

JAERI - M  
92-216

電子ビーム加熱大量蒸発で生成したガドリニウム  
原子ビーム中の蒸発部生成プラズマの除去  
(受託研究)

1993年1月

大場 弘則・西村 昭彦・柴田 猛順

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

電子ビーム加熱大量蒸発で生成したガドリニウム  
原子ビーム中の蒸発部生成プラズマの除去

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部  
大場 弘則・西村 昭彦・柴田 猛順

(1992年12月17日受理)

直進型電子銃蒸発源でガドリニウム原子を大量に蒸発させて、原子ビーム中の蒸発部近傍生成プラズマの除去試験を行った。原子ビームの流れに沿って設けた平行平板の除去電極に正または負の電圧を印加した。除去電極に正電位を印加すると除去電極に数Aの電流が流れ、プラズマの除去ができなかった。これは蒸発面が陰極、除去電極が陽極となってアーク電流が流れるためと考察した。一方、除去電極に負の高電圧を印加すると、原子ビーム中のプラズマの除去ができた。原子ビームとともに上昇するアース電位のプラズマからイオンが負電位の除去電極に引出される。プラズマが除去電極を通過する間にプラズマを消滅させるのに必要な除去電極電位を蒸発部生成プラズマ特性値を用いて推定した。必要除去電極電位の推定値は実験値と一致した。

Removal of Plasma in Gadolinium Atomic Beam  
under High-rate Electron Beam Evaporation

Hironori OHBA, Akihiko NISHIMURA and Takemasa SHIBATA

Department of Fuels and Materials Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 1992)

Removal of plasma in a gadolinium atomic beam was tried under high-rate evaporation using an axial electron gun. Positive or negative electric potential was applied to removal electrodes which were a pair of parallel electrodes put along the atomic beam. When positive potential was applied to the removal electrodes, current of several amperes flowed into the electrodes and the plasma could not be removed because arc current flows from high temperature evaporation surface to the removal electrodes. On the other hand, the removal of the plasma was achieved by applying high negative potential to the removal electrodes. The plasma flowing up with the atomic beam had grounded potential and ions were extracted to the negatively biased removal electrodes from the plasma. The removal electrode potential to extinguish the plasma between the electrode was estimated using the plasma parameters such as density, electron temperature, and drift velocity. The estimated values agreed well with experimental results.

Keywords: Plasma, Gadolinium, Electron Beam Heating, High-rate  
Evaporation, Removal Electrode, Axial Electron Gun

---

This work was performed under contract with Atomic Energy Bureau of Science and Technology Agency of Japan.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験方法 .....	1
3. 実験結果 .....	2
4. 考 察 .....	3
5. おわりに .....	6
謝 辞 .....	6
引用文献 .....	7

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Apparatus .....	1
3. Experimental Results .....	2
4. Discussion .....	3
5. Conclusion .....	6
Acknowledgement .....	6
References .....	7

## 1. はじめに

原子法レーザー同位体分離では金属蒸気にレーザー光を照射し、目的同位体のみをイオン化してこれを電極に回収する。金属蒸気を電子ビーム加熱で生成させると、蒸発部近傍でプラズマが生成する<sup>1)、2)</sup>。大量のプラズマが金属蒸気とともに回収電極に流れ込むと、プラズマ内の天然同位体比組成のイオンもレーザーでイオン化された目的同位体イオンとともに回収電極に回収されるため、回収イオンの同位体比が低下し、同位体分離ができなくなる。このため回収電極に流れ込む前にこのプラズマを除去する必要がある。

著者等<sup>3)、4)</sup>は、除去電極として蒸発部と回収部の間に一对の平行平板電極を設けて、電子ビーム蒸発時に生成するプラズマの除去を行っている。これまでの研究で、除去電極に正負の電圧を印加する従来の方法を用いた場合、蒸気密度が高くなるとプラズマの除去ができなくなるのに対し、2枚の除去電極に負の高電圧を印加すれば蒸気密度の高い場合でもプラズマの除去ができることを明かにした。また、この時必要な印加電圧を簡単な方法で評価できることを示した。

以上の知見は磁場偏向型電子銃蒸発源で生成した低原子ビーム密度での試験結果から得られたものであるが、他の装置または高密度蒸発時でも成立することが確かめられればより一般的な知見として、原子法レーザー同位体分離に役立つ。

一方、著者等は直進型電子銃蒸発源を用いてガドリニウムを蒸発させ、原子法レーザー同位体分離を効率よく行うのに必要な光反応部蒸気密度 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を得ている<sup>5)</sup>。直進型電子銃蒸発源でガドリニウムを大量に蒸発させた場合についても磁場偏向型電子銃蒸発源を用いて得られた上記の知見が成り立つかどうかを調べてみた。

## 2. 実験方法

本実験における真空容器内部の概略をFig. 1に示す。本装置については別報<sup>5)、6)</sup>で詳細に述べてあるので、ここでは本実験に関することのみ簡単に述べる。水冷銅るつぼに入れたガドリニウムを直進型電子銃(Ardenne製EH30/20)からの電子ビームで加熱してガドリニウム蒸気を生成させた。電子ビームは斜め上方30度より入射した。蒸発面から28cmの位置に直径6cmの穴を設けた蒸気シールドを取り付けた。プラズマ除去電極は間隔3cm、15cm×10cmの一对の平行平板で、蒸気シールド板に取り付けた。電子銃出力を加速電圧20kVで6~18kWの範囲で変化させ、ガドリニウム

## 1. はじめに

原子法レーザー同位体分離では金属蒸気にレーザー光を照射し、目的同位体のみをイオン化してこれを電極に回収する。金属蒸気を電子ビーム加熱で生成させると、蒸発部近傍でプラズマが生成する<sup>1)、2)</sup>。大量のプラズマが金属蒸気とともに回収電極に流れ込むと、プラズマ内の天然同位体比組成のイオンもレーザーでイオン化された目的同位体イオンとともに回収電極に回収されるため、回収イオンの同位体比が低下し、同位体分離ができなくなる。このため回収電極に流れ込む前にこのプラズマを除去する必要がある。

著者等<sup>3)、4)</sup>は、除去電極として蒸発部と回収部の間に一对の平行平板電極を設けて、電子ビーム蒸発時に生成するプラズマの除去を行っている。これまでの研究で、除去電極に正負の電圧を印加する従来の方法を用いた場合、蒸気密度が高くなるとプラズマの除去ができなくなるのに対し、2枚の除去電極に負の高電圧を印加すれば蒸気密度の高い場合でもプラズマの除去ができることを明かにした。また、この時必要な印加電圧を簡単な方法で評価できることを示した。

以上の知見は磁場偏向型電子銃蒸発源で生成した低原子ビーム密度での試験結果から得られたものであるが、他の装置または高密度蒸発時でも成立することが確かめられればより一般的な知見として、原子法レーザー同位体分離に役立つ。

