

(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2019-12742

(P2019-12742A)

(43) 公開日 平成31年1月24日(2019.1.24)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
H 0 1 F 6/06 (2006.01) H 0 1 F 6/06 1 3 0 4 M 1 1 4
H 0 1 L 39/04 (2006.01) H 0 1 L 39/04

審査請求 未請求 請求項の数 13 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2017-127714 (P2017-127714)	(71) 出願人	000002130
(22) 出願日	平成29年6月29日 (2017. 6. 29)		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	静谷 英治
			大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
			住友電気工業株式会社内
		(72) 発明者	上野 栄作
			大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
			住友電気工業株式会社内
		Fターム(参考)	4M114 AA02 AA17 AA20 AA25 DA32 DA45 DA52 DA53

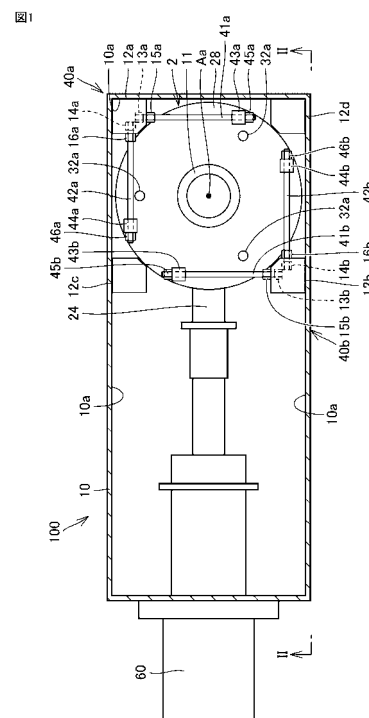
(54) 【発明の名称】 超電導マグネットおよび検査装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】耐電磁力性能に優れた支持構造を有する超電導マグネットおよび検査装置を提供する。

【解決手段】水平支持部材40aと水平支持部材40bとは、巻軸Aaの方向から見た平面視において、巻軸Aaに対して対称に配置される。連結材41a、41bおよび連結材42a、42bは、巻軸Aaの方向から見た平面視において、ガセット12a～12dから互いに異なる方向に延びる。固定具28には、連結材41a、41b、42a、42bを通すための貫通孔が形成されている。連結材41a、41b、42a、42bの各々は、貫通孔を通して巻軸Aaに垂直な方向に延在し、かつ、ガセット12a～12dに固定される第1の固定端と、固定具28に固定される第2の固定端とを有する。連結材41a、41bは第2の固定端に係合される係合材45a、45bを、連結材42a、42bは第2の固定端に係合される係合材46a、46bをさらに含む。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

巻回された超電導線材を有するコイル部と、前記コイル部を挟むように前記コイル部の巻軸の方向に沿って配置された第 1 および第 2 の固定部とを有する超電導コイルと、

前記超電導コイルを収容する容器と、

前記第 1 の固定部を前記容器の側面につなぎ、前記超電導コイルを前記巻軸に垂直な方向に支持する第 1 の支持部材および第 2 の支持部材と備え、

前記第 1 の支持部材と前記第 2 の支持部材とは、前記巻軸の方向から見た平面視において、前記巻軸に対して対称に配置され、

前記第 1 および第 2 の支持部材の各々は、

10

前記容器の前記側面に固定された第 1 のベース部と、

前記巻軸の方向から見た平面視において、前記第 1 のベース部から互いに異なる方向に延びる第 1 の連結材および第 2 の連結材とを含み、

前記第 1 の固定部には、前記第 1 および第 2 の連結材を通すための第 1 の貫通孔が形成されており、

前記第 1 および第 2 の連結材の各々は、前記第 1 の貫通孔を通して前記巻軸に垂直な方向に延在し、かつ、前記第 1 のベース部に固定される第 1 の固定端と、前記第 1 の固定部に固定される第 2 の固定端とを有し、

前記第 1 および第 2 の支持部材の各々は、前記第 1 の連結材の前記第 2 の固定端に係合される第 1 の係合材、および前記第 2 の連結材の前記第 2 の固定端に係合される第 2 の係合材をさらに含む、超電導マグネット。

20

【請求項 2】

前記第 1 および第 2 の連結材の各々は、前記第 2 の固定端に雄ねじ部を有し、

前記第 1 および第 2 の係合材の各々は、雌ねじ部を有し、

前記雄ねじ部と前記雌ねじ部とが螺合することにより、前記第 1 および第 2 の連結材と前記第 1 および第 2 の係合材とはそれぞれ係合する、請求項 1 に記載の超電導マグネット。

【請求項 3】

前記雄ねじ部および前記雌ねじ部の材質は、FRP (Fiber Reinforced Plastics) である、請求項 2 に記載の超電導マグネット。

30

【請求項 4】

前記第 1 の連結材に加わる軸力が、超電導状態に冷却された前記超電導コイルを励磁したときに前記第 1 の連結材に加わる電磁力よりも大きくなるように、前記第 1 の連結材と前記第 1 の係合材とが係合され、かつ、

前記第 2 の連結材に加わる軸力が、超電導状態に冷却された前記超電導コイルを励磁したときに前記第 2 の連結材に加わる電磁力よりも大きくなるように、前記第 2 の連結材と前記第 2 の係合材とが係合される、請求項 1 から請求項 3 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

【請求項 5】

前記第 1 の連結材に加わる熱収縮は、前記第 1 の固定部において前記第 1 の連結材が挿通される前記第 1 の貫通孔が形成された部分に加わる熱収縮の前記第 1 の連結材の延在方向の成分に等しい、請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

40

【請求項 6】

前記第 1 の連結材と前記第 2 の連結材とは、延在方向が互いに直交するように配置される、請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

【請求項 7】

前記第 1 の連結材と前記第 1 の係合材との係合部分、および前記第 2 の連結材と前記第 2 の係合材との係合部分の各々は、接着剤により固定される、請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

【請求項 8】

50

前記第 1 および第 2 の連結材ならびに前記第 1 および第 2 の係合材の材質は、F R P である、請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

【請求項 9】

前記第 2 の固定部を前記容器の前記側面につなぎ、前記超電導コイルを前記巻軸に垂直な方向に支持する第 3 の支持部材および第 4 の支持部材と備え、

前記巻軸の方向から見た平面視において、前記第 3 の支持部材と前記第 4 の支持部材とは、前記巻軸に対して対称に配置され、かつ、前記第 1 の支持部材および前記第 2 の支持部材が配置された位置から前記巻軸を中心として 90 度回転させた位置に配置される、請求項 1 から請求項 8 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネット。

【請求項 10】

10

前記第 3 および第 4 の支持部材の各々は、

前記容器の前記側面に配置された第 2 のベース部と、

前記巻軸の方向から見た平面視において、前記第 2 のベース部から互いに異なる方向に延びる第 3 の連結材および第 4 の連結材とを含み、

前記第 2 の固定部には、前記第 3 および第 4 の連結材を通すための第 2 の貫通孔が形成されており、

前記第 3 および第 4 の連結材の各々は、前記第 2 の貫通孔を通して前記巻軸に垂直な方向に延在し、かつ、前記第 2 のベース部に固定される第 3 の固定端と、前記第 2 の固定部に固定される第 4 の固定端とを有し、

前記第 3 および第 4 の支持部材の各々は、前記第 3 の連結材の前記第 4 の固定端に係合される第 3 の係合材、および前記第 4 の連結材の前記第 4 の固定端に係合される第 4 の係合材をさらに含む、請求項 9 に記載の超電導マグネット。

20

【請求項 11】

前記巻軸の方向から見た平面視において、

前記第 1 の支持部材の前記第 1 の連結材と前記第 3 の支持部材の前記第 2 の連結材とは平行であり、

前記第 1 の支持部材の前記第 2 の連結材と前記第 4 の支持部材の前記第 1 の連結材とは平行であり、

前記第 2 の支持部材の前記第 1 の連結材と前記第 4 の支持部材の前記第 2 の連結材とは平行であり、

30

前記第 2 の支持部材の前記第 2 の連結材と前記第 3 の支持部材の前記第 1 の連結材とは平行である、請求項 9 または請求項 10 に記載の超電導マグネット。

【請求項 12】

請求項 1 から請求項 11 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネットを備え、

前記容器は、前記コイル部の前記巻軸が通る磁束通過部を有し、

超電導状態に冷却された前記超電導コイルを励減磁することにより、前記磁束通過部に配置された被検査対象の磁化特性を測定するように構成される、検査装置。

【請求項 13】

請求項 1 から請求項 11 のいずれか 1 項に記載の超電導マグネットを備え、

前記容器は、前記コイル部の前記巻軸が通る磁束通過部を有し、

40

前記超電導コイルの前記巻軸の方向の下方に配置され、前記磁束通過部の直下に被検査対象が配置されるように、前記超電導コイルに対する前記被検査対象の位置を調整するステージをさらに備え、

超電導状態に冷却された前記超電導コイルを励減磁することにより、前記被検査対象の磁化特性を測定するように構成される、検査装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、超電導マグネットおよび検査装置に関する。

【背景技術】

50

【0002】

特開2012-188224号公報(特許文献1)は、真空容器、輻射シールドおよび超電導マグネットを、相互に同軸となるように複数の支持体で連結支持するように構成された極低温容器を開示している。複数の支持体は、非磁性材であるアルミニウム材またはステンレス材と、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)のように金属に比べて熱伝導率が十分に低い材料とを組み合わせ形成されている。

【0003】

特開昭61-248403号公報(特許文献2)は、超電導コイルを冷却媒体に浸漬して収納している内槽を、FRP(Fiber Reinforced Plastic)などの低熱伝導材料からなる支持材を介して真空槽に支持するクライオスタットを開示している。支持材は、両端にねじ部を有し、該ねじ部を介して内槽および真空槽に結合される。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2012-182248号公報

【特許文献2】特開昭61-248403号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明の一態様の目的は、耐電磁力性能に優れた支持構造を有する超電導マグネットおよび検査装置を提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一態様に係る超電導マグネットは、超電導コイルと、容器と、第1の支持部材および第2の支持部材とを備える。超電導コイルは、巻回された超電導線材を有するコイル部と、コイル部を挟むようにコイル部の巻軸の方向に沿って配置された第1および第2の固定部とを有する。容器は、超電導コイルを収容する。第1の支持部材および第2の支持部材は、第1の固定部を容器の側面につなぎ、超電導コイルを巻軸に垂直な方向に支持する。第1の支持部材と第2の支持部材とは、巻軸の方向から見た平面視において、巻軸に対して対称に配置される。第1および第2の支持部材の各々は、第1のベース部と、第1の連結材および第2の連結材とを含む。第1のベース部は、容器の側面に固定される。第1の連結材および第2の連結材は、巻軸の方向から見た平面視において、第1のベース部から互いに異なる方向に延びる。第1の固定部には、第1および第2の連結材を通すための第1の貫通孔が形成されている。第1および第2の連結材の各々は、第1の貫通孔を通して巻軸に垂直な方向に延在し、かつ、第1のベース部に固定される第1の固定端と、第1の固定部に固定される第2の固定端とを有する。第1および第2の支持部材の各々は、第1の連結材の第2の固定端に係合される第1の係合材、および第2の連結材の第2の固定端に係合される第2の係合材をさらに含む。

30

【0007】

本発明の一態様に係る検査装置は、本発明の一態様に係る超電導マグネットを備える。容器は、コイル部の巻軸が通る磁束通過部を有する。検査装置は、超電導状態に冷却された超電導コイルを励減磁することにより、磁束通過部に配置された被検査対象の磁化特性を測定するように構成される。

40

【発明の効果】

【0008】

上記によれば、耐電磁力性能に優れた支持構造を有する超電導マグネットおよび検査装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の実施の形態に係る超電導マグネットの全体構成を模式的に示した上面透

50

視図である。

【図 2】本発明の実施の形態に係る超電導マグネットの全体構成を模式的に示した側面図である。

【図 3】図 2 に示された超電導マグネットを断熱容器の底面側から見た概略平面図である。

【図 4】水平支持部材の位置を説明するための模式図である。

【図 5】連結材の第 2 の固定端の位置を説明するための模式図である。

【図 6】第 1 の構成例に係る検査装置の概略断面図である。

【図 7】第 2 の構成例に係る検査装置の概略断面図である。

【図 8】超電導マグネットにおける、電磁力による荷重を支持する構造の第 1 の形態を説明するための図である。

【図 9】超電導マグネットにおける、電磁力による荷重を支持する構造の第 2 の形態を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

[本発明の実施形態の説明]

最初に本発明の実施態様を列記して説明する。

【0011】

(1) 本発明の一態様に係る超電導マグネット 100 (図 1 および図 2 参照) は、超電導コイル 2 と、容器 10 と、第 1 の支持部材 40 a および第 2 の支持部材 40 b とを備える。超電導コイル 2 は、巻回された超電導線材 21 を有するコイル部 20 と、コイル部 20 を挟むようにコイル部 20 の巻軸 A a の方向に沿って配置された第 1 および第 2 の固定部 28, 30 とを有する。容器 10 は超電導コイル 2 を収容する。第 1 の支持部材 40 a および第 2 の支持部材 40 b は、第 1 の固定部 28 を容器 10 の側面 10 a につなぎ、超電導コイル 2 を巻軸 A a に垂直な方向に支持する。第 1 の支持部材 40 a と第 2 の支持部材 40 b とは、巻軸 A a の方向から見た平面視において、巻軸 A a に対して対称に配置される。第 1 および第 2 の支持部材 40 a, 40 b の各々は、第 1 のベース部 12 (12 a, 12 b) と、第 1 の連結材 41 (41 a, 41 b) および第 2 の連結材 42 (42 a, 42 b) とを含む。第 1 のベース部 12 は、容器 10 の側面 10 a に固定される。第 1 の連結材 41 および第 2 の連結材 42 は、巻軸 A a の方向から見た平面視において、第 1 のベース部 12 から互いに異なる方向に延びる。第 1 の固定部 28 には、第 1 および第 2 の連結材 41, 42 を通すための第 1 の貫通孔が形成されている。第 1 および第 2 の連結材 41, 42 の各々は、第 1 の貫通孔を通して巻軸 A a に垂直な方向に延在する。第 1 および第 2 の連結材 41, 42 の各々は、第 1 のベース部 12 に固定される第 1 の固定端と、第 1 の固定部 28 に固定される第 2 の固定端とを有する。第 1 および第 2 の支持部材 40 a, 40 b の各々は、第 1 の連結材 41 (41 a, 41 b) の第 2 の固定端に係合される第 1 の係合材 45 (45 a, 45 b)、および第 2 の連結材 42 (42 a, 42 b) の第 2 の固定端に係合される第 2 の係合材 46 (46 a, 46 b) をさらに含む。

【0012】

上記 (1) に係る超電導マグネット 100 によれば、第 1 および第 2 の支持部材 40 a, 40 b によって電磁力による水平方向の荷重を支持することができる。

【0013】

(2) 上記 (1) に係る超電導マグネット 100 において、第 1 および第 2 の連結材 41, 42 の各々は、第 2 の固定端に雄ねじ部を有する。第 1 および第 2 の係合材 45, 46 の各々は、雌ねじ部を有する。雄ねじ部と雌ねじ部とが螺合することにより、第 1 および第 2 の連結材 41, 42 と第 1 および第 2 の係合材 45, 46 とはそれぞれ係合する。

【0014】

上記構成によれば、第 1 および第 2 の支持部材 40 a, 40 b の各々における支持張力は、第 1 および第 2 の連結材 41, 42 の第 2 の固定端に形成された雄ねじ部に螺合する第 1 および第 2 の係合材 45, 46 の締め付け力により調整することができる。

【0015】

(3) 上記(2)に係る超電導マグネットにおいて、雄ねじ部および雌ねじ部の材質は、FRPである。

【0016】

雄ねじ部および雌ねじ部の材質をFRPとした支持部材は、雄ねじ部の材質をFPRとし、雌ねじ部の材質をステンレスとした支持部材に対して、引張強度が著しく高い。したがって、これにより、高い断熱性および高い強度を有する支持部材を実現することができる。

【0017】

(4) 上記(1)から(3)に係る超電導マグネットにおいて、第1の連結材41に加わる軸力が、超電導状態に冷却された超電導コイル2を励磁したときに第1の連結材41に加わる電磁力よりも大きくなるように、第1の連結材41と第1の係合材45とが係合される。第2の連結材42に加わる軸力が、超電導状態に冷却された超電導コイル2を励磁したときに第2の連結材42に加わる電磁力よりも大きくなるように、第2の連結材42と第2の係合材46とが係合される。

【0018】

超電導コイル2の励減磁を繰り返した場合、第1および第2の連結材41、42の各々には断続的に電磁力が加わる。この電磁力が軸力よりも大きい場合、連結材は、電磁力と軸力との差分に相当する応力を受けて、引っ張りが繰り返されることとなる。その結果、連結材が疲労破壊してしまう可能性がある。

【0019】

上記のように、連結材に加わる軸力が連結材に加わる電磁力よりも大きくなるように係合材を締め付けることで、超電導コイル2の励減磁に伴って連結材が受ける繰り返し応力を低減することができる。よって、連結材の疲労破壊を防止することができる。

【0020】

(5) 上記(1)から(4)に係る超電導マグネット100において、第1の連結材41に加わる熱収縮は、第1の固定部において第1の連結材41が挿通される第1の貫通孔が形成された部分に加わる熱収縮の第1の連結材41の延在方向の成分に等しい。

