

Bi2223/Ag 高温超電導テープ線材を用いた ダブルパンケーキコイルのクエンチ特性

松浦 宏行^{*1}, 石郷岡 猛^{*2}, ニノ宮 晃^{*3}

Measurement of Quench Characteristics of HTS Tape and Coil

Hiroyuki MATSUURA^{*1}, Takeshi ISHIGOHKA^{*2}, Akira NINOMIYA^{*3},

ABSTRACT : Different from low temperature superconductors, Bi-2223/Ag HTS (High Temperature Superconductor) tapes have lower “ n ” value. This characteristic brings rather “fuzzy” notification of the critical current. It depends on the cooling condition. This means that the critical current of Bi-2223/Ag tape can not be decided absolutely. Rather we should focus on the temperature rise characteristics of the coil against over-current exceeding the critical current. If the temperature of the coil keeps a finite value without thermal runaway, the coil can be used continuously. We call the uppermost current without thermal runaway as “tolerance current”. Considering the situation mentioned above, the authors have studied the temperature rise characteristics of HTS coil for both DC and AC currents. Two cooling conditions are adopted. One is a cooling by immersion in liquid nitrogen bath, and the other is a conduction cooling by GM (Gifford-McMahon) refrigerator. From the experimental result, the “tolerance current” of the Bi-2223/Ag coil for various conditions is obtained.

Keywords : High-Temperature Superconductor (HTS), Coil, Bi-2223/Ag HTS tape, critical current, tolerance current

(Received March 26, 2007)

1. はじめに

超電導機器を実電力系統で使用する場合、系統の短絡故障などにより臨界電流を超える電流が流れることが考えられる。このとき超電導機器は超電導状態から常電導状態への転移(クエンチ)が起こり、超電導機器は本来の性能を発揮できず、電力の供給が停止し電力系統の信頼性を損なってしまう。

一方、高温超電導体は金属系超電導体と比べ、臨界電流を超えて常電導電圧が発生しても熱暴走を起こさなければ継続して通電できるという長所がある。^{[1]~[5]}

そこで本論文では HTS テープ線材及び同線材を用いて作製したコイルに、冷却条件を変え、交流、ならびに

直流電流を印加したときの常電導転移特性を調べ、従来の臨界電流に加えて新たに許容電流を求めた。なお、本論文では、高温超電導体が熱暴走を起こす直前の電流を許容電流と定義した。

2. 実験方法

2.1 超電導コイル

本実験ではコイルを自作し実験を行った。実験で使用したコイルの諸元を Table I に、外観を Fig. 1 に示す。このコイルは冷凍機のコールドヘッドに取り付けて冷却し実験を行うことを考慮している。そのためコイルの巻き芯には熱伝導が良い銅円筒を用いた。また、交流磁界による渦電流を防止するため銅円筒にはスリットを入れた。コイルは巻線後エポキシで固定し、冷凍機と距離をとって配置した。

^{*1} : 工学研究科電気電子工学専攻修士学生

^{*2} : 電気電子工学専攻教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

(Professor, Dept. of Electrical and Mechanical Engineering)

^{*3} : 電気電子工学専攻助手

TABLE I
自作 HTS コイル諸元

無誘導型ダブルパンケーキコイル	
使用線材	Bi-2223/Ag
線材の臨界電流 I_c	91 [A]
巻き数(1層)	10 ターン
内径/外径	50/60 [mm]
巻芯材料	銅
使用線材長	350 [cm]
インダクタンス	0.01 [mH]

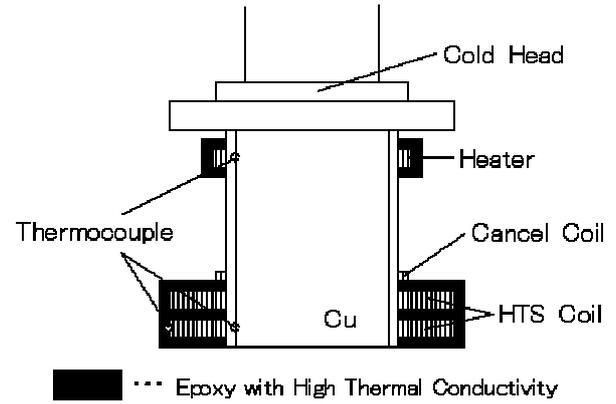


Fig. 3. 熱電対設置図



Fig. 1. コイル外観

2. 2 実験回路

Fig. 2 に実験回路を示す。実験ではこの回路に一定の直流・交流を印加し続け、タップ間で検出される電圧が一定になったところで測定を行った。

LN₂(液体窒素)中での実験ではコイルを LN₂ 浴中にすることで温度を一定に保ち、冷凍機の実験では温度ステージをヒーターと熱電対を用いて 75K 一定に保つことで行った。熱電対の設置場所を Fig. 3 に示す。

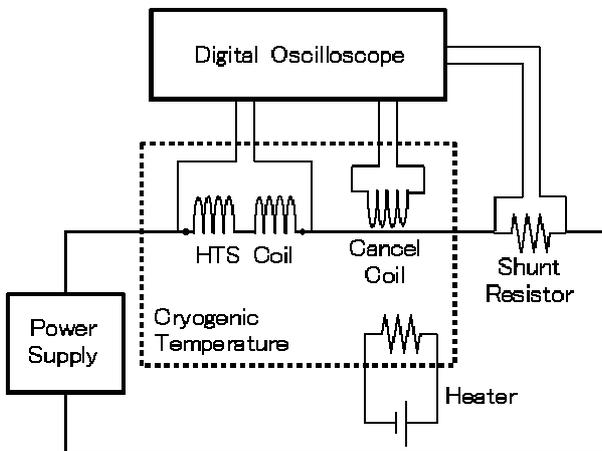


Fig. 2. 実験回路図

3. 実験及び結果

本実験では超電導コイルに電流タップ間電圧が一定になるまで実験を行った。直流・交流、LN₂・冷凍機での実験結果を次に示す。なお、実験結果は温度について議論する為常電導体から発生する電圧は消さず誘導性電圧のみを消去した。また交流での実験において発生する電流・電圧は全て実効値である。

3. 1 直流での実験結果

LN₂ 冷凍機で冷却した自作コイルに直流を印加し、定常状態時に発生する電圧と温度を測定した。それぞれの測定結果を次に示す。

3. 1. 1 LN₂ で冷却した場合

LN₂ での測定結果を Fig. 4 に示す。このとき許容電流(熱暴走直前の電流)は 75A, 測定時のコイルの温度は 80.1K であった。

またこの測定結果より、コイルの直流臨界電流は 21A, n 値は 2.7 となった。

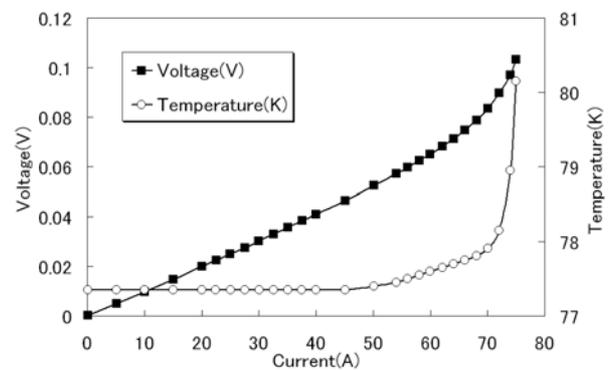


Fig. 4. 直流・LN₂での実験結果

3. 1. 2 冷凍機で冷却した場合

同様に冷凍機での測定を行った。結果を Fig. 5 に示す。このとき許容電流は 30A, コイルの温度は 84K であった。また、この測定結果より、コイルの冷凍機における直流臨界電流は 9.9A, n 値は 3.8 となった。

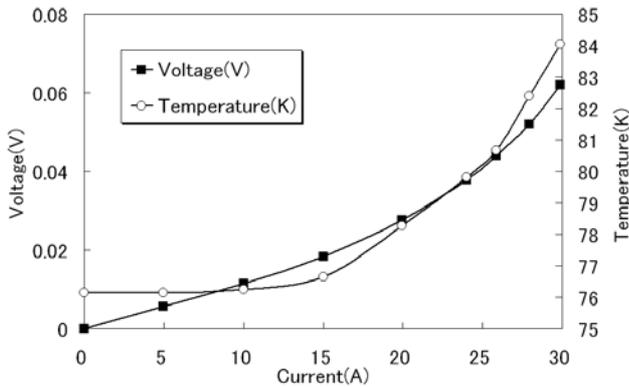


Fig. 5. 直流・冷凍機での実験結果

3. 2 交流での実験結果

同様に LN₂・冷凍機で冷却した自作コイルに交流(値は実効値)を印加し、定常状態時に発生する電圧と温度を測定した。それぞれの測定結果を次に示す。なおこの測定結果はキャンセルコイルで誘導分は除去してある。

3. 2. 1 LN₂で冷却した場合

LN₂での測定結果を Fig. 6 に示す。このとき許容電流は 60A, そのときの温度は 81.6K となった。

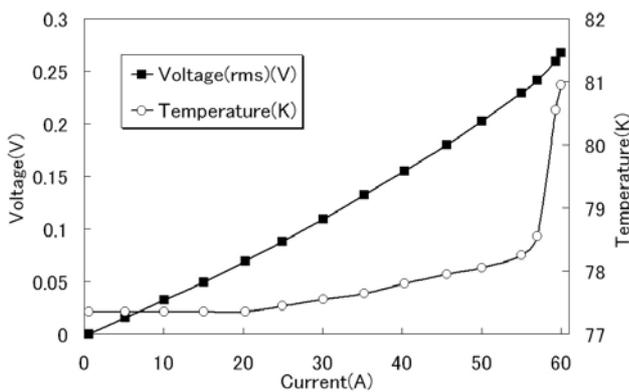


Fig. 6. 交流・LN₂での実験結果

3. 2. 2 冷凍機で冷却した場合

同様に冷凍機での測定を行った。結果を Fig. 7 に示す。測定結果より許容電流は 26A, この時コイルの温度は 86K であった。

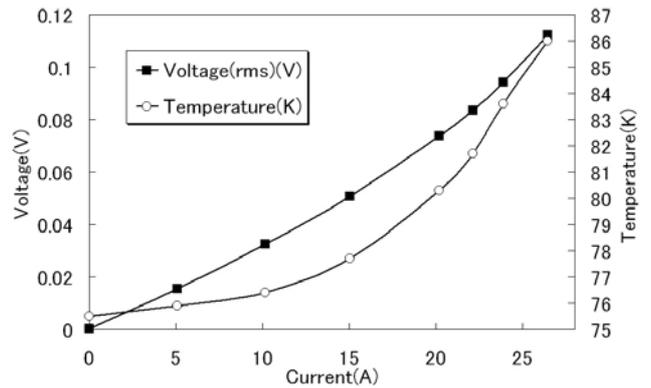


Fig. 7. 交流・冷凍機での実験結果

3. 3 熱暴走

タップ間電圧が一定にならなかった場合、コイルは熱暴走を起こし電圧・温度の急速な増加が見られた。その実験結果の例として Fig. 8 に直流冷凍機実験時における許容電流 (30A) の測定結果を、Fig. 9 に許容電流を超えた直後の印加電流(31A)の測定結果を示す。

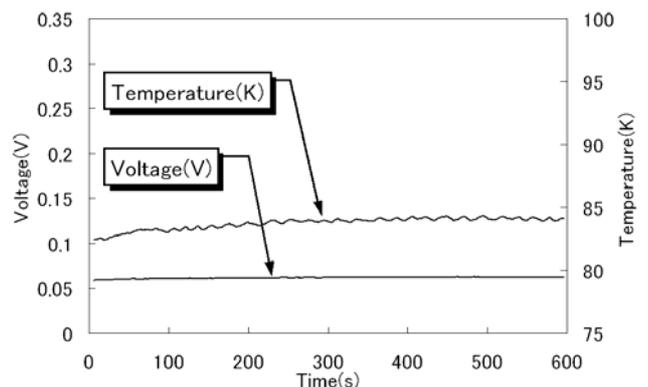


Fig. 8. 直流 30A (伝導冷却における許容電流) をコイルに印加したときの温度と電圧の変化

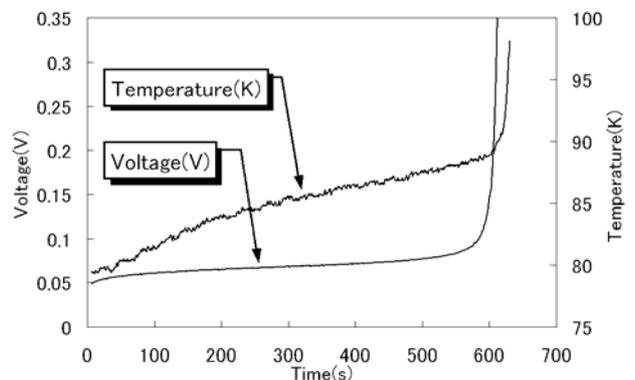


Fig. 9. 直流 31A (伝導冷却における許容電流直後) の電流をコイルに印加したときの温度と電圧の変化

4. シミュレーションについて

本研究では実際に行った実験を、有限要素法解析ソフト ANSYS を用いて解析を行った。これは数値解析による許容電流を再現し、解析によって許容電流を定めることを目指すためである。この解析では液体窒素による冷却と冷凍機による伝導冷却中でのコイルの発熱状況を調べた。

4.1 解析モデル

実験で使用したモデルは、コイルが円周方向に一様に発熱するため Fig.10 のように円筒座標系を採用して二次元の熱伝導を調べた。巻線部分は銅、エポキシ、カプトンテープ、超電導テープ線材からなっているが、本研究ではコイル部分の一つの材料として考えた。

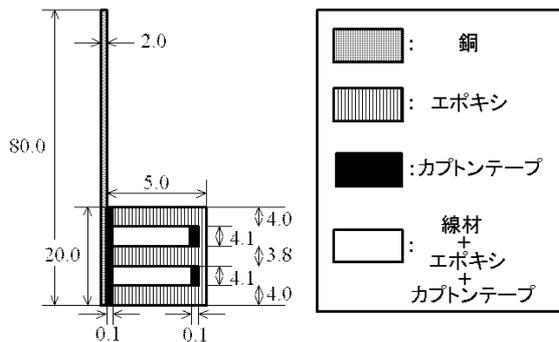


Fig. 10. 模擬モデル概略図

4.2 入力条件

各素材の熱伝導率は TABLE II のように設定した。ここで線材+カプトンテープ+エポキシの部分はコイルの巻き数が 10 ターン、カプトンテープの巻き数が 9 ターン、残りはエポキシであることを計算して設定した。

冷却条件は液体窒素中にコイルを入れて冷却する方法と冷凍機による伝導冷却の二つを模擬した。液体窒素を用いるシミュレーションではモデル図の混合部を除く全周囲を 77.3 K で一定とし、冷凍機を用いるシミュレーションでは縦長の銅筒の上辺だけが 76 K で一定を維持しているものとした。

TABLE II
各素材の熱伝導率

銅	0.401 [W/mmK]
エポキシ	0.0015 [W/mmK]
カプトンテープ	0.0008 [W/mmK]
線材+カプトンテープ+エポキシ	0.12815 [W/mmK]

1/mm³ 当たりの発熱 W [W/mm³] は次のように求めた。

印加電流 I [A], そのときのタップ間電圧 V [V], コイル内径 50.2mm, 外径 58mm, 厚さ 3.9mm である。この条件より単位体積あたりの発熱 W [W/mm³] は

$$W = (\text{コイル全体の発熱}) \times (\text{コイルの体積}) \\ = (I \cdot V) / 5303 \quad [\text{W/mm}^3]$$

ここでコイル全体の発熱を求める際の電圧 V と電流 I は、液体窒素中でのコイルの臨界電流のグラフにおける電流と発生電圧特性から求めた。コイルの V - I 特性グラフを Fig.11 に示す。

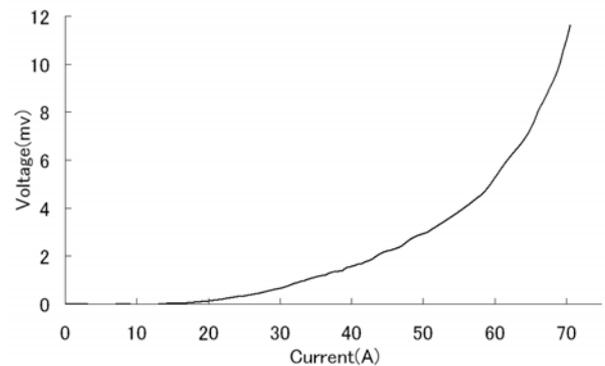


Fig. 11. LN₂ 温度におけるコイルの V - I 特性

4.3 解析結果

この計算で得たコイルの V - I 特性の理論値と実測値の比較を行った。液体窒素冷却、冷凍機伝導冷却の両方について、理論値と実測値を比較したものを、それぞれ Fig.12, および Fig.13 に示す。

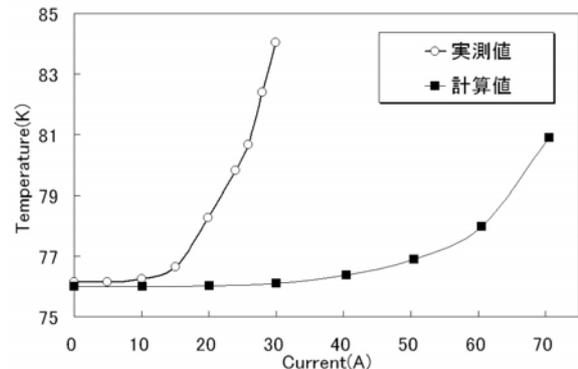


Fig. 12. LN₂ 冷却における実測値と計算値の比較 (直流時)

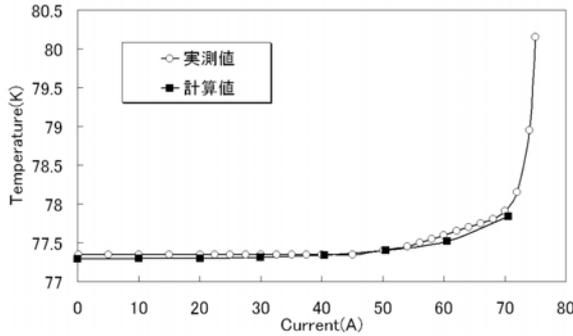


Fig. 13. 伝導冷却における実測値と計算値の比較 (直流時)

液体窒素冷却の場合、実測値と計算値は、傾向としては一致しているが、かなりの差がある。これは、線材+カプトンテープ+エポキシの複合層の材料定数の設定の不正確さによるものと思われる。

5. 考察

5.1 直流・交流の比較

実験結果より LN₂・冷凍機での場合の両方で、直流より交流(実効値)を印加するほうが熱暴走を早く起こすことがわかった。これは波高値で発生する熱に対し冷却が間に合わない為だと思われる。そのため直流より交流のほうがわずかながら熱暴走温度が高い。

5.2 LN₂・冷凍機の比較

実験結果より、LN₂で冷却した方が冷凍機で冷却を行った場合より熱暴走を発生する電流が高いが、一旦熱暴走が始まると、急激に温度が上昇することがわかった。これは冷凍機の冷却能力が LN₂ よりも低く、また LN₂ が一定の温度を超えると核沸騰から膜沸騰になり冷却能力が低下するためだと思われる。そのため LN₂ では抵抗が直線的に増加しているにもかかわらず、ある時点から温度が急速に増加することを確認できた。

これにより冷凍機の冷却能力の向上やコイルと冷凍機の熱交換を増加させることで LN₂ 浴中よりも超電導体をより安全に使用する使用環境を作れる可能性がある。

5.3 定格電流について

実験より HTS コイルの許容電流は冷却方法に依存していることがわかる。実用の観点ではコイル定格電流は「許容電流」のおよそ 70%であるべきである。そこで、実験結果より Table III に様々な使用条件におけるコイル定格電流をまとめる。

TABLE III
自作 HTS コイルの定格電流

交直の別と冷却方式	許容電流 [A]	定格電流
直流, 液体窒素冷却	75	53
直流, 冷凍機伝導冷却	30	21
交流, 液体窒素冷却	60	42
交流, 冷凍機伝導冷却	26	18

6. まとめ

Bi-2223/Ag テープ線材で無誘導型ダブルパンケーキコイルを作製し、LN₂・冷凍機での冷却条件における直流・交流印加時の熱暴走特性について調べ許容電流を得た。その結果以下の結論を得た。

- 1) 冷凍機で超電導テープ線材を使用する場合、定格電流は冷媒の冷却能力に依存する。
- 2) 交流(実効値)電流の許容電流は直流電流より低い。
- 3) 液体窒素冷却における許容電流は冷凍機による伝導冷却の場合より高い。
- 4) HTS コイルの定格電流は、印加電流の波形や様々な冷却条件によって定められる許容電流を考慮して決められるべきである。

実用的な観点から、今後高温超電導コイルの定格電流と許容電流の関係を研究する必要がある。

参考文献

- [1] I. Tanaka, H. Miyazaki, M. Iwakuma, K. Funaki, H. Hayashi, and A. Tomioka, "Heat Characteristics of a Cryocooler-Cooled Oxide Superconducting Pulsed Coil", *Abstracts of Cryogenic Society of Japan Conference*, Vol.72, Paper No.2E-p35, June 2005.
- [2] S. Chigusa, I. Tanaka, T. Miyazaki, M. Iwakuma, K. Funaki, H. Hayashi, and A. Tomioka, "Thermal Analysis of a Cryocooler-Cooled Bi2223 Superconducting Pulsed Coil (1)", *Abstracts of Cryogenic Society of Japan Conference*, Vol.73, Paper No.1D-p01, Nov. 2005.
- [3] I. Tanaka, S. Chigusa, T. Miyazaki, M. Iwakuma, K. Funaki, H. Hayashi, and A. Tomioka, "Thermal Analysis of a Cryocooler-Cooled Bi2223 Superconducting Pulsed Coil (2)", *Abstracts of Cryogenic Society of Japan Conference*, Vol.73, Paper No.1D-p02, Nov. 2005.
- [4] S. Chigusa, M. Iwakuma, K. Funaki, H. Hayashi, and A. Tomioka, "Thermal Analysis of a Cryocooler-Cooled Bi2223 Superconducting Pulsed Coil", *Abstracts of*

Cryogenic Society of Japan Conference, Vol.74, Paper No.2P-p29, May 2005.

- [5] A. Kawagoe, H. Yamamuro, F. Sumiyoshi, T. Mito, H. Chikaraishi, T. Baba, M. Yokota, Y. Morita, H. Ogawa, T. Hemmi, K. Okumura, R. Abe, and M. Iwakuma, “Heat Transfer Properties of a Conduction Cooled Prototype LTS Pulse Coil for UPS-SMES”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.16, No.2, pp.624-627, June 2006.