

1. 序論

超伝導バルク体の擬似永久磁石への応用において、パルス着磁法(PFM)は、磁場中冷却着磁法(FCM)に代わる着磁法として盛んに検討されているが、しかし PFM は、FCM に比べて大きな発熱が起きることから、捕捉磁場が小さいという欠点がある。これまで本研究グループでは、PFM におけるバルクの温度測定と発熱量の解析を行い、着磁メカニズムの検討を行ってきた。その結果として、PFM での着磁メカニズムの理解が進み、発熱を抑えるため 2 段階での着磁を行う MMPSC 法(Modified multi-pulse technique with stepwise cooling)により、新日鐵製の $\phi 45\text{mmGd}$ 系バルク ($B_T=1.7\text{T}$ at 77K by FCM)を用いて、 5.2T の捕捉磁場を達成している。本研究では、超伝導工学研究所(SRL - ISTEK)により作製されたさらにピン止め力の強い $\phi 45\text{mmGd}$ 系バルク ($B_T=1.8\text{T}$ at 77K by FCM)を用い、更なる高磁場捕捉を試みた。

2. 実験方法

バルク中心の捕捉磁場を B_L^C 、周辺のピン止め力の強い GSB(Growth Sector Boundary)での捕捉磁場を B_{GSB} 、ピン止め力の比較的弱い GSR(Growth Sector Region)での捕捉磁場を B_{GSR} と定義する。 B_L^C と B_{GSB} 、 B_{GSR} を測定するため、ホールセンサーをバルク表面にそれぞれ貼り付けた。またバルク温度は、バルク表面に熱電対を貼り付け計測した。GM 冷凍機で超伝導バルク体を冷却したのち、パルス電源を用いて、液体窒素で冷却したコイルに電流を流し、発生するパルス磁場によって着磁を行った。着磁方法は、同一のパルス磁場を複数回印加する SPA(Successive Pulse Application)法と MMPSC 法を用いた。MMPSC 法では、1st Stage の印加磁場を $B_{ex}^1(4.5\text{T}\sim 6.8\text{T})$ 、2nd Stage の印加磁場を $B_{ex}^2(6.37\text{T}\sim 7.8\text{T})$ とし、1st Stage の温度 $T_s(1)\approx 20\sim 30\text{K}$ 、2nd Stage の温度 $T_s(2)\approx 20\text{K}\sim 40\text{K}$ に設定し、それぞれ 2 回ずつ、計 4 回のパルス磁場を印加した。

3. 実験結果

3.1 SPA 法における捕捉磁場

図 1 に、 $T_s=20\text{K}$ 、 30K 、 40K における No1 パルスの印加磁場 B_{ex} と中心での捕捉磁場 B_L^C の関係を示す。低磁場印加($B_{ex}<6.5\text{T}$)では、 T_s が高いほど捕捉磁場が大きい、高磁場印加($T_s>6.5\text{T}$)では、 20K での捕捉磁場が大きく、 40K での捕捉磁場が小さい。これは 20K では、ピン止め力が強いことを示しており、低磁場印加では中心まで磁束が侵入することができないためである。しかし、高磁場印加した時 $T_s=30\text{K}$ 、 40K においては、発熱による温度上昇から磁束が十分に捕捉できずに逃げる(磁束クリープ)ため捕捉磁場が低下する。図 2 に、SPA 法での No1 パルスにおける印加磁場とバルク中心での最大温度上昇の関係を示す。各 T_s において印加磁場の増加とともに温度上昇が増加し、初期温度が低温になるにつれて温度上昇が大きくなる

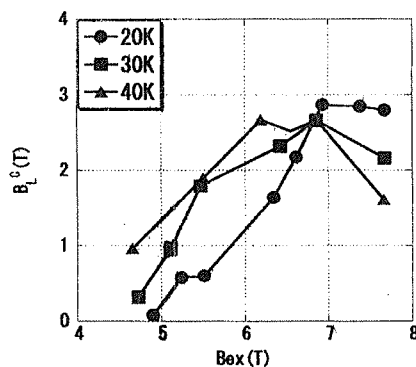


図 1 No1 パルスにおける印加磁場に対する捕捉磁場依存性 (20,30,40K)

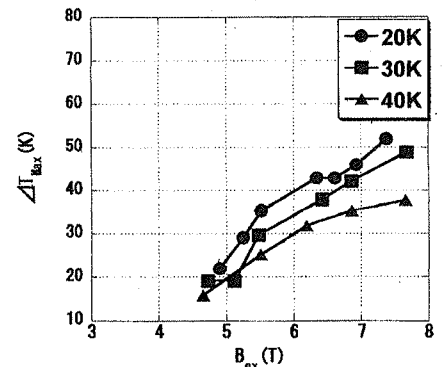


図 2 No1 パルスにおける印加磁場と温度上昇の最大値の関係 (20,30,40K)

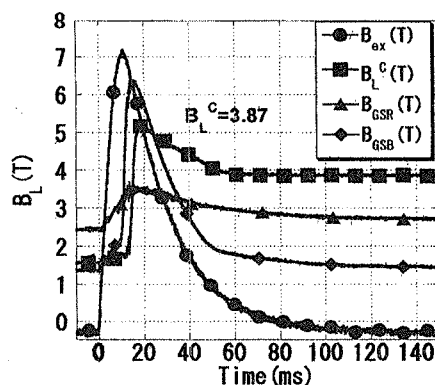


図 3 7.17T 印加した時の B_{ex} と B_L^C , B_{GSB} , B_{GSR} の時間依存性

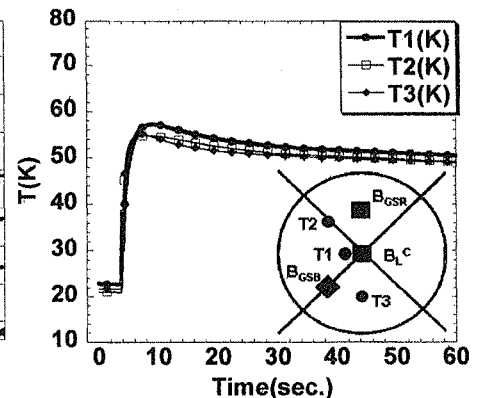


図 4 7.17T 印加した時の温度上昇の時間依存性

ことが分かる。これは、低温では比熱が小さく、少量の発熱で大きな温度上昇が起きてしまうからである。また各条件において No2 パルス、No3 パルスを印加しても、捕捉磁場に大きな違いはなかった。

3.2 20K における同温での MMPSC 法

ピン止め力の強さを生かし、最低温である $T_s(1)=T_s(2)=20K$ に設定し、同温での MMPSC 法を用いた高磁場捕捉を試みた。図 3 は 2nd Stage での $B_{ex}=7.17T$ (No3 パルス)を印加したときの、印加磁場と局所磁場 B_L の時間依存性を示す。バルク中心では、立ち上がりで磁束は 5T 付近まで侵入し、時間の経過とともに、捕捉磁場が約 1T 減少し、最終的に 3.87T 捕捉された。図 4 は、2nd Stage での $B_{ex}=7.17T$ (No3 パルス)を印加したときの温度上昇の時間依存性である。中心、GSB、GSR での温度上昇を $T1(K), T2(K), T3(K)$ とする。各局所での温度上昇は、同じ振る舞いがみられた。中心の立ち上がりの温度は約 60K に達しており、この大きな発熱が、捕捉磁場の減少を引き起こしたと考えられる。

3.3 30K における同温での MMPSC 法

発熱を抑えるために $T_s(1)=T_s(2)=30K$ に設定し、MMPSC 法を用いた高磁場捕捉を試みた。図 5 は 2nd Stage で 6.7T(No3 パルス)印加した時の局所磁場の時間依存性を示す。バルク中心に 5.5T 付近まで磁束が侵入し、最終的に 4.12T を捕捉した。図 3 で見られた大きな磁束の逃げは見られなかった。図 6 は、3.2 節で説明した中心での温度上昇と 2nd Stage で 6.7T(No3 パルス)印加した時の中心での温度上昇との比較である。

初期温度 20K での T_{MAX} は約 60K であるのに対し、30K での T_{MAX} は約 54K である。また、 ΔT は 10K の以上の差がある。初期温度を 30K にすることにより発熱を抑え、 T_{MAX} を抑えたことで 4T を超える磁場を捕捉することに成功した。

4. 考察

本研究グループで 5.2T の磁場を捕捉した GdBaCuO 系バルク(バルク B)との比較を行った。図 7、図 8 にバルク B とバルク A をそれぞれ 20K での SPA 法の No1 パルスでの温度上昇 ΔT と捕捉磁場 B_{Lc} の印加磁場依存性を示す。図 8 から、バルク A は 7T 以上の磁場を印加した時、バルク B よりも捕捉磁場が大きいことが分かる。また図 7 から温度上昇も大きいことが分かる。また図 7、

図 8 の印加磁場 6.3T 付近に注目してみると、温度上昇には大きな差は見えほぼ同じ値を示すが、捕捉磁場の差が約 2.1T にもおよんだ。強いピン止め力をもつバルク体は、FCM により大きな磁場を捕捉することが可能である。しかし、パルス着磁法において、強いピン止め力は大きな発熱を引き起こす原因となり、それに伴い磁束の減少を引き起こしてしまう。発熱を出来る限り抑え、強いピン止め力を生かした新しいパルス着磁法が求められる。

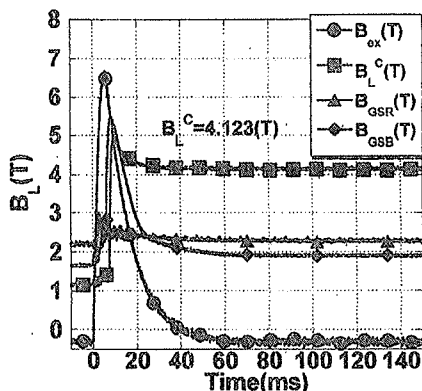


図 5 6.7T を印加した時の B_{ex}

と B_L, B_{GSR}, B_{GSB} の時間依存性

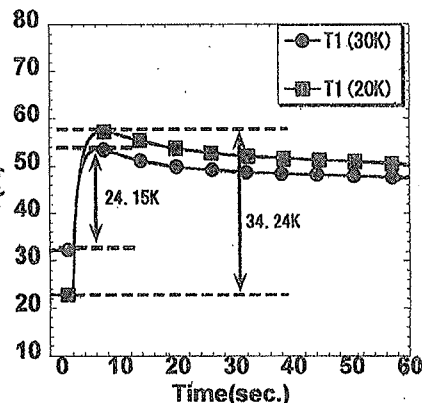


図 6 図 3、図 4 の時の中心

での温度上昇の時間依存性

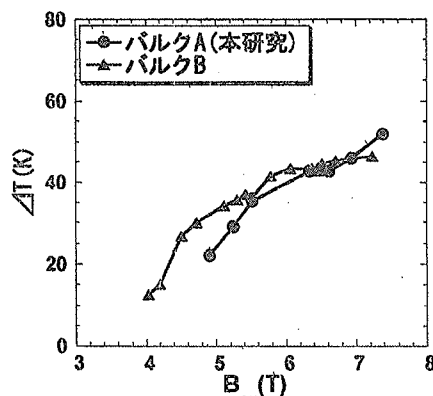


図 7 No1 パルスにおける印加

磁場と温度上昇の関係

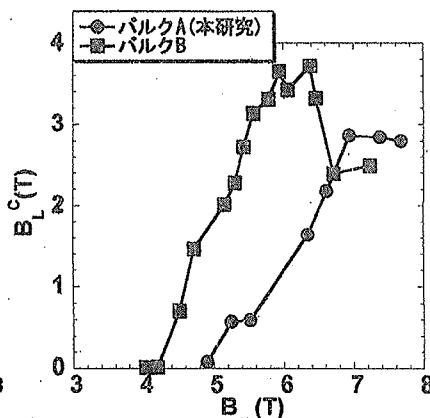


図 8 No1 パルスにおける印加磁

場に対する捕捉磁場依存性