

5T級DI-BSCCO小型コイルの特性評価(3)

—積層枚数依存性を考慮したコイル通電損失の評価—

Characteristic tests of 5T-class DI-BSCCO small-scale coil (3)

—Effect of the number of stacked layers on transport loss in coil—

蔵脇 正弘, 八尋 達郎, 川崎 基弘, 柁川 一弘, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学);
林 敏広, 加藤 武志, 藤野 剛三(住友電工)

KURAWAKI Masahiro, YAHIRO Tatsuro, KAWASAKI Motohiro, KAJIKAWA Kazuhiro, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo
(Kyushu Univ.); HAYASHI Toshihiro, KATO Takeshi, FUJINO Koso (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: kurawaki@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

Bi-2223 銀シーステーブ線材の長尺化、高性能化(高 I_c 、高強度、低損失化)により高磁界マグネットなど超電導応用製品の開発が期待されている。5T 級の Bi-2223 高磁界高温超電導マグネットにおいて励減磁時における交流損失の評価はこれまでほとんど行われていないが、幅広いマグネット応用のためには非常に重要な課題である。

これまでに、我々は DI-BSCCO を使用したダブルパンチーキコイル(DPC)16stack の 5T 級小型コイルを製作し、液体ヘリウム中でのコイルの低周波数通電時の交流通電損失およびコイル巻線の交流外部磁界損失を測定しその結果を報告した[1]。また、通電時のコイルの磁界分布に対応するコイル巻線の局所的な外部磁界損失を積算して実測値との比較を行った[2]。

今回は、DPC8stack の小型コイルについて交流通電損失を測定し、テープ線材の垂直磁界損失に対する積層枚数の効果を考慮した解析結果と比較・検討したのでその結果を報告する。

2. 5T級コイルの諸元

5T 級コイルの主な諸元を Table 1 に示す。コイルは、8 個の DPC を重ねた 16 層構成である。インダクタンスの実測値は 0.16H、磁界発生率は 0.014T/A であり、300A の通電で中心磁界 4.14T が発生する。

3. 解析方法

文献[3]より、テープ線のフィラメント領域に印加される最大磁界振幅に対する垂直磁界損失は、積層枚数に依存しない一本のマスター曲線に乗る。その最大磁界振幅 H_{sm} は

$$H_{sm} = [H_c(t) - N_e M(t)]_{\max} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 N_e はある積層枚数時の等価的反磁界係数である。このマスター曲線を用いて、逆に次式より、任意の積層枚数における垂直磁界損失の外部磁界 H_m 依存性を求めることができる。

$$H_{sm} = H_m - N_e' M_m \quad (2)$$

ここで、 M_m は $H_c = H_m$ におけるフィラメント領域単位体積当たりの磁化であり、 N_e' は任意の積層枚数における等価的反磁界係数である。

4. 解析結果および考察

Fig. 1 にコイル巻線の短尺試料[1]を 6 枚積層したときの垂直磁界損失の実測値をもとに各種の積層枚数における垂直磁界損失を解析した結果を示す。特に小振幅側で積層枚数の増加により垂直磁界損失が減少しており、近接の線材による反磁界効果が顕著になっている。この特性を用いて、積層枚数ごとにコイルの外部磁界損失を求めた結果を Fig. 2 に示す。積層枚数の増加により全体的に交流外部磁界損失に減少傾向がみられる。また、コイルは 95.25 ターン(最大 96 枚積層状態)であるが 42 枚や 60 枚のほうが実測値に近くなっている。これは、線材に加わる垂直磁界がコイル内で不均一であり、

実効的な積層枚数が実際の積層枚数より小さくなっているからではないかと考えられる。

参考文献

1. K. Nogami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.201
2. T. Yahiro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.261
3. 柁川 一弘他 :電学論 B, 121 巻 10 号, 平成 13 年

Table 1 Bi-2223 5T 級コイルのパラメータ (8stack)

Parameters	5T-class coil
Height [mm]	85.8
Inner diameter [mm]	82
Outer diameter [mm]	136.1
Layer number	16
Total turn number	1524
Coil coefficient [T/A]	0.014
Inductance [H]	0.16

