

電子ビームイオントラップの開発に向けた高温超伝導コイルの製作

中村信行研究室 玉井駿宏

1. 序論

1.1 背景

多価イオンの分光測定や固体表面との相互作用の研究は、太陽コロナや核融合実験炉などの高温プラズマ診断や固体表面の局所加工などの応用に必要とされている。電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) は、トラップされたイオンに電子ビームを衝突させることで逐次電離し、多価イオンを生成するイオン源である。

現在我々の研究室には、最大電子ビームエネルギーが 1 keV の小型 EBIT (Compact EBIT: CoBIT)[1] と 200 keV の Tokyo-EBIT[2] があり、それぞれ低価数と超高価数の多価イオンの生成が可能である。各 EBIT の仕様を表 1 に示す。しかし、これらの装置は仕様が両極端であり、例えば次世代熱核融合炉 ITER のコアプラズマ診断に有用となるイオンの生成に適した 10 keV 程度の運転は、CoBIT では不可能であり、Tokyo-EBIT では過剰性能となる。また、多価イオンの発光寿命測定[3]には、電子ビームを切った状態で高磁場による Penning トラップを用いて行うが、CoBIT 内の低磁場では Penning トラップを行うことができない。さらに、磁場を形成する超伝導コイルの冷却には液体ヘリウムや液体窒素などの冷媒を定期的に充填する必要があるため、例えば、放射光施設など、立ち入りの制限された場所での運転には不都合がある。

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

1.2. 目的

本研究では、新たな EBIT として現有の CoBIT と Tokyo-EBIT の中間の仕様を持つ無冷媒超伝導 EBIT の開発に向けて高磁場を発生可能な高温超伝導コイルの製作を行った。無冷媒超伝導 EBIT の目標仕様は、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 としており、EBIT 内の静電磁場と電子ビーム軌道の計算を軌道計算ソフトの Tricomp5.0 [4]を用いて行った。

2. 設計

2.1 装置概要

新たな EBIT の概略図と仕様を図 1 と表 2 に示す。電極などの配置は現在研究室にある CoBIT を元に設計を行い、高温超伝導コイルによって 3 T の高磁場を発生させ、最大 50 keV の電子ビームを 100mA で運転可能にすることを目標に設計を行った。本 EBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ、電子コレクター、冷凍機と高温超伝導コイルから構成される。磁場の発生源である高温超伝導コイルは、液体ヘリウム温度(4 K)まで冷却せずに超伝導状態になるため、液体ヘリウムを使用せずに冷却可能であるが、臨界電流の影響により、液体窒素温度(77K)では大きな電流を流すことができない。そこで、4K まで冷却可能な SHI Cryogenics Group 社製の RDK-415D 4K Cryocooler Series を使用する[5]。RDK-415D の直冷式の 2 段型冷凍機を使用することで、液体ヘリウムを使用するときのような予冷が不要になり、装置の運転が簡便になる。冷凍機の第 2 ステージは 4 K まで冷却可能だが、熱伝導による冷却で被冷却体に温度勾配が形成されるため、高温超伝導コイル全体が 20 K 以下になるように設計した。冷凍機の第 1 ステージ

は高温超伝導コイルの周りに設置した放射 シールドに取り付け、冷凍機の第 2 ステージは冷凍機の振動が伝わらないように銅の平編 線を用いて高温超伝導コイルに取り付ける。

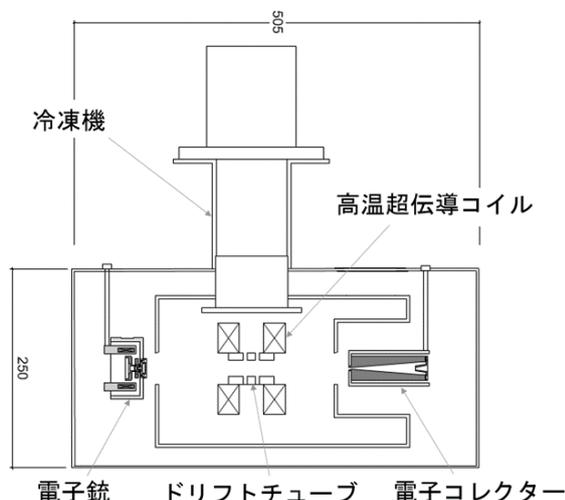


図 1. 無冷媒超伝導 EBIT の断面図

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
磁場の発生源	高温超伝導コイル
冷却方法	直冷式冷凍機

2.3 高温超伝導コイル

2.3.1 高温超伝導線材

高温超伝導コイルには、住友電気工業株式会社の革新的ビスマス系超伝導線 (DI-BSCCO) Type HT-NX を使用する [6]。DI-BSCCO は銀合金をシース材に使用した Bi2223 線材であり、高臨界電流特性を有している。特に Type HT-NX は補強材にニッケル合金を使用することで同シリーズの中で最も許容両曲げ直径が小さい線材である。表 3 に使用する高温超伝導線材の仕様を示す。製作する高温超伝導コイルは絶縁層の無い線材を使用することで、クエンチ保護の特徴を有す無絶縁コイルにする。また、無絶縁コイルは通常のコイルに比べて励磁時間の遅延が

あるが、線材に金属皮膜を施すことで改善可能とされている。使用する線材の補強材にはニッケル合金が使用されているため、励磁時間の遅延を緩和可能であると考えた。DI-BSCCO はテープ線材であるため、テープ線材にかかる磁場がテープ面に対して垂直磁場か平行磁場かで異なる臨界電流を有しており、特に垂直磁場により臨界電流が大きく制限されている。

表 3. 高温超伝導線材の仕様 [6]

形式	住友電工社製 DI-BSCCO
Type	HT - NX
平均幅	4.5 ± 0.2 mm
平均厚さ	0.31 ± 0.03 mm
補強材料	ニッケル合金 (30 μm)
単長	500 mm
臨界電流 (77K, 自己磁場)	180 A
許容引張り張力 *(RT)	410 N**
許容引張り強度 *(77K)	400 MPa**
許容引張り歪み *(77K)	0.5%**
許容両曲げ直径 *(RT)	40 mm**

2.3.2. 高温超伝導コイルの概要

高温超伝導コイルは、無酸素銅のボビンに高温超伝導線材を巻きつけた DP コイルを 6 つ用意し、3 つずつの固まりに分けることでヘルムホルツ型のコイルにする。ボビンには無酸素銅の羽があり、高温超伝導コイルの冷却効率向上と巻線機へ固定するための台としての役割を担っている。また、無酸素銅の羽から高温超伝導線材への熱伝導を良くするために、羽と高温超伝導線材の間にインジウム薄膜を設ける。無絶縁高温超伝導コイルの 概要は図 2 に示す。一般的に、高温超伝導線材の固定にはエポキシ樹脂が使用されるが、多価イオンの生成に必要な高真空を維持するために、エポキシ樹脂を使用せずコイルを固定する方法を考案した。コイルボビンの設計には 3DCAD の Inventor を用いて行った。

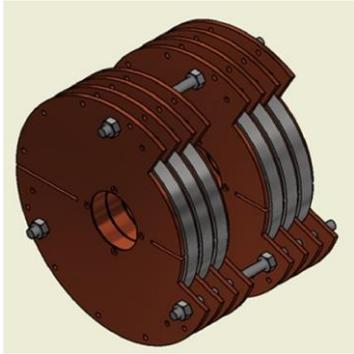


図 2. 無絶縁高温超伝導コイルの概要

2.3.3 磁場計算

高温超伝導コイルによって形成される磁場の計算を市販ソフトの Tricomp5.0 を用いて行った。コイルは 20 K 以下まで冷却することを想定し、20 K の臨界電流に対して余裕を持つために、コイルの運転電流は 250 A とした。磁場の計算では、コイルに 250 A の電流を流し、コイルの中心磁場が 3 T になるのに必要なコイルの巻き数とコイルの形状を決定した。決定した高温超伝導コイルの仕様を表 4 に示し、このときとの高温超伝導コイル周辺の磁場の様子とコイルの中心磁場の様子を図 3 と図 4 に示す。図 3 は Z 軸に対して軸対象になっており、R 軸は Z 軸に対する動径方向、白線は磁力線の向きを示している。

図 4 は図 3 の Z 軸上の平行磁場 B_z を示している。ヘルムホルツ型のコイル間隔は 30 mm であるため、コイル中心から ± 15 mm の付近でトラップされた多価イオンの発光が観測される。トラップ領域で多価イオンを一様に生成するためには、トラップ領域の磁場が均一になっていることが望ましい。しかし、中心磁場が $B=2.74$ T のとき、コイルの中心磁場均一度は、コイル中心から ± 15 mm の範囲で $\Delta B/B_{max} = 15.3\%$ と磁場の一様性は得られなかった。設計当初は、無酸素銅の羽の厚さは 1 mm にすることを想定していたが、構造的に最低でも厚さは 3 mm 必要であったため、磁場の均一性が悪くなってしま

った。その一方、多少磁場の均一性が悪くなってしまっても電子ビームの軌道への影響は殆ど無く、多価イオンの生成自体は問題なく行えると考えられる。

表 4. 高温超伝導コイルの仕様

中心磁場	2.74 T
電流	250 A
電流密度	1.79×10^2 A/mm ²
巻き数	240 TURNS \times 3 \times 2 = 1440 TURNS
起磁力	360000 AT
断面形状 (幅 \times 厚さ)	(9.0 mm \times 37.2 mm) \times 6
線材の長さ	(58 m \times 3) \times 2 = 348 m
内径	40 mm
外径	114.4 mm
コイル間隔	30 mm

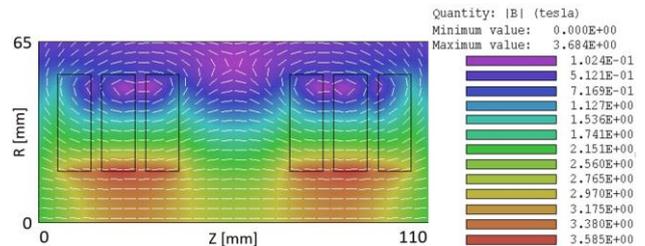


図 3. コイル断面の磁場強度分布

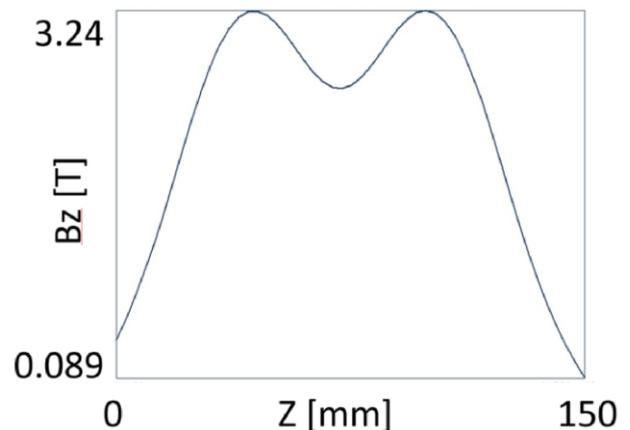


図 4. コイルの中心磁場

2.3.4 耐電磁力の計算

超伝導コイルに電流を流すと、コイル自体が発生させる磁場と電流による電磁力が発生する。電磁力の向きはコイル内に生じる磁場の向きによって変わり、コイルの巻き取り軸の軸方向と動径方向に電磁力が働き、線材に圧縮応力と引

張応力が生じる。軸方向はコイル内の垂直磁場の影響で、中心でゼロとなるような電磁力が働くことでコイル線材に圧縮応力が生じる。動径方向は平行磁場による影響で膨張するような電磁力(フープ力)が働くことで、コイル線材に張力応力(フープ応力)が生じる。

設計したコイルの場合、圧縮応力と引張応力の最大応力は、それぞれ約3.8 MPaと約13 MPaであったため、DI-BSCCOの許容引張り強度の400 MPaに対して十分小さな値であることが確認できた。

3. 高温超伝導コイルの製作

3.1 巻線機の製作

高温超伝導コイルの製作には、高温超伝導線材に引張り張力をかけながら DP コイルを巻き取る必要があるため、図5と図6に示した巻線機の製作を行った。製作にあたって、速度調整、巻く位置の高さ調整、回転方向の変更、一定のトルク力の保持の4点を実現できるように設計を行った。また、今回使用する DI-BSCCO の許容引張り張力は410 Nであるため最大トルクは40N・m以下とし、巻取りの回転速度は低速範囲での巻取りが可能になるように設計した。

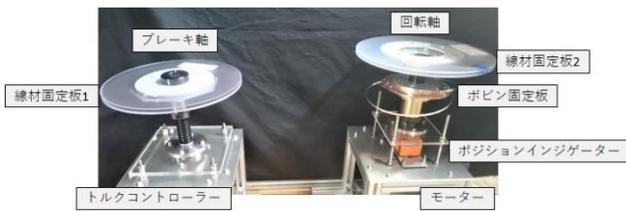


図5. 巻線機の全体

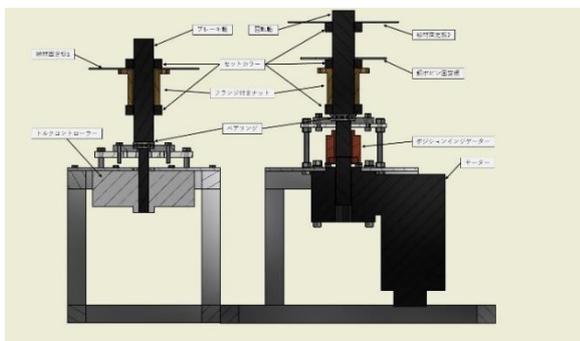


図6. 巻線機の断面図

3.2 DP コイルの製作

3.2.1. 構成

高温超伝導コイルを製作するにあたって、DP コイルの性能を確認するために、試験用の DP コイルの製作を行った。図7に製作した DP コイルを示す。DP コイルは主に、無酸素銅のボビンと羽、ボビンに巻かれた無絶縁の高温超伝導線材の DI-BSCCO、コイルを固定するための線材固定ネジとフープ力対策部品から構成されている。また、無酸素銅のボビンと羽は株式会社京和真空に製作を依頼した。

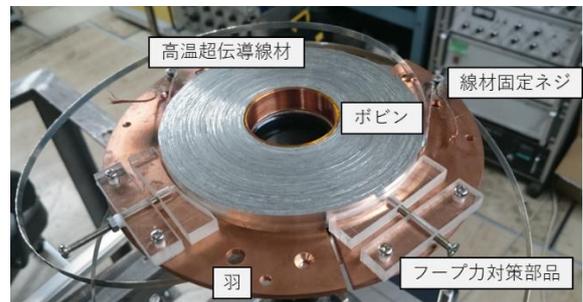


図7. 製作した DP コイル

3.2.2. 巻取り手順

DP コイルは1本のテープ線材を2つのボビンに分け、テープ線材の真中から実際に使用するボビンに2列に分けて積層させながら巻くことで作られる。コイルの巻取り作業には先ほど述べた巻線機の他に、高温超伝導線材の巻かれたボビン(ボビン1)、何も巻かれていないボビン(ボビン2)、無酸素銅のボビンと羽を結合させたもの(銅ボビン)を主に使用した。ボビン1には長さ65mのDI-BSCCOが巻かれており、各ボビンの巻取り箇所直径はそれぞれ、ボビン1: Φ180 mm、ボビン2: Φ170 mm、銅ボビン: Φ40 mmである。DP コイルを1個作るのに必要な線材の巻き数と線材の長さはそれぞれ240 TURNS(1列: 120 TURNS)と58 m(1列: 29 m)と定められる。また、トルクコントローラーのトルクは約2.0 N・mで巻取りを行った。

