

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709021

研究課題名(和文)次世代MRI装置を実現するMgB<sub>2</sub>線材技術の開発研究課題名(英文)Development of MgB<sub>2</sub> based superconducting technology for the next generation of MRI magnet

研究代表者

前田 穂 (MAEDA, Minoru)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：80610584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、MRI診断装置用の超伝導コイルの次世代化に向けて、二硼化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)線材の高性能化と、その材料を基盤とした要素技術の開発に従事した。その結果、線材コア組織の制御により、臨界電流特性や耐歪特性を向上するための新しい知見を得た。また、超伝導接続技術として、磁場下で優れた臨界電流特性を有する、炭素添加のMgB<sub>2</sub>単芯線材に着目し、本来の特性の約70%まで向上・維持できる接続性能を達成した。さらに、超伝導接続により閉じた小型MgB<sub>2</sub>コイルを作製し、固体窒素冷却下でその永久電流モードの性能を世界で初めて評価するとともに、冷却及び超伝導磁石としての性質・特性に関する様々な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Magnesium diboride (MgB<sub>2</sub>) superconducting wire has potentially excellent characteristics, and it offers an exciting opportunity for the development of lightweight, space-saving, and low-cost magnetic resonance imaging (MRI) scanners. The practical realization with reliable performance including a persistent-mode operation, however, still requires further enhancement of the transport critical current property and the development of MgB<sub>2</sub>-based technology. Here, we undertook the study and attempted to improve the superconducting properties of MgB<sub>2</sub> wires, joints, and coils. Some of the wires were fabricated with carbon doping, which improves the in-field critical current density, and the superconducting joints between the two carbon-doped mono-core wires achieved current carrying retention in the joint of up to about 70% compared to wire without a joint. MgB<sub>2</sub> coils were also fabricated via the wind and react method, and the persistent-mode operating states in solid nitrogen were evaluated.

研究分野：電子・電気材料工学

キーワード：超伝導材料・素子 二硼化マグネシウム 超伝導線材 超伝導マグネット MRI 臨界電流密度 固体窒素 超伝導接続

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導材料を応用した超伝導技術は、人類の医療に関する知識・技術・システムにおいて、高度化を進めるための欠かせないキーテクノロジーの一つであり、近年ますますその重要性を高めている。特に超伝導線材を用いてコイルを作製し、その超伝導磁石としての性質を利用した、磁気共鳴画像診断装置 (MRI scanner: Magnetic Resonance Imaging scanner) は、人体に傷をつけず非侵襲で体内の内部構造を可視化できるため、病気の原因の特定に加えて、発病する前にもその疾患の引き金となる兆候を診断することが可能となる。それ故に MRI 診断は、体への負担の少ない適切な低侵襲医療の普及とさらなる医療技術の開発に大きく貢献しつつある。

しかしながら、大多数の MRI 診断装置において、そのコイルを超伝導状態で稼働するためには、寒剤として温度 4.2 K (-269 °C) の液体ヘリウムが必要となる。この極低温寒剤は高価で取り扱いも容易ではないことに加えて、その資源も有限であることから、枯渇への環境負荷の問題を抱えている。さらに、MRI 診断装置自体も極めて高額な医療機器であるとともに、近年においては、その稼働に必要な貴重なヘリウム資源からの供給不安定性などにも大きく左右されている。その結果、低侵襲医療の普及に大きな制約が生じており、我々の高質な健康管理に欠かせない医療機器であるにもかかわらず、現状では人類の約 10% のみしか利用できていない。

これらの深刻な課題に対処するために、次世代の MRI 診断装置は、まず環境親和型の合理的な冷却システムで稼働することが望まれている。そして、MRI 用コイルの作製・運転コストの低減とともに、装置の小型・軽量化まで達成・実現できれば、先進国や都市部の医療機関だけでなく、発展途上国や地方の小さな診療所にも容易に導入することが可能となり、低侵襲医療のさらなる普及に貢献することができる。以上の MRI 診断装置の次世代化への要求を潜在的に満たし、従来のニオブ系超伝導材料に代わる候補の一つとして、二硼化マグネシウム ( $MgB_2$ ) 超伝導材料が挙げられている。以下にその優れた特長をまとめる。

