

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4258397号
(P4258397)

(45) 発行日 平成21年4月30日(2009.4.30)

(24) 登録日 平成21年2月20日(2009.2.20)

(51) Int.Cl. F I
 H O 1 B 13/00 (2006.01) H O 1 B 13/00 5 6 3 Z
 H O 1 B 12/10 (2006.01) H O 1 B 12/10

請求項の数 5 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2004-38632 (P2004-38632)	(73) 特許権者	000005120
(22) 出願日	平成16年2月16日(2004.2.16)		日立電線株式会社
(65) 公開番号	特開2005-228701 (P2005-228701A)		東京都千代田区外神田四丁目14番1号
(43) 公開日	平成17年8月25日(2005.8.25)	(74) 代理人	100071526
審査請求日	平成18年3月17日(2006.3.17)		弁理士 平田 忠雄
		(72) 発明者	宮下 克己
			東京都千代田区大手町一丁目6番1号 日立電線株式会社内
		(72) 発明者	酒井 修二
			東京都千代田区大手町一丁目6番1号 日立電線株式会社内
		(72) 発明者	岩城 源三
			東京都千代田区大手町一丁目6番1号 日立電線株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 Nb-Ti 超電導線

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

安定化銅からなる中央部の外周に、順に、銅合金からなる第1の被覆層、フィラメント領域、銅合金からなる第2の被覆層、及び安定化銅からなる外皮が被覆され、前記フィラメント領域は第3の被覆層が形成された複数の Nb-Ti フィラメントとこれらを覆うように形成されたマトリックス層とを有する Nb-Ti 超電導線において、前記マトリックス層が安定化銅からなり、前記第3の被覆層が、温度 10 K 以下における電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \cdot m$ の範囲の抵抗を有する銅あるいは銅合金からなることを特徴とする Nb-Ti 超電導線。

【請求項2】

前記第1及び第2の被覆層が Cu-2wt%Ni からなることを特徴とする請求項1記載の Nb-Ti 超電導線。

【請求項3】

前記第3の被覆層の厚さ x と前記 Nb-Ti フィラメントの半径 y との比率 (x/y) が 0.1 以下であることを特徴とする請求項1又は2記載の Nb-Ti 超電導線。

【請求項4】

前記 Nb-Ti フィラメント径が 30 μm 以下であることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項記載の Nb-Ti 超電導線。

【請求項5】

超電導線の断面形状において、前記 Nb-Ti フィラメントに対する前記第3の被覆層

の占有率比 X が $0.1 \sim 0.8$ 、前記安定化銅の占有比 Y が $1.5 \sim 3$ であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項記載の Nb - Ti 超電導線。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、変動磁界を発生させるパルス磁界発生用超電導マグネットに好適に使用できる Nb - Ti 超電導線に関するものである。

【背景技術】

【0002】

通常、超電導マグネットは医療用 MRI、分析用 NMR (核磁気共鳴装置) に代表されるように直流磁界 (静磁界) で使用されるため、超電導線から発生する損失はほとんどゼロで無視できる。このような直流用超電導マグネットに要求されるのは、マグネット小型化のための高い電流密度と安定にマグネットを運転できる安定性である。よって、使用される超電導線には高純度の銅やアルミが安定化材として複合化されており、超電導フィラメント部に対する安定化銅部の比率 (銅比) は要求される電流密度や安定性により決定される。

【0003】

一方、実用化が期待されている SMES (超電導電力貯蔵) は充・放電を繰り返すので変動磁界を発生させる。このようなパルス磁界発生用超電導マグネットでは超電導線から交流損失が発生し、損失は熱となって冷媒である液体ヘリウムが蒸発する。蒸発したヘリウムガスを再度液化するためには液化機が必要となるが、液化機の構造上、液化効率が 0.2% と非常に低いため、例えば 1W の熱量で蒸発したヘリウムガスを再度液化するには液化機で 500W を消費することになり、液化機を含めた超電導マグネットシステム全体の効率が大幅に低下してしまうため、超電導線には交流損失低減対策が必要となる。

【0004】

また、あまりに交流損失が大きい場合やエポキシ含浸等で冷却性が悪い場合には、損失発生による熱により超電導状態が破れてしまう (クエンチ) 可能性もある。

【0005】

超電導線から発生する交流損失は以下の 3 つに大別される。

(1) 超電導フィラメントの磁化に起因するヒステリシス損失; $W_h (\text{W} / \text{m}^3)$

(2) 有限の抵抗を有するマトリックスを介して超電導フィラメント間を流れる結合電流により発生する結合損失; $W_c (\text{W} / \text{m}^3)$

(3) 銅などの低抵抗金属から発生する渦電流損失; $W_e (\text{W} / \text{m}^3)$

【0006】

上記 3 つの損失のなかで、まず (1) のヒステリシス損失 (W_h) は磁界変動率 (磁界周波数 f) とフィラメント径 (d) に比例して増加するため ($W_h \propto f \cdot d$)、その低減対策としてフィラメント径を小さくすることが必要となる。

【0007】

(2) の結合損失 W_c は磁界変動率 (磁界周波数) と超電導線のツイストピッチ (L_p) の 2 乗に比例して増加し、超電導線に複合化している安定化銅等の等価電気抵抗率 R_{eq} に反比例して (等価電気伝導率 σ_{eq} に比例して) 増加する ($W_c \propto (f \cdot L_p)^2 / \sigma_{eq}$)。そのため、低減対策としてツイストピッチを短くし、複合化するマトリックス金属に安定化銅の他に CuNi 合金等の高抵抗金属を用いて結合電流を速やかに減衰させて損失を低減させる。

【0008】

(3) の渦電流損失 W_e は磁界変動率 (磁界周波数) と超電導線に複合化された安定化銅等の寸法 (r) の 2 乗に比例して増加し、安定化銅等の電気抵抗率 R_{eq} に反比例して増加する ($W_e \propto (f \cdot r)^2 / R_{eq}$)。そのため、低減対策として安定化銅の寸法 r を CuNi 等を挿入することで分割して小さくすることが必要となる。

【0009】

このように、パルス用途の Nb - Ti 超電導線では、交流損失を低減させるために Nb - Ti フィラメント径を細くし、ツイストピッチを短くし、複合金属として安定化銅の他

10

20

30

40

50

にCuNi合金を使用するのが一般的である。かかる交流損失低減対策を施したNb-Ti超電導線において、上記3つの交流損失のなかで最も高い比率を占めるのは一般的に(2)の結合損失である。このため、最終的に結合損失を低減することが重要課題となるケースが多い。

【0010】

前述のように結合損失低減のポイントは、ツイストピッチの短縮とCuNi等の高抵抗金属の使用の2点であり、一般的に使用される高抵抗金属としてはCu-10wt%Niがある(例えば、特許文献1参照)。その抵抗率は液体ヘリウム中(4.2K)において安定化銅の に比較して約3桁高い。

【0011】

図7(a)に、一般的なパルス用Nb-Ti超電導線の断面構成図を示す。このNb-Ti超電導線は、安定化銅からなる中央部1の外周に、順に、Cu-10wt%Niからなる第1の被覆層3、フィラメント領域5、Cu-10wt%Niからなる第2の被覆層7、及び安定化銅からなる外皮9が被覆されている。また、フィラメント領域5は、Nb-Tiからなるフィラメント51の周囲を安定化銅からなる第3の被覆層53で被覆したものが、Cu-10wt%Niからなる複数マトリックス層55内に配された構造となっている。結合損失の原因となる結合電流の経路は図7(b)に示すように、フィラメント領域5内部(A)、中央部1の安定化銅部(B)、外皮9の安定化銅部(C)の3つである。

【特許文献1】特開平05-290647号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

しかしながら、Cu-10wt%Niは、上述のように液体ヘリウム中(4.2K)での抵抗率が安定化銅(高純度銅)に比較して約3桁高く、安定性の観点からは不利となる。結局、交流損失低減と安定性向上は二律背反の関係にあり、運転条件(磁界変動率やマグネットの負荷率等)に応じて両者のバランスをとることが要求される。

【0013】

一般的に超電導マグネットの運転電流は、超電導線の限界性能である臨界電流特性とマグネットの負荷特性の関係から決定される。一般に超電導マグネットは負荷率50~70%付近で使用されることが多く、負荷率が高くなるほど安定性が低下する。このため、図7に示すNb-Ti超電導線において、線材のマトリックス比(安定化銅:Cu-Ni:Nb-Ti)や断面構成が安定性確保の重要な因子となる。

【0014】

パルス用途のNb-Ti超電導線は、使用されるマグネットの運転条件によっては交流損失低減よりも安定性やマグネットの小型化(高電流密度化)が重視されるケースがある。例えば瞬時電圧低下対策用SMESの場合、落雷等による電力系統の瞬時電圧低下は、年に数回程度であり、1回の充放電が数秒間だけで使用頻度が低い。普段は直流磁界を発生しているだけの待機状態であり、長期的に見た場合交流損失によるシステム効率低下は無視でき、交流損失により発生する熱により超電導が破れる(クエンチする)ほど大きな交流損失でない限り、ある程度までの交流損失は許容できる。損失低減よりも高負荷率運転によりマグネットを小型化することが重要になる場合である。

【0015】

このような一部のパルス用途Nb-Ti超電導線にCu-10wt%Niのような高抵抗金属を必要以上に使用すると過剰な交流損失低減対策が原因でマグネットの安定性が低下し、特に高負荷率運転が要求されるマグネットほど安定性に注意が必要となる。例えば、あるパルス用超電導線材の場合、要求される交流損失許容値を満足するには図7中の第2の被覆層7に配置するCu-10wt%Ni層の厚さが1μm以下の薄い高抵抗層で十分な場合でも製造上の制約から層の厚さが10μm以上となってしまう場合もある。その結果、同じ半径および長さのNb-Ti超電導線で形成した場合と比較して、Cu-10

10

20

30

40

50

w t % N i の比率が増加する分だけ、相対的に安定化銅の比率が低下していき、安定性が低くなってしまふ。

【 0 0 1 6 】

従って、本発明の目的は、交流損失を低減させると共に安定性も確保可能で、パルス超電導マグネット用途に適した Nb - T i 超電導線を提供することにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 7 】

上記目的を達成するため、本発明の Nb - T i 超電導線は、安定化銅からなる中央部の外周に、順に、第 1 の被覆層、フィラメント領域、第 2 の被覆層、及び安定化銅からなる外皮が被覆され、前記フィラメント領域は第 3 の被覆層が形成された複数の Nb - T i フィラメントとこれらを覆うように形成されたマトリックス層とを有する Nb - T i 超電導線において、前記マトリックス層が安定化銅からなり、前記第 3 の被覆層が、温度 1 0 K 以下における電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \cdot m$ の範囲の抵抗を有する銅あるいは銅合金からなることを特徴とする。なお、安定化銅とは、超電導状態を安定化させるための銅であり、超電導の本質にかかわる磁気的な安定および、その安定に寄与する温度の安定を目的として用いられるものを示し、本業界で通常用いられている用語である。本願に係る発明において、安定化銅は 1 0 K 以下の温度における電気抵抗率が $5 \times 10^{-10} \cdot m$ 以下の高純度銅を指す。

10

【 0 0 1 8 】

前記第 1 及び第 2 の被覆層も温度 1 0 K 以下における電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \cdot m$ の範囲の抵抗を有する銅あるいは銅合金とすることが好ましい。

20

【 0 0 1 9 】

前記第 3 の被覆層の厚さ x と前記 Nb - T i フィラメントの半径 y との比率 (x / y) は 0 . 1 以下であることが好ましい。

【 0 0 2 0 】

前記 Nb - T i フィラメント径は 3 0 μ m 以下であることが好ましい。

【 0 0 2 1 】

超電導線の断面形状において、前記 Nb - T i フィラメントに対する前記第 3 の被覆層の占有率比 X が 0 . 1 ~ 0 . 8 、前記安定化銅の占有比 Y が 1 . 5 ~ 3 であることが好ましい。

30

【 発明の効果 】

【 0 0 2 2 】

本発明の Nb - T i 超電導線は交流損失と安定性のバランスが優れているため、本発明の Nb - T i 超電導線を用いたパルス磁界発生用超電導マグネットは、交流損失を低く抑えた状態で高い安定性を確保でき、高負荷率のパルス運転が可能となる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 3 】

以下、本発明に係る Nb - T i 超電導線の実施の形態を図面を参照しながら説明する。

【 0 0 2 4 】

図 1 は、本発明の一実施形態に係る Nb - T i 超電導線の断面構成図を示すものである。

40

【 0 0 2 5 】

この Nb - T i 超電導線は、安定化銅からなる中央部 1 の外周に、順に、Cu - 2 w t % N i からなる第 1 の被覆層 2 3、フィラメント領域 2 5、Cu - 2 w t % N i からなり 2 0 μ m の厚さを有する第 2 の被覆層 2 7、及び安定化銅からなる外皮 9 が被覆され、全体として直径 1 m m に形成されている。

【 0 0 2 6 】

フィラメント領域 2 5 は、直径 1 6 μ m の Nb - T i からなるフィラメント 5 1 の周囲を厚さ 0 . 5 μ m のりん脱酸銅からなる第 3 の被覆層 6 3 で被覆したものが複数、安定化銅からなるマトリックス層 6 5 内に配された構造となっている。

50

【 0 0 2 7 】

第1の被覆層23及び第2の被覆層27を構成するCu-2wt%Niの導電率は、従来用いられているCu-10wt%Niの約5倍に相当する。また、第3の被覆層63の形成材料であるりん脱酸銅は、温度10K以下における電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \cdot m$ の範囲の抵抗を有するものである。なお、Nb-Tiに対する高純度安定化銅の比率(銅比)は2.25に形成されている。

【 0 0 2 8 】

第3の被覆層63は、上記りん脱酸銅の他に、りん入り無酸素銅(P20-OFC)、Cu-2wt%Ni、Cu-Si合金、Cu-Fe合金、Cu-Zr合金等の温度10K以下における電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8} \cdot m$ の範囲の抵抗を有する銅あるいは銅合金とすることができる。この理由については後述する。

10

【 0 0 2 9 】

次に、Nb-Tiからなるフィラメント51の周囲に配置した第3の被覆層63の厚さ x とNb-Tiフィラメント51の半径 y の比率(x/y)は0.1以下であることが好ましい。これは、0.1を超えると、抵抗層としての第3の被覆層63の占有率がフィラメント面積に対して22%に到達し、フィラメント領域25全体に対する超電導フィラメント51と第3の被覆層63の占積率を ρ_0 とすると、 $\rho_0 = 0.6(60\%)$ の場合、Nb-Ti占積率が38%まで低下してしまい、電流密度が低下するからである。また、フィラメント周囲の安定化銅の占積率が減少するため安定性が低下するからである。

【 0 0 3 0 】

20

また、超電導線の断面形状において、Nb-Tiからなるフィラメント51に対する第3の被覆層63の占有比 X が0.1~0.8、安定化銅(本明細書では10K以下の温度における電気抵抗率が $5 \times 10^{-10} \cdot m$ 以下の高純度銅を指す)の占有比 Y が1.5~3であること(銅あるいは銅合金:安定化銅(高純度銅):Nb-Ti= $X:Y:1$ 、 $X=0.1 \sim 0.8$ 、 $Y=1.5 \sim 3$)が好ましい。これは、超電導線の安定化銅比は使用される条件によって大きく異なるが、パルスマグネット用として使用する場合、マグネットを安定に運転するためには概ね安定化銅比1.5以上は必要となる。一方、安定化銅比を高くし過ぎると安定性は向上するが、Nb-Tiの占有率が低下して電流密度が減少し、マグネットが大型化してしまう。加えて、交流損失も増加するため安定化銅比の上限は3.0とする。また、交流損失を低減するために用いる第3の被覆層63の占有比 X につ

30

【 0 0 3 1 】

更に、個々のNb-Tiからなるフィラメント51の径は $30 \mu m$ 以下とすることが望ましい。これは、磁界条件等により変化するが、フィラメント径が $30 \mu m$ を超えると、交流損失の主成分は結合損失成分からヒステリシス損失成分に変わり、パルス用として無視できないほど交流損失が大きくなってしまふからである。

40

【 0 0 3 2 】

次に、前述した、第3の被覆層として電気抵抗率が $1 \times 10^{-9} \cdot m$ 以上、 $3 \times 10^{-8} \cdot m$ 以下の抵抗を有する銅あるいは銅合金を使用する理由について詳述する。

【 0 0 3 3 】

図2に示すような断面構造のモデルの超電導線の結合損失 W_c (J/m^3)は次式で示される。

【 0 0 3 4 】

【数1】

$$W_c = A^* \left(\frac{r_b}{r_s} \right)^2 \mu_0 H_m^2 \cdot \left[\pi \frac{\omega \tau_{eff}}{1 + (\omega \tau_{eff})^2} \right] \dots \dots \dots (1)$$

【0035】

但し、 A^* ；超電導線の形状因子に起因する係数、 r_s ；超電導線の半径、 r_b ；フィラメント領域外周部の半径、 H_m ；磁界振幅、 ω ； $2\pi f$

ここで、 τ_{eff} は結合等価時定数で以下の式で示される。

10

【0036】

【数2】

$$\tau_{eff} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_s}{2\pi} \right)^2 \mu \sigma_{eff} \dots \dots \dots (2)$$

【0037】

但し、 L_s ；線のツイストピッチ、 σ_{eff} ；マトリックスの等価導電率で以下の式で示される。

20

【0038】

【数3】

$$\sigma_{eff} = \frac{r_b^2 - r_c^2}{r_b^2} \sigma_i + m\sigma_{o1} + n\sigma_s + o\sigma_{c1} + p\sigma_{c2} \dots \dots \dots (3)$$

【0039】

但し、 σ_i ；フィラメント領域の等価導電率、 $\sigma_{o1} \sim \sigma_{c2}$ ；図2中の各部分の導電率、 m, n, o, p ；超電導断面構造の幾何学的寸法に依存する定数。

30

ここで、 σ_i はフィラメント領域が図3のようにNb-Tiフィラメント151の周囲に導電率の異なる金属b層152とc層154の2層構造となっている場合、以下の式で表される。

【0040】

【数4】

$$\sigma_i = \frac{(1 - \lambda_0) \sigma_m + (1 + \lambda_0) (\sigma_2 / \alpha f)}{(1 + \lambda_0) \sigma_m + (1 - \lambda_0) (\sigma_2 / \alpha f)} \sigma_m \dots \dots \dots (4)$$

40

【0041】

但し、 λ_0 ；フィラメント領域全体に対する超電導フィラメント部とb層部の占積率でc層の等価半径をcとすると $\lambda_0 = (b/c)^2$ となる。

σ_m ；c層部の導電率。 σ_2 ；b層部の導電率。 f ；b層の厚さtをaで表現した場合の係数で $t = b - a = f a$ 、よって $f = (b - a) / a$ となり、tがフィラメント半径aに比較して薄い場合は $f \ll 1$ となる。

以下にb層とc層の導電率が異なる2つのケースについて示す。

【0042】

i) b層が安定化銅からなる高導電率層、c層がCu-Ni等の低導電率層の場合

(4) 式中の m はCuNi合金の導電率 σ_{CuNi} となり、 σ_2 が安定化銅の導電率

50

σ_{cu} となる。よって $(\lambda_0 / \sigma_m) \gg \lambda_0$ が成り立つため、(4)式は近似的に、
【0043】

【数5】

$$\sigma_i = \frac{1 + \lambda_0}{1 - \lambda_0} \sigma_m = \frac{1 + \lambda_0}{1 - \lambda_0} \sigma_{CuNi} \dots\dots\dots (5)$$

【0044】

i) b層がCu-Ni等の低導電率層、c層が安定化銅からなる高導電率層の場合
(4)式中の σ_m は安定化銅の導電率 σ_{cu} となり、 λ_0 がCu-Niの導電率 σ_{CuNi} となる。よって $(\lambda_0 / \sigma_m) \ll \lambda_0$ が成り立つため、(4)式は近似的に、

10

【0045】

【数6】

$$\sigma_i = \frac{1 - \lambda_0}{1 + \lambda_0} \sigma_m = \frac{1 - \lambda_0}{1 + \lambda_0} \sigma_{Cu} \dots\dots\dots (6)$$

【0046】

20

また、通常の直流用Nb-Ti線材のように安定化銅とNb-Tiのみで構成されている場合は(4)式にあてはめると $\sigma_m = \sigma_{cu}$ となり、 λ_0 はNb-Tiの占積率とすると(5)式と同じ形になり、 $\lambda_0 < 1$ より、

【0047】

【数7】

$$\sigma_i = \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \sigma_m = \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \sigma_{Cu} \dots\dots\dots (7)$$

【0048】

30

ここで(6)式と(7)式を比較すると、 $\lambda_0 = 0.6$ の場合、(6)式では $\sigma_i = 0.25 \sigma_{cu}$ 、(7)式では $\sigma_i = 4 \sigma_{cu}$ となり、マトリックスのほとんどが安定化銅にもかかわらず、分母と分子が逆になることで σ_i が16倍も異なることがわかる。よって、Nb-Tiフィラメント周囲に薄い高抵抗層を配置することで、(6)式に示すように等価的な導電率 σ_i が減少し、結果的に交流損失が低減可能となる。ただし高抵抗層としてCu-10wt%Ni合金を選択した場合、確かに σ_i は低減可能であるが、安定化銅より3桁も高い金属を超電導フィラメントの外周に直接配置するのは安定性を低下させる原因となる。

【0049】

そこで、安定化銅とCu-10wt%Niの中間の電気抵抗率を有する金属あるいは合金をNb-Tiフィラメント周囲に薄く被覆した構造とすることで、 σ_i は(6)式と(7)式の中間の値をとることになり、交流損失と安定性のバランスの取れたNb-Ti線材を実現可能になる。

40

【0050】

σ_i は(6)式と(7)式の中間の値とするためには(4)式中の λ_0 と λ を調整することが重要となる。

いま、 $\lambda_0 = 0.6$ 、 $\sigma_m = \sigma_{cu} = 7 \times 10^9 (1 / \Omega \cdot m)$ 、 $\lambda_0 = 10^9 (1 / \Omega \cdot m)$ として λ を0.01~0.2まで変化させた場合(ケース1)、 $\lambda_0 = 5 \times 10^8 (1 / \Omega \cdot m)$ として λ を0.01~0.2まで変化させた場合(ケース2)、 $\lambda_0 = 3.3 \times 10^7 (1 / \Omega \cdot m)$ として λ を0.01~0.2まで変化させた場合(

50

ケース3)の i の変化を図4に示す。

【0051】

図4において、高抵抗層がない全て安定化銅の場合、 $i = 2.8 \times 10^{10}$ ($1/\cdot m$)となるが、ケース1より $\rho_2 = 10^9$ ($1/\cdot m$)、 $f = 0.03$ の場合でも $i = 1.6 \times 10^{10}$ ($1/\cdot m$)となり、安定化銅より7倍高い抵抗層をNb-Tiフィラメント半径に対して3%の厚さだけフィラメント外周に配置しただけで i は約43%低減させることができる。

【0052】

ケース2の $\rho_2 = 5 \times 10^8$ ($1/\cdot m$)は一般的にエアコン用の銅管等に使用されている工業用純銅(りん脱酸銅)の4.2Kにおける導電率に相当する値で、超電導安定化材用の高純度無酸素銅に比較すると4.2Kの極低温では1/10以下の導電率である。このように、Nb-Tiフィラメント周囲に薄いらん脱酸銅の層を設けることで半分以下に i を低減可能なことがわかる。

【0053】

ケース3の $\rho_2 = 3.3 \times 10^7$ ($1/\cdot m$)はCu-2.5wt%Niの4.2Kにおける導電率に相当する値で、Nb-Tiフィラメント周囲にフィラメント半径の1/100程度の薄いCu-2.5wt%Niの層を設けることで i を約1/6まで低減可能なことがわかる。

【0054】

以上の理由により交流損失と安定性のバランスの観点から i をコントロールするために、Nb-Tiフィラメント周囲に配置する金属の導電率は $10^9 \sim 3.3 \times 10^7$ ($1/\cdot m$)が妥当な値であり、導電率を抵抗率に変換すると $\rho = 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8}$ $\cdot m$ の範囲となる。

【実施例】

【0055】

実施例として図1に示した構造を有するNb-Ti超電導線、比較例として図5及び図6に示したNb-Ti超電導線を用意した。これら3種類のNb-Ti超電導線の線材の諸元を表1に示す。

【0056】

【表1】

項目	実施例(図1)	比較例1(図5)	比較例2(図6)
線径(mm)	1.0	1.0	1.0
フィラメント径(μm)	16.0	16.0	16.0
フィラメント本数	1394	1394	1394
Cu:Cu-Ni:Nb-Ti	2.25:0.25:1	2.1:0.4:1	2.5:0:1
ツイストピッチ(mm)	15	15	15

【0057】

各線材に複合化した高抵抗金属と交流損失および安定性の関連性を調査するため、線径、フィラメント径、ツイストピッチ、およびNb-Tiの占積率は統一した。

【0058】

実施例の超電導線は、図1に示すように、安定化銅からなる中央部1の外周に、順に、Cu-2wt%Niからなる第1の被覆層23、フィラメント領域25、Cu-2wt%Niからなり20 μm の厚さを有する第2の被覆層27、及び安定化銅からなる外皮9が被覆されている。また、フィラメント領域25は、直径16 μm のNb-Tiからなるフ

フィラメント51の周囲を厚さ0.5 μ mのりん脱酸銅からなる第3の被覆層63で被覆したものが1394本、安定化銅からなるマトリックス層65内に配された構造となっている。なお、Nb-Tiに対する高純度安定化銅とりん脱酸銅の合計の比率は2.25に形成されている。

【0059】

比較例1の超電導線は、図5に示すように、安定化銅からなる中央部1の外周に、順に、Cu-10wt%Niからなる第1の被覆層33、フィラメント領域35、Cu-10wt%Niからなり20 μ mの厚さを有する第2の被覆層37、及び安定化銅からなる外皮9が被覆されている。また、フィラメント領域35は、直径16 μ mのNb-Tiからなるフィラメント51の周囲を厚さ0.5 μ mの安定化銅からなる第3の被覆層73で被覆したものが1394本、Cu-10wt%Niからなるマトリックス層75内に配された構造となっている。なお、Nb-Tiに対する安定化銅の比率は2.1に形成されている。

10

【0060】

比較例2の超電導線は、CuNi等を含まない直流用のCu/Nb-Ti構造であり、図6に示すように、安定化銅からなる中央部1の外周に、順に、フィラメント領域45、及び安定化銅からなる外皮9が被覆されている。フィラメント領域45は、直径16 μ mのNb-Tiからなる1394本のフィラメント51が、安定化銅からなるマトリックス層85内に配された構造となっている。なお、Nb-Tiに対する安定化銅の比率は2.5に形成されている。

20

【0061】

3種類の線材の外部磁界5Tにおける臨界電流を4端子法により測定した。測定は長さ約1mの短尺サンプルをFRP製の円筒状ホルダーに張力をかけて巻線し、両端を電流端子へ半田付けし、電圧端子間距離400mmとしてホルダーを超電導マグネット内にセットし、外部から5Tの磁界を加えて測定した。臨界電流の定義は電圧基準0.1 μ V/cmとした。

【0062】

交流損失は、表面をカプトンテープで電気絶縁した線材を、内径75mm、高さ70mmの55ターン・1層コイル状サンプルとし、そのコイル状サンプルを磁化測定用ピックアップコイルにセットし、外部から $B = 2 \pm 0.5$ Tの三角波交流磁界（直流バイアス磁界2T、三角波交流磁界振幅0.5T、 $f = 1$ Hz）を加えてコイル状サンプルの磁化を測定し、得られた磁化曲線から交流損失を求めた。

30

【0063】

安定性を定量的に評価する試験としてMQE（最小クエンチエネルギー；超電導線をクエンチさせるのに必要な最小熱エネルギー量で、MQEが大きいほど熱的安定性が高い）の測定を行った。長さ1mの短尺超電導線の中心部に直径0.2mmの絶縁皮膜付きマンガニン線ヒーターを長さ10mmにわたって巻線し、その上からエポキシ樹脂を塗布してヒーターの熱の大半が超電導線に伝わるようにした。上述の臨界電流測定用円筒状ホルダーに超電導線を巻き付け、外部から5Tの磁界を加えた状態で線材に臨界電流値の約55%に相当する一定電流（350A）を通電保持し、マンガニン線ヒーターに幅20msのパルス電流を通電して線材を加熱した。線材がクエンチするまでパルス電流波高値を徐々に高くしていき、クエンチが発生したときの電流値とヒーター抵抗値から入熱量を計算し、その値をMQE（最小クエンチエネルギー）とした。

40

【0064】

表2に前述の3種類（実施例、比較例1, 2）のNb-Ti線材の臨界電流、交流損失、MQEの値を示す。

【0065】

【表 2】

超電導特性	実施例	比較例 1	比較例 2
臨界電流 I_c (A)	640	637	641
交流損失 (kW/m ³)	38.5	19.8	339
MQE (mJ)	7.3	3.1	8.4

【0066】

10

臨界電流値は3つのサンプルともほぼ同じ値となった。

交流損失は比較例 1、実施例、比較例 2 のサンプルの順で小さく、安定化銅に比較して 3 桁電気抵抗率の高い Cu - 10 wt % Ni を複合化した線材が最も低かった。高抵抗層を含まない直流用である比較例 2 のサンプルは他の 2 つのサンプルに比較して極端に交流損失が大きくなった。比較例 2 のサンプルの大きな交流損失の 90 % 以上は結合損失成分である。MQE 値は、比較例 2、実施例、比較例 1 のサンプルの順で大きく、Cu / Nb - Ti 構成の比較例 2 が最も高く、実施例のサンプルも比較例 2 のサンプルに近い安定性を示した。

【0067】

20

以上の結果から、交流損失を極力低減したい場合には、比較例 1 のサンプルが最適であるが、交流損失が低い一方で安定性が低く (MQE 値が低く)、高い負荷率で運転するマグネット用としては不向きであることがわかる。一方、実施例のサンプルは交流損失が比較例 1 のサンプルの 1.94 倍と高いものの、MQE 値は Cu / Nb - Ti 構造の比較例 2 のサンプルに近い値を示し、比較例 1 のサンプルの 2.35 倍の安定性があることがわかる。以上より、実施例のサンプルは交流損失を低減しつつ安定性を保持していることが確認できた。

【図面の簡単な説明】

【0068】

【図 1】本発明の一実施形態に係る Nb - Ti 超電導線の断面図である。

【図 2】一般的なパルス用 Nb - Ti 超電導線の構成と寸法を示す断面図である。

30

【図 3】Nb - Ti フィラメント周囲が 2 層構造 (b 層と c 層) になっている場合の断面図である。

【図 4】等価導電率 σ_i と f (高抵抗層の厚さ / Nb - Ti フィラメント半径) の関係を示すグラフである。

【図 5】比較例 1 の Nb - Ti 超電導線の断面図である。

【図 6】比較例 2 の Nb - Ti 超電導線の断面図である。

【図 7】一般的なパルス用 Nb - Ti 超電導線の断面図である。

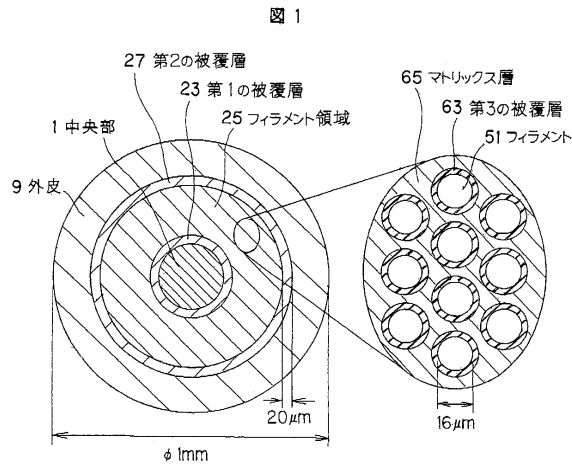
【符号の説明】

【0069】

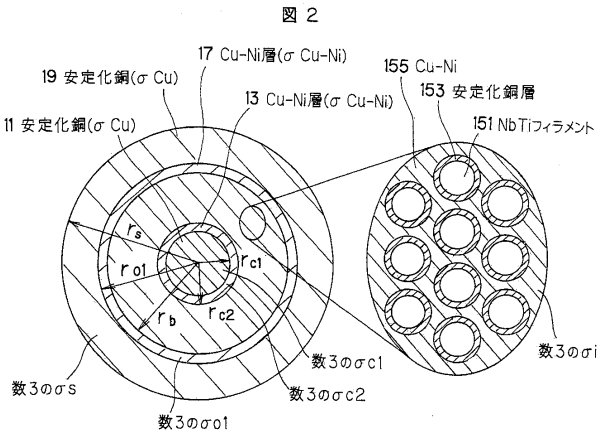
40

- 1 中央部
- 3, 23, 33 第 1 の被覆層
- 5, 25, 35, 45 フィラメント領域
- 7, 27, 37 第 2 の被覆層
- 9 外皮
- 51 フィラメント
- 53, 63, 73 第 3 の被覆層
- 55, 65, 75, 85 マトリックス層

