

1. 序論

中性原子より電子を一つ取り除くと正のイオンができ、電子を2つ以上取り除いたものを特に多価イオンと呼んでいる。多価イオンは(1)低価数のイオンと比べ大きな内部エネルギーを持つ(2)中性原子と比べ大きな相対論的効果や量子電気力学(Quantum Electro Dynamics: QED)的効果を有する。これらのことから多価イオンの電子状態の遷移の様子が中性原子とは異なる振舞いを示すと予想されていて、多価イオンの研究がレーザー研究や核融合プラズマ等で重要視されている。我々の研究室では多価イオン源である電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap: EBIT)を用いて様々な研究を行っている。

2. 目的

EBITの構成は図1左側の様に電子銃、ドリフトチューブ(DT、超伝導コイルと電子コレクターで構成されている。電子ビームが電子銃よりDT内を通して電子コレクターへと導かれる。この時DT内で原子又はイオンが電子ビームと衝突し、電子を一つずつ剥ぎ取る「逐次電離」を行い多価イオンが生成される。DT内へ物質を導入できればどのような多価イオンも生成可能であるが、今までの導入方法では低融点の金属を制御して導入することが困難であった。そこで本実験では低融点の金属を用いることが出来、なおかつ連続的なビームで生成量を制御できる導入用イオン源を設計、製作してその性能評価を行い、低融点金属に対し分光等様々な実験に用いることができる量をEBITへ導入することを目的とした。

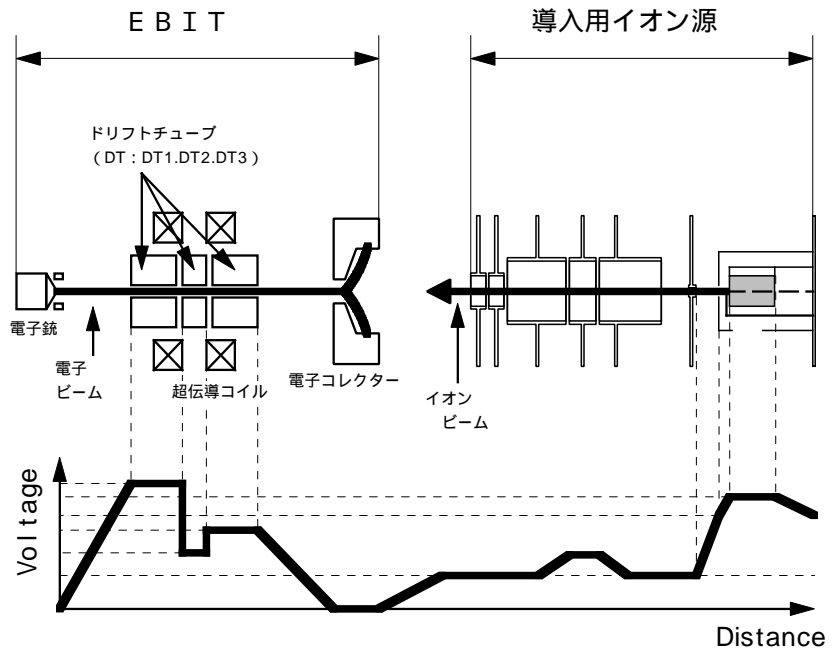


図1 導入用イオン源からEBITまでの電圧配置

3. 導入用イオン源の原理と構成

今回製作したイオン源の概要は図2に示す通りである。

以下の部分で構成されている。

- K-Cellを用いた金属蒸気の生成

K-Cellとはるつぼに金属を入れ、加熱することで蒸気を取り出す装置である。るつぼの開口直径が深さに比べて小さいので内部で平行状態になっていると考えることができる。また熱電対がるつぼに接しているため温度制御がよい。この二点より蒸気を制御して取り出すことができる。これがK-Cellの特徴である。

これを用いることで低融点金属を制御して取り出しことができる。

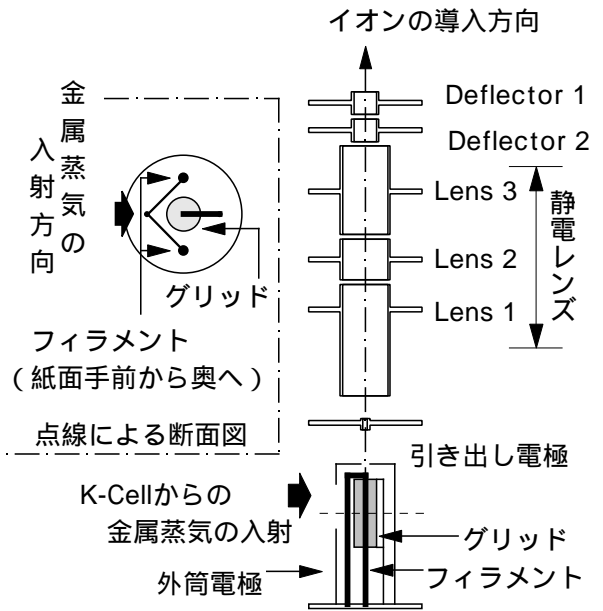


図2 導入用イオン源の概要

- 電子衝突による電離

グリッドからフィラメント間に電圧をかけることで熱電子が飛び出す。このときに蒸気化した物質が熱電子と衝突すると、電子を剥ぎ取られて電離する。この方法は製作が簡単であり、熱電子を制御することでイオンの量を制御できるので本研究ではこの方法を用いた。生成されたイオンは引き出し電極によって外部へ引き出される。

- 静電レンズによる集光

引き出されたイオンはそのままでは広がっていくだけでEBITへ効率良く導入することが出来ない。そのイオンをフォーカスし、ビームとして取り扱うために静電レンズを用いた。これは、電圧をかけることで光に対する光学レンズと同様に電子やイオンに対しレンズ効果を得ることができるものである。また、イオ

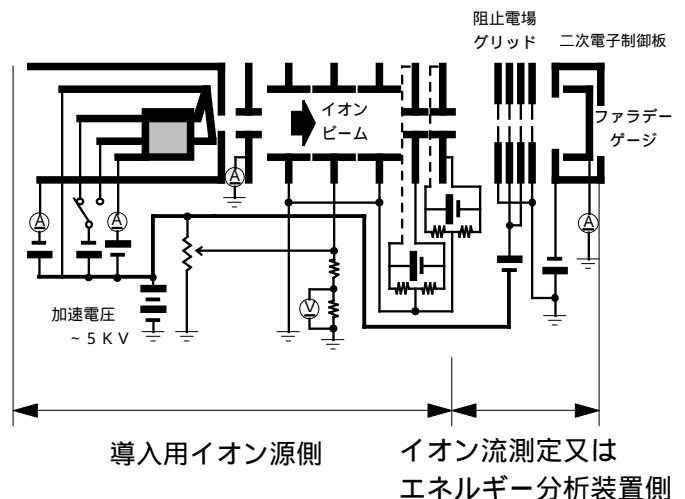


図3 導入用イオン源及びイオン流測定又はエネルギー分析装置の電源配置

ンビームの軸をEBITへスムーズに導入できる様に、その軸をデフレクターによって調整できるようにした。

・電源配置

電源配置の構成は図3の通りである。導出されるイオンの加速エネルギーを5KVの高圧電源によってかえることができる。またその電圧を基にして可変できるように、グリッド、フィラメント、外筒電極の電圧を据え付けた。

4．実験手段と方法

実験を次の様に行うことで、製作した導入用イオン源の性能を評価し、他の実験に用いることができる量の物質をEBITへ導入できるかを考察する。

4.1 導入用イオン源の性能評価の方法

導入用イオン源の性能を知るために様々なパラメーターの変化に対するイオン流の変化を測定し、イオンのエネルギー分析を行った。イオン流を測定する方法としては図3右側のようにファラデーゲージを用いることで行った。またイオンのエネルギー分析をする時にはその方法として、ファラデーゲージの前面に四枚のグリッドを設ける阻止電場法を用いて行った。

4.2 EBITへイオンを導入

導入用イオン源を実際にEBITへ取り付けてBiのイオンビームを導入し、EBITより出力されるX線を半導体検出器 (Solid State Detector : SSD) を用い、Pulse High Analyserで観測することでX線のスペクトルを得て実際にBiが導入されているか、また他の実験で使用できる量が導入されているかを考察した。

5．結果と考察

5.1 導入用イオン源の性能評価 (結果)

・イオン流の変化

始めに圧力制御が比較的容易なArガスを用いてグリッド、静電レンズ (レンズ2) の電圧とフィラメントの電流に対しイオン流がどのように変化するかを測定した。

グリッドの電圧に対するイオン流の変化を測定したのが図5.1.1である。

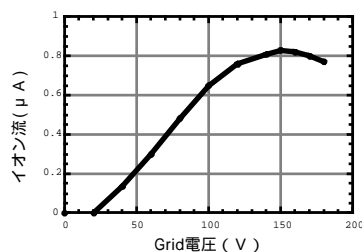


図5.1.1 グリッドの電圧に対するイオン流の変化

ある値で最大となりそれ以降は緩やかに減少する関数となっている。グリッドの電圧をあげる程に熱電子が多く放出され、熱電子のエネルギーが増していく。電離確率は熱電子のエネルギーに依存し [1]、この二つの要因から図の様に観測されたと考えられる。

静電レンズの電圧に対するイオン流の変化を測定したのが図5.1.2である。これは、焦点がイオンビームの通る二次電子制御板の穴にあったときが最大値であり、それ以外では焦点が合わずにイオン流が減少するためであると考えられる。

フィラメントの電流に対するイオン流の変化を測定したのが図5.1.3である。フィラメントの電流をあげる程熱電子の量が増えるが、それと共にフィラメントの温度も高くなってしまふ。例えばタングステンに2600Kになる電流をかけたとすると、その寿命は約10000時間であるとされ [2]、このことを考慮に入れて使用すべきである。

次に、K-Cellを使い、Biを用いてその加熱温度に対するイオン流の変化を測定したのが図5.1.4である。フィラメントの電流を変化させた時と同様に、温度が高い程金属蒸気が増し、イオン流が増加すると考えられる。しかし、温度を上げ過ぎれば金属が無くなる時間も短くなる。例えば今回使用したK-Cellで2gのBiを700 に過熱した時には約8.2時間で無くなる計算となる。このことを考慮に入れるべきである。

・エネルギースペクトル

今度はBiを用いてグリッドと加速電圧に対するイオンのエネルギー分析を行った。阻止電場法で得られるエネルギーの積分型スペクトルを微分することでエネルギースペクトルを得た。

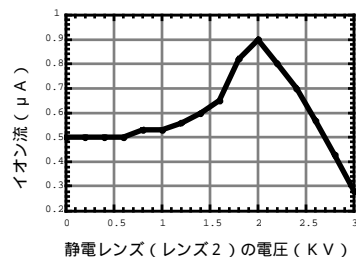


図5.1.2 静電レンズ (レンズ2) の電圧に対するイオン流の変化

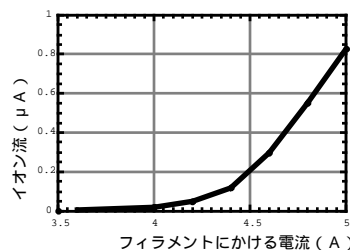


図5.1.3 フィラメントにかける電流に対するイオン流の変化

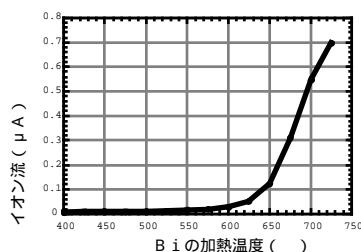


図5.1.4 グリッドの電圧を150V、外筒電極の電圧を-5V、フィラメントの電流を5.0A、加速電圧を3KV、二次電子制御板を-5VでのBiの加熱温度に対するイオン流の変化

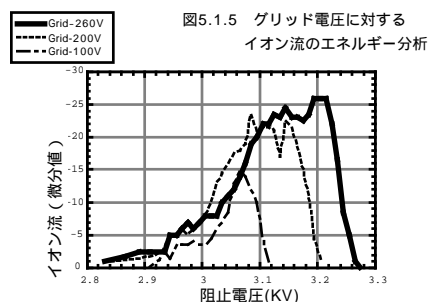


図5.1.5 グリッド電圧に対するイオン流のエネルギー分析

グリッドの電圧に対するイオンのエネルギー分析が図5.1.5である。イオンの全体量が電圧と共に上がるのはArでのイオン流の測定結果である図5.1.1と同様であるが、エネルギーの最大値がグリッド電圧と共に高くなっていることが判る。これは、イオン化室内の最大電圧がグリッドの電圧であるためにグリッド付近で生成されたイオンが最大のエネルギーを持つためだと考えられる。

加速電圧に対するイオンのエネルギー分析が図5.1.6である。加速電圧と共に低エネルギー側のピークが変化していることが見られる。これは、低エネルギー側のピーク付近に広がっているイオンがグリッド上部から外筒電極の引き出し電極方向にある穴にかけての領域で生成されたイオンであり、加速電圧が変化したことで引き出し電極からの電場のしみ込みが変化したためにピークの位置も変わったのだと考えられる。高エネルギー側のピークの形が加速電圧に依らないことから、これはグリッド内部で生成されたイオンであると考えられる。

これらのことより、導入用イオン源で生成されるイオンビームのエネルギーは最大値がグリッドの電位に相当するエネルギー、最低値が引き出し電極からの電場のしみ込みによる電位に相当するエネルギーまで広がっていることとなる。

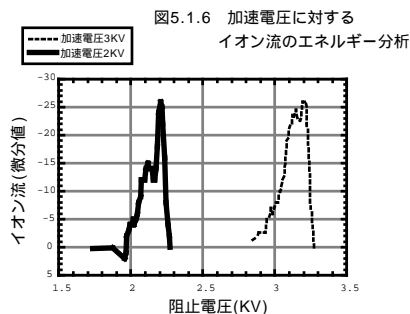


図5.1.6 加速電圧に対するイオン流のエネルギー分析

5.2 EBITへイオンを導入

最後に、実際にBiをEBITへ導入して多価イオンから得られるX線を観測した。EBITの電子ビームを20KeVとした時にBiを1分間溜め込みながらX線スペクトルを観測したのが図5.2である。10.60 KeVと11.70KeVに大きなピークがある。これはBiでのNe-likeのエネルギーの計算結果 [3] と一致することから、導入用イオン源を用いたBiのEBITへの導入は成功したこととなる。

X線の全体量をガスを直接DTへ吹き込む方法で希ガスを導入した時と比べると、希ガスの導入では数100～1000cps得られるのに対し、今回の実験では100～200cpsしか得られなかった。このことから多価イオンの分光等の他の実験を行うにあたり、イオンの導入量が少なかったとされる。

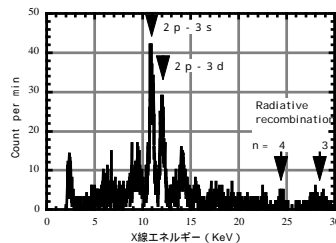


図5.2 BiをEBITへ導入し、電子ビームを20KeVとしたときに得られたX線スペクトル

6.さらなる発展

イオン流を増やすためには中性原子の量を増やすか、熱電子の密度を増やすことが考えられる。しかし、中性原子の量を増やすためにはK-Cellの温度を上げなければならないが、前述した様に上げ過ぎればBi自体が無くなる時間が短くなるのでこれ以上は望めない。

熱電子の密度を増やすためには(1)熱電子の放出量を増やす(2)熱電子の飛行時間を長くするの二つが挙げられる。そのような方法として次のようなことを考えた。

- ・フィラメントを二本同時に電流をながす
- ・フィラメントを熱電子の出易い物質に取り換える
- ・磁場をかけ、熱電子の飛行時間を長くする

フィラメント一本に電流を流した時と、二本同時に電流を流したときのイオン流を比較すると、一本では54nAであったのに対して二本では103nAと二本同時に電流を流すことで約二倍の出力を得られた。

7.まとめ

今回、EBITのための低融点金属を制御して導入できる導入用イオン源を設計、製作して導入用イオン源の性能を評価した。実際にEBITへBiを導入してX線スペクトルを観測したところ、導入用イオン源でのBi導入は成功したことが判った。しかし、その導入量が他の実験に用いるのには少ないことが明らかになった。今後は今回実験出来なかった方法を試み、イオン流を増やす必要がある。

数少ない可視光領域で見られるスペクトルにTi様多価イオンがあり、計算結果からBi、Pb、In、Tm、ErやYbにおいてJ=3-2遷移波長近くにJの異なる遷移があることが判っている[4]。これらの元素はK-Cellを用いる良い候補であることからこの導入用イオン源を用いて可視分光を行うことも予定している。

参考文献

- [1] 日本学術振興会第132委員会 編：電子・イオンビームハンドブック(日刊工業新聞社、1975)。
- [2] 日本真空技術KK：真空ハンドブック(1978)。
- [3] Hang Lin Zang and Douglas H.Sampson : Relativistic Distorted Wave Collision Strengths for Excitation to the 88 n=3 and n=4 Levels in all 71 Neon-like Ions with $22 \leq Z \leq 92$, Atomic Data and Nuclear Data Tables 43, 1-69 (1989)。
- [4] Kato et al : M1-Transition of Ti-like Highly Charged Ions, Physical Scripta T80 (1999)。