガス流速が異なることが明らかとなった。

Heに比べNeの方が、また、全ガス圧力 P は高い方がガス流速が大きいことから、ガス密度が大きいほどガス流速が大きくなることが推察される。ただし、そのときのモータへの投入電力は大きくなる。大気における測定結果は、NeとHeのほぼ中間のガス流速であった。

次に、繰り返し数 f に対し、モータの回転数を $f/20$ ステップで変化させ、放電状態を観測した。この時、レーザ発振 0.5 秒後に、光軸方向から100~150パルスの放電をスチールカメラで重ね撮りし、下流アーク状放電の発生有無の判定を行った。下流アーク状放電の発生しない最少モータ回転数を測定し、臨界ガス流速 v_0 を求め、前記 CR_0 値定義式より最少ガス条件として、 CR_0 値を算出した。

図3-9に、Heバッファガスにおける CR_0 値特性を示す。主コンデンサの充電電圧は19 kVとし、全ガス圧を180~280 kPaの範囲で変化させた。 CR_0 値特性には全ガス圧依存性がみられ、230 kPa以上では、 CR_0 値が3以下の小さい値を示した。

一方、Neバッファガスでは、Heの場合と異なった傾向がみられ、圧力には依らず、繰り返し数3 kHz以上で CR_0 値が3以上となった。

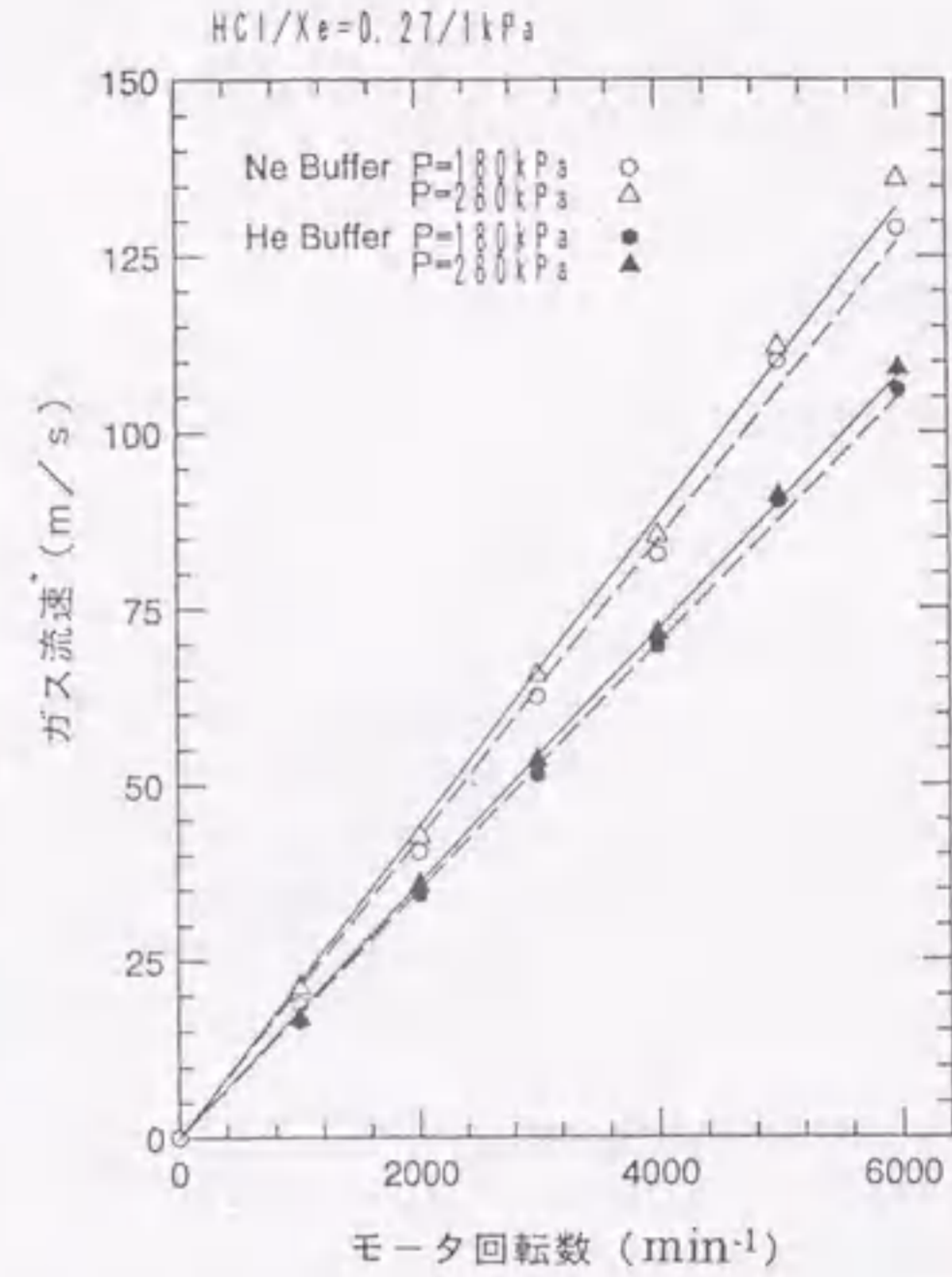


図3-8 モータ回転数に対するガス流速

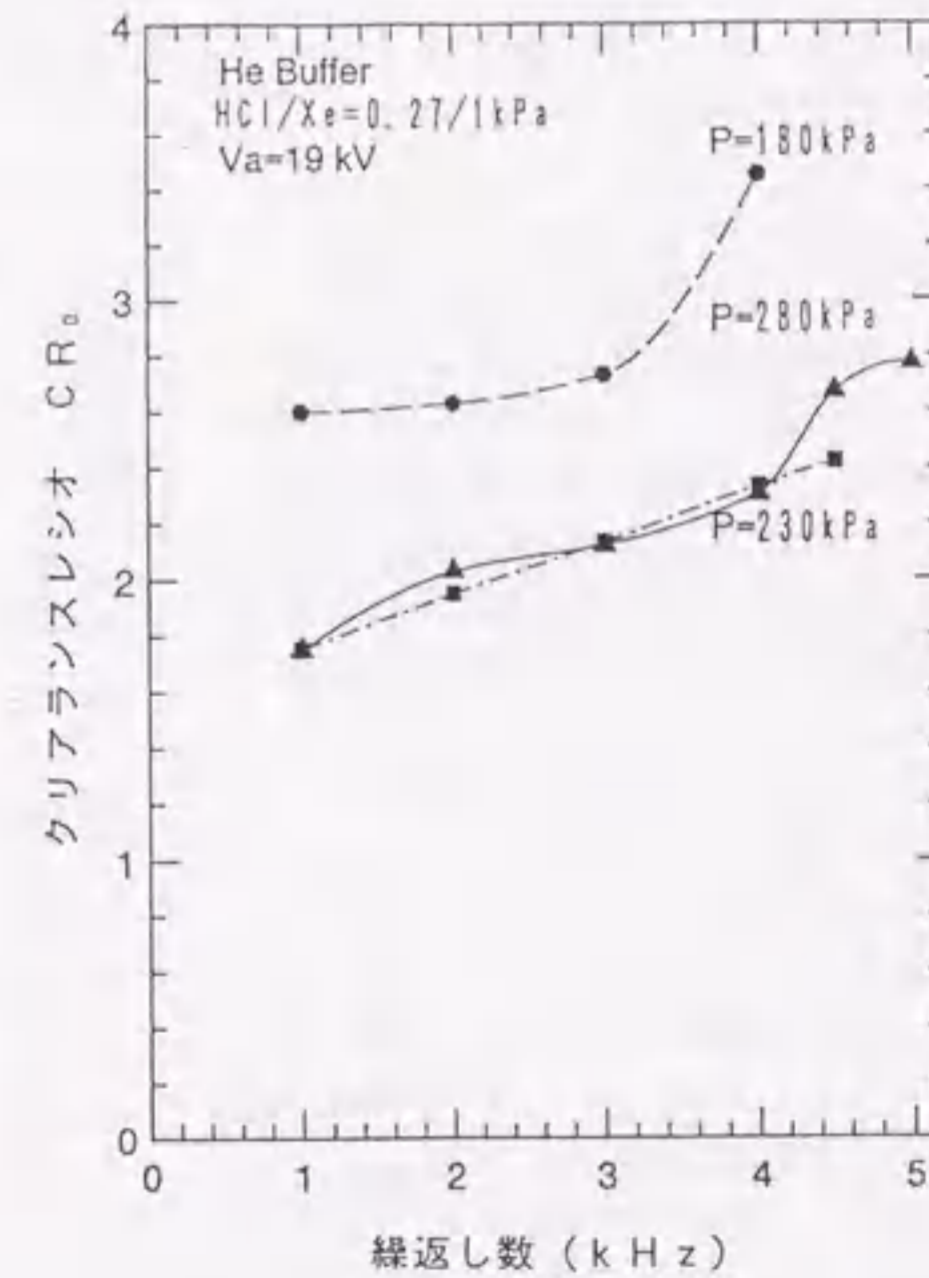


図3-9 繰り返し数に対する CR_0 値 (Heバッファ)

図3-10は、繰り返し数1 kHz、Heバッファガスにおいて、主コンデンサの充電電圧 V_c を変化させたときの CR_0 値である。全ガス圧力は180 kPaであり、 V_c を19 kVより小さくすると、 CR_0 値が急激に低下していくことが分かる。

ガス上流側の予備電離による放電生成物の影響を考慮すると、 CR_0 値が3に相当するガス流速付近で動作させる必要がある。Neバッファガスでは、3 kHz以上で CR_0 値が3を超える。Heバッファガスでは、 $P=180$ kPaの場合に3.5 kHz以上で3を超える。したがって、これらの条件で安定なレーザ発振を得るためにも、低 CR 値化が必要となる。それには、充電電圧 V_c を下げる、つまり、入力エネルギーを低くすることが対応策の一つに考えられる。 CR_0 値の入力エネルギー依存性については、すでに報告があり、放電入力35 J/リットル以下で CR_0 値が非常に小さくなるといわれている。図3-10から計算すると、本装置においておいては、47 J/リットル($V_c=19$ kV)以下で CR_0 値が急激に小さくなる。⁴⁰⁾

この臨界エネルギー密度は、全ガス圧に依存すると考えれば、Heバッファガスでは、 $P=230\sim 280$ kPaで47 J/リットル以下と推測される。ただし、 $P=180$ kPaでは、放電部のインピーダンスと電源回路のインピーダンスとのマッチングが悪く、逆に、 CR_0 値は大きくなるなどと推測しているがまだ確証がない。しかし、実用では入力エネルギーを低くすると出力が少なくなるので、全体的な高効率化の検討が必要となる。

一方、ガス密度揺らぎに関しては、音響波波形の最大値をセンサー感度から圧力に換算し、圧力変動 Δp とし、変動率を、レーザ全ガス圧 P との比($\Delta p/P$)で求めた。全ガス圧をパラメータとした場合の、レーザ繰り返し数に対する圧力変動率($\Delta p/P$)を図3-11に示す。 $\Delta p/P$ は、低繰り返し時に高い圧力時ほど少ないが、2 kHz以上において反転している。この結果は、2 kHz以上においてパルス毎のレーザ出力が低下する特性と一致

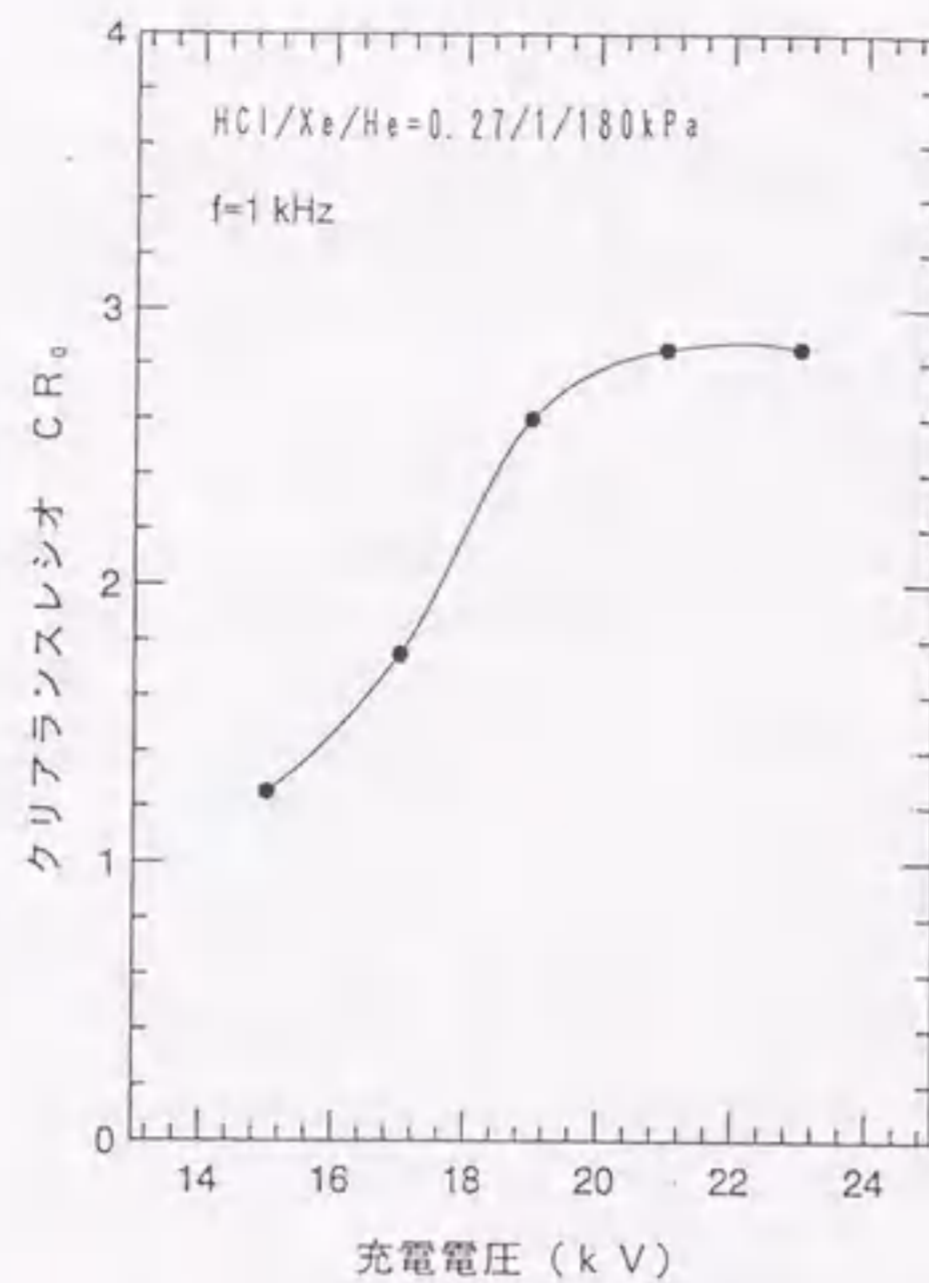


図3-10 充電電圧に対する CR_0 値

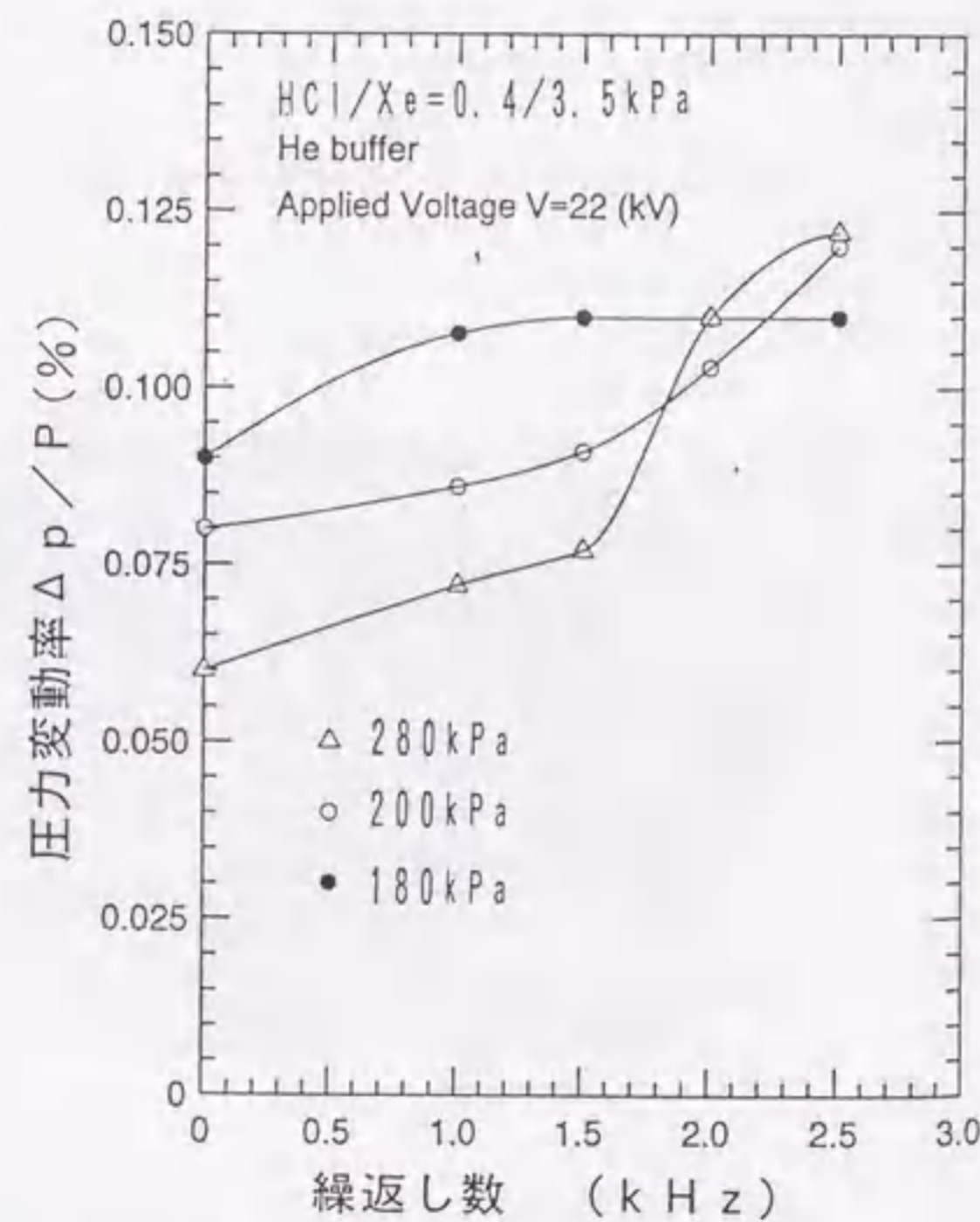


図3-11 繰返し数に対する圧力変動

している。AEセンサーで測定した音響波波形をFFT処理すると、50 kHzにピークが観測された。Heバッファガス中を伝搬する音響波の速度は、約1,000 m/sであるため、間隔20 mmの電極間を反射しながら伝搬する音響波の周波数は、ちょうど50 kHzとなり、測定結果と良く一致した。また、この50 kHzのピークは、レーザの繰り返し数が2 kHzを越えると急増した。

3.3. レーザ出力のガス温度依存性

3.3.1. 実験条件

これまでに、高繰り返し動作における出力の低下要因として、ガス密度揺らぎ、予備電離強度、予備電離放電生成物の影響を検討してきたが、さらにレーザガス温度の影響について検討した。高繰り返し動作を行うには、下流アーク状放電を抑止するために $CR=2$ 以上、また、予備電離放電による生成物の影響を避けるために $CR=3$ が必要となる。例えば、4 kHz動作を行うには120 m/sの高速ガス循環が必要となり、摩擦や断熱圧縮による発熱量を熱交換器で完全に除去できない可能性がある。そこで、1 Hz動作において、ガス流速に対するガス温度を測定し、レーザ出力との関係を調べた。

レーザガス温度の測定は、放電部のガス上流側でJ型熱電対によって行い、ガス流速を変化させる場合には、ガス流速の設定1分後に測定した。レーザ出力は、前記パイロ型エネルギーメータ、破壊電圧波形は、高電圧プローブ(Tektronix Inc. P6015)を用いて測定した。また、放電状態の撮影は、横方向の観測窓よりスチルカメラによって行った。本試験では、レーザ装置はすべて繰り返し数1 Hzで動作させた。まず、ガス温度とレーザ出力の関係を明らかにするため、ガス流速と熱交換器の冷却水を操作してガス温度を変化させ、レーザ出力を測定した。ただし、レーザ動作はすべて1 Hzであるので、放電入力によるガス温度上昇は無視できる。

3.3.2. 結果と検討

図3-12に実験結果を示す。Neバッファガスでは、レーザ出力はガス流速に依存せず、ガス温度の上昇にともないほぼ直線的に減少することが分かる。これに対しHeバッファにおいては、ガス温度を50℃まで上昇させてみたが、レーザ出力の低下は見られず、反対にわずかに増加傾向を示した。

Neバッファガスにおける、ガス温度上昇によるレーザ出力の低下原因を調べるため、①:ガス流速10 m/s、②:ガス流速120 m/s、③:冷却後ガス流速10 m/sにおける1パルスの放電状態を観測した。なお、①~③時のレーザエネルギーを、図3-12に書き入れた。ガス温度が17.3℃の①に対し、36.5℃の②では主放電中に電流の集中した領域が多発していた。この電流集中は23.7℃まで冷却した③においてはほとんど消滅している。また、36.5℃の状態でもガス流速を0 m/sにしても、電流集中が同様に発生することを確認している。

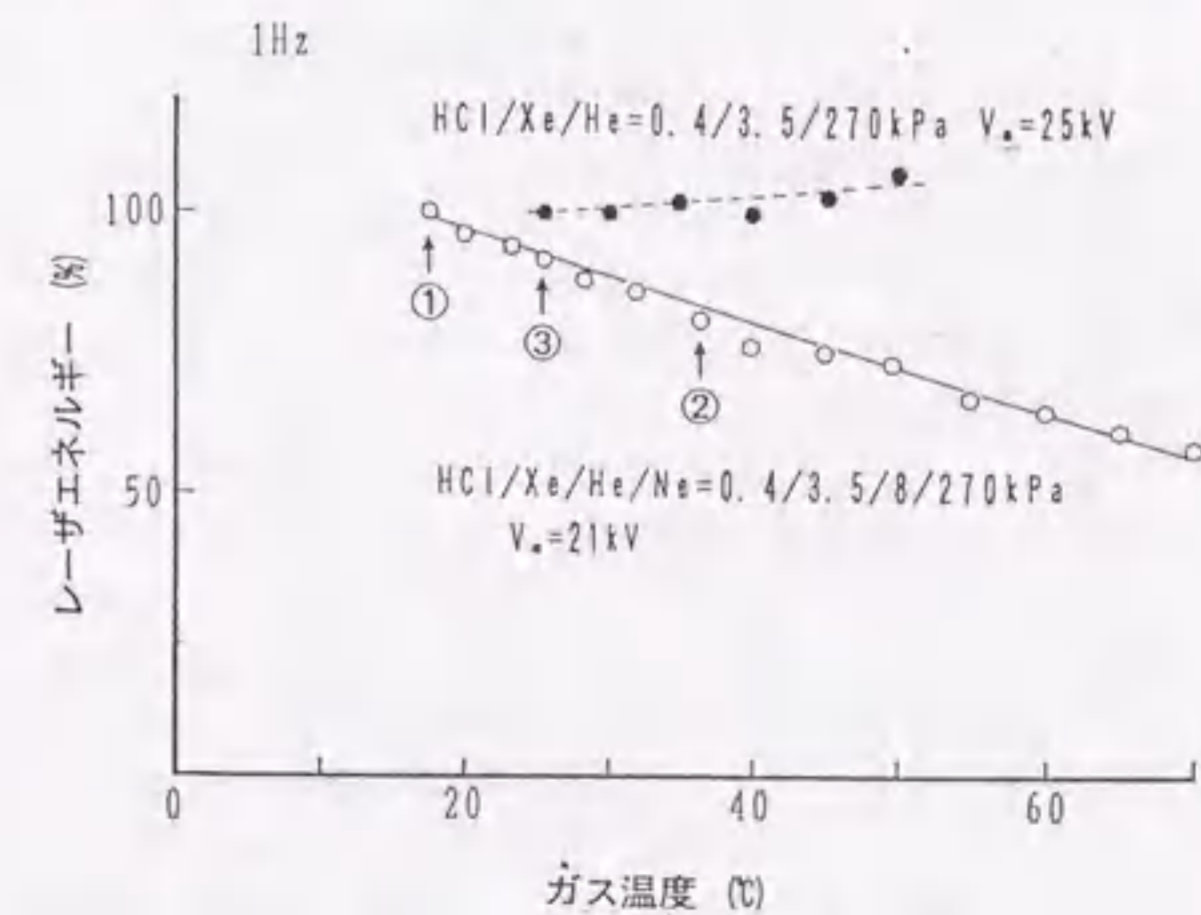


図3-12 ガス温度とレーザ出力の関係

以上の結果より、ガス温度が上昇すると、主放電中に電流の集中した領域が発生し、レーザ出力を低下させると考えられる。3 kHz以上の高繰り返し動作において、主放電中に同様な電流集中が発生することはすでに報告しており、ガス温度上昇がこの一因になっている可能性が高い。

Neバッファにおいて、ガス温度が上昇すると主放電が不安定になる原因を調べるため、主電極間の破壊電圧の測定を行った。破壊電圧は、主放電と予備電離放電の両方に注目した。これには、ガス流速を 120 m/s まで増加させ、さらに、冷却水を停止してガス温度を 70 °C まで上昇させた。図 3-13 に、ガス温度に対する主放電

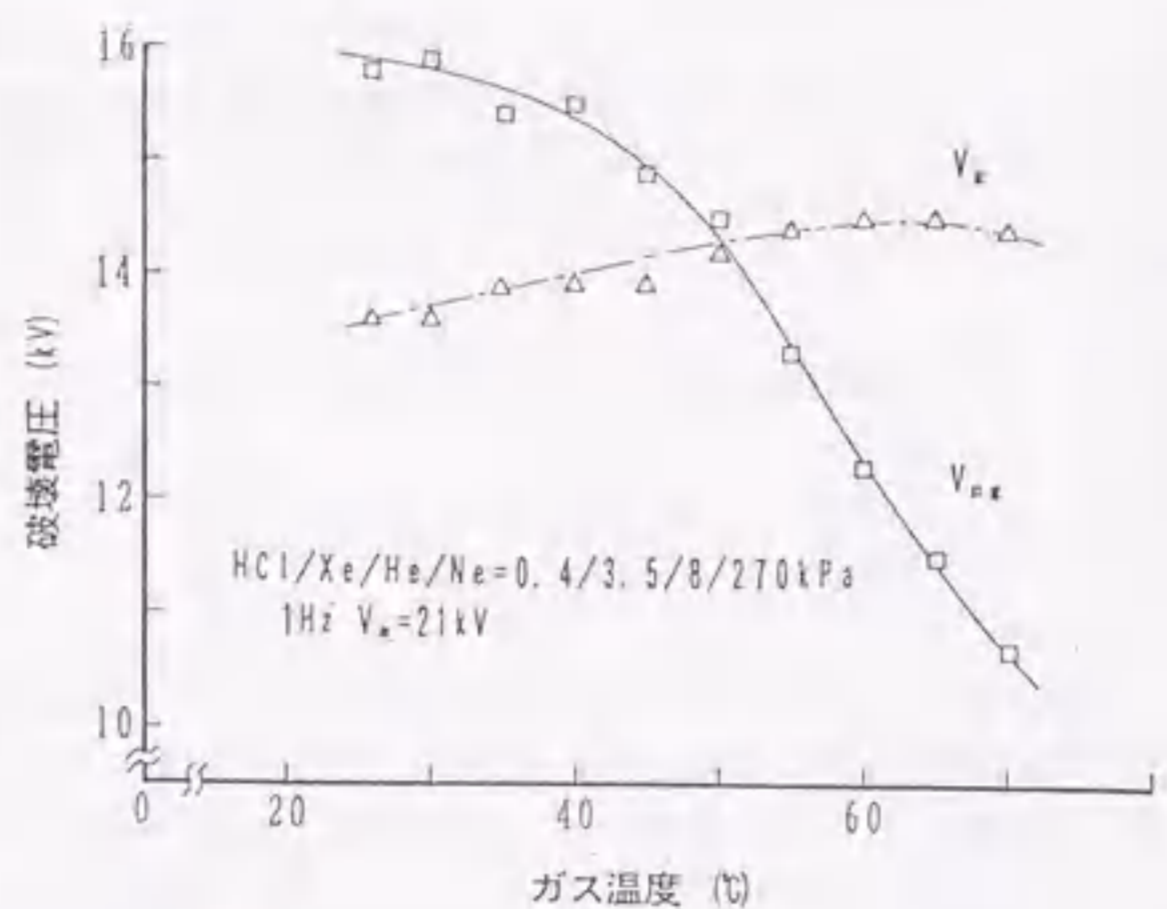


図 3-13 レーザ出力と破壊電圧の関係 (Ne バッファ)

破壊電圧 V_g 、予備電離放電破壊電圧 V_{pg} の変化を示す。 V_{pg} はガス温度の上昇とともに大きく低下していき、 V_g は 60 °C ぐらいまで微増して飽和傾向を示す。 V_{pg} が低下すると予備電離強度が減少し、その結果、主放電が不安定になることが考えられる。

本実験結果より、ガス流速を増加させるとガス温度が上昇し、それとともにレーザ出力が低下することが分かった。このレーザ出力の低下要因として、主放電中に電流集中が発生する放電の不安定性が観測され、そのとき予備電離破壊電圧 V_{pg} が低下していることが明らかとなった。 V_{pg} が低下する一因として、ガス温度上昇により、レーザ装置内壁から電離電圧の低い不純物ガスが放出されることが考えられる。また、 V_{pg} が低下すると、予備電離に必要な短波長の発光が減少し、初期電子が不足して放電が不均一になることが推察される。この初期電子不足により、主放電が点弧しなくなり、破壊電圧 V_g は上昇傾向を示したと考えられる。

V_g の上昇理由としては、ピーキングコンデンサ C_p の温度上昇による容量の低下も考えられる。たとえば、本レーザ装置に使用しているセラミックコンデンサは、温度が 20 °C から 40 °C のなると、容量は 10 % ほど減少する。 C_p はレーザガス中にあるため、ガス温度上昇により容量が減少するのに対し、主コンデンサ C_s は大気中にあるため、容量は変化しない。したがって、 C_p/C_s が小さくなり、 V_g が上昇することは考えられる。しかし、この程度の C_p/C_s の変化量が放電不均一性の原因にならないことは別に確認している。

一方、ガス温度が上昇することで、レーザ出力が低下する理由の 1 つとしては、イオンによる光吸収の温度依存性、XeCl*エキシマ生成に関する反応定数の低下が報告されている。もう 1 つの理由としては、アウトガスの影響が考えられる。低温では、レーザ発振器本体の壁面に付着しているハロゲン化合物などが、温度上昇とともにレーザガス中に放出される。これらのアウトガスは、予備電離の破壊電圧を低下させるほか、UV 光を吸収し、放電部で生成される初期電子密度を減少させる。さらに、ハロゲン化合物はイオン化電圧が低いため、主放電部での不均一性を増大させ、フィラメント状のアーカ放電を誘発することが推察される。⁴³⁾⁻⁴⁷⁾

これらのことを考慮すると、高繰り返し動作を行う場合には、低繰り返し動作時ではレーザ出力は低下するが、ガス温度上昇が小さく、また、放電安定性が良く出力低下の見られなかった He バッファガスが適しているといえる。本実験結果より、最終目標の 5 kHz 以上、500 W を達成する有利な施策として、He バッファの採用が非常に有効であることが示された。⁴⁸⁾⁻⁵³⁾

また、Ne バッファガスでの温度上昇が He の場合より高くなったのは、Ne と He の比熱、比重や粘性係数などの違いにより、流路抵抗によるガス温度上昇が、同じガス流速においても高くなるためである。このため、プロアへの投入電力は He より大きくなる。図 3-14 に、Ne および He バッファガス各々 270 kPa における、ガス流速とプロアへの投入電力の関係を示す。

流速が比較的低い領域では、両者の投入電力に大きな差はない。流速が高くなると、投入電力は流速の 3 乗に比例して増大し、流速 120 m/s の場合、He バッファの 70 kVA に対し、Ne バッファでは、2.2 倍以上の 170 kVA となる。レーザのガス温度上昇は、投入電力の差に伴い、70 m/s 以上で急激に大きくなった。

本装置では、放電入力最大 15 kW 程度となるので、レーザ動作時にはこの投入電力に加算される分も無視できず、実際にはさらに温度上昇の影響が増大する可能性があり、冷却系の設計がきわめて重要となる。

3.4. 高繰り返し化総合試験

3.4.1. 基本動作特性

モデル 1 装置は、ガス容量が 1.5 m³ と大きいので、放電部の基礎的な出力特性の測定は、プロアが装備されていない補助タンクに入れて、低繰り返し動作 (1 Hz) で測定を行った。その後、得られた測定結果を基に、高速ガス循環チャンバを使って、高繰り返し動作試験を行った。実験方法としては、まず He、Ne 系統ガスにおいて破壊電圧を測定し、次に、Xe 分圧、全ガス圧を変化させ、充電電圧に対するレーザ出力を測定した。

続いて、これらの結果から、最大レーザ出力が得られるガス混合比において、充電電圧に対するレーザ出力を測定した。最後に、高繰り返し動作でのレーザ出力測定を行った。レーザ出力の測定は、前記パイロパワーメータとサーモパイルディテクターを用いた。

図 3-15 に、Ne バッファガスにおける最適混合ガス状態 Xe/HCl/He/Ne=6.9/0.4/8/260 kPa でのレーザ出力特性を示す。この結果、充電電圧 28 kV において最大レーザ出力 148 mJ、同 18 kV において最大効率 1.78 % が得られた。効率は、主コンデンサ C_s への充電エネルギーに対するレーザ出力より求めている。

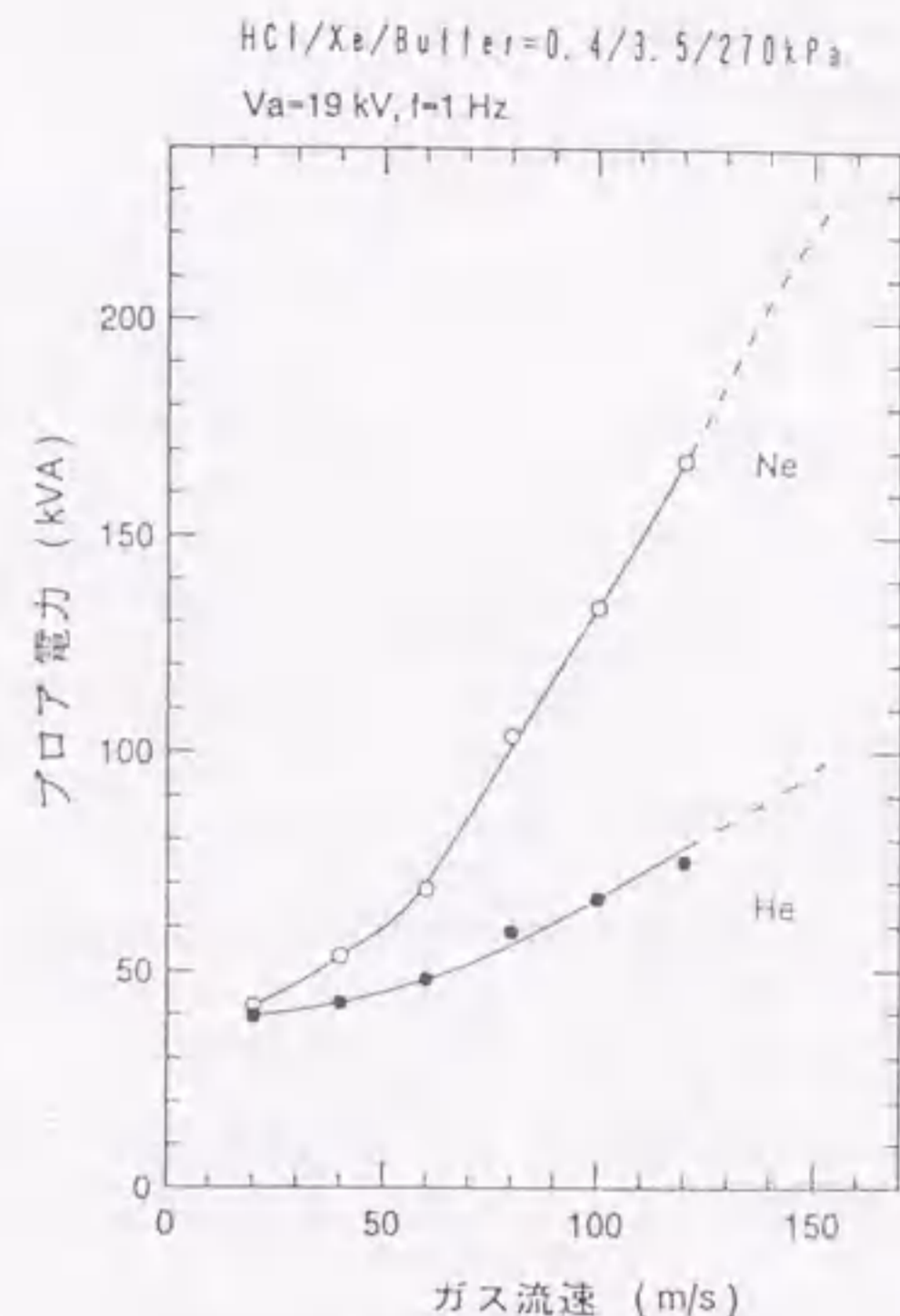


図 3-14 プロアへの投入電力

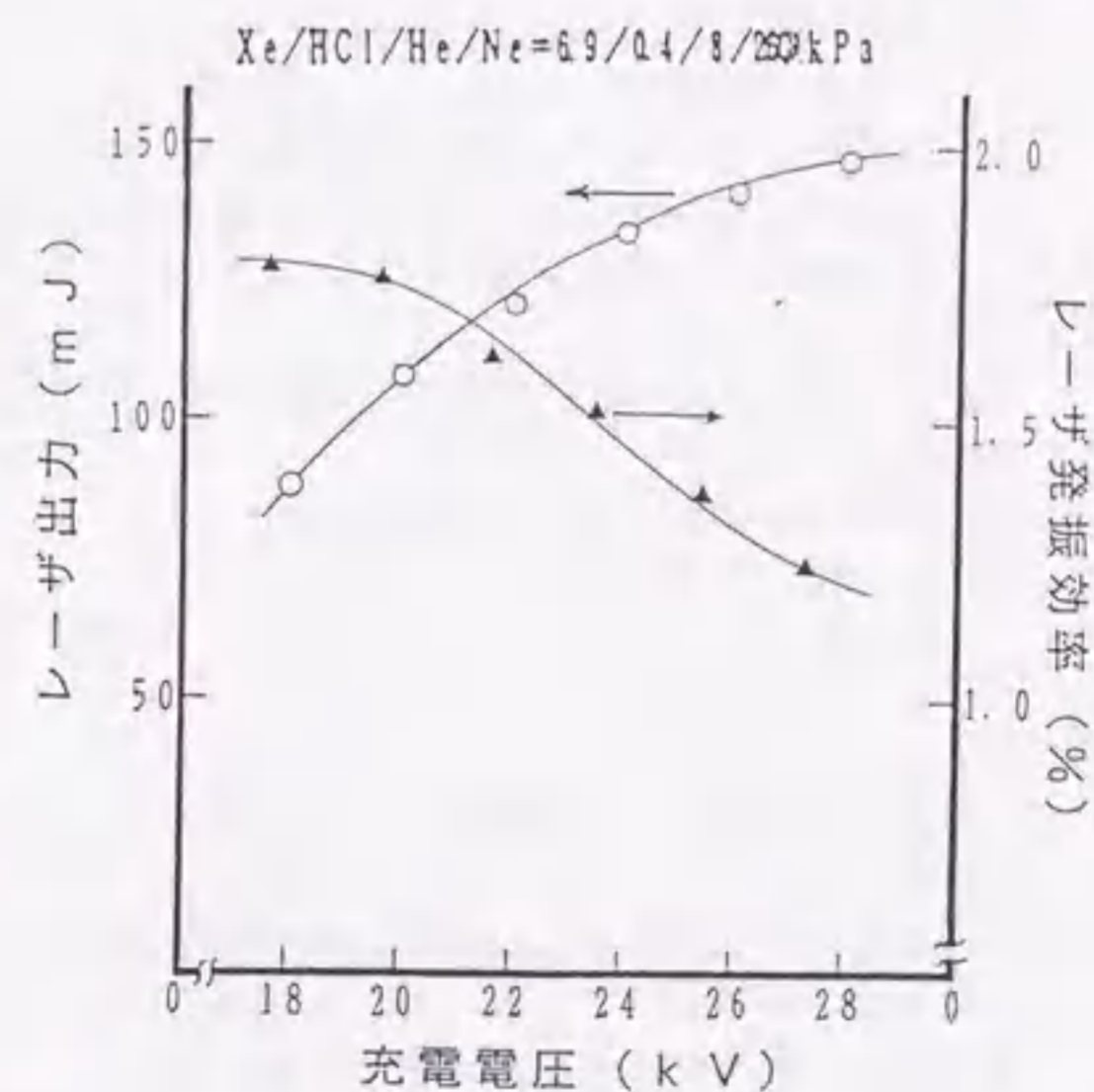


図 3-15 レーザ出力と発振効率

これまで、基礎実験用モデル0装置のレーザ出力特性は、主にXe=3.5 kPaで測定しており、それと比較するために、同分圧のXeにおけるレーザ出力をモデル1装置で測定した。この結果を図3-16に示す。モデル0装置に比べると、約2倍高いレーザ出力が得られ、すべての充電電圧において、1ショット60 mJ以上が得られた。したがって、Xe分圧が3.5 kPaと低くても第1段階の目標である2 kHz、0.1 kWが十分達成できる見通しを得た。

図3-17に、Neバッファガスにおける繰り返し数とレーザ平均出力の関係を示す。レーザガスとしてXe=3.5 kPa、HCl=0.4 kPa、全ガス圧力を280 kPaに設定、充電電圧は18 kV、ガス流速はCR=3として設定した。繰り返し数2 kHzまでレーザ平均出力は直線的に上昇し、これ以上は飽和傾向となった。ともあれこの手始め段階で、2 kHzにおいて105 W、また2.2 kHzで110 Wが得られた。⁵⁴⁾

最終目標の繰り返し数5 kHz以上、レーザ出力エネルギー100 mJ/パルス、平均出力500 Wまでは、今一步の所まで来たが、安定な高繰り返し動作を実現するためには、下記のような基礎技術の確立が必要と思われる。さらに、2 kHz以上の高繰り返し領域になると、レーザ平均出力の飽和・低下現象が見られている。ガス流速は、CR=3として設定してあるので、下流アーク状放電は発生していない最適の状態である。したがって、出力低下の原因は下流アーク状放電以外の要因が考えられ、次のようなものが推測される。

- (a) イオンや準安定原子などが、主放電空間に残留している。
- (b) 高繰り返し化による予備電離不足。
- (c) 主放電、予備電離放電によるガス密度揺らぎ。
- (d) モータの高速化によるガス温度の上昇。

これらを実験によって解明し、高繰り返し動作におけるレーザ出力低下を改善していく必要がある。また、高繰り返し動作試験結果は、Neバッファガスで行ったが、Xe分圧の最適条件6.9 kPaでの高繰り返し動作、または、Heバッファでの高繰り返し動作も検討する必要がある。

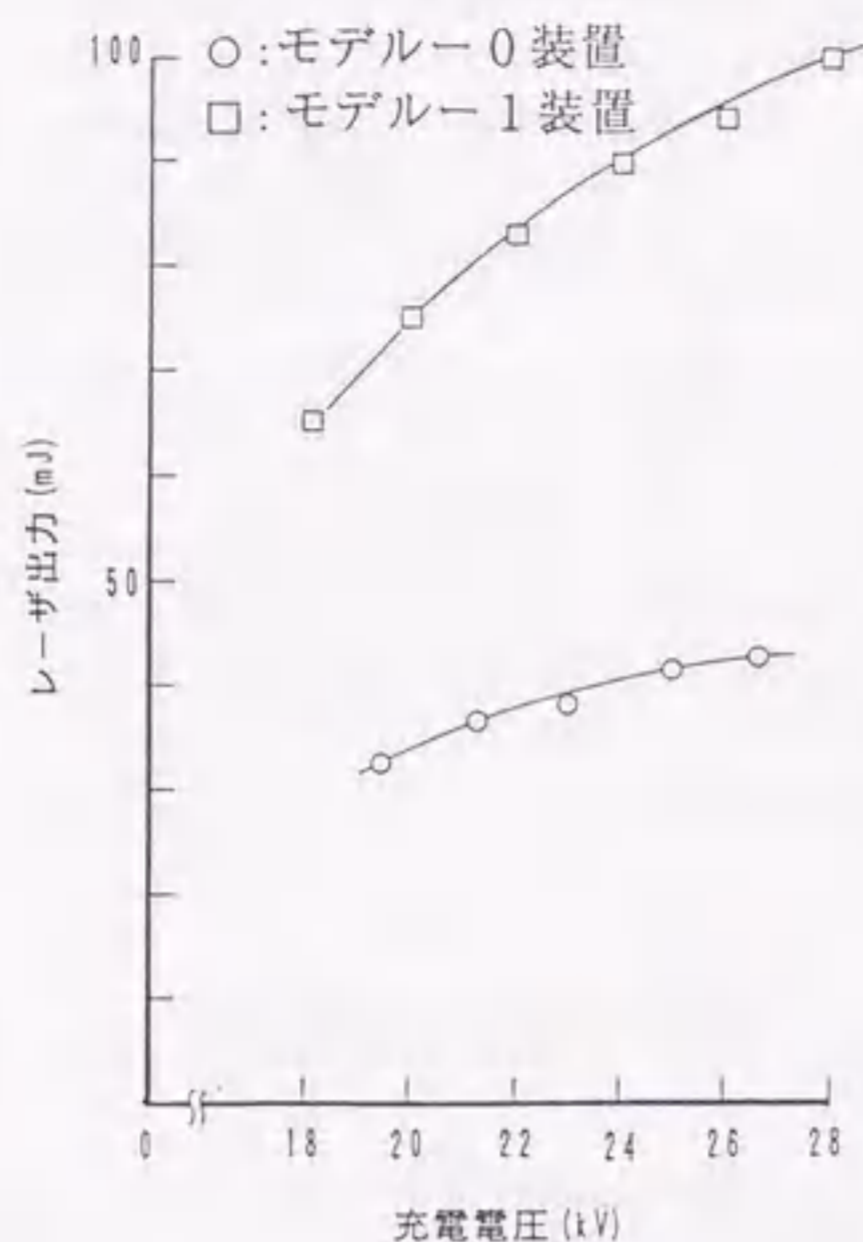


図3-16 モデル1とモデル0装置の比較

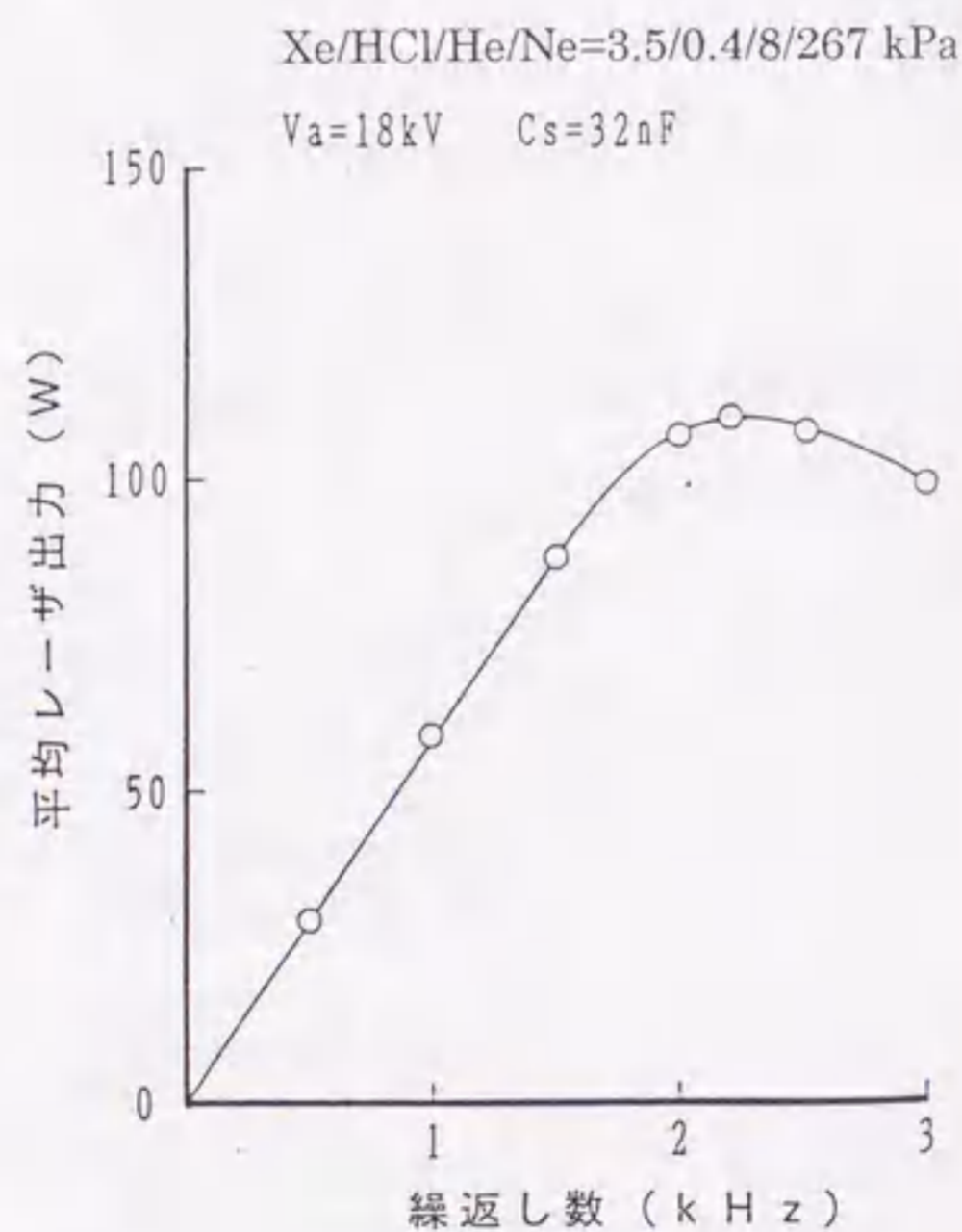


図3-17 繰り返し数と平均レーザ出力

3.4.2. 高繰り返し化の基本的

検討

上述の諸実験結果を基に、さらなる高出力化を実現させるための改良、最適動作条件化を行い、モデル1装置において以下のような性能向上が得られた。

図3-18に、Neバッファガスでの繰り返し数と平均レーザ出力との関係を示す。主コンデンサC₁への充電電圧は、18 kV、および20 kVとした。レーザの平均出力は、繰り返し数を高くするにつれて増加し、2 kHz、20 kVで、最大出力150 Wが得られた。しかし2 kHzより高い繰り返し数では、平均出力が急激に減少している。

次に、Heバッファで同様の実験を行った。図3-19に、この繰り返し数と平均出力との関係を示す。Neバッファに比べ、1ショット毎のレーザ出力エネルギーが低いため、2 kHz以下での平均出力は低くなっている。しかしながら、2 kHz以上の高い繰り返し数においても、平均出力は繰り返し数の上昇と共に増加する傾向を示し、20 kV、3 kHzにおいて、135 Wのレーザ出力が得られた。この時のガス流速は、102 m/sである。⁵⁾

Heバッファガスでは、その全ガス圧が低い方が、安定に動作する傾向が観察された。また、Xeガス分圧が低い方が、高繰り返し動作の安定性が良いことが確かめられている。そこで、全ガス圧を240 kPaから200 kPaとし、Xe分圧を3.5から2.7 kPaへと低下させた。図3-20に、この条件での繰り返し数と平均出力との関係を示す。平均出力は、繰り返し数に比例して増加し、3.5 kHzから飽和傾向を示すものの、4 kHzまで増大し、ここで135 Wが得られた。

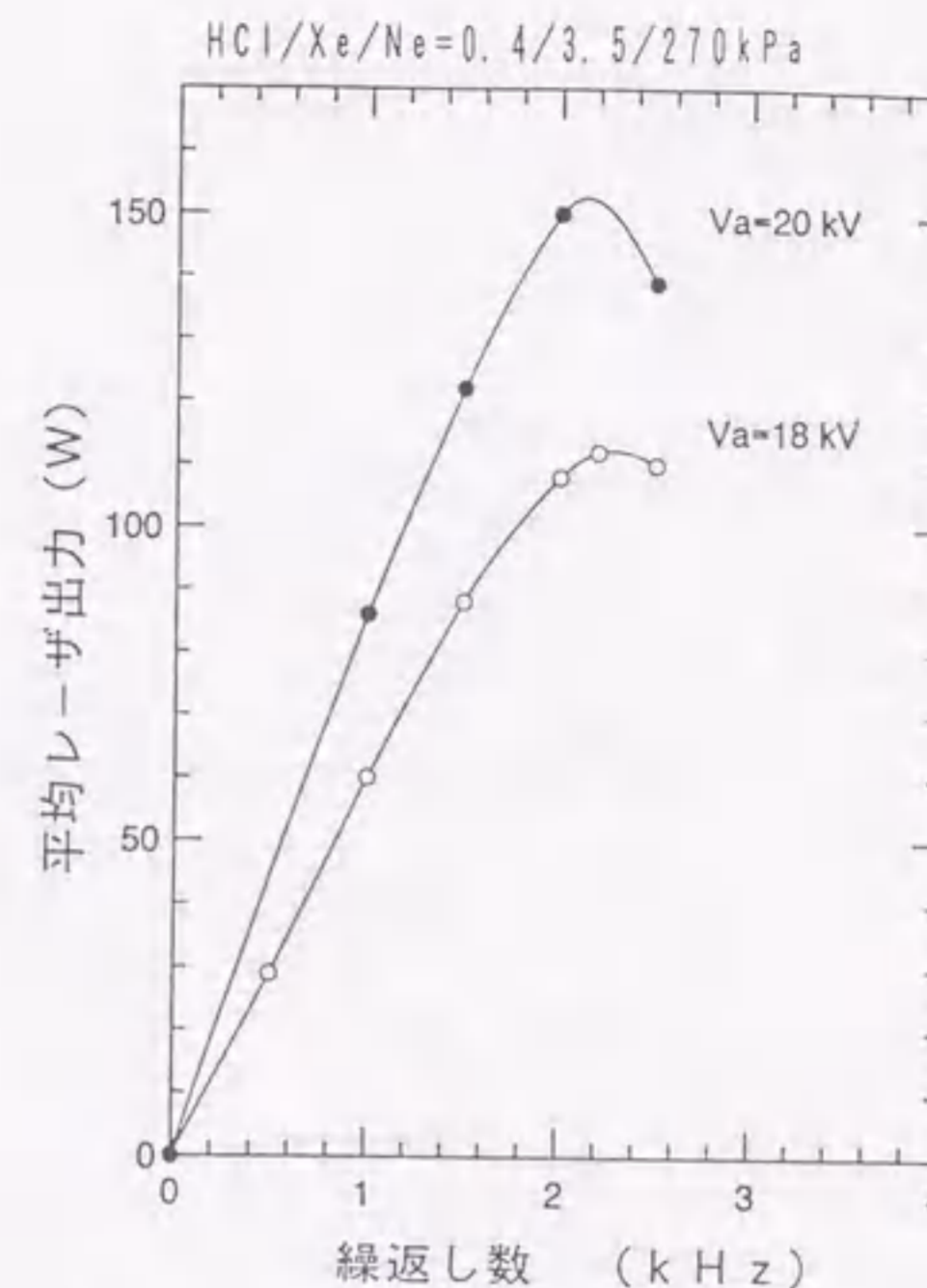


図3-18 高繰り返し動作 (Neバッファ)

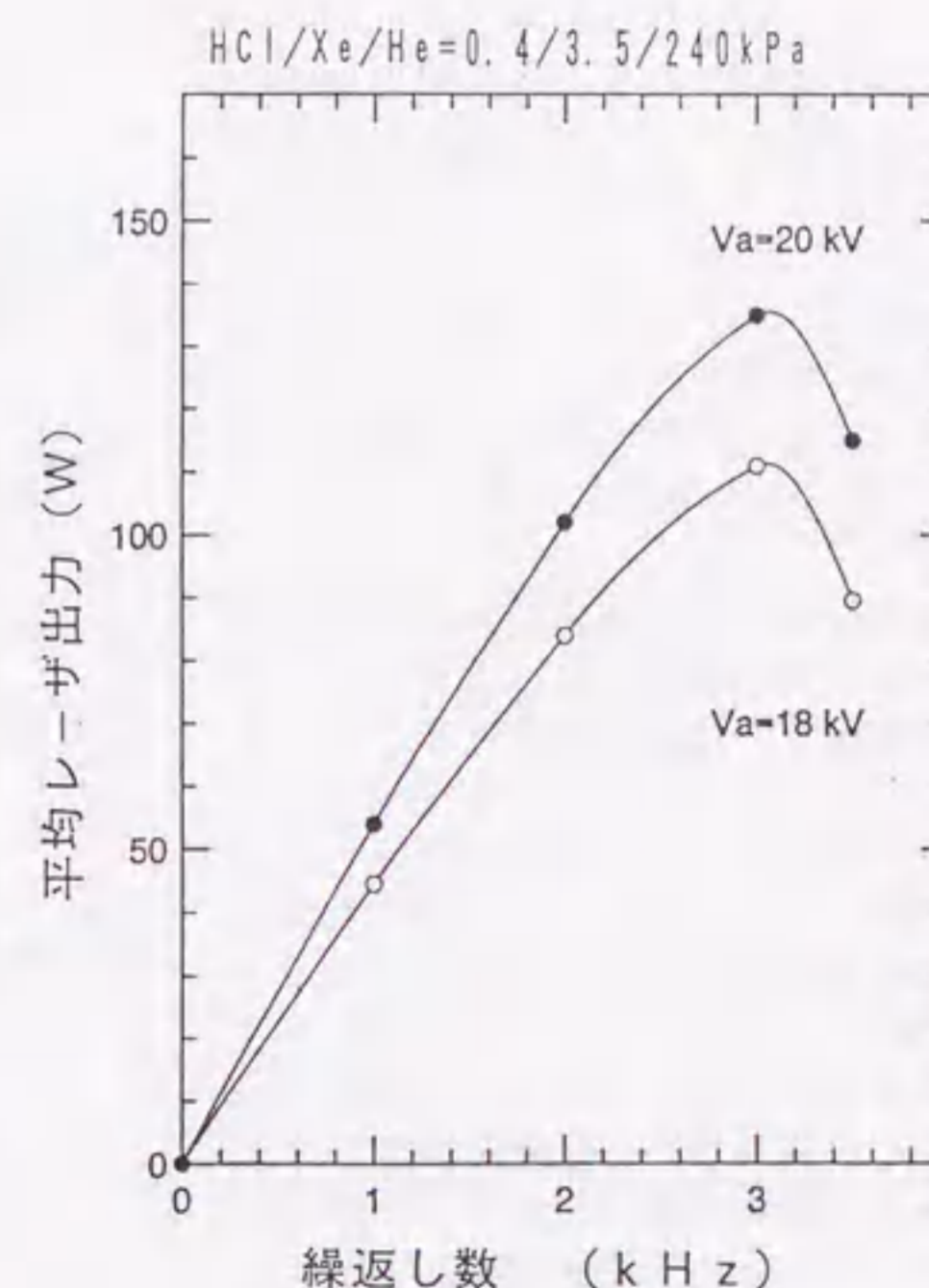


図3-19 高繰り返し動作 (Heバッファ)

3.5. 出力増大化

3.5.1. ガス条件の最適化

上記の結果を受けてバッファガスをHeに絞り、高繰り返し動作に対する全ガス圧力、Xe分圧、HCl分圧、充電電圧、電極間隔などの効果を詳細に測定した。その結果、Xe分圧の低減が高繰り返し動作の安定化に有効であることが分かり、次のような諸特性を明らかにして、Xe分圧を1.5 kPa以下とすることで、平均レーザー出力の増大化を図った。レーザーガスとしては、HCl/Xeの混合ガスをHeガスで希釈し、実験条件に対応して全ガス圧力、ガス混合比などを変化させて、繰り返し数と平均レーザー出力との関係を測定した。この時、主コンデンサC₀への充電電圧V_aは、19~20 kVとした。^{56)~59)}

まず、ガス混合比をXe/HCl/He=1.24/0.15/98.61%一定にし、全ガス圧力P=152~278 kPaにて変化させ、レーザーの動作特性を調べた。同一の充電電圧で比較すると、ガス圧力が高くなるにともない、レーザー発振のしきい値電圧は高くなるが、大きなレーザー出力が得られるようになる。一方、P=278 kPaを越える高いガス圧力下で1 kHzを越える高繰り返し動作を行うと、放電の局所的な集中が顕著となり、平均レーザー出力は繰り返し数に対し飽和傾向を示す。^{60)~62)}

このように、高いガス圧力域で繰り返し数を上げられないのは、これまでの実験で予備電離不足が主因であることを確認している。すなわち、予備電離放電から放出されたUV光は高いガス圧力の下では吸収が増加して、主放電部で生成される電子密度が減少し、放電は集中したフィラメント状放電となり易くなる。また、高繰り返し動作ではピン電極の加熱により、予備放電の破壊電圧が低下し、投入される電力が減少して、UV光の強度が減少するなどの原因も考えられる。^{63)~65)}

図3-21は、印加電圧V_a=19 kVにおいて、全ガス圧力、HCl分圧および

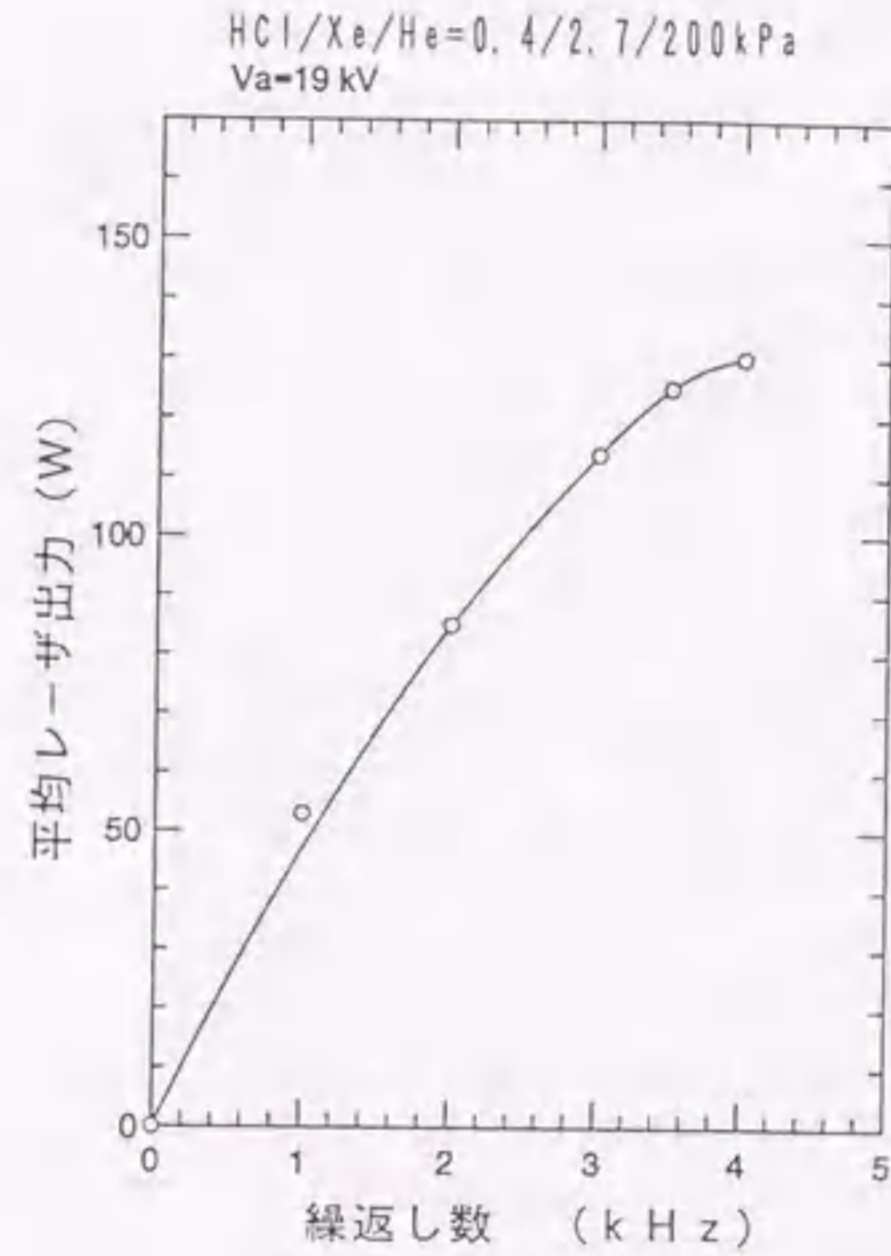


図3-20 低ガス圧での4 kHz動作

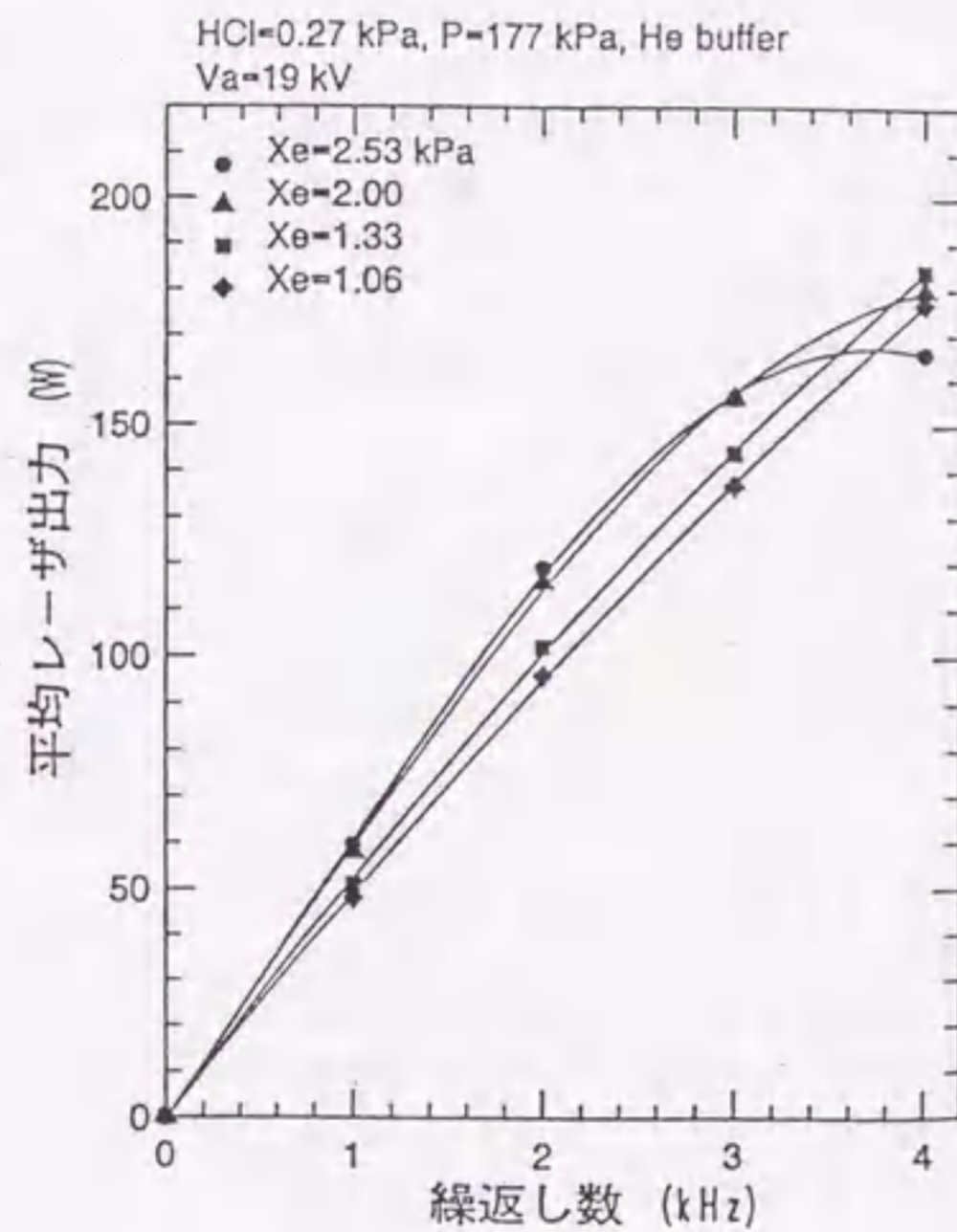


図3-21 Xe分圧依存性

充電電圧を一定にして、Xe分圧をパラメータとした高繰り返し動作特性を示す。Xe分圧が2 kPa以上では、3 kHz以下の領域において高い平均出力を示すが、4 kHz以上では飽和傾向を示す。一方、Xe分圧1.06~1.33 kPaでは、繰り返し数にほぼ比例して平均出力が伸びている。放電状態の写真観察から、Xe分圧が高くレーザー出力低下の顕著な領域では、陰極表面近傍に多数の電流集中領域(以下ホットスポット)が観測された。レーザー出力が低下したのは、電流集中によりレーザー励起に有効な放電体積が等価的に低下したためと推察される。

図3-22は、HCl分圧をパラメータとして測定した高繰り返し出力特性である。レーザー出力は低繰り返し時での出力比が維持されたまま、直線的に増加している。HCl分圧に対しては、Xe分圧で測定された特徴的な出力依存性は観測されなかった。

次に、Xe=1.06 kPa、HCl=0.27 kPa、V_a=20 kV一定として、He分圧Pを変化させた時の結果を図3-23に示す。Xe、HClの絶対量を一定とすると、平均レーザー出力は、P=227 kPaまでの範囲で、全ガス圧力とともに増加する。このとき、定量的な測定は行っていないが、P=278 kPa以上では、予備電離不足と思われる影響が現れ、3 kHz以上で出力変動が大きくなり測定が不能となった。ここでは、P=227 kPaにおいて、4 kHz、200 Wの出力を得た。

さらにレーザー出力増大を試みるため、主電極間隔Gを20 mmから24 mm拡大し、放電体積を増加させた。図3-24にその結果を示す。Gを20%拡大することによりレーザー出力は13%増加し、P=176 kPaの低圧においても4 kHz、203 Wを得た。⁶⁶⁾

このように、低繰り返し動作に適したガス条件が、必ずしも高繰

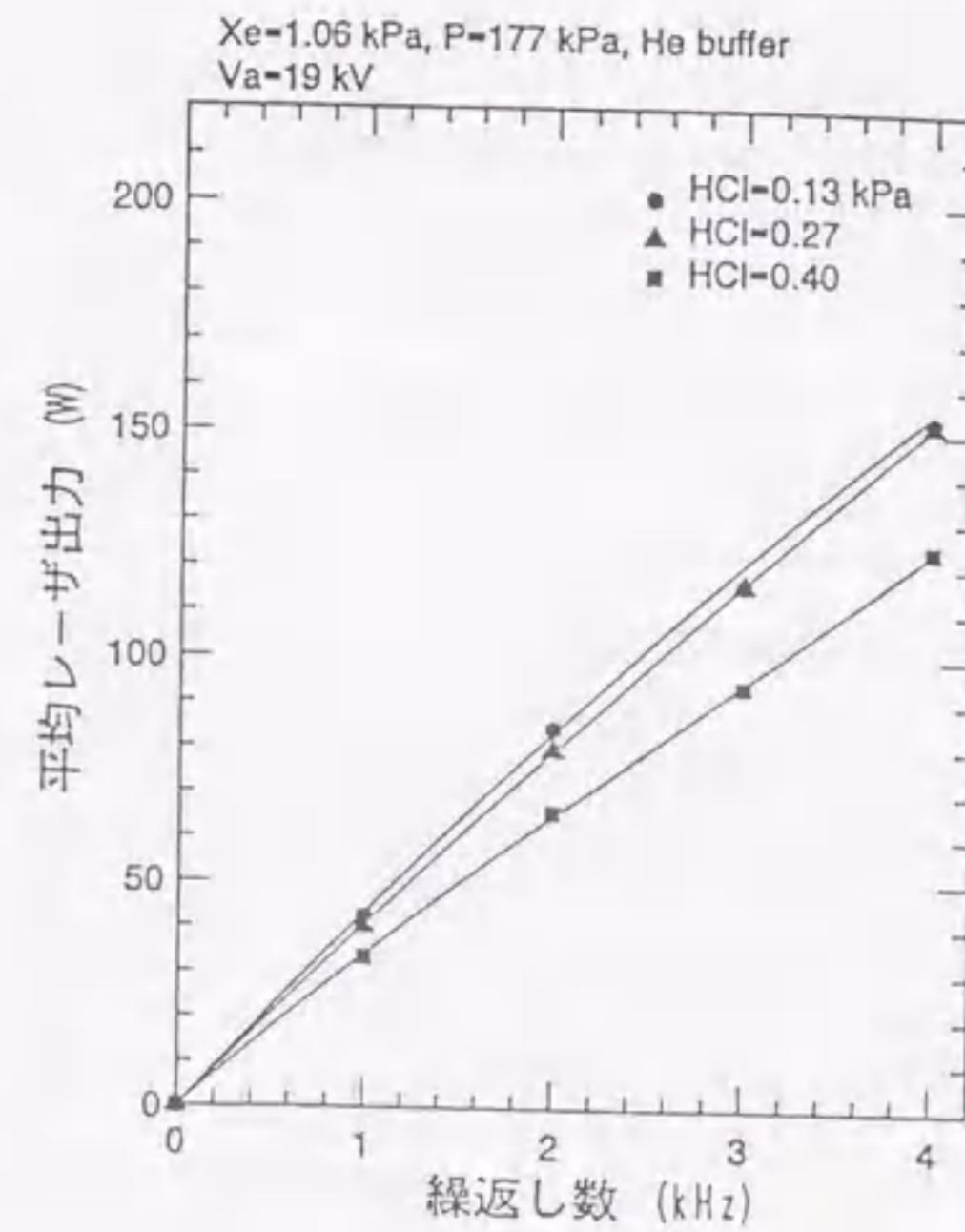


図3-22 HCl分圧依存性

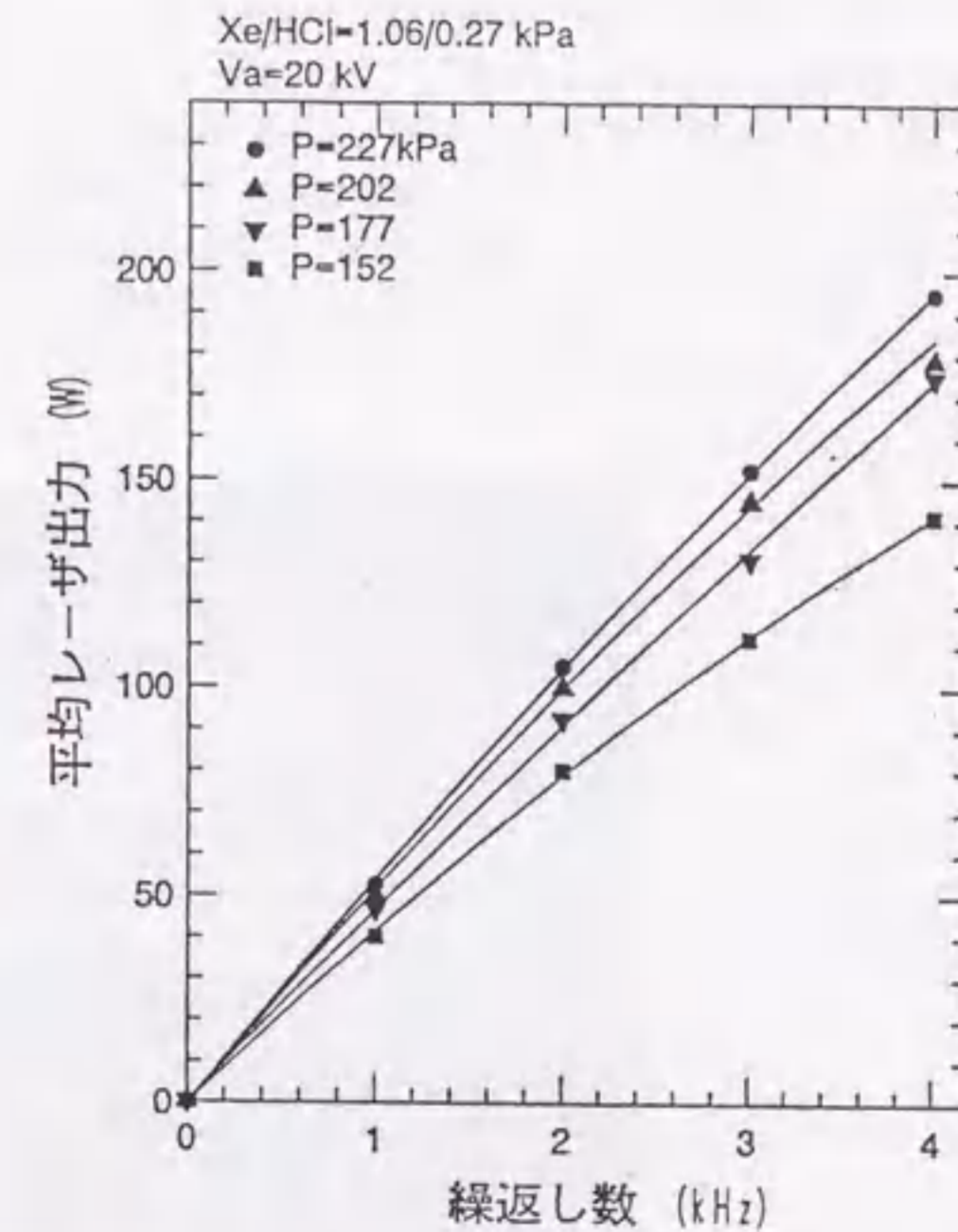


図3-23 全ガス圧による出力増大

数%高くなった。 $T_d > 10$ nsで、レーザ出力は T_d を大きくするにつれて低下していき、60 ns以上では一定値となる。高繰り返し動作に最適なHeバッファガスでは、出力の変動率を±10%以下にするためには、 $T_d \leq 15$ nsとすることがある。

図3-28は、Neバッファガスにおいて、 T_d の変化によるレーザ出力波形をパイラナ光電管を用いて測定した結果である。各々の波形で、先行パルスの出力はほぼ同じであるのに対して、後続パルスは T_d が小さくなるにつれて大きくなっている。図3-27に示されるように、 $T_d \leq 10$ nsでは100%以上の出力が得られたが、この時、電圧波形の測定で後続放電部の破壊電圧が低下していたことから、後続放電部が先行放電のレーザ光あるいは放電光により均一に予備電離されたと推察される。 $T_d \leq 10$ ns動作での予備電離が、後続放電部自身の予備電離より均一かつ強いため、放電部のインピーダンスが低下し発振効率が向上したためと考えられる。なお、先行パルスのレーザ出力が数mJ以下と小さい場合には、この効果は観測されなかった。⁶⁷⁾

3.6. 長時間動作特性

モデル-1装置では、レーザチャンバ本体はNiクラディングのSUS 304を使用したほか、電極はNi無垢棒から加工、プロアはセラミックコートをし、内部の熱交換機など金属部分にはニッケルメッキを施し、また絶縁物部品にはフッ素系樹脂PVDFやバイトゴムパッキングを用いるなど、可能な限り多くの耐蝕材を使って、ハロゲンガスへの耐食性を確保し、長時間の安定動作が得られるように設計した。

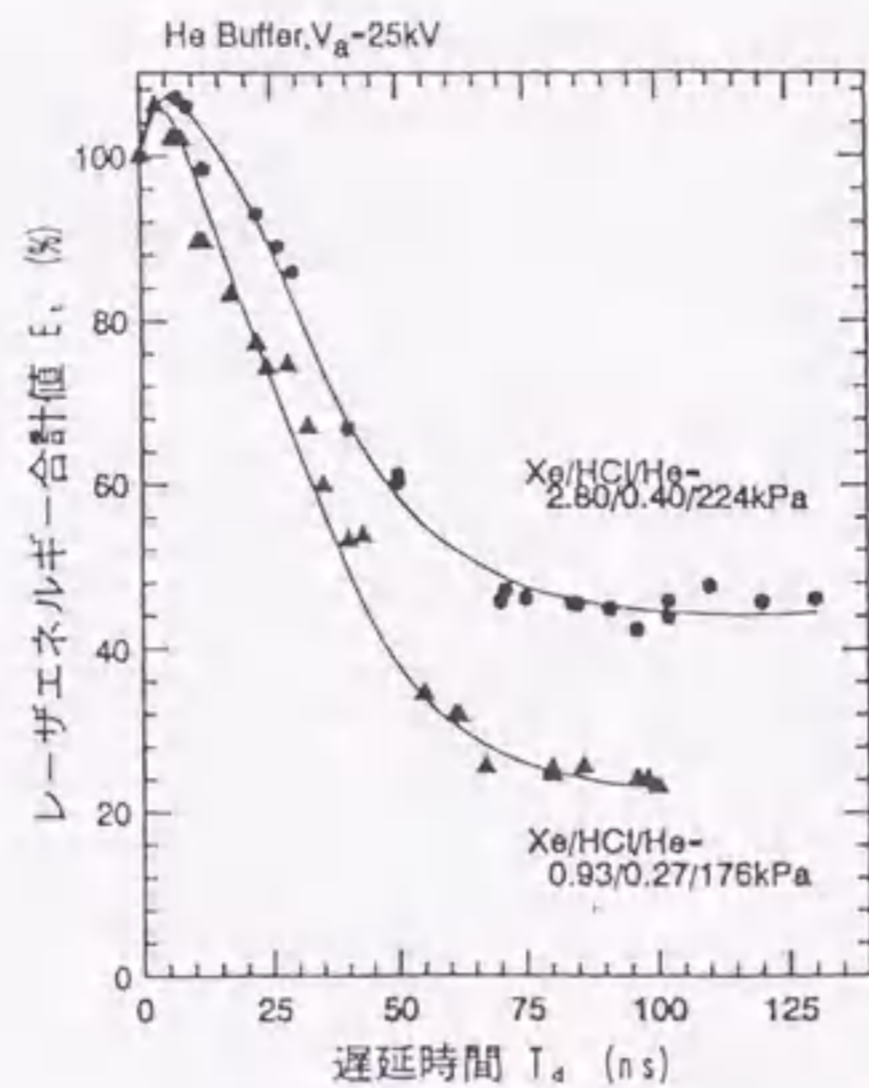


図3-27 遅延時間による出力変化

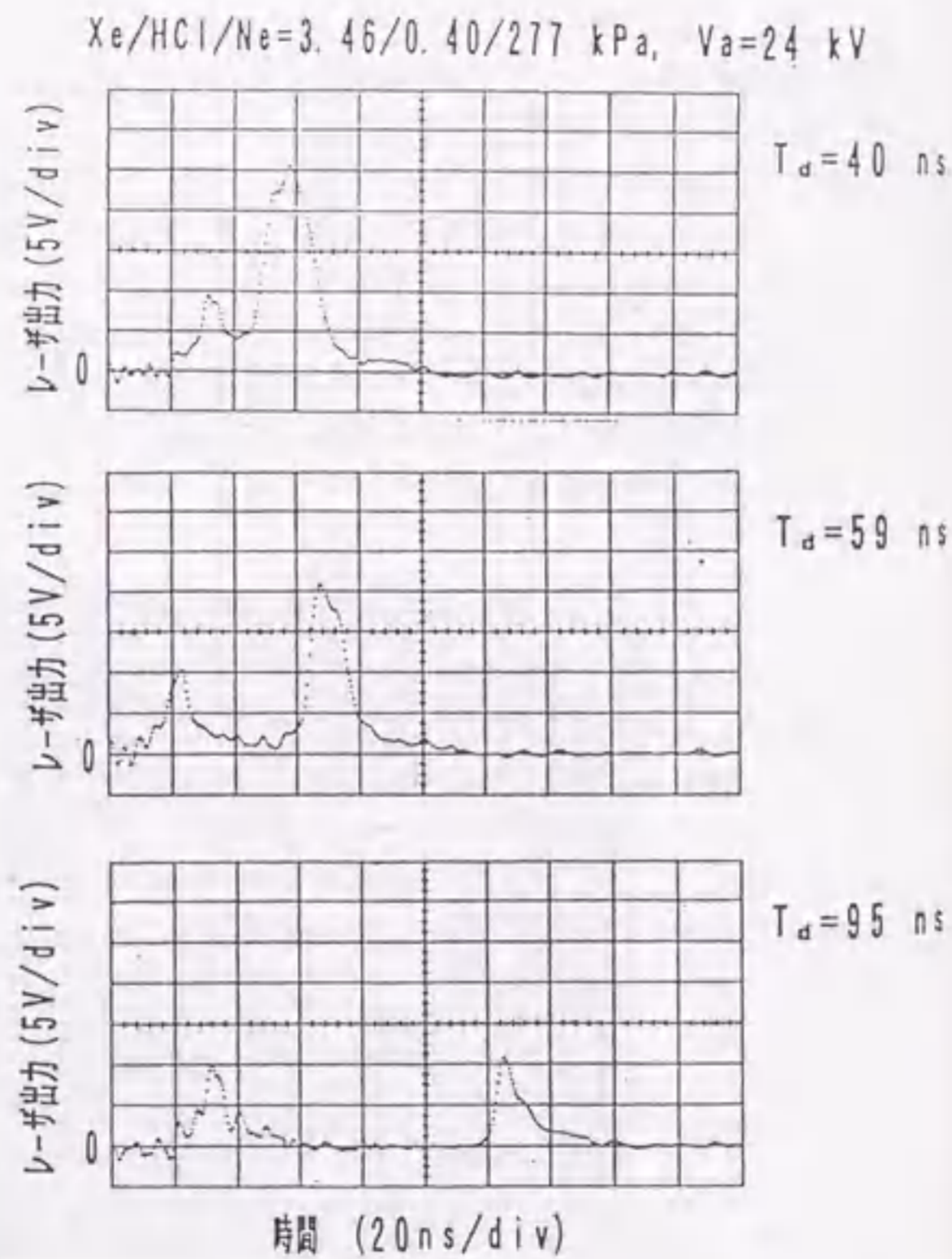


図3-28 遅延時間による出力波形

図3-29は、この2kHzでの1時間連続動作実験の結果である。動作開始時には、平均出力は113Wであったが、1時間後には96Wまで、すなわちほぼ85%に低下している。時間経過に対する低下割合は、最初の8分で顕著であるが、時間と共に次第に低下は少なくなり、後半の30分ではほぼ直線的に低下する傾向が見られた。これを実験式で示すと、t分後の平均レーザ出力 P_L は、

$$P_L(t) = -0.1t + 98 \text{ (W)} \quad (t: \text{分}) \dots\dots\dots (3-3)$$

となる。

また、Neバッファガスの場合には図3-30に示す特性が得られ、Heバッファとほとんど同じ低下傾向を示した。



図3-29 長時間動作 (Heバッファ)

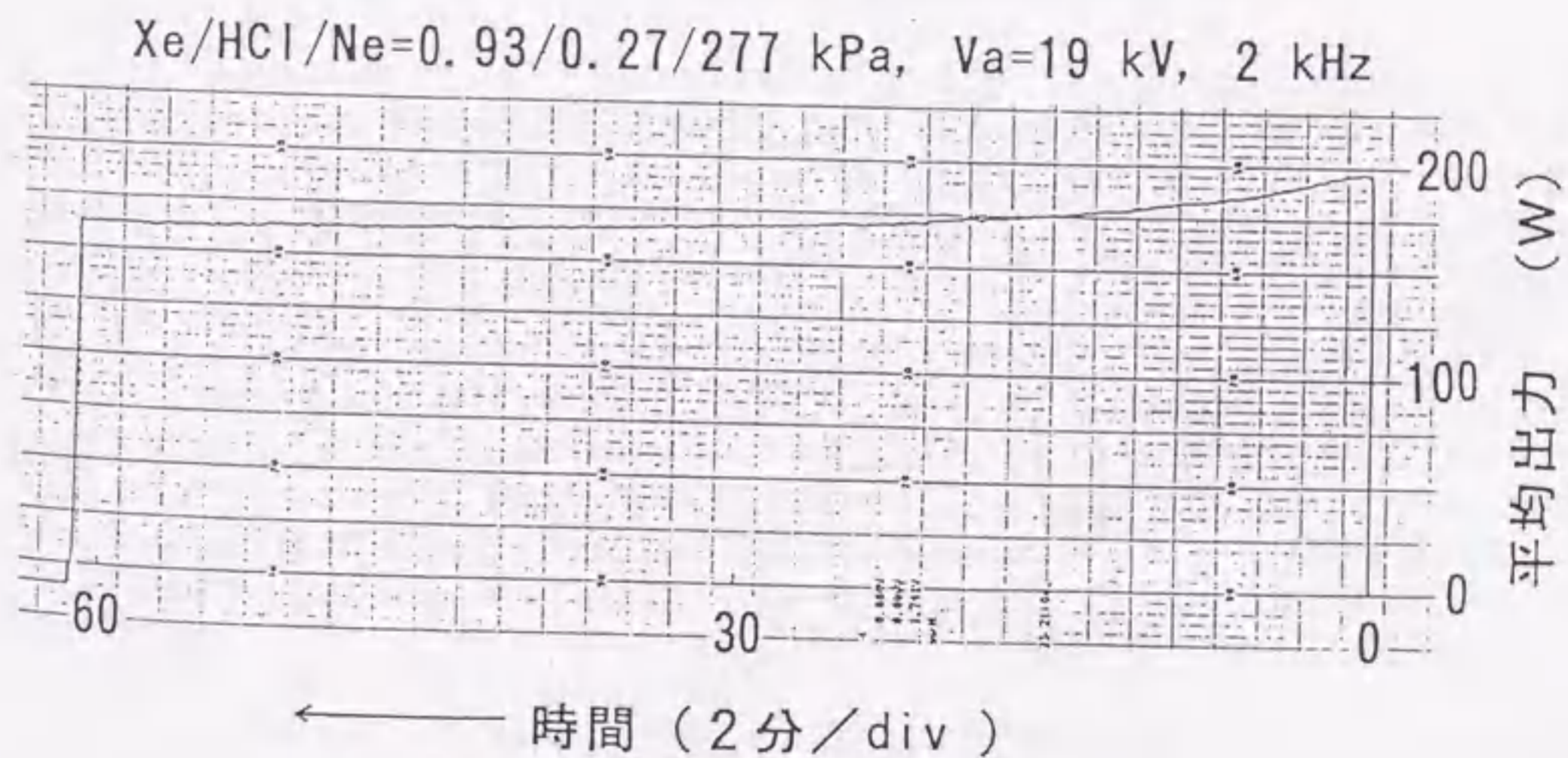


図3-30 長時間動作 (Neバッファ)

次に、Neバッファガスで高出力が得られるXe=3.46 kPaのガス構成で同じように動作させた結果を図3-31に示す。(a)はガスを入れた初日、(b)は同じガスを封入して15日間放置した後の動作結果である。(a)の場合には、1時間連続動作させた後に25分間停止させ、再び同じように動作を行った。最初の開始時には、302 Wが得られたが、直後に低下したため記録されていない。1時間後は192 W、すなわち64%まで低下しており、図3-30の場合より低下割合はかなり大きい。とくに、最初の30分では207 W、すなわち69%まで大幅に低下しているが、後半の30分ではわずかな低下に留まっている。25分休止後に再開させた時、232 Wまで40 Wも増大しており、低下原因を推察する手がかりとなる。一方、15日後に動作させた場合には、初期出力が245 Wであったが、1時間ほど停止してミラークリーニングを行い動作を再開させたところ、283 Wまで増大した。

これらの実験結果を基に出力低下原因を推察してみると、(a)の25分停止後の出力回復分40 Wは、ピーキングコンデンサ、ピン電極、主電極などの加熱が主因と思われる。(b)でのミラー汚れに因る38 W増大相当分は(a)における低下分にも含まれると思われる。したがって、14日間放置したことによる出力低下は19 W、すなわち初期出力の6%程度と少なく、モデル-1装置の安定性はかなり高いと評価できる。

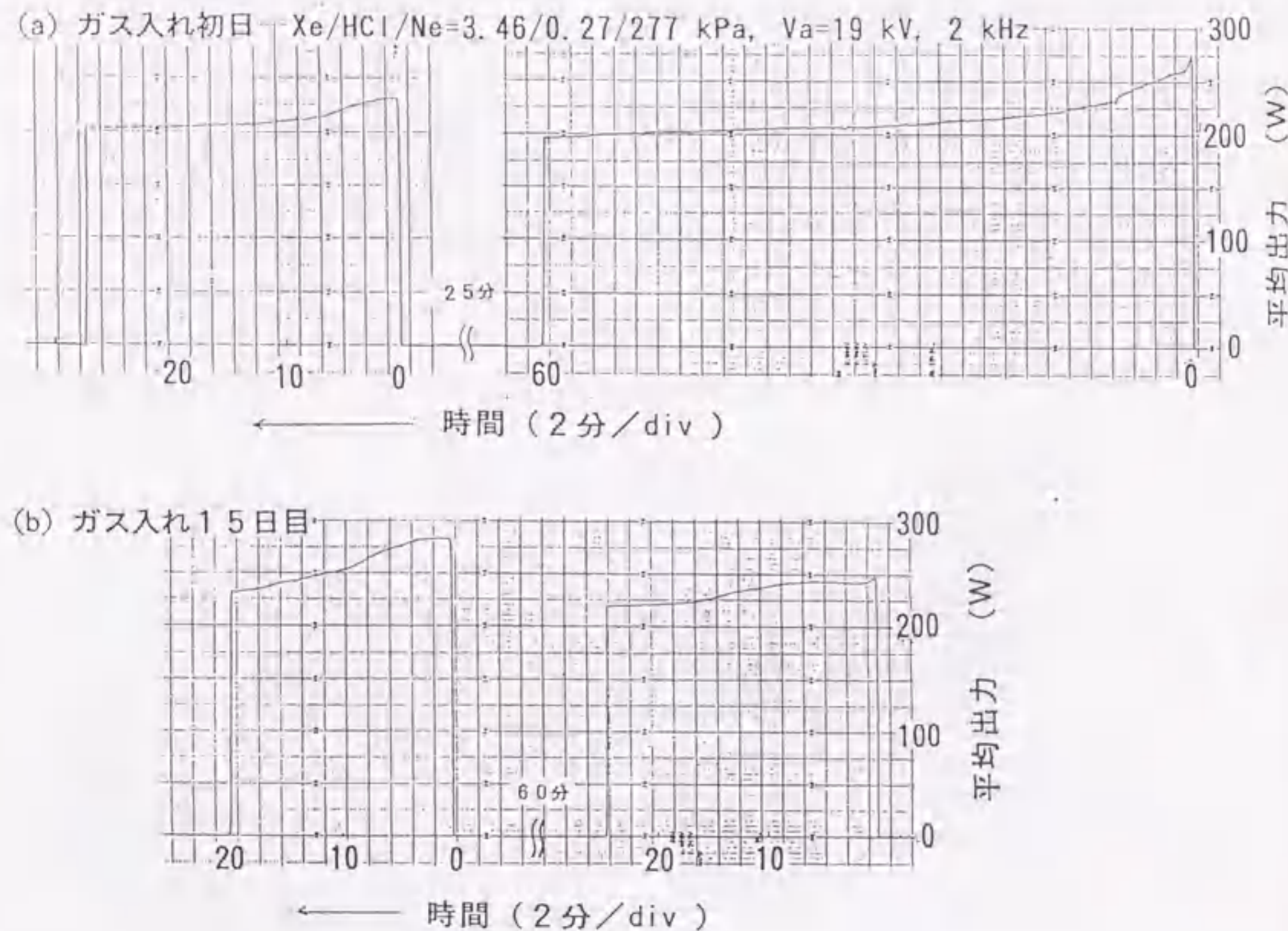


図3-31 長時間動作(高出力動作)

3.7. 高繰り返し動作化の考察

高繰り返し域では、パルス当たりのレーザーエネルギーは急速に減少し始めるため、平均出力は飽和・減少傾向を示す。この時の放電状態を、横方向から放電条件を変えながら詳細に観察した結果、主放電中に発生するアーク状の局所的な電流集中(放電不均一)割合が、レーザーエネルギー減少分と極めてよく対応していることが、現象的に明らかとなった。また、この不均一化はある程度偶発的に発生し、パルス毎出力変動の主因にもなっているという相関関係も分かった。従来の研究報告では、多くはレーザー出力、効率の増減がエキシマ生成過程から論議されており、このような具体的知見はこれまでに報告されていない。この知見から、高繰り返し動作では、まず放電電流の局所集中を主体にして、メカニズム解明を行う対応が決め手になることが明らかとなった。^{6,8)}

さらに、実験的な試行錯誤の末、ガス流状態、放電部構造、電極形状、予備電離状態など相互間の整合も含め改良を積み重ねて、モデル-1装置による実験において定量値を得た。当初は、放電のメカニズムのモデル設定ができず、シミュレーションによる解析をする意味は無かったが、その技術的ポイントが明確化できたので、シミュレーションが可能になった。^{6,9)-7,5)}

ガス状態に関しては、ガス温度が上昇することで、レーザー出力が低下する理由の1つとしては、イオンによる光吸収の温度依存性、XeCl^{*}エキシマ生成に関する反応定数の低下が報告されている。もう1つの理由としては、アウトガスの影響が考えられる。低温では、レーザー発振器本体の壁面に付着しているハロゲン化合物などが、温度上昇とともにレーザーガス中に放出される。これらのアウトガスは予備電離の破壊電圧を低下させるほか、UV光を吸収し、放電部で生成される初期電子密度を減少させる。さらに、ハロゲン化合物はイオン化電圧が低いので、主放電部での不均一性を増大させ、フィラメント(アーク)状の放電を誘発するためと推察する。

これらのことを考慮すると、高繰り返し動作を行う場合には、低繰り返し動作時ではレーザー出力は低下するが、ガス温度上昇が小さく、また、放電安定性が良く出力低下の見られなかったHeバッファガスが適しているといえる。本実験結果より、最終目標5 kHz以上、500 Wを達成する一施策として、Heバッファガスの採用が非常に有効であることが分かる。

一方、放電により加熱されたガスは、高温高圧になり、また一部はイオン化される。これが放電部に残留すると、次の良好な放電を点弧する障害となる。高繰り返し発振には高温ガスを高速で流して、次々に排出する必要があるが、放電部のガス流速のもっとも遅い部分が、高繰り返し性能を決める。ガス流速を均一化することでガス排出が効率的に行われ、低いガス流速でも高繰り返し運転を行うことができる。さらに、繰り返し運転時のガス流は、放電を行っていない場合のガス流速に比べ、かなり低下していることも考えられる。このように、レーザー運転時のガス流速分布の均一化と、高速排出は今後の課題の一つである。

エキシマレーザーの発振現象は、光共振器、放電、電気回路、ガス流などが互いに影響を与え合う複雑な現象であるため、音響波や衝撃波が高繰り返し化を阻んでいる実際の原因であるのか充分には明らかとなっていない。ダンパによって高繰り返し化が達成されるとの報告もあるが、それらも特定の装置に対するもので、音響波や衝撃波が引き起こしている問題点とそのメカニズムについては、まだ推察の域をでていないのが実状である。音響波・衝撃波の放電に対する影響についてもいくつかの論文があるが、エキシマレーザーの動作条件に合うものは無い。ダンパの開発と平行して、放電と音響波・衝撃波、およびガス流との関係を解明すること、さらには電極表面での放電事象が大きな問題となっており、ガス流の層流か乱流という状態などとの関係を調べるのが今後の課題である。^{7,6)-7,7)}

ガス構成については、Xe分圧が高い場合、高繰り返し動作で放電が不均一になるのは、次のような理由であると推察される。放電時に生成されたXe₂⁺、Cl⁻が消滅するまでの時間は数μsと長いので、流速の遅い電極表面には多量に残留する。これらのイオンは、フィラメント状放電の発生・成長を助長して、陰極表面にホットスポットを生成する。このため、Xe量を減少させると共に、放電電流が集中しにくく、冷却性能の良いHeをバッファガスとして用いることにより、放電不安定性が抑制され、4 kHzに及ぶ高繰り返しが可能となった。^{7,8)-8,5)}

一方、分割放電部を使った放電部伸長試験では、図3-27の出力特性に示すように、同時動作に比べて単独動作の出力が低くなった。これには、非励起部分が長くなりレーザー光の吸収が増加したことも考えられる。そこで、プローブレーザー光を使って吸収係数αを測定した。この結果、Xe/HCl

$1/N_e = 3.46 / 0.25 / 274$ kPa のガスでは、 $\alpha \leq 0.033$ %/cm が得られた。また、Heバッファガスでは、損失が小さく測定不可能であった。モデル-2装置で使用される2.5 mの共振器にNeバッファガスを用いたとしても、吸収損失はせいぜい8.3%以下と利得に比べて非常に小さい。

次に、共振器長が長くなったことにより回折損失が増加し、発振しきい値が高くなった点が考えられる。図3-32は、3種類の主放電電極に対する放電長対レーザー出力特性を示す。モデル-1装置の共振器長は1.3 mであり、放電長 $L = 265$ mmは分割放電部の一方のみ、 $L = 530$ mmは分割放電部全体の、および $L = 610$ mmはモデル-1装置用放電部の放電長である。測定点は、同一のガス条件、充電電圧で動作させた結果を示す。 $X_e = 0.93$ kPaにおける測定点は、NeおよびHeバッファのいずれの場合も、それぞれ放電長に対して出力が直線的に増加している。また、外挿したレーザー出力しきい値を与える放電長は240 mmとなった。分割放電部を単独で動作させた場合、レーザー出力が極端に低かったのは、放電長が短く発振しきい値に近いところで動作していたためである。

ここで、比較的データの揃っているNeバッファ、 $X_e = 3.46$ kPaにおける結果から、共振器長をパラメータとする放電長と発振しきい値との関係について検討する。共振器長が800 mmで、放電長265 mmのモデル-0装置では、レーザー出力40 mJが得られている。この測定点を通り、本分割放電部（共振器長：1.3 m、放電長：265、530 mm）で得られた出力特性と同じ傾斜の直線を引き、発振しきい値放電長を求めると180 mmとなる。共振器長が500 mm増加することで、発振しきい値放電長は40 mm増加したことになる。損失が比例的に増加すると仮定し、最終のモデル-2装置（Heバッファ・ $X_e = 0.93$ kPa）では、発振しきい値放電長は340 mmと外挿される。この結果、放電長600 mm×直列2電極のモデル-2装置では、放電部1台動作で50 mJ、2台同時動作では160 mJが得られることになる。

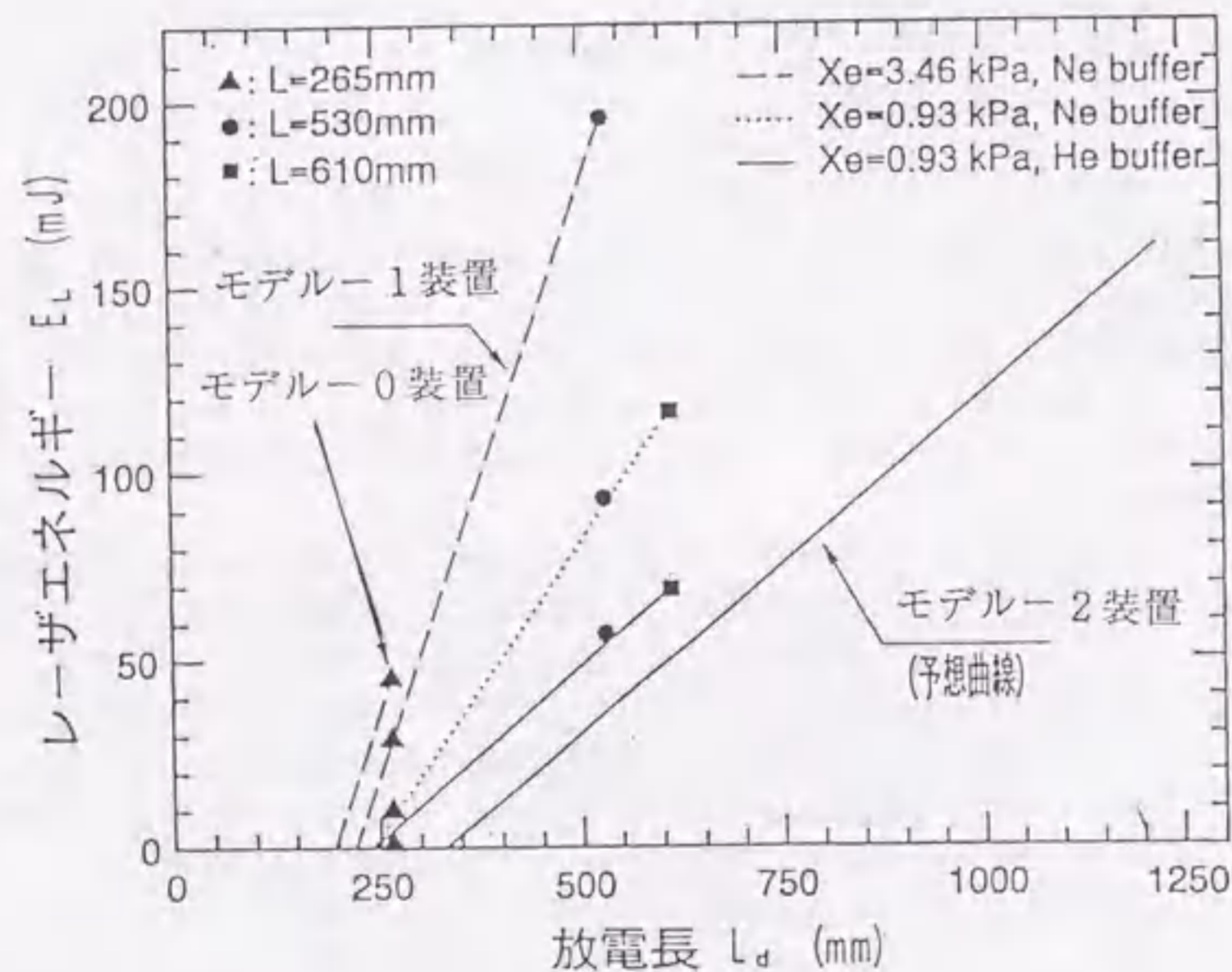


図3-32 放電長とレーザー出力特性

一方、分割した2台の放電部が点弧するまでのジッタは ± 16 nsで、各構成要素の中ではサイクロンドライブによるものが最大 ± 9 nsとなり、改良の余地がある。さらに、許容出力変動率 ± 10 %を維持するためには、両放電間の遅延時間 T_d を15 ns以下にする必要があり、原理的に現状のジッタでほぼ満足されそうである。なお、遅延時間 $T_d \leq 10$ nsでは、後続放電部が先行放電のレーザー光あるいは放電発光により予備電離が増強され、最大で同時点弧時の106%の出力が得られた。このよ

うに、分割放電部の模擬試験を実施することにより、放電部のジッタ、両放電部の相互作用、すなわち共振器長と出力との関係が明かとなった。したがって、最終目標の5 kHz動作では、4 kHzを5 kHzに増大させた場合の低下分10%を見込んだとしても、500 Wを達成できる見通しが得られ、モデル-2装置の設計が可能となった。^{86) - 93)}

しかし、最終目標の繰り返し数5 kHz、レーザー出力エネルギー100 mJ/パルス、平均出力500 Wまでには、順次技術的積み上げをしてきたが、まだ相当の距離があるものと考えられ、高繰り返し化のための基礎技術確立が必要と思われる。その基礎技術について、今後の開発課題にポイントをまとめると、次のようになる。^{94) - 99)}

(a) プラズマキネテクス技術

- * 放電生成物の同定とその発生シミュレーション
- * 放電生成物とアーク発生との関係解析
- * 電極材料や電極表面状態、および混合ガスと陰極輝点発生との関係検討
- * 不純ガスの分析・同定、および初期電子発生との関連の明確化

(b) 予備電離技術

- * 高繰り返し化に伴う予備電離放電破壊電圧低下の防止対策—新予備電離法の開発

(c) ガス密度揺らぎの吸収・制御技術

- * 揺らぎの大きさとアーク発生メカニズムの解析
- * 揺らぎの吸収・制御
- * 高速ガス循環に伴うガス温度上昇防止

(d) 低CR値化技術

- * イオン、準安定原子の高速排出

(e) その他部品の長寿命化技術

- * コンデンサの長寿命化
- * ミラー、ウインドウなど光学素子の高耐光化、長寿命化

3.8. 本章のまとめ

高繰り返し要素技術を開発するため、専用のモデル-1実験装置を設計・試作した。これには、高速・大容量のガス流をチャンパ内で循環させるのに、最大回転数 $8,000 \text{ min}^{-1}$ の4段翼軸流プロアと磁気カップリングを開発し搭載した。この出口のガス吐出圧力は $2,000 \text{ m}(\sim 2.3 \text{ kPa})$ 以上で、放電などによるガス流乱れに対しても、きわめて早くガス流状態が復元するような定流特性を持ち、短時間の動作では4 kHz以上の高繰り返しレーザー動作に対応できることが明らかになった。そこで、レーザー出力のガス流依存性、ガス温度依存性など基本特性を明らかにし、この結果、低繰り返し時と同じような動作条件で、2.2 kHz、110 Wを実証した。続いて、ガス温度上昇の少ないHeバッファガス使い、短時間動作では4 kHz、135 Wまで記録を伸ばし、さらには全ガス圧力、ガス組成の最適化、動作電圧の最適化と放電部の改良などを行って出力増大化を図り、4 kHzにて200 Wの安定なレーザー発振動作を実証した。

これで、第2章で示した基礎実験用モデル-0装置で明らかにした、2.5 kHzまでの短時間レーザー発振特性は、本装置においてもほとんど同じように再現できた。また、繰り返し数2 kHz、平均出力100 Wレベルでは1時間程度の安定なレーザー動作も確認した。このような動作は、今もなお国内外を通して前例はない。さらには、最終目標を目指すモデル-2装置の設計に向けて、モデル-1装置を5 kHzまで短時間動作させて、高繰り返し発振に関する諸技術課題の抽出と分析を行うと共に、諸条件の総合的最適化をするために多くの実験データを積み上げて、その実現見通しを得た。

参考文献

- 1) J. L. Miller, J. Dickie, J. Davin, J. Swingle, and T. Kan, "Operating characteristics of a closed cycle flow rare gas halide laser," *Appl. Phys. Lett.*, 35, 912-914 (1979).
- 2) C. P. Wang and O. L. Gibb, "2-kHz repetition rate XeF laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-15, 318-322(1979).
- 3) T. S. Fahlen, "200 W KrF gas transport laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16, 1260-1262(1980).
- 4) V. Yu. Baranov, D. D. Malyuta, V. S. Mezhevov, and A. P. Napartovich, "Influence of gas density perturbation on the ultimate characteristics of pulse-periodic lasers with ultraviolet preionization," *Sov. J. Quantum Electron.*, 10, 1512-1514(1980).
- 5) V. Yu. Baranov, "High repetition rate pulsed gas laser and their application in chemistry and isotope separation," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-19, 1577-1587(1983).
- 6) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Characteristics of the pulse-periodic regime of excimer lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 13, 318-322(1983).
- 7) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Reasons for the fall in the output power of a pulse-periodic XeCl laser during its operation," *Sov. J. Quantum Electron.*, 13, 1518-1521(1983).
- 8) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, and Yu. B. Kiryukhin, "Increase in the repetition frequency of XeCl laser pulses to 1 kHz," *Sov. J. Quantum Electron.*, 14, 558-560(1984).
- 9) V. M. Borisov, F. I. Vysikailo, A. Yu. Vinokhodov, and Yu. B. Kiryukhin, "Establishment of steady-state power level in the pulse-periodic excimer laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 14, 1383-1386(1984).
- 10) M. Matera, R. Roberto, P. Burlamacchi, and R. Salimbeni, "High repetition rate operation of a closed-cycle rare-gas halide laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 56, 205-207(1985).
- 11) V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, and Y.B.Kiryukhin, "Output energy evolution effects in a pulse-periodic XeCl excimer laser with an average power of ~ 400 W," *Sov. J. Quantum Electron.*, 17, 595-598(1987).
- 12) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, Yu. B. Kiryukhin D. N. Molchanov, V. P. Novikov, and O. B. Khristoforov, "Divergence of radiation from an electric-discharge XeCl laser operating in the pulse-periodic regime," *Sov. J. Quantum Electron.*, 18, 1065-1070(1988).
- 13) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, D. V. Vlasov, Yu. B. Kiryukhin D. N. Molchanov, V. P. Novikov, M. I. Persiantsev, and I. V. Fedorov, "Conversion of $\lambda = 308$ nm radiation at pulse repetition frequencies up to 600 Hz by stimulated Raman scattering in compressed hydrogen," *Sov. J. Quantum Electron.*, 18, 1272-1277(1988).
- 14) H. M. von Bergmann, G. L. Bredenkamp, and P. H. Swart, "High repetition rate high power excimer lasers," *Proc. SPIE*, 1023, 20-24(1988).
- 15) 堀田和明, "放電励起高繰り返しエキシマレーザー," *レーザー研究*, 16, 191-199(1988).
- 16) 堀田和明, 新井基尋, 伊藤紳二, "高効率・高繰り返しKrFエキシマレーザー," *電子情報通信学会論文誌*, J71-C, 1659-1668(1988).
- 17) D. Basting, P. Oesterlin, W. Mückenheim, H.-J. Kahlert, and U. Brinkmann, "Excimer laser in the kilowatt range," *Proc. SPIE*, 1041, 193-195(1989).
- 18) M. L. Sentis, P. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Performance characteristics of a high PRF and high power XeCl discharge laser," *Proc. SPIE*, 1041, 204-211(1989).
- 19) R. J. Winfield, J. M. Green, J. Fieret, K. Hawkins, R. Heath, and M. R. Osborne, "Pulse power for the CHIRP XeCl laser," *Proc. SPIE*, 1046, 98-105(1989).
- 20) A.E.Greene and C.A.Brau, "Theoretical studies of UV-preionized transverse discharge KrF and ArF lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-14, 951-957 (1978).
- 21) T. S. Fahlen, "Efficient quarter-joule KrF laser with corona preionization," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-15, 311, (1979)
- 22) A. J. Kearsley, A. J. Andrews and C. E. Webb, "A novel pre-ionization technique for discharge excited rare gas halide lasers," *Opt. Commun.*, 31, 181-184 (1979).
- 23) V. Hasson and H. M. Bergmann, "Simple and compact photopreionization-stabilized excimer lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, 50, 1542-1544(1979).
- 24) R. S. Taylor, A. J. Alcock, and K. E. Leopold, "Laser induced preionization of a rare-gas halide discharge," *Opt. Lett.*, 5, 216-218(1980).
- 25) G. Herziger, R. Wollermann-Windgasse, and K. H. Banse, "On the homogenization of transverse gas discharges by preionization," *Appl. Phys.*, 24, 267-272(1980).
- 26) S. Sumida, K. Kunitomo, M. Kaburagi, M. Obara, T. Fujioka, and K. Sato, "Effect of preionization uniformity on a KrF laser," *J. Appl. Phys.*, 52, 2682-2686(1981).
- 27) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. M. Davidoskii, and O. B. Khristoforov, "Use of discharge over a dielectric surface for preionization in excimer lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 11, 42-45(1981).
- 28) M. A. Kanatenko, "Initial-stage dynamics of a self-sustained volume discharge with preionization," *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 9, 94-95(1983).
- 29) R. S. Taylor, "Preionization and discharge stability study of long optical pulse duration UV-preionized XeCl lasers," *Appl. Phys. B*, B41, 1-24(1986).
- 30) A. Luches, V. Nassisi, and M. R. Perrone, "Output characteristics of an excimer with delayed double preionization," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 20, 1015-1018(1987).
- 31) 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "エキシマレーザー予備電離の電子密度測定(II)," 第48回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, 19a-ZA-8, 677(1987).
- 32) B. Eliasson and U. Kogelschatz, "UV excimer radiation from dielectric-barrier discharges," *Appl. Phys. B*, B46, 299-303(1988).
- 33) S. Takagi, S. Sato, and T. Goto, "Electron density measurements in UV-preionized XeCl and CO₂ laser gas mixtures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, 2219-222(1989).
- 34) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの開発(X)," *レーザー学会学術講演会第11回年次大会*, 予稿集, 31p V 4, 88(1991).
- 35) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの基礎実験(XI)," 第38回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28p-E-1, 889(1991).
- 36) 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "高繰返しエキシマレーザーにおけるレーザー出力のガス流速依存性," *電気学会論文誌A*, 114-A 巻, 445-450(1994).
- 37) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第4版 (1986).
- 38) 日本機械学会: 技術資料 流体の熱物性値集 (1983).
- 39) 新版空気機械工学便覧編集委員会: 新版空気機械工学便覧(基礎編), コナ社, (1979).
- 40) 柿崎弘司, 岡本 昇, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの基礎実験(VI)," 第37回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28a-L-5, 830(1990).

