

(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2021-48154
(P2021-48154A)

(43) 公開日 令和3年3月25日(2021.3.25)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 F 6/04 (2006.01)	HO 1 F 6/04	
HO 1 F 6/06 (2006.01)	HO 1 F 6/06	1 1 0

審査請求 未請求 請求項の数 14 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2019-168013 (P2019-168013)	(71) 出願人	000005108 株式会社日立製作所 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(22) 出願日	令和1年9月17日(2019.9.17)	(71) 出願人	504151365 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 茨城県つくば市大穂1番地1
		(74) 代理人	110001807 特許業務法人磯野国際特許商標事務所
		(72) 発明者	渡邊 洋之 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
		(72) 発明者	岩城 伸夫 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

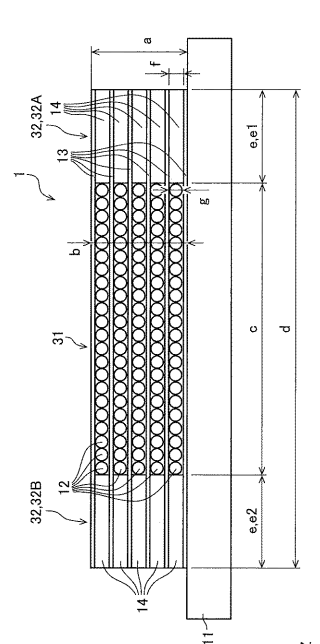
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 伝導冷却型超伝導コイル

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 高温超伝導体を使用した伝導冷却型超伝導コイルにおいて、急速な冷却が可能でクエンチしても劣化しない超伝導コイルを提供する。

【解決手段】 伝導冷却型超伝導コイル1において、超伝導物質を有しコイル状に構成される超伝導線12と、超伝導線が巻回されるポピン11と、層状の超伝導線の各層を挟む複数の第1冷却板13と、超伝導線の層の端において、複数の第1冷却板の各層間に配置される複数の第2冷却板14とを備える。第1冷却板のコイル軸方向における長さは、超伝導線冷却板積層部31のコイル軸方向の長さ、第2冷却板のコイル軸方向の長さとの合計以上で形成される。第2冷却板は、コイルの径方向における1層の厚さが、超伝導線の1層の径方向長さと同じであり、コイル軸方向における長さが、冷却板積層部32の厚さと同じである。超伝導線と複数の第1冷却板と複数の第2冷却板とは、樹脂により一体化されている。



【選択図】 図1

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

超伝導物質を有しコイル状に構成される超伝導線と、
前記超伝導線が巻回されるボビンと、
巻回され層状に配置された前記超伝導線の各層を挟むように配置される複数の第 1 冷却板と、

前記超伝導線の各層で前記超伝導線が複数本として配列された端の少なくとも一方において、複数の前記第 1 冷却板の各層間に配置される複数の第 2 冷却板と、
を備え、

前記第 1 冷却板の前記超伝導線のコイル状の軸方向における長さの寸法は、層状に配置された前記超伝導線と複数の前記第 1 冷却板とで積層された超伝導線冷却板積層部のコイル状の軸方向の長さの寸法と、前記第 2 冷却板のコイル状の軸方向の長さの寸法との合計以上の寸法で形成され、

前記第 2 冷却板は、前記超伝導線のコイル状の径方向における 1 層の厚さの寸法が、前記超伝導線の 1 層の径方向の長さの寸法と概ね同じ寸法であり、

前記第 2 冷却板の前記超伝導線のコイル状の軸方向における長さの寸法が、複数の前記第 1 冷却板と複数の前記第 2 冷却板が積層された冷却板積層部の厚さの寸法と概ね同じ寸法であり、

前記超伝導線と複数の前記第 1 冷却板と複数の第 2 冷却板とは、樹脂により一体化されている、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記超伝導線冷却板積層部の厚さの寸法は、前記冷却板積層部の厚さの寸法と概ね同じ寸法である、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 3】

請求項 1 において、

前記冷却板積層部は、前記超伝導線冷却板積層部の両端に備えられている、
ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 4】

請求項 3 において、

前記超伝導線冷却板積層部の両端に備えられる二つの前記冷却板積層部のコイル状の軸方向における長さの寸法が互いに等しい、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 5】

請求項 1 において、

複数の前記第 1 冷却板と複数の前記第 2 冷却板が積層された第 2 の冷却板積層部を備え、

当該第 2 の冷却板積層部のコイル状の軸方向における長さの寸法は、前記冷却板積層部のコイル状の軸方向における長さの寸法よりも短い、
ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 6】

請求項 1 において、

各層の前記超伝導線は、複数の前記第 1 冷却板に交互に挟まれて配置されている、
ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 7】

請求項 1 において、

前記超伝導線は、前記超伝導線が二層に積層される毎に、複数の前記第 1 冷却板に交互に挟まれて配置されている、

10

20

30

40

50

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 8】

請求項 1 において、

前記第 1 冷却板および前記第 2 冷却板は、それぞれ前記超伝導線のコイル状の周方向に分断箇所を有し、周方向に循環電流が流れない構造となっている、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 9】

請求項 1 において、

前記冷却板積層部における前記第 1 冷却板と前記第 2 冷却板とがボルトで固定される、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

10

【請求項 10】

請求項 1 において、

前記超伝導線は、高温超伝導線である、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 11】

請求項 1 において、

前記超伝導線は、ニホウ化マグネシウムを有する、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 12】

請求項 1 において、

前記超伝導線は、超伝導フィラメント、安定化材、シース材を備えて構成される、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

20

【請求項 13】

請求項 1 において、

前記超伝導線に、ガラスクロスまたはエナメル絶縁が施されている、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

【請求項 14】

請求項 1 において、

前記超伝導線と前記第 1 冷却板との間に、ガラスクロスまたはガラス繊維強化プラスチックを備える、

ことを特徴とする伝導冷却型超伝導コイル。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、伝導冷却型超伝導コイルに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、低温超伝導体を使用した超伝導磁石において、導体を冷媒に浸漬し難い構造の磁石では伝導冷却方式が採用されている。この技術に関する文献としては、例えば非特許文献 1 - 4 がある。

40

非特許文献 1 においては、超伝導導体の外側にアルミニウム合金、及び純アルミニウムを配置してコイル巻線部を冷却している。

非特許文献 2 においては、コイル巻線の層間に純アルミニウム板を設置してコイル巻線部を冷却している。

非特許文献 3 や非特許文献 4 においては、コイル巻線の層間、および内外周にアルミニウム板を設置してコイル巻線部を冷却している。

【0003】

前記の構造に関連する特許文献としては、例えば特許文献 1 - 4 がある。

特許文献 1 では、コイル導体を支持する電磁力支持シリンダーの外側または内側に冷却用熱伝導体を配置する構造が開示されている。

50

特許文献 2 では、超伝導コイル巻線の層間に導体に沿うような凹部を設けた冷却用金属板を設置する構造が開示されている。

特許文献 3 では、超伝導コイル巻線の層間に冷却板を設置した構造が開示されている。

特許文献 4 では、超伝導コイル巻線の層間に良熱伝導性樹脂または良熱伝導性樹脂と冷却板の両方を設置した構造が開示されている。

また、特許文献 3 と特許文献 4 では、定常的な冷却のみならず交流通電時の発熱を除去する目的も含めた冷却構造が開示されている。さらに特許文献 4 では、低温超伝導のみならず酸化物高温超伝導体も視野に入れた冷却構造が開示されている。

【 0 0 0 4 】

一方、高温超伝導体（相転移温度 T_c が約 25 K 以上）においては、クエンチ伝播速度が遅く、クエンチした場合の温度上昇が低温超伝導体よりも大きくなる傾向にある。したがって、高温超伝導体を使用したコイルにおいては、その電流密度によってはクエンチ時の局所的発熱過大により焼損する可能性があり、その対策として過去種々の検討が実施されてきた。例えば、非特許文献 5 や非特許文献 6 がある。

非特許文献 5 や非特許文献 6 では MgB_2 （二ホウ化マグネシウム）導体を平板状にして、やはり平板状の銅板を半田付けすることにより、クエンチ時の熱を拡散させ、導体温度上昇を抑制している。

この平板状の銅板は、先に述べたコイル巻線層間の冷却板と同様の役目を果たすこととなり、コイルの伝導冷却の促進にも寄与する構造となっている。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 5 】

【 特許文献 1 】 特開昭 63 - 293901 号公報

【 特許文献 2 】 国際公開第 2014 / 049842 号

【 特許文献 3 】 特開平 10 - 116725 号公報

【 特許文献 4 】 特開平 11 - 135318 号公報

【 非特許文献 】

【 0 0 0 6 】

【 非特許文献 1 】 A. Yamamoto, 他 9 名, "Conceptual Design of a Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.24, No.2, March 1988

【 非特許文献 2 】 Y. Makida, 他 8 名, "Development of an Astromag Test Coil with Aluminum Stabilized Superconductor" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991

【 非特許文献 3 】 A. Yamamoto, 他 11 名, "A Thin Superconducting Solenoid Magnet for Particle Astrophysics" IEEE Transactions on Superconductivity, Vol.12, No.1, March 2002

【 非特許文献 4 】 Y. Makida, 他 6 名, "Performance of an Ultra Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, June 2005

【 非特許文献 5 】 S. Mine, 他 7 名, "Development of a 3T 250mm Bore MgB_2 Magnet System" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.25, No.3, June 2015

【 非特許文献 6 】 M. Wozniak, 他 1 名, "Long Length Critical Current Measurement of MgB_2 Wire in a Coil" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.3, April 2016

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 7 】

以上、背景技術で述べたように、従来の高温超伝導体を利用した超伝導コイルでは、クエンチ時に局所的に発熱して高温になり、絶縁損傷を発生させたり、あるいは導体自体が

10

20

30

40

50

焼損したりする可能性がある。そのため、導体に銅板のような冷却板を半田付けして一体化するような手法が必要であった。また、この銅板が定常時におけるコイル冷却促進の役割も担うことになっている。

しかしながら、この方法は、導体全長にわたって銅板を半田付けする処理が必要となり、コイル製作のコストが比較的上昇することとなる。

また、超伝導導体を冷却するのにコイル巻線層間に冷却板を設置する場合、冷却銅板のコイル軸方向端部における冷却構造が冷却構造上の熱的隘路とならない構造とする必要がある。しかし、その点に関する合理的な構造の提案は、特許文献 1 - 4、非特許文献 1 - 6 を含めて、現状ではない。

【0008】

本発明は、クエンチしてもコイル損傷が発生しにくく、急速な冷却が可能な伝導冷却型超伝導コイルを提供することを課題（目的）とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

前記の課題を解決するために、本発明を以下のように構成した。

すなわち、本発明の伝導冷却型超伝導コイルは、超伝導物質を有しコイル状に構成される超伝導線と、前記超伝導線が巻回されるボビンと、巻回され層状に配置された前記超伝導線の各層を挟むように配置される複数の第 1 冷却板と、前記超伝導線の各層で前記超伝導線が複数本として配列された端の少なくとも一方において、複数の前記第 1 冷却板の各層間に配置される複数の第 2 冷却板と、を備え、前記第 1 冷却板の前記超伝導線のコイル状の軸方向における長さの寸法は、層状に配置された前記超伝導線と複数の前記第 1 冷却板とで積層された超伝導線冷却板積層部のコイル状の軸方向の長さの寸法と、前記第 2 冷却板のコイル状の軸方向の長さの寸法との合計以上の寸法で形成され、前記第 2 冷却板は、前記超伝導線のコイル状の径方向における 1 層の厚さの寸法が、前記超伝導線の 1 層の径方向の長さの寸法と概ね同じ寸法であり、前記第 2 冷却板の前記超伝導線のコイル状の軸方向における長さの寸法が、複数の前記第 1 冷却板と複数の前記第 2 冷却板が積層された冷却板積層部の厚さの寸法と概ね同じ寸法であり、前記超伝導線と複数の前記第 1 冷却板と複数の第 2 冷却板とは、樹脂により一体化されていることを特徴とする。

【0010】

また、その他の手段は、発明を実施するための形態のなかで説明する。

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、クエンチしてもコイル損傷が発生しにくく、また急速な冷却が可能な伝導冷却型超伝導コイルを提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図 1】本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル超伝導コイルの中心軸を含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

【図 2 A】本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの中心軸方向に垂直な切断面における断面構造の一例を示す図である。

【図 2 B】本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの中心軸 Z 方向に垂直な図 2 A とは別の切断面における断面構造の一例を模式的に示す図である。

【図 3】本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルにおける超伝導線の断面構造の一例を示す図である。

【図 4 A】本発明の第 2 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの中心軸を含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

【図 4 B】本発明の第 2 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの超伝導線冷却板積層部における超伝導線、および、その近傍の構成例を示す図である。

【図 5】本発明の第 3 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの中心軸を含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

10

20

30

40

50

【図6】本発明の第4実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルの中心軸方向に垂直な切断面における断面構造の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、本発明を実施するための形態（以下においては「実施形態」と表記する）を、適宜、図面を参照して説明する。なお、各図面において、共通する構成要素には同一の符号を付し、重複した説明を、適宜、省略する。

【0014】

第1実施形態

本発明の第1実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルについて、図1～図3を参照して説明する。なお、伝導冷却型超伝導コイルの「超伝導」は「超電導」と同義語として、本発明の実施形態の説明では、「超伝導」と表記する。

【0015】

《伝導冷却型超伝導コイルの構造》

図1は、本発明の第1実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル1の中心軸Zを含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

また、図2Aは、本発明の第1実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル1の中心軸Z方向に垂直な切断面における断面構造の一例を示す図である。また、図2Aにおいて、二つのI-I軸の交点に図1の中心軸Zが位置している。なお、図2B、図3については、後記する。

【0016】

図1および図2Aにおいて、伝導冷却型超伝導コイル1は、ボビン11、超伝導線12、複数の第1冷却板13、複数の第2冷却板14を備えて構成される。

超伝導線12は、1本の超伝導線が筒状（円筒状）のボビン11を中心として、多層のコイル状に形成されている。そのため、図1および図2において、超伝導線12は、複数本が配列、もしくは多層に積層したように表記されている。また、超伝導線12は1本で構成されているが、図面の説明上、「複数（複数本）の超伝導線12」とも、適宜、表記する。

図1においては、超伝導線12の断面は、断面構造が円形の場合を例として表記している。また、図2Aに示すように、超伝導線12は、コイルの周方向に長い線状で構成されている。

また、図1および図2Aに示すように、複数の配列として表記したそれぞれの超伝導線12は、それぞれ二つの第1冷却板13に挟まれて構成されている。なお、複数の層の超伝導線12と複数の第1冷却板13が積層されている部分を、超伝導線冷却板積層部31（図1）と表記する。

【0017】

また、図1に示すように、コイル軸方向（中心軸方向）の超伝導線12の端部において、第2冷却板14が備えられている。第2冷却板14の厚さ（コイル径方向の長さ）は、超伝導線12の円形断面の直径と、ほぼ同じ長さ（厚さ）である。

複数のそれぞれの第2冷却板14は、複数（複数本）の超伝導線12と共に、それぞれ二つの第1冷却板13に挟まれて構成されている。

なお、複数の第1冷却板13と複数の第2冷却板14が交互に積層されている部分を、冷却板積層部32と表記する。

【0018】

前記したように、複数の層の超伝導線12と複数の第1冷却板13が積層されている部分が超伝導線冷却板積層部31であるので、超伝導線冷却板積層部31の図面視で左端と右端の両側の端部に、それぞれ冷却板積層部32が配置されている。なお、左端と右端における冷却板積層部32のコイル軸方向の長さが異なる場合には、左端を冷却板積層部32B、右端を冷却板積層部32Aと表記する。

以下においては、両端の冷却板積層部32は、同一の構造であるとして説明をする。ま

10

20

30

40

50

た、前記したように左端が冷却板積層部 3 2 B で右端が冷却板積層部 3 2 A である場合については、後記する第 5 実施形態で説明する。

また、図 1 および図 2 A に示すように、第 1 冷却板 1 3 と第 2 冷却板 1 4 は、超伝導線 1 2 とともに、筒状のポピン 1 1 を中心として、周方向に形成されている。

【 0 0 1 9 】

図 1 において、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 とが積層された厚さ（冷却板積層部 3 2 の厚さ）を寸法 a と表記する。

また、図 1 および図 2 A において、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の超伝導線 1 2 とが積層された厚さ（超伝導線冷却板積層部 3 1 の厚さ）を寸法 b と表記する。

また、図 1 において、複数の超伝導線 1 2 が、コイルとしての軸方向に配列された長さ（超伝導線冷却板積層部 3 1 の軸方向の長さ）を寸法 c とする。

また、第 1 冷却板 1 3 のコイル軸方向の長さを寸法 d とする。

また、第 2 冷却板 1 4 のコイル軸方向の長さ（冷却板積層部 3 2 のコイル軸方向の長さ）を寸法 e とする。なお、両端の冷却板積層部 3 2 のコイル軸方向の長さが異なる場合には、冷却板積層部 3 2 A における第 2 冷却板 1 4 のコイル軸方向の長さを寸法 e 1 とし、冷却板積層部 3 2 B における第 2 冷却板 1 4 のコイル軸方向の長さを寸法 e 2 とする。この寸法 e 1 と寸法 e 2 が異なる場合については、後記する第 5 実施形態で説明する。

また、一つの第 2 冷却板 1 4 の厚さを寸法 f とする。

また、1 本の超伝導線 1 2 の厚さ（超伝導線の断面が円形状の場合は直径）を寸法 g とする。

【 0 0 2 0 】

図 1 および図 2 A において、2 枚の第 1 冷却板 1 3 は、複数の超伝導線 1 2 と、1 枚の第 2 冷却板 1 4 を同じように挟んで構成される。そのため、一つの第 2 冷却板 1 4 の厚さの寸法 f は、1 本の超伝導線 1 2 の厚さ（超伝導線の断面が円形状の場合は直径）の寸法 g に概ね等しくなるように設定する。

そして、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 とが積層された厚さ（冷却板積層部 3 2 の厚さ）の寸法 a は、複数の超伝導線 1 2 と複数の第 1 冷却板 1 3 とが積層された厚さ（超伝導線冷却板積層部 3 1 の厚さ）の寸法 b に概ね等しくなるように設定する。

【 0 0 2 1 】

また、複数（複数本）の超伝導線 1 2 の冷却は、まず、図 1 における一番上の第 1 冷却板 1 3 を、図示していない冷凍機器を介して冷却することから行われる。

そして、一番上の第 1 冷却板 1 3 から、複数の第 2 冷却板 1 4 や、中段や下段に配置された複数の第 1 冷却板 1 3 へ伝導冷却が行われる。この伝導冷却の際に、熱は、図 1 の伝導冷却型超伝導コイル 1 の端部における複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 が交互に積層された部分（冷却板積層部 3 2 ）を介して行われる。

この伝導冷却が速やかに、効率的に行われるために、第 2 冷却板 1 4 のコイル軸方向の長さの寸法 e を、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 とが積層された厚さの寸法 a と概ね等しく設定する。すなわち、冷却板積層部 3 2 のコイル軸方向の長さの寸法 e を冷却板積層部 3 2 の厚さの寸法 a と概ね等しく設定する。また、この関係は、冷却板積層部 3 2 のコイル軸方向の長さの寸法 e を超伝導線冷却板積層部 3 1 の厚さの寸法 b と概ね等しく設定するに対応する（ $a \approx b$ ）。

【 0 0 2 2 】

前記したように、図 1 におけるコイル端の第 1 冷却板 1 3 と第 2 冷却板 1 4 が積層された部分（冷却板積層部 3 2 ）は、冷凍機からの冷却板等で冷却されることになるが、この積層部分の外周側に冷凍機に連結された伝熱板を設置して冷却することを考えると、熱の速やかな流動のために、冷却板積層部分（冷却板積層部 3 2 ）のコイル軸方向の長さの寸法 e が、熱伝導上、コイルの全厚さに概ね対応する超伝導線冷却板積層部 3 1 の厚さの寸法 b、あるいは冷却板積層部 3 2 の厚さの寸法 a とほぼ同等であることが合理的である。

【 0 0 2 3 】

また、第 1 冷却板 1 3 のコイル軸方向の長さの寸法 d は、複数の超伝導線 1 2 がコイル

としての軸方向に配列された長さの寸法 c と第 2 冷却板 14 のコイル軸方向の長さの寸法 e の合計値よりも長い。すなわち、第 1 冷却板 13 は、複数の超伝導線 12 と第 2 冷却板 14 とを覆う。

図 1 においては、複数の第 1 冷却板 13 と複数の第 2 冷却板 14 とが積層された箇所が複数の超伝導線 12 と複数の第 1 冷却板 13 とが積層された箇所の両側にあるので、概ね、 $d = c + 2e$ の関係がある。

また、複数の第 1 冷却板 13 と複数の第 2 冷却板 14 とが積層された箇所（冷却板積層部 32）が複数の超伝導線 12 と複数の第 1 冷却板 13 とが積層された箇所（超伝導線冷却板積層部 31）の片側の場合には、概ね $d = c + e$ の関係がある。

両側あるいは片側のいずれの場合でも、 $d = c + e$ の関係がある。

10

前記したように、概ね $e = a$ の関係があるとしたので、 $d = c + a$ の関係がある。

すなわち、第 1 冷却板 13 のコイル軸方向の長さの寸法 d は、複数の超伝導線 12 がコイルとしての軸方向に配列された長さの寸法 c に比較して、少なくとも片側においては、コイルの全厚さに概ね対応する超伝導線冷却板積層部 31 の厚さの寸法 b と同程度の寸法、あるいはそれ以上の寸法に設定している。

【0024】

また、図 2 B は、本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 の中心軸 Z 方向に垂直な図 2 A とは別の切断面における断面構造の一例を模式的に示す図である。

図 1 および図 2 A において、伝導冷却型超伝導コイル 1 が、超伝導線 12、複数の第 1 冷却板 13、複数の第 2 冷却板 14 で構成されていることを説明した。ただし、1 本の超伝導線 12 をコイル状に巻回している。このコイル状に巻回された 1 本の超伝導線 12 と、複数の第 1 冷却板 13、複数の第 2 冷却板 14 との関係が図 1 および図 2 A では必ずしも明確とは言えないので図 2 B を用いて補足説明をする。

20

【0025】

図 2 B は、前記したように図 2 A とは別の断面の構造を模式的に示している。

図 2 B が図 2 A と異なるのは、領域 200 における構造である。領域 200 において、1 本の超伝導線 12 が如何にコイル状に形成されるかを模式的に示している。

図 2 B の領域 200 においては、超伝導線 12 が、内側（内層）から外側（外層）、あるいは下層から上層へ移行する様子を示している。なお、この超伝導線 12 が巻かれて、内側から外側、あるいは下層から上層へ移行する箇所においては、所定の第 1 冷却板 13 に孔部が、適宜、設けられる。

30

【0026】

図 1、図 2 A、図 2 B において示した超伝導線 12 は、例えば高温超伝導体である MgB₂（二ホウ化マグネシウム）が用いられている。また、高温超伝導体を用いた超伝導線を高温超伝導線と呼称するものとする。

なお、高温超伝導体の定義は、日本工業規格 JIS H 7005 で定めた約 25 K（ケルビン）以上の相転移温度 T_c を持つ超伝導体とする。

また、約 25 K（ケルビン）未満の相転移温度 T_c を持つ超伝導体を低温超伝導体とする。図 1、図 2 A、図 2 B において示した超伝導線 12 は、低温超伝導体も用いることができる。

40

また、第 1 冷却板 13 と第 2 冷却板 14 は、例えば銅で形成（構成）されている。

【0027】

また、複数の超伝導線 12 と複数の第 1 冷却板 13 と複数の第 2 冷却板 14 とを備えた伝導冷却型超伝導コイル 1 は、図示していない樹脂によって一体化されている。この一体化する際には、液状の樹脂を超伝導線 12 と第 1 冷却板 13 と第 2 冷却板 14 との間に浸透させていく。なお、樹脂の絶縁性や熱伝導率は格別な特性は要求されない。例えば、樹脂の絶縁性は、超伝導線 12 が超伝導体として使用される場合には、電流は超伝導体の状態にある超伝導線 12 を流れるので樹脂の絶縁性は、格別、問題とならない。

また、樹脂の熱伝導率が高くなくとも時間をかけて超伝導線 12 を冷却すれば、いずれ超伝導線 12 は超伝導体の状態となる。そのため、樹脂の熱伝導率は、格別、問題となら

50

ない。

超伝導線 1 2 と第 1 冷却板 1 3 と第 2 冷却板 1 4 との間に樹脂を含浸させることは、真空状態にしておくよりも、固定性、耐久性、冷却効率などの観点で望ましくなる。

【 0 0 2 8 】

以上の構成において、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 とを介して、複数の超伝導線 1 2 は、超伝導状態になるように冷却される。

【 0 0 2 9 】

《超伝導線の断面構造》

図 3 は、本発明の第 1 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 における超伝導線 1 2 の断面構造の一例を示す図である。

図 3 において、超伝導線 1 2 は、超伝導フィラメント 1 7、第 1 シース 1 8、第 2 シース 1 9、安定化材（安定化銅）2 0 を備えて構成される。

超伝導線 1 2 の中心部に、例えば安定化銅で構成される安定化材 2 0 がある。この安定化材 2 0 の外周側に複数の超伝導フィラメント 1 7 が配置される。超伝導フィラメント 1 7 は、例えば MgB_2 （二ホウ化マグネシウム）を含む超伝導体で構成される。

複数の超伝導フィラメント 1 7 は、被覆材である第 2 シース 1 9 で覆われている。

また、被覆材である第 1 シース 1 8 は、超伝導線 1 2 の最外殻を覆って、第 2 シース 1 9 とともに、超伝導フィラメント 1 7 を保護している。

【 0 0 3 0 】

伝導冷却型超伝導コイル 1 の超伝導線 1 2 における超伝導体が超伝導状態から逸脱するのがクエンチ（超伝導状態から常伝導状態への相転移）である。

導体（超伝導フィラメント 1 7、もしくは超伝導線 1 2）がクエンチした場合には、超伝導フィラメント 1 7 が、超伝導状態ではなくなり、高抵抗を示す状態となる。

そのため、超伝導フィラメント 1 7 に流れていた電流が、所定の抵抗を有する安定化材（安定化銅）2 0 に流れ込むことになり、発熱（抵抗発熱、ジュール熱）が始まる。

ある部分で生じたクエンチによる超伝導線 1 2 の発熱は、超伝導線 1 2 を挟む 2 枚の第 1 冷却板 1 3（図 1）、および両隣の超伝導線 1 2（図 1）に伝わる。

【 0 0 3 1 】

第 1 冷却板 1 3 によって、導体（超伝導線 1 2）の温度上昇が抑制されるが、一方では、第 1 冷却板 1 3 の広い範囲で温度が上昇し、隣接する層の導体（超伝導線 1 2）を加熱することになる。

このようにして、隣の層の複数の導体（超伝導フィラメント 1 7、もしくは超伝導線 1 2）が超伝導の臨界温度を越えると、一斉にクエンチを起こすことになる。つまり、超伝導線 1 2 の一部のクエンチによって、超伝導線 1 2 の一部が異常な高温になるのではなく、クエンチが起きた比較的に低温の状態でもクエンチが広範囲に広がる。クエンチが広範囲に広がることにより、多くの導体の安定化材（安定化銅）2 0 に電流が流れるようになって、コイルの抵抗が高くなる。

【 0 0 3 2 】

超伝導を適用する通常の装置、機器においては、コイル保護のためにクエンチ時、コイルの始点と終点に対応するコイル口出し間電圧を検出して、電源をオフする構成となっている。コイル口出し間の電圧が、電圧の立ち上がり早くかつ大きいほど、保護が早くなって、コイル温度上昇が抑えられ、コイル損傷の可能性が小さくなる。

すなわち、第 1 冷却板 1 3 の存在、および第 2 冷却板 1 4 の存在によりクエンチした導体の温度上昇が抑制される。それとともに、クエンチによる温度上昇が速く広範囲に広がって、コイルの抵抗が高くなり、コイル口出し間電圧が高くなる。そのためクエンチ検出による電源オフも早くなり、コイル損傷の可能性を小さくすることができる。

【 0 0 3 3 】

< 第 1 実施形態の総括 >

本（第 1）実施形態の伝導冷却型超伝導コイル 1 は、図 1、図 2 A、図 2 B に示したように、コイル状に配列された複数の超伝導線 1 2 の両端に複数の第 2 冷却板 1 4 を配置し

10

20

30

40

50

、複数の第1冷却板13によって前記の複数の超伝導線12と複数の第2冷却板14を挟む構成をとっている。

この構成のように、複数の第1冷却板13が超伝導線12の各層間に存在することによって、超伝導線12を速やかに冷却が可能となる。また、一部の超伝導線12がクエンチを引き起こしても、第1冷却板13と第2冷却板14の冷却作用と高い熱伝導性によって、クエンチ時の局所的な温度上昇を緩和して、伝導冷却型超伝導コイル1のコイル損傷が発生しにくい構造となっている。

【0034】

また、前記したように、超伝導線12と第2冷却板14を第1冷却板13で挟む構成であるので、従来例のような銅板を導体(超伝導体)に半田付けをするような工程もなく、低コストで製作できる。

また、本(第1)実施形態の伝導冷却型超伝導コイル1における超伝導線12は、図3に示したように、超伝導フィラメント17、第1シース18、第2シース19、安定化材(安定化銅)20を備えて構成されているので、クエンチを引き起こした際にも、伝導冷却型超伝導コイル1のコイル損傷が発生しにくい構造となっている。

【0035】

<第1実施形態の効果>

本発明の第1実施形態によれば、クエンチしてもコイル損傷が発生しにくく、また冷却の速い伝導冷却型超伝導コイルを提供できる。また、低コストで製作できる。

【0036】

第2実施形態

本発明の第2実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル1Bについて、図4Aと図4Bを参照して説明する。

図4Aは、本発明の第2実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル1Bの中心軸Zを含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

図4Aにおいて、伝導冷却型超伝導コイル1Bは、ボビン11、複数の超伝導線12B、複数の第1冷却板13、複数の第2冷却板14を備えて構成される。

図4Aにおける伝導冷却型超伝導コイル1Bが図1における伝導冷却型超伝導コイル1と異なるのは、超伝導線冷却板積層部31Bにおける超伝導線12Bおよびその近傍(領域300)の構成である。この超伝導線12Bおよびその近傍である領域300の構成を次に図4Bを参照して説明する。

なお、ボビン11、複数の第1冷却板13、複数の第2冷却板14については、図1で示した第1実施形態の構成と同様であるので、事実上、重複する説明は省略する。

【0037】

図4Bは、本発明の第2実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル1Bの超伝導線冷却板積層部31Bにおける超伝導線12B、および、その近傍(領域300:図4A)の構成例を示す図である。

図4Bにおいて、超伝導線12Bは、第1ガラスクロス(またはエナメル絶縁)15に覆われて構成されている。

また、第1ガラスクロス(またはエナメル絶縁)15に覆われた超伝導線12Bは、二つの第2ガラスクロス(またはGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic:ガラス繊維強化プラスチック))16を介して、二つの第1冷却板13に挟まれて構成される。

【0038】

このように、超伝導線12Bが、第1ガラスクロス(またはエナメル絶縁)15で覆われることによって、複数の超伝導線12B間の絶縁性が向上する。

また、第1ガラスクロス(またはエナメル絶縁)15に覆われた超伝導線12Bが、二つの第2ガラスクロス(またはGFRP)16を介して、二つの第1冷却板13に挟まれて構成されることによって、複数の超伝導線12Bと第1冷却板13との間の絶縁性や耐久性が向上する。

【0039】

10

20

30

40

50

< 第 2 実施形態の効果 >

第 1 実施形態の効果に加え、さらに、第 1 ガラスクロス（またはエナメル絶縁）15 や第 2 ガラスクロス（または G F P R）16 を備えることによって、さらに超伝導線 12 B の絶縁性や耐久性が向上する。

【 0 0 4 0 】

第 3 実施形態

本発明の第 3 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 C について、図 5 を参照して説明する。

図 5 は、本発明の第 3 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 C の中心軸 Z を含む切断面における断面構造の一例を示す図である。

図 5 において、伝導冷却型超伝導コイル 1 C は、ボビン 11、複数の超伝導線 12、複数の第 1 冷却板 13、複数の第 2 冷却板 14 を備えて構成される。

図 5 の構成において、図 1 の構成と異なるのは、超伝導線 12 と第 2 冷却板 14 とに対する第 1 冷却板 13 の配置の構成である。

【 0 0 4 1 】

すなわち、超伝導線冷却板積層部 31 C における超伝導線 12 の積層を二段構成、および第 2 冷却板 14 の積層を二段構成とし、これらの構成に対して、二つの第 1 冷却板 13 で挟む構成としている。つまり、積層された超伝導線 12 の間に、第 1 冷却板 13 が存在しない層がある。

同様に冷却板積層部 32 C において、積層された第 2 冷却板 14 の間に、第 1 冷却板 13 が存在しない層がある。

図 5 においては、上段から 2 層は、前記した積層された超伝導線 12 の間、および積層された第 2 冷却板 14 の間に第 1 冷却板 13 が存在しない層となっている。

ただし、ボビン 11 に最も近い層は、図 1 と同じように、超伝導線 12 の一段構成、および第 2 冷却板 14 の一段構成に対して、二つの第 1 冷却板 13 で挟む構成としている。

【 0 0 4 2 】

伝導冷却型超伝導コイル（1 C）の通電電流、超伝導線 12 の性能、およびコイル形状により、伝導冷却型超伝導コイル（1 C）のクエンチのしやすさや温度上昇程度が変わってくる。そのため、伝導冷却型超伝導コイル（1 C）によっては、必ずしも各層に冷却板（第 1 冷却板 13）を設置する必要はない。

また、コイル（超伝導コイル）内部においても、コイルの内周側と外周側とでは、発生する磁場（経路磁場）の強度が異なっていることや、冷却構造上の制約から温度分布が異なってくる場合がある。その相違によって第 1 冷却板 13 の必要性も影響を受け、配置箇所を低減できる場合がある。

【 0 0 4 3 】

< 第 3 実施形態の効果 >

冷却板（第 1 冷却板 13）の構成を最適化することによって、伝導冷却型超伝導コイル（1 C）の形状の最適化（小型化）やコストを低減できる効果がある。

【 0 0 4 4 】

第 4 実施形態

本発明の第 4 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 D について、図 6 を参照して説明する。

図 6 は、本発明の第 4 実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイル 1 D の中心軸 Z 方向に垂直な切断面における断面構造の一例を示す図である。

図 6 において、伝導冷却型超伝導コイル 1 D は、ボビン 11、複数の第 1 冷却板 13、複数の第 2 冷却板 14、複数の超伝導線 12 を備えて構成される。また、第 1 冷却板 13 および第 2 冷却板 14 は、それぞれ分断される箇所があり、その分断箇所がギャップ 21 として示されている。

図 6 の断面図は、図 2 の断面図と、ギャップ 21 を除いて似た構成であるが、断面の切断位置が異なる。そのため、図 6 においては、複数の第 1 冷却板 13 と複数の第 2 冷却板

10

20

30

40

50

14が主として示されており、第1冷却板13および第2冷却板14のそれぞれの隙間であるギャップ21において、複数の超伝導線12が覗いて見えている。

【0045】

図6においては、複数の第1冷却板13、および複数の第2冷却板14が、2箇所のギャップ21（分断箇所）によって、周方向に2分割されて、伝導冷却型超伝導コイル1Dが構成されている。

図6に示すように、複数の第1冷却板13、複数の第2冷却板14を分割することによって、コイル製作を容易にすることができる。

また、複数の第1冷却板13、複数の第2冷却板14を分割することによって、伝導冷却型超伝導コイル1Dの励磁時に誘起される循環電流が冷却板に流れることを防止できる。つまり、循環電流が冷却板に流れることを防止することによって、伝導冷却型超伝導コイル1Dの定格電流の通電時において、磁場の静定に支障が出ることを避けることが可能となる。

なお、ギャップ21の分割数、およびギャップ幅は、製作性や伝導冷却型超伝導コイルの各種の特性などから決定される。

【0046】

<第4実施形態の効果>

冷却板を分割することによって、伝導冷却型超伝導コイル1Dの製作が容易になる効果がある。

また、循環電流が冷却板に流れることを防止できるので、伝導冷却型超伝導コイル1Dの安定動作に効果がある。

【0047】

第5実施形態

本発明の第5実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルについて、図1を兼用して説明する。

第5実施形態の伝導冷却型超伝導コイル(1)は、図1における冷却板積層部32Aのコイル軸方向の長さの寸法e1と冷却板積層部32Bのコイル軸方向の長さの寸法e2とが異なる場合である。具体的には、冷却板積層部32B(第2の冷却板積層部)のコイル軸方向の長さの寸法e2を、冷却板積層部32Aのコイル軸方向の長さの寸法e1よりも短くする。

ただし、冷却板積層部32Aのコイル軸方向の長さの寸法e1は、冷却板積層部32Aの厚さの寸法aと概ね等しく設定する。なお、前記したように、冷却板積層部32Aの厚さの寸法aは、超伝導線冷却板積層部31の厚さの寸法bと等しくしておく。

【0048】

すなわち、本(第5)実施形態の伝導冷却型超伝導コイルにおいては、冷却板積層部32Bのコイル軸方向の長さの寸法e2を短くするものである。つまり、冷却板積層部32Bにおける第2冷却板14の長さを短くする。

本(第5)実施形態の伝導冷却型超伝導コイルにおいては、外部の冷凍機からの冷却板等による冷却を主として、冷却板積層部32Aを介して行う。そのため、冷却板積層部32Bのコイル軸方向の長さの寸法e2を、冷却板積層部32A側と同程度の長さに確保する必要がない。この冷却板積層部32Bのコイル軸方向の長さの寸法e2を短くする構成によって、第2冷却板14と第1冷却板13の量を減らして、製作コストを低減する。

【0049】

<第5実施形態の効果>

冷却板の量を減らして、製作コストが低減できる。

【0050】

第6実施形態

本発明の第6実施形態に係る伝導冷却型超伝導コイルについて、図1を兼用して説明する。

第6実施形態の伝導冷却型超伝導コイルにおいては、第1冷却板13を第2冷却板14

10

20

30

40

50

にボルト（不図示）で固定する。前記した樹脂含浸と併せて、冷却板をさらに強固に固定できる。

【0051】

< 第6実施形態の効果 >

冷却板を強固に固定できる。

【0052】

その他の実施形態

なお、本発明は、以上に説明した実施形態に限定されるものでなく、さらに様々な変形例が含まれる。例えば、前記の実施形態は、本発明を分かりやすく説明するために、詳細に説明したものであり、必ずしも説明したすべての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施形態の構成の一部を他の実施形態の構成の一部で置き換えることが可能であり、さらに、ある実施形態の構成に他の実施形態の構成の一部または全部を追加・削除・置換をすることも可能である。

以下に、その他の実施形態や変形例について、さらに説明する。

【0053】

《超伝導線》

図1において、超伝導線12の断面形状を円形の場合を示して説明した。しかし、超伝導線12の断面形状は、円形に限定されない。例えば、断面形状が、楕円形や四角形、それ以上の多角の形状であってもよい。

【0054】

《超伝導体》

第1実施形態においては、図3に示した超伝導フィラメント17は、例えば MgB_2 （二ホウ化マグネシウム）を含む超伝導体であると説明したが、超伝導体は、 MgB_2 に限定されない。

例えば、ニオブチタン($NbTi$)、ニオブ酸スズ(Nb_3Sn)、ビスマス系超電導体($BSCCO$)、イットリウム系超電導体($YBCO$)などの超伝導体であっても、本（第1）実施形態の伝導冷却型超伝導コイルは、同じような効果が期待できることがある。

【0055】

《冷却板の段構成》

図5で示した第3実施形態においては、超伝導線12の二段構成、および第2冷却板14の二段構成に対して、二つの第1冷却板13で挟む構成の例を示したが、超伝導線12と第2冷却板14の段構成は、前記の二段構成には限定されない。三段構成でもよい。

また、図1に示した一段構成と図5で示した二段構成を混在させてもよい。

また、伝導冷却型超伝導コイル1Cの外周側か内周側かによって、超伝導線12の多段構成の段数が変化してもよい。

【0056】

《冷却板の分割数》

図6で示した第4実施形態においては、複数の第1冷却板13、および複数の第2冷却板14を周方向に2分割にする例を示した。しかし、2分割に限定されない。

例えば4分割でも6分割でもよい。一般に2分割以上で同様の効果が期待できる。

【0057】

《冷却板積層部》

図1で示した第1実施形態の伝導冷却型超伝導コイル1において、複数の第2冷却板14は、複数（複数本）の超伝導線12がコイル軸方向に配列された端の両側に設けられ、複数の第1冷却板13が複数（複数本）の超伝導線12と複数の第2冷却板14を挟むように構成している例を示した。しかし、複数の第2冷却板14が、複数（複数本）の超伝導線12がコイル軸方向に配列された両側に設けられることに限定されない。

複数の第2冷却板14（あるいは冷却板積層部32）が、複数（複数本）の超伝導線12がコイル軸方向に配列された端のどちらか一方の側であってもよい。

すなわち、超伝導線冷却板積層部31に対して、超伝導線冷却板積層部31のどちらか

10

20

30

40

50

一方の端のみに、冷却板積層部 3 2 を備える構成であってもよい。

この構成によっても、複数の第 1 冷却板 1 3 と複数の第 2 冷却板 1 4 とによって、複数（複数本）の超伝導線 1 2 を冷却することが可能である。

【 0 0 5 8 】

《第 1 冷却板、第 2 冷却板》

本発明の第 1 実施形態の伝導冷却型超伝導コイル 1 を示す図 1 において、第 1 冷却板 1 3 と第 2 冷却板 1 4 は、銅で形成されていることを例示した。しかし、第 1 冷却板 1 3 および第 2 冷却板は、銅による構成に限定されない。熱伝導度が高い特性を有する材質（金属）であれば、銅以外の他の材質でもよい。例えば、アルミニウムや前記特性を有する合金でもよい。

10

【 0 0 5 9 】

《安定化材》

本発明の第 1 実施形態を示す図 3 において、安定化材 2 0 は、安定化銅で形成されていることを例示した。しかし、安定化材 2 0 は、銅による構成に限定されない。熱伝導率が高く、電気抵抗が低い材質（金属）であれば他の材質でもよい。例えば、アルミニウムや前記特性を有する合金でもよい。

【 0 0 6 0 】

《第 1 ガラスクロス、第 2 ガラスクロス》

本発明の第 2 実施形態を示す図 4 において、第 1 ガラスクロス 1 5、第 2 ガラスクロス 1 6 を共に用いた構成で説明したが、第 1 ガラスクロス 1 5 のみ、あるいは第 2 ガラスクロス 1 6 のみの構成でも、第 1 実施形態よりは絶縁性が向上する効果がある。

20

また、第 1 ガラスクロス 1 5 の代わりにエナメル絶縁でもよく、第 2 ガラスクロス 1 6 の代わりに G F P R を用いてもよい。

また、エナメル絶縁と G F P R の組み合わせた構成でもよい。

なお、第 1 ガラスクロス 1 5（またはエナメル絶縁）、第 2 ガラスクロス 1 6（または G F P R）の材質の特性は、絶縁性が高く、熱伝導率が大きいものが望ましい。

【 0 0 6 1 】

《第 2 実施形態と第 3 実施形態の組み合わせ》

第 3 実施形態においては、第 1 実施形態で説明した超伝導線 1 2 を用いて、超伝導線 1 2 の二段構成に対して、二つの第 1 冷却板 1 3 で挟む構成を示した。

30

しかし、第 3 実施形態の超伝導線 1 2 の二段構成において、図 4 A、図 4 B で示した第 2 実施形態の領域 3 0 0 の構成における超伝導線 1 2 B の構成を用いてもよい。

すなわち、図 5 で示す第 3 実施形態の超伝導線 1 2 を、図 4 A、図 4 B に示す超伝導線 1 2 B のように、超伝導線を第 1 ガラスクロス（またはエナメル絶縁）1 5 で包んでもよい。また、二つの超伝導線の間には第 2 ガラスクロス（または G F P R）1 6 を設けてもよい。

【 0 0 6 2 】

《ボビン》

第 1 実施形態において、図 1 および図 2 に示したボビン 1 1 を「筒状（円筒状）」として説明したが、ボビン 1 1 は、筒状に限定されない。例えば、中心部に空洞のない「棒状」の構成であってもよい。また、筒状の周辺部に対して、異なる材質の部材を中心部に備える構成であってもよい。

40

【 0 0 6 3 】

《伝導冷却型超伝導コイルの応用》

本発明の第 1 実施形態～第 4 実施形態で説明した伝導冷却型超伝導コイルは、例えば、超伝導電磁石装置（超電導電磁石装置）や超伝導エネルギー貯蔵装置や磁気共鳴画像装置（MRI）などに適用、応用することができる。

【符号の説明】

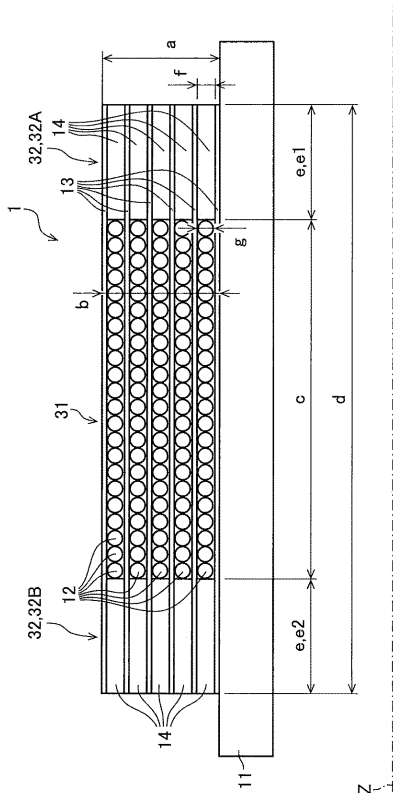
【 0 0 6 4 】

1, 1 B, 1 C, 1 D 伝導冷却型超伝導コイル

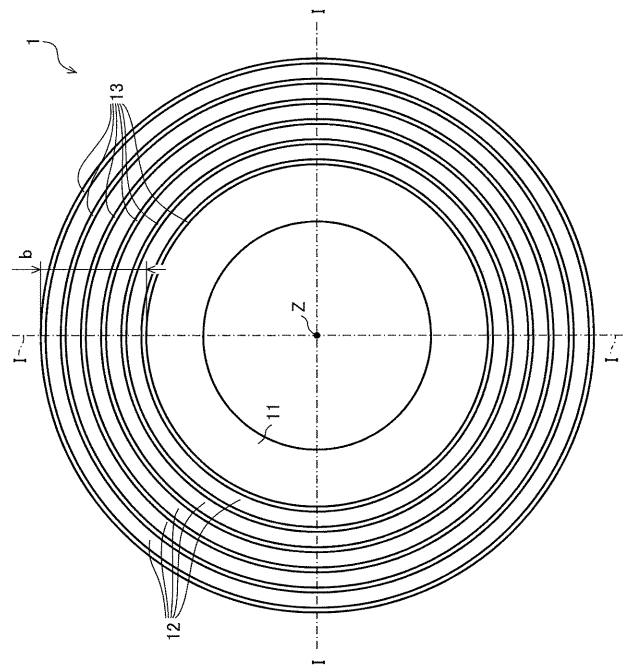
50

- 1 1 ポピン
- 1 2 , 1 2 B 超伝導線
- 1 3 冷却板、第 1 冷却板
- 1 4 冷却板、第 2 冷却板
- 1 5 ガラスクロス、第 1 ガラスクロス、エナメル絶縁
- 1 6 ガラスクロス、第 2 ガラスクロス、G F R P
- 1 7 超伝導フィラメント
- 1 8 シース (被覆材)、第 1 シース
- 1 9 シース (被覆材)、第 2 シース
- 2 0 安定化材、安定化銅
- 2 1 ギャップ (切断箇所)
- 3 1 , 3 1 B , 3 1 C 超伝導線冷却板積層部
- 3 2 , 3 2 A , 3 2 C 冷却板積層部
- 3 2 B 冷却板積層部、第 2 の冷却板積層部

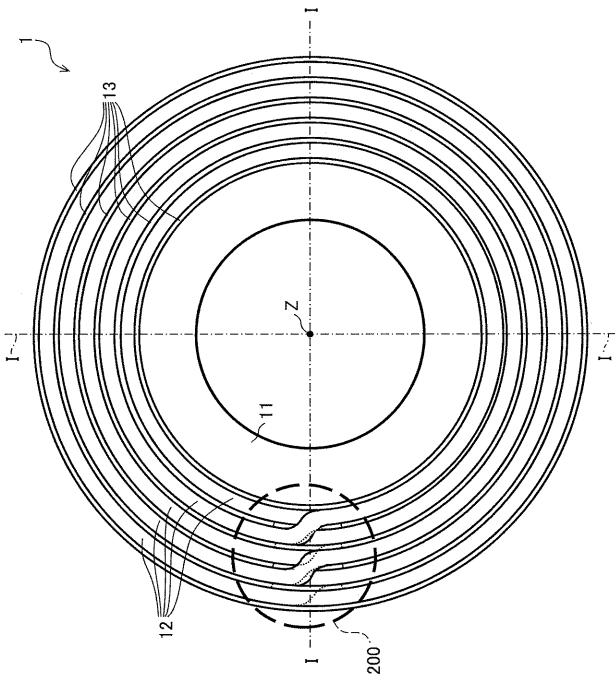
【 図 1 】



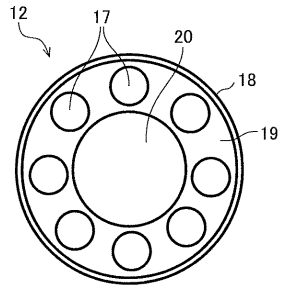
【 図 2 A 】



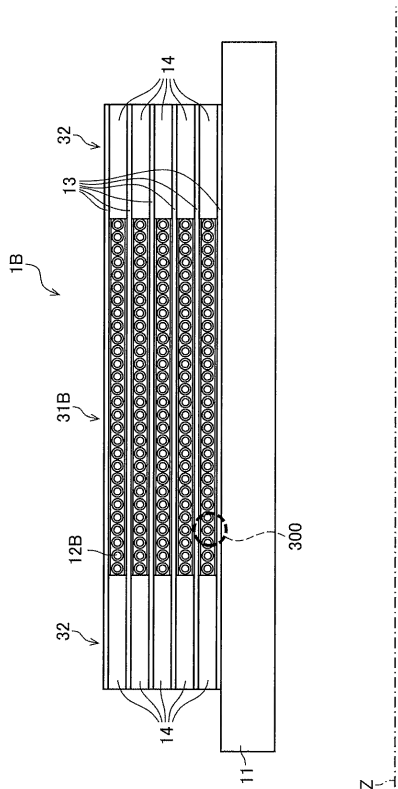
【 図 2 B 】



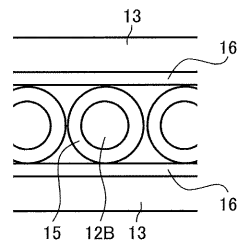
【 図 3 】



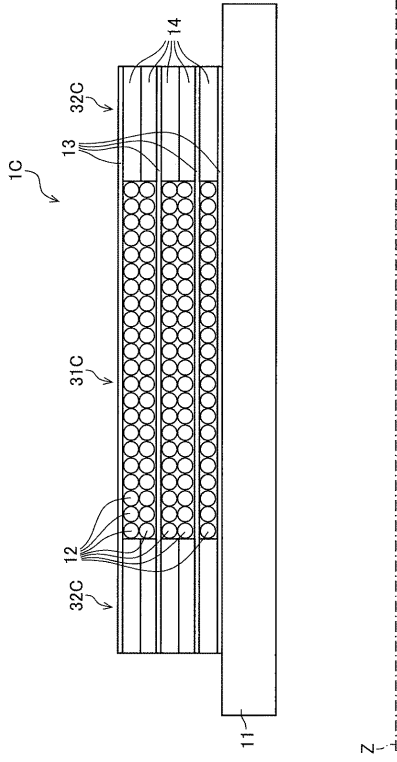
【 図 4 A 】



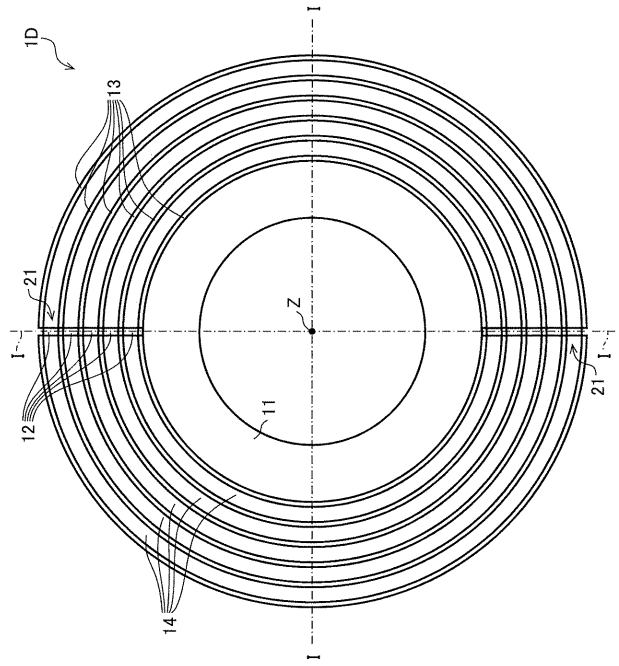
【 図 4 B 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

(72)発明者 瀧本 良寛

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

(72)発明者 田中 秀樹

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

(72)発明者 和久田 毅

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

(72)発明者 山本 明

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内