

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

MgB₂超伝導薄膜の線材化に関する基礎的研究

申請者

岩中 拓夢

最終学歴

令和5年3月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻博士課程
研究指導認定見込

調査委員
(主査)

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 土井 俊哉

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 白井 康之

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 浜 孝之

(続紙 1)

京 都 大 学	博士 (エネルギー科学)	氏名	岩中 拓夢
論 文 題 目	MgB ₂ 超伝導薄膜の線材化に関する基礎的研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、低コストと優れた超伝導特性を両立可能と期待される MgB₂ 薄膜の線材化に向け、優れた超伝導特性を実現する成膜条件の確立、線材の曲げによる超伝導特性の劣化の検証、長尺線材の作製に向けたプロセスの開発について研究を行った結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章では、超伝導物質の発見の歴史と基礎物性を概説している。また、超伝導機器の更なる普及に貢献可能と期待される MgB₂ 薄膜の線材化に向けた課題を示している。そして現状における種々の超伝導応用機器および社会的ニーズを調査して MgB₂ 薄膜線材の開発目標の設定を行っている。</p> <p>第2章では、優れた超伝導臨界電流密度 J_c(超伝導体の断面積あたりに電気抵抗 0 で流せる電流の最大値)を実現する MgB₂ 薄膜の成膜条件の確立について検討した結果を論じている。優れた磁場中 J_c が報告されている EB(Electron Beam)蒸着法をベースに、実験計画法を用いて成膜条件を探索している。その結果、基材温度と、ホウ素とマグネシウムの成膜レート比の増加が、J_c の向上に有効であることを明らかにしている。作製した中で最も優れた性能を有する 1 μm 厚の MgB₂ 薄膜の J_c は、磁場を薄膜に対し垂直に印加した場合、5, 10, 15, 20 K かつ 5 T においてそれぞれ 159,000, 98,500, 43,200, 8,000 A/mm² であった。一方、磁場を薄膜に対し平行に印加した場合、同温度、磁場における J_c はそれぞれ 167,000, 85,200, 38,600, 5,300 A/mm² であり、実用レベルの J_c を大きく上回っていることを示した。これらの J_c は、MgB₂ を用いた従来線材であるパウダーインチューブ (PIT) 線材の J_c に比べて、15 K, 20 K においては数十倍高く、5 K, 10 K においては約百倍高い。これらの結果より、優れた J_c を実現する MgB₂ 薄膜の成膜条件の確立に成功したことを示している。</p> <p>第3章では、実用上重要である工学的臨界電流密度 J_c(超伝導線材全体の断面積あたりに電気抵抗 0 で流せる電流の最大値)の向上を目的に、MgB₂ 薄膜の厚膜化を実現するための検討を行っている。10 μm と従来の MgB₂ 薄膜の 10 倍の厚さの試料を作製し、評価することで、薄膜に対し垂直に磁場を印加した際の J_c は若干低下するものの、低下後も実用レベルの数倍から数十倍の非常に高い J_c を維持できることを示し、J_c 向上のために厚膜化が非常に有効な手段であることを示している。</p> <p>第4章では、MgB₂ 薄膜線材の主な用途である超伝導磁石の設計に役立てることを目的に、</p>			

曲げによる J_c の劣化について検討している。膜厚 $1\ \mu\text{m}$ の短尺 MgB_2 薄膜線材を作製し、異なる曲率半径で曲げ、 J_c を測定している。曲げ半径 $25.0\ \text{mm}$ 以上の場合には MgB_2 薄膜線材の J_c は劣化しないこと、曲げ半径 $20.0\ \text{mm}$ 以下では J_c の劣化が見られ、曲げ半径 $15.0\ \text{mm}$ で J_c が 0 になることから、 MgB_2 薄膜線材の許容曲げ半径が $25.0\ \text{mm}$ であることを明らかにしている。また、 J_c を向上するため MgB_2 薄膜を厚膜化すると許容曲げ半径が増加することが懸念されるが、 $10\ \mu\text{m}$ に厚膜化しても許容曲げ半径は $25.5\ \text{mm}$ と大きく増加しないことを示している。以上の結果から、 MgB_2 薄膜線材の許容曲げ半径は一般的な超伝導コイルの半径より十分小さく、コイル化において障壁にならないことを明らかにしている。

