

JAERI-Research
99-043



JP9950422



電子ビーム加熱生成した
ウラン原子ビームの速度

1999年7月

大場弘則・小倉浩一・西村昭彦・田村浩司・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。
入手の間合わせは、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（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

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.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

電子ビーム加熱生成したウラン原子ビームの速度

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部

大場 弘則・小倉 浩一⁺・西村 昭彦⁺・田村 浩司・柴田 猛順

(1999年6月1日受理)

電子ビーム加熱で生成したウラン原子ビームの速度をレーザードップラースhift法で測定した。ウラン原子ビームの生成には磁場偏向型電子銃あるいは斜入射直進型電子銃を用い、加熱方式の違いによる原子ビーム速度への影響を比較した。磁場偏向型電子銃加熱で生成した原子ビームは、斜入射直進型電子銃加熱で生成したそれよりも加速されることがわかった。これは蒸発部近傍での入射電子ビームエネルギーが蒸発原子の励起やイオン化により損失し、損失エネルギーが原子間衝突時に原子ビームの並進運動エネルギーに転換されることとして説明できた。

Velocity of Uranium Atomic Beam Produced by Electron Beam Heating

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

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

(Received June 1, 1999)

Atomic beam velocities of uranium produced by an electron beam heating were measured by Laser Doppler-shift technique. The electron beam evaporators of the bent beam gun and the axial beam gun were used for comparison of atomic beam velocities. The atomic beam velocity in the bent beam gun was higher than that in the axial beam gun. The excitation and ionization energy of evaporated atoms by energy loss of the incident electron beam was converted to the kinetic energy of atomic beam by atom-atom collision. This is because the rate of the electron impact excitation and ionization of evaporated atoms by the bent electron beam was higher than that of the axial electron beam.

Keywords: Atomic Beam Velocities, Laser Doppler-shift Technique, Electron Beam, Evaporation, Uranium, Bent Beam Gun, Axial Beam Gun, Energy Conversion

⁺ 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
4. おわりに	6
謝 辞	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
3. Experimental Results and Discussion	2
4. Conclusion	6
Acknowledgements	6
References	7

This is a blank page.

1. はじめに

原子法レーザー同位体分離は、電子ビーム加熱により生成した重金属原子ビームに波長可変レーザー光を照射し、目的同位体のみをイオン化して電極に回収するものである。原子ビームの速度は、照射するレーザー光の繰り返し周波数や回収電極形状の決定等、分離装置設計上重要なパラメータである。

著者等^{1,2,3)}は、電子ビーム加熱で生成したガドリニウムの原子ビームにレーザー光を入射させた時の共鳴蛍光のドップラーシフトから原子ビーム速度を求め、蒸発面温度と熱平衡状態にある時の平均速度、および単原子気体が断熱膨張した時の最大速度よりも遥かに速いことを報告した。また、ガドリニウムは熱的に励起されやすい準安定準位が多数存在するため、蒸発面からの膨張時に原子励起エネルギーが原子の運動エネルギーになると考察した。これについては Asano⁴⁾等はマイクロバランスによりウラン原子ビーム速度と蒸着速度の同時測定を行い、やはり原子ビーム速度は蒸発面温度から推定される値よりも遥かに速いことを確認している。さらに、著者等は、磁場偏向型電子銃で生成したガドリニウム原子ビームが斜入射直進型電子銃を用いた場合よりも速いことや、内部エネルギーの運動エネルギーへの転換を考慮した値を超えて加速されていることに着目し、蒸発時に熱的に励起されている原子励起エネルギーだけでなく、蒸発面近傍の蒸発原子が電子ビームにより励起され、この励起エネルギーも速度エネルギーに転換している可能性を示した³⁾。しかしながら、その考察は定量的ではなく、またウラン原子ビームについては電子銃加熱方式の違いによって加速の度合いが異なることを明確にしていなかった。

ここでは、電子銃加熱方式の違いにより生じる蒸発原子励起やイオン化の割合の原子ビーム速度への影響を明らかにするため、蒸発面近傍での蒸発原子と入射電子ビームとの相互作用領域の異なる磁場偏向型電子銃と斜入射直進型電子銃を用いてウラン原子ビームを生成させた。その時の原子ビーム速度をレーザー誘起蛍光法によるドップラーシフトから精度良く測定し、それぞれを比較することにより原子ビーム速度加速機構の定量的な考察を試みた。

2. 実験方法

実験装置は蒸気発生部と計測部から構成される。蒸気発生部の磁場偏向型電子ビーム加熱蒸発装置（以下偏向型電子銃と言う。）および斜入射直進型電子ビーム加熱装置（以下直進型電子銃と言う。）の概略をそれぞれ Fig. 1 (a)、(b)に示す。偏向型電子銃は加速電圧が 10kV、最大出力が 16kW の電子銃（日本電子（株）製 JEBG-203UB）から出た

電子ビームが磁場で 270° 偏向されて水冷銅るつぼ (容量 80cc) 内のウランに垂直に入射して加熱蒸発を行う。一方、直進型電子銃は水冷銅るつぼ (容量 320cc) 内のウランを加速電圧が 20kV、最大出力が 30kW の電子銃 (Ardenne 社製 EH-30/20) により加熱蒸発させるもので、電子ビームが鉛直軸とのなす角度 30° 斜め上方から照射されること、るつぼ近傍には電子ビーム偏向磁場がないことが特長である。どちらの装置でも、るつぼ内には対流熱損失を低減させて蒸発量を増加させる目的でタングステン (板、円筒あるいは粒) を入れている⁵⁾。ウランの蒸発量は水晶振動子膜厚計 (Inficon 社製) を用いて、偏向型電子銃、直進型電子銃においてそれぞれ蒸発面から 620mm、1010mm の高さで測定した。

計測部を Fig.2 に示す。生成したウラン原子ビームに線幅 ($\sim 500\text{kHz}$) の狭いレーザー光を水平方向から入射させ 2 枚のミラーで折り返し、再び原子ビームに 30° の角度で入射させた。レーザー光源にはアルゴンイオンレーザー (Spectra-Physics 社製 model 2030) により励起されるリング色素レーザー (Spectra-Physics 社製 model 380D) を用いた。2 本のレーザー光に共鳴する原子ビームからの蛍光スペクトルを蛍光検出器で測定し、それぞれの蛍光スペクトルピークのシフト量から原子ビーム速度を求めた。色素はローダミン 6G を使用し、ウラン吸収遷移レベル $0-16900\text{cm}^{-1}$ を測定に用いた。波長掃引幅は 150MHz エタロンを有するファブリーペロー干渉計と波長計を用いてモニターした。蛍光スペクトルは光電子増倍管の信号をロックインアンプで処理した後、ペンレコーダーで記録した。蛍光スペクトル測定は、偏向型電子銃では $7\sim 10\text{kW}$ 、直進型電子銃では $10\sim 26\text{kW}$ の電子ビーム入力範囲で蒸発量を変化させて行った。なお測定中の真空容器内の圧力は 10^{-6}Torr オーダーであった。