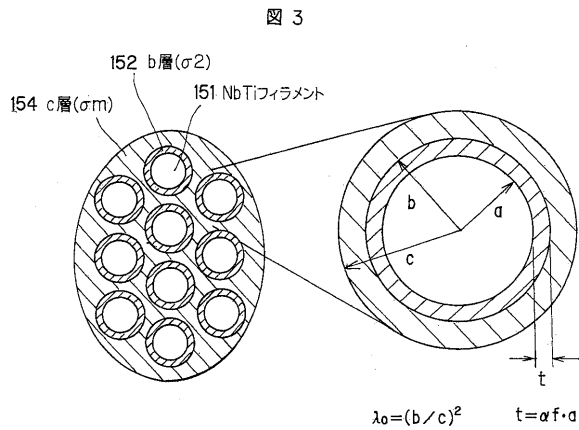
【図1】



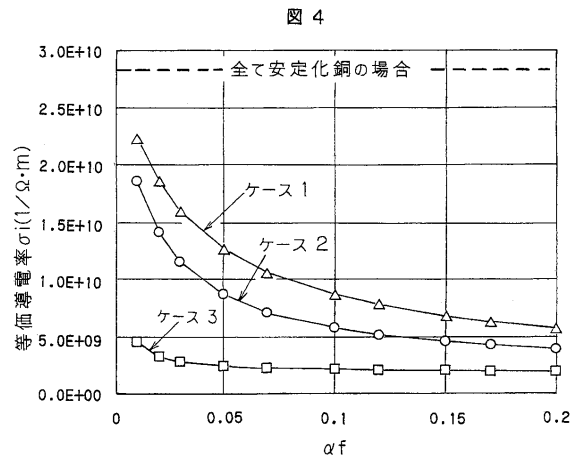
【図2】



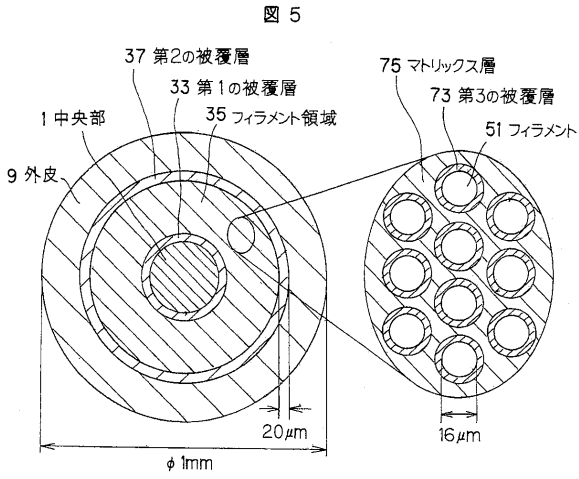
【図3】



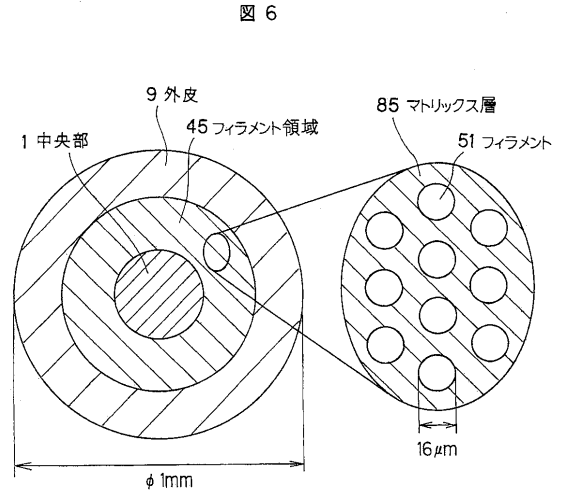
【図4】



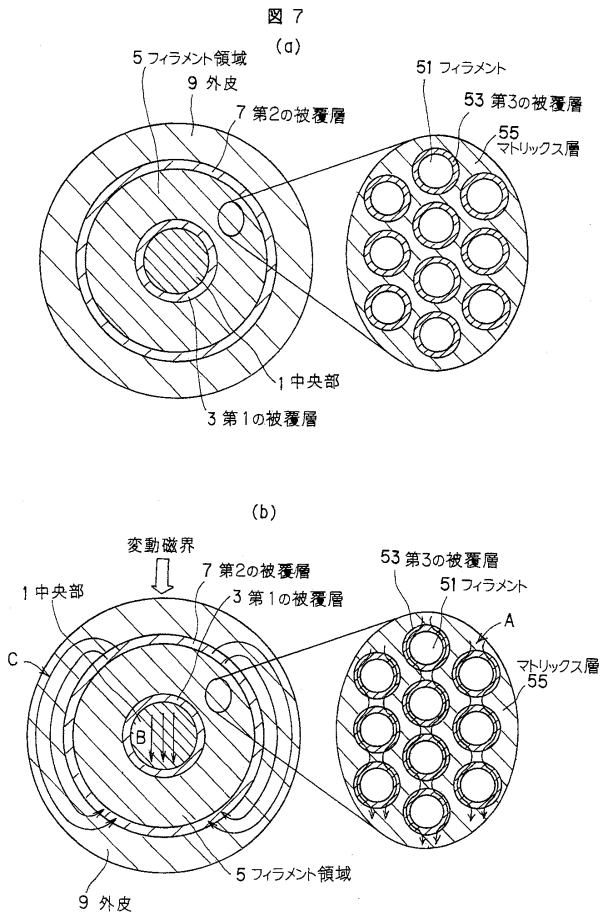
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 佐藤 淳一
東京都千代田区大手町一丁目6番1号 日立電線株式会社内

審査官 近野 光知

(56)参考文献 特開2002-163944(JP,A)
特開平05-089726(JP,A)
特開平09-129045(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01B 12/00~12/16