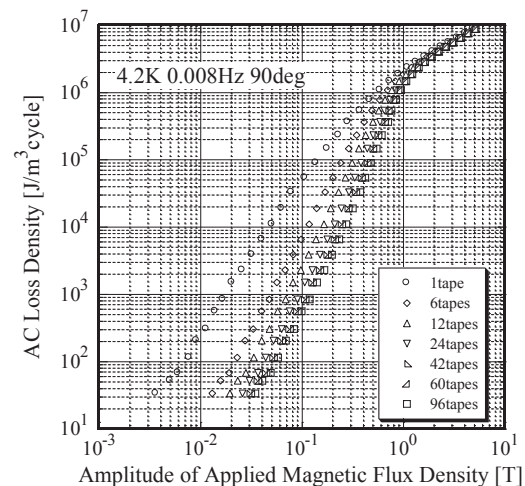


Fig.1 短尺試料の垂直磁界損失の積層枚数依存性

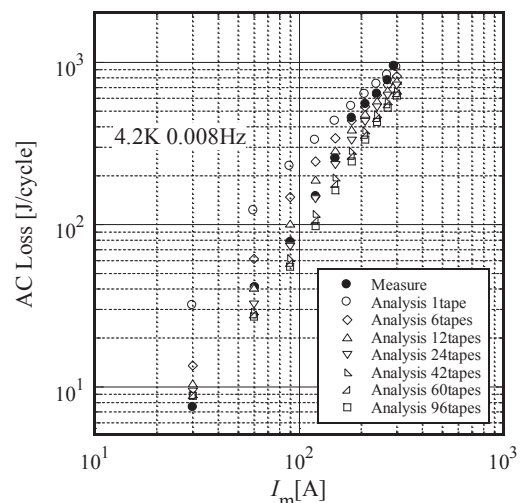


Fig.2 コイルの外部磁界損失の積層枚数依存性

Improved stability of magnetic field in superconductor coils by applying twisted Bi-2223 multifilamentary tapes

李全, 雨宮尚之, 中村武恒(京都大学)

LI Quan, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University)

E-mail: quan@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

One main factor, which determines the field quality of the NMR and MRI magnets wound with HTS superconductor tapes, is the stability of their magnetic field. The magnetic field is strongly influenced by shielding current, which is not considered during designing magnets. In this paper, twisted Bi-2223 multifilamentary tapes are applied winding coils in order to reduce the magnetic field generated by the shielding current. To clearly testify the advantage of twisted tapes, two coils are wound with twisted tapes and untwisted tapes respectively. The comparison of experiment results shows that, the magnetic field generated by the shielding current can be decayed and reduced successfully by using the twisted tapes. The hysteresis in the magnetic field is also smaller in the coil wound with twisted tapes than the other one.

2. Experiment results and analysis

The configurations of untwisted and twisted Bi-2223 multifilamentary tapes are shown in Fig. 1. The width of both tapes is 2.64 mm, and the thickness, number of filaments, critical current, n value of untwisted/twisted tape are 0.186 mm/0.205 mm, 121/55, 75 A/65 A and 17/16. The designed twisted pitch of filaments in the twisted tape is 10 mm. The properties of coils wound with each kind of tapes are presented in Table 1.

Table 1. Properties of superconductor coils

Coil	Untwisted	Twisted
Number of turn	370	356
Number of pancake	10	
Height	63 mm	62 mm
Inner diameter	70 mm	
Outer diameter	80 mm	
Critical current	33 A	30 A

All experiments have been done in liquid nitrogen at 77 K, supplying DC current at selected values, which are ± 5 A, ± 10 A, ± 15 A, ± 20 A and ± 25 A. First, hysteresis loops were measured changing input from 0 A to 25 A, to -25 A and again to 25 A, by a 5 A step in turn. Fig. 3 shows the hysteresis loops, which are enlarged and centered, by calculating the difference from average at each input current, as shown in Fig. 4. It can be observed that the B - I characteristic is narrower in the coil with twisted tapes than that in the coil with untwisted tapes. Fig. 5 shows the results at a 15 A input, with a duration of 6 hours, which proves that the magnetic field generated by the shielding current in the coil with twisted tapes decays rapidly. This can be proved by the experimental results at other inputs as well.

3. Conclusion

The magnetic field generated by shielding current can be decayed and reduced effectively by using twisted tapes, and smaller amount of hysteresis can also be achieved.

Acknowledgement

This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (21360132).

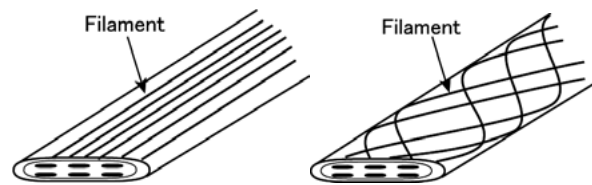


Fig. 1 Configuration of untwisted (left) and twisted (right) Bi-2223 multifilamentary tapes

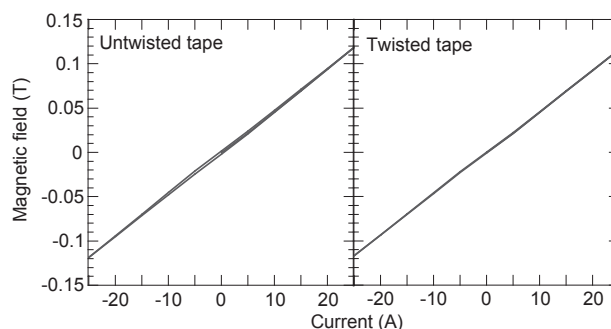


Fig. 2 Hysteresis loops of coils wound with untwisted tape (left)/twisted tape (right) measured at 77 K.

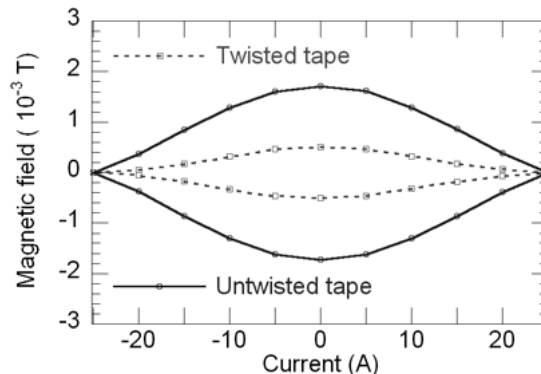


Fig. 3 Enlarged and centered hysteresis loops.

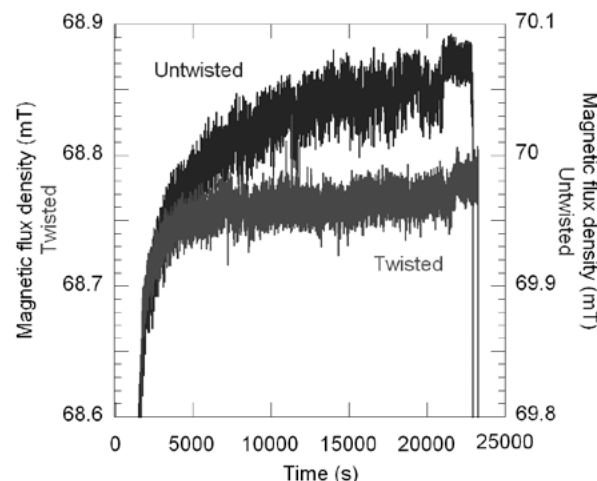


Fig. 4 Magnetic flux density of twisted/untwisted coil while supplying 15 A DC current.

Bi2223 テープ線材を用いた 3T MRI 超電導マグネットの開発 Development of 3T MRI magnet with Bi2223 tape conductor.

寺尾 泰昭、尾崎 修、一原 主税、川嶋 慎也、長谷 隆司 (神戸製鋼)、北口 仁 (NIMS) 小林 慎一、佐藤 謙一 (住友電工)、
浦山 慎一、福山 秀直 (京大)

TERAO Yasuaki, OZAKI Osamu, ICHIHARA Chikara, KAWASHIMA Shinya, HASE Takashi, (KSL), KITAGUCHI Hitoshi (NIMS),
KOBAYASHI Shin-ichi, SATO Ken-ichi (SEI) URAYAMA Shin-ichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto University)

E-mail: terao.yasuaki@kobelco.com

1. はじめに

戦略物資であるヘリウムは、需要増大に伴い枯渇が懸念されており、液体ヘリウムに頼らないMRI用マグネットの構築が求められている。そのため、マグネットを構成するコイル全てにBi2223テープ線材を用いて、20 Kで運転可能な脳用3T MRIマグネットの開発を行っている。マグネットの仕様をTable.1に示す。これまでにテストコイルによる要素試験を行い、実機マグネットの含浸手法や応力基準を確立し、試験結果を踏まえ実機マグネットの設計・製作を行った。

2. テストコイルによる要素試験

2-1. 小型コイル試験

含浸手法とフープ応力基準を決定するため、小型のテストコイル(内径φ60 mm、外径φ74 mm、長さ65 mm)による要素試験を実施した。コイルは①スタイクキャスト塗込み含浸、②プリプレグ含浸、③WAX真空含浸、の3種類の含浸方法で作製し、バックアップ磁場12T下で励磁試験を実施した。結果、プリプレグ含浸とスタイクキャスト塗込み含浸コイルでフープ応力137 MPaまで安定して通電できることを確認した。なお、 I_c が制限となり、これ以上の応力を印加することは出来なかった。WAX含浸コイルも I_c まで通電することができたが、励磁中巻線内部の導体の動きによる電圧のスパイクや変動が観測され、不安定な電圧挙動を示した。WAX含浸は導体間の接着力が無く、局所的に導体が動き易いことが原因と考えられる。

2-2. 中型スプリットコイル試験

MRIマグネットは単一ソレノイドコイルと異なり巻棒フランジ面とコイル間に強い軸方向の圧縮応力がかかる。このことを模擬すべく中型のスプリットコイル(内径φ200 mm、外径φ230 mm、長さ72 mm×2、スプリットギャップ10 mm)を作製しフランジ界面での軸方向応力の限界を見極める試験を行った。小型コイルの試験から含浸手法を①スタイクキャスト塗込み含浸、②プリプレグ含浸の2種類に絞った。結果、スタイクキャスト塗込み含浸コイルにおいてフランジ界面での最大軸方向応力4.7 MPaまで安定して通電できた。小型コイル同様これ以上の応力での試験は I_c が制限となり実施できなかった。プリプレグ含浸コイルでは励磁中に電圧スパイクが発生した後、電圧挙動に異常が見られ不安定な電圧挙動を示した。フランジとコイル界面部分に空隙ができ導体が動き易くなっていたことが原因として考えられる。スタイクキャスト塗込み含浸では空隙にスタイクキャストが入り込むことから導体の動きが抑えられたと考えられる。

要素試験の結果から、実機マグネットのフープ応力を137 MPa、フランジ界面とコイル間の軸方向応力を4.7 MPaとし、含浸手法はスタイクキャストの塗込み方式とした。

3. 実機マグネットの設計・製作および励磁試験

要素試験の結果をもとに、実機マグネットの設計および製作を行った。マグネットの線材条長は44.6 kmとなった。製作したマグネットの外観をFig.1に示す。10KGM冷凍機一台を組み込んでおり、初期冷却では570時間で6.8 Kへ到達した。社内試験では漏れ磁場の制約上定格の1/10となる0.3 Tまでしか通電できなかったが、コイル電圧や磁場測定の結果から設計値通り製作出来ていることが確認できた。磁場分布はP-Pで1500ppmであり、主たる成分は軸方向の1~4次成分であった。これはテープ線材をソレノイド巻きにしたことによって生じた巻線端部の充填率の低下が原因と考えられる。鉄シムによる磁場補正で目標とする均一度を達成する計画である。

4. まとめ

初期冷却試験とコイル電圧、磁場測定の結果からマグネットが設計通り出来ていることが確認できた。今後、京都大学へ移設し1.5 Tへ励磁し画像取得を行った後、3.0 Tでの画像取得を目指す。

Table.1 Specifications of the magnet system

Diameter of the RT bore	≥ φ500mm with iron shims	
Field strength	3T	
Field homogeneity	≤5ppm in r250mm × z200mm ellipse as design	
Operation temperature	20K	
Stored energy	2.3KJ	
Conductor	Bi-2223/Ag/Cu-alloy Superconducting tape	
	Width	4.5±0.3mm
	Thickness	0.36±0.04mm
	Reinforcement material	0.05mm-thick Co-alloy

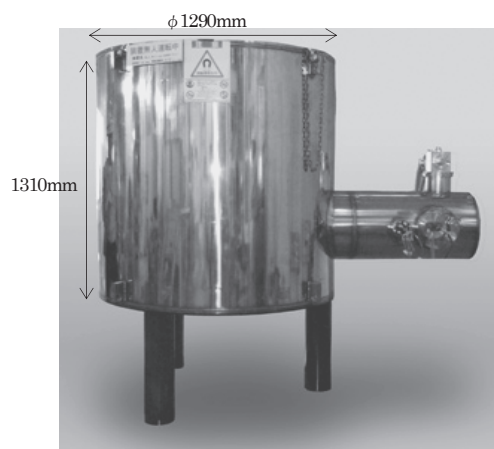


Fig.1 Photograph of 3T MRI magnet

謝辞

この開発は、独立行政法人科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業(先端計測分析技術・機器開発)による成果である。

BHOピンを導入したPLD法GdBCO線材の臨界電流密度特性

Critical current density properties in PLD-processed GdBCO coated conductors with BHO pinning centers

永水 隼人, 和田 純, 鯉田 貴也, 木内 勝, 小田部 莊司, 松下 照男 (九工大);
飛田 浩史, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

NAGAMIZU Hayato, WADA Jun, KOIDA Takaya, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); TOBITA Hiroshi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail: nagamizu@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材 (RE:希土類) は様々な応用機器への利用が有望視されている。しかしながら実用化に向けては、磁界下での臨界電流密度 J_c の更なる向上が求められている。これまでの研究で、人工的にピンを導入することで磁界下での J_c が向上することが分かっている [1]。現在人工ピンとしては、 $BaZrO_3$ (BZO) ピンが広く研究されているが、本研究では、新しい人工ピンとして BHO ピンを導入した GdBCO 線材の臨界電流密度特性を調査し、BZO ピンを導入した線材特性との比較より、BHO ピンの有用性を議論する。

2. 実験

測定した試料は PLD 法で作製された GdBCO コート線材であり、ピン無し (#1), BHO ピン入り (#2), BZO ピン入り (#3) の 3 種類である。試料の諸元を Table1 に示す。これらの試料に対して、SQUID 磁力計を用いて、直流磁化法により $B \parallel c$ での J_c の磁界依存性を測定した。また、磁化の緩和特性を測定し、見かけのピンポテンシャル U_0^* を評価した。測定温度は 20-77.3 K, 印加磁界は 0-7 T である。不可逆磁界 B_i は $J_c = 1.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ となる磁界で定義した。

Table1: Specification of specimens

Specimen	Process	thickness $d(\mu\text{m})$
#1	GdBCO	1.1
#2	GdBCO+BHO	1.0
#3	GdBCO+BZO	1.1

3. 結果及び考察

Fig. 1 に 20 K と 77.3 K における #1, #2, #3 の J_c - B 特性を示す。まず 77.3 K について議論する。 $B = 0 \text{ T}$ での J_c はどの試料も同程度になっている。1 T 以上の磁界領域では、#2, #3 どちらの J_c も #1 より高くなっており、磁界下で人工ピンが有効に作用していることが分かる。#2, #3 で比較すると、#2 の方が人工ピンの導入による J_c の劣化が少なく、磁界依存性も優れていることから、BHO ピンの優位性が確認できる。また、77.3 K での B_i は #1, #2, #3 でそれぞれ 2.6, 3.7, 4.4 T となっており、BZO ピンの導入で約 1.4 倍、BHO ピンの導入で約 1.7 倍 B_i が向上していることが分かる。20 K においても同様の傾向が確認でき、低温領域においても BHO ピンが有効に作用していることが分かる。

Fig. 2 に #1, #2, #3 の 20 K における U_0^* の磁界依存性を示す。#1 の U_0^* は低磁界では高い値を示しているが高磁界になるにつれて急激に減少している。一方で、#2 の U_0^* は 4 T 程度にピークを持ち、高磁界でも高い値を維持していることが分かる。また、#3 の U_0^* も 2 T 程度にピークを持っているが、高磁界側では小さくなっている。つまり、#2 は #1, #3 に比べて低温、高磁界

で高い緩和特性を有し、緩和しにくいことから SMES 等への利用に有利であるといえる。これらの結果に対する詳細な議論は当日行う。

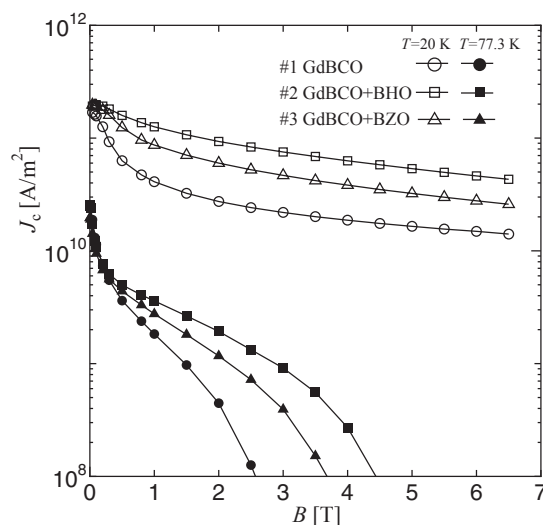


Fig. 1 Field dependence of J_c at 20 and 77.3 K.

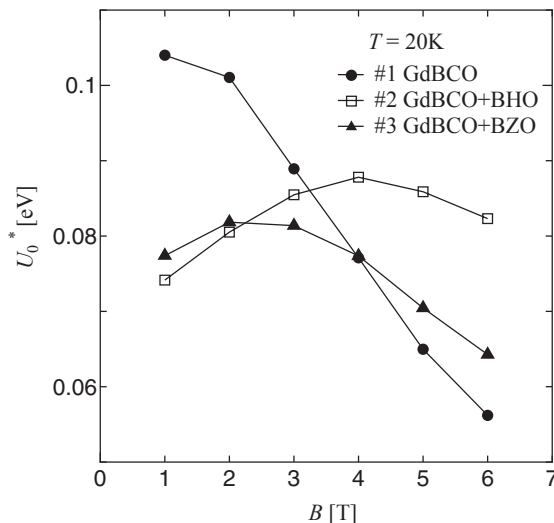


Fig. 2 Field dependence of U_0^* at 20 K.

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC-SRL を通じて NEDO から委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] M. Namba, et al., Physica C 469 (2009) 1404-1409.

PLD 法 RE123 テープ線材の臨界電流特性の異常な磁界角度依存性

Anomaly observed in the angular dependence of J_c of PLD-RE123 coated conductor

筑本 知子, 衣斐 顕, セルゲイ・リー, 田辺 圭一 (ISTEC)
 CHIKUMOTO Noriko, IBI Akira, LEE Sergey, TANABE Keiichi (ISTEC)
 E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

近年、パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) 等により、非常に高い J_c 値をもつ高性能 RE123 テープ線材が得られるようになってきており、それを用いた応用機器開発も進められている。特に、SMES や超電導磁石等の磁場応用においては、磁場中 J_c 特性が鍵を握っているが、今までのところ J_c 特性をいかに向上するかは研究開発の主眼がおかれており、どうしてそのような特性になるのかの理解については、進んでいない状況である。特に、PLD 法で作製した RE123 テープ線材の J_c の磁界角度依存性において、 $B_a // ab$ 付近での非対称ピークや磁気ヒステリシスの消失などの様々な異常が報告されており[1]、そのメカニズムの解明を行う必要がある。

そこで、本研究においては、PLD 法 RE123 について、磁気ヒステリシス及び磁束クリープの磁界角度依存性の測定を行い、磁化の異常の出る温度・磁場範囲、製造条件、配向度の影響などを調べたので、その結果について報告する。

2. 実験方法

測定試料は、 $CeO_2/LaMnO_3/IBAD-MgO$ /ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板) 上に PLD 成膜した GdBCO テープ線材で、約 4mm 角に切り出したものを用いた。

磁化測定は SQUID 磁束計 (MPMS-7, Quantum Design 社) を用いて行い、サンプルローテータを用い、テープ面に対する磁界印加角度を 0° ($B // c$) から 90° ($B // ab$) まで変化させて磁気ヒステリシス測定及び磁束クリープ測定を行った。

3. 実験結果

Fig. 1 に 65K と 75K で測定した磁気ヒステリシス曲線を示す。75K においては、 0° 、 15° 、 30° と磁場の印加方向を変えても、y 軸に対して対称的な磁化曲線となるのに対し、65K においては、 0° では y 軸に対称的な磁化曲線となったものの、 15° では非対称となり、さらに 30° では低磁場においてヒステリシスが消失していることがわかる。同様な現象は 60K、55K においても見られた。

Fig. 2 に 65K、2T (減磁過程) において測定した磁化緩和測定結果を示す。 0° においては RE123 系超電導体において通常報告されているような対数型磁気緩和がみられるのに対し、 15° においては急速に磁気緩和して緩和測定開始時には平衡磁化に近い値に達してしまい、本測定時間範囲 ($100s \leq t \leq 3500s$) においては、小さな磁気緩和しかみられていない。当日はさらに、磁気緩和特性の磁場・温度依存性や磁場履歴の効果等の詳細をふまえて、この現象について考察を行う。

4. 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- For example, M. Iwakuma, A. Ibi, T. Izumi and Y. Shiohara: *Supercond. Sci. Technol.* **23** 075009 (2010).

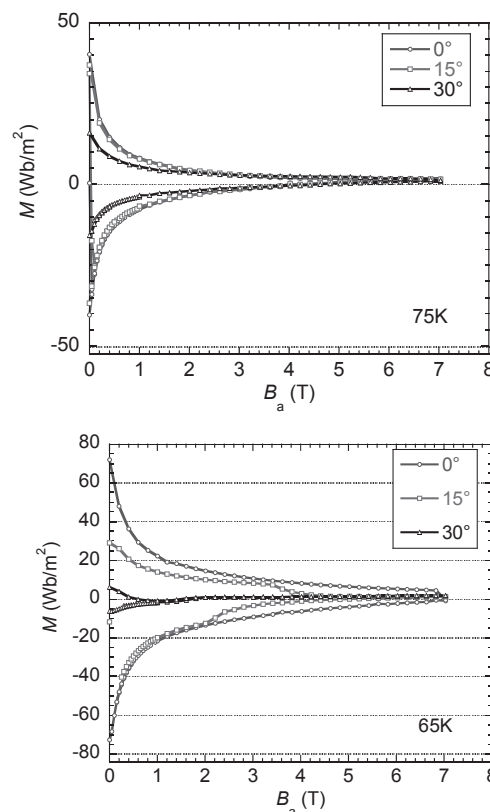


Fig.1 Part of magnetic hysteresis curves measured for Gd123 tape prepared by PLD technique.

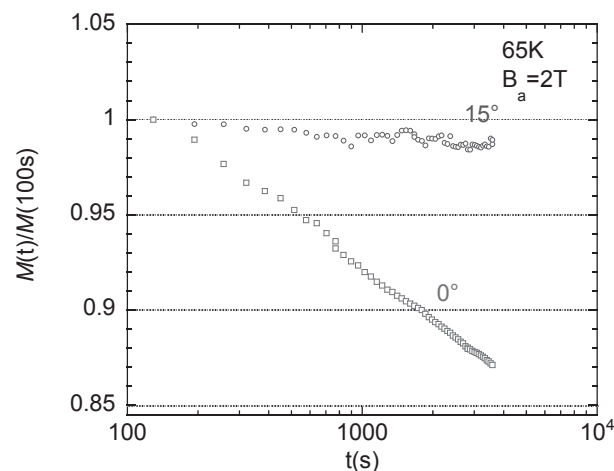


Fig.2 Magnetic relaxation curves measured for Gd123 at 2T and 65K.