

RE123 系線材の応力 - ひずみ特性 (4) 実用線材のひずみ特性

Stress-strain characteristics on RE123 wires 4

山田 雄一, 山田 穰, 衣斐 顕, 筑本 知子, 町 敬人, 大熊 武 (ISTEC)

YAMADA Yuichi, YAMADA Yutaka, IBI Akira, CHIKUMOTO Noriko, MACHI Takato, OKUMA Takeshi (ISTEC)

E-mail: yamada-yuichi@istec.or.jp

1. はじめに

“イットリウム系超電導電力機器技術開発”において、実用線材として期待できる各種の製造プロセスで RE123 系線材の開発を行っている。製造プロセスによって予歪量などが異なり、使用上重要な曲げひずみ特性が変化すると考えられる。

本プロジェクトにおいては、線材を単純に巻線して使用するだけでなく、幅を狭くするスリット加工や線材の超電導層を分割するスクライブ加工を施した線材を用いてケーブルや変圧器コイルを作成する予定である。また、線材の使用歩留まりを向上させるために局所 I_c 劣化部の補修も検討評価されている。そこで、これら実用線材用の加工において、線材の曲げひずみ特性を評価した。

2. 評価線材

電力ケーブル用線材については、交流損失低減のために幅が 2-4mm の線材を使用することが検討されている。このため、I-PLD (ISTEC 製、PLD-GdBCO/IBAD-MgO 中間層/ハステロイ) 及び S-PLD (住友製、PLD-GdBCO/配向金属基板) について、機械的スリット加工を施した。また、変圧器用には交流損失を低減するために、超電導層を 3 分割した F-PLD (フジクラ製、PLD-GdBCO/IBAD-MgO 中間層/ハステロイ) について、3 分割した線材及びそれを補修したものを評価対象とした。

3. 分割・補修サンプルの作成と試験方法

F-PLD 線材にマスキングテープを貼り付け、レーザーによって細くマスキングテープにパターンニングし、過酸化水素水とアンモニアで安定化層の銀をエッチング、硝酸セリウムアンモニウムで超電導層をエッチングすることにより分割を行う。分割加工を行った線材の構造を Fig.1 に示す。

これにより得られた母材の 3 分割線材に模擬欠陥を加えた後、20mm 長さの 3 分割線材 (パッチ) を用意し、分割部がそれぞれ対応するように保護銀層側同士を銀拡散接合で接続補修を行う (Fig.2) [1]。

これらの線材について、低温中で連続的に曲げ (戻し) を加え、所定の各ひずみ状態における臨界電流測定を行う。この評価には、いわゆる“Goldacker 式”の試験装置 [2] を用いた。

補修線材の曲げ試験では、変圧器における巻線を模擬するために、母材の超電導線の超電導層側が圧縮応力を受ける方向に曲げる。なお、電圧タップはパッチの外に母材側に設ける (Fig.2)。

4. 評価結果

Fig.3 に母材の圧縮方向、引張方向の曲げひずみ特性 [3] と、3 分割を施した線材及び補修接合した線材の圧縮方向の曲げひずみ特性を示す。母材の F-PLD は圧縮方向では直径約 10mm まで I_c の低下がない。3 分割線材は約 10mm で若干下がっているが、直線状の I_c に対して 5% も低下していない。これに対して、補修接合線材は直径約 60mm 付近で I_c が約 5% 低下している。

5. 結論

本プロジェクトで変圧器の製作に使用を予定している線材の分割・補修接合部の曲げひずみ特性は、試作を予定して

いる変圧器コイル二次巻線 (最小直径 514mm) に対して十分に余裕があることがわかった。

6. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。線材提供に関してフジクラ殿、住友電工殿のご協力を頂きました。ここにお礼申し上げます。

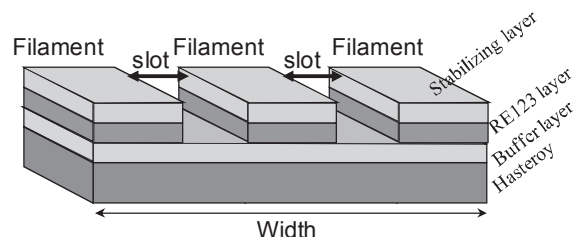


Fig. 1 Structure of scribing wire

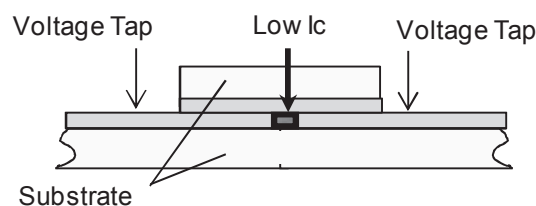


Fig. 2 Structure of patched wire

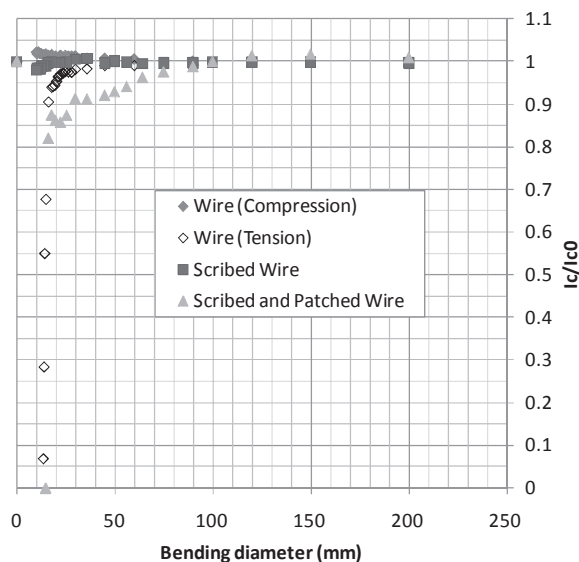


Fig. 3 Bending characteristics of wires

参考文献

1. J. Kato et al.: 2007 Physica C 463-465, P747
2. W. Goldacker, et al.: 2002 Adv. Cryog. Eng. Vol. 48 (2002) P469
3. 山田他: 2009 秋季低温工学・超電導学会講演概要集 P130

YBCO 超電導線材の劣化特性と熱応力・歪み解析

Degradation Characteristics of Coated Conductors and Thermal Stress-Strain Analysis

王 旭東, 石山 敦士(早大);丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)

WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); MARUYAMA Osamu, OKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導線材の電力応用において、突発的な短絡電流の流入のより温度が急上昇し、線材が特性劣化する可能性がある。そのため線材の劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の1つとして考える必要がある。そこで我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流通電試験および超電導線材の劣化要因の一つと考えられる熱応力・歪みと過電流通電による温度上昇との関係について解析評価してきた[1]。今回は、安定化層の厚みおよび YBCO 層の特性のばらつきと温度上昇との関係について、詳細な 3 次元解析を行い、熱応力・歪みに与える影響を評価したので報告する。本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 解析方法

超電導線材に過電流通電を行った際の温度上昇は、式(1)、(2)と有限要素法に基づく電流分布・熱伝導連成解析により求めた。超電導特性には n 値モデルを採用し、実測値を用いた。境界条件は超電導線材の端部のみが電氣的・熱的(77 K)に接触しているとした。式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2)の ρ は密度、 c は比熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j はジュール発熱である。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (2)$$

温度上昇に起因する超電導線材の熱応力・歪み分布は、式(3)と有限要素法により求めた。境界条件は超電導線材の端部が機械的に電流リードに拘束されているとした。また、超電導線材の変形はなく、平面応力状態を仮定している。式(3)の $[B]$ はひずみ-変位マトリクス、 $[D]$ は応力-ひずみマトリクス、 $\{d\}$ は接点変位ベクトル、 $\{\varepsilon\}$ は熱ひずみベクトルである。

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon\} dV \quad (3)$$

3. 解析結果

温度上昇解析は、1 秒間の方形波電流(150, 206 A)を通電して行った。解析に用いた超電導線材の諸元を Table 1 に示す。解析条件として、超電導線材の長手方向中央 1 cm 区間に I_c の劣化または銅層厚のばらつきを仮定した。それぞれの温度上昇の結果を Fig. 1, 2 に示す。Fig. 1, 2 より、通電電流が 150 A の場合では I_c の劣化が温度分布に大きく影響する。一方、通電電流が I_c 以上の 206 A では銅層厚のばらつきにより約 700 K の局所的なホットスポットが発生した。よって、電力機器への応用で想定される過電流通電に対しては、超電導線材の安定化層である銅層などの厚みのばらつきが、局所的なホットスポットの要因となりうることを示された。

そこで、ホットスポットが最も顕著な Fig. 2 (b)の銅層厚 20 μm の温度結果をもとに熱応力・歪みについて解析評価した。結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、約 700 K の局所的なホットスポットにおいて、600 MPa 以上の応力と 1%の歪みが発生した。また、先行研究では 600 MPa 付近で、1%程度の歪みで不可逆的な I_c の劣化が報告されている[2]。よって、銅層厚のばらつきに起因した局所的なホットスポットは、超電導線材の局所的な劣化要因となりうることを示された。

4. まとめ

今回は安定化層の厚みおよび YBCO 層の特性のばらつきと温度上昇との関係について、詳細な 3 次元解析を行い、熱応力・歪みに与える影響を解析評価した。その結果、安定化層のばらつきが局所的なホットスポットを引き起こし、超電導線材の局所的な劣化要因となりうることを示された。今後は、さまざまな条件で解析評価を行っていく予定である。

Table.1 Specifications of coated conductors

Length	7 cm
Width	5 mm
Copper Thickness	25, 22.5, 20 μm
YBCO Thickness	1.5 μm
Hastelloy Thickness	100 μm
Initial I_c	180, 120, 0 A

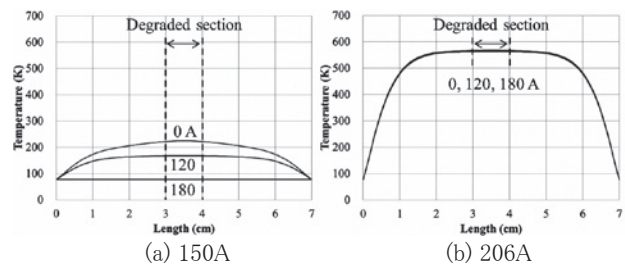
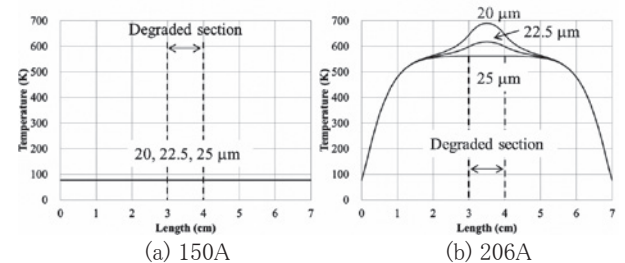
Fig. 1 Temperature results with different I_c degradation

Fig. 2 Temperature results with different copper thickness

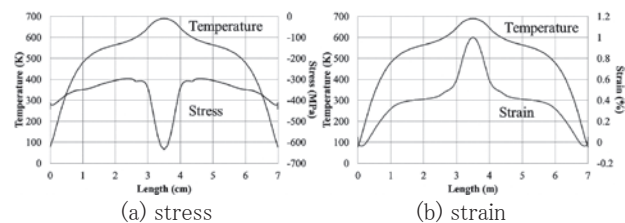


Fig. 3 Results of stress and strain

参考文献

1. M. Kanemitsu, X. Wang, A. Ishiyama et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 82 (2010) p.72
2. H.S. Shin, J.R.C. Dizon, R.K. Ko, T.H. Kim, D.W. Ha, S.S. Oh: Physica C, vol. 463-465 (2007) pp. 736-741

Cu 安定化 PLD-GdBCO コート線材の機械特性

Mechanical Characteristic of Cu Stabilized PLD-GdBCO Coated Conductor

西島 元, 北口 仁 (NIMS); 申 亨燮 (安東大)

NISHIJIMA Gen, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SHIN Hyung-Seop (ANU)

E-mail: nishijima.gen@nims.go.jp

1. はじめに

Coated conductor (コート線材) は一軸引張りや曲げに対して良好な機械特性を示す[1]。このことはコート線材応用の立場から最大の魅力である。しかしながら、剥離によって容易に劣化することが指摘されており[2]、コート線材特有の評価技術、応用技術の開発が必要である。

超伝導線材の引っ張り試験は研究者/機関による違いはほとんど無いと考えられるが、剥離強度評価については van der Laan [3], Xie [4] による垂直引張り、柳澤らによる劈開[5], Suzuki らによる MELT 法[6], 宮里らによる DCB 法[7]など種々の評価がなされている段階である。

本研究では厚さ 100 μm の Cu で安定化された $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (GdBCO) コート線材に対して臨界電流の温度・磁場依存性を調べ、機械特性試験を行った。これらの結果について主として評価手法の観点から議論する。

2. 線材諸元

試料線材は市販の GdBCO 線材である。諸元を Table 1 に示す。線材幅は 5 mm であり基板厚さ、超伝導層厚さ、安定化層厚さはそれぞれ 100 μm , 1.5 μm , 100 μm である。

3. 実験方法

臨界電流測定は 4 端子法による。試料長は 60 mm であり、両端は 10 mm ずつ電流端子とした。電流端子は半田付けではなく、0.1 mm 厚 In 箔を挟んで Cu ブロックで圧着した。電圧端子間隔は 20 mm とした。実験は He ガスフロー VTI 中で行い、外部磁場 12 T まで、通電電流 600 A までの範囲で評価した。磁場印加方向はテープ面垂直 (B//c-axis) およびテープ面平行 (B//ab) とした。

引張り試験では自作の Nyilas 型伸び計 (Ti-6Al-4V 製、標点距離 25 mm) を用いた。

4. 実験結果

Fig. 1 に臨界電流 (I_c) の温度・磁場依存性を示す。 I_c は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電界基準で決定した。77 K, 0 T で約 250 A であった。B//tape の場合、20 K 以下では $I_c > 600$ A であった。B//c では 4.2 K, 4 T まで測定できた。

Fig. 2 は室温における一軸引張り特性である。Cu が 100 μm と厚いため、100 MPa 付近で Cu が降伏し、応力歪の傾きに変化していることが顕著である。

77 K 試験、剥離試験については現在遂行中であり、結果は当日報告する。

参考文献

- [1] たとえば G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 18 (2008) 1131.
- [2] T. Takematsu, et al., Physica C 470 (2010) 674.
- [3] D.C. van der Laan, et al., Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 765.
- [4] Y. Xie, et al., presented at ASC 2010
- [5] 柳澤他, 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 p. 247

[6] K. Suzuki and M. Tomita, Physica C 470 (2010) 1342.

