

特 集

高温超電導バルク磁石による強磁場応用と磁気浮上

Application of Intense Magnetic Field and Magnetic Levitation by High Temperature Superconducting Bulk Magnet

岡 徹雄^{*1}, 横山 和哉^{*2}, 高橋 雅人^{*3}, 坂井 直道^{*1}

Tetsuo OKA, Kazuya YOKOYAMA, Masato TAKAHASHI, Naomichi SAKAI

The recent status of research and development is discussed from the viewpoint of industrialization of high temperature superconducting bulk as a compact magnetic field generator or magnetic levitation device. It is expected that various high magnetic field equipment and non-contact magnetic levitation utilizing the superconducting performance that can be greatly improved in combination with refrigerators will widely spread.

Keywords: bulk superconductor, field-trapped magnet, pulsed field magnetization, magnetic levitation.

(2023 年 6 月 29 日受付)

1 緒言

超電導体の磁場応用については大きく 2 つのカテゴリーに分類されることが多い。一つは超電導線材に代表される電気抵抗がゼロとなる性質を生かしたコイルやケーブルであり、もう一つは焼結法などその材料合成に由来する塊状のまま応用する方法である。元来、薄膜の対となるバルク（塊）という単語があるが、その特徴的な振舞から、高温超電導体のバルク材料を特にバルクあるいはバルク磁石と称している。

超電導線材をコイルとして使う強磁場応用は磁気浮上列車や MRI などすでに産業化している。超電導コイルの発生する強磁場は現在 25 T 以上におよび[1]、国際的にも大型プロジェクトが推進されている。一方、バルク磁石には従来からの巨大市場がなく、市場創出と製品開発を同時に進めなければならない。本稿では、バルク磁石が発生する強磁場と磁気浮上に着目し、その性状を解説しながらその応用開発に言及する。

2 バルク磁石

バルク磁石に主に用いられるのは RE (希土類) 123 系と呼ばれる超電導相 $REBa_2Cu_3O_{7-y}$ に常電導相を分散させた銅酸化溶融成長体である[2]。すでに工業的に安定に生産されてその市場供給が始まっている[3]。

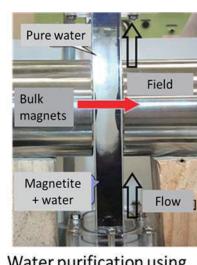
臨界電流密度の向上を反映して、極低温でのバルク磁石の捕捉磁場は大幅に向上する。したがって強磁

場を得るために冷凍機の利用は必須であろう。液体窒素のような特殊作業はなく簡単に操作でき、自由に温度設定できる利点をもつ。ただ、低温で捕捉された磁束の反発によりバルクには応力がかかるため機械的な補強が必要である。様々な補強手段が考案され、すでに 10 T の印加に耐える構造が提案されている [4]。

Fig. 1 に示すように、バルク磁石は 2 つのカテゴリーに分類できる。能動的 (Active) の利用では、超電導状態のバルク磁石をあらかじめ磁化して擬似永久磁石として利用する。永久磁石とは異なる原理で捕捉された強い静磁場はモータなどの回転機[5]や NMR[6, 7]などに向けて研究されている。

Active

- Strong magnets
 - NMR/MRI magnets
 - Magnetic separation
 - Motors/Generators
 - Sputtering cathodes
 - Drag delivery system
 - Undulators



Passive

- Levitation devices
 - Contactless-Bearings
 - Flywheel Energy storages
 - Demonstration models
 - Transporters
 - Stirrers/Mixers
 - Spin coaters



Fig. 1 Application of HTS Bulk Magnets.

連絡先：岡 徹雄, 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5
芝浦工業大学工学部, e-mail: okat@shibaura-it.ac.jp

^{*1}芝浦工業大学 ^{*2}足利大学 ^{*3}東京工業大学

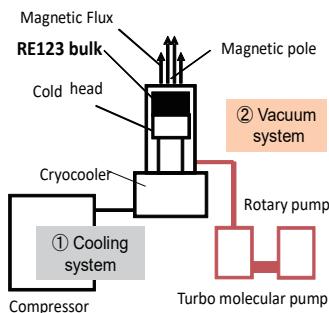


Fig. 2 Bulk Magnet System for Levitation

超電導コイルを小径から巻くと小さい曲率が電流性能を下げる。また成形後の熱処理はコスト高に繋がる。バルク磁石の場合、一旦励磁した磁場はいわば凍結されて極めて安定性に優れるという利点がある。

受動的 (Passive) な利用では、バルク磁石が外部の静磁場を捕捉して永久磁石を磁気浮上させる。高温超電導体の発見当初から軸受けや搬送装置など様々な提案がなされている。Fig. 2 に示すバルク磁石は真空容器内で冷凍機の冷凍部に直接固定して冷却される。受動的応用はほぼこの構成だけで、あとは浮上用の永久磁石や、逆の配置として磁石軌道が用意される。

3 バルク磁石の着磁

バルク磁石の着磁には静磁場法とパルス着磁法がある。合成した材料の磁場捕捉性能を評価するには超電導ソレノイドの静磁場が用いられる。これは最も効率よい方法であるが、大型の超電導磁石を用意する必要がある。より簡便な方法にパルス着磁法があるが、超電導状態での磁束の運動が起こす発熱によって臨界電流が低下するため、パルス着磁での捕捉磁場性能は静磁場に対して大幅に劣る。様々なパルスコイルによる磁場捕捉とパルス印加法が研究され[8-11]、現状で最大の捕捉磁場として希土類 123 系で 5.2 T が、MgB₂ では 1.6 T が報告されている[12, 13]。

磁束の運動を観察するとそこには磁束流 (フロー) と磁束跳躍 (フラックスジャンプ) が顕著に現れる。突然に出現する高速の磁束跳躍は磁場捕捉性能を著しく低下させるが、それはわずかな温度の相違によっても起こる[14]。磁束侵入の挙動と波形制御に磁性体ヨークの影響が大きいことが示唆される一方[15]、バルク磁石への欠陥の導入が磁束の侵入を促進すること[16]、またバルクの接合部からも優先的な磁束侵入が起こることが報告されている[17]。

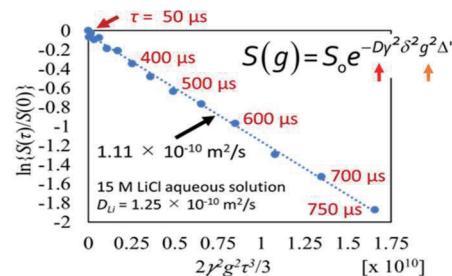
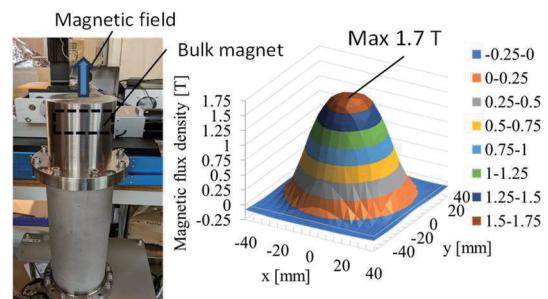


Fig. 3 Diffusion NMR Device

4 磁石としての強磁場応用

4.1 NMR

バルク磁石の強磁場応用に NMR 用磁石がある。リング状のバルク磁石を重ねて井戸型の磁極を構成し、これを他の NMR 磁石で励磁して利用する。この研究ではバルク磁石によるシリコンゴムからの世界初の NMR 信号が検出された[18]。さらに MRI 画像の取得に成功し、この成果はプレス発表された[19]。

この研究はバルク磁石表面の磁場を使う研究に発展し、物質の拡散係数を簡便に測定できるシステムとして、自動車用バッテリーなどのイオンの挙動の解析に使われる[20]。Fig. 3 に ⁷Li の拡散係数の測定結果とその装置を示す。点が示す測定値と点線で示す文献値が一致することから、電解液の分析に応用できることがわかる。バルク磁石の強磁場と急勾配によって拡散原子の位置情報を正確に捉えて、より微小部分での拡散を短時間に計測できる[21]。

4.2 磁気分離

強い静磁場は廃棄自動車のシュレッダーダストの分離や、加工食品からの磁性異物の除去などに多く利用されている。より強い磁場空間には超電導磁石が使われるが、例えば福島での土壤除染の取組は地域との協力で進められ高く評価されている[22]。

自動車部品に使われる無電解ニッケルメッキでは、浴中に残るニッケルを硫酸ニッケルとして回収する試

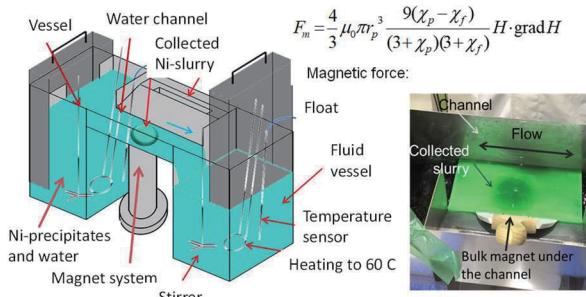


Fig. 4 Magnetic Separation

みが行われた[23]。磁気力は磁場の強さと勾配の積に比例するため、バルク磁石の磁場分布は好適である。Fig. 4 に示す実験では、1 日の稼働で硫酸ニッケル 8 kg が回収でき、これは再び原材料として利用できる。資源回収によるコスト低減、廃棄物からの環境保全、メッキ浴の寿命延長など様々な効果が見込める。

5 磁気浮上応用

5.1 磁気軸受

磁気浮上は超電導のピン止め効果を使ったバルク磁石特有の現象で、これを非接触軸受として電力貯蔵用フライホイールに応用する検討がなされた[24]。現在は鉄道の電力回生に向けた開発が進められており、大電力の貯蔵に非接触軸受には大きな期待がかかる[25]。また、電磁力による非接触軸受 AMB と組み合わせた安定回転の研究にも目が向けられている[26]。

5.2 磁気浮上実験モデル

Fig. 5 に示すバルク磁石を使った展示モデルは身近な理科教材となり[27]、さらに人を乗せた磁石板は実用レベルの浮上力を示した[28, 29]。

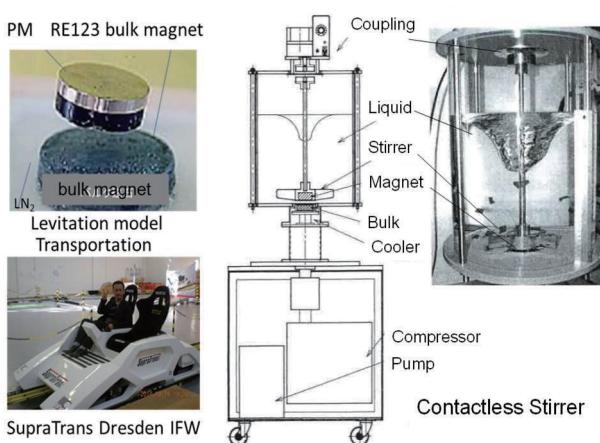


Fig. 5 Magnetic Levitation and Contactless stirrer

5.3 浮上搬送

無塵空間を非接触で搬送する強いニーズがあり、磁石軌道上での安定性の研究が進められた[30]。一方で人が搭乗できる移動手段としても試作された[31]。バルク磁石搭載部はモジュール化されて最適に設計計算された製品となっている[32]。さらに大型の建築物の免震・除震構造への適用が試みられた[33]。

5.4 非接触浮上

半導体製造時に無塵環境下での露光を目的に非接触型の回転機構を備えたスピナーが試作され、その回転性能が実用的に評価された[34]。医薬品製造では製剤タンクへの異物混入を防ぐため、攪拌子を完全に遮断したミキサーが必要である[35]。Fig. 5 に示すように、非接触攪拌には超電導を利用するしか方法はない。バルク磁石と浮上磁石が磁気結合し、小型冷凍機が連結回転する攪拌機がすでに販売されている[36, 37]。

6 まとめ

バルク磁石の製造から市場応用までのロードマップが示されている[38]。その製法は比較的シンプルであるから設備産業の整備が進めば工程は安定し、大量生産による品揃えやコストダウンに繋がる。小型冷凍機の利用はバルク磁石の利用分野を広げ、その技術開発は鍵となる。バルク磁石をめぐる真空、低温、磁場の 3 つのキー技術は工業的に完成しつつある。市場が見えた分野から順に産業投入が進むことを期待する。

謝辞

本論文は理化学研究所の仲村高志氏、株式会社マグネオ技研の秋山慎一氏の協力によりなされたものです。著者はこれらの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Awaji, et al., Field Stability Analysis of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet and Upgrade Plans for 30 T System at HFLSM, IMR, Tohoku University, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 29, No. 5, 4300305, 2019.
- [2] 坂井直道, 成木紳也, 村上雅人, 超伝導バルク磁石, 応用物理, Vol. 71, No. 5, p. 580, 2002.
- [3] CAN SUPERCONDUCTORS, <https://shop.cansuperconductors.com/> (参照 2023-6-25)
- [4] M. Morita et al., Development of New Reinforcement Method and 10 T Magnetization of QMGT Magnet, *NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT*, No. 117, pp. 36-42, 2017.

- [5] M. Miki, et al., Development of a synchronous motor with Gd–Ba–Cu–O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 7, 1 2006, doi:10.1088/0953-2048/19/7/S14
- [6] 金錫範, 液体窒素冷却の小型 NMR 用高温超伝導バルクマグネットの開発, 低温工学 Vol. 52, No. 1, p. 11, 2017.
- [7] 富田優, et al., 小型 NMR マグネット用超電導磁石の開発, 低温工学 Vol. 52, No. 1, p. 18, 2017.
- [8] T. Oka, Pulsed Field Magnetization and Flux Behaviors in Melt-Processed HTS Bulk Magnets: A Review, *Super-conductivity: Applications Today and Tomorrow*, Nova Science Publishers, New York, Chapter 6, pp. 115-133, 2014.
- [9] H. Fujishiro, et al., Higher trapped field over 5 T on HTSC bulk by modified pulse field magnetization, *Physica C*, Vol. 445–448, No. 334, p.8, 2006.
- [10] T. Ida, et al., Magnetization properties for Gd–Ba–Cu–O bulk superconductors with a couple of pulsed-field vortex-type coils, *Physica C*, Vol. 412–414, p.638, 2004, doi:10.1016/j.physc.2003.12.082.
- [11] M. D. Ainslie, et al., Enhanced trapped field performance of bulk high-temperature superconductors using split coil, pulsed field magnetization with an iron yoke, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 29, No. 7, 074003 (16pp), 2016, doi:10.1088/0953-2048/29/7/074003.
- [12] H. Fujishiro, et al., Record-High Trapped Magnetic Field by Pulse Field Magnetization Using GdBaCuO Bulk Superconductor, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 39, p. L1221, 2005.
- [13] T. Hirano, et al., A record-high trapped field of 1.61 T in MgB₂ bulk comprised of copper plates and soft iron yoke cylinder using pulsed-field magnetization, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 33, 085002 (10pp), 2020, doi:10.1088/1361-6668/ab9542.
- [14] T. Oka et al., Magnetic Flux Trapping and Flux Jumps in Pulsed Field Magnetizing Processes in REBCO and Mg-B Bulk Magnets, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1590, 012025, 2020, doi:10.1088/1742-6596/1590/1/012025
- [15] K. Yokoyama, et al., Enhancement of trapped field of REBCO bulk in a desktop-type magnet system, *Eng. Res. Express* Vol. 1, No. 2, 025053, 2019, doi:10.1088/2631-8695/ab5d97
- [16] K. Yokoyama, et al., Pulsed-field magnetization of a bulk superconductor with small holes, *Physica C*, Vol. 484, p. 343, 2013, doi: 10.1109/TASC.2011.2178057.
- [17] K. Takemura, et al., Pulsed field magnetizing behavior of Gd–Ba–Cu–O bulk superconductor with a superconducting joint, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 33, No. 5, 6800305, 2023, doi:10.1109/TASC.2023.3244149
- [18] 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 (Magnetic Resonance Engineering)*, Vol. 31B(2), pp. 65–70, 2007.
- [19] K. Ogawa, et al., Development of a magnetic resonance microscope using a high T_c bulk superconducting magnet, *Applied Physics Letters*, Vol.98, 234101, 2011, doi:10.1063/1.3598440.
- [20] M. Takahashi, et al., NMR Relaxometry Using Outer Field of Single-Sided HTS Bulk Magnet Activated by Pulsed Field, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 32, No. 6, 4602404, 2022, doi: 10.1109/TASC.2022.3161247.
- [21] 高橋雅人, et al., 高温超伝導バルク磁石表面勾配磁場を用いた拡散 NMR 測定装置の開発, 第 61 回 NMR 討論会, L1-2, 高知, 2022, https://www.nmrj.jp/NMR2022/index_e.html (参 2023-6-25).
- [22] 秋山庸子, et al., 超電導高勾配磁気分離のセシウム汚染土壤減容への適用可能性, 低温工学, Vol.55, No. 3, pp. 172-178, 2020, doi:10.2221/jcsj.55.172
- [23] T. Oka, et al., Magnetic Separation of Nickel-Plating Waste Liquid using a High Temperature Superconducting Bulk Magnet, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 35, 094006 (5pp), 2022, doi: 10.1088/1361-6668/ac7f61.
- [24] 安定回転めざす電力貯蔵円盤, 電気学会誌, Vol. 119, No. 3, pp. 136-139, 1999.
- [25] Y. Arai, et al., Levitation properties of superconducting magnetic bearings using superconducting coils and bulk superconductors, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 23, 11501 1 (5pp), 2010, doi:10.1088/0953-2048/23/11/115011
- [26] M. Komori, and C. Shiraishi, Superconducting Bearings Assisted by Self-Sensing AMBs in Liquid Nitrogen, 8th International Symposium on Magnetic Bearing, Mito, 2002
- [27] 三浦敦朗, 香月淳, 横山和哉, 超伝導バルク体のピン止め効果を利用した磁気浮上走行装置の製作, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会資料, Y-142, 函館, 2017.
- [28] 横山和哉, <https://www2.ashitech.ac.jp/elec/yokoyama/index.html>.
- [29] <https://newcars.jp/news/lexus-hoverboard/>, 2015.
- [30] P. Bernstein and J. Noudem, Superconducting magnetic levitation: principle, materials, physics and models, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 33, No. 3, 033001, 2019, doi:10.1088/1361-6668/ab63bd.
- [31] U. Floegel-Delor, et al., Bulk superconductor levitation devices: Advances in and prospects for development, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 28, No. 4, 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2809467.
- [32] M. Sawamura and M. Izumi, Numerical analysis of magnetic levitation forces for bulk superconductors with different superconducting junctions between multiple-seed-growth domains, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 34, No. 5, 055002, 2021, doi: 10.1088/1361-6668/abe8b3.
- [33] 津田理, 石山敦士, 磁気浮上応用, 低温工学, Vol. 46, No. 3, pp. 94-101, 2011.
- [34] S. Fukui, et al., Study on Application of Magnetic Levitation Utilizing HTS Bulks to Spin Processors for Photo Mask Production, *Physica C*, Vol. 463-465, pp. 1289-1292, 2007.
- [35] 秋山慎一, 超電導による磁気浮上のクリーンな回転装置, クリーンテクノロジー, 日本工業出版, 2002 年 7 月号 63-65 頁.
- [36] https://www.sartorius.com/.../p/M_Drive_Units, (2023-6-25)
- [37] 磁気浮上回転装置, 特許第 4930906 号
- [38] J. H. Durrell, et al., Bulk superconductors: a roadmap to applications, *Supercond. Sci. Technol.* Vol 31, No. 10, 103501, 2018, doi: 10.1088/1361-6668/aad7ce.