一方、著者等は直進型電子銃蒸発源を用いてガドリニウムを蒸発させ、原子法レーザー同位体分離を効率よく行うのに必要な光反応部蒸気密度 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を得ている<sup>5)</sup>。直進型電子銃蒸発源でガドリニウムを大量に蒸発させた場合についても磁場偏向型電子銃蒸発源を用いて得られた上記の知見が成り立つかどうかを調べてみた。

## 2. 実験方法

本実験における真空容器内部の概略をFig. 1に示す。本装置については別報<sup>5)、6)</sup>で詳細に述べてあるので、ここでは本実験に関することのみ簡単に述べる。水冷銅るつぼに入れたガドリニウムを直進型電子銃(Ardenne製EH30/20)からの電子ビームで加熱してガドリニウム蒸気を生成させた。電子ビームは斜め上方30度より入射した。蒸発面から28cmの位置に直径6cmの穴を設けた蒸気シールドを取り付けた。プラズマ除去電極は間隔3cm、15cm×10cmの一对の平行平板で、蒸気シールド板に取り付けた。電子銃出力を加速電圧20kVで6~18kWの範囲で変化させ、ガドリニウム

蒸発量、蒸発部生成プラズマの密度を変えた。このとき除去電極に正または負電圧を印加して、蒸発面から29 cmの位置に設けたタングステン製の円筒ラングミュアプローブ<sup>6)</sup> (直径0.7 mm、長さ3 mm)でプローブ特性を取得した。プローブ特性よりプラズマが除去できたかどうかをみた。蒸発面から56.5 cm上方に設けた水晶振動子型膜厚計 (Inficon社製)で蒸着速度を測定した。

### 3. 実験結果

除去電極に正電圧を印加していった場合の円筒プローブ特性測定例をFig. 2に示す。電子電流流入領域ではプローブ電流が大きくなるのでレコーダーレンジの切り換えを行った。この測定は電子ビーム入力12 kW、蒸着速度300 Å/sのときの例で、(a)、(b)、(c)、(d)は除去電極電位をそれぞれ0 V、2 V、4 V、10 Vとした場合のプローブ特性である。印加した正電圧を増加させていくと4 Vまではイオン飽和電流、電子飽和電流が減少していくが、10 Vでは逆にイオン飽和電流、電子飽和電流とも増加し、プラズマの除去ができないことがわかる。Fig. 3は正電圧印加時のイオン飽和電流と除去電極に流れる電流を示す。除去電極には10 V印加すると10 Aに近い大きな電流が流れる。またこのとき、蒸発面から除去電極にかけて発光している様子が確認された。印加電圧を高くしていくと、Fig. 2のプローブ特性から求めた電子温度も徐々に高くなり、10 V印加時には電子温度は1 eVよりも高くなった。

除去電極に負電圧を印加した場合のプローブ特性をFig. 4に示す。Fig. 4の(a)、(b)、(c)、(d)は電子ビーム入力14 kW、蒸着速度420 Å/sのときの例で、除去電極電位がそれぞれ0 V、-100 V、-200 V、-420 Vのものである。電極に負電圧を印加していくとイオン飽和電流が減少し(d)ではプローブ特性を示さなくなり、蒸発表面から飛び込んでくる高エネルギー電子のみになる。これは蒸発部近傍生成のプラズマが除去電極を通過できなくなり電極間でプラズマが除去できたことを意味する。Fig. 5にはFig. 4の測定時の除去電極電流を示す。除去電極電流は数10 mAで正電位印加時に比べ100分の1程度であった。Fig. 6にはプラズマ除去に必要な除去電極電位を示す。蒸着速度の増加にともない高い除去電極電位を必要とするが、電極部での蒸気密度が $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ になる蒸着速度が600 Å/sのときでも除去電極に-500 V程度を印加すればプラズマの除去ができています。



蒸発量、蒸発部生成プラズマの密度を変えた。このとき除去電極に正または負電圧を印加して、蒸発面から29 cmの位置に設けたタングステン製の円筒ラングミュアプローブ<sup>6)</sup> (直径0.7 mm、長さ3 mm) でプローブ特性を取得した。プローブ特性よりプラズマが除去できたかどうかをみた。蒸発面から56.5 cm上方に設けた水晶振動子型膜厚計 (Inficon社製) で蒸着速度を測定した。

### 3. 実験結果

除去電極に正電圧を印加していった場合の円筒プローブ特性測定例をFig. 2に示す。電子電流流入領域ではプローブ電流が大きくなるのでレコーダーレンジの切り換えを行った。この測定は電子ビーム入力12 kW、蒸着速度300 Å/sのときの例で、(a)、(b)、(c)、(d)は除去電極電位をそれぞれ0 V、2 V、4 V、10 Vとした場合のプローブ特性である。印加した正電圧を増加させていくと4 Vまではイオン飽和電流、電子飽和電流が減少していくが、10 Vでは逆にイオン飽和電流、電子飽和電流とも増加し、プラズマの除去ができないことがわかる。Fig. 3は正電圧印加時のイオン飽和電流と除去電極に流れる電流を示す。除去電極には10 V印加すると10 Aに近い大きな電流が流れる。またこのとき、蒸発面から除去電極にかけて発光している様子が確認された。印加電圧を高くしていくと、Fig. 2のプローブ特性から求めた電子温度も徐々に高くなり、10 V印加時には電子温度は1 eVよりも高くなった。

除去電極に負電圧を印加した場合のプローブ特性をFig. 4に示す。Fig. 4の(a)、(b)、(c)、(d)は電子ビーム入力14 kW、蒸着速度420 Å/sのときの例で、除去電極電位がそれぞれ0 V、-100 V、-200 V、-420 Vのものである。電極に負電圧を印加していくとイオン飽和電流が減少し(d)ではプローブ特性を示さなくなり、蒸発表面から飛び込んでくる高エネルギー電子のみになる。これは蒸発部近傍生成のプラズマが除去電極を通過できなくなり電極間でプラズマが除去できたことを意味する。Fig. 5にはFig. 4の測定時の除去電極電流を示す。除去電極電流は数10 mAで正電位印加時に比べ100分の1程度であった。Fig. 6にはプラズマ除去に必要な除去電極電位を示す。蒸着速度の増加にともない高い除去電極電位を必要とするが、電極部での蒸気密度が $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ になる蒸着速度が600 Å/sのときでも除去電極に-500 V程度を印加すればプラズマの除去ができています。

