

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-128461

(P2004-128461A)

(43) 公開日 平成16年4月22日(2004.4.22)

(51) Int.Cl.⁷

H01F 6/00
A61B 5/055
G01R 33/3815
G01R 33/421

F I

H01F 7/22 ZAAZ
G01N 24/06 510C
G01N 24/02 540A
A61B 5/05 331

テーマコード (参考)

4C096

審査請求 有 請求項の数 9 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2003-176754 (P2003-176754)
(22) 出願日 平成15年6月20日 (2003.6.20)
(31) 優先権主張番号 10227877.6
(32) 優先日 平成14年6月22日 (2002.6.22)
(33) 優先権主張国 ドイツ (DE)

(71) 出願人 591148048
ブルーカー バイオシュピン アー・ゲー
スイス国、フェルアンデン ツェー・ハー
ー8117、インドゥストリーシュトラ
ーセ26
(74) 代理人 100081880
弁理士 渡部 敏彦
(72) 発明者 ロバート ショウェッカー
スイス国 チューリッヒ ツェーハーー8
004 カセルネンシュトラーセ 21
(72) 発明者 アンドレアス アマン
スイス国 チューリッヒ ツェーハーー8
008 ネベルバッハシュトラーセ 7

最終頁に続く

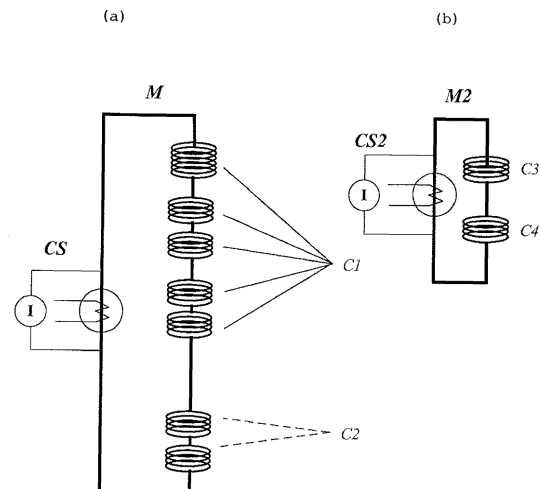
(54) 【発明の名称】 アクティブ・シールド超伝導磁石アセンブリ

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 コイル装置の個々のパラメータが望ましい値と異なった場合にも、その周縁磁場の境界値を維持する。

【解決手段】 作業容積 (AV) 内に z 軸方向の磁場 (H) を発生させる磁石アセンブリであって、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) と、動作状態で超伝導的に閉じる少なくとも 1 つの電流路 (P1, ..., Pn) とを含み、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) は、互いに同軸的に配置された半径方向内側部分コイル系 (C1) と半径方向外側部分コイル系 (C2) を含み、電流路 (P1, ..., Pn) の電流を適当な値に設定し、コイル・パラメータの設計値からのずれによる磁石アセンブリの周縁磁場の仕様からのずれを補償することを可能にする。

【選択図】 図 2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

z 軸上で $z = 0$ を中心に配置された作業容積 (AV) 内に z 軸方向の磁場 (H) を発生させる磁石アセンブリであって、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) と、動作状態で超伝導的に閉じる少なくとも 1 つの電流路 ($P_1, \dots, P_n$) とを含み、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) は、互いに同軸的に配置された半径方向内側部分コイル系 (C_1) と半径方向外側部分コイル系 (C_2) を含み、動作状態で該部分コイル系 (C_1, C_2) の磁気双極子モーメントは反対符号を有すると共に、大きさが量 Δm だけ異なり、その絶対値 $|\Delta m| < \text{該半径方向内側部分コイル系 (C}_1\text{) の磁気双極子モーメントの大きさの } 2.5\%$ であり、該磁石アセンブリの磁場 (H) は、 $z = 0$ のまわりで z 軸に沿って係数 H_n を有する z の多項式で展開することができ、該磁石アセンブリは、該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) の各々が動作状態でそれぞれの電流 ($I_{P_1}, \dots, I_{P_n}$) で充電されるように電流を供給するための外部デバイスを有し、該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) は、該磁石アセンブリの作業容積 (AV) 内における動作状態での該磁石アセンブリの磁場 (H) に、全体として、動作状態での該磁石コイル系 (M) の磁場寄与成分の 5% 未満の量寄与する磁石アセンブリにおいて、
 該磁石アセンブリの外側の周縁磁場挙動を最適化する間、それぞれの動作電流 ($I_{P_1}, \dots, I_{P_n}$) に充電された該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) の磁気双極子モーメントの全体の大きさが充電された部分コイル系 (C_2) の磁気双極子モーメントの大きさの少なくとも 0.1% であり、該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) をそれぞれの動作電流 ($I_{P_1}, \dots, I_{P_n}$) に充電するときに、該磁石アセンブリの磁場 (H) の多項式展開における 2 次の係数 (H_2) に生ずる変化 ΔH_2 が、
 $|\Delta H_2| < \max(0.25 \text{ T/m}^2, 0.9 \times |H_2(M)|)$
 で与えられ、ここで、 $H_2(M)$ は、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) の動作状態における磁場の多項式展開における 2 次の係数を表すことを特徴とする磁石アセンブリ。

【請求項 2】

該絶対値 $|\Delta m|$ は、該部分コイル系 (C_1) の磁気双極子モーメントの大きさの 1% よりも小さいことを特徴とする請求項 1 記載の磁石アセンブリ。

【請求項 3】

該磁石アセンブリは、該磁石アセンブリで超伝導 Z₂ シムとしての役目をする別の超伝導コイル系を含み、該磁石アセンブリの磁場 (H) への該別の超伝導コイル系の寄与が、該磁石アセンブリの動作状態における磁場 (H) の多項式展開の 2 次の係数 (H_2) をほぼゼロにすることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の磁石アセンブリ。

【請求項 4】

該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) は、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) から誘導的にほぼ減結合されることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の磁石アセンブリ。

【請求項 5】

該超伝導的に短絡される電流路 ($P_1, \dots, P_n$) の少なくとも 1 つは、該磁石アセンブリの動作状態において外部磁場変動を補償する装置の一部であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の磁石アセンブリ。

【請求項 6】

該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) の少なくとも 1 つは、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) の最も外側のコイルの半径の少なくとも 90% である半径を有する磁石コイルを含むことを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の磁石アセンブリ。

【請求項 7】

該電流路 ($P_1, \dots, P_n$) の少なくとも 1 つは、該アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 (M) の外側部分コイル系 (C_2) のコイル担持部としての役割もするコイル成形部に巻かれたコイルを含むことを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の磁石

アセンブリ。

【請求項 8】

該磁石アセンブリの作業容積 (AV) 内における該磁石アセンブリの磁場 (H) への該電流路 (P1, ..., Pn) の動作状態での全体的な寄与が無視できるほど小さいことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の磁石アセンブリ。

【請求項 9】

該電流路 (P1, ..., Pn) の少なくとも 1 つは、動作状態において、 $z = 0$ で z 軸と直交する平面に関して非対称な磁場を発生することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の磁石アセンブリ。

【発明の詳細な説明】

10

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、 z 軸上で $z = 0$ を中心に配置された作業容積内に z 軸方向の磁場を発生させる磁石アセンブリであって、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系と、動作状態で超伝導的に閉じる少なくとも 1 つの電流路とを含み、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系が互いに同軸的に配置された半径方向内側部分コイル系及び半径方向外側部分コイル系を含み、動作状態で該部分コイル系の磁気双極子モーメントは反対符号を有すると共に、大きさが量 Δm だけ異なり、その絶対値 $|\Delta m|$ が半径方向内側部分コイル系の磁気双極子モーメントの大きさの 2.5% よりも小さく、磁石アセンブリの磁場が z 軸に沿って $z = 0$ のまわりで係数 H_n を有する z の多項式で展開することができ、磁石アセンブリが超伝導的に閉じる電流路を動作状態で動作電流によって充電する外部デバイスを有し、磁石アセンブリの作業容積内における動作状態での磁石アセンブリの磁場への超伝導的に閉じる電流路の全体としての寄与成分がアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系の磁場寄与成分の 5% よりも小さいことを特徴とする磁石アセンブリに関する。

20

【0002】

【従来の技術】

アクティブ・シールド磁石コイル系と、少なくとも 1 つの超伝導的に閉じる付加的電流路とを有するこのタイプの磁石アセンブリは、特許文献 1 に開示されている。この磁石アセンブリでは、超伝導的に閉じる付加的な電流路が超伝導シム・デバイスとして働いて磁石アセンブリの作業容積における磁場の均一性を改善する。

30

【0003】

特許文献 2 は、アクティブ・シールド磁石コイル系と、少なくとも 1 つの超伝導的に閉じる付加的電流路とを含む別の磁石アセンブリを開示している。この磁石アセンブリは、外部の電磁的な擾乱を補償するため、該磁石コイル系自身によって生ずる磁場のドリフトを補償するため、又は作業容積における磁場強度を微調整するために超伝導的に閉じる付加的電流路を備えている。

【0004】

超伝導磁石はいろいろな分野で応用されており、例えば、磁気共鳴法のための高磁場への応用もそれに含まれる。このような高磁場磁石は、普通大きな周縁磁場を発生する。この磁場は、磁石の周辺で危険になることがある。この問題は、磁石がアクティブ・シールド、すなわち磁石の主コイルと直列に結合されて反対の極性の磁場を発生する付加的な超伝導コイルを備えることによって解決できる。

40

【0005】

【特許文献 1】

米国特許第 6 2 6 5 9 6 0 号明細書

【特許文献 2】

国際公開第 0 0 / 5 2 4 9 0 号パンフレット

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、特に、きわめて効率的に周縁磁場を遮蔽する磁石は、磁石コイルの設計仕

50

様にずれという問題を持ち出し、この問題により、磁石アセンブリが発生する周縁磁場に大きな変化が生じて、要求される周縁磁場の仕様が満たされなくなることがある。生産における許容誤差による設計仕様からの小さなずれは避け難い。例えば、ワイヤの直径の許容誤差は、1パーセントにまで達することがある。磁石アセンブリの外側で周縁磁場を補償するために、符号が異なる大きな磁場寄与成分が互いに重畳するので、このような小さなずれが周縁磁場の値を劇的に悪化させることがある。0.5 mTという周縁磁場が生ずるべき場所で、主コイル及び周縁磁場の相互に補償する量が、例えば大きさ100 mTのオーダーになっている。コイル系の製造における不正確さによる、これら2つの磁場寄与成分の一方の望ましい値からの約1%ずれは、周縁磁場の強度0.5 mTの等高面という場所で望ましい値から約1 mTのずれを生ずる。したがって、この場所で要求される周縁磁場のリミットを、この場合は複数の要因によって、超えてしまう可能性がある。 10

【0007】

本発明の根底にある目的は、従来の磁石アセンブリを改良して、製造における不正確さの結果、コイル装置の個々のパラメータが望ましい値と異なった場合にも、その周縁磁場の境界値を維持することができる磁石アセンブリを提供することにある。特に、巻線データの望ましい値からのずれ、及び個々のコイル系を担持するコイル成形部の望ましい幾何形状からの幾何的なずれによる周縁磁場への影響を補償することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】

上記目的は、本発明に従って、磁石アセンブリがアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系と独立に充電できる少なくとも1つの付加的電流路を備えることによって達成される。磁石アセンブリの機能にマイナスの副作用を及ぼすことなく付加的電流路によって磁石アセンブリの周縁磁場を改善可能にするためには、これらの電流路の寸法はいろいろな必要条件を満たさなければならない。磁石アセンブリの作業容積において付加的電流路が発生する磁場寄与成分がアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系の磁場寄与成分の値の5%を超えてはならない。さらに、付加的電流路を流れる電流が作業容積における磁石アセンブリの磁場の均一性を実質的に低下させないことを確保するしなければならない。磁石アセンブリの該磁場の均一性は、主に中心部のまわりでの磁場の多項式展開における2次の係数によって決まるので、磁石アセンブリの全体磁場の2次の係数への付加的電流路の寄与が、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系の対応する係数に比べて小さくしなければならない。 20 30

且つ/又は、絶対値が最大0.25 T/m²を超えてはならない。これらの条件は、引用した従来技術による超伝導的に閉じる付加的電流路によっても少なくとも部分的には満たされる。

