

JAERI - M
93-102

高密度原子ビームから散乱した
原子フラックスの測定
(受託研究)

1993年5月

西村 昭彦・大場 弘則・柴田 猛順

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

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。
入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

高密度原子ビームから散乱した原子フラックスの測定

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

西村 昭彦・大場 弘則・柴田 猛順

(1993年4月1日受理)

電子ビーム加熱により発生させたガドリニウム原子ビーム中から散乱した原子フラックスを水晶振動子膜厚計により測定した。蒸発るつぼ上部に設置したスリットにより原子蒸気の中心部を取りだして原子ビームとした。スリットの形状は平行平板型と円筒型のそれぞれの場合を試みた。スリット出口での原子密度は原子法レーザー同位体分離において必要とされる 10^{13} 個/ cm^3 オーダーまで増加させた。実験の結果、原子密度の増加に伴い原子ビーム中から散乱してくる原子フラックスが増加することがわかった。この原子フラックスの分布からイオン回収電極に付着する中性原子量の評価を行った。ここでの評価法は原子法レーザー同位体分離装置を設計する上で有用である。

Measurement of Atomic Flux Scattered
from High Density Atomic Beam

Akihiko NISHIMURA, Hironori OHBA and Takemasa SHIBATA

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

(Received April 1, 1993)

Atomic flux scattered from gadolinium atomic beam produced by electron beam heating were measured by quartz crystal sensors. The center part of gadolinium vapor was collimated to be the atomic beam by slits located over a crucible. Two types of slits, parallel plates and a cylindrical tube, were used in this experiment. The atomic density at these slit outlets was attained to be the order of 10^{13} atoms/cm³, which is required by Atomic Vapor Laser Isotope Separation. The atomic flux scattered from the atomic beam increased consistently with evaporation rates. The atomic flux to deposit on ion collection electrodes was estimated from the distribution of the atomic flux. The estimation in this report is useful to the design of AVLIS plant.

Keywords: Scattering, Atom-atom Collision, High Density, Atomic Beam, Electron Beam Heating, Evaporation, Laser Isotope Separation, Gadolinium

The 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 驗	1
3. 実験結果	2
4. 考 察	4
5. おわりに	4
文 献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus	1
3. Experimental Result	2
4. Discussion	4
5. Conclusion	4
References	5

1. はじめに

原子法レーザー同位体分離 (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)¹⁾ では、るっぽ内の金属を電子ビーム加熱により蒸発させ、生成した原子ビーム中の目的同位体原子のみをレーザー光照射によりイオン化してイオン回収板上に補集するものである。しかし同位体分離を効率良く行うためにレーザー光照射部の原子密度を増加させると、スリット等により原子ビームの広がりを制限しても、中性原子の流れから原子間の衝突により中性原子がイオン回収板上に付着し濃縮度が低下してしまう²⁾。

著者ら³⁾は、高密度原子ビームの流れに平行設置した回収板への原子付着量を直接シミュレーションモンテカルロ法を用いて評価した。その結果、原子密度が $10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ に近くなると、散乱により数パーセント程度の中性原子が回収板に付着することを示した。しかしながら、中性原子の流れから原子間衝突により原子が散乱されるのを実験的に確かめた例はない。著者らは、AVLISにおいて必要とされる $10^{12} \sim 10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ のガドリウム原子ビームを電子ビーム加熱を用いて発生させ、この原子ビーム特性^{4)~7)} を測定してきた。ここでは、この原子ビーム中からの原子がされてくるかどうかを水晶振動子膜厚計を用いて調べてみた。

2. 実験

図1(a)(b)に実験装置の概要を示す。実験では原子蒸気中にスリットを組んだ。このスリットは蒸発源からイオン回収部へ直接飛来する中性原子を防いでスポットから広がる原子蒸発を指向性の高い原子ビームにする。ここでは2種類のスリットの場合について行った。図1(a)には平行平板型のスリットを、また図1(b)には円筒型のスリットを示す。るっぽ内のガドリニウム金属を電子ビーム加熱して原子蒸気を発生させた。使用した電気銃は、ARDENNE 社製EH30/80（最大電子ビーム入力30 kW）である。電子ビームは真空容器上部に設けられた偏向室内の磁場により90度偏向した後、蒸発面に対して直線的に入射した。蒸気発生量は電子ビーム入力を変化させて行った。実験装置の詳細については別報⁴⁾を参照されたい。

図1(a)に示した平行平板スリット（幅100mm, 長さ150mm）の場合は、原子ビームの中心軸上及び中心軸から離れた場所に水晶振動子膜厚計（XTAL-C, -1）を設けた。XTAL-Cは蒸発面から直接飛来する原子の蒸着速度を測定する。一方、中心軸から離れたXTAL-2はスリットによりさえぎられるため蒸発面を直接見込むことがない。従って、この膜厚計により蒸着速度が測定できれば、蒸着原子はスリット近傍の原子ビーム中において生じた原子間衝突により散乱されて飛來したと考えられる。本実験ではスリット出口での原子密度が $10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ 程度になるようにXTAL-Cでの蒸着速度を 600 Å/sまで増加させて、XTAL-1における蒸着速度を測定した。

1. はじめに

原子法レーザー同位体分離 (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)¹⁾ では、るっぽ内の金属を電子ビーム加熱により蒸発させ、生成した原子ビーム中の目的同位体原子のみをレーザー光照射によりイオン化してイオン回収板上に補集するものである。しかし同位体分離を効率良く行うためにレーザー光照射部の原子密度を増加させると、スリット等により原子ビームの広がりを制限しても、中性原子の流れから原子間の衝突により中性原子がイオン回収板上に付着し濃縮度が低下してしまう²⁾。

著者ら³⁾は、高密度原子ビームの流れに平行設置した回収板への原子付着量を直接シミュレーションモンテカルロ法を用いて評価した。その結果、原子密度が $10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ に近くなると、散乱により数パーセント程度の中性原子が回収板に付着することを示した。しかしながら、中性原子の流れから原子間衝突により原子が散乱されるのを実験的に確かめた例はない。著者らは、AVLISにおいて必要とされる $10^{12} \sim 10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ のガドリウム原子ビームを電子ビーム加熱を用いて発生させ、この原子ビーム特性^{4)~7)} を測定してきた。ここでは、この原子ビーム中からの原子がされてくるかどうかを水晶振動子膜厚計を用いて調べてみた。

2. 実験

図1(a)(b)に実験装置の概要を示す。実験では原子蒸気中にスリットを組んだ。このスリットは蒸発源からイオン回収部へ直接飛来する中性原子を防いでスポットから広がる原子蒸発を指向性の高い原子ビームにする。ここでは2種類のスリットの場合について行った。図1(a)には平行平板型のスリットを、また図1(b)には円筒型のスリットを示す。るっぽ内のガドリニウム金属を電子ビーム加熱して原子蒸気を発生させた。使用した電気銃は、ARDENNE 社製EH30/80（最大電子ビーム入力30 kW）である。電子ビームは真空容器上部に設けられた偏向室内の磁場により90度偏向した後、蒸発面に対して直線的に入射した。蒸気発生量は電子ビーム入力を変化させて行った。実験装置の詳細については別報⁴⁾を参照されたい。