[7] T. Miyazato, et al., presented at ISS 2010.

Table 1 Specification of GdBCO coated conductor

Stabilizer	Cu	100 μm
Superconducting layer	PLD-GdBa ₂ Cu ₃ O _x	1.5 μm
Buffer	CeO ₂	0.3 μm
	MgO	10 nm
	Y ₂ O ₃	20 nm
	Al ₂ O ₃	150 nm
Substrate	Hastelloy C276	100 μm

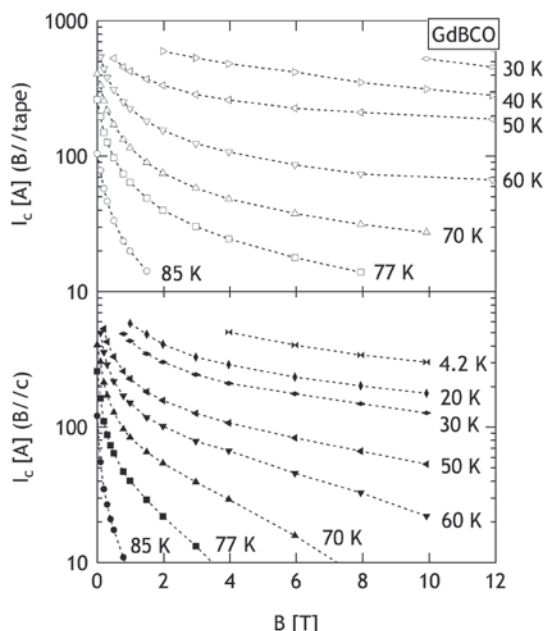


Fig. 1 Critical current (I_c) as a function of magnetic field (B) and temperature (T) for GdBCO coated conductor

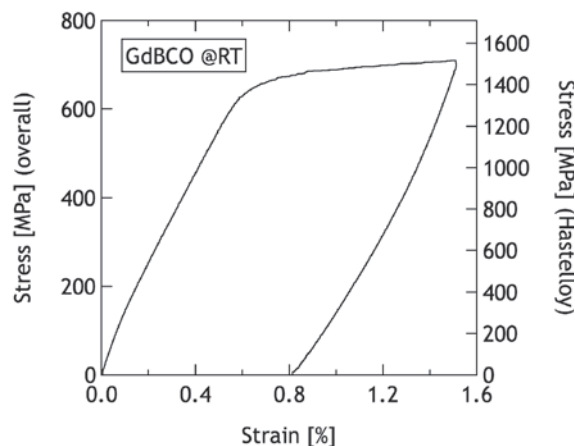


Fig. 2 Stress-strain curve for GdBCO coated conductor at room temperature.

引張りひずみを与えた GdBCO coated conductor に加わる 内部ひずみと超伝導特性

Internal strain and superconducting properties of GdBCO in coated conductor under tensile strain

小黒 英俊, 峯岸 一博, 鈴木 匠, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 菅野 未知央(高エネ機構); 町屋 修太郎(大同大); 菖蒲 敬久(原子力機構); 衣斐 颯, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)

OGURO Hidetoshi, MINEGISHI Kazuhiro, SUZUKI Takumi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); SUGANO Michinaka(KEK); MACHIYA Shutaro(Daido Univ.); SHOBU Akihisa(JAEA); IBI Akira, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(SRL)

E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO coated conductor(RE:Y 及び希土類元素)は磁場中での高い臨界電流密度と、基板の Hastelloy 等に由来する、高い耐応力特性を併せ持つ。このため、Coated conductor は強磁場超伝導マグネットに使用する材料として、非常に魅力的な材料である。我々のグループでは、これをマグネットに使用するために、輸送特性や機械特性の研究を続けてきた[1]。

また、我々は実用超伝導線材に対し、中性子や放射光を用いて、超伝導体そのものに加わるひずみを正確に測定してきた[2]。この結果を用いて、Nb₃Sn 超伝導線材に対し、そのひずみと超伝導特性を正確に表す事に成功している[3]。

本研究では、 T_c の引張りひずみ依存性と放射光による内部ひずみ測定の結果を用いて、GdBCO coated conductor のひずみ効果のメカニズムを明らかにする事を目的とした。このため、 T_c の引張りひずみ依存性の結果について、Coated conductor 内の GdBCO 結晶の変形挙動をもとに、これが説明可能であるのかを考察した。

2. 実験方法

試料には PLD 法 GdBCO 線材を用いた。Hastelloy 基板を用いており、GdBCO 層は 0.5 μm 、Ag 層は 40 μm となっている。試料幅は 2 mm である。

T_c の引張りひずみ依存性は、4 端子法で測定を行った。電流電極を兼ねた Cu 電極に試料両端をはんだで固定し、さらに真鍮の板で押さえつけて、片方の電極を動かす事で引張りひずみを与えた。この状態で電流を流し、発生電圧から T_c を見積もった。測定時の電流密度は 10 A/cm² とし、電圧端子間距離は 5 mm となっている。

放射光による内部ひずみ測定は、SPring-8 の BL46XU において、引張りひずみを印加した状態で、テープ長手方向の GdBCO 020 及び 200 面のひずみの変化を室温で測定した。このときに得られたピーク位置と、無荷重状態でのピーク位置とを比較しひずみを求めた。

3. 実験結果と考察

図 1 に、 T_c の引張りひずみ依存性を示す。この結果から、 T_c は引張りひずみによって、線形に単調減少することが分かった。 T_c の低下率は $dT_c/d\varepsilon = -188.72$ となった。

放射光で測定したピーク位置から、無荷重状態を基準としてひずみを計算した結果を、図 2 に示す。この結果から、GdBCO の a 軸方向と b 軸方向は、ひずみの変化量が異なることが分かった。それぞれ、線材全体の変化に対し、a 軸は 97.79%、b 軸は 90.17% の割合で変化する。この変化率が低温下でも変化しないとして、 T_c の変化について考察した。ひずみと T_c の関係は、文献[4]より a, b, c 軸にそれぞれ配向した GdBCO 薄膜の一軸圧縮による T_c 変化のデータを用いて、Coated conductor の T_c 変化が記述できるか計算を行った。結果として、 T_c の変化はうまく記述できなかつた。この原因として、

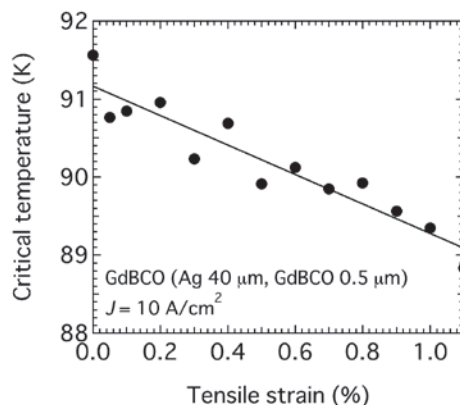


Fig. 1 Tensile strain dependence of critical temperature for GdBCO coated conductor.

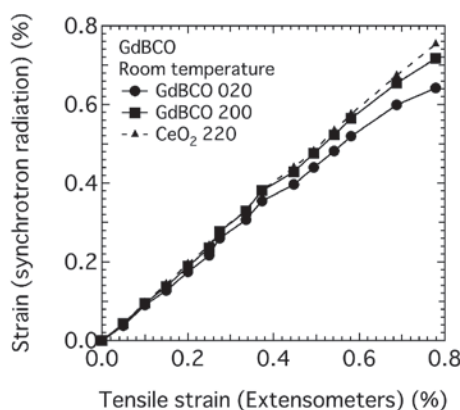


Fig. 2 The strain measured by synchrotron radiation as a function of tensile strain measured by extensometers.

GdBCO 単結晶の一軸圧縮時の結晶の変形と、coated conductor 内の結晶の変形が異なるために、 T_c の変化の仕方が異なる可能性がある。つまり、Coated conductor のひずみと超伝導特性の関係を理解するには、GdBCO 結晶の変形挙動を、3 次元的に調べる必要がある事が分かった。

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

1. K. Minegishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.11
2. H. Oguro, et al.: J. Appl. Phys., Vol. 101 (2007) 103913
3. H. Oguro, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20 (2010) 1424
4. S. L. Bud'ko, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 46 (1992) 1257

IBAD-MgO 上に作製した LTG-SmBCO 線材の低温超伝導特性

Superconducting properties of LTG-SmBCO coated conductor on IBAD-MgO tapes at low temperatures

高橋佑弥, 吉田隆, 一野祐亮, 鶴田彰宏(名大); 高橋保夫, 吉積正晃, 和泉輝郎, 塩原融(SRL)

Y. Takahashi, Y. Yoshida, Y. Ichino, A. Tsuruta (Nagoya Univ); Y. Takahashi, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara (SRL)

E-mail: takahashi-yuya10@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで、LTG(Low-Temperature Growth)法により作製した $\text{Sm}_{1.04}\text{Ba}_{1.96}\text{Cu}_3\text{O}_y$ (SmBCO) 薄膜が PLD-SmBCO 薄膜より高い磁場中超伝導特性を示すことを報告した[1]。高温超伝導体の線材応用のためには臨界電流密度 J_c だけでなく臨界電流 I_c も高いことが求められ、そこで LTG-SmBCO 厚膜を検討している。また実際の応用では、液体窒素の 77 K だけでなく、過冷却窒素温度の 65 K や、冷凍機を用いた 40 K での動作も想定されている。そこで本報告では、LTG-SmBCO 厚膜の低温における超伝導特性を明らかにすることを目的とし、金属基板上に LTG-SmBCO 厚膜を作製し、77、65、40 K における磁場中 I_c の評価を行った。また LTG-SmBCO 厚膜は膜厚増加に伴って基板温度を上昇させて作製した。

