

# 電子ビームイオントラップから引き出された多価イオンビームの診断とその応用

電気通信大学 量子・物質工学専攻 中村信行研究室 島崎隆宏

## 1. 序論

我々は Tokyo-EBIT (Electron Beam Ion Trap) [1, 2] を用いて様々な研究を行っている。Tokyo-EBIT はレーザーセンターで稼働中の多価イオン源である。Tokyo-EBIT を用いると  $\text{F}^{53+}$  や  $\text{Bi}^{81+}$  など極めて価数の高い重元素多価イオンを生成することができる。それらの多価イオンをビームとして引き出して衝突実験を行い、固体表面との相互作用[3, 4]や電子との衝突における共鳴過程[5, 6]の研究を行っている。

しかしながら、EBIT は極めて価数の高い多価イオンを生成可能な反面、その生成量はそれほど多くないため、衝突実験を行う際に多価イオンビームの輝度の低さがしばしば障害となっている。例えば、ガラスキャピラリーを用いる多価イオンガイド実験[7]では、キャピラリーのガイド効果を生じさせるために約 1 pA の多価イオンビームを必要とするのだが、価数選別ビームではそのイオン量を満たせないため、価数非選別ビームを用いて実験を行っている。なお、価数選別ビームとは、EBIT によって生成した多価イオンから特定の価数の多価イオンのみを選別して用いるビームであり、価数非選別ビームとは、EBIT によって生成した全ての価数の多価イオンを用いるビームである。ガラスキャピラリーを用いる多価イオンガイド実験は価数非選別ビームを用いて行ったため、価数に依存する効果などを定量的に調べることができていない。

そこで私は、Tokyo-EBIT を用いて行う実験の可能性をさらに広げるため、多価イオンビームの輝度増加を目的として価数非選別ビームの診断を行い、その過程で明らかとなった問題点を解決しつつ、エミッタンスやエネルギー分布など、実験を行う上で重要となる特性を測定した。

## 2. エミッタンスとその測定方法

エミッタンスとは、ビームの拡がりを表す物理量である。

ビームのある断面において、そこを通過する全てのイオンに対し、位置  $r$  と拡がり角  $\alpha$  を求める。 $r$  はビーム中心軸からの最短距離で定義され、 $\alpha$  はビーム中心軸とイオンの移動方向との成す角で定義される。何らかの方法により全てのイオンの  $r$  および  $\alpha$  を求めて図1のように位相図上にプロットし、それを中心から 86.5 %含むように結んだ閉曲線をエミッタンス図と呼び、エミッタンスはエミッタンス図内の面積として定義される。

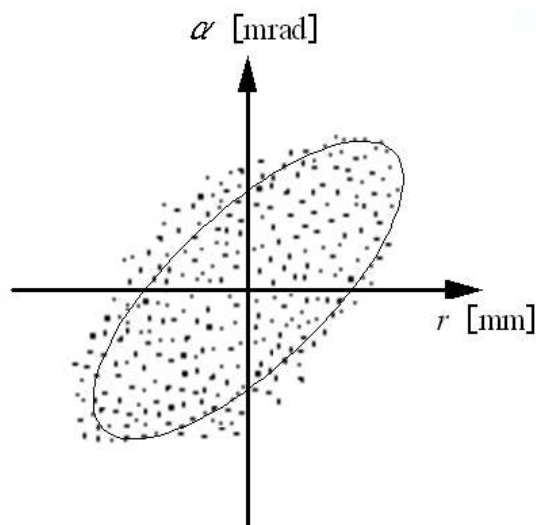


図1. 位相図とエミッタンス

エミッタンスの測定方法はいくつか存在するが、ここでは本研究で用いたシングルスリット法について説明する。

図2のように Z 軸をイオンビームの中心軸にとる。シングルスリット法では、スリット穴の位置をイオンの位置  $r$  とし、スリット-検出器間の空間を、イオンの移動方向が変化しない

ドリフト空間だと仮定する。そして、イオンの拡がり  $h_{\pm}$  を検出器することで、 $h_{\pm}$  と  $r$  とスリット-検出器間の距離  $l$  とから拡がり角  $\alpha$  を求め、位相図を描いてエミッタンスを求める。

