交流用Cu-Ni-MnマトリックスNb-Ti超電導線材の電磁気特性

—マトリックス合金組成および断面構成を変化させた種々のダブルスタック構造交流用Nb-Ti線材—

正員 宮下克己 (日立電線) 正員 鎌田 園 尚 (日立電線)
非会員 酒井修二 (日立電線) 非会員 田中浩樹 (Super-GM)

Electromagnetic Properties of Nb-Ti Superconducting Wires with Cu-Ni-Mn Alloy for AC Use

The double stack Nb-Ti superconducting wires for AC use which are changed the matrix and cross sections of wires

Katsumi Miyashita, Member (Hitachi Cable, Ltd.) Kuniyasu Kamata, Member (Hitachi Cable, Ltd.)

Shuuji Sakai, Member (Hitachi Cable, Ltd.) Hiroki Tanaka, Non-Member (Super-GM)

Electromagnetic properties of sub-micron filament Nb-Ti superconducting double stack wires with Cu-Ni-Mn alloy matrix for AC use are described. The Nb-Ti superconducting wires are prepared, (1) changing Mn contents (0-1.78wt%) in Cu-30wt%Ni-Mn alloy matrix, (2) the variation of ratio of filament spacing (dn) to filament diameter (df), (3) due to increasing Nb-Ti ratio (λ), the structures of wires are varied from the triple stack in the past papers¹⁾⁻³⁾ to the double stack, and the copper ratio of wires are decreased.

The addition of Mn to Cu-Ni matrix reduces the hysteresis loss of Nb-Ti filaments and increases the critical current density of Nb-Ti filaments. The minimum hysteresis loss of Nb-Ti wire with Cu-30%Ni-0.9%Mn alloy is 17 J/m^3 ($\pm 0.5 \text{ T/cycle}$) and less than 1/16 of that of Nb-Ti wire with Cu-30%Ni alloy. The critical current density J_c of Nb-Ti wire (filament diameter $df=0.1 \mu\text{m}$) with Cu-30%Ni-1.34wt%Mn alloy is 20000 A/mm^2 ($\lambda J_c=4100 \text{ A/mm}^2$) at 0.5T and 9200 A/mm^2 ($\lambda J_c=1900 \text{ A/mm}^2$) at 1T. AC loss(Q_t)/ λJ_c of wires with Cu-30%Ni-Mn alloy is $1 \sim 2 \times 10^{-8} \text{ J/A} \cdot \text{m}$ and about 1/10 of that of wire with Cu-30%Ni alloy. $Q_t/\lambda J_c$ of the double stack wires ($\lambda=0.17$) decreases to about 1/2.7 of that of the triple stack wire ($\lambda=0.11$).

キーワード: 交流用, Nb-Ti超電導線, Cu-Ni-Mn合金, 近接効果, ヒステリシス損失, 臨界電流密度

1. まえがき

商用周波数レベルでの超電導電力機器実現のためには、超電導線から発生する交流損失を実用化レベルまで低減し、加えて小型化のために機器の経験磁界に相当する磁界中における臨界電流密度を向上させる必要がある。

交流磁界中において超電導線に発生する交流損失は、ヒステリシス損失、結合損失、および渦電流損失の以上3つの和からなり、交流用Nb-Ti超電導線においてはサブミクロンオーダーのフィラメント、Cu-Ni合金の使用、ツイストピッチ短縮等により損失の低減がなされており、現在これらの損失の中でもヒステリシス損失の低減が大きな課題となっている。ヒステリシス損失はフィラメント径に比例して減少する⁵⁾が、フィラメント間隔を狭くしていくと近接効果により逆にヒステリシス損失が増大する。近接効果とは、超電導フィラメントから周囲のマトリックスにしみ出た超電導電子によりフィラメント間が電磁氣的に結合することであり、近接効果が生じるフィラメント間隔は、材料固有の値をもつ。そこで、フィラメント周りのマトリックスには近接効果を抑制するこ

とによるヒステリシス損失低減が要求される。一方、臨界電流密度に関しては、ほとんどの電力機器の経験磁界が1T以下であることから低磁界中での J_c 向上が要求され、フィラメントの極細化によるS/N(超電導/常電導)界面のピンニング(表面ピン)^{6,7)}による高 J_c 化が重要となる。加えて、平均臨界電流密度(λJ_c)向上のためにはフィラメント間隔(dn)の縮小によるNb-Ti体積率(λ)の向上が重要となり、近接効果によるヒステリシス損失増大を抑制できる限界までdnを狭くする必要がある。

過去において、従来交流用Nb-Ti超電導線に使用されてきたCu-Ni合金に磁性元素Mnを添加したCu-Ni-Mn合金を用いることでヒステリシス損失を大幅に低減させたNb-Ti超電導線を作製した¹⁾⁻⁴⁾。しかし、線材の断面構成の関係上、Nb-Ti体積率 λ の最高値が0.163であり、 λJ_c 向上が課題であった。そこで、本報では作製工程において、スタック回数を3回から2回に減らすことにより λ を向上させ、かつMn濃度の異なるCu-30wt%Ni-Mn合金を複合化した交流用Nb-Ti超電導線材を作製し、その交流損失、臨界電流密度特性および T_c 直上抵抗について述べる⁸⁾⁻¹⁰⁾。

2. 試料と実験方法

<2.1> 試料 表1に作製した5種類の線材の諸元を示す。Type-1線材はNb-Tiフィラメント周りのマトリックスに従来のCu-30wt%Niを用いた線材であり、次のType-2線材はCu-30%Ni-0.9%Mnマトリックスを採用した以外は全て幾何学的構造と寸法がType-1と同様である。フィラメント径 df とフィラメント間隔 dn の比は過去の研究結果^{1)~3)}よりCu-30%Ni-0.9%Mnを用いた線材でのヒステリシス損失低減の観点から、 $df:dn=1:0.65$ が最適値であったことに起因する。Type-3線材は安定化銅の比率を低減させ、Nb-Ti比率を向上させた線材であり、銅比(Cu/Nb-Ti)はType-1、2線材の約1/4の0.19まで減少させた。Type-4、5線材はCu-30%Ni-Mn合金のMn濃度を各々1.34wt%(Type-4)と1.78wt%(Type-5)に高めた線材で、Mn濃度向上よりマトリックスの近接効果作用(ヒステリシス損失低減作用)を高めることができるため²⁾³⁾、 $df:dn=1:0.5$ とした。各Type線材を伸線することで異なるフィラメント径(df)の線材を作製した。そのため、線径は df に比例して縮小している。ツ

表1 線材諸元

Table 1. The wire specifications for AC use.

Sample	Nb-Tiフィラメント 周りのマトリックス	$df:dn$	Nb-Ti (%)	Cu/Nb-Ti	$df=0.1\mu\text{m}$ での 線径 (mm)
Type-1	Cu-30wt%Ni	1:0.65	17.0	0.85	0.175
Type-2	Cu-30%Ni-0.9%Mn	1:0.65	17.0	0.85	0.175
Type-3	Cu-30%Ni-0.9%Mn	1:0.65	20.9	0.19	0.175
Type-4	Cu-30%Ni-1.34%Mn	1:0.5	20.6	0.69	0.161
Type-5	Cu-30%Ni-1.78%Mn	1:0.5	20.6	0.69	0.161

図1 断面構成

Fig. 1 Cross section of wire.

図2 線材の断面写真

Fig. 2 Cross sectional photo of Type-2 and 3 wires.

イストピッチは全ての線材において線径の6倍とした。

図1に線材の断面構成を示す。Nb-Ti体積率(λ)を向上させるために、線材作製における静水圧押し出し用ピレットの組込みを過去の3回^{1)~3)}から2回に減らしたダブルスタック構造を採用した。 $df:dn=1:0.65$ のトリプルスタック材が $\lambda=0.11$ なのに対し、本報のダブルスタック材は0.17となり、約1.5倍に向上している。Type-3を除いたType-1, 2, 4, 5線材は中心に配置した安定化銅が渦電流損失低減のためにCu-10%Niで199分割されている。また、Type-3線材は55分割である。線径0.161mmにおける分割された個々の銅フィラメント径は5 μm であり、4.2Kにおける銅の平均自由行程(純度や加工歪みにより変化)近傍まで極細化されている。Nb-Tiフィラメント数はType-3線材が約65万本、それ以外の線材が約53万本である。

図2に作製したType-2と3線材の断面写真を示す。他のType線材も含めて断面は均一であり、線径0.1mmまで断線なしに伸線でき、加工性は良好であった。

<2.2>実験方法 ヒステリシス損失(Q_h)の測定は、線材を長さ5mmに切り出した後、端面を研磨した測定用サンプルの長さ方向に対して垂直に外部磁界を印加し、温度4.5Kにおける磁化特性を高分解能SQUID型磁束計にて測定した。 Q_h は得られた磁化曲線(ヒステリシスループ)内の面積をサンプルの体積で除した値とした。

Q_h 、結合損失(Q_c)および渦電流損失(Q_e)の和である全交流損失(Q_t)はサーチコイルとキャンセルコイルからなるピックアップコイル内にターン間絶縁した外径14mm、長さ30mmの1層巻コイル状サンプルを挿入し、外部から水冷銅コイルにより交流磁界を印加して、ピックアップコイルの信号を積分器を通して磁化信号として磁化曲線を測定し、 Q_t をもとめた。

臨界電流(I_c)は、GFRP(G-10)製円筒型ホルダーに掘られたV型溝に無誘導巻きにして固定し、4端子法により測定した。 I_c の定義は電圧端子間に抵抗率 $\rho=10^{-14} \Omega \cdot \text{m}$ に相当する電圧が発生したときの電流値とし、 I_c をNb-Tiフィラメントのみの断面積で除した値を臨界電流密度(J_c)とし、線材の全断面積で除した値を平均臨界電流密度(λJ_c)とした。ゼロ磁界中、温度10Kにおける線材の電気抵抗(T_c 直上抵抗)を直流4端子法により測定した。

3. ヒステリシス損失

図3にType-1(Cu-30%Ni)とType-2(Cu-30%Ni-0.9%Mn)の $df=0.2\mu\text{m}$, $0.14\mu\text{m}$ および $0.1\mu\text{m}$ 線材の磁化曲線(±0.5T/cycle)を示す。Type-2線材の磁化は複合化したCu-30%Ni-0.9%Mnの磁化がNb-Tiフィラメントの磁化に重畳されて磁化曲線が大きく右上がりに傾く。これはMnが銅合金中においても大きな磁気モーメントを維持するためであり、この結果Nb-Tiフィラメントの磁化を観察することが困難となるため、線材の4.5Kにおける磁化からNb-Tiの臨界温度(T_c)直上の10Kにおける磁化を差し引いた結果を示した。なお、Cu-30%Ni-0.9%Mnのヒステリシス損失はNb-Tiフィラメントのそれに比較して無視できるほど小さい²⁾。図3において $df=0.2\mu\text{m}$ でのType-1と2のヒステリシス損失 Q_h は概ね等しいが、 $df=0.14\mu\text{m}$ 線材になるとType-1線材に近接効果の影響が現れて0.1T以下の低磁界において磁化の不可逆性が顕著になり、フィラメントの電磁氣的結合が生じていることがわかる。Type-2の $df=0.14\mu\text{m}$ 線材はType-1線材に観察された低磁界中での不可逆性が小さく、0.9wt%のMn添加が近接効果抑制に大きく寄与していることが伺える。加えて、 df , dn が量子磁束間隔 af ($0.07\mu\text{m}$ at 0.5T)に近いレベルまで極細化されているため、磁束の可逆運動(reversible movement)の効果¹⁾が現れて Q_h が低減した。更に極細化した $df=0.1\mu\text{m}$ において、Type-1線材は近接効果によるフィラメント間の電磁氣的結合が強くなり、 $df=0.14\mu\text{m}$ 線材よりも Q_h が

増加しているのに対し、Type-2の $df=0.1\mu\text{m}$ 線材は Q_h が更に低減できている。Beanモデル⁴⁾によれば、 J_c と磁界振幅(B_m)を一定とすれば $Q_h \propto df$ の関係であるが、近接効果を抑制し、かつ磁束量子間隔に近い $0.1\mu\text{m}$ オーダーまで df を極細化した結果、Type-2においては、 df を $0.2\mu\text{m}$ から1/2の $0.1\mu\text{m}$ に極細化することで Q_h を約1/20まで低減できた。

図4 各Type線材のヒステリシス損失とフィラメント径の関係

Fig. 4 Dependence of hysteresis losses at ±0.5T/cycle on filament diameter for Type-1~5.

図3 Type-1およびType-2線材の磁化曲線

Fig. 3 Magnetizations of Type-1 and 2 wires.

図4にType-1～5線材の $Q_h(\pm 0.5T/\text{cycle})$ の df 依存性を示す。 $df=0.2\mu m$ 付近では各Type線材間の Q_h にほとんど差はみられない。Mn無添加のType-1線材における $df=0.2\sim 0.14\mu m$ の範囲での Q_h と df の関係は $Q_h \propto df^{1.6}$ であり、 $df=0.14\mu m$ で最小値($Q_h=270J/m^3$)を示し、 $0.14\mu m$ 以下でヒステリシス損失が増加した。一方、 $0.9wt\%Mn$ を添加したType-2および3線材は $df=0.2\sim 0.1\mu m$ の範囲で $Q_h \propto df^{4.1}$ の関係で Q_h が急激に減少し、 $df=0.1\mu m$ において最小値(Type-2: $17J/m^3$, Type-3: $22J/m^3$)を示した。同様に $1.34wt\%Mn$ 添加のType-4は $Q_h \propto df^{3.2}$ 、 $1.78wt\%Mn$ 添加のType-5は $Q_h \propto df^{3.4}$ の関係で、 $df=0.12\mu m$ において Q_h が最小値(Type-4: $54J/m^3$, Type-5: $48J/m^3$)を示した。Type-2～5線材における Q_h の急激な減少は、図3に示した磁性元素Mn添加による近接効果抑制、および df が減少することによって df, dn が磁束量子間隔に漸近していくことによる量子磁束の可逆運動の結果によるものである。Type-4(Cu-30%Ni-1.34%Mn)とType-5(Cu-30%Ni-1.78%Mn)の Q_h の最小値は、Mn濃度 $0.9wt\%$ としたType-2,3の最小値と比較すると、Nb-Ti体積当たりの Q_h に換算して約2倍ほど高い値であるが、この原因は同じフィラメント径においてType-4,5のフィラメント間隔(dn)とType-2,3の dn が異なるためであり、Mn濃度を高めることによりヒステリシス損失を低減できるフィラメント間隔を縮小できることは過去の研究により明らかになっている²⁾。ただし、過去の研究²⁾においてマトリックスにCu-30%Ni-1.78%Mnを用いたトリプルスタック構造線材($df:dn=1:0.4$)の Q_h は、 $1.34\%Mn$ マトリックスに比較して明らかに増加に転じ、加えて J_c は急激に低下していた。この原因については、未だ特定できていないため、Cu-Ni-Mn合金のMn濃度と

図5 Type-3およびType-4線材のヒステリシス損失と磁界振幅(B_m)の関係

Fig. 5 Dependence of hysteresis losses of Type-3 and 4 wires on amplitude of applied field (B_m).

しては超電導特性の再現性が確認できた $0.9\sim 1.34wt\%Mn$ が妥当と考えられる。

図5にType-3とType-4線材($df=0.1\mu m$)の Q_h -磁界振幅(B_m)特性を示す。Type-3の $0.1\mu m$ 線材は、 B_m が約 $0.8T$ 以下においては $Q_h \propto B_m^4$ の関係となり、 $B_m > 1T$ においては $Q_h \propto B_m^{1.2}$ となった。Type-4の $df=0.1\mu m$ 線材はフィラメント間隔(dn)がType-3線材より小さいために低磁界において近接効果によるフィラメント間の弱結合が生じた結果、約 $0.8T$ より低磁界側においてType-3より高い値を示したが、 $1T$ 以上の磁界中においてはフィラメント間の電磁氣的結合が無視できるほど小さくなり、両者の Q_h はほぼ等しい値となった。

4. 結合損失と渦電流損失

図6に振幅 $0.35T$ 、周波数 $f=5Hz$ および $20Hz$ の正弦波交流磁界中においてピックアップコイル法により測定したType-1線材(線径: $0.66mm$, $df=0.38\mu m$, ツイストピッチ: $6mm$)の磁化曲線を示す。本来はヒステリシス損失が最小値を示した $df=0.1\mu m$ 付近の線材を測定すべきであるが、交流損失低減対策を十分に施した線材であるために測定装置の分解能を越えて測定不可能であったため、 df , ツイストピッチがともに大きい上記の線材を測定用試料とした。測定より得られた交流損失-周波数依存特性から結合損失における等価横抵抗率 $\rho \perp$ を算出して $df=0.1\mu m$ 級の線材の結合損失を計算により求めた。図6より周波数が高くなると結合損失(Q_c)と渦電流損失(Q_e)成分が増加していくことがわかる。

図6 Type-1線材の交流磁界中における磁化曲線(線径: $0.66mm$, $df=0.38\mu m$, $lp=6mm$)

Fig. 6 Magnetizations of Type-1 wire in AC field. (wire dia. : $0.66mm$, $df=0.38\mu m$, $lp=6mm$)

図7にType-1線材の交流損失の周波数依存性を示す。周波数依存成分は Q_c+Q_e に相当する。ピックアップコイル法では Q_c 成分と Q_e 成分の分離は不可能であるため、安定化銅部の渦電流損失(Q_e)成分に関しては次式により算出した¹²⁾。

$$Q_e = \pi^2 \cdot \frac{R_{Cu}^2 \cdot B_m^2 \cdot f \cdot \alpha}{\rho_{Cu}} \quad (J/m^3) \quad \dots\dots (1)$$

ただし、 R_{Cu} : Cu-Niで分割された個々の安定化銅半径, B_m : 磁界振幅, f : 周波数, α : 銅の体積率, ρ_{Cu} : 4.2Kにおける銅の抵抗率

(1)式において $R_{Cu}=8.7 \times 10^{-6} \text{ m}$, $B_m=0.35 \text{ T}$, $f=20 \text{ Hz}$, $\alpha=0.14$ を代入し、 ρ_{Cu} はゼロ磁界中、 T_c 直上の10Kにおいて測定した値($5.6 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$)を用いると $Q_e=0.5 \text{ J/m}^3$ となり、全体の損失に比較して無視できるほど小さい値であった。そこで図7中における交流損失の周波数依存成分(Q_c+Q_e)を全て Q_c として以下に示す Q_c の計算式よりType-1線材の等価横抵抗率 $\rho_{\perp}$ をもとめた。

$$Q_c = \frac{B_m^2 \cdot l_p^2 \cdot f}{2 \rho_{\perp}} \quad (J/m^3) \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 l_p : ツイストピッチ, $\rho_{\perp}$: 等価横抵抗率

(2)式に図7における磁界振幅 $B_m=0.35 \text{ T}$ と $f=20 \text{ Hz}$ における $Q_c=240 \text{ J/m}^3$ 、および $l_p=6 \text{ mm}$ を代入して $\rho_{\perp}=1.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ が得られた。

Type-2線材の $\rho_{\perp}$ も同様の方法で測定した結果、 $\rho_{\perp}=1.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ が得られた。Type-2線材はCu-30%Niに0.9%Mnを添加したこと以外はType-1線材と全て同じ断面構成であり、加えてCu-30%Niの $\rho (=3.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m})$ と

図7 Type-1線材の交流損失と交流磁界周波数の関係
Fig. 7 Dependence of AC loss of Type-1 wire on frequency of AC field.

Cu-30%Ni-0.9%Mnの $\rho (=3.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m})$ がほぼ等しいことから、両者の $\rho_{\perp}$ は一致した。

銅比(Cu/Nb-Ti)を0.19まで低減したType-3線材の全交流損失測定結果と(2)式より算出した $\rho_{\perp}$ は $2.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ であり、中心に配置した安定化銅を減少させた結果、結合損失を更に低減できた。

図4においてType-2線材のヒステリシス損失 Q_h が最小を示した $df=0.1 \mu \text{ m}$ における Q_c ($B_m=0.5 \text{ T}$, $f=50 \text{ Hz}$)を(2)式より算出すると、(2)式に $df=0.1 \mu \text{ m}$ 線材の $l_p=1 \text{ mm}$ と上記の値を代入して $Q_c=38 \text{ J/m}^3$ であった。渦電流損失 Q_e は前述のとおり無視できるほど小さいため、 $Q_e=0$ として全交流損失($Q_t=Q_h+Q_c$)をもとめると、実測した $Q_h=17 \text{ J/m}^3$ 、および先に求めた $Q_c=38 \text{ J/m}^3$ より $B_m=0.5 \text{ T}$, $f=50 \text{ Hz}$ において $Q_t=55 \text{ J/m}^3$ (2.75 kW/m^3)であった。

5.臨界電流密度

図8にType-1および2線材の臨界電流密度 J_c (at 0.5, 1, 1.5T)とフィラメント径の関係を示す。フィラメントの極細化により表面ピン力が向上し、 df の減少と共に J_c が増加した。Type-1線材は $df<0.14 \mu \text{ m}$ においてヒステリシス損失が増大しているため(図4参照)、近接効果によるフィラメント間の電磁氣的結合が強くなる $df=0.1 \mu \text{ m}$ 近傍から J_c が急激に増加していく。一方、Type-2の J_c は、 $df=0.1 \sim 0.2 \mu \text{ m}$ の範囲において増加し、加えてヒステリシス損失は減少しており、0.9%Mnの添加がヒステリシス損失の低減だけでなく、 J_c の向上にも有効であることがわかった。また、Type-2線材の J_c は $df=0.075 \mu \text{ m}$ 以下で急激に低下しており、この原因としては df および d_n のサイズが磁束量子間隔より小さくなったことにより表面

図8 Type-1,2 線材の臨界電流密度(J_c)とフィラメント径(df)の関係

Fig. 8 Dependence of critical current density J_c on Nb-Ti filament diameter df for Type-1 and 2 wires.

ピンが有効に働かなくなったためと考えられる⁷⁾。

図9にType-4と5線材の J_c - df 特性を示す。Mn濃度を1.34%としたType-4の $df=0.1\mu\text{m}$ 線材において $J_c=20000\text{A/mm}^2$ at 0.5Tを達成した。更にMn濃度を高めたType-5線材(1.78% Mn)の J_c は、Type-4に比較して減少していることから、 J_c 向上の観点から、Mn濃度の上限値は1.34~1.78%の範囲にあると推測される。図8のType-2線材の J_c - df 特性と比較すると $df<0.075\mu\text{m}$ の領域でType-2線材の J_c が急激に減少するのに対し、Type-4の J_c は更に増加していく。過去の試作結果³⁾においてもMn濃度の違いにより J_c の df 依存性が大きく変化したことから

図9 Type-4, 5線材の臨界電流密度(J_c)とフィラメント径(df)の関係

Fig. 9 Dependence of critical current density J_c on Nb-Ti filament diameter df for Type-4 and 5 wires.

図10 Type-1~5($df=0.1\mu\text{m}$)線材の λJ_c -B特性

Fig. 10 Dependence of overall J_c (λJ_c) on magnetic field (B) for Type-1~5 wires ($df=0.1\mu\text{m}$).

考慮して、マトリックス中におけるMn濃度の J_c に及ぼす影響は、Ni濃度に比較して微量でも大きく変化するこ

とがわかる。図10にType-1~5の $df=0.1\mu\text{m}$ 線材の平均臨界電流密度 λJ_c -B特性を示す。Type-1と2線材の λJ_c に比較してType-3,4および5線材の λJ_c が高いのは、Nb-Tiフィラメント自身の J_c 向上に加えて、Nb-Ti体積率 λ を向上させたためである。安定化銅の体積率を減少させることで λ を向上させたType-3線材の λJ_c は、 $\lambda J_c=3570\text{A/mm}^2$ at 0.5T, 1600A/mm^2 at 1Tが得られた。また、フィラメント間隔 dn を縮小して λ を向上させたType-4の $df=0.1\mu\text{m}$ 線材は、線材全体に対する安定化銅の体積率を低減させることなく、 $\lambda J_c=4100\text{A/mm}^2$ at 0.5T, 1900A/mm^2 at 1Tまで向上できた。

6. T_c (臨界温度)直上抵抗

交流用超電導線材に要求される特性としては、低交流損失と高臨界電流密度の他に高安定性がある。線材の安定性向上の手段としては銅比向上等による線材抵抗率の低減をはかることが最も一般的である。ただし、超電導線のクエンチを積極的に利用するS/N(超電導/常電導)転移型限流器に関しては、極端な安定性の低下を生じない範囲での線材の高抵抗化が必要とされる。過去の試作結果³⁾において、線材に $200\sim 250^\circ\text{C}\times 1\text{hour}$ の最終熱処理を施すことで、安定化銅自身の残留抵抗比RRR($R_{293\text{K}}/R_{10\text{K}}$)を熱処理前の2~3倍に向上できることを示した。本報において作製した超電導線についても、最終熱処理によるRRRの向上効果、および限流器への適応等を考慮して T_c 直上抵抗率を調べた。測定方法は線材に 1A/mm^2 に相当する直流電流を通電し、ゼロ磁界中、温度10Kにおい

表2 Type-2,3および4線材の10Kにおける電気抵抗率と残留抵抗比RRR ($R_{293\text{K}}/R_{10\text{K}}$)

Table 2. Resistivity at 10K and Residual Resistance Ratio RRR($R_{293\text{K}}/R_{10\text{K}}$) of Type-2, 3 and 4.

	wire dia. (mm)	Cu dia. (μm)	Heat treatment	Resistivity at 10K ($\Omega\cdot\text{m}$)	RRR ($R_{293\text{K}}/R_{10\text{K}}$)
Type-2	0.353	9.3	Non	3.9×10^{-9}	23.3
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	2.1×10^{-9}	40.1
	0.191	5.0	Non	4.8×10^{-9}	18.3
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	3.0×10^{-9}	28.3
Type-3	0.353	9.3	Non	1.3×10^{-8}	12.5
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	7.8×10^{-9}	22.6
	0.191	5.0	Non	1.7×10^{-8}	10
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	9.2×10^{-9}	17.2
Type-4	0.353	9.3	Non	4.1×10^{-9}	23.5
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	2.0×10^{-9}	40.8
	0.191	5.0	Non	4.9×10^{-9}	17.5
			$200^\circ\text{C}\times 1\text{h}$	2.8×10^{-9}	30.6

表3 各Typeにおいて最適化された線材の諸元と超電導特性

Table 3. Specifications and superconducting properties of the optimum wires of each Types.

Type	wire dia. (mm)	df (μm)	dn (μm)	Qh at 0.5T/cyle (J/m^3)	Qt at 0.5T/cyle, f=50Hz (J/m^3)	λ Jc at 0.5T (A/mm^2)	Qt/ λ Jc at 0.5T, f=50Hz ($\text{J}/\text{A} \cdot \text{m}$)
Type-1	0.248	0.14	0.091	270	338	1950	1.73×10^{-7}
Type-2	0.175	0.1	0.065	17	55	2800	1.96×10^{-8}
Type-3	0.175	0.1	0.065	25	50	3530	1.42×10^{-8}
Type-4	0.191	0.12	0.06	55	105	3600	2.92×10^{-8}
Type-5	0.191	0.12	0.06	48	98	3350	2.93×10^{-8}
triple stack wire ※	0.191	0.1	0.065	11	66	1260	5.24×10^{-8}

※ : Cu-30%Ni-0.9%Mn matrix, df:dn=1:0.65, $\lambda=0.11$, Cu/Nb-Ti=1.92¹⁾⁴⁾

て直流4端子法により測定した。

表2にType-2,3および4線材の電気抵抗率とRRRを示す。各線材において最終熱処理 $200^\circ\text{C} \times 1\text{hour}$ を施した線材と非熱処理材の値を示した。Cu-Niにより分割された銅のフィラメント径が小さくなると線材の抵抗率は上昇した。この原因としては銅フィラメント径が銅の平均自由行程のサイズまで極細化されたこと等が考えられる。最終熱処理($200^\circ\text{C} \times 1\text{hour}$)によりRRRは熱処理前の約1.6~1.8倍に向上し、線材の高安定化に寄与する。加えて、銅自身の抵抗率が低減できたために、銅比低減の観点から λ Jcの向上にも有効と考えられる。

7. むすび

表3に各Type線材においてQh/ λ Jcが最小値を示した線材と過去に作製した¹⁾⁴⁾トリプルスタック構造線材(Cu-30%Ni-0.9%Mnマトリックス, df:dn=1:0.65, $\lambda=0.11$)の諸元、交流損失及び λ Jcを示す。Mn無添加のType-1とその他のType線材を比較すると、マトリックスへの磁性元素Mnの添加により、Qt/ λ Jcを1桁低減できることがわかる。また、過去に作製したトリプルスタック構造線材とType-2を比較すると、Type-2線材は λ の増加によりQhは増加したが、結合損失が減少し、かつ λ Jcが約2.2倍に向上しているため、Qt/ λ Jcは約1/2.7低減できた。表2と表3より得られたType-2,3および4線材の特徴を以下に示す。

Type-2線材は、試作線材中で低交流損失、高臨界電流密度および高安定性の3特性のバランスがとれた線材であり、Type-3線材は銅比を減らし、Nb-Ti体積率を向上させたため、低交流損失と高電流密度が優れ、他のType線材に比較して安定性は低下した。Type-4線材は、マトリックスのMn濃度を高めることでフィラメント間隔を縮小してNb-Ti体積率を向上させた線材であり、高臨界電流密

度と高安定性に重点が置かれている。

交流用超電導線材は電力機器の種類によって要求される超電導特性が異なるため、様々な超電導特性向上対策が必要となる。本報によって得られた種々の知見を組み合わせることにより要求性能に適した線材が設計可能となった。

以下に本研究により得られた知見を示す。

- (1) 従来、交流用Nb-Ti線材のマトリックスとして最も利用されてきたCu-30wt%Niに0.9~1.78wt%Mnを添加したCu-Ni-Mn合金を使用することで、ヒステリシス損失を概ね1/20程度まで低減し、Nb-Tiフィラメント当たりのJcを向上させることができた。
- (2) ヒステリシス損失とJcの観点から、0.8Tより低磁界側で使用される線材に関してはCu-30%Ni-0.9%Mnマトリックスを複合化した線材が適しており、0.8Tより高磁界側においては、弱い近接効果によるヒステリシス損失増加が無視できるため、Mn濃度を高めたCu-30%Ni-1.34%Mnマトリックス複合化線材のほうが適している。
- (3) 高Jc化の観点からCu-Ni-MnのMn濃度は1.34wt%が最適値であり、df=0.1 μm 線材においてJc=20000A/mm² at 0.5T (λ Jc=4100A/mm²)の性能が得られた。
- (4) 線材断面構成をトリプルスタック構造からダブルスタック構造とし、加えて安定化銅を削減してNb-Ti体積率を増加させた結果、ダブルスタック線材のQt/ λ Jcはトリプルスタック線材のQt/ λ Jcの1/2.7に低減できた。
- (5) 安定化銅を5 μm 程度まで極細化しても $200^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ の最終熱処理によりRRRを約1.6倍に向上できた。

本研究は、通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により、実施したものである。

(平成6年7月26日受付, 同6年9月30日再受付)

文 献

- 1) K.Miyashita, M.Toyama, S.Sakai, K.Kamata and H.Tanaka: "Electromagnetic properties of Nb-Ti Superconducting Wires with Cu-Ni-Mn Matrix for AC Use", Adv. Cryo. Eng. (Materials), 40 (1993) 543~550
- 2) 宮下克己, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「Cu-Ni-Mn合金を複合化した超極細多芯交流用Nb-Ti線材 - 交流損失 -」, 低温工学, 29, 229~237 (平6-6)
- 3) 宮下克己, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「Cu-Ni-Mn合金を複合化した超極細多芯交流用Nb-Ti線材 - 臨界電流密度と安定化銅の残留抵抗比 -」, 低温工学, 29, 238~244 (平6-6)
- 4) 宮下克己, 外山元一, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「Cu-Ni-Mn合金を複合化した交流用Nb-Ti線材」, 平5電気学会全大, No.1017
- 5) C.P.Bean: "Magnetization of High-Field Superconductors", Rev. Mod. Phys., 36, 31 (1964)
- 6) I.Hlasnik, S.Takacs, V.P.Burjak, M.Majoros, J.Krajcik, L.Krenpasky, M.Polak, M.Jergel, T.A.Koneeva, O.N.Mironova and I.Ivan: "Properties of superconducting Nb-Ti superfine filament composites with diameters $\leq 0.1\mu\text{m}$ ", Cryogenics, 25 558 (1985)
- 7) H.Tateishi, T.Ohnishi, K.Ohmatsu, K.Takei and M.Nagata: "Superconducting properties of Nb-Ti conductor with very fine filaments", Proc. of Int. Symposium on Flux Pinning and Electromagnetic Properties in Superconductors, Japan, 208~211 (1985)
- 8) 宮下克己, 外山元一, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「交流用Nb-Ti線材の開発(9)」第50回低温工学研究会予稿集, p.135, (平5-11)
- 9) 宮下克己, 外山元一, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「交流用Nb-Ti線材の開発(10)」第51回低温工学研究会予稿集, p.68, (平6-4)
- 10) 宮下克己, 外山元一, 酒井修二, 鎌田圀尚, 田中浩樹: 「交流用Nb-Ti線材の電磁気特性」, 平6電気学会全大, No.1065
- 11) F.Sumiyoshi, M.Matsusita, M.Noda, T.Matsusita, K.Funaki, M.Iwakuma and K.Yamafuji: "Anomalous magnetic behavior due to reversible fluxoid motion in superconducting multifilamentary wires with very fine filaments", Jpn. J. of Appl. Physics., 25, 148~150 (1986)
- 12) 電子技術総合研究所資料: 「超電導技術の電力応用への研究開発」, p.110 (1984)

宮下 克己

(正員) 1965年1月7日生まれ。平成2年3月信州大学大学院修士課程(電気工学専攻)修了。同年4月日立電線(株)入社。平成6年信州大学大学院後期博士課程社会人コース修了。主として金属系超電導線材の研究開発に従事。現在に至る。博士(工学)。低温工学協会会員

酒井 修二

(非会員) 1950年7月20日生まれ。昭和50年3月大阪大学工学部冶金学科卒業。同年4月日立電線(株)入社。主として金属系超電導線材および伸銅材料の研究開発に従事。現在に至る。低温工学協会, 日本金属学会会員。

鎌田 圀尚

(正員) 1945年2月17日生まれ。昭和43年3月東京大学工学部冶金学科卒業。同年4月日立電線(株)入社。主として高磁界用等の金属系超電導線材の研究開発に従事。平成元年より超電導技術推進本部で超電導関連プロジェクトのとりまとめに従事。現在に至る。低温工学協会, 日本金属学会, 軽金属学会, 日本結晶学会会員。工学博士。

田中 浩樹

(非会員) 1964年2月18日生まれ。昭和62年3月横浜市立大学理学部物理学科卒業。同年4月日立電線(株)入社。平成4年3月より超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)に出向。超電導材料の研究企画業務に従事。平成6年10月より日立電線(株)にて伸銅材料の研究に従事。現在に至る。応用物理学会会員。