

多層巻 Y 系コイルのフープ応力耐性向上と線材補修技術の検証

Verifications of higher hoop stress resistance of thick Y-coil and wire patching technique

中部電力 式町 浩二、平野 直樹、長屋 重夫
 東北大・金研 淡路 智、渡辺 和雄
 物材機構 西島 元

K. Shikimachi¹, N. Hirano¹, S. Nagaya¹, S. Awaji², K. Watanabe², G. Nishijima³
¹ Chubu Electric Power Co.
² Institute for Materials Research, Tohoku University
³ NIMS

1. はじめに

電力系統制御用 2GJ 級 SMES[1],[2]の実現に向け、Y 系超電導線材を用いた伝導冷却型高磁場コンパクトコイルの技術開発を進めている。これまでに IBAD/CVD-YBCO 線材の機械特性の評価[3]-[6]とともにその単層ソレノイド巻コイルのフープ応力基礎評価[7]を実施し、その優れた強度特性を実証した。さらに、前回、長尺 CVD-YBCO 線材を用いた多層巻パンケーキコイルを製作し、外部高磁場中でコイルのフープ応力耐性を試験評価したが、電極部で不具合が生じ、フープ応力耐性試験は最大 560 MPa で終了した[8]。今回、SMES プロジェクトで目標としているフープ応力耐性 600 MPa を検証するとともに、低特性部が局所的に含まれることがある長尺線材を有効利用する技術を検証するため、補修した長尺 CVD-GdYBCO 線材を用いて小型多層巻パンケーキコイルを製作し、同様の試験によりフープ応力耐性を評価検証した。

2. CVD-YBCO コイルのフープ応力試験評価

2-1. コイル製作

前回製作したコイルでは全幅 10 mm を 5 mm 幅にレーザ切断した線材を用いたが、切断面の影響を回避するため、今回はフープ応力評価用のコイル製作に 10 mm 幅の長尺 CVD-GdYBCO 線材を用いた。用いた線材仕様を Table 1 に示す。線材は、幅 10 mm、厚さ 100 μm のハステロイ基板に IBAD 法等による中間層、CVD 法による Gd と Y の混晶の超電導層を成膜し、Ag スパッタ後、安定化層として Cu メッキを線材全周囲に厚さ約 50 μm 施した。Cu メッキ線材はポリイミドテープを用いてラップ巻により絶縁処理を実施した。

コイル製作に用いた線材の I_c 分布を Fig. 1 に示す。用いた線材は全長 50 m において低特性部が 3 箇所 (Fig. 1 丸印部) 含まれており、コイル通電電流がこれらの低特性部で制約されてしまうため、これらの部位に別の高特性の線材をパッチすることで補修を試みた。この補修線材を用いて製作したシングルパンケーキ型多層巻 Y 系コイル (以下、SP コイル) の諸元を Table 1 に、その外観写真を Fig. 2 に示す。コイルはアミド系樹脂により含浸した。含浸後の絶縁テープ・樹脂を含む平均線材厚さは約 370 μm となった。なお、線材補修技術の検証もあわせて実施するため、電圧タップをコイル両端に加え、補修 3 箇所それぞれに取り付けて試験を実施した。

Table 1 Specifications of the wire and the SP coil for the hoop stress test

Wire type	Copper plated IBAD/CVD-GdYBCO tape coated conductor with three repaired portions
Wire length	50 m
Insulated wire width	10 mm
Insulated wire thickness	280 μm (excluding repaired portions)
Coil figure	Single-pancake coil
Inner diameter	200 mm
Outer diameter	251 mm
Height	11 mm
Turns	69.5

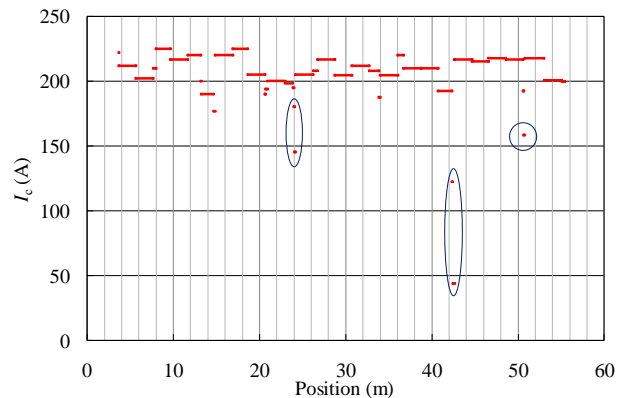


Fig. 1 I_c distribution of the wire used for the hoop stress test coil at 77 K.

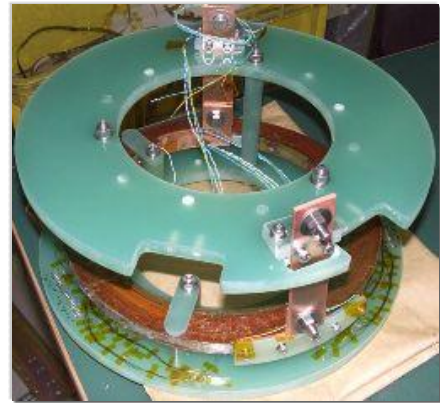


Fig. 2 An appearance of the SP coil for the hoop stress test.

