

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6058577号
(P6058577)

(45) 発行日 平成29年1月11日(2017.1.11)

(24) 登録日 平成28年12月16日(2016.12.16)

(51) Int.Cl.		F I			
HO 1 B	12/06	(2006.01)	HO 1 B	12/06	Z A A
HO 1 F	6/04	(2006.01)	HO 1 F	6/04	
HO 1 F	6/06	(2006.01)	HO 1 F	6/06	1 4 0

請求項の数 10 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2014-58216 (P2014-58216)	(73) 特許権者	000003078
(22) 出願日	平成26年3月20日 (2014.3.20)		株式会社東芝
(65) 公開番号	特開2015-185244 (P2015-185244A)		東京都港区芝浦一丁目1番1号
(43) 公開日	平成27年10月22日 (2015.10.22)	(74) 代理人	110001380
審査請求日	平成28年2月15日 (2016.2.15)		特許業務法人東京国際特許事務所
		(72) 発明者	岩井 貞憲
			東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
		(72) 発明者	宮崎 寛史
			東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
		(72) 発明者	田崎 賢司
			東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高温超電導線材および高温超電導コイル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

テープ形状の金属材料からなる基板と、

テープ長さ方向に沿って細線化されるとともに前記基板のテープ幅方向に複数並置される超電導層と、

前記超電導層の少なくとも上面に積層されて前記超電導層の劣化を防止する保護層と、

積層された前記基板、前記超電導層および前記保護層の表面を全周にわたって被覆する安定化層と、を備え、

細線化されてできる前記超電導層の素線間は、前記保護層で充填されることを特徴とする高温超電導線材。

【請求項 2】

細線化されてできる前記超電導層の素線間は、前記安定化層で充填されることを特徴とする請求項 1 に記載の高温超電導線材。

【請求項 3】

前記安定化層の形成には、電気めっき法を用いることを特徴とする請求項 2 に記載の高温超電導線材。

【請求項 4】

前記保護層の形成には、電気めっき法を用いることを特徴とする請求項 3 に記載の高温超電導線材。

【請求項 5】

請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の高温超電導線材を少なくとも一部に用いた高温超電導コイル。

【請求項 6】

前記高温超電導線材および超電導層が細線化されていない非細線化高温超電導線材が電気的に接続され巻回して形成されることを特徴とする請求項 5 に記載の高温超電導コイル。

【請求項 7】

巻回中心軸方向に沿って積層された複数のパンケーキコイルを備え、

前記複数の前記パンケーキコイルの少なくとも 1 つは前記高温超電導線材からなることを特徴とする請求項 5 または請求項 6 に記載の高温超電導コイル。

【請求項 8】

前記高温超電導線材は、前記巻回中心軸方向に沿った端部の前記パンケーキコイルに用いられることを特徴とする請求項 7 に記載の高温超電導コイル。

【請求項 9】

隣接する前記パンケーキコイルの接触面に差し込まれて冷熱源の冷熱を前記パンケーキコイルに伝導させるコイル冷却部を備えることを特徴とする請求項 7 または請求項 8 に記載の高温超電導コイル。

【請求項 10】

前記コイル冷却部は、前記高温超電導線材よりも熱伝導率が高いことを特徴とする請求項 9 に記載の高温超電導コイル。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、発生磁場の精度を向上させた高温超電導線材および高温超電導コイルに関する。

【背景技術】

【0002】

イットリウム系（RE系）の高温超電導線材（以下、単に「線材」という）は、従来の低温超電導線材に比べて高い外部磁場中でも高い臨界電流密度特性をもつ。

よって、次世代の超電導線材として様々な分野での応用が期待されている。

【0003】

例えばこの線材を巻回してコイルにして、超電導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）、核磁気共鳴装置（NMR）または磁気共鳴画像診断装置（MRI）などの種々の超電導応用機器に用いることができる。