## 4. 考 察

### 4. 1. 除去電極に正電位を印加してもプラズマを除去できない理由

Fig. 3に示したように除去電極に正の電位を印加していくとプラズマが除去できないだけでなく除去電極に大電流が流れ込んでいる。この電流は高温の蒸発部が陰極、除去電極が陽極となって、陰極と陽極の間にアーク電流が流れるためと思われる<sup>4)</sup>。この仮説をもとに本実験条件で流れるアーク電流を推定し実験値と比較してみた。

陰極から流れ出すアーク電流はBohm<sup>7)</sup>によれば次の式で与えられる。

$$J_e = \gamma \sqrt{m_+ / m_e} J_+ = \gamma \sqrt{m_+ / m_e} n_+ e \sqrt{k T_e / m_+} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $J_e$ は陰極から流れる電子電流密度、 $J_+$ は陰極に流れ込むイオン電流密度、 $m_+$ はイオンの質量、 $m_e$ は電子の質量、 $\gamma$ は補正係数で $1/3 < \gamma < 2/3$ である。 $T_e$ は電子温度、 $n_+$ はイオン密度である。アーク放電の陰極は電子放出が可能な高温の蒸発部である。アーク電流 $I$ はガドリニウムの蒸発面積を $S$ とすれば

$$I = J_e \cdot S \dots \dots \dots (2)$$

である。高温の蒸発部は目視観察から直径1.5cm程度であるので $S = 1.8 \text{ cm}^2$ とする。電子温度はガドリニウムの蒸発面温度と等しいと仮定した。

蒸発面温度は水晶振動子膜厚計で測定した蒸着速度から次のようにして推定できる。ガドリニウムの飽和蒸気圧 $P_v (\text{Torr})$ <sup>8)</sup>、蒸発面単位面積からの蒸発速度 $\Gamma_m (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ <sup>9)</sup>は次式のように蒸発面温度 $T_v (\text{K})$ に依存する。

$$\begin{aligned} \log P_v &= -19600 / T_v + 8.517 \\ \Gamma_m &= 5.85 \times 10^{-2} \cdot P_v \cdot \sqrt{M_v / T_v} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

一方、 $\Gamma_m$ は蒸発面 $S (\text{cm}^2)$ からの蒸発角度分布が $\cos^n \theta$ ならば水晶振動子膜厚計の取付け位置 $r (\text{cm})$ における蒸着速度 $J_0 (\text{cm} / \text{s})$ の値から次式で推定できる。

$$\Gamma_m = 2 \pi J_0 \rho r^2 / \{ S \cdot (n + 1) \} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\rho$ はガドリニウム密度( $7.89 \text{ g} / \text{cm}^3$ )である。(3)式および(4)式による $\Gamma_m$ が等しいとして蒸発面温度を推定できる。蒸着速度が $300 \text{ \AA} / \text{s}$ のとき、蒸発角度分布は $\cos^5 \theta$ であり<sup>10)</sup>、蒸発面積は $1.8 \text{ cm}^2$ と推定されるので $2445 \text{ K}$

となる。また、この蒸発面温度におけるガドリニウムの蒸気圧より、蒸発面でのガドリニウム原子密度は  $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  と推定される。Fig. 7 に各蒸着速度での推定蒸発面温度と蒸発面での推定原子密度を示す。

蒸発面のごく近傍では電子ビームによる電離はまだ起こっていないので、ここでのイオン密度は次の Saha の式<sup>11)</sup>による熱電離度  $\alpha$  と蒸発面での原子密度から推定した。

$$\begin{aligned} \alpha^2 / (1 - \alpha^2) &= Z_{+} / Z_{\cdot} \cdot 2 \cdot (2\pi m_e k T / h^2)^{3/2} \cdot k T / P v \cdot \exp(-11605 V_i / T) \\ &= Z_{+} / Z_{\cdot} \cdot 5.0 \times 10^{-4} T^{5/2} / P v \cdot \exp(-11605 V_i / T) \quad \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ここで  $T$  は蒸発面温度 (K)、 $P v$  はガドリニウムの飽和蒸気圧<sup>8)</sup> (Torr)、 $V_i$  はガドリニウムのイオン化ポテンシャル (6.15 eV) である。 $Z_{+}$ 、 $Z_{\cdot}$  はそれぞれイオン、中性原子の内部エネルギーに対する分配関数である。イオン、中性原子それぞれエネルギー準位  $7000 \text{ cm}^{-1}$  程度まで計算して、 $Z_{+} / Z_{\cdot} = 1.3$  とした。蒸着速度が  $300 \text{ \AA} / \text{s}$  のときの推定蒸発面温度は  $2445 \text{ K}$  で、熱電離度は  $0.012\%$  となる。したがって、このときのイオン密度は  $1.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  と推定される。

以上の値と (1)、(2) 式から各蒸着速度での放出可能電子電流値を計算した。ここで  $\gamma$  は  $0.5$  とした。Fig. 8 に計算値を実験値とともに示すが、プラズマ除去電極に流れ込む電流は計算した放出可能電子電流にほぼ等しい。これは除去電極に正の電位を印加すると高温の蒸発部が陰極、除去電極が陽極となって陰極と陽極の間にアーク電流が流れてしまい、プラズマの除去ができないという仮説が正しいことを示していると思われる。また、Fig. 2 で電子温度が高くなっていくのは数 A にもなるアーク電流が流れ、プラズマにエネルギーが注入されたためと考えられる。除去電極に正電圧を印加したときの蒸発部生成プラズマの電位は印加した電圧にほぼ等しい。したがって、アース電位の蒸発面から放出する電子は除去電極に印加した電位で加速される。よって、印加電圧がガドリニウムのイオン化ポテンシャル  $6.15 \text{ eV}$  を越えると、ガドリニウムのイオン化が進むため、印加電圧が  $4 \text{ V}$  まではプローブイオン飽和電流が減少するのに対し、 $10 \text{ V}$  では増加していると思われる。今後イオン化ポテンシャルの  $6 \text{ V}$  近近でのイオン飽和電流の増減を調べたい。

#### 4. 2. 除去電極に負の電位を印加したときのプラズマ除去メカニズムおよび必要な除去電極電位の推定

大量に蒸発させた本実験でも電極両方に負電位を印加して、プラズマの除去ができた。Fig. 9 に十分高い負電圧を除去電極に印加したときプラズマが除去される様子を示す。

ガドリニウム蒸気とともに上昇する蒸発部生成プラズマからイオンが引出されてプラズマと電極の間隔（シース）が除去電極を通過するまでに成長してプラズマが消滅すればプラズマは回収電極部に流れ込まない。必要な除去電極電位を前報<sup>4)</sup>と同様に次のように推定した。

蒸発部生成プラズマは蒸発部とつながっているので電位はアース電位に近い。プラズマから負電位の除去電極に空間電荷制限電流で決まるイオン電流が流れる。プラズマはガドリニウム原子とともに上昇しながらボーム速度  $v_B$  程度で膨張する。プラズマと電極の間隔（シース）の減少と増大は空間電荷制限イオン電流密度 ( $i_{p.c.c.}$ ) とプラズマの膨張に相当するイオン電流密度 ( $i_{exp.} = v_B \cdot n_i$ ) の大小により次のようになる。

$$\begin{aligned} i_{p.c.c.} &= i_{exp.} \text{ ならばシースは一定} \\ i_{p.c.c.} &< i_{exp.} \text{ ならばシースは減少} \\ i_{p.c.c.} &> i_{exp.} \text{ ならばシースは増大} \end{aligned}$$

ここで  $n_i$  はイオン密度である。このメカニズムは、二枚の電極間にレーザー等によりパルス的に生成したプラズマの消滅過程のメカニズム<sup>12), 13), 14)</sup>と同様である。プラズマが除去電極を上昇している間にシースが増大、プラズマの幅が減少して、ついにはプラズマが消滅してしまえば電極間でプラズマは除去できたことになる。

蒸着速度  $400 \text{ \AA/s}$  のとき、除去電極下端部にはイオン密度が  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度が  $0.07 \text{ eV}$ 、ドリフト速度が  $1000 \text{ m/s}$  のプラズマが入る。これらの値は前報<sup>6)</sup>の測定結果である。このとき除去電極に  $-400 \text{ V}$  を印加すると、電極下端部に入ってからイオン密度、プラズマの幅の時間変化は Fig. 10 のように計算される。電極下部に入ってから  $142 \mu\text{s}$  後にプラズマが消滅している。除去電極のガドリニウム原子ビーム方向の長さは  $15 \text{ cm}$  なので、プラズマが除去電極を通過するのに要する時間は  $150 \mu\text{s}$  である。従って、プラズマは除去電極を通過している間に完全に消滅してしまうため、除去電極が充分機能しているといえる。Fig. 11 には除去電極電圧を変えたときのプラズマ消滅時間を示している。プラズマ除去に必要な除去電極電圧は、プラズマが除去電極を通過する時間  $150 \mu\text{s}$  で、プラズマが消滅する電圧で  $-376 \text{ V}$  となる。各蒸着速度についてこれを計算した結果を Fig. 6 中の破線で示す。計算値と実験値は良く一致している。計算に用いた電子温度は実測値であるが、この値はプラズマの膨張速度を決めるもので、電子温度が必要除去電位を求める上で非常に重要である。この蒸着速度での電子温度を蒸発面温度程度の  $0.2 \text{ eV}$  にすると、必要除去電位は  $-250 \text{ V}$  となり  $130 \text{ V}$  程低くなる。

また、必要除去電位を印加したときの除去電極に流れる電流は、蒸着速度  $420 \text{ \AA/s}$  で除去電位  $-400 \text{ V}$  を印加したとき  $37 \text{ mA}$  であった。電極内側ではプラズマが電極間を上昇する間にシースが増大し、プラズマが減少して電極にイオンが流入する。電極内側

に流れる電流は、電極間隔 3 cm、奥行 10 cm、面積 30 cm<sup>2</sup>のところに入るイオン電流とすると、前報<sup>1)</sup>の原子ビーム中のイオン量の割合 0.4% を用いれば 32 mA となり実験値とほぼ一致する。

蒸発部生成プラズマの電子温度および原子ビーム中のイオン量、そのドリフト速度がわかれば必要除去電極電位、その時流れる除去電極電流が推定できること、したがって除去電極の設計が可能であることが確認された。

## 5. おわりに

直進型電子銃蒸発源でガドリニウム原子を大量に蒸発させたとき、蒸発部近傍で生成するプラズマの除去試験を行った。原子ビームの流れに沿って設けた平行平板の除去電極に正または負の電圧を印加した。除去電極に正電位を印加すると除去電極に数 A の電流が流れ、プラズマの除去ができなかった。これは蒸発面が陰極、除去電極が陽極となってアーク電流が流れるためと考察した。一方、除去電極に負の高電圧を印加すると、原子ビーム中のプラズマの除去ができた。原子ビームとともに上昇するアース電位のプラズマからイオンが負電位の除去電極に引出されて、プラズマが除去電極を通過する間にプラズマを消滅させるのに必要な電位を蒸発部生成プラズマ特性値を用いて推定した。必要除去電極電位の推定値は実験値と一致した。

## 謝 辞

本論文の原稿を読んで頂き、貴重なコメントをして下さった核融合研究部プラズマ実験研究室室長前田彦祐氏に深く感謝いたします。また、本研究を行う上で有益な議論をしていただいた小倉浩一氏、および不断の激励と御指導をいただいた有沢 孝同位体分離研究室室長、半田宗男燃料・材料工学部次長、近藤達男燃料・材料工学部部長に感謝いたします。

に流れる電流は、電極間隔 3 cm、奥行 10 cm、面積 30 cm<sup>2</sup>のところに入るイオン電流とすると、前報<sup>5)</sup>の原子ビーム中のイオン量の割合 0.4% を用いれば 32 mA となり実験値とほぼ一致する。

蒸発部生成プラズマの電子温度および原子ビーム中のイオン量、そのドリフト速度がわかれば必要除去電極電位、その時流れる除去電極電流が推定できること、したがって除去電極の設計が可能であることが確認された。

## 5. おわりに

直進型電子銃蒸発源でガドリニウム原子を大量に蒸発させたとき、蒸発部近傍で生成するプラズマの除去試験を行った。原子ビームの流れに沿って設けた平行平板の除去電極に正または負の電圧を印加した。除去電極に正電位を印加すると除去電極に数 A の電流が流れ、プラズマの除去ができなかった。これは蒸発面が陰極、除去電極が陽極となってアーク電流が流れるためと考察した。一方、除去電極に負の高電圧を印加すると、原子ビーム中のプラズマの除去ができた。原子ビームとともに上昇するアース電位のプラズマからイオンが負電位の除去電極に引出されて、プラズマが除去電極を通過する間にプラズマを消滅させるのに必要な電位を蒸発部生成プラズマ特性値を用いて推定した。必要除去電極電位の推定値は実験値と一致した。

## 謝 辞

本論文の原稿を読んで頂き、貴重なコメントをして下さった核融合研究部プラズマ実験研究室室長前田彦祐氏に深く感謝いたします。また、本研究を行う上で有益な議論をしていただいた小倉浩一氏、および不断の激励と御指導をいただいた有沢 孝同位体分離研究室室長、半田宗男燃料・材料工学部次長、近藤達男燃料・材料工学部部長に感謝いたします。

に流れる電流は、電極間隔 3 cm、奥行 10 cm、面積 30 cm<sup>2</sup>のところに入るイオン電流とすると、前報<sup>1)</sup>の原子ビーム中のイオン量の割合 0.4% を用いれば 32 mA となり実験値とほぼ一致する。

蒸発部生成プラズマの電子温度および原子ビーム中のイオン量、そのドリフト速度がわかれば必要除去電極電位、その時流れる除去電極電流が推定できること、したがって除去電極の設計が可能であることが確認された。

## 5. おわりに

直進型電子銃蒸発源でガドリニウム原子を大量に蒸発させたとき、蒸発部近傍で生成するプラズマの除去試験を行った。原子ビームの流れに沿って設けた平行平板の除去電極に正または負の電圧を印加した。除去電極に正電位を印加すると除去電極に数 A の電流が流れ、プラズマの除去ができなかった。これは蒸発面が陰極、除去電極が陽極となってアーク電流が流れるためと考察した。一方、除去電極に負の高電圧を印加すると、原子ビーム中のプラズマの除去ができた。原子ビームとともに上昇するアース電位のプラズマからイオンが負電位の除去電極に引出されて、プラズマが除去電極を通過する間にプラズマを消滅させるのに必要な電位を蒸発部生成プラズマ特性値を用いて推定した。必要除去電極電位の推定値は実験値と一致した。

## 謝 辞

本論文の原稿を読んで頂き、貴重なコメントをして下さった核融合研究部プラズマ実験研究室室長前田彦祐氏に深く感謝いたします。また、本研究を行う上で有益な議論をしていただいた小倉浩一氏、および不断の激励と御指導をいただいた有沢 孝同位体分離研究室室長、半田宗男燃料・材料工学部次長、近藤達男燃料・材料工学部部長に感謝いたします。

## 引用文献

- 1) S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer: "Electron Beam Technology", John Wiley & Sons, Toronto, 206-225(1982).
- 2) 大場弘則、有沢 孝、西村昭彦、小倉浩一、柴田猛順：真空, 35, 282(1992).
- 3) 柴田猛順、小嶋章、小倉浩一、吉原清次、有沢 孝：日本原子力学会（1989年秋の大会）予稿集 G 2 7.
- 4) 大場弘則、有沢 孝、西村昭彦、小倉浩一、柴田猛順：真空, 35, 286(1992).
- 5) 西村昭彦、有沢 孝、大場弘則、柴田猛順：JAERI-M, 91-178(1991).
- 6) 大場弘則、西村昭彦、柴田猛順：JAERI-M, 92- (1992)投稿中.
- 7) D. Bohm: "The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields", ed. A. Guthrie and R. K. Wakering, Chap. 4, McGraw-Hill, New York, 87(1949).
- 8) C. E. Harberman, A. H. Daane: J. Chem. Phys. 41, 2818(1964).
- 9) 熊谷寛夫、富永五郎編著：真空の物理と応用、裳華房、東京、55(1981).
- 10) A. Nishimura, H. Ohba, T. Shibata: J. Nucl. Sci. Technol. 投稿中
- 11) 石川順三：イオン源工学、アイオニクス、東京、41(1986).
- 12) F. F. Chen: Phys. Fluids, 25, 2385(1982).
- 13) 小倉浩一、有沢 孝、柴田猛順：JAERI-M, 91-222(1991).
- 14) K. Ogura, T. Arisawa, T. Shibata: Jpn. J. Appl. Phys. 31, 1485(1992)