- (1) 超伝導転移温度が従来の材料に比べて十分高いため、高価な極低温寒剤の液体ヘリウムを使用せずに、冷凍機や他の代替寒剤などを適用することで、その超伝導応用が可能となる。それ故に、従来よりも冷却に関する運転コストの大幅な低減が期待できる。
- (2) 密度が従来の材料 (ニオブチタン超伝導体) の 1/3 程度の大きさであるため、同量の原材料で作製すると、従来に比べて 3 倍長い超伝導線材の作製が可能となる。
- (3) 構成元素がマグネシウムと硼素の軽元素からなるため、従来よりも超伝導応用装置の小型・軽量化が実現できる。

- (4) 原材料の元素が地球上に豊富であることから、従来の材料に比べて潜在的に作製コストの低減が期待できる。
- (5) 形状対称性に優れた丸線材や平角線材の作製が可能であるため、鮮明な MRI 画像を得るために必要な高均一度の磁場を発生する、超伝導コイル (超伝導磁石) の作製が比較的容易となる。

以上の特筆すべき特長により、 $MgB_2$  を用いた超伝導線材 ( $MgB_2$  線材) は、MRI 診断装置の次世代化への応用も含めて、従来よりも小型で軽量の超伝導応用を実現する、先端材料の一つとして期待が持たれている。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では  $MgB_2$  線材に着目した。この超伝導線材をコイル状に巻線し、超伝導コイル (超伝導磁石) として、その優れた機能を発揮・活用していくためには、現状で主に以下の課題が挙げられている。まず、応用上重要な指標となる、磁場・冷却などの使用環境・サイクル下での臨界電流特性や熱的安定性及び耐歪特性に加えて作製コストなど、超伝導線材自体の特性・性能・コストのさらなる改善が要求されている。そして、コイルとして MRI 診断装置に応用していくためには、磁場発生とともにその時間的安定度を極めて高く維持することも必要である。この条件を満たすための  $MgB_2$  線材の課題の一つに、超伝導接続技術の確立が挙げられている。この線材技術は、超伝導材料を介して超伝導線材どうしを超伝導接続する技術であり、コイルを形成する線材の両端の接続に適用することで、超伝導特有の性質の一つとなる、永久電流に伴う高安定磁場の発生を可能にすることができる。さらに冷却環境としても、貴重な資源となる極低温寒剤の液体ヘリウムを必要とせず、MRI 診断装置用の  $MgB_2$  コイルに適した冷却方法・システムの開発が強く望まれている。そこで本研究では、MRI 診断装置の次世代化に向けて、これらの重要な課題に対処していくために、 $MgB_2$  線材の高性能化と  $MgB_2$  線材を基盤とした要素技術の開発の研究に従事した。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、臨界電流特性を含めた超伝導線材の特性・性能の改善に関する研究を進めるために、Powder-in-tube 法 (金属管粉末充填・加工法) を用いて In situ 処理から  $MgB_2$  線材を作製して研究対象とした。具体的には、原材料粉末に硼素粉末とマグネシウム粉末及び炭素添加剤などを使用した。これらの混合粉末を金属管 (シース材) に充填し、細線加工後に電気炉で焼結することで、短尺の  $MgB_2$  単芯線材を得た。また、Hyper Tech Research Inc. (アメリカ) 製の単芯線材と銅の安定化材を組み合わせることで複合多芯化した後に焼結し、 $MgB_2$  多芯線材も得た。

次に  $MgB_2$  超伝導接続技術の開発研究を

進めるために、その試料として同様に Hyper Tech Research Inc. (アメリカ) が作製した単芯線材を用いた。この線材はシース材に合金のモネルとバリア材にニオブの材料から構成されている。まず、超伝導接続する線材領域のシース部分を硝酸でのエッチング処理により除去し、バリア材を研磨することで  $MgB_2$  コアを露出させた。これらの除去・処理をした 2 本の線材をステンレス鋼製容器内に、マグネシウム粉末及び硼素粉末 (または炭素添加した硼素粉末) との混合粉末と一緒に封入して焼結することで、超伝導接続部の試料を得た (図 1)。

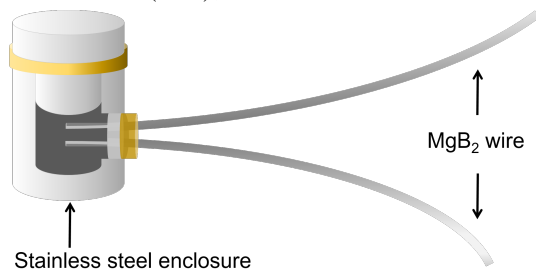


図 1 ステンレス鋼製容器内の  $MgB_2$  焼結体を介して 2 つの  $MgB_2$  線材を接続する概略図。

そして、 $MgB_2$  超伝導コイルの性能・冷却環境などの評価・最適化に関する研究を進めるために、その材料として Hyper Tech Research Inc. (アメリカ) 製の単芯線材及び多芯線材を用いた。具体的には、これらの線材を巻き線後に焼結する、Wind and React 法を適用し、小型の  $MgB_2$  コイルを得た。また、寒剤として、従来の液体ヘリウムよりも安価で取り扱いが容易であり、その資源も地球上に豊富な液体窒素に着目し、 $MgB_2$  コイルを超伝導状態にすることを考慮に入れて、さらに液相から固相状態にした、固体窒素環境下での冷却・コイル性能を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) $MgB_2$ 線材の高性能化への研究

###### 耐歪特性を改善するためのカーボンナノチューブ添加

まず初めに、 $MgB_2$  線材の耐歪特性や熱的安定性の改善を図るために、その高性能化への添加剤として、炭素原子の六員環からなる網目シートを円筒状に結合した、カーボンナノチューブに着目した。カーボンナノチューブは、この固有の構造により、高機械強度や高熱伝導性及び高耐熱性・高電流密度耐性など、物理・化学的に優れた性質を示し、様々な材料を高性能化する添加剤として知られている。また、炭素や炭素を含んだ化合物は、 $MgB_2$  材料の磁場下の臨界電流特性を改善する添加剤としても知られており、カーボンナノチューブにおいても、その添加効果が現在までに様々な研究機関で調べられてきた。しかしながら、大多数の研究が組織・構造と臨界電流特性を含めた超伝導特性のみへの添加効果に留まる報告となっている。そこで本

研究では、多層カーボンナノチューブを添加した  $MgB_2$  線材に着目し、その耐歪特性や熱的安定性への効果も含めて評価・高性能化への研究に従事した。

その結果として、まず、超伝導特性から評価すると、 $900\text{ }^\circ\text{C}$  で 30 分間焼結した多層カーボンナノチューブ添加の  $MgB_2$  線材は、超伝導転移温度が  $\sim 37.3\text{ K}$  であり、同じ条件で焼結した無添加の線材に比べて、 $1\text{ K}$  程度低いことがわかった。この超伝導特性の変化の原因を調べるために、両者の結晶構造を評価すると、 $MgB_2$  格子の  $c$  軸長には顕著な差がなく、一方で  $a$  軸長には収縮が多層カーボンナノチューブの添加により生じていることがわかった。この  $a$  軸長のみの格子収縮は、 $MgB_2$  結晶構造の秩序を乱し、超伝導転移温度の低下を引き起こす原因となる。また同様に、炭素添加による結晶構造の低秩序化は、電子散乱を増大し、電子の平均自由行程とコヒーレンス長を短縮させるので、臨界磁場特性と磁場下の臨界電流特性を改善する要因にもなる。これは実験結果からも、低温側での上部臨界磁場特性の改善とともに、測定温度  $4.2\text{ K}$  で磁場  $10\text{ T}$  の臨界電流密度が、多層カーボンナノチューブの添加により 10 倍以上増大していることが明らかになった。

これらの磁場下の超伝導特性の改善に加えて、カーボンナノチューブの添加が耐歪特性や熱的安定性にも及ぼす影響を調べるために、その添加した  $MgB_2$  線材のコア組織の形態について、透過型電子顕微鏡による組織観察から評価した。その結果、多層カーボンナノチューブは形状を保持したまま、焼結後も線材コア内に存在しており、 $MgB_2$  の主相と複合した組織を形成していることがわかった。この複合化は、おそらく、多層カーボンナノチューブを構成する炭素原子のごく一部の分離により、 $MgB_2$  結晶格子の低秩序化を引き起こすが、カーボンナノチューブ自体の耐熱特性により、その特異な円筒状構造は焼結後もほぼ安定して  $MgB_2$  コア内に存在できると考えられる。この複合組織を有する  $MgB_2$  線材の耐歪存性を評価した結果、可逆範囲より大きい一軸歪に対する臨界電流密度の保持率において、その減少が無添加の線材に比べて大きく抑制されていることがわかった。また、熱伝導率も同様に評価した結果、多層カーボンナノチューブの添加により、超伝導転移温度より高い温度領域では、無添加の線材に比べて大きく向上したが、一方で低い温度領域ではわずかに改善する程度に留まった。したがって、カーボンナノチューブ添加は、磁場下の超伝導特性だけでなく、応用上重要な耐歪特性なども改善する可能性が十分にあり、その最適化案としてコア組織内にカーボンナノチューブを凝集することなく均一に分散することができれば、 $MgB_2$  線材のさらなる高性能化も期待できる。

単芯線材や複合多芯線材のコア組織構造の制御

MgB<sub>2</sub> 線材の臨界電流特性改善への課題の一つとして、そのコア組織の制御が挙げられている。この理由として、MgB<sub>2</sub> 線材の最も一般的な作製方法である Powder-in-tube 法の in situ 処理は、原材料の混合粉末の焼結反応により、輸送電流を制限する多数の空隙が線材のコア内に形成されてしまうことが知られている。この空隙形成に対処するために、線材コアを高密度化する Cold High Pressure Densification (CHPD)などの加圧処理や、マグネシウム粉末の展延性を利用したコア組織の制御法などが、これまでの研究から提案されてきた。特に後者の方法では、粒径の大きなマグネシウム粉末を原材料として、その粉末を細線加工により線材方向へと伸長させることで、焼結後に形成する空隙の形と方向を制御することができる。しかしながら、マグネシウム粉末は、MgB<sub>2</sub> コア組織を形成する要素の一つにしか過ぎない。そこで本研究では、空隙形成・制御に関する新たな知見を得るために、もう一つの原材料である硼素粉末の粒径にも焦点を当てた。具体的には、粗大なマグネシウム粉末 (~150 μm) に対して、大きさの異なる 3 種類の微細な硼素粉末 (< ~0.3 μm、< ~0.5 μm、< ~45 μm) から MgB<sub>2</sub> 単芯線材を作製し、その粒径差による組成・組織及び超伝導特性への影響を評価した。また、同様に空隙制御法の一つである CHPD にも焦点を当て、MgB<sub>2</sub> 複合多芯線材への適用と臨界電流特性への影響を評価した。

その結果として、まず、粒径差による組成への影響から評価すると、粗大なマグネシウム粉末と粒径が ~0.3 μm と ~0.5 μm 以下の硼素粉末からなる線材は、650 °C の温度で 1 時間の焼結により、MgB<sub>2</sub> の主相と微量の MgO の不純物相からなる線材コアを形成することがわかった。このほぼ単相な MgB<sub>2</sub> コアの生成は、マグネシウムの融点 (~650 °C) 付近の温度と短時間の熱処理であるにもかかわらず、粗大なマグネシウム粉末とその微細な硼素粉末との焼結反応が十分促進することを示唆している。一方、粒径が ~45 μm 以下の硼素粉末からなる線材は、同じ熱処理条件で焼結すると、微量の MgB<sub>2</sub> 相と MgO 相の他に、不純物の主相が線材コア内に含有していることがわかった。この不純物は、未反応のマグネシウムであり、この低温・短時間の熱処理条件では、粗大なマグネシウム粉末との焼結反応が不十分であることがわかった。そこで焼結反応を活性化させるために、温度・時間を 850 °C 及び 3 時間まで上昇・増加すると、ほぼ単相な MgB<sub>2</sub> コアからなる線材を得ることができた。これらの結果より、粗大なマグネシウム粉末から MgB<sub>2</sub> 線材を作製する場合、その最適な焼結条件は硼素の微細粉末の粒径に大きく依存することが明らかになった。

この粒径差の効果は、MgB<sub>2</sub> 線材の焼結反応だけでなく構造組織にも大きな差異を与えることが考えられる。そこで、粒径が ~45

μm 以下の硼素粉末からなる線材を、650 °C の温度で 1 時間の焼結した後に、そのシースを除去してコア組織を走査型電子顕微鏡により評価した。その結果、コア組織は空隙が無数にある粒状構造を有していることがわかった (図2の右図)。この粒状組織の形成は、原材料の硼素粉末が、粗大なマグネシウム粉末に比べて 3 分の 1 以下の小さな粉末であるにもかかわらず、マグネシウム粉末が細線加工により線材方向へ十分伸長しないことを示唆している。一方で、粒径が ~0.3 μm と ~0.5 μm 以下の硼素粉末からなる線材は、同じ焼結条件後のコア組織において、空隙の方向と形が線材方向に制御された構造を有することがわかった。この組織の形成は、原材料の硼素粉末が、粗大なマグネシウム粉末に比べて極めて微細な粉末であるため、細線加工に伴うマグネシウム粉末の線材方向への伸長を阻害しないことを示唆している。以上の結果から、粗大なマグネシウム粉末に対する微細な硼素粉末の粒径比の差は、MgB<sub>2</sub> 線材のコア組織の構造形成に大きな影響を与えることが明らかになった。

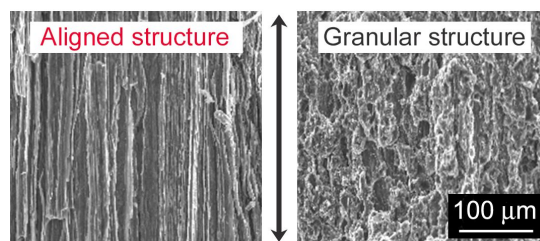


図2 MgB<sub>2</sub> 線材のコア組織. 空隙の形と方向を線材方向 (黒矢印) に制御した構造 (左図) と空隙が無数にある粒状構造 (右図).

これらの組成・構造組織の差異は、臨界電流特性に大きな影響を与えることが考えられる。そこで、測定温度 20 K での臨界電流密度をこれまでの 650 °C 及び 850 °C の焼結条件と比較したところ、粒径が ~0.3 μm と ~0.5 μm 以下の硼素粉末を用いた線材は、磁場下において優れた輸送特性を有することがわかった。この輸送電流特性の改善は、線材コア内の結晶粒サイズや結晶性の大きな差異が主な原因であることに加えて、空隙の制御も多かれ少なかれ寄与していることが考えられる。これらの結果を踏まえて、さらにコア組織の制御と臨界電流特性の改善に関する知見を得るために、粒径が ~0.3 μm 以下の硼素粉末を用いた線材を、マグネシウムの融点以下の 630 °C や融点以上の 700 °C の温度で焼結して比較した。(例えば、630 °C で 1 時間焼結した線材のコア組織が図2の左図となる。) その結果、粗大なマグネシウム粉末に対して、同じ硼素の微細粉末を原材料としても、焼結温度に対して組織構造の形態が大きく依存し、一方で臨界電流特性においても同様に増減することが明らかになった。

また、線材コア内の組織構造の制御として、Cold High Pressure Densification に着目し、

その加圧処理のさらなる知見を得るために、 $MgB_2$  複合多芯線材を試料として選択した。具体的に、まずは 6 本の  $MgB_2$  単芯線材と 1 本の銅の安定化材から作製した複合 6 芯線材の輸送電流特性を評価するために、1 本のみの単芯線材との特性を比較した。その結果、測定温度 20 K での磁場下の臨界電流密度はほぼ同程度であるが、臨界電流に関しては、6 倍増加していることがわかった。そして、この輸送電流特性のさらなる改善を図るために、Cold High Pressure Densification を複合 6 芯線に適用した結果、1 本のみ単芯線材に比べて、臨界電流と臨界電流密度の両方が増大することが明らかになった。この超伝導特性の改善は、Cold High Pressure Densification による高密度化が、複合多芯線材においても極めて有効であることを示唆している。したがって、今後は、これらの単芯線材や多芯線材などの空隙・組織構造の制御の研究で得た知見を組み合わせることで、 $MgB_2$  線材のさらなる高性能化が期待できる。

### (2) $MgB_2$ 材料を基盤とした超伝導接続技術の研究

MRI 診断装置用の超伝導磁石に  $MgB_2$  コイルを応用する課題の一つとして、永久電流モードで高安定磁場を発生する  $MgB_2$  超伝導接続技術の改善が挙げられている。これまでの研究では、この課題に対処するために、主に無添加の  $MgB_2$  線材を試料として、その接続部の接続抵抗の低減と接続部を介した輸送臨界電流特性の向上が進められてきた。しかしながら、炭素を添加した  $MgB_2$  線材に関しては、無添加の線材に比べて、磁場下で優位な臨界電流特性を有するにもかかわらず、その超伝導接続の研究報告は少なく、接続部を含めた輸送性能も非常に低い結果を示すのみであった。そこで本研究では、炭素を添加した  $MgB_2$  線材の超伝導接続に焦点を当てて、その研究開発を推進した。

まずは、炭素添加の  $MgB_2$  単芯線材の接続部を作製するために、従来の無添加の線材に用いる接続方法を選択して追試した。しかしながら、先行研究の報告と同様に、十分な輸送臨界電流特性を得ることができなかった。そこで、従来の作製工程を一つ一つ吟味・調整することで、特に焼結前の接続部の成型圧力が接続性能に大きく依存することを明らかにした。この結果を踏まえて作製方法を再調整し、690 °C で 30 分間焼結した炭素添加の  $MgB_2$  接続部の組成を評価すると、 $MgB_2$  の主相と微量の不純物の  $MgO$  相から構成していることがわかった。このほぼ単相な  $MgB_2$  組成の生成は、接続部を介した輸送電流特性にも大きな効果を与えることが考えられる。そこで、測定温度 20 K での臨界電流特性を評価すると、接続部なしの線材と接続部を介した線材の磁場 0.5 T での臨界電流は、それぞれ、194 A と 140 A の値を有することがわかった。この結果は、超伝導接続性能が、本来の線材の臨界電流の約 72% 程度ま

で向上・維持できることを示唆しており、応用が期待される 20 K の温度で、炭素添加の  $MgB_2$  単芯線材の接続技術を世界で初めて大きく改善することに成功した。また、小型  $MgB_2$  ソレノイドコイルを形成する線材の両端を、同作製方法により接続して評価した。その結果、接続抵抗は測定温度が約 17 K で  $1.8 \times 10^{-13} \Omega$  以下となり、永久電流モードによる高安定磁場の発生も潜在的に十分可能であることがわかった。したがって、今後はこれらの研究で得た知見を活用して、現状の単芯線材だけでなく複合多芯線材においても、その接続技術の適用・最適化を図ることで、 $MgB_2$  材料を基盤とした超伝導接続技術のさらなる改善・確立が期待できる。

### (3) 固体窒素環境下での冷却及び $MgB_2$ コイルの研究

MRI 診断装置の次世代化へ向けて、高価な寒剤である液体ヘリウムの課題に対処するために、冷凍機と固体窒素を組み合わせた冷却技術の開発・適用が代替構想の一つとして挙げられている。しかしながら、固体窒素冷却に関する研究報告は未だ少なく、特に  $MgB_2$  材料においても、その冷却環境下で低いコイル性能を示すのみであった。そこで本研究では、冷媒に固体窒素を選択して  $MgB_2$  コイルへの適用試験・最適化と、MRI 診断装置の応用への可能性を追求した。

まずは、 $MgB_2$  単芯線材の両端を接続した直径 109mm の小型コイルを 690 °C で 30 分間焼結し、その超伝導コイル特性を固体窒素冷却中で評価した。その結果、超伝導接続で閉じたコイル内に 99.3 A の電流を保持することに成功した。この永久電流モードへの移行は、固体窒素冷却下の  $MgB_2$  コイルにおいて、世界で初めての実証となった。さらに永久電流モードを 4.75 日間保持したところ、超伝導接続を介して閉じたコイルの磁場減衰は極めて小さく、その接続抵抗も  $7.4 \times 10^{-14} \Omega$  以下であることがわかった。この結果を踏まえて、次に  $MgB_2$  単芯線材よりも大きい輸送臨界電流特性を有する複合 36 芯線材を用いて、直径 130mm の小型コイルを作製し、675 °C で 60 分間焼結した後、同様に超伝導コイル特性を固体窒素冷却中で評価した。その結果、応用が期待される 20K 付近の温度よりも十分高い 28K の温度で、コイルへ 200A の電流を温度変化せずに、超伝導状態を保持したまま繰り返し通電することに成功した。また、冷却性能試験として、冷凍機冷却を停止した後においても、コイルを超伝導状態に保持したまま、低温で長時間維持できることを確認した。この固体窒素特有の優れた冷却性能は、電力不足・電力供給不安定な発展途上国・地域を対象として、予期せぬ停電が引き起こされても、その冷却状態が保持されることにより、超伝導コイルの保護・装置の復旧にも対処できることを示唆している。したがって、これらの試験結果、特にコイル性能として、永久電流モードや高安定かつ繰り返し数百

アンペア級の大電流通電性能の実証は、まだ低い磁場を発生するだけの試作コイルであることを考慮すべきであるが、MgB<sub>2</sub> 線材が固体窒素冷却 MRI 診断装置用の超伝導コイル材料として期待できることを明確にした。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

“Solid cryogen: a cooling system for future MgB<sub>2</sub> MRI magnet,” Dipak Patel, Md Shahriar Al Hossain, Wenbin Qiu, Hyunseock Jie, Yusuke Yamauchi, Minoru Maeda, Mike Tomsic, Seyong Choi, and Jung Ho Kim, *Scientific Reports*, Vol.7, 2017 年 ArticleNo.43444, Pages1-8, 査読有, DOI: 10.1038/srep43444

“A new approach to a superconducting joining process for carbon-doped MgB<sub>2</sub> conductor,” Dipak Patel, Md Shahriar Al Hossain, Minoru Maeda, Mohammed Shahabuddin, Ekrem Yanmaz, Subrata Pradhan, Mike Tomsic, Seyong Choi, Jung Ho Kim, *Superconductor Science and Technology*, Vol.29, 2016 年, ArticleNo.095001, Pages1-7, 査読有, DOI: 10.1088/0953-2048/29/9/095001

“Evaluation of persistent-mode operation in a superconducting MgB<sub>2</sub> coil in solid nitrogen,” Dipak Patel, Md Shahriar Al Hossain, Khay Wai See, Wenbin Qiu, Hiroki Kobayashi, Zongqing Ma, Seong Jun Kim, Jonggi Hong, Jin Yong Park, Seyong Choi, Minoru Maeda, Mohammed Shahabuddin, Matt Rindfleisch, Mike Tomsic, Shi Xue Dou, Jung Ho Kim, *Superconductor Science and Technology*, Vol.29, 2016 年, ArticleNo.04LT02, Pages1-6, 査読有, DOI: 10.1088/0953-2048/29/4/04LT02

“Control of core structure in MgB<sub>2</sub> wire through tailoring boron powder,” Minoru Maeda, Daisuke Uchiyama, Md Shahriar Al Hossain, Zongqing Ma, Mohammed Shahabuddin, Jung Ho Kim, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.636, 2015 年, Pages29-33, 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.02.151

“Multiwalled carbon nanotube-derived superior electrical, mechanical and thermal properties in MgB<sub>2</sub> wires,” Dipak Patel, Minoru Maeda, Seyong Choi, Seong Jun Kim, Mohammed Shahabuddin, Jafar Meethale Parakandy, Md Shahriar Al Hossain, Jung Ho Kim, *Scripta Materialia*, Vol.88, 2014 年 Pages13-16, 査読有, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.06.010

“The roles of CHPD: superior critical current density and n-value obtained in binary in situ MgB<sub>2</sub> cables,” M. S. A. Hossain, A. Motaman, S. Barua, D. Patel, M. Mustapic, J. H. Kim, M. Maeda, M. Rindfleisch, M. Tomsic, O.

Cicek, T. Melisek, L. Kopera, A. Kario, B. Ringsdorf, B. Runtsch, A. Jung, S. X. Dou, W. Goldacker, P. Kovac, *Superconductor Science and Technology*, Vol.27, 2014 年 ArticleNo.095016, Pages1-7, 査読有, DOI: 10.1088/0953-2048/27/9/095016

[学会発表](計 3 件)

Minoru Maeda, Dipak Patel, Md Shahriar Al Hossain, Seyong Choi, Jung Ho Kim, “Development of MgB<sub>2</sub> wire and coil for the next generation of MRI magnet,” **29th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY**, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)

前田穂, 内山大輔, “原材料粉末の粒径差による MgB<sub>2</sub> 線材コアの空隙制御,” **第 1 回 低温工学・超電導学会 材料研究会シンポジウム/第 3 回 液体水素冷却 MgB<sub>2</sub> 超電導線の開発と応用に関するフォーラム**, 2015 年 06 月 09 日, 東京大学山上会館(東京都文京区)

前田穂, “次世代 MRI 装置の実現に向けた MgB<sub>2</sub> 線材技術の開発,” **JST-ALCA (科学技術振興機構-先端的低炭素化技術開発)の液体水素冷却 MgB<sub>2</sub> 超電導線の開発と応用に関するフォーラム**, 2014 年 07 月 24 日, JST 東京本館(東京都千代田区)

[図書](計 1 件)

Soo Kien Chen, Minoru Maeda, Akiyasu Yamamoto, Shi Xue Dou, 出版社 Springer 書名 *Vortices and Nanostructured Superconductors*, (*Springer Series in Materials Science*, 978-3-319-59353-1, Vol. 261), 担当した章 *Chapter 3 Chemically and Mechanically Engineered Flux Pinning for Enhanced Electromagnetic Properties of MgB<sub>2</sub>*, 編集者 Adrian Crisan, 発行年 2017, 出版確定期(出版予定日 2017 年 7~8 月)

[その他]

ホームページ等

前田穂 - 研究者 - researchmap  
<http://researchmap.jp/read0156055/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田穂 (MAEDA, Minoru)  
日本大学・理工学部・助手  
研究者番号: 80610584

(2) 研究協力者

JungHo Kim (KIM, JungHo)  
Dipak Patel (PATEL, Dipak)