



JAERI-Research

JP0050737

2000-030



電子ビーム加熱蒸発ウラン原子ビーム中プラズマの特性

2000年8月

大場 弘則・西村 昭彦・小倉 浩一・柴田 猛順

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

電子ビーム加熱蒸発ウラン原子ビーム中プラズマの特性

日本原子力研究所東海研究所物質科学部

大場 弘則・西村 昭彦⁺・小倉 浩一⁺・柴田 猛順

(2000年6月20日受理)

電子ビーム加熱蒸発時に生成するウランプラズマの電子温度および原子ビーム中イオン量の割合を測定した。電子温度は 0.13 eV で蒸発面温度に比べ低い値であった。原子ビーム中イオン量の割合は最大で 3%以上であった。電子ビーム入力を一定に保ちながら電子ビームの加速電圧を低くした時、加熱用電子ビーム電流が増大し、電子によるウランの電離断面積も大きくなるため、原子ビーム中のイオン量の割合が増加した。このことは、蒸発部生成プラズマは蒸発ウラン原子と加熱用電子ビームとの衝突電離で発生することを示している。

Characteristics of Plasma in Uranium Atomic Beam Produced by Electron-Beam Heating

Hironori OHBA, Akihiko NISHIMURA⁺, Koichi OGURA⁺ and Takemasa SHIBATA

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

(Received June 20, 2000)

The electron temperature of plasma and the ion flux ratio in the uranium atomic beam produced by electron-beam heating were characterized with Langmuir probes. The electron temperature was 0.13 eV, which was lower than the evaporation surface temperature. The ion flux ratio to atomic beam flux was more than 3% at higher evaporation rates. The ion flux ratio has increased with decreasing acceleration energy of the electron-beam under constant electron-beam power. This is because of an increase of electron-beam current and a large ionization cross-section of uranium by electron-impact. It was confirmed that the plasma is produced by electron-impact ionization of the evaporated atoms at the evaporation source.

Keywords: Uranium, Atomic Beam, Plasma, Electron-beam Evaporation, Electron Temperature, Ion Flux Ratio, Acceleration Energy

⁺Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法	1
3. 実験結果および考察	2
3.1 蒸発量の電子ビーム入力依存性	2
3.2 蒸発部生成ウランプラズマ電子温度	2
3.3 ウラン原子ビーム中のイオン量	3
4. おわりに	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
3. Experimental Results and Discussion	2
3.1 Deposition Rate Dependence on Electron-beam Input power	2
3.2 Electron Temperature of Uranium Plasma Generated at the Evaporation Source	2
3.3 Ion Content in the Uranium Atomic Beam	3
4. Conclusion	5
References	6

This is a blank page.

1. はじめに

原子法レーザー同位体分離は、電子ビーム加熱で生成した原子ビーム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。ところが、電子ビーム加熱蒸発で原子ビームを生成させると、蒸発部での電子ビーム衝突による原子のイオン化によってプラズマが発生し、原子ビームとともに上昇する¹⁻³⁾。蒸発部生成プラズマが原子ビームとともに上昇してレーザー光照射部に流入すると、蒸発部生成プラズマ内の天然同位体比のイオンが、レーザー光で選択的に電離された目的同位体イオンとともに回収され、回収同位体の同位体比が低下してしまう。我々は加速電圧 10 kV の磁場偏向型電子銃、あるいは加速電圧 20 kV の直進型電子銃を用いてガドリニウムを蒸発させたとき生成するガドリニウムプラズマの特性を測定している¹⁻³⁾。プラズマの電子温度はどちらの場合も 0.1 eV 以下と非常に低いこと、原子ビーム中のイオン量の割合は偏向型電子銃では 1%程度、直線型電子銃を用いた場合では 0.3%程度となり、これらイオンの生成は熱電離ではなく、加熱用電子ビームによる衝突電離であることを明らかにしている¹⁻³⁾。さらに一対の平行平板電極に高い負電圧を印加すれば蒸発部生成プラズマを除去できること、蒸発部生成プラズマの電子温度、イオン密度を用いて除去電極が設計できることを示した^{4,5)}。

レーザーウラン濃縮装置でもウランを電子ビームで蒸発させてウラン原子ビームを生成する。ウラン原子ビームの中のウランプラズマがレーザー光照射部に流入しないようにするには、蒸発部生成プラズマ特性の知見が必要である。このため、本研究では蒸発部生成ウランプラズマの電子温度と原子ビーム中のイオンの割合を測定した。また、ガドリニウムプラズマ測定では加熱用電子ビームの加速電圧一定で行った。電子によるウランの電離断面積は電子エネルギーにより大きく変化する。もしプラズマ生成が電子ビームによる衝突電離ならば、加熱用電子ビームの加速電圧を変えると、生成するプラズマの密度が大きく変わるはずである。ここではプラズマ生成機構をより明確にするために、原子ビーム中のイオン量の電子ビーム加速電圧依存性についても調べた。

2. 実験方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。ウラン原子ビームは水冷銅るつぼ内の金属ウランを磁場偏向型電子銃(ULVAC(株)製 EGL-180)で加熱して生成させた。るつぼ内にはウランを効率良く蒸発させるために多孔質タンクステンを入れた⁶⁾。ウラン蒸着速度は液面から 710 mm の位置に設けた水晶振動子型膜厚計(日電アネルバ(株)製 EVM-32B)で測定し

た。電子温度はウラン原子ビーム中にタングステン製円筒プローブ(直径 0.7 mm × 長さ 3 mm)を入れ、X-Y ペンレコーダにプローブ特性を記録して測定した。プローブは液面から 155 mm の位置に取付けた。原子ビーム中のイオン量は -100 V の平板プローブ(2 cm²)に流れる飽和イオン電流から求めた。イオン流束を測定する平板プローブは上面と側面にカバーを取り付け、上方に流れてくるイオンのみを検出した。プローブ特性およびイオン電流の測定回路を Fig.2 に示す。本装置では電子ビーム発生のためのフィラメント電源はサイリスタ制御されており、その電流は 50 Hz で変動する。これに伴い、原子ビームおよびイオンも変動するので X-Y ペンレコーダーに記録されるのは平均のプローブ電流値である。このためオシロスコープを用いたプローブ測定も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 蒸発量の電子ビーム入力依存性

Fig.3 は蒸着速度の電子銃入力依存性を示したもので、電子ビーム加速電圧を変えた場合も図示した。蒸発量は加速電圧に依存せず、電子ビーム入力に依存することが確認された。

