

JAERI-M  
7809

Qスイッチレーザ光によるDIVAプリズマ  
中への金属不純物注入

1978年8月

山内 俊彦・永見 正幸・仙石 盛夫・熊谷 勝昭

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

Qスイッチレーザー光によるDIVAプラズマ中への金属不純物注入

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

山内 俊彦・永見 正幸

仙石 盛夫・熊谷 勝昭

( 1978年7月26日受理 )

DIVAトカマクプラズマ中における金属不純物の挙動を調べることを目的として、ルビーレーザー光を金属薄膜に照射する方法によって金属不純物の注入を行った。この報告ではルビーレーザー光を用いた金属不純物注入法に関する設計および注入量について述べる。注入された金属不純物は、金およびアルミニウムである。パイレックスガラス板に蒸着されたこれらの金属膜にルビーレーザー光を照射し金属蒸気を生成させ、更にDIVAプラズマ中に混入、浸透させる。この方法では 1.膨張する金属気体の分布が二乗余弦分布より鋭いこと、2.金属試料の蒸発量の制御が容易であること、3.金属気体の注入速度をレーザー光強度により可変できること、などの利点がある。

Metal Impurity Injection into DIVA Plasmas with a Q-switched Laser Beam

Toshihiko YAMAUCHI, Masayuki NAGAMI, Seio SENGOKU and Katsuaki KUMAGAI

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Establishment, JAERI

(Received July 26, 1978)

Metal impurity injection into DIVA plasmas with a Q-switched ruby laser beam is described. Metal materials used are aluminium and gold. The Q-switched laser beam is incident onto a thin metal film thickness about 0.2  $\mu\text{m}$  coated on pyrex glass plate surface. The metal film is vaporized by the laser beam and injected into DIVA plasma. The laser-beam injection method has advantages of sharp profile of vaporized metal, easy control of vaporized metal quantity and injection rate control of metal vapor.

Keywords: Metal-Impurity Injection, Q-Switched Laser Beam, Metal Foil, Metal Vapor, Sharpness, DIVA Plasmas, Vaporization Control

## 目 次

1. 序 言	1
2. 注入の目的および方法	1
3. 設計方法	2
3.1 試料(蒸着膜)の作成	2
3.2 レーザ発振装置	2
3.3 電子温度測定	3
3.3 全体構成図	3
4. 金属不純物の注入に関する基礎方程式	3
5. 実験結果および検討	5
5.1 注入速度の測定	5
5.2 プラズマ中への注入量特性	6
6. 結 言	9
謝 辞	10
参考文献	10

## CONTENTS

1. INTRODUCTION-----	1
2. METHOD AND PURPOSE OF METAL INJECTION-----	1
3. DESIGN OF LASER INJECTING-----	2
3.1 METAL FOIL SAMPLES-----	2
3.2 LASERS OSCILLATOR-----	2
3.3 MEASUREMENTS OF ELECTRON TEMPERATURE-----	3
3.4 ARRANGEMENTS OF THIS APPARATUS-----	3
4. BASIC FOMULA IN METAL-IMPURITY INJECTION-----	3
5. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION-----	5
5.1 MEASUREMENTS OF INJECTION VELOCITY-----	5
5.2 INJECTED QUANTITY INTO DIVA PLASMAS-----	6
6. SUMMARY-----	9
ACKNOWLEDGMENT-----	10
REFERENCES-----	10

## 1. 序 言

高温トカマク装置において重要な研究テーマの一つにプラズマ中への不純物の混入過程を調べることがある<sup>(1)</sup>。この研究はプラズマの輻射損失をできる限り減少させるために重要である。特に、金属不純物はその混入量が極く微量であっても、大きな輻射損失を伴うことは良く知られている。従って金属不純物の混入過程を明らかにすることは、トカマク炉実現のための最も重要な問題である。

金属不純物注入に関して、金属薄膜に蒸発しきい値を越えたレーザー光を照射し注入する方法は以下のような特徴を持っている<sup>(2)</sup>。

1. 蒸発し膨張する金属気体の分布は、二乗余弦分布より鋭く一次元近似が適用できる。
2. 金属試料の蒸発量は膜厚および膜面へのレーザー光照射面積で決定される。従って蒸発量の制御を膜厚あるいは照射面積を変えることにより容易に出来る。同時に重要な蒸発量のばらつきは全く見られない。
3. 蒸発した金属気体の速度はレーザー光強度を増減することにより変えることができる。
4. 金属不純物として純度の高い不純物を注入することができる。
5. 複数の金属不純物を同時に注入することができる。

## 2. 注入の目的および方法

DIVAプラズマ中へ金属不純物を注入する主たる目的は、プラズマ中での不純物の挙動（とじ込め時間や輸送現象など）を調べることである。それらを明らかにするために注入時に要求されるべき条件をあげると以下ようになる。

1. 任意の金属不純物を注入できること。
2. 金属の注入量を連続的に変えられること。
3. 金属気体の注入速度を連続的に変えられること。
4. 金属の蒸発量を容易に測定できること。
5. プラズマ中に注入した量を見積もれること。
6. 注入操作を非円形DIVAプラズマに対して複数点でできること。

以上の条件において、以下のような手段を構じた。

1. 試料はバイレックスガラス板に蒸着するため任意の金属の注入ができる。
2. 光干渉法により膜厚の均一性を調べる。膜厚は蒸着時の蒸着時間と温度、そしてレーザー光が照射され蒸発する面積は膜の前面においた円形開口により決定される。膜厚と円形開口により蒸発量を制御する。
3. 注入速度はレーザー強度を変えることにより変化させる。10<sup>8</sup>W/cm<sup>2</sup>以下のレーザー強度では中性気体が主であり、この弱電離プラズマ中の電子やイオンと同一速度で膨張する<sup>(2),(3)</sup>。

注入速度は2点間のダブルプローブの " time of flight " で決定する。

4. 蒸発量は膜厚と円形開口で決定される。膜厚を  $d$  , 円形開口の面積を  $S$  として密度を  $\rho_0$  とすれば蒸発量は

$$m = \rho_0 \times d \times S \quad g$$

となり、容易に決定される。ここで入射レーザー光の直径は円形開口より大きいとする。

5. 蒸発した金属の不純物気体はDIVAプラズマ装置の真空容器内に膨張する。任意の点にパイレックスガラス板を置いてそこまで膨張する金属気体は全て吸着するとして各点での吸着量を測定する。その測定値をその位置からさらに中に入れる金属気体の注入量とする。
6. DIVAプラズマ装置において従来ある上側の観測ボックスを取りはずし、大半径  $R=62\text{cm}$  で電子温度が測定でき、その両側  $R=56\text{cm}$  と  $R=68\text{cm}$  で金属不純物を注入できるよう構成する。蒸着基板は両方の点で注入可能な大きさの直径とする。