【0009】

超伝導的に閉じる付加的電流路の本発明による実施の形態では、その巻線が囲む面積を十分大きくして、そこに流れる電流が周縁磁場に十分大きな寄与を、特に十分大きな磁気双極子モーメントを発生することを確保する。このような仕方では、本構成の個々の付加的電流路に動作状態で流れる電流を適当に選ぶことによって、超伝導的に短絡される付加的電流路を流れる電流の双極子モーメントが、アクティブ・シールド磁石コイル系の製造許容誤差によって生ずる磁気双極子モーメント望ましい値からのずれを少なくとも部分的に補償すると共に、本構成全体の磁場のその他の性質が、超伝導的に短絡される付加的電流路の磁場寄与成分によって実質的に低下することをなくすることができる。 40

【0010】

本発明の構成は、磁石コイル装置の設計パラメータの望ましい値からのずれに対して過剰に反応する非常に優れたアクティブ・シールド超伝導磁石系で、設計仕様からのそのようなずれを防止するための金のかかる面倒な手段を製造時に講じなくても、理論的に達成可能な周縁磁場のリミットを維持することができるという利点がある。これによって、設計仕様による巻線データの精密な製造許容誤差のための余分な手段を必要としないので、ワイヤ及びコイル成形部に精密な許容誤差が要求されず、より経済的な製造が可能になる。本発明の構成の1つの特別な利点は、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系のいろいろ 50

るな設計パラメータの望ましい値からのずれによって周縁磁場に過大な値が生ずるのを防止できると共に、個々のパラメータの各々について特別な構成を計算して建造する必要をなくすることができる。

【0011】

本発明の磁石アセンブリの特に有利な実施の形態では、アクティブ・シールド磁石コイル系の部分コイル系の磁気双極子モーメントは、半径方向内側部分コイル系の磁気双極子モーメントの1%未満だけ異なる。この場合、アクティブ・シールド磁石コイル系の2つの部分コイル系の双極子モーメントのずれに関連した製造許容誤差は、磁石コイル系の全体的な双極子モーメントに対して特に大きい。これにより、部分コイル系の望ましい値からの小さなずれに対しても、磁石コイル系の全体的な双極子モーメントの理論値から大きなずれを生ずる。したがって、磁石コイル系の周縁磁場の望ましい値からのずれを補償するための超伝導的に短絡される付加的電流路という形態で本発明のデバイスを提供することは、特に、このようなアクティブ・シールド磁石コイル系の場合に有利である。

10

【0012】

また、本発明の磁石アセンブリの実施の形態は、この磁石アセンブリが高分解能磁気共鳴分光のための装置の一部であり、特に有利である。このような磁石アセンブリの半径方向内側部分コイル系は、一般にそのような装置に必要な高い磁場強度のために非常に大きな双極子モーメントを有し、したがって、アクティブ・シールド磁石系を用いることが特に有利である。本発明の構成は、磁石コイル系の製造における設計仕様からのずれが、通常の大きな双極子モーメントのために、この場合は特に望ましくない過大な周縁磁場を引き起こさないことを保証する。

20

【0013】

本発明の磁石アセンブリの実施の形態は特に好ましいものであり、本実施の形態では、磁石アセンブリが磁石アセンブリの超伝導Z₂シムの役目を果たす別の超伝導コイル系を含み、磁石アセンブリの磁場への別の超伝導コイル系の寄与が磁石アセンブリの動作状態における磁場の多項式展開における2次の係数をほぼゼロにしている。磁石アセンブリに付加的なZ₂シムを設けることによって、超伝導的に閉じる付加的電流路からの多少不均一な磁場寄与成分によって生ずる磁石アセンブリの磁場均一性の低下を少なくとも部分的に補償することができる。このようにして、付加的電流路は、外側周縁磁場に变化を生ずるだけで、磁石アセンブリの中央部において磁場の均一性の低下を生じない。

30

【0014】

本発明の磁石アセンブリの特に好ましい実施の形態では、超伝導的に短絡される付加的電流路の少なくとも1つが磁石コイル系全体から誘導的に減結合される。磁石コイル系と超伝導的に短絡される電流路との間に誘導結合があると、充電の間にそのスイッチを規則的に開いて、その電流路の望ましくない充電を防止する必要がある。この好ましい実施の形態の構成では、付加的電流路がそれぞれの動作電流に充電される間にもアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系には何も電流変化が誘導されず、したがって作業容積内の望ましくない磁場変化も回避される。

【0015】

本発明の磁石アセンブリの別の有利な実施の形態では、超伝導的に短絡される付加的電流路の少なくとも1つが、磁石アセンブリに追加の機能を与えるデバイスの一部である。特に、その電流路は外部磁場変動を補償する役割をする。本実施の形態は、この二重の機能によって磁石アセンブリ全体がよりコンパクトになるので有利である。

40

【0016】

本発明の磁石アセンブリの特に好ましい別の実施の形態では、超伝導的に短絡される付加的電流路の少なくとも1つが、アクティブ・シールド磁石コイル系から熱的に減結合される。磁石コイル系でクエンチが起きたとき、この付加的電流路に伝達される熱の量が十分に少ないので、少なくともクエンチの初期段階の間、この付加的電流路にはクエンチが誘発されない。磁石コイル系のクエンチの初期段階における磁束の変化によって、付加的な、しかしやはり超伝導的な電流路に誘導される電流が磁石アセンブリの周縁磁場をクエン

50

チの間小さく抑えるために必要なので、これは重要である。

【0017】

本発明の磁石アセンブリの特に好ましい実施の形態では、超伝導的に閉じる付加的電流路の少なくとも1つが、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系の最も外側のコイル半径の少なくとも90%の半径の磁石コイルを有する。この電流路は、広い面を囲むので、大きな電流を必要とせずにかんりの磁気双極子モーメントを発生する。この電流路を流れる最大電流を、それを超えると超伝導状態が壊れる臨界電流よりも低い値に容易に抑えることができるので、これは有利である。

【0018】

本発明の磁石アセンブリのさらに有利な実施の形態は、超伝導的に閉じる付加的電流路の少なくとも1つが、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系の外側部分コイル系のコイル担持体としての役割もするコイル成形部に巻かれているコイルを含むことを特徴とする。これにより、この付加的電流路は広い面を囲むので、周縁磁場に十分な影響を及ぼす磁気双極子モーメントを発生するのにほんのわずかな量の電流しか必要としない。この磁石アセンブリの生産は、付加的電流路のために余分なコイル成形部を必要としないので、安価である。 10

【0019】

本発明の磁石アセンブリの特に好ましい実施の形態は、磁石アセンブリの作業容積内における磁石アセンブリの磁場への超伝導的に閉じる電流路の動作状態での全体的な寄与が無視できるほど小さいことを特徴とする。これにより、作業容積内において所望の磁場を実現し磁石アセンブリの外側で周縁磁場を最適化する系を簡単に設置できるという利点がある。付加的電流路における電流の設定は、作業容積内の磁場の大きさの著しい変化につながらない。 20

【0020】

本発明の磁石アセンブリのさらに有利な別の実施の形態では、超伝導的に閉じる付加的電流路の少なくとも1つが、動作状態において、 $z = 0$ で z 軸と直交する平面に関して非対称な磁場を発生する。この実施の形態は、磁石アセンブリの周縁磁場の望ましい挙動からの、この平面に関して非対称なずれを補正することを可能にする。このタイプの周縁磁場の歪みは、例えば、磁石アセンブリの超伝導シム・コイルによって生じる。これは、シム・コイルが z 軸に沿って $z = 0$ のまわりで奇数次係数 H_n を有する z の多項式で展開される磁場寄与成分を生ずる場合である。 30

【0021】

本発明のその他の利点は以下の説明と図面から明らかになる。上述した特徴及び以下で述べる特徴は、本発明に従って、単独でも、任意の組み合わせによっても利用できる。図に示され、説明される実施の形態はすべてを尽くすものではなく、発明を説明するための例示的な性格のものであると理解すべきである。

【0022】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面を用いて詳しく説明する。

【0023】

図1は、作業容積 AV を中心に配置され、同軸的な半径方向内側及び半径方向外側部分コイル系 C_1 及び C_2 を含むアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 M と、2つの超伝導部分コイル系 C_3 及び C_4 を含む別の磁石コイル系 M_2 の形の超伝導的に閉じる付加的電流路 P_1 とを有する本発明の磁石アセンブリを示す図である。 40

