

多価イオン源製作に向けた磁場集束電子ビーム軌道計算

中村信行研究室 玉井駿宏

1. 背景

1.1 多価イオン

本研究で扱う多価イオンとは、電氣的に中性の原子から 2 個以上の電子を取り去ることで作られる 2 価以上の高電離イオンのことを示す。

このような多価イオンは太陽コロナや核融合炉内の高温のプラズマ中に多く存在している。プラズマとは、イオンと電子が混在している状態を示し、固体、液体、気体に続く第 4 の状態とされている。気体のイオン化は、気体の温度が上昇していくにつれて、気体を構成する原子や分子の速度が上昇していき互いに激しく衝突することで電子が剥ぎ取られることで行われている。そのため、高温のプラズマ中では粒子同士の衝突エネルギーが大きくなるので、生成されるイオンの大半は多価イオンになる。一方、非常に低温のプラズマ中では粒子同士が衝突するエネルギーは小さいため、生成されるイオンの価数は 1 価が大半を占めるようになる。

1.2 EBIT(Electron Beam Ion Trap)の構成

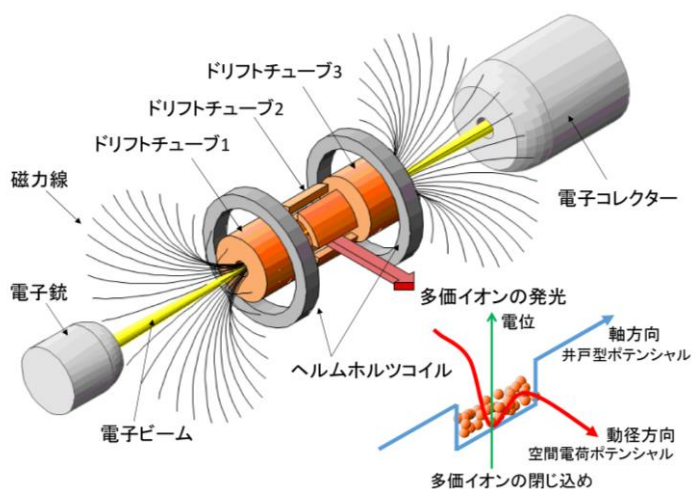


図 1. EBIT の概略図

EBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ (Drift Tube : DT)、電子コレクター、ヘルムホルツコイルから構成されており、その概略図を図 1 に示す。電子ビームは電子銃から放出され、磁場によって集束されながら DT1,2,3 内を通過した後、電子コレクターで回収されている。多価イオンは電子ビームによる空間電荷ポテンシャルと DT2 の電位を DT1,3 より数 10V 下げることで作られた井戸型ポテンシャルによって 3 次的にトラップされており、ヘルムホルツコイルを使うことでトラップ領域からの多価イオンの発光を観測できるようになっている。また、DT2 の電位を瞬間的に DT1,3 より高くすることで多価イオンをトラップ領域から引き出し、TOF 法などの価数分析測定を行っている。

研究室では、Tokyo-EBIT と CoBIT(Compact EBIT)と呼ばれる 2 台の EBIT で研究を行っており、表 1 に各 EBIT の仕様を示す。以下に各 EBIT の詳細について述べる。

表 1 [1,2]

多価イオン源	Tokyo-EBIT	CoBIT
装置全体の長さ	5m	0.5m
電子ビームエネルギー	20 - 300 keV	100 - 1000 eV
電子ビーム電流	0 - 330 mA	0 - 10 mA
最大電流密度	1000 A/cm ²	10 A/cm ²
最大磁束密度	4.5 T	0.2 T

Tokyo-EBIT [1, 3]

Tokyo-EBIT は超高価数多価イオンを生成することを目的に電気通信大学で製作された EBIT であり、高さが 5 m に達する大型なイオン源である。最大 300 keV の電子ビームによって自然界に存在する元素で最も重いウラン原子の裸イオン U⁹²⁺ を生成可能である。磁場の発生源には超伝導コイルを使用することで、トラップ領域に最大 4.5T の磁場を発生させ、多価イオ

ンを Penning トラップすることも可能である。この Penning トラップモードは、電子ビームの空間電荷ポテンシャルがなくても多価イオンをトラップすることができ、多価イオンの発光寿命の測定に用いられる[4]。しかし、Tokyo-EBIT は高エネルギーの電子ビームで運転することを想定して作られているため、数 keV 程度の電子ビームでは電子ビーム軌道が安定しない。そのため、低価数な多価イオンを生成するには不向きな装置である。超伝導コイルの冷却には液体ヘリウムを使用するため運転費用が高く、装置自体も大型なため利便性の悪い面がある。

CoBIT [2, 5]

CoBIT は比較的低価数な多価イオンの発光を分光測定することを目的に Tokyo-EBIT の構造を元に作られた EBIT であり、高さが 50cm 程の小型なイオン源である。約 100 eV~ 1 keV の電子ビームでは、鉄原子の場合最大 Fe^{16+} の多価イオンを生成可能である。磁場の発生源には、高温超伝導コイルを使用することで、トラップ領域に最大 0.2 T の磁場を作れるが、このような低磁場では Penning トラップによる測定ができない。高温超伝導体を冷却するのに液体窒素を使用できるため、CoBIT の運転費用は、液体ヘリウムを使用する Tokyo-EBIT よりも安価に済む。

2. 無冷媒超伝導 EBIT の設計

現有の 2 台の EBIT の間の領域の電子ビームエネルギーでは、軌道が安定しないため中価数程度の多価イオンの生成が困難である。また、CoBIT の磁場が低いため低価数領域の多価イオンでは Penning トラップによる発光寿命の測定ができていない。そこで、中価数程度の多価イオンの生成と強磁場の発生を目的とした無冷媒超伝導 EBIT の製作を計画しており、本 EBIT の磁場集束電子ビーム軌道の計算を行った。

2.1 装置概要

逐次電離による多価イオンの生成には、電子銃から放出された電子ビームが層流になり、電子ビームがイオン化領域中心で高磁場によって高密度に圧縮される必要がある。計算では、高磁場の発生源である高温超伝導コイルの仕様を決め、EBIT 内の静電磁場と電子軌道計算を行うことで磁場集束電子ビームの最適化を行った。設計した EBIT の概略図と仕様を図 2 と表 2 に示す。

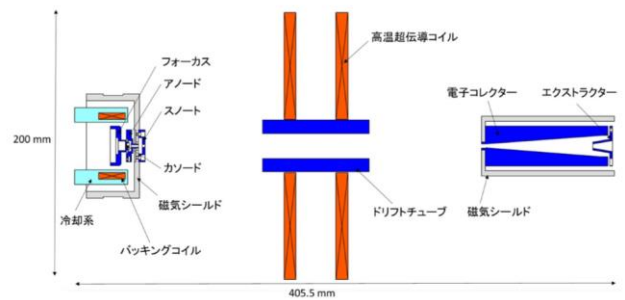


図 2. 無冷媒超伝導 EBIT の断面図

表 2. 無冷媒超伝導 EBIT の仕様

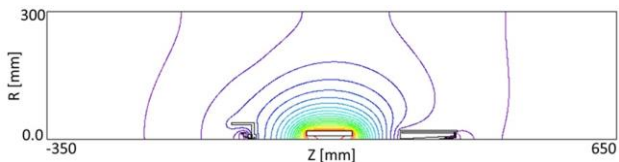
最大電子ビームエネルギー	50 keV
最大電子ビーム電流	100 mA
最大磁束密度	3 T
ピアス型電子銃のパービアンス	$0.4 \mu A / V_0^{3/2}$
磁場の発生源	高温超伝導コイル
クライオスタット	冷凍機

本 EBIT では、Tokyo-EBIT や CoBIT と同じパービアンスのピアス型電子銃を使用し、磁場の発生源には高温超伝導コイルを使用することを想定している。高温超伝導体は極低温まで冷却せずに超伝導状態になるため、高価な液体ヘリウムを使用せずに済む。このとき、CoBIT のように液体窒素(77 K)による冷却で超伝導状態にすることが可能だが、この温度では臨界電流によって十分な電流が流すことができない。そのため、本 EBIT では 30 K まで冷却可能な冷凍機を使用することを想定している。電子銃内の磁場調整には磁気シールドとバックアップコイ

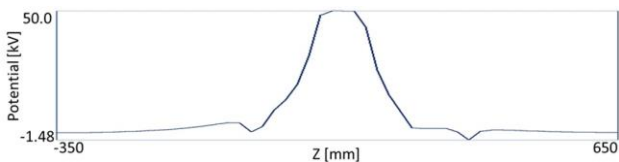
ルを使用している。バックリングコイルには、イオン化領域とは逆方向の磁場を発生させることで電子銃内の高温超伝導コイルからの磁場を減少させ、磁場分布を最適な形にしている。バックリングコイルはスノート電極による高電位上で動作しているため、冷却系には絶縁性の高い油を利用することを想定している。

2.2 電子ビーム軌道計算

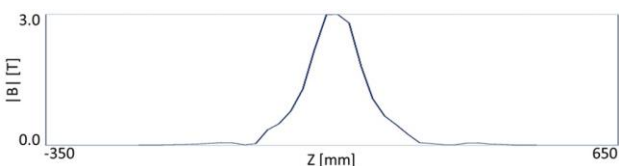
電子銃から放出された電子ビームがドリフトチューブ中心で層流になり、コレクターですべて回収されるような電子ビームの軌道計算を行った。図 3 に電子ビーム軌道及び軸上電位・磁場分布の計算結果を示す。



(a)EBIT 内の電位: (i)カソード 0.0 V (ii)フォーカス -80 V (iii)アノード 4.0 kV (iv)スノート 6.0 kV (v)ドリフトチューブ 50 kV (vi)コレクター 3.0 kV (vii)エクストラクター -2.0 kV



(b)電位分布



(c)磁場分布

図 3. 電子ビーム軌道及び軸上電位・磁場分布

電子銃から放出された電子ビームが層流になるかどうかは、電子銃内の磁場の形状に依存しており、カソード表面の磁場が 0 T かつ傾きが 0 になっていなければならない。また、カソード表面から磁気シールドの外に向けて、

磁場が一定の傾きで増加し、急激に増加しないように設計した。ドリフトリユープの 3 つの電極の間隔はととも短いので 1 つにまとめても電子ビームの軌道計算にはほとんど影響を及ぼさないので、計算の簡略化のために、ドリフトチューブを一つの電極として計算を行った。電子コレクターでは、コレクター電極の電位を 3 kV にすることで電子ビームを減速させ、エクストラクターにカソード面に対して負の電位を印加することで電子ビームを押し返すことで、電子ビームを全てコレクター電極で回収可能にしている。

3. 永久磁石を用いた室温 EBIT の設計

EBIT の小型化などの利便性の向上を目的として永久磁石を用いた室温 EBIT の製作を行うために、電子ビーム軌道の計算を行った。

3.1 装置概要

永久磁石を用いた EBIT では磁場の発生源に永久磁石を使用しているため、コイルを冷却するためのクライオスタットが不要となり、装置全体の大きさを CoBIT より小型化させることが可能である。また、CoBIT などで使用していた電子銃内のスノート電極を取り除くことで装置の大きさを小さくしている。永久磁石によって生じる磁場分布が超伝導コイルとは異なる独自の磁場になるため、一部の電極に鉄を利用することを考えて設計を行った。図 4 に装置の断面図を示す。

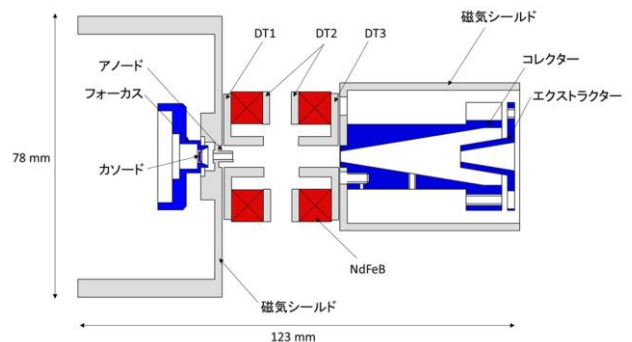
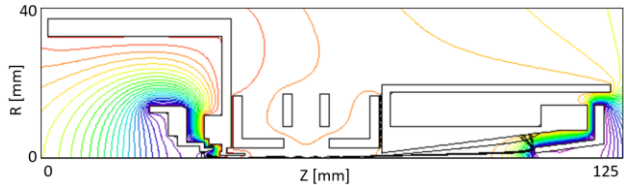


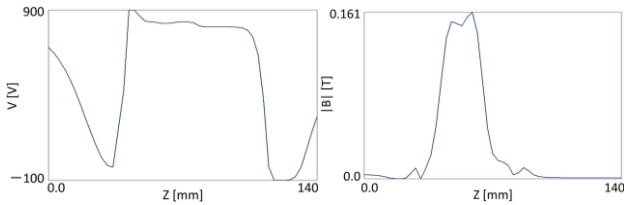
図 4. 永久磁石を用いた室温 EBIT の断面図

3.2 電子ビームの軌道計算

本 EBIT の電子ビーム軌道計算では、永久磁石による磁場が独特なため、目標の仕様を設定せずにどの程度のエネルギーの電子ビームならば扱えるかの確認を行った。図 5 に永久磁石を用いた EBIT の電子ビーム軌道及び Z 軸上の電位・磁場分布を示す。



(a)電子ビーム軌道:(i)カソード 0.0 V (ii)フォーカス -30 V (iii)アノード 900 V (iv)ドリフトチューブ 1,2,3 830,800,830 V (v)コレクター 800 V (vi)エクストラクター -100 V



(b)電位分布

(c)磁場分布

図 5. 永久磁石を用いた室温 EBIT の電子ビーム軌道及び Z 軸上の電位・磁場分布

永久磁石の磁場は、イオン化領域中心から離れていくにつれて減少していき、一度逆向きの磁場が生じた後ゼロ磁場に近づいていく。このような磁場中に電子ビームを通すと電子ビームをすべてコレクターで回収することが困難になるため、アノードの素材にも鉄を使用することで、この逆向きの磁場を最小限に抑えている。また、今回の計算では、図 5(a)に示した電極の電圧のときのみ、電子銃から放出された電子ビームを電子コレクターで全て回収することができた。永久磁石を用いた EBIT ではイオン化領域中心の磁場を変化させることはできないため、各電子ビームエネルギーに最適な磁場分布を作るにはカソードの位置を調整する必要がある。

4 結論

新たに多価イオン源を製作するために、各 EBIT の磁場集束電子ビームの軌道計算を行った。無冷媒超伝導 EBIT は、中価数の多価イオンの生成と高磁場の発生を目的としている。設計した仕様は、最大電子ビームエネルギー：50 keV、最大電子ビーム電流：100 mA、最大磁場：3 T となり、このときの電子ビーム軌道は十分に圧縮された層流になっていることを確認できた。永久磁石を用いた室温 EBIT は、永久磁石を用いることで EBIT の利便性の向上を目的としている。永久磁石によって生じる磁場に対応するために、一部の電極の素材に鉄を使用し、電子銃内のスノートを取り除いて設計した。このとき、特定の電子ビームエネルギーならば電子銃からコレクターまで電子ビームを通すことができた。今後は、この計算結果を元に実際に製作する多価イオン源を決め、具体的な電極などの配置を検討し、再度電子ビーム軌道計算を行い、実際に装置の組み立てを行っていく。

参考文献

- [1] 西沢一生 修士論文 電気通信大学 (1997).
- [2] 菊池浩行 修士論文 電気通信大学 (2007).
- [3] S. Ohtani et al, JSP, Science and Nuclear Fusion Research 73, 1063 (1997)
- [4] Guise N D et al Phys. Rev. A 89(4) 040502 (2014)
- [5] N. Nakamura, H. Kikuchi, A. Sakaue, and T. Watanabe Rev. Sci. Instrum. 79,063104 (2008).