【0021】

これによると、連結材に加わる熱収縮は、第1の固定部の熱収縮と連結材aの曲げとに変換されることとなり、連結材に発生する熱応力を緩和することができる。

【0022】

(6) 上記(1)から(5)に係る超電導マグネット100において、第1の連結材41と第2の連結材42とは、延在方向が互いに直交するように配置される。

【0023】

上記構成によれば、第1の支持部材40aの第1の連結材41aと第2の支持部材40bの第1の連結材41bとは平行に配置され、かつ、第1の支持部材40aの第2の連結材42aと第2の支持部材40bの第2の連結材42bとは平行に配置されることとなる。これによれば、第1の固定部28に水平方向に加わる荷重(熱収縮応力および電磁力)を、第1の連結材41の延在方向の成分と第2の連結材42の延在方向の成分とに分解して、これら2つの成分を第1および第2の連結材41、42がそれぞれ支持することが可能となる。

【0024】

(7) 上記(1)から(6)に係る超電導マグネット100において、第1の連結材41と第1の係合材45との係合部分、および第2の連結材42と第2の係合材46との係合部分の各々は、接着剤により固定される。

【0025】

このようにすると、接着剤が、係合部分における係合材の緩み止め材として機能するため、各係合部分において、雄ねじ部と雌ねじ部とを摩擦力に依らずに、より強固に固定することができる。これにより、超電導コイル2を摩擦力に依らずに、強固に固定すること

10

20

30

40

50

ができる。

【0026】

(8) 上記(1)から(7)に係る超電導マグネット100において、第1および第2の連結材41, 42ならびに第1および第2の係合材45, 46の材質は、FRPである。

【0027】

上記構成によれば、係合材を金属製のナットとしたものに比べて、同じ引張強度を保ちつつ、第1および第2の連結材41, 42の直径を小さくすることができる。第1および第2の連結材41, 42の直径を小さくするほど、伝熱経路の熱抵抗が高くなり、容器10から超電導コイル2に侵入する熱が低減されるため、超電導コイル2の冷却効率を向上させることができる。また、第1および第2の連結材41, 42の直径を小さくすることで、第1および第2の支持部材40a, 40bを小型軽量化および低コスト化することができる。

10

【0028】

(9) 上記(1)から(8)に係る超電導マグネット100は、第3の支持部材40cおよび第4の支持部材40dをさらに備える(図3参照)。第3の支持部材40cおよび第4の支持部材40dは、第2の固定部30を容器10の側面10aにつなぎ、超電導コイル2を巻軸Aaに垂直な方向に支持する。巻軸Aaの方向から見た平面視において、第3の支持部材40cと第4の支持部材40dとは、巻軸Aaに対して対称に配置される。第3の支持部材40cおよび第4の支持部材40dはさらに、第1の支持部材40aおよび第2の支持部材40bが配置された位置から巻軸Aaを中心として90度回転させた位置に配置される(図4参照)。

20

【0029】

これによると、水平方向に作用する電磁力による荷重を、第1から第4の支持部材40a~40dによって支持することができる。

【0030】

(10) 上記(9)に係る超電導マグネット100において、第3および第4の支持部材40c, 40dの各々は、容器10の側面10aに配置された第2のベース部12(12c, 12d)と、巻軸Aaの方向から見た平面視において、第2のベース部12から互いに異なる方向に延びる第3の連結材41(41c, 41d)および第4の連結材42(42c, 42d)とを含む。第2の固定部30には、第3および第4の連結材41, 42を通すための第2の貫通孔が形成されている。第3および第4の連結材41, 42の各々は、第2の貫通孔を通して巻軸Aaに垂直な方向に延在する。第3および第4の連結材41, 42の各々は、第2のベース部12に固定される第3の固定端と、第2の固定部30に固定される第4の固定端とを有する。第3および第4の支持部材40c, 40dの各々は、第3の連結材41の第4の固定端に係合される第3の係合材45(45c, 45d)、および第4の連結材42の第4の固定端に係合される第4の係合材46(46c, 46d)をさらに含む。

30

【0031】

このようにすると、超電導コイル2に加わる電磁力による荷重を合計8本の連結材41a~41d, 42a~42dで支持することができる。

40

【0032】

(11) 上記(9)または(10)に係る超電導マグネット100において、巻軸Aaの方向から見た平面視において、第1の支持部材40aの第1の連結材41aと第3の支持部材40cの第2の連結材42cとは平行である。第1の支持部材40aの第2の連結材42aと第4の支持部材40dの第1の連結材41dとは平行である。第2の支持部材40bの第1の連結材41bと第4の支持部材40dの第2の連結材42dとは平行である。第2の支持部材40bの第2の連結材42bと第3の支持部材40cの第1の連結材41cとは平行である。

【0033】

50

このようにすると、超電導コイル 2 に加わる電磁力による荷重を、互いに平行である一対の連結材によって、両持ち梁式に支持することができる。これにより、各支持部材 4 0 の第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 の剛性が高められる。よって、第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 が荷重によって疲労破壊することを防止することができる。

【0034】

(12) 本発明の一態様に係る検査装置(図 6 参照)は、上記(1)から(11)に係る超電導マグネット 100 を備える。容器 10 は、コイル部 20 の巻軸 A a が通る磁束通過部を有する。検査装置は、超電導状態に冷却された超電導コイル 2 を励減磁することにより、磁束通過部に配置された被検査対象 200 の磁化特性を測定するように構成される。

10

【0035】

上記検査装置によれば、被検査対象 200 の磁化特性の測定時に発生する電磁力による繰返し荷重を、4 本の支持部材 40 a ~ 40 d によって支持することができる。また、電磁力による繰返し荷重を、両持ち梁式に支持することができるため、各水平支持部材 40 の第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 の剛性が高められる。よって、第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 が繰返し荷重によって疲労破壊することを防止することができる。

【0036】

(13) 本発明の一態様に係る検査装置(図 7 参照)は、上記(1)から(11)に係る超電導マグネット 100 を備える。容器 10 は、コイル部 20 の巻軸が通る磁束通過部を有する。検査装置は、超電導コイル 2 の巻軸 A a の方向の下方に配置され、磁束通過部の直下に被検査対象 200 が配置されるように、超電導コイル 2 に対する被検査対象 200 の位置を調整するステージ 210 をさらに備える。検査装置は、超電導状態に冷却された超電導コイル 2 を励減磁することにより、被検査対象 200 の磁化特性を測定するように構成される。

20

【0037】

上記検査装置によれば、被検査対象 200 の磁化特性の測定時に発生する電磁力による繰返し荷重を、4 本の支持部材 40 a ~ 40 d によって支持することができる。また、電磁力による繰返し荷重を、両持ち梁式に支持することができるため、各水平支持部材 40 の第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 の剛性が高められる。よって、第 1 および第 2 の連結材 4 1, 4 2 が繰返し荷重によって疲労破壊することを防止することができる。

30

【0038】

[本発明の実施形態の詳細]

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は同一の参照符号を付し、その説明は繰り返さない。

【0039】

図 1 は、本発明の実施の形態に係る超電導マグネットの全体構成を模式的に示した上面透視図である。図 2 は、本発明の実施の形態に係る超電導マグネットの全体構成を模式的に示した側面図であり、図 1 の I I - I I 線での断面図に対応する。

【0040】

図 1 および図 2 に示されるように、本実施の形態に係る超電導マグネット 100 は、超電導コイルを冷凍機で冷却する冷凍機冷却型の超電導マグネットである。超電導マグネット 100 は、超電導コイル 2 と、断熱容器 10 と、垂直支持部材 32 と、水平支持部材 40 a ~ 40 d と、冷凍機 60 とを備える。

40

【0041】

断熱容器 10 は、超電導コイル 2 を収容する。断熱容器 10 は、側面 10 a、底面 10 b および上面 10 c を有する。なお、図 1 には、上面 10 c は示されていない。断熱容器 10 の内部には、芯部 11 が、底面 10 b および上面 10 c を貫くように形成される。芯部 11 は中空状に形成される。

【0042】

超電導コイル 2 は芯部 11 に通される。したがって、コイル部 20 の巻軸 A a の方向が

50

断熱容器 10 の底面 10 b に対して垂直方向となるように、超電導コイル 2 が断熱容器 10 の内部に設置されている。すなわち本実施の形態では、超電導マグネット 100 を設置したときの上下方向と、コイル部 20 の巻軸 A a の方向とが実質的に一致する。

【0043】

超電導コイル 2 は、コイル部 20 と、伝熱板 24 と、固定具 28, 30 とを含む。コイル部 20 は、超電導線材 21 を巻軸 A a の周りに巻回することによって形成され、磁束を発生させる。超電導線材 21 を巻軸 A a の周りに螺旋状に巻回することによってコイル部 20 を構成してもよい。あるいは、複数のパンケーキコイルを積層することによってコイル部 20 を構成してもよい。このような構成では、巻軸 A a の方向は、複数のパンケーキコイルの積層方向にも対応する。