【0004】

一般にRE系の線材は、RE系酸化物超電導層、保護金属層および安定化層を含む多層構造をとる。

数mm程度の幅をもつテープ形状にして使用されるこのRE系の線材は、その各々の層が非常に剥離しやすい。

よって、超電導特性はこの剥離やその他の応力によるクラックなどで容易に劣化する。

【0005】

ところで、この線材をコイルにして外部磁場を発生させると、線材は外部磁場の変化を打ち消すように線材の内部に遮蔽電流を生じさせる。

線材が上述のようなテープ形状をしていると、テープ断面のアスペクト比から、遮蔽電流は、テープ面垂直方向の外部磁場に対するものが大部分となる。

【0006】

線材が超電導体であるため、この遮蔽電流の減衰は非常に遅い。

さらに、遮蔽電流は、発生磁場とは逆方向のいわゆる遮蔽外部磁場を発生させて、外部磁場の設計値を低減させるとともに、時間的な安定度および均一度を低下させてしまう。

【0007】

そこで、テープ形状に沿って超電導層を細線化して、遮蔽電流の経路を分断して低減す

10

20

30

40

50

る技術が提案されてきた（例えば、特許文献 1 または特許文献 2 参照）。

【0008】

また、このように細線化された超電導層の各素線および素線間のスリット溝の表面に安定化層を配置した線材も提案されている（例えば、特許文献 3 参照）。

このように素線およびスリット溝の表面に安定化層を配置することで、素線を通る電流の一部が他の素線へ流れる転流が可能となり、素線間の電流量の偏りである偏流を低減することができる。

【0009】

さらに、形成したスリット溝を含めてハンダ等の接合部材で覆うことで、各素線および安定化層を電氣的に接続する技術も提案されている（例えば、特許文献 4 参照）。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献 1】特許第 4 6 5 7 9 2 1 号公報

【特許文献 2】特許第 4 7 7 7 7 4 9 号公報

【特許文献 3】特許第 4 9 9 6 5 1 1 号公報

【特許文献 4】特許第 4 8 6 4 7 8 5 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

20

しかしながら、上述した従来の技術では、素線となって並置される超電導層は互いに絶縁物などで電氣的に分離される。

よって、線材はこれらの素線の並列導体となり、素線間のインダクタンスが僅かにでもずれると、容易に偏流が生じてしまっていた。

【0012】

つまり、容易に素線間の電流分配が不均一となって発生磁場を攪乱させ、設計通りの磁場分布を得ることができないという課題があった。

また、偏流によって線材の電氣的負荷が偏在することで、線材全体における臨界電流値も不均一となり、超電導性を不安定にさせていた。

【0013】

30

偏流を防止するために、素線を常導電性のハンダ等の接合部材で覆うと、層数が増加することとなり、通常の線材に比べて線材全体に占める電流密度が低下する。

すなわち、素線をハンダなどの接合部材で覆うことで、高電流密度という高温超電導体の優位性が損なわれてしまう。

【0014】

本発明は、このような事情を考慮してなされたもので、超電導層の細線化に起因する電流密度の低下を防止するとともに設計通りの磁場分布を得ることが可能な高温超電導線材および高温超電導コイルを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0015】

40

本実施形態にかかる高温超電導線材は、テープ形状の金属材からなる基板と、テープ長さ方向に沿って細線化されるとともに前記基板のテープ幅方向に複数並置される超電導層と、前記超電導層の少なくとも上面に積層されて前記超電導層の劣化を防止する保護層と、積層された前記基板、前記超電導層および前記保護層の表面を全周にわたって被覆する安定化層と、を備え、細線化されてできる前記超電導層の素線間は、前記保護層で充填されるものである。

【発明の効果】

【0016】

本発明により、超電導層の細線化に起因する電流密度の低下を防止するとともに設計通りの磁場分布を得ることが可能な高温超電導線材および高温超電導コイルが提供される。

50

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】第1実施形態にかかる高温超電導線材のテープ幅方向の断面図。

