

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月21日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740219

研究課題名（和文） 次世代ミュオン源用超伝導磁石の放射線耐性の検討

研究課題名（英文） A study on the radiation resistance in a superconducting magnet mater for the next generation muon sources

研究代表者

吉田 誠（YOSHIDA MAKOTO）

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・助教

研究者番号：70379303

研究成果の概要（和文）：次世代ミュオン源用超伝導磁石は高放射線環境下で使用されることが想定され、磁石材料の放射線損傷を十分考慮した設計が求められる。本研究では、高強度アルミ安定化超伝導線に使われているアルミ合金と無酸素銅に原子炉中性子を照射し、電気伝導度の劣化を測定した。その結果、アルミ合金の放射線損傷は、焼きなました純アルミと同等であり、無酸素銅の劣化はアルミの約3分の1であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：A superconducting magnet for the next generation muon experiments would be operated in a high radiation dose environment, thus the magnet materials should be chosen carefully considering its radiation hardness. In this study aluminum stabilizer and copper stabilizer used in the superconducting cable are irradiated by reactor neutrons, and the radiation effects in electric resistance are measured in-situ during exposure. The resistance of aluminum stabilizer is degraded at the same rate as in pure aluminum and the degradation rate of copper stabilizer is measured to be one third of aluminum.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、耐放射線、超伝導磁石、ミュオン

1. 研究開始当初の背景

(1) 加速器の発展に伴い人工的にミュオンビームを生成することで、ミュオンを使った素粒子実験はもとより、ミュオンスピンドル緩和法による物性研究や負ミュオンを用いた非破壊元素分析など応用範囲が広がっている。近年は、さらなる大強度化、高度化によって新たな展開が切望されており、J-PARC 等の大強度陽子加速器を使ったミュオン源や新しいミュオンビーム生成手法が精力的に開発されている。現在、最大強度のミュオンビームはスイスの PSI 研究所で得られ、最大で毎秒 10^8 個～ 10^9 個のミュ

オンを用いて、レプトンフレーバー非保存過程探索実験などの素粒子実験を始め、様々な実験に供されている。国内では、J-PARC の 3GeV 陽子ビームを利用した MUSE が世界最大強度のパルスミュオンビーム生成を目指して建設され、すでに部分的に稼動している。ただし、負電荷ミュオンについては、強度はおよそ一桁小さい。

(2) 素粒子実験の中でも、日本の J-PARC や米国フェルミ研究所で検討されている次世代のミュオン・電子転換過程探索実験では、毎秒 10^9 個を超える大量の負電荷ミュオン

ビームが必要である。このような大強度化を実現するためには、ミュオンビームのもととなるパイオンの捕獲効率を劇的に向上させることが必要となる。パイオン生成標的を強磁場ソレノイド中に配置し、標的から放出されるパイオンを強磁場で捕獲する方法が提案されている。

(3) 運転効率や磁場強度の要請により、パイオン捕獲ソレノイド磁石には超伝導コイルを使用することが望ましいが、陽子標的からの強烈な放射線にさらされるため、大口径超伝導磁石技術に加え、放射線被曝に対する綿密な対策が必要となる。超伝導磁石は極低温で運転されるため、伝熱特性や導電率特性の良い材料が使われるが、これらの性能は、放射線によって劣化する事が知られている。次世代大強度ミュオン源用の超伝導磁石を設計するには、極低温における放射線損傷を正確に知る必要がある。

2. 研究の目的

(1) パイオン捕獲ソレノイド磁石には、極低温領域において導電率特性及び熱伝導率特性が優れ、しかも機械的強度特性が優れたアルミ合金を複合化した超伝導線を使用することが検討されている。アルミニウム合金は、軽量かつ強度が高く、極低温での残留抵抗が小さいため、超伝導線の安定化材に使うことで、より物質量の小さい超伝導磁石を実現できる。アルミニウムは銅に比べて放射線の透過性が高いので、大量の放射線による核発熱を軽減し、間接冷却が可能になる。

(2) 過去の文献では、純アルミや純銅などの金属について極低温での放射線損傷が調べられているが、超伝導線に使われる高強度アルミは高純度アルミに微量の添加剤を加えてあり、中性子等の放射線によって伝導率がどのように劣化するのかのデータは存在しない。

(3) 本研究では、実際に超伝導磁石に使用されるアルミ安定化材や銅安定化材について、放射線損傷による伝導率の劣化を測定することを目的とする。高放射線環境下で稼動する超伝導磁石を設計する際には、シミュレーションにより放射線被曝量を見積り、磁石レイアウトを検討してきたが、磁石設計を完成するには、放射線耐性の検討結果のフィードバックが必要である。本研究では、高強度アルミ安定化材の放射線損傷を実測することで、次世代ミュオンビームラインに不可欠なパイオン捕獲ソレノイド磁石の開発を推進することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションにより中性子量を見積もった結果、直径 1.3 メートルのソレノイドコイルの中心に陽子標的をおいた場合、超伝導コイルの中性子被曝量はピーク位置で 10^{21} n/m² を超えると予想されている。高強度アルミ合金における中性子による劣化、アニーリングによる回復に不定性が大きいため、この設計が十分なマージンを持っているかどうか判断することは難しい。そこで、本研究では、高強度化のための添加剤を加えた 5N 高純度アルミの極低温環境下における放射線による残留抵抗値の劣化、アニール効果を実測した。また、極低温領域で使われるセルノックス抵抗温度計についても、中性子照射試験を行い、劣化が起こるかどうかを調べた。

