

RE123 焼結体の粒間臨界電流特性の支配因子

Predominant Factors of Intergrain Critical Current Properties of RE123 Sintered Bulks

下山 淳一、廣田 哲也、(東大院工)、今 康一、市川 直樹、稲森 聡、内藤 恭吾(ティーイーピー)

SHIMOYAMA Jun-ichi, HIROTA Tetsuya (Univ. of Tokyo), KON Kouichi, ICHIKAWA Naoki, INAMORI Satoshi and NAITO Kyogo (TEP)

E-mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

これまでに $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123) 超伝導体の材料として、coated conductor、溶融凝固バルク、SQUID、フィルタなどの薄膜デバイスが開発され、様々な用途で応用が進められている。これらは全て RE123 相結晶の 2 軸配向多結晶か疑似単結晶であり、RE123 多結晶体における粒界の弱結合の問題を巧みに回避している。RE123 の無配向焼結体では粒間の J_c が低く、極低温においてもせいぜい数百 A/cm^2 に留まっていたが、これは弱結合の問題が顕著に現れたためと考えられていた。我々の最近の研究により明らかになったことは

- Y123 焼結体の密度を高めるための高温焼結は結晶の粗大化と同時にクラックを発生する。
- 上記の結果として相対密度が 70%前後の試料が高い粒間 J_c を示す。
- ボールミルによって微細化した Y123 粉末を焼結する場合には最適焼結温度が約 40°C 低下し、一方で 粒間 J_c が改善する。
- いずれの場合においても 800°C 、酸素分圧 1 kPa 下での還元アニール過程の導入と酸素のオーバードープングがさらに粒間 J_c を向上させる。

などである。前回の学会では、Y123 焼結体の粒間 J_c が 20 K、低磁場で $3.6 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ に達したことを報告した[1]。焼結条件の最適化による微細組織の改善と還元ポストアニールの追加による粒界特性の向上が粒間 J_c の改善をもたらしたと考えているが、還元ポストアニールは低磁場の J_c 向上だけでなく、通電法で決定した不可逆温度も 10 K 以上高め、90 kOe の磁場下では 66 K に達した。以上の背景のもと、本研究では RE123 焼結体の組織のさらなる改善、および仕込組成を変えることによる粒間 J_c のさらなる上昇を図った。

2. 実験方法

RE_2O_3 、 BaCO_3 、 CuO を出発原料とし、湿式混合後、仮焼、粉碎、焼成の過程を経て最後にボールミル粉碎によって微細な RE123 単相の粉末を得た。これを今回は厚さ 0.7 mm 以下の薄いペレットに成型し焼成した。ペレットを薄くしたのは、ボールミル粉碎で得られた粉末を焼結した場合、ペレット表面から 1 mm 弱の部分に比較的緻密な領域が形成されることがわかったためである。一方、 RE_2O_3 、 BaO_2 、 CaCO_3 、 CuO を出発原料に用い、仕込組成を $\text{RE}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x = 0\text{--}0.2$) とした焼結体も作製した。全ての試料は焼結後、 800°C 、酸素分圧 1 kPa 下でアニールし、最後に 300°C で酸素アニールを行った。試料の構成相、格子定数を X 線回折測定により、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。低磁場における粒間 J_c は残留磁化法により、磁場中の抵抗率は交流 4 端子法により調べた。

3. 結果と考察

様々な条件で作製した Y123 焼結体の粒間 J_c を Fig. 1 に示した。20 K での粒間 J_c は最高 $4.1 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ に達したが、薄い焼結体の作製による若干の緻密化(相対密度~78%)が、今回の J_c の改善をもたらしたと考えている。なお、 Y_2BaCuO_5 (Y211) を 2 mol% 添加したのは、Y123 焼結体の長期保存による劣化の抑制を目的としたものであり、粒界特性の改善には関与していないと思われる。

一方、Caドープ RE123 は通常の固相反応法によって作製した粉末を原料としたもので、ボールミル過程を経っていないため、

焼結後の粒間結合がやや悪いものの、Caドープによる顕著な粒間 J_c の改善が Fig. 2 に示すように確認された。RE123 焼結体における粒界の臨界電流特性は微細組織とキャリアドープ状態に大きく依存することがわかっているが、Caドープはキャリアのオーバードープによる効果をさらに強めたものと見ることができる。但し、Caドープでは T_c の低下が顕著なため、今後、ドープ量の最適化を図る必要がある。なお、ノンドープ試料の 20 K の粒間 J_c は、別バッチである Fig. 1 の空气中、 900°C 、24 h 焼成試料のそれを比較的良く再現している。

講演では微細組織の改善を目指した磁場配向やHIP処理の効果、REの違いによる粒間臨界電流特性の変化などについても議論する。

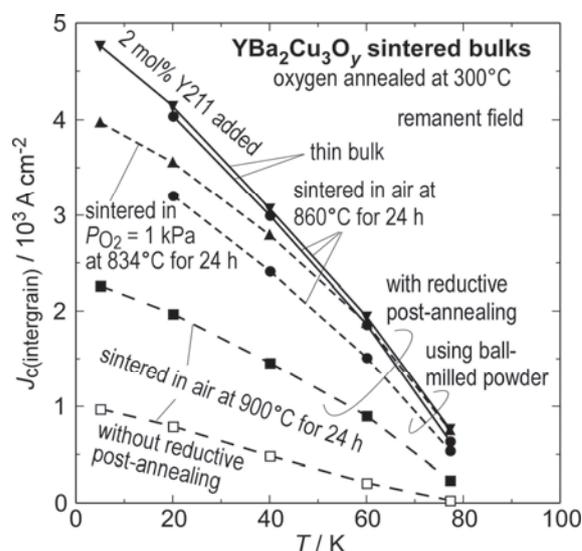


Fig. 1 Temperature dependence of intergrain J_c for Y123 sintered bulks prepared by various conditions.

