

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686064

研究課題名（和文） 希土類系高温超伝導線材の強磁場マグネット応用のための材料力学的研究

研究課題名（英文） Material mechanics study on rare-earth based high- T_c superconductors aiming high-field magnet application

研究代表者

西島 元 (NISHIJIMA GEN)

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導線材ユニット・主任研究員

研究者番号：30333884

研究成果の概要（和文）：

超伝導マグネットの更なる強磁場化のためには、高温超伝導体の活用が必要不可欠である。特に高強度基板を用いている希土類系高温超伝導テープ線材は、高い機械強度が注目されている。本研究では四点曲げ試験を応用した高温超伝導テープ線材歪印加装置を開発し、市販超伝導線を用いて実験を行った。本装置をヘリウムガス温度可変インサートに組み合わせ、臨界電流の歪依存性を調べた。その結果、臨界電流の歪依存性は温度、磁場によって変化し、応用機器開発のためにはスケーリング則導出が必要なことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

To develop higher field superconducting magnets, application of high- T_c superconductor is necessary. In particular, rare-earth based superconductors, which are usually deposited on a high-strength metal substrate, are important candidates for high-field magnet material. In this work, an apparatus, which applies tensile/compressive strain to high- T_c superconductor, was developed. The apparatus was designed based on a four-point bending test. The author investigated strain dependence of critical current at various temperatures and magnetic fields for commercially available superconductor using the apparatus with a variable temperature insert and a cryogen-free superconducting magnet. Temperature and magnetic field are important parameter to determine the strain dependence of critical current for the rare-earth based high- T_c superconductor. A scaling law is needed to develop application devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	8,700,000	2,610,000	11,310,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・複合材料・物性

キーワード：複合変形応力

1. 研究開始当初の背景

超伝導マグネットが磁場を発生すると、マグネット巻線は、電流と磁場の外積で表されるローレンツ力を受ける。このときのローレンツ力の方向は、コイル赤道面では径方向外側となるので、巻線にとっては引張り応力と

なる。この応力をフープ応力と呼び、近似的には磁場 × 輸送電流密度 × コイル半径の関係で表される。フープ応力が余りにも大きければマグネットは破壊する。つまり、フープ応力に体する耐性がマグネット巻線の機械特性として重要となる。先の式から分かる

ように、フープ応力は強磁場化、大電流化、大型化に伴って飛躍的に増大する。従って、強磁場応用を考えると、耐フープ応力特性の低い超伝導材料は使い物にならない。

2. 研究の目的

本研究は、強磁場マグネット材料としての希土類系高温超伝導線材の機械特性を磁場中で評価し、輸送電流と歪の関係性を明らかにすることで、超伝導マグネットの強磁場化や次世代核融合炉用大型マグネットの開発に資することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 4点曲げ歪効果評価装置開発

希土類系高温超伝導線材はテープ状である。この輸送電流の磁場に体する応答は、印加磁場方向がテープ面に対して垂直な場合のほうが、平行な場合に比べて顕著な磁場依存性を示すことは良く知られている。つまり、希土類系高温超伝導線材応用において、テープ面に垂直に印加される磁場強度が、その機器の特性を支配することを意味する。そこで、本研究では基本的にテープ面に垂直方向の磁場方向で評価する。

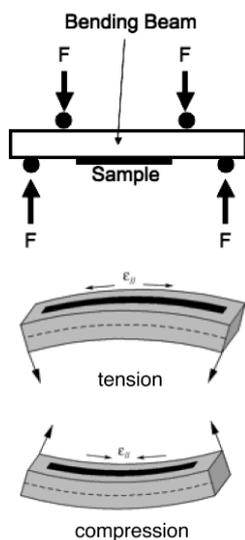


図 1: 4点曲げの原理

装置の原理は図1に示すように4点曲げ試験である。ビームに超伝導線材を貼付けることで引張りまたは圧縮歪を印加することが可能となる。歪を保持した状態で超伝導線の臨界電流を測定する。歪を変化させることで、臨界電流の歪依存性を調べる事ができる。

装置は、ヘリウムガスを用いた温度可変インサートと組み合わせて試験を行う。さらに温度可変インサートを無冷媒超伝導マグネットに設置することで、磁場中、温度可変条件で試験を行うことが可能となる。

(2) フープ応力試験による希土類系超伝導線

の強磁場マグネット適用性評価

マグネット設計上重要なパラメータとなるフープ応力に対する耐性を調べるために、単層巻きコイルを作製し、大口径超伝導マグネット中で通電試験を行う。

4. 研究成果

図2,3に77 Kおよび83 Kにおける市販の希土類系高温超伝導線材 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ の臨界電流の歪依存性を示す。温度が高いほど磁場による傾向の変化が大きい。また、-0.4%から0.4%歪の範囲では顕著なピーク効果は見られなかった。希土類系高温超伝導線における臨界電流の歪効果は、希土類の種類(Y, Gd, Sm など)だけでなく、製膜方法にもよることが分かって来ており、本研究で用いたIBAD-PLD法によるGd系線材の場合は顕著なピーク効果は見られなかったということになる。一方で、IBAD-MOD法によるY系線材の場合は顕著なピーク効果が観察されることが知られており、両者の違いについては今後結晶構造等観察によって調べていく予定である。

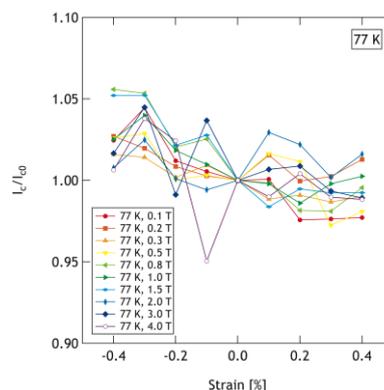


図 2: 77 Kにおける $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 線材の臨界電流の歪依存性

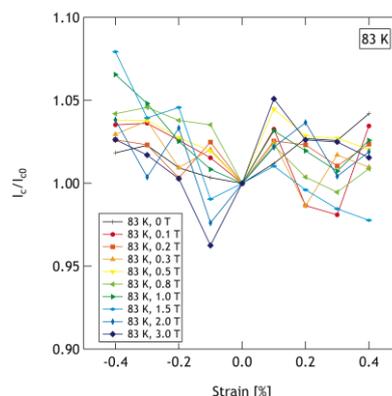


図 3: 83 Kにおける $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 線材の臨界電流の歪依存性

一方、フープ応力試験においては、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 線材は顕著な高強度性を示した。図4に11 T, 4.2 K 中での電流・電圧特性を示す。

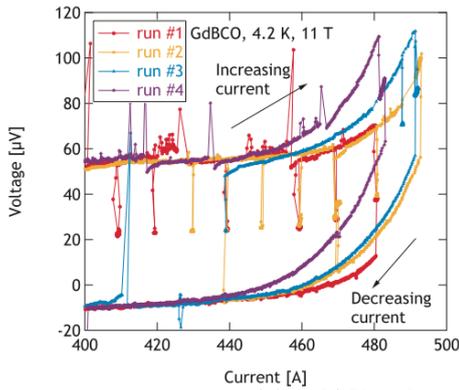


図 4: 4.2 K, 11 T フープ応力試験における GdBa₂Cu₃O_x 線材の電流・電圧特性

Run#2 電流増加時は run#1 と同じカーブを描いており、この時点では健全である。Run#1 では最大 1306 MPa のフープ応力を印加しているが、劣化しなかったことを意味する。しかし、run#3 電流増加時には run#1, #2 よりも小さい電流値で電圧が増加しており、劣化していることを示す。つまり、run#2 で印加した最大 1322 MPa のフープ応力によって劣化した。従ってこの線材の劣化閾値は 1306 MPa と 1322 MPa の間に存在することがわかった。

ただし、多層巻きダブルパンケーキコイルの場合は、単なるフープ応力問題ではなく、コイル径方向応力という新たな問題に対処する必要があることが明らかとなった。

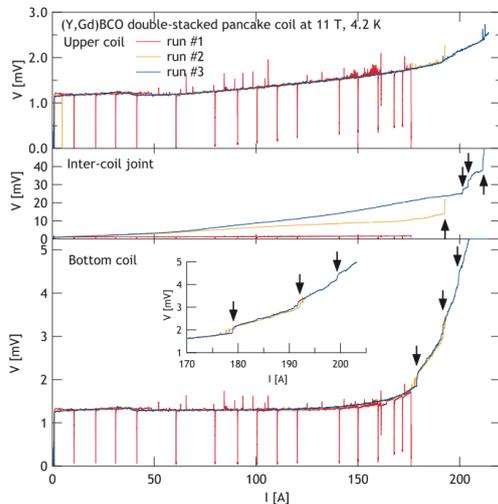


図 5: GdBa₂Cu₃O_x 線材によるダブルパンケーキコイルの 4.2 K, 11 T における電流・電圧特性。矢印で示す箇所に電圧の跳びが見られる。

図 5 に示すように、コイルを磁場中で通電すると電圧にジャンプが見られる。これは径方向応力による剥離が原因と考えられる。径方向応力はフープ応力に比べると 3 桁以上小さいものの、多層薄膜構造である希土類系超伝導線材は剥離に対して顕著に脆弱であることも明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① G. Nishijima, K. Minegishi, S. Awaji, K. Watanabe, T. Izumi and Y. Shiohara, "Hoop stress test of GdBa₂Cu₃O_y coated conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 (2011) 3094-3097. 査読有
- ② G. Nishijima, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, A. Ibi, T. Izumi, and Y. Shiohara, "Mechanical and transport characteristic exploration for coated conductors by hoop stress tests," Physica C, 471 (2011) 1062-1066. 査読有
- ③ G. Nishijima, K. Minegishi, K. Watanabe, K. Ohata, K. Nakagawa and G. Iwaki, "Effect of ODS-Cu composition for mechanical-electromagnetic property of bronze-processed Nb₃Sn superconducting wire," IEEE Trans. Appl. Supercond., 20 (2010) 1391-1394. 査読有
- ④ G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, H. Tsubouchi and K. Watanabe, "Development of pre-bent high-strength Nb₃Sn cable with stainless-steel reinforcement strands," IEEE Trans. Appl. Supercond., 19 (2009) 1112-1115. 査読有

[学会発表] (計 13 件)

- ① G. Nishijima 他, "Longitudinal and transverse mechanical properties of Cu stabilized GdBa₂Cu₃O_y coated conductor," Superconductivity Centennial Conference, The Hague, The Netherlands, 2011/9/22 招待講演
- ② G. Nishijima 他, "Transport and mechanical characteristics of PLD-GdBCO coated conductor with Cu stabilizer," 2011 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Spokane, USA, 2011/6/16
- ③ 西島 元 他, 「Cu 安定化 PLD-GdBCO コート線材の機械特性」第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 茨城県つくば市, 2011/5/19
- ④ G. Nishijima 他, "Transport and mechanical property evaluation for Cu stabilized PLD-GdBa₂Cu₃O_y coated conductor," 22th International Conference on Magnet Technology, Marseille, France, 2011/1/13
- ⑤ 西島 元 他, 「Y 系線材の 4K フープ応力試験」2010 年第 3 回超電導応用研究会シンポジウム, 神奈川県横浜市, 2010/12/10, 招待講演
- ⑥ G. Nishijima 他, "Mechanical and transport characteristic evaluation for coated conductor by hoop stress test," 23rd International

Symposium on Superconductivity, 茨城県つくば市, 2010/11/3, 招待講演

- ⑦西島 元 他, 「低温工学・超伝導工学における国際情勢と動向について-ASC:高温超伝導材料-」 2010 年第 3 回冷凍部会例会, 静岡県沼津市, 2010/9/10, 招待講演
- ⑧ G. Nishijima 他, “Hoop stress test of GdBa₂Cu₃O_y coated conductor,” Applied Superconductivity Conference 2010, Washington DC, USA, 2010/8/4
- ⑨西島 元 他, 「GdBa₂Cu₃O_y コート線材のフープ応力試験」 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会, 神奈川県川崎市, 2010/5/12
- ⑩西島 元 他, 「CuNb 補強 Nb₃Sn 超伝導線材における臨界電流の 3 次元歪効果」 第 81 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 岡山県岡山市, 2009/11/19
- ⑪G. Nishijima 他, “Effect of alumina dispersed copper composition for mechanical characteristic of Nb₃Sn wire,” 21st International Conference on Magnet Technology, 合肥, 中国, 2009/10/19
- ⑫G. Nishijima 他, “Three-dimensional strain effect of critical current for CuNb reinforced Nb₃Sn superconducting wire,” 9th European Conference on Applied Superconductivity, Dresden, Germany, 2009/9/15
- ⑬西島 元 他, 「Nb₃Sn 線材の機械特性に与えるアルミナ分散銅複合の効果」 第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学会, 東京都新宿区, 2009/5/14

[その他]

ホームページ等

http://samurai.nims.go.jp/NISHIJIMA_Gen-j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西島 元 (NISHIJIMA GEN)

物質・材料研究機構・超伝導線材ユニッ

ト・主任研究員

研究者番号：30333882

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし