

伝導冷却バルク超電導体のパルス着磁に関する数値解析

56209 河本 哲

(指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words : PFM, Bulk superconductor, Trapped field, Temperature rise

1. はじめに

バルク超電導体は、ピン止め力により磁界を捕捉することができ、磁気浮上や磁気軸受、DDS(Drug Delivery System)や磁気分離装置といった応用に非常に注目されている。

バルク超電導体を着磁する技術として、磁界を準静的に除去する磁界中冷却法(FC)とパルス磁界を印加するパルス着磁法がある。

磁界中冷却法とは、強磁界中にバルク超電導体を設置し冷却することで着磁し、その後準静的に磁界を除去する方法である。この方法は、捕捉される磁界が大きい反面、超電導コイルにより着磁を行うため、システム全体の大型を招く。

パルス着磁法は、バルク超電導体にパルス磁界を印加し、磁束を捕捉させる手法である。パルス着磁法は磁界中冷却法に比べて捕捉磁界が小さくなるが、常電導のコイルを用いてパルス磁界を印加するので、機器全体の小型化を図ることが可能となる。

2. 伝導冷却によるパルス着磁

バルク超電導体を冷却する方法として、浸漬冷却と伝導冷却があるが、機器への搭載および任意温度への制御を考慮した際、冷媒を用いない伝導冷却は応用上のメリットがある。

しかし、着磁過程における詳細な電磁現象は明確ではなく、さらに効率のよい着磁を行うためにはパルス着磁における複雑な過渡電磁現象および熱現象を明らかにする必要がある。

3. 解析手法

3-1 支配方程式

パルス着磁過程における過渡現象を解析する手法として、有限要素法による軸対称モデルの解析を行う。

ベクトルポテンシャルを A とし、磁気抵抗率を ν とし、超電導体の電流密度を J_{sc} とすると、(1)式のような支配方程式が得られる。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_{sc} \quad (1)$$

また、 ρ を密度、 c を比熱、 κ_{ab} 、 κ_c をそれぞれ ab 平面内および c 軸方向の熱伝導率、 Q を発熱率とすると、軸対称系の熱伝導方程式は次式ようになる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa_{ab} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_c r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + Q \quad (2)$$

ここで、発熱率は、 $Q = JE$ で与えられる。

3-2 超電導体の特性

高温超電導体の電圧-電流特性を近似するモデルとして、(3)式で表される n 値モデルを用いている。

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (3)$$

ここで、 J_c は臨界電流密度を表し、 E_c は電流密度が J_c に等しくなるときの基準電界、 n の値は、常電導転移の急峻さを表す値である。本解析では基準電界の値を $E_c = 1.0 \times 10^{-6}$ V/mとし、 $n = 8$ としている。

さらに、超電導体の臨界電流密度は、磁界依存性と温度依存性を持つ。磁界依存性は、式(4)で示されるKimモデルに従うとし、温度依存性は式(5)に従うものとする。

$$J_c = J_{c0} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad (4)$$

$$J_{c0}(T) = \alpha \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

また、本解析では、 $B_0 = 0.4$ T、 $T_{c0} = 92.0$ Kとする。

3-3 解析モデル

解析対象のモデルは、図1に示される軸対称モデルを用い、印加するパルス波形は、図2に示すように、磁界の上昇過程は正弦波、減衰過程は指数関数的に減衰する。

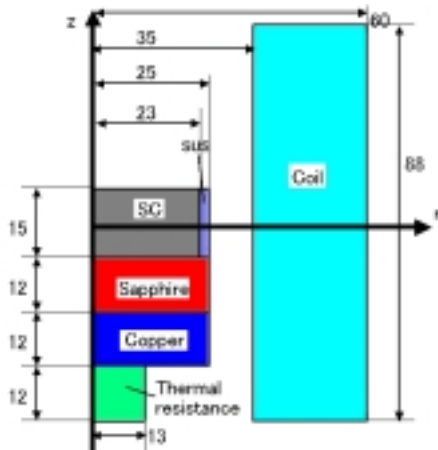


図1 解析モデル(単位:[mm])

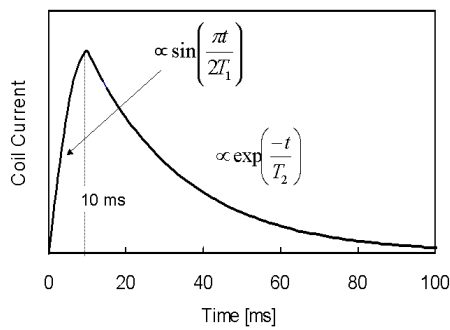


図2 印加するパルス波形

4. 2回パルス磁界を印加した場合の解析結果

40 Kにおいて $J_{c0} = 1.14 \times 10^{10}$ A/mとなるバルクに予め65 Kの条件下において図3に示すような磁界を印加しておく。印加した磁界が弱ければ磁束は内部まで侵入していないことが分かる。

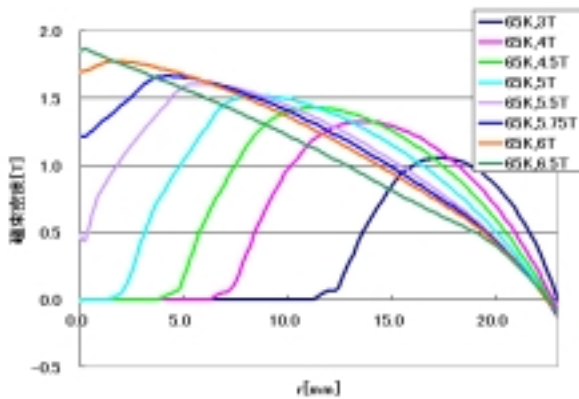


図3 初期捕捉磁界

予め図3のような初期捕捉磁界を形成しておいて40 Kの下で9.5 Tの磁界を印加した。

バルク表面中心の磁束密度と、着磁過程の最大温度を図4に示す。

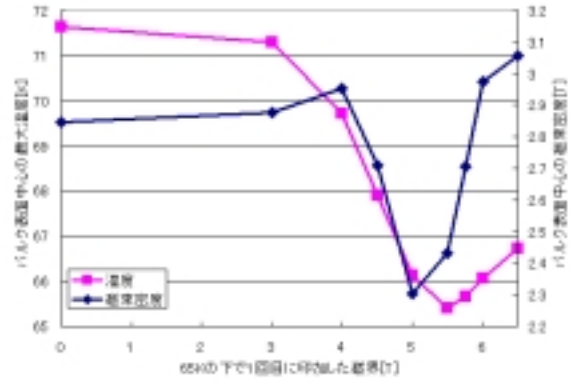


図4 バルク表面中心の磁束密度と最大温度

図4を見ると初期の捕捉磁界が中心から離れた位置で大きくなるようなM字型を取った場合、温度上昇幅が小さく、磁束が侵入しにくいことが分かる。

また、図5に2回目のパルスとして10.0 Tを印加した場合のバルク表面の磁束密度を示す。磁束が内部まで入り込む場合は、温度上昇幅の小さい方が捕捉磁界特性が良くなる。

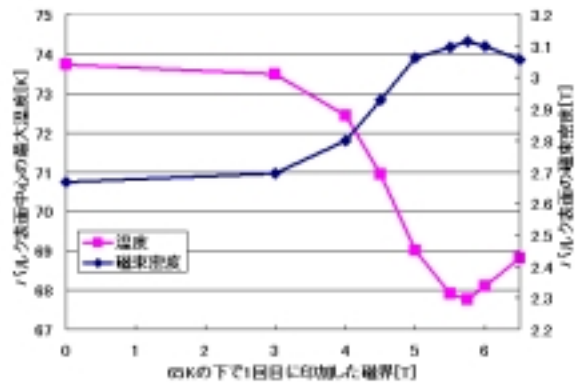


図5 バルク表面中心の磁束密度

5. まとめ

伝導冷却条件下におけるバルク超導体のパルス着磁過程の数値解析プログラムを開発した。

1回目のパルスにおいてM字型の初期捕捉磁界を形成しておく、2回目のパルスを印加した際の温度上昇幅が小さくなり、臨界電流密度の低下を軽減することが可能であることが分かった。

今後は、臨界電流密度や発熱率の過渡変化を解析することで、より効果的な着磁方法を探索することが求められる。

5. 参考文献

[1] Hiroyuki Fujishiro, Takuya Hiyama, Tatsuya Tateiwa, Yosuke Yanagi, Tetsuo Oka, "Importance of initial "M-shaped" field profile in a two-stage pulse field magnetization(MMPSC) method", BL-10/ISS 2006.
 [2] K.Yokoyama, M.Kaneyama, T.Oka, H.Fujishiro, K.Noto, "Temperature measurement of RE123 bulk superconductors on magnetizing process", Physica C, 412-414 (2004), p.688-694.