

磁気分離用5連型超伝導バルク磁石装置の作製と特性評価

平成15年度入学 11番 藤代研究室 岡村 宏紀

1. 序論

磁気分離装置は、水中の不純物を吸着・分離し、浄化する装置である。この装置の吸着力を強くし、不純物をより回収できるようにするため、磁場を印加して強力な擬似永久磁石化させたバルク超伝導体を用いた新しいタイプの磁気分離装置を開発した。磁場を印加する方法には磁場中冷却着磁法(FCM)、パルス着磁法(PFM)がある。FCMは最も大きい捕捉磁場を得られる方法だが、装置がとても大型なため、応用には適さない。本実験では、得られる捕捉磁場はFCMに劣るが、装置が小型で安価なため、応用に適しているPFMで実験を行う。昨年度、磁気分離装置に利用する超伝導バルクの装置の試作型として、真空容器内に5つのバルクを等間隔に配置させた5連型超伝導バルク磁石装置を開発した。この装置を用いて、水浄化試験を行ったが、捕捉磁場が低く、取り出し磁場が小さかったため、湖水中のアオコなどの有害物質を十分に回収することができなかった。その結果から、今回は改良型の5連型超伝導バルク磁石装置を製作した。改良点を表1に示す。バルクの厚さを昨年度より5mm削って15mmとした。バルクの厚さを薄くすると、捕捉磁場は多少減少するが、着磁コイルのコイルギャップを狭くすることができるため、印加磁場を増大させることができる。冷凍機を最低到達温度が40K級のものから10K級のものに変更して低温化を図ることによってピン止め力を向上させ、捕捉磁場の向上が見込める。真空容器の幅を70mmから51mmに縮め、バルク表面から真空容器表面までの距離を6mmから2mmに縮めることによって、取り出し磁場の増大を目指した。これらの改良によりバルク表面から磁気分離装置の不純物を回収するドラム部分までの距離を18mmから9.3mmまで縮めることができるので、磁気分離装置の動作磁場の向上を見込むことができる。本実験の目標は、磁気分離装置の不純物回収率を増加させるために、この装置内の5つのバルクすべてに真空容器表面で2T以上の磁場を捕捉させることである。

	昨年度	本年度
バルクの厚さ	20mm	15mm
最低到達温度	47K	15K
コイルギャップ	35mm	25mm
着磁コイルの発生磁場	5.5T	6T
真空容器の幅	70mm	51mm
バルク表面から真空容器表面までの距離	6mm	2mm
バルク表面からドラム表面までの距離	18mm	9.3mm

表1. 本年度の装置の改良点

2. 実験方法

バルクは縦33mm、横33mm、厚さ15mmのGdBaCuOを5つ使用した。これら5つのバルクを、冷凍機(Cold Stage)に近いほうから順に#1、#2...、#5とする。バルクは二段式GM冷凍機で冷却した。それを一対のソレノイドコイルの間に位置させて液体窒素でコイルを冷却し、パルス磁場を印加した。印加磁場の大きさはコイルの冷却時間によって変動してしまうので、導線中のシャント抵抗により測定した。バルク#1と#3の表面に中心部にはホールセンサを接着して、バルク中心の捕捉磁場を測定した。また、磁場分布と総磁束量は真空容器表面にホールセンサを走査させて測定した。#1.#3.#5には温度変化を測定するために、熱電対を設置した。

3. 実験結果と考察

まず初めに1発のパルス磁場を印加する単パルス法で実験を行う。昨年度の実験結果より、5つのバルクはそれぞれ温度が違うということが分かっている。そのため、それぞれのバルクにおける最適な B_{ex} が違う。これより、最適な B_{ex} の決定のために単パルス法を行った。なお、今回の実験で初期のバルク温度 T_s は30Kで行った。図1と図2に、#1バルク、#3バルクで単パルス法の印加磁場 B_{ex} と真空容器表面での最大捕捉磁場 B_{max} 、バルク中心の捕捉磁場 B_{LC} 、真空容器表面の総磁束量 Φ_T の関係をそれぞれ示す。このとき、6T以上の磁場を印加するとコイル

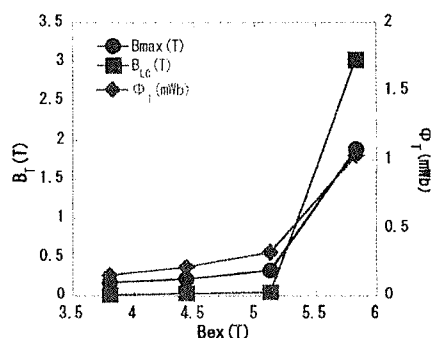


図1. #1の着磁特性

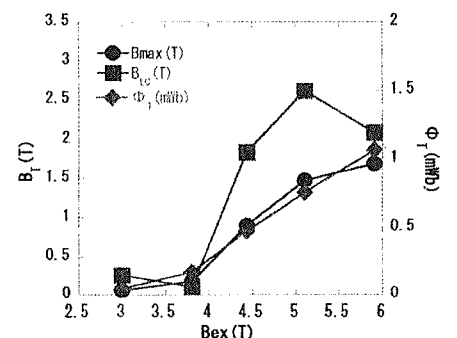


図2. #3の着磁特性

ルが破損してしまう危険性があるので、本実験では最大でも B_{ex} を 6T 未満とした。図 1 より、#1 バルクでは 5.83T を印加するまで、磁束が中心までほとんど侵入しなかった。図 2 より、#3 に 5.91T を印加したら、 B_{LC} は減少してしまいましたが、 Φ_T と B_{max} が向上した。これより、 Φ_T が増加すれば B_{LC} に関係なく B_{max} も増加する。また、Cold Stage からの距離が大きくなるほど、捕捉磁場のピークでの B_{ex} が小さくなるということが確認できたため、最適な B_{ex} は #1~#3 で 5.8T~5.9T、#4 で 5.4T、#5 で 5.11T と決定した。

次に、同じ強度の磁場を複数回印加する SPA を行った。本実験では、3 発の磁場を印加した。図 3 に、それぞれのバルクで単パルス法と SPA を行ったときの結果の比較を示す。図 3 から、SPA では単パルス法に比べ、 B_{max} が増大したことが分かる。この結果、SPA を行うことによって B_{max} が 2T 程度の磁場を捕捉することができた。しかし、1つのバルクに磁場を印加したとき、隣に位置しているバルクの捕捉磁場を減衰させることが示唆された。このことをより明確にするために、磁場を印加したときの隣のバルクへの影響を調べる実験を行った。図 4 は、#3 で SPA を行った後、#4 に 2 発磁場を印加したときの #3 の特性変化を示す。#4 に印加する前と後では、 B_{max} は 2.02T から 1.81T、 B_{LC} は 2.33T から 2.06T、 Φ_T は 1.29mWb から 1.13mWb と、それぞれ減衰した。この結果より、3 発の SPA では隣に位置するバルク特性の減衰が大きすぎる。5 つのバルクすべて同時に効率よく着磁し、隣に位置するバルクの特性的減衰を最小限に抑え、それぞれのバルクが良い特性を示すには、1 つのバルクに単パルス法、多くても 2 発の印加を行うことが、一番適しているという結論に達した。以上から、#2→#3→#4→#5→#1 の順にそれぞれ単パルス法で印加して、減衰した #2、#4、#3 に再び 1 発ずつ印加する、という方法で着磁した。図 5 は、すべてを着磁した後、バルク表面から 2mm、5mm、8mm 上を Line scan したものである。 B_{max} は Cold Stage に近い方から順に、1.88T、1.84T、1.94T、1.76T、2.25T であった。裏面の取り出し磁場を計測すると、平均して 2.3T ほどで、#4 に関しては 2.56T と、大きい値を示した。これは、バルクが真空容器表面の裏側に多少寄ってしまっている可能性があると考えられる。これより、表裏を平均すると、すべてのバルクに 2T 以上の磁場を捕捉させていることが分かる。

図 6 に実際、磁気分離実験を行ったときの捕捉磁場の z 軸依存性を示す。バルク表面から離れると、その分、磁場は減少してしまうが、ドラム表面の位置とされる 9.3mm 上で 5 つのバルクは 0.6T~0.8T の磁場を発生していた。

4. まとめ

本実験では、改良した 5 連型超伝導バルク磁石装置で取り出し磁場の向上を目指した。結果、昨年の 1.2T を大きく上回り、目標としていた 2T 以上を得ることができた。これは冷却をしっかりと、ピン止め力を増大させた上で、発生磁場の大きいコイルを使用したことによって印加磁場を向上させることができたため、捕捉磁場も向上することができ、そして、バルク表面を真空容器表面に近づけたことによって装置からの取り出し磁場も向上したからである。バルク表面から磁気分離装置のドラム部分の表面までの距離も約 1/2 に改良したため、昨年度はドラム部分の表面で 0.3T 得られなかった取り出し磁場も 0.6~0.8T まで増大させることができた。

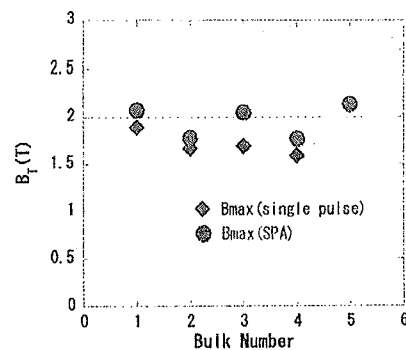


図 3. SPA での B_{max} 変化

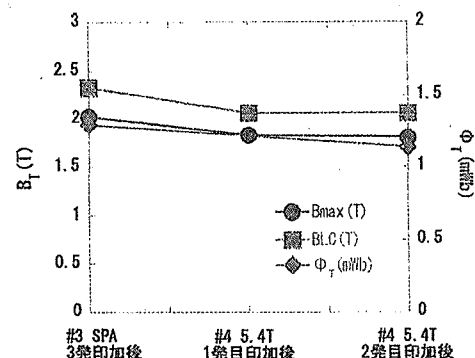


図 4. #4 に印加したときの #3 への影響

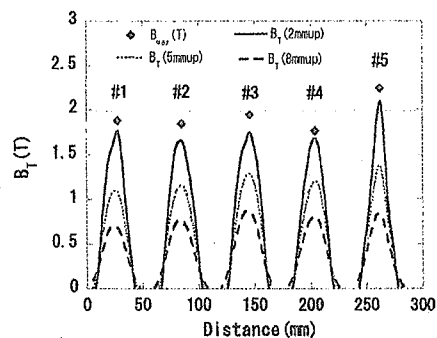


図 5. 5 つのバルク着磁後の Line scan

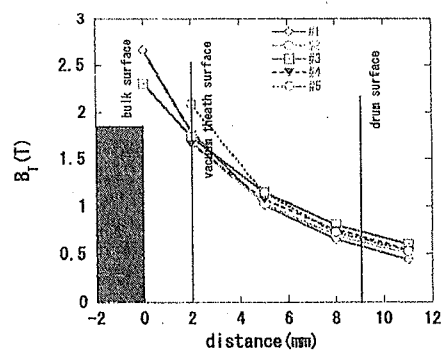


図 6. 捕捉磁場の z 軸依存性