

無絶縁高温超伝導コイルの評価

中村信行研究室 山西颯馬

1 序論

1.1 背景

多価イオンとは2価以上の正イオンで、多価イオンは太陽コロナや核融合炉の中に多く存在する [1]。

多価イオンを生成、研究するために我々の研究室で使用しているのが2種類の電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap:EBIT) である。

1つ目がTokyo-EBITで全長5m、最大電子ビームエネルギーは300keV、最大電流300mAとなっている [2][3]。ウランの電子を全て取り除いた裸イオンも生成可能で、ペニングトラップを行うこともできる [4]。2つ目がCoBITで、全長が50cm程度、最大電子ビームエネルギーが1000eVで、電子ビームエネルギー100-1000eVでの運転が想定されている [5]。液体窒素での運転を可能として、Tokyo-EBITよりランニングコストを抑えている。

1.2 新型 EBIT 装置開発の現状

ITER内に不純物として混入するされるタングステンイオンのスペクトルのデータを蓄積するにあたって、30~60価程度の多価イオンを生成するには電子ビームエネルギー1~10keV程度での運転が必要である。しかしこれはCoBITでは不可能であり、Tokyo-EBITでは過剰性能となる。また、強力な磁場が必要なペニングトラップができる装置はTokyo-EBIT1台のみである。そして、研究室にある装置は冷却にTokyo-EBITは液体ヘリウム、CoBITは液体窒素を使用しており、定期的な補充が必要であり、立ち入りが制限された場所での運転には不都合がある。そこでTokyo-EBITとCoBITの中間の性能を持つ無冷媒超伝導EBITの開発を行っている。

新型EBITの概略図と仕様を図1.1[6]と表1.1[6]

に示す。冷却には住友重機械工業社の4Kギフォード・マクマホン (Gifford McMahon:GM) 冷凍機 RDK-415Dを使用する。RDK-415Dは直冷式の2段階冷凍機で、第2ステージは4Kまで冷却可能である。これによって冷媒を定期的に補充する必要がなくなる。コイルの温度が最も高い部分でも20K以下になることを目指す。

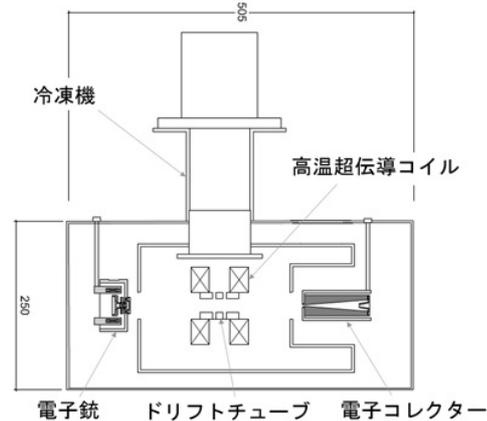


図 1.1 装置概要 [6]

表 1.1 新型 EBIT の仕様 [6]

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	4 KGM 冷凍機
冷却温度	20 K 以下

高温超伝導コイルには住友電気工業株式会社のビスマス系超伝導線 (DI-BSCCO) Type HT-NX を使用する [7]。この線材の仕様を表 1.2、垂直磁場に対する臨界電流の温度変化を図 1.2 に示す。

表 1.2 高温超伝導線材の仕様 [7][8]

住友電工 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 (30μm)
臨界電流 (77K)	180 A

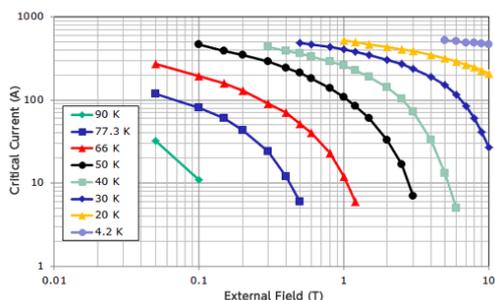


図 1.2 外部磁場と温度に対する臨界電流の大きさ [7]。横軸が外部磁場、縦軸が臨界電流である。例えば 0.1T のとき 77.3K であれば臨界電流は約 80A である。

コイル全体が 20 K 以下、コイルの中心磁場が 3T になるという想定で図 1.2 より臨界電流に対して余裕を持たせるため、コイルの最大運転電流は 250A と設定された。コイルの運転電流を基にコイルの中心磁場が 3T になるようコイルの巻き数や、DP コイル 6 つを 3 つずつに分けてスプリットコイルにするという形状が決定した。6 個の DP コイルを組み合わせてスプリットコイルとして完成した時の仕様を表 1.3 に示す。現在 6 つの DP コイルのうち 1 つに相当する試験用コイルが完成している。このコイルを 20K 以下に冷却して、クエンチを起こさずに 250A を流すことが目標となっている。

表 1.3 完成した時の高温超伝導コイルの仕様 [6]

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

試験用コイルでは既に、冷却試験及び励磁試験が行われている。試験装置の概要を図 1.3 に示す。冷却試験の温度測定箇所は図 1.3 中の赤文字が指す赤丸の場所に対応する。最終的な温度は第 2 ステージが 10K、コイル上面が 35K、放射シールドが 49K、第 1 ステージが 39K となった。コイルの温度を 20K 以下という目標には到達していない。励磁試験では 205A でクエンチが発生している。

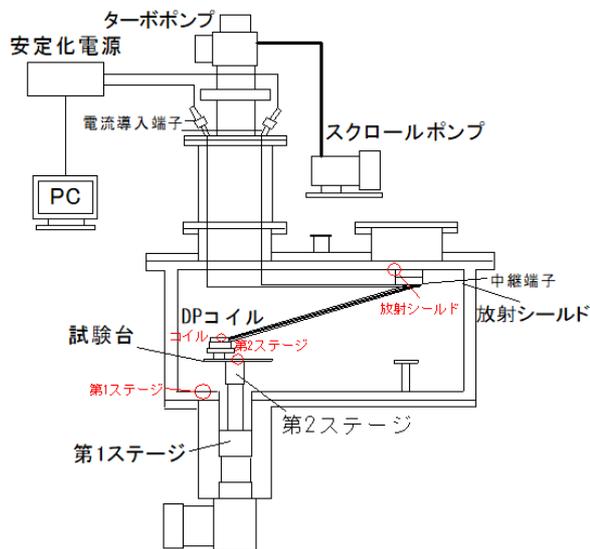


図 1.3 試験装置の概要

1.3 熱侵入

電流リードによる加熱はリード線の抵抗によるジュール発熱と、リード線両端の温度差に伴う熱伝導による熱侵入がある [9]。リード線の抵抗によるジュール発熱は次式で求められる。

$$Q = I^2 \rho L / s \quad (1.1)$$

ρ は抵抗率、 L はリード線の長さ、 s はリード線の断面積である。熱伝導による熱侵入は次式で求められる。

$$Q = \lambda s (T_H - T_L) / L \quad (1.2)$$

λ は熱伝導率、 T_H はリード線の高温側の温度、 T_L はリード線の低温側の温度である。

超伝導リード線の場合、超伝導状態であれば抵抗による発熱がゼロになるのでリード線を伸ばせば伸ばすほど熱侵入の影響を減らせることになる。また、超伝導リード線の本数を増やすと 1 本あたりに流れる電流が減少するがその分だけ高温側からの熱侵入も大きくなる [10]。

1.4 研究目的

先行実験ではコイル全体を 20K 以下に冷却し、クエンチなしで 250A の電流を流すという目標を達成できていない。この原因の 1 つとして 1.3 章で挙げた電流リードからの熱侵入で装置内部及びコイルの温度が上がってしまうことがあげられる。しかしこれについての対策はリード線の中継端子経由にして、中継端子からコイルまでは超伝導リード線にしたのみである。そこで電流リードによる加熱の影響が小さくなるよう引き続き、配線改良などを行い、冷却・励磁試験の結果を比較しながら目標の性能を達成することを目指した。

2 実験

試験装置の概要は図 1.3 で示した通りである。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、銅撚線 (KIV 100SQ) の電流リードを通過し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入る。

真空チャンバー内で電流リードを直接 DP コイルに接続するとコイルへの熱侵入が大きくなり、コイルの温度が上昇してしまう。そこで電流リードを放射シールドに取り付けた中継端子につなぎ、中継端子からは超伝導コイルに使用した線材を電流リードに使用し、コイルまで繋げている。以降導入端子から中継端子までのリード線を銅リード線、中継端子からコイルまでのリード線を超伝導リード線と記す。

中継端子には無酸素銅のブロックを使用しているので高い熱伝導率を維持しつつ絶縁するため、放射シールドとの間に窒化アルミニウムのブロックを挟んでいる。また、超伝導リード線は 1 本あたりに流れる電流を減らしてクエンチを防ぐため、入出力並列で 2 本ずつ、合計 4 本を使用している (3.2 章以降は入出力 1 本ずつ、合計 2 本)。

3 結果と考察

冷却試験では、図 1.3 に示すコイルと放射シールドの測温計で温度を測定した。温度が下がりきり、変化がなくなったところで励磁試験を行った。

3.1 銅リード線を取り除いての試験

外部から放射シールドまでの電流リード (銅リード) 線による加熱がなければどれくらいコイルが冷えるのかを調べるため、銅リード線を取り除いて冷却試験を行った。

冷却試験ではコイルの温度は 15.5K、放射シールドの温度は 30K となった。銅リード線を取り除くことで目標の一つであるコイルを 20K 以下まで冷却やすことを達成することができた。

3.2 超伝導リード線を切断して冷却・励磁試験

放射シールドからコイルまでの高温超伝導線材による超伝導リード線を入出力 2 本ずつ、合計 4 本だったのを 1 本ずつ切断して冷却、励磁試験を行った。銅リード線経路変更の概略図を図 3.1 に示す。

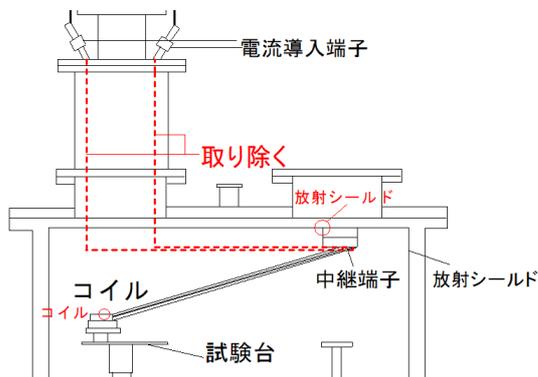


図 3.1 銅リード線経路変更の概略図

冷却試験では、放射シールドの温度が 56K、コイルが 24K になった。先行実験の結果と比べて放射シールドの温度が下がらなくなった一方で、コイルは温度が下がった。超伝導リード線を 2 本に減らしたことで熱侵入が減少し、コイルの温度をより下げられるようになったといえる。

励磁試験では、184A でクエンチが発生した。コイルの温度は下がったが超伝導リード線の本数が減ったことで 1 本あたりに流れる電流が増加し、結果、クエンチする電流値が低下したと考えられる。

3.3 放射シールドまでの電流リードの経路を変えて試験

銅リード線によるコイルの加熱の影響を減らすため、銅リード線の中継端子付近までは放射シールドと真空チャンバー内を通るようにし、中継端子付近で放射シールド内に入って中継端子に接続するようにした。

この状態で冷却、励磁試験を行った。冷却試験では、第 1 ステージが 45K、放射シールドが 69K、コイルが 22K となった。3.2 章と比べて放射シールドの温度はさらに下がらなくなったが、コイルの温度をより下げることができた。

励磁試験では、194A でクエンチが発生した。3.2 章よりは高い電流を流せるようになったが依然先行実験での励磁試験の結果を超えるには至っていない。

4 まとめと今後の展望

本研究では無冷媒超伝導 EBIT に使用する超伝導コイルにクエンチなしで 250A の電流を流せるよう、試験装置の改良を行った。まず電流導入端子から中継端子までの電流リードの熱侵入および抵抗による発熱の影響を取り除くことでコイルを目標の 20K 以下まで冷やせることがわかった。中継端子からコイルまでの電流リードを 4 本から 2 本とし、中継端子までの電流リードの中継端子付近まで放射シールドの上部を通すことでコイルに電流が流せる状態のままコイルを 22K まで冷却できるようになった。しかし現在まで先行実験の励磁試験の電流値の結果を超えるに至っていない。

今後は中継端子からコイルまでの電流リードを 4 本に戻した上で、超伝導リードの長さを伸ばして冷却・励磁試験を行う。コイルにクエンチなしで 250A 流せるようになり次第、同様のコイルを増産し、複数個のコイルによる冷却・励磁試験を行う。

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] 大谷俊介、桜井誠 プラズマ・核融合炉学会誌 73 巻 10 号 1063-1079
- [3] 西沢一生 修士論文 電気通信大学 (1996)
- [4] 簗島真希 修士論文 電気通信大学 (2013)
- [5] 菊池浩行 修士論文 電気通信大学 (2008)
- [6] 玉井駿宏 修士論文 電気通信大学 (2018)
- [7] <https://www.sei.co.jp/super/hts/type.ht.html>
- [8] <https://www.sei.co.jp/technology/tr/bn190/pdf/190-03.pdf>
- [9] 荻原宏康 低温工学概論 -超伝導技術を支えるもの- (東京電機大学出版社、1999)
- [10] 辺見勉 博士論文 総合研究大学院大学 (2005)