3.2 蒸発部生成ウランプラズマ電子温度

Fig.4 に電子銃入力 7 kW (10 kV, 0.7 A) でのプローブ特性を、Fig.5 にはその電子電流特性を示す。Fig.5 から求まる電子温度は 0.13 eV で、蒸発面温度(約 3000 K ≈ 0.26 eV)の約半分であった。また Fig.6 (a) はオシロスコープを用いて測定した円筒プローブ電流とフィラメント電源一次側の電圧波形である。フィラメントには絶縁トランスを通して加速電圧の電位で数 10 A の電流が供給される。図に示す一次側の電圧に比例した電流がフィラメントに流れている。図の様にプローブ電流はフィラメント電圧が 0 V の時すなわちフィラメント電流が流れていらない時大きくなる。Fig.6 (b) には円筒プローブで、プローブに約 +0.5 V の電圧を印加した時の電圧、電流の時間変化を示す。Fig.6 (a) と同様にフィラメント電流が流れていらない時プローブ電流が大きい。プローブ電流が大きいと電流計測用の 1 kΩ での電圧降下があるため、プローブ電圧が低下している。Fig.7 にはプローブ電圧に対してプローブ電流の最大値、最小値についてそれぞれを対数プロットした電子電流特性を示すが、どちらの場合でも電子温度は 0.13 eV であった。従って、蒸発量、イオン量が 50 Hz で変化しても電子温度は一定であることがわかった。Fig.8 は電子温度の蒸着速度依存性を示す。電子温度は蒸着速度 0.2~2 Å/s で 0.25 eV から 0.1 eV に低下するが、その後、蒸着速度を 18 Å/s まで増加させても 0.1~0.13 eV とほ

とんど一定であった。電子温度の値はガドリニウムと同様に蒸発面温度より低くなることが確認された。次節で議論するように、プラズマは加熱用電子ビームによる衝突電離で生成している。このとき二次電子は数 eV あり、生成時の電子温度も数 eV と考えられる。ところが、蒸発部から数 10 cm 上で測定した電子温度は約 0.1 eV であった。プラズマ生成部は約 1 cm³ なので、プラズマは上昇するにつれて膨張する。このプラズマ膨張により電子温度が低下すると考えられる。

3.3 ウラン原子ビーム中のイオン量

電子銃の加速電圧を 7 kV あるいは 10 kV にして平板プローブを用いてオシロスコープを用いて測定したイオン電流と電子ビーム電流入力との関係を Fig. 9 に示す。プローブ電流はオシロスコープでのモニター波形最大値、最小値の平均としたが。イオン流束

$$J_i = \frac{I_i}{eA}, \quad (1)$$

はである。ここで、 I_i はイオン電流、 e は素電荷、 A は平板プローブ捕集面積である。一方、原子ビーム流束 J_a は水晶振動子型膜厚計での蒸着速度 R より次のように求めることができる。

$$J_a = \frac{R\rho}{m} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2, \quad (2)$$

ここで、 ρ はウラン密度(18.7 g/cm³)、 m はウラン原子の質量、 h_1 、 h_2 はそれぞれ水晶振動子型膜厚計、プローブの蒸発面からの高さである。 $(h_1/h_2)^2$ は J_a が蒸発部からの距離の二乗に反比例するとして、膜厚計の蒸着速度をプローブ位置での原子ビーム流束に変換している。従って、原子ビーム中のイオン量の割合 α は次式から求めた。

$$\alpha = \frac{J_i}{J_a} = \frac{I_i / (eA)}{R\rho / m(h_1 / h_2)^2} \quad (3)$$

なお、電離度はイオン密度と原子ビーム密度の比であり、また密度は流束と速度の比で定義される。プラズマは原子ビームより速く上昇する²⁾ため、(3)式は電離度とは異なる。Fig.10 は加速電圧 7 kV と 10 kV での原子ビーム中イオン量の割合の電子ビーム入力依存性を示す。原子ビーム中のイオン量の割合は電子ビーム電流の増大に伴い高くなり最大で 3% 以上にもなる。また同じ電子ビーム入力でも加速電圧が低いほどイオンの割合が高いことがわかった。

プラズマ特性測定時の蒸発面温度は、蒸着速度から推定すると 3100 K 程度になる。この時の熱電離度は既報²⁾と同様に Saha の式を用いて計算すると約 0.3% であり、蒸発

部でのイオン化に熱電離はほとんど寄与していない。一方で、蒸発ウラン原子と加熱用電子ビームとの衝突による電離量を、ガドリニウムの場合と同様に推定してみる。Fig.11に蒸発面近傍で 80～100 Gauss の磁場により偏向されている加熱用電子ビーム中をウラン原子ビームが通過して相互作用する様子を示す。エネルギーが 10 keV の電子ビームが表面に入射すると、蒸発面では入射ビームと同程度のエネルギーで鏡面反射方向に電子ビームが反射される⁸⁾。蒸発面から上昇するウラン原子ビームの一部が図中斜線部において入射、反射電子ビームと衝突して電離される。図中斜線部に原子ビームが滞在している間に電離される割合 α_e を次式で推定してみる。

$$\alpha_e = (1 + \eta) \sigma_e \cdot \frac{I_B}{eS} \cdot \frac{L}{u}, \quad (4)$$

ここで、 η は入射電子ビーム電流に対する反射率でウランの場合 0.48 である⁹⁾。 I_B は電子ビーム電流、 S は電子ビームスポット面積 ($\pi d^2/4$) でスポット径 d は目視により 6 mm とした、 e は電子の電荷、 u は衝突領域でのウラン蒸気速度、 σ_e は電子衝撃による電離断面積、 L は電子ビームと原子ビームの衝突領域長さである。ウランは電子による電離で容易に多価イオン U^{n+} が生成するが、蒸発部では U^{n+} が U 原子と多数回衝突して n 個の U^+ になると思われる¹⁰⁾。このため(4)式での σ_e は $\sigma_e = \sum n \sigma_{n+}$ とした。ここで σ_{n+} は U^{n+} の生成断面積である。Halle 等は電子衝撃によるウランの 1 値から 4 値までの生成断面積を 500 eV 以下で実測している¹¹⁾。ここでは中井らがこの実測値から推定した 100 keV までの半経験式を用いた¹²⁾。半経験式を用いて σ_e を求めると、10 kV では $\sigma_e = 5.54 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 、7 kV では $\sigma_e = 7.40 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ となる。衝突領域長さは電子ビーム軌道とビームスポット径から推定して $L = 15 \text{ mm}$ とした。ウラン原子は 800 m/s～1100 m/s まで加速される¹³⁾。ウラン蒸気速度 u は、衝突領域内で蒸発面温度での平均速度約 500 m/s と実測値の平均値で 700 m/s を用いた。Fig.10 には原子ビーム中イオン量の割合の推定値と電子ビーム入力の関係も示した。図中に示すように 7 kV、10 kV いずれの場合も計算値は実験値とほぼ一致している。Fig.12 には電子ビーム加速電圧 7 kV、10 kV の場合について、原子ビーム中イオン量の割合の蒸着速度依存性を示す。図中には推定値も併せて示す。測定値が推定値と概ね一致することがわかる。加速電圧を 7 kV とした場合の方が、10 kV よりも原子ビーム中のイオン量の割合が大きくなる理由は、電子の加速エネルギーが低くなり、同一電力をウラン液面に入力するのに大電流が必要なこと、電離断面積が大きくなることのためである。以上のように蒸発部生成プラズマは加熱用電子ビームおよび反射電子ビームによる蒸発原子との衝突電離で生じることがこれまで以上に明確になった。