- 41) 高木茂行, 柿崎弘司, 後藤達美, 山部長兵衛, 堀井憲爾, "エキシマレーザ放電の密度揺らぎ測定," 電気学会論文誌A, 111-A 巻, 283-290(1991).
- 42) 伊藤紳二, 新井基尋, 堀田和明, "kHz XeClレーザにおけるCR値依存性," 第37回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28a-L-3, 830(1990).
- 43) H. J. Seguin, et al. "Ultraviolet photoionization in TEA lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-10, 311-319(1974).
- 44) M. C. Gower, A. J. Kearsley, and C. E. Webb, "gas composition and lifetime studies of discharge excited rare-gas halide lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-16, 231-235(1980).
- 45) A. A. Vill, and A. A. Salk, "Excimer laser of extremely homogeneous UV spark preionization," Proc. SPIE, 1278, 51-57(1990).
- 46) M. Bähr, W. Böttcher, and S. Choroba, "The time-dependent development of the macroscopic instability of a XeCl* laser discharge," IEEE Transactions Plasma Sci., 19, 369-378(1991).
- 47) G. Imada, H. Nakamura, T. Komesu, T. Honna, W. Masuda, K. Masugawa, K. Yasui, S. Satoh, T. Goto, K. Yasuoka, and T. Tamagawa, "Discharge-pumped excimer laser with high-speed and low temperature gas flow," Proc. SPIE, 1810, 418-421(1992).
- 48) 平松美根男, 西部 稔, 後藤俊夫, 服部秀三, 山辺長兵衛, "Ar/He混合希釈による放電励起XeClレーザの出力特性の改善," 電気学会, プラズマ研究会資料, EP-83-40, 41-46(1983).
- 49) M. Hiramatsu, T. Goto, S. Hattori, and C. Yamabe, "Improved performance of discharge-pumped XeCl laser using Ar/He diluent," Jpn. J. Appl. Phys., 23, 1223-1226(1984).
- 50) V. M. Baginskii, P. M. Golovinskii, V. A. Danilychev, A. I. Milanich, A. S. Soroka, and A. I. Shchedrin, "Dynamics of growth of a discharge and ultimate energy characteristics of laser utilizing He-Xe-HCl mixtures, Sov. J. Quantum Electron., 16, 488-493 (1986).
- 51) V. M. Baginskii, P. M. Golovinskii, and A. I. Shchedrin, "Influence of the halide concentration on the discharge stability and energy characteristics of He/Xe/HCl laser. Numerical simulation," Sov. Phys. Tech. Phys., 31, 1402-1406(1986).
- 52) H. Hiramatsu and T. Goto, "An account of excitation mechanism of discharge-pumped XeCl laser using Ne/Ar diluent," Rev. Laser Eng., 16, 402-409(1988).
- 53) A. I. Fedorov and S. V. Mel'chenko, "Some feature of the formation of a self-sustaining volume discharge in He(Ne)-Xe-HCl mixture," Sov. Phys. Tech. Phys., 35, 463-466(1990).
- 54) 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美, 石川 憲, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (XIII)," 第38回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 28p-E-3, 890(1991).
- 55) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (XV)," 第39回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 29p-D-5, 884(1992).
- 56) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの基礎実験 (XVI)," 第53回応用物理学関係連合講演会, 予稿集, 17a-SS-9, 879(1992).
- 57) V. M. Baginskii, P. M. Golovinskii, A. M. Razhev, and A. I. Shchedrin, "Dependences of the plasma parameters and output energy of excimer lasers on the Xe content in an He-Xe-HCl mixture," Sov. J. Quantum Electron., 18, 1444-1449(1988).
- 58) S. Choroba and W. Böttcher, "Interferometric measurement of two-dimensional Xe and electron density distributions in XeCl laser discharges," Appl. Phys. B, B51, 379-385(1990).
- 59) G. M. Jursich, W. A. von Drasek, K. Mulderink, and V. Olchowka, "Influence of gas composition on XeCl laser performance," Proc. SPIE, 1412, 115-122(1991).

- 60) J. I. Levatter and S. C. Lin, "Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures," J. Appl. Phys., 51, 210-222(1980).
- 61) V. Hasson and H. M. von Bergmann, "Spatial control of pulsed high-pressure pre-ionization stabilized glow discharges," J. Phys. D, 13, 632-638(1980).
- 62) R. Turner, "The glow-to-arc transition in a pulsed high-pressure gas discharge," J. Appl. Phys., 52, 681-692(1981).
- 63) M. R. Osborne, "Rare-gas-halide discharge stability," Appl. Phys. B, B45, 285-291(1988).
- 64) C. Tallman, "Preionization techniques for discharge lasers," Proc. SPIE, 1046, 2-14(1989).
- 65) A. A. Vill, and A. A. Salk, "Excimer laser of extremely homogeneous UV spark preionization," Proc. SPIE, 1278, 51-57(1990).
- 66) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 石川 憲, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの開発 (XVIII)," 第54回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28p-B-7, 943(1993).
- 67) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 石川 憲, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの開発 (XVII)," 第40回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-Z-8, 981(1993).
- 68) M. R. Osborne, J. Coutts, M. H. R. Hutchinson, and C. E. Webb, "Output pulse termination of a self-sustained excimer laser," Appl. Phys. Lett., 49, 7-9(1986).
- 69) V. E. Peet, and A. B. Treshchalov, "Investigation of the dynamics of formation of excited atoms, ions, and excimer molecules in the plasma of an electric-discharge XeCl laser," Sov. J. Quantum Electron., 15, 1613-1619 (1985).
- 70) M. Ohwa and M. Obara, "Theoretical analysis of efficiency scaling laws for a self-sustained discharge pumped XeCl laser," J. Appl. Phys., 59, 32-41(1986).
- 71) M. J. Kushner and A. L. Pindroh, "Discharge constriction, photodetachment, and ionization instabilities in electron-beam-sustained discharge excimer lasers," J. Appl. Phys., 59, 904-914(1986).
- 72) M. Ohwa and M. Obara, "Theoretical evaluation of the buffer gas effects for a self-sustained discharge ArF laser," J. Appl. Phys. 63, 1306-1312(1988).
- 73) I. O. Blinov, A. V. Dem'yanov, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, A. A. Pastor, P. Yu. Serdobintsev, and N. N. Shubin, "Evolution of spatial distributions of charged particles in the plasma of an electric-discharge XeCl laser," Sov. J. Quantum Electron., 18, 1531-1535(1988).
- 74) Yu. I. Bychkov, V. P. Panteleev, A. I. Suslov, and A. G. Yastremsky, "Stability of a self-sustaining discharge in an excimer mixture," Sov. J. Plasma Phys., 15, 192-194(1989).
- 75) M. J. Kushner, "Microarcs as a termination mechanism of optical pulses in electric-excited KrF excimer lasers," IEEE Transactions Plasma Sci., 19, 387-399(1991).
- 76) Q. Lou, "Gas flow effects in pulse avalanche discharge XeCl excimer laser," Proc. SPIE, 1397, 103-106(1990).
- 77) Ph. Delaporte, B. Fontaine, B. Forestier, and M. Sentis, "Fast flow gasdynamics effects in high pulse repetition rate excimer lasers," Proc. SPIE, 1397, 485-492(1990).
- 78) D. Klingler, Z. Rozenberg, and M. Rokni, "Measurement of HCl electron attachment in relation to XeCl laser kinetics," Appl. Phys. Lett., 39, 319-321(1981).
- 79) A. B. Treshchalov, V. E. Peet, and V. T. Mihkelsoo, "Formation dynamics of excited components in discharge XeCl plasma from the data of dye laser absorption probing," IEEE J. Quantum Electron., QE-22, 51-57(1986).

- 80) D. Lo, "The role of halogen donors in discharge instability of rare-gas halide excimer lasers," Appl. Phys. B, B49, 535-540(1989).
- 81) D. Lo and C. Zheng, "Evolution of instability in a XeCl laser discharge," Optics Commun., 69, 277-280(1989).
- 82) D. Lo and J. Xie, "Output characteristics and electron-HCl kinetics of a XeCl laser at very high current density," J. Phys. D: Appl. Phys., 23, 637-642(1990).
- 83) M. Trentelman, G. B. Ekelmans, F. A. van Goor, and W. J. Witteman, "Discharge studies with a high efficiency XeCl-excimer laser," Proc. SPIE, 1397, 115-118(1990).
- 84) M. Leo, R. A. Leo, V. Nassisi, L. marsigliante, and A. Pecoraro, "Discharge impedance of an ultraviolet preionized XeCl laser," J. Appl. Phys., 70, 1168-1171(1991).
- 85) V. Nassisi, "Impedance of an UV preionization excimer laser," Proc. SPIE, 1527, 291-304(1991).
- 86) T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, and S. Sato, "Ultrahigh repetition rate and high-power XeCl excimer laser," Conf. on Laser and Electro-Optics(CLEO'92), Technical Digest, 12, CTuT6, 214-215(1992). <Invited>.
- 87) T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, and S. Sato, "Output characteristics of ultra-high repetition rate and high power XeCl excimer laser," 9th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Laser(GCL'92), Digest, WdEP4,(1992).
- 88) K. Kakizaki, N. Okamoto, S. Takagi, S. Sato, and T. Goto, "Performance characteristics of high repetition rate excimer laser," Proc. Laser Advanced Materials Processing (LAMP'92), 165-169(1992).
- 89) T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, and S. Sato, "4 kHz excimer laser," Int. Conf. on LASER'92, Technical Digest, TL.4, (1992). <Invited>.
- 90) S. Satoh, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Takagi, K. Ishikawa, and T. Goto, "High-repetition-rate XeCl excimer laser," Proc. 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials, Digest, 165-169(1993).
- 91) 後藤達美, "エキシマレーザ開発の現状," 電気学会 産業電気電力応用研究会資料, IEA-91-2, 11-18(1991).
- 92) 後藤達美, 岡本 昇, 柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, "高繰返しエキシマレーザとその開発現状," 第29回レーザ熱加工研究会論文集, 31-43(1993).
- 93) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美, 石川 憲, "エキシマレーザの基礎開発," レーザー学会, 第18回レーザ研究業績賞・奨励賞受賞記念講演会予稿集, RTM-94-12, 13-18(1994).
- 94) S. Longo, C. Gorse, and M. Capitelli, "Open problems in the XeCl laser physics," IEEE Transactions Plasma Sci., 19, 361-368(1991).
- 95) E. Müller-Horsche, P. Oesterlin, and D. Basting, "Recent progress towards multikilowatt output," Proc. SPIE, 1503, 28-39(1991).
- 96) V. M. Borisov, O. B. Khristoforov, Yu. B. Kiryukhin, S. G. Kuznetsov, Yu. Yu. Stepanov, and A. Yu. Vinokhodov, "The kilowatt range high repetition rate excimer lasers," Proc. SPIE, 1503, 40-47(1991).
- 97) J. Fieret, G. M. Green, R. Heath, M. A. O'key, M. R. Osborne, S. J. Osbourn, A. F. Taylor, and R. J. Winfield, "Review of the multi-kilohertz performance of the CHIRP laser and components," Proc. SPIE, 1503, 53-61(1991).
- 98) H. Frowein and D. Basting, "High power (500 W) excimer laser project," Proc. SPIE, 1810, 364-367(1992).
- 99) B. Lacour, H. Brunet, H. Besaucele, and C. Gagnol, "High average power XeCl excimer laser," Proc. SPIE, 1810, 368-371(1992).

第4章 高繰返しエキシマレーザ実用化の要素技術開発

4.1. はじめに

前章までの基礎的研究を進め、実用エキシマレーザ発振を供する要素技術として、まず安定な一様性の良い放電点弧させることが必須となる。一言で放電の安定化と言っても、ガス流状態、放電生成物、予備電離方法、放電注入エネルギー、電源回路構成、などの諸動作条件が複雑な相互作用をして関与するため、これらの各専門技術分野における技術蓄積を基に新たな基礎的技術の積み上げをし、基本的な動作条件を最適化することが決め手になることが分かる^{1)・2)}。

とくに高繰返し化には、高速ガス循環が放電の安定化とガス冷却に重要な役割を担うことになる。これには、信頼性に優れた、吐出圧力が高くガス流量の大きい高性能プロアと、駆動用モータをチャンバの外側に設置し、非接触で大トルクの回転力を伝達する専用の磁気カップリングを開発することにした。これらはいずれも腐食性の高いハロゲンガスに晒されるので、耐食性が高く不純ガスを発生しない構造材料の選定と処理方法の検討も要素技術となる。電極形状なども、予備電離方式と合わせ高繰返し動作への適合性を検討する必要がある。放電点弧時に発生する強力な音響波・衝撃波は、放電不安定の要因になると考えられるので、その影響を排除するダンピング技術を、チャンバを含むガス循環系と一体で確立することも不可欠である。

さらに、長時間の安定動作を維持するためには、周辺の要素技術を同時に開発する必要がある。これにはまず、寿命の短いサイクロトロンを置換できる、大電力・高速スイッチング性を持つ半導体スイッチ素子を新たに開発することも不可欠である。また、これだけでは十分な性能のレーザ発振は得られず、実際にはレーザの本質的特徴である高コヒーレンシや、高安定、高効率などが要求される場合が多く、用途に応じてこれらを最適化するための光学的技術などの検討も必要となる。最終的には、各要素技術を総合実証するため、これらの成果を組み入れたモデル-2装置を試作して、全体的な適合を図り最適動作化することにより、総合的性能を評価することが必要と思われる。

本章では、このような要素技術の研究開発結果と、モデル-2装置による目標の5 kHz レーザ動作実証結果とを示す。^{1)・2)}

4.2. 高速ガス循環

4.2.1. プロアの開発

高速ガス循環技術においては、第1段階として2 kHz 動作を目指したモデル-1装置組込用プロアにより、放電部で目標とした100 m/s以上のガス流速が得られた。これにより、放電部の流速測定結果とチャンバ各部の圧力測定結果から、ガス循環路に対する圧力損失などの定量値を明らかにした。モデル-2装置組み込み用プロアは、これらを基に風洞の低圧損化をすることで、モデル-1装置用より段数を4段から2段に、動翼直径を400 mmから320 mmと小形化し、最大許容回転数を増大させることにより、目標の放電部ガス流速150 m/sを越える高速ガス循環を実現し、モータ駆動電力を大幅に低減させるなどの諸改良を加えた設計をした。

プロア羽根の製造は、モデル-1装置用プロアと同様に経済的な理由から鋳造で行った。この場合、翼形状は本来の形と違ったものになることは避けられない。たとえば、NACA 65 翼列では、翼の後縁は翼弦長の0.15%と非常に薄く、鋳造では製作することができない。鋳造では、非常に薄肉の部分やシャープエッジの部分は肉厚を厚くしたり丸めたりする必要がある。そのため、100 m/s

プロアでは、鋳造で製作できるように翼形状を修正した翼型を使用した。モデル-2用プロアでも、この修正翼型により設計を行った。

このような型を使用した場合には、翼列の性能が悪くなり、その結果プロアのヘッド-流量 (P-Q) 特性が悪くなることが多い。しかし、モデル-1装置プロアでは、放電部のガス流路も低圧損化され、ほぼ設計値どおりの性能を得ることができた。そこで、モデル-2装置用 150 m/s プロアの開発では、低圧損化されたガス流路に対して最適化された設計を行った。プロアは、回転数を上げることによって小形化・高性能化することができる。モデル-1装置用プロアの 8,000 min⁻¹ に対して、このプロアでは 10,000 min⁻¹ に回転数増を図った。表 4-1 に、両プロアの設計仕様と通風条件とを合わせ示す。

表 4-1 プロアの設計仕様

レーザ装置	モデル-1	モデル-2
プロア形式	4 段軸流	2 段軸流
動翼外径 (mm)	400	320
回転数 (min ⁻¹)	8,000	10,000
動翼翼列	NACA 65	
静翼翼列	NACA 65	
入り口静翼翼列	NACA 63	
ヘッド (m)	620	1,400
流量 (m ³ /s)	1.8	2.7

(NACA翼型: National Advisory Committee for Aeronautics—前米国航空局名の略—により開発・制定された翼型、その形式などで番号が付けられている。)

図 4-1 に、モデル-2 装置用プロアの最終的な構造を示す。プロアは入り口静翼、羽根車 (動翼)、静翼、スペーサ、ケーシング、ベアリング、フランジ、シャフトなどから構成され、最終的には、塩化水素ガスに対する耐触性を持たせるためにセラミックコーティングをした。羽根車 (動翼) とスペーサは、シャフトに取り付けられて高速で回転する。ケーシングはアルミ鋳造で製作し、入り口静翼、静翼が 3 枚一組になって羽根車およびスペーサを包むように取り付けられる。動翼とスペーサには、高速で回転するため大きな遠心力が加わるので、応力解析をして機械的な強さの確認を行った。また、軸系の固有振動数解析も行い、10,000 min⁻¹ に対して十分に高いことを確認した。

図 4-2 に羽根車の写真を示し、ケーシングは図のように上下に 2 分割されており、軸受けも耐触性を持たせるためにセラミック製とした。その他の部品は、全て塩化水素ガスに対して耐触性のある

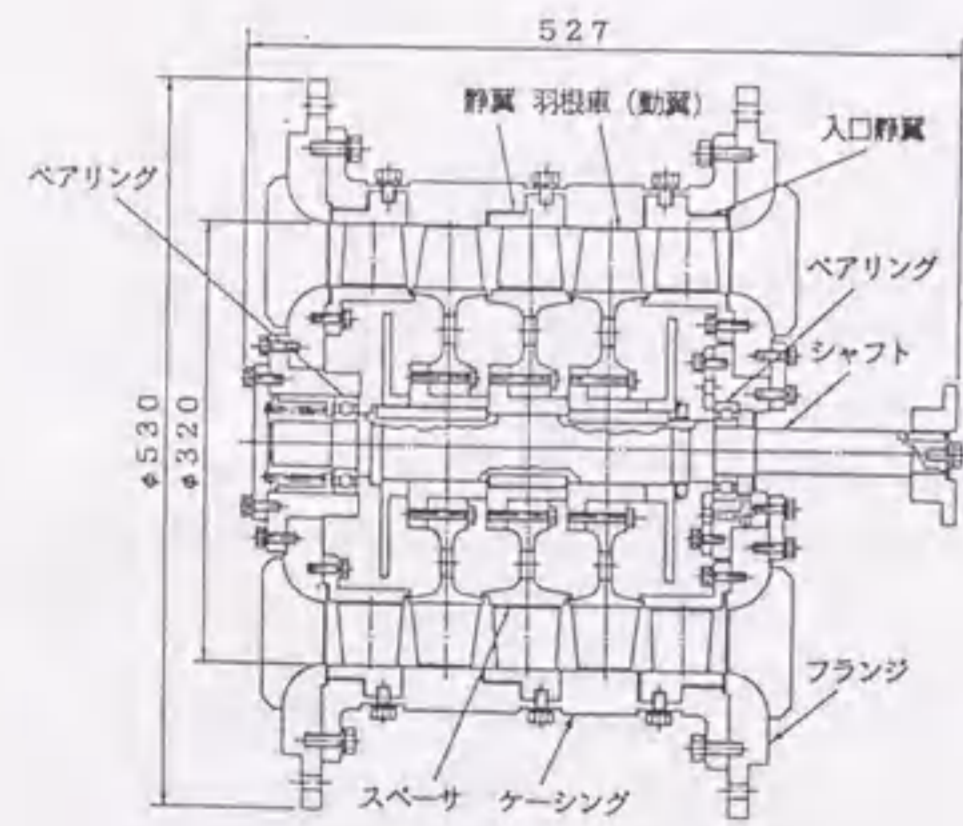


図 4-1 軸流プロアの断面図

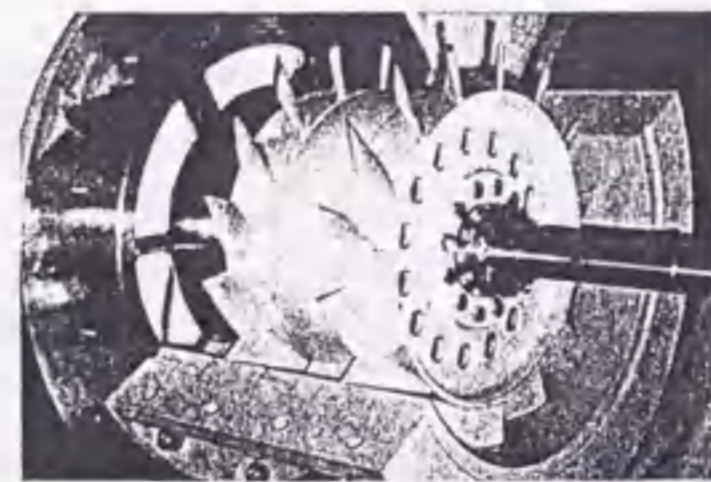


図 4-2 プロアの内部写真

インコネル 625、または SUS 316 で製作した。

この特性は、専用の試験風洞を使い、大気圧の空気をガス流体として、被試験プロアにより、流量測定部および絞り部を通して排出することで評価した。プロアの流量-静圧ヘッド特性、流量-静圧効率特性は、この絞りにより流量を調整し、プロア前後の圧力、モータの回転数、トルク、気圧および湿度を測定して求めた。流量は、測定部に設置したピトー管により流速を 30 点測定し、その平均値と断面積との積から求めた。プロアの静圧ヘッド H(m) は次式で与えられる。

$$H = (P_{S2} - P_{T1}) / (\rho_1 \times g) \dots \dots \dots (4-1)$$

ここで、 ρ_1 (kg/m³) はプロア吸い込み口での空気密度、 P_{S2} (Pa) はプロア吐き出し口での静圧、 P_{T1} はプロア吸い込み口での全圧である。プロア吐出圧力は、ガスの種類に依存しないパラメータとしてヘッド H で表される。空気の密度は気圧と湿度によって変化するので、これを測定して密度を補正する。プロアの駆動トルクと回転数は、モータとプロアの間にはけたトルクメータにより測定した。

プロアの特性は、翼の速度と音速の比 U/a で決まるマッハ数で表す。ガスが異なってもマッハ数を一致させて実験を行うことで、実ガス中での性能を知ることができる。レイノルズ数の影響に関しては、限界レイノルズ数以上では、プロアの性能は一定になり、その値以下でプロア特性は若干変化することが知られている。マッハ数は、プロアの試験回転数を変えて調整することができる。表よりプロアの試験回転数は、レーザガス中での回転数 10,000 min⁻¹ に対して、空気とレーザガスそれぞれ中における音速の比より、3,760 min⁻¹ と計算される。本実験では、試験回転数は 3,000~6,000 min⁻¹ で行う。各回転数で測定した流量とヘッドは以下で実回転数時の値に換算する。

$$H = H_M \times (N/N_M)^2 \dots \dots \dots (4-2)$$

$$Q = Q_M \times (N/N_M) \dots \dots \dots (4-3)$$

ここで H_M 、 Q_M はそれぞれヘッドと流量の測定値、 N は実回転数、 N_M は試験回転数、 H と Q は回転数 N でのそれぞれヘッドと流量である。

図 4-3 に、プロアの 10,000 min⁻¹ に換算した流量と静圧ヘッドの関係を示す。図中には、解析値をひし形で、測定値をすべて 10,000 min⁻¹ に対する換算値で示した。測定値と解析値は、非常によく一致している。図中に、同時にレーザ発振器風洞の抵抗曲線も示した。抵抗曲線とプロア特性曲線との交点はプロアの動作点となり、その時の流量は 3.4 m³/s、ヘッドは 680 m となる。なお、プロアの最大ヘッド H は 1,500 m で、放電による通風抵抗の増加に対しても十分な風量が確保できる見込みである。放電部のガス流速 v (m/s) は、通風開口 S を 900 × 20 mm² とすると、プロア流量 Q_M から次式で計算できる。

$$v = 0.85 \times Q_M / S = 160 \text{ (m/s)} \dots \dots \dots (4-4)$$

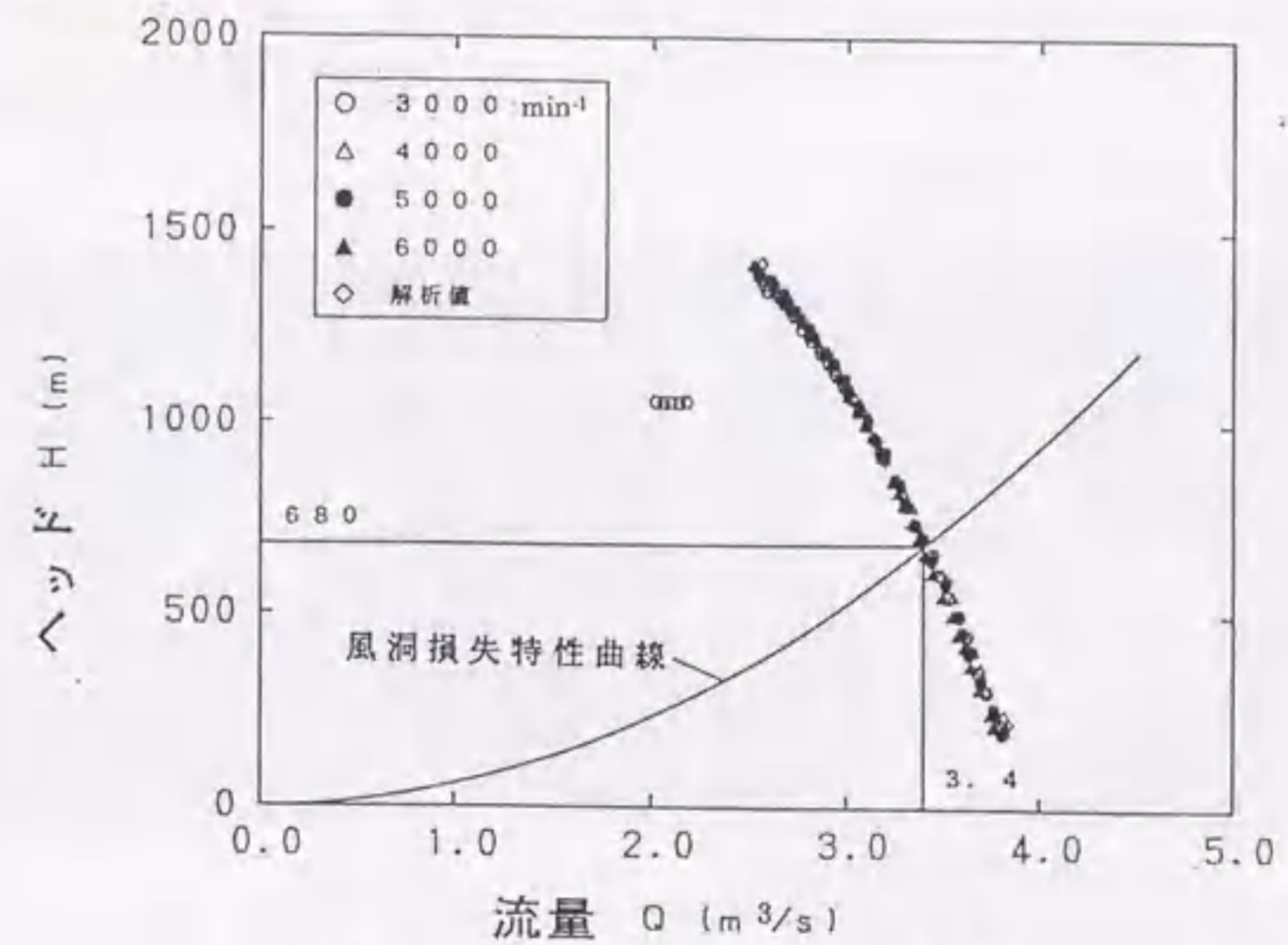


図 4-3 プロアの流量と静圧ヘッド

ここで、0.85は漏れを表す係数で、モデル1装置で測定した値である。漏れをできるだけ小さくすることで、放電部の流量は改善される。設計仕様値のガス流速150 m/sを得るため、(4-4)式より、風量は3.2 m³/s以上必要であるが、実測値はそれを上回る値3.4 m³/sが得られた。

図4-4に、プロアの静圧効率と流量の関係を示す。図中に、解析値をひし形で示した。プロア流量は3.4 m³/sであるので、効率は61%と見積もられる。1台当たりの駆動電力は正味18 kWとモデル1装置用の1/5に低減させることができた。また、これをモデル2装置に組み込んだ場合には、最大160 m/sの放電部流速が得られることが分かり、これを2台並列運転して使用するので、正味電力は36 kWとなる。表4-2は、これらの結果から予測されるプロアの特長値である。

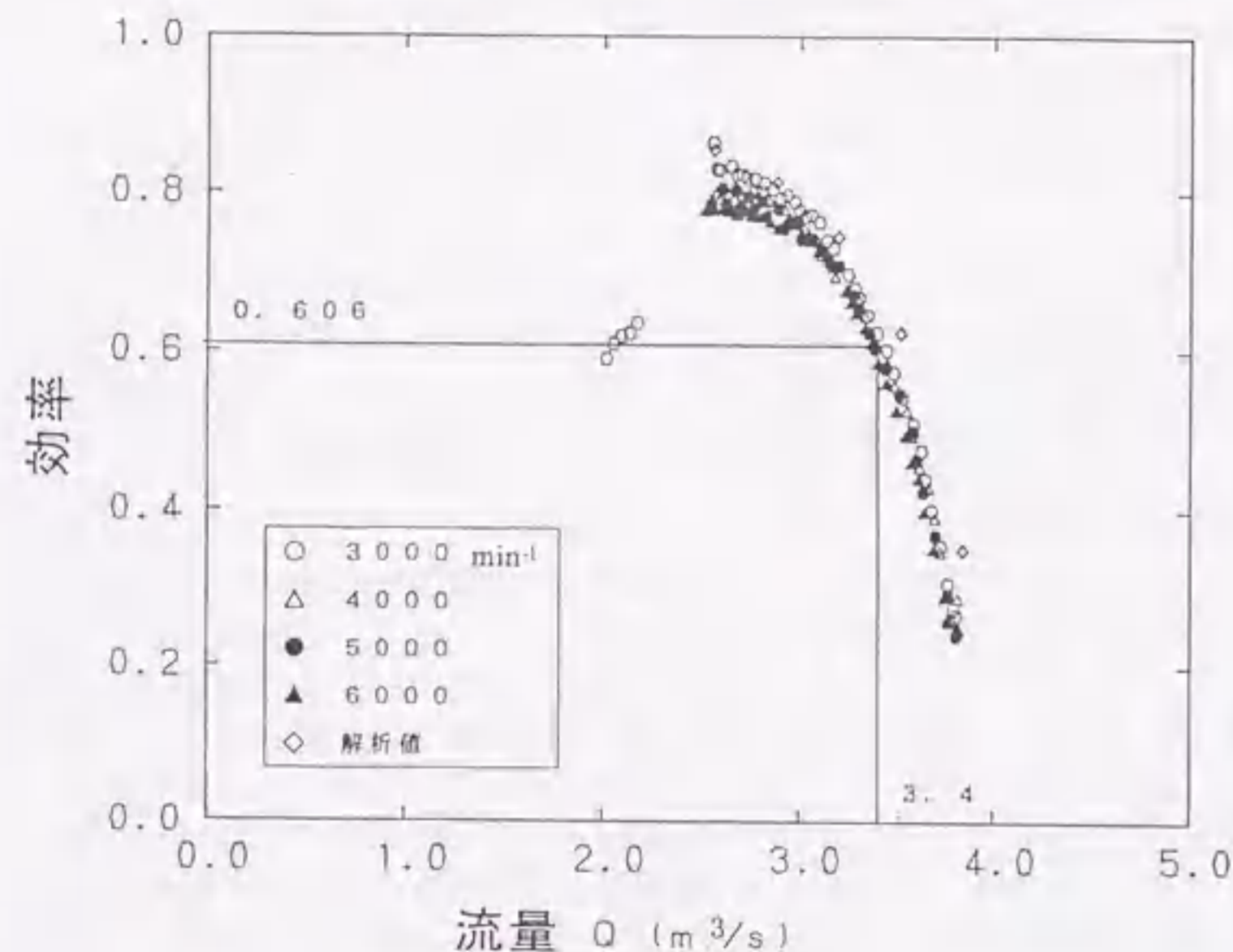


図4-4 プロアの流量と静圧効率

表4-2 プロアの特長予測値

送風機流量	3.4 m ³ /s
送風機ヘッド	680 m
送風機効率	60.6%
放電部流量	2.9 m ³ /s
放電部流速	160 m/s
送風機動力	18 kW

4.2.2 磁気カップリングの開発

一般に、モータは非常に多くの積層鉄板と絶縁材料から構成されるので、運転時の温度上昇などで多量のアウトガスを発生する。そこで、チャンバ外部に駆動用モータを設置し、圧力隔壁をはさんだ磁石間の吸引力により内部のプロアに動力を伝える磁気カップリングが有用となる。モータが腐食性ガスに侵されず、アウトガスによるレーザ動作の不安定化が避けられ、また、磁性流体シールやメカニカルシールに比べて機械的な損失は少なく、ガス漏れも無いなどのメリットがあり、実用にはもっとも適している。

まず、この主要設計となる磁気設計では、2次元の有限要素法(FEM)磁界解析により、各ロータ位置に於ける磁気エネルギーを求めて、単位長さ当たりの伝達トルクを計算した。さらに、磁極端部の磁束漏れによるトルク損失を計算し、これら全てを考慮して疑似3次元解析をし最適設計化を行った。外転ロータのN極と内転ロータのS極の位相角であるトルク角を θ とし、 $\theta = \pi/2 - \pi/16$, $\theta = \pi/2$, $\theta = \pi/2 + \pi/16$ の磁束線図を求め、図4-5にその磁界解析結果の一例を示す。

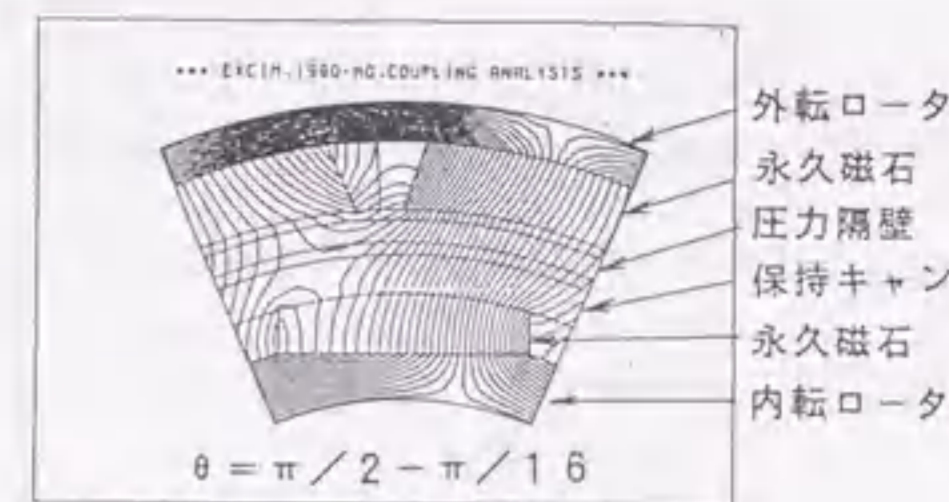


図4-5 磁気カップリングの磁気解析

構造設計では、外転ヨーク、内転ヨーク、圧力隔壁の応力解析を行い、最適構造化を図った。また、これは10,000 min⁻¹の高速回転をさせるため、ロータの振動解析も行い、構造設計に反映させた。完全非接触・コンパクトで、高速回転・大トルク伝達を可能とする点で、一般的な磁気カップリングと比べ高い性能が要求されるので、とくに圧力隔壁において、磁路空隙となる部分は、最短・最適設計化に留意して小形・高トルク化の実現を図った。さらに、耐食処理の強化・信頼性向上を目的として永久磁石保持キャン方式を採用し、腐食性ガスに曝される内転ロータにおいては、永久磁石の耐食処理方法として永久磁石を金属で覆い、腐食性ガスから隔離するようにした。一般に、保持キャンを用いると空隙長が大きくなり、極端に機器が大形化したり、漏れ磁束により過電流損が発生し冷却が必要となるので、本設計では高性能のSm-Co希土類永久磁石を採用した。この結果、表4-3に示すように、空隙長15 mm、伝達トルク11 kgf-m、最大回転数10,000 min⁻¹、チャンバ内最大圧力300 kPaでの仕様で製作を行った。これには、永久磁石の製造・加工・着磁技術、保持キャンの製作技術がポイントとなる。

表4-3 磁気カップリング仕様

形式	永久磁石同期型
伝達トルク	11 N-g-m
回転数	10000 min ⁻¹
永久磁石	希土類Sm-Co
内圧	300 kPa
外圧	100 kPa

図4-6に、この外観と内部写真を示す。内転ロータの構成は、内転ヨークに永久磁石を接着して保持キャンで覆い、永久磁石との隙間には樹脂が充填されている。保持キャンの材料は、耐食性の良いインコネル材を使った。また、圧力隔壁材としては、ロータの高速回転で高周波磁界による渦電流が発生しないように、非磁性材の繊維強化エポキシ樹脂を使った。

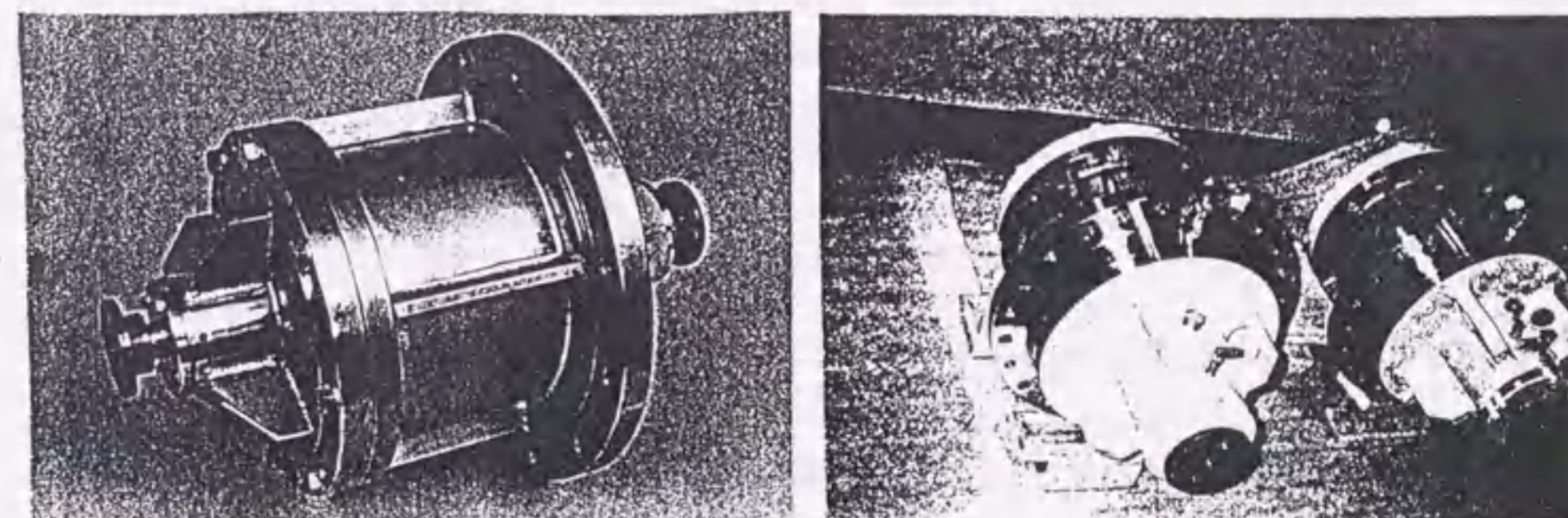


図4-6 磁気カップリングの外観と内部写真

この性能評価としては、まず静トルク試験を行い、さらに $10,000 \text{ min}^{-1}$ の回転試験を行った。試験装置は、片側軸端部を固定したトルク検出器に内転ロータを結合し、外転ロータは減速機と結合して、その軸端部に回転位置検出器を直結した構成となっている。減速機を介して外転ロータを回転させると、外転ロータ磁極軸と内転ロータ磁極軸がある角度（トルク角）をなし、復元力が発生する。この復元力が、伝達トルクとして測定される。伝達トルク対トルク角特性試験の結果を、図4-7に示す。最大伝達トルクは、約 $11 \text{ N}\cdot\text{m}$ が確認できほぼ設計値と一致した。また、周期毎の最大トルクは同値であり、位置による最大伝達トルクのパラツキ、およびロータに偏心のないことが分かる。

一方回転試験は、磁気カップリングを $10,000 \text{ min}^{-1}$ で高速回転させ、各点の振動を測定して、振動値が許容範囲以下であることを確認した。この結果を図4-8に示し、いずれの測定点でも回転時の振動値は $5 \mu\text{m}$ 以下で、振動・機械強度、回転いずれも問題なくモデル2装置用に適用可能であることが実証された。

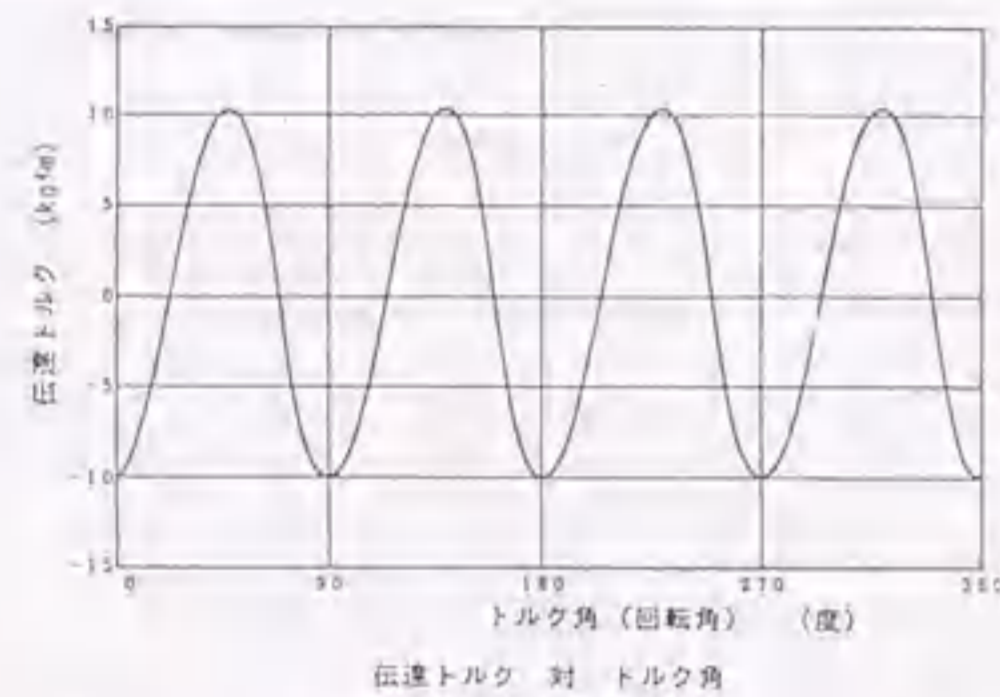
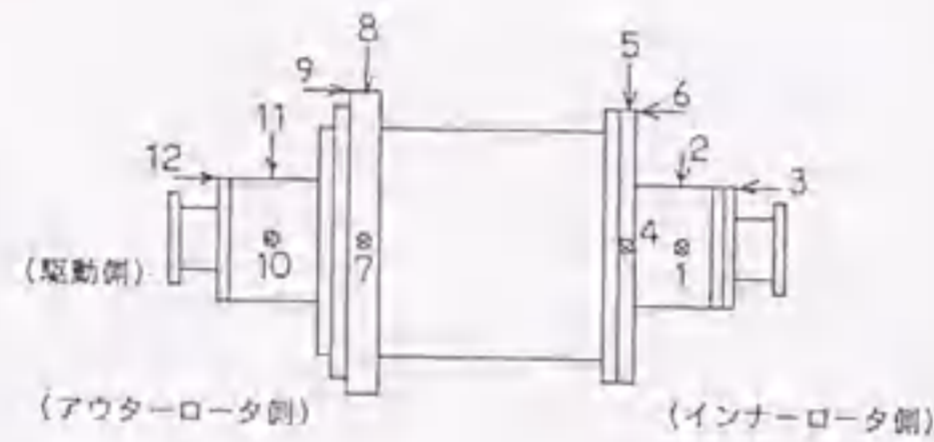


図4-7 伝達トルク対トルク角特性試験結果



単位 μm (P-P)

RPM \ POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10000	3.7	1.7	2.2	3.3	1.6	2.7	4.2	1.5	3.5	5.0	2.3	2.0

振動計：昭和測器（株） Model 1022

図4-8 振動測定結果

4.3. チャンバ材料の選定

エキシマレーザー装置では、腐食性の強いハロゲンガスを使用するため、チャンバおよび熱交換器などの内部構成部品材料がこれと反応し、装置性能に様々な影響を与えることが考えられる。実際には、長期的に装置そのものの損傷が促進されること、短期的にはハロゲンガス濃度の変化、化学反応と紫外線照射による劣化との複合的作用で不純物が生成されて、放電の安定性が損なわれることなどがある。とくに、放電への影響は、高繰り返し化、大出力化の妨げともなる可能性があり、これらの環境下において、耐力性の高い構成材料の選定や処理方法を検討する必要がある。

4.3.1. 試験条件

構造材料では、諸文献によれば金属材料としてNiが優れた耐食性を持つとされているので、専用の腐食試験装置の試作し、純Ni、インコネルやハステロイなどのNi基合金、およびNiメツ

キついで耐食特性比較をした。続いて、放電への影響が比較的大きいと推察される絶縁材料とし、放電部周辺で使用されているテフロンおよびPVDF、Oリングなどシール材として使用されているバイトン、ネオプレンゴムの合計4種類についても試験を行った。さらに、放電部の代替絶縁材料として、性能向上が期待できるセラミックス材について、純度の異なる8種類のアルミナ系セラミックス、また、比較材料として炭化珪素を選定し、長時間安定性と、表面処理材の紫外線照射による劣化程度を確認するため、最長3,000時間の耐食試験を行った。一方、表面処理試験片としては、耐食処理として有望なテフロンコーティング、Niめっき、複合処理（Niめっき後テフロン含浸）の3種類について試験をした。³⁾

試験装置は、放電部周辺の環境を模擬するために、ハロゲンガス環境中で紫外線を照射できることを特徴としている。装置は大きく3つの部分に区別され、一定濃度のハロゲンガスを含む試験ガスを供給するシリンダーキャビネット部、ヒータ、送風ファン、紫外線ランプを持つ試験チャンバ、それに安全装置などの制御を行う制御盤で構成されている。装置内面はテフロンライニングを、また内部に設置したヒータにもテフロンコーティングを施し、腐食試験を行うための十分な耐食性を確保した。また、試験片をセットするための台もテフロン製とした。内部の腐食試験ガスは、テフロンコーティングを施した送風ファンにより、ヒータから試験片台に向かって循環し、試験片に対して上側から当たるようにした。台の上部には窓を設け、外部より紫外線ランプで試験片を照射できる構造になっている。

このような条件において、試験中のガス組成を確認するために、ガス中のHCl濃度および水分量の測定を行った。方法としては、試験チャンバ出口配管の一部に設けた三方弁より試験ガスを排気し、一定量のガスを吸収液に通して、液中のCl濃度を硝酸銀滴定法により測定した。また、水分量は、排気ガスを採集ビンにサンプリングし、ガスクロマトグラフにより測定した。分析は試験開始時に比較的短い間隔で行い、以後試験終了までに合計9回行った。分析結果としては、試験開始直後のガス導入開始2時間後の1回目では、HCl濃度が1.94%と低かったが、約4時間後の2回目には2.80%であり、試験条件を満足していた。また、その後行った分析結果から、HCl濃度は全試験期間を通じて2.80~3.11%の範囲にあり、試験条件が満足されていることを確認した。また、水分量は1回目の分析で0.2%検出されたが、2回目以降はすべて0.1%以下であった。

試験方法として、外観、重量変化、材質変化を調べるための腐食試験片 ($30 \times 45 \times 2 \text{ mm}^3$) と、材料特性を調べるための特性試験片 ($30 \times 120 \times 2 \text{ mm}^3$) の2種類を用い、試験前にエチルアルコールで脱脂洗浄し、外観観察・重量測定を行った後に合計3,000時間の耐食試験に供した。本試験の条件は、エキシマレーザー装置として使用される場合のもっとも厳しい使用条件を考慮して設定し、まず試験温度は、放電部出口付近の温度を想定し $55 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。試験圧力は、試験装置試作上の制約から実機条件より低い $0.10 \sim 0.12 \text{ MPa}$ としたが、試験ガス中のHCl濃度を3%とすることで、実用条件よりも高いHCl量を確保した。また、試験ガスには紫外線による影響を避けるために、ヘリウムバランスガスを用いた。さらにガス流速を一定にするため、送風ファンの回転数を回転導入機の部分で測定し約 450 min^{-1} に調整した。試験中のガス組成変化を最少限にするために、ガスの補給は1~2日おきに行い、とくに試験初期にはほぼ毎日行った。

腐食試験片は、試験前に外観観察、重量測定を行い、ハロゲンガス環境で紫外線を照射した試験後で、外観変化、重量変化、および材質変化を評価した。また、引張試験 (JIS K6301)、硬さ試験 (JIS K6301A 形) も行った。さらに、劣化程度を詳細に検討するため、試験片の一部をブランクとして、試験前後でフーリエ変換赤外分光 (FTIR) 分析、試験片表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察およびオーージェ (AES) 分析をした。

4.3.2. 評価結果

図4-9に、ハロゲンガスとの反応性が高く、レーザーの安定発振に大きな影響があると考えられる金属材料の試験結果を示す。従来から使用されているステンレス系の材料に比べて、純NiおよびNi基合金が、ハロゲンガスとの反応性を数分の1から10分の1と、大幅に改善できる材料であることが分かった。また、金属材料とハロゲンガスとの反応により生成される物質は、金属構成元素の塩化物 (FeCl_2 , NiCl_2 など) であることが確認された。金属塩化物は一般的に吸湿性が非常

に強く、大気解放時に大気中の水分を吸収し材料劣化を早める危険性がある。さらに、これは、水またはアルコールに良く溶ける性質があり、装置のメンテナンスなどにおいて、上記の溶剤が洗浄液として有用であることも確認された。Niメッキやテフロンコーティングなどの表面処理は、長期間使用する場合には、剥離などの問題が生じる可能性があるものの、数年程度の使用では比較的良好な耐食性を持つことも確認でき、これらをモデル1（部分的）、2装置に反映させた。

腐食試験片は、試験前後に外観観察、重量測定を、試験後にFTIR分析を行ない、ハロゲンガス環境で紫外線を照射した場合の外観変化、重量変化、および材質変化を評価し、試験結果を表4-4にまとめた。テフロンおよびPVDFは、2,000時間後でも重量変化はほとんど認められなかったが、バイトンおよびネオプレンは、試験時間に比例した重量減少が認められた。また、紫外線照射による僅かな影響が、バイトンおよびネオプレンにあった。テフロンは外観上の変化はなく、PVDFは僅かな変色が認められたものの、両材質とも重量減少やFTIRによる材質劣化は確認できなかった。さらに、紫外線照射の有無によっても、上記の傾向に変化はなかった。バイトンは、外観上の顕著な変化はなかったものの、大きな重量減少が認められ、FTIRによる材質上の変化として-OH基が検出され、紫外線照射の有無による上記の傾向には変化はなかった。

表4-4 腐食試験片評価結果

材 質	調 査 項 目		
	外 観 変 化	重 量 減 少 (mg)*	材 質 変 化 **
テフロン 紫外線照射なし	変化なし	≦ 1	変化なし
テフロン 紫外線照射あり	変化なし	≦ 1	変化なし
PVdF 紫外線照射なし	僅かに変色	≦ 1	変化なし
PVdF 紫外線照射あり	僅かに変色	≦ 1	変化なし
バイトン 紫外線照射なし	変化なし	1.28	-OH基出現
バイトン 紫外線照射あり	変化なし	1.30	-OH基出現
ネオプレンゴム 紫外線照射なし	硬化	1.84	-OH基出現 不明な吸収の出現
ネオプレンゴム 紫外線照射あり	硬化	1.88	-OH基出現 不明な吸収の出現

備考 *：同条件の試験片の平均値

**：IR分析結果から推定

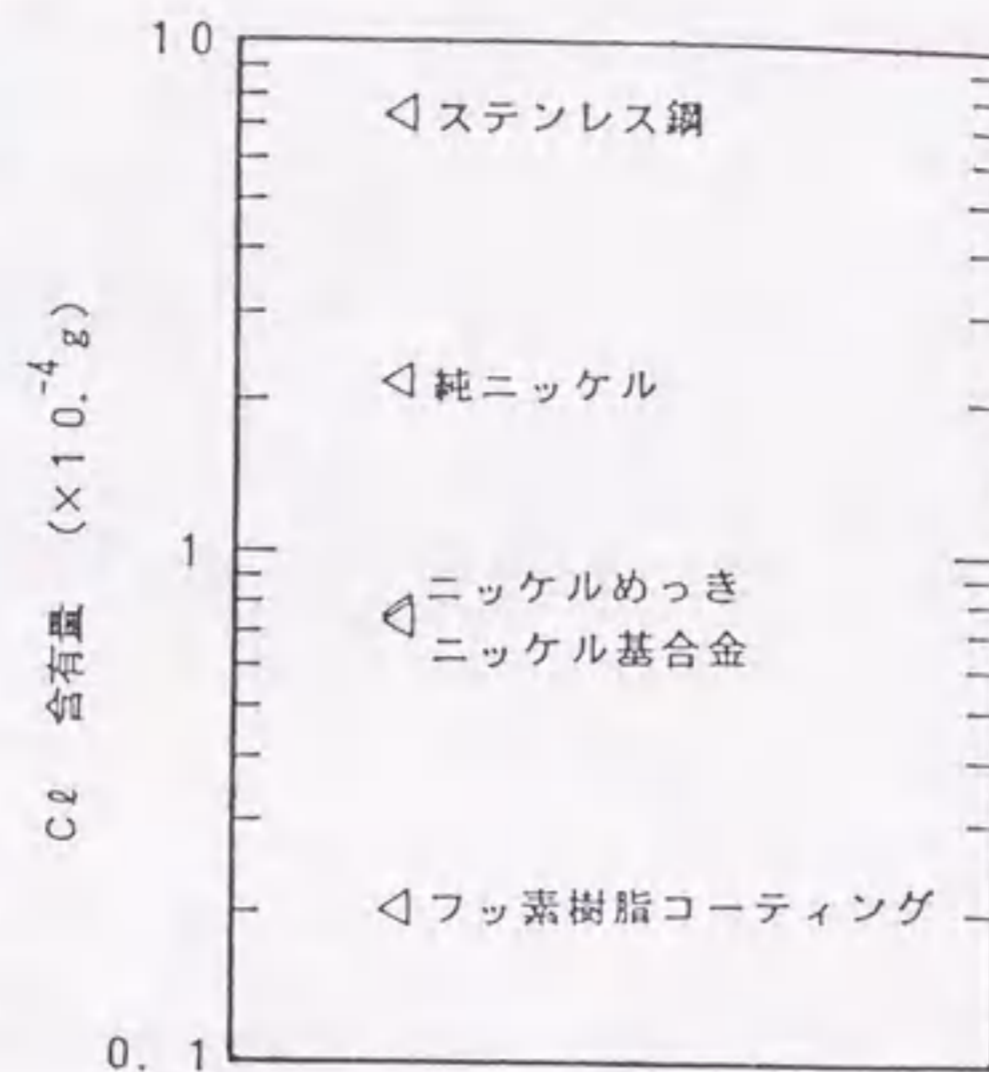


図4-9 反応生成物の塩素量比較

特性試験片は、ハロゲンガス環境で紫外線を照射した場合の特性変化を調べるために、試験後に引張試験および硬さ試験を行い、その劣化程度を評価した。この特性試験結果を、表4-5にまとめた。PVDFは、同表や図4-10示すように、長時間使用に対しても顕著な劣化はなく、エキシマレーザ環境で安定に使用できると考えられる。また、テフロンは、重量変化等はほとんど認められなかったものの、図4-11に示すように紫外線照射による特性の劣化傾向が確認され、とくに強い紫外線が照射される部分に使用するには注意が必要である。短時間試験では顕著な劣化が認められなかったバイトンも重量変化は大きく、紫外線照射にあまり影響なくとも、HCl環境中での劣化であることから、長時間の使用に対してはシール材として可否の検討が必要である。ネオプレンゴムは、重量変化や、とくにHCl環境での硬さ変化が、図4-12で示すように顕著であり、エキシマレーザ装置用材料としては不適当と考えられる。

表4-5 特性試験片評価結果

材 質	引 張 強 さ	伸 び	硬 さ
テフロン	低下傾向あり紫外線照射により劣化促進	紫外線照射による低下傾向あり、	—
PVdF	僅かに上昇紫外線照射の顕著な影響なし	顕著な影響なし	—
バイトン	短時間では上昇するが飽和傾向あり	顕著な影響なし	顕著な影響なし
ネオプレンゴム	低下傾向あり紫外線照射の顕著な影響なし	同左	上昇、紫外線照射の影響小

備考 —：測定せず

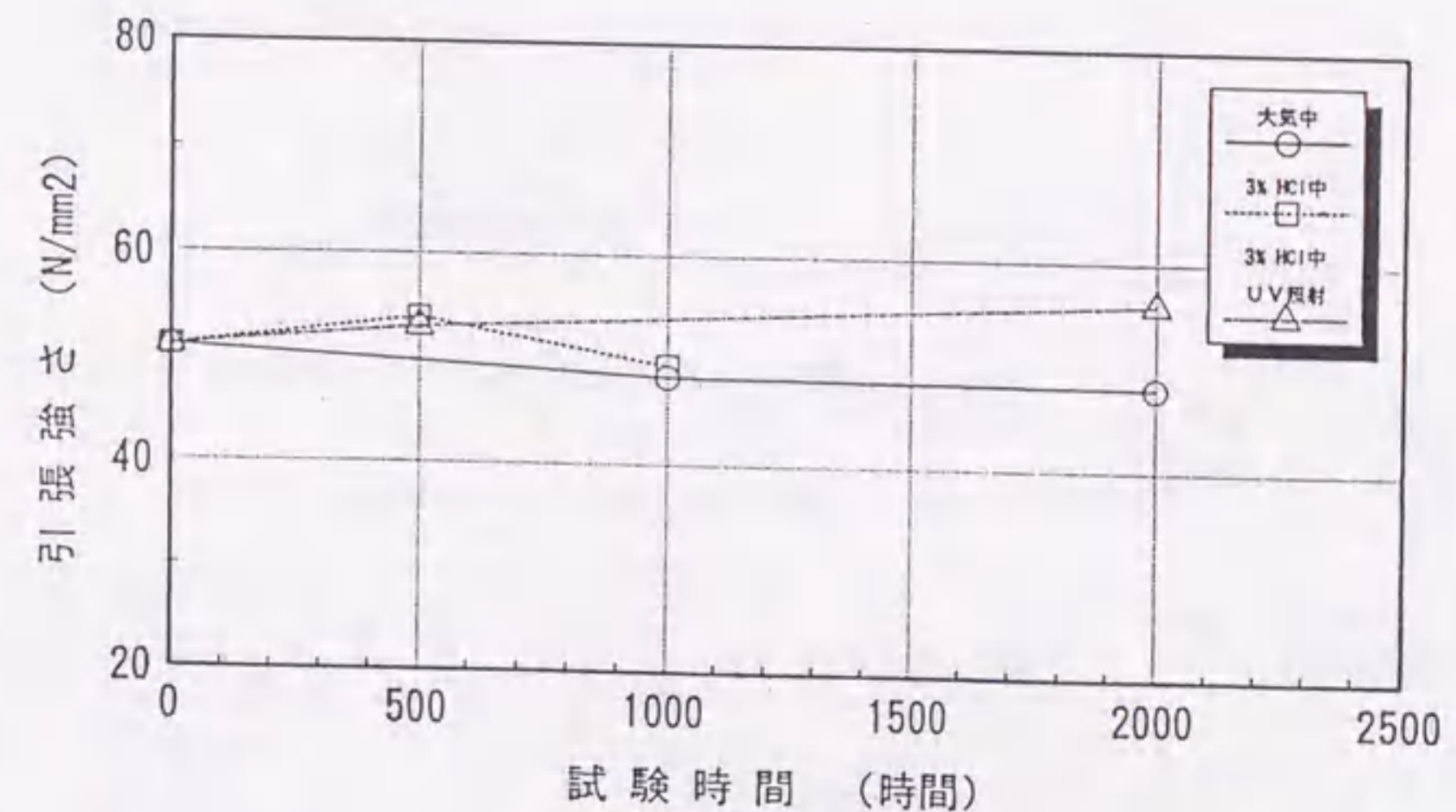


図4-10 PVDFの引張り強さ変化

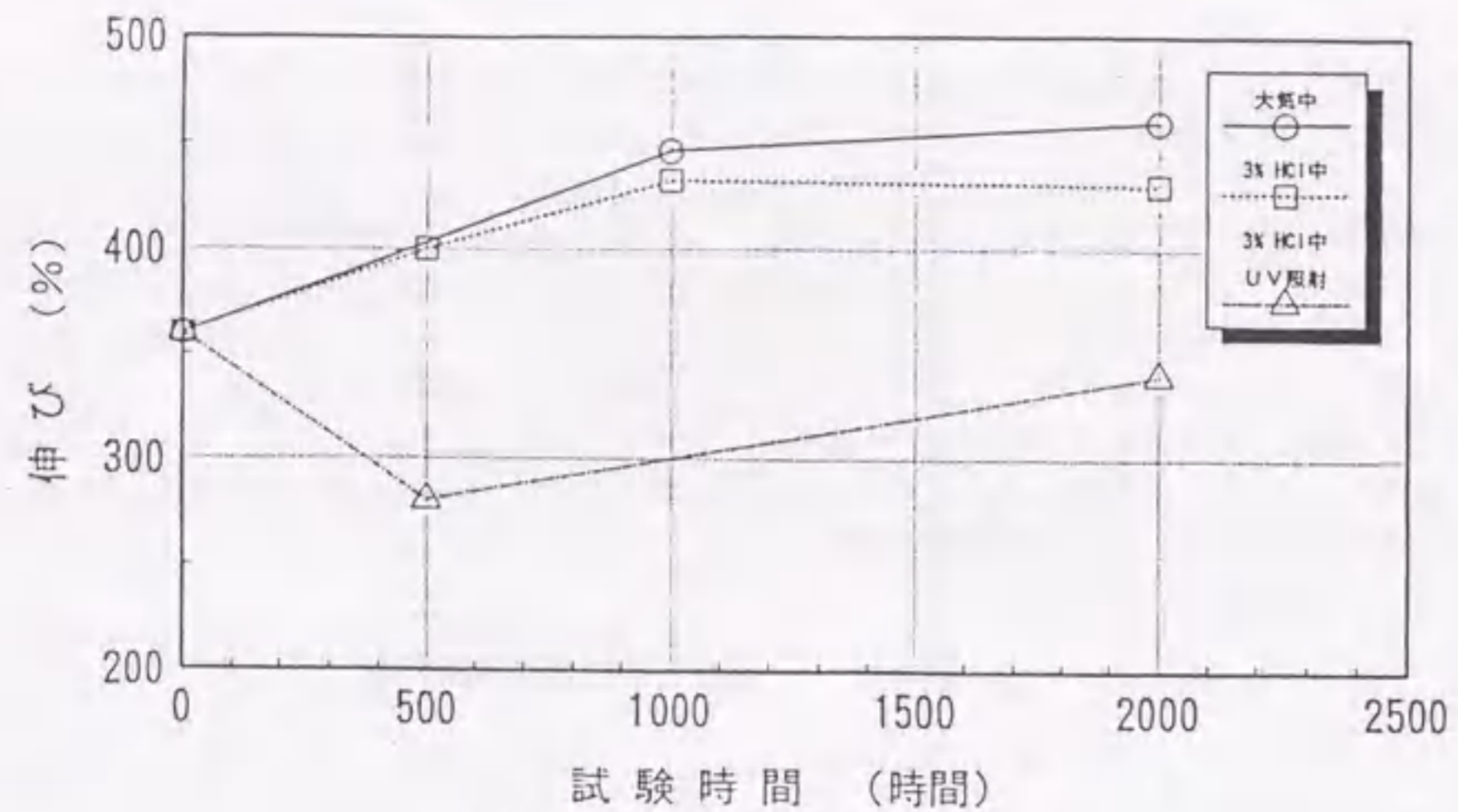


図4-11 テフロン伸び変化

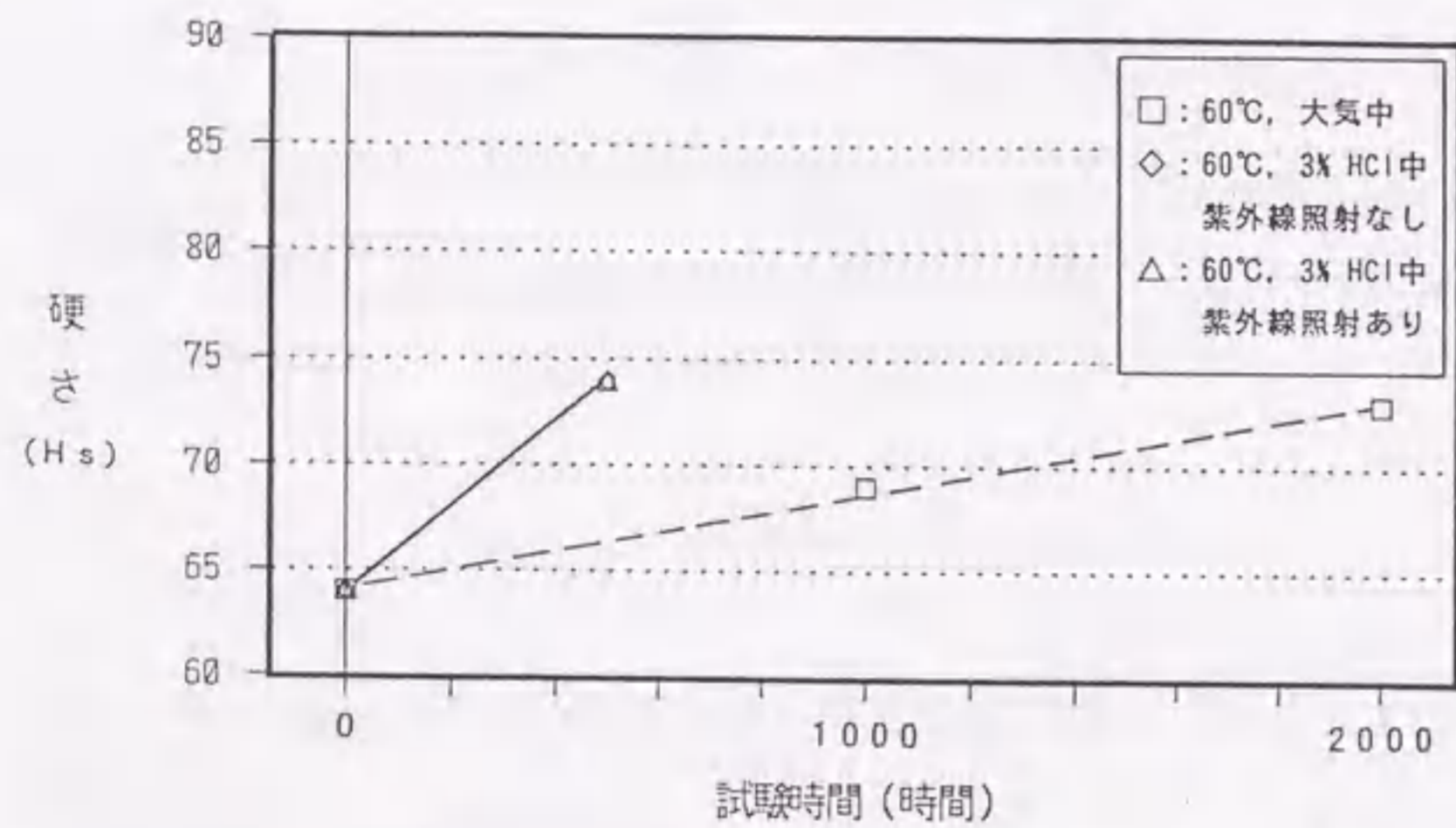


図4-12 ネオプレンゴム特性試験結果

一方、上記諸材に対しコストダウンや性能向上を目的に、諸代替材の試験片を作成して同様の耐食性試験を行い、実用可否の比較検討をした。表4-6に、セラミックス材の3,000時間試験前後の外観観察、および重量測定結果を示す。外観観察からは、細かな点状の変色が認められ、AD1およびAD9には全体にわずかな変色が認められた。また、重量変化やX線回折による材質検査での構造変化は、ほとんど認め

表4-6 セラミック材の耐食試験結果

記号	材質	調査項目	
		外観変化	重量変化 (mg)*
TPA	Al ₂ O ₃	点状変色	0.4
AD1		僅かな変色	0.5
AD9		僅かな変色	0.1
SC	SiC	点状変色	0.4

備考 *：同条件の試験片の平均値

られなかった。さらに、材質劣化を詳細に検討するため、SEM観察、AES分析を行った。純度のもっとも高いTPAでは、ほとんど塩素原子の侵入は認められないが、他ではわずかながら塩素侵入が認められた。AD1での結果を一例として、それぞれ図4-13、14に示すが、この侵入層はきわめて薄く、エキシマレーザ放電に対しほとんど影響を与えないと推察する。⁴⁾

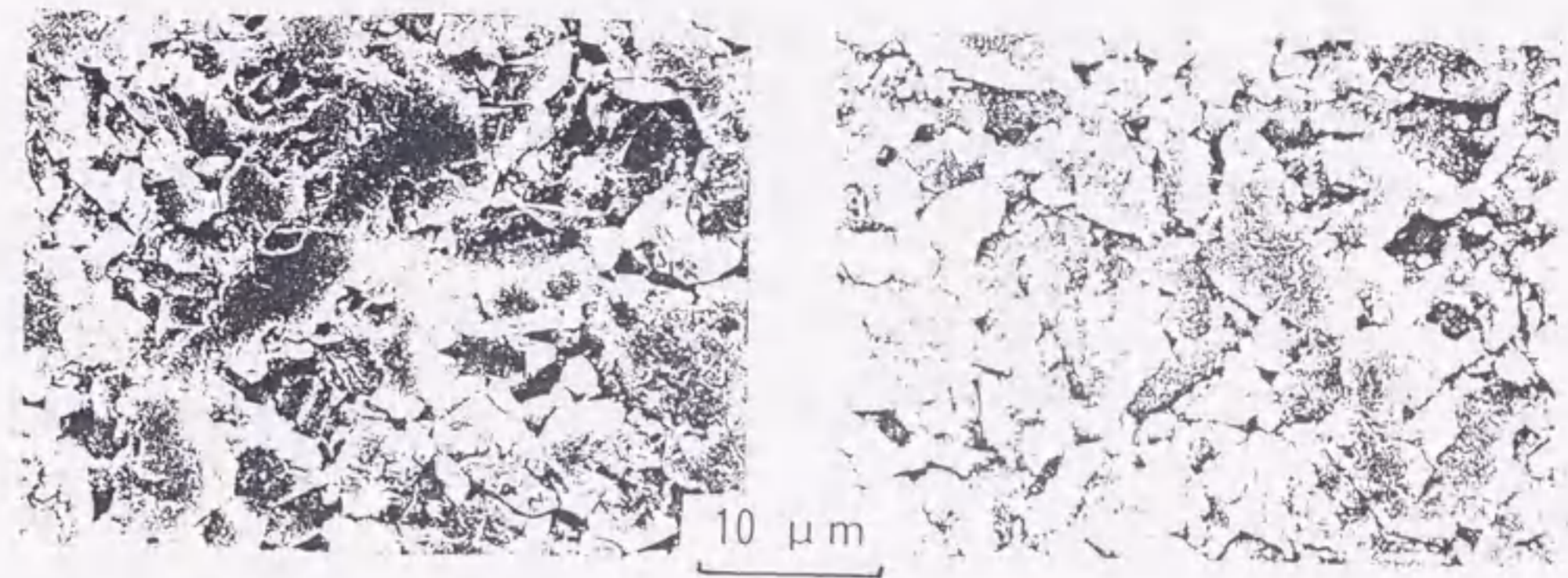


図4-13 耐食試験材料のSEM観察写真(左:試験前、右:試験後)

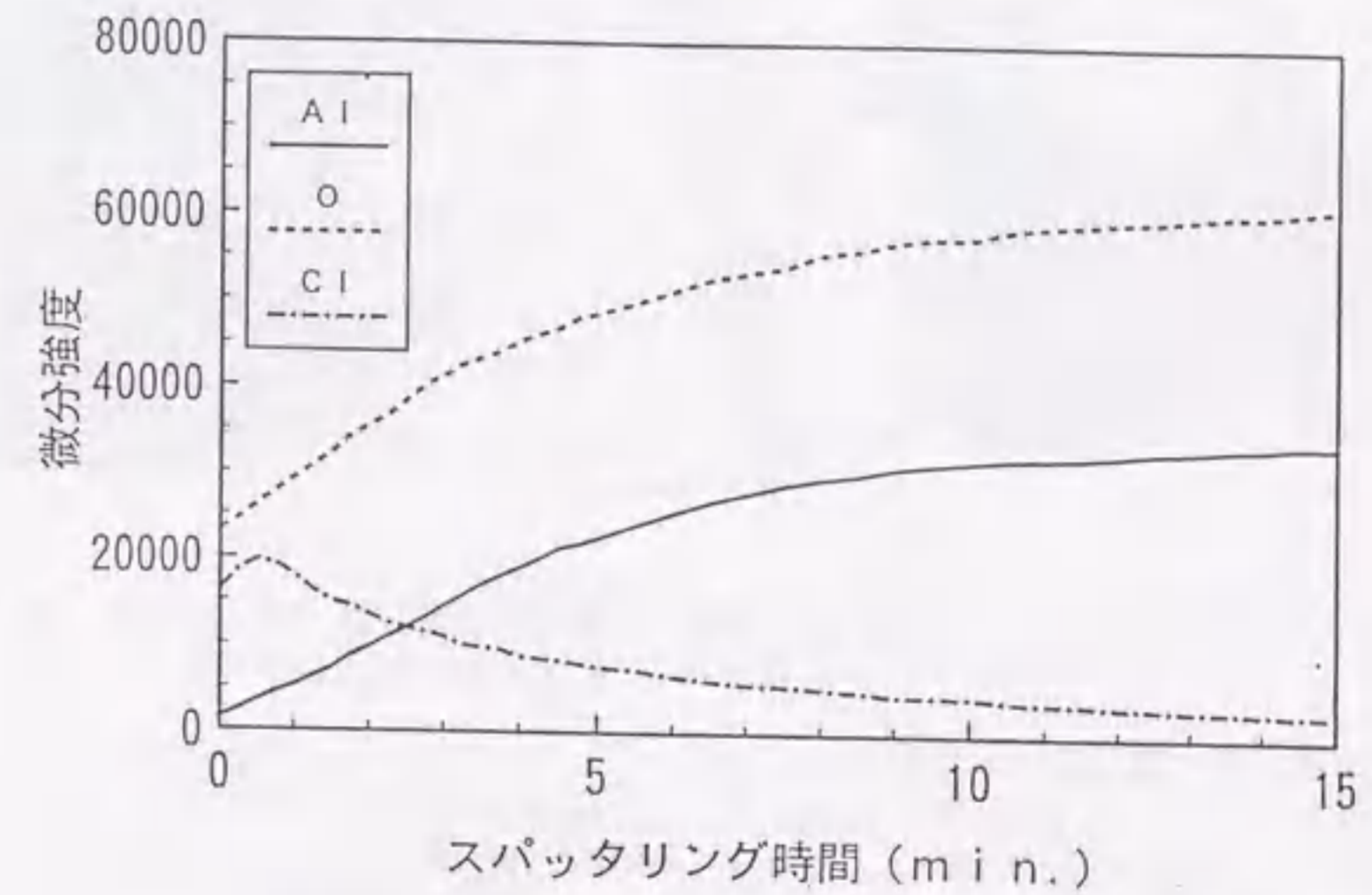


図4-14 耐食試験材料のオージェ分析結果

表面処理材についても、同様に検討を行った。表4-7は、試験前後の外観観察および重量測定結果を示す。外観観察からは、テフロンコーティング材が褐色に変色しているが、ほかの処理材は表面がわずかに曇った程度で、ほとんど変化は認められなかった。また、重量変化もテフロンコーティング材の変化が比較的大きかったが、他の表面処理材にはほとんど変化はなかった。さらに、表面処理皮膜の劣化程度を詳細に検討するため、表面のSEM観察および断面観察を行った。また、テフロンコーティング材は、赤外分光法(IR)による分析を行った。図4-15に、SEM観察結果例を示す。すべての表面処理皮膜に表面形態の顕著な変化はなく、断面観察からも剥離などの劣化部分は確認できなかった。テフロンコーティングについても、試験前後のIRスペクトルに変化は認められず、これで評価できるような材質劣化は少ないように思われる。

表4-7 表面処理剤の耐食試験材料のオージェ分析結果

記号	表面処理	調査項目	
		外観変化	重量変化 (mg)*1
K	Niめっき	僅かにくもり	0.4
SL	複合処理 *2	僅かにくもり	0.8
CL	複合処理 *3	僅かにくもり	0.8
T	テフロンコーティング	褐色に変色	16.9

備考 *1: 同条件の試の平均値。
*2: 基材としてステンレス鋼板を使用。
*3: 基材として銅板を使用。

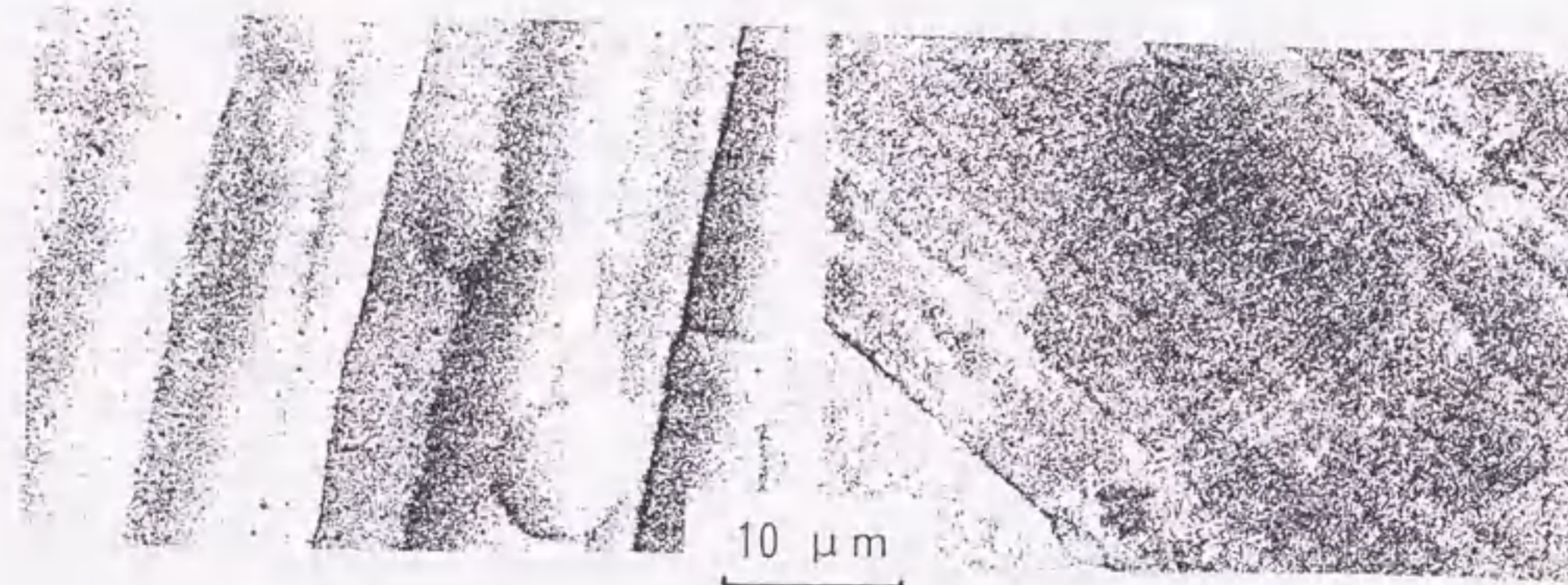


図4-15 耐食試験材料(銅基板複合処理)のSEM観察写真(左:試験前、右:試験後)

以上の結果より、電極周辺用構造部材としてセラミックス材は優れた耐食性を示し、テフロン樹脂の代替材として適していると考えられる。とくに純度の高いアルミナ系セラミックスは、きわめて耐食性が高い。また、表面処理材は、数年程度の使用で顕著な劣化はないと推察する。ただし、テフロンコーティング材については重量変化が大きく、ガス組成への影響が懸念されるため、その使用部分はできるだけ控えることが望ましい。

4.4. 予備電離方式の検討

通常のエキシマレーザ動作においても、予備電離条件がその性能に大きく関与するが、とくに高繰り返し動作においては安定な放電点弧が難しくなり、予備電離の最適化検討をする必要がある。従来方式としてもっとも広く使われているUV予備電離方式に対し、まだ研究段階と言えるX線予備電離方式が、初期電子放出で基本的特異性をもち、多くの興味ある論文報告があるので、ここでは、この試作をして、従来のUV方式と実用性に留意した比較検討をする。^{5)~15)}

4.4.1. X線管の設計と線量特性

エキシマレーザの放電部をX線で予備電離する際、通常は数 10 cm^2 以上もの大面積を照射する必要がある。したがって、通常はカソード・アノード対を大きくした1本の放電部と一体化したX線管を取り付けている。しかし、ここではメンテナンス性、冷却性、製作性、可交換性から、個別にいくつかのX線管に分割する独自方式が、実用性に優れているとして試作することとした。^{18)~18)}

図4-16に、独自開発した真空封止による小形X線管の断面図、および外観写真を示す。外径41mmのKOV製円筒内に、タングステンにバリウムを含浸させたコイル状の直熱インプレカソードと、同軸状にタンタルのアノードを配置した単純な構成となっている。カソードは、第1章で紹介したアルゴンレーザ管に実用されているもので、熱放出電子は、カソードに負の高電圧を印加することで径方向に加速され、アノードと衝突してX線を発生する。このように、アノード・カソードを同軸状に配置することで、従来よく用いられている平板-平板構成に比べ、X線を効率よく発生させることができる。X線取出し窓は、最初はX線透過性の良いベリリウムを用いたが、後には、多少透過性は犠牲になるが、安価で作りやすい特殊ガラスにした。

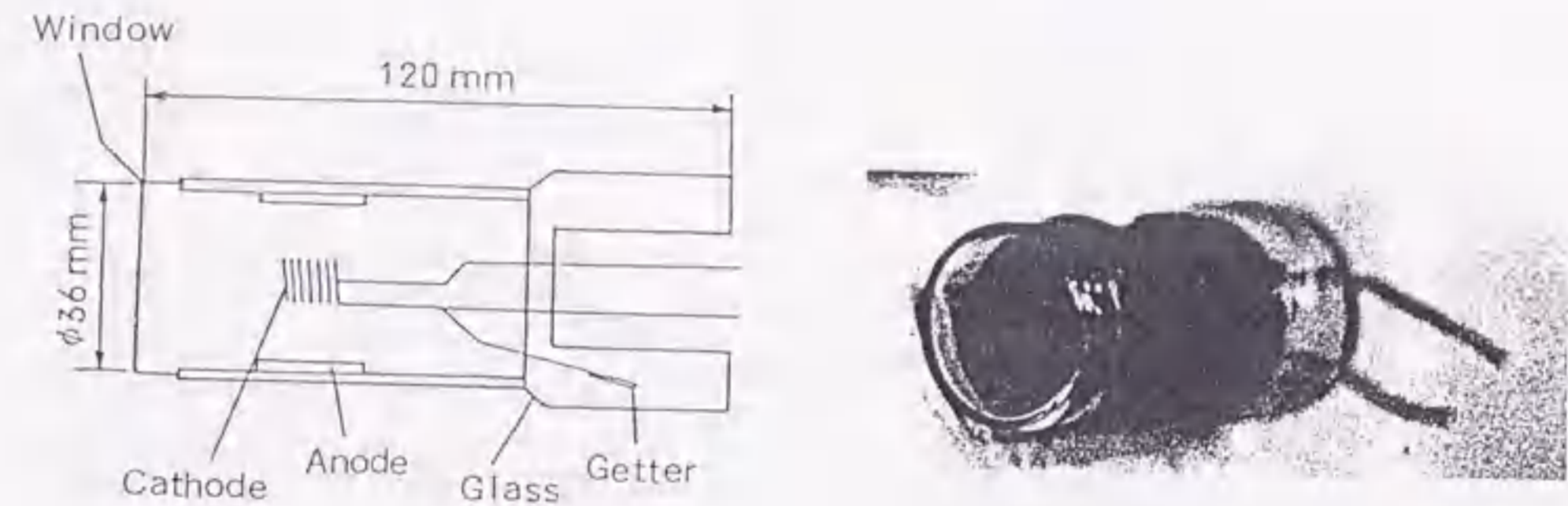


図4-16 開発X線管の断面図(a)と外観写真(b)

図4-17は、X線発生特性を調べるために使った実験装置の外観写真である。X線管を6~8本一方の主放電電極背面に直線状に並べて取り付け、その位置、間隔などを変えることにより、主電極間において最適なX線線量の空間分布が得られるようにしてある。放電回路にはLC反転倍電圧回路を採用し、主コンデンサ容量は3nF、最大印加電圧は75kVである。スイッチング素子にはサイラトロン(ITT Inc. F-285)を用い、最大1kHzまでの繰り返しができる。電圧波形の半値幅は、直列に接続されたコイルにより調整され、以下の実験では450nsとした。

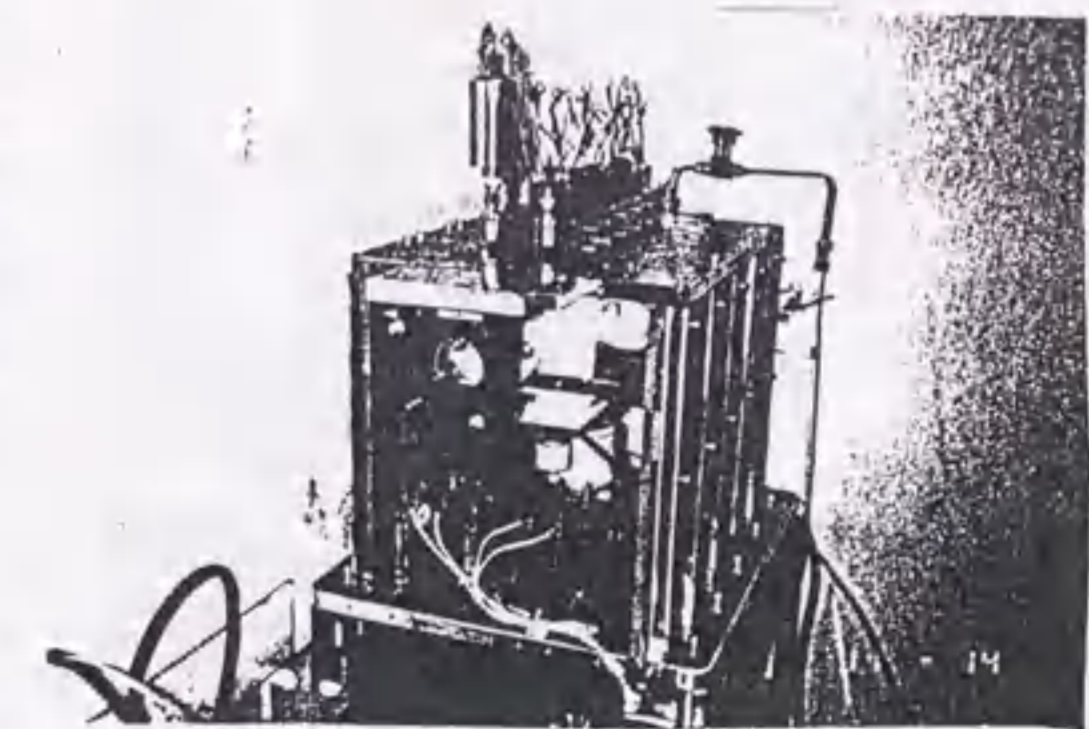


図4-17 X線発生装置の外観図

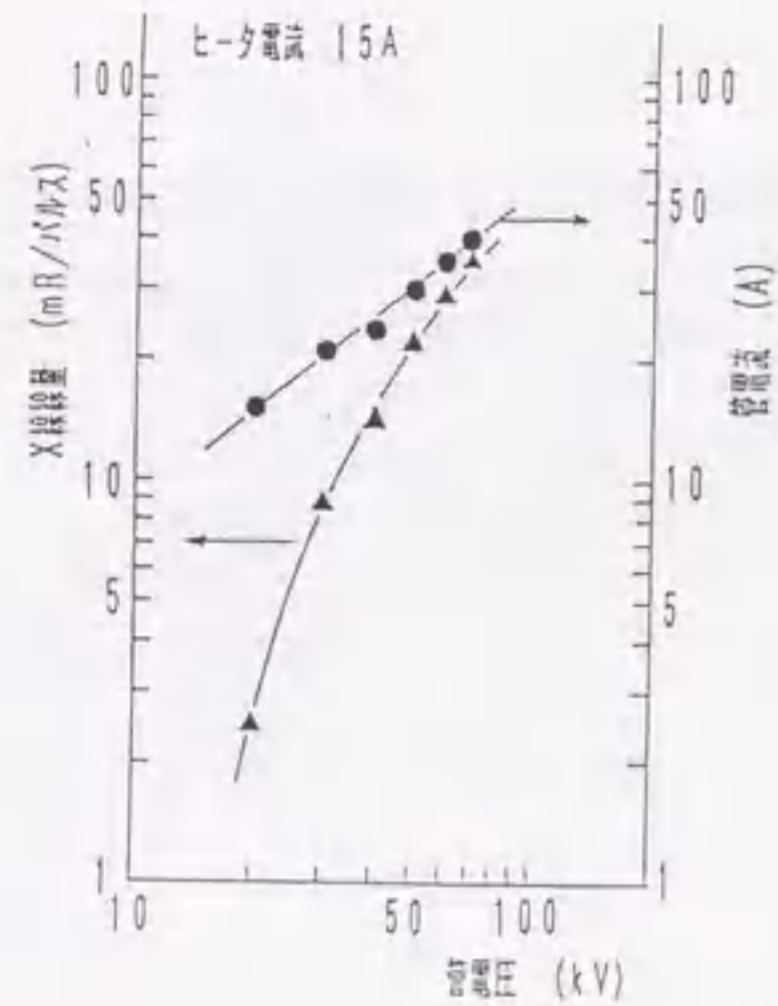


図4-18 管電圧と電流およびX線線量

X線は、広がり角度をもって照射されるために、測定距離が長くなるに従ってX線線量の空間分布は平坦になっていく。放電部の電極長を300mmにすると、そのとき並べるX線管の間隔は、X線管径41mmに冷却用ヒートシンクを考慮し60mm間隔が構造的に妥当な値となる。X線の分布は、隣りあったX線管の位置関係でのみで決まるとすると、線量のピークから50%低下したところが30mmになるように距離を決めれば、ほぼ平坦な分布が得られる。実際には、本装置では100mmが最適であった。

図4-20は、2本のX線管を63mm間隔に並べ、測定距離を変えてX線線量の空間分布を測定した結果である。ここで、各々のX線管線量のばらつきは、ヒータ電流で補正した。測定距離85mmの場合が、60mmの場合に比べより均一化されていることが分かる。

図4-18に、管電圧-管電流・X線線量特性を示す。管電流は、管電圧の0.82乗に比例していることから、この電圧範囲は、空間電荷電流制限領域にあると考えて良い。X線線量は、管電圧の増加に対して、やや飽和傾向が見られるものの、管電圧70kVで36mR/パルスの線量が得られている。カソード・アノードを同軸状に構成したことで、管電流と管電圧の積に対するX線への変換効率が上がり、平板-平板構成X線管より20%ほど改善できた。

図4-19は、X線線量の空間強度分布測定結果である。空間分布の測定には、 $3 \times 10 \text{ mm}^2$ のシンチレータとフォトダイオードの対をアレイ状にして並べ、幅97mmの1次元X線量分布が測定できる評価装置を用いた。同図は、X線管単体で、測定距離を変えたときのX線線量空間分布も示す。

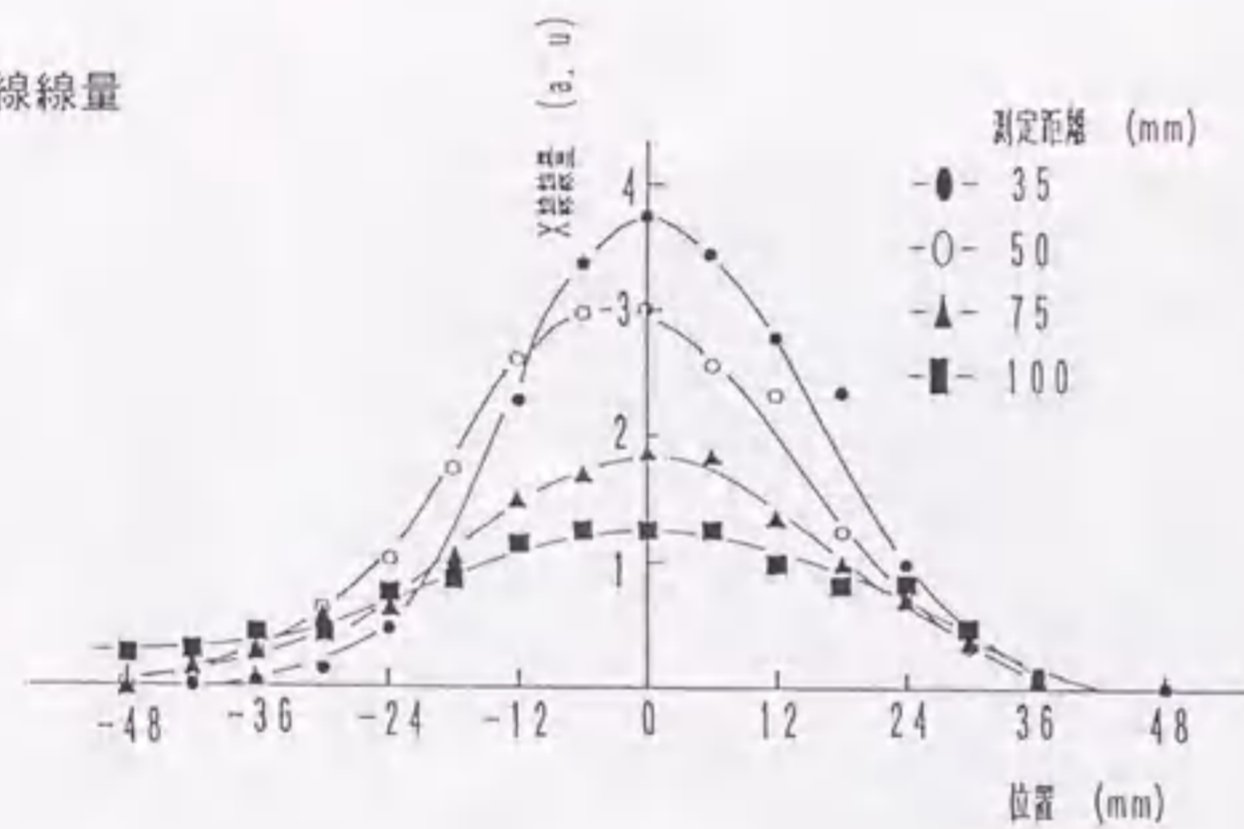


図4-19 X線線量の空間分布

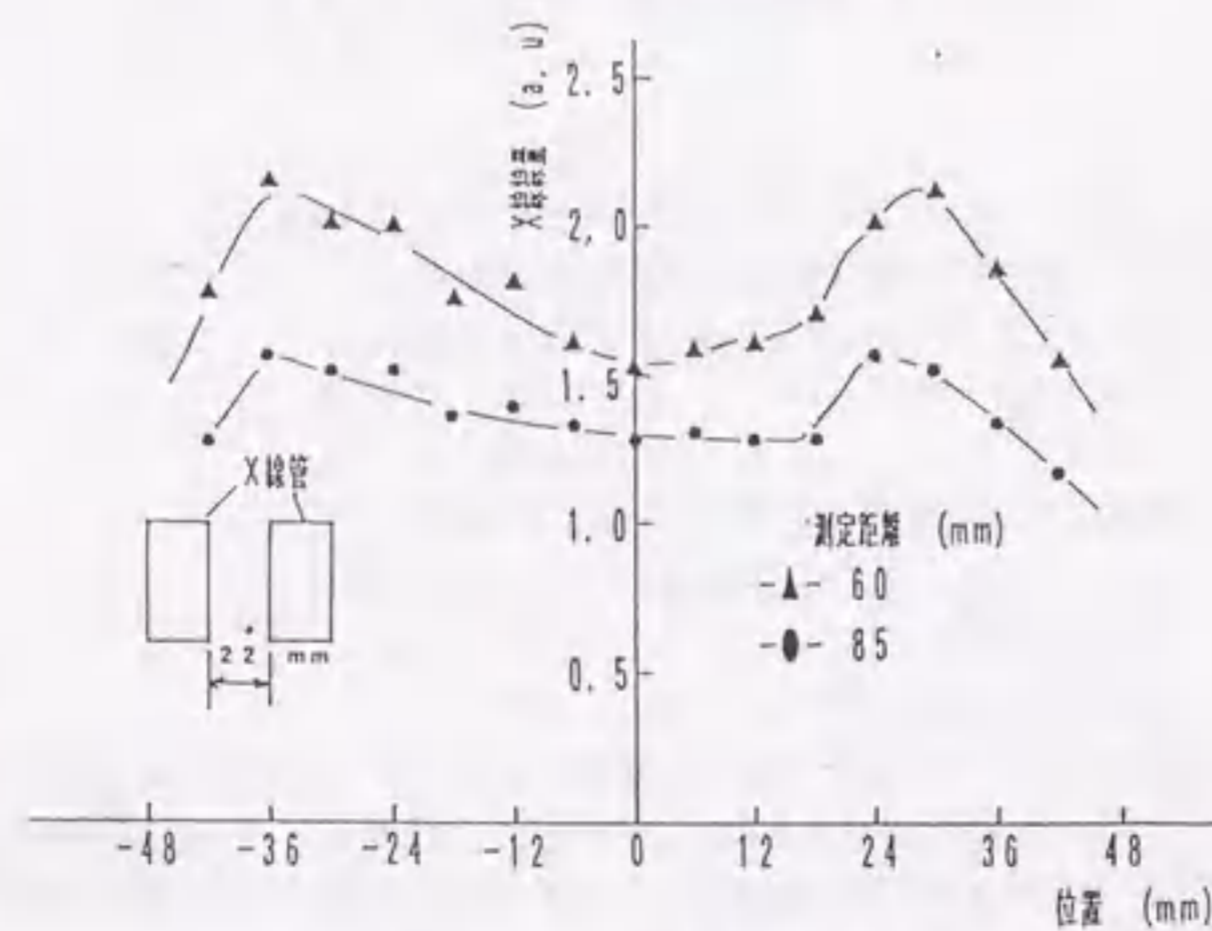


図4-20 2並列X線管の線量空間分布

図4-21は、繰り返し周波数に対するX線線量率を測定した結果である。繰り返し周波数に対してX線線量率は、ほぼ比例して増加している。ただし、測定は、X線管の熱容量を考慮して上限150Hz、100ショットのバーストモード動作で行った。

4.4.2 X線予備電離の基礎試験

上述X線管の高繰り返し性能を、1kHzの連続動作試験、2.5kHzまでのダブルパルスモード試験をして確認、また、予備電離装置として用いることにより、1Hz動作でのレーザ発振を試みた。

図4-22に、X線予備電離放電装置の外観写真を、図4-23にX線管駆動電源の回路構成を示す。X線管は、52mm間隔で6本を一列に並べて設置した。各カソードを兼ねるヒータには、トランスの浮遊容量を少なくするため、直列に接続し、交流電源からスライダックおよび絶縁トランスを介して給電している。X線の発生は、カソードを約1,000℃に加熱し、これに負の高電圧パルスを印加することによって行う。高繰り返し動作を可能とするため、各X線管のアノードは、フッ素系冷媒(以下フッロリナート™)を用いて冷却するようになっている。¹⁹⁾

X線管のインピーダンスがヒータ電流で変化するため、これによりX線管電圧も変化する。管電圧は、ヒータ電流14Aで61kV、15Aで50kVとなり、電圧パルス半値幅は250nsであった。主放電回路は容量移行型であり、主コンデンサ $C_S=14 \text{ nF}$ 、ピーキングコンデンサ $C_P=13 \text{ nF}$ である。放電部容器はアルミニウム製で、耐食性を上げるため、内面をニッケルメッキした。容器内には、主電極、貫流ファンおよび熱交換器が挿入されている。主電極は、アルミニウムにニッケルメッキしたもので、放電体積は $10(\text{W}) \times 20(\text{G}) \times 266(\text{L}) \text{ mm}^3$ である。電極を支持する絶縁材としては、PVDFあるいはテフロンを、紫外線被照射がもっとも強いガス流ガイド板には、アルミナセラミックを用いている。放電部は、X線管を設置する都合上、陽極(アース側)をフランジ面(上面)にし、背面からX線を照射している。

