

DI-BSCCO[®]線材の I_c 改善状況Recent improvement in critical current of DI-BSCCO[®] wire

菊地 昌志, 小林 慎一, 鍵山 知宏, 山崎 浩平, 山出 哲, 中島 隆芳,
林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工); 北口 仁(NIMS); 下山 淳一(東大)

KIKUCHI Masashi, KOBAYASHI Shinichi, KAGIYAMA Tomohiro, YAMAZAKI Kouhei, YAMADE Satoru,
NAKASHIMA Takayoshi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (Sumitomo Electric);
KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SHIMOYAMA Junichi (Tokyo Univ.)

E-mail: kikuchi-masashi@sei.co.jp

1. はじめに

当社は、2004年にBi2223超電導線材作製プロセスに加圧焼成法を導入して以降、高 I_c 化開発を加速している。当社の標準製品であるDI-BSCCO[®] Type H (線材断面積が約1mm²)では、 $I_c=180A$ 級の性能が最長2kmに亘って得られているが、当社線材を適用した超電導機器において技術的もしくは経済的な優位性を高めるためには、さらなる I_c 向上が必要とされている。2009年に作製した、銀比を低減しかつ断面積を大きくした短尺試料では、それまでの最高値を20A上回る $I_c=236A$ を得た[1]ものの、 I_c の根本的な改善に繋がる有用な指針を得ることができなかった。これを受け、さらに高 I_c 化開発を促進するため、 I_c を支配する因子(結晶配向性、超電導性、粒接合性)の改善に注力している。

Bi2223線材の T_c と熱処理条件との関連を調査した結果として、 T_c の上がりやすい条件下でBi2223線材を熱処理した場合、フィラメント中にPb3221相が析出する現象が報告されている[2]。Pb3221相はBi2223相の粒界に沿った析出するため、著しくBi2223相の粒間特性を低下させる。超電導性と粒接合性の改善させるためには、Pb3221相を析出させずにBi2223相の T_c を向上させることが必要であり、PITプロセス全体に亘って製造条件の最適化を進めた。

2. 短尺試料における I_c 改善状況

PITプロセスの最適化を進めた結果、Type H仕様の中心値付近の幅、厚みを有する1m長試料(以下#A)において、2010年8月に $I_c=241A$ を達成した。本試料の J_c はこれまでの最高値 $66kA/cm^2$ から $74kA/cm^2$ に改善された。Fig. 1に、180Aの I_c を有するType Hから採取した試料と#Aの反磁性磁化曲線を示す。50Kの磁化率に対して0.1%の磁化率となる温度で定義した T_c は、前者が111Kであるのに対して後者では112.6Kに向上している。また、#AのX線回折による構成相分析ならびにSEM観察を行った結果、粒接合性に影響を与えるPb3221相の存在は認められなかった。この結果は、主にBi2223相の粒間超電導特性を反映する、10%の磁化率を示す温度と90%の磁化率を示す温度の差として定義した ΔT_c (超電導転移幅)が2.3Kと極めて優れていることと整合しており、#Aでは高い T_c とともに優れた粒間特性が得られているものと考えられる。これらを含めて、 J_c が改善された要因については現在も解析中であり、今後の J_c 向上の見通しも含めて当日報告する。

当社は、DI-BSCCO[®]のキャリアドープ状態と77K、自己磁場下の I_c ならびに低温磁場中の I_c との関連についても調査を進めている。#Aの過剰酸素量を変えることでキャリア濃度を最適ドープ状態になるように調整した結果、 I_c は250A (600A-cm、 $J_c=76kA/cm^2$)まで向上しており、線材サイズをType H仕様に収まる範囲内でやや大きくすること、 $I_c>300A$ の可能性があることが示唆される。

3. DI-BSCCO Type H の I_c 改善状況

Fig. 2に示す通り、短尺試料の I_c 改善に伴いType Hの I_c にも大きな成果が出ている。2010年10月には、Type H型の長尺試作線材において $I_c=230A$ (50m)、209A (450m) の特性が確認されており、 $I_c>200A$ を有するkm級Type H品を近く製品化予定である。

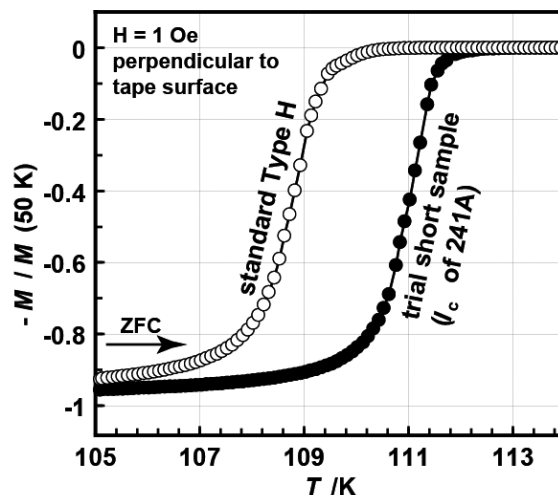


Fig. 1 Magnetization curves of the standard Type H wire and the trial short sample with I_c of 241A

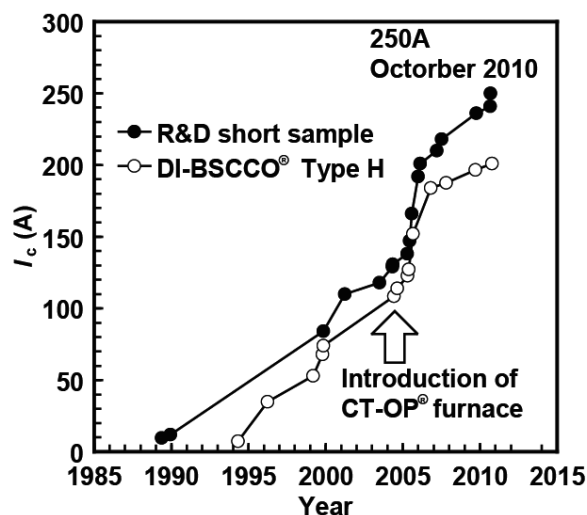


Fig. 2 Progress in I_c of Bi2223 superconducting wire

参考文献

1. M. Kikuchi *et al.*: Abstracts of CSJ conference, Vol. 81 (2010) p.1
2. M. Watanabe *et al.*: Abstracts of CSJ conference, Vol. 81 (2010) p.3

DC マグネトロンスパッタリング法で作製した Bi2223 薄膜 及び後アニール処理した (Bi, Pb) 2223 薄膜

Bi2223 thin films prepared by DC magnetron sputtering and post-annealed (Bi, Pb) 2223 thin films

和泉 竹衛、土井 俊哉、吉村 卓也、白樂 善則 (鹿児島大学) ;
松本 明善、北口 仁 (物質・材料研究機構)

IZUMI Takemori, DOI Toshiya, YOSHIMURA Takuya, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University)
MATUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI hitoshi (National Institute for Material Science)

E-mail : k9544875@kadai.jp

1. はじめに

Powder-in-tube 法により容易に作製可能であることから、長尺の Bi2223 線材の開発は他の高温超伝導体に比べて進んでいる。しかしながら、Bi2223 線材の J_c は数万 A/cm² 程度と低い値に留まっており、真に実用線材となるためには更なる特性向上が求められている。我々は Bi2223 が持つ可能性を調べるために良質な薄膜の作製に取り組んでいる。今回 DC マグネトロンスパッタリング法により Bi2223 薄膜を作製した。さらにその薄膜を Bi+Pb+O₂ 雰囲気中で熱処理することにより特性改善を試みた。

2. 実験方法

Bi2223 薄膜は単結晶 SrTiO₃(STO)基板上に DC マグネトロンスパッタリング法により作製した。作製時の酸素分圧は 0.33 Torr、基板温度は 706 °C とした。作製した薄膜試料に Bi+Pb+O₂ 雰囲気中 845 °C にて 30 時間の熱処理を行い (Bi,Pb)2223 薄膜を作製した。

薄膜試料の配向性を確認するために θ - 2θ 法による X 線回折測定 (XRD) 及び極点図測定を行った。また、試料表面については走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した。さらに、試料の臨界電流密度 (J_c)、抵抗ゼロの臨界温度 (T_{c-zero}) は直流四端子法で測定した。

3. 結果と考察

Fig.1 に単結晶 STO 基板上に作製した Bi2223 薄膜と熱処理後の (Bi,Pb)2223 薄膜の XRD パターンを示す。Bi2223 のピークは Bi2223 の (000) のピークだけが観測できた。このことから Bi2223 は c 軸配向していることが分かる。また、(Bi,Pb)2223 のピークは Bi2223 のピークに比べてピーク強度が強く、ピークがシャープになっており、Bi+Pb+O₂ 雰囲気中で熱処理することによって結晶化度が向上したことが確認できた。Fig.2 に Bi2223 薄膜と (Bi,Pb)2223 薄膜の抵抗率-温度依存性を示す。Bi2223 薄膜は $T_{c-zero}=72$ K であった。一方、(Bi,Pb)2223 薄膜は $T_{c-zero}=105$ K であり T_{c-zero} が大幅に改善された。また、77K において J_c を測定したところ、自己磁場において $J_c=2 \times 10^5$ A/cm² であった。以上の結果から Bi2223 薄膜を Bi+Pb+O₂ 雰囲気中で熱処理することで (Bi,Pb)2223 薄膜を作製する手法は特性向上に非常に効果的であると言える。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 22246079 の助成を受けて実施されたものである。

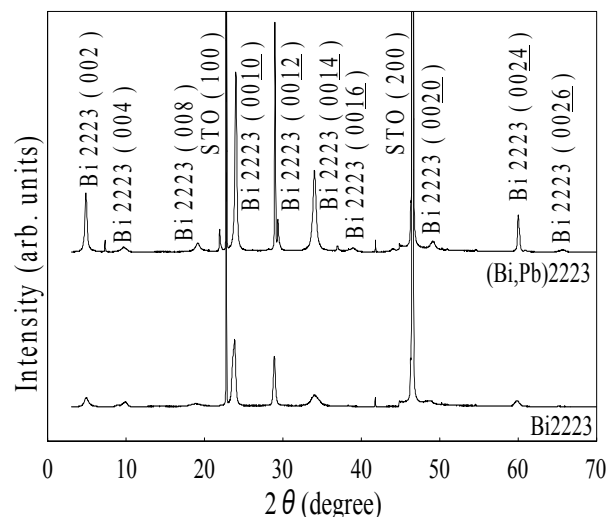


Fig.1 The X-ray diffraction patterns of the Bi2223 and the (Bi,Pb)2223 thin films. All diffraction peaks of the patterns can be indexed as (00 l).

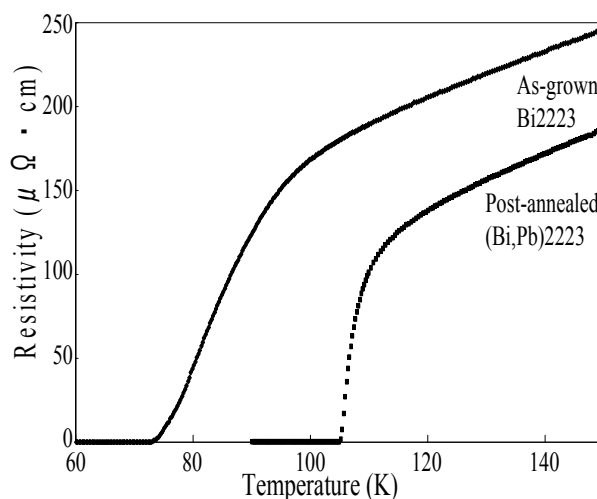


Fig.2 Temperature dependence of the resistivity for the as-grown Bi2223 and the post-annealed (Bi,Pb)2223 thin films.

Bi(Pb)2223 線材の T_c に対する 2 段階アニール効果 Effect of two step post-annealing on T_c of Bi(Pb)2223 tapes

渡辺 雅彦, 下山 淳一, 小畑 圭亮, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二(東大院工); 小林 慎一, 林 和彦(住友電工)
WATANABE Masahiko, SHIMOYAMA Jun-ichi, OBATA Keisuke, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji
(Univ. of Tokyo); KOBAYASHI Shin-ichi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: tt096686@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

我々は Bi(Pb)2223 線材の高 T_c 化を通じた臨界電流特性の改善を図ってきた。これまでに Bi(Pb)2223 焼結体バルクや実用線材について金属組成の制御や適度な還元アニールによって T_c が 115 K を超え、最高 117.8 K に達することを報告してきた[1, 2]。しかし、同時に生成する不純物である Pb3221 相によって超伝導転移が鈍くなり、臨界電流特性はむしろ劣化した。そこで我々は定比に近い金属組成を有する線材に対して様々な条件で還元アニールを施すことで、アニール条件と T_c や不純物の析出量の関係を系統的に調べてきた[3]。その結果、アニール温度パターンにより、その効果が大きく異なる可能性が示唆された。そこで本研究では、還元雰囲気中において異なる温度での 2 段階のポストアニールによって、Pb3221 相の生成を伴わず、 T_c をより高めることを試みている。また、金属組成が異なる線材に対して、同様に 2 段階アニールを行い、その効果の金属組成依存性についても調べた。

2. 実験方法

Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO を定比組成に近い $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の比になるように混合後、空气中 780 ~ 810°C で仮焼した。得られた仮焼粉末を内径 3 mm, 外径 5 mm の Ag 管に充填し、細線化・圧延によって厚さ~0.33 mm, 幅~3 mm のテープに加工した。これに対して 5% O_2 気流中 830°C で 36 h の一次焼成を行った後、加圧焼成(300 MPa)を行い、Bi(Pb)2223 の単芯線材を得た。また、多芯線材については空气中 847°C で 216 h の本焼成を行った。これらの本焼成後の試料を as-sintered 試料と呼ぶ。得られた試料に対し、0.5% O_2 気流中において第 1 ポストアニールを 775°C で 100 h 行い、さらに 725°C で第 2 ポストアニールを 100 h または 200 h 行った。これらの試料について最後に空气中 600°C でアニール後、急冷することにより酸素量を調節した。構成相の同定及び格子定数の評価は X 線回折測定、微細組織観察は SEM により行い、磁化特性は SQUID 磁束計を用いて調べた。

3. 結果・考察

Fig. 1 に定比組成多芯線材の as-sintered 試料、0.5% O_2 気流中 725°C でポストアニールを行った試料、および 2 段階ポストアニールを行った試料の XRD パターンを、Fig. 2 にそれらの試料の磁化率の温度依存性を示した。Fig. 1 より 775°C での第 1 ポストアニールの導入による Pb3221 生成量には顕著な変化はみられない。一方で、Fig. 2 に示したように、2 段階ポストアニールを行った試料の方が高い T_c を示し、 T_c^{onset} は 115.2 K まで達した。このとき、775°C でのアニールを行わなかった試料では 725°C でのアニール時間を長くしても T_c^{onset} は変化しなかったが、775°C でのアニールを行った試料では 725°C でのアニール時間の延長により T_c^{onset} がさらに上昇した。この傾向は他の組成でも同様に認められた。また、2 段階ポストアニール法の特長として超伝導転移が非常に鋭く、 T_c^{mid} が高いことが挙げられ、725°C のポストアニールを 200 h 行った試料において T_c^{mid} が 112.7 K に達した。また、775°C でのアニール

を行った試料はそれを行わなかった試料と比べて c 軸が長く、Bi(Pb)2223 相の金属組成がさらに定比に近づいたことが示唆された。これらの事実は超伝導特性が最終的な金属組成を変えるアニール条件だけで決定されるのではなく、それまでの過程にも依存することを意味している。

発表では、2 段階ポストアニールを行った線材の I_c についても報告する。

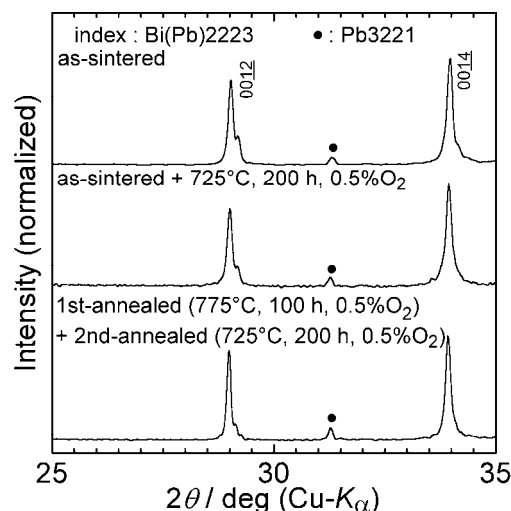


Fig. 1. XRD patterns of Bi(Pb)2223 multi-filamentary tapes, as-sintered, post-annealed at 725°C in 0.5% O_2 for 200 h and post-annealed at 775°C and 725°C in 0.5% O_2 (two step).

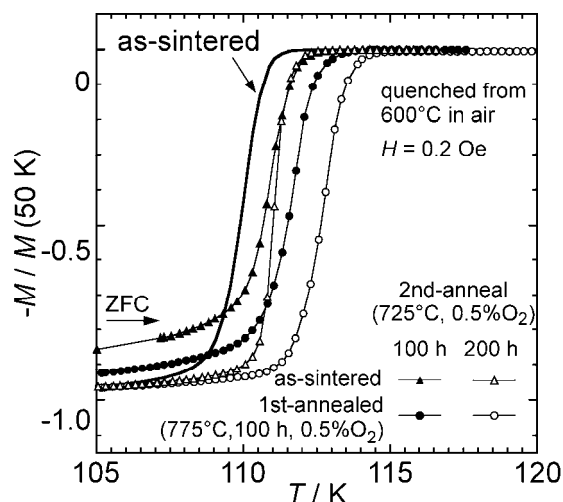


Fig. 2. ZFC magnetization curves for Bi(Pb)2223 tapes with nearly stoichiometric cation composition, as-sintered, post-annealed and two step post-annealed.

