

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01100

研究課題名（和文）素粒子実験用MgB2超伝導薄肉ソレノイドのクエンチ保護に関する研究

研究課題名（英文）Quench protection of MgB2 thin superconducting solenoid for particle detector

研究代表者

横田 康博（MAKIDA, Yasuhiro）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：30199658

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 22,280,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子検出器への応用を目標に、通常ニオブチタンによる超伝導磁石より粒子透過性に優れたニホウ化マグネシウムによる超伝導磁石の開発を進めている。ダブルパンケーキタイプ及び薄肉ソレノイドタイプのテストコイルを製作し、クエンチ試験を実施した。温度マージンが大きくなるため、ニオブチタン磁石と比べクエンチの発展、すなわち抵抗性電圧の増大が非常に緩やかであることが観測された。素粒子検出器向けにはアルミ安定化超伝導線が必要になると考え、ハンダ付けでアルミ安定化材を付加したニホウ化マグネシウム超伝導線を作成し、その安定性とアルミへの電流再分配を測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導転移温度39 Kのニホウ化マグネシウム（MgB2）超伝導線材に注目して、粒子検出器用の超伝導磁石開発に取り組んでいる。テストコイルを製作してクエンチ試験を行い、普及しているニオブチタン超伝導線による磁石との比較をした。他の高温超伝導テープ線材のようにクエンチ後の超伝導特性の劣化は見られなかったことは、MgB2磁石の利点となる。次にこれまでの粒子検出器用磁石と同様に、アルミ安定化材を付加したMgB2サンプル線を製作し、超伝導安定性とクエンチ安全性が向上することを確認した。この試験の際に、小型ホール素子の格子を作成してアルミ安定化材中の電流再分配を磁場変化を通して観察することに成功した。

研究成果の概要（英文）：With the goal of application to elementary particle detectors, we have been developing superconducting magnets made of magnesium diboride, which have better particle transparency than popular superconducting magnets made of niobium titanium. We fabricated double pancake type and thin-walled solenoid type test coils, and quench tests have been carried out on the former type coil. Due to the larger temperature margin, it was observed that the quench evolution, that is the increase in resistive voltage, was much slower compared to niobium titanium magnets. Thinking that an aluminum stabilized superconducting wire would be necessary for particle detector magnets, we created a magnesium diboride superconducting wire with an aluminum stabilizing material added by soldering, and have investigated its stability and have measured its current redistribution in aluminum area after normal transition.

研究分野：超伝導工学

キーワード：ニホウ化マグネシウム アルミ安定化超伝導線 クエンチ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本で2001年に発見されたニホウ化マグネシウム (MgB_2) 超伝導体は、蒸着工程で製作される他のビスマス系や希土類系などテープ形状の酸化物系高温超伝導線材と比較すると、冶金工学的な工程(熱処理、同時押出、伸線など)で製造できるので、円形や角形など断面形状に自由度があり、超伝導特性の方向性もないので、様々な形状のコイルへの適用や、大電流撚線ケーブルへの加工が容易である。

磁石への応用が試みられている MgB_2 であるが、①電流密度を実用化超伝導線材($NbTi$ やニオブ3スズ(Nb_3Sn))まで高めること、②コイル製作工程での性能劣化を克服すること③超伝導状態喪失時のコイル保護(クエンチ保護)が実用化に向けた課題となっている。①に関しては国内外の材料系研究機関や線材メーカーが性能向上に努めており、図1に示すように4.2Kの5T以上の領域では $NbTi$ 相当の性能を有するようになってきた。しかしながら MgB_2 超伝導磁石の真価を発揮する20Kでの電流密度はまだ $NbTi$ に及んでいないため、高磁界領域のコイルとして採用例が相次ぐ酸化物系高温超伝導線材と比べ、実用への展開は進んでいない。②に関しては、劣化の背景として曲げによる歪や凹みなど断面変形によって MgB_2 の生成が阻害される線材内部のメカニズムが明らかになるとともに、その限界値がおおよそ熱処理前で3%、熱処理後で0.3%であることもわかってきた。③のクエンチ保護に関しては、酸化物系高温超伝導コイルを対象に研究開発が盛んにおこなわれている一方、 MgB_2 コイルのクエンチ特性の先行研究は少なく、酸化物系高温超伝導コイルのようにクエンチ後の超伝導特性劣化といったシリアスな課題が潜んでいるかどうかも明確になっていない。

