

## 超伝導ケーブルの新しい布設方法 - ヘリカル変形法

## A new laying method of Superconducting power cable - Helically Laying Method

山口 作太郎, 岩田 暢祐, 岩之府 ユーリ, 筑本 知子, 井上 徳之(中部大); 林 和彦(住友電工)  
 YAMAGUCHI Sataro, IWATA Yosuke, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, INOUE Tokuyuki (Chubu Univ.);  
 HAYASHI Kazuhiko (SEI)  
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導ケーブルは製造及び布設などの関連建設工事を常温で行うが、最終的には液体窒素温度まで冷却して利用する。すると長さがほぼ 0.3%の熱収縮によって縮むことが実験的に知られている。この収縮率は小さくなく、銅では塑性変形が始まる領域でもある。そして、長さが 10kmケーブルでは 30m 縮むため、熱収縮長は無視できない長さである。つまり、熱収縮対策を取らないと最悪ケーブル破断につながる懸念される。また、超伝導テープ線材に大きな応力が印加されると臨界電流が低下[1]することも知られている。このため、中部大学は 200mケーブル実験装置では端末クライオスタットを移動式[2]にすることによって熱応力低減を行って来たが、この方法では数 km 以上のケーブルでは、移動距離が長くなることや、ケーブルと断熱 2 重管の摩擦に依ってケーブル全体に渡り十分な熱応力緩和が困難であると想定されるため、新しい方法が求められていた。

本講演では、新しい方法であるヘリカル変形法について、中部大の 200m ケーブル実験装置、JST A-STEP での研究開発及び石狩プロジェクトでの回線 1, 回線 2 での結果などを紹介し、ヘリカル変形法の有用性について述べる。

## 2. ケーブルの布設方法

Fig. 1 を用いてケーブルをヘリカル変形する方法及び低温に保持したときのケーブルについて説明する。最初に常温でケーブルを断熱 2 重管内に引き込む。Fig. 1 上はその状況を示し、ケーブルは直線状になっている。そして、ケーブル内部には引張り応力が残留している。次に、ケーブルの一端を固定し、もう一方は自由端にしてから液体窒素温度まで冷却する。すると、冷却に依ってケーブルは熱収縮するので、自由端からケーブルは断熱 2 重管内に引き込まれる。次に、ケーブルの両端を固定し、昇温を行う。すると、ケーブル長は長くなるので、配管内でヘリカル変形を行う。これは中部大学 200m ケーブル実験装置で X 線撮影によって最初に確認された。Fig. 1 中はヘリカル変形した状態を示している。尚、昇温時にはケーブル両端のロードセルによってケーブルに働く力をモニターした。そして、最終的にケーブルシステムとして完成後、ケーブルを冷却すると、ケーブルは熱収縮によって、直線状になる。Fig. 1 下はその状態を示している。以上のプロセ

スではケーブルにロードセルを取り付け、ケーブル端部に発生する力を常にモニターし、安全を確認しながら行うことにした。

Table 1 は石狩 PJ でのケーブルの種類、ケーブル長、冷却時の引込長を示している。熱収縮によって 1m を越す長さが引き込まれているが、摩擦のため 0.3%の熱収縮率に対応する長さよりは短くなっている。このため、ケーブル内部には小さい残留応力があると思われる。

Table 1 Cables, their length and thermal expansion

	Length [m]	Thermal contraction length [m]
Cable 1 (回線 1)	200	0.52
Cable 2 (回線 1)	300	0.76
Cable 3 (回線 2)	469	1.33
Cable 4 (回線 2)	373	1.13

## 3. 現時点でのまとめ

石狩 PJ 回線 1 では 0.3%に対応する熱収縮の全てをヘリカル変形法で吸収しなく 0.25%程度とし、部分的には端末クライオスタットを移動することで対応した。一方、回線 2 では 0.3%の熱収縮を全てヘリカル変形法で吸収するように作業を行った。しかし、条件によっては端末クライオスタットを移動することが必要になったりした。同時に各種追加実験も可能になった。尚、この実験は摩擦を伴うので実験条件が同じであっても実験データにはある程度のバラツキが必然的に発生するが、端末クライオスタットとケーブルの間にはロードセルを入れて、常時ケーブルに働く力をモニターし、許容応力以下に制御している。

## 参考文献

1. M. Sugano, et al.: Supercond. Sci. Tech., Vol. 23 (2010) 085013
2. S. Yamaguchi, et al.: *Physica C*, Vol. 471 (2011) p.1300.

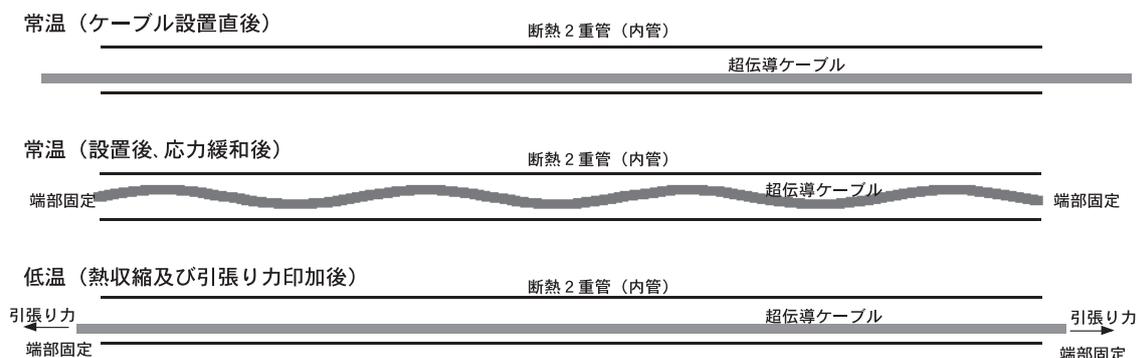


Fig.1 Process of Helically Deformed Cable

## 長距離・超伝導ケーブルのための新しい断熱 2 重管の提案

### A structure of cryogenic pipe for a long superconducting transmission line

山口 作太郎, VYATKIN Vladimir, 岩之府 ユーリ, 渡邊裕文, 筑本 知子, 井上 徳之, 高野廣久 (中部大)  
 YAMAGUCHI Sataro, VYATKIN Vladimir, IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, INOUE Tokuyuki,  
 TAKANO Hirohisa (Chubu Univ.)  
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

#### 1. はじめに

超伝導ケーブルの開発目的の一つに銅ケーブルに比べて損失が少なく、長距離送電が可能になることが上げられる。このため、冷凍機負荷及び冷媒循環のためのポンプ負荷を下げる必要があり、重要な課題として断熱 2 重管の熱侵入量と流体損の低減がある。このため、中部大学では 2006 年から実験を始めた 20m ケーブル実験装置と並行に断熱 2 重管の熱侵入量を精密測定するために Test Bench を同時に建設し、数々の実験[1]を行ってきた。また、流体損を低減するために送電用に多用されているコルゲート管ではなく、直管を用いた。このため、建設方法等も他の超伝導ケーブルとは大きく異なっている。そして、当初の熱侵入量の目標値は 1W/m であった。これは 10,000km ほどの距離を現状の銅ケーブルやアルミ架空線の 1000km の損失程度で送電することを目標にして決めた。その後、200m ケーブル実験装置を建設し、6 回ほどの実験を通じて最終的に熱侵入量は 1.4W/m となった[2]。但し、これは冷媒が一方に流れている時の値であり、冷媒循環にはもう一つ低温配管を導入する必要があるため、目標値の 2 倍以上の値であると考えていた。更に、冷媒温度の上昇によって超伝導ケーブルの臨界電流が低下するため、送電システムの経済性が悪化する。このため、可能な限り臨界電流の低下を避ける方策が重要となる。

本稿では石狩 PJ で試みた新しい方策[3]について述べると同時にその実験結果及び将来展望について議論を行う。

#### 2. 新しい試み 輻射シールド付き断熱 2 重管ほか

Fig. 1 に石狩 PJ で用いた 2 つの断熱 2 重管構造を示す。外管は真空容器であり、安価にするために鉄管を利用した。また、防蝕・防錆のためポリエチレン・ライニングを行っている。また、断熱真空容器として利用するために表面に亜鉛メッキを施した。内管は 2 本のステンレスから成り、ケーブルを収納しているケーブル管と冷媒循環のためのリターン管である。そして、新しい多層断熱材(MLI)を用いた。2 つの断熱 2 重管構造の違いは一方に輻射シールドがあることである。Fig. 1 左には、リターン管にアルミ製のカバーが取り付けられており、これがケーブル管を覆うように配置している。そして、その表面に新型 MLI が巻いてある。これによって、外管からの熱放射が直接ケーブル管には入らなく、輻射シールド部で吸収される。更に、支持構造材からの伝導熱もリターン管に入るような構造をして

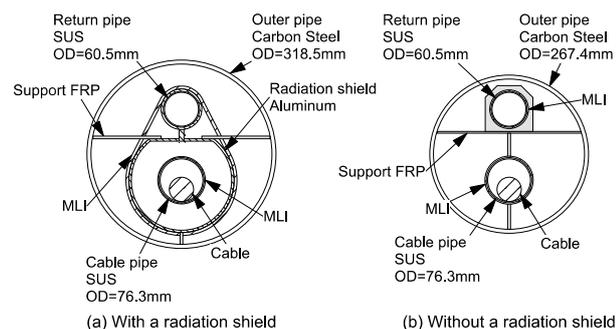


Fig.1 Process of Helically Deformed Cable

いる。これによって、低温系に入る全熱侵入量は 2 つの構造ではそれほど違わなくても(低温配管は完全に同じあり、MLI の面積はほぼ同じ)、ケーブル管の温度上昇は著しく抑えられ、超伝導ケーブルの臨界電流の低下は大きく抑制される。

#### 3. 実験結果と今後の展望

Table 1 に石狩 PJ (回線 2) での断熱 2 重管の熱侵入量と温度上昇を示す。輻射シールドがない断熱 2 重管での往復熱侵入量は 1.27W/m ほどになり、中部大の 200m ケーブル実験装置の半分以下になった。また、輻射シールドを付けた断熱 2 重管では、熱侵入量が 0.89W/m となり、当初の目標値を越した。このため、超伝導ケーブルを納めているケーブル管の温度上昇は極めて低く、流量が 30L/min で 10km あたり 0.40K となった。そして、更にデータ解析などから熱侵入量が下がる可能性があり、往復で 0.5W/m が次の目標値になろう。この値は MLI のカタログ値(常温と液体窒素温度の間の熱伝達率 1W/m<sup>2</sup>)からも推測できる値である。

Table 1 Heat Leaks & Temp. Raise of Two Cryogenic Pipes

	Pipe	Heat Leak [W/m]	Temp. raise [K/km]@30L/min
Cryogenic pipe1	cable	0.818	0.928
	return	0.462	0.525
Cryogenic pipe2 with RS	cable	0.034	0.04
	return	0.851	0.96

この表から、輻射シールド付きの断熱 2 重管で長さ 10km の超伝導ケーブルを作った場合には、ケーブル管の温度上昇は 0.34K であり、冷媒入口側と出口側で超伝導ケーブルの臨界電流は現在の数百 m のケーブル実験装置と同等である。そして、冷媒全体の温度上昇は 10K 以下になる。そして、流体損としての圧力差は cable 管と return 管を合わせて 0.3MPa@30L/min 以下になる。また、冷凍機は 10kW 以下でよく、今後の詳細検討は必要であるが、10km の送電線が建設可能なレベルに到達したと考えられる。

更に、断熱 2 重管の熱侵入量が大きく減少し、特にケーブル管の温度上昇は極めて低いため、各種の基礎的なデータ取得が可能になろう。例えば、交流損を高精度で測定が可能になろう。本研究は、経済産業省・石狩 PJ、及び文部科学省・私立大学研究基盤形成事業から援助を受けて実施した。中部大、技術開発組のメンバーに感謝を表す。

#### 参考文献

1. M. Hamabe, et al.: *Adv. in Cryogenic Eng.* Vol. 53 (2008) p. 168
2. H. Watanabe, et al.: EUCAS-15\_1A-LS-P-04.04
3. S. Yamaguchi, et al.: *IEEE Transactions on Applied Supercond.*, Vol. 25 (2015): p. 1

# 高温超電導開発のロードマップ(国際エネルギー機関高温超電導委員会調査) HTS Road Map of IEA-HTS-TCP (Technology Collaborative Program)

山田 穰 (芝浦工大); マルチオーネニ ブライアン (Energetics 社, USA);  
マルチーニ ルチアーノ (RSE, Italy); 大崎 博之(東大)

YAMADA Yutaka (Shibaura Institute of Technology); MARCHIONINI Brian (Energetics Incorporated, USA);  
MARTINI Luciano (RSE, Italy); OHSAKI Hiroyuki (Tokyo University)  
E-mail: yamadayu@sic.shibaura-it.ac.jp or yutakayamada@gmail.com

1. はじめに IEA(国際エネルギー機関 本部パリ)の高温超電導委員会(IEA-HTS-TCP)において、世界各国の識者にアンケートを行い、高温超電導線材、冷却、各種電力応用について、将来見通しの調査(2015-2030)を行った。特に、世界で15社以上ある線材会社の内、すでに 5 社以上が年産1000km の製造能力を持ち、YBCO 線では、その販売値段を10ドル/kAm 程度にし、商用化を目指していることが分かった。機器応用では、欧州米国で盛んなケーブル、限流器で2025-30 年には商用化する意向が分かった。この調査の概要を報告する。

2. 調査方法 調査対象は、超電導電力機器(ケーブル、限流器、SMES、発電機、変圧器)およびその基盤技術である線材、冷凍機(冷却系)とした。これらについて、実用化の見通し時期、必要な技術課題、販売台数を、線材、冷凍機については、その際の目標値段、数量も問うた。

日米欧韓中国ロシアなど世界各国の主要機関の技術開発者、プロジェクトリーダー、識者100人以上にアンケート調査を行った(2014年夏~2015年3月)。また、日本国内では主要機関にも出向きヒアリングをした。米国でも電話、メールなどで詳細を聞いた。

3. 結果 ここでは、特に、線材とケーブルの結果を紹介する(その他は、発表で触れる)が、最も実用化に近いとの結果が得られたのは、ケーブル、限流器であった。いずれも、欧州、米国で活発にデモンストレーションが行われている。

表1は、線材各社からの実用化に際しての線材値段の目標である。回答の多くが、10ドル/kAm 近くを2030年に目標としているのがわかる。ただし、MgB<sub>2</sub>はすでにその価格帯にあり、2020年には5ドル/kAm を目指すとしている。これは、臨界温度や臨界磁場特性が低いため、できるだけ値段を下げて早期にNbTi への競争力をつけるためであろう。表2はその際の線材の供給量である。Bi2223 や MgB<sub>2</sub> はもちろん Y 系線材でも数社はすでに年間1000km の供給が可能である。

他方、表3、4は電力あるいはケーブル会社からの回答で、超電導ケーブルへの実用化時期と線材値段への要望である。ケーブルの実用化に関しては、高圧、低圧、いずれも2025~2030年を目途とするものが多かった。このためには線材の低コスト化が必須である(表4)。目標としては2030年に5-25ドル/kAm の値段域としており、表1の線材側からの目標に近い値が要求されている。

4. まとめ 昨年夏、韓国電力(KEPCO)は HTS ケーブルの商用化を決めたとの報告があった。これにより、世界初の商用ケーブルをソウル近郊に敷設する計画も進んでいる。上記結果もよりも早く商用化は進んで行きそうである。

### 謝辞

本調査は、世界9か国からなるIEA-HTS-TCP(国際エネルギー機関高温超電導委員会)の活動としてなされたものであり、各委員、また、アンケート回答に協力していただいた日米欧韓中日の関係者にお礼申し上げる。

Table 1 Wire price perspective from the wire company.

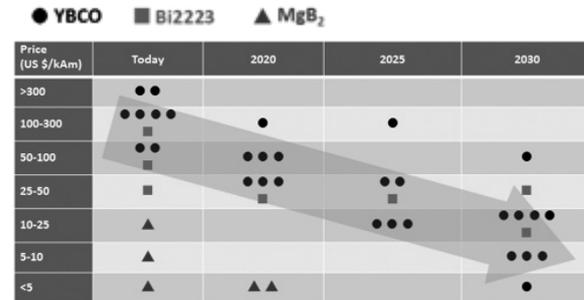


Table 2 Wire capacity perspective from the wire company.

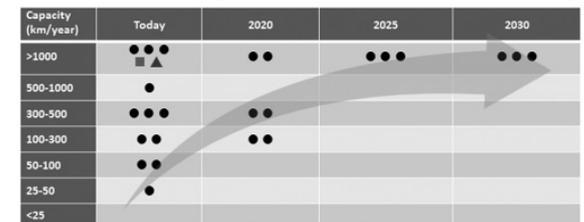


Table 3 HTS cable perspective from the power and cable companies.

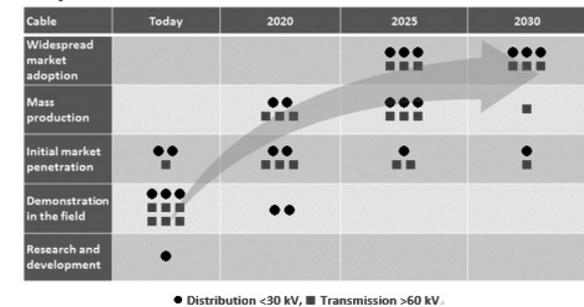
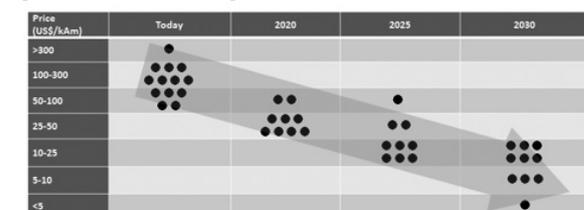


Table 4 HTS cable requirement for the wire price from the power and cable companies.



### 参考文献

1. "HTS Road Map for Power Application 2015-2030" by IEA-HTS-TCP.

# 66kV 級超電導ケーブルシステムの短絡電流事故特性(1) -40m ケーブルシステム試験-

## A Short Circuit Current Test through a 40m HTS Cable

森村 俊也, 南野忠彦, 大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 中野 哲太郎, 丸山 修, 三村 智男(東京電力ホールディングス)  
 MORIMURA Toshiya, MINAMINO Tadahiko, OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);  
 NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)  
 E-mail: morimura-toshiya@sei.co.jp

### 1. はじめに

超電導ケーブルの実系統適用では、超電導ケーブルに短絡電流が流れることが考えられる。66kV 系統では最大 31.5kA-2 秒の短絡電流が流れる可能性があり、LN<sub>2</sub> の沸騰などが想定される。このような急激な現象は、冷却システムの停止や過度な内圧上昇を引き起こす可能性があるため、短絡電流事故時の安定性・安全性の評価は必須である。本件では、数十 m 級のケーブルシステムにおける短絡電流通電時の LN<sub>2</sub> の液温や圧力の変化を解析コード[1]にフィードバックし、長尺システムにおける短絡電流事故時の現象を解析により予測し、安全性を議論する方針で検討を進めている。今回、40m 級の 66kV 級超電導ケーブルシステムを構築して短絡電流試験を実施したので、その結果を報告する。

### 2. 超電導ケーブルシステムの短絡電流試験

超電導ケーブルコアの諸元を表 1、ケーブルシステムの概略図及び試験条件を図 1 に示す。ケーブルコアは三心一括型であり、うち 2 コアを通電に使用した。2 コアのシールド層は両端で短絡、導体層は B 端末側で短絡し、二相短絡を模擬した往復通電とした。なお、ケーブルシステムの両端末部について、電源接続側を「A 端末」、短絡側を「B 端末」と呼ぶ。図 1 に示すように、ケーブルシステムの冷却は B 端末側を入口とする循環冷却とした。なお、ケーブル部に温度計①～③を取り付け、各部における LN<sub>2</sub> の温度を測定した。

図 1 に示す冷却条件・試験条件で短絡電流試験を実施した。温度計①～③で測定した LN<sub>2</sub> の温度及びケーブル入口・出口の LN<sub>2</sub> の圧力の変化を図 2 に示す。また、LN<sub>2</sub> の流量及びリザーバタンクの液面の変化を図 3 に示す。リザーバタンク容量は 290L であり、LN<sub>2</sub> の液面はパーセント単位で示す。LN<sub>2</sub> の温度上昇は、③で最大 1.5K 程度であり、①が最も小さい。これは B 端末側を入口とした循環冷却を行っているためである。システム内圧は通電直後に約 20kPa 上昇したが、10 秒程度で元の圧力に復帰しており、大きな圧力上昇は観測されなかった。LN<sub>2</sub> の流量及びリザーバタンクの液面にも急激な変化は無く、安定に循環冷却を継続した。外観チェックにおいても、LN<sub>2</sub> の吹き出しといった異常は確認されなかった。なお、短絡電流試験実施前後でケーブルコアの I<sub>c</sub> 特性に変化は無く、コアへのダメージが無いことを確認した。

### 3. まとめ

超電導ケーブルシステムの安定性・安全性検証のため、40m 級の 66kV 級超電導ケーブルシステムを構築し、短絡電流試験を実施した。短絡電流通電時の LN<sub>2</sub> の温度及び圧力に過度な変化は確認されず、冷却システムの異常も生じなかった。また、短絡電流試験によるコアへのダメージも確認されなかった。今後は、66kV 系統における最大短絡電流 31.5kA-2 秒レベルの条件で再度試験を実施予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、NEDO の助成により実施したものである。

Table 1 Specifications of 66kV HTS Cable Core

Layer	Specifications	O.D. [mm]
Former	Copper Strand (200mm <sup>2</sup> ), PPLP <sup>®</sup>	23
HTS cond.	2 layers DI-BSCCO <sup>®</sup> 29pcs	26
Insulation	PPLP <sup>®</sup> (7mm <sup>t</sup> )	40
HTS Shield	1 layer DI-BSCCO <sup>®</sup> 22pcs	42
Protection	Copper tapes (110mm <sup>2</sup> ), Kraft papers	46

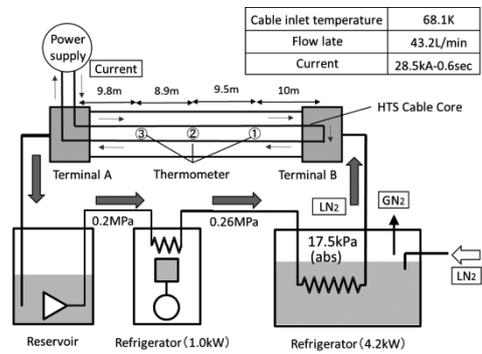


Fig. 1 Schematic view of HTS cable system.

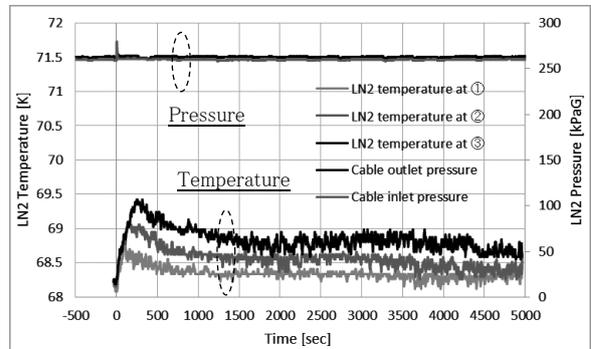


Fig. 2 LN<sub>2</sub> temperature and pressure at both ends.

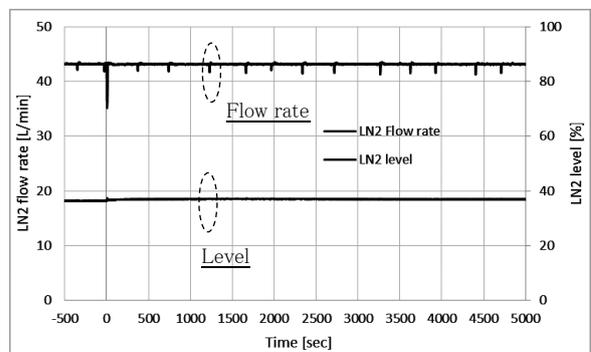


Fig. 3 LN<sub>2</sub> flow rate and level at reservoir.

### 参考文献

1. T.Yasui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.30

# 66kV 級 40m HTS ケーブルの短絡事故時における冷媒の挙動解析と 模擬試験結果の比較

## Temperature and Pressure Simulations of 66kV 40m HTS Cable System in Short-circuit Current Accidents Compared with Experimental Results

竹田 夏子, 安井 鉄郎, 横尾 祐輔, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(KEK);  
大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 三村 智男(東京電力)

TAKEDA Natsuko, YASUI Tetsuo, YOKOO Yusuke, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);  
WANG Xudong (KEK); OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (SEI); MIMURA Tomoo (TEPCO)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

高温超電導ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、将来の電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策として期待されている。しかし、実用化に向けては短絡事故電流の通過時における安全性確保のための影響評価が必要不可欠であるため、我々はケーブルの導体温度及び冷媒液体窒素の温度・圧力を計算する数値解析プログラムの開発を行ってきた[1,2]。本研究では、ケーブルだけでなく冷却システムまで考慮した短絡事故時の冷媒の挙動解析結果と、住友電気工業株式会社・熊取試験場にて実施された 40m HTS ケーブル短絡電流模擬試験の結果との比較を行ったので報告する。

### 2. モデルケーブルの解析条件

図 1 に示す冷却システムを考慮した循環ポンプモデルを用いて短絡電流通過時における冷媒の圧力・温度変化を解析した。ケーブル入口における冷媒温度は、電流リードや常電導接続部の発熱の影響により上昇することを考慮し、実験結果に合わせた関数として与えた。

図 1 に示す A 端, B 端, リザーバタンク, ポンプ吐出部分の各圧力は、液体及び気体の変化量を用いた以下の式で計算した[2]。

$$P = \frac{P_0(1 + \Delta V_{gas}/V_0)}{(1 - \Delta V_{liq}/V_0)} \quad (1)$$

ここで、 $P_0$ は初期圧力、 $\Delta V_{gas}$ は気体変化量、 $\Delta V_{liq}$ は液体変化量、 $V_0$ は初期気体体積とした。また質量流量は隣り合う端末部の差圧を用いて以下の式から導出した。

$$g = \sqrt{\frac{\Delta P \rho D e}{2 f d l}} \quad (2)$$

但し、 $\Delta P$ は端末間の圧力差、 $\rho$ は冷媒密度、 $D e$ は水力直径、 $f$ はファニング摩擦係数、 $d l$ は要素長とした。

超電導ケーブル本体の冷媒の物性値は、流体の 2 つの入力パラメータ(圧力、温度、密度、エンタルピー等)を用いて他のパラメータを出力するコンピュータプログラムである GASPAC を用いて導き出した。今回エンタルピー  $H$  及び圧力  $P$  を入力パラメータとして、それぞれ式(3)式(4)を用いて毎時間・毎要素ごとに導き出した。

$$\Delta H = H_{(n,t+\Delta t)} - H_{(n,t)} \\ = \Delta t \left\{ \frac{(2Q_{ht(n,t)} + Q_h) dl}{V \rho_{(n,t)}} + \frac{v_{(n,t)}}{dl} (H_{(n-1,t)} - H_{(n,t)}) \right\} \quad (3)$$

$$P_{(n,t)} = P_{(n-1,t)} - \frac{2 f \rho_{(n-1,t)} \{v_{(n-1,t)}\}^2 dl}{D e} \quad (4)$$

ここで、 $V$ は冷媒体積、 $v$ は冷媒の流速、 $Q_{ht}$ はケーブル壁面における強制対流伝熱、 $Q_h$ は外部からの侵入熱とした。

### 3. 解析結果

図 2 は 28.5kA-0.6s の二相短絡電流を流した場合の、ケーブル出口部における冷媒温度解析結果及び実験測定結果を

示したグラフである。実験値と合わせ、B 端の初期圧力を 259kPa、冷媒温度初期値を 68K、ポンプの初期流量を 43.2L/min とした。解析結果は実験結果をよく再現しており、解析コードの妥当性を確認することができた。

### 4. 今後の予定

本研究では冷却システムを考慮した循環ポンプモデルを用いて 28.5kA-0.6s の二相短絡電流を流した場合の、冷却システムにおける各部の圧力変化及びケーブル内の温度解析を行い、実験結果との比較を通して解析コードの妥当性を確認することができた。今後は 66kV 級高温超電導ケーブルにおける最大想定短絡電流 31.5kA-2s を流した場合の冷媒の挙動解析を行い実験結果との比較を通して更なる解析コードの改良を進める。

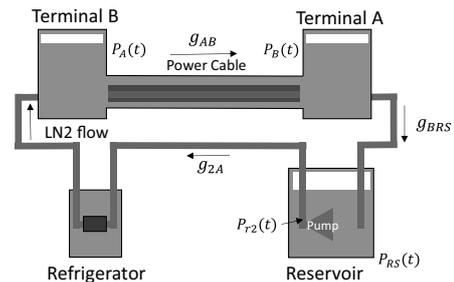


Fig.1 Pump Circulation Model

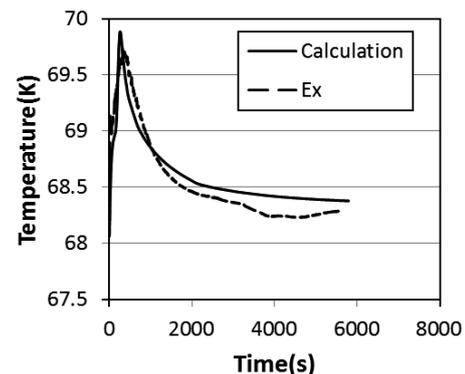


Fig.2 Calculation and Experimental Results  
(Time-Temperature)

### 謝辞

本研究は、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環としてNEDOの助成により実施した。

### 参考文献

1. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021
2. Y.Sato, T.Yasui, K.Agatsuma, et al.; Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.90(2014)p.22

# 275 kV,3 kA 級 20 mHTS ケーブルの短絡事故時における 冷媒温度・圧力解析コードの開発

## Development of the Coolant Temperature and Pressure Simulation Code on Short-circuit Current Accidents in 275 kV, 3 kA 20 m HTS Cable

横尾 祐輔, 安井 鉄郎, 竹田 夏子, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学);王 旭東(KEK);高木 智洋, 八木 正史(古河電工)  
YOKOO Yusuke, YASUI Tetsuo, TAKEDA Natsuko, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);  
WANG Xudong (KEK); TAKAGI Tomohiro, YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., Ltd.)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

高温超電導ケーブルのもつ電力輸送の高密度化と低損失化という特性は、将来の電力輸送システムの拡充という課題に対する解決策として期待されている。しかし、実システムに適用するには、短絡電流通過時の安全性評価が必要不可欠である。古河電工では、外層の他に内層銅フォーマ部にも冷却流路をもつ複流路型の 20m 単心型超電導ケーブルを用いて、臨界電流を超える直流通電を行い、温度と圧力挙動を確認した。我々は、短絡電流が流れた際の高温超電導ケーブルの導体温度及び冷媒の温度・圧力を計算する数値解析プログラムの開発を進めている。本研究では、実験条件の一つである 7.73 kA, 30 s の直流通電をした際の高温超電導ケーブルの導体温度及び冷媒の挙動解析を行ったので報告する。

### 2. モデルケーブルの解析条件

本研究では、20m の複流路型単心構造の高温超電導ケーブルを対象とし、数値計算により超電導ケーブル内各部の温度分布及び、冷媒液体窒素の温度・圧力解析を行った。なお、モデルケーブルの各パラメータは Table 1 に示す通りである。

ケーブルコア内部の金属層の温度分布は次の非線形熱伝導方程式を基礎式として算出した。

$$\rho_{cu}c_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

$Q_{in}$ : 流入熱量  $Q_{out}$ : 流出熱量

解析の際、計算の簡便化のため(i)~(iv)を仮定した。

- (i) 銅フォーマ/HTS 導体、及び HTS シールド/銅シールドをそれぞれ銅層一層の導体層、シールド層とみなし、各層内温度は径方向で一様とする。
- (ii) 外側流路と内側流路での圧力損失は同値とし、これにより外側流路と内側流路の流量比を算出する。
- (iii) 境界条件として入口の冷媒の温度と圧力を与える。
- (iv) ケーブル内での冷媒の質量流量(入口部体積流量)は一定とする。

以上の仮定を考慮した場合におけるケーブルの長手方向断面の模式図及び熱の出入りを Fig. 1 に示す。

ケーブルコア外側壁面の温度 $T_{wall}$ は、境界条件から絶縁層の冷媒壁面における半径方向熱流束が、壁面における冷媒の強制熱伝達による熱流束と等しいとして算出した。

$$\frac{2\pi k_{pplp}(T_{sh} - T_{wall})}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = 2\pi r_3 h_t (T_{wall} - T_{LN_2}) \quad (2)$$

$T_{sh}$ :シールド層温度  $T_{LN_2}$ :冷媒温度  $h_t$ :熱伝達係数

ケーブルコア内側壁面における冷媒への熱の移動は、強制熱伝達によるものとして算出した。また、冷媒の特性は GASPAC を用いて計算した。

### 3. 解析結果

Fig.2 は定常状態算出時の出口部の冷媒とケーブルコア各部の温度の推移を示したものである。これを見ると、最終的に、約 2000 秒後には各温度が安定し始めていることがわかる。Fig.3 は過渡状態算出時の出口部の冷媒とケーブルコア各部の温度の推移を示したものである。これを見ると約 30 秒経過したとき導体層とシールド層の温度が最高点に達し、それ

に伴って冷媒の温度も上昇する様子がわかる。

### 4. 今後の予定

今後は、短絡電流が流れた際の過渡状態の解析を行っていき、実験結果との整合性を確認していく予定である。

Table. 1 Specifications of the Model Cable

Symbol	Quantity	Value
$r_{00}$	Inner radius of Conductor Layer	7.00 mm
$r_0$	Outer radius of Conductor Layer	17.70 mm
$r_1$	Outer radius of Dielectric Layer	40.50 mm
$r_2$	Outer radius of Shield Layer	44.00 mm
$r_3$	Outer radius of Insulation Layer	49.50 mm
$r_4$	Inner radius of Corrugated pipe	55.00 mm
$T_{LN_2} _t^0$	Inlet Temperature of LN <sub>2</sub>	77.0 K
$P _t^0$	Inlet Pressure of LN <sub>2</sub>	800 kPa-G
$V _t^0$	Inlet Flow rate of LN <sub>2</sub>	30 L/min (77K)

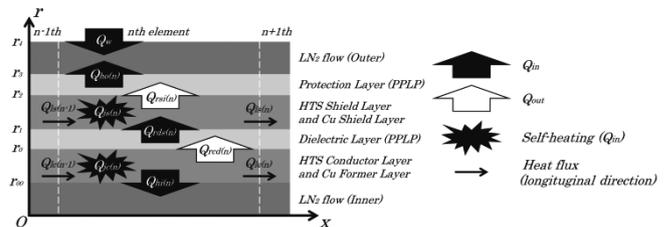


Fig. 1 Model Cable Structure and Heat flow

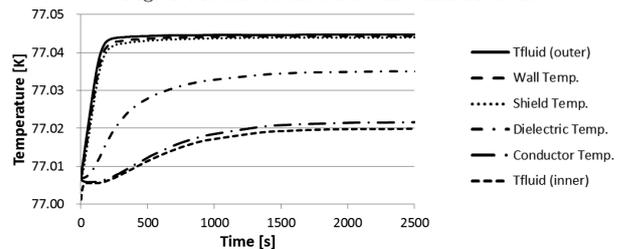


Fig. 2 Calculation Result of Temperature at outlet (steady state)

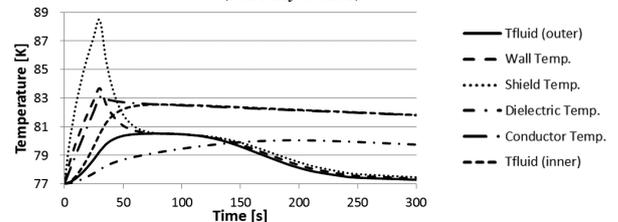


Fig. 3 Calculation Result of Temperature at outlet (transient state)

### 参考文献

- 1. Y.Yokoo,T.Yasui, K.Agatsuma, et al,: Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.92(2015)p.152

### 謝辞

本研究の一部は NEDO の助成事業「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」により実施した。

# 発電機引出線に適した大容量三相同一軸超電導ケーブルのケーブル構造

## Suitable Cable Structure of Large-current Capacity HTS Tri-axial Cable for Outgoing Line of Generator

榎原 稜二, 篠崎 勇希, 北谷 大貴, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(前川製作所)  
 SAKAKIBARA Ryoji, SHINOZAKI Yuki, KITAYA Daiki, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);  
 HAMAJIMA Takataro (Mayekawa Mfg.)  
 E-mail: r.sakakibara@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

三相同一軸超電導ケーブルは、通電層が同軸上に配置されており、各相に垂直磁場が印加されないため、超電導シールド層が不要となり、大電流通電に適している。これまで、大電流通電用三相同一軸ケーブルの導体部損失や定常運転時の冷媒の温度上昇、冷凍機・ポンプ動力について検討してきた[1]。本研究では、10kA級発電機引出線に三相同一軸超電導ケーブルを適用した場合を想定し、三相同一軸ケーブル(2layer/相)の定常運転時における冷凍機・ポンプ動力の定格電流依存性、負荷率依存性について検討した。

### 2. 解析方法

本解析における三相同一軸ケーブルの諸元を Table 1 に示す。各相は、銅テープで構成されたシールド層、超電導層、絶縁用の PPLP®により構成され、コルゲート管に収容されるとした。ケーブルの冷却は、循環系が簡易な向流を採用した。ケーブルの熱特性は、交流損失、渦電流損失、誘電体損失、冷媒の摩擦損失、ケーブル外部からの熱侵入を考慮した。冷媒となる液体窒素の流体特性は、流れを Reynolds 数から判断し、熱伝達と圧力損失を考慮した。

超電導ケーブルシステムの定常運転時の冷凍機動力 $Q_r$ は式(1)、ポンプ動力 $Q_p$ は式(2)で表される。

$$Q_r = \frac{mc\Delta T}{\eta_r} \quad (1) \quad Q_p = \frac{\Delta P V}{\eta_p} \quad (2)$$

ただし、 $m$ を冷媒の質量流量[kg/s]、 $c$ を比熱[J/(kg·K)]、 $\Delta T$ をケーブル内部の温度上昇値[K]、 $\Delta P$ を冷媒の圧力損失[Pa]、 $V$ を流量[m<sup>3</sup>/sec.]、 $\eta_r$ 、 $\eta_p$ をそれぞれ冷凍機とポンプの効率とした。冷凍機とポンプの効率は「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の値を参考している[2]。

本検討では、三相同一軸ケーブルの適用先として発電機引出線を想定しているため、大電流通電が求められる。そのため、定格電流は 5~10kA とし、U 相の負荷率(ケーブルの定格電流/ケーブルの臨界電流×100)が60%となるように、ケーブル内径を設計した。なお、HTS テープ線の曲げ歪みを0.3%以下とし、臨界電流の劣化はないものとした。

### 3. 解析結果及び考察

三相同一軸ケーブルの定常運転時における冷凍機・ポンプ動力の定格電流依存性を Fig.1 に示す。同図より、発電機引出線はケーブル長が比較的短いため、圧力損失が小さく、ポンプ動力よりも冷凍機動力が支配的となることがわかる。また、定格電流が大きい場合ほどポンプ動力は減少する。これは、定格電流の増大に伴い、ケーブル導体部の径が大きくなり、冷媒流速が減少したことにより、圧力損失が低減したためであると考えられる。

Fig.2 に 10kA 通電時、冷媒流量が一定の場合と冷媒流速が一定の場合における冷凍機・ポンプ動力の負荷率依存性を示す。ただし、定格電流を一定とするため、通電層の径を大きくし、超電導線材の本数を多くすることで、負荷率を低減させている。Fig.2 より、負荷率を低くすると、交流損失が減少するため、ケーブルの内部損失は小さくなるが、冷凍機動力は増加することがわかる。冷媒流量が一定の場合、径が大きくなると冷媒流速が遅くなり、冷媒が流路内に留まる時間が長くなる。それにより、冷媒がケーブル内部を循環する間に受け

取る全熱量が増大し、流路出口の冷媒温度が上昇したため、冷凍機動力が増大したと考えられる。一方、冷媒流速が一定の場合は、流量一定の場合と比べて流速が維持されることから、ケーブル内部の温度上昇を抑制できる。しかし、(1)式中の温度上昇 $\Delta T$ の減少分よりも、質量流量 $m$ の増加分の方が大きいと、冷凍機動力が増加したと考えられる。

以上より、発電機引出線を想定した三相同一軸ケーブルにおいて、超電導線材の本数を増やし負荷率を下げることで、交流損失の発生を抑制できるものの、ケーブル運転時に必要となる全動力は増加することがわかった。そのため、目標とする定格電流に対して、可能な限り負荷率を大きく設計した方がよいことがわかった。

Table 1 Specifications of analytical model of tri-axial cable

Conductor composition	BSCCO 2-layer
HTS tape width	4 mm
HTS tape thickness	0.2 mm
Critical current of HTS tape	200 A
Nominal voltage	22 kV
Cable length	300 m
Flow rate	40 litter/min.
Refrigerator efficiency	0.10
Pumping efficiency	0.51

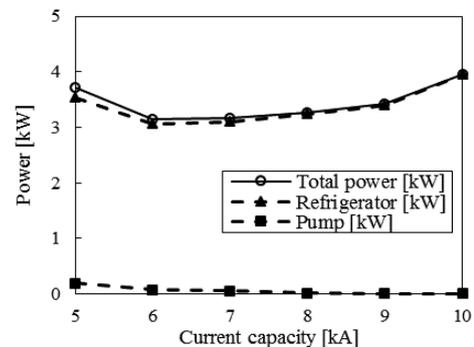


Fig.1 Dependence of required power of refrigerator and pump for cable operation on current capacity of tri-axial cable.

