

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7280274号
(P7280274)

(45)発行日 令和5年5月23日(2023.5.23)

(24)登録日 令和5年5月15日(2023.5.15)

(51)国際特許分類	F I			
H 0 1 F 6/06 (2006.01)	H 0 1 F	6/06	1 2 0	
G 2 1 B 1/05 (2006.01)	H 0 1 F	6/06	1 1 0	
G 2 1 B 1/11 (2006.01)	G 2 1 B	1/05		
G 2 1 K 5/04 (2006.01)	G 2 1 B	1/11	A	
G 2 1 K 1/00 (2006.01)	G 2 1 K	5/04	D	
請求項の数 43 (全29頁) 最終頁に続く				

(21)出願番号	特願2020-541677(P2020-541677)	(73)特許権者	512317995 トカマク エナジー リミテッド イギリス国 オーエックス14 4エス ディー オックスフォードシャー アピ ン ミルトン ブルック ドライブ 173
(86)(22)出願日	平成31年1月31日(2019.1.31)	(74)代理人	100083806 弁理士 三好 秀和
(65)公表番号	特表2021-513219(P2021-513219 A)	(74)代理人	100095500 弁理士 伊藤 正和
(43)公表日	令和3年5月20日(2021.5.20)	(74)代理人	100111235 弁理士 原 裕子
(86)国際出願番号	PCT/GB2019/050275	(74)代理人	100195257 弁理士 大淵 一志
(87)国際公開番号	WO2019/150123	(72)発明者	スレード、 ロバート イギリス国 オーエックス14 4エス ディー
(87)国際公開日	令和1年8月8日(2019.8.8)		
審査請求日	令和3年12月27日(2021.12.27)		
(31)優先権主張番号	1801621.2		
(32)優先日	平成30年2月1日(2018.2.1)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		
(31)優先権主張番号	1812119.4		
(32)優先日	平成30年7月25日(2018.7.25)		
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 部分絶縁HTSコイル

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

高温超伝導HTS界磁コイルであって、
HTS材料及び金属安定化材を含む複数の巻線と、
部分絶縁層を介して前記巻線の間で電流をシェアすることができるように巻線を分離する部分絶縁層と
を含み、
前記部分絶縁層は、
一方の側を第1の絶縁層で、他方の側を第2の絶縁層でコーティングした導電層を含み、

各絶縁層は、それを通して前記巻線と前記導電層との間に電気的接触を形成することができる1つ以上の窓を有し、
前記第1の絶縁層の窓は、前記第2の絶縁層の窓から前記導電層の平面内でオフセットされている、HTS界磁コイル。

【請求項2】

前記導電層は連続的な導電性細片である、請求項1に記載のHTS界磁コイル。

【請求項3】

前記導電層は複数の領域を含み、各領域は、前記第1の絶縁層内のそれぞれの第1の窓を前記第2の絶縁層内のそれぞれの第2の窓に電気的に接続し、各領域は、前記導電層の平面内で他の領域から電気的に絶縁されている、請求項1又は2に記載のHTS界磁コイ

ル。

【請求項 4】

各領域は、前記第 1 の窓と第 2 の窓との間の軌道を含み、前記第 1 の窓と第 2 の窓との間の軌道の長さは、前記長さに垂直に測定された前記軌道の幅の少なくとも 2 倍である、請求項 3 に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 5】

各軌道は直線でない、請求項 4 に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 6】

前記第 2 の絶縁層内の窓はそれぞれ、前記第 1 の絶縁層、前記第 2 の絶縁層、及び前記導電層を通して延びるそれぞれのビアの一部であり、前記部分絶縁層は、それぞれのビアの前記第 1 の絶縁層に近接する端部に絶縁キャップをさらに含む、請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

10

【請求項 7】

前記導電層は金属を含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 8】

前記金属は、

銅、

真鍮、

スチール、

ステンレス鋼、

ハステロイ、及び

ニッケル

20

のうちの 1 つである、請求項 7 に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 9】

前記部分絶縁層及び前記巻線は連続的に巻かれている、請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 10】

一方の層の各窓と他方の層の最も近い窓との間のオフセット距離は、前記導電層の厚さよりも大きい、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 11】

一方の層の各窓と他方の層の最も近い窓との間のオフセット距離は、H T S 界磁コイルの 1 巻きの長さの $1/5$ 未満であり、より好ましくは $1/10$ 未満であり、より好ましくは $1/50$ 未満である、請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

30

【請求項 12】

各絶縁層は、前記部分絶縁層の長さに沿ってオフセットされている複数の窓を含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 13】

各絶縁層の窓は、両絶縁層に関して同じ間隔で規則的に離間し、各窓は同じ面積を有する、請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 14】

一方の絶縁層の窓は、一方の絶縁層の各窓が反対側の絶縁層の 2 つの最も近い窓から等距離になるように、反対側の絶縁層の窓からオフセットされている、請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

40

【請求項 15】

前記絶縁層は、螺旋状の巻き付けの隙間が前記窓を形成するように、前記導電層の周りに絶縁テープを螺旋状に巻き付けること、又は前記巻線の周りに絶縁テープを螺旋状に巻き付けること
によって形成される、請求項 1 から 14 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイル。

【請求項 16】

各絶縁層は、前記絶縁層の長さに沿って延びる単一の窓を含み、一方の絶縁層の窓は、

50

他方の絶縁層の窓から前記部分絶縁層の幅に沿ってオフセットされている、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 17】

前記導電層は、前記導電層の各窓によって露出する部分が前記各絶縁層の平面内にあるように曲げられている、請求項 16 に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 18】

各絶縁層は、少なくとも 1 つの側で前記導電層を越えて延びている、請求項 1 から 17 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 19】

前記部分絶縁層は、前記窓又は各窓内に導電性インサートを含み、
各窓は、導電性材料でめっきされ、かつ / 又は
前記導電層は、各窓内に延びる導電性突出部を含む、請求項 1 から 18 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

10

【請求項 20】

前記導電性インサート又は突出部はそれぞれの窓を埋める、請求項 19 に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 21】

前記導電性インサート又は突出部はそれぞれの窓の一部分のみを埋め、前記窓を通した前記導電層と前記巻線との電氣的接触は前記導電性インサートのみを介している、請求項 19 に記載の HTS 界磁コイル。

20

【請求項 22】

前記部分絶縁層は、前記絶縁層の外側に配置されかつ前記窓を通して前記導電層に電氣的に接続されている導電性接続細片を含み、前記導電性接続細片は、隣接する巻線に電氣的に接続されている、請求項 1 から 21 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 23】

前記 HTS 界磁コイルははんだポッティングされている、請求項 1 から 22 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

【請求項 24】

前記部分絶縁層は、突き合わせ接合によって接続されている複数のセクションを含む、請求項 1 から 23 のいずれか一項に記載の HTS 界磁コイル。

30

【請求項 25】

HTS 界磁コイルの製造方法であって、
HTS 材料及び金属安定化材を含む HTS ケーブルを提供することと、
部分絶縁層であって、
一方の側に第 1 の絶縁層を、他方の側に第 2 の絶縁層をコーティングした導電層を含み、

各絶縁層は、それを通して前記 HTS ケーブルと前記導電層との間に電氣的接触を形成することができる 1 つ以上の窓を有し、

前記第 1 の絶縁層内の窓は、前記第 2 の絶縁層内の窓から前記導電層の平面内でオフセットされている部分絶縁層を提供することと、

40

前記部分絶縁層を介して前記 HTS ケーブルの複数の巻線の間で電流をシェアすることができるように、前記 HTS ケーブルと前記部分絶縁層とを一緒に組み立てて前記 HTS ケーブルの複数の巻線を含む HTS 界磁コイルを形成することとを含む方法。

【請求項 26】

前記部分絶縁層を提供することは、前記導電層及び絶縁層のそれぞれを別々に提供することと、前記 HTS 界磁コイルの組み立て中に前記部分絶縁層を形成することを含む、請求項 25 に記載の方法。

【請求項 27】

前記 HTS 界磁コイルの組み立て中に前記部分絶縁層を形成することは、前記絶縁層を

50

エポキシ樹脂で前記導電層に取り付けることと、前記部分絶縁層を前記H T S界磁コイルに組み込む直前に加熱した加圧ローラを用いて前記エポキシ樹脂を硬化させることとを含む、請求項 2 6 に記載の方法。

【請求項 2 8】

前記部分絶縁層を提供することは、
前記絶縁層を前記導電層に接着剤で接着することと、
前記絶縁層をエッチングして前記窓を形成することと
を含む、請求項 2 5 に記載の方法。

【請求項 2 9】

前記部分絶縁層を提供することは、前記部分絶縁層の複数のセクションを提供することと、前記セクションを突き合わせ接合によって接続することとを含む、請求項 2 5 又は 2 8 に記載の方法。

10

【請求項 3 0】

前記部分絶縁層を提供することは、
第 1 の絶縁層を提供することと、
前記第 1 の絶縁層の表面を導電層で被覆することと、
前記導電層に第 2 の絶縁層を取り付けることと、
前記第 1 及び第 2 の絶縁層に窓を穿孔することと
を含む、請求項 2 5 から 2 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 3 1】

前記第 2 の絶縁層の窓を穿孔することは、前記第 1 の絶縁層、導電層、及び第 2 の絶縁層を通るビアを穿孔することと、前記第 1 の絶縁層に近接する各ビアの端部に絶縁キャップを付けることとを含む、請求項 3 0 に記載の方法。

20

【請求項 3 2】

前記部分絶縁層を提供することはさらに、
前記第 1 及び第 2 の絶縁層のそれぞれについて、前記絶縁層の前記導電層と反対側の面を導電性接続層で被覆することを含み、前記導電性接続層は、前記H T S界磁コイルの組み立て後の前記H T Sケーブルに接触し又ははんだ付けされている、請求項 3 0 又は 3 1 に記載の方法。

【請求項 3 3】

前記導電層とそれぞれの金属層とを電気的に接続するために各窓を導電性材料でライニングすることを含む、請求項 3 2 に記載の方法。

30

【請求項 3 4】

前記導電層をエッチングして複数の領域を形成し、前記部分絶縁層が組み立てられたときに、各領域が前記第 1 の絶縁層内のそれぞれの第 1 の窓を前記第 2 の絶縁層内のそれぞれの第 2 の窓に電気的に接続し、各領域が前記導電層の平面内で他の領域から電気的に絶縁されるようにすることを含む、請求項 3 0 から 3 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 3 5】

前記H T S界磁コイルをはんだポッティングすることを含む、請求項 2 5 から 3 4 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 3 6】

前記部分絶縁層のうちの少なくとも 1 つが、少なくとも一方の側で前記導電層を越えて延びるオーバーハングを有し、はんだポッティングのステップに続いて、前記オーバーハングの少なくとも一部が除去されるようなレベルまで前記H T S界磁コイルの前記一方の側を機械加工することを含む、請求項 3 5 に記載の方法。

【請求項 3 7】

はんだポッティングのステップに続いて、前記H T S界磁コイルをエポキシ樹脂でポッティングすることを含む、請求項 3 5 又は 3 6 に記載の方法。

【請求項 3 8】

はんだポッティングの前に前記H T S界磁コイルの一方の側に取り外し可能なマスクを

50

取り付け、はんだポッティング後に前記マスクを取り外すことを含む、請求項 35 から 37 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 39】

H T S ケーブルを提供することは、それぞれが H T S 材料を含む複数の H T S テープを提供することと、前記 H T S テープを接続してケーブルを形成することとを含む、請求項 25 から 38 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 40】

前記 H T S テープを互いに接続してテーブルを形成するステップは、前記 H T S 界磁コイルの巻線中に行われる、請求項 39 に記載の方法。

【請求項 41】

前記 H T S テープを互いに接続するステップは、各テープをはんだでコーティングすることと、前記 H T S 界磁コイルを組み立てる直前に加熱ローラに前記 H T S テープを一緒に通すこととを含む、請求項 40 に記載の方法。

【請求項 42】

請求項 1 から 24 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイルを含むトカマク核融合炉であって、前記 H T S 界磁コイルはトロイダル磁場コイル又はポロイダル磁場コイルのいずれかである、トカマク核融合炉。

【請求項 43】

請求項 1 から 24 のいずれか一項に記載の H T S 界磁コイルを含む陽子線治療、P B T 装置であって、前記 H T S 界磁コイルは、

P B T 装置の加速器の界磁コイル、及び

P B T 装置の陽子線ステアリングシステムの双極子磁石又は四重極磁石のうちの一つである、P B T 装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、H T S 磁石に関する。

【背景技術】

【0002】

核融合発電の課題は非常に複雑である。トカマク以外の多くの代替装置が提案されているが、J E T のような現在稼働している最良のトカマクに匹敵する成果はまだ得られていない。

【0003】

世界の核融合研究は、これまでに建設された最大かつ最も高価な（150 億ユーロの）トカマクである I T E R の建設開始後、新しい段階に入った。商用核融合炉への成功につながるルートは、電力生産を経済的にするために必要とされる高効率と組み合わせた長パルス、安定した動作を必要とする。これらの 3 つの条件を同時に達成することは特に困難であり、計画されたプログラムは、理論的及び技術的研究だけでなく、I T E R 及び他の核融合施設に関する長年の実験的研究を必要とするであろう。このルートで開発された商用核融合炉は 2050 年までに建設されないと広く予想されている。

【0004】

経済的な発電（つまり、電力入力よりもはるかに多い電力出力）に必要な核融合反応を得るために、熱核融合が起こるのに十分なほどプラズマが高温になるようにエネルギー閉じ込め時間（プラズマ体積にほぼ比例する）を十分長くすることができるよう、従来のトカマクは（I T E R で例示されるように）巨大でなければならない。

【0005】

特許文献 1 には、中性子源又はエネルギー源として使用するためのコンパクトな球状トカマクの使用を含む代替的なアプローチが記載されている。球状トカマクにおける低アス

10

20

30

40

50

ペクト比のプラズマ形状は、粒子閉じ込め時間を改善し、はるかに小さい機械での正味の発電を可能にする。しかしながら、小さな直径の中心柱が必要であり、それはプラズマ閉じ込め磁石の設計に対する課題を提示している。高温超伝導体（HTS）界磁コイルは、このような磁石の有望な技術である。

【0006】

HTS磁石のもう1つの潜在的な用途は、陽子線治療装置である。陽子線治療（陽子線療法としても知られるPBT）は、がん（放射線治療に反応するその他の状態）の治療に用いられる粒子線治療の一種である。PBTでは、陽子線が治療部位（例えば、腫瘍）に向けられる。

【0007】

もう1つの類似した治療法は、ホウ素-11を標的部位に導入し、陽子線を用いて $p+^{11}B-3$ の反応を開始する、陽子ホウ素捕捉療法（PBCT）である。同じ装置を用いて、PBT又はPBCTのいずれかに陽子線を提供することができる。

【0008】

PBT及びPBCTのための陽子線は、サイクロトロン又は線形加速器などの粒子加速器によって生成される。通常PBT及びPBCTに使用される加速器は、一般に60から250MeVの範囲のエネルギーで陽子を生成し、現在稼働している最も強力な施設は、400MeVの最大エネルギーを有する。

【0009】

大まかに言って、ビーム角度の変化を可能にするPBT装置の設計には2つのタイプがある。第1のタイプの設計では、図7に示すように、加速器3001は、加速器3001が患者3003の周りで（通常、水平軸を中心に）回転することを可能にするガントリ3002に取り付けられる。患者は、更なる自由度（例えば、並進運動及び垂直軸を中心とする回転）を提供する可動ベッド3004上に置かれる。

【0010】

第2のタイプの設計を図8に示す。加速器4001は静止しており、ビームはステアリング電磁石4002（一般に四重極磁石と双極子磁石の両方を含む）を介して患者に向けられ、ステアリング電磁石の少なくとも一部はガントリ4003に配置され、ビームは患者4004の周りで（例えば、水平軸を中心に）回転することができる。患者は、可動ベッド4005上に置かれる。

【0011】

いずれの設計も、ガントリが400MeVにもなるビームエネルギーで陽子を進ませることができる電磁石を保持することを必要とする。これには非常に高い磁場が必要であるため、HTS磁石を使用することにより、電磁石とそれを動かすのに必要なガントリの質量及びサイズを大幅に削減することができる。HTS磁石は、加速器、ステアリング磁石の四重極磁石、又はステアリング磁石の双極子磁石内で使用することができる。

【0012】

超伝導材料は通常、「高温超伝導体」（HTS）と「低温超伝導体」（LTS）に分けられる。Nb及びNbTiなどのLTS材料は、その超伝導性をBCS理論で説明できる金属又は金属合金である。すべての低温超伝導体は、約30K未満の臨界温度（それを超えるとゼロ磁場でも材料が超伝導にならない温度）を有する。HTS材料の挙動はBCS理論では説明されておらず、このような材料は約30Kを超える臨界温度を有する可能性がある（ただし、HTS及びLTS材料を定義するのは、臨界温度ではなく、組成及び超伝導動作の物理的な違いであることに注意すべきである）。最も一般的に使用されるHTSは「銅酸化物超伝導体」、BSCCO又はReBCO（ここで、Reは希土類元素、通常はY又はGdである）などの銅酸化物（酸化銅基含有化合物）をベースとするセラミックである。他のHTS材料は、鉄ニクタイト（例えば、FeAs及びFeSe）及びニホウ酸マグネシウム（MgB₂）を含む。

【0013】

ReBCOは通常、図1に示すような構造のテープとして製造される。このようなテー

10

20

30

40

50

プ100は、一般に約100ミクロンの厚さであり、基板101（通常、約50ミクロンの厚さの電解研磨したハステロイ）を含み、基板101の上に、I B A D、マグネトロンスパッタリング、又は他の好適な技術によって、約0.2ミクロンの厚さのバッファスタック102として知られる一連のバッファ層が堆積される。エピタキシャルR e B C O - H T S層103（M O C V D又は他の好適な技術によって堆積される）がバッファスタックを覆い、通常1ミクロンの厚さである。1~2ミクロンの銀層104が、スパッタリング又は他の好適な技術によってH T S層上に堆積され、銅安定化層105が、電気めっき又は他の好適な技術によってテープ上に堆積され、これは、多くの場合テープを完全に封入する。

【0014】

基板101は、製造ラインを通して供給されかつ後続の層の成長を可能にすることができる機械的なバックボーンを提供する。バッファスタック102は、その上にH T S層を成長させるための二軸配向結晶テンプレートを提供するために必要とされ、その超伝導特性を損なう基板からH T Sへの元素の化学拡散を防止する。銀層104は、R e B C Oから安定化層への低抵抗界面を提供するために必要とされ、安定化層105は、R e B C Oのいずれかの部分が超伝導を停止する（「常伝導」状態になる）場合に代替的な電流経路を提供する。

【0015】

さらに、基板及びバッファスタックがなく、代わりにH T S層の両側に銀層を有する「剥離」H T Sテープを製造することができる。基板を有するテープは、「基板付き」H T Sテープと呼ばれる。

【0016】

H T Sテープは、H T Sケーブルに配置することができる。H T Sケーブルは、導電性材料（通常は銅）によってそれらの長さに沿って接続されている1つ以上のH T Sテープを含む。H T Sテープは積み重ねる（すなわち、H T S層が平行になるように配置する）ことができ、又はH T Sテープはケーブルの長さに沿って変化し得るテープの他の配置を有することができる。H T Sケーブルの注目すべき特別なケースは、単一のH T SテープとH T S対である。H T S対は、H T S層が平行になるように配置された一对のH T Sテープを含む。基板付きテープを使用する場合、H T S対は、タイプ0（H T S層が互に向き合う）、タイプ1（一方のテープのH T S層が他方のテープの基板に面する）、又はタイプ2（基板が互に向き合う）であり得る。3つ以上のテープを含むケーブルは、テープの一部又は全部をH T S対に配置することができる。積層H T Sテープは、H T S対の様々な配置、最も一般的には、タイプ1の対の積層、又はタイプ0の対（又は同等にタイプ2の対）の積層のいずれかを含むことができる。H T Sケーブルは、基板付きテープと剥離テープの混合物を含むことができる。

【0017】

本明細書でコイルを説明する場合、次の用語を使用する。

・「H T Sケーブル」 - 1つ以上のH T Sテープを含むケーブル。この定義では、単一のH T SテープはH T Sケーブルである。

・「巻線」 - コイル内のH T Sケーブルのうち、コイルの内側を囲む部分（すなわち、完全なループとしてモデル化することができる）

・「弧」 - 界磁コイル全体より短いコイルの連続した長さ

・「内半径 / 外半径」 - コイルの中心からH T Sケーブルの内側 / 外側までの距離

・「内周 / 外周」 - コイルの内側 / 外側の周囲で測定した距離

・「厚さ」 - コイルのすべての巻線の径方向の深さ、すなわち内半径と外半径の差

・「臨界電流」 - 所与の温度及び外部磁場でH T Sが常伝導になる電流（H T Sは、テープが1メートルあたり E_0 ボルトを生成する超伝導転移の特徴点で「常伝導になる」とみなされる。 E_0 の選択は任意であるが、通常は1メートルあたり10マイクロボルト又は100マイクロボルトとみなされる。）

・「臨界温度」 - 所与の磁界及び電流でH T Sが常伝導になる温度

10

20

30

40

50

・「最大臨界温度」 - 外部磁場がなく、電流が無視できる場合にHTSが常伝導になる温度。

【0018】

大まかに言って、磁気コイルには、巻き付けによるものと複数のセクションの組み合わせによるものの2種類の構造がある。図2に示すように、巻線コイルは、HTSケーブル201をフォーマ202の周りに連続した螺旋状に巻き付けることによって製造される。前者は、コイルの必要な内周を提供するように成形され、最終的な巻線コイルの構造部分であることができ、又は巻き付け後に除去することができる。セクションコイルは、図3に概略的に示すように、いくつかのセクション301から構成され、セクションのそれぞれは、いくつかのケーブル又は予め形成されたバスバー311を含むことができ、コイル全体の弧を形成する。これらのセクションは、接合部302によって接続され、完全なコイルを形成する。図2及び図3のコイルの巻線は、明確にするために間隔を空けて示しているが、一般にコイルの巻線を接続する材料が存在し、例えば、コイルの巻線はエポキシ樹脂でポッティングすることによってまとめることができる。

10

【0019】

コイルは、コイルの巻線の上に電気絶縁材料を有する「絶縁」か、又はコイルの巻線が（例えば、はんだ付け又は直接接触によりケーブルの銅安定化層を接続することにより）ケーブルに沿ってだけでなく径方向に電氣的に接続される「非絶縁」である。非絶縁コイルは、後でより詳細に説明する理由により、大きな界磁コイルには適していない。

