

超電導バルクの着磁現象とその応用に関する研究

平成 28 年度入学 藤代・内藤研究室 22216017 高橋 圭太

1. 序論

REBaCuO 高温超電導バルク(RE : 希土類あるいはY)の臨界電流密度 $J_c(B, T)$ 特性は、ピン止め点の導入や結晶成長技術の進展により向上を続けている。超電導体の電気抵抗がゼロという特徴から、バルクを磁場中冷却着磁(FCM)によって着磁することにより、小型でありながら数テスラ級の強力な磁場発生源である擬似永久磁石(TFM)としての応用が期待される。これら TFM では、バルクの“磁束ピン止め効果”を利用しておらず、着磁に要した印加磁場と同程度の磁場しか捕捉させることができない。また、着磁のために大型のマグネットを要し、高磁場を利用できる施設には限りがあるという課題がある。

一方で、超電導体のもう一つの特徴である“反磁界効果”を利用したバルク磁気レンズは、転移温度 T_c 以下の零磁場中着磁(ZFCM)において、着磁コイルが生み出す磁場を収束させることで、印加磁場より大きな収束磁場を発生させることができるとして研究が行われてきた^[1]。しかし、その磁気収束効果は印加磁場を掃引した後で消失してしまうため、着磁コイルの継続的な運転が必要であり、この場合には多くのエネルギー消費を伴うという課題がある。

本研究では、超電導バルク円筒とバルク磁気レンズから構成されるハイブリッド磁気収束型超電導バルク磁石(HTFML)の新しいコンセプトを提案する。デバイスの有効性と着磁効率について、着磁シミュレーションにより”case-1”: MgB₂円筒と GdBaCuO レンズ、また、”case-2”: GdBaCuO 円筒と GdBaCuO レンズの 2 つの場合に対し検証する。この HTFML では、TFM が供給する捕捉磁場や着磁コイルによる印加磁場よりも大きな磁場を収束磁場として永続的に発生させることができる。

2. 解析モデルと着磁プロセス

”case-1”における 3 次元解析モデルの概略図と各構成要素の寸法を Fig. 1 に示す。MgB₂円筒($T_c = 39$ K)と GdBaCuO レンズ($T_c = 92$ K)により HTFML を構成し、外側に配置したソレノイドコイルによって磁場を印加する。着磁過程の誘導現象は基礎方程式により記述するとし、要したパラメータの詳細はここでは省略する^[2]。HTFML を立ち上げるための着磁プロセスを以下の(1)～(4)のシーケンスに従って解説する。

- (1)予冷：装置を 40 K (< 92 K)まで冷却する。GdBaCuO レンズのみが転移した状態で保持する。
- (2)増磁過程：外部磁場 B_{ex} を昇磁し、最大値 B_{app} まで上げる。ここでは、GdBaCuO レンズの ZFCM を行う。
- (3)本冷：装置を 20 K (< 39 K)まで冷却する。磁場が侵入した状態の MgB₂ 円筒を転移させる。
- (4)減磁過程： B_{ex} を減磁し、0 T まで掃引する。ここでは、MgB₂ 円筒の FCM を行い、TFM として励起する。

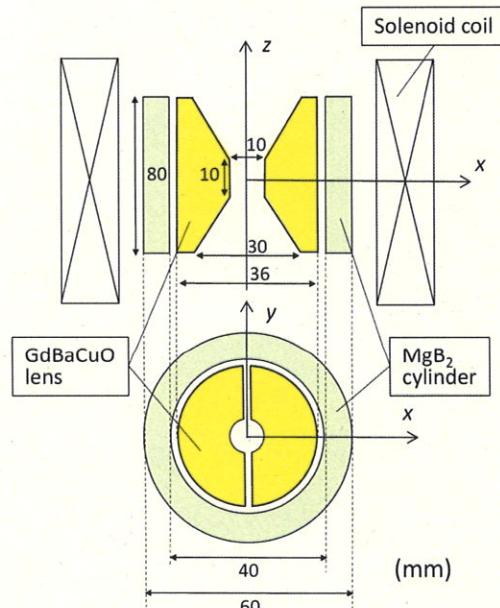


Figure 1. 解析モデルの概略図と寸法

3. 解析結果と議論

Figure 2 に印加磁場 $B_{app} = 3$ T のときの HTFML 中心の磁場分布のステップ依存性を(a)増磁過程と(b)減磁過程について各々示す。Figure 2(a)の増磁過程(Step 0~5)にかけては、外部磁場 B_{ex} がレンズ中心($r = 0$ mm)において“反磁界効果”により収束され収束磁場 B_c となり、 B_{ex} の増加と共に増大している。印加磁場が比較的小小さく、レンズの領域($r = \pm 5\sim 18$ mm)において ZFCM による磁束の侵入はわずかである。バルクのレンズ効果を維持するためには、ここで磁束侵入の抑制が重要である。Figure 2(b)の減磁過程(Step 5~10)にかけては、レンズの ZFCM 中に MgB₂ 円筒の FCM を含んでおり、 B_{ex} の減少と共に B_c も減少しているが、磁場の掃引の後で安定し TFM として励起された MgB₂ 円筒に磁場が捕捉されている。その結果、レンズ中心の収束磁場は Step 10 で $B_c = 4.73$ T となり、“ピン止め効果”と“反磁性効果”的組み合わせにより高磁場の発生を実現している。

Figure 3 にレンズ中心における収束磁場 B_c の外部磁場 B_{ex} 依存性を Fig. 2 より引用して示す。また、MgB₂ 円筒のみを用いた場合の FCM による捕捉磁場を同図に示す。MgB₂ 円筒のみを用いた場合、昇磁過程において B_T の値は B_{ex} と同等であり、Step 5 で最大値 $B_{app} = 3$ T をとる。Step 10 では $B_T = 2.85$ T であり、3 T は MgB₂ 円筒を 20 K でフル着磁するために合理的な値であると言える。GdBaCuO レンズを組み合わせた HTFML の場合には、レンズ中心における B_c は、遮蔽効果により Step 5 で $B_c = 6.10$ T まで増大した後、Step 10 で $B_c = 4.73$ T で飽和しており、着磁コイルによる B_{app} や MgB₂ による B_T より高い値となっている。この結果は本論で提案する HTFML の優位性を示唆している。

4. 結論

超電導バルク円筒とバルク磁気レンズから構成されるハイブリッド磁気収束型超電導バルク磁石(HTFML)の新しいコンセプトを提案し、その優位性を報告した。“case-1”的場合、 $B_{app} = 3$ T の着磁で、レンズ中心において $B_c = 4.73$ T を得た。“case-2”では、GdBaCuO 円筒の高い J_c 特性により、 $B_{app} = 10$ T の着磁で $B_c = 13.49$ T を達成しており、更なる捕捉磁場の向上が期待できる。

参考文献

- [1] Zhang Z Y, Matsumoto S, Teranishi R and Kiyoshi T, *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 115012 (2012).
- [2] Takahashi K, Fujishiro H and Ainslie M D, submitted to *Supercond. Sci. Technol.*, (2017).

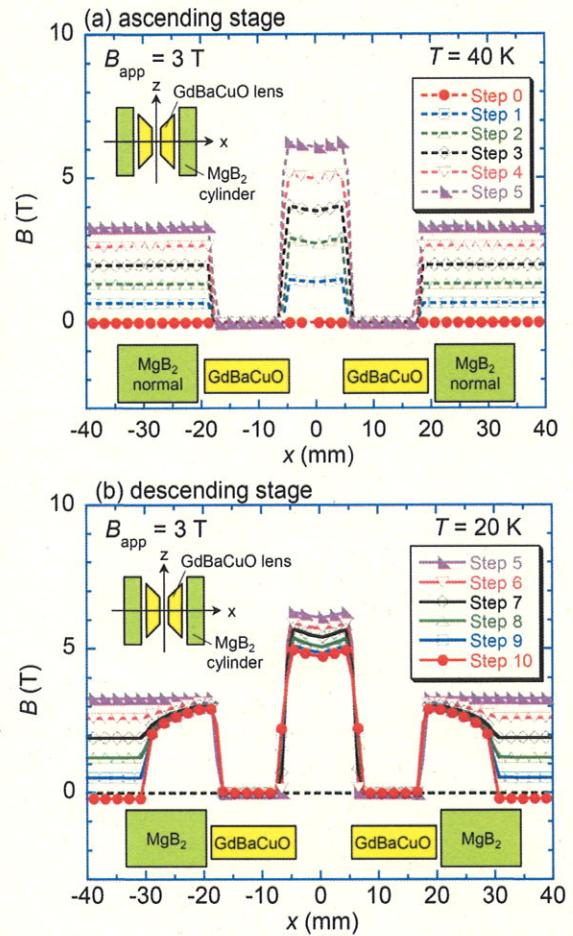


Figure 2. 磁場分布のステップ依存性
(a) 増磁過程、(b) 減磁過程

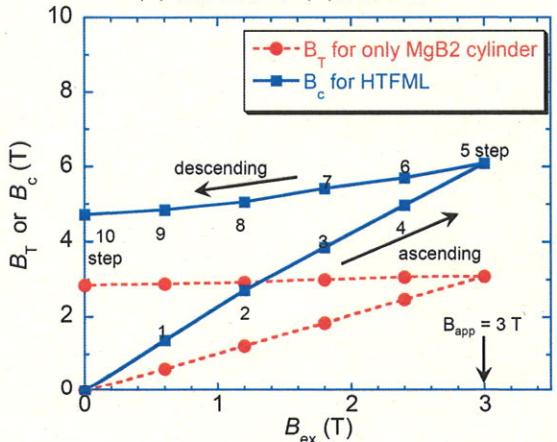


Figure 3. レンズ中心における収束磁場 B_c 及び捕捉磁場 B_T の外部磁場 B_{ex} 依存性