(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7507783号
(P7507783)

(45)発行日　令和6年6月28日(2024.6.28)

(24)登録日　令和6年6月20日(2024.6.20)

(51)国際特許分類		FI		
Ｈ０１Ｆ　6/06　(2006.01)		Ｈ０１Ｆ	6/06	１４０
Ｈ０１Ｂ　12/06　(2006.01)		Ｈ０１Ｂ	12/06	
		Ｈ０１Ｆ	6/06	１１０

請求項の数　16　（全17頁）

(21)出願番号　特願2021-558749(P2021-558749)
(86)(22)出願日　令和2年4月3日(2020.4.3)
(65)公表番号　特表2022-527526(P2022-527526A)
(43)公表日　令和4年6月2日(2022.6.2)
(86)国際出願番号　PCT/EP2020/059638
(87)国際公開番号　WO2020/201540
(87)国際公開日　令和2年10月8日(2020.10.8)
審査請求日　令和5年3月28日(2023.3.28)
(31)優先権主張番号　1904665.5
(32)優先日　平成31年4月3日(2019.4.3)
(33)優先権主張国・地域又は機関
英国(GB)

(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 アビンドン ミルトン ブルック ドライブ １７３
(74)代理人　100083806
弁理士　三好 秀和
(74)代理人　100095500
弁理士　伊藤 正和
(74)代理人　100111235
弁理士　原 裕子
(74)代理人　100195257
弁理士　大渕 一志
(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
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　高温超伝導ケーブル

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
磁石のコイルに電流を流すためのケーブルであって、
ＨＴＳ輸送テープと、
前記ＨＴＳ輸送テープの面を横切って横並びで配置された２つ以上のＨＴＳシャントテープを含むシャントアセンブリと
を含み、
前記輸送テープ及び前記シャントテープのそれぞれが基板層と高温超伝導（ＨＴＳ）材料のＨＴＳ層とを含み、前記シャントテープの層は前記輸送テープの層に平行に延び、
前記シャントテープのうちの１つ以上のシャントテープの前記ＨＴＳ層は、前記ＨＴＳ層におけるドロップアウト及び／又は完全又は部分的な破断部を含む複数の不連続部によって中断され、
前記ＨＴＳ輸送テープの面は、前記複数の不連続部のそれぞれを横切って延在する、ケーブル。
【請求項２】
前記不連続部は、隣接するシャントテープ間で互い違いになっている、請求項１に記載のケーブル。
【請求項３】
前記１つ以上のシャントテープのそれぞれの内部の前記不連続部は、前記シャントテープに沿って一定の間隔で設けられる、請求項１に記載のケーブル。

【請求項４】
前記不連続部の間隔は前記シャントテープ間で異なる、請求項３に記載のケーブル。
【請求項５】
前記シャントテープは、前記輸送テープ内のＨＴＳ材料とは異なるＨＴＳ材料を含む、請求項１に記載のケーブル。
【請求項６】
前記２つ以上のシャントテープは互いに異なるＨＴＳ材料を含む、請求項１に記載のケーブル。
【請求項７】
前記シャントテープのうちの１つ以上のシャントテープの前記ＨＴＳ層及び基板層は、前記輸送テープの前記ＨＴＳ層及び基板層と比較して異なる配向を有する、請求項１に記載のケーブル。
【請求項８】
前記シャントテープの前記ＨＴＳ層及び基板層の配向は、横方向に隣接するシャントテープ間で交互になっている、請求項７に記載のケーブル。
【請求項９】
前記シャントアセンブリは、前記２つ以上のシャントテープを含む第１のシャント層と、前記第１のシャント層を横切って横並びで配置された２つ以上の更なるシャントテープを含む第２のシャント層とを含み、前記更なるシャントテープの層は、前記輸送テープの層に平行に延びる、請求項１に記載のケーブル。
【請求項１０】
前記第１のシャント層の各シャントテープは、前記第２のシャント層の隣接するシャントテープとタイプ０又はタイプ１又はタイプ２の対を形成する、請求項９に記載のケーブル。
【請求項１１】
前記ケーブルは、前記シャントアセンブリに隣接する別の輸送テープをさらに含み、前記輸送テープが積層された対を形成し、前記シャントアセンブリが前記２つの輸送テープの間で前記対の内側に配置されるようにする、請求項１に記載のケーブル。
【請求項１２】
前記輸送テープは、前記対のそれぞれのＨＴＳ層が互いに向かい合い、かつ前記対のそれぞれの基板層の間にあるように、タイプ０の対として配置される、請求項１１に記載のケーブル。
【請求項１３】
磁石のコイルに電流を流すためのケーブルであって、
ＨＴＳテープの積層テープアセンブリを含み、各ＨＴＳテープは、基材層と高温超伝導（ＨＴＳ）材料のＨＴＳ層とを含み、前記テープアセンブリは、
連続的なＨＴＳ層を含むＨＴＳ輸送テープと、
それぞれがそのＨＴＳ層に複数の不連続部を含む１つ以上のシャントテープを含むシャントアセンブリと、
前記輸送テープと前記シャントアセンブリとの間を電流が流れることを可能にするための前記輸送テープと前記シャントアセンブリとの間の常伝導層と
を含み、
前記ＨＴＳ輸送テープの面は、前記複数の不連続部のそれぞれを横切って延在し、
前記シャントアセンブリの１つ以上のテープにおける不連続部の配置は、前記輸送テープのＨＴＳ層における横方向の電流分布を方向付けるように選択される、ケーブル。
【請求項１４】
前記ケーブルは、前記テープのうちの別の１つのテープのＨＴＳ材料とは異なるＨＴＳ材料を含む少なくとも１つのテープを含む、請求項１から１３のいずれか一項に記載のケーブル。
【請求項１５】

請求項１から１４のいずれか一項に記載のケーブルが巻かれたマグネットコイル。
【請求項１６】
トカマクと、請求項１５に記載のマグネットコイルを含む磁気プラズマ閉じ込めシステムとを含む核融合炉。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、磁石のコイルに電流を流すためのケーブルであって、高温超伝導材料を含むケーブルに関する。特に、限定されるものではないが、このようなケーブルが巻かれたマグネットコイルを含む磁気プラズマ閉じ込めシステムを含む核融合炉に関する。
【背景技術】
【０００２】
超伝導材料は一般に、「高温超伝導体」（ＨＴＳ）と「低温超伝導体」（ＬＴＳ）に分けられる。Ｎｂや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よりも低い臨界温度（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、超伝導動作及び組成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（Ｒｅは希土類元素、一般にＹ又はＧｄ）などの銅酸化物（酸化銅基を含む化合物）をベースとするセラミックである。他のＨＴＳ材料は、鉄プニクチド（例えば、ＦｅＡｓ及びＦｅＳｅ）及び二ホウ酸マグネシウム（MgB_2）を含む。
【０００３】
ＲｅＢＣＯは通常、図１に示したような構造を有するテープとして製造される。このようなテープ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ハステロイ）を含み、基板１０１の上に、ＩＢＡＤ、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ＲｅＢＣＯ－ＨＴＳ層１０３（ＭＯＣＶＤ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ＨＴＳ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、これにより多くの場合テープは完全に封入される。
【０００４】
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ＨＴＳ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ＨＴＳへの元素の化学拡散を防止する。銀層１０４は、ＲｅＢＣＯ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、ＲｅＢＣＯ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。
【０００５】
ＨＴＳテープは、ＨＴＳケーブルに配置することができる。本明細書で言及されるＨＴＳケーブルは、一般に導電性材料（通常は銅）を介してそれらの長さに沿って接続される１つ以上のＨＴＳテープを含む。ＨＴＳテープは積層する（すなわち、ＨＴＳ層が平行になるように配置する）ことができ、又はＨＴＳ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構成を有することができる。ＨＴＳケーブルの注目すべき特別なケースは、単一のＨＴＳテープとＨＴＳ対である。ＨＴＳ対は、ＨＴＳ層が平行になるように配置された１対のＨＴＳテープを含む。基板付きテープを使用する場合、ＨＴＳ対は、タイプ

０（ＨＴＳ層が互いに向き合う）、タイプ１（一方のテープのＨＴＳ層が他方のテープの基板に面する）、又はタイプ２（基板が互いに向き合う）であり得る。３つ以上のテープを含むケーブルは、テープの一部又はすべてをＨＴＳ対に配置することができる。積層されたＨＴＳテープは、ＨＴＳ対の様々な構成、最も一般的には、タイプ１の対の積層体、又はタイプ０の対（又は同等にタイプ２の対）の積層体のいずれかを含むことができる。

【０００６】

ＨＴＳテープ（及び一般に超伝導体）の重要な特性は、「臨界電流」（I_c）であり、これは、所定の温度及び外部磁場でＨＴＳが常伝導になる電流である。超伝導体が「常伝導になった」と考えられる超伝導転移の特徴点は、ある程度不定であるが、通常はテープがE_0＝１０又は１００マイクロボルト／メートルを生成するときであると考えられる。臨界電流は、超伝導体の温度及び超伝導体における磁場を含む多くの要因によって決まり得る。後者の場合、磁場の大きさと磁場中の超伝導体結晶軸の配向の両方が重要である。

【０００７】

ＨＴＳケーブルの場合、ケーブルが均一な温度であり、その全長に沿って均一な磁場にあると仮定すると、積層体内のすべてのテープの臨界電流は比較的均一になる。この場合、ケーブルが電源に接続されると、電流は、オームの法則に従って、ケーブルの端部における終端抵抗の比率でテープ間に単純に分布する。しかしながら、多くの場合、電流分布は、ケーブル内のテープの長さに沿って又は幅全体にわたって局所磁場の大きさ又はＲｅＢＣＯ層のｃ軸に対する磁場角度が異なる場合など、多くの要因の影響を受ける可能性がある。このようなばらつきは、ケーブルが磁石用コイルに巻かれるときに生じる。例えば、パンケーキコイルの積層体から形成される磁石では、積層体の端部でコイルを構成するケーブルは、その構成テープの幅全体にわたってI_cのばらつきを有し得る。輸送電流はその結果、個々のテープの幅のうちI_cが最も高い部分に優先的に流れる。場合によっては、コイル内のケーブルの局所場の大きさ及び方向に応じて、ケーブル内の１つ以上のテープ内の輸送電流が、大部分が一方の端に沿って流れる可能性がある。したがって、ケーブル内のテープ内の電流分布は、主にコイルの形状によって決まる。

【０００８】

ケーブルに沿った温度の違いも、特にケーブルのすべてのセクション及び／又は層に適切な量の冷却を提供することが困難な場合があるため、ケーブル内で電流がどのように分布するかに影響を与え得る。

【０００９】

テープの両端又はテープ間でのI_cの違いは、ＨＴＳケーブル内の電流分布につながる可能性があり、これは多くの用途にとって最適ではない。特に、テープの異なる部分の間のI_cの違いは、ＨＴＳ材料の内部に閉ループで流れる遮蔽電流を生じる可能性がある。遮蔽電流は、超伝導状態で必要とされるように、ＨＴＳ内のすべての点が（外部電圧又は輸送電流が存在しない場合でも）臨界電流を流すように、過剰な臨界電流を「使い果たす」ために生成される。しかしながら、外部から印加された電圧によって駆動される各テープに出入りする電流のみが大きな磁場を生成するため、遮蔽電流はＨＴＳ磁石の性能を制限する可能性がある。

【００１０】

遮蔽電流（又はループ「超電流」によって生成される磁場は小さく、テープから離れるに従って急速に減衰するが、磁場の質（すなわち、均一性と時間的安定性）に悪影響を与える可能性がある。これは、コイルから磁場が利用される領域までの距離がテープ幅と比較して小さい磁石、例えば、磁場の均一性を０．０００１％（ＮＭＲの場合）及び０．００１％（ＭＲＩの場合）よりも良好に制御しなければならない場合があるＮＭＲ挿入コイル又はＭＲＩコイルにおいて特に問題となり得る。

【００１１】

したがって、高い磁場品質を必要とする用途では、（ａ）電流が積層体内のテープ間に均等にかつ（ｂ）積層体内の各テープの幅全体にわたって均一に分布することが望ましい。

【００１２】

この問題の部分的な解決策は、積層体内の個々のテープを蛇行形状に切断してからより合わせた「Ｒｏｅｂｅｌ」ケーブルによって提供される。しかしながら、Ｒｏｅｂｅｌケーブルにはいくつかの欠点がある。
・Ｒｏｅｂｅｌケーブルはテープを無駄にする（蛇行形状を作るために幅の広いテープからセグメントを打ち抜くと約４０％が失われる）
・コイルに巻いて通電すると、ローレンツ力により、個々のテープが交差する場所に応力集中が生じる。これらにより、テープが損傷し、局所I_Cが低下する可能性がある。
・テープ間の電流共有は、単純な積層テープケーブルのように全長に沿ってではなく、テープが交差する場所に制限される。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１３】