レーザーウラン濃縮装置では、レーザー光照射部での原子ビーム密度を約 10^{13} cm^{-3} と

設計している¹⁴⁾。このとき、今回の測定と同様に3%以上のイオンが発生すると、レーザー光照射部に $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 以上の天然同位体比イオンが流れ込むことになる。このように高いイオン密度では、これまでに報告しているプラズマ除去方法でも除去が非常に困難である。本実験で用いたような加速電圧10kVの偏向型電子銃は、ウラン濃縮装置には適当でないことがわかる。これに対しガドリニウムの大量蒸発に用いた直進型電子銃は、蒸発原子と電子ビームとの相互作用距離が短くなる。また加速電圧も高くでき電子ビーム電流が小さくなり、かつ電離断面積も小さくなる。ウラン濃縮装置では直進型電子銃を用いれば、ウラン原子ビーム中のイオン量を小さくでき、レーザー光照射部にプラズマが流入するのを押さえることができると思われる。

4. おわりに

偏向型電子銃を用いて、ウランを蒸発させたとき生成するウランプラズマの電子温度および原子ビーム中イオン量の割合を測定した。電子温度は0.13eVで蒸発面温度よりも低い値であった。原子ビーム中のイオン量の割合は最大で3%以上となった。電子ビームの加速電圧を低くすると、ウラン液面への入力を一定にするため大きな電流が必要なこと、電子によるウランの電離断面積が大きくなることから、原子ビーム中のイオン量の割合が非常に高くなかった。このことから、プラズマの生成は電子による衝突電離であることを明確に示すことができた。また、本実験で用いた偏向型電子銃ではイオン生成量が非常に多すぎるので、レーザーウラン濃縮の原子ビーム生成には、ウラン原子と電子ビームとの衝突領域長さが短くてイオン生成量を少なくできる直進型電子銃を用いるのが良いと思われる。

なお、本報告は科学技術庁からの受託研究「レーザー法ウラン濃縮技術開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 大場弘則, 有沢孝, 西村昭彦, 小倉浩一, 柴田猛順: 真空, 35, 282(1992).
- 2) Ohba H., Nishimura A. and Shibata T.: Jpn. J. Appl. Phys., 32, 5759(1993).
- 3) 大場弘則, 西村昭彦, 柴田猛順: JAERI-M 92-194,(1992).
- 4) Ohba H., Nishimura A., Ogura K. and Shibata T.: Rev. Sci. Instrum., 65, 657(1994).
- 5) 大場弘則, 西村昭彦, 柴田猛順: JAERI-M 92-216,(1993).
- 6) 大場弘則, 小倉浩一, 西村昭彦, 柴田猛順: JAERI-Tech 99-047,(1999).
- 7) 大場弘則, 小倉浩一, 柴田猛順: 真空, 35, 1001(1992).
- 8) Schiller S., Heisig U. and Panzer S.: “*Electron Beam Technology*”. John-Wiley & Sons, (1982)Chap.1.p.38.
- 9) Schiller S., Heisig U. and Panzer S.: “*Electron Beam Technology*”. John-Wiley & Sons, (1982)Chap.1.p.36.
- 10) 柴田猛順, 小倉浩一, 大場弘則: 真空, 36, 928(1992).
- 11) Halle J. C., Lo H. H. and Fite W. L.: Phys. Rev., A23, 1708 (1981).
- 12) 中井洋太, 多幡達夫: 日本原子力学会 (1991 秋の大会) 予稿集 L22.
- 13) 大場弘則, 小倉浩一, 西村昭彦, 田村浩司, 柴田猛順: JAERI- Research 99-043,(1999).
- 14) Greenland P.T.: Contemp. Phys., 31, 405(1990).

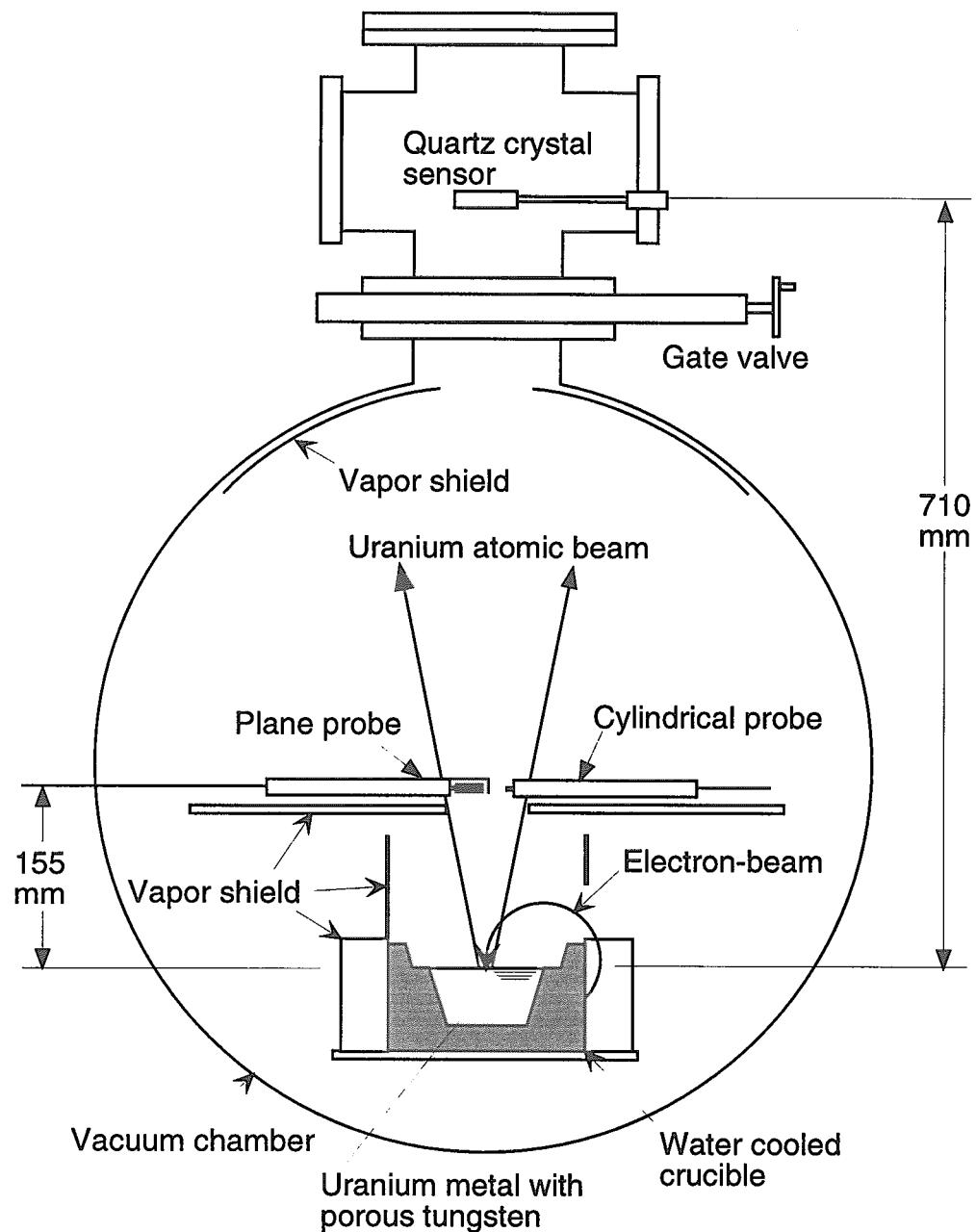


Fig.1. Schematic drawing of experimental apparatus.

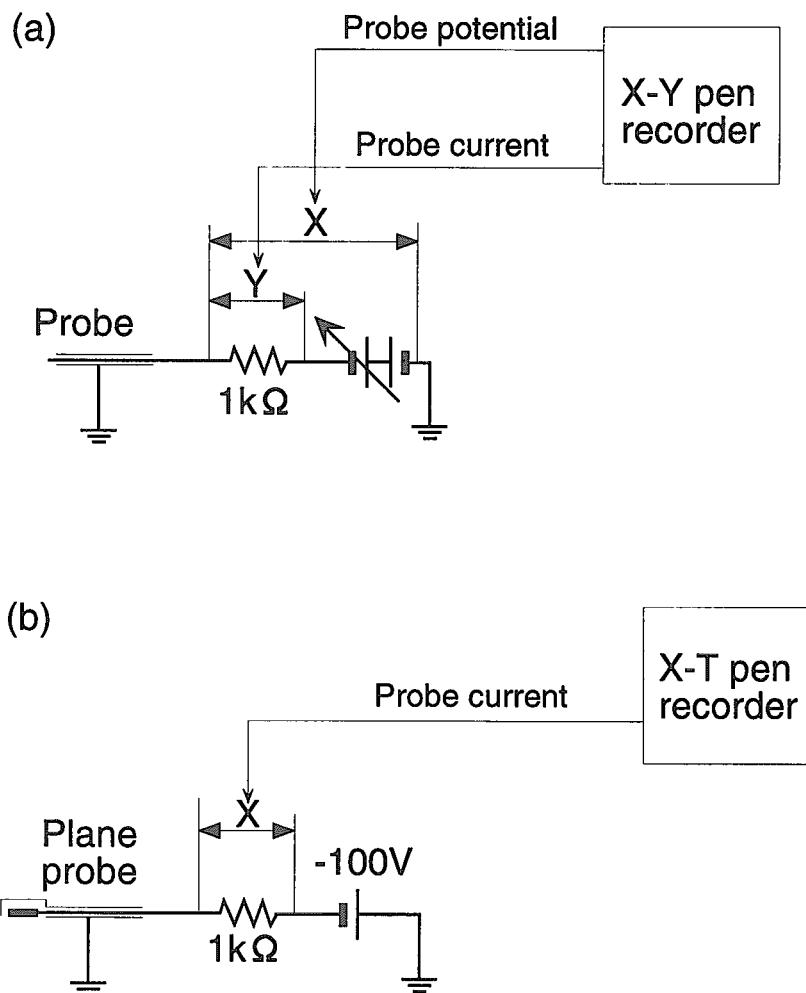


Fig. 2. Electrical circuit for measurement. (a): probe characteristic, (b): ion current.

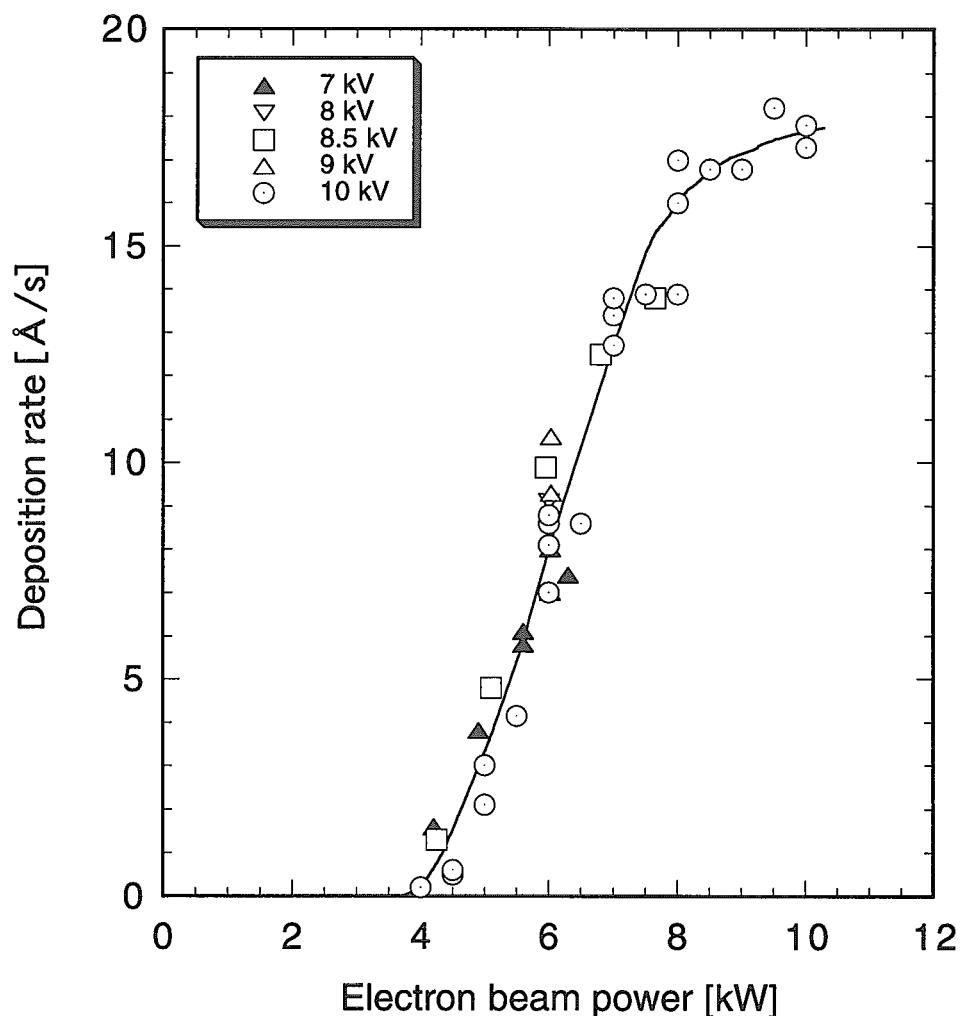


Fig. 3. Deposition rate of uranium at the quartz crystal sensor position vs electron-beam power.

