長尺高温超電導バルク体の着磁方法およびその特性*

(反復移動による着磁法の検討)

西嶋規世^{*1}, 佐保典英^{*1}, 林 秀美^{*2}
堤 克哉^{*2}, 富田 優^{*3}, 村上雅人^{*3}

Magnetization Method for Long High-Tc Bulk Superconductors (Study on Swing-Field-Cooling Method)

Noriyo NISHIJIMA^{*4}, Norihide SAHO, Hidemi HAYASHI,
Katsuya TSUTSUMI, Masaru TOMITA and Masato MURAKAMI

^{*4} Hitachi, Ltd., Mechanical Engineering Research Laboratory,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

We have developed a new water-treatment system that consists of a membrane separator and a magnetic separator using long (>200 mm) high-Tc bulk superconductors (SC's) as permanent magnets. For the magnetization of the long bulk SC's, we developed a new magnetization method, i.e., a swing-field-cooling method. This method involves applying a field, and cooling the bulk SC's below their transition temperature (T_c). The bulk SC's are then moved inside and outside of the applied field repeatedly. As a result, the bulk SC's experience high and low fields under the gradually cooled ambient, and the trapped field strength gradually increases. The advantage of the method is that it can magnetize bulk SC's with larger area than that of the applied field magnet. To evaluate the method, we fabricated a bulk magnet system more than 200 mm long, and magnetized it by split solenoid superconducting magnets with a diameter of approximately 100 mm. We then performed field measurements and found that a wider area could be magnetized by the present method. In addition, we also developed a simple model—based on the Bean model—of the magnetization process. Taking account of the temperature dependency of critical current density (J_c), the model could successfully simulate the resulting magnetic field produced by the present method.

Key Words: Bulk Superconductor, Magnetic Field, Magnetization, Modeling, Swing

1. 緒 言

製造プロセスの進歩によって、液体窒素温度(77K)近辺でも高い電流密度を有する高温超電導バルク体 (High-Tc Bulk Superconductor : 以下 HTS バルク体) の製造が可能になり, HTS バルク体の軸受システムや磁気分離システムへの展開が期待されている¹⁾.

著者らは, 下水, 環境水等の浄化を目的として HTS バルク体を擬似的永久磁石として用い, 回転膜によるろ過と磁気分離を組み合わせた膜磁気分離水処理装置の開発に取り組んでいる²⁾. 図1に膜

磁気分離装置の概要を示す. まず, 前処理槽において, 原水に, 凝集剤と磁性粉を添加し原水中の汚濁物と磁性粉が一体となったフロックを原水中に形成させる. フロックを含む原水は, 膜磁気分離装置下部から導入され回転膜上のフィルタによりろ過され浄化水として放流される. 回転膜の外側においては, 除去されたフロックが蓄積していくが, これを HTS バルク体が発生する磁気力によって汚泥回収シェル側に吸引する. 汚泥回収シェルは回転することによってフロックを大気中に引き上げ連続的に回収する.

本水処理装置においては, 回転膜の幅と同程度の長さの長尺な磁場発生部が必要となる. このため, 著者らは複数の HTS バルク体を並べて, 長さ 200mm 以上の磁場発生領域を持つ磁場発生装置 (以下バルクマグネット) を製作し, 2個の水平対向型のコイルからなる超電導マグネットを用いて磁場中冷却法による着磁を行い, その着磁特性について報告した³⁾.

* 原稿受付 2002年4月1日.

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(☎300-0013 土浦市神立町502).

^{*2} (株)九州電力総合研究所(☎815-8520 福岡市南区塩原2-1-47).

^{*3} (財)国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所(☎105-0023 東京都港区芝浦1-16-25).

E-mail: nisijima@merl.hitachi.co.jp

磁場中冷却法では、HTSバルク体の特性が制限とならない限りにおいて、ほぼ外部印加磁場に近い捕捉磁場が得られるが、大きな領域に着磁を行うためには、大型の印加磁場発生手段が必要となり、着磁システムが大型化してしまうという問題がある。着磁法としては、この他にパルス磁場を用いた研究がなされており⁴⁾、超電導マグネットを必要としない点で有効な着磁法であると言える。

また、本装置以外に大きな領域に着磁を行った例として、浮上式鉄道への適用を想定した報告⁵⁾があり、198×99mm 角のバルク体に対し、1.07×0.5m のレーストラック型超電導コイルを用いて磁場中冷却法による着磁を実施している。本装置や上記研究例のような長尺あるいは、大型のバルク体に対し、小型の印加磁場マグネットを着磁を行うことができれば、バルク体を利用したマグネットの実用性が大きく高まるものと考えられる。

このような観点から、本稿では、大型のHTSバルク体に着磁を行うために、磁場中冷却の過程でHTSバルク体を反復移動させ、広い範囲に着磁を行う方法（以下：反復移動法）を提案するとともに、実験およびモデルによって検討を行った結果について報告する。

Fig. 1 Structure of a membrane-magnetic separator for water purification

2. 実験方法

2.1 実験装置 HTSバルク体を用いたバルクマグネットの概要を図2に示す。バルクマグネットは、回転膜の幅分の長さを持った磁場発生部が必要となるために33mm 角×20mm 厚の11個のHTSバルク体を並べた約400mmの長尺の磁場発生部を備え、さらにHTSバルク体を冷却するための冷凍機、熱伝導ブロック、及びバルク体全体を覆う真

空容器から構成される。本実験で用いたHTSバルク体は、Y-Ba-Cu-O系材料でc軸が厚み方向に平行になるように方位制御され、かつY123相の擬単結晶中に、Y211相が微細分散したものである⁶⁾。また、着磁操作の繰り返しにおける劣化、急激な温度変化による熱衝撃を緩和するために表面に樹脂含浸が施されている⁷⁾。

Fig. 2 A superconducting bulk magnet system

2.2 着磁方法 着磁は上下に2個並べた水平対向型のコイルからなる超電導マグネットを用いて行い、バルクマグネットを図3に示すように水平ボアに挿入する。本超電導マグネットは、図中に示すように、水平方向に室温円筒空間（室温ボア、φ70mm）が設けられており、この空間内に供試体を挿入し磁場を印加することが出来る。また、着磁過程でHTSバルク体を移動させるために、後ろ側にアクチュエータを取付け、バルクマグネット全体を反復移動させた。

Fig. 3 Magnetization set up of a bulk magnet system

着磁手順としては以下のようなになる。①磁場発生部を水平ボア内中心に配置した状態で臨界温度以上（約100K）までHTSバルク体を冷却し、超電導マグネットによって磁場を印加する。②バルクマグネットをアクチュエータによって反復移動させながら、HTSバルク体を着磁温度まで冷却する。③反復移動を停止し、印加磁場を消去する。

この一連の着磁動作において、バルク体は周期的に変化する磁場を印加されながら継続的に冷却され

る。必要な磁場発生領域全体にわたって間欠的ではあるが高い磁場を印加することによって広い空間に着磁を実現しようとするのが本方法のねらいである。

3. 実験結果

3・1 実験条件 磁場中冷却法による着磁では、印加磁場強度、HTSバルク体の冷却温度が着磁特性に大きく影響するパラメータとなるが、反復移動法においてはさらに、反復移動の範囲、反復移動の周期が新たにパラメータとなる。本研究では反復移動周期は、着磁操作全体に要する時間に対し充分短くとすることとし、反復移動範囲のみをパラメータとした。また、印加磁場強度、着磁温度については、印加磁場強度 0.1Tあるいは 0.2Tとし、着磁温度は全ての実験において約 55Kとした。印加磁場強度を低く設定したのは、反復移動着磁時に発生する磁気力について現段階では充分検討出来ておらず、高い印加磁場強度で着磁を行うと着磁用マグネットが破損してしまう恐れがあったからである。高い印加磁場強度での反復移動着磁は今後の課題である。着磁温度 55Kとしたのは、反復移動法の効果を見るために、HTSバルク体特性が捕捉磁場の制限とまらない程度の充分低い温度とするためである。

表 1 に各着磁実験での条件を示す。反復移動範囲はバルクマグネットのバルク体列の中心が超電導マグネット室温ボアの中心と一致する位置を基準とした移動距離である。条件①および⑤は反復移動を行わない場合の磁場中冷却法での着磁である。

Table 1 Experimental conditions

No.	Applied field	Swing amplitude of bulks
①	0.1T	0
②		$\pm 25\text{mm}$
③		$\pm 70\text{mm}$
④		$\pm 100\text{mm}$
⑤	0.2T	0
⑥		$\pm 100\text{mm}$

磁場計測は磁束計 (F.W. BELL 製 9900 型) を用いて行い、図 4 のように真空容器表面上の HTS バルク体の中間を原点として座標系をとり、真空容器表面での Z 方向磁場強度分布 B_z を計測した。

真空容器表面とバルク体の表面は 3.5mm 離れており、また、磁束計センサー部には 1.5mm の厚みがあり計測素子はその内部に埋め込まれている。このため、例えば真空容器表面での計測値はバルク表面から約 4.25mm の距離での分布を計測したことになる。

Fig. 4 Measurement region in a trapped field

3・2 着磁実験結果 図 5 に印加磁場強度で 0.1T で反復移動を行わなかった場合 (条件①) と反復移動範囲を広げていった場合 (条件②～④) についての $y=0\text{ mm}$ における真空容器表面での捕捉磁場分布を示す。これより、反復移動を行うことによって中心における捕捉磁場が減少するが、周辺 ($x < -100\text{ mm}$, $x > 100\text{ mm}$) における捕捉磁場が増大していることが分かる。また、各バルク体に対応する捕捉磁場の形状は山型で反復移動の有無に関わらずほぼ同様であることから、バルク体内部まで磁束が侵入しほぼ一定の磁束が捕捉されていることを示している。条件①における捕捉磁場のピーク値は約 0.075T であり、印加磁場 0.1T に対し若干低いように見えるが、計測結果は真空容器表面での値であり、バルク体表面ではほぼ印加磁場に近しい捕捉磁場が得られていると考えられる。

反復移動の効果をより詳しく見ると、中心におけるピーク値は反復移動範囲を広げるほど減少しているのに対し、周辺部の捕捉磁場の増大は約 0.04～0.045T の一定値に漸近しているように見える。

Fig. 5 Measured magnetic-field distribution at $y=0$ under an applied field of 0.1 T

図 6 に印加磁場を 0.2T とした条件⑤、⑥における表面の捕捉磁場分布を示す。条件⑤、⑥においてはより広い範囲の計測を実施した。 $x < -150\text{ mm}$, $x > 150\text{ mm}$ の範囲においては、反復移動を行わなかった場合、磁場はほとんど捕捉されないのに対し、

反復移動を行った場合は 0.06 T～0.08 T 程度の磁場が捕捉されている。

Fig. 6 Measured magnetic-field distribution at $y=0$ under an applied field of 0.2 T

4. モデルによる検討

4.1 モデル 反復移動法においては、冷却過程中にバルク体の内部において磁束の出入りを繰り返した結果として捕捉磁場が得られるため、着磁操作中の温度、印加磁場の履歴によって捕捉磁場が変化する。従って着磁操作中の温度履歴、印加磁場の履歴を考慮し、バルク体内部の磁束の挙動を時間を追って計算して捕捉磁場分布を求める必要があると考えられる。

そこで、磁束の挙動について、基本的にはピンモデル⁸⁾に従いながら以下の仮定に基づいて、モデル計算による検討を実施した。

- (1)バルク体の臨界電流密度はバルク体の温度のみに依存し、磁場強度に依存しない。
- (2)着磁操作中においてバルク体は準定常状態にあるとする。すなわちバルク体内部の温度は一定値をとり、かつ磁束の移動による発熱現象等はないとする。
- (3)バルク体の厚み、奥行き無限大の1次元モデルを考え、磁束・電流の分布は幅方向のみ考慮する。
- (4)ある瞬間において各バルク体を受ける外部磁場は分布のない一定値であるとする。

隣接するバルク体による磁場が与える影響は無視し、バルク体1個ずつについてそれぞれ個別に計算した。①～③の条件下でバルク体内部の磁束密度に関する以下の方程式を満たす解を時間進行的に求めた。

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 j_c \quad \text{If } \frac{\partial B}{\partial x} > \mu_0 j_c$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 j_c \quad \text{If } \frac{\partial B}{\partial x} < -\mu_0 j_c$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad \text{If } -\mu_0 j_c \leq \frac{\partial B}{\partial x} \leq \mu_0 j_c$$

$$B|_{x=x_0} = B_a$$

上記式はバルク体内部で pinning force により磁束が固定される効果を簡単にモデル化したものである。バルク体の pinning force ($=\mu_0 j_c$) が局所的な磁場勾配より小さくなった場合磁束が移動し、捕捉磁場が変化する。

ここで B : バルク体内部の磁束密度, B_a : 外部印加磁場強度, μ_0 : 真空透磁率, j_c : 臨界電流密度, x_0 : バルクと外部境界位置である。 B_a は反復移動によって個々のバルク体に対し変化するので時間の関数, j_c は温度の関数であり、温度は冷却過程では時間の関数となるためやはり時間の関数である。また、 B は時間とバルク体内部の位置の関数である。

反復移動によって個々のバルク体から見ると外部磁場は周期的に変化するが、外部磁場としては、実験に用いたマグネットのボア中心軸上の磁場分布を用いた。また、温度は直線的に所定温度まで低下するものとし、臨界電流密度の温度依存性はバルク体製造メーカーの提供資料に依った。

反復移動の1往復を基準として、反復移動の所定回数を定め、全反復移動の間に温度が臨界温度から 50 K まで直線的に低下するとした。モデルにおける磁場の捕捉過程を分かり易く示すために、全反復移動回数を 100 回、反復移動距離を ± 100 mm とした条件で、 $x=100$ mm に位置するバルク体の最初の 2 往復分の反復移動過程における捕捉磁場分布の変化を示す。図 7 に反復移動を行うバルク体とマグネットの位置関係と、最初の 2 往復分の移動経路、図 8 にこの時のバルク体内部の磁束密度分布の変化を示す。

Fig. 7 Initial position and swing path of a bulk under a sample condition

a の位置で臨界温度付近にあるバルク体には磁束が容易に進入できるため磁束密度は外部の印加磁場に等しく、図8の最上段のグラフに示すように 0.055T 程度で均一である。バルク体が図7に示す b

(a) Calculated field distribution under a sample condition

(b) Sketch of the magnetic field shown in (a) above

Fig.8 Magnetic flux motion during first two swings

の位置に移動する過程で、外部磁場は図8の最上段のグラフに示すように減少していくが、温度が低下したバルク体は b の位置に到達した段階では pinning force によって若干の磁束を内部に捕捉している。b から c に移動する過程で、印加磁場が上昇するため、再度磁束が進入するが、c の状態では、温度が低下しているためバルク体は a の時と異なり、pinning force によって内部への磁束進入に抵抗を示す。このため c の状態ではバルク体内部の磁束密度は低くなっている。さらに、c から d、d から e に移動した時はさらなる温度低下によって pinning force が増大しており、磁束の移動に対し大きな抵抗を示すため、e の状態において中心部に外部磁場の影響が到達しなくなり、中心部の磁束は完全に捕捉され変化しない状態となっている。e から f にいたる過程ではさらに磁束が固定された領域が外側に広がっていくことがわかる。この過程を繰り返すことによって、最終状態ではバルク体内部にほぼ均一な捕捉磁場が得られる。

4・2 計算結果 本モデルを用いて条件⑥（印加磁場 0.2T, 反復移動距離 $\pm 100\text{mm}$ ）に対し計算した結果を図9に示す。

Fig. 9 Calculated and measured magnetic-field distribution at $y=0$ and under an applied field of 0.2 T

計算において全反復移動回数は 300 回とした。本モデルは 1 次元で計算しており、バルク体の厚み、奥行きを考慮していないが、得られる捕捉磁場は近似的にはバルク体の表面の値と考えることができる。実験結果は真空容器表面での計測結果であるため、そのまま比較はできないが、中心部での捕捉磁場が減少し、周辺部で増大する傾向は一致している。条件⑤の静磁場着磁の実験結果では中心部で、印加磁場 0.2T の約 75% の捕捉磁場 0.15T が真空容器表面で得られていることから、バルク体表面の捕捉磁場の約 75% が真空容器表面で計測されていると仮定すると、計算結果は中心部では、計測結果とほぼ一致しているが、周辺部ではやや低く見積もっている傾

向がある。これは、モデルが1次元であることと、バルク体が隣接する影響がモデルで考慮されていないことに起因していると考えられる。

また、図9においては同時に印加磁場の分布および反復移動幅を示した。印加磁場は、ボア中心から170mm程度離れるとほぼゼロになる。反復移動幅が100mmであることを考慮すると、中心付近のバルク体は印加磁場の中でしか反復移動していない事がわかる。このため、中心付近のバルク体は着磁過程で平均的に受ける印加磁場が大きく、このため、中心付近でピークを持つ捕捉磁場が得られているものと考えられる。

4・3 反復移動回数の影響 モデルを用いて、反復移動回数の影響を検討した。図10に条件⑥に対して、着磁操作時の全反復移動回数を25, 50, 100回とした場合の計算結果を示す。反復移動回数が少ないと、捕捉磁場は反復移動毎の捕捉磁場の形状が残った凹凸状の分布をとり、反復移動回数が100回になるとほぼ均一な捕捉磁場が得られることが分かる。

Fig. 10 Calculated magnetic-field distribution at $y=0$ under an applied field of 0.2 T at different swing frequencies

4・4 反復移動距離の影響 次にモデルを用いて、より長尺なバルクマグネットを仮想的に考え、大きな反復移動距離をとった場合の計算結果を図11に示す。バルク体は現状と同じとし、小型のものを23個並べ長さ約800mmとしたものを想定し、印加磁場0.2T、反復移動範囲 ± 250 mm、全反復移動回数300回とした。図11において捕捉磁場の小さな山が個々のバルク体に相当する。これより、反復移動距離を大きくすると、バルク体の捕捉磁場は反復移動範囲内において印加磁場のほぼ半分まで均一な分布になる事が分かる。図9に示した条件と異なり、図11に示した場合では、反復移動距離が印加磁場分布の幅(± 170 mm)より大きい。このため、反復移動の範囲内のバルク体は全て、ボア中心の最大印加磁場と外側のほぼゼロの磁場を交互に受ける

ことになり、着磁過程で各バルク体を受ける最大印加磁場と最低印加磁場の平均が最大印加磁場の約半分まで等しくなるため、捕捉磁場は均一な分布になるものと考えられる。

以上のことから、反復移動法を用いることで、印加磁場マグネットの大きさの制限を受けずに大型のバルク体に対し着磁することができ、かつ反復移動幅を印加磁場分布の幅より大きくすることで、印加磁場の約半分以上を均一に着磁させる事ができると予想される。

Fig. 11 Calculated magnetic-field distribution at $y=0$ under an applied field of 0.2 T in the case of a large swing amplitude

5. まとめ

高温超電導バルク体を用いた磁気分離用長尺バルクマグネットを用いて着磁方法の検討を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 反復移動による着磁法を提案し、着磁実験により効果を実証した。
- (2) 磁束の挙動を考慮した着磁モデルを作成した。作成したモデルによる捕捉磁場分布を実験と比較し、良好に再現できることを示した。
- (3) モデルを用いて、提案した着磁法における反復移動回数、距離の影響を検討した。
- (4) 反復移動法を用いることで、印加磁場マグネットの大きさの制限を受けずに大型のバルク体に対し印加磁場の約半分以上を着磁させる事ができる事をモデルによって示した。

文 献

- (1) 村上雅人, 低温工学, 34-3 (1999), 92-101.
- (2) N. Saho, German-Japan Workshop on High Temperature Superconductivity, Oct. 18. 2000, SRL ISTEC Tokyo Japan.
- (3) 西嶋規世 他5名, 第13回「電磁力関連のダイナミクスシンポジウム」講演論文集, 2001年6月, 631-634.

- (4) 水谷宇一郎 他 5 名, 低温工学, **34-11** (1999), 654-661.
 - (5) 上條弘貴 他 1 名, 第 13 回「電磁力関連のダイナミクスシンポジウム」講演論文集, 2001 年 6 月, 635-638.
 - (6) M. Morita, M. Sawamura, et al, Physica **C 235-240** (1994), 209-212.
 - (7) 富田優 他 1 名, 低温工学, **34-11** (1999), 616-620.
 - (8) C.P.Bean, Phys. Lett. **6**(1962), 162
-