3. 実験結果および考察

Fig.3(a)、(b)はそれぞれの蒸発装置での膜厚計位置における蒸着速度と電子ビーム入力の関係を示した。蛍光スペクトル測定結果の一例として、Fig.4 に直進型電子銃で蒸発量が最も多い蒸着速度 8.1\AA/s における蛍光スペクトルを示す。図中で、A が蛍光スペクトル、B が 150MHz のエタロンからのモニター信号である。水平に入射させたレーザー光に共鳴した鋭いピークの長波長側には、斜め 30° に入射したレーザー光によってドップラーシフトした、より広がった蛍光スペクトルがある。また、短波長側に認められる小さなピークについては、長波長側に認められたピークの持つシフト量とがほぼ同程度であることから、レーザー光導入窓の表面反射によって 30° 入射したレーザーと逆方向に進行するレーザー光により生じたものと思われる。原子ビーム速度 $u(\text{m/s})$ は水平に入射させたレーザー光の共鳴蛍光スペクトルピークと、斜め 30° に入射したレーザー光によってドップラーシフトした蛍光スペクトルピークの周波数シフト

ν_{shift} を用いて次式から求めた。

$$\nu_{shift} = \frac{u}{c} \nu_0 \sin \theta, \quad (1)$$

ここで c は光速で、 ν_0 はレーザー光の中心周波数、 θ はレーザー光水平方向と折返し斜入射レーザー光との交差角で 30° である。Fig.4 の測定例での原子ビーム速度は、エタロンのモニター信号を基準にしたシフト量から求めると $u=907\text{m/s}$ となる。

Fig.5、Fig.6 にはそれぞれ偏向型電子銃、直進型電子銃を用いた時の原子ビーム速度の蒸着速度依存性を示す。図中には蒸発面温度 T_0 での熱平衡状態における平均速度

$$u_T = \sqrt{\frac{8kT_0}{\pi m}}, \quad (2)$$

およびこの蒸発面温度に等しい単原子気体の断熱膨張により加速され、マッハ数が無限大になった場合の最大速度

$$u_M = \sqrt{\frac{5kT_0}{m}}, \quad (3)$$

を示した。ここで、 k はボルツマン定数、 m は原子の質量である。ここでの蒸発面温度は水晶振動子膜厚計で測定した蒸着速度とウランの飽和蒸気圧データ⁶⁾を用いて既報⁷⁾のように推定した。また、ウラン原子ビームは単原子気体であるが、基底状態近傍に多くの準安定準位があるために蒸発面温度程度でもかなりの割合が励起状態に存在すると考えられ、これに対応する原子励起エネルギーがある。ここで、蒸発面近傍における原子間衝突により原子の励起エネルギーが並進運動エネルギーに移ると考えてみる。蒸発面では原子の並進温度と原子励起温度が蒸発面温度に等しいとして、これらに分配されたエネルギーが蒸発面近傍での膨張を経てすべて原子ビームの流線方向の運動エネルギーに断熱的に移ったとすると、次のエネルギー保存式より

$$\frac{1}{2} m u_{ex}^2 = \frac{5}{2} k T_0 + \frac{\sum g_i E_i \exp\left(-\frac{E_i}{k T_0}\right)}{\sum g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k T_0}\right)}, \quad (4)$$

蒸発面温度 T_0 に相当する原子励起エネルギーにおいて並進温度および原子励起温度がともに 0K まで低下したと仮定、つまりウラン原子の励起エネルギーが全て並進エネルギーに転換した場合の最大速度 u_{ex} を求めることができる。図中には(4)式で求めた速度も示した。ここで、 E_i はエネルギー準位、 g_i は縮重度であり E_i の全角運動量 J の時 $2J+1$ である。エネルギー準位および J 値は文献値⁸⁾を用いた。

測定した原子ビーム速度は蒸着速度が 0 \AA/s 近傍では蒸発面での原子間衝突が無く、どちらの電子銃を用いた場合でも熱平衡速度に近いが、蒸発量を増加させると加速されていく。偏向型電子銃では蒸着速度 $0.2 \sim 12.5 \text{ \AA/s}$ に対して $550 \sim 1100 \text{ m/s}$ であるが、蒸着速度が 2 \AA/s を超えると u_{ex} を遥かに超えて加速されている。一方、直進型電子銃では $0.1 \sim 8.0 \text{ \AA/s}$ に対して $500 \sim 900 \text{ m/s}$ であり、 u_M を超えて u_{ex} に漸近しているのがわかる。

ここで、両者の蒸発量を無次元数で置き換えて比較するために、電子ビーム加熱蒸発面を、ノズル膨張の研究で重要なパラメータとなっているクヌーセン数 (平均自由行程 / 流れの代表長さ) で定義してみる。蒸発量の増加とともにパラメータの値も増加すると便利のため、次式で示されるクヌーセン数の逆数 Kn^{-1} を用いた。

$$Kn^{-1} = \frac{D}{\lambda} = \sqrt{2}(\pi d_A^2)ND, \quad (5)$$

ここで、 λ は蒸発原子の平均自由行程、 πd_A^2 は衝突断面積で、 d_A は原子の直径である。なお d_A はウラン原子間距離 2.76 \AA を用いた⁹⁾。 N は蒸発面でのウラン原子密度で、蒸着速度から求めた蒸発面温度 T_0 と熱平衡状態であると仮定した。また、 D は流れの代表長さとして通常ノズル径で定義されるが、ここでは蒸発面での電子ビームスポット径で定義し、目視観察の結果から偏向型電子銃で直径 10 mm 、直進型電子銃では $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ の楕円とした。例えば、偏向型電子銃を用いて蒸発面から 620 mm の高さで蒸着速度 10 \AA/s を得た時、 $T_0=2859 \text{ K}$ 、 $N=2.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ と推定され、 $Kn^{-1}=7.72$ となる。また、直進型電子銃を用いた場合、 1010 mm の高さで 10 \AA/s の蒸着速度が得られると、 $T_0=2939 \text{ K}$ 、 $N=5.04 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $Kn^{-1}=20.1$ となる。 Kn^{-1} をパラメータとして偏向型電子銃あるいは直進型電子銃を用いて生成した原子ビーム速度の測定結果を Fig.7 に示す。このように明らかに直進型電子銃の方が高密度で蒸発しているのも関わらず、原子ビームは偏向型電子銃を用いた場合、最大で 200 m/s 以上も高速で蒸発面から上昇していることがわかった。

Fig.8 は蒸発面近傍での加熱用電子ビームと原子ビームとの相互作用を偏向型電子銃の場合(a)と直進型電子銃の場合(b)について模式的に示したものである。偏向型電子銃の場合、蒸発面に対して電子ビームは弧を描いて垂直に入射し、これにより原子ビームと電子ビームとの衝突長さが直進型電子銃に比べて長くなる。また、偏向型電子銃の加速電圧は 10 kV であり、直進型電子銃の加速電圧 20 kV より低いために、入射時の蒸発

原子の励起やイオン化率等が高くなる。よって、偏向型電子銃の場合、原子ビームのイオン化だけでなく励起も多く起こり、この励起エネルギーが蒸発面近傍での原子間衝突により並進運動エネルギーに移り原子ビームが加速されていると考えられる。このため、(4)式のウラン原子励起エネルギーの並進運動エネルギーへの転化に加えて、入射電子ビームによってウラン原子が励起あるいはイオン化される損失分のエネルギー ΔE も蒸発原子並進運動エネルギーに転換した場合の最大速度 u_{elec} を次のように推定してみた。

$$\frac{1}{2} m u_{elec}^2 = \frac{5}{2} k T_0 + \frac{\sum g_i E_i \exp\left(-\frac{E_i}{k T_0}\right)}{\sum g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k T_0}\right)} + \Delta E.$$

$$\Delta E = \frac{dE}{dX} \cdot \frac{I_B}{Se} \cdot \frac{L}{u_A}, \quad (6)$$

ここで、 dE/dX は高速電子ビームに対する電離および励起による比エネルギー損失（阻止能）である。 $I_B/(Se)$ は蒸発面での入射電子フラックスで、 I_B は電子ビーム電流、 S は電子ビームスポット面積、 e は素電荷である。 L/u_A は衝突領域長さとして原子ビーム速度の比で、蒸発原子と電子との相互作用時間を表す。偏向型電子銃の加速エネルギーは 10keV なので、ウラン原子 1 個に対する電子の阻止能は $3.16 \times 10^{-15} \text{ eVcm}^2/\text{atom}$ である¹⁰⁾。この電子銃を用いて蒸発面から 620mm の高さで蒸着速度 10 \AA/s を得るには Fig.3(a) から 9.2kW の電子ビーム入力が必要である。また、滞在時間は Fig.8(a) に示したように相互作用長さを 30mm とすれば、原子ビーム速度 1080m/s から $2.8 \times 10^{-5} \text{ s}$ であり、損失のエネルギーは $\Delta E = 10.3 \times 10^{-13} \text{ erg}$ ($=0.64 \text{ eV}$) となる。よって、 $u_{elec} = 1120 \text{ m/s}$ を得る。 u_{elec} の推定に用いた値を Table 1 にまとめた。一方、直進型電子銃の場合では、ウラン原子 1 個に対する入射電子 20keV の阻止能は $2.07 \times 10^{-15} \text{ eVcm}^2/\text{g}$ である。蒸着速度を蒸発面から 1010mm の高さで 8 \AA/s にするには 22.8kW の入力が必要なので、相互作用長さが 10mm、原子ビーム速度 900m/s より、 $\Delta E = 2.17 \times 10^{-13} \text{ erg}$ ($=0.13 \text{ eV}$) が得られる。この時、 $u_{elec} = 929 \text{ m/s}$ と推定できる。Fig.9 には偏向型電子銃と直進型電子銃で加熱生成した原子ビーム速度の測定値と(6)式に基づく推定値および u_{ex} 、 u_T 、 u_M をクヌーセン数の逆数に対して破線で示した。蒸発が顕著になると測定値と推定値はほぼ一致し、それぞれの場合で、電子ビーム加熱生成原子ビームは蒸発の少ない領域では、原子間衝突があまりないために平均速度に近いが、蒸発量が増加するに従い原子間衝突が頻繁になり、膨張冷却、エネルギー交換を経て徐々に加速されていく様子がわかる。このように、電子銃加熱方式により原子ビーム加速の度合いが明らかに異なることを定量的に示すこ

とができた。これにより、加熱用電子ビームの投入電力、軌道、スポット径等により原子ビーム速度が概ね推定できる指針を得た。

4. おわりに

電子ビーム加熱で生成したウラン原子ビームの速度をレーザードップラーシフト法で測定した。ウラン原子ビームの生成には偏向型電子銃あるいは直進型電子銃を用い、加熱方式の違いによる原子ビーム速度への影響を比較した。どちらの電子銃を用いても、ウラン原子ビームは蒸発面温度と熱平衡状態にある原子の平均速度や、膨張冷却によるマッハ数が無限大になった時の最大速度をはるかに超え、さらに原子励起エネルギーの並進運動エネルギーへの転化を考慮した時の最大速度に近づくこと、あるいは超えることを確認した。また、偏向型電子銃加熱で生成した原子ビームは、直進型電子銃加熱で生成したそれよりも加速されることがわかった。これは蒸発部近傍での入射電子ビームのエネルギーが蒸発原子の励起やイオン化のために損失し、その損失分が原子間衝突時に並進運動エネルギーへ転換されるとして説明することができた。

謝 辞

ウラン原子に対する阻止能について貴重な議論をして頂いた近畿大学の中井洋太教授に厚く感謝いたします。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) Nishimura A., Ohba H. and Shibata T. : J. Nucl. Sci. Technol., **29**, 1054(1992).
- 2) 西村昭彦、有沢孝、小倉浩一、大場弘則、柴田猛順 : 真空 **35**, 305(1992).
- 3) 西村昭彦、有沢孝、小倉浩一、大場弘則、柴田猛順 : 真空 **35**, 637(1992).
- 4) Asano T., Uetake N. and Suzuki K. : J. Nucl. Sci. Technol., **29**, 1194(1992).
- 5) 大場弘則、小倉浩一、西村昭彦、柴田猛順 : JAERI-Tech 99-047 (1999).
- 6) Das D., Dharwadkar S. R. and Chandrasekhariah M. S. : J. Nucl. Mater., **97**, 88(1981).
- 7) Nishimura A., Arisawa T., Ohba H., and Shibata T. : J. Vac. Sci. Technol. **A11**, 1516(1993).
- 8) "Smithells Metals Reference Book", 6th ed., edited by Brandes E. A., Butterworths, London 27(1983).
- 9) Blaise J., Radziemski, Jr. L. J. : J. Opt. Soc. Am., **66**, 644(1976).
- 10) Page L., Bertel E., Joffe H., and Sklavenitis L. : Atomic Data **4**, 68(1972).

Table 1. Data used for estimation of atomic beam velocity

Parameter \ Gun type	Bent electron beam	Axial electron beam
Acceleration voltage (kV)	10	20
Stopping power (MeVcm ² /g)	7.88	5.17
Spot size (mm)	10 in diameter	10×15 in ellipse
Interaction zone between atom and electron-beam (mm)	30	10

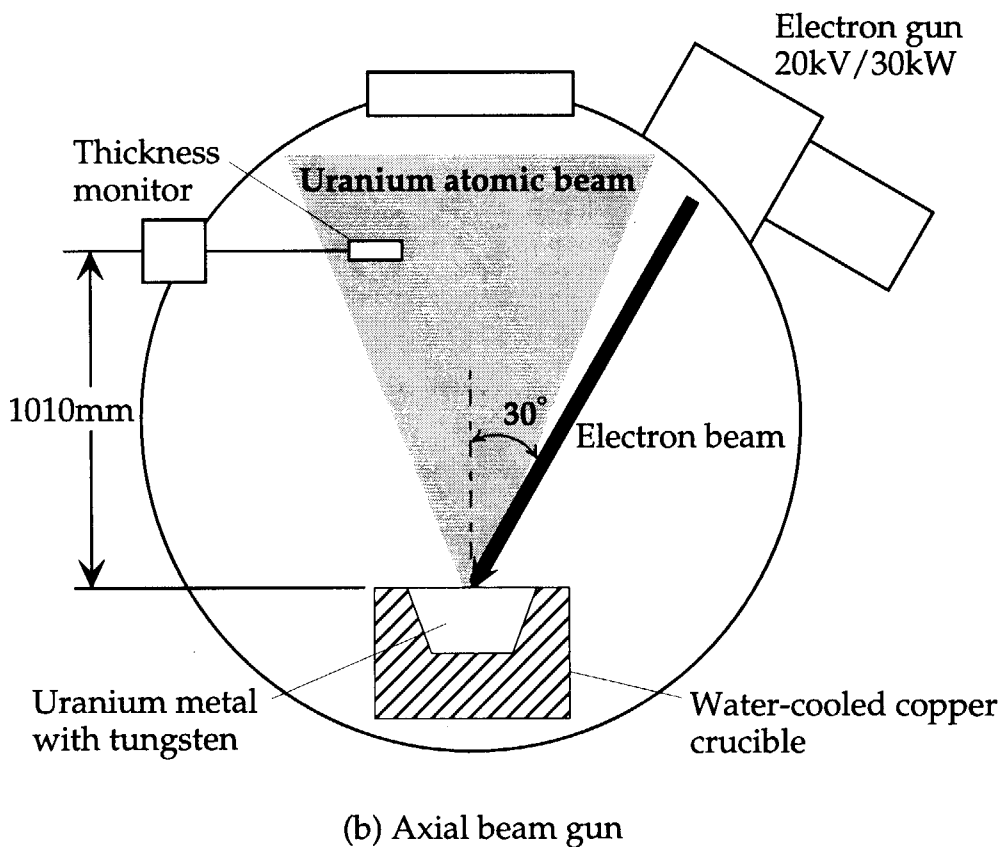
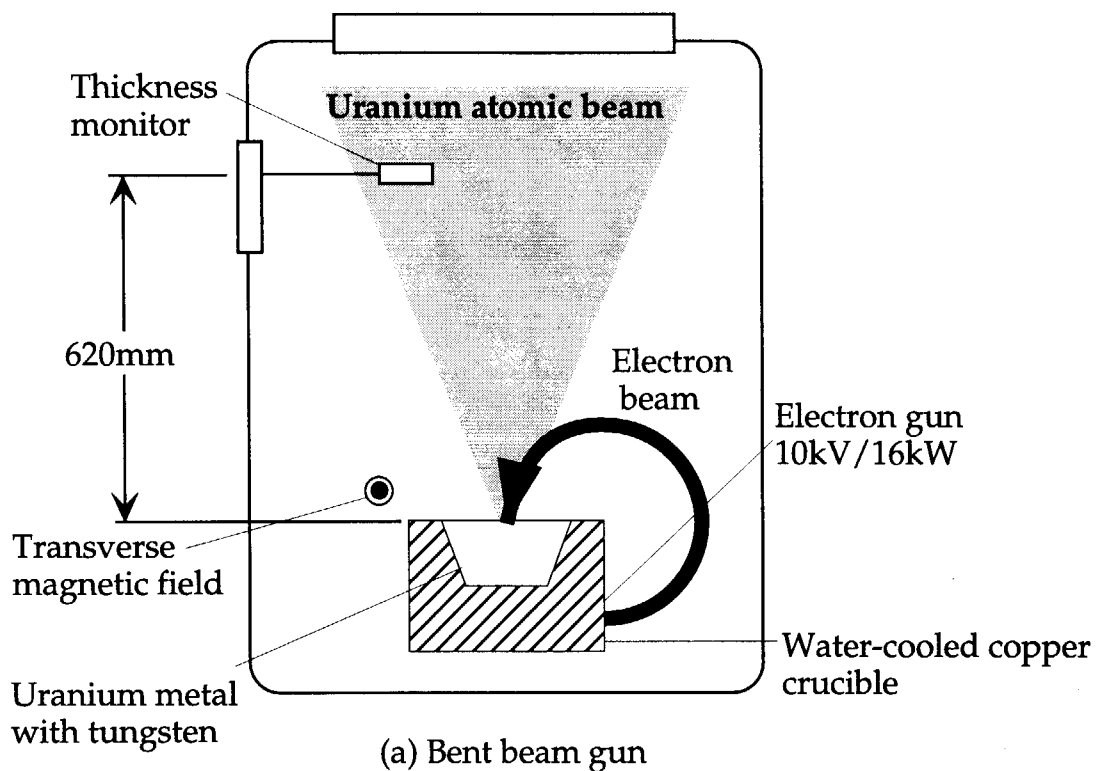


Fig.1 Schematic drawings of two types of electron beam evaporator used for production of uranium atomic beam

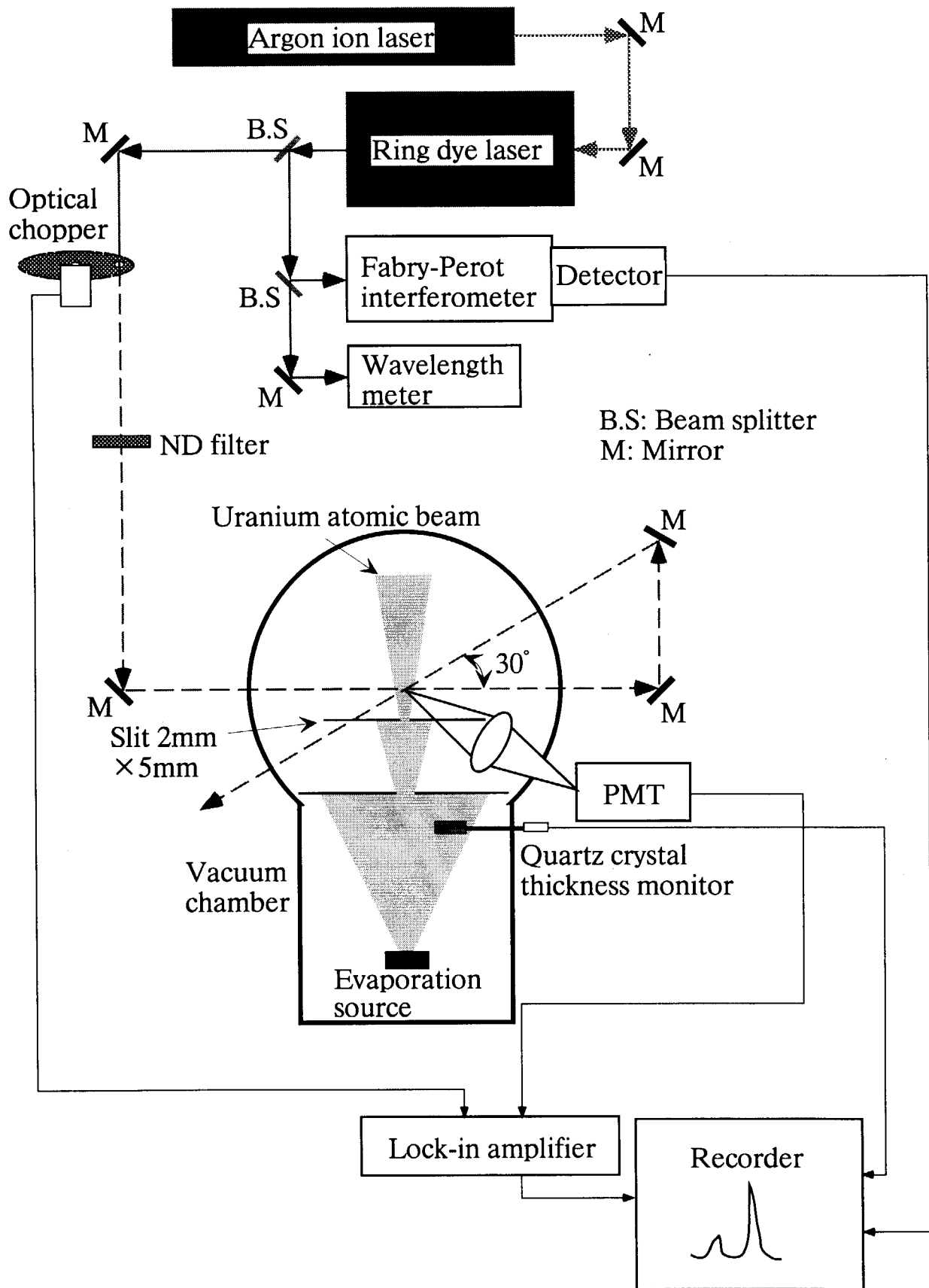


Fig.2 Schematic drawing of experimental apparatus.

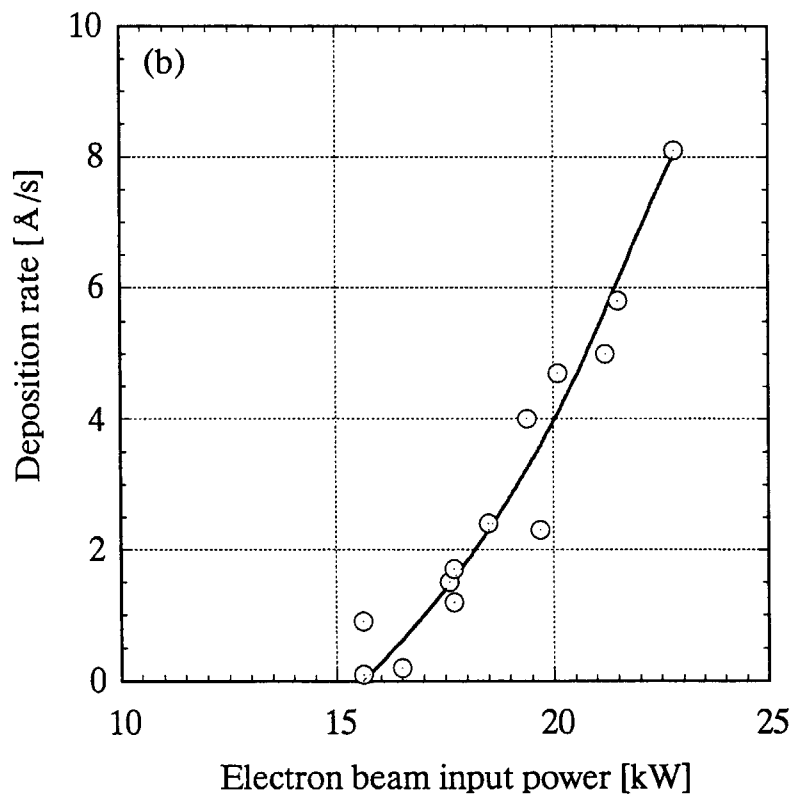
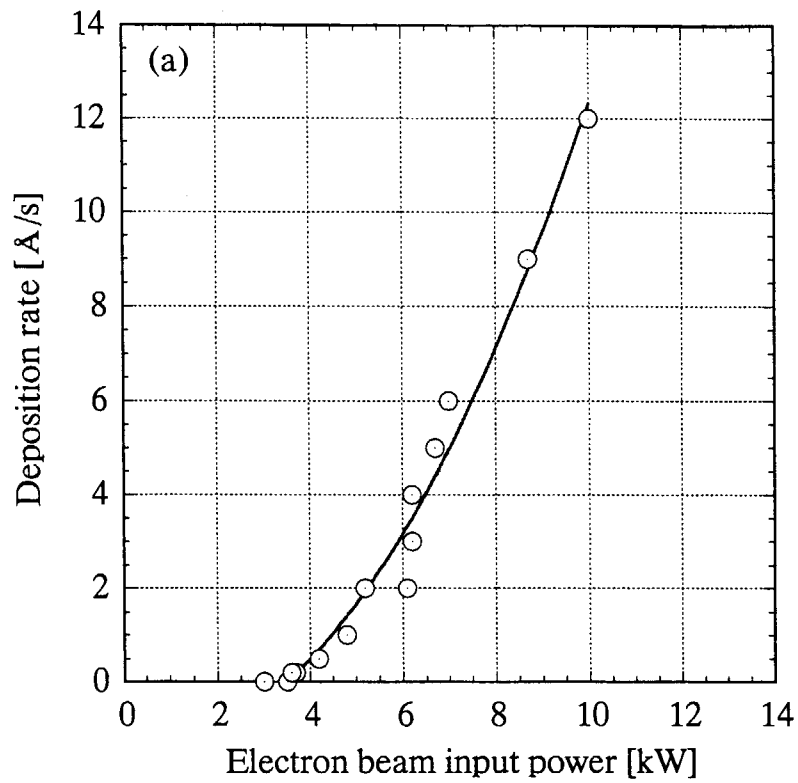


Fig.3 Deposition rates as a function of electron beam input power.
 (a): deposition rate at a height of 620mm by the bent beam gun,
 (b): deposition rate at a height of 1010mm by the axial beam gun.

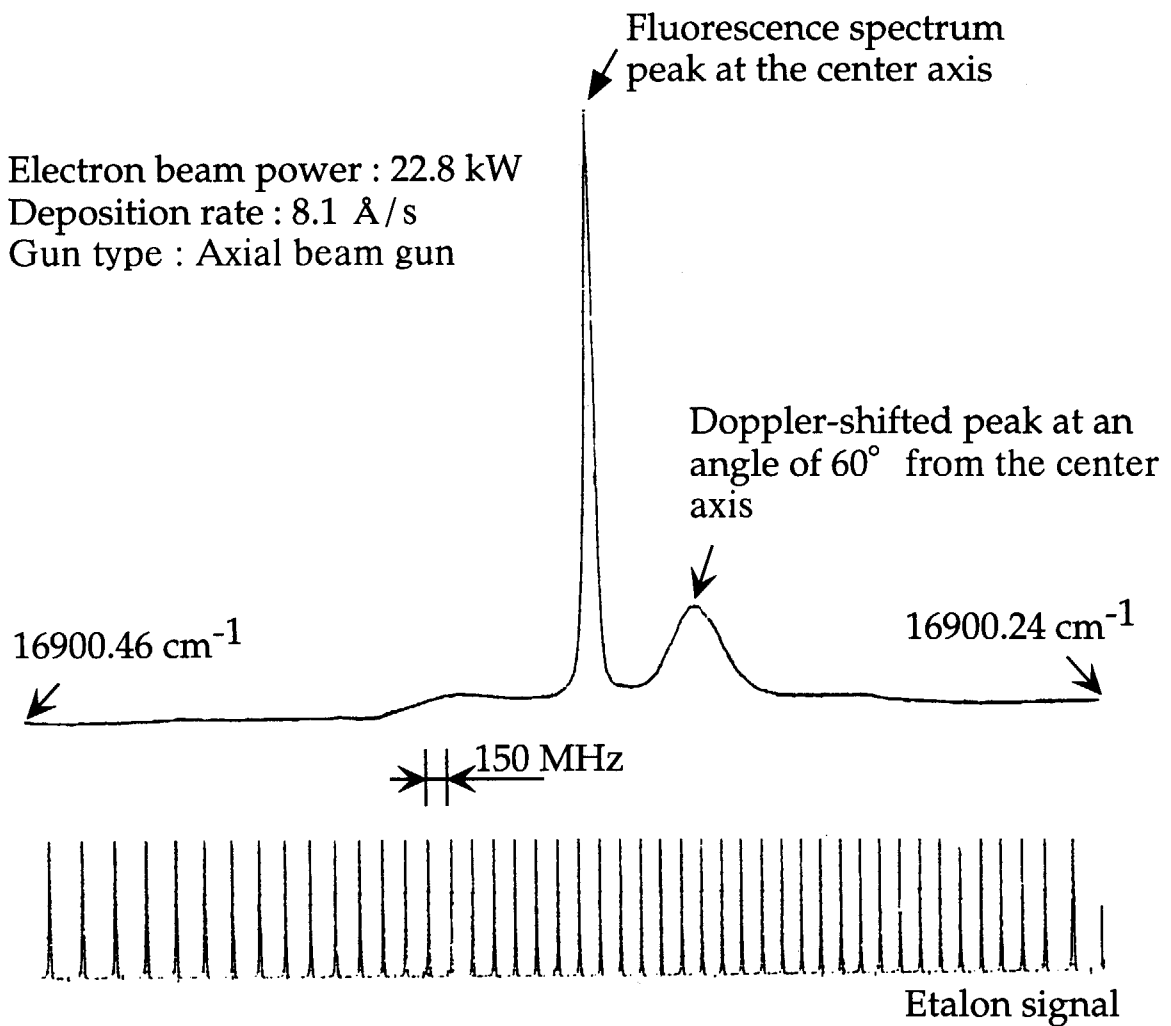


Fig.4 Example of measured fluorescence spectrum of uranium atomic beam by Doppler-shift technique.

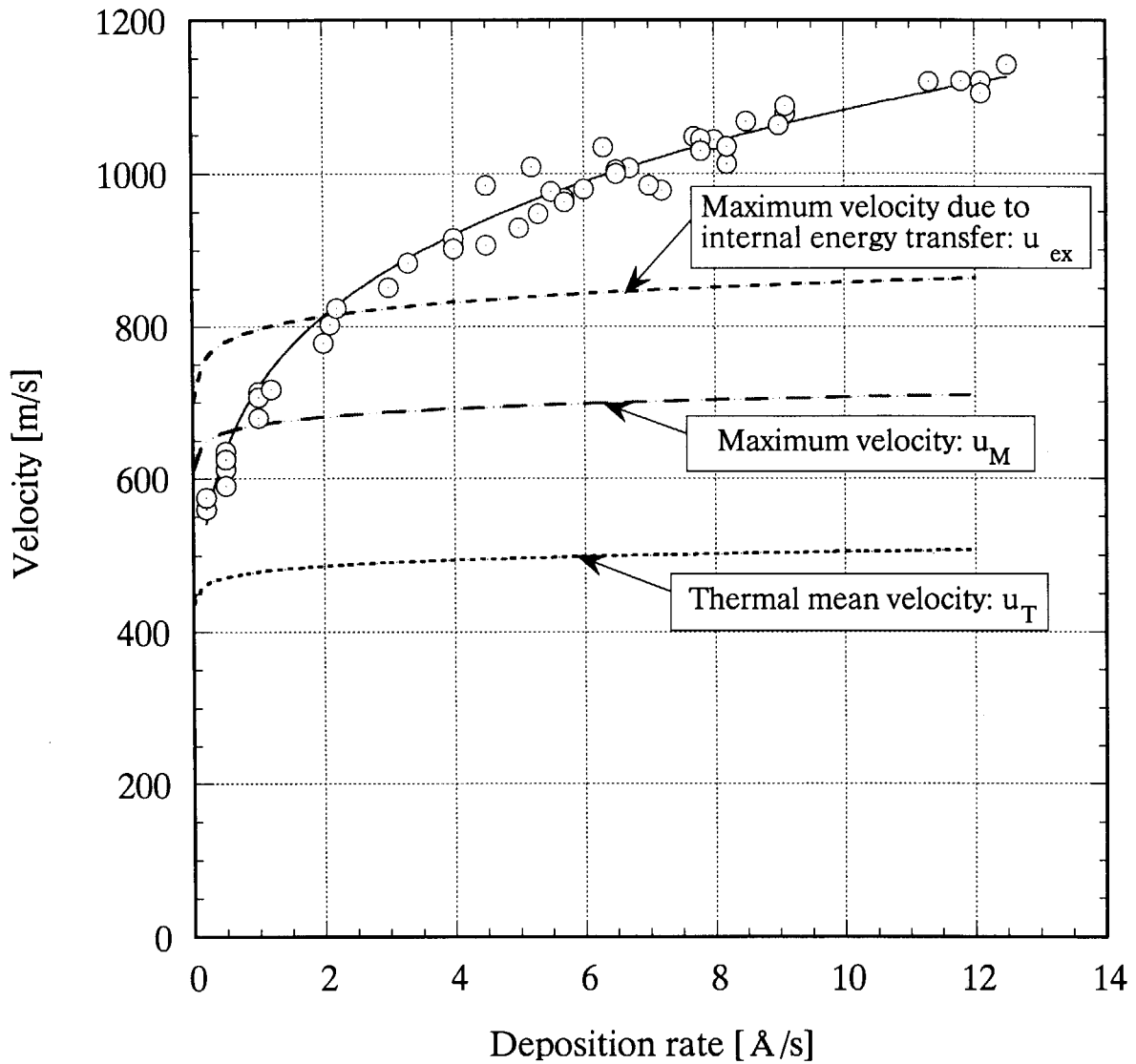


Fig.5 Deposition rate dependence of atomic beam velocity by the bent beam gun. Circles: measured data.

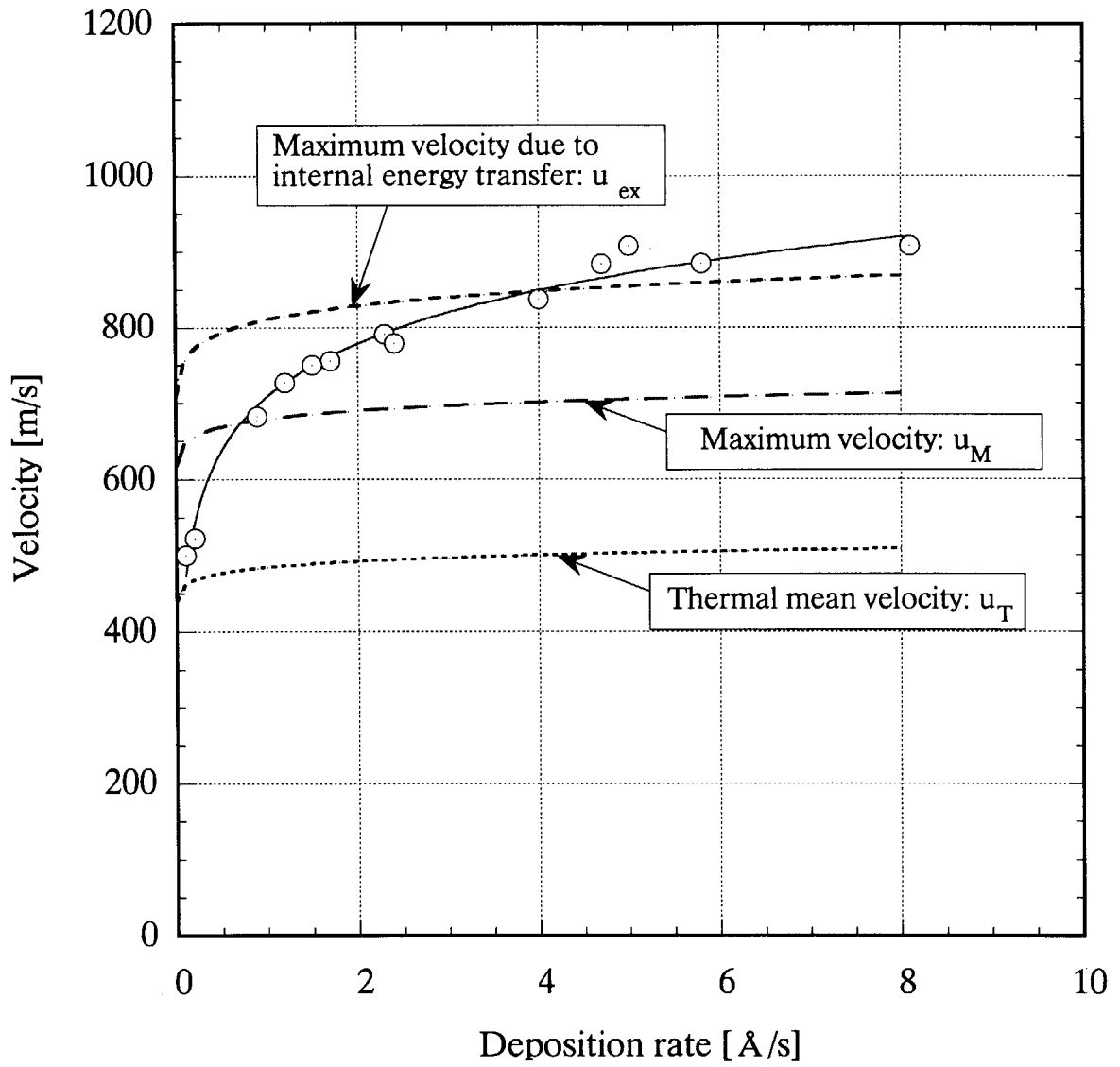


Fig.6 Deposition rate dependence of atomic beam velocity by the axial beam gun. Circles: measured data.

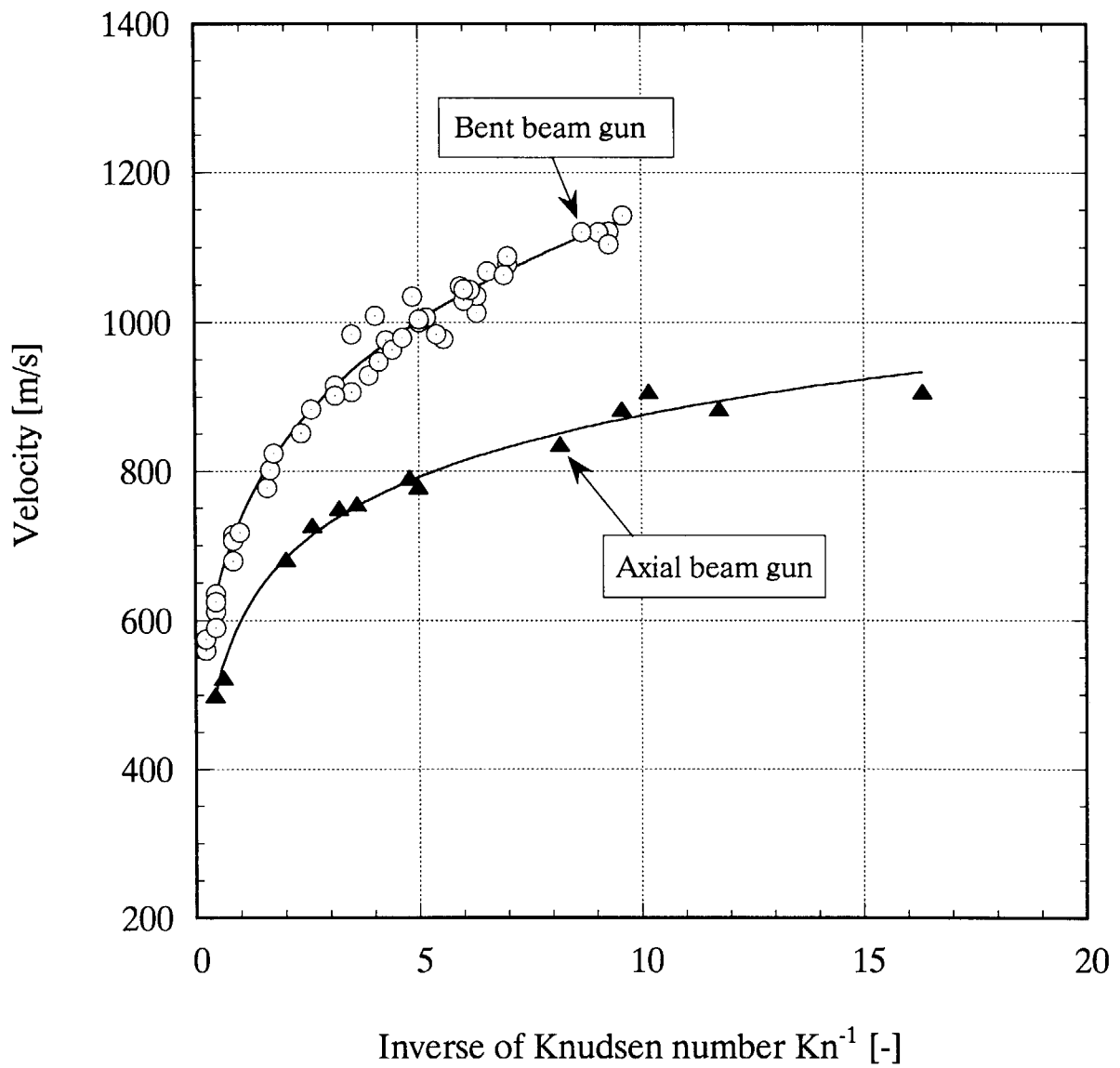
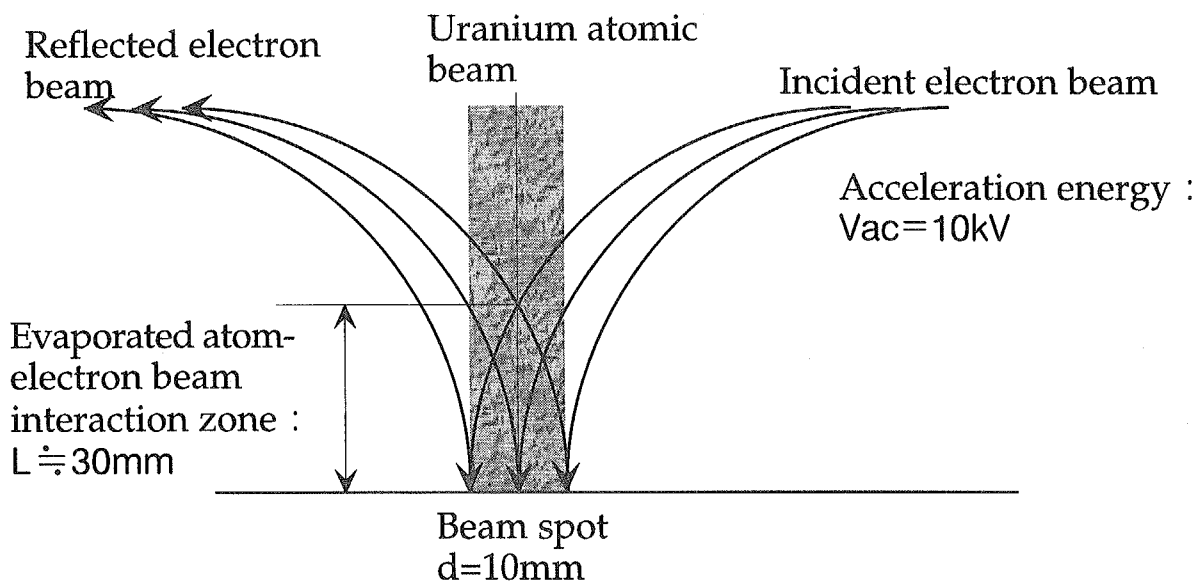
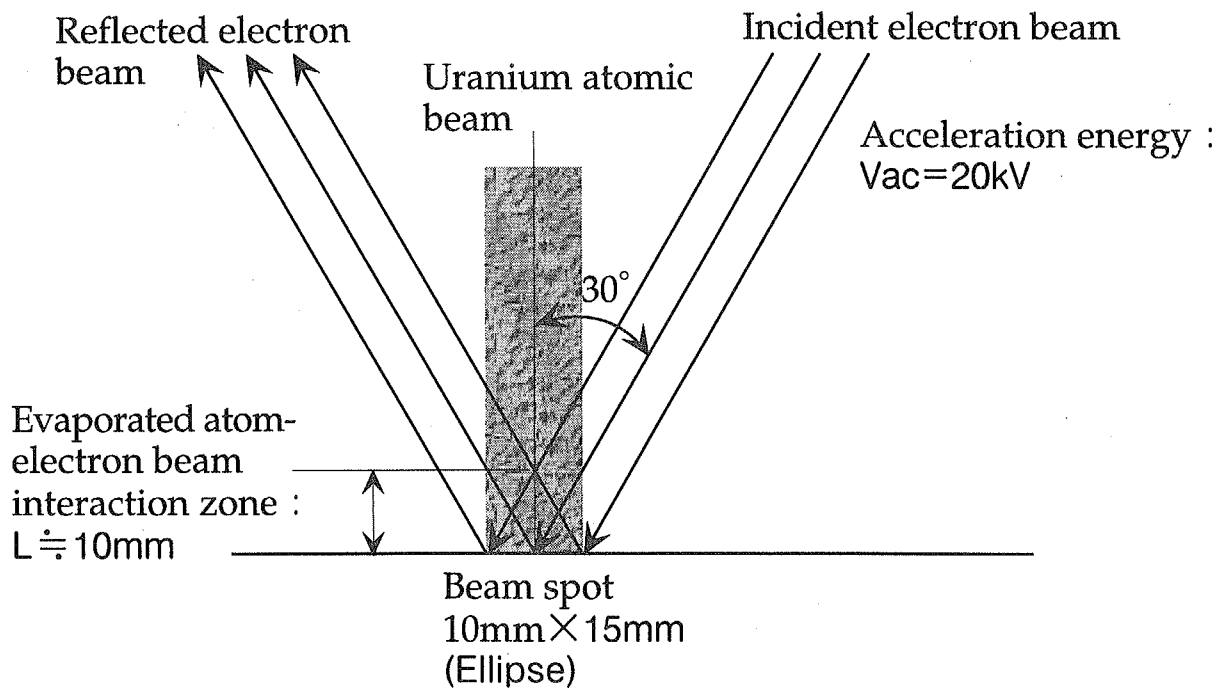


Fig.7 Atomic beam velocities of uranium produced by two types of electron beam gun as a function of inverse of Knudsen number



(a) Bent beam gun type



(b) Axial beam gun type

Fig.8 Schematic view of electron beam evaporation

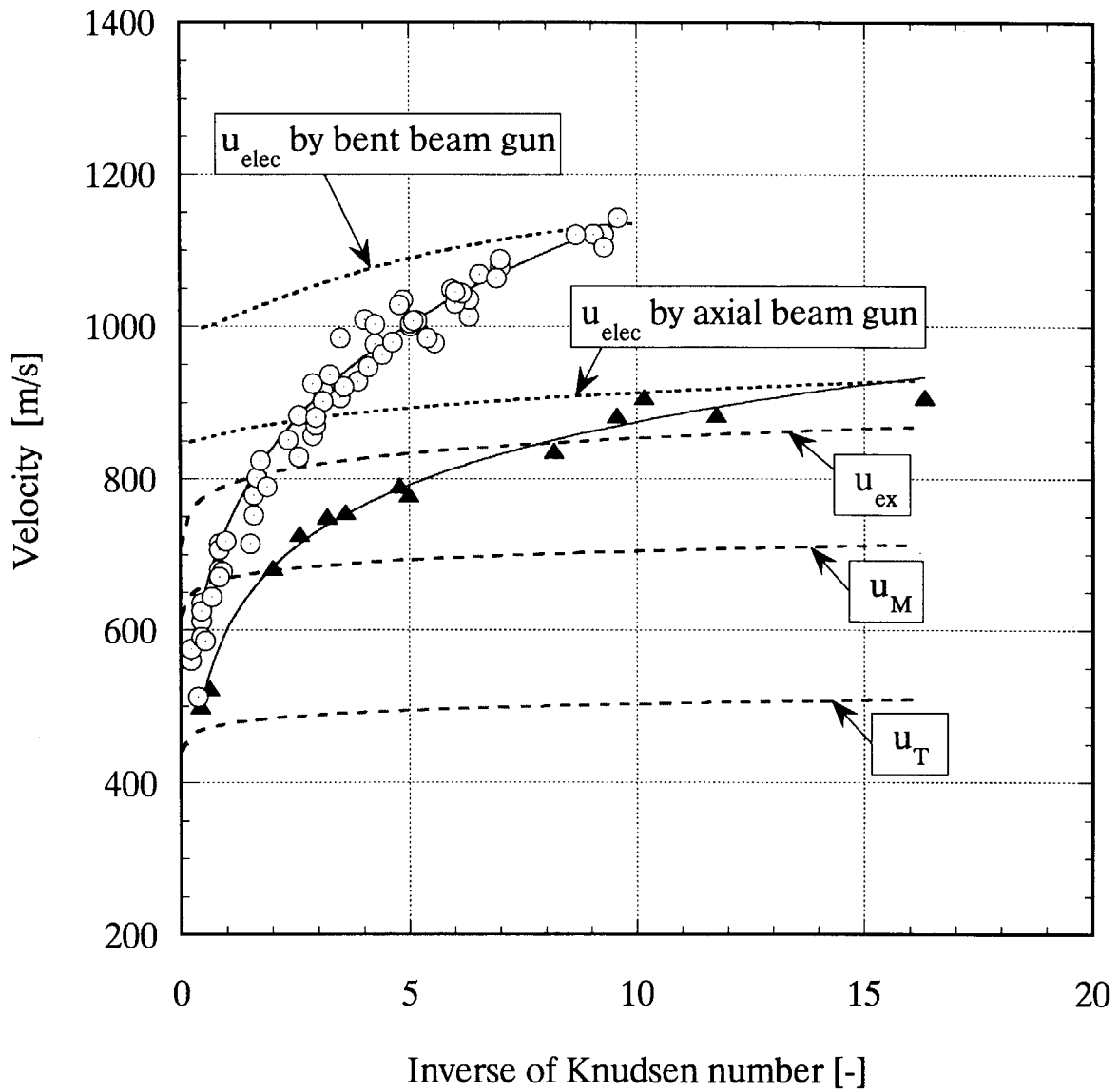


Fig.9 Measured and estimated atomic beam velocities of uranium.
 u_{elec} are the data estimated from the energy loss of electron beams.

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 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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

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
工率, 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
磁束密度	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	
光束密度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(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, 1 eV および 1 u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, ヘクト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。
- E C関係理事会指令では 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 ⁷ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=1 N·s/m²)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁶St (ストークス)(cm²/s)

圧	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 ⁻¹	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	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁷	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁷
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	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

1 cal=4.18605J (計量法)
=4.184J (熱化学)
=4.1855J (15°C)
=4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
=75 kgf·m/s
=735.499W

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

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

電子ビーム加熱生成したウラン原子ビームの速度