(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6172371号
(P6172371)

(45)発行日　平成29年8月2日(2017.8.2)　(24)登録日　平成29年7月14日(2017.7.14)

| (51)Int.Cl. | | F I | | |
|---|---|---|---|---|
| ***H01F 6/06*** | ***(2006.01)*** | H01F | 6/06 | 130 |
| ***H01L 39/04*** | ***(2006.01)*** | H01F | 6/06 | |
| *H01B 12/02* | *(2006.01)* | H01L | 39/04 | |
| | | H01B | 12/02 | ZAA |

請求項の数 11　(全 19 頁)

(21)出願番号　特願2016-253283(P2016-253283)
(22)出願日　平成28年12月27日(2016.12.27)
(62)分割の表示　特願2013-11941(P2013-11941)の分割
原出願日　平成25年1月25日(2013.1.25)
(65)公開番号　特開2017-85143(P2017-85143A)
(43)公開日　平成29年5月18日(2017.5.18)
審査請求日　平成29年1月20日(2017.1.20)
(31)優先権主張番号　特願2012-110342(P2012-110342)
(32)優先日　平成24年5月14日(2012.5.14)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

早期審査対象出願

(73)特許権者　000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目５番３３号
(74)代理人　110001195
特許業務法人深見特許事務所
(72)発明者　西村　崇
大阪市此花区島屋一丁目１番３号　住友電気工業株式会社　大阪製作所内
(72)発明者　加藤　武志
大阪市此花区島屋一丁目１番３号　住友電気工業株式会社　大阪製作所内

審査官　五貫　昭一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】超電導マグネット

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
帯状面を有する酸化物超電導線が巻き回されることによって形成されたコイル部と、
前記コイル部の中に配置され、前記コイル部の軸方向に沿った貫通孔を有し、磁性体から作られた残留磁場抑制部とを備え、
前記残留磁場抑制部は、１ｍｍ以上の肉厚を有するパイプを含み、前記コイル部の中であって前記パイプ内に磁場が印加される試料が配置されるよう構成されている、超電導マグネット。
【請求項２】
前記磁性体は１００以上の最大透磁率を有する、請求項１に記載の超電導マグネット。
【請求項３】
前記軸方向における前記残留磁場抑制部の長さは、前記酸化物超電導線の前記帯状面の幅以上である、請求項１または２に記載の超電導マグネット。
【請求項４】
前記軸方向における前記残留磁場抑制部の長さは、前記軸方向における前記コイル部の長さの半分以上である、請求項１または２に記載の超電導マグネット。
【請求項５】
前記軸方向における前記残留磁場抑制部の長さは、前記軸方向における前記コイル部の長さ以上である、請求項１または２に記載の超電導マグネット。
【請求項６】

前記軸方向における前記残留磁場抑制部の長さは、前記軸方向における前記コイル部の長さよりも大きい、請求項１または２に記載の超電導マグネット。
【請求項７】
前記残留磁場抑制部は、前記貫通孔を有する第１の部分と、前記第１の部分から離れて前記第１の部分を囲む第２の部分とを有する、請求項１～６のいずれか１項に記載の超電導マグネット。
【請求項８】
前記コイル部の少なくとも１つの径方向において前記コイル部および前記残留磁場抑制部は共通の中心位置を有する、請求項１～７のいずれか１項に記載の超電導マグネット。
【請求項９】
前記コイル部の軸方向において前記コイル部および前記残留磁場抑制部は共通の中心位置を有する、請求項１～８のいずれか１項に記載の超電導マグネット。
【請求項１０】
前記コイル部を収める空洞部を有し磁性体から作られたシールドをさらに備え、
前記コイル部の少なくとも１つの径方向において前記コイル部および前記シールドは共通の中心位置を有する、請求項１～９のいずれか１項に記載の超電導マグネット。
【請求項１１】
前記コイル部を収める空洞部を有し磁性体から作られたシールドをさらに備え、
前記コイル部の軸方向において前記コイル部および前記シールドは共通の中心位置を有する、請求項１～９のいずれか１項に記載の超電導マグネット。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、超電導マグネットに関し、特に、帯状面を有する酸化物超電導線が巻き回されることによって形成されたコイル部を有する超電導マグネットに関する。
【背景技術】
【０００２】
超電導マグネットから生じる磁場の強さは、印加電流のみによって決定されるわけではなく、遮蔽電流によって誘起される磁場の影響を受けることが知られている。たとえば非特許文献１：Y. Yanagisawa et al., “Effect of current sweep reversal on the magnetic field stability for a Bi-2223 superconducting solenoid”, Physica C, 469[22] (2009) 1996-1999によれば、テープ状のＢｉ－２２２３超電導線を用いた超電導ソレノイドにおいて、遮蔽電流によって誘起される磁場について言及されている。
【先行技術文献】
【非特許文献】
【０００３】
【非特許文献１】Y. Yanagisawa et al., “Effect of current sweep reversal on the magnetic field stability for a Bi-2223 superconducting solenoid”, Physica C, 469[22] (2009) 1996-1999
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
このため、磁場の発生を停止させることを意図して超電導マグネットのコイル部への電流印加が停止されても、遮蔽電流の影響によって超電導マグネットは残留磁場を有する。
【０００５】
そこで、本発明の目的は、残留磁場を抑えることができる超電導マグネットを提供することである。
【課題を解決するための手段】
【０００６】

本発明の超電導マグネットはコイル部および残留磁場抑制部とを有する。コイル部は、帯状面を有する酸化物超電導線が巻き回されることによって形成されている。残留磁場抑制部はコイル部の中に配置されており、コイル部の軸方向に沿った貫通孔を有し、磁性体から作られている。

【０００７】

この超電導マグネットによれば、残留磁場抑制部が設けられることで、コイル部への電流印加が停止された状態における磁場の大きさ、すなわち残留磁場を抑えることができる。

【０００８】

好ましくは磁性体は１００以上の最大透磁率を有する。これにより残留磁場抑制部が、残留磁場の抑制に必要な磁気的特性をより十分に有することができる。ここで「最大透磁率」とは、室温付近における磁性体の比透磁率の最大値のことをいう。

【０００９】

好ましくは軸方向における残留磁場抑制部の長さは、酸化物超電導線の帯状面の幅以上である。これによりコイル部内において残留磁場抑制部を酸化物超電導線の単位幅に渡って配置することができる。

【００１０】

軸方向における残留磁場抑制部の長さは、軸方向におけるコイル部の長さの半分以上であってもよい。これにより残留磁場抑制部をコイル部の半分以上に渡って配置することができる。

【００１１】

軸方向における残留磁場抑制部の長さは、軸方向におけるコイル部の長さ以上であってもよい。これにより残留磁場抑制部をコイル部内の全体に渡って配置することができる。

【００１２】

軸方向における残留磁場抑制部の長さは、軸方向におけるコイル部の長さよりも大きくてもよい。これにより残留磁場抑制部をコイル部の全体に渡って配置しつつコイル部から突出させることができる。残留磁場抑制部が突出することで、残留磁場抑制部をより容易に固定することができる。

【００１３】

残留磁場抑制部は、１ｍｍ以上の肉厚を有するパイプを含んでもよい。厚さが１ｍｍ以上とされることで、残留磁場をより十分に抑えることができる。

【００１４】

残留磁場抑制部は、貫通孔を有する第１の部分と、第１の部分から離れて第１の部分を囲む第２の部分とを有してもよい。これにより、より高い磁場を扱う場合に、より効果的に残留磁場を抑えることができる。

