

(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2006-93723

(P2006-93723A)

(43) 公開日 平成18年4月6日(2006.4.6)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 F 6/04 (2006.01)	HO 1 F 7/22 ZAAG	4M114
HO 1 L 39/04 (2006.01)	HO 1 L 39/04	

審査請求 有 請求項の数 11 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2005-301522 (P2005-301522)	(71) 出願人	000006013 三菱電機株式会社
(22) 出願日	平成17年10月17日 (2005.10.17)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(62) 分割の表示	特願平9-328744の分割	(74) 代理人	100057874 弁理士 曾我 道照
原出願日	平成9年11月28日 (1997.11.28)	(74) 代理人	100110423 弁理士 曾我 道治
		(74) 代理人	100084010 弁理士 古川 秀利
		(74) 代理人	100094695 弁理士 鈴木 憲七
		(74) 代理人	100111648 弁理士 梶並 順

最終頁に続く

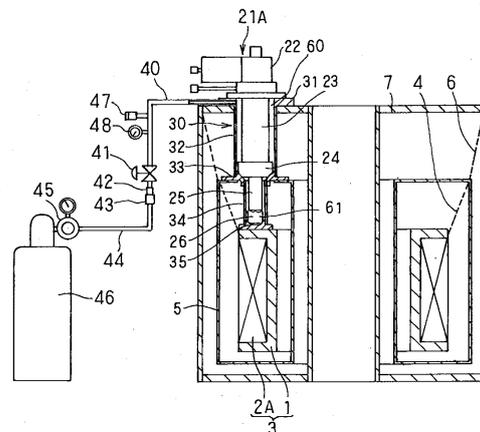
(54) 【発明の名称】 超電導磁石装置

(57) 【要約】

【課題】この発明は、多段式蓄冷型冷凍機の交換性を容易にし、超電導コイルと多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージとの間の熱抵抗を低減できる超電導磁石装置を得る。

【解決手段】冷凍機取付シリンダ30は、第1および第2取付熱接続部33, 35を熱シールド5および超電導コイルカートリッジ3に熱接続させて真空容器7に気密に取り付けられている。2段式蓄冷型冷凍機21Aは、第1および第2熱ステージ24, 26を第1および第2取付熱接続部33, 35に熱接続されて冷凍機取付シリンダ30に気密に取り付けられている。そして、ヘリウムガス60がヘリウム導入管40を介して2段式蓄冷型冷凍機21Aと冷凍機取付シリンダ30との間に充填されている。

【選択図】 図1



- |                 |               |
|-----------------|---------------|
| 2A: 超電導コイル      | 30: 冷凍機取付シリンダ |
| 3: 超電導コイルカートリッジ | 32: 第1取付シリンダ  |
| 5: 熱シールド        | 33: 第1取付熱接続部  |
| 7: 真空容器         | 34: 第2取付シリンダ  |
| 21A: 2段式蓄冷型冷凍機  | 35: 第2取付熱接続部  |
| 23: 第1シリンダ      | 40: ヘリウム導入管   |
| 24: 第1熱ステージ     | 41: 締切弁       |
| 25: 第2シリンダ      | 60: ヘリウムガス    |
| 26: 第2熱ステージ     | 61: 液体ヘリウム    |

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

真空容器と、この真空容器内に配設された超電導コイルを有する超電導コイルカートリッジと、この超電導コイルカートリッジを囲繞するように上記真空容器内に配設された熱シールドと、複数の取付シリンダが各段の取付熱接続部を介して連結されて構成され、各段の取付熱接続部がそれぞれ上記熱シールドおよび上記超電導コイルカートリッジに熱的に接続されて上記真空容器に気密に取り付けられた冷凍機取付シリンダと、各段の熱ステージがそれぞれ上記冷凍機取付シリンダの各段の取付熱接続部に熱的に接続されて該冷凍機取付シリンダに取り付けられ、上記超電導コイルカートリッジを介して上記超電導コイルを略 4 K まで伝導冷却する略 4 K 冷却用の多段式蓄冷型冷凍機とを備えた超電導磁石装置において、

10

上記冷凍機取付シリンダと上記多段式蓄冷型冷凍機との間の空間に、常温部からのヘリウムガスを供給可能にするヘリウムガス導入管を上記冷凍機取付シリンダに設けたことを特徴とする超電導磁石装置。

## 【請求項 2】

常温で供給されたヘリウムガスを上記多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージと上記冷凍機取付シリンダとの間の空間において少なくともその一部を液化することにより、上記多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージと上記冷凍機取付シリンダとの熱接続部の熱抵抗を低減させることを特徴とする請求項 1 記載の超電導磁石装置。

## 【請求項 3】

上記冷凍機取付シリンダのヘリウム導入管に締切弁を備えていることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 記載の超電導磁石装置。

20

## 【請求項 4】

液体ヘリウム貯液容器が上記冷凍機取付シリンダの最終段の取付熱接続部の外周部に配設され、液体ヘリウム導入路が上記冷凍機取付シリンダと上記液体ヘリウム貯液容器とを連通するように上記最終段の取付熱接続部に穿設されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 3 のいずれかに記載の超電導磁石装置。

## 【請求項 5】

上記液体ヘリウム貯液容器の一部に熱接続部が設けられ、上記超電導コイルカートリッジが上記熱接続部を介して上記液体ヘリウム貯液容器に熱接続されていることを特徴とする請求項 4 記載の超電導磁石装置。

30

## 【請求項 6】

複数の超電導コイルカートリッジが分散配置され、上記複数の超電導コイルカートリッジが上記熱接続部を介して上記液体ヘリウム貯液容器にそれぞれ熱接続されていることを特徴とする請求項 5 記載の超電導磁石装置。

## 【請求項 7】

上記冷凍機取付シリンダ内のヘリウムガスの膨張に伴う圧力上昇を緩和する容器が上記ヘリウムガス導入管の常温部に設けられていることを特徴とする請求項 3 記載の超電導磁石装置。

## 【請求項 8】

上記多段式蓄冷型冷凍機のシリンダの外径と上記冷凍機取付シリンダの取付シリンダの内径とが上記熱ステージの外径と略一致するように構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 のいずれかに記載の超電導磁石装置。

40

## 【請求項 9】

低熱伝導率材からなる詰め物が上記冷凍機取付シリンダの取付シリンダと上記多段式蓄冷型冷凍機のシリンダとの隙間に挿入されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 8 のいずれかに記載の超電導磁石装置。

## 【請求項 10】

上記冷凍機取付シリンダの取付シリンダが繊維強化樹脂で作製されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 9 のいずれかに記載の超電導磁石装置。