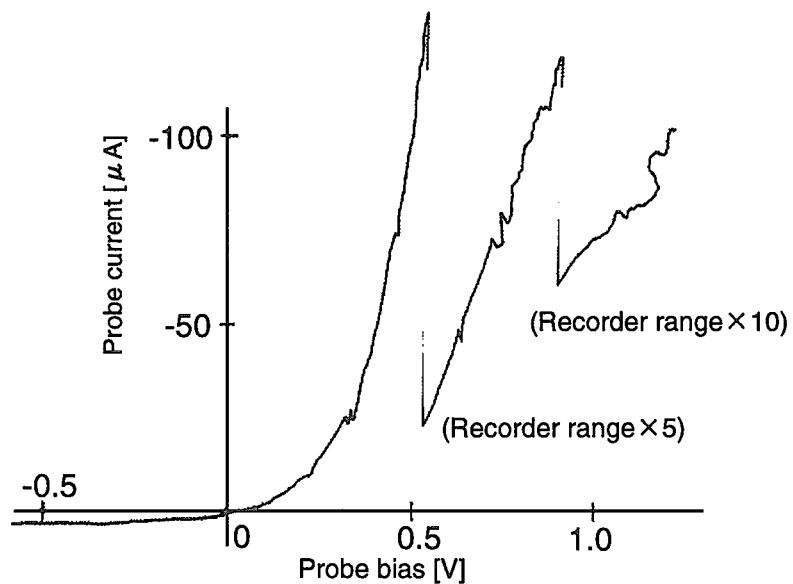


Fig. 4. A typical cylindrical probe characteristics of uranium plasma.
Electron beam power: 7 kW(10 kV, 0.7 A), Deposition rate: 13.3 Å/s.

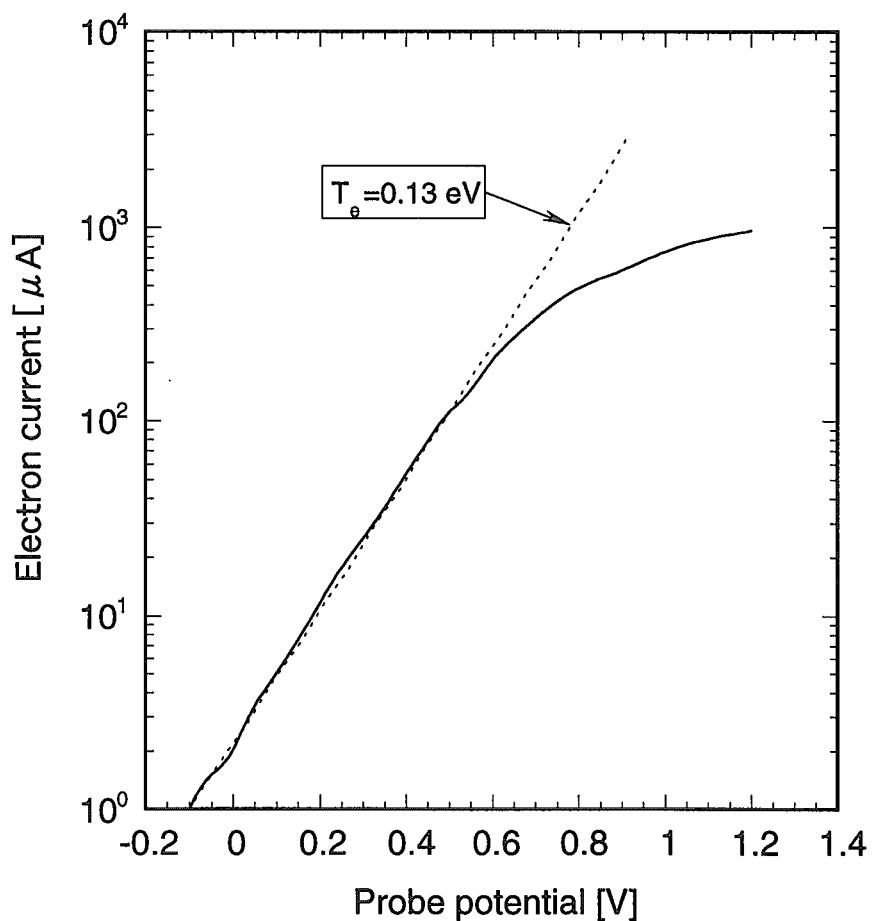
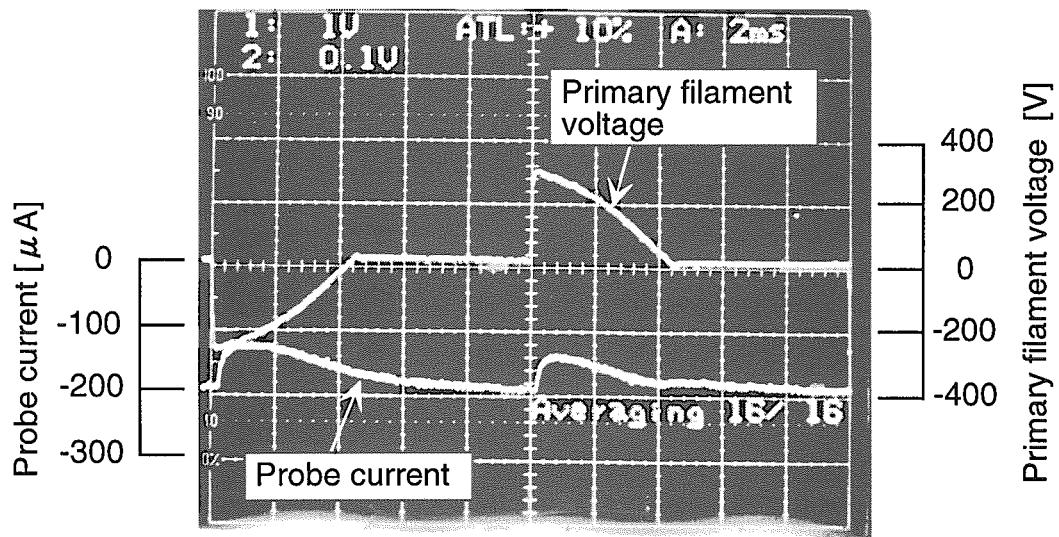
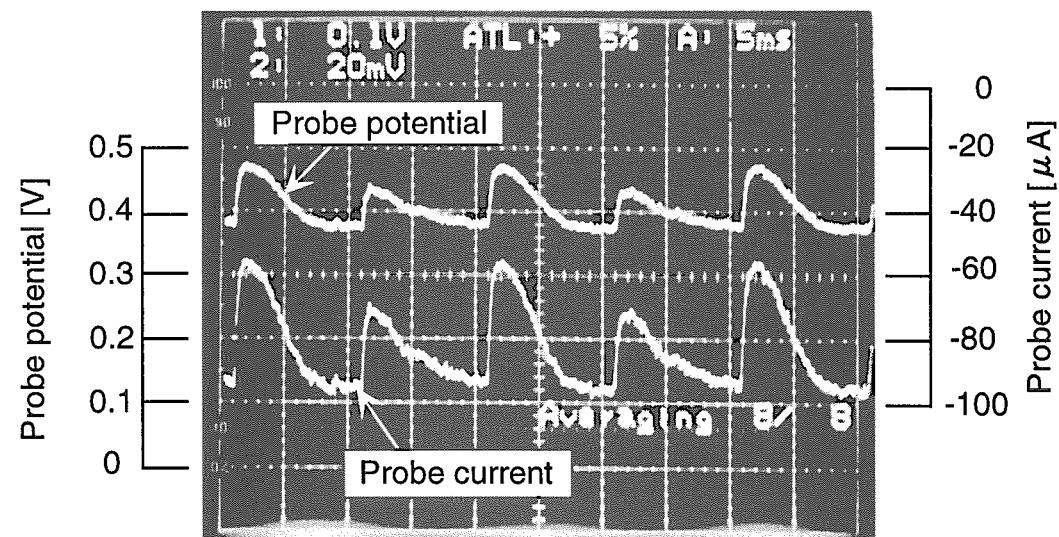


Fig. 5. Electron current characteristic of Fig. 4.



(a) Electron beam power : 5.5 kW, Probe potential: 1.0 V



(b) Electron beam power: 7 kW, Probe potential: 0.5 V.

Fig. 6. Oscillograph of relation between probe current and filament voltage of electron gun power supply (a) and relation between probe current and probe potential (b).

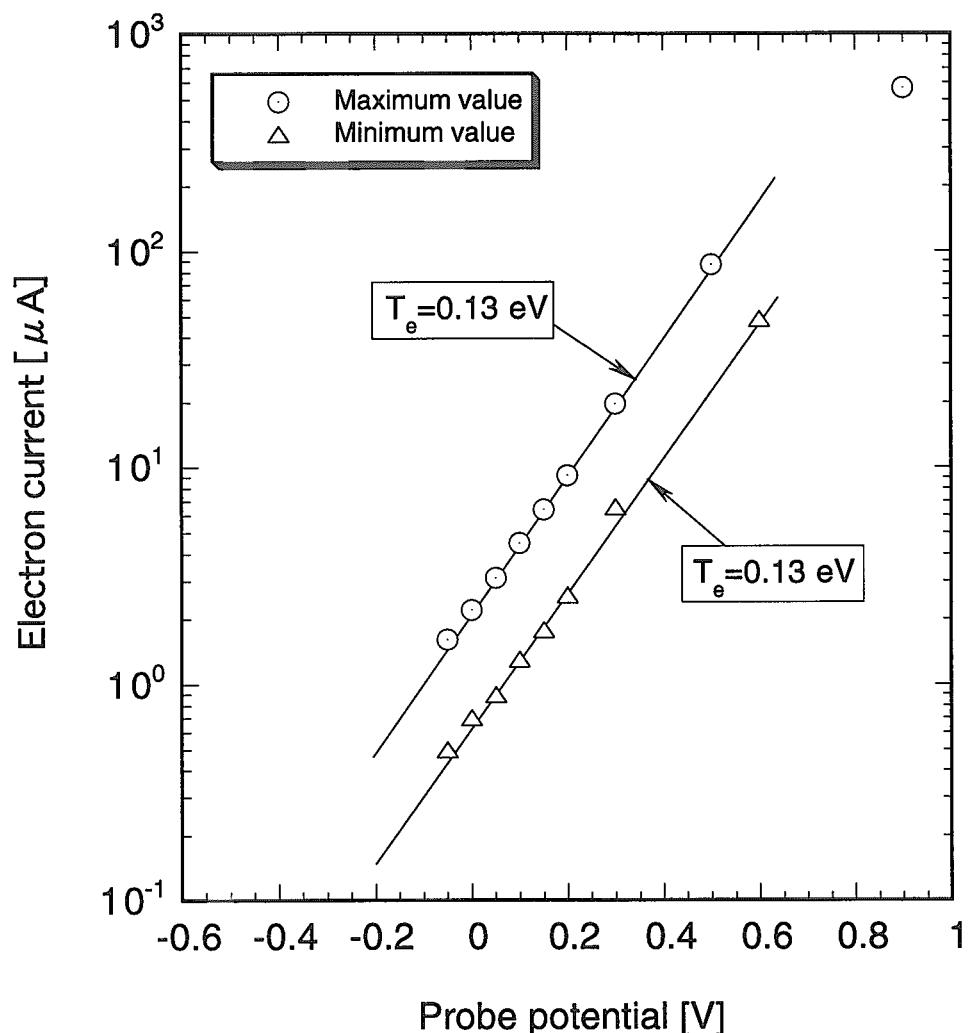


Fig. 7. Electron current characteristic measured with oscilloscope at electron-beam power of 6 kW.

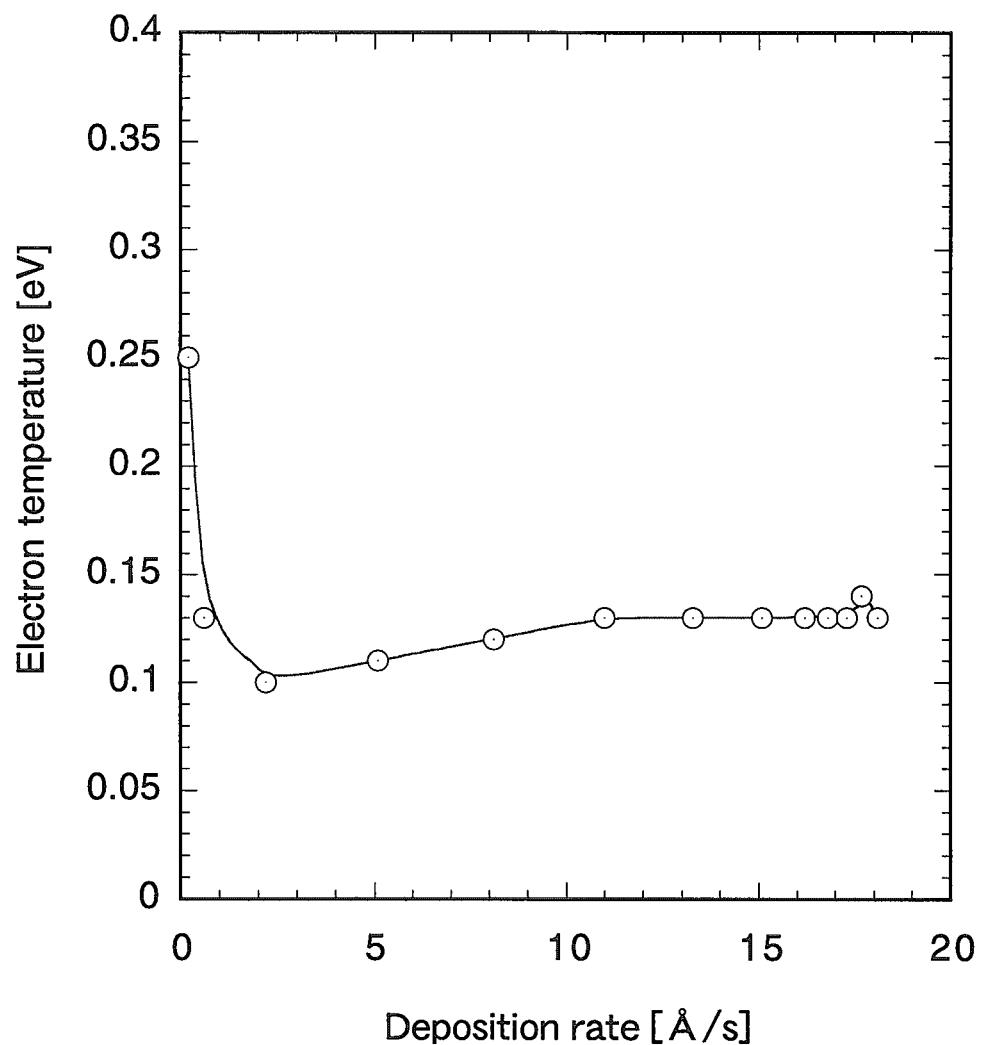


Fig.8. Electron temperature of uranium plasma.

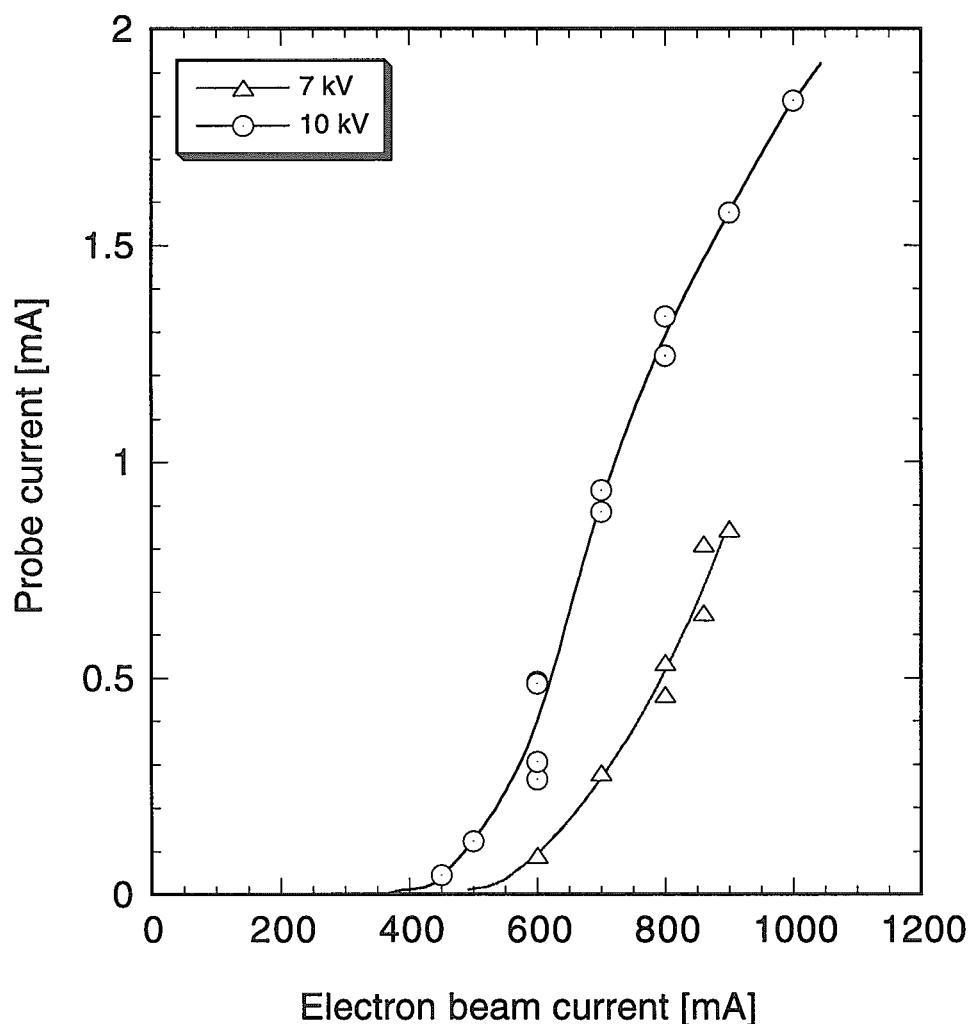


Fig. 9. Probe current measured with oscilloscope vs electron-beam current.

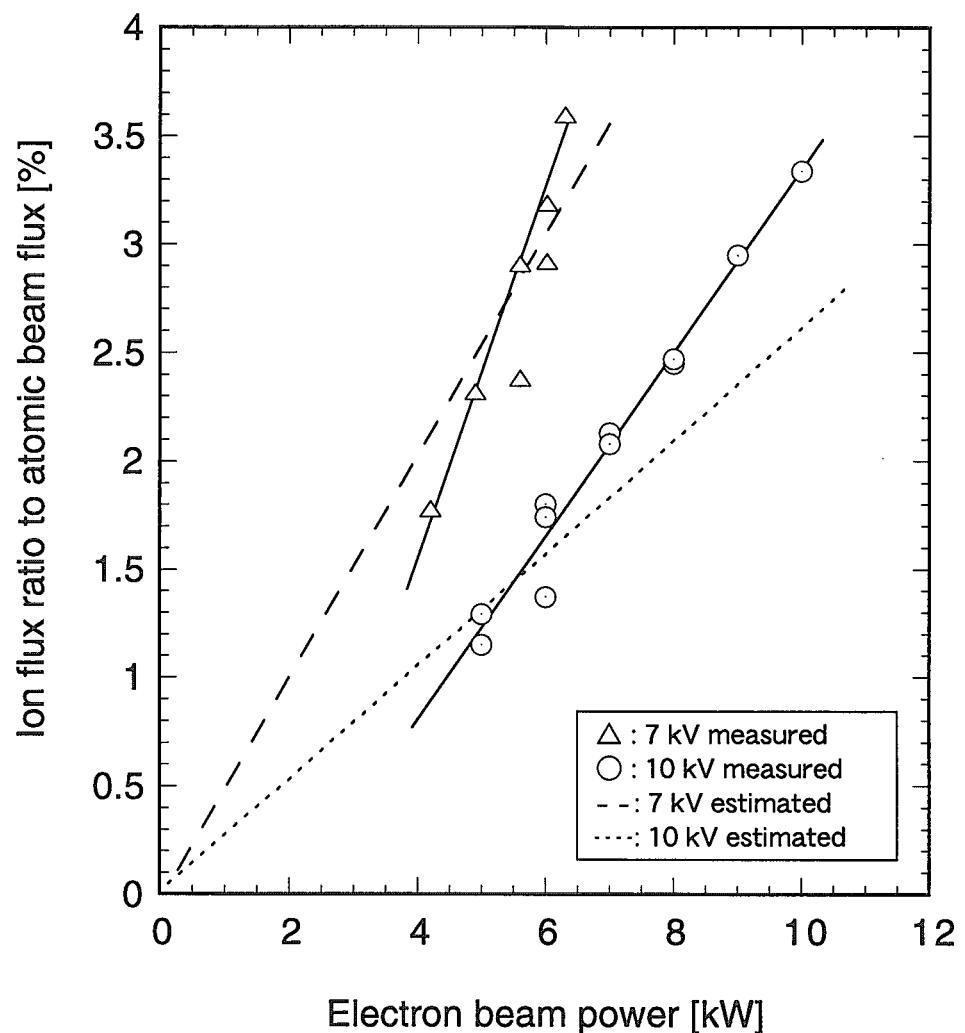


Fig.10. Ion flux ratio in uranium atomic beam vs electron-beam power.

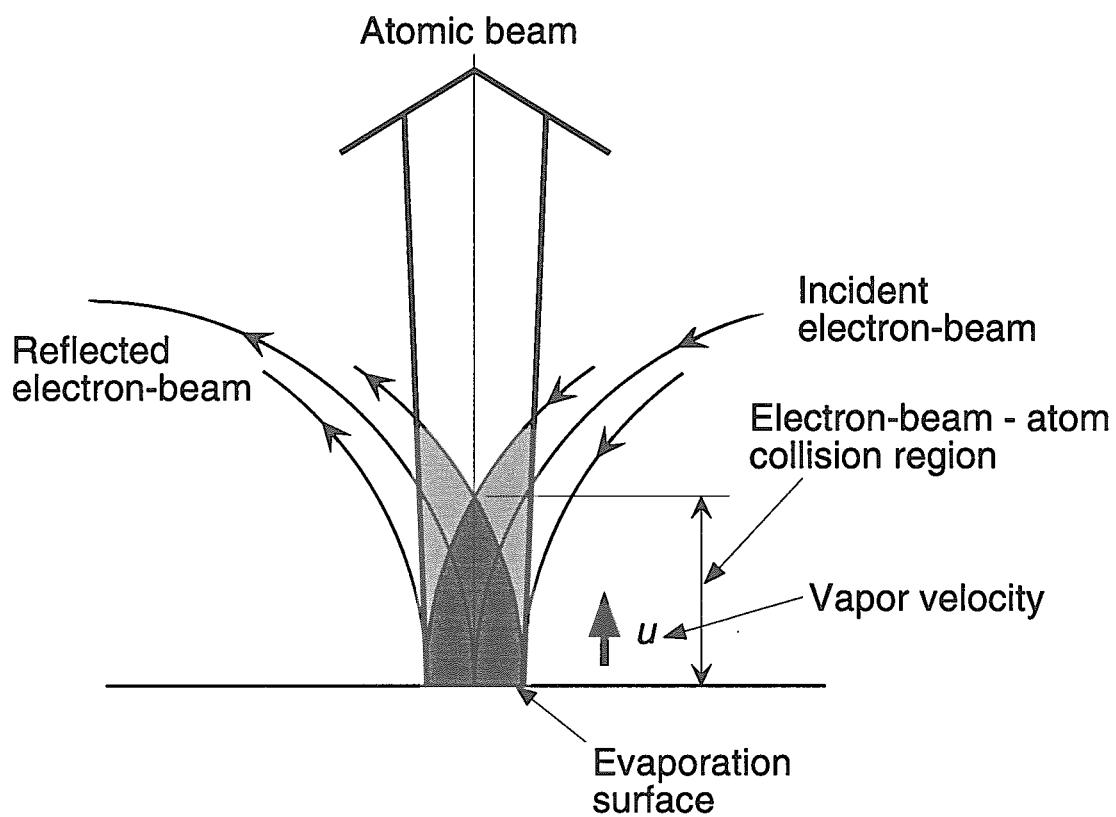


Fig. 11. Schematic view of the uranium atomic beam passing through the incident and reflected electron-beams in the vicinity of the evaporation surface.

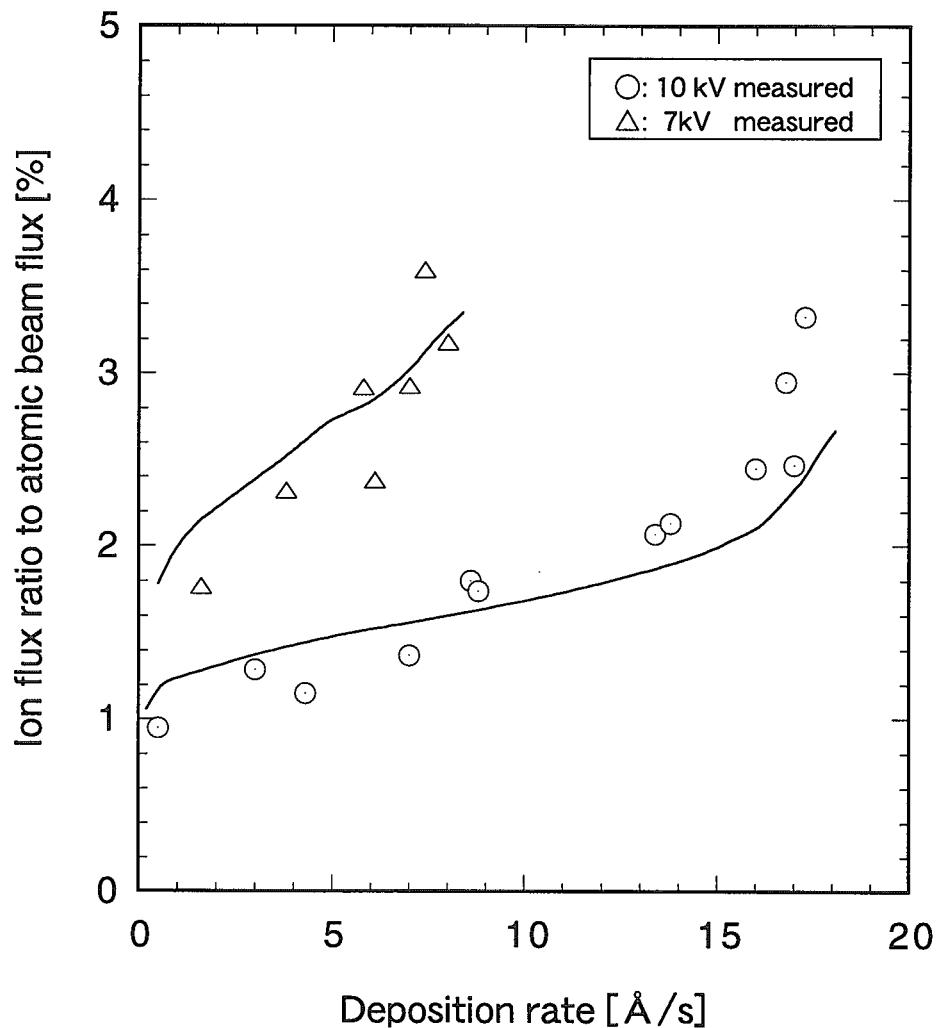


Fig.12. Ion flux ratio in uranium atomic beam. Solid lines denote the estimated value.

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放熱能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855 J(15 °C)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1866 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
3.7 × 10 ¹⁰	1	

照射線量	Gy	rad
	1	100
0.01	1	

線量当量	C/kg	R
	1	3876
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

(86年12月26日現在)