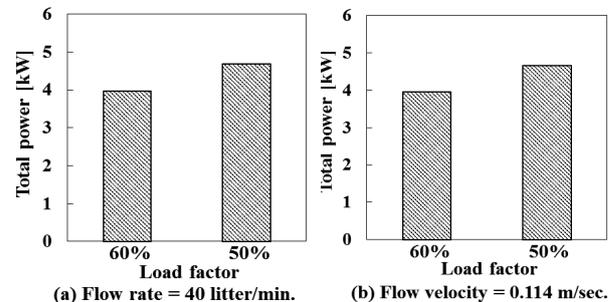


Fig.2 Influence of load factor of tri-axial cable with 10kA on power of refrigerator and pump.

### 参考文献

- 榎原・北谷・篠崎・宮城・津田・濱島:「各相が2層で構成される三相同一軸高温超電導ケーブルの構成方法に関する検討」, 電気学会全国大会, Vol.5, pp.178(2015)
- 「超電導技術開発/高温超電導ケーブル実証プロジェクト」分科会資料

# RE-123 長尺マルチフィラメント線材の局所臨界電流分布評価

## Characterization of Local Critical Current Distribution in Long-length RE-123 Coated Conductor

東川 甲平, 上津原 大, 井上 昌睦 (九大); 藤田 真司, 飯島 康裕 (フジクラ); 木須 隆暢 (九大)  
 HIGASHIKAWA Kohei, UETSUHARA Dai, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.); FUJITA Shinji, IJIMA Yasuhiro (Fujikura);  
 KISS Takanobu (Kyushu Univ.)  
 E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

RE-123 線材は、磁界中の良好な臨界電流特性によりマグネット应用到に期待されているが、テープ形状に由来する線材の磁化がマグネットの発生磁界に与える影響から、マルチフィラメント加工による磁化の低減が期待されている。一方、高温超伝導マグネット应用では、クエンチの伝搬速度が極めて遅く、線材の局所均一性の確保が重要となるが、従来の1次元的な評価手法では幅方向の分解能の観点からマルチフィラメント線材の評価が行えていない。そこで本研究では、2次元面内均一性の評価が可能なリール式走査型ホール素子顕微鏡により、長尺マルチフィラメント線材の評価を行った。

### 2. 従来の評価

測定対象とした試料は、113 m 長の 4 mm 幅 4 分割のマルチフィラメント線材である。その概略を Fig. 1 に示す。本線材は超伝導層の製膜前にバッファ層を傷つける手法によってマルチフィラメント化されたものであり、四端子法によって評価された臨界電流 ( $I_c$ ) も長尺にわたって高い値を示している<sup>[1]</sup>。また、TAPESTAR<sup>TM</sup> による局所  $I_c$  の均一性の評価も行われている。以上が、典型的な RE-123 線材の評価項目であるが、実際に長尺にわたってマルチフィラメントが形成されているか、また四端子法測定で見られる若干の  $I_c$  低下の要因が TAPESTAR<sup>TM</sup> では検出できておらず、長尺マルチフィラメント線材の品質管理が困難となっていた。

### 3. リール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM) の適用

そこで、線材の幅方向にもホール素子を走査することで2次元的な評価が可能な RTR-SHPM により本線材の評価を試みた。77 K 液体窒素温度において得られた残留磁界分布を Fig. 2 に示す。113 m 全長にわたって4本のフィラメントが形成されている様子が明確に示されている。また、特徴的な領域を拡大して最下部に等アスペクト比の磁気像を示しているが、このような長尺線から各フィラメント中の mm オーダーの局所特性低下部まで検出できており、線材作製プロセスへのフィードバックや、局所発熱の観点から問題となるマグネット应用の際の負荷率の決定などに有用となる情報を得ることができた。各フィラメントの  $I_c$  分布の解析など、詳細は当日に報告する。

### 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費 (16H02334, 16K14216) の助成を得て行ったものである。

### 参考文献

[1] C. Kurihara et al., Physics Procedia (2016) in press.

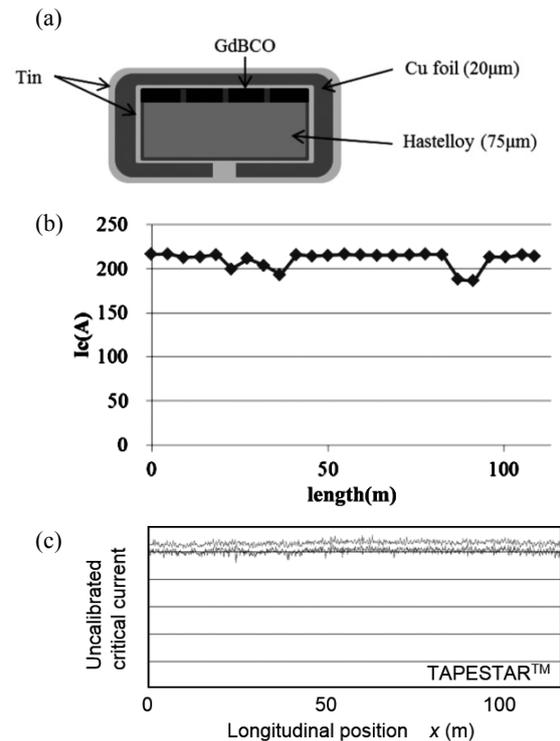


Fig. 1. Specifications of the multi-filamentary REBCO coated conductor: (a) schematic diagram of the structure<sup>[1]</sup>, (b) critical current for each 4.7-m-long section measured by 4-probe transport method<sup>[1]</sup>, and (c) longitudinal homogeneity of local critical current estimated by TAPESTAR<sup>TM</sup>.

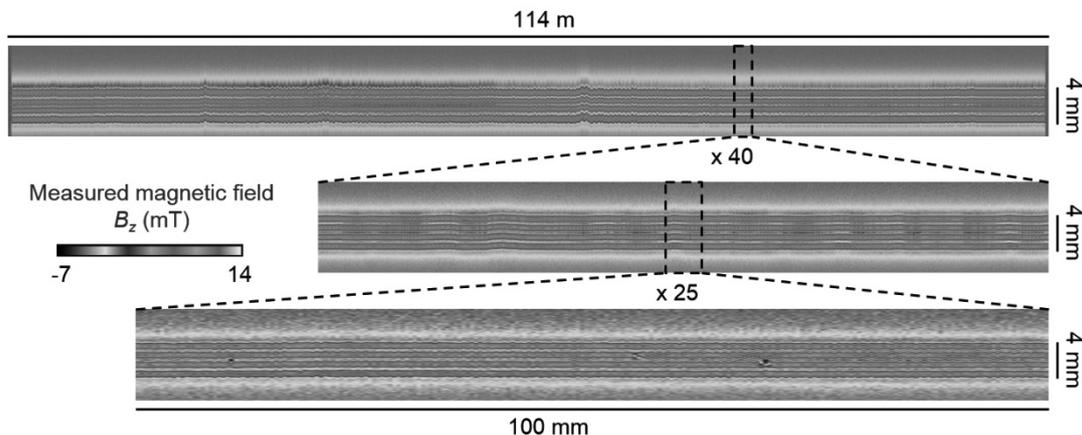


Fig. 2. Measurement results obtained by RTR-SHPM: remanent magnetic field distribution in the 113-m-long, 4-mm-wide, and 4-filamentary REBCO coated conductor.

# リール式走査型ホール素子顕微鏡による Roebel 導体素線の面内臨界電流密度分布の評価

## Characterization of In-plane Critical Current Density Distribution in Roebel Cable's Strands Based on Reel-to-reel Scanning Hall-probe Microscopy

郭 翔, 上津原 大, 東川 甲平, 井上 昌睦 (九大);

JIANG Zhenan, BADCOCK Rodney, LONG Nicholas, BUCKLEY Robert (Victoria University of Wellington);

木須 隆暢 (九大)

GUO Xiang, UETSUHARA Dai, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);

JIANG Zhenan, BADCOCK Rodney, LONG Nicholas, BUCKLEY Robert (Victoria University of Wellington);

KISS Takano (Kyushu Univ.)

E-mail: x.guo@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

Roebel 導体は、高温超伝導テープ線材で困難とされてきたツイスト構造を持つ大電流容量導体であり、様々な機器への応用が期待されている。一方、その特徴的な素線形状から、電流は加工前の線材の長手方向のみならず幅方向にも流れるため、2次元的な局所均一性の評価が本質的に重要となっており、従来の1次元的な評価では健全性の把握が困難となっている。そこで本研究では、2次元的な評価を行えるリール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM) [1]によって、2次元シート電流密度ベクトルの面内分布を評価し、Roebel 導体の素線の非破壊評価への適用可能性を検討した。

### 2. 方法

測定対象とした試料は Roebel 導体用にパンチング加工された 2 mm 幅の素線である。なお、 $J_c$ 分布の検出を検証するため、今回の実験では作製プロセスを最適化する前の線材を意図的に用いた。本試料を長手方向に一定速度で搬送し、同時にホールセンサを幅方向に走査することで、磁化した試料の残留磁界の2次元分布を取得した。また、得られた磁界分布に対して、Biot-Savart 則の逆問題を解き、シート電流密度ベクトルの2次元分布として評価した。

### 3. 結果及び考察

評価結果を Fig. 1 に示す。まず、残留磁界分布を見ると、Roebel 導体用の素線に見られる特徴的な形どおりに磁界が捕捉されており、2次元分布として取得することに成功している。この結果をもとに磁化電流をシート電流密度分布として評価し、長手方向成分を  $J_x$ 、幅方向成分を  $J_y$  として示している。TAPESTAR に代表される従来の長尺線評価手法では  $J_x$  に相当する成分のみを評価するが、本試料に関しては転移想定部において電流が幅方向にも流れることが必須のため、 $J_y$  の評価が本質的に重要となる。本手法によれば、そのような成分も評価できており、結果として臨界電流密度に相当するシート電流密度の大きさ  $|J|$  の2次元分布を取得することに成功している。磁化電流が試料形状に沿って周回している様子がわかる。また、このデータは機器の設計基準の設定に重要となる局所臨界電流の長手方向分布や、パンチング加工の精度を表す有効線幅の長手方向分布にも換算することができる。このように、高温超伝導応用の重要な役割を担うと考えられる Roebel 導体に関して、その素線の健全性を非破壊かつ高解像で評価できる手法を初めて提示した。

#### 参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 6600704.

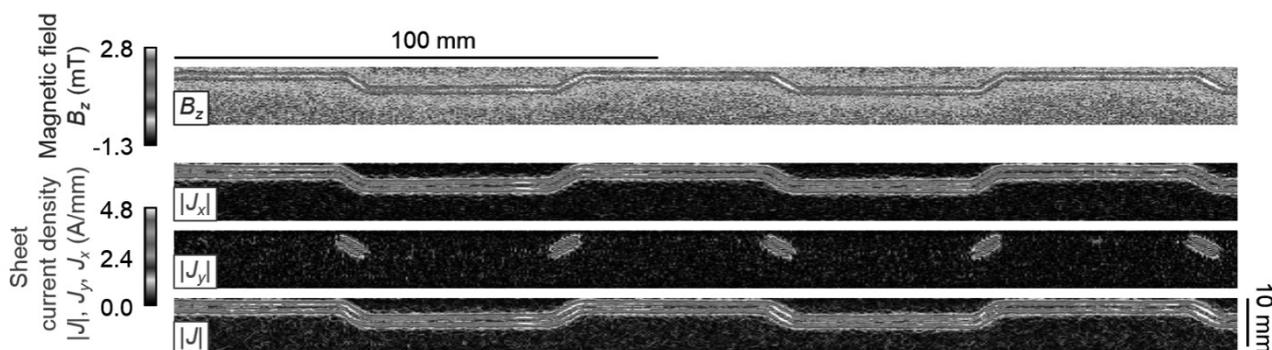


Fig. 1. Two-dimensional distribution of remanent magnetic field in a Roebel cable's strand measured by the RTR-SHPM and the corresponding distributions for sheet current density vector with longitudinal direction of x and width direction of y.

# ピックアップコイルを用いたマルチフィラメント HTS 線材の 電流分布測定における空間分解能の検討

Study on space resolution of AC current distribution measurement in  
multifilamentary HTS tapes by a pickup coil

足立 裕亮, 北原 晃一郎, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

ADACHI Hiroaki, KITAHARA Koichiro, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k4124670@kadai.jp

## 1. はじめに

本研究では、低損失加工されたマルチフィラメント HTS テープ線材内の電流分布を定量的に評価するために、ピックアップコイル群を用いた電流分布測定法の確立を目指して、その電流分布算出精度の向上を検討している。本発表では、使用するピックアップコイルの幅や断面積、ピックアップコイルと測定サンプル間の距離などを変えたときの電流分布測定における空間分解能について詳細に調べたので、その結果について報告する。

## 2. 本測定法による電流分布算出方法

本測定では、Fig. 1 (a) に示すように、ピックアップコイル群でサンプル線材表面付近の磁場分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を求める。測定に用いるピックアップコイルは、 $\phi 40 \mu\text{m}$  あるいは、 $\phi 30 \mu\text{m}$  の絶縁 Cu 線を紙製ポピンに巻線した 3 層構造で、合計 17 (=6+5+6) ターンである。本測定法において電流分布は、求める各電流要素に電流値を与え、その電流分布による計算磁場分布と測定磁場分布を比較し、その誤差の二乗和が最小となるような電流分布を解として求める。

## 3. ピックアップコイルと電流要素の関係

超伝導フィラメント内の電流分布は一様でないため、超伝導フィラメント周辺の磁場分布を精度よく計算するためには、超伝導フィラメント内に少なくとも 3 つの電流要素を配置してフィラメント内部の電流分布まで求める必要がある。例えば、5 mm 幅 10 分割 HTS 線材の超伝導フィラメントサイズは、フィラメント間の溝幅を考慮しない場合は 0.5 mm であり、この場合の電流要素の幅は  $0.5/3 = 0.167 \text{ mm}$  となる。

Fig. 1(b) は、ピックアップコイルと電流要素の関係の一例を示したものである。電流要素を丸線で表わし、その直径が 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm の場合を示している。また、ピックアップコイルは、 $\phi 40 \mu\text{m}$  の Cu 線の 3 層 17 ターンのものをしており、コイル幅は 0.24 mm となる。線径が 30  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  の Cu 線の場合、コイル幅はそれぞれ 0.18 mm, 0.12 mm となる。

## 4. ピックアップコイル幅が電流算出精度に及ぼす影響

Fig. 2 は、電流要素の線径を変化させた場合の電流算出誤差の最大値の計算結果であり、ピックアップコイル幅が、0.24 mm, 0.18 mm, 0.12 mm の場合についての結果を示している。電流要素の線径がコイル幅より小さくなると電流算出精度が悪くなることがわかる。この計算結果は理想的な測定の場合のものであり、実際は設置誤差やノイズの影響により、実験における電流算出精度は、計算結果より低下した。

## 5. ピックアップコイル形状と配置位置による空間分解能の向上

Fig. 3 は、ピックアップコイルの断面形状を変えたときの電流要素との配置関係を示したものである。電流要素の直径はいずれも 0.22 mm である。コイル断面積を小さくすると、コイル中心と電流要素中心間距離も小さくなる。

Fig. 4 は 6 本の電流要素に通電したときの Coil A ~ Coil E の場合の磁場分布の計算結果である。Coil A と Coil B の結果

より、コイル幅を 0.24 mm から 0.18 mm に狭めても磁場分布にほとんど差は見られない。一方、コイル断面積を小さくすると、サンプルとの距離が短くなるため、磁場分布測定における空間分解能の向上が見られる。この場合、実験による電流分布の精度向上が図れるかについての検証は、当日報告する。

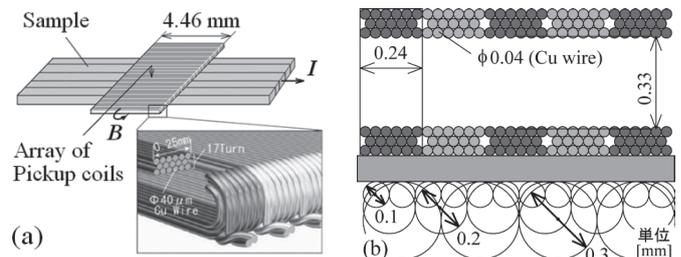


Fig. 1 Relation between sample and pickup coils.

(a) outside drawing, (b) cross-sectional drawing

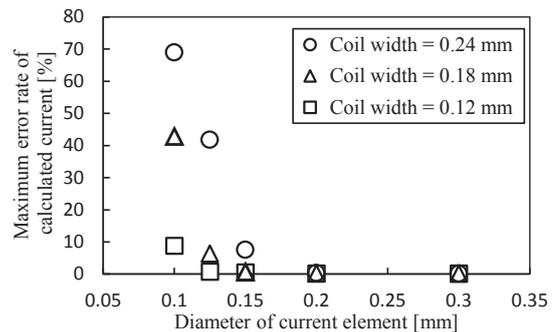


Fig. 2 Calculated results of current distributions.

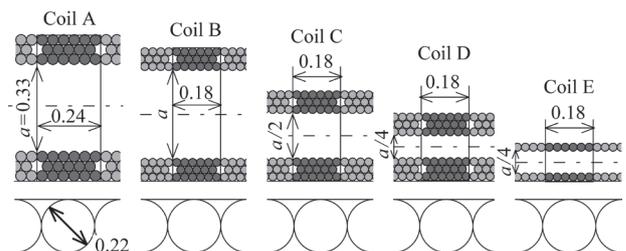


Fig. 3 Parameters of several shapes of pickup coils.

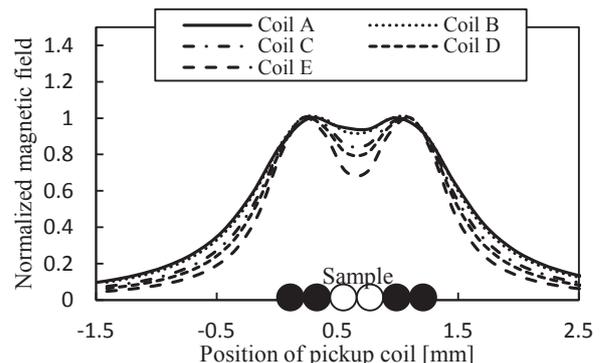


Fig. 4 Calculated results of magnetic field distributions.

# 超音波を用いた GdBCO 線材の剥離診断と臨界電流特性評価

## Delamination Diagnosis of GdBCO Coated Conductors Using Ultrasonic Waves and Critical Current Evaluation

坂巻裕太, ニノ宮晃, 野村新一 (明治大)  
 SAKAMAKI Yuta, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.)  
 E-mail: nomuras@meiji.ac.jp

### 1 はじめに

著者らは AE センサを用いて超音波を GdBCO 線材に伝搬させ、その伝達特性から機械的欠損、特に剥離診断の可能性研究を行っている。これまで、GdBCO 線材単線において、剥離の有無、位置、大きさを診断できる可能性を示している [1]。今回はコイル巻線を想定し、GdBCO 線材を 2 枚積層させた場合においても剥離診断が可能かどうか検証した。また、本診断法により剥離が起きていると推定される GdBCO 線材の臨界電流特性を評価した。本研究では 10 mm 幅、0.2 mm 厚の GdBCO 線材を使用した。

### 2 GdBCO 線材 2 枚積層させた場合の剥離診断

コイル巻線での剥離診断の可能性を検証するために、図 1 に示すように、GdBCO 線材を 2 枚積層させ、2 枚のうち 1 枚のみを層間剥離させている。コイル製作時の巻線張力を想定して線材短尺試料の長手方向に張力 40 MPa を印加した状態のまま常温中での剥離診断を行った。線材の層間剥離方法は、温度調整機能付き半田ごてを用いて一部分を加熱 (210–230 °C) する方法を採用した。加熱した線材は受信 AE センサー側の 2 層目の線材である。

線材位置を固定し、AE センサーを移動させることで、健全な部分と加熱した部分の超音波伝達特性の違いから剥離診断を試みた。送信用 AE センサーからパルス幅 1  $\mu$ s、波高値 30 mV の電圧信号を入力し超音波を線材に伝搬させ、送受信信号を FFT 処理したものを 30 回平均化処理して伝達特性とした。

図 2 は超音波伝達特性の測定結果である。層間剥離が生じたと思われる加熱点と加熱点から 7.5 mm 離れた健全な部分と思われる信号伝達特性とを比較すると、信号強度および共振周波数の違いが確認された。特に、加熱点では信号が減衰し、共振周波数も低下する傾向にあることが確認された。この結果は、GdBCO 線材を 2 枚積層させた場合においても層間剥離など何らかの機械的欠損を検出できる可能性を示唆している。なお、図 1 の状態とは反対に 1 層目を加熱処理し 2 層目を健全な状態とした場合でも、加熱点と健全な部分との間に伝達特性の違いを確認している。

### 3 剥離が推定される GdBCO 線材の臨界電流特性

図 3 は、加熱処理した GdBCO 線材と未加熱の健全な線材の引張応力に対する臨界電流特性を比較した結果である。本実験では、常温中で線材に引張応力を印加し、引張応力を除去した後、液体窒素中で臨界電流値を測定した。試験サンプル数は加熱処理した線材、未加熱の線材ともに

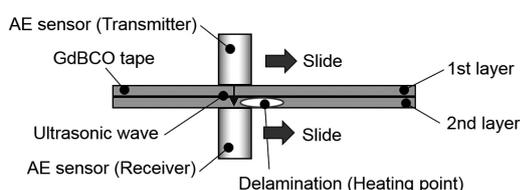


Fig. 1. Delamination diagnosis method using ultrasonic waves for the multilayer GdBCO tape short sample.

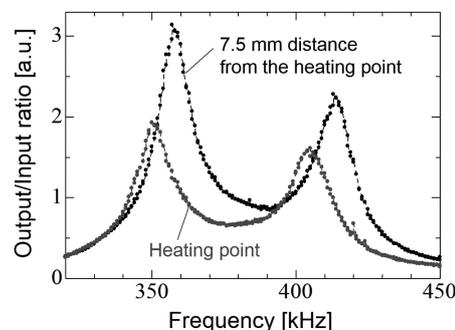


Fig. 2. Frequency dependence of the AE signal intensity of the multilayer GdBCO tape sample. The 2nd layer is heated as shown in Fig. 1.

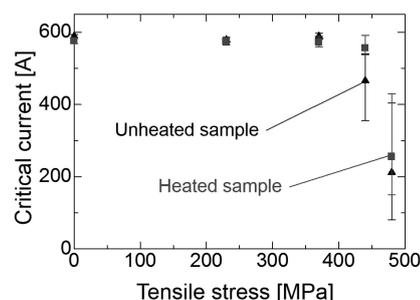


Fig. 3. Comparison of the critical current properties between the heating GdBCO tape sample and the unheated sample.

3 サンプルであり、グラフのプロットは 3 サンプルの平均値である。また、エラーバーは 3 サンプルの最大値と最小値で示している。図 3 の結果より、加熱処理した線材と未加熱の線材とで、平均値の差は 10% 以内であり、エラーバーも 70% 程度重なっていることから、臨界電流特性に顕著な差は確認されなかった。

### 4 今後の課題

GdBCO 線材を 2 枚積層させた場合においても剥離診断の可能性を示唆できた。しかしながら、2 枚のうちどちら側の線材が剥離しているかの特定までは至っていない。今後は、時間応答性を考慮した伝達特性や位相特性を評価し、多数枚積層した場合においても何層目に剥離が起きているか特定する診断法の可能性について検討を進めていく必要がある。

一方、加熱処理した線材について、引張応力に対する臨界電流値の顕著な劣化は確認されなかった。今後は曲げ応力や電磁力が印加された状態での臨界電流特性も評価し、常温中で実施する超音波を用いた剥離診断結果と臨界電流特性との関係性について検討を進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] Y. Sakamaki, A. Ninomiya, S. Nomura: Abstract of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p. 223.

## Hot-wall PLD による人工ピン導入 REBCO 線材の磁場中特性

## In-field performance of BMO doped REBCO coated conductors by the hot-wall PLD process

藤田 真司, 柿本 一臣, 五十嵐 光則, 平田 渉, 武藤 翔吾, 吉田 朋, 飯島 康裕(フジクラ); 淡路 智(東北大)  
 FUJITA Shinji, KAKIMOTO Kazuomi, IGARASHI Mitsunori, HIRATA Wataru, MUTO Shogo,  
 YOSHIDA Tomo, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
 E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

## 1. はじめに

フジクラでは独自に開発した IBAD/PLD 法を用いて、高品質な長尺 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(REBCO)線材を提供している。特に PLD は温度均一性を改善した Hot-wall 方式を採用し、安定した特性が得られるようになっている。磁場中 J<sub>c</sub> を向上させるため、REBCO 薄膜に人工ピンとして BaMO<sub>3</sub> を導入する研究が盛んに行われているが、今回 Hot-wall PLD 方式で人工ピンを導入した REBCO 線材を作製し、磁場中特性を評価したので報告する。

## 2. 線材作製

75 μm 厚, 12mm 幅の Hastelloy®テープ上に IBAD-MgO 層を含む中間層薄膜を成膜した配向基板の上に、Hot-wall PLD 法で REBCO 層を成膜した。RE として Gd または Eu, 人工ピンとして BaHfO<sub>3</sub> を 3.5 mol% または BaZrO<sub>3</sub> を 5.0 mol% をドープしたターゲットを用いた。GdBCO 層上には Ag を 2 μm スパッタ蒸着した。線材諸元を Table 1 に示す。GdBCO の成膜条件として、通常量産条件(A)ではなく 30 K, 2 T(B // c) の J<sub>c</sub> が高くなるように条件を最適化した(B, C)。

## 3. 評価方法

線材端部から測定サンプルを切り出し、フォトリソグラフィおよびウェットエッチングにより 30 μm 程度×1 mm 長のマイクロブリッジを形成した。サンプルをプローブに取り付け、超電導マグネットに挿入し、He ガスにより 77~4 K に冷却し、磁場を印加して四端子通電法で I-V 測定を行なった。測定は東北大学金属材料研究所・強磁場超伝導材料研究センターのマグネットおよび設備を使用して実施した。

## 4. 結果

サンプル Hf2 の TapeStar®による長手方向の I<sub>c</sub>(77.3K, s.f.) 分布を Fig. 1 に示す。I<sub>c</sub> 分布の標準偏差÷平均値で定義した I<sub>c</sub> 均一性は 2.7% であり、人工ピンを導入していない長尺線材と同程度の均一性が得られている。77.3 K, 20 K における F<sub>p</sub> (= J<sub>c</sub> × B) の磁場依存性をそれぞれ Fig. 2, 3 に示す。77.3 K では GdHf よりも GdZr の方が F<sub>p</sub> は高いが、温度が下がると逆転している。また、GdHf2 の条件は 77.3 K では低い、低温では 5 T 程度以下では条件 B と同程度であり、5T 程度以上ではむしろ高くなっている。さらに EuHf はどの温度領域でも高い F<sub>p</sub> を示しており、4.2 K においては F<sub>p</sub> = 1.67 TN/m<sup>3</sup> @18 T (J<sub>c</sub> = 9.27 MA/cm<sup>2</sup>) と非常に高い値が得られた。磁場角度依存性では、人工ピン導入のものは 65~50 K で B // c にブロードで高いピークが現れるが、温度が下がるにつれてこのピークは低くなり、20 K 以下ではほとんど消失した。他の温度や磁場角度依存性については当日紹介する。

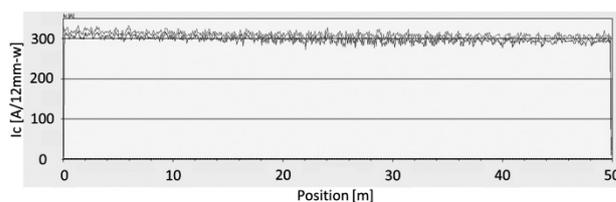
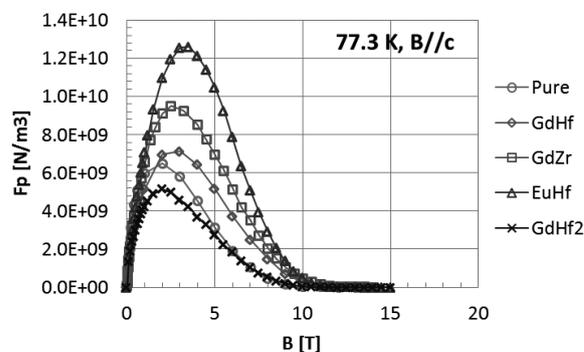
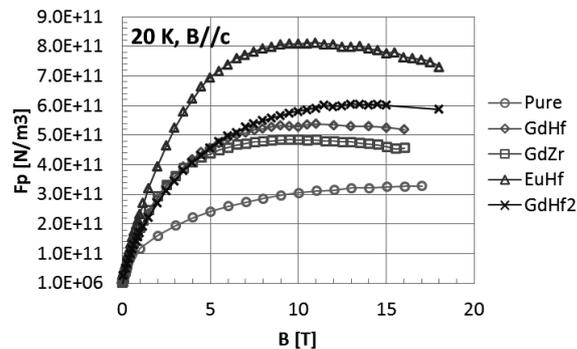
## 5. まとめ

数 10 m ではあるが、Hot-wall PLD を用いることで長尺で均一な特性の人工ピン線材を作製することができた。30 K, 2 T における J<sub>c</sub> で製造条件を最適化することにより、低温磁場中で高い特性が得られることを確認した。また、RE を Gd から Eu に変更することで、低温磁場中で高い F<sub>p</sub>(J<sub>c</sub>) が得られた。今

後は長尺化、高スループット化を目指し、Lot 内や Lot 間のばらつきも含めて開発を進める。

Table 1 Specifications of REBCO layer

Index	RE	APC	Thickness [μm]	Deposition Condition	Conductor Length [m]
Pure	Gd	-	1.92	A	330
GdZr	Gd	BaZrO <sub>3</sub> 5.0 mol%	1.09	B	10
GdHf	Gd	BaHfO <sub>3</sub> 3.5 mol%	1.02	B	10
EuHf	Eu	BaHfO <sub>3</sub> 3.5 mol%	1.05	B	10
GdHf2	Gd	BaHfO <sub>3</sub> 3.5 mol%	1.32	C	50

Fig. 1 Longitudinal I<sub>c</sub> distribution of GdHf2Fig. 2 Magnetic field dependence of F<sub>p</sub> at 77.3 K, B // cFig. 3 Magnetic field dependence of F<sub>p</sub> at 20 K, B // c

# BHO 導入 EuBCO 線材の広範な温度、磁場における臨界電流特性

## Critical Current Property of BaHfO<sub>3</sub> Doped EuBCO Coated Conductor Over a Wide Range of Temperature and Magnetic Field

鈴木匠, 高崎建, 井上昌睦, 小野寺優太, 今村和孝, 東川甲平 (九大);  
 衣斐頭, 和泉輝郎 (ISTERA(現 産総研)); 吉田 朋 (フジクラ); 土屋雄二, 淡路智, 渡辺和雄 (東北大); 木須隆暢 (九大)  
 SUZUKI Takumi, TAKASAKI Ken, INOUE Masayoshi, ONODERA Yuta, IMAMURA Kazutaka,  
 HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.); IBI Akira, IZUMI Teruo (ISTERA); YOSHIDA Tomo (Fujikura Ltd.);  
 TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)  
 E-mail: suzuki@ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導線材(REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>: REBCO)は磁場中での高い臨界電流密度と高強度基板による優れた機械特性を有することから、マグネット応用への期待が高い。特に、PLD(Pulse Laser Deposition)法で製膜された、EuBCO 線材はBaHfO<sub>3</sub>(BHO)を添加したターゲットを用いることにより、c 軸相関ピンとなるナノロッドが形成され、磁場中の臨界電流密度  $J_c$  が大幅に向上することが知られている。更に厚膜形成時に異相の生成が抑えられ、厚膜でも優れた  $J_c$  特性を持つ。このことから、GdBCO 線材等に比べて高い臨界電流  $J_c$  を持つ線材が実現されており、3  $\mu\text{m}$  を超える厚膜の線材が作製されている。しかし、超伝導機器の設計においては広範な温度、磁場領域に亘る臨界電流特性が必要となるが、詳細な実測値はまだ得られていない。本研究では、BHO を導入した EuBCO 線材の電流輸送特性を広範な温度、磁場領域に亘って計測するとともに、パーコレーション転移モデルによる特性の記述を行った。

### 2. 実験方法

試料線材は IBAD 基板上に PLD 法により製膜した BHO を導入した EuBCO 線材を用いた。超伝導層の膜厚は 3.3  $\mu\text{m}$  である。比較のため、同様に BHO を導入した、膜厚 3.2  $\mu\text{m}$  の GdBCO 線材の測定を行った。試料はウェットエッチングによりマイクロブリッジ形状に加工し、 $E$ - $J$  特性の温度、磁場、磁場印加角度依存性を測定した。臨界電流密度を決定する電界基準は 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  とした。

### 3. 実験結果及び考察

Fig.1 に臨界電流密度の温度、磁場依存性を示す。77 – 4.2 K の液体窒素温度から、液体ヘリウム温度までの広範な温度領域に加えて、25 T までの高い磁場中臨界電流密度特性が得られた。これらの結果に対し、パーコレーション転移モデルによる  $E$ - $J$  特性の定式化を行い、得られた  $J_c$  曲線を Fig. 1 の実線で示す。解析解は実験結果をよく再現することができ、本手法が広範な温度、磁場領域の電流輸送特性を推定する手法として有効であることが確認できた。

次に、等  $J_c$  マッピングを行い、BHO 導入 EuBCO と GdBCO の特性の比較を行った。Fig.2 (a)に BHO 導入 EuBCO 線材、(b)に BHO 導入 GdBCO 線材の温度、磁場平面の等  $J_c$  図を示す。BHO 導入 EuBCO 線材は高  $J_c$  領域が、高温、高磁場領域に大幅に広がっていることが確認できた。よって同線材は広範な温度・磁場領域に亘り、実用性能が大幅に向上していることが明らかとなった。また、このような等  $J_c$  マッピングは超伝導機器の設計において重要となるが、実験的に求める事は困難であるため、パーコレーション転移モデルによる定式化が有用である。

**謝辞** 本研究は、経産省及びAMED の高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト「共通基盤技術の研究開発」及び日本学術振興会の科研費(16H02334, 26420273)の助成を得て行った。

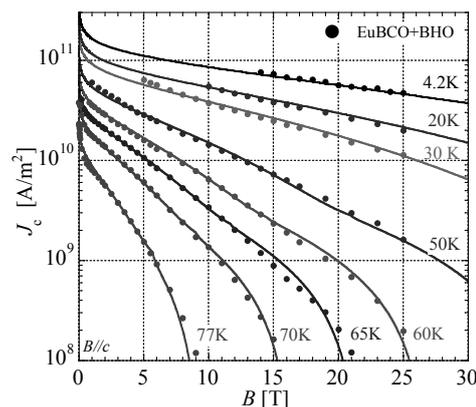


Fig. 1  $J_c$ - $B$ - $T$  characteristics for BHO doped EuBCO coated conductor.

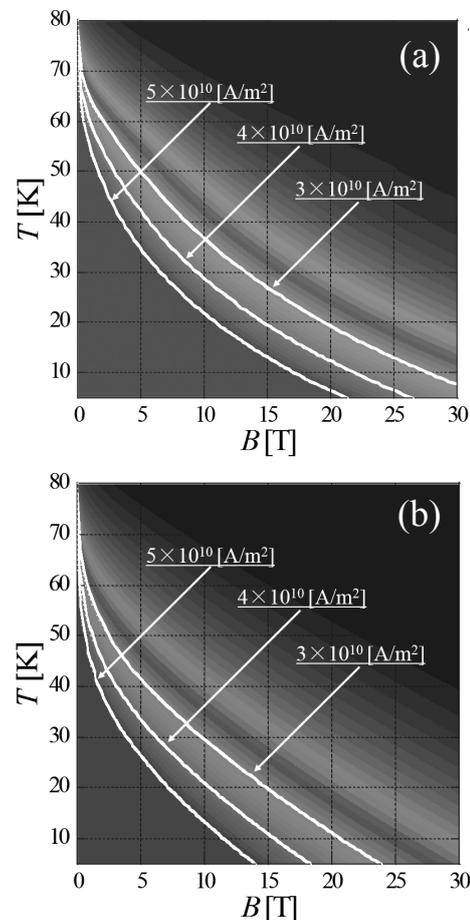


Fig.2 Contour map of  $J_c$  in  $B$ - $T$  plane.  
 (a) BHO doped EuBCO coated conductor.  
 (b) BHO doped GdBCO coated conductor.

# REBCO コート線材における磁化緩和特性: 温度変化ならびに電流負荷率の影響に関する考察

## Magnetic moment relaxation in REBCO coated conductor: Influence of temperature change and current load factor

小野寺 優太, 今村 和孝, 鈴木 匠, 東川 甲平, 井上 昌睦(九大); 吉田 朋(フジクラ);  
衣斐 顕, 町 敬人, 和泉 輝郎(iSTERA(現 産総研)); 木須 隆暢(九大)

ONODERA Yuta, IMAMURA Kazutaka, SUZUKI Takumi, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);  
YOSHIDA Tomo (Fujikura Ltd.); IBI Akira, MACHI Takato, IZUMI Teruo (iSTERA); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)  
E-mail: y.onodera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導(REBCO)線材は優れた磁場特性を有することからマグネット等への応用が期待されているが、テープ構造を有することから、素線に誘起される遮蔽電流による磁化が大きく、発生磁場の時間的・空間的安定性に影響を及ぼす。したがって、外部磁場や温度など動作条件によって大きく変化する磁気モーメントとその緩和特性を定量的に把握する事が求められるが、現状では定性的な理解に留まっている。

本研究では、BaHfO<sub>3</sub> 人工ピンを導入した EuBCO コート線材を用いて、テープ面に垂直な外部磁場の印加によって遮蔽電流を誘起させ、臨界状態での磁化緩和特性、ならびに温度変化によって臨界電流を変化させ、遮蔽電流に対する臨界電流密度の比を人為的に変化させた場合の磁化緩和特性について実験的に調べた。さらに、緩和特性より導出される電界-電流密度( $E$ - $J$ )特性の解析をもとに、外部磁場や温度変化によって複雑に変化する磁気モーメントの緩和特性を定量的に記述する手法について考察した。

### 2. 実験

実験には、BaHfO<sub>3</sub> を人工ピンとして添加した EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  線材を用いた。同線材をレーザーカッターを用いて長さ 2 mm、幅 0.7 mm の矩形状に加工した後、SQUID 磁化率計(MPMS)にて磁化緩和特性を計測した。また、同一試料から切り出したマイクロブリッジを用いて四端子法による  $E$ - $J$  特性の測定を並行して行った。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1に、1 T中における磁化緩和特性を示す。温度条件は、65、67 K一定時の場合と、67 Kにて着磁後、65 Kに階段状に低下させた場合である。一定温度時は臨界状態で遮蔽電流が流れ、時間と共に減衰していく様子が確認できる。また、着磁後に温度を減少させた場合は、臨界電流値が上昇することで電流負荷率が約90%となり、緩和が一旦抑制されている。しかしながら、時間の経過と共に再び臨界状態に漸近し、当該温度の磁化緩和曲線へと推移し、再び緩和が開始することが確認できる。

この磁化緩和の挙動と $E$ - $J$ 特性との関係について調べたところ、Fig. 2に示すように、温度降下による磁化緩和の減衰率の変化は $E$ - $J$ 特性の推移に起因していることが分かった。これらの実験結果に対して、磁束クリープの影響を考慮したパーコレーションモデルによる $E$ - $J$ 特性の解析式[1]を用いた考察を行ったところ、解析によって得られた $E$ - $J$ 特性 (Fig. 2の実線) 及び磁化緩和特性 (Fig. 1の実線) が実験結果とよく一致していることが確認できた。このことから、 $E$ - $J$ 特性を把握し温度変化を考慮することで、磁化緩和の動的挙動を定量的に記述できることが示された。すなわち、電流負荷率を変化させることで抑制される磁化緩和特性を、 $E$ - $J$ 特性の解析式を基に動作条件に応じて広い時間スケールに亘って予測可能となる。

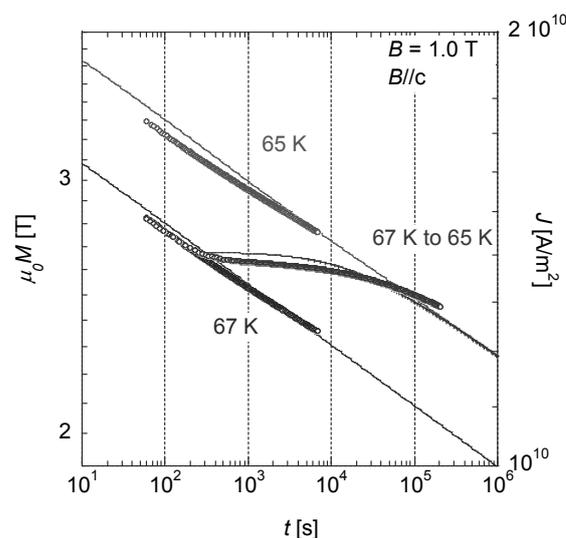


Fig. 1 Temperature dependence of  $M$ - $t$  and  $J$ - $t$  characteristics measured by magnetization method.

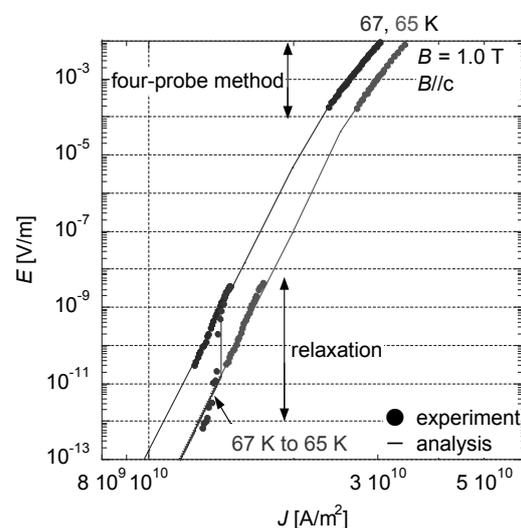


Fig. 2  $E$ - $J$  characteristics estimated from dc four-probe and relaxation measurement.

### 謝辞

本研究の一部は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省ならびに日本医療開発機構の助成を得て実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (16H02334, 26420273) の助成を得て行ったものである。

### 参考文献

1. T. Kiss et al., *Physica C* 392-396 (2003) 1053-1062.

# YBCO 薄膜におけるナノ析出物による磁束ピン止め特性のサイズ効果(1) —実験結果

## Size effect of nanoprecipitates on the flux pinning properties of YBCO thin films (1)

### —Experimental results

山崎 裕文(産総研); 山田 博(大島商船高専)

YAMASAKI Hirofumi (AIST); YAMADA Hiroshi (Nat. Ins. Tech., Oshima College)

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

#### 1. はじめに

筆者らは、Yリッチな共蒸着法 YBCO 薄膜では  $J_c$  の磁界角度依存性で  $H//ab$  中心の富士山型のピークが観測され、高濃度の微細ナノ析出物 ( $\leq 7$  nm) によることを示した [1]。今回、通常より低温度で作製した薄膜はより微細な析出物を含み、高温での  $J_c$  は通常薄膜より低いが低温での  $J_c$  は高いクロスオーバー現象を観測した。さらに大きなナノ析出物を含む PLD 法膜では、より顕著なクロスオーバーを観測した。

#### 2. Yリッチ共蒸着 YBCO 薄膜の $J_c$ の温度依存性の比較

通常よりも低温度で成膜した共蒸着法 YBCO 薄膜 A について幅広い温度範囲で  $J_c$  の磁界角度依存性を測定した(図1挿入図)。通常で成膜した商用薄膜 B と  $|\theta - 90^\circ| = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  の  $J_c$  値を比較したところ、薄膜 A の  $J_c$  は、60 K 以上では低いものの、20 K 等の低温度で高くなった(図1)。TEM 観察で高濃度の微細ナノ析出物を観測したが、制限視野電子回折像から  $Y_2O_3$  であることがわかった(図2a, c)。薄膜 A、薄膜 B の微細ナノ析出物のうち輪郭がはっきりしているものについて番号を付けて断面積測定を行った。400 個以上のナノ粒子について測定した断面積の統計分布を図2b, d に示す。断面積の最頻値は、薄膜 A が  $10\text{--}20\text{ nm}^2$  (球と見なした場合の直径が  $3.6\text{--}5.0$  nm)、薄膜 B が  $20\text{--}40\text{ nm}^2$  (直径  $5.0\text{--}7.1$  nm) で、薄膜 A の方がより微細であることがわかった。

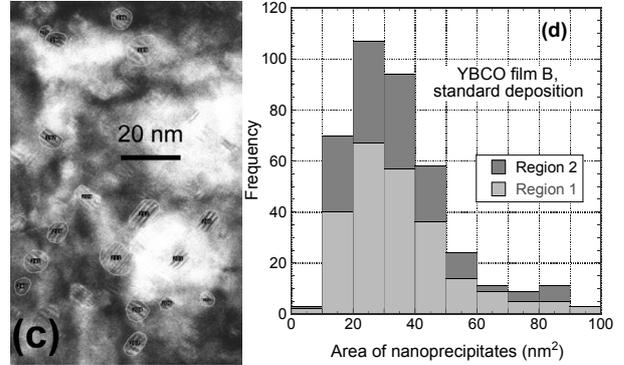


Fig. 2 TEM plan-view picture (a) and a histogram for the cross-sectional areas of nanoprecipitates (b) in film A. The same set of data for film B are shown in (c) and (d).

#### 3. かなり大きなナノ析出物を含むPLD-YBCO 膜との比較

共蒸着法 YBCO 膜 A, B よりも大きなナノ析出物を含む PLD-YBCO 膜 C, D についても  $H//c$  における  $J_c(T)$  を測定して比較した(図3)。断面積が  $60\text{--}160\text{ nm}^2$  (球と見なした場合の直径  $8.7\text{--}14.3$  nm) を中心に分布するナノ粒子(図3挿入図)を高濃度を含む薄膜 C は、40 K 以上の高温で薄膜 A, B よりかなり  $J_c$  が高かったが、それ以下の温度で逆転し、顕著なクロスオーバーが観測された。これは、例えば 70 K 付近では、コヒーレンス長が  $\xi_{ab} = 3\text{--}4$  nm と長かったものが、低温では 2 nm 程度まで低下することがその原因である。また、断面積が  $40\text{--}80\text{ nm}^2$  (直径  $7.1\text{--}10.1$  nm) を中心に分布するナノ粒子を高濃度を含む薄膜 D は、 $T_c$  が高く超電導性が優れていること(熱力学的臨界磁界  $H_c$  が高い)、粒子のサイズが薄膜 C よりも  $2\xi_{ab}$  に近く磁束ピン止めに適当であることなどから、全温度領域で最高の  $J_c$  を示した。以上のような点について、次報で詳しく述べる。

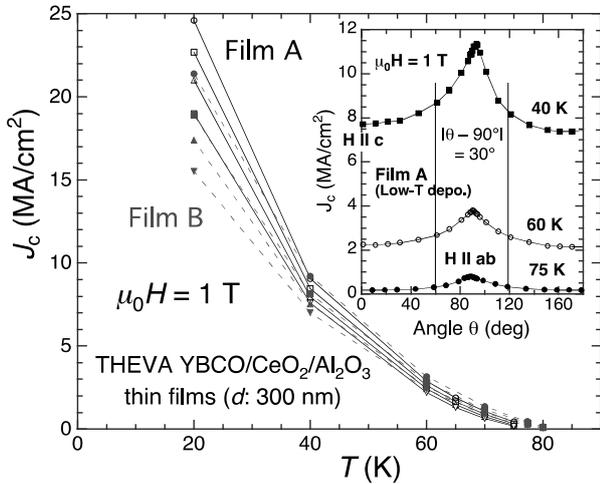


Fig. 1 Temperature dependence of  $J_c$  at  $\mu_0 H = 1$  T at various angles. Solid and broken lines are for film A & film B. Inset) Magnetic-field angle dependence of  $J_c$  in film A.

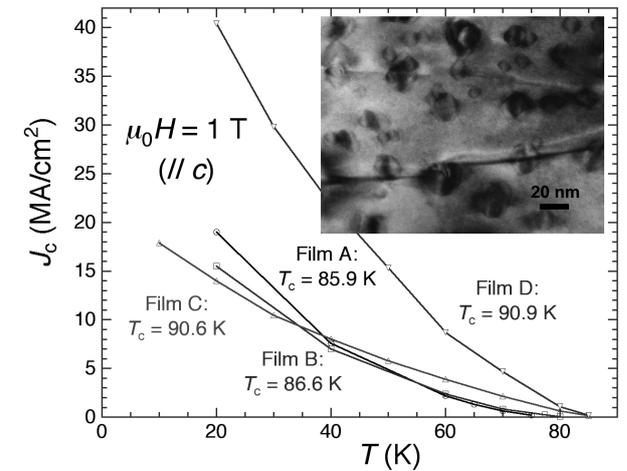
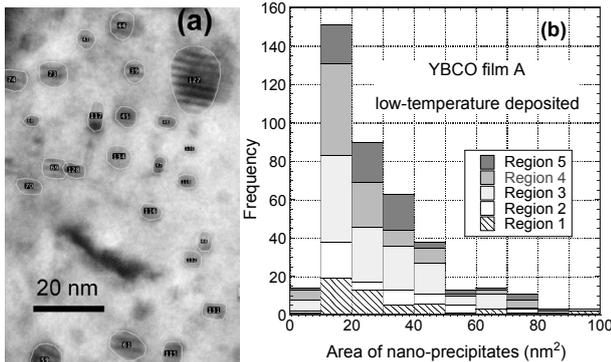


Fig. 3 Temperature dependence of  $J_c$  at  $\mu_0 H = 1$  T ( $//c$ ). Inset) TEM plan-view picture for film C.

#### 参考文献

1. H. Yamasaki, K. Ohki, H. Yamada, Y. Nakagawa and Y. Mawatari: Supercond. Sci. Tech., Vol. 21 (2008) p. 125011

# YBCO 薄膜におけるナノ析出物による磁束ピン止め特性のサイズ効果(2) —異方的スケール則とコアピン止め理論解析 Size effect of nanoprecipitates on the flux pinning properties of YBCO thin films (2) —Anisotropic scaling and theoretical analyses based on core pinning interaction

山崎 裕文(産総研); 山田 博(大島商船高専)

YAMASAKI Hirofumi (AIST); YAMADA Hiroshi (Nat. Ins. Tech., Oshima College)

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

## 1. はじめに

低温成膜 YBCO 薄膜では、ナノ析出物ピンがコヒーレンス長  $\xi(T)$  の2倍より小さいと言う条件がより広い角度で成立するため、 $J_c(H, \theta)$  から計算されるランダムピンのスケール則がきれいに観測された。このスケール則と前頁に示した  $J_c(T)$  のクロスオーバー現象を、コアピン止め相互作用による要素的ピン力  $f_p$  を用い、直接和モデルを仮定して説明した。

## 2. 富士山型の $J_c(\theta)$ ピークとランダムピンのスケール解析

前ページで示した共蒸着法低温成膜 YBCO 薄膜 A の  $J_c(H, \theta)$  は、 $H//ab$  中心の富士山型の  $J_c$  ピークを示した(図1挿入図)。このデータから異方性パラメーター  $\varepsilon(\theta) = (\cos^2\theta + \sin^2\theta/\gamma^2)^{1/2}$  を用いて計算した  $\varepsilon H$  に対して  $J_c$  をプロットしたところ、各磁界で計算された  $J_c(\varepsilon H)$  曲線はなめらかにつながった(図1、 $\gamma=7$  は YBCO の異方性)。我々は、このスケール則を、直径が  $2\xi$  以下の微細ナノ粒子(体積  $V$ ) について、コアピン止め相互作用による要素的ピン力  $f_p$  を計算して説明した [1]。量子化磁束の常電導コアが粒子を含むことによって、 $(\mu_0/2)H_c^2 V$  だけ系のエネルギーが低下する( $H_c$ : 熱力学的臨界磁界)。  $f_p$  は、このエネルギーをローレンツ力で磁束がピンから外れるときの特性距離  $\xi$  で除することによって得られ、 $f_p = \mu_0 H_c^2 V / 2\xi$  となる。直接和モデルを仮定すると、 $F_p = f_p N_p = \mu_0 H_c^2 V N_p / 2\xi$  となり( $N_p$ : ピン濃度)、図 2a に示すようにローレンツ力方向の  $\xi(\theta) = \xi_{ab} \varepsilon(\theta)$  であるため、

$$J_c = F_p / B = H_c^2 V N_p / 2\xi_{ab} \varepsilon(\theta) H \propto 1/\varepsilon(\theta) H \quad (1)$$

と計算される [1]。低磁界領域を除いて、図1の  $J_c(\varepsilon H)$  は (1) 式に従っている。図 2b に、 $B_{c2}$  の文献値 [2, 3] から計算した  $\xi(\theta) = \xi_{ab} \varepsilon(\theta)$  を示すが、75 K では  $\theta \leq 65^\circ$  くらいまで微細ナノ析出物が  $2\xi(\theta)$  より小さいと言う条件が成立している。きれいなスケール挙動が観測されたことから、 $\theta > 65^\circ$  で、その条件から外れることの効果は小さいものと考えられる。粒子が微細な薄膜 A では、70 K でもスケール則がほぼ成立した。

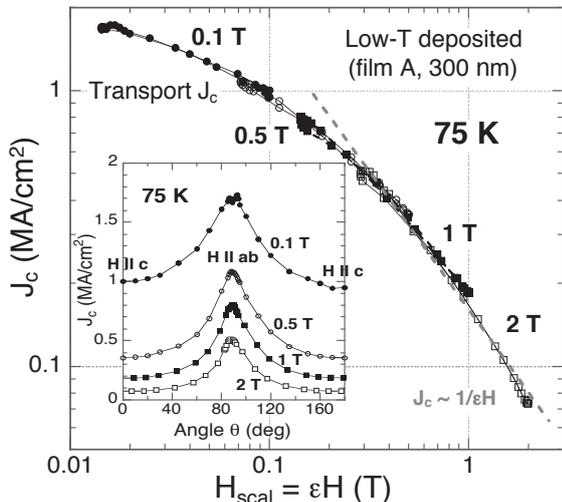


Fig. 1  $J_c$  vs.  $\varepsilon(\theta)H$  in low-temperature deposited film A. Inset shows  $J_c(H, \theta)$  data at 0.1, 0.5, 1 and 2 T.

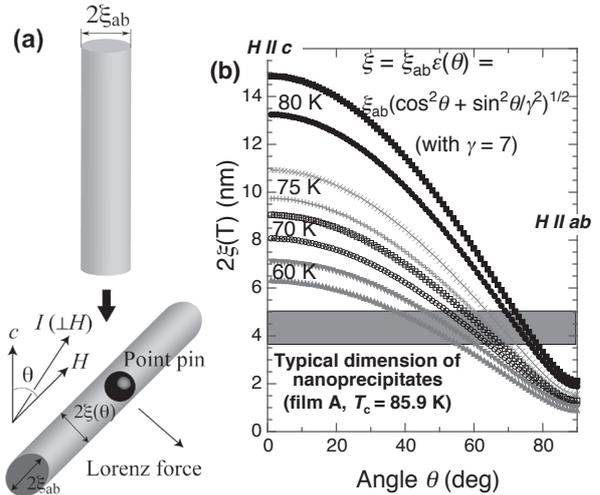


Fig. 2 (a) Schematic showing the interaction between a slant flux line and a small random (point) pin. (b)  $2\xi(T)$  values as a function of angle  $\theta$  for film A, estimated using  $B_{c2}(H//c) = \phi_0 / 2\pi\xi_{ab}^2$  from reported thin film data of  $B_{c2}$  [2, 3].

(1) 式によって、前頁図 1 の  $J_c(T)$  のクロスオーバー現象を説明できる。  $\xi(T)$  の大きな高温では、薄膜 A, B とも  $J_c$  が (1) 式で表されるため、低温成膜薄膜 A 中ナノ粒子のサイズ ( $V$ ) が B より小さいことで、 $J_c$  が小さくなる。しかし、低温では  $\xi(T)$  が小さくなって、ナノ粒子が量子化磁束のコア領域からはみ出すため、(1) 式で表される体積効果が効かなくなり、析出物濃度  $N_p$  の大きな薄膜 A の方が  $J_c$  が高くなる。

## 3. $2\xi$ より大きなナノ析出物を含む YBCO 膜での $J_c$

直径が 9–14 nm を中心に分布する比較的大きな析出物を含む薄膜 C (前頁図3挿入図) についても、同様の解析を行った。直径が  $a > 2\xi$  の球状絶縁体粒子が磁束をピン止める場合、図 3 からわかるように特性距離が  $a/2$  であって  $f_p = (\mu_0/2)H_c^2 \pi\xi^2 a / (a/2) = \mu_0 H_c^2 \pi\xi^2$  となり、

$$J_c = \pi H_c^2 \xi_{ab}^2 N_p \varepsilon(\theta) / H \propto \varepsilon(\theta) / H \quad (2)$$

を得る[1]。  $\varepsilon(\theta)$  の角度依存性は  $H//c$  中心のブロードなピークをもたらした[1]、また、 $\xi_{ab}(T) \sim (1-T/T_c)^{-1/2}$  と低温で小さくなるため、 $H_c^2 \xi_{ab}^2$  でもたらされる(2)式の温度依存性は、(1)式と比較してはるかに緩やかになる。これが、前頁図3の  $J_c(T)$  クロスオーバーの原因である。



Fig. 3 Schematic showing the interaction between a flux line and a relatively large sphere pin.

## 参考文献

1. H. Yamasaki, K. Ohki, H. Yamada, Y. Nakagawa and Y. Mawatari: Supercond. Sci. Tech., Vol. 21 (2008) p. 125011
2. A. Llordés *et al.*, Nat. Mater., Vol. 11 (2012) p. 329
3. M. Miura *et al.*, Appl. Phys. Lett., Vol. 96 (2010) p. 072506

# YBCO+BSO/YBCO+BSO 多層膜の作製と磁束ピンニング機構解析

## Fabrication and vortex pinning analysis of YBCO+BSO/YBCO+BSO multilayer films

堀出 朋哉(九工大); 一瀬中(電中研); 松本 要(九工大)  
 HORIDE Tomoya (Kyushu Institute of Technology); Ataru Ichinose (CRIEPI);  
 MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)  
 E-mail: horide@post.matsc.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(YBCO)薄膜に人工ピン(APC)を導入することにより臨界電流密度( $J_c$ )が向上する。これまでにさまざまな種類のAPCが検討されてきたが、その中でもBaMO<sub>3</sub>(BMO)ナノロッドがもっとも有効なAPCのひとつと考えられている。BaZrO<sub>3</sub>、BaSnO<sub>3</sub>(BSO)、BaHfO<sub>3</sub>などがナノロッド材料として検討され、同時に基板温度等の成膜条件も最適化されてきた。その結果膜厚方向に切れたり曲がったりすることなくまっすぐにナノロッドを成長させることにより77 Kにおいて巨視的ピン力( $F_p$ )が30 GN/m<sup>3</sup>近くまで向上することが報告された。

$J_c$ の絶対値に加えて $J_c$ の異方性も高性能YBCO線材開発において制御が必要なパラメータである。結晶構造による磁束構造の異方性のため、YBCOでは磁場が $c$ 軸に平行な( $B//c$ )とき $J_c$ が最小となり、磁場が $ab$ 面に平行な( $B//ab$ )とき $J_c$ が最大となる。結晶構造に加え、磁束ピンニングの異方性により $J_c$ の異方性も変化する。転位や双晶などがYBCO薄膜中に存在しているが、これらは $c$ 軸方向に伸びた形状であるため $J_c$ は $B//c$ のときピークを示す。APCの導入によっても $J_c$ 異方性が変化する。ナノ粒子を導入したYBCO薄膜の $J_c$ はAPCを導入していないYBCO薄膜と同様 $B//ab$ で $J_c$ が最大となる。一方ナノロッドを有するYBCO薄膜では $B//c$ において大きな $J_c$ ピークが現れる。この場合 $B//ab$ 近傍で $J_c$ 最小となるためAPCにより $B//ab$ 近傍の $J_c$ を向上させる必要が出てくる。このような $J_c$ 異方性改善のためにハイブリッドAPCが開発された。ハイブリッドAPC構造ではナノロッドに加え異なるタイプのAPCを同時に導入することにより $J_c$ 異方性の制御を行う。BSOナノロッドとPrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>ナノレイヤーからなるハイブリッドAPCではナノレイヤーが磁束運動を加速するため $B//c$ で $J_c$ が劣化する[1]。一方BSOナノロッドとY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ナノ粒子からなるハイブリッドAPCでは高磁場で $J_c$ が向上するだけでなく、 $J_c$ 異方性がナノ粒子により改善されることが明らかになった[2]。ハイブリッドAPCの種類に応じて $J_c$ 挙動が大きく変化するが、ハイブリッドAPCが磁束ピンニングに及ぼす影響は明らかではない。さまざまなハイブリッドAPCに対し $J_c$ を評価することにより、ハイブリッドAPCが磁束挙動に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。本研究ではナノロッドとナノロッドエッジからなるハイブリッドAPCを新たに作製し、 $J_c$ の磁場依存性および磁場角度依存性の測定を行った。結果をもとにハイブリッドAPCの磁束ピンニング機構を議論する。

### 2. 実験方法

パルスレーザー蒸着(PLD)を用いてSrTiO<sub>3</sub>(100)基板上に薄膜作製を行った。異なるBSO添加量を有するYBCO+BSOターゲットを交互にアブレーションすることにより、YBCO+BSO/YBCO+BSO多層膜を作製した。図1に多層膜構造の模式図を示す。BSO添加量を変化させることが可能であり、PLDのパルス数を変化させることにより $c$ 軸方向のナノロッドエッジ間隔を制御することができる。本研究ではBSO添加量を1.8-5.4vol%とし、層間隔を10-40 nmと設定した。作製した多層膜のナノ構造を透過型電子顕微鏡(TEM)により観察した。またPhysical Property Measurement System(PPMS)を用いて、多層膜の77Kにおける $J_c$ を磁場と磁場方向を変化させながら測定した。

### 3. 結果

図2にYBCO+BSO(1.8%)/YBCO+BSO(3.6%)多層膜の77K、1 Tにおける $J_c$ の磁場角度依存性を示す。14nm/16 nmと40 nm/33 nmでは薄膜内の平均BSO濃度はほぼ同じであるが、異なる $J_c$ 挙動が観察された。ナノロッドエッジのピンニング効果により、層間隔が狭い14nm/16 nmにおいて $B//ab$ の $J_c$ が大きくなった。これはYBCO+BSO多層膜において平均BSO濃度だけでなく、多層膜構造によって変化するBSO分布が $J_c$ に影響を及ぼしていることを示している。当日は単層膜、BSO添加量差および層間隔を系統的に変化させた多層膜の $J_c$ を比較することにより、多層膜型ハイブリッドAPCの有効性を示し、さらにその磁束ピンニング機構を明らかにする。

### 謝辞

本研究は公益財団法人岩谷直治記念財団科学技術研究助成により行われた。

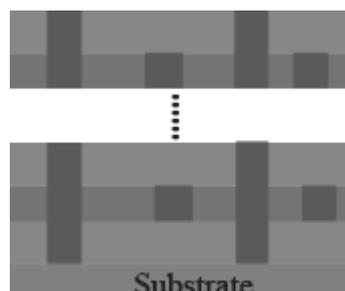


Fig.1 Schematic image of the YBCO+BSO/YBCO+BSO multilayer films.

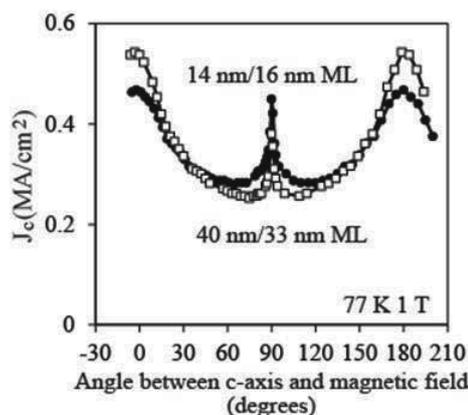


Fig.2 Angular dependence of  $J_c$  in the YBCO+BSO(1.8%)/YBCO+BSO(3.6%) multilayer films at 77 K and 1 T.

### 参考文献

1. T. Horide et al.: J. Appl. Phys., Vol. 114 (2013) p. 073903
2. T. Horide et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) p. 075019