50

## 【請求項 11】

上記繊維強化樹脂はカーボン繊維強化樹脂であることを特徴とする請求項 10 記載の超電導磁石装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

この発明は、超電導コイルを多段式蓄冷型冷凍機で冷却する超電導磁石装置に関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

超電導磁石装置は、強い磁場を発生させるための装置で、超電導コイルを極低温に冷却し、電気抵抗がゼロで電流が流れる超電導状態として使用している。このため、ジュール発熱がなく、常電導磁石装置に比べて、強い磁場を少ない電力で発生させることが可能となる。

この種の超電導磁石装置においては、超電導コイルを冷却するために、従来液体ヘリウムが使用されていた。しかしながら、液体ヘリウムは、蒸発潜熱が非常に小さいので、取り扱いが難しく、また高価であった。そこで、冷凍機で直接超電導コイルを冷却する方式が提案されている。

## 【0003】

図 9 は例えば特許文献 1 に記載された従来超電導磁石装置を示す断面図である。

図において、超電導コイルカートリッジ 3 は、Nb<sub>3</sub>Sn 製の超電導コイル 2 がアルミニウム等の金属で作製された支持体 1 に取り付けられて構成されている。この超電導コイルカートリッジ 3 は、真空容器 7 内に配設された熱シールド 5 内に収容されている。この真空容器 7 は、内部を高真空に保持されて、超電導コイルカートリッジ 3 や熱シールド 5 への熱侵入を低減している。そして、超電導コイルカートリッジ 3 は熱シールド 5 に第 2 断熱サポート 4 により断熱支持され、熱シールド 5 は第 1 断熱サポート 6 により真空容器 7 に断熱支持されている。

ここで、第 2 および第 1 断熱サポート 4、6 は熱伝導率が小さく、かつ、強度の大きな材料、例えば GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) で作製されている。また、熱シールド 5 は熱伝導率が大きなアルミニウムや銅、あるいはそれらの合金で作製されている。

## 【0004】

2 段式蓄冷型冷凍機 21 は、駆動部 22、第 1 シリンダ 23、第 1 熱ステージ 24、第 2 シリンダ 25、第 2 熱ステージ 26、ガス配管 27 および圧縮機 28 から構成され、その第 1 および第 2 熱ステージ 24、26 により熱シールド 5 および超電導コイルカートリッジ 3 をそれぞれ 50 K 程度および 8 K 程度に冷却するものである。また、冷凍機取付シリンダ 30 は、2 段式蓄冷型冷凍機 21 を着脱可能にし、その保守や交換を容易にするためのもので、取付フランジ 31、第 1 取付シリンダ 32、第 1 取付熱接続部 33、第 2 取付シリンダ 34 および第 2 取付熱接続部 35 から構成されている。この取付シリンダ 30 は、その取付フランジ 31 を真空容器 7 に気密に取り付けられ、外部から真空容器 7 および熱シールド 5 を貫通して挿入されている。そして、第 1 取付熱接続部 33 が熱シールド 5 に熱接続され、第 2 取付熱接続部 35 が超電導コイルカートリッジ 3 に熱接続されている。さらに、2 段式蓄冷型冷凍機 21 が、第 1 熱ステージ 24 を第 1 取付熱接続部 33 に熱接続され、第 2 熱ステージ 26 を第 2 取付熱接続部 35 に熱接続されるように、取付シリンダ 30 内に挿入されている。

## 【0005】

つぎに、従来の超電導磁石装置の動作について説明する。

2 段式蓄冷型冷凍機 21 を運転すると、超電導コイルカートリッジ 3 の熱エネルギーは第 2 取付熱接続部 35 を介して第 2 熱ステージ 26 で吸収される。そこで、超電導コイルカートリッジ 3 は、2 段式蓄冷型冷凍機 21 の第 2 熱ステージ 26 が吸収できる熱エネルギー

10

20

30

40

50

ギーの量、即ち冷凍能力と外部から伝導や輻射で侵入する熱エネルギーとがつり合う温度になる。この時、熱エネルギーを吸収するためには、熱抵抗に応じた温度勾配が必要であるので、超電導コイルカートリッジ 3 - 第 2 取付熱接続部 3 5 - 第 2 熱ステージ 2 6 の間の熱抵抗を小さくする必要がある。特に、第 2 取付熱接続部 3 5 - 第 2 熱ステージ 2 6 は着脱可能に構成されているので、他の部分に比べて熱抵抗が大きくなる可能性があり、注意が必要である。超電導コイル 2 の運転温度は、超電導コイル 2 が安定して強い磁場を発生できるように、発生する磁場強度、超電導線の材質を考慮して設計される。この従来例では、超電導線に  $\text{Sn}_3\text{Nb}$  を選んでいるので、超電導コイルの運転温度は 1 2 K 程度であり、冷凍能力特性から 1 K 程度の温度勾配は許される。

#### 【0006】

また、同様に、熱シールド 5 の熱エネルギーは、第 1 取付熱接続部 3 3 を通じて第 1 熱ステージ 2 4 で吸収される。そこで、熱シールド 5 は、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 の第 1 熱ステージ 2 4 が吸収できる熱エネルギーの量、即ち冷凍能力と外部から伝導や輻射で侵入する熱エネルギーとがつり合う温度になる。この温度は、通常 5 0 K 程度になるように設計されている。

また、上述の特許文献 1 には明記されていないが、その構造から 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 を取り付けて運転すると、取付シリンダ 3 0 と 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 との間の空気が冷却されて、ほぼ真空状態になると考えられるので、熱エネルギーの移動は熱伝導が主となる。そして、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 を交換する際には、真空状態だと力を受けるので、超電導コイルカートリッジ 3 と熱シールド 5 の温度を常温まで上げる必要がある。

#### 【0007】

従来の超電導磁石装置は、この状態で外部電源（図示せず）から電流を供給するパワーリード（図示せず）を用いて超電導コイル 2 に電流を流し、強い磁場を発生させる。この種の超電導磁石装置が用いられる代表的な例は医療用の MRI 装置である。このような装置では、同じ強さの磁場を安定して発生させる必要があるので、超電導スイッチを用いて、永久電流状態で運転されている。そして、このような装置では、装置の安全性が人命に影響する場合も考えられるので、高い信頼性が要求される。

#### 【0008】

上記従来の超電導磁石装置では、超電導コイル 2 として  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  で作製された超電導線が用いられている。これは、蓄冷材に鉛を用いた 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 の到達温度が 8 K 程度であり、 $\text{NbTi}$  の超電導線を用いた超電導コイルの冷却温度である 4 K まで冷却できなかつたからである。しかし、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  の超電導線は化合物であり、もろいため製作が難しく、また高価であるという課題があった。

#### 【0009】

近年、磁性蓄冷材を用いて 4 K での冷凍発生を可能にした 2 段式蓄冷型冷凍機が開発され、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  に比べて作製しやすく安価な  $\text{NbTi}$  の超電導線を用いた超電導コイルを直接冷却する方式が提案されている。

図 1 0 は従来の超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

この図 1 0 に示された従来の超電導磁石装置では、伝熱板 5 0 が  $\text{NbTi}$  の超電導線を用いた超電導コイル 2 A の周りに巻かれ、熱伝導部材 5 1 が 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の第 2 熱ステージ 2 6 と伝熱板 5 0 との間に設置され、磁性蓄冷材を用いた 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A により超電導コイル 2 A を直接冷却するように構成されている。

また、4 K で冷凍を発生するには多くの電力が必要となる。2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の冷凍能力特性の一例を図 1 1 に示す。図 1 1 から、4 K 付近では冷凍能力が大きく変化していることが理解される。熱抵抗が大きく、温度差が 1 K の場合は、超電導コイル 2 A の温度を 4 . 2 K にするためには、第 2 熱ステージ 2 6 の温度を 3 . 2 K にする必要がある。図 1 1 から、冷凍能力は 4 . 2 K では 0 . 5 W であるが、3 . 2 K では 0 . 1 W に激減していることが理解される。この結果、温度差が 1 K つくと、5 倍大きな冷凍機が必要となり、消費電力等の点から非常に不利となる。そこで、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A を用いた超電導磁石装置においては、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 を用いた超電導磁石装置に比

10

20

30

40

50

べて、熱抵抗を極めて少なくし、超電導コイル 2 A と第 2 熱ステージ 2 6 との温度勾配を少なくすることが肝要となる。

【 0 0 1 0 】

そこで、従来、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の第 2 熱ステージ 2 6 を超電導コイルカートリッジ 3 に直接取り付けられる方式が提案されている。しかし、この方式では、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A を直接真空容器 7 に取り付けることになり、冷凍機の交換が困難となってしまう。また、超電導コイルカートリッジ 3 を構成する銅やアルミニウム、NbTi 線材の比熱は 4 K では非常に小さくなる。このため、支持体 1 や超電導コイル 2 A の 4 K での熱容量は小さく、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が停止すると、超電導コイル 2 A の温度が容易に上昇してしまう。そこで、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A は冷凍能力を安定して発生させるよう高い信頼性が要求される。

10

また、この種の超電導磁石装置が小物の物性測定装置等に使用される場合には、磁場を大きく変化させる必要があり、電源を接続した状態で使用される。このような場合には、頻りに運転と停止を繰り返すので、MRI 装置等に比べて信頼性に対する要求は小さいが、使いやすさと安全性が要求される。

【 0 0 1 1 】

【特許文献 1】特開平 5 - 5 9 5 6 8 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 2 】

図 9 に示される従来の超電導磁石装置では、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 が、その第 1 および第 2 熱ステージ 2 4、2 6 を熱シールド 5 および超電導コイルカートリッジ 3 に熱接続されている第 1 および第 2 熱接続部 3 3、3 5 に熱接続するように取付シリンダ 3 0 内に挿入し、取り付けられているので、熱接続部での熱抵抗が大きくなり、大きな冷凍能力の 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 が必要となるとともに、消費電力の点から不利になるという課題があった。また、その運転状態において、取付シリンダ 3 0 と 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 との間が真空状態となっており、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 を交換する際に、超電導コイルカートリッジ 3 と熱シールド 5 の温度を常温まで上げる必要があり、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 の交換に時間を要するという課題もあった。

20

【 0 0 1 3 】

また、図 1 0 に示される従来の超電導磁石装置では、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の第 2 熱ステージ 2 6 が熱伝導部材 5 1 および伝熱板 5 0 を介して超電導コイル 2 A に熱接続されているので、熱接続部での熱抵抗が大きくなり、大きな冷凍能力の 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が必要となるとともに、消費電力の点から不利になるという課題があった。また、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が真空容器 7 に直接取り付けられているので、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の交換に際しては、真空容器 7 内の真空状態を破らないように、シリンダ等の外筒部を残して内部構成部品を引き抜いての交換となり、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の交換が困難となるという課題もあった。さらに、超電導コイルカートリッジ 3 の 4 K での熱容量が小さいので、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が停止した際に超電導コイル 2 A の温度が短時間に上昇し、超電導状態が容易に破られてしまうという課題もあった。

30

40

【 0 0 1 4 】

また、図 1 0 に示される従来の超電導磁石装置の改良装置では、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の第 2 熱ステージ 2 6 が超電導コイルカートリッジ 3 に直接熱接続されているので、超電導コイルカートリッジ 3 の 4 K での熱容量が小さく、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が停止した際に超電導コイル 2 A の温度が短時間に上昇し、超電導状態が容易に破られてしまうという課題があった。また、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が真空容器 7 に直接取り付けられているので、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の交換に際しては、真空容器 7 内の真空状態を破らないように、シリンダ等の外筒部を残して内部構成部品を引き抜いての交換となり、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A の交換が困難となるという課題もあった。

【 0 0 1 5 】

50

この発明は、上記のような課題を解決するためになされたもので、多段式蓄冷型冷凍機の交換性を容易にし、超電導コイルと多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージとの間の熱抵抗を低減できる超電導磁石装置を得ることを目的とする。

また、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際にも、超電導コイルの温度上昇を抑え、超電導状態を長時間維持できる超電導磁石装置を得ることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0016】

この発明は、真空容器と、この真空容器内に配設された超電導コイルを有する超電導コイルカートリッジと、この超電導コイルカートリッジを囲繞するように上記真空容器内に配設された熱シールドと、複数の取付シリンダが各段の取付熱接続部を介して連結されて構成され、各段の取付熱接続部がそれぞれ上記熱シールドおよび上記超電導コイルカートリッジに熱的に接続されて上記真空容器に気密に取り付けられた冷凍機取付シリンダと、各段の熱ステージがそれぞれ上記冷凍機取付シリンダの各段の取付熱接続部に熱的に接続されて該冷凍機取付シリンダに取り付けられ、上記超電導コイルカートリッジを介して上記超電導コイルを略4Kまで伝導冷却する略4K冷却用の多段式蓄冷型冷凍機とを備えた超電導磁石装置において、上記冷凍機取付シリンダと上記多段式蓄冷型冷凍機との間の空間に、常温部からのヘリウムガスを供給可能にするヘリウムガス導入管を上記冷凍機取付シリンダに設けたものである。

10

【発明の効果】

【0017】

この発明によれば、多段式蓄冷型冷凍機の交換性を容易にし、超電導コイルと多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージとの間の熱抵抗を低減できるとともに、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際にも、超電導コイルの温度上昇を抑え、超電導状態を長時間維持できる超電導磁石装置を得ることができる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

以下、この発明の実施の形態を図について説明する。

実施の形態1.

図1はこの発明の実施の形態1に係る超電導磁石装置を示す断面図である。

図において、超電導コイルカートリッジ3は、NbTi製の超電導コイル2Aがアルミニウムの金属で作製された支持体1に取り付けられて構成されている。この超電導コイルカートリッジ3は、真空容器7内に配設された熱シールド5内に收容されている。この真空容器7は、内部を高真空に保持されて、超電導コイルカートリッジ3や熱シールド5への熱侵入を低減している。そして、超電導コイルカートリッジ3は熱シールド5に第2断熱サポート4により断熱支持され、熱シールド5は第1断熱サポート6により真空容器7に断熱支持されている。

30

ここで、第2および第1断熱サポート4、6は熱伝導率が小さく、かつ、強度の大きな材料、例えばGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)で作製されている。また、熱シールド5は熱伝導率が大きなアルミニウムや銅、あるいはそれらの合金で作製されている。

40

【0019】

2段式蓄冷型冷凍機21Aは、駆動部22、第1シリンダ23、第1熱ステージ24、第2シリンダ25、第2熱ステージ26、さらに図示していないがガス配管および圧縮機から構成され、第2シリンダ25内の蓄冷材としてGdRh, Gd0.5Er0.5Rh等の磁性蓄冷材を用い、その第1および第2熱ステージ24、26により熱シールド5および超電導コイルカートリッジ3をそれぞれ50K程度および4K程度に冷却するものである。また、冷凍機取付シリンダ30は、2段式蓄冷型冷凍機21Aを着脱可能にし、その保守や交換を容易にするためのもので、取付フランジ31、第1取付シリンダ32、第1取付熱接続部33、第2取付シリンダ34および第2取付熱接続部35から構成されている。この取付シリンダ30は、その取付フランジ31を真空容器7に気密に取り付けら

50

れ、外部から真空容器 7 および熱シールド 5 を貫通して挿入されている。そして、第 1 取付熱接続部 3 3 が熱シールド 5 に熱接続され、第 2 取付熱接続部 3 5 が超電導コイルカートリッジ 3 に熱接続されている。さらに、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が、第 1 熱ステージ 2 4 を第 1 取付熱接続部 3 3 に熱接続され、第 2 熱ステージ 2 6 を第 2 取付熱接続部 3 5 に熱接続されるように、取付シリンダ 3 0 に挿入され気密に取り付けられている。

ここで、各シリンダには例えばステンレススチールが用いられ、各熱ステージおよび各取付熱接続部には例えば銅やアルミニウムが用いられる。

#### 【0020】

また、ヘリウム導入管 4 0 がその一端を取付シリンダ 3 0 の内部に臨むように取付フランジ 3 1 に取り付けられている。そして、第 1 の継ぎ手 4 2 がこのヘリウム導入管 4 0 の他端に取り付けられている。さらに、締切弁 4 1、安全弁 4 7 および圧力計 4 8 がヘリウム導入管 4 0 に取り付けられている。

10

また、配管 4 4 がヘリウム容器 4 6 に接続され、第 2 の継ぎ手 4 3 が配管 4 4 の他端に取り付けられている。そして、減圧弁 4 5 が配管 4 4 に取り付けられている。

#### 【0021】

このように構成された超電導磁石装置を運転する際には、まず第 1 の継ぎ手 4 2 と第 2 の継ぎ手 4 3 とを接続してヘリウム導入管 4 0 と配管 4 4 とを連結し、締切弁 4 1 を開け、減圧弁 4 5 により大気圧程度に減圧されたヘリウムガス 6 0 をヘリウム容器 4 6 から配管 4 4、締切弁 4 1 およびヘリウム導入管 4 0 を介して取付シリンダ 3 0 内に導入する。

2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が運転され、初期冷却が進むと、取付シリンダ 3 0 内に導入されたヘリウムガス 6 0 が冷却されて減圧弁 4 5 の設定値以下の圧力となると、新たなヘリウムガス 6 0 が上記経路を通して導入され、取付シリンダ 3 0 内の圧力がほぼ大気圧に制御される。そして、最終的に第 2 熱ステージ 2 6 の温度が略 4 K になると、取付シリンダ 3 0 内のヘリウムガス 6 0 の一部が液化し、液体ヘリウム 6 1 となって取付シリンダ 3 0 の第 2 シリンダ 2 5 の底部に溜まる。所定量の液体ヘリウム 6 1 を発生して初期冷却が完了すると、ヘリウム容器 4 6 が不要となるので、締切弁 4 1 を閉じ、ヘリウム容器 4 6 を第 2 の継ぎ手 4 3 から分離する。

20

#### 【0022】

ここで、第 2 熱ステージ 2 6 と第 2 取付熱接続部 3 5 との熱接続は、固体の接触に、液体ヘリウム 6 1 の沸騰と凝縮に伴う良好な熱接続が加わり、同様に、第 1 熱ステージ 2 4 と第 1 取付熱接続部 3 3 との熱接続は、固体の接触に、ヘリウムガス 6 0 の対流と伝導に伴う良好な熱接続が加わっている。

30

そこで、超電導コイルカートリッジ 3 の熱エネルギーは第 2 取付熱接続部 3 5 および液体ヘリウム 6 1 を介して第 2 熱ステージ 2 6 で吸収されて、略 4 K に冷却される。また、熱シールド 5 の熱エネルギーは第 1 取付熱接続部 3 3 およびヘリウムガス 6 0 を介して第 1 熱ステージ 2 4 で吸収されて、略 5 0 K に冷却される。

この状態で外部電源（図示せず）から電流を供給するパワーリード（図示せず）を用いて超電導コイル 2 A に電流を流し、強い磁場を発生させる。

#### 【0023】

このように、この実施の形態 1 によれば、第 2 熱ステージ 2 6 と第 2 取付熱接続部 3 5 との熱接続が、固体の接触に加え、液体ヘリウム 6 1 の沸騰と凝縮に伴う良好な熱接続が加わり、両者間の熱接続部の熱抵抗が大幅に低減される。同様に、第 1 熱ステージ 2 4 と第 1 取付熱接続部 3 3 との熱接続が、固体の接触に加え、ヘリウムガス 6 0 の対流と伝導に伴う良好な熱接続が加わり、両者間の熱接続部の熱抵抗が大幅に低減される。そこで、超電導コイル 2 A と第 2 熱ステージ 2 6 との間の温度勾配、さらには熱シールド 5 と第 1 熱ステージ 2 4 との間の温度勾配が極めて少なくなり、大きな冷凍能力の冷凍機を用いる必要がなくなるとともに、消費電力の点でも非常に有利となる。

40

また、取付シリンダ 3 0 の底部に液体ヘリウム 6 1 が溜められているので、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が停止しても、液体ヘリウム 6 1 が蒸発しきるまでは超電導コイル 2 A を略 4 K に維持でき、長時間超電導状態を保つことができるようになる。

50

また、取付シリンダ30と2段式蓄冷型冷凍機21Aとの間が大気圧のヘリウムガス60で満たされているので、2段式蓄冷型冷凍機21Aを交換する際に力を受けず、従来の装置のように超電導コイルカートリッジ3や熱シールド5の温度を常温まで上げる必要がなく、交換時間を短縮できるとともに、交換作業性を向上させることができる。

#### 【0024】

なお、圧力計48のレンジは真空から $2 \times 10^5 \text{ Pa}$  (2 bar)程度が望ましい。このような範囲の真空計を用いることで、気体温度計を構成することが可能となり、安価に第2熱ステージ26の温度を測定することが可能となる。

また、停電等の事故の際には、液体ヘリウム61が蒸発し、取付シリンダ30内の圧力が大きく上昇する可能性があるが、安全弁47を用いているので、内部圧力が過度に上昇すれば、安全弁47が作動して内部圧力が所定値を越えないように制御され、安全性が確保される。

10

#### 【0025】

実施の形態2.

図2はこの発明の実施の形態2に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

この実施の形態2では、図2に示されるように、液体ヘリウム貯液容器70が取付シリンダ30の第2取付熱接続部35に設けられ、液体ヘリウム導入路71が液体ヘリウム貯液容器70と冷凍機取付シリンダ30の内部とを連通するように第2取付熱接続部35に穿設されている。ここで、液体ヘリウム貯液容器70は、第2取付熱接続部35と同様に熱伝導率の大きな銅やアルミニウムで作製されている。

20

なお、他の構成は上記実施の形態1と同様に構成されている。

#### 【0026】

このように構成された超電導磁石装置では、2段式蓄冷型冷凍機21Aが運転され、初期冷却が進むと、取付シリンダ30内に導入されたヘリウムガス60が冷却されて減圧弁45の設定値以下の圧力となると、新たなヘリウムガス60が上記経路を通して導入され、取付シリンダ30内の圧力がほぼ大気圧に制御される。そして、最終的に第2熱ステージ26の温度が略4Kになると、取付シリンダ30内のヘリウムガス60の一部が液化し、液体ヘリウム61となって取付シリンダ30の第2シリンダ25の底部から液体ヘリウム導入路71を通して液体ヘリウム貯液容器70内に溜まる。

従って、この実施の形態2においても、上記実施の形態1と同様の効果が得られる。

30

#### 【0027】

この実施の形態2においても、2段式蓄冷型冷凍機21Aが停止しても、液体ヘリウム61が蒸発する間4.2Kを保つことができる。

例えば、高い信頼性が要求される医療用MRI装置に用いられる超電導磁石装置の4Kへの熱侵入量は0.5W程度となる。液体ヘリウムの蒸発潜熱から計算すると、1Wの入熱の際のヘリウム蒸発量は1.4l/hである。そこで、例えば20lの液体ヘリウム貯液容器70を用いると、

$$20 / (0.5 \times 1.4) = 29 \text{ 時間}$$

の間、超電導状態を保つことが可能となる。これに対し、超電導コイルカートリッジ3の熱容量だけで温度上昇を計算すると30分以内に超電導状態が破れる可能性があり、液体ヘリウムの効果が大きいことがわかる。

40

従って、この実施の形態2による超電導磁石装置は、永久電流モードで用い、高い信頼性が要求される医療用超電導磁石装置にも十分適用できるものである。この場合、永久電流スイッチ(図示せず)は超電導コイル2Aと直列に設置することになる。

#### 【0028】

実施の形態3.

この実施の形態3では、図3に示されるように、液体ヘリウム貯液容器70の一部に熱接続部72が設けられ、液体ヘリウム貯液容器70が熱接続部72を介して超電導コイルカートリッジ3の支持体1に熱接続するようにしている。

なお、他の構成は上記実施の形態2と同様に構成されている。

50

## 【 0 0 2 9 】

この実施の形態 3 では、ほぼ 4 K に保持されている液体ヘリウム貯液容器 7 0 が熱接続部 7 2 を介して超電導コイルカートリッジ 3 に強固に熱接続している。そこで、超電導コイルカートリッジ 3 の熱伝導のみで冷却する場合には超電導コイルカートリッジ 3 に温度勾配が生じやすいが、ほぼ 4 K に保持されている液体ヘリウム貯液容器 7 0 を熱接続することにより、温度勾配を低減することができる。

## 【 0 0 3 0 】

実施の形態 4 .

この実施の形態 4 では、図 4 に示されるように、2 個の超電導コイルカートリッジ 3 が上下に離れて配置され、2 個の液体ヘリウム貯液容器 7 0 が超電導コイルカートリッジ 3 のそれぞれに熱接続するように配置され、2 個の液体ヘリウム貯液容器 7 0 がヘリウム連通管 7 3 により連結されている。

10

なお、他の構成は上記実施の形態 3 と同様に構成されている。

## 【 0 0 3 1 】

離れて配置された 2 個の超電導コイルカートリッジ 3 の熱伝導のみで冷却する場合には、温度勾配が大きくなり、超電導コイルカートリッジ 3 の温度が上昇してしまう。

この実施の形態 4 では、2 個の液体ヘリウム貯液容器 7 0 はヘリウム連通管 7 3 で連結されているので、液体ヘリウム 6 1 を各液体ヘリウム貯液容器 7 0 に自由に導入でき、各液体ヘリウム貯液容器 7 0 をほぼ 4 K に保持できる。そこで、2 個の超電導コイルカートリッジ 3 が離れていても、各超電導コイルカートリッジ 3 はそれぞれほぼ 4 K に保持されている液体ヘリウム貯液容器 7 0 に熱接続部 7 2 を介して熱接続されているので、温度上昇が抑えられ、低い温度に保持される。

20

## 【 0 0 3 2 】

実施の形態 5 .

この実施の形態 5 では、図 5 に示されるように、容器 4 9 がヘリウム導入管 4 0 の経路中に設けられ、締切弁 4 1 が容器 4 9 と第 1 継ぎ手 4 2 との間に設けられている。

なお、他の構成は上記実施の形態 1 と同様に構成されている。

## 【 0 0 3 3 】

上記実施の形態 1 による超電導磁石装置では、運転を中止した際に、液体ヘリウム 6 1 は蒸発し体積を増やし、取付シリンダ 3 0 内のヘリウムガス 6 0 は温度上昇に伴って膨張するので、圧力が上昇する。そして、取付シリンダ 3 0 内の圧力が過度に上昇すれば、安全弁 4 7 が作動し、ヘリウムガス 6 0 を外部に放出することになる。

30

しかしながら、この実施の形態 5 では、取付シリンダ 3 0 内で温度上昇に伴って膨張したヘリウムガス 6 0 はヘリウム導入管 4 0 を通って常温部に設けられた容器 4 9 内に押し出され、取付シリンダ 3 0 内の圧力上昇が抑えられる。従って、超電導コイルカートリッジ 3 が常温に戻っても、安全弁 4 7 が作動せず、取付シリンダ 3 0 内のヘリウム量が維持され、ヘリウム容器 4 6 からヘリウムガス 6 0 を補充する必要がなく、コスト的に有利となる。

このように、上記実施の形態 5 によれば、運転と停止とを繰り返すことが多い実験用超電導磁石装置に十分適用できる超電導磁石装置が得られる。

40

なお、容器 4 9 の容積が大きいほど圧力上昇は小さくなるが、容器 4 9 は安全弁 4 7 が作動しない適当な大きさにすることが望ましい。

## 【 0 0 3 4 】

実施の形態 6 .

この実施の形態 6 では、図 6 に示されるように、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A が第 1 シリンダ 2 3 の外径と第 1 熱ステージ 2 4 の外径とを略等しく、さらに第 2 シリンダ 2 5 の外径と第 2 熱ステージ 2 6 との外径とを略等しく構成され、冷凍機取付シリンダ 3 0 が第 1 取付シリンダ 3 2 の内径を第 1 熱ステージ 2 4 の外径と略等しく、第 2 取付シリンダ 3 4 の内径を第 2 熱ステージ 2 6 の外径と略等しく構成されている。

なお、他の構成は上記実施の形態 1 と同様に構成されている。

50

## 【 0 0 3 5 】

上記実施の形態 1 による超電導磁石装置では、運転を中止した際に、液体ヘリウム 6 1 は蒸発し体積を増やし、取付シリンダ 3 0 内のヘリウムガス 6 0 は温度上昇に伴って膨張するので、圧力が上昇する。この圧力上昇は液体ヘリウム 6 1 の量が多く、温度の低い部分の容積が大きい程大きくなる。

しかしながら、この実施の形態 6 では、第 1 シリンダ 2 3 の外径および第 1 取付シリンダ 3 2 の内径が第 1 熱ステージ 2 4 の外径と略等しく、第 2 シリンダ 2 5 の外径および第 2 取付シリンダ 3 4 の内径が第 2 熱ステージ 2 6 の外径と略等しくなっているため、第 1 シリンダ 2 3 と第 1 取付シリンダ 3 2 との隙間、さらには第 2 シリンダ 2 5 と第 2 取付シリンダ 3 4 との隙間が小さく、2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A と冷凍機取付シリンダ 3 0 との間の空隙の容積を小さくできる。

10

そこで、運転を中止した際の取付シリンダ 3 0 内の圧力上昇を抑えることができ、上記実施の形態 5 と同様の効果が得られる。

## 【 0 0 3 6 】

実施の形態 7 .

この実施の形態 7 では、図 7 に示されるように、詰め物 8 0、8 1 が第 1 シリンダ 2 3 と第 1 取付シリンダ 3 2 との隙間および第 2 シリンダ 2 5 と第 2 取付シリンダ 3 4 との隙間にそれぞれ挿入されている。この詰め物 8 0、8 1 は低熱伝導率材、例えば天然ゴムの発泡体を円筒状に成形したものである。

なお、他の構成は上記実施の形態 1 と同様に構成されている。

20

## 【 0 0 3 7 】

この実施の形態 7 においても、詰め物 8 0、8 1 により 2 段式蓄冷型冷凍機 2 1 A と冷凍機取付シリンダ 3 0 との間の空隙の容積が小さくなり、上記実施の形態 6 と同様の効果が得られる。

## 【 0 0 3 8 】

実施の形態 8 .

この実施の形態 8 では、図 8 に示されるように、冷凍機取付シリンダ 3 0 の第 1 取付シリンダ 3 2 および第 2 取付シリンダ 3 4 が、繊維強化樹脂、例えば G F R P で作製されている。そして、第 1 取付シリンダ 3 2 の両端が取付フランジ 3 1 および第 1 取付熱接続部 3 3 の外周部に接合され、第 2 取付シリンダ 3 4 の両端が第 1 取付熱接続部 3 3 および第 2 取付熱接続部 3 5 の外周部に接合されている。

30

なお、他の構成は上記実施の形態 1 と同様に構成されている。

## 【 0 0 3 9 】

この実施の形態 8 では、第 1 および第 2 取付シリンダ 3 2、3 4 がステンレススチールに比べて熱伝導率の小さい G F R P で作製されているので、熱侵入量を小さく抑えることができる。

また、G F R P は熱収縮率が大きく、ヘリウム導入管 4 0 を介して外部からヘリウムガスを導入して初期冷却を行った際に、第 1 および第 2 取付シリンダ 3 2、3 4 は熱収縮するが、第 1 および第 2 取付シリンダ 3 2、3 4 を取付フランジ 3 1、第 1 および第 2 取付熱接続部 3 3、3 5 の外周部に接合しているため、冷凍機取付シリンダ 3 0 の気密性は確保され、ヘリウムガスの漏れを防止することができる。

40

## 【 0 0 4 0 】

上記実施の形態 8 では、第 1 および第 2 取付シリンダ 3 2、3 4 を繊維強化樹脂である G F R P で作製するものとしているが、G F R P に代えて C F R P (C-carbon Fiber Resin reinforced Plastic) で作製してもよい。

この場合、C F R P は G F R P と同様に熱伝導率の小さい材料であるが、温度の高い領域では比較的熱を伝える特性を有しているため、初期冷却を行う際に、冷凍能力の大きな第 1 熱ステージ 2 4 の冷凍能力の一部を使用することが可能となり、初期冷却時間を提言することができる。

## 【 0 0 4 1 】

50

なお、上記各実施の形態では、2段式蓄冷型冷凍機を用いるものとしているが、蓄冷型冷凍機は2段式に限定されるものではなく、熱シールドの設置数に合わせて選択すればよく、例えば熱シールドが超電導コイルカートリッジを囲繞するように2重に配設されていれば、3段式蓄冷型冷凍機を用いることになる。

また、この発明は、上記各実施の形態の特徴部分を組み合わせた超電導磁石装置にも適用されるものである。

【0042】

この発明によれば、真空容器と、この真空容器内に配設された超電導コイルを有する超電導コイルカートリッジと、この超電導コイルカートリッジを囲繞するように上記真空容器内に配設された熱シールドと、複数の取付シリンダが各段の取付熱接続部を介して連結されて構成され、各段の取付熱接続部がそれぞれ上記熱シールドおよび上記超電導コイルカートリッジに熱的に接続されて上記真空容器に気密に取り付けられた冷凍機取付シリンダと、各段の熱ステージがそれぞれ上記冷凍機取付シリンダの各段の取付熱接続部に熱的に接続されて該冷凍機取付シリンダに取り付けられ、上記超電導コイルカートリッジを介して上記超電導コイルを略4Kまで伝導冷却する略4K冷却用の多段式蓄冷型冷凍機とを備えた超電導磁石装置において、上記冷凍機取付シリンダと上記多段式蓄冷型冷凍機との間の空間に、常温部からのヘリウムガスを供給可能にするヘリウムガス導入管を上記冷凍機取付シリンダに設けたので、多段式蓄冷型冷凍機の交換性を容易にし、超電導コイルと多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージとの間の熱抵抗を低減できるとともに、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際にも、超電導コイルの温度上昇を抑え、超電導状態を長時間維持できる超電導磁石装置を得ることができる。

10

20

【0043】

また、常温で供給されたヘリウムガスを上記多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージと上記冷凍機取付シリンダとの間の空間において少なくともその一部を液化するようにしているので、多段式蓄冷型冷凍機の最終段熱ステージと冷凍機取付シリンダとの熱接続が、固体の接触に加え、液体ヘリウムの沸騰と凝縮に伴う良好な熱接続が加わり、両者間の熱接続部の熱抵抗が大幅に低減される。

【0044】

また、上記冷凍機取付シリンダのヘリウムガス導入管に締切弁を備えているので、冷凍機取付シリンダ内へのヘリウムガスの導入が容易となる。

30

【0045】

また、液体ヘリウム貯液容器が上記冷凍機取付シリンダの最終段の取付熱接続部の外周部に配設され、液体ヘリウム導入路が上記冷凍機取付シリンダと上記液体ヘリウム貯液容器とを連通するように上記最終段の取付熱接続部に穿設されているので、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際にも、超電導状態をより長時間維持できるようになる。

【0046】

また、上記液体ヘリウム貯液容器の一部に熱接続部が設けられ、上記超電導コイルカートリッジが熱接続部を介して上記液体ヘリウム貯液容器に熱接続されているので、超電導コイルカートリッジの温度勾配を低減することができる。

【0047】

また、複数の超電導コイルカートリッジが分散配置され、上記複数の超電導コイルカートリッジが上記熱接続部を介して上記液体ヘリウム貯液容器にそれぞれ熱接続されているので、分散配置された超電導コイルカートリッジの温度をそれぞれ低く抑えることができる。

40

【0048】

また、上記冷凍機取付シリンダ内のヘリウムガスの膨張に伴う圧力上昇を緩和する容器が上記ヘリウムガス導入管の常温部に設けられているので、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際の冷凍機取付シリンダ内の圧力上昇を抑えることができる。

【0049】

また、上記多段式蓄冷型冷凍機のシリンダの外径と上記冷凍機取付シリンダの

50

取付シリンダの内径とが上記熱ステージの外径と略一致するように構成されているので、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際の冷凍機取付シリンダ内の圧力上昇を抑えることができる。

【0050】

また、低熱伝導率材からなる詰め物が上記冷凍機取付シリンダの取付シリンダと上記多段式蓄冷型冷凍機のシリンダとの隙間に挿入されているので、多段式蓄冷型冷凍機が停止した際の冷凍機取付シリンダ内の圧力上昇を抑えることができる。

【0051】

また、上記冷凍機取付シリンダの取付シリンダが繊維強化樹脂で作製されているので、熱侵入量を抑えることができる。

【0052】

また、上記繊維強化樹脂はカーボン繊維強化樹脂であるので、初期冷却時間の短縮が図られる。

【図面の簡単な説明】

【0053】

【図1】この発明の実施の形態1に係る超電導磁石装置を示す断面図である。

【図2】この発明の実施の形態2に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

【図3】この発明の実施の形態3に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

【図4】この発明の実施の形態4に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

【図5】この発明の実施の形態5に係る超電導磁石装置を示す断面図である。

【図6】この発明の実施の形態6に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

【図7】この発明の実施の形態7に係る超電導磁石装置の要部を示す断面図である。

【図8】この発明の実施の形態8に係る超電導磁石装置に適用される冷凍機取付シリンダを示す断面図である。

【図9】従来の超電導磁石装置を示す断面図である。

【図10】従来の超電導磁石装置の他の例の要部を示す断面図である。

【図11】2段式蓄冷型冷凍機の冷凍特性を示す図である。

【符号の説明】

【0054】

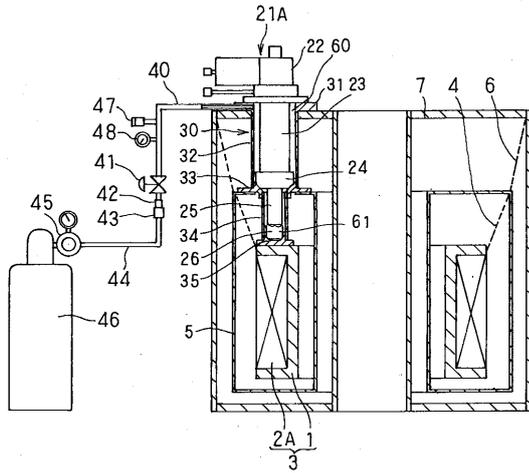
2 A 超電導コイル、3 超電導コイルカートリッジ、5 熱シールド、7 真空容器、21 A 2段式蓄冷型冷凍機、23 第1シリンダ、24 第1熱ステージ、25 第2シリンダ、26 第2熱ステージ、30 冷凍機取付シリンダ、32 第1取付シリンダ、33 第1取付熱接続部、34 第2取付シリンダ、35 第2取付熱接続部、40 ヘリウム導入管、41 締切弁、49 容器、60 ヘリウムガス、61 液体ヘリウム、70 液体ヘリウム貯液容器、71 液体ヘリウム導入路、72 熱接続部、80、81 詰め物。

10

20

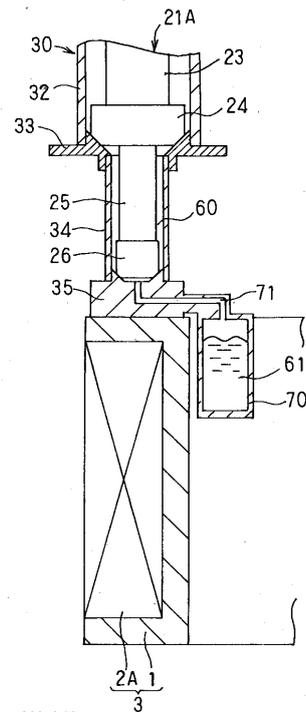
30

【 図 1 】



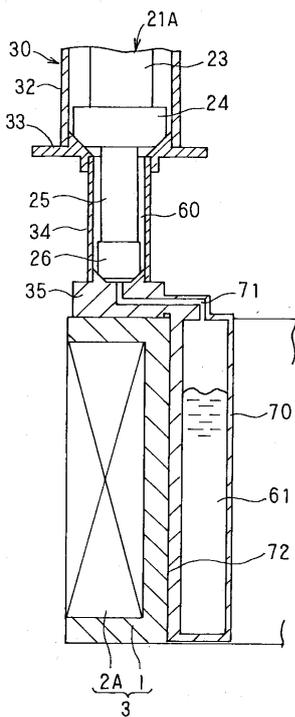
- |                 |               |
|-----------------|---------------|
| 2A: 超電導コイル      | 30: 冷凍機取付シリンダ |
| 3: 超電導コイルカートリッジ | 32: 第1 取付シリンダ |
| 5: 熱シールド        | 33: 第1 取付熱接続部 |
| 7: 真空容器         | 34: 第2 取付シリンダ |
| 21A: 2 段式蓄冷型冷凍機 | 35: 第2 取付熱接続部 |
| 23: 第1 シリンダ     | 40: ヘリウム導入管   |
| 24: 第1 熱ステージ    | 41: 縮切弁       |
| 25: 第2 シリンダ     | 60: ヘリウムガス    |
| 26: 第2 熱ステージ    | 61: 液体ヘリウム    |

【 図 2 】



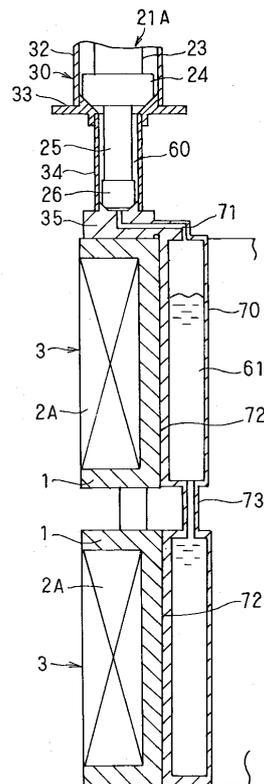
- 70: 液体ヘリウム貯液容器  
71: 液体ヘリウム導入路

【 図 3 】

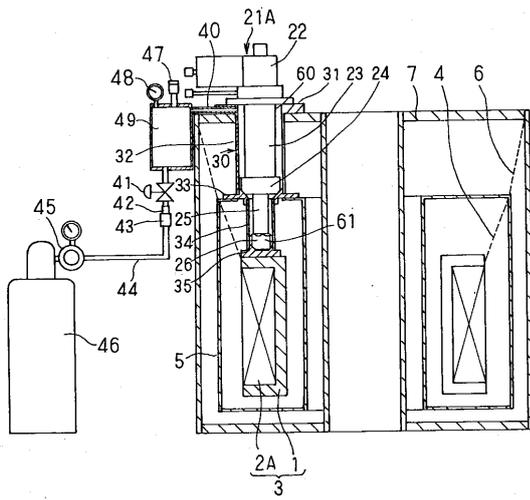


72: 熱接続部

【 図 4 】

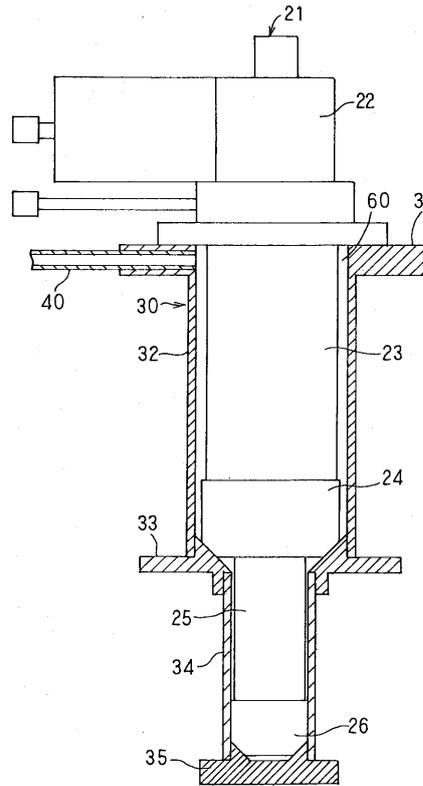


【 図 5 】

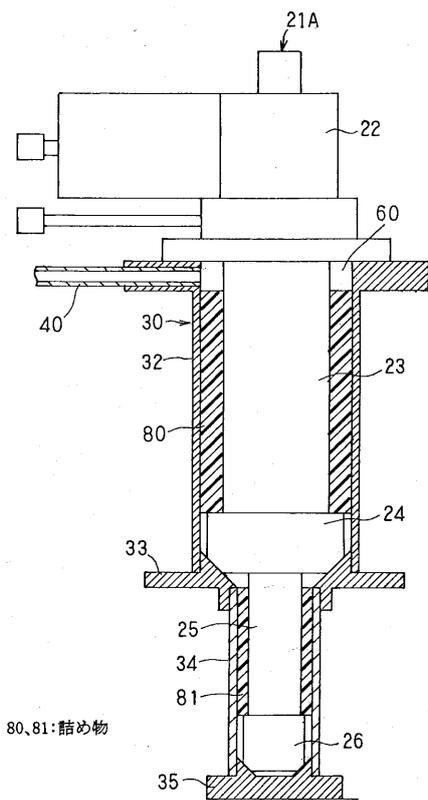


49:容器

【 図 6 】

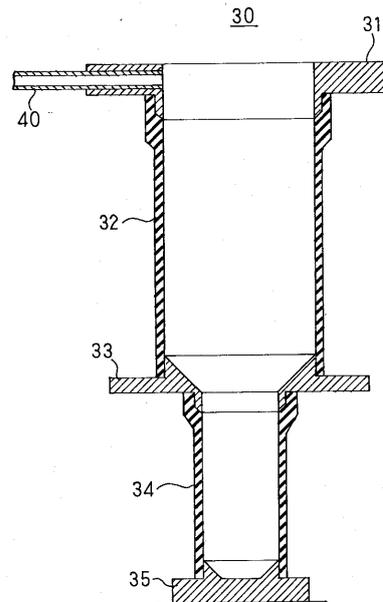


【 図 7 】