図1(a)に示した平行平板スリット（幅100mm, 長さ150mm）の場合は、原子ビームの中心軸上及び中心軸から離れた場所に水晶振動子膜厚計 (XTAL-C, -1) を設けた。XTAL-Cは蒸発面から直接飛来する原子の蒸着速度を測定する。一方、中心軸から離れたXTAL-2はスリットによりさえぎられるため蒸発面を直接見込むことがない。従って、この膜厚計により蒸着速度が測定できれば、蒸着原子はスリット近傍の原子ビーム中において生じた原子間衝突により散乱されて飛來したと考えられる。本実験ではスリット出口での原子密度が $10^{13} \text{ atoms/cm}^3$ 程度になるようにXTAL-Cでの蒸着速度を 600 Å/sまで増加させて、XTAL-1における蒸着速度を測定した。

図1(b)に示した円筒スリット(直径38mm, 長さ150mm)の場合は、円筒上端より206mmの位置に7個の水晶振動子膜厚計を設置した。中心軸上に置かれたXTAL-Cは蒸発面から直接飛来する原子の蒸着速度を測定する。XTAL-2とXTAL-2'は対称な位置にある。また、XTAL-3, XTAL-4, XTAL-5は円筒下端より上方の原子ビームのみしか見込まない位置に設置してあるため、これらにより測定される蒸着速度は原子ビーム中から飛来した原子によるものと考えられる。

3. 実験結果

3.1 平行平板スリットの場合

図2に図1(a)に示したXTAL-C, -1による蒸着速度測定結果を示す。蒸発量を増加させるとXTAL-2の位置においても蒸着が測定できた。これより、原子ビーム中から散乱された原子が飛来することが分かる。XTAL-Cでの蒸着速度が200Å/sに達するとXTAL-1により蒸着が観測されはじめる。XTAL-Cでの蒸着速度が600Å/sまではXTAL-1の蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度のほぼ2乗に比例して増加する。また、XTAL-Cでの蒸着速度が600Å/sを超えるとXTAL-1での蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度の3乗に比例する傾向を示し始める。

まず最初にスリット内部の原子密度はXTAL-Cにより測定した蒸着速度にはほぼ比例すると考える。一般的に原子間の衝突頻度は原子密度の2乗に比例する。従って、XTAL-1での蒸着速度がXTAL-Cでの蒸着速度の2乗に比例する領域では、スリット内部で生じる1回の原子間衝突によって原子ビーム中から散乱した原子がXTAL-1に飛来すると考えられる。さらに原子密度が増加すると、原子ビーム中で衝突散乱した原子は原子ビームから出る前に再び他の原子と衝突するようになる。XTAL-1での蒸着速度がXTAL-Cの蒸着速度の3乗に比例し始めている領域では、この2回目の衝突が生じていると思われる。

3.2 円筒スリットの場合

図3に、中心軸上のXTAL-Cによる蒸着速度を横軸にXTAL-1, -2, -2', -3による蒸着速度を縦軸に示す。なお、XTAL-4, -5の位置では検出限界以下であった。XTAL-1はXTAL-Cに対してほぼ比例して増加している。これはXTAL-1の位置が蒸発面を直接見込む配置となっているためである。また、XTAL-2及びXTAL-2'は200Å/sまではXTAL-Cの約1/30で比例している。これはXTAL-2及びXTAL-2'がスリットを通してつば周辺部を見込んでいるためと思われる。また、200Å/sを超えるとXTAL-2及びXTAL-2'における蒸着量は急激に増加しXTAL-Cのほぼ2乗に比例して増加しており、スリット内部及びスリット近傍で散乱された原子が飛来しているのがわかる。さらに、300Å/sを超えるとXTAL-3においても蒸着速度が測定でき、700Å/sでは約5Å/sとなった。XTAL-3での蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度の3～4乗に比例しており円筒内部での2～3回の散乱を経て飛来して

図1(b)に示した円筒スリット(直径38mm, 長さ150mm)の場合は、円筒上端より206mmの位置に7個の水晶振動子膜厚計を設置した。中心軸上に置かれたXTAL-Cは蒸発面から直接飛来する原子の蒸着速度を測定する。XTAL-2とXTAL-2'は対称な位置にある。また、XTAL-3, XTAL-4, XTAL-5は円筒下端より上方の原子ビームのみしか見込まない位置に設置してあるため、これらにより測定される蒸着速度は原子ビーム中から飛来した原子によるものと考えられる。

3. 実験結果

3.1 平行平板スリットの場合

図2に図1(a)に示したXTAL-C, -1による蒸着速度測定結果を示す。蒸発量を増加させるとXTAL-2の位置においても蒸着が測定できた。これより、原子ビーム中から散乱された原子が飛来することが分かる。XTAL-Cでの蒸着速度が200Å/sに達するとXTAL-1により蒸着が観測されはじめる。XTAL-Cでの蒸着速度が600Å/sまではXTAL-1の蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度のほぼ2乗に比例して増加する。また、XTAL-Cでの蒸着速度が600Å/sを超えるとXTAL-1での蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度の3乗に比例する傾向を示し始める。

まず最初にスリット内部の原子密度はXTAL-Cにより測定した蒸着速度にはほぼ比例すると考える。一般的に原子間の衝突頻度は原子密度の2乗に比例する。従って、XTAL-1での蒸着速度がXTAL-Cでの蒸着速度の2乗に比例する領域では、スリット内部で生じる1回の原子間衝突によって原子ビーム中から散乱した原子がXTAL-1に飛来すると考えられる。さらに原子密度が増加すると、原子ビーム中で衝突散乱した原子は原子ビームから出る前に再び他の原子と衝突するようになる。XTAL-1での蒸着速度がXTAL-Cの蒸着速度の3乗に比例し始めている領域では、この2回目の衝突が生じていると思われる。

3.2 円筒スリットの場合

図3に、中心軸上のXTAL-Cによる蒸着速度を横軸にXTAL-1, -2, -2', -3による蒸着速度を縦軸に示す。なお、XTAL-4, -5の位置では検出限界以下であった。XTAL-1はXTAL-Cに対してほぼ比例して増加している。これはXTAL-1の位置が蒸発面を直接見込む配置となっているためである。また、XTAL-2及びXTAL-2'は200Å/sまではXTAL-Cの約1/30で比例している。これはXTAL-2及びXTAL-2'がスリットを通してつぼ周辺部を見込んでいるためと思われる。また、200Å/sを超えるとXTAL-2及びXTAL-2'における蒸着量は急激に増加しXTAL-Cのほぼ2乗に比例して増加しており、スリット内部及びスリット近傍で散乱された原子が飛来しているのがわかる。さらに、300Å/sを超えるとXTAL-3においても蒸着速度が測定でき、700Å/sでは約5Å/sとなった。XTAL-3での蒸着速度はXTAL-Cの蒸着速度の3～4乗に比例しており円筒内部での2～3回の散乱を経て飛来して

