

多価イオン源用高温超伝導マグネットの製作

1. 序論

1.1 多価イオンとは

すべての物質は原子から構成されている。原子には中心に正の電荷を帯びた原子核が存在し、その周りを負の電荷を帯びた電子が周回している。その原子から電子を多数取り去ったものを多価イオンと呼ぶ。このような多価イオンは高温プラズマ内に多く存在する。

近年、多価イオンの分光測定が様々な分野で注目されている。例えば、太陽コロナには未だ解明されていないコロナ加熱という現象があり、それを解明するために2016年に打ち上げられた「ひのこ」では太陽コロナに存在している10価程度の鉄多価イオンの分光診断を行っている。また、熱核融合実験(プラズマ分光診断)を行うために、様々な価数のタングステン多価イオンの分光データが必要とされている。

1.2 EBIT とは

多価イオンを供給する代表的な装置、電子ビームイオントラップ (Electron beam ion trap) は通称 EBIT と呼ばれている。EBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ、電子コレクター、超伝導コイル、及び冷却装置(クライオスタット)で構成されている。電子銃から発射された電子ビームはドリフトチューブの方に向かって加速し、超伝導コイルによって生み出された磁場によって動径方向に圧縮され、多価イオンをトラップする仕組みとなっている。

この装置は、生成されたイオンを閉じ

中村信行研究室 寺西若葉

込め、電子ビームによる衝撃から1つずつ電子を電離して多価イオンをトラップすることが出来る。EBIT で得られる多価イオンの価数の大きさは電子ビームエネルギーに依存する。図 1.1[1]に示すように、電子ビームエネルギーが大きければ大きいほど、得られる価数も大きい。

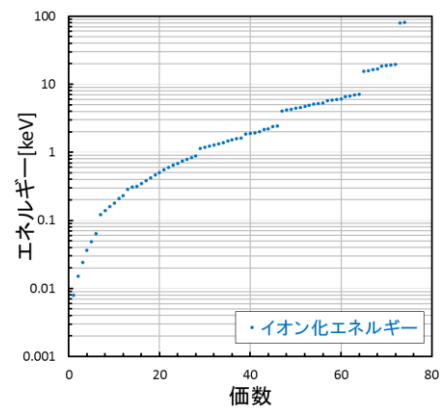


図 1.1. タングステン多価イオンのイオン化エネルギー[1]

1.3 Tokyo-EBIT

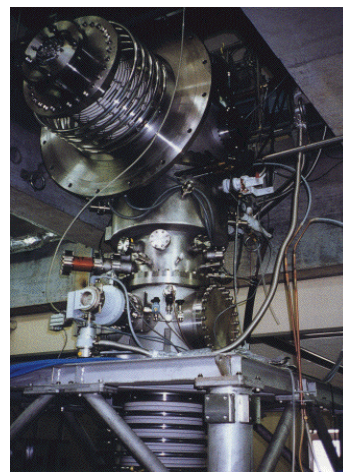


図 1.2. Tokyo-EBIT [2]

図 1.2 は Tokyo-EBIT である。仕組みとしては、磁場の発生源に超伝導コイルを用いることで、トラップ領域に最大 4.5T の磁場を発生させることが出来る。また、そのような高磁場設定なので、ペニングトラップが可能である。ペニングトラップとは、電子ビームを切った状態でも、静電磁場のみである程度の時間イオンを閉じ込めることが出来る方法である。Tokyo-EBIT では高電子ビームエネルギーで操作されることを前提として設計されているため、低電子ビームエネルギーではうまく操作されず、理想的な電子ビーム軌道を描くことが不可能である。それゆえ低価数の多価イオンの生成は難しい。また、大型装置のために、取り付けられた超伝導コイルの冷却に用いる液体ヘリウムの消費が著しく、金銭的なコストがかさんでしまうなどの欠点がある。

1.4 CoBIT



図 1.3. CoBIT[2]

CoBIT には高温超伝導コイルを用い、生じる最大磁場は 0.2T である。高温超伝導コイルの冷却には、冷媒に液体ヘリウムを用いなくてもよい。その代わりに液

体窒素を用いるので、金銭的なコスト効率率は Tokyo-EBIT に比べて良好である。

2 新型 EBIT の製作

2.1 研究の目的

本研究では、序論で述べたような Tokyo-EBIT と CoBIT が適さない中価数程度のイオンを生成するための、新しい中型 EBIT の製作を目的としている。高磁場を発生させる超伝導コイルの仕様の最終的な決定を下し、そこから予想される EBIT 内の静電磁場を求め、電子軌道計算をすることで、電子ビームの最適化、コイルの具体的な設計を行った。

2.2 装置の概要

表 2.1 に装置の仕様、図 2.1 に設計図を記す。また、コイルに使用する予定の高温超伝導線材の仕様を表 2.2 に示す。

表 2.1. 無冷媒超伝導 EBIT の仕様

最大電子ビームエネルギー	50keV
最大電子ビーム電流	100mA
最大磁束密度	3T
磁場の発生源	高温超伝導コイル
コイル冷却	GM 型冷凍機

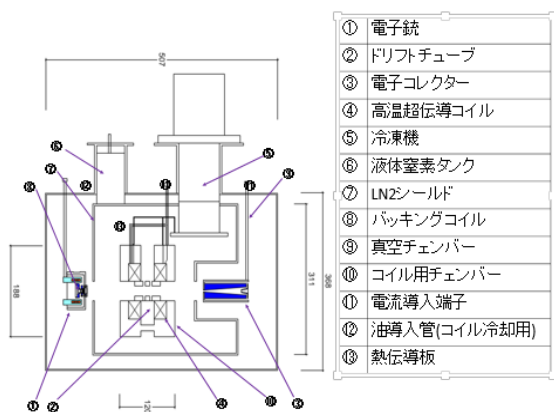


図 2.1. 新型 EBIT の概略図

2.3 高温超伝導コイル

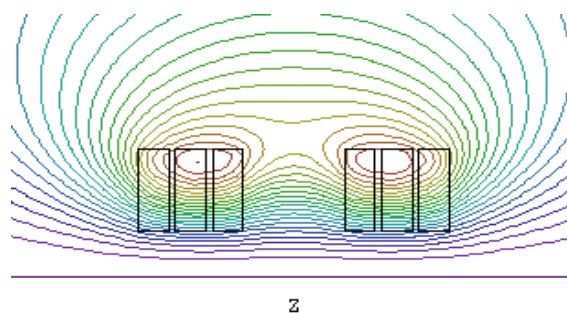
高温超伝導線材はテープ状であり、テープにかかる磁場がテープ面に対して垂直磁場か並行磁場かで異なる臨界電流値を有する。

表 2.2. 高温超伝導線材の仕様

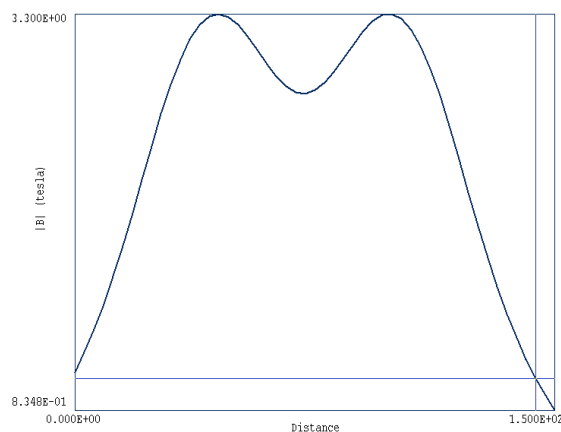
形式	住友電工社製 DI-BSCCO
Type	HT-NX
平均幅	4.5mm
平均厚さ	0.31mm
補強材料	ニッケル合金
単長	500mm
臨界電流	180A

本 EBIT では、高温超伝導線材のヘルムホルツ様コイルによって生じる磁場の利用を予定している。このとき生じる磁場の値は高温超伝導コイルの内径、外径、巻き数、電流密度、コイル間隔に依存している。高温超伝導コイルは冷凍機で 30K まで冷却されていると仮定し、高温超伝導線材の仕様を満たす臨界電流の範囲内で高温超伝導コイルの仕様を定めた。

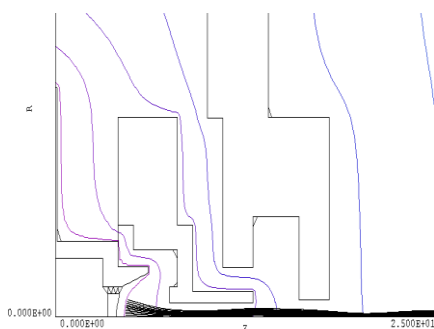
導体を上下2層に渦巻き(蚊取り線香)状に巻線したコイルをパンケーキコイルという。3T という高磁場を得るために複数のパンケーキコイルを重ねる必要があった。理論上パンケーキ間隔は、ない方がいい。しかしその間隔が 1mm だとボビンの構造上、薄すぎるので設計がしにくい。今回はコイルを製作する際、パンケーキコイル間隔が 1mm のときと 2mm のときのケースに分け、2mm の場合でも設計可能かどうかをシミュレーションにより調べた。その結果を図 2.2 に示す。



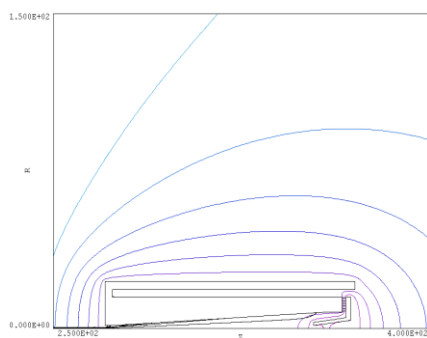
(a) 磁束線の拡大図



(b) 中心磁場



(c) 電子銃付近の電子ビーム



(d) 電子コレクター付近の電子ビーム

図 2. 2. パンケーキ間隔が 2mm の時の
磁場と電子ビームの様子

シミュレーション結果から、パンケーキコイル間の距離が 2mm の場合でも磁場は 3T に近く、また電子銃付近の磁場の様子から電子ビームも層流であることがわかる。

よって、パンケーキコイル間の距離が 2mm の場合でも設計可能だといえる。

3 巻き線機

実際にコイルを作るうえで必要なものはコイルを巻く巻き線機(図 3. 1)と、それを巻きつけるボビン(図 3. 2)である。上部にボビンを固定し、軸を回して線材を巻きつける仕組みとなっている。現段階で線材の高さの調整、巻き数のカウント、巻く向き指定、巻く速度の調整が可能で、モーターの制御回路の製作を行った。

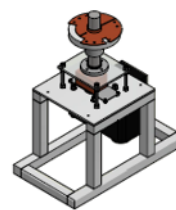


図 3. 1. 巻き線機的设计図

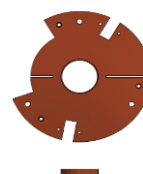


図3. 2. ボビンの设计図

4 結論

中価数のイオンの生成に適した無冷媒超伝導EBITを製作するために、まずは全体構成図を決め、各 부품の概要も取り決めた。磁場を発生させるコイルの設計をし、そこから磁場集束電子ビームの軌道計算を行った。今回は、実際に組み立てるときのパンケーキコイル間の間隔が 1mm の場合と 2mm の場合に分けて考えた。目指す磁場は 3T で、また電子ビーム軌道も層流になっていた。

コイルを製作するためのコイル巻き線機の製作を行っている。まずはコイルを 1 個作り、通電試験により磁場の大きさを確認してから、コイル全体の製作に移る見込みである。

参考文献

[1] J. Scofield, Ionization Energies, Internal report, LLNL, Livermore, USA

[2] <http://yebisu.ils.uec.ac.jp/nakamura/>