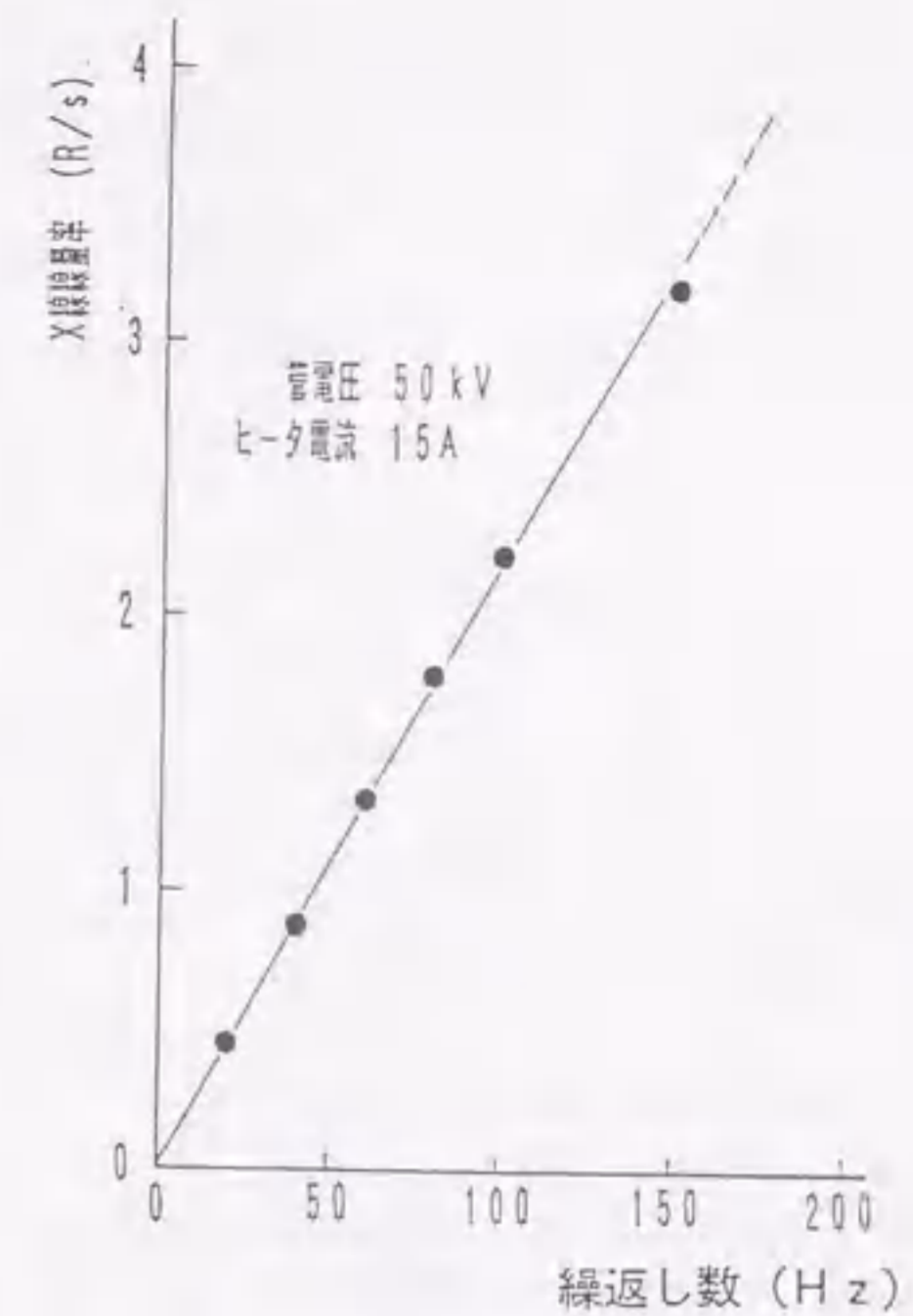


図4-21 繰り返し数とX線線量率

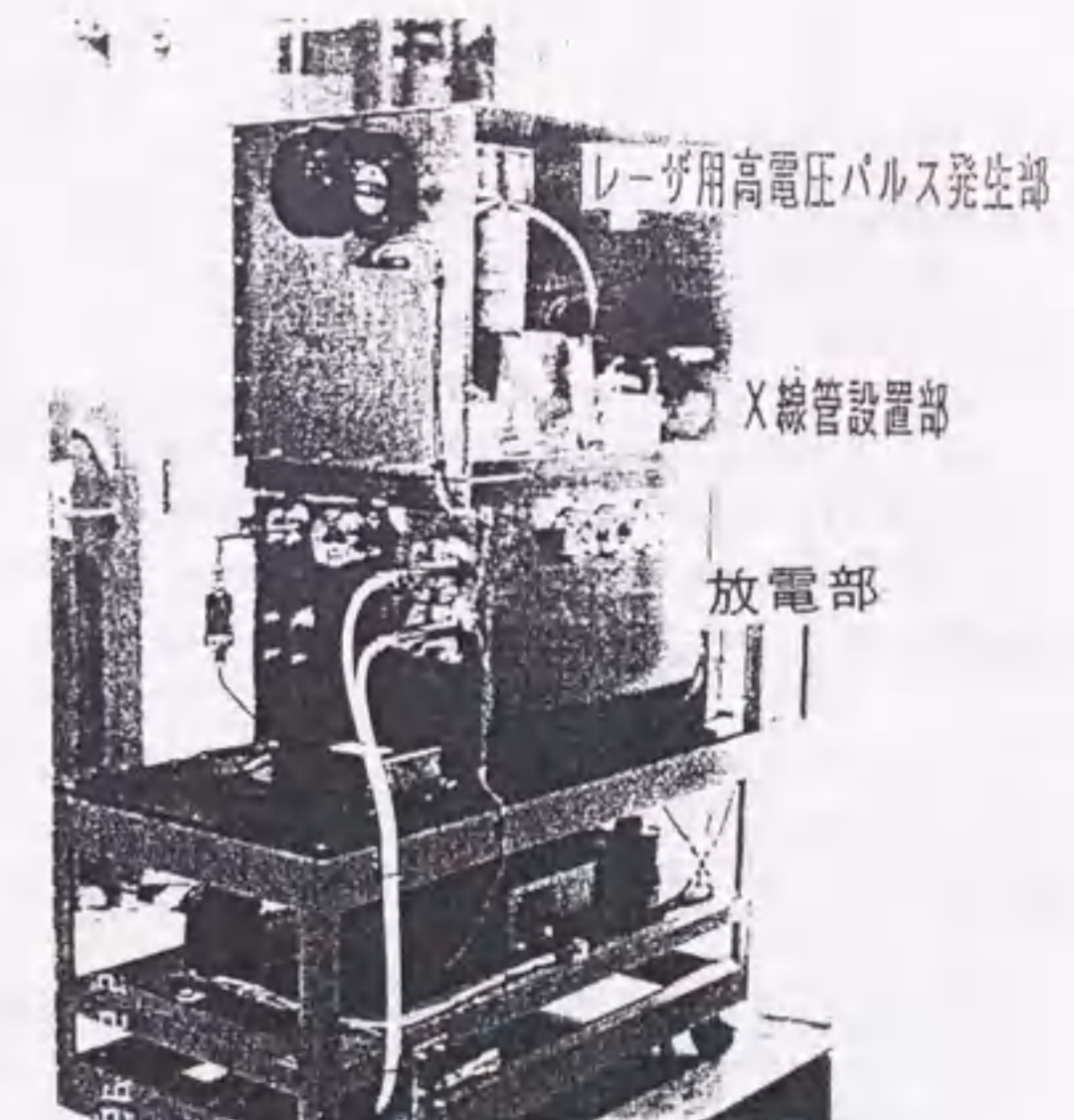


図4-22 X線予備電離放電装置の外観写真

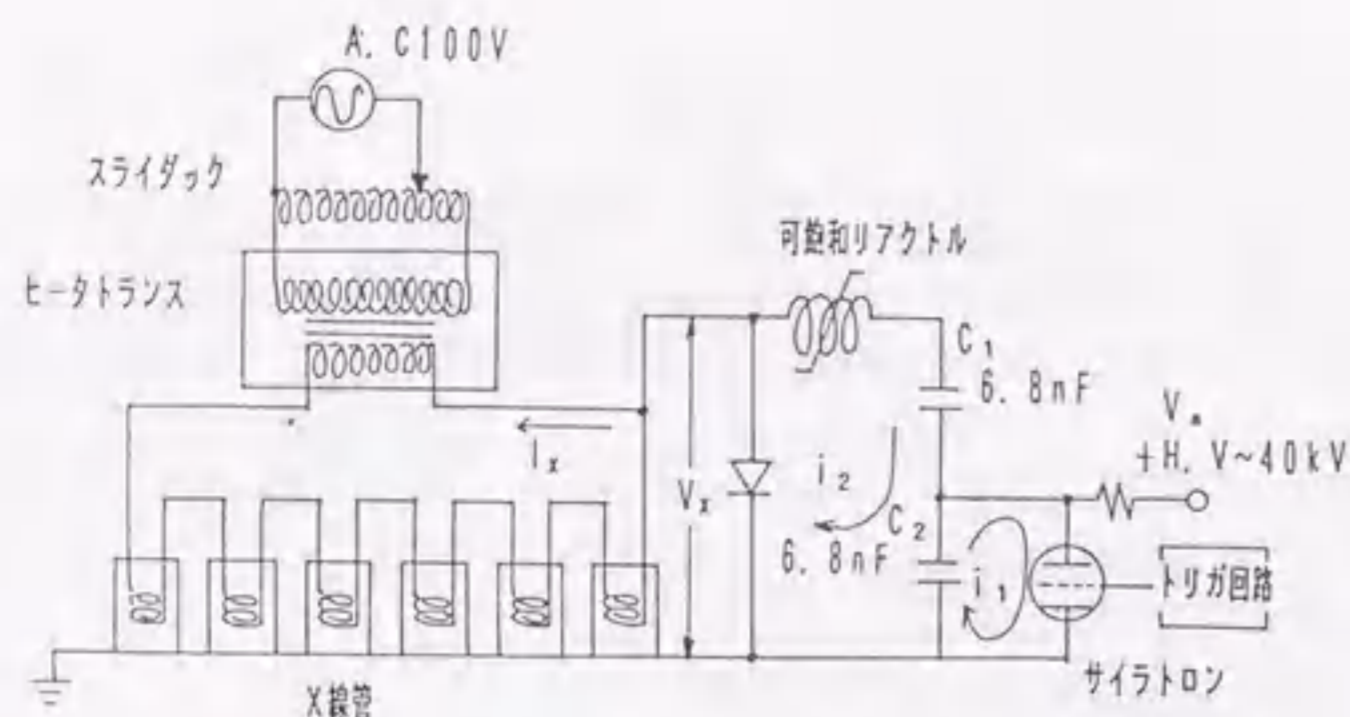


図4-23 X線予備電離放電装置の回路図

図4-24に、X線管を1 kHz動作させたときの、パルス数に対するX線量を示す。X線量は、電離箱形サーベイメータ（アロカ（株）ICS-301）を用いて、積算X線量として求め、これをパルス数で割って、パルス当たりのX線量とした。ここでは、X線管電圧50 kV、ヒータ電流15 Aである。最初の10パルスにおけるX線量と比較して、100パルス以後では線量が約40%に低下した。この結果は平均線量であるため、全パルスが低下しているのか、X線が発生しないパルスがあるか明かでない。そこで、X線管単体で、1 kHz動作100ショットのX線パルス列を観測した。各パルスの波高値は、1 Hz動作時にほぼ等しかった。この評価装置はプラスチックシンチレータとピンフォトダイオードを直づけにしたもので、ノイズに弱く、X線量の信号がノイズによっても低下することがある。しかし、1 kHz動作時のX線管の管電流があまり変動していないことから、図4-24の結果は、実際には、あまりX線量は変動していないと考えられる。

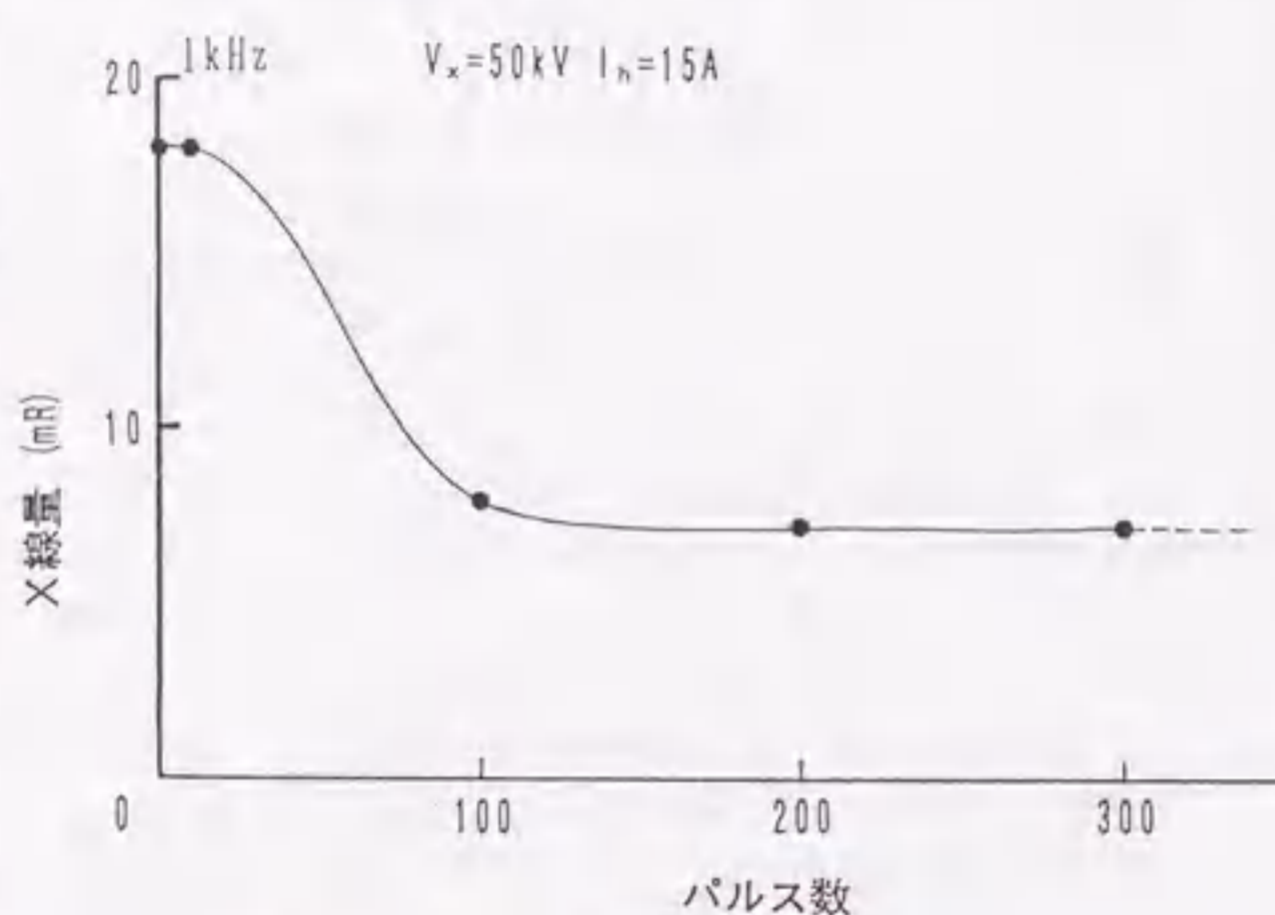


図4-24 パルス数に対するX線量

図4-25に、ダブルパルス動作におけるX線管の高繰り返し特性を示す。測定はヒータ電流を14 A、X線管電圧を50 kVに設定して行った。換算繰り返し数2.5 kHzでは、電源容量により管電圧は48 kVまで低下したが、1 kHz以上においてもX線量および管電流の低下は認められず、これがさらに高い繰り返し数までの予備電離に適用できると推測される。

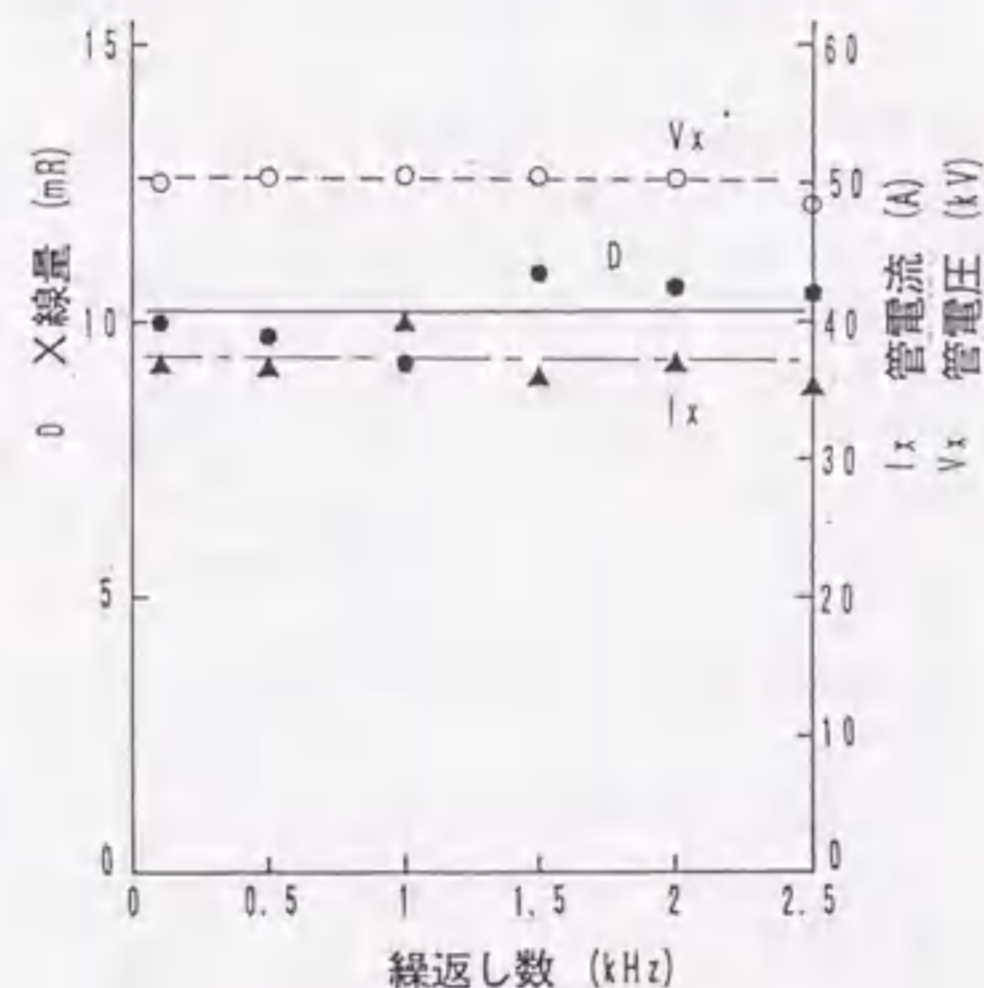


図4-25 X線管の高繰り返し特性

次に、主放電部電源をX線管電源に同期して動作させ、光共振器を取り付けてレーザ発振を試みた。同期回路上の関係から、レーザ発振は1 Hzとした。光共振器は、内部ミラー方式とし、曲率10 mの全反射ミラーとアンコート出力ウインドで構成した。レーザ混合ガスは、 $\text{HCl}/\text{Ne}=0.4/270 \text{ kPa}$ に、Xeを3.5および11 kPaに変えて用いた。

図4-26に、レーザ出力特性を示す。Xe分圧11 kPa、充電電圧28 kVにおいて最大43 mJ/パルスが得られた。発振効率、26 kVにおいて最大0.72%であった。UV予備電離方式での同じ放電体積、同じ放電入力電力密度で比較すると、X線予備電離でのレーザ出力は、Xe 3.5 kPaでは67%、11 kPaでは56%の出力となる。また、X線管電圧の最大値を示す時と主放電開始時との差を遅延時間とし、これに対するレーザ出力特性を測定した。遅延時間が200 ns以上で、レーザ出力の低下が始まっていることが分かり、これまでの報告に比べて少し短いようである。また、X線管電圧に対するレーザ出力特性を求めると、レーザ出力は管電圧40 kV以上では飽和傾向を示した。X線量は管電圧に対し、直線的に増加することから、レーザ出力飽和の原因が、X線量不足ではないと推察される。

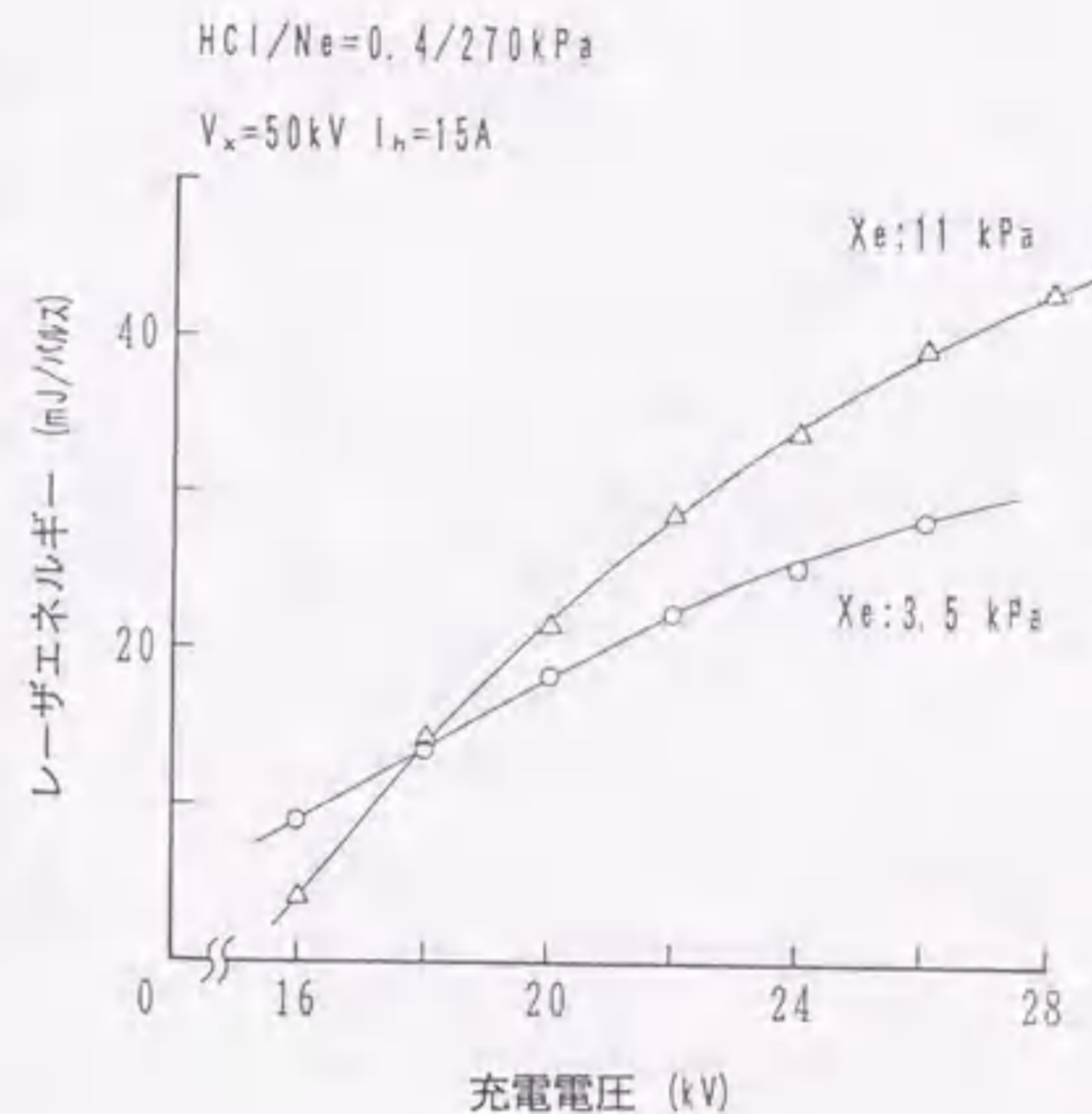


図4-26 Xe分圧に対するレーザ出力特性

4.4.3. X線予備電離の高繰り返し化

高繰り返し動作に適した予備電離方式を開発するため、これまで使用してきたUV予備電離方式と、上述の独自設計による小形真空封止X線管を用いた方式との比較検討を行った。これには、kHz動作が可能なX線管を6本装着した（以下X線管アレイ）X線、および短波長光予備電離放電部（以下X線/UV評価装置）を用いた。この放電部では、X線方式およびUV方式の2通りの予備電離が可能で、1 kHzまでの高繰り返しレーザ発振を行って、各予備電離方式の優位性を比較することができる。まず初めに、UV方式の評価を行い、続いてX線予備電離による発振特性を測定した。このとき、放電中にX線管配置場所に対応した電流集中が観測された。そこで、X線量空間分布の均一化を行い、1 Hz動作でのレーザ出力特性の改善を行った。さらに、高繰り返し動作におけるX線予備電離による発振特性、およびUV予備電離方式との比較検討を行った。²⁰⁾

実験に用いたX線/UV評価装置の放電回路は容量移行型であり、主コンデンサ $C_s=16 \text{ nF}$ 、ピーキングコンデンサ $C_p=12.4 \text{ nF}$ である。 $10 \times 20 \times 270 \text{ mm}^3$ の放電空間は、52 mm間隔で光軸に沿って6本並べられたX線管によって予備電離される。X線管の透過窓（直径30 mm）から主放電電極間中央までの距離は70 mmである。主電極は、アルミニウムにニッケルメッキをしたものであり、陽極は背面中央部に長さ290 mm、幅14 mmの溝加工がしてあり、放電部とは厚さ1 mmのアルミニウム壁で隔離されたことになる。UV予備電離は、ピーキングコンデンサに直接接続したピン電極により行うが、X線管使用時にはピン電極を短絡して用いた。このように、X線/UV予備電離方式の優位性比較は、同一放電部配置にて、レーザ発振特性から直接検討できるようにした。実験に用いたレーザガスは、Xe=2.7~10.6 kPa、 $\text{HCl}=0.4 \text{ kPa}$ をNeにより278 kPaまで希釈したものであ

る。また、全ガス圧力は装置の耐圧上限である 278 kPa とした。通常の使用状態では、X 管電圧 50 kV、ヒータ電流 14 kA で、放電空間における X 線量は 2.3 ~ 3.7 mR となっている。

X 線量分布の均一化に際し使用した減衰板は、大きさ 10 × 20 mm²、厚さ 0.6 ~ 1.5 mm のアルミニウム板であり、陽極の溝加工部隔壁上に装着した。放電空間における X 線量分布およびアルミニウム透過特性は、予備の電極系を用いて実際の放電部を模擬し、既設の X 線予備電離評価装置を用いて測定した。放電空間全域における X 線量分布は、実測した 1 本の X 線管の空間分布に各 X 線管の線量を掛け、6 本を重ね合わせるというシミュレーションをして求めた。Xe 分圧に対するレーザ出力特性を、減衰板の種類をパラメータとして図 4-27 に示す。X 線管を陽極裏側に装着したままの場合、すなわち減衰板未装着時（図中 I）では、Xe = 5.3 kPa 以上でレーザ出力が低下した。この時、観測窓から放電状態を観測したところ、放電中に白い柱状の電流集中部が見られた。この部分は、X 線管の直下に発生しており、さらに X 線管の一つを停止させたとき、対応する電流集中が消えたことから、X 線量分布が不均一なため発生していると推測した。

そこで、電流集中部の X 線量を減少させて線量分布の均一化を図るため、減衰板を X 線管直下に装着した。減衰板の厚さは、数種類を試験して放電状態の観測より 1.5 mm に決定した。この結果、レーザ出力は Xe = 8 kPa まで増加するようになった（同図 II）。減衰板の効果を数値的に評価するため、下記の方法で放電空間全域の X 線量分布シミュレーションを行った。

- (a) 管電圧 50 kV、ヒータ電流 14 A、アルミニウム 1 mm 透過後において最大線量が得られる X 線管の線量を 1 とし、各 X 線管の線量を規格化 (D_n) する。ただし、n は X 線管に付けた番号である。
- (b) X 線管単体の線量分布を規格化 ($P_{(d)}$) して D_n に乗じる。ただし、d は電極中央を 0 とする位置 (mm) を示す。
- (c) X 線量の最大値が得られる各 X 線管の直下 ($d=0, 52, 104$ mm) と、最小となる X 線管と X 線管の間 ($d=26, 78$ mm) において、左右 2 本隣までの X 線量の和を求める。ここでは簡単のため、X 線管直下の線量 D_c および X 線管と X 線管の間の線量 D_l を求めると次式となる。

$$D_{cn} = D_n P_{(0)} + (D_{n-1} + D_{n+1}) P_{(52)} + (D_{n-2} + D_{n+2}) P_{(104)} \dots \dots \dots (4-5)$$

$$D_{ln} = (D_n + D_{n+1}) P_{(26)} + (D_{n-1} + D_{n+2}) P_{(78)} \dots \dots \dots (4-6)$$

減衰板装着時の D_c は、(4-5) 式の第一項に減衰板の厚さに対応した係数を乗じた。一方、減衰板の効果は X 線管直下の線量のみ利くため、 D_l は減衰板の有無にかかわらず一定である。図 4-28 に、放電空間全域の X 線量分布のシミュレーション結果を示す。横軸の 0 は電極中央を示し、有効放電長の端 ±135 mm は点線で示した。減衰板未装着の場合には、図中の I で示すように、分布が非常に不均一である。ここで、X 線量の最大不均一化率を

$$F = (\text{最大値と最小値の差}) / (\text{最小値}) \times 100 (\%) \dots \dots \dots (4-7)$$

と定義すると、減衰板未装着時 I では $F=44.6\%$ となる。これに対し、減衰板 II を装着するとかなり分布が改善される。ただし、放電端部においては減衰過剰であることが分かった。端部を除く最大変動率を計算すると、 $F=11\%$ となる。

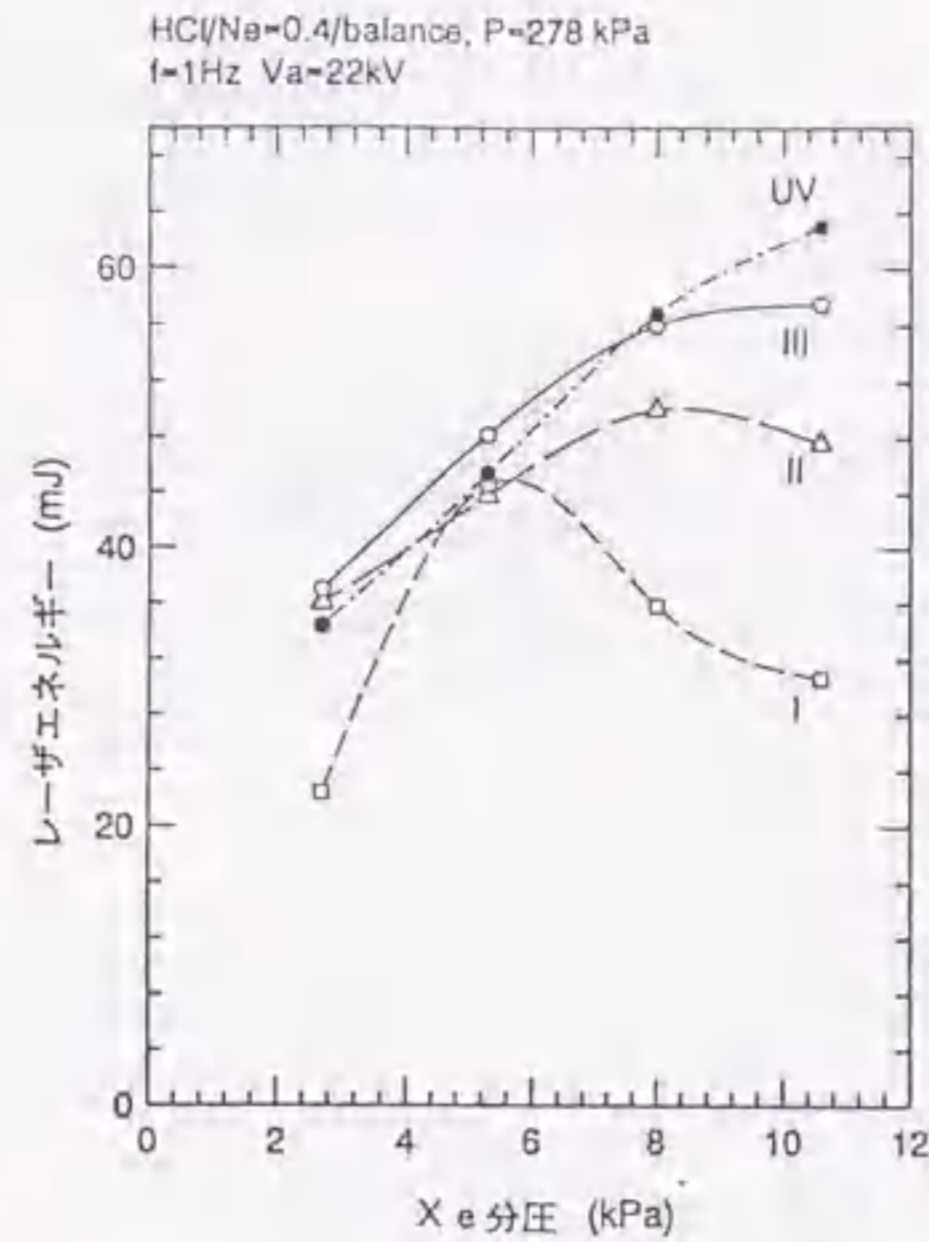


図 4-27 Xe 分圧に対するレーザ出力

次に、線量分布均一化と平均線量の増大を狙って、線量分布のシミュレーションをさらに進め、最適な減衰板の設計を行った。減衰板全部の厚さの和を最少とすることに留意し、電極とアルミ減衰板の透過特性を用いて各減衰板の厚さを決定した。境界の分布均一化のため減衰板を 2 枚構造とした。分布シミュレーションの結果は図 4-28 の III で示すようになり、 $F=5.8\%$ 、平均線量は減衰板 II 装着時に比べて約 14% 増加となった。このとき、レーザ出力特性はさらに改善され、図 4-27 に示すように、Xe = 10.6 kPa まで出力が増加するようになり、UV 方式と比較しても、Xe = 8 kPa まではこれを上回るようになった。

引き続き、高繰り返し性に対する X 線 / UV 予備電離性能を比較するため、ガスを循環してその高繰り返し特性試験を行った。UV 予備電離の場合には、Xe 分圧は 10.6 kPa まで実験し、Xe 分圧の増加にともない 1 パルス当たりのレーザ出力も増加した。また、X 線予備電離の場合にも、減衰板 III を装着することにより、Xe = 10.6 kPa までレーザ出力は増加した。この高繰り返し動作における両予備電離方式の比較結果を、図 4-29 に示す。○で示した UV 予備電離の場合には最大繰り返し数は 1.1 kHz となり、そのときの平均出力は 48.6 W であった。X 線予備電離に比べ、最大繰り返し数が低いのは、Xe 分圧の増加により CR 値が増加し、プロアの最大許容ガス流速により制限されるためである。▲で示した X 線予備電離の場合には、Xe = 10.6 kPa でも 1.4 kHz までの動作が可能であり、平均出力 52.4 W が得られた。同じ繰り返し数で比較した場合には、わずかではあるが UV 予備電離の方が高出力が得られる。また、Xe = 8 kPa では、同図中に●で示すように、500 Hz で Xe = 10.6 kPa を上回り、800 Hz 以上で UV 予備電離を上回って、電源容量の上限である 1.4 kHz において、本実験の最大平均レーザ出力 58.1 W が得られた。このように、1 kHz を越える高繰り返し領域においては、X 線予備電離方式が UV 方式に比べやや有利となる条件が明らかとなった。

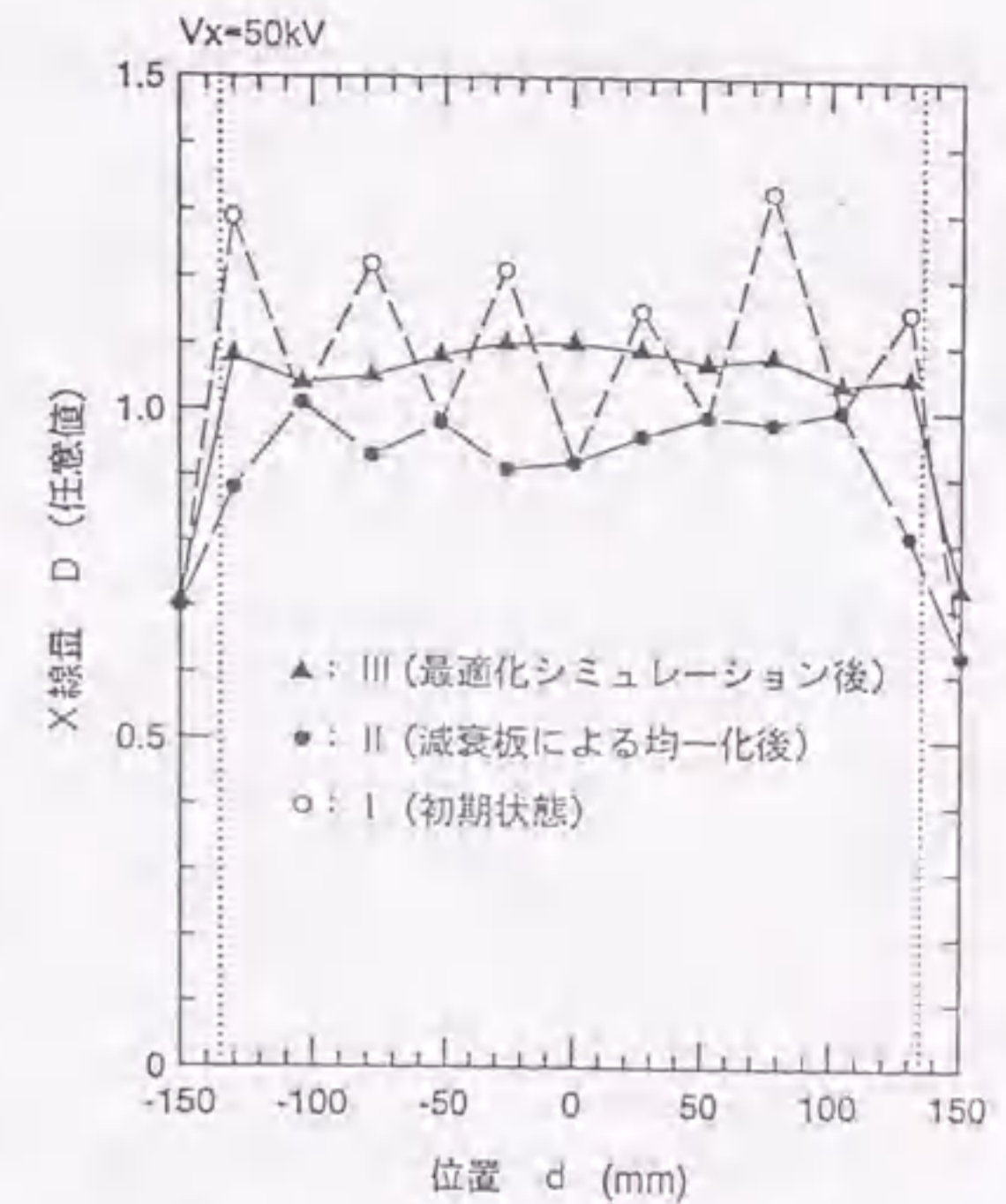


図 4-28 放電空間の X 線量分布

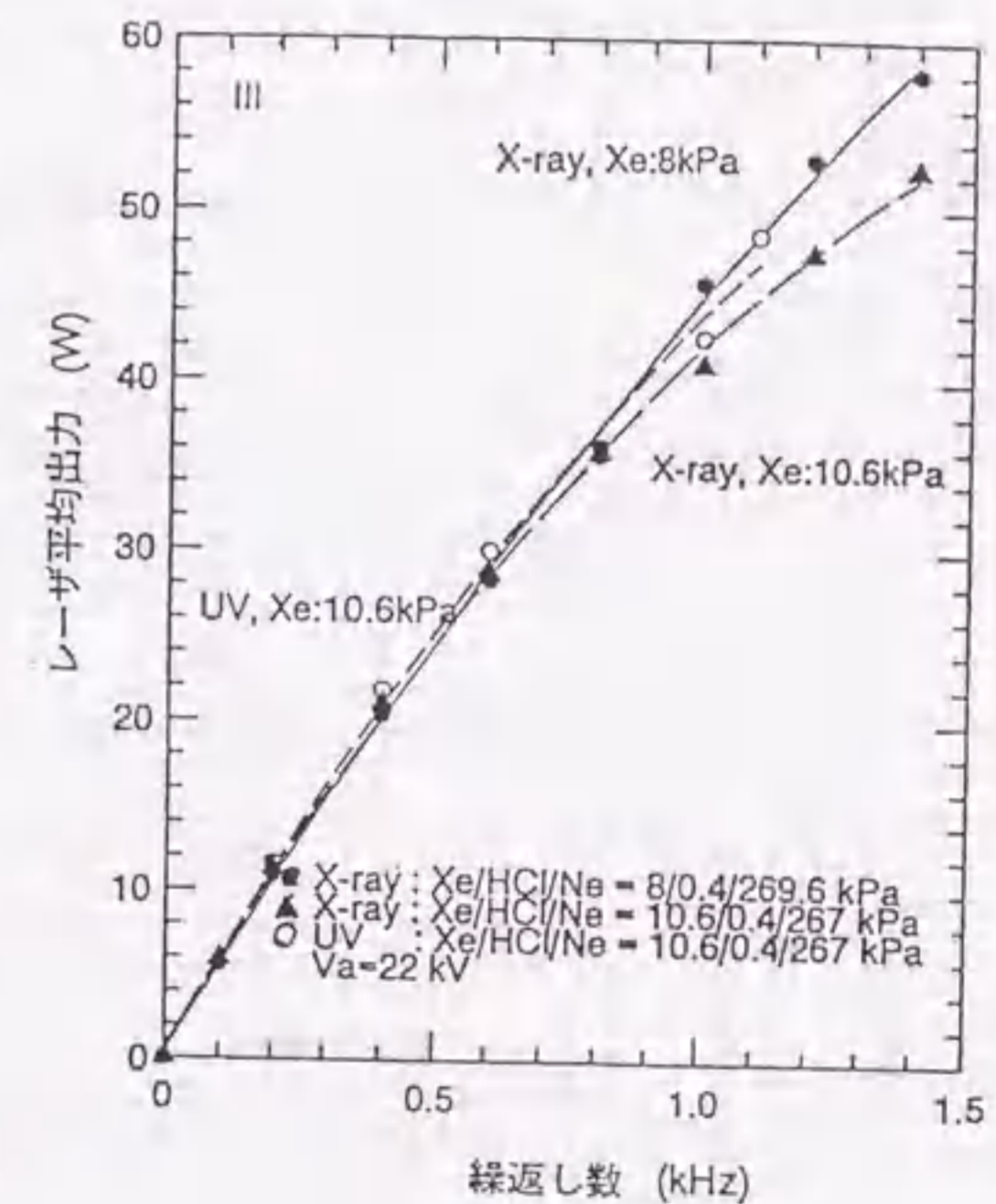


図 4-29 X 線 / UV 予備電離高繰り返し出力特性

4.4.4. X線予備電離による大出力レーザ発振

上述の予備電離強度均一化計算の精度を高め、プログラム化をした。この均一化手法を、500 Wの大出力発振を実現するモデル2装置に搭載可能なX線予備電離放電部に適用した。図4-30に、試作した放電部の構成図を示す。UV予備電離の場合と同様、2組の容量移行型放電部から構成され、比較検討しやすいようにしてある。1組のコンデンサ容量は、主コンデンサ $C_s=32.2$ nF、ピーキングコンデンサ $C_p=29.9$ nFであり、UV予備電離放電部と全く同じ容量とした。また、放電体積も $11(W) \times 23(G) \times 615(L)$ mm³で、UV予備電離放電部と同じとし、主電極背面に直径41 mmの専用X線管を55 mm間隔で12本並べることによって予備電離される。²¹⁾

X線管の透過窓はガラス製、直径36 mmで、これより電極間中央までの距離は60 mmである。主電極は幅50 mmで、アルミニウム材にニッケルメッキを施してあり、形状はErnst型とし、陽極は幅方向中央部を15 mm平坦にした。さらに陽極背面は、長さ640 mm、幅14 mmの部分が中空構造となっており、放電部との隔壁でX線を透過する部分の厚さは1 mmである。実験においては、2組のコンデンサバンクを短絡し、サイラトロン1本(EG&G社HY-3204)で放電点弧させた。図中右側(高反射ミラー側)を#1放電部、左側(出力ミラー側)を#2放電部とする。

X線管は、前に高繰返し装置で使用したもの比べて、窓材およびその形状を改良した。窓材では、ベリリウムが人体に有害であるためガラスに変えた。また、X線の有効取り出しと、線量空間分布の改善を考慮して、これまでのベリリウム窓X線管の窓径30 mmに対し、改良管では36 mmと直径を最大に広げた。

X線管駆動電源については、充電容量のみ13.6 nFから35.2 nFに増加させた。駆動X線管の本数が6本から24本と4倍に増えており、管電圧を昇圧させるため、カソードのヒート方式も、これまでの絶縁トランス方式からバッテリー方式に変えた。絶縁トランス方式では、トランスを含めた回路の浮遊容量が増大し、本電源容量では昇圧する余裕がない。これに対し、バッテリー方式ではX線管の近くにこれを設置できるので、浮遊容量が低減される。バッテリーは、X線管12本に対して、2 V

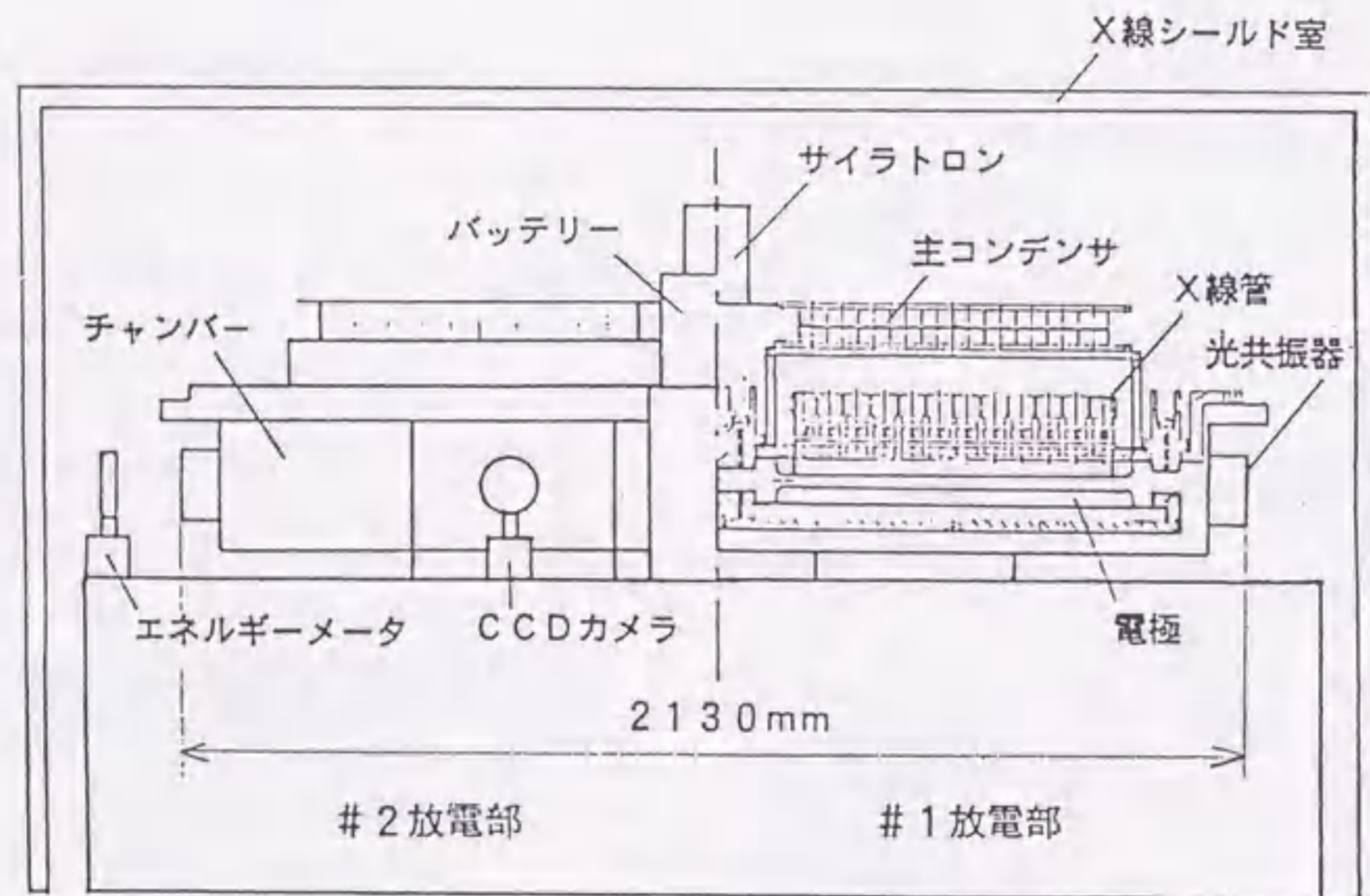


図4-30 モデル2装置用X線予備電離放電部の構成図

の単セル(ブリヂストン社BCセル)を9本組み合わせ18 Vとし、これを2組用意して、使用後は交換し急速充電を行うようにした。この結果、ヒータ電流は13.8 Aとなり、充電電圧27.5 kV時の管電圧は38~42 kVとなった。

分割X線予備電離方式では、複数のX線を用いるため、X線量の空間分布の不均一が発生する。そこで、以下に示すシミュレーション手法により、この放電部のX線量強度分布を計算し、X線管の並び替え、減衰板の挿入によりさらに高い均一化を図った。

放電部における空間分布の計算は、次の手順で行った。

- 電極透過後のX線管単体の線量空間分布を、各X線管に関して登録。
- 対象装置に合わせて、X線管の本数、設置間隔を入力し、登録されているX線管を任意の位置に配置する。
- 配置されたX線管の線量を1 mm単位の位置で合成し、放電部X線量の空間分布を出力する。
- 放電部平均相対線量(Ave.)と、ここでは以下に定義する不均一率Fを出力する。

$$F = \frac{\text{最大値} - \text{最小値}}{\text{平均値}} \times 100 (\%) \dots \dots (4-8)$$

計算対象領域は端子X線管中央から5 mm外側までとする。

ガラス窓X線管を各12本、55 mm間隔に配置するモデル2装置用放電部(#1、#2)について、まず、線量分布シミュレーションを行った。ここでは、#1側放電部の結果を示す。図4-31に、減衰板未装着の初期状態におけるシミュレーション結果を示す。この放電部での不均一率は、 $F=32.0\%$ であった。

次に、以下のシミュレーションを用いて、X線管の並び替え、減衰板の挿入により、放電部の均一化を図った。

- X線を減衰させるための金属板の形状、厚さ t (mm)、長さ d (mm)を入力、幅は一定(ここでは13 mm)とする。
- 減衰板を挿入した場合において、電極透過後の単体線量空間分布の変化を計算する。このとき(a)で登録したX線管の線量空間分布と、実験データである電極透過後のX線の減衰板透過特性、および減衰板長さ依存特性を用いる。
- 各X線管について、(e)、(f)を行い再登録する。
- 上述したX線量の空間分布シミュレーションの手順(b)~(d)を行い、線量の減少を最少限にして、不均一率Fが減少するように t 、 d を設定するか、X線管を並び換える。

以上の手順により、#1放電部について線量均一化シミュレーションを行った。均一化のために使用した減衰板は、大きさ $13 \times 17 \sim 25$ mm²、厚さ0.3~0.8 mmのアルミニウム板であり、陽極背面の中空部分に装着した。図4-32に、その結果を示す。不均一率Fは、32.0%から17.4%へ大幅に低減した。このときの平均線量の減少分は約7%ときわめて小さい。

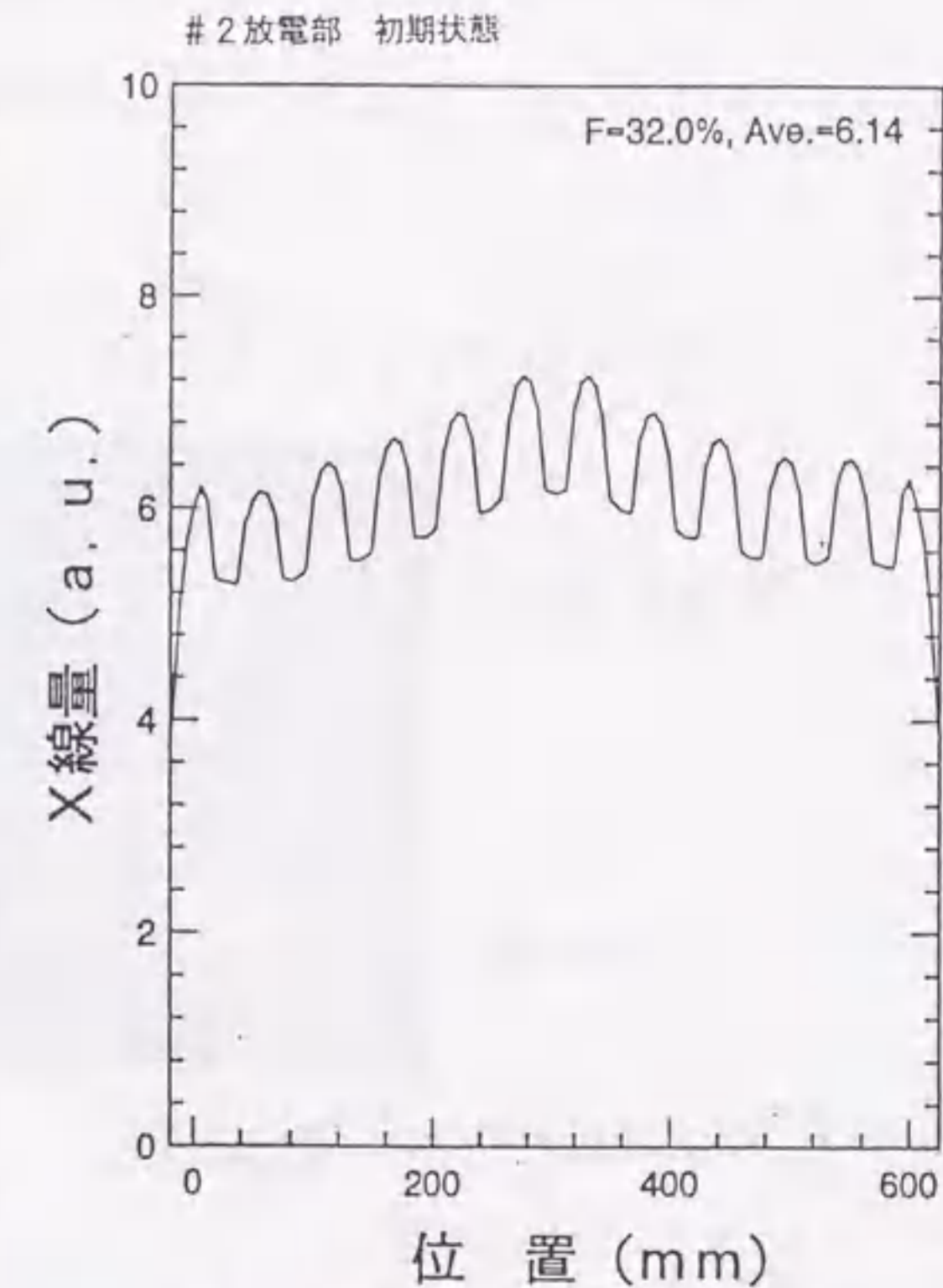


図4-31 予備電離X線初期空間分布

次に、均一化後の効果を調べるため、 $\text{HCl}/\text{Xe}/\text{He} = 0.27/0.93/176$ kPa の混合ガスで、放電状態の観察を行った。図4-33はこの結果であり、左が初期状態、右が均一化後の写真である。初期状態では、X線量の強い部分に対応して放電集中が観測されているが、均一化後は一様なグロー状放電が得られている。X線量の空間分布均一化により、放電中の電流集中はほとんど消滅したことが分かる。

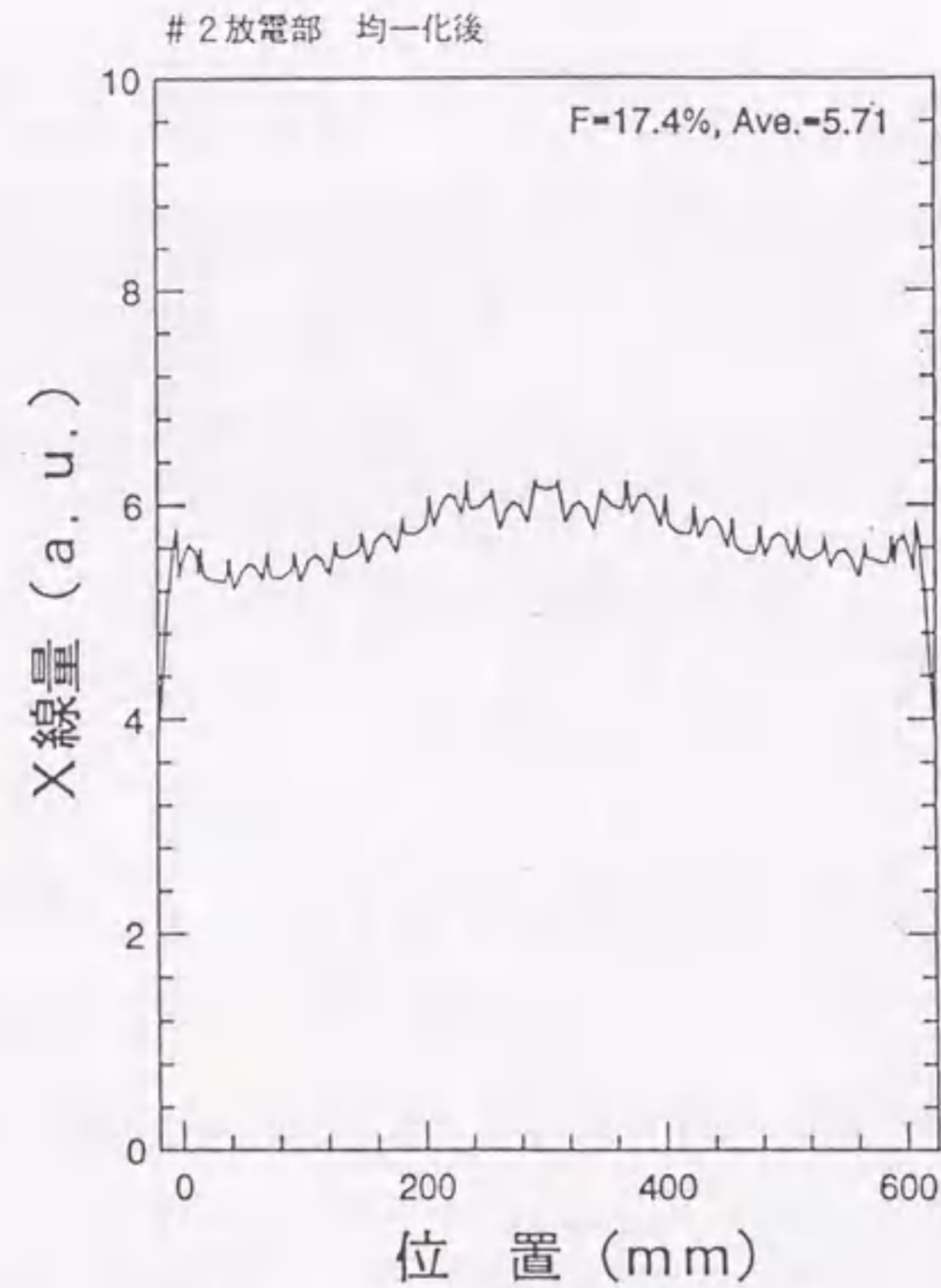


図4-32 予備電離X線均一化後空間分布

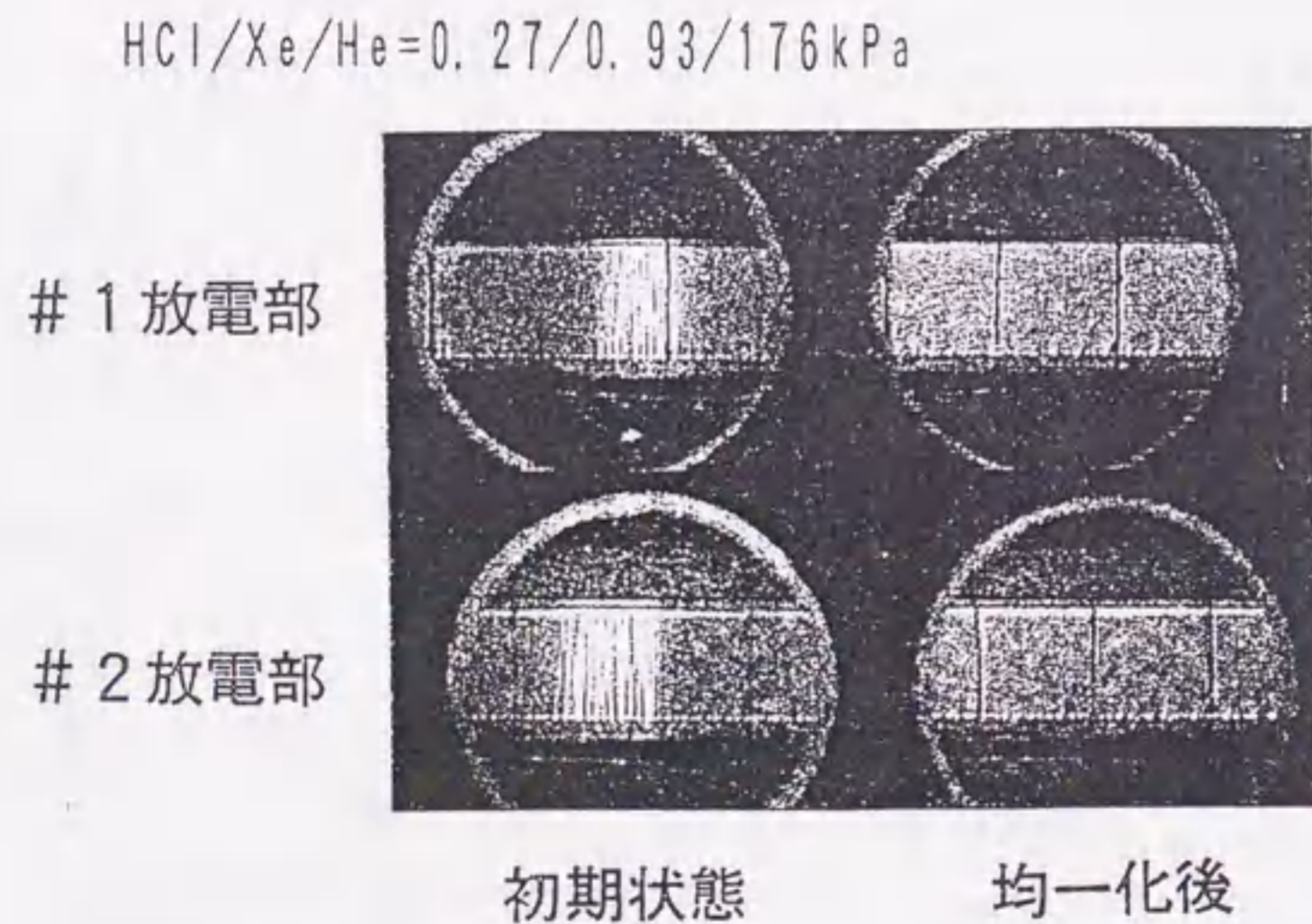


図4-33 X線後空間分布均一化による放電状態の改善

この均一化放電部を用い、同一ガスにおいてX線と放電点弧の遅延時間を100 nsとしてレーザー発振を行った。図4-34に、レーザー出力および発振効率特性を示す。

また、同図には同じ条件にてUV予備電離において得られている特性も示した。これで示されるように、X線予備電離の場合には、UV予備電離と比較して、10~20%程度高い出力が得られていることが分かる。充電電圧23 kVにおけるレーザー出力は、UV予備電離の111 mJ/パルスに対して124 mJ/パルスである。X線予備電離の最大効率は、充電電圧18 kV (入力10.4 J)において0.88%となった。なお、発振効率は主コンデンサに蓄えられたエネルギーに対するレーザー出力の割合とし、X線発生のためのエネルギー13.3 Jは含めていない。

図4-35には、充電電圧 $V_c = 23$ kVにおけるレーザー出力の全ガス圧依存性を示す。実線がX線予備電離、破線がUV予備電離の場合である。基準ガスにHeを追加し、全ガス圧を増加させて測定した。UV予備電離の場合には、全ガス圧 $P = 200$ kPa以上では出力が低下したのに対し、X線予備電離の場合には $P = 250$ kPa以上でわずかに低下した程度であり、出力特性に大きな違いがでている。また、 $P = 278$ kPaにおいては、UV予備電離の1.5倍の出力が得られている。

予備電離条件は、実際には管電圧40 kV、ヒータ電流13.8 Aであった。X線管の単体線量および過去の実験データ、今回のシミュレーション結果から、放電部のX線量を算出すると0.8 mRとなった。1 mR以下の線量でも高出力が得られたのは、分布均一化の効果と考えられる。同様に、1~2 mR/100 nsの低

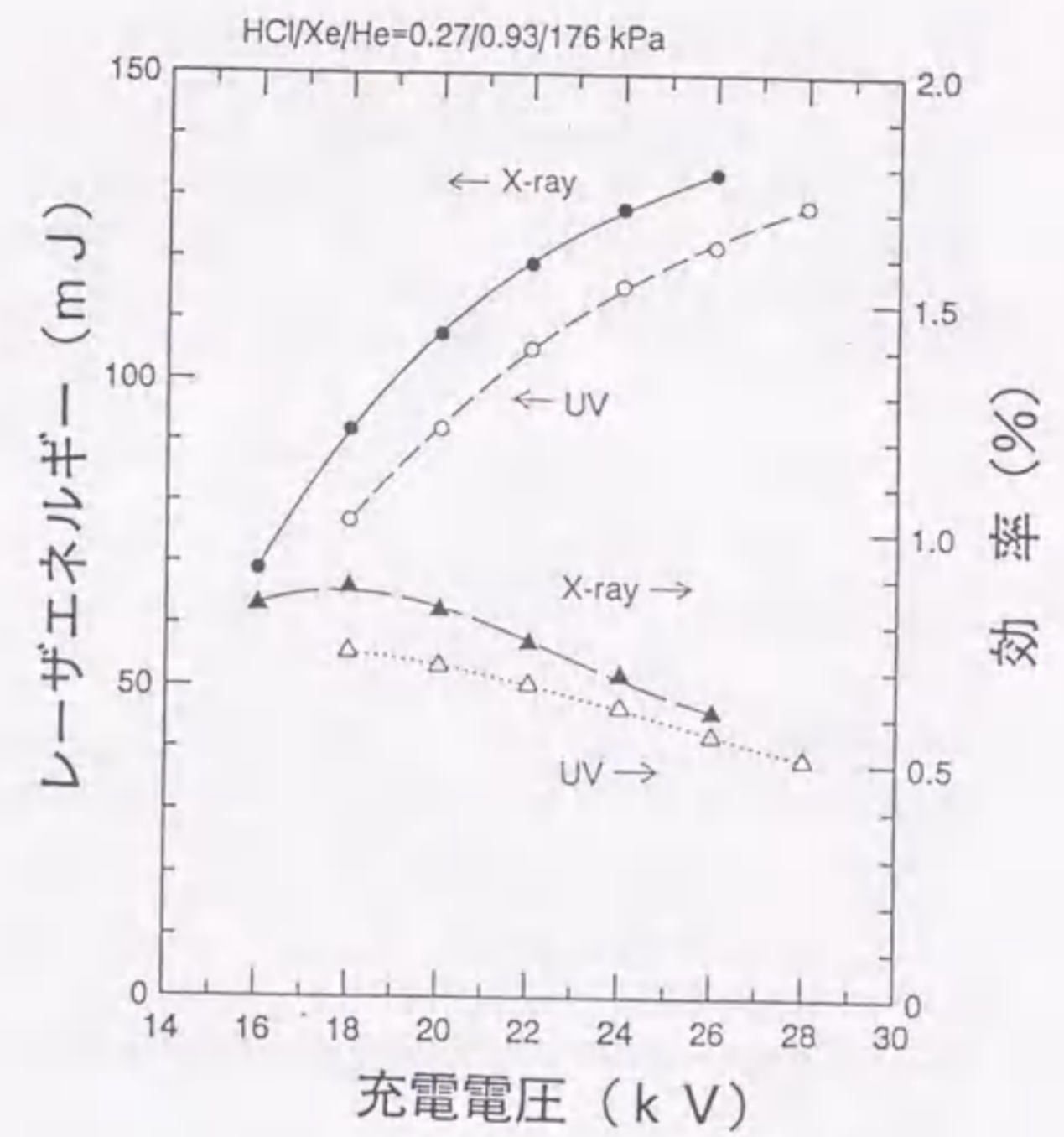


図4-34 X線/UV予備電離の比較

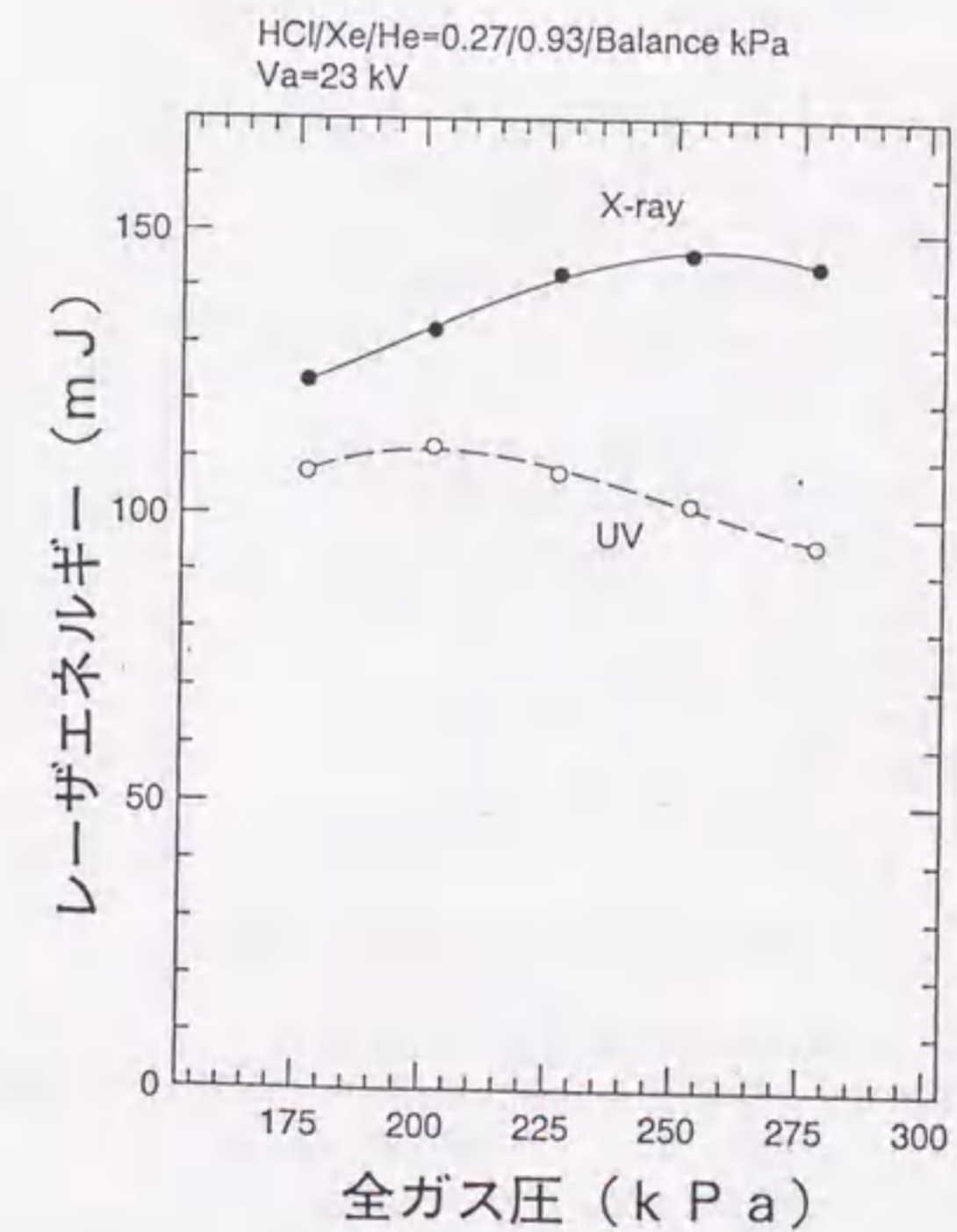


図4-35 X線/UV予備電離のレーザー出力特性比較

線量でも安定放電が得られたとの文献報告が出され、ここでも“X線照射の空間的な高い均一性による寄与”がきわめて有効と推察している。その他の文献報告では、多くの場合 100 mR を越えるものが多く、あまりその均一性を論じたものはない。また、分布均一化の結果、予備電離電子が均一化するのに要する時間と考えられる最適遅延時間が、従来の $\sim 1 \mu\text{s}$ に比べて 100 ns 程度に短縮されたと推測される。この短縮により、ハロゲンへの電子付着による予備電離電子数の減少が抑止され、低線量予備電離が可能になったとの推察ができる。^{22) - 30)}

4.5. 放電技術、その他

4.5.1. 放電技術

電極形状に関しては、エキシマレーザ放電部に従来から一般的に用いられてきたものとして、Chang 型、Ernst 型などがある。これらはどちらも、電極表面の電界分布を一様にするを主眼に設計されている。しかし、実際には電極表面だけでなく、放電空間全体の電界分布を一様にするのが重要と考えられる。放電空間の電界分布については、表面電荷法により電極表面とギャップ中央のみの電界計算を行った例がある。以上より、空間の電界を考慮して電界計算を行い、Ernst 型($k=0.3$)において電極中央部を 3 mm 平坦にした、もっとも簡単な新形状の電極を製作した。新電極は複数の関数を組み合わせた形状であるため、複合関数形状電極 (以下、複合電極) と称することにする。^{31) - 36)}

電界計算は、空間の電界分布を把握するために 2 次元有限要素法を用いた。今回の電界計算では、電極形状の違いによる放電部の中央付近における電界分布に着目しているため、主電極の形状のみを入力して比較した。入力した電極の寸法は、幅 30 mm、高さ 15 mm、主電極間ギャップは 23 mm である。電極の設定電圧は、これに合わせて検討が容易に行えるように、一方の電極を 23 kV、他方の電極を 0 kV とした。

図 4-36 は、電界強度分布を以上の方法により計算した放電部の概略図である。電極中心から横方向 (ガス流の方向) の位置を X、下側の電極表面から放電方向の位置を Y とし、それぞれ横軸、縦軸としている。

図 4-37 左は Ernst 型電極、図 4-37 右は複合電極での電界強度分布である。図 4-37 の各電界分布曲線は、図 4-36 に示したギャップ間の各位置における値に対応する。ここで、例えば $Y=11.5 \text{ mm}$ は、ギャップ中央部の電界分布である。図 4-37 左の Ernst 型電極では、放電領域全体 ($Y=0.1 \text{ mm} \sim 11.5 \text{ mm}$) にわたり、電極中心 ($X=0 \text{ mm}$) 付近での電界が最大となった。一方、図 4-37 右の複合電極では、電極表面付近 ($Y < 2.5 \text{ mm}$) の電界強度は 2ヶ所 ($|X|=4 \text{ mm}$ 付近) のピークがあるが、ギャップ中央方向へ進むにつれ電界強度のピーク値は電極の中心 ($X=0 \text{ mm}$) 付近に移り、Ernst 型の場合とほとんど変わらなくなる。

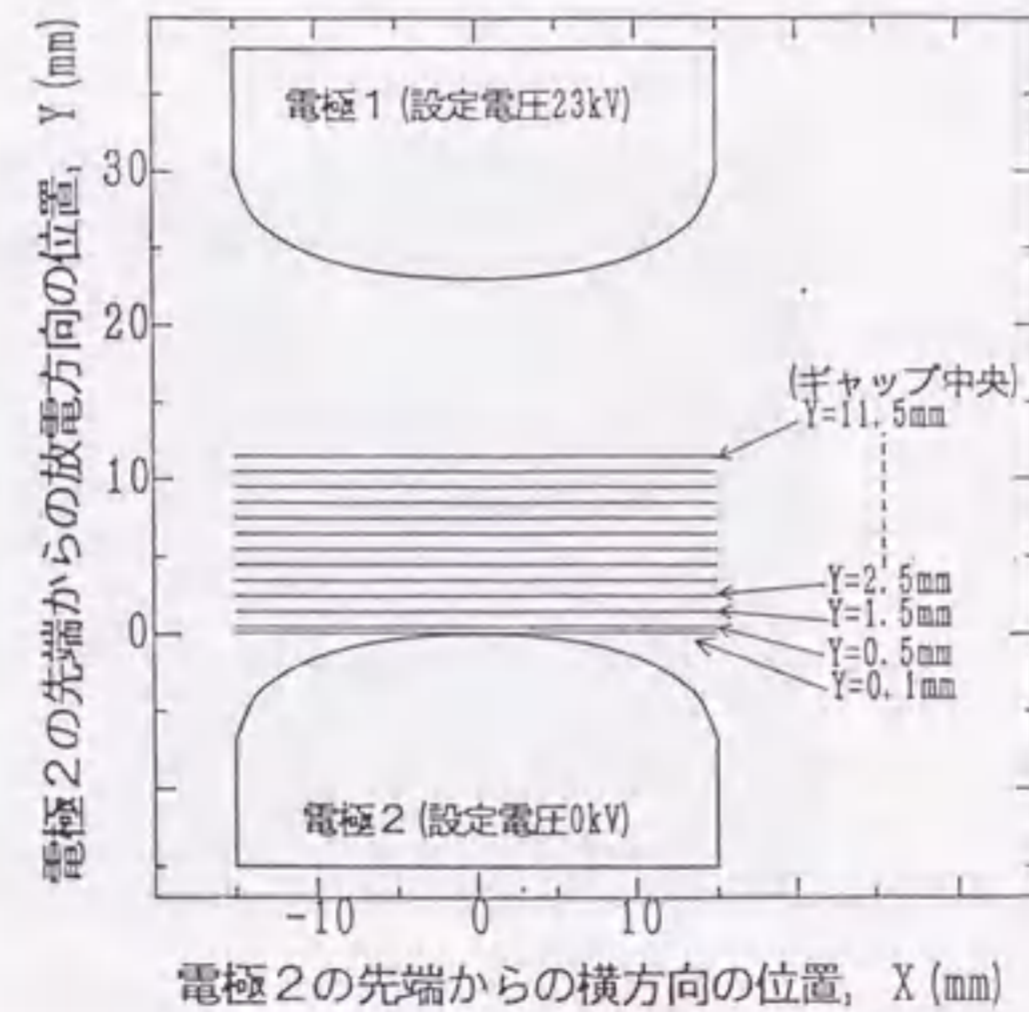


図 4-36 放電部の電界分布計算位置

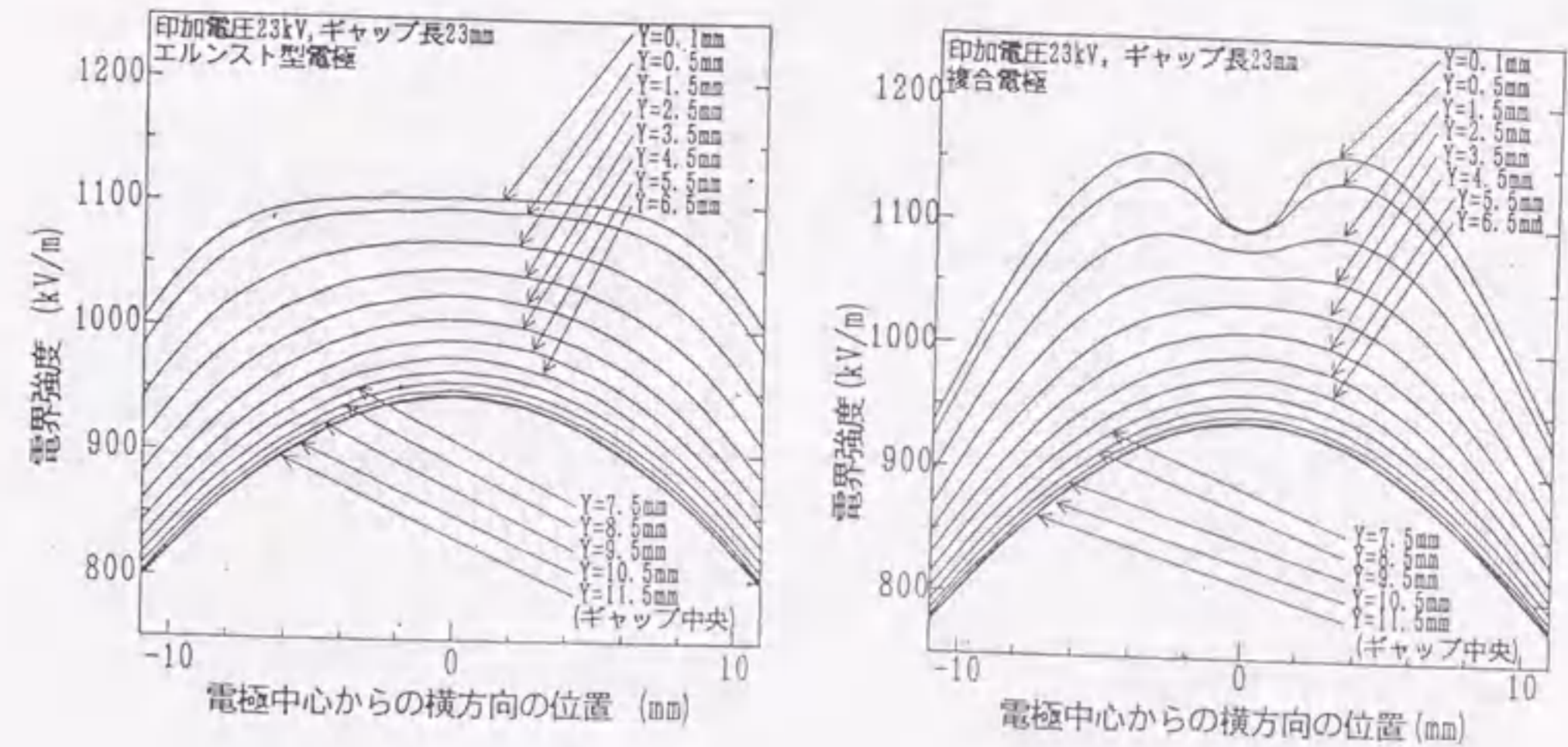


図 4-37 Ernst 型電極と複合型電極の電界強度分布

図 4-38 は、図 4-37 の結果をギャップ中全体におたって積算し、平均電界を計算した結果である。放電幅に相当する領域 ($|X| < 4 \text{ mm}$) では複合電極の方がはるかに電界が均一になっており、放電の高安定化が期待される。

実験装置では、長さ 220 mm の電極による 5 kHz の連続放電と、長さ 460 mm の電極による 3 kHz までの連続発振および、1 kHz の長時間発振を行った。表 4-8 に、放電実験と発振実験を行ったときの、放電部および電源の各仕様を示す。予備電離電極は、主電極中央から 43 mm の距離で主電極に沿って両側に 20 mm 間隔で配置されている。放電励起回路を図 4-39 に示す。高速スイッチング装置により生成された電圧パルスが、磁気パルス圧縮装置 (MPC 装置) で急峻になり、放電部に印加される。連続放電および連続発振時の充電電圧は 22 kV、ガス成分は、モデル 2 装置の高線り返し発振実験と成分比を合わせるため、 $\text{He} 1 / \text{Xe} / \text{He} = 0.09 / 0.53 / 176 \text{ kPa}$ とした。

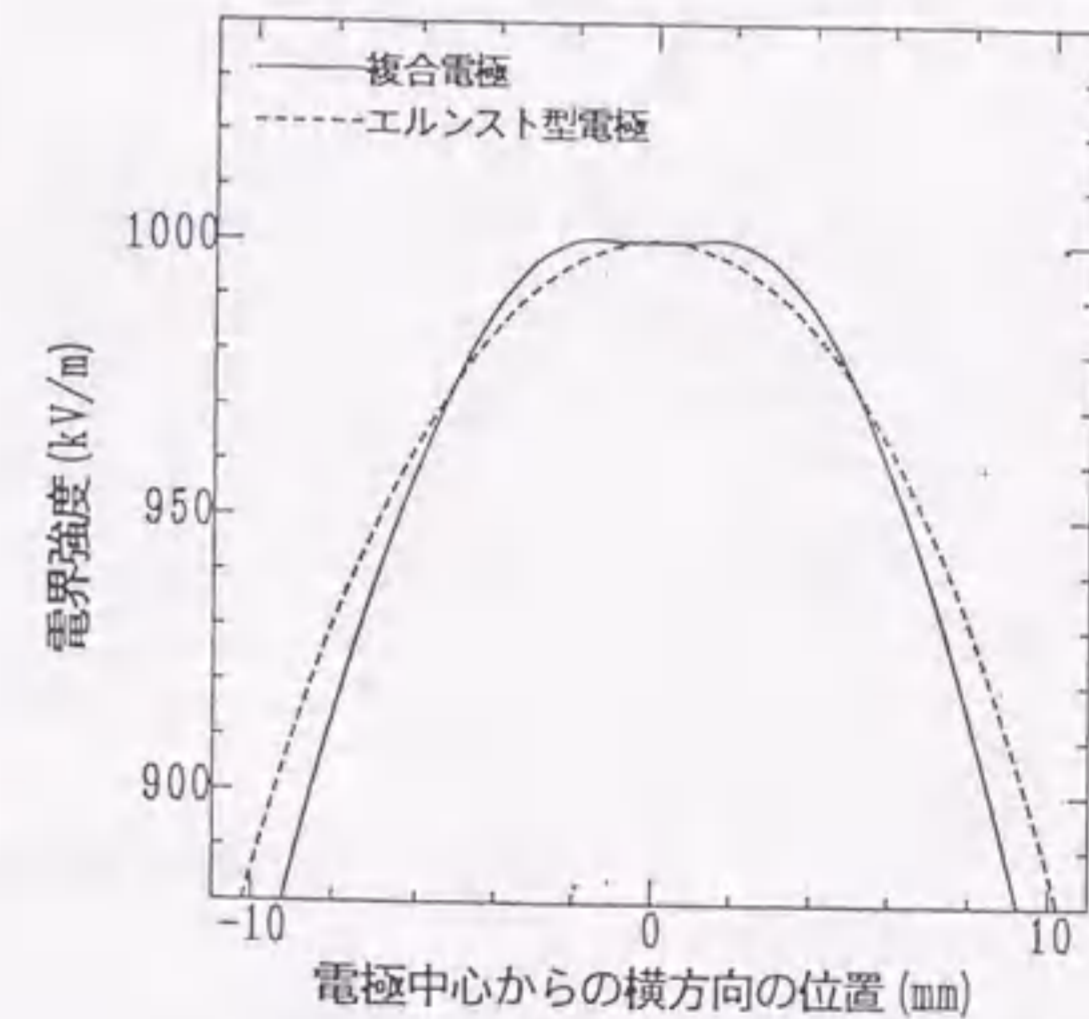


図 4-38 平均電界強度分布

表 4-8 放電部と励起電源の仕様

実験条件		放電実験	発振実験
放電部	ギャップ長	23 mm	23 mm
	電極長	220 mm	460 mm
	放電長	160 mm	400 mm
	予備電離放電数	9ヶ所	37ヶ所
励起電源	スイッチング装置	MAGT/サイラトロン	サイラトロン
	充電コンデンサ容量 Cs	5.1 nF	18.7 nF
	スイッチとMPC間のケーブルの容量 Cc	1.2 nF	1.2 nF
	MPC入口コンデンサ容量 C1	3.4 nF	17.0 nF
	ピーキングコンデンサ容量 Cp	4.3 nF	17.6 nF
最大繰り返し数		5 kHz	3 kHz

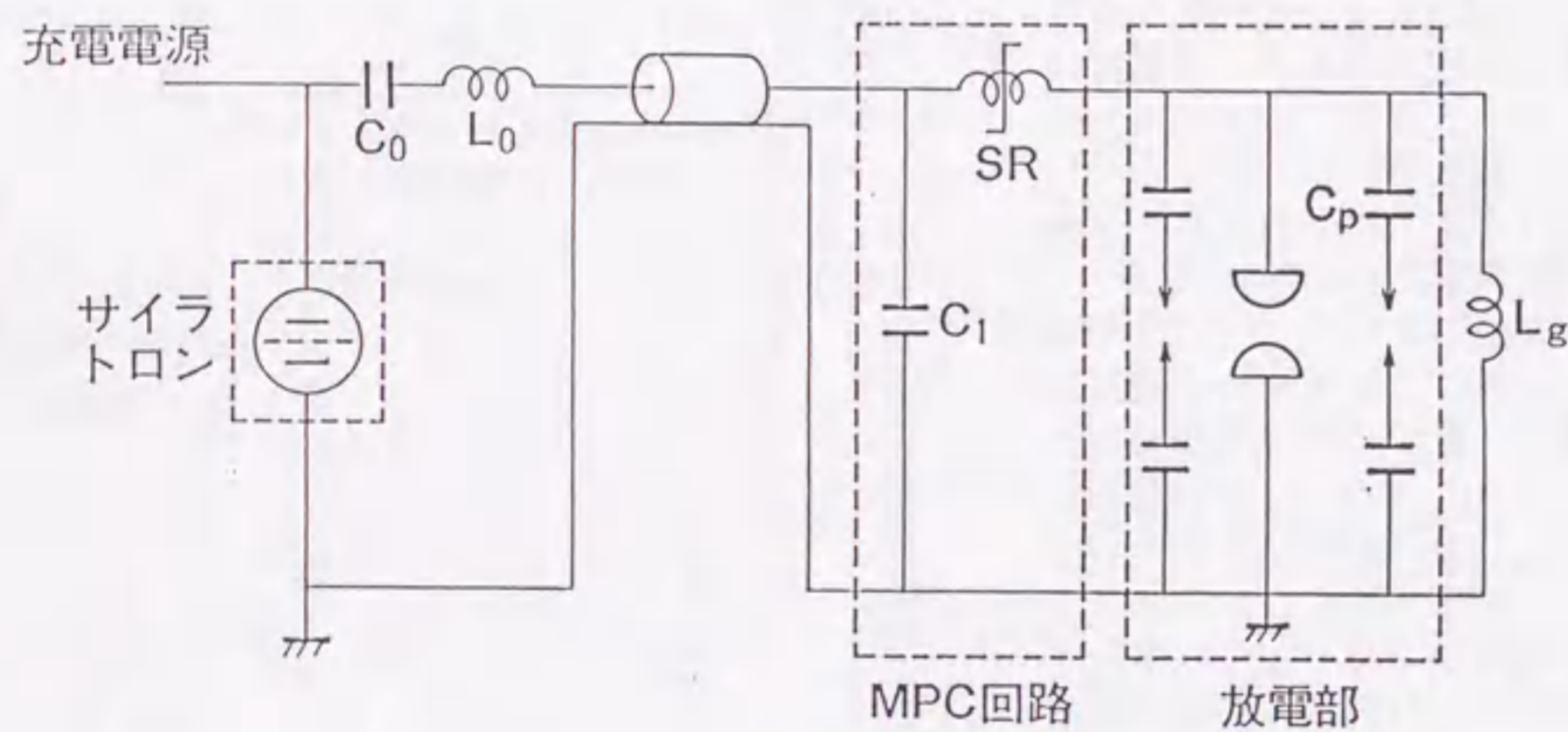


図 4-39 放電励起実験回路

連続放電での実験結果では、長時間運転の限界は、放電部内の各部分の温度上昇により決まると考えられる。そこで、この見通しをつけるため、1 kHz~5 kHz で連続放電を行い、ピーキングコンデンサ表面の温度変化を測定した。図 4-40 は、1 kHz、3 kHz で 10 分間連続放電させたときと、5 kHz で 6 分間放電させた時の、ピーキングコンデンサ表面の温度上昇である。これより、各繰り返し数での温度上昇は、1 kHz で 4 °C、3 kHz で 6.5 °C、5 kHz で 9 °C であり、全てが測定した時間内に飽和している。前には 10 °C の上昇があり問題としたが、この場合にはコンデンサ容量の減少は少ないため、ピーキングコンデンサの温度上昇が長時間運転を妨げる主原因にはならない。電極等にも、とくに異常はみられなかった。

次に、連続発振実験として、新たに開発した電極と従来型電極との比較を行った。図 4-41 は、単発振出力の充電電圧依存性、図 4-42 は、繰り返し発振出力の繰り返し数依存性である。図 4-41 で、充電電圧が低いと、出力は Ernst 電極の方が高いが、充電電圧を高くすると、複合電極の方が出力は大きい。また、図 4-42 でも、例えば繰り返し 3 kHz での出力を比較すると、複合電極での出力は Ernst 電極での出力より 29 % 大きく、複合電極の優位性が確認できた。

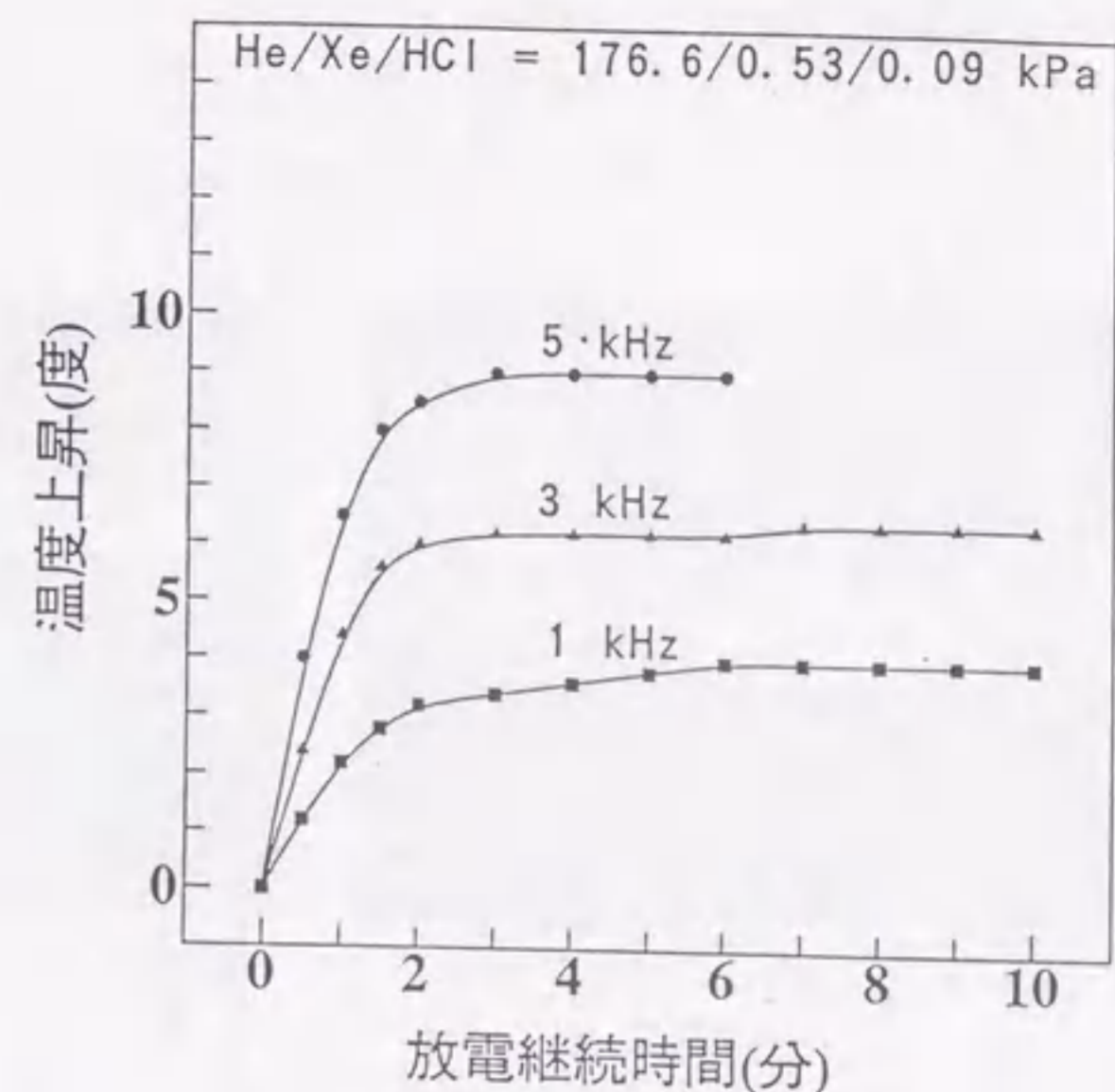


図 4-40 ピーキングコンデンサ表面の温度上昇

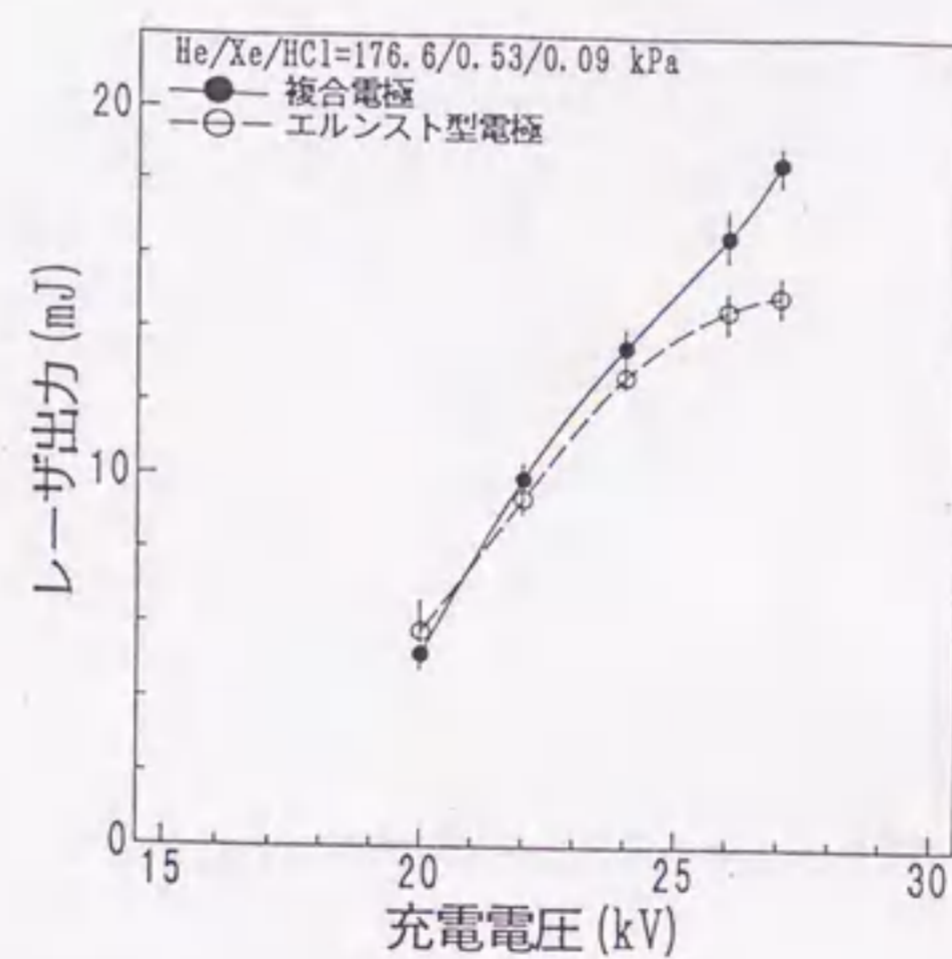


図 4-41 単ショット発振出力の充電電圧依存性

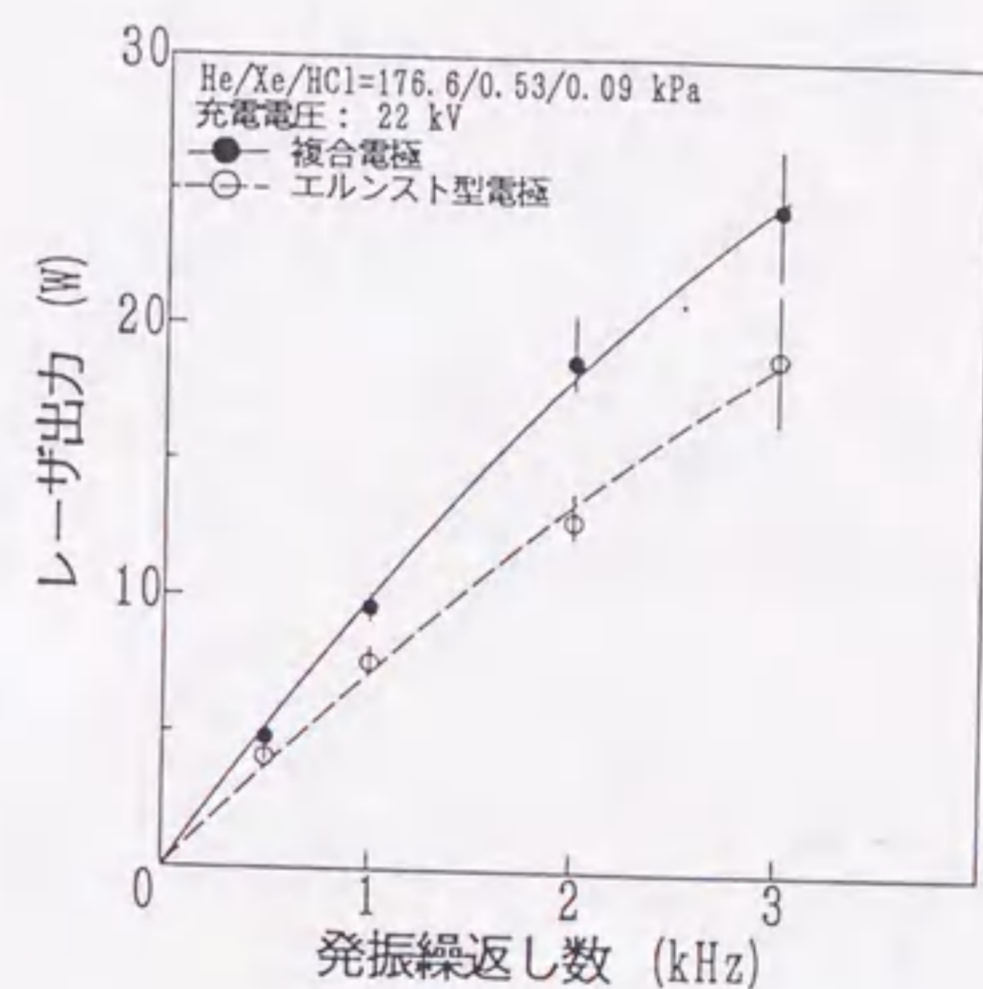


図 4-42 発振出力の繰り返し数依存性

4.5.2. 衝撃波ダンパ

従来よりエキシマレーザの高繰り返し化を阻む一つの原因として衝撃波が考えられている。レーザガスを励起するためにパルス放電を行うと衝撃波が発生するが、レーザ発振の繰り返し数が上がって放電の間隔が短くなると、この衝撃波が十分に減衰する前につぎの放電が行われるようになる。この衝撃波によるガス密度の粗密がアーキングを誘起する可能性があるため、次の放電時にレーザガスを均一に励起することが困難になると考えられる。これまでエキシマレーザの放電部で発生する衝撃波に関する国内外の研究は少なく、放電部での衝撃波と放電現象の関係は明らかになっていない。

そこでエキシマレーザの放電部スケールモデルを内蔵し、視測窓を持つ可視化用のチャンバ内にて、Heガス中で放電を行い、そのとき生じる衝撃波をシュリーレン法により可視化し、衝撃波の形成状況を観察した。同時に衝撃波ダンパの効果についても可視化により明らかにした。主放電電極が取り付けられている上下の壁面には、図4-43に示す多孔の波型板を使った衝撃波ダンパが取り付けられるようになっており、この放電部モデルを可視化チャンバ内に設置して実験を行った。ガスはHeを使用し、圧力は133 kPaとする。

図4-44に可視化方法を示す。閃光時間が半値幅で75 nsと短いストロボを光源としてシュリーレン法により放電電極間を可視化する。写真はCCDカメラとデジタルメモリ、VTRを使用して撮影する。デジタルメモリはストロボの発光時にCCDカメラに写った画像を一時的に記録するために使用される。放電後、任意の時間にストロボを発光させそのときのシュリーレン像をCCDカメラとデジタルメモリを使用して撮影し、VTRに記録する。放電後ストロボを発光させるタイミングはリターダーを使用して調整する。このような放電実験を繰り返し行い、遅延時間を変えて撮影していくことで連続したビデオ画像が得られる。なお、衝撃波の観察は衝撃波ダンパを使用しなかった場合とアノード側に衝撃波ダンパを取り付けた場合について行った。^{37) - 38)}

図4-45(a)に、この実験結果放電後9 μs時点でのシュリーレン写真を示す。左右の予備電離ビンの回りには円形の衝撃波が発生していることがわかる。また、中央の主放電電極からも衝撃波が発生している。図4-45(b)に放電後24 μs後のシュリーレン写真を示す。この2枚の写真は上のアノード側に衝撃波ダンパを取り付けた状態で撮影した。シュリーレン法では、ガス密度の粗密は写真の濃淡で観察できる。予備電離ビンから発生した衝撃波は、上下の壁面で反射されているが、衝撃波ダ

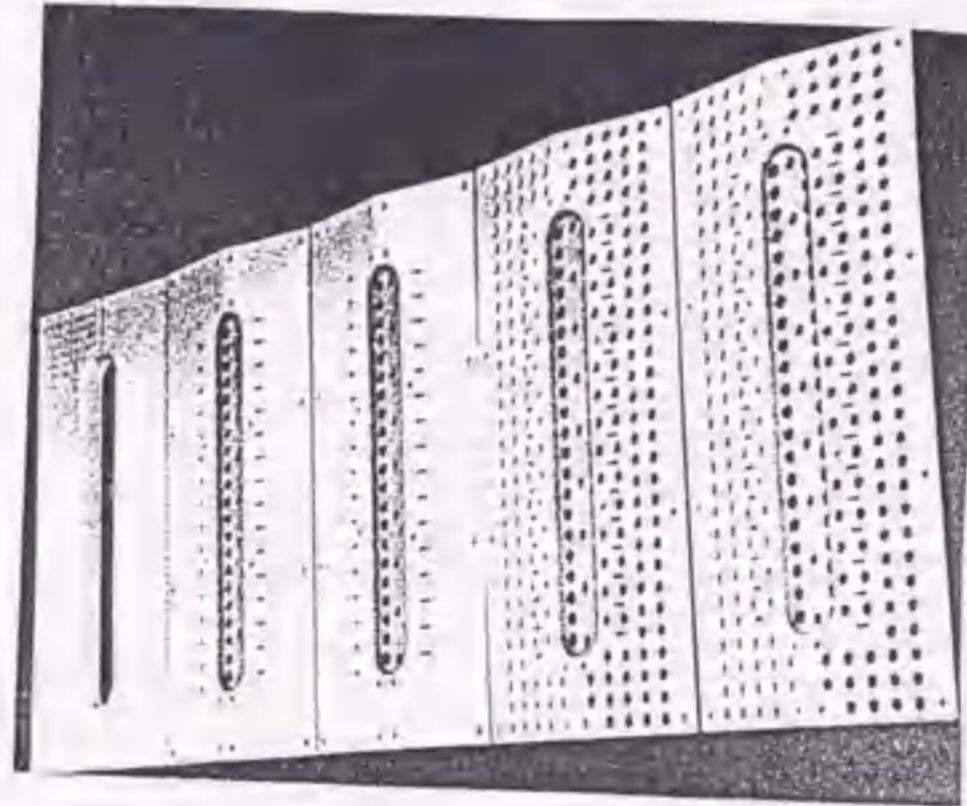


図4-43 ダンパの外観写真

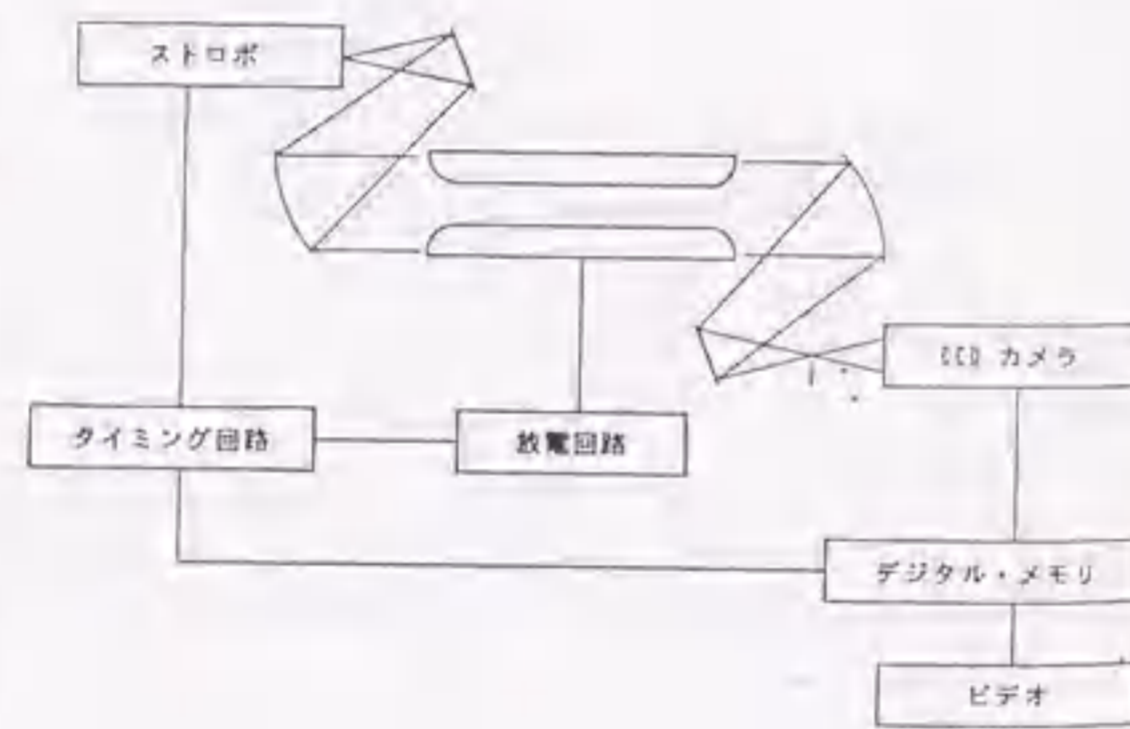
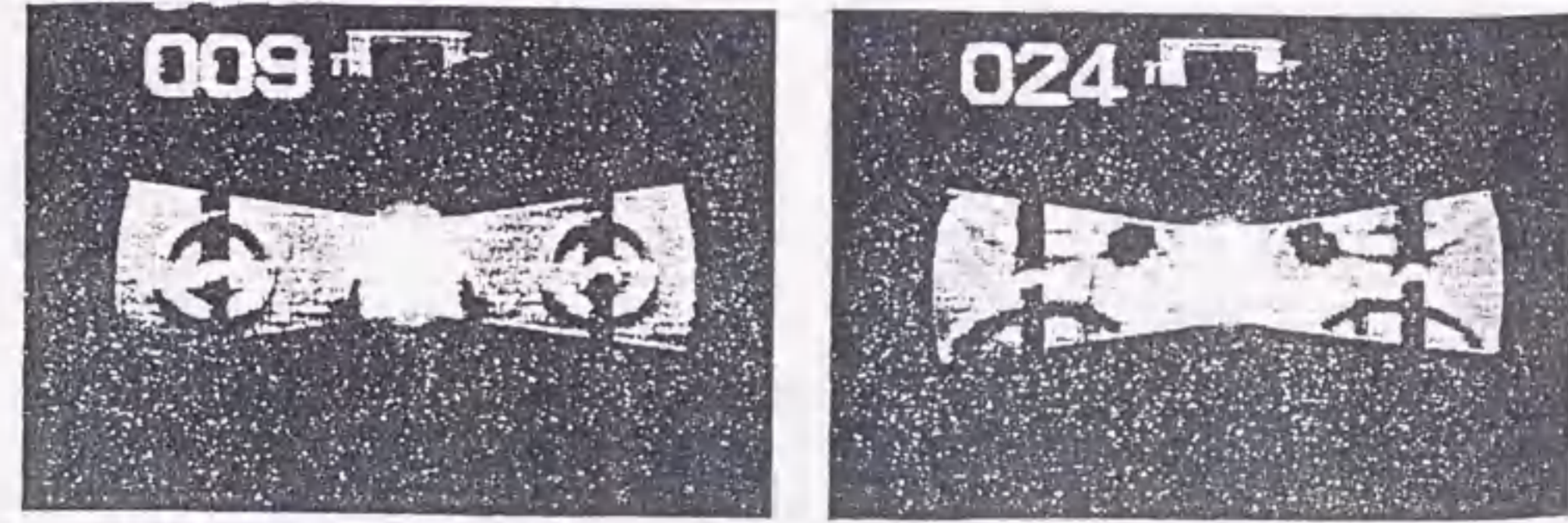