【図2】第2実施形態にかかる高温超電導線材のテープ幅方向の断面図。

【図3】(A)は第3実施形態にかかる高温超電導コイルの一例を示す図、(B)は(A)の高温超電導コイルのI-I断面を示す図。

【図4】第3実施形態にかかる高温超電導コイルの一部に使用される細線化されていない超電導線材の断面図。

【図5】第3実施形態にかかる高温超電導コイルの変形例の切欠き斜視図。

【図6】各々のパンケーキコイルにおける外部磁場の垂直成分の分布を示す図。 10

【図7】(A)は第3実施形態にかかる高温超電導コイルの変形例の上面図、(B)は(A)のII-II断面の断面図。

【図8】第3実施形態にかかる高温超電導コイルの変形例の概略斜視図。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明の実施形態を添付図面に基づいて説明する。

【0019】

(第1実施形態)

図1は、第1実施形態にかかる高温超電導線材10a(10)(以下、単に「線材10a」という)のテープ幅方向の断面図である。 20

【0020】

第1実施形態にかかる線材10aは、図1に示されるように、テープ形状の金属材料からなる基板11と、テープ長さ方向に沿って細線化されるとともに基板11のテープ幅方向に複数並置される超電導層12と、超電導層12の少なくとも上面に積層されて超電導層12の劣化を防止する保護層13と、積層された基板11、超電導層12および保護層13の表面を全周にわたって被覆する安定化層14と、を備える。

なお、第1実施形態では、細線化されてできる超電導層12の素線間は、安定化層14で充填される。

【0021】

基板11は、テープ形状のステンレスまたは銅などの高強度の金属材料からなる。 30

この基板11に蒸着、めっきまたは塗布などで複数の層を積層して線材10aを形成する。

【0022】

基板11には、超電導層12の熱収縮に起因する熱歪みを防止する中間層15が形成される。

この中間層15を基板11の表面に配向させるマグネシウムなどからなる配向層(図示せず)を形成してもよい。

そして、中間層15の上に超電導層12が積層される。

【0023】

超電導層12は、テープ長さ方向に沿って細線化されるとともに基板11のテープ幅方向に複数並置される。 40

超電導層12は、例えば $BSCCO(Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10})$ または $REBCO((RE)Ba_2Cu_3O_7)$ 、RE:希土類)などの銅酸化物系の高温超電導体から構成される。なお、超電導層12は、例えば MgB_2 など、高温超電導体から構成されれば種類は上述のものに限定されない。

【0024】

保護層13は、超電導層12の少なくとも上面に積層されて超電導層12の劣化を防止する。

第1実施形態では、保護層13は、超電導層12とともに細線化されて超電導層12の 50

上面に配置される。

保護層 1 3 は、銀、金または白金などから組成され、超電導層 1 2 に含まれる酸素の拡散などによる劣化から超電導層 1 2 を保護している。

【 0 0 2 5 】

安定化層 1 4 は、積層された基板 1 1、超電導層 1 2 および保護層 1 3 の表面を全周にわたって被覆する。

そして、安定化層 1 4 は、超電導層 1 2 および保護層 1 3 が細線化されることでこれらの素線間に形成されるスリット溝 1 6 に充填される。

安定化層 1 4 には、銅またはアルミニウムなどの良伝導性の金属が用いられる。

【 0 0 2 6 】

従来では、超電導層 1 2 を細線化することで発生する偏流の課題に対して、素線 1 2 a どうしをハンダ付けすることで解消していた。

つまり、素線 1 2 a どうしをハンダ付けして、素線 1 2 a に対するハンダの抵抗比に反比例した微小な電流を、電流量の少ない素線 1 2 a へ転流させていた。

【 0 0 2 7 】

ハンダは有限の電気抵抗を有する常電導金属であるため、転流する遮蔽電流は微小である。

よって、有限の電気抵抗を有する常電導金属で電氣的に接続しても、遮蔽電流は、十分に低減される。

【 0 0 2 8 】

しかし、上述したように、ハンダの分だけ層が増加して線材 1 0 a が厚くなり、線材 1 0 a の電流密度が低下して、高温超電導体の優位性が損なわれるという課題があった。

