

電子ビームイオントラップの電子ビーム軌道計算

中村信行研究室 早乙女 京吾

1 序論

1.1 多価イオンとは

一般的に原子から 2 個以上の電子を取り除いた正のイオンを多価イオンと呼ぶ。取り除いた電子の個数が q 個の場合、 q 価の多価イオンとなる。多価イオンは太陽コロナや核融合炉などの温度の高いプラズマ中に多く存在している。プラズマ中における原子や分子の速度が温度の上昇とともに大きくなり、互いの衝突で電子が剥ぎ取られイオン化する。これより高温のプラズマ中では衝突のエネルギーは大きくなるため、多価イオンの割合は大きくなる。多価イオンの準位間遷移の発光によるスペクトル線の解析はプラズマ中の反応の素過程や密度、温度などの状態を知ることにおいて重要な役割を担う。

1.2 電子ビームイオントラップ

多価イオンを観測する装置の 1 つに電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) がある。EBIT では電子ビームによりイオン化エネルギーを与えることで電離を進める、逐次電離という方法で多価イオンを生成している。一度に多くの電子を剥ぎ取るためには数 MeV から数百 MeV を要するのに対し、逐次電離では 130keV 程度で電子を全て剥ぎ取ったウランの裸イオンを生成することが可能である [1]。電子ビームによる逐次電離で多価イオンを生成するには、高い効率で電離を行う必要がある。そのため磁場によって圧縮された高密度の電子ビームが重要になる。EBIT は電子銃、ドリフトチューブ (Drift Tube : DT)、超伝導コイル、電子コレクターなどから構成される。

1.3 Tokyo-EBIT

Tokyo-EBIT は電気通信大学で製作された高さ約 5m の大型の EBIT で、電子を少数しか持たないような重元素の多価イオンを生成し分光測定を行うことが主な目的である。磁場の発生源には超伝導コイルを用いることでトラップ領域に最大 4.5T の磁場を発生させ、電子ビームの空間電荷ポテンシャルがない状態でも多価イオンをトラップする、Penning トラップを可能とする。

1.4 Compact EBIT

M 殻にも複数の電子を持つような中程度の価数の重元素イオンを分光測定する目的で製作された小型の EBIT が Compact EBIT (CoBIT) である。この装置は通常 1keV 以下の電子ビームエネルギーで運用され、鉄原子の場合、この装置では最大 Fe^{16+} の多価イオンを生成することができる。

1.5 電子銃

EBIT に実装される電子銃はカソード (陰極電極)、アノード (陽極電極)、スノート、フォーカスと呼ばれる電極で構成されることが多く、大まかに、カソードより発せられた熱電子がアノードによって引き出され、スノートでさらに加速する仕組みである。電子銃ではカソードで発生した電子がカソードとアノードの間の電位差 (これを引き出し電圧と呼ぶ) により、電子ビームとして放出される。フォーカスは電子ビームの集束を強める役割を持つ。電子密度が高くなると電子同士に働く空間電荷効果を考える必要がある。特にカソード近傍では速度をほとんど持た

ない電子が存在しており、その空間電荷により出力電流が制限されるなどの効果が与えられる。ここで、単純なモデルで2枚の平行平板電極の空間電位を V とすると、ポアソンの式より空間電荷で制限される電流、空間電荷制限電流 $J(z)$ は次のように表せる。

$$J(z) = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V^{\frac{3}{2}}}{z^2} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 e は電気素量、 m は電子の質量、 z は陰極と陽極間の距離である。カソードとアノードの電位差を示す引き出し電圧を V_a 、カソードとアノードの距離を d とすると、電子銃の最大電流密度 J は、

$$J = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_a^{\frac{3}{2}}}{d^2} [\text{A/m}^2] \quad (2)$$

また、カソードの面積を $S(\text{m}^2)$ とすると、 $J \cdot S = I$ から、

$$P = 2.33 \times 10^{-6} \frac{S}{d^2} = \frac{I}{V_a^{\frac{3}{2}}} [\text{A/V}_a^{\frac{3}{2}}] \quad (3)$$

P はパービアンズと呼ばれ、電子銃の性能を表す [2]。式 (3) から分かるように P は定数で、同じ電子銃であればパービアンズの値は等しく、そのため引き出し電圧によりその場の電子ビーム電流が決まる。電子銃は一般的に $1 \times 10^{-6} [\text{A/V}_a^{\frac{3}{2}}]$ 以上のパービアンズのものが高パービアンズ型電子銃である。Tokyo-EBIT および CoBIT で使用されている高パービアンズ型電子銃は Pierce 型と呼ばれ、カソード、アノード、フォーカス、スノートで構成されている。

1.6 研究の目的

我々の研究室では Tokyo-EBIT と CoBIT を使用しており、上記で述べたようにその両方で電子銃が組み込まれていて、その部品の一部には特注品を使っている。しかし、現在使用中の電子銃のカソード部の生産停止が決定してしまい、残りのスペアの数も限られているのが現状である。そのため市販のもので代用を考えているが現在使用している電子銃とは別の性能となってしまう。そこで新たな電子銃のモ

デルをシミュレーションして軌道計算を行い、最適な運用ができる電子銃を求めることが本研究の目的である。

2 計算方法

2.1 電子銃のモデル

本研究では空間電荷制限電流条件の下で電子銃のシミュレーションを行った。求める電子銃は空間電荷制限による電子ビーム電流の最大値が目標値を上回ること、電子ビームがアノードに衝突しないことの2つの条件を満たすことを念頭に、電極の最適化などを行った。CoBIT での実装を想定したため、CoBIT の一般的な電子ビームの電流値 10mA 以上の値を得ることができる電子銃を目標とした。また、EBIT における電子ビームの理想系は完全な層流であり、電子ビームがアノードに衝突しないことも条件として計算を行った。以前使用していたカソードは (株) 東京カソード研究所で開発されたもので、直径 3mm の凹面のものであった [3]。今回新たに実装しようと試みたものは New Japan Radio Co., Ltd. (新日本無線株式会社) の DS-NJK1120A という直径 1.5mm の平面のカソードである [4]。

2.2 軌道計算

電子銃による電子ビームの軌道計算には市販のソフト、Tricom 5.0 を使用した。CAD ソフトの Vectorworks 2012 で 2次元領域の電極や磁気シールドの形状と配置を作成し、それを Tricom 5.0 の Mesh で取り込む。このとき図が水平軸に対して軸対称であると設定するため、Vectorworks2012 で作成するのは電子銃の半分のみでよい。次に EStat で電位、BStat で起磁力の条件をそれぞれ与えることで静電場と静磁場を求める。その後、Trak で空間電荷の影響を考慮しつつ電子軌道を計算し、結果を出力する。

3 計算結果

図 1 に変更前の CoBIT の電子銃の電子ビーム軌道の計算結果を示す。記号はそれぞれ、(a) カソード (b) フォーカス (c) アノード (d) スノートを示していて、電圧は (a) 0.0V (b) 0.0V (c) 900V (d) 1000V と設定している。このときの電子ビーム電流は 10.0mA で、目標値を満たしている。

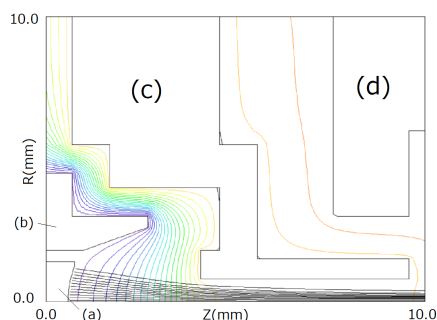


図 1: 変更前の CoBIT の電子ビーム軌道

これからカソードのみ変更した電子銃の電子ビーム軌道の計算結果を図 2 に示す。電圧は (a) 0.0V (b) 0.0V (c) 900V (d) 1000V と設定している。電流値は 7.4mA で目標値を下回った。また、アノードに電子ビームが衝突してビーム軌道が波打っているため、理想的な電子ビーム軌道とは程遠いものとなった。

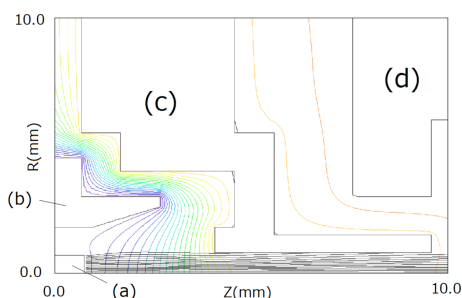


図 2: カソードを変更した電子銃の電子ビーム軌道

次にカソードを固定してカソード以外の電極に変更を加えた。図 3 に電子ビーム軌道の計算結果を示す。電圧は (a) 0.0V (b) 0.0V (c) 900V (d) 1000V

と設定している。図からアノードに電子ビームが衝突せずに集束していることが確認できた。このときの電子ビーム電流は 3.7mA であった。引き出し電圧は 900V であるため式 (3) より電子銃のパービアンスを求めると、 P は約 $0.14\mu\text{A}/V_a^{3/2}$ となった。電子ビームは目標値の 10mA を満たさなかった。これはカソードのスケールが小さくなったことで電子の放出量が少なくなったことが大きな原因だと考えた。また、アノードを近づけることで電流値を大きくしようと試みたが、現在の間隔よりさらに近づけると電子ビームが波打ってしまい、細く集束したビームにならなかった。

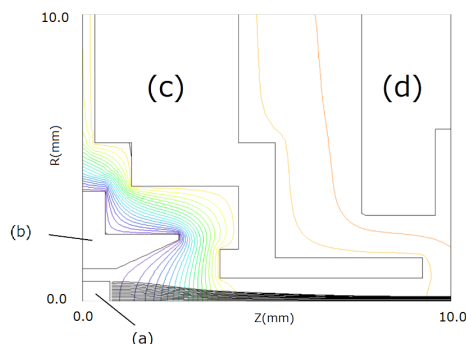


図 3: 作成した電子銃の電子ビーム軌道

そこで、アノードの電圧を大きくすることで電流値 10mA を満たすよう軌道計算を行った。上記で求めたパービアンスより約 1800V の電圧をかけることで電流値が 10mA に到達すると計算し、電子ビーム軌道を求めた。図 4 は電子ビームの軌道の計算結果である。電圧は (a) 0.0V (b) 0.0V (c) 1800V (d) 1900V と設定した。このとき電流値は 10.4mA で目標値を満たした。しかし、CoBIT の運転時のアノード電圧は 1000V 以下で想定されており、1800V での運転も可能だが設計時の想定値を大きく超えてしまうため、装置への負荷がどうしても無視できない問題となってしまふ。この問題を解決するにはやはりパービアンスが大きくなるよう電子銃の電極・配置を調整しなければならない。改善案としては、電子ビームが波打たずにカソードとの間隔を縮めること

ができるアノードの形状を作成する。その場合フォーカスとアノードの間隔が狭まりこの2つの間にある磁場の流れに影響を及ぼすことが予想できるため、フォーカスの横幅の調整も必要と考えた。

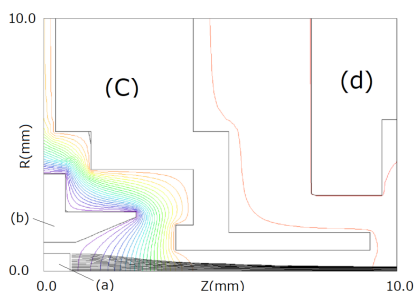


図 4: 作成した電子銃の電子ビーム軌道 ($c = 1800V$)

4 結論

EBIT に使用している電子銃のカソードの生産が停止するため、市販のカソードを用いた電子銃のモデルを作成し、その電子ビームの軌道計算を Tricomp 5.0で行った。これを実際に CoBIT で運用するには電子ビームがアノードに衝突せず、電子ビーム電流値が 10mA を上回ることが主な条件である。また、電子ビームが波打たず細く集束することも重要である。カソードを変更した上で条件を満たす電子銃を作成するにはカソード以外の電極の調整も必要不可欠であった。そこでフォーカスやアノードにも変更を加えて、電子ビームの圧縮と電流値の上昇を促した。CoBIT での通常運転時のアノード電圧 900V を印加する場合を想定して軌道計算を行い最適な電子銃を模索したが、電子ビーム電流は 10mA に達することができなかった。次に、作成した電子銃で 10mA の電子ビーム電流値を発生させるにはどの程度アノードの電圧を大きくしなければならないか確認したところ、約 1800V であった。

しかしアノード電圧 1800V での CoBIT の運転は装置に大きな負荷をかける恐れがあり、望ましくない。そのため、よりパービアンスの高い電子銃を軌道計算によって求めることが課題である。今後は主

にアノードとフォーカスの形状・配置を調整し、電子ビーム電流値 10mA を満たすよう、繰り返し電子ビーム軌道計算を行う。

5 参考文献

- [1] プラズマ核融合学会誌 8 月 J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.8 (2007)
- [2] 電子・イオンビーム工学 電気学会 (1995)
- [3] 菊池浩行 修士論文 電気通信大学 (2007)
- [4] New Japan Radio Co., Ltd. (新日本無線株式会社) DS-NJK1120A