図4-44 シュリーレン法の測定法

ンパの取り付けられている写真上の壁面からの衝撃波は、写真下の壁面からの反射衝撃波よりもガス密度の粗密が小さいことがわかる。この写真より、開発した衝撃波ダンパが放電部のガス密度変化の均一化に非常に有効であることがわかる。また、その他の写真から、放電部には主放電電極の表面から発生している衝撃波、主放電空間から横に広がっていく衝撃波が発生していることが明らかになった。



(a) 放電後9 μsec後のシュリーレン写真 (b) 放電後24 μsec後のシュリーレン写真

図4-45 ダンパによるガス密度揺らぎの低減

ンパでは、設置位置とチャンバの構造が最も重要である。設置位置についていくつかの提案があり、放電部近辺の壁面に取り付けると効果的であるとも言われている。本開発でも、これが定性的に効果のあることを確認した。また、ダンパの設置によって、繰り返し数500 Hzで50%ものレーザ出力向上があったとの報告もある。これには、圧力変化を放電の中心より90 mmの位置(ダンパを取り付けた反対側の壁面)で測定し、ダンパにより圧力変化の減衰が早くなったと述べられている。

ダンパの役割で重要な点は、測定箇所での圧力振幅を減衰させるのではなく、主放電空間の密度揺らぎを減じることである。衝撃波(密度揺らぎ)の発生源は放電部であり、放電部から密度変化が周辺に伝わっていく。そのため、ダンパの役割は、単に衝撃波を吸収することのみでなく、放電部から発生した衝撃波が再び放電部に戻らないようにすることである。音波の場合、密度揺らぎは周波数と音速の関係で求められるので、周波数によっては放電部の密度揺らぎにほとんど影響しない場合もある。音波の波長λは、速度aと周波数fからλ=a/fで求められ、波長λが放電幅、あるいは放電電極長のオーダーになると、放電部領域での密度揺らぎが定在波の発生で大きくなり、放電集中をさらに増大させ引き起こすと予想される。

本開発のエキシマレーザでは、使用しているガスの大半はHeであるため、音速aは約1,000 m/sで、λが放電幅10 mm程度になると周波数fは100 kHzである。放電長1 mの場合では、周波数fは1 kHzになる。これらの周波数以上の圧力変動があるとき、放電部には圧力振幅に比例したガス密度の揺らぎができる。音波の場合、ガスは断熱変化するので圧力変化ΔPによる無次元密度変化Δρ/ρ₀は次式で表される。

$$\Delta \rho / \rho_0 = (1 + \Delta P / P_0)^{1/k} - 1 \dots \dots \dots (4-9)$$

ここで、ρ₀、P₀はそれぞれ基準密度、圧力、kはガスの比熱比である。これについて、静止したCO₂レーザ用ガス中で繰り返し放電を行い、密度揺らぎをマイケルソン干渉計により測定し、均一放電の得られる密度揺らぎの限界値を求めた例がある。その結果、わずか1.8%のΔρ/ρ₀によりアーキングが引き起こされるとしている。これをHeパuffアのエキシマレーザに適用すると、3%の揺らぎに相当する。

この放電によって生じる密度の揺らぎが、放電部において実際の程度であるのか定量的に見積もるため、レーザ光取出し窓から放電部の近傍まで圧力センサを挿入して、圧力変化の測定を行った。これは、放電エネルギー70 J/リットル、ガス圧力146 kPa (Xe/He=13/133 kPa)で測定した。放電部近辺での圧力変動すなわち密度の揺らぎは比較的小さいが、放電部の上流側150 mmの位置では非

常に大きな密度変化を示した。これを図4-46に示す。この密度揺らぎは、放電部からの衝撃波の影響で大きくなったと考えられる。

光軸上での測定値と放電部の上流での測定値との違いは、ヘルムホルツの重ね合わせの原理より理解できる。すなわち、光軸上の圧力センサから放電部を見た場合、衝撃波や音波の発生源である放電部の面積は小さく、一方、放電部の上流側センサからは、放電部の面積ははるかに大きく見える。ある点の波の振幅は、衝撃波や音響波を放射する点からの波の重ね合わせになるので、ガス流方向にはより強い波が伝播し、光軸方向は弱い。測定結果から、光軸上に伝わっていく密度変化の振幅値は18%以下であり、流路方向に伝わっていく密度変化の振幅は6%にも達していた。また、光軸方向、流路方向とも、測定値は100 kHz以上の高い周波数で、波長は放電幅を10 mmとした計算値に良く一致していた。以上より、本開発のモデル装置においても、流路方向に伝搬する衝撃波・音響波が、放電部に再び戻らないようにすることが重要となる。

ダンバの性能を検証するには、放電を行って衝撃波を発生させ、それがダンバより反射してくる衝撃波の量、すなわち密度変化の減少割合を測定すればよい。この測定は、比較的放電ノイズの影響を受けにくいレーザシュリーレン法を用いて行った。ガスの屈折率 n と密度 ρ との間には、 $n = 1 + K\rho$ の比例関係がある。ここで、 K はグランドストーン・デイル定数である。ガスの屈折率は密度が高い方が大きくなるので、光は密度の高い方に曲がって進む。この関係と幾何光学的な関係を利用すると、レーザスポットの移動した量から、測定区間での積分平均としての密度勾配を計算することができる。さらに、この密度勾配に移動速度を掛け、時間積分すると密度揺らぎが得られる。

$$\rho = \int \rho_x a dt \dots \dots \dots (4-10)$$

ここで ρ_x は測定した密度勾配、 a は音速である。密度勾配 ρ_x は、衝撃波の場合にもおよそ音速で移動するので、音速 a を用いて計算する。音波の移動と密度勾配には方向性があるため、この結果は概算の見積りを与える。

このレーザシュリーレン法を用いて、放電部から10 mm上流にプローブレーザー光を通し、流路方向の密度勾配の時間変化を測定した。図4-47に、密度勾配を積分して求めた密度揺らぎを示す。縦軸は無次元化した密度であり、横軸は経過時間である。密度揺らぎは、放電直後は衝撃波の通過により激しく変動しているが、約0.5 ms後に変動は無くなり、1.5 msで再び小さな揺らぎが現れている。これは、ダンバで吸収し

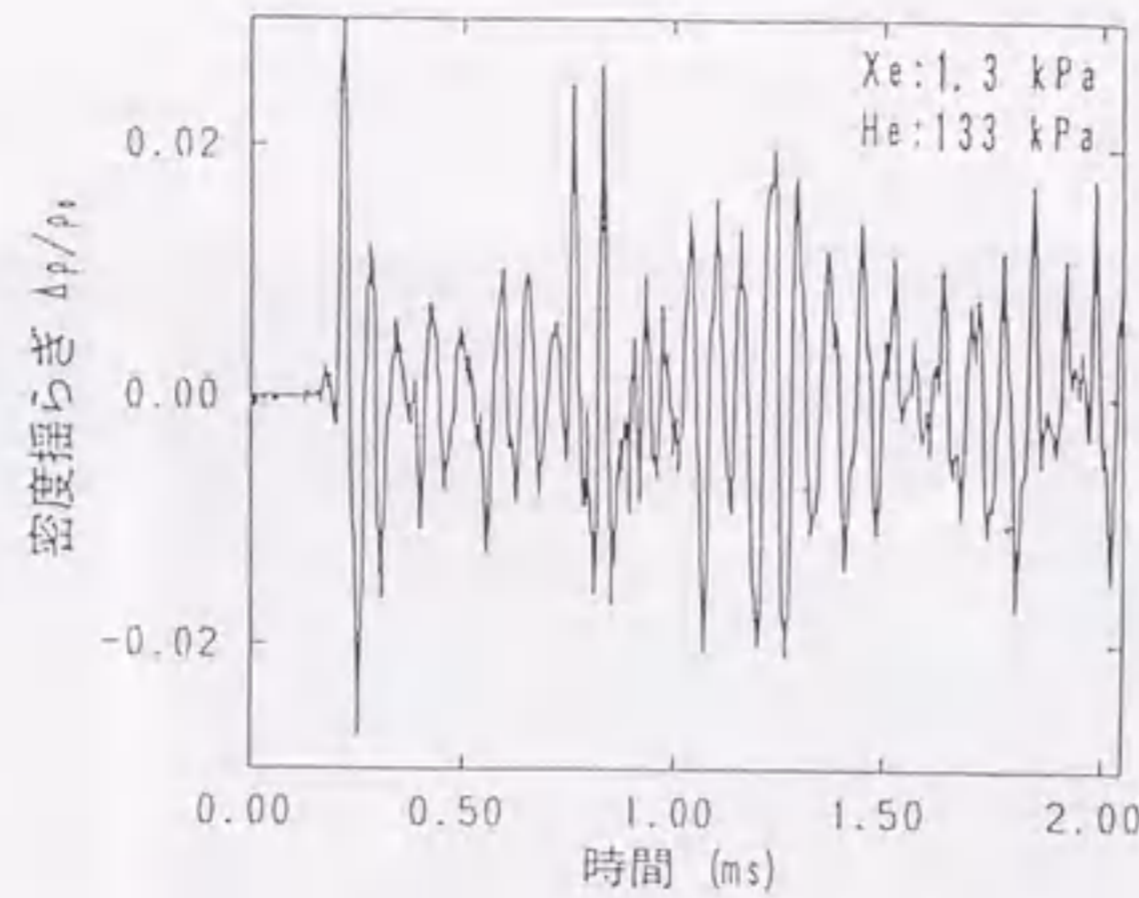


図4-46 放電部上流150 mmでの密度揺らぎ

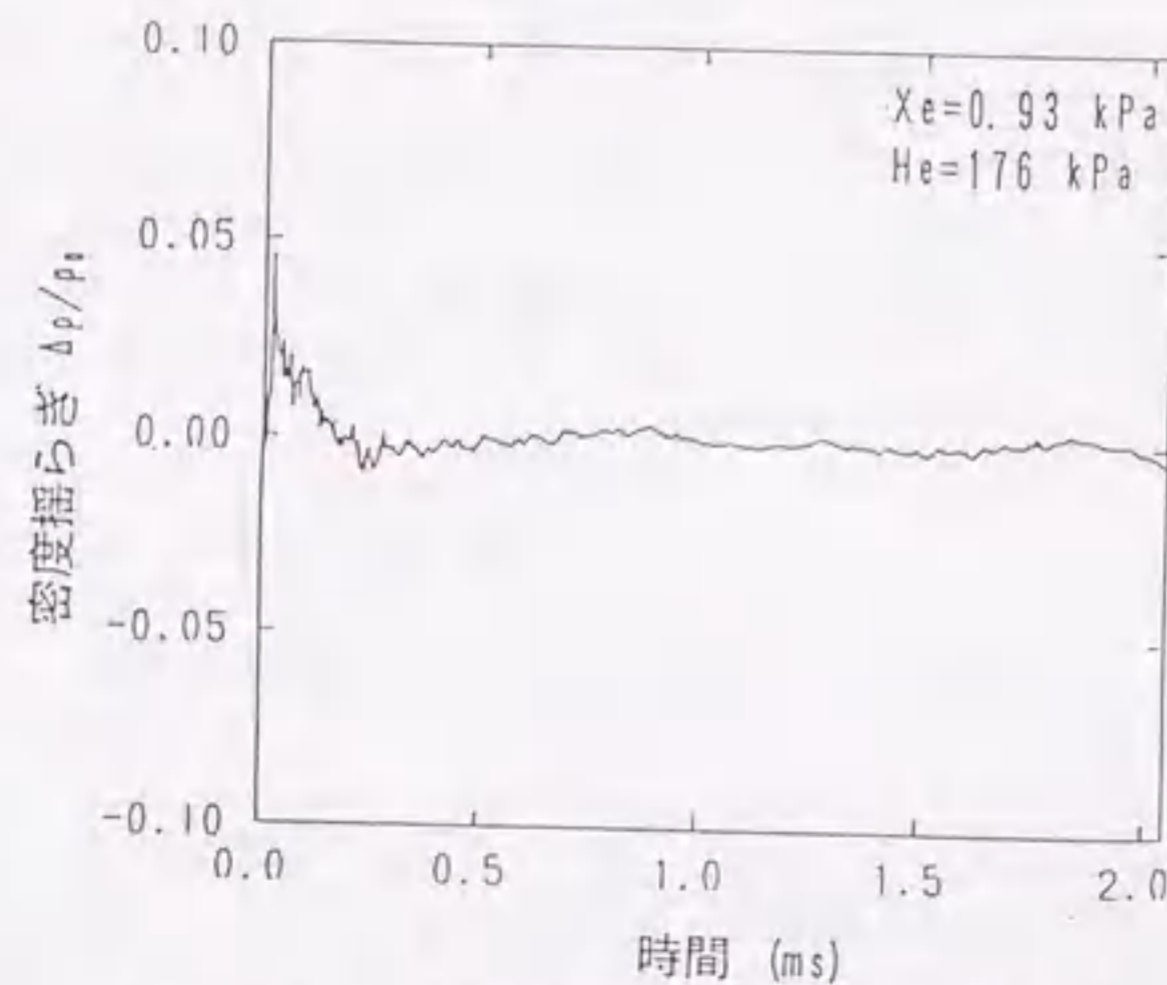


図4-47 シュリーレン法による密度揺らぎ

きれず放電部に戻ってきた反射波である。反射波の密度揺らぎのレベルは非常に小さく、放電部の密度分布にはほとんど影響を与えない程度であった。5 kHzの繰り返しに相当する0.2 msでの密度変化は、文献に示した安定放電に対する許容値1.8%の変動値を下回っている。また、反射波による密度の揺らぎも非常に小さく、ダンバで衝撃波の吸収が十分できたことが分かる。

図4-48に、1 kHzのバースト運転時の密度勾配の測定結果を示す。密度勾配は放電後0.2 msには十分に小さく、放電に影響を与えないと思われる程度になっている。この測定結果からは、文献に指摘するような、放電を繰り返すことにより圧力揺らぎが増大していく現象は読み取れない。これは、ガス流ガイド板の設計やダンバの設置位置が適正であったためと考えられる。

高速プロア動作では、シングルパルス運転では弱い衝撃波しか観察されなかった光軸方向、上下方向（放電電極方向）に定在波動的な波動が発生し、放電部に密度変化が引き起こされる可能性がある。この定在波対策として、放電部のミラー近傍などに衝撃波ダンバを取り付ける方法と、これが放電部から排出され易い構造にすることが考えられる。それらの対策として、前の研究結果を反映させた衝撃波ダンバの改良を行った。この放電部からの排出状態は、放電部近傍の壁面形状によって大きく影響を受ける。

図4-49に、最適化した放電部壁面形状と、従来用いられていた平行壁に対する放電後のガス密度変動の比較を示す。図から分かるように、最適化された壁面形状（縮小拡大ノズル）では、ガス密度変動は急激に減衰していく。

しかし、平行壁を使用した場合には、放電部のガス密度変動は5 kHzの繰り返しに対応する200 μ sを過ぎても十分に減衰していない。ガス密度変動の減衰は、放電部流路形状を放電電極部でもっとも狭くすることにより、大幅に早めることができる。この技術は、同様に光軸方向の衝撃波の減衰にも適用することができる。

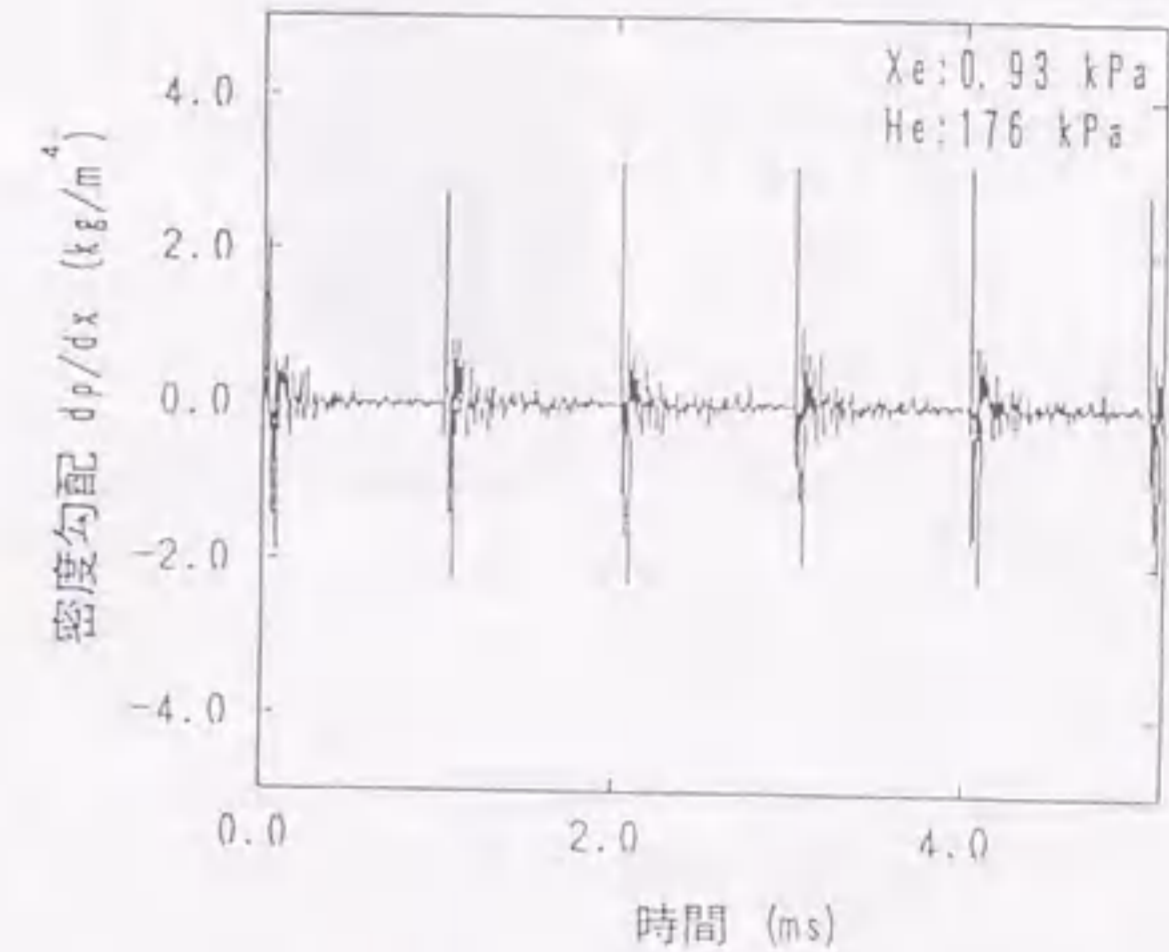


図4-48 1 kHz動作時の密度揺らぎ

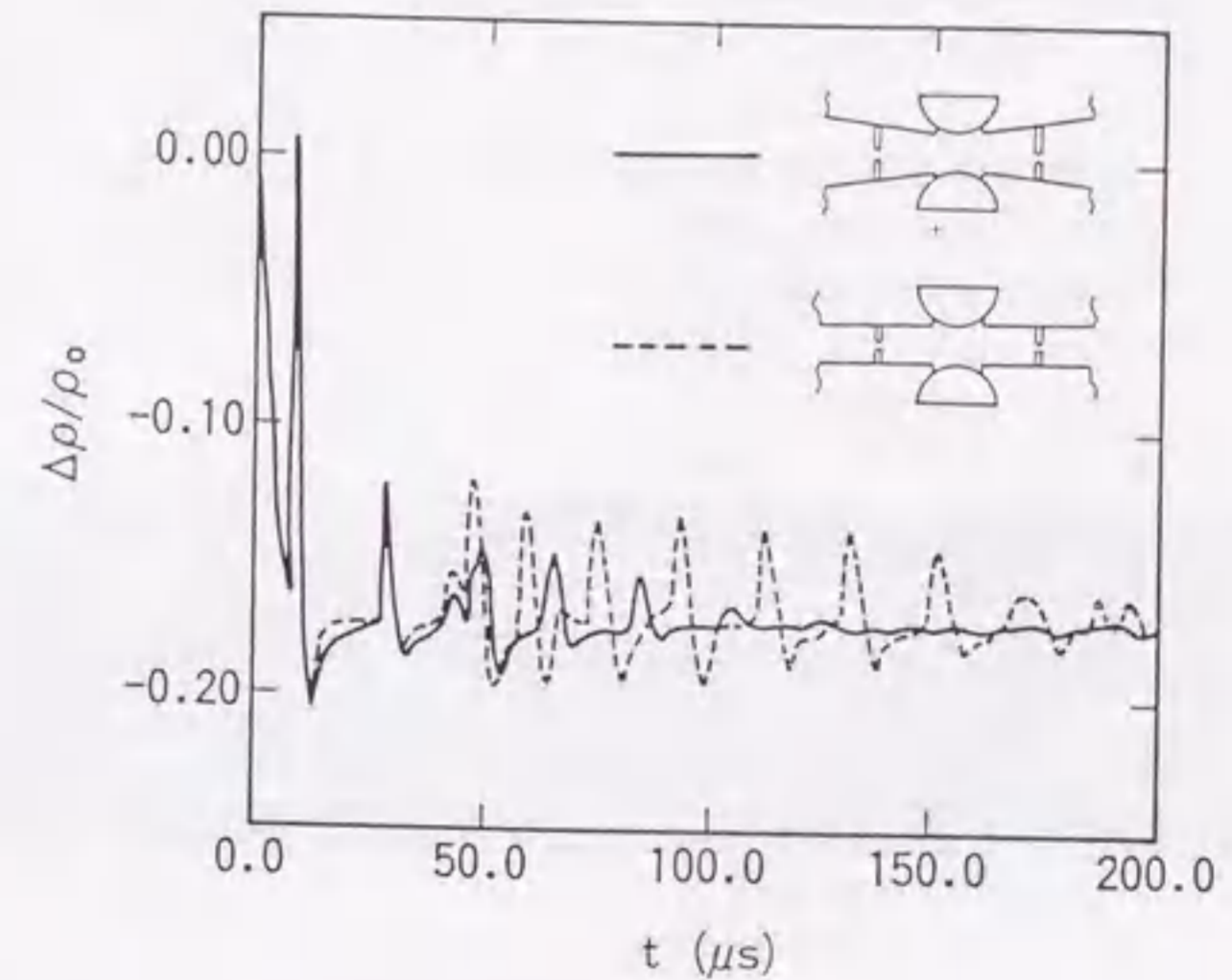


図4-49 並行壁と適量化壁との衝撃波の減衰状態比較

図4-50に、製作した衝撃波ダンパの写真を示し、中央の白い部分に放電部が納められている。ダンパは、放電部から流路方向に伝播した衝撃波を吸収するように取り付けられている。さらに、放電電極間とミラー間（光軸方向）の波動を放電部から速く排出するため、前述のように壁面形状が最適化されている。

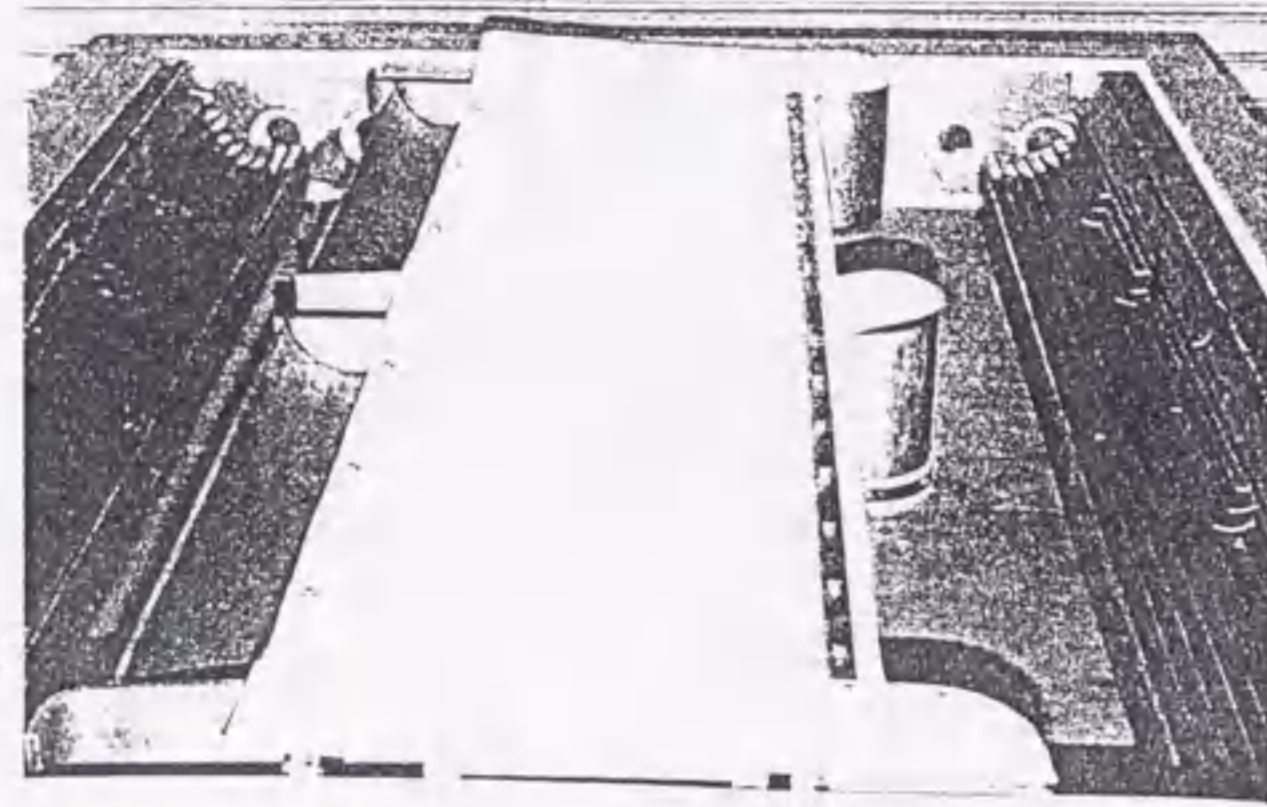


図4-50 衝撃波ダンパの写真

パルス放電によるジュール加熱によって、放電部のガスは瞬間的に加熱され、高温・高圧の状態になる。このパルス放電によって発生した高圧ガスは、衝撃波管の高圧部に相当し、放電後急激に膨張することによって衝撃波を発生させ、これがレーザーガス中に密度変化を引き起こす。レーザー発振の光学的な観点からは、放電部のガス密度擾乱 $\Delta\rho/\rho$ は 0.1% 以下、放電が安定に点弧するには $\Delta\rho/\rho$ は 1% 以下にすることが必要といわれている。^{37) - 39)}

放電部で発生した衝撃波は、20% を越える密度変化を引き起こすため、これを次のパルス放電までに減衰させるための衝撃波ダンパシステムが必要になる。音響波・衝撃波のダンパでは、実際に近い放電で発生させた衝撃波を可視化観測して設計ポイントを明らかにして設計・試作を行った。実際の使用環境に近い試験装置を使い、紫外線を試験片に照射した状態でチャンバと内部構造部品材料の耐食性試験を行い、プロア性能も合わせてモデル2装置への適用が可能との評価をした。そこで、開発した衝撃波ダンパを実際の装置に組み込み、吸収性能の検証を行った。さらに放電部流路形状の最適化など衝撃波ダンパシステムの改良を行い、モデル2装置に組み込んで性能を実証した。^{40) - 43)}

図4-51は、シュリーレン法による測定系構成図であり、高繰り返し運転時に測定したガス密度変動を図4-52に示す。放電部のガス密度変動は、高繰り返し運転時にも、放電後 0.2 ms で次のパルス放電を安定に点弧できるレベルまで減衰しており、この衝撃波ダンパシステムが有効に機能していることを検証できた。放電部壁面形状の最適化は、衝撃波伝播のシミュレーションにより行った。これは、ガスの粘性を無視した圧縮性流体の質量、運動量、エネルギーの保存方程式（以下オイラー

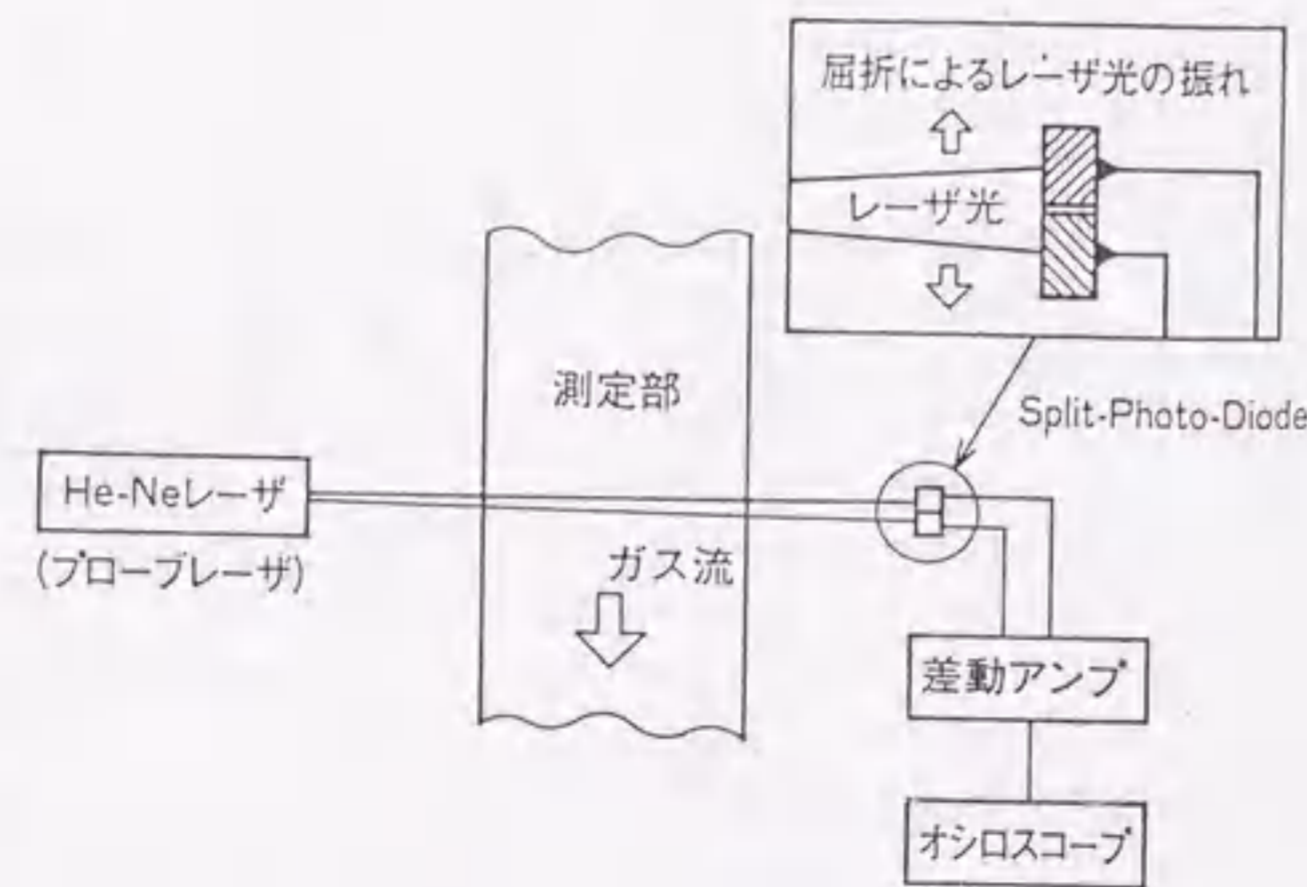


図4-51 レーザシュリーレン法の原理

式) を適当な初期条件のもとで数値的に解くものである。オイラー式は、衝撃波を伴う流れを高精度かつ安定に解くために開発された Symmetric TVD Total Variation Diminishing 法と、格子歪分割法を組み合わせた方法で数値的に解かれる。^{1) 1)}

放電部のガスは、パルス放電によるジュール加熱で瞬間的に熱せられ、高温・高圧の状態になる。放電直後のガス温度は、シュリーレン法によって測定され、その値から放電部ガスの温度分布と圧力分布が初期条件として与えられる。主放電に先だって予備電離ピンで 150 ns 間アーク放電が点弧し、次に主放電が 50 ns 間点弧するが、これはガス

の運動に比較するとはるかに短い時間しか継続しない。この時間は音速の速い He ガスでも 0.2 mm 先までしか音波が伝わらない距離であり、ガスはパルス放電によって密度一定のまま瞬間的に加熱されると考えることができる。すなわち、衝撃波伝播のシミュレーションにおいては、パルス放電はまったく瞬間的におきると考えられ、放電部のガス温度とガス圧力は、瞬間的に放電エネルギーに対応して上昇するとして取り扱った。

数値シミュレーションは、コンピュータのメモリー空間、計算時間で制限されるため、実際の流れは 3 次元であるが 2 次元で行った。ここでの計算は、ガス流方向-放電電極方向断面 (Xy 断面) と、ガス流方向-光軸方向断面 (Xz 断面) とでそれぞれ行い、光軸方向に伝播する衝撃波、主放電電極の表面から発生した衝撃波の効果をそれぞれ明らかにした。

図4-53、54に、5 kHz 高繰り返し動作時における、それぞれ Xy 断面、Xz 断面について放電後 12 μ s、放電後 200 μ s のガス密度分布を示す（実際にはカラー表示）。ガスは、He/Xe = 133/0.67 kPa の混合ガスとし、図の左から右に約 150 m/s の流速で流れているとして計算を行った。

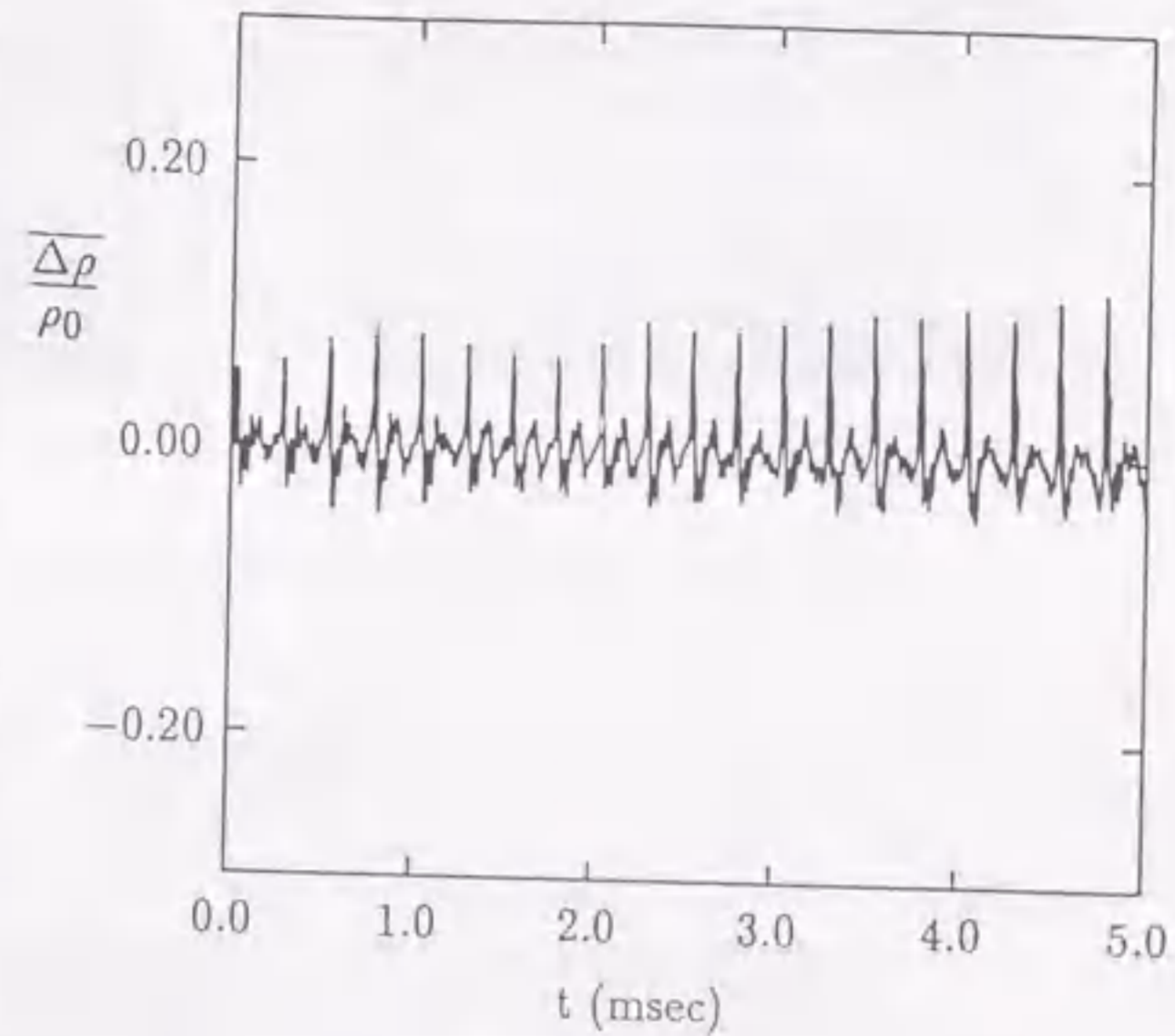
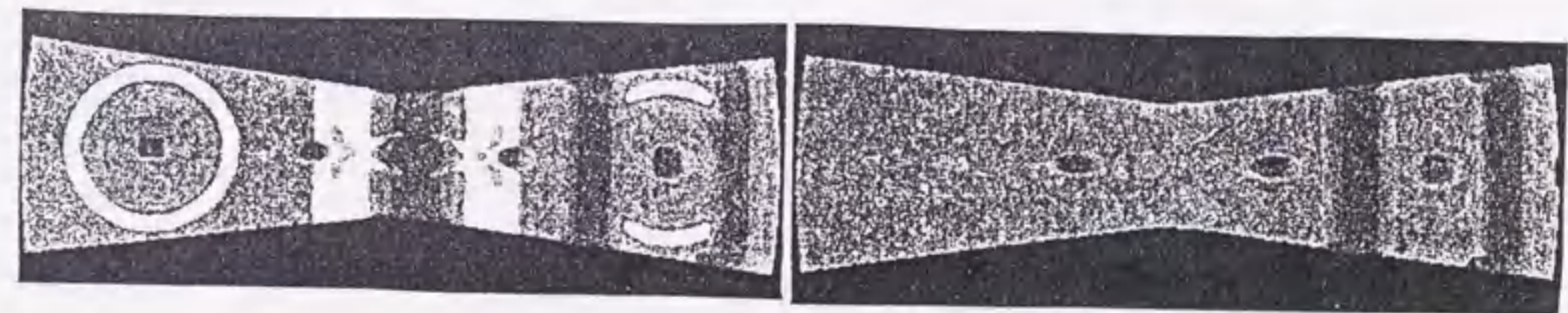


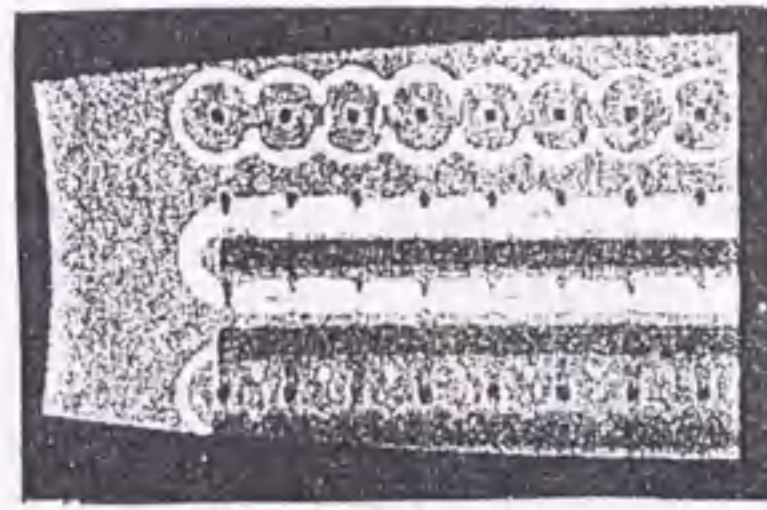
図4-52 高繰り返し動作時のガス密度変動



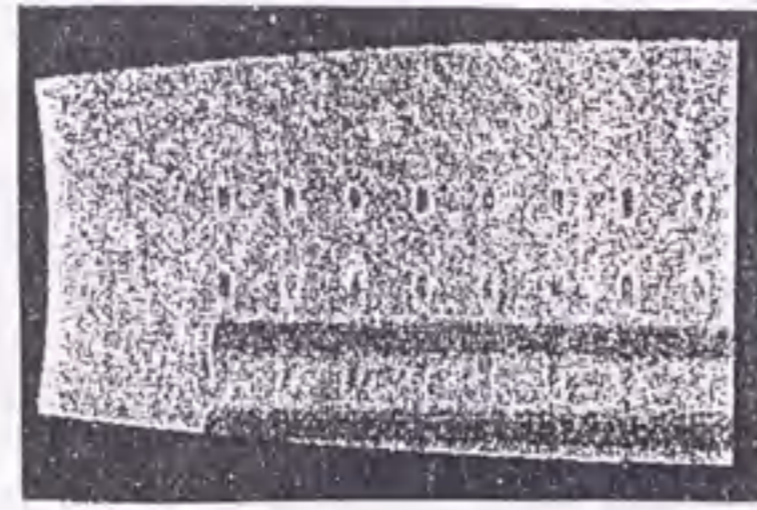
放電後 12 μ s

放電後 200 μ s

図4-53 5 kHz 動作時での放電部密度変化 (X-Y 断面)



放電後 12 μs



放電後 200 μs

図4-54 5 kHz 動作時での放電部密度変化 (X-Z断面)

カラー図 (図示せず) では、放電部入り口での初期密度を基準とし、基準状態では緑、密度が高くなっていくと黄色、さらに 10 %以上高くなると赤が表示され、逆に密度が低くなると青緑、10 %以上低くなると青が表示されている。また、色の 1 階調の変化は 1 %の密度の表示に対応させてある。図中の青いバンドは、放電によって加熱され膨張したガスを示している。加熱ガスは図の左から右に流れるので、図右の青いバンドは、前回および前前回のパルス放電によってできた加熱ガスである。

放電後 12 μs の写真からは、予備電離ピンから発生している衝撃波、放電部から流路方向 (横方向) に伝播する衝撃波、放電電極表面から発生している衝撃波、光軸方向に伝播する衝撃波が観察できる。これらの内、放電部から流路方向 (横方向) に伝播する衝撃波は、エネルギーが非常に大きく減衰は遅いが、放電部から外部に向かって伝播していくので、外部に設けられた衝撃波ダンパで吸収することができる。

一方、それ以外の予備電離ピンから発生している衝撃波、放電電極表面から発生している衝撃波、および光軸方向に伝播する衝撃波は、壁面で反射を繰り返して、放電部に長い期間密度変動を引き起こすと考えられる。これらの衝撃波に対しては、放電部壁面形状を工夫することで、密度変動の減衰を早めることができた。放電後 200 μs の密度分布のカラー表示から分かるように、密度分布は 200 μs で均一性を回復し、放電部のガス密度分布は、1 %程度以下の変化に収まっている。放電部の密度分布の不均一性が 1 %以下では、アーク状放電は引き起こされず、安定な放電を点弧することができるので、図に示した計算例では、5 kHz の繰り返し動作が可能であることが分かる。

この計算をさまざまな放電部形状について行い、形状の最適化をした。また、Xe ガス圧力が高い場合には、5 kHz 運転時の放電間隔となる 200 μs 間にはガス密度変動が十分減衰しないことも明らかになり、一方、レーザー発振実験から、高繰り返し運転には Xe 濃度が低い方がよいとの結果とも一致する。^{44)~46)}

4.5.3. 光学素子の評価試験

高繰り返しで高平均出力のエキシマレーザーには、実用段階では高耐光強度の光学素子も不可欠なコンポーネントとなる。モデル 1 装置において、繰り返し数 4 kHz、平均出力 200 W 動作で、専用開発被評価光学素子の実装試験を行ってきたが、最終的にモデル 2 装置に被評価光学素子を装着し、5 kHz、500 W 以上で実装試験を行った。これらの素子は、高反射側基板には熱伝導係数がきわめて高い SiC、透過側基板には CaF₂ を使用しており、マグネトロンスパッタリング法により SiO₂/Al₂O₃ 多層膜を蒸着したものである。

レーザーの動作条件を以下に示す。

- レーザー波長 : 308 nm (XeCl エキシマレーザー)
- 出力パルス幅 : 約 20 ns (半値全幅)
- 繰り返し数 : 5 kHz
- 平均出力 : 500 W 以上
- 照射面積 : 10 × 23 mm²
- 照射パルス数 : 最大 2 × 10⁵ ショット (第一段階試験)

被評価光学部品を実装した初期状態での平均出力は 560 W、2 × 10⁵ ショット照射後のそれは 530 W で、5.7 %の低下となった。比較のため、照射する前の初期と照射後のガス状態において、未使用の市販光学素子を装着して平均出力を測定した。この結果、約 6 %の出力低下が測定され、被評価光学素子での出力低下は、ガス劣化に起因すると推定され、素子自体の性能変化はないと考えられる。まだ短時間ではあるが、光学素子の耐光性には、モデル 2 装置に実装した評価で、2 × 10⁵ ショット後においても性能劣化は見られなかった。⁴⁷⁾

4.6. モデル 2 装置の動作結果

4.6.1. 概要設計と製作

本モデル装置の基本設計には、放電部においてガスを 150 m/s で循環させるために、最大 10,000 min⁻¹ で小形の 2 段翼軸流プロアと、磁気カップリングを検討し、放電部流速 158 m/s の高速ガス循環が出来ることを確認した。図 4-55 は、本装置外観写真と構成を示す概略図であり、チャンバの

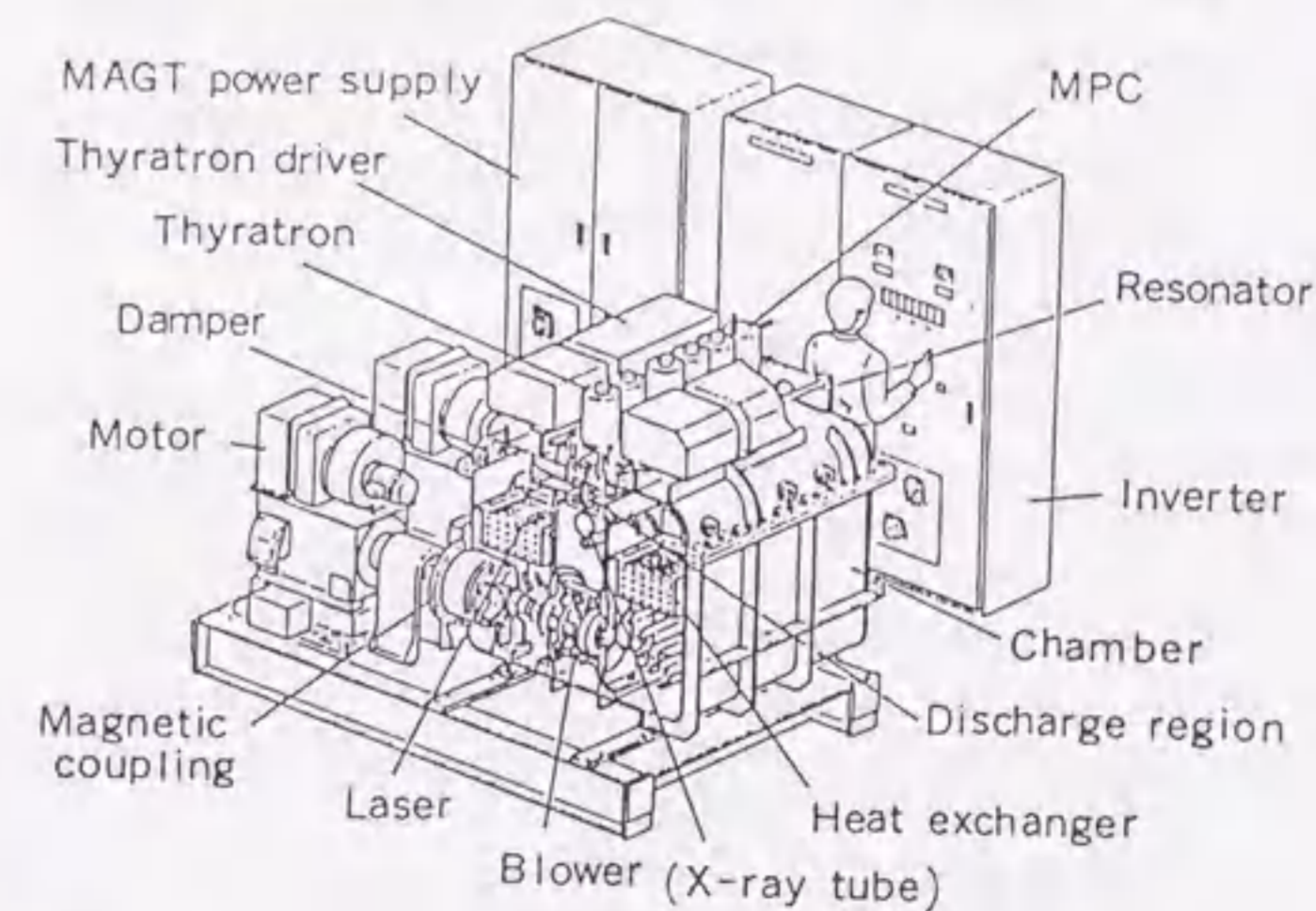
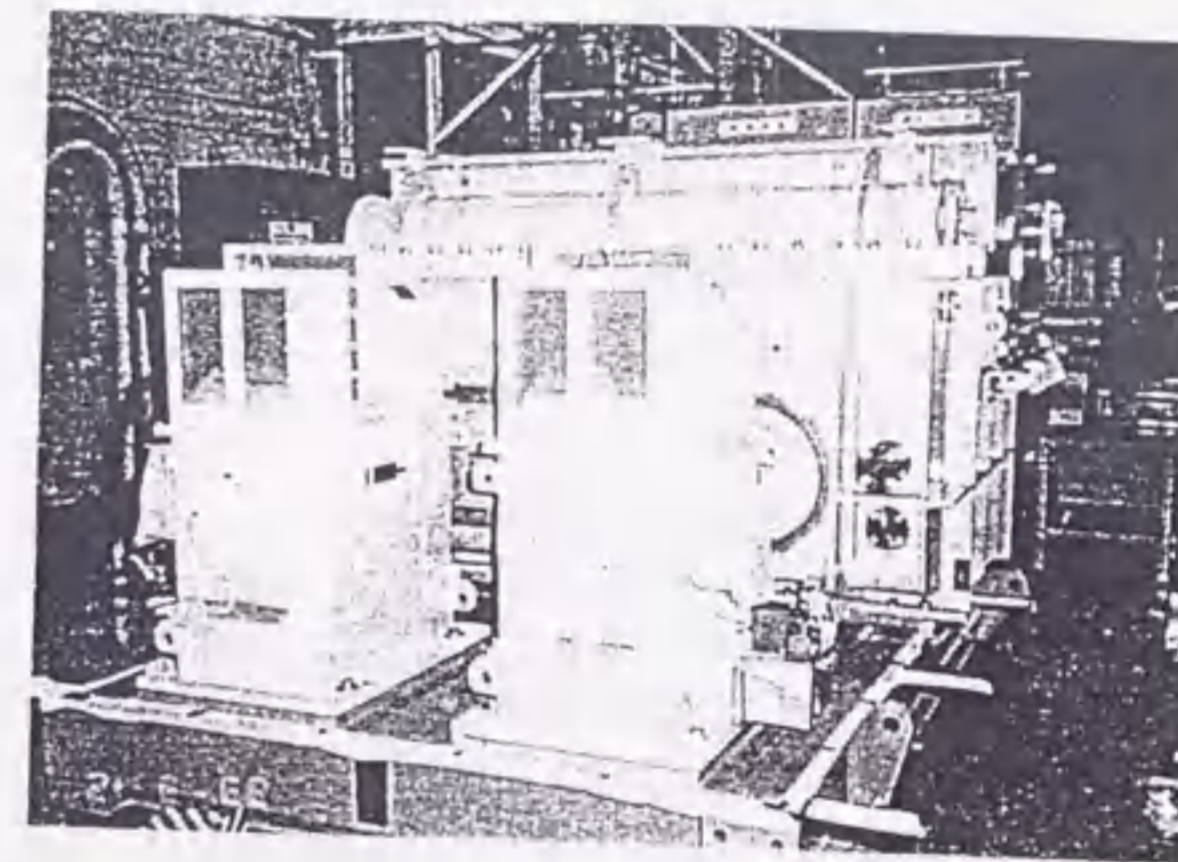


図4-55 モデル 2 装置の外観写真と構成概略図

外形寸法は、約高さ1.5m×幅2.5m×長さ2mである。有効放電容積は10(W)×2.4(G)×1200(L)mm³であり、モデル1装置より、電極長を約2倍に、電極間隔を1.2倍にして出力増を図った。

この装置では、繰り返し数5kHz以上という目標を、装置の小形化、ブロー消費電力の大幅低減という実用性の観点から、できれば150m/s以下のガス流速で実現させる。このため、主放電の電流集中化原因を究明し、放電一様化に適する動作条件の総合的な整合を図った。

さらに、放電と出力の長時間安定化を目的に、ハロゲンガスに対する耐食性試験結果に基づき、チャンバ構造材には、ニッケルクラッド材、セラミック材を主体に使った。耐食性のチャンバ構造材については、2,000時間以上の耐食試験結果から、選定は適切であったことが明らかである。この結果、腐食により発生する不純ガスは、放電安定性にも悪影響を及ぼす可能性があるが、本装置ではこの問題は少ないと思われる。

また、2kHz以上の高繰り返し域においては、平均出力の飽和・減少(パルス当たり出力エネルギーの減少)が顕著となり、一方、繰り返し数が増大できる動作条件においては、レーザ出力エネルギーの減少を伴うというトレードオフの関係が見られた。したがって、低繰り返し時の出力エネルギーを高繰り返し時にも維持するのは難しいが、500Wという大出力化の目標に対しても同時実現を図った。実用化には、装置の小形化と、レーザ発振やガス循環などを含む総合効率の向上が重視される。できるだけ低速ガス流で動作させて、ガス循環に使われる電力を低減させる技術開発も、高繰り返し動作には、ブロー入力にレーザ発振の放電入力と同程度となるので、きわめて有効で重要となる。

これらの技術課題に対して、独自のシミュレーションと実験結果に基づき、XeおよびHC1分圧を下げると共に、成分比では封入ガスの大部分を占め、放電の安定化とレーザ媒質にエネルギーを移乗させるなどの役割を果たすバッファガスにHeを使用することなどで、パルス間の相互作用消滅時間を100μs程度まで低減させて対応した。Heは、初期電子の発生量は少ないことが以前の実験で分かっているが、この対策をすると、軽くて動き易いので繰り返し入力が格段に低減でき、冷却作用が高い上に安価で実用性が高いという利点がある。これが使われている例はほとんどないが、比較検討を行って、とくに高繰り返し動作においては、一般常識の見解に反してHeが適しているとの見解を基にした。

できるだけ低速のレーザガス流で安定な放電を点弧する課題には、第3章のモデル1装置による実験で始めて明らかにした、ガス流速とレーザ出力との特異な関係の原因解明結果を基に、主放電電極のガス上流側にある予備電離用ピン電極の位置とガス流速との関係を調整した。すなわち、ピン電極放電に晒されたガスが主放電部に流入する瞬間を避けるタイミングで、主放電を点弧するようにした。また、技術問題を前もって明らかにする目的で、サイラトロン安定動作限界の2kHzにて長時間動作させ、これに取り入れたいくつかの要素技術について効果の確認をした。前章の図3-29~3-32はこの結果であり、ブロー、チャンバなどについては問題のないことが確認できている。

動作実験は実績のあるUV方式で行ったが、X線方式での放電均一性は良好であり、ピン電極のように消耗の問題もないので、実用化は極めて有望である。しかし、短時間では従来実績のあるUV予備電離方式で取りあえず目標が達成できる見通しが得られたので、X線予備電離部の搭載実験は後回しにした。しかし、この放電部は別に予備実験用準備したブローのないチャンバで低繰り返し動作させ、基礎特性を測定した。

一方、放電の安定化を主目的として、放電の分光分析、干渉計測定などにより、不均一化のメカニズム解明と、適切な対策方法の基礎的検討を行ってきた。この結果、荷電粒子が意外に長く残留するので、電界強度分布やガス流によりその移動する範囲が広く、これが低繰り返し時には見られない高繰り返し動作特有の状態を生み出す主因となることが分かった。この対策法として、一般によく知られており電界分布のよいErnst型電極の一部を、別の関数による形状に変えた複合関数形状電極を試作した。この前節に示した予備実験評価では、サイラトロン電源により5kHzレーザ発振に適した動作条件を求め、充電電圧、Xe分圧、HC1分圧などをパラメータとして、繰り返し数と平均出力の関係を測定した。この結果、3kHz以上においてErnst型の場合を30%程度上回るレーザ出力が得られたが、本装置にはまだこの電極は組み込まれていない。

また、ガス流分布を均一化するために、ガス密度揺らぎのシミュレーションと性能確認を基に設計した衝撃波ダンパも、主にガス流方向に伝搬する衝撃波成分をもっともよく減衰させる改良を加えて取り付けた。この放電安定化に対する効果は、まだ定量的に確認できていないが、ダンパ単独での性能評価結果から、繰り返し数が4~5kHzの動作域では、この寄与分が大きくなると推測できる。

高速半導体パルス電源技術実証のためには、サイラトロン1本分に相当するスイッチ動作ができる高速半導体パルス電源を試作し、これとサイラトロン7本を使った電源とで並列同時運転するようにしたが、この詳細結果は第5章で述べるので、ここでは省略する。

図4-56に、放電部の構成概略図を示す。2組の放電部は同一仕様で、容量移行型UV予備電離方式である。各々の放電部において、主コンデンサC₁=32nF、ピーキングコンデンサC_p=30nFであり、放電体積は10(W)×23(G)×610(L)mm³である。予備電離用のピン電極は図示していないが、主電極に沿って千鳥足状に配置され、ギャップ間隔は1.0~1.2mmに設定してある。両放電部は、190mm隔てて光共振器が取り付けられたチャンバ内に設置され、共振器長は2,130mmである。放電部は、別々の高圧電源、サイラトロン、サイラトロンドライバで独立して駆動される。遅

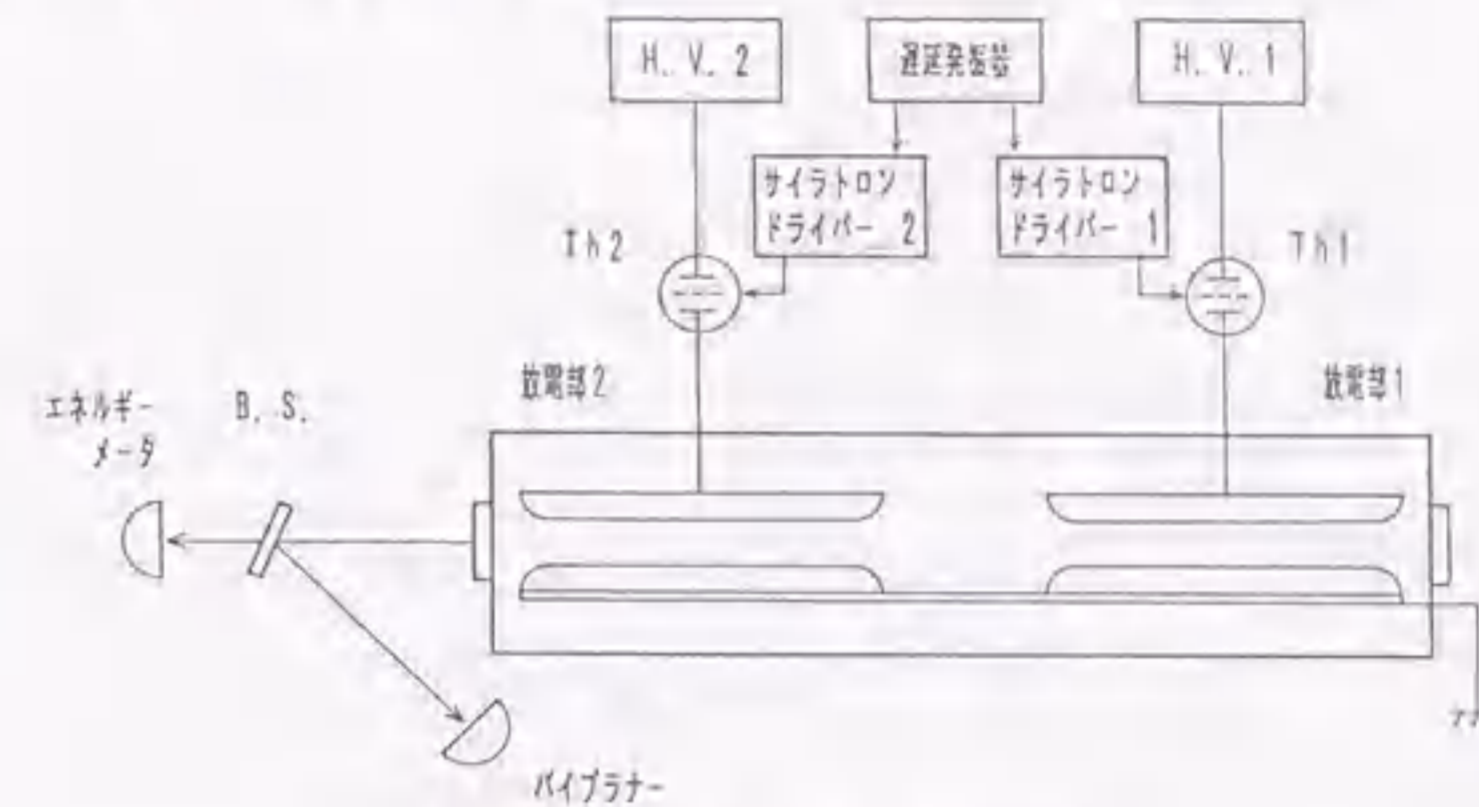


図4-56 モデル2装置用放電部

延発振器により、放電部#1と放電部#2の遅延時間は任意に変化させることができるが、遅延時間特性の測定以外では、これは0に設定されている。

実験は、モデル1装置において短時間5kHz動作で最高出力が得られたガス条件、HC1/Xe=0.27/0.93kPa、Heバッファガス、全ガス圧P=177kPaを中心に行った(以下、基準ガスと呼ぶ)。また、高出力化のための参照データとして、Neバッファガスでの実験も行った。

レーザ出力は、金属メッシュにより約1/4に減衰させた後に、前記エネルギーメータを用いて測定した。電圧波形は、各々の放電部に対し高圧プローブ(Tektronix Inc. P6015)を用いて観測し、破壊電圧と充電電圧を測定した。放電部#1と放電部#2における主放電点弧の遅延時間(T_d)は、それぞれの破壊電圧測定結果から求めた。

図4-57は、HC1/Xe=0.27/0.93kPaをHe、またはNeガスで、全ガス圧176kPaまで希釈した混合ガスにおけるレーザ出力の充電電圧依存性

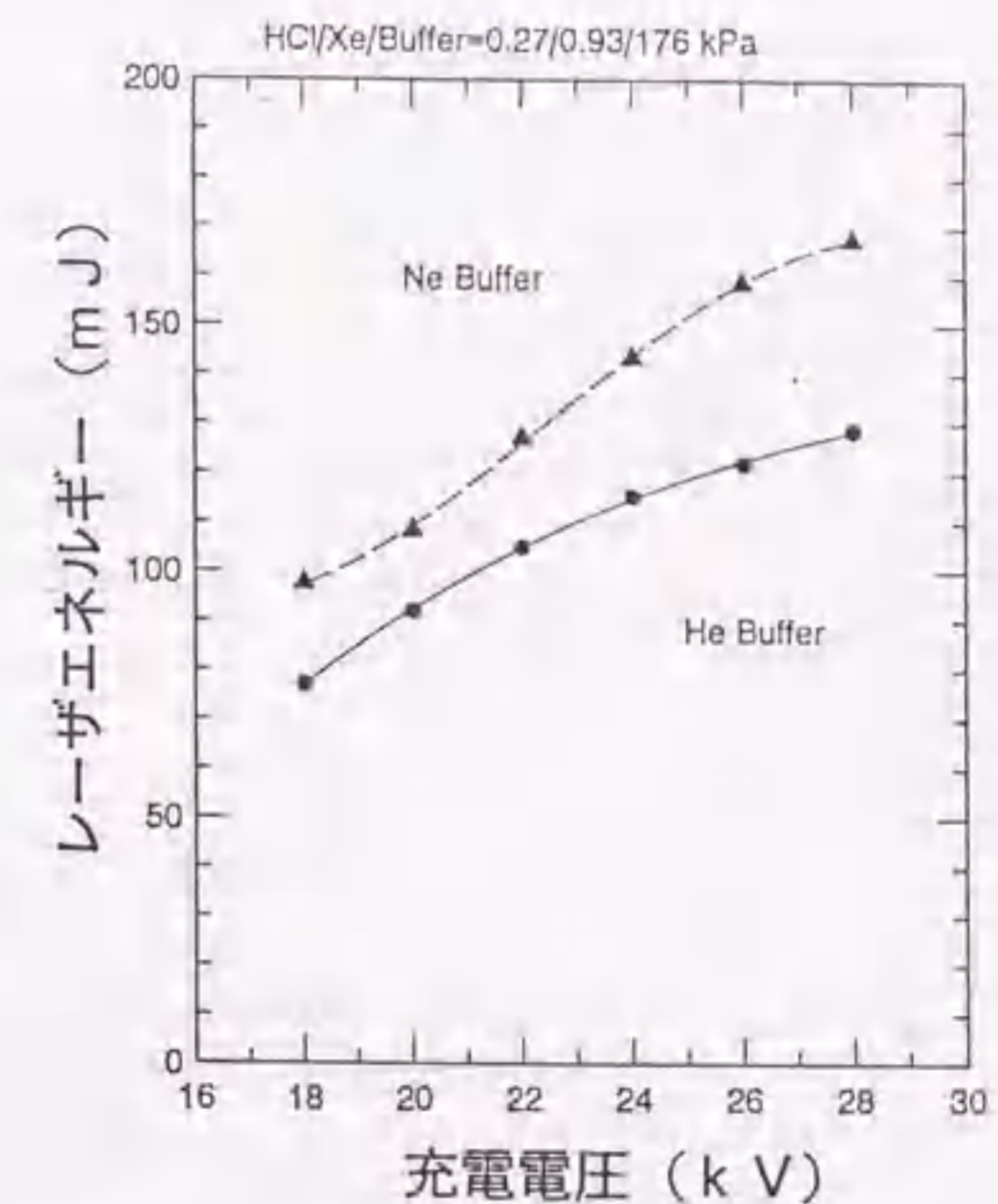


図4-57 レーザ出力の充電電圧依存性

を示す。最終目標である、5 kHz 以上、500 W を達成するためには、充電電圧 $V_a = 23$ kV において 100 mJ 以上のレーザー出力が必要である。図より、He バッファガスでは 111 mJ、Ne バッファガスでは 136 mJ が得られることが分かる。モデル 2 装置は、ガス温度上昇やモータ投入電力の問題から、He バッファガスを基準ガスとしている。したがって、5 kHz 動作における出力低下分 (10% 以下) を考慮しても、500 W 以上の出力が得られることになる。

次に、高繰り返し動作する場合、複数のサイラトロンでは、#1、#2 放電部を駆動するため、両電極の放電タイミングが問題となる。そこで、遅延回路により、基準ガス中で動作タイミングとレーザー出力との関係を調べた。図 4-58 はこの測定結果で、縦軸は最大エネルギーの得られた遅延時間 0 s を基準に、相対値表示してある。図において、遅延時間 0 s を中心にシングルピークが明確に得られた。また、レーザー出力低下分を 5% 以下とするには、高繰り返し動作において、遅延時間を ± 20 ns に制御する必要があることも分かる。

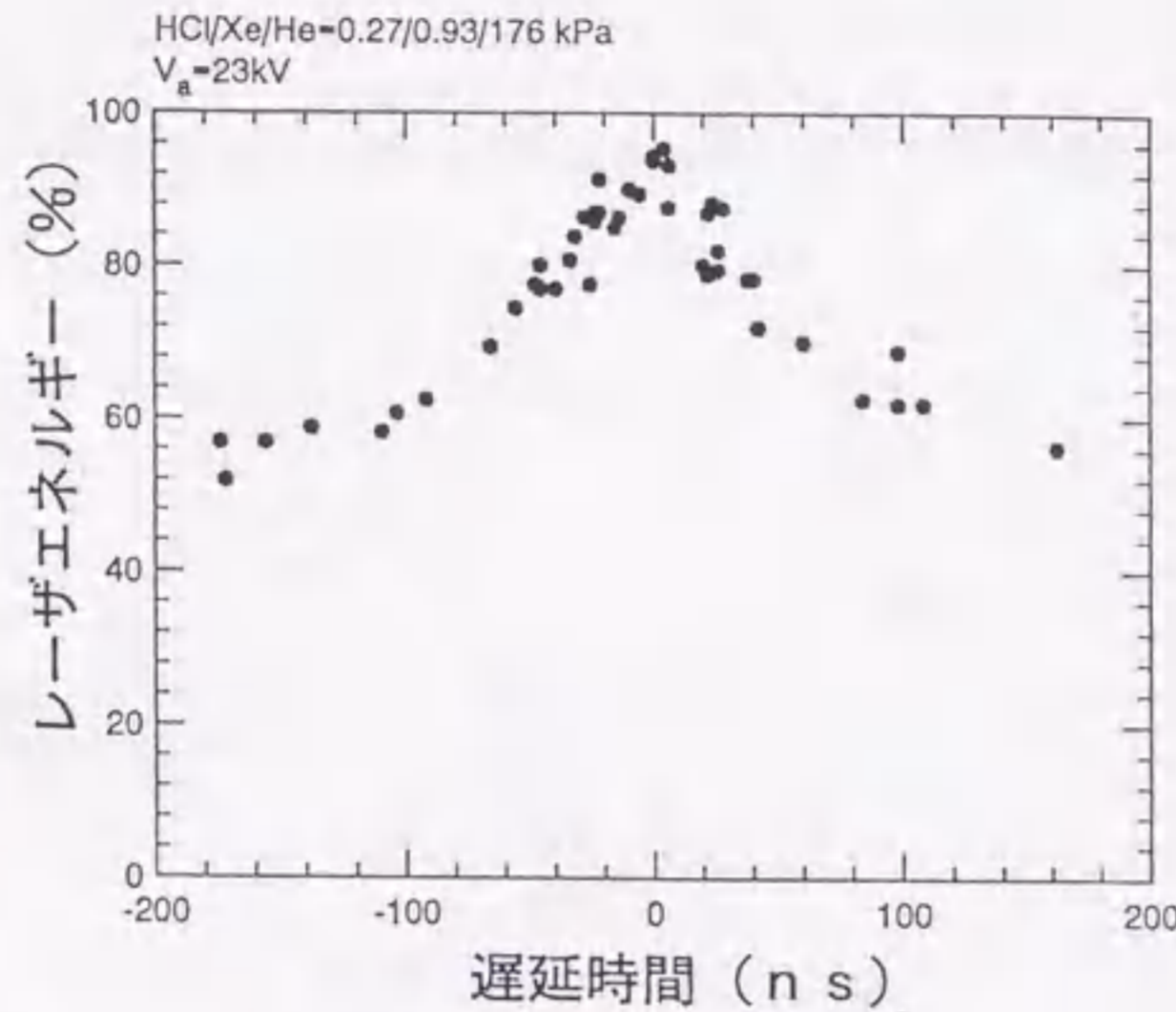


図 4-58 レーザ出力の遅延時間依存性

4.6.2. 5 kHz、500 W 動作結果

モデル 2 装置において、プロアの最大回転数を $10,000 \text{ min}^{-1}$ まで高め、放電部においてピトー管による流速測定をした結果を図 4-59 に示す。ガス流速は、繰り返し回転数と共に直線的に増加しており、最大回転数において 150 m/s の流速が得られ、目標仕様値を達成している。

高繰り返し動作に対応するためには、各放電部に 4 本づつ、計 8 本のサイラトロンにより同時スイッチングを行った。また、各サイラトロンドライバーには、点弧タイミングを調整するための遅延回路が設けられており、両放電部のタイミングの遅れ時間を ± 10 ns 以下に設定した。

レーザー出力は、金属メッシュにより約 1/4 に減衰させた後、前記エネルギーメータを用いて測定した。放電の観察は、光軸方向に設置した CCD カメラによって行い、ガス下流に発生するアーク状放電の有無を判定し、これが無い臨界の繰り返し数、ガス流速、放電幅を求め、そこでの流速を前出の式で算出する臨界 CR 値とした。次に、5 kHz 動作を目指すため、充電電圧、ガス条件の最適化を行った。モデル 1 装置では、繰り返し数の上限が 4 kHz であるが、これより繰り返し数と出力を増大させるため放電長を約 2 倍としたことなどで、動作の最適条件の確認が必要である。

これには、まず 1 kHz において充電電圧と CR 値との関係を求め、動作電圧の適値を検討した。図 4-60 に、この関係を示す。充電電圧が 21 kV までは、臨界 CR = 2.6 であるが、それ以上の電圧では限界 CR 値が急激に増大していく。このため、繰り返し性能からの最大ガス流速が 158 m/s であることより、5 kHz 動作を達成するには、限界 $CR \leq 3.2$ とする必要がある。したがって、以下の実験では安定な 5 kHz 動作を行うため、充電電圧は臨界 CR 値が異常に増大しない範囲の 21 kV とした。

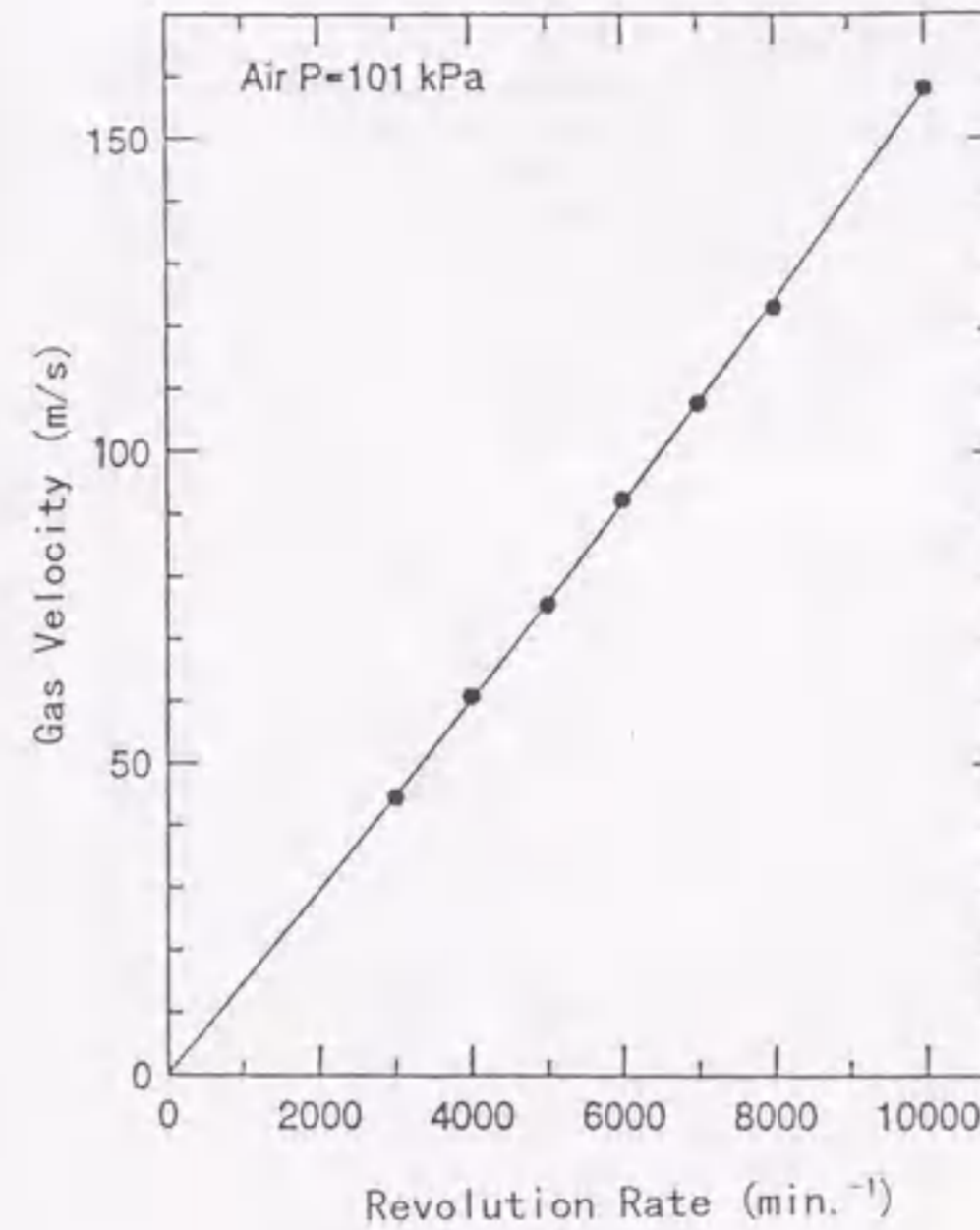


図 4-59 プロア回転数とガス流速

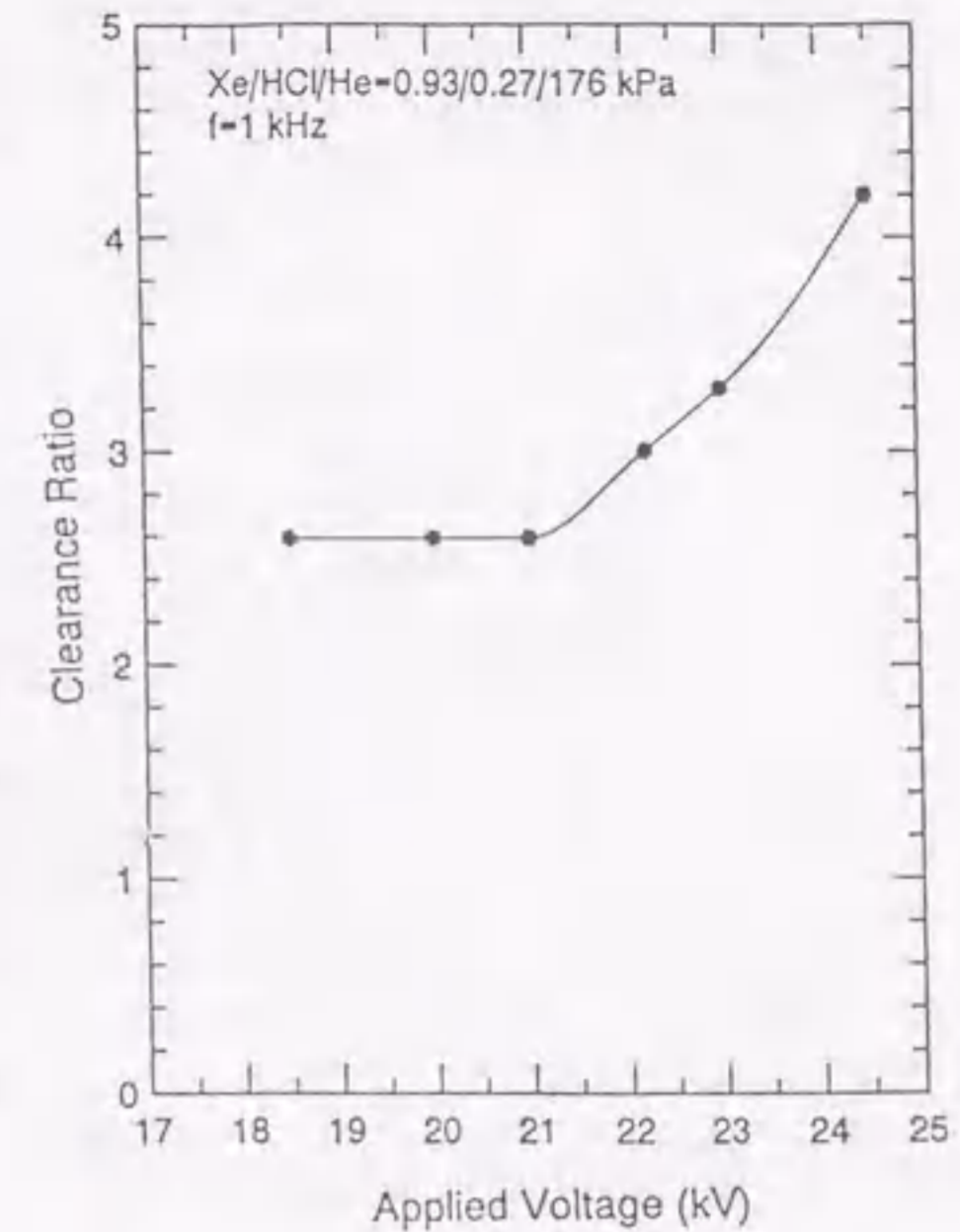


図 4-60 CR 値の充電電圧依存性

この条件で高繰り返し動作させたところ、基準ガスで 4 kHz、410 W が得られたものの、それ以上の繰り返し数では下流アーク状放電が多発し、レーザー発振を維持することができなくなった。放電生成物残存による後続パルス放電への影響は、Xe、HCl 分圧に大きく依存するので、ショット当たりのレーザーエネルギーが 5 kHz では 1 Hz 動作の 10% 前後低下することも考慮し、Xe 分圧を低減させた。その結果、 $Xe < 0.53 \text{ kPa}$ では、分圧低減によるエネルギー低下が大きくなり過ぎることが分かり、 $Xe = 0.53 \text{ kPa}$ とした。

一方、これに応じて、HCl 分圧の最適化は行った。これまでの HCl 分圧: 0.20 kPa は、Xe 分圧: 1.06 kPa のときの適値であり、HCl 分圧は低いほど高繰り返し動作には有利となる。図 4-61 に、Xe 分圧: 0.53 kPa におけるレーザー出力の HCl 分圧依存性を示す。これより、 $V_a = 21 \text{ kV}$ では、HCl 分圧: 0.09 kPa 付近に最適値があり、これまでの HCl 分圧: 0.20 kPa に比較して出力が約 18% 増加することが分かる。

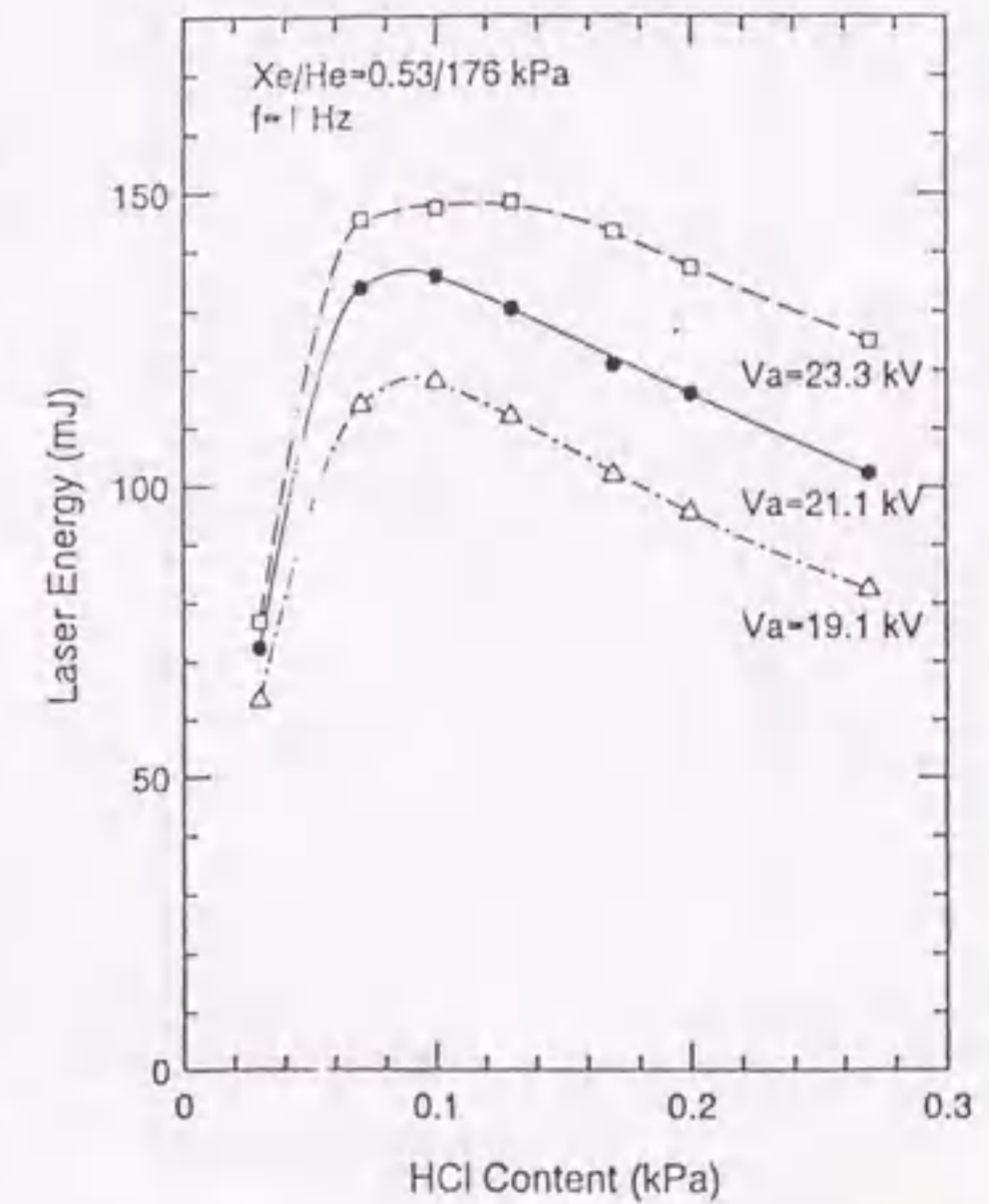


図 4-61 レーザ出力の HCl 分圧依存性

このようなガス条件で、高繰り返し動作を行った結果、流速 158 m/s においても、下流アーク状放電の発生しない安定放電が得られた。

図 4-6 2 は、各ガス条件における繰り返し数と、臨界ガス流速との関係である。4 kHz 以上の繰り返し域では、HCl 分圧の低減効果が顕著である。この効果を再確認するため、HCl を混合しない場合について調べた結果を、図 4-6 2 中 (白丸) に示した。1 kHz から 5 kHz までの領域で、HCl ガスが臨界ガス流速を顕著に高めていることが分かり、5 kHz 動作の臨界ガス流速は 108 m/s となった。これより、以下の実験では、Xe/HCl=0.53/0.09 kPa の混合ガスを用いた。図 4-6 3~6 8 は、諸動作特性を、図 4-6 9 は、5 kHz でのレーザエネルギーのパルス列を示す。レーザ動作開始 0.1 s 後の測定結果で、パルス間のレーザエネルギー変動は極めて少ない。このとき、5 kHz での平均出力は 500 W であり、サイクロン電源により目標達成が確認できた。^{48) -49)}

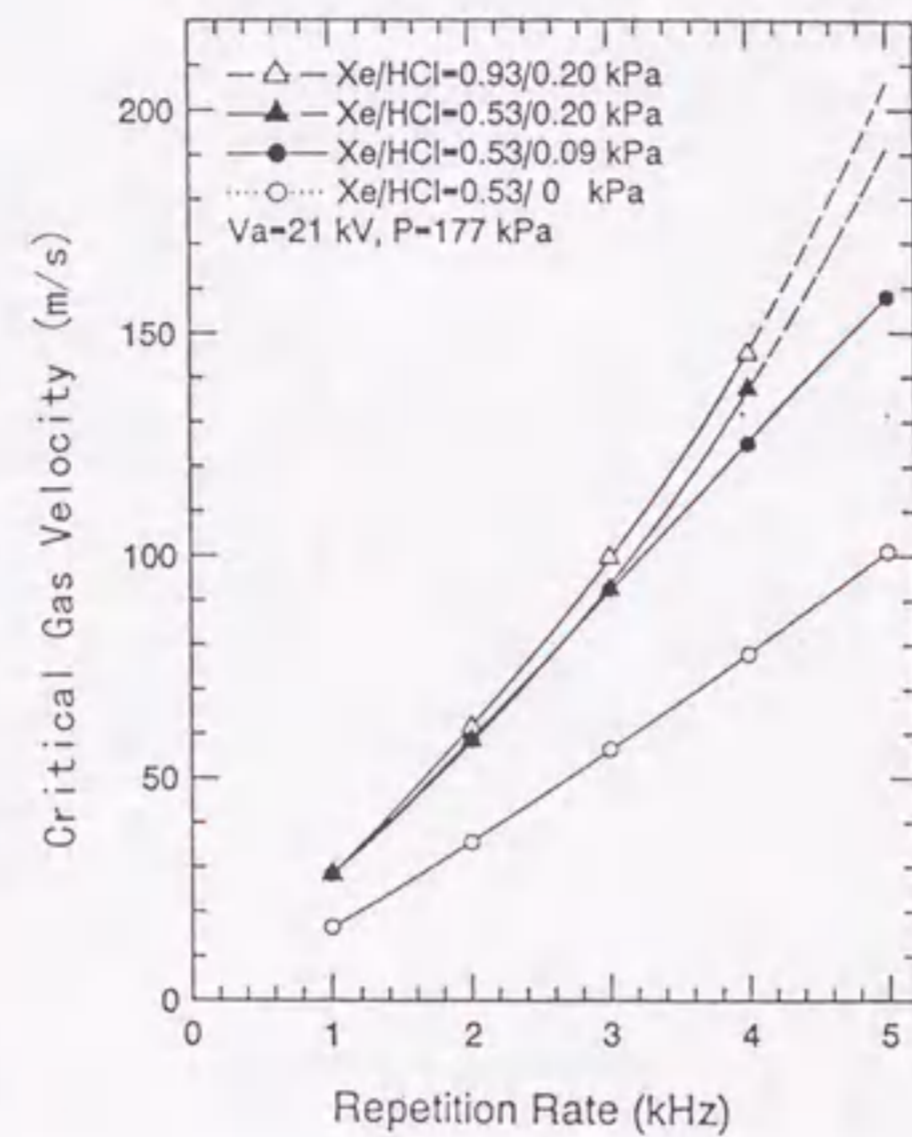


図 4-6 2 繰り返し数と臨界ガス流速特性

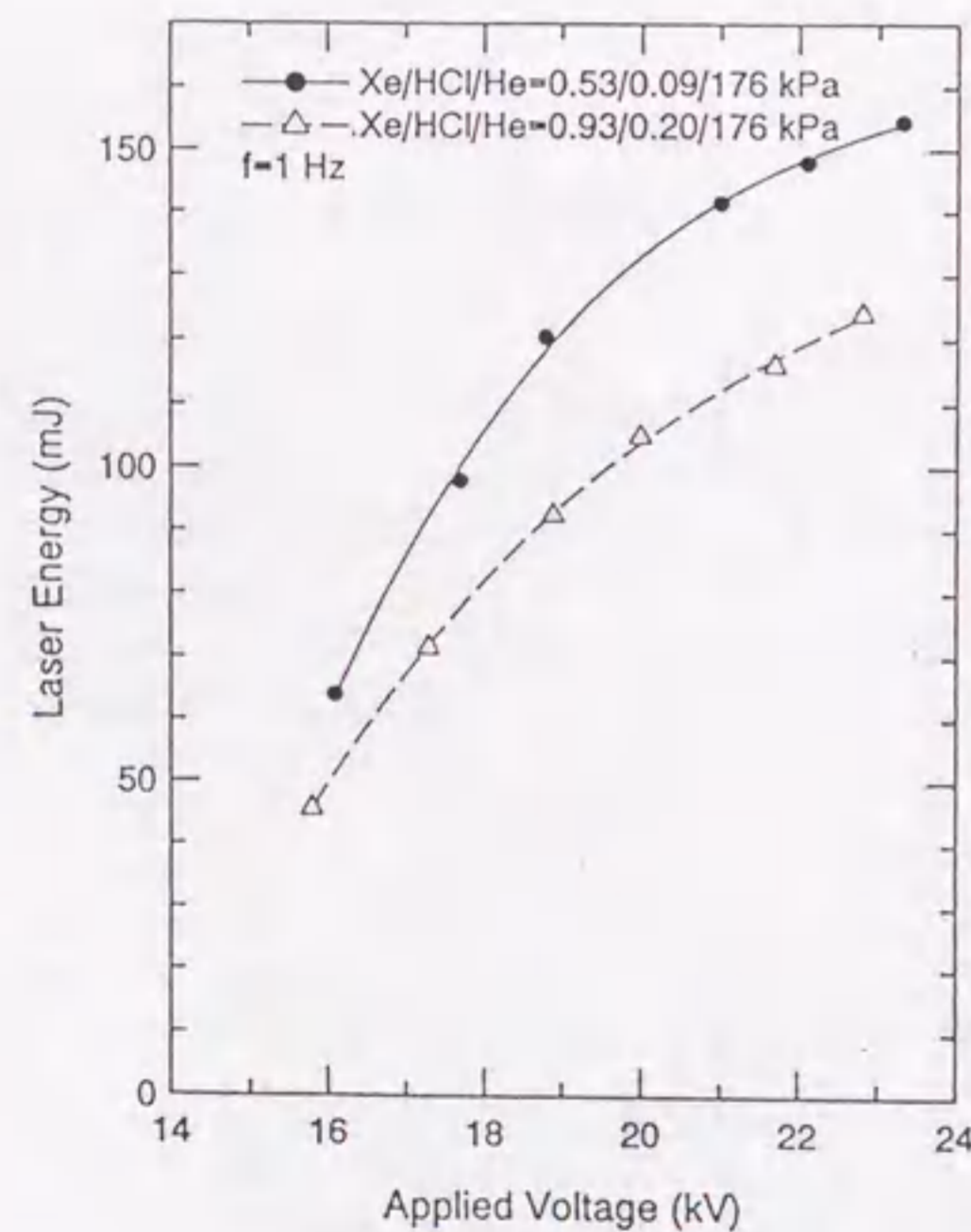


図 4-6 3 充電電圧とレーザ出力特性

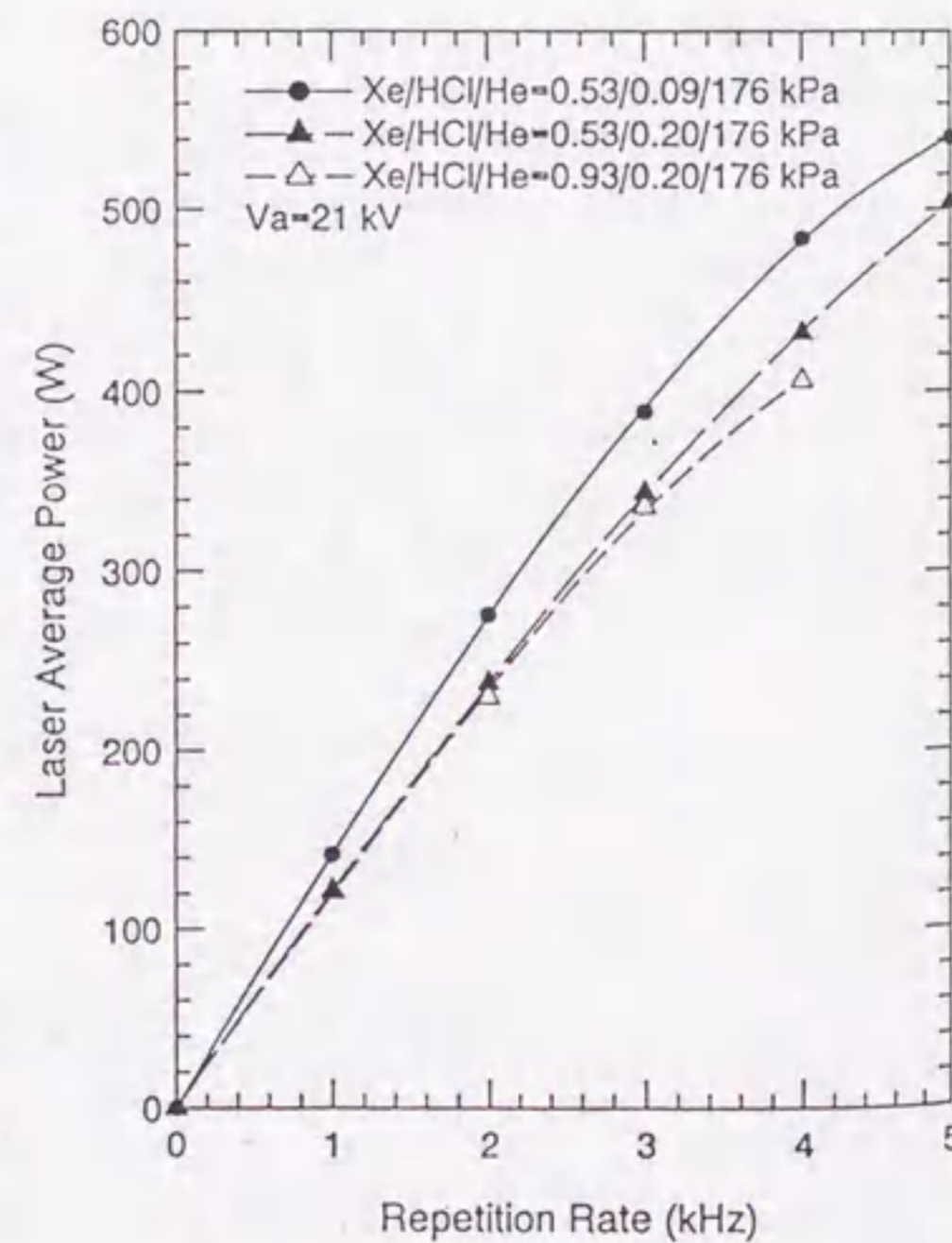


図 4-6 4 高繰り返し平均出力特性

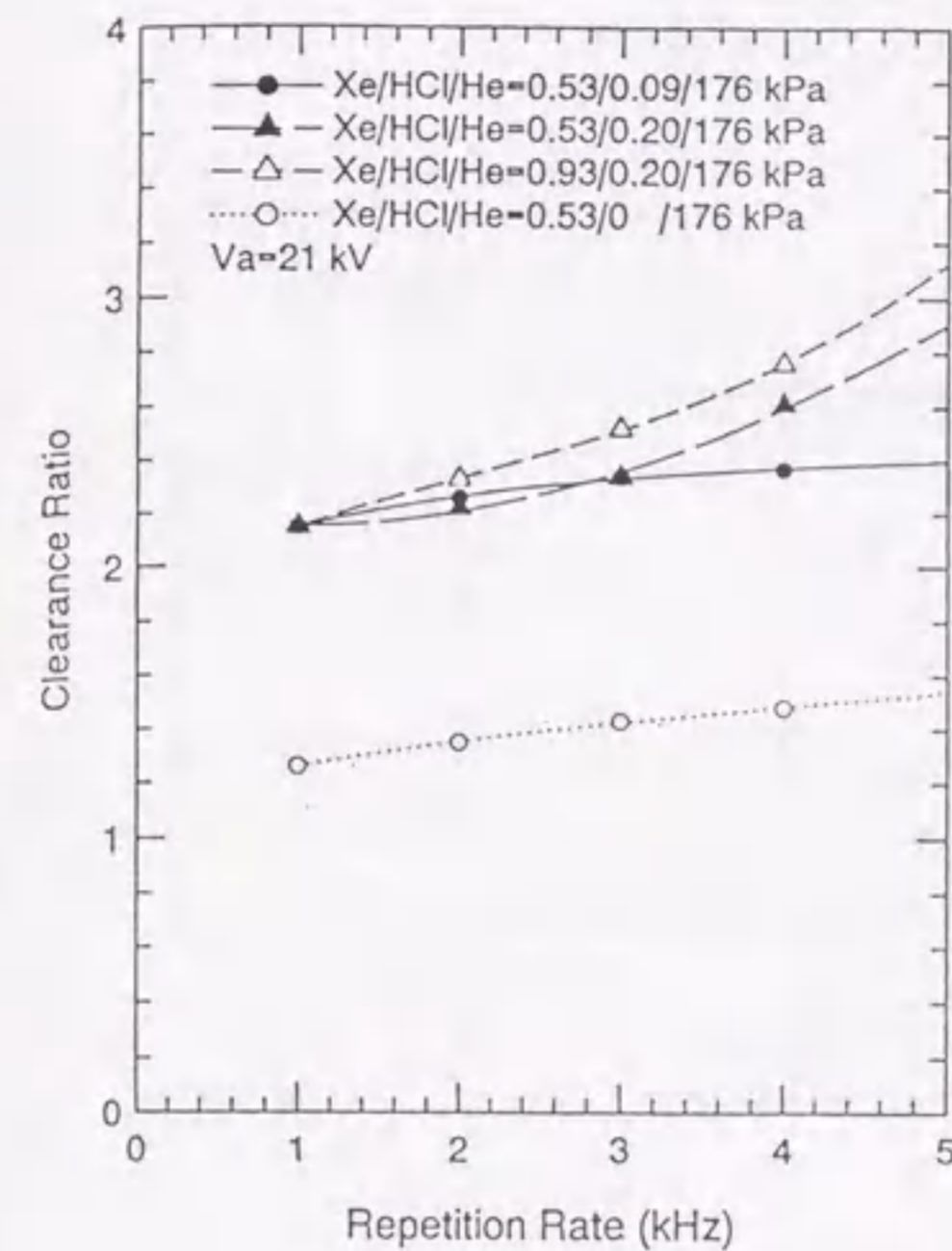


図 4-6 5 繰り返し数に対する臨界CR値

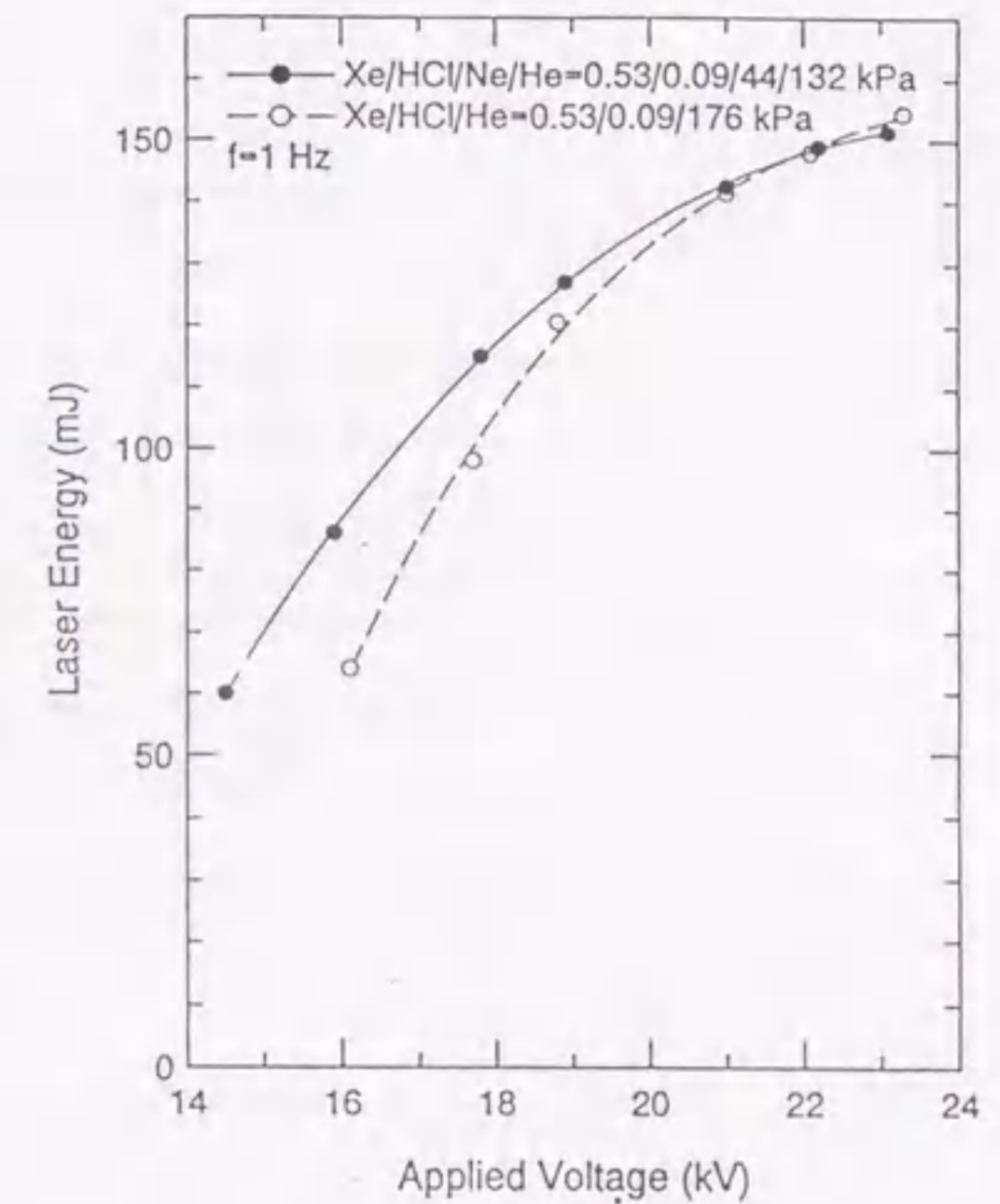


図 4-6 6 充電電圧とレーザ出力 (He/Neバッファ)

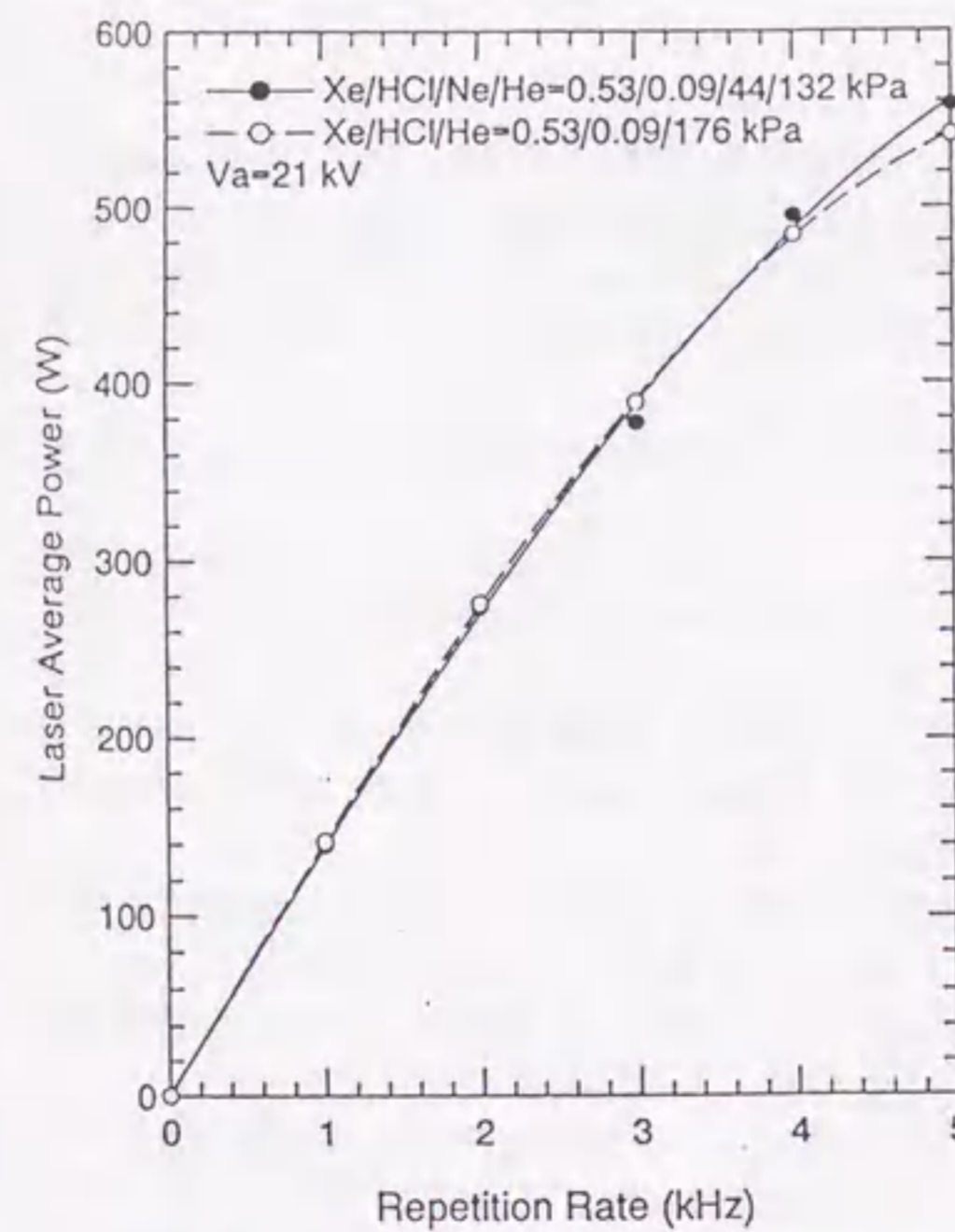


図 4-6 7 高繰り返し平均出力特性 (He/Neバッファ)

