

# ハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ(HTFML)の実現と高性能化に関する研究

藤代・内藤研究室 G0318128 難波空

## 1. Introduction

REBaCuO 系(RE : 希土類元素あるいはY)やMgB<sub>2</sub>超電導バルクは「磁束ピン止め効果」を利用してバルク体に捕捉し、擬似永久磁石(Trapped Field Magnet: TFM)として利用できる。TFMは小型かつ強力な磁場発生源として核磁気共鳴(NMR)装置や小型モーターなどへの応用研究が行われている。また、超電導の「磁気シールド効果」を利用したバルク磁気レンズは超電導コイルマグネットが発生する外部磁場をレンズ中心に収束し、外部磁場の2倍程度高い磁場を発生することができる。しかし、外部磁場がゼロの場合は磁気レンズ内の収束磁場もゼロとなる。

そこで、当研究室では超電導バルク磁石と磁気レンズを組み合わせたハイブリッド型バルク磁石レンズ(HTFML)のコンセプトをシミュレーションにより提案した[1]。これは超電導バルク磁石が捕捉した磁場を磁気レンズが収束することで、外部磁場ゼロの状態でバルク磁石の発生磁場より大きな磁場を持続的に発生できる。HTFMLは超電導バルクを用いたあらゆる応用において発生磁場増大に大きく貢献する可能性を秘めた新しいデバイスである。

本研究では MgB<sub>2</sub>バルク磁石円筒( $T_c = 39$  K)と GdBaCuO バルク磁気レンズ( $T_c \sim 90$  K)で構成した HTFML の実証実験を行い、HTFML の実現可能性を明らかにすることを目的とした。

## 2. Experimental setup and magnetizing procedure

図1にHTFMLの構成を示す。外径60 mm、内径40 mm、高さ60 mmのMgB<sub>2</sub>バルク円筒(E.P.C. S.R.L., Italy)をバルク磁石として用いた。GdBaCuO磁気レンズは2つのGdBaCuOバルク円筒(日本製鐵)を有限要素シミュレーションで決定した最適形状[2]に加工して作製した。着磁中に生じる電磁応力によるバルクの破壊を防ぐため、それぞれステンレス鋼で補強した。温度はMgB<sub>2</sub>バルク上とGdBaCuOバルクのステンレス製治具上で、それぞれセルノックス抵抗温度計により測定した。HTFML中心の磁場をホールセンサで測定した。

図2に示す(1)–(3)の手順でHTFMLを着磁した。

- (1) MgB<sub>2</sub>の転移温度より高い  $T = 40$  Kにおいて  $+0.222 \text{ Tmin}^{-1}$  で外部磁場  $B_{\text{ex}}$  を印加磁場  $B_{\text{app}} = 1.0\text{--}3.0 \text{ T}$  に上げる( $TS = 0\text{--}5$ )。この過程ではシールド効果によりGdBaCuO磁気レンズが外部磁場を収束する。
- (2) コールドステージの温度を  $T = 20$  K に下げて MgB<sub>2</sub> バルクを超電導状態にする。
- (3)  $TS = 5\text{--}10$  にかけて、外部磁場  $B_{\text{ex}}$  を  $-0.011 \text{ Tmin}^{-1}$  でゼロに減磁する。この過程でMgB<sub>2</sub>バルク円筒は磁場中冷却着磁され、ピン止め効果により磁束を捕捉する。

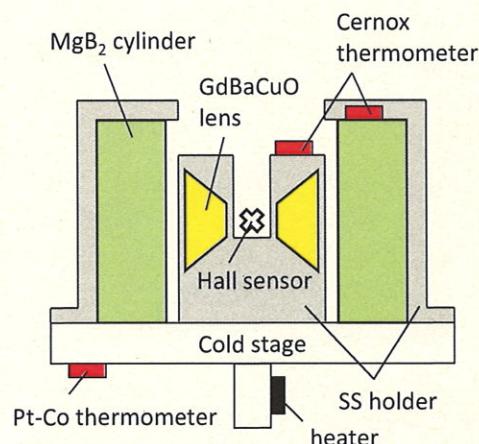


図1 HTFML 実証実験のセットアップ

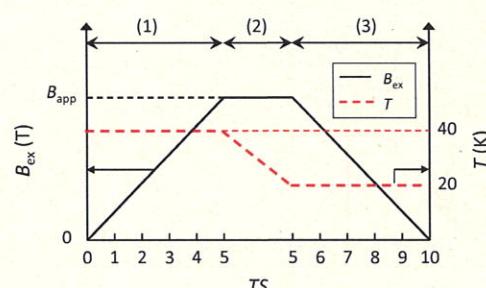


図2 着磁シーケンス

### 3. Results and Discussion

最初にMgB<sub>2</sub>バルク円筒の捕捉磁場特性を評価した。図3に印加磁場 $B_{app} = 2.0\text{ T}$ の着磁中における(a)MgB<sub>2</sub>バルク円筒の中心磁場 $B_c$ と外部磁場 $B_{ex}$ 、(b)MgB<sub>2</sub>バルクとコールドステージの温度を示す。増磁過程( $TS = 0\text{--}5$ )ではMgB<sub>2</sub>バルクが常電導状態であるため、 $B_c = B_{ex}$ である。 $T = 20\text{ K}$ への冷却後の減磁過程( $TS = 5\text{--}10$ )では、ピン止め効果により磁場がバルクに捕捉され、 $B_c$ は減磁後でも $2.0\text{ T}$ を維持している。

図4に印加磁場 $B_{app} = 2.0\text{ T}$ の着磁中における(a)HTFMLの中心磁場 $B_c$ と外部磁場 $B_{ex}$ 、(b)MgB<sub>2</sub>バルク、GdBaCuO磁気レンズ、コールドステージの温度を示す。増磁過程では中心磁場 $B_c$ は外部磁場 $B_{ex}$ を上回っていることがわかる。これはGdBaCuO磁気レンズのシールド効果により外部磁場がレンズボアに収束されるためである。 $B_{ex}$ が $B_{app} = 2.0\text{ T}$ に到達したとき、 $B_c = 3.65\text{ T}$ が得られた。減磁過程では、MgB<sub>2</sub>バルクが捕捉した磁場をGdBaCuO磁気レンズが収束することで $B_c$ はほとんど減衰せず、減磁後で $3.55\text{ T}$ を達成した。

図5に印加磁場 $B_{app} = 1.0\text{--}3.0\text{ T}$ の着磁中におけるHTFMLの中心磁場 $B_c$ の $TS$ 依存性を示す。 $B_{app} = 1.0\text{--}3.0\text{ T}$ の着磁後( $TS = 10$ )における $B_c$ はいずれも外部磁場を上回っており、明瞭なHTFML効果が実験的に確認できた。しかし、 $B_{app} = 2.5, 3.0\text{ T}$ の着磁の減磁過程では $B_c$ が徐々に減少し、 $TS = 10$ においてそれぞれ $B_c = 3.46, 3.22\text{ T}$ であり、 $B_{app} = 2.0\text{ T}$ の着磁後に得られた $3.55\text{ T}$ より低い。これは高印加磁場ほど磁気レンズにより多くの磁束が侵入し、シールド効果が低下したことに由来すると考えられる。

### 4. Conclusion

本研究ではMgB<sub>2</sub>バルクTFMとGdBaCuOバルク磁気レンズで構成したHTFMLの実証実験を行った。印加磁場 $B_{app} = 1.0\text{--}3.0\text{ T}$ の着磁によりHTFML効果を実証した。特に印加磁場 $B_{app} = 2.0\text{ T}$ の着磁終了後に最高収束磁場 $3.55\text{ T}$ を達成した。高磁場ではGdBaCuO磁気レンズへの磁束侵入により、着磁後の収束磁場は向上しなかった。したがって、HTFML効果向上には更なる低温への冷却が有効であると考えられる。なお、本研究成果は*Supercond. Sci. Technol.*に掲載された[3]。

#### References

- [1] Takahashi K, Fujishiro H and Ainslie M D 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 044005
- [2] Namba S et al., 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 6801605
- [3] Namba S, Fujishiro H, Naito T, Ainslie M D and Takahashi K 2019 *Supercond. Sci. Technol.* **32** 12LT03

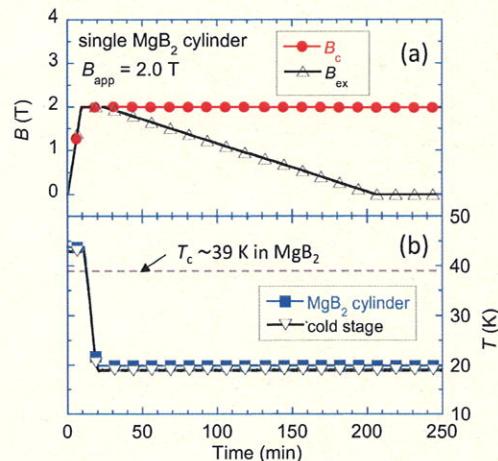


図3  $B_{app} = 2.0\text{ T}$  の着磁中における  
MgB<sub>2</sub>バルク円筒の中心磁場

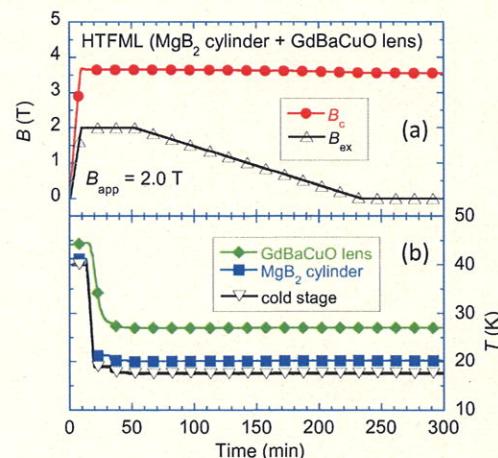


図4  $B_{app} = 2.0\text{ T}$  の着磁中における  
HTFML の中心磁場

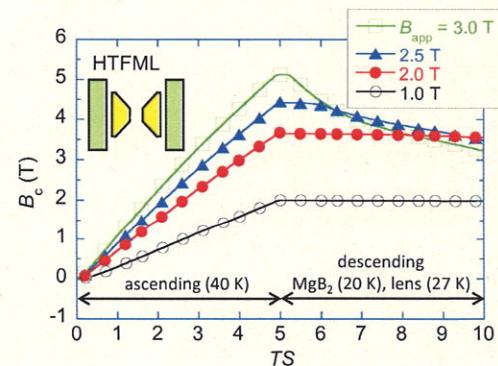


図5  $B_{app} = 1.0\text{--}3.0\text{ T}$  の着磁中における  
HTFML 中心磁場  $B_c$  の  $TS$  依存性