

Φ300 mm 級イットリウム系含浸コイルの熱暴走特性評価

Thermal runaway of ϕ 300 mm-class impregnated YBCO coil

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

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

1. はじめに

イットリウム系超電導コイルは高い熱的安定性を有しているため、伝導冷却においても高負荷率で運転することが可能である。しかしながら、発生電圧がある閾値を超えてしまい熱暴走した場合にはコイルが焼損する危険性がある。そのためコイルを安定に運転するためには、巻線内部に劣化が無いことおよび熱暴走特性を定量的に把握することが重要となる。熱暴走はコイルサイズや線材の安定化層の影響を受けるため、今回、2種類のイットリウム系線材を用いて試作したΦ300 mm 級のコイルを用いて、伝導冷却で通電試験を実施し、実験と解析の両面から熱暴走特性を評価したので報告する。

2. コイル諸元および伝導冷却試験

試作したコイルの諸元を Table 1 に示し、外観を Fig.1 に示す。#a および #b コイルともに 4 本の線材を電氣的に接続している。#a および #b コイルを伝導冷却試験装置に組み込み、通電試験を実施した。コイル上面のみに厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付けて、アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。コイル温度は 2 段ステージに取り付けたヒータにより制御し、設定温度は 30 K から 60 K の範囲で変えた。30 K から 60 K の各温度における電界-電流特性の通電結果および短尺線材の臨界電流特性から計算した電界-電流特性を Fig.2 示す。#a および #b コイルともに 30 K から 60 K の各温度において実験結果と計算結果は定量的に一致し、試作した含浸コイルが良好な超電導特性を有していることを確認した。

3. 熱暴走試験

コイル温度を 40 K から 60 K の範囲で変えて過負荷通電試験を実施し、コイルが熱暴走する限界の電流値を測定した。試験方法は、コイル温度を一定値に制御しながら通電電流値を 0.1 A 刻みで上昇させ、電圧の急激な上昇が確認された場合に電源を遮断する方法とした。#a コイルの 40 K における熱暴走試験の結果を Fig.3 に示す。電流値を 256 A に設定した後、コイル電圧が上昇し続け、最終的に急激な電圧上昇が観測されたため、電流を遮断して試験を終了した。

次に、短尺線材の臨界電流値から計算したコイル内部発熱分布を用いて、3次元熱解析を実施した。境界条件として冷却板の温度を一定とし、他の表面は断熱条件とした。コイル温度 40 K における解析結果を Fig.4 に示す。255 A 通電時においては、コイル温度は定常であったが、258 A 通電時においてコイル温度が急激に上昇し熱暴走する結果となり、実験結果とほぼ一致することを確認した。また、#b コイルにおいて、コイル温度 40 K において、204 A 通電時に熱暴走した結果に対して、解析結果が 210 A であり、誤差 3%未満の精度で熱暴走電流を予測可能であることを確認した。

4. まとめ

構成が異なる 2 種類のイットリウム系線材を用いて、Φ300 mm 級の含浸コイルを試作し、伝導冷却にて熱暴走試験を実施した。線材の安定化層や構成の違いによらず、熱暴走電流を定量的に予測できることを示した。

Table 1 Specification of YBCO tapes and coils

Coil No	#a	#b
Tape width (mm)	4.4	4
Tape thickness (mm)	0.2	0.1
Substrate	NiW	Hastelloy®
Copper stabilizer thickness (mm)	0.1	0.04
Tape length (m)	130	200
Number of turns	172	257
Inner diameter (mm)	200	200
Outer diameter (mm)	296	290

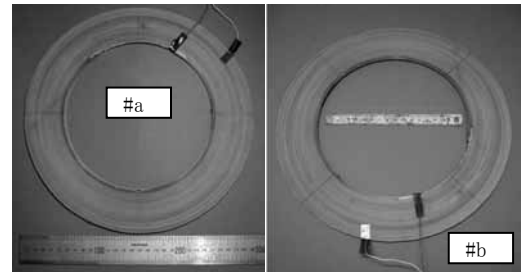


Fig.1 Photograph of impregnated YBCO coils

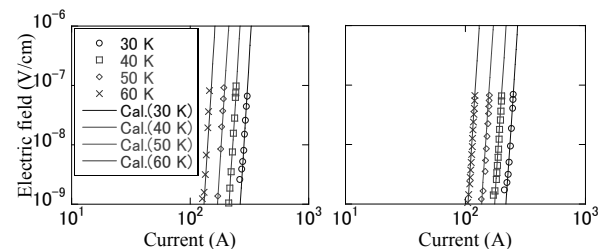


Fig.2 E-I characteristics of YBCO coils from 30 K to 60 K

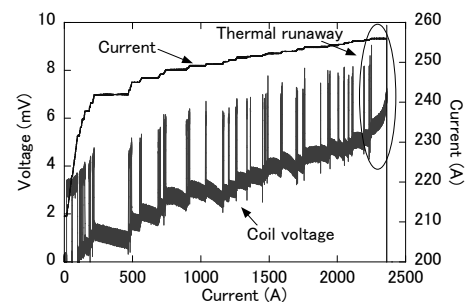


Fig.3 Voltage and current variations of YBCO coil at 40 K

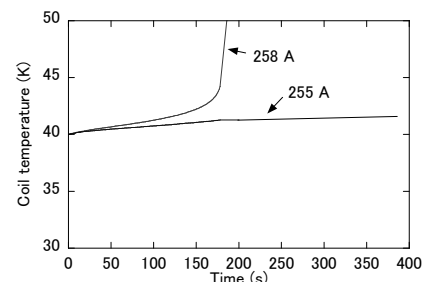


Fig.4 Calculated time variations of coil temperature

YBCOコイルにおける劣化部位に起因する常伝導伝播特性

Normal zone propagation caused by conductor degradation for YBCO coils

奥山絵里加, 柳澤吉紀, 中込秀樹(千葉大学); 高橋雅人, 前田秀明(理研)
 OKUYAMA Erika, YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki(Chiba Univ.);
 TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki(RIKEN)
 E-mail: maeda@jota.gsc.riken.jp

1. はじめに

YBCO 線材は高磁場で高い臨界電流密度を持ち高強度特性を有するので、次世代高温超伝導マグネットへの応用が期待されている。しかしながら、コイル中の線材の一部が何らかの要因で特性劣化した場合、この部位から熱暴走が発生しコイルに損傷を与える恐れがある。我々はすでにエポキシ含浸でコイル線材の劣化が生じる可能性を報告した[1]。本報は、YBCO コイル線材の部分劣化による熱暴走と、その結果生じる take off 電圧について、コイル保護の基本的な考え方を構築することを目的とする。YBCO コイルによる実験と数値解析を併用した。

2. 実験方法

IBAD-MgO 法で製作された YBCO 線材(SuperPower 社製 SCS4050)を用いて、5 層巻きシングルバンケーコイルを製作した。巻枠は内径 30 mm の FRP 円筒である。YBCO 線材は、幅 4.1 mm、厚さ 0.1 mm で、層間はカプトンテープで絶縁した。使用する線材はコイル両端 48.5 cm、各層は 9.7 cm である。全体電圧と各層の電圧測定用タップと併せて、温度測定の為、各層の中間部位に厚さ 50 μm の T 型熱電対をそれぞれ取付けた。コイルは最後にパラフィンで含浸した[1]。本コイルは 4 層目と 5 層目に劣化部分を持つ (I_c は各々 30A と 40A)。通電試験は液体窒素中 (77 K) で実施し、電源の設定電圧 (2-3V) でコイルを保護した。劣化がない場合のコイル臨界電流は約 100A である。

3. 解析方法

ジュール発熱を含む 1 次元熱拡散方程式によりシングルバンケーコイルをモデル化した。コイル両端部を 77K 一定と仮定した。線材長手方向の熱伝導に加え、層間の絶縁体を介した熱伝導を考慮することでコイルを模擬した。分流モデルには銅安定化材の常伝導抵抗と超伝導層の n 値モデルによる並列回路を仮定した[2]。 n 値を低く設定 (2~3) することで劣化部位に特徴的な、ゆるやかな常伝導転移特性をモデル化した。液体窒素への熱伝達は無視し、断熱条件を仮定した。

4. 実験結果

励磁中のコイルの電圧を計測したところ、いずれの場合にも 80 から 100A でコイル電圧が take off し、電源がダウンした。各層間電圧を時間軸に対してプロットすると、take off に至る振る舞いには次の 2 つのパターンが見られた。

(1) 臨界電流より低い電流値で take off する場合: Fig. 1 にコイル電圧とコイル温度を示す。劣化ターン V_4 は常伝導電圧により発熱するが、これが隣接する層 V_3 にクエンチを起こす ($t = 469$ s, 78 A)。さらに、これが V_2 に伝播するとともに、 V_4 にクエンチバックしている。take off 後、2.5 s で電源が遮断される ($t = 471.5$ s) が、コイル温度は 330 K まで上昇する。温度と電圧から計算すると常伝導領域は巻き線全体の 50% であり、常伝導伝播は比較的限定的である。

(2) 臨界電流に近い電流値 (~100A) で take off した場合: この場合も、take off は $V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ のプロセスをたどる。コイル臨界電流に近いので、常伝導電圧 (抵抗) の増加率は Fig. 1 より早く、電源は take off 後 1 秒でダウンする。この結果、コイル温度上昇は 195 K と小さい。コイル温度と電圧に基づいた計算によれば、各層はほぼフルノーマルになっている。

上記のような take off の実験を繰り返す間に、コイル臨界電流特性や n 値が徐々に劣化した。Fig. 1 に示すように、take off は、1-2 秒の熱パルスを生じ、これが瞬間的な温度分布と熱応力を生むので、コイル特性が劣化するものと推測される。

YBCO コイルの評価試験においては、コイル電圧の take off による特性劣化を避けるために、クエンチ検知電圧を低く設定するなどの対策が必要である。

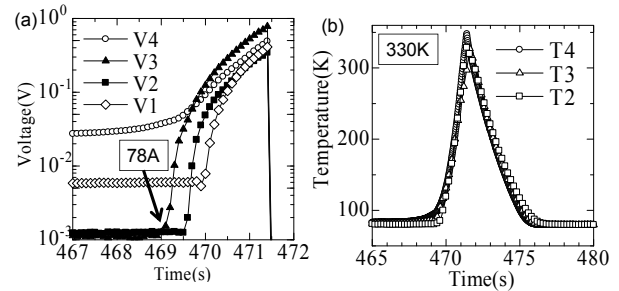


Fig. 1 (a) Experimental coil voltage and (b) coil temperature around the take-off current of 78A.

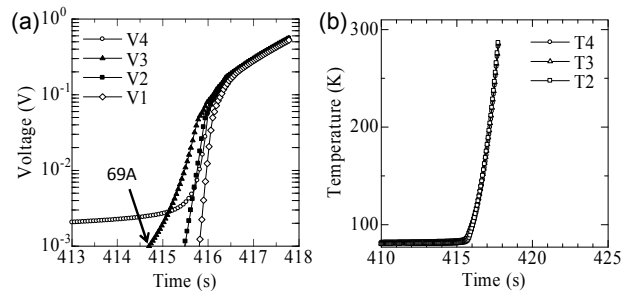


Fig. 2 (a) Simulated coil voltage and (b) coil temperature around the take-off current of 69A.

5. 解析との比較

解析によるコイル電圧とコイル温度を Fig. 2 (a) (b) に示す。解析では、電圧の take off は 69 A で発生するが、これは Fig. 1 (78 A) に比べて 10 A 近く低い。また、その時点での V_4 における常伝導電圧も実験の場合と比べ 1 桁低い。実験では発熱劣化部位やコイル外周部がパラフィンを介して液体窒素で冷却されているのに対して、解析では断熱条件を仮定したためである。電圧 take off は実験と同じ振る舞いを示している。実際、各層の温度分布の時間変動から、 V_4 の加熱で V_3 がクエンチし、 V_4 がクエンチバックするプロセスを解析的に実証できた。これについては、 n 値が大きく (~30) 急峻な常伝導転移特性を持つ健全部位のほうが take off しやすいためと推察される。

6. まとめ

YBCOコイルでは劣化部位の常伝導発熱により、隣接する健全層がクエンチして電圧の take off が生じ、室温レベルへの瞬間的な温度上昇が起きる。この種の take off により、コイルの特性が劣化することがあるので注意する必要がある。

本研究は(独)科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470 (2010) pp.674-677
2. A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15 (2005) pp.1659-1662

エポキシ含浸による YBCO ダブルパンケーキコイルの特性劣化

Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation

竹松 卓也, 胡 瑞鑫, 高尾 智明(上智大学); 柳澤 吉紀, 奥山 絵里加, 中込 秀樹(千葉大学)

木吉 司(NIMS); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

TAKEMATSU Takuya, HU Ruixin, TAKAO Tomoaki(Sophia Univ.)

YANAGISAWA Yoshinori, OKUYAMA Erika, NAKAGOME Hideki(Chiba Univ.)

KIYOSHI Tsukasa(NIMS); TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki(RIKEN)

E-mail: takematsu@ssbc.riken.jp

1. はじめに

YBCO 線材は短尺における軸引張り強度が高く(700 MPa 程度), 理論的には従来の超伝導線材と比べてはるかに高い電流密度での磁石設計が可能となる。しかし, YBCO 線材の強度は強い異方性を持ち, 横方向(c 軸方向)引張り力を印加した場合, 10-20MPa[1]または>40MPa[2]などの非常に低い応力で YBCO 層が剥離する。

YBCO 線材で巻き線したコイルをエポキシの様な剛ポリマーで含浸・硬化して製作する場合, エポキシの硬化収縮や冷却熱応力に負けて線材性能が劣化する可能性がある。本報ではこの種の劣化を系統的な実験により実証し, 原因と対策を提示した。