そこで、ハンダによる素線 1 2 a の接続に替えて、安定化層 1 4 でスリット溝 1 6 を充填して、充填された安定化層 1 4 を介した転流を発生させる。

つまり、安定化層 1 4 でスリット溝 1 6 を充填することで、線材 1 0 a を構成する層を増加させることなく、偏流の発生を軽減させることができる。

【 0 0 2 9 】

しかし、線材 1 0 a を構成する各々の層は、非常に剥離しやすいことが知られている。

安定化層 1 4 もまた、容易に剥離して素線 1 2 a どうしを絶縁状態にしてしまう。

そこで、保護層 1 3 の上面および基板 1 1 の下面に積層した安定化層 1 4 どうしを接続して、超電導層 1 2、保護層 1 3 および基板 1 1 の表面を全周にわたって被覆する。

このように被覆することで、安定化層 1 4 が剥離して素線 1 2 a どうしを絶縁状態にしてしまうことを防止する。

また、このように表面を全周にわたって被覆することで、剥離方向の全体的な物理強度も向上する。

【 0 0 3 0 】

スリット溝 1 6 の形状に沿って確実に均一に固着することができることから、安定化層 1 4 の形成には、電気めっき法を用いることが望ましい。

ただし、例えば、スリット溝 1 6 の形状に合わせた凹凸部を備えた保護層側半分のピースと、基板 1 1 の形状に合わせた凹部のみを備えた基板側半分のピースと、を嵌め合わせて一つの安定化層 1 4 を形成させてもよい。

なお、基板 1 1 を安定化層 1 4 と同一の組成として、安定化層 1 4 および基板 1 1 を一体化してもよい。

【 0 0 3 1 】

以上のように、第 1 実施形態にかかる線材 1 0 a によれば、超電導層 1 2 の細線化に起因する電流密度を低下させることなく、素線間での偏流を低減することができる。

【 0 0 3 2 】

素線間での偏流を低減させることによって、設計通りの磁場分布を得るとともに線材 1 0 a の電氣的負荷の偏在を防止することができる。

【 0 0 3 3 】

10

20

30

40

50

さらに、線材 10 a の両側面（図 3（B）の I - I 断面の両側面）においても、安定化層 14 が形成されるため、この両側面を経由した転流も可能となる。

すなわち、テープ幅方向の両端の素線間で転流させることで、素線間の偏流をより低減することができる。

【0034】

（第 2 実施形態）

図 2 は、第 2 実施形態にかかる線材 10 b（10）のテープ幅方向の断面図である。

【0035】

第 2 実施形態にかかる線材 10 b は、図 2 に示されるように、細線化されてできる超電導層 12 の素線間（スリット溝 16）は、保護層 13 で充填される。

10

銀、金または白金などから組成される保護層 13 は、銅またはアルミニウムなどから組成される安定化層 14 に比べて、一般的に導電性が高い。

【0036】

そこで、例えば、偏流の度合いが高い場合に使用される線材 10 b として、保護層 13 でスリット溝 16 を充填する。

スリット溝 16 の形状に沿って確実に均一に固着することができることから、保護層 13 の形成には、電気めっき法を用いることが望ましい。

【0037】

なお、安定化層 14 に替えて保護層 13 でスリット溝 16 を充填すること以外は、第 2 実施形態は第 1 実施形態と同じ構造および動作手順となるので、重複する説明を省略する。

20

図面においても、共通の構成または機能を有する部分は同一符号で示し、重複する説明を省略する。

【0038】

このように、第 2 実施形態にかかる線材 10 b によれば、第 1 実施形態の効果に加え、隣接する素線間の電気抵抗がより低くなるため、隣接する素線間の転流がより容易となり、素線間の偏流をより低減することができる。

【0039】

素線間での偏流を低減させることによって、設計通りの磁場分布を得ることができる。

また、偏流を低減させることで、線材 10 b への電氣的負荷を防止することができる。

30

【0040】

（第 3 実施形態）

図 3（A）は、第 3 実施形態にかかる高温超電導コイル 30（以下、単に「超電導コイル 30」という）の一例を示す図、図 3（B）は、図 3（A）の超電導コイル 30 の I - I 断面を示す図である。

【0041】

図 3 は、線材を同心円状に巻回した、いわゆるパンケーキコイル P に、線材 10 を適用した一例を示している。

また、図 3（B）に示される外部磁場 B は、主に自他のパンケーキコイル P による発生磁場の総和からなるものである。

40

【0042】

図 4 は、第 3 実施形態にかかる超電導コイル 30 の一部に使用される細線化されていない非細線化高温超電導線材 20 の断面図である。

【0043】

第 3 実施形態にかかる線材 10 は、図 3（A）、（B）に示されるように、巻回されて超電導コイル 30 にされる。

線材 10 は、スリット溝 16 の分だけ、線材 10 の断面積における超電導層 12 の占める割合が小さくなっている。

【0044】

よって、線材 10 は、図 4 に示されるスリット溝 16 を備えない従来の非細線化高温超

50

電導線材 20 に比べて、電流密度が小さくなる。

さらに、線材 10 は、スリット加工の分だけ工数が増加して、非細線化高温超電導線材 20 に比べて高価なものとなる。

【0045】

そこで、図 3 (B) に示されるように、外部磁場 B が侵入しやすく、遮蔽電流が発生しやすい部分にのみ線材 10 を配置する。

前述したように、遮蔽電流は、テープ断面のアスペクト比から、テープ面垂直方向の外部磁場 B に対するものが大部分となる。

よって、図 3 (B) に示されるように、外部磁場 B の垂直成分が大きくなる、パンケーキコイル P の中腹部に線材 10 を配置することが望ましい。

10

【0046】

線材 10 をこの中腹部に配置させるには、非細線化高温超電導線材 20 に線材 10 をハンダなどで接続して、一つの超電導線材として巻回する方法がある。

さらに、線材 10 のパンケーキコイル P_a の内径および外径をそれぞれ外径または内径とする非細線化高温超電導線材 20 のパンケーキコイル P_b , P_c を嵌め込んでもよい。

【0047】

また、図 5 は、第 3 実施形態にかかる超電導コイル 30 の変形例の切欠き斜視図である。

パンケーキコイル P_n は、図 5 に示されるように、中心軸 C に (巻回中心軸方向に) 沿って積層されて用いられることがある。

20

【0048】

ここで、図 6 は、各々のパンケーキコイル P_n (n = 1 ~ 4) における外部磁場 B の垂直成分の分布を示す図である。

図 6 から、積層されるパンケーキコイル P_n は、中心軸 C に沿って内側に位置するほど、外部磁場 B のテープ面垂直成分が小さく、遮蔽電流の影響が小さいことがわかる。

【0049】

そこで、線材 10 は、パンケーキコイル P₁ (P₄) など、中心軸 C に沿った端部近傍のものに用いられるのが望ましい。

そして、外部磁場 B のテープ面垂直成分が少ない中心軸 C に沿った内側のパンケーキコイル P_n (n = 2, 3) には、スリット溝 16 を備えない非細線化高温超電導線材 20 を用いる。

30

このように、超電導コイル 30 におけるパンケーキコイル P の位置によっても、線材 10 および非細線化高温超電導線材 20 を使い分けることが望ましい。

【0050】

なお、図 3 (B) の外部磁場 B の形状は、典型的な形状を例示したもので、超電導コイル 30 の形状または他の部材によって、変化する。

よって、線材 10 が配置される位置は、外部磁場 B の形状によって、適宜決定される。

必要な場合は、超電導コイル 30 のすべてを線材 10 のみで構成させてもよい。

【0051】

また、隣接するパンケーキコイル P の接触面には、冷熱源 23 の冷熱をパンケーキコイル P に伝導させるコイル冷却部 22 が差し込まれる。

40

コイル冷却部 22 には、線材 10 よりも熱伝導率が高い素材が選択されて、冷熱を接触面へ伝導させて、冷却が容易でない内部のパンケーキコイル P も確実に冷却する。

【0052】

このように、第 3 実施形態にかかる線材 10 によれば、第 1 実施形態の効果を備えた超電導コイル 30 を提供することができる。

さらに外部磁場 B の垂直成分の大きい部分に限定的に用いることで、超電導コイル 30 の全体として安価で高い電流密度に維持することができる。

【0053】

また、コイル冷却部 22 で超電導コイル 30 を確実に均等に冷却することで、運転時に

50

発生する温度差を軽減させることができる。

つまり、発熱による局所的な臨界電流密度の低下を軽減することで、発生磁場を安定させることができる。

【 0 0 5 4 】

以上述べた少なくとも一つの実施形態の線材 1 0 および超電導コイル 3 0 によれば、超電導層 1 2 の細線化に起因する電流密度の低下を防止するとともに、設計通りの磁場分布を得ることが可能となる。

さらに、電氣的負荷の偏在を防止することで、超電導コイル 3 0 の超電導性を安定化させることも可能となる。

【 0 0 5 5 】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。

これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更、組み合わせを行うことができる。

これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

【 0 0 5 6 】

例えば、図 3 (A) では、線材 1 0 が適用される超電導コイル 3 0 として、パンケーキコイル P を例示した。

しかし、適用できる超電導コイル 3 0 は、パンケーキコイル P に限定されない。

【 0 0 5 7 】

例えば、線材 1 0 は、図 7 (A) の上面図および図 7 (B) の I I - I I 断面 (図 7 (A)) の断面図で示される歪曲した巻棒 2 4 とともに曲面 2 5 に配置される鞍型の超電導コイル 3 0 にも適用できる。

また、線材 1 0 は、非円形に巻きまわしたレーストラック型、鞍型、楕円または図 8 で示されるソレノイド型の超電導コイル 3 0 などにも適用できる。

【 符号の説明 】

【 0 0 5 8 】

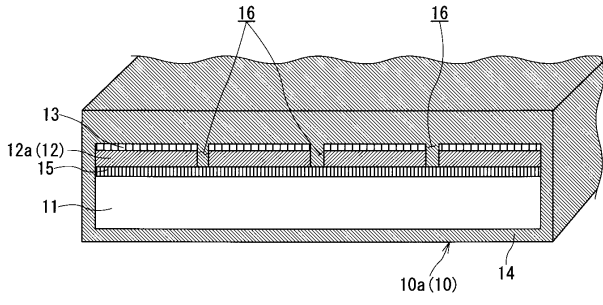
1 0 (1 0 a , 1 0 b) ... 高温超電導線材 (線材)、1 1 ... 基板、1 2 (1 2 a) ... 超電導層 (素線)、1 3 ... 保護層、1 4 ... 安定化層、1 5 ... 中間層、1 6 ... スリット溝、2 0 ... 非細線化高温超電導線材、2 2 ... コイル冷却部、2 3 ... 冷熱源、2 4 ... 巻棒、2 5 ... 曲面、3 0 ... 高温超電導コイル (超電導コイル)、B ... 外部磁場、C ... 中心軸、P (P_n (n = 1 ~ 4) ; P_a , P_b , P_c) ... パンケーキコイル。

10

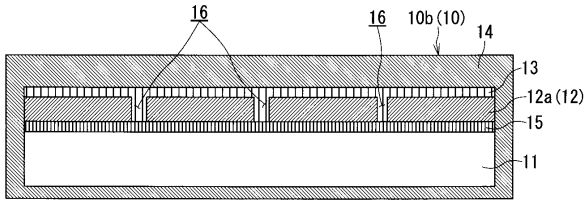
20

30

【図1】

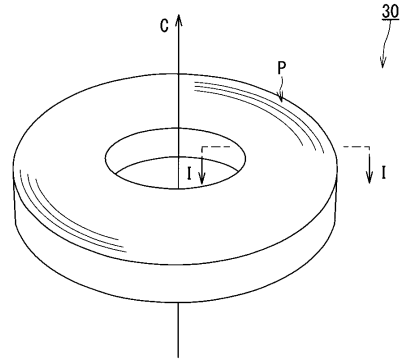


【図2】

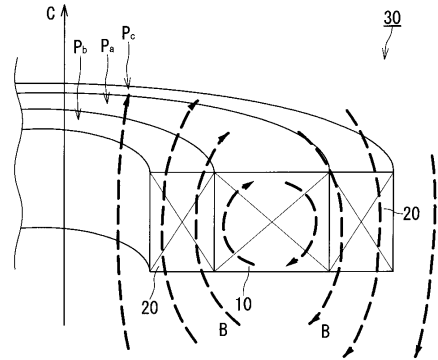


【図3】

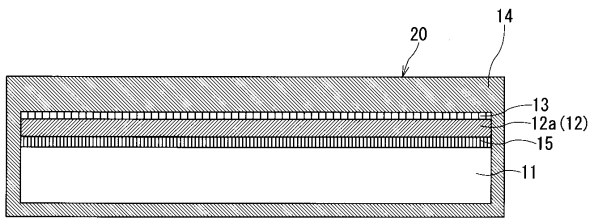
(A)



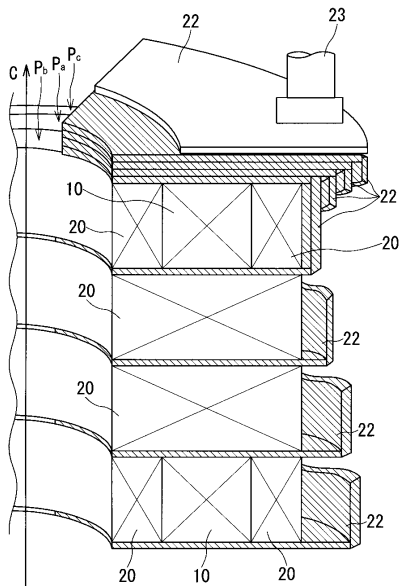
(B) I-I断面



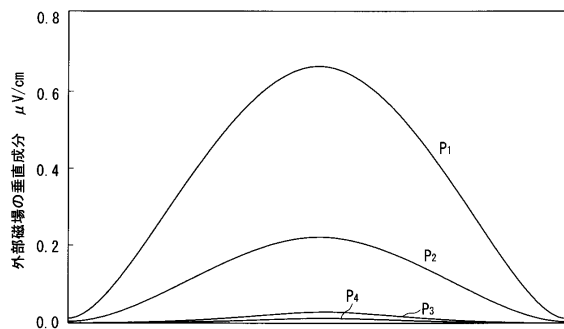
【図4】



【図5】

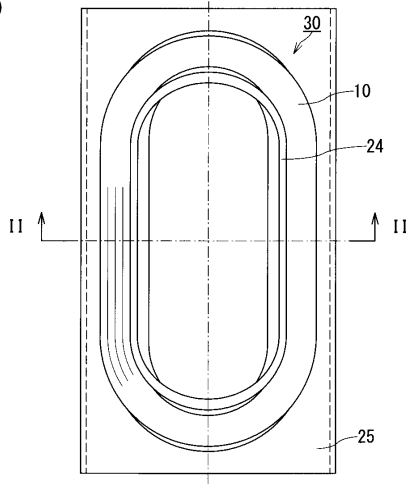


【図6】

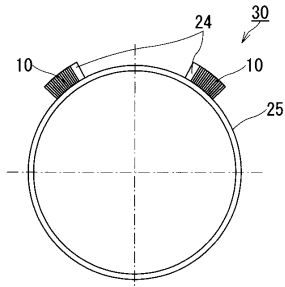


【 図 7 】

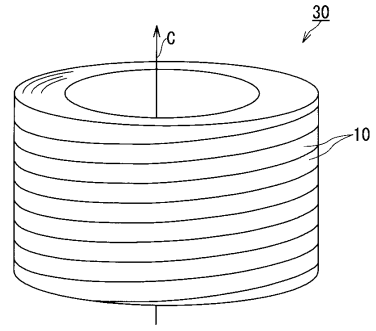
(A)



(B) II-II断面



【 図 8 】



フロントページの続き

(72)発明者 石井 祐介
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 和田 財太

(56)参考文献 特表2011-522380(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01B 12/00

H01B 13/00

H01F 6/00