強制冷却 Nb₃Sn 導体の歪効果

白木 八男*・村瀬 暁*・大熊 啓嗣*・浜島高太郎**
青木 伸夫***・市原 政光***

*佛東芝 総合研究所 エネルギー機器研究所
川崎市川崎区浮島町4-1

**東芝重電技術研究所
横浜市鶴見区末広町2-4

***昭和電線電纜K.K. 超電導研究開発部
川崎市川崎区小田栄2-1-1

(1983年12月2日受理)

Strain Effects of Forced Flow Nb₃Sn Conductor

Hachio SHIRAKI*, Satoru MURASE*, Hirotsugu OHGUMA*,
Takataro HAMAJIMA**, Nobuo AOKI*** and Masamitsu ICHIHARA***

* Energy Science & Technology Lab., R&D Center, Toshiba Corporation
4-1 Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210, Japan

** Heavy Apparatus Eng. Lab., Toshiba Corporation
Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, 230, Japan

*** Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.
2-1-1 Odasakae-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210, Japan

(Received December 2, 1983)

Synopsis:

Reduced size cable-in-conduit conductors with a parameter of various void fractions were fabricated, prior to the full size conductor, to study the relation of the critical current and bending strain. The reduced size conductor has 3 (0.61 ϕ mm wire) $\times$ 6 composites in conduit where the void fraction is changed from 30% to 50%. The conductor with $\sim$ 50% void fraction has critical bending strain (ϵ_{bc}) of $\sim$ 0.9% which is nearly equal to ϵ_{bc} of the strand, while the conductor with void fraction below $\sim$ 40% behaves like a compacted composite and its ϵ_{bc} is below $\sim$ 0.5%.

1. 緒 言

ステンレス鋼等の高強度材料からなる管に、冷媒流路と超電導燃線を配置した cable-in-conduit タイプの Nb₃Sn 導体を巻回した強制冷却型コイルは、一般的な浸漬冷却型コイルに比較して高安定性、高冷却効率、低交流損等の特性が得られるため、将来の核融合炉用コイルへの応用が期待されている¹⁾。これに対応して筆者等は、核融合炉で予定されている磁場強度12Tで10kAの電流値で運転可能な cable-in-conduit タイプの Nb₃Sn 強制冷却コイルを開発している²⁾。

強制冷却導体の冷媒流路となるコンジット内の素線間のすきまの占める割合（空間率）は、従来冷却安定性等の立場から30～40%が最適とされてきた^{1),3)}。しかし、Nb₃Sn 線は応力／歪に対して敏感でそれらの増加によって特性が劣化するため、空間率（ V_f ）が小さいとコンジット内に配置された Nb₃Sn 素線の動きが管壁によって拘束されて、冷却時におけるコンジット（一般にはステンレス鋼が使われる）からの熱収縮⁴⁾、導体をコイルとして曲げた場合の曲げ歪の影響を大きく受けることが問題となる。しかし、超電導特性の中でも実用的に重要な性質である臨界電流（ I_c ）と曲げ歪

(a) 0.61 ϕ 264 cores Nb₃Sn wire (b) Cabling configuration for a 18 strand cable (pipe method)

Fig. 1 SEM micrograph of Nb₃Sn wire and cabling configuration for a 18 strand cable.

の関係について V_f をパラメータにした研究はほとんどなく、わずかに I_c と引張歪に関する研究がみられるにすぎない³⁾。本論文では V_f を変化させた cable-in-conduit タイプの試作導体を製作し、 I_c -曲げ歪特性について調べたので報告する。

2. 試 料

(a) 素 線

素線はブロンズ法と違って高電気伝導率を持つ純銅のマトリックスの中に、加工硬化の少ないCuクラッド Sn 合金を内部に配置した多数のニオブ・シースから構成される Nb パイプ法 Nb₃Sn 線である⁵⁾。熱処理によって生じる素線間の粘着を防止するため、表面には (Cu₂O+Cu₂S) を約 1 μ m 被覆してある⁶⁾。素線の顕微鏡写真 (SEM 断面) を Fig. 1-(a) にその諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Parameters of the Nb₃Sn wire

wire diameter (mm)		0.61
filament dia. (μ m)	outer	25
	inner	18
number of filaments		264
Cu ratio		1.2

(b) 試作導体用燃線 (ケーブル)

Fig. 1-(b) に示す Nb₃Sn 素線を 3 本撚り合せ (ピッチ 32mm $\cdots$ 3L (L は左への撚り方向)) トリプレットを作り、このトリプレット 6 本を撚り合せ (ピッチ 77mm $\cdots$ 6L) 試作導体用燃線を製作した。ピッチが小さいと素線の動きがそこなわれるため、素線としてふるまうことができる最適ピッチを採用した⁷⁾。

Fig. 2 Photo micrograph of the reduced size Nb₃Sn cable-in-conduit conductor.

Fig. 3 Experimental procedure for measurement of critical current under the bending strain and calibration of the bending strain.

(c) 強制冷却試作導体

製作した試作導体の顕微鏡写真(斜視)をFig. 2に示す。本導体はステンレス・コンジット(SUS-304, 外径5.10φmm—肉厚0.65mm)内に試作導体用撚線を挿入し, 所定の空間率($V_f \div 30\%, 40\%, 50\%$)を得るためスウェーijingおよびドローijingで減面加工して製作した。

(d) ハンダ含浸撚線

ハンダ含浸撚線は撚線および試作導体の I_c -曲げ歪特性と比較検討するために製作した。(b)項の撚線の素線間をハンダ(Sn-40Pb)で満した構造を有し, 素線間が100%結合したモデル導体である。

(e) Nb₃Snの生成熱処理

素線, 撚線および試作導体の熱処理は, Arガス(純度99.999%)雰囲気中において700°Cで5時間行なった。本熱処理によって生成したNb₃Sn層厚は $\sim 1\mu\text{m}$ であった。

3. 実験方法

3-1 I_c -歪特性

I_c -歪特性の測定方法をFig. 3-(a)に示す。まず300

mm長の試作導体を直線状態で熱処理した後, 所望の曲げ半径(R)を有するマンドレルに巻きつける。その後マンドレル長に合わせるため試料の両端を各々110mm切断した。内部の撚線を損傷しないように試料の両端のコンジットを電流導入分の長さ(各々20mm)だけ除去し, 銅のパワーリードにハンダ付した。電圧タップは試料中心のコンジット上に1ヶ所(電圧タップ間距離 $l = 1\text{ cm}$), 撚線間に1ヶ所($l = 5\text{ cm}$), 計2ヶ所取付けた。 I_c 測定は液体ヘリウム中(4.2K)で行ない, $l = 1\text{ cm}$ あたり1μVの電圧が発生した電流値を I_c とした。

3-2 曲げ歪の較正

コンジットに加えた式(1)に示す計算上の歪と実際に加わった歪との関係を調べるため, Fig. 3-(b)に示すようにコンジットの引張側と圧縮側に歪ゲージを貼り付けた。このコンジットを $R = 350\text{ mm}$ のマンドレルに巻き, その時のゲージの出力電圧をX-Yコーダーに記録させた。計算上の曲げ歪($\pm \varepsilon_b$: +は引張側, -は圧縮側)は式,

$$\pm \varepsilon_b = \frac{r}{r + R} \quad (1)$$

Fig. 4 Calibration of the bending strain on the cable-in-conduit.

を用いて求めた。

ここで、 r はコンジットの中立軸からコンジットの外表面までの距離である。

コンジット上の計算による曲げ歪を歪ゲージによって校正した結果をFig. 4に示す。横軸はコンジットの引張側に貼り付けた歪ゲージで測定した歪値であり、縦軸は圧縮側に貼り付けた歪ゲージで測定した歪値である。図中の破線は計算上の歪で、 $R=350\text{mm}$ のマンドレルに曲げると引張、圧縮とも0.596%歪になる。実線は各歪ゲージによる測定値で引張歪は0.575%、圧縮歪は0.603%であった。計算上の歪誤差は実測上の歪に対して引張側で+3.4%、圧縮側で-1.2%で、非常に小さい値であることがわかった。この結果から、一連の曲げ歪の値は計算値を用いた。

4. 実験結果と考察

4-1 素線、燃線およびハンダ含浸燃線の I_c -曲げ特性

強制冷却試作導体の構成要素である素線、燃線と比較導体であるハンダ含浸燃線の規格化した I_c ($I_c(D)/I_c(\infty)$: D は曲げ直径を示す)と曲率(曲げ直径の逆数)の関係を図5に示す。縦軸の規格化した I_c の1.0に相当する I_c 値は素線で65A、燃線、ハンダ含浸燃線は1160Aであった。素線の臨界曲率(規格化した I_c が1.0以下に低下する曲率)は 0.16cm^{-1} ($D \approx 60\text{mm}$)、燃線は 0.14cm^{-1} ($D \approx 70\text{mm}$)、ハンダ含浸燃線は 0.02cm^{-1} 以下($D \approx 500\text{mm}$)であった。燃線の I_c と曲率特性は素線とほぼ同じと言える。ハンダ含浸燃線は曲率の増加に対して I_c の低下は非常に大きく、

Fig. 5 Normalized critical current as a function of inverse bending diameter for the 0.61φ wire, the cable and the Sn-Pb filled cable.

曲率 0.063cm^{-1} ($D \approx 160\text{mm}$)で規格化した I_c の40%まで低下した。素線および燃線はまったく劣化がみられない領域にもかかわらず、ハンダ含浸燃線は大きな劣化を示した。これはハンダによって素線間が結合し、モノリス(一体化)としてふるまったためと考えられる。

Fig. 6に、Fig. 5の横軸の曲率を(1)式で求めた曲げ歪(ϵ_b)に直したグラフを示す。なおこの場合の素線の r は素線の中立軸から最外層の Nb_3Sn フィラメントまでの距離(0.275mm)で、燃線とハンダ含浸燃線の r は燃線の中立軸から燃線の最外層の Nb_3Sn フィラメントまでの距離(1.8mm)である。横軸を曲げ歪で整理すると、ハンダ含浸燃線の歪の増加に対する I_c の低下状態は素線の延長線上にあり、同傾向の I_c -曲げ歪曲線が得られることがわかった。このことは、ハンダ含浸燃線は素線が完全に拘束され、一体化された

Fig. 6 Normalized critical current as a function of bending strain for the 0.61φ wire, the cable and the Sn-Pb filled cable.

ことを意味する。素線の臨界曲げ歪 (ϵ_{bc} : 定義は臨界曲率と同じ) は $\sim 1.0\%$ であった。この値は以前に筆者等が同様な素線を用いて求めた ϵ_{bc} とほぼ同様であった⁹⁾。ハンダ含浸により燃線はモノリス化するが、未含浸燃線は素線間が拘束されず曲げることができるので ϵ_{bc} は非常に大きく、 $\sim 5.0\%$ (素線の約5倍) であった。燃線がコンジット内で拘束されずに曲げることができれば (未結合), 大電流導体にもかかわらず小電流導体と同様な小さな曲げ径まで曲げることが可能である。このことは, cable-in-conduit タイプの強制冷却導体の利点となる。

4-2 熱収縮歪と空間率

Fig. 7 に空間率 (V_f) をかえた試料 (直線状態) の I_c を示す。横軸は空間率で, V_f が減少して $\sim 30\%$ になると導体の I_c は燃線の I_c に比べて28%程度低下することがわかった。これは, コンジットと燃線および素線間が V_f の減少に伴って機械的に結合したために生じたと考えられる⁴⁾。ステンレス鋼と Nb₃Sn 燃線を機械的に結合させて熱処理 ($\sim 700^\circ\text{C}$) した後, 4.2K まで冷却すると Nb₃Sn 層に熱収縮歪に伴う圧縮歪が強く加わることが報告されている⁹⁾。熱処理温度である 700°C から 4.2K まで冷却する間に Nb₃Sn 層が受ける圧縮歪 (ϵ_i) を, コンジットと燃線が結合した場合 ($V_f \div 30\%$) と未結合 ($V_f \div 40, 50, 100\%$) の場合について,

$$\epsilon_i = \frac{\sum_{i=1}^n E_i V_i \frac{\Delta L}{L_{oi}}}{\sum_{i=1}^n E_i V_i} - \frac{\Delta L}{L_{oi}} \quad (2)$$

を用いて計算した。ここで, E_i は Nb₃Sn 超電導導体を構成する各材料のヤング率, V_i は各材料の体積率, $\Delta L/L_{oi}$ は各材料の熱収縮率である。 $V_f \div 100\%$ の試料として燃線を用いた。構成材料のヤング率, 体積率, 熱収縮率を Table 2 に示す。Cu および Cu-Sn 合金は $\sim 0.05\%$ の引張歪 ($700^\circ\text{C} \rightarrow 600^\circ\text{C}$ まで冷却される間に受ける) を受けると降伏を起し, それらのヤング率が $12.4 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ から $1.24 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ になり, その他の材料は $700^\circ\text{C} \rightarrow 4.2\text{K}$ まで降伏を起さないと仮定

Table 2 Volume fractions, Elastic moduli and Component contractions

Component	V_i (%)	E_i ($\times 10^3 \text{ kg/mm}^2$)	$\Delta L/L_{oi}$ (4-970 K)
Cu (Cu-Sn alloy)	32.0	12.4	0.0161
Nb ₃ Sn (Nb)	9.0	13.0	0.0070
SUS	59.0	17.9	0.0161

Fig. 7 Critical current as a function of void fraction for the reduced size cable-in-conduit conductors with various void fractions and the cable.

して計算した。各数値を (2) 式に代入して計算した結果以下の値となった。

(a) $V_f \div 40, 50, 100\%$ (未結合) の場合

$$\epsilon_i = -0.28\%$$

(b) $V_f \div 30\%$ (結合) の場合

$$\epsilon_i = -0.82\%$$

未結合の場合の $\epsilon_i = -0.28\%$ は以前に筆者等が同様な素線の圧縮歪量を測定した値¹⁰⁾, および D.W. Deis 等がブロンズの Nb₃Sn 線の圧縮歪量を測定した値¹¹⁾ とよい一致を示した。結合した場合の $\epsilon_i = -0.82\%$ も R.M. Scanlan 等が $V_f = 33\%$ の cable-in-conduit (ステンレス鋼の $V_i = 47\%$) 導体を用いて測定した圧縮歪量 (-0.8%) とほぼよい一致を示した¹²⁾。結合した導体 ($V_f \div 30\%$) のコンジットを除去して再度 I_c 測定をすると, 28%程度低下していた I_c が元の値 (○印) に復帰することが確認された。このことは, 非常に強い圧縮歪 (-0.82%) が Nb₃Sn 層に加わっているにもかかわらず, Nb₃Sn の I_c 値はまだ復帰可能な領域にあると言える。

4-3 曲げ歪と空間率

Fig. 8 に V_f をかえた試料の曲げ歪と I_c との関係を示す。横軸の曲げ歪 (ϵ_b) の算出は式(1)と同じであるが, ここで, r は素線, 導体とも素線の中立軸から最外層の Nb₃Sn フィラメントまでの距離 (0.275mm) を用いた。 $V_f \div 50\%$ の導体の ϵ_{bc} は $\sim 0.9\%$ であり, 燃線の ϵ_{bc} と等しい値であった。 $V_f \div 40\%$ の導体の ϵ_{bc} は $\sim 0.5\%$ であり, 曲げ歪を加えない場合には V_f の影響はみられなかったが, 曲げ歪を加えると V_f の影響がみられた。これは, 曲げ歪が加わると素線の動きがコンジットに拘束され, それによって素線に大きな歪

Fig. 8 Critical current as a function of bending strain for the reduced size cable-in-conduit conductors with various void fractions and the 0.61φ wire.

が加わり、歪の増加に対する I_c の低下が急に大きくなると考えられる。 $V_f \approx 30\%$ の導体は、曲げ歪が加わらない状態ですでに撚線の I_c に比べて28%程度低下しているが、曲げ歪の増加に対する I_c の低下は非常にゆるやかであった。この結果は、Fig. 6 で示した素線間が拘束されたハンダ含浸撚線の劣化曲線とは異なっているように思われる。 $V_f \approx 30\%$ の導体の歪算出式における r の値をハンダ含浸撚線と同じ値 (1.8 mm) にして曲げ歪を求め、 I_c の劣化曲線を比較したグラフを Fig. 9 に示す。モノリスと考えられるハンダ含浸撚線の歪の増加に対する I_c の劣化曲線と $V_f \approx 30\%$ 導体のそれとは、明らかに異なっていることがわかった。約 1.5% の曲げ歪までは $V_f \approx 30\%$ の導体の I_c はハンダ含浸撚線より低い、それ以上の歪では反対に高くなることがわかった。この原因として、 $V_f \approx 30\%$ の導体

Fig. 9 Normalized critical current as a function of bending strain for the 0.61φ wire, the Sn-Pb filled cable and the reduced size cable-in-conduit conductor with $\sim 30\%$ void fraction.

には強い圧縮歪 (-0.82%) が加わっているため、曲げに伴う引張歪 (圧縮歪より I_c を早く低下させる) の影響が少なくなっていることが考えられる。この実験結果の妥当性を調べるため下記に示す Ekin の式¹³⁾,

$$I_c/I_{cm} = \frac{2}{\pi \epsilon_B^2} \int_{-\epsilon_b}^{\epsilon_b} (\epsilon_b^2 - x^2)^{1/2} \left(\frac{B_{c2m}^* (1 - a |\epsilon_0|^u)}{B_{c2m}^*} \right)^{n-p} \cdot \left(\frac{1 - B/B_{c2m}^* (1 - a |\epsilon_0|^u)}{1 - B/B_{c2m}^*} \right)^q dx \quad (3)$$

を用い、それぞれの試料について $I_c - \epsilon_b$ 曲線を計算した。ここで、 ϵ_b は加える曲げ歪、 ϵ_0 は真歪 ($\epsilon_t + x$) であり、 x は $-\epsilon_b \leq x \leq \epsilon_b$ 、 I_{cm} は無歪下 (熱歪、曲げ歪がゼロの状態) の I_c である。 B_{c2m}^* (無歪下の臨界磁場)、 B (印加磁場)、 $n=1$ 、 $p=0.5$ 、 $u=1.7$ 、 $q=2.0$ 、 a は $\epsilon_0 < 0$ の時 900 で $\epsilon_0 > 0$ の時 1250 であり、これらはスケーリング・パラメータである。 B を除いて用いたパラメータ値は Ekin と同じである¹³⁾。ハンダ含浸撚線の圧縮歪 (ϵ_t) は撚線と同じ値 (-0.28%) を用いた。実際に加わる圧縮歪は撚線より多少大きくなるが、Sn-Pb 合金のヤング率は $1.1 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ であり、Cu より 1 桁以上小さいので圧縮歪の増加分は無視した。その結果を Fig. 10 に示す。縦軸は $I_c(\epsilon_b)$ を $I_c(\epsilon_b=0)$ で規格化して示してある。

計算によって求めた $I_c - \epsilon_b$ 曲線は、Fig. 9 に示す実験によって得られた $I_c - \epsilon_b$ 曲線と同様な傾向を示すことがわかった。 I_c の絶対値のずれは、スケーリング・パラメータの違いから生じたと考えられる。強い圧縮歪を受けた導体の $I_c - \epsilon_b$ 曲線はフラットな特性 (歪の

Fig. 10 Normalized critical current as a function of bending strain for the Sn-Pb filled cable and the reduced size cable-in-conduit conductor with $\sim 30\%$ void fraction. The lines present calculated lines.