[参考文献]

- [1] A. Tanimoto *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012146.
- [2] J. Shimoyama *et al.*, *Physica C* **463-465** (2007) 802-806.
- [3] M. Watanabe *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference*, **81** (2009) p.3

BSCCO テープにおける低温曲げ歪の臨界電流への影響 In-situ Bending Dependence of Critical Current of BSCCO Tapes

長村光造 (応科研)、中村武恒 (京大)、伊藤佳孝、吉川雅章、寺沢俊久、藪野良平 (イムラ材研)
OSAMURA Kozo (RIAS), NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ), ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki,
TERASAWA Toshihisa, YABUNO Ryouhei (Imura RI.)
E-mail: osamura_kozo@rias.or.jp

1. はじめに

BSCCO-2223 テープ線材の臨界電流に及ぼす応力・歪の影響については、(1) BSCCO 層が弾性限にある歪領域でいわゆる Nb3Sn 線材とは異なる真性歪効果を示し、(2) 弾性限を越える歪領域では BSCCO 層の多重破断が起こることが知られている。曲げ歪では一般に引張と圧縮の歪が同時に加わることになる。このときどのような真性歪効果が現れるか定量的な考察はまだ行われていない。また曲げ歪における多重破断も複雑な様相を呈する。一方実用的には曲げは頻繁に起こるので、その挙動を詳細に調べることが重要である。

例えば冷凍機冷却環境下で超電導テープをコイルとして使用するとき実温度はかなりの温度幅で変動すると考えられる。そこで実際に冷凍器により冷却した状態で低温でテープに曲げ歪を与え、温度変化させたときの臨界電流の挙動を調べたので報告する。

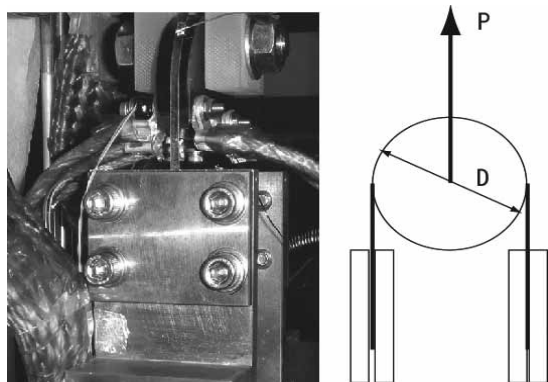


Fig. 1 Low temperature bending apparatus for critical current measurements

2. 実験方法

用いた試料はDI-BSCCOテープに銅合金をラミネートしたいわゆる 3ply-BSCCO テープ線材である。テープを Fig.1 に示すように直径 D の半円板に巻きつけ、その両端を銅ブロックで固定した。さらに円板の中心を荷重 P で引張った。こうすることによりテープ線材を円板にしっかりと添わせ、更に引張荷重を加えることができる。この曲げ・引張治具を冷凍機ヘッドに取り付けて冷却した。雰囲気は真空とした。引張荷重を与えた状態で電流を流し $1\mu\text{V}/\text{cm}$ の条件で臨界電流を決定した。

3. 実験結果

Fig.2 に臨界電流の温度依存性を示す。D=50 と 40 mm まで曲げたテープ試料に 50MPa までの張力を与えた状態で測定したところ 60K 辺りからほぼ直線的に 85K まで臨界電流は低下した。この張力は 77K での応力-歪曲線から弾性限内の値であった。さらに D=30mm まで曲げた試料では臨界電流の値は全体に下がるが、温度依存性は類似していた。

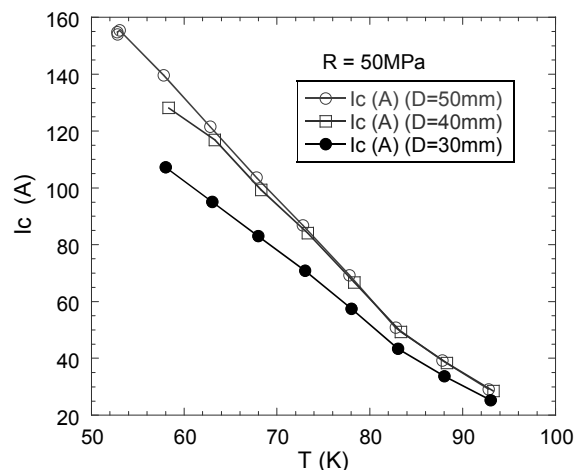


Fig. 2 Temperature dependence of critical current under tensile stress of 50 MPa for 3ply BSCCO tapes bent with different diameter.

さらに約 80K の一定温度で試料に与える張力を増加させたところ Fig. 3 に示すようになった。D=50 と 40 mm の試料では約 180 MPa 付近から臨界電流は減少し始めた。一方 D=30mm の

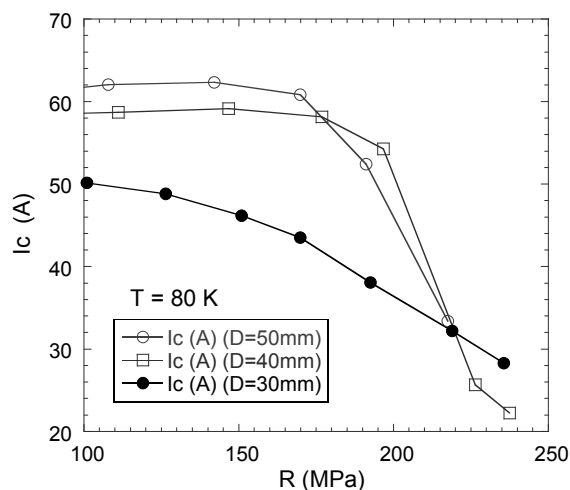


Fig. 3 Tensile stress dependence of critical current at 80 K for 3ply BSCCO tapes bent with different diameter.

試料では、はじめから臨界電流の値は低く、引張応力の増加とともに連続的に低下した。

4. まとめ

以上結果をまとめると、本実験で用いたテープ試料を D = 40mm まで曲げても劣化しないことが明らかとなった。ただし曲げた状態で 180MPa 以上の引張応力を印加すると劣化が始まると結論づけられた。

DI-BSCCO TypeAC 線材の臨界電流の応力/ひずみ依存性評価 Evaluation of stress/strain dependence of critical current in DI-BSCCO TypeAC

笠場 孝一(富山大); 廣内 悟, 吉野 泰弘(岩手大); 藤上 純, 長部 吾郎(住友電工)

KASABA Koichi(TOYAMA Univ.); HIROUCHI Satoru, YOSHINO Yasuhiro(IWATE Univ.); FUJIKAMI Jun, OSABE Goro(SEI)
E-mail: t2409021@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

本研究では、住友電工製 DI-BSCCO に対して、実用上欠かせない、臨界電流 I_c の応力/ひずみ依存性を単軸引張り試験、曲げ試験、横圧縮試験で測定した。引張り試験と横圧縮試験に関しては、77K・自己磁界下での測定に加え、4K・14.5T 環境中での測定を行った。

2. 実験方法

試料は、DI-BSCCO TypeAC で、交流用途のテープ線材である。また、TypeAC の機械的特性を向上させる狙いで Cu 合金をラミネートしたものが TypeACT である。東北大金研強磁場超伝導材料研究センターの 15T ソレノイド型超伝導マグネットのボア内に引張り試験装置、横圧縮試験装置を挿入し、4K・14.5T 環境中でそれぞれ試験を行った。また同型および他の試験装置を用いて 77K・自己磁界下での試験を行った。一方、曲げ試験は Goldacker 型曲げ試験機を用いて行った。これは、ステッピングモータによって、試料に連続的な純曲げを与えることが可能な装置である。すべての試験において、 I_c は 4 端子法で、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ を基準として測定した。

3. 結果および考察

Fig.1 に各試験環境下での引張り試験で得た I_c の応力依存性を示す。測定途中もしくは最後に除荷をし、その除荷後にも測定を行ったが、それを白抜き記号で表す。 I_c の劣化挙動は TypeAC, TypeACT とともに、応力の増加に伴ってわずかに劣化していき、さらに大きな応力が加わることで急激に劣化した。また I_c が大きく劣化する以前に限り、除荷後に I_c がわずかに回復する可逆性を示した。例えば I_{c0} 97%維持応力を求めると、77K・自己磁界下では TypeAC, TypeACT でそれぞれ 109MPa, 202MPa, 4K・14.5T 下ではそれぞれ 92MPa, 141MPa であった。どちらの試験環境下においても、Cu 合金のラミネートによる、応力特性の著しい向上が確認できる。

Fig.2 に 77K・自己磁界下での曲げ試験で得た I_c の曲げひずみ依存性を示す。ここで曲げひずみの定義は、線材の表面ではなく、AC については表裏の Ag 層を除いた、また ACT についてはそれにさらに補強層を除いた、Bi フィラメントと Ag シース材が存在するコア領域内の最大ひずみとする。また、参考までに TypeAC に関して、 I_c の劣化は引張りの領域のみで生じているという仮定の下で、77K での引張り試験の結果である I_c 劣化曲線を用い、曲げひずみの生じている超伝導体の輸送可能電流を積算した I_c の予測計算の結果を併記する。曲げ試験による I_c の大きな劣化が開始するひずみが、この計算によってほぼ模擬できていることから、 I_c 劣化の契機は、コア領域内の最も大きな引張りが作用する箇所が支配していると考えられる。このことは、曲げにより I_c が微小劣化した TypeAC の縦断面の SEM 像で、引張り領域に限定したき裂が存在していたことによっても裏付けられる。曲げに対しても引張りと同様、Cu 合金のラミネートによって大きな曲げひずみまで高い I_c を維持することが可能となり、TypeACT では曲げひずみが 0.25% に達するまで I_{c0} の 95%を保っていた。

Fig.3 に各試験環境下での横圧縮試験で得た I_c の応力依存性を示す。TypeAC では 77K・自己磁界下、4K・14.5T 下ともに I_{c0} の 97%となるのは、横圧縮応力が 75MPa 前後であり、一方、TypeACT はいずれの試験環境でも、この試験機が作

用させることが出来る約 90MPa に至るまで I_c の劣化はほとんど現れなかった。

なおこの DI-BSCCO 線材に限らず、このようなテープ状で容易に曲げることのできる線材に関して、特に引張り試験で、ひずみの定義や試験片の装着法などに課題があり、今後これらの統一的なルールの構築が必要であると考えている。

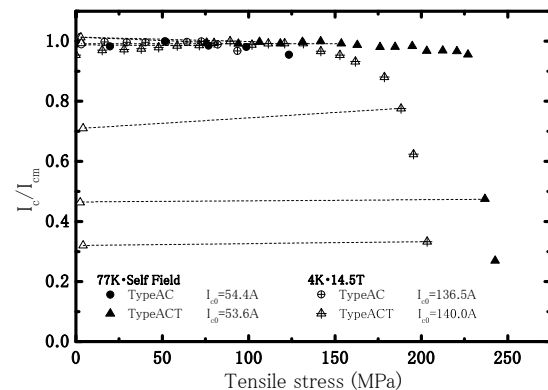


Fig.1 Tensile stress dependence of critical current.

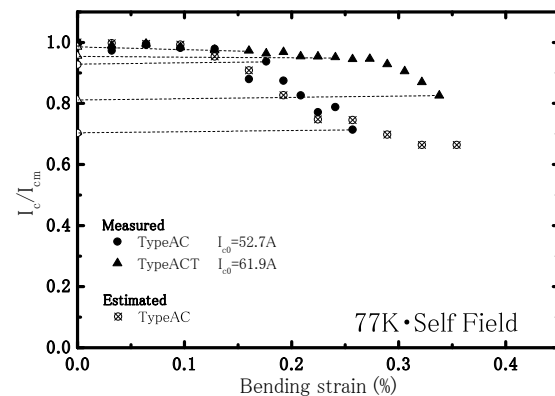


Fig.2 Bending strain dependence of critical current.

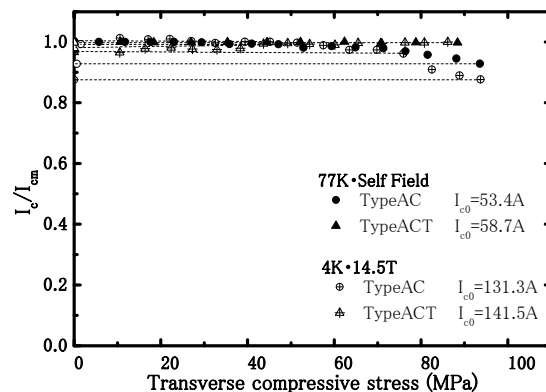


Fig.3 Transverse compressive stress dependence of critical current.

パルスおよび定常中性子源を用いた BSCCO テープ線材の集合組織測定

Texture measurement of BSCCO tapes using Pulsed and Steady Neutron Source

町屋 修太郎(大同大); 長村 光造(応用科学研究所); ハルヨ ステファヌス(原子力機構)
伊藤 崇芳(原子力機構); 鈴木 裕士(原子力機構)

Shutaro MACHIYA (Daido Univ.); Kozo OSAMURA (RIAS); HARJO Stefanus (JAEA);
ITO Takayoshi (JAEA); Hiroshi SUZUKI (JAEA)
E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

1. 緒言

一般的に、BSCCO は圧延時のへき開と破砕による集合組織を持つが、実用線材について、評価された例はあまりない。BSCCO の超伝導特性には、一般的には結晶の配向 (Orientation) の状態が影響すると考えられている。しかしながら Labo-X 線では、侵入深さの問題から表面から数ミクロンしか評価できず、また、フィラメント評価するためには分解せねばならず、膜厚方向全体で評価することはできない。高エネルギー X 線を用いれば、膜厚方向全体の平均を評価できるが、評価領域の大きさと試料セッティングの自由度の高さの点から、中性子回折を用いた評価がもっとも優れている。そこで、本実験では、中性子線を用いた配向の評価を試みた。中性子源として、JRR-3 の定常中性子源と J-PARC のパルス中性子の 2 つのソースを用いた。Ic 特性が異なる複数のテープ線材において、測定を行い、比較検討を行ったので、結果を報告する。

2. 試料および実験方法

用いた Bi-2223 の試料は、ラミネート強化をしていない素線を用いた。幅 4.2 mm、厚さは約 0.22 mm であり、背反する 2 枚を張り合わせたものを 1 セットとし 5 組 10 枚として、中性子散乱実験を行った。用いた試験片を、表 1 に示す。Ic は 184 A から 150 A の間の特性が異なる 6 種の試験片の測定を行った。

オイラークレドールを装備した RESA-II での測定は、Axial 方向セットアップと、Lateral 方向セットアップの 2 種類の試料セットアップを用いた。用いた回折は 220 と 0 0 14 である。用いた波長は約 0.2 nm である。

J-PARC では、BL-19 の「匠」を用いて測定を行った。匠はエネルギー分散型中性子分光装置であり、180 度に対向する検出器群を用いることで、BSCCO のような c 軸配向の場合、RESA-II での Axial と同様のセットアップを用いることで、試料をまわすことなく一回の測定で、集合組織の評価が可能である。用いた回折は 220 と強度が得られた 0 0 24 である。

3. 結果および考察

まず、c 軸まわりの配向を評価するために、RESA-II にて 0 0 14 を用いて第一象限のみ c 軸まわりの 2 軸スキャンを行ったところ、c 軸の回転による依存性はなく、また集合組織の角度依存性もなかった。つまり、図 1 ような典型的な c 軸配向である。

次に、6 種の試験片にてロッキングカーブ測定を行い、その半値幅の測定を行った。得られた半値幅と Ic と n 値との相関を、図 2、図 3 にそれぞれまとめた。ばらつきはあるものの、Ic と n 値どちらにも、右下がりの相関があるように見える。結晶の方位分布のみが超伝導特性を決定するものではないが、結晶の方位の集合度の指標である FWHM と n 値が相関を持つことは、興味深い点である。

Table 1 Ic characteristic of specimen.

Specimen	Ic (A)	n
MM12	174	17.0
MM7	162	18.3
TM386	156	19.3
TM377	150	19.7
HS	108	-
Brass insert	184	-

4. まとめ

本実験では、実用高温超伝導線材である BSCCO-Bi-2223 テープ線材において、角度分散法と TOF 法と回折実験を行い、集合組織測定を行った。その結果、BSCCO は典型的な c 軸配向であることを確認した。また、配向度合いを示す半値幅は、n 値と相関が見られた。

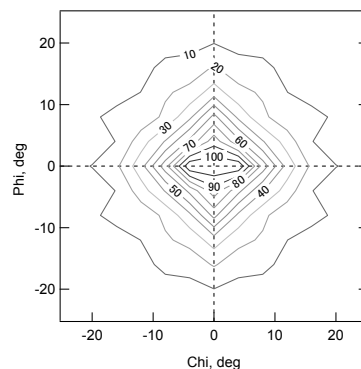


Fig. 1 0 0 14 pole figure of TM377 (only first quadrant)

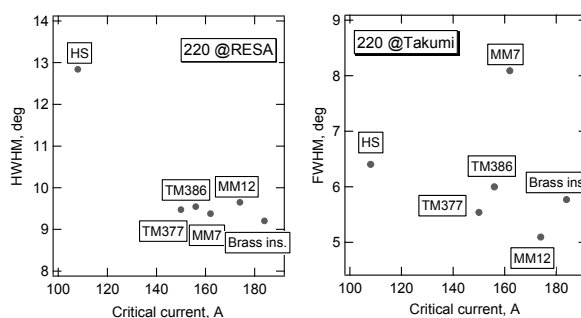


Fig. 2 Relation between Ic and orientation of FWHM.

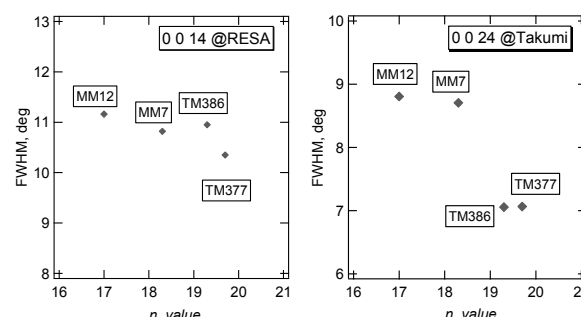


Fig. 3 Relation between n value and orientation of FWHM.

c 軸配向 Bi(Pb)2223 バルクの微細組織と臨界電流特性

Microstructure and critical current properties of c-axis oriented Bi(Pb)2223 bulks

小畑 圭亮, 渡辺 雅彦, 下山 淳一, 荻野 拓, 山本 明保, 岸尾 光二 (東大院工); 小林 慎一, 林 和彦 (住友電工)
 OBATA Keisuke, WATANABE Masahiko, SHIMOYAMA Jun-ichi, OGINO Hiraku,
 YAMAMOTO Akiyasu, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)
 KOBAYASHI Shin-ichi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: tt106654@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

Bi 系超伝導材料では c 軸配向組織の形成にプレスや圧延など機械的配向法が広く用いられているが、試料内部の配向が不十分であり、配向が乱れた箇所では臨界電流特性が大きく劣化する[1,2]。そこで我々は Bi(Pb)2212 を主相とする仮焼粉末を磁場中スリップキャスト法により内部まで c 軸配向させた後、焼成を行うことで高度に c 軸配向し、試料全体にわたって高い臨界電流密度をもつ Bi(Pb)2223 焼結体の作製を試みてきた[3]。しかし、仮焼粉末は Bi(Pb)2212 以外に不純物相を多く含み、結晶の配向を妨げていた。そこで本研究では単相化した Bi(Pb)2223 粉末を磁場中でスリップキャストすることにより、さらに高度な c 軸配向組織を有する焼結体の作製を目指している。また、有効なピンニングセンターの導入手法として不純物元素の微量置換が有効であり[3,4]、本研究では Sr サイトに La を微量置換した試料についても高い配向度を持つ焼結体を作製、評価し、微量置換法の最適化を進めている。

2. 実験方法

仕込組成を $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x = 0, 0.002$) とし、原料粉末を混合後、空气中 780~810°C で仮焼成を行った。ペレット成型後、空气中、854°C で 216 時間焼成し Bi(Pb)2223 焼結体を作製した。これを粉碎し、エタノール、分散剤、結合剤と混合して作製したスラリーより、無磁場下もしくは 4 T の磁場中でスリップキャストを行い厚さ~1 mm の粉末堆積物を得た。以下、スリップキャスト時の磁場を H_a と表す。粉末堆積物を脱炭後、銀管に封入し、一軸プレスの後 300 MPa で加圧焼成を行った。最後に空气中 500°C でアニール後、急冷することにより酸素量を制御した。試料の構成相の同定及び格子定数の評価は X 線回折測定、微細組織観察は SEM により行い、磁化特性は SQUID 磁束計を用いて調べた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に無磁場下及び $H_a = 4$ T でスリップキャストし、加圧焼成を行ったノンドープ試料の研磨面の二次電子像を示す。磁場中でスリップキャストを行った試料の方が配向の乱れた粒が少ないことが分かる。また La を微量置換した試料についても同様の傾向が見られた。しかし、La 置換試料には加圧焼成の際に生成したと思われる CuO や SrO などの不純物が多く見られた。Fig. 2 にこれらの試料の 20 K における J_c - H 特性を示す。磁場中でスリップキャストした試料では無磁場下でスリップキャストを行った試料よりも全磁場領域において J_c が向上しており、結晶の配向が臨界電流特性改善に有効であることが分かる。さらに La を 0.2% 置換することで高磁場中の J_c が改善し

ており、高磁場で有効なピンニングセンターが導入されたことが示唆された。

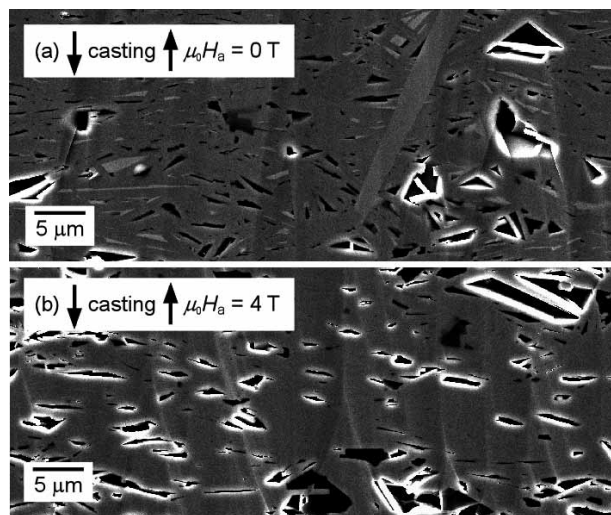


Fig. 1 Secondary electron images of $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ bulks after Controlled Over Pressure sintering: (a) $\mu_0 H_a = 0$ T and (b) $\mu_0 H_a = 4$ T.

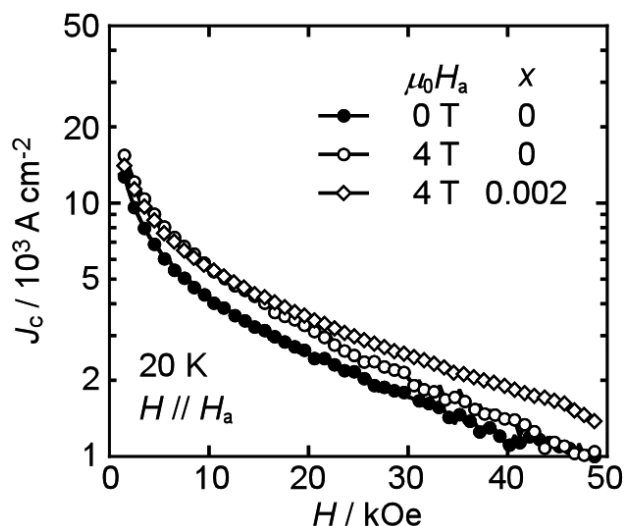


Fig. 2 J_c - H curves of c-axis oriented and randomly-oriented $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ bulks at 20 K.

参考文献

- [1] W. Pachla *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **41** (2001) 635.
- [2] S. Patnaik *et al.*, *IEEE. Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 2930-2933.
- [3] K. Takimoto *et al.*, *IEEE. Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 3080-3083.
- [4] S. Uchida *et al.*, *J. Phys. conf. series* **43** (2006) 231-234

ピックアップコイルを用いた電気エネルギーフローの測定による 高温超伝導コイルの非接触型局所異常検出

Contactless measurement of local abnormal condition in high temperature superconducting coil by measuring energy flow using Pick-up coil

藤岡 直人、木元 武尊、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工)

FUJIOKA Naoto, KIMOTO Takeru, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k5529103@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導線材は、使用温度領域が高く比熱が大きいために異常が伝播しにくい。このため、局所的に温度が上昇し線材が損傷する危険性がある。そのため、運転監視システムには、局所的な異常の検出とその発生場所の特定が可能であることが求められる。そこで我々は、ポインティングベクトル法を応用し、測定素子を超伝導コイルの周方向に複数配置することにより、高感度化と異常発生場所の特定を可能にした。高感度化については、すでに実証されている。[1]そこで今回は、異常発生場所の特定が可能かどうかを検証した。

2. 測定方法と測定装置

本測定法では、超伝導コイル周辺のポインティングベクトルを測定し、その変化から異常を検出する。ポインティングベクトルは超伝導コイル周辺の局所的な電界と磁界をそれぞれ測定し、電界と磁界の外積から求められる。電界と磁界の測定には、電界測定用ピックアップコイルと磁界測定用ピックアップコイルをそれぞれ用いる。

今回の実験でサンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、高強度銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を 1 層×15 ターン巻線した内径 70mm、高さ 64.3mm のソレノイドコイルである。なお、電界測定用ピックアップコイル電圧のうち誘導性電圧は、キャンセル用ピックアップコイル電圧を使ってキャンセルし、ポインティングベクトル測定の精度を上げた。

3. 実験方法

サンプルコイルに、50Hz、10A_{rms} の交流電流を定電流モードで通電しながら、コイル巻線部の一部に室温の窒素ガスを吹き付け、その部分を局所的に常伝導転移させて測定を行った。異常発生場所や測定素子の設置場所を Fig. 1 に示す。異常の発生している方を異常発生側とし、180 度反対側を正常側とし、その中間を中間点として、それぞれに測定素子を設置している。巻線に局所的な異常を発生させるために、サンプルコイルの 7、8、9 ターン目の約 45mm を断熱材で覆い、その断熱材と巻線部の間に窒素ガスが溜まる空間を設けた異常発生装置を取り付けている。測定素子はコイル中心の高さである 8 ターン目に設置した。なお、コイルの状態をモニターするために、コイルの端子間電圧損失成分と、異常発生側と正常側の巻線温度も測定した。

4. 測定結果

ガス窒素の流量を 0.9l/sec として異常を発生させたときの、温度、端子間電圧損失成分、正常時の値で規格化したエネルギーフローの測定結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の横軸は、測定開始からの経過時間である。測定結果より、窒素ガスを注入すると端子間電圧損失成分、異常側巻線の温度ともに上昇し、温度は臨界温度である 107K を超えている。そのときのエネルギーフローは異常発生側でのみ上昇しており異常の範囲が中間点まで及んでいないことが分かる。これらの結果から、本運転監視システムで超伝導コイルに発生する異常の発生領域が特定可能であることがわかる。

5. まとめ

本運転監視システムによって、高温超伝導コイル内に発生

した局所的な異常の発生場所を特定可能かどうか実験的な検討を行った。窒素ガスを吹き付けて異常を発生させ、その様子を本運転システムの測定素子で三点同時に測定した。結果、異常の発生場所が特定可能であることを示した。

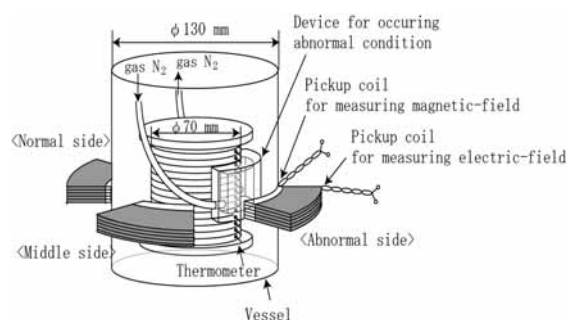


Fig. 1 Measuring system to detect locally abnormal condition in HTS coil.

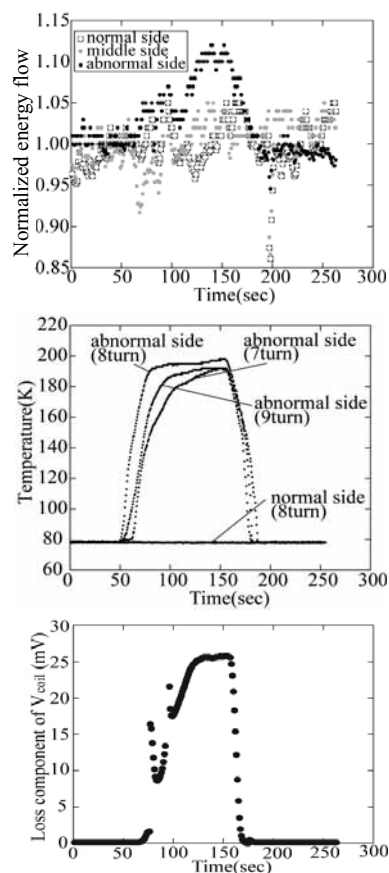


Fig. 2 Results of tests on detection of local winding condition in the sample coil.

Reference

[1] S. Kaminohara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.210

ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発 3 — 負荷変動中の巻線異常の検出 —

Development of A Monitoring System of Superconducting Transformer by Using the Poynting's Vector Method3 –Detection of abnormal conditions in winding during load change–

小坂 亮大、羽生 大仁、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工); 岡元 洋 (九州電力)
 KOSAKA Ryota, HABU Kisato, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);
 OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.,Inc.)
 E-mail: k8197118@kadai.jp

1. はじめに

超伝導変圧器の実用化のためには、変圧器が正常に運転していることを常に監視するシステムが必要である。我々は、ポインティングベクトル法を応用し、放電事故の危険性のない非接触型の新しい運転監視システムを提案している。

これまで、鉄心を持つ変圧器にも本監視システムが適用可能であるかどうかを、小型の超伝導変圧器と試作した監視システムを用いて実証している[1]。また、一次側巻線と二次側巻線で発生する異常を判別可能であることも実証している[2]。しかしながら超伝導変圧器は、一般に二次側に接続された負荷が変動するので、これに伴ってポインティングベクトルも変化する。したがって、1箇所ポインティングベクトルの観測結果からは、巻線部の異常なのか負荷変動なのかを判断することは難しい。そこで今回は、変圧器の二次側負荷が変動する場合でも巻線異常の検出が可能なる方法を考案し、その有効性を実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 本監視システムの原理と負荷変動時の運転監視方法

我々の提案しているポインティングベクトル法では、電界測定用ピックアップコイルと磁界測定用ピックアップコイルで局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求めている。電界は、磁界測定用ピックアップコイルの電圧を用いて、電界測定用ピックアップコイルの電圧から誘導性の成分のみの測定を行うことにより、異常検出の精度を高めている。

負荷変動と巻線異常を区別して判断するために、超伝導変圧器の上部と下部の対称な位置のポインティングベクトルを同時に測定し、その差を監視するという方法を考案した。上下対称な位置のポインティングベクトルは、異常のない状態であればほぼ対称と考えられる。上部と下部のポインティングベクトルの差を求めれば、負荷変動してもほぼゼロの状態であると考えられる。したがって、上下のどちらかのセンサーの近くで異常が起きた場合、その異常を検出できると考えられる。今回試作した装置をFig.1に示す。超伝導変圧器巻線の冷却用容器の外側に、上部と下部の2箇所測定センサーを取り付けている。

3. 実験条件・結果

今回は、以下の手順で実験を行った。超伝導変圧器に20A_{rms}、50Hzの交流電流を定電圧モードで通電し、二次側の負荷を変動させた時の変圧器周辺のポインティングベクトルを測定した。変圧器は、高さ約100mm、一次側内径80mm、二次側内径110mmである。定格容量は、500VAである。巻線には、臨界電流が88Aの高強度Bi-2223多芯テープ線材を使用した。測定センサーの設置場所は、コイル中心の位置から軸方向に+30mmの場所にシステム1を、-30mmの場所にシステム2とした。負荷は、抵抗負荷とし、定格運転から定格の50%まで変化させた。巻線部に発生させた異常は、電磁界を乱さないように液体窒素の自然蒸発によってコイル上部から異常を発生させた。

実験結果をFig.2(a),(b)に示す。Fig.2(a)は、変圧器に異

常を発生させずに負荷を変動させた時に測定したエネルギーフロー、Fig.2(b)は、巻線部に異常を発生させ、負荷を変動させた時のエネルギーフローである。エネルギーフローの差は、正常時の上下のエネルギーフローの比率で補正した後に差を求めている。Fig.2(a)では、上下のそれぞれのエネルギーフローが負荷変動に伴って大きく変動しているにもかかわらず、エネルギーフローの差は変化していないことから、巻線状態に変化がないことがわかる。また、Fig.2(b)では、エネルギーフローの差が増加していることから、巻線部上部で発生した異常が検出できていることがわかる。以上のことから、本システムを用いることで二次側に接続された負荷が変動する時でも、超伝導変圧器の巻線部の異常を検出できることがわかった。

4. まとめ

超伝導変圧器における巻線異常と負荷変動を区別して検出するために、測定センサーを変圧器の上部と下部の2箇所に設置し、その測定値の差を監視する方法を考案し、実際に巻線異常の検出試験を行った。その結果、負荷が変動中であっても、巻線部の異常を検出できることを実証した。このことから、超伝導変圧器の運転監視装置として、本監視システムが有効であることを示した。

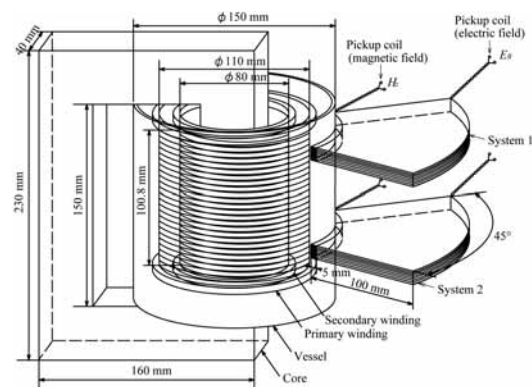
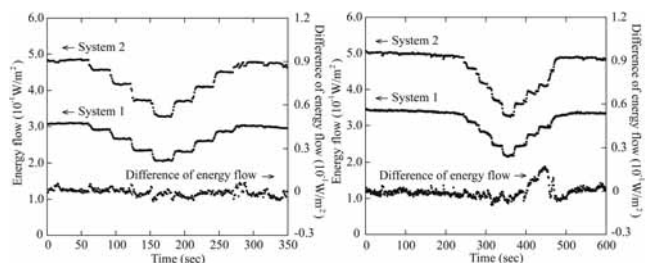


Fig. 1 Experimental set up



(a) Usual condition (b) Unusual condition

Fig. 2 Experimental result

Reference

- [1] K. Habu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81 (2009) p.121
 [2] K. Habu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 (2010) p.135

伝導冷却型 4 T 級 Y 系コイルの開発(1) —人工ピン入り線材を用いたコイルの通電特性—

Development of conduction-cooled 4 T-class coil wound with YBCO tapes (1) —Effects of artificial pinning centers on V-I characteristics of YBCO coil—

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

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

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

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

1. はじめに

イットリウム系(Y系)コイルの高磁場化に向けた開発を進めている。コイル設計に当たり高磁場中での臨界電流特性が改善された人工ピン入り線材の適用が有効であるが、コイル化した際の発生磁場がどの程度向上するかについて事前に把握しておく必要がある。そこで、短尺での臨界電流特性を取得した人工ピン入り線材を用いてコイルを試作すると共に、伝導冷却下におけるコイル通電特性について、以前同諸元で製作した人工ピンが導入されていない線材を用いたコイルとの比較および評価を行った。

2. パンケーキコイルの試作および通電評価

試作した含浸パンケーキコイル4枚(#A~#D)の線材諸元とコイル諸元を Table.1 に示す。巻線および含浸プロセスを経た後に、線材の臨界電流特性が劣化していないことを確認するため、各パンケーキコイルを液体窒素中で通電評価した。通電試験結果を Fig.1 に示す。各コイルは $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ V/cm 定義において n 値が全て 25 を超える良好な超電導特性を有しており、劣化なく含浸パンケーキコイルを製作することができた。また短尺線材の臨界電流特性から計算した電流-電界特性は実験値とほぼ一致していることから、臨界電流値が複雑な磁場、角度依存性を持つ人工ピン入り線材に対しても、コイル通電特性を定量的に予測ができることが分かった。

3. 伝導冷却通電試験

4枚のパンケーキコイルを用いて、Fig.2 に示す4積層コイルを試作した。積層順は上から#A,#B,#C,#D とした。2枚のパンケーキコイル毎に挿入したアルミ板の先端を、GM 冷凍機の2段階ステージに熱的に接続し、コイルを伝導冷却した。2段階ステージに取り付けたヒータの制御によりコイル温度を一定に維持し、20 K から 60 K の範囲で通電試験を実施した。発生電圧は各パンケーキコイルの両端で測定し、コイル温度は積層コイルの上下面に取り付けた抵抗温度計により測定した。またホール素子によりコイルの中心磁場を計測した。

電圧が発生したのは、人工ピン無しの場合と同じく最外層のコイル(#A)のみであった。伝導冷却下においてもコイル#Aの n 値は 25 を超えており、良好な超電導特性が得られた。Fig.3 にコイル#A の臨界電流値、およびコイル中心磁場の温度依存性について、人工ピン無しの場合と併せて示す。コイル温度の低下に伴い人工ピンの有無による違いは顕著となり、コイル温度 20 K において、コイル中心磁場は人工ピン無しの場合と比較して約 1.6 倍の 2.3 T を達成した。

4. まとめ

人工ピン入りY系線材を用いて含浸パンケーキコイルおよび4積層コイルを劣化なく製作することができた。液体窒素温度におけるパンケーキコイルの通電特性について、臨界電流値が複雑な磁場、角度依存性を持つ人工ピン入り線材に対しても、解析で定量的に予測可能であることが分かった。また4積層コイルの伝導冷却試験を実施し、コイル通電特性および

発生磁場は、温度の低下に伴い人工ピンの有無による違いが顕著となることを明らかにした。

Table.1 Specifications of YBCO single-pancake coils

Coil No.	#A	#B	#C	#D
Tape width	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Tape thickness	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
Tape Length	24 m	24 m	24 m	24 m
Min Ic@77 K, 0T	86 A	86 A	99 A	99 A
Inner diameter	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
Outer diameter	89 mm	89 mm	88 mm	88 mm
Number of turns	111	111	111	111

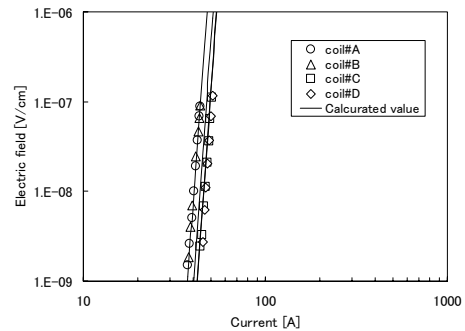


Fig.1 E-I characteristics of single-pancake coils

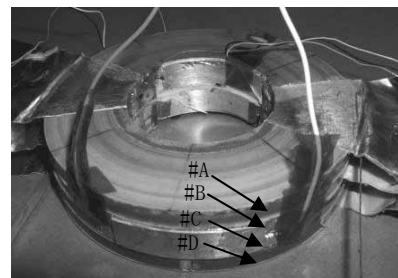


Fig.2 Stacked single-pancake coils

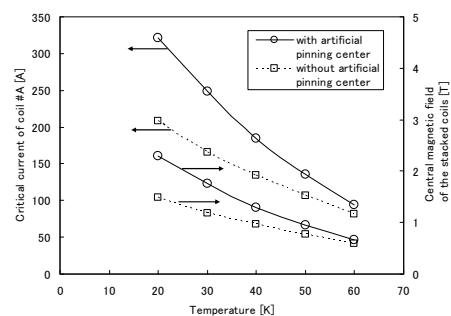


Fig.3 Critical current of the uppermost coil and central magnetic field of the stacked coils wound with YBCO tapes with/without artificial pinning center

伝導冷却型 4T 級 Y 系コイルの開発(2) -12 積層コイル設計・試作-

Development of conduction-cooled 4T-class coil wound with YBCO tapes

-design and fabrication of 12 stacked pancake coils-

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の実機適用を目指して、高磁場化を目指した開発を進めている。今回、取り扱いが容易な伝導冷却システムにおいて、中心磁場 4 T 以上発生可能なイットリウム系超電導コイルを開発したので報告する。

2. コイル諸元

使用した線材の諸元を Table 1 に示す。線材は、磁場特性の向上が見込まれる人工ピン入り線材を使用した。また、試作した 12 個のシングルパンケーキコイルの諸元を Table 2 に示す。ここで、Table 2 には、液体窒素中での通電試験により測定したコイル Ic(10⁻⁶ V/cm 定義)およびコイル n 値(10⁻⁸~10⁻⁷ V/cm 定義)を併せて示している。12 個のコイルは伝導にて冷却するために樹脂含浸されているが、含浸による劣化の有無を調べるためにコイル Ic が最も低い #3 コイルに関しては、Fig.1 に示すように樹脂含浸前後でのコイル VI 特性を比較した。含浸前後での特性は、10⁻⁹~10⁻⁷ V/cm の領域ではほぼ一致しており、樹脂含浸をしたことによる劣化はないと言える。試作した 12 個のコイルの Ic および n 値を比較すると、多少のばらつきが見られるが、これは線材の長手方向の特性のばらつきの影響と考えられる。

3. 伝導冷却試験

試作したシングルパンケーキコイルを軸方向に積層し、4 積層(#5~#8), 8 積層(#1~#8), 12 積層(#1~#12)コイルと段階的に試作し、伝導冷却にて通電試験を実施した。ここで、積層コイルは、コイル内周および外周で電気的に接続されており、2 枚のパンケーキコイルごとに 0.25 mm のアルミ板を取り付け、各アルミ板の先端を 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 段冷却ステージに取り付けたヒータにより制御し、発生電圧は各パンケーキコイルの両端で測定した。また通電中のコイル中心磁場はホール素子により測定した。コイル温度 20 K において、4 積層コイルでは中心磁場 2.3 T, 8 積層コイルでは 3.6 T を達成し、最終的に 12 積層コイルにおいて、265 A 通電時に中心磁場 4.7 T を達成した。12 積層コイルの 20 K における通電試験結果を Fig.3 に示す。伝導冷却においても良好な超電導特性を有しており、4.7 T 発生時においてもコイルは熱暴走することなく安定に運転することができた。

4. まとめ

Y 系線材を用いて 12 積層コイルを試作し、伝導冷却システムにおいて、中心磁場 4.7T 発生可能な超電導コイルの製作に成功した。今後は、コイルの大型化を目指した開発を進めていく。

Table 1 Specification of YBCO tape

Width (mm)	4
Thickness (mm)	0.1
Copper stabilizer thickness (mm)	0.04
Substrate	Hastelloy®
Type	Zr-doped wire
Ic@77 K, self field (A)	86~112

Table 2 Specification of impregnated pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4	#5
Inner dia. (mm)	50	50	50	50	50
Outer dia. (mm)	90	89	87	88	89
Hight (mm)	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Turns	111	111	111	111	111
Tape length (m)	24	24	24	24	24
Coil Ic (A)	48	51	46	48	48
N value	24	24	26	31	26

#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
50	50	50	50	50	50	50
89	89	89	88	88	88	88
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
111	111	111	111	111	111	111
24	24	24	24	24	24	24
48	55	55	52	49	49	49
26	27	29	23	25	24	22

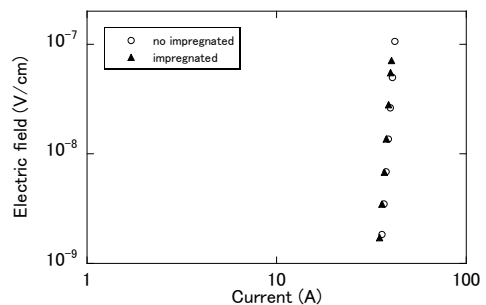


Fig.1 E-I characteristics pancake coil at 77 K (Coil No. #3)

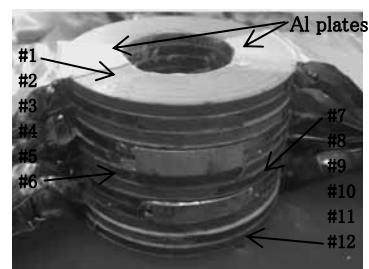


Fig.2 12 stacked pancake coils

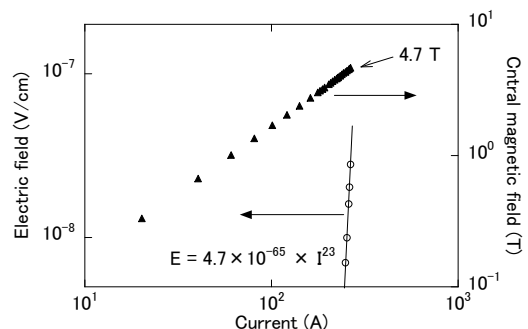


Fig.3 Current dependences of electric field and central magnetic field in a conduction-cooled test at 20 K

RE123 コイルの電磁力下の変形挙動

Deformation of the RE123 coil under the electro-magnetic stress

淡路 智, 渡辺和雄(東北大金研), 西島 元(物材機構), 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫(中部電力)

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.), NISHIJIMA Gen (NIMS), SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Elect. Power co ltd)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(RE123, RE; 希土類)コート線材(Coated conductor)は, その高い機械特性から, 超伝導磁気エネルギー貯蔵(SMES)や強磁場マグネット応用が期待されている. 特に, NEDO プロジェクトとして, 2MJ-SMES 開発が進行中である. これらの超伝導マグネット開発において, 電磁力によるコイルの変形挙動を理解することは非常に重要である. コイルの変形挙動や内部応力分布に関しては, Wilson が無限長のコイルに対して解析的な式を与えているが, 本研究では, 多層巻きエポキシ含浸を行ったコイルについて, 歪みゲージを用いて変形挙動を測定した結果について報告する.

2. 実験方法

作製したテストコイルの仕様を表1に示す. 用いた線材は, CVD法によってHasteloy 基板上で作製した, YGd123線材である. この線材を約70ターン巻いて2つのシングルパンケーキコイルを作製し, エポキシ樹脂を用いて真空含浸を行った後, これを重ねて一つのコイルとした. コイルには, 最外層と最内層に4等配で歪みゲージを取り付けたほか, コイル上面には, 径方向と周方向(hoop 方向)の歪み測定用のゲージを, 内層, 中層, 外層の3箇所に貼り付け, コイルの歪み分布の測定も行った. 試験は, 東北大学金属材料研究所強磁場センターの大口径11T超伝導マグネット内部の大型クライオスタットを挿入し, 液体ヘリウム中バックアップ磁場11T中で行った.

3. 結果と議論

図1にコイルの通電時の電圧測定結果を示す. バックアップ11T中において, 両コイルとも150A近傍から電圧が発生した. 一回目と二回目の通電では, 両コイルともほぼ同じ電圧が発生しており, コイル自身の劣化が無いことが分かる. 一方で中間電極からは一回目の通電では電圧発生していないが, 二回目では低電流から電圧が発生し, 三回目でその値がさらに大きくなっている. またその際214Aの通電で, 電圧が急激に大きくなり中間電極が破損した. 11T中で最大電流214A流した時のコイル内部応力をBJRとWilsonの式で計算した結果を図2に示す. BJRは線材が独立に変形することを仮定しているため, コイル外側に行くに従って電磁応力が増加することが分かる. 一方で, コイルが一体変形をする場合のWilsonの式では, 逆にコイル最内層で応力が最大となる. これは, 図に示したように, コイル径方向の応力が引っ張りとなり, 外側の線が内側を引っ張ることで, 応力が加算されるためである. 図2は, コイル上面に取り付けた歪みゲージで測定したコイル周方向の歪みである. この結果, 電磁力によって誘起された歪みは, コイル外側に向かって減少することが分かった. 従って, 図2の結果と照らし合わせると, Wilsonの式による結果に定性的に一致する結果となり, 含浸コイルが一体変形することが示唆される. 径方向の歪み測定などの結果を合わせて, コイル変形とコイル内部の状態などについての詳細については当日議論する.

Table 1 Specification of the test coil

内径 (mm)	外形 (mm)	厚さ (mm)	ターン数	線材長 (m)	線材厚 (mm)
200	248.49	11.89	68	47.9	0.36
	248.71		71	50.0	0.34

本研究は, 超伝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.

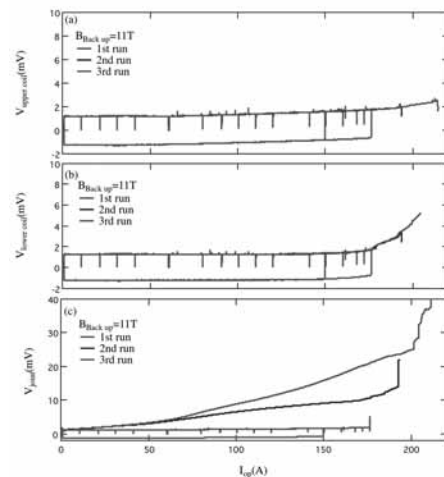


Fig. 1 Voltages as a function of operation current in back-up field of 11T.

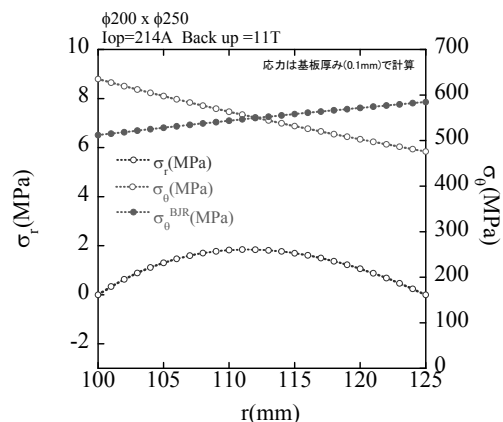


Fig. 2 Calculated stress distribution in 11T and $I_{op}=214A$.

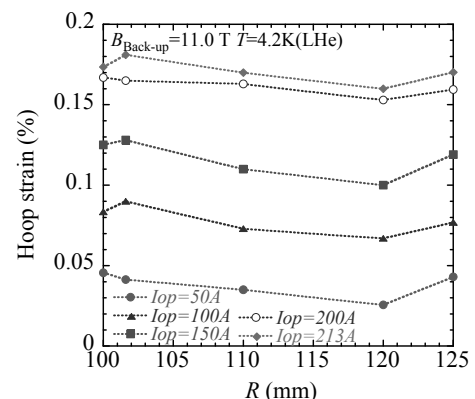


Fig. 3 Measured strain distribution at 11T and various I_{op} .

TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発④ (集合型超電導電流リードの作製とその特性)

Development of current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes ④ (Assembled superconducting current lead and its properties)

石井 雄一、坂井 裕貴、柴田 和樹、山田 豊、太刀川 恭治(東海大)、塩原 敬(東海大、現九大院)

小泉 勉、青木 裕治(昭和電線)、田村 仁、三戸 利行(核融合科学研究所)

ISHII Yuichi, SAKAI Yuki, SHIBATA Kazuki, YAMADA Yutaka, TACHIKAWA Kyoji, SHIOHARA Kei (Tokai University);

KOIZUMI Tsutomu, AOKI Yuji (SWCC); TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail:0BAZM005@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

TFA-MOD 法により作製した YBCO テープ線材を 5 本用いた電流リードユニットを 10 組並列に接続した集合型超電導電流リードについて、通電特性及び熱侵入量等を評価したので報告する。

2. 実験方法

TFA-MOD 法により作製した YBCO 線材は、幅 5 mm、厚さ 100 μm の Hastelloy™ 基板上に酸化物の中間層を経て厚さ 1.5 μm の YBCO 超電導層、その上に 15 μm の Ag 保護層から構成される。Fig. 1 に試作した電流リードユニットの外観及び模式図を示す。YBCO 線材 5 本を幅 44 mm、厚さ 1 mm、長さ 190 mm の GFRP 板で補強し、線材両端を Cu 電極にハンダ接合した電流リードユニットを 10 組作製した。同ユニットの液体窒素中、自己磁場下 (@77 K, s. f.) における I_c 値は 408 A ~ 534 A の範囲で平均約 460 A であり、また、同ユニットに使用した 10 組 50 本の YBCO 線材の I_c 値の合計は約 4600 A であった。Fig. 2 に電流リードユニット 10 組を並列に配置した集合型超電導電流リードの外観写真を示す。10 角形状の Cu 電極の外周部に同ユニットを 10 組、In 箔を間に挟んでボルトで締結した。通電試験は核融合科学研究所により行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 3 に集合型超電導電流リード 4000 A、10 分間保持通電時の電流リードユニット間 (V_{unit})、正極側および負極側の 10 角型 Cu 電極と各ユニットの接続抵抗 ($V_{\text{Cu}(+)}$ 、 $V_{\text{Cu}(-)}$) 及び集合型超電導電流リード全体での発生電圧 (V_{overall}) について示す (@77 K, s. f.)。通電電流 4000 A では 50 本の YBCO 線材全てに電圧は発生せず、10 分間安定して通電が出来た。10 角形状の Cu 電極部の電圧は通電電流と共にほぼ直線的に増加し、4000 A では $V_{\text{Cu}(+)}$ と $V_{\text{Cu}(-)}$ は約 1 mV と 0.7 mV、各ユニット全体の電圧は 0.3 mV で、 V_{overall} は約 2 mV と低抵抗の接続が実現できた。このとき Cu 電極部のジュール発熱量は、液体窒素中で数 W 程度である。また、通電電流 4300 A 付近より YBCO テープに電圧が発生し始めるが、5000 A、10 分間の通電が可能であった。

謝辞

本研究は東海大学と昭和電線ケーブルシステム(株)の共同研究の一部であり、超電導応用基盤技術開発(NEDO)プロジェクトの成果を引用している。

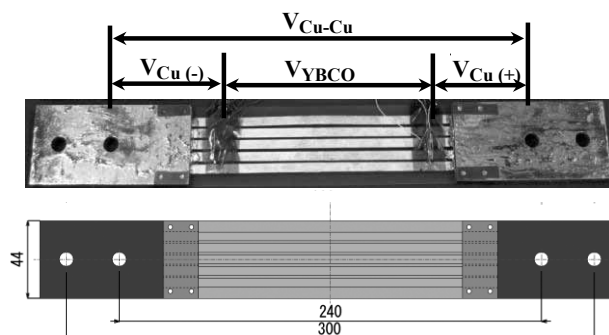


Fig. 1 HTS current lead unit prepared by five YBCO tapes.

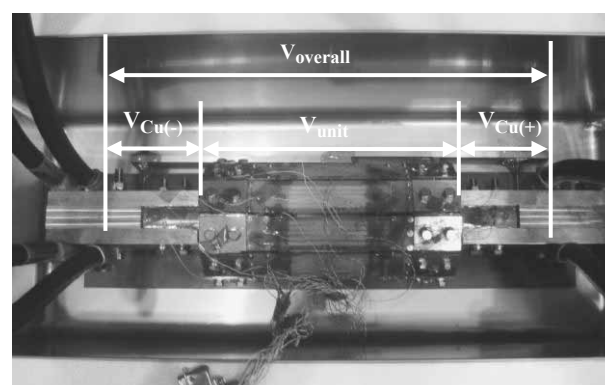


Fig. 2 HTS current lead assembled from ten units.

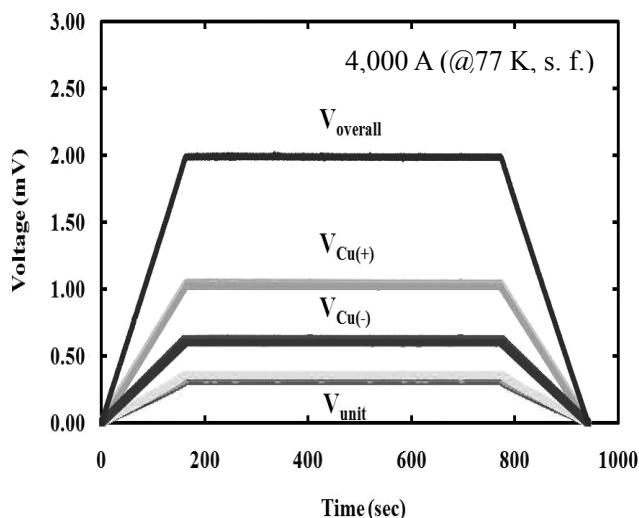


Fig. 3 Transport current of 4000 A at 77 K for the HTS current lead assembled from ten units.