超電導ストリップの端子電圧—電流特性

工 藤 実 弘・土 井 俊 雄

日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1—280

(1969年 9 月13日受理)

Terminal Voltage-Current Characteristics of Superconducting Strips

Mitsuhiro KUDO and Toshio DOI

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-280 Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo

(Received September 13, 1969)

The effects of the cooling perimeter on the terminal voltage-current characteristics were investigated for various superconducting strips. When the critical current was higher than the recovery current and when the adhesion between superconducting wires and copper substrate was poor, then the current carrying capacity and the recovery current were found to degrade with decreasing the magnitude of the cooling perimeter. Particularly in case of zero cooling perimeter, the equivalent heat flux obtained was not zero, but of a finite value. This may be thought to be due to the longitudinal thermal conduction in the conductor. Many small voltage jumps, like a step, were often observed in the terminal voltage vs current curves, which was mainly due to the irregularities of the critical current of each wire embedded in the copper substrate and to those of the surface resistance between wires and copper substrate.

1. 緒 言

大型超電導マグネットを設計する場合には、これに用いる超電導ストリップの通電電流容量 (I_c') と共に安定性を知る必要がある。安定性の目安になるのは次式で表わされる安定化パラメータ α_s である¹⁾。

$$\alpha_s \equiv \rho I^2 / q_r \beta P_0 A \quad (1)$$

ここに ρ , I , q_r , β , P_0 そして A はそれぞれ銅の比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$), 電流 (A), 熱流束 (W/cm^2), 露出係数 (後述), 導体周囲長 (cm) そして銅断面積 (cm^2) である。そして $\alpha_s \leq 1$ のときに安定であるとする。しかし、実際の場合には超電導コイルの形状や構造に依存して線材の経験磁場, 加工度あるいは冷却の度合が異なるので, ρ , I_c' , q_r そして β の値は一定の値にならない。そのために短尺試料を用いて磁場—臨界電流 ($H-I_c$) 特性や端子電圧—電流 ($V-I$) 特性を測定して, 種々の磁場中での電流容量と安定性を求めることが行なわれている。本報ではいくつかあるパラメータ

のなかから特に冷却周囲 (βP_0) をとりあげ, $H-I_c$ ならびに $V-I$ 特性におよぼす影響を検討した。

2. 実験方法

実験に用いた超電導ストリップは日立で試作した HISUPER-4X, 10X ならびに 16M で, 直径 0.25 mm の超電導合金線が平角銅中にそれぞれ 4, 10 ならびに 16 本埋め込まれたものである。冷却周囲 (P) の大きさとしては厚み 0.2 mm の絶縁テープを貼付することにより全面冷却, 一平面と両端面, 両端面ならびに完全被覆の 4 種とし, ストリップの厚みを t , 幅を w としたとき, それぞれ $P=2t+2w$, $2t+w$, $2t$ ならびに 0 で表わした。またこれら P をストリップの寸法に関係なく表わすために $P_0=2t+2w$ (全面冷却) に対する P の割合として露出係数 $\beta (=P/P_0)$ を導入した。

$H-I_c$ ならびに $V-I$ 特性の測定は 20 V, 2,000 A の安定化直流電源を用い, 液体ヘリウム温度, 横磁場中, 磁場一定・電流増加の操作で行なった。電流の増

Table 1. Dimension and contact resistance of specimens.

Specimens		Thickness	Width	Ratio of Cross-Sectional Area of Cu to Superconducting Wires	Contact Resistance
Type	Lot. No.	t (cm)	w (cm)		r_s ($\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$)
HISUPER-4X	HS-3106	0.075	0.40	14/1	0.06
HISUPER-10X	HS-3208	0.16	0.69	20/1	0.02
HISUPER-16M	HS-16M03	0.20	0.20	8/1	0.02

加・減少速度は 1,000 A/min を標準とした。10X ならびに 16M ストリップの試料形状は長さ 35 mm の I 型としたが、4X ストリップの場合には厚みが薄く、曲げ加工の影響は小さいと考えられたので内径 25 mm の 9 ターンコイルとした。電流リードと試料の接続は全て Pb-Sn ハンダによったが、この接続部分の抵抗値は $0.5\mu\Omega$ 以下であった。なお、超電導線と銅との密着性をみるために、ストリップの先端から超電導線をむき出して、2 本の超電導線間に電流を流し、その線間に発生した電圧から超電導線と銅との界面抵抗 r_s を次式により算出した。

$$r_s = \pi d L V / 2 I (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (2)$$

ここに d は超電導線径、 L はストリップの測定部分の長さである。表 I に実験に用いた 3 種のストリップの寸法ならびに界面抵抗値をまとめて示した。

3. 結 果

3.1 HISUPER-4X ストリップ

図 1 は 9 ターンコイルの中の中央部の 1 ターンの V - I 特性である。 $P=2t+2w$ ならびに $2t$ の場合をそれぞれ (a) ならびに (b) に示した。この V - I 曲線から次に示す八つのパラメータが求められた。

I_c' : 電流増加のとき、始めて電圧が発生する時の電流値 (通電電流量)

I_m : 電流増加のとき、抵抗状態(超

(a) $P=2t+2w$ (The whole surface of the conductor is exposed to liquid helium).

(b) $P=2t$ (Both flanks of the conductor are exposed to liquid helium).

Fig. 1 Effects of the cooling perimeter P on the terminal voltage-current characteristics at applied transverse magnetic fields for HISUPER-4X STRIP.

電導線と銅に電流が分流している状態) から完全に常電導状態に転移する時の電流値 (take-off 電流)

I_l : 常電導状態の抵抗値が発熱による温度上昇のために直線性 ($R=V/I=一定$) からずれて急激に増加し始める時の電流

I_r : 電流減少の時、常電導から抵抗状態あるいは超電導状態へ回復が始まる時の電流値 (回復電流)

I_r^0 : 電流減少のとき、完全に超電導状態が回復して抵抗が零になる電流値

q_m : I_m に対応する熱流束

q_l : I_l に対応する熱流束

q_r : I_r に対応する熱流束

ここで熱流束 q は電圧端子間距離を L (cm) としたとき、次式より求めた。

$$q = V \cdot I / PL = V \cdot I / \beta P_0 L \quad (3)$$

しかし、 $\beta=0$ でも $q\beta$ は零にならず有限の値をとるので、熱流束の代りに有効熱流束 $q\beta$ の形で取り扱うこととした。

$P=2t+2w$ あるいは $2t+w$ のように冷却条件の比較的良好な場合の電圧の挙動は2段またはそれ以上の電圧の階段状のとびを経た後に、すなわち一度抵抗状態を経た後に常電導に転移した。これに対して $P=2t$ あるいは 0 のように冷却条件の比較的良好な場合の電圧の挙動は、抵抗状態に留まることなく、1段のとびで常電導に転移した。また電流が I_l よりも小さいときは、電流の増加を止めても電圧の値は変わらなかった。電流が I_l よりも大きいときには電流の増加を止めても電圧は徐々に増加を続け、電流を戻すと同一経路をたどらずにループを描いた。

図2は50 kOe の場合の冷却周囲の異なる $V-I$ 曲線をまとめたものである。冷却条件が悪くなるにつれて I_c' , I_r あるいは I_r^0 の低下が見られた。

4X ストリップの70kOe の場合の有効熱流束と β の関係を図3にまとめた。 $\beta=0$ のときでも、 $q_r\beta$ は 0.05W/cm^2 の値を示したが、 $q_m\beta, q_r\beta$ とともに β に対して直線関係を示した。 $q_r\beta$ は図1から明らかなように、磁場依存性があることがわかったが、 $q_m\beta$ や $q_l\beta$ にはこのような依存性は見られなかった。

図4(a)は9ターンコイルの各1ターンの $V-I$ 曲

Fig. 2 Terminal voltage-current characteristics at 50 kOe for the HISUPER-4X STRIPS with various magnitudes of the cooling perimeter.

線を比較したものである。①—⑧の $V-I$ 曲線にみられる電圧のとびの起こる電流値は、そのコイル内の各1ターンコイルの $V-I$ 曲線にみられる電圧のとびの起こる電流のいずれかに一致した。図4(b)は④—⑤の1ターンコイルをさらに四つに分けて、各部分の $V-I$ 曲線と1ターンコイルの $V-I$ 曲線の対応をみたもので、各分割部分の $V-I$ 曲線の和が1ターンコイルの $V-I$ 曲線となることが明らかとなった。

Fig. 3 Variations of two equivalent heat fluxes $q_m\beta$ and $q_r\beta$ with the effective rate of the cooling perimeter β for HISUPER-4X and -10X STRIPS at 70 kOe.

(a) Terminal voltages across eight taps of a 9-turn coil.

(b) Terminal voltages across five taps of a 1-turn coil.

Fig. 4 Terminal voltage-current characteristics for the 1, 9-turn coils wound with HISUPER-4X STRIP.

3.2 HISUPER-10X ストリップ

図5は4X ストリップと同様に冷却周囲を $2t+2w$, $2t+w$, $2t$ ならびに 0 と変えた 10X ストリップでの V - I 曲線である。 β が小さくなるにつれて, I_c' や I_r^0 は若干低下してゆき, V - I 曲線は履歴を示すようになることがわかった。

図6は 70 kOe の場合の冷却周囲を変えたときの V - I 曲線をまとめたものである。この磁場になって始めて電流が 2,000 A に達する前に常電導状態に転移した。そして $P=2t+2w$ の場合を除き, 核沸騰-膜沸騰状態の転移は明瞭に現われなかった。 $P=2t+2w$ の場合, $q_m\beta$ と $q_r\beta$ は同じ $0.64\text{W}/\text{cm}^2$ の値を示した。 $q_l\beta$ は $\beta=0$ の場合でも $0.83\text{W}/\text{cm}^2$ 以上であることがわかった。 $q_r\beta$ と β の関係は図3に示したように上に凸の曲線となり, $\beta=0$ でも $q_r\beta=0.21\text{W}/\text{cm}^2$ の値を示した。

3.3 HISUPER-16M ストリップ

16M ストリップの V - I 曲線を図7に示した。この場合には V - I 曲線に階段状のとびは見られず, また I_c' や I_r^0 は冷却周囲の大きさが変わっても変わらなかった。ただし冷却周囲が小さくなるにつれて抵抗状態の勾配は大きくなった。16M ストリップの断面は

Fig. 5 Effects of the cooling perimeter P on the terminal voltage-current characteristics at applied transverse magnetic fields for HISUPER-10X STRIP.

Fig. 6 Effects of the cooling perimeter P on the terminal voltage-current characteristics at 70 kOe for HISUPER-10X STRIP.

もので、10Xストリップと同じように上に凸の曲線となった。なお $q_m\beta$, $q_r\beta$ には磁場依存性は認められなかった。

4. 結果の検討

4.1 熱流束

$q_r\beta$ が $\beta=0$ にもかかわらず有限の値を示したのは相山ら²⁾も指摘しているように、特に I 型試料において線長方向への熱伝導による冷却が無視できない大きさであったためである。常電導状態の方が抵抗状態のときよりも接続部分と試料との温度差が大きくなるので、それだけ熱伝導による冷却量が大きく、16M ストリップのように $q_r\beta$ が $q_m\beta$ より大きいという結果が得られることも

あると考えた。電流が I_c' に達する前の超電導状態では、逆に接続部の温度の方が試料のそれよりも高くなるが、1,000 A でも高々 0.1°K であるので、このような接続部の温度上昇は I_c' にはほとんど影響しなかつ

Fig. 7 Effects of the cooling perimeter P on the terminal voltage-current characteristics at 70 kOe for HISUPER-16M STRIP.

正方形なので、 $P=2t$ の場合に露出部分が重力方向に平行 ($P=2t(\parallel)$) か垂直 ($P=2t(\perp)$) かによって、 V - I 曲線に差が生じ、前者の方が冷却量は大きいことがわかった。図 8 は $q_m\beta$, $q_r\beta$ と β の関係をまとめた

Fig. 8 Variations of two equivalent heat fluxes $q_m\beta$ (open circles) and $q_r\beta$ (open triangles) with the effective rate of the cooling perimeter β for HISUPER-16M STRIP at 70 kOe. The marks $\parallel$ and $\perp$ denote two cases that the surfaces exposed to liquid helium are parallel and perpendicular to the gravitational direction, respectively.

たと思われる。9 ターンコイルの場合には、その中央の1ターンの端子電圧を測定したので接続部の影響は無視できた。この場合にはむしろ、曲げ加工の密着性に対する影響が懸念され、事実わずかではあるが r_s の値が加工前の値より増加していた。4X ストリップの $q_m\beta$ や $q_r\beta$ の値はI型形状で測定してもほとんど変わらなかった。したがって、これらの値が10Xや16M ストリップで得られた値より小さかったのは、界面抵抗値が大きかったためと考えた。また $q_m\beta$ や $q_r\beta$ に対する冷却面の傾きの影響をみると16M ストリップの場合、 $q_r\beta(\perp)$ の値は図8より推定される下向きの面を含まない $\beta=0.25$ の場合の値に一致することから、下向きの面は冷却にほとんど寄与しないと考えた。

4.2 V-I 曲線

電流が I_c' から I_m あるいは I_r から I_r^0 の間にあるときの $V-I$ 曲線はすでに Stekly³⁾ によって示されたように式(4)に従う。

$$V/V_c = (I/I_c) - 1/1 - \alpha_c(I/I_c)$$

$$\alpha_c \equiv \rho I_c^2 / h(T_c - T_b)PA \quad (4)$$

ここに h , T_c そして T_b はそれぞれ熱伝達係数、転移温度そして液体ヘリウム温度であり、 $V_c = I_c \cdot \rho / A$ である。この式(4)は銅と超電導線の密着性が悪い場合、あるいは銅量が I_c に対して不十分の場合にはあてはまらない。4X ストリップの $V-I$ 曲線に見られた V の階段状のとびの主な原因は、図4に示した実験結果から、ストリップ内の超電導線の I_c' や r_s が長さ方向において一定の値をとらず、数 mm の長さではばらついていたのであると推定した。

また $\beta=0$ のとき $V-I$ 曲線に核沸騰—膜沸騰状態の転移に対応する履歴がみられないのは、すでにいくつかの報告があるように⁴⁾⁵⁾, $\beta=0$ のときの $q-dT$ 曲線が核沸騰状態で勾配が小さくなり、 q_m に対応する温度 T_m が T_c より高くなったためと考えた。

5. 結 言

超電導ストリップの冷却周囲の大きさを種々変えてその $H-I_c$ 特性ならびに $V-I$ 特性に対する影響を検討した結果次のような結論を得た。

(1) 冷却周囲が小さくなるにつれて、 I_c' が I_r より大きい場合、あるいは I_c' が I_r より小さくても銅と超電導線の間の密着性が悪い場合には I_c' や I_r^0 の低下がみられた。

(2) $\beta=1.0$ のときの $q_m\beta$ は $0.40 \sim 0.64 \text{ W/cm}^2$, $q_r\beta$ は $0.30 \sim 0.71 \text{ W/cm}^2$ の値であった。高い方の値は $r_s=0.02 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$, 低い方の値は $r_s=0.06 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ のストリップに対応する。 $\beta=0$ のときでも、長さの短い部分だけが常電導状態に転移したときは線長方向への熱伝導があるために、見掛け上 $0.21 \sim 0.38 \text{ W/cm}^2$ の $q_r\beta$ があると等しいことになることがわかった。

(3) 熱流束の値は冷却面の向きによって異なり、下向きの面の熱流束はほとんど無視できるほど小さい。

(4) $V-I$ 曲線にみられる多数の階段状のとびは、試料の線長方向において、 I_c' や r_s の値がばらついて一定の値でないことが主な原因と考えた。

終りに種々ご指導下された日立研究所、飯塚富雄氏ならびに実験に協力下さった中央研究所梅沢正、原伸洋両氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Doi, H. Kimura, M. Kudo and U. Kawabe: Proceeding of the 2nd ICEC (1968) 167
- 2) 相山, 木村: 低温工学 4 (1969) 101
- 3) Z. J. J. Stekly and J. L. Zar: I. E. E. E. Trans. Nucl. Sci. NS-12 (1965) 365
- 4) 川辺, 尾形, 土井: 応用物理学会講演予稿集 (1967)
- 5) 平田, 小俣: 低温工学 3 (1968) 120