

CVD-YBCO コート線材のフープ力試験 Hoop Stress Test for CVD-YBCO Coated Conductor

東北大・金研 西島 元, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄
中部電力 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫

G. Nishijima¹, H. Oguro¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, K. Shikimachi², N. Hirano² and S. Nagaya²

¹ Institute for Materials Research, Tohoku University

² Chubu Electric Power Co. Inc.

1. はじめに

Coated conductor (コート線材) はその高い超伝導特性だけでなく, NiW, Hastelloy C-276 といった高強度材料を基板として用いていることによる高い機械特性[1]が強磁場マグネット材料として魅力的である。今, マグネットの応力を magnetic pressure $p_m = B^2 / (2\mu_0)$ で見積もると[2], 20 T では 159 MPa, 30 T では 358 MPa である。このことは, 30 T 超伝導マグネット開発のためには, 400 MPa 程度以上の応力でも使える超伝導材料が求められることを意味する。そこで, 本研究では YBCO コート線材の機械特性を調べるために液体ヘリウム中でフープ力試験を行った[3]。

2. 線材および試料コイル諸元

試料線材には多段 MOCVD 法によって製作された長尺 YBCO 線材を用いた[4]。Fig. 1 に線材構造を示す。この線材をポリイミドテープで絶縁し, PTFE シートで絶縁した SUS 製巻枠に Hastelloy 外側 (Coil A), Hastelloy 内側 (Coil B) の 2 通りの方法で巻き, 試料コイルを製作した。Fig. 2 に写真を示す。

計測のための電圧端子は Coil A には両電極のみ,

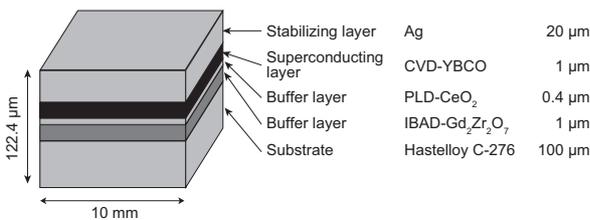


Fig. 1. Schematic architecture of CVD-YBCO coated conductor.

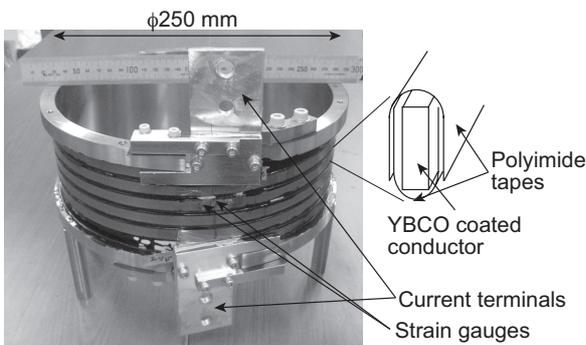


Fig. 2. Photograph of YBCO coil.

Coil B には両電極および各ターンに取付けた。また, 両コイルに歪ゲージを貼付けた(Fig. 3)。

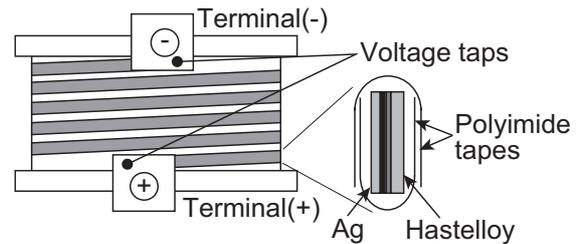
両コイルとも, 液体窒素中 (77 K, 0 T) での予備通電を行い, 巻線による劣化の有無を調べた後に液体ヘリウム中 (4.2 K, 11 T) で通電し, 電磁力によるフープ力印加試験を行った。

3. 実験結果

3-1. Coil A

フープ力試験前の 77 K 予備通電では臨界電流 (0.1 μV/cm 定義) $I_c = 112.7$ A, n 値は 26 であった。これは巻線による劣化が無いことを意味する。

(a) Coil A (Hastelloy outside)



(b) Coil B (Hastelloy inside)

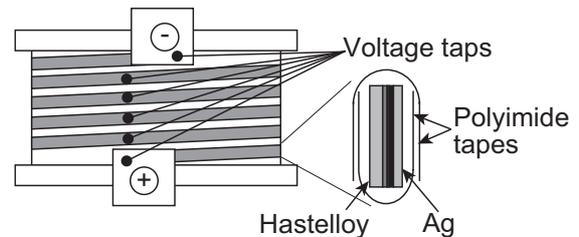


Fig. 3. Schematic illustration of coils A and B.

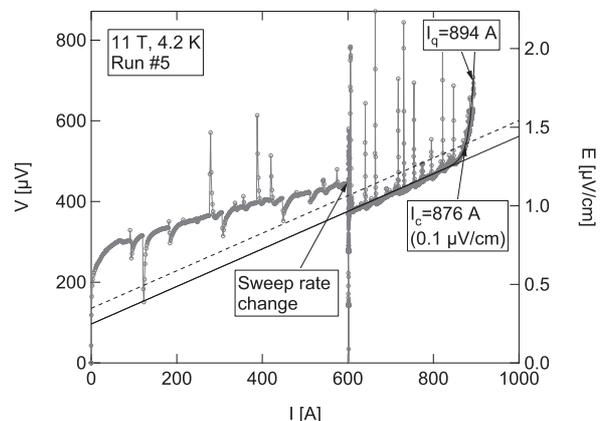


Fig. 4. V-I characteristic of the YBCO coil A at 11 T, 4.2 K.

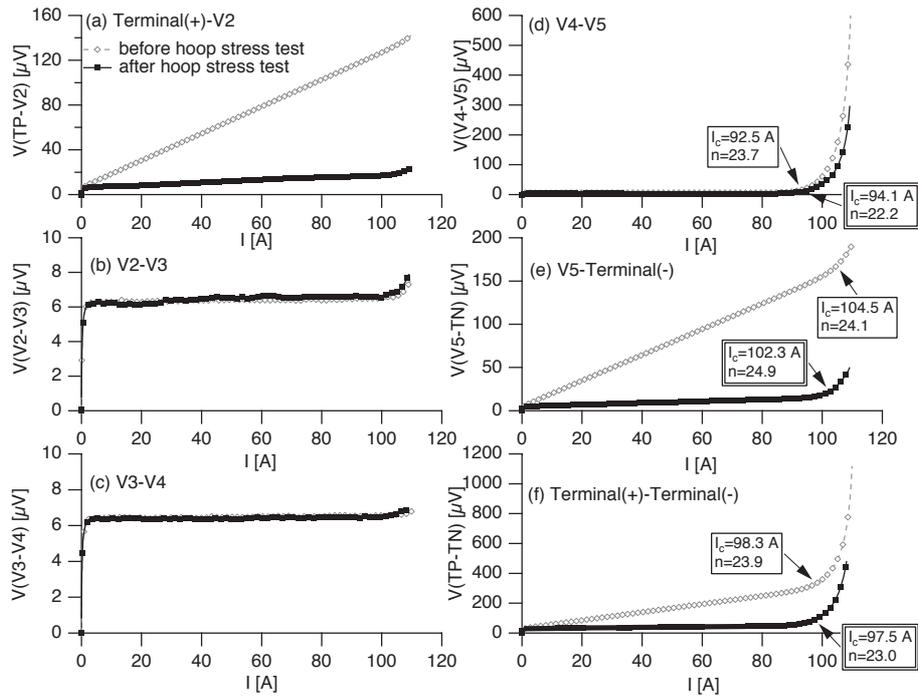


Fig. 5. V-I characteristics of the YBCO coil B at 77 K.

Fig. 4にはCoil Aの4.2 K, 11 TにおけるV-I曲線を示す。コイルのクエンチ電流 $I_c=894$ Aであり、この時のフープ応力は1028 MPaと見積もられる。この線材は77 Kにおける引張り試験で1 GPa以上の応力に耐えることが示されている[5]が、4.2 K、磁場中においても1 GPaまで印加できることが示された。

3-2. Coil B

Fig. 5はCoil Bの77 K予備通電におけるV-I特性である。図にはフープ力試験前（薄いプロット）とフープ力試験後（濃いプロット）の両方を示した。線材全長の I_c , n 値はそれぞれ98.3 Aおよび23.9であった。また、Fig. 5(d)に示されるように、V4-V5が局所的に I_c が低く、92.5 Aであった。Fig. 5(a)と5(e)において、フープ力試験後のV-I曲線のほうがフープ力試験前のそれよりも傾きが小さい。これはフープ力試験（ローレンツ力印加試験）により電極部の接続抵抗が低下したためと考えられる。

Coil Bの4.2 K, 11 TにおけるV-I曲線をFig. 6に示す。Coil Bの最大印加フープ応力は777 MPaであった。また、前述したようにフープ力試験後の77 K V-I曲線はフープ力試験前のそれと比べて劣化は見られなかった。

Coil Bの場合、ローレンツ力による導体剥離を検討しておく必要がある。 $I_q=676$ Aのときのローレンツ力は0.74 MPaである。コート線材の剥離強度についてはvan der Laanらの研究により、MOD-RABiTS YBCOコート線材が10 MPaで剥離するとの報告[6]があるが、CVD-YBCOコート線材についてはまだ報告が無い。今回の結果は、少なくとも0.74 MPaのローレンツ力はCVD-YBCO線材の剥離を引き起こさないことを示唆している。

Fig. 6において注目されることは、Fig. 6(a)の全長のI-V特性を支配しているのはFig. 6(c) V5-terminal(-)間であり、Fig. 6(b) V4-V5ではない点である。これはフープ力試験前の77 K予備通電の結果とは矛盾する。ただし、フープ力試験後に再度77 K通電を行った結果はFig. 5に示した通りであり、V4-V5が全体のI-Vを支配していた。このことは、

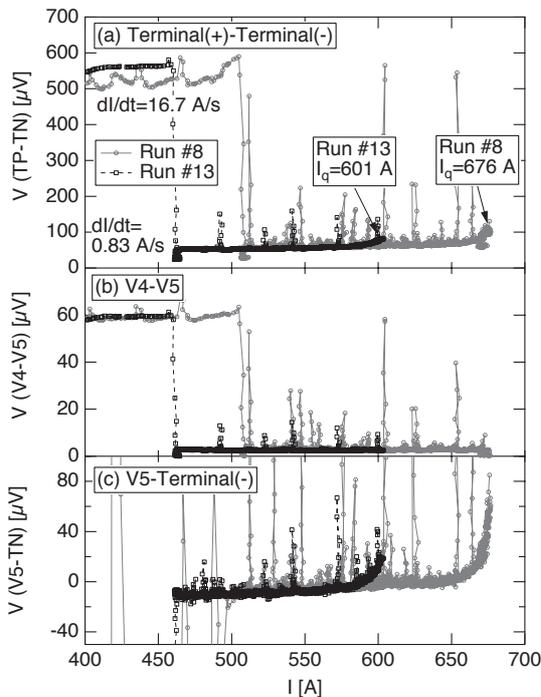


Fig. 6. V-I characteristics of the YBCO coil B at 11 T, 4.2 K.

Fig. 6(c)に見られる常伝導電圧発生が線材の劣化に起因しないことを示唆している。前節で議論したローレンツ力によって導体が外側に膨らむ方向に変形し、電極近傍で曲げ歪として作用し、臨界電流の低下を引き起こしたと考えると説明できる。

4. まとめ

多段MOCVD法によって製作された長尺YBCO線材を用いてハステロイ基板外配置／内配置の2種類のコイルを製作し、4.2 K、磁場中でフープ力試験を行った。ハステロイ基板外配置の場合、最大 1028 MPa のフープ力を印加できた。また、内配置の場合は最大 777 MPa まで印加できた。これらの結果により、高強度基板を用いたコート線材は強大な電磁力

下にも適用可能であり、強磁場マグネット材料として有望であることが示された。

参考文献

- [1] M. Sugano, et al., Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) S344.
- [2] Y. Iwasa, Case studies in superconducting magnets, Plenum Press, 1994, Ch. 3.
- [3] G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. in press.
- [4] N. Kashima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 2763.
- [5] M. Sugano, et al., personal communication (2007).
- [6] D.C. van der Laan, et al., Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 765.