

学術論文

高温超電導バルク体を用いる小型 NMR 用マグネットの 積層構造最適化に関する研究

Study on Optimized Configuration of Stacked HTS Bulk Annuli for Compact NMR Application

金 錫範(正員)^{*1}, 今井 諒^{*1}, 木本 敬章^{*1}, 矢野 順一^{*1}, 朱 鎮弘^{*1}

SeokBeom KIM (Mem.), Makoto IMAI, Takaaki KIMOTO, Yorikazu YANO, JinHong Joo

Recently, the performance of high temperature superconducting (HTS) bulks such as critical current density, size, and mechanical strength has been improved rapidly. So, various applications with HTS bulks such as motors, bearings, and flywheels are being investigated by many research groups. We have been developing a new prototype compact NMR magnet with stacked HTS bulk annuli and fundamental studies for the optimized configuration were carried out experimentally and analytically. In design and manufacture of a compact NMR magnet which consists of a stack of HTS bulk annuli, spatial homogeneity and temporal stability of trapped magnetic fields are key issues. This paper presents a study on optimized configuration of stacked HTS bulk annuli for the compact NMR application. A four-stacked bulk magnet was designed and tested at 77 K as functions of gap length between HTS bulks. Then, various optimized patterns were investigated numerically to find out an optimized stack pattern of HTS bulk annuli in a given condition.

Keywords: compact NMR, HTS bulk annuli, optimized gap length, field homogeneity, FEM

1 緒言

近年、核磁気共鳴分光法 (NMR) はタンパク質の構造解析に有用なツールとして食品や医療分野で注目されており、最近では、金属系および酸化物系超電導線材を用いた超電導マグネットによる GHz 級の NMR 装置が開発されている。しかしながら、既存の NMR 装置は、まだ非常に高価・大型であるために大きい病院や研究所、大学などで設置されてはいるものの個人が自由に使える装置とは言えないのが現状である。もし、安価・小型で、さらに簡便な方法で使える NMR 装置が開発され、研究室ごと、または各個人が自由に使えるようになると、高性能 NMR 診断装置で測定する前の基礎診断や判断などが可能となるため、医学分野や食品開発など幅広い分野において急速な進展が得られると考えられる。一方、YBCO 酸化物超電導体をはじめとする高温超電導バルク体は、材料研究分野による製造プロセスの向上に伴って臨界電流密度と機械的強度面での高性能化、大型化が急速に進んでおり[1]、中村氏らによって高温超電導バルク NMR 装置の可能性が示された[2],[3]。そこで、我々は、高温超電導バルク体の強力な捕捉磁場を利用して小型で簡便な NMR 用マグネットを開発することによって、コンパ

クトで持ち運べるパーソナル NMR 装置の開発を目的として研究を行って来た[4],[5]。我々は、市販の高温超電導バルク体 (YBCO, GdBCO) を用いて液体窒素や冷凍機による伝導冷却による実験と共に、3 次元有限要素法に基づく電磁場数値解析 (JMAG) を併用して研究を進めて来た。これまでの研究により、高温超電導バルク体を用いた NMR 用マグネットを開発するための積層構造の有効性について検証しており、経済的な観点も含めた場合は、高温超電導バルク体の厚みを薄くして、各バルク間にギャップを設けることで、試料測定空間での磁場均一度を向上させることができることを明らかにして来た[4],[5]。そこで、本論文では、厚みが薄い (5 mm) 複数の高温超電導バルク体を用いて、試料測定空間での磁場均一度を向上させるための積層構造の最適化を図るためのバルク体間のギャップ依存性について実験を行い、また、数値解析との比較による検討を行った。

2 開発する小型 NMR 用マグネットの概要

本研究で開発する NMR 用マグネットは、第 II 種超電導体である高温 (酸化物) 超電導体の強力な捕捉磁場特性を利用したものであり、リング形状の高温超電導バルク体、または、高温超電導薄膜を積層構造にしたマグネットである。積層構造の高温超電導体を小型の低温容器に挿入し、低温容器を外部磁場印加装置である励磁用超電導マグネットの室温空間に配置して、積層構造の超電

連絡先：金 錫範, 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1, 岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻
e-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

^{*1} 岡山大学

導体に磁場を印加した状態で液体窒素などを入れることによって常電導状態から超電導状態へ転移させる磁場中冷却方式 (FC 法: Field cooling method) を採用して高温超電導体を着磁させる。着磁された高温超電導体には印加した磁場分布と強度がそのまま捕捉されることになる。高温超電導体が着磁された後は、印加磁場を除去してから高温超電導体が入っている低温容器ごと励磁用マグネットから取り出して NMR 用マグネットとして使用することが可能となるため、電源を必要としない持ち運びが可能で非常にコンパクトな装置となる。一般的に NMR 用マグネットとして使用する際には、発生磁場の高い空間均一度と時間的安定性が要求される。そこで、本研究では、直径 20 mm の球状測定空間に 4.7 T (200 MHz 相当) の均一磁場を発生させることを当面の目標としており、その目標を達成させるためには、積層構造の最適化や適切な冷却方法の選定などについて検討する必要がある。

3 捕捉磁場特性に関する実験

3.1 実験方法

高温超電導体の塊である高温超電導バルク体は、液体窒素温度以上での使用が可能であり、それに伴う比熱も大きいのでクエンチが起きにくく、応用面においては非常に便利なものである。本研究では、Gd 系 ($\text{Gd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 高温超電導バルク体を用いて実験を行っている。商用の高温超電導バルク体を用いて本研究で目標とする磁場強度を得るためには、リング状高温超電導バルク体を積層させる必要がある。本研究では、機械的強度向上を図るために厚さ 2mm のステンレスリングを装着させた内径 20 mm、外径 60 mm、厚さ 5 mm の高温超電導バルク体を使用している。このリング状高温超電導バルク体を 4 個積層して検討を行った。これはこれまで検討を行ってきた厚さ 20mm の単一バルク体の捕捉磁場と比較することにより積層構造バルク体の有用性を確認するためである。Table 1 に実験に用いたバルク体の諸元と各々のバルク体の最大捕捉磁場強度を示す。また、比較のために用いられた厚み 20 mm の高温超電導バルク体の緒元も Table 1 に示している。Table 1 に示されているように、今回の実験で用いた高温超電導バルク体の中で Bulk A の捕捉磁場強度が他のバルク体に比べて約 24% 低かったため磁場均一性に影響を及ぼすと考えられる。積層構造の高温超電導バルク体の着磁方法は、直径 100 mm の室温空間に最大 10 T の磁場強度を印加できる超電導マグネットを用い 2T の磁場を印加し、印加磁場と平行方向に

積層高温超電導バルク体を配置し、高温超電導バルク体に均一磁場を印加した状態で液体窒素により超電導バルク体を冷却し、超電導状態にした後に印加磁場を除去してから外へ取り出す磁場中冷却方式を用いた。Fig. 1 に積層した高温超電導バルク体の概略図を示し、Fig. 2 に積層構造の最適化を検討するためのバルク体にギャップを設けた場合の断面図を示す。本研究では、バルク体間のギャップがない場合と 5 mm の場合について実験的に検討した。そして、高温超電導バルク体の捕捉磁場分布や時間的変化については、1 μm 間隔で駆動させることが可能な 3 軸ステージに極低温用の高分解能ホール素子 (センシング面積: $25 \times 25 \mu\text{m}^2$) を取り付けすることで 3 次元磁場分布特性を自動で測定した。具体的には、積層構造の高温超電導バルク体の内部磁場分布測定においては、高さ方向への磁場分布を 1 mm 間隔で測定し、高さ方向への各位置での 2 次元平面磁場分布においては、Fig. 3 に示すように $7 \times 7 \text{ mm}^2$ の範囲を 0.2 mm 間隔 (36 点 $\times$ 36 点、合計 1296 点) でホール素子を走査して測定した。また、捕捉磁場強度の時間減衰特性については、着磁用超電導マグネットの内部で積層構造の高温超電導バルク体の高さ方向の中心にホール素子の位置を固定し、印加磁場を取り除いてから 8 時間程度測定を行った。

Table. 1 Specification of the HTS bulk annuli

	Bulk A	Bulk B	Bulk C	Bulk D	Bulk E
Inner diameter (mm)	20				
Outer diameter (mm)	60				
Thickness for Bulk (mm)	5				20
Maximum trapped magnetic Field (T)	0.444	0.552	0.548	0.577	1.459

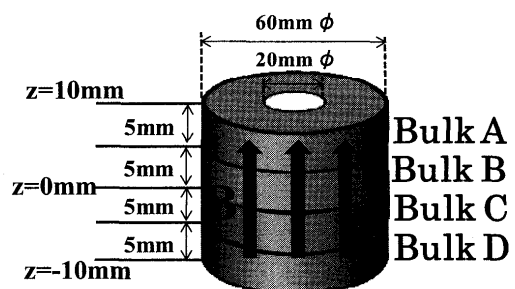


Fig.1 To-scaled schematic drawing of a four stacked HTS bulk magnet.

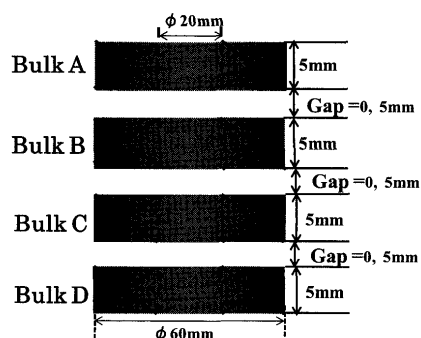


Fig. 2 To-scaled schematic drawing of a four stacked HTS bulk magnet with various axial gap length between the bulks.

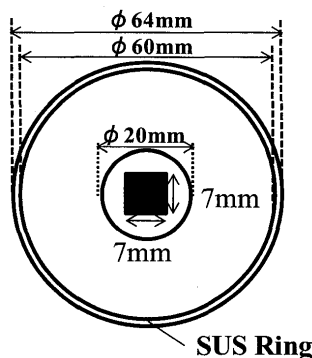


Fig. 3 Measuring range of x-y plane ($7 \times 7 \text{ mm}^2$) by high resolution Hall-sensor to discuss the characteristics of the magnetic field distribution.

3.2 捕捉磁場強度の時間減衰特性測定結果

4 個の高温超電導バルク体を Fig. 1 と 2 のようにバルク体間のギャップが 0 mm と 5 mm で積層した場合と単一バルク体として最も捕捉磁場強度が低い Bulk A 及び最も高かった Bulk D を磁場中冷却法により着磁させた後のバルク体の内部空間の高さ方向中心での時間減衰特性を Fig. 4 に示す。印加磁場を除去してから 100 分後の磁場強度値を基準にして規格化したものを Fig. 4 (b) に示している。Fig. 4 (a) における時刻 0 は、着磁用の超電導マグネットによる印加磁場をゼロに戻したときの時刻である。Fig. 4 (a) で示された測定結果より、どの場合においても印加磁場が除去されてから約 20 分程度まで捕捉磁場強度が大きく減少している。これは、フラックスクリープ (flux creep) 現象によって高温超電導バルク体内のピンニング力の弱い磁場が取り除かれるためであると考えられる。その後、磁場は緩やかに減少し、捕捉磁場強度は安定する。また、積層構造においては、バルク体間のギャップがない場合が 5 mm のギャップがある場合に比べて捕捉磁場強度が高く、単一の場合においては Bulk D が Bulk A より高い。そして、Fig. 4 (a) を規格化して比較すると、臨界電流密度が最も低い Bulk A 以外はほ

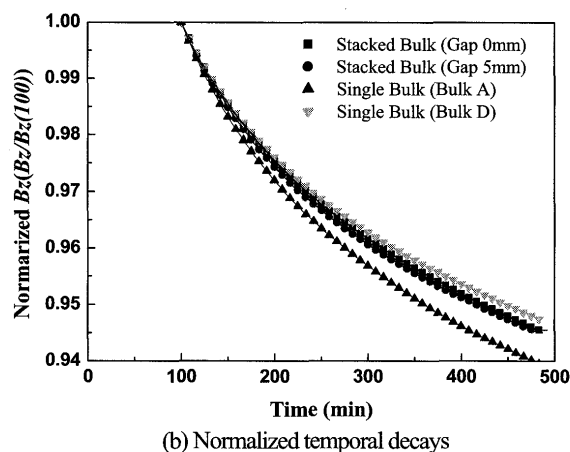
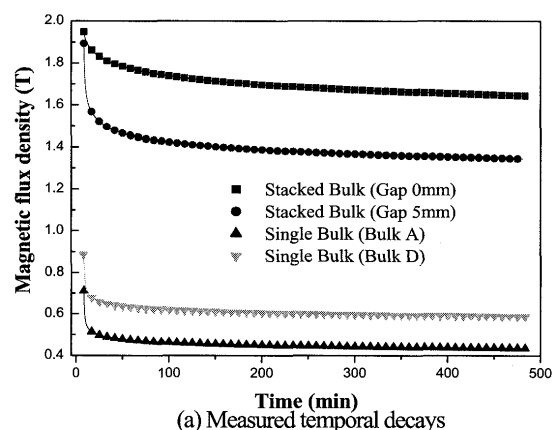


Fig. 4 The characteristics of temporal decays of (a) single and stacked HTS bulk annuli with axial gap length are 0 and 5 mm at 77 K and (b) normalized temporal decay profiles.

ぼ同じ傾向を示しており、積層構造においてバルク体間のギャップを設けても磁場強度の時間減衰特性にはあまり影響がないことが明らかになった。

3.3 高さ方向磁場分布測定

4 個の高温超電導バルク体を積層構造にした場合 (Gap=0, 5 mm) と単一バルク体 (Bulk D, E) における内部中心部の高さ方向の磁場強度分布およびそれぞれの磁場分布から最も高い磁場強度を基準にして規格化したものを Fig. 5 に示す。まず、積層構造の測定結果を比較すると、磁場強度においてはギャップなしの場合がギャップありの場合に比べて高いものの、高さ方向への磁場強度分布の平滑度はギャップを設けた方が向上されている。これの原因としては、バルク体間のギャップを設けることでマグネットの高さが相対的に伸長したことと共にバルク体が離れて配置されることによって磁場補正効果が同時に行われたためであると考えられる。また、バルク体の厚みが 20 mm の単一バルク体 (Bulk E) は、4 個のバルク体をギャップなしで積層した場合と同じ高さ

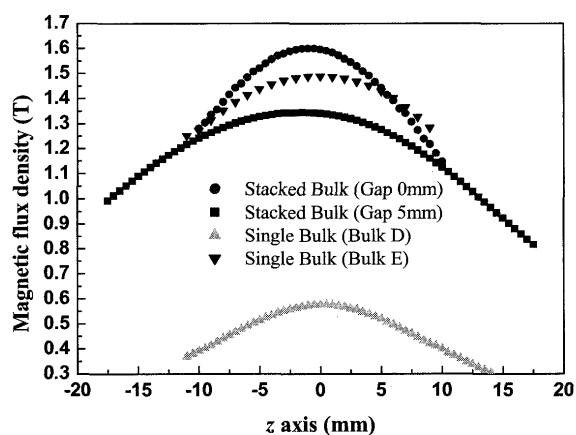
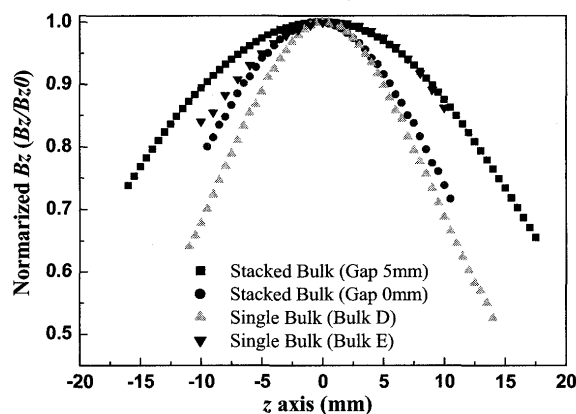
(a) Measured B_z profiles(b) Normalized B_z profiles

Fig. 5 (a) Measured magnetic field distributions along the axial direction in the single and stacked HTS bulk annuli at 77 K and (b) normalized B_z profiles.

になる。Bulk E による捕捉磁場強度はおおよそ 1.5 T であり、厚み 5 mm のバルク体 (Bulk A, B, C, D) の捕捉磁場能力は、Bulk A 以外はそれぞれ約 0.55 T である。実験結果では、4 個のバルク体を積層した場合の磁場強度が 1.6 T を示しており、少し高くなっている。しかしながら、各々のバルク体に補足された磁場分布の形状依存性によって、Fig. 5 (b) からわかるように同じ厚みの単一バルク体 (Bulk E) に比べて磁場分布の平滑度が悪くなっている。従って、積層構造による効果を大きくさせるためには、磁場強度が強くなる高さ方向の中心部分には厚みがあるバルク体を配置するのが効果的であると思われる。

3.4 マグネット内部の 2 次元平面磁場分布特性

NMR 用マグネットにおいては、試料の測定空間での磁場強度および磁場均一性が重要な問題となる。そこで、本研究では、積層高温超電導バルク体の内部において、2 次元平面磁場分布の高さ依存性について実験的に検討を行った。ギャップなしの積層構造のバルク体を液体窒

素中で 2 T の印加磁場により捕捉させた場合における高さ方向中心の 2 次元平面での B_z 成分分布を測定したものを Fig. 6 示し、測定範囲は Fig. 3 で表したものである。

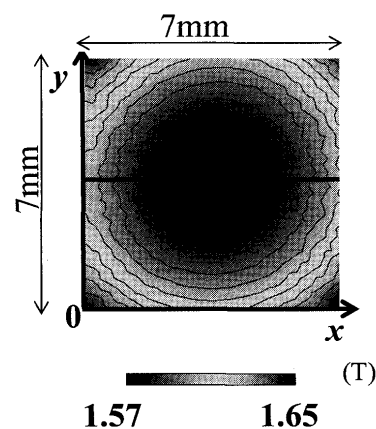
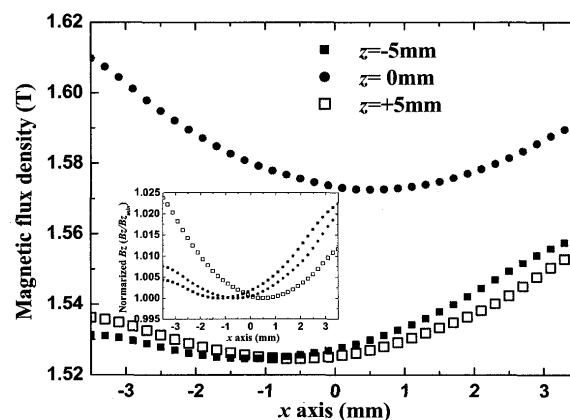
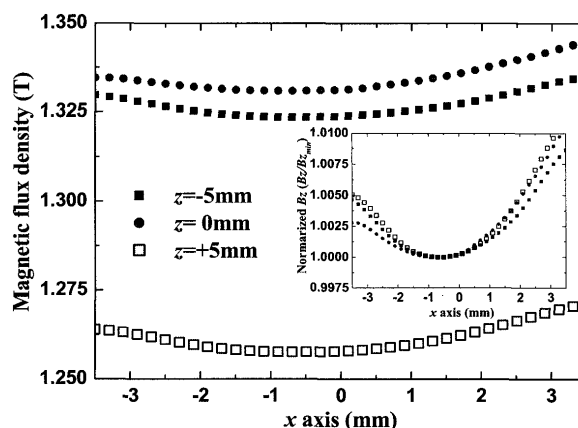


Fig. 6 Measured radial field distributions (x-y plane) at the center of axial direction with 0 mm gap length when applied magnetic field was 2 T at 77 K.



(a) Gap length = 0 mm



(b) Gap length = 5 mm

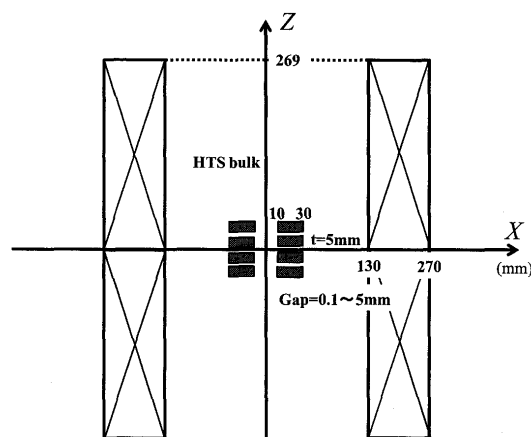
Fig. 7 Measured magnetic field profiles in radial direction at axial positions are 0, +5 and -5 mm at 77 K when applied magnetic field was 2 T.

また、ギャップなしの場合とギャップが 5 mm の場合における、高さ方向の中心部と ± 5 mm 位置での 2 次元平面磁場分布図から平面の中心を通る部分 (Fig. 6 の実線) での磁場強度分布を Fig. 7 に示す。そして、Fig. 7 の中で挿入図は、規格化されたものを表している。Fig. 7 で左右非対称になっているのは捕捉磁場分布の不均一性を意味しており、両方とも物理的な中心からずれていることが分かる。特に、ギャップなしの場合は、高さ方向の中心と上下方向への中心が一致しておらず、最上部で積層されたもっとも臨界特性が低いバルク体 (Bulk A) の影響が顕著に出ている。一方、ギャップを 5 mm 設けた場合においては、同じ形状の 2 次元磁場分布を示しているものの、磁場強度の面において Bulk A の影響が顕著に現れている。しかしながら、試料の測定空間のことを考慮するとギャップを設けて磁場の空間均一性を高める方が有効であると考えられる。

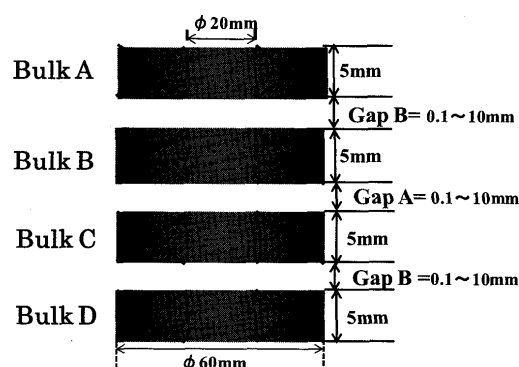
4 数値解析による積層構造最適化

4.1 解析手法と解析モデル

本研究では、高温超電導バルク体を用いた小型 NMR 用マグネットの構造最適化を図るために有限要素法に基づいた電磁場数値解析を行った (JMAG)。実際の超電導バルク体内での磁束挙動を完全に模擬するのは非常に困難であるため、高温超電導バルク体内の電磁現象を渦電流問題と考えると、これを数値的に解くのに一般的な手法である $A-\Phi$ 法に基づく回転対称有限要素法を採用して行った。また、高温超電導体の非線形の電磁気作用を考慮するため、 n 値モデルを用いた (詳しい解析方法は参考文献[4]を参考)。解析に用いた高温超電導バルク体の臨界電流密度は製造元からのデータを用いており、77K において $5.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (0T), $2.4 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (1T), $1.8 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (2T), $9.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ (3T), $3.0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ (4T) である。バルク体の捕捉磁場はバルク体内部に流れる遮蔽電流による発生磁場により模擬を行っている。そのため観測時間は、単一バルク体において、実際に行った実験値と磁場強度が同じとなる時間とした。Fig. 8 に本研究で用いた解析モデルを示しており、実験との比較のために実験で使われる超電導マグネットと同じ寸法の励磁用マグネットと超電導バルク体を用いた。また、高さ方向中心でのバルク体間のギャップを Gap A、上下のギャップを Gap B とし、それぞれのギャップ距離を 0~10 mm の間隔で変化させて捕捉磁場分布特性の検討を行った。



(a) Analysis model



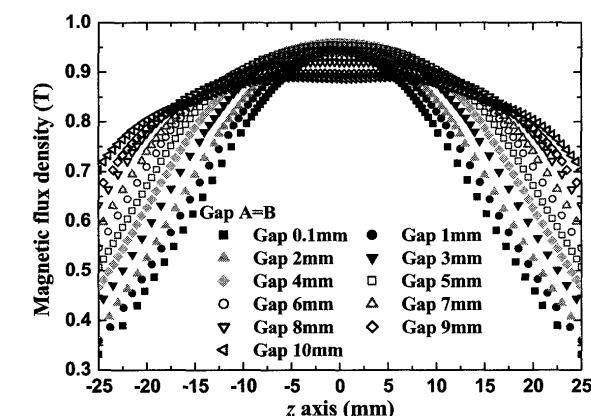
(b) To-scaled schematic drawing of a four stacked HTS bulk magnet as function of axial gap length

Fig. 8 To-scaled the schematic drawing of an analysis model with superconducting magnet and HTS bulk annuli.

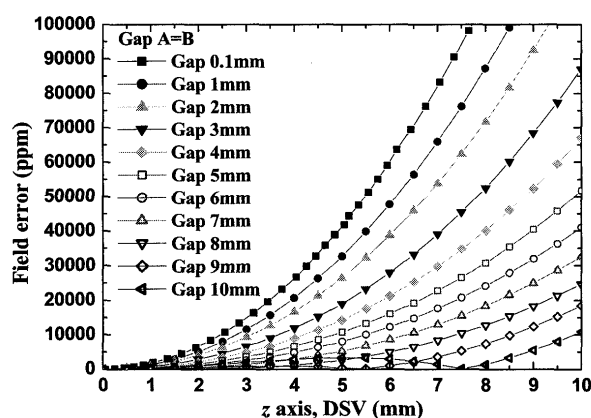
4.2 解析結果

Fig. 9 にバルク間のギャップ Gap A と Gap B を同じ値で変化させた場合における高さ方向の捕捉磁場分布と変位当たりの磁場強度の差に関する解析結果を示す。

Fig. 9 の結果から、ギャップ距離が 9 mm まではギャップを大きくしていくに従い磁場均一度が向上していることがわかる。しかし、それよりもギャップを大きくした場合、捕捉磁場分布が歪んでしまう。これは、ギャップが大きすぎるため、ギャップ部からの漏れ磁場が大きくなってしまい中心部の磁場強度が低下したためであると考えられる。次に、Fig. 10 (a) に Gap A を 5 mm に固定し、Gap B を変化させた場合のバルク体の高さ方向への磁場均一度を示し、Fig. 10 (b) に Gap B を 5 mm に固定し、Gap A を変化させた場合の解析結果を示す。Fig. 10 には、厚み 20 mm の単一バルク体の解析結果も合わせて示している。Fig. 10 の解析結果から、Gap B を固定して Gap A を変化させた場合の磁場均一度が相対的に向上している。



(a) Calculated magnetic field distributions along the z-axis of the stacked HTS bulk annuli



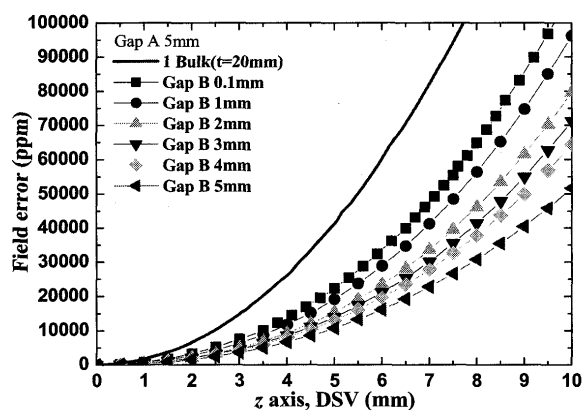
(b) Calculated spatial field error along the z-axis

Fig. 9 Calculated magnetic field distributions along the axial direction of the stacked HTS bulk annuli as functions of axial gap length and spatial field error profiles.

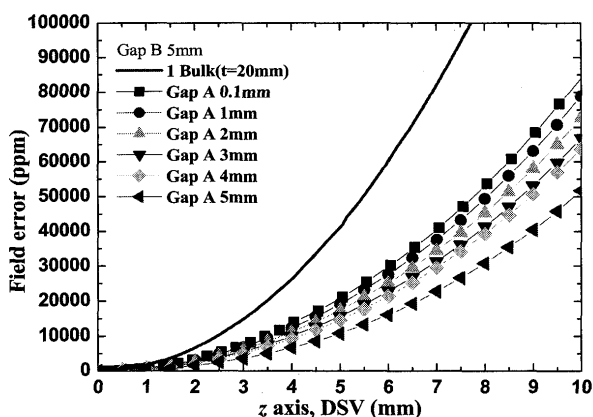
これは、Gap B を固定した場合 (Fig. 10 (b)) が相対的な積層バルク体の高さが大きくなるためである。しかし、限られた数の高温超電導バルク体を用いて積層構造を実現させるときには、バルク体の厚みと数を考慮した積層構造の最適化が必要になると思われ、その際には数値解析による検討が必要不可欠になると考えている。

5 結言

本研究では、NMR 装置の小型化・低コスト化を目指して、高温超電導バルク体を用いた小型 NMR 装置用高磁界発生マグネット開発を行ってきた。そして、本論文では、4 個の厚さ 5 mm の高温超電導バルク体を積層するための積層構造最適化について実験と電磁場数値解析の両面から検討を行った。実験と解析の両方の結果からバルク体を積層する際に各バルク間にギャップを設けることにより磁場均一度が向上する結果が得られ、ギャッ



(a) Gap A = 5mm



(b) Gap B = 5mm

Fig. 10 Calculated spatial field error profiles along the z-axis of stacked bulk annuli as function of gap length.

プ距離と配置などが積層構造最適化に非常に有効であることを明らかにした。

(2010 年 11 月 18 日受付, 2011 年 2 月 24 日再受付)

参考文献

- [1] M. Tomita and M. Murakami, High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K, *Nature*, vol.421, pp.517-518, 2003.
- [2] T. Nakamura, et al, Development of a superconducting magnet for nuclear magnetic resonance using bulk High-Temperature superconducting materials, *Concepts in Magnetic Resonance, Part B*, pp.65, 2006.
- [3] Y. Iwasa, HTS and NMR/MRI magnets: Unique features opportunities and challenges, *Physica C*, vol.445-448, pp.1088-1094, 2006.
- [4] S.B. Kim, et al, Characteristics of trapped magnetic fields in HTS bulk annuli with various axial spaces for compact NMR magnets, *Physica C*, vol. 470, pp.1740-1744, 2010.
- [5] S.B. Kim, et al, Characteristics of the magnetic field distribution on compact NMR magnets using cryocooled HTS bulks, *Physica C*, vol.469, pp.1811-1814, 2009.