

GdBa₂Cu₃O_y コート線材のフープ応力試験

Hoop Stress Test for GdBa₂Cu₃O_y Coated Conductor

東北大・金研 西島 元, 峯岸 一博, 淡路 智, 渡辺 和雄
 ISTECSRL 和泉 輝郎, 塩原 融
 G. Nishijima¹, K. Minegishi¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, T. Izumi² and Y. Shiohara²
¹ Institute for Materials Research, Tohoku University
² Superconductor Research Laboratory, ISTECSRL

1. はじめに

超伝導マグネットが強磁場化, 大型化は, 超伝導線材の力学特性 (mechanical property) がマグネット性能の支配因子となることを意味する。たとえば, 30 T 超伝導マグネットの場合なら, 400 MPa 以上の応力に耐える超伝導線材が必要になる。

我々は, Coated conductor (コート線材) の高超伝導特性と高機械特性に着目し, 強磁場マグネット線材としての評価研究を行っている。既に, CVD-YBCO コート線材のフープ応力印加試験を 11 T, 4.2 K において行い, ハステロイ基板を外側に巻いた場合に 1 GPa, 基板を内側に巻いた場合でも 777 MPa までのフープ応力印加が可能であることを示した[1]。

コート線材の性能進化は著しく, 3 年前は 1 cm 幅線材で 100 A 程度しかなかった臨界電流(I_c)が, 現在は 4 倍になっている。同時に, これまでは力学特性のみが注目されてきたコート線材が, 安定性の面で課題を抱えていることや, 高アスペクト比テープ形状であることに起因する課題も指摘されている。

本研究では GdBCO 線材の電磁機械特性をフープ応力試験によって調べた。

2. 線材および試料コイル諸元

ISTEC-SRL より提供された IBAD-PLD 法 GdBCO 線材 (5 mm 幅) を試料線材とした。Table 1 に線材諸元を示す。この線材に, 一定間隔で (巻棒に巻いたときに 90 度間隔になるように) 歪ゲージ (共和電業 KFL-1-120-C1-16) を 5 枚貼り付けた後, 直径 270 mm の GFRP 製巻棒 (外径 280 mm に幅 5 mm, 深さ 5 mm の角溝加工) に 1.5 ターン巻き付け, 試料コイルを製作した。このとき, 基板を外側にして巻いた Coil A と, 基板が内側にして巻いた Coil B の 2 個を製作した。電流端子との接続には一般的な半田を用いた (温度は管理しなかった)。Fig. 1 にコイル写真を示す。

電圧端子のハンダ付けは, Coil A の場合は巻線前に行い, Coil B の場合は巻線後に行った。

両コイルをそれぞれ液体ヘリウム中 (4.2 K, 11 T)

Table 1 Specification of GdBCO coated conductor

Stabilizer	Ag	10 μm
Superconducting layer	PLD-GdBCO	1.2 μm
	CeO ₂	0.5 μm
Buffer	LaMnO ₃	19 nm
	IBAD-MgO	4 nm
	Gd-Zr-O	110 nm
Substrate	Hastelloy C276	100 μm

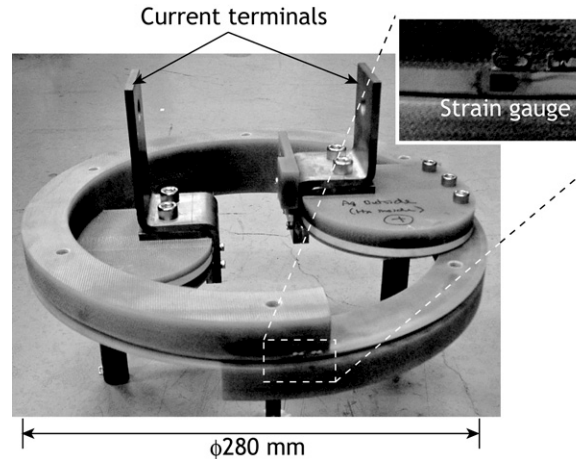


Fig. 1 Photograph of hoop stress test coil

で通電し, 電磁力によるフープ応力印加試験を行った。

3. 実験結果

3-1. Coil A の力学特性

Fig. 2 に Coil A の 11 T, 4.2 K におけるフープ応力-歪特性を示す。フープ応力は磁場・電流密度・コイル半径の積で求めた。ここで, 磁場は線材試料コイルの線材位置 (マグネットボア内において, 鉛直方向には z=0, 径方向に r=135 mm) における印加磁場値であり, 自己磁場は考慮していない。また, 電流密度は通電電流値を線材全断面積で除した値であり, いわゆる工学電流密度(J_e)である。

5 個の歪ゲージによる歪測定値はほぼ一致している。#2 の測定値が他に比べて小さく観測されており, ノイズも大きい, 原因は今の所不明である。最大印加フープ応力 1250 MPa における歪は最大 0.7% であった。最大印加フープ応力は, 通電電流源の容量が最大 500 A (実際には 470 A) であったことにより制限された。

歪 0.1% 以下の立ち上がり部分を除けば BJR-歪特性は直線であり, 1250 MPa フープ応力印加-除荷を 2 サイクル行っても BJR-歪は可逆であった。従って, このサイクルの範囲では 1250 MPa-0.7% は弾性域であると考えられる。BJR-歪特性の直線部分の傾きから弾性率を求めると 192 GPa となる。短尺試料の測定では 200 GPa 以上の値が得られているが[2], これについては検討中である。

コート線材の弾性率はほぼ 190 – 200 GPa の範囲にある[3]。しかしながら、いずれも 77 K における測定値であり、4.2 K における測定値が望まれる。

3-2. Coil A の電流電圧特性

Fig. 3 に Coil A の 11 T, 4.2 K における電流電圧特性を示す。VPVN は電流端子間電圧であり、電流端子接続抵抗を含むため、抵抗成分が重畳している。全ての電圧端子区間において、分流電圧は観測されず、470 A までの範囲では超伝導であった。また、2 サイクルの通電において電圧は可逆であった。

1000 MPa 程度の応力によって臨界電流が不可逆に劣化することが報告されているが、本研究では通電電流源の容量に比べて線材の臨界電流が大きすぎたために調べられなかった。今後、2 mm 幅線材を用いて実験を行うことで、これについて調べる予定である。

3-2. Coil B の力学特性

Fig. 4 には Coil B の 11 T, 4.2 K におけるフープ応力-歪特性を示す。Coil A で得られた歪信号と比べると 5 個の歪ゲージによる歪信号は良く一致している。最大印加フープ応力は 1100 MPa であった。

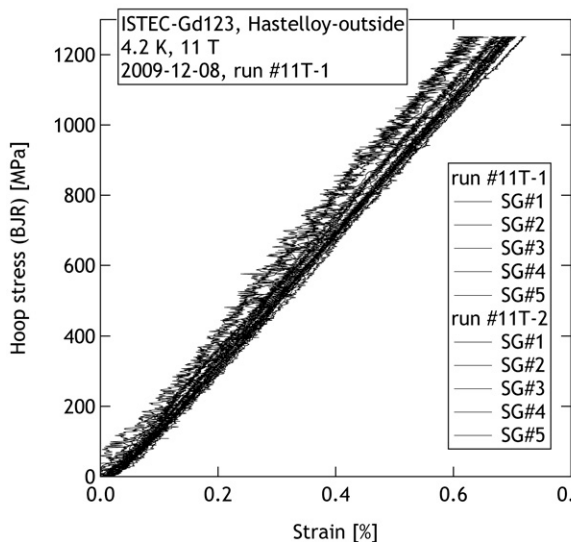


Fig. 2 Hoop stress - strain characteristic of coil A at 4.2 K, 11 T.

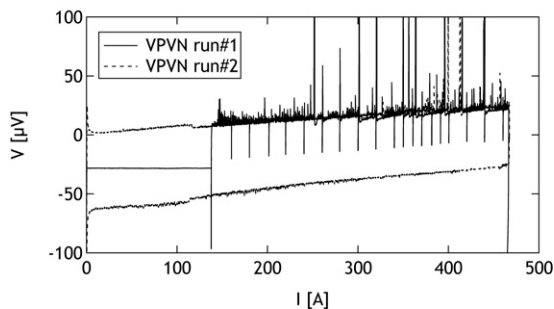


Fig. 3 Voltage-current characteristic of coil A at 4.2 K, 11 T.

3-3. Coil B の電流電圧特性

Fig. 5 には Coil B の 11 T, 4.2 K における電流電圧特性を示す。230 A で V2VN から電圧が発生し、240 A と 250 A で V2VN に跳びが見られる。これ以上の電流値では電流-電圧は線形に増加した。

350 A から電流を減少させたところ、電流増加時に電圧が発生した電流値 (230 A) よりも低い電流になっても電圧を観測し、210 A で超伝導に復帰した。このとき、V1V2, VPV1 には常伝導成分は観測されていない。

再び電流を増加させたところ、前段落と同じ電流値で電圧が発生し、ヒステリシスは見られなかった。電圧はそのまま線形に増加し、410 A のとき (BJR=1100 MPa) にマイナス電極で焼損した。

電圧が発生した 230 A はフープ応力換算で 500 MPa であるが、ローレンツ力では 2530 N/m である。今、線材全長にわたって一様にローレンツ力が働くと仮定すると、線材は巻棒から離れる方向の力を受けるが、電極は固定されているため、電極近傍に大きな曲げ歪が発生する。この曲げ歪によって電氣的

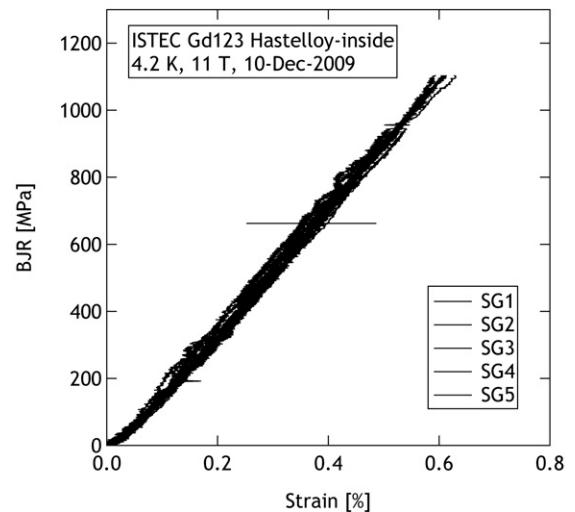


Fig. 4 Hoop stress - strain characteristic of coil B at 4.2 K, 11 T.

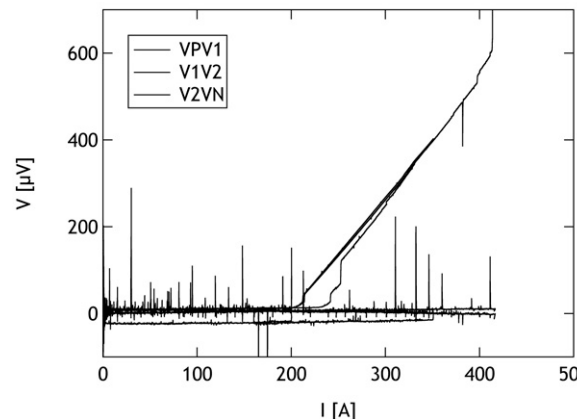


Fig. 5 Voltage-current characteristic of coil B at 4.2 K, 11 T.

に（不可逆に）劣化したと考えると定性的に説明できる。

4. まとめ

IBAD-PLD 法 GdBCO コート線材の, 11 T, 4.2 K におけるフープ応力印加試験を行った。ハステロイ基板を外側にして巻いた場合は, 1250 MPa までのフープ応力に対して機械的・電氣的な劣化無しに通電できた。一方, 基板を内側にして巻いた場合にも機械的な劣化は観測されなかったが, 電極近傍において電氣的な劣化が見られた。これは電極近傍における曲げの影響であり, コイル製作時には超伝導層に大きな曲げ歪が印加されない構造にする必要がある。

参考文献

- [1] G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 18 (2008) 1131.
- [2] 峯岸他, 2010 年度春季低温工学・超電導学会, 発表予定
- [3] K. Osamura, et al., Supercond. Sci. Technol., 22 (2009) 02515.