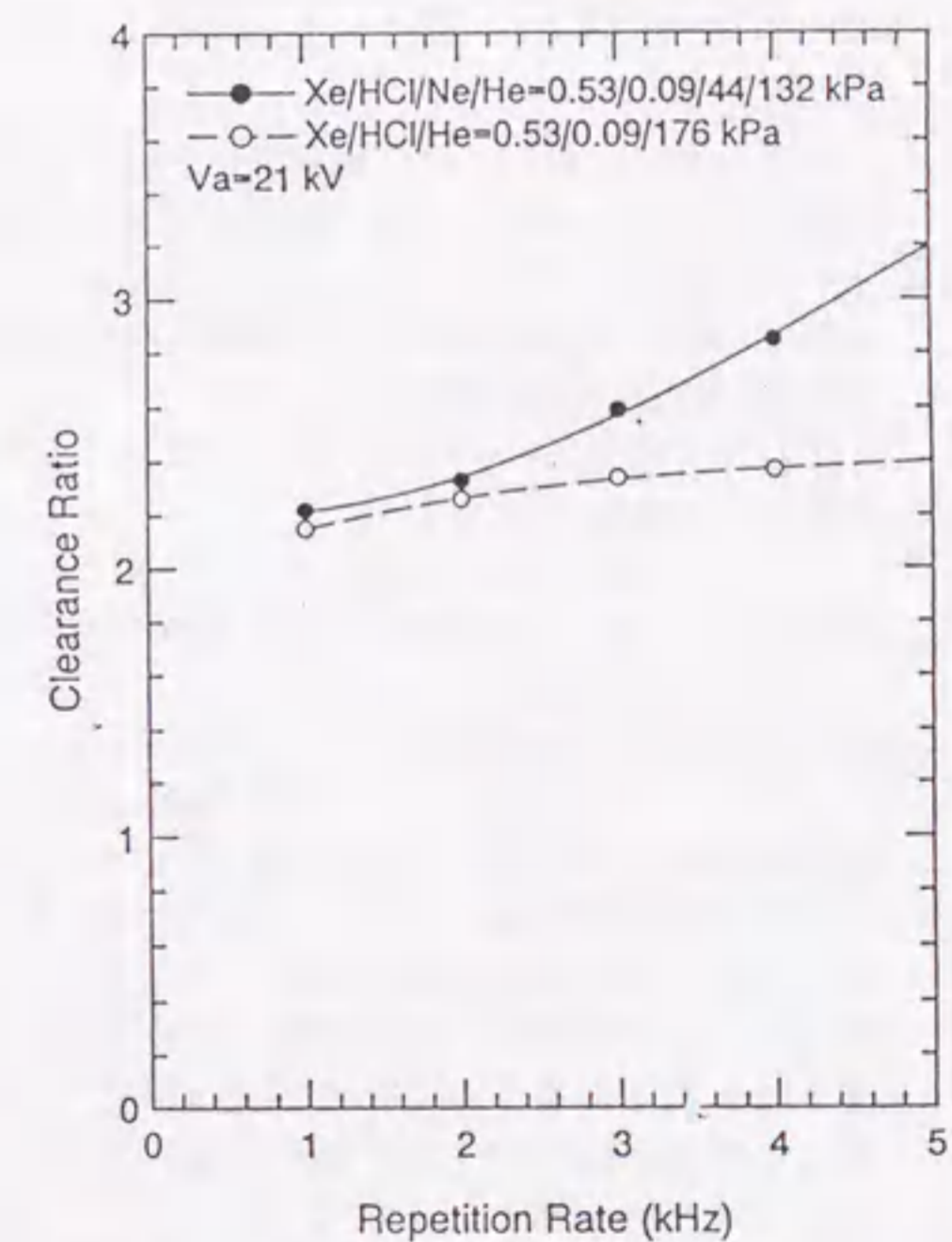


図 4-6 8 繰り返しに対する臨界CR値 (He/Neバッファ)

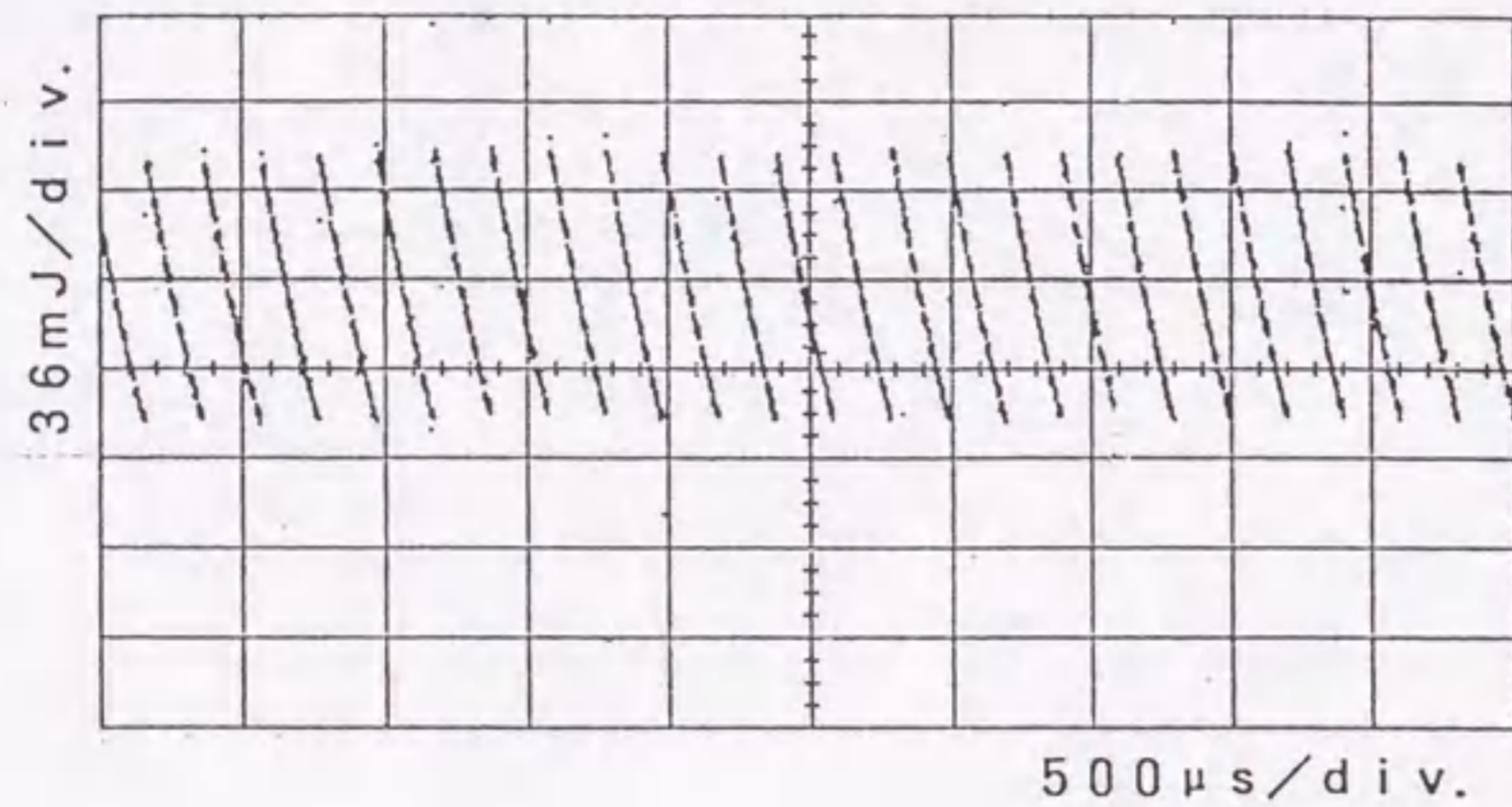


図4-69 5 kHz 動作出力パルス列

4.7.章のまとめ

高速ガス循環用プロアと磁気カップリング、チャンバ構造材料の耐食性評価、予備電離用X線源、電極形状による放電均一化、衝撃波ダンパの性能実証などの要素技術を開発し、高繰り返しエキシマレーザ装置の実用性検討をした。この結果、最終目標の繰り返し数 5 kHz 以上、平均出力 500 W 以上がほぼ計画どおり実証でき、同時に各要素技術の総合的性能も確認された。これらを各要素技術別にまとめると、以下になる。

プロアと磁気カップリングについては、高速回転させることで大幅な小形化が実現でき、実用の問題もあまりない。

チャンバ材料では、金属材ではNiあるいはNi合金が長時間耐力性に優れている。構造材料の耐食技術は、ハロゲンガスの反応と紫外線照射による劣化の複合的作用で不純物が生成されて、短期的にも放電に悪影響を与え、高繰り返し化、大出力化の妨げとなる可能性がある。このため、一部放電部周辺材料の代替絶縁材として有望なセラミックス材料の短時間耐食試験を行い、さらに、セラミックス材料の長時間安定性と表面処理材の紫外線照射による劣化程度を確認するため、2,000 時間の耐食試験を行った結果、長期的にも優れた耐食性を持つことが分かった。

X線予備電離技術としては、独自設計による真空封止の熱陰極X線管を、モデル2装置に取付可能なX線予備電離放電部に適用し、本実証機に搭載できるようなX線予備電離放電部を製作した。X線管は、主放電電極背面に総数 24 本一列にならべて取り付けられており、主放電部における予備電離強度の均一性を改善するためのシミュレーションコードを作り、X線管配置の適正化をした。この結果、予備電離強度均一化計算の精度を高め、プログラム化をし、UV予備電離方式と同等以上のレーザエネルギーを得た。この均一化手法で、放電部でのX線強度むらは 17%程度まで低減でき、単一パルスレーザ発振においては、ピン電極間の放電によるUV予備電離の場合を 10~20 %上回るレーザ出力が得られた。

一方、光学部品の評価では、開発試作品をモデル2装置に実装し、5 kHz, 550 W にて 2×10^5 ショットまでの耐光強度試験を行ったが、性能劣化は見られなかった。

放電技術では、前年度の高速半導体パルス電源による 5 kHz の短時間放電で、とくにピーキングコンデンサおよび予備電離電極の温度上昇が問題となることが分かり、この対策をすると共に、放電部の改造を行い放電部の流速を増加させて、5 kHz の連続放電を実証した。また、高繰り返し放電の安定化と出力増大化のため、電界計算を基に電極を複合同数形状に改良し、実験でその効果を確認した。

高繰り返し化実証では、ダンパによる衝撃波吸収性能の検証結果をもとに、さらに放電部流路形状の最適化など衝撃波ダンパシステムの改良を行い、モデル2装置に組み込んで性能を実証した。

参考文献

- 1) Tatsumi Goto, Koji Kakizaki, Shigeyuki Takagi, Saburoh Satoh, Shinichiroh Kosugi, and Takashi Ohishi, "5 kHz high repetition rate and high power XeCl excimer laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 66, 5162-5164(1995).
- 2) Tatsumi Goto, Koji Kakizaki, Shigeyuki Takagi, Saburoh Satoh, Shinichiroh Kosugi, Takashi Ohishi, Yukio Kanazawa, Akira Ishii, Tsuneharu Teranishi, Koichi Yasuoka, Takashi Shinohe, Hiromichi Ohashi, Fumihiko Endo, and Katsuya Okamura, "Development of key components and technologies for high repetition rate and high power excimer laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 69, (Jan. 1998).
- 3) 後藤達美, 金沢幸雄, 福井 清, 佐藤三郎, "XeClエキシマレーザーガスと装置材料との化学反応," 第38回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28a-E-11, 889(1991).
- 4) W. Hans and P. Scott, "Preventing contamination of excimer lasers gases," *Laser Focus*, 19, 87-92(Oct. 1983).
- 5) Shao Chi Lin and J.I. Levatter, "X ray preionization for electric discharge lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 34, 505-508 (1979).
- 6) S. C. Lin, Z. Bao, G. Gong, Y. Huo, J. Shu, S. Tang, Y. Wei, and C. Zheng, "Study of x ray preionized avalanche discharge XeCl laser at high gas pressures," *Appl. Phys. Lett.*, 38, 328-330(1981).
- 7) J. I. Levatter and Z. Li, "Low energy x ray preionization source for discharge excited lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, 52, 1651-1654(1981).
- 8) H. Shields and A. J. Alcock, "Short pulse, x ray preionization of a high pressure XeCl gas discharge laser," *Optics. Commun.*, 42, 128-132(1982).
- 9) H. Shields, A. J. Alcock, and R. S. Taylor, "Preionization kinetics of an x ray preionized XeCl gas discharge laser," *Appl. Phys. B*, B31, 27-35(1983).
- 10) C. R. Tallman and I. J. Bigio, "Determination of the minimum x ray flux for effective preionization of an XeCl laser," *Appl. Phys. Lett.*, 42, 149-151(1983).
- 11) A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, Yu. N. Novoselov, A. M. Prokhorov, V. S. Skakun, V. E. Tarasenko, and S. A. Genkin, "Use of x ray radiation to preionize the active medium in high-pressure gas lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 14, 356-359(1984).
- 12) 緑川克美, 小原 實, 藤岡知夫, "X線予備電離希ガスハライドレーザー," *レーザー研究*, 12, 114-124(1984).
- 13) L. F. Champagne, A. J. Dudas, and B. L. Wexler, "Progress on the scaling of the X ray preionized discharge pumped XeCl laser," *Proc. SPIE*, 476, 2-5(1984).
- 14) M. Steyer and H. Voges, "Parametric study of x ray preionized high pressure rare gas halide lasers," *Appl. Phys. B*, B42, 155-160(1987).
- 15) J. Bonnet, D. Pigache, E. Estocq, P. Laborde, and M. Stehle, "Experimental analysis of an x ray preionized XeCl laser," *Proc. SPIE*, 1023, 92-97(1988).
- 16) 佐藤三郎, 角野 努, 内田 裕, 後藤達美, "X線予備電離パルスレーザーの開発 (I) -産業用X線管の適応評価-, " *レーザー学会学術講演会第8年次大会予稿集*, 19a I 11, 70(1988).
- 17) 佐藤三郎, 角野 努, 内田 裕, 後藤達美, "X線予備電離パルスレーザーの開発 (II) ," 第35回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-ZL-3, 782 (1988).
- 18) 柿崎弘司, 角野 努, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz級X線予備電離エキシマレーザーの開発 (I) ," 第39回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29p-D-3, 884(1992).
- 19) 柿崎弘司, 角野 努, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz級X線予備電離エキシマレーザーの開発 (II) ," 第40回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-Z-7, 980(1993).
- 20) 柿崎弘司, 角野 努, 佐藤三郎, 後藤達美, "kHz級X線予備電離エキシマレーザーの開発 (III) ," 第54回応用物理学学会学術講演会予稿集, 28p-B-8, 944(1993).
- 21) 柿崎弘司, 角野 努, 後藤達美, "kHz級X線予備電離エキシマレーザーの開発(IV) ," 第55回応用物理学学会学術講演会予稿集, 21a-C-6, 884(1994).
- 22) T. Letardi, P. Di Lazzaro, G. Giordano, and C. E. Zheng, "Large area x ray preionizer for electric discharge laser," *Appl. Phys. B*, B48, 55-58(1989).
- 23) M. Steyer, K. A. Stankov, H. Mizoguchi, B. Outang, and F. P. Schäfer, "Compact, wide aperture x-ray preionized XeCl laser with high specific optical power," *Appl. Phys. B*, B49, 331-337(1989).
- 24) M. L. Sentis, Ph. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Parametric studies of x-ray preionized discharge XeCl laser at single shot and at high pulse rate frequency(1 kHz)," *J. Appl. Phys.* 66, 1925-1930(1989).
- 25) B. Fontaine, B. Forestier, Ph. Delaporte, and P. Canarelli, "Pulse repetition frequency effects in a high average power x-ray preionized excimer laser," *Proc. SPIE*, 1132, 64-72(1989).
- 26) J. W. Gerritsen, H. P. Godfried, and R. J. M. Bonnie, "Mixture-dependent electron densities in x-ray preionized Ne-Xe-HCl mixtures," *J. Appl. Phys.*, 67, 2716-2724(1990).
- 27) B. Rácz, M. Steyer, and H. Mizoguchi, "Spatial distribution and temporal development of the gain in a wide aperture x-ray preionized excimer amplifier," *Optical Commun.*, 80, 353-358(1991).
- 28) S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, N. Lisi, and C. E. Zheng, "Space and time re-solved discharge evolution of a large volume x ray triggered XeCl laser system," *Appl. Phys. B*, B55, 84-91(1992).
- 29) T. Letardi, H. Fang, and S. Fu, "Theoretical modeling of an x ray preionized self sustained XeCl laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, 28, 1647-1652(1992).
- 30) 扶間寿文, "大口径X線予備励起KrFレーザーの高効率・大出力発振," *レーザー研究*, 20, 929-947(1992).
- 31) T. Y. Chang, "Improved uniform field electrode profiles for TEA laser and high voltage applications," *Rev. Sci. Instrum.*, 44, 405(1973).
- 32) E. A. Stappaerts, "A novel analytical design method for discharge laser electrode Profiles," *Appl. Phys. Lett.*, 40, 1018-1019(1982).
- 33) G. J. Ernst, "Uniform-field electrodes with minimum width," *Optics Commun.*, 49, 275-277(1984).
- 34) T. Hermsen, "Note on the design of electrode profiles for discharge lasers," *Optics Commun.*, 64, 59, (1987).
- 35) A. Ishii et al. "Uniform field electrodes for high power and high repetition TEA CO₂ lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, 88-92(1993).
- 36) A. Ishii, K. Yasuoka, Y. Okita, T. Tamagawa, and T. Tamagawa, "3 kHz XeCl excimer laser using newly developed electrode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, 2324-2328(1995).
- 37) H. D. Hogge et al. "Flow and acoustics in pulsed excimer systems," Paper No.2/4, AIAA Conference on Fluid Dynamics of High Power Lasers, Cambridge, MA, Oct., (1978).
- 38) P. E. Cassady, "Fluid dynamics in closed cycle pulsed lasers," *AIAA J.* 23, 1922-1931(1985).

- 39) V. M. Borisov, Y. B. Kiryukhin, I. V. Kochetov, and V. P. Novikov, "Electron kinetics and acoustically induced inhomogeneities of the energy deposited in a pulse periodic XeCl laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 15, 1081-1086(1985).
- 40) C. J. Knight, "Sidewall muffler design for pulsed excimer lasers," *AIAA Journal*, 24, 1774-1782(1986).
- 41) V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, F. I. Vysikailo, A. V. Gubarev, Yu. B. Kiryukhin, I. E. Krayushkin, and S. A. Laptev, "Acoustic vibrations in the gas discharge chamber of a fast-flow pulsed-periodic laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 17, 766-770(1987).
- 42) L. Arif, et al. "Waves behavior in a high repetition high average power excimer laser," *Proc. 7th Int. Symp. Gas Flow and Chemical Lasers*, SPIE Vol. 1031, 392(1988).
- 43) A. Holmzwarth, J. Griebisch, and P. Berger, "Theoretical and experimental investigations on pressure wave reflections and attenuation in high power excimer lasers," *Proc. SPIE*, 1503, 98-109(1991).
- 44) S. Kosugi, K. Maeno, and H. Honma, "Effects of xenon gas on generation and propagation of shock waves in the cavity of excimer laser," *Proc. SPIE*, 1810, 217-220(1992).
- 45) S. Kosugi et al. "Measurement of gas temperature profile in discharge region of excimer laser with laser schlieren method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, 4980-4986(1993).
- 46) 小杉伸一郎, "エキシマレーザ放電部衝撃波の研究," 千葉大学博士論文, (1994).
- 47) 岩淵 俊, 武藤勝彦, 宮田威男, 春田健雄, 後藤達美, "大出力・高繰返しエキシマレーザ用光学部品の開発," 第55回応用物理学会学術講演会予稿集, 20p-c-1, 864(1994).
- 48) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 石川 憲, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの開発 (XIX)," レーザー学会学術講演会第14回年次大会予稿集, 20a II 8, 37(1994).
- 49) 高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 石川 憲, 後藤達美, "5 kHz 高繰返しエキシマレーザの開発 (XXI)," 第41回応用物理学会学術講演会予稿集, 30p-H-6, 966(1994).

第5章 エキシマレーザ装置の半導体スイッチ電源駆動

5.1. はじめに

エキシマレーザでは、高速立ち上がりのパルス放電励起を行う必要があり、現在は、過去の遺物とも言える電子管のサイラトロンをスイッチングに使っている。しかし、この寿命が $10^8 \sim 10^9$ ショット程度で kHz 台の高繰返し動作では頻りに交換が必要となり、とくに高出力装置ではそれらを複数個同時にスイッチ動作させるため、実用では重大な技術課題となることは前に述べた。したがって、これを半導体スイッチ素子に置き換える試みが行われているが、研究着手時点ではサイラトロンと同等の性能を持つ高速大電力スイッチ素子はなく、多段の磁気パルス圧縮回路 (MPC) でパルス圧縮する方式が考え出された。しかし、これは電源効率が下がることで改善が必要とされた。このため、本研究では、重要項目として専用の高速半導体スイッチ素子を開発し、高繰返しエキシマレーザを駆動してサイラトロンの置換を実証することにした。¹⁾

5.2. 開発装置の設計コンセプト

5.2.1. 半導体スイッチング電源化の状況

サイラトロンは、kHz 級の大出力エキシマレーザ電源用として単体では対応できず、電子管の特性上、直・並列動作に適さない。また、電極劣化や封入ガスの制御における本質的な技術限界から、寿命が $10^8 \sim 10^9$ ショットと短く、実用としては低出力・低繰返し電源用に限られる、これはランニングコストの点でも、大きな制約を課す結果になっている。そこで、高繰返し・大出力エキシマレーザでは、電源のスイッチ素子を半永久的寿命を持つ半導体化することは不可避とも言えよう。

このような技術は、本研究開発に着手した当初にはあまり注目されていなかったが、MPCに使う過飽和リアクトルコア材の改良、低損失化が進み、サイラトロン方式より優位になってきた^{1), 2)}。しかし、スイッチ素子の性能を上げない限り、効率や大きさが実用性を妨げ、今なお大部分の装置ではサイラトロンが使われている。

図5-1は、通常スイッチ素子に使われている大容量サイラトロン製品の外観図と、これにMPCと同じように過飽和リアクトルを回路インダクタンスを低減させるよう一体的に取り付け、磁気アシストとして用い寿命の改善を図った場合の写真である。これらサイラトロンの性能仕様概要は、以下のようにになっているが、今後はほとんど新たな技術開発の余地はなく、大きな性能向上は望めない。

2) - 3)

* 順方向アノード電圧	: 30 kV
* ピーク順方向アノード電流	: 10 kA
* パルス繰返し数	: 500 Hz
* 平均アノード電流	: 1 A
* アノード電流立ち上がり時間	: 50 kA/ μ s
* アノード電流パルス幅	: 0.5 μ s

一方、半導体スイッチ化の研究開発は活発であり、それらの代表例として、図5-2にSCRサイリスタを使ったTEA CO₂レーザ駆動用電源の回路概略図を、表5-1、2にその設計仕様値およびパラメータを示す³⁾。しかし、寿命の問題は解決されるとしても、今のところ製品レベルでは半導体スイッチ素子の耐圧が低いため、昇圧トランスを使うとその分パルス立ち上がりが悪くなるなど

で、多段のMPCが必要になる。ところがこれには、大形、低効率、高価、など実用には致命的な問題が伴うので、まだ多くの技術課題があると言わざるを得ない。^{4) - 5)}

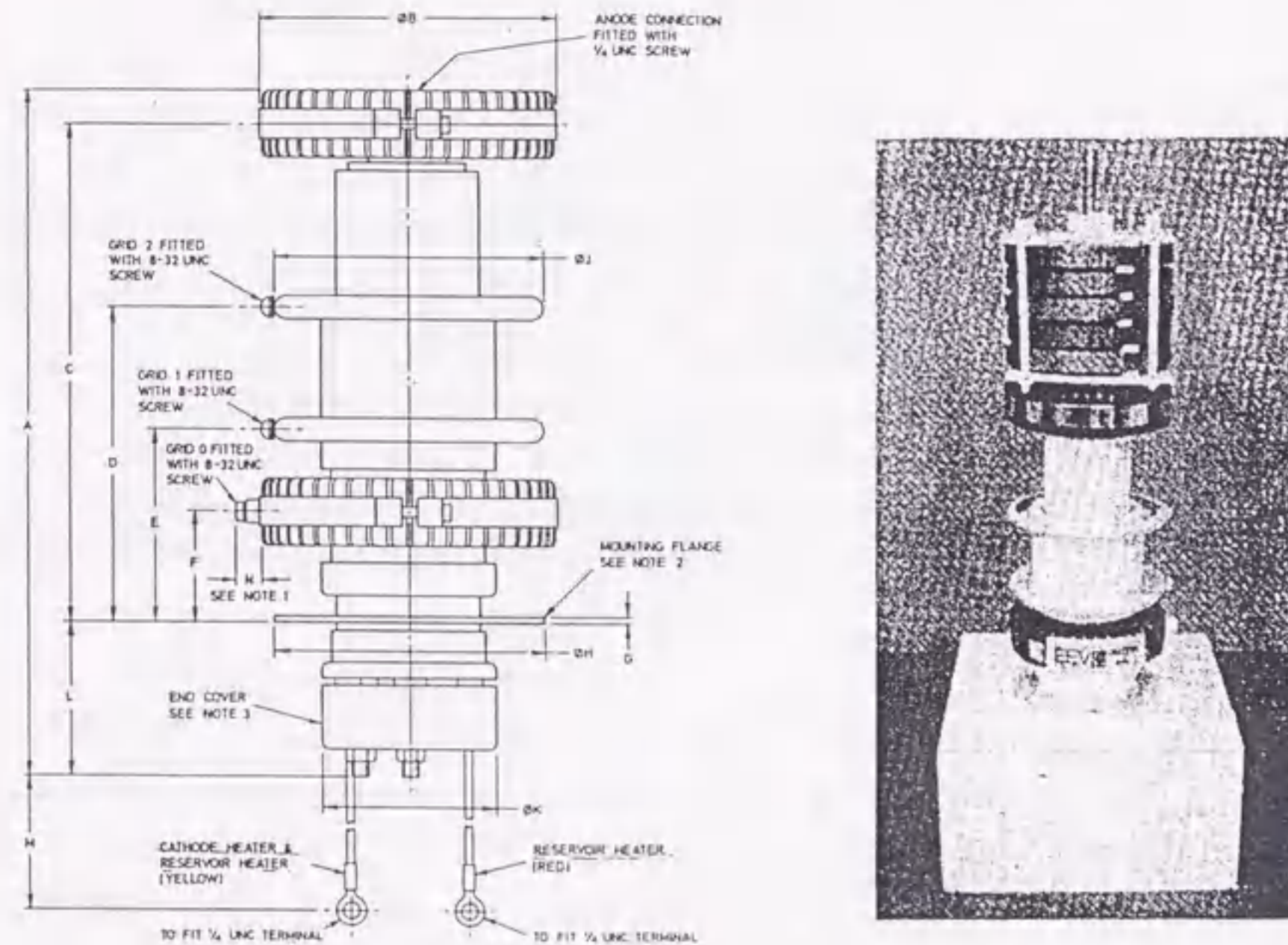


図5-1 大容量サイラトロンと磁気アシスト構成

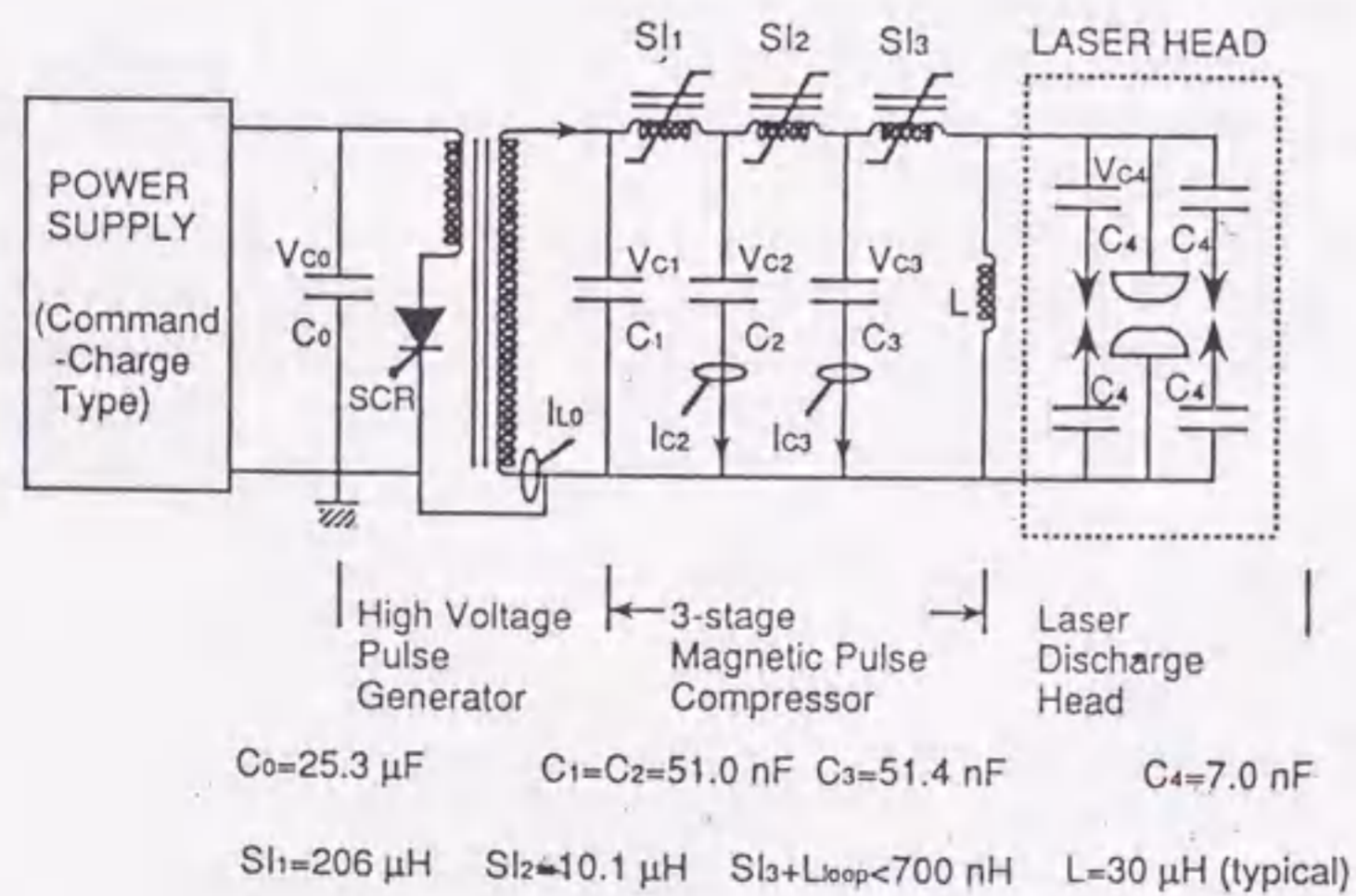


図5-2 全固体電源の回路構成例

表5-1 全固体電源の設計パラメータ

Number of Series SCR:	n_s	1
Number of Parallel SCR:	n_p	2
Step-up Ratio:	a	22
Current Compression Ratio:	G	100
Voltage Gain:	α	22
Current Gain:	β	9.09
Current Rise Rate Gain:	γ	909

表5-2 全固体電源の動作仕様値

	SCR	PT ^{a)}	MPC
Charging Voltage (kV)	2.85	63	60
Capacitance (μF)	25	—	0.050
Pulse Duration (μsec)	35	35	0.5

a) PT: Pulse Transformer

したがって、高電圧、大電流、高速立ち上がりを満たす半導体スイッチ素子の開発が、これらの問題を根本的に解決するものとして期待され、諸新半導体素子の提案・開発が進められるようになってきた。最近では、これらの要求にできるだけ近い半導体スイッチ素子を組み込んだ電源を使って、レーザー装置の製品化を進める動きも一部では始まっている。しかし、高繰り返し動作に対しては、さらにスイッチング損失の極限的低減化が強い要求として加わるため、筆者らは独自の高繰り返しスイッチング動作に適する素子開発を行うことにした。^{6) - 7)}

5.2.2. 電源回路の基本設計

まず半導体スイッチ素子については、基本構造として、高速性に優れたMOS-FET (Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor) 構造を、大電力性に優れたサイリスタに取り込んだ、高速ターンオン半導体スイッチ素子 (MAGT: MOS Assisted Gate-triggered Thyristor と命名) を設計した。

この半導体素子の基本構造としては、順方向耐圧に優れた大電力を駆動する能力を持つバイポーラ素子と、高速スイッチング能力を持つユニポーラ素子両方の長所を合わせ持つ複合型パワー素子が適するとして、MOSサイリスタ構造の検討を進めた。当面は、サイラトロンと同等のスイッチング性能を持ち、これと容易に互換できるような高速ターンオン半導体スイッチ素子、およびその駆動回路技術の研究開発を行った。素子試作は、まず基本特性のシミュレーションを行い、高 di/dt 化および高繰り返し化のための試作評価結果を基にして、その大電流化に向けての問題点抽出をする手順を進めた。大電流化には、微細電極構造形成に必要なプロセス検討のための要素試作を行い、素子構造を最適化する。

一方、これを組み込む電源回路設計では、素子を複数個直列接続して 30 kV 程度の耐圧とするため、素子保護に1段のMPC (磁気アシストを兼ねる) を使うこととした。これには、個々の素子間における特性差の補正など、スイッチング装置としての高繰り返し動作に伴う回路技術上の問題点を明らかにする。

高繰り返しエキシマレーザー用高速スイッチング技術では、従来のサイラトロンを半導体化する高速ターンオン半導体スイッチの開発に伴い、その高速スイッチング技術の研究開発を行っている。エキシマレーザーの高繰り返し化において、高速スイッチング技術の研究は要素技術の一つであり、寿命に問題のあるサイラトロンに代わり、高速ターンオン半導体スイッチング技術の研究開発が要求される。

5.3. 高速半導体スイッチ素子

5.3.1. 素子構造の基本設計と特性

基本特性の検討結果から、まず高 di/dt 化を狙ったMOSサイリスタ構造の高速ターンオン半導体スイッチ素子試作を行った。図5-3に、高速ターンオン半導体スイッチの構造として選定したMOSサイリスタ（以下、MAGT：MOS Assisted Gate-triggered Thyristor）基本構造を、素子特性の比較のために、同時に試作した従来のIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）構造と並べて示す。

MAGT構造では、高 di/dt でサイリスタをターンオンするための絶縁ゲート電極と、pベース層電位の固定、オフ状態の維持および高 dv/dt 耐量の達成を目的としたベース電極とを備えている。ゲート電極に正の電圧が印加されると、電子がカソード電極からn型チャンネルを通して直接nベース層に注入され、nベース層内の電子密度の急激な増加をもたらす。それに伴い、アノード電極から正孔の注入が起り、nエミッタから電子が接合を通して注入されて、MAGTはラッチアップしサイリスタ動作を開始する。IGBTでは、ウェルとなるpベース層の電位を、ソース電極とpベース層の短絡によって固定しているが、この構造だと、エミッタ注入効率が低下してサイリスタ動作が起りにくい。それに対し、MAGTではベース電極を設けることで、pベース層の電位を固定しているので、高いエミッタ注入効率を実現でき、速やかにサイリスタ動作に移行することができる。一方、MAGTをオフ状態に保つ時には、ゲート電極に負の電圧を印加すれば、オフ状態でのリーク電流および高 dv/dt による変位電流は、ベース電極から排出されるので、トリガー感度の高いMAGTが誤点弧するのを防止することができる。^{8) - 10)}

最初の試作ペレット寸法は、3.3 mm×4.9 mmであり、多層配線構造形成プロセスを追加、ベース電極コンタクト部分の微細化を図った。nベース層の幅はキャリア密度を急速に増加させ、高速ターンオンを実現するために順方向耐圧を損なわない範囲で可能な限り薄くし、不純物濃度プロファイルは、トリガー感度が高くなるようにした。また、 dv/dt 耐量を高めることを目的として、電子線照射によるキャリアライフタイム制御を試み dv/dt 耐量とターンオン特性に対する効果を調べた。

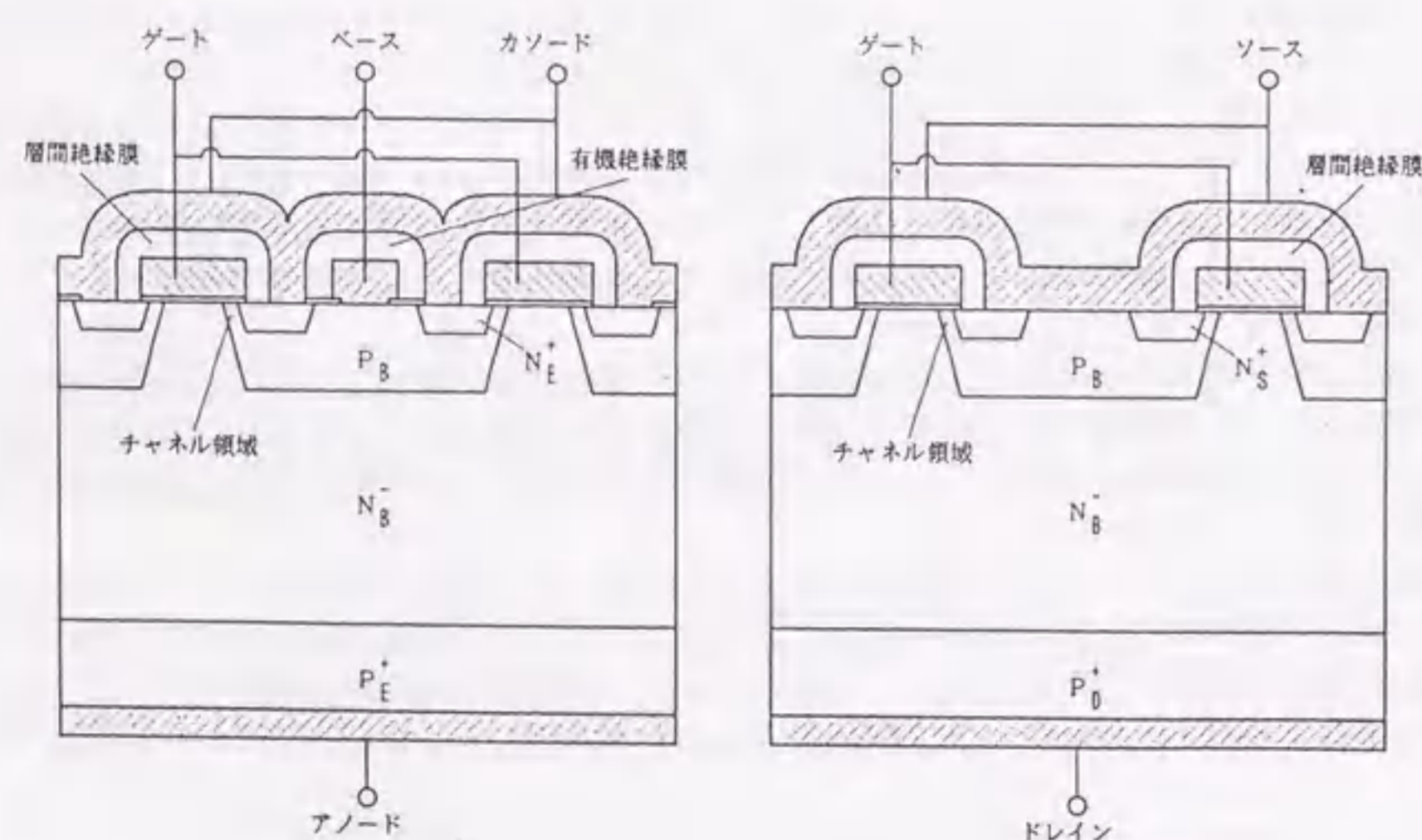


図5-3 MOSサイリスタ（左）とIGBT（右）構造比較

この結果、微細化によるエミッタ面積増加の効果が現れて、ターンオン特性に大幅な向上が見られ、順方向耐圧も目標値の2,500 Vが確認できた。図5-4は、試作したMAGTとIGBTについて、の順方向電圧降下の電流密度依存性を示す。トランジスタ動作で導通しているIGBTが、電流密度 300 A/cm^2 程度で飽和しているのに対し、MAGTは、サイリスタ動作により順方向電圧降下7 Vで 10 kA/cm^2 もの高い電流密度の導通を可能としている。したがって、IGBTでは 300 A/cm^2 より高いピーク電流密度のパルス通電をしようとする、大きな順方向電圧降下が発生し、その電力損失により多大な発熱を生じる。これに対し、MAGTでは、 10 kA/cm^2 もの高いピーク電流密度までパルス通電がきわめて低い順方向電圧降下で可能となり、高繰返し時においても低損失、すなわち低発熱で動作する。これより、小さなチップ面積の素子で、高速ターンオン半導体スイッチを構成することができる。

図5-5はパルス通電波形測定回路で、容量CとインダクタンスLの値を変えることにより、パルス通電のピーク電流値 I_{AP} （IGBTの場合は I_{DP} ）、電流立ち上がり率 dI_a/dt 、またパルス通電幅をいろいろと変えて電流・電圧波形を測定した。図5-6は、試作したIGBTのパルス通電波形である。IGBTのドレイン電流 I_D のピークに対応して、ドレイン電圧 V_D の急激な増加が見られる。これは、ピーク電流密度が飽和電流密度 300 A/cm^2 を超えているために生じた現象である。

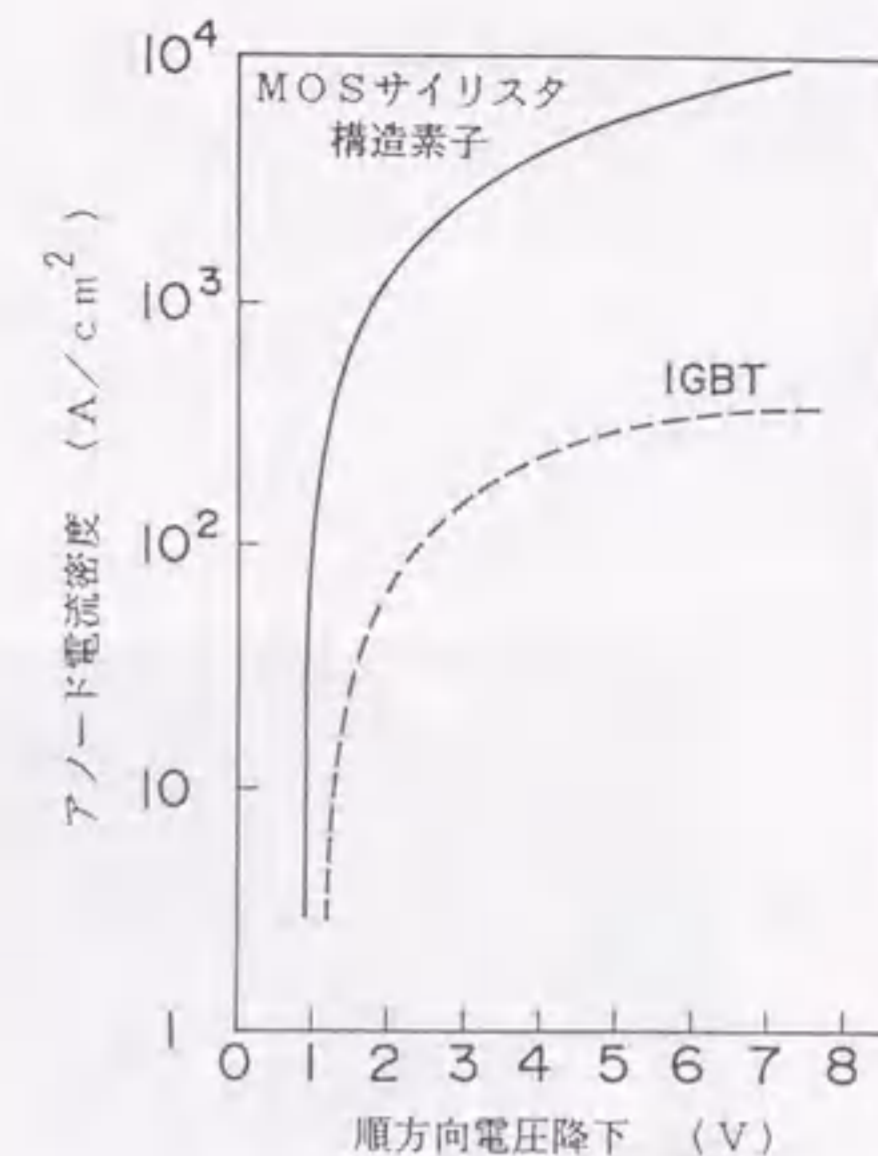


図5-4 試作MOSサイリスタ構造素子とIGBT素子の特性比較

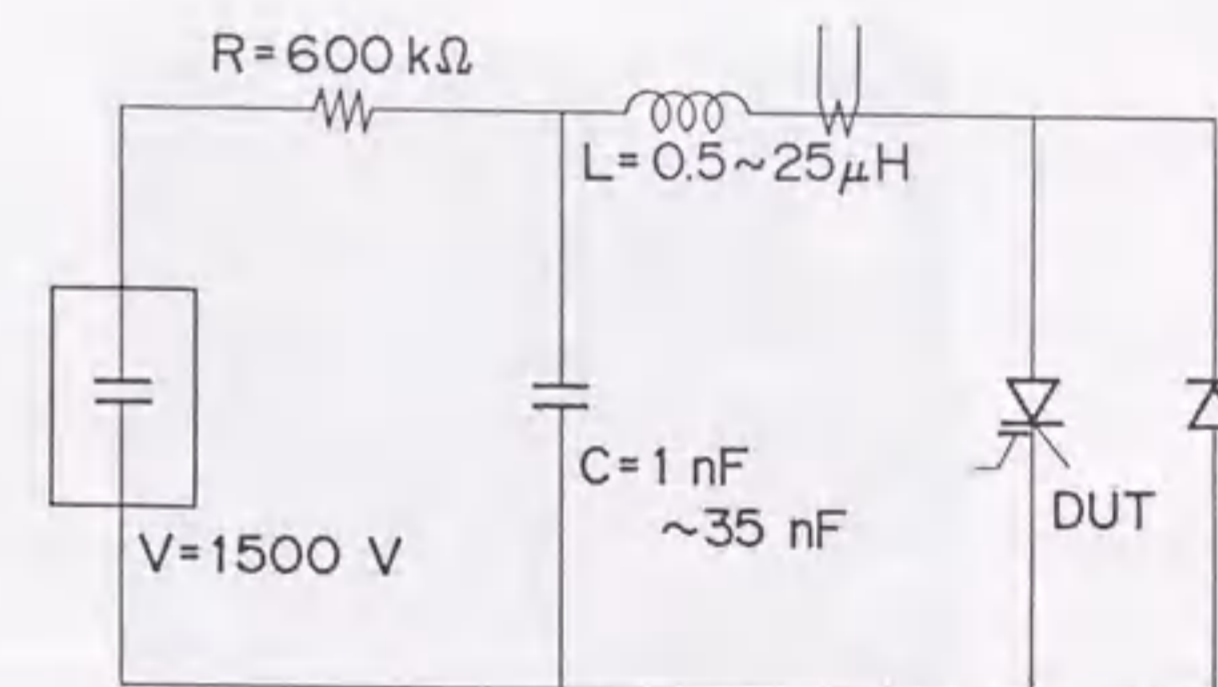
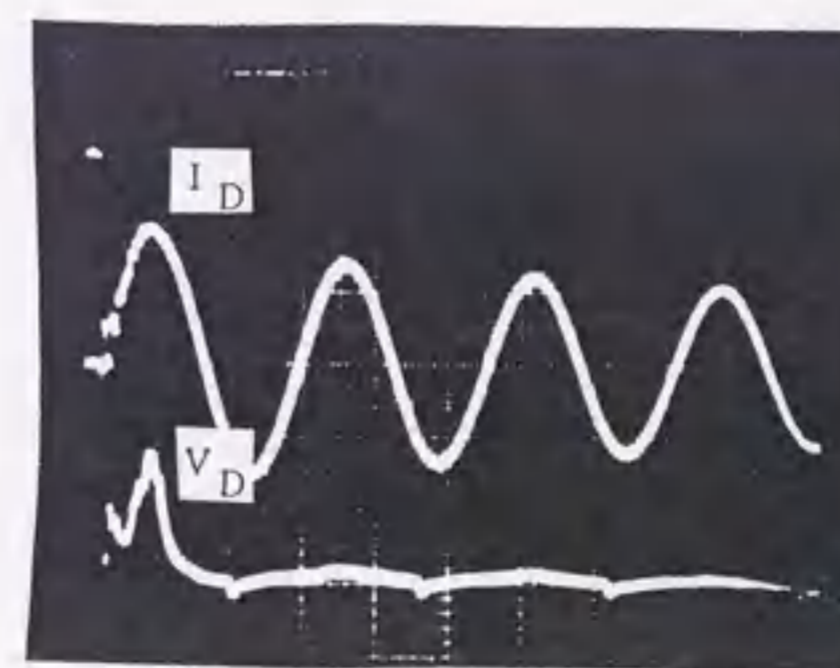


図5-5 パルス通電波形測定回路

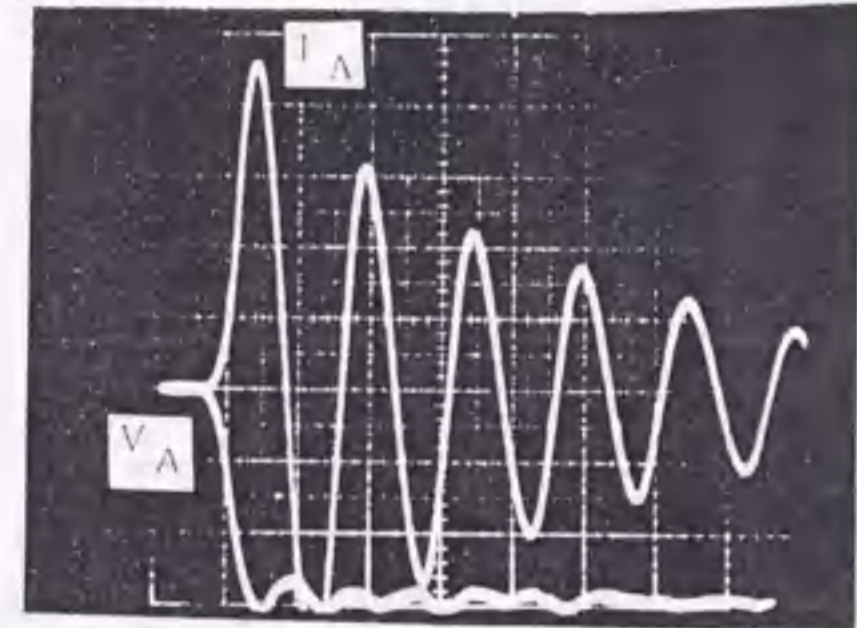


$I_{DP} = 19 \text{ A}$ (400 A/cm^2)
 I_D : ドレイン電流 10 A/div.
 V_D : ドレイン電圧 200 V/div.
 t : 時間 $0.5 \mu\text{s/div.}$

パルス幅 $0.7 \mu\text{s}$

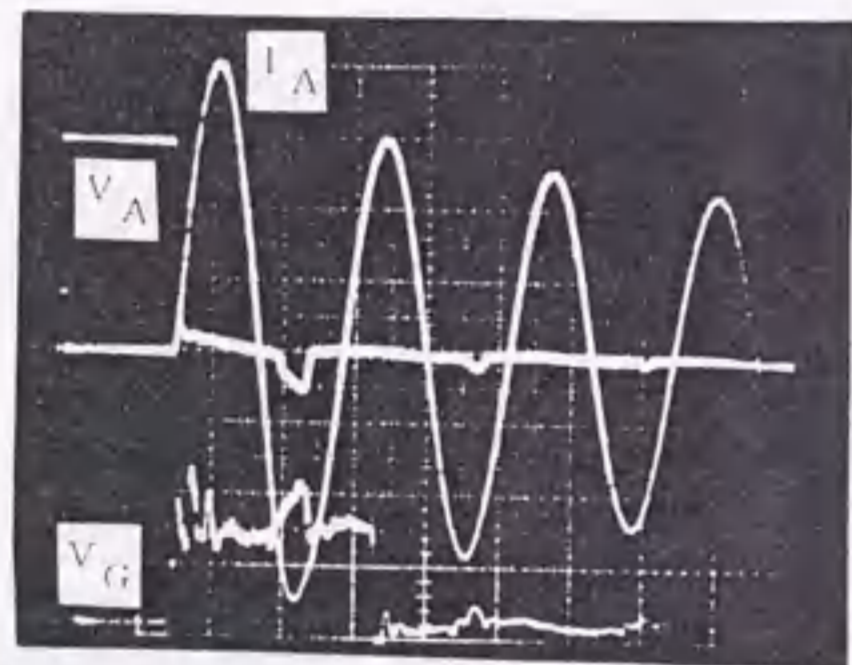
図5-6 試作IGBTのパルス通電波形

図5-7は、試作MAGTのパルス幅を0.1, 0.7, 3 μ sにした場合の通電波形である。いずれも、ピーク電流密度は kA/cm^2 オーダーであるが、飽和電流密度を超えていないため、IGBTで見られたような、パルス通電のピークに対応した急激な順方向電圧降下は見られない。パルス幅3 μ sの場合には、順方向電圧降下の増大はほとんど見られないが、0.7 μ sの場合には、通電の初期に高い電流立ち上がり率 dI_A/dt に起因する過渡的な順方向電圧降下の増大が見られる。その値はピーク電流密度 $9.1 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 、電流立ち上がり率 $40 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ という条件においてさえ、100 V以下という小さなものである。これらに対し、パルス幅0.1 μ sの場合は事情が異なり、MAGTがサイリスタ動作を開始するまでのアノード電圧が低下する期間が、パルス通電波形の大きな部分を占めるため、大きな電力損失が発生する。パルス幅0.1 μ sの場合に、これまでで最高の電流立ち上がり率 $55 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ が得られた。



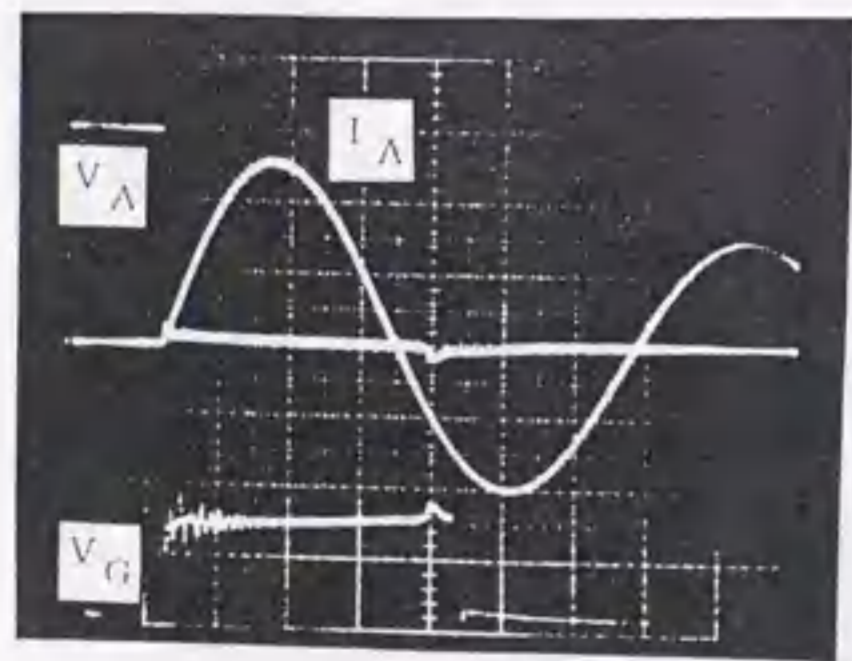
(a) パルス幅 0.1 μ s

$I_{AP} = 45 \text{ A}$ ($2.0 \text{ kA}/\text{cm}^2$)
 $dI_A/dt = 1.2 \text{ kA}/\mu\text{s}$
 (55 $\text{kA}/\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2$)
 I_A : アノード電流 10 A/div.
 V_A : アノード電圧 500 V/div.
 t : 時間 0.1 $\mu\text{s}/\text{div.}$



(b) パルス幅 0.7 μ s

$I_{AP} = 200 \text{ A}$ ($9.1 \text{ kA}/\text{cm}^2$)
 $dI_A/dt = 0.86 \text{ kA}/\mu\text{s}$
 (40 $\text{kA}/\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2$)
 I_A : アノード電流 50 A/div.
 V_A : アノード電圧 500 V/div.
 V_G : ゲート電圧 20 V/div.
 t : 時間 1 $\mu\text{s}/\text{div.}$



(c) パルス幅 3 μ s

$I_{AP} = 125 \text{ A}$ ($5.7 \text{ kA}/\text{cm}^2$)
 $dI_A/dt = 0.13 \text{ kA}/\mu\text{s}$
 (5.7 $\text{kA}/\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2$)
 I_A : アノード電流 50 A/div.
 V_A : アノード電圧 500 V/div.
 V_G : ゲート電圧 20 V/div.
 t : 時間 1 $\mu\text{s}/\text{div.}$

図5-7 試作MOSサイリスタ構造素子のパルス通電波形

MAGTは、ベース電極に負の電圧が印加されていれば、高い dv/dt 耐量を保つことはできるが、パルス通電直後に高い dv/dt がかけられると、ベース電極から排出される変位電流により大きな電力損失が発生し、高繰り返し動作時の発熱が問題となる。この変位電流を減少させることを目的として、電子線照射によるキャリアライフタイム減少を試み、 dv/dt 耐量とターンオン特性に対する影響を調べた。

図5-8、9は、それぞれ、パルス幅0.7 μ sの場合の順方向電圧降下の電流密度依存性およびターンオン電力損失のピーク電流密度依存性を示す。電子線照射したサンプルの方が順方向電圧降下が高いが、ターンオン電力損失は、わずかな差しか無いことがわかる。したがって、飽和電流密度以下の領域でこの素子を使う限り、電子線照射によるターンオン特性への影響は問題となるほどではない。さらに、深いn型層を高温で精度よく形成して、高耐圧n型微細素子化を行った。

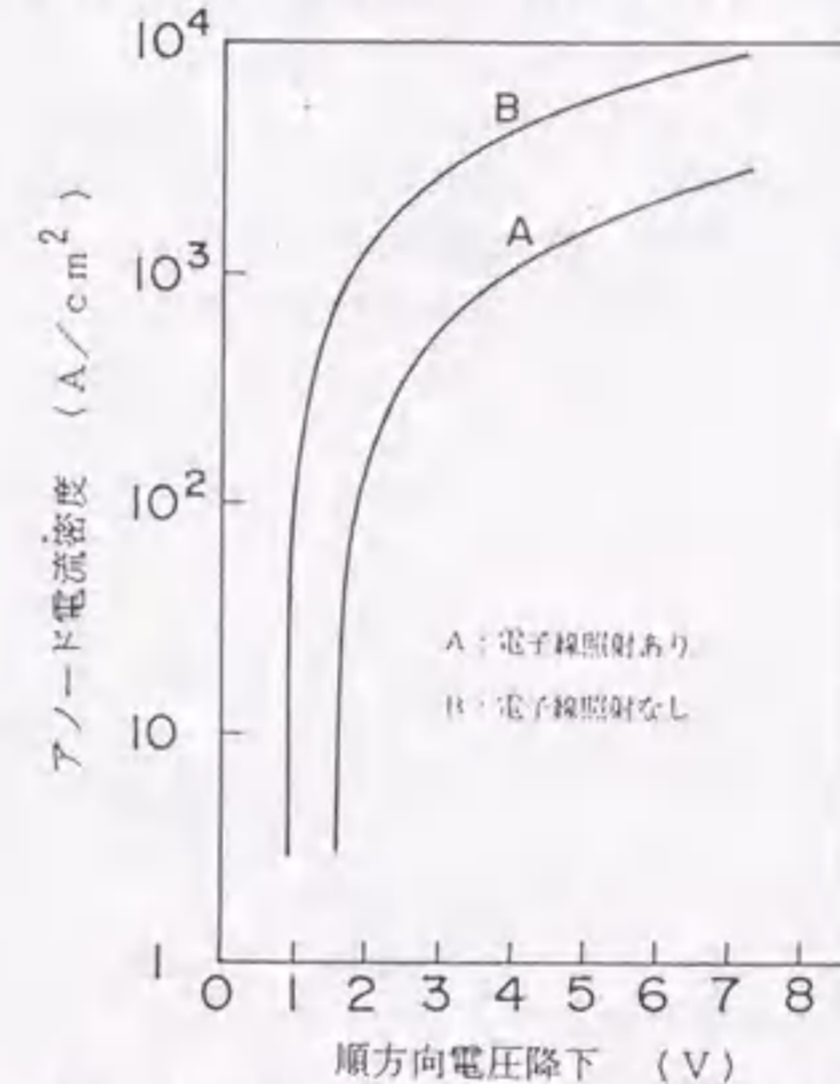


図5-8 試作MOSサイリスタ構造素子の順方向電圧降下—電流密度依存性

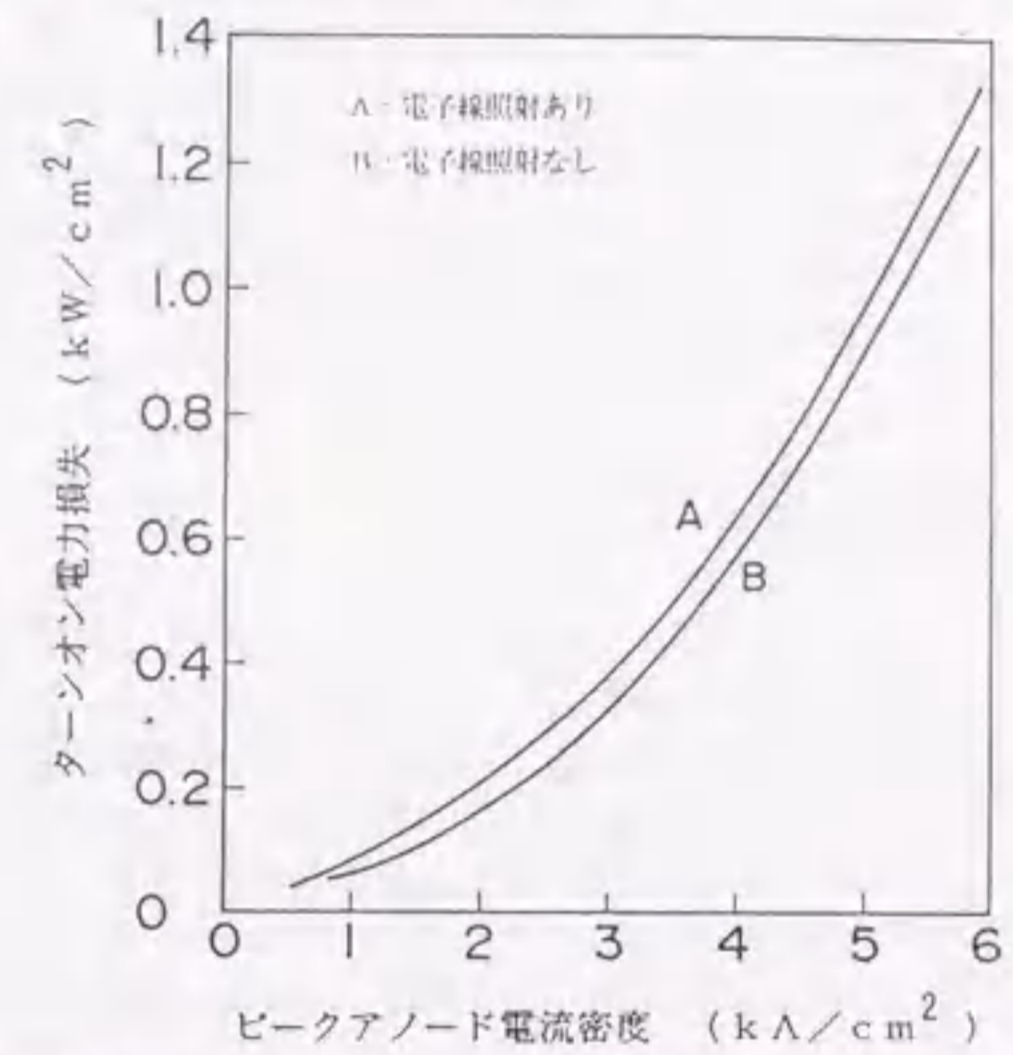


図5-9 ピークアノード電流密度とターンオン電力損失

また、MAGTに高繰り返しパルス通電をする際に、もっとも問題となるのは素子からの発熱量である。素子が収納されるパッケージの熱抵抗と冷却方式により、許容される発熱量の上限が決まるので、素子からの発熱量をそれ以下に抑えなければならない。それには、先ず発熱の原因となる電力損失発生要因を明らかにする必要がある。要因としては、ターンオン初期に現れる高 di/dt によるものと、その後の大電流通電によるものとに分けられる。しかし、その後の研究により、次のようなさらに詳しい発生要因が分かってきた。

- 素子における電力損失は、パルス通電期間、回路定数のミスマッチに起因する続流パルス通電時間、オフ期間の3つの期間における電力損失に分けられる。
- パルス通電時間における電力損失は、さらに、ターンオフの立上り時間に発生するもの、高 di/dt によるもの、ピーク電流での順方向電圧降下によるものとに分けられる。
- ターンオンの立上り時間に発生する電力損失は、アノード電圧が印加電圧から順方向電圧降下に相当する電圧まで低下する数10 nsの期間で発生する電力損失であり、この期間で、アノード電流が立上り始めるようなパルス幅の短い場合にのみ問題となり、パルス幅0.1 μ sの場合がこれに相当する。
- 高 di/dt による電力損失は、nベース中のキャリア密度が十分に高くないうちに、アノード電流が立上るために発生する電力損失であり、(c)の場合よりパルス幅が大きい、なお高い di/dt がかかっている場合に問題となり、パルス幅0.7 μ sの場合がこれに相当する。
- ピーク電流での順方向電圧降下による電力損失は、パルス通電のピークで流れるアノード電流密度が、素子の飽和電流密度を超える場合に問題となり、IGBTの場合がこれに相当する。MA

GTでは、飽和電流密度が 10 kA/cm^2 程度あるので、数 kA/cm^2 までの電流密度で使う場合には問題とはならず、(d)、(e)の発生要因による電力損失が主なものとなる。

- (f) 続流パルス通電期間における電力損失は、さらに、素子に順方向電流が流れている期間に発生するもの、逆並列ダイオードが通電するまでに素子に流れる逆方向電流によるものとに分けられ。この期間の電力損失は、回路定数のマッチングの度合い、逆並列ダイオードの特性などに依存して決まるので、その評価には、レーザ電源との組合せ試験が必要となる。
- (g) オフ期間における電力損失は、もれ電流や、 dv/dt による変位電流等によって発生するものであり、通常の素子ではさほど問題とはならないが、非常に高感度に設計されているMAGTの場合にはこれらの電流が無視できない大きさになる。

以上のような要因によって発生する電力損失のほとんどは、これまでの基本設計で明らかになっているように、nベース層を、順方向耐圧が仕様を満たす範囲内でできるだけ薄くすること、nエミッタ層の幅を同時ターンオンする幅に設定すること、微細化プロセスを適用して、チップ面積に占めるnエミッタの面積をできるだけ大きくすること、高トリガ感度となるように不純物プロファイルの設計を行うことが有効である。ただし、(g)の発生要因によるものは、電子線照射等によるキャリアライフタイムの最適化を行い、ターンオン特性を低下させずに、効果的に電力損失を低減させなければならず、さらに検討を加える必要がある。(11) - (12)

5.3.2. 素子の性能向上

図5-10に、実用試作したMAGTの断面構造を示す。高速ターンオンのために、サイリスタ構造のnエミッタ層とnベース層とを短絡し、nベース層に電子を高速注入するMOSFETがついているのが特徴である。また、pベース層電位の固定、オフ状態の維持および高 dv/dt 耐量の達成を目的としたベース電極を備えている。これで高いエミッタ注入効率を実現でき、速やかにサイリスタ動作に移行することができる。一方、MOSサイリスタ構造素子をオフ状態に保つ時にはベース電極に負の電圧を印加すれば、オフ状態でのリーク電流および高 dv/dt による変位電流はベース電極から排出されるので、トリガ感度の高いMOSサイリスタ構造素子が誤点弧するのを防止することができる。

図5-11にMAGTのペレット写真を示し、チップ寸法は $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、素子領域面積は 0.14 cm^2 で、大幅な拡大が図られている。この評価結果としては、nバッファ構造を採用しnベース層を薄型化したことで、順方向耐圧は変わらずターンオン特性には大きな改善が見られた。また、電流量を増大させたが、パターンレイアウトを工夫して配線抵抗を低減した結果、小面積素子と同程度の

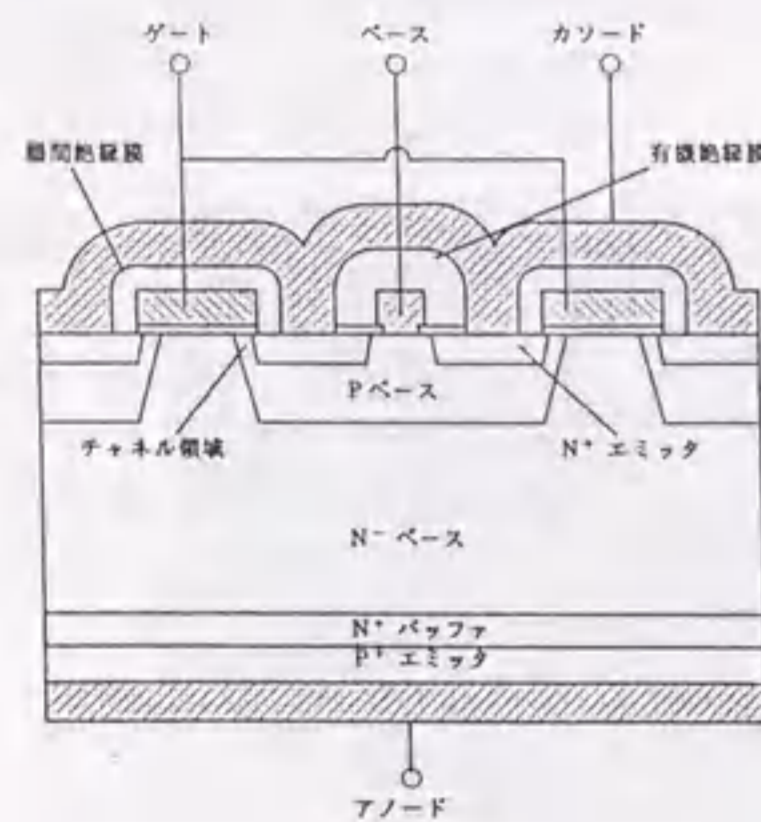


図5-10 試作MOSサイリスタ構造素子の断面図

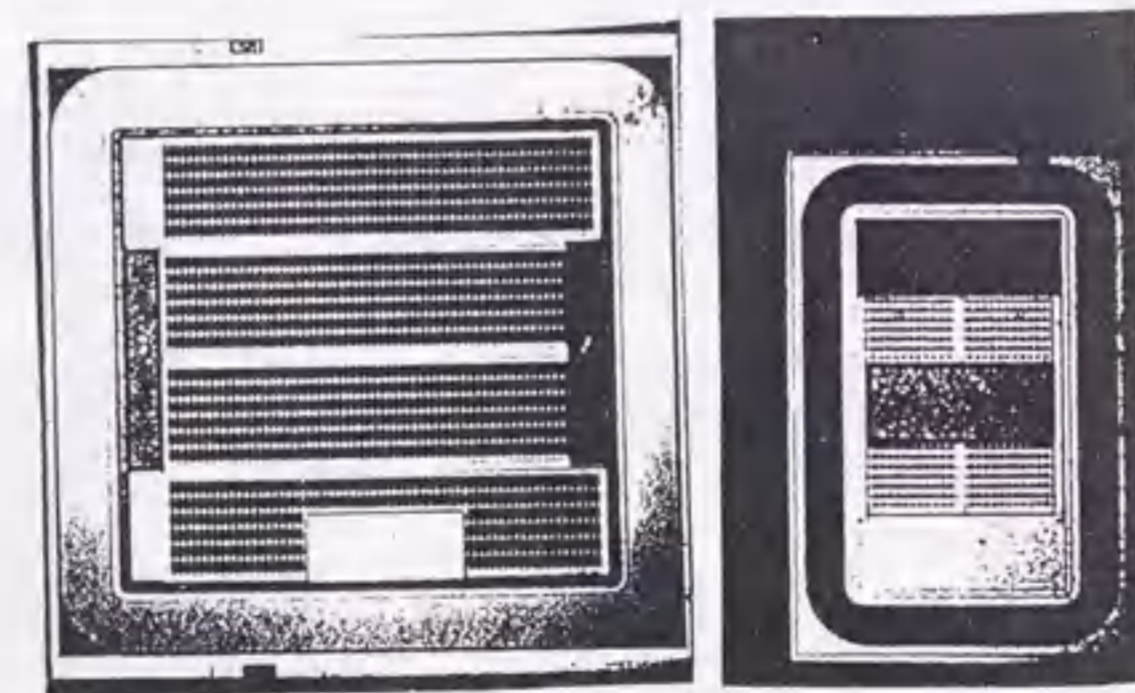


図5-11 試作MOSサイリスタ構造素子のペレット写真

図5-12は、nベース厚に対する順方向耐圧とターンオン損失の関係を示し、ターンオン損失はnベース層の厚さに対して単調増加を示している。nベース層が薄いほどターンオン損失は小さく、電子線照射量によらずほぼ同じ値となった。また、順方向耐圧の観点からは、nバッファ層を設けることにより、薄いnベース層でもパンチスルーによるブレークダウンを避けることが可能となり、高い順方向電圧を維持することができるようになる。実験結果では、nベース層の厚さが $250 \mu\text{m}$ 以上あれば $2,500 \text{ V}$ 以上の順方向耐圧が得られ、nベース層の厚さとしては、順方向耐圧が維持できる下限値の $250 \mu\text{m}$ を選ばれば良いことが分かった。

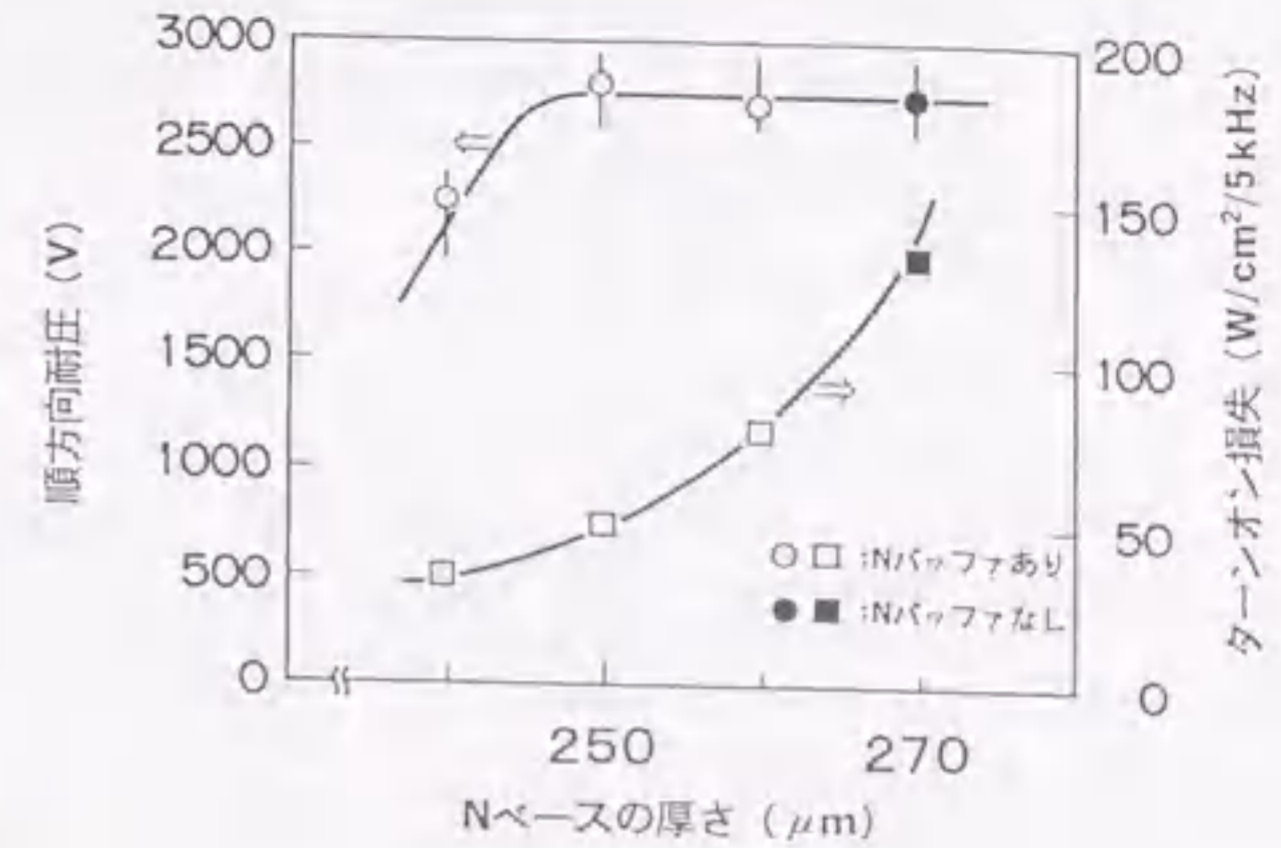
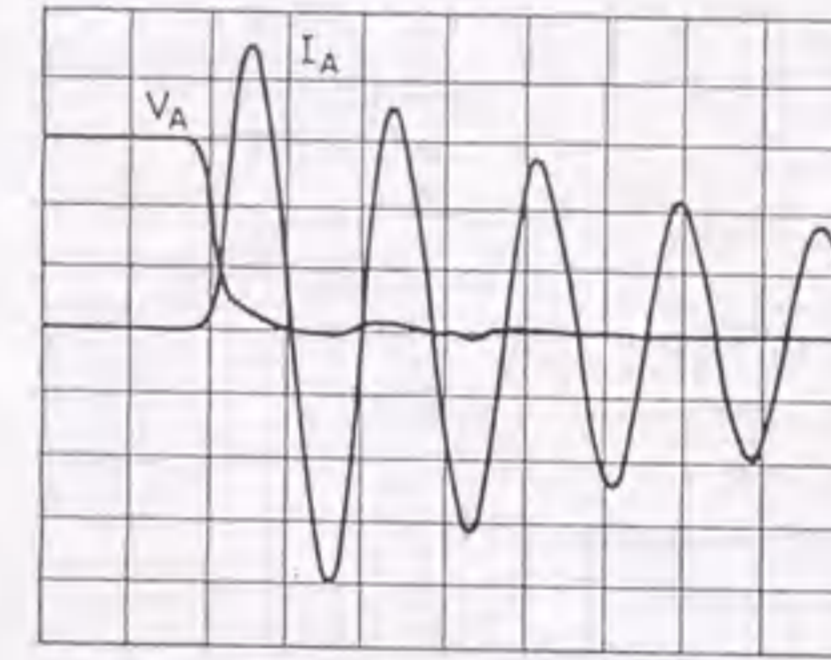


図5-12 耐圧・ターンオン損失とnベース厚さの関係

図5-13は、パルス通電波形であり、nバッファ層を付加してnベース層厚を減らしたことにより、きわめて高い電流立ち上がり率 $110 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ が得られた。図5-14は、電子線照射量とオン電圧の関係である。電流密度 600 A/cm^2 の場合、電子線を照射しない素子ではnベース層の厚さによるオン電圧の違いは小さいが、電子線を照射すると、少数キャリアの有効拡散長が減少するため、nベース層が厚くなると急激にオン電圧が上昇している。ターンオン損失は電子線照射量によってほとんど変化していないことから、少数キャリアライフタイムは高速ターンオンの過渡状態にはあまり影響を与えず、オン電圧を測定するような定常状態で主に影響を与えることが明らかとなった。



$i_p = 90 \text{ A}$ (4.1 kA/cm^2)
 $di/dt = 2.4 \text{ kA}/\mu\text{s}$
 ($110 \text{ kA}/\mu\text{s}/\text{cm}^2$)
 $I_A : 20 \text{ A/div.}$
 $V_A : 500 \text{ V/div.}$
 $\uparrow : 0.1 \mu\text{s/div.}$

図5-13 初回試作MOSサイリスタ構造素子のパルス通電波形

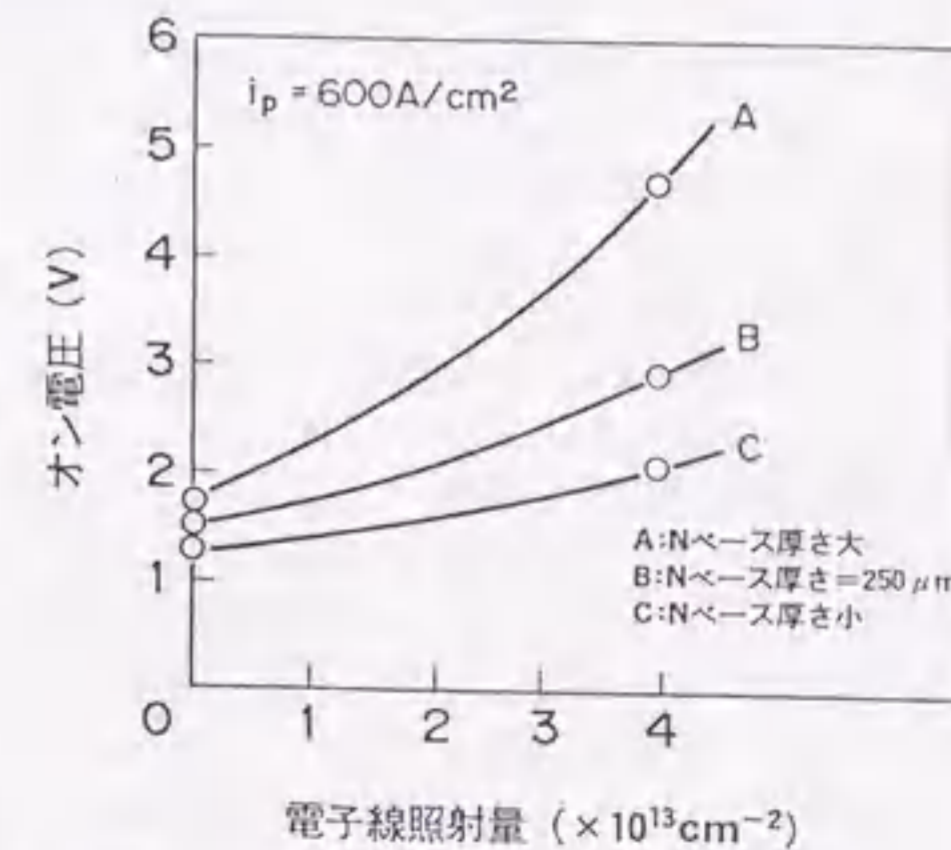


図5-14 電子線照射量とオン電圧の関係

高速ターンオン素子の特性として、電圧立ち上がり率 dv/dt に対する耐量も重要である。高繰り返しエキシマレーザ電源では、高電流密度のパルス電流を通電した後、次のパルスが来るまでに電圧を印加する必要がある。このため、通常使われるオフ状態で電圧を印加したときの dv/dt 耐量ではなく、パルス電流通電後の dv/dt 耐量を上げることが要求される。

図5-15は、パルス通電後の dv/dt 耐量の電子線照射量依存性を示し、最大電流値 i_p が 600 A/cm^2 、パルス幅 t_w が $0.7 \mu\text{s}$ のパルス通電をし、電流減衰後、休止時間 Δt が $5 \mu\text{s}$ 経過した時点で電圧を印加して dv/dt 耐量を測定した。電子線照射量が増すほど dv/dt 耐量が上がっているが、これは、電子線を照射すると少数キャリアライフタイムが減少し、パルス通電後速やかに素子内部のキャリアが消滅するためと考えられる。また、pベース層の不純物濃度、nエミッタ層の幅を変えたサンプルでも同様の測定を行なったところ、ベース電極までの引き出し抵抗が小さいほど大きな dv/dt 耐量が得られた。これも、引き出し抵抗が小さいほど素子内部のキャリアを速やかに排出できるためと考えられる。

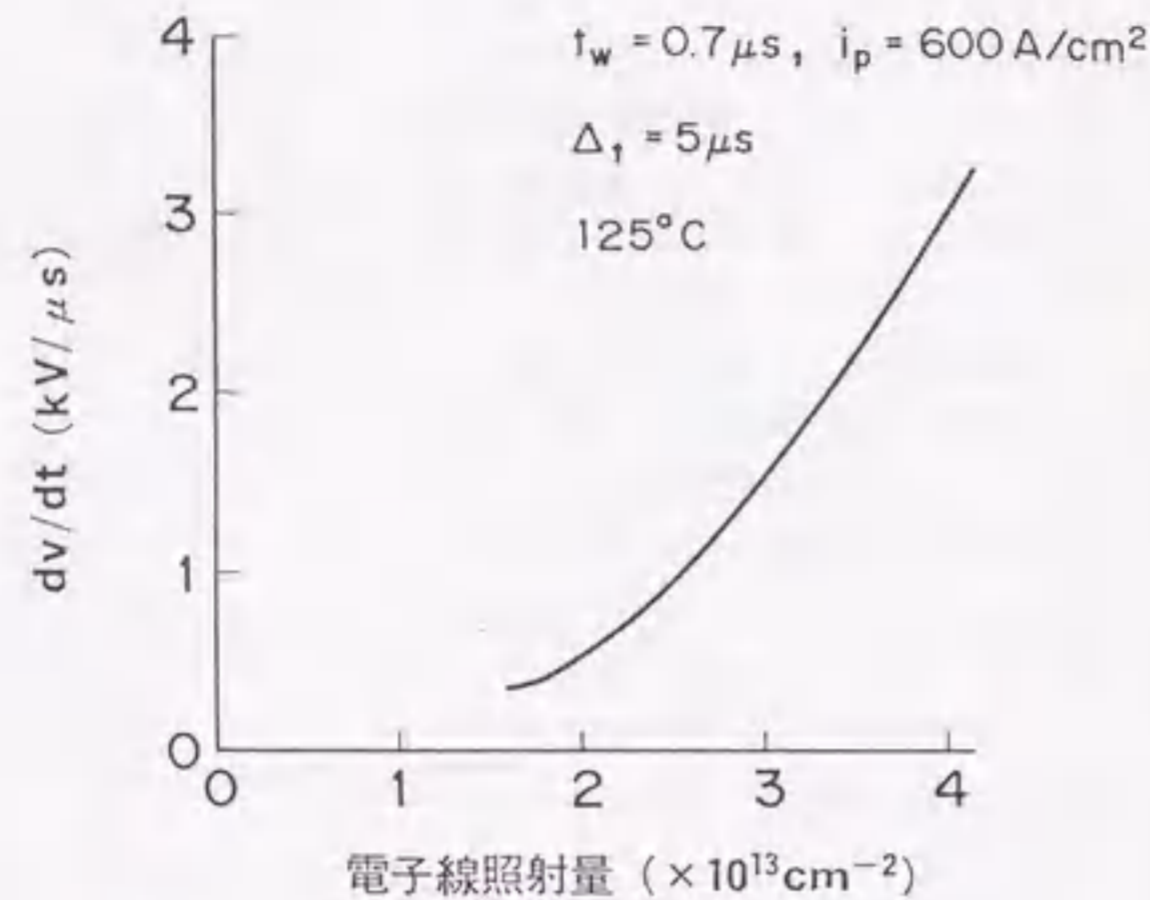


図5-15 dv/dt 耐量の電子線照射量依存性

図5-16は、ターンオン損失の電子線照射量依存性を示した図で、電子線照射量を増してもターンオン損失には変化が無いことがわかる。このように、高速ターンオン素子において、電子線照射は、 dv/dt 耐量の向上に有効に作用しターンオン損失の増加をあまり引き起こさない、というきわめて好都合な手段である。

以上述べてきたように、nバッファ層の採用によるnベース層薄型化の効果によりターンオン特性に大きな改善が見られ、ターンオン損失の低減、電流立ち上がり率の増大で優れた特性が得られた。また、電子線照射は、ターンオン損失をあまり増加させずに dv/dt 耐量を向上させることができることを確認した。

一方、半導体素子の重要な基礎パラメータであるキャリアライフタイムを、波長 337.1 nm の窒素レーザを使ったターンオン特性評価装置で測定した。図5-17は、pベース層、pエミッタ層として用いられるアクセプタ拡散層のキャリアライフタイムを求めたもので、ドナー濃度が約 10^{13} cm^{-3} のn形Si結晶にGaを拡散して作製した試料のキャリア濃度とキャリアライフタイムの拡散深さ依存性を示す。図5-18は、これを整理してキャリアライフタイムのアクセプタ濃度依存性を示す。アクセプタ濃度が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ までは、キャリアライフタイムは 1.1 から $1.3 \mu\text{s}$ で一定となった。しかし、アクセプタ濃度がそれ以上になると、キャリアライフタイムは急激に減少し、最終的には 260 ns までになった。

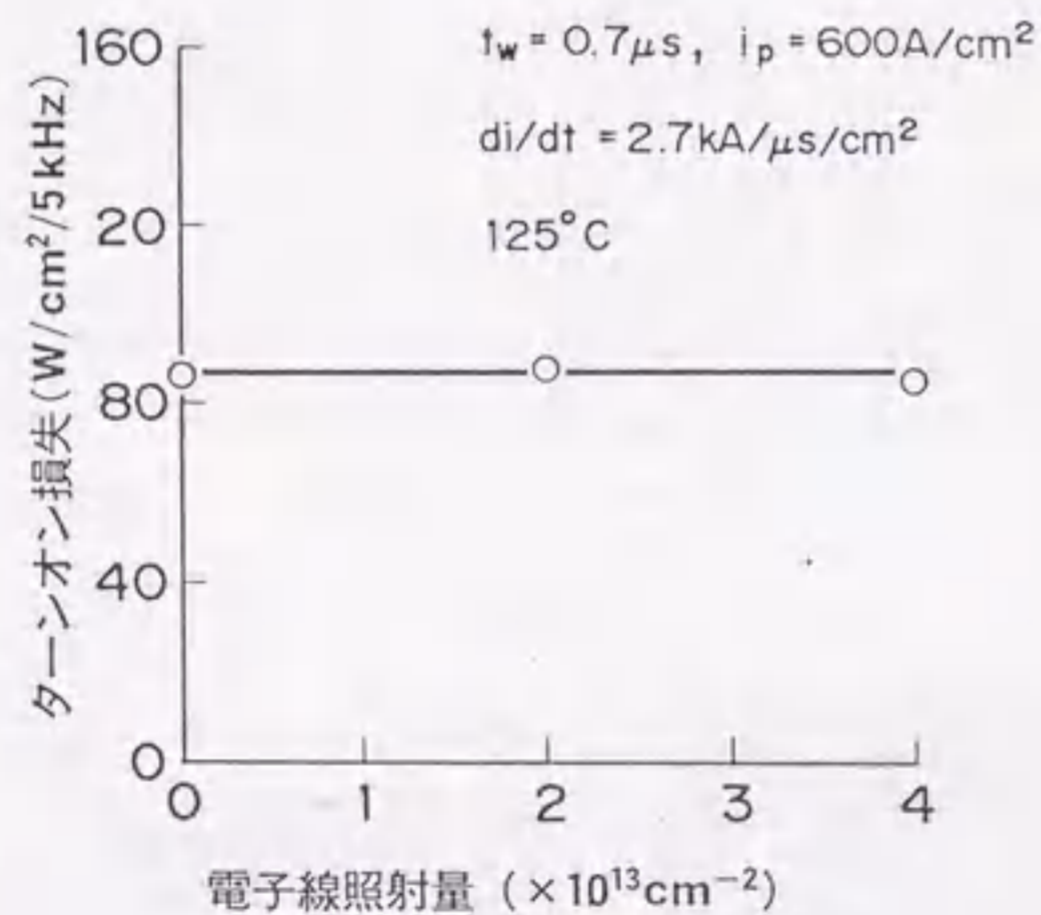


図5-16 ターンオン損失の電子線照射量依存性

この結果から、pベース層の最大アクセプタ濃度がほぼ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下であれば、pベース層のキャリアライフタイムを高く維持でき、高速ターンオン特性が得られることが分かった。

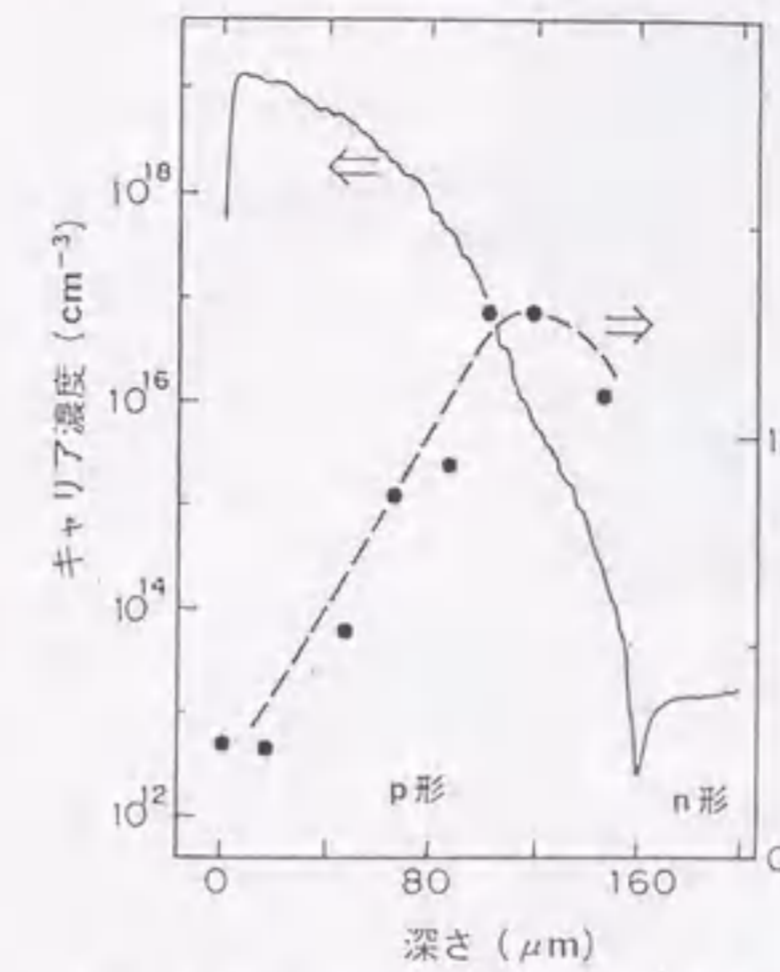


図5-17 拡散層のキャリア濃度とライフタイムの深さ依存性

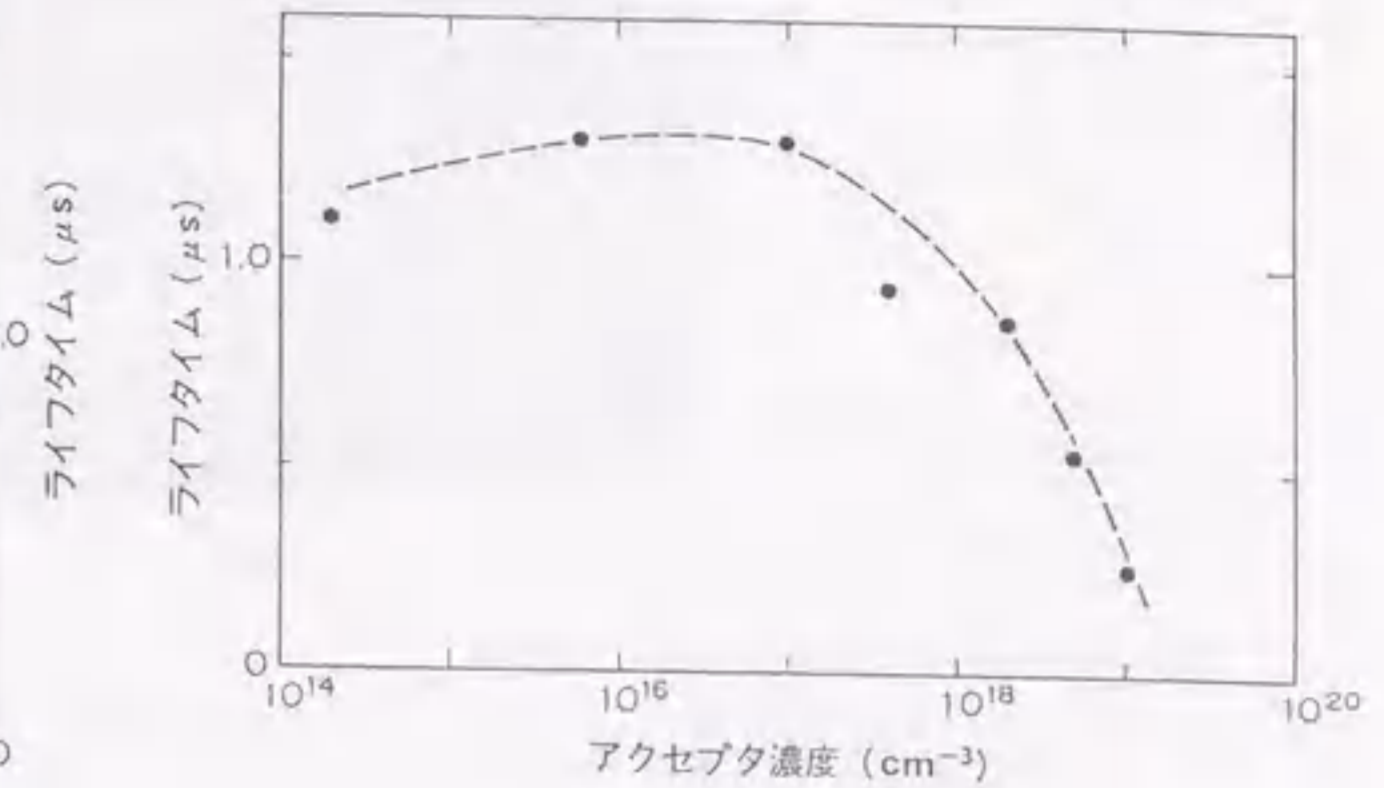


図5-18 ライフタイムのアクセプタ濃度依存性

一方、大電流化に向けての問題点の抽出を行うため試作したMOSサイリスタ構造素子の構造断面図を図5-19に示す。ゲート電極とは別にベース電極が形成されており、大電流パルス通電後に負バイアスを印加すると、短時間で残留電荷が素子外部に引き出されて高繰り返し通電ができる。このように、この素子は、大電流パルスを高繰り返しで高 di/dt ターンオンするのに適した基本構造を持っている。

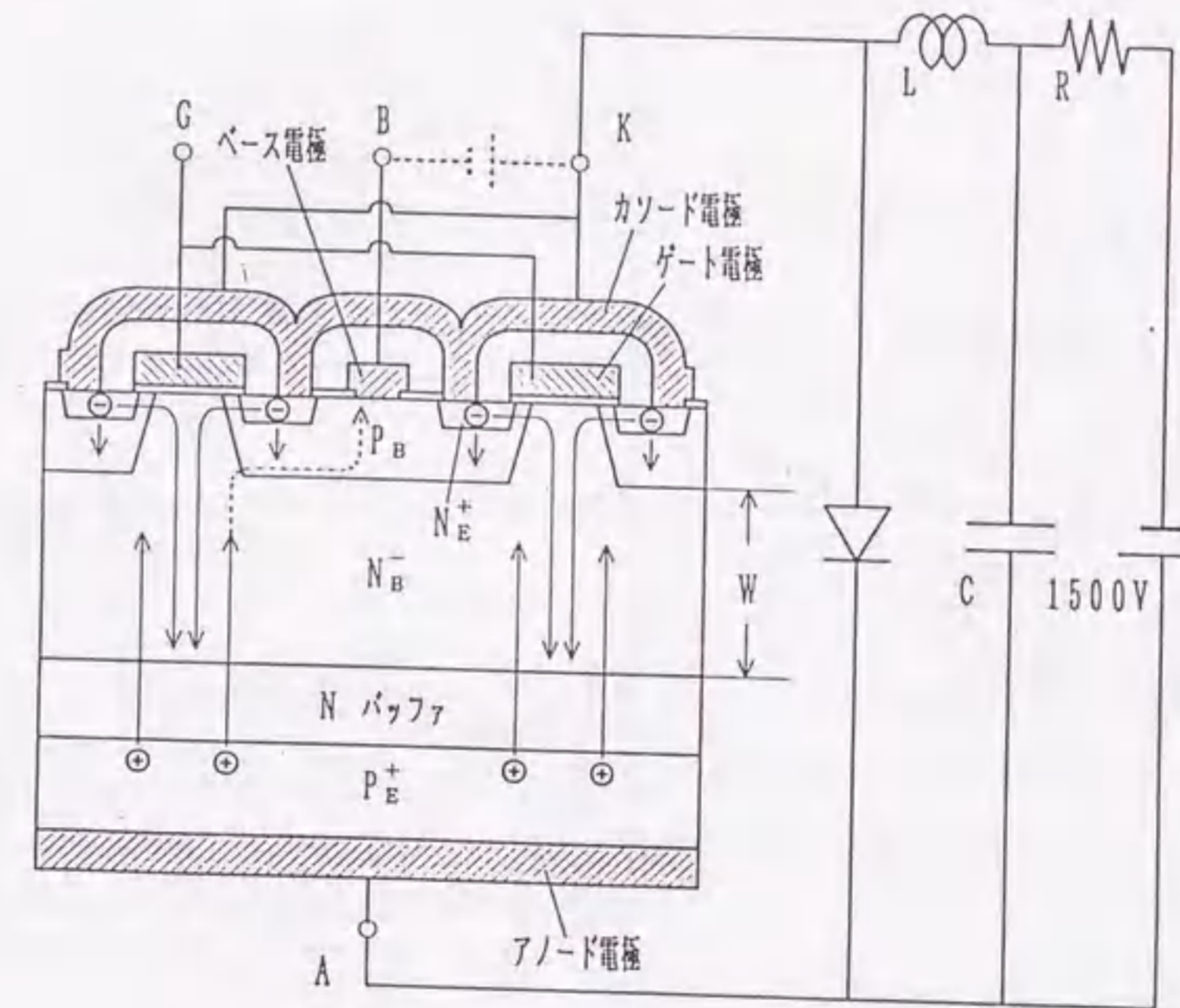


図5-19 MOSサイリスタ構造素子の通電回路

図5-20は、パルス通電波形であり、微細コンタクトホール形成プロセスを追加して、有効通電面積の増加を図ったことにより、これまでのピーク電流密度 10 kA/cm^2 を大幅に超える 28 kA/cm^2 が得られた。

さらに、大電流通電時の高繰り返し動作制限要因の分析を、図5-19のパルス通電波形測定回路で容量Cと

インダクタンスLの値を変えることにより、ターンオン時に被測定素子に流れるパルス電流の最大電流値 i_p と電流立ち上がり率 di/dt 、パルス幅 t_w を変えて行った。図5-21は、スイッチング波形を模式的に示した図であり、2つの電流パルスの間は次のように5つの区間に区分することができる。

$$1/f = t_w + t(\text{suc.}) + \Delta t + t(dv/dt) + t(\text{biased}) \dots (5-1)$$

ここで、 f は1秒間の繰り返し数（繰り返し数 5 kHz では $1/f = 200 \mu\text{s}$ ）、 t_w はパルス幅、 $t(\text{suc.})$ は続流が流れている時間、 Δt は休止区間、 $t(dv/dt)$ は次のパルス通電のために電圧を立ち上げるのに要する時間、 $t(\text{biased})$ は電圧を印加している時間である。これらの中で、高繰り返し化を図る上で最も問題となるのは Δt で、大電流パルス通電後に、素子内部に残っている残留電荷を短時間で消滅させることが重要である。 Δt はパルス電流の最大電流値 i_p の値と共に、素子内部のキャリアライフタイム τ とベース電極の負バイアスに依存している。

また、繰り返し数は素子内部の損失に起因する発熱量で制限され、素子内部の損失は、先に示した5つの区間に対応した損失に区分することができる。

$$P = P_{on} + P(\text{suc.}) + P(\Delta t) + P(dv/dt) + P(\text{biased}) \dots (5-2)$$

この中でもっとも大きな値となるのは、電圧波形と電流波形が重なるターンオン時に発生する P_{on} であり、パルス電流の最大電流値 i_p と共に急激に大きくなり、とくに大電流の場合には、キャリアライフタイム τ にも依存するようになる。

以上のように、大電流化を図ると Δt 、 P_{on} 共に大きくなって高繰り返し動作が困難となる。そこで、通常の電流値と大電流通電の場合とで Δt の τ およびベース負バイアス依存性、 P_{on} の i_p 依存性、オン抵抗変化の i_p 、 τ 依存性を調べ、大電流化する場合の問題点抽出を行った。

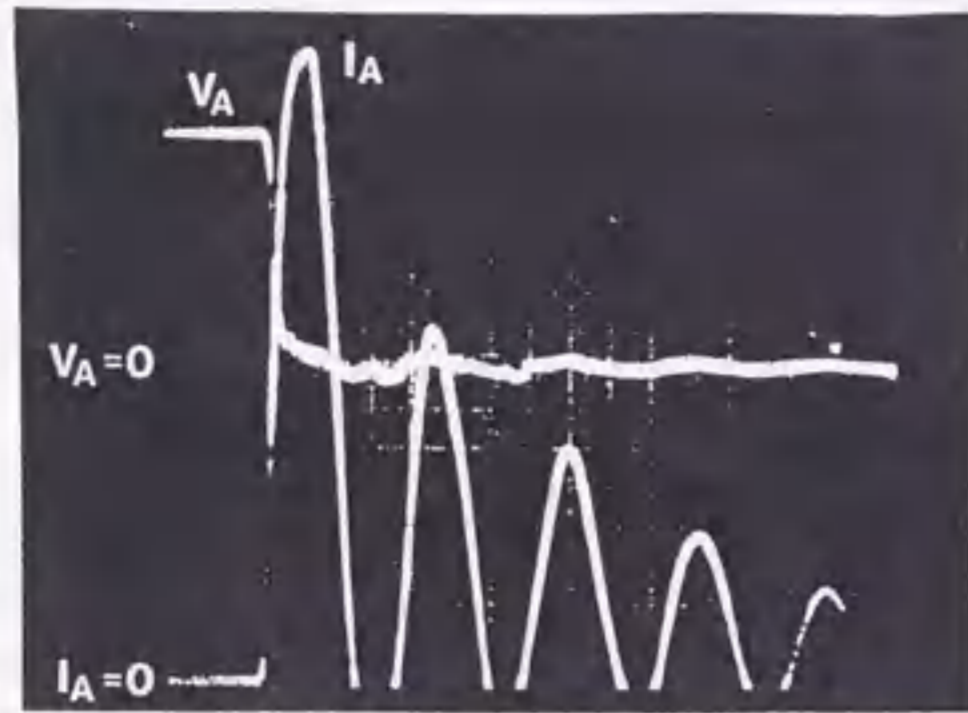


図5-20 パルス通電波形

$i_p = 4 \text{ kA} (28 \text{ kA/cm}^2)$
 $di/dt = 20 \text{ kA}/\mu\text{s}$
 $(142 \text{ kA}/\mu\text{s/cm}^2)$
 $I_A: 500 \text{ A/div.}$
 $V_A: 500 \text{ V/div.}$
 $t: 0.5 \mu\text{s/div.}$

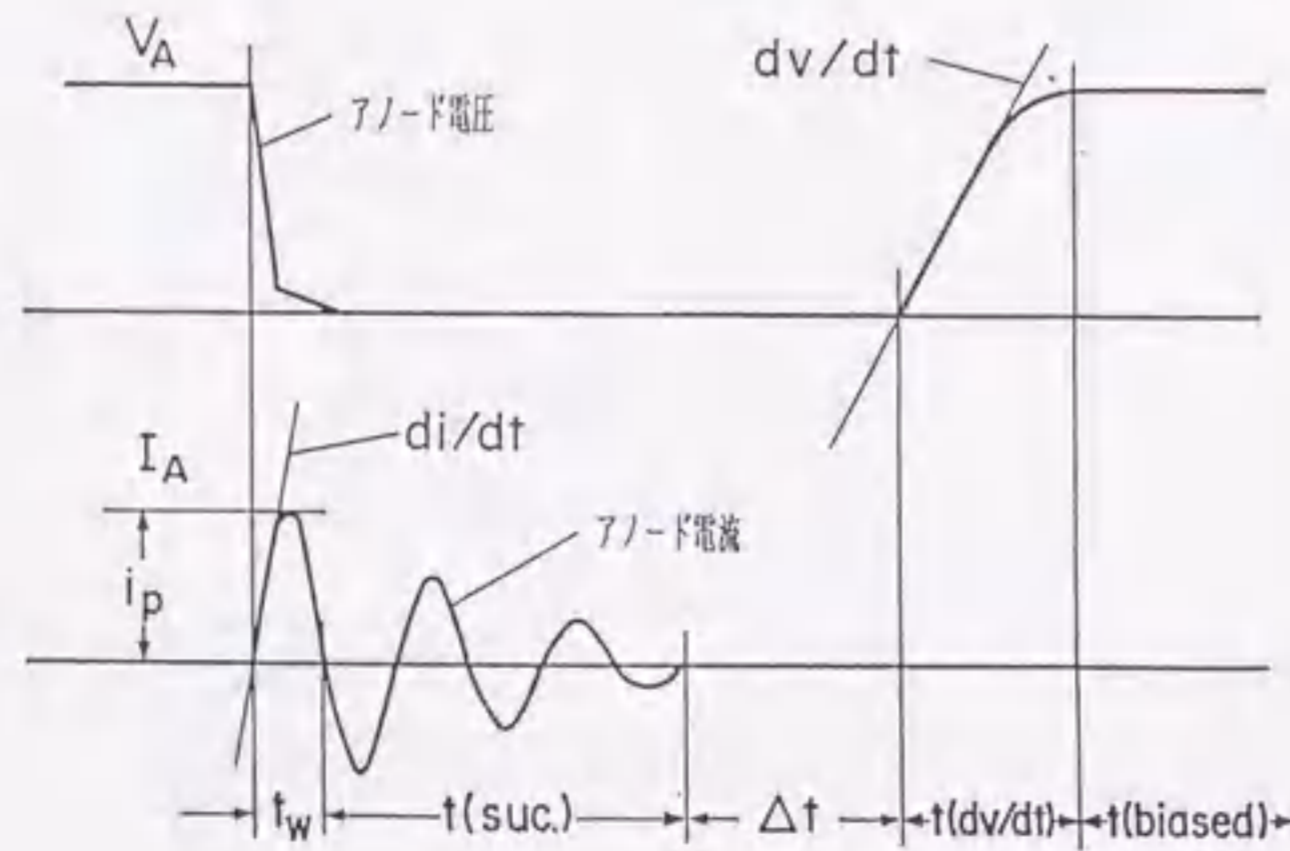


図5-21 スwitching波形

図5-22は、大電流通電時におけるターンオン損失 P_{on} のピーク電流密度 i_p 依存性を示す。 P_{on} は i_p に比例して増加し、高繰り返し通電で素子温度が上昇すると、ターンオン損失は約2倍程度となるので、大電流通電を行うと高繰り返し動作が著しく困難となる。これを回避するためには、チップ寸法拡大や微細プロセスによる有効通電面積の増加により、電流密度を下げる必要がある。