(2) 中性子源としては、京都大学原子炉実験所の研究炉 KUR を使用した。KUR には、極低温環境での照射を可能にするクライオスタットが備え付けられている。クライオスタット中には極低温に冷却されたヘリウムガスを循環させ、クライオスタット先端部に設置する照射試料を冷却する。試料位置での中性子量を Ni 片の放射化法によって測定したところ、 1.4×10^{15} n/m²/s であった。このとき、KUR は熱出力 1MW で運転した。KUR の最大熱出力は 5 MW であるが、冷凍能力に制限があるため、5MW で照射すると試料温度が 20K 以上に上昇する事が分かったので、12K 程度の極低温に試料温度を保つため 1 MW で運転した。試料を極低温に冷却したまま中性子を照射し、照射中に逐次、電気抵抗を 4 端子法で測定した。

(3) 照射試料は、高強度アルミ安定化材と無酸素銅、純アルミを用意した。アルミ安定化材は、高強度化のための冷間加工ひずみを保存した状態で照射試験を行うため、超伝導線の試作品から放電加工を用いて切り出したものを使用した。アルミ試料の寸法は、断面 1mmx1mm、長さ 70mm である。両端にポリミド被覆リード線を純銅スリーブで圧着して電流導入端子とし、その内側に 45mm 間隔で電圧測定用リード線を圧着した (図 1)。また、直径 1 ミリの無酸素銅についても同様にリード線を圧着し、照射試料とした。さらに、焼きなました 5N グレードの純アルミを、放射化の少ないアルミナ製試料ホルダー (図 2) に固定して測定を行い、高強度アルミ安定化材との比較を行った。

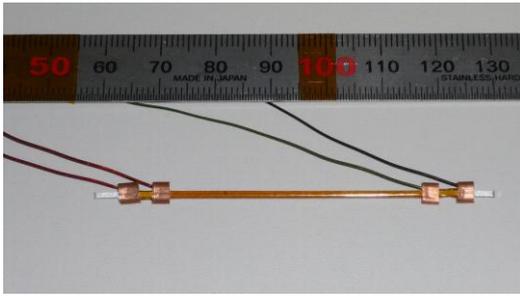


図 1 高強度アルミ安定化材の照射試料

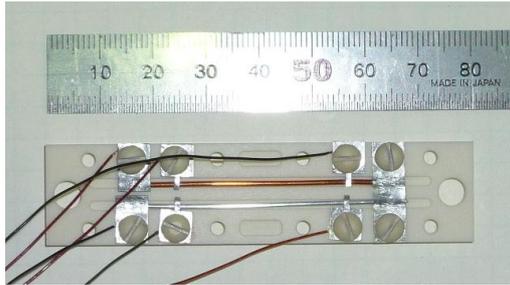


図 2 アルミナホルダーに固定した純アルミ試料と純銅試料

4. 研究成果

(1) イットリウムを添加した高強度アルミ安定化材を、約 12K の極低温環境下で中性子を照射しながら電気抵抗を測定した。2010 年度に試験したアルミ試料 (Cu, Mg 添加) と同様の結果が得られ、 10^{20} neutrons/m² の速中性子束に換算して、抵抗率がおよそ $0.03 \text{ n}\Omega \text{ m}$ 増えることがわかった。照射中に取得した抵抗値のデータを図 3 に示す。原子炉を運転している間、照射量に比例して各試料の電気抵抗が増える事が観測された。また、金鉄熱電対によって測定した試料温度は約 12K で安定していたのに対し、CERNOX 温度計は 12K から 15K までドリフトした。

(2) 5N グレード純アルミ (RRR=3000)、および超伝導線に使われる無酸素銅 (RRR=300) の試料についても試験した。5N 純アルミは 10^{20} n/m² あたり $0.025 \text{ n}\Omega \text{ m}$ 抵抗率が上昇し、無酸素銅の抵抗率は 10^{20} neutrons/m² あたり $0.009 \text{ n}\Omega \text{ m}$ 上昇した。これらの結果より、中性子照射によるアルミの抵抗率増加は、添加剤や加工歪みの有無にほとんど依存しないことや、銅に比べて約 3 倍敏感である事が分かった。

(3) 2010 年度に行った中性子照射試験中にはセルノックス抵抗温度計の読み値が 12K から 15K までドリフトすることが観測されたので、2011 年度の試験では、金鉄熱電対を併設して、温度測定の信頼性を確かめた。照射試

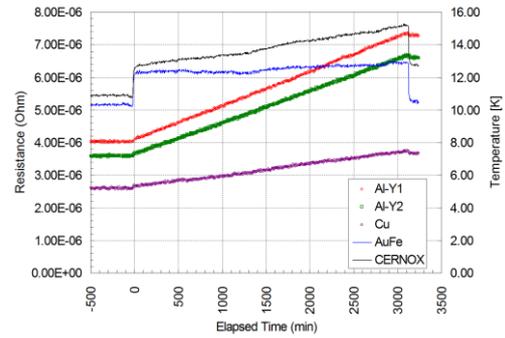


図 3 照射中の試料抵抗と温度計の変化。赤および緑が高強度アルミ安定化材の抵抗値、紫が無酸素銅の抵抗値。黒は CERNOX 温度計の読み値、青が金鉄熱電対の示す温度。

料から 70cm はなれた場所につけたセルノックス温度計と試料付近の金鉄熱電対は照射中ほぼ一定の温度を示したことから、試料近傍のセルノックスも放射線により劣化することが分かった。超伝導磁石の運転温度である 5K 付近の温度領域では劣化によるドリフトは影響が小さくなると期待されるが、今後の磁石設計で留意する必要がある。

(4) イットリウム添加高強度アルミ安定化材および無酸素銅については、極低温で中性子を照射した後、室温に戻し、再度冷却して残留抵抗の変化を測定した。その結果、アルミの放射線損傷は、室温でアニールすることで、完全に回復し、照射前の残留抵抗に戻る事が確認された。一方、銅については、室温アニールの後でも照射損傷の 5%~15% が回復できずに残り、繰り返し照射によって照射損傷が蓄積されていく事が分かった。これは、高放射線にさらされる超伝導磁石に寿命が存在することを示しており、 10^{22} neutrons/m² 程度の速中性子にさらされる場合は、安定化材の劣化を考慮に入れて設計する必要があることが分かった。照射前、および照射後に室温アニールを行った後再冷却したときの各試料の残留抵抗測定結果を図 3 に示す。

(5) 上記で得られた結果を踏まえ、COMET 実験 (J-PARC E21) のパイオン捕獲ソレノイドの概念設計を行った。超伝導磁石コイルへの中性子照射量を 10^{21} neutrons/m² 程度に抑えることを目標に、磁石内部に放射線遮蔽を設けられるように常温ボアの大口徑磁石とした。また、冷却伝熱用の純アルミ板についても放射線による伝熱性能の劣化を考慮し、1mm~2mm の厚いアルミ板を超伝導コイル内部に多数挿入し、内部から冷却することとした。また、セルノックス抵抗温度計にも放射線による劣化が懸念されるため、各測定点について複数の温度計を設置することとした。

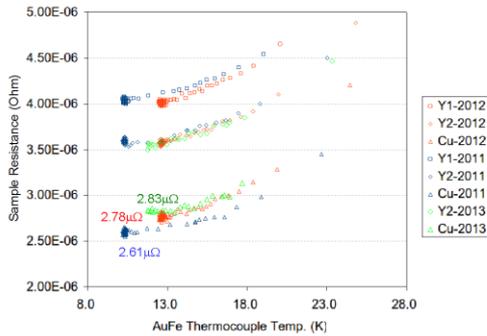


図 3 照射前冷却時の照射試料の残留抵抗値。四角印：アルミ安定化材 # 1、ひし形：アルミ安定化材 # 2、三角印：無酸素銅。青：2011 年度照射前、赤：2012 年度照射前、緑：2012 年度照射・室温アニール後

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 8 件)

① 吉田 誠、”COMET Magnet”、 Radiation Effects in Superconducting Magnet Materials 2013 (RESMM13)、2013 年 4 月 15 日 - 19 日、高エネルギー加速器研究機構

② 吉田 誠、「超伝導線安定化材の極低温での中性子照射試験」、第 47 回京都大学原子炉実験所学術講演会、2013 年 1 月 29 日-30 日、京都大学原子炉実験所

③ 吉田 誠、”Irradiation Effects in Superconducting Magnet Materials at Low Temperature”、 International Particle Accelerator Conference IPAC12、2012 年 5 月 20 日 - 25 日、米国 New Orleans

④ 吉田 誠、”Neutron Irradiation Effects in Aluminum Stabilizer of Superconducting Cable for the COMET Experiment at J-PARC”、 24th International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic Materials Conference 2012 (ICEC24-ICMC2012)、2012 年 5 月 14 日 - 18 日、福岡

⑤ 吉田 誠、「超伝導線安定化材の極低温での中性子照射試験」、第 46 回京都大学原子炉実験所学術講演会、2012 年 2 月 2 日、京都大学原子炉実験所

⑥ 吉田 誠、「超伝導線安定化材の低温での中

性子照射試験」、2011 年度秋期低温工学・超電導学会、2011 年 11 月 10 日、金沢

⑦ 吉田 誠、”Superconducting Magnet R&D for COMET”、 NuFact11、2011 年 8 月 1 日 - 6 日、スイス CERN.

⑧ 吉田 誠、”Low-temperature Neutron Irradiation Tests of Superconducting Magnet Materials Using Reactor Neutrons at KUR”、 Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC2011)、2011 年 6 月 13 日-17 日、米国 Spokane

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 誠 (YOSHIDA MAKOTO)

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・助教

研究者番号：70379303

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし