

高温超電導材を使った小型マグネットの開発

富田 優* 福本 祐介* ミリアラムラリダ*

鈴木 賢次* 石原 篤*

Development of a Compact Permanent Magnet System Based on High Tc Superconductors

Masaru TOMITA Yusuke FUKUMOTO Miryala Muralidhar

Kenji SUZUKI Atsushi ISHIHARA

We have designed and fabricated a compact, lightweight and mobile permanent high-Tc superconducting magnet system using melt-processed bulk rings. Magnetic field distribution inside the annular magnet reached 0.75T to 2.59T, for one to ten rings, respectively. The increasing number of rings enhanced magnetic field in the center position and caused the field to be flatter over the entire surface. Using this new permanent magnet, we successfully magnetized several melt-processed bulk samples at 77 K. Use of simple superconducting permanent magnet for magnetizing bulk melt-processed materials can open new technological windows in various industrial areas.

キーワード：高温超電導，超電導バルク材，薄膜，着磁，マグネット，NMR，軸受

1. はじめに

現在、市販されている超電導マグネットは、NbTi（ニオブチタン）やNb₃Sn（ニオブスズ）といった金属系超電導材で作られていて、液体ヘリウム温度（4.2K）まで冷却する必要があるため、冷凍機も含め非常に大がかりな装置である。一方、希土類系の高温超電導材¹⁾を用いたものは、液体窒素（77K）あるいは同等温度の冷凍機による冷却でも超電導磁石として動作するため、金属系超電導材に比べて飛躍的なコンパクト化・低価格化が可能となる。高温超電導の強磁場研究では、17テスラを超える磁場を発生できる超電導バルク磁石が開発されており^{2), 3)}、これを活用した高性能の材料分析器や軸受機器の実現も期待されている。また、これまでの大型のマグネットと異なり、高温超電導バルク材を使った持ち運び可能な小型のマグネットが実現できれば、移動困難な汎用の超電導マグネットをステーション化し、そこで小型マグネットに着磁させ、必要な場所に必要の磁場を自由に移動させることが可能となる。

このような小型マグネットの開発は、様々な応用に波及する。その一つとして、試料振動型磁力計（VMS；Vibrating Sample Magnetometer）や核磁気共鳴（NMR；Nuclear Magnetic Resonance）装置の持ち運び可能な移動型材料分析器があげられる。また、鉄道用超電導ケーブルの開発^{4), 5)}においてはき電線として使われる超電導

線材の冷却用の冷媒の液体窒素を循環させる必要があり、冷媒内のポンプ軸の動揺が課題となっている。その解決法として、小型マグネットの支持力によるポンプ軸の安定化が期待されている。

高温超電導バルク材は、それ自身が超電導の結晶であるため、①高磁場中でも高電流密度、②制御不要で安定した磁気浮上、③コンパクトで強磁場発生といった特徴がある。また、実用上使用可能な温度と言われている液体窒素温度（77K）においても高い電流密度を有するため、高温超電導バルク材の持つ特徴を液体窒素冷却でも十分に活かすことが可能であり、小型の超電導マグネット開発に適している。

そこで、著者らはリング形状に加工したGd（ガドリニウム）系の高温超電導バルク材（以下、リングバルク）を用いた小型超電導マグネットの開発を進めている。

本稿では、高磁場を発生する小型超電導マグネットの開発と、この技術を使った機器開発のうちNMR装置の開発および鉄道向けの超電導ケーブル用ポンプの支持用軸受について述べる。

2. 小型超電導マグネットの開発

2.1 リングバルクの製作

Gd-123とGd-211の粉末をモル比3：1として混合し、溶融時にGd-211相を安定させるために0.5wt%のPtを加え、機械特性を向上させるために10wt%のAg₂Oを混合した。混合した粉末を90mmφのパレットに入れ、冷

* 材料技術研究部 超電導応用研究室

特集：材料技術

間静水圧成型機により200MPaの圧力下で成型した。成型したバルク体は電気炉で焼成された後、400-450℃の温度で600時間、酸素アノールを行い、最終的に外径はφ80mmとなる。この時、レーザー加工で中心にφ50mmの穴をあけ、リング形状とした。このような穴あけ等の加工をした場合、冷却や捕捉磁場の電磁力等によって使用初期にバルク材の特性劣化が進行する恐れがあるため、加工直後に樹脂含浸⁶⁾による補強を施し、材料マトリックスの高強度化を図った。含浸工程は含浸材料となる主剤樹脂と硬化剤のそれぞれを30℃まで予熱した状態で、配合組成(重量比)100:32で混合させ、真空下で脱気を行う。次に、バルク体を70℃まで予熱し、真空槽の中で減圧した後、脱気後の樹脂に浸し、この状態で大気圧以上に加圧し、最後に80℃において6時間、120℃において2時間加熱した。最終的なリングバルクの外観は図1のとおりであり、内径47mm、外径87mm、厚さ22mmである。

2.2 リングバルクの着磁及び磁場分布測定

リングバルクの着磁は、フィールドコイル法(FC)で行った。市販の超電導マグネットの中心にリングバルクを配置し、C軸と平行方向に2~5Tの磁場を印加した。その後、液体窒素で浸漬冷却し15分間維持した後、印加磁場を0Tとし、さらに、磁場の安定を得るため、15分間放置した後、ホール素子を用いて磁場分布の測定を行った。リングバルクの表面磁場の測定結果を図2に示す。

バルク体表面は0.9T以上となり、中心付近に均一な磁場空間が得られていることが分かる。また、バルク内部の磁場分布について、中心部(底面から11mm)の磁場分布の測定を行った。結果を図3に示す。磁場の色の目盛間隔は0.01Tであり、中心磁場は0.74Tでφ4mm程度の空間に均一な磁場を得ることができた。中心部に穴をあける円環状に加工することにより、磁場の均一化を図ることができる。以下同様に、溶融法によって製作した

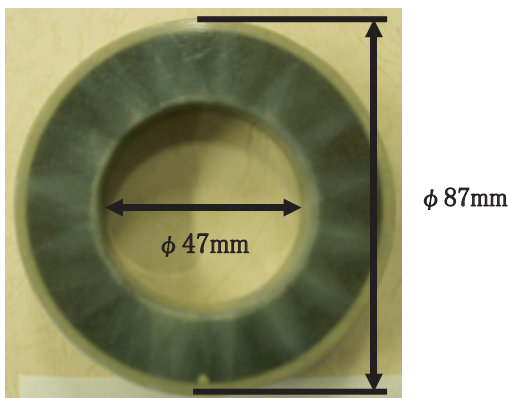


図1 リングバルクの外観

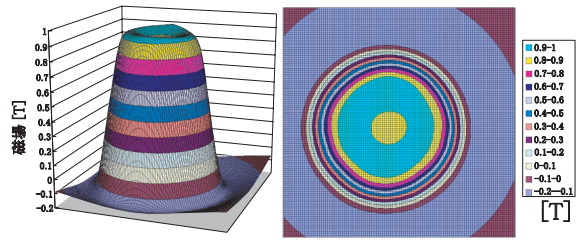


図2 リングバルクの表面磁場分布

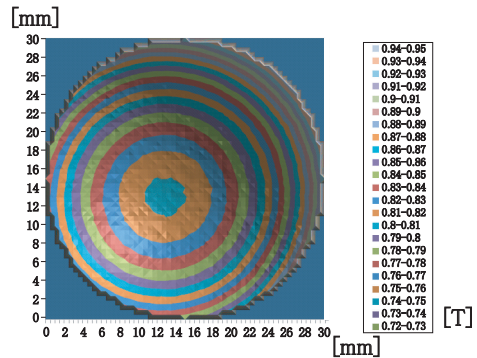


図3 中心部の磁場分布

表1 リングバルクの中心磁場
(上段：バルク No, 下段：中心磁場値)

3856	3858	3871	4171	4172
0.61T	0.74T	0.71T	0.55T	0.56T
4173	4176	4188	4189	4201
0.69T	0.69T	0.55T	0.55T	0.55T

10個のバルクについて磁場分布の測定を行った。各バルクの中心磁場値について、表1に示す。バルクにはそれぞれ材料の不均一性に起因し、最大30%程度の中心磁場の差があるが、0.55T以上の磁場を発生していることが分かった。

以上の検討結果を踏まえ、リングバルクの積層数を変化させて、着磁を行い磁場分布について評価を行った。積層については、中心より磁場値の高いバルクを配置した。高さ方向に磁場を測定した結果を図4(上)、半径方向に測定した結果を図4(下)に示す。ともに、バルクの中心位置を0とした。また、層数の増加に伴い、中心磁場は均一に近づき、磁場値は0.75Tから10積層時の2.59Tまでの向上がみられた(図5)。また、1層及び7層の場合の磁束クリープについて測定を行った。結果を図6に示す。1層の場合も7層の場合もほぼ同様の結果となり、外部磁場を消磁後、1時間で14%、6時間で19%低下することが分かった。この磁束クリープ現象については、着磁後、温度を数K降下することにより軽減することができる。

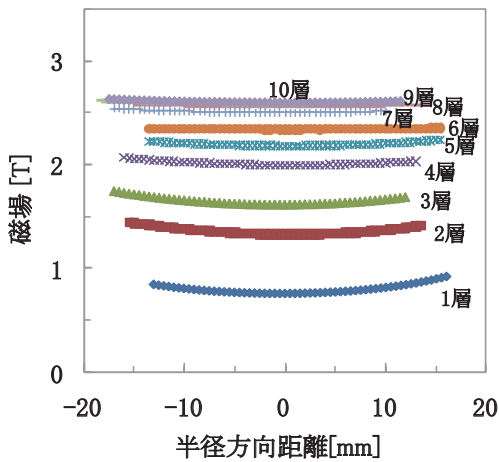
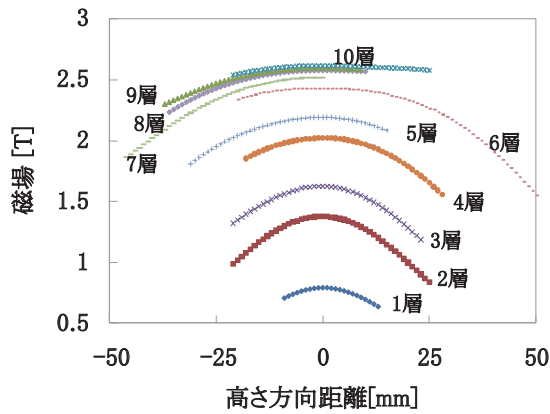


図4 リングバルクの積層による磁場分布の変化
(バルク中心を0mmとする)

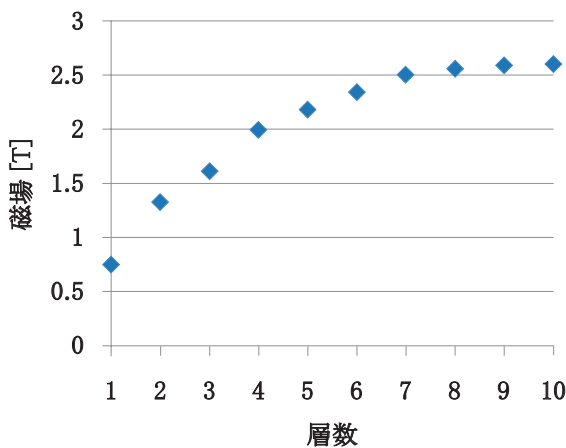


図5 積層数による中心磁場の変化

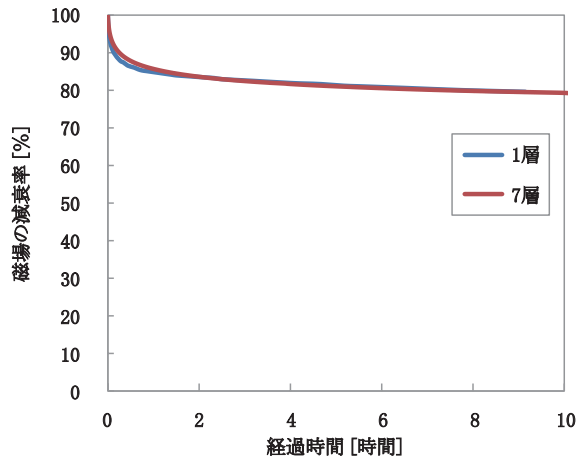


図6 磁束クリープの様子

2.3 小型超電導マグネットの構成および着磁試験

リングバルク単体の検討結果を踏まえ、液体窒素温度で動作する小型超電導マグネットを構成した。磁場を得るためにリングバルクを選定し、C軸方向に積層し、内外周をFRP容器で覆い、メインステーションとなる大型の超電導マグネットを着磁を行う。その後、液体窒素の蒸発を抑えるため、真空断熱層を持つSUS製の容器に納め、適宜液体窒素を補給し、冷却する(図7)。最終的には、直径120mm、長さ320mmの円筒形の容器となり、ボア径はφ45mm程度である。製作した小型超電導マグネットの性能確認試験として、φ30mmのGd系超電導バルク材を準備し、小型超電導マグネットと市販されている大型の超電導マグネットにて着磁を行った。なお、一般には、超電導バルク材は、市販の大型の超電導マグネットを使い磁場捕捉のため着磁を行なう。

小型超電導マグネットのリングバルクの積層数を4個(中心磁場2.02T)とし、FCで行った(図8)。サンプルホルダーにサンプルを設置し、サンプルを小型超電導マグネットの中心へ配置する。その後、液体窒素を充填し、サンプルが十分に冷却されたあとサンプルホルダーを引き出し、着磁されたサンプルを取り出した。市販の超電導マグネットを着磁した磁場分布特性を図9(左)、小型超電導マグネットを着磁した磁場分布特性を図9(右)に示す。最大磁場値は両者とも0.7T以上となり、ほぼ同等の磁場分布特性を得られた。これにより、小型超電導マグネットは、バルク着磁用として十分使用できることがわかった。これから、小型超電導マグネットの発生磁場性能は、市販の大型の超電導マグネットと同等の性能を有していると言える。

特集：材料技術

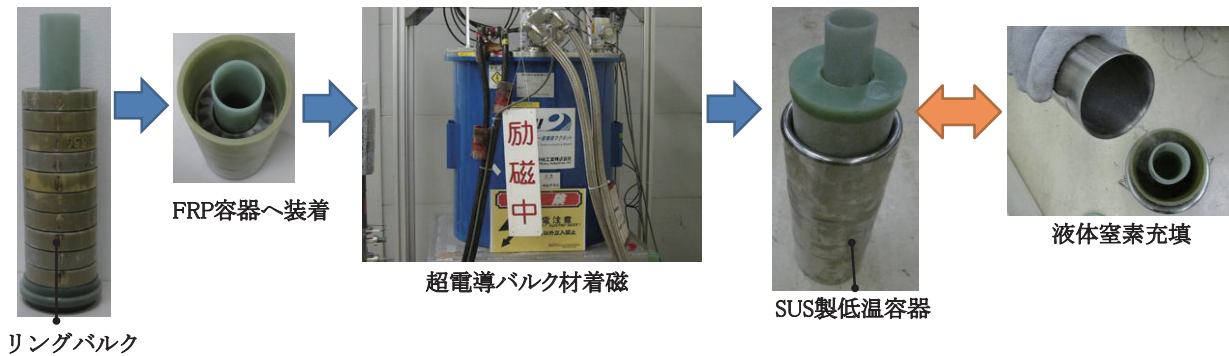


図7 小型超電導マグネットの構成手順

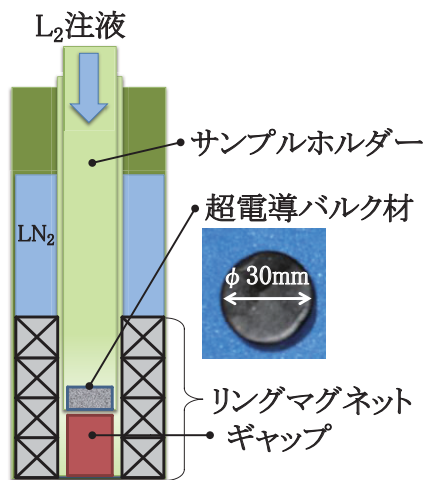


図8 小型超電導マグネットによる着磁

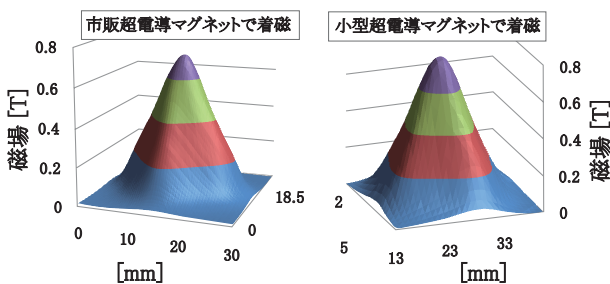


図9 着磁試験の結果

(左：市販品で着磁，右：小型超電導マグネットで着磁)

3. 小型超電導マグネットの機器応用

3.1 卓上型 NMR

3.1.1 基本構成

図10に高温超電導バルク材を適用したNMR装置の概念図を示す。クライオスタット内にリングバルクを設置し、中心に試料空間を形成している。クライオスタット内は冷却のため液体窒素やネオンなどで満たされ、また、周囲には鉄のシールド材などが設置され漏洩磁場を遮断している。これまでのコイル型による磁石では電源

の供給装置が必要で、各研究現場で簡単に使用できるような移動型の卓上型NMRの実現は困難であった。一方、高温超電導バルク材を用いると、一旦、磁場を着磁すれば、超電導材内部は、永久電流状態となり、液体窒素などの冷却剤を数日おきに補充する程度で、電源供給も不要のまま発生磁場は保持される。

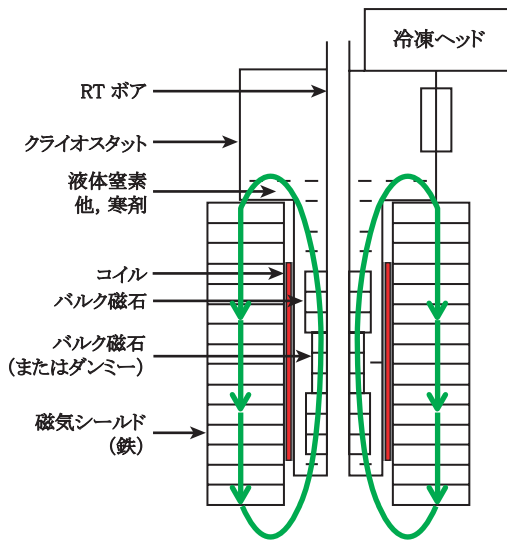


図10 NMR マグネットシステムの構成

3.1.2 超電導バルク材と薄膜プレート

鉄道総研はマサチューセッツ工科大学 (MIT) と共同で、コンパクトなNMR マグネットを開発している^{7), 8)}。近年は、超電導バルク材とYBCO (YBa₂Cu₃O₇) 薄膜プレートを複合化したNMR用マグネットの研究を進めている⁹⁾。超電導バルク材は発生磁場特性に優れているが、均一磁場を得るのが困難であり、一方、YBCO 薄膜プレートは、均一磁場は得やすいが、発生磁場の値が低いという特徴がある。超電導バルク材と薄膜プレートを複合化する理由は、NMRとして求められる発生磁場特性と磁場の均一性の双方が期待できるからである。

YBCO 薄膜プレートは、一辺が40mm、厚さ80 μmの角型で中心にφ25mmの穴空け加工を施している。加工

前後の磁場分布特性それぞれについて、図11に示す。穴空け加工を施したことによって中心磁場は低下しているが、薄膜プレートの劣化は見られなかった。

次に薄膜プレート25枚の積層方法について、図12の(1)の角状に積層した場合と(2)の22.5°ずつ回転し星形に積層した場合のそれぞれについて、磁場分布を測定した。着磁方法は、0.1TのNdFeB(ネオジウム鉄ボロン)磁石の磁場を用いてFCにより行った。磁場分布の測定結果を図13に示す。均一度では、ほぼ同等の結果となったが、角型の方が星型よりも高い捕捉磁場を示すことがわかった。また、ここでのリングバルクは、内径26mm、厚さ4mmに加工したGd系超電導バルク材を使用した。

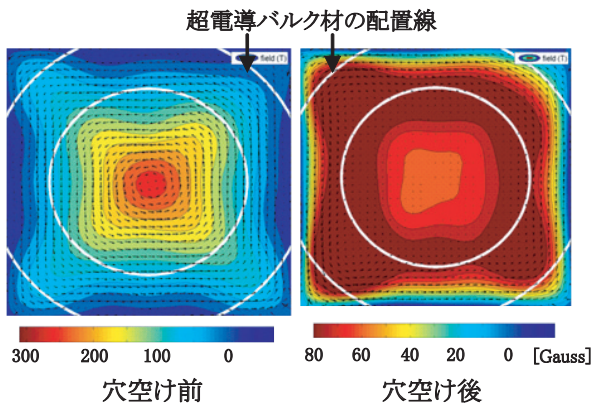
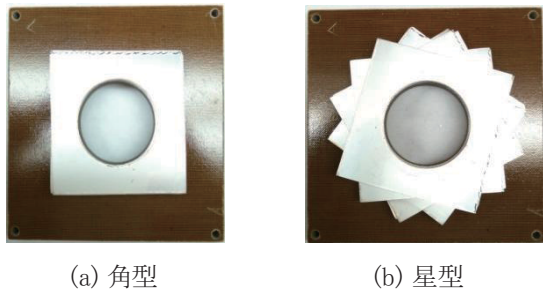
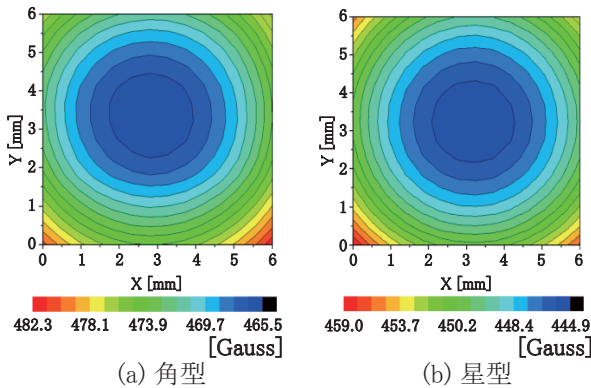


図11 穴空け前後での磁場分布の比較



(a) 角型 (b) 星型
図12 積層したYBCO薄膜プレート



(a) 角型 (b) 星型
図13 径内の磁場分布の測定結果

3.1.3 プロトタイプマグネットの構成、試験

これまでの実験結果をもとに、プロトタイプのNMR用マグネットを製作した(図14)。プレートは750枚を積層しており、その上下にリングバルクを配置している。上下に配置したリングバルクは、外径46mm、内径25mmであり、それぞれ中心磁場は、0.25T、0.21Tである。これら2つのマグネットをFCで着磁し、外部印加磁場は、0.75Tと0.25Tの2パターンとした。図15にテストコイル中心付近の磁場分布を示す。0.75T印加時の測定結果が同心円状の磁場分布を示しているが、0.25T印加時の方が、磁場の均一面積は大きいことが分かった。今後は、リングバルクの数を増やすことによる磁場分布の変化等を確認する予定である。

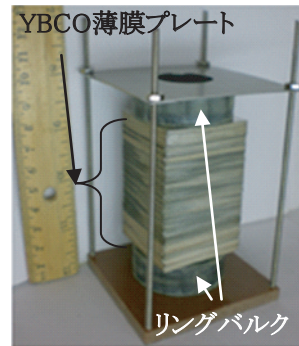
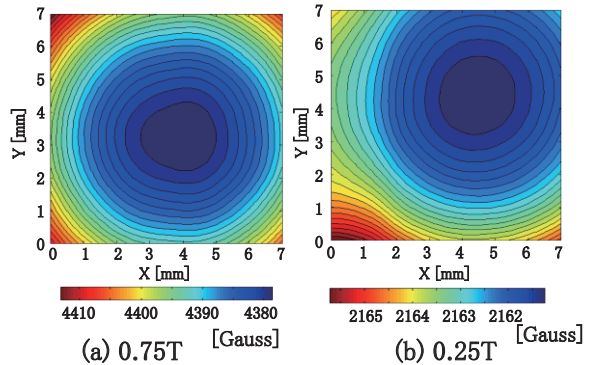


図14 プロトタイプマグネットの外観



(a) 0.75T (b) 0.25T
図15 マグネット内部の磁場分布

3.2 鉄道用超電導ケーブルのポンプ支持軸受

鉄道用超電導ケーブルやモータ等の応用機器を構成する際、超電導材を冷却するために冷媒を循環させなければならない。冷媒を循環するポンプは、インペラをモータで回すだけの簡単な構造であるが、モータは常温部、インペラは極低温部に配置されるため、熱侵入を防ぐためにもシャフトを長くする必要がある。しかし、長尺のシャフトを用いると高速回転領域で軸ブレが起こるため制約があり、また、液体の冷媒の中に機械式のベアリングを設置した場合、摩耗や動作不良が起きてしまう問題がある。そこで、リングバルクを使いシャフト軸の安定

特集：材料技術

化を図る方法の研究を進めている。

シャフトの末端部は冷媒内に配置されているため、自ずとリングバルクは超電導状態になり、シャフト部分に永久磁石や超電導バルク材を設置することによって、安定したシャフトの支持ができる。

現在、図16に示すようなポンプ用支持軸受を製作し、性能試験を進めている。リングバルクは、内径26mm、厚さ4mmに加工したGd系超電導バルク材を使い、シャフトにはネオジム磁石の同極が対向しているマグネットバーを設置し、超電導接合面で1T近くの強力な磁場を発生する。支持軸の安定化を確認しており、今後、ポンプの回転を模擬した実験を行う予定である。

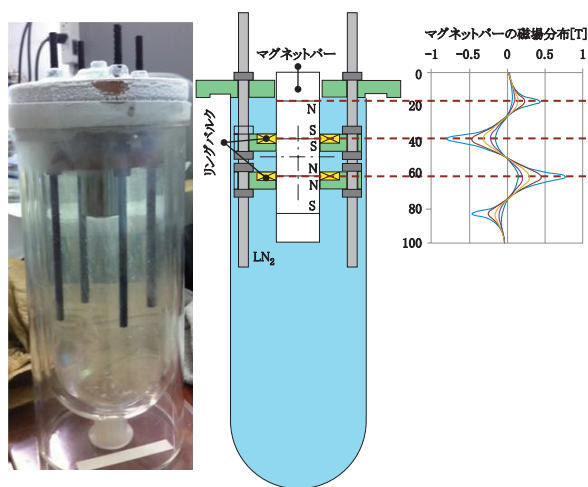


図16 鉄道用超電導ケーブルのポンプ支持軸受

4. まとめ

本研究において以下の知見を得た。

- (1) 高温超電導材料を用いた液体窒素の冷媒で使用できる小型超電導マグネットを開発した。小型超電導マグネットと市販の大型の超電導マグネットのそれぞれで、直径30mmの供試材への着磁を行なった結果、ほぼ同じ磁場分布特性が得られ、市販の超電導マグネットと同様の高精度の磁場発生が得られることが

わかった。

- (2) 小型超電導マグネットを用いた応用機器として、卓上型のNMR装置の開発を行なった。超電導バルク材とYBCO薄膜プレートを使用したマグネットにおいて、印加磁場を下げることにより、磁場の均一面積の拡大化が図れることがわかった。また、鉄道用超電導ケーブルのポンプ支持軸受部の開発では、リングバルクで支持軸の安定化が図れることを確認した。

文献

- 1) S. Jin, et al.; Stress and field dependence of critical current in Ba2YCu3O7-d superconductors, Appl. Phys. Lett., 51, 855-857, 1987.
- 2) M. Tomita, M. Murakami.; High temperature superconductor bulk magnets that can trap 17.24 T at 29K, Nature., 421, 517-520, 2003.
- 3) 富田優；高温超電導体の樹脂含浸・金属含浸による高磁場特性の向上，鉄道総研報告，Vol.22, No.4. pp.47-52, 2008
- 4) 富田優, 福本祐介, 鈴木賢次: 鉄道応用に向けた高温超電導線材の特性向上，鉄道総研報告，Vol.23, No.6. pp.47-52, 2009
- 5) Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109, 2011.
- 6) 富田優；樹脂含浸技術による高温超電導体の特性向上と超電導応用，鉄道総研報告，Vol.17, No.5,35-40, 2003
- 7) Y. Iwasa, S. Hahn, M. Tomita, H. Lee, J. Bascunaan; A “Persistent-Mode” Magnet Comprised of YBCO Annuli, IEEE Trans Appl Supercond 15 2352-2355, 2005.
- 8) 富田優；MITとの共同研究，RRR Vol.63 No.3, 2006
- 9) S. Hahn, J. Voccio, S. Bermond, Dong keun Park, J. Bascunan, Seok Beom Kim, M. Tomita, Y. Iwasa ; Field Performance of an Optimized Stack of YBCO Square “Annuli” for a Compact NMR Magnet, IEEE Trans Appl Supercond 21 1632-1635, 2011.