

AC LOSS MEASUREMENT OF A HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING SCANNING MAGNET

Kichiji Hatanaka^{1A)}, Jinta Nakagawa^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Takane Saito^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{B)}, Koji Noda^{C)}, Takeo Kawaguchi^{D)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

^{B)} Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University
Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578

^{C)} National Institute of Radiological Sciences

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

^{D)} KT-Science Ltd, Fujie, Akashi, Hyogo 673-0044

Abstract

Twenty years have passed since the discovery of high temperature superconductivity. However, there not have been many applications of high temperature superconducting (HTS) wires to magnets. In order to investigate the applicability of HTS wires at higher frequencies, two sets of air core magnets were fabricated using a Bi2223 wire and AC loss was measured at 10-21 Hz. Each magnet consists of two coils. Each coil consists of 3 double pancakes and the number of turns is 420 in total. The critical currents were measured at 77 K to be 56 - 62 A for double pancakes and 40 - 43 A after assembling to form coils. The maximum current is assumed to be 200 A at 20 K. Magnets were installed in a cryostat and cooled to 20 K. The critical currents were measured to be 257 A and 282 A for Bx-coil and By-coil, respectively, at 20K. The AC loss was measured at 10, 15 and 21 Hz. AC loss per cycle is independent of the frequency. It is consistent with the hysteresis loss. The loss depends on the 2.4-th power of the applied current.

高温超電導スキャニング磁石の交流損失測定

1. はじめに

1986年のBednorzとMüllerによる高温超電導体の発見以来、すでに20年が経過しているが高温超電導 (HTS) 線材の応用に関してはその範囲は現在でも非常に限られている。電力伝送線や発電機等への応用開発が進められているが、未だ研究段階にある。一方、HTS線材の電磁石への応用としては、最近、高磁場NMR用磁石が製品として市場に供給され始めている。HTS線材を利用した磁石には、小型・軽量という超電導磁石共通の利点とともに、低温超電導体と比較して特に温度マージンが大きい特徴がある。超電導への転移温度と動作温度 (通常20K程度) の間に大きな余裕があるばかりでなく、動作温度付近でHTS線材の比熱が大きく、熱的安定性が高くクエンチを回避できることが期待される。

我々は、HTS電磁石を加速器関連分野に利用するべく開発研究を進めている¹⁾。HTS線材の温度マージンが大きいことは、同線材の交流磁石への応用可能性を示している。本研究では、空芯スキャニング磁石を製作し、コイル単体および磁石の交流損失を10-21Hzで測定した。損失の励磁電流値および周波数依存性を調べる。

2. スキャニング磁石

スキャニングコイルの設計に際しては、粒子線治療用ガントリーに搭載することを考慮して、以下の方針を採った。

- 粒子とエネルギーは陽子230MeVとする。 $B\rho = 2.3\text{Tm}$ である。
- コイル中心から1.25mの位置で、最大200mm角以上の照射野が得られる。
- 二方向 (x, y) の各コイル2台をビームライン上の同じ位置に設置する。
- ビームが通る空間を考慮して、2台のコイルの間隔を70mmとする。
- 中人軸から半径20mmの範囲内での磁場均一度は0.5%が必要である。

最初の条件から、コイルが発生する磁場長は0.185Tm以上が必要となる。入手可能と思われる高温超電導線材のサイズ、性能等を考慮して、コイルの断面を30mm角として磁場の数値解析を行った。また、コイルの動作温度を20Kと仮定して、Bi2223系線材の臨界電流の温度依存性から、コイル電流値を200Aとした。磁場計算に基く、コイルの概略設計を表1にまとめる。また、コイル配置を図1に示す。

¹⁾ E-mail: hatanaka@rcnp.osaka-u.ac.jp

表1. コイルの概略設計

コイル内法 (Bx-コイル)	150mm×300mm
コイル内法 (By-コイル)	150mm×380mm
コイル断面	30mm×30mm
コイル電流	200A
コイル巻数	420ターン/1台
ピーク磁束密度	0.6T以上

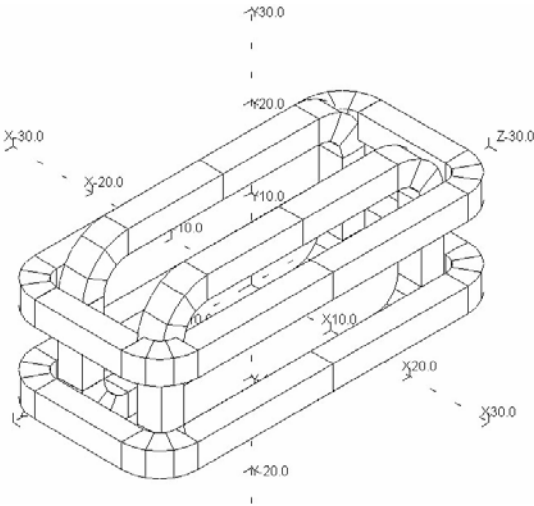


図1. スキャニング磁石のコイル配置。

使用したテープは銀マトリクス中にBi2223高温超電導体のフィラメントが挿入されており、テープ両面はステンレス薄板で補強されている。およその外寸法は幅4mm、厚さ0.4mmである。テープの77Kでの自己磁界下での臨界電流は平均140Aであった。各コイルは3個のダブルパンケーキで構成され、ダブルパンケーキ間には0.9mm厚の真鍮冷却板が挿入され、全体が積層・含浸されている。ダブルパンケーキの巻数は140ターンである。全てのダブルパンケーキの臨界電流を77Kで測定し、56-62Aであった。4台のコイルについては、77Kでの臨界電流は40-43Aが得られた。図2に、ダブルパンケーキの臨界電流測定結果の例を示す。

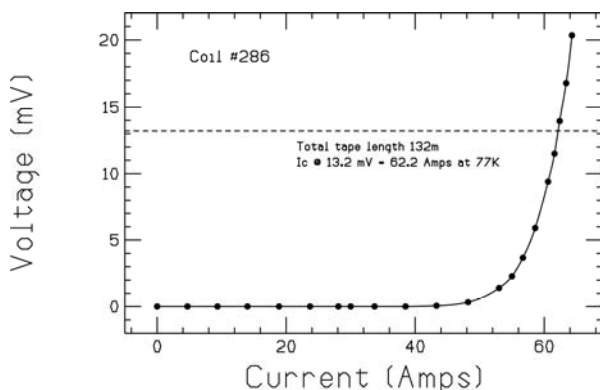


図2. ダブルパンケーキの電流－電圧測定結果。

3. 交流損失

コイル1台の巻数は420ターンである。Bx_1コイルのインダクタンスの測定値は75mHと、有限要素法からの予測値(70mH)と矛盾しない値が得られた。コイル単体の交流損失を77Kで測定した。測定回路の構成と測定結果を図3、図4に示す。

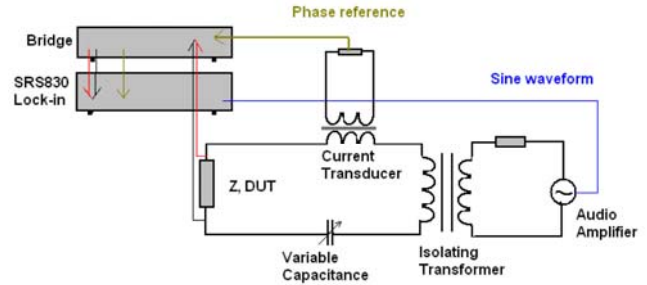


図3. コイルの交流損失測定系。DUT(Device Under Test)はBx_1コイル。

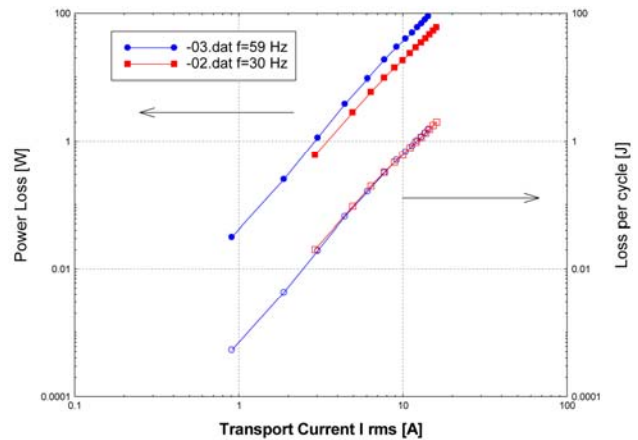


図4. Bx_1コイルの交流損失。丸印、四角印はおのおの励磁周波数30Hz、59Hzの結果。右のスケールは1サイクルあたりの交流損失。

図4から、1サイクルあたりの交流損失は励磁周波数に依存しないことがわかる。これは、ヒステリシス損失の特徴である。超電導コイルの交流損失には、ヒステリシス損失以外に結合損失、マトリクスや冷却板等の金属中での渦電流損失がある。後者二種類の1サイクルあたりでの損失は励磁周波数に比例する。今回製作したコイルではヒステリシス損失が主であることが分かる。

Bxコイル、Byコイル各2台を図1の配置に組み、クライオスタットに収納した。スキャニング磁石はCRYOMECH社製冷凍機AL330で冷却されている。AL330は20Kで45Wの冷却能力を有している。磁石は1mm厚の黄銅版熱シールドで囲われ、熱シールドはDAIKIN社製冷凍機V104SCLで冷却されている。V104SCLは80Kで53Wの冷却能力を有する。熱シールド板外側は積層断熱材20層で覆われている。冷却試験の結果を

図5に示す。冷却開始後、約10時間でコイルは超電導状態になり、約1日で20Kまで冷却される。

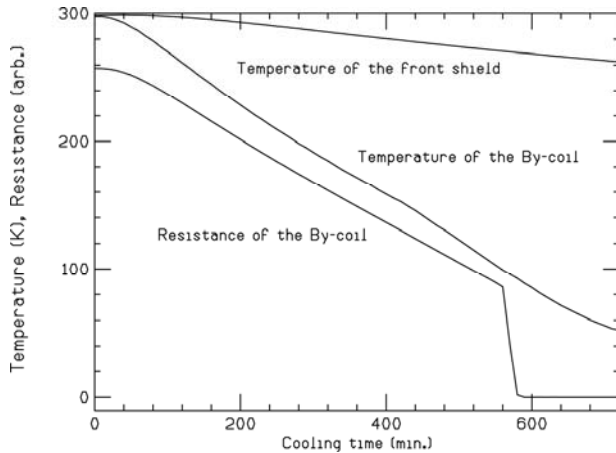


図5. 冷却開始後の熱シールド板温度、Byコイル温度、Byコイル抵抗の測定値。

Bxコイル、Byコイル各2台を直列に接続し、20Kで臨界電流を測定し、260-280Aが得られた。励磁電流100Aでの、中心軸上でのBx磁石の磁場分布を図6で計算値と比較してある。

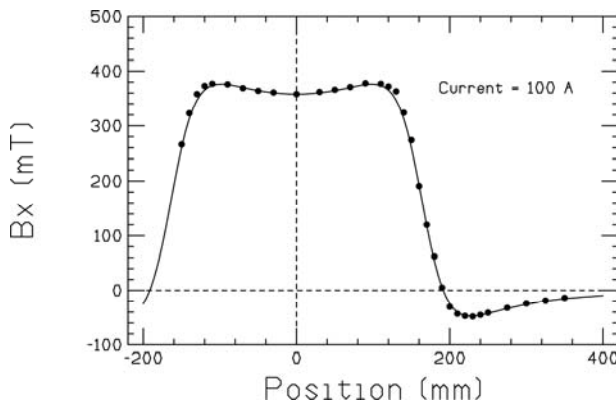


図6. 中心軸上でのBx磁石の磁場分布。励磁電流は100A。曲線はTOSCAによる三次元磁場計算結果。

Bx磁石の交流損失を電氣的に測定した。測定系の構成を図7に示す。進相コンデンサーと磁石（インダクタンス）とで直列共振回路を形成している。同

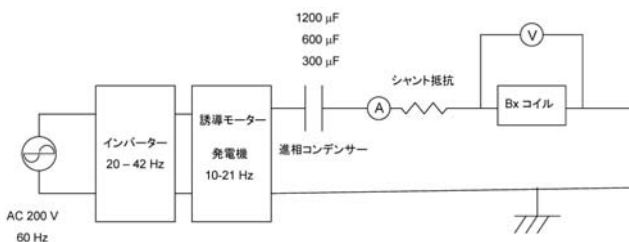


図7. Bx磁石の交流損失測定に用いた直列共振系。

調はインバーター周波数を変えて求めた。進相コンデンサーの容量が1200 μ F、600 μ F、300 μ Fで共振周波数は10.5Hz、15Hz、21Hzであり、磁石のインダクタンスは191mHであった。この値は、有限要素法による計算値200mHとよく一致している。交流損失の測定結果を図8に示す。1サイクルあたりの交流損失は周波数依存性をほとんど示さず、コイル単体の場合同様、高温超電導線のヒステリシス損失が現れていると考えられる。励磁電流に対しては2.4乗の依存性を示している。一方、解析的には3-4乗の依存性が予測されている^[2]。今後、有限要素法等の数値計算による解析を進める予定である。

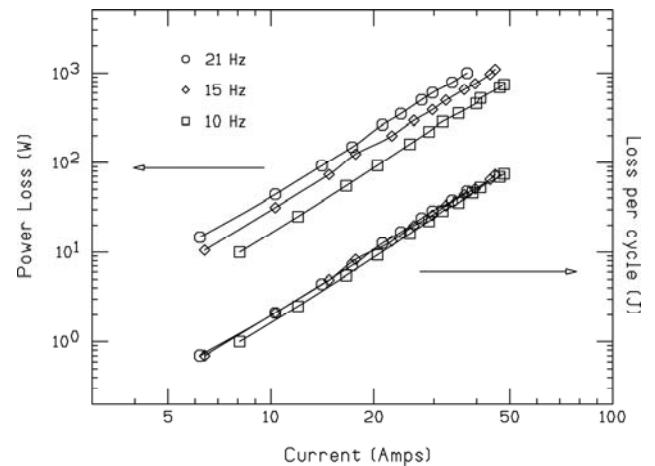


図8. Bx磁石の交流損失の周波数依存性。曲線は測定点を結んだもの。

参考文献

- [1] K. Hatanaka, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physical Research A 571 (2007) 583-587.
- [2] E.H. Brant and M. Indenbom, Physical Review B 48 (1993) 12893-12906.