3.3 高温超伝導コイル試験装置の立ち上げ

3.3.1 試験装置の構成

試験装置の概要を図 8 に示す。試験装置では、無冷媒超伝導 EBIT で使用する直冷式の 2 段型冷凍機によってコイルの冷却を行う。真空チャンバーに取り付けられた 2 段型冷凍機は第 1 ステージで放射シールドの冷却を行い、第 2 ステージで試験台を冷却する。熱放射による熱侵入を減らすために、放射シールドは熱放射を軽減するスーパーインシュレーションによって覆われている。DP コイルは試験台に取り付けることで冷却される。真空チャンバーはターボ分子ポンプとスクロールポンプによって真空を引いており、真空チャンバー内の真空度を冷凍機の運転に必要な 10^{-2} Pa 以下にするには、約 24 時間真空を引き続ける必要がある。

コイル電源には菊水電子工業株式会社の PAG8-300 1P200 を使用した。コイル電源から出力された電流は、銅燃線 (KIV 100SQ) の電流リードを用いて真空チャンバーに取り付けられた電流導入端子 (A0221-2-CF) から真空チャンバー内に取り入れられる。真空チャンバー内で電流導入端子を直接 DP コイルに接続すると熱侵入が非常に大きくなり、試験台の温度が上昇してしまう。そこで、電流導入端子に接続した電流リードを放射シールドに固定し、放射シールドから高温超伝導線材の電流リードに変えることで DP コイルへの熱侵入を減少させる。銅燃線と高温超伝導線材の接続には無酸素銅のブロックを介して行い、高温超伝導線材の電流リードには DP コイルに使用した DI-BSCCO を並列に 2 本使用した。電流リードを放射シールドに固定する際、電氣的に絶縁しつつ高い熱伝導を保つ必要があるため、窒化アルミニウムの板を挟んで無酸素銅のブロックを放射シールドに固定した。

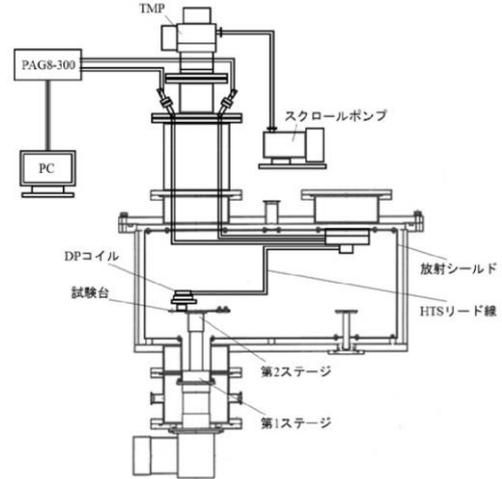


図 8. 試験装置の概要

3.3.2 冷却試験

試験装置内の冷却温度を測定するために冷凍機の各ステージとコイル、電流導入の温度測定を行った。冷凍機を起動してからの時間経過に対する冷凍機の第 2 ステージとコイル上面、窒化アルミニウム板周辺の放射シールド、第 1 ステージの温度変化をそれぞれ、 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ として図 9 に示す。最終的に装置内の温度は $T1=10$ K、 $T2=35$ K、 $T3=49$ K、 $T4=39$ K になり、コイルが 40 K 以下まで冷却されているのを確認でき、試験用 DP コイルの場合、温度マージンは約 5 K であるのが確認できた。今回の測定では、高温超伝導電流リードの長さが短いことや、コイルと試験台の間にインジウム膜が挟まれていないなど改良する余地がまだあるため、さらに温度マージンを大きくすることが可能だと考えられる。

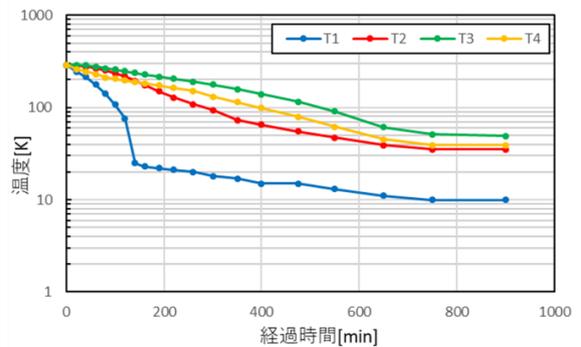


図 9. 試験装置内の温度変化

4. 励磁試験

試験装置を用いて DP コイルの励磁試験を行った。図 10 に DP コイルの中心磁場の変化を示す。赤線が電流値、青線が中心磁場の理論値、緑線が中心磁場の測定値である。電流の上昇速度は 1 A/s とし、電圧が一定になったのを確認してから電流値を上昇させた。最終的に電流が 205 A でクエンチが生じ、コイル間の電圧が上昇したため、直流電源の出力を停止した。再現実験を行ったところ、コイル自体には損傷は見られなかったため、高温超伝導線の電流リード部でクエンチが生じたと考えられる。

DP コイルの中心磁場は 205 A の電流のときに、約 0.82 T であった。理論値の中心磁場は約 0.84 T であるが、ホール素子の取り付け箇所がコイルの中心から数 mm ずれているのを考慮すると、205 A まではほぼ設計通りの DP コイルができているのを確認できた。

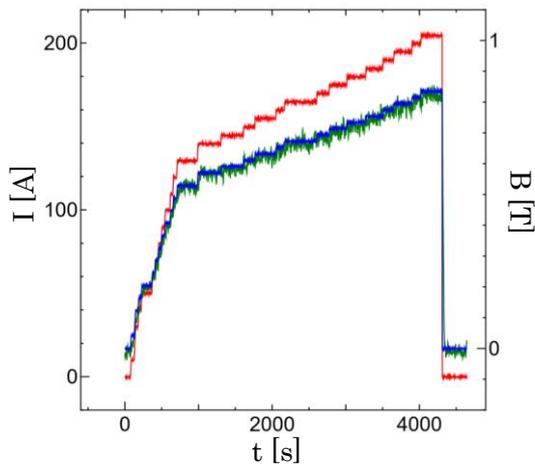


図 10. DP コイルの中心磁場の変化

4 まとめと今後の展望

本研究では、新たな EBIT として現有の CoBIT と Tokyo-EBIT の中間の仕様を持つ無冷媒超伝導 EBIT の開発に向けて高磁場を発生可能な高温超伝導コイルの設計・製作を行った。無冷媒超伝導 EBIT の目標仕様を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、中心磁場 3 T とし、Tricom5.0 を用いた電子ビ

ーム軌道計算によって EBIT の構成と高温超伝導コイルの形状を決めた。

高温超伝導コイルは直冷式の 2 段型冷凍機で 20 K 以下まで冷却し、250 A の電流によって励磁させることで約 3 T の磁場を発生させる。コイルの固定にはエポキシ樹脂を使用せずに行い、6 つの DP コイルを組み合わせることでヘルムホルツ型のコイルにする。また、高温超伝導線材に無絶縁の DI-BSCCO を使用することで、クエンチ保護の特徴を有する無絶縁高温超伝導コイルの製作が可能になった。

高温超伝導線材の DP コイルの巻き取りには、設計から製作まで行った自作の巻線機を使用し、試験用の DP コイルを製作した。試験用 DP コイルの励磁試験を行うために、DP コイルを冷却し、250 A の電流で励磁可能な試験装置の立ち上げを行い、試験台の温度が 40 K 以下まで冷却されているのを確認した。

DP コイルの励磁試験を行い、205 A で高温超伝導線の電流リード部でクエンチが生じた。このとき、コイル自体に損傷は無く、205 A の電流でコイルの中心磁場が約 0.82 T であったため、ほぼ設計通りのコイルが出来ているのを確認した。

今後は、コイルの温度をさらに下げられるように、コイルの固定箇所にインジウム薄膜を挟むなどで冷凍機の冷却効率を高める。さらに、クエンチ箇所である高温超伝導の電流リードを修正した後、再度 250 A の電流で励磁実験を行う。

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] 簗島真希 電気通信大学修士論文(2012).
- [4] <http://www.asl-i.com/contents/soft/tricom/>
- [5] <http://www.shicryogenics.com/products/4k-cryocoolers/rdk-415d-4k-cryocooler-series/>
- [6] http://www.sei.co.jp/super/hts/type_ht.html