### 3. 設 計 方 法

#### 3.1 試料（蒸着膜）の作成

金属膜を作る蒸着基板はパイレックスガラス板（直径140mm、厚さ2mm）であり中心に回転軸へ装着するための穴（直径34mm）があけてある。この中心の穴に回転軸を通し、基板を回転軸に固定する。

蒸着用基板は蒸着装置に取り付けアルミニウムあるいは金の金属を蒸着する。金属膜の厚さは、膜の吸着性および膜が厚いとそれだけレーザー強度を高めることの必要性、パイレックス板の損傷性、金属膜が蒸発して中性気体になる必要性などから1 $\mu\text{m}$ 程度までで充分と思われる。この膜厚は光干渉法により測定する。第3.1図にレーザー光照射後の試料を示す。これには2種類の金属膜（アルミニウムと金）が蒸着されており、基板の周囲の方の白い領域がアルミニウム膜であり、中心に近い方の黒っぽい領域が金の膜である。一実験において一枚の試料を真空容器内に入れた時、一枚の試料で実験できるレーザー光の照射回数は500回以上である。（円形開口の直径を $\phi=2\text{mm}$ とした時）同図で大きい穴は直径の大きい円形開口を使用し、小さい穴は小さい直径の円形開口を使用してレーザー光を照射した場合であり、ここで最小の円形開口の直径は1mmである。

#### 3.2 レーザ発振装置

金属を蒸発させるために使用するルビーレーザー装置として、照射時間が短かく出力が強く（半値幅：20~30 nsec, レーザ強度：100 MW）従来レーザー散乱電子温度測定用に使用されてきたQスイッチ発振装置と、照射時間が長く出力が低い（発振時間：1 msec, 出力：数百 KW以下）ノーマル発振装置が準備された。Qスイッチ発振装置は最大出力エネルギーは7 J程度、



半値幅は 20 nsec, ノーマル発振装置は最大出力エネルギーは 2 J 程度, 発振時間 1 m sec の特性を持つ。ひとつにはノーマル発振装置で不純物を注入しながら, 同時に Q スイッチ発振装置で電子温度を測定することができるようにするためである。金属粒子の注入と電子温度の測定は DIVA プラズマ装置断面同一面上で行なわれる。今回は特に Q スイッチ発振装置で金属不純物の注入を行った。

### 3.3 電子温度測定

電子温度測定の場合に必要なレーザ吸収器を製作した。それを第 3.2 図に示す。この吸収器は試料板の回転軸の筒の内側に上方から装着する。反射光を極力防ぐため, 紙面上で直線偏光しているレーザ光に対し, 吸収器はブリュスター角をなし, 入射したレーザ光はそこで吸収される。一方, 電子温度測定のためのレーザ光の入射窓は従来の観測ボックスを利用する。そしてそれは金属不純物注入のために使用され, 余分なレーザ光を中から外へ通過させ, DIVA 装置の外にレーザ光を取り除くためにも利用される。

### 3.4 全体構成図

第 3.3 図に金属不純物注入実験および電子温度測定のための全体構成図を示す。同図において, 発振装置から出たレーザ光は方向変換用プリズム系を通り, 円形開口に入り, 平行ビームで試料に照射される。レーザ光を平行光のまま用いるのは, (1)膜の蒸発に必要なレーザ光以外の余ったレーザ光を, 下の観測ボックスの入射窓から DIVA 装置の外に出すことが容易であり, そのことにより DIVA 装置の内側の金の面を損傷しないため, (2)レーザ光を集中することによりパイレックス基板を蒸発させる可能性があるため, (3)円形開口の直径を変えることにより蒸発量を広範囲に精度よく制御することができるため, 等による。

金属不純物を打込むためのレーザ光の入射窓は上方に 2ヶ所あり, それはダイバータに近い方の  $R = 56$  cm, 遠い方の  $R = 68$  cm の位置である。金属気体の膨張速度の測定は  $R = 68$  cm の位置に取り付けられた 2組のダブルプローブで行うことができる。金属膜を取り付けた回転軸は  $R = 62$  cm の位置にあり, そこでは従来の Q スイッチレーザ光が下方から入射し電子温度が測定できる。

## 4. 金属不純物の注入に関する基礎方程式

これまでのレーザプラズマの研究の中で, 金属ターゲットにレーザ光を照射し, 生成プラズマの諸現象を調べる研究は盛んである<sup>(4)</sup>。その中で多く試みられた金属ターゲットは, 研磨された金属板であり, その表面にレーザ光を照射し金属を表面から蒸発させている。そのためレーザ光を照射し金属が蒸発した後の金属表面には不規則な穴ができ, それから求められる蒸発量の精度は悪い。また蒸発量の制御も難しい。さらに金属板からの反射光を DIVA 装置の外に

に取り出しにくい欠点がある。その反射光はDIVA装置の内側の面の金を蒸発させる可能性がある。

本装置は前にも述べたように、(1)金属面からの強い反射光が全くDIVA装置の中に入らない、(2)蒸発量が精度よく求まる、(3)多くの金属を同時に注入できる、等の特徴を持っている。

金属膜へ100MW/cm<sup>2</sup>以下のレーザー光を照射した時、金属膜はそのエネルギーを吸収して蒸発する。その時の蒸発しきい値は

$$\epsilon_{thr} = m \times (c_h \times \Delta T + \Omega_m + \Omega_e) \quad (4.1)$$

となる。上式を変形し、膜が蒸発する蒸発の速さを求めると<sup>(5)</sup>

$$V_p = I / (\rho_0 \times (c_h \times \Delta T + \Omega_e + \Omega_m)) \quad (4.2)$$

となる。ここでmは蒸発質量、 $c_h$ は比熱、 $\Delta T$ は上昇温度、 $\Omega_m$ は融解熱、 $\Omega_e$ は蒸発熱、Iはレーザー強度そして $\rho_0$ は固体の密度である。上式(4.1)式はエネルギーに対する蒸発しきい値であり、(4.2)式はレーザー強度に対する侵入速度(あるいは蒸発速度)の式を示す。(4.1)式を満足する時、mの質量の金属膜が完全に蒸発する。レーザーエネルギーが(4.1)式を越える時、金属膜は蒸発し、その膨張速度を求めることができる。金属膜が固相から液相そして気相へと蒸発過程が進んだ時、次の質量、運動量そしてエネルギー保存の式を適用できる。

$$\begin{aligned} \partial \rho / \partial t + \partial (\rho \times V) / \partial x &= 0 \\ \partial V / \partial t + (V \times \partial V / \partial x) + 1 / \rho \times \partial P / \partial x &= 0 \\ \partial (\rho \times \xi + 1/2 \times \rho \times V^2) / \partial t + \partial \{ \rho \times V (\xi + 1/2 \times V^2 + P / \rho) \} / \partial x \\ + \partial I / \partial x &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

上式を一次元相似流として解析する。計算を実行し、気体の先端の速度を求めると

$$V_0 = B \times U / C \quad (4.4)$$

となる。ここで

$$\begin{aligned} B &= \gamma \times (\gamma + 1)^2 / (\gamma - 1)^2 \\ B_1 &= \ln \{ (\gamma - 1)^2 / \{ 2 \times (\gamma + 1)^3 \} \times (B/C)^{3/2} + (\gamma - 1) / (\gamma + 1)^2 \\ &\quad \times (B/C)^{1/2} \} \\ \eta &= I / \rho_0 \times U^{3/2} \\ \alpha &= A / \rho_0 \\ C &= (B_1 - \ln(\eta / \alpha)) \end{aligned}$$

である。ところで $\xi$ は特性内部エネルギー、Pは圧力、Vは速度、 $\gamma$ は比熱比、Aは飽和蒸気

圧と密度の式の係数である。この時レーザー光は金属膜の表面上でのみ吸収され(深さ  $50 \text{ \AA}$  程度)、熱の侵入深さである約  $1 \mu\text{m}$  より小さい。それゆえ膨張速度の別解として次のことが考えられる。レーザー光照射面の背面では照射面からの熱拡散による温度上昇がある。まさに蒸発しようとしている金属膜は、高温で高密度の金属気体の真空中への膨張と考えられる。その時の膨張速度は音速の3倍程度になる<sup>(2)</sup>。

次に膨張する金属気体の角度分布特性について述べる。金属板にノーマル発振のレーザー光を照射した時、金属気体の蒸発の角度分布は余弦分布であり、Qスイッチ発振のレーザー光を使用した時は二乗余弦分布であることが報告されている<sup>(6)</sup>。この理由として、Qスイッチ発振では1発の短かいレーザー光なので、照射される前の金属表面の状態は平面である。それに対し、ノーマル発振ではレーザー光パルスがくり返し続いたため穴がだんだん深くなるとともに変形し、照射面(レーザー光吸収面)は平面でなくなる。つまりその穴のために生ずる蒸発領域の不確定さと、穴の蒸発面が膨張方向に垂直でないため方向性を失い、分布が広がると考えられる。

本研究のQスイッチ発振での金属気体の分布特性を第4.1図に示す<sup>(2)</sup>。これは円形開口の直径が6mmの時の弱電離プラズマをダブルプローブで測定した分布特性である。同図に井上氏らの論文による式から得た結果および蒸発現象として考えた理論( $\propto \cos^2 \theta$ )分布を、膨張方向  $\theta = 90^\circ$  で中心軸上の値を一致させて図示する。同図において金属粒子の分布は明らかに二乗余弦分布より鋭い分布である。また井上氏らの論文による式とはよい一致を示す。井上氏らの論文による式では、金属面に垂直な速度が大きいいため強い方向性を持つと考えられる。この原因として考えられることは

- 金属膜が蒸発する時、パイレックスガラス基板方向に蒸発時の圧力を及ぼすため、ガラス基板面に垂直に膨張する。

である。

次に金属気体の膨張速度に対する角度分布特性を考える。金属気体の密度が膨張中心の密度の  $1/10$  になる点までの速度を考慮すれば、実験結果は第4.2図となる<sup>(2)</sup>。(縦軸はレーザー光照射からプローブにプラズマが到着するまでの時間である。また円形開口の直径は6mmである。) 同図から速度分布特性は角度によらずほとんど一定の速度であると考えてよいと思われる。

## 5. 実験結果および検討

### 5.1 注入速度の測定

まずアルミニウム膜が試料の場合の注入速度を求める。理論値は(4.4)式に結合エネルギー  $\xi = 1.2 \times 10^{11} \text{ erg/g}$ 、レーザー強度  $I = 84 \text{ MW/cm}^2$ 、比熱比  $\gamma = 5/3$ 、密度  $\rho_0 = 27 \text{ g/cm}^3$ 、定数  $A = 1.7 \times 10^4 \text{ g/cm}^3$  を代入すると注入速度は

$$V_{Al, THE} = 5.2 \times 10^5 \text{ cm/sec} \quad (5.1)$$

となる。一方、実験結果は2点間のダブルプローブの" time of flight "の測定結果から求ま

る。レーザ強度  $I = 100 \text{ MW/cm}^2$  程度までのレーザ光により生成された金属気体は弱電離プラズマであるため中性気体が主で、ダブルプローブで測定できるプラズマ中の電子密度は低い。そして中性気体、イオンおよび電子の一団となったプラズマは同一速度で膨張する<sup>(2)</sup>。R=68cmの位置にあるダブルプローブで測定したアルミニウムプラズマの波形を第 5.1 図に示す。金属膜に近い方と遠い方のプローブ間距離は 15mm であるので、そのピークの時間差 ( " time of flight " ) とからアルミニウム気体の膨張速度を求めると

$$V_{Al, EXP} = 5.2 \times 10^5 \text{ cm/sec} \quad (5.2)$$

となる。ゆえに (5.1) 式と (5.2) 式はよい一致を示す。このアルミニウム気体は一定速度で進み DIVA プラズマの " scrape off " 層に達し、プラズマ中に入り、水素プラズマからエネルギーを得て電離し、プラズマの電子温度を下げるものと思われる。

一方、金の膜が試料の時の注入速度は、一定のレーザエネルギーに対し

$$\sqrt{M_{Au}/M_{Al}} = V_{Al}/V_{Au} \quad (5.3)$$

であるから、金の原子量  $M_{Au} = 197 \text{ g}$ 、アルミニウムの原子量  $M_{Al} = 27.0 \text{ g}$  および (5.1) 式の値を (5.3) 式に代入して、金の気体の膨張速度は

$$V_{Au, THE} = 1.9 \times 10^5 \text{ cm/sec} \quad (5.4)$$

となる。一方、実験結果は (5.2) 式の値を求めたのと同様にして

$$V_{Au, EXP} = 2.1 \times 10^5 \text{ cm/sec} \quad (5.5)$$

となり、(5.4) 式と (5.5) 式はよく一致している。

## 5.2 プラズマ中への注入量特性

円形開口の直径を大きくすることにより金属不純物の蒸発量を漸次増加させていった時、許される最大金属不純物の注入量は DIVA プラズマがこわれる時の量に相当する。金属不純物の注入を行ってもワンターン電圧  $V_L$  が変化しない場合、注入量の増加とともに  $V_L$  が上昇する場合、上述したようにある注入量を越えるとプラズマがこわれる場合に区別される。本研究では最初の場合、 $V_L$  が変化しない時の実験を中心に行った。たとえば、DIVA プラズマが全電子密度  $N_e = (3 \sim 4) \times 10^{18}$  個、 $V_L = 4 \sim 5 \text{ V}$  の時、アルミニウム金属不純物の蒸発量  $N_{oe} = 4.0 \times 10^{16}$  個の場合を考える。この時注入は、DIVA プラズマの放電開始から 7 msec 後に行っている。まず、 $V_L$  の時間変化を第 5.2 図(a), (b) に示す。同図(a)が注入しない時、(b)が注入した時の  $V_L$  の波形である。同図から、7 msec から 10 msec までの間で  $V_L$  は数%の上昇を示す。上述のプラズマ条件の下で、この程度の注入量まで金属不純物を注入しても  $V_L$  は不変である。同図に電流  $I_p$  の波形も示す。

次に、第 5.3 図はマイクロ波散乱で観測した DIVA プラズマのプラズマ中心における平均電

電子密度  $\bar{n}_e$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) の時間変化を 4 mm 波のフリンジ数で示す。同図において電子密度の増加分は、最大で約 8% である。

また、第 5.4 図(a), (b)は上と同時に分光測定により得られた DIVA プラズマからの放出光の時間変化である。この放出光はアルミニウムの線スペクトル A IIX を示す。同図(a)が注入しない時、(b)が注入した時の出力波形である。結局、電子密度、アルミニウムおよび金の放出スペクトルに金属不純物注入の効果明らかに検出された。以上に関して DIVA プラズマとの詳しい説明は別に発表される<sup>(7)</sup>。

次にレーザー光が金属膜に照射された時、膜から任意の距離まで蒸発量の何割が到達できるのかについて述べる。たとえば  $R = 56 \text{ cm}$  の位置での注入では、金属膜から DIVA プラズマの "scrape off" 層まで 6 cm 程度であるので、その 6 cm の位置まで膨張した金属気体が DIVA プラズマ中に実効的に入ることになる。本特性の実験方法は、バイレックスガラス板を金属膜から任意の距離に離して置き、膨張してきた金属気体は全てガラス板に吸着するとして任意の点に膨張して来る金属量の空間分布を調べた。

まず金属膜と膨張空間に関して第 5.5 図のように座標系を決める。同図で X 軸はレーザー光照射面の中心から垂直に立てた軸である。その X 軸を中心に垂直な面内に  $r$  をとる。測定した吸着金属気体の  $r$  分布特性の一例を第 5.5 図に示す。同図は多数回アルミニウム膜にレーザー光を照射し金属気体を生成した時、 $X = 25 \text{ mm}$  の位置に設置されたガラス板上に吸着したアルミニウムの量を、マイクロトメータで解析した結果である。この時の円形開口の直径は 3 mm である。点線の曲線はガウス分布に最適化した曲線である。同図で中心にくぼみがある。これは多回レーザー光を照射したため、より後に照射したレーザー光の通過光が設置されたガラス板上の吸着粒子に照射されたことによる。その結果、吸着したアルミニウムがガラス板上から再蒸発したためである。実験結果から設置されたガラス板に吸着したアルミニウムは膨張方向の X 軸と設置されたガラス板との交点を中心として対称に分布している。また第 5.6 図からその曲線の半値半巾は 3.7 mm である。アルミニウム膜から設置されたガラス板までの距離は 25 mm なのでアルミニウム気体の広がり半角は 5.0 度となる。DIVA プラズマ装置において、膜から "scrape off" 層までの距離を 6 cm とすれば、そこでのアルミニウム気体の広がり半径は  $\Delta r = 5.2 \text{ mm}$  となる。

次にアルミニウム金属膜と設置されたガラス板との距離を変化させた時、中心軸 x 軸上での吸着したアルミニウム量の距離に対する減衰特性を第 5.7 図に示す。そこで  $x = 0$  は金属膜が蒸発できず固体のままであることを示す。同図からアルミニウムの吸着量は距離とともに減衰しており、それを検討および定式化する。

金属膜の膜厚を  $d$ 、その密度を  $n_s$ 、および金属膜から設置されたガラス板までの距離  $x$  の間での金属気体の密度は一定で  $n$  とする。その時、設置されたガラス板の吸着量の分布を  $F(x, r)$  とする。まず金属気体の  $r$  方向への広がりを無視して考える。

$x$  の間にある金属気体の量は

$$n \times x = n_s \times d - F \quad (5.6)$$

となる。上式を微分して

$$d(n \times x) / dt = -dF / dt \quad (5.7)$$

となる。設置されたガラス板に接している金属気体の密度  $n$ ，その膨張速度  $v$ ，そして設置されたガラス板に衝突した金属気体は全て吸着するとすれば

$$dF / dt = n \times v \quad (5.8)$$

である。(5.8)式を(5.7)式に代入して

$$d(n \times x) / dt = -n \times v \quad (5.9)$$

となる。 $x$ は設置されたガラス板の位置を示し、一定として

$$dn / dt = -n \times v / x \quad (5.10)$$

なので

$$n = \exp(- (v/x) \times t + C) \quad (5.11)$$

となる。ここで  $C$  は積分定数である。

(5.11)式を(5.6)式に代入して

$$\begin{aligned} F &= n_S \times d - n \times x \\ &= n_S \times d - \exp(- (v/x) \times t + C) \times x \end{aligned} \quad (5.12)$$

となり、 $t = 0$  で  $F = 0$  とすれば(5.12)式は

$$F = n_S \times d \times (1 - \exp(- (v/x) \times t)) \quad \text{cm}^{-2} \quad (5.13)$$

となる。

次に金属気体が膨張する時の  $r$  方向の広がりの影響を考える。金属膜へのレーザー光の照射半径を  $r_0$ ，広がり角を半角で  $\theta$  ラジアンとする。(5.6)式において金属膜面上でのレーザー光照射面積は  $S_1 = \pi \times r^2$ ，金属膜と設置されたガラス板との間隔  $x$  における平均的面積を中間の位置  $x/2$  での面積を考えて  $S_2 = \pi \times (r + x \times \theta / 2)^2$ ，設置されたガラス板上の面積は  $S_3 = \pi \times (r + x \times \theta)^2$  となる。以上のことを考慮し(5.13)式までと同様にして解くと

$$\begin{aligned} F &= n_S \times d \times (1 - \exp(- (v/x) \times t)) \times (S_1 / S_3) \quad \text{cm}^{-2} \quad (5.14) \\ S_1 / S_3 &= 1 / (1 + x \times \theta / r)^2 \end{aligned}$$

となる。 $S_1 / S_3$  は  $x = 0$  で1であり、 $x \geq 0$  において減少函数である。ゆえに(5.14)式の  $F$  は  $x$  に対して減少函数となる。(5.14)式の計算結果を第5.7図に示す。(5.14)式から  $\lim_{\substack{x=0 \\ t \rightarrow 0}} F = n_S \times d$  なので、第5.7図の縦軸上任意目盛の値  $\delta$  は、レーザー光照射前の金属膜から求められる単位面積当りの個数に相当する。(5.14)式と第5.7図の実験結果はよい一致を示して

いる。

次に例として円形開口の直径が2.1mmの時、金属気体の注入量を求める。R = 56 cmの位置でアルミニウム不純物を注入した場合を考える。この時、全蒸発量は円形開口の直径と膜厚から

$$N_{oe} = 4.0 \times 10^{16} \text{ 個} \quad (5.15)$$

となる。

次に、アルミニウム膜面からDIVAプラズマの" scrape off "層まで6 cmである。その時、第5.7図の実験曲線と理論曲線は

$$F_{EXP}(6, 0) = 0.7 \times F_{THE}(6, 0) \quad (5.16)$$

の関係がある。ゆえに実験値として

$$F_{EXP}(6, 0) = 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \quad (5.17)$$

となる。面積 $S_3$ に吸着している全個数がプラズマ中への注入量だから

$$N_{oi} = 2.8 \times 10^{16} \text{ 個} \quad (5.18)$$

となる。

ここでアルミニウム膜の膜厚 $d = 0.2 \mu\text{m}$ 、照射面積 $S_1 = 0.031 \text{ cm}^2$ 、アルミニウム膜面から6 cm離れた位置でのアルミニウム気体の吸着面積 $S_3 = 0.92 \text{ cm}^2$ 、アルミニウム金属の密度 $\rho_0 = 2.7 \text{ g/cm}^3$  および原子量 $M = 27 \text{ g}$ とする。設置されたパイレックス板に金属気体を吸着させることにより、膜面から6 cmの位置では、蒸発した全量の少なくとも70%がDIVAプラズマに注入されることが判った。

## 6. 結 言

DIVAプラズマ装置でDIVAプラズマの不純物を研究する上で、プラズマ中に不純物を積極的に注入し、不純物とプラズマの相互作用を調べることは非常に重要な問題と思われる。そこで著者の一人がこれまで行ってきたレーザプラズマの薄膜方式(パイレックスガラス板に薄膜を蒸着したものを試料としているのでこのように名づける。)を適用し、DIVAプラズマへ注入できる装置を設計した。その結果、この方式はDIVAプラズマ注入に対し多くの長所があり、優れていると思われる。つまり、

1. 一次的に金属膜をプラズマ中に打込むことができるため、プラズマの任意の場所に照準し打込むことが可能であること。
2. 金属膜の種類は蒸着できれば何でもよく、金属膜を重ねて蒸着することにより2種類以上の金属膜を同時に注入できること。あるいはメタン気体などの気体と同時に注入ができること。

3. 金属膜を使用しているため、レーザ光照射により金属膜の厚み全体が蒸発する。そのため容易に精度よく、DIVAプラズマ中への金属気体の注入量を測定することができることをあげることができる。

また、今回の実験で得られた結論は次の通りである。

1. 金属気体の蒸発量は、DIVAプラズマの全電子密度  $N_e = (3 \sim 4) \times 10^{18}$  個、ワンター電圧  $V_L = 4 \sim 5$  V の時、不純物の量は  $N_{oc} = 4.0 \times 10^{16}$  個程度以下が  $V_L$  を変化させないために適している。
2. 金属気体の膨張速度はレーザ強度  $84 \text{ MW/cm}^2$  の時、アルミニウムで  $V_{Al} = 5.2 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 、金で  $V_{Au} = 2.1 \times 10^5 \text{ cm/sec}$  となる。そして速度の比は原子量の逆数の平方根に等しい。
3. アルミニウム金属不純物の注入による DIVA プラズマの電子密度の増加分は 1. と同じプラズマ条件の下に平均電子密度で約 8 % である。
4. 半径  $R = 56 \text{ cm}$  の位置で金属不純物の注入を行った時、蒸発した金属気体の少なくとも 70 % が DIVA プラズマ中に注入される。

## 謝 辞

本研究に対し、常に暖かい支援をしていただいた核融合研究部、森 茂部長（現在、核融合推進センター長）、プラズマ実験研究室、田中裕二室長に深謝いたします。本論文をまとめるに当り、心から御支援下さった核融合研究部、小幡行雄部長に感謝いたします。また、金属不純物注入装置を DIVA プラズマ装置に設置するに対し、多くの助言をいただいた DIVA グループリーダー 下村安夫氏に感謝いたします。さらに実験を行うに当り、計測グループリーダー 船橋昭昌氏には暖かい御配慮をいただきました。また、DIVA プラズマに注入した金属不純物イオンからの放出光の測定に関し、プラズマ実験研究室 河西敏氏の御助力を受けました。さらに装置技術管理室の方々の熱心な DIVA プラズマ装置稼働に対し感謝いたします。また、伝熱流動研究室の方々には金属膜の製作に多大な御助力をいただき感謝いたします。

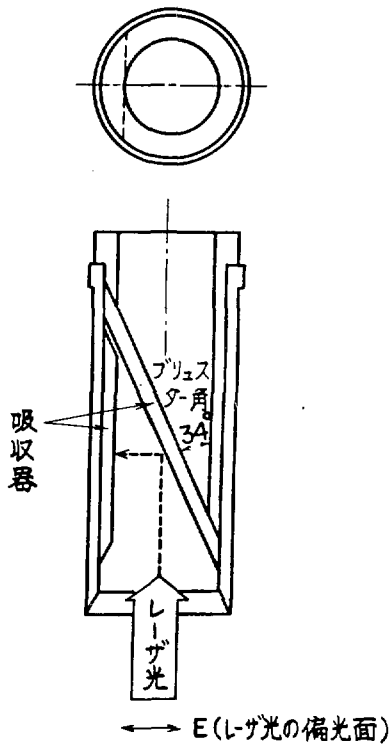
## 参 照 文 献

- (1) E. S. Marmor, J. L. Cecchi, S. A. Cohen : P. P. L., MATT-1138 (1975)
- (2) 山内, 石川, 奥田 : 電気学会論文誌, 50-A8, 55 (昭50)
- (3) F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois : Laser Handbook, 2, 1371 (1972) North-Holland
- (4) W. I. Linlor : Appl. Phys. Letters, 3, 210 (1963)
- (5) 山内, 奥田 : J. Phys. Soc. Japan, 35, 1270 (1973)
- (6) A. S. Gilmour and F. A. Giori : Thirteenth Ann. Conf. Mass Spectromet. Allied Topics, St. Louis, Missouri, 16-21 (1965)
- (7) 永見, 下村, 前田, 河西, 山内 : To be published in Nucl. Fusion, 9, (1978)

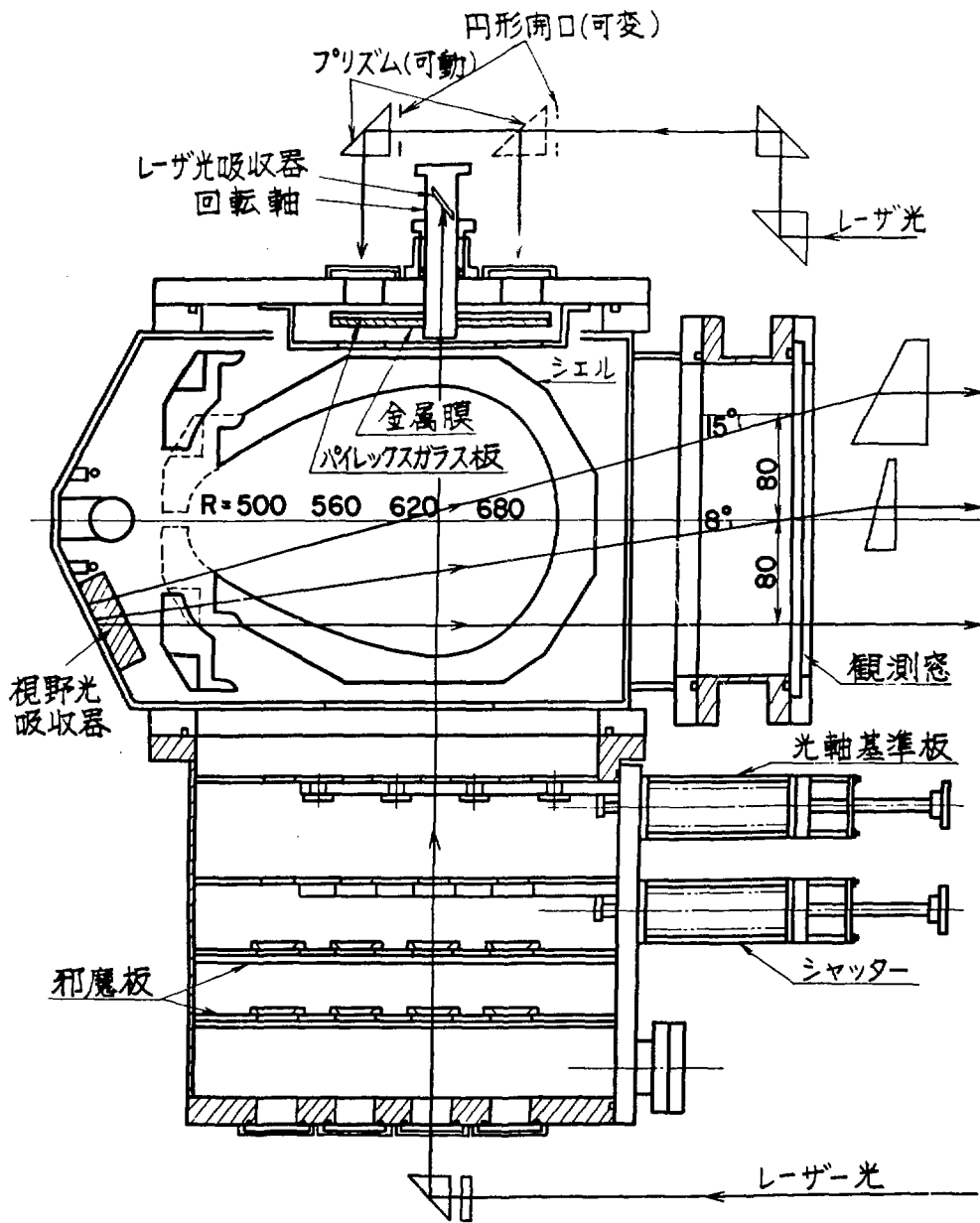




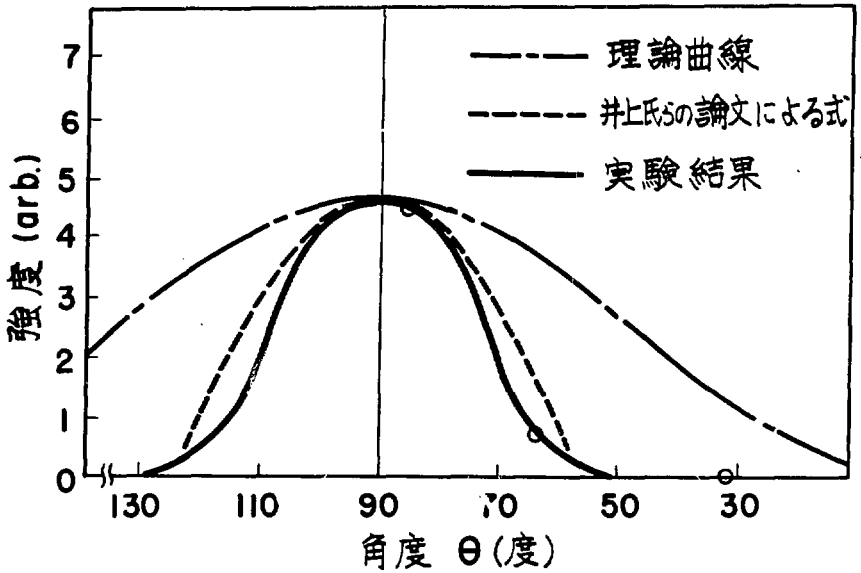
第 3.1 図 レーザ照射後のターゲット板  
 (基板：パイレックスガラス板，  
 A：アルミニウム膜，B：金膜)



第 3.2 図 電子温度測定のためのレーザー光吸収器

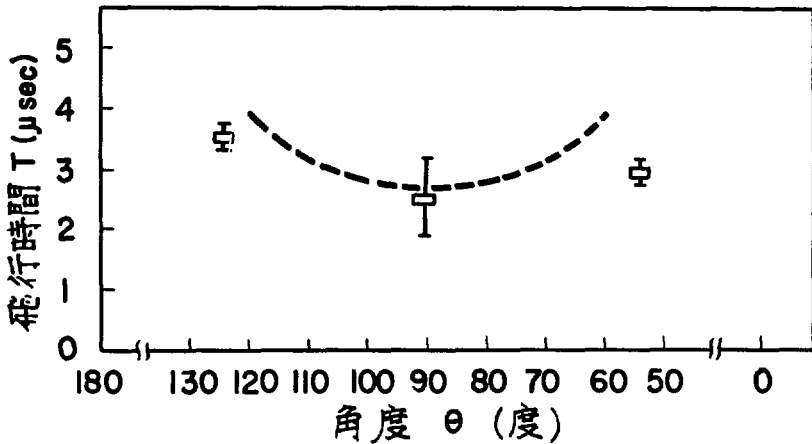


第 3.3 図 金属不純物を注入するための全体構成図



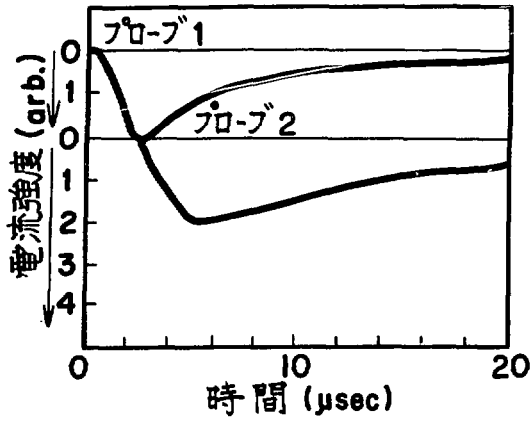
第 4.1 図 セシウムの弱電離プラズマの分布特性<sup>(2)</sup>

(一点鎖線： $\cos^2\theta$  分布，点線：井上氏らの論文による式から得た曲線，実線：実験結果，膜面からダブルプローブまでの距離：5 cm，レーザー強度：34 MW/cm<sup>2</sup>，円形開口の直径：6 mm， $\theta$ ：金属膜面とのなす角度)

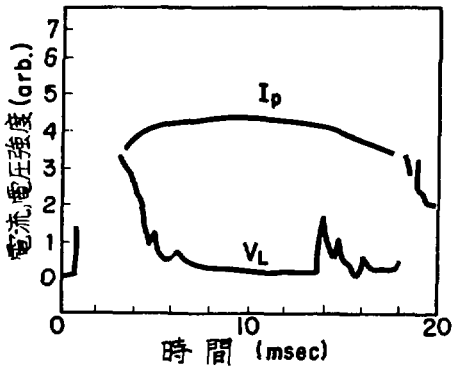


第 4.2 図 セシウムの弱電離プラズマの速度分布特性<sup>(2)</sup>

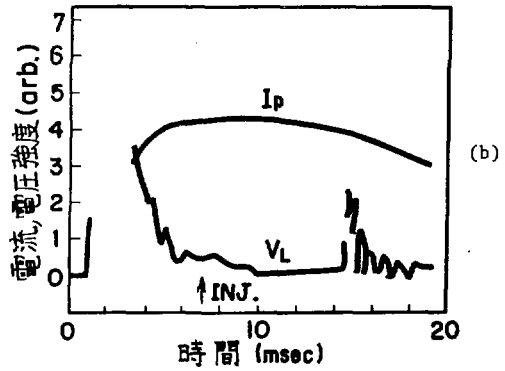
(点線：井上氏らの論文による式から得た曲線，膜面からダブルプローブまでの距離：2.3 cm，レーザー強度：34 MW/cm<sup>2</sup>，円形開口の直径：6 mm， $\theta$ ：金属膜面とのなす角度)



第 5.1 図 ダブルプローブによるアルミニウムプラズマの波形  
(両プローブ間の距離：15mm)

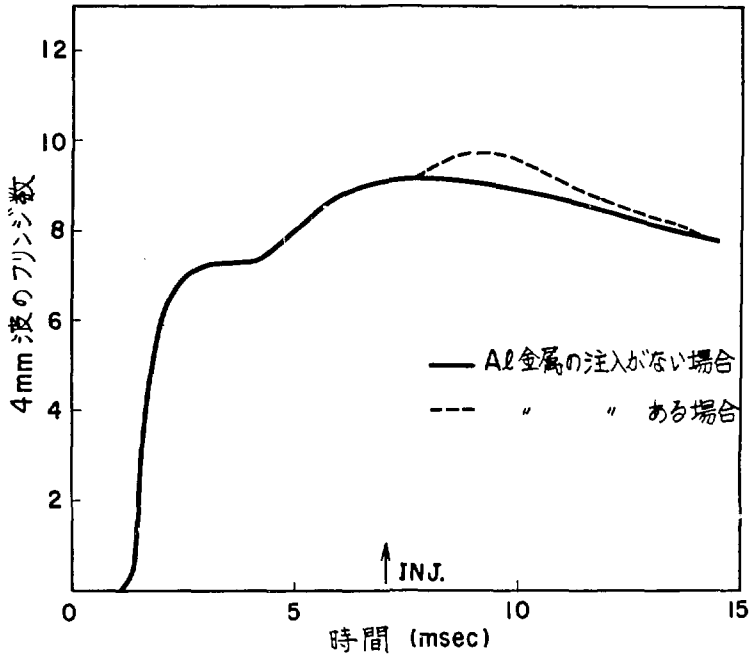


(a) アルミニウム金属不純物を注入しない時の  
電圧, 電流波形

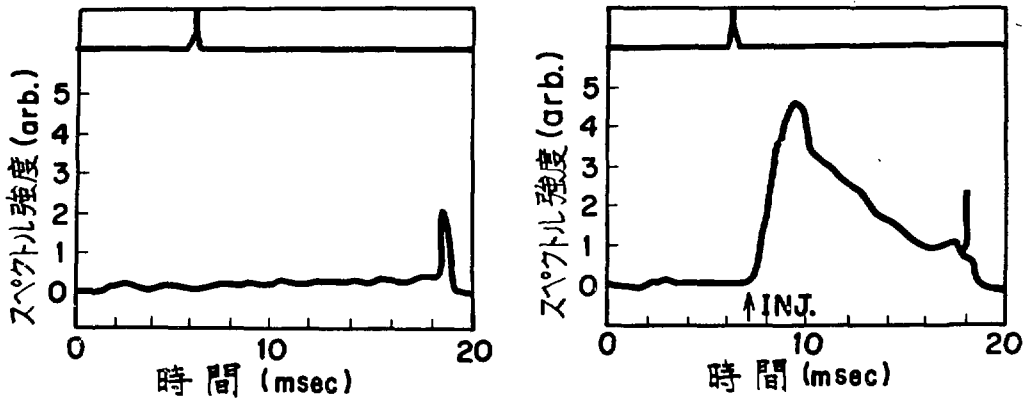


(b) アルミニウム金属不純物を注入した時の電圧,  
電流波形 (注入量  $N_{oe} = 4.0 \times 10^{16}$  個,  $R = 56$  cm  
の位置での注入実験)

第 5.2 図



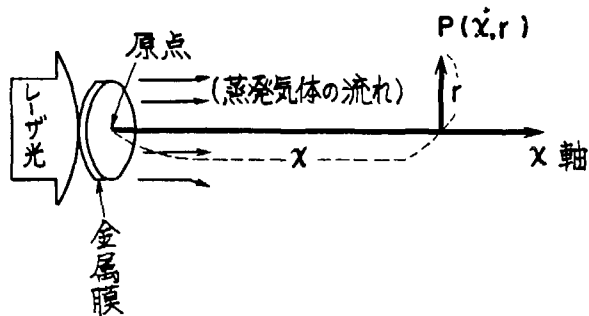
第 5.3 図 アルミニウム金属不純物の注入による電子密度の増加  
 (縦軸は 4mm 波のフリンジ数で、それは平均電子密度  $\bar{n}_e$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) を示す。Noe =  $4.0 \times 10^{16}$  個, R = 56cm)



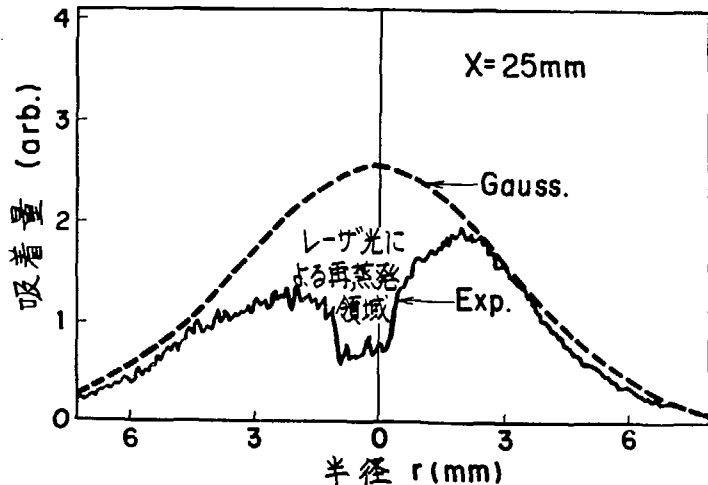
(a) アルミニウム金属不純物を注入しない時の出力波形  
 (上の波形はレーザー光を発振させるための信号、レーザー光より 0.96msec 早く出ている)

(b) アルミニウム金属不純物を注入した時の AIX のスペクトル出力波形 (Noe =  $4.0 \times 10^{16}$  個, R = 56 cm)

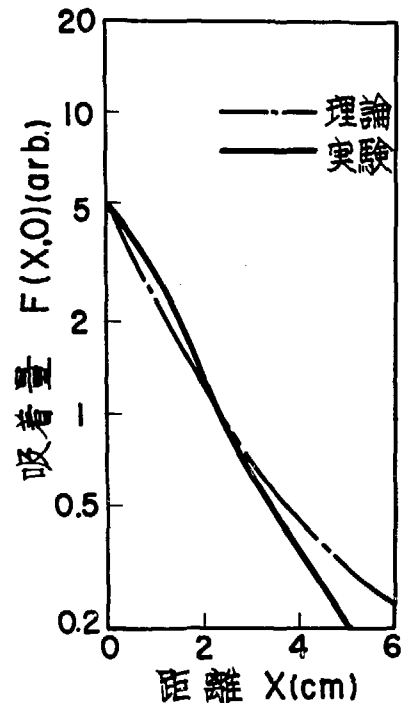
第 5.4 図



第 5.5 図 金属不純物膨張空間の座標系  
 (X軸に関して金属気体は対称な分布をしているため任意のPの位置を(x, r)で表わす。)



第 5.6 図 パイレックスガラス板に吸着したアルミニウム金属の空間分布特性  
 (距離  $x = 25 \text{ mm}$ , 円形開口の直径  $\phi = 3 \text{ mm}$ )



第 5.7 図 パイレックスガラス板に吸着したアルミニウム金属の減衰特性 ( $\phi = 3 \text{ mm}$ )