

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04920

研究課題名(和文)7テスラ級・大口径MgB2超伝導バルク磁石の開発とマウス用MRIの超高感度化

研究課題名(英文)Development of a 7 tesla-class tubular MgB2 bulk magnet with a large bore to achieve a high-resolution MRI device for a mouse experiment

研究代表者

内藤 智之(Naito, Tomoyuki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：40311683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：永久磁石より強力な2テスラ級磁場を発生できるリング形状の大型MgB2超伝導バルクを浸透法によって再現性良く作製することが出来るようになった。炭素ドーピングによってMgB2バルク磁石の動作温度10 K付近の捕捉磁場特性が向上することを見出した。また、チタンドーピングによって捕捉磁場5.6テスラというMgB2バルク磁石の世界記録を達成した。世界で初めてMgB2バルク磁石の磁場下でプロトンの核磁気共鳴スペクトルの観測に成功し、ベンチトップ型核磁気共鳴装置の磁極としてのポテンシャルを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導バルク磁石の社会実装を進めるためには、磁場強度はもちろんのこと用途に応じたサイズや形状を実現する必要がある。従って、低コストである浸透法で大型かつリング形状のMgB2バルクを作製可能となったことは、任意形状のバルクを作製できることを意味しており意義がある。また、炭素やチタンなど不純物元素の添加によってMgB2バルク磁石の特性が向上したことやMgB2バルク磁石中でプロトンの核磁気共鳴信号が観測できたことにより、永久磁石との差別化がより一層明確になったことも超伝導バルク磁石の社会実装を進める上で重要な点である。

研究成果の概要(英文)：We found out the fabrication condition for an infiltration-reaction processed MgB2 bulk ring trapping 2 tesla-class magnetic field stronger than permanent magnet. A carbon doping improved the trapped field properties of MgB2 bulk around 10 K, a typical operating temperature. We achieved a record-high trapped field of 5.6 tesla for triple-stacked MgB2 disk bulk doped with titanium. For the first time, we succeeded in observing a proton NMR (nuclear magnetic resonance) signal under a magnetic field trapped by a tubular MgB2 bulk magnet, which strongly suggests a potential ability of an MgB2 bulk magnet as a magnetic pole of bench-top NMR device.

研究分野：超伝導理工学

キーワード：超伝導バルク磁石 二ホウ化マグネシウム 捕捉磁場

1. 研究開始当初の背景

超伝導体に磁場を印加すると磁場は量子化された磁束として超伝導体内部に侵入する。その後、外部磁場を取り除いても一旦侵入した磁束はエネルギー利得から超伝導体内に留まる。この磁束ピン止め現象を利用して着磁された超伝導体は疑似「永久磁石」になる。このとき、捕捉磁場は面内を周回する超伝導電流（臨界電流）で維持される。つまり、高い捕捉磁場を得るためには、高い臨界電流密度 J_c （強い磁束ピン止め力）を実現する必要がある。

超伝導を利用した磁石応用は超伝導線材を巻いたソレノイド型コイル磁石が一般的であるが、超伝導バルク磁石には同じ磁場強度でコンパクトというメリットがある。すでにバルク磁石を用いた卓上型核磁気共鳴 (NMR) 装置の製品化に向けた開発が行われている。また、バルク磁石によるマウス胎児の磁気共鳴画像 (MRI) 撮像の成功例もある。このように、バルク磁石と磁気共鳴現象を利用した装置の親和性は高いと言える。一般的な人体用 MRI には超伝導コイル磁石 (1.5~3 テスラ程度、外径 2 メートル実用内径 1 メートル) が用いられている。医学的基礎研究ではマウスを対象とした比較的小型の超伝導型 MRI (7~9 テスラ、外径 1 メートル、実用内径 10 センチ) が用いられている。一方、コンパクトな卓上サイズの永久磁石型 MRI はあるが磁場強度が最大で 1.9 テスラである。MRI 信号 (共鳴周波数) は磁場強度に比例することから磁場強度と均一度が高いほど高解像度の MRI が得られる。従って、バルク磁石を用いることでコンパクトかつ高性能な MRI 装置が実現可能と考えられるが、 MgB_2 バルク磁石を磁極として用いるためには磁場強度を上げる必要がある。

これまで研究の主流であったレアアース系超伝導バルク磁石 (超伝導転移温度 $T_c=90K$) に替わって金属系超伝導体 MgB_2 ($T_c=39K$) が結晶配向不要、軽量性および脱レアアースなどの観点から低 T_c にも関わらず注目を浴びている。 MgB_2 はコヒーレンス長が長く弱結合の問題がないために多結晶体を超伝導バルク磁石にすることが出来る点が最大の長所である。本研究グループは世界に先駆けて 2009 年頃から MgB_2 超伝導バルク磁石の開発を実施してきた。研究開始当初 1.5 テスラであった捕捉磁場を諸課題 (低充填率や低い臨界電流密度など) の克服により 4.6 テスラまで向上させることに成功してきた。これまで緻密化には熱間等方圧加圧焼結 (HIP) 法や放電プラズマ焼結 (SPS) 法など加圧炉を用いていたが、実用機器への実装には性能に加えてバルク作製コストを下げるのが求められる。そこで本研究では、常圧下で高充填率 MgB_2 バルクを作製可能な浸透法に着目した。

2. 研究の目的

本研究では浸透法によって 7 テスラ級磁場を発生させる大口径リング型 MgB_2 バルク磁石を開発しマウス用小型 MRI へ展開することを目的とした。

(1) Mg と B の混合圧粉体から MgB_2 を生成させる従来方法において、融けた Mg が B 粉末に浸透する距離は B 粉末サイズ (ミクロンオーダー) であったが、浸透法では Mg 圧粉体と B 圧粉体を積層させて前駆体とするため、B 圧粉体サイズのミリもしくはセンチメートルオーダーが浸透すべき距離となる。このとき、Mg が浸透し MgB_2 が生成すると高充填率領域を Mg 融液が浸透・通過出来なくなり MgB_2 生成が進まなくなることや B 粒径が大きいと中間生成物 Mg_2B_{25} が残存することが既知の問題として分かっている。そこで、マクロサイズでの Mg 融液浸透・ MgB_2 生成のメカニズムを明らかにし大口径 MgB_2 リング磁石の実現を目指した。また、結晶粒微細化や不純物添加による捕捉磁場の向上も目的とした。

(2) 浸透法で作製した大口径 MgB_2 リング磁石の捕捉磁場の強度および均一度を明らかにすることを目的とした。当初、その発生磁場下において MRI 撮像を実施することを目的としていたが、実際にはより実験条件の厳しい (要求される磁場均一度は NMR の方が高い) NMR 実験を実施した。

3. 研究の方法

MgB_2 バルクは浸透法で作製した。自製ステンレスカプセル内に B および Mg 圧粉体を積層した前駆体を設置し、アルゴンガス中で密封した後、熔融・反応プロセスを用いて MgB_2 バルクを作製した。原料粉末は Mg (純度 99.5%, 粒径 180 μm 以下, 高純度化学) 粉末と結晶 B (純度 99%, 粒径 45 μm 以下, 高純度化学) を用いた。Mg の融点 650°C 以上となる様々な温度 700-900°C において 9-24 h 熱処理した。原料 B 粉末は遊星型ボールミル粉砕機 (PM100, Retsch 社) を用いて回転速度 0-600 rpm で 1 h 粉砕された。また、炭素や Ti などの不純物添加した MgB_2 バルクを HIP 法で作製した。

B 粉末の粒径解析は光散乱回折型粒度分布測定装置 (LS230, Beckman Coulter 社) を用いて行った。作製した MgB_2 バルクの構成相は X 線回折 (XRD) 実験 (Cu-K α 線を使用) で評価した。 MgB_2 バルクは無冷媒超伝導電磁石 (JM-TD-10T100, ジャパンスーパーコンダクターテクノロジー社) を用いて磁場中冷却着磁 (FCM) 法で着磁 (磁石化) した。冷凍機冷却された MgB_2 バルクを励磁電磁石ボアに挿入した後、外部磁場を掃引した。なお、一部の実験では液体もしくは気体ヘリウムを用いて MgB_2 バルクを冷却した。 MgB_2 バルクの捕捉磁場はホール素子 (HG-106C, 旭化成マイクロデバイス) を用いて測定した。また、着磁温度は冷凍機コールドヘッドに設置したセルノックス温度計およびヒーターで制御した。捕捉磁場の測定後、バルクを小片試料に切り

分けて以下の測定・評価を実施した。臨界電流密度は市販の超伝導量子干渉素子 (SQUID) 磁束計 (MPMS-XL, カンタムデザイン社) を用いて測定した磁化ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルを用いて見積もった。また、走査型電子顕微鏡 (JSM-7001F, JEOL 社) と電子線後方散乱回折 (EBSD) 法 (NordlysNano, オックスフォード社) を用いて微細組織観察を行った。

リング型 MgB_2 バルクを用いて NMR プロブが入る室温ボアを有する NMR 実験装置を新たに製作し、理研横浜キャンパスにおいてプロトンの NMR 信号の検出実験を実施した。共鳴周波数の空間分布や時間変化から MgB_2 バルク磁石の磁場均一度および安定性を評価した。

4. 研究成果

(1) B 粉末微細化による MgB_2 バルク磁石の特性向上

図 1 にボールミル (BM) 粉砕した B 粉末から作製した MgB_2 バルクの捕捉磁場の温度依存性を示す。また、挿入図にボールミル回転速度 0-600 rpm に対する B 粉末の粒度分布を示す。BM 回転数が 200rpm の粒度分布は 0rpm (BM 無し) とほぼ一致しており、ほとんど微細化は起こっていないことが分かる。BM 回転数 400 および 600rpm では粒度分布が大きく変化し、数百ナノメートルサイズの粒が支配的になった。捕捉磁場は R200 バルク (BM200rpm の B 粉末; 以下同様) でわずかに低下したが、R400 および R600 バルクでは向上した。また、R0 に対して、R200-600 バルクの T_c は低下している。これは BM によって B 粒に入った歪みに起因すると考えられる。この推測が正しければ MgB_2 生成時において緩和されていないことを意味しており興味深い結果である。R400 および R600 バルクの捕捉磁場の向上は T_c 低下の負の効果よりも MgB_2 結晶粒微細化による粒界ピン止めの向上という正の効果が上回ったためと考えられる。一方、R200 バルクの振る舞いは T_c 低下のみの効果によってもたらされたと考えられる。また、XRD パターンにおいて浸透法でしばしば観測される中間生成物 Mg_2B_{25} 相が R0 および R200 バルクでは検出されたが、R400 と R600 バルクでは検出されなかった。EBSD による結晶相解析においても同様の結果であったが、併せて中間相の減少によって MgB_2 相の体積分率が向上したことが分かった。したがって、ボールミルによる B 粉末の微細化は、磁束ピン止め中心となる結晶粒界の増加に加えて反応促進による MgB_2 体積分率の増加をもたらすという二つの正の効果をもたらすことが明らかとなった。つまり、浸透法による MgB_2 バルク作製においてボールミルによる B 粒の粉砕は必須であることが分かった。

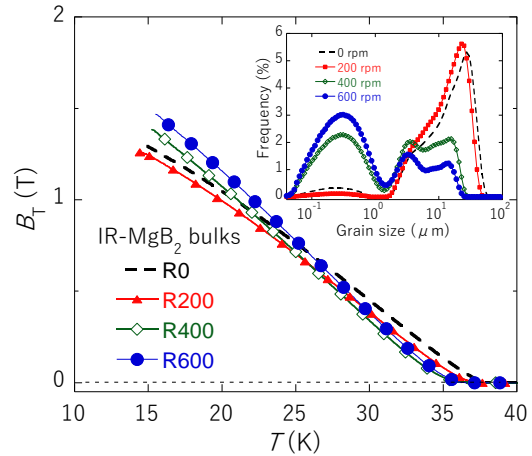


図 1: ボールミル粉砕した B 粉末から作製した MgB_2 バルクの捕捉磁場の温度依存性。挿入図はボールミル回転速度に対する B 粉末の粒度分布。

(2) 浸透法によるリング型大型 MgB_2 バルクの作製と捕捉磁場特性

図 2 左下挿入図に示すように自製カプセルは一組の穴の開いた金属製容器、金属製スペーサー、軟鉄ガスケット、締め付け用のボルトとナットから構成され、 MgB_2 リングバルクを作製後の穴あけ加工無しで直接作製した。図 2 右上挿入図に作製した大型 MgB_2 リングバルク (外径 60mm×内径 40mm×厚さ 15mm) の一例を示す。このようなリングバルクが再現性良く作製可能となった。図 2 に MgB_2 リングバルク (外径 60mm×内径 40mm×厚さ 15mm) の捕捉磁場の温度依存性を示す。単体リングバルクは 20K で 1.3 テスラの磁場を中空中心部で捕捉した。同サイズのバルクを 2 個積層した場合、その積層中空中心において着磁温度 22K のとき 1.7 テスラ捕捉磁場が得られた。冷却の問題で積層バルクは 22K が最低温度であったが、その捕捉磁場の温度依存性から 20K では 2 テスラ、4.2K まで冷却できれば 3~4 テスラ程度の捕捉磁場が得られると期待される。今後、以下の研究成果 (3) および (4)

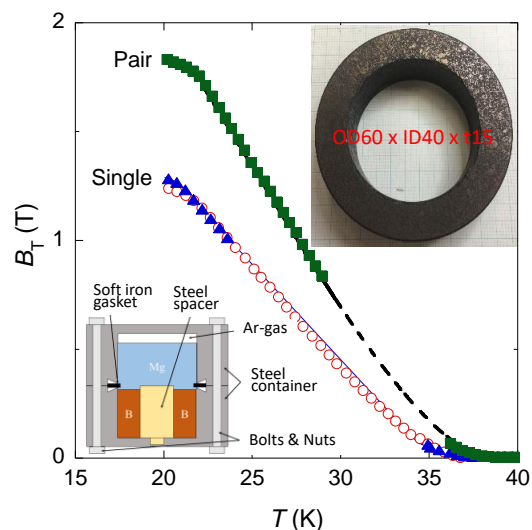


図 2: 浸透法で作製した MgB_2 リングバルク (外径 60mm×内径 40mm×厚さ 15mm) 単体および 2 個積層の捕捉磁場の温度依存性。左下挿入図はリングバルク作製用カプセルの概略図。右上挿入図は作製したリングバルクの一部。

に示すような不純物添加によって捕捉磁場の更なる向上を試みる予定である。

(3) 炭素ドープ効果による低温領域における MgB_2 バルク磁石の特性向上

炭素源として C または B_4C を 10mol% 添加し、出発原料をボールミル (BM) の有無で 2 種類ずつ用意した。ボールミルは Ar 雰囲気中、250rpm (ボールおよび容器の材質はメノウ)、12 h の条件で行った。HIP 焼結は印加圧力 98MPa、900°C、3 h 保持の条件下で実施した。バルクサイズは直径 37-38mm、厚さ 7mm であった。図 3 に各 MgB_2 バルクの捕捉磁場の温度依存性を示す。20K の捕捉磁場値について以下に比較する。pristine バルクについては、BM 効果によって捕捉磁場は 2.17 テスラから 2.58 テスラに増加した。C10%-BM および B_4C 10%-BM バルクの捕捉磁場は、それぞれ 1.93 テスラおよび 1.15 テスラと pristine-BM バルクを下回った。C ドープによる T_c 低下が低捕捉磁場の原因と考えられる。ただし、温度依存性を見るとより低温領域では C10% ドープバルクの捕捉磁場曲線と pristine のそれがクロスするように見える。挿入図に磁場中電気抵抗率の温度依存性から見積もった不可逆曲線を示す。C10%-BM バルクの不可逆曲線は捕捉磁場から予想された通り 10K 以下では pristine-BM バルクより高磁場側に位置した。したがって、 MgB_2 バルク磁石の典型的な動作温度 10K 程度において C ドープは有効となり得ることが明らかとなった。

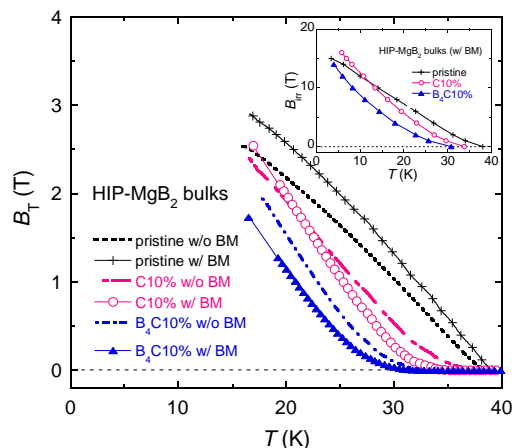


図 3：HIP 法で作製した 無添加および炭素ドープした MgB_2 バルクの捕捉磁場の温度依存性。挿入図は不可逆磁場の温度依存性。

(4) Ti ドープ効果による MgB_2 バルク捕捉磁場の世界記録更新と 7 テスラ級捕捉磁場の実現可能性

MgB_2 バルク磁石のポテンシャルを明らかにすべく、Ti 添加 MgB_2 バルクを HIP 法で作製し、その捕捉磁場を測定した。前駆体準備や HIP 条件は (3) のバルクと同様であったが、バルクサイズは直径 26mm、厚さ 10mm であった。着磁実験は東北大学金属材料研究所強磁場センターの 18T 超伝導マグネット (18T-SM) を用いて実施した。Ti を Mg に対して 5、10 および 20% 添加した MgB_2 バルクを図 4 挿入図のように 3 個積層させて気体もしくは液体ヘリウム冷却中で FCM 法により着磁した。Ti10% および 20% バルクのバルク間中心で着磁温度 11.3 K において 5.6 テスラを捕捉することに成功し世界記録を更新した。より低温での着磁実験では減磁中にフラックスジャンプが発生したことにより捕捉磁場のほとんどがバルクから流出してしまっていたが、その着磁過程からフラックスジャンプが抑制出来れば 7 テスラ級捕捉磁場が得られる可能性が示された (図 4 中の + シンボルはその推定値)。推定値ではあるが、本研究で目標とした捕捉磁場 7 テスラの実現可能性が示されたことは重要である。

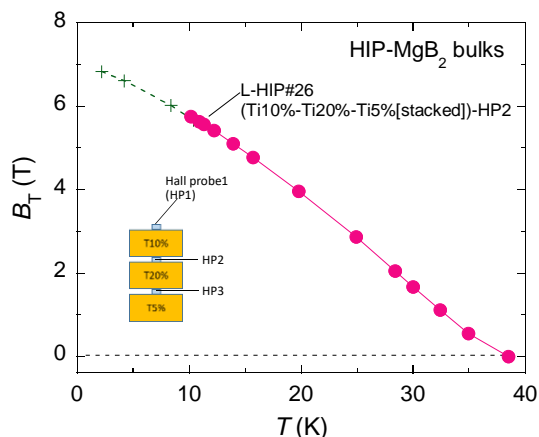


図 4：HIP 法で作製した Ti ドープ MgB_2 バルクを 3 個積層したものの捕捉磁場の温度依存性。Ti ドープ量は 5-20%。

(5) MgB_2 バルク磁石の発生磁場下におけるプロトン NMR スペクトルの検出と MgB_2 バルク磁石の磁場均一度と安定性の評価

研究成果 (2) で述べたように浸透法によって大型の MgB_2 リングバルクを再現性良く作製できるようになったが、捕捉磁場特性のバラつきから積層型磁極として用いるのは難しいと考えた。そこで浸透法で作製された市販の円筒状 MgB_2 バルク (外径 60mm × 内径 40mm × 厚さ 60mm, Experiments Projects Constructions, イタリア) を用いた。また、NMR プロブを挿入する室温ポアを有する装置を新しく立ち上げた (図 5 (a) に概略図を示す)。NMR 実験に先立ち、円筒状 MgB_2 バルクの捕捉磁場特性を評価した。25 K において 2.0 および 0.47 テスラで磁場中冷却着磁した。着磁後の磁束クリープによる捕捉磁場の減衰を抑制するために、着磁後のバルクを冷凍機の最低到達温度である 20 K 程度まで冷却した。バルク中空中心軸 (z 軸) および動径方向 (r 軸)

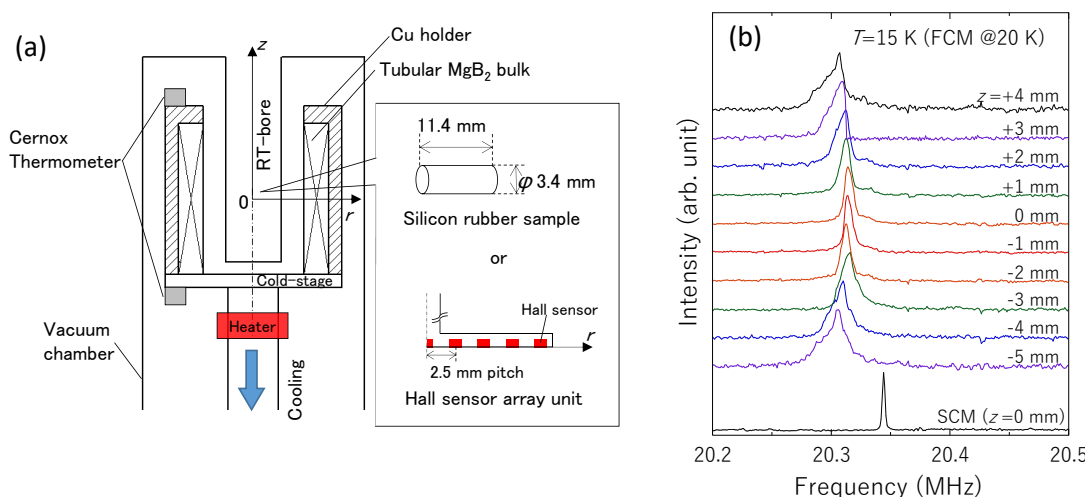


図 5 : (a) NMR 実験のセットアップの概略図。円筒中空の中心軸方向を z 軸，径方向を r 軸とした。また，円筒中空中心を原点とした。(b) MgB_2 バルクの捕捉磁場下における z 軸方向におけるプロトン NMR スペクトル強度の周波数依存性。励磁用超伝導電磁石 (SCM) 磁場下における NMR 信号を参照に示す。

の捕捉磁場強度を 5 個のホール素子 (HG-106C, 旭化成マイクロデバイス) を並べたホール素子アレイで測定し磁場均一度を評価した。2.0 テスラ中 FCM 後のバルクはフル着磁 (超伝導電流がバルク全体に流れる) になっており NMR 測定の目安となる 100ppm の磁場均一度を示す空間が z 軸方向 $\pm 0.5\text{mm}$ 以下であった。この空間サイズは検出コイルサイズ (直径 4mm \times 長さ 11mm 程度) に対して狭すぎる。一方，0.47 テスラ中 FCM では 100ppm 均一度が z 軸方向 $\pm 2\text{mm}$ で得られ検出コイル直径サイズに対して許容できることが分かった。

NMR 実験は理研横浜キャンパスで実施した。励磁用超伝導電磁石以外は岩手大学で立ち上げた装置を丸ごと持参した。励磁は NMR 用高均一磁場を発生する超伝導電磁石 (JRTC-300/89, ジャパンスーパーコンダクターテクノロジー社) を用いた。FCM 法で MgB_2 バルクを 0.47 テスラの磁場下で着磁し，その後冷凍機の最低到達温度である 15 K までバルクを冷却した。NMR 測定は自製プローブ (48 ターンの励起および検出用ソレノイドコイルから成る) の中に挿入した直径 3.4 mm，長さ 11.4 mm の円柱状シリコンゴムの ^1H (プロトン) の NMR スペクトルを測定した。図 5 (b) に各 z 位置で測定したプロトンの NMR スペクトルを示す。参考のために励磁用超伝導電磁石の発生磁場下で測定された NMR スペクトルも併せて示す。 $-4 \leq z \leq +5$ mm の範囲で NMR スペクトルを検出することができた。 MgB_2 バルク磁石磁場下における NMR スペクトルの周波数と参照スペクトルのそれからラーモアの式で見積もった磁場値はそれぞれ 0.4771 テスラ (20.314 MHz) および 0.4778 テスラ (20.344 MHz) であった。0.7 ミリテスラの減少はあるものの着磁磁場とほぼ等しい強度の磁場を捕捉したことが分かった。

スペクトルのピーク位置における共鳴周波数から見積もった z 軸方向の捕捉磁場の均一度は $-2 \leq z \leq +2$ mm の領域で 100 ppm 以下であった。一方，半値幅 (FWHM) から r 軸方向の磁場均一度を考察した。最もシャープなスペクトルは $z = -1$ mm の位置で観測されたが，その半値幅は 7.944 kHz (394 ppm) であった。つまり，ピーク周波数位置の変化から見積もられた均一度に比べて半値幅から見積もられた均一度は 4 倍程度悪い。半値幅はサンプル空間の磁場均一度によって決まるので，この大きな不均一はサンプルの長さが 11.4 mm と大きいことに起因すると考えられる (つまり，検出コイルの長手方向サイズを 4mm 程度に出来ればこのような差異は生じないと期待される)。捕捉磁場の空間均一度を評価した後， $z = -1$ mm の位置に NMR プローブを固定し，21 日間 NMR スペクトルの連続測定を行って磁場の時間安定性を評価した。その結果，21 日間スペクトルの変化は無かった，すなわち磁場の減衰が無かったことから磁場安定性は少なくとも 0.1 ppb/h より高いことが分かった。この値は先行研究における EuBaCuO バルクを用いた先行研究で報告された磁場安定性 (3.8 ppb/h) を上回っており MgB_2 バルク磁石が NMR 用磁極として高いポテンシャルを持つことを示している。自製の MgB_2 バルクを使用できなかったが，今回世界で初めて MgB_2 バルク磁石の磁場中で NMR スペクトルを検出することが出来たことは， MgB_2 バルク磁石の社会実装を進めて良く上で重要なマイルストーンとなる。本研究で目的とした MRI 撮像が未達であった課題は残るが，MRI が要求する磁場均一度は NMR より 1 桁以上低く実験のハードルは低いので近い将来実現できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Naito Tomoyuki, Ogino Arata, Fujishiro Hiroyuki, Awaji Satoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Effects of carbon doping on trapped magnetic field of MgB2 bulk prepared by in-situ hot isostatic pressing method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 6800406 ~ 6800406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2985355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Naito Tomoyuki, Takahashi Yuhei, Awaji Satoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 A record-high trapped field of 5.6 T in the stacking of MgB2/TiB2 composite bulks prepared by an in-situ hot isostatic pressing method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125004 ~ 125004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abb203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takahashi Yuhei, Naito Tomoyuki, Nakamura Takashi, Takahashi Masato	4. 巻 34
2. 論文標題 Detection of 1H NMR signal in a trapped magnetic field of a compact tubular MgB2 superconductor bulk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 06LT02 ~ 06LT02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abf66e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 内藤智之, 藤代博之	4. 巻 56
2. 論文標題 MgB2超伝導バルク磁石の現状と展望	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 低温工学	6. 最初と最後の頁 309 ~ 316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.56.309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Yuhei , Naito Tomoyuki , Fujishiro Hiroyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Trapped field properties of MgB2 bulks prepared via an in-situ infiltration-reaction process using refined boron powders	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 6801005 ~ 6801005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3158641	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 T. Naito, A. Ogino, H. Fujishiro, and S. Awaji
2. 発表標題 Effects of carbon doping on trapped magnetic field of MgB2 bulk prepared by in-situ hot isostatic pressing method
3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Naito, Y. Takahashi, and H. Fujishiro
2. 発表標題 Effects of SiC-doping on the trapped field properties of in-situ HIP-processed MgB2 bulks
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Naito, Y. Takahashi, K. Amase, H. Fujishiro, A. Kikuchi, and S. Awaji
2. 発表標題 Recent progress in intermetallic compound superconductor bulks capable of trapping strong mag-netic fields
3. 学会等名 10th ACASC /2nd Asian ICMC/CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋裕平, 内藤智之, 藤代博之
2. 発表標題 浸透法で作製した大型MgB ₂ リングバルクの捕捉磁場特性: ポア内磁場均一度の評価
3. 学会等名 2020年度春季(第99回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤智之, 高橋裕平, 平野達也, 難波 空, 藤代博之, 淡路 智
2. 発表標題 MgB ₂ バルク磁石のFCMおよびPFM法による捕捉磁場特性の最近の進展
3. 学会等名 2020年度秋季(第100回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋裕平, 内藤智之, 仲村高志, 高橋雅人
2. 発表標題 円筒状MgB ₂ 超伝導バルク磁石を用いた1H NMR信号の検出
3. 学会等名 2021年度春季(第101回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田智貴, 内藤智之
2. 発表標題 無酸素銅板/MgB ₂ 超伝導バルク積層のパルス着磁における無酸素銅の効果
3. 学会等名 2021年度春季(第101回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takahashi, T. Naito, and H. Fujishiro
2. 発表標題 Trapped field properties of MgB ₂ bulks prepared via an in-situ infiltration-reaction process using refined boron powders
3. 学会等名 The 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田智貴, 内藤智之
2. 発表標題 無酸素銅板/MgB ₂ 超伝導バルク積層のパルス着磁における無酸素銅の効果II
3. 学会等名 2021年度秋季(第102回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岩手大学理工学部物理・材料理工学科マテリアルコース藤代・内藤研究室 http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤代 博之 (Fujishiro Hiroyuki) (90199315)	岩手大学・学長・副学長等・理事 (11201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 裕平 (Takahashi Yuhei)		
連携研究者	仲村 高志 (Nakamura Takashi) (60321791)	国立研究開発法人理化学研究所・生命機能科学研究センター・特別嘱託技師 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関