図5-23は、素子のオン抵抗の時間変化を示し、ターンオン動作は、2つの期間 T_1 、 T_2 に区分される。 T_1 はゲート電圧が印加されてから素子内部の空乏層が消滅するまでの期間で、 T_2 は空乏層が消滅してからNベース層内のキャリア密度が上昇してオン抵抗が減少していく期間である。 T_1 では、電子のみがMOSチャネルを通して飽和速度で注入されており、オン抵抗は時間に反比例して減少する。その後、素子内部の電子量が増加し、かつアノード電流が立ち上がり始めるとpエミッタ層から正孔の注入が起こり、さらにオン抵抗の減少が始まる。また、 i_p が 600 A/cm^2 と $6,000 \text{ A/cm}^2$ に相当する di/dt が $2.8 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ と $28 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ の場合について、各々電子線照射有り・無しの場合のオン抵抗の時間変化を示している。 di/dt の大きい方がオン抵抗が低いのは、電流立ち上がりが大きいほど注入されるキャリア量が多いためである。通常の測定で観測するアノード電圧は、電流とオン抵抗の積となるため、 di/dt の大きい方が過渡的に発生するアノード電圧は大きくなっている。この図から、電子線照射の有無は i_p の大小に係わらずオン抵抗にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。図中の点線で示しているのは、シミュレーションによって得られたオン抵抗の計算値であるが、実測値と良く一致している。

図5-24、および25は、各々パルス通電してから時間 Δt 後の dv/dt 耐量を、 i_p が 600 A/cm^2 と $5,000 \text{ A/cm}^2$ の場合について示す。素子温度 (25°C 、 125°C) と、ベース負バイアス値 (0 V 、 -9 V) をパラメータとしており、高繰り返し通電をして素子温度が上昇した場合には、 dv/dt 耐量は著しく減少するが、ベース負バイアス値を 0 V から -9 V とすることにより、 dv/dt 耐量をかなり改善できる。 i_p を大きくした場合は、 Δt の最小値が $4 \mu\text{s}$ から 8

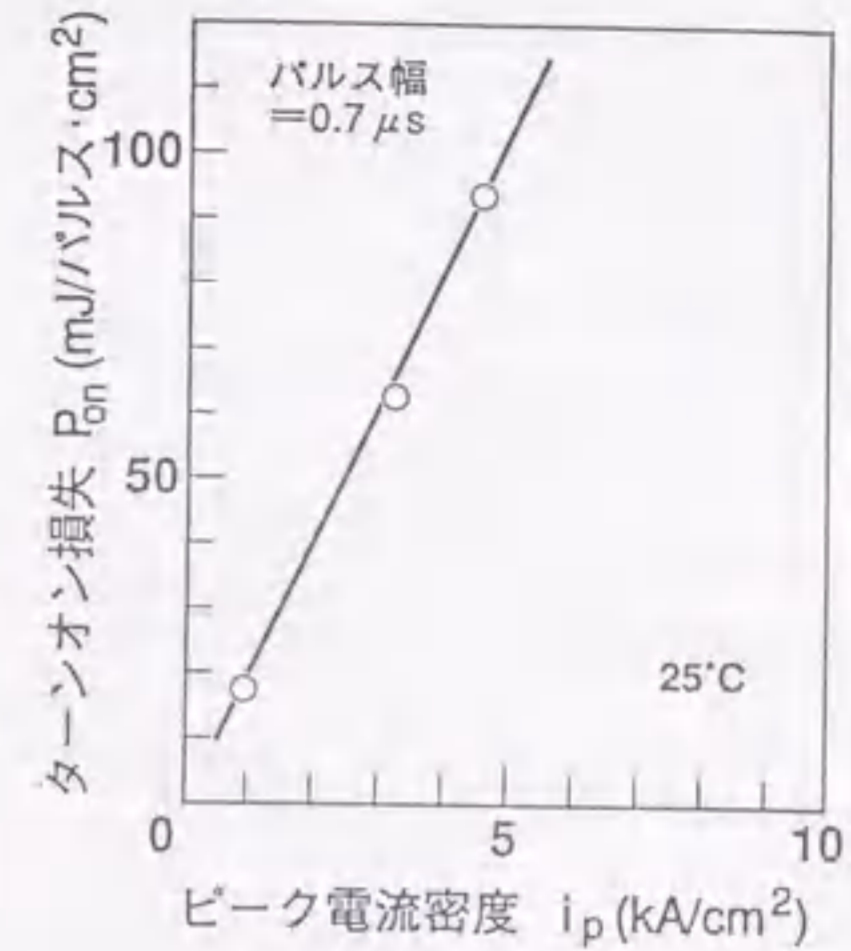


図5-22 ターンオン損失のピーク電流密度依存性

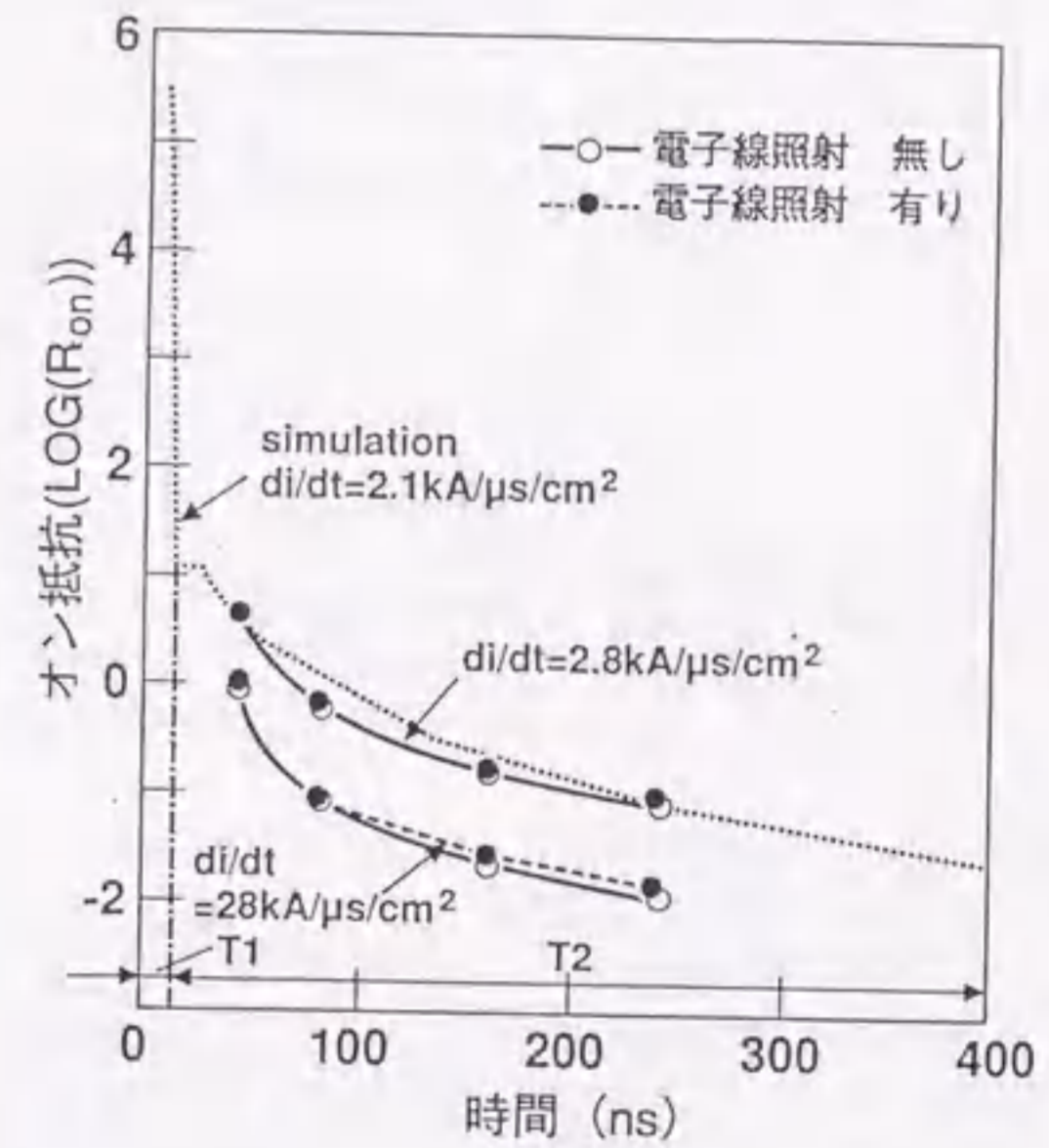


図5-23 オン抵抗の時間変化

μs と伸びており、 125°C の場合に dv/dt 耐量が著しく減少していることが分かる。 Δt が伸びるのは、残留キャリアの量が多く、排出されるまでに長い時間を要するため、この間はかなりのベース電流が流れ、 P_{on} と匹敵するほどの損失が発生して高繰り返し動作の制限要因のひとつになる。また、 25°C の場合には、接合が回復してからの dv/dt 耐量立上がりは、 i_p にかかわらず同程度であるのに対し、 125°C の場合には dv/dt 耐量があまり上がらない。これは、 n ベース内の残留電荷の消滅が高温の場合には遅くなるためである。

電子線照射量をパラメータにして dv/dt 耐量の Δt 依存性を示すと、 dv/dt 耐量は電子線照射量に強く依存していることが分かる。なお、電子線照射無しの場合には、 5kHz 動作でのパルス間隔 $200\mu\text{s}$ の間には、アノード電圧を印加することはできなかった。以上のように、 Δt の値は素子温度、ベース負バイアス値、電子線照射量に依存している。ただ、 5kHz 駆動の場合について考えると、これらの図に示されている $\Delta t \leq 20\mu\text{s}$ という値は十分に小さな値であり、ある程度の電子線照射をすれば、 Δt は必要範囲内に入ることが分かった。

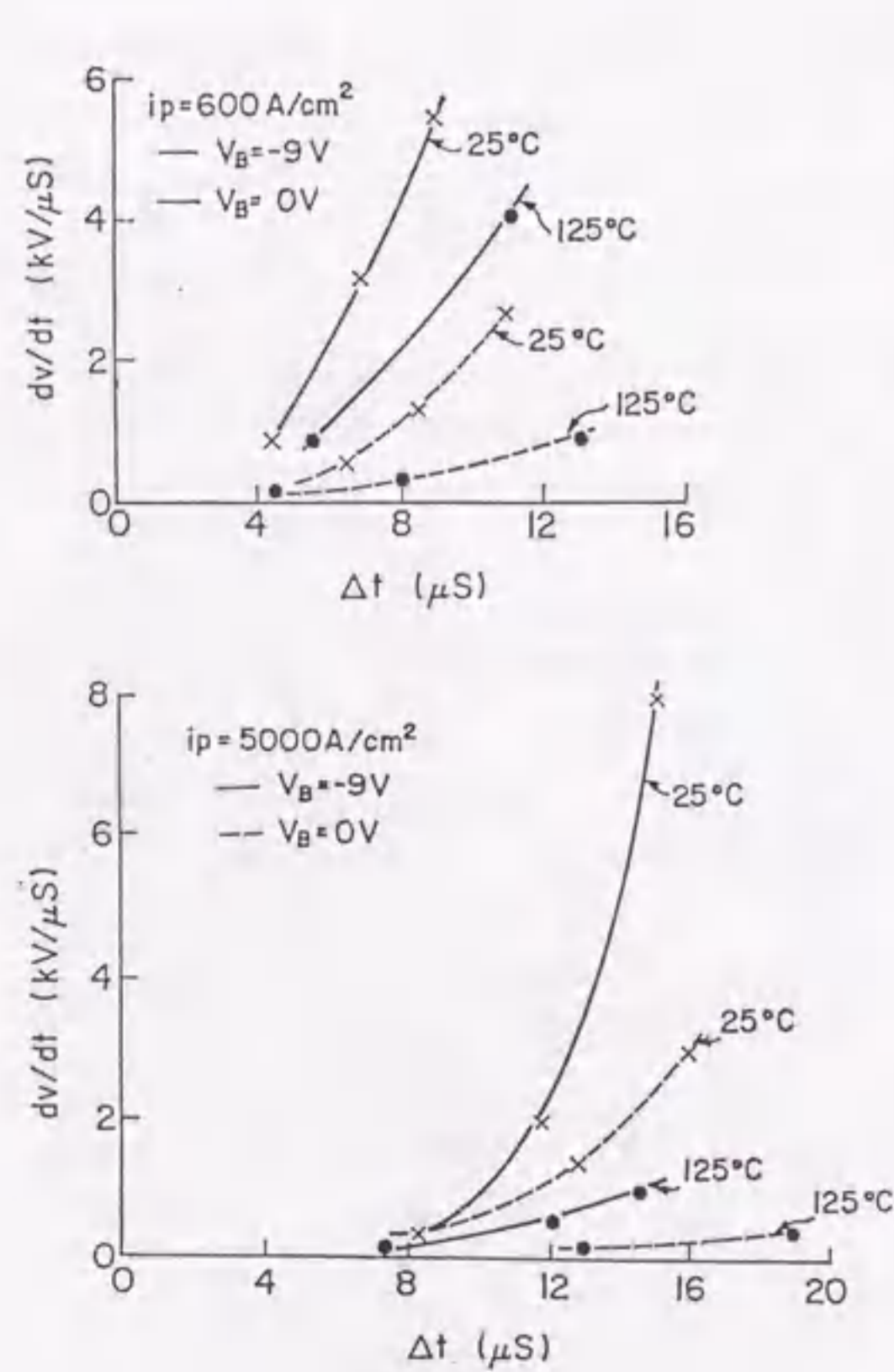


図5-24 dv/dt 耐量の Δt 依存性 (ベース負バイアス、温度)

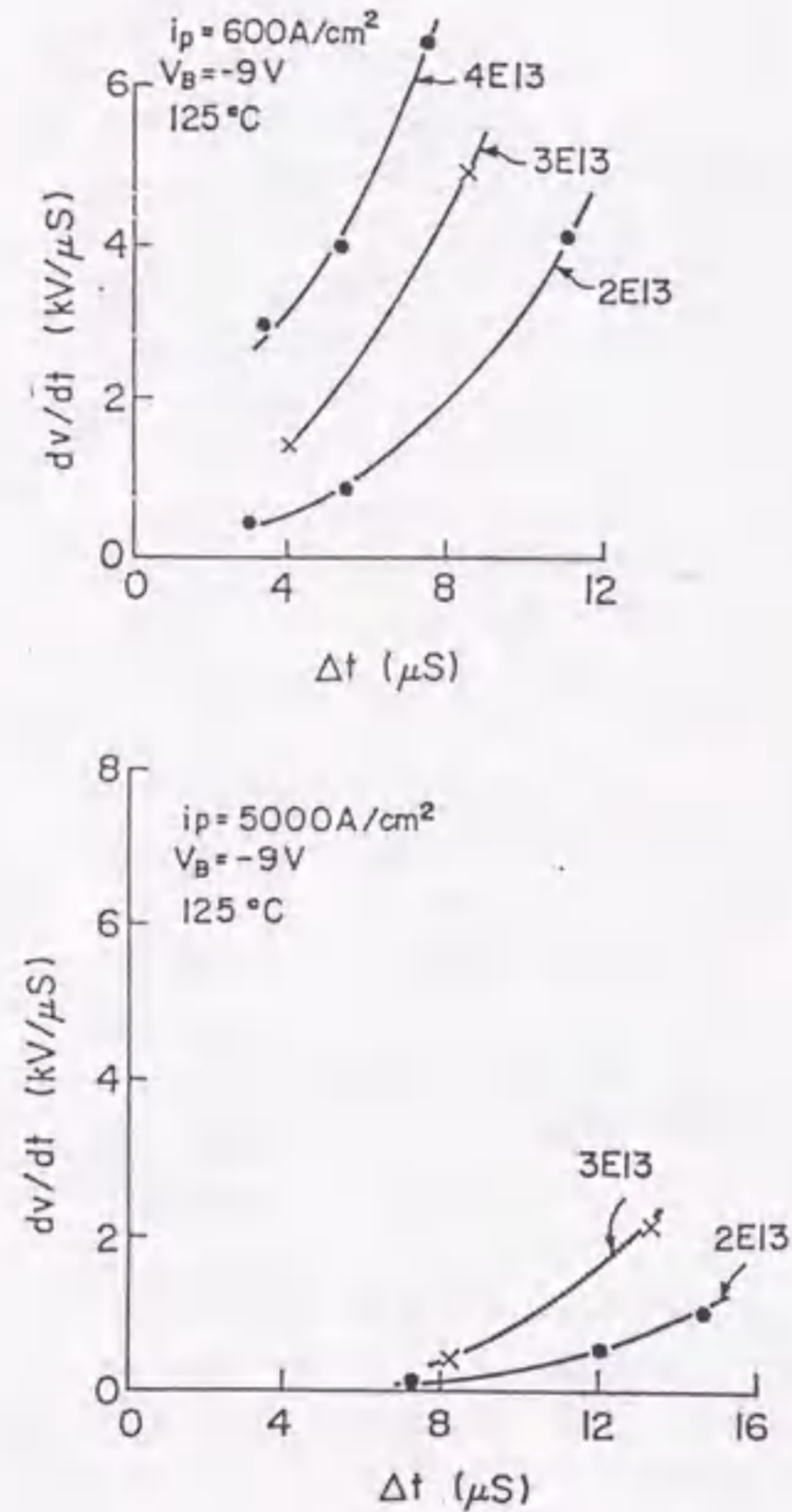
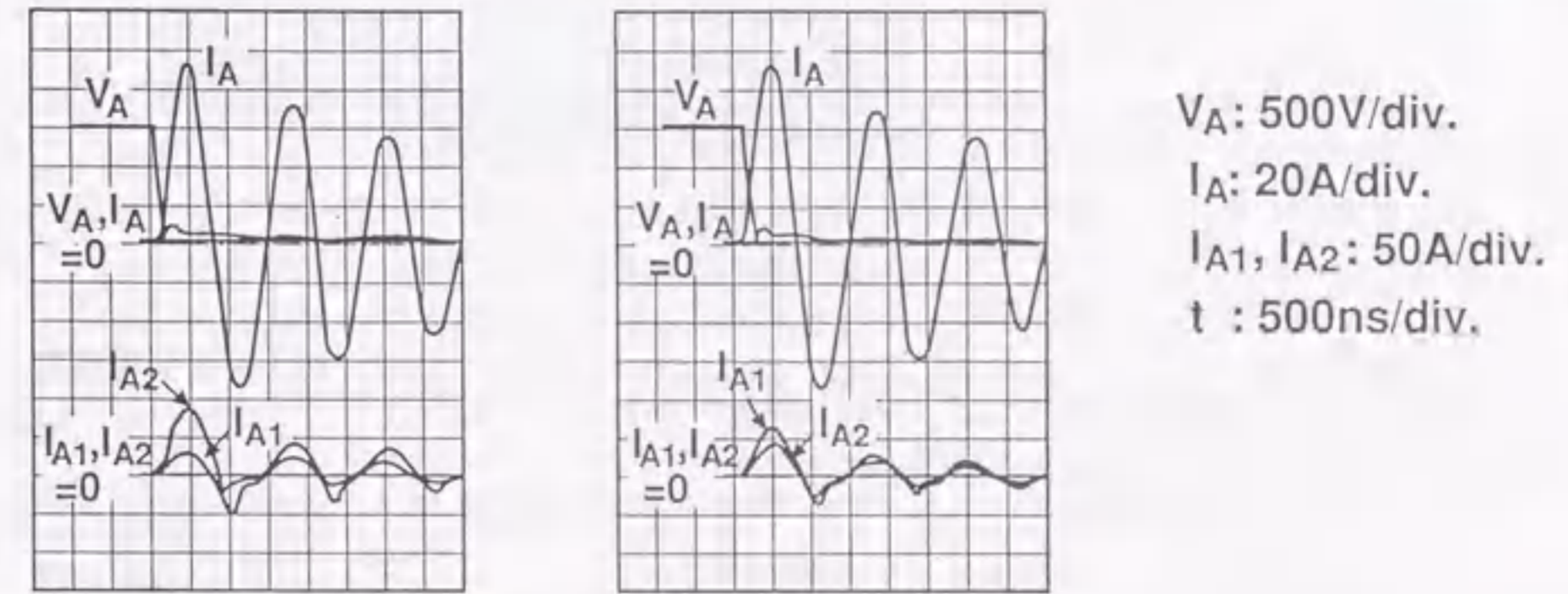


図5-25 dv/dt 耐量の Δt 依存性 (電子線照射)

一方、通電電流を増やす別の手段として、チップの並列動作試験を行った。同じ設計値で試作した素子の並列動作では、ダイレクトパラレル接続をするだけで各々のチップに均等な電流が流れた。図5-26は、設計値の異なる試作素子を並列動作させた時に、各々のチップに流れた電流波形を測定したもので、 I_{A1} 、 I_{A2} は、それぞれ素子1、2に流れる電流、 I_A は素子1と素子2に流れる電流の和を示している。ゲート電圧を同時に印加した場合には、(a)に示すように、素子2の方が素子1より大きな電流が流れている。そこで、素子2のゲート電圧を素子1より 7ns 遅れて印加したところ、(b)に示すようにほぼ同じ電流が流れるようになった。このように、違った素子でも数 ns 程度のゲートタイミング調整によって、並列動作が可能であることが分かった。



(a) 素子1と素子2にゲート電圧を同時に印加した場合
(b) 素子1と素子2とのゲート電圧の印加のタイミング差が 7ns の場合

図5-26 2素子の並列動作波形

5.3.3. 素子の実用性評価

これまでに示した基本特性の検討と、高 di/dt 化のための試作評価結果を基にMAGTの高繰り返し化を図り、電力損失に対し、すでに述べた幾つかの発生要因を分析、 n ベース層を順方向耐圧が仕様を満たす範囲内で行えるだけ薄くすること、 n ミッタ層の幅を同時ターンオンする幅に設定すること、微細化プロセスを適用してチップ面積に占める n エミッタの面積をできるだけ大きくすること、高トリガ感度となるように不純物プロファイルの設計を行うこと、がその低減に有効であることが分かった。

また、MAGTの大電流化に向けては、素子構造最適化の詳細設計を行い、問題点を抽出した。その結果、電圧 $1,500\text{V}$ でパルス幅 $0.7\mu\text{s}$ の通電をした場合、これまでで最高のピーク電流密度は $28\text{kA}/\text{cm}^2$ ($142\text{kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$)に達し、大幅な増大化ができた。これは、実際の高繰り返し動作で使われる電流値の数 10 倍の値であり、大電流化の制限要因とはならない。大電流化を図る場合の問題になると考えられるパルス通電時の損失 P_{on} と、休止区間 Δt の電流密度依存性から、 5kHz の高繰り返し運転を制限するのは主として P_{on} であり、微細プロセスによる有効通電面積の増加やチップ寸法拡大により、電流密度を下げる必要のあることが分かった。

また、総合的に微細化プロセス技術の確立を図る要素試作、長期連続動作信頼性試験なども行って、レーザ動作への適用性について最終的チェックをした。しかし、素子を実際に製作する段階では、この微細化技術の適用性に問題が無いとは言い切れない。

最終段階では、素子全面を均一に高速ターンオンさせるように、さらに素子パラメータを最適化した。具体的には、 n エミッタ層の幅 (LNE) を同時にターンオンする限界の大きさまで縮小すること、および微細化することによって、デッドスペースとなるベース電極の取り出し部分を減らして単

位面積内のチャンネル幅を大きくし、サイリスタをターンオンさせる電子電流の注入量を増加させた。また、深さ方向の素子パラメータも重要で、nバッファ層の形成により、高い順方向耐圧を実現しながらnベース層を薄くすること、pベース層とnエミッタ層の不純物プロファイルを最適化することも不可欠であった。

微細化技術は、VLSI開発によって急速に進歩してきているが、VLSIとパワー半導体素子との間には、扱う電圧・電流に格段の差があり、それらの素子構造・製造技術には自ずから差異が生じている。VLSIでは、素子の横方向、縦方向を同時に微細化している。一方、パワー半導体素子では、横方向はVLSI並みに微細化するが、縦方向の拡散層、絶縁膜、金属配線などは厚いことが要求され、VLSIに比べ課題が多い。したがって、微細化技術の適用に際し、VLSIとパワー半導体素子の相違をよく見極めることが必要となる。

具体的にはまず第1に、Si基板内部の拡散層形成で、微細かつVLSIよりも深い不純物拡散層の形成が不可欠である。これには、専用の深いpベース層を形成するための高耐圧p型微細素子構造形成装置と、nベース層厚さを低減するための高濃度nバッファ層形成に使う高耐圧n型微細素子構造形成装置が適用された。第2に、Si基板表面上の微細パターンの形成および大電流微細電極の形成には、高精度露光技術、平坦化絶縁膜形成技術、高精度エッチング技術、微細ホール埋め込み電極形成技術が寄与している。高精度露光技術は、微細拡散層、微細電極、微細絶縁膜のパターン形成すべてに不可欠な技術であり、高精度露光装置を使用することにより、パターン幅の微細化とパターン相互の合せ余裕の低減を実現させた。

また、平坦化絶縁膜形成技術は、大電流微細電極の電極間絶縁を確保し、電極の段切れを防ぐために必要な技術である。MOSサイリスタ構造素子では、ゲート電極、ベース電極、カソード電極の3個の電極を形成するので、それぞれの電極の絶縁をとるために2種類の絶縁膜が必要となる。これには、高温処理によりゲート電極上に平坦化絶縁膜を形成するための層間絶縁膜形成装置と、厚いベース電極上を覆うため低温で厚い平坦化絶縁膜を形成できる有機絶縁膜形成装置とを適用した。

微細ホール埋め込み電極形成技術は、微細で深いコンタクトホール内に電極を埋め込み大電流を取り出すための技術であり、段差被覆性に優れた金属配線形成装置が不可欠である。このための微細電極形成装置も適用された。高精度エッチング技術には、層間絶縁膜に微細なコンタクトホールを形成する酸化膜ドライエッチング装置と、微細ベース電極を形成するメタルドライエッチング装置も適用した。

図5-27、28は、最終試作したMAGT素子のチップとパッケージング状況を示す写真であり、寸法を8×8mm、素子領域面積を0.25cm²に拡大させた。引出し抵抗の低減化と、高電流密度のパルス通電に備え、直径200μmのA1ワイヤを11本ボンディングした電極引出し構造となっている。図5-29は、この単一パルス通電動作波形である。素子面積を拡大し微細電極形成プロセスを追加して、素子通電領域の増加を図ったことで、ピーク電流は8kA、ピーク電流密度は2kA/cm²が得られた。D_i/d_i値も、21kA/μs (84kA/(μs・cm²))と大きく、素子面積を拡大しても均一通電されている。

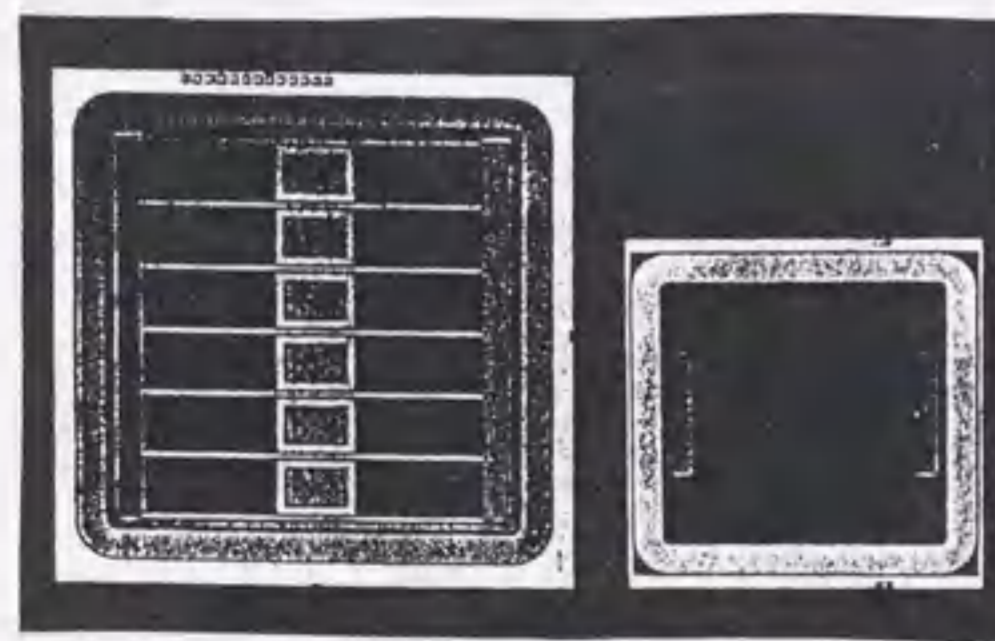


図5-27 改良試作MOSサイリスタ構造素子の比較写真

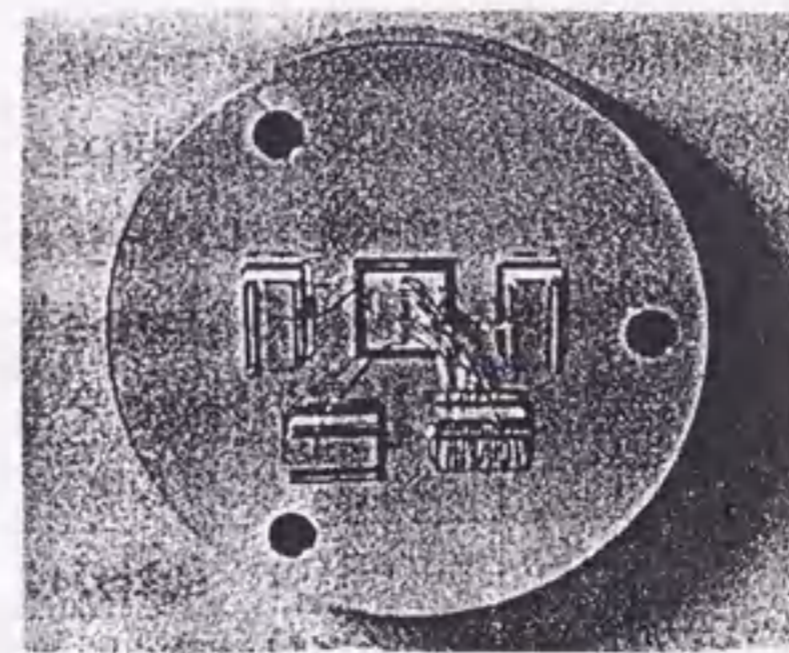


図5-28 改良試作MOSサイリスタ構造素子のパ

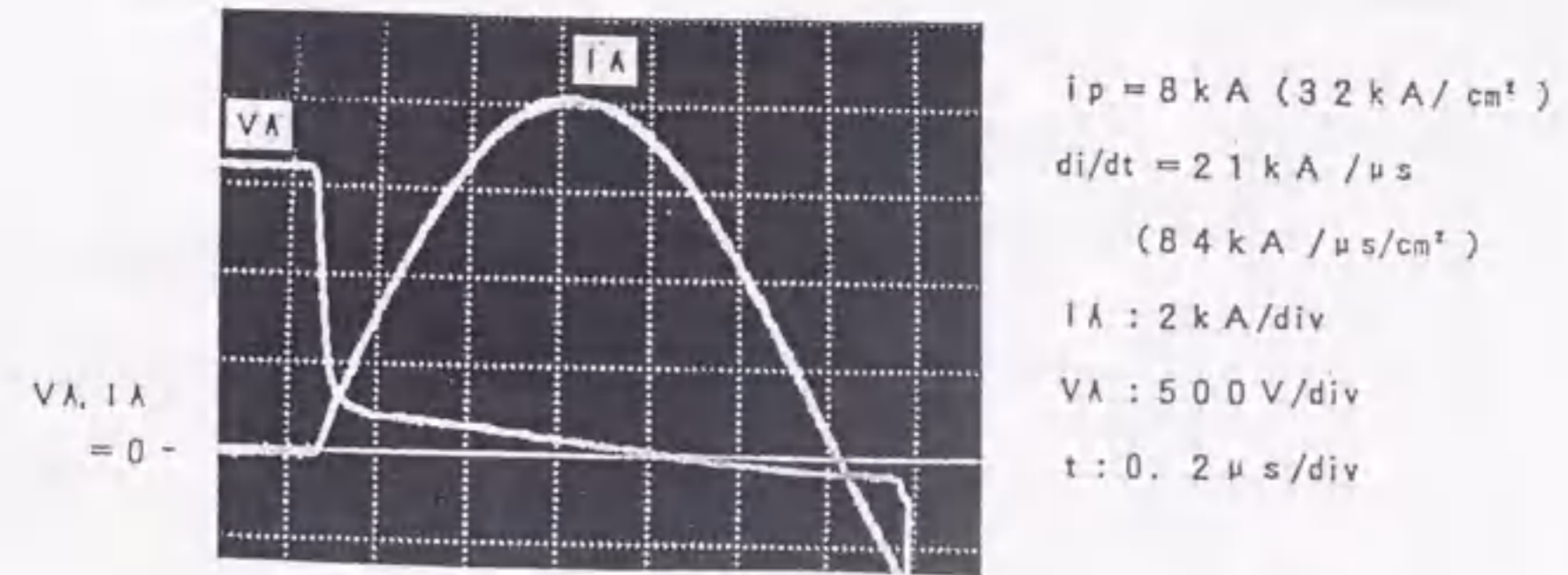


図5-29 パルス通電波形

図5-30は、ターンオン損失P_{on}のピーク電流密度i_p依存性であり、比較のため、小面積の前試作素子における特性も合わせて示した。面積拡大による電流集中などの損失増加はみられず、微細電極形成プロセスの追加により、素子領域全体で均一なターンオンが維持できたためと考えられる。

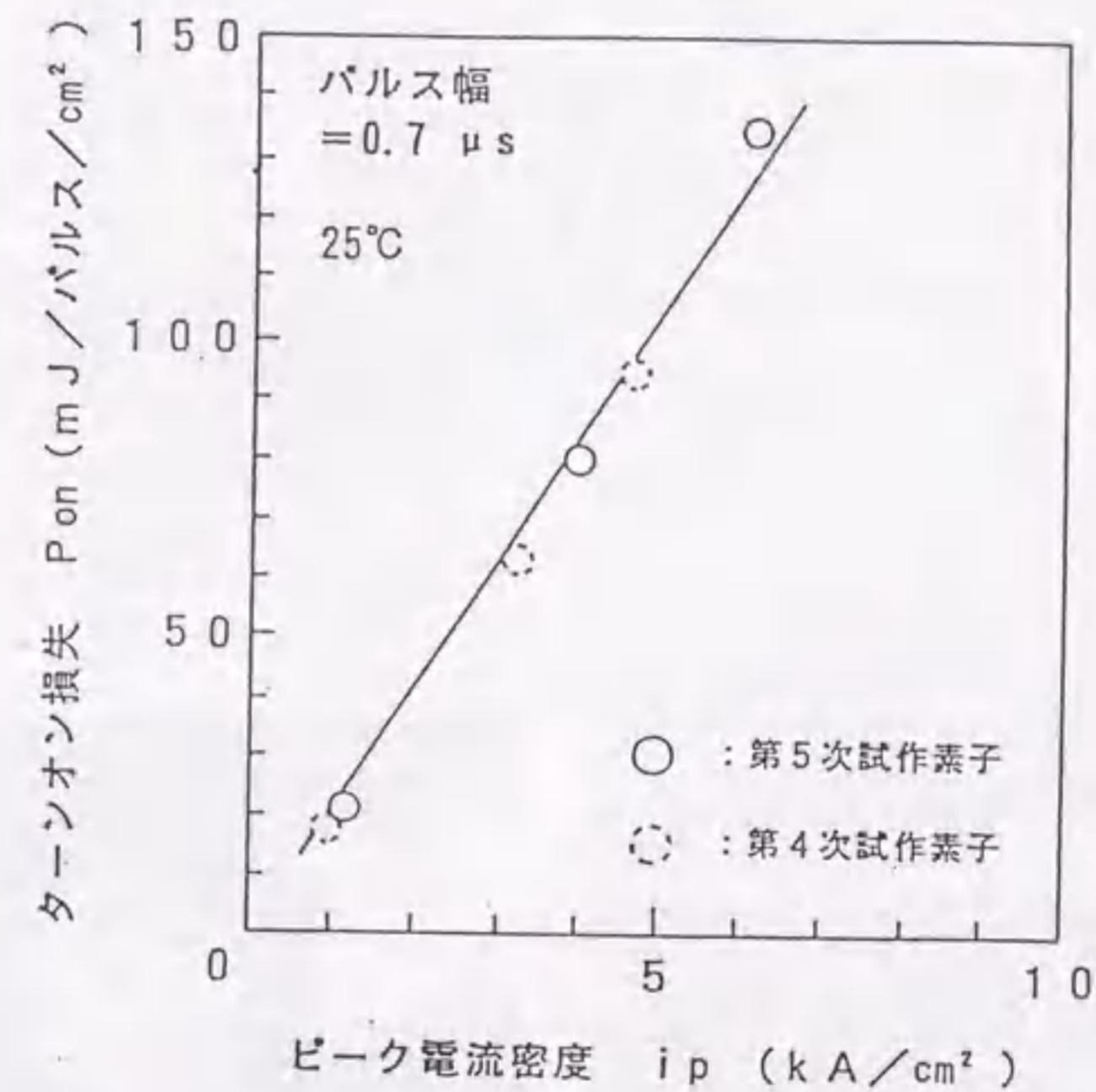


図5-30 ターンオン損失のピーク電流密度依存性

5.4. 高速半導体スイッチ電源

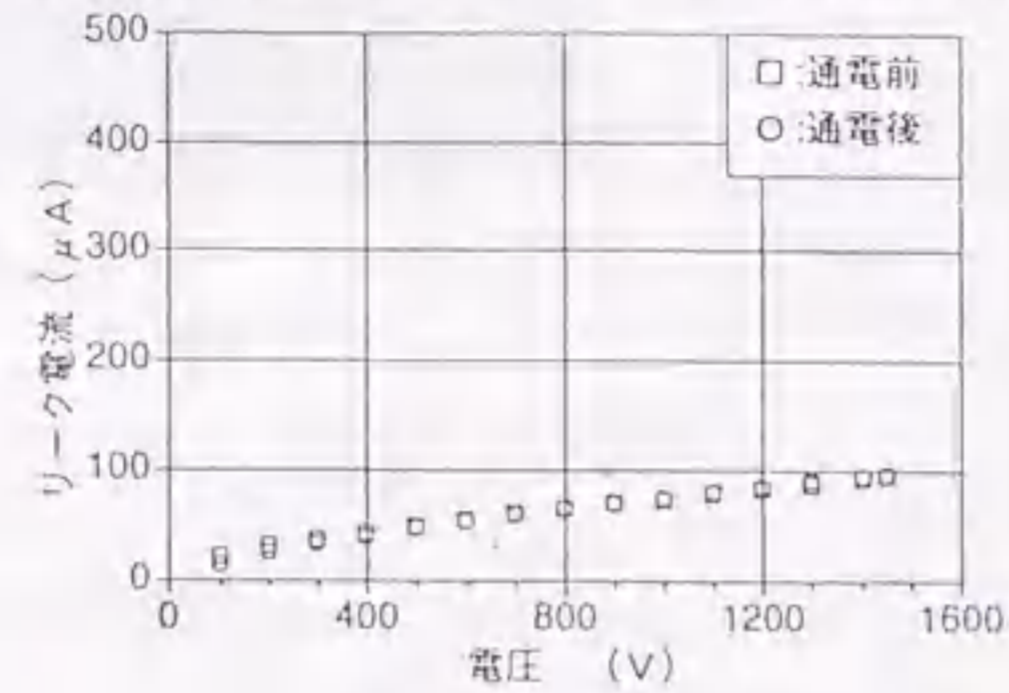
5.4.1. MAGTモジュールの駆動回路

半導体スイッチ素子では、高速立上り・大電流・高耐圧化と、低損失化を同時に実現するような性能向上を図る必要がある。この素子を直並列に接続し、市販製品のサイラトロン単体と、このモジュールとの性能比較を行い、特長を明らかにすると共に、これを組み込みレーザ動作できるパルス電源を試作し基本的性能を明らかにして、サイラトロン電源と同等以上の機能を持ち、これに置換できることを実証する。¹³⁾⁻¹⁵⁾

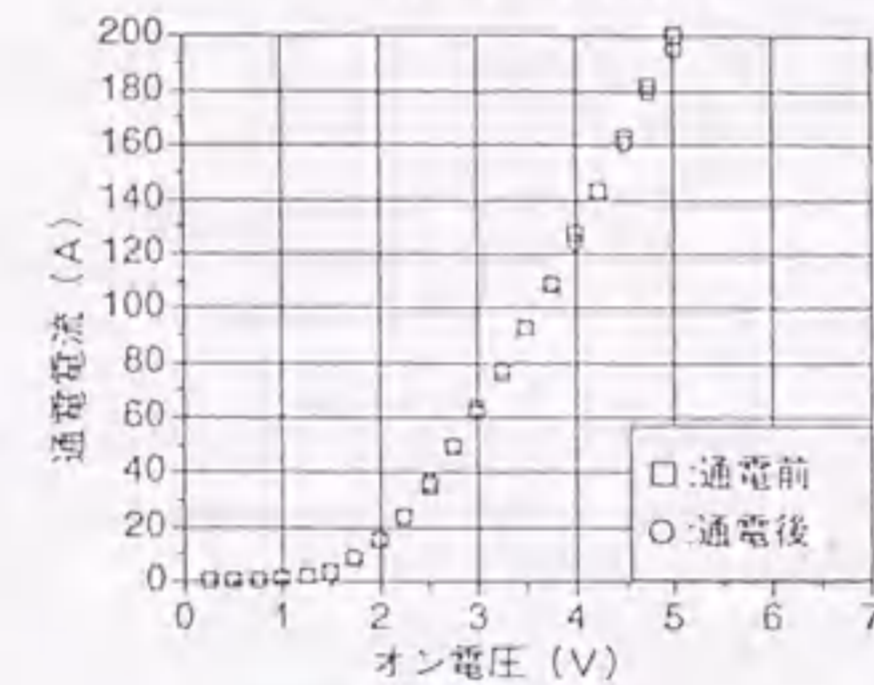
まず最初は、高速ターンオン半導体スイッチMAGTの特性に合わせた駆動回路の基礎的検討を目的とし、素子単体で長時間高繰り返し通電実験を行った。実験条件としては、チップ寸法6×6mm、素子領域面積0.14cm²のMAGTにて、印加電圧1,500V、繰り返し数1kHzの連続スイッチング動作をさせ、通電前後の静特性(オフ状態におけるリーク電流特性、I-V特性)を比較することにより、駆動回路と素子の長期信頼性を判定した。電圧波形は、2本の電圧プローブ(Tektronix Inc. P6009)を用いてアノード電圧とカソード電圧を差動測定し、電流波形は高周波トランス(Pearson Elect. Inc. 110A)を用いて測定した。また、各スイッチに光ファイバ温度プローブ(高岳製作所 FTP-1)を取り付け、高繰り返し動作における素子各部の温度上昇を測定した。

図5-31に、 9×10^8 ショットの通電を終了した時のV-I特性およびリーク電流特性を、初期静特性と比較して示す。いずれも特性の変化は認められなかった。一般に半導体の故障率は、初期故障期を過ぎると、磨耗期に至るまでは非常に小さく、磨耗期に至る時間は通常の使用期間より長いことが知られている。本実験で実証した通電ショット回数は、初期故障期を十分経過したと言ってよい。

また、本実験における通電電流条件8.5kA/cm²が、一般的な半導体スイッチの使用条件に比べ非常に過酷な条件であることを考慮すると、MAGTの長期信頼性は、サイラトロン(スイッチ寿命 10^8 ショット程度)に比べ十分高いことが検証されたと言え、エキシマレーザ励起電源用スイッチ素子として適用することで、寿命の問題を解決できることが実証された。



(b) リーク電流特性



(a) I-V特性

図5-31 スwitching特性

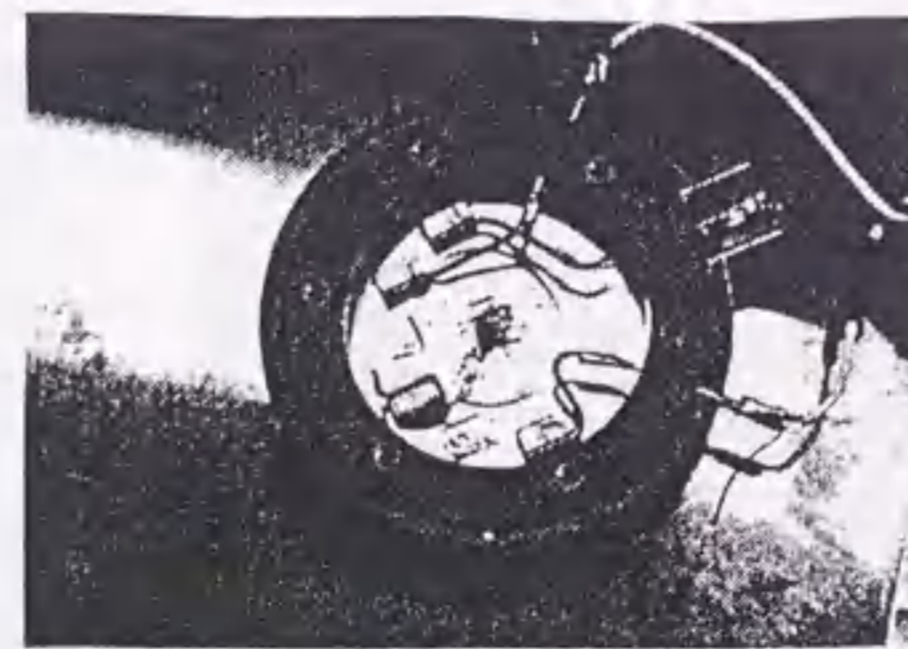


図5-32 高速ターンオン半導体スイッチ素子

次に、高速ターンオン半導体スイッチ素子MAGTを5素子直列接続した高速スイッチングモジュールを試作し、スイッチング特性を評価した。MAGTは、図5-32のように、平形パッケージにマウントされており、図5-33に、スイッチングモジュール1段の構成を示す。R_S、C_S、D_Sよりなるスナバ回路、および直列分担抵抗R_Dから構成された分圧回路により、充電時に発生する各直列段の分担電圧の不平衡、およびスイッチのオン、オフに伴う過電圧を抑制している。

個々のスイッチは、高压充電電源装置に同期した制御装置からの駆動信号により動作する高速駆動回路によって、個別に駆動される。高速駆動回路は、出力段のスイッチ素子にMOSFETを用い、さらにソース接地回路を採用して、高速ターンオン半導体スイッチのMOSキャパシタへの充電を高速にすることによって、スイッチングの高速化を図っている。また、駆動信号の伝送線路に光ファイバケーブルを採用することにより、低圧回路である制御装置と、高压回路である高速駆動装置の絶縁を図っている。

直列接続時にもっとも問題となるのは、スイッチングモジュールがターンオンする際、各スイッチのターンオンタイミングのばらつきに起因して発生する過電圧である。このターンオン過電圧の抑制は、スイッチングモジュールの信頼性を向上させる上できわめて重要である。上記問題を解決する手段として、個々の駆動回路にはナノ秒オーダーで信号を遅延できるプログラマブル遅延回路を設け、各スイッチのターンオンタイミング差を極力小さくするよう調整した。図5-34は、ターンオン時の各スイッチの電圧立ち上がり部を、動作トリガ信号を基準として重ねて示し、これより、各スイッチのターンオンタイミング差を、±1ns程度に抑制できたことが分かる。

図5-35は、スイッチングモジュールの外観を示す写真で、強制空冷方式とし、放熱フィンに5m/sの風を流し冷却した。また、高速駆動装置をモジュール近くに取り付けることで、ゲート駆動回路の配線インダクタンスを小さくした。

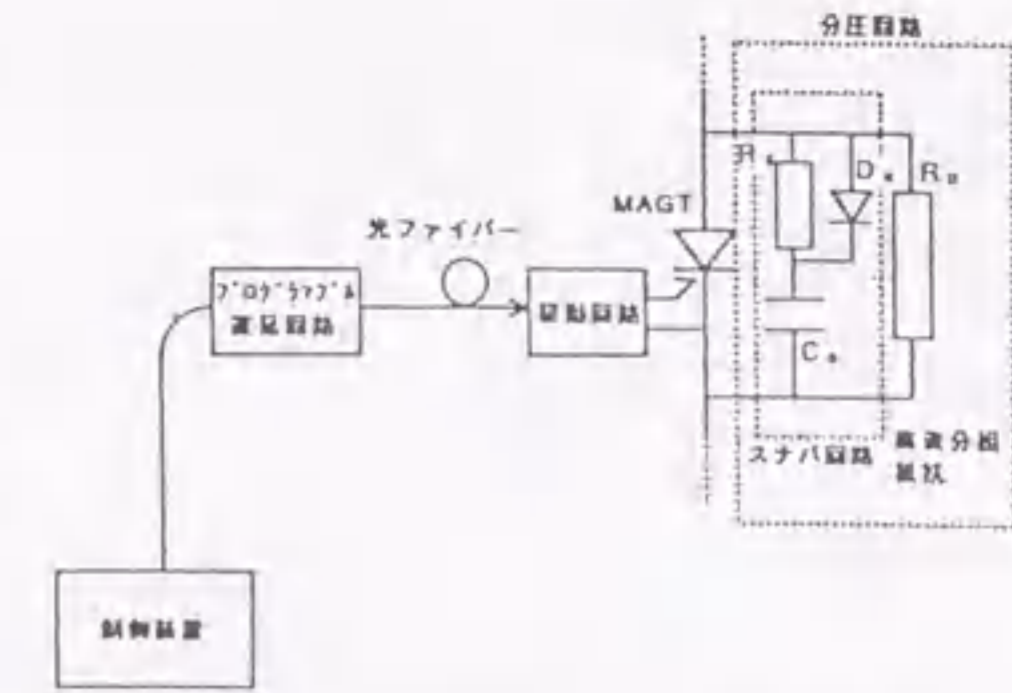


図5-33 スwitching装置1段の構成

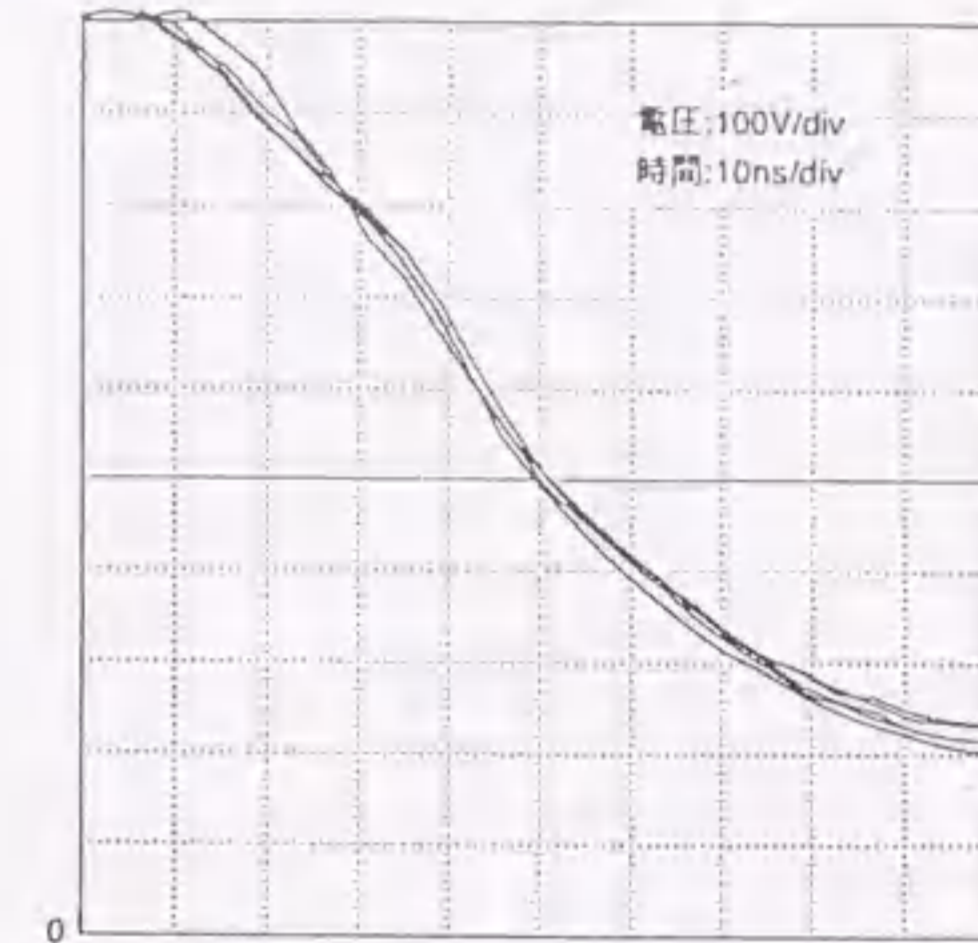


図5-34 各スイッチのターンオン時間差

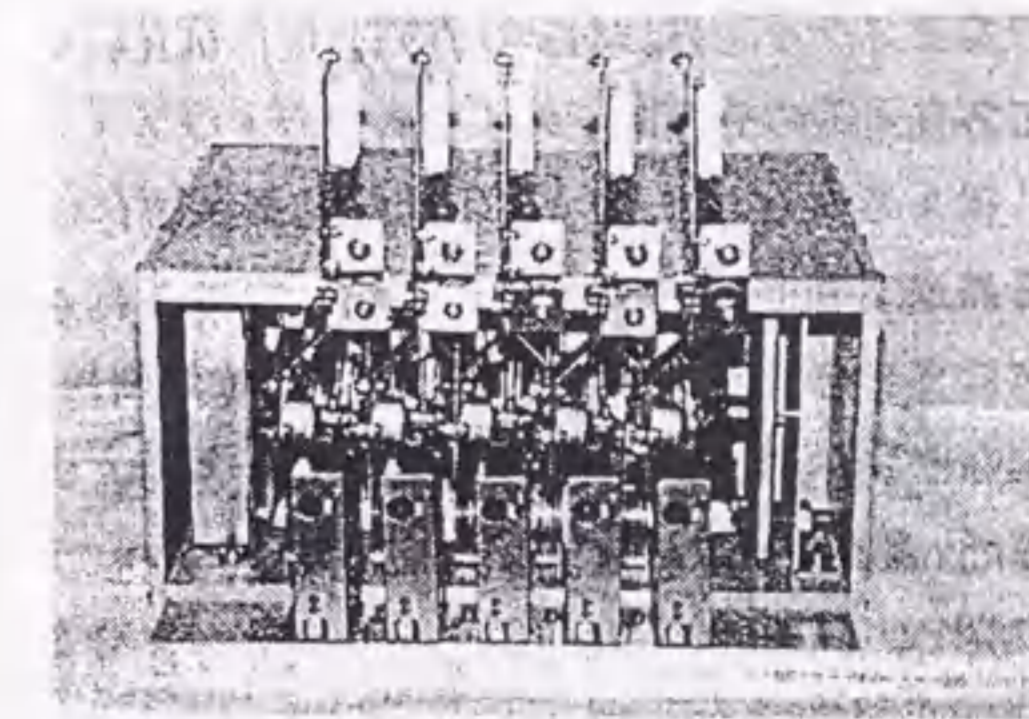


図5-35 高速スイッチング装置外観写真

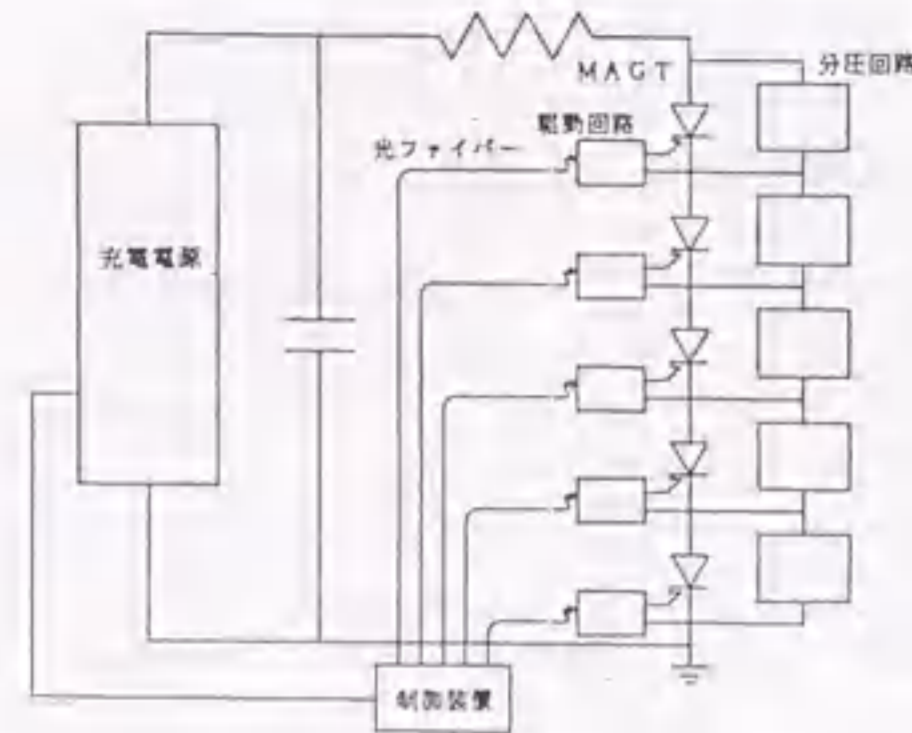


図5-36 高繰り返し実験回路

特性評価実験回路を図5-36に示す。高压電源により充電された18 nF1次コンデンサの電荷を、スイッチングモジュールの動作により、負荷抵抗を通じて放電させ、電圧、電流波形を測定することにより特性を評価した。電圧波形は電圧プローブ (Tektronix Inc. P6015)、電流波形は高周波トランス (Pearson Elect. Inc. 410A) を用いて測定した。また、各スイッチに前記光ファイバ温度プローブを取り付け、高繰り返し動作における温度上昇を測定した。

図5-37に、充電電圧5 kVでのスイッチング波形、および損失波形を示す。パワーおよびエネルギー損失は、モジュールの電圧、電流波形の積、およびその時間積分をデジタルシグナルアナライザ (Tektronix Inc. DSA602) で演算することにより求めた。この結果、電圧5 kV、電流400 A、電流パルス幅0.55 μ sの短パルススイッチングを行うことができ、この時のスイッチング損失は35 mJ/パルスであった。また、図5-38に、直列接続された各段の過渡的な分圧電圧波形を示し、各段とも、ターンオン過電圧なしに動作していることが分かる。MAGTのスイッチング損失は、1個あたり7 mJ/パルスとなり、これを繰り返し数5 kHzで駆動すると、発熱量は35 W/スイッチとなる。放熱フィン熱抵抗は0.59 $^{\circ}$ C/Wであり、したがって、MAGTの温度上昇は約21 $^{\circ}$ Cとなる。

本実験のような抵抗負荷では、蓄積エネルギーがほとんど抵抗で消費されるため、モジュールには逆流しないので負担は軽くなる。しかし、実際にエキシマレーザ装置を負荷と

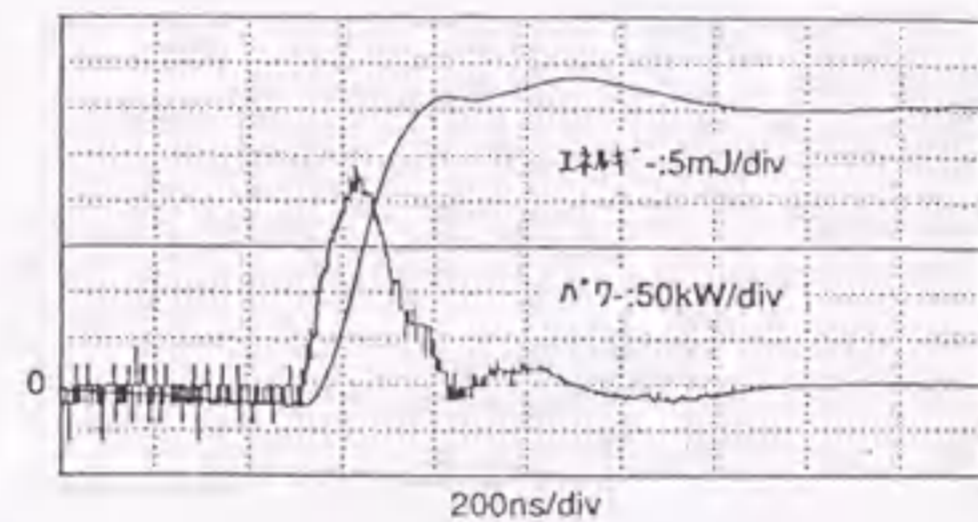
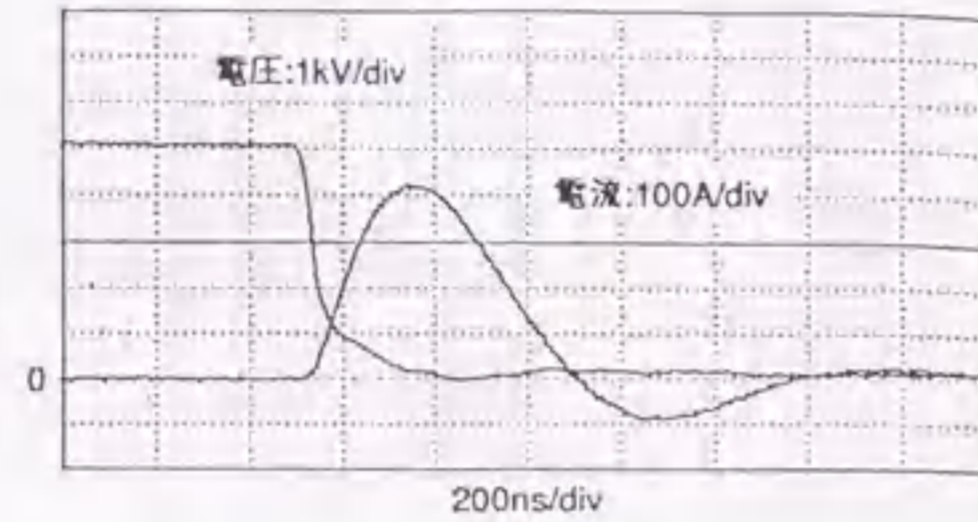


図5-37 スwitching波形および損失波形

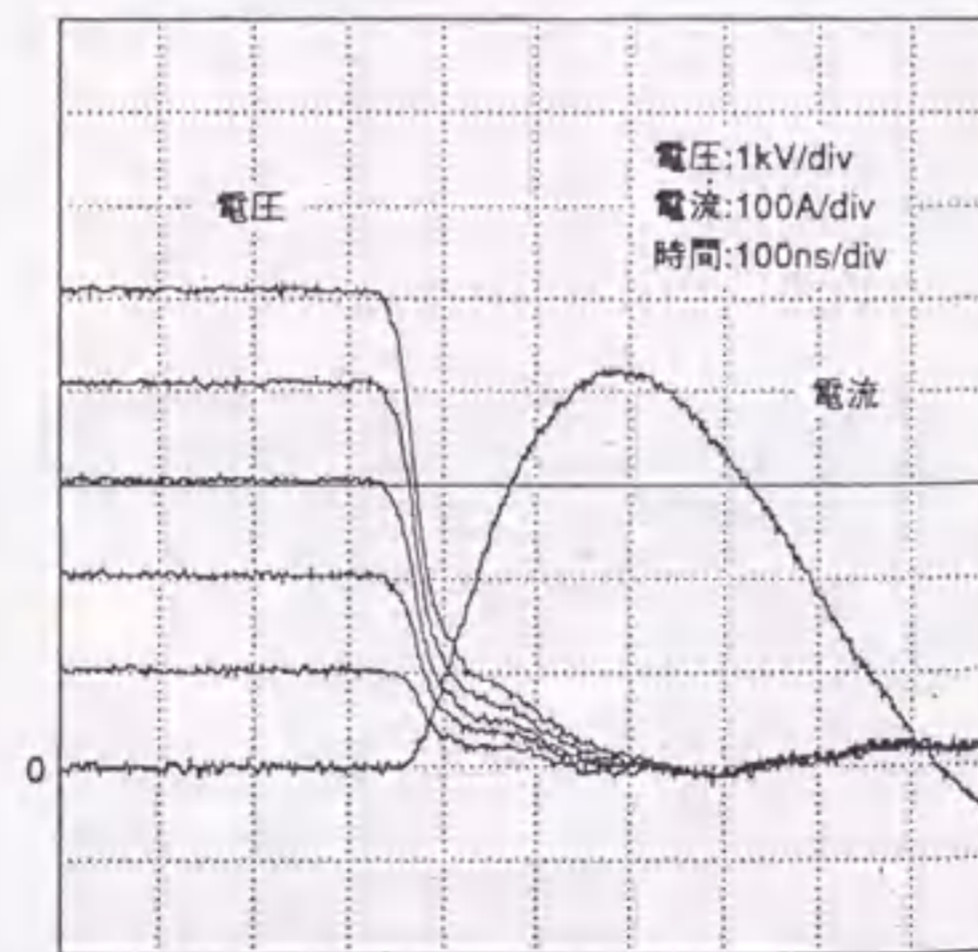


図5-38 各段の過渡負担電圧波形

して動作させた場合、負荷へのエネルギー注入効率あまり高くないため、残留エネルギーがモジュールに逆流し、損失は増加すると考えられる。さらに、半導体は一般に温度が高くなると損失が増えるため、実規模の電源を開発する時には、これらを考慮した熱設計をする必要がある。しかし仮に、上記要因でMAGTの発生損失が2倍になったとしても、温度上昇は42 $^{\circ}$ Cとなり5 kHzでの高繰り返し動作は十分可能と推測できる。

続いて、電圧5,000 V、電流400 A、電流パルス幅0.55 μ sの条件で高繰り返し通電実験を行い、MAGTの温度上昇を測定した。図5-39に、各素子の温度上昇実測値を、熱設計値と比較して示す。2 kHzの繰り返しにおけるスイッチの温度上昇は約8 $^{\circ}$ Cであり、設計値とほぼ一致した。これで、最終目標を満たす実規模の高速半導体スイッチ電源が設計できる見通しを得た。

最終段階として、上記結果を基に、電圧を25 kVまで拡大した実規模の高速MAGTスイッチユニットを試作した。これには、通電損失を低減するため新しい駆動回路を採用したほか、分圧回路の定数を各モジュール単位で変化させることにより、分圧電圧を均等化する方法を新たに試みた。

このユニットは、MAGT 8素子を直列接続したスイッチモジュール4台より構成され、全体で32素子を直列に接続しており、図5-40、41はこの構成と外観写真を示す。分圧回路VDは直流分圧抵抗と高周波分圧用のR-C回路より構成し、基板上に実装している。また、各直列段にブレイクオーバーダイオードBODを並列に接続し、各スイッチを過電圧から保護している。個々のMAGTは、充電電源装置に同期した制御装置からの信号で動作する回路GDにより個別に駆動される。駆動信号のタイミングをプログラマブル遅延回路DLで調整することにより、ターンオンタイミングのばらつきを ± 2 nsに抑え、ターンオン時に発生する過電圧を抑制している。冷却は、フッ素系絶縁冷媒パーフロロカーボン液 (8M社 FX3300、: フロリナート) を冷媒とする強制循環液冷方式とした。

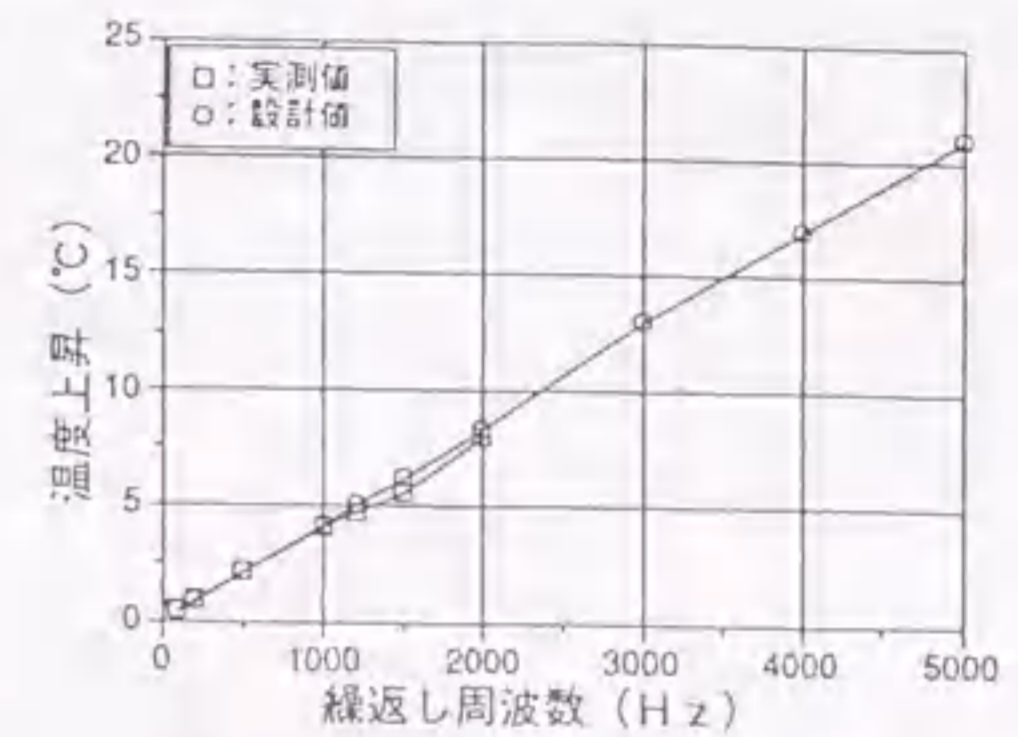


図5-39 スwitchの温度上昇

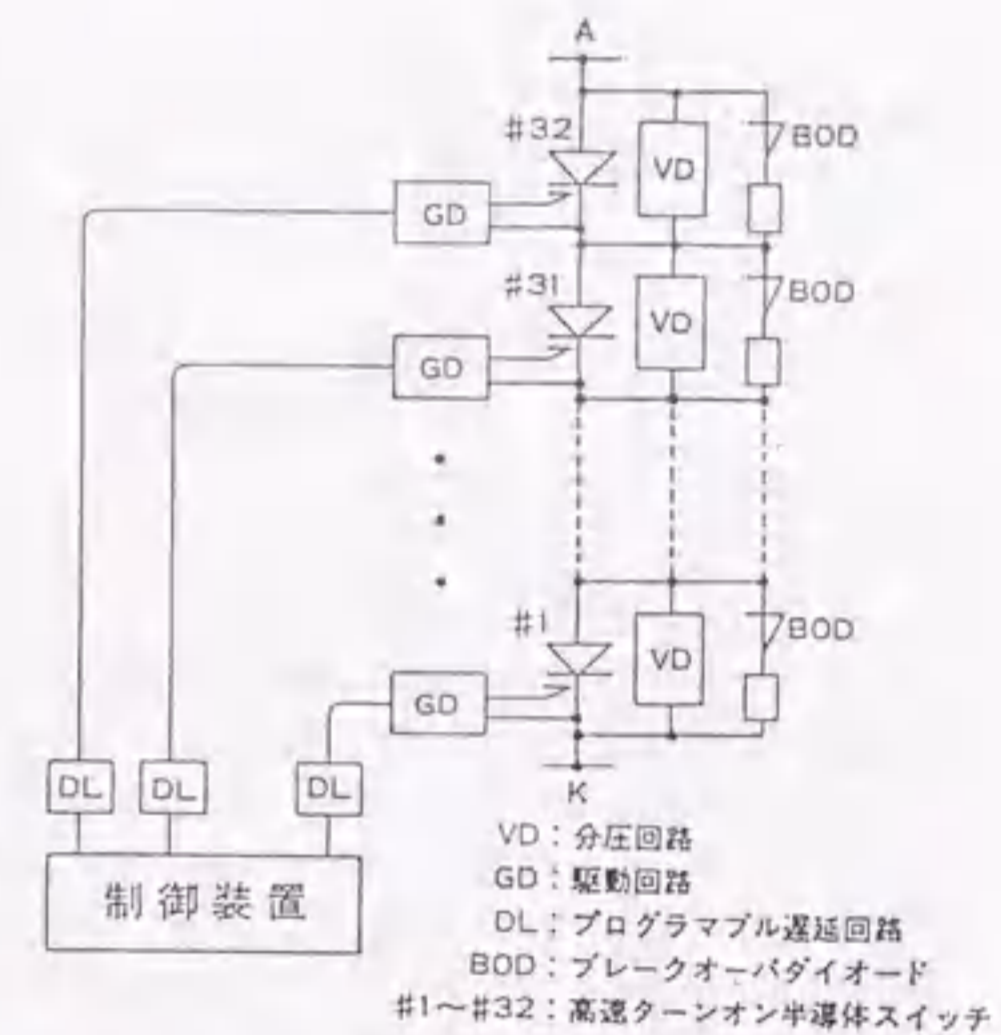


図5-40 高速スイッチング装置の構成

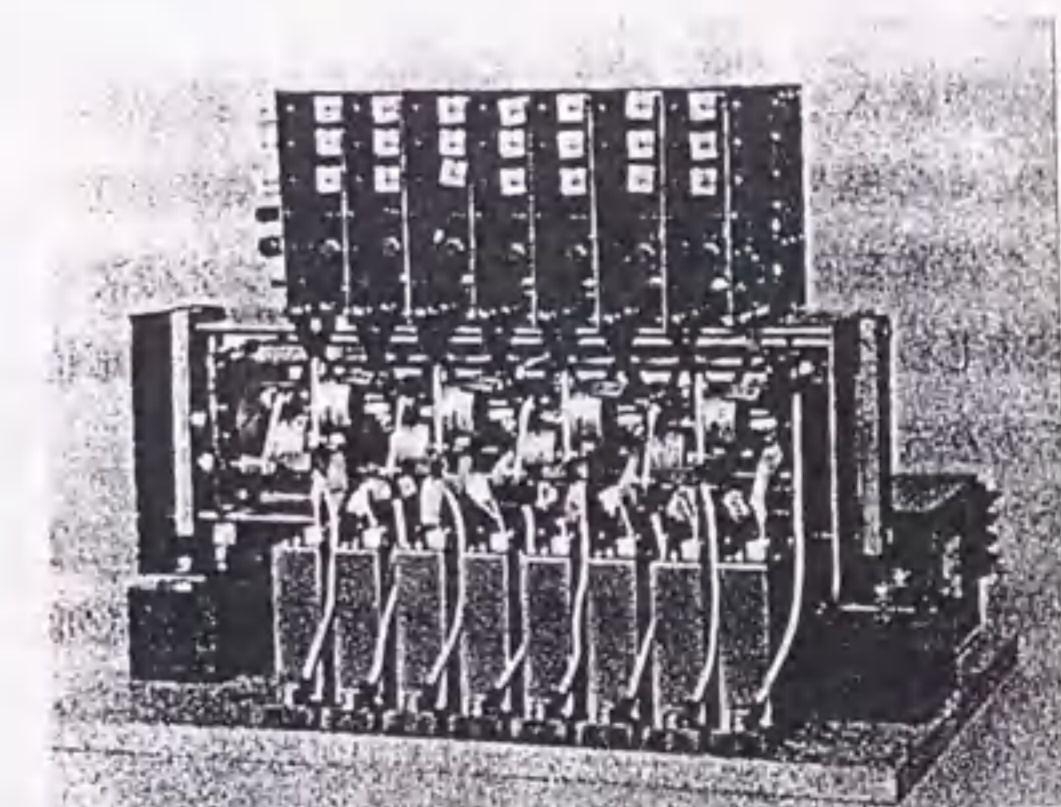


図5-41 スwitchモジュールの外観写真

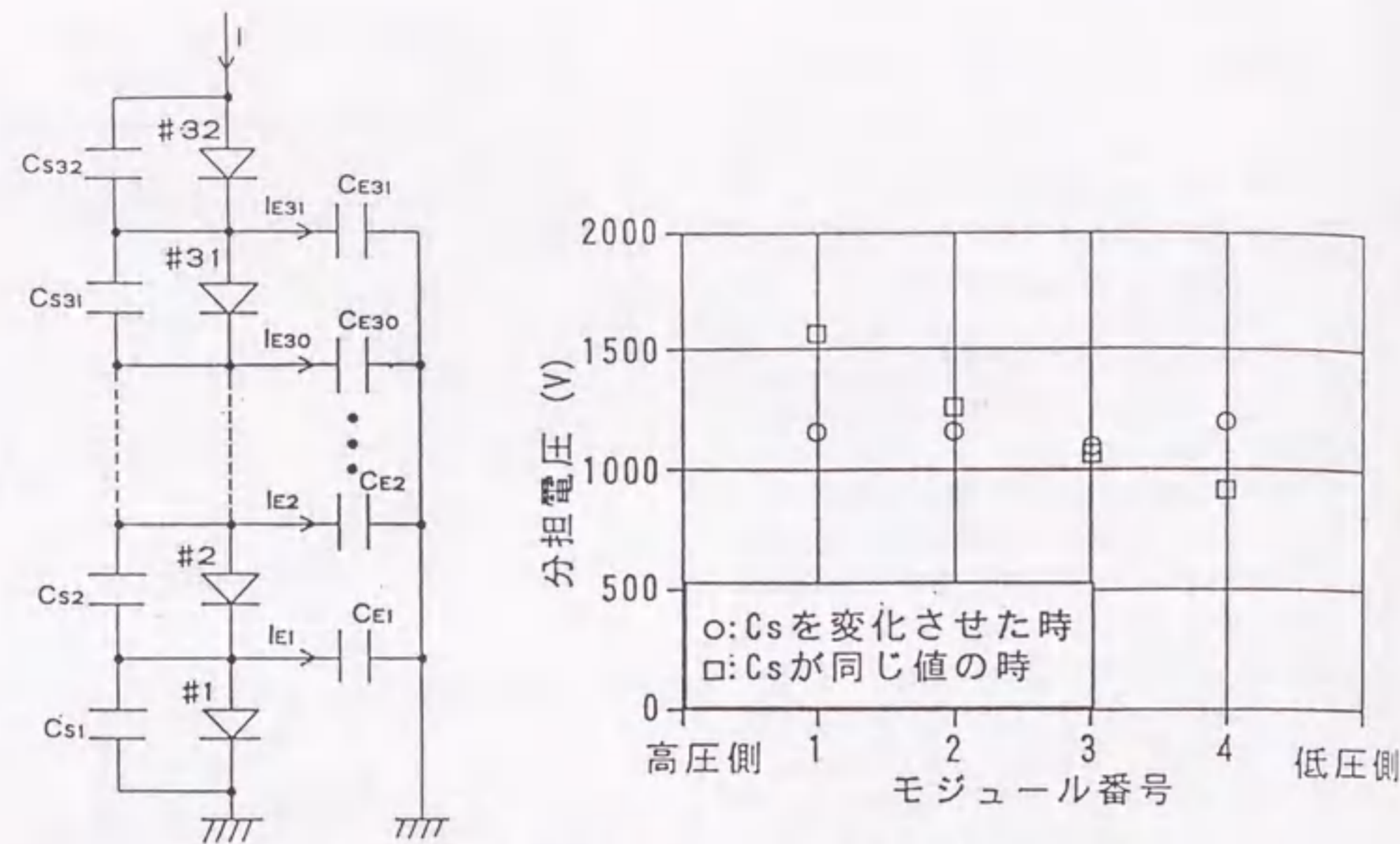


図5-4-2 C_s を変化させたときのスイッチング装置等価回路と分担電圧

5 kHz 動作には、充電時間が 100 μ s 程度的高速充電を行う必要があり、充電時に dV/dt の高い電圧が印加される。このため、各MAGT素子の分担電圧は、主に静電容量により支配されると考えられる。図5-4-2左は、静電容量に着目した等価回路を示し、 C_s は分圧回路の静電容量、 C_E は各直列段の対地間静電容量であり、高速スイッチング装置の幾何学的構造により決まる浮遊容量、および駆動回路への電源供給に用いているトランスの巻線間静電容量から成る。スイッチに電圧印加されると、充電電流の一部 I_{EK} が C_{EK} を通って分岐するため、低圧側になるほど C_s に流れ込む充電電流が小さくなり、 C_s が同値の場合、高圧側になるほど分担電圧が高くなる。

このため、高圧側ほど大きな C_s にする方式を検討したが、実際には煩雑となるので、各モジュール単位で C_s の値を変化させる方式を試みた。このときの各モジュール分担電圧特性を、各直列段を同じ C_s にしたときの特性と比較して図5-4-2右に示す。この結果、各モジュール単位で C_s を変化させるのみで十分な効果が得られ、低圧側のモジュールほど C_s を小さくする方法で分担電圧の均等化を図った。図5-4-3に、各モジュールの分担電圧特性を示し、この方法で分担電圧の最大偏差を5%以内に抑えることができた。

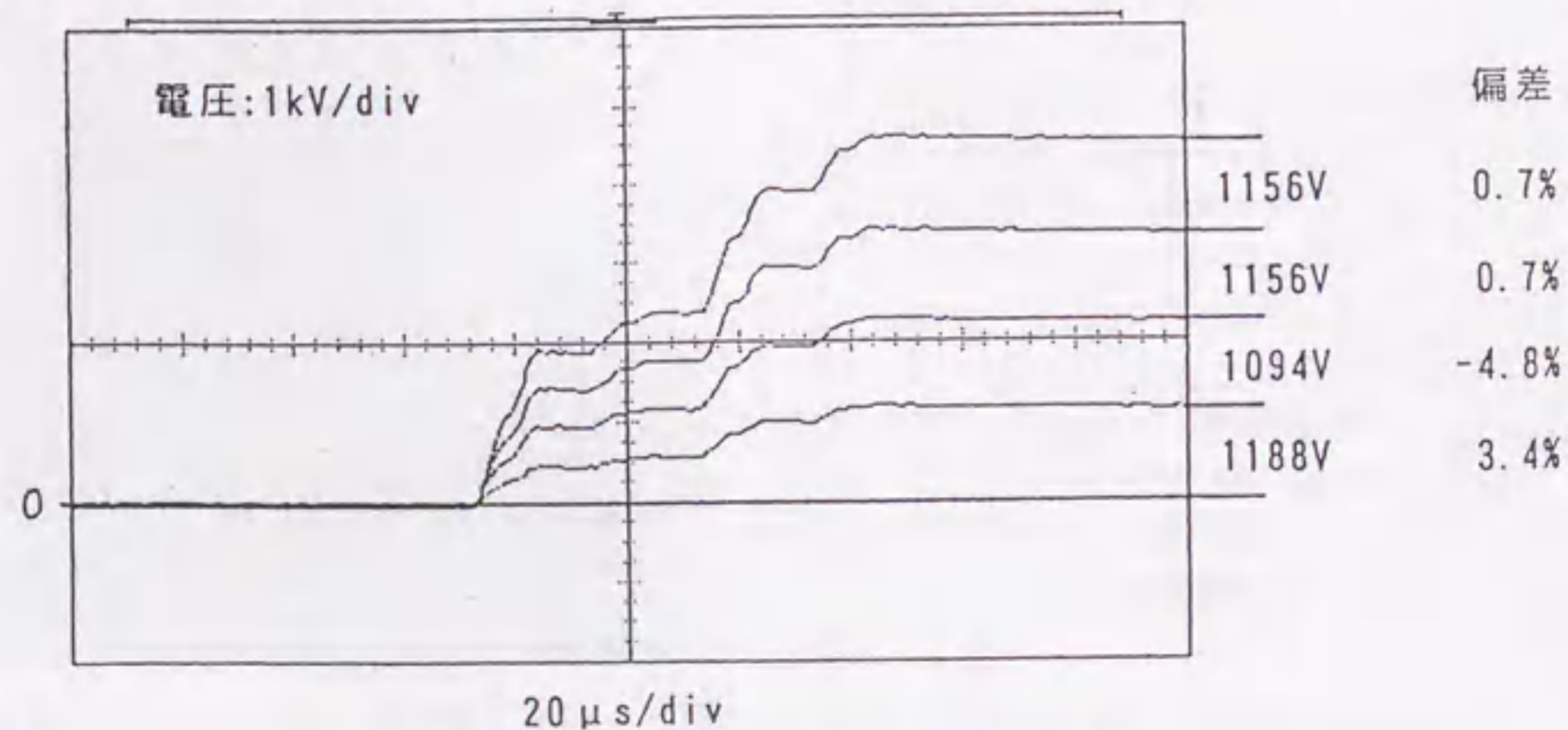


図5-4-3 各モジュールの分担電圧特性

本ユニットの性能評価回路を図5-4-4に示し、1次コンデンサ4nFの電荷を、負荷抵抗を通して放電させる。図5-4-5は、充電電圧25kVのときの電圧、電流波形であり、電圧25kV、電流440A、電流パルス幅)0.64 μ sの短パルススイッチング動作を確認した。

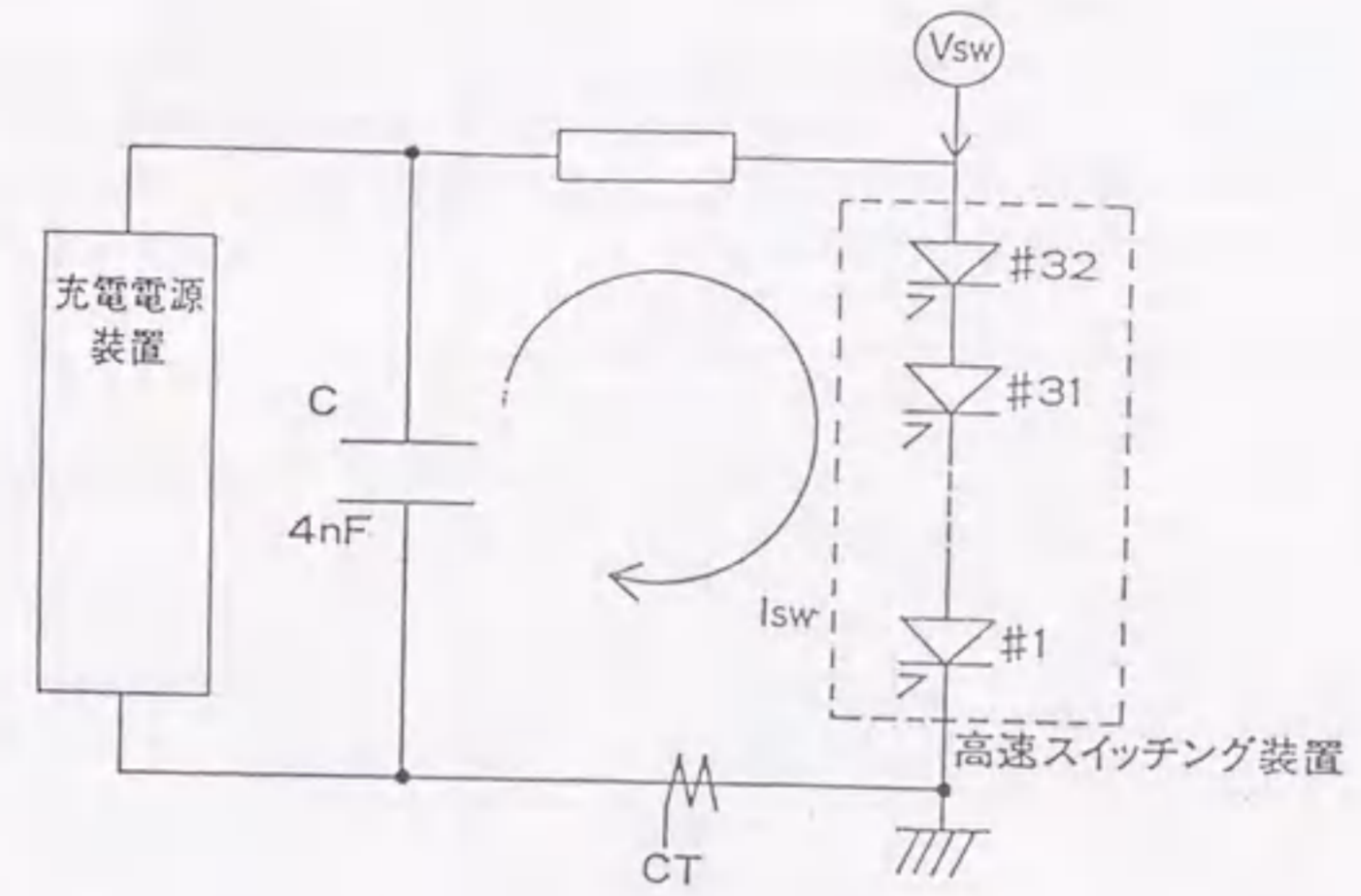


図5-4-4 スwitching装置性能評価回路

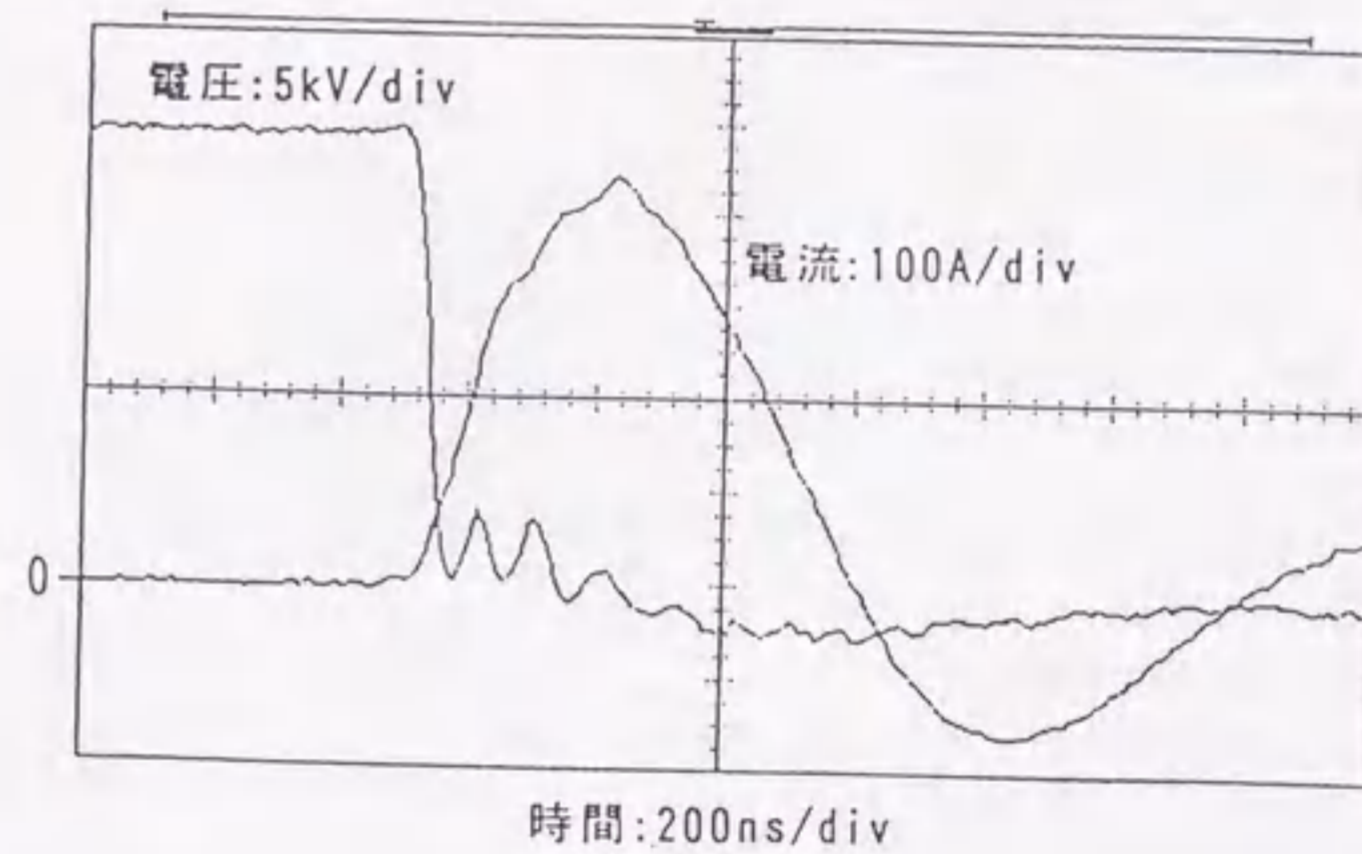


図5-4-5 スwitching装置の電流・電圧波形

5.4.2. 磁気圧縮回路

本電源は、1段の磁気パルス圧縮回路MPCと組み合わせレーザー励起を行うように設計されている。したがって、MPCの高繰り返し化を図るには、可飽和リアクトルの低損失化が必要である。低損失という点では、すでに鉄系よりもコバルト系のアモルファス材料が優れていることを確認しており、これを可飽和リアクトルの鉄心に採用し、MPCの設計・試作をした。供試鉄心は、コバルト系

アモルファス材料（東芝 TN-111、外径 150 mm、内径 90 mm、幅 25 mm）を、ポリエステルフィルムで層間絶縁したもの（鉄心A）である。他の供試鉄心として、TN-111（外径 170 mm、内径 90 mm、幅 25 mm）をポリイミドフィルムで層間絶縁し、熱処理を施したもの（鉄心B）も試作した。

鉄心A、Bの諸元と直流ヒステリシス特性を表5-3に示す。鉄心の損失は、B-H曲線の囲む面積に等しい。したがって、保磁力の小さな鉄心Bのほうが発生する損失が少なく、可飽和リアクトルの低損失化には優位である。¹⁶⁾

これら鉄心では、放熱効率を上げ温度上昇を極力抑えるため、アモルファス材料を層間絶縁用フィルムとともに巻き上げたので、貫層方向の熱伝導はきわめて小さく、発生熱のほとんどは沿層方向に伝導する。したがって、鉄心幅を狭くするほど沿層方向への熱伝導が良好になり、放熱効率が上がる。アモルファス材料を用いた鉄心では、通常層間絶縁用フィルムの幅をアモルファス材料の幅より広くして（フィルムエクステンション）完全な層間絶縁を施す。しかし、これは、鉄心端面からの放熱を妨げるため、エクステンションをなくし、鉄心端面の放熱効率を向上させた。フィルムの幅がアモルファス材料の幅より若干狭くても、層間の間隙はフィルムで保たれるため、層間絶縁は十分保たれ、それらの動作時諸特性を表5-4に示す。

一方、低損失化を補う手段として、鉄心の冷却技術は重要で、冷却方式としてフロリナートによる直接冷却方式を採用した。これは、化学的にも電気的にもきわめて安定な物質であり、冷媒用、絶縁用として用いられている。¹⁷⁾⁻¹⁹⁾

図5-46は、性能評価するための実験回路を示す。1段構成のMPCに、高圧充電電源と前記のMAG Tモジュールを用いて発生させたパルス電流を入力し、可飽和リアクトルSRの動作によってパルス圧縮させる。コイルは2ターンで、モジュールの電圧 V_{sw} 、MPCへの入力電流 I_1 、可飽和リアクトルの極間電圧 V_{SR} 、可飽和リアクトルを流れる電流 I_2 を前記測定器類を、鉄心内部の温度およびMPC周囲の冷媒温度は、光ファイバ温度計（高岳製作所（株）FT1110）を用いて測定した。

表5-3 鉄心の諸元と直流磁気特性

	鉄心A	鉄心B
材質	コバルト系アモルファス材料(TN-111)	
コアサイズ (mm)	$\phi 150 \times \phi 90 \times 25$	$\phi 170 \times \phi 90 \times 25$
磁束密度 B_{800} (T)	0.605	0.601
角形比 B_r/B_s (%)	84.0	80.5
保磁力 H_c (A/m)	0.59	0.20
絶縁フィルム	ポリエステル	ポリイミド
熱処理	なし	あり

表5-4 可飽和リアクトル動作時の諸特性

	鉄心A	鉄心B
コイル巻数	2ターン	2ターン
充電電圧 V_{c1}	5 kV	5 kV
入力周波数	775 kHz	900 kHz
動作飽和磁束密度 ΔB	1.06 T	1.07 T
損失	4.5 mJ/パルス	4.3 mJ/パルス

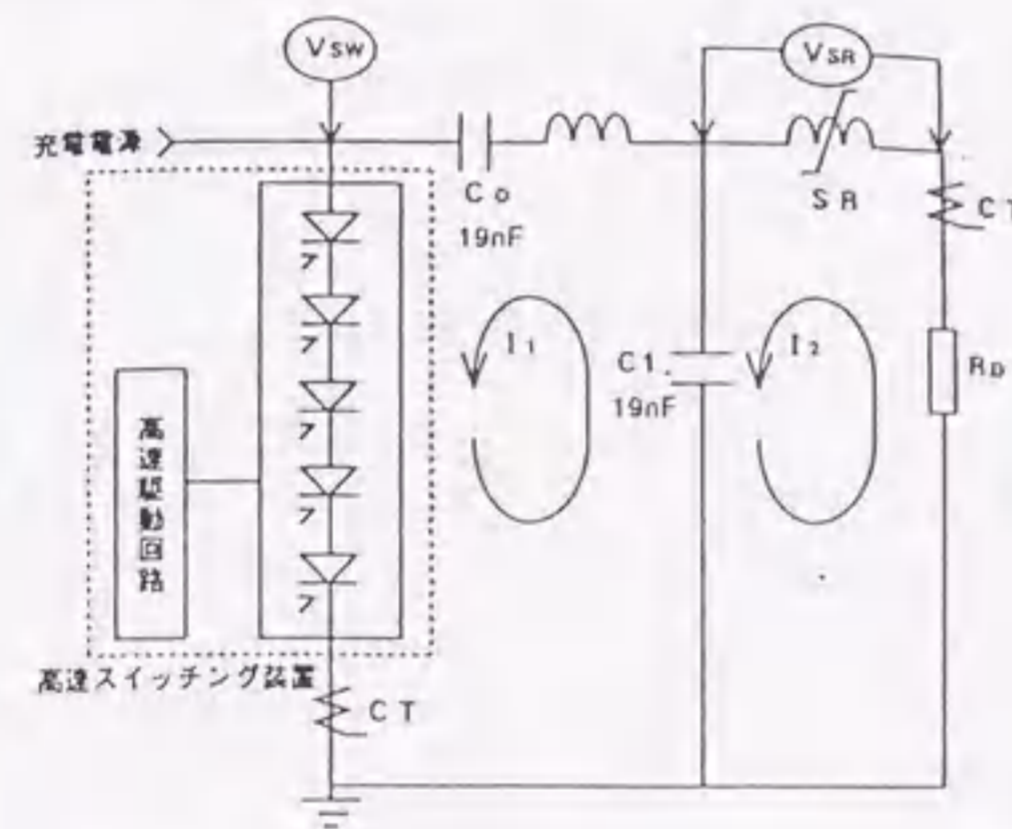
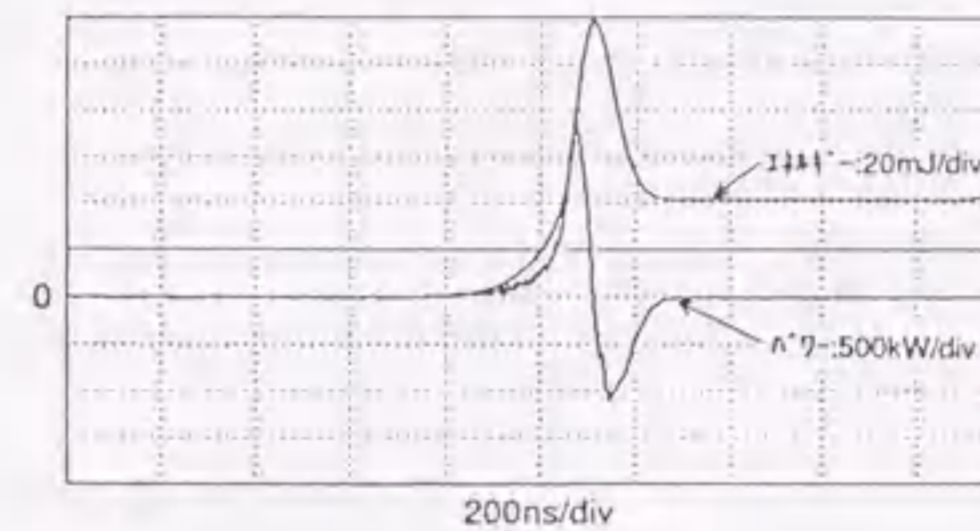
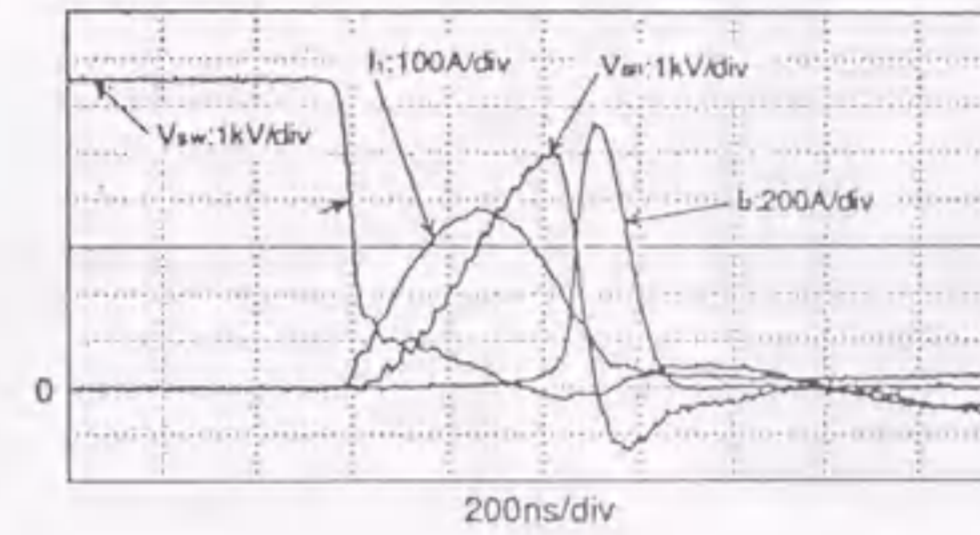


図5-46 スイッチング装置の実験回路

図5-47は、動作時の電圧、電流波形および可飽和リアクトルの損失波形を、鉄心Bについてに示す。パワーおよびエネルギー損失は、可飽和リアクトルの極間電圧と電流波形の積、および、その時間積分をデジタルシグナルアナライザで演算することにより求めた。また、可飽和リアクトルの極間電圧を時間積分することにより求めた鉄心の磁束変化と、リアクトル電流とから、可飽和リアクトル動作時のB-H曲線を得た。図5-48に、鉄心Bの動作時におけるB-H曲線を示す。これらから、動作時における諸特性は表5-5のようになる。鉄心Bの方がMPCへの入力周波数が高くなっているが、これは鉄心Bの飽和磁束が鉄心Aに比べ小さいためである。損失は、MPCへの入力周波数の約1.73乗に比例することが分かっており、鉄心Bでの損失を、鉄心Aを用いた時の入力周波数775 kHzの場合に換算すると、33 mJ/パルスとなり、鉄心Bを用いた方が約25%低損失であることが分かった。



鉄心B

図5-47 MPC動作時の電圧、電流および損失波形

鉄心の温度上昇については、周囲温度に対する鉄心中央部の温度上昇 $\Delta\theta$ を、冷媒と鉄心端面の境界層での温度上昇 $\Delta\theta_a$ 、鉄心内部の温度上昇 $\Delta\theta_b$ に分けて考えると、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \Delta\theta_a + \Delta\theta_b \\ \Delta\theta_a &= W / (S \cdot \alpha_a) \\ \theta_b &= W \cdot H / (2 \cdot S \cdot \alpha_b) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5-3)$$

と表される。ここで、 $\alpha_a = 0.0137 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$: 冷媒と鉄心端面の境界層における熱伝導率、 $\alpha_b = 0.09 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$: 鉄心内部の熱伝導率、W: 鉄心の損失、S: 鉄心の冷却面積、H: 鉄心幅であり、繰り返し数2 kHzにおける鉄心A、B

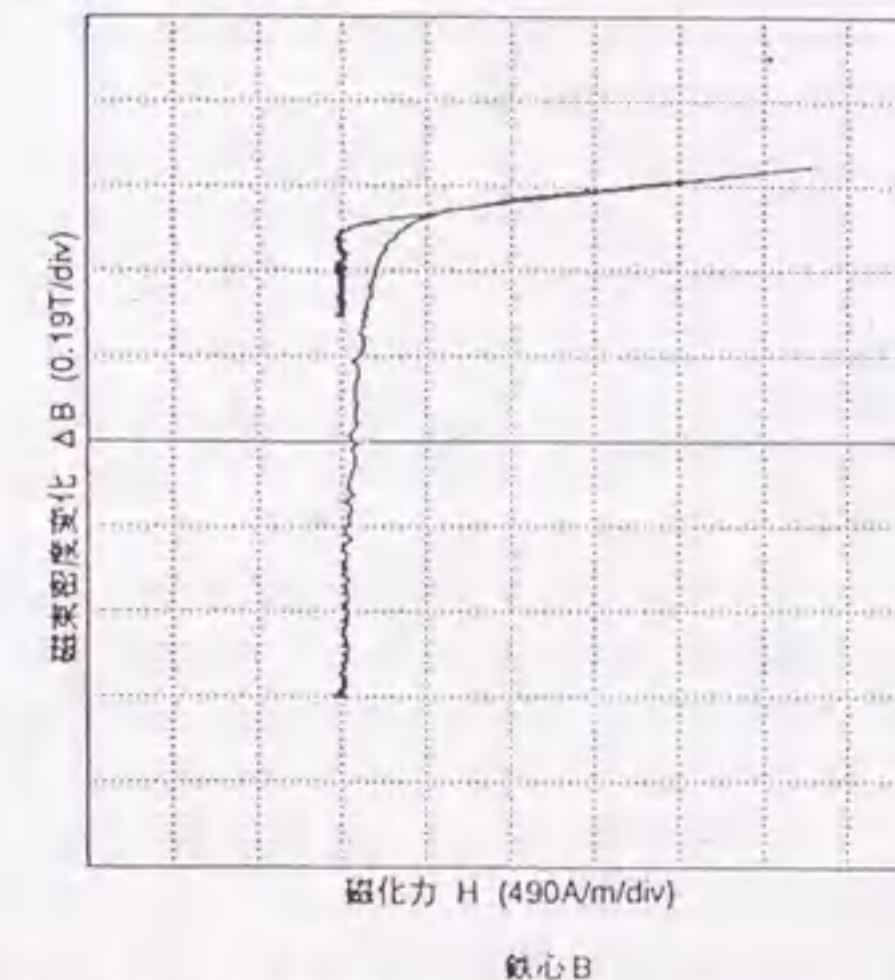


図5-48 可飽和リアクトル鉄心の動作B-H曲線

の周囲温度に対する温度上昇は、表5-5のように算出される。

そこで、MPCを繰り返し数2 kHzまで連続動作させ、鉄心B各部の温度上昇を調べ、図5-49に示す。前述の温度上昇の計算値より若干高い値となっているが、これは冷媒と鉄心端面層における熱伝導度 α_s が、冷媒の流量などにより変化するため、 $\Delta\theta$ の実測値28℃より $\Delta\theta_a$ 、 α_s を逆算すると、それぞれ、24℃、0.011 W/(cm²・℃)となる。

また、5 kHzの繰り返し動作における鉄心の温度上昇は、鉄心AおよびBを用いた場合、それぞれ約95℃、70℃となる。TN-111の連続使用可能温度は120℃とされており、鉄心Bを採用することにした。しかし、5 kHzで安定に動作させるためには、さらに低損化、冷却効率の向上が課題となる。この対策として、鉄心のヒステリシス損失は、熱処理をして保磁力を小さくすることで約25%低減させることができ、また、鉄心で発生した熱はほとんど沿層方向に伝導することから、鉄心幅を狭幅化して鉄心端面への熱伝導効率を上げ、フィルムエクステンションをなくして放熱効果を向上させた。

これらの結果を基に、MAG T電源と組み合わせる上記単位鉄心を6個重ねて構成した実規模のMPCを試作し、最終性能を確認した。このように、複数の単位鉄心を重ね合わせた可飽和リアクトルでは、各単位鉄心への冷却液の流れが均等になるようにする必要がある。各単位鉄心の温度上昇に差が生ずると、磁気特性の変化を引き起こすばかりでなく、鉄心の磁気特性が局所的に劣化してしまい、停止後に再動作した際、初期の特性を維持することができなくなる。このため、鉄心の冷却が、可飽和リアクトルのスイッチング動作安定化には重要な技術ポイントとなる。

そこで、冷媒は各単位鉄心の間を千鳥足状に均一に流れる構造を採用し、タンクの外部に配置されたポンプにより強制的に循環させた。図5-50、51は、この構造断面図と外観写真で、単位鉄心6個を重ね合わせたものが、可飽和リアクトルの巻線と冷却タンクを兼ねた銅製の同軸円筒状導体の中に配置されている。飽和時のインダクタンス L_s は、同軸円筒導体の外径 $D_o=22$ cm、内径 $D_i=3$ cm、高さ $H=29$ cmであり、

$$L_s = (\mu_o \cdot \mu_s / 2\pi) \cdot H \cdot \ln(D_o / D_i) \times 10^{-2} = 0.23 \mu\text{H} \cdots (5-4)$$

となる。ここで、 $\mu_o=4 \times 10^{-7}$ 、 $\mu_s=2$ である。

実験・測定方法は、前記とほぼ同じで、充電電圧21 kVのときのMPC動作時電圧、電流波形を図5-52に示す。4直列MAG Tモジュールによりパルス幅600 nsの電流がMPCに入力され、約170 ns、すなわち圧縮率が3.5倍になっていることが分かる。次に、この通電条件で5 kHzの90分間の連続高繰り返し動作を行い、スイッチング波形に変化はみられず、高い安定性が確認できた。このときの鉄心の温度上昇を図5-53に示し、90分経過後の鉄心と冷却液の温度上昇は、それぞれ41℃、11℃であった。