【0024】

図2は、本発明の磁石アセンブリの配線を示す概略図であって、特に、図2(b)は、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 M とは別の2つの超伝導部分コイル系 C_3 及び C_4 を含む付加的コイル系 M_2 の実施の形態で電流供給源 CS_2 を含む超伝導的に閉じる付加的電流路 P_1 の配線を示す。磁石コイル系 M 及び M_2 は、電流供給源 CS 又は CS_2 によって互いに独立な動作電流に充電することができる。 50

【 0 0 2 5 】

本発明は、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系を含む磁石アセンブリの２つの実施の形態によって以下のように説明される。各実施の形態では、作業容積ＡＶ内に９Ｔの強度の磁場を発生させ、超伝導材料として、ニオブ・チタンを用い、磁石アセンブリを液体ヘリウム中で４．２Ｋという温度で運転する。

【 0 0 2 6 】

第１の磁石アセンブリ（以下では、実施の形態「Ｖ１」と呼ぶ）は、従来技術によるアクティブ・シールド超伝導磁石コイル系Ｍを含む。半径方向内側部分コイル系Ｃ１と、半径方向外側部分コイル系Ｃ２は、この磁石コイル系を構成する部分である。Ｃ１は、２つの同心的且つ同軸的なソレノイド・コイルＣ１ａ及びＣ１ｂから成り、それらは直接互いの上に巻かれて極性が等しい。Ｃ２は、Ｃ１と同心的且つ同軸的に配置され、Ｃ１の極性と反対の極性を有する単一のソレノイド・コイルから成る。この磁石コイル系の動作電流は８１．７Ａである。透明な内側ボアの直径は７０ｍｍである。

【 0 0 2 7 】

本発明によるバリエーション（以下では「Ｖ２」と呼ぶ）は、バリエーションＶ１と比較されるものであり、磁石コイル系Ｍと、これに加えて、互いに直列に結合された２つの超伝導部分コイル系Ｃ３及びＣ４を含む別のコイル系Ｍ２の形で超伝導的に閉じる付加的電流路Ｐ１を有する。本例では、磁石コイル系ＭはバリエーションＶ１の磁石コイル系Ｍと同一である。Ｃ３は、Ｃ２の最も外側の層の上に直接巻かれたヘルムホルツ（Ｈｅｌｍｈｏｌｔｚ）・コイルから成り、Ｃ４は、半径方向で２つの部分コイル系Ｃ１及びＣ２の間に配置された別のソレノイド・コイルから成る。

【 0 0 2 8 】

表１は、部分コイル系Ｃ１（Ｃ１ａ及びＣ１ｂ）並びにＣ２と、Ｃ３及びＣ４との最も重要な特徴を示す。

【 0 0 2 9 】

【表１】

	C1a	C1b	C2	C3	C4
ri [mm]	38.0	58.5	222.0	102.2	147.5
ra [mm]	58.5	102.2	225.4	106.8	149.8
L [mm]	380	380	450	63.3	450
C [mm]	0	0	0	±55.8	0
W	361	468	698	98	698
N	26	62	6	8	4
m* [m ²]	673.4		-658.7	-53.9	193.9
	14.7			140.0	

【 0 0 3 0 】

表１のそれぞれは以下の通りである。

【 0 0 3 1 】

- r i コイルの内径
r a コイルの外径
L ソレノイド・コイル、又はヘルムホルツ・コイルの部分コイルの長さ
C ソレノイド・コイル、又はヘルムホルツ・コイルの部分コイルの中心部の軸方向位置
W ソレノイド・コイル、又はヘルムホルツ・コイルの部分コイルの各層の巻線数
N ソレノイド・コイル又はヘルムホルツ・コイルのワイヤ層の数、

m^* 電流 1 アンペアあたりの磁気双極子モーメント

付加的電流路 P 1 は、磁石コイル系 M から誘導的に減結合され、磁場寄与成分にも、磁石アセンブリの中心部における磁場の多項式展開の 2 次の係数 H_2 にも変化を生じない。付加的電流路 P 1 の電流 1 アンペアは、磁場に $\Delta H_0 = 9 \cdot 2 \times 10^{-6} \text{ T}$ 、2 次の係数では $\Delta H_2 = -1 \cdot 7 \times 10^{-4} \text{ T/m}^2$ という無視できるほどの変化しか生じない。

【0032】

磁石アセンブリ V 1 又は V 2 では、個々の磁石コイルの設計仕様からのずれが動作状態における各構成形態の周縁磁場に及ぼす影響を以下のように計算する。ここでは、設計パラメータの望ましい値からの可能なずれの一例を示し、この例では、超伝導ワイヤの直径が望ましい値よりも小さいことによる理論値と比較される部分コイル系 C 2 の巻線の増大を示す。 10

【0033】

磁石コイル系 M は、例えば 0.5 mT 等高面の最大拡がりで特徴づけられる周縁磁場を有する。磁石コイル系 M のある実施の形態では、設計仕様によれば、その拡がり半径方向で 0.63 m、軸方向で 1.09 m である。部分コイル系 C 2 で、直径が仕様で定められた値より 4 % だけ小さなワイヤが用いられると、この部分コイル系は、1 層あたり 698 本でなく 727 本の巻線を有することになり、バリエーション V 1 の場合 0.5 mT 等高面の半径方向の拡がり半径がかなり増大する。本発明の磁石アセンブリ V 2 では、付加的電流路 P 1 を 19.2 A の電流で充電することによって、実際の巻線数を考慮に入れた周縁磁場の望ましい値からのずれを理論的にほぼ補償する。電流路 P 1 における最適電流を決定する別の可能性としては、磁石の周縁磁場を測定して必要な補償電流を実験的に決定することがある。 20

【0034】

表 2 は、2 つの実施の形態 V 1 及び V 2 について動作状態で得られる双極子モーメントと 0.5 mT 等高面の寸法とを、設計仕様に従った場合、及び部分コイル系 C 2 におけるワイヤが 4 % 細すぎる場合に対して示す表である。

【0035】

【表 2】

	設計による	C2における巻線のずれ	
	V1及びV2	V1	V2
IP1 [A]	0	—	19.2
R5G [m]	0.63	0.80	0.63
Z5G [m]	1.09	0.92	1.14
B63 [mT]	0.50	1.26	0.49
$m_{C1} [\text{Am}^2]$	55051	55225	55225
$m_{C2} [\text{Am}^2]$	-53850	-56236	-56236
$m_M [\text{Am}^2]$	1201	-1011	-1011
$m_{P1} [\text{Am}^2]$	0	—	2687

【0036】

表 2 のそれぞれは以下の通りである。

【0037】

IP1 付加的電流路 P 1 を流れる電流

R5G 0.5 mT 等高面の半径方向での磁石軸から測った最大拡がり

Z5G 0.5 mT 等高面の軸方向での磁石中央面から測った最大拡がり

B63 半径 0.63 m の磁石コイル系と同軸な円筒面での磁石アセンブリの磁場強度の 50

最大の大きさ

m_{C1} 動作状態での部分コイル系 C 1 の磁気双極子モーメント

m_{C2} 動作状態での部分コイル系 C 2 の磁気双極子モーメント

m_M 動作状態での磁石コイル系 M の磁気双極子モーメント

m_{P1} 動作状態での付加的電流路 P 1 の磁気双極子モーメント

表 2 の値から分かるように、設計仕様からの巻線データのずれは、部分コイル系 C 2 の磁気双極子モーメントにはっきりした変化を生ずる。この変化は、本発明の実施の形態 V 2 の場合、付加的電流路 P 1 に供給される電流が発生する磁気双極子モーメントによって大体補償されて、實際上設計と同一の周縁磁場を生ずる。表 2 はまた、0.5 mT 等高面の半径方向の最小拡がりに関して最適化された磁石コイル系 M が最小の磁気双極子モーメントにならないことを示している。部分コイル系 C 2 における仮の巻線数のずれに対して、バリエーション V 1 では設計仕様によるものよりも小さな磁気双極子モーメントが得られる。しかし、0.5 mT 等高面の半径方向の拡がりには設計仕様よりもかなり大きくなる。本発明の実施の形態 V 2 の場合、付加的電流路 P 1 に供給される電流によって、全双極子モーメントの大きさは増加するが、0.5 mT 等高面の半径方向の拡がりには最小になる。

【0038】

磁石軸から距離 R 5 G の内側の領域は、普通、磁性材料及び磁場に敏感な装置がないようにしておかなければならない。この距離は、設計仕様による構成では 0.63 m である。このため、個々のコイル・パラメータが望ましい値とは異なる値を有するときでも、磁石軸からこの距離で 0.5 mT という磁場強度を超えないことが必要である。この要求は実施の形態 V 1 では満たされない。周縁磁場は磁石軸から 0.63 m の距離で、0.5 mT という設計値の 2 倍にまで増加し、0.5 mT という閾値は、磁石軸からの距離が 0.8 m を超えるところではじめて達成される。これと対照的に、本発明のバリエーション V 2 は、設計値と比べた周縁磁場の増加を何も示さない。

【0039】

上記の例における磁石コイル系 M の周縁磁場は、0.5 mT 等高面の半径方向の最小拡がりに関して最適化されている。個々のコイル・パラメータの設計仕様からの製造時のずれのために、従来技術による上記の例の磁石アセンブリの実施形態は、0.5 mT 等高面の軸方向の拡がり望ましい値より小さいことを示す。これには常に、0.5 mT 等高面の半径方向の拡がりの増加に伴う（表 2 の例に示される）。本発明の磁石アセンブリの実施の形態では、付加的電流路を流れる電流を適当に選択することによって、製造時の個々のコイル・パラメータの設計仕様からのずれを周縁磁場に及ぼす影響を大体排除することができる。磁石アセンブリの設計で目標とした周縁磁場の値は、いくつかのコイル・パラメータの製造許容誤差に関わりなく、常に維持することができる。本発明の磁石アセンブリでは、設計によって最適化しようと意図した周縁磁場規準が、いくつかのコイル・パラメータの製造許容誤差に関わりなく、いつでも最適化されたままにとどまる。

【0040】

【発明の効果】

以上詳細に説明したように、本発明によれば、従来の磁石アセンブリを改良して、製造における不正確さの結果、コイル装置の個々のパラメータが望ましい値と異なった場合にも、その周縁磁場の境界値を維持することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の磁石アセンブリの半径方向の半分を通る概略垂直断面図である。

【図 2】本発明の磁石アセンブリの配線図であり、(a) は、アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系 M の配線を示し、(b) は、超伝導的に閉じる付加的電流路 P 1 の配線を示す。

【符号の説明】

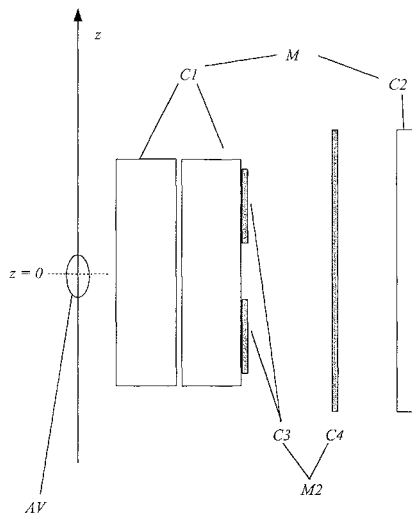
A V 作業容積

M アクティブ・シールド超伝導磁石コイル系

C 1 半径方向内側部分コイル系

- C 2 半径方向外側部分コイル系
 C 1 a , b ソレノイド・コイル
 M 2 別の磁石コイル系（付加的コイル系）
 C 3 超伝導部分コイル系（ヘルムホルツ・コイル）
 C 4 超伝導部分コイル系（別のソレノイド・コイル）

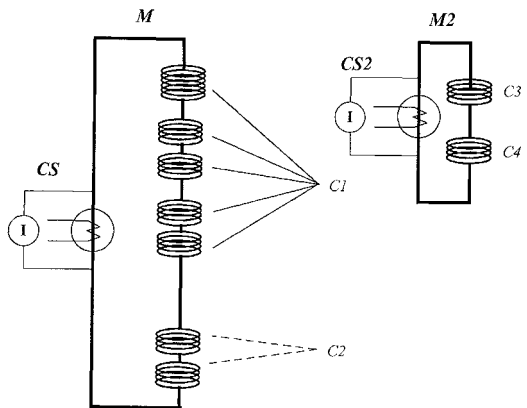
【図 1】



【図 2】

(a)

(b)



フロントページの続き

(72)発明者 ピエール・アラン ボヴィエー

スイス国 チューリッヒ ツェーハー - 8 0 5 1 ヘーレンヴァイセン 3 1

Fターム(参考) 4C096 AB48 AD08 CA02 CA40