第 5 章では、長尺 MgB_2 薄膜線材の作製に向け、EB 蒸着法の課題を明確にし、その課題を解決する新製法の開発に取り組んでいる。長尺 MgB_2 薄膜線材の作製に EB 蒸着法を適用することを考えた場合、その課題がホウ素の成膜レートの時間的な不安定性と空間的な不均一性であることを示し、その課題を解決するために、スパッタ法によるホウ素の供給と、加熱蒸着法によるマグネシウムの供給により MgB_2 薄膜を形成する新製法を開発している。新製法で作製した MgB_2 薄膜の J_c は、EB 蒸着法で作製した MgB_2 薄膜より大幅に低く実用レベルに達していなかったため、その原因を調査し、新製法で作製した MgB_2 薄膜の結晶性が低く、 T_c が低いためであることを明らかにしている。

第 6 章では、新製法で作製した MgB_2 薄膜の J_c を実用レベルにまで引き上げるため、長尺線材の作製プロセスにも適用可能な高温ポストアニールを検討している。 430°C の高温ポストアニールにより、 $5\ \text{K}$ 、 $6\ \text{T}$ での J_c は $1,900\ \text{A}/\text{mm}^2$ から $69,000\ \text{A}/\text{mm}^2$ と約 36 倍に、 $10\ \text{K}$ 、 $5\ \text{T}$ での J_c は $700\ \text{A}/\text{mm}^2$ から $58,600\ \text{A}/\text{mm}^2$ と約 84 倍に、 $15\ \text{K}$ 、 $3\ \text{T}$ での J_c は $300\ \text{A}/\text{mm}^2$ から $79,300\ \text{A}/\text{mm}^2$ と約 264 倍に、 $20\ \text{K}$ 、 $4\ \text{T}$ での J_c は 0 から $1,100\ \text{A}/\text{mm}^2$ と、大幅に向上し、 $10\ \text{K}$ では $9\ \text{T}$ 以内、 $15\ \text{K}$ では $6\ \text{T}$ 以内、 $20\ \text{K}$ では $4\ \text{T}$ 以内の幅広い磁場領域において実用レベルの J_c を有することを示した。以上の結果から、本製法により優れた J_c を有する長尺 MgB_2 薄膜線材の作製が可能になることを示している。

第 7 章は総括で、本論文で得られた成果を要約し、今後の展望を述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低コストと優れた超伝導特性を両立可能と期待される MgB_2 薄膜の線材化に向け、優れた超伝導特性を実現する成膜条件の確立、線材の曲げによる超伝導特性の劣化の検証、長尺線材の作製に向けたプロセスの開発について研究を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1) EB 蒸着法をベースに、実験計画法を用い、優れた J_c を実現する MgB_2 薄膜の成膜条件を確立することに成功した。また、基材温度と、ホウ素とマグネシウムの成膜レート比の増加が、 J_c の向上に有効であることを示した。

2) MgB_2 薄膜の特性を低下させることなく膜厚を $10\ \mu\text{m}$ まで厚くすることに成功し、厚膜化が J_c 向上に非常に有効な手段であることを示した。

3) MgB_2 薄膜線材の主な用途である超伝導磁石の設計に必須である、 J_c の曲げ依存性を明らかにした。 MgB_2 薄膜の膜厚が $1\ \mu\text{m}$ の場合、許容曲げ半径が $25.0\ \text{mm}$ であること、および J_c を向上するために MgB_2 薄膜を $10\ \mu\text{m}$ に厚膜化した場合でも許容曲げ半径は $25.5\ \text{mm}$ であり、一般的な超伝導コイルの半径より十分小さいため、コイル化において障壁にならないことを示した。

4) 長尺 MgB_2 薄膜線材の作製に向け、スパッタ法によるホウ素の供給と、加熱蒸着法によるマグネシウムの供給により MgB_2 薄膜を形成する新製法を開発した。新製法で作製した MgB_2 薄膜の結晶性は EB 蒸着法で作製した MgB_2 薄膜より低いため、 J_c および T_c が低いことを明らかにした。

5) 新製法と高温ポストアニールを組み合わせることで、 MgB_2 薄膜の J_c を実用レベルまで引き上げることに成功し、 $10\ \text{K}$ では $9\ \text{T}$ 以内、 $15\ \text{K}$ では $6\ \text{T}$ 以内、 $20\ \text{K}$ では $4\ \text{T}$ 以内の幅広い磁場領域において実用レベルの J_c を有する長尺 MgB_2 薄膜線材の作製を可能とした。

これらの成果は低コストと優れた超伝導特性を両立可能と期待される MgB_2 薄膜線材の実用化に向けた重要な知見を与えるものであり、重要な省エネルギー技術の 1 つである超伝導技術を発展させるものであり、学術上、実用上の寄与は大きい。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 2 月 24 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降