

NMR 用超電導バルク磁石の新しい積層構造と内挿超電導円筒による 磁場均一性向上

Improved Magnetic-Field Homogeneity of NMR HTS Bulk Magnet using a New Stacking Structure and Insertion of an HTS Film Cylinder into a Bulk Bore

伊藤 佳孝, 柳 陽介(イムラ材研); 仲村 高志(理研)

ITOHO Yoshitaka, YANAGI Yousuke (IMRA MATERIAL); NAKAMURA Takashi (RIKEN)

E-mail: y-itoh@ai-i.aisin.co.jp

1. はじめに

NMR 用超電導磁石には磁場の強度・均一性・安定性が求められ、現在実用となっている磁石は NbTi 線等を用いコイルの巻き方と超電導接続によりこれらを実現している。そのため磁石は大型となり、更に超電導コイルの冷却に液体 He が必要となっている。これに対し、RE-Ba-Cu-O 系に代表される高温超電導バルクは、円筒形状として均一な磁場で着磁すれば印加した均一な磁場分布を維持するように超電導永久電流がバルク内に自動的に分布して流れ、バルクボア内に均一な磁場空間が形成できる。冷凍機で冷却することにより、小型で無冷媒の NMR 磁石の実現が可能である。しかしながら、RE 系バルクはその製法上不純物や欠陥等を有すること、また、磁性イオンを含むことが磁場の均一性を乱す要因となっている。我々は、これらを克服し NMR 用磁石に必要なとされる 1ppm レベルの磁場均一性を実現する新たな手法を開発したので報告する[1, 2]。

2. 超電導バルク磁石の均一磁場設計

NMR 用バルク磁石の着磁に用いる静磁場着磁プロセスは、I. 磁場印加工程 ($T > T_c$)、II. 着磁温度 T_m ($< T_c$) への磁場中冷却工程、III. 減磁工程 ($T = T_m$)、IV. 使用温度 T_0 ($< T_m$) への過冷却工程からなる。本報告では、I において印加磁場の均一化、III において発生磁場の均一性維持について検討した。

2.1 印加磁場の均一化

印加磁場工程で磁場均一性を乱す要因としては RE 系バルクの常磁性磁化の影響がある。RE 系超電導体は一般に大きな磁気モーメントを有する希土類元素 RE のイオンを含むため、円筒状の RE 系バルクに均一な外部磁場 H_{ext} を印加しても、Fig. 1(a) Type A に示すように、円筒の両端に現れる磁荷による H_{ext} と逆向きの磁場(逆磁場) H_b が重畳されてバルクボア内の磁場分布が乱れ、最終的に捕捉される磁場の均一性が低下する。これに対し、Fig. 1(b) Type B に示すように、バルクボア中央部の内径を部分的に拡大すると、中央部内径拡大空間の上下の内壁に現れる磁荷による順方向の磁場(順磁場) H_f が更に重畳され、内径拡大空間の形状を最適化することにより逆磁場 H_b を打ち消して印加した H_{ext} の磁場分布の均一性を維持することができる。

この考えに基づき、軸対称モデルで電磁界解析を行い、バルクボア内の印加磁場分布が均一となる中央拡大部の内径 d と内高 h を求めた。バルクは外径 60mm、内径 28mm、高さ 120mm とした。Gd 系バルクでの 40K、FC5T の着磁を想定し、Bean モデルで $J_c = 6.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 、比透磁率 $\mu_r = 1.01$ とした。内径 d を着磁後の電流領域が円筒の内壁に達しない 36mm とすると、最適内高は $h = 74 \text{ mm}$ となった。この時の着磁後のボア中心部の捕捉磁場マップを Fig. 2 に示す。印加磁場 $\pm 1 \text{ ppm}$ の均一領域は、中央部拡大なしの $\phi 4.4 \times 2.2 \text{ mm}$ に対し、拡大ありでは $\phi 32 \times 17 \text{ mm}$ に大幅に拡大できることが分かる。なお、本解析で求めた内径拡大空間の最適寸法はバルクの形状に依存し磁化の大きさには依存しないため、バルクの種類や温度によって μ_r が変化しても変わらない。

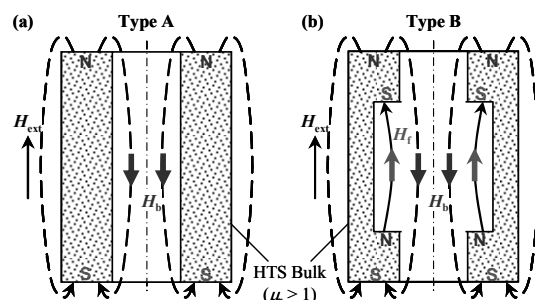


Fig. 1 Magnetic field in the bore of the HTS bulk ($\mu_r > 1$) with (a) a straight bore and (b) a central wide bore when the homogeneous external field H_{ext} is applied to the HTS bulk.

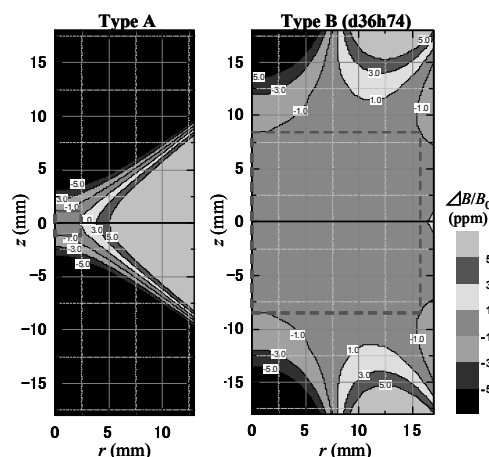


Fig. 2 Calculated trapped field distribution maps for the type A bulk with 28 mm ID ($h = 0$) and the type B bulk with $h = 74$ mm and 36 mm ID in the center.

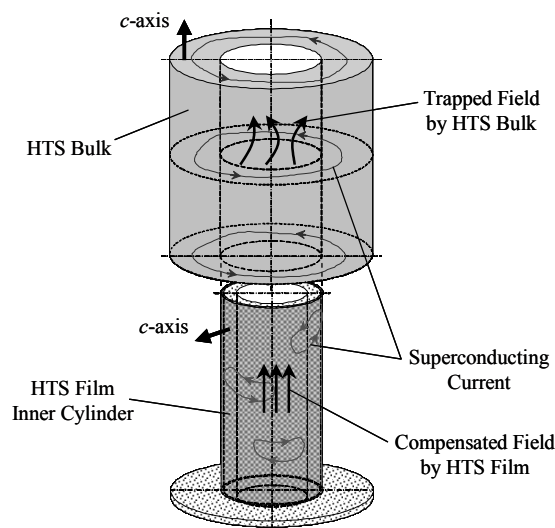


Fig. 3 Homogenization of magnetic field trapped in the bore of HTS bulk by inserting the HTS film inner cylinder into the bulk bore.

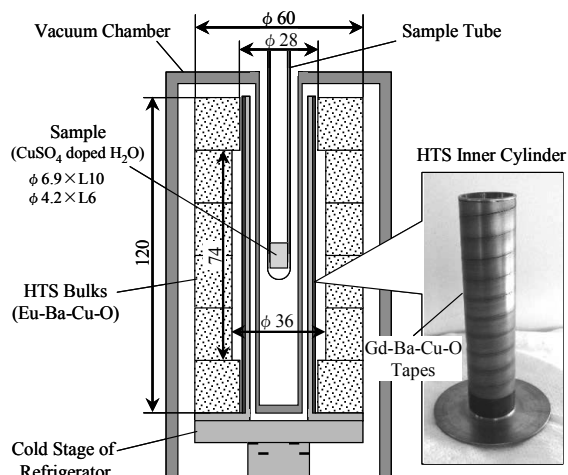


Fig. 4 Schematic view of the superconducting bulk magnet with an HTS inner cylinder inserted into the HTS bulk bore and a photograph of the HTS inner cylinder.

2.2 発生磁場の均一性維持

前節で示したように、バルクに磁化があっても印加磁場分布を均一にすればボア内に均一な捕捉磁場空間が得られるはずである。しかしながら、実際にバルクの形状を改良して着磁しても、設計通りの磁場均一性は得られなかった。これは、静磁場着磁でバルク内に誘起する超電導電流がバルクの不純物や欠陥により乱され磁場分布が不均一になったためと考えられる。そこで、円筒状超電導バルクの内側に径方向に c 軸配向した RE 系超電導薄膜の円筒(内挿超電導円筒)を配置した (Fig. 3)。これにより、超電導バルクで保持できずに生じた印加磁場分布の乱れを、均質な内挿超電導円筒の異方性のない円筒面内に誘起する超電導電流で補償し、その内側に印加した均一な磁場分布を維持できると考えられる。

3. 実験方法

銅の円筒に Gd 系線材 (幅 10mm, $I_c=560\text{A}@77\text{K}$) を螺旋状に巻いて内挿超電導円筒を作製し磁場均一化効果を検証した。線材は巻き境界の位置を横切って流れようとする超電導電流を確保するため、巻境界をカバーするように 1 / 3 ピッチずつ軸方向にずらして 3 層巻いた。Fig. 4 に作製した円筒状超電導バルク磁石 (磁極) の構成を示す。バルクは Eu 系 ($\mu_r \approx 1.001$) を用い、中央部拡大空間は 2.1 節で求めた最適寸法とし、外周を肉厚 5mm の Al リングで補強した。冷却は GM パルス冷凍機を用いた。室温ボア径は 20mm である。着磁は NMR 用超電導磁石を用いて 100K で磁場均一性を 0.5ppm 以下に調整した後、 $T_m=50\text{K}$ 、FC4.747T (^1H 共鳴周波数 202MHz) で行った。その後、 $T_c < 40\text{K}$ に冷却し磁場の安定化を行った。着磁した磁極の室温ボアに NMR プローブを設置し、8mm 管 (試料空間 $\phi 6.9 \times 10\text{mm}$) に充填した水の ^1H NMR スペクトルの半値幅から磁場の均一性を評価した。

4. 結果

Fig. 5 に着磁過程における磁場均一性の変化を内挿超電導円筒がない場合と比較して示す。内挿円筒がない場合には、100 K で印加磁場の均一性を 0.5 ppm 以下に調整した後、50 K に冷却するだけで均一性は 4.1 ppm に低下し、減磁・過冷却過程で更に 19.4 ppm まで低下する。これに対し、内挿円筒があると 100→50 K の冷却過程と 4.7→0 T の減磁過程において磁場均一性は殆ど変化せず、1 ppm レベルを維持できることが分かる。内挿円筒には、減磁過程においてバルクが捕捉・維持できなかった均一な磁場分布を補償する効果を期待したが、本結果より、冷却過程においても印加磁場の均一性維持の効果があることが分かった。

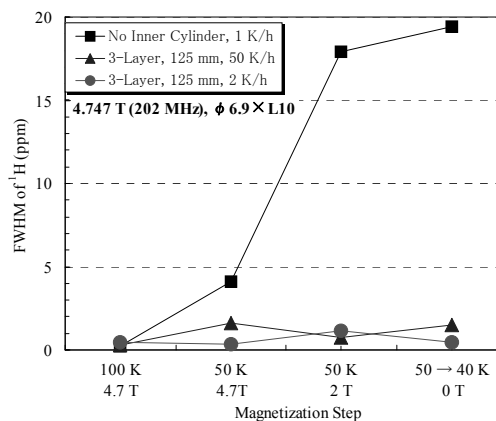


Fig. 5 Changes in the FWHM of the ^1H NMR spectrum of H_2O during the FC magnetization step of HTS bulk magnets with and without HTS inner cylinders.

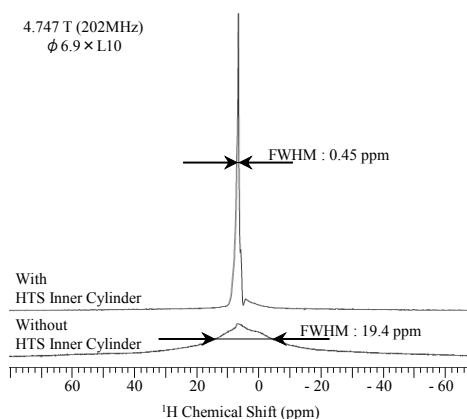


Fig. 6 Comparison of ^1H NMR spectra of H_2O between the HTS bulk magnets with and without the HTS inner cylinder (3-layer, 125 mm height).

Fig. 6 には、最高の分解能が得られた時の ^1H スペクトルを示す。これより、8 mm 管の試料空間 ($\phi 6.9 \times 10\text{ mm}$) で、0.45 ppm の磁場均一性が得られていることが分かる。更に、着磁 48 日後に同じ試料サイズの異なる試料管で再度測定を行ったところ、半値幅は 0.51 ppm であり 1 ppm 以下を維持していることが確認できた。

5. まとめ

NMR 用小型無冷媒超電導バルク磁石の実用化に向け、磁石の室温ボア内で標準の試料管サイズの空間にシムコイルなしで 1 ppm レベルの磁場均一性を実現する手法の開発を行った。円筒状超電導バルクのボア中央部を拡大してボア内の印加磁場を均一化し、更に、バルクボア内に超電導薄膜の円筒を配置して着磁の際バルクのみでは維持できなかった磁場分布の均一性を補償することにより、1 ppm 以下の磁場均一性を $\phi 20\text{ mm}$ 室温ボア内の 8 mm 管の試料空間に実現できることが分かった。

本研究の一部は、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の医療分野研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) で実施したものである。

参考文献

1. Y. Itoh, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.47
2. Y. Yanagi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.48