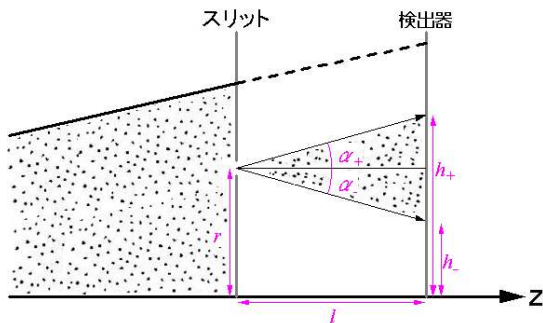


図2. シングルスリット法

### 3. エネルギー分析器とその原理

本研究では阻止電場型エネルギー分析器を用いて測定を行った。

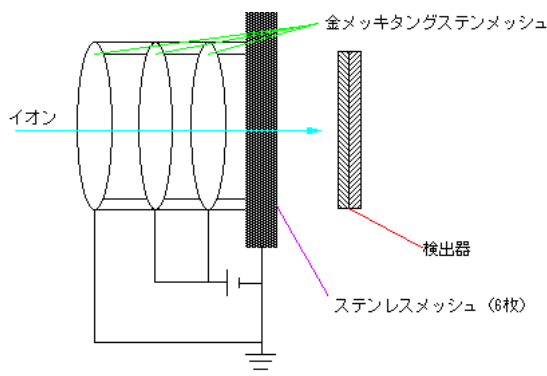


図3. 阻止電場型エネルギー分析器

図3における3個の楕円および黒塗りの長方形はそれぞれ、金メッキされたタングステンメッシュおよび6枚重ねのステンレスメッシュを表す。両端のメッシュを接地電位とし、中央の2枚のメッシュに阻止電圧をかけることにより、左方から入射するイオンビームに対してエネルギー分析を行う。なお、測定の際に多価イオンビームの強度が検出器の測定可能強度を大幅に超えていたので、ステンレスメッシュを6枚重ねることにより透過率を0.001%とし、ビーム強度を測定可能な範囲内に収まるよう調整した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 多価イオンビームの診断

本測定は図4の配置で行った。シングルスリット法で用いたスリットはスリット幅0.02 mm、厚さ0.2 mm のものであり、検出器としては直径25 mm、位置分解能1%の二次元位置有感型検出器 (Position Sensitive Detector : PSD) を用いた。

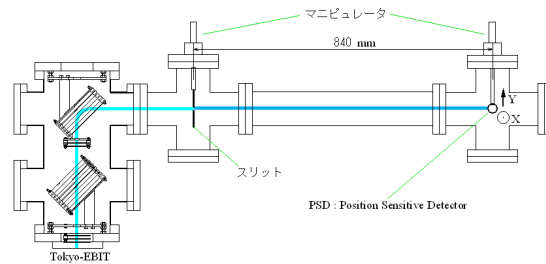


図4. 多価イオンビームの診断測定

Tokyo-EBIT で生成した多価イオンを引き出し、平行平板型偏向器で曲げて第3ビームラインに入射させ、スリットによりビームの一部を切り出し、840 mm 後方に設置した PSD にてイオンの到達位置および量を検出した。

電子ビームの加速電圧を 100 kV、電流値を 160 mA、多価イオンの引き出し電圧を 3 kV とし、イオン種に残留ガスを用いた結果、PSD にて図5のようなイオンの強度分布像を得た。

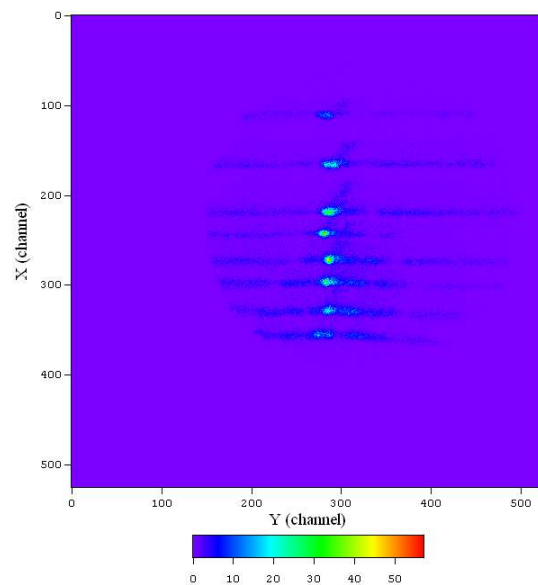


図5. 多価イオンビームの二次元強度分布 1

図5において、縦軸および横軸は PSD のチャンネル数を表し、色彩により検出したイオンの量を表している。縦軸は図4に記載したように紙面に対して垂直な方向のチャンネルを、横軸は紙面に平行な上下方向のチャンネルを表している。