表5-5 鉄心の温度上昇(2 kHz)

	鉄心A	鉄心B
鉄心冷却面積	250 cm ²	327 cm ²
損失	90 W	86 W
$\Delta\theta_a$	26.3℃	19.2℃
$\Delta\theta_b$	5℃	3.7℃
$\Delta\theta$	31.3℃	22.9℃

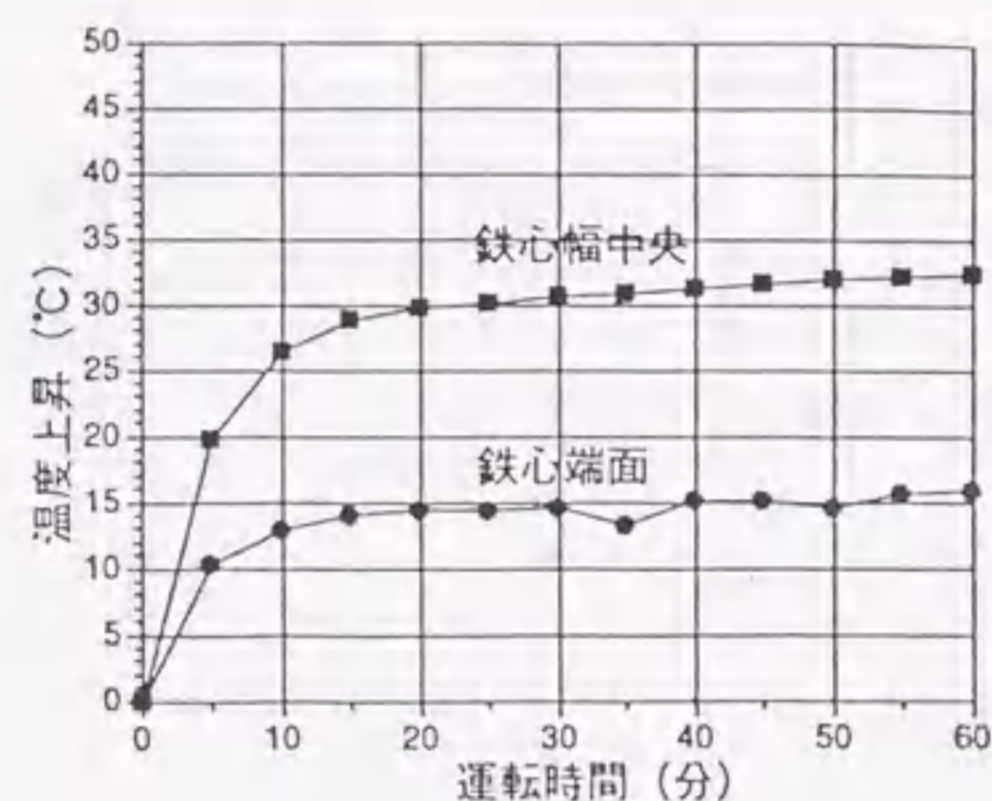


図5-49 鉄心各部の温度上昇

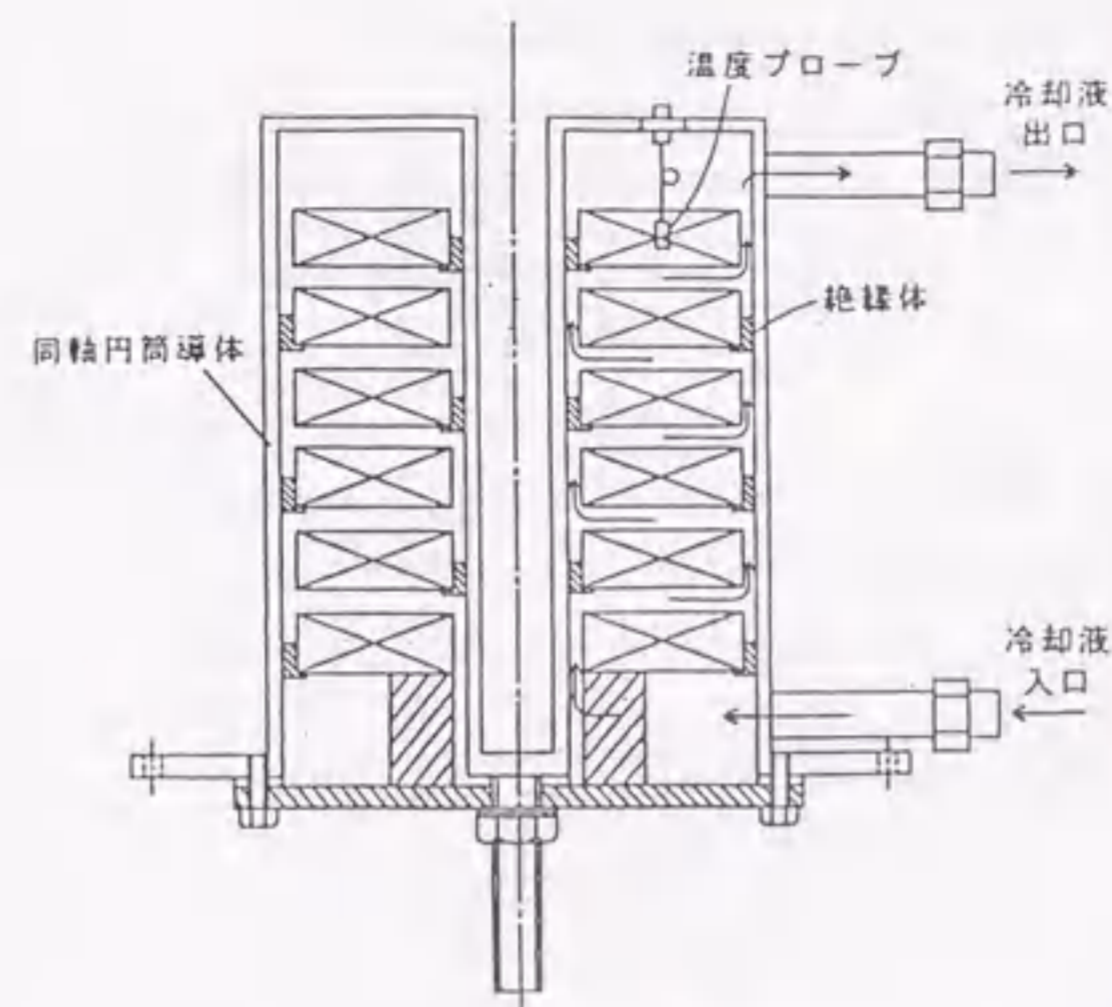


図5-50 MPC装置の構造断面図

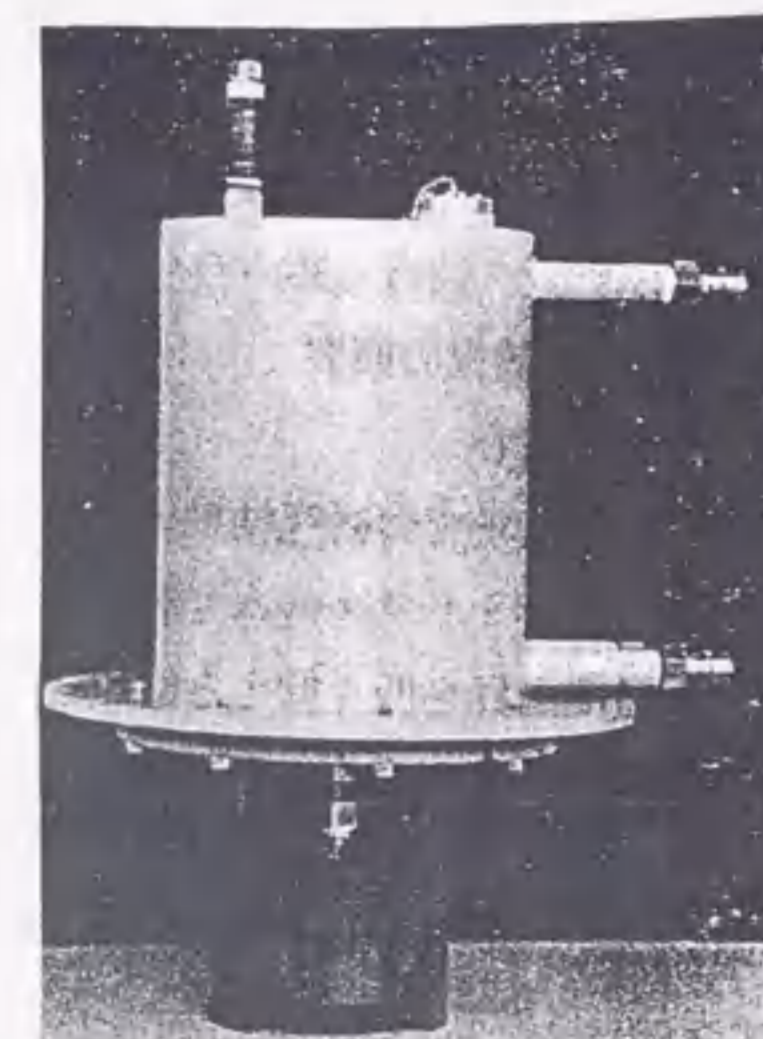


図5-51 MPC装置の外観写真

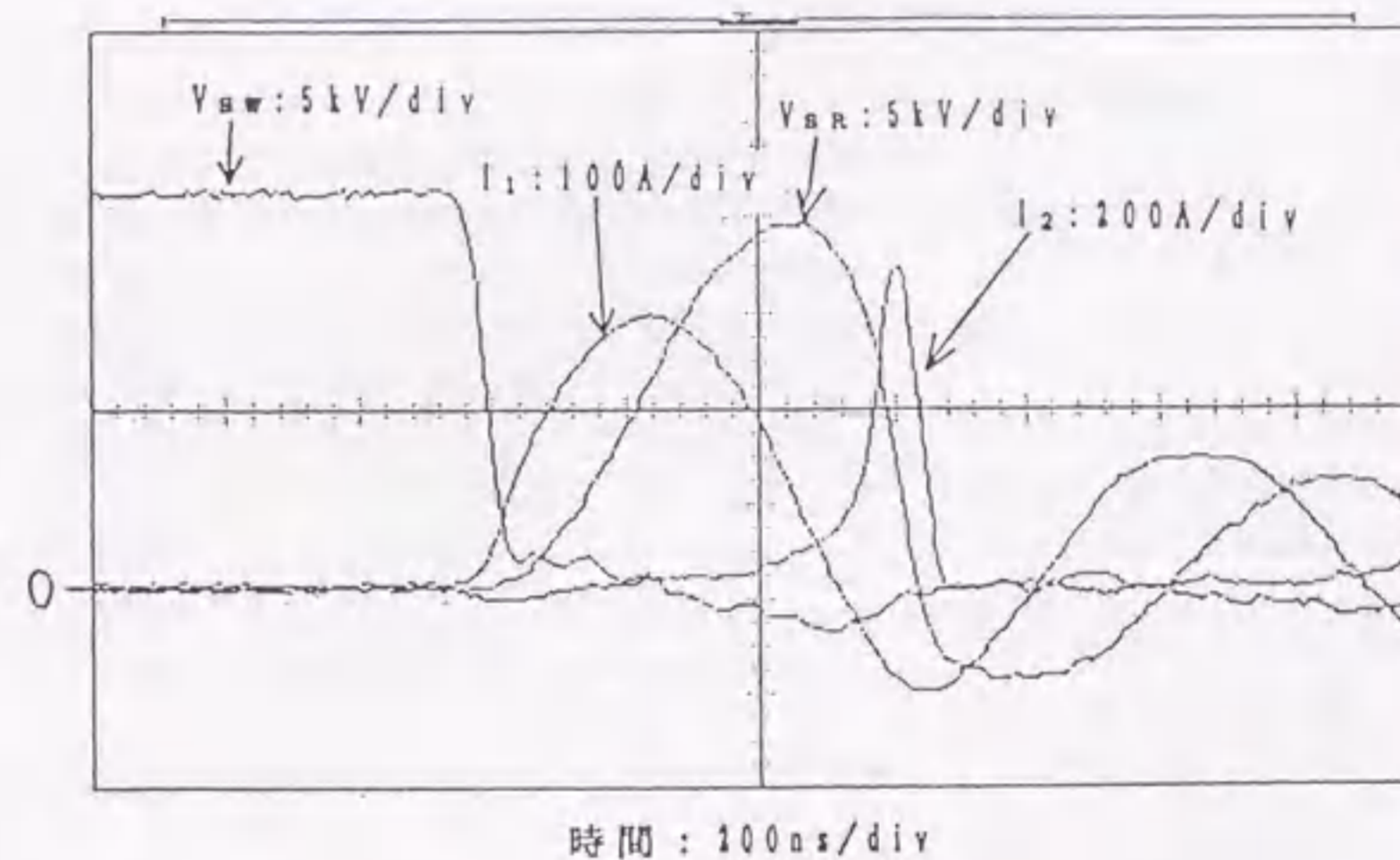


図5-52 MPC動作時の電流・電圧波形

この結果は、前の単一鉄心による5 kHz動作における温度上昇の約70℃よりかなり低いので、その理由を検討した。まず、冷却液の温度上昇から、鉄心損失 W_{SR} は次式で計算できる。

$$W_{SR} = \Delta T_c \cdot Q \cdot \gamma \cdot C_p \cdots (5-5)$$

ΔT_c : 冷却液の温度上昇、 Q : 冷却液流量 (6.5 l/min = 1.1×10^{-4} m³/s)、 γ : 冷却液比重 (1.75×10^3 kg/m³)、 C_p : 冷却液比熱 (1.05×10^3 W・s/(kg・℃))である。

ここで、安定後の冷却液温度上昇値 $\Delta T_c=11$ ℃を代入すると、 $W_{SR}=2.2$ kWと算出され、単位体積当たりの鉄心損失は201 $\mu\text{J}/(\text{パルス} \cdot \text{cm}^3)$ となる。これは、前に測定したの単体鉄心の損失と差異は無いことが分かった。

鉄心内部の熱伝達率はアモルファス材料の組成によるため変わらないと考えられ、冷却液と鉄心端面の境界層における熱伝達率 α_c に着目し検討すると、 $\alpha_c = 0.032 \text{ (W/(cm}^2 \cdot \text{°C))}$ となる。これは、前の単体鉄心における値より約3倍大きく、冷却系の性能を向上させた効果によるもので、本MPCが繰り返し数5 kHzでも安定に動作することが確認できた。

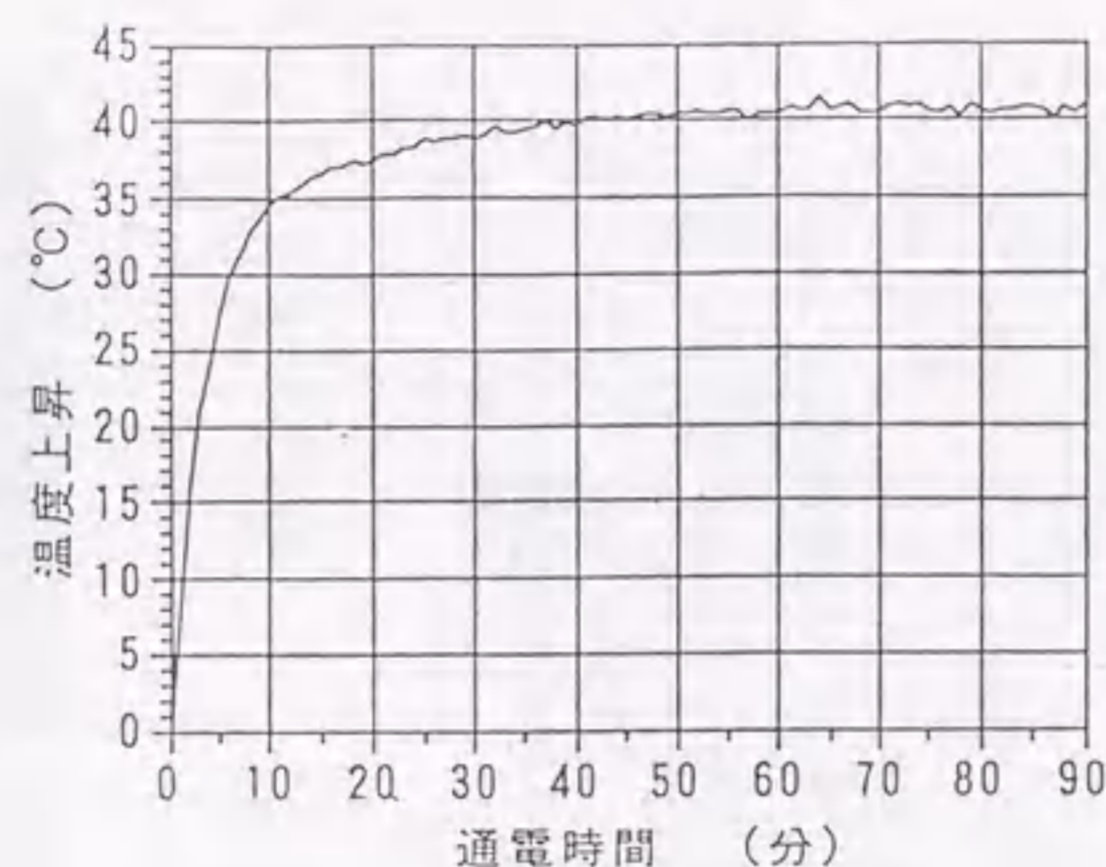


図5-53 鉄心の温度上昇特性

5.4.3. 電源の構成と特性

放電負荷にMAGT電源を接続した場合、スイッチ部は放電部からの反射エネルギー、輻射ノイズなど過酷な環境にさらされ、スイッチ損失の増加、誤点弧を引き起こす可能性がある。このような状態で安定したスイッチ動作を実現するためには、これら外部条件がスイッチ部の動作に与える影響や問題点を明らかにする必要がある。さらに、その高信頼性化を図るためには、過充電による過電圧、スイッチングに伴う過電圧から保護する技術、輻射サージによるスイッチ誤動作を防止する技術も確立する必要がある。

MAGTスイッチユニットは、上記のMPCと組み合わせ、まず抵抗負荷で充電電圧を21 kVに設定し、繰り返し5 kHzで10分間高繰り返し通電を行った。このときのMAGTの温度上昇を、カソード電極に直接装着した光ファイバ温度プローブを用いて測定した。この条件で90分間の連続動作を行ったときの温度上昇を図5-54に示し、平衡後の温度上昇分 ΔT_{sw} は24°C、フロリナートの温度上昇は3°Cであった。この結果より、スイッチで発生した損失を求めると、 $W_{sw} = 46 \text{ W}$ となり、MAGT接合部とフロリナート間の熱抵抗 R_{thj-c} とは、次式のように示され、

$$\Delta T_{sw} = W_{sw} \cdot R_{thj-c} \dots \dots \dots (5-6)$$

これより、 $R_{thj-c} = 0.457 \text{ °C/W}$ となる。

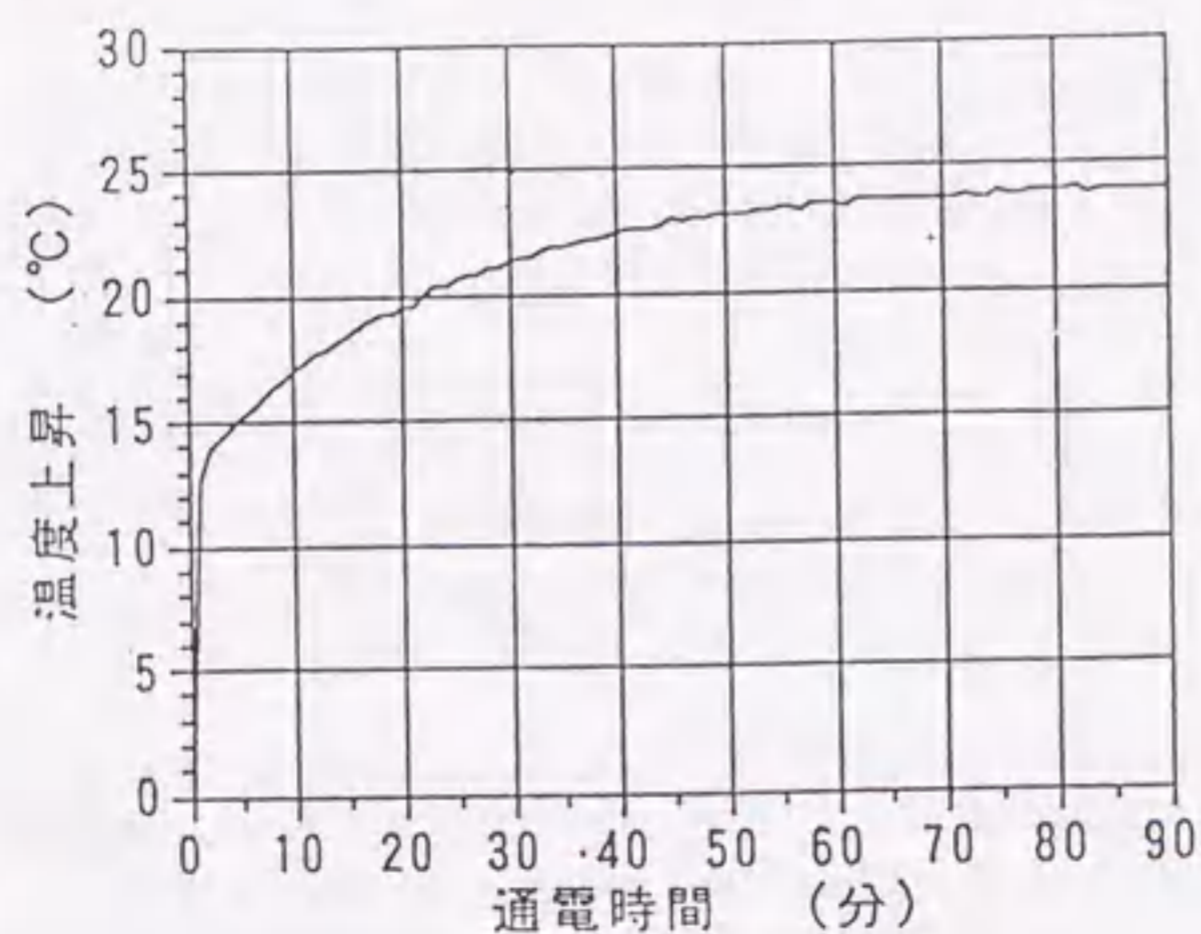


図5-54 スwitchの温度上昇特性

次に、充電電圧を25 kVに昇圧して同様の実験を行い、この電圧、電流波形を図5-55に示す。2次コンデンサの電圧 V_2 から、電圧25 kV、電流370 A、電流パルス幅 $0.6 \mu\text{s}$ の条件におけるMAGTユニットのエネルギー伝達効率および損失が算出できる。 $V_2 = 22.5 \text{ kV}$ より、2次コンデンサへの移行エネルギーは1.01 Jであり、1次コンデンサの充電エネルギーは1.25 Jであるので、81%の伝達効率で動作している。また損失は、MPCの漏れ電流による損失を無視すると、240 mJ (7.5 mJ/MAGT素子) となる。

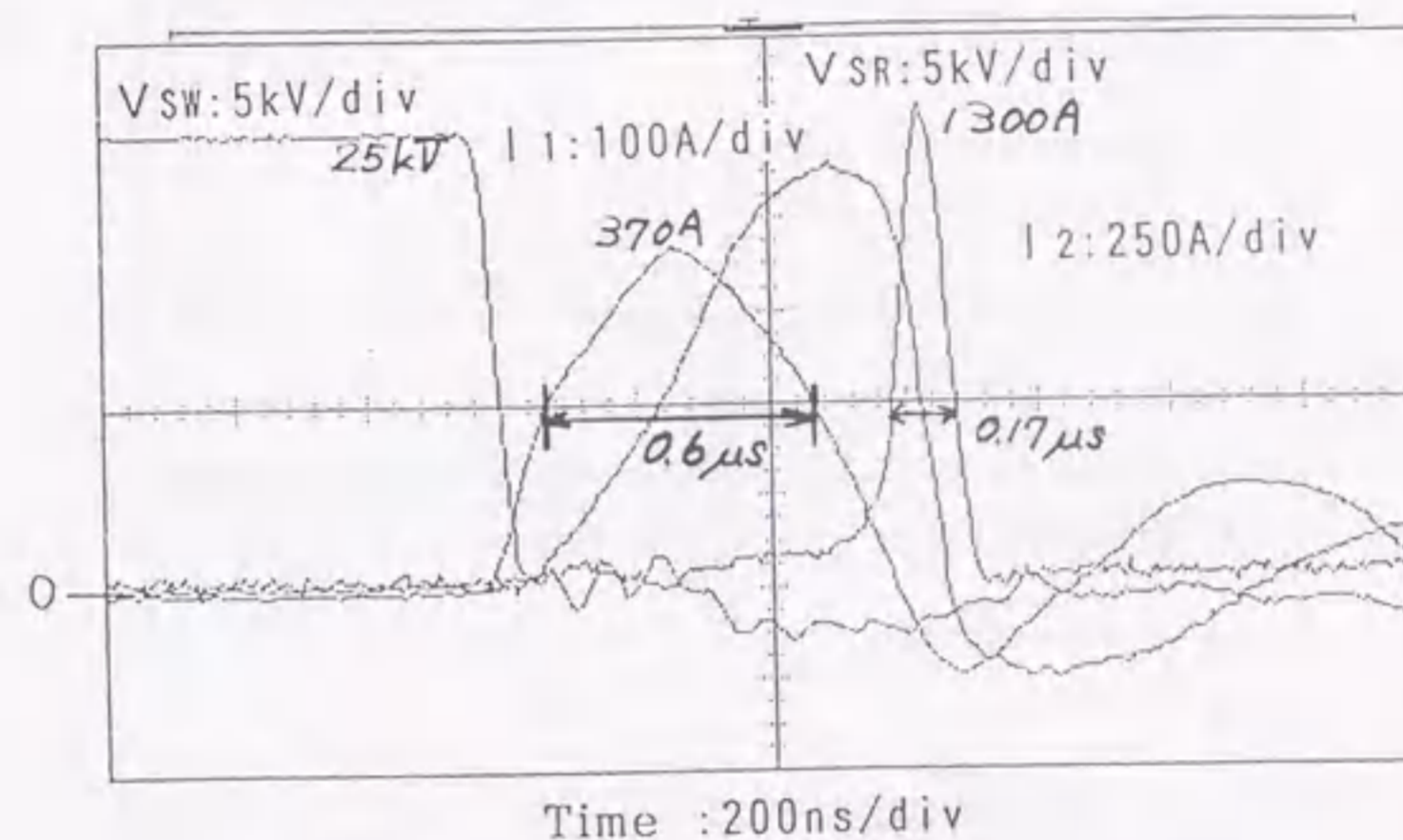


図5-55 組み合わせ試験の電流・電圧波形

この条件で、繰り返し5 kHzのスイッチ動作を行った場合、MAGT素子の発熱量は37.5 Wであり、前述の R_{thj-c} を用いてMAGTの温度上昇を試算すると、約17°Cとなる。実際にエキシマレーザを負荷とした場合、負荷へのエネルギー注入効率があまり高くないため、残留エネルギーがスイッチユニットに逆流し損失は増大すると考えられるが、仮に損失が2倍になったとしても温度上昇は34°Cであり、5 kHzでの高繰り返し動作には問題にならないと考えられる。

図5-56には、この条件において5 kHzで約10秒間動作させたときのスイッチユニット電圧波形を示すが、スイッチング波形に変化はみられず、安定に動作していることが確認された。そこで、

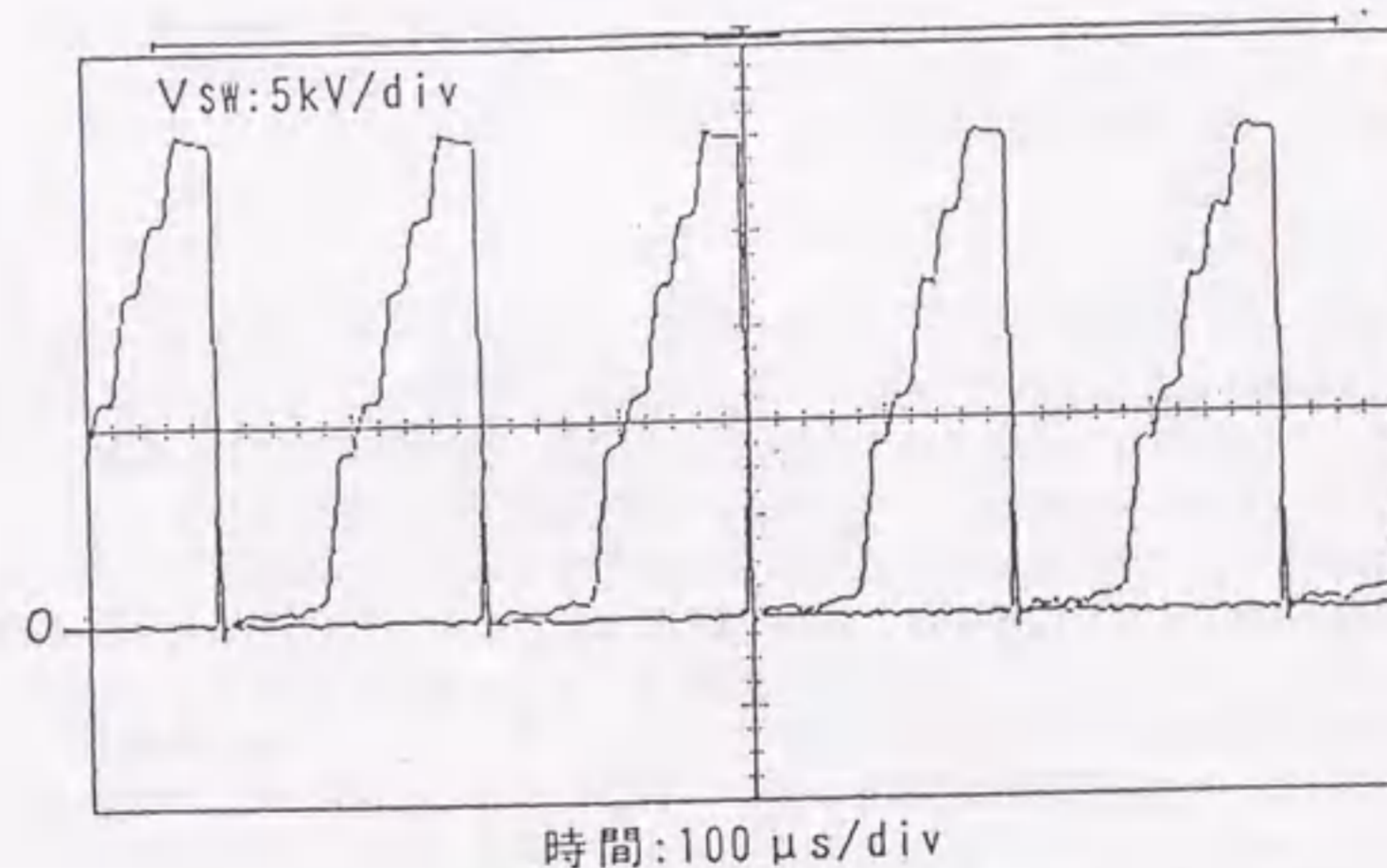


図5-56 5 kHz 通電試験の電圧波形

最終的にガス循環チャンバを使い、放電負荷での通電を行うことにより、放電部がスイッチユニットの動作に与える影響、問題点を検討した。図5-57に、この時のスイッチング波形を示す。スイッチユニット部は、放電部からの輻射ノイズの影響を防ぐため、鉄製の管体中に配置し、また、電源系統から回り込むサージによる駆動回路系の誤動作や破壊を防ぐため、電源供給回路にノイズカットトランスを挿入した。

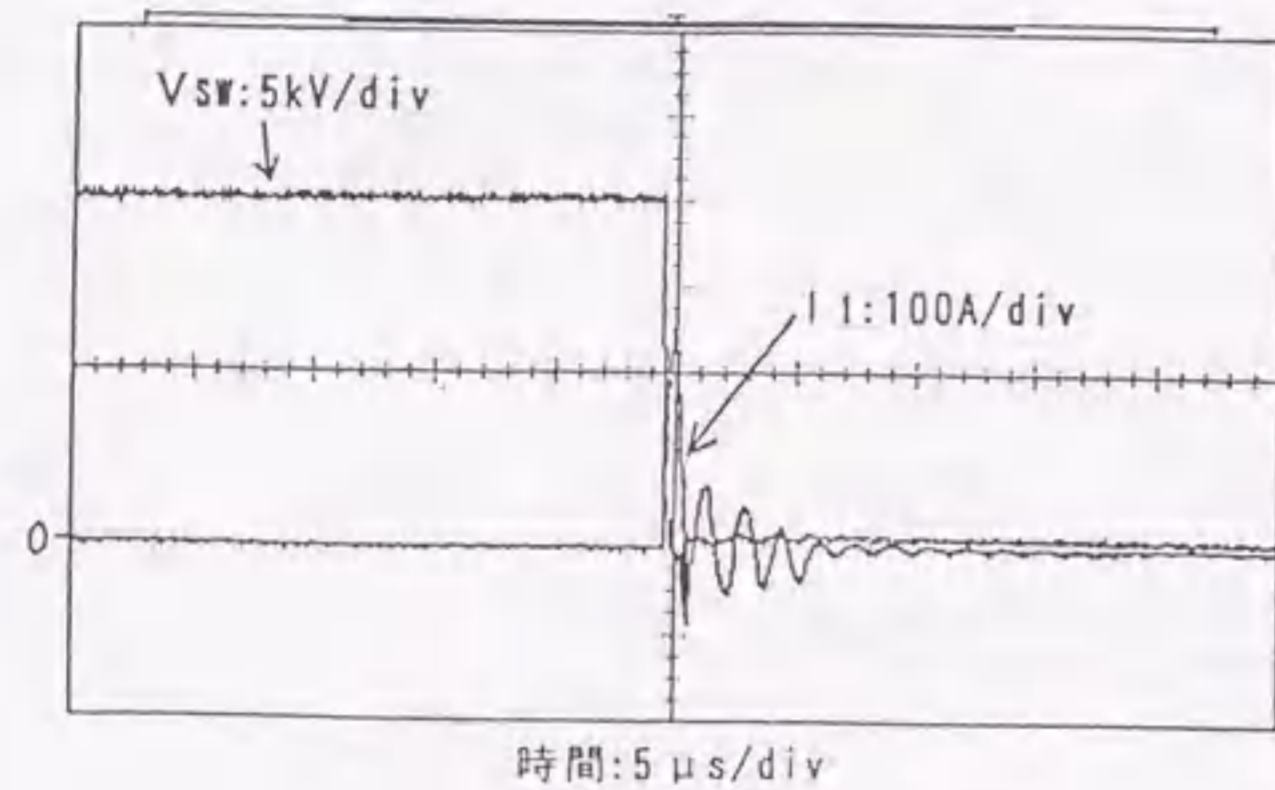


図5-57 放電負荷における5 kHz時のスイッチング電圧波形

この結果、放電負荷として5 kHzの動作を行っても安定性は高く、輻射ノイズなどの外乱による誤動作は観測されず、また、残留エネルギーによりスイッチング装置に流れる持続電流は通電開始後10 μs経過した時点で消滅していることなどが確認できた。

本MAG Tスイッチユニットは、32素子を直列接続しており、耐圧安全係数を大きくしている。これは、素子が研究試作の段階であり、個別の特性ばらつきが大きいことによるが、この問題は製品化時には解決し、接続個数は半減以下にすることが見込まれる。また、MAG T素子に比較的近い特性を持つ従来のGTO (Gate Turn-Off) 素子では、ピーク電流がほぼ2桁低く、その上ターンオン時間は低速でほぼ1桁大きく、スイッチング損失も格段に大きいので高繰り返し動作ができない。

今のところ、高速半導体スイッチ素子として、低損失、高速立ち上がり特性などすべてについて、MAG Tに並ぶ性能を持つものは類がなく、したがって、その駆動技術、レーザー電源組み込みの例はない。

5.5. レーザ駆動

レーザー駆動には、電極間に25 kV程度の高電圧を印加する必要がある。これには、MAG T素子の耐圧が2,500V級で設計されているので、これを多段に直列接続するが、従来より大幅に高速化された新しいスイッチング素子であるため、各素子の保護、同時ターンオン、電圧分担均等化、などの駆動回路系についても、これに適応できる新たな技術開発を行った。このようなMAG Tの特性に合わせた新駆動技術と、さらに5 kHzの繰返し動作に耐えるような独自開発による低損失の磁気圧縮回路(MPC)技術とを合わせ開発し、5 kHz、25 kV-300 Aという他に類を見ない高速半導体パルス電源を実現させたことを述べた。そこで、これをモデル2装置に搭載し、5 kHz-500 W以上のレーザー発振を実証する目標に向けて実験を進めた。図5-58に、この実験回路を示す。

図5-59に、放電回路構成を示す。長さの異なる3対の主電極が直列に配置されており、放電長はサイラトロン励起部分が680 mm、520 mmで、MAG Tユニット励起部が100 mmである。電極はいずれもErnst形状で、幅30 mm (放電幅10 mm)、ギャップ長23 mmである。主コンデンサ/ピーキングコンデンサの容量は、主電極の長さに対応して、36/33、29/25、5/5 nFであり、単位長さ当り

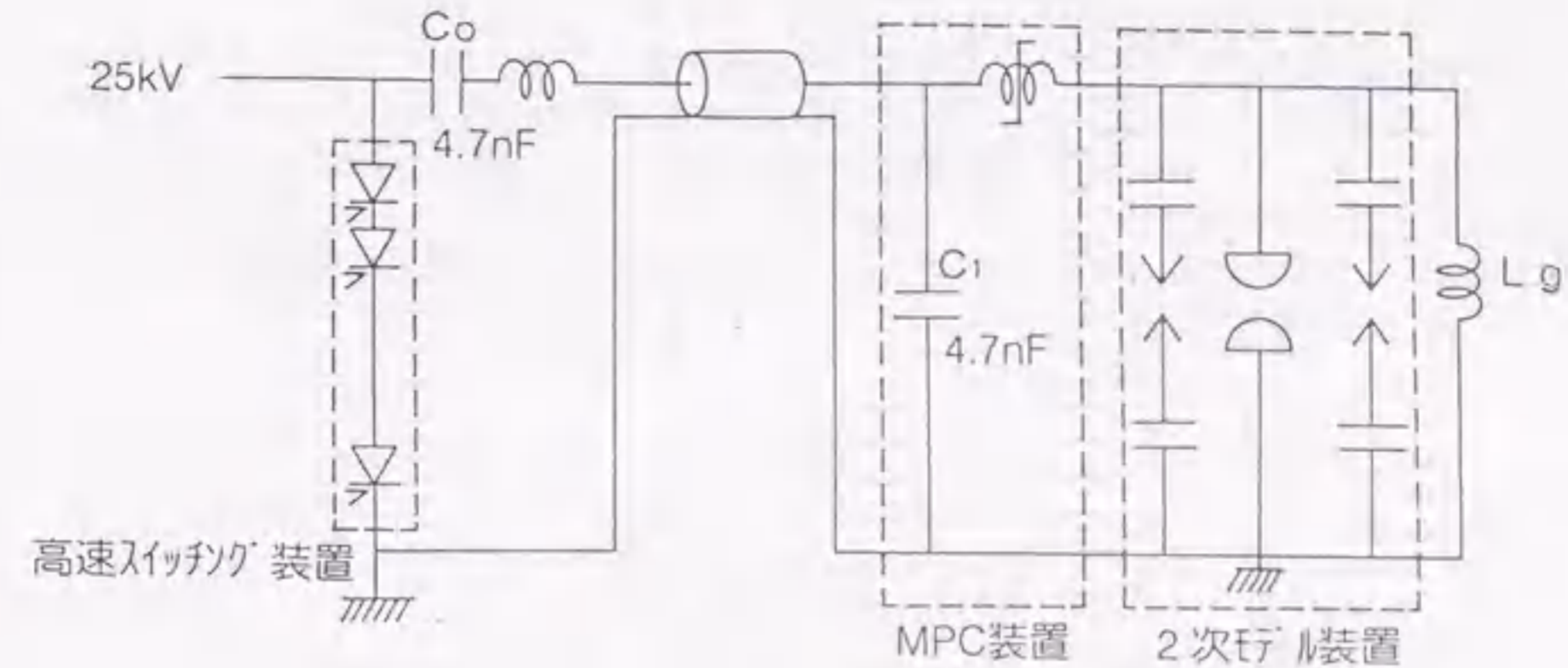


図5-58 高速半導体スイッチパルス電源実験回路

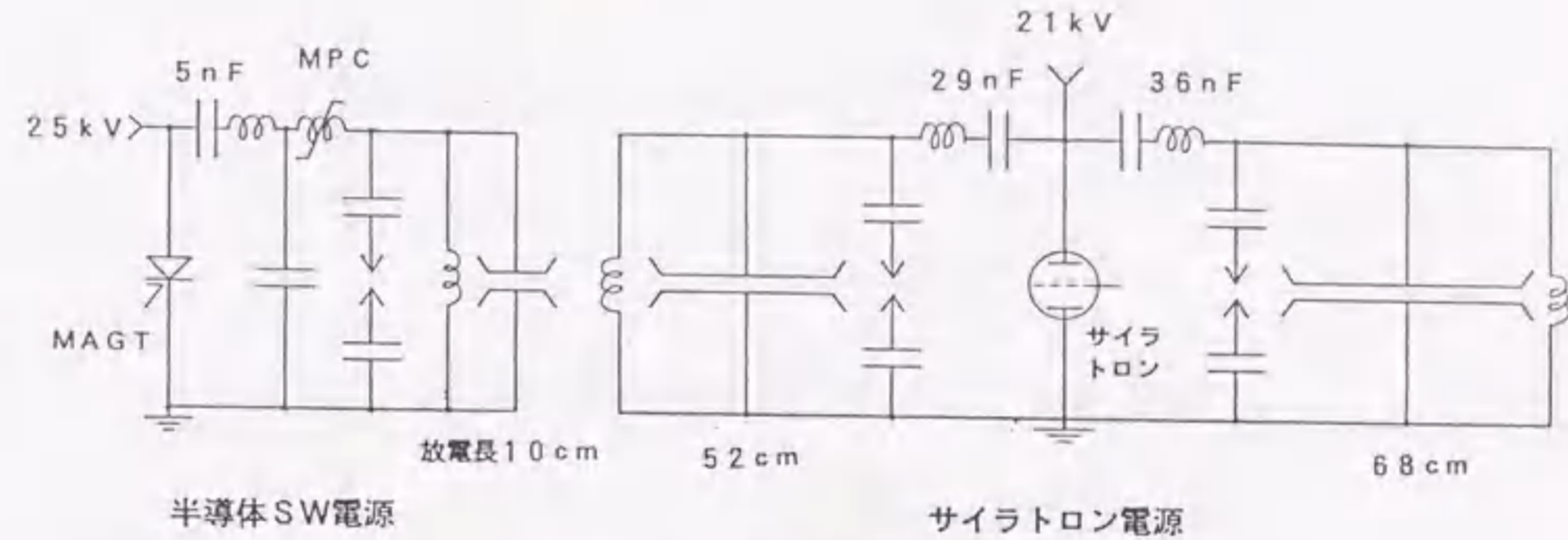


図5-59 並列電源駆動の回路構成

の放電入力と同じになるようにしてある。サイラトロン側電極は、低繰り返し動作ではサイラトロン1本、高繰り返し動作では複数本を同時駆動した。

MAG Tユニット励起用の電極部は、陰極(上側)がMPC回路に接続され、陽極(下側)は他の陽極から独立に接地できるようになっている。また、この小電極対は、隣の電極との短絡による異常放電を防止するため、絶縁物で囲まれている。

レーザー発振には、ガス混合比HC1/Xe/He=0.09/0.53/176 kPa、充電電圧を21 kVとし、前章で示したサイラトロンみの駆動で、5 kHz、500 W以上を得たときと同一条件とした。

ここで、まず安定した回路動作、安定放電を得るためには、充電リアクトル L_g の値がMPCの非飽和時インダクタンス $L_{sat} > L_g$ 次の条件を満たす必要がある。一般に可飽和リアクトルは、コンデンサ C_1 がピーク電圧 V_p に時間 τ で充電される場合、 $(V_p \times \tau) / 2$ で与えられる磁束量に達した時点で飽和するように設計する。 L_g 値が大きすぎると、 C_1 の電圧を可飽和リアクトルと L_g で分圧してしまい、時刻 τ の時点で可飽和リアクトルの磁束量が飽和磁束量に達せず、飽和点が遅れる。飽和が遅れると、共振動作により C_1 のエネルギーが C_1 に逆流し、エネルギー移行効率が低下するばかりでなく、MAG Tスイッチユニットの損失も増大する。

一方、MPC飽和時のインダクタンスを L_{sat} とすると、主放電ギャップ間に $V_p \times L_g / (L_{sat} + L_g)$ の電圧が印加されるので、 $L_{sat} \ll L_g$ にしないと主放電が点弧するのに必要な電圧が印加されず、主放電が点弧しない。また、点弧しても、ピーキングコンデンサからのエネルギーが小さな L_g を通して漏れてしまうため、十分なエネルギーが主放電に注入されず正常な放電が得られない。 L_g の最適化を図るため、この値を変えたときにエンドライト発光量の変化を調べた。

図5-60は、エンドライト発光量と L_g の関係を示した図である。 $L_g=76\mu\text{H}$ で、発光量が最も高い値になり、これを最適値とした。

また、この条件で10分間の連続放電を行い、前節と同じ測定系で、MAGTおよびMPC可飽和リアクトルの温度上昇、放電のエンドライト発光波形をそれぞれ測定した。図5-61は、各繰り返して10分間動作したときのMAGTおよび可飽和リアクトルの温度上昇特性である。動作開始10分後の温度上昇は、MAGTで 20°C 、可飽和リアクトルで 35°C であった。図中、MAGTの温度上昇をみると、繰り返しが高くなるに従い上昇率が高くなっていることが分かる。これは、温度上昇によりMAGTで発生する損失が増加するためと考えられる。

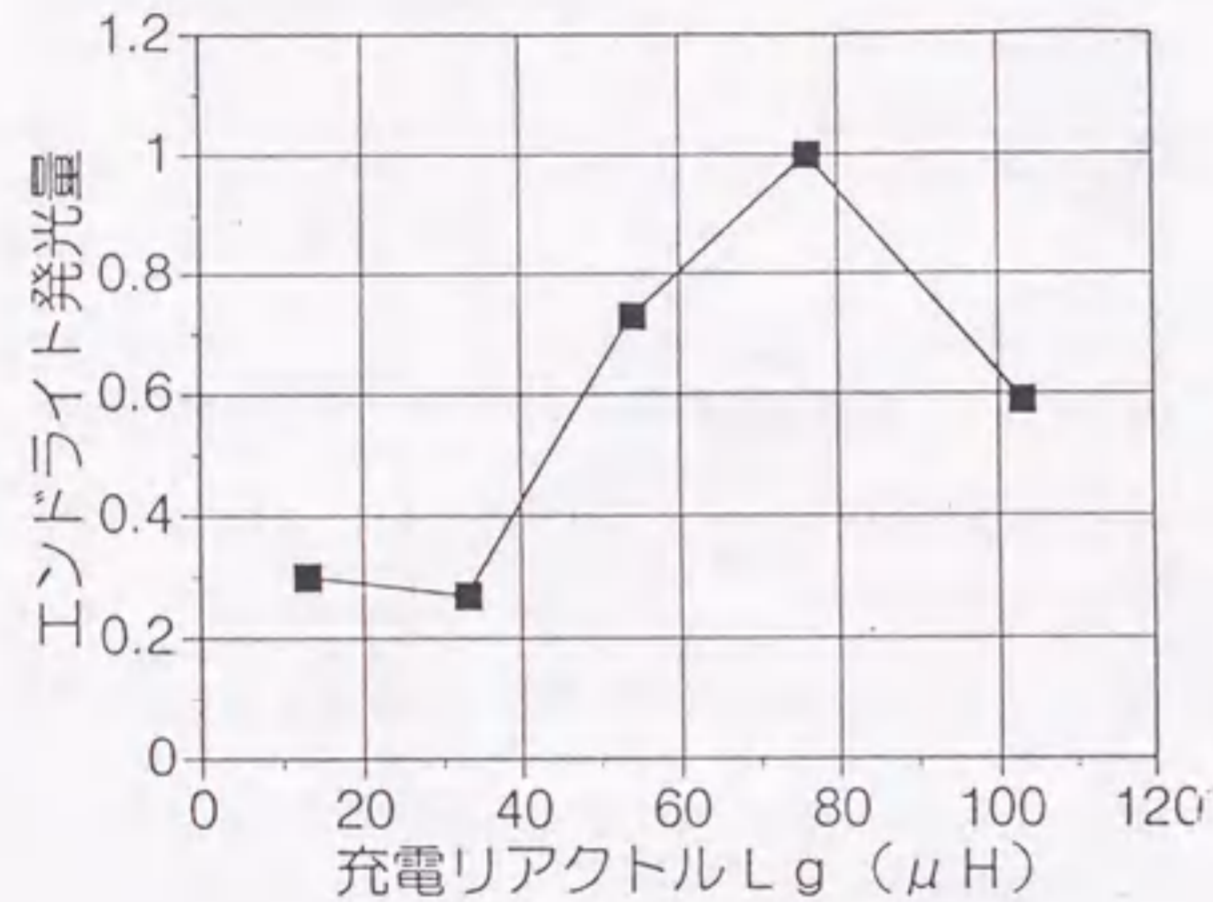


図5-60 エンドライト発光量と L_g の関係 (最大値を1)

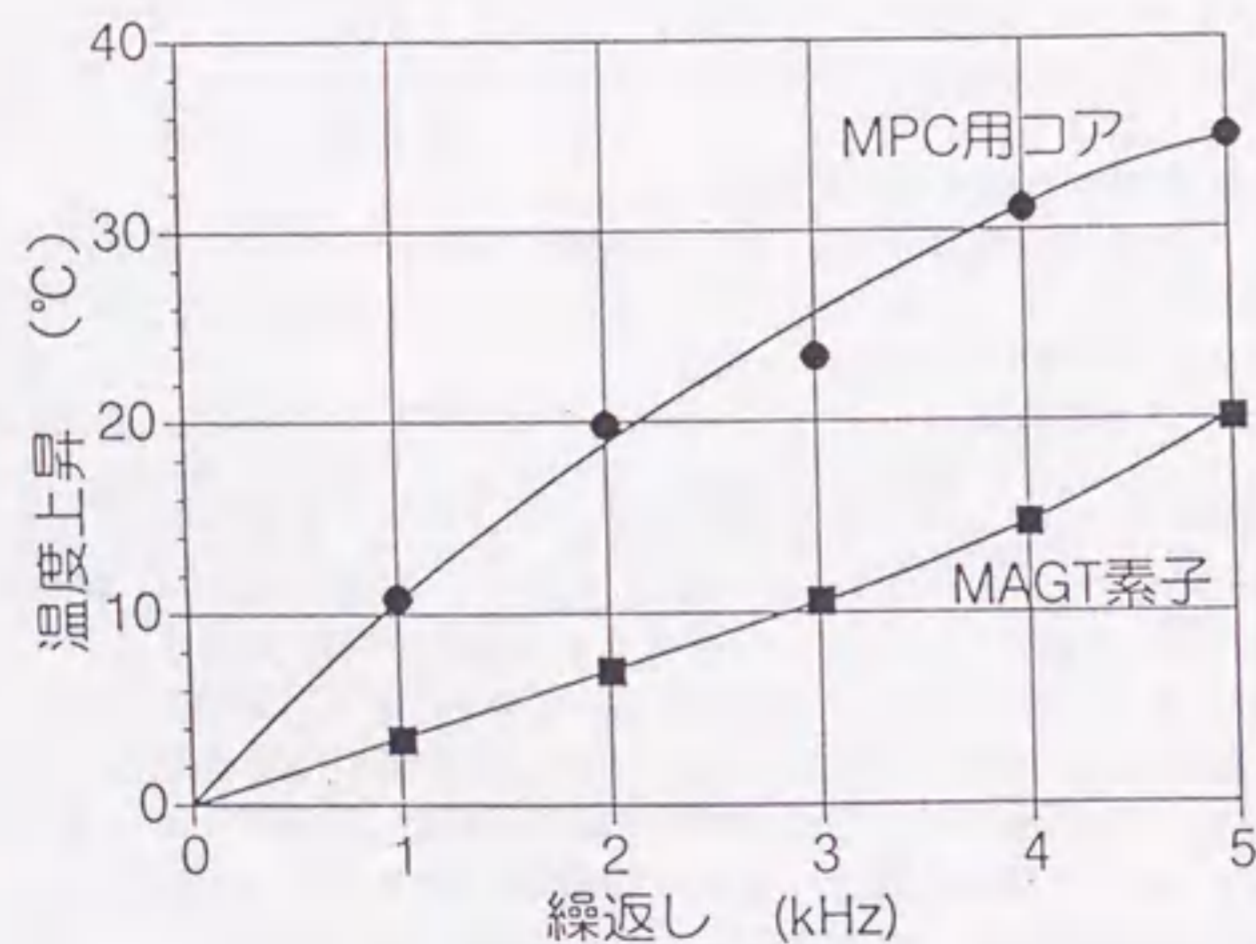
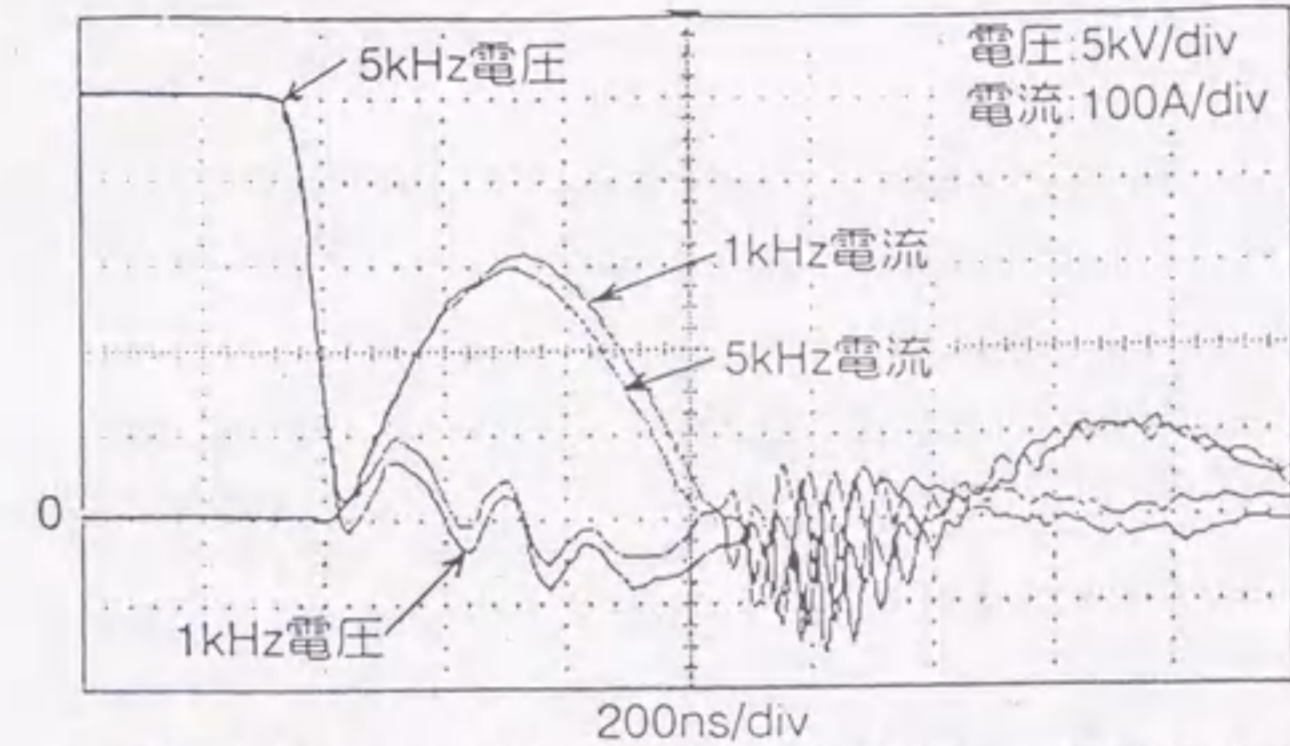
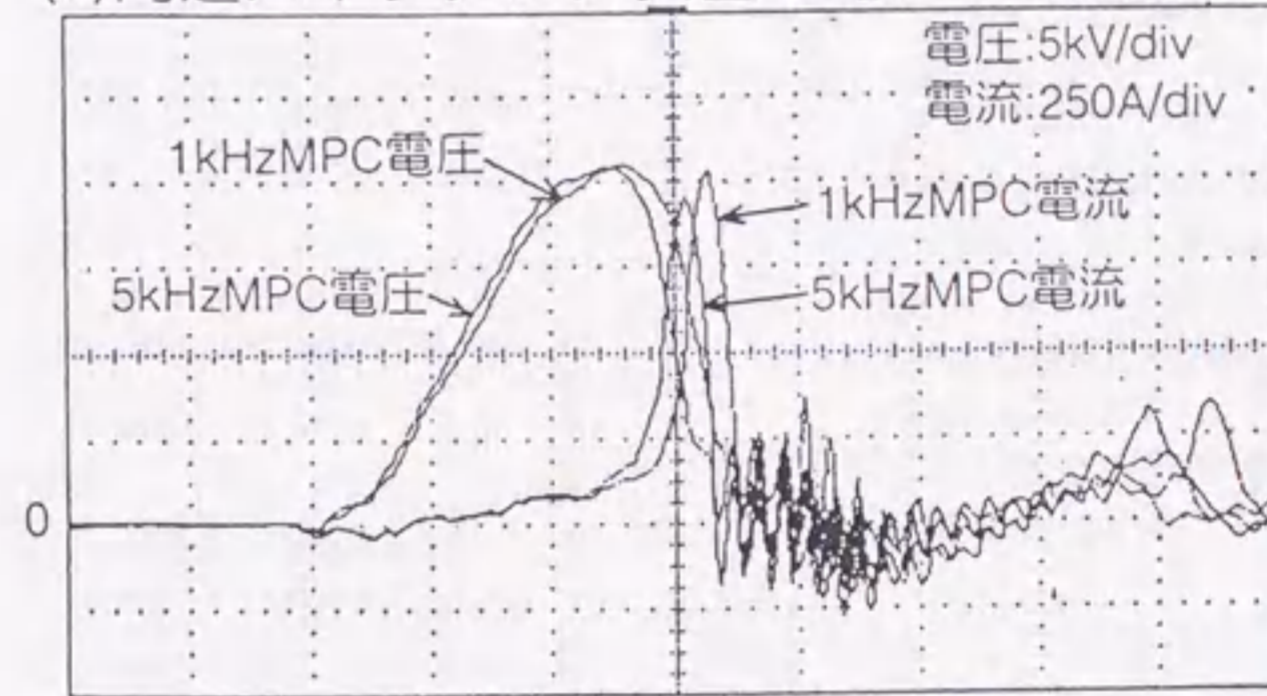


図5-61 高速半導体スイッチパルス電源各部温度上昇

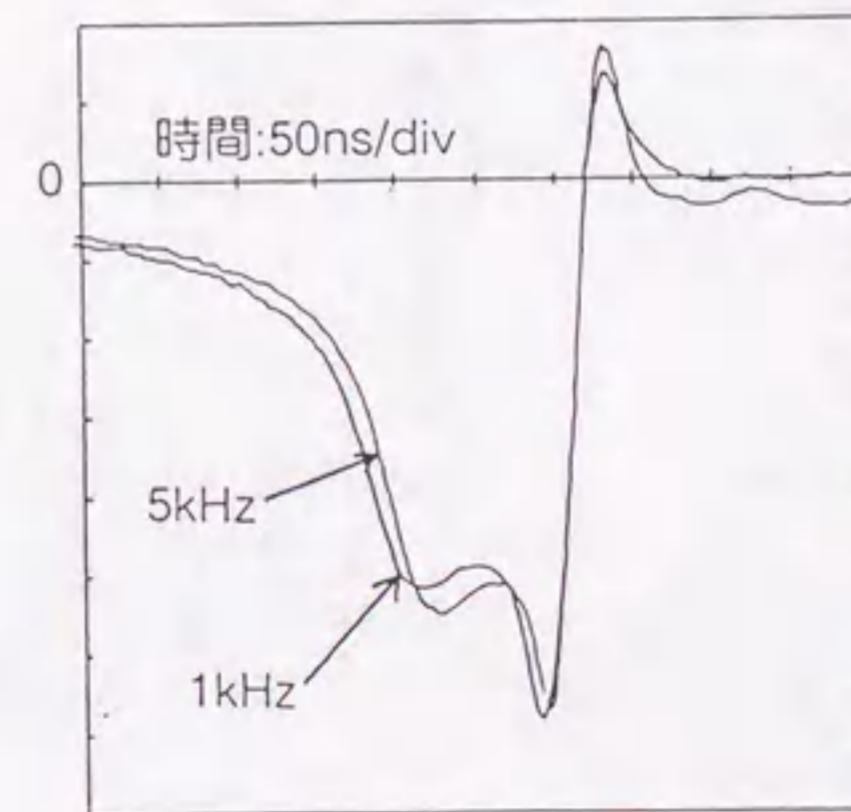
図5-62は、1kHzと5kHzで10分間動作したときの、(a) MAGTユニットの電圧、電流波形、(b) MPCの電圧、電流波形、(c) 放電部電圧波形を比較して示した図である。これより、1kHzに比べ5kHz動作では、スイッチユニットのピーク電流が低く、順電圧、電流の共振周波数が高いこと、可飽和リアクトルの飽和タイミングが早いこと、放電部電圧の立ち上がりが速いこと、などが分かった。原因は、スイッチの温度上昇によりスイッチ損失が増大したこと、コンデンサの温度上昇により静電容量が変化したこと、可飽和リアクトルの温度上昇により飽和磁束密度 ΔB が低下したこと、などが考えられる。



(a)高速スイッチング装置の電圧、電流波形



(b)MPC装置電圧、電流波形



(c)放電部電圧波形

図5-62 1kHzと5kHzの各部電圧、電流波形比較

図5-63は、1 kHzと5 kHzにおける放電のエンドライト発光波形を比較した図であり、発光波形はほぼ同じで、5 kHzでも安定した放電が得られていることを確認できた。電源の信頼性については、抵抗負荷での実験から開始10分後の定常時温度上昇に対し、MAG Tスイッチ、可飽和リアクトルについてそれぞれ、71%、83%であることが分かっている。この結果から定常時の温度上昇を推定すると、MAG Tスイッチで約28℃、可飽和リアクトルで約42℃になるが、いずれも許容値内に収まっており、温度上昇の観点からは5 kHzの長時間動作が十分可能であると言える。

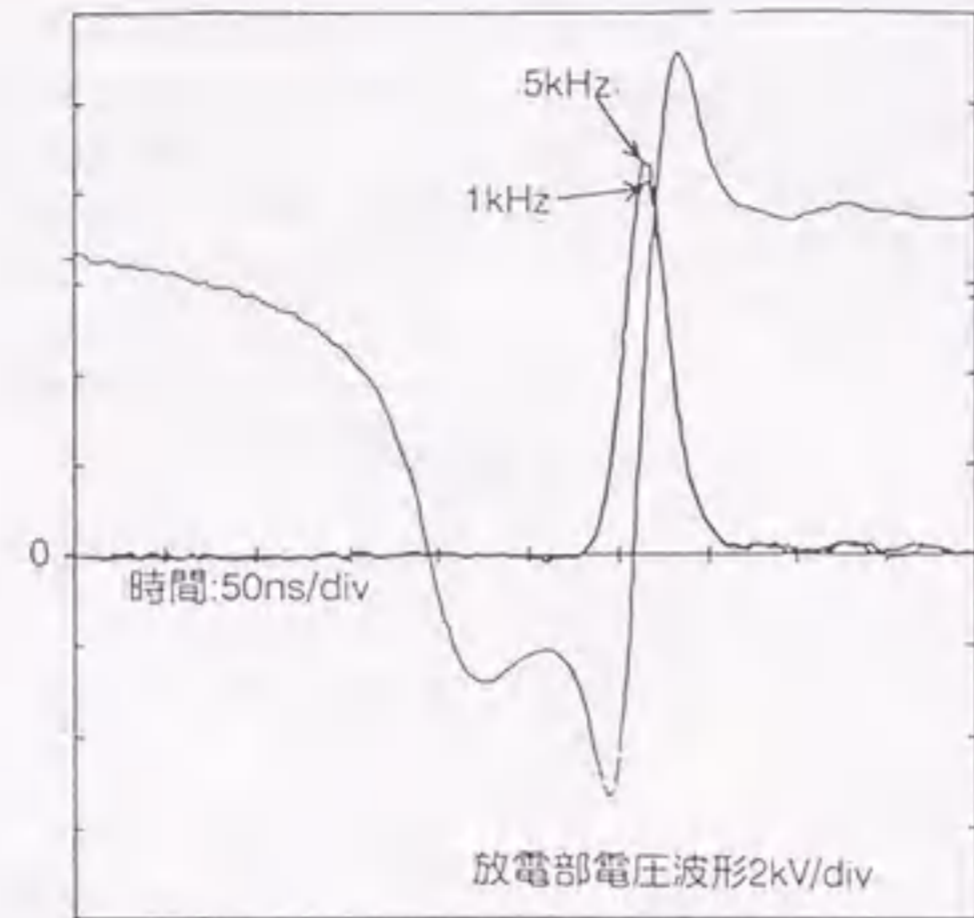


図5-63 エンドライト発光波形比較

図5-64に、1 Hz動作による充電電圧とレーザ出力の関係を示す。○印はMAG Tスイッチ電源とサイラトロンハイブリッド駆動、●印はサイラトロンみの駆動によるレーザ出力特性を示している。充電電圧を増加するにしたがってレーザ出力も高くなり、21 kVにおいてハイブリッド駆動で115 mJの出力が得られた。サイラトロン駆動のみでは98 mJであることから、MAG T電源のレーザ出力寄与率は約15%となる。放電長から単純に計算すると寄与率は約13%となり、これよりやや上回る結果となった。

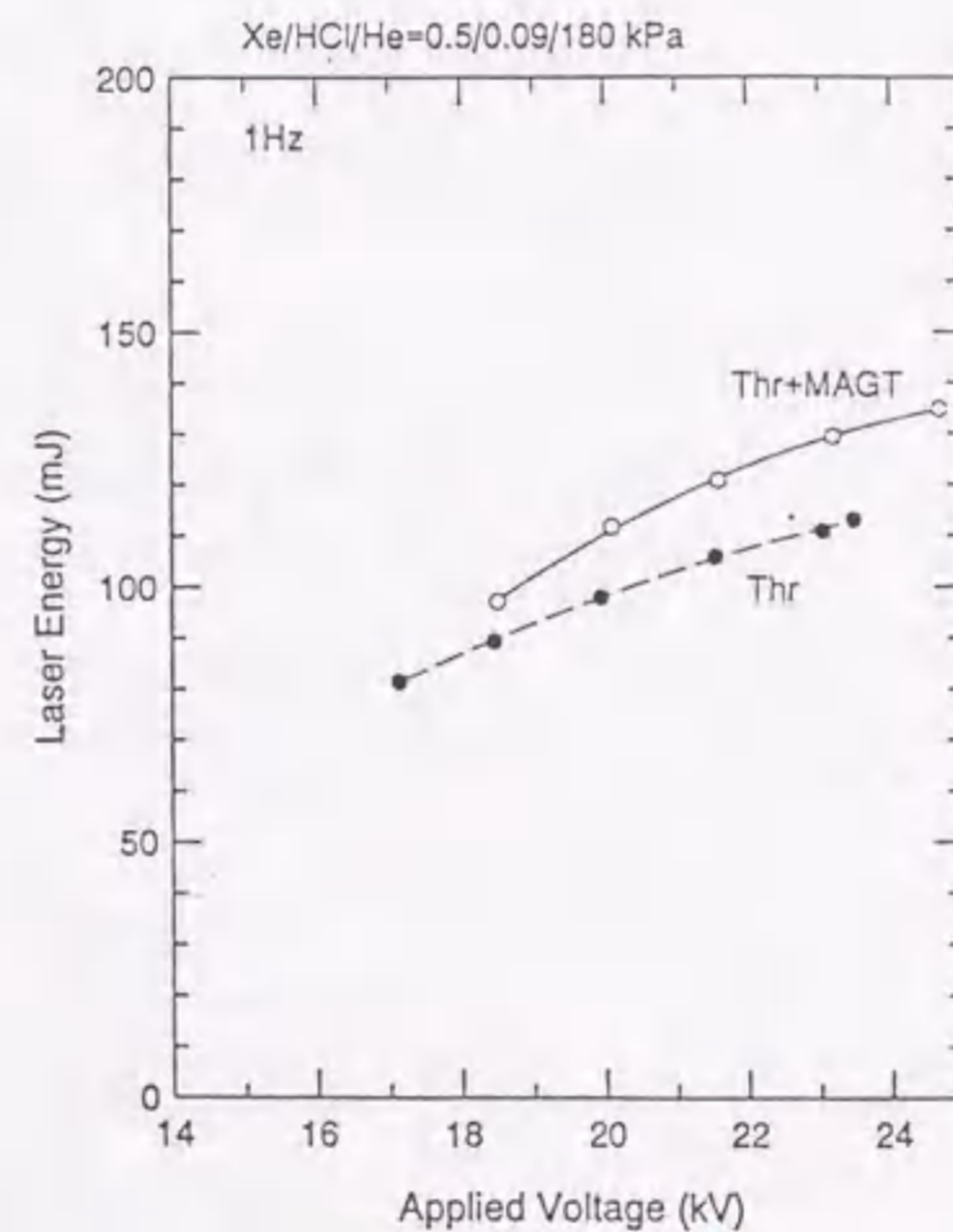


図5-64 並列電源駆動による低繰り返し動作

図5-65に、3 kHzにおけるレーザ出力に対するMAG Tスイッチ部とサイラトロンスイッチ部との遅延時間特性を示す。縦軸は、サイラトロンスイッチのみのレーザ出力109.6 mJを1とした相対値であり、MAG T電源のレーザ出力寄与率を示すことになる。横軸は遅延時間: T_d (ns)、-はサイラトロンスイッチ部が先行、+はMAG Tスイッチが先行して放電点弧することを示す。この図から、遅延時間を±5 ns以内とすることにより、レーザ出力が増大することが分かる。このとき、MAG Tモジュール部の寄与率は最大約8%となった。遅延時間が大きくなるに従い寄与率は低下し、±50 ns以上ではMAG Tモジュールの効果が無くなる。ハイブリッド動作においては、遅延時間 T_d を±5 ns以内にすることが重要である。

図5-65 遅延時間依存性

図5-66に、繰り返し数と平均出力特性を示す。図中の●印はサイラトロンみの動作、○印はハイブリッド電源駆動特性である。サイラトロン駆動電源のみでは5 kHz、500 Wが得られた。図5-67は、そのときの破壊電圧波形である。前述したように、両電源による放電部の遅延時間は5 ns以内になっている。

また、5 kHzのMAG T電源寄与率は約8%となり、1 Hz動作時での15%に比べ約1/2に低下した。原因は、MAG Tモジュール励起の放電部が放電領域の端部に置かれ、プロアの中心に対応する位置から外れており、ガス流速がいくぶん低くなって下流アーク状放電の発生も見られ、寄与率が低下したと思われる。しかし、5 kHzにおいても電極長の増大分だけレーザ出力も増加しており、レーザガスがMAG T電源によりサイラトロンと同じように有効に励起されていることは明白である。このような特性の素子を組み込み、駆動回路とMPCを組み合わせてパルス電源にした前例はなく、さらに、これをサイラトロンパルス電源と並列にして実際にレーザ駆動を行い、MAG Tモジュールがサイラトロンと同等の機能を持ち、しかも動作の安定性では優れた性能を持つことが実証できたのは、エキシマレーザ実用化を加速するのに大きなポイントとなる。^{20) - 25)}

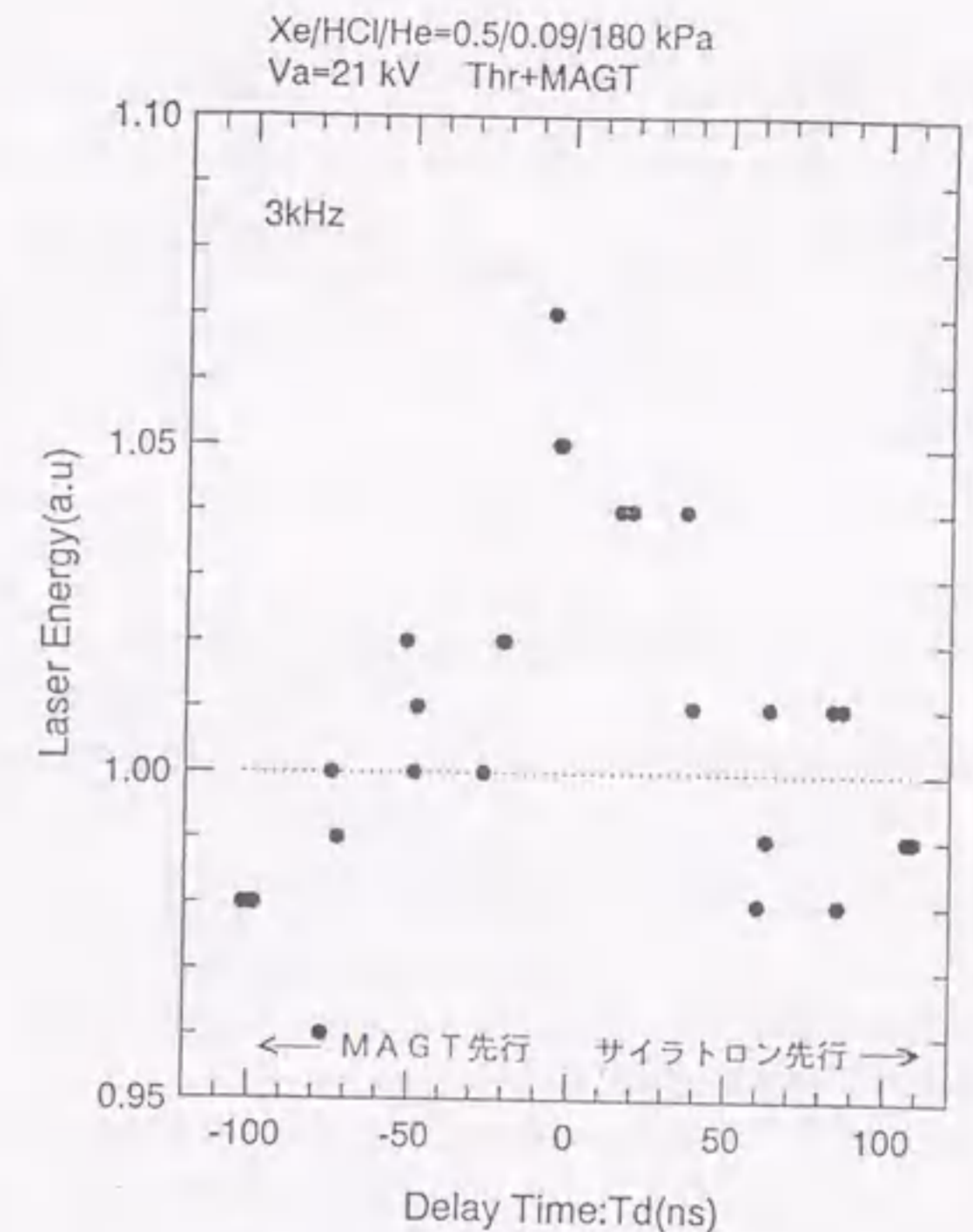


図5-65 遅延時間依存性

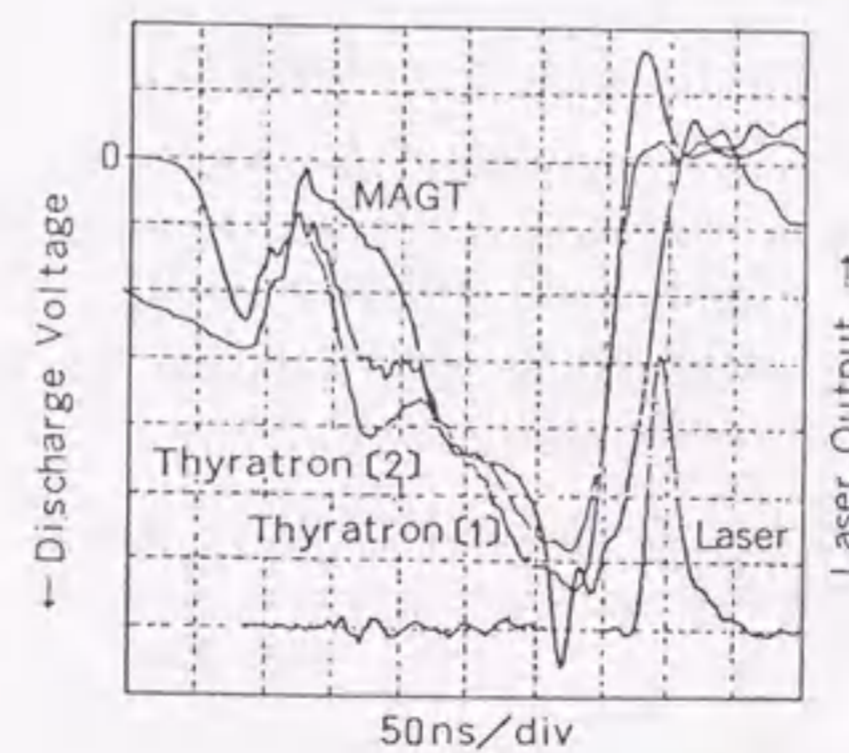


図5-67 破壊電圧波形

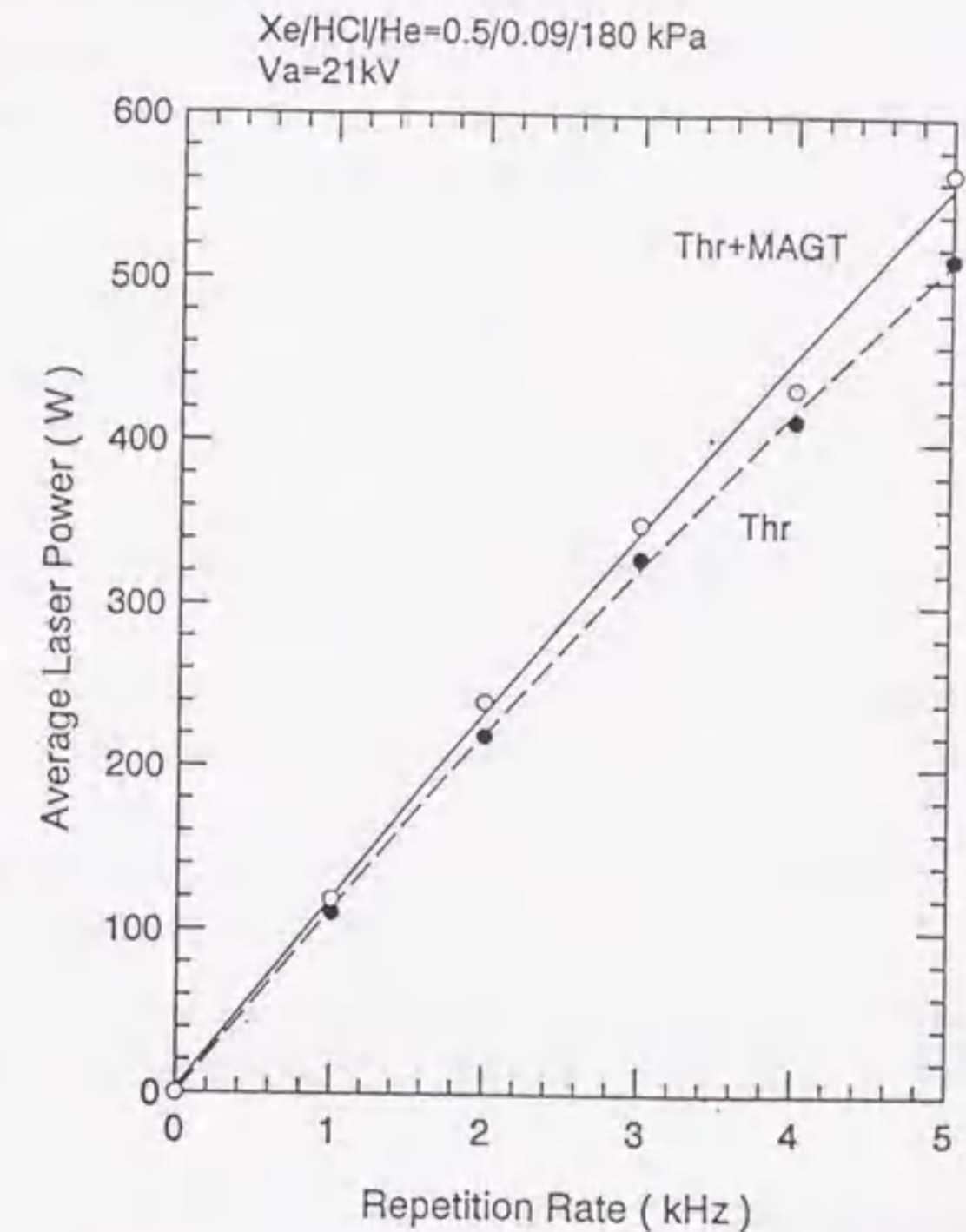


図5-66 並列電源駆動による高繰り返し動作

5.6. 本章のまとめ

高繰り返し大出力エキシマレーザ装置の実用化には、寿命の問題がないサイラトロン置換用の高速半導体スイッチ素子による電源の開発が不可欠である。半導体スイッチ素子については、基本構造として、高速性に優れたMOS-FET構造を大電力性に優れたサイリスタに取り込んだ、前例のない高速ターンオン半導体スイッチ素子MAGTを設計した。この開発では、素子単体での電流立ち上がり率 di/dt の高速化、nパツファ層構造の採用などによる高耐圧低損失化、超LSIで確立されている微細化技術の導入による大電流化を順次進めた。この結果、ピーク電流 32 kA/cm^2 、電流立ち上がり率 $142 \text{ kA}/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 、耐圧 2500 V 級の大電流・高速立ち上がり・高耐圧化を同時実現した。また、素子単体では、 10^9 ショット (55 時間) の寿命試験後も特性劣化は認められず、長寿命スイッチ素子の実用化見通しを明らかにした。

電源設計では、まずこれを 32 個直列接続し駆動回路を付けたスイッチングモジュールとし、諸特性を調べて最適条件化を図った。この抵抗負荷を使った試験において、各素子の分担電圧均等化、ゲート電圧立ち上がりの高速化などを行い、素子全てを高速で同時にターンオンさせる専用駆動回路技術を確立した。また、目標値の、 5 kHz 、 25 kV - 300 A の通電試験では、 2.7×10^7 ショット (1.5 時間) において、素子の温度上昇は 21°C で平衡状態になり、モジュールとしての要求性能を実証できた。このモジュールは、素子の保護を主目的にした自社開発による低損失の 1 段 MPC 回路と組み合わせ半導体パルス電源とし、基本動作特性の異なるサイラトロン駆動電源と並列動作できるように諸特性の整合を図った。

レーザ動作では、この電源と 7 並列サイラトロンで構成される電源によりモデル 2 装置を同時駆動した。この結果、サイラトロン電源で最適化したガス条件で、 5 kHz 、 560 W が得られ、MAGT 電源による入力分はレーザ出力に 8% 寄与しており、これによりサイラトロンの置換が可能であることを実証した。

このような電源構成で実際にレーザ駆動を行った前例はなく、同動作条件で MAGT モジュールがサイラトロンと同等の機能を持ち、しかも動作の安定性では優れた性能を持つことが実証できたのは、エキシマレーザ実用化を加速する上で大きな成果と言える。

参考文献

- 1) Tatsumi Goto, Koji Kakizaki, Shigeyuki Takagi, Saburoh Satoh, Takashi Shinohe, Hiromichi Ohashi, Fumihiko Endo, Katsuya Okamura, Akira Ishii, Tsuneharu Teranishi, and Koichi Yasuoka, "Design concept and performance considerations for fast high power semiconductor switching for high repetition rate and high power excimer laser," *Rev. Sci. Instrum.*, 68, 2658-2665(1997).
- 2) J. A. Kunc, M. A. Gundersen, "Plasma parameters characteristics of hydrogen thyratrons under steady state conditions," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, PS-10, 315-319(1982).
- 3) K. Rust and G. McDuff, "Life extension of thyratrons in short pulse circuits with use of saturable magnetic sharpeners," *IEEE Transactions Electron Devices*, 38, 731-739(1991).
- 4) I. Smilanski, S. R. Byron, and T. R. Burkes, "Electrical excitation of an XeCl laser using magnetic pulse compression," *Appl. Phys. Lett.*, 40, 547-548 (1982).
- 5) T. Shimada, M. Obara, and A. Noguchi, "An all solid state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, 56, 2018-2020 (1985).
- 6) T. Shinohe, A. Nakagawa, Y. Minami, M. Atsuta, Y. Kamei, and H. Ohashi, "Ultra high di/dt 2500 V MOS assisted gate triggered thyristors(MAGTs) for high repetition excimer laser system," *IEEE IEDM Tech. Digest*, 301-304(1989).
- 7) P. H. Swart and H. M. von Bergmann, "A Thyristor driven pulser for multi-kolowatt lasers," *Proc. SPIE*, 1397, 559-562(1990).
- 8) T. Shinohe, A. Nakagawa, Y. Minami, M. Atsuta, Y. Kamei, and H. Ohashi, "Ultra high di/dt pulse switching of 2500 V MOS assisted gate triggered thyristors (MAGTs)," *Proc. 2nd Int. Symp. Power Semiconductor Devices and Ics*, 277-282(1990).
- 9) A. Nakagawa, H. Yoshidfa, and Y. Kamei, "Turn on mechanism of 2500 V MOS assisted gate triggered thyristors (MAGT)," *IEEE IEDM Tech. Digest*, 811-814(1990).
- 10) T. Shinohe, A. Nakagawa, M. Atsuta, Y. Minami, and H. Ohashi, "Design criteria for high frequency Ultra high di/dt MAGTs," *IEEE IEDM Tech. Digest*, 153-156(1991).
- 11) T. Shinohe, Y. Minami, S. Sato, and H. Ohashi, "Device parameter analysis for direct replacement of thyratrons with MAGTs," *Proc. 5th Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs*, 77-81(1993).
- 12) 南 良博, 竹中 浩, 小倉常雄, "高速ターンオン素子の周波数特性," 電気学会, 電子デバイス研究会資料, EDD-94-38, 69-78(1994).
- 13) F. Endo, K. Okamura, C. Yamazaki, E. Kaneko, and I. Ohshima, "Development of semiconductor switch for pulsed power utilizing MAGTs," *Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Digest*, P II 58-61(1993).
- 14) 遠藤文彦, 渥美 薫, 岡村勝也, 渡辺幸夫, 金子英治, 大島 巖, "パルスパワー用半導体素子 MAGT のパルス通電特性," 電学論D, 113-D, 445-452(1993).
- 15) F. Endo, K. Atsumi, K. Okamura, U. Watanabe, E. Kaneko, and I. Ohshima, "Pulse switching characteristics of MAGTs for pulsed power applications," *Elect. Eng. Jpn.*, 114, 108-118(1994).
- 16) T. Teranishi, F. Endo, K. Okamura, E. Kaneko, and I. Ohshima, "High repetition rate operation of a magnetic pulse compression circuit for excimer laser," *Proceeding of the 9th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest*, (1993).

- 17) H. J. Baker, P. A. Ellsmore, and E. C. Sille, "An efficient laser pulser using ferrite magnetic switches," J. Phys. E: Sci. Instrum., 21, 218-224(1988).
- 18) H. Tanaka and M. Obara, "An all solid state magnetic pulse compressor with amorphous metals for pumping a repetition rated KrF excimer laser," Rev. Sci. Instrum., 61, 1196-1199(1990).
- 19) H. Hatanaka and M. Obara, "High efficiency operation of the high repetition rate all solid state magnetic pulse compressor for KrF excimer lasers," Meas. Sci. Technol., 2, 42-48(1991).
- 20) 畑中秀和、河原暢郎、緑川克美、小原 実、田代英夫、"高出力TEA CO₂レーザー励起用固体素子電源の開発" レーザー研究, 20, 322-336 (1992).
- 21) 佐藤三郎、岡本 昇、遠藤文彦、石井 彰、石川 憲、後藤達美、"5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの開発 (X X) -高速半導体スイッチを用いた発振特性-" レーザー学会学術講演会第 14 回年次大会予稿集, 20a II 9, 38(1994).
- 22) 佐藤三郎、岡本 昇、遠藤文彦、石井 彰、石川 憲、後藤達美、"5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの開発 (X X II) ," 第 41 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30p-H-7, 966(1994).
- 23) 岡本 昇、高木茂行、遠藤文彦、石井 彰、石川 憲、後藤達美、"5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの開発 (X X III) ," 第 55 回応用物理学学会学術講演会予稿集, 21a-C-8, 884(1994).
- 24) 高木茂行、岡本 昇、柿崎弘司、石川 憲、後藤達美、遠藤文彦、"5 kHz 高繰返しエキシマレーザーの開発 (24) ," 第 42 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28p-ZP-3, 959(1995).
- 25) 高木茂行、柿崎弘司、岡本 昇、遠藤文彦、"半導体スイッチ電源によるXeClレーザーの3 kHz 動作," レーザー学会学術講演会第 16 回年次大会, 予稿集, 25p VI 1, 93(1996).

第 6 章 高繰返しエキシマレーザー実用化の考察

産業応用への実用化を目指して、エキシマレーザーの高繰返し化を行い、短時間ではあるが 5 kHz までの動作を実現させるとともに、多くの要素技術を開発した。ここでは、これらの結果について全体的な考察をして、将来の実用化に対する技術展望をする。

6.1. 開発技術の位置付け

6.1.1. 本技術分野の開発進展状況

本通産大プロ研究開発の間、国外では欧州における高繰返し化技術の進展が注目される。とくに、第 2 章で述べた欧州各国の研究協力のもとに進められた EUREKA 計画では、kHz 台での高出力動作に関する成果がいくつかの研究機関から報告されている。この中で、高繰返し化技術に関しては、IMFM (Institut de M'ecanique des Fluides de Marseille, (仏)) における Sentis らの研究は、もっとも注目される代表例である。図 6-1 は、放電部ガス流速が 50 m/s 程の実験用ガス循環チャンバと出力特性であり、主に放電部のガスタービュランスを 0.01 %レベルまで低減させるなどの改善を行い、'90 年代になって、X線予備電離方式のXeClレーザーで繰返し数 1 kHz, 平均出力 200 W を、また 200 ショットバーストモード動作で 1.7 kHz までの実験結果を示した。入力エネルギーは 60 J/(L・bar)と高いが、500 Hz 以上では放電集中が原因と思われる出力パルスエネルギーの変動が見られ、出力はこの間に初期値の 2/3 程度にまで低下しており、安定性に欠ける結果に終わっている。したがって、まだ出力安定性で kHz 台での実用にはほど遠いと言える。¹⁾

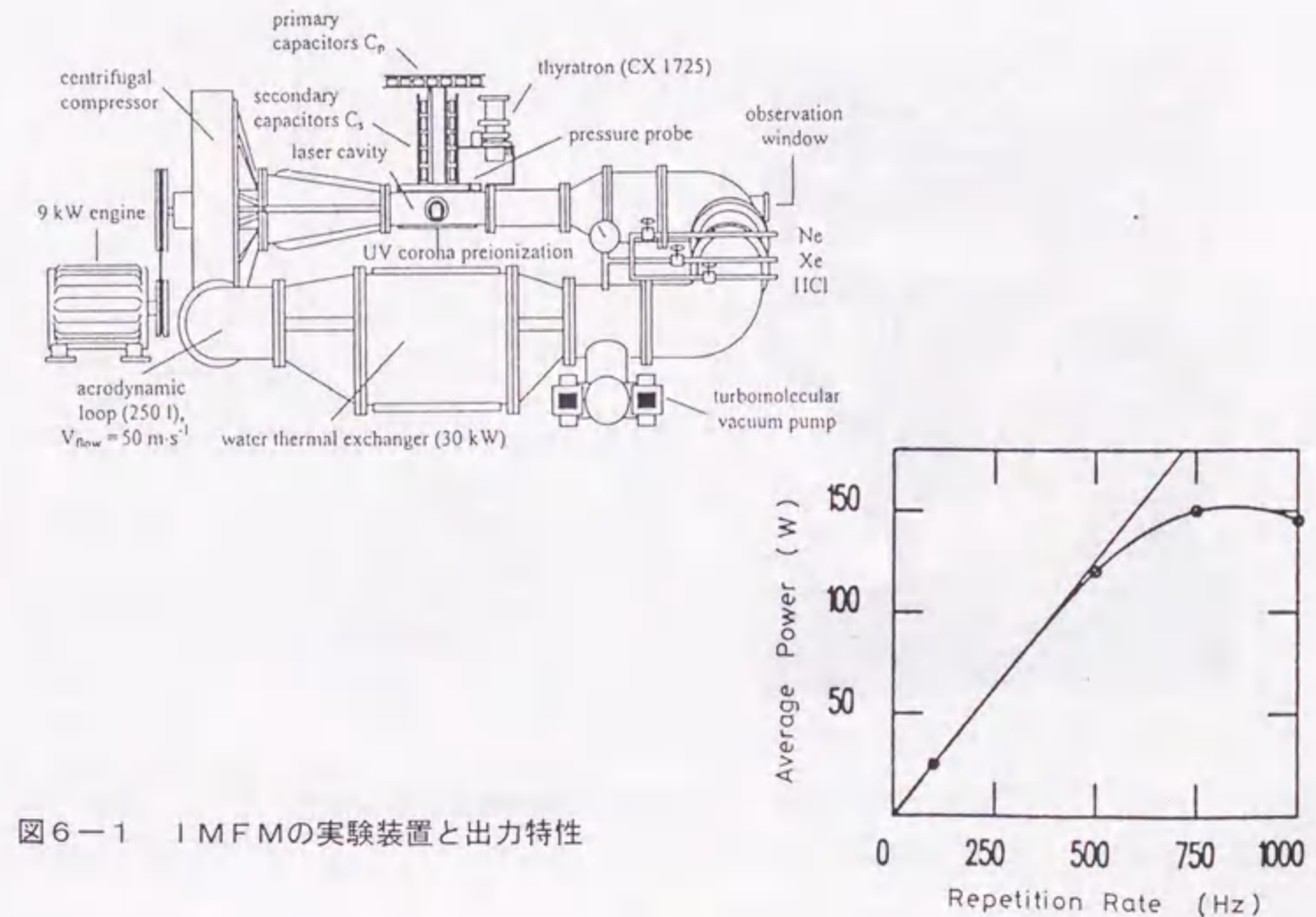


図 6-1 IMFMの実験装置と出力特性

同様に、Lambda Physik GmbH (独) からは、図6-2の装置と出力特性を示して、XeClエキシマにて500 Hz、750 Wまでの報告をしているが、その詳細や進展は明らかにされていない。^{9) - 14)}

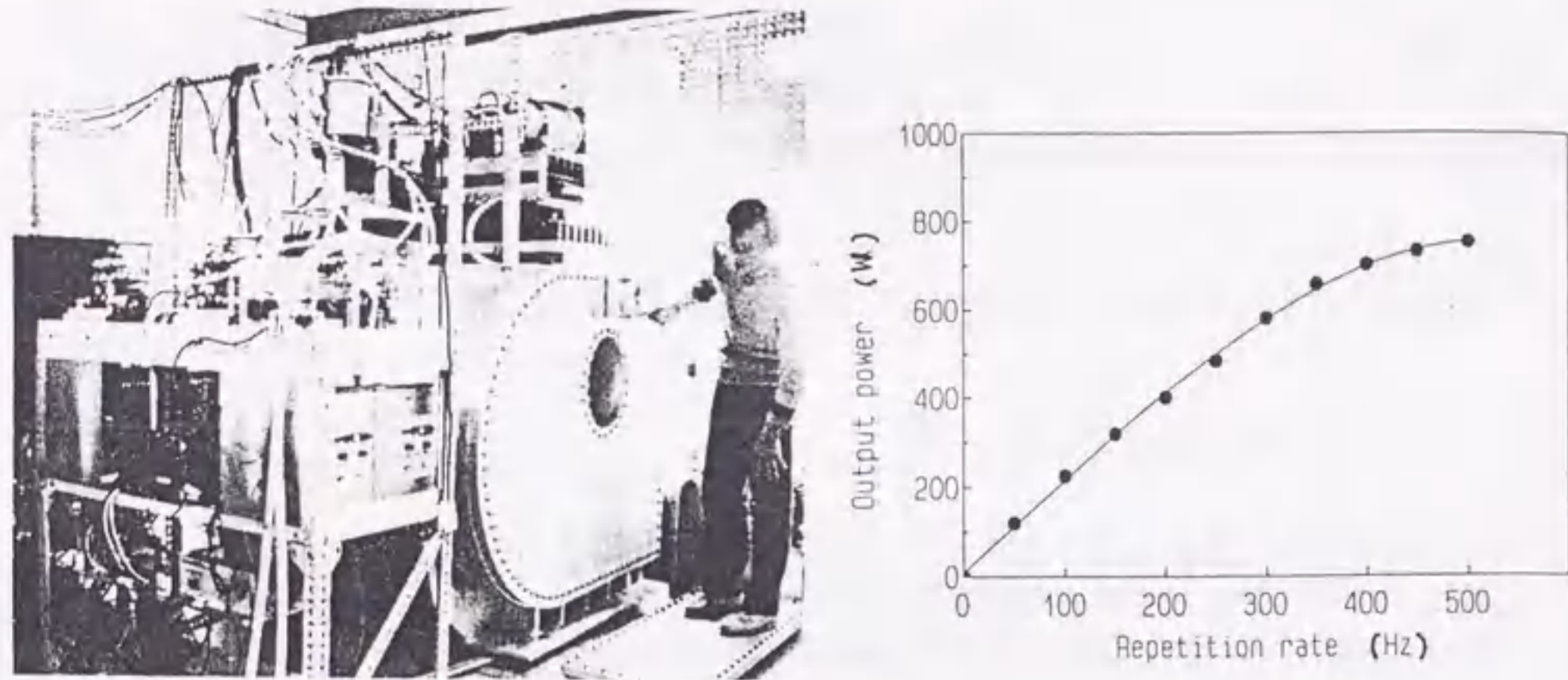


図6-2 Lambda Physik の実験装置と出力特性

Rand Afrikaans Univ. (南ア) は、図6-3の装置により、KrFエキシマにて1.6 kHz、500 Wを得た出力特性を示している。また、Culham Lab. とAEA Technol. (英) は、図6-4の装置で1.1 kHz、430 Wを実証した出力特性を示すような報告などがある。

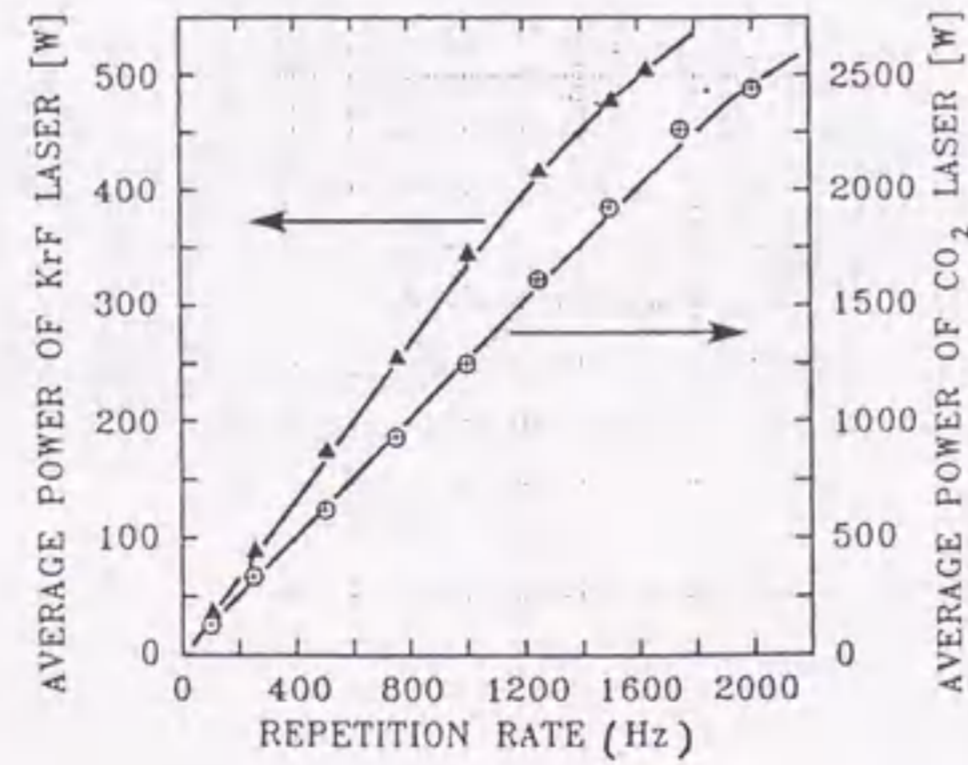
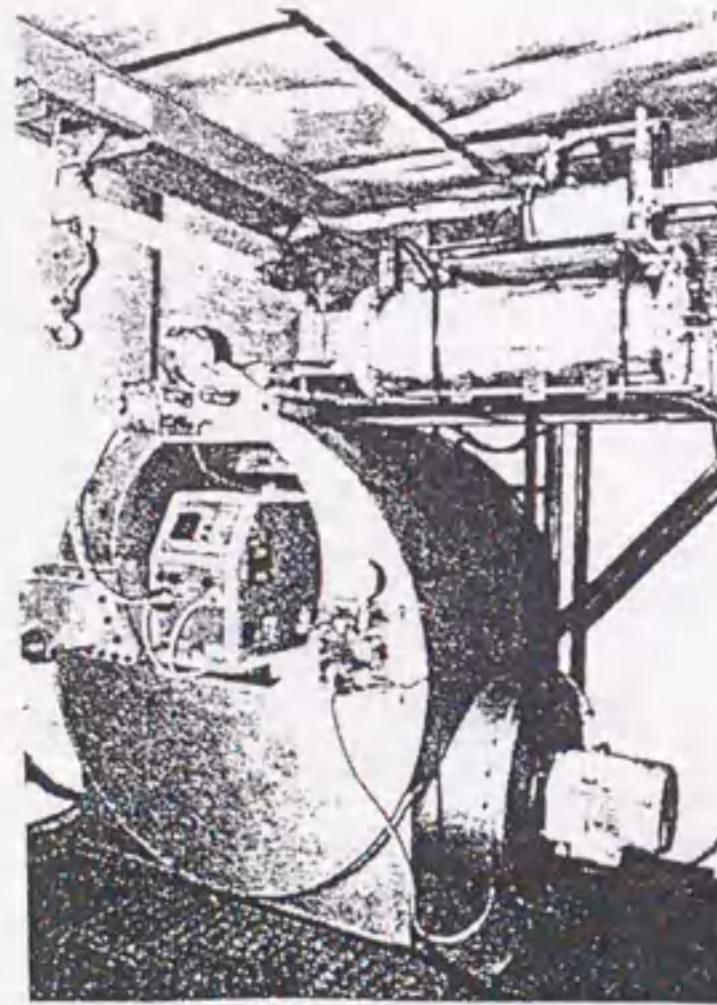


図6-3 Rand African Univ. の実験装置と出力特性

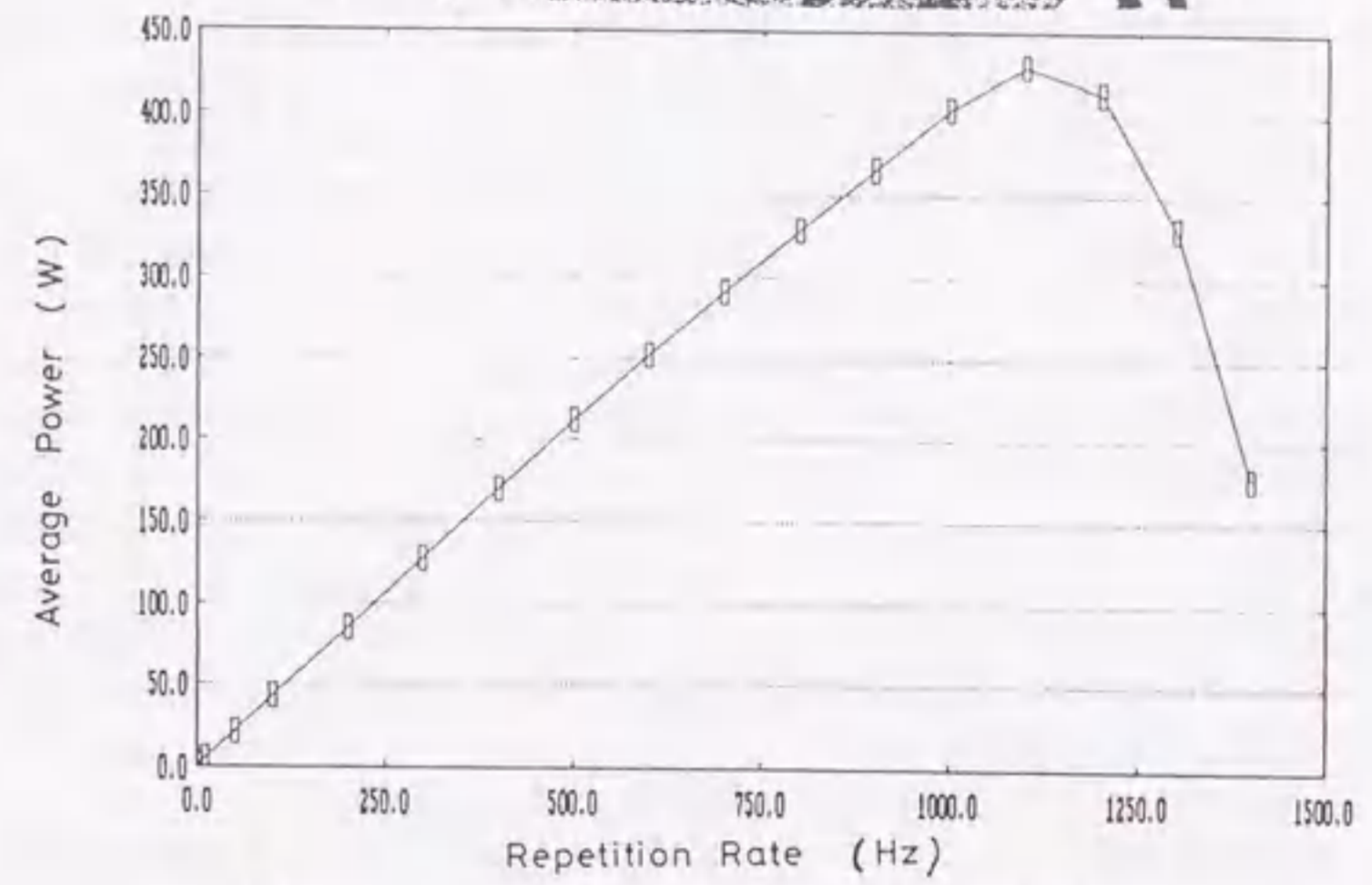
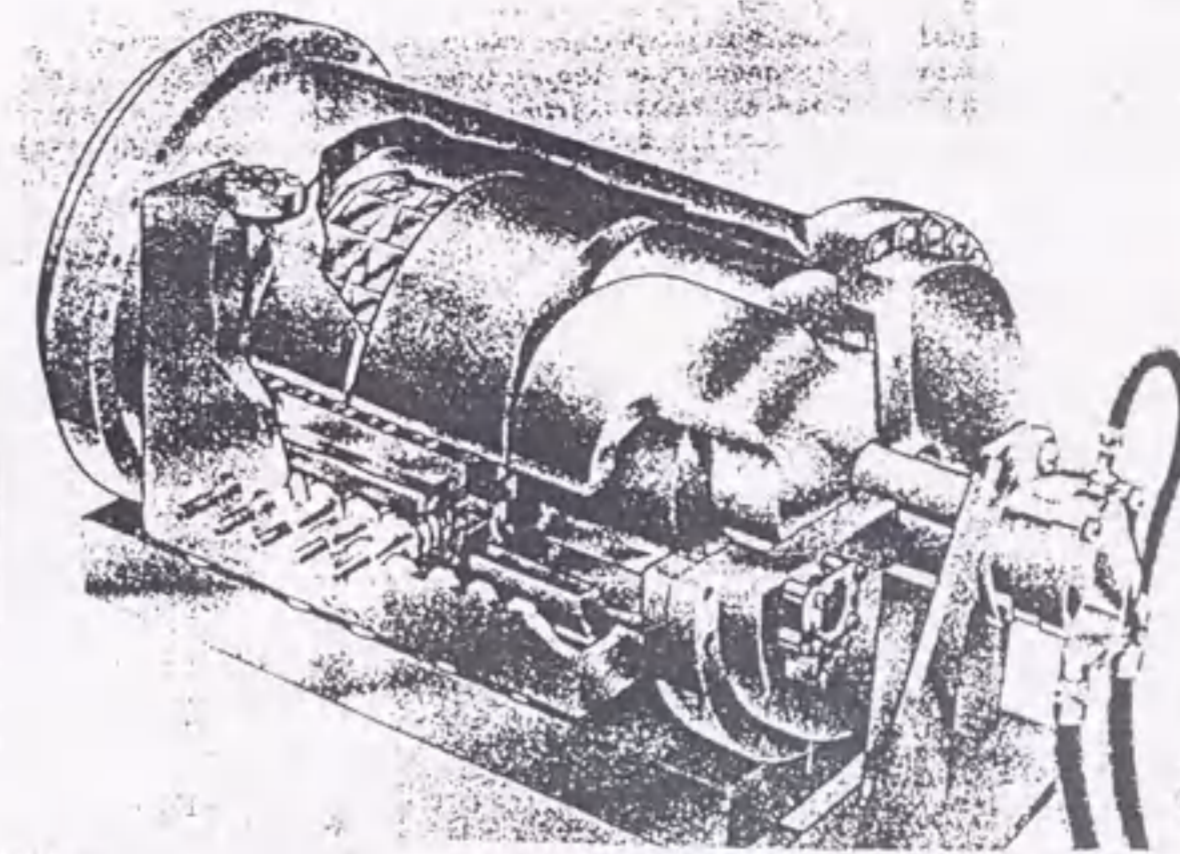