2. 実験方法

IBAD-MgO 法で製作された YBCO 線材(SuperPower 社製, SCS4050, 77 K での I_c : 96 A)を用いて, ダブルパンケーキコイルを製作した。巻枠は厚さ 3 mm の FRP 円筒である。YBCO 線材は, 幅 4.1 mm, 厚さ 0.1 mm で, ターン間はカプトンテープで絶縁した。コイルは内径 30 mm, 外径 38 mm, 高さ 8.8 mm である。最初に, 非含浸でコイルを製作した(巻き線張力 ~0MPa)。ターン数は 54 である。液体窒素中で通電して, 電流-電圧特性を評価し, その後コイルを室温まで昇温させる一連のサイクルを 5 回繰り返した。この後, コイルをエポキシ樹脂(Emerson&Cuming, Stycast 1266)で含浸・硬化した(338 Kx 50 時間)。その後, 同様の熱サイクルとコイル評価を 5 回繰り返した。

また, 以上とは別に同じ寸法の非含浸コイルを製作し, 柔ポリマーであるパラフィンで含浸・硬化して, 同様の特性評価を行った。

3. 実験結果

非含浸コイルとエポキシ含浸コイルの電流-電圧特性を比較して Fig.1 に示す。非含浸コイルの場合(○), 45A から常伝導電圧が現れ, n 値は 27 である。1 μ V/cm に対応する電流(54 A)は, 負荷曲線と短尺 I_c の交点に一致する。即ち, 非含浸コイルでは特性劣化はない。一方, エポキシ含浸コイルの場合(△), 常伝導電圧はわずか 8A から生じ, n 値は 3 である。即ち, エポキシ含浸により, コイル特性は顕著に劣化する。

コイルを巻き戻しながら, 各層の電流-電圧特性を計測した結果, 劣化層を第 6 層と特定した。劣化部の一部を切り出し, 銅安定化材の端部を切除した所線材が剥離した(Fig.2(a))。剥離面の SEM 像を Fig.2(b)に示す。エネルギー分散型 X 線分光(EDS)による元素分析によれば, 向かって右側にバッファ層と超伝導層間の剥離が生じ, 向かって左側で超伝導層の破断が生じている。

4. 検討

エポキシ含浸コイルについて, エポキシ硬化, 熱収縮, ローレンツ力に起因する径方向応力を多層円筒モデルで数値計算した。径方向(即ち横方向)積算応力のピーク値は+12.5 MPa であった。この値は YBCO 線材の横方向引張り強度(10-20MPa[1]または>40MPa[2])と同オーダーであるから, 過剰な横方向応力で線材が劣化した可能性がある。

また, 両者の差異に相当する何らかの応力集中が生じている可能性もある。次報[4]で述べるように, YBCO 線材は劈開(へきかい)力(cleavage)に対して非常に弱く, <1MPa の微弱な平均応力で容易に剥離する。劈開力の本質は 10 倍以上の

応力集中を持つ横方向引張り力である。劈開力とコイル劣化の関係については, 次の講演(3A-a04)で論ずる[4]。

柔ポリマーであるパラフィン含浸コイルの場合, 特性の劣化は見られなかった(Fig.1 の■)。パラフィンは接着強度がほぼゼロであるため, 層間が容易に分離して径方向の引張り力が生じないからである。この場合, 径方向に圧縮応力が生じることはあるが, YBCO 線材は圧縮応力に十分強いのでコイル特性上の問題はない。パラフィン含浸はソレノイドで広く利用されている手法であり, コイル特性の劣化を防ぐうえで有効である。同様に, 非含浸コイルでも層間の接着力がゼロなので, 層方向に引張応力が生じず, 線材の劣化がないものと推測される。

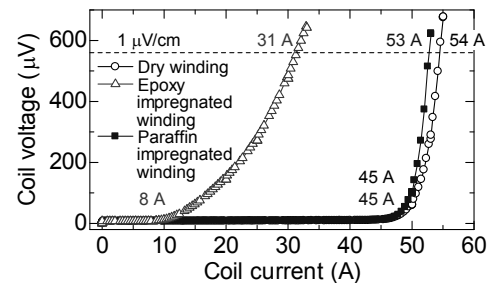


Fig.1 Current-voltage characteristics of a dry coil (○), an epoxy impregnated coil (△) and a paraffin impregnated coil (■).[2]

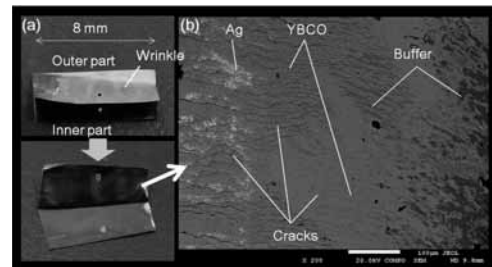


Fig.2 (a) Delaminated YBCO coated conductor on the 6th layer. (b) Microstructure of the fractured surface for the outer part (i.e. YBCO part) of the degraded conductor taken by SEM.[2]

5. まとめ

エポキシ含浸 YBCO コイルではエポキシの剛性に線材の強度が負けるために, 線材の一部が劣化しコイル特性が顕著に劣化する。劣化は, 非含浸方式や柔ポリマーであるパラフィン含浸の手法により有効に抑制できる。

本研究は(独)科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. D.C. van der Laan, et al.: Supercond. Sci. Technol.20 (2007) 765.
2. Y. Xie, et al.: Applied Superconductivity Conference, Washington DC., USA, Aug. 2, 2010
3. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470 (2010) pp.674-677
4. 柳澤他:2010年度秋季低温工学超伝導学会 3A-a04

YBCO 線材における劈開(へきかい)力に対する顕著なぜい弱性

Brittleness of YBCO-coated conductor due to stress concentration by cleavage

柳澤 吉紀, MA Juehui, 中込 秀樹(千葉大);竹松 卓也, 福田 竜彦, 高尾 智明(上智大);高橋 雅人, 前田 秀明(理研)
 YANAGISAWA Yoshinori, MA Juehui, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
 TAKEMATSU Takuya, FUKUDA Tatsuhiko, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
 E-mail: y_yanagisawa@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

YBCO 線材の引っ張り強度は大きな異方性を持つ。線材の長手方向の引っ張り強度は700 MPa以上であるが、横方向(c 軸方向)では1桁低い(10-20MPa[1]または>40-100 MPa[2])。YBCO 線材は多層構造を持つが、ハステロイと安定化銅が YBCO+バッファで接合された構造としてモデル化できる。この種の接合構造を持つ複合体では、接合面を端部から押し開く劈開(へきかい, cleavage)力に加わるとわずかな力で接合が剥離することが知られている。実際の YBCO 線材における劈開(へきかい, cleavage)力による特性劣化の報告はまだない。本報では YBCO 線材に劈開(へきかい, cleavage)力に加わる場合の剥離強度とその破断プロセスを調べ、エポキシ含浸コイルの特性劣化[3]との関連を論じた。

2. 実験方法

空圧シリンダを用いた引っ張り試験装置の概略図を Fig.1 に示す。幅 4.1 mm の YBCO 線材 (SuperPower 社製, SCS4050, 77 K での I_c : 113 A) を銅基板と引っ張り治具で挟み込み、それらを Sn-3.8wt%Cu-1.0wt%Ag 半田(融点 217°C) で接合した。半田の接合面積は $4 \times 4 \text{ mm}^2$ である(YBCO 層が上面)。引っ張り治具は Fig.1 に示すような形状で、力点は線材中心から水平方向に 10.8 mm 離れている。この構成で引っ張り力を加えると線材端部に劈開力に加わる。これにより接合面の端部に応力集中が起こり、この部分から剥離が進展する。引っ張り力はロードセルを用いて、引っ張り用の棒の縦方向変位は変位計を用いて計測した。また、線材を設置する FRP 製の土台には AE センサを圧着し、破断の過程で発生する音響波を計測した。試験は液体窒素中で行い、(1)引っ張り力印加→(2)除荷→(3) I_c 測定の手順を線材の破断が起こるまで繰り返した。また、線材の破断面は SEM/EDS により観察・元素分析した。

3. 結果と考察

Fig.2(a)に引っ張り力-縦方向変位の関係を示す。3 回目の掃引(#3)では 7 N を超えたところ(点(A))から力-変位曲線の傾きが小さくなる。それと同期して AE 信号が顕著に現れ始める(Fig.2(b)参照)。さらに、除荷した後に I_c が 113 A から 100 A まで低下している(Fig.2(c)参照)。4 回目の掃引(#4)では点(B)において力-変位曲線が折れ曲がり、その後は引っ張り力がほぼ一定のまま変位が増加し続け、最後に点(C)で破断する。破断後の線材は超伝導特性を示さず I_c は 0 A となる(Fig.2(c)参照)。破断面を SEM で観察したところ、銅安定化材の破断は線材端部から約 0.4 mm の部分から始まっており、安定化材の破断面の境界はめくれ上がっていた。

以上の結果は次のように説明できる。まず点(A)において、線材端の内部において YBCO 層+バッファ層のハステロイからの剥離が先行して始まり、部分的な I_c 劣化が起こる。次に点(B)において銅安定化材が破断することで引きはがし現象(peeling)が始まり、点(C)において完全に剥離する。特性が劣化する点(B)における平均的な引っ張り応力(引っ張り力/半田接合面積)は $8 \text{ N} / 16 \text{ mm}^2 = 0.5 \text{ MPa}$ であり、均一な力を加えた場合の横引っ張り強度[1][2]の 1/100 である。すなわち、YBCO 線材は極めて劈開力に弱く、驚くほどわずかな劈開力で接合が破壊され剥離する。

前報では、エポキシ含浸コイルにおいては各ターンの中心面付近の径方向引っ張り応力で、コイル特性が劣化する可能性を述べた[4]。他の説明として、エポキシリッチな各ターンの上(下)端に、劈開力が加わりコイル特性の劣化が生じる可能性もある。これを確認するために有限要素法による応力解析で、定量的な比較検討を進めている。

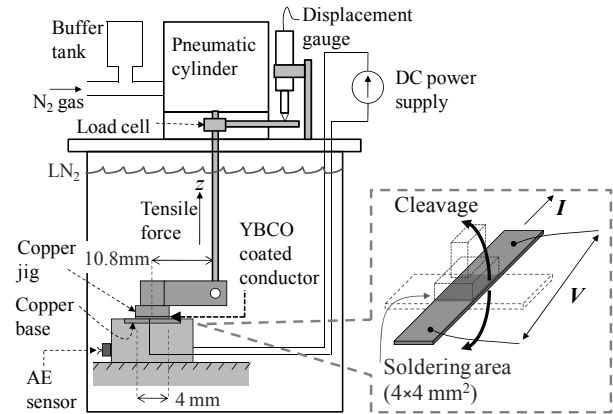


Fig. 1 Experimental apparatus for the cleavage test for a YBCO-coated conductor.

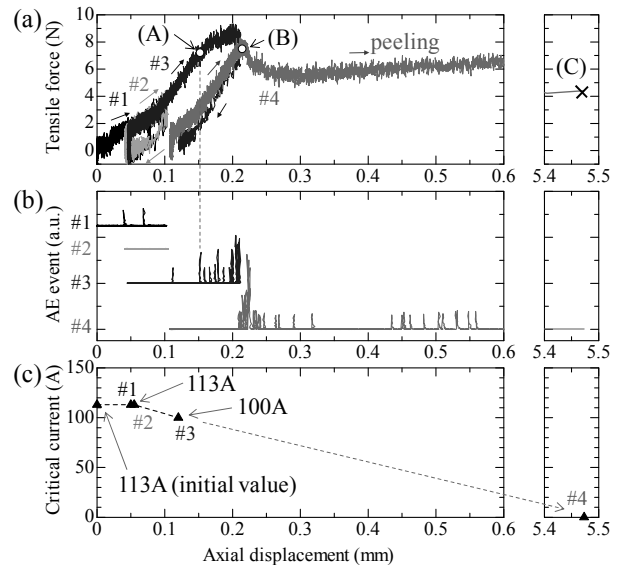


Fig. 2 (a) Tensile force vs. vertical displacement. (b) AE event signal vs. vertical displacement. (c) Critical current vs. vertical displacement.

4. まとめ

YBCO線材は劈開(へきかい, cleavage)力に対して顕著なぜい弱性を示す。線材が破断する引っ張り力は、均一な横引っ張りの場合と比べ2桁小さい。このぜい弱性がエポキシ含浸コイルにおける特性劣化を引き起こす原因の一つであると推察される。

本研究は(独)科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業・戦略的イノベーション創出推進による成果である。

参考文献

1. D.C. van der Laan, et al.: Supercond. Sci. Technol.20 (2007) 765.
2. Y. Xie, et al.: Applied Superconductivity Conference, Washington DC., USA, Aug. 2, 2010
3. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470 (2010) pp.674-677

磁気セイル用高温超電導コイルの通電特性と熱安定性

Current carrying capability and thermal stability of HTS coil for magnetic sail

中村 武恒, 福井 昌則, 嶋崎 光代, 雨宮 尚之 (京大); 船木 一幸 (JAXA); 山川 宏 (京大)

NAKAMURA Taketsune, FUKUI Masanori, SHIMAZAKI Mitsuyo, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

FUNAKI Ikkoh (JAXA); YAMAKAWA Hiroshi (Kyoto Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 船木・山川のグループは、超電導マグネットの作る強力なダイポール磁場と太陽風(プラズマ流)との相互作用を利用した宇宙探査用高効率推進機を提案し、精力的な検討を実施している[1]。本研究では、ダイポール磁場実現の一環として、高温超電導コイルの熱損失特性に着目して検討している[2]。本報告では、イットリウム系高温超電導コイルについて、その熱損失特性の検討現状を報告する。

2. 熱損失評価用小形コイルの試作と通電特性 本研究では、SuperPower社製のY系高温超電導テープ材(幅: 3 mm, 厚み: 0.1 mm, 長さ: 2.8 m, 臨界電流: 73 A@77 K)を使用して、熱損失評価用の高温超電導小形コイルを試作した。図 1 には試作した高温超電導コイルの外観写真を、また図 2 には 77 K における通電特性(シンボル)をそれぞれ示す。図 2 において、電圧(V)—電流(I)特性の測定結果から評価した臨界電流は 45 A 程度であった。さらに、予めコイル各部の磁界ベクトルを電磁界解析によってデータベース化し、かつ短尺試料から得た V - I 特性(磁界依存性)を適用して局所電圧を計算するとともに、それらを加算することによって得たコイル全体の通電特性を点線で示す。実験結果との比較から明らかなように、両者は大きく乖離している。そこで、線材長手方向のパラツキを想定し、標準偏差 $\sigma = 0.18$ として解析した結果(試行回数 100 回の期待値)を実線で示すが、実験結果と良く一致している。現在は、上記解析方法の妥当性を検討している。なお、実験結果では電流が 44.7 A のときに熱暴走を起こした。

3. 熱損失評価コードの開発 前記で得られた特性をもとに、コイルの熱損失特性を評価するため、まずヒータ発熱に伴う温度解析プログラムの開発を行った。図 3 には、第一ステップとして開発した、1次元解析モデルの模式図を示す。本解析では、特にイットリウム層や銀層の厚みが薄いため、同層の解析を精密に行うために時間刻みを非常に小さくしなければならない(3.0×10^{-16} s)。図 4 には、各層の熱物性値を考慮した解析結果の一例(境界条件: 右端は 77 K(温度固定条件), 左端は断熱条件)を示す。実験結果との比較他、詳細は講演当日に報告する。

謝辞 本研究における解析の一部について、京都大学生存圏研究所・山川研究室の小山友一氏にご協力頂いた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- [1] H. Yamakawa, I. Funaki et al.: Acta Astronautica, Vol.59, pp.777- 784 (2006)
 [2] 中村武恒, 船木一幸, 山川宏: 平成 22 年度春季低温工学・超電導学会、平成 22 年 5 月 12~14 日、川崎産業振興会館 (2010) 3C-a05



Fig. 1 Photograph of YBCO double-pancake coil.

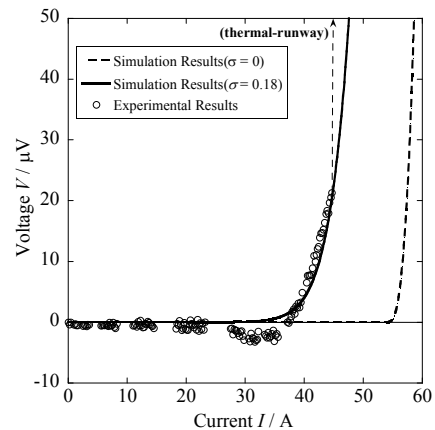


Fig. 2 Voltage (V) vs. current (I) curves of YBCO double-pancake coil at 77 K (symbols: experimental data, curves: analysis curves obtained from analysis model)

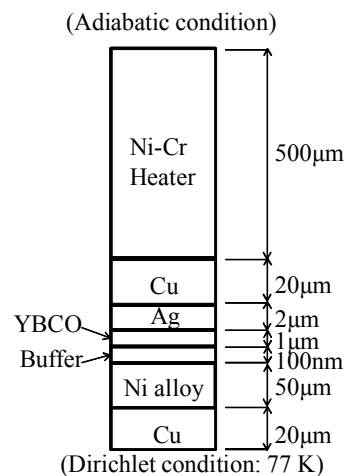


Fig. 3. Thermal analysis model.

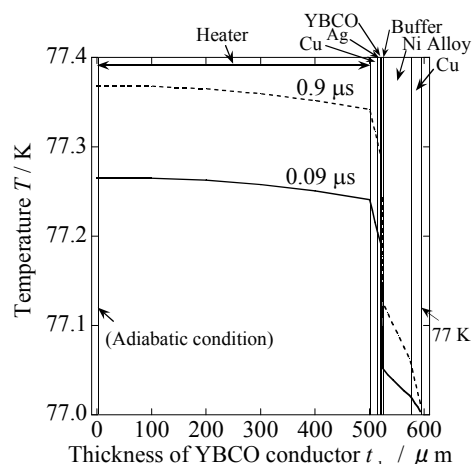


Fig. 4 An example of thermal analysis result at 77 K.

各種基板上 SmBCO 薄膜の微細構造と磁束ピンニング特性 Flux pinning properties and microstructure in SmBCO film on various substrate

吉田 隆、一野祐亮、高橋祐也、高橋駿介、高井吉明 (名古屋大学)、

吉積正晃、和泉輝郎、塩原 融 (ISTEC-SRL)、加藤 丈晴 (JFCC)

YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, TAKAHASHI Yuta, TAKAHASHI Shunsuke, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.),

YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL), KATO Takeharu (JFCC)

E-mail: yoshida@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物系超伝導線材の強磁場応用には、磁場中での高特性化が重要な課題である。我々は REBCO 材料の中で T_c が高く、高い不可逆磁場 B_{irr} が期待される SmBCO 系超伝導線材の作製技術の向上を図ってきた。単結晶基板上における微細組織と磁束ピンニング特性の関係を踏まえて、最近では IBAD-MgO テープ上での高性能 SmBCO 線材の作製やナノロッド状の BaZrO₃ および BaSnO₃ 人工ピンの導入などの検討を行ってきた。

本報告では、SmBCO 線材および 1wt% Y₂O₃ 添加 SmBCO 線材 (SmYBCO) の微細構造と磁束ピンニング特性を比較することより、磁場中高特性 REBCO 線材の指針を得ることを目的とした。

2. 実験方法

SmBCO 線材および SmYBCO 線材は、PLD 法 (KrF エキシマレーザ) を用いて、CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/Hastelloy 基板上に作製した SmBCO 層の全膜厚を 400 nm~500nm とした。作製した薄膜は、透過型電子顕微鏡 (TEM) により断面微細構造を観察した。超伝導特性は直流四端子法を用い、磁場 (B)=0~7T で測定を行なった。 J_c の磁場印加角度依存性の測定は、基板面法線に対する磁場印加角度 θ を $\theta=-7^\circ\sim 127^\circ$ で変化させて測定を行なった。

3. 結果及び考察

図1に IBAD-MgO 及上の SmBCO 線材および SmYBCO 線材の J_c の磁場印加角度依存性を示す。 $B=1T$ および $3T$ における J_c は SmYBCO 線材の方が高い特性を有していることが確認された。一般的に角度依存性は図中の SmBCO 線材のように $B//ab$ 方向におよび $B//c$ を境に対称的な挙動を示す。しかし、 $B=1T$ における SmYBCO 線材は $B//ab$ において対称的な挙動を示していないことが確認される。

図2に SmYBCO 線材の断面 TEM 観察結果を示す。テープ面に対して 20° 程度傾いた方向に析出物が 30-50nm 程度の間隔に多層構造を有していることが確認された。また、TEM-EDX 分析から、Y 組成は膜に均一に分散していることが確認された。一方析出物の場所は Sm 組成が過剰に存在していることが確認された。現在、単結晶基板の RE₂O₃ 導入 SmBCO 薄膜の作製を行っており、当日はこれらの結果を比較して議論する予定である。

4. 謝辞

本研究の一部は、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するとともに、科学研究費補助金 (19676005) の助成を受けて実施されたものである。

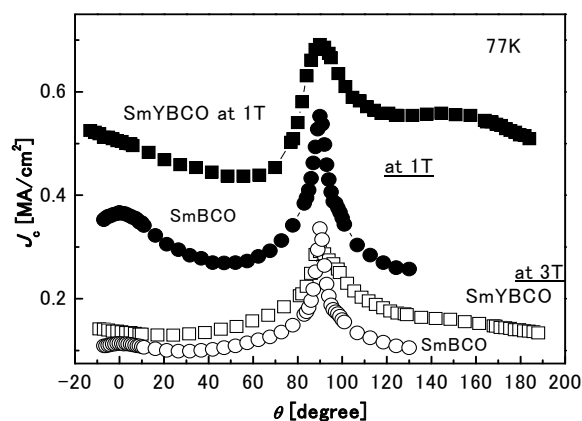


Fig.1 Magnetic field angular dependence of J_c in LTG-SmBCO and SmYBCO on IBAD-MgO.

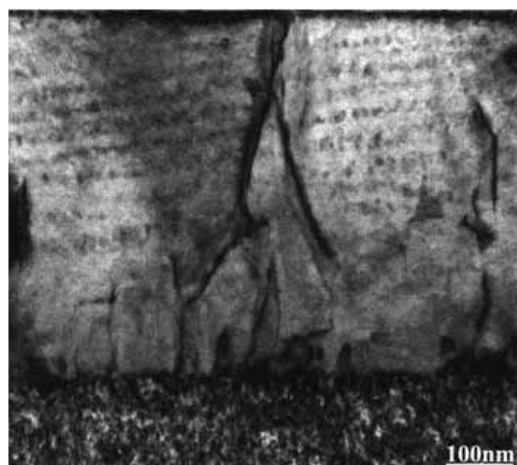


Fig.2 TEM image of SmYBCO on IBAD-MgO.

Synthesis and characterization of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ thin films incorporating length-controlled nanorods

メレパオロ, 松本 要, 本田 泰崇, 田中 敢(九工大), 一瀬 中 (電中研), 吉田 隆, 一野 祐亮 (名大), 向田 昌志 (九大), 喜多 隆介 (静岡大)

MELE Paolo, MATSUMOTO Kaname, HONDA Yasutaka, TANAKA Isamu (Kyushu Institute of Technology), ICHINOSE Ataru (CRIEPI), YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke (Nagoya University), MUKAIDA Masashi (Kyushu University), KITA Ryusuke (Shizuoka University)

E-mail: pmele@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. Introduction

In $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) films incorporating one-dimensional artificial pinning centers (APCs) such as BaZrO_3 (BZO) [1], or BaSnO_3 (BSO) [2] nanorods, critical current J_c decreases significantly when the magnetic field is inclined from the c -axis of the epitaxial YBCO films; in contrast, J_c of films added with three-dimensional APCs such as Y_2O_3 nanoparticles is hardly changed [3]. The main desired features of J_c for applications of coated conductors (e.g. the binding to build magnets) are isotropy and high values in magnetic field. Y_2O_3 random pinning appeared interesting especially because in-field J_c of YBCO+ Y_2O_3 films at low temperatures (40K~60K range) is higher than the J_c of YBCO-BZO films and T_c is almost undepressed by Y_2O_3 insertion. However, the distribution of yttria nanoparticles and their crystalline orientation into YBCO film is quite difficult to control. On the other hand, the distribution of BZO or BSO nanorods is easy to control, but presents the great limitation of strong anisotropy. We will discuss the control of nanorod length as the powerful tool to deepen understanding of flux pinning by APCs.

2. Experimental procedures

Pure YBCO films and mixed YBCO + BSO films were grown for reference by pulsed-laser deposition (PLD) on the SrTiO_3 (STO) single crystals. The PLD conditions were: $E = 310$ mJ/pulse, $T = 860$ °C, $p\text{O}_2 = 200$ mTorr. Several multilayered films alternating pure YBCO and YBCO+BSO layers with different thicknesses were prepared on STO substrates by PLD using the same experimental conditions, by alternating ablation of a pure YBCO target and YBCO + 4wt% BSO mixed target. The total thickness of all the films was kept to 300 nm. The crystallinity and the orientations of the films and c axis length were determined by XRD. The superconducting transition temperature (T_c), the J_c/B characteristics ($T=77$ K, $B//c$, $B=0-9$ T) and the $J_c/B/\theta$ angular dependences ($T=77$ K, $B = 1$ T) were measured by PPMS. Cross-sections of films were analyzed by transmission electron microscopy (TEM).

3. Results and discussion

Several multilayered films were prepared: YBCO layer length/YBCO+BSO layer length ratios were 15/60, 30/60, 30/90, 30/30 and 60/60 (lengths in nm). Segmented BSO nanorods regularly inserted inside the YBCO matrix were observed in the cross-sectional TEM images. Fig. 1 shows typical aspect of a multilayered film (ratio 15/60). All the films were grown on STO substrate epitaxially and shown $00l$ peaks. Self-field J_c values were high for all the samples (2~3 MA/cm²), while the in-field J_c was extremely high (about 0.26 MA/cm² at $B=5$ T, $B//c$) for two samples only.

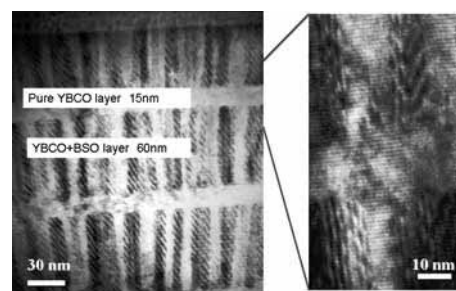


Fig. 1. (left) TEM cross-sectional image of YBCO (1 layer thickness = 15 nm) / YBCO+ BSO (1 layer thickness = 60nm) multilayered film; (right) high-magnification of the same film

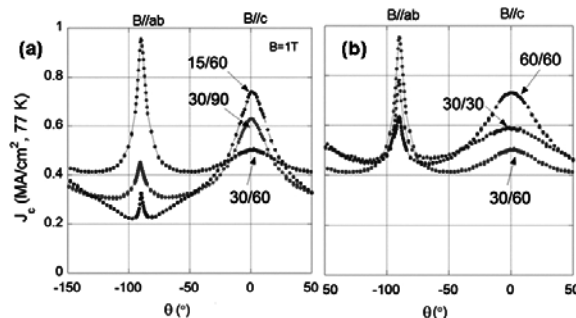


Fig. 2. Plots of the angular dependence of J_c (77K, 1T) for YBCO/YBCO+BSO multilayered films. The thicknesses of multilayers (nm) are indicated in the figure.

These samples presented shorten ratios between YBCO layer thickness and YBCO+BSO layer thickness: 0.25 and 0.33, respectively. According to J_c/θ dependencies (Fig. 2a) these samples were characterized by anisotropic pinning behaviour, with $J_c(B//c) > J_c(B//ab)$. The samples which ratio is 1 presented an opposite behaviour with $J_c(B//ab) > J_c(B//c)$ (Fig. 2b). The sample which ratio is 0.5 had an intermediate behaviour (Fig 2a, b). These behaviors depend on the different mechanism of vortex depinning from APCs [4]. The anisotropic pinning behavior can be explained by the energy change of staircase vortex. In the case of nanorods, a staircase state of the vortex line comes to stabilize in energy as the direction of the magnetic field is tilted from the direction of nanorod; however, the angular dependence of the pinning energy of nanoparticle is more gradual than that of nanorod.

References

- [1] P. Mele et al., *Supercond. Sci. Technol.* 20 (2007) 244
- [2] P. Mele et al., *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 032002
- [3] P. Mele et al., *Supercond. Sci. Technol.* 20 (2007) 616
- [4] G. Blatter et al., *Rev. Mod. Phys.* 66 (1994) 1125

人工ピンを導入した PLD-Gd123 コート線材における低温 J_c 特性

J_c property of PLD-Gd123 coated conductors with APC at low temperature

鈴木 匠, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大金研); 吉積正晃, 衣斐 顕, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)
 SUZUKI Takumi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo(IMR, Tohoku Univ.);
 YOSHIKAZUMI Masateru, IBI Akira, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(SRL)
 E-mail: takumi-s@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

希土類高温酸化物超伝導体($REBa_2Cu_3O_y$ (RE123, RE は Y を含む希土類元素))のテープ線材は強磁場中で高い臨界電流密度特性を示すことや、機械特性に優れた基板を用いていることなどから、低温強磁場応用への適用も期待されている。本研究では、人工ピンとしてBaZrO₃ ナノロッドを導入した長尺Gd123 テープ線材における低温での人工ピンとしてのナノロッドの効果について議論する。

2. 試料緒元および実験方法

試料線材の緒元をTable 1 に示す。PLD(Pulse Laser Deposition)法によって作製したGd123 テープ線材であり、基板はIBAD(Ion-Beam Assisted Deposition)法により作製されたMgO パッファ層を持つHastelloy基板である。また、最表面には保護層として10 μ mのAgを用いた。この試料に対して、フォトリソグラフィおよびウェットエッチング技術を用いて、幅 約100 μ m、長さ 約1 mmのブリッジ形状に加工した。

測定は四端子法を用いて臨界電流密度を通電法にて測定した。試料温度は、ヘリウムガスフローと試料ホルダー上のヒーターにより、精密にコントロールし、臨界電流決定の電界基準は1 μ V/cm とした。

3. 実験結果と考察

Fig.1に人工ピンとしてBaZrO₃(BZO)を導入したPLD-Gd123 コート線材の40 Kにおける臨界電流密度 J_c の磁場印加角度依存性を示す。低磁場では $\theta = 0^\circ$ ($B//c$)で c 軸相関ピンに起因したピークが存在するが、高磁場では確認できなかった。この振る舞いは液体窒素温度等の高温での振る舞いと定性的に一致している。さらに低温では低磁場のピークも消失する。Fig.2に J_c の磁場依存性を示す。ナノロッド導入によって、 $B \perp c$ で J_c が減少しているが、 $B//c$ の低磁場において J_c がほぼ等しくなる。また、ナノロッド導入試料では J_c の磁場依存性が大きくなる傾向が見られた。

Fig.3 に、 J_c の異方性 J_c^{ab}/J_c^c の温度依存性を示す。 J_c^{ab}/J_c^c は温度の減少と共に一旦急激に減少し最小となった後、さらに低温では増加する。ナノロッドの導入により、 J_c の異方性が低温でも減少していることが分かる。これらの結果から低温高磁場ではナノロッドがブロードに効いていると考える。当日はさらに低温での人工ピンの効果について議論する予定である。

4. 謝辞

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。

Table 1 Specification of Gd123 coated conductor with APC

	Material	Thickness
Stabilizer	Ag	10 μ m
Superconducting layer	PLD-Gd123	1.2 μ m
Buffer	CeO ₂	0.5 μ m
	LaMnO ₃	19 nm
	IBAD-MgO	4.0 nm
	Gd-Zr-O	110 nm
Substrate	Hastelloy	100 μ m

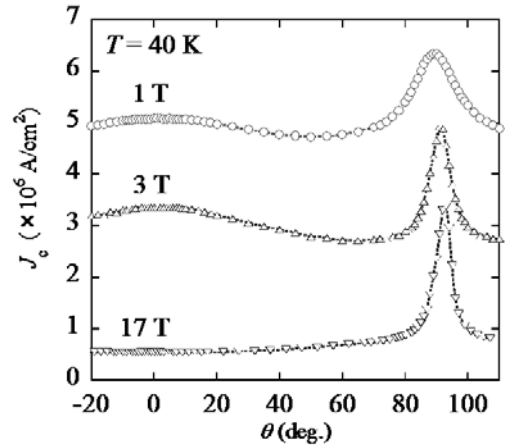


Fig.1 Magnetic field angle dependence of J_c in a PLD-Gd123 coated conductors with APC at 40.0 K.

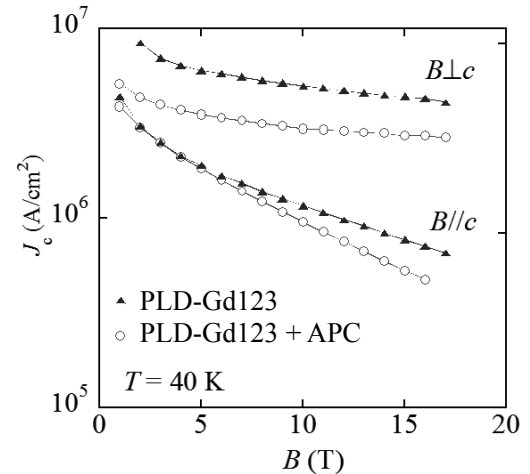


Fig.2 Magnetic field dependence of J_c at 40 K for $B//c$ and $B \perp c$.

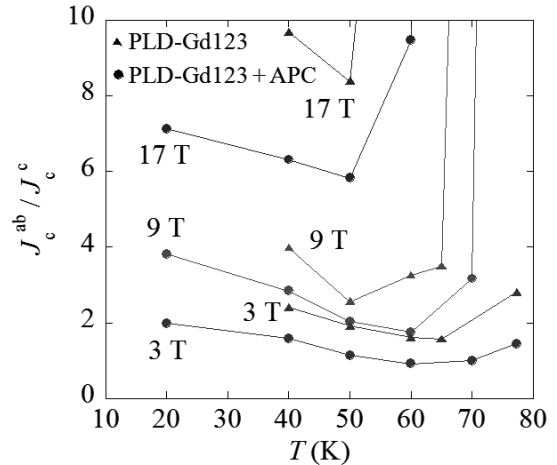


Fig.3 Temperature dependence of the J_c anisotropy, J_c^{ab}/J_c^c , at 3 T, 9 T and 17 T.

市販 MOCVD-(RE)BCO テープの J_c の幅広い温度領域での磁界角度依存性と磁束ピン止め

Magnetic-field angle dependent J_c and flux pinning in commercial MOCVD-(RE)BCO tapes in a wide temperature range

山崎 裕文(産総研); 李 潤錫(前川); 古瀬 充穂(産総研)

YAMASAKI Hirofumi (AIST); LEE Yoonseok (Mayekawa); FURUSE Mitsuho (AIST)

E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

1. はじめに

我々は、これまでに市販の YBCO 薄膜 (THEVA 社製共蒸着法薄膜)、テープ線材の液体窒素温度での磁界角度依存性 $J_c(H, \theta)$ を誘導法で測定し、 $H // ab$ のまわりの富士山型の J_c ピークや、それよりも鋭い山型のピークを観測してきた [1, 2]。ごく最近、山崎らは、高 J_c のフッ素フリー (FF) MOD 薄膜では、積層欠陥と YBCO マトリクスとの界面に生成する転位 (ab 平面内の線状ピン) が主要ピンであり、それと磁束との交点が小さなランダムピンのようにふるまうことを示した [3]。今回、SuperPower 社製の市販テープの $J_c(H, \theta)$ を 20–80 K の幅広い温度範囲で通電法によって測定した。MOCVD-YBCO テープは磁界角度依存性とその温度変化が FF-MOD 薄膜とよく似た挙動を示すことから、 ab 平面に平行な線状ピン (転位) の寄与が大きいことを推定した。

2. MOCVD-YBCO テープの J_c の磁界角度依存性

SuperPower 社製 MOCVD-YBCO テープの磁界角度依存性 $J_c(H, \theta)$ を通電法で測定した所、 $H // ab$ を中心とした山型の J_c ピークを示した (図1a)。このような $J_c(\theta)$ は小さなランダムピン (半径がコヒーレンス長 ξ 以下の点状欠陥) が主体となる場合に多く見られ、そのみによるときは、 $\epsilon(\theta) = (\cos^2\theta + \sin^2\theta/\gamma^2)^{1/2}$ を用いて、 $J_c(H, \theta) = J_c(\epsilon H)$ と、 ϵH のみの関数となる [1]。図1aの $J_c(H, \theta)$ について J_c を ϵH に対してプロットすると、各磁界で計算された $J_c(\epsilon H)$ 曲線のうち、ランダムピン主体の $6^\circ \leq |\theta - 90^\circ| \leq 15^\circ$ の部分は、なめらかにつながるのと同時に、 $H // ab$ でスケール曲線からはずれた (図1b)。この挙動は FF-MOD 膜と同様であり [3]、 $J_c(\theta)$ が主に小さなランダムピンと ab 平面相関ピンの両者によることから、FF-MOD 膜同様、積層欠陥周辺部の転位 (線状ピン) が主要ピンであることが示唆された。ただ、 $J_c \sim (\epsilon H)^\alpha$ の $\alpha \approx 0.7$ であって、77–80 K の場合の $\alpha \approx 1$ より小さいことから、転位以外にナノ析出物ピンの寄与があることも指摘された [4]。

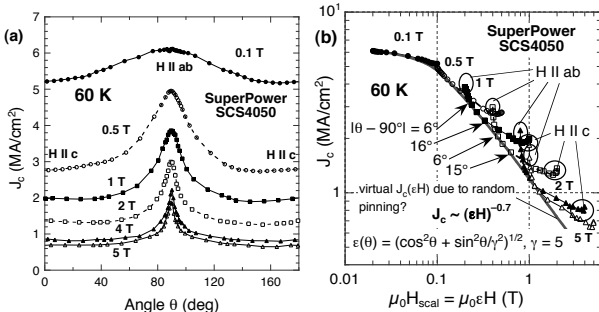


Fig. 1 (a) Magnetic-field angle dependence of J_c in SuperPower tape at 60 K. (b) The scaling analyses of small random pins.

同じテープの $J_c(H, \theta)$ をさらに温度を下げて測定したところ、 $H // ab$ のピークが 60 K 以上と比べて非常に鋭くなった。40 K における結果を図 2a に示すが、 $H // ab$ では 1 T から 5 T まで磁界による J_c の低下が非常に少ないことがわかる。これは、 $\xi \sim 1/(1 - T/T_c)^{-1/2}$ の温度依存性で 40 K の $\xi_c \approx$

0.35 nm と短くなり、YBCO の c 軸長 (1.17 nm) より充分短くなって層状構造に起因するイントリンシックピンニングが有効になったからである [5]。図 2b に人工ピン入りの Zr ドープ YGdBCO テープの 40 K における $J_c(H, \theta)$ を示すが、Zr ナノロッドやナノ粒子の効果で、 c 軸方向の J_c が改善した。

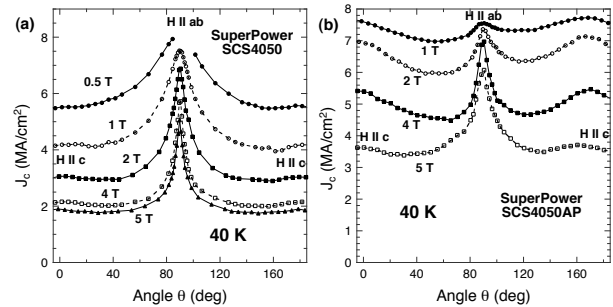


Fig. 2 (a) $J_c(H, \theta)$ of the SuperPower tape at 40 K. (b) $J_c(H, \theta)$ of SuperPower YGdBCO tape with artificial pinning centers.

2. 転位ピンによる J_c の温度依存性

積層欠陥 ($// ab$) 周辺部の転位は線状ピン (直径 a とする) となり、その要素的ピン止め力が $f_p = \mu_0 H_c^2 \pi a^2 \xi_{ab} / 4 \xi = \mu_0 H_c^2 \pi a^2 / 4 \epsilon(\theta)$ と計算されている [3]。強いピンに対して成立する直接和を仮定すると $J_c(T) \sim H_c(T)^2 \sim \{1 - (T/T_c)^2\}^2 \sim (1 - T/T_c)^2 (1 + T/T_c)^2$ となるが、小さなランダムピン主体の $|\theta - 90^\circ| = 20^\circ$ の J_c について成立した (図 3)。MOCVD-YBCO テープでも転位ピンが重要であることを示す結果である。

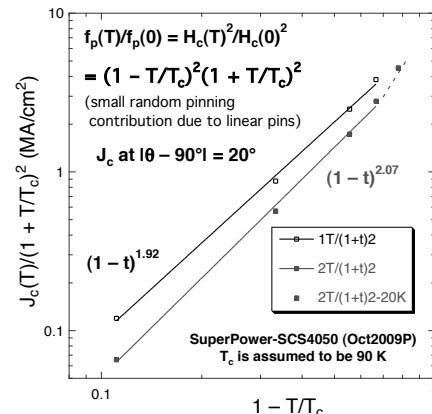


Fig. 3 T dependence of $J_c(\theta = 70^\circ \text{ \& } 110^\circ)$ in the YBCO tape.

参考文献

1. H. Yamasaki, K. Ohki, H. Yamada, N. Nakagawa and Y. Mawatari: Supercond. Sci. Tech., Vol. 21 (2008) p. 125011
2. Y. Lee, H. Yamasaki and M. Furuse: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 44 (2009) p. 558
3. H. Yamasaki et al.: Supercond. Sci. Tech., Vol. 23 (2010) p. 105004
4. Y. Lee, H. Yamasaki and M. Furuse: presented at ISS2010.
5. Awaji et al.: Cryogenics, Vol. 39 (1999) p. 569