

REBCO エポキシ含浸コイルの電磁力試験

Hoop stress tests of epoxy-impregnated REBCO coils

淡路 智¹, 小黒英俊¹, 鈴木 匠¹, 諏訪友音¹, 渡辺和雄¹, 西島 元²,
花井 哲³, 丸川宏太郎³, 大保雅載⁴, 齋藤 隆⁴, 坂本久樹⁵, 井上 至⁵,
Yasuyuki Miyoshi⁶, Xavier Chaud⁶, Francois Debray⁶

¹東北大・金研, ²物材機構, ³東芝, ⁴フジクラ, ⁵古河電工, ⁶LNCMI
S. Awaji¹, H. Oguro¹, T. Suwa¹, T. Suzuki¹, K. Watanabe¹, G. Nishijima², S. Hanai³, K. Marukawa³, M.
Daibo⁴, T. Saito⁴, H. Sakamoto⁵, I. Inoue⁵, Y. Miyoshi⁶, X. Chaud⁶, F. Debray⁶

¹Institute for Materials Research, Tohoku University

²National Institute for Materials Science

³Toshiba Corporation

⁴Fujikura Ltd.

⁵Furukawa Electric Co., Ltd

⁶Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123, REは希土類)高温超伝導線材の開発が進み, 最近では強磁場マグネット開発のためのコイル化技術への展開が世界的に実施されている。東北大金研強磁場センターでも, 25T無冷媒超伝導マグネットなどの強磁場超伝導マグネット開発のため, RE123線材を用いたコイル化技術開発を進めている。特に, 無冷媒超伝導マグネット開発のため,

伝導冷却に適した構造として, RE123含浸コイルが重要となる。一方で, RE123テープは多層膜構造を有することで, 剥離力に弱く, エポキシ含浸した場合の熱応力により剥離が発生し, コイルが劣化することが報告され, 深刻な問題となっている。しかし最近, コイル化技術の進歩によってコイル分割や接着力の弱い含浸材を用いることで含浸コイルの作製が可能となってきた[1]。今年度はエポキシ含浸した

TABLE I SPECIFICATION OF THE TEST COILS

	Coil A	Coil B
Wire		
<i>Material</i>	PLD-GdBCO	CVD-YGdBCO
<i>Buffer</i>	CeO ₂ /IBAD-Gd ₂ Zr ₂ O ₇	LaMnO ₃ /IBAD-MgO
<i>Width</i>	5 mm	4 mm
<i>Stabilizer</i>	Cu 100 μm	Cu 40 μm
<i>Substrate</i>	Hastelloy 100 μm	Hastelloy 50 μm
<i>Thickness</i>	≈ 217 μm	95 μm
<i>I_c (77K, sf)</i>	150 A	111 A
Coil		
<i>Type</i>	Single pancake	Double pancake
<i>Inner dia.</i>	89.8 mm	75 mm
<i>Outer dia.</i>	176 mm	86.7 mm
<i>Height</i>	5.5 mm	10 mm
<i>Turn No.</i>	147 turns	34 x 2 turns
<i>Tape length</i>	61.4 m	40 m
<i>Impregnation</i>	Epoxy resin	Epoxy resin
<i>No. of sub-coils</i>	16	3
<i>Inductance</i>	3.7 mH	620 μH
<i>Coil I_c (77K)</i>	71 A (0.1 μV/cm)	50 A (0.1 μV/cm)
<i>n-value (77K)</i>	17-21	23

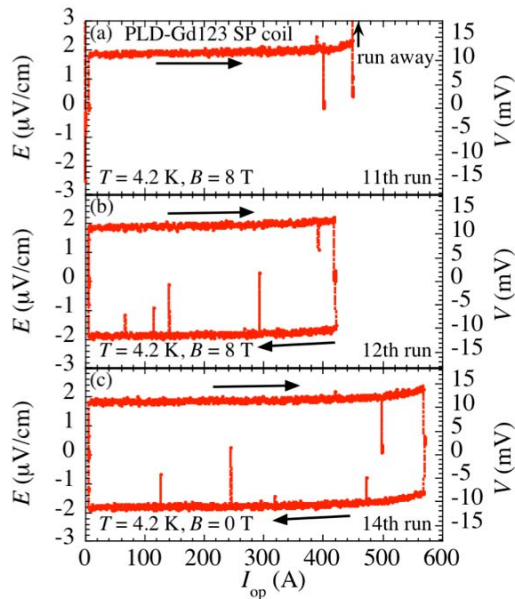


Fig. 1 Transport properties of the coil-A at 8 T(a, b) and 0 T (c).