図6-4 Culham Lab. の実験装置と出力特性

ここで、'94年時点でのパルス繰り返し数とパルスエネルギーの関係について、世界的レベルでの開発状況を図6-5のようにまとめている。^{15) - 20)}

一方、K I A E (V. Kurchatov Inst. of Atomic Energy, (旧ソ連)) も、早くより高繰り返し化に取り組み、電極材の違いと繰り返し動作安定化との関係など多くの基礎的検討を積み上げてきた。しかし、これまでにXeClエキシマレーザーで、繰り返し数600 Hz、300 W程度を定常動作で得られたというのが、諸報告から推察できるという状況にある。^{21) - 22)}

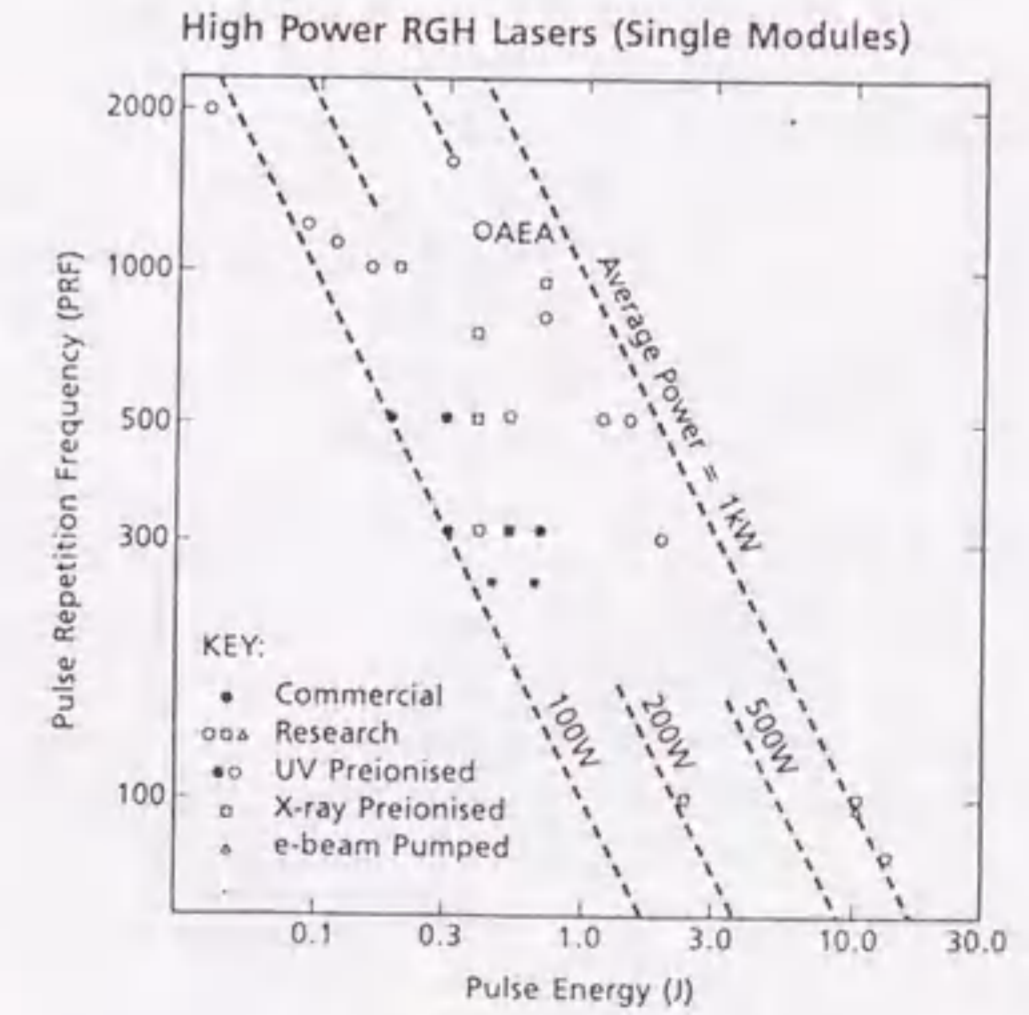


図6-5 大出力エキシマレーザー開発状況

この他には、継続的な研究報告は見られず、今のところ研究レベルの記録値では 2 kHz 程度、製品レベルの装置では 1 kHz (平均出力 40 W 程度) というのが、国外でのトップを競う状況である。

6.1.2. 本研究開発のポイント

前章までに述べた結果から、筆者による研究開発レベルが、上記のような他の諸研究機関による結果に対して、諸実験条件が違うか明らかにされていないことなどから、単純な比較の域をでないと思うが、いくつかの点でより上位にあると言える。そこで、考察を進めるのに、まず本開発技術結果の特徴的ポイントをまとめる。

高繰り返し化には、放電部のガス流速を上げて均一・安定な放電を点弧させることが必須となっているが、プロア入力は流速の 3 乗に比例して大きくなるので、ガス循環チャンバの設計がポイントとなる。そこで、チャンバ内のガスを効率よく高速循環させるように、ガス流路の低損失化設計と、高吐出圧力・高ヘッドで大流量が得られる最大 10,000 min^{-1} の高速回転軸流プロアと、チャンバ外部から隔壁を介して回転駆動力を伝達する高トルク磁気カップリングの開発を行った。このガス循環系により、放電部で最大 158 m/s という、まだ前例がない高速ガス流速を実現した。さらにこれは、ガス流速分布の均一性、放電加熱で引き起こされるガス乱れに対する復元性に優れ、高繰り返しパルス放電に適した特性を持っていることも実証された。したがって、荷電粒子などの放電生成物やガス乱れが迅速に除去でき、これが目標達成の技術ポイントになっていると思われる。

材料の耐食技術では、チャンバ内壁からの不純ガス放出を少なくするため、ハロゲンガスとの反応性が高く、レーザー放電の安定動作に大きな影響があると考えられる Ni など諸材料について、ハロゲンガスと紫外線照射環境下での数千時間におたる材料劣化試験を行った。この結果、従来から使用されているステンレス系の材料に比べて、ハロゲンガスとの反応性を数分の 1~10 分の 1 まで大幅に改善できる材料として、純 Ni および Ni 基合金が適することが分かった。また、金属材料とハロゲンガスとの反応により生成される物質は、金属構成元素の塩化物 (FeCl_2 、 NiCl_2 など) であることが確認された。金属塩化物は一般的に吸湿性がきわめて強く、大気解放時に大気中の水分を吸収し材料劣化を早める危険性があるが、水またはアルコールに良く溶ける性質があり、装置のメンテナンスなどにこれらが溶剤洗浄液として有効であることも確認された。

一方、放電電極周辺部材としてテフロンを使用する場合には、紫外線劣化によって生成された分解生成物の放出が、後述のように放電不安定化に何らかの影響を与える可能性があり、また、シール材に適用しているバイトンについても、ハロゲンガス雰囲気でも長時間使用すると、放電に影響を与える物質の放出が予想されるデータを得た。しかしながら、電極近傍に使用する絶縁材の代替材として有望と思われるセラミックス材については、長時間での安定性が確認された。また、部分的に必要な表面処理の劣化程度を検討し、テフロンコーティングの使用は最少限にとどめることが望まれるが、ほかの表面処理については、比較的耐食性に優れていることも分かった。これらの評価結果は、モデル 1、2 装置の設計にできるだけ多く反映させて材料の選定をした結果、きわめて信頼性の高い基礎データの積み上げができた。

この結果、正確で再現性の高い実験データが得られており、このようなチャンバ構造材の選定など周辺技術開発がきわめて大きな寄与を果たしていると思われる。高繰り返し化阻害原因を、材料変質に起因するガス劣化によるものと分離でき、的確な原因究明と適切な対策が可能となったことは、従来あまり論じられていないが、きわめて重要な技術ポイントとして挙げたい。

高繰り返し放電の点弧では、パルス相互の間隔がきわめて短くなるので、 Xe^+ のような長寿命イオンの生成を抑制あるいは除去して、パルス間の相互作用を少なくすることが決め手となる。従来の研究では、kHz 台での実験に限られており、放電パルス間の相互作用を解明するような試みは行われていない。本研究では、kHz 台での正確で再現性の高い諸実験データを基に、次節に示す計算機シミュレーション結果も考慮して各種励起・荷電粒子の寿命を比較検討し、できるだけこのパルス間相互作用が少なく、レーザー出力が大きい動作条件を明らかにした。

そこで、高繰り返し動作時における Xe および HCl 分圧の適値を、低繰り返し時のほぼ 1/7 とし、また荷電粒子が放電部やその近傍に残留しにくく、その上安価で冷却性能の優れた He をバックアップガスとして用いることにした。これには、特性出力 (単位有効放電容積当たりの出力) やレーザー発

振効率が程度犠牲にされてはいるが、高繰り返し化の記録値を実現できたことにおいてはポイントとなった。通常は He をバックアップガスとするが、He に比べ価格が 10 倍以上であり、また比重が大きいのでガス循環用モータ入力が 3 倍以上となるので、He をバックアップにすれば、実用に際して、全効率、ランニングコストできわめて大きな利点になる。

放電技術においては、放電部のガス流路改修を行い、エキシマレーザーの放電部の電界分布を検討した。これを基に、従来から一般に利用されてきた Ernst 型電極よりも、放電空間全体にわたり均一な放電を点弧でき、エネルギー集中を抑える独自形状の複合形状電極を製作した。この結果、第 4 章で示したように、繰り返し数 3 kHz でレーザー発振を行い、従来の Ernst 型電極より出力を 29% 増とした。このような改良電極は、まだモデル 2 装置には時間の制約から装着していないが、同じ効果が得られるのは明らかである。^{24)~25)} 電極形状については、Stappaerts の検討結果がきっかけとなり、²⁴⁾ 放電の均一性が向上すれば、効率、電極やガス寿命も大幅に改善できると期待され、いくつかのシミュレーション検討が行われている。しかし、まだ実験による効果の確認はほとんど明らかにされていないので、今後の課題ともなるポイントである。^{27)~28)}

また、衝撃波対策では、伝播のシミュレーションを行い、放電部の壁面形状を工夫することによって、衝撃波の減衰を大幅に早めることができ、5 kHz 運転をより安定化させ得ることを示した。これに従い、衝撃波ダンパの改良とその性能検証を行い、この効果を明らかにした。放電部ガス密度変動の測定結果より、高繰り返し運転時にも、ガス密度変動はパルス放電間隔内に極めて小さいレベルまで減衰できることを示した。しかし、放電時に発生するガスの揺らぎが放電安定化に及ぼす影響については、きわめて多くの検討結果が報告されているものの、何かの要因と強い相関があるので、効果の定量化はきわめて難しく、これも今後の課題となる技術ポイントである。^{29)~31)}

一方、高速半導体スイッチ素子によるパルス電源では、まずスイッチ素子の長寿命化を目指して、前章で述べたように、サイラトロン置換用の高速半導体スイッチ素子 MAG T を試作した。このために導入した微細加工装置により、平面的なセルパターンの微細化だけでなく、MAG T 構造の実現と高耐圧大電流素子に特有な深い拡散層の制御など諸加工条件を確立して、微細セル構造で低損失化に有利な新構造を開発したことがポイントになっており、ピーク電流 32 kA/cm^2 、電流立ち上がり率 142 $\text{kA}/(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 、2500 V 級の大電流・高速立ち上がり・高耐圧化を同時実現した。

MAG T のターンオン時間は 40 ns 以下であるが、スイッチング損失を抑えるため、1 段の MPC を併用し、さらに 10^9 ショットの長期連続通電試験で信頼性も確認している。本素子に比較的近い特性を持つ従来素子 G T O より、ピーク電流がほぼ 2 桁高く、またターンオン時間はほぼ 1 桁短く、スイッチング損失も格段に少ないので、今のところ、高速半導体スイッチ素子としての性能すべてにおいて、これに並ぶものはない。

この素子は、32 個を 25 kV で動作させるため多段に直列接続して、市販品では最大容量のサイラトロンと同等のスイッチング性能を持つユニットとした。これを、保護・同時ターンオン・電圧分担均等化などの駆動回路技術、および 5 kHz の繰り返し動作に耐えるような独自開発による低損失の磁気圧縮回路 (MPC) 技術を開発、5 kHz、25 kV-300 A という他に類を見ない高速半導体スイッチパルス電源とした。予備実験では、放電負荷を用いて、上記仕様で長時間の連続動作を行い、スイッチ素子の温度上昇も設計値通りで、定常時の温度上昇は、MAG T で約 28 °C、MPC 用可飽和リアクトルで約 42 °C になることが分かった。これらの値はいずれも許容範囲内にあり、温度上昇の観点からは、高速半導体パルス電源の信頼性は十分高いと言える。5 kHz 動作時のエンドライト発光波形は 1 kHz 動作時とほぼ同等で、スイッチング特性に変化は見られず、5 kHz でも安定放電が得られることも確認した。このような特性の素子は他にはなく、したがってその駆動技術、MPC を組み合わせるとパルスレーザー電源にした前例はない。目標性能の達成と共に、半永久的長時間動作の可能性を確認したことは、これらの結果がきわめてインパクトの高い技術ポイントであると言えよう。

最終的には、不完全ながら諸要素技術を取り入れたモデル 2 装置において、最大ガス流速 158 m/s でサイラトロンスイッチ電源により高繰り返し動作を行った。しかし、これまでの実験で高繰り返し動作に適するとした基準ガスでは、4 kHz 以上で放電が不安定となった。このため、低 CR 値化が必要となり、充電電圧をパラメータとした実験から動作電圧を下げ 21 kV と決定した。さらに、シミュレーションで明確となった Xe イオンの残留を減らすため、Xe 分圧を低減させ、この条件で高出力エネルギーが得られるよう HCl 分圧を最適化した。この結果、繰り返し数 5 kHz において、平均出力 500 W 以上の安定レーザー発振が得られ、今後の実用化に対する道筋が明らかになった。

また、高速半導体パルス電源は、サイラトロン電源と並列での実動作において、5 kHz でサイラトロンと同等の電圧・電流容量で駆動させることにより、動作特性を調べた。この場合においても、サイラトロン電源で求められた最適ガス条件で、繰り返し数 5 kHz、平均出力 560 W が得られ、サイラトロンとの置換性が実証できた。その波形観測結果からは、安定性ではむしろ優れた性能を示すと共に、サイラトロンと MAG T ユニットのスイッチング遅延時間を ±5 ns 以内にすることにより、レーザー出力は最高値を示した。これで、サイラトロン電源と同様に、MAG T ユニットの組込んだ電源においても、有効にレーザー励起されていることが実証された。この高速半導体スイッチパルス電源により、サイラトロン電源の置換が原理的に可能であることが明らかになった。これは、エキシマレーザー実用化を加速する上できわめて大きなポイントとなる。

このように、ハロゲンガスと Xe の濃度や比率を適合化した残留イオンの影響が少ないガス構成にするなどの他にも、予備電離の最適化、放電部ガス流路構造など多くの経験則を総合的に検討し、さらに全電力変換効率の向上など実用性も考慮、ガス循環ブロー入力を最少限に下げるといった条件も加味し、高繰り返し、大出力という目標を達成した。国外でも、まだこのような要素技術を総合的に積み上げて、高繰り返し域でレーザー動作を実現させた報告例はなく、総合的技術としてはとくに重要なポイントと評価できよう。

6.1.3. 実用化の技術課題

モデル 2 装置はまだ開発段階ではあるが、研究レベルにおいては、上記のように繰り返し数では記録値を大幅に更新するものである。今後は、実用機を目指した性能向上開発を本格的に行うことが必要となる。そこで、まだ研究用ではあるが、高繰り返し・大出力の市販装置としては、今のところもっとも定評の高いラムダフィジック社 LPX3000 と性能比較をしてみると表 6-1 となり、これに関する、実用化への技術課題を抽出し考察してみる。

表 6-1 標準市販装置との性能比較表

装置名	ラムダフィジック (LPX3000)	モデル 2 装置
レーザーガス種類	XeCl	XeCl
波長 (nm)	308	308
最大平均出力 (W)	150	550
最大パルスエネルギー (mJ)	500	110
最大繰り返し数 (kHz)	0.3	5
最大発振効率 (%)	1 (推定)	0.8
発散角: V × H (mrad)	4.5 × 2	4 × 2
ビームサイズ: V × H (mm ²)	28 × 9	23 × 10
パルス間安定度 (%)	±3	±6
動作寿命 (ショット)	2 × 10 ⁷ (再生器有)	1.8 × 10 ⁵ (再生器無)
励起回路/スイッチ	LC 反転/サイラトロン	容量移行/半導体スイッチ
パルス幅 (ns)	30	17

モデル 2 装置においては、市販の大容量サイラトロン 8 本を同時並列に使ったスイッチング電源で駆動し、当初には 5 kHz にて 1 秒間発振、5 分間休止の断続で、積算発振時間として 36 秒間 (2 × 10⁸ ショット) 動作させた。断続動作を行ったのは、市販サイラトロンの能力が限界に達しており、そのスイッチング不安定動作により、充電電源の回路素子が破壊されるという故障を誘発するためである。これで、最大繰り返し数としては製品装置より 16 倍以上が得られ、また、サイラトロンに代わり、寿命が半永久的な独自設計の高速半導体スイッチによる並列駆動でも、同様の性能をを実証したことなどで優位性を示した。

前章で示したように、繰り返し数を上げた場合、レーザー平均出力が直線的に増大している特性から、平均出力についても、まだ最適条件化は不十分であるが、5 kHz 動作時に 560 W と目標値以上が問題なく十分達成できている。この断続動作試験では、5 % 程度の出力低下が見られたが、ミラー

劣化には起因していないことを確認しており、したがってガス劣化が主因と考えられる。また、繰り返し数 5 kHz を越える動作については、充電電源の性能も限界となり、安定動作の可否は確認できなかったが、ノイズ対策や電源の容量向上などを図れば、これを越える動作も可能と推察される。しかし、高繰り返し動作条件下では、時間と共にサイラトロンの特性劣化が著しく、いずれにしても、電源の全半導体スイッチ化が、長時間の安定な連続動作、長寿命化という実用化に不可欠な条件を満たす決め手になると思われる。

言うまでもなく、実用化の可否は装置の総合性能で決まり、パルス間安定度の改善、ガス再生器の開発など、諸周辺技術の性能レベルアップも重要である。また、高繰り返し条件下ではパルス間隔が短いので、先行放電パルスによる残留荷電粒子や放電によるガス揺らぎが放電不均一化を招き、出力変動、電極やガスの劣化を増大させる。この対策として、X線予備電離など本質的な放電技術の改善が技術課題となる。

いずれにしても、高繰り返しエキシマレーザーは、他の実用レーザーと比較してまだ完成度は低く、装置技術において初歩的とも言える課題も多く残されている。これには、専用装置化で応用の実績を積み上げることが望まれる。一方、寿命に限られるサイラトロンに替わりうる高速半導体スイッチ素子とその駆動技術をこれまでに開発し、半導体パルス電源を試作してきた。しかし、この素子にも、大電流化、高耐電圧化、電源には、放電との整合最適化、小型化、低価格化などが技術課題となる。

6.2. 残留荷電子のシミュレーション

モデル 1 装置で行った実験から、高繰り返し動作時のレーザー出力低下主因が、本実験条件においては、放電による生成物の残留であると推察できた。そこで、各種ガス中での励起過程、消滅過程のプラズマ状態を明らかにするためシミュレーションを試み、生成物の残存時間を計算した。励起時において、Xe ガスの密度は He に比べ格段に低いものの、励起電圧が低いので、多くの Xe 励起種が生成される。このため、エキシマレーザーガス中では、Xe^{*}、Xe⁺ が 10¹⁵ cm⁻³ と、He のそれより 2 桁ほど高くなっているとの結果が得られた。

He/Xe/HCl 混合ガスでの消滅過程では、電子、Xe^{*} は HCl との反応により 100 μs 程度で急速に消滅していく。これに対して、Cl⁻ と Xe₂⁺ は消滅過程においても生成されるため、200 μs 経過後も 10¹⁰ cm⁻³ 以上が残存する。これらのイオンは、とくにガス流速が遅い電極表面近傍に残留し、後続パルス放電に影響を与え、ガス下流におけるアーク状放電、放電の空間的不均一化、の原因になると推察される。

高繰り返し動作における放電電流集中には、次のような現象が実験的に観測された。

- (a) Xe 分圧に大きく依存している。
- (b) 不安定状態では、グロー放電中にカソードからフィラメント放電の進展が観察される。
- (c) この現象は、繰り返し数の上昇と共に顕著となる。

電流集中の原因は、(a) から Xe に由来する放電生成物であり、(b) よりこれらが電極近傍に残存していると考えられる。ガスは、高繰り返し動作状態では高速に循環されているが、電極近傍では流速が粘性により遅くなるため、生成物が残存する。

そこで、エキシマガスにおいて、放電生成物の残存時間をシミュレーションにより計算し、生成物と放電電流集中の関係について検討した。これには、(a) の実験結果に基づき Xe の生成物に着目した。最初に He/Xe の混合ガスにおける励起密度を計算し、その結果をもとに、Xe/HCl/He 混合ガスでの放電終了後の密度を計算した。

励起時および放電終了後の密度は、次式に示されるレート方程式をルンゲ・クッタ法で数値計算することにより求めた。

$$d[N_j]/dt = \sum K_{ji}[N_i][e] - \sum K_{ij}[N_j][e] + \sum C_{il}[N_i][N_l] - \sum C_{ij}[N_j][N_i] + \sum D_{ilm}[N_i][N_l][N_m] - \sum D_{ilj}[N_i][N_l][N_j] + \sum r[N_j] \dots \dots \dots (6-1)$$

ここで、 N_i, N_l, N_m は各種の中性粒子、励起粒子およびイオン、 e は電子で、 $[\]$ はその密度を表す。 K_{ji} は電子により j 準位に励起される反応定数、 K_{ij} は電子との再結合で減少する反応定数、 C_{il} は2個の中性粒子、励起粒子あるいはイオン粒子が j 準位となる反応定数、 C_{ij} は j 準位にある励起粒子、イオン粒子が j 準位から減少する反応定数である。 D_{ilm} は、中性粒子、励起粒子、イオン粒子、電子のいずれかが3体衝突により j 準位になる反応定数、 D_{ilj} は3体衝突により j 準位から他の準位に変化する反応定数、また、 τ は自然放出で他準位に移る反応定数である。

励起時の計算では、レーザー動作の放電条件に近づけるため、電子密度 $n_e = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ とした。³⁸⁾ 励起状態のパラメータとなる E/P は、次のように決定した。放電励起時の主電極間の印加電圧は 10 kV、電極間隔は 2 cm であり、この間の電界 E は $10 \text{ kV}/2 \text{ cm} = 5 \text{ kV/cm}$ となる。 P は放電部のガス圧で、177 kPa であるため、 E/P は $5 \text{ kV/cm} \div 177 \text{ kPa} = 2.8 \times 10^{-2} \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$ となる。励起時間は 50 ns として、簡略化ため E/P および電子密度は一定と仮定した。電子と他の粒子との反応定数は、この E/P に対応する値を文献から求めた^{38) - 39)}。初期状態では、中性粒子のみが存在するとして、励起およびイオン粒子、電子密度をゼロとした。

次に、消滅時には $E/P = 0 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$ として、とくに断りのない限り、電子と他の粒子との反応で励起は考えず、再結合のみとした。計算の初期条件には、励起時の反応によって 5 ns の間に生成された粒子密度を用いた。初期の電子密度 $[e]_0$ は電気的中性が保たれるように、次式を満たすように決定した。

$$[e]_0 + \sum N^- = \sum N^+ \quad \dots \dots \dots (6-2)$$

ここで、 N^-, N^+ は励起時の $t = 50 \text{ ns}$ における負イオン密度、正イオン密度である。消滅時の時間値は、励起の終了時間 $t = 50 \text{ ns}$ をゼロとした。また、励起、消滅の両計算において、刻み幅 (時間) は 10^{-9} s 一定とし、ガス混合比は高繰返しのガス条件に近づけ、 $\text{He} = 177 \text{ kPa}$ 、 $\text{Xe}/\text{He} = 1.06/176 \text{ kPa}$ 、 $\text{HCl}/\text{Xe}/\text{He} = 1.06/0.27/176 \text{ kPa}$ とした。

図6-6に、 He/Xe ガスで生成される各種粒子と反応パスについて、 Xe の生成物を中心に示す^{39) - 40)}。 Xe と電子のみの反応では、衝突により Xe^+ あるいは Xe^* に励起され、また、 Xe^* は電子との衝突で Xe^+ へと2段階励起される。 Xe^+ は Xe と反応して Xe_2^+ を、同様に Xe^* は Xe と反応して Xe_2^* を生成する。 He と電子との反応もほぼ同じで、 $\text{He}^+, \text{He}^*, \text{He}_2^+, \text{He}_2^*$ が生成される。 Xe/He ガスでは、これらの同種生成物間の反応に、 Xe 原子、 He 原子、 Xe 励起種、 He の励起種などの異種間での反応が加わる。励起された粒子は電子と再結合し、 $\text{Xe}^+, \text{Xe}_2^+$ は Xe^* に、 $\text{He}^+, \text{He}_2^+$ は He^* となる。

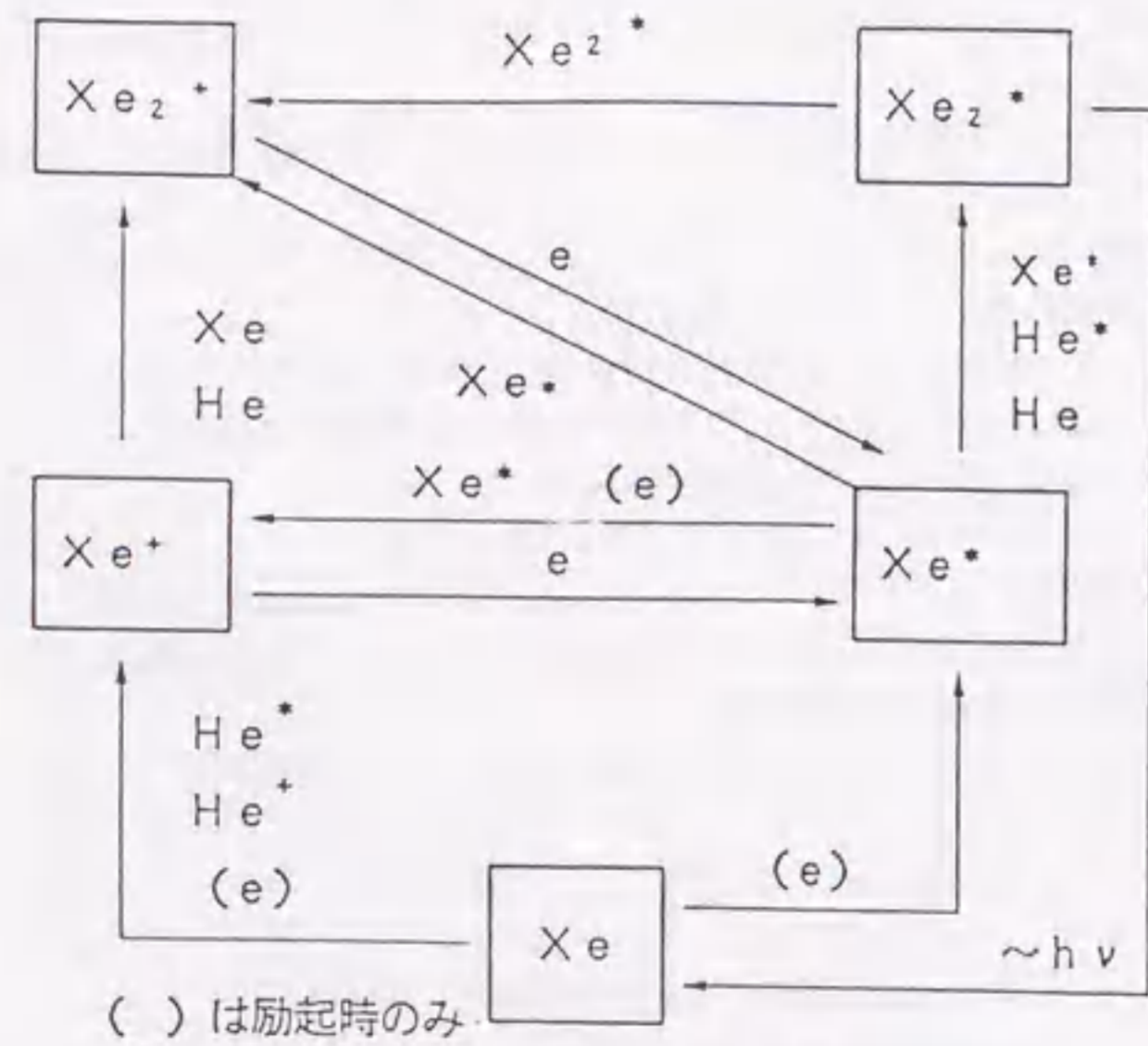


図6-6 Xeの反応過程

図6-7は、 He/Xe 混合ガス中での、励起時における各種粒子密度の時間変化である。 $t = 50 \text{ ns}$ 後において、 Xe^*, Xe^+ が 10^{15} cm^{-3} 以上と高い。これは、 Xe の密度は He に比べて低いにもかかわらず、 Xe^*, Xe^+ の励起電圧が、それぞれ、8.45 eV、12.13 eV であるのに対して、 He のそれらは 19.8 eV、24.59 eV と低いためである⁴¹⁾。エキシマレーザーのような高ガス圧中放電では、ほとんどの電子が数 eV 以内に分布するため、励起電圧の低い Xe との反応が主体となる。

次に、 $\text{He}/\text{Xe}/\text{HCl}$ 混合ガスにおいて、 Xe の生成物を中心に放電後の密度計算を行う。ここでは、とくに図6-7の He/Xe 混合ガスで、励起時の密度が高い $\text{Xe}^*, \text{Xe}^+, \text{Xe}_2^*$ と HCl の生成物である $\text{Cl}^-, \text{電子}, \text{中性粒子}$ に着目してモデル化した。図6-8に計算モデル、表6-2に反応式を示す。図6-8において、 $\text{Xe}^+, \text{Xe}_2^+$ は Cl^- および電子と再結合し中性の Xe になり、 Xe^* は HCl との反応で中性の Xe となる。

表6-2において、 $\langle \text{XL1} \rangle \sim \langle \text{XL3} \rangle$ は Xe^* と HCl の反応で、 HCl は振動準位に励起されるかあるいは H と Cl に分離される。 $\langle \text{XL4} \rangle, \langle \text{XL5} \rangle, \langle \text{XL7} \rangle$ および $\langle \text{XL8} \rangle \sim \langle \text{XL10} \rangle$ は、 Xe と電子、 He との反応である。 $\langle \text{XL6} \rangle, \langle \text{XL11} \rangle$ は、 $\text{Xe}^+, \text{Xe}_2^+$ と Cl^- の再結合で、反応定数は全ガス圧をパラメータとして Flannery 方程式に従った。 $\langle \text{XL12} \rangle \sim$

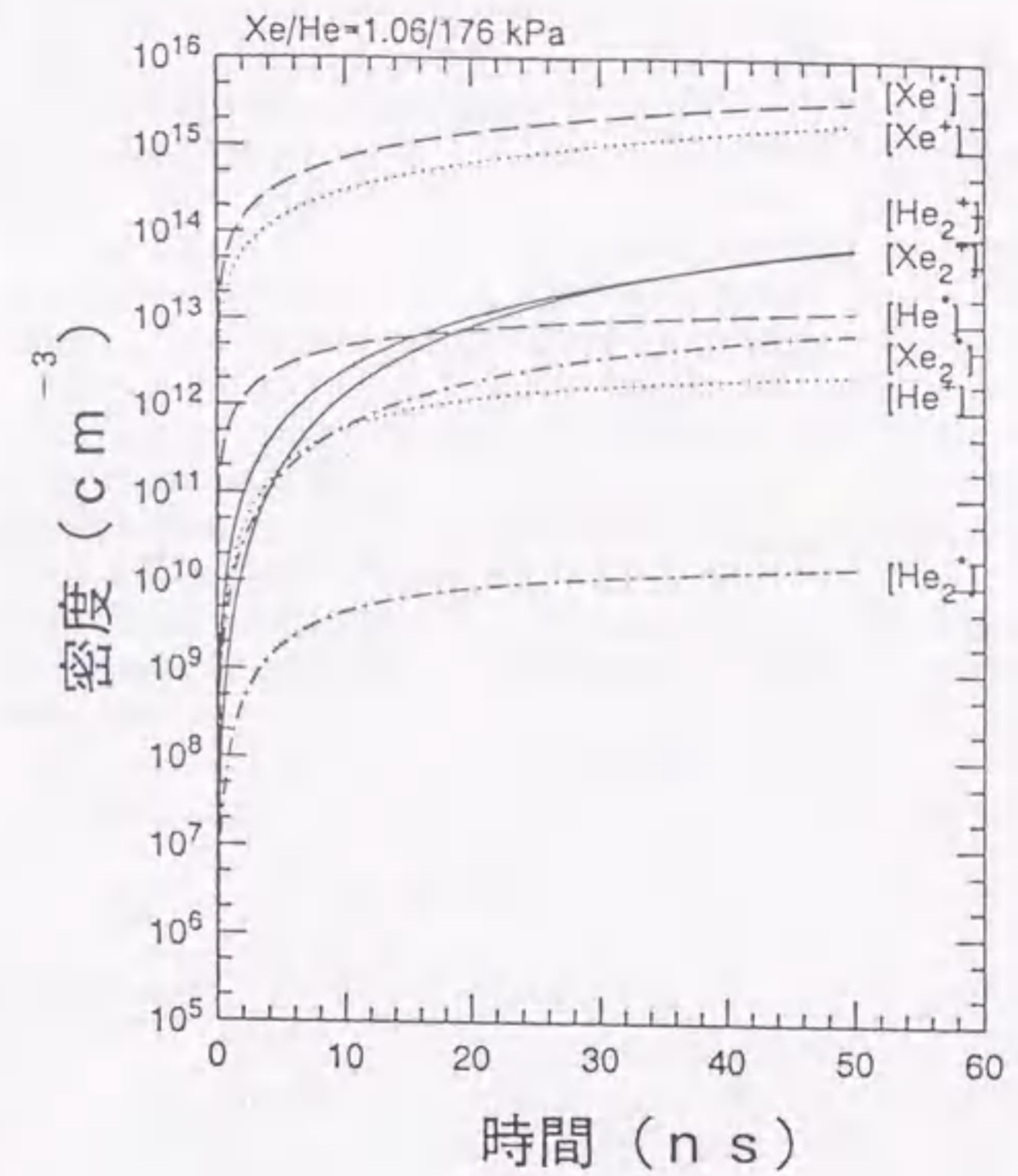


図6-7 Xe/He混合ガスでの励起密度

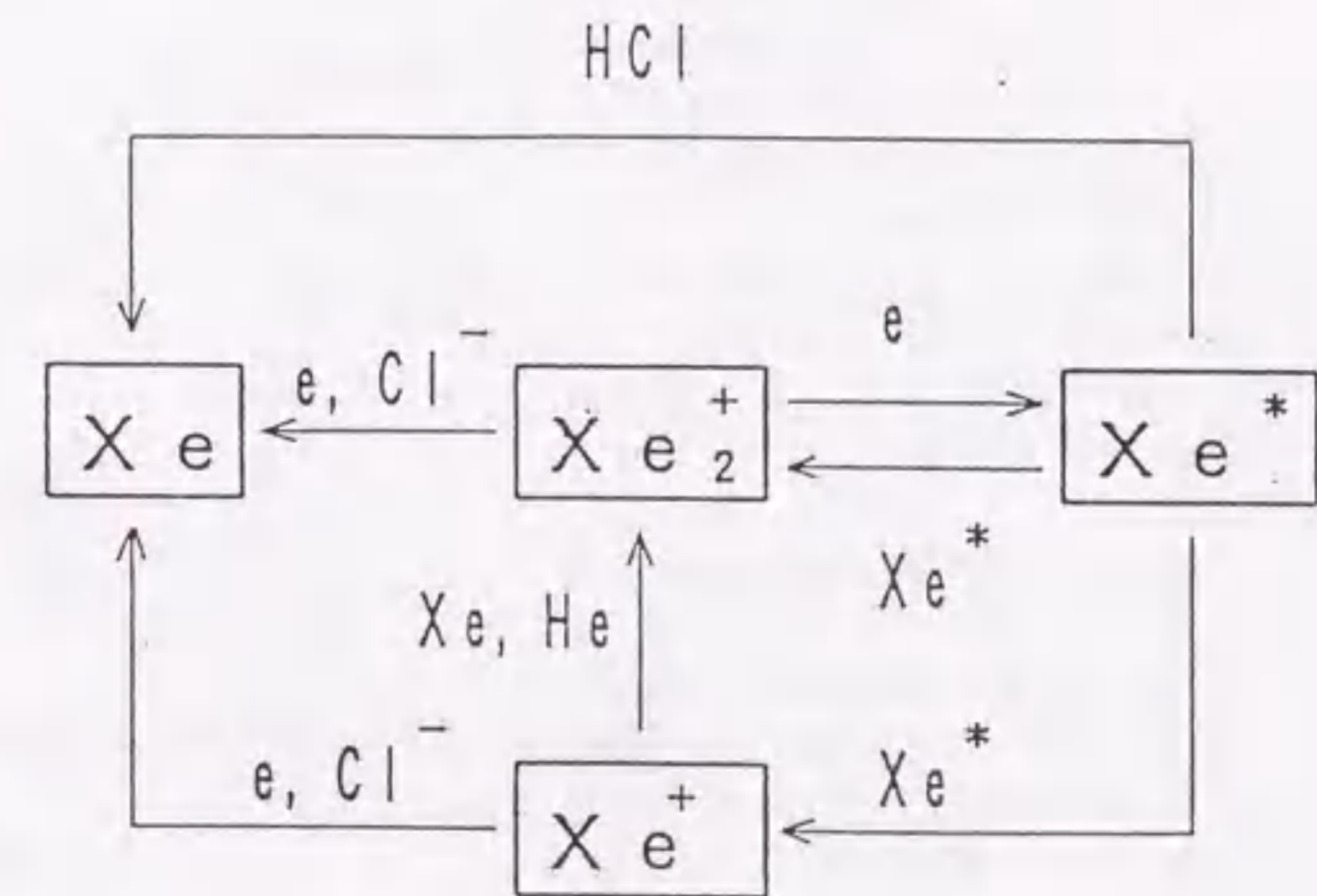


図6-8 エキシマガスでの消滅過程

表6-2 反応式および反応定数

	反応	反応定数
<XL1>	$Xe^* + HCl \rightarrow Xe + H + Cl$	$k_1 = 5.6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL2>	$Xe^* + HCl(v) \rightarrow XeCl^* + H$	$k_2 = 2.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL3>	$Xe^* + HCl(v) \rightarrow Xe + H + Cl$	$k_3 = 5.6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL4>	$Xe^* + Xe^* \rightarrow Xe^+ + Xe + e$	$k_4 = 1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL5>	$Xe^* + Xe^* \rightarrow Xe_2^+ + e$	$k_5 = 5.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL6>	$Xe^* + Cl^- \rightarrow XeCl^*$	$k_6 = 0.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL7>	$Xe^* + e \rightarrow Xe^+$	$k_7 \leq 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
	$Xe^* + e \rightarrow Xe^* + h\nu$	
<XL8>	$Xe^* + Xe + He \rightarrow Xe_2^+ + He$	$k_8 = 1.1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL9>	$Xe^* + Xe + Xe \rightarrow Xe_2^+ + Xe$	$k_9 = 3.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL10>	$Xe_2^+ + e \rightarrow Xe^* + Xe$	$k_{10} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ Te}^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL11>	$Xe_2^+ + Cl^- \rightarrow XeCl^* + Xe$	$k_{11} = 0.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL12>	$HCl + e \rightarrow HCl(v) + e$	$\beta = 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
<XL13>	$HCl(v) + e \rightarrow H + Cl^-$	
<XL14>	$HCl + e \rightarrow H + Cl^-$	

<XL14>は、HClと電子との反応で、HClが振動準位に励起、あるいはCl⁻に解離される。この反応は、電子エネルギーの関数として決定され、放電終了後には電子温度の低下と共に大きくなる。電子が消滅していく<XL12>~<XL14>のすべてを含んだ反応定数をβとして、測定値であるβ~10⁻¹¹ cm³/sを用いた^{4,2)}。初期値としては、実際の測定値を参考にし^{4,3)}、図6-7での計算値を用い、[Xe*] = 10¹⁶ cm⁻³、[Xe⁺] = 10¹⁵ cm⁻³、[Xe₂⁺] = 10¹³ cm⁻³とし、[Cl⁻]は文献^{4,3)}より10¹³ cm⁻³、また、電子密度は(6-2)式を満たすように決定した。

図6-9に、消滅過程の計算結果を示す。電子、Xe⁺、Xe*が10 μsで急速に減少していくのは、以下の過程による。電子は<XL12>~<XL14>の反応で、HClと反応してCl⁻を生成し減少していく。また、Xe⁺は、<XL7>で電子と再結合しながら、<XL8>、<XL9>の反応ではXe₂⁺を生成しながら減

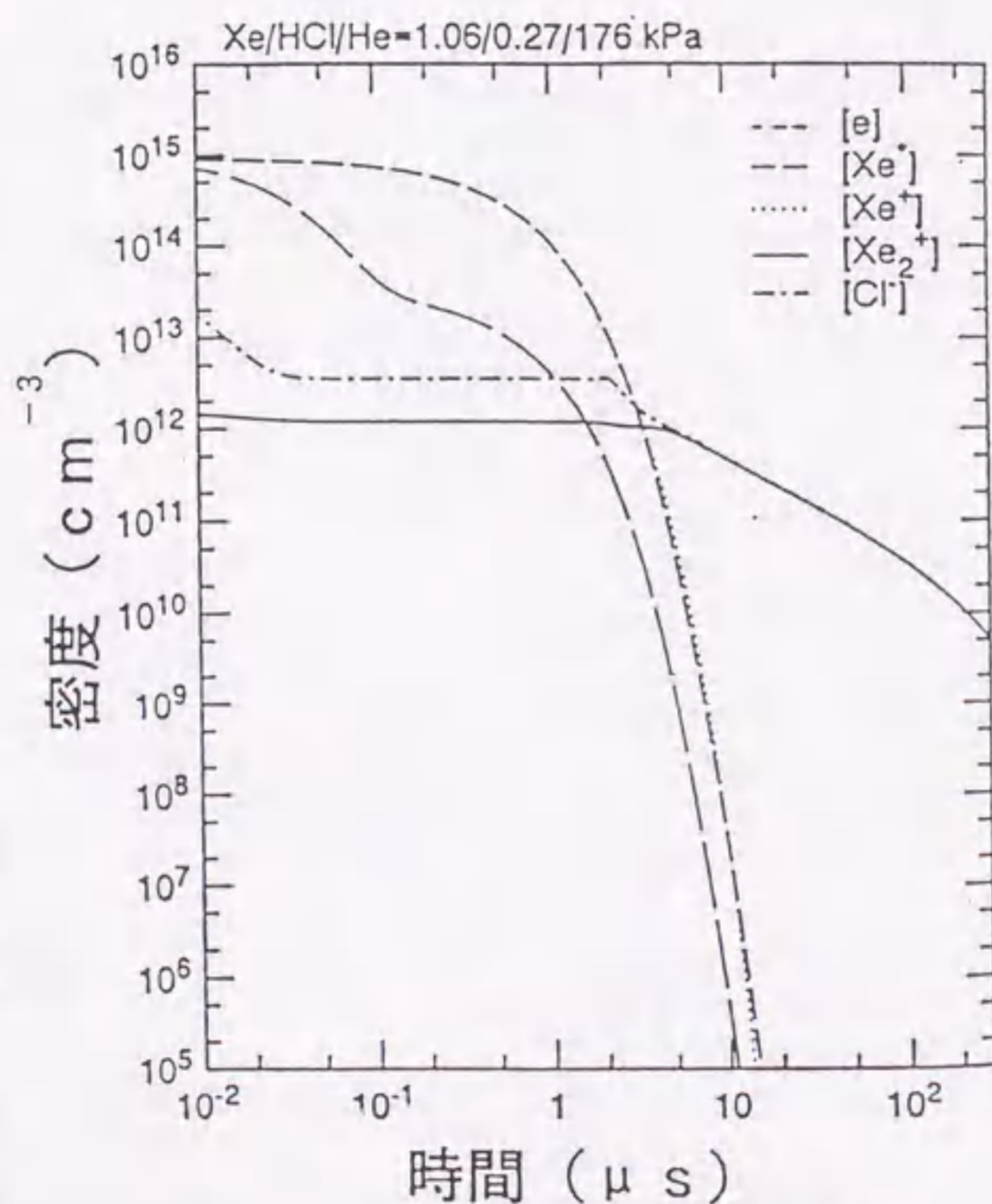


図6-9 エキシマガスでのイオン残存時間

少していく。Xe*は、HClと<XL1>~<XL3>の反応過程をとるが、とくに<XL1>は、Xe*との反応種が中性粒子のHClであるため減少が速い。

Cl⁻は、<XL6>、<XL11>でXe⁺、Xe₂⁺との再結合により消滅するが、<XL12>~<XL14>の反応で生成されるため、約10 μs後までほとんど減少しない。<XL8>、<XL9>で、Xe⁺から生成されるXe₂⁺も同様の傾向を示す。10 μs後に、電子、Xe⁺密度が低下すると、<XL11>の反応でXe₂⁺とCl⁻は再結合し、ゆっくりと減少していく。このため、200 μsにおいて10¹⁰ cm⁻³以上の荷電粒子が残留することになる。

残留荷電子Cl⁻、Xe₂⁺の大部分は、高繰り返し動作で放電では高速ガス流で放電部から排出されるが、電極表面近傍では粘性のため流速が遅くなり動かない。その密度は10¹⁰ cm⁻³以上と、予備電離による電子密度と同等あるいはそれ以上であるため、後続の放電状態に十分影響を与える可能性が大きい。Xe分圧が高い場合、放電時に生成されたXe₂⁺、Cl⁻が消滅するまでの時間は長く、これらがホットスポットを発生させたり、ガス流の乱れにより、後続放電点弧時に不均一状態、フィラメント状放電の発生、成長を助長する。Xe量を増加すると、電離不安定性も増加し放電は一層不均一になりやすくなり、この影響はさらに加速されると推察する。実用では、これらの現象はレーザ動作の不安定性に繋がり、この動作条件の制御が重大な技術ポイントとなる。

とくに、UV予備電離の場合には、初期電子の供給体に関して多くの議論が有り、今なお明確な同意ができていない。レーザガス中に含まれている不純物粒子が、その供給体になっていることは否定できないと思われる。しかし、筆者らは図6-10に示すように、不純物により電子放出するものと、UV光を吸収するのみで電子放出しないものとを、考慮する必要があるとの見解を示している。このような推測をすると、多くの予備電離に関連する放電不安定性が、より明解に定性的説明できることが分かった。^{4,4)}

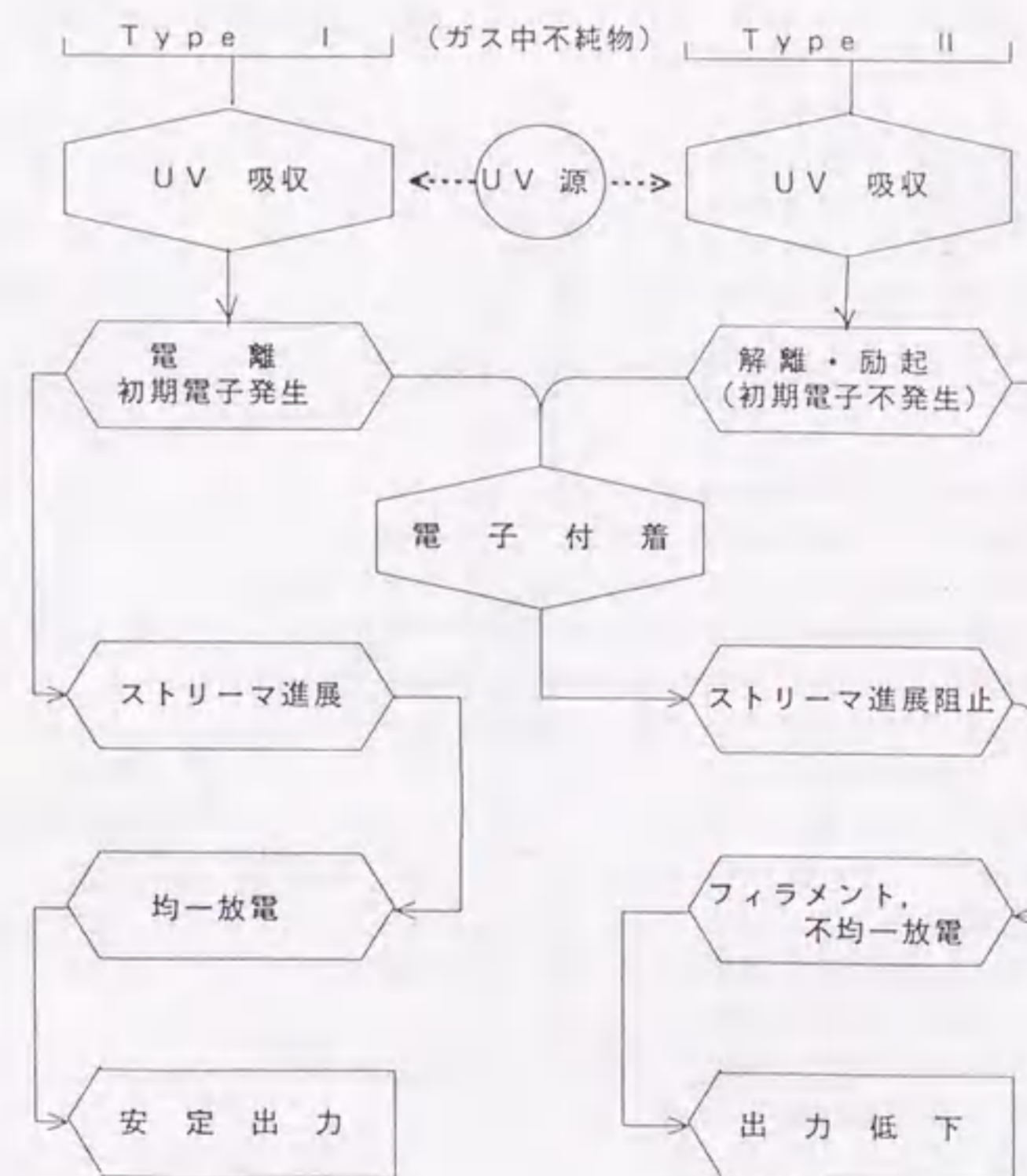


図6-10 放電不安定性の機構

6.3. 実用化の方向付け

6.3.1. 放電の安定化・均一化

これまでの開発で、まだ多くの技術課題が残されているが、ここでは高繰り返し動作における平均出力の低下原因に限りさらに検討を加え、今後の展開を述べたい。

高繰り返し時には、陰極表面にホットスポットが多発し、対応してフィラメント状放電が観測され、Xe量を増加すると顕著となったが、HClの場合には見られなかった。これより、Xeは電離しやすいため、混合量を増加するのに伴いショット毎の電離不安定性が増し、さらに、高繰り返し動作ではパルス間隔が短くなるため、電極表面には先行パルスによる放電生成物の残留が多く、Xe増量が放電不安定性を加速し、また、放電時に電極間で発生した生成物の大部分は、ガス流により排出されるが、電極表面ではガスの粘性により、一部で生成物が残留してショット数とともに蓄積され、陰極近傍からフィラメント状放電が進展すると推察できる。

また、ガス流速が、電極端部、上流ビン電極に対応する位置で遅くなっていることをピトー管によって測定しており、また電極面での残留が不均一である可能性も分かった。さらに、陰極表面のホットスポットは、電流密度が高いため周囲より温度が高くなっており、電極面での局所的な温度むらを形成する。これらのガス流速、温度むらによって、残留イオンは、主放電では空間的に、電極面では位置的に不均一な分布をしやすく、荷電粒子密度が高いところでは、放電が集中する傾向が強まり、フィラメント状放電から局所的な電流集中に進展する。

局在化する残留イオンが放電集中の主因になるとすれば、できるだけこれを低いレベルに抑えるような放電条件で動作させるのは言うまでもないが、他にも再結合を促進させる、あるいは局在残留イオンの影響をできるだけ受けにくいようにすることが、この対策となる。再結合の促進では、水素ガスを添加させるなどが他レーザで試みられている。しかしながら、エキシマレーザでは、まだkHz台での動作について研究は少なく、筆者らが高繰り返し化を目指した本研究で始めて、世界記録となっている2kHz以上の動作領域で放電集中現象を検討した結果、残留イオンが主因となっている可能性が高いとしているに過ぎない。別に、水素ガスを添加させた効果を論じ、低繰り返し域で出力が15%程度増大しかつ安定化したとの研究報告例がある。その作用は、水素分子が振動励起されて電子を冷却している。⁴⁵⁾これは、再結合の促進効果も期待できることも示している。同様に、筆者らも水素添加効果として、図6-11で示すように、パルスショット数による出力エネルギーの低下が軽減できることを実験的に確認している。^{46)~47)}いずれにしても、高繰り返し域での効果については、今後の重要な研究課題となる。

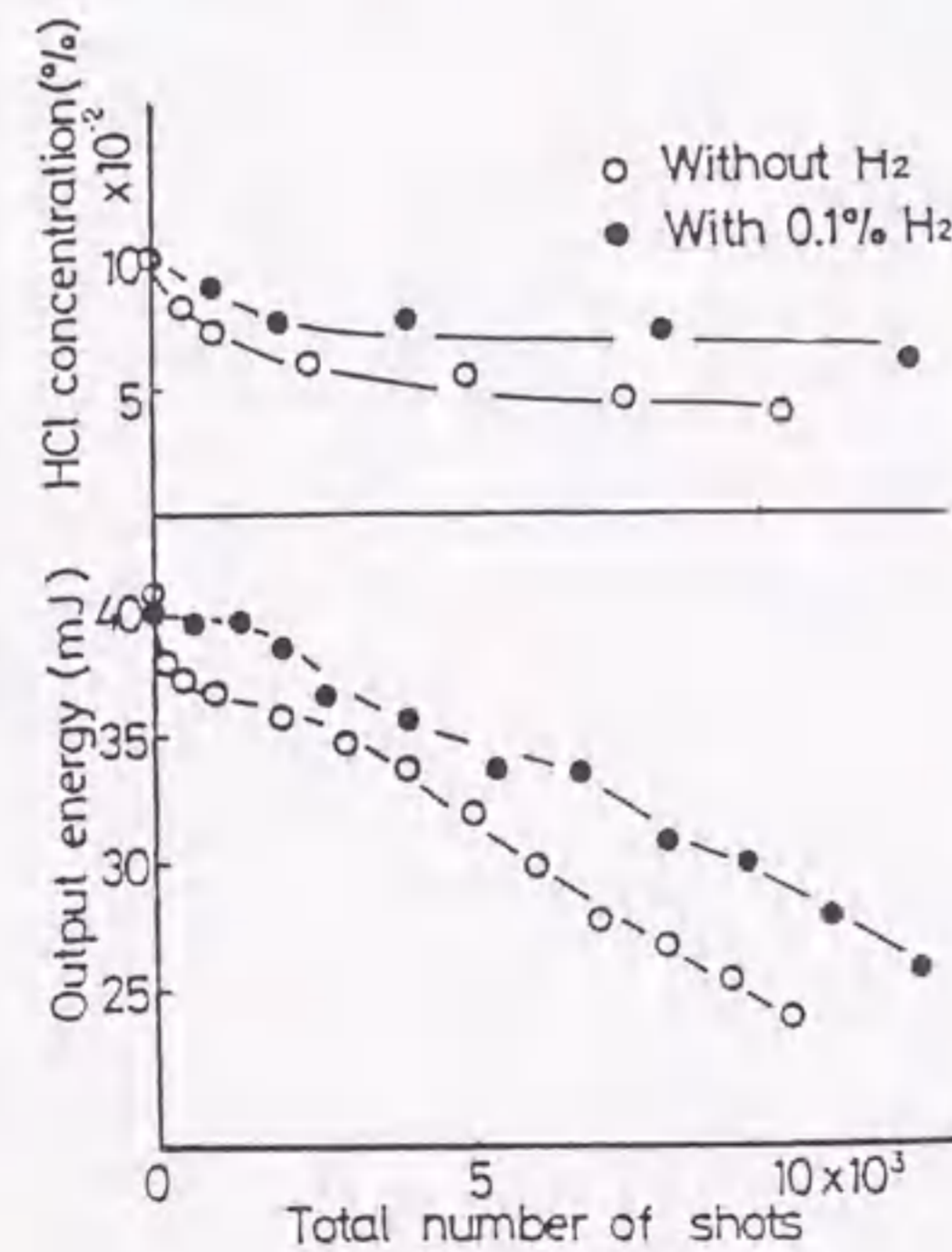


図6-11 水素ガス添加効果

以上の結果から、今のところXeClエキシマレーザでは、レーザ励起効率の低下は避けられないが、Xe混合比を下げ、Heバフファの低い全ガス圧下で動作させれば高繰り返しが可能である。このような動作条件では実用という観点から、ガス循環のプロア入力大幅に低減され総合効率は上がり、チャンバは小形で安価となり、Heも安価でランニングコストが低減できるなど多くの利点がある。

一方、残留イオンの影響をできるだけ受けにくい方法としては、X線予備電離がもっとも有効ではないと思われる。これは、UVやコロナ放電予備電離方式では、ガス中に含まれる電離電圧の低い不純物ガスが初期電子の発生源になっているのは明らかとてよく、これらに関する研究については、TEA CO₂レーザ関連を含めきわめて多くの報告がある。しかし、最近 Taylor らは、それらを総括するような論文において、不純物ガスの同定を諸方向から総合的に試みた。図6-12には、エキシマレーザガス中に存在するH₂、N₂とそれらの酸化物、各種ハイドロカーボン、クロロカーボン、フロロカーボン、ハライドメタルなどについての電離電圧に対するヒストグラムが示されている。しかしながら、実験ではレーザ放電現象との対応がとれず、明確な結論は得られていない。⁴⁸⁾

これには、すでに筆者らが図6-10にて示した、2種類の不純物ガスが存在するとのモデル設定がされていないためと思われる。Babcock らは、TEA CO₂レーザにおいて、初期電子増大を目的に、各種シードガスの添加を試み、CCl₄においては逆効果になったことを報告している。⁴⁹⁾また、放電励起エキシマレーザ開発当初、ハロゲンドナーとしてCCl₄を用いた例もあるが、放電が不安定であり、それ

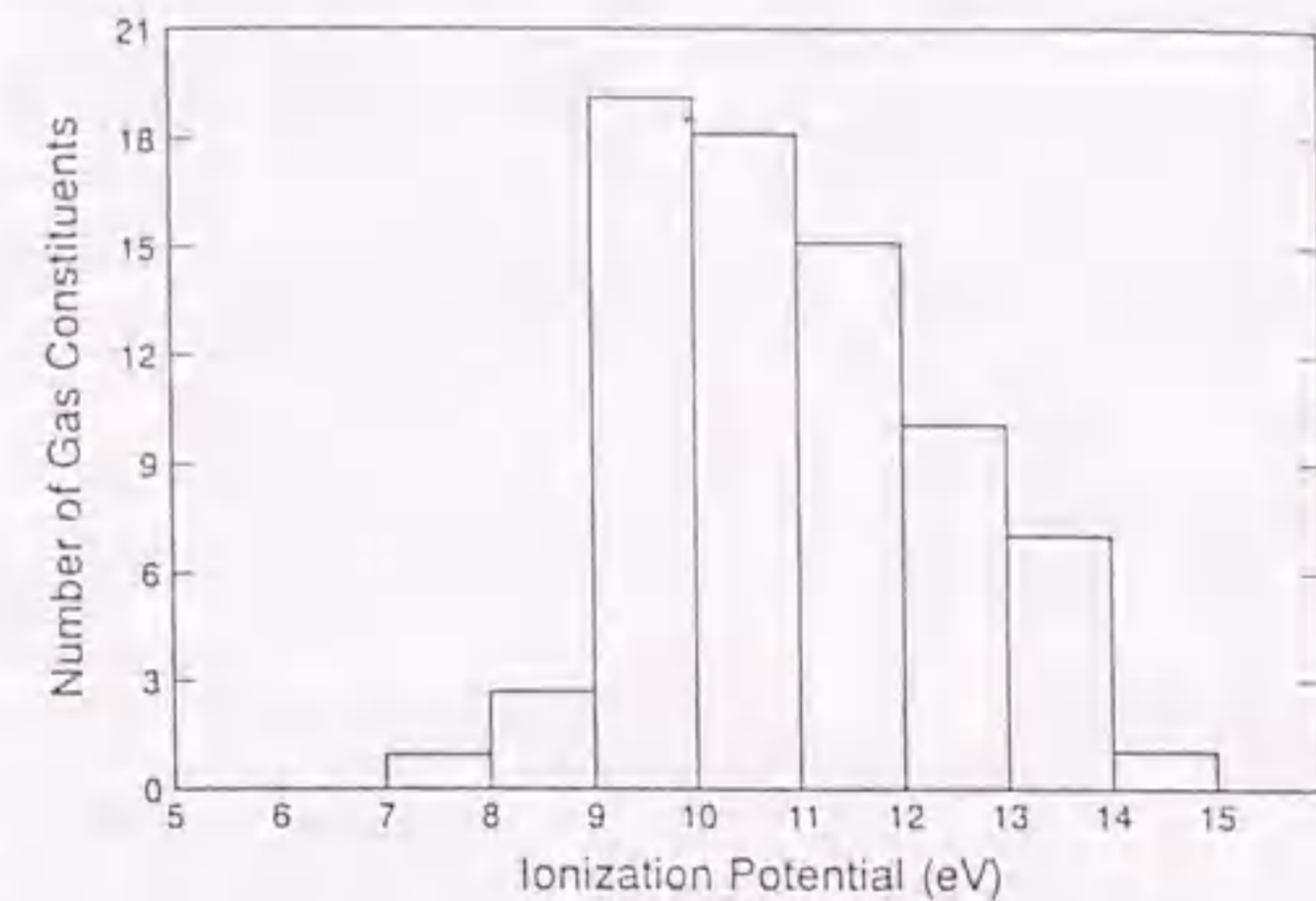


図6-12 不純物ガスのヒストグラム

以後XeClにはHClを使うのが一般化した。まだ実験的確認はなく推論の域を出ないが、チャンバ内にCCl₄は多く存在し、比較的蒸気圧も低いので、壁面に付着しているものも動作中には気化する。したがって、これがUV光を吸収するが初期電子放出はしない不純物と仮定すれば、結局はUV光の初期電子放出に寄与する分は減じ、予備電離不足により放電不安定となることで、従来の諸現象が明快に理解できる。X線予備電離では、多量にあるバフファガスから初期電子が多量に放出されることで、これがもっとも有効な予備電離方法と期待する理由となる。

X線予備電離は、1980年頃より多くの理論的・実験的試みが行われてきたが、X線発生源が複雑であり、いずれも実用性が低いことが現時点でもなお課題とされている。参考までに、実用化を主眼にした最近の文献を示すが、詳細は省略する。^{50)~57)}図6-13に、プラズマカソードを使ったX線源の一例を示す。⁵⁴⁾

一方、筆者らが開発したX線予備電離方式では、これまでの実験において、分割予備電離方式の開発ポイントとしてX線量空間分布の不均一化が明らかにされ、減衰板装着により分布の均一化を図った。さらには、分割X線予備電離方式における放電部X線量の空間分布シミュレーションコードを開発し、この均一化設計を可能にした。これを基に、24本のX線管によるモデル2装置用のX線予備電離改良放電部を製作し、上記コードにより、均一化設計を行った。これでは、減衰板による平均線量の減少を7%に抑え、不均一率F(=(Max.-Min.)/Ave.)を、30%以上から20%前後に低減させた。この結果、HCl/Xe/He=0.27/0.93/176 kPaの基準ガスにおいて、X線予備電離モデル2放電部で124 mJのレーザ発振が得られ、レーザ出力は、UV予備電離方式と比較して10

～20%増大した。簡便な方式であり、今後の実用化がもっとも有力と自負し期待している技術である。

言うまでもなくエキシマレーザーでは、放電の安定化が予備電離に止まるものではない。このような放電そのものが、まだ本質的に解明されていないとも言える。最近になり、陰極面でのシーズ状態、どのようにして電子密度が短時間にレーザー発振を得る $10^{15} / \text{cm}^3$ 程度まで進展するかなどについて、基礎的研究が進んでいることは注目される。とくに後者については、光速に近い進展をするストリーマ放電、イオン波(Ionization wave)、光電子放出などが議論されており、従来の“グロー放電”、“アーク放電”で議論する域を越えるようになってきた。⁸¹⁾

-81)

一方、本研究は、決して重厚長大装置を作るのではなく、より実用性の高い装置を提供するための技術ポイントを明らかにすることを目的としたが、この従来未開の動作域で諸現象を実証する過程で、これまでの議論では理解できない多くの事実が明らかとなった。したがって、このような結果は大きな研究成果と評価でき、今後は新たなモデル設定によるシミュレーションとその実験的検証が不可欠と痛感するとともに、その先には実用機で本質的な性能向上が期待できると思っている。

さらに、今後高繰り返し装置を実用化するには、保守の簡便化、ランニングコストの低減化、小型化、低価格化、高信頼化など、一般の装置とも共通する技術課題があるのは言うまでもないが、とくに本装置においては、長時間の安定動作化がもっとも重要な技術課題である。この結果、5 kHz動作において後続パルス放電が点弧する時間間隔 200 μs では、 Xe^+ 、 Cl^- が予備電離による電子密度と同等量存在し、残留イオンが後続パルス放電に与える影響が検証された。

kHz 台での高繰り返し動作域においては、放電パルスの間隔が短いので、残留荷電粒子が主役となり、放電状態に諸影響を与えることを実験により示すと共に、シミュレーションともよく一致することが本研究で始めて明らかになった。また、平均出力が繰り返し数を増大させても飽和・減少するような現象は、放電電流の集中が主因であり、 Xe 、 HCl の成分比を低減させる、 He バッファガスをを使う、放電部の配置や電極形状を適正化するなどで対策できることを始めて明らかにした。

さらに今後は、従来のUV予備電離に代わるもので放電の安定化が改善され、半導体スイッチ化で保守が簡単になるなど、kHz 台の高繰り返し装置において実用技術が急速に進展すると思われ、新たな応用の展開が期待できる。

光学素子は、高出力用に高耐力学素子が、本通産大プロ開発で並行して試作された。この評価試験として、最終目標値 500 J/cm^2 の3倍に相当するエネルギー密度で照射、ミラーへの損傷を加速した損傷加速耐久試験と、照射パワー密度を最終目標値 500 W/cm^2 から徐々に高めていく耐光強度試験の両方を行った。全反射ミラーの基板はSiC、ウインドウの基板は CaF_2 である。レーザー光をほぼ100%反射する全反射ミラーでは、入射光および反射光が同一の多層膜を2度通過する。その時、発生した吸収損失は、熱として蓄積され、熱レンズ効果でビーム質の低下を招くことが予想される。熱レンズ効果の大きさは、基板の熱膨張係数で決定されるため、小さい値の材質を用いる方

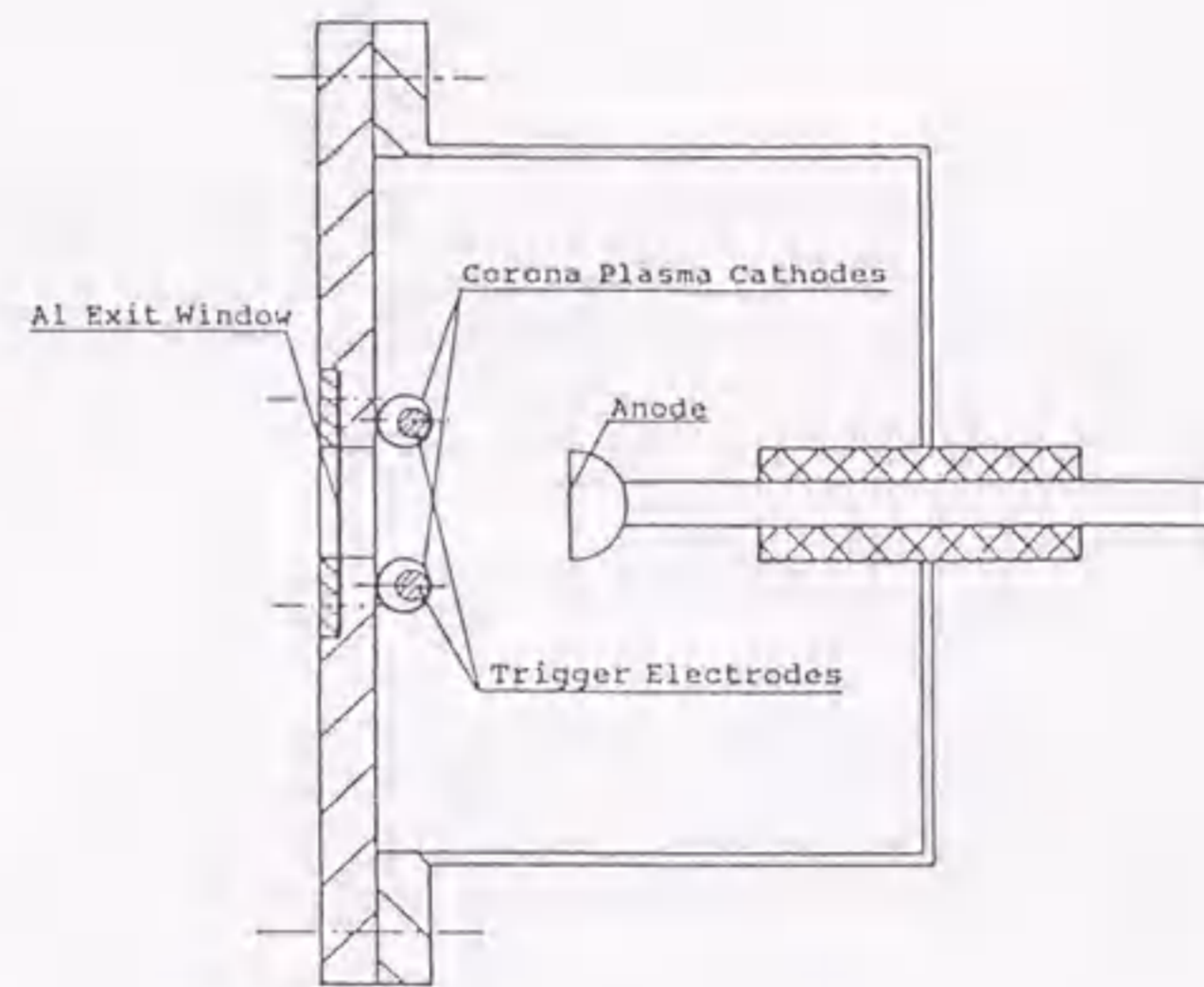


図6-13 プラズマカソードX線源の一例

が影響が少ない。SiC、 SiO_2 の熱膨張係数は、それぞれ、 47×10^{-7} 、 $55 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ である。大プロの最終評価用モデル2装置は、市販装置よりかなりの大出力となるため、熱レンズ効果が大きく影響すると考えられ、全反射ミラー基板は熱膨張係数の小さいSiCが選択されている。一方、ウインドウでは、透過率が大きく耐食性の高い CaF_2 が選ばれているが、今回は SiO_2 でも試験を行った。試験結果の詳細はここでは省略するが、耐光強度試験において両者ともに 2 kW/cm^2 までのパワー強度に耐えたことが実証され、実装可能であることが示された。今後は、さらに長時間の耐光強度を確認することが実用化では必要となるが、この段階では発熱の問題が大きく影響するので、基板の材質依存性が顕著になると思われる。

6.3.2. 本開発技術の応用分野

通常の産業応用では、生産性や経済性の向上が重視されるため、アブレーション、アニーリングなど多くの場合に、高繰り返しは共通する重要な要求となるが、今後この技術が新たに適用でき注目されると思われるものとして、3次元光造形、クリーニング、誘雷などがある。

3次元光造形は、X、Y軸方向に操作されたレーザービームを紫外線硬化樹脂に照射し、輪切り状に形成された樹脂をZ軸方向に微動して3次元物体を形成する方法で、多品種少量製品の樹脂金型を作るには画期的な技術となる。

またクリーニングの一例としては、半導体ウエハ表面に付着した $0.2 \mu\text{m}$ 以下の微細な塵を、強力な紫外光で励起された水分子で取り去る方法があり、クリーンルームが不要な洗浄技術として注目されている。

一方、レーザー誘雷も、雷雲に向けて強力なUVレーザー光を照射すれば大気がイオン化され、高繰り返し照射すれば残留電離生成物(イオン)が蓄積され高電離状態ができるので、これで安全かつ被害の少ない場所に落雷を任意に誘導できると期待され、落雷事故防止に有効な手段として基礎的技術検討とともにフィールド実験も始まった。

医療応用としては、エキシマレーザーによる骨の切断が有望視されている。最近基礎開発を終了した通産省関係の研究開発プロジェクトにて、数100 Hz程度の装置を使った結果が報告されているが、さらに手術時間を短縮する必要があり、これに高繰り返し化技術が適用できる。

波及技術としては、現在国内において進めている、TEA CO_2 レーザを使う分子法レーザーウラン同位体分離法(MLIS)の開発にも、これら高繰り返しレーザー動作技術、高速半導体パルス電源が適用できる。同様に、原子法レーザーウラン同位体分離法(AVLIS)の開発にも、サイラトロン電源の代替として無保守の高速半導体パルス電源が使える。

大出力エキシマレーザーの高繰り返し化技術としては、これまでに海外で得られた記録値のほぼ3倍を実証して、この最適動作諸条件を明らかにし、産業用には不可欠な高繰り返し化技術の確立に先駆的役割を果たしてきたが、このように、いずれにおいても高繰り返し化が実用では決め手になり、新たな応用分野を切り開くのに有力な技術となる。

駆動電源でも、スイッチ素子の半導体化で、将来はほぼ無保守化ができると思われる。現在、エキシマレーザーでは先行している海外製品は、ほとんどサイラトロンが使われているが、この半導体化が上記のような諸応用を加速させることになると思う。⁸²⁾⁻⁸⁵⁾

6.4. 本章のまとめ

ガスレーザーに限っても、その種類や発振方法はきわめて多様であり、20年を越える蓄積を、この限られた紙面で詳述することはできない。ここでは、レーザー装置を実際に使う側で必要とされる基本技術や特性、最新技術や今後の課題などは何か、という間に答える内容となるよう努めた。長年レーザー開発に携わってきた筆者の習性から、どうしてもこれを作る方向に興味の対象が向いてしまうので、できるだけこれを避けるようにも努めた。このため引用文献には、レビューや解説書を多く入れるようにし、また、基本技術に関わるもの以外はあえて挙げず、新技術に関わり実用上重要と思われ

るものを優先的に挙げるようにした。ここに示した実験資料の大半は、研究段階の記録値ではなく、製品開発段階で筆者や関係グループが得たものから多くを選んだ。ガスレーザーは、今後も開発研究が続き、ここに述べた内容も書き換えられるであろうし、またそのように努力したい。

これまでに、高速ガス循環が可能な、2 段の軸流型プロアを内部に組み込んだ高繰り返しエキシマレーザー装置を試作した。He バッファガスにおいて、全ガス圧、混合比、動作電圧などを最適化し、Xe 分圧を低減することで、5 kHz で 500 W を越える高繰り返し、高出力の安定動作を達成した。

エキシマレーザーは、CO₂ レーザと比較してみると、装置技術における課題が多く残されており、実用化に向けての性能向上が進んでいるものの、まだ完成度が低い。一方、応用技術では光化学反応を使うことで、プロセスの制御が難しく実績が乏しい。このため、装置の性能に対する要求ポイント、仕様を決めて専用機設計をするのが、まだ難しい状況にある。しかし、ここに示したように、数千 Hz 級の高繰り返し装置実現の見通しが得られたことは、今後、応用技術開発への関心を高めるのに、大きく寄与するものと思う。現在このような開発は、CO₂、YAG レーザに続き、産業分野での実用化を目指して本格化しており、この成果が'90年代を飾るものと確信している。

参考文献

- 1) M. L. Sentis, P. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Performance characteristics of a high PRF and high power XeCl discharge laser," Proc. SPIE, 1041, 204-211(1989).
- 2) Ph. Delaporte, B. Fontaine, B. Forestier, and M. Sentis, "Fast flow gasdynamics effects in high pulse repetition rate excimer lasers," Proc. SPIE, 1397, 485-492(1990).
- 3) M. L. Sentis, Ph. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Design and characteristics of high pulse repetition rate and high average power excimer laser systems," IEEE J. Quantum Electron., 27, 2323-2339(1991).
- 4) O. Uteza, M. Sentis, Ph. Delaporte, B. Forestier, B. Fontaine, and G. P. Lopez, "Laser beam quality of high PRF excimer laser," Proc. SPIE, 1810, 180-187(1992).
- 5) J. P. Truong, M. L. Sentis, P. Delaporte, B. Forestier, B. Fontaine, O. Uteza, and Y. Tassy, "Efficient acoustic wave damping in a high pulse repetition rate XeCl laser," Proc. SPIE, 1810, 430-434(1992).
- 6) O. P. Uteza, M. L. Sentis, Ph. C. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Laser beam quality of high pulse repetition frequency excimer lasers," Optics Commun., 102, 523-531(1993).
- 7) N. Bernard, Th. Hofmann, B. L. Fontaine, Ph. Delaporte, M. Sentis, and B. M. Forestier, "High repetition rate spiker-sustainer XeCl laser," Appl. Phys. B, B62, 431-435(1996).
- 8) O. Uteza, Ph. Delaporte, B. Fontaine, B. M. Forestier, M. L. Sentis, I. Tassy, and J. P. Truong, "Acoustic wave origin in excimer lasers," Appl. Phys. B, B64, 531-537(1997).
- 9) P. Oesterlin, W. Muckenheimer, and D. Basting, "High power excimer laser : First results," Proc. SPIE, 1023, 51-54(1988).
- 10) D. Basting, P. Oesterlin, W. Mückenheimer, H. J. Kahlert, and U. Brinkmann, "Excimer laser in the kilowatt range," Proc. SPIE, 1041, 193-195(1989).
- 11) P. Oesterlin and D. Basting, "EUREKA's excimers" Phys. World, 3, 43-45(1990).
- 12) E. Müller-Horsche, P. O. Oesterlin, and D. Basting, "High power excimer lasers," Proc. SPIE, 1225, 142-146(1990).
- 13) E. Müller Horsche, P. Oesterlin, and D. Basting, "Recent progress towards multikilowatt output," Proc. SPIE, 1503, 28-39(1991).
- 14) H. Frowein and D. Basting, "High power (500 W) excimer laser project," Proc. SPIE, 1810, 364-367(1992).
- 15) H. M. von Bergmann, G. L. Bredenkamp, and P. H. Swart, "High repetition rate high power excimer lasers," Proc. SPIE, 1023, 20-24(1988).
- 16) H. M. von Bergmann and P. H. Swart, "Industrial excimer and CO₂ TEA lasers," Proc. SPIE, 1397, 63-66(1990).
- 17) R. J. Winfield, J. M. Green, J. Fieret, K. Hawkins, R. Heath, and M. R. Osborne, "Pulse power for the CHIRP XeCl laser," Proc. SPIE, 1046, 98-105(1989).
- 18) J. Fieret, "Aerodynamic aspect of a corona preionized high repetition frequency excimer laser," Proc. SPIE, 1225, 122-130(1990).
- 19) J. Fieret, G. M. Green, R. Heath, M. A. O'key, M. R. Osborne, S. J. Osbourn, A. F. Taylor, and R. J. Winfield, "Review of the multi-kilohertz performance of the CHIRP laser and components," Proc. SPIE, 1503, 53-61(1991).

- 20) J. Fieret, R. Heath, A. Lawrence, M. R. Osborne, S. J. Osbourn, T. Stamatakis, and R. J. Winfield, "The CHIRP II high-power excimer laser," *J. Modern Optics*, 41, 1179-1192(1994).
- 21) R. V. Arutyunyan, V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, Yu. B. Kiryukhin, and A. N. Morozov, "Electrode effects in a pulse periodic excimer laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 16, 1589-1592(1986).
- 22) V. M. Borisov, A. Yu. Vinokhodov, and Y.B.Kiryukhin, "Output energy evolution effects in a pulse periodic XeCl excimer laser with an average power of 400 W," *Sov. J. Quantum Electron.*, 17, 595-598(1987).
- 23) A. Ishii, Y. Okita, K. Yasuoka, T. Tamagawa, S. Nakagawa and I. Ohshima, "Uniform field electrodes for high-power and high-repetition TEA-CO₂ lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, 88, (1993)
- 24) 石井 彰, "放電励起式ハルスレーザの大出力高繰返し化に関する研究," 東京工業大学博士論文, (1995).
- 25) A. Ishii, K. Yasuoka, Y.Okita T.Tamagawa, and T. Tamagawa, "3 kHz XeCl excimer laser using newly developed electrode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, 2324--2328(1995).
- 26) E. A. Stappaerts, "A novel analytical design method for discharge laser electrode Profiles," *Appl. Phys. Lett.*, 40, 1018-1019(1982).
- 27) T. Hermsen, "Note on the design of electrode profiles for discharge lasers," *Optics Commun.*, 64, 59, (1987).
- 28) M. M. Turner, "Modeling the self sustained, discharge excited XeCl laser in two dimensions," *J. Appl. Phys.*, 71, 2113-2122(1992).
- 29) M. M. Turner, "Relations between preionization density distribution, electrode design, and efficiency in high-pressure discharge-excited gas lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 63, 2866-2868(1993).
- 30) F. Flora and L. Mezi, "New technique for compact discharge electrodes design," *Rev. Sci. Instrum.*, 65, 3639-3645 (1994).
- 31) P. Canarelli, M. L. Sentis, P. Ch. Delaporte, B. L. Fontaine, and B. M. Forestier, "Acoustic waves damping experimental study in x-ray preionized high repetition rate XeCl," *Proc. SPIE*, 1278, 77-87(1990).
- 32) Ph. Delaporte, B. Fontaine, B. Forestier, and M. Sentis, "Fast flow gasdynamics effects in high pulse repetition rate excimer lasers," *Proc. SPIE*, 1397, 485-492(1990).
- 33) A. Holmzwarth, J. Griebisch, and P. Berger, "Theoretical and experimental investigations on pressure wave reflections and attenuation in high power excimer lasers," *Proc. SPIE*, 1503, 98-109(1991).
- 34) A. Holzwarth, P. Berger, and H. Hüger, "Shock propagation and attenuation in high power excimer lasers," *Proc. SPIE*, 1810, 174-179(1992).
- 35) S. Kosugi, K. Maeno, and H. Honma, "Effects of xenon gas on generation and propagation of shock waves in the cavity of excimer laser," *Proc. SPIE*, 1810, 217-220(1992).
- 36) J. P. Truong, M. L. Sentis, P. Delaporte, B. Forestier, B. Fontaine, O. Uteza, and Y. Tassy, "Efficient acoustic wave damping in a high pulse repetition rate XeCl laser," *Proc. SPIE*, 1810, 430-434(1992).
- 37) O. Uteza, Ph. Delaporte, B. Fontaine, B. M. Forestier, M. L. Sentis, I. Tassy, and J. P. Truong, "Acoustic wave origin in excimer lasers," *Appl. Phys. B*, B64, 531-537(1997).
- 38) H. Hokazono, K. Midorikawa, M. Obara, and T. Fujioka, "Theoretical analysis of a self sustained discharge pumped XeCl laser," *J. Appl. Phys.*, 56 680-690(1984).
- 39) M. Maeda, A. Takahashi, T. Mizunami, and Y. Miyazoe, "Kinetic Model for Self Sustained Discharge XeCl Lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, 1161-1169(1982).

- 40) E. Kannari, W. D. Kimura, and J. J. Ewing, "Comparison of model prediction with detailed species kinetic measurements of XeCl laser mixtures," *J. Appl. Phys.*, 68, 2615-2631(1990).
- 41) 電気学会: 放電ハンドブック, p-12.
- 42) R. S. Taylor, "Preionization and discharge stability study of long optical pulse duration UV-preionized XeCl lasers," *Appl. Phys. B*, B41, 1-24(1986).
- 43) V. M. Babinskii, P. M. Golovinskii, A. M. Razhev, and A. I. Shchedrin, "Dependences of the plasma parameters and output energy of excimer lasers on the Xe content in an He/Xe/HCl mixture," *Sov. J. Quantum Electron.*, 18, 1444-1449(1988).
- 44) 後藤達美, 実野孝久, 中島信昭, 内田 裕, 中村賢治, 菊池理一, 堀口至朗, 篠田宣一, 酒井洋輔, "エキシマレーザのガス劣化と放電不安定化機構," 第39回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29p-D-15, 888(1992).
- 45) A. N. Adkhamov, B. A. Azimdzhanov, T. U. Arslanbekov, V. I. Mikhailov, A. N. Obichki, I. M. Ternovskii, and V. E. Chekalin, "Influence of hydrogen on the characteristics of an excimer XeCl laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, 18, 72-73(1988).
- 46) 内田 裕, 佐藤三郎, 後藤達美, "XeClエキシマレーザ-媒質ガス中の塩化水素濃度変化の定量測定-水素添加効果-, " 第37回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-L-4, 847(1990).
- 47) 佐藤三郎, 内田 裕, 後藤達美, "XeClエキシマレーザ-媒質ガス中の塩化水素濃度変化の定量測定, " 第37回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-L-3, 847(1990).
- 48) R. S. Taylor and K. E. Leopold, "Transmission properties of spark preionization radiation in rare-gas halide laser gas mixes," *IEEE J. Quantum Electron.*, 31, 2195-2207(1995).
- 49) R. Babcock, I. Liberman, and W. D. Partlow, "Volume ultraviolet preionization from bare sparks," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-12, 29-34(1976).
- 50) J. W. Gerritsen and G. J. Ernst, "High-pressure behaviour of an x-ray preionized discharge pumped XeCl laser," *Appl. Phys. B*, B46, 141-146(1988).
- 51) S. J. Scott, "Experimental investigations on an x-ray preionized test bed," *J. Appl. Phys.* 64, 537-543(1988).
- 52) T. Letardi, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Hermsen, and C. E. Zheng, "Study of a 10-liter active volume, x-ray preionized XeCl discharge laser system," *Proc. SPIE*, 1023, 30-37(1988).
- 53) T. Letardi, P. Di Lazzaro, G. Giordano, and C. E. Zheng, "Large area x-ray preionizer for electric discharge laser," *Appl. Phys. B*, B48, 55-58(1989).
- 54) M. Steyer, K. A. Stankov, H. Mizoguchi, B. Outang, and F. P. Schäfer, "Compact, wide aperture x-ray preionized XeCl laser with high specific optical power," *Appl. Phys. B*, B49, 331-337(1989).
- 55) M. L. Sentis, Ph. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, "Parametric studies of x-ray preionized discharge XeCl laser at single shot and at high pulse rate frequency(1 kHz)," *J. Appl. Phys.* 66, 1925-1930(1989).
- 56) B. Fontaine, B. Forestier, Ph. Delaporte, and P. Canarelli, "Pulse repetition frequency effects in a high average power x-ray preionized excimer laser," *Proc. SPIE*, 1132, 64-72(1989).
- 57) H. Mizoguchi, A. Endoh, J. Jethwa, and F. P. Schäfer, "10 × 10 cm² aperture x-ray preionized discharge pumped KrF excimer laser," *Proc. SPIE*, 1278, 69-76(1990).
- 58) P. Canarelli, M. L. Sentis, P. Ch. Delaporte, B. L. Fontaine, and B. M. Forestier, "Acoustic waves damping experimental study in x-ray preionized high repetition rate XeCl," *Proc. SPIE*, 1278, 77-87(1990).

- 59) J.-M. Hueber, B. L. Fontaine, Ph. C. Delaporte, B. M. Forestier, and M. L. Sentis, "Small volume long pulse x-ray preionized XeCl laser with double discharge and fast ferrite magnetic switch," *Optics Commun.*, **85**, 237-240(1991).
- 60) J. M. Hueber, B. L. Fontaine, M. N. Kobhio, Ph. C. Delaporte, B. M. Forestier, and M. L. Sentis, "Parametric study of small volume long pulse x-ray preionized XeCl laser with double discharge and fast magnetic switch," *Proc. SPIE*, **1503**, 62-70(1991).
- 61) V. V. Atezhnev, S. R. Belov, V. S. Bukreev, S. K. Vartapetov, A. N. Zhukov, I. T. Ziganshin, A. M. Prokhorov, A. E. Soldatkin, and Y. D. Stepanov, "Excimer laser with sealed x-ray preionizer," *Proc. SPIE*, **1503**, 197-199(1991).
- 62) T. Letardi, H. Fang, and S. Fu, "Theoretical modeling of an x-ray preionized self-sustained XeCl laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1647-1652(1992).
- 63) S. J. Scott, "Development of a long life, 2 kHz repetition rate x-ray preionizer," *Appl. Phys. B*, **B56**, 201-208(1993).
- 64) F. A. van Goor, "Fast rise time x-ray pre-ionization source using a corona plasma cathode," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26**, 404-409(1993).
- 65) M. S. Pronko, "Controlling output gain uniformity by spatial variation of the x-ray preionization in a large-aperture discharge-pumped KrF amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 2147-2156(1994).
- 66) F. A. van Goor, M. Trentelman, J. C. M. Timmermans, and W. J. Witteman, "Improved x-ray switched XeCl laser," *J. Appl. Phys.*, **75**, 621-623(1994).
- 67) S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Hermsen, T. Letardi, G. Schina, and C. E. Zheng, "Parametric study of an x-ray preionizer with plasma cathode," *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 315-322(1994).
- 68) V. P. Konovalov, J. Bretagne, and G. Gousset, "On the distribution of positive ions in the cathode region of a gas discharge," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **25**, 1073-1079(1992).
- 69) A. Belasri, J. P. Boeuf, and L. C. Pitchford, "Cathode sheath formation in a discharge-sustained XeCl laser," *J. Appl. Phys.*, **74**, 1553-1567(1993).
- 70) L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and I. V. Filyugin, "Fast ionization waves under electrical breakdown conditions," *Phys. Uspekhi*, **37**, 247-268(1994).
- 71) E. B. Gordon, O. S. Rzhavskii, and V. V. Khmelenko, "Feasibility of the construction of an electric-discharge excimer laser with a condensed rare gas as the active medium," *Quantum Electron.*, **24**, 209-215(1994).
- 72) H. Akashi, Y. Sakai, and H. Tagashira, "Modeling of a self-sustained discharge-excited ArF excimer laser: the influence of photo-ionization and photodetachment by laser light on the discharge development," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 445-451(1995).
- 73) I. Odrobina and M. Cernák, "Numerical simulation of streamer-cathode interaction," *J. Appl. Phys.*, **78**, 3635-3642(1995).
- 74) R. Dreiskemper, G. Schröder, and W. Böttcher, "Light emission during cathode sheath formation in preionized high-pressure glow discharges," *IEEE Transactions Plasma Sci.*, **23**, 180-187(1995).
- 75) A. N. Malinin, L. L. Shimon, V. M. Dobosh, and B. Ya. Khomyak, "Formation of negative ions in gaseous mixtures used as the active media in XeCl lasers," *Quantum Electron.*, **25**, 1158-1161(1995).
- 76) A. V. Dem'yanov, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, M. Capitelli, and S. Longo, "Influence of vibrational kinetics of HCl on the growth of microinstabilities and the characteristics of an electric-discharge XeCl laser under inhomogeneous preionization conditions," *Quantum Electron.*, **25**, 645-654(1995).

- 77) M. Makarov, "Effect of electrode processes on the spatial uniformity of the XeCl laser discharge," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 1083-1093(1995).
- 78) M. Makarov and Y. Bychkov, "The dynamics of XeCl discharge contraction," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29**, 350-363(1996).
- 79) O. Lamrous, A. Gaouar, and M. Yousfi, "Zero-dimensional hybrid model for analysis of discharge excited XeCl lasers," *J. Appl. Phys.*, **79**, 6775-6784(1996).
- 80) Yu. B. Golubovskii, S. U. Nisimov, and I. A. Porokhova, "Self-consistent mechanism for sustaining ionization waves in a low-pressure discharge," *Tech. Phys.*, **42**, 145-151(1997).
- 81) V. M. Borisov, A. V. Dem'yanov, and Yu. B. Kiryukhin, "Theoretical and experimental investigations of the growth of a large-scale instability in the discharge of an XeCl laser with UV preionization," *Quantum Electron.*, **27**, 23-28(1997).
- 82) A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka, and W. Ziemlich, *J. Appl. Phys.*, **71**, 3515 (1992).
- 83) H. Endert, R. Pätzelt, and D. Basting, "Excimer laser: a new tool for precision micromachining," *Opt. and Quantum Electron.*, **27**, 1319-1335(1995).
- 84) D. Bäuerle, "Laser chemical processing: recent developments," *Appl. Sur. Sci.*, **106**, 1-10(1996).
- 85) T. J. Jackson and S. B. Palmer, "Oxide superconductor and magnetic metal thin film deposition by pulse laser ablation; a review," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 1581-1594(1994).

第7章 結論

ガスレーザの実用化を目指した研究開発に関し、長年の経験を基に技術ポイントをまとめて技術課題の洗い出しを行い、今後産業用として実用の要求がもっとも強いエキシマレーザにおいて、とくにその高繰り返し化を実現する研究過程で、実用化を目指した技術検討を試みた。この研究結果をまとめると、以下のようになる。

7.1. 本研究成果のまとめ

第1章においては、主に連続放電励起をする代表的実用ガスレーザであるアルゴンイオンレーザ、および、低封入ガス圧下で連続放電励起する CO_2 レーザと、高封入ガス圧下で高速電流立ち上がりパルス放電励起をする赤外波長域TEA CO_2 レーザの実用化研究開発などを基に、諸実験データを示してガスレーザに関し実用化で重要な技術ポイントを明確化した。一方、応用側からは、今後紫外域以下の短波長光による光化学反応を使うプロセス応用の要求が強くなり、実用化が有望となってきた。これに応えるものとして、高効率で大出力が得られるエキシマレーザが、もっとも適することを示したが、従来の連続動作レーザと違うのは、TEA CC_2 レーザと共通する高封入ガス圧下で動作させることである。したがって、放電の安定な点弧と持続が技術的に難しく、これがエキシマレーザ実用化においてもっとも重要な技術課題になるが、さらに実用化に伴う諸課題なども合わせまとめた。

第2章では、産業用として実用化するには、高信頼性は言うまでもないが、さらに高生産性・経済性が要求されるので、実用に耐える高繰り返しエキシマレーザの開発を目指すこととし、これに向けた諸基礎研究を行った。その結果、繰り返し数をkHz台に上げてゆくと、局所的な放電集中が顕著となってレーザ出力が急激に低下し、これが封入ガスの構成と循環条件とに強く依存することが分かり、それらの要因解明を試みた。これには、kHz台において正確で再現性の高い諸実験データを基に、各種励起・荷電粒子の寿命に注目し検討を行った。高繰り返し放電の点弧では、パルス相互の時間間隔がきわめて短くなるので、電離されやすく長寿命の荷電子を生成するXeの関わりが大きいことなどの推論を示し、できるだけパルス間の相互作用が少なく、レーザ出力が大きい動作条件を明らかにした。この結果、高繰り返し動作時における放電条件を最適化することにより、これまでに報告されている最高繰り返し数の5kHz動作ができる見通しを示して、実際の装置設計値を明らかにした。

第3章では、前章の結果に基づき、第一段階として、繰り返し数2kHz、平均出力100Wを目指し、ガス流速100m/s以上が得られる高吐出圧力軸流プロアを組み込んだチャンバを製作し、安定な2.2kHz、110W、および短時間では4kHz、135Wレーザ発振動作の実証結果を示した。安定な動作域では、1時間程度の連続動作試験を繰り返し行い、ほぼ一定出力状態が維持できることを確認できた。これより、最終目標とする5kHz、500Wレーザ動作を実証するための装置設計ができる諸技術資料を明らかにした。

第4章では、実用性の高い、高繰り返し大出力エキシマレーザ装置開発を目標とし、ガス循環、チャンバ材料、予備電離、封入ガス設定条件など諸要素部品、要素技術の開発と、それらの総合性能実証について詳細結果を示した。高繰り返し化には、放電部のガス流速を上げて安定な放電を点弧させることが必須で、ガス循環チャンバの設計がポイントとなるため、ガス流路の低損失化設計と、高吐出圧力で大流量の高速回転軸流プロアおよび高トルク磁気カップリングの開発を行い、性能を確認した。これは、ガス流速分布の均一性、放電加熱でのガス乱れに対する復元性ともに優れ、高繰り返しパルス放電に適した特性を持っており、荷電粒子などの放電生成物やガス乱れが迅速に除去できることを明らかにした。

一方、ガスの劣化も放電集中の原因となるので、チャンバ内部構造材からの不純ガス放出を少なくするため、Niなど諸材料の性能劣化比較試験を行って材料選定をした。この結果、再現性の高い実験データが得られ、高繰り返し化阻害原因の的確な究明と適切な対策が可能となった。そこで、最終的にはこのような要素技術を組み込んで高繰り返しモデル装置を製作し、総合的にまだ報告例のないレーザー出力5 kHz, 500 W以上を実証し、実用化の可能性を明らかにした。

第5章では、エキシマレーザーの高繰り返し動作において、実用化の決め手となるもう一方の要素技術が、電源に組み込まれるスイッチング素子であるとし、この開発結果を示した。従来は、サイラトロンが主に使われているが、動作時間と共に特性劣化が著しいため、独自の大電力高速半導体スイッチ素子MAGTを開発して長寿命化を図った。素子構造では、高耐圧大電流素子に特有な深い拡散層の制御など低損失化に有利な諸微細セルパターン加工条件を確立し、大電流・高速立ち上がり・高耐圧化を同時実現させた。また、レーザー駆動には、これを多段に直列接続するので、各素子の保護、同時ターンオン、電圧分担均等化など駆動回路系についても新技術開発を行い、比類のない高速半導体スイッチパルス電源を実現させた。このパルス駆動電源は、5 kHzにおいてもサイラトロン電源と同等以上のスイッチング機能を持つことが実証できた。しかも動作の安定性では、サイラトロン電源よりかなり優れた性能を持つことも実証でき、エキシマレーザー実用化を加速する上で決定的ポイントとなることを示した。

第6章では、高繰り返しエキシマレーザー装置について、海外諸研究機関における開発状況を示し、上記研究開発結果のポイントを整理すると共に、本格的実用化の課題を示して技術的位置付けをした。とくに、高繰り返し動作では、残留荷電子が放電状態に大きな影響を与えると推察されるので、そのシミュレーションを試み、実験結果とよく一致することを明らかにした。また、最近の研究報告も参考にして、有望な応用分野を視野に入れた実用化の方向付けをした。

7.2. 高繰り返しエキシマレーザー実用の展開

エキシマレーザーは、装置技術において、イオンレーザー、CO₂レーザーなど他の実用ガスレーザーと比較し、基本的な放電機構がよく解明されていないこと、ガス条件の安定維持が難しいことなどで、まだ完成度は低く、いくつかの本質的研究課題が残されている。このため、海外でも大規模な研究開発が行われており、また国内でも、通産大プロジェクトの一環として、高性能化を目指した大規模な開発が進められた。この成果として、実用性は飛躍的に向上してきた。とくに高繰り返し化は、実用には不可欠な技術であり、応用技術側からの関心も高く、本研究開発で飛躍的性能向上を実証した。しかし、一方ではまだ多くの技術課題が残されていることも明らかとなった。そこで、この高繰り返し化について今後の展開を述べる。

まずXeClエキシマレーザーでは、レーザー励起効率の低下は避けられないが、Xe混合比を下げ、Heバッファの低い全ガス圧下で動作させれば高繰り返しが可能である。このような動作条件では、実用という観点から、ガス循環のプロア入力が大幅に低減され総合効率は上がり、チャンバは小型で安価となる。また、Heも安価でランニングコストが低減できるなど多くの利点があるので、この方向で実用を進めるのが有利と思われる。

一方、従来のUV予備電離は多くの問題を抱えており、機能の限界も明らかになってきて。これに代わるものとして、実用性の高いX線予備電離方式による性能実証結果を示した。X線利用効率がまだ低いなどの問題もあるが、その改良は比較的容易と推測され、放電の安定化は飛躍的に改善されると期待できる。したがって、今後はこの開発を主体にして検討するのが良いと思う。

また、電源の半導体スイッチ化については、本開発では直列接続の個数が多く大型で高価ともなるが、実際の製品ではこれらの問題は解決される。これで、電源保守はほとんど不要となるなど、kHz台の高繰り返し装置における実用性向上への寄与は大きく、新たな応用の展開も可能となろう。

繰り返し数5 kHzを越える動作については、充電電源の性能も限界となり、安定動作の可否は確認できなかったが、5 kHzにおいても、なお繰り返し数を上げた場合のレーザー平均出力が直線的に増大している特性から、電源の容量向上を図れば、これを越える動作は可能と推察される。長時間動作

は、サイラトロンの安定性が主因になっており、残念ながら実証できないが、高速半導体スイッチ化とガス再生器の使用により、比較的容易に実現できると思われる。

応用技術では光化学反応を使うことで、現状ではプロセスの制御が難しく実績が乏しい。このため、装置の性能に対する要求ポイント、仕様を決めて専用機設計をするのがまだ難しい状況にある。しかし、実用性の高いkHz級の高繰り返し装置実現の見通しが得られたので、今後、専用装置化により応用の実績を積み上げることで、応用技術開発での問題点を明らかにすることが有効と思われる。現在このような開発は、CO₂、YAGレーザーに続き、産業分野での実用化を目指して本格化しており、この成果が、まさに21世紀の期待を最初に飾るものと確信している。

謝辞

本研究は、株式会社 東芝において行われたものであるが、本論文の作成に際しては、基本構成と研究の位置付けについて、貴重な御意見、御指導を戴きました名古屋大学 後藤俊夫教授に、また研究内容の細部にわたる御検討と御助言を戴きました、同大学 河野明廣教授、高村秀一教授に厚く感謝致します。

また、本研究の目標完遂にもっとも大きな障壁となった高繰り返し放電の安定化において、実験・理論の両面で有意義な討論、御助言に多大の貴重な時間・資料等を提供して下さいました、大阪大学 實野孝久助教授、北海道大学 酒井洋輔教授、長岡技術科学大学 八井 淨教授、佐賀大学 山辺長兵衛教授、さらに、今なお可視短波長域ではもっとも安定かつ高光品質で貴重なイオンレーザの性能向上に、実験・理論支援を戴いた東京大学 神谷武志教授、小林重昭先生に深く感謝致します。

本研究では、実用化をもう一つの目標としており、これにはレーザ専門技術と共にガス循環、放電、材料、電源など諸要素技術の集積化が必要である。したがって、社内各専門技術部門の一体的協力の下にこれを進め、多数の部門長、担当研究者が関与協力し達成した成果であり、この関係各位と、主要メンバーで、現佐賀大学 佐藤三郎助教授、東京工業大学 安岡康一助教授にも改めて感謝致します。

この主要部分を成す高繰り返しエキシマレーザに関しては、通商産業省工業技術院の産業科学研究開発制度に基づき実施されている「超先端加工システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から超先端加工システム技術研究組合への委託事業により得られた成果の内容を含むものである。

また、私事ではあるが、執筆中は背後で心安らぐ支えをし、共に結語を目にすることなく急逝した家内美智子の霊前に、我が精魂を添えてこれを捧げたい。

論文目録

氏名 後藤達美

(発表した論文)

論文題目	公表の方法及び時期	著者
I. 学術誌等		
1. Power enhancement for argon II narrow tube lasers by a transverse magnetic field.	Appl. Phys. Lett., Vol. 46, No. 10, 925-927(1985).	S. Kobayashi T. Kamiya, T. Hayashi, T. Goto
2. レーザ出力の均一化デバイスとその応用.	レーザー研究, Vol. 17, No. 5, 371-385(1988).	岩崎賢二, 後藤達美, 林 俊治, 清水 進
3. Electron density measurements in UV-preionized XeCl and CO ₂ laser gas mixtures.	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 28, No. 11, 2219-2222(1989).	S. Takagi, S. Sato, T. Goto
4. Double-pulse operation in XeCl excimer laser for simulation of high repetition-rate performance.	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 6, 1108-1111(1990).	S. Takagi, N. Okamoto S. Sato, T. Goto
5. Effects of H ₂ and CO additives on the O ₂ accumulation in the TEA CO ₂ laser.	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 7, 1266-1269(1990).	Y. Uchida, S. Oukuma S. Sato, T. Goto
6. 2.5 kHz high repetition rate XeCl excimer laser.	J. Appl. Phys., Vol. 68, No. 11, 5927-5929 (1990).	S. Takagi, N. Okamoto K. Kakizaki, S. Sato, T. Goto
7. Square and uniform laser output device : theory and applications.	Appl. Optics, Vol. 29, No. 12, 1736-1744 (1990).	K. Iwasaki, T. Hayashi T. goto, S. Shimizu
8. エキシマレーザ放電の密度揺らぎ測定.	電気学会論文誌A, Vol. 111-A, No. 4, 283-290(1991).	高木茂行, 柿崎弘司 後藤達美, 山部長兵衛 堀井憲爾
9. 高繰返しエキシマレーザの開発 - 3 kHz, 135 W 動作 -.	レーザー研究, Vol. 20, No. 2, 91-97(1992).	高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美
10. 高繰返しエキシマレーザの開発 (II) - Xe 分圧低減による 4 kHz, 200 W 動作 -.	レーザー研究, Vol. 21, No. 5, 566-576(1993). <研究業績賞受賞>	高木茂行, 柿崎弘司, 岡本 昇, 佐藤三郎, 後藤達美
11. 高繰返しエキシマレーザにおけるレーザ出力のガス流速依存性.	電気学会論文誌A, Vol. 114-A, No. 6, 445-450(1994).	柿崎弘司, 高木茂行, 佐藤三郎, 後藤達美
12. 5 kHz high repetition rate and high power XeCl excimer laser.	Rev. Sci. Instrum., Vol. 66, No. 11, 5162-5164(1995).	T. Goto, K. Kakizaki, S. Takagi, N. Okamoto, S. Sato, S. Kosugi, T. Ohishi

論文題目	公表の方法及び時期	著者
13. Design concept and performance considerations for fast high power semiconductor switching for high repetition rate and high power excimer laser.	Rev. Sci. Instrum., Vol. 68, No. 7, 2658-2665(1997).	T. Goto, K. Kakizaki, S. Takagi, S. Satoh, T. Shinohe, H. Ohashi, F. Endo, K. Okamura, A. Ishii, T. Teranishi, K. Yasuoka
14. Development of key components and technologies for high repetition rate and high power excimer laser.	Rev. Sci. Instrum. (投稿済み)	T. Goto, S. Takagi, K. Kakizaki, S. Satoh, S. Kosugi, T. Ohishi, Y. Kanazawa, A. Ishii, T. Teranishi, K. Yasuoka, T. Shinohe, H. Ohashi, F. Endo, K. Okamura
II. 国際会議		
1. Highly efficient argon ion laser.	International Conf. Laser'84, Digest, (1984). Proc. International Conf. Laser '84, 280-282(1984).	T. Goto, T. Hayashi, S. Kobayashi, T. Kamiya
2. High repetition rate excimer laser.	Conf. on Laser and Electro Optics(CLEO)'89, Technical Digest, WF27, 192-193(1989).	S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, T. Goto
3. Laser power saturation in ultra-high repetition rate operation of a XeCl excimer laser.	Conf. on Laser and Electro Optics(CLEO)'90, Technical Digest, CTHB3, 348-349(1990).	S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, T. Goto
4. The outline of AMMTRA's R&D.	Int. Conf. on LASER '90, Digest, (1990). <Invited>	T. Goto
5. 2.5 kHz high repetition rate XeCl excimer laser.	8th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers(GCL'90), Digest, (1990). Proc. SPIE, 1397, 55-58(1990).	K. Ishikawa, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato, T. Goto
6. Ultrahigh repetition rate and high-power XeCl excimer laser.	Conf. on Laser and Electro Optics(CLEO)'92, Technical Digest, 12, CTuT6, 214-215 (1992). <Invited>	T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato
7. Output characteristics of ultra-high repetition rate and high power XeCl excimer laser.	9th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Laser(GCL)'92, Digest, WdEP4 (1992). Proc. SPIE, 1810, 376-381 (1992).	T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato
8. Discharge-pumped excimer laser with high-speed and low temperature gas flow.	Proc. SPIE, 1810, 418-421 (1992).	G. Imada, H. Nakamura, T. Komesu, T. Honna, W. Masuda, K. Masugawa, K. Yasui, S. Satoh, T. Goto, K. Yasuoka, T. Tamagawa

論文題目	公表の方法及び時期	著者
9. Breakdown characteristics in atmosphere by TEA-CO ₂ laser.	9th Int. symposium on Gas Flow and Chemical Laser '92, Digest, ThGP27,(1992). Proc. SPIE, 1810, 671-674 (1992).	K. Yasui, K. Masugawa, T. Kuroda, Y. Ohmomo, G. Imada, S. Satoh, T. Goto, K. Yasuoka, T. Tamagawa
10. Performance characteristics of high repetition rate excimer laser.	Proc. Laser Advanced Materials Processing (LAMP)'92, 165-169(1992).	K. Kakizaki, N. Okamoto, S. Takagi, S. Sato, T. Goto
11. 4 kHz excimer laser.	Int. Conf. on LASER '92, Technical Digest, TL.4, (1992). <Invited>	T. Goto, S. Takagi, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Sato
12. High-repetition-rate XeCl excimer laser.	Proc. 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials, Digest, 165-169(1993).	S. Satoh, N. Okamoto, K. Kakizaki, S. Takagi, K. Ishikawa, T. Goto
13. Key technologies for high repetition rate excimer lasers.	23rd Workshop of the Int. school of Quantum Electronics (Nov. 1997). <invited (予定)>	T. Goto
III. その他		
関連国内学会発表 107件		