2. 実験方法

LTG-SmBCO 厚膜は PLD 法を用いて、 $\text{CeO}_2/\text{LMO}/\text{IBAD-MgO}/\text{GZO}/\text{Hastelloy}$ (IBAD-MgO) 基板上に成膜した。LTG-SmBCO の基板温度は seed layer が 870°C、upper layer が 800°C で固定して行った。また upper layer の基板温度を膜厚が 500 nm 増すごとに 15°C ずつ高くする方法で作製した試料も評価した。ここで、seed layer の膜厚は全て 0.1 μm で一定とした。

3. 実験結果及び考察

成膜温度 800°C で固定して成膜した場合、膜厚 1.5 μm までの LTG-SmBCO 膜は、良好な 2 軸配向であることを確認した。一方、基板温度を段階的に変化させながら成膜した LTG-SmBCO では膜厚 2.0 μm で a 軸配向粒が生成した。また T_c は 93.0 ~ 93.4 K であった。

図 1 に基板温度を段階的に変化させながら成膜した膜厚 1.5 μm の LTG-SmBCO 膜(試料 A)と成膜温度を固定した LTG-SmBCO 膜(試料 B)における I_c の磁場依存性を示す。1 T 以上の磁場では試料 B のほうが高い I_c を示すことが確認できた。 T_c が同程度であるため、試料 B 中には新たな PC が導入されたことが示唆される。

図 2 に 77、65、40 K における試料 B の I_c の磁場依存

性を示す。7T における I_c は、65K では 48.2 A/cm-width、40K では 204.5 A/cm-width を示し、低温ほど高い I_c を示すことが確認できる。

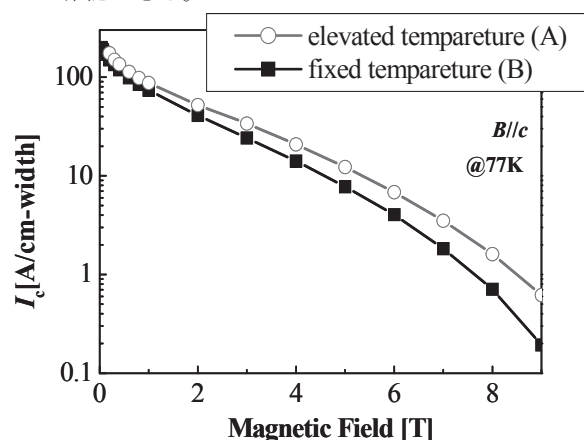


Fig. 1. Magnetic field dependence of I_c on LTG-SmBCO coated conductor

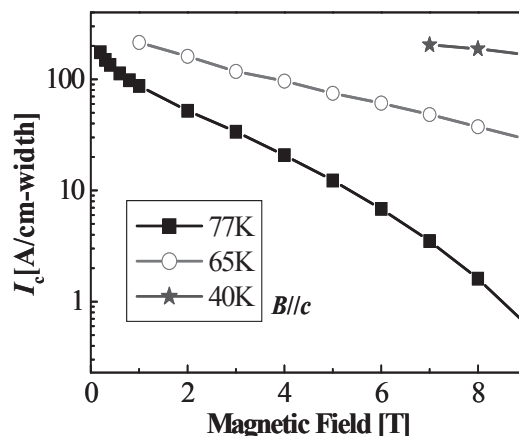


Fig. 2. Magnetic field dependence of I_c on LTG-SmBCO coated conductor.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005)の助成と、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. Y. Yoshida et. al.: JJAP 44 (2005) L129-L132.

Sm-rich 層積層化による SmBCO 線材の磁場中 J_c 特性 J_c properties in the magnetic field of the SmBCO coated conductor formed by introducing Sm-rich layers

久保 勇人、吉田 隆、一野 祐亮、芝本 峰(名大); 吉積 正晃、和泉 輝郎、塩原 融(SRL)

KUBO Hayato, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, SHIBAMOTO Takashi (Nagoya Univ.);

YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yu (SRL)

E-mail: kubo-hayato11@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO)高温超伝導線材を Nb-Ti 同様の実用線材として用いるために、磁場中 J_c の向上に関する研究が盛んに行われている。これまで、我々のグループでは低温成膜(LTG)プロセスを用いて MgO(100)単結晶基板上に LTG-SmBCO 薄膜の作製を行い、その結果、LTG-SmBCO 薄膜内の高密度な転位やナノサイズの low- T_c 相が磁束ピンニング点として働き、 $B = 5$ T まで Nb-Ti と同等の J_c を示すことを報告してきた[1]。さらに LTG-SmBCO 薄膜内に磁束ピンニング点としてナノサイズの low- T_c nanoparticle を導入することで $B = 8$ T まで Nb-Ti と同等の J_c を示すことを報告してきた[2]。以上のように low- T_c 相が磁束ピンニング点として有効であることが分かる。そこで本研究では、磁場中における J_c の向上を目的として、Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_y(SmBCO)と low- T_c 相である Sm/Ba 置換量が大きな Sm_{1.2}Ba_{1.8}Cu₃O_y(Sm-rich)を積層した線材を作製し、磁場中における J_c を評価した。

2. 実験方法

SmBCO 層と Sm-rich 層を積層した線材は PLD 法(KrF, $\lambda = 248$ nm)を用いて、IBAD-MgO 基板上に基板温度(T_s) 750°C で作製した。線材の作製方法は SmBCO/Sm-rich/SmBCO/Sm-rich/IBAD-MgO とした。このとき1層目の Sm-rich 層は厚みが 40 nm で c 軸配向テンプレート層として用い、その上の SmBCO 層はそれぞれ 200 nm とした。本研究では、2層目の Sm-rich 層を 10, 40, 100 nm と変化させた。

結晶性・配向性は X 線回折法、表面形態は原子間力顕微鏡(AFM)、そして超伝導特性は直流四端子法を用いて評価した。

3. 結果及び考察

Fig.1 に SmBCO 層と Sm-rich 層を積層した各線材の 77 K における $B//c$ 方向の磁場に対する J_c を示す。また、比較のために pure-SmBCO 線材と YBCO に BaZrO₃(BZO)を添加した線材のデータもプロットしている[3]。図が示すように Sm-rich 層を 40 nm 積層した線材は 0~9 T の磁場領域で pure-SmBCO 線材と比較して J_c が向上していることが分かる。これは、自己磁場下での J_c が pure-SmBCO 線材では $J_c = 1.39$ MA/cm² であるのに対して、Sm-rich 層を 40 nm 積層した線材では $J_c = 3.73$ MA/cm² と約 2.6 倍に大きく向上していることから全磁場領域において J_c が向上したと考えられる。また、Sm-rich 層を 100 nm 積層した線材では自己磁場下では $J_c = 0.98$ MA/cm² と低下したが 3 T 以上の磁場下で J_c が向上している。このことから、low- T_c 相である Sm-rich 層が磁場の印加によって常伝導状態となり、それが磁束ピンニング点として働いていること

が示唆される。

Fig.2 に SmBCO 層と Sm-rich 層を積層した各線材と pure-SmBCO 線材の 77 K、3 T における J_c の磁場印加角度依存性を示す。図から Sm-rich 層を 40 nm 積層させた線材は、 $B//c$ 方向にピークが確認された。この結果から、low- T_c 相である Sm-rich 層に起因した c 軸相関ピンが導入されていると考えられる。

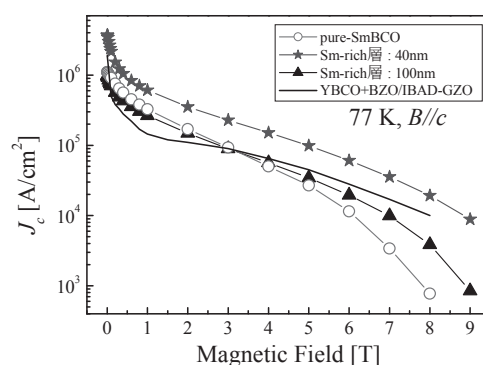


Fig. 1. Magnetic field dependence of J_c for multilayered SmBCO coated conductor.

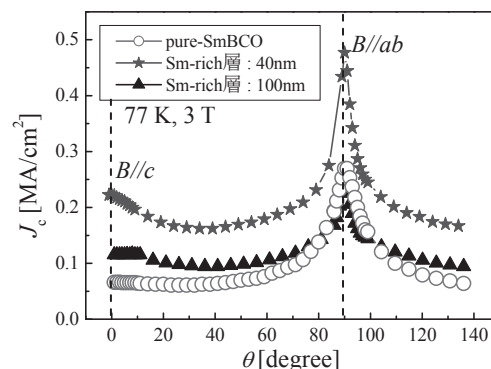


Fig. 2. Field angular dependence of J_c for multilayered SmBCO coated conductor.

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005)の助成と、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

【参考文献】

1. Y. Yoshida, et al. : Jpn. J. Appl. Phys, 44 (2005) L129-L132.
2. Y. Yoshida, et al. : Jpn. J. Appl. Phys, 44 (2005) L546-L548.
3. Y. Yamada, et al. : Appl. Phys. Lett, 87 (2005) p1352502.

MOD-YBCO 超電導長尺分割線材の低交流損失化

AC loss reduction of TFA-MOD coated conductors in long length by laser scribing technique

平野 寛信, 町 敬人, 高木 裕司, 高橋 保夫, 和泉 輝郎 (SRL); 澤田 俊幸, 宇都 浩史, 岩熊 成卓 (九大)

HIRANO Hironobu, MACHI Takato, TAKAGI Yuji, TAKAHASHI Yasuo, IZUMI Teruo (SRL);

SAWADA Toshiyuki, UTO Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: hhirano@istec.or.jp

1. はじめに

Y 系 MOD 超電導線材は低コスト製造が可能なことから、変圧器、送電ケーブル、SMES 等の将来の電力機器への適用が期待されている。これらの機器は運転時に磁場中で使用されるために磁場中での交流損失低減が要求され、その方法として、線材を幅方向に分割した分割線材について製造技術の開発及び評価を行っている。

今回、MOD 法で作製した長尺線材をレーザスクライビング加工を行い 5 分割線材を作製し、そのフィラメント 5 本の臨界電流(I_c)及び TapeStar™ によるヒステリシス損失の測定評価を行った後、コイルを作成して交流通電時の損失を各フィラメントに流れる電流を測定する事により検証を行った結果を報告する。

2. 線材諸元

交流損失を測定評価した MOD-YBCO 超電導分割線材の諸元を Table1 に示す。IBAD 法で MgO バッファ層を成膜したハステロイ金属基板上に MOD 法で YBCO 超電導層を形成し、銀保護層を被覆した後、YAG レーザで 5mm 幅 5 分割に分割加工を行った 50m 長分割線材を使用した。

Table1. Specification of MOD-YBCO coated conductors

	Material	Thickness
Stabilizer	Ag	20 μ m
Superconducting layer	MOD-YBCO	1.5 μ m
Buffer layer	CeO ₂	1 μ m
	LaMnO ₃	20nm 以下
	IBAD-MgO	10nm 以下
Substrate	Gd-Zr-O	110nm
	Hastelloy™	100 μ m

3. 測定結果

(1)フィラメント I_c

Table1 に示す線材を分割加工した後線材作成及び分割加工の健全性を確認する目的で各フィラメント I_c 測定を行った。各フィラメント I_c は 7~25A であり、その合計値は分割加工前の I_c の約 75% であり、分割加工による消失分を考慮すると、 I_c の低下率は約 5% であることから、50m の長尺で長手方向の均一性及び分割加工の長尺健全性が確認出来た。測定結果を Fig1 に示す。

(2)ヒステリシス損失

フィラメント I_c 測定後、TapeStar™ で長手方向各位置のヒステリシス損失測定を行った。測定は LN2 温度に冷却した分割線材に磁場を印加した時の幅方向の磁場強度を測定する事で算出を行った。この結果、各位置でヒステリシス損失は分割前と比較してほぼ 1/5 (1/分割数) 以下となり、分割加工による交流損失低減効果が確認できた。測定結果を Fig2 に示す。

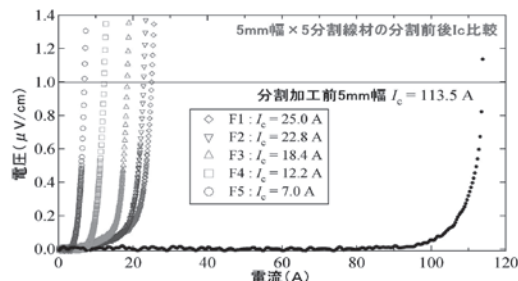


Fig1. Filaments critical current of YBCO coated conductors

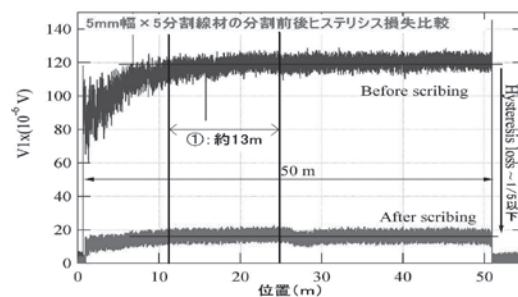


Fig2. Hysteresis loss of YBCO coated conductors

(3)コイル形状での交流損失測定

ヒステリシス損失測定後の線材の中の 13m 長を使用して、コイルを作成し、周波数を 50~150Hz の範囲で変化させた時に各フィラメントに流れる電流値の測定を行う事で交流損失の評価を行った。測定結果を Fig3 に示す。

この結果、各フィラメントに流れる電流値のばらつきは 20%程度であり、交流損失はほぼ 1/5(分割数)になっている事が確認できた。

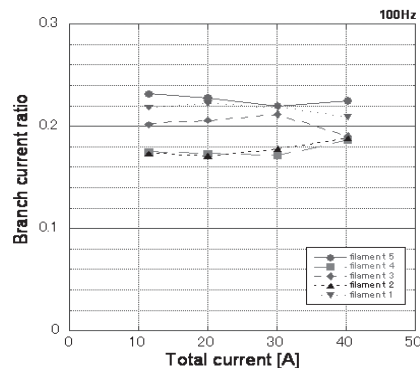


Fig3. Uniformity evaluation of filament current

4. まとめ

- 線材作製及び分割加工の均一性に問題の無い事を確認
- 部分的・全体的、双方でロス 1/5(1/分割数)を確認 (コイルでの確認は世界初)

5. 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものである。