

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5852425号
(P5852425)

(45) 発行日 平成28年2月3日 (2016.2.3)

(24) 登録日 平成27年12月11日 (2015.12.11)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 F 6/04 (2006.01)

H O 1 F 7/22 Z A A G

H O 1 F 6/02 (2006.01)

H O 1 F 7/22 K

A 6 1 B 5/055 (2006.01)

A 6 1 B 5/05 3 3 1

G O 1 R 33/3815 (2006.01)

G O 1 N 24/06 5 1 O D

請求項の数 10 (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2011-264015 (P2011-264015)
 (22) 出願日 平成23年12月1日 (2011.12.1)
 (65) 公開番号 特開2013-118228 (P2013-118228A)
 (43) 公開日 平成25年6月13日 (2013.6.13)
 審査請求日 平成26年8月19日 (2014.8.19)

(73) 特許権者 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
 (74) 代理人 100064414
 弁理士 磯野 道造
 (74) 代理人 100111545
 弁理士 多田 悦夫
 (72) 発明者 青木 学
 茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株
 式会社日立製作所 日立研究所内
 (72) 発明者 安藤 電弥
 茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株
 式会社日立製作所 日立研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超電導電磁石装置、その冷却方法、および磁気共鳴イメージング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

冷媒が循環される冷媒循環流路と、
 前記冷媒循環流路における冷媒の蒸気を冷却する冷凍機と、
 前記循環される冷媒により冷却される超電導コイルと、
 前記超電導コイルと熱的に接触されると共に、内部空間を有する保護抵抗と、
 前記保護抵抗内の内部空間に、前記冷媒よりも高沸点、かつ、前記冷媒により凍結され
 る高沸点冷媒を供給する高沸点冷媒供給部と、
 前記冷媒循環流路、前記超電導コイル、および前記保護抵抗を少なくとも収容する真空
 断熱容器と、
 を備えることを特徴とする超電導磁石装置。

【請求項 2】

前記高沸点冷媒は、
 初期冷却時には、前記高沸点冷媒供給部から前記保護抵抗の内部空間に供給されて前記
 超電導コイルを冷却し、
 前記初期冷却後には、前記内部空間において、前記冷媒により冷却・凍結されること、
 を特徴とする請求項 1 に記載の超電導磁石装置。

【請求項 3】

前記保護抵抗は、前記内部空間を管路として有する保護抵抗管として形成されており、
 前記保護抵抗管が、前記超電導コイルの外周側および/または内周側に、当該超電導コ

イルと熱的に接触するように巻かれていること

を特徴とする請求項 1 または 2 に記載の超電導電磁石。

【請求項 4】

前記保護抵抗は、無酸素銅または無酸素銅と同等の常電導線を前記超電導コイルと磁気的に結合しないように無誘導に巻線したこと特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の超電導電磁石装置。

【請求項 5】

前記保護抵抗は常電導線を密巻した構造を有し、前記の冷媒循環流路を流れる冷媒が密巻された常電導線の隙間を通過するように構成されていることを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の超電導電磁石装置。

10

【請求項 6】

前記保護抵抗の内部を前記複数の冷媒循環流路が貫くことを特徴とする請求項 1 ないし 5 のいずれかに記載の超電導電磁石装置の冷却構造。

【請求項 7】

前記超電導コイルの中心軸は水平方向を向き、前記保護抵抗は超電導コイルの外周面、内周面、ボビンのいずれかに熱的に接触されることを特徴とする請求項 1 ないし 5 のいずれかの超電導電磁石装置。

【請求項 8】

前記超電導コイルの中心軸は鉛直方向を向き、前記の超電導コイルは水平方向に設けた開口部を挟んで配置されることを特徴とする請求項 1 ないし 5 のいずれかに記載の超電導電磁石装置。

20

【請求項 9】

冷媒が循環される冷媒循環流路と、
前記冷媒循環流路における冷媒の蒸気を冷却する冷凍機と、
前記循環される冷媒により冷却される超電導コイルと、
前記超電導コイルに対して並列に接続される保護抵抗と、
前記冷媒循環流路、前記超電導コイル、および前記保護抵抗を少なくとも収容する真空断熱容器と、

を備える超電導磁石装置の冷却方法であって、

前記保護抵抗は、前記超電導コイルと熱的に接触されると共に、外部につながる流路を備える内部空間を有するように形成されており、

30

初期冷却時は、

前記冷媒よりも高沸点、かつ、前記冷媒により凍結される高沸点冷媒が、前記外部につながる流路から前記内部空間へと供給され、さらに、前記冷媒循環流路に、前記高沸点冷媒が供給されて、前記超電導磁石が冷却され、

前記初期冷却の後は、

前記冷媒循環流路から前記低沸点冷媒を除去した後に、前記冷媒が供給されることで、前記超電導磁石が冷却されると共に、前記内部空間に残留される前記高沸点冷媒が凍結されること、

を特徴とする超電導磁石装置の冷却方法。

40

【請求項 10】

請求項 1 ないし 8 のいずれかの超電導磁石装置を備えることを特徴とする磁気共鳴イメージング装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超電導電磁石装置、その冷却方法、および磁気共鳴イメージング装置に関する。

【背景技術】

【0002】

50

超電導電磁石装置は、超電導コイルと、それに並列に設置された永久電流スイッチから構成され、上記の永久電流スイッチを開にした状態で励磁電源から超電導コイルに電流供給し、その後、永久電流スイッチを閉にした状態で励磁電源からの供給電流を減少させゼロにすることで、超電導コイルおよび永久電流スイッチからなる超電導状態の閉回路に電流がほとんど減衰することなく流れ続ける永久電流運転となる。これにより超電導電磁石装置は、長期に渡って磁場を保持することが可能である。

【 0 0 0 3 】

永久電流運転中に超電導コイルに常電導転移で抵抗が発生した場合、超電導コイルの蓄積エネルギーがジュール発熱で熱エネルギーに変換され、コイル温度が上昇する。この蓄積エネルギーが全て超電導コイルで消費されると、過大な温度上昇を引き起こし超電導コイルに性能劣化または焼損が生じてしまう場合がある。この問題を避けるため、上記の回路では、常電導転移発生後に超電導コイルに並列に設けた保護抵抗に電流を供給し、超電導コイル並びに保護抵抗でエネルギーを消費することで、超電導コイルの温度上昇を抑えるようになっている。

10

【 0 0 0 4 】

従来の超電導電磁石装置は、上記の超電導コイルや永久電流スイッチに代表される構成素子を超電導状態に保持するため、液化ヘリウムや液化窒素に代表される冷媒に浸漬させて使用する浸漬冷却方式や、冷凍機と構成素子とを熱伝導性の良い金属で熱的に接続して冷却する伝導冷却方式が多く採用されている。ただし、上記の冷却方式は装置が大型化すると、浸漬冷却方式では大量の冷媒が必要となり、伝導冷却方式では冷却対象物内での温度勾配が大きくなって所望の温度に保持することができなくなる。そこで、核融合装置に代表される大型装置では、装置内部に冷媒流路を設けてポンプで強制的に循環させる強制冷却方式が採用されている（特許文献 1）。また、磁気共鳴イメージング装置（MRI）に代表される中型装置では、超電導コイル等の熱源で気化した冷媒と液化した冷媒の密度差と自然対流を利用して冷媒を流路内で循環させるサーモサイフォン方式（特許文献 2）が提案されている。

20

【 0 0 0 5 】

ちなみに、超電導電磁石装置を超電導状態に保持するため、液体ヘリウムや液化窒素に代表される冷媒に超電導素子を浸漬させる浸漬冷却方式や、冷凍機と構成素子とを熱伝導性の良い金属で熱的に接続して冷却する伝導冷却方式が多く採用されている。しかしながら、核融合装置や磁気共鳴イメージング装置（MRI）といった大型の装置については、使用冷媒量が増大することや冷却対象物内部での温度勾配が大きくなることを避けるため、装置内部に設けた流路に冷媒を循環させる強制冷却方式やサーモサイフォン方式が採用されている。

30

【 0 0 0 6 】

ここで、超電導電磁石装置を常温から冷却する作業を初期冷却と呼ぶ。この初期冷却について、上記の浸漬冷却方式では、液化窒素に代表される冷媒を装置内部に冷媒導入口から送りこみ、装置内部の熱で気化した冷媒を冷媒排出口から排出し、その後、装置内部が冷媒の液化温度に到達することで内部に冷媒が液化したままの状態に留まり、超電導素子が浸漬したことをもって初期冷却を終了する。

40

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 7 】

【 特許文献 1 】 特開平 7 - 1 2 2 4 2 2 号公報 （ 図 1 など ）

【 特許文献 2 】 特開平 6 - 3 4 2 7 2 1 号公報 （ 図 1 など ）

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

ところで、上記の冷却方式のうち、強制冷却方式（特許文献 1）並びにサーモサイフォン方式（特許文献 2）では、冷媒流路の一部を超電導素子に熱的に接触させたのみである

50

ことから、浸漬冷却と比較して熱伝導率が小さいため（冷却効率が劣るため）、短時間で初期冷却を完了できないという課題があった。

【 0 0 0 9 】

また、上記のような超電導電磁石装置は長期に渡って極低温状態に保持する必要があるが、なんらかの原因で温度上昇してしまう場合がある。例えば停電による冷凍機の停止や、コイルの一部が常電導転移し、そのジュール発熱でなだらかにコイル全体が常電導転移するクエンチ現象である。浸漬冷却方式の場合、冷媒が蓄冷剤として作用して温度上昇を抑制するが、上記のような伝強制冷却方式並びにサーモサイフォン方式では蓄冷剤として作用する部材が流路内に少量しか存在しないため、浸漬冷却と比較して温度上昇を抑制することが困難であった。そこで、蓄冷剤となる物質を装置内部に格納しておく方法も考えられるが、内部に新たに構造物を設ける必要があるため装置が大型化してしまうという課題があった。

10

【 0 0 1 0 】

以上の点から、本発明の課題は、冷却性能に優れて使い勝手の良い、超電導電磁石装置、その冷却方法、および磁気共鳴イメージング装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 1 】

本発明は、冷媒が循環される冷媒循環流路と、前記冷媒循環流路における冷媒の蒸気を冷却する冷凍機と、前記循環される冷媒により冷却される超電導コイルと、前記超電導コイルと熱的に接触されると共に、内部空間を有する保護抵抗と、前記保護抵抗内の内部空間に、前記冷媒よりも高沸点、かつ、前記冷媒により凍結される高沸点冷媒を供給する高沸点冷媒供給部と、前記冷媒循環流路、前記超電導コイル、および前記保護抵抗を少なくとも収容する真空断熱容器と、を備える超電導磁石装置として構成した。他の構成については、後記する実施形態で詳細に説明する。

20

【発明の効果】

【 0 0 1 2 】

本発明によれば、冷却性能に優れて使い勝手の良い、超電導電磁石装置、その冷却方法、および磁気共鳴イメージング装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

30

【図 1】本発明の第 1 の実施形態に係る超電導磁石装置の断面図であり、(a) は中心位置での縦断面を、(b) は(a) A - A ' 線での横断面を示す。

【図 2】図 1 の超電導磁石装置の回路を模式的に示した図である。

【図 3】本発明の第 2 の実施形態に係る超電導磁石装置の断面図であり、(a) は中心位置での縦断面を、(b) は(a) A - A ' 線での横断面を示す。

【図 4】本発明の第 3 の実施形態に係る超電導磁石装置の断面図であり、(a) は中心位置での縦断面を、(b) は(a) A - A ' 線での横断面を示す。

【図 5 A】本発明の第 4 の実施形態に係る超電導磁石装置の断面図であり、(a) は中心位置での縦断面を、(b) は(a) A - A ' 線での横断面を示す。

【図 5 B】本発明の第 4 の実施形態に係る超電導磁石装置の断面図であり、(a) は図 5 A (a) の B - B ' 線での横断面を、(b) は図 5 A (a) の C - C ' 線での横断面を示す。

40

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

次に、本発明の実施形態について、適宜図面を参照しながら詳細に説明する。

ちなみに、本実施形態では、強制冷却方式並びにサーモサイフォン方式を採用した超電導電磁石装置において、初期冷却時間を短縮すると共に、装置を大型化することなく冷凍機停止やクエンチ時の温度上昇を抑制することが可能である超電導電磁石装置について説明する。

【 0 0 1 5 】

50

第 1 の実施形態

以下、本発明を適用してなる第 1 の実施形態について、図 1 並び図 2 を参照して説明する。図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る超電導電磁石装置の断面図であり、(a) は中心位置での縦断面を、(b) は(a)の A - A ' 線での横断面を示す。

なお、これらの断面は、スライス断面であり、奥側にあるものは記載されていない。この点は、後記の図 3 などにおいても同じである。

【 0 0 1 6 】

図 1 に示すように、本実施形態の超電導電磁石装置 1 は、真空容器 2、この真空容器 2 に内包された輻射シールド 3、この輻射シールドに内包された複数の超電導コイル 4、コイルボビン 5、サーモサイフォン部 6 (本体下部 6 a、本体上部 6 b、冷媒降下流路部 6 c)、永久電流スイッチ 9、保護抵抗 1 0、保護抵抗収容部 1 1 などのほか、真空容器 2、輻射シールド 3、冷凍機 1 2 などを含んで構成される。なお、本実施形態の超電導コイル 4 の中心軸 2 1 は鉛直方向を向いている。すなわち、図 1 (a)において、紙面の上方が上であり、紙面の下方が下である。

ちなみに、第 1 の実施形態に係る超電導電磁石装置 1 は、例えば、核磁気共鳴装置 (Nuclear Magnetic Resonance) に適用される。

【 0 0 1 7 】

図 1 (a) に示すように、第 1 の実施形態での超電導コイル 4 は、符号 4 a が付されたものと符号 4 b が付されたもの 2 つである。コイルボビン 5 には、前記の超電導コイル 4 が巻き付けられている。この例における超電導コイル 4 とコイルボビン 5 は周知のものであるので、詳細な説明を省略する。

【 0 0 1 8 】

なお、コイルボビン 5 の外周には、超電導コイル 4 やコイルボビン 5 と熱的な接触をしつつこれらを取り巻く環状の保護抵抗収容部 1 1 が配置されており、保護抵抗 1 0 は、その内側 (保護抵抗収容部 1 1 内) に収容されている。この図の例では、保護抵抗 1 0 は、保護抵抗収容部 1 1 内に、内層と外層というように二重のコイル状に密に巻かれて収容されている。この保護抵抗 1 0 は、管状に構成された保護抵抗管 1 0 a、1 0 b を備えている。保護抵抗管 1 0 a は超電導コイル 4 a に対応し、保護抵抗管 1 0 b は超電導コイル 4 b に対応する。つまり、保護抵抗収容部 1 1 の内部において、保護抵抗管 1 0 a が上部に位置し、保護抵抗管 1 0 b が下部に位置する。

【 0 0 1 9 】

コイルボビン 5 を環状に取り巻く保護抵抗管 1 0 a、1 0 b には、「高沸点冷媒供給部」に相当する高沸点冷媒の給排出部 2 2 (供給部 2 2 a と排出配部 2 2 b) が接続されており、供給部 2 2 a から供給して排出配部 2 2 b から排出するというように、高沸点冷媒を、保護抵抗管 1 0 a、1 0 b の内部の高沸点冷媒通路 (内部空間 S) を通流させて、コイルボビン 5 (ひいては超電導コイル 4) を急速に冷却することができるようになっている。ちなみに、高沸点冷媒は、例えば液化窒素である。

この第 1 の実施形態では、保護抵抗管 1 0 a、1 0 b が連通して、実質的に 1 本の高沸点冷媒通路 (内部空間 S) を構成しており、給排出部 2 2 は 1 つであるが、保護抵抗管 1 0 a および 1 0 b がそれぞれ独立しているならば給排出部 2 2 は 2 つ設ける必要がある。また、給排出部 2 2 が、高沸点冷媒供給部 2 2 a と高沸点冷媒排出部 2 2 b を有することとしたが、すなわち、専用の入口と専用の出口を有することとしたが、入口出口が共用されるものであってもよい。

【 0 0 2 0 】

なお、保護抵抗 1 0 は、無酸素銅を代表とする常電導線、または無酸素銅と同等の電気的・磁氣的性質の常電導線を前記の超電導コイル 4 と磁氣的に結合しないように無誘導に巻線 (この例では密に巻線) したものである。無誘導に巻線するとは、例えば、時計回り向きの巻き線の数と、反時計回り向きの巻き線の数とを同じにするなどである。

【 0 0 2 1 】

次に、サーモサイフォン部 6 は、図 1 (a) (b) の位置関係を基準にして、超電導磁

10

20

30

40

50

石装置 1 の内部の右側に配置されている。より具体的には、本実施形態のサーモサイフォン部 6 は、図 1 (b) における 3 時の方向に配置されており、本体 (本体下部 6 a 、本体上部 6 b) 、および、本体下部 6 a の下端と本体上部 6 b の上端を結ぶ独立した冷媒下降流路部 6 c を主として構成されている。なお、冷媒下降流路部 6 c は、幅広の矩形状断面に構成されている。サーモサイフォン部 6 は、本体下部 6 a に冷媒 R の液溜めが形成され、超電導コイル 4 の発熱などの熱により気化して液溜めの表面から上昇する冷媒 R の蒸気は、本体上部 6 b へと案内され (詳細は後記する) 、そして、冷凍機 1 2 で液化され、液化された冷媒 R は、冷媒下降流路部 6 c の内部を重力により下降して、再び本体下部 6 a の液溜めに戻るように循環する。冷媒 R は、前記の高温冷媒である液化窒素よりも沸点の低い液化ヘリウムであり、冷媒供給部 2 3 a を介してサーモサイフォン部 6 の内部に供給され、冷媒排出部 2 3 b を介してサーモサイフォン部 6 の内部から排出されるように構成されている。

10

【 0 0 2 2 】

なお、本実施形態のサーモサイフォン部 6 は、超電導コイル 4 およびコイルボビン 5 の一部 (右端部分) を液密・気密を保持しつつ収容するように構成されている。そして、サーモサイフォン部 6 の内部において、該サーモサイフォン部 6 は、保護抵抗収容部 1 1 の内部と連通している。すなわち、本体下部 6 a と保護抵抗収容部 1 1 の下部とが連通し、本体上部 6 b と保護抵抗収容部 1 1 の上部とが連通している。このため、図 1 (a) (b) から理解されるように、冷媒 R の液溜めは、本体下部 6 a だけでなく、保護抵抗収容部 1 1 の下部 (保護抵抗管 1 0 b 同士の隙間) にも形成される。ちなみに、本体下部 6 a に形成される液溜めにおける冷媒 R の液面は、この例では、コイルボビン 5 の下端と超電導コイル 4 b の下端との間に位置している。

20

【 0 0 2 3 】

保護抵抗収容部 1 1 に収容されている保護抵抗 1 0 (保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b) が図 1 (a) に示されるように密に巻かれていると、冷媒 R が気化した蒸気は、鉛直方向 (真上) への上昇は阻害される。しかし、本実施形態では、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b の断面が円形であることから、密に巻かれても、隣接する保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b との間や、保護抵抗収容部 1 1 の内壁との間に隙間ができ、その隙間が、本体下部 6 a と本体上部 6 b とを連通する。すなわち、その隙間、つまり、(1) 保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b 同士の隙間と、(2) 保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b と保護抵抗収容部 1 1 の内壁との隙間が、液溜めの表面から上昇する冷媒 R の蒸気が本体上部 6 b へと向かう通路 (らせん状の通路) として機能し、冷媒 R の冷熱を全体に伝達するように、換言すると、超電導コイル 4 の発熱と外部からの侵入熱を奪って、超電導コイル 4 を冷却するように、また、温度の均一化を図るように、構成されている。

30

この隙間 (通路) を考慮すると、広い意味では、環状の保護抵抗収容部 1 1 も、サーモサイフォン部 6 を構成すると言える。

【 0 0 2 4 】

次に、超電導磁石装置 1 の回路を、図 2 を参照して説明する。

図 2 は、超電導電磁石装置 1 の回路を模式的に示す図である。

この図 2 に示されるように、また、前記したように、保護抵抗 1 0 は、保護抵抗管 1 0 a 、 1 0 b とで構成され、それぞれ複数ある超電導コイル 4 (4 a 、 4 b) に並列に設置されている。これらは、真空容器 2 の内部 (輻射シールド 3 の内部) に設置されているが、真空容器 2 の外には、励磁電源 1 3 、電流遮断器 1 4 、直流電源 1 6 が設置されている。なお、超電導コイル 4 並びに永久電流スイッチ 9 は臨界温度以下に保たれ、超電導状態となっている。また、保護抵抗 1 0 は、超電導コイル 4 並びに永久電流スイッチ 9 と、同じ温度レベルに冷やされている。

40

【 0 0 2 5 】

永久電流スイッチ 9 を開にした状態で励磁電源 1 3 から超電導コイル 4 に電流供給し、その後、永久電流スイッチ 9 を閉にした状態で励磁電源 1 3 からの供給電流をゼロにして電流遮断器 1 4 を開にすると、超電導コイル 4 および永久電流スイッチ 9 からなる超電導

50

状態の閉回路に電流がほとんど減衰することなく流れ続ける永久電流運転となる。これにより超電導電磁石装置 1 は、長期に渡って磁場を保持することが可能である。

【 0 0 2 6 】

超電導電磁石装置 1 は、前記のとおり、装置内部に設けたサーモサイフォン部 6 で冷媒 R を循環させて冷却することにより、超電導コイル 4 並びに永久電流スイッチ 9 を超電導状態に維持するサーモサイフォン方式を適用している。超電導電磁石装置 1 の中央部に設けた超電導コイル 4 からの発熱で気化した冷媒が、密度差による浮力で上昇し、冷凍機 1 2 で再度凝縮されて下降することで図中に示した矢印 2 0 の方向に冷媒が循環する。この冷却方式は浸漬冷却方式と比較して使用冷媒量を減らせる利点があるが、超電導コイルと冷媒との接触面積が小さいため、超電導電磁石装置を常温から冷却する初期冷却に要する時間が長くなるといった課題があった。また、停電による冷凍機の停止やコイル全体が常電導転移するクエンチ現象で超電導コイル 4 が温度上昇してしまう場合がある。浸漬冷却方式の場合、冷媒が蓄冷剤として作用して温度上昇を抑制することが可能であるが、上記のようなサーモサイフォン方式では、蓄冷剤として作用する部材が流路内に冷媒 R を除いて存在しないため、浸漬冷却と比較して温度上昇を抑制することが困難である。

10

【 0 0 2 7 】

そこで、本発明者らはこの点に着目し、以下に述べるように、超電導コイルに対して並列に設置された保護抵抗 1 0 と超電導コイル 4 並びにサーモサイフォン部 6 を熱的に接触させ、かつ、保護抵抗 1 0 の内部の高沸点冷媒通路にサーモサイフォン部 6 中を循環する冷媒 R (液化ヘリウム) より凝固点が高い冷媒 (液化窒素) を供給可能な流路 (内部空間 S) を設けることで、初期冷却時の冷却構造および、停電時やクエンチ時の温度上昇を抑制する蓄冷剤としての機能を両立させることとした。

20

以下、第 1 の実施形態に係る超電導磁石装置 1 の動作を説明する。

【 0 0 2 8 】

(高沸点冷媒による初期冷却)

室温からの初期冷却の際には、高沸点冷媒供給排出部 2 2 の高沸点冷媒供給部 2 2 a から、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b の内部に設けた高沸点冷媒通路に高沸点冷媒 (液化窒素) を供給する。高沸点冷媒通路が内部に設けられた保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b が熱的に超電導コイル 4 やコイルボビン 5 に接続されているため、さらには、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b が熱的にサーモサイフォン部 6 にも接続されているため、これら (装置内部) を潜熱や顕熱で冷却して蒸発・昇温し、高沸点冷媒排出部 2 2 b から排出される。高沸点冷媒を高沸点冷媒供給部 2 2 a から供給し続けることにより、装置内部の冷却が進み、高沸点冷媒の蒸発量が減少してくる。また、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b の内部、すなわち、高沸点冷媒通路 (内部空間 S) が高沸点冷媒で満たされてくる。

30

【 0 0 2 9 】

この保護抵抗 1 0 を介した冷却と並行して、冷媒供給排出部 2 3 の冷媒供給部 2 3 a から、サーモサイフォン部 6 にも高沸点冷媒 (液化窒素) を供給する。高沸点冷媒は、サーモサイフォン部 6 の内部を冷却することで、コイルボビン 5 (超電導コイル 4) や保護抵抗 1 0 を冷却する。

ちなみに、初期冷却の終了は、例えば、図示しない温度センサにより、装置内部の温度を計測することにより、および / または、高沸点冷媒排出部 2 2 b や冷媒排出部 2 3 b から排出される高沸点冷媒の温度を計測することにより、判定できる。

40

【 0 0 3 0 】

(低沸点冷媒による冷却)

高沸点冷媒による初期冷却の終了後、サーモサイフォン部 6 から初期冷却で用いた高沸点冷媒を除去し、今度は、それよりも沸点 (凝固点) が低い冷媒を、冷媒供給部 2 3 a からサーモサイフォン部 6 に供給することで、仕上げの冷却を行う。その際、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b の内部には、高沸点冷媒を溜めたままにしておく。

【 0 0 3 1 】

サーモサイフォン部 6 に供給された冷媒 R は、その顕熱と潜熱とで、コイルボビン 5 な

50

どを直接冷やしつつ（すなわち超電導コイル4を冷却しつつ）、装置内部を冷却して、蒸発・昇温し、冷媒排出部23bから排出される。ちなみに、本実施形態では、保護抵抗10（保護抵抗管10a, 10b）が密に巻かれているため、前記のとおり、蒸発した冷媒Rは鉛直方向（真上）への上昇ができないので、抵抗管同10a, 10b同士の隙間などを旋回しながら上昇していき、装置内部を冷却する。

【0032】

冷媒Rを冷媒供給部23aから供給し続けることにより、装置内部のさらなる冷却が進み、冷媒Rの蒸発量が減少し、サーモサイフォン部6の本体下部6aに冷媒Rの液溜めが形成され、超電導コイル4および永久電流スイッチ9が超電導状態になる。

なお、冷凍機12は、この時点で運転を開始してもよいし、この前でも後でも、任意の時点で運転を開始してもよい。

【0033】

前記のとおり、初期冷却の際に保護抵抗10の内部に供給した冷媒は除去せず保持する。このことにより、保護抵抗10の内部の冷媒は固化した状態で存在することになる。例えば窒素が固化した場合、温度30K以下での比熱は同体積の銀や銅と比較して2～3倍程度と大きく、蓄冷剤としての効果大きい。これにより冷凍機が停止した場合やクエンチ時の温度上昇の抑制が可能である。また、保護抵抗10は、前記のとおり、無酸素銅に代表される常電導線を超電導コイルとの磁気的な結合が生じないように無誘導に密巻きした構造をしており、かつ、図中のA-A'断面に示すようにその常電導線の隙間を冷媒が移動することが可能で周回方向への熱伝導経路を兼ねていることから、別途、熱伝導経路

【0034】

（まとめ）

このように本実施形態の超電導電磁石装置1は、初期冷却の際に保護抵抗10の内部に設けた流路に冷媒を供給することで、サーモサイフォン部6（冷媒循環経路）のみに冷媒を供給した場合と比較して短時間で初期冷却を終了することが可能である。また、保護抵抗10の内部に保持した冷媒が蓄冷剤として機能し、冷凍機が停止した場合やクエンチ時の温度上昇の抑制が可能である。そして、保護抵抗10は周回方向への熱伝導経路を兼ねていることから、別途設置する必要のある熱伝導経路を省略し、装置を小型化することが可能である。

【0035】

すなわち、強制冷却方式並びにサーモサイフォン方式を採用した超電導電磁石装置において、初期冷却時間を短縮すると共に、装置を大型化することなく冷凍機停止やクエンチ時の温度上昇を抑制することが可能な超電導電磁石装置1を提供することができる。

なお、保護抵抗管10a, 10bは、超電導コイル4の外周側に巻いているが、内周側に（内周側および／または外周側）に巻いてもよい。ここで、内周側とは、超電導コイル4とコイルボビン5の間やコイルボビン5の内周側が例としてあげられる（後記する第3の実施形態（図4）における超電導コイル4aなど参照）。

【0036】

第2の実施形態

次に、本発明を適用してなる第2の実施形態について、図3などを参照して説明する。

図3は、第2の実施形態に係る超電導電磁石装置1の断面図であり、（a）は中心位置での縦断面を、（b）は（a）のA-A'線での横断面を示す。

なお、第1の実施形態と同様の要素については、第1の実施形態で用いたのと同じ符号をその要素に付して、適宜説明を省略するものとする。

【0037】

この第2の実施形態は、サーモサイフォン部6が、超電導磁石装置1の3時の方向の位置に設けられている点で（図3（b）参照）、また、保護抵抗10が抵抗管10a, 10bとして構成され、その内部に高沸点冷媒通路（内部空間S）が形成されている点などで、図1に示す第1の実施形態と同じである。

【 0 0 3 8 】

しかし、図 3 に示されるように、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b が角型であり、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b 同士の間にも、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b と保護抵抗収容部 1 1 の内壁との間にも隙間がない。このため、第 1 の実施形態では、サーモサイフォン部 6 の内部に供給された初期冷却時の高沸点冷媒や初期冷却後の冷媒 R は、保護抵抗管 1 0 a , 1 0 b 同士の隙間などを通流して、中心軸 2 1 を中心にして旋回しながら本体下部 6 a から本体上部 6 b へと上昇することができたが、この第 2 の実施形態ではそれができない。したがって、第 2 の実施形態では、サーモサイフォン部 6 の内部に、初期冷却時の高沸点冷媒や初期冷却後の冷媒 R が上昇することができる、サーモサイフォン部 6 の内部に閉じた循環流路が設けられている。

10

【 0 0 3 9 】

すなわち、図 3 (a) (b) に示すように、第 2 の実施形態のサーモサイフォン部 6 は、冷媒降下流路部 6 c 、下部流路部 6 d 、冷媒上昇流路部 6 e 、上部流路部 6 f 、および、液溜め部 6 g を備え、これらがこの順に接続されて、初期冷却時には高沸点冷媒が初期冷却後には冷媒 R が、サーモサイフォン部 6 の内部にいきわたるよう、特に初期冷却後の通常運転時には、サーモサイフォンにより冷媒 R がサーモサイフォン部 6 の内部を循環し、冷却を促進するように構成されている。

なお、冷凍機 1 2 は、液溜め部 6 g の上部空間を冷却して冷媒 R の蒸気を液化するように配置されている。

20

【 0 0 4 0 】

ちなみに、この第 2 の実施形態では、冷媒上昇流路部 6 e は、並列した複数の流路に分割されている。その一つは、図 3 (b) に示されるように、サーモサイフォン部 6 の内部において、保護抵抗 1 0 を内周側と外周側の両側から挟み込むように配置された冷媒上昇流路部 6 e である。また、別の一つは、図 3 (a) に示されるように、保護抵抗 1 0 を上下方向に貫通して配置された冷媒上昇流路部 6 e である（「保護抵抗の内部を複数の冷媒循環流路が貫く」に相当）。この例では、この貫通して配置された冷媒上昇流路部 6 e は、図 3 (b) に示されるように 5 つある。

冷媒下降流路部 6 c は、第 1 の実施形態と同様に幅広の矩形断面に構成されている。この点は、下部流路部 6 d も同じである。

30

【 0 0 4 1 】

また、この第 2 の実施形態では、永久電流スイッチ 9 は、下部流路部 6 d の上部に熱的に接触するように配置されており、熱伝導により冷却されるように構成されている。

なお、冷媒供給排出部 2 3 の構成が第 1 の実施形態のそれと少し異なるものの、この第 2 の実施形態における、初期冷却の動作、初期冷却後の動作、クエンチ時における動作などは、第 1 の実施形態とほぼ同様であるので、説明を省略する。

【 0 0 4 2 】

この第 2 の実施形態によれば、第 1 の実施形態と同様の効果（急速冷却や蓄熱作用）が得られるだけでなく、第 1 の実施形態のような周方向への冷媒流路を省略することが可能であることから、冷媒 R が下降する冷媒固化流路部 6 c に対して冷媒 R が上昇する流路の体積（冷媒上昇流路部 6 e の内部の体積）を小さくし、その内部に存在する冷媒 R の質量の差を大きくすることで冷媒 R をより高い位置まで上昇させることが可能となる。ちなみに、液溜め部 6 g が上部に配置されていることや、第 1 の実施の形態に比べて冷媒 R の上昇経路の長さが短いこと（圧力損失が少ないこと）も、冷媒 R の液面の上昇に貢献する。このことから、装置の上下に複数の冷媒容器を配置する必要がなく、超電導電磁石装置 1 を小型化することが可能となる。

40

【 0 0 4 3 】

補足すると、図 3 (a) に示すように、液溜め部 6 g における冷媒 R の液面の高さや冷媒上昇流路部 6 e における冷媒 R の液面の高さは、冷媒上昇流路部 6 e の方が高くなり、上部流路部 6 f にまで液面が達する（かつ液溜め部 6 g に冷媒 R がオーバーフローする）。これは、冷媒上昇流路部 6 e の冷媒には、超電導コイル 4 の発熱などを受けて蒸発した冷

50

媒 R の蒸気が混在するため、この蒸気の浮力などにより冷媒下降流路部 6 c における冷媒 R の液面を押し上げる作用が生じるからである（冷媒 R 中に含まれる蒸気が多くなるほど単位体積当たりの質量は小さくなる）。このことなどにより、サーモサイフォンが構成され、図 3（a）において、冷媒 R が時計回りに循環する。

【 0 0 4 4 】

第 3 の実施形態

次に、本発明を適用してなる第 3 の実施形態について、図 4 などを参照して説明する。

図 4 は、第 3 の実施形態に係る超電導電磁石装置の断面図であり、（a）は中心位置での縦断面を、（b）は（a）の A - A' 線での横断面を示す。

なお、第 1 の実施形態などと同様の要素については、第 1 の実施形態などで用いたのと同じ符号をその要素に付して、適宜説明を省略するものとする。

【 0 0 4 5 】

この第 3 の実施形態は、図 1 に示す第 1 の実施形態と比較して、直径の異なる複数の超電導コイル 4 が存在し、超電導コイル 4 の中心軸 2 1 が水平方向を向いており、サーモサイフォン部 6 における冷媒 R は、複数ある超電導コイル 4 の外周面を周方向に沿いながら鉛直方向上側に向かう点で異なる。

すなわち、この第 3 の実施形態は、「超電導コイルの中心軸は水平方向を向き、保護抵抗は超電導コイルの外周面、内周面、ボビンのいずれかに熱的に接触される」というものである。

【 0 0 4 6 】

ちなみに、第 3 の実施形態の超電導磁石装置 1 は、例えば、医療分野における磁気共鳴画像（Magnetic Resonance Imaging）装置に適用されるものであり、超電導コイル 4 として、超電導コイル 4 b , 4 c（主コイル）のほかに、超電導コイル 4 a , 4 d（シールドコイル）を備えて、装置のほぼ中央に撮像領域が構成される。また、保護抵抗 1 0 も、4 つの超電導コイル 4（4 a ~ 4 d）に対応して 4 つ（保護抵抗管 1 0 a ~ 1 0 d）を備えている。このうち、保護抵抗 1 0 a , 1 0 d は、対応する超電導コイル 4 a , 4 d の内周側に、当該超電導コイル 4 a , 4 d と熱的に接触して密に巻かれている。また、保護抵抗 1 0 b , 1 0 c は、対応する超電導コイル 4 b , 4 c の外周側に、当該超電導コイル 4 b , 4 c と熱的に接触して密に巻かれている。すなわち、この第 3 の実施形態では、第 1 の実施形態での保護抵抗収容部 1 1 が省略されている。

なお、符号 6 a ~ 6 c は、第 1 の実施形態と同じである。

【 0 0 4 7 】

この第 3 の実施形態の超電導磁石装置 1 は、直径が異なる複数の超電導コイル 4 が存在し、その中心軸 2 1 が水平方向を向いた超電導電磁石装置 1（トンネル型の M R I 装置）であるが、この第 3 の実施形態でも、第 1 の実施形態などと同様の効果を得ることができ、超電導電磁石装置 1 を小型することなどが可能である。

なお、前記した第 1 の実施形態や第 2 の実施形態の超電導磁石装置を、この第 3 の実施形態のような M R I 装置に適用してもよい。

【 0 0 4 8 】

第 4 の実施形態

次に、本発明を適用してなる第 4 の実施形態について、図 5 A や図 5 B などを参照して説明する。

図 5 A は、第 4 の実施形態に係る超電導電磁石 1 の断面図であり、（a）は中心位置での縦断面を、（b）は（a）の A - A' 線での横断面を示す。図 5 B も、第 4 の実施形態に係る超電導磁石装置 1 の断面図であり、（a）は図 5 A（a）の B - B' 線での横断面を、（b）は図 5 A（a）の C - C' 線での横断面を示す。

なお、第 1 の実施形態などと同様の要素については、第 1 の実施形態などで用いたのと同じ符号をその要素に付して、適宜説明を省略するものとする。

【 0 0 4 9 】

この第 4 の実施形態の超電導磁石装置 1 は、オープン型の M R I 装置であり（例えば特

開2011-194136号公報の図1など参照)、トンネル型のMRI装置である第3の実施形態の超電導磁石装置1(図4参照)とは形式が異なる。具体的には、超電導磁石装置1は、装置が上側と下側に別れており、装置の上側が2本の支柱1a, 1bを介して装置の下側に支持されており、装置の上側と下側の間に開口部24が形成されている。ちなみに、開口部24を挟んで、装置の上側に超電導コイル4a, 4bが配置され、下側に超電導コイル4c, 4dが配置されている。このうち、超電導コイル4b, 4cが主コイルであり、超電導コイル4a, 4dがシールドコイルである。

すなわち、この第4の実施形態は、「超電導コイルの中心軸は鉛直方向を向き、超電導コイルは水平方向に設けた開口部を挟んで配置される」というものである。

【0050】

10

コイルボビン5は、装置の上側と下側にそれぞれあり、各コイルボビン5には、対応する各超電導コイル4が外周側から巻き付けられている。そして、各超電導コイル4には、対応する保護抵抗10(保護抵抗管10a~10d)が外周側から巻き付けられている。各保護抵抗管10a~10dは内部が連通しており、高沸点冷媒供給部22aから供給された高沸点冷媒が保護抵抗管10a 保護抵抗管10b 保護抵抗管10c 保護抵抗管10d の順にとおり、高沸点冷媒排出部22bから排出されるようになっている。なお、図5Aなどでは、各保護抵抗管10a~10dの間の接続関係の図示は省略している。

【0051】

この第4の実施形態のサーモサイフォン部6は、冷媒降下流路部6c、下部流路部6d、冷媒上昇流路部6e1, 6e2、上部流路部6f、および、液溜め部6gを備え、これらがこの順に接続されている。また、冷媒供給排出部23が、液溜め部6gの上部空間と外部とを接続している。そして、初期冷却時には高沸点冷媒が、初期冷却後には冷媒Rが、それぞれサーモサイフォン部6の内部にいきわたるよう、冷媒共有排出部23から導入され、初期冷却後の通常運転時には、冷却を促進するように、サーモサイフォンにより、冷媒Rがサーモサイフォン部6の内部を循環される。

20

ちなみに、この第4の実施形態の超電導磁石装置1におけるサーモサイフォン部6の動作は、第2の実施形態のそれに近いので、第2の実施形態とほぼ同じ符号を付している。

【0052】

なお、図5A(b)に示すように、下部流路部6dは、装置の端から端までを横断するように設けられている。冷媒Rの流れを基準に、下部流路部6dの始端に冷媒降下流路部6cの終端(下端)が接続され、下部流路部6dの終端に冷媒上昇流路部6e1の始端(下端)が接続され、下部流路部6dの始端に近い側に冷媒上昇流路部6e2の始端(下端)が接続されている。そして、冷媒下降流路部6cからの冷媒Rの流れを、冷媒上昇流路部6e1, 6e2に振り分けるようにしている(図5B(a)参照)。

30

また、上部流路部6fは、冷媒上昇流路部6e1, 6e2と液溜め部6gの間に位置するが、この上部流路部6fは、下部流路部6dに対応した構成なので、説明を省略する。

【0053】

冷媒上昇流路部6e1, 6e2の内、冷媒上昇流路部6e1は、支柱1aの内部を通されており、冷媒上昇流路部6e2は、支柱1bの内部を通されている。そして、冷媒上昇流路部6e1, 6e2は、超電導コイル4a~4dと保護抵抗管10a~10dが巻かれたコイルボビン5a~5dの外周の形状に沿うように、屈曲しながら立ち上がるように構成されており、超電導コイル4a~4dの冷却を促進するようにされている。

40

【0054】

この第4の実施形態でも、初期冷却時には、保護抵抗10(保護抵抗管10a~10d)を介してと、サーモサイフォン部6を介しての、高沸点冷媒による冷却が行われる。このため、従来のように、サーモサイフォン部6を介してだけよりも、より急速な冷却が可能である。また、保護抵抗管10a~10dの内部の高沸点冷媒通路(内部空間S)に高沸点冷媒(液化窒素)を残留させたまま冷媒R(液化ヘリウム)による冷却を行い、高沸点冷媒を凍結させるので、高沸点冷媒の高い比熱(さらには融解熱)により、クエンチ時などにおける熱的安定性が向上する。

50

【 0 0 5 5 】

また、この第 4 の実施形態によれば、超電導コイル 4 の外側に巻き付けられた保護抵抗 1 0 による周方向への熱伝導に加えて、複数設けた冷媒流路（中心軸 2 1 を挟んで対抗する位置に設けられた冷媒上昇流路 6 e 1 , 6 e 2 ）によって周方向への冷却効率が向上する。また、このような構造をとることで、開口部 2 4 を挟んで複数の超電導コイル 4 が配置された超電導電磁石装置 1 でも上下に複数の冷媒容器を配置する必要がなく、超電導電磁石装置 1 を小型化することが可能となる。

【 0 0 5 6 】

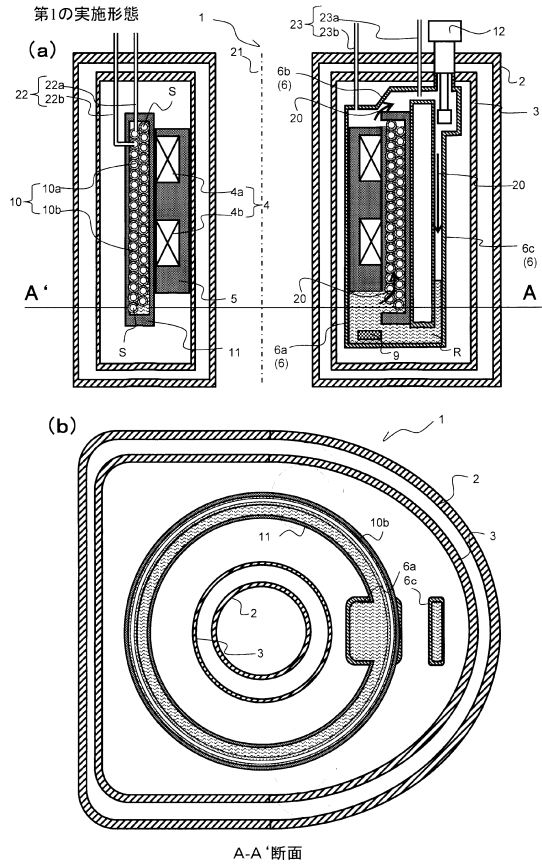
なお、第 4 の実施形態では、支柱が符号 1 a , 1 b の 2 つある例を示したが、支柱が 1 つしかないタイプのオープン型の M R I 装置にも適用することができる。この場合は、1 つの支柱に、冷媒降下流路 6 c と冷媒上昇流路 6 e (6 e 1 , 6 e 2) や、保護抵抗管 1 b , 1 0 c を連通させる部材などが収容される。ちなみに、冷媒上昇流路 6 e 1 , 6 e 2 を合流させて 1 つの流路として支柱を通過させ、通過後に分岐するようにしてもよい。また、冷媒上昇流路 6 e は、符号 6 e 1 , 6 e 2 の 2 が存在する例を示したが、全体として、1 つでも、3 つ以上でもよい。

【 符号の説明 】

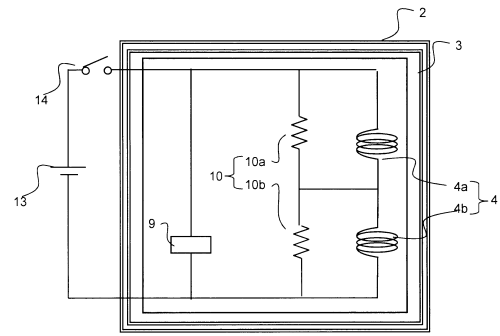
【 0 0 5 7 】

1	超電導電磁石装置	
2	真空断熱容器	
3	輻射シールド	20
4、4 a、4 b、4 c、4 d	超電導コイル	
5	コイルボビン	
6	サーモサイフォン部（冷媒循環流路）	
6 a	本体下部	
6 b	本体上部	
6 c	冷媒降下流路部	
6 d	下部流路部	
6 e	冷媒上昇流路部	
6 f	上部流路部	
6 g	液溜め部	30
9	永久電流スイッチ	
1 0	保護抵抗	
1 0 a	抵抗管部	
1 0 b	高沸点冷媒通路部	
1 1	・ BR>@ 保護抵抗収容部	
1 2	冷凍機	
1 3	直流電源	
1 4	電流遮断器	
2 0	気化した冷媒の進行方向を示す矢印	
2 1	超電導電磁石装置の中心軸	40
2 2	高沸点冷媒供給排出部（高沸点冷媒供給部、外部につながる流路）	
2 2 a	高沸点冷媒供給部	
2 2 b	高沸点冷媒排出部	
2 3	冷媒供給排出部	
2 3 a	冷媒供給部	
2 3 b	冷媒排出部	
2 4	開口部	
S	内部空間	

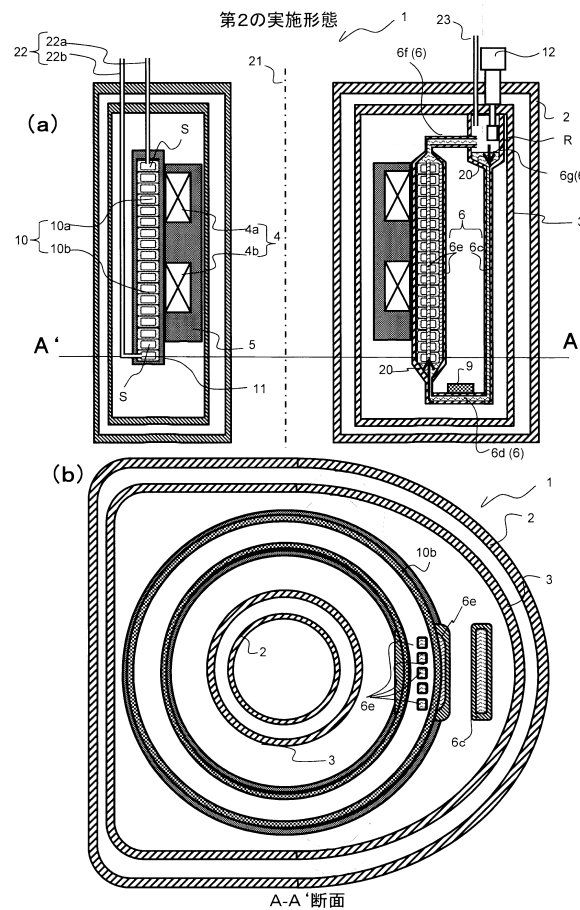
【図 1】



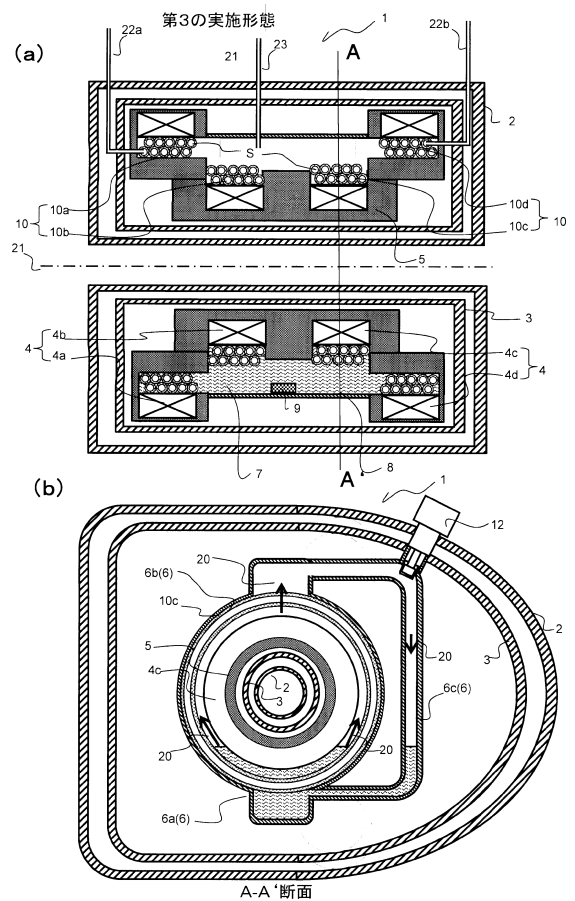
【図 2】



【図 3】



【図 4】



フロントページの続き

(72)発明者 村田 幸弘

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内

(72)発明者 中川 竜司

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内

審査官 堀 拓也

(56)参考文献 特開平11-219814(JP,A)

特開平11-233334(JP,A)

特表2005-530976(JP,A)

特開平8-222429(JP,A)

特開2000-182821(JP,A)

特開2005-124721(JP,A)

特開昭58-61608(JP,A)

特開平9-106908(JP,A)

特開2012-178485(JP,A)

特開2003-303713(JP,A)

特開2002-324707(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01F 6/04

A61B 5/055

G01R 33/3815

H01F 6/02