いるものと思われる。ここでは、XTAL-2及びXTAL-3への原子散乱量とスリット内部の原子密度の関係を調べるために円筒出口付近での原子密度を推定した。

蒸発量が少なく蒸発が点蒸発とみなせる場合には、原子密度は蒸発面からの距離の2乗に反比例することは一般によく知られている。また、蒸発面から数10cmの位置において原子密度が 10^{13} atoms/cm³ に達する大量蒸発時においても、原子蒸気をスリット等でコリメートしない場合は原子密度は蒸発面からの距離の2乗に反比例する。従って、低密度の蒸発やスリット無しの高密度蒸発の場合については、蒸発面からある距離で蒸着速度を測定すれば任意の位置での蒸着速度を求めることができる。しかしながら、本実験のように高密度蒸気をスリットを用いてコリメートした場合、XTAL-2やXTAL-2'及びXTAL-3等において散乱原子の蒸着が観測されたことは、スリット出口から下流の原子ビームの密度はもはや蒸発面からの距離の2乗に反比例せず、それよりも急激に減少することを示している。従って、スリット内部での原子密度を推定するには原子ビームの広がりを把握する必要がある。

図4に図3から求めた原子ビームの蒸着速度分布 $f(r)$ を示す。スリット出口からである原子ビームフラックス量は図4に示した蒸着速度分布 $f(r)$ を用いて次式により求めることができる。

$$F = 2\pi \int_0^\infty f(r) r dr$$

ここで、 r は中心軸からの距離である。スリット出口の原子密度を得るためににはこの F の値をスリット出口面積及び原子ビーム速度で割ればよい。原子ビーム速度については、著者らはこれまでに、原子ビームにレーザー光を斜入射させた場合に現れる誘起蛍光スペクトルのドップラーシフト量から測定している⁶⁾。ここでは、この概報の値を用いた。図5には円筒スリット出口原子密度の推定値とXTAL-Cの関係を示す。破線は原子密度が距離の2乗に反比例すると仮定した場合の円筒スリット出口原子密度である。蒸発量を増加させると円筒スリット出口での原子密度は急激に増加しており、中心軸上に置かれたXTAL-Cの蒸着速度とは比例していないことがわかる。

図6は各XTALの蒸着速度と円筒出口原子密度を両対数でプロットした結果を示す。XTAL-C、XTAL-1の蒸着速度は円筒内部の原子密度にはほぼ比例している。これに対して、XTAL-2の蒸着速度については円筒出口密度が 2×10^{12} atoms/cm³ 以下では原子密度に比例しているが、これより高密度になると円筒出口の原子密度のはば2乗に比例する。また、XTAL-3についてはさらに急激な増加を示しスリット出口原子密度の3～4乗に比例している。従って、蒸発量が増加すると、XTAL-2の位置では円筒内部における原子間の一回衝突によって、XTAL-3の位置では2～3回の原子間衝突によって散乱された原子が飛来するものと思われる。

4. 考 察

ここでは円筒スリットの上に半径 r_0 の円筒形状のイオン回収電極を設けた場合に、このイオン回収電極に付着する中性原子の量を図3及び図4のデータを用いて評価してみた。図7にイオン回収電極の配置を示す。ここで、中性原子付着量Gは次式で表される。

$$G = 2\pi \int_{r_0}^{\infty} f(r) r dr$$

中性原子付着率G/Fをスリット出口密度とイオン回収電極の関数として図8に示す。現在、AVLISでは天然ウラン中に0.7%含まれる²³⁵Uを数%程度まで濃縮することを目標としている。従って、許容できる中性原子の付着は10%程度である。図8(a), (b)には10%の値を破線で示した。スリット出口原子密度が高い領域ではイオン回収電極半径 r_0 を大きくする必要がある。AVLISでは装置内に多くのスリットを設けて蒸発原子をできるだけ利用することが望ましい。隣り合うスリットの間隔は r_0 により制限されるため、 r_0 が増加すると原子の利用効率が低下してしまう。

実際のAVLISでは蒸発部がスポットではなく直線であるためイオン回収電極も円筒ではなく平板である。この場合についても、ここでの測定と同様な散乱測定を行い中性原子付着が10%以下の範囲で分離効率が最大になるように、蒸発量やスリット形状及びイオン回収電極等を決める必要がある。また、逆に原子散乱シミュレーションによりイオン回収電極の最適設計ができれば実験により散乱量を求めなくてもよいことになる。このため、当研究室で開発中の数値シミュレーションによる解析^{8), 9), 10)}を発展させてここでの実験結果を定量的に評価できるようにしたい。

5. おわりに

電子ビーム加熱により生成した高密度ガドリニウム原子ビームを用いて、原子ビームから散乱される原子フラックスを測定した。その結果、原子密度が高くなるほど原子ビーム中から散乱していく原子が増加することがわかった。散乱した原子ビームの分布を用いてイオン回収電極に付着する中性原子量の評価を行った。ここでの評価法は今後原子法レーザー同位体分離を設計する上で有用なものになると思われる。

4. 考 察

ここでは円筒スリットの上に半径 r_0 の円筒形状のイオン回収電極を設けた場合に、このイオン回収電極に付着する中性原子の量を図3及び図4のデータを用いて評価してみた。図7にイオン回収電極の配置を示す。ここで、中性原子付着量Gは次式で表される。

$$G = 2\pi \int_{r_0}^{\infty} f(r) r dr$$

中性原子付着率 G/F をスリット出口密度とイオン回収電極の関数として図8に示す。現在、AVLISでは天然ウラン中に0.7%含まれる ^{235}U を数%程度まで濃縮することを目標としている。従って、許容できる中性原子の付着は10%程度である。図8(a), (b)には10%の値を破線で示した。スリット出口原子密度が高い領域ではイオン回収電極半径 r_0 を大きくする必要がある。AVLISでは装置内に多くのスリットを設けて蒸発原子をできるだけ利用することが望ましい。隣り合うスリットの間隔は r_0 により制限されるため、 r_0 が増加すると原子の利用効率が低下してしまう。

実際のAVLISでは蒸発部がスポットではなく直線であるためイオン回収電極も円筒ではなく平板である。この場合についても、ここでの測定と同様な散乱測定を行い中性原子付着が10%以下の範囲で分離効率が最大になるように、蒸発量やスリット形状及びイオン回収電極等を決める必要がある。また、逆に原子散乱シミュレーションによりイオン回収電極の最適設計ができれば実験により散乱量を求めなくてもよいことになる。このため、当研究室で開発中の数値シミュレーションによる解析^{8), 9), 10)}を発展させてここでの実験結果を定量的に評価できるようにしたい。

5. おわりに

電子ビーム加熱により生成した高密度ガドリニウム原子ビームを用いて、原子ビームから散乱される原子フラックスを測定した。その結果、原子密度が高くなるほど原子ビーム中から散乱していく原子が増加することがわかった。散乱した原子ビームの分布を用いてイオン回収電極に付着する中性原子量の評価を行った。ここで評価法は今後原子法レーザー同位体分離を設計する上で有用なものになると思われる。

文 献

- 1) P.T. Greenland, Contemporary Physics, 21, 405 (1990).
- 2) D.N. Travis, D.J.H. Wort, "Separation Phenomena in Liquids and Gases", Second Workshop, P. 637(1989).
(Vol. 2, edited by P. louvet, P. Noe, and Soubbaramayer).
- 3) 薫木英雄, 西村昭彦, 大場弘則, 山本浩康, 柴田猛順, 真空, 34, 718 (1991).
- 4) 西村昭彦, 有沢孝, 大場弘則, 柴田猛順, JAERI-M, 91-178 (1991).
- 5) 大場弘則, 西村昭彦, 柴田猛順, JAERI-M, 92-194 (1992).
- 6) A. Nishimura, H. Ohba, T. Shibata, J. Nucl. Sci. Technol., 29, 1054 (1992).
- 7) A. Nishimura, T. Arisawa, H. Ohba, T. Shibata, J. Vac. Sci. Technol. A, to be Published.
- 8) Kaburaki, H., Yamamoto, H., Yokokawa, M. and Arisawa, T., :Proceeding of the 1st International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications, 51 (1990).
- 9) 薫木英雄, JAERI-M, 92-054, 2 (1992).
- 10) A. Nishimura, H. Kaburaki, H. Ohba, T. Shibata, J. Nucl. Sci. Technol., 30, 270 (1993)

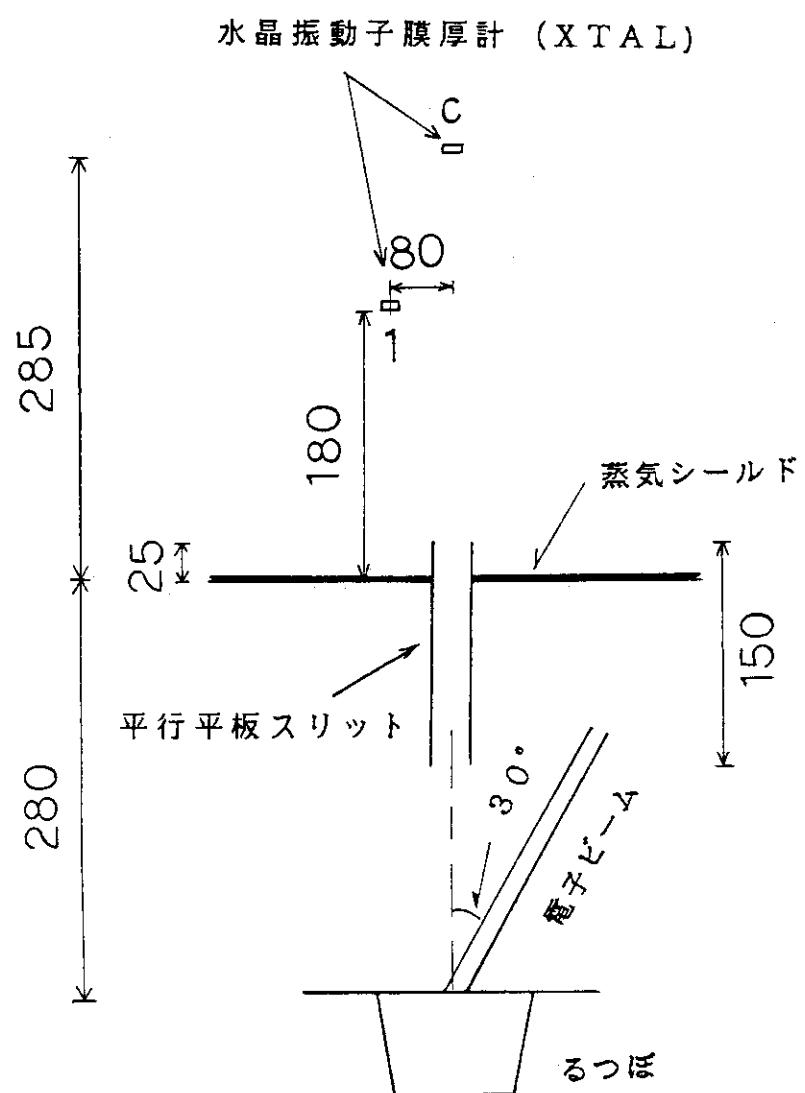


図1(a) 実験装置概要 (平行平板スリット)

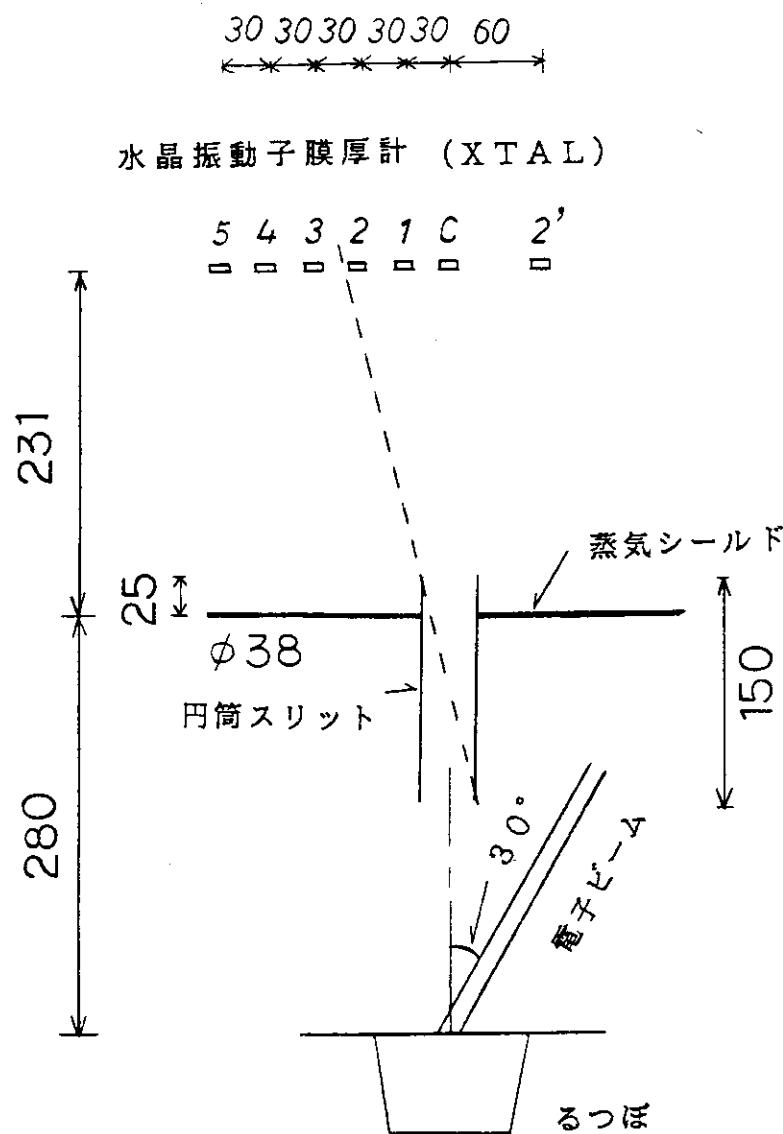


図1(b) 実験装置概要 (円筒スリット)

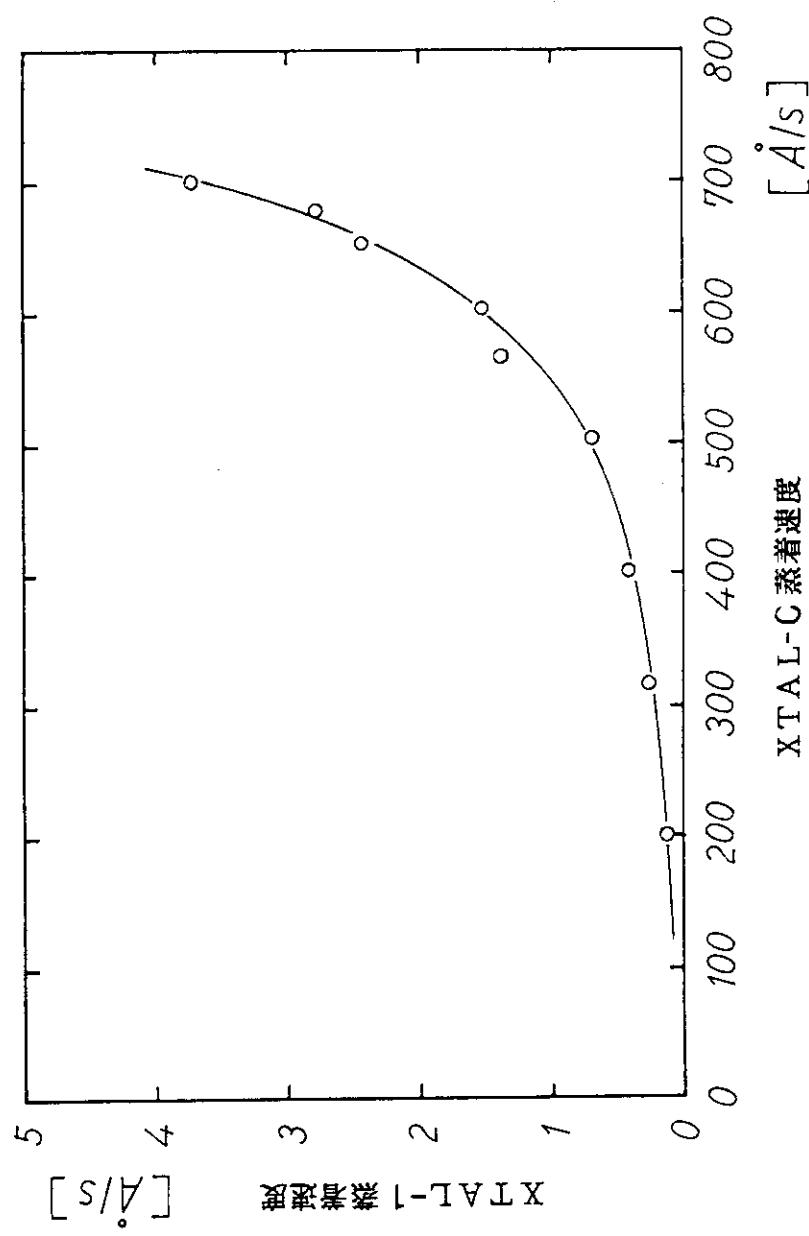


図2 X-TAL-1における蒸着速度とX-TAL-Cによる原子ビーム中心軸上で
蒸着速度の関係(平行平板スリット)

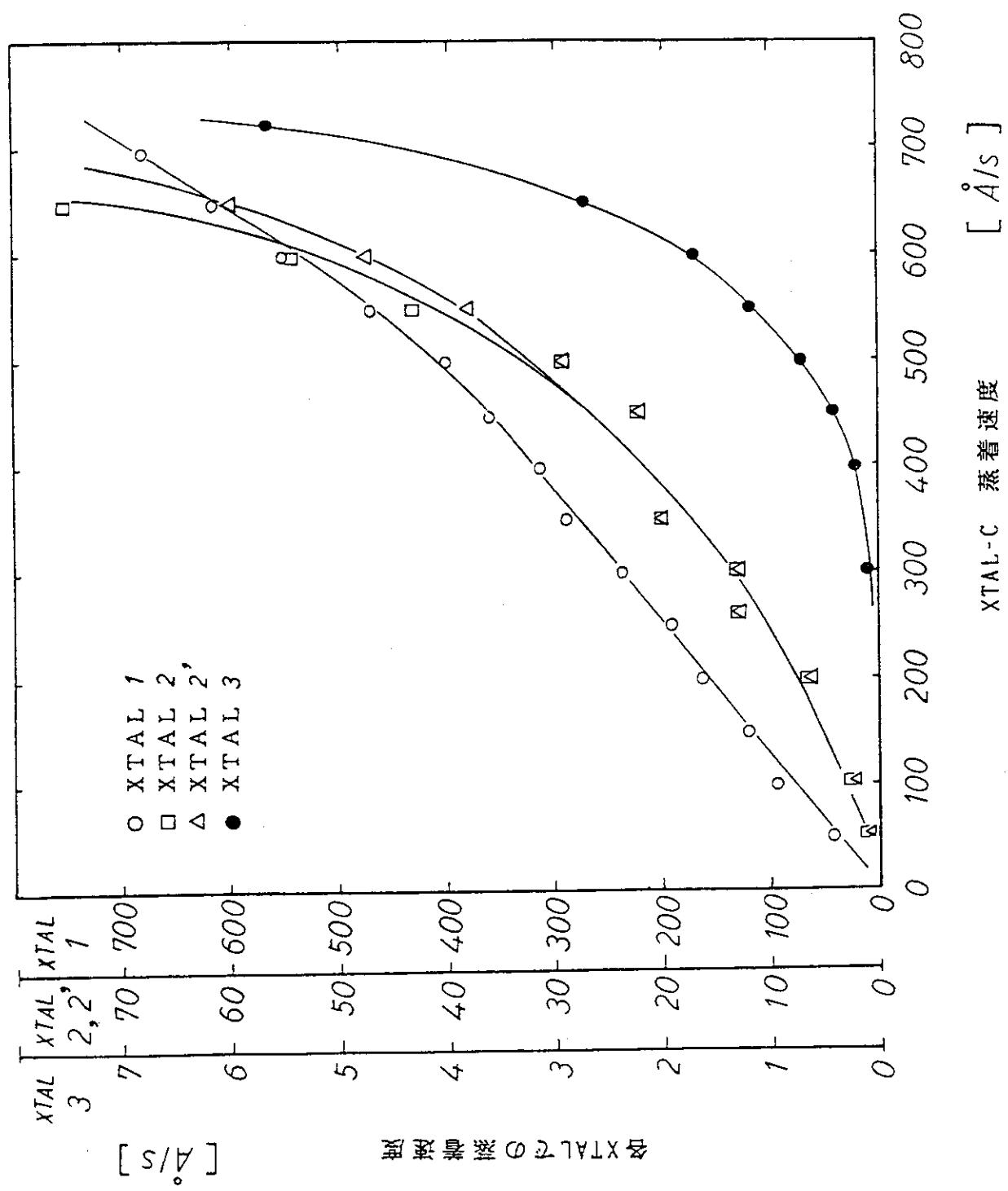


図3 X-TAL-1, -2, -2', -3における蒸着速度とX-TAL-Cによる
原子ビーム中心軸上の蒸着速度の関係(円筒スリット)

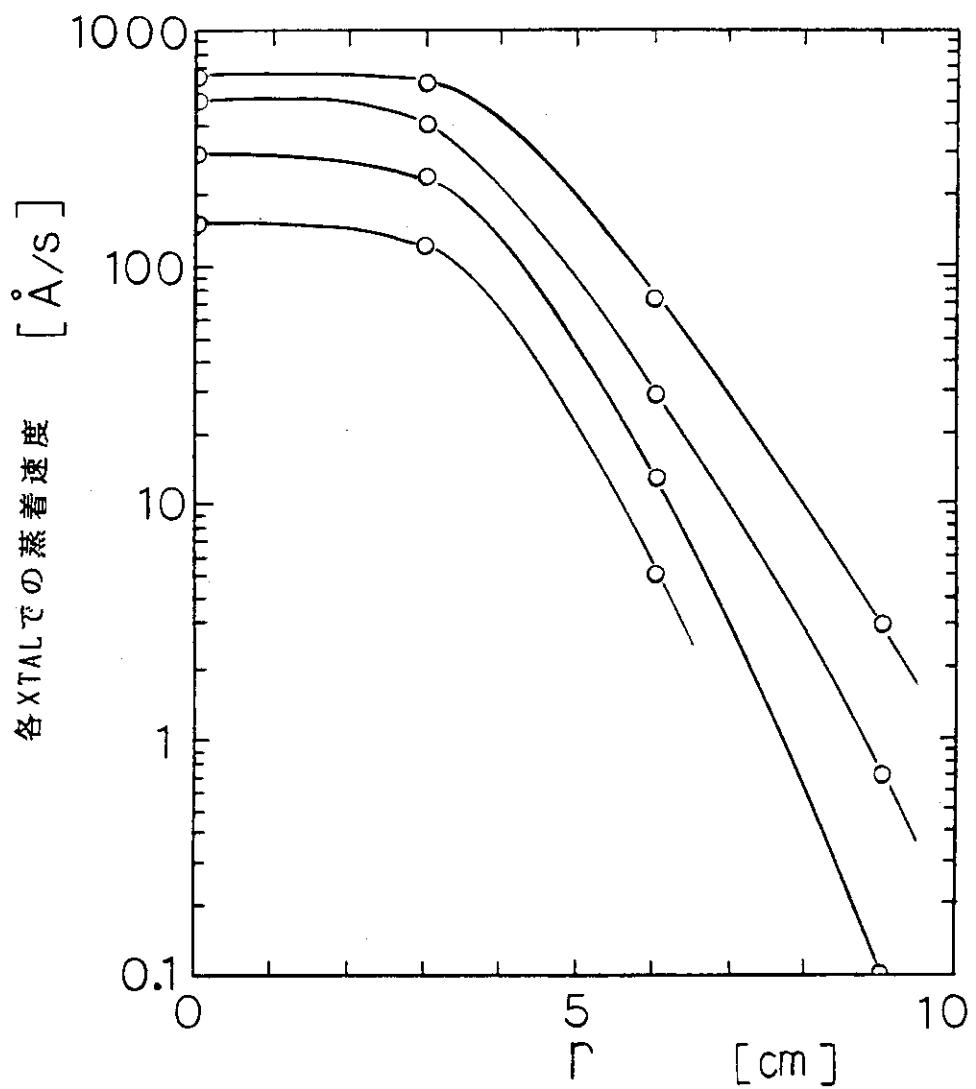


図4 円筒スリットを用いた場合の原子ビーム蒸着速度の半径r方向分布

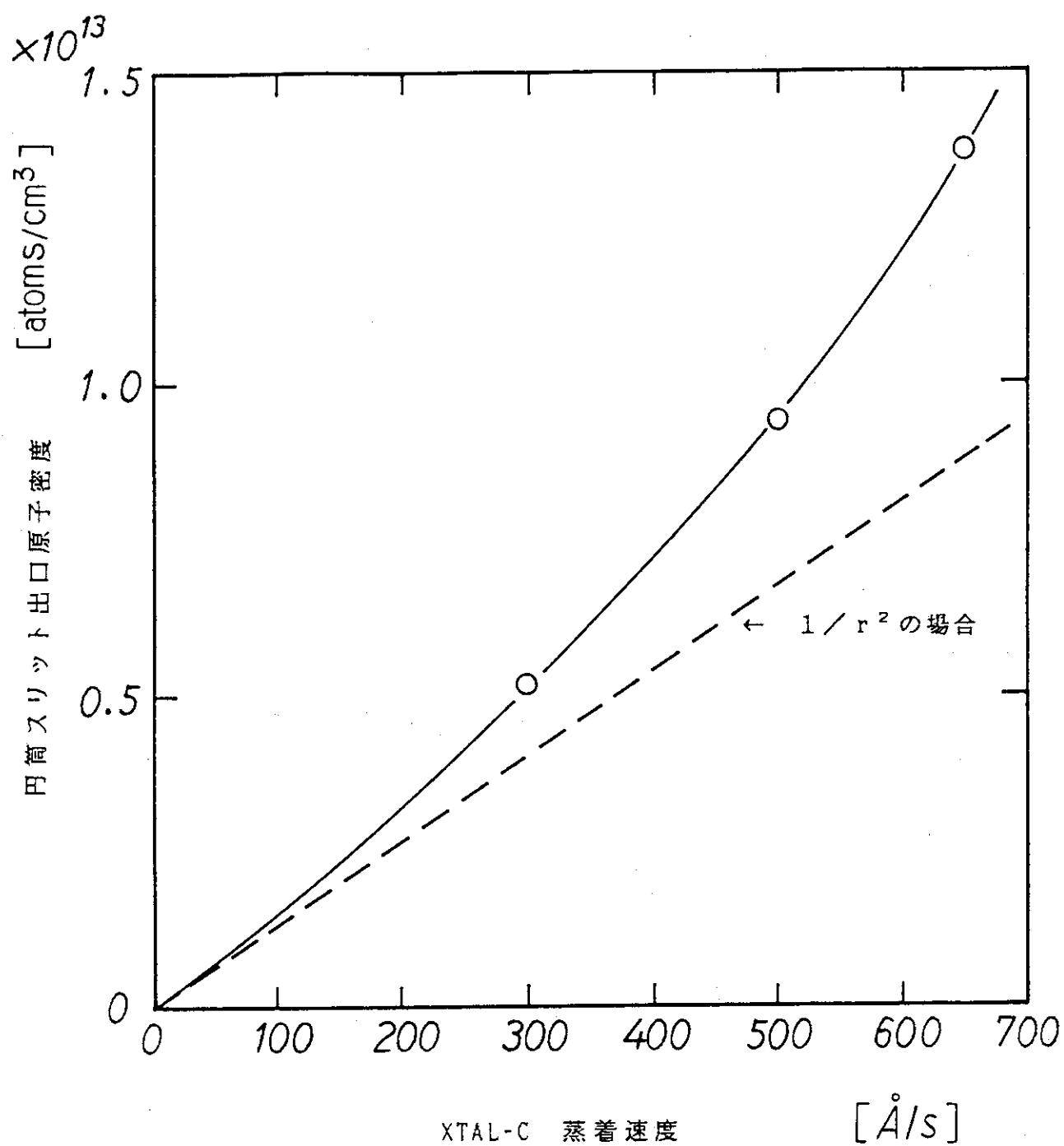


図5 円筒スリット出口原子密度の推定値とX-TAL-Cによる
原子ビーム中心軸上での蒸着速度の関係

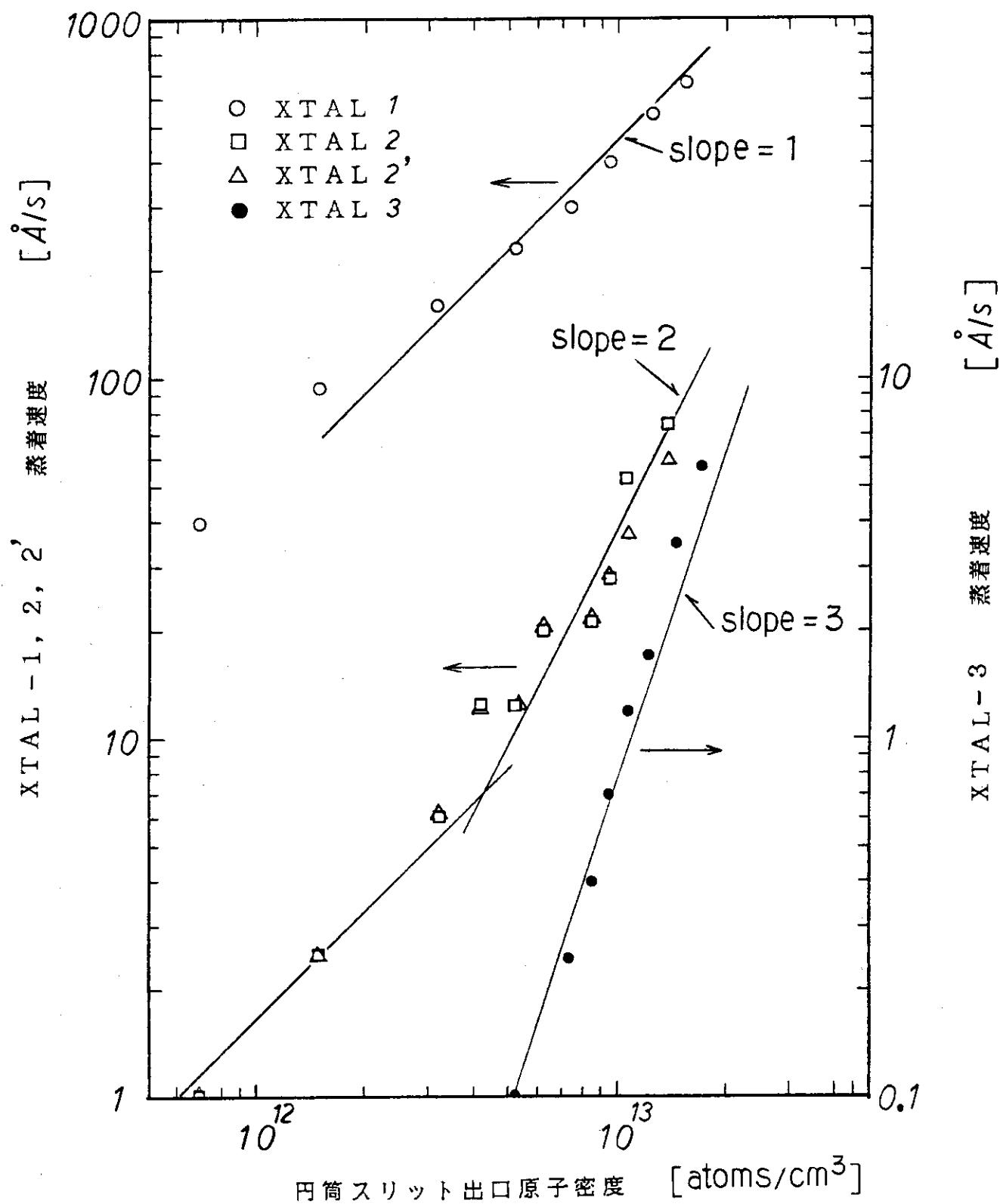


図6 XTAL-1, -2, -2', -3における蒸着速度と円筒スリット出口原子密度の推定値との関係

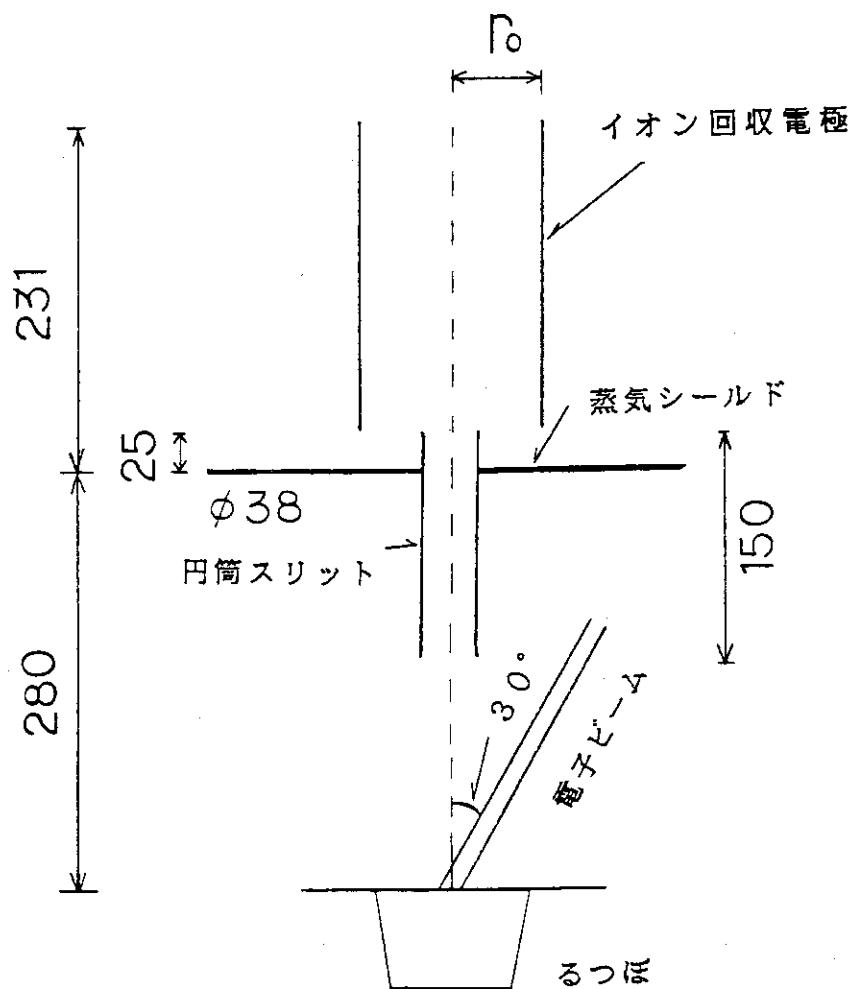


図7 円筒スリット上部に設けたイオン回収電極の概要

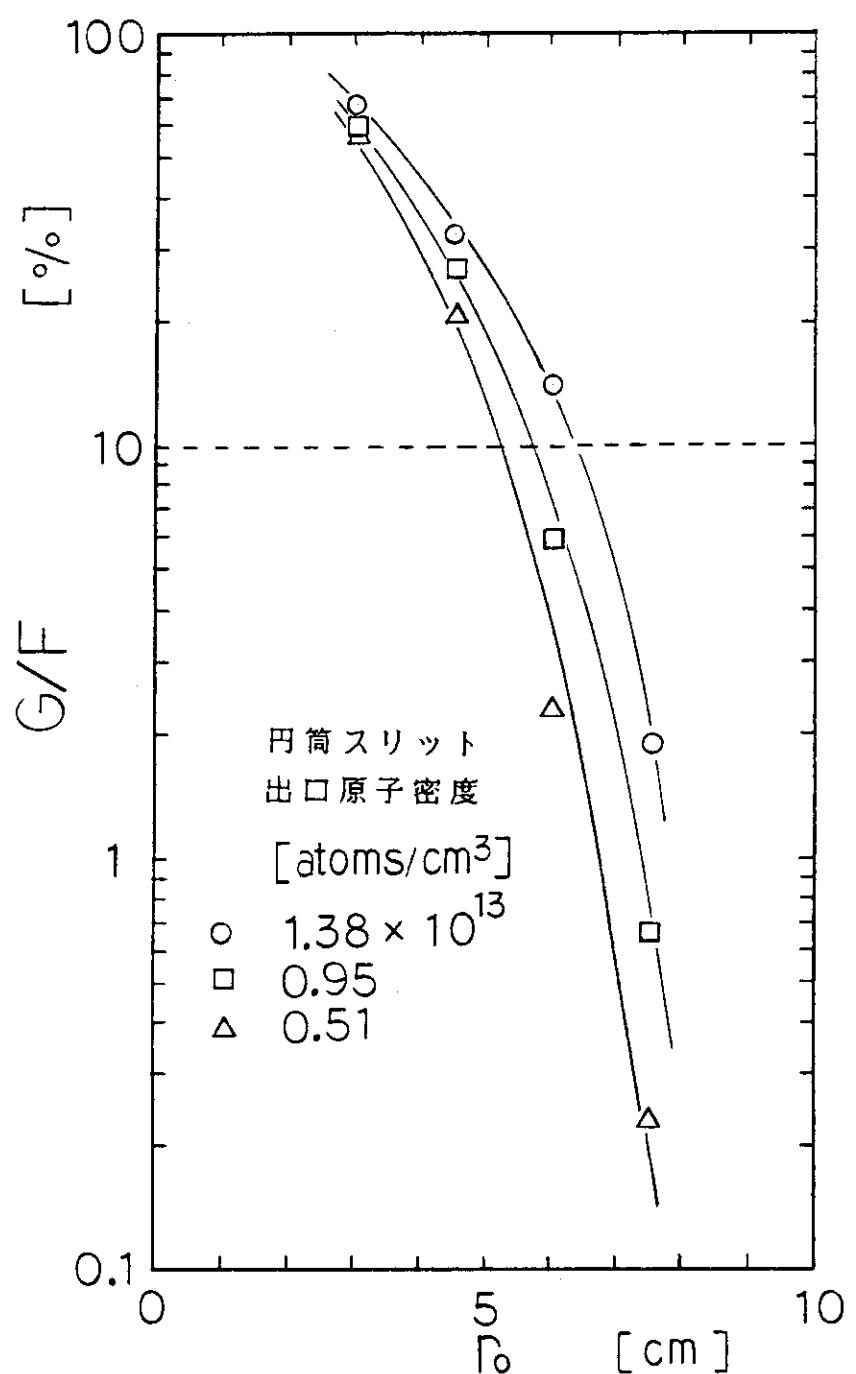


図 8(a) イオン回収電極に付着する中性原子量と円筒スリット出口量の比 G/F の
イオン回収電極半径 r 依存性

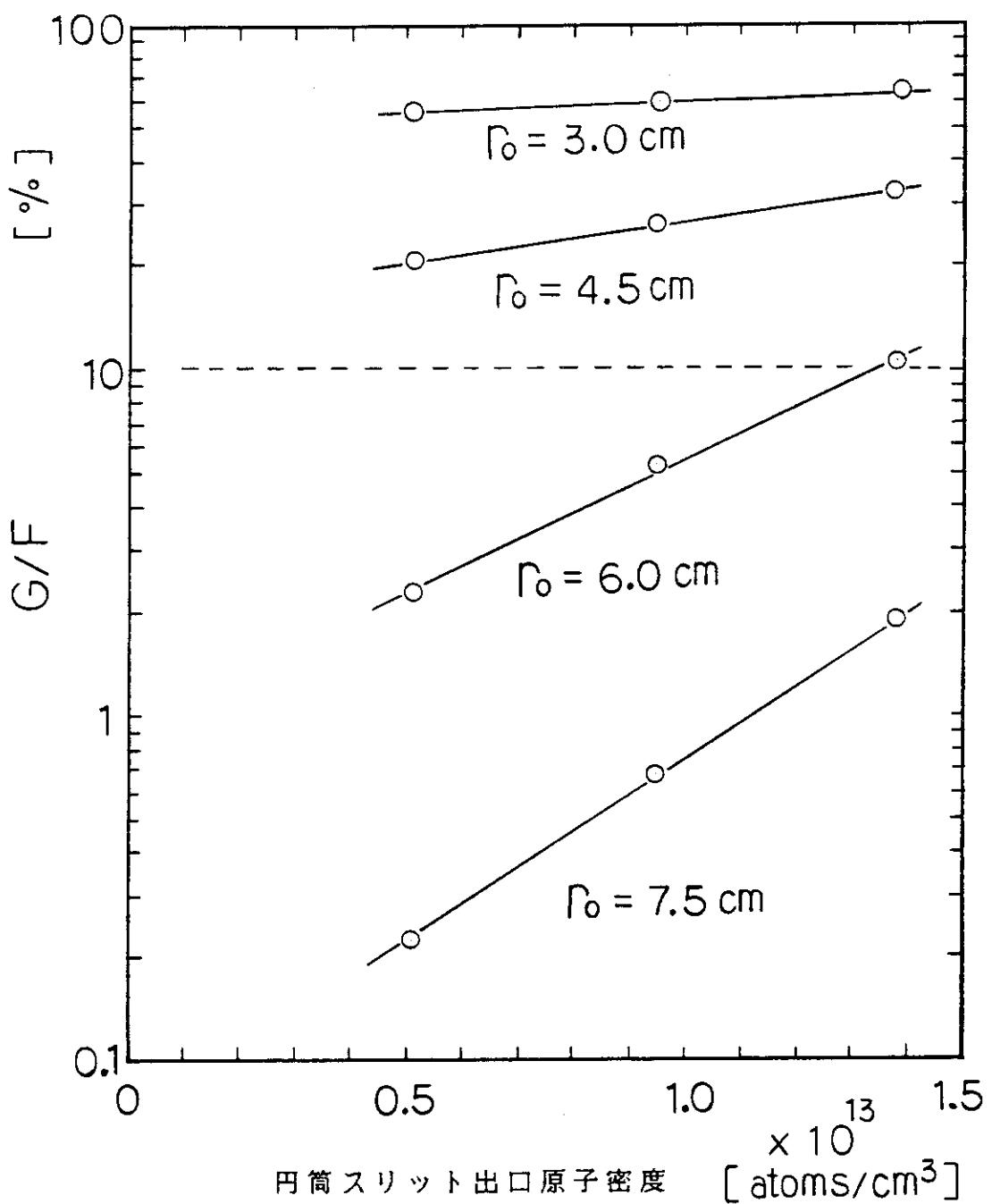


図 8(b) イオン回収電極に付着する中性原子量と円筒スリット出口量の比 G/F の
円筒スリット出口密度依存性