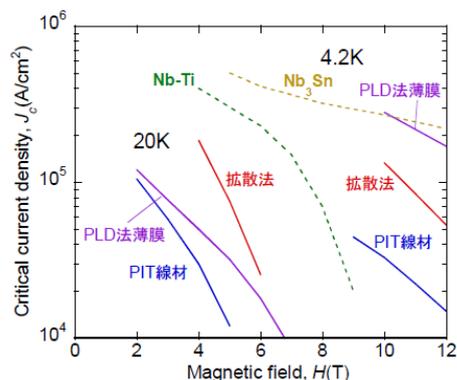


図1 MgB_2 の臨界電流密度 J_c の向上製造方法の改良(Powder In Tube 法⇒Pulse Laser Deposit 法や拡散法)によって20Kで $NbTi$ に並ぶ電流密度を目指している。なお量産品はPIT法で製造されている。

2. 研究の目的

MgB_2 は臨界電流密度や臨界磁場が実用化超伝導線材に及んでいないため、酸化物系高温超伝導線ほど超伝導磁石応用の分野では注

表1 $NbTi$ と比較した MgB_2 の透過性の評価

	質量数	物質質量 (g/cm ³)	輻射長 X_0 (mm)
$NbTi$	Nb 92.91, Ti 47.87	6.6	17.5
MgB_2	Mg 24.31, B 10.81	2.2	188

目されていない。一方コイルの物質量の低さ(粒子透過性の高さ)が重要な素粒子検出器向けの超伝導磁石応用では、 MgB_2 は表1に示すように $NbTi$ に対して非常に魅力的な超伝導線材となっている。この理由により、本研究は MgB_2 超伝導線を用いて、より粒子透過性能が向上した検出器用の超伝導磁石システム実現をめざしている。

- (1) 「研究開始当初の背景」の内のクエンチ保護に関して、アルミ安定化材の付加を提案しその要素研究をする。クエンチ保護や超伝導安定性の向上のため、低抵抗のアルミ安定化材を超伝導線に付加し、常伝導領域の発熱密度を下げ、熱容量を増してホットスポットを抑える手法は、粒子検出器用超伝導磁石向けの $NbTi$ コイルでは実績を積み上げてきたが、 MgB_2 でのその有効性を確認する。
- (2) 「研究開始当初の背景」の内の許容歪や変形による超伝導特性の劣化を元に、検出器向け薄肉ソレノイドタイプの MgB_2 試験用超伝導コイルを作成して、その実証をする。

3. 研究の方法

- (1) アルミ付加によるクエンチ保護試験
これまで $NbTi$ 超伝導線の場合、「同時押出法」によって周りにアルミ安定化材を付加してきたが、 MgB_2 部の許容歪や生成熱処理温度など同時押出法でのアルミ付加には課題が多く、今回はハンダ法で MgB_2 線にアルミを付加した試料を作成する。試料のクエンチ試験を通じて保護効果があることを確認する。

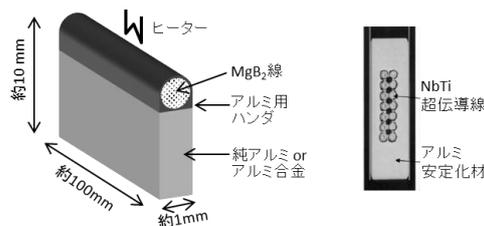


図2 アルミ安定化材を付加した試料(左)及び同時押出による従来のアルミ安定化線(右)

- (2) MgB_2 試験用超伝導コイルによるクエンチ保護試験
 $NbTi$ 超伝導線を用いて培われてきた設計で MgB_2 超伝導線による薄肉ソレノイドタイプの試験コイルを作成する。試験用コイルは薄肉円筒状に密巻にした MgB_2 線によるコイル巻

線をエポキシ樹脂含浸し、巻線全体を一体化する。このコイル巻線の内外表面にはコイル全体の熱伝導を保証する高純度アルミ薄板（ストリップ）を貼りつけている。この純アルミストリップは、クエンチ発生時には常伝導伝播を促進して局所的な温度上昇（ホットスポットの発生）を防ぎ、クエンチ保護として機能する。図 3 に製法及び製作したコイル写真を示す。製作したコイルは既存のクライオスタット内で冷却励磁試験を行う。



(a) ϕ 300 mm、長さ 250 mm(左)と 120 mm(右) (b) コイル断面

図 3 薄肉ソレノイド試験用コイルの製作

4. 研究成果

(1) アルミ付加によるクエンチ保護試験[1]

図 3 にアルミを付加した MgB_2 線試料を示す。 MgB_2 線はハイパーテック社製の 24-NM（生成熱処理済み）を購入し、アルミ安定化材としては 1 mm 厚の 99.999%純アルミと A6061 アルミ合金の 2 種類を超音波ハンダコテでハンダ接続した。通常安定化材としては抵抗率が $1 \times 10^{-12} \Omega \cdot m$ @4.2 K まで下がる純アルミが使用されるが、大型のマグネット用の線材では電磁力支持のためアルミ合金で線材を補強した実績もあり、 $1 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ @4.2 K 程度のアルミ合金を付加した試料も作成した。

クエンチ時の安定化材への電流の拡散は次式に示されるように抵抗率 ρ の逆数に比例するので純アルミとアルミ合金では電流再分配の状況は異なると予測された。この現象も観察するため、図 4 のように試料には、強制クエンチを起こすヒーター、常伝導転移を確認する電圧タップに加え電流再分配に伴う試料周辺の磁場変化を見るホール素子アレイ（格子）を配置した。

$$\frac{\partial^2 J(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial J(x, y, t)}{\partial t}$$

J : 電流密度、 μ_0 : 真空の透磁率、 ρ : 抵抗率

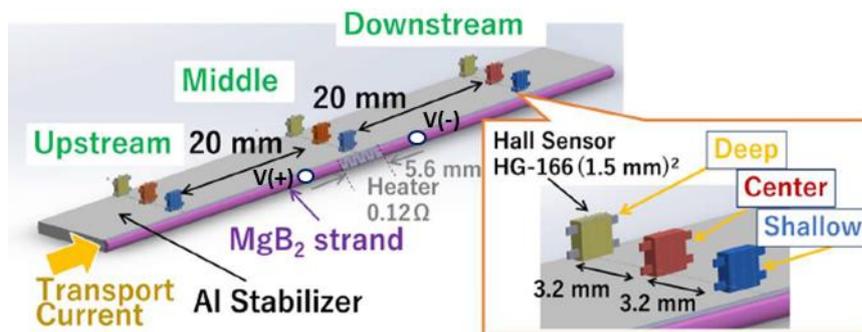


図 4 試料及びセンサー配置。ホール素子アレイは電流方向に上流・中心・下流の 3 か所各アレイは、 MgB_2 素線に近い位置から Shallow（浅）、Center、Deep（深）

試験は、図 4 の試料の表面をシリコングリスで覆って疑似断熱状態として、最大 5 T の外部磁場を印加し、試料に最大 126 A 通電した状態で、ヒーター加熱によって常伝導転移（クエンチ）を発生させた。ホール素子からの信号は印加地場による信号と電流再分配に対応した微小磁場変化が重なり合っており、後者を抽出することで電流再分配の状況を把握した。

図 5 には 4 T の印加磁場の下で、試料に臨界電流値の 96 %に相当する 126 A を通電し、ヒーター加熱をした場合の、純アルミとアルミ合金での試験結果（トレンド）を示している。両者の違いの特徴は以下のとおりである。

- ① 純アルミのホール素子アレイはヒーター加熱をする中心だけでなく電流の上流側と下

流側でも増方向に変動している。アルミ合金の方はヒーター加熱をしている中心のホール素子アレイのみ反応している。従って電流再分配はアルミ合金の場合ヒーター周辺に限定されている。

② 純アルミのホール素子アレイは MgB_2 素線からの位置 (Shallow, Center 及び Deep) に関わらず、増加している。アルミ合金では、Shallow は低下する一方 Center 及び Deep は増加している。従って電流の再分配領域は、純アルミの場合 MgB_2 -アルミ境界付近に留まっており、アルミ合金の場合は全体に広がっている。

①②の状況を説明するイラストを図6に示す。先に示した電流拡散式を裏付ける結果となっている。純アルミに関してはさらに長時間ヒーター加熱を続けていけば、断面全体に電流が再分配されるデータが得られるはずで、今後の課題とする。

大型のマグネットでは、純アルミとアルミ合金の両者を付加した導体が予測され、その断面比率などを決める際の、良い知見が得られた。また、 MgB_2 素線単独では容易にクエンチ試験で焼損していたものが、図5に示されるように、アルミを付加した試料では単に分流しただけでヒーター加熱をやめると超伝導復帰し、電流は MgB_2 素線に復帰している。コイルの実効的な電流密度を下げてしまことになるが、アルミ安定化材の付加はコイルのクエンチ保護に寄与することが確認された。

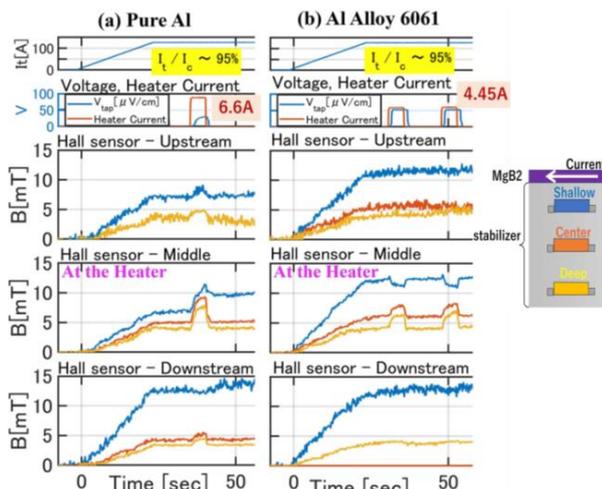


図5 4 Tの印加磁場の下で、123 A を通電し、ヒーター加熱をした場合の、純アルミとアルミ合金での試験結果

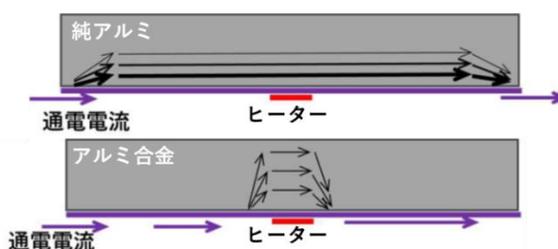
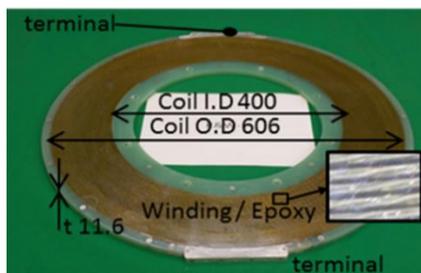


図6 ヒーター加熱時の電流分布の違い

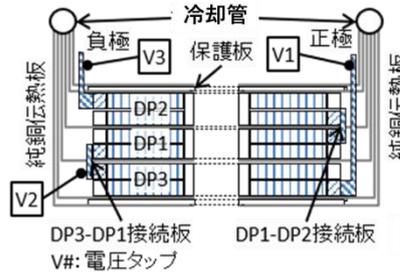
(2) MgB_2 試験用超伝導コイルによるクエンチ保護試験

図3に示す薄肉ソレノイドタイプ試験用コイルのクエンチ試験は、アルミ安定化材の試験に時間をとられ、本研究期間内に開始できなかった。クライオスタット等重要な機材はそろっており、今後実施を予定している。

先行研究で作成していたダブルパンケーキタイプの MgB_2 テストコイルを対象にクエンチ試験を実施した[2]。図7に描かれているように、テストコイルは冷却管中の液体ヘリウムから純銅の伝熱板を介して伝導冷却されているが、電極（負極）での抵抗発熱により 500 A を超えるとクエンチする。クエンチ後のコイルに大きなダメージは無い事を確認しており、酸化物高温超伝導線のようなクエンチ後の特性劣化は起きていない。



(a)ダブルパンケーキコイル



(b)ダブルパンケーキコイル断面

図7 パンケーキタイプテストコイル

<引用文献>

- [1] T. Yagai, R. Inomara, Y. Makida etc., "Design and Demonstration of Al-Stabilized MgB_2 Conductor for Higher-Sensitivity Particle Detection Magnet", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol 34. 4500706, 2024.
- [2] 槇田他, "サーモサイフォン循環液体水素冷却による SMES モデル装置", 低温工学, 57 巻 4 号, 10.2221/jcsj.57.241, 2022, pp.241-245

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yagai T., Inomata R., Makida Y., Shintomi T., Hirano N., Hamajima T.	4. 巻 34
2. 論文標題 Design and Demonstration of Al-Stabilized MgB2 Conductor for Higher-Sensitivity Particle Detection Magnet	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2024.3355365	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 横田康博	4. 巻 57
2. 論文標題 サーモサイフォン循環液体水素冷却によるSMES モデル装置	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 低温工学	6. 最初と最後の頁 241-245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2221/jcsj.57.241	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tsuyohi YAGAI
2. 発表標題 Design and Demonstration of Al-Stabilized MgB2 Conductor for Higher-Sensitivity Particle Detection Magnet
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology (MT18) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷貝剛
2. 発表標題 高粒子透過性検出器を実現する薄肉ソレノイドコイル用アルミ安定化MgB2導体の開発
3. 学会等名 2023年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	近藤 良也 (KONDO Yoshinari) (30391775)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・シニアフェロー (82118)	
研究分担者	川井 正徳 (KAWAI Masanori) (50391735)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・前任技師 (82118)	
研究分担者	谷貝 剛 (YAGAI Tsuyoshi) (60361127)	上智大学・理工学部・教授 (32621)	

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
---------	---------