高温超電導集合導体

向井 英仁, 増田 孝人, 日方 威, 佐藤 謙一

住友電工(株)大阪研究所 大阪市此花区島屋 1-1-3

(1990年2月28日受理)

High Critical Temperature Superconducting Assembly

Hidehito MUKAI, Takato MASUDA, Takeshi HIKATA and Ken-ichi SATO

Osaka Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.,
Shimaya 1-1-3, Konohana-ku, Osaka 554

(Received February 28, 1990)

Synopsis:

High critical temperature superconducting assembly of 50 cm length have been developed using silver sheathed $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconducting tapes. A critical current of 150 A at 77.3 K was achieved over 40 cm with the resistivity of $4 \times 10^{-13} \Omega \cdot \text{m}$, which was much lower than the resistivity of silver, $3 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$. The average critical current of every 5 cm was 177 ± 9.4 A. It suggests that the superconducting tapes of 10 m length used for the assembly have a uniform transport property. Larger transport current will be attained by increasing the number of strand. Multifilamentary taped superconducting wire showed the good bending strain vs. critical current property. The critical current was decreased by 30 % due to about 3 % bending strain. Transport current properties of single core taped superconducting wires were stable for 50 times heat cycles between room temperature and 77.3 K.

1. はじめに

高温超電導体の線材化に関する試みのうち、パイプ伸線法は、従来の金属塑性加工技術により長尺材の作製が可能であることおよび超電導体と安定化材とが複合化された線材が得られるという点で最も実用化が期待されるプロセスのうちの一つである。したがって同法により作製した線材の臨界電流密度 (J_c) の向上に関する検討が精力的になされてきた。その結果、圧縮加工¹⁾、Bi 系超電導体への鉛添加による高温相の単相化²⁾、冷間加工と焼結との組合せ等により、緻密化および配向性の向上がなされ、 $2 \sim 3$ 万 A/cm^2 の J_c をもつ線材が得られるようになった³⁾。高温超電導体の実用化には、よりいっそうの特性改善とともに長尺化および通電電流の大容量化等の応用を踏まえた基礎検討を並行して行う必要がある。本研究ノートでは、長さ 50 cm の素線を 20 本複合した 150 A 級集合導体の試作結果、高温超電導多芯線材の曲げ歪み- J_c 特性および単芯線のヒートサイクル特性について報告する。

2. 高温超電導集合導体

粉体の作製法は通常の固相反応法により行った。組成は、銀被覆線材とした状態で臨界温度、臨界電流密度がより優れた特性を示すように種々検討した。その結果、 $\text{Bi} : \text{Pb} : \text{Sr} : \text{Ca} : \text{Cu} = 1.8 : 0.4 : 2 : 2.2 : 3$ が最適であった。酸化物、炭酸塩原材料を前記組成となるよう秤量、混合した後、750~860 °C で焼結、粉碎を繰り返し銀パイプ中に充填した。引き抜き加工、平角圧延加工により線材厚 0.5 mm、幅 3.6 mm の素線を作製した。

集合導体は、外径 12 mm の銀パイプ外周上にテープ面が沿う方向に 50 cm 長のテープ線材を 1 層当り 10 本で 2 層合計 20 本配置し、焼結を行った。このとき、被覆材の銀と中心に配置した銀パイプが拡散、接合し一体化する。臨界電流 (I_c) の測定は直流四端子法により、液体窒素に浸漬して行った。5 cm ごとに電圧端子を取り付け、 I_c 分布を測定した。 I_c の定義は通常 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ルールが適用されるが、本稿では電圧端子間距離が 1 cm 以上 40 cm 以下であるが、すべ

Fig. 1 Critical current distribution of superconducting assembly.

て $1\mu\text{V}$ の電圧発生で I_c を定義した。

Fig. 1 に集合導体の I_c 分布を示す。各区間の平均 I_c は 177 A, 標準偏差 ± 9.4 A (5.3%) と均一な特性であった。電流 - 電圧波形を $V = kI^n$ で近似した場合の n 値は, 12.6~22.8 であった (比抵抗 $3.2 \times 10^{-12} - 1.6 \times 10^{-11} \Omega \cdot \text{m}$ より算出)。電圧端子間隔が 40 cm の場合の I_c は 150 A であった (n 値 13.9, 比抵抗 $4 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-12} \Omega \cdot \text{m}$)。この場合, I_c 定義を比抵抗で表すと $4 \times 10^{-13} \Omega \cdot \text{m}$ であり, 銀の 77.3 K における比抵抗 $3 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ に比べ小さく銀に分流していないことがわかる。Fig. 2 に集合導体を使用した同一ロットの素線の I_c 分布を示す。区間の平均 I_c は 10.8 A, 標準偏差 ± 0.56 A (5.2%) と均一であった。集合導体を使用した素線は, 総長 10 m にわたりこの素線とはほぼ同等な特性を示していると考えられる。

高温超電導テープ線材の J_c の磁場特性は, 異方性

Fig. 2 Critical current distribution of taped superconducting wire.

があり, テープ面に垂直に磁場を加えた場合に比べ平行に加えたほうが I_c の低下が少ない³⁾。本構造では, 通電電流による自己磁場はテープ面にほぼ平行に加わる。その結果たとえば, 1,000 A の通電により発生する自己磁場は約 0.03 T であり, I_c の低下は 2 割程度である³⁾。したがって, 本構造でさらに集合本数を増やすことにより, 大容量化が可能である。

3. 多芯化による曲げ歪み - J_c 特性の改善

高温超電導ケーブル導体などの長尺線材には, 製造時やコイルリング時に曲げ歪み加わる。そのため焼結後の曲げ歪みに対し J_c 特性の低下が小さい素線を開発する必要がある。高温超電導線材の多段かん合により高温超電導体を微細化することで曲げ歪み - J_c 特性の改善が期待できる。

前章で述べた同様なプロセスで作製した高温超電導線材を銀パイプ内に 6 本かん合した。得られた 6 芯線をさらに 2 次かん合し 36 芯線 (6×6), および 762 芯線 (6×127) を作製後平角加工と焼結を繰り返し多芯テープ線材を得た。多芯テープ線材は直径の大きなセラミクス製ボビンから順次小さなボビンに巻き替えながら, 液体窒素浸漬で逐次 I_c 測定を行い, 曲げ歪み - J_c 特性を調査した。ここで, 曲げ歪みは線材厚と曲げ半径の比で定義した。

Fig. 3 に単芯, 36 芯, 762 芯テープ状線材の曲げ歪み - J_c 特性を示す。縦軸は, 歪みを加えない状態での J_c で規格化した。かん合本数が増加するほど, したがって線材の厚さ方向の, 銀による超電導体の分割数が増加するほど曲げ歪み特性が改善されてゆく。その理由については, 以下のようなことが考えられる。

Fig. 3 Dependence of critical current density on bending strain after sintering. ○: single filamentary tape, △: 36 filamentary tape, □: 762 filamentary tape.

ここで、超電導体固有の特性として、脆性破壊に至る最大の曲げ歪みがあって、それを許容歪みと呼ぶことにする。曲げ歪みを加えてゆくと超電導体の最も中立軸から離れた箇所が許容歪みを越えて脆性破壊する。隣接する箇所は、許容歪み以下であるが、破壊の際に瞬間的な応力増を受け脆性破壊に至る。連鎖的により中立軸に近い箇所まで脆性破壊すると考えられる。ところで、超電導体が銀によって分割されている場合、銀が応力増を緩和し、中立軸側にある超電導体は破壊されない。したがって、より多く銀により分割されるほど曲げ歪みに対し J_c 特性の低下が小さくなると考えられる。

4. ヒートサイクルと J_c 特性

高温超電導線材は、初期冷却および室温 - 液体窒素温度の繰り返しに対し特性が安定であることが必要で

Fig. 4 Dependence of critical current density on heat cycles between room temperature and 77.3 K.

ある。長さ 50 cm の単芯テープ線の初期 J_c が 1,000, 3,000 A/cm² の 2 本の線材についてヒートサイクル J_c 特性を調べた。結果を Fig. 4 に示す。 J_c の大きさによらず冷却サイクル数 50 回まで J_c は安定であった。Y 系銀被覆材では、ヒートサイクルにより J_c 特性が劣化するとの報告⁴⁾があるが、組織、強度の点で Bi 系が優れていると考えられる。

5. ま と め

1) 総長 10 m の素線を用い 150 A 級 50 cm 長の集合導体を試作した。その結果全長にわたって特性が均一であることと同構成で集合本数を増すことによりさらに大容量化がはかれることを示した。

2) 多芯化により焼結後の曲げ歪みに対する J_c 特性の低下が抑制できた。

3) ヒートサイクル (50 回) に対し J_c 特性が安定であることを示した。

参 考 文 献

- 1) H. Mukai, N. Shibuta, T. Hikata, K. Sato, M. Nagata and H. Hitotsuyanagi: New Developments in Applied Superconductivity, ed. by Y. Murakami, World Scientific, Singapore (1989) 101
- 2) M. Takano, J. Takada, K. Oda, H. Kitaguchi, Y. Ikeda, Y. Tomii and H. Hazaki: Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) L 1041
- 3) T. Hikata, T. Nishikawa, H. Mukai, K. Sato and H. Hitotsuyanagi: *ibid.* 28 (1989) L 1204
- 4) K. Osamura, S. Ochiai and K. Hayashi: Abstracts, 2nd Int. Symp. Superconductivity, Tsukuba, November 14-17 (1989) PWB-9