

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-61135  
(P2021-61135A)

(43) 公開日 令和3年4月15日(2021.4.15)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 B 12/06 (2006.01)	HO 1 B 12/06 Z A A	5 G 3 2 1
HO 1 B 13/00 (2006.01)	HO 1 B 13/00 5 6 5 D	
HO 1 F 6/06 (2006.01)	HO 1 F 6/06 1 1 0	
	HO 1 F 6/06 1 2 0	
	HO 1 F 6/06 1 5 0	
審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 14 頁)		

(21) 出願番号 特願2019-183864 (P2019-183864)  
(22) 出願日 令和1年10月4日(2019.10.4)

(71) 出願人 000005186  
株式会社フジクラ  
東京都江東区木場1丁目5番1号  
(71) 出願人 504151365  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
茨城県つくば市大穂1番地1  
(71) 出願人 301023238  
国立研究開発法人物質・材料研究機構  
茨城県つくば市千現一丁目2番地1  
(74) 代理人 100106909  
弁理士 棚井 澄雄  
(74) 代理人 100126882  
弁理士 五十嵐 光永

最終頁に続く

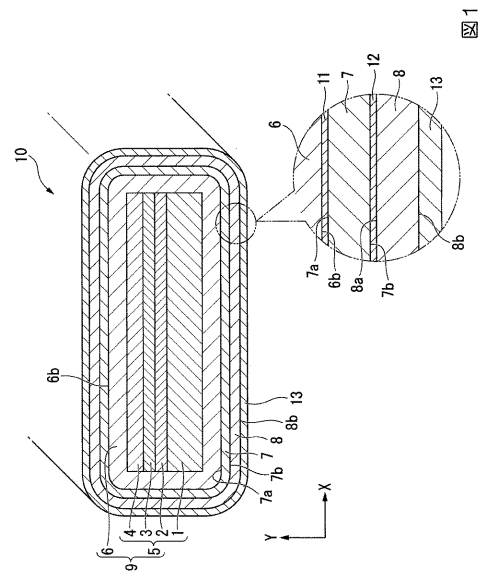
(54) 【発明の名称】 酸化物超電導線材、超電導コイルおよび超電導コイルの製造方法

(57) 【要約】

【課題】超電導コイルの径の調整が容易であって、超電導コイルの寸法精度を高めることができ、しかも超電導コイルにおける巻き数を十分に確保できる酸化物超電導線材、超電導コイルおよび超電導コイルの製造方法を提供する。

【解決手段】酸化物超電導線材10は、基材1および超電導層3を有する超電導線材本体9と、超電導線材本体9を覆う第1絶縁被覆層7と、第1絶縁被覆層7を覆う第2絶縁被覆層8とを備える。第2絶縁被覆層8の外表面8bに、厚さ調整層13が形成されている。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

基材および超電導層を有する超電導線材本体と、  
前記超電導線材本体を覆う第 1 絶縁被覆層と、  
前記第 1 絶縁被覆層を覆う第 2 絶縁被覆層と、を備え、  
前記第 2 絶縁被覆層の外面に、厚さ調整層が形成されている、酸化物超電導線材。

**【請求項 2】**

前記厚さ調整層は、前記第 2 絶縁被覆層の外面の全てを覆っている、請求項 1 記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 3】**

前記第 2 絶縁被覆層の内面に、第 2 の厚さ調整層が形成されている、請求項 1 または請求項 2 記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 4】**

前記厚さ調整層は、半硬化樹脂から構成されている、請求項 1 ~ 3 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 5】**

前記厚さ調整層は、熱可塑性樹脂から構成されている、請求項 1 ~ 3 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 6】**

前記厚さ調整層は、エポキシ樹脂で構成されている、請求項 1 ~ 5 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 7】**

前記第 1 絶縁被覆層の内面および外面のうち少なくとも一方に離型処理が施されている、請求項 1 ~ 6 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材。

**【請求項 8】**

請求項 1 ~ 7 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材が巻回され、  
前記厚さ調整層が硬化されて硬化樹脂層とされている、超電導コイル。

**【請求項 9】**

請求項 1 ~ 7 のうちいずれか 1 項に記載の酸化物超電導線材を巻回して多層巻きコイルを形成し、

次いで、前記厚さ調整層を硬化させる、超電導コイルの製造方法。

**【請求項 10】**

前記厚さ調整層を硬化させる前に前記多層巻きコイルの径を調整する、請求項 9 に記載の超電導コイルの製造方法。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、酸化物超電導線材、超電導コイルおよび超電導コイルの製造方法に関する。

**【背景技術】****【0002】**

酸化物超電導線材は、例えば、基材と、中間層と、酸化物超電導層と、保護層とを備える。超電導コイルは、例えば、超電導線材を巻回して得た多層巻きコイルに、エポキシ樹脂などの樹脂を含浸させることで作製することができる（例えば、特許文献 1 を参照）。

超電導コイルは、ガラス繊維などの芯材を熱硬化性樹脂で結合させた半硬化樹脂テープ（プリプレグテープ）と、超電導線材とを共巻きし、前記樹脂を硬化させることによって作製することもできる（例えば、特許文献 2 を参照）。

**【0003】**

超電導コイルにおいて、径を設計どおりとすることは重要であるが、実際には、超電導線材の厚さの変動などにより径が設計値を外れることがある。その場合には、例えば、コイルに縮径方向の力を加えることなどによって、コイルの径を調整することができる。

10

20

30

40

50

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

【特許文献1】特許第5501541号公報

【特許文献2】特許第4187293号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

特許文献1に記載の超電導コイルでは、多層巻きコイルの径を設計値に合わせて調整するのは容易でなかった。例えば、コイルの径が設計値より大きい場合、コイルに縮径方向の力を加えても、コイルの径を設計値まで小さくするのが難しい場合があった。そのため、超電導コイルの径の寸法精度が低くなる可能性があった。

10

特許文献2に記載の超電導コイルでは、プリプレグテープが芯材を含むため薄型化が難しい。そのため、超電導コイルの径を設計値に合わせると、プリプレグテープの厚さを原因として、超電導線材の巻き数が少なくなり、超電導コイルの作る磁力を大きくできない場合があった。

## 【0006】

本発明の一態様は、超電導コイルの径の調整が容易であって、超電導コイルの寸法精度を高めることができ、しかも超電導コイルにおける巻き数を十分に確保できる酸化物超電導線材、超電導コイルおよび超電導コイルの製造方法を提供することを課題とする。

20

## 【課題を解決するための手段】

## 【0007】

本発明の一態様は、基材および超電導層を有する超電導線材本体と、前記超電導線材本体を覆う第1絶縁被覆層と、前記第1絶縁被覆層を覆う第2絶縁被覆層と、を備え、前記第2絶縁被覆層の外面に、厚さ調整層が形成されている酸化物超電導線材を提供する。

## 【0008】

前記酸化物超電導線材によれば、厚さ調整層は厚さの増減が可能であるため、例えば、径調整工程において、厚さ調整層の厚さの減少を伴うコイルの縮径が可能である。従って、コイルの径を容易に調整し、設計値に近づけることができる。よって、超電導コイルの寸法精度を高め、超電導コイルの所望の性能を実現することができる。

30

## 【0009】

前記厚さ調整層は、前記第2絶縁被覆層の外面の全てを覆っていることが好ましい。

## 【0010】

前記酸化物超電導線材では、前記第2絶縁被覆層の内面に、第2の厚さ調整層が形成されていることが好ましい。

## 【0011】

前記厚さ調整層は、半硬化樹脂から構成されていることが好ましい。

## 【0012】

前記厚さ調整層は、熱可塑性樹脂から構成されていることが好ましい。

## 【0013】

前記厚さ調整層は、エポキシ樹脂で構成されていることが好ましい。

40

## 【0014】

前記酸化物超電導線材では、前記第1絶縁被覆層の内面および外面のうち少なくとも一方に離型処理が施されていることが好ましい。

## 【0015】

本発明の他の態様は、前記酸化物超電導線材が巻回され、前記厚さ調整層が硬化されて硬化樹脂層とされている超電導コイルを提供する。

## 【0016】

本発明のさらに他の態様は、前記酸化物超電導線材を巻回して多層巻きコイルを形成し、次いで、前記厚さ調整層を硬化させる超電導コイルの製造方法を提供する。

50

## 【 0 0 1 7 】

前記超電導コイルの製造方法では、前記厚さ調整層を硬化させる前に前記多層巻きコイルの径を調整することが好ましい。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 1 8 】

本発明の一態様によれば、超電導コイルの径の調整が容易となる。そのため、超電導コイルの寸法精度を高めることができる。本発明の一態様によれば、超電導コイルの径を容易に調整できるため、超電導コイルにおける超電導線材の巻き数を十分に確保し、超電導コイルの磁力を大きくできる。

## 【 図面の簡単な説明 】

10

## 【 0 0 1 9 】

【 図 1 】 第 1 実施形態の酸化物超電導線材を模式的に示す断面図である。

【 図 2 】 図 1 の酸化物超電導線材を用いた超電導コイルを模式的に示す断面図である。

【 図 3 】 図 1 の酸化物超電導線材を用いた超電導コイルの斜視図である。

【 図 4 】 図 1 の酸化物超電導線材を用いて超電導コイルを製造する工程を示す図である。

【 図 5 】 前図に続く製造工程を示す図である。

【 図 6 】 前図に続く製造工程を示す図である。

【 図 7 】 前図に続く製造工程を示す図である。

【 図 8 】 第 2 実施形態の酸化物超電導線材を模式的に示す断面図である。

## 【 発明を実施するための形態 】

20

## 【 0 0 2 0 】

以下、好適な実施形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。

## 【 0 0 2 1 】

[ 酸化物超電導線材 ] ( 第 1 実施形態 )

図 1 は、第 1 実施形態の酸化物超電導線材 10 を模式的に示す断面図である。

酸化物超電導線材 10 は、超電導積層体 5 と、安定化層 6 と、第 1 絶縁被覆層 7 ( 第 1 絶縁層 ) と、第 2 絶縁被覆層 8 ( 第 2 絶縁層 ) とを備える。

超電導積層体 5 は、基材 1 上に中間層 2 を介して酸化物超電導層 3 および保護層 4 が形成された構造を有する。詳しくは、超電導積層体 5 は、テープ状の基材 1 の一方の面に、中間層 2 と酸化物超電導層 3 と保護層 4 がこの順に積層された構成を有する。

30

## 【 0 0 2 2 】

Y 方向は、酸化物超電導線材 10 の厚さ方向であり、基材 1、中間層 2、酸化物超電導層 3、保護層 4 等の各層が積層される方向である。X 方向は、酸化物超電導線材 10 の幅方向であり、酸化物超電導線材 10 の長手方向および厚さ方向に直交する方向である。

## 【 0 0 2 3 】

基材 1 は、テープ状であり、例えばハステロイ ( 登録商標 ) 等の金属で形成されている。

中間層 2 は、例えば、基材 1 側から、拡散防止層、ベッド層、配向層、キャップ層等を備える。拡散防止層は、基材 1 の成分の一部が拡散し、不純物として酸化物超電導層 3 側に混入することを抑制する機能を有する。ベッド層は、基材 1 と酸化物超電導層 3 との界面における反応を低減し、その上に形成される層の配向性を向上させる。配向層は、キャップ層の結晶配向性を制御する。キャップ層は、結晶粒が面内方向に自己配向し得る材料からなる。

40

## 【 0 0 2 4 】

酸化物超電導層 3 は、酸化物超電導体から構成される。酸化物超電導体としては、特に限定されないが、例えば一般式  $REBa_2Cu_3O_x$  ( RE 1 2 3 ) で表される RE - Ba - Cu - O 系酸化物超電導体が挙げられる。希土類元素 RE としては、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu のうちの 1 種又は 2 種以上が挙げられる。

## 【 0 0 2 5 】

50

保護層 4 は、事故時に発生する過電流をバイパスしたり、酸化物超電導層 3 と保護層 4 の上に設けられる層との間で起こる化学反応を抑制する等の機能を有する。保護層 4 の材質としては、例えば銀 ( A g )、銅 ( C u )、金 ( A u )、金と銀との合金、その他の銀合金、銅合金、金合金などが挙げられる。

【 0 0 2 6 】

安定化層 6 は、超電導積層体 5 の外面全体を覆って形成されている。安定化層 6 は、酸化物超電導層 3 が常電導状態に転移した時に発生する過電流を転流させるバイパス部としての機能を有する。安定化層 6 の構成材料としては、銅、銅合金 ( 例えば C u - Z n 合金、C u - N i 合金等 )、アルミニウム、アルミニウム合金、銀等の金属が挙げられる。安定化層 6 は、めっき ( 例えば電解めっき ) によって形成することができる。

10

【 0 0 2 7 】

基材 1、中間層 2、酸化物超電導層 3、保護層 4 および安定化層 6 の構成は、公知技術を適用できる。超電導積層体 5 および安定化層 6 を「超電導線材本体 9」と総称する。

【 0 0 2 8 】

第 1 絶縁被覆層 7 は、安定化層 6 の外面 6 b 全体を覆って形成されている。第 2 絶縁被覆層 8 は、第 1 絶縁被覆層 7 の外面 7 b 全体を覆って形成されている。

【 0 0 2 9 】

第 1 絶縁被覆層 7 および第 2 絶縁被覆層 8 は、絶縁性材料 ( 例えば、絶縁性の樹脂 ) で構成される。絶縁性の樹脂としては、ポリイミド、フッ素樹脂、ポリアミド、ポリアミドイミド、ポリウレタン、ポリエステル、ポリビニルブチラール、およびポリビニルホルマールなどが挙げられる。なかでも、ポリイミドおよびフッ素樹脂は、電気絶縁性等の特性に優れるため好ましい。

20

第 1 絶縁被覆層 7 および第 2 絶縁被覆層 8 の厚さは、それぞれ例えば 0 . 5 ~ 5 0 μ m である。

【 0 0 3 0 】

第 1 絶縁被覆層 7 および第 2 絶縁被覆層 8 は、前記絶縁性材料で構成されるテープを用いて形成することができる。この構成によれば、第 1 絶縁被覆層 7 および第 2 絶縁被覆層 8 を容易に形成することができる。

【 0 0 3 1 】

第 1 絶縁被覆層 7 の内面 7 a と外面 7 b のうち少なくとも一方には、離型処理が施されていることが好ましい。詳しくは、第 1 絶縁被覆層 7 の内面 7 a と外面 7 b のうち少なくとも一方に、コーティング層が形成されていることが好ましい。本実施形態では、内面 7 a にコーティング層 1 1 が形成されている。外面 7 b にはコーティング層 1 2 が形成されている。コーティング層 1 1 , 1 2 は、対象面 ( 内面 7 a と外面 7 b のうち少なくとも一方 ) の全域に形成するのが好ましいが、対象面の少なくとも一部の領域に形成されていればよい。

30

【 0 0 3 2 】

コーティング層 1 1 , 1 2 は、例えば、フッ素樹脂を含む。コーティング層 1 1 , 1 2 は、例えば、フッ素樹脂を含む塗料を塗布し、乾燥させることにより得られる。コーティング層 1 1 , 1 2 を構成するフッ素樹脂としては、例えば、P T F E ( ポリテトラフルオロエチレン )、F E P ( 四フッ化エチレン・六フッ化プロピレン共重合体 )、P F A ( ペルフロオロアルコキシフッ素樹脂 )、E T F E ( エチレン・四フッ化エチレン共重合体 ) などが挙げられる。塗料は、フッ素樹脂に必要な応じて有機バインダーなどを添加することで得られる。塗料を塗布する方法は、特に限定されず、ディッピング法、スプレーコーティング法、ロールコーティング法、またはスピンドローコーティング法など、公知の塗布法を適用することができる。フッ素樹脂を含むコーティング層 1 1 , 1 2 は、対向面に対する接着力を低くする効果の点で優れている。

40

【 0 0 3 3 】

コーティング層 1 1 , 1 2 の厚さは、例えば、0 . 5 ~ 5 μ m である。コーティング層 1 1 , 1 2 を形成することで、処理面 ( 第 1 絶縁被覆層 7 の内面 7 a と外面 7 b のうち少

50

なくとも一方)と対向面との界面で層間剥離を生じやすくすることができる。そのため、超電導コイル100(図2参照)において、酸化物超電導線材10の厚さ方向に剥離力が作用したときにコーティング層11,12と対向面との間が優先して剥離し、酸化物超電導層3には剥離力が作用し難くすることができる。よって、超電導コイル100では、冷却の際の超電導特性の劣化を抑制できる。コーティング層11,12の厚さを0.5 $\mu$ m以上とすると、剥離力が作用した場合にコーティング層11,12の対向面からの剥離が容易となる。コーティング層11,12の厚さが5 $\mu$ m以下とすると、コーティング層11,12の形成が容易となる。

**【0034】**

第1絶縁被覆層7は、コーティング層11,12の形成により、コーティング層11,12がない場合に比べて、対向面(例えば、安定化層6の外面6bおよび第2絶縁被覆層8の内面8a)から剥離しやすくなる。

**【0035】**

第2絶縁被覆層8の外面8bには、厚さ調整層13が形成されている。厚さ調整層13は、第2絶縁被覆層8の外面8bの少なくとも一部を覆う。厚さ調整層13は、外面8bの全て(全領域)を覆うことが好ましい。厚さ調整層13が外面8bの全てを覆う場合には、酸化物超電導線材10をコイル化したときに、酸化物超電導線材10どうしを強固に固定できる。

**【0036】**

厚さ調整層13の厚さは、特に限定されないが、例えば、1~30 $\mu$ mとすることができる。厚さ調整層13の厚さを1 $\mu$ m以上とすることで、超電導コイル100(図2参照)において酸化物超電導線材10どうしを強固に固定することができる。厚さ調整層13の厚さを30 $\mu$ m以下とすることで、超電導コイル100(図2参照)において電流密度を低くすることができる。

**【0037】**

厚さ調整層13は、例えば、半硬化状態の樹脂(半硬化樹脂)で構成されている。半硬化樹脂は、流動性を失っているが完全硬化には至っていない。半硬化樹脂は、例えば、重合性官能基の一部が重合反応し、未反応の重合性官能基が残存している状態にある。半硬化樹脂に含まれる重合性官能基の反応率は、例えば10~90%である。半硬化樹脂のデュロメータ硬さ(JIS K6253-3:2012に準拠)は、例えばA10~70である。

**【0038】**

半硬化樹脂を構成する樹脂は、熱硬化性樹脂が好ましい。熱硬化性樹脂としては、エポキシ樹脂、フェノール樹脂、アミノ樹脂、不飽和ポリエステル樹脂などが挙げられる。エポキシ樹脂は、酸化物超電導線材10をコイル化したときに、酸化物超電導線材10どうしを強固に固定できるため好ましい。半硬化樹脂を構成する樹脂としては、熱硬化性樹脂の他、光硬化性樹脂の使用も考えられる。

**【0039】**

厚さ調整層13は、例えば、液状またはワニス状の熱硬化性樹脂を対象面(例えば、外面8b)に塗布した後、塗膜を加熱して半硬化状態とすることで形成することができる。塗膜を加熱する温度は、例えば150~200である。

液状またはワニス状の熱硬化性樹脂を塗布する方法は、特に限定されず、ディッピング法、スプレーコーティング法、ロールコーティング法、またはスピンドローコーティング法など、公知の塗布法を適用することができる。

**【0040】**

厚さ調整層13は、例えば、熱可塑性樹脂で構成されていてもよい。熱可塑性樹脂は、ガラス転移温度または融点に達すると軟化し、温度が下がると再び硬化する性質をもつ。熱可塑性樹脂としては、例えば、フェノキシ樹脂、エポキシ樹脂、ポリアミド樹脂、ポリエステル樹脂、ポリイミド樹脂などが挙げられる。厚さ調整層13が熱可塑性樹脂で構成される場合は、厚さ調整層13を加熱により軟化させることができるため、コイルの径を

10

20

30

40

50

調整することができる。

【 0 0 4 1 】

[ 超電導コイル ]

図 2 は、酸化物超電導線材 1 0 を用いた超電導コイル 1 0 0 を模式的に示す断面図である。図 2 は、図 3 の I - I 断面を示す図である。図 3 は、超電導コイル 1 0 0 の斜視図である。

図 2 および図 3 に示すように、超電導コイル 1 0 0 は、酸化物超電導線材 1 0 が厚さ方向に積層されて多数回巻回されて構成されたパンケーキ型の多層巻きコイルである。図 2 に示すように、硬化樹脂層 1 4 は、第 2 絶縁被覆層 8 の外面 8 b 全体を覆っている。硬化樹脂層 1 4 は、半硬化樹脂から構成される厚さ調整層 1 3 (図 1 参照) が完全に硬化して硬度が高められることにより得られた樹脂層である。或いは、硬化樹脂層 1 4 は、熱可塑性樹脂から構成される厚さ調整層 1 3 が、後述する径調整工程の昇温で軟化し、その後温度が下がることで再び硬化した樹脂層である。超電導コイル 1 0 0 の形状は、例えば矩形状である。

【 0 0 4 2 】

[ 超電導コイルの製造方法 ]

図 4 ~ 図 7 は、酸化物超電導線材 1 0 を用いて超電導コイル 1 0 0 を製造する工程を示す図である。

【 0 0 4 3 】

( 巻回工程 )

図 4 に示すように、巻枠 2 0 を用意する。巻枠 2 0 は矩形状である。巻枠 2 0 の短径 L 1 は長径 L 2 より小さい。図 5 に示すように、酸化物超電導線材 1 0 (図 1 参照) を、巻枠 2 0 に必要な層数となるよう巻き付けて多層巻きコイル 2 1 を形成する。多層巻きコイル 2 1 を構成する酸化物超電導線材 1 0 のうち、径方向に隣り合う酸化物超電導線材 1 0 , 1 0 は、厚さ調整層 1 3 (図 1 参照) が互いに接する。

【 0 0 4 4 】

( 径調整工程 )

図 6 に示すように、多層巻きコイル 2 1 の径を調整する。例えば、多層巻きコイル 2 1 の径を小さくするには、多層巻きコイル 2 1 を側面から縮径方向に押圧する。

【 0 0 4 5 】

多層巻きコイル 2 1 は、例えば、略矩形状であって、一对の長辺部 2 1 A , 2 1 A と、一对の短辺部 2 1 B , 2 1 B とを有する。多層巻きコイル 2 1 の短径を小さくするには、例えば、型枠 (図示略) を用いて長辺部 2 1 A , 2 1 A を互いに近づく方向に押圧する。多層巻きコイル 2 1 の長径を小さくするには、例えば、前記型枠を用いて短辺部 2 1 B , 2 1 B を互いに近づく方向に押圧する。

【 0 0 4 6 】

径調整工程は、常温または昇温した状態で行う。厚さ調整層 1 3 が半硬化樹脂から構成される場合は、厚さ調整層 1 3 は常温において容易に変形可能であるため、常温で径調整工程を行うことができる。

厚さ調整層 1 3 が熱可塑性樹脂から構成される場合は、多層巻コイル 2 1 の全体を昇温させる。そして、厚さ調整層 1 3 が軟化し変形可能となった状態で多層巻コイル 2 1 を縮径方向に押圧することで、多層巻きコイル 2 1 の径を調整する。その後、多層巻きコイル 2 1 の温度を下げることで、熱可塑性樹脂から構成される厚さ調整層 1 3 が再び硬化する。

【 0 0 4 7 】

( 硬化工程 )

厚さ調整層 1 3 が半硬化樹脂から構成される場合は、半硬化樹脂を完全に硬化させるために硬化工程を行う。図 7 に示すように、ヒータ 2 2 を用いて多層巻きコイル 2 1 を加熱することにより、厚さ調整層 1 3 (図 1 を参照) を構成する半硬化樹脂を完全に硬化させて硬化樹脂層 1 4 (図 2 参照) とする。このとき、多層巻きコイル 2 1 は、径調整工程で

の縮径方向の押圧を維持した状態で硬化させると良い。

【 0 0 4 8 】

硬化樹脂層 1 4 の硬さ（例えば、デュロメータ硬さ）は、半硬化樹脂から構成される厚さ調整層 1 3 の硬さ（例えば、デュロメータ硬さ）より高くなる。硬化樹脂層 1 4 の硬さは、例えば、デュロメータ硬さ D 4 0 以上である。この工程の加熱温度は、厚さ調整層 1 3 を形成する際の加熱温度より高い温度である。これにより、厚さ調整層 1 3 に含まれる未反応の重合官能基の少なくとも一部は重合反応する。そのため、硬化反応が進行して厚さ調整層 1 3 は硬化樹脂層 1 4 となる。隣り合う酸化物超電導線材 1 0 の厚さ調整層 1 3 , 1 3 は、互いに接した状態で硬化するため、互いに接合される。

尚、厚さ調整層 1 3 が熱可塑性樹脂から構成される場合は、前述した径調整工程の後の温度下降によって厚さ調整層 1 3 は硬化状態に戻るため、必ずしも硬化工程を行う必要はない。

【 0 0 4 9 】

[ 実施形態の酸化物超電導線材および超電導コイルが奏する効果 ]

酸化物超電導線材 1 0 では、第 2 絶縁被覆層 8 の外面に厚さ調整層 1 3 が形成されている。厚さ調整層 1 3 は低硬度であるため厚さの増減が可能である。そのため、例えば、径調整工程において多層巻きコイル 2 1 を縮径方向に押圧すると、厚さ調整層 1 3 の厚さの減少を伴う多層巻きコイル 2 1 の縮径が可能である。従って、多層巻きコイル 2 1 の径を容易に調整し、設計値に近づけることができる。よって、超電導コイル 1 0 0 の寸法精度を高めることができる。

【 0 0 5 0 】

酸化物超電導線材 1 0 では、超電導コイル 1 0 0 を作製するに際して、巻回の後、そのまま加熱するだけで、厚さ調整層 1 3 の半硬化樹脂が硬化して硬化樹脂層 1 4 となって互いに接合され、酸化物超電導線材 1 0 どうしが固定される。酸化物超電導線材 1 0 は、外部から供給した樹脂を含浸させる必要がないため、超電導コイル 1 0 0 を製造する工程を簡略にできる。よって、超電導コイル 1 0 0 の製造が容易となる。

【 0 0 5 1 】

酸化物超電導線材 1 0 では、厚さ調整層 1 3 は第 2 絶縁被覆層 8 の外面に形成されているため、ガラス繊維などの芯材を熱硬化性樹脂で結合させた半硬化樹脂テープを用いる場合とは異なり、半硬化樹脂の形状を維持するための芯材が不要である。よって、酸化物超電導線材 1 0 の断面積の増大が抑えられ、酸化物超電導線材 1 0 の電流密度の低下が抑制される。

【 0 0 5 2 】

酸化物超電導線材 1 0 は、ガラス繊維などの芯材を有する半硬化樹脂テープを使用する場合に比べて厚さを抑えることができる。そのため、超電導コイル 1 0 0 における酸化物超電導線材 1 0 の巻き数を多くできる。よって、超電導コイル 1 0 0 の磁力を大きくできる。

【 0 0 5 3 】

酸化物超電導線材 1 0 では、第 1 絶縁被覆層 7 に離型処理が施されているため、当該処理面（第 1 絶縁被覆層 7 の内面 7 a と外面 7 b のうち少なくとも一方）と対向面との接着力を小さくできる。そのため、超電導コイル 1 0 0 を冷却して超電導状態で使用する場合、前記処理面と前記対向面との界面で層間剥離を生じやすくすることができる。従って、酸化物超電導線材 1 0 の厚さ方向に作用する剥離力を抑制できる。よって、超電導コイル 1 0 0 において、冷却の際の超電導特性の劣化を抑制できる。

【 0 0 5 4 】

比較形態として、半硬化樹脂層がない酸化物超電導線材を挙げる。この酸化物超電導線材を用いて超電導コイルを作製するには、酸化物超電導線材をコイル状に巻回し、必要に応じてコイルの径を調整する。次いでコイルに樹脂を含浸させ、加熱により樹脂を硬化させる。

比較形態の酸化物超電導線材は層の厚さの増減を許容する構造を持っていないため、コ

10

20

30

40

50



イルの径を調整する工程において、設計値に合わせてコイルの径を調整するのは容易でない。

【 0 0 5 5 】

比較形態の酸化物超電導線材は、半硬化樹脂テープ（プリプレグテープ）と共巻きすることでコイル化してもよい。しかし、プリプレグテープはガラス繊維などの芯材を有するため薄型化が難しい。そのため、コイルの径を設計値に合わせると、プリプレグテープの厚さを原因として、酸化物超電導線材の巻き数が不足し、超電導コイルの作る磁力を大きくすることができない場合がある。

【 0 0 5 6 】

前述の超電導コイル 1 0 0 の製造方法によれば、多層巻きコイル 2 1（図 5 参照）を形成した後、厚さ調整層 1 3（図 1 参照）を硬化させて硬化樹脂層 1 4（図 2 参照）とする。そのため、厚さ調整層 1 3 を硬化させる前に多層巻きコイル 2 1 の径を調整することができる。例えば、多層巻きコイル 2 1 を縮径方向に押圧することによって、その径を容易に調整し、設計値に近づけることができる。よって、超電導コイル 1 0 0 の寸法精度を高めることができる。

【 0 0 5 7 】

[ 酸化物超電導線材 ]（第 2 実施形態）

図 8 は、第 2 実施形態の酸化物超電導線材 1 0 A を模式的に示す断面図である。

酸化物超電導線材 1 0 A は、第 2 絶縁被覆層 8 の外面 8 b に厚さ調整層 1 3（第 1 の厚さ調整層）が形成されるだけでなく、第 2 絶縁被覆層 8 の内面 8 a に第 2 の厚さ調整層 1 5 が形成されている点で、図 1 に示す酸化物超電導線材 1 0 と異なる。酸化物超電導線材 1 0 A は、図 1 に示す酸化物超電導線材 1 0 と同様の効果を奏する。酸化物超電導線材 1 0 A は、第 2 の厚さ調整層 1 5 によって、コイルの径調整工程においてコイルの縮径が可能である。また、コイル化したときの酸化物超電導線材 1 0 A の固定化強度をさらに高めることができる。

【 実施例 】

【 0 0 5 8 】

以下、図 1 に示す酸化物超電導線材 1 0 を用いて作製した超電導コイル 1 0 0 の試験結果について説明する。なお、本発明は以下に示す実施例に限定されない。

【 0 0 5 9 】

（実施例 1 ～ 3）

（酸化物超電導線材の作製工程）

図 1 に示す酸化物超電導線材 1 0 を次のようにして作製した。ハステロイで構成されるテープ状の基材 1（厚さ 7 5  $\mu\text{m}$ ）の一方の面に中間層 2 を形成した。中間層 2 は、拡散防止層、ベッド層、配向層およびキャップ層をこの順に積層した構成である。中間層 2 の上に、G d B C O で構成される酸化物超電導層 3 を形成した。酸化物超電導層 3 の上に、A g で構成される保護層 4 を形成した。これにより、超電導積層体 5 を得た。超電導積層体 5 の外面に、銅で構成される安定化層 6（厚さ 2 0  $\mu\text{m}$ ）を電界めっきにより形成し、幅 4 mm の超電導線材本体 9 を得た。

【 0 0 6 0 】

第 1 のポリイミドテープ（厚さ 1 2 . 5  $\mu\text{m}$ ）と、第 2 のポリイミドテープ（厚さ 1 2 . 5  $\mu\text{m}$ ）とを用意した。第 1 のポリイミドテープは、両面にそれぞれフッ素樹脂製のコーティング層 1 1 , 1 2（それぞれ厚さ 1 . 3  $\mu\text{m}$ ）を有する。第 2 のポリイミドテープは、一方の面に厚さ調整層 1 3（厚さ 1 0  $\mu\text{m}$ ）を有する。第 1 のポリイミドテープと第 2 のポリイミドテープとを、超電導線材本体 9 の外面に 2 重突き合わせ巻きした。「2 重突き合わせ巻き」とは、それぞれ突き合わせ巻きした 2 枚のテープ（第 1 のポリイミドテープと第 2 のポリイミドテープ）を重ねて配置する巻き方である。「突き合わせ巻き」とは、テープを、幅方向の端部同士が重ならないように側面を突き合わせて螺旋状に巻き付ける巻き方である。

【 0 0 6 1 】

10

20

30

40

50

第1のポリイミドテープと第2のポリイミドテープとは、第1のポリイミドテープが内層側であって、第2のポリイミドテープが外層側となるように配置した。第2のポリイミドテープは、厚さ調整層13が外周面側となるように配置した。第1のポリイミドテープは第1絶縁被覆層7となった。第2のポリイミドテープは第2絶縁被覆層8となった。このようにして、酸化物超電導線材10を得た。

【0062】

(巻回工程)

図4に示す巻棒20を用意した。巻棒20は矩形状であって、4つの角部20aはアーチ形状(湾曲凸状)となっている。短径L1は38.6mmである。長径L2は155mmである。角部20aの曲率半径は8.5mmである。

図5に示すように、酸化物超電導線材10を巻棒20に121ターン巻き付けることによって、多層巻きコイル21を形成した。

【0063】

(径調整工程)

図6に示すように、多層巻きコイル21の短径L3を設計値(83.6mm)に近づけるべく、型枠(図示略)を用いて長辺部21A, 21Aに互いに近づく方向の押圧力(0.5MPa)を加えた。

【0064】

(硬化工程)

図7に示すように、ヒータ22を用いて、120、5時間の条件で多層巻きコイル21を加熱することで超電導コイル100(図2および図3参照)を作製した。多層巻きコイル21を加熱する際には、径調整工程で用いた型枠により多層巻きコイル21に押圧力を加えながら加熱を行った。同じ手順によって、超電導コイル100を計3つ作製した。3つの超電導コイル100をそれぞれ実施例1~3とする。

実施例1~3の超電導コイル100の短径L3を測定し、測定値と設計値との差(測定値-設計値)を算出した。結果を表1に示す。

【0065】

(比較例1~3)

厚さ調整層がないこと以外は実施例1~3と同様の酸化物超電導線材を作製した。この酸化物超電導線材を用いて、実施例1~3と同様にして多層巻きコイルを作製した。

型枠を用いて一対の長辺部を互いに近づく方向に押圧した状態で、多層巻きコイルを減圧容器に入れ、減圧下で多層巻きコイルにエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂を含浸させた多層巻きコイルを実施例1~3と同様の条件で加熱し、超電導コイルを得た。同じ手順によって、超電導コイルを計3つ作製した。3つの超電導コイルをそれぞれ比較例1~3とする。

比較例1~3の超電導コイルの短径を測定し、測定値と設計値との差(測定値-設計値)を算出した。結果を表1に示す。

【0066】

【表1】

	測定値と設計値との差	平均値
実施例1	+0.09mm	+0.07mm
実施例2	+0.11mm	
実施例3	+0.02mm	
比較例1	+0.83mm	+0.71mm
比較例2	+1.09mm	
比較例3	+0.21mm	

【0067】

表1に示すように、実施例1~3は、測定値と設計値との差(誤差)が、比較例1~3

10

20

30

50

と比べておよそ一桁小さかった。そのため、実施例 1 ~ 3 では、高い寸法精度を実現できることがわかった。

#### 【 0 0 6 8 】

(実施例 4)

図 1 に示す酸化物超電導線材 1 0 を次のようにして作製した。

ハステロイで構成されるテープ状の基材 1 (厚さ 5 0  $\mu\text{m}$ ) の一方の面に中間層 2 を形成した。中間層 2 は、拡散防止層、ベッド層、配向層およびキャップ層をこの順に積層した構成である。中間層 2 の上に、E u B C O で構成される酸化物超電導層 3 を形成した。酸化物超電導層 3 の上に、A g で構成される保護層 4 を形成した。これにより、超電導積層体 5 を得た。超電導積層体 5 の外面に、銅で構成される安定化層 6 を電界めっきにより形成し、幅 4 m m の超電導線材本体 9 を得た。

10

#### 【 0 0 6 9 】

第 1 のポリイミドテープ (厚さ 1 2 . 5  $\mu\text{m}$ ) と、第 2 のポリイミドテープ (厚さ 1 2 . 5  $\mu\text{m}$ ) とを用意した。第 1 のポリイミドテープは、両面にそれぞれフッ素樹脂製のコーティング層 1 1 , 1 2 (それぞれ厚さ 1 . 2 5  $\mu\text{m}$ ) を有する。第 2 のポリイミドテープは、一方の面に厚さ調整層 1 3 (厚さ 2 5  $\mu\text{m}$ ) を有する。第 1 のポリイミドテープと第 2 のポリイミドテープとを、超電導線材本体 9 の外面に 2 重突き合わせ巻きした。第 1 のポリイミドテープと第 2 のポリイミドテープとは、第 1 のポリイミドテープが内層側であって、第 2 のポリイミドテープが外層側となるように配置した。第 2 のポリイミドテープは、厚さ調整層が外周面側となるように配置した。第 1 のポリイミドテープは第 1 絶縁被覆層 7 となり、第 2 のポリイミドテープは第 2 絶縁被覆層 8 となった。このようにして、酸化物超電導線材 1 0 を得た。

20

#### 【 0 0 7 0 】

酸化物超電導線材 1 0 (長さ 1 0 0 m) を円形状の巻枠 (外径 5 0 m m) に巻線し、1 2 0 、 5 時間の条件で加熱することで超電導コイルを作製した。この超電導コイルを液体窒素により冷却した。臨界電流特性を測定したところ、臨界電流値は 9 8 A であり、酸化物超電導線材 1 0 の劣化はみられず、十分な臨界電流特性が得られた。n 値は 3 5 であった。これは、フッ素樹脂製のコーティング層 1 1 , 1 2 が設けられていることにより、酸化物超電導線材 1 0 に加わる剥離力が抑制され、酸化物超電導層 3 に生じるダメージを防ぐことができたためであると考えられる。

30

#### 【 0 0 7 1 】

(比較例 4)

コーティング層がない第 1 のポリイミドテープを用いること以外は実施例 4 と同様にして酸化物超電導線材を作製した。この酸化物超電導線材を用いて超電導コイルを作製した。実施例 4 と同様にして臨界電流特性を測定したところ、臨界電流値は 3 A であり、実施例 4 よりも低い臨界電流特性となった。これは、コーティング層が形成されていないため、酸化物超電導線材に加わる剥離力によって酸化物超電導線材が劣化したためであると考えられる。n 値は 2 であった。

#### 【 0 0 7 2 】

測定結果より、実施例 4 は、比較例 4 に比べて臨界電流特性に優れていることが確認された。

40

#### 【 0 0 7 3 】

以上、本発明を好適な実施形態に基づいて説明してきたが、本発明は上述の実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の改変が可能である。例えば、離型処理は、フッ素樹脂を含むコーティング層を対象面に形成する処理に限定されない。例えば、パラフィン、グリース、シリコンオイル等を含むコーティング層を形成する処理を採用してもよい。

#### 【 0 0 7 4 】

超電導コイルの形状は特に限定されない。超電導コイルは、円形状、レーストラック状、矩形状などであってよい。超電導コイルの形状によっては、酸化物超電導線材を巻回す

50

る際に酸化物超電導線材に加える張力によって、コイルの径を調整することもできる。例えば、円形状の超電導コイルは、酸化物超電導線材に加える張力によってコイルの径を調整しやすい。巻回の際に酸化物超電導線材に加える張力が高いと、コイルの径は小さくなりやすい。

【0075】

図1に示す酸化物超電導線材10は安定化層6を備えているが、酸化物超電導線材は、安定化層がない構成も可能である。その場合、超電導線材本体は、例えば、基材と中間層と酸化物超電導層と保護層とを備える超電導積層体である(図1における超電導積層体5を参照)。第1絶縁被覆層と第2絶縁被覆層とは「絶縁層」と総称してもよい。前述の実施形態の酸化物超電導線材は、第1絶縁被覆層の内面と外面のうち少なくとも一方に離型処理が施されているが、酸化物超電導線材は、第1絶縁被覆層の内面と外面のいずれにも離型処理が施されていない構成であってもよい。

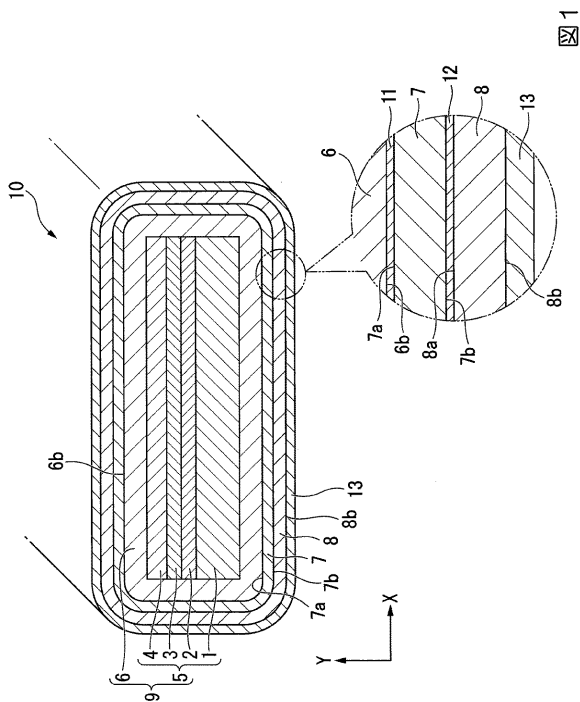
10

【符号の説明】

【0076】

1 基材、3 酸化物超電導層、5 超電導積層体、6 安定化層、7 第1絶縁被覆層、7a 内面、7b 外面、8 第2絶縁被覆層、8a 内面、8b 外面、9 超電導線材本体、10, 10A 酸化物超電導線材、11, 12 コーティング層、13 厚さ調整層、14 硬化樹脂層、15 第2の厚さ調整層、21 多層巻きコイル、100 超電導コイル。

【図1】



【図2】

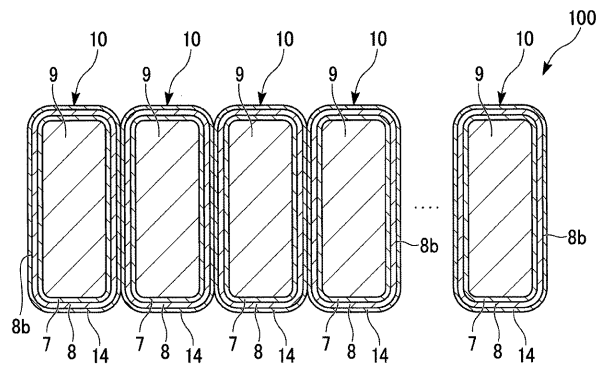


図2

【図3】

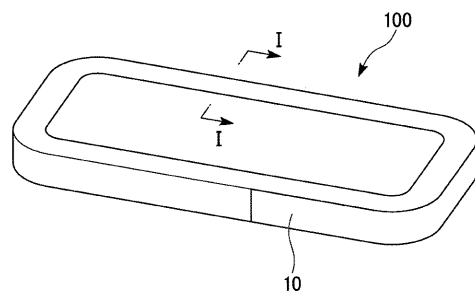
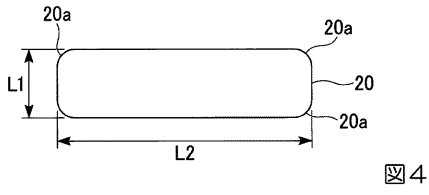
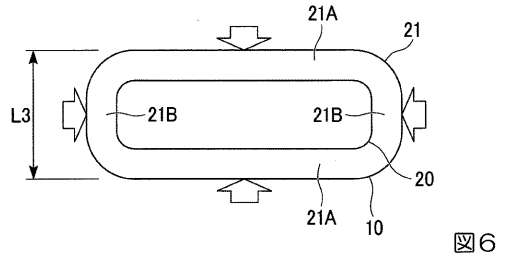


図3

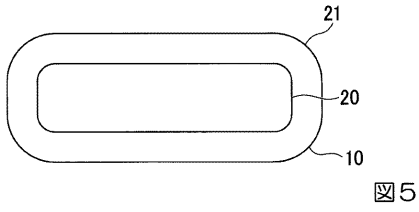
【 図 4 】



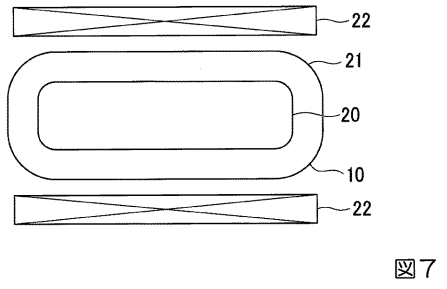
【 図 6 】



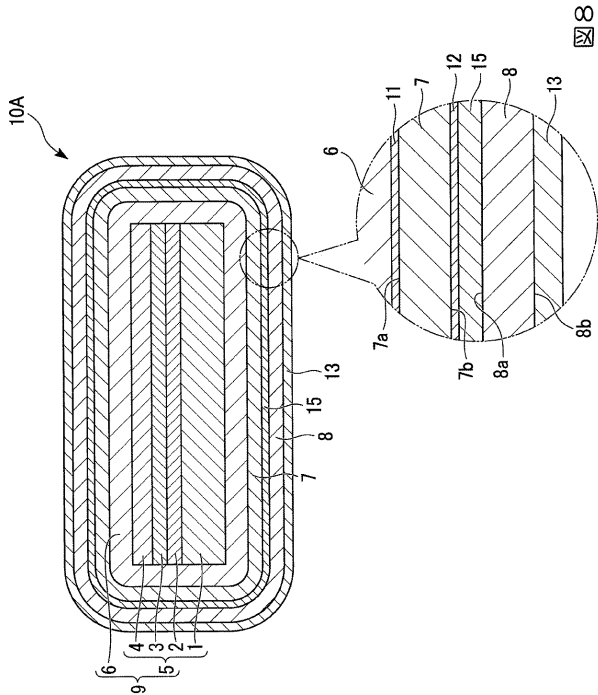
【 図 5 】



【 図 7 】



【 図 8 】



---

フロントページの続き

(74)代理人 100160093

弁理士 小室 敏雄

(74)代理人 100169764

弁理士 清水 雄一郎

(72)発明者 藤田 真司

千葉県佐倉市六崎1-4-40 株式会社フジクラ 佐倉事業所内

(72)発明者 土屋 清澄

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内

(72)発明者 寺島 昭男

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内

(72)発明者 菊池 章弘

茨城県つくば市千現一丁目2番地1 国立研究開発法人物質・材料研究機構内

Fターム(参考) 5G321 AA01 AA02 AA04 BA03 CA04 CA05 CA15 CA18 CA24 CA27

CA38 CA41 CA48 CA50 CA99 CB07 DA10