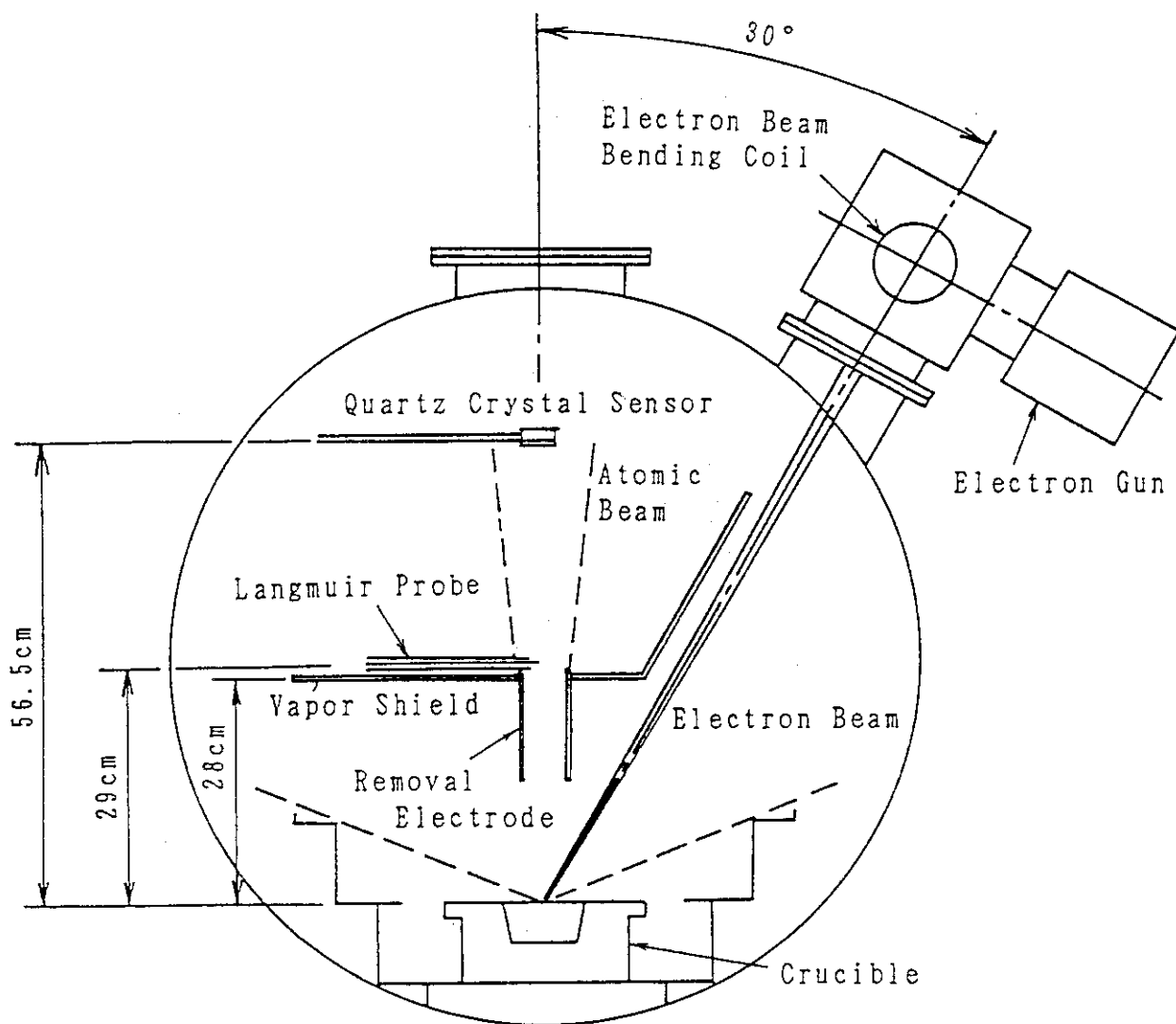


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

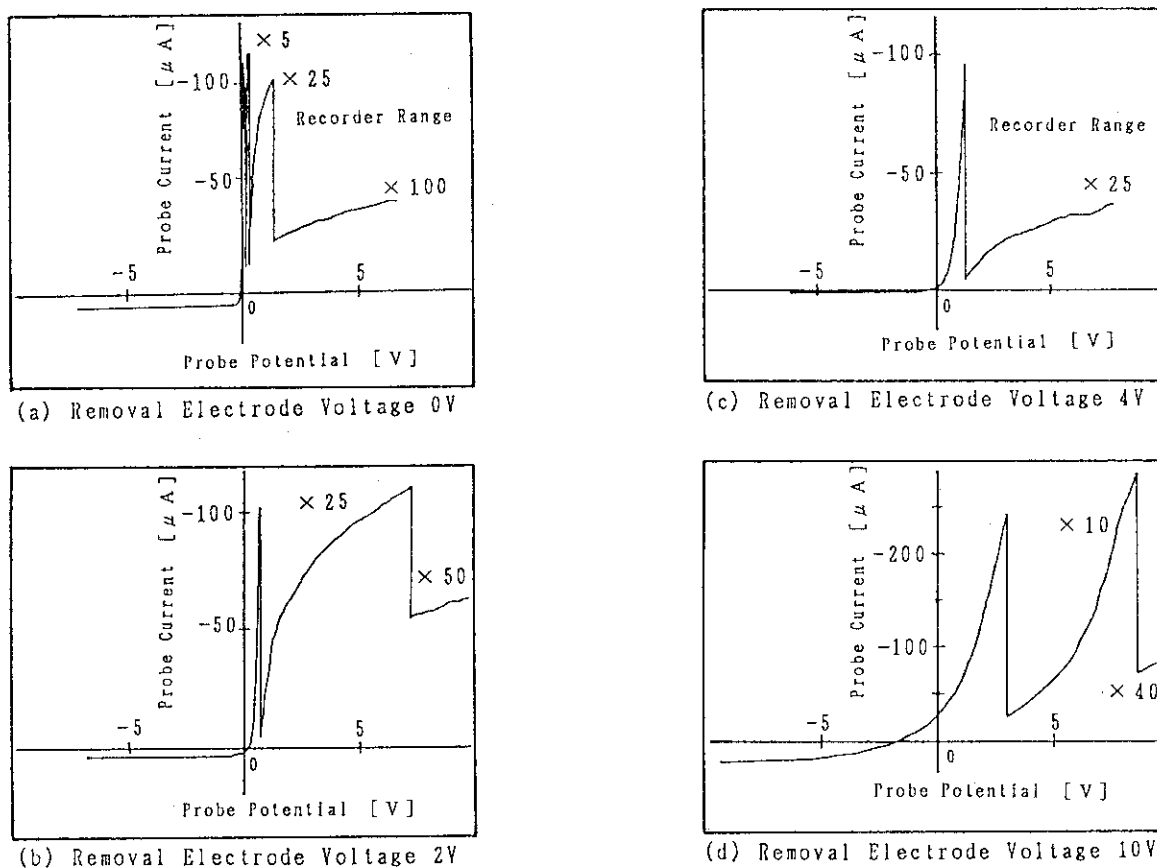


Fig. 2 Examples of the cylindrical Langmuir probe characteristic. Positive voltage was applied to removal electrodes at deposition rate of  $300\text{\AA}/\text{s}$ .

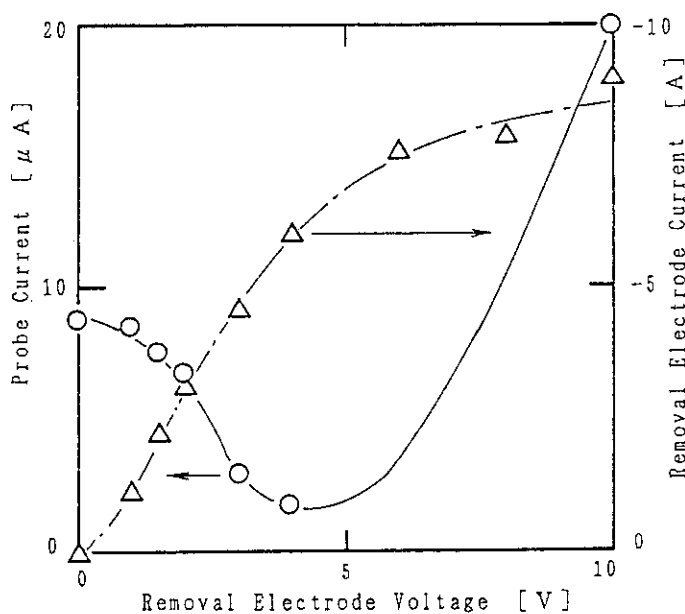


Fig. 3 Removal characteristic of plasma when both removal electrodes were biased to positive voltage at the deposition rate of  $300\text{\AA}/\text{s}$ .

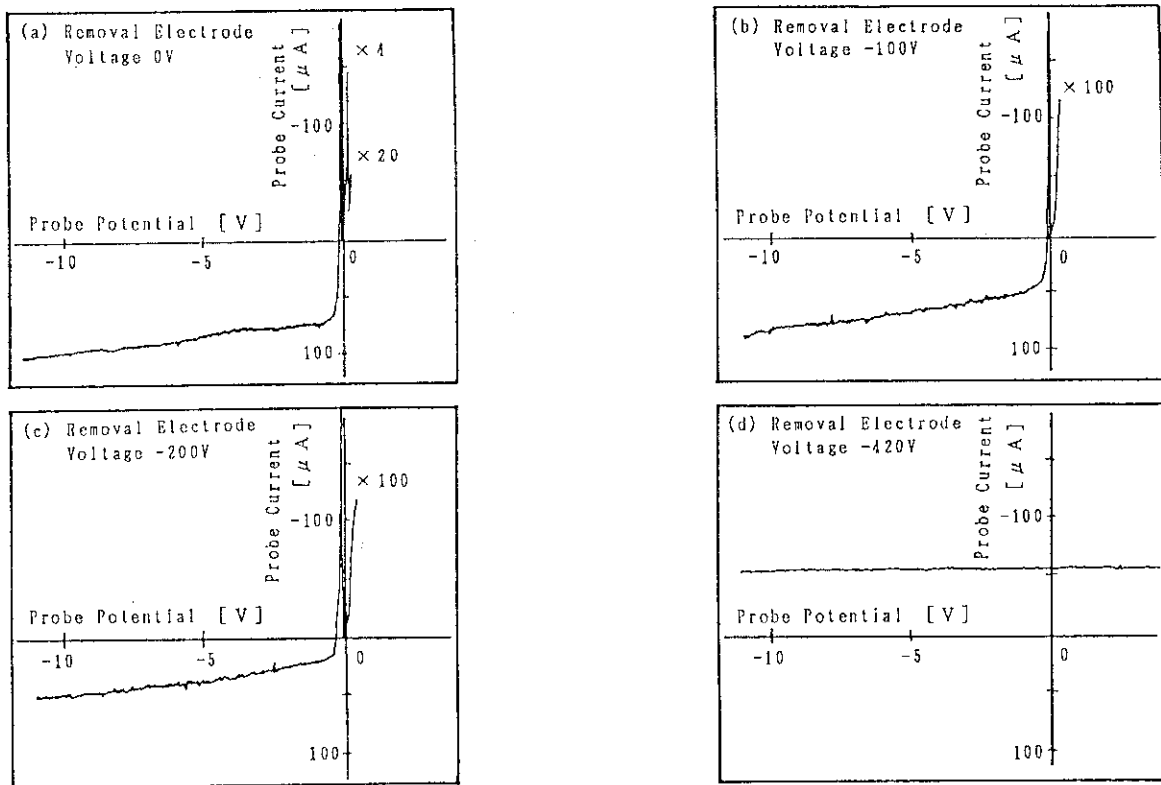


Fig. 4 Examples of the cylindrical probe characteristic. Negative voltage was applied to both removal electrodes at the deposition rate of 420 $\text{\AA}$ /s.

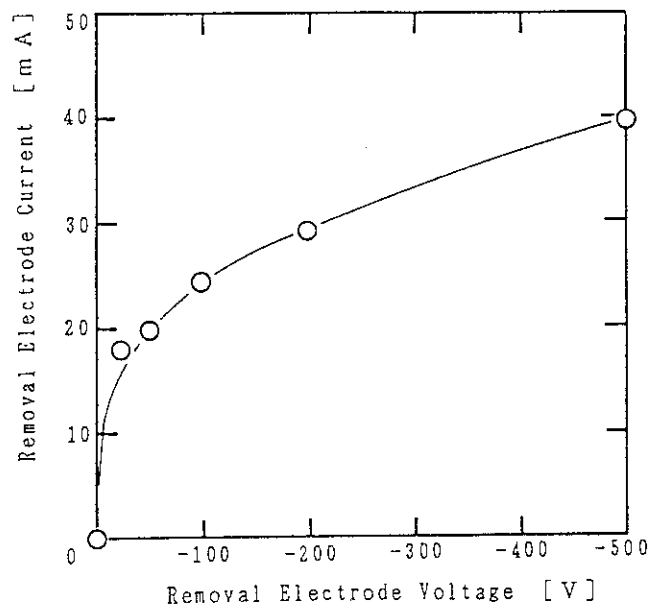


Fig. 5 Dependence of removal electrode current on removal electrode voltage at the deposition rate of 420 $\text{\AA}$ /s.

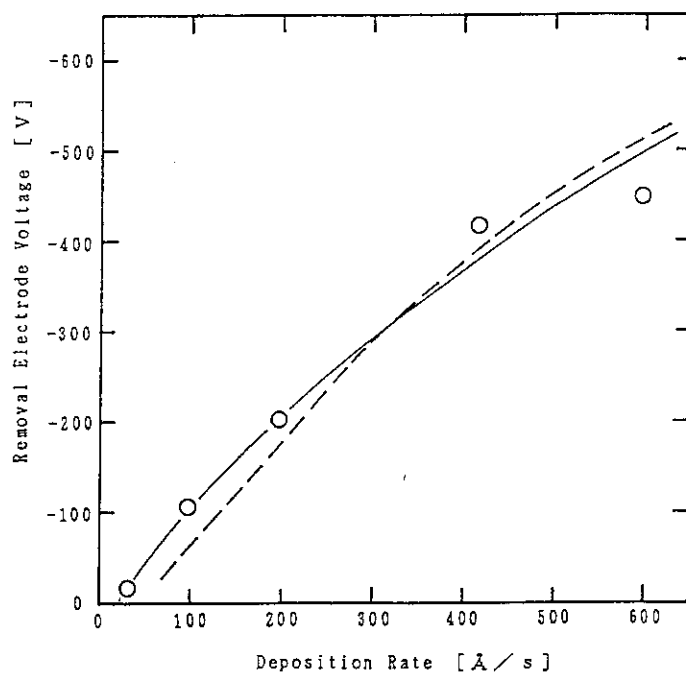


Fig. 6 Deposition rate dependence of removal electrode voltage. Both removal electrodes were negatively biased. Open circle: experimental data, dashed line: estimated value.

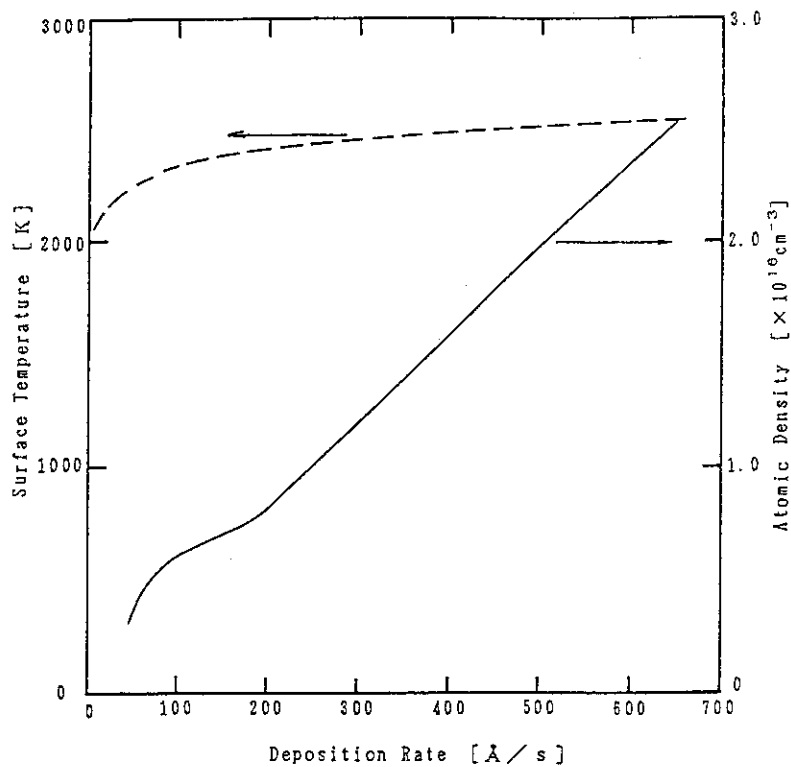


Fig. 7 Deposition rate dependence of evaporation surface temperature and atomic density at the surface.