【００１５】

残留磁場抑制部は、コイル部を収める容器の一部を構成していてもよい。残留磁場抑制部が容器の一部を構成しない場合、コイル部の内部に、残留磁場抑制部と、残留磁場抑制部とは独立してその機能を保持し得る容器との両方を設ける必要がある。よってコイル部の内部の体積のうち、残留磁場抑制部および容器によって占められる割合が大きくなる。この結果、コイル部の内部において磁場を実際に利用することができる空間が小さくなるか、あるいはこの空間の大きさを維持するためにコイル部を大きくする必要がある。これに対して残留磁場抑制部が容器の一部を構成する場合、コイル部の内部において残留磁場抑制部が容器の一部としての機能も有する。よってコイル部の内部の体積のうち、残留磁場抑制部および容器に占められる割合が抑えられる。この結果、コイル部の内部において磁場を実際に利用することができる空間を大きくすることができるか、あるいはこの空間の大きさを維持しつつコイル部を小さくすることができる。

【００１６】

ここで、残留磁場抑制部が「容器の一部を構成する」とは、容器の目的を達するための容器の機能を保つ上で不可欠な部分を構成することを意味する。容器の目的は、コイル部

が超電導状態に保持されるようにコイル部の温度を低く保持することである。この目的を達する上で、室温より低い温度を有する液体（たとえば液体窒素または液体ヘリウム）を容器が保持する場合、容器の機能は、この液体を、実用上十分な時間、液体状態で保持することである。また上記目的を達する上で、外界とコイル部との間の断熱のための真空を容器が保持する場合、容器としての機能とは、コイル部を真空中に保持することである。逆に言えば、残留磁場抑制部が取り去られても容器がその機能を失わない場合、残留磁場が容器の一部を構成しているとは言えない。たとえば、上記のような機能を既に有する容器に対して残留磁場抑制部が付加されているような場合は、残留磁場が容器の一部を構成しているとは言えない。

【００１７】

好ましくは、コイル部の少なくとも１つの径方向においてコイル部および残留磁場抑制部は共通の中心位置を有する。これにより、コイル部が磁場を発生した際に、径方向においてコイル部と残留磁場抑制部との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００１８】

好ましくは、コイル部の軸方向においてコイル部および残留磁場抑制部は共通の中心位置を有する。これにより、コイル部が磁場を発生した際に、軸方向においてコイル部と残留磁場抑制部との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００１９】

好ましくは超電導マグネットは、コイル部を収める空洞部を有し磁性体から作られたシールドをさらに含み、コイル部の少なくとも１つの径方向においてコイル部およびシールドは共通の中心位置を有する。これにより、コイル部が磁場を発生した際に、径方向においてコイル部とシールドとの間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００２０】

好ましくは超電導マグネットは、コイル部を収める空洞部を有し磁性体から作られたシールドをさらに含み、コイル部の軸方向においてコイル部およびシールドは共通の中心位置を有する。これにより、コイル部が磁場を発生した際に、軸方向においてコイル部とシールドとの間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【発明の効果】

【００２１】

上述したように本発明によれば残留磁場を抑えることができる。

【図面の簡単な説明】

【００２２】

【図１】本発明の実施の形態１における超電導マグネットの構成を概略的に示す断面図である。

【図２】図１の一部拡大図であり、図３の線ＩＩ－ＩＩに沿う概略断面図である。

【図３】図２の概略平面図である。

【図４】図１の超電導マグネットに含まれるコイル部が有するダブルパンケーキコイルの構成を概略的に示す斜視図である。

【図５】図４の線Ｖ－Ｖに沿う概略断面図である。

【図６】図４のダブルパンケーキコイルに用いられている酸化物超電導線の構成を概略的に示す一部斜視図である。

【図７】本発明の実施の形態２における超電導マグネットの構成を概略的に示す断面図である。

【図８】本発明の実施の形態３における超電導マグネットの構成を概略的に示す断面図である。

【図９】本発明の実施の形態４における超電導マグネットが有する残留磁場抑制部の構成

を概略的に示す断面図である。
【図１０】図９の線Ｘ－Ｘに沿う概略断面図である。
【図１１】残留磁場抑制部の厚さおよび個数の各々と残留磁場との関係を概略的に示すグラフ図である。
【図１２】実施例１に対する比較例の磁場分布を示す図である。
【図１３】実施例１において残留磁場抑制部の厚さが０．５ｍｍである場合の磁場分布を示す図である。
【図１４】実施例１において残留磁場抑制部の厚さが１．０ｍｍである場合の磁場分布を示す図である。
【図１５】実施例２に対する比較例の磁場分布を示す図である。
【図１６】実施例２において残留磁場抑制部の厚さが１ｍｍである場合の磁場分布を示す図である。
【図１７】実施例２において残留磁場抑制部の厚さが１０ｍｍである場合の磁場分布を示す図である。
【図１８】実施例３における、残留磁場抑制部の厚さと、残留磁場および残留磁場低減率の各々との関係を示すグラフ図である。
【図１９】シミュレーションに用いたＳＳ４００の磁化曲線を示すグラフ図である。
【図２０】本発明の実施の形態５における超電導マグネットの構成を概略的に示す断面図である。
【図２１】本発明の実施の形態６における超電導マグネットが有する超電導コイルの構成を概略的に示す断面図である。
【図２２】図２１の概略平面図である。
【図２３】本発明の実施の形態７における超電導マグネットが有する超電導コイルの構成を概略的に示す断面図である。
【図２４】図２３の概略平面図である。
【図２５】図２３の変形例を示す概略断面図である。
【発明を実施するための形態】
【００２３】
以下、図面に基づいて本発明の実施の形態を説明する。なお、以下の図面において同一または相当する部分については同一の参照符号を付しその説明は繰返さない。
【００２４】
（実施の形態１）
図１を参照して、本実施の形態の超電導マグネット１００は、超電導コイル９１と、断熱容器１１１と、冷却装置１２１と、ホース１２２と、コンプレッサ１２３と、ケーブル１３１と、電源１３２とを有する。断熱容器１１１は超電導コイル９１を収めている。本実施の形態においては、磁場が印加される試料（図示せず）を収めるための磁場印加領域ＳＣが、断熱容器１１１を貫くように断熱容器１１１に設けられている。冷却装置１２１は冷却ヘッド２０を有する。
【００２５】
図２および図３を参照して、超電導コイル９１は、コイル部１０と、パイプ部８１（残留磁場抑制部）と、取付部７１とを有する。
【００２６】
コイル部１０はダブルパンケーキコイル１１および伝熱板３１を有する。ダブルパンケーキコイル１１はコイル部１０の軸方向Ａａに沿って積層されている。径方向Ａｒは軸方向Ａａに垂直な方向に対応している。冷却装置１２１の冷却ヘッド２０は、ダブルパンケーキコイル１１を冷却することができるように、伝熱板３１によってダブルパンケーキコイル１１につながっている。伝熱板３１の材料は、非磁性体であり、具体的には１００未満の最大透磁率を有するものである。また伝熱板３１の材料は、熱伝導率および可撓性が大きい材料が好ましい。伝熱板３１の材料は、たとえばアルミニウム（Ａｌ）または銅（Ｃｕ）である。ＡｌまたはＣｕの純度は９９．９％以上が好ましい。冷却されたダブルパ