【0020】

図4は、HTSケーブル401が1巻きのリボンと同様の方法で平らなコイルを形成するように巻かれる「パンケーキコイル」として知られる特定のタイプの巻線コイルの断面を示す。パンケーキコイルは、任意の2次元形状である内周で作製することができる。多くの場合、パンケーキコイルは、図5の断面図に示すように、パンケーキコイル間の絶縁体503と、互いに接続されている内部端子504とを備える、反対方向に巻かれた2つのパンケーキコイル501、502を含む「二重パンケーキコイル」として提供される。これは、コイルの巻線に電流を流して磁場を生成するのに、一般によりアクセスしやすい外部端子521、522に電圧を供給するだけでよいことを意味する。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0021】

【文献】国際公開第2013/030554号

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0022】

本発明の第1の態様によれば、高温超伝導HTS界磁コイルが提供される。HTS界磁コイルは、複数の巻線と、部分絶縁層とを含む。複数の巻線は、HTS材料及び金属安定化材を含む。部分絶縁層は、部分絶縁層を介して巻線の間で電流をシェアすることができるように巻線を分離する。部分絶縁層は、導電層と、第1及び第2の絶縁層とを含む。導電層は、一方の側が第1の絶縁層で被覆され、他方の側が第2の絶縁層で被覆されている。各絶縁層は、それを通して巻線と導電層との間に電氣的接触を形成することができる1つ以上の窓を有する。第1の絶縁層の窓は、第2の絶縁層の窓から導電細片の平面内でオフセットされている。

40

【0023】

本発明の第2の態様によれば、HTS界磁コイルを製造する方法が提供される。HTS材料及び金属安定化材を含むHTSケーブルが提供される。部分絶縁層が提供される。部分絶縁層は、導電層と、第1及び第2の絶縁層とを含む。導電層は、一方の側が第1の絶縁層で被覆され、他方の側が第2の絶縁層で被覆されている。各絶縁層は、それを通して巻線と導電層との間に電氣的接触を形成することができる1つ以上の窓を有する。第1の絶縁層の窓は、第2の絶縁層の窓から導電層の平面内でオフセットされている。HTSケ

50

ープル及び部分絶縁層は、部分絶縁層を介してH T Sケーブルの巻線の間で電流をシェアすることができるように組み立てられてH T S界磁コイルを形成する。

【0024】

本発明の第3の態様によれば、50cmより大きい半径を有する高温超伝導H T S界磁コイルであって、H T S界磁コイルはH T S材料を含む複数の巻線を有し、巻線は抵抗材料を介して巻線の間で電流をシェアすることができるように配置されているH T S界磁コイルが提供される。

【0025】

本発明の第4の態様によれば、50cmより大きい半径を有する高温超伝導H T S界磁コイルであって、H T S界磁コイルはH T S材料を含む巻線を有し、H T Sの最大臨界温度よりも低い第1の温度での第1の抵抗率と、第1の温度よりも高い第2の温度での第2のより低い抵抗率とを有する金属絶縁体転移材料によって巻線が分離されているH T S界磁コイルが提供される。

10

【0026】

本発明の第5の態様によれば、第1、第3又は第4の態様のいずれか1つによるH T S界磁コイルを含むトカマク核融合炉であって、H T S界磁コイルはトロイダル磁場コイル又はポロイダル磁場コイルのいずれかであるトカマク核融合炉が提供される。

【0027】

本発明の第6の態様によれば、第1、第3又は第4の態様のいずれか1つによるH T S界磁コイルを含む陽子線治療、P B T装置であって、H T S界磁コイルは、

20

P B T装置の加速器の界磁コイル、及び

P B T装置の陽子線ステアリングシステムの双極子磁石又は四重極磁石のうちの1つであるP B T装置が提供される。

【0028】

本発明の更なる実施形態は、請求項2以降に記載されている。

【図面の簡単な説明】

【0029】

【図1】H T Sテープの概略図である。

【図2】巻かれたH T Sコイルの概略図である。

【図3】セクションH T Sコイルの概略図である。

30

【図4】パンケーキコイルの断面の概略図である。

【図5】二重パンケーキコイルの断面の概略図である。

【図6】ランプアップ中及び定常状態への部分絶縁コイルにおける電流、電圧、及び電力を示す。

【図7】陽子線治療装置の概略図である。

【図8】更なる陽子線治療装置の概略図である。

【図9】図9Aは部分絶縁層の概略図である。図9Bは図9Aの部分絶縁層の側面図である。

【図10】図10Aは代替構成による部分絶縁層の概略図である。図10Bは図10Aの部分絶縁層の断面図である。

40

【図11】例示的な部分絶縁層の概略図である。

【図12】部分絶縁層の代替構成を示す。

【図13】例示的な巻線システムの概略図を示す。

【図14】部分絶縁層及びH T Sテープのアセンブリの断面図である。

【図15】例示的なはんだポッティングされたコイルを示す。

【図16A】部分絶縁層の更なる代替構成を示す。

【図16B】部分絶縁層の更なる代替構成を示す。

【図16C】部分絶縁層の更なる代替構成を示す。

【図16D】部分絶縁層の更なる代替構成を示す。

【図16E】部分絶縁層の更なる代替構成を示す。

50

【発明を実施するための形態】

【0030】

上記のように、HTSコイルは絶縁されていても、絶縁されていなくてもよい。一般に、非絶縁コイルは、トカマクの界磁コイルのように、クエンチが起こり得る状態で動作する大きな磁石には適していないと考えられる。絶縁体が意図的にないことにより、各ケーブル巻線内のテープの間だけでなく、ケーブル巻線の間でも電流をシェアすることができる。巻線間の材料が従来の導体、例えば金属の抵抗と、セラミック又は有機絶縁体などの従来の絶縁体の抵抗との中間の抵抗を有し、例えば、銅の抵抗率の100から 10^{15} 倍又は 10^{-6} から 10^8 オームメートルの抵抗率を有する「部分絶縁」（部分的に絶縁した）コイルも可能である。巻線間に絶縁体がないか部分的な絶縁体があると、局所的な「ホットスポット」（常伝導域）の温度が上昇する速度が遅くなる。HTS磁石の常伝導（抵抗性HTS）域の増大（空間的伝播）速度は多くのパラメータによって決まるが、通常、軸方向において（すなわち、ケーブルに沿って）100mm/s未満であり、横方向において（すなわち、隣接する巻線の間で）約2~100倍遅い。各方向における常伝導域の正確な伝播速度は、利用される材料及びケーブル構造の熱的及び電気的性質によって決まる。特に、横方向の伝播速度は巻線間の材料の熱的性質の影響を受ける。

10

【0031】

大きな磁石（数メートルの長さ寸法、例えば、半径が50cmを超え、コイルの断面寸法が全体の最大コイル寸法よりも小さい（すなわち、約10分の1である））では、横方向の伝播によって、コイルの周囲のごく一部をカバーする領域でコイルの全断面が常伝導になり、その結果、すべての巻線の全電流が常伝導部分内で金属安定化材のみに流れる可能性がある。常伝導域の外側では、導体は依然として超伝導である。この常伝導域の抵抗は、磁石の電流を急速に低下させるのに十分ではないが、磁石全体の蓄積された磁気エネルギーが、コイルの周囲でゆっくりとしか成長しないこの小さな常伝導（抵抗性）の体積に放出される。磁石の蓄積エネルギーをコイルの外部の抵抗に放出できるようにこの状況が迅速に検出されない限り、常伝導域の温度が非常に急速に上昇し、常伝導域内の導体に重大な損傷を与える可能性がある。

20

【0032】

小さなコイル（数センチメートルの長さ寸法、例えば、半径が10cm未満で、コイルの断面が最大コイル寸法と同程度の大きさである）の場合、関係する蓄積磁気エネルギーは相対的にはるかに低く、常伝導域は短時間でコイルの全体積により均等に広がる。言い換えると、常伝導域の温度が損傷値（通常は約200Kとみなされる）を超える前に、クエンチがコイル全体を取り囲むように伝播する。

30

【0033】

このため、非絶縁又は部分絶縁コイルは、小さなHTS磁石のパッシブクエンチ保護には良い選択肢であるが、大きな磁石のパッシブクエンチ保護には不十分であると考えられてきた。

【0034】

さらに、非絶縁又は部分絶縁コイルは、ランプアップ中の磁場の安定化に遅れを示す。これは、コイルのインダクタンスに発生する電圧が、巻線間の金属に電流を流すためである。非絶縁HTSコイルは、3つの電流経路、すなわち、HTSテープをたどる2つの螺旋状経路（HTSに1つと金属安定化材に1つ）と、コイル端末の間で非絶縁又は部分絶縁HTSケーブルを接続する金属（及び他の抵抗材料）を通る径方向経路（これは単一の経路としてモデル化できるが、実際には磁石を通るすべての径方向の抵抗性経路の合計を表す）とを有するものとしてモデル化することができる。螺旋状経路を流れる電流のみがコイルの中心に大きな軸方向磁場を生成する。HTS螺旋状経路は、テープがすべて超伝導である場合、インダクタンスLとゼロ又は無視できる抵抗を有するインダクタとしてモデル化できる。銅安定化材の螺旋状経路は、HTS経路と平行であり、同じインダクタンスを有するが、かなりの抵抗を有する。このため、HTS螺旋状経路の一部がクエンチし始めない限り、ほとんど電流が流れない。これが起こると、HTS螺旋状経路の臨界電

40

50

流 I_c を超える過剰電流は、それらの相対抵抗に従って、螺旋状安定化材経路と径方向経路との間でシェアされる。径方向電流経路は、HTSが全体にわたって超伝導である間、無視できるインダクタンスと螺旋状経路よりはるかに大きい抵抗 R を有するようにモデル化できる。

【0035】

図6は、ランプアップ中及び定常状態動作中の非絶縁コイルにおける電流、電圧、及び電力を示す。非絶縁コイルのランプアップの間、電流は最初に主に径方向経路に流れ(図6の期間A)、その後安定する。径方向経路を流れる電流の量は、ランプ速度が速いほど多くなる(螺旋状経路の両端の電圧 $L \cdot dI/dt$ が高いため。これは期間Bである)。ランプの終わりに、 dI/dt はゼロに低下し、電流は時定数 L/R でHTS螺旋状経路に移動する(期間C)。電流は、ランプの終了後、ほとんどの場合、数(約5) L/R 時定数で螺旋状経路に移される。このため、時定数は、適正なランプアップ時間をもたらすように選択されるべきであり、例えば、5~10時間の時定数がトカマクのTFコイルにふさわしい(約1~2日のランプアップ時間をもたらす)。

10

【0036】

コイルを巻くために使用されるHTSケーブルに接合部がある場合、電源電流のごく一部が、期間Cの間、径方向経路に流れ続ける。この割合は、単に、径方向抵抗(すなわち、すべての巻線から巻線への、すなわち巻線間の抵抗の合計)と螺旋状経路抵抗の合計に対する螺旋状経路抵抗の比率である。

【0037】

大きな L を有する磁石において充電遅延時定数を短く保つには、比較的高い巻線間の抵抗が必要であるが、常伝導域の温度を低く保つには、比較的低い巻線間の抵抗が必要である。したがって、最良の妥協点を得るために、巻線から巻線への抵抗を容易に制御する方法を見出すことが望ましい。

20

【0038】

理想的な巻線から巻線への抵抗の選択における更なる考慮事項は、磁石のランピング段階(期間A及びB)の間の径方向抵抗に電流を流すことによって生じる熱負荷である。かなりの量(数kW程度)になる可能性があるこの更なる熱負荷は、それが界磁コイルを含む装置の動作中に生じる熱負荷、例えば核融合炉のコイルの中性子熱負荷以下であるならば、更なる冷却を必要としない。これが可能なのは、動作の熱負荷とランピングの熱負荷が同時に発生する可能性がないため(例えば、TF磁石が磁場になるまで融合が開始されないため)である。当然ながら、より高い熱負荷(すなわち、より高い巻線から巻線への抵抗)でランプアップし、更なる冷却を提供することも可能である。これは一般によりコストがかかるが、より速いランプ時間を可能にする。

30

【0039】

大きな磁石では、(絶縁コイル又は非絶縁コイルのどちらかで)クエンチによる損傷を避けるために、アクティブクエンチ保護スキームを実施することもできる。このスキームでは、クエンチ領域で十分な温度上昇が発生して損傷を引き起こす前に、磁石の蓄積エネルギーを磁石のクエンチ領域以外の他の何らかの構成要素に放出することができる。他の構成要素は、外部抵抗、又は磁石のコールドマスのより大きな割合でクエンチされた磁石の別個の部分であることができる(これにより、磁石の蓄積エネルギーを大きな体積に分散し、全体的な温度上昇を抑える)。しかしながら、アクティブなアプローチは、ホットスポットの末端温度が、コイルの損傷が発生する可能性がある温度、例えば約200K未満であるように、常伝導域(「ホットスポット」とも呼ばれる)の開始から磁石電流ランプダウン(「ダンプ」)のトリガまでの時間が十分に短いことを必要とする。

40

【0040】

したがって、許容可能な時間枠で安定した磁場にランプできるようにコイルの時定数を制御する一方で、ホットスポット温度の上昇率を制限するためにクエンチされた常伝導域の周囲の巻線の間である程度の電流シェアリングを提供する手段を開発することが望ましい。

50

【 0 0 4 1 】

時定数 L / R を選択するために変えることができるコイルの可能なパラメータは、以下の通りである。

- ・コイルの巻き数 N の 2 乗に比例するインダクタンス L 。したがって、巻き数を減らすことによって時定数を減らすことができる。しかしながら、磁場はアンペア回数に比例するので、少ない巻き数で高い磁場を生成するには、より多くの巻き数及びより低い輸送電流で同じ磁場を生成する磁石よりも高い輸送電流が必要である。

- ・巻線から巻線への径方向抵抗、 R_T (ここで、 $R = N R_T$)

【 0 0 4 2 】

これらのパラメータに関して、 R は $N R_T$ にほぼ比例し、 L は N^2 にほぼ比例するため、 L / R は N / R_T にほぼ比例する。 B は $N I$ に比例するため、 N の最小値は、必要な磁場 (B) と、ケーブルあたりの最大電流 (I) とによって設定される。時定数及びランピング中の熱負荷は、より少ない巻き数を使用することによって低減することができるが、これは、磁石が所定の磁場を生成するためにより高い電流を必要とする。

【 0 0 4 3 】

各巻線間の抵抗 R_T を大きくすることにより、時定数及びランピング熱負荷を低減することもできる。しかしながら、 R_T を高くしすぎると、巻線間の電流シェアリングが阻害され、コイルの「パッシブクエンチ保護」、すなわち、クエンチすることなく、またコイルからエネルギーを放出することなく、ホットスポットから回復するコイルの能力が低下する。大電流ケーブルは、電流を流すために複数のテープを必要とし、特にテープ間の良好な電流シェアリング及び高い熱伝導率を可能にするために、テープ間の抵抗を非常に低く保つことが望ましい。これにより、テープは $ReBCO$ 超伝導層の欠陥に対して堅牢になる。各巻線が複数のテープを含む場合、必要な R_T は、各巻線のテープ間の抵抗よりもはるかに大きい場合があり、そのため、電流は、巻線の間ではなく欠陥をバイパスするために巻線内で優先的にシェアされる。しかしながら、 R_T は、ホットスポットの熱暴走の速度を制限し、問題を検出して磁石をダンプする時間を最大にするために、巻線間の電流シェアリングを可能にするべきである。

【 0 0 4 4 】

部分絶縁コイルを使用すると、ホットスポットの開始から常伝導域温度が 200 K を超えるまでの時間窓を同等の絶縁コイルと比較して大幅に延長することができ、磁石ダンプの開始のための追加の時間を可能にすることが分かった。これにより、 R_T を正しく選択した部分絶縁コイルは、トカマクの大きな界磁コイルとしての使用に驚くほど適している。

【 0 0 4 5 】

この時間窓内に、ホットスポットを検出しなければならず、クエンチ検出システムは、ホットスポットが (パッシブ電流シェアリングによって消散するのではなく) クエンチを引き起こす可能性が高いと判断し、安全な方法で磁石からエネルギーを放出、すなわち、制御された方法で大きなコールドマスを強制的にウォームアップしなければならない (大きなコールドマスは、磁石の意図的にクエンチされた部分、例えばトロイダル磁場コイルのリターンリムであり得る)。

【 0 0 4 6 】

時間窓の持続時間は、各巻線における導電性金属 (例えば銅) の量によって決まり、金属安定化材が多いほど、時間窓が延長される。しかしながら、安定化材の量を増やすとコイルの電流密度が低下し、これは、トロイダル磁場コイルの中心柱のようなスペースが限られた用途では望ましくない (ここで、より高い電流密度が核融合炉におけるより厚い中性子シールドを可能にし、したがってより少ない熱負荷、又は球状トカマクにとってより好ましいアスペクト比もしくはより小さい全体サイズを可能にする)。

【 0 0 4 7 】

球状トカマクに絶縁コイルを用いる現在のクエンチ保護アプローチは、巻線により多くの金属安定化材をもたらし、その結果、時間窓を管理可能なレベルまで増大させるために、より大きく、より高価な装置をもたらすが、時間窓は (0.5 から 1 秒のオーダーで)

依然として短い。非絶縁又は部分絶縁コイルは絶縁コイルよりも必要な金属安定化材が少ないため、非絶縁又は部分絶縁トロイダル磁場コイルの使用により、時間窓を延長し、電流密度を増加させることができる。実際、非絶縁トロイダル磁場コイルの電流密度の限界は、電流密度が増加するにつれて中心柱への応力が制限要因になるため、電氣的な問題ではなく機械的な問題である。最終的に、テープ材料に生じた歪みが R e B C O 層に伝達され、臨界電流の低下を引き起こす。

【 0 0 4 8 】

プラズマ半径 1 . 4 m、5 T の磁場、1 8 個のリムを有するトロイダル磁場 (T F) 磁石の実施例を考える。全 T F 中心ロッド電流は 3 5 M A である。1 0 k A の輸送電流を仮定すると、各リムは 1 9 6 の巻線を有し、全 T F インダクタンスは約 4 6 H である。(約 6 時間の合計ランプ時間を有するために) 1 . 4 時間の時定数を達成するには、約 0 . 5 ミリオームの個々のリムの径方向抵抗を必要とする。したがって、所望の時定数を達成するためには、巻線から巻線への平均抵抗 R_T は、2 . 5 4 マイクロオームである必要がある。

10

【 0 0 4 9 】

モデリングにより、これは、0 . 0 5 m m の厚さ及び 0 . 0 2 オームメートルの抵抗率 (これは 2 0 K での通常の銅の 2×10^6 倍である) を有する巻線間の部分絶縁層を用いて達成することができる。当業者は、部分絶縁のための他のパラメータも可能であることを理解するであろう。

【 0 0 5 0 】

R_T は、H T S ケーブル内及び / 又はコイルの巻線間の被覆材のための金属の選択によって調整することができる。典型的な H T S ケーブルでは、これは銅であるが、より大きな抵抗を可能にするために、ステンレス鋼などの他の金属を使用することができる。代替的又は追加的に、コイルの巻線の間隔を増加させて、コイルの巻線の間により厚い (そのためより抵抗が大きい) 金属層を生じることができる。他の工学的制約 (例えば、電流密度及び構造安定性) も満たす適切な材料には、ゲルマニウム及び他の半導体が含まれる。

20

【 0 0 5 1 】

更なる代替例は、絶縁体に通常の (すなわち、非超電導の) 金属を使用するが、従来の絶縁体を用いて電流経路の形状を調整することである。言い換えれば、巻線の間で電流を強制的に流す距離を増大させる。コイルの巻線間の材料は、図 9 A 及び B に示すように、「漏れのある絶縁」を有する金属細片 (又は他の導電性細片) を含む部分絶縁層を含むことができる。金属細片 9 0 1 は、少なくとも H T S ケーブルに面する側に薄い絶縁被覆 9 0 2 を備え、絶縁被覆は、金属細片のそれぞれの側で間隔を置いて窓 (すなわち「貫通穴」) 9 0 3 の上で除去されるか又は欠落している。窓は任意の形状を有することができ、テープの端まで延びることができる。金属細片の両側の窓の位置は、図 9 B に示すように、ずらして配置されており、これにより、電流が金属細片の長さの一部に沿った経路 9 1 0 を取らなければならないので、(絶縁されていない細片、又はそれぞれの側の窓が互いに正反対である細片と比較して) 抵抗が増加する。

30

【 0 0 5 2 】

図 9 A 及び B に示す部分絶縁層の抵抗 (すなわち、巻線間の抵抗) は、以下によって決まる。

40

- ・同じ側の隣接する窓間の距離 (距離が大きいほど抵抗が大きくなる)。これが支配的な効果である。
- ・反対側の隣接する窓間のオフセット、すなわち一方の側の窓と反対側の隣接する窓との間の距離 (オフセットが大きいほど抵抗が大きくなる)
- ・抵抗は、窓の両側の相対的なオフセットによっても変化し、一方の側の窓が反対側の最も近い窓の間にあるとき、同じ側の所定の窓間の距離で最大になる。この配置はまた、部分絶縁層の均一な抵抗加熱を提供する。
- ・金属細片の厚さ (オフセットが厚さよりも著しく大きい場合、厚さが大きいほど抵抗が

50

小さくなる)

- ・金属細片の幅(幅が広いほど抵抗が小さくなる)
- ・金属細片の抵抗率(抵抗率が大きいほど抵抗が大きくなる)
- ・窓の面積(面積が大きいほど抵抗が小さくなる)。ただし、窓の面積は、窓間の距離が窓の寸法と同等である場合にのみ重要である。

【0053】

正確な関係は、当技術分野で知られている一般的に利用可能な技術又は簡単な実験によってモデル化することができる。

【0054】

窓の間隔が一定である必要はない。重要な要素は、電流が細片の一方の側の巻線から他方の側へ流れるためには、電流が窓を通過して細片に入り、次に細片に沿って流れ、細片の反対側の別の窓を通過して出なければならないことである。1つの窓に入った電流が複数の経路に分割され、複数の窓を通過して出することは明らかに可能である。各経路をたどる電流の割合は、単にその経路のインピーダンスによって決まる(インピーダンスは変化する電流を遅くするための経路の抵抗によって支配されるが、経路のインダクタンスは急速に変化する電流に対して作用する)。

【0055】

細片の両側の窓間の距離が窓の寸法に同等でない限り、窓間の経路の抵抗は、窓間の距離によって支配され、窓間の距離に比例し、細片の厚さに反比例する。これは、部分絶縁細片の望ましい配置である。

【0056】

コイルの異なる場所で抵抗を変えることが望ましい場合、これらの特性のいずれかを部分絶縁層の長さに沿って変化させることができる。

【0057】

絶縁被覆は、例えば、カプトン(登録商標)テープの形態で又は液体として用いられたポリアミド、マイラーフィルム、絶縁ワニス、又は任意の他の好適な絶縁体であることができる。

【0058】

金属は、銅、真鍮、ステンレス鋼、ハステロイ、又は必要に応じて任意の他の好適な金属(又は非金属導体)であることができる。ハステロイのステンレス鋼などの材料を使用することにより、部分絶縁層は、従来の全銅磁石と比較して、改善された構造的安定性も提供することができ、高磁場トカマクで経験する大きな応力に対処するのに役立つ。

【0059】

HTSコイルは、通常どおりに巻くことができ、部分絶縁層は巻線を巻くときに巻線の間配置される。HTSコイルは、樹脂中に封入するか又は互いにはんだ付けすることができ、後者の場合、部分絶縁層は、任意選択ではんだ付け可能なコーティングで被覆して巻線の間のはんだ接着性を高めることができる。部分絶縁層は、コイルの各巻線を分離するようにHTS巻線で連続的に巻かれている。

【0060】

窓は、エッチングによって、絶縁体細片を金属細片に付ける前に切断することによって、マスキングによるスプレーコーティングによって、インクジェット印刷によって、又は当技術分野で知られている他の好適な方法によって(例えば、フレキシブルPCB製造で知られている技術を用いて)製造することができる。

【0061】

窓間の距離が窓のサイズよりも著しく大きく、一方の側の窓が他方の側の窓の間になるように窓がオフセットされている場合、巻線間の抵抗 R_{TT} は以下のように概算することができる。

【数1】

10

20

30

40

50

$$R_{TT} = \frac{d^2 \rho}{4wtL}$$

ここで、 d は窓の間（同じ側の窓と次の窓との間）の距離、 ρ は抵抗率（コイルが低温かつ高磁場で作動することを考慮）、 w はテープの幅、 t は金属細片の厚さ、 L は各巻線の平均長さである。

【0062】

例えば、 2.54 マイクロオームの巻線間の抵抗は、 20 mmの幅、 50 ミクロンの厚さ、 16.2 mの巻線長さ、及び 60.5 mmの窓間の距離 d を有する真鍮細片（= 約 20 Kで 45 nm）を用いて実現することができる。

10

【0063】

代替的な「漏れのある絶縁」構造を図10A（平面図）及び10B（10AのB-B断面）に示す。前述のように、金属細片1001は、少なくともHTSに面する側に薄い絶縁被覆1002を備えている。この場合、前の実施例のように縦方向に間隔を置いて配置された窓の代わりに、各絶縁被覆1002は、金属細片の全長にわたる単一の窓1003（又は「通路」）を有し、金属細片のそれぞれの側の窓は反対側の縁にある（例えば、細片、細片の一端から見て、上面の左側と下面の右側に窓を有することができる）。

【0064】

窓は金属細片の縁まで延びているように表示されているが、必ずしもそうである必要はない。すなわち、窓の両側に絶縁材料がある場合がある。

20

【0065】

窓は、それらが重ならないように配置され、電流1010が細片の幅に沿って進むだけで細片を通して流れることを可能にする。

【0066】

この構造では、巻線から巻線への抵抗は、以下によって決定される。

- ・片側の窓と反対側の窓との間の距離（細片の幅に沿って内側の縁で測定され、距離が大きいほど抵抗が大きくなる）。
- ・金属細片の厚さ（厚さが大きいほど抵抗が小さくなる）
- ・金属細片の抵抗率（抵抗率が大きいほど抵抗が大きくなる）
- ・各窓の幅（幅が広いほど抵抗が小さくなる）。前の構成の窓の面積と同様に、これは小さな影響であるが、この場合、窓間の距離と各窓の幅は、金属細片の幅によって制限されることに留意すべきである。

30

【0067】

窓間の距離が細片の厚さよりも著しく大きい場合、巻線から巻線への抵抗は次のように与えられる。

【数2】

$$R_{TT} = \frac{s\rho}{tL}$$

40

ここで、 s は窓間の距離、 ρ は抵抗率（コイルが低温かつ高磁場で作動することを考慮）、 t は金属細片の厚さ、 L は各巻線の長さである。

【0068】

例えば、 2.54 マイクロオームの巻線間の抵抗は、 20 mmの幅、 50 ミクロンの厚さを有するステンレス鋼細片（= 486 nm）と、それぞれの側の対向する縁にある 7.9 mmの非絶縁細片とを用いて実現することができる。

【0069】

上記の両方の構成が特定の実施例である一般的な場合、部分絶縁層は、それぞれの側に

50

薄い絶縁層を有する金属細片を含む。各絶縁層は、(細片の厚みによるオフセットに加えて)金属細片の面内で他の層の窓からオフセットされた1つ以上の窓を有する。オフセット距離は、金属細片の厚さよりも大きく、コイルの1巻きの長さよりもかなり短いことができる(例えば、少なくとも5分の1、少なくとも10分の1、又は少なくとも100分の1)。窓は、HTSテープと金属細片との電気的接触を可能にし、その結果、巻かれたコイル内の隣接するHTSテープ間の電流経路が金属細片を横切って(長さに沿って又は幅に沿って)横方向に進む。これにより、窓の位置及び間隔を変えることによって部分絶縁層の抵抗を容易に制御することが可能となり、同様の寸法の金属細片のみによって得られるよりも大きな抵抗が得られる。

【0070】

窓は、部分絶縁層の長さに沿って均等に分布させることができ、そのような分布は、部分絶縁層の全長に沿って延在する。代替的に、窓間の距離(又は窓の他の特性)は、コイルの各巻線の全抵抗が一定になるように、部分絶縁層に沿って変化させることができる。

【0071】

各部分絶縁層に1つの窓のみが設けられている場合、各窓は、部分絶縁層の全長にわたって延在することができる。

【0072】

窓を通しての電気的接触を確実にするために、部分絶縁層は、巻線中にHTSケーブルにはんだ付けすることができる。代替的に、接触は、一度巻かれたコイル内の圧力のみによって得ることができる。更なる代替例として、追加の導電性インサートを窓に追加することができ、又は金属細片は、窓内に延びる突出部を有することができる。インサート又は突出部は、窓全体を埋めるか又は窓の一部のみを埋めることができる。例えば、窓が「通路」である場合、インサートは、その通路に沿って間隔を置いて設けることができる。この結果、インサートは効果的に窓のサイズを小さくするように作用し、部分絶縁層の抵抗をさらに調整するために使用することができる。

【0073】

先に開示した窓の様々な配置のすべては、窓と、窓を部分的に埋める金属インサート又は突出部との組合せによって実現することができ、例えば、金属インサートの間隔は、コイルの1巻線あたりの抵抗が一定であることを確実にするために部分絶縁層に沿って変えることができる。

【0074】

部分絶縁層とHTSコイルとの物理的接続は、圧力のみによって(すなわち、単にコイルのコンパクトな巻線によって)、絶縁被覆とHTSケーブルの外面との接着剤(例えばエポキシ樹脂)接続によって、及び/又は部分絶縁層の外側金属面とHTSケーブルとの間のはんだ接続によって行うことができる。

【0075】

図11は、良好な物理的及び電気的接続を確実にするために部分絶縁層に対して行われ得るいくつかの更なる改良点を示す。前述のように、部分絶縁層は、金属(又は他の導電性)細片1101と、薄い絶縁被覆1102とを含む。金属インサート1103は、窓内に配置することができ、又は金属細片は、HTSケーブルとの接触を容易にするために窓を通過して延びる突出部を有することができる。

【0076】

代替的又は追加的に、より大きなはんだ付け表面(ひいてはコイルのより容易な製造及びより強固に結合されたコイル)を提供するために、部分絶縁層は、絶縁層の外面に結合された更なる金属細片1104、以下「接続細片」を含むことができる。これらの接続細片は、層の電気的性質にほとんど影響を及ぼさないが、部分絶縁層を実質的に全表面に沿ってHTSケーブルにはんだ付けすることを可能にする。

【0077】

部分絶縁層はまた、コイルを製造するときに部分絶縁層を横切って及び/又は絶縁被膜を横切るはんだブリッジを避けるために、部分絶縁層の縁に結合され、金属細片1101

10

20

30

40

50

の少なくとも縁を覆う絶縁材料 1105 を有することができる。

【0078】

部分絶縁層はフレキシブル PCB として製造することができ、絶縁被覆は接着剤によって金属細片に結合され、次いで窓を形成するためにエッチングされ、必要に応じて更なる金属要素が金属細片と電気的に接触するように更なる金属要素が絶縁被覆又は金属細片に結合される。代替的に、絶縁被覆は、予め切断された窓を有し（又は細片に付けたときに「通路」を提供するようなサイズとし）、次いで接着剤によって巻線中の金属細片に結合することができる。他の製造方法も使用することができる。

【0079】

図 12 は、部分絶縁層の代替構成を示す。前述のように、部分絶縁層は、金属細片 1201 と、（図 10A 及び B を参照して上述したように）金属細片のそれぞれの側の一方の縁に「通路」を形成するように配置されている絶縁被覆 1202 とを含む。この場合、金属細片は、「ジョグル」又は「キンク」1203 を備え、すなわち、金属細片は、金属細片の窓によって露出する部分が絶縁被覆の平面内にあるように曲げられている。絶縁被覆は、はんだ付け時に金属細片と絶縁被覆の他方の側の HTS テープとの間の望ましくない橋絡を防ぐために、オーバーハング 1204 を備えることができる。

10

【0080】

上記は主に、金属細片に絶縁体を付け、次にこれを HTS ケーブルで巻いてコイルを形成することによって形成される部分絶縁層の観点から書かれているが、HTS ケーブルに絶縁体を付け、次にそれを裸の金属細片で巻いている構造は、HTS ケーブル、絶縁体、及び金属細片を巻線中にまとめる構造と同様であることが理解されるであろう。事実上、「部分絶縁層」は、コイルを巻くとその場で形成することができる。

20

【0081】

漏れのある絶縁層の更なる代替例では、カプトン（登録商標）テープなどの絶縁材料の螺旋状ラップを金属細片の周りに巻き付け、絶縁巻線の間意図的に間隙を残して「窓」を形成することができる。代替的に、各巻線を絶縁層で螺旋状に包み、間隙を残して「窓」を形成することもできる。しかしながら、隣接する巻線の間抵抗率（すなわち、窓の接触領域及び反対側の窓間のオフセット）を制御することは、後者のアプローチではより困難になるであろう。

【0082】

図 16A ~ E は、さらに別の漏れのある絶縁層を示す。先の実施例と同様に、この実施例の技術的特徴は、必ずしも一緒に使用する必要はなく、必要に応じて他の実施例の特徴と組み合わせることができる。漏れのある絶縁層は 5 つの層を含み、5 つの層は順番に以下のとおりである。

30

- ・第 1 の金属接続層 1611、
- ・第 1 の絶縁層 1621、
- ・導電層 1630、
- ・第 2 の絶縁層 1622、
- ・第 2 の金属接続層 1612。

【0083】

図 16A ~ C は、それぞれ、第 1 の金属接続層 1611、導電層 1630、及び第 2 の金属接続層 1622 のレイアウトを示す。図 16D 及び E は、図 16A ~ C の線 D 及び E に沿った断面図である。

40

【0084】

先の実施例と同様に、接続層は、はんだ付けによる HTS ケーブルへの取り付けを容易にするために存在する。

【0085】

導電層が連続した金属細片である先の実施例とは対照的に、この実施例では、導電層はいくつかの導電領域に分割されている。これらの領域には 2 つのタイプがある。正方形の領域 1631（実際には任意の形状であることができるが）は、ビア 1606 によって金

50

属接続層の一方にのみ接続されている。これらの領域は、部分絶縁層の電気的性質に影響を与えないが、それぞれの絶縁層を通る熱経路を提供する。これらの領域のサイズ及びそれらと金属接続層との間の接続の数を変えることによって、部分絶縁層の熱的性質を電気的性質とは無関係に変えることができる。

【0086】

他の領域1632は、第1の絶縁層1621の窓1601と第2の絶縁層1622の窓1602とを接続している。窓間の抵抗は、領域1632の幾何学的形状を変えることによって制御することができる。例えば、領域1632が図16Bに示すように細長い軌道1633を含む場合、軌道の幅を増大させると窓間の抵抗が減少し、（例えば、直線でない軌道を提供することにより、又は窓を移動することにより）軌道の長さを増大させると窓間の抵抗が増加する。

10

【0087】

第1の絶縁層の窓1601は、第1の接続層及び第1の絶縁層を通る穿孔されたビアにより形成され、次いで第1の接続層及び導電層を接続するために金属1603（又は他の導電性材料）でめっきされる。第2の絶縁層の窓1602は、すべての層を通るビア1602を穿孔することによって形成され、次いで金属1604（又は他の導電性材料）でめっきされる。第2の絶縁層の窓1602を通して第1の接続層に接続が形成されるのを防ぐために、第1の接続層をビア1602の周囲でエッチングして電気的に絶縁し、ビア1602の端部に絶縁キャップ1605を配置して、はんだ付け又はHTSケーブルとの接触による橋絡が生じないことを確実にする。

20

【0088】

代替例として、代わりに窓1602は、それらが第2の接続層、第2の絶縁層、及び導電層を通過し、かつ第1の絶縁層を通過しない（又は完全には通過しない）ように部分絶縁層の他方の側から穿孔することができる。更なる代替例として、すべての窓は、すべての層を通過するビアから形成することができ、第2の接続層のエッチング及び第2の接続層上の絶縁キャップが第1の絶縁層の窓1601に使用される。

【0089】

一実施例として、図16A～Eによる部分絶縁層は、以下のように、フレキシブルPCBプロセスによって製造することができる。

- ・第1の絶縁層1621を提供し、その上面及び下面に（それぞれ第1の接続層1611及び導電層1630を形成するために）銅でめっきする。
- ・銅めっきした第1の絶縁層1621（すなわち、層1621、1611m1630）をドリル加工してビア1601を形成し、穴をめっきする（1603）。
- ・導電層1630をエッチングして、領域1632（及び任意選択で領域1631、ただしこれらはエッチング除去され得ることが望ましい）を形成する。
- ・第2の絶縁層1622を導電層1630に付ける。これは、第1の絶縁層と同じ絶縁体であってもよいし、異なる絶縁体であってもよい。
- ・一実施例では、第2の絶縁層は、第2の接続層を接続するために使用される接着剤であることができる。
- ・第2の接続層1612を第2の絶縁層1622に付ける。
- ・第1及び第2の絶縁層に窓1602を形成するために上記のようにビアを穿孔する。
- ・ビアを銅1604で被覆する。
- ・第1の接続層をエッチングして、窓1602を第1の接続層から分離する（1611）。
- ・窓1602を形成するビアの第1の接続層1611の端部に絶縁キャップ1605を付ける。

30

40

【0090】

当然ながら、図16A～Eの実施例の特徴の一部のみを部分絶縁層で使用する場合、存在しない特徴に対応する方法ステップは実行されない。

【0091】

一般に、上記の部分絶縁層の実施例の特徴は、様々な方法で組み合わせることができ、

50

それぞれの実施例の他の特徴とは別に使用することができることに留意されたい。例えば、絶縁層の窓は、「通路」の実施例（図10A）のように、図16Bのパターン化された導電層と組み合わせて、各絶縁層の縁に単一の細長い窓を備えていることができ、導電層は、図12のように、パターン化された導電層の電気接点を絶縁層の平面にもたらすために「ジョグル」を備えていることができる。

【0092】

上記の説明の多くは、大きなHTSコイルに焦点を当ててきたが、先に開示された「漏れのある絶縁」は、より小さなHTSコイルにもそれらのコイルに制御された巻線から巻線への抵抗を提供するために適用可能であることに留意されたい。

【0093】

このような「漏れのある絶縁」を含むコイルの様々な製造方法について次に説明する。これらは実施例としてのみ提示されており、当業者は、他の巻線方法が可能であり、各実施例の要素を本明細書に提示されていない様々な方法で組み合わせることができることを容易に理解するであろう。

【0094】

部分絶縁層は、（例えば、上記のようなフレキシブルPCB製造プロセスによって）事前に形成されてもよいし、巻線中にその場で形成されてもよい。金属細片に絶縁被覆を施すことは、絶縁被覆及び/又は金属細片にそれらを接続する前に接着剤（例えばエポキシ樹脂）を塗布することを含み得る。

【0095】

部分絶縁層が（事前に形成されるか又は後述するように巻線プロセスの初期段階によって）コイルへの巻線前に形成される場合、巻線プロセス中の接続を容易にするために、層はそれぞれの側にHTSテープを備えることができる。

【0096】

図13は、例示的な巻線システムの概略図を示す。コイル1300は、3巻きのHTSテープ1301と、部分絶縁層1302とから巻線される。部分絶縁層は、2巻きのHTSテープ1311と、それぞれの側が乾燥エポキシ樹脂でコーティングされた2巻きの絶縁テープ1312と、1巻きのステンレス鋼箔1313とからその場で形成される。部分絶縁層及びHTSテープのアセンブリは、それを熱及び圧力ローラ1303に通すことによって互いに結合される（巻線の圧力がエポキシ樹脂を硬化させるのに十分な場合には、これらのローラを省略するか又は大きな熱又は圧力を加えないローラに置き換えることができる）。部分絶縁層1302及びHTSテープ1301の各々は、露出した表面にフラックスを塗布するためにフラックスボックス1304に通される。

【0097】

図13のコイルは円形として示されているが、同様の巻線システムを使用して（例えば、異なる形状のフォーマを用いて）任意の形状のコイルを巻くことができる。

【0098】

図14は、部分絶縁層及びHTSテープのアセンブリの断面を示す。アセンブリは、絶縁層1402の間に挟まれているステンレス鋼テープ1401を含み、絶縁層1402は同様にHTSテープ1403の間に挟まれている。各層はエポキシ樹脂で結合されているが、ステンレス鋼テープとHTSテープの間の直接接続には（良好な電氣的接続を確保するため）エポキシ樹脂は使用されていない。部分絶縁層及びHTSのアセンブリの最小曲げ半径は、（アセンブリの厚さにより）単一のHTSテープの最小曲げ半径よりも制限されるので、コイルを製造するこの方法は、より大きなコイルに好ましい。しかしながら、これは、製造時にアセンブリを部分的に「事前に曲げる」こと、すなわち、「ゼロ歪み」位置が一直線のテープとコイルの最小曲率半径の中間の曲率半径になるように）アセンブリを部分的に曲げた状態に形成することによって克服することができる。

【0099】

図示の実施例では、絶縁テープは、「通路」の実施形態を提供するように配置され、テープのそれぞれの側の一方の縁に単一の大きな窓を有する。これは、巻線中にHTSテ

10

20

30

40

50

プ及びステンレス鋼テープから絶縁テープをずらしてオーバーハング1410を形成することによって達成される。このオーバーハングは、アセンブリがはんだ付けされる時、又は後述するようにコイルが「はんだポッティング」される時に、HTSとステンレス鋼との間の望ましくない電氣的橋絡を防ぐのに役立つ。代替的に、ステンレス鋼よりも幅の狭い絶縁テープを設け、ステンレス鋼の一方の縁に位置合わせ（して他方の縁に「通路」を提供）することもできる。

【0100】

部分絶縁層が他の配置の窓を有する場合、HTSテープとスチールテープとの間の電氣的接続を確実にするために、例えば、窓が部分絶縁層の外縁への流体連通を許容しない場合に、部分絶縁層の組み立て中にはんだを設けることができる。代替的又は追加的に、前述のように、窓内に更なる金属インサート又は金属層の突出部を使用することができる。

10

【0101】

コイルをまとめて電氣的接続を改善するために、コイルは、「はんだポッティング」され又は「はんだで結合され」、すなわち、（当技術分野でよく知られている「エポキシ樹脂ポッティング」との類推により）コイルを貫通させることができるはんだで完全に被覆され得る。図15は、例示的なはんだポッティングされたコイルを示す。コイルは、部分絶縁層1510とHTSケーブル1520とを含む。部分絶縁層1510は、金属細片1511と絶縁被覆1512とを含み、絶縁被覆は、コイルの縁を越えて突出するオーバーハング1513を有する。コイルがはんだポッティングされると、はんだ1530はコイルの表面を被覆し、ケーブルのHTSテープ間に延び、それにより、ケーブルのHTSテープ間及びHTSケーブルと金属層との間の電氣的接続を確実にする。HTSテープの金属表面及び部分絶縁層の露出した金属表面は、はんだ付けの前にフラックスで処理することができる。

20

【0102】

次いで、コイルを平面1514（点線）に沿って機械加工し、オーバーハングを切断してはんだを滑らかにすることができ、これにより、オーバーハングを横切るはんだブリッジが残らないことをさらに確実にする。

【0103】

部分絶縁層がオーバーハングの代わりに縁に絶縁被覆を備えている場合（例えば、図11に示し、上述したように）、コイルは、はんだポッティングに続いてこの絶縁被覆まで機械加工されることができる。使用するはんだが使用する絶縁被覆を濡らさない場合、縁の絶縁被覆が十分に広ければ、そのようなブリッジは形成されない可能性がある。

30

【0104】

コイルの一方の側にオーバーハングを設ける代わりに、コイルのその側を取り外し可能なマスク（例えば、2成分シリコン）でコーティングして、はんだがその側の接続をブリッジするのを防ぐことができる。この配置により、HTSテープ及び部分絶縁層のすべての一端を共通の平面上に配置することができるため、コイルの位置合わせが容易になる。

【0105】

「通路」の実施形態についてはんだポッティングが示されているが、はんだポッティングは先に提示した他の構成にも同様に適用可能である。一部の例では、オーバーハング1513は、各絶縁コーティングの両側に、又は部分絶縁層の長さの一部のみに沿って、すなわち、絶縁層を横切る接続が望ましくない場合に設けることができ、そのような接続が許容される場合（例えば、窓が金属層の縁部まで延びている場合など）にはオーバーハングがない。絶縁被膜の窓がコイルの外側と流体連通しないように配置される場合、これらの窓を通して巻線中の別のはんだ付け段階をはんだ接続部に行くことができ、又は本明細書に開示されている他の任意の接続方法を代わりに使用することができる（例えば、窓内の追加の金属インサート）。

40

【0106】

部分絶縁層が圧力のみによってHTSテープに電氣的に接続できる場合（例えば、図11及び図12の実施形態、ならびに金属層又は金属層に電氣的に接続されている構成要素

50

の一部が絶縁被覆の平面内にある他の実施形態では)、必要に応じてはんだを使用することもできるが、はんだポッティング又は他のはんだ付けを行うことなく、HTSと部分絶縁層との間に電氣的接続を形成することができる。この場合、コイルは、機械的安定性を改善するためにエポキシ樹脂ポッティングすることができるが、エポキシ樹脂が(HTSケーブル内又はケーブルと部分絶縁層との間の)いかなる電氣的接続も阻止しないように注意すべきである。

【0107】

HTSケーブルは、巻線前又は巻線プロセス中に個別にはんだ付けすることができる。巻線中のはんだ付けは、HTSテープが巻き戻されているときに各HTSテープをはんだでコーティングし、それらを一緒に加熱ローラに通してケーブルを形成し、次いでケーブルに部分絶縁層を巻き付けることによって行うことができる。

10

【0108】

一部の実施形態では、HTSケーブルと金属層との間の間隙が小さいため、はんだは、ポッティング中にこれらの間隙を濡らさない可能性がある。これは、はんだ、金属層、及びHTSケーブルの外面の組成によって決まる。これは通常、金属層とHTSケーブルの外表面が異なる場合に起こる。このため、金属層とHTSケーブルとの直接接触によって電氣的接続が行われない実施形態では、金属層とHTSケーブルの外表面は類似の金属であることができ、又はこれらの間隙はポッティングによってではなく個別にはんだ付けすることができる。

【0109】

同様に、はんだは一般に、絶縁層とHTSテープとの間の間隙を濡らさない。はんだポッティングに続いて、これらの間隙を結合するためにコイルをエポキシ樹脂ポッティングすることができる(少なくともコイルの外側に流体連通している場合)。

20

【0110】

場合によっては(例えば、部分絶縁層がフレキシブルPCBとして製造される場合)、より短い長さの部分絶縁層(例えば、2~5m)を形成し、それらをコイル内の突き合わせ接合で接続することが望ましいことがある。上記のどの実施例でも、これは単一の「部分絶縁層」と考えるべきである。

【0111】

上記の開示は、多くの可変要素を等しく扱ってきたが、所与の磁石について、設計プロセスにより、いくつかの可変要素は制約され、他の可変要素は自由に選択できることが理解されるであろう。例えば、必要な磁場及び磁石の形状が分かっている場合、設計プロセスは以下のステップを含むことができる。

30

- ・必要な磁場を生成するために必要な数の「アンペア回数」(すなわち、巻き数Nに輸送電流Iを乗じたもの)を決定するステップ。
- ・許容可能な時定数を達成するインダクタンスL(Nによって決まる)及び径方向抵抗R(N及び巻線間の抵抗 R_{TT} によって決まる)を提供するため値I及びNを選択するステップ(「許容できる」は使用事例によって決まる)。
- ・必要な R_{TT} を提供するために部分絶縁体の性質を選択するステップ。

【0112】

I及び R_{TT} の選択は、他の要因によって制約される可能性が高い。例えば、輸送電流は、HTSケーブルの臨界電流を超えることができず、 R_{TT} は、部分絶縁層の許容可能な厚さ及びテープの幅によって決まる(どちらも他の考慮事項、例えば、利用可能なスペース及びHTSテープの性能によって設定される可能性が高い)。

40

【0113】

上記の説明は巻かれたパンケーキコイルに関するものであるが、同様の考慮事項がセクションコイルにも当てはまる。このようなコイルでは、コイルパラメータに対するL及びRの依存性は異なる可能性があるが、HTS磁石の設計の通常の技術を用いて当業者が確認することができる。

【0114】

50

本開示は、許容可能な速いコイルランプ時間と、1巻線で形成されるホットスポットとHTSテープの損傷との間の長い時間窓との間の良好なトレードオフを提供するようにL/R時定数を調整することを可能にすることによって、非絶縁/部分絶縁コイルの使用を可能にする。これにより、ホットスポットは、コイル温度を監視することによって検出することができ、必要に応じて、アクティブクエンチ保護システムを係合させて、同等の絶縁コイルと比較してより長い時間枠で磁石電流を流すことができる。

【0115】

さらに、非絶縁コイルは、HTSケーブル間で銅を「シェア」できるため、同等の絶縁コイルよりも少ない銅又は他の金属安定化材しか必要としない（すなわち、各HTSケーブルがそのケーブルからの電流をシェアするのに十分な銅を必要とするのではなく、コイルが全体としてケーブルのサブセットのみからの電流をシェアするのに十分な銅を必要とする）。したがって、部分絶縁コイルを用いてより高い電流密度を実現することができ、これは、コイルの厚さが重要な設計上の考慮事項である球状トカマクのトロイダル磁場コイルのような用途において（球状トカマクの場合、中心柱の半径を最小化するか又は所与の中心柱の半径に対してより多くの中性子遮蔽を可能にするために）特に有用である。

【0116】

絶縁コイルの挙動が通常動作に要求される場合、非絶縁コイルの利点は、冷却時の非常に高い抵抗と、転移温度（酸化バナジウムの場合は約110 K）を超えて温めた場合の比較的低い温度（少なくとも10分の1）と有する、酸化バナジウムなどの金属絶縁体転移材料を使用することにより、クエンチ中にも得ることができる。このため、巻線間に金属絶縁体遷移材料を備えた「半絶縁」コイルは、通常動作中及びランプアップ中は（非常に低い時定数を有する）絶縁コイルとして、（金属絶縁体転移材料が熱くなり、導電性になる）クエンチ中は非絶縁コイルとして挙動する。これにより、金属絶縁体遷移金属が低い抵抗を有する場合の R_T をランプアップの時定数に悪影響を与えることなく可能な限り低くすることができる（低温での R_T が十分に低い時定数を提供するという条件で。ただし、金属絶縁体転移材料はそれらの転移温度付近で抵抗率が非常に急激に低下するため（例えば、10ケルビンを超えると抵抗率が少なくとも10分の1に低下、又は10ケルビンを超えると抵抗率が1000分の1に低下）、これは容易に達成可能である）。

【0117】

上記開示は、様々なHTS磁石システムに適用することができる。例としての上述したトカマク核融合炉に加えて、本開示は、核磁気共鳴イメージング（NMR/MRI）装置におけるHTSコイル、磁場による非磁気媒体内の磁気装置の操作（例えば、患者内で医療デバイスを操作するためのロボット磁気ナビゲーションシステム）、及び例えば電子航空機用の電気モータのための磁石に使用することができる。更なる例として、本開示は、開示された特徴を含むHTS磁石システムを含む陽子線治療装置に適用することができ、HTS磁石システムは、PBT装置の加速器、PBT装置の四重極又は双極子ステアリング磁石、又はPBT装置の任意の他の磁石内で使用される。

10

20

30

40

50

【図面】

【図 1】

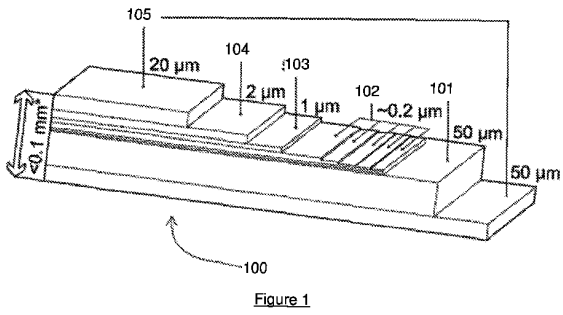


Figure 1

【図 2】

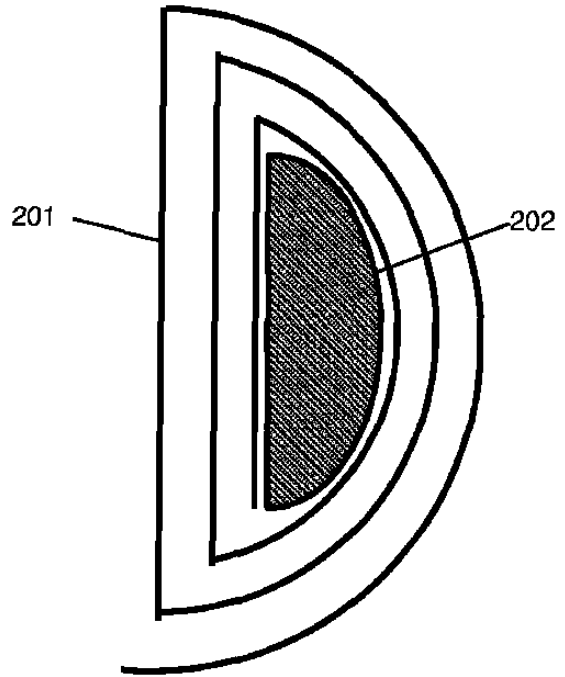


Figure 2

【図 3】

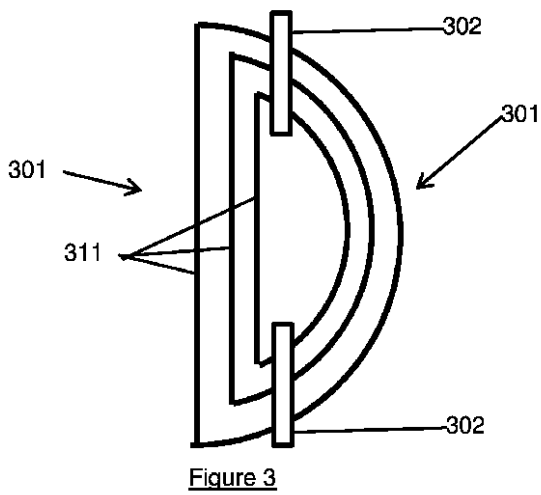


Figure 3

【図 4】

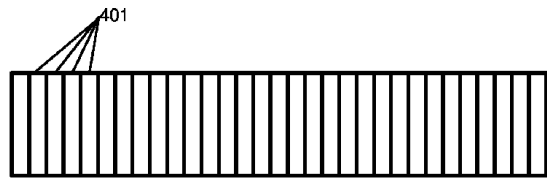


Figure 4

10

20

30

40

50

【 図 5 】

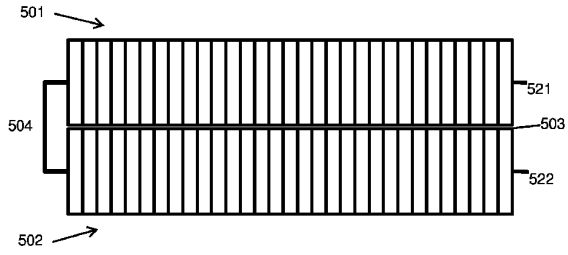


Figure 5

【 図 6 】

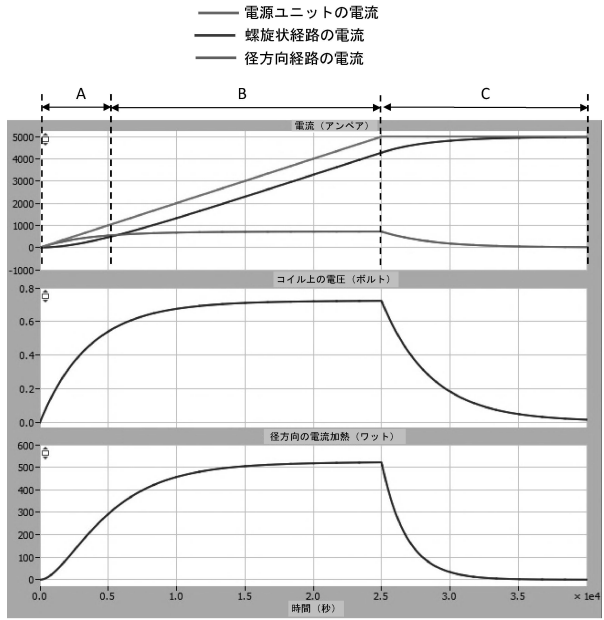


Figure 6

【 図 7 】

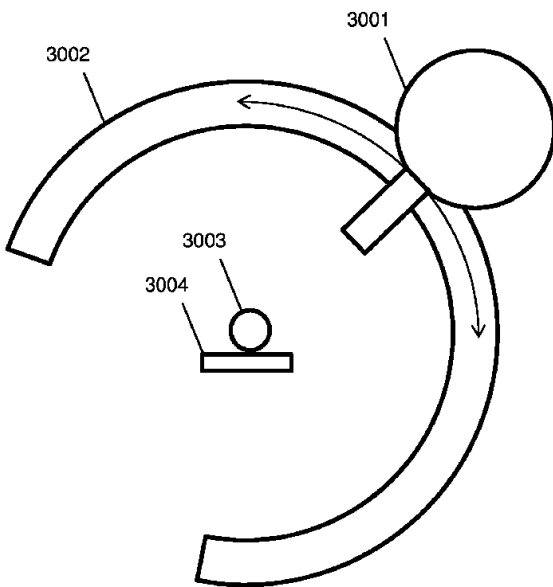


Figure 7

【 図 8 】

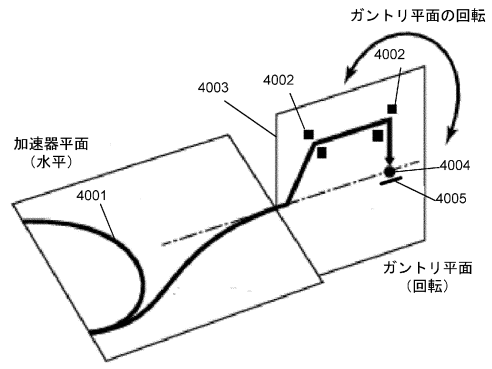


Figure 8

10

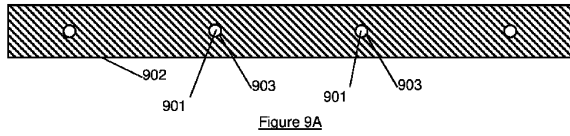
20

30

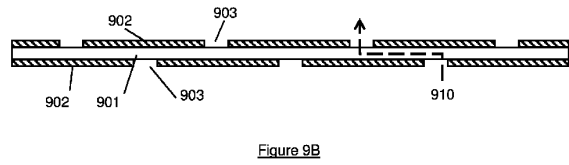
40

50

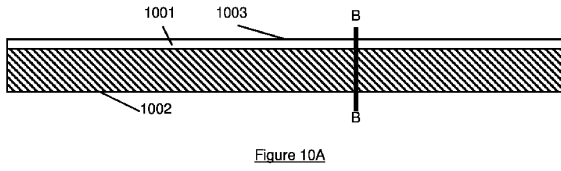
【 9 A 】



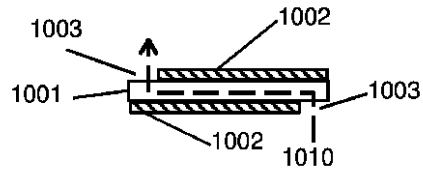
【 9 B 】



【 1 0 A 】

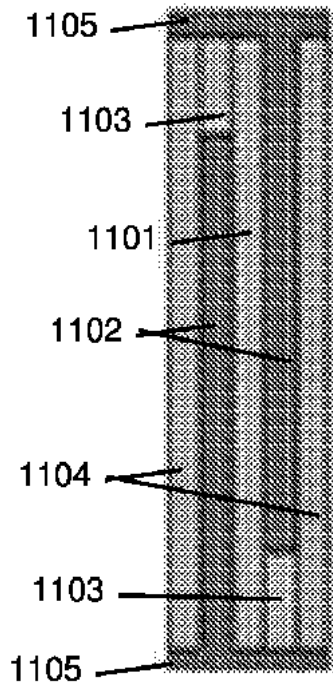


【 1 0 B 】

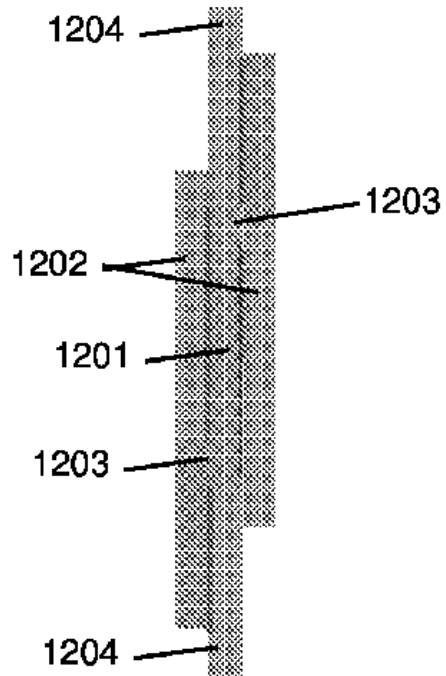


10

【 1 1 】



【 1 2 】



20

30

40

Figure 11

Figure 12

50

【 図 1 3 】

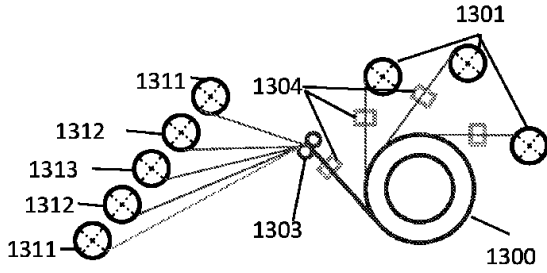


Figure 13

【 図 1 4 】

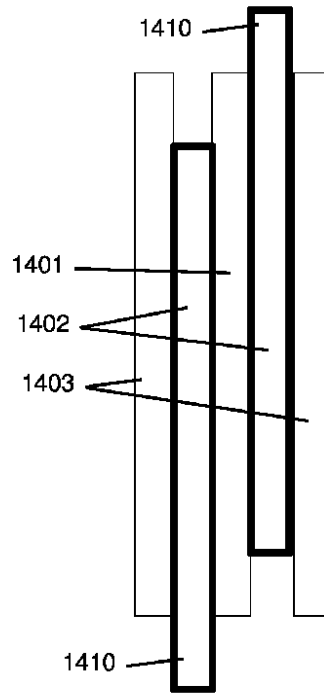


Figure 14

10

20

【 図 1 5 】

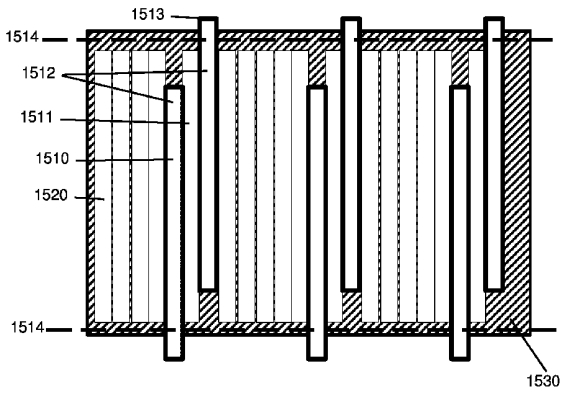


Figure 15

【 図 1 6 A - 1 6 C 】

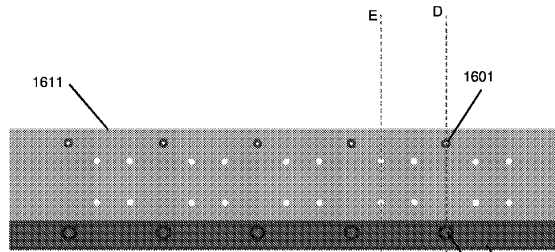


Figure 16A

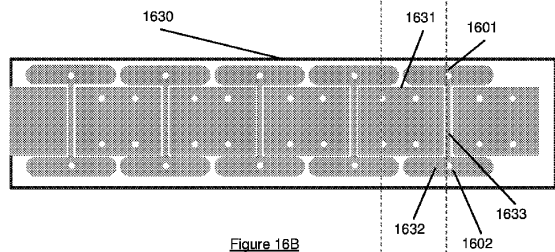


Figure 16B

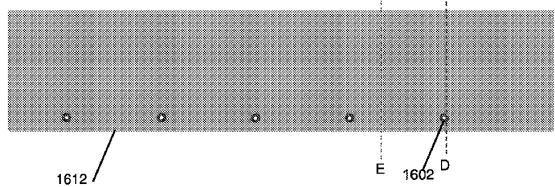


Figure 16C

30

40

50

【 16 D 】

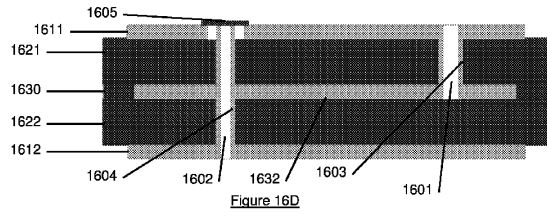


Figure 16D

【 16 E 】

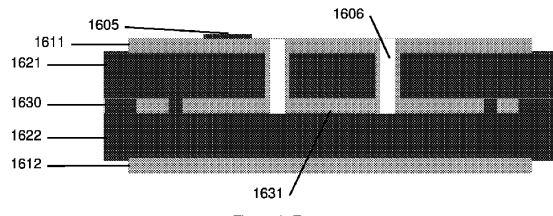


Figure 16E

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I
G 2 1 K 1/00 A

(33)優先権主張国・地域又は機関

英国(GB)

(31)優先権主張番号 1818817.7

(32)優先日 平成30年11月19日(2018.11.19)

(33)優先権主張国・地域又は機関

英国(GB)

イー オックスフォードシャー アビンドン ミルトン パーク ブルック ドライブ 173 トカマク エナジー リミテッド

(72)発明者 クルイブ、 マーセル

イギリス国 オーエックス14 3ディービー オックスフォードシャー アビンドン カルハム サイエンス センター ディー5 カルハム イノベーション センター トカマク エナジー リミテッド

(72)発明者 ヴァン ノグテレン、 バス

イギリス国 オーエックス14 5ディーエヌ オックスフォードシャー アビンドン マリーナ ウエイ 29

(72)発明者 ブリトルズ、 グレグ

イギリス国 オーエックス14 3ディービー オックスフォードシャー アビンドン ミルトン パーク カルハム サイエンス センター ディー5 カルハム イノベーション センター トカマク エナジー リミテッド

(72)発明者 ルイス デ ヴィラ バルデス、 エンリケ

イギリス国 オーエックス2 6ディーディー オックスフォードシャー オックスフォード クランハム ストリート 66

(72)発明者 ベイトマン、 ロッド

イギリス国 オーエックス14 4エスディー オックスフォードシャー アビンドン ミルトン パーク ブルック ドライブ 173 トカマク エナジー リミテッド

(72)発明者 ダウン、 アラン

イギリス国 オーエックス14 4エスディー オックスフォードシャー アビンドン ミルトン パーク ブルック ドライブ 173 トカマク エナジー リミテッド

審査官 後藤 嘉宏

(56)参考文献

特開2016-039289(JP,A)
特開2006-313924(JP,A)
特開平09-082520(JP,A)
特開2015-179764(JP,A)
特表2017-535948(JP,A)
国際公開第2017/039299(WO,A1)
特開平07-085735(JP,A)
特開平10-097919(JP,A)
特開平03-088308(JP,A)
特開2012-256684(JP,A)
特開2013-247281(JP,A)
特表2016-537611(JP,A)
特開2014-049638(JP,A)
特開平04-287903(JP,A)
特開2012-023168(JP,A)
特表2016-534327(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H01F 6/06
G21B 1/05

G 2 1 B	1 / 1 1
G 2 1 K	5 / 0 4
G 2 1 K	1 / 0 0