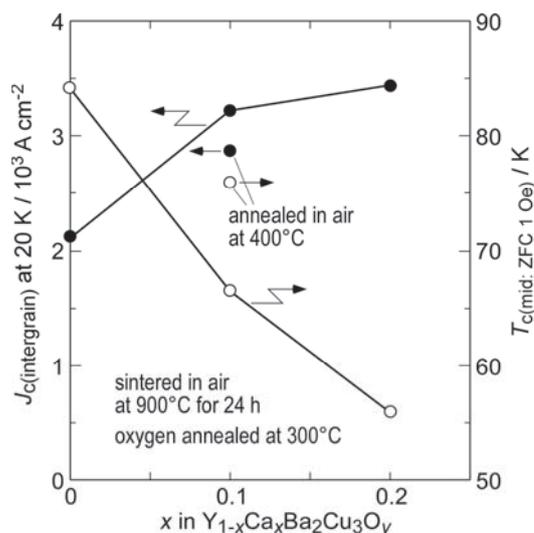


Fig. 2 Effects of Ca-doping on intergrain J_c at 20 K under remanent field and $T_{c(\text{mid})}$ for Y123 sintered bulks.

参考文献

1. J. Shimoyama *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.95

TDGL シミュレーションを用いた ピンニングサイズ及び分布が超伝導特性に及ぼす影響の検討

Investigation of effect of size and distribution of pinning centers on superconducting property by using TDGL simulation

伊藤 慎太郎, 一野 祐亮, 吉田 隆(名古屋大学)
ITO Shintaro, ICHINO Yuusuke, YOSHIDA Yutaka(NAGOYA University)
E-mail : ito-shintaro13@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

第 II 種超伝導体内部に侵入した量子化磁束の運動がエネルギー散逸を起こすことは知られている。そのため、超伝導体内部の量子化磁束運動を抑制することが必要とされている。対策として常伝導体を超伝導体内部に人工ピン (APC) として導入し、量子化磁束運動を抑制することが広く試みられている。一方で量子化磁束運動について、計算機シミュレーションを用いて検討されており [1]、人工ピンを導入した場合についてもシミュレートされている [2]。

本研究では、計算機シミュレーションを用いて、第 II 種超伝導体内の人工ピンの大きさ及び分布が、 J_c (臨界電流密度) の磁場依存性に与える影響について検討することを目的とした。

2. シミュレーション方法

本研究では、時間依存する Ginzburg-Landau 方程式 (TDGL equations) を計算機を用いて解き、磁束運動をシミュレートした。以下に使用した方程式を示す。

$$\gamma \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{i2e\phi}{\hbar} \right) \Delta + \alpha \Delta + \beta |\Delta|^2 \Delta + \frac{1}{4m} (-i\hbar \nabla + 2e\mathbf{A})^2 \Delta = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot rot } \mathbf{A} = \frac{\hbar e}{2m} i (\Delta^* \nabla \Delta - \Delta \nabla \Delta^*) - \frac{e^2}{m} |\Delta|^2 \mathbf{A} - \sigma (\nabla \phi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) \quad (2)$$

ここで \mathbf{A} はベクトルポテンシャル、 Δ はオーダーパラメータを表す。この式を無次元化した後、離散化を行いシミュレーションを行った。対象領域は $40\xi \times 40\xi$ の超伝導平板において x 軸方向には周期境界条件、 y 軸方向の境界は真空空間に接し、 z 軸方向は一様である条件とした。外部磁場は xy 平面に垂直に印加し、対破壊電流密度 (J_d) で無次元化した電流 J を x 方向に印加している。第 II 種超伝導体は GL パラメータ $\kappa=1.4$ として Nb を想定し、導入する人工ピンサイズは (a) ピン導入なし、(b) $2\xi \times 2\xi$ 、(c) $4\xi \times 4\xi$ の 3 条件とし、ピンは四角格子状に間隔 8ξ で並んでいるとして比較した。

初期条件として外部磁場 $B_{ex} = 0.0$ において定常状態になるまで保持したオーダーパラメータを用いた。電流はステップ状に $0.06J_d$ まで上昇させた。ステップ間隔はシミュレーション上の時間スケールで 100000step とし、その間の x 方向の電界を平均した値を系全体の電界 E とした。なお、電界も無次元化されている。

3. 実験結果及び考察

まず量子化磁束のピン止めの様子を確認するため、外部磁場を $0.30B_{c2}$ 印加し、定常状態になった第 II 種超伝導体内の磁束密度を Fig. 1 に示す。人工ピン導入 ($2\xi \times 2\xi$) に

より、量子化磁束の内部への運動が抑制されていることが確認された。一方、人工ピンを導入していない超伝導体においては内部まで量子化磁束が侵入した。

次に、外部磁場を印加していない状態で、ステップ状に電流を $0.06J_d$ まで印加した時の電界の変化を示す。 $4\xi \times 4\xi$ において、他の 2 条件よりもやや高い電界値が確認された。その理由としては、ピンサイズが大きいこと、量子化磁束が隣接ピンへ容易に移動できること。さらに量子化磁束の急激な運動によって大きな誘導電界が生じることが考えられる。 $2\xi \times 2\xi$ においては、ピン導入なしと同じ挙動をしている。これについては、ピンの配置が関係していると考えている。本シミュレーションでは、ピンを四角格子状に配置している。しかし、量子化磁束は三角格子を組むため、ピン止め力が効率よく作用していないと考えられる。

当日は、三角格子状ピン配置、外部磁場印加やピン間隔など他の条件のシミュレーション結果についても報告する予定である。

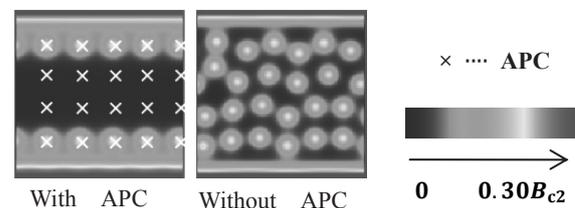


Fig. 1 Flux density in the type-II superconductor

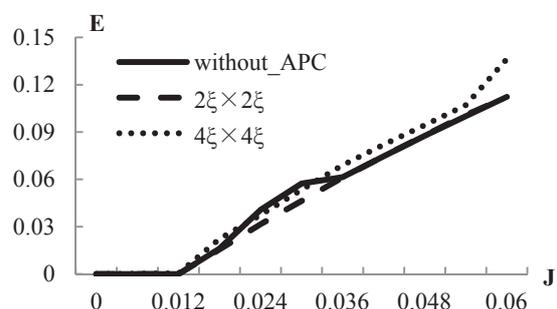


Fig. 2 Electric field vs. current density of three conditions

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(232226014)の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] M. Machida, et al.: Phys. Rev. Lett. Vol., 71 (1993) p. 3206
- [2] R. Kato, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 47 (1993) p. 8016

Nd/Ba 組成制御による BaHfO₃ 添加 Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y 薄膜の超伝導特性の向上

Improvement of superconducting properties in BaHfO₃-doped Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y thin films by controlling the Nd/Ba composition

澤野 友祐, 一野 祐亮, 吉田 隆 (名大)

SAWANO Yusuke, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University)

E-mail: sawano-yusuke12@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

RE_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y(REBCO: RE=Rare Earth)において、RE と Ba のイオン半径が近いほど、RE/Ba 置換が起こりやすく、固溶限界が大きい。この RE/Ba 置換型固溶体が T_c の低下を引き起こす一方で、微細に分散した固溶体が磁場中において PC として働き、J_c が向上することが報告されている[1]。これまでに我々は NdBCO に BHO を導入した薄膜を作製し、BaHfO₃(BHO)がナノロッドとして成長するため、基板表面に垂直方向の磁場に対して J_c が向上することを報告した[2]。そこで本研究では Nd/Ba 置換型固溶体による超伝導特性の向上及び Nd/Ba 置換型固溶体が BHO ナノロッドの成長および超伝導特性に与える影響を明らかにするために BHO 添加 NdBCO 薄膜において Nd/Ba 組成を変化させた薄膜を作製し、超伝導特性を評価した。

2. 実験方法

NdBCO 薄膜は KrF エキシマレーザーを用いた PLD 法により LaAlO₃ 単結晶基板上に作製した。ターゲットの Nd/Ba 組成は x = 0.01, 0.08, 0.12 とした。BHO の導入方法は NdBCO ターゲットと BHO ターゲットを交互に交換して成膜するターゲット交換法を用いた。各薄膜の BHO 添加量は約 2.5 vol.% とし、膜厚は 130-160 nm とした。作製した薄膜の結晶性は X 線回折法(XRD)、超伝導特性は直流四端子法、膜厚及び組成比は ICP 発光分析法により評価を行った。

3. 実験結果及び考察

XRD の結果から本研究で作製した薄膜は良好な 2 軸配向をしていることを確認した。直流四端子法による電気特性の測定結果から x = 0.01, 0.08, 0.12 の NdBCO 薄膜の T_c はそれぞれ 92.0 K, 93.0 K, 89.0 K であり NdBCO(x = 0.12)薄膜は Nd/Ba 置換量の増加に伴い、T_c が低下したと考えられる。Fig. 1 に NdBCO(x = 0.01, 0.08)薄膜の B//c 方向の磁場に対する 77 K における J_c を示す。NdBCO(x = 0.08)薄膜は無添加及び BHO を添加した薄膜とともに NdBCO(x = 0.01)に比べ J_c が向上した。これは Nd/Ba 置換型固溶体によるピンニング力が働いたためと考えられる。Fig. 2 に BHO を添加していない NdBCO(x = 0.01, 0.08)薄膜の 1 T と 5 T における J_c の磁場印加角度依存性を示す。NdBCO(x = 0.08)薄膜は 1 T において全磁場印加角度で J_c が向上していることから Nd/Ba 置換型固溶体による 3 次元ピンニングが働いていると考えられる。また、BHO 無添加にも関わらず B//c 方向の磁場に対して J_c のピークが見られ、5 T 高磁場中においても c 軸方向に対してピンニングが働いていることを確認した。無添加 NdBCO 薄膜における c 軸相関ピンニングは RABiTS 基板上的 NdBCO 薄膜においても同様に報告されており、Nd/Ba 置換型固溶体によるピン

ニングであると推察されている[3]。

今後、Nd/Ba 組成を変化させた BHO 添加 NdBCO 薄膜の評価から Nd/Ba 置換が超伝導特性や BHO の成長様式に及ぼす効果を詳細に検討する予定である。

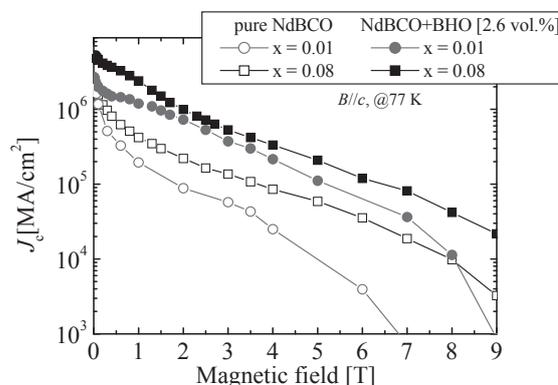


Fig. 1 Magnetic field dependence of J_c of the NdBCO(x = 0.01, 0.08) films

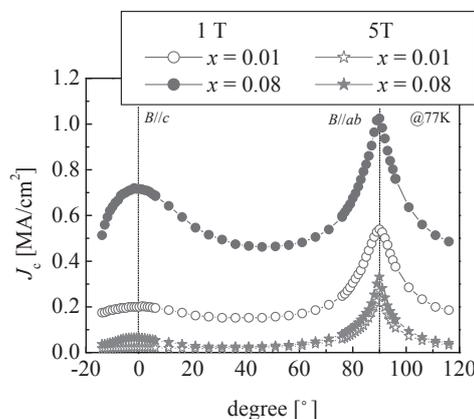


Fig. 2 Magnetic field angular dependence of J_c in 1 T and 5 T for pure-NdBCO(x = 0.01, 0.08) films

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 19676005, 25289358)からの助成を受けて実施したものである。

5. 参考文献

- [1] M. Murakami, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.9 (1196) p.1015
- [2] 澤野ら:2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-C9-4
- [3] S. H. Wee, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.19 (2006) p.865

低温成膜法を用いて作製した $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜中 高密度 BaMO_3 ナノロッドの磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of high number density BaMO_3 nano-rods in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films deposited by low temperature growth technique

三浦 峻, 吉田 隆, 一野 祐亮(名大工); 松本 要(九工大); 一瀬 中(電中研); 淡路 智(東北大)
 MIURA Shun, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.);
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: miura-syun12@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

これまで我々は低温成膜(LTG: Low Temperature Growth)法を用いることで、通常より低温領域で成膜しても超伝導特性を低下させず、高品質な c 軸配向膜を作製可能なことを報告した[1]。また、気相蒸着法において BaMO_3 (BMO; $M=\text{Zr, Sn, Hf}$)材料は $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO)膜内でナノロッドを形成し、強力な磁束ピンニング力を有することが報告されている。本研究では、BMO材料の中でも、比較的細いナノロッドを形成すると報告されているBHOを選択した[2]。更にLTG法を用いて低温でBHO添加SmBCO薄膜を作製することでBHOナノロッドをより細く高密度に導入し、高磁場中における臨界電流密度及び不可逆磁場向上を試みた。

2. 実験方法

BHO添加SmBCO薄膜はSmBCOとBHOの2つのターゲットを使用し、KrFエキシマレーザーを用いたPLD法により LaAlO_3 (LAO)単結晶基板上に作製した。作製方法として基板温度(T_s) 870°C でSmBCO seed layerを膜厚約50 nmで作製し、その上に $T_s^{\text{upper}}=680\sim 850^\circ\text{C}$ で3.0~6.0 vol.%程度のBHOを添加したSmBCO upper layerを膜厚約400 nm作製した。BHOの導入方法としてはターゲット交換法を用いた。作製した薄膜の超伝導特性を直流四端子法で測定し、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて微細構造観察を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に2.7 vol.% BHOを添加したSmBCO薄膜の平面TEM観察結果を示す。Fig. 1 (a)は $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ と比較的低温で作製した試料であり、Fig. 1 (b)は $T_s^{\text{upper}}=840^\circ\text{C}$ と比較的高温で作製した試料である。これらの平面TEM観察結果からナノロッドの直径(d_{BHO})と数密度(ρ_{BHO})を算出したところ、 $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ 試料では $d_{\text{BHO}}=5.7\text{ nm}$ 、 $\rho_{\text{BHO}}=2300/\mu\text{m}^2$ 、 $T_s^{\text{upper}}=840^\circ\text{C}$ 試料では $d_{\text{BHO}}=8.5\text{ nm}$ 、 $\rho_{\text{BHO}}=1440/\mu\text{m}^2$ となった。低温で作製した試料には細く、高密度なナノロッドが導入されていることが確認された。またFig. 1 (a)から、特徴的なFire Works構造が観察でき、 $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ 試料に導入されているいくつかのナノロッドは基板表面の法線方向に対して傾斜していることがわかった。以上の結果から低温で作製した試料には細く、高密度なナノロッドが導入され、かつ成長方向が基板法線に対して分散することがわかった。更に膜内に高密度にナノロッドを導入するために、BHO添加量を増加させ、 $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ で試料を作製した。Fig. 2 に $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ で作製した2.7, 3.7及び5.5 vol.% BHO添加SmBCO薄膜及び無添加SmBCO薄膜の c 軸方向に平行に磁場を印加した場合の不可逆磁場曲線(@ $B//c$)を示す。無添加試料の77 Kにおける不可逆磁場は7.0 T程度であった。Fig. 2の不可逆磁場曲線よりBHO添加した $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ 試料の77 K

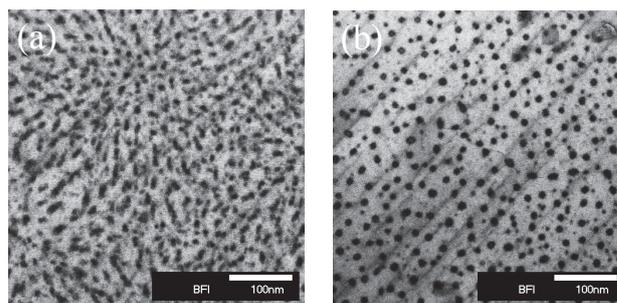


Fig. 1 Planar TEM images of 2.7 vol.% BHO doped SmBCO films grown at (a) $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ and (b) $T_s^{\text{upper}}=840^\circ\text{C}$.

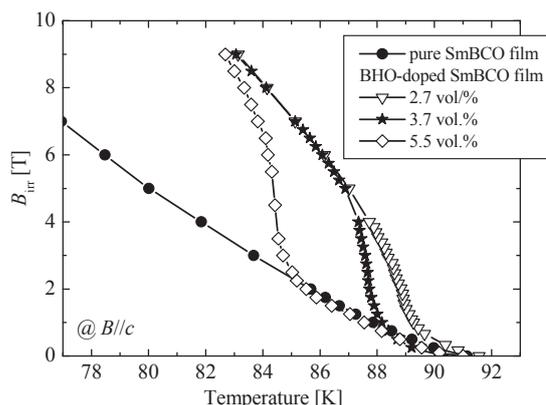


Fig. 2 Temperature dependence of irreversibility magnetic field of the BHO doped SmBCO films at $T_s^{\text{upper}}=750^\circ\text{C}$ and a pure SmBCO film.

における不可逆磁場は、無添加試料と比較して大きく向上していることが予想される。不可逆磁場曲線の挙動は3つの試料で大きく異なっており、これはBHO添加量の違いにより膜内におけるBHOナノロッドの数密度や直径が異なっているためであると考えられる。また、これらBHO添加試料の77 K及び65 Kにおける臨界電流密度(J_c)の磁場依存性(@ $B//c$)を測定し、そこから巨視的ピン力密度(F_p)を算出した。この F_p の最大値を示す磁場はBHO添加量を増大させると、高磁場側へシフトする傾向にあり、最大で8 T程度まで増加した。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014,19676005)からの助成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. Vol. 44 (2005) p.L129.
2. T. Matsushita et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 25 (2012) p.125003

劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(1)

-REBCO 線材の許容剥離応力評価方法-

Degradation-free impregnated REBCO pancake coils (1)

-Method for evaluating delamination stress of REBCO tapes-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

REBCO コイルを伝導冷却システムで使用するためには伝熱パスの確保の観点から樹脂含浸することが望ましい。しかしながら、含浸したREBCOコイルは冷却時にコイル径方向にはたらく熱応力が線材の許容剥離応力を超えてしまい劣化してしまう問題が生じる。そのため、劣化のない含浸コイルを設計製作するためには、線材の許容剥離応力を定量的に評価する必要がある。本発表では、REBCO 線材の剥離応力評価の考え方および実際に小コイルを用いた試験結果について報告する。

2. 冷却時に発生するコイル径方向応力

樹脂含浸した REBCO コイルの諸元を Table 1 に示し、液体窒素中での通電試験結果を Fig.1 に示す。Fig.1 には短尺線材の電流-電圧特性から計算したコイル電流-電圧特性をあわせて示している。コイル n 値が 10 程度と低く、計算値と比較しても低い電流値で電圧が発生していることからコイルは劣化していると考えられる。次に REBCO 線材の許容剥離応力とコイルを室温から 77 K まで冷却した際の径方向応力の関係を調べるため、劣化したコイルの熱応力解析を実施した。応力解析の結果より冷却時に発生したコイル径方向応力は、最大で 12 MPa 程度であった。一方、線材の許容剥離応力の評価に関しては、様々な研究機関等で実施されているが、50 MPa 以上という結果も報告されており、今回劣化したコイルの径方向応力との因果関係を説明することができない。したがって、従来の評価方法を用いて、劣化のない含浸コイルを設計することは困難である。

3. 許容剥離応力評価方法

線材の許容剥離応力評価方法として、内径と外径の比が異なる複数の小コイルの試験結果を用いる方法を新たに提案する。本手法は、コイルの等価剛性が等しい場合、コイル径方向応力がコイルの内径と外径の比に依存することに着目したものであり、内径 30 mm の小コイルを複数試作して、液体窒素中で通電試験を実施し、劣化の有無を調べる方法である。Table 2 に試作した小コイルの諸元を示し、内外径比とコイル n 値の関係を Fig.2 に示す。内外径比が 1.4 以下であれば、全てのコイル n 値が 20 以上となるのに対して、内外径比が 1.5 以上では 1 つの場合を除いて、 n 値が 13.7 以下と低い結果となった。この結果より、小コイルと同じ構成のコイルを製作する場合、コイルを劣化させないためには、内外径比を 1.4 以下とすればよいことがわかる。ここで、内外径比 1.4 の場合のコイル径方向応力の最大値は 3.2 MPa であった。

4. まとめ

コイル径方向応力がコイル内外径比に依存することに着目し、REBCO線材の許容剥離応力を評価する方法として、内外径比の異なる小コイルの試験結果を用いる方法を提案した。本手法により線材の許容剥離応力が 3 MPa 程度であることを明らかにした。引き続き、コイル構成が異なる場合においても提案した手法の有効性を確認していく予定である。

Table 1 Specifications of REBCO tape and single pancake coil

Tape width	4 mm
Tape thickness	0.1 mm
Tape length	13.1 m
Inner diameter	30.0 mm
Outer diameter	60.6 mm
Number of turns	92

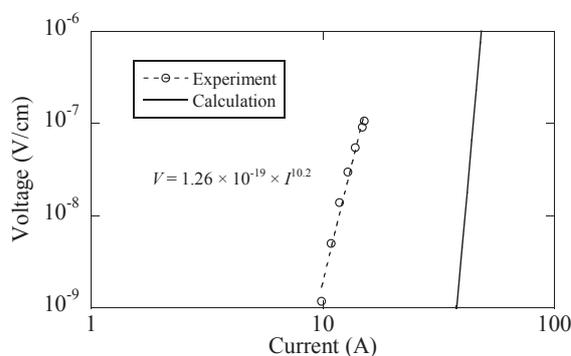


Fig.1 V-I characteristics of single pancake coil at 77 K

Table 2 Specifications of small model coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4	#5
Tape length (m)	1.9	1.9	1.9	2.7	3.7
Inner dia. (mm)	30	30	30	30	30
Outer dia. (mm)	36.7	36.9	36.7	39.5	41.9
Number of turns	18	18	18	25	33
OD/ID	1.22	1.23	1.22	1.32	1.40

#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
4.3	5.6	6.9	6.9	10.0	10.1	13.1
30	30	30	30	30	30	30
42.8	45.8	48.9	48.8	55.0	54.6	60.6
38	47	56	56	75	76	92
1.43	1.53	1.63	1.63	1.83	1.82	2.02

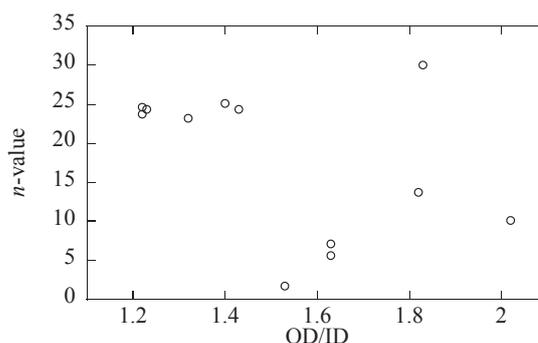


Fig.2 n -values of small model coils having different ratio of outer diameter to inner diameter (OD/ID)

劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(2)

-市販線材の許容剥離応力-

Degradation-free impregnated REBCO pancake coils (2)

-Delamination strength of a different type of conductors-

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

1. はじめに

第一報(劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(1))にて, REBCO 線材の許容剥離応力の新しい評価手法を提案した [1]. 本発表では, 新手法の有効性を検証することを目的とし, コイル径方向応力を線材の許容剥離応力以下にすることで, 含浸コイルの劣化を回避できるかテストした. また, 許容剥離応力は, 線材の寸法・製法によって異なると考えられる. そこで, 市販されている4種類の REBCO 線材についても, それぞれ許容剥離応力を評価し, 同手法が有効であるか検証した.

2. REBCO 含浸コイルの劣化回避

試作した REBCO 含浸コイルの諸元を Table 1 に示す. 使用した線材の許容剥離応力は約 3 MPa で, コイル内径と外径の比(内外径比 OD/ID)換算で約 1.4 である. Fig.1 にコイル径方向の熱応力 σ_r の解析結果を示す. 試作したコイルの OD/ID は 2.0 で, 最大約 12 MPa 発生することから, 許容剥離応力を超えてしまう. そこで, 巻線部を径方向に 3 分割し, σ_r が許容剥離応力以下となるように設定した. 試作したコイルを液体窒素中での通電した結果, コイル n 値は 27.2 であり, 劣化を回避することができた.

3. 市販線材の許容剥離応力評価

上記の REBCO 線材とは寸法・製法が異なる3種類の市販線材(合計4種類)について, 許容剥離応力を比較・評価した. 線材諸元を Table. 1 に示す. 線材 A が, 第一報および2節で示した線材である. 3 種類の市販線材についても, 第一報で提案した新評価方法を採用し, OD/ID の異なる複数のモデル小コイルを試作した. 試作したコイルは, 液体窒素中で通電試験し, 劣化の指標となるコイル n 値を取得した. コイル径方向応力 σ_r は, 巻線部の等価剛性および熱収縮率によって異なる. そのため, 線材が違えば OD/ID が同じでも σ_r は一致しない. そこで比較のため, 各コイルの熱応力解析を実施した. コイル n 値について, 横軸に解析で得た σ_r の最大値を取ったグラフを Fig.2 に示す. 線材 A の許容剥離応力は, コイル n 値が急激に低下する約 3 MPa である. これに対し, 線材 B, C の許容剥離応力は, それぞれ約 3 MPa, 約 1 MPa であり, また, 線材 D は 12 MPa 以上であることが分かった.

4. まとめ

許容剥離応力の新たな評価手法にもとづき, REBCO 含浸コイルの劣化回避を試みた. コイル径方向応力を線材の許容剥離応力以下に設定することで, 劣化を回避できることを示した. また, 4 種類の市販線材について, 本手法により許容剥離応力の比較・評価を実施した. 結果, 許容剥離応力は, 1 MPa, 3 MPa, 12 MPa 以上と, 線材の寸法, 製法で大きく異なることを明らかにした. 今後, これらのクライテリアを元に設計した含浸コイルでも, 劣化を回避できることを実証していく. また, 許容剥離応力は, 製造ロットや, 長手方向でも分布をもつ可能性があることから, 引き続き, さらなるデータの蓄積を進めるとともに, 実コイルでの有効性を検証していく.

Table 1 Specification of a coil.

線材 length (m)	12.8
Inner diameter (mm)	30
Outer diameter (mm)	59.8
Number of turns	91
n-value	27.2

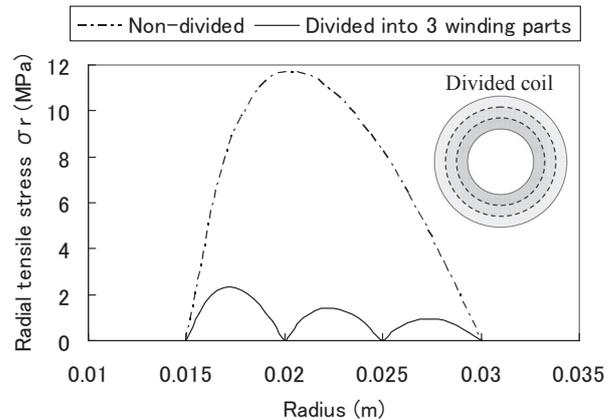


Fig.1 Calculated radial tensile stress distribution in the coil when the coil was cooled from 293 K to 77 K.

Table 1 Specification of four REBCO tapes.

Tape	A	B	C	D
Width (mm)	4	5	5	4.8
Thickness (mm)	0.1	0.12	0.17	0.2
Substrate thickness (μm)	50	75	75	75
HTS layer thickness (μm)	1	2	2.5	1
Cu stabilizer/ thickness (μm)	electroplate/ 20 (one side)	2-ply/ 75 \times 1	3-ply/ 75 \times 1	3-ply/ 50 \times 2

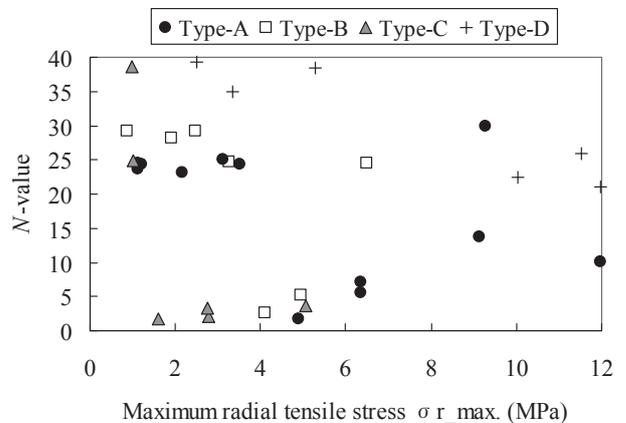


Fig.2 n-values of small model coils.

参考文献

- 宮崎他: 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, “劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(1)-REBCO 線材の許容剥離応力評価方法-”

劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(3) -コイル径方向熱応力の低減方法- Degradation-free impregnated REBCO pancake coils (3) - Reduction method of the radial thermal stress -

戸坂 泰造, 岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

TOSAKA Taizo, IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

1. はじめに

樹脂含浸した REBCO コイルにおいて超電導特性が劣化する現象の主原因は、冷却時に発生するコイル径方向の熱応力によって、REBCO 線材の積層構造が破壊されるためと考えられている。したがって、REBCO 含浸コイルの実用化に向けた研究開発の目標は、この熱応力を線材の許容剥離応力以下にする設計手法を確立することになる。しかしながら、短尺で線材の許容剥離応力を評価した場合、測定結果のばらつきが大きいとともに、コイルに発生する径方向熱応力の計算結果に対して非常に大きな許容剥離応力が得られ、実態と一致せず設計には使えなかった。一方、小コイルに発生する熱応力で線材の許容剥離応力を評価する方法[1][2]は、複合材としてのコイルの機械的特性が同じであれば、径方向熱応力はコイルの内外径比で決まることを根拠として、実際のコイルの設計に使えることが意図されている。ただし、この評価方法では、コイルの構成が変わると発生する熱応力が変わるため、許容されるコイル内外径比の値も変わることによる必要がある。本発表では、コイルの構成が径方向熱応力に及ぼす影響を計算評価した結果について報告する。

2. 径方向熱応力発生メカニズムと計算諸元

コイルの径方向に熱応力が発生するのは、線材と絶縁材の熱収縮率が異なるためである。そのメカニズムを Fig.1 を用いて模式的に説明する。一般的に、線材に比べてターン間絶縁材(含浸材も含む)の熱収縮率は大きい。冷却により絶縁材が縮むと、線材は巻厚の中心に引き寄せられ、内部応力がバランスするまで元の位置に戻ろうとする力(F_{θ})が働く。その力が径方向に引張応力(σ_r)を発生させることになる。

絶縁材の物性値や厚さは、コイル設計における重要なパラメータであり、上述のように径方向熱応力への影響も大きいと考えられる。そこで、コイル構成が径方向熱応力に及ぼす影響の評価を、Table 1 に示すように絶縁材の諸元をパラメータとした計算によりおこなった。線材諸元については基板厚さ $50 \mu\text{m}$ 、全厚さ $100 \mu\text{m}$ の市販線材を想定した。

3. 径方向熱応力の低減に有効なパラメータ

コイル内外径比(外径/内径)を 1.4 として計算した場合の径方向熱応力の最大値を Fig.2 に示す。Case A は、絶縁材の物性値として文献等に記載されているエポキシの値を用いた場合であり、Case A'、Case A'' は絶縁材の厚さを 1/2、1/4 にした場合である。絶縁材を薄くすることは、熱応力低減に一定の効果はあるものの、 $20 \mu\text{m}$ 程度ではその効果はあまり大きくない。一方、Case B は、Case A に対してヤング率を高くした場合、Case C は熱収縮率を小さくした場合、Case D はその両方にした場合となるが、径方向熱応力を小さくするためには、熱収縮率を小さくすることが有効であることがわかる。

4. まとめ

REBCO含浸コイルの特性が劣化する現象を体系的に把握し、劣化させない技術を開発手法として確立させることを目指した研究開発の一環として、コイルの機械特性が径方向熱

力に及ぼす影響を評価した。その結果、ターン間絶縁材の熱収縮率を小さくすることが径方向熱応力の低減に効果的であり、絶縁材を薄くすることも一定の効果があることがわかった。REBCO含浸コイルを劣化させないことを確実に設計問題として扱えるようになるためには、コイル製作の実績を積みながらデータを蓄積していくことが重要である。

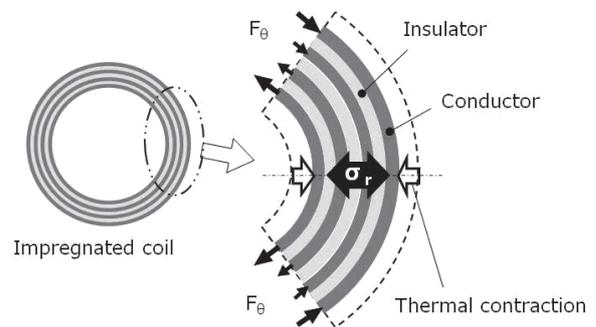


Fig.1 Fundamental mechanism of radial thermal stress

Table 1 Parameters of insulator

Case I.D.	A	A'	A''	B	C	D
t [mm]*	0.08	0.04	0.02	0.08	0.08	0.08
E [GPa]**	8	8	8	18	8	18
$\alpha \Delta T$ [%]***	-1.03	-1.03	-1.03	-1.03	-0.395	-0.395

*: Thickness,

** : Young's modulus,

*** : Thermal contraction (293 K \rightarrow 77 K)

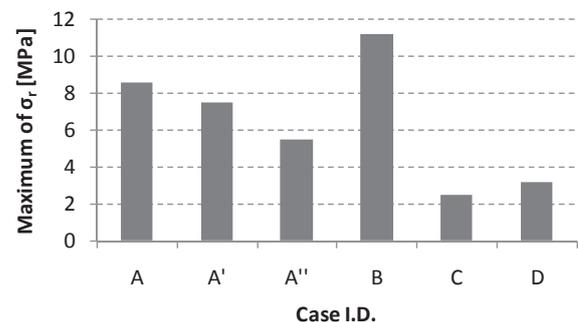


Fig.2 Calculation results of thermal stress (σ_r) when "outer dia./inner dia." is 1.4.

参考文献

- 宮崎他: 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, "劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(1) -REBCO 線材の許容剥離応力評価方法-"
- 岩井他: 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, "劣化を回避する REBCO 含浸コイル開発(2) -市販線材の許容剥離応力-"