

JAERI-Tech

97-011



表面電離によるNd原子ビーム量の測定

1997年3月

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村）あて、お申し越しください。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。

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 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

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

表面電離による Nd 原子ビーム量の測定

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

田村 浩司・柴田 猛順

(1997年2月3日受理)

表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、Nd 原子ビームを用いてその信号特性を調べた。フィラメント表面の温度を十分高くすることにより、 40 \AA/s までの原子ビーム量に比例した表面電離イオン電流を得ることができた。質量分析計との同時測定により、1 msec 以下の速い応答速度があり、現在想定している原子ビームの変動を十分な時間分解能でモニターできることがわかった。

Measurements of Nd Atomic Beam Flux
by Means of Surface Ionization

Koji TAMURA and Takemasa SHIBATA

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

(Received February 3, 1997)

We have developed an atomic beam flux monitor by means of surface ionization. The properties of the ion signal were investigated with Nd atomic beam. The observed ion signal was proportional to the atomic beam flux up to 40 A/s by heating the filament to sufficiently high temperature. Based on the measurements with quadrupole mass analyzer, it was confirmed that the flux monitor has time resolution of less than 1 msec and can measure atomic beam flux change with sufficient time resolution.

Keywords:Surface Ionization, Atomic Vapor Flux Monitor, Neodymium

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	1
3. 実験結果	2
4. 考察	3
5. 結論	4
謝 辞	4
引用文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
3. Results	2
4. Discussion	3
5. Conclusions	4
Acknowledgments	4
References	5

1. はじめに

金属原子ビームは真空蒸着¹⁾、原子法レーザー同位体分離²⁾、原子衝突実験³⁾など多くの分野で用いられている。金属原子ビーム量は、水晶振動子膜厚計を用いて評価する場合が多い。しかし、水晶振動子膜厚計は、発振周波数の変化幅に限界があるため、膜厚計への付着量に上限がある。このため、原子法レーザー同位体分離のように原子ビーム量が高いところで使用すると、短時間で上限に達し、長時間の測定ができない。また、その応答速度は、速いものでも0.1秒であるため、これより短時間で変化するビーム量の変動は観測できない。電子ビーム加熱で生成した原子ビーム密度は100Hzで変動している⁴⁾。そのため、レーザー同位体分離や原子衝突実験では、速い応答速度の原子ビーム検出器を用いることが望ましい。このような原子ビーム密度変動は、質量分析計の2次電子増倍管出力を見ることにより高速で測定ができるが、高価で検出器が大きいため、原子ビームの計測、に用いるには簡便でない。

表面電離法は、⁵⁾元素が高温物質に触れて蒸発するとき、表面でその一部が電離する現象である。仕事関数の大きい高温物質に、イオン化ポテンシャルの小さい原子が触れるとき、高い効率でイオン化がおきることから、アルカリ金属原子やアルカリ土類金属原子の原子ビーム検出にこれまで多く用いられてきた。^{6,7)}

表面電離原子ビーム検出器の特長として、

- イオン化ポテンシャルが6eV程度までのさまざまな原子ビームの測定に適応可能である。
- 構造が単純で長寿命である。磁場等の部品が不要で、安価でコンパクトになる。
- 連続信号が得られる。
- 原子ビームの変動に対する応答速度が速い

などがある。しかし、これまでの原子ビーム検出器は、希土類元素のような、蒸気圧の低い金属の原子ビームへの応用例は少なかった。またビーム量も同位体分離実験で用いる量に比べ非常に低い場合がほとんどである。このため、ここでは、同位体分離で用いる応答速度の速い原子ビーム量の簡便な測定を目指し、表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、その特性をネオジム原子ビームを用いて測定した。

2. 実験装置

図1に試作した原子ビーム検出器を示す。タンゲステン-レニウム(5%)製(Goodfellow社製)で直径0.25mmのフィラメントに直流電流を流して、抵抗加熱により表面を高温にした。フィラメントへの通電の電流電圧特性を図2に示す。用いたタンゲ

1. はじめに

金属原子ビームは真空蒸着¹⁾、原子法レーザー同位体分離²⁾、原子衝突実験³⁾など多くの分野で用いられている。金属原子ビーム量は、水晶振動子膜厚計を用いて評価する場合が多い。しかし、水晶振動子膜厚計は、発振周波数の変化幅に限界があるため、膜厚計への付着量に上限がある。このため、原子法レーザー同位体分離のように原子ビーム量が高いところで使用すると、短時間で上限に達し、長時間の測定ができない。また、その応答速度は、速いものでも0.1秒であるため、これより短時間で変化するビーム量の変動は観測できない。電子ビーム加熱で生成した原子ビーム密度は100Hzで変動している⁴⁾。そのため、レーザー同位体分離や原子衝突実験では、速い応答速度の原子ビーム検出器を用いることが望ましい。このような原子ビーム密度変動は、質量分析計の2次電子増倍管出力を見ることにより高速で測定ができるが、高価で検出器が大きいため、原子ビームの計測に用いるには簡便でない。

表面電離法は、⁵⁾元素が高温物質に触れて蒸発するとき、表面でその一部が電離する現象である。仕事関数の大きい高温物質に、イオン化ポテンシャルの小さい原子が触れると、高い効率でイオン化がおきることから、アルカリ金属原子やアルカリ土類金属原子の原子ビーム検出にこれまで多く用いられてきた。^{6,7)}

表面電離原子ビーム検出器の特長として、

- イオン化ポテンシャルが6eV程度までのさまざまな原子ビームの測定に適応可能である。
- 構造が単純で長寿命である。磁場等の部品が不要で、安価でコンパクトになる。
- 連続信号が得られる。
- 原子ビームの変動に対する応答速度が速い

などがある。しかし、これまでの原子ビーム検出器は、希土類元素のような、蒸気圧の低い金属の原子ビームへの応用例は少なかった。またビーム量も同位体分離実験で用いる量に比べ非常に低い場合がほとんどである。このため、ここでは、同位体分離で用いる応答速度の速い原子ビーム量の簡便な測定を目指し、表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、その特性をネオジム原子ビームを用いて測定した。

2. 実験装置

図1に試作した原子ビーム検出器を示す。タンゲステン-レニウム(5%)製(Goodfellow社製)で直径0.25mmのフィラメントに直流電流を流して、抵抗加熱により表面を高温にした。フィラメントへの通電の電流電圧特性を図2に示す。用いたタンゲ

ステン-レニウムの表面温度Tと抵抗値Rの関係は、製造メーカーによれば、

$$T=21.3+3900 \cdot R$$

である。⁸⁾ この関係から求められた各フィラメント電流値での推定温度を同じく図2に示す。原子ビームはフィラメント 20mm の範囲に照射され、その一部がイオン化される。生成イオンを、フィラメント近傍で、負電位をかけたイオン検出電極に集め、イオン電流を得た。イオン電流量は $10k\Omega$ の抵抗を介してオシロスコープまたはレコーダーで測定した。

図3は装置全体の概略図を示す。Nd原子ビームは、るつぼのNd金属を、電子ビーム加熱することにより得た。原子ビーム中に含まれるイオンは、除去電極に約-50Vを印加して除いた。⁹⁾るつぼより400mm上部に、試作した表面電離原子ビーム検出器をおいた。また、試作したビーム検出器の特性を見るため四重極型質量分析計（日本真空技術株製、MSQ-100）、水晶発振式膜厚計（日本真空技術株製、CRTM-5000）による測定も同時に行った。

3. 実験結果

図4に表面電離原子ビーム検出器と水晶発振式膜厚計を同時に用いてネオジム原子ビームの計測を行ったときの測定例を示す。このときのフィラメント電流は6.75A、イオン検出電極電位は-225Vで、加熱用電子ビーム電流を変化させることで原子ビーム量を変化させた。この結果から膜厚計で測定される蒸着速度の増減に対応して、試作した原子ビーム検出器のイオン電流も増減していることがわかる。信号変化を比較すると、膜厚計の信号は表面電離の信号に比べ約1秒の時間遅れがある。このことから、表面電離型原子ビーム量測定器は従来の膜厚計に比べ時間応答が速く、より正確に蒸気量変動が測定できることがわかる。

検出器の使用条件の最適化のため、検出イオン電流のフィラメント電流、フィラメント電位、イオン検出電極電位等の依存性をみた。図5はフィラメントに6.5A流した時のイオン電流を、イオン検出電極電位が、-75V,-150V,-225Vの場合について求めたものである。いずれの場合も、水晶振動子膜厚計から求められた蒸着速度とともに増大するイオン電流が得られ、イオン電流の電極電位依存性はほとんどないことがわかった。

図6はイオン電流のフィラメント電流依存性で、イオン検出電極電位-225Vのときのものである。フィラメント電流6A以下では、イオン電流は膜厚計で測定した蒸着速度の増加に対して飽和の傾向が見られるが、6.75A以上ならば、本実験の範囲内では蒸着速度すなわち原子ビーム量に比例することがわる。この結果から、あらかじめ、そのフィラメント電流でのイオン化率を求めておけば、表面電離法による原子ビーム量の定量測定が可能であることがわかる。

ステン-レニウムの表面温度Tと抵抗値Rの関係は、製造メーカーによれば、

$$T=21.3+3900 \cdot R$$

である。⁸⁾ この関係から求められた各フィラメント電流値での推定温度を同じく図2に示す。原子ビームはフィラメント 20mm の範囲に照射され、その一部がイオン化される。生成イオンを、フィラメント近傍で、負電位をかけたイオン検出電極に集め、イオン電流を得た。イオン電流量は $10k\Omega$ の抵抗を介してオシロスコープまたはレコーダーで測定した。

図3は装置全体の概略図を示す。Nd原子ビームは、るつぼのNd金属を、電子ビーム加熱することにより得た。原子ビーム中に含まれるイオンは、除去電極に約-50Vを印加して除いた。⁹⁾るつぼより400mm上部に、試作した表面電離原子ビーム検出器をおいた。また、試作したビーム検出器の特性を見るため四重極型質量分析計（日本真空技術(株)製、MSQ-400）、水晶発振式膜厚計（日本真空技術(株)製、CRTM-5000）による測定も同時に行った。

3. 実験結果

図4に表面電離原子ビーム検出器と水晶発振式膜厚計を同時に用いてネオジム原子ビームの計測を行ったときの測定例を示す。このときのフィラメント電流は6.75A、イオン検出電極電位は-225Vで、加熱用電子ビーム電流を変化させることで原子ビーム量を変化させた。この結果から膜厚計で測定される蒸着速度の増減に対応して、試作した原子ビーム検出器のイオン電流も増減していることがわかる。信号変化を比較すると、膜厚計の信号は表面電離の信号に比べ約1秒の時間遅れがある。このことから、表面電離型原子ビーム量測定器は従来の膜厚計に比べ時間応答が速く、より正確に蒸気量変動が測定できることがわかる。

検出器の使用条件の最適化のため、検出イオン電流のフィラメント電流、フィラメント電位、イオン検出電極電位等の依存性をみた。図5はフィラメントに6.5A流した時のイオン電流を、イオン検出電極電位が、-75V,-150V,-225Vの場合について求めたものである。いずれの場合も、水晶振動子膜厚計から求められた蒸着速度とともに増大するイオン電流が得られ、イオン電流の電極電位依存性はほとんどないことがわかった。

図6はイオン電流のフィラメント電流依存性で、イオン検出電極電位-225Vのときのものである。フィラメント電流6A以下では、イオン電流は膜厚計で測定した蒸着速度の増加に対して飽和の傾向が見られるが、6.75A以上ならば、本実験の範囲内では蒸着速度すなわち原子ビーム量に比例することがわかる。この結果から、あらかじめ、そのフィラメント電流でのイオン化率を求めておけば、表面電離法による原子ビーム量の定量測定が可能であることがわかる。

イオン化率はフィラメントへの入射原子量に対する検出イオン量で定義できる。ここで、図6のフィラメント電流が、6.75Aのときのイオン化率を求めてみる。図6より水晶発振式膜厚計から求められる蒸着速度 $R=30 \text{ \AA/s}$ のとき表面電離イオン電流 $I_i=5 \mu \text{ A}$ である。原子ビーム流束は、

$$R \cdot \rho \cdot N/M$$

である。ここで、 ρ はネオジムの密度、 N はアボガドロ数、 M はネオジムの原子量である。原子ビーム検出器下部のメッシュ透過率を t 、フィラメントへの原子ビーム照射面積を S とすれば、

$$I_i = e \cdot \beta \cdot t \cdot R \cdot \rho \cdot N \cdot S/M$$

である。これより、

$$\beta = M \cdot I_i / (e \cdot \rho \cdot N \cdot S \cdot t \cdot R)$$

となる。ここで、 $\rho=7 \text{ g/cm}^3$, $S=0.025 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, $M=144 \text{ g/mol}$, $t=0.81$ と代入すれば $\beta=0.088$ となりイオン化率は 9 % であることがわかった。

表面電離型原子ビーム検出器の速い原子ビーム変動に対する応答性を調べるために、質量分析計との同時計測を行った。図7に測定結果の一例を示す。これはフィラメント電流 6.5A、イオン電極電位 -225V、蒸着速度約 5 \AA/s のときのもので、質量分析計の信号はセラトロン出力電流を 100 k\Omega の抵抗を介して測定したものである。電子銃用フィラメント電流量に同期して原子ビーム量が変動するため、質量分析計の信号に、100Hz 周期でイオン電流の変動が見られる。原子ビーム検出器の表面電離イオン信号にも、それに対応した周期でイオン量の変動が見られている。

図8は、同時刻での質量分析計のイオン信号と表面電離型原子ビーム検出器のイオン信号の関係で、両者は比例していることがわかる。これにより、表面電離型原子ビーム検出器は 1 msec 以下の応答速度をもち、各時間での原子ビーム量が評価できることがわかった。

4. 考察

表面電離による原子のイオン化係数 β は、イオン化ポテンシャル、高温物質の仕事関数など、さまざまな要素に依存するが、近似的に Saha-Langmuir の式で記述される¹⁰⁾、

$$\begin{aligned} \beta &= \alpha / (1 + \alpha) \\ \alpha &= N_+ / N_0 = (q_+/q_0) \cdot \exp[(\phi - E_i)/kT], \end{aligned}$$

ここで q_+, q_0 はイオンと原子の分配関数、 ϕ は金属の仕事関数、 E_i は原子のイオン化ポテンシャル、 N_0 と N_+ は表面から脱離する中性原子とイオンの数である。図9に推定表面温度の逆数とイオン化率 β の関係を片対数プロットで示す。本測定では $\beta \ll 1$ であるから、

イオン化率はフィラメントへの入射原子量に対する検出イオン量で定義できる。ここで、図6のフィラメント電流が、6.75Aのときのイオン化率を求めてみる。図6より水晶発振式膜厚計から求められる蒸着速度 $R=30 \text{ \AA/s}$ のとき表面電離イオン電流 $I_i=5 \mu \text{ A}$ である。原子ビーム流束は、

$$R \cdot \rho \cdot N/M$$

である。ここで、 ρ はネオジムの密度、 N はアボガドロ数、 M はネオジムの原子量である。原子ビーム検出器下部のメッシュ透過率を t 、フィラメントへの原子ビーム照射面積を S とすれば、

$$I_i = e \cdot \beta \cdot t \cdot R \cdot \rho \cdot N \cdot S/M$$

である。これより、

$$\beta = M \cdot I_i / (e \cdot \rho \cdot N \cdot S \cdot t \cdot R)$$

となる。ここで、 $\rho=7 \text{ g/cm}^3$, $S=0.025 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, $M=144 \text{ g/mol}$, $t=0.81$ と代入すれば $\beta=0.088$ となりイオン化率は 9 % であることがわかった。

表面電離型原子ビーム検出器の速い原子ビーム変動に対する応答性を調べるために、質量分析計との同時計測を行った。図7に測定結果の一例を示す。これはフィラメント電流 6.5A、イオン電極電位 -225V、蒸着速度約 5 \AA/s のときのもので、質量分析計の信号はセラトロン出力電流を 100 k\Omega の抵抗を介して測定したものである。電子銃用フィラメント電流量に同期して原子ビーム量が変動するため、質量分析計の信号に、100Hz 周期でイオン電流の変動が見られる。原子ビーム検出器の表面電離イオン信号にも、それに対応した周期でイオン量の変動が見られている。

図8は、同時刻での質量分析計のイオン信号と表面電離型原子ビーム検出器のイオン信号の関係で、両者は比例していることがわかる。これにより、表面電離型原子ビーム検出器は 1 msec 以下の応答速度をもち、各時間での原子ビーム量が評価できることがわかった。

4. 考察

表面電離による原子のイオン化係数 β は、イオン化ポテンシャル、高温物質の仕事関数など、さまざまな要素に依存するが、近似的に Saha-Langmuir の式で記述される¹⁰⁾、

$$\begin{aligned} \beta &= \alpha / (1 + \alpha) \\ \alpha &= N_+ / N_0 = (q_+/q_0) \cdot \exp[(\phi - E_i)/kT], \end{aligned}$$

ここで q_+, q_0 はイオンと原子の分配関数、 ϕ は金属の仕事関数、 E_i は原子のイオン化ポテンシャル、 N_0 と N_+ は表面から脱離する中性原子とイオンの数である。図9に推定表面温度の逆数とイオン化率 β の関係を片対数プロットで示す。本測定では $\beta \ll 1$ であるから、

$\beta = \alpha / (1 + \alpha) \sim \alpha$ である。従って、Saha-Langmuir の式が成立すれば、イオン化率の対数と $1/T$ は直線関係になるはずである。しかし、本実験では、高温になるにつれ、イオン化率に飽和傾向が見られた。この飽和挙動はタンクスチレンへのバリウムの蒸着でも報告されている。⁵⁾ このような飽和挙動は、仕事関数などの表面状態が温度により変化することが原因と考えられており、本実験での飽和挙動も表面の仕事関数などの表面状態が温度により変わっているのではないかと思われる。

今回の測定ではネオジム原子ビームについてのみの測定であるが、ガドリニウムなど他の希土類元素原子ビームや、ウラン原子ビーム等についても表面電離型ビーム検出器は有効であると考えられる。さらに、コンパクトな計測器として簡便に使用できるものを今後試作していく予定である。

5. 結論

表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、Nd 原子ビームを用いてその特性を調べた。フィラメント表面の温度を充分あげることにより、原子ビーム量に比例した表面電離イオン電流を得ることができた。質量分析計との同時測定により、1 msec 以下の速い応答速度があり、原子ビームの変動をモニターできることがわかった。この結果から、本ビーム検出器は簡便な測定器として同位体分離や原子衝突、原子分光などの実験に使用できる見通しが得られた。

謝辞

本研究の実験、まとめにあたり、小倉浩一氏、足立肇氏をはじめ、同位体分離研究室のかたがたに御協力いただきました。ここに心から感謝いたします。

$\beta = \alpha / (1 + \alpha) \sim \alpha$ である。従って、Saha-Langmuir の式が成立すれば、イオン化率の対数と $1/T$ は直線関係になるはずである。しかし、本実験では、高温になるにつれ、イオン化率に飽和傾向が見られた。この飽和挙動はタンクスチレンへのバリウムの蒸着でも報告されている。⁵⁾ このような飽和挙動は、仕事関数などの表面状態が温度により変化することが原因と考えられており、本実験での飽和挙動も表面の仕事関数などの表面状態が温度により変わっているのではないかと思われる。

今回の測定ではネオジム原子ビームについてのみの測定であるが、ガドリニウムなど他の希土類元素原子ビームや、ウラン原子ビーム等についても表面電離型ビーム検出器は有効であると考えられる。さらに、コンパクトな計測器として簡便に使用できるものを今後試作していく予定である。

5. 結論

表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、Nd 原子ビームを用いてその特性を調べた。フィラメント表面の温度を充分あげることにより、原子ビーム量に比例した表面電離イオン電流を得ることができた。質量分析計との同時測定により、1 msec 以下の速い応答速度があり、原子ビームの変動をモニターできることがわかった。この結果から、本ビーム検出器は簡便な測定器として同位体分離や原子衝突、原子分光などの実験に使用できる見通しが得られた。

謝辞

本研究の実験、まとめにあたり、小倉浩一氏、足立肇氏をはじめ、同位体分離研究室のかたがたに御協力いただきました。ここに心から感謝いたします。

$\beta = \alpha / (1 + \alpha) \sim \alpha$ である。従って、Saha-Langmuir の式が成立すれば、イオン化率の対数と $1/T$ は直線関係になるはずである。しかし、本実験では、高温になるにつれ、イオン化率に飽和傾向が見られた。この飽和挙動はタンクスチンへのバリウムの蒸着でも報告されている。⁵⁾ このような飽和挙動は、仕事関数などの表面状態が温度により変化することが原因と考えられており、本実験での飽和挙動も表面の仕事関数などの表面状態が温度により変わっているのではないかと思われる。

今回の測定ではネオジム原子ビームについてのみの測定であるが、ガドリニウムなど他の希土類元素原子ビームや、ウラン原子ビーム等についても表面電離型ビーム検出器は有効であると考えられる。さらに、コンパクトな計測器として簡便に使用できるものを今後試作していく予定である。

5. 結論

表面電離を用いた原子ビーム検出器を試作し、Nd 原子ビームを用いてその特性を調べた。フィラメント表面の温度を充分あげることにより、原子ビーム量に比例した表面電離イオン電流を得ることができた。質量分析計との同時測定により、1 msec 以下の速い応答速度があり、原子ビームの変動をモニターできることがわかった。この結果から、本ビーム検出器は簡便な測定器として同位体分離や原子衝突、原子分光などの実験に使用できる見通しが得られた。

謝辞

本研究の実験、まとめにあたり、小倉浩一氏、足立肇氏をはじめ、同位体分離研究室のかたがたに御協力いただきました。ここに心から感謝いたします。

引用文献

- [1] 日本学術振興会薄膜第131委員会編：“真空ハンドブック”，オーム社，東京 49 (1983).
- [2] Greenland G.T. : Contemporary Physics 31, 405(1990).
- [3] Ogura K., Shibata T.:質量分析 41, 37(1993).
- [4] Ohba H., Araki M., Shibata T. : Jpn.J.Appl.Phys., 33, L693 (1994).
- [5] Kaminsky M.: "Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces", Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg · New York, 127 (1965).
- [6] 伊佐公男、楠勲、小寺熊三郎:真空 15, 321 (1972).
- [7] Ezoe H., Watanabe K., Hirose A., Tanaka S. : Mass Spectroscopy 29, 237 (1981).
- [8] Goodfellow 社私信。
- [9] Ohba H., Nishimura A., Ogura K., Shibata T.: Rve.Sci. Instrum., 65, 657 (1994).
- [10] Langmuir I., Kingdon K.H. : Proc.Roy.Soc. (London) A107, 61 (1924).

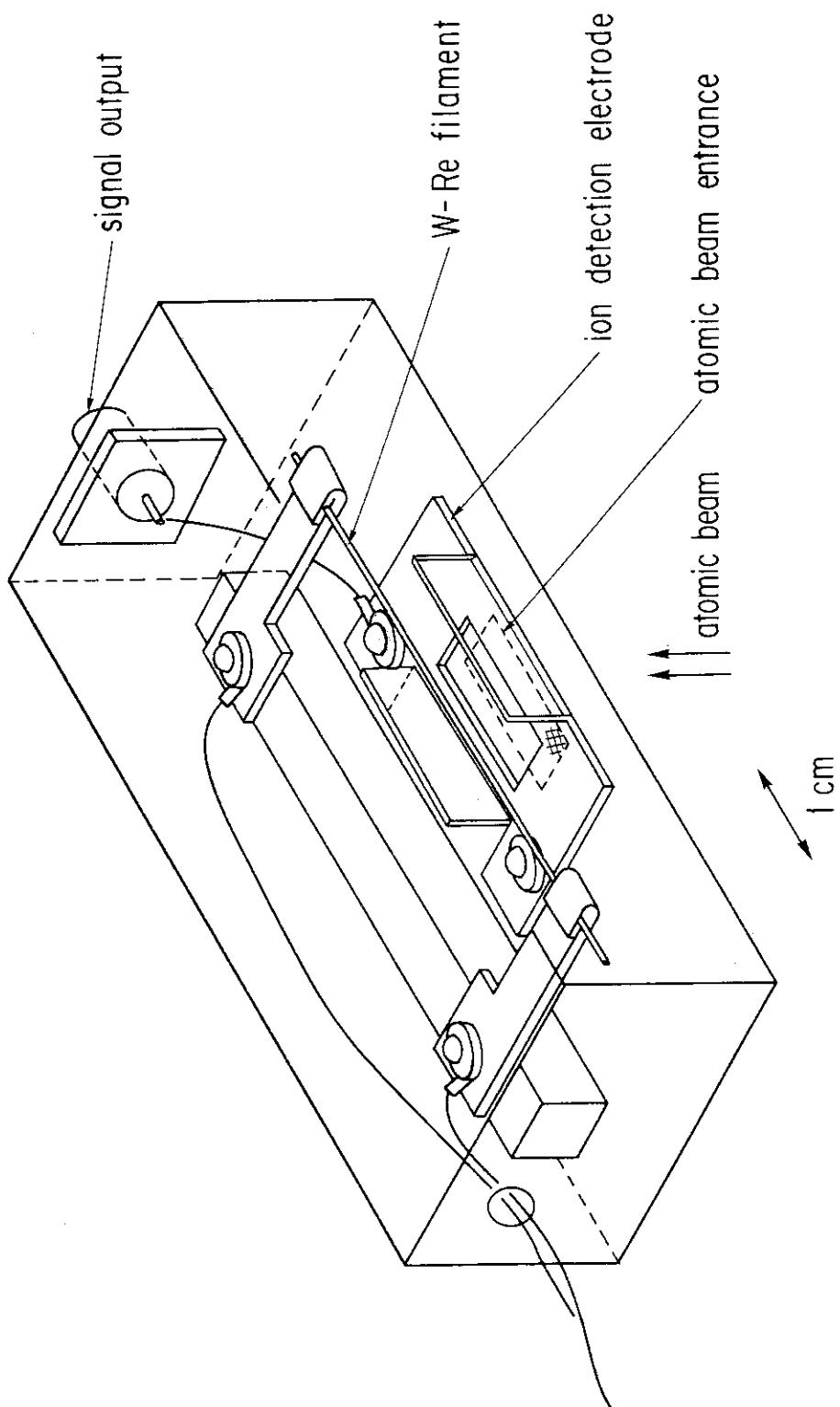


図1 試作した表面電離原子ビーム検出器

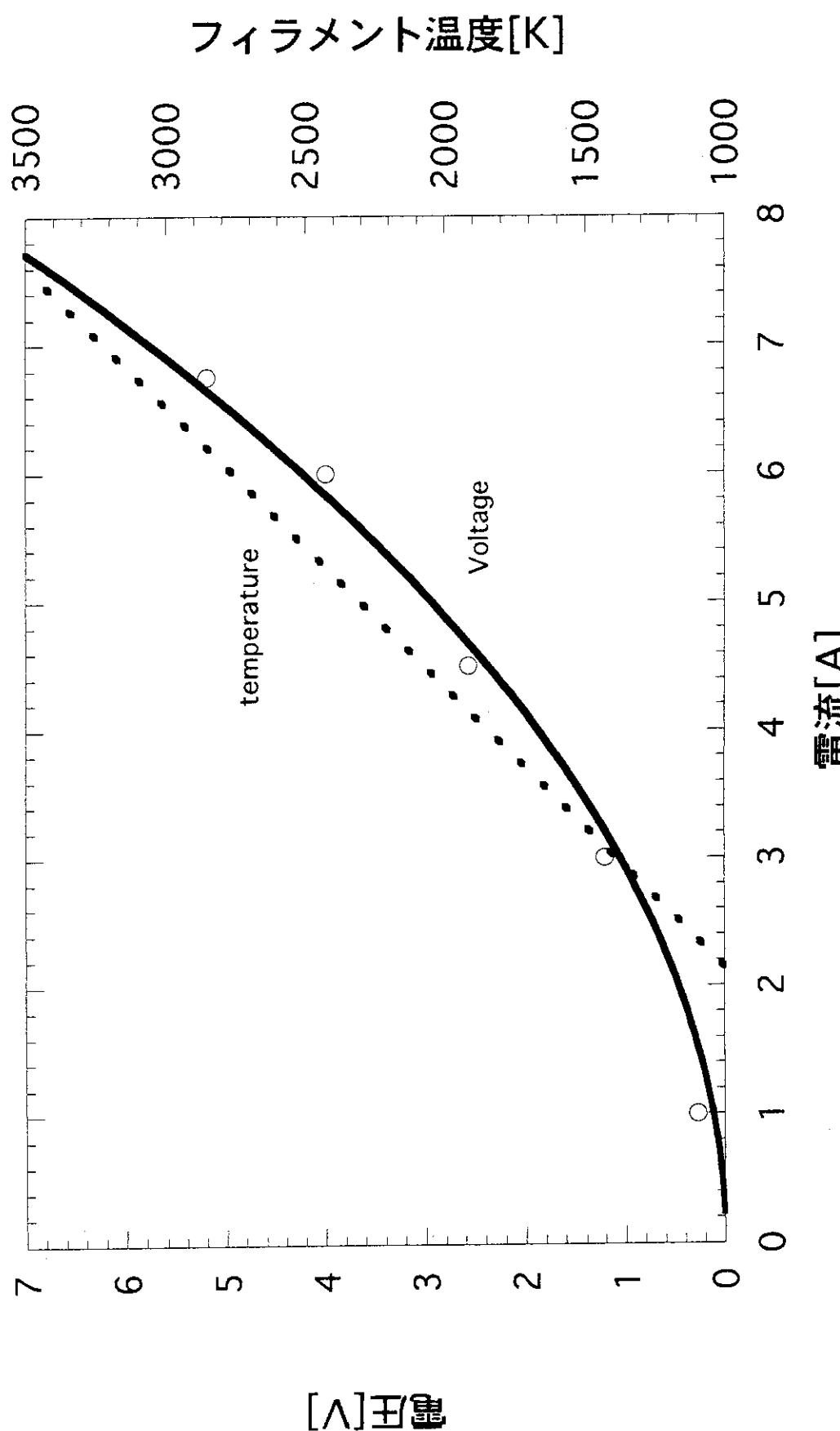


図2 フィラメント電圧と電流、温度の関係

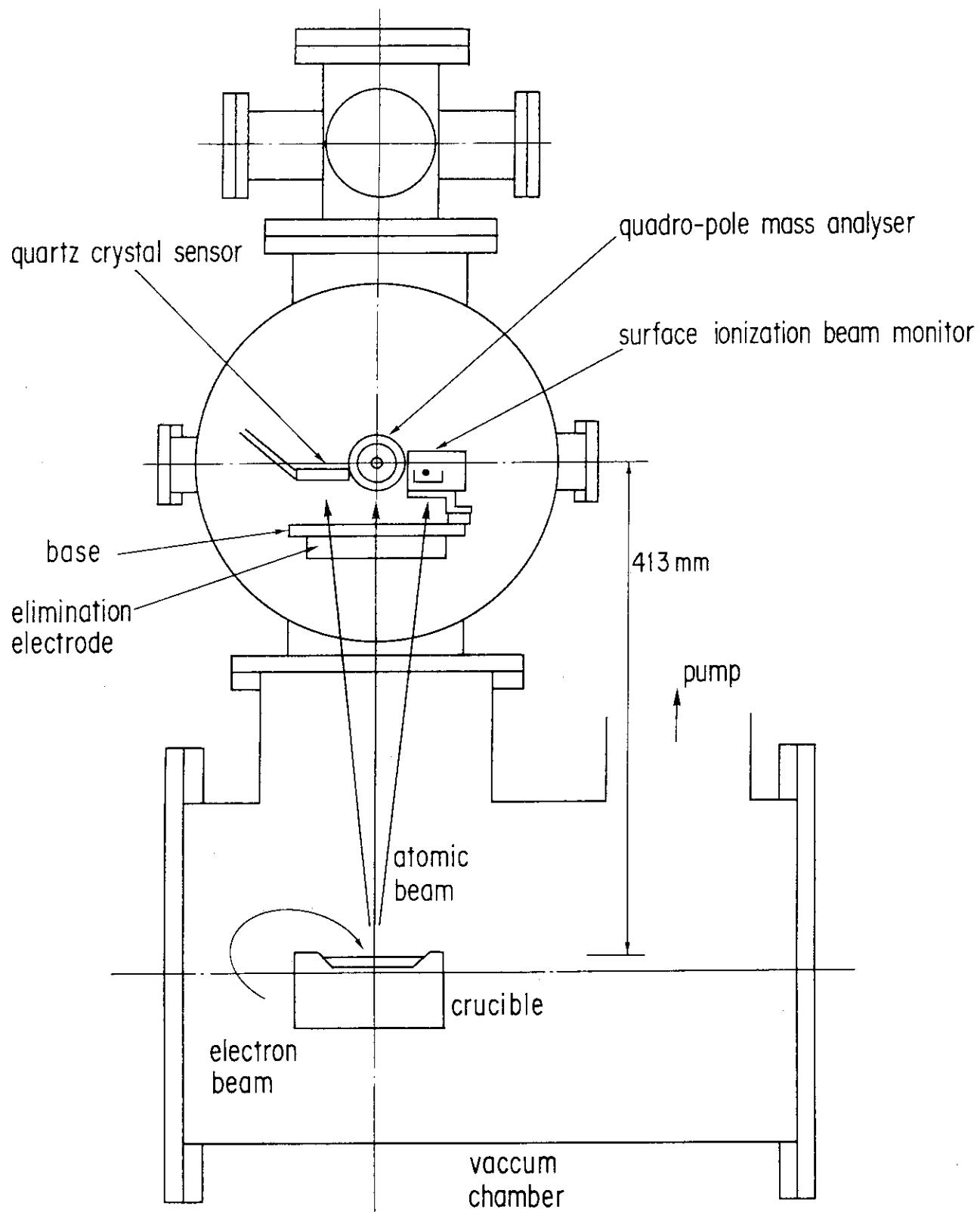


図3 実験装置配置図

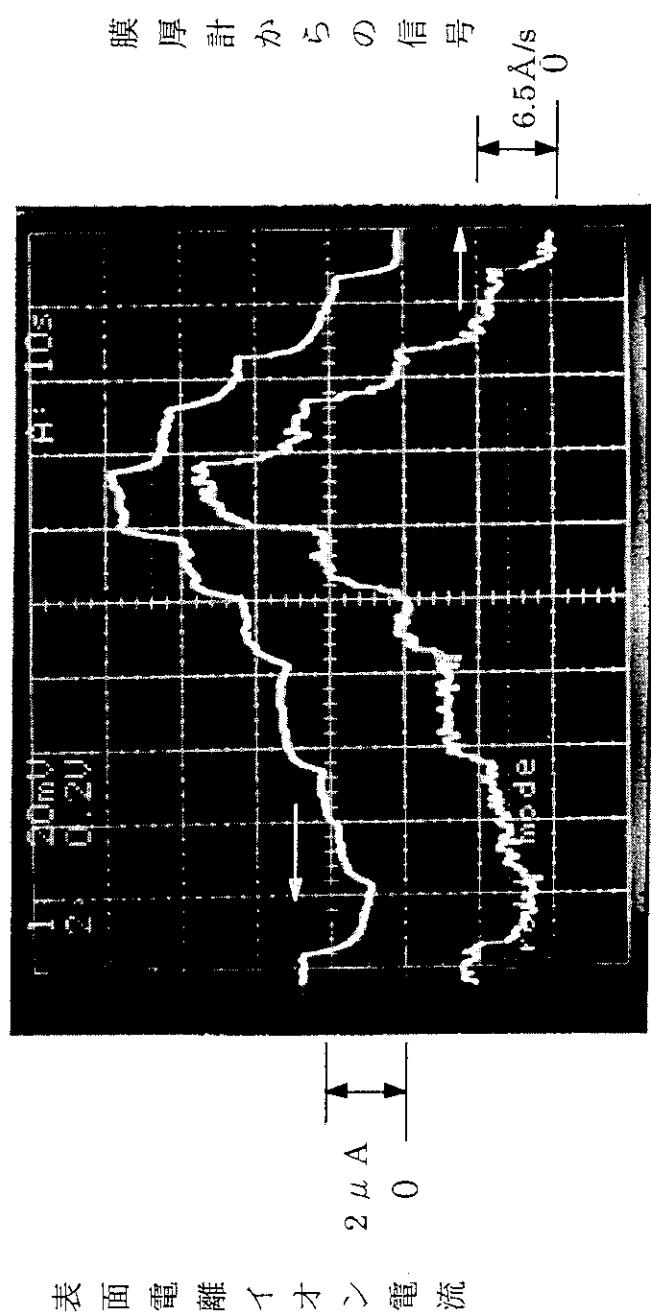


図4 蒸着速度と表面電離イオン電流の関係

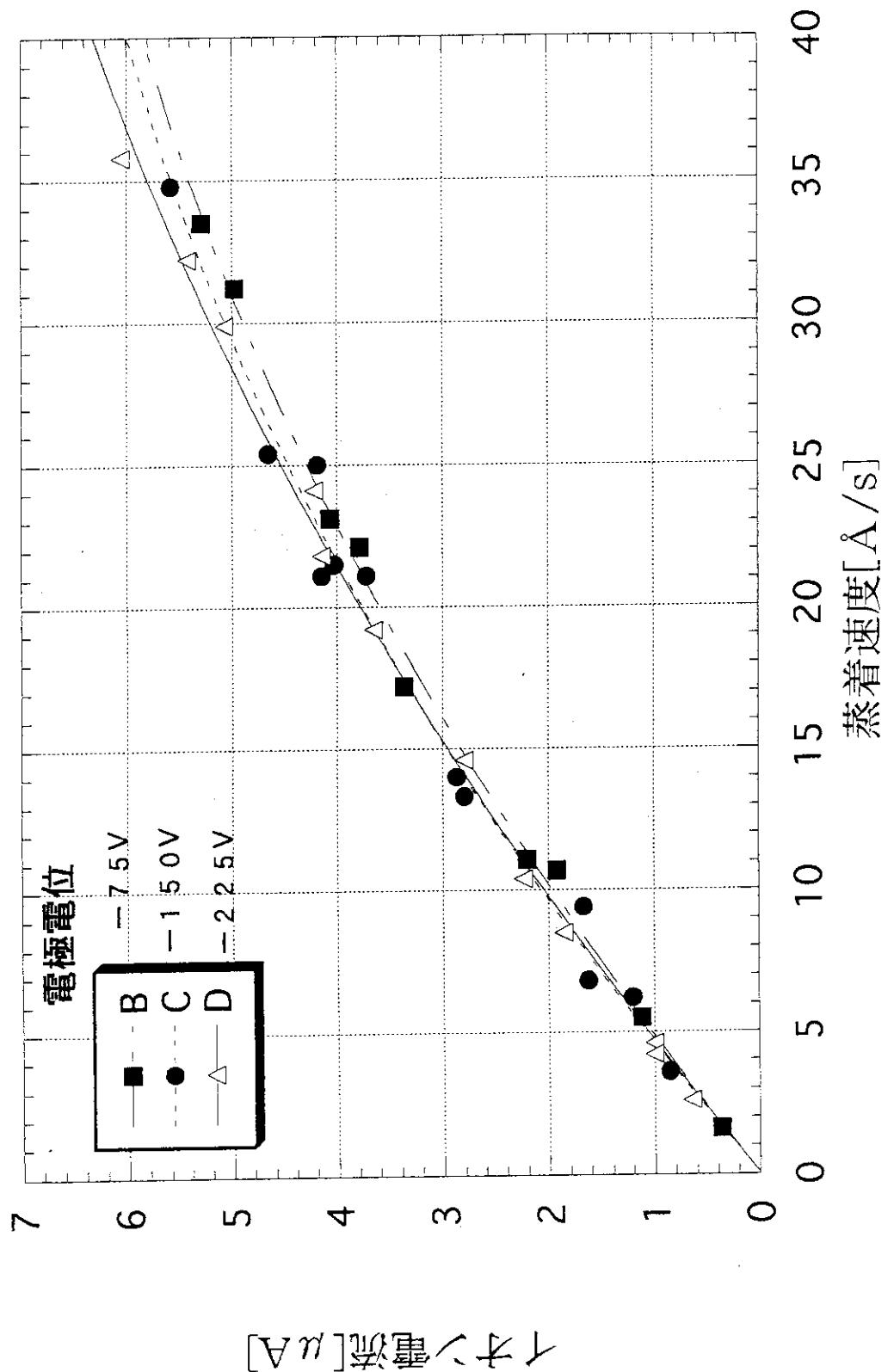


図5 表面イオン電流の回収電極電位依存性

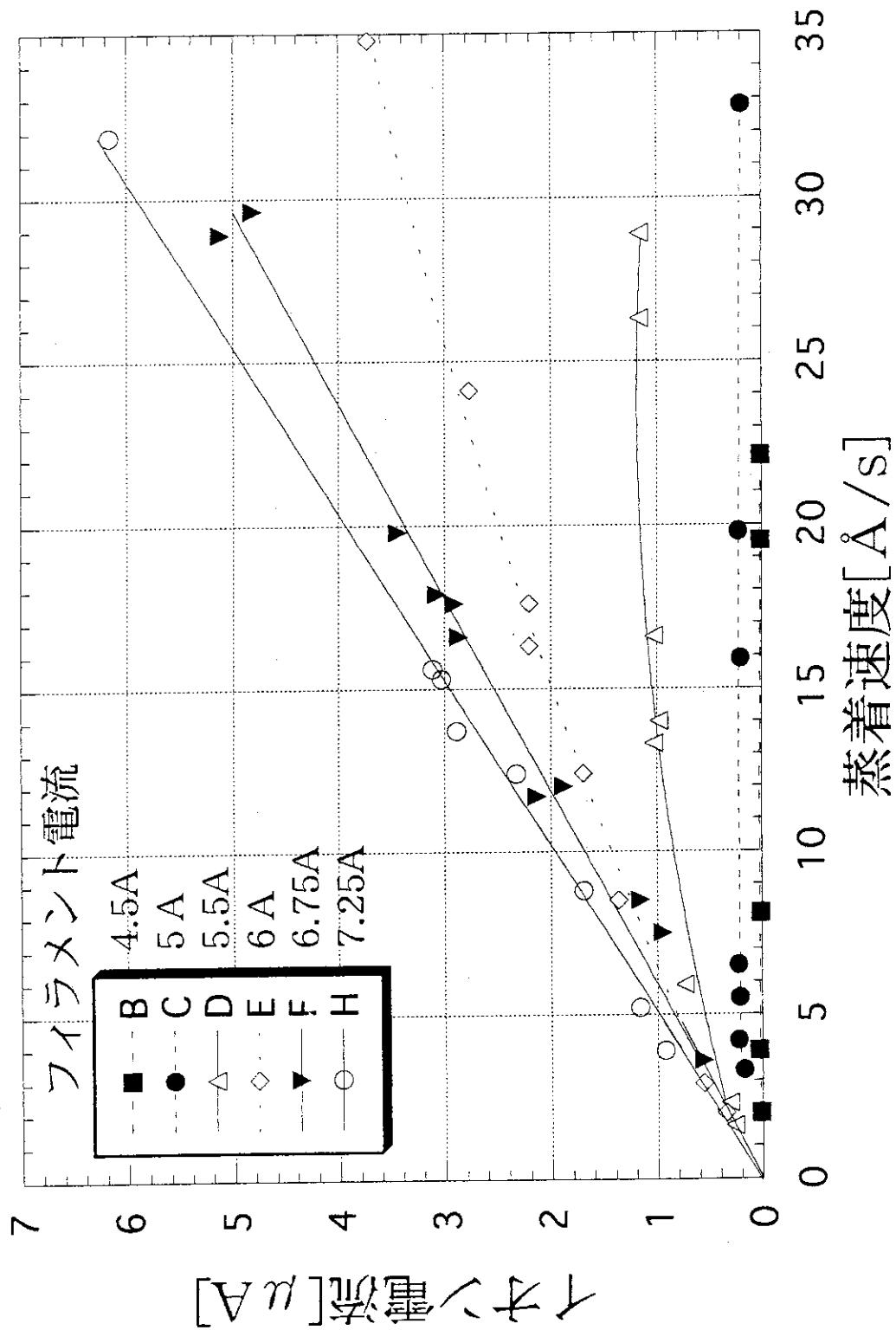


図6 表面イオン電流のフィラメント電流依存性

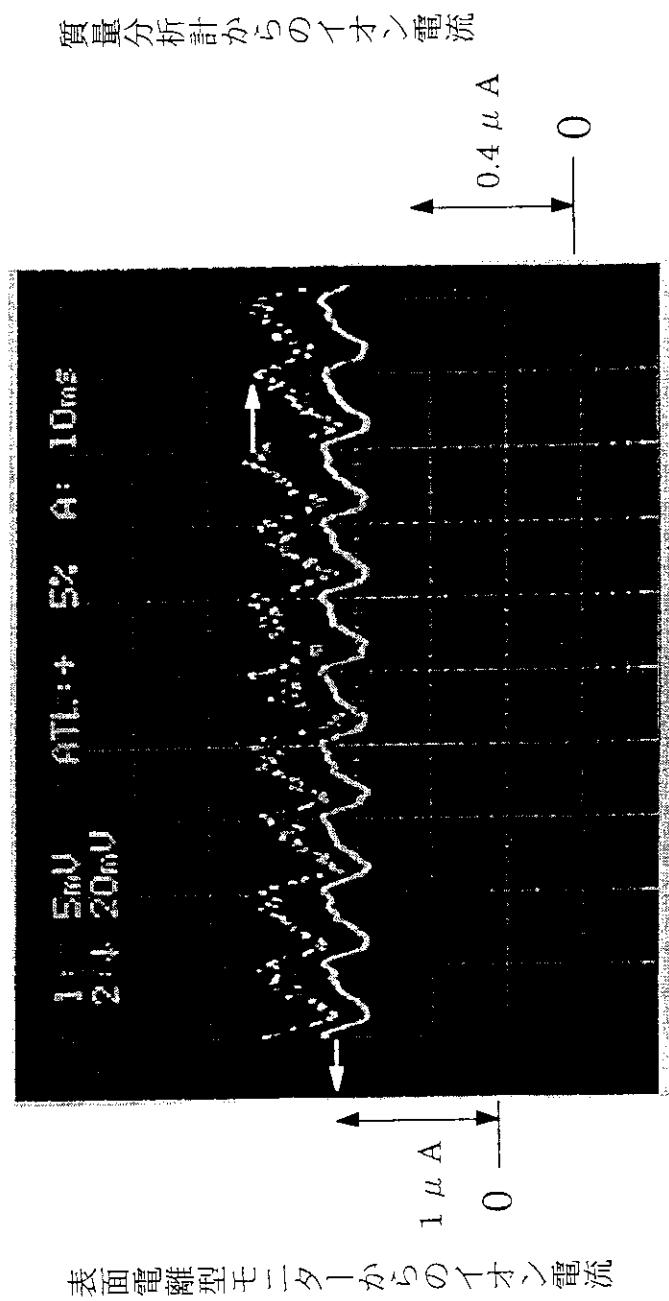


図7 表面イオン電流の時間的変化

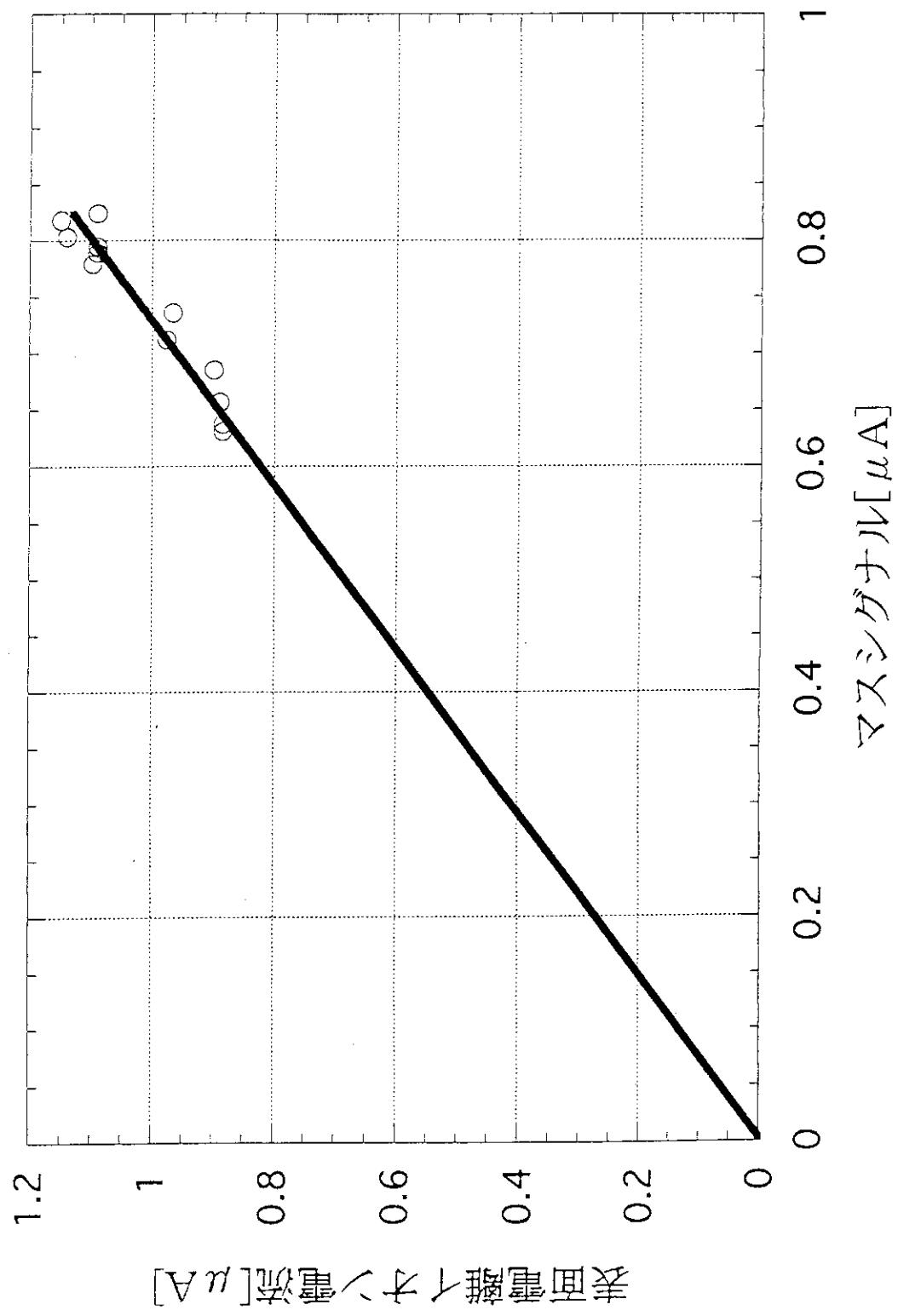


図8 四重極型質量分析器と表面電離原子ビーム検出器との信号の相関

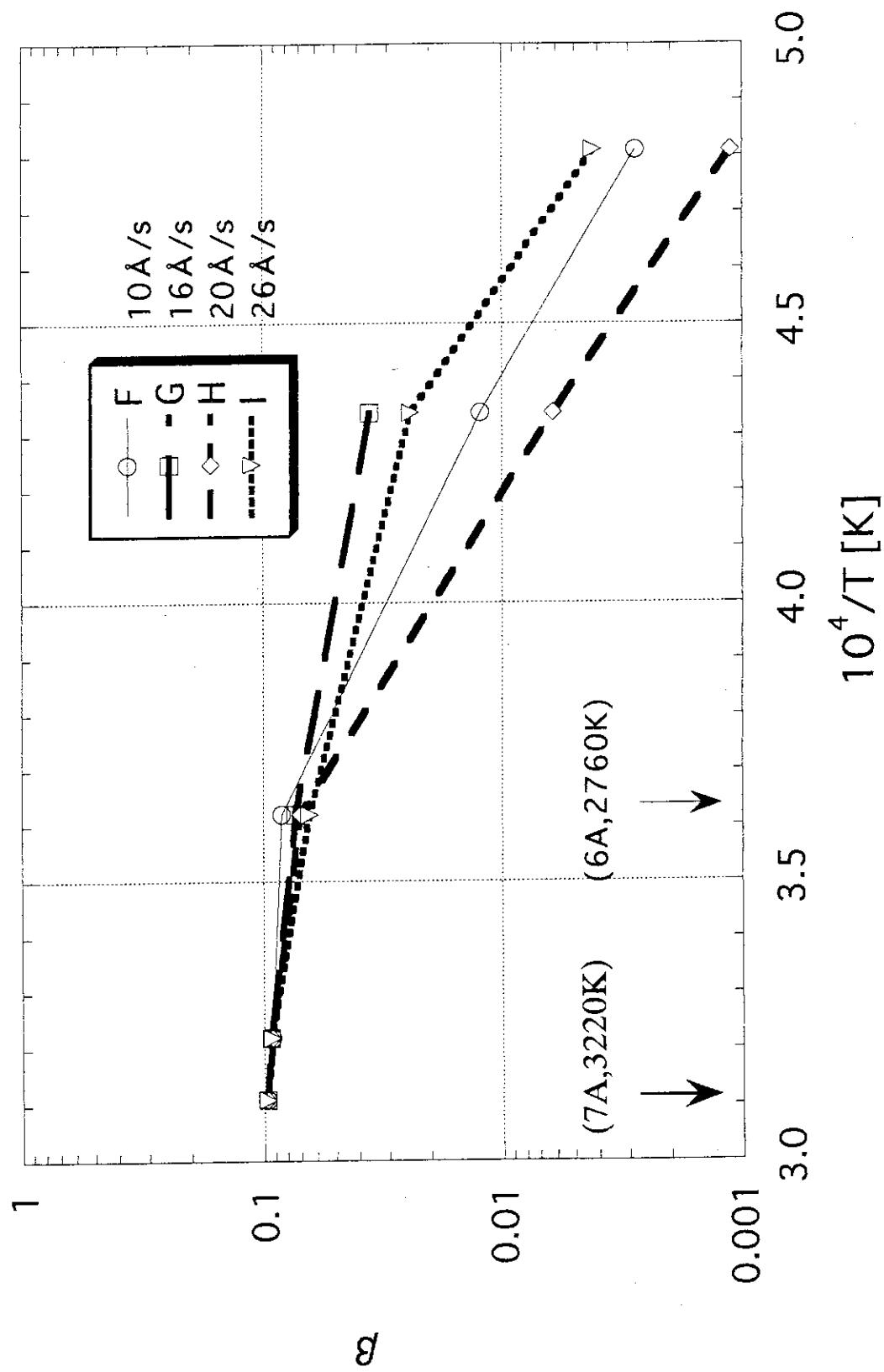


図 9 表面イオン化率のフィラメント温度依存性