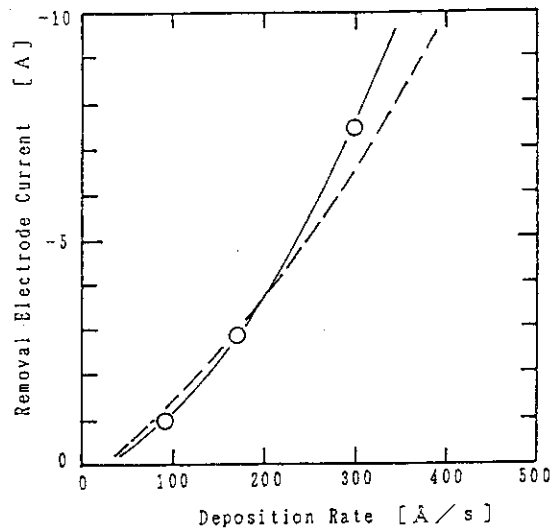


Fig. 8 Deposition rate dependence of removal electrode current. Both removal electrodes were biased to positive voltage. Open circle: experimental data, dashed line: estimated value.

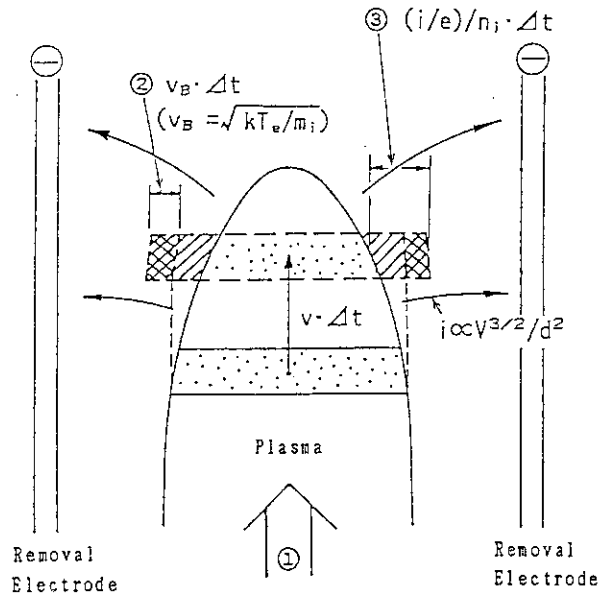


Fig. 9 Removal mechanism of the plasma in the atomic beam when both removal electrodes are negatively biased.

- ① The plasma flows upward with atomic beam.
- ② The plasma expands with the Bohm velocity.
- ③ Ions given by the space-charge-limited current are extracted from the plasma to negatively biased electrodes and the plasma edge retrograde.

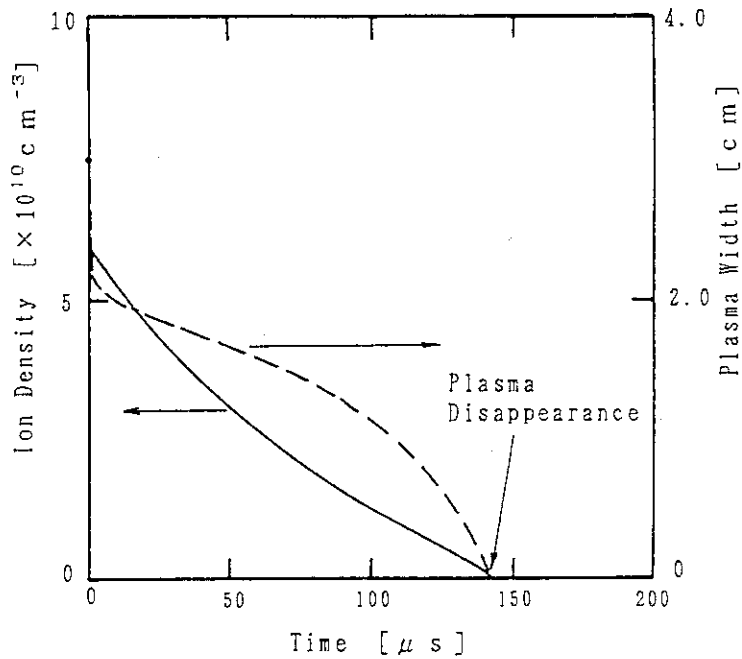


Fig. 10 One example of calculations of ion density and plasma width between the removal electrodes after the plasma arrived at the lower end of the electrodes. At the lower end of electrodes, the ion density is  $6 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ , the plasma drift velocity is  $1000 \text{m/s}$  and the electron temperature is  $0.07 \text{eV}$ . These data correspond to measured value at the deposition rate of  $400 \text{\AA/s}$ . The both electrodes are biased to  $-400 \text{V}$ .

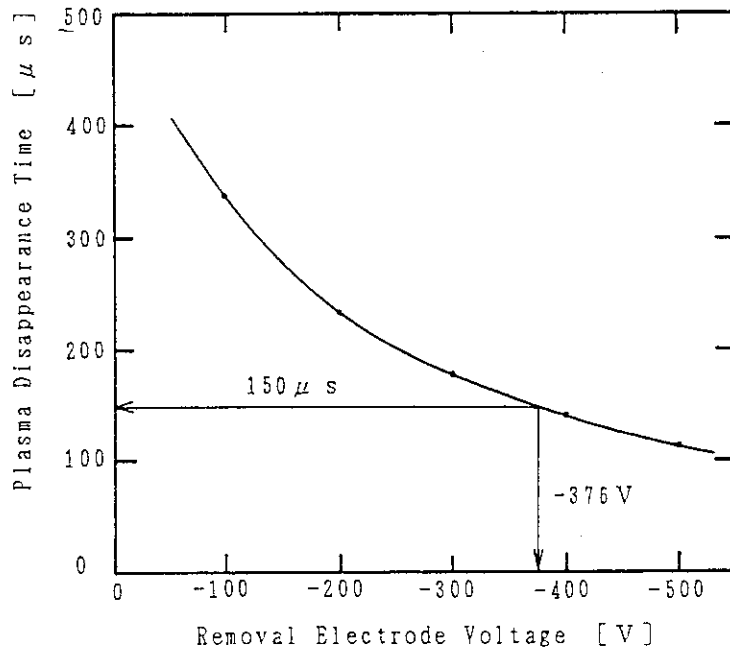


Fig. 11 Plasma disappearance time vs removal electrode voltage. Both removal electrodes were biased to negative voltage at the deposition rate of  $400 \text{\AA/s}$ .