ンケーキコイル１１に超電導電流が流れることで磁束ＭＦが発生する。
【００２７】
パイプ部８１は、コイル部１０の軸方向Ａａに沿った貫通孔ＨＬを有する。好ましくはパイプ部８１は、１ｍｍ以上の肉厚を有するパイプを含む。パイプ部８１はコイル部１０の中に配置されている。好ましくはパイプ部８１は、パイプ部８１の中心がコイル部１０の中心ＣＰと一致するように配置されている。
【００２８】
パイプ部８１は、磁性体から作られており、具体的には１００以上の最大透磁率を有する。パイプ部８１をなす磁性体は、たとえば、鉄、電磁軟鉄、電磁鋼、パーマロイ合金、またはアモルファス磁性合金である。なお鉄の最大透磁率は一般に５０００程度である。
【００２９】
軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、酸化物超電導線１４の帯状面ＳＦの幅（図２における各ダブルパンケーキコイル１１の高さの半分）以上である。好ましくは軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、各ダブルパンケーキコイル１１の高さ以上である。軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さの半分以上であってもよい。より好ましくは、軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さ以上である。さらに好ましくは、図２に示すように、軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さよりも大きい。
【００３０】
パイプ部８１は取付部７１によってコイル部１０に取り付けられている。本実施の形態においては、パイプ部８１のうちコイル部１０から突出した部分が取付部７１によってコイル部１０に固定されている。好ましくは取付部７１の材料は、非磁性体であり、具体的には１００未満の最大透磁率を有するものである。
【００３１】
さらに図４および図５を参照して、コイル部１０を構成しているダブルパンケーキコイル１１の各々はパンケーキコイル１２ａおよび１２ｂを有する。パンケーキコイル１２ａおよび１２ｂは互いに積層されている。パンケーキコイル１２ａおよび１２ｂの各々は、酸化物超電導線１４が巻き回されることによって形成されている。
【００３２】
さらに図６を参照して、酸化物超電導線１４はテープ状、言い換えれば帯状の形状を有しており、よって帯状面ＳＦを有する。帯状面ＳＦは、軸方向Ａａに沿った幅Ｄｗと、幅Ｄｗよりも小さい厚さＤｔとを有する。たとえば、厚さＤｔは０．２ｍｍ程度、幅Ｄｗは４ｍｍ程度である。たとえば、酸化物超電導線１４は、その延在方向に延びるＢｉ系超電導体と、この超電導体を被覆するシースとを有する。シースは、たとえば銀や銀合金よりなっている。酸化物超電導線１４は、帯状面ＳＦに垂直な磁場（垂直磁場）が印加されるほど交流損失が増大するような特性を有する。
【００３３】
パンケーキコイル１２ａにおける酸化物超電導線１４の巻き回し方向Ｗａと、パンケーキコイル１２ｂにおける酸化物超電導線１４の巻き回し方向Ｗｂとは互いに逆である。パンケーキコイル１２ａの内周側に位置する酸化物超電導線１４の端部ＥＣｉと、パンケーキコイル１２ｂの内周側に位置する酸化物超電導線の端部ＥＣｉとは、互いに電気的に接続されている。これにより、パンケーキコイル１２ａの外周側に位置する酸化物超電導線１４の端部ＥＣｏと、パンケーキコイル１２ｂの外周側に位置する酸化物超電導線１４の端部ＥＣｏとの間で、パンケーキコイル１２ａおよび１２ｂは互いに直列に接続されている。またダブルパンケーキコイル１１のうち互いに隣り合うもの（図２において縦方向に隣り合うもの）の各々の端部ＥＣｏは互いに電気的に接続されている。これにより、ダブルパンケーキコイル１１は互いに直列に接続されている。
【００３４】
本実施の形態によれば、パイプ部８１（図２）が設けられることで、コイル部１０への

電流印加が停止された状態における磁場の大きさ、すなわち残留磁場を抑えることができる。好ましくは磁性体は１００以上の最大透磁率を有する。これによりパイプ部８１が、残留磁場の抑制に必要な磁気的特性をより十分に有することができる。なお残留磁場の抑制の実施例については後述する。

【００３５】

好ましくは軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さ（図２における縦方向の長さ）は、酸化物超電導線１４の帯状面ＳＦの幅Ｄｗ（図５）以上である。これによりコイル部１０内においてパイプ部８１を酸化物超電導線１４の幅Ｄｗに渡って配置することができる。軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さの半分以上であってもよい。これによりパイプ部８１をコイル部１０の半分以上に渡って配置することができる。軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さ以上であってもよい。これによりパイプ部８１をコイル部１０内の全体に渡って配置することができる。

【００３６】

軸方向Ａａにおけるパイプ部８１の長さは、軸方向Ａａにおけるコイル部１０の長さよりも大きくてもよい。これによりパイプ部８１をコイル部１０の全体に渡って配置しつつコイル部１０から突出させることができる。パイプ部８１が突出することで取付部７１（図２）を用いてパイプ部８１をより容易に固定することができる。

【００３７】

パイプ部８１は、１ｍｍ以上の肉厚ＴＳ（図３）を有するパイプを含んでもよい。肉厚ＴＳが１ｍｍ以上とされることで、残留磁場をより十分に抑えることができる。

【００３８】

（実施の形態２）

図７を参照して、本実施の形態の超電導マグネット１００Ａは超電導コイル９１Ａおよびパイプ部８１を有する。超電導コイル９１Ａは、超電導コイル９１（図２）のパイプ部８１が省略された構成を有する。パイプ部８１は、断熱容器１１１の外部において磁場印加領域ＳＣの側壁に沿って配置されている。本実施の形態においては、パイプ部８１の端が磁場印加領域ＳＣから突出している。またパイプ部８１の端は取付部７１によって断熱容器１１１に取り付けられている。

【００３９】

なお、上記以外の構成については、上述した実施の形態１の構成とほぼ同じであるため、同一または対応する要素について同一の符号を付し、その説明を繰り返さない。

【００４０】

（実施の形態３）

図８を参照して、本実施の形態の超電導マグネット１００Ｄは超電導コイル９１Ｄおよび断熱容器１１１Ｄを有する。超電導コイル９１Ｄは、超電導コイル９１の伝熱板３１が省略された構成を有する。断熱容器１１１Ｄは、液体窒素などの冷媒が注入され得るように構成されている。この冷媒により超電導コイル９１Ｄが冷却される。すなわち本実施の形態においてはコイル部１０が冷却装置１２１（図２）によってではなく冷媒によって直接冷却され得る。なお、上記以外の構成については、上述した実施の形態１の構成とほぼ同じであるため、同一または対応する要素について同一の符号を付し、その説明を繰り返さない。

【００４１】

（実施の形態４）

図９および図１０を参照して、本実施の形態の超電導マグネットは、前述したパイプ部８１の代わりにパイプ部８１Ｍを有する。パイプ部８１Ｍは内周パイプ８１ａ（第１の部分）および外周パイプ８１ｂ（第２の部分）を有する。内周パイプ８１ａは貫通孔ＨＬを有する。外周パイプ８１ｂは内周パイプ８１ａから離れて内周パイプ８１ａを囲んでいる。内周パイプ８１ａの外面と外周パイプ８１ｂの内面との間には隙間ＧＰが設けられている。言い換えれば、パイプ部８１Ｍは、最外面と最内面との間において厚さＴＨ（図１０

）を有し、かつこの厚さＴＨの部分の内部に隙間ＧＰが設けられている。なお、上記以外の構成については、上述した実施の形態１～３のいずれかの構成とほぼ同じであるため、同一または対応する要素について同一の符号を付し、その説明を繰り返さない。

【００４２】

図１１を参照して、パイプ部を設けることによる残留磁場の低減率ＲＴを、隙間ＧＰが設けられた場合（実線）と、隙間ＧＰが設けられない場合（破線）とのそれぞれについて示す。厚さＴＨが十分に大きい場合、本実施の形態のように隙間ＧＰが設けられた場合の方が、残留磁場を低減する効果をより大きくし得る。より高い磁場を扱う場合には、パイプ部が磁気的に飽和することを避ける観点で厚さＴＨが十分に大きくされることが好ましく、この場合に本実施の形態のように隙間ＧＰを設けることが好ましい。これにより、より高い磁場を扱う場合に、より効果的に残留磁場を抑えることができる。

【００４３】

なお本実施の形態においては内周パイプ８１ａおよび外周パイプ８１ｂによる二重構造を有するパイプ部８１Ｍについて説明したが、３つ以上のパイプによる多重構造が用いられてもよい。この場合、より高い磁場を扱う場合に、より効果的に残留磁場を抑えることができる。

【００４４】

また隙間ＧＰを充填する、非磁性体からなる充填部（図示せず）が設けられてもよい。これにより内周パイプ８１ａおよび外周パイプ８１ｂを互いに固定することができる。また強磁場下における内周パイプ８１ａおよび外周パイプ８１ｂの変位によって両者が接触してしまうことを防止することができる。また取付部７１（図２または図７）とほぼ同様の部材によって内周パイプ８１ａおよび外周パイプ８１ｂの各々が固定されてもよい。この場合、上記充填部は設けられなくてもよい。

【００４５】

（実施の形態５）

図２０を参照して、本実施の形態の超電導マグネット１００Ｂは、超電導コイル９１Ａのコイル部１０を収める断熱容器１１１Ｂ（容器）を有する。断熱容器１１１Ｂは、容器本体部１１１Ａおよびパイプ部８１によって構成されている。よってパイプ部８１が断熱容器１１１Ｂの一部を構成している。

【００４６】

ここで、「パイプ部８１が断熱容器１１１Ｂの一部を構成している」とは、断熱容器１１１Ｂの目的を達するための断熱容器１１１Ｂの機能を保つ上で不可欠な部分をパイプ部８１が構成していることを意味する。断熱容器１１１Ｂの目的は、コイル部１０が超電導状態に保持されるようにコイル部１０の温度を低く保持することである。この目的を達する上で、外界とコイル部１０との間の断熱のための真空が保持されるようにコイル部１０を真空中に保持することが、断熱容器１１１Ｂの機能である。図２０においては、外界に通じた磁場印加領域ＳＣと断熱容器１１１Ｂの内部とが少なくとも部分的にパイプ部８１のみによって隔てられている。よって仮にパイプ部８１が取り去られると、断熱容器１１１Ｂの真空が破れてしまうので、断熱容器１１１Ｂの真空容器としての機能が失われる。

【００４７】

実施の形態２（図７）のようにパイプ部８１が断熱容器１１１の一部を構成しない場合、コイル部１０の内部に、パイプ部８１と、パイプ部８１とは独立してその機能を保持し得る断熱容器１１１との両方を設ける必要がある。よって超電導コイル９１Ａの内部の体積のうち、パイプ部８１および断熱容器１１１によって占められる割合が大きくなる。この結果、超電導コイル９１Ａの内部において磁場を実際に利用することができる空間（磁場印加領域ＳＣに対応）が小さくなるか、あるいはこの空間の大きさを維持するために超電導コイル９１Ａを大きくする必要がある。

【００４８】

これに対して本実施の形態によれば、超電導コイル９１Ａの内部においてパイプ部８１が断熱容器１１１Ｂの一部としての機能も有する。よって超電導コイル９１Ａの内部の体

積のうち断熱容器１１１Ｂに占められる割合が抑えられる。この結果、磁場印加領域ＳＣを大きくすることができるか、あるいは磁場印加領域ＳＣの大きさを維持しつつ超電導コイル９１Ａを小さくすることができる。

【００４９】

なお断熱容器１１１Ｂは、パイプ部８１を容器本体部１１１Ａに取り付けるための取付部７２を有してもよい。取付部７２は、断熱容器１１１Ｂの機密性を維持するために、容器本体部１１１Ａに接するＯリングを有してもよい。

【００５０】

また本実施の形態においては、真空容器としての機能を有する断熱容器１１１Ｂが用いられるが、容器は真空容器に限定されるものではなく、コイル部１０が超電導状態に保持されるようにコイル部１０の温度を低く保持するという目的を達するものであればよい。たとえば、室温より低い温度を有する液体（たとえば液体窒素または液体ヘリウム）を保持する容器が用いられてもよい。このような容器は、この液体を、実用上十分な時間、液体状態で保持することできればよい。

【００５１】

（実施の形態６）

本実施の形態の超電導マグネットは、実施の形態１の超電導マグネット１００（図１）とほぼ同様の構成を有し、さらにコイル部１０とパイプ部８１とが相対的に特定の位置関係にある。以下、この位置関係について説明する。

【００５２】

図２１を参照して、コイル部１０の軸方向Ａａにおいてコイル部１０およびパイプ部８１は共通の中心位置Ｃａを有する。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、軸方向Ａａにおいてコイル部１０とパイプ部８１との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００５３】

さらに図２２を参照して、コイル部１０の径方向Ａｒ（図２１）の１つである径方向$Ａｒ_1$（少なくとも１つの径方向）において、コイル部１０およびパイプ部８１は共通の中心位置$Ｃｒ_1$を有する。径方向$Ａｒ_1$に沿い中心位置$Ｃｒ_1$を通る仮想軸（図２２において破線で示されている）はコイル部１０およびパイプ部８１の各々の対称軸である。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、径方向$Ａｒ_1$においてコイル部１０とパイプ部８１との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。またコイル部１０の径方向Ａｒ（図２１）の１つである径方向$Ａｒ_2$（少なくとも１つの径方向）において、コイル部１０およびパイプ部８１は共通の中心位置$Ｃｒ_2$を有する。径方向$Ａｒ_2$に沿い中心位置$Ｃｒ_2$を通る仮想軸（図２２において破線で示されている）はコイル部１０およびパイプ部８１の各々の対称軸である。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、径方向$Ａｒ_2$においてコイル部１０とパイプ部８１との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００５４】

２つの対称軸（図２２の２つの破線）が交差する位置が中心点Ｃｒである。図示されているように、平面視においてコイル部１０およびパイプ部８１は共通の中心点Ｃｒを有する。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、一般的な径方向Ａｒにおいてコイル部１０とパイプ部８１との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００５５】

なおコイル部１０およびパイプ部８１が、中心位置Ｃａ、$Ｃｒ_1$および$Ｃｒ_2$のすべてではなくこれらのうち１つまたは２つのみを共有する構成が用いられてもよい。

【００５６】

また、ある方向においてコイル部１０およびパイプ部８１が共通の中心位置を有するというときに、両者の位置ずれによる磁気回路の対称性の乱れが問題とならない程度の誤差は許容される。具体的には、その方向におけるコイル部の寸法の誤差は、好ましくは１０

％程度以下であり、より好ましくは５％程度以下である。

【００５７】

（実施の形態７）

図２３を参照して、本実施の形態の超電導マグネット１００Ｃは、超電導マグネット１００Ａ（図７）の構成に加えてさらに、パッシブシールド９９（シールド）を有する。パッシブシールド９９は、超電導マグネット１００Ｃの外部への不必要な磁場の漏洩を防止するためのものである。パッシブシールド９９はコイル部１０を収める空洞部を有し、たとえば筒状の形状を有する。パッシブシールド９９は磁性体から作られている。磁性体は１００以上の最大透磁率を有することが好ましい。パッシブシールド９９は断熱容器１１１に固定されている。この固定は、たとえば取付部７３によって行い得る。

【００５８】

コイル部１０の軸方向Ａａにおいてコイル部１０およびパッシブシールド９９は共通の中心位置Ｃａを有する。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、軸方向Ａａにおいてコイル部１０とパッシブシールド９９との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００５９】

さらに図２４を参照して、コイル部１０の径方向Ａｒ（図２３）の１つである径方向$Ａｒ_1$（少なくとも１つの径方向）において、コイル部１０およびパッシブシールド９９は共通の中心位置$Ｃｒ_1$を有する。径方向$Ａｒ_1$に沿い中心位置$Ｃｒ_1$を通る仮想軸（図２４において破線で示されている）はコイル部１０およびパッシブシールド９９の各々の対称軸である。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、径方向$Ａｒ_1$においてコイル部１０とパッシブシールド９９との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。またコイル部１０の径方向Ａｒ（図２３）の１つである径方向$Ａｒ_2$（少なくとも１つの径方向）において、コイル部１０およびパッシブシールド９９は共通の中心位置$Ｃｒ_2$を有する。径方向$Ａｒ_2$に沿い中心位置$Ｃｒ_2$を通る仮想軸（図２４において破線で示されている）はコイル部１０およびパッシブシールド９９の各々の対称軸である。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、径方向$Ａｒ_2$においてコイル部１０とパッシブシールド９９との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００６０】

２つの対称軸（図２４の２つの破線）が交差する位置が中心点Ｃｒである。図示されているように、平面視においてコイル部１０およびパッシブシールド９９は共通の中心点Ｃｒを有する。これにより、コイル部１０が磁場を発生した際に、一般的な径方向Ａｒにおいてコイル部１０とパッシブシールド９９との間で相対変位が生じるような力が両者の間で発生することを避けることができる。

【００６１】

なおコイル部１０およびパッシブシールド９９が、中心位置Ｃａ、$Ｃｒ_1$および$Ｃｒ_2$のすべてではなくこれらのうち１つまたは２つのみを共有する構成が用いられてもよい。

【００６２】

また実施の形態６の超電導マグネットに対して上述したようにパッシブシールド９９が配置される場合、磁気回路としての対称性がより高められる。これにより、コイル部１０、パイプ部８１およびパッシブシールド９９の間で相対変位が生じるような力がこれらの間で発生することをより避けることができる。

【００６３】

また、ある方向においてコイル部１０およびパッシブシールド９９が共通の中心位置を有するというときに、両者の位置ずれによる磁気回路の対称性の乱れが問題とならない程度の誤差は許容される。具体的には、その方向におけるコイル部の寸法の誤差は、好ましくは１０％程度以下であり、より好ましくは５％程度以下である。

【００６４】

なおパッシブシールド９９を固定するための取付部は、超電導マグネット１００Ｃ（図

２３）における取付部７３のように断熱容器１１１の上面および下面（軸方向Ａａに交差する面）に配置されるものに限定されるわけではない。超電導マグネット１００Ｅ（図２５）における取付部７４のように、断熱容器１１１Ｂとパッシブシールド９９との間に配置された取付部７４が用いられてもよい。

【実施例１】

【００６５】

実施の形態３に対応する実施例（図２のパイプ部８１を有するもの）と、それに対する比較例（パイプ８１部が省略されたもの）との各々についての残留磁場の、有限要素法によるシミュレーション結果について説明する。本シミュレーションにおいて、ダブルパンケーキコイル１１（図４）の内径は１３０ｍｍ、外径は２１０ｍｍ、高さは９ｍｍ、巻数は２８０とされた。またコイル部１０（図２）におけるダブルパンケーキコイル１１の積層数は１０とされた。パイプ部８１の材料としては、図１９に示す磁化曲線を有するＳＳ４００（ＪＩＳ規格）を用いることが想定された。また冷媒として液体窒素を用いることを想定して断熱容器１１１Ｄ内の温度は７７Ｋが想定され、オン状態における電流は２５Ａとされた。オン状態における磁場は０．５Ｔとされた。

【００６６】

図１２～図１４のそれぞれは、比較例（パイプが省略されたもの）、実施例であってパイプ部８１の肉厚が０．５ｍｍのもの、および、実施例であってパイプ部の肉厚が１ｍｍのものに対応する残留磁場（Ｔ）の分布を示す。この結果から、比較例に比して実施例の方が残留磁場が低減されることが見出された。またパイプ部８１の肉厚が０．５ｍｍの場合にも効果が得られ、肉厚が１ｍｍの場合にはより大きな効果が得られることも見出された。

【実施例２】

【００６７】

実施の形態２に対応する実施例（図７のパイプ８１部を有するもの）と、それに対する比較例（パイプ８１部が省略されたもの）との各々についての残留磁場の、有限要素法によるシミュレーション結果について説明する。本シミュレーションにおいて、ダブルパンケーキコイル１１（図４）の内径は２００ｍｍ、外径は２８０ｍｍ、高さは１０ｍｍ、巻数は２９０とされた。またコイル部１０（図２）におけるダブルパンケーキコイル１１の積層数は２０とされた。また伝熱板３１の厚さは１ｍｍとされた。パイプ部８１の材料としてはＳＳ４００（ＪＩＳ規格）を用いることが想定された。またパイプ部８１の外径は１５０ｍｍ、長さは４８０ｍｍとされた。また冷却装置１２１（図１）によりコイル部１０が２０Ｋの温度まで冷却されることが想定され、オン状態における電流は２２５Ａが想定された。オン状態における磁場は５Ｔとされた。

【００６８】

図１５～図１７のそれぞれは、比較例（パイプが省略されたもの）、実施例であってパイプ部８１の肉厚が１ｍｍのもの、および、実施例であってパイプ部の肉厚が１０ｍｍのものに対応する残留磁場（Ｔ）の分布を示す。この結果から、比較例に比して実施例の方が残留磁場が低減されることが見出された。またパイプ部８１の肉厚が１ｍｍの場合にも効果が得られ、肉厚が１０ｍｍの場合により大きな効果が得られることも見出された。

【実施例３】

【００６９】

図１８を参照して、実施の形態２に対応する実施例において、残留磁場の大きさ（左側の縦軸）およびパイプ部８１による残留磁場の低減率（右側の縦軸）の各々と、パイプ部８１の厚さ（横軸）との関係について、有限要素法によるシミュレーションを行った。グラフ中のＰ１～Ｐ３は、図７の位置Ｐ１～Ｐ３に対応している。すなわち位置Ｐ１はコイル中心位置、位置Ｐ２は超電導コイル９１Ａの端の位置、位置Ｐ３はパイプ部８１の端の位置である。この結果から、位置Ｐ１～Ｐ３のいずれの位置においても残留磁場が低減されることが見出された。また本実施例においては、たとえば厚さが１ｍｍ以上であれば、低減率１０％以上の有意な低減効果が得られた。また本実施例においてはパイプ部８１の

厚さが１０ｍｍ程度以上では残留磁場の低減率がおおよそ飽和していた。

【実施例４】

【００７０】

下記の表１を参照して、実施の形態２に対応するものであって、冷却装置１２１によりコイル運転温度を７７Ｋとして比較的低い磁場を発生させるのに適した場合の実施例と、冷却装置１２１によりコイル運転温度を２０Ｋとして比較的高い磁場を発生させるのに適した場合の実施例との各々のシミュレーション結果を示す。なお表中の「比較例」はパイプ部８１が設けられない場合の結果を示す。

【００７１】

【表１】

| 温度 | 77K | 20K |
|---|---|---|
| オン磁場 | 0.63T | 5.1T |
| 残留磁場<br>(比較例) | 6.8mT | 83mT |
| 残留磁場<br>(実施例) | 0.52mT<br>(92%低減) | 4.5mT<br>(95%低減) |
| パイプ厚 | 1mm | 10mm |

【００７２】

この結果から、残留磁場の大部分を除去するのに必要なパイプ部８１の厚さは、オン状態において超電導マグネット１００Ａ（図７）が発生する磁場（オン磁場）の大きさに顕著に依存することがわかった。具体的には、オン磁場１Ｔ未満では厚さは１ｍｍ程度で、オン磁場５Ｔ以上では１０ｍｍ程度で残留磁場の大部分が除かれることがわかった。

【００７３】

今回開示された実施の形態および実施例はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した実施の形態ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

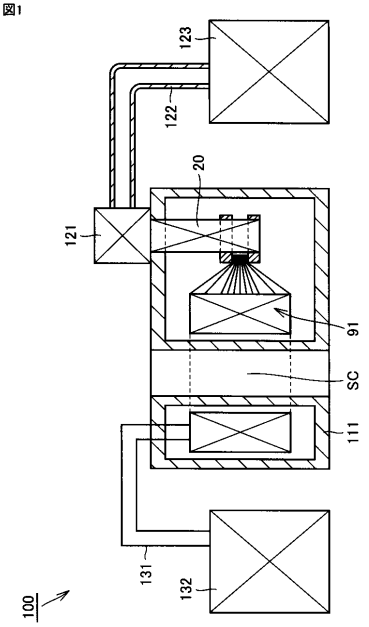
【符号の説明】

【００７４】

１０　コイル部、１１　ダブルパンケーキコイル、１２ａ，１２ｂ　パンケーキコイル、１４　酸化物超電導線、２０　冷却ヘッド、３１　伝熱板、８１　パイプ部（残留磁場抑制部）、８１ａ　内周パイプ（第１の部分）、８１ｂ　外周パイプ（第２の部分）、９１，９１Ａ　超電導コイル、１００，１００Ａ～１００Ｅ　超電導マグネット、１１１，１１１Ｄ　断熱容器、１２１　冷却装置、１２３　コンプレッサ、１３２　電源、ＳＣ　磁場印加領域、ＳＦ　帯状面。

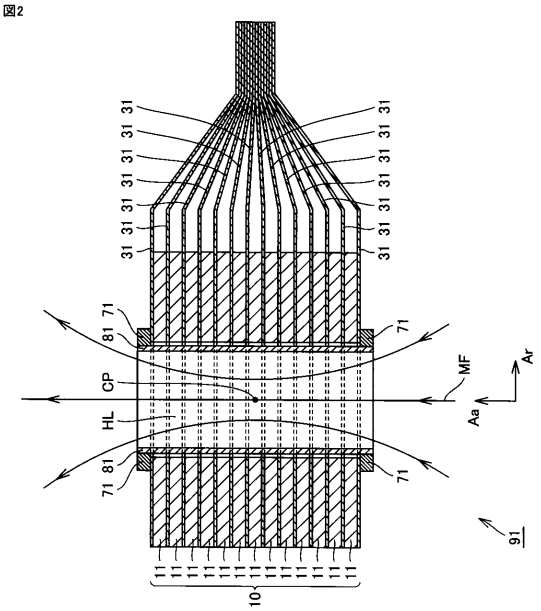
【図１】

図1



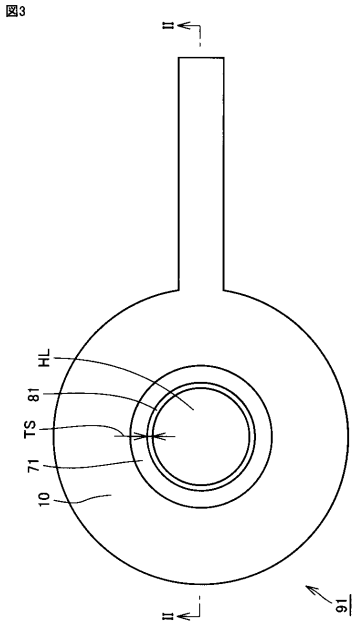

【図２】

図2



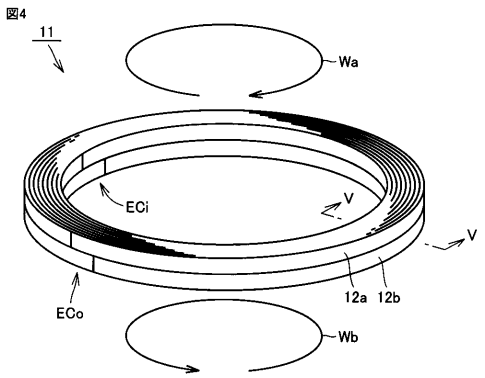

【図３】

図3



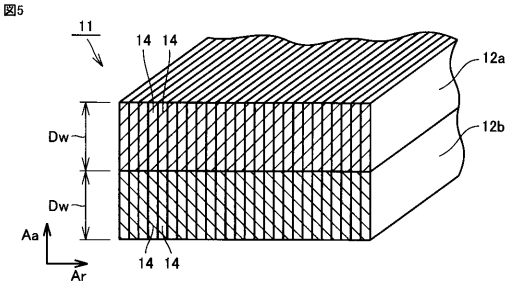

【図４】

図4

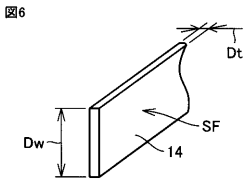



【図５】

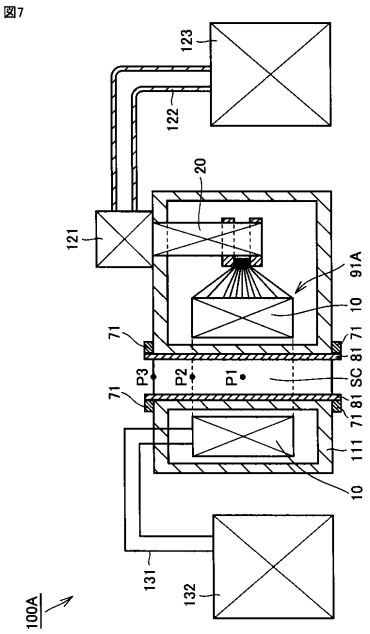
図5



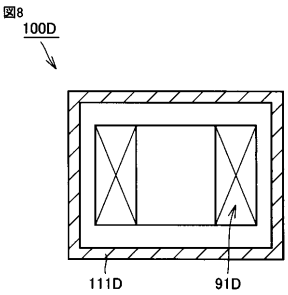
【図６】



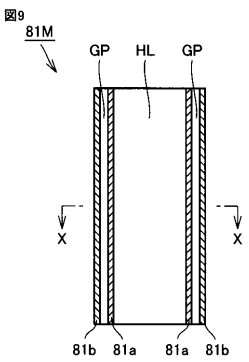

【図７】



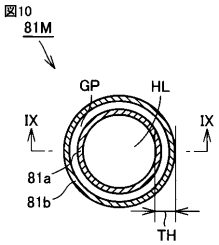

【図８】



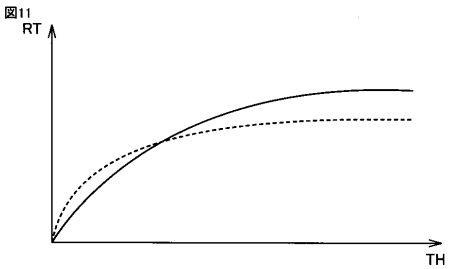

【図９】




【図１０】

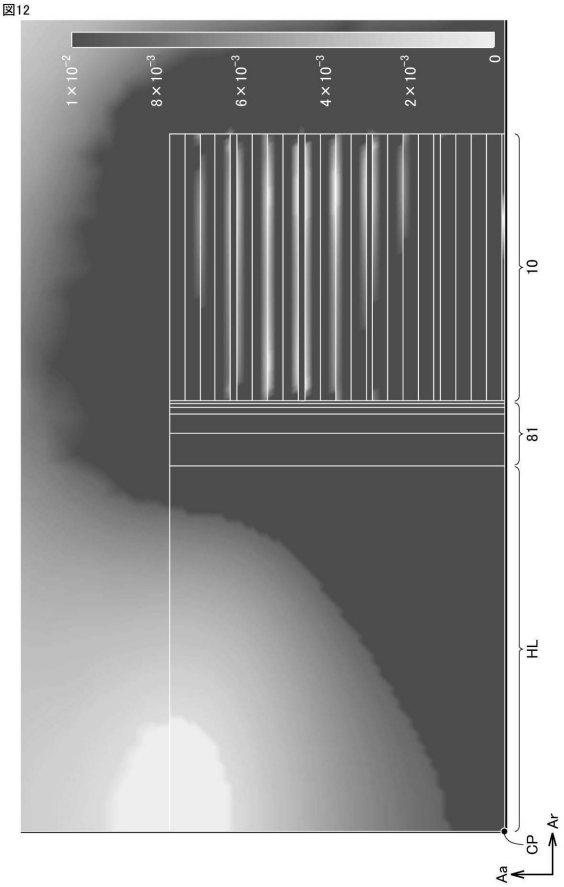



【図１１】



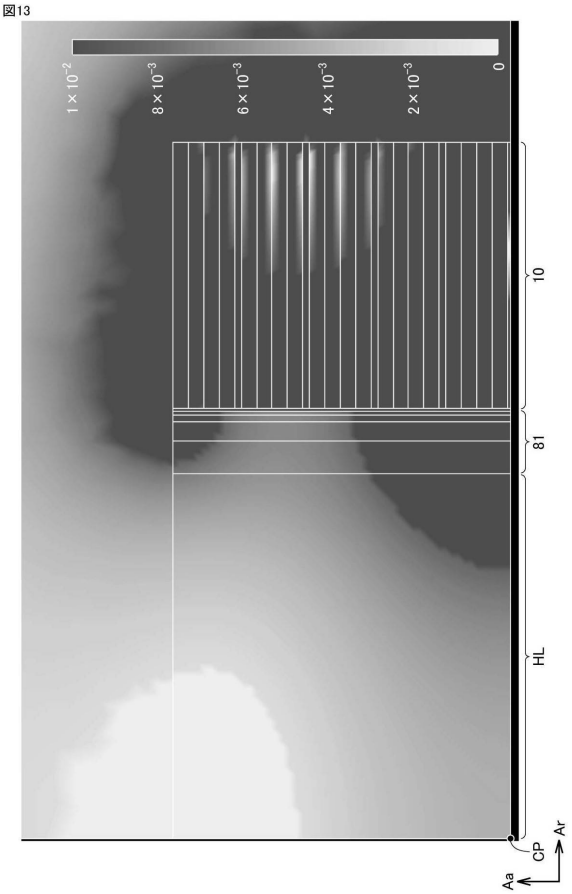
【図１２】

図12



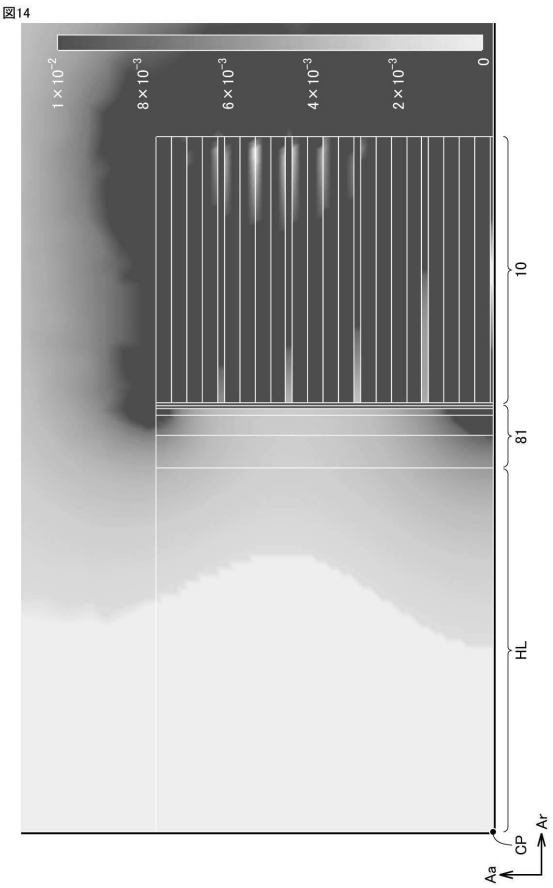

【図１３】

図13



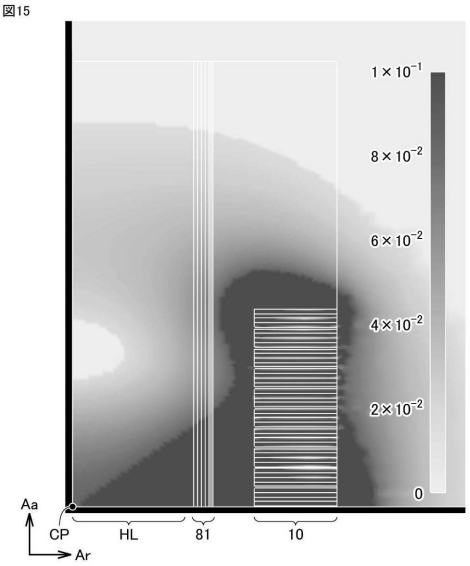

【図１４】

図14

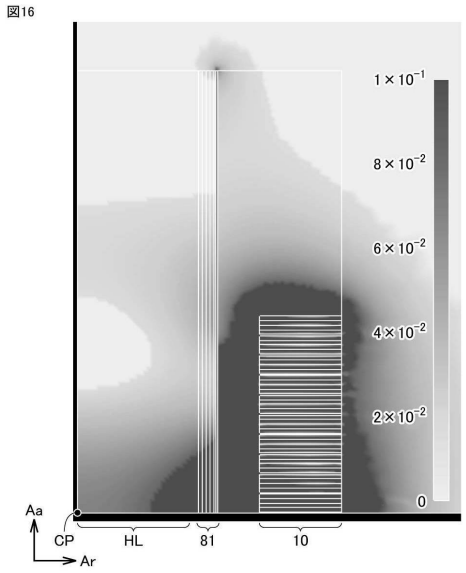



【図１５】

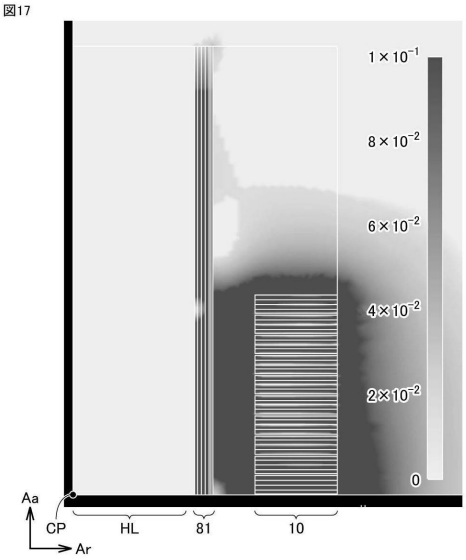
図15



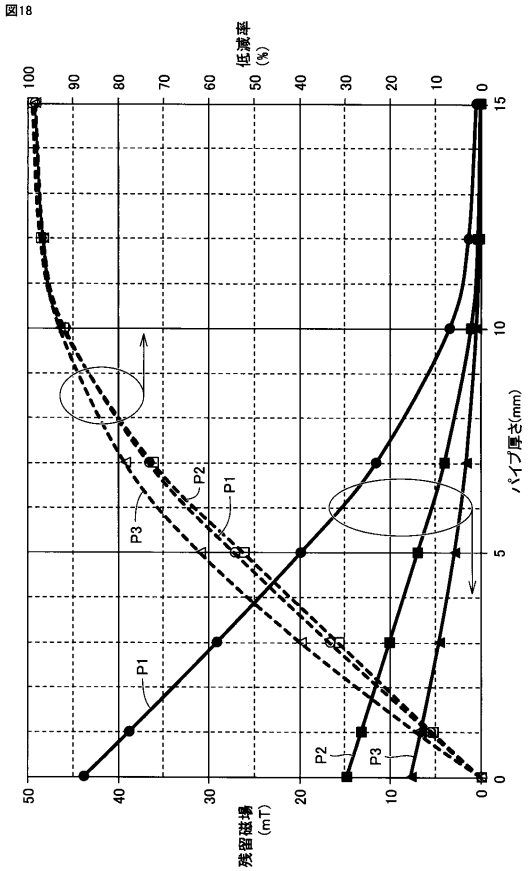
【図１６】



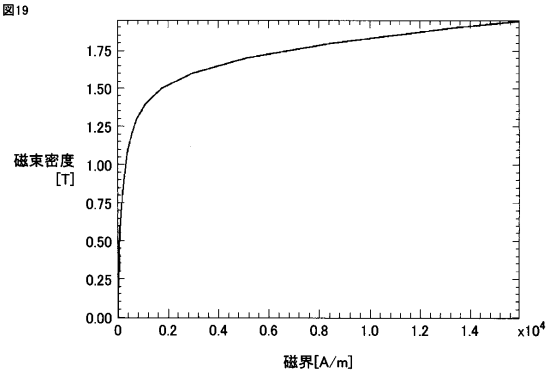

【図１７】



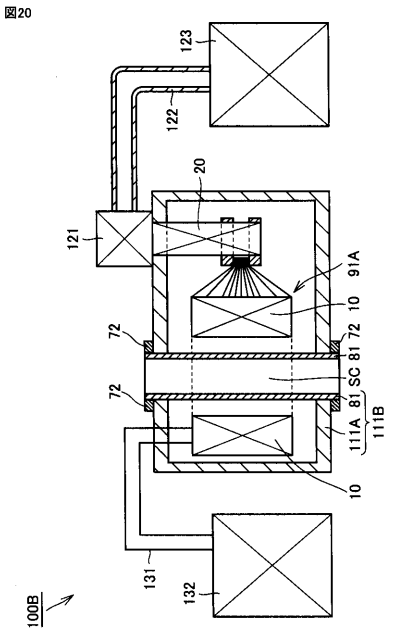

【図１８】



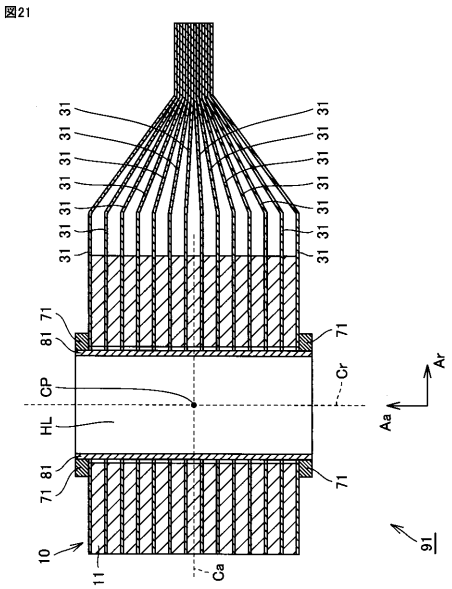

【図１９】



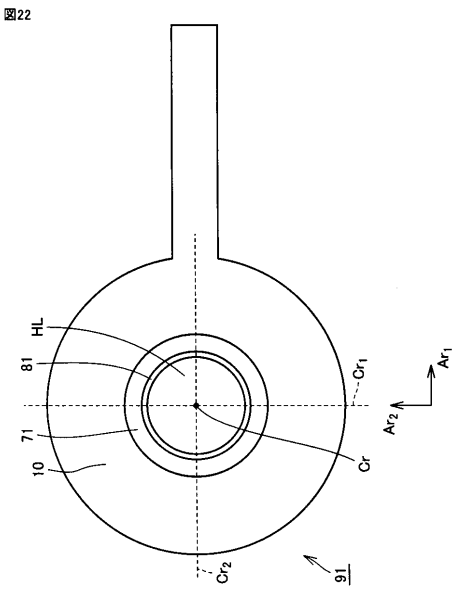
【図２０】



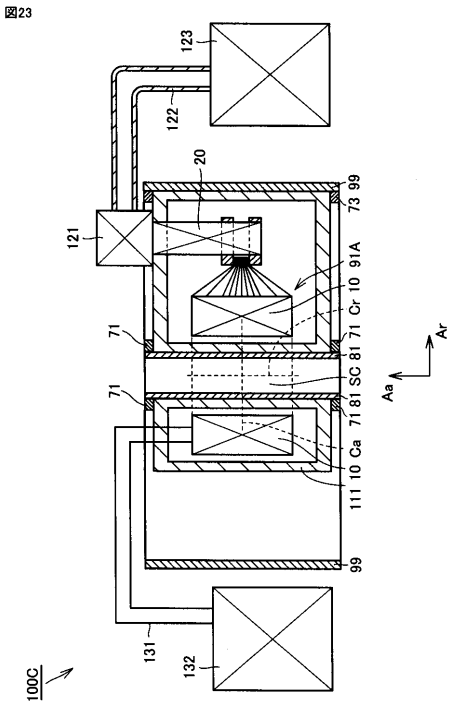

【図２１】




【図２２】

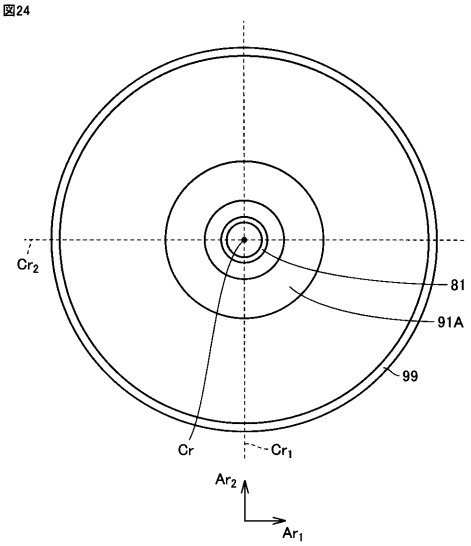



【図２３】



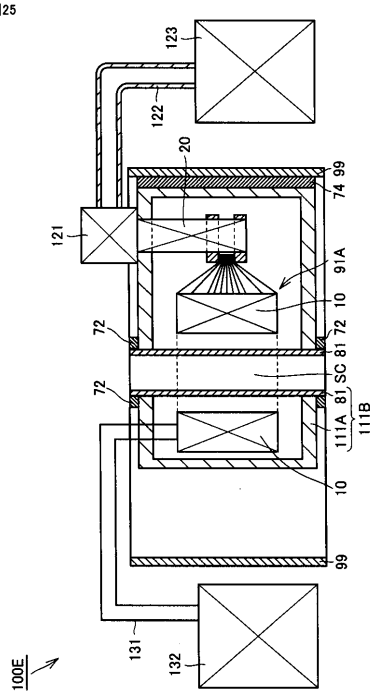
【図２４】

図24




【図２５】

図25



フロントページの続き

(56)参考文献 特開２００５－１１８０９８（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－１５３４４１（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－３２０３９５（ＪＰ，Ａ）
特開昭６４－３３９０７（ＪＰ，Ａ）
特開平６－２５１９２９（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－３９５９１（ＪＰ，Ａ）
特開平４－７８０７（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－３２１４３０（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｆ　　６／０６
Ｈ０１Ｌ　３９／０４
Ｈ０１Ｂ　１２／０２