

# 多層巻 CVD-YBCO コイルのフープ応力耐性評価

## Hoop stress estimation of CVD-YBCO coil

中部電力 式町 浩二、平野 直樹、長屋 重夫  
 東北大 金研 淡路 智、西島 元、渡辺 和雄  
 東芝 花井 哲、石井 祐介、川島 秀一

K. Shikimachi<sup>1</sup>, N. Hirano<sup>1</sup>, S. Nagaya<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>2</sup>, G. Nishijima<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>2</sup>, S. Hanai<sup>3</sup>, Y. Ishii<sup>3</sup>, S. Kawashima<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Chubu Electric Power Co.

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

<sup>3</sup> Toshiba Corporation

### 1. はじめに

電力系統制御用 2GJ 級 SMES[1],[2]の実現に向けて、10T 級伝導冷却型超電導コイル技術の開発を進めている。これまでに CVD-YBCO 線材の機械特性評価[3]-[6]とともに単層ソレノイド巻コイルのフープ応力基礎検証評価[7]を実施し、高強度特性を検証してきた。今回、長尺の CVD-YBCO 線材を使用した小型多層巻パンケーキコイルを製作し、外部磁場中で 600MPa 級のフープ応力試験を実施し、CVD-YBCO コイルの電磁応力耐性を評価した。

### 2. CVD-YBCO 線材の高磁場特性評価

CVD-YBCO 線材を用いて高磁場中での  $I_c$  測定を実施した[8],[9]。Fig.1 に線材の広い温度範囲における  $J_c(I_c)$  特性を示す。77.3K 自己磁場下の 1cm 幅あたりの臨界電流  $I_c$  は約 186A であるが、4.2K、10T の値は  $B \perp c$  と  $B // c$  でそれぞれ約 1800A と約 408A となり、低温では大幅な  $I_c$  向上が見込まれることが確認できる。なお、 $B \perp c$  の低温領域では高温超伝導体特有の Intrinsic pinning が支配的となることで、その  $I_c$  は  $B // c$  と比べても大きく向上することが、磁束ピンニング解析によって理解でき、低温応用としては温度の低下に伴う異方性の増大が問題となる場合があることに注意が必要である。上記結果から、SMES 動作温度である 20K を含む 4.2K の低温から窒素温度に至る広い温度領域における  $I_c$  特性を把握することができ、今回製作したモデルコイルを含め各種応用機器においても、この結果を用いてコイルパフォーマンスに対する予想を立てることが可能となった[10]。

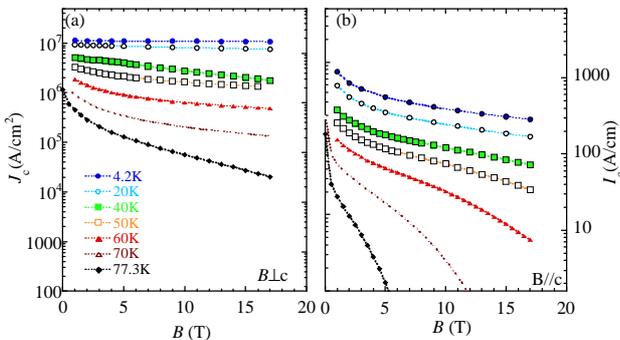


Fig. 1  $I_c$ -B-T characteristics of CVD-YBCO wire. (a)  $B \perp c$ , (b)  $B // c$ .

### 3. CVD-YBCO コイルのフープ応力試験評価

#### 3-1. コイル製作

SMES 開発で目標としているフープ応力 600MPa を実証するため、長尺 CVD-YBCO 線材を用いてフープ応力試験用小型コイルを製作した。使用した線材は幅 10mm、厚さ 100 $\mu$ m のハステロイ基板に IBAD 法による中間層、CVD 法による YBCO 層を成膜後、5mm 幅に切断し、安定化銅を線材全周囲に厚さ 50 $\mu$ m メッキした。銅メッキ後の線材寸法は、幅約 5.5mm、厚さ約 250 $\mu$ m である。この線材を用いて製作したシングルパンケーキ (SP) コイル 2 個を積層した 2SP コイルの諸元を Table 1 に、その設計図、外観写真を Fig.2, 3 に示す。コイルはエポキシ樹脂により真空含浸した。

Table 1 Specifications of the 2SP coils for the hoop stress test

Wire type	Copper plated IBAD/ CVD-YBCO tape coated conductor
Wire length	50 m + 50 m
Average width of insulated wire	5.7 mm
Average thickness of insulated wire	350 $\mu$ m
Coil figure	2 stacked single-pancake coils
Inner diameter	200 mm
Outer diameter	249 mm
Height	12 mm
Turns	139

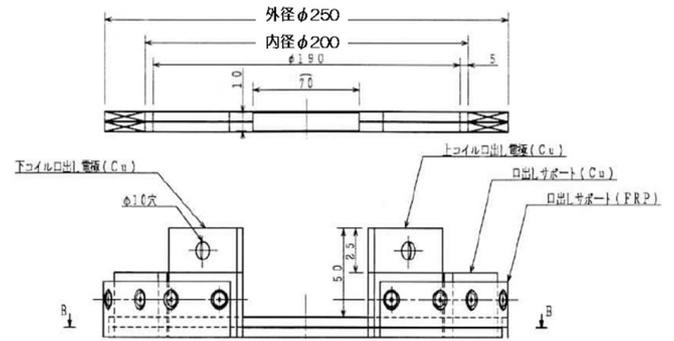


Fig. 2 2SP coil design for the hoop stress test.

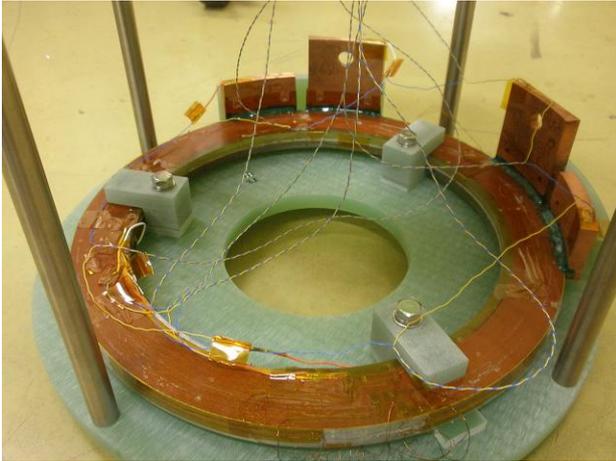


Fig. 3 An appearance of the 2SP coils for the hoop stress test.

### 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立ち液体窒素浸漬冷却によりコイルの通電試験を実施し、2SP コイルの特性を確認した。上・下段コイル（電極込・除）2SP コイルの各部 I-V 測定結果を Fig.4(a)に示す。コイル 2 個を積層する前に通電した結果、電極部を除いた上段コイルの  $I_c$  および  $n$  値はそれぞれ 31A, 14 であり下段コイルではそれぞれ 42A, 6 であった。また、上下段 2 個積層した 2SP コイルの  $I_c$  は 35A,  $n$  値は 8 程度であった。また、銅メッキ前の線材 I-V 特性から 2SP コイル I-V 特性を推定した計算結果を Fig.4(b)に示す。使用した CVD-YBCO 線材の  $I_c$ -B-T- $\theta$  特性は網羅できていないが、計算結果は Fig.1 の結果からコイル自己磁場を考慮して  $I_c$  低下を概略見込んでいる（磁場分布に応じ線材  $I_c$  の 0.46-0.71 倍）。コイルの I-V 実測結果は推定結果とほぼ一致しており CVD-YBCO 線材は問題なく巻線されたと考えられる。

### 3-3. フープ応力試験

次に、液体ヘリウム浸漬により 2SP コイルを 4.2K まで冷却し、外部磁場を印加後に通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルとしてのフープ応力耐性を検証した。Fig.5 に 2SP コイルの電圧タップ取り付け位置を示す。Fig.6 に外部磁場 11T において 2SP コイルを 3 回繰り返し通電した時の上段コイル両端、下段コイル両端および上下段コイル間接続電極の I-V 測定結果を示す。上段コイルは下段コイルと比較して  $I_c$  は高いものの  $n$  値が低いいため、120A 付近から上段コイルにおいて電圧が発生し始めている。1 回目に 176A 付近まで通電した際、コイル間接続電極の電圧が跳ね上がった。その後、再通電、再々通電により電流値を増加し、通電電流の増加とともに発生電圧が上昇し、最終的に 214A 付近で過電圧により通電不能となった。試験後の検査により電圧の跳ね上がりはコイル間接続電極の不具合が原因であることが判明した。本試験において 11T 中では 3 回繰り返し通電を実施したが、電極部を除くコイル電圧は常に同じ軌跡を辿っており今回のフープ応力負荷によるコイル巻線部の劣化はなかったと考えられる。

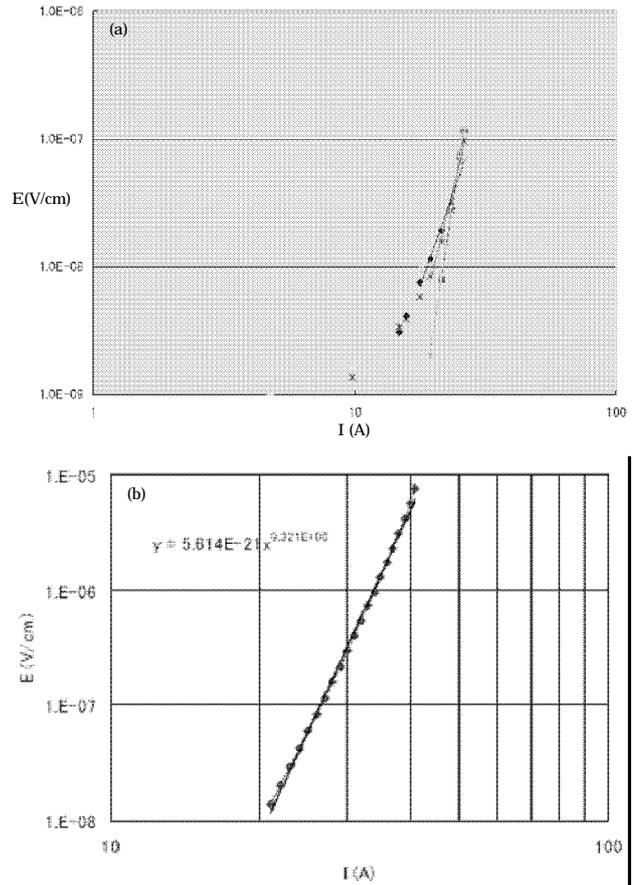


Fig. 4 (a) Measured and (b) calculated I-V characteristics of the 2SP coils.

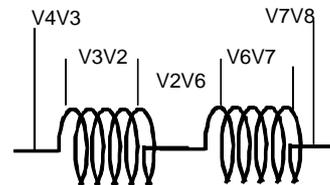


Fig. 5 Voltage tap positions on the 2SP coils.

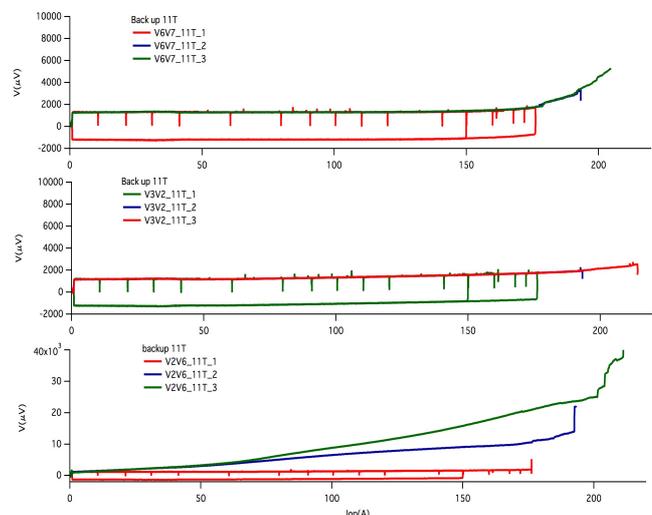


Fig. 6 I-V characteristics of the 2SP coils. (a) Upper coil (b) Bottom coil (c) Joint electrode between the coils.

Fig.7 に 214A 通電時に 2SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで  $\sigma_{bjr}$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_r$  は、それぞれ線材が独立とした時の周方向応力、一体変形する場合の周方向応力、径方向応力である。特にコイル周方向の応力であるフープ応力は、線材が完全に独立として磁場 ( $B$ ) $\times$ 電流密度( $J$ ) $\times$ 半径( $R$ )で計算した値  $\sigma_{bjr}$  とコイルが一体変形した場合の値  $\sigma_{\theta}$  を示している。ただし、応力は安定化材を含む線材全体にかかる平均応力としている。なお、 $\sigma_{\theta}$  は無限長のコイルを仮定して Wilson の式から計算した結果である。図から分かるように、コイルが完全に一体変形を起こす場合には、コイル内部応力は  $BJR$  から計算される値とは異なる。この違いは、コイルの径方向に働く応力が影響するためであり、コイルが発生する自己磁場と外部磁場の割合によって振る舞いが異なる。今回の場合では、 $\sigma_{bjr}$  と  $\sigma_{\theta}$  の半径方向の分布が大きく異なっていることが分かる。結果として、最大フープ応力は  $\sigma_{bjr}$  より  $\sigma_{\theta}$  の方が大きくなる。これらの結果から、214A の通電で最大フープ応力として 280MPa の応力が 2SP コイルに負荷されたと考えられる。さらに、実質的に応力を負担する Hastelloy のみに応力が負荷されたと計算すると約 2 倍の応力となり 560MPa のフープ応力が負荷されたと結論できる。

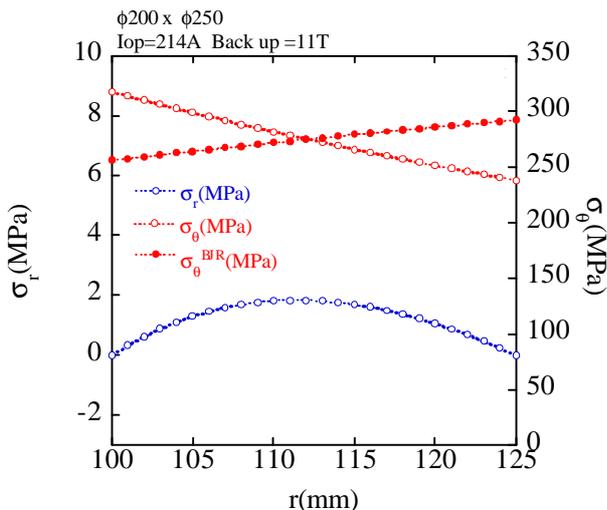


Fig. 7 Hoop stress distributions of the 2SP coils at 214 A operating current in 11T back-up field.

#### 4. まとめ

大規模 SMES のコイル化要素技術を開発するため、CVD-YBCO 線材を使用し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 560MPa のフープ応力に耐えることを実証した。

#### 謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「イット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, "Performance Improvement of YBCO Coil for High-Field HTS-SMES Based on Homogenized Distribution of Magnetically-Mechanically Influenced Critical Current," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, pp. 758-761, 2008.
- [2] K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa, T. Nakamura, "System Coordination of 2 GJ class YBCO SMES for Power System Control," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 2012-2018, 2009.
- [3] M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.
- [4] M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors," *Physica C* 463-465 (2007) 742-746.
- [5] M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K for MOCVD-YBCO coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 054006.
- [6] M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "The intrinsic strain effect on critical current under a magnetic field parallel to the c axis for a MOCVD-YBCO-coated conductor," *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115019.
- [7] G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Transport Characteristics of CVD-YBCO Coated Conductor under Hoop Stress", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18, pp. 1131-1134, 2008.
- [8] 石原亮輔, 難波雅史, 淡路智, 渡辺和雄, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫, "MOCVD 法により作製された長尺 YBCO 線材の強磁場臨界電流特性" 第 80 回 2009 年春期低温工学 電導学会
- [9] 淡路智, 石原亮輔, 難波雅史, 渡辺和雄, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫, "CVD-YBCO コー ト線材に対する  $J_c$  の低温異方性", 2009 年秋期第 70 回応用物理学会学術講演会
- [10] S. Awaji, R. Ishihara, M. Namba, G. Nishijima, H. Oguro, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Upgrading Design to a 24 T cryogen-free superconducting magnet based on Low temperature and high magnetic field properties of the practical CVD processed coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, in press.