10

【0044】

固定具 28, 30 は、巻軸 A a の方向に沿ってコイル部 20 を挟むように設けられてコイル部 20 を把持する。固定具 28 (第 1 の固定部) は、巻軸 A a 方向に沿ったコイル部 20 の上端に取り付けられる。固定具 30 (第 2 の固定部) は、巻軸 A a 方向に沿ったコイル部 20 の下端に取り付けられる。なお、固定具 28, 30 は、中空円状の形状を有する。

【0045】

複数の伝熱板 24 は、コイル部 20 と冷凍機 60 とを互いに熱的に接続する。図 2 は、代表的に 2 つの伝熱板 24 が図示されている。しかし伝熱板 24 の数は特に限定されるものではない。

20

【0046】

冷凍機 60 は、伝熱板 24 を介してコイル部 20 を冷却する。この実施の形態によれば、超電導コイル 2 は断熱容器 10 の内部に収容されて、冷凍機 60 により直接冷却されるもので、極低温容器は有していない。高温超電導コイルの場合は、極低温容器を有さなくても、冷却が可能である。

【0047】

垂直支持部材 32 は、超電導コイル 2 の垂直方向の荷重を支持する。垂直支持部材 32 は棒状の形状を有しており、少なくとも両端部にボルトを有する。垂直支持部材 32 の一方の端部は、ナット 32 a によって固定具 28 に固定される。垂直支持部材 32 の他方の端部は、断熱容器 10 の底面 10 b に支えられる。すなわち垂直支持部材 32 は、固定具 28 と、断熱容器 10 の底面 10 b とをつなぐ。

30

【0048】

図 1 に示された構成によれば、垂直支持部材 32 の数は 3 本である。3 つのネジ 32 a によって示されるように、たとえば 3 つの垂直支持部材 32 は、水平面において、巻軸 A a に対して等角度 (120°) となるように配置される。

【0049】

水平支持部材 40 a ~ 40 d は、超電導コイル 2 の水平方向 (言い換えれば巻軸 A a に垂直な方向) の荷重を支持する。水平支持部材 40 a, 40 b の各々は、超電導コイル 2 の固定具 28 と、断熱容器 10 の側面 10 a とをつなぐ。水平支持部材 40 c, 40 d の各々は、超電導コイル 2 の固定具 30 と、断熱容器 10 の側面 10 a とをつなぐ。

40

【0050】

図 1 に示されるように、巻軸 A a 方向から見た平面視において、水平支持部材 40 a と水平支持部材 40 b とは、固定具 28 上に、巻軸 A a に対して対称に配置されている。水平支持部材 40 a は「第 1 の支持部材」の一実施例に対応し、水平支持部材 40 b は「第 2 の支持部材」の一実施例に対応する。

【0051】

水平支持部材 40 a は、ガセット 12 a (第 1 のベース部) と、連結材 41 a, 42 a と、係合材 13 a ~ 16 a, 45 a, 46 a とを含む。ガセット 12 a は、断熱容器 10 の側面 10 a に固定される。連結材 41 a, 42 a は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、ガセット 12 a から互いに異なる方向に延びる。連結材 41 a, 42 a の各々は、

50

ボルトにより構成される。係合材 1 3 a ~ 1 6 a, 4 5 a, 4 6 a の各々は、ナットにより構成される。

【0052】

以下では、水平支持部材 4 0 a ~ 4 0 d を包括的に表記する場合には、単に「水平支持部材 4 0」とも称する。また、連結材 4 1 a ~ 4 1 d, 4 2 a ~ 4 2 d を包括的に表記する場合には、単に「連結材 4 1, 4 2」とも称し、係合材 1 3 a ~ 1 3 d, 1 4 a ~ 1 4 d, 1 5 a ~ 1 5 d, 1 6 a ~ 1 6 d, 4 5 a ~ 4 5 d, 4 6 a ~ 4 6 d をそれぞれ包括的に表記する場合には、単に「係合材 1 3, 1 4, 1 5, 1 6, 4 5, 4 6」とも称し、ガセット 1 2 a ~ 1 2 d を包括的に表記する場合には、単に「ガセット 1 2」とも称する。

10

【0053】

連結材 4 1 a, 4 2 a の各々は水平方向に延在する。連結材 4 1 a の一方の端部（第 1 の固定端）は、係合材 1 3 a, 1 5 a が係合されることにより、ガセット 1 2 a に固定される。連結材 4 2 a の一方の端部（第 1 の固定端）は、係合材 1 4 a, 1 6 a が係合されることにより、ガセット 1 2 a に固定される。

【0054】

固定具 2 8 には、ブロック 4 3 a, 4 3 b, 4 4 a, 4 4 b が設けられる。ブロック 4 3 a, 4 4 a には連結材 4 1 a, 4 2 a をそれぞれ通すための貫通孔（第 1 の貫通孔）が形成されている。連結材 4 1 a は、他方の端部（第 2 の固定端）に雄ねじ部を有する。係合材 4 5 a は、雌ねじ部を有する。連結材 4 1 a の雄ねじ部と係合材 4 5 a の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 5 a が連結材 4 1 a の他方の端部に係合される。ブロック 4 3 a にて連結材 4 1 a の他方の端部と係合材 4 5 a とが係合されることにより、連結材 4 1 a の他方の端部が固定具 2 8 に固定される。

20

【0055】

連結材 4 2 a は、他方の端部（第 2 の固定端）に雄ねじ部を有する。係合材 4 6 a は、雌ねじ部を有する。連結材 4 2 a の雄ねじ部と係合材 4 6 a の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 6 a が連結材 4 2 a の他方の端部に係合される。ブロック 4 4 a にて連結材 4 2 a の他方の端部と係合材 4 6 a とが係合されることにより、連結材 4 2 a の他方の端部が固定具 2 8 に固定される。

【0056】

30

水平支持部材 4 0 b は、ガセット 1 2 b と、連結材 4 1 b, 4 2 b と、係合材 1 3 b ~ 1 6 b, 4 5 b, 4 6 b とを含む。ガセット 1 2 b（第 1 のベース部）は、断熱容器 1 0 の側面 1 0 a に固定される。連結材 4 1 b, 4 2 b は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、ガセット 1 2 b から互いに異なる方向に延びる。連結材 4 1 b, 4 2 b の各々は、ボルトにより構成される。係合材 1 3 b ~ 1 6 b, 4 5 b, 4 6 b の各々は、ナットにより構成される。

【0057】

連結材 4 1 b, 4 2 b の各々は水平方向に延在する。連結材 4 1 b の一方の端部（第 1 の固定端）は、係合材 1 3 b, 1 5 b が係合されることにより、ガセット 1 2 b に固定される。連結材 4 2 b の一方の端部（第 1 の固定端）は、係合材 1 4 b, 1 6 b が係合されることにより、ガセット 1 2 b に固定される。

40

【0058】

ブロック 4 3 b, 4 4 b には連結材 4 1 b, 4 2 b をそれぞれ通すための貫通孔（第 1 の貫通孔）が形成されている。連結材 4 1 b は、他方の端部（第 2 の固定端）に雄ねじ部を有する。係合材 4 5 b は、雌ねじ部を有する。連結材 4 1 b の雄ねじ部と係合材 4 5 b の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 5 b が連結材 4 1 b の他方の端部に係合される。ブロック 4 3 b にて連結材 4 1 b の他方の端部と係合材 4 5 b とが係合されることにより、連結材 4 1 b の他方の端部が固定具 2 8 に固定される。

【0059】

連結材 4 2 b は、他方の端部（第 2 の固定端）に雄ねじ部を有する。係合材 4 6 b は、

50

雌ねじ部を有する。連結材 4 2 b の雄ねじ部と係合材 4 6 b の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 6 b が連結材 4 2 b の他方の端部に係合される。ブロック 4 4 b にて連結材 4 2 b の他方の端部と係合材 4 6 b とが係合されることにより、連結材 4 2 b の他方の端部が固定具 2 8 に固定される。

【0060】

図 3 は、図 2 に示された超電導マグネット 1 0 0 を断熱容器 1 0 の底面 1 0 b 側から見た概略平面図である。

【0061】

図 3 に示されるように、巻軸 A a 方向から見た平面視において、水平支持部材 4 0 c と水平支持部材 4 0 d とは、固定具 3 0 上に、巻軸 A a に対して対称に配置される。水平支持部材 4 0 c は「第 3 の支持部材」の一実施例に対応し、水平支持部材 4 0 d は「第 4 の支持部材」の一実施例に対応する。

10

【0062】

水平支持部材 4 0 c は、ガセット 1 2 c (第 2 のベース部) と、連結材 4 1 c, 4 2 c と、係合材 1 3 c ~ 1 6 c, 4 5 c, 4 6 c とを含む。ガセット 1 2 c は、断熱容器 1 0 の側面 1 0 a に固定される。連結材 4 1 c, 4 2 c は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、ガセット 1 2 c から互いに異なる方向に延びる。連結材 4 1 c, 4 2 c の各々は、ボルトにより構成される。係合材 1 3 c ~ 1 6 c, 4 5 c, 4 6 c の各々は、ナットにより構成される。

【0063】

連結材 4 1 c, 4 2 c の各々は水平方向に延在する。連結材 4 1 c の一方の端部 (第 3 の固定端) は、係合材 1 3 c, 1 5 c が係合されることにより、ガセット 1 2 c に固定される。連結材 4 2 c の一方の端部 (第 3 の固定端) は、係合材 1 4 c, 1 6 c が係合されることにより、ガセット 1 2 c に固定される。

20

【0064】

固定具 3 0 には、ブロック 4 3 c, 4 3 d, 4 4 c, 4 4 d が設けられる。ブロック 4 3 c, 4 4 c には連結材 4 1 c, 4 2 c をそれぞれ通すための貫通孔 (第 2 の貫通孔) が形成されている。連結材 4 1 c は、他方の端部 (第 4 の固定端) に雄ねじ部を有する。係合材 4 5 c は、雌ねじ部を有する。連結材 4 1 c の雄ねじ部と係合材 4 5 c の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 5 c が連結材 4 1 c の他方の端部に係合される。ブロック 4 3 c にて連結材 4 1 c の他方の端部と係合材 4 5 c とが係合されることにより、連結材 4 1 c の他方の端部が固定具 3 0 に固定される。

30

【0065】

連結材 4 2 c は、他方の端部 (第 4 の固定端) に雄ねじ部を有する。係合材 4 6 c は、雌ねじ部を有する。連結材 4 2 c の雄ねじ部と係合材 4 6 c の雌ねじ部とが螺合することにより、係合材 4 6 c が連結材 4 2 c の他方の端部に係合される。ブロック 4 4 c にて連結材 4 2 c の他方の端部と係合材 4 6 c とが係合されることにより、連結材 4 2 c の他方の端部が固定具 3 0 に固定される。

【0066】

水平支持部材 4 0 d は、ガセット 1 2 d (第 2 のベース部) と、連結材 4 1 d, 4 2 d と、係合材 1 3 d ~ 1 6 d, 4 5 d, 4 6 d とを含む。ガセット 1 2 d は、断熱容器 1 0 の側面 1 0 a に固定される。連結材 4 1 d, 4 2 d は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、ガセット 1 2 d から互いに異なる方向に延びる。連結材 4 1 d, 4 2 d の各々は、ボルトにより構成される。係合材 1 3 d ~ 1 6 d, 4 5 d, 4 6 d の各々は、ナットにより構成される。

40

【0067】

連結材 4 1 d, 4 2 d の各々は水平方向に延在する。連結材 4 1 d の一方の端部 (第 3 の固定端) は、係合材 1 3 d, 1 5 d が係合されることにより、ガセット 1 2 d に固定される。連結材 4 2 d の一方の端部 (第 3 の固定端) は、係合材 1 4 d, 1 6 d が係合されることにより、ガセット 1 2 d に固定される。

50

【0068】

ブロック43d, 44dには連結材41d, 42dをそれぞれ通すための貫通孔(第2の貫通孔)が形成されている。連結材41dは、他方の端部(第4の固定端)に雄ねじ部を有する。係合材45dは、雌ねじ部を有する。連結材41dの雄ねじ部と係合材45dの雌ねじ部とが螺合することにより、係合材45dが連結材41dの他方の端部に係合される。ブロック43dにて連結材41dの他方の端部と係合材45dとが係合されることにより、連結材41dの他方の端部が固定具30に固定される。

【0069】

連結材42dは、他方の端部(第4の固定端)に雄ねじ部を有する。係合材46dは、雌ねじ部を有する。連結材42dの雄ねじ部と係合材46dの雌ねじ部とが螺合することにより、係合材46dが連結材42dの他方の端部に係合される。ブロック44dにて連結材42dの他方の端部と係合材46dとが係合されることにより、連結材42dの他方の端部が固定具30に固定される。

10

【0070】

水平支持部材40a~40dおよび垂直支持部材32の各々の材質は、FPRである。これにより、高い断熱性および高い強度を有する支持部材を実現することができる。

【0071】

具体的には、水平支持部材40a~40dの各々において、連結材41, 42および係合材13~16, 45, 46の材質はFPRである。少なくとも連結材41, 42の雄ねじ部の材質はFPRであり、少なくとも係合材13~16, 45, 46の雌ねじ部の材質はFPRである。

20

【0072】

雄ねじ部の材質をFPRとし、雌ねじ部の材質をFPRとした水平支持部材と、雄ねじ部をFPRとし、雌ねじ部を金属(ステンレス)とした水平支持部材とについて、引張試験を行なった。引張試験では、直径8mm、12mmおよび16mmの雄ねじ部と雌ねじ部とを螺合させた状態で雌ねじ部に引張張力を加え、破断荷重を測定した。その結果、雄ねじ部の材質をFPRとし、雌ねじ部の材質をステンレスとした水平支持部材は、たとえば直径8mmのとき、破断荷重が2500N程度であるのに対して、雄ねじ部および雌ねじ部の材質をFPRとした水平支持部材は、破断荷重が6500N程度であり、引張強度が著しく高いことが確認された。

30

【0073】

図1から図3に示された構成では、たとえば、連結材41, 42をFPR製の寸切ボルトとし、係合材13~16, 45, 46をFPR製のナットとすることができる。このようにすると、係合材を金属製のナットとしたものに比べて、同じ引張強度を保ちつつ、連結材41, 42の直径を小さくすることができる。

【0074】

連結材41, 42は、ガセット12を介して断熱容器10に接続されているため、断熱容器10の外部の熱を超電導コイル2に伝える伝熱経路を構成する。よって、連結材41, 42の直径を小さくするほど、伝熱経路の熱抵抗が高くなり、断熱容器10から超電導コイル2に侵入する熱が低減されるため、超電導コイル2の冷却効率を向上させることができる。また、連結材41, 42の直径を小さくすることで、水平支持部材40を小型軽量化および低コスト化することができる。

40

【0075】

図1から図3に示された構成によれば、垂直支持部材32の数は3である。しかし、垂直支持部材32の数は耐荷重および超電導コイル2の冷却効率の観点から適切に定めることができる。

【0076】

同様に、固定具28と断熱容器10の側面10aとをつなぐ水平支持部材40の数、および固定具30と断熱容器10の側面10aとをつなぐ水平支持部材40の数は、連結材41, 42の耐荷重と超電導コイル2の冷却効率との観点から定めることができる。

50

【0077】

たとえば水平支持部材40の本数を多くするほど、1本の水平支持部材40に加わる荷重を小さくすることができる。しかし上述したように、水平支持部材40は、断熱容器10の外部の熱を超電導コイル2に伝える伝熱経路を構成する。水平支持部材40の数が増え、断熱経路が増えるため、超電導コイル2の冷却効率が低下しやすい。逆に水平支持部材40の本数を少なくするほど、超電導コイル2の冷却効率の低下を抑えることができる。しかし1本の水平支持部材40に加わる荷重が大きくなる。

【0078】

図4は、水平支持部材40a～40dの位置を説明するための模式図である。

図4に示されるように、巻軸Aa方向から見た平面視において、水平支持部材40aと水平支持部材40bとは、固定具28上に、巻軸Aaに対して対称に配置される。水平支持部材40a、40bの各々において、連結材41と連結材42とは延在方向が互いに直交するように配置されることが好ましい。

【0079】

このようにすると、水平支持部材40aの連結材41aと水平支持部材40bの連結材41bとは平行に配置され、かつ、水平支持部材40aの連結材42aと水平支持部材40bの連結材42bとは平行に配置されることとなる。これによれば、固定具28に水平方向に加わる荷重（熱収縮応力および電磁力）を、連結材41の延在方向の成分と連結材42の延在方向の成分とに分解して、これら2つの成分を連結材41、42がそれぞれ支持することが可能となる。

【0080】

ここで、連結材41と係合材45とは、連結材41に加わる軸力が、超電導状態に冷却された超電導コイル2を励磁したときに連結材41に加わる電磁力よりも大きくなるように、係合される。

【0081】

連結材41に係合材45に係合する際、係合材45の雌ねじ部を回して締め付けると、締め付けにより連結材41の雄ねじ部が引っ張られる。そのため、連結材41の雄ねじ部には元に戻ろうとする力である軸力が生じる。

【0082】

一方、超電導コイル2の周辺に磁性体が存在する場合、超電導コイル2を励磁すると、超電導コイル2が発生する磁場により、超電導コイル2と磁性体との間に相互に引き合うような電磁力が発生し得る。この電磁力は、巻軸Aa方向の成分と巻軸Aaに垂直な方向の成分とを有する。超電導コイル2に対して巻軸Aaに垂直な方向の電磁力が加わると、水平支持部材40の連結材41、42に対しても電磁力が加わることとなる。

【0083】

超電導コイル2の励減磁を繰り返した場合、連結材41には断続的に電磁力が加わる。この電磁力が軸力よりも大きい場合、連結材41は、電磁力と軸力との差分に相当する応力を受けて、引っ張りが繰り返されることとなる。その結果、連結材41が疲労破壊してしまう可能性がある。

【0084】

上記のように、連結材41に加わる軸力が連結材41に加わる電磁力よりも大きくなるように係合材45の雌ねじ部を締め付けることで、超電導コイル2の励減磁に伴って連結材41が受ける繰り返し荷重を低減することができる。よって、連結材41の疲労破壊を防止することができる。

【0085】

連結材41および係合材45と同様に、連結材42と係合材46とは、連結材42に加わる軸力が、連結材42に加わる電磁力よりも大きくなるように係合される。これにより、連結材42の疲労破壊を防止することができる。

【0086】

なお、図示は省略するが、連結材41と係合材45との係合部分、および連結材42と

10

20

30

40

50

係合材 4 6 との係合部分の各々を接着剤で固定してもよい。接着剤は、係合部分における係合材の緩み止め材として機能する。これにより、各係合部分において、雄ねじ部と雌ねじ部とを摩擦力に依らずに、より強固に固定することができる。これにより、超電導コイル 2 を摩擦力に依らずに強固に固定することができる。

【0087】

図 3 に示したように、水平支持部材 4 0 c と水平支持部材 4 0 d とは、固定具 3 0 上に、巻軸 A a に対して対称に配置される。水平支持部材 4 0 c, 4 0 d の各々においても、水平支持部材 4 0 a, 4 0 b と同様に、連結材 4 1 と連結材 4 2 とを延在方向が互いに直交するように配置することで、固定具 3 0 に水平方向に加わる応力を、連結材 4 1, 4 2 が効率良く相殺することができる。

10

【0088】

また、水平支持部材 4 0 c, 4 0 d の各々においても、連結材 4 1 に加わる軸力が連結材 4 1 に加わる電磁力よりも大きくなるように、連結材 4 1 と係合材 4 5 とを係合し、かつ、連結材 4 2 に加わる軸力が連結材 4 2 に加わる電磁力よりも大きくなるように、連結材 4 2 と係合材 4 6 とを係合する。これにより、連結材 4 1, 4 2 の疲労破壊を防止することができる。

【0089】

さらに、図 4 に示されるように、水平支持部材 4 0 c, 4 0 d は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、水平支持部材 4 0 a, 4 0 b が配置された位置から巻軸 A a を中心として 90° 回転させた位置に配置される。このようにすると、巻軸 A a 方向の平面視において、水平支持部材 4 0 a の連結材 4 1 a と、水平支持部材 4 0 c の連結材 4 2 c とは平行に配置され、水平支持部材 4 0 a の連結材 4 2 a と、水平支持部材 4 0 d の連結材 4 1 d は平行に配置される。また、水平支持部材 4 0 b の連結材 4 1 b と、水平支持部材 4 0 d の連結材 4 2 d とは平行に配置され、水平支持部材 4 0 b の連結材 4 2 b と、水平支持部材 4 0 c の連結材 4 1 c とは平行に配置される。このようにすると、超電導コイル 2 に加わる電磁力による荷重を合計 8 本の連結材 4 1 a ~ 4 1 d, 4 2 a ~ 4 2 d で支持することができる。連結材 4 1 a ~ 4 1 d, 4 2 a ~ 4 2 d による電磁力の支持構造については後述する。

20

【0090】

図 5 は、連結材 4 1, 4 2 の第 2 の固定端の位置を説明するための模式図である。図 5 では、水平支持部材 4 0 a の連結材 4 2 a における第 2 の固定端の位置について説明するが、水平支持部材 4 0 a の連結材 4 1 a および水平支持部材 4 0 b の連結材 4 1 b, 4 2 b についても、以下の説明に従って第 2 の固定端の位置を決定することができる。また、水平支持部材 4 0 c の連結材 4 1 c, 4 2 c および水平支持部材 4 0 d の連結材 4 1 d, 4 2 d についても、以下の説明に従って第 4 の固定端の位置を決定することができる。

30

【0091】

超電導コイル 2 を室温から低温に冷却することによって、固定具 2 8 が収縮する。固定具 2 8 は熱収縮によって径方向に収縮する。そのため、連結材 4 1 a が挿通されるブロック 4 4 a には、図中に矢印 F 1 で示すように、巻軸 A a に向かう方向に熱収縮が加わる。この応力によってブロック 4 4 a は巻軸 A a に向かって移動する。なお、ブロック 4 4 a の移動量は固定具 2 8 を室温から低温に冷却したときの固定具 2 8 の熱収縮率に依存する。

40

【0092】

超電導コイル 2 を室温から低温に冷却すると、固定具 2 8 とともに連結材 4 2 a も収縮する。連結材 4 2 a には、図中に矢印 F 2 で示すように、連結材 4 2 a の延在方向に沿って第 1 の固定端に向かう方向（すなわち、ガセット 1 2 a に向かう方向）に熱収縮が加わる。

【0093】

この結果、連結材 4 2 a の第 2 の固定端には、巻軸 A a 方向に向かう熱収縮 F 1 と、第 1 の固定端に向かう熱収縮 F 2 とが加わる。熱収縮 F 2 が、熱収縮 F 1 の連結材 4 2 a の

50

延在方向の成分に等しくなるように、第2の固定端の位置を決定する。これによると、連結材42aでは、熱収縮F1の連結材42aの延在方向の成分を吸収することができるため、熱収縮F1の連結材42aに垂直な方向の成分のみが加わることとなる。なお、この熱収縮F1の連結材42aに垂直な方向の成分は、連結材42aの曲げに変換される。すなわち、連結材42aに加わる熱収縮は、固定具28の熱収縮と連結材42aの曲げとに変換されることとなり、連結材42aに発生する熱応力を緩和することができる。

【0094】

次に、図6および図7を参照して、本実施の形態に係る超電導マグネット100が適用され得る検査装置の構成例について説明する。本実施の形態に係る検査装置は、超電導マグネット100が発生する変動磁場を用いて被検査対象の磁化特性を測定するように構成される。

10

【0095】

図6は、第1の構成例に係る検査装置の概略断面図である。図6に示されるように、第1の構成例に係る検査装置は、超電導マグネット100を備える。

【0096】

断熱容器10は、中空状の芯部11の内部に、超電導コイル2の巻軸Aaが通る磁束通過部を有する。磁束通過部は超電導コイル2によって発生した磁束を通すことができる。

【0097】

試料200（被検査対象）は磁束通過部に配置される。試料200には、超電導コイル2から発生した磁場が印加される。試料200の位置における磁場の強度が所望の強度となるように超電導コイル2に電流が印加される。

20

【0098】

検査装置においては、試料200の磁化特性の測定時には、所定の磁場発生パターンに従って超電導コイル2に磁場を発生させるために、超電導コイル2の通電電流を制御する。たとえば、磁場発生パターンとして、0[T]→+6[T]→-6[T]→+6[T]→0[T]の順で強度が変化する磁場を1サイクルとする。この1サイクルで変動する磁場が発生するように、超電導コイル2の通電電流を制御する。1サイクルでの試料200の磁化特性が測定されると、試料200が交換され、交換された試料200について1サイクルにおける磁化特性が測定される。

【0099】

このように、試料200の磁化特性の測定時には、磁場発生パターンに従って、超電導コイル2の励磁と減磁とが交互に繰り返される。試料200は磁性体であるため、超電導コイル2を励磁すると、試料200には超電導コイル2に引き付けられる吸引力が働く。その結果、超電導コイル2において、吸引力に対する反力として電磁力が作用する。吸引力と電磁力とは互いに逆向きで同じ大きさの力である。

30

【0100】

試料200が芯部11の内部に配置されているため、超電導コイル2には巻軸Aaに垂直な方向に沿って巻軸Aaに向かうように電磁力が作用する。試料200が巻軸Aaに対して対称に配置されていれば、互いに逆向きで同じ大きさの電磁力が打ち消し合うため、超電導コイル2全体としては電磁力が働かない。

40

【0101】

一方で、図6に示されるように、試料200が巻軸Aaに対して非対称に配置されている場合には、超電導コイル2において、試料200に近い側に位置する部分に作用する電磁力（図中のFaに相当）は、試料200に遠い側に位置する部分に作用する電磁力（図中のFbに相当）よりも大きくなる。その結果、超電導コイル2全体としては、巻軸Aaに垂直な方向に電磁力が作用する。図6の例では、巻軸Aaに垂直な方向の左向きに働く電磁力Faが右向きに働く電磁力Fbよりも大きいため、超電導コイル2全体として左向きに電磁力が作用することとなる。

【0102】

超電導コイル2が繰り返し励減磁されることにより、超電導コイル2には、上述した巻

50

軸 A a に垂直な方向の左向きに電磁力が繰り返し働く。その結果、超電導コイル 2 は繰り返し荷重を受けることとなる。

【0103】

図 7 は、第 2 の構成例に係る検査装置の概略断面図である。図 7 に示されるように、第 2 の構成例に係る検査装置は、超電導マグネット 100 と、ステージ 210 とを備える。

【0104】

試料 200 は、ステージ 210 上において磁束通過部の直下に配置される。試料 200 には、超電導コイル 2 から発生した磁場が印加される。試料 200 の位置における磁場の強度が所望の強度となるように超電導コイル 2 に電流が印加される。

【0105】

第 2 の構成例に係る検査装置においては、超電導コイル 2 により変動磁場を発生させて、試料 200 の磁化曲線（外部磁場と試料 200 の磁化との関係を示す曲線）を測定する。

【0106】

検査装置は、ステージ 210 上に配置された複数の試料 200 に対して、超電導コイル 2 から発生した磁場を順番に印加することにより、各試料 200 の磁化特性を測定する。ステージ 210 は、複数の試料 200 を順番に磁束通過部の直下に導入するための位置決め機構を構成する。

【0107】

ステージ 210 は磁性体で形成されているため、超電導コイル 2 を励磁すると、ステージ 210 には超電導コイル 2 に引き付けられる吸引力が働く。その結果、図 7 (A) に示すように、超電導コイル 2 には、吸引力に対する反力として電磁力 F_c が作用する。吸引力と電磁力とは互いに逆向きで同じ大きさの力である。すなわち、巻軸 A a の方向の下向きに電磁力 F_c が働く。

【0108】

ここで、図 7 (B) に示すように、ステージ 210 が巻軸 A a に垂直な方向の右向きに移動すると、ステージ 210 には、巻軸 A a に垂直な方向の左向きに吸引力が働く。その結果、超電導コイル 2 には、巻軸 A a に垂直な方向の右向きに電磁力 F_d が作用する。よって、超電導コイル 2 において、巻軸 A a 方向の下向きの電磁力 F_c と、巻軸 A a に垂直な方向の右向きの電磁力 F_d とが作用することとなる。

【0109】

ステージ 210 を巻軸 A a に垂直な方向に移動させながら超電導コイル 2 を繰り返し励減磁することにより、超電導コイル 2 には、上述した巻軸 A a に垂直な方向の右向きに電磁力が繰り返し働く。したがって、超電導コイル 2 は繰り返し荷重を受けることとなる。

【0110】

以上説明したように、超電導マグネット 100 が適用された検査装置において、超電導コイル 2 を繰り返し励減磁することにより、超電導コイル 2 は巻軸 A a に垂直な方向に、電磁力による繰り返し荷重を受ける。そのため、超電導マグネット 100 には疲労を考慮した耐電磁力が求められる。

【0111】

この実施の形態に係る超電導マグネット 100 では、図 1 から図 4 に示したように、超電導コイル 2 の固定具 28 を断熱容器 10 の側面 10 a につなぎ、超電導コイル 2 を巻軸 A a に垂直な方向に支持する水平支持部材 40 a, 40 b が配置され、かつ、固定具 30 を断熱容器 10 の側面 10 a につなぎ、超電導コイル 2 を巻軸 A a に垂直な方向に支持する水平支持部材 40 c, 40 d が配置されている。水平支持部材 40 c, 40 d は、巻軸 A a 方向から見た平面視において、水平支持部材 40 a, 40 b が配置された位置から巻軸 A a を中心として 90° 回転させた位置に配置されている。これによると、水平方向に作用する繰り返し荷重を、水平支持部材 40 a ~ 40 d によって支持することができる。

【0112】

図 8 は、超電導マグネット 100 における、電磁力による荷重の支持構造の第 1 の形態

10

20

30

40

50

を説明するための図である。図 8 (A) は、超電導マグネット 100 を断熱容器 10 の上面 10 c 側から見た概略平面図である。図 8 (B) は、超電導マグネット 100 を断熱容器 10 の底面 10 b 側から見た概略平面図である。

【0113】

図 8 では、水平支持部材 40 a の連結材 42 a、水平支持部材 40 b の連結材 42 b、水平支持部材 40 c の連結材 41 c および水平支持部材 40 d の連結材 41 d の各々に水平な方向に電磁力 F_3 が作用している。この電磁力 F_3 は、図 8 (A) に示されるように、固定具 28 側において、水平支持部材 40 b から水平支持部材 40 a に向かう方向に作用する。固定具 30 側では、図 8 (B) に示されるように、電磁力 F_3 は、水平支持部材 40 c から水平支持部材 40 d に向かう方向に作用する。

10

【0114】

固定具 28 側においては、電磁力 F_3 に対する反力として、水平支持部材 40 b の連結材 42 b の第 2 の固定端に応力 F_4 が働く。電磁力 F_3 と応力 F_4 とは互いに逆向きの力である。

【0115】

一方、固定具 30 側においては、電磁力 F_3 に対する反力として、水平支持部材 40 c の連結材 41 c の第 4 の固定端に応力 F_5 が働く。電磁力 F_3 と応力 F_5 とは互いに逆向きの力である。

【0116】

なお、図 8 (A) には、固定具 30 側で作用している応力 F_5 が破線矢印で示されている。図 8 (B) には、固定具 28 側で作用している応力 F_4 が破線矢印で示されている。

20

【0117】

これによれば、超電導マグネット 100 全体として、電磁力 F_3 による荷重は、水平支持部材 40 b の連結材 42 b および水平支持部材 40 c の連結材 41 c によって支持されていることが分かる。すなわち、電磁力 F_3 による荷重は、一对の連結材 42 b、41 c によって両持ち梁式に支持されている。

【0118】

図 9 は、超電導マグネット 100 における、電磁力による荷重を支持する構造の第 2 の形態を説明するための図である。図 9 (A) は、超電導マグネット 100 を断熱容器 10 の上面 10 c 側から見た概略平面図である。図 9 (B) は、超電導マグネット 100 を断熱容器 10 の底面 10 b 側から見た概略平面図である。

30

【0119】

図 9 では、巻軸 A a に垂直な方向でガセット 12 d に向かう方向に電磁力 F_6 が作用している。図 9 (A) に示されるように、固定具 28 側においては、電磁力 F_6 に対する反力として、水平支持部材 40 a の連結材 41 a の第 2 の固定端に応力 F_7 が働くとともに、水平支持部材 40 b の連結材 42 b の第 2 の固定端に応力 F_8 が働く。このように、固定具 28 側では、電磁力 F_6 は、連結材 41 a に水平な方向の成分と、連結材 42 b に水平な方向の成分とに分解され、それぞれの成分が連結材 41 a、42 b によって支持されている。

【0120】

図 9 (B) に示されるように、固定具 30 側においては、電磁力 F_6 に対する反力として、水平支持部材 40 c の連結材 41 c の第 4 の固定端に応力 F_9 が働くとともに、水平支持部材 40 c の連結材 42 c の第 4 の固定端に応力 F_{10} が働く。このように、固定具 30 側では、電磁力 F_6 は、連結材 41 c に水平な方向の成分と、連結材 42 c に水平な方向の成分とに分解され、それぞれの成分が連結材 41 c、42 c によって支持されている。

40

【0121】

なお、図 9 (A) には、固定具 30 で作用している応力 F_9 、 F_{10} が破線矢印で示されている。図 9 (B) には、固定具 28 側で作用している応力 F_7 、 F_8 が破線矢印で示されている。

50

【0122】

これによれば、超電導マグネット100全体として、電磁力F6による荷重は、水平支持部材40bの連結材42bおよび水平支持部材40cの連結材41cによって支持されているとともに、水平支持部材40aの連結材41aおよび水平支持部材40cの連結材42cによって支持されていることが分かる。すなわち、電磁力F6による荷重は、一对の連結材42b, 41cによって両持ち梁式に支持されるとともに、一对の連結材41a, 42cによって両持ち梁式に支持されている。

【0123】

図8および図9に示した支持構造によれば、電磁力による繰返し荷重を、水平支持部材40a~40dによって支持することができる。また、電磁力による繰返し荷重を両持ち梁式に支持することができるため、各水平支持部材40の連結材41, 42の剛性が高められる。よって、連結材41, 42が繰返し荷重によって疲労破壊することを防止することができる。この結果、耐電磁力性能に優れた支持構造を実現できる。

【0124】

なお、上述した実施の形態では、水平支持部材40は固定具28, 30に固定されるものとしたが、固定具28, 30のいずれか一方のみに固定されてもよい。水平支持部材40を固定具28, 30に固定することで、水平支持部材40を一方の固定具のみに固定する構成に比べて、水平方向のより大きな荷重を支持することができる。しかし、水平支持部材40は断熱容器10に接続されているため、断熱容器10の外部の熱を超電導コイル2に伝える伝熱経路を構成する。そのため、水平支持部材40の数が増えると伝熱経路が増えるため、超電導コイル2の冷却効率が低下しやすくなる。逆に水平支持部材40の本数を少なくするほど、超電導コイル2の冷却効率の低下を抑えることができる。したがって、水平支持部材40の耐荷重と冷却効率との観点から、水平支持部材40を固定具28, 30に固定するか、固定具28, 30の一方のみに固定するかを選択することができる。

【0125】

今回開示された実施の形態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】

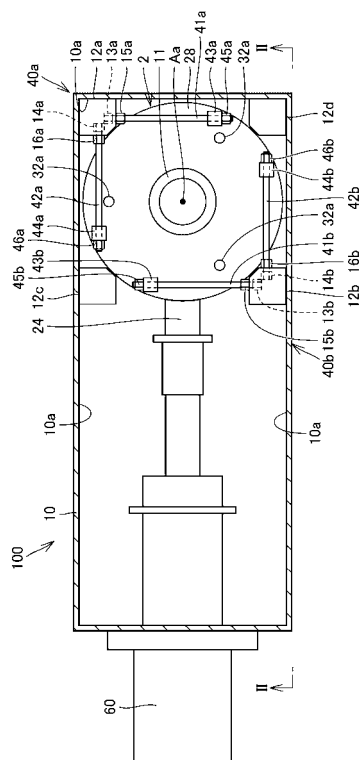
【0126】

2 超電導コイル
10 断熱容器
10a 側面
10b 底面
10c 上面
11 芯部
12, 12a~12d ガセット
20 コイル部
21 超電導線材
24 伝熱板
28, 30 固定具
32 垂直支持部材
32a ねじ
40, 40a~40d 水平支持部材
41, 41a~41d, 42, 42a~42d 連結材
13a~13d, 14a~14d, 15a~15d, 16a~16d, 45a~45d,
46a~46d 係合材
44a~44d ブロック

60 冷凍機
 100 超電導マグネット
 200 試料
 210 ステージ
 Aa 巻軸

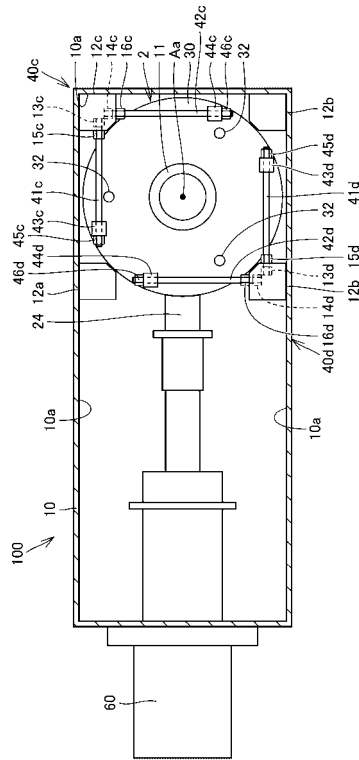
【図1】

図1



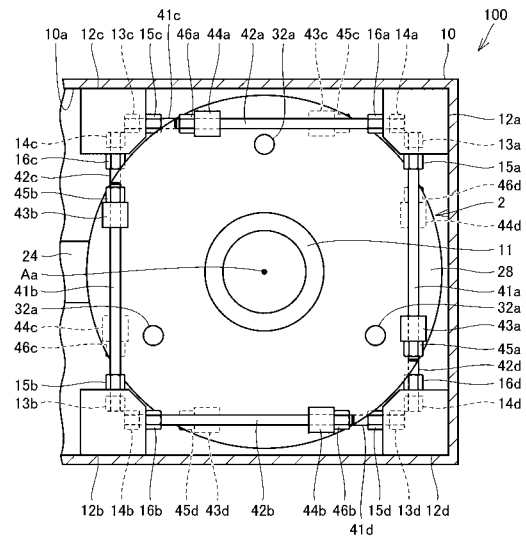
【図 3】

図3



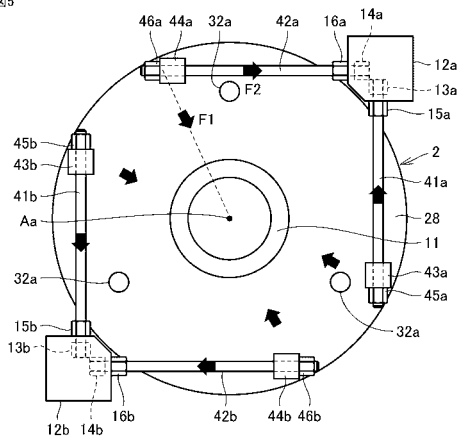
【図 4】

図4



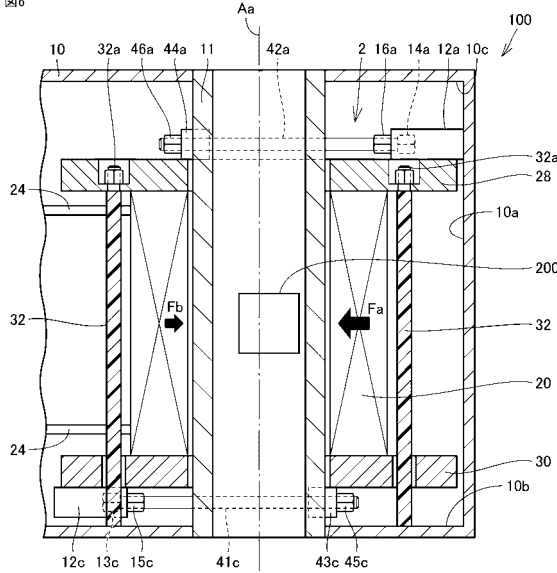
【図 5】

図5

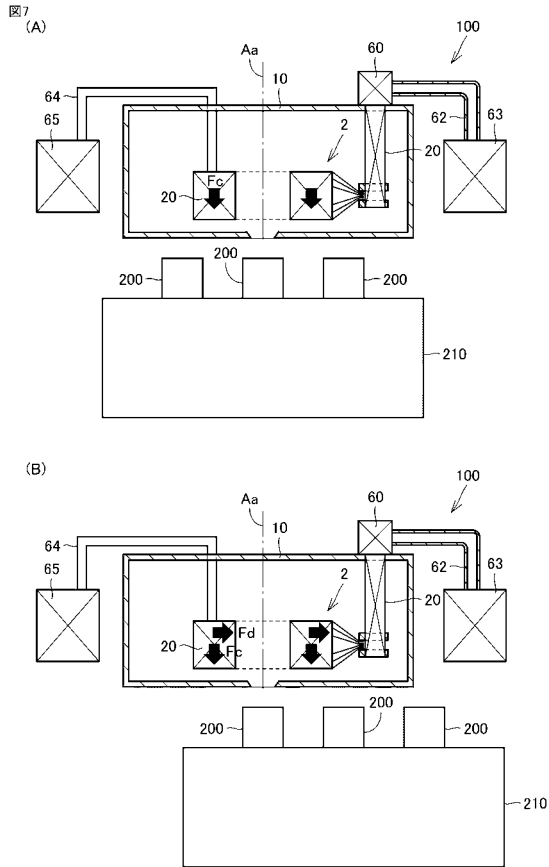


【図 6】

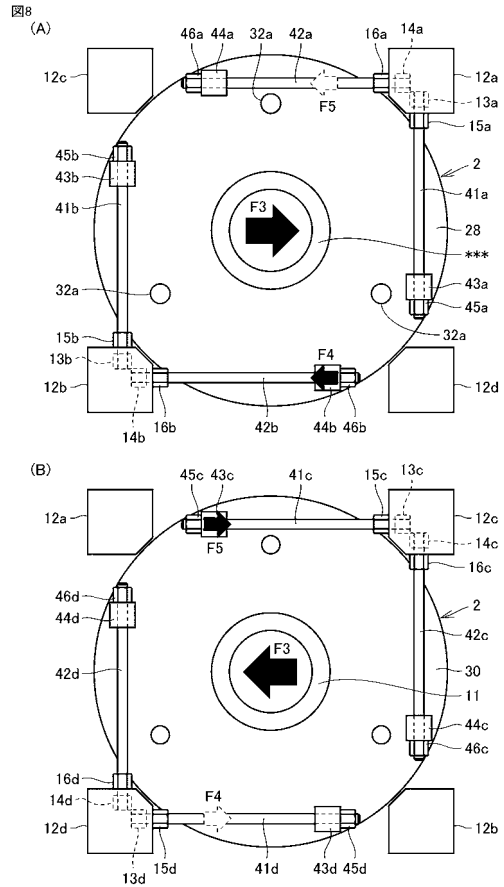
図6



【図 7】



【図 8】



【図 9】

