

# 小型多価イオン源による多価イオンビームの特性

中村信行研究室

金原達彦

## 1. 背景・目的

多価イオンとは、原子から電子を2個以上取り除いたイオンであり、太陽コロナや核融合炉などの高温プラズマ中に存在する。多価イオンは反応性が非常に高く、固体表面と衝突させることでナノサイズの構造変化を発生させる。また、EUV (Extreme Ultraviolet) リソグラフィ光源などへの、様々な応用が期待されている。

我々の研究室では、Tokyo Electron Beam Ion Trap (Tokyo-EBIT) [1] と呼ばれる大型イオン源と、Compact EBIT(CoBIT) [2] と呼ばれる小型のイオン源を用いて多価イオンの研究を行っている。Tokyo-EBITは高価数の重元素多価イオンの生成が可能である反面、中程度の価数の多価イオンの生成には過剰性能である。CoBITはそのような中程度の価数の多価イオンを効率的に生成するよう設計されており、これまで分光研究に用いられてきた。しかし、CoBITには生成した多価イオンをビームとして引き出すビームラインが無く、Tokyo-EBITで行っているような衝突実験が不可能であった。そこで我々はCoBITから引き出した多価イオンの衝突実験を可能とする新規ビームラインの構築を行っている。

本研究では、CoBITより引き出したイオンビームのエミッタンスを測定することでビームの特性を調べた。

## 2. 装置

### 2.1 EBIT

我々の研究室で用いているイオン源である電子ビームイオントラップ (EBIT) による多価イオン生成の原理を Fig.1 に示す。EBITは主に、電子銃、ドリフトチューブ (DT)、電子コレクターから構成されており、DTの周りには超伝導コイルが配置されている。DTの周りには超伝導コイルが配置されている。DT1・2・3の領域では、軸方向にはDTに印加される電圧により形成する井戸型ポテンシャル、径方向には電子ビームの空間電荷ポテンシャルによりイオンをトラップする。DT内部にトラップされたイオンは強磁場で圧縮された電子ビームにより逐次電離が進み、多価イオンが生成される。

この装置では単一の価数のイオンのみを生成することは難しく、トラップ領域内は様々なイオンが入り混じった状態である。よって、衝突実験を行うには価数分別能力を持つ装置を用いることで、必要な価数のイオンのみを取り出す必要がある。

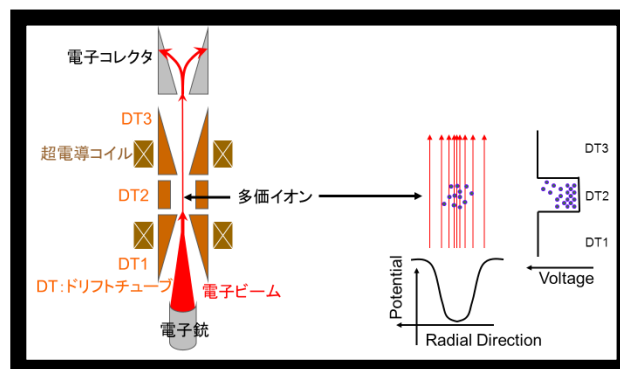


Fig.1 多価イオンの生成方法

## 2.2 新規ビームライン

衝突実験用新規ビームラインはアイントセルレンズ、静電偏向器(ベンダー)、ウィーンフィルターの3つの要素で構成されている。まず、CoBITで生成された多価イオンはアイントセルレンズにより集束させられる。次にベンダーにて多価イオンのみを90度曲げることにより、イオン源内で発生する軟X線と多価イオンを分離する。最後にウィーンフィルターにより様々な価数を持ったイオンを分別し、選択した価数のイオンのみを引き出す。

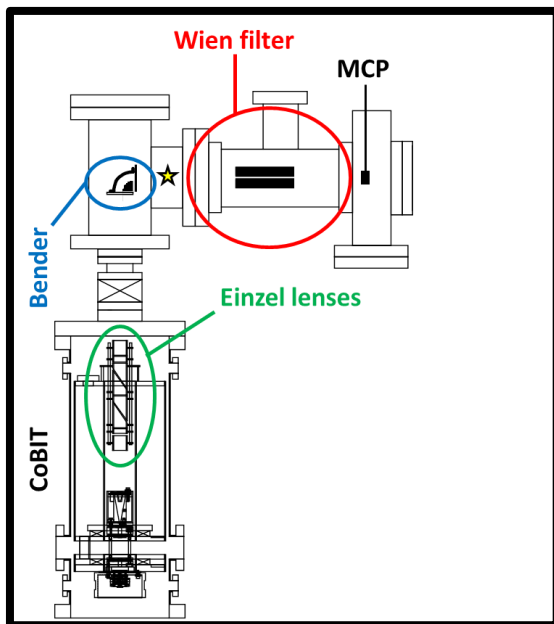


Fig.2 新規ビームライン

## 3. 実験原理

### 3.1 エミッタンス

ビームの特性を評価するにあたり、今回はイオンビームのエミッタンスを測定した。エミッタンスとは荷電粒子ビームの集束特性を記述するために用いられる物理量であり、横軸をビーム軸からの距離、縦軸をビームの発散角とした Fig.3 の

ような位相図上において、ビームの構成粒子が占める面積を $\pi$ で割った値により定義される。

エミッタンスは、ビーム源により決まり、レンズによる収束作用などでは不変である。

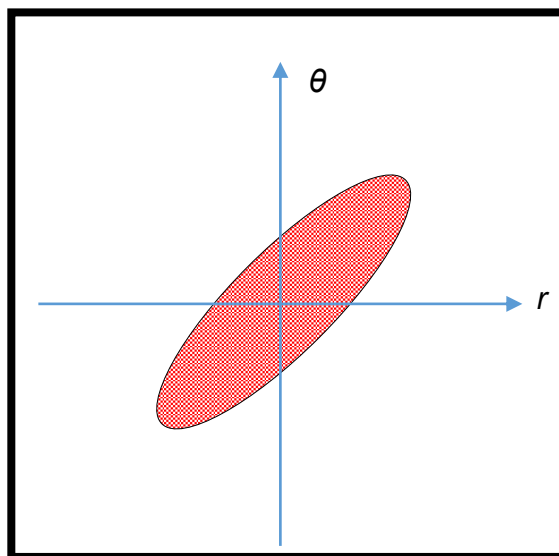


Fig.3 位相図

### 3.2 エミッタンス測定

エミッタンス測定法の一例を Fig.4 を用いて説明する。ビーム軸からスリットまでの距離を $r_i, r_{i-1}$ とし、検出面でのビームの到達位置を $h_i, h_{i-1}$ とすると、ビームの発散角 $\theta_i, \theta_{i-1}$ は近似的に

$$\theta_i = (h_i - r_i) / L$$

$$\theta_{i-1} = (h_{i-1} - r_{i-1}) / L$$

と計算することができる。スリット位置 $r$ を変化させながら発散角 $\theta$ を上記の式より求めることで位相図が作成され、エミッタンスの値を求めることができる。

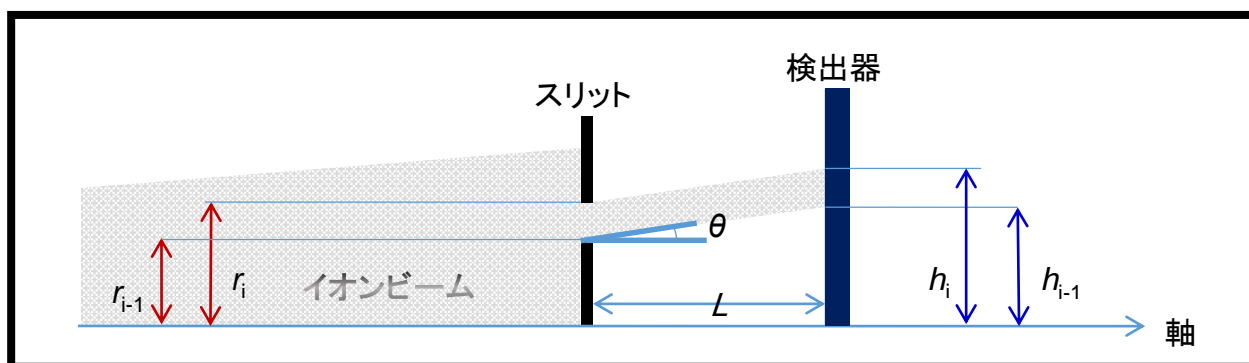


Fig.4 エミッタンス測定

この方法によりエミッタンスを測定するために、Fig.5のような測定装置を構築した。この測定では、静電偏向器の下流に幅 0.2mm のスリットと位置有感型検出器 (PSD)を配置することで、CoBIT より引き出したビームのうちスリットを通過した部分のビームの拡がりを測定することができる。この測定をスリットの位置を変更しながら多価イオンビーム全体に対して行うことで位相図が得られる。

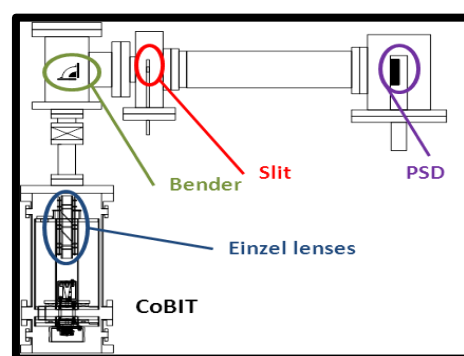


Fig.5 エミッタンス測定系

#### 4. 実験結果

得られた位相図を Fig.6 に示す。これを水平にし、拡大したものが Fig.7 である。

Fig.7 に描かれた楕円の面積を求めることにより、多価イオンビームのエミッタンスが $\sim 5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 程度であることが分かった。また、スリットを通過したイオンビームの強度分布を調べたところ、ビームの直径が約 18mm 程度であることが判明した。

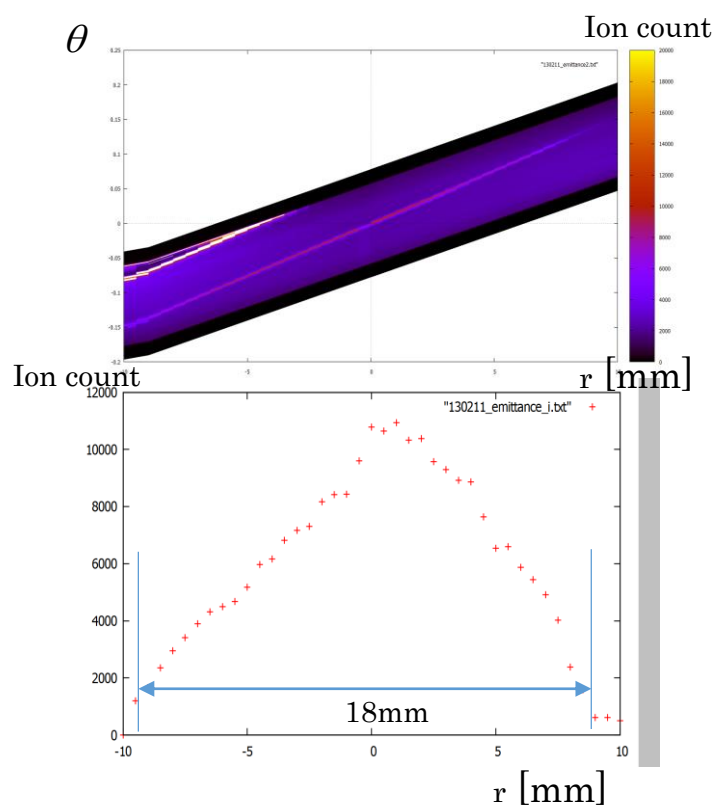


Fig.6 多価イオンビームの位相図と強度分布

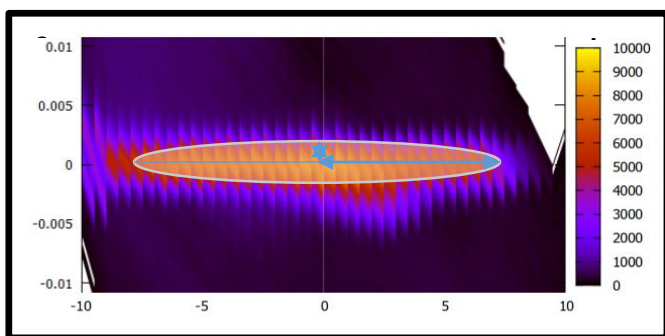


Fig.7 多価イオンビームの位相図

## 5. 考察

実験結果より診断したビームのエミッタンスは $\sim 5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ であった。この値を他のEBITと比較すると、Table.1より他のEBIT装置と同程度のエミッタンスであることがわかる。

一方で、ビームの直径が約18mm程度であることは、一般的なEBITからの多価イオンビームの直径が数mm程度であることや、ウィーンフィルターのスリット部の幅が0.2mmであることを考慮すると大きすぎると考えられる。

イオン源	エミッタンス [mm · mrad]
Dresden EBIT [3]	$\sim 10$
LNNL EBIT [4]	$\sim 1$
Stockholm R-EBIT [5]	7.2
TITAN EBIT [6]	$15.7 \pm 0.5$
REX EBIT [7]	$\sim 10$

Table.1 他のEBITのエミッタンス

## 6. まとめと今後の展望

今回の結果より、CoBITから引き出された多価イオンビームのエミッタンスは良好であると考えられるが、ビームの直径は18mm程度と大きく、現行のレンズ

では十分に集束できていないことがわかった。よって、今後の展望としてビームをより集束させるために、静電偏向器の再設計、もしくは静電偏向器を通した後にビームを集束させるための静電レンズを取り付ける必要があると考えられる。また、CoBIT内に設置しているアインツェルレンズを含め、軌道計算を再度行い、改造・改良を行う必要がある。

## 7. 参考文献

- [1] Hirofumi WATANABE  
*Characteristics of Tokyo Electron-Beam Ion Trap* (1997)
- [2] N.Nakamura *Compact electron beam ion trap for spectroscopy of moderate charge state ions.* (2008)
- [3] DREEBIT  
[http://www.dreebit.com/en/ion\\_sources/](http://www.dreebit.com/en/ion_sources/)
- [4] R.E.Marrs *Self-cooling of highly charged ions during extraction from electron beam ion sources and traps* (1998)
- [5] M.Hobein *Optimization of the Stockholm R-EBIT for production and extraction of highly charged ions* (2010)
- [6] A.T.Gallant *TITAN-EBIT – charge breeding of radioactive isotopes for high precision mass measurements* (2010)
- [7] Charge breeding system  
<http://isolde.web.cern.ch/isolde/REX-ISOLDE/rexebis.html>