

パルス着磁による新しい超伝導バルク磁石の開発

材料物性工学専攻 池部研究室 藤原 篤

1. はじめに

バルク超伝導体の応用の 1 つとして、超強力磁石(超伝導バルク磁石)がある。パルス着磁(PFM)法で超伝導バルク磁石を実現する場合、通常は円盤状バルク底面を冷凍機の cold stage に接触させて c 軸方向に冷却し、ソレノイド型のパルスコイルで着磁する方法が用いられてきた("c-axis cooled type")。この配置ではバルクを 1 個しか冷却できず、しかもバルク磁石の磁極も 1 方向しか利用できなかった。将来の磁気分離などへの応用を積極的に推進するには、複数個のバルクを PFM 法により着磁する技術の開発が必要不可欠であると考え、本研究では複数個のバルクを縦に配置し、バルクを ab 面方向から冷却する新しいタイプの超伝導バルク磁石を作製した("ab-plane cooled type")。このタイプのバルク磁石はスプリット型のパルスコイルを用いてバルクの c 軸方向に磁場を印加した。バルク超伝導体は RE123 超伝導相の疑似単結晶であり、側面(ab 面方向)の熱伝導率は底面(c 軸方向)の熱伝導率に比べ、低温で約 3 倍大きい。そのため"ab-plane cooled type"は"c-axis cooled type"に比べて、冷却時間の短縮と PFM による発熱を放熱させる能力の向上が期待できる。さらに、バルクの両面(N 極、S 極)を自由空間に配置することが出来るため、今までにない応用の可能性を持っており、バルクの個数を増加させ、列状または面上に配置したマルチバルク磁石を超伝導マグネットなしに着磁できる可能性を秘めている。このシステムを実現するには、パルスコイルの最適化、バルク冷却システムの最適化の問題の解決が必要と考え、検討を行った。

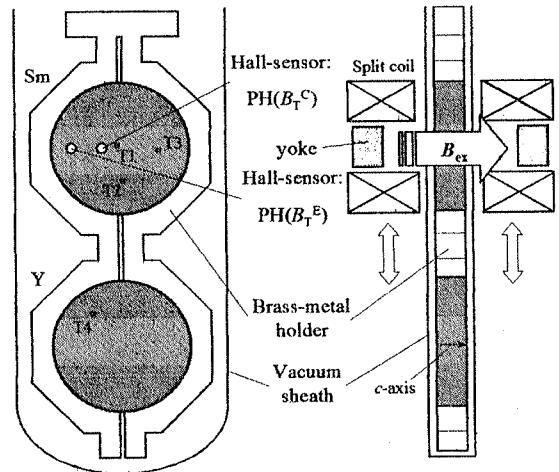


Fig. 1 2連型バルク磁石の概略図

2. 実験方法

Fig. 1 にバルクに熱電対と Hall sensor をセットした冷凍機支持部の概略図及びスプリットパルスコイル使用時の概略図を示す。使用したバルクは直径 45 mm、厚さ 15 mm の Sm 系バルク (Sm123: Sm211=1.0:0.3) と Y 系バルク (Y123: Y211=1.0:0.4) である。この 2 つのバルクを真鍮部材で締め付けて、伝導冷却した。PFM 中の温度 T と磁場 B_T はバルク表面の 4 地点 ($T1 \sim T4$) に極細熱電対を、Sm 系バルクの中心 (center) と端 (edge) に Hall sensor を貼り付けて、モニタした。また、真空容器表面の捕捉磁場分布 B_T^{4mm} も axial-type の Hall sensor を用いて測定した。バルクを温度 $T_s=50$ K に冷却し、パルス磁場 ($B_{ex}=3.6 \sim 6.4$ T) をバルクの c 軸方向に複数回印加して PFM 実験を行った。比較のために "c-axis cooled type" でも同じ条件で実験を行った。

3. 実験結果

Fig. 2(a) に Sm 系バルクにパルス磁場 $B_{ex}=3.6 \sim 6.4$ T を 1 発印加したときの $T1$ での温度上昇 ΔT と印加磁場 B_{ex} の関係を示す。比較として載せている "c-axis cooled type" よりも、本研究の "ab-plane cooled type" の方が着磁の際に温度上昇が抑制されていることが確認できる。Fig. 2(b) は center での

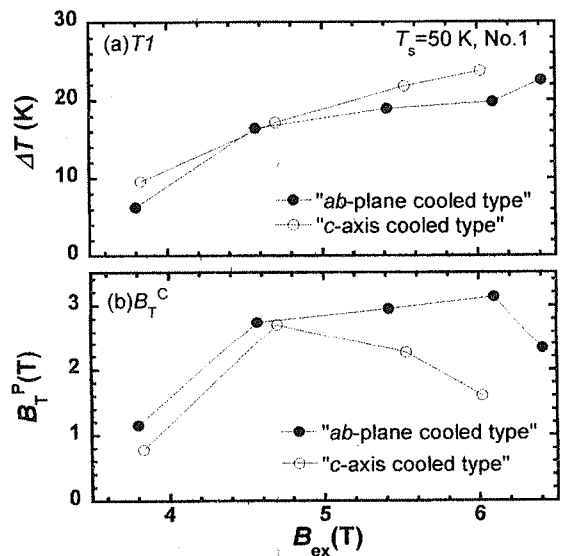


Fig. 2 温度上昇 ΔT 及び捕捉磁場 B_T^P と印加磁場 B_{ex} の関係 (a) ΔT (b) B_T^P

捕捉磁場 B_T^P と印加磁場 B_{ex} の関係を示す。

"ab-plane cooled type"は B_T^P が最大となる B_{ex} が高磁場側にシフトしており、捕捉特性が全体的に向上していることがわかる。Fig. 3は $T_s=50$ Kにし、Sm系バルクにパルス磁場 $B_{ex}=6.1$ Tを2発、Y系バルクに $B_{ex}=5.4$ Tを1発印加した後の真空容器表面での捕捉磁場分布 B_T^{4mm} の Line scanの結果である。Line scansは各バルクの中心を通るように行った。図中の"front"はHall sensorを貼り付けた側、"back"は逆側を示している。Sm系バルク、Y系バルクの表裏共にコーン型の磁場分布となっているのがわかる。Sm系バルクにおいて真空容器表面で最大捕捉磁場 2.0 Tを確認した。

4. 伝熱シミュレーションによる考察

"ab-plane cooled type"は"c-axis cooled type"と比較すると、着磁の際の温度上昇が抑制され、捕捉磁場が向上するが、さらに、Fig. 4に示すように、温度変化の時間依存性 $T(t)$ も違っている。そこで、熱伝導解析を行い、発熱現象をより詳しく検討した。解析ソフトは(株)フォトンの PHOTO-series THERMOを使用した。Table. 1に解析に使用したパラメータを示す。ここで、 T_s , R , V_Q , q , Q_{ex} , Q_{si} はそれぞれ、設定温度、接触熱抵抗、発熱体積、発熱量仕事率、実験から求めた総発熱量、シミュレーションから求めた総発熱量を示している。また、"ab-plane cooled type"、"c-axis cooled type"ともに発熱源はバルク体内部である。

Fig. 5に熱伝導解析の結果を示す。物性値や発熱領域を変化させることで、実験の再現が可能となった。シミュレーションによって計算した総発熱量は"c-axis cooled type"で $Q_{si}=533$ J、"ab-plane cooled type"で $Q_{si}=487$ Jとなり、 Q_{ex} とほぼ等しい結果となった。また、この解析から"c-axis cooled type"ではバルク体内で周辺部を中心として局所的に大きな発熱が、"ab-plane cooled type"ではバルク体内部の広範囲で小さな発熱が起こっていることがわかった。さらに、立下りの振る舞いから、真鍮部材への熱の逃げが効果的に存在していることも確認できた。

5. 結論

Sm系バルク、Y系バルクの真空容器表面で最大捕捉磁場 2.0 Tを発生できるバルク磁石を開発した。また、2つのタイプの着磁の際の発熱メカニズムに違いがあり、"ab-plane cooled type"ではバルク体内の広範囲で小さい発熱が生じていることがわかった。さらに、真鍮部材による熱はけ性の向上も存在し、これらの要因が温度上昇の抑制の原因であると考えられる。以上の結果から、"ab-plane cooled type"は非常に有用であると言える。

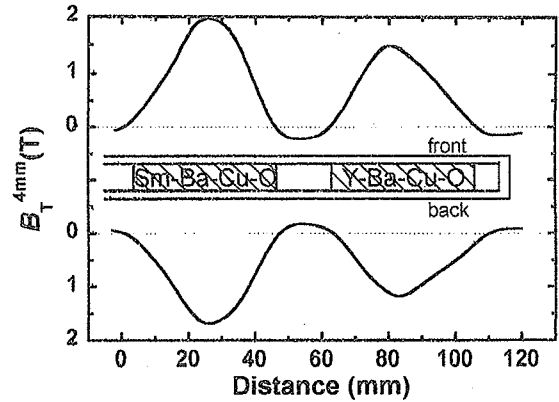


Fig. 3 Line scanの結果

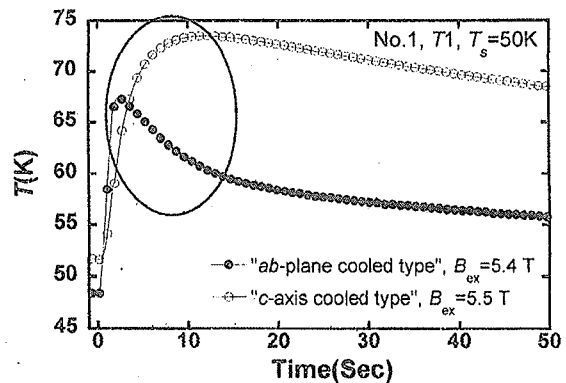


Fig. 4 "ab-plane cooled type"と "c-axis cooled type"の $T(t)$ の測定結果

Table. 1 解析に使用した物性値

	c-axis cooled type	ab-plane cooled type
T_s (K)	50(バルク周辺)	50(バルク底面)
R (W/m/K)	$1.35 \cdot 10^{-2}$ (バルク周辺)	$1.31 \cdot 10^{-2}$ (バルク底面)
V_Q (m ³)	$1.79 \cdot 10^{-5}$	$1.84 \cdot 10^{-5}$
q (W)	$1.5 \cdot 10^4$	$9.2 \cdot 10^3$
Q_{ex} (J)	517.09	439.79
Q_{si} (J)	533.14	487.49

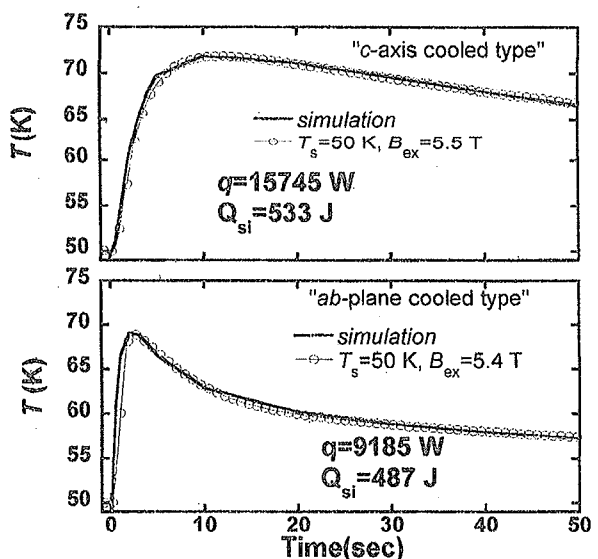


Fig. 6 熱伝導解析の結果