コイルを数種類作製し、電磁力下の試験を行った。

2. 実験方法

実験に用いたテストコイルの諸元を Table 1 に示す。今回は、2種類の異なる RE123 線材を用いてコイルを作製した。コイル A は、金研強磁場センターの大口径無冷媒超伝導マグネット(8T360-CSM)を使用し、コイル B はグルノーブル強磁場施設 LNCMI にある内径 170mm の大口径 19T 水冷マグネットを用いて試験を行った。両コイルともエポキシ含浸コイルであり、液体ヘリウム中で実験を行った[2]。

3. 実験結果と考察

3.1 A コイル

Fig.1 にバックアップ 8T および 0T 中における A コイルの通電特性を示す。電流掃引時には、コイルインダクタンスに起因した電圧が発生するが、11回目の通電(Fig. 1(a))では、約 400A を越えた付近からさらに電圧が上昇をはじめ、450A 近傍で熱暴走を起こした。12回目の通電では(Fig. 1(b))、11回目とほぼ同じ通電特性を示し、420A の安定通電を確認した。これらの結果、 $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した本コイル I_c は 8T の磁場中で約 415A であった。一方、ゼロ磁場中の I_c は 520A まで上昇した。大きな異方性を有する RE123 テープの場合、コイル I_c は大まかには発生磁場の c 軸方向成分 (コイルに対する径方向成分) によって決まる。磁場の径方向成分は、大口径の大型マグネット中の扁平なコイル場合、ほとんどが自己磁場の寄与となる。このため、コイル I_c はバックア

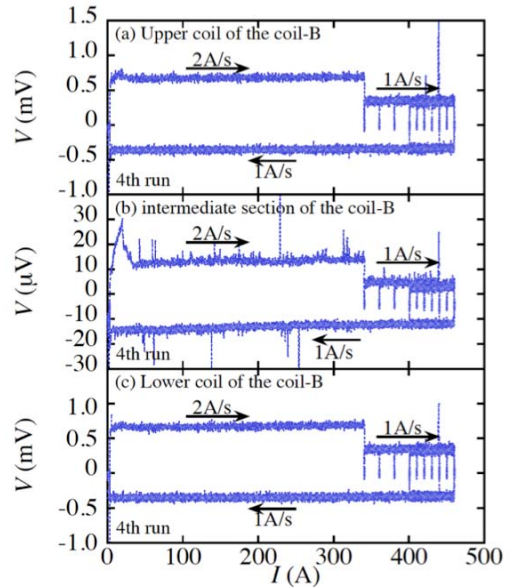


Fig. 2 Transport properties of the coil-B at 13.5 T. (a), (b) and (c) are data of upper pancake, intermediate section and lower pancakes.

ップ磁場に大きく依存しないと考えられている。しかし今回、8T 中と 0T 中で I_c の違いが見られた。この結果は、 I_c の磁場印加角度依存性の違いに起因していると考えられ、コイル設計には線材 I_c の磁場、磁場印加角度などを考慮する必要性を示唆している。一方で、8T 中の $I_c \approx 415\text{A}$ 通電時のコイルに誘起された電磁力は、基板換算で約 570 MPa となり、RE123 線材の高い機械特性を示唆している。

3.2 B コイル

Fig. 2 にコイル B に対するバックアップ磁場 13.5 T 中の通電特性を示す。図から分かるように、最大 460 A まで抵抗成分による電圧発生が見られていない。次に、通電電流に対するコイル表面のひずみ状態を Fig. 3 に示す。ひずみは、コイル内面、外面、上部表面に取り付けたひずみゲージで測定した。測定した多くのひずみは、Fig. 3 に示すように通電電流に対してほぼ線形に増加し、可逆となった。また、最大通電電流に対するひずみは、コイル内面で約 0.5%、外面で約 0.3%、上面で約 0.4%であった。これらの結果は、コイルが可逆に変形し、コイル内面により大きな電磁力がかかっていることを示している。含浸コイルが一体となって変形する場合、コイル内部の応力分布は、Wilson による解析式が与えられている[3]。これを用いてコイル内部の hoop 応力と径方向応力を計算した結果を Fig. 4 に示す。比較のため含浸なしの場合(BJR)も示した。図から分かるように、コイル内部で応力が分布しており、hoop 応

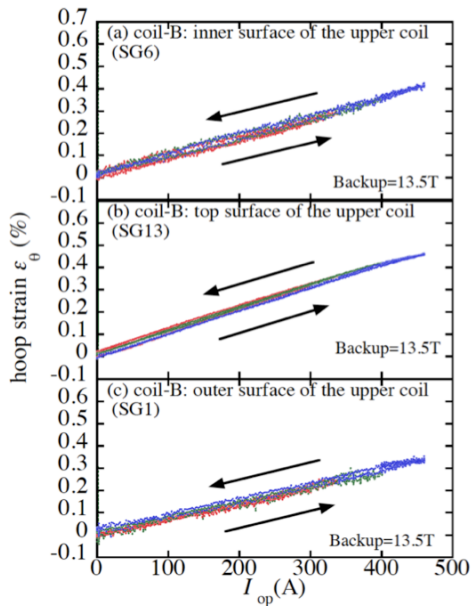


Fig. 3 Hoop strains of the coil-B at 13.5 T as a function of the operation current. Strains were measured on (a) inner-, (b) top- and (c) outer-surfaces of the coil.

力はコイル内部の方が、外部よりも大きくなること
 が分かる。この計算結果は、測定されたひずみの結
 果と定性的に良く一致している。また、線材の応力-
 ひずみ特性から見積もったコイル内面の応力は約
 1330 MPa となり、Fig. 4 の結果と定量的にも良い一
 致を示している。これらの結果は、Y123 コイルが高
 い機械特性を有しているため、1000 MPa を越える高
 い電磁力下で用いることが可能であることを示唆し
 ている。

4 まとめ

RE123 テープ線材を用いたエポキシ含浸コイルを
 試作し、高磁場・高電磁力下における試験を行った。
 その結果、1300 MPa 以上の高い電磁力下でも安定に
 運転が可能であることが分かった。コイル臨界電流
 は、線材の I_c の磁場角度依存性の影響を大きく受け、
 それによってコイル I_c が制限されることを実証した。
 これらの結果を踏まえ、実際の 25T 無冷媒超伝導マ
 グネットなどの設計・開発を実施していく予定であ
 る。

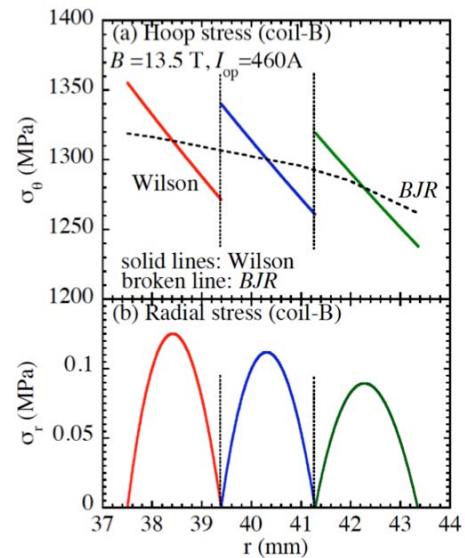


Fig. 4 Calculated stress distribution in the coil-B at $I_{op}=460A$ and $B = 13.5T$. (a) Hoop stress and (b) Radial stress. The dotted lines correspond to the boundaries of the sections.

参考文献

- [1] Y. Shiroyanagi, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (2008) 1649.
- [2] S. Awaji, *et al.*: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (2013) 4600305.
- [3] M. N. Wilson, "Superconducting Magnets," Oxford Science Publications, Oxford, 1982, pp. 42-46.