

## RE-123 線材における磁界中局所臨界電流の長手方向分布の評価 Characterization of Longitudinal Distribution of In-field Local Critical Current in RE-123 Coated Conductor

東川 甲平, 上吹越 将人, 福崎 貴裕, 今村 和孝, 井上 昌睦 (九大); 吉田 朋, 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC); 木須 隆暢 (九大)  
HIGASHIKAWA Kohei, KAMIHIGOSHI Masato, FUKUZAKI Takahiro, IMAMURA Kazutaka, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);  
YOSHIDA Tomo, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC); KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

RE-123 高温超伝導線材は、その磁界中の良好な臨界電流 ( $I_c$ ) 特性から、マグネット応用が大きく期待されている。一方、クエンチ伝搬速度の極めて遅い高温超伝導応用では、線材の局所特性低下部の発熱による局所焼損が懸念されるため、線材特性の空間均一性の把握が不可欠となっている。また、77 K 自己磁界中の特性とマグネット応用が想定される低温磁界中の特性の相関は必ずしも良くないという報告もあり<sup>[1]</sup>、実用レベルの磁界印加環境下での均一性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、5 T の超伝導マグネットと線材搬送機構を組み合わせた RE-123 線材の磁界中局所  $I_c$  の長手方向分布評価システムを開発した。

### 2. 磁界中局所臨界電流の長手方向分布評価システム

開発した評価装置の写真を Fig. 1 に示す。同装置は 100 m 長の線材を長手方向に一定速度で搬送させることができる機構を有しており、移動した線材はまず冷媒中で冷却され、その後 5 T まで印加可能な超伝導マグネットによって磁化される。この際の線材の磁界分布をホールセンサによって取得し、得られた磁界分布から局所臨界電流の長手方向分布を評価した。

### 3. RE-123 線材の評価結果

一例として、冷媒として大気圧の液体窒素を用い、2 T の外部磁界を印加した際の磁界分布を Fig. 2 に示す。試料には 5 mm 幅の RE-123 線材を用いており、外部磁界を遮蔽している様子が示されている。特に、2 T という外部磁界中で数 mT 以下の分解能で磁界分布を取得できていることがわかる。この磁界の遮蔽がそれぞれの位置における臨界電流値に比例することを利用して、取得した磁界分布から局所臨界電流の長手方向分布を求めた。その結果を Fig. 3 に示す。このように、様々な外部磁界印加条件下で、RE-123 線材の空間均一性を把握することが可能となり、実用レベルの高磁界下における局所  $I_c$  の分布を取得する事に成功した。詳細は当日に報告する。

### 謝辞

本研究は、経産省高温超伝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」による助成を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (24360122, 26630113) の助成を得て行ったものである。

### 参考文献

- [1] V. Selvamanickam et al., Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) 055010

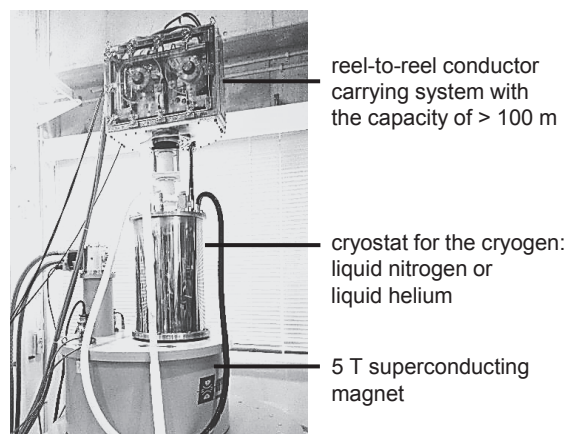


Fig. 1. Photograph of the reel-to-reel measurement system for the characterization of longitudinal distribution of local critical current in RE-123 coated conductors for high-field conditions.

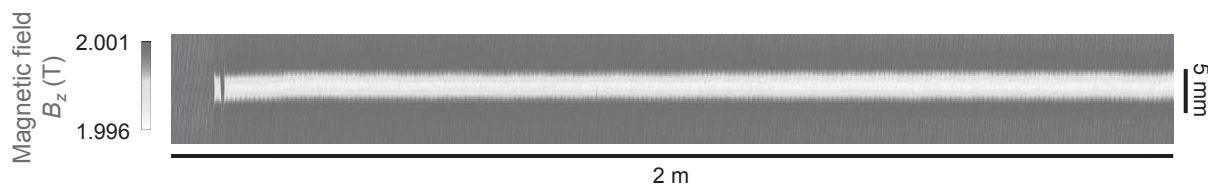


Fig. 2. Magnetic field distribution in a 2-m-long piece of 5-mm-wide coated conductor measured at 2 T and 77 K.

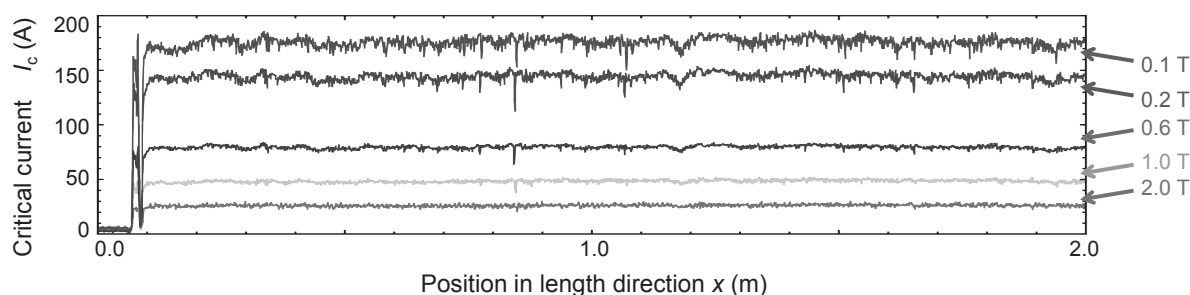


Fig. 3. Longitudinal distributions of local critical currents estimated for different external magnetic field conditions at 77 K.

# 磁気顕微鏡とX線マイクロCTによる複合評価を用いた 長尺REBCO線材の臨界電流制限因子の検討

## Investigation on current limiting mechanism in a long REBCO tape by hybrid microscopy combining magnetic microscopy and X-ray micro-CT

井上 昌睦, 田中 健太, 高崎 建, 今村 和孝, 東川 甲平, 木須 隆暢(九大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎(ISTEC)  
INOUE Masayoshi, TANAKA Kenta, TAKASAKI Ken, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)  
E-mail: inoue@ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々はこれまで、磁気顕微鏡による  $J_c$  分布の計測と、SEM や TEM 等の電子顕微鏡による構造観察とを組み合わせたハイブリッド顕微鏡法が REBCO 線材の臨界電流制限因子の解明に有効であることを報告してきた。TEM は優れた結晶構造解析手法であるが、一種の破壊検査であり、また観察の領域が限られていることから、この前段で内部構造の非破壊検査が実現できると有益である。そこで、本研究では X 線マイクロCT による REBCO 線材の内部構造観察を実施し、臨界電流の制限因子について考察を行ったのでその手法と成果について報告する。

### 2. 実験

まず、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (GdBCO) 線材の面内の  $J_c$  分布をホール素子磁気顕微鏡にて観察し、高  $J_c$  領域と低  $J_c$  領域の特定を行った。その後、それらの領域にマイクロブリッジを形成し磁場中  $J_c$  特性の計測を行うとともに、同様の領域の X 線マイクロCT 観察を行った。X 線マイクロCT は、X 線透過像を試料を回転させながら取得した後、画像解析により断面像を得るもので、 $\text{MgB}_2$  線材のフィラメント構造の 3 次元観察への実績もある[1]。空間分解能はカメラの仕様と回転角によって決まる。今回の空間分解能は  $2\mu\text{m}$  とした。

### 3. 実験結果及び考察

Fig.1 に磁気顕微鏡で得られた  $J_c$  の面内分布を示す。同図の矢印で示す箇所では、周囲の高  $J_c$  領域よりも  $J_c$  が 40%程度低い。このような低  $J_c$  領域は長尺にわたり周期的に観察されている。マイクロブリッジによる  $J_c$  の温度・磁場依存性を調べたところ、低  $J_c$  領域では磁場中でも  $J_c$  値が低く、巨視的ピン力密度も  $J_c$  の低下率に相当するだけ低下していた。しかし、Fig.2 に示すように、巨視的ピン力密度の磁場依存性は同様に、同一曲線にスケールすることが確認された。これらの結果は、低  $J_c$  領域では何らかの欠陥により電流パスの有効断面積が低下していることを示唆している。

Fig.3 に X 線マイクロCT 像を示す。高  $J_c$  領域の超伝導層表面付近 (a 図) 及び  $6\mu\text{m}$  下層の基板表面付近 (b 図) の CT 像と比べると、低  $J_c$  領域の超伝導層表面付近 (c 図) では数十  $\mu\text{m}$  程度の黒もしくは白い構造が局在していることが分かる。色の濃淡は X 線の吸収率の差異を反映していることから、これらは GdBCO 以外の何らかの欠陥の存在を意味している。さらに、 $6\mu\text{m}$  下層の基板表面付近の構造を見てみると (d 図)、超伝導層表面付近で観察されていた欠陥構造の存在が確認できる。このことは、これらの欠陥が基板起因で発生していること、電流パスの有効断面積低減の起源になっていると考えられることを示している。

### 謝辞

本研究は、経産省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 (26420273) の助成を得て行ったものである。

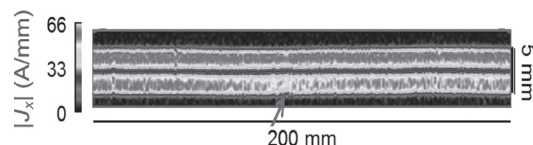


Fig. 1 Critical current density distribution in a long GdBCO tape measured by SHPM

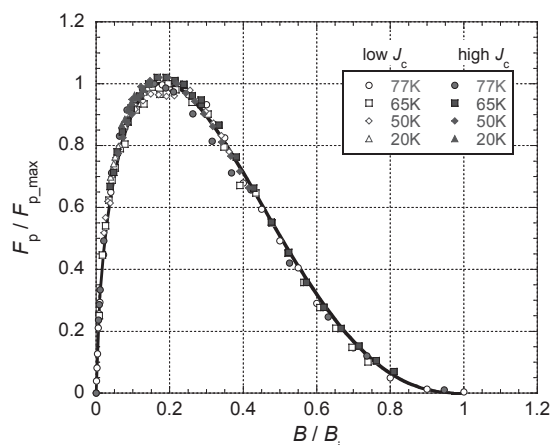


Fig. 2 Scaling of macroscopic pinning force density for low  $J_c$  micro-bridge and high  $J_c$  micro-bridge

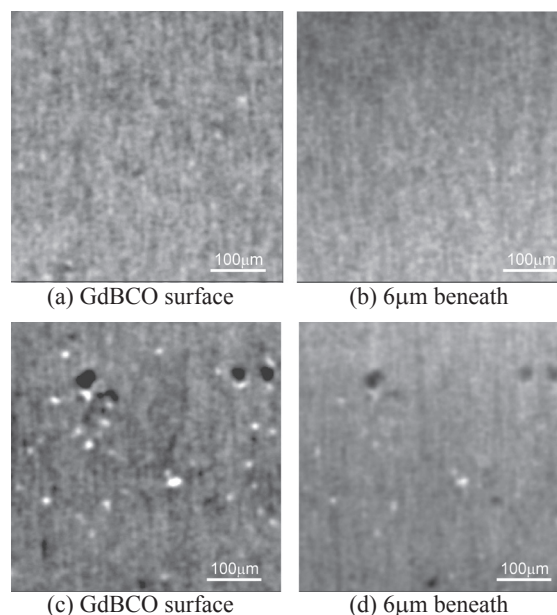


Fig. 3 X-ray micro-CT images at high  $J_c$  region: (a), (b) and low  $J_c$  region: (c), (d)

### 参考

- 井上他, 2015 年春季低温工学・超電導学会, 3C-p09

# BaHfO<sub>3</sub>人工ピンニングセンターを添加した GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 超伝導線材の 圧縮・引張りずみに対する臨界電流特性

Critical current properties in BaHfO<sub>3</sub> doped GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> coated conductors  
on compressive and tensile strain

宇佐美 貴史, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大);菅野 未知央(KEK);町 敬人, 和泉 輝郎(SRL)

USAMI Takashi, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);

SUGANO Michinaka (KEK); MACHI Takato, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: usami-takashi14@ees.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 線材に BaMO<sub>3</sub>(BMO; M=Zr, Sn, Hf)材料を添加することは、REBCO 線材の磁場中超伝導特性を向上させるために効果的であり[1]、超伝導機器の小型化や高磁場化に向けて有効な手段の 1 つである。また、基板材料に高い強度を持つ Hastelloy が用いられている REBCO 線材は、線材としての機械的な強度が高いことが知られている[2]。一方、REBCO 線材を機器応用する際、線材には曲げ変形に加えて、強力なフープ応力が作用する。そのため、超伝導線材における  $I_c$  のひずみ特性の評価は重要であるが、現在、BMO を導入した REBCO 線材に関して  $I_c$  のひずみ特性を評価した報告は少ない。そこで、BMO が REBCO 線材の  $I_c$  のひずみ特性に与える影響を明らかにするため、異なる添加量で BaHfO<sub>3</sub>(BHO)を導入した GdBCO 線材を作製し、 $I_c$  のひずみ特性を評価した。

## 2. 実験方法

Nd:YAG Reel-to-Reel 装置を用いた PLD 法により IBAD-MgO 基板に無添加 GdBCO 線材、BHO 添加 GdBCO 短尺線材を同条件で作製した。線材の長さはそれぞれ 70 mm である。BHO と GdBCO の混合ターゲットを用い、BHO の添加量が 0.7 vol.%, 1.5 vol.%, 2.2 vol.% の 3 種類の線材を作製した。基板の移動速度を 0.02 mm/s とし、基板が成膜領域中で 780 °C±20°C になるようヒーター温度を決定した。ターゲット-基板間距離は 55 mm、酸素分圧は 90 Pa で成膜を行った。線材の組成、膜厚は高周波誘導結合プラズマ発光(ICP)分析、磁場中超伝導特性の評価は PPMS (Physical Properties Measurement System)を用いて行った。磁場中超伝導特性を評価する際は、線材を 3 mm×10 mm のサイズに加工した後、レーザーエッチングにより 0.1 mm のブリッジを形成し測定を行った。機械的特性の評価には Goldacker 型試験機(最小曲率半径: 6 mm)を用い、加工なしの線材に対して液体窒素中で連続的に曲げ変形を加えながら各ひずみで  $I_c$  を測定した。加工なしの線材の  $I_c$  を測定する際は、DC スパッタを用いて Ag 安定化層を 3.5 μm 蒸着させた。

## 3. 実験結果

XRD 測定の結果から、本研究で作製したすべての線材は良好な  $c$  軸配向を示すことを確認した。面内配向度は、それぞれ 2°程度であり、超伝導層である GdBCO は線材長さ方向に[100]、[010]配向であることを確認した。また、ICP 分析より、線材全体の組成比が均一であり、すべての線材の超伝導層の膜厚が 200 nm であることを確認した。

Fig. 1 に本研究で作製した線材の 77 K、1 T における  $J_c$  の磁場印加角度依存性を示す。図より、すべての BHO 添加 GdBCO 線材において  $B//c$  方向にピークが確認されることから、BHO はナノロッドとして成長していると考えられる。Fig. 2 にこれらの線材の  $I_c$  のひずみ依存性を示す。図中の矢印は  $I_c$  の最大値を取るひずみ( $\epsilon_p$ )を示している。

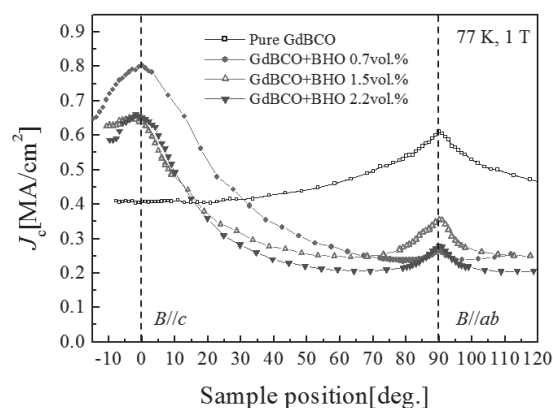


Fig. 1 Applied field angular dependence of  $J_c$  of the BHO doped GdBCO coated conductors at 77 K in  $B= 1$  T.

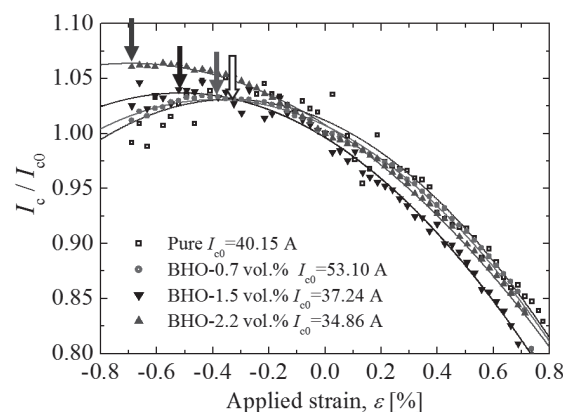


Fig. 2 Bending strain dependence of  $I_c$  for GdBCO coated conductors at 77 K in a self-field. The arrows indicate the peak strain for each coated conductors.

BHO 添加 GdBCO 線材のひずみに対する  $I_c$  の変化は放物線状であり、 $\epsilon_p$  が無添加の線材より圧縮側にシフトすることが確認された。さらに、BHO 添加量と  $\epsilon_p$  とは相関があり、BHO 添加量が多いほど、 $\epsilon_p$  がより圧縮側にシフトすることが確認された。当日は不可逆ひずみ、ひずみ感受性に関する議論も行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 25289358, 15H04252, 15K14301 及び 15K14302)の助成、及び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の委託、及びイットリウム系超電導電力機器技術研究開発の一環として NEDO の委託により実施したものである。

## 参考文献

1. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 032002
2. C. C. Clickner, et al.: Cryogenics 46 (2006) 432–438 433

# YBCO 線材を用いた電磁力平衡コイルの複合曲げによる歪み分布の評価

## Experimental Investigation of Strain Distribution for Force-Balanced Coil using YBCO tapes

谷貝 剛(上智大); 木村 祐介, 鎌田 太陽, 野村 新一 (明治大); 中村 武恒 (京大); 筒井 広明 (東工大); 力石 浩孝, 柳 長門, 今川 信作 (NIFS); 工藤 正美, 吉田 洋 ((株) システムリンクエージ)

T. Yagai (Sophia University); Y. Kimura, H. Kamada, S. Nomura (Meiji University); T. Nakamura (Kyoto University); H. Tsutsui (Tokyo Institute of Technology); H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa (NIFS); M. Kudo and H. Yoshida (System Linkage Co. Ltd.)  
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

HTS テープ線材を用いた高磁界マグネットの開発は、核融合や NMR、電力貯蔵装置のさらなる発展に極めて重要である。銅酸化物超電導体は脆いため、高磁界中での応用には受ける電磁力の影響を低減する必要がある。本グループでは、ヘリカル巻線によって構成される電磁力平衡コイルの適用を目的に研究を進めている。電磁力平衡コイル(FBC)は、ヘリカル配位の一つであり、仮想変位の原理から導出されるヘリカル巻線をトロイダル方向の発生応力がゼロになる場合を上限值、ポロイダル方向にゼロの場合を下限值に選び、この範囲のヘリカル巻数を有するコイルを指す。ポロイダル巻きピッチが一定の単純ヘリカルとは異なるFBC用の巻線には、曲げ半径ベクトルが幅広面に垂直なフラットワイズ(FW)曲げ歪みと、平行なエッジワイズ(EW)曲げ歪みが複合的に印加される事になるため、FBCの製作には、複合歪み状態における超電導特性の把握が必要不可欠となる。

そこで本研究では、FBC製作を想定してYBCOテープ線材への複合曲げ歪み印加装置を開発し、歪みゲージによる測定結果から歪みの分布を評価する事を目的とする。

### 2. 実験装置

図1は、YBCO テープ線材複合曲げ試験装置の概略図である。YBCO は水平に配置され、両端のクランプ兼電流導入端子に接続されている。クランプは複数の回転軸を持ち、曲げの印加時にFW曲げは、中心にある治具(曲率半径30mm)が垂直に降下する事で印加され、同時にEW曲げは曲率半径300mmの治具(FW治具と一体)が前面に押し出される事で印加される。この装置の大きな特徴は、複合曲げ印加時に、線材への張力を5N~200Nで一定に制御できる点であり、ヘリカル巻線機による巻線加工時の状態を模擬できる点にある。曲げ変形を印加中は、常に歪みゲージからのデータをモニタし、歪みの空間分布の時間変化を記録できるようになっている。線材部分の冷却は、曲げ変形印加後に液体窒素に浸す事によって実現できる。

以下に歪み印加・検出テストの実験条件を示す。テープ線材に取り付ける歪みゲージは、大きさが2mm×2mmであり、160mm長の線材の中心を原点に取り、 $x=\pm 1.4\text{mm}$ に2列、各々 $y=0\text{mm}$ 及び25mmの位置に2カ所、合計4個のゲージで歪みを評価した(図2)。このとき基準となるダミーゲージは中心から50mmの位置にある。ゲージはテープ上面に貼っているため、紙面表から裏へ治具が降下してFW歪みが印加される時は4個のゲージ全てが圧縮歪みとなり、負の値として検出される。 $+x$ 方向に治具が移動してEW歪みを印加する時には、図2のNo.1およびNo.3ゲージが圧縮(負)、No.2およびNo.4が引張歪み(正)になる。

### 3. 実験結果

図3は、50Nの軸方向張力を加えた状態で歪み印加治具を200mm降下させてFW歪みを印加、その後EW印加のために治具を $+x$ 方向に移動させた量を横軸とし、ゲージNo.1、およびNo.4の歪みを縦軸にプロットしたものである。初期値が

異なるのは、 $y=+25\text{mm}$ がFW治具の端に相当するため、その影響を受けているためと考えられる。

EW歪みは治具の移動量が4mmを超えたところで始まる。No.1は圧縮、No.4は引張り歪みが加わると予測したが、両方ともその逆の結果となった。複雑な歪み印加機構については、講演にて発表する。

なおこの研究は、平成26年度LHD計画共同研究の助成を受けて行われている。

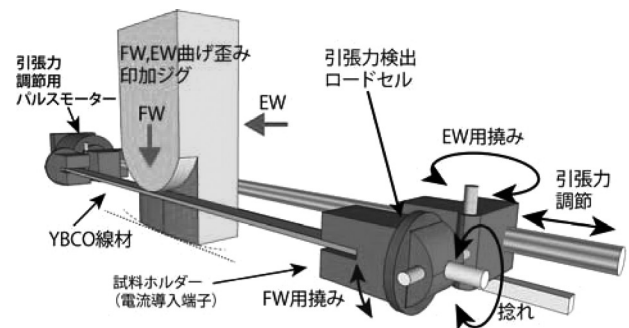


Fig.1 Schematic of newly developed complex strain application system.

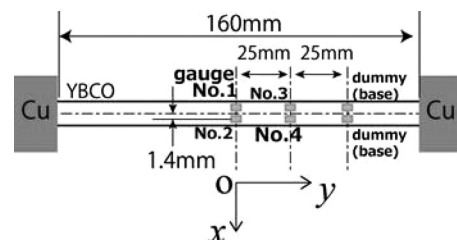


Fig.2 Experimental setup of strain measurement.

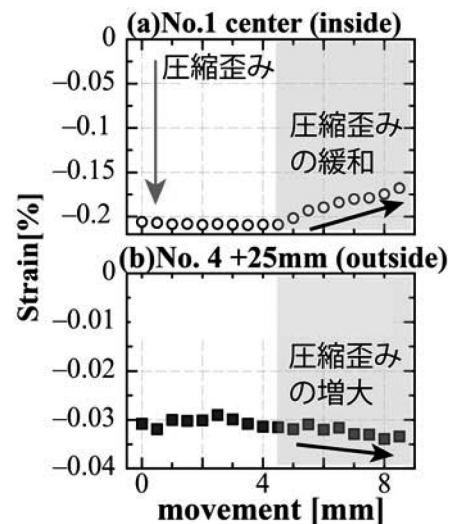


Fig.3 Results of strain distributions of the gauge No.1 and No. 4.

# 放射光ひずみ測定のための低温引張システムの開発

## Development of cryogenic tensile testing machine for strain measurement using synchrotron radiation

菅野 未知央(高エネ研); 町屋 修太郎(大同大); 菖蒲 敬久, 城 鮎美(原子力機構); 中本 建志(高エネ研)  
 SUGANO Michinaka (KEK); MACHIYA Shutaro (Daido University); SHOBU Takahisa, SHIRO Ayumi (JAEA);  
 NAKAMOTOTatsushi (KEK)  
 E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材を強大な電磁力を受ける高磁場超伝導磁石に応用するためには、同材料が有する臨界電流のひずみ効果を考慮にいれた磁石設計が必要である。超伝導体の弾性変形範囲内では、線材軸方向の引張に対して、一定ひずみ(ピークひずみ)で臨界電流が最大になる放物線的なひずみ依存性が観察されている。従来の A15 型超伝導体では、超伝導の内部ひずみが解放される時に臨界電流が最大値を取ることが知られている。一方、REBCO 線材では軸方向ひずみがゼロになるひずみと、ピークひずみが明らかに一致しないという振る舞いが観察されている[1]。また、低温になるほどピークひずみが圧縮側にシフトするなど興味深い傾向も報告されている[2]。このように、REBCO 線材では内部ひずみに対する臨界電流の変化が複雑であり、臨界電流を最大化するための最適ひずみ状態が明らかになっていない。

複合線材内部の超伝導体のひずみ状態を観察する手法として、近年量子ビームが盛んに用いられている。特に低温で、引張荷重を負荷した状態で超伝導体の内部ひずみを測定することで臨界電流のひずみ依存性と内部ひずみの関係を議論できると考えられる。

量子ビームを利用した低温引張ひずみは、JRR-3 や J-PARC など中性子回折実験で先行して行われてきた[3][4]。これは、中性子回折のビームラインでは回折計の耐荷重が高く、冷凍機と引張機構を同一の真空容器に組み込んだ大型の低温引張装置が設置可能であり、かつ中性子ビームの高い透過性を利用してクライオスタットを透過した回折測定も容易であるためである。この方式では、冷凍機と試料間の距離を短くできるため、試料温度を 10 K 以下まで冷却することに成功している[3][4]。一方、放射光を利用すると回折測定自体に要する時間を短縮できるため測定点数を多く取れるメリットがある。しかしながら、一般的に放射光ビームラインでは大型の測定装置を回折計に設置することが難しく、このことが低温引張実験を難しくする一因となっている。

以上のような背景から、本研究では放射光ひずみ測定のための小型低温引張システムの開発を行い、SPring-8 において初めてのビーム実験を行った結果について報告する。

### 2. 低温引張装置

Fig. 1 に今回新たに開発した低温引張システムの全体写真を示す。回折計に設置されている引張装置の部分は真空容器、熱シールドおよび試料部(最低温部)からなる 3 層構造である。上部のサーボモーターを制御することにより、線材軸方向に最大 2 kN までの引張荷重を負荷することができる。冷却には、4 K-1.5 W の 2 段 GM 冷凍機を用いた。引張装置部分を小型、軽量化するため、冷凍機の真空容器は床置とした。引張装置と冷凍機真空容器の間を 2 m 長の真空フレキホースで接続し、その中に伝熱パスとして 5N の高純度アルミ薄板を積層した可とう導体を挿入した。2 本あるフレキホースは、GM 冷凍機の 1 段、2 段ステージと引張装置の熱シールド、試料つかみ具にそれぞれ

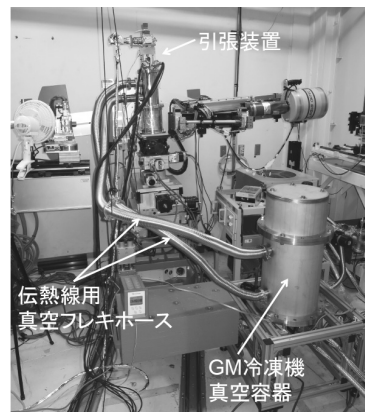


Fig. 1 Cryogenic tensile testing apparatus mounted on the goniometer at BL28B2 in SPring-8

接続されている。つかみ具は銅製であり、温度センサーとヒーターを用いて、試料両端温度を調整することができる。このように、共通の真空でありながら、真空容器を別構造にすることで、回折計に設置する部分の軽量化し、かつ試料位置調整のための移動、回転を可能にしている。冷却試験を行ったところ、現状での試料部の最低到達温度は 25 K であった。また、ヒーターの出力を調整することで、200 K 以上まで昇温できることも確認した。

### 3. 低温引張ひずみ測定

SPring-8 の白色 X 線回折ビームライン (BL28B2) に低温引張システムを設置し、低温引張ひずみ測定を実施した。試料として、SuperPower 社製の人工ピン入り (Y,Gd)BCO 線材を用いた。引張装置に取り付けた線材および、無ひずみの格子定数を測定するための超伝導体はく膜を最低到達温度まで冷却した後、徐々に昇温しながら無負荷の状態で行った。これにより、線材中の (Y,Gd)BCO 膜の残留ひずみの温度依存性を測定した。また、40 K、77 K、300 K の 3 温度で段階的に引張荷重ひずみを増加させながら、(Y,Gd)BCO 膜の内部ひずみを測定した。以上の結果から、室温、低温の両方で負荷ひずみに対する内部ひずみ変化のデータを得ることに成功した。

### 4. まとめ

低温引張システムを開発し、SPring-8 において超伝導線材の初めての低温引張試験を実施した。2 m 長の高純度アルミ可とう導体を用いた伝導冷却により、引張装置部分を小型、軽量化しつつ、試料部を 25 K まで冷却できることを確認した。さらに、放射光を用いた REBCO 線材の低温引張ひずみ測定にも成功した。

### 参考文献

1. K. Osamura et al, SUST, Vol. 23 (2010) 045020.
2. M. Sugano et al, SUST, Vol. 23 (2010) 085013.
3. Y. Tsuchiya et al, Mea. Sci. Tech., Vol. 21 (2010) 025904.
4. X. Jin et al, Rev. Sci. Instr., Vol. 84 (2013) 063106.

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費基盤 B (24360281) の助成を受けたものです。

# 実用 REBCO テープ線の 77K における機械—超電導特性 Mechanical-Superconducting Properties of Practical REBCO Wires at 77 K

長村光造 (応用科研); 町屋修太郎 (大同大学); 西島元 (NIMS)  
OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ); NISHIJIMA Gen (NIMS)  
E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

## 1. はじめに

最近では複数のメーカーから  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  (RE=Y, Gd) テープ線が市販されるまでになってきている。これらの線材を超電導機器に使用するためには、諸特性を共通化された測定方法で比較検討することが求められる。ここでは特に 77 K における機械特性、臨界電流の歪依存性等の測定結果を報告するとともに、測定方法の標準化(規格化)について検討したので報告する。

## 2. 試験方法

供試料には市販されている、ここでは A, B, C, D と称する 4 種類の REBCO テープ線材を用いた。島津製作所製引張試験機を用いチャック間距離 10 cm で国際標準 IEC-61788-XX [1, 2] に準じて室温で引張試験を行った。さらに試料部分を液体窒素に浸漬し、同様の引張試験を行った。さらに引張試験とほぼ同様の試料配置で試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して I-V 測定を行い臨界電流及び  $n$  値を決定した。

## 3. 実験結果および考察

室温および 77 K で測定した引張試験結果を Fig.1 にまとめて示す。ここで細線は室温、太線は 77 K でのデータを示す。ヤング率は初期勾配および 0.2%程度引張った後除荷したときの勾配とから決定した。また降伏条件を知るため 0.2%耐力を求めた。一般的な傾向としてヤング率は5%程度 77K で大きくなること、降伏後の耐力は低温になると大幅に上昇することが明らかとなった。

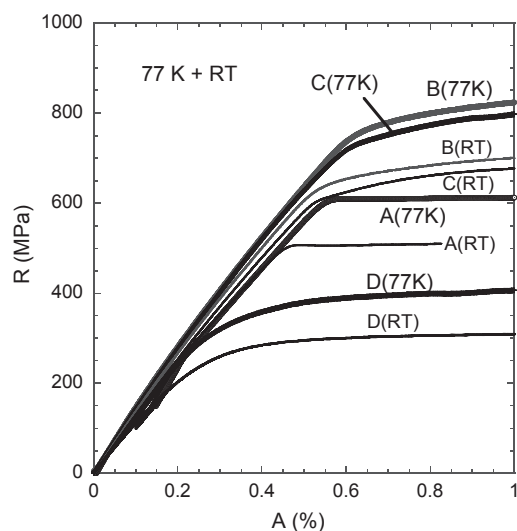


Fig. 1 Stress versus strain curves for 4 kinds of REBCO tapes at room temperature and 77 K.

Fig.1に見られるように室温から77Kへの機械的性質の挙動は妥当なものであり、このことより室温での試験方法に準じて液体窒素温度で行った試験結果は十分に再現性のある信頼性のある結果が得られた。この液体窒素温度での引張試験結果をもとに国際標準を提案する足がかりが得られたと考えられる。

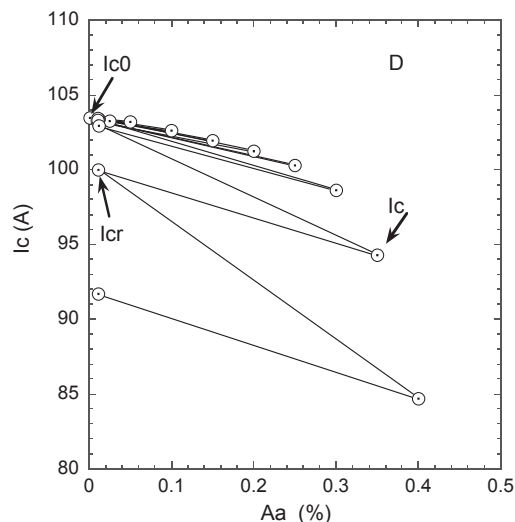


Fig. 2 Critical current as a function of applied strain for a REBCO wire

臨界電流の引張歪依存性を次の手順で行った。まず引張歪ゼロの状態での臨界電流を測定し  $I_{c0}$  とする。次に  $Aa$  まで引張歪を印加した状態で測定した臨界電流を  $I_c$  とする。さらに引張歪をゼロにした状態での臨界電流を  $I_{cr}$  とする。Fig.2にみられるように  $I_c$  は引張歪が増加すると減少する。その原因は(1)様々な超電導特性を支配するパラメータの歪依存性に由来する可逆歪効果と(2)超電導層の破断によるものとが考えられる。ここで  $I_{cr}$  は外部応力をゼロにした時の値であり、もし超電導層の破断による劣化がなければ  $I_{c0}$  に戻るはずである。Fig.2に示すように大きな引張歪を印加した後では  $I_{cr}$  は  $I_{c0}$  に戻らない。つまり  $I_{cr}/I_{c0}$  の比の1からの減少を観測することにより可逆限界歪を見定めることができる。ここでは  $I_{cr}/I_{c0}=0.99$  を実用的な可逆限界歪/応力と定義して、試料ごとの値を実験的に求めた。詳細は当日報告する。

実用超電導線を様々な応用に供するとき、機器の製作過程で機械的変形が加わり、また低温への冷却過程、磁場中で電流を流す動作中に引張、圧縮、曲げ等の様々な機械的変形が加わる。このような環境中で超電導線の健全性を前以て見定めておくことは重要である。ここで報告する可逆限界歪および応力は超電導線の安全な使用限界を与える重要なパラメータとなる。そこで国際標準によりその測定方法および決定方法を決めておくことは重要と考えられる。なおここでは  $I_{cr}/I_{c0}=0.99$  としたが、これが妥当であるかは議論がなされるべきところと考えられる。

## 参考文献

1. K Osamura et al, International RRT for mechanical properties of REBCO SC tapes at room temperature, SuST 27 (2014) 085009
2. IEC 61788-XX: 2015 Ed. 1.0 FDIS Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires