

JAERI-Tech
98-020



電子ビーム加熱で生成した希土類金属の
原子ビームの速度

1998年6月

岡崎哲治・田村浩司・足立 肇・大場弘則・雨川和博*・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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

電子ビーム加熱で生成した希土類金属の原子ビームの速度

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部

岡崎 哲治・田村 浩司・足立 肇

大場 弘則・雨川 和博*・柴田 猛順

(1998年5月25日受理)

希土類金属（セリウム、ガドリニウム、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウム）を電子ビーム加熱により蒸発させ、その原子ビーム速度を真空天秤を用いて測定した。蒸発源から382mm上方に設置した天秤蒸着板への蒸発原子蒸着による運動量変化に伴う重量変化から蒸着速度と原子ビーム速度を算出した。セリウム、ガドリニウムの速度は、蒸発量増加に伴い1000~1100m/sまで加速されるが、ディスプロシウム、サマリウムおよびイッテルビウムの昇華性金属の速度は蒸発量にあまり依存せず、450~650m/sとほぼ一定で熱平衡速度に近い値であった。昇華性金属を電子ビーム加熱した場合は、広い領域から蒸発するので蒸発面近傍での原子間衝突が少なく、膨張冷却による加速がないためと考えられる。

Atomic Beam Velocities of Rare Earth Metals Produced by Electron Beam Heating

Tetsuji OKAZAKI, Koji TAMURA, Hajime ADACHI,
Hironori OHBA, Kazuhiro AMEKAWA * and Takemasa SHIBATA

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

(Received May 25, 1998)

Atomic beam velocities of rare earth metals (cerium, gadolinium, dysprosium, samarium, ytterbium) were measured using a vacuum balance during evaporation with electron beam. Deposition rate and velocities were determined from the weight change and the momentum change due to vaporized atom deposition under the deposition plate installed at a height of 382 mm above the evaporation surface. Velocities of cerium and gadolinium atomic beam were accelerated up to 1000~1100m/s by increasing the evaporation rate. On the other hand, velocities of sublimates such as dysprosium, samarium and ytterbium did not depend on the evaporation rate and had the nearly constant value between 450~650 m/s which approximated to the thermal equilibrium velocity. It is considered that the sublimate evaporants heated by electron beam evaporated from wide region and the possibility of interatomic collisions in the vicinity of evaporation source was small, so that atoms were not accelerated by the expansion into the vacuum and the cooling effect of the atomic beam.

Keywords : Atomic Beam, Velocities, Rare Earth Metals, Cerium, Gadolinium, Dysprosium, Samarium, Ytterbium, Vacuum Balance, Electron Beam, Evaporation, Deposition Rate, Sublimates, Thermal Equilibrium Velocity

* Nuclear Fuel Industries

目 次

1. はじめに	1
2. 測定方法	1
2.1 実験装置	1
2.2 測定対象試料	2
2.3 測定の原理および速度算出方法	2
3. 測定結果及び考察	3
3.1 蒸着速度の電子ビーム入力依存性	3
3.2 原子ビーム速度	3
3.3 原子密度	5
4. おわりに	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
2.1 Apparatus	1
2.2 Evaporants	2
2.3 Measurement Principle of Atomic Beam Velocity	2
3. Results and Discussion	3
3.1 Deposition Rates as a Function of Electron Beam Power	3
3.2 Atomic Beam Velocities	3
3.3 Atomic Beam Densities	5
4. Conclusion	5
References	6

This is a blank page.

1. はじめに

電子ビーム加熱蒸発源は、高融点金属でも大量の原子蒸気を作ることができることから、真空蒸着や原子衝突実験、原子法レーザー同位体分離等多くの分野で用いられている。この電子ビーム加熱により生成された原子ビームの速度を把握することは、原子法レーザー同位体分離における装置設計や、原子密度を導出するために極めて重要である。

原子ビーム速度を測定する方法としては、(1)レーザー光を原子ビームに斜方向から照射し、その蛍光スペクトルのドップラーシフトから算出する斜入射ドップラー分光法^{1,2,3,4)}、(2)原子ビームの流れの途中に置いた高速シャッターでパルス化し、上方に設けた質量分析計で計測する飛行時間法¹⁾、(3)パルスレーザー光で原子をイオン化し、ビーム方向2ヶ所の位置での最大密度の到達時間差をラングミュアプローブで測定して求めるプローブ法^{4,5)}、(4)真空電磁式天秤を用いて測定する方法^{4,5,6)}等がある。このうち真空天秤法は、操作が簡単であり、原子ビーム速度と同時に原子ビーム密度も求めることができるので、他の方法に比べ原子ビーム特性を知る上で有効である。

これまで真空天秤を用いて希土類元素のうちガドリニウム、ネオジムの原子ビーム速度を測定し、レーザー生成プラズマの挙動実験⁷⁾や電荷移行断面積測定^{8,9)}等のデータとして役立ててきた。またこれらの原子ビームは、蒸発面近傍での膨張冷却により加速されることがわかっている。

今回、セリウム、ガドリニウム、ディスプレイシウム、サマリウム、イッテルビウムを電子ビーム加熱で蒸発させ、天秤法を用いた原子ビーム速度計測を行った。その結果、昇華性の強いディスプレイシウム、サマリウム、イッテルビウムでは蒸発面近傍での膨張冷却による原子ビームの加速が起こらないという新たな知見が得られたので報告する。

2. 測定方法

2. 1 実験装置

Fig.1 に実験装置の概略を示す。0~20g の範囲が測定可能な真空天秤¹⁰⁾を装置内に組み込み、水冷銅るつぼ上方 382mm の位置に直径 0.2mm の白金製細線で蒸着板(銅板, 面積 10.25cm²)を吊るした。また、蒸着速度の計測のために、るつぼ上方 402mm の位置に水晶振動子式膜厚計を設置した。蒸着板に衝突して蒸着する原子の運動量の変化による重量表示値の変化から原子ビーム速度を求めるため、蒸着板及び膜厚計の下方にシャッターを設置し、蒸着板への蒸着開始および終了を制御した。

水冷銅るつぼ(直径 50mm、深さ 26mm)内の測定対象試料は、磁場偏向型電子銃(加速電圧 10kV、最大出力 5kW)を用いて蒸発させた。本電子銃には、スイープ機能

と呼ぶ電子ビームスポットを50Hzで掃引する機能が付加されているので、原子ビーム速度に対するこの影響の有無も確認した。スイープ値0のとき電子ビームスポットは最小で5mm×8mmの楕円形である^{11,12,13)}。スイープ値を最大の10にすると、目視で10mm×25mmの長円のスポットに見える。

2. 2 測定対象試料

測定対象試料は、希土類金属のうちセリウム、ガドリニウム、ディスプレイウム、サマリウム、イッテルビウムとした。主な物性値をTable 1に示す^{14,15)}。

これまで実験に用いてきたガドリニウムやネオジムでは、蒸発が顕著に始まる蒸気圧0.1Torrの温度は融点よりかなり高く、液面から蒸発する。これに対し、ディスプレイウム、サマリウム、イッテルビウムは蒸気圧0.1Torrの温度は融点よりも低い。このため固体金属から蒸発する。

逆にセリウムは特に蒸気圧が低く、他の金属と同様に近づけた蒸発では十分な蒸発量が得られない。このため、水冷銅のつば内に多孔質体(タングステン製、気孔率30%、直径10mm、高さ22mm)を取り付けたハースライナ(モリブデン製、厚さ2mm)を置いた。セリウムをハースライナ内に入れ、電子銃で溶解し、多孔質体内に含浸させた。その後、多孔質体に電子ビームを照射してセリウムを蒸発させた¹⁶⁾。

ガドリニウムについては、ガドリニウム金属からの蒸発だけでなくセリウムと同様にハースライナに取り付けた多孔質体に含浸させたガドリニウムからも蒸発させた。

2. 3 測定の原理および速度算出方法

Fig.2は測定時の天秤の指示および膜厚計の蒸着速度の一例で、セリウムを電子ビーム入力1.3kWで蒸発させたときのものである。シャッターを開け蒸着を開始した瞬間、蒸着板に入射する原子の運動量変化により真空天秤の重量指示値が低下する。シャッターを開けている間は蒸着により蒸着板重量が変化する。シャッターを閉めると蒸着重量分指示値が上昇する。この時の蒸着速度Aは次式で表せる。

$$A = \Delta m / (t S \rho) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Δm は重量増加分、 t は蒸着時間、 S は蒸着面積、 ρ は試料密度である。また、原子ビーム速度 V は運動量変化分 ΔM を用いて、

$$V = \Delta M g t / \Delta m \quad \dots \dots \dots (2)$$

と表せる。ここで、 g は重力加速度である。さらに当該位置における原子密度 N_a は、

$$N_a = A \rho N / (M V) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで N はアボガドロ数、 M は試料の原子量である。例えば、**Fig.2**のセリウムの指示値からは、蒸着速度 43.4 Å/s、原子ビーム速度 947m/s、原子密度 $1.33 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ が求められる。蒸着速度は水晶振動子式膜厚計の測定値 42.1 Å/s (382mm 高さに換算)と良く一致する。

3. 測定結果及び考察

3. 1 蒸着速度の電子ビーム入力依存性

Fig.3~7は、るつぼ上方 402mm の位置に設置した水晶振動子式膜厚計で計測したセリウム、ガドリニウム、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムの蒸着速度の電子ビーム入力依存性を示したものである。なお参考までに、以前に取得したネオジムのデータも同位置に換算して**Fig.8**に示した。

ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムは、蒸気圧が高いため蒸気を得るのに小さい入力で済むのに対し、セリウム、ガドリニウム、ネオジムでは 0.5~1kW 以上の入力が必要であることがわかる。

3. 2 原子ビーム速度

セリウム、ガドリニウム、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムの原子ビーム速度の蒸着速度依存性を各々**Fig.9~13**に示す。また参考までに、以前に真空天秤で取得したネオジムの原子ビーム速度 v を今回の測定高さ(るつぼ上面から 382mm)の蒸着速度に換算して**Fig.14**に示した。セリウム、ガドリニウム、ネオジムは、蒸着速度の増加に伴い、加速されていることが確認できる。一方、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムは、蒸着速度を増加させてもほぼ一定の速度で原子ビームが上昇することがわかった。ガドリニウムでは、ガドリニウム金属からの蒸発と多孔質体に含浸したガドリニウムの蒸発では、原子ビーム速度はほぼ同じであった。また、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムでは、電子ビームのスイープを行っても行なわなくても原子ビーム速度に違いは見られなかった。

ここで、各試料について蒸発面温度 T を推定し、原子ビーム速度が蒸発面温度と平衡状態であると仮定した時の推定速度を算出してみる。蒸発面単位面積当たりから

の蒸発速度 γ は、飽和蒸気圧 $P(T)$ と蒸発面温度 T に依存し次式で表わされる。

$$\gamma = 0.058 P(T) (M/T)^{0.5} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 M は試料の原子量である。一方 γ は、蒸発の角度分布が $\cos^n \theta$ であれば膜厚計の取付け位置での蒸着速度から次式で推定できる¹⁷⁾。

$$\gamma = 2\pi J_0 \rho h^2 / (n+1) s \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 J_0 は蒸着速度、 ρ は密度、 h は膜厚計位置、 n は蒸発角度分布指数で一般に2~4(ここでは2とした)、 s は蒸発面でのビームスポット面積である。以上の2式を用いて、蒸着速度から蒸発面温度を求める。熱平衡速度 V_t は次式²⁾で表わされる。

$$V_t = (8RT_0 / \pi M)^{0.5} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 R はガス定数である。例えば、Fig.2の場合、スポット面積を 0.785cm^2 とすれば、 $T=2421\text{K}$ となり $V_t=605\text{m/s}$ と推定される。推定速度をFig.9~14中の実線で示した。セリウムやネオジウムは熱平衡速度に比べてはるかに加速されているのに対して、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムは、熱平衡速度に近いことがわかる。

ガドリニウムは、蒸着速度の増加に伴って加速されて熱平衡状態よりも高速度で原子ビームが上昇することがこれまでに知られており²⁶⁾、今回も同様な傾向が得られた。セリウムやネオジウムについてもガドリニウムと同様に、十分に高温になったスポットからの蒸発なので、蒸発面近傍での原子間衝突が頻繁で、上方に集束された原子ビームを形成し、膨張冷却により加速されていると考えられる。また、速度の絶対値ではセリウム、ガドリニウム、ネオジウムの順で高速になっている。これはTable 1からわかるように蒸気圧の違いからくる蒸発表面温度の差によるものと考えられる。

これに対してディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムは、Table 1に示したように昇華性金属であるため、低い温度で金属固体面の広い領域から蒸発するものと思われる。このため蒸発面近傍での原子間衝突が少なく、膨張冷却による加速が行なわれないものと思われる。また、ディスプロシウム、サマリウム、イッテルビウムで多少速度に違いが出るのは、表面温度の差によるためであろう。このように、昇華性の金属は加速されないことが新たにわかった。ただし、蒸発面温度からの推定速度より測定された速度は大きい。これは、蒸発試料が液化していないので絶えずガス放出があり、放出されたガスが蒸着板に衝突し反射しているため、見掛けの速度が高くなっているのかも知れない。

今後、昇華性のものについてはレーザードップラー法など他の方法でも速度を測定したい。また、これらの金属の蒸発角度分布を測定し、速度との関係も調べたい。

3. 3 原子密度

式(3)に基づき算出した原子密度の蒸着速度依存性をガドリニウムについて Fig.15、ディスプレイウムについて Fig.16 に示す。また、サマリウム、イッテルビウムの原子密度は、ディスプレイウムとほぼ同じ値であり、セリウムは原子ビーム速度が速いためその約半分であった。電子ビーム蒸発で容易に $10^{11}/\text{cm}^3$ オーダーの原子密度が得られることがわかる。

4. おわりに

電子ビーム蒸発源により生成した希土類金属（セリウム、ガドリニウム、ディスプレイウム、サマリウム、イッテルビウム）の原子ビーム速度を、真空天秤を用いて測定した。

セリウムはガドリニウムと同じ様に、蒸発面近傍での膨張冷却により加速されることが確認された。これに対し、昇華性金属であるディスプレイウム、サマリウム、イッテルビウムの原子ビーム速度は蒸着速度に依存せずほぼ一定であることが新たにわかった。蒸発が固体からの昇華の場合、蒸発面積が広いので蒸発面近傍での原子間衝突が少なく、膨張冷却による加速がないためと考えられる。

参考文献

- 1) Auerbach D.J. : "Atomic and Molecular Beam Methods Vol.1"
Scole G. ed., Oxford Univ., New York, 362 (1988).
- 2) 西村昭彦、有沢孝、大場弘則、小倉浩一、柴田猛順 : 真空、35, 305 (1992).
- 3) Nishimura, A., Ohba, H., and Shibata, T. : J. Nucl. Sci. Tech., 29, 1054 (1992).
- 4) 小倉浩一、柴田猛順 : 真空、36, 207 (1993).
- 5) Ogura, K. and Shibata, T. : Rev. Sci. Instrum., 65, 3455 (1994).
- 6) Uetake, N., Asano, T. and Suzuki, K. : Rev. Sci. Instrum., 62, 1942 (1991).
- 7) 松元英也、池畑隆、真瀬寛、小倉浩一、柴田猛順 :
JAERI-Research 97-025 (1997).
- 8) Ogura, K. and Shibata, T. : J. Mass Spectrom. Soc. Jpn., 41, 37 (1993).
- 9) Shibata, T. and Ogura, K. : J. Phy. Soc. Jpn., 64, 3136 (1995).
- 10) 浜崎正則、阿部哲也、村上義男 : 真空、36, 263 (1993).
- 11) 大場弘則、小倉浩一、柴田猛順 : 真空、36, 203 (1993).
- 12) 大場弘則、柴田猛順 : JAERI-M 93-243 (1993).
- 13) Ohba, H. and Shibata, T. : Jpn. J. Appl. Phys., 34, 4253 (1995).
- 14) Daane A.H. : "The Rare Earth" Spedding F.H., Daane A.H., ed., John Wiley & Sons,
New York, 177 (1961).
- 15) Habermann C.E. and Daane A.H. : J. of Chemical Physics, 41, 2818 (1964).
- 16) 大場弘則、雨川和博、柴田猛順 : 真空、40, 296 (1997).
- 17) 西村昭彦、有沢孝、大場弘則、小倉浩一、柴田猛順 : 真空、34, 639 (1991).

Table 1 Physical properties of evaporation materials^{14,15)}

	Cerium	Gadolinium	Dysprosium	Samarium	Ytterbium	Neodymium
Atomic weight	140.115	157.25	162.5	150.36	173.04	144.24
Density ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	8.24 (α , ~7K) 6.66 (β , 77~200K) 6.773 (γ , 200~998K) 6.67 (δ , 998K~)	7.895 (α , ~1535K) 7.80 (β , 1535K~)	8.550	7.52 (α , ~1190K) 7.4 (β , 1135K~)	6.965 (α , ~1071K) 6.54 (β , 1071K~)	7.004 (α , ~1141K) 6.80 (β , 1141K~)
Melting point (K)	1072	1586	1685	1350	1097	1294
Temperature at 0.1Torr vapor pressure(K)	2200	2050	1550	1100	800	1800
Boiling point (K)	3699	3539	2835	2064	1466	3341
Vapor pressure at 1400K (Torr)	9×10^{-8}	3.3×10^{-6}	1×10^{-2}	12	6.3×10^2	2.8×10^{-4}

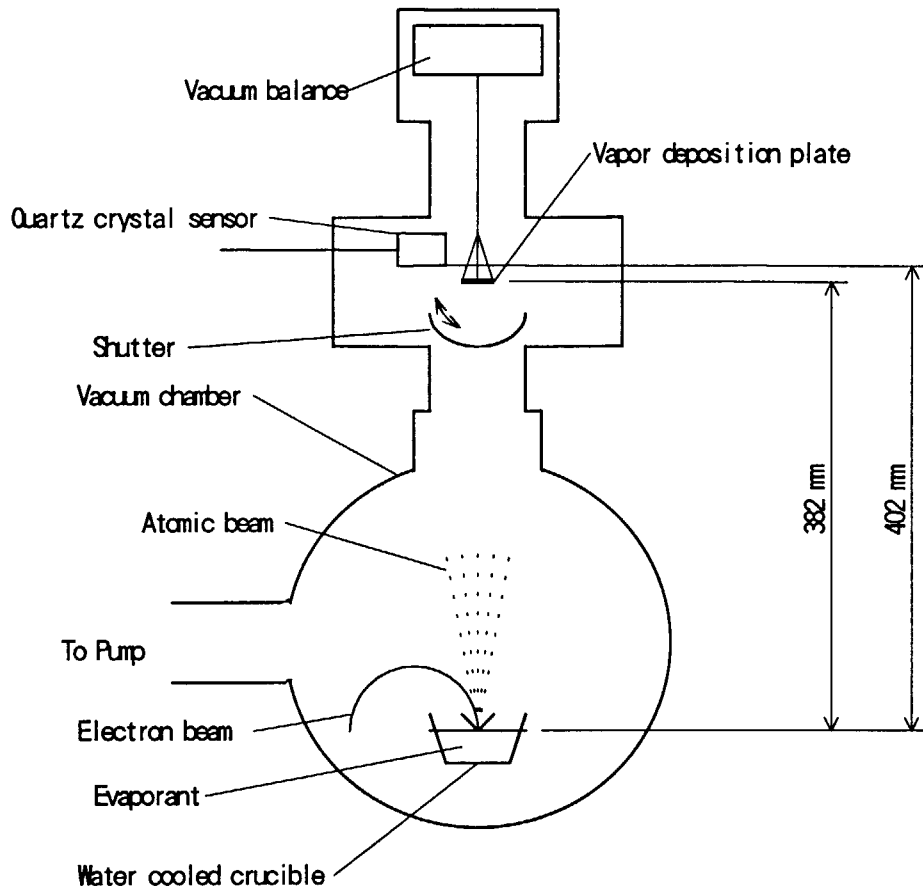
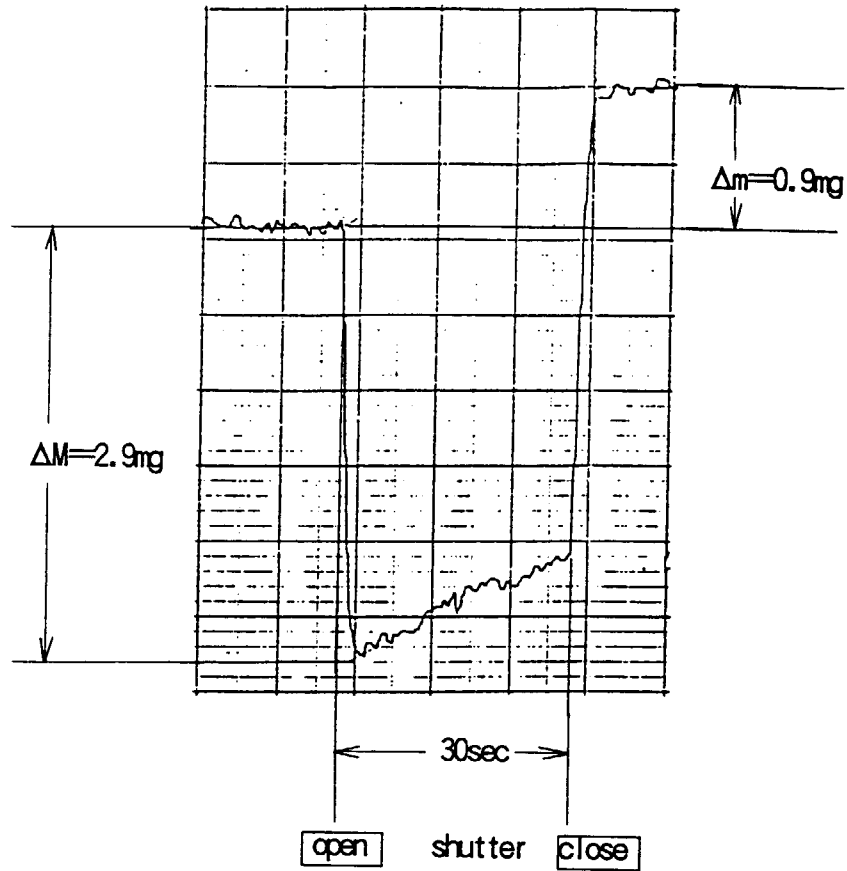


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus using vacuum balance

<Vacuum balance output signal>



<Deposition rate by quartz crystal sensor>

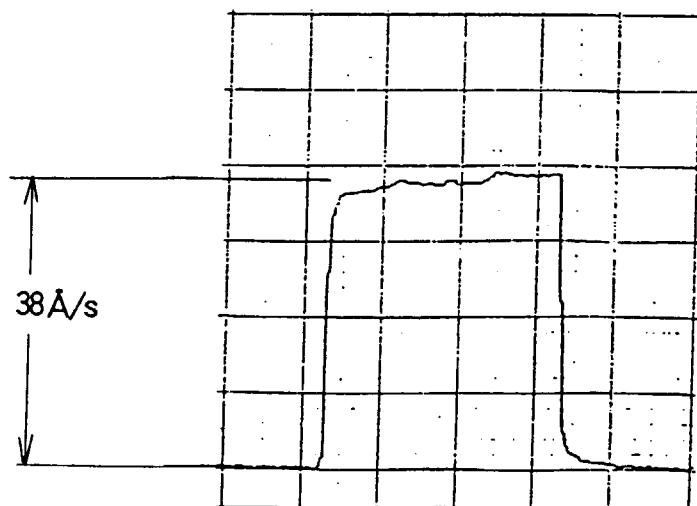


Fig.2 Examples of output signal of vacuum balance and deposition rate measured by a quartz crystal sensor at a height of 402 mm above a crucible (Evaporant: Cerium)

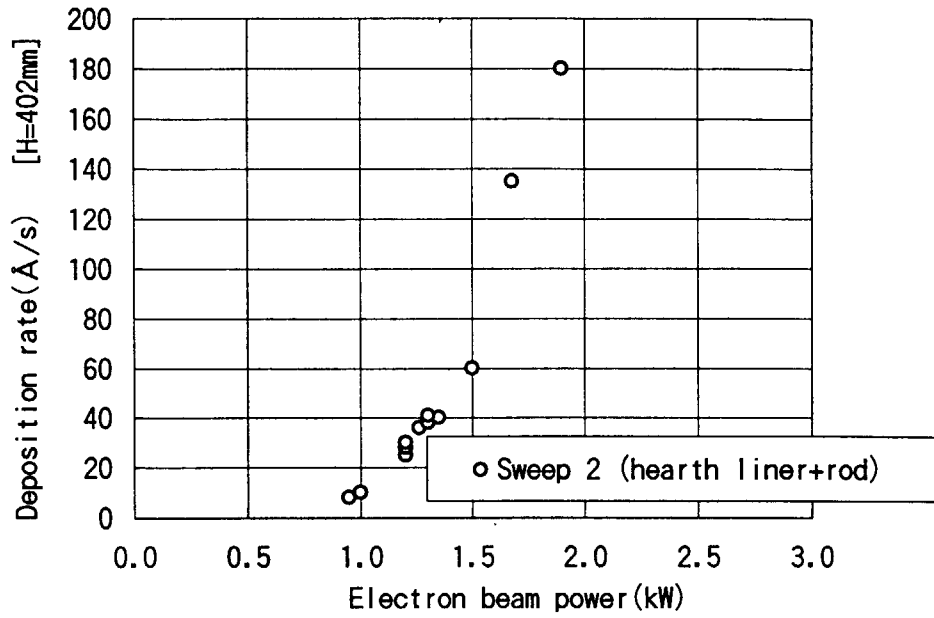


Fig.3 Deposition rate of Cerium evaporant as a function of electron beam power

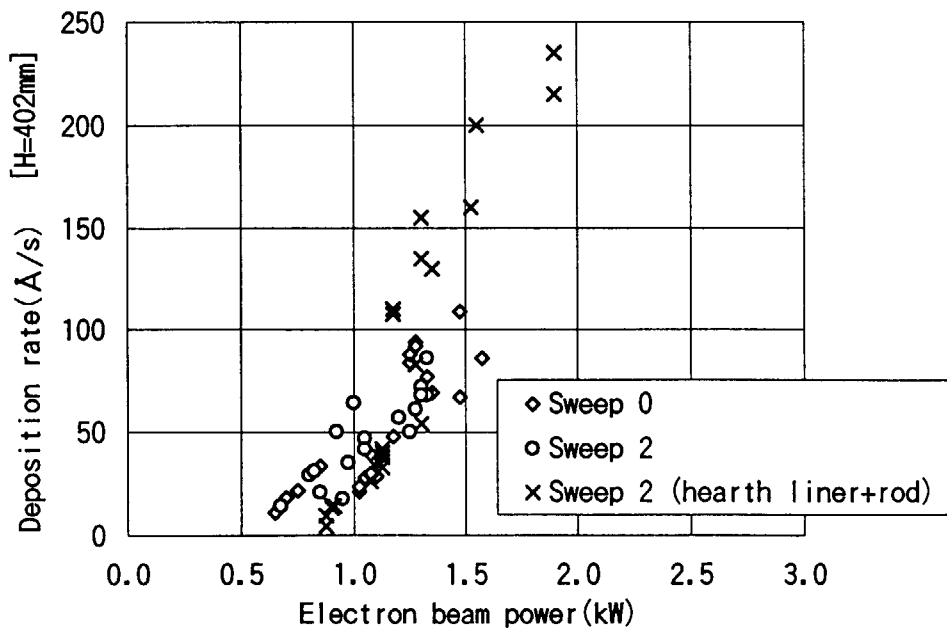


Fig.4 Deposition rate of Gadolinium evaporant as a function of electron beam power

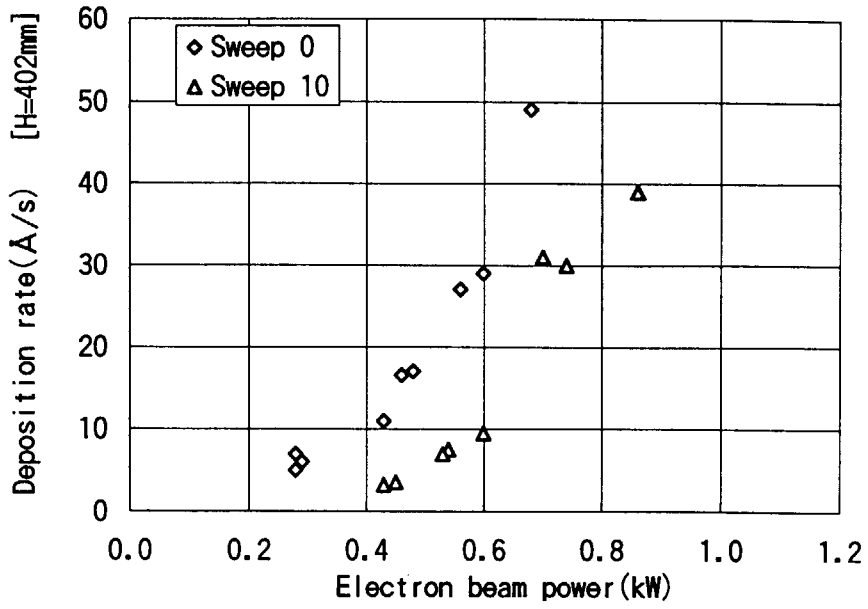


Fig.5 Deposition rate of Dysprosium evaporant as a function of electron beam power

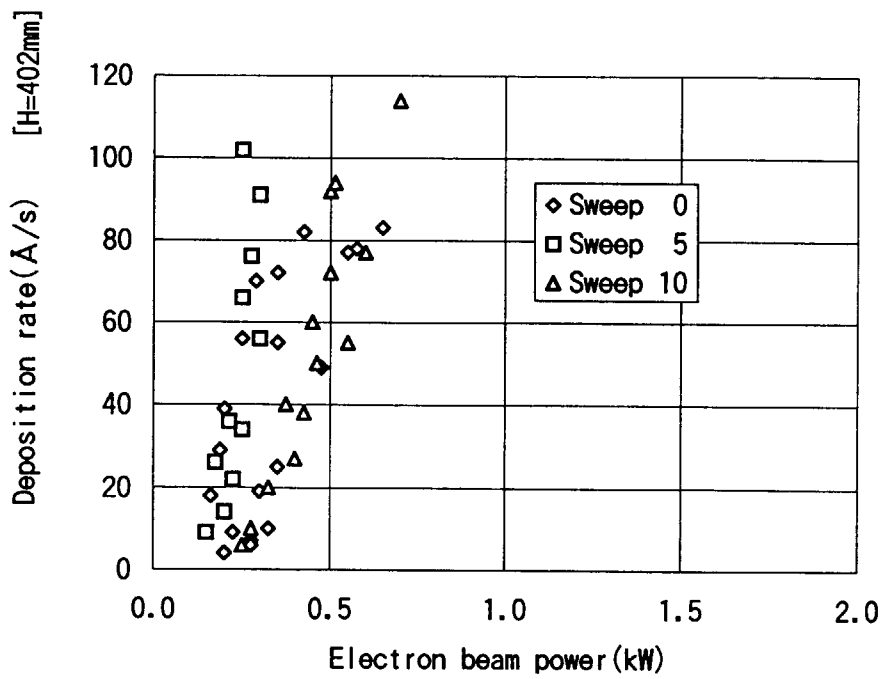


Fig.6 Deposition rate of Samarium evaporant as a function of electron beam power

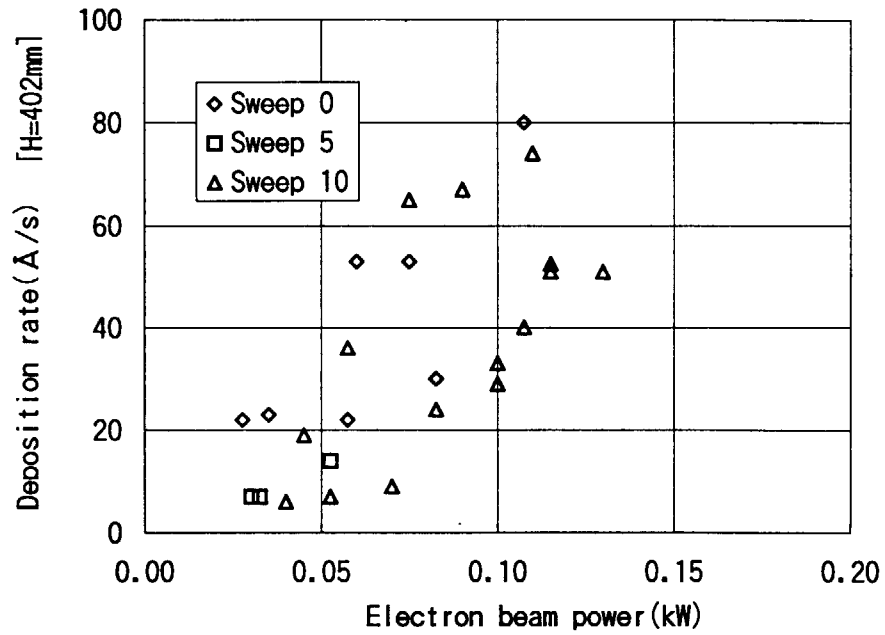


Fig.7 Deposition rate of Ytterbium evaporant as a function of electron beam power

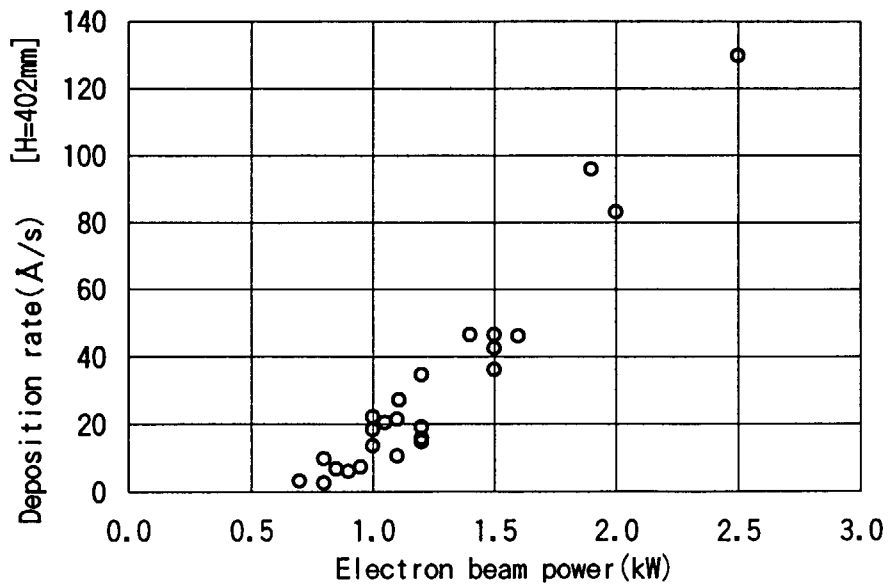


Fig.8 Deposition rate of Neodymium evaporant as a function of electron beam power

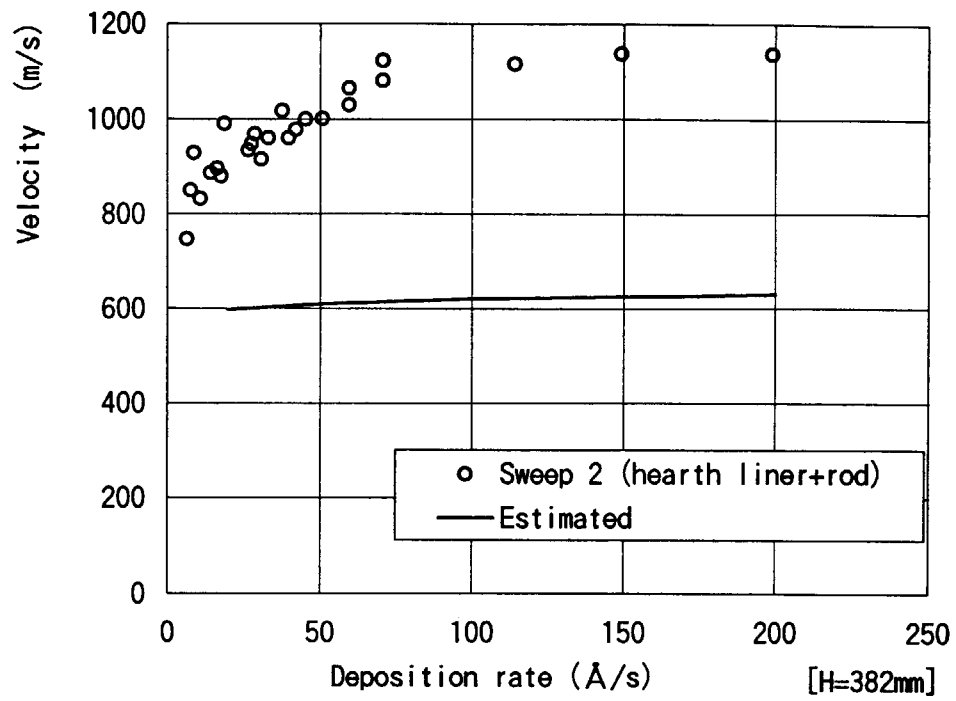


Fig.9 Velocity of Cerium atomic beam

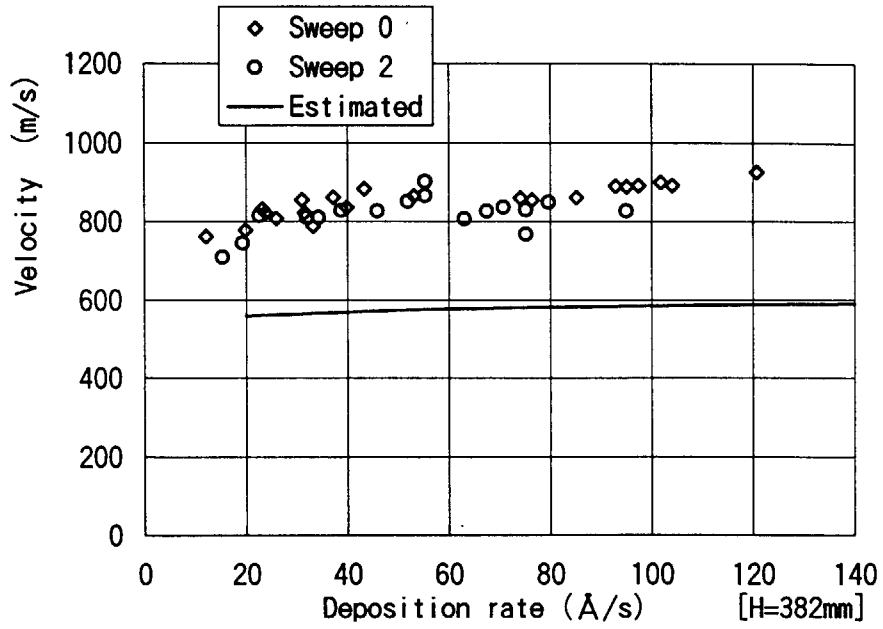


Fig.10-a Velocity of Gadolinium atomic beam

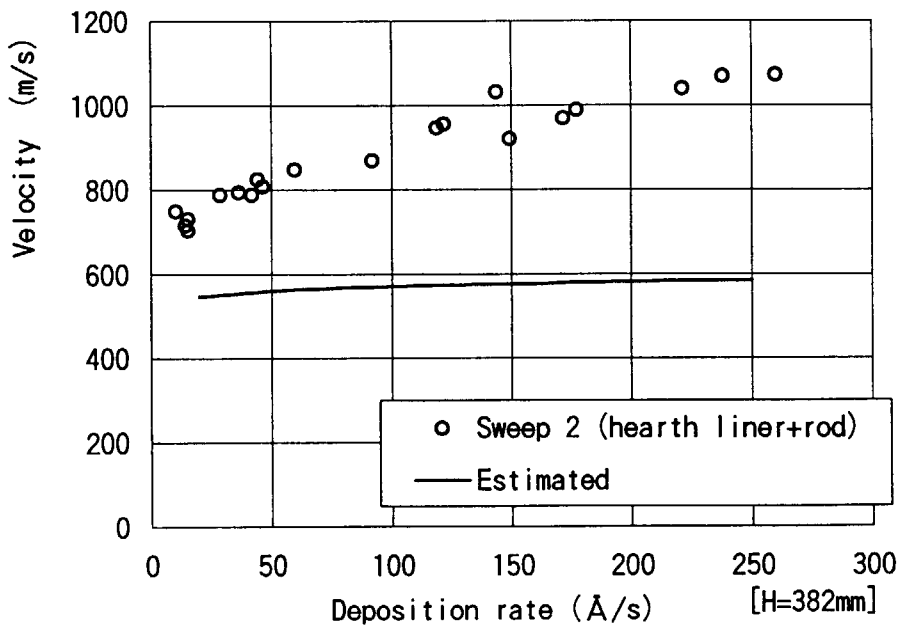


Fig.10-b Velocity of Gadolinium atomic beam

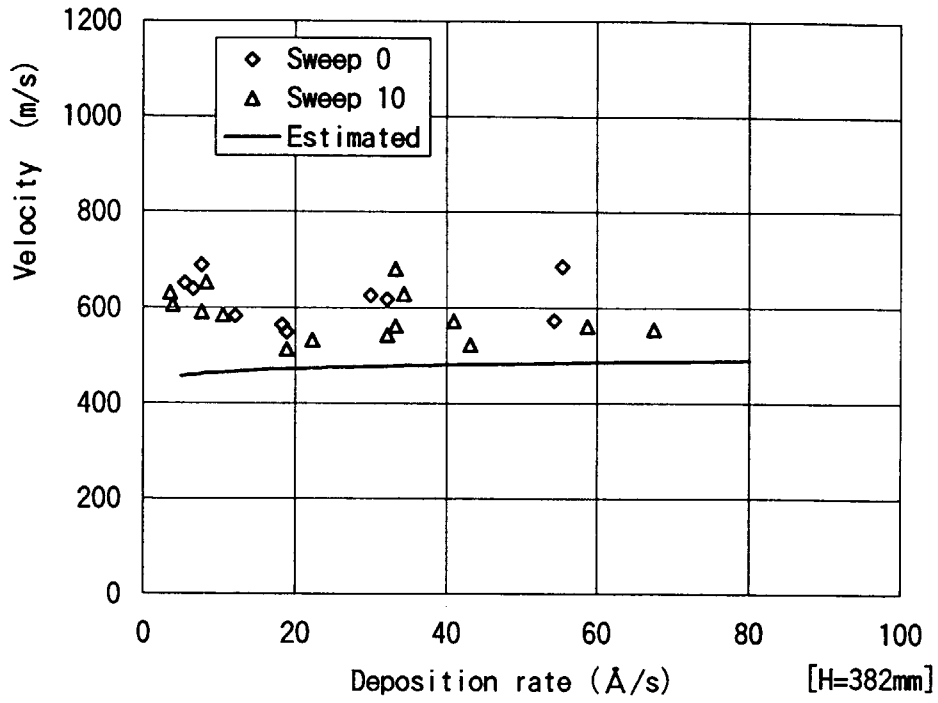


Fig.11 Velocity of Dysprosium atomic beam

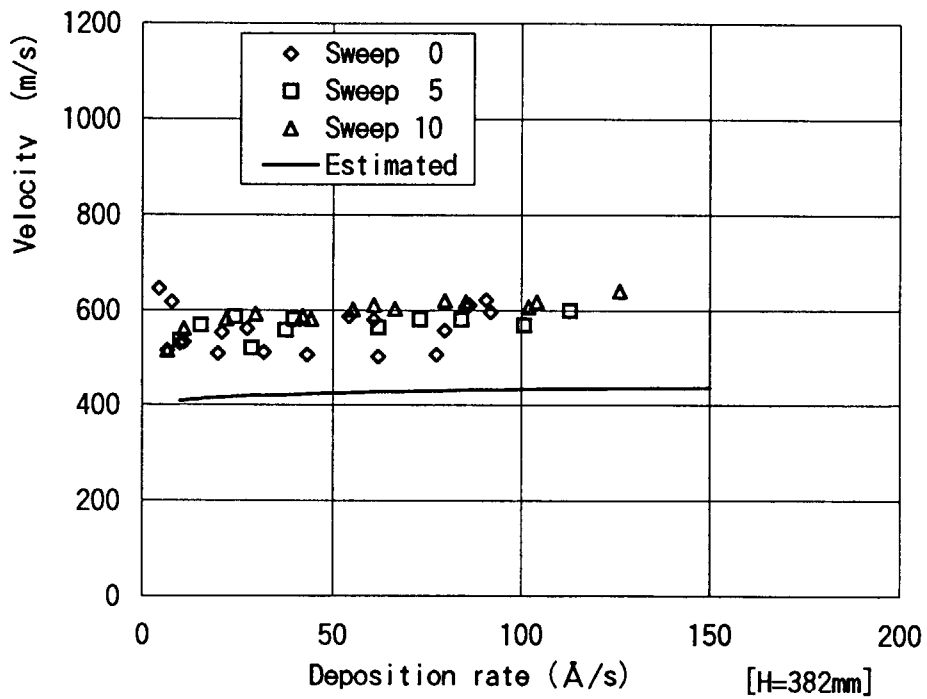


Fig.12 Velocity of Samarium atomic beam

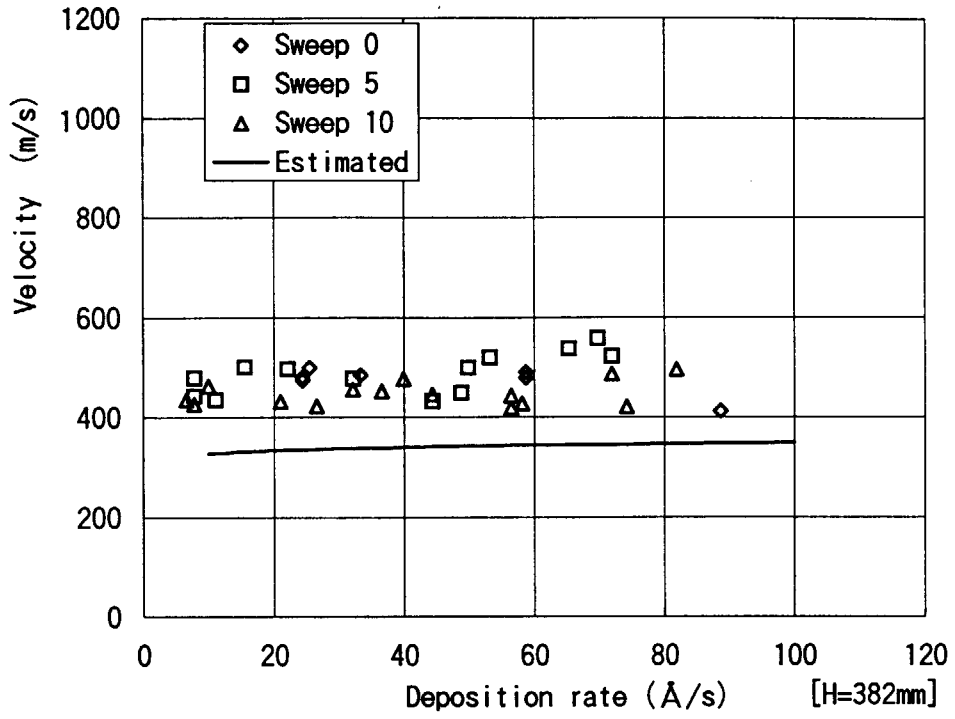


Fig.13 Velocity of Ytterbium atomic beam

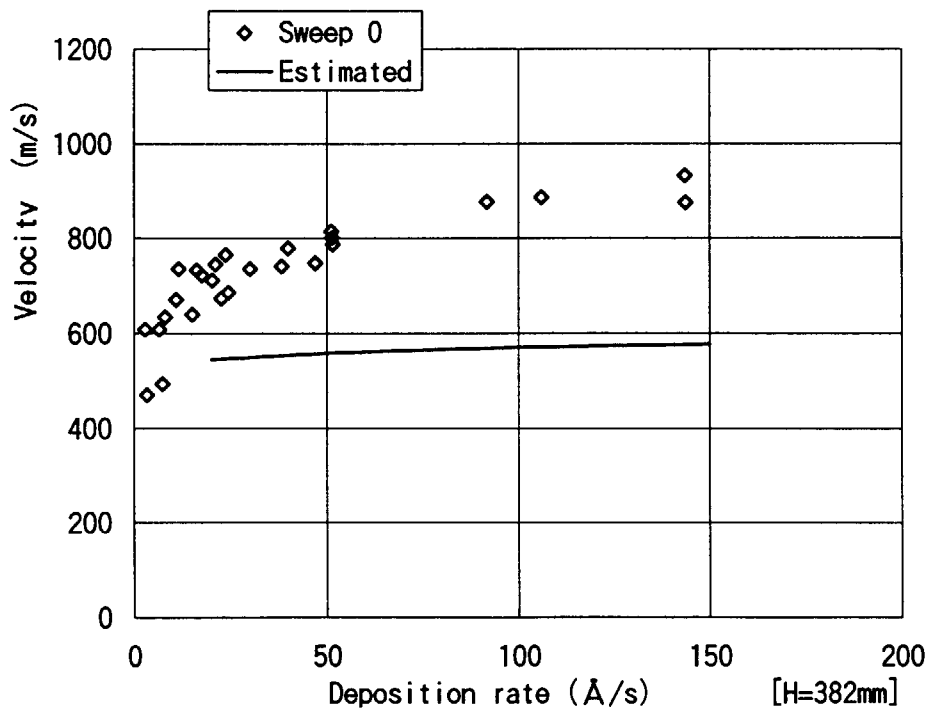


Fig.14 Velocity of Neodymium atomic beam

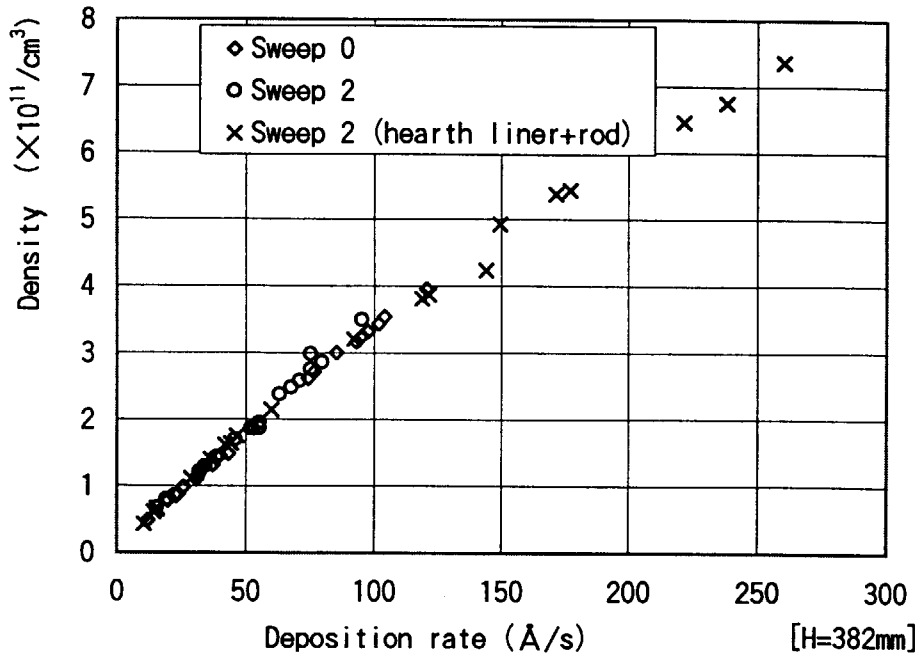


Fig.15 Density of Gadolinium atomic beam

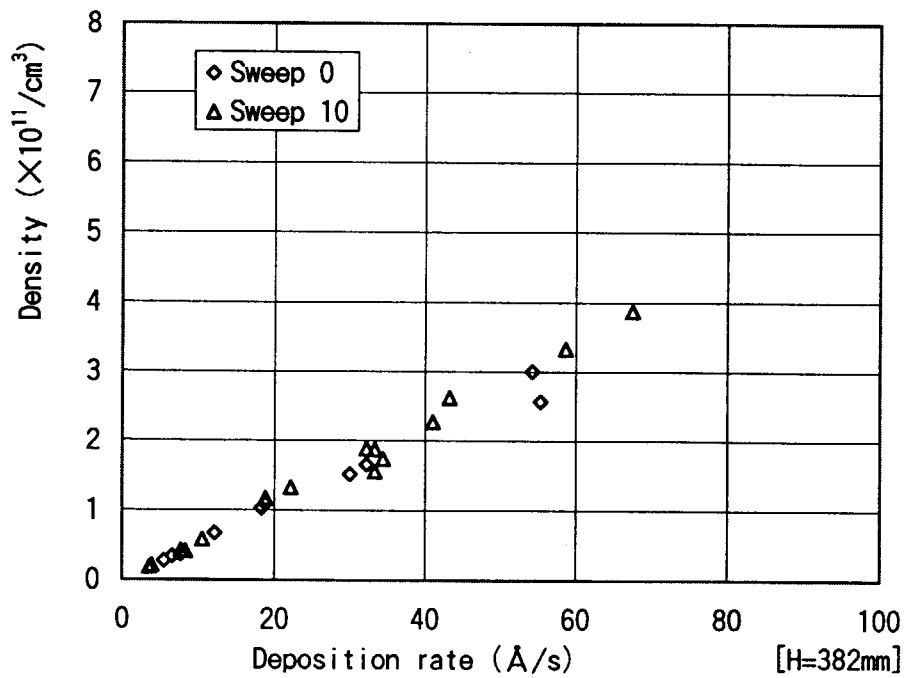


Fig.16 Density of Dysprosium atomic beam

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
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	bar
ガ	Gal
キュ	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

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

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, 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。
- 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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (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 ⁻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	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 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	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 = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

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

電子ビーム加熱で生成した希土類金属の原子ビームの速度