したがって、これらの問題の１つ以上に対処するＨＴＳケーブルが必要である。

【課題を解決するための手段】

【００１４】

本発明の第１の態様によれば、磁石のコイルに電流を流すためのケーブルが提供される。磁石は、ＨＴＳ輸送テープと、輸送テープの面を横切って横並びで配置された２つ以上のＨＴＳシャントテープを含むシャントアセンブリとを含む。輸送テープ及びシャントテープのそれぞれが基板層と高温超伝導（ＨＴＳ）材料のＨＴＳ層とを含み、シャントテープの層は輸送テープの層に平行に延びる。

【００１５】

１つ以上のシャントテープのＨＴＳ層は、ＨＴＳ層におけるドロップアウト及び／又は完全又は部分的な破断部を含む複数の不連続部によって中断され得る。不連続部は、隣接するシャントテープ間で互い違いであることができる。１つ以上のシャントテープのそれぞれの内部の不連続部は、規則的又は半規則的な間隔を有することができる。不連続部の間隔は、シャントテープ間で異なることができる。

【００１６】

シャントテープは、輸送テープ内のＨＴＳ材料とは異なるＨＴＳ材料を含むことができる。

【００１７】

２つ以上のシャントテープが、互いに異なるＨＴＳ材料を含むことができる。

【００１８】

１つ以上のシャントテープのＨＴＳ及び基板層は、輸送テープのＨＴＳ層及び基板層と比較して異なる配向を有することができる。

【００１９】

シャントテープのＨＴＳ層及び基板層の配向は、横方向に隣接するシャントテープ間で交互になることができる。

【００２０】

シャントアセンブリは、２つ以上のシャントテープを含む第１のシャント層と、第１のシャント層を横切って横並びで配置された２つ以上の更なるシャントテープを含む第２のシャント層とを含むことができ、更なるシャントテープの層は、輸送テープの層に平行に延びる。

【００２１】

第１のシャント層の各シャントテープは、第２のシャント層の隣接するシャントテープとタイプ０又はタイプ１又はタイプ２の対を形成することができる。

【００２２】

積層体は、シャントアセンブリに隣接する別の輸送テープをさらに含み、輸送テープが積層された対を形成し、シャントアセンブリが２つの輸送テープの間で対の内側に配置されるようにする。

【００２３】

輸送テープは、対のそれぞれのＨＴＳ層が互いに向かい合い、かつ対のそれぞれの基板層の間にあるように、タイプ０の対として配置することができる。

【００２４】

ケーブルは、テープのうちの別の１つのテープのＨＴＳ材料とは異なるＨＴＳ材料を含む少なくとも１つのテープを含むことができる。

【００２５】

本発明の第２の態様によれば、磁石のコイルに電流を流すためのケーブルが提供される。ケーブルは、ＨＴＳテープの積層テープアセンブリを含み、各ＨＴＳテープは、基板層と高温超伝導（ＨＴＳ）材料のＨＴＳ層とを含む。テープアセンブリは、連続的なＨＴＳ層を含む輸送テープと、それぞれがそのＨＴＳ層に複数の不連続部を含む１つ以上のシャントテープを含むシャントアセンブリと、輸送テープとシャントアセンブリとの間を電流が流れることを可能にするための輸送テープとシャントアセンブリとの間の常伝導層とを含む。シャントアセンブリの１つ以上のテープにおける不連続部の配置は、輸送テープのＨＴＳ層における横方向の電流分布を方向付けるように選択される。

【００２６】

本発明の第３の態様によれば、磁石のコイルに電流を流すためのケーブルが提供される。ケーブルは、高温超伝導材料を含む連続的な輸送導体層と、シャント構造内の電流の分布を方向付けるための非超伝導バリアを有する高温超伝導材料を含むシャント構造とを含む。

【００２７】

シャント構造における電流の分布は、輸送導体層における電流の分布を制御することができる。

【００２８】

本発明の第４の態様によれば、上記のケーブルのいずれかが巻かれたマグネットコイルが提供される。

【００２９】

本発明の第５の態様によれば、トカマクと、マグネットコイルを含む磁気プラズマ閉じ込めシステムとを含む核融合炉が提供される。

【図面の簡単な説明】

【００３０】

【図１】ＨＴＳテープの概略切り取り図である。

【図２】ＨＴＳテープの概略断面図である。

【図３】図２のＨＴＳテープの概略部分分解斜視図である。

【図４】ＨＴＳテープの概略断面図である。

【図５】ＨＴＳテープの概略断面図である。

【図６】ＨＴＳテープの概略断面図である。

【図７】図６のＨＴＳテープの概略部分分解斜視図である。

【図８】ＨＴＳテープを含むトロイダル磁場磁石の中心柱の概略断面上面図である。

【図９】図８のトロイダル磁場磁石の二重パンケーキコイルの一方の概略断面図である。

【図１０】図９のパンケーキコイルの一方の断面について計算された磁場（Ｂ）のベクトルプロット及び磁場（Ｂ）の大きさの等高線プロットである。

【図１１】図１０のパンケーキコイルの断面について計算された臨界電流（I_c）の等高線プロットである。

【図１２】異なる間隔の切断部を有するシャントテープを含むＨＴＳテープのＩ－Ｖ曲線を示すグラフである。

【図１３】ＨＴＳテープの概略断面図である。

【発明を実施するための形態】

【００３１】

本発明は、より均一な電流密度を生成するためにケーブル幅全体及びテープ間の電流分布を調整することを可能にする、積層されたＨＴＳテープを含むＨＴＳケーブルに関する

。これにより、電流密度がテープ間でより均等に分布しかつ／又は各ターン全体にわたってより均一であるＨＴＳ磁石を製造することができる。これらの特性は、磁場の均一性などの磁石の「実際の」性能が、ＨＴＳ磁石の設計者が考えていたものにより酷似しているので、ＨＴＳ磁石の設計に大いに役立つ。

【００３２】

ケーブルの幅全体にわたる電流分布は、各テープにおけるＲｅＢＣＯ層のａｂ面に対する磁場角を可能な限りゼロに近づける目的で、意図的に不均一になるように調整することもできる。これは、ケーブルの臨界電流を最大にする。後述するように、ＨＴＳケーブルの両端に生じる電圧は、（例えば、複数のランプサイクル又は熱サイクルによる疲労から生じる可能性がある）亀裂などのＲｅＢＣＯ層の損傷又は中性子照射によるケーブルの劣化の早期警告も提供する。

【００３３】

一実施例では、ＨＴＳケーブルは、積層されたＨＴＳテープの「巻かれた」対の間に挟まれた２つ以上の「シャント」ＨＴＳテープを含むことができる。巻かれた対は、意図的な破断部又はI_Cドロップアウトがない連続的なテープ対（通常、必ずではないが、タイプ０の対）である。対照的に、非常に低いが無視できない抵抗が、一定の間隔でシャントＨＴＳテープに導入される。巻かれた対の臨界電流を超える輸送電流は、「内部の」シャントＨＴＳテープに共有され、シャントＨＴＳテープ間で分配されなければならない。シャントＨＴＳテープ間の分散した抵抗接続の数及び抵抗、ならびに各シャントテープの「動的な」（すなわち、電流に依存する）抵抗を変化させることによって、ケーブルに沿った個々のテープ間及びケーブルの幅全体にわたる輸送電流の分布に影響を与えることができる。

【００３４】

ＨＴＳテープの動的抵抗は以下のように定義される。

【数１】

$$R(I) = E_0 \frac{h}{I}\left(\frac{I}{I_c(B,T,\theta)}\right)^n$$

ここで、

・E_0は臨界電流を定義するために用いられる電界基準、通常１０又は１００μＶ／ｍであり、
・ｈはテープの長さであり、
・Ｉはテープ内の輸送電流であり、
・I_Cはテープの臨界電流（それ自体、磁場の大きさＢ、温度Ｔ、及びベクトルＢとＲｅＢＣＯ結晶のｃ軸との間の角度（θ）の関数）であり、
・ｎは超伝導から常伝導への遷移の急峻さを定義する超伝導体のｎ値である（ＲｅＢＣＯテープの場合、ｎは通常２０から５０であるが、ＢとＴにも依存する）。

【００３５】

したがって、シャントテープに沿って一定の間隔でI_Cドロップアウト（例えば、臨界電流がより低い領域又は使用時に非超伝導である領域）又は完全な切断部を加えることによって、及び／又はケーブルの異なる部分に異なる臨界電流を有するシャントテープを使用することによって、ケーブル内の電流分布を調整することが可能である。ドロップアウトは、例えば、テープを鋭角に曲げるか又は折り畳むことによって形成することができ、その結果、ＲｅＢＣＯ層に局所的な歪みによる亀裂及びI_C低下が生じる。シャント対に使用されるＨＴＳテープ片のｎ値も、所望の電流分布を実現するのに役立つように選択することができる。

【００３６】

図２は、タイプ０の対として配置されている、一対の比較的幅の広い「巻かれた」ＨＴＳテープ２０１Ａ、２０１Ｂを含むＨＴＳケーブル２００の断面を示す。これらは「輸送

」テープと見なすこともできる。巻かれた対のテープ２０１Ａ、２０１Ｂの間には、「２ｘ２」マトリクス配列、すなわち、２行及び２列を有する配置の４つのより幅の狭い「シャント」ＨＴＳテープ２０２Ａ～２０２Ｄがある。ＨＴＳテープのそれぞれは、基板層２０６上にＲｅＢＣＯ層２０４を含み、両層が銅被覆２０８によって囲まれている。ＨＴＳテープ２０２Ａ及び２０２Ｃは、ＨＴＳテープ２０２Ｂ及び２０２Ｄと同様にタイプ２の対として配置されている。

【００３７】

積層されたＨＴＳテープの外面には、ステンレス鋼、真鍮又は銅などの金属から作られた安定化層２１０も加えられる。安定化層は、ケーブル内の任意の位置に加えることができ、場合によっては全く含まれないこともできる。

【００３８】

図３は、ＨＴＳケーブル２００のいくつかの層の部分的に分解された斜視図を示す（明確にするために、テープ２０２Ｃ～２０２Ｄは省略されている）。最も外側に巻かれたテープ２０１Ａ～２０１Ｂは連続的であり、一方、シャントテープ２０２Ａ～２０２Ｂはそれぞれ、それらの長さに沿って規則的な一連の破断部３０２を有する。破断部は、２つのテープの破断部が互いに長手方向に一致せず、図示の実施例では異なる間隔を有するように、シャントテープ２０２Ａ～２０２Ｂ内に配置される。対照的に、巻かれたＨＴＳテープ２０１Ａ、２０１Ｂは意図的な破断部又はI_cドロップアウトを有していないので、コイルに巻かれると、これらのテープは、ゼロ抵抗の連続的な螺旋状超伝導経路を提供する。

【００３９】

以下の説明での参照を容易にするために、テープは、Ｓ１（シャントテープ２０２Ａ～２０２Ｂ）、Ｓ２（シャントテープ２０２Ｃ～２０２Ｄ）及びＷ（テープ２０１Ａ～２０１Ｂ）で示される横方向の対にグループ化される。したがって、シャントＨＴＳテープは、タイプ０の対に関して配置を説明する場合のように、各列内ではなく、各行内の対と見なされる。

【００４０】

シャント対Ｓ１及びＳ２のテープは、互いに及びそれぞれ臨界電流$I_{c,W}$を有するＷ対のテープとは異なる臨界電流$I_{c,S1}$及び$I_{c,S2}$を有する。

【００４１】

ケーブルに増加する電流I_0が供給されると、Ｗ対は、I_0がその臨界電流$2*I_{c,W}$に近づくまで、すべての電流を流す。ケーブルはその後、シャントテープに過剰電流（$I_0-2*I_{c,w}$）を流すのに十分な電圧を生成する。この過剰電流は、テープ間の常伝導金属（すなわち、非ＨＴＳ材料）を通る局部抵抗に従ってシャントテープ間で分割され、これは、テープの動的抵抗及びテープに沿った不連続部又は中断部（ドロップアウト）の間隔に影響される。

【００４２】

図４は、ＨＴＳケーブル４００が、ＨＴＳテープ２０１Ａとテープ２０２Ａ～２０２Ｂ）を含むＳ１シャント対との間に位置する追加の安定化層４０１Ａと、ＨＴＳテープ２０２Ａとテープ２０２Ｃ～２０２Ｄを含むＳ２シャント対との間に位置する追加の安定化層４０１Ｂとを含むことを除いて、図２と同様である。この実施例では、追加の安定化層は銅から形成されているが、他の金属（又は合金）及び他の導電性材料も使用することができる。ＨＴＳケーブル４００内の任意の位置に、しかしながら好ましくはＷ、Ｓ１又はＳ２ＨＴＳテープによって形成されるタイプ０の対の間に、１つ以上のこのような追加の安定化層を含めることができる。

【００４３】

本明細書に記載されるＨＴＳケーブルの更なる利点は、異なるＨＴＳテープ（すなわち、異なるＨＴＳ材料を有するか又は異なる超伝導特性を有するテープ）を単一のケーブルに組み込むことができることである。これにより、例えば、異なる供給業者からのＨＴＳテープを使用して単一のケーブルを製造することができ、これは、単一のケーブル供給業者が十分なＨＴＳテープを供給することができない可能性がある大型のマグネットコイル

の製造に特に重要である。

【００４４】

本明細書に記載されるＨＴＳケーブルはまた、（ａ）各「レーン」内の個々のＨＴＳテープ片の長さ（例えば、テープ片２０２Ａ、２０２Ａ’及び２０２Ａ”の長さ）を選択すること、及び（ｂ）各レーンにおけるテープ製造業者を（臨界電流に基づいて）選択すること、及び／又は（ｃ）シャントＨＴＳテープ２０２Ａ～２０２Ｄの幅を選択することの組み合わせを使用して、電流を強制的にテープ間で均等に分布させることによって、臨界電流の増加を可能にすることができる。

【００４５】

内部シャントテープの多くの並べ替え及び組み合わせが可能である。

【００４６】

図５は、ＨＴＳケーブル５００のＨＴＳシャントテープ２０２Ｂ及び２０２Ｄのうちの２つがタイプ０の対として配置されることを除いて、図４と同様である。

【００４７】

図６は、シャントＨＴＳテープの向き（すなわち、ＨＴＳ層及び基板層のどちらが最も上であるか）がＨＴＳケーブル６００を横切って左から右に交互になるように、ＨＴＳケーブル６００がタイプ２の対として配置された２つの更なるシャントＨＴＳテープ６０２Ａ及び６０２Ｂを含むことを除いて、図５と同様である。この実施例では、シャントＨＴＳテープは、２×３マトリクスとして配置される（すなわち、２行及び３列がある）。しかしながら、一般に、任意の数の行又は列を有するマトリクスを形成するシャントＨＴＳテープ、すなわち、ｎｘｍマトリクス配列を使用することができる。通常、輸送ＨＴＳテープ２０１Ａ、２０１Ｂの幅は、シャントＨＴＳテープの幅の整数倍であるため、輸送ＨＴＳテープの面を横切って整数個のシャントテープを設けることができる。

【００４８】

図７は、図６のＨＴＳケーブル６００が示されていることを除いて、図３と同様である。安定剤層は、明確にするために省略されている。シャントＨＴＳテープの３つの（柱状）対は、７０２Ａ、７０２Ｂ、及び７０２Ｃで示される。シャントＨＴＳテープの内側の対７０２Ｂは、シャントＨＴＳテープの外側の対７０２Ａ、７０２Ｃの破断間隔よりも小さい破断間隔を有する。このことは、外側の対７０２Ａ、７０２Ｃの特定の範囲の輸送電流に対する動的抵抗がより低くなるため、外側の対が内側の対７０２Ｂよりも高い臨界電流を有するので、電流を外側の対７０２Ａ、７０２Ｃに優先的に流すように強制する。これにより、輸送テープ２０１、２０１Ｂの端では中央よりも多くの電流が流れる。

【００４９】

電流をケーブルの端に優先的に分布させることにより、各テープに垂直な磁場の成分が減少するため、ケーブルの電流容量を増やすことができる。これは一般に有益であり、（局所的な過負荷による）ホットスポットが熱暴走を引き起こし、結果として磁石のクエンチを引き起こす前に、同じ量のＨＴＳを有するコイルがより高い磁場を（より高い輸送電流で）生成することを可能にする。

【００５０】

上記のすべての実施例において、ＨＴＳケーブルは、完全な絶縁、部分的な絶縁（例えば「漏れのある」）絶縁を使用して、又は巻線間に絶縁を使用せずにコイルに巻くことができる。（後述するように）トカマクでは、トロイダル磁場（ＴＦ）コイルは部分的な絶縁で巻かれ（許容可能なランプ時間で最適なクエンチ保護を提供するため）、ポロイダル磁場（ＰＦ）コイルは完全な絶縁で巻かれる（より速いクエンチ検出方法が必要とされるという犠牲を払って、最小のランプ時間及び予測可能な交流電流（ＡＣ）挙動を提供するため）。

【００５１】

ＨＴＳケーブル（上記のような）の１つの重要な用途は、トカマクとして知られる核融合炉の一種である。トカマクは、高温で安定したプラズマを提供するために、強力なトロイダル磁場、高いプラズマ電流、及び通常は大きなプラズマ体積及びかなりの補助加熱の

組み合わせを特徴とする。これにより、トカマクは核融合が起こり得るような条件を作り出すことができる。補助加熱（例えば、高エネルギーの水素、重水素、又はトリチウムの数十メガワットの中性粒子ビーム入射による）は、核融合が起こるのに必要な十分に高い値まで温度を上昇させるため及び／又はプラズマ電流を維持するために必要である。

【００５２】

トカマクのマグネットコイルは２つのグループに分けられる。ポロイダル磁場コイルは、その中心がトカマクの中心柱にあるように巻かれた水平円形コイルであり、ポロイダル磁場（すなわち、中心柱に実質的に平行なもの）を生成する。トロイダル磁場コイルは、中心柱を通って垂直に巻かれ、プラズマチャンバーの外側の周りに巻かれ（「リターンリム」）、トロイダル磁場（すなわち、中心柱の周りに円形であるもの）を生成する。ポロイダル磁場とトロイダル磁場の組合せは、プラズマを閉じ込めたままにするプラズマチャンバー内にヘリカル磁場を生成する。

【００５３】

トロイダル磁場を生成するために必要なアンペア回数は非常に大きい。したがって、トカマクの設計は、磁場コイルに超伝導材料を使用することをますます必要としている。コンパクトな球形トカマクの場合、中心柱の直径はできるだけ小さくする必要がある。超伝導材料でも達成できる電流密度は限られているので、これは相反する要件を提示している。

【００５４】

本明細書に記載されるＨＴＳケーブルは、例えば、ポロイダル磁場又はトロイダル磁場のいずれか（又は両方）を生成するために、トカマク、特に球状トカマクでの使用に特に適している。

【００５５】

図８から図１１は、トカマクで使用されるようなトロイダル磁場（ＴＦ）磁石の課題を示しており、このトロイダル磁場は、中心柱の周りに二重パンケーキコイルの配置を含む。

【００５６】

図８は、二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒが中心柱８０２の周りに均一に配置されたＴＦ磁石の断面を示す。各二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒは、各二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒに電流が順に流れるとトロイダル磁場が生成されるように、その軸が図の平面内にあるように配置されている。

【００５７】

図９は、二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒのうちの１つの半径方向断面の拡大図を示す。各二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒは、共通の軸（図示せず）を中心に反対方向に巻かれ、向かい合って積層された２つのパンケーキコイル９０２Ａ、９０２Ｂから形成されている。各コイル９０２Ａ、９０２Ｂは、タイプ０の配置の積層されたＨＴＳテープからなるＨＴＳケーブル、すなわち、上記の背景のセクションで説明したような「従来の」ＨＴＳケーブルから形成されている。ＨＴＳケーブルの隣接する巻線９０５、９０６は、部分的に絶縁された層９０７によって互いに分離されている。

【００５８】

図１０は、（単一の）パンケーキコイル９０２Ａ、９０２Ｂの一方の内部における磁場の計算結果を示す。図のＸ軸とＹ軸は、コイル内のそれぞれの半径方向距離と軸方向距離を示す。等高線は、コイル内の磁場の大きさ｜Ｂ｜を示す。線１００１は、コイル９０２Ａ、９０２Ｂの例示的な巻線の位置を示す。図に示した矢印の方向は、線１００１に平行からの磁場（Ｂ）ベクトルのずれを示す。

【００５９】

図１１は、臨界電流の計算結果が示されていることを除いて、図１０と同様である。テープによって生成される磁場を計算するために、各テープが１２のストリップに分割され、単一ストリップに対する臨界電流が順番にすべてのシャントテープにわたって合計される。臨界電流の計算は、電流がテープ全体にわたって均一であることを前提としている。しかしながら、実際には、電流と臨界電流の均一な比、すなわち、

【数２】

$$\frac{I(x)}{I_c(B(x),T,\theta(x))} \approx \text{一定}$$

を達成するために、電流がテープ全体にわたって（すなわち、Ｘ軸に沿って）再分配されるので、この仮定は常に正しいとは限らない。

【００６０】

したがって、臨界電流分布の計算は、図１１に示した近似臨界電流分布I_c（ｘ）を用いて電流分布Ｉ（ｘ）を再計算する反復手順を用いて改善することができる。このプロセスは、両方の電流分布が変化しなくなるまで反復的に繰り返すことができる。したがって、図１１に示した結果は最初の反復のみを表している。

【００６１】

図１１は、図１０に示した計算された磁場を参照して理解することができる。臨界電流は、磁場が０に近い内側半径で最大であるが、大きな半径（Ｘ位置）で急速に低下し、Ｂが増加する。臨界電流はまた、パンケーキの下端（ｙ＝０）におけるＨＴＳケーブル内のテープに（したがってＲｅＢＣＯ層のａｂ面に）ほぼ平行から上端（ｙ＝２０ｍｍ）における数度のずれまでの磁場角の変化により、コイルの幅（Ｙ位置）全体にわたって変化する。使用中、輸送電流はI_c分布に比例してテープに流れる。したがって、コイル８０２Ａ、８０２Ｂ内の磁場強度及び磁場方向の不均一性は、電流がパンケーキコイルの内縁を「独占する」傾向を生じさせる。

【００６２】

この問題は、「従来の」ＨＴＳケーブルを図２～図７に関連して上述したものと同様のＨＴＳケーブルに置き換えることによって対処することができる。シャントＨＴＳテープにおける不連続部（すなわち、ドロップアウト又は切断部又はI_cの変化）は、ケーブルの片側にあるシャントＨＴＳテープにおける輸送電流の割合をより大きくするように選択される。これにより、二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒは、クエンチ前により多くの電流を流すことができる。

【００６３】

本明細書に記載されるＨＴＳケーブルの更なる利点は、核融合炉内の中性子損傷、又は熱サイクル若しくは磁場サイクルによる疲労によって引き起こされ得るようなＨＴＳテープのI_c低下を監視することを含む。特に、I_c低下の早期警告を提供することができ、これは、例えば、大型のトカマクコイル（ＰＦ及びＴＦの両方）で大いに役立つ。

【００６４】

図１２は、図２に示したＨＴＳケーブル２００のＩ－Ｖ（電流－電圧）曲線を示す。各曲線は、シャントＨＴＳテープにおける完全な切断部間の異なる間隔に対するものである。間隔が狭いほど抵抗が大きくなり、したがって勾配（ｄＶ／ｄＩ）が大きくなる。

【００６５】

$2*I_{c,W}$（１２０１）の電流（巻かれたW対の合計臨界電流）未満では、ケーブル２００は、無視できるほどの抵抗を有するので、無視できるほどの電圧を発生する。$2*I_{c,W}$（１２０１）＜Ｉ＜$2*I_{c,W}+4*I_{c,S}$（１２０２）の範囲の輸送電流（Ｉ）の場合（ここで$4*I_{c,S}$は２つのＳ対（Ｓ１及びＳ２）の合計臨界電流である）、ケーブルは一定の抵抗を示し、したがってＩに比例した電圧を発生する。Ｉ＞$2*I_{c,W}+4*I_{c,S}$（１２０２）の場合、ケーブルは過剰電流を常伝導（すなわち、非超伝導）金属安定化材２１０に分流させ、これは、ジュール加熱がケーブル内のＨＴＳテープの臨界電流を減少させるため、最終的にはクエンチ（熱暴走）につながる。

【００６６】

図１２を参照すると、監視の目的で、ケーブルは、１２０１と１２０２の間、すなわち、巻かれたテープの合計I_cとシャントテープの合計Ｉcとの間のどこかの一定の輸送電流で動作するように設計されている。この輸送電流では、ケーブルはわずかに抵抗性がある

。したがって、ケーブルはいくらかの電力を熱として消散させる。ケーブル（W対又はS対のいずれか）の臨界電流が低下すると、この消散がわずかに増大し、新しい熱平衡に達するまで温度が上昇する（この場合、発熱の増加は、上昇した温度で利用可能な冷却力の増加に等しい）。この温度上昇は、コイル全体に分布する多くのポイントでケーブルの温度を監視することによって検出することができる。したがって、温度のゆっくりした上昇は、臨界電流の低下の指標となり、したがって、将来のある（不確定な）時間に発生する可能性のあるクエンチ（熱暴走）の非常に早い警告として使用することができる。

【００６７】

図１３は、（ＨＴＳケーブル６００のように２つではなく）４つの「輸送」ＨＴＳテープ１３０１Ａ、１３０１Ｂ及び１３０４Ａ、１３０４Ｂが存在することを除いてＨＴＳケーブル６００（図６参照）と類似している、ＨＴＳケーブル１３００の断面を示す。輸送ＨＴＳテープは２つの層に配置され、これらの層は、ＨＴＳケーブル６００の場合と同様に、すなわち２×３マトリクスに配置された６つのより幅の狭い「シャント」ＨＴＳテープ１３０２Ａ～１３０２Ｃ、１３０３Ａ～１３０３Ｃによって互いに分離されている。各層の輸送ＨＴＳテープ１３０１Ａ、１３０１Ｂ及び１３０４Ａ、１３０４Ｂは、各輸送ＨＴＳテープのＨＴＳ層をシャントＨＴＳテープに向けて並べて配置され、それにより２対のタイプ０のＨＴＳ輸送テープ１３０１Ａ、１３０４Ａ及び１３０１Ｂ、１３０４Ｂを形成する。中央のシャントＨＴＳテープ１３０２Ｂ、１３０３Ｂはそれぞれ、２つのＨＴＳ輸送テープにまたがっている。

【００６８】

ＨＴＳケーブル１３００は、輸送ＨＴＳテープ１３０１Ａ、１３０１Ｂ、１３０４Ａ、１３０４Ｂの２倍の幅を有する。より幅の広いＨＴＳケーブルは、タイプ０の対の輸送ＨＴＳテープをさらに加え、それに応じてシャントＨＴＳテープの数を増やすこと、すなわち、シャントＨＴＳテープの追加の列を加えるか又は１つ以上のシャントＨＴＳテープ１３０２Ａ～１３０２Ｃ、１３０３Ａ～１３０３Ｃの幅を増加させて輸送ＨＴＳテープにまたがるようにすることによって製造することができる。

【００６９】

ＨＴＳケーブル１３００などのより幅の広いＨＴＳケーブルは、トカマクで使用されるＴＦ磁石での使用に特に有益である。というのは、これらのケーブルは、比較的幅の狭いＨＴＳテープから特定の高さ（コイルの軸に沿ったサイズ）の二重パンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒを製造することを可能にするから、すなわち、所与の高さの二重パンケーキコイルを得るために軸方向に積層する必要があるコイルがより少ないからである。したがって、必要なコイルの間の接合部（すなわち電気的接続）が少なくて済むため、製造がより簡素化され、故障の「弱点」が少なくなる。また、多数の幅の狭いパンケーキコイルの積層体から構成されたＴＦコイルの全体の抵抗は、より少ない（例えば２つの）より幅の広いパンケーキコイルを有するＴＦコイルと比較して、後者においてより均一に分布される。

【００７０】

場合によっては、より幅の広いＨＴＳケーブルは単一のＴＦリムを２つのコイルのみから構成することを可能にすることができる。これは、電流が一方のパンケーキコイルの内径からその外径に（パンケーキコイルの外径上にあるため容易にアクセス可能な）パンケーキコイル間の接合部を通って螺旋状に流れ、次いで他方のパンケーキコイルの外径から他方のパンケーキの内径に螺旋状に戻り、次いで二重パンケーキコイル８０１Ａ、８０１Ｂ間の「リム－リム」接合部を通って次のリム８０１Ｂに入るように、各リム８０１Ａの２つのパンケーキコイルを配置することができるため、特に有利である。リム－リム接合部は、パンケーキコイルの内径にＴＦ中心柱８０２から離れて配置され、これにより接合部の製造、修理又は試験が容易になる。

【００７１】

より少ない（例えば２つの）積層されたコイルを有することの更なる利点は、それによりパンケーキコイル８０１Ａ～８０１Ｒのインダクタンスが（より多くのコイルを有する

積層体のインダクタンスと比べて）低減することである。より低いインダクタンス（Ｌ）のコイルには、（ａ）ランピング中の電圧の低下（Ｖ＝ＬｄＩ／ｄｔ）、（ｂ）クエンチ保護に必要とされるような、急速な通電解除中に生じる電圧の低下という潜在的な利点がある。

【００７２】

本発明の様々な実施形態を上記で説明してきたが、それらは限定ではなく例として提示されたことを理解されたい。関連技術の当業者には、本発明の主旨及び範囲から逸脱することなく、それらの形態及び詳細に様々な変更を行うことができることが明らかであろう。

【図面】

【図１】

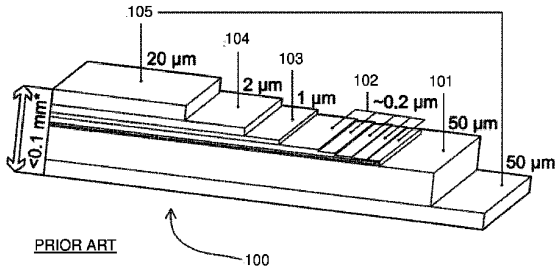


Figure 1

【図２】

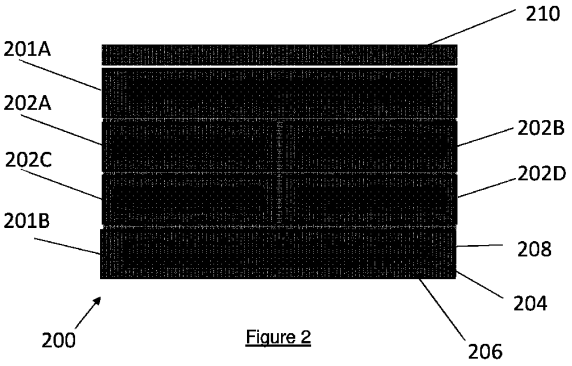


Figure 2

【図３】

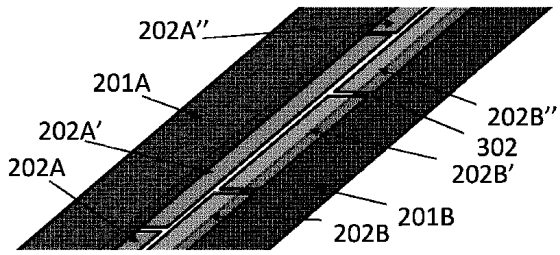


Figure 3

【図４】

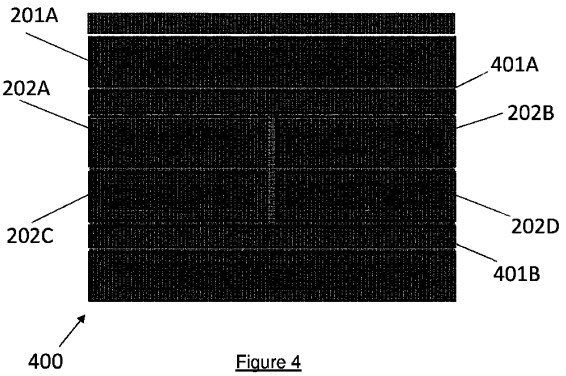


Figure 4

【図５】

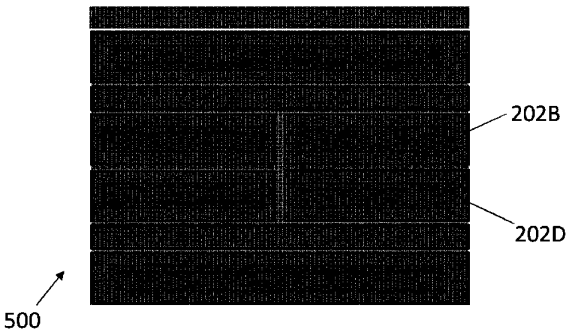


Figure 5

【図６】

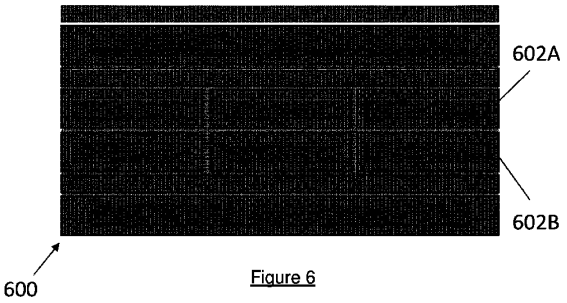


Figure 6

【図７】

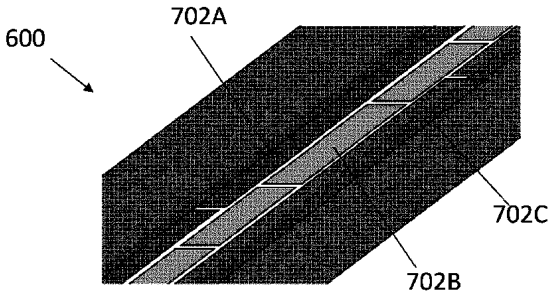


Figure 7

【図８】

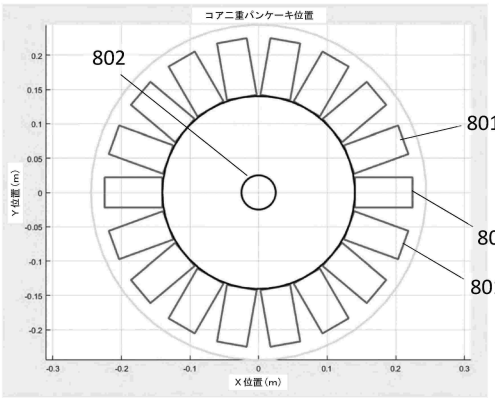


Figure 8

【図９】

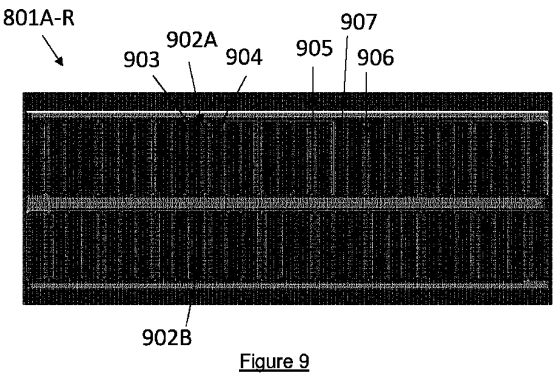


Figure 9

【図１０】

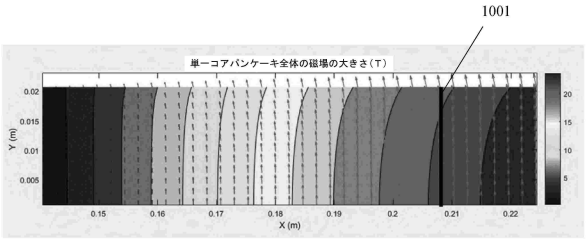


Figure 10

【図１１】

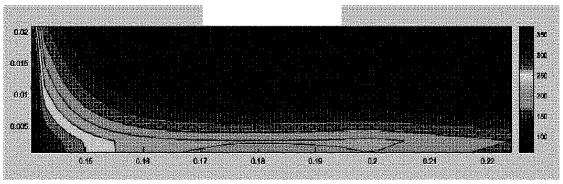


Figure 11

【図１２】

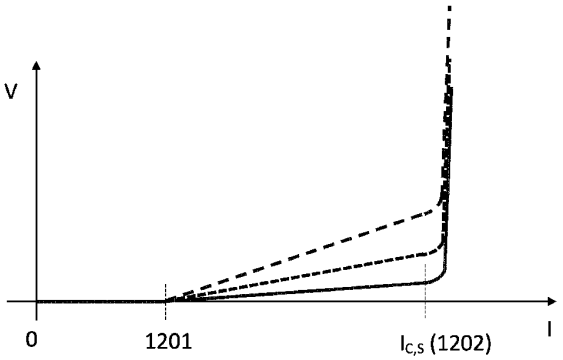


Figure 12

【図１３】

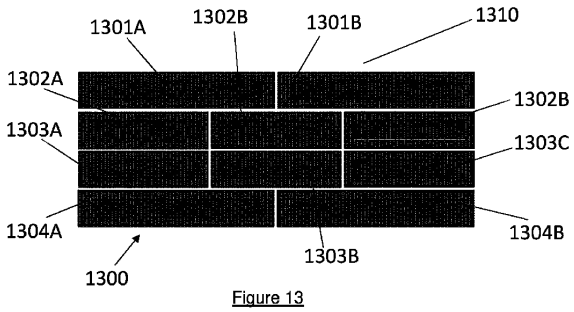


Figure 13

フロントページの続き

ィー アビンドン ミルトン ブルック ドライブ １７３ トカマク エナジー リミテッド 気付

審査官 後藤 嘉宏

(56)参考文献
特開２０１１－２２２３４６（ＪＰ，Ａ）
特開２０１０－００３４３５（ＪＰ，Ａ）
国際公開第２０１５／０１１４９１（WO，Ａ１）
特表２０１６－５３４３２７（ＪＰ，Ａ）
特開２００５－０８５６１２（ＪＰ，Ａ）
特表２０１３－５０３４２２（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２０１９／０２６７１７１（ＵＳ，Ａ１）
特表２０１３ー５４３６３１（ＪＰ，Ａ）
特表２００４－５０１４９３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｆ　６／０６
Ｈ０１Ｂ　１２／０６