

新型電子ビームイオントラップ用無絶縁超伝導コイルの評価

中村信行研究室 河野泰隆

1 序論

1.1 背景

多価イオンとは、中性原子より束縛電子を複数取り除いた正イオンを指す [1]。その性質上膨大な内部エネルギーや強力なクーロン力を持つ。また束縛電子が原子核のごく近傍を高速で運動することにより相対論効果や量子電磁気学的効果が顕著に現れるため、原子物理学において注目されている。

多価イオンを生成し観測を行う装置の 1 つに、電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap:EBIT) がある。EBIT における多価イオン生成方法には、ある価数を生成するためのイオン化エネルギーを与え、目的の価数まで 1 つずつ電子を電離させる逐次電離を利用する。

現在、我々の研究室で使用されている EBIT は、Tokyo-EBIT と Compact EBIT (CoBIT) と呼ばれる 2 台が存在する。各 EBIT の概要を表 1 に示す [2][3]。1~10 keV に相当するイオン化エネルギーを持つ多価イオンの生成は両方の装置で観測に適さない為、この不足部分を補うための新型 EBIT の開発が始まった。

表 1 我々の研究室にて使用中の EBIT 概要 [2][3]

	Tokyo-EBIT	Compact EBIT
電子ビームエネルギー	10-340 keV	100-1000 eV
電子ビーム電流	0-330 mA	0-10 mA
最大磁場 (トラップ領域)	4.5 T	0.2 T

1.2 使用した超伝導コイル

超伝導コイルは先行研究 [4] にて新設計されたものである。超伝導線には Bi2223 相の高温超伝導材である住友電気工業社製 DI-BSCCO Type HT-NX を用いており、コイルはダブルパンケーキ型

に巻き上げられ、コイル両端は、線材にはんだ付けされた銅撚線をコイル羽に取り付けられた固定用ネジを用いて引っ張ることにより固定している。完成時には合計 6 台のコイルを 3 台ずつに分割したスプリット型の配置が用いられる予定である。超伝導コイルの冷却には冷媒ガスの断熱膨張による寒冷を用いた GM 冷凍機を用いる。表 2 に使用したコイルの設計値を、図 1 に超伝導コイルの完成予想図を示した [4]。また、使用した線材の I_c (臨界電流) - B (垂直磁場) - T (温度) 曲線を図 2 に示した [5]。

表 2 試作超伝導コイル設計値 [4]

中心磁場 (完成時)	2.74 T
中心磁場 (1 台)	1.0 T
印加電流	250 A
電流密度	$1.79 \times 10^2 \text{ A/mm}^2$
巻き数	240 TURNS/個
起磁力	360000 AT
内径	40 mm
外径	114.4 mm

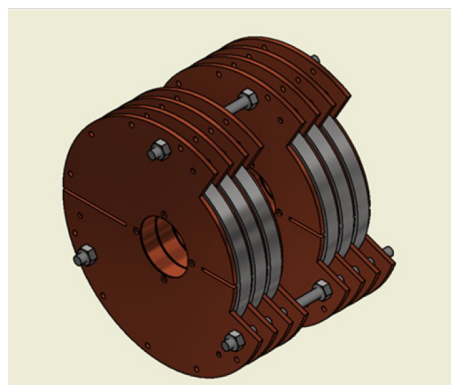


図 1 超伝導コイルの完成予想図 [4]

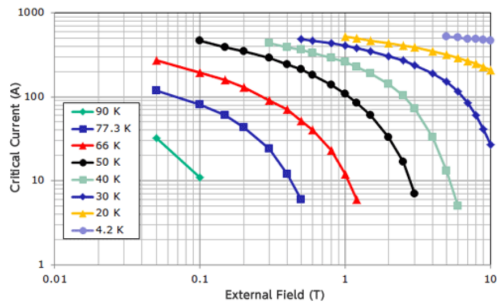


図2 使用した超伝導線材の $I_c - B - T$ 特性 [5]

1.3 目的

本研究では、新型 EBIT の観測領域に使用される無絶縁高温超伝導コイル及び装置等の改良を行い、試験用に製作されたコイル 1 台について、20 K 以下まで冷却すると共に、設計目標値である印加電流 250 A、最大中心磁場 1 T を達成することを目的としている。

2 実験

2.1 装置構成

実験装置の構成を図 3 に示した。図の簡略化のため、各部温度計の配線等を省略している。実験容器は外壁と放射シールドの二層構造となっており、その間に断熱材を挟み込んでいる。真空装置はスクロールポンプ 1 台とターボ分子ポンプ 1 台を用い、超伝導コイル及び真空槽の冷却には SHI Cryogenics Group 社製 RDK-415D 4K Cryocooler Series を使用した。

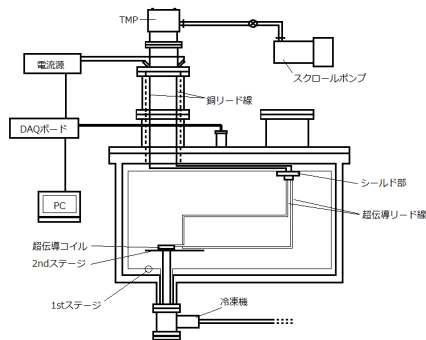


図3 超伝導コイル試験装置概略図

2.2 冷却試験

冷却試験は、予め装置内部の真空度が 10^{-2} Pa 以下となるまで真空ポンプを動作させ、その後冷凍機を始動させた時点から測定を行った。温度計は極低温用の白金コバルト抵抗体を用い、図 3 中のコイル、2nd ステージ、1st ステージ、シールド部の 4 か所に取り付けた。各温度計には定電流源から 2 mA の電流を流し、100 ms ごとに電圧を測定することで抵抗値を導出し、使用した温度計の基準特性表より温度を読み取り記録を行った。

2.3 励磁試験

冷却試験終了後、温度が安定した段階で測定を開始した。印加電流の上昇速度は 0.2 A/s に設定し 100 ms 毎に計測を行い、超伝導が破れた場合即時に電流源の出力を切った。ホール素子には制御電流として 100 mA が印加されており、ホール電圧値は増幅器を用いて 10 倍したものを計測した。

3 結果

試験 1,2,3 のそれぞれについて行った冷却試験、及び励磁試験について示した。ただし、冷却試験について電流計の値が一定ではない為、正確な測定値が得られていない可能性がある。

3.1 初期状態における試験結果

まず、超伝導コイル自体に手を加えない状態において冷却及び励磁試験を行った。この冷却試験及び励磁試験を、それぞれ冷却試験 1、励磁試験 1 と呼称した。

3.1.1 冷却試験 1 結果

冷却試験 1 の結果は図 4 の通りとなった。コイル上面、1st ステージ、シールド部、2nd ステージの温度はそれぞれ、10 K、43 K、61 K、10 K となっており、コイルの 20K 程度の冷却は達成出来たが放射シールド部での温度がやや高い値を示していた。これは冷凍機より最も遠く銅リード線や真空ゲージのフィラメントといった熱源が多いためであると考えられる。

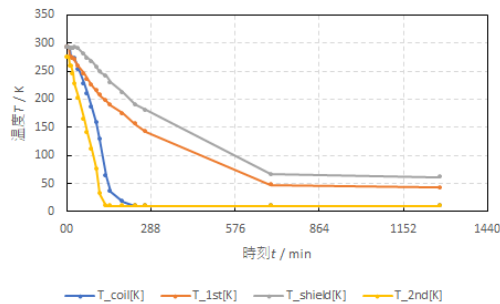


図 4 冷却試験 1 結果

3.1.2 励磁試験 1 結果

実験結果を図 5 に示した。ただし、励磁試験時に電流値が PC 上で記録出来ていなかった為、実験ノートに記載した値を用いた。今回は 206.1 A において超伝導が破れ、目標の 250 A は達成できていない。

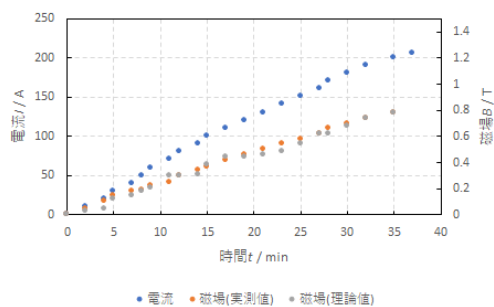


図 5 励磁試験 1 結果

3.2 コイル補強後の試験結果

コイル電流が目標値を達成できていない原因として、コイル内の温度分布が均一でないことや線材の振動によって発生するジュール熱が挙げられた。このことから、コイル中の温度分布をより均一にし、超伝導線材の振動を抑えることを目的としてコイル全体をアルミテープを用いて補強した。この時の冷却試験及び励磁試験をそれぞれ、冷却試験 2、励磁試験 2 と呼称する。

3.2.1 冷却試験 2 結果

冷却試験 2 の結果図 6 に示した。コイル上面、1st ステージ、シールド部、2nd ステージの温度はそれぞれ、4 K、39 K、52 K、10 K となっており、コ

イルの上面温度を 20K 以下とする共に 1st ステージとシールド部の表面温度も低下させることに成功した。

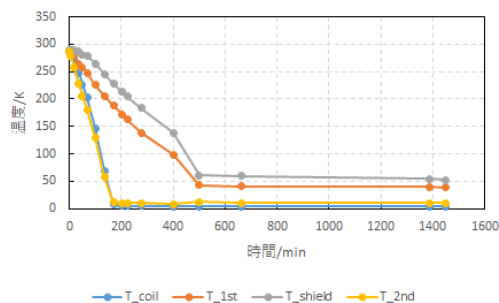


図 6 冷却試験 2 結果

3.2.2 励磁試験 2 結果

電流値及び磁場の測定結果を図 7 に示した。印加電流値は電流源での読みで 251.3 A であり、約 2 分間この値を維持したのち超伝導が破れた。この時の磁場は 0.99 T であった。なお、再現実験を 2 回行ったがどちらも 250 A は達成できなかった。

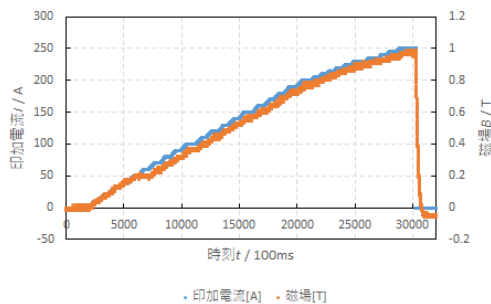


図 7 励磁試験 2 結果

3.3 コイル冷却強化後の試験結果

この実験ではコイル片面にインジウム膜を貼り付け、コイルとコイル羽を裏返しインジウム膜側の面を 2nd ステージに張り付けることで、コイルとステージの接地面積を増やしコイル中の温度分布をより均一にすることを図った。この時の冷却試験及び励磁試験をそれぞれ、冷却試験 3、励磁試験 3 と呼称する。

3.3.1 冷却試験 3 における試験結果

冷却試験 3 の結果図 8 に示した。ただしシールド部の温度計に異常があった為記録を行っていない。コイル上面、1st ステージ、2nd ステージの温度はそれぞれ、4 K、37 K、9 K となっており冷却試験 2 と変化はほぼ見られなかった。

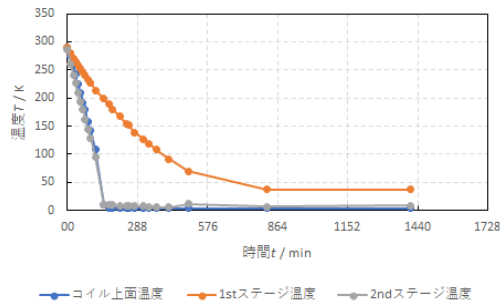


図 8 冷却試験 3 結果

3.3.2 励磁試験 3 における試験結果

励磁試験の結果を図 9 に示した。ただし、ホール素子の配線不良により磁場の測定は行っていない。今回の励磁試験においては 201 A 到達直後に超伝導が破れた。印加電流が 250 A に到達しなかった原因としては、コイルを裏返したことによって線材が緩み、線材の振動により発生したジュール熱が考えられる。

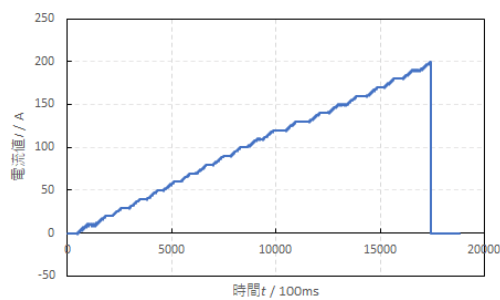


図 9 励磁試験 3 結果

4 まとめと今後の展望

本研究では、新型 EBIT に使用される予定の超伝導コイルが設計通り動作するかについて実験を行った。超伝導コイルは、Bi2223 相の高温超伝導線材

を用いて絶縁体を挟まずに製作され、冷凍機を用いて 20 K 以下まで冷却した後 250 A の電流を印加するように設計されている。

冷却試験及び励磁試験は、試作された超伝導コイル 1 台を用いて行った。最初に、先行研究から手を加えない状態で試験を行ったところ、コイル上面は 10 K 程度まで冷却を行うことが出来たが、206 A を印加した時点で超伝導が破れた。次にコイル上面やコイルとリード線との接合部を固定するようにアルミテープを一面に貼り試験を行ったところ、コイル上面の温度は 4 K となり、1 回だけではあるが 2 分程度 251 A を維持することに成功した。

本研究により、超伝導コイルに 250 A の電流を印加することが可能であると判明した為、今後はコイルの冷却方法や線材の固定方法を更に改良し、安定的に 250 A を印加可能な条件を探っていく。

参考文献

- [1] 市川行和 大谷俊介, "原子分子物理学ハンドブック", 朝倉書店, 2012
- [2] CURRELL, et al, "A New Versatile Electron-Beam Ion Trap", Journal of the Physical Society of Japan Vol.65 No.10 pp.3186-3192, Oct 1996
- [3] 菊池浩行 修士論文, 電気通信大学, 2007
- [4] 玉井駿宏 修士論文, 電気通信大学, 2017
- [5] https://sei.co.jp/super/hts/type_ht.html