

1. はじめに

溶融法で製作された REBaCuO 系バルク超伝導体の応用の一つに超伝導バルク磁石がある。この磁石はバルク体に磁束を捕捉させる必要がある。一般的な着磁方法として、磁場中冷却着磁(FCM)、パルス着磁(PFM)などがある。FCM は強い捕捉磁場が得られるが、磁場を捕捉させるのに時間がかかる上、装置が大型で高価であるため一般的ではない。一方、PFM では FCM ほどの強い捕捉磁場は得られないが、装置が小型でコストも安価であるため各種応用が考えられている。これまでの PFM における研究で、PFM におけるバルク内での発熱は高磁場を印加するほど、またバルクを低温にするほど大きくなること、大きな発熱は捕捉磁場を減少させることがわかってきている。そこで本研究では、より強い磁場が捕捉される GdBaCuO 系バルクを用い、低温化による PFM によって過去最高の捕捉磁場である4テスラを目指すことを目的にする。

2. 実験方法

直径4.5mm、厚さ1.5mmで、 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  と  $Gd_2BaCuO_5$  をモル比 1:0.4、 $Ag_2O$  10wt%、 $Pt$  0.5wt% を混合し作製された GdBaCuO バルク超伝導体(新日鉄製)を使用した。このバルクは上部表面に対し垂直な c 軸配向した擬似単結晶で、直交した4つの結晶粒界面(GSB)をもつ。バルク上部には、着磁時の磁束の侵入や磁化の変化を計測するため中心から等間隔に三点[中心(C)、内側(M)、外側(E)]の位置にホールセンサーをつけ、着磁時の温度上昇を中心(T1)と外側(T5)に熱電対を貼り付け計測した(図1を参照)。着磁後、バルク上3.5mmでホールセンサーにより磁場分布を測定した。バルクは GM 冷凍機により、バルク上部温度約 40K~20K まで冷やされる。この周辺に液体窒素で冷却したパルスコイルを設置し、パルスの立ち上がり時間約 12ms、強さ 4.03T~7.23T の範囲で磁場を与える。パルス磁場の大きさ  $B_{ex}$  はシャント抵抗で測定した。

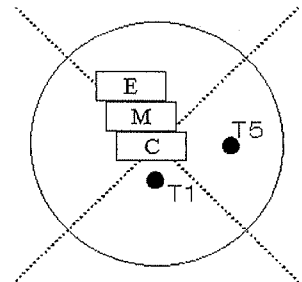


図1、サンプル上のホールセンサーと熱電対の関係。点線は GSB を表している。

4 テスラ実現のための実験では、バルク温度一定でパルス一発ごとに印加磁場を小さくする Iteratively Magnetizing pulsed-field operation with Reducing Amplitudes (IMRA) 法と、パルス一発ごとにバルクの温度を下げて印加する Multi-Pulse technique with Step-wise Cooling(MPSC)法を検討した。

3. 実験結果及び考察

本実験の前に、高捕捉磁場を実現するための最適温度  $T_s$  と印加磁場  $B_{ex}$  を検討した。図2に 20K,40K における一発のパルスを印加したときの T1 の最高温度とバルク総磁束量  $\Phi$  の関係を示す。比較として FCM の結果を載せた。過去の実験により、図2においてバルクの総磁束量は最高温度が高くなる、つまり印加磁場が高くなるとともに FCM の総磁束量の曲線に近づいて、ある程度高くなると曲線にぶつかり総磁束量が減少することが知られていた。今回も 20K,40K の総磁束量どちらも、FCM の曲線に近づき、曲線に近づくと減少している。また 40K より 20K の総磁束量のほうが大きい。よって低温である程度の高印加磁場が必要であることが解かる。

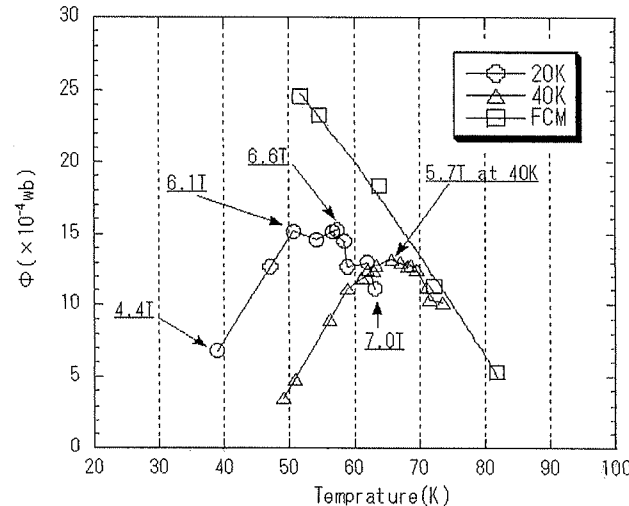


図2、パルス印加時における T1 の温度上昇と総磁束量の関係。20K,40K,FCM の結果を載せている。

図3はピンニング損失  $Q_p$  と印加磁場  $B_{ex}$  の関係を示す。磁束線はピンニング力  $F_p$  により捕捉される。 $Q_p$  とは、その磁束線がバルクに捕捉されるときに発生する熱量のことで、 $Q_p$  が大きいときは  $F_p$  も大きくなり、多くの磁束を捕捉することができる。 $Q_p$  はホールセンサーCで測定したバルク内の磁化を表したヒステリシス曲線(図3の挿入図参照、図3は20Kで6.05Tの場合)の囲む面積により求めた。図3の20Kと40Kの  $Q_p$  を比較すると、40Kでは低磁場

で大きい、高磁場では 20K の方が高い。図 2, 3 より、強い捕捉磁場を得るには、ピンニング力が強まる低温かつ高い印加磁場が必要であること。また、印加磁場が強すぎても図 1 のように大きい発熱で捕捉磁場が落ちてしまうことがわかった。この実験結果を基に、IMRA 法、MPSC 法を実施した。

IMRA 法は、バルクの初期温度を 20K に設定し、一発ごとに印加磁場を低くする方法でおこなった。図 4 に IMRA 法におけるパルス印加時の T1 の最高温度とバルクの総磁束量の関係を示す。比較として FCM の結果を載せた。IMRA 法は回数を重ねるとともに、温度上昇が低くなり、総磁束量は向上していることがわかる。挿入表は各印加磁場  $B_{ex}$  と C の捕捉磁場  $B_T$  である。印加磁場を低くすると発熱が抑えられるため総磁束量は向上するが、捕捉磁場の向上にはならない。

MPSC 法は、一、二発は、サンプルの初期温度を高くし小さい磁場(40K, 4~5T)を、三発目以降は初期温度を低くして高い磁場(20K, 6~7T)を印加した。図 5 に MPSC 法におけるパルス印加時の T1 最高温度と捕捉磁場の関係を示す。比較として FCM の結果を載せた。挿入表に、バルク初期温度、印加磁場を実施回数ごとにのせた。一発目、二発目で最高温度が高くなっているが、捕捉磁場は向上していない。しかし、20K で印加した三・四発目では、温度上昇が少なく、高い捕捉磁場が得られ中心で 4.19T の捕捉磁場を得た。これは、一・二発目で弱い印加磁場を打って、バルクに 1T 弱の磁場を捕捉させることで、三・四発目に低温で高磁場を印加しても、大きな発熱がなく磁束がバルクに捕捉されたと考えられる。

#### 4. 結論

今回の実験では、PFM によりバルクに磁場を捕捉させるには発熱が大きく関係しており、大きな発熱を抑え高磁場を印加した MPSC 法がもっとも有効で、PFM における世界最高の 4.19T を捕捉させることに成功した。これは  $Q_p$  の大きくなる低温の状態、いかに大きい発熱を抑えることができるかが問題で、二、三発目の印加磁場の大きさがポイントとなった。また、IMRA 法では、高い捕捉磁場は得られなかったが、高い総磁束量を得るのに有効であることがわかった。

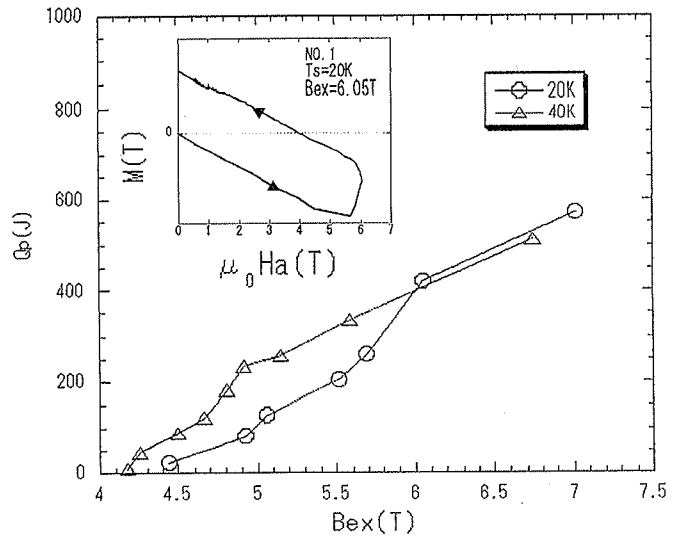


図 3、ピンニング損失と印加磁場の関係を示したグラフ  
挿入図はヒステリシス曲線

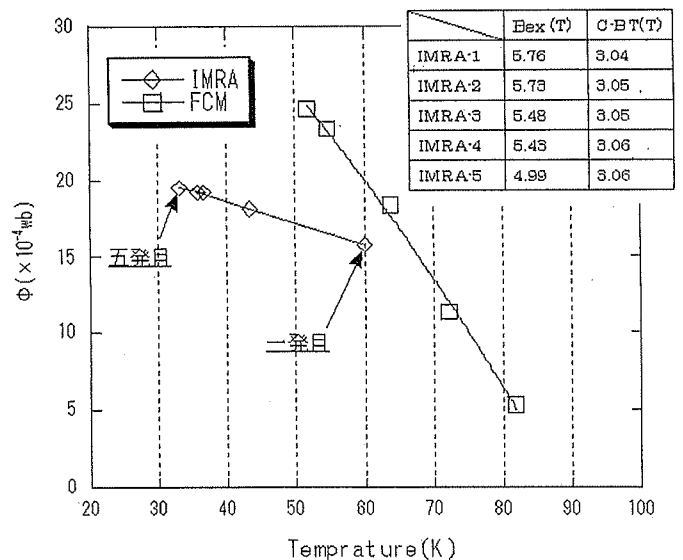


図 4、IMRA 法での T1 の最高温度と総磁束量  
FCM のグラフも載せている。  
挿入表は IMRA の回数ごとの印加磁場と C の捕捉磁場

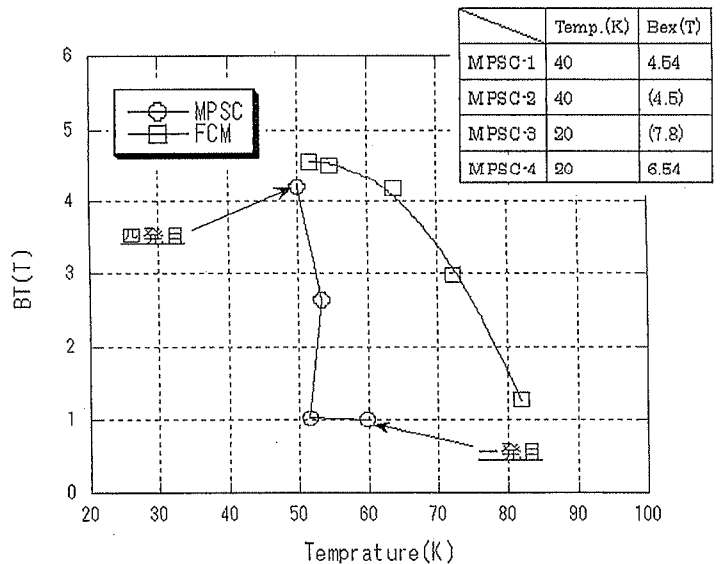


図 5、MPSC での中心の最高温度と C での捕捉磁場のグラフ  
挿入表は MPSC の回数ごとの初期温度と印加磁場  
印加磁場の括弧がついている値は推定での値である。