3-2. 通電確認試験

液体ヘリウム中でのフープ応力試験の実施に先行して液体窒素浸漬冷却下でコイルに通電し、SP コイルおよび補修部の特性を確認した。SP コイルの巻線部全体および補修3箇所 の I-V 測定結果を Fig. 3 に示す。コイル I_c は 89 A (10^{-7} V/cm クライテリア)であり、Fig. 1 の線材 I_c 分布およびコイルの自己磁場を考慮すると、ほぼ線材 I_c に近い値であり、コイル劣化はほとんどないと考えられる。また、補修部では安定化 Cu 層を介して電流がバイパスするため、接続状況に応じた抵抗成分の損失が発生するが、補修各部の発生電圧がコイル両端の発生電圧に占める割合は十分小さく、コイル全体では問題ないレベルとなっていることを確認した。

3-3. フープ応力試験

液体ヘリウムにより SP コイルを 4.2K まで浸漬冷却し、外部磁場を印加後に通電することで、多層巻 SP コイルのフープ応力耐性を検証した。

Fig. 4 に外部磁場 11T において SP コイルを 2 回繰り返し通電した時のコイル両端 (電極部含む) の I-V 測定結果を示す。コイル電圧には励磁時のインダクタンス成分によるヒステリシスを伴う電圧が約 4 mV、接続部等の抵抗成分が約 $5 \mu\Omega$ 観測されているが、最大 572 A 通電時においてもフロー電圧は観測されておらず、コイルは健全と考えられる。

Fig. 5 に最大 572 A 通電時のコイル内部の応力分布を示す。ただし、線材に負荷される応力は高強度の Hastelloy 基板が負担する割合が極めて大きいため、厚さ 0.1 mm の基板が全て応力を負担するとして算出している。今回の多層巻 SP コイルに作用するフープ応力は、巻線部の各ターンが独立変形する場合と一体変形する場合で様相が大きく異なるため、それぞれのフープ応力を計算した。一体変形については Wilson による無限長コイルを仮定した内部応力分布の式によって近似計算した。その結果、今回の試験において、一体変形を仮定した場合の最大応力は内径側で約 850 MPa、独立変形を仮定した場合の最大応力は BJR の計算により外径側で約 750 MPa となる。前回実施したパンケーキ型多層巻 Y 系コイルの同様なフープ応力試験において歪ゲージを用いた径方向歪みを実測した結果、一体変形の場合の外径側が高い傾向を示したため[9]、今回の試験において最大 850 MPa 級のフープ応力耐性が負荷されたと考えられる。

補修部に関して、最大 572 A 通電時の各 I-V 特性を Fig. 6 に示す。比較のため、液体窒素中での通電確認時の補修部3箇所 の I-V 特性 (Fig. 3 拡大) を Fig. 7 に示す。補修部それぞれ異なる補修方法を試みたため、発生抵抗値に差が見られるが、フープ試験時における発生電圧は、いずれの補修部においても液体窒素中での通電確認時と同様の特性を再現しており、また、フロー電圧は観測されなかった。補修線材を用いて製作したコイルが高いフープ応力に対しても問題なかったことから、今回実施した補修技術についても有益であることが確認された。

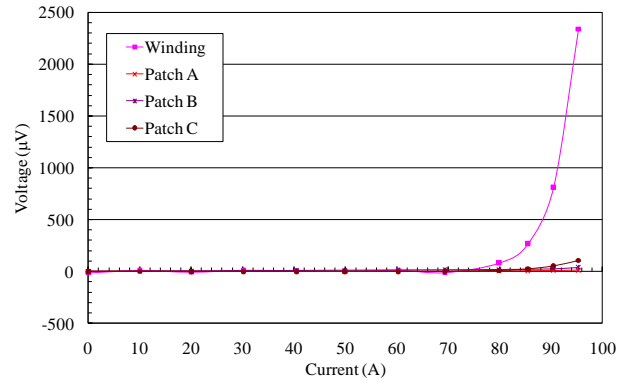


Fig. 3 I-V characteristics of the whole winding (excluding the electrodes) and the three patched portions of the SP coil at 77 K in liquid N₂.

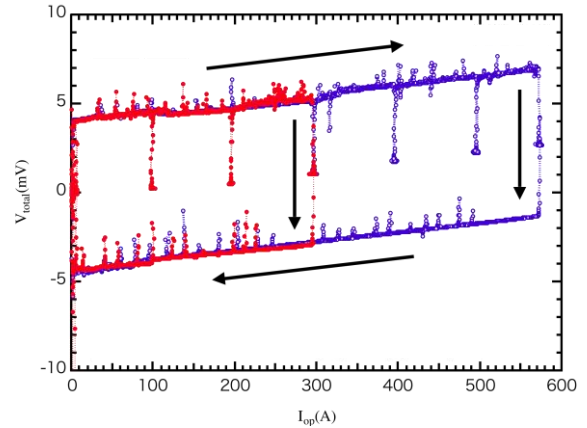


Fig. 4 I-V characteristics of the SP coil (including the electrodes) in 11 T external magnetic field. Red dots: first excitation up to 300 A, blue dots: second excitation up to 572 A.

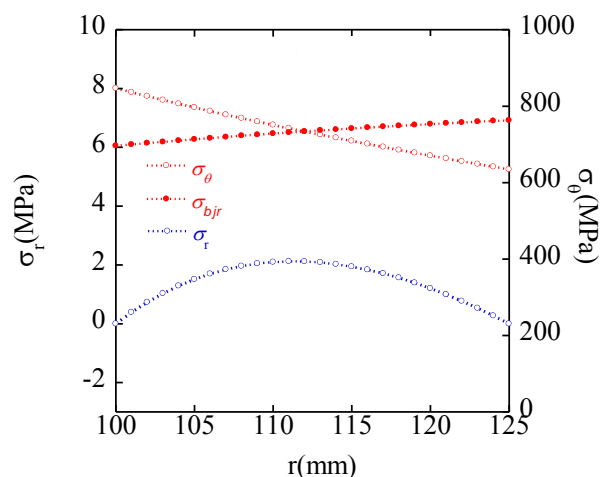


Fig. 5 Calculated stress distributions of the SP coil at 572 A, 11 T. σ_θ and σ_{bjr} indicate the stresses in a circumferential direction, and σ_r indicates the stress in a radial direction.

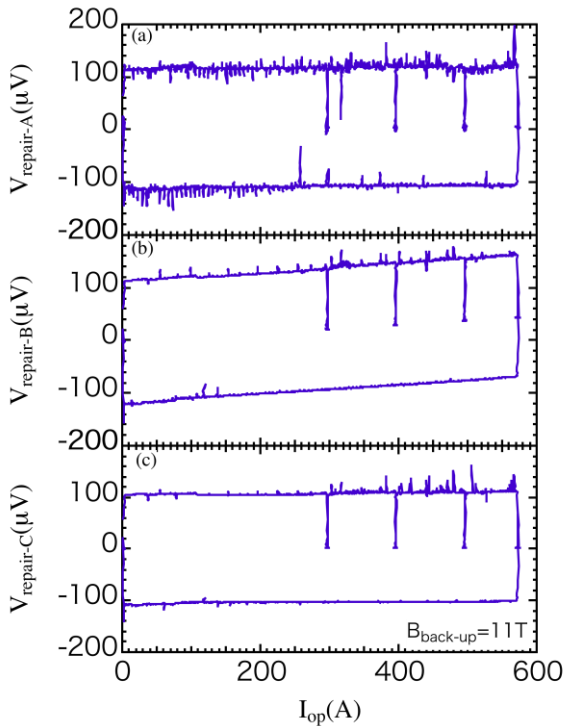


Fig. 6 I-V characteristics of the three portions of the SP coil in 11 T external magnetic field. (a) Patch A portion (b) Patch B portion (c) Patch C portion.

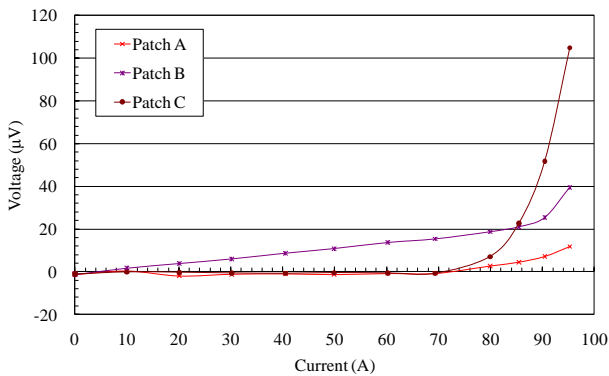


Fig. 7 I-V characteristics of the three portions of the SP coil at 77 K in liquid N_2 .

4. まとめ

大規模 SMES のコイル化要素技術を開発するため、Y 系線材を用いた小型多層巻コイルを製作し、フープ応力特性を評価した。液体ヘリウムで浸漬冷却し、11T の外部磁場中で通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルが線材基板に対して最大 850 MPa 級のフープ応力に耐えることを実証するとともに、同等の高いフープ応力耐性を有する線材補修技術を確立した。

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「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

- [1] K. Higashikawa, T. Nakamura, M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, pp. 758-761, 2008.
- [2] K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa, T. Nakamura, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 2012-2018, 2009.
- [3] M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.
- [4] M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *Physica C* 463-465 (2007) 742-746.
- [5] M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 054006.
- [6] M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115019.
- [7] G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18, pp. 1131-1134, 2008.
- [8] 式町浩二、玉田勉、成瀬光人、平野直樹、長屋重夫、淡路智、西島元、渡辺和雄、花井哲、石井祐介、川島秀一：東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成 21 年度年次報告、pp. 33-35.
- [9] 淡路智、渡辺和雄、西島元、式町浩二、平野直樹、長屋重夫：第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会、p 155.