

手のひらサイズの超小型超電導バルク磁石の開発

Development of a Palm-sized Miniature Superconducting Bulk Magnet

佐保 典英(クライオン, 元日立・日立研); 松田 和也, 西嶋 規世(日立・日立研)
SAHO Norihide (LLC CRYOIGN, Ex-Hitachi Research Laboratory, Hitachi);
MATSUDA Kazuya, NISHIJIMA Noriyo (Hitachi Research Laboratory, Hitachi)
E-mail: kazuya.matsuda.wy@hitachi.com

1. はじめに

近年, 小域空間に高い磁束密度を発生できる高温超電導バルク磁石(以下, 超電導バルク磁石と記す)を利用した応用機器の研究開発が活発に行われている[1, 2]。筆者らは, 先に磁氣的ドラッグ・デリバリー・システム(MDDS: Magnetic Drug Delivery System)および磁性幹細胞誘導システム用として, 両腕で抱えられるサイズの携帯型高温超電導バルク磁石システムを開発した[3]。超電導バルク磁石の欠点として, 着磁後のバルク体を昼夜連続で低温保持しなければならないことが挙げられる。このため, 高温超電導バルク体(以下, バルク体と記す)を冷凍機で冷却する超電導バルク磁石では, 冷凍機を昼夜連続で運転するための電力費用がユーザ側の負担となる。また, 前記磁石システムを利用しているユーザからは, さらに小型・軽量化を図り, かつ省エネルギーな超電導バルク磁石の開発に期待が寄せられた。

これらの背景から, 本研究では, 手のひらに載るサイズで, 消費電力を大幅に低減した超小型超電導バルク磁石を開発した。本報では, 超小型化を実現するために, 超電導バルク磁石を他の超電導バルク磁石で着磁する新たな着磁方法を提案するとともに, 開発した超小型超電導バルク磁石の着磁特性について報告する。

2. 新着磁方法

本着磁方法は, 以下に示す2ステップで着磁する方法である。まず, 第1ステップとして予め励磁した高磁場の超電導ソレノイド型磁石(以下, 磁石 A と記す)で, リング状のバルク体を内蔵した着磁用超電導バルク磁石(以下, 磁石 B と記す)をフィールド・クール法(以下, FC 法と記す)にて着磁する。次に, 第2ステップでこの磁石 B の高磁場常温空洞内にて, 冷凍機一体型の超小型超電導バルク磁石(以下, 磁石 C と記す)を FC 法で着磁する。

Fig. 1 に示すように, 第1ステップにおいて磁石 A で磁石 B を着磁する場合, 磁石 A の漏洩磁界の影響が強い位置では, 磁石 B の冷凍機に内蔵されているリアピストン型の電動圧縮機のピストン移動が拘束され運転不可となる。このため, 磁石 A の磁場中心に配置する磁石 B のバルク体と冷凍機は離して配置し, その間に銅やアルミニウム製の熱伝導体で熱的に接続する。このような構成では, 磁石 B の低温に冷却する部分が広がって熱侵入量が増加し, 冷凍能力が大きな冷凍機を選択する必要となる。よって磁石 B の小型化は困難であり, 運転消費電力も低減できない。

一方, 着磁された磁石 B の漏洩磁界の範囲は, 磁石 A のそれに比べて非常に狭い。このため第2ステップにより着磁する磁石 C は, 冷凍機をバルク体に近接させることが可能であり, 全体を小型化できる。

上記着磁方法を実証するため, 磁石 B および磁石 C を設計した。まず, 磁石 B および磁石 C のバルク体の設計にあたり, 磁石 B のリング状バルク体の外径を 60 mm に定めた。これは, 使用する磁石 A の室温空洞内径が 100 mm であり, 磁石 B の真空容器のサイズを考慮した上での選定である。ここで, 磁石 C が捕捉する磁束密度の大きさは, 磁石 B の励磁磁界が大きいほど, また磁石 C のバルク体の直径 D_c が大きいほど大きくなる。磁石 B の励磁磁界, すなわち磁石 B のリング状バ

ルク体の常温空洞内での捕捉磁場は, 磁石 B のバルク体の内径 D_b が小さいほど高い。しかし, 前記常温空洞内に挿入する磁石 C のバルク体の外径は小さくなるため, 捕捉できる磁束密度が小さくなる。数種類の D_b と D_c の組合せを仮定し, 磁石 B および磁石 C の捕捉磁場をビーンモデル法にて数値解析して比較検討した結果, D_b を 35 mm, D_c を 20 mm に選定した。

3. 着磁実験結果

3.1 磁石 B の構造及び着磁第1ステップの捕捉磁気特性

Fig. 2 に磁石 B の構造を示す。使用したリング状バルク体の材質は Gd 系(Gd-Ba-Cu-O)で, 外径 60 mm, 内径 35 mm, 厚さ 20 mm のものを 3 段重ねて使用した。内部の常温空洞サイズは, 内径 31 mm, 奥行き 60.5 mm である。リング状バルク体と冷凍機は, 前述した冷凍機の安定運転を確保するため, 熱伝導体を介して離されている。使用した冷凍機は, 圧縮機一体型のスターリング式である。

上記の磁石 B を用いて, 第1ステップの着磁を行った。まず, 5 T に励磁した磁石 A の高磁場常温空洞内に, 常温の磁石 B を挿入した。次に, 冷凍機で磁石 B のバルク体を温度約 38 K に冷却した。その後, 磁石 A を消磁することにより磁石 B を着磁した。その結果, 磁石 B の常温空洞内では, 磁石 A の励磁磁界 $B_z = 5.0$ T (B_z : 軸方向磁束密度)の 98%となる 4.9 T の磁場を捕捉した。一方, 漏洩磁場は空洞底部から 140 mm 離れた位置で $B_z = 0.1$ T となり, 磁石 C の冷凍機はこの位置近傍に配置しても運転に支障が無いことが分かった。

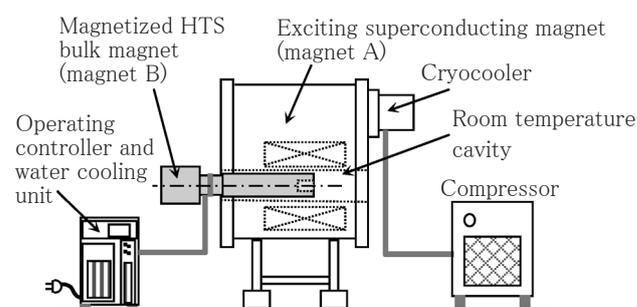


Fig.1 First magnetization system where superconducting bulk magnet B is magnetized using solenoid magnet A.

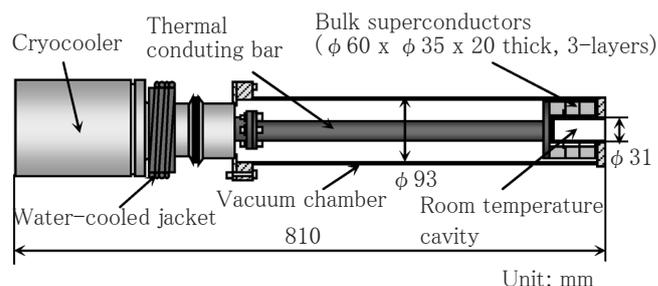


Fig.2 Structure of the trial portable HTS bulk magnet B for the second magnetization with three laminated high-Tc bulk superconductors in a vacuum chamber.

3.2 磁石 C の構造及び着磁第2ステップの捕捉磁気特性

Fig. 3 に磁石 C の概略構造を示す。使用したバルク体の材質は Gd 系(Gd-Ba-Cu-O)で、外周にステンレス製の補強リングを有している。バルク体の外径は 20 mm、厚さは 20 mm である。また、使用した冷凍機は圧縮機一体型のスターリング式冷凍機で、コールドヘッド温度 77 K で 1 W の冷凍性能を有している。圧縮機の圧縮熱は隣設したファンにより空冷で排熱させる構造とした。磁石 C のサイズは、全長 235 mm、幅 65 mm、高さ 115 mm、また磁石本体の重量は 1.8 kg である。

第2ステップにおいて、磁石 C の着磁を以下の手順で行った。まず、Fig. 4 に示すように磁石 B の励磁磁界 4.9 T の常温空洞内に冷却前の磁石 C の先端に内蔵したバルク体を挿入し、その後冷凍機でバルク体を冷却した。磁石 C のクールダウン時間は 90 分で、バルク体を締結した銅製の冷却ステージ温度が 46.0 K に達した。この時の室温は 23.8°C であった。その後、磁石 B の冷凍機を停止し、バルク体を臨界温度以上に昇温させ、空洞内から着磁した磁石 C を引き抜いた。

磁石 C のバルク体に捕捉された B_z の真空容器表面での測定値および数値解析結果との比較を Fig. 5 に示す。縦軸はバルク体の B_z 、横軸は真空容器表面の半径方向距離 R_s である。 B_z の最大値は $R_s=0$ mm 近傍で 3.15 T であった。ビーンモデル法により測定値分布から推算したバルク体内の永久電流値 J_c は 8×10^8 A/m² で、この値を使用して求めた解析値と、実測値のプロファイルはほぼ一致している。実測値が解析値に比べ左側にシフトしている原因は、バルク体自身の磁気特性によるものであり、磁石 B の励磁磁界の影響ではない。

Fig. 6 に磁石 C のバルク体表面の中央部からの距離 Z_0 と B_z 分布の実測値、および前記 J_c 値を用いた解析結果を示す。本図から、真空中にあるバルク体表面での B_z は 4.8 T と見積もられ、バルク体は磁石 B の励磁磁界とほぼ同等値を捕捉していると考えられる。また、真空容器表面中央部で $B_z = 3.15$ T に着磁された際の磁石 C の $B_z = 0.5$ mT ラインは、実測の結果、バルク体中央を中心とした Z 軸方向の長径 175 mm、半径方向の短径 150 mm の楕円状の範囲であった。

磁石 C の着磁後の定常冷却状態での消費電力は、空冷ファンの電力を含め 23.0 W であり、3 T 級の超電導磁石を、ノート型パーソナルコンピュータ並みの消費電力で運転維持できることを実証した。これにより、バッテリーを内設した小型のキャリーバッグを用いて、着磁後のバルク磁石を外部電源無しで長時間輸送することが可能となった。

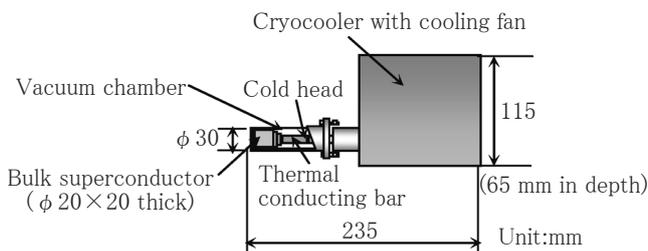


Fig.3 Structure of the trial palm-sized HTS bulk magnet C.

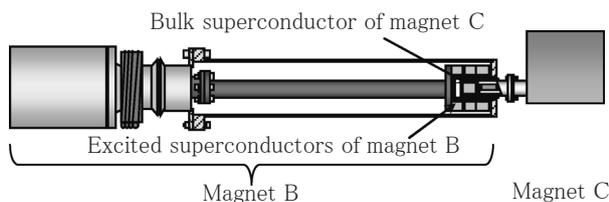


Fig.4 Second magnetization step where the superconducting bulk magnet C is excited using the magnetic field produced by the superconductors of magnet B.

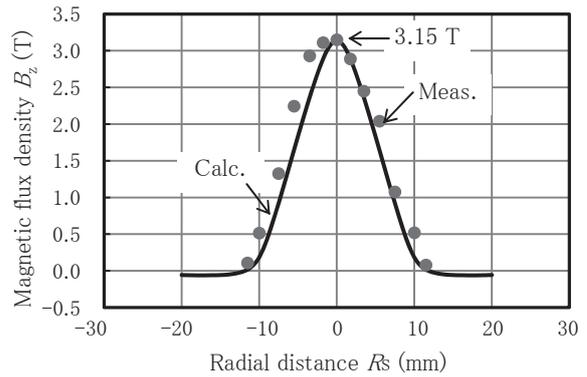


Fig.5 Calculated and measured values of the magnetic flux density B_z of the trial HTS bulk magnet C magnetized in a 4.9 T field.

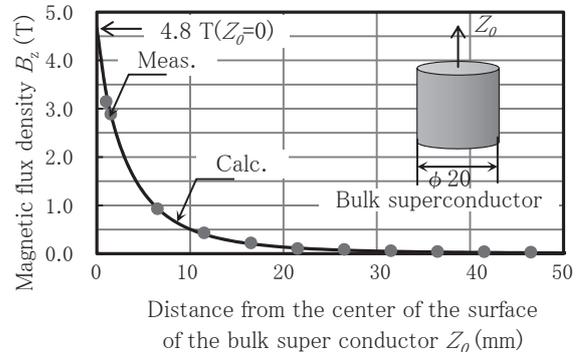


Fig. 6 Calculated and measured values of the magnetic flux density B_z at various distances from the center of the bulk superconductor of magnet C magnetized in a 4.9 T field.

4. まとめ

デスクトップサイズの超電導磁石応用装置への適用を目的に、超小型超電導バルク磁石(磁石 C)を開発した。開発した磁石 C は、全長 235 mm、幅 65 mm、高さ 115 mm、磁石本体の重量は 1.8 kg であり、手のひらサイズの超電導バルク磁石を具現化した。この磁石 C を、着磁用超電導ソレノイド磁石(磁石 A)、着磁用超電導バルク磁石(磁石 B)を用いた 2 段階の FC 法からなる新着磁方法により着磁を行った。磁石 B の空洞内の 4.9 T の印加磁界強度中で着磁した結果、磁石 C の真空容器表面での最大 B_z は、3.15 T であった。また、着磁後の定常冷却状態での消費電力は、空冷ファンの電力を含め 23.0 W であり、3 T 級の超電導磁石で世界最小・最軽量で最少消費電力の冷凍機一体型超電導バルク磁石を実証した。

参考文献

1. N. Saho, T. Mizumori, N. Nishijima, H. Isogami, M. Murakami and M. Tomita: TEION KOGAKU Vol. 37 (2002) 622-628
2. T. Nakamura, K. Ogawa, Y. Terada, K. Kose and T. Haishi: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 85 (2011) 173
3. N. Saho, H. Isogami, N. Nishijima, H. Tanaka, J. Kubota: TEION KOGAKU Vol. 46 (2011) 102-110