図5はスリットの位置を固定した測定で得たデータである。この結果から、多価イオンビームは何らかの要因によって分裂させられていると考えられる。分裂の要因としては、多価イオンを生成する多価イオン源自体に問題がある場合と、多価イオンをビームとして引き出すビームラインに問題がある場合の二つが考えられる。

以上のことから、イオン銃を用いてビームラインに問題が存在するかどうかの調査を行うことにした。

#### 4.2 イオン銃を用いたビームラインの試験 本測定は図6の配置で行った。

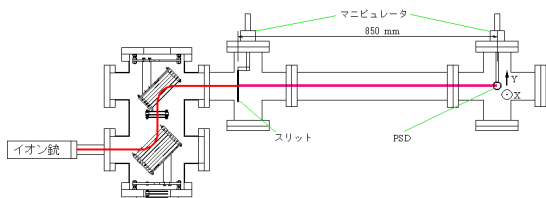


図6. イオン銃を用いたビームラインの試験

イオン銃を第1ビームラインの対向位置に設置し、上流に設置された偏向器によりイオンビームを多価イオンビームと同じビーム軌道に入射させる。その後は多価イオンビームでの測定同様、スリットでビームの一部を切り出し、後方に設置した PSD にてイオンの強度分布を検出する (PSD とスリットの距離が異なるのは他の測定との兼ね合いでスリットを 10 mm 上流側へ動かしたため)。

その結果、PSD にて図7の像を得た。縦軸、横軸、そして色彩でイオンの量を表す点は図5と同じである。

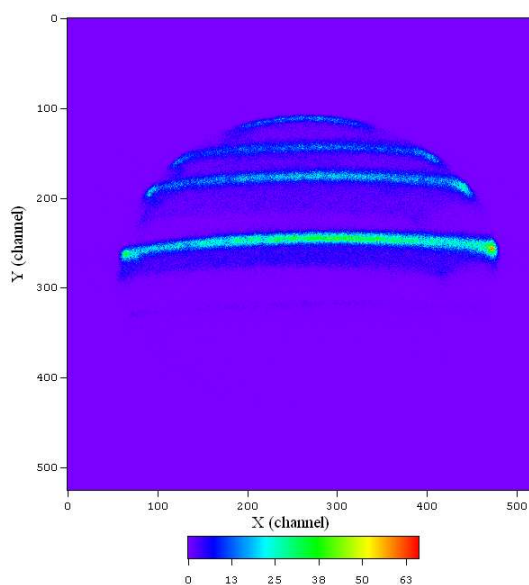


図7. 一価イオンビームの二次元強度分布 1

図5および図7から、問題はビームラインにあるということが判明した。図5および図7で得られた像を見ると、縦幅が小さいのに対して横幅は大きいことが分かる。このことから、多価イオンビームを横方向に分断する形状をしているスリットか、偏向器のビーム入射部およびビーム出射部に存在するワイヤー (図8参照) が原因ではないかと考えた。さらに、レンズやディフレクタ、偏向器にける電圧等を変えてもビーム分裂が収まる様子が無かったので、ワイヤーが原因である可能性が高いと考えたが、確信を得られなかった。



図8. 偏向器入口部に設置されたワイヤー

そこで、荷電粒子の軌道計算シミュレーションソフトである SIMION を用いてシミュレートしたところ、偏向器の入口部および出口部に設置したワイヤーによってできた不均一な電場が原因だと考えられたため、ワイヤーの代わりに網目の細かいメッシュへ換装した。

換装後、再度図6の配置で測定を行った。偏向器の入口部および出口部のワイヤーをメッシュに換装した点以外に変更点は無い。その結果、図9の強度分布像を得た。縦軸、横軸、そして色彩でイオンの量を表す点は図5と同じである。

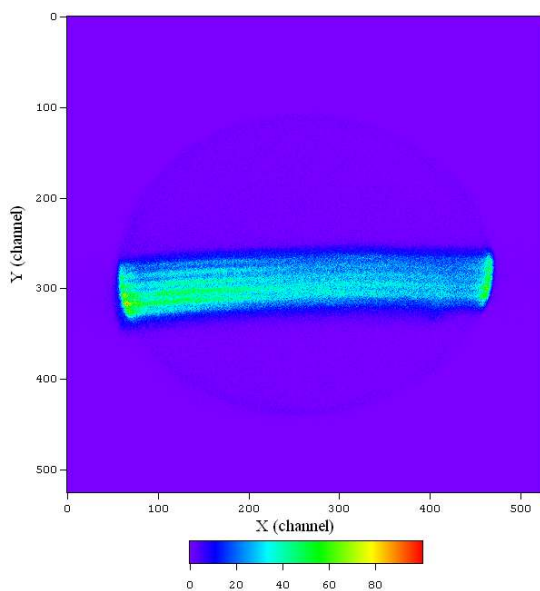


図9. 一価イオンビームの二次元強度分布2

図9に見られるように、濃淡こそできているものの、図5および図7のようなビーム分裂は解決できたことが分かる。

#### 4.3 多価イオンビームのエミッタンス

本測定は図4の配置で行った。変更点は、偏向器の入口部分および出口部のワイヤーをメッシュに換装した点のみである。電子ビームの加速電圧を10 kV、電流値を56 mA、多価イオンの加速電圧を3 kV とし、イオン種として残留ガスを用いた結果、図10の像を得た。縦軸、横軸、そして色彩でイオンの量を表す点は図5と同じである。

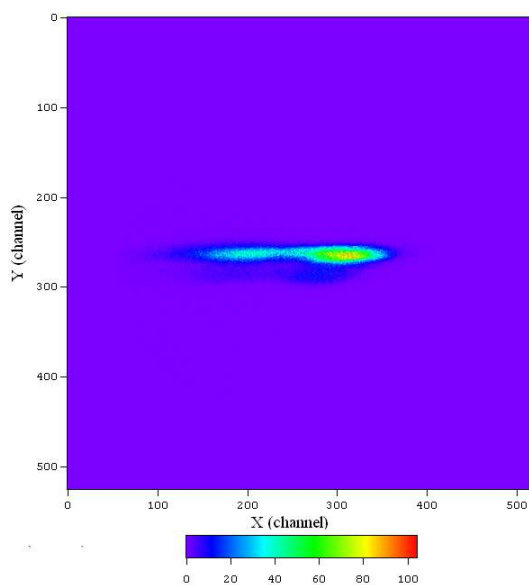


図10. 多価イオンビームの二次元強度分布1

図を見て分かるように、多価イオンビームにおいても図9同様ビーム分裂が治まった様子が観測された。

それを確認した上で、前回同様スリット幅0.02 mmのスリットを用いてシングルスリット法で測定を行ったところ、図11のような位相図を得た。なお、縦軸は、イオンの移動方向とビーム中心軸の成す角である拡がり角  $\alpha$  を表し、横軸はスリット穴の位置、すなわちイオンの位置  $r$  を表す。そして、色彩により各パラメータを持つイオンの量を表している。

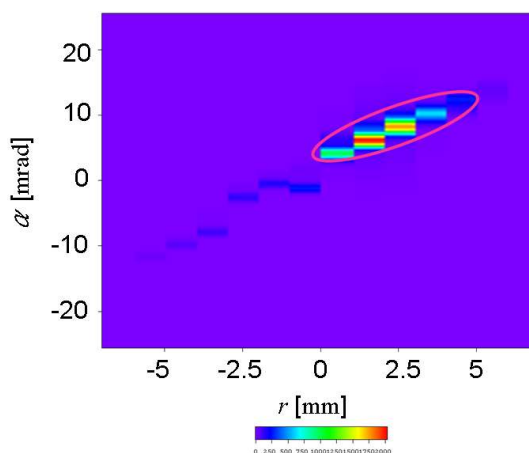


図11. 多価イオンビームのエミッタンス

図 11 にある桃色の楕円はエミッタンス図である。ビーム分裂時のエミッタンスは約  $250 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  であったが、今回の測定では  $26.5 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  となった。ビーム分裂を解決し、エミッタンスを改善できたので、輝度増加の可能性は十分あると考え、第2ビームラインと価数選別ビームを用いて改善前との比較を行ったが、ビームの輝度増加は確認できなかった。

#### 4.4 多価イオンビームのエネルギー分布

本測定は図 12 の配置にて行った。図中のエネルギー分析器は図 3 のものである。

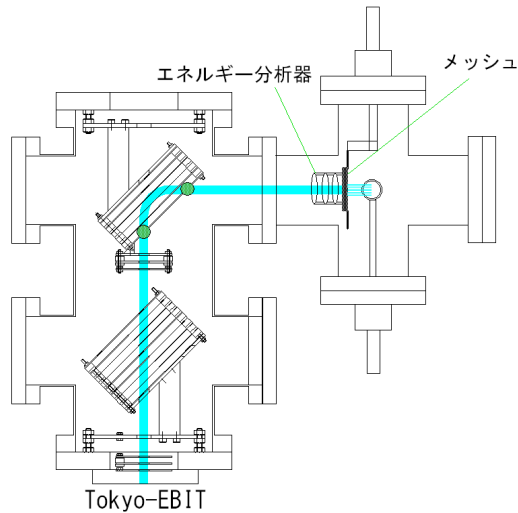


図 12. 多価イオンビームのエネルギー分布測定

エネルギー分析器にかかる電圧を徐々に上げ、阻止電場を大きくしながらエネルギー分析器を通過するイオン量を測定したところ、図 13 の結果を得た。

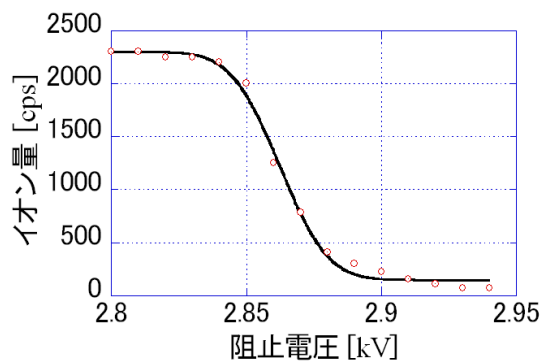


図 13. 多価イオンビームのエネルギー分布

図 13 において、赤の点は実測値であり、黒の実線は誤差関数によりフィッティングを行った結果得られた回帰曲線である。この回帰曲線から得られたデータを微分すると、図 14 のように多価イオンのエネルギー分布を表す図を得ることができる。ただし、横軸は多価イオンの運動エネルギーを価数  $q$  で割ったものである。

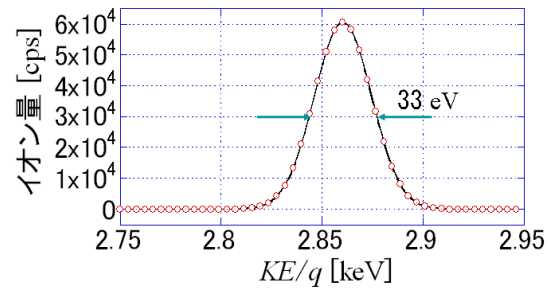


図 14. 多価イオンビームのエネルギー分布幅

図 14 から、価数非選別の多価イオンビームは半値全幅で  $33 \text{ eV}$  のエネルギー広がりを持つことが分かった。

#### 4.5 エネルギー分布幅の

##### 多価イオン生成条件への依存性

多価イオンビームのエネルギー分布幅の、電子エネルギー  $E_e$ 、電子ビームの電流値  $I_e$ 、そしてトラップポテンシャル  $U_t$  への依存性を調べた。なお、測定は図 12 の配置にて行った。

$I_e$  を  $170 \text{ mA}$ 、 $U_t$  を  $15 \text{ V}$  とし、 $E_e$  を変えながらエネルギー分析を行った結果、図 15 のデータを得た。

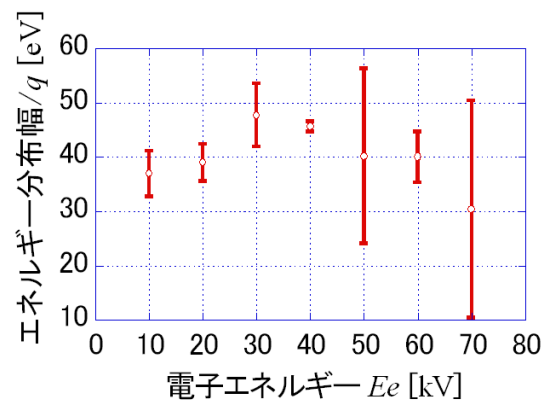


図 15. エネルギー分布幅の  $E_e$  依存性

縦軸はエネルギー分布幅を  $q$  で割ったものであり、横軸は  $E_e$  である。 $E_e$  を上げればトラップ内で生成される多価イオンの価数分布はより高価数になり、下げればより低価数になるが、図 15 に見られるように、 $E_e$  に対する顕著な依存性を見ることはできなかった。

$E_e$  を 20 keV、 $U_t$  を 15 V とし、 $I_e$  を変えながらエネルギー分析を行った結果、図 16 のデータを得た。

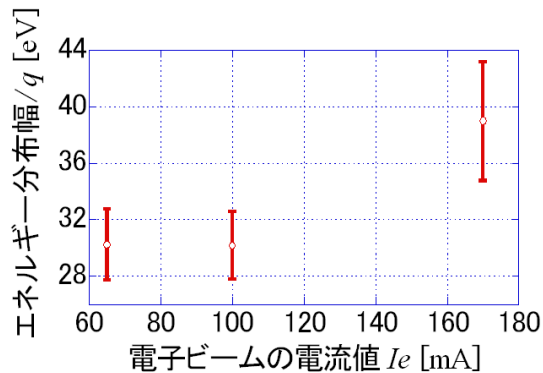


図 16. エネルギー分布幅の  $I_e$  依存性

縦軸はエネルギー分布幅を  $q$  で割ったものであり、横軸は  $I_e$  である。 $I_e$  を上げればトラップ内でより多くの多価イオンが生成されるようになり、下げれば多価イオンの生成量は減少するが、図 15 同様、明らかな依存性は見られなかった。だが、 $I_e$  が 170 mA の時はエネルギー分布幅  $/q$  が大きくなっているように見える。これは、単位時間当たりのイオン加熱率が上昇したことに起因している可能性がある。

トラップポテンシャル  $U_t$  を変えると、トラップ内で生成される多価イオンの温度、すなわち運動エネルギーが変化すると考えられる。 $U_t$  を大きくすればトラップ内のイオン温度が上がって運動エネルギーが高くなり、 $U_t$  を小さくすればイオン温度は低下する。 $E_e$  を 20 keV、 $I_e$  を 170 mA とし、 $U_t$  を変えながらエネルギー分析を行った結果、図 17 のデータを得た。なお、縦軸はエネルギー分布幅を  $q$  で割ったものであり、横軸は  $U_t$  である。

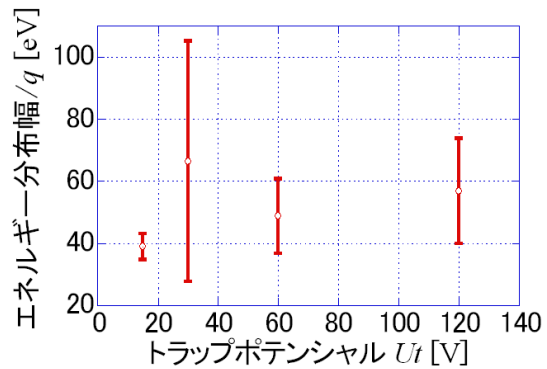


図 17. エネルギー分布幅の  $U_t$  依存性

図 17 に見られるように、 $U_t$  に対する顕著な依存性を見ることはできなかった。

## 5. まとめ

多価イオンビームの輝度改善を目的として、エミッタンスを測定した。偏向器に手を加えることによりエミッタンスを 26.5 mm·mrad へと改善したが、輸送系のレンズ等の調整を行っても多価イオンビームの輝度増加は確認できなかった。

多価イオンビームのエネルギー分布を測定した結果、エネルギー分布幅  $/q$  は約 40 eV であり、 $E_e$  および  $I_e$  および  $U_t$  に対する顕著な依存性は見えなかった。

## 参考文献

- [1] N. Nakamura et al., Phys. Scr. T73 (1997) pp. 362-364
- [2] H. Sakaue et al., J. Plasma Fusion Res. Vol. 83, No. 8 (2007) 671-675
- [3] M. Tona, Surf. Sci. 601 (2007) 723
- [4] J. Sun et al., Phys. Rev. A 77 (2008) 032901
- [5] H. Watanabe, Phys. Rev. A 75 (2007) 012702
- [6] N. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 073203
- [7] R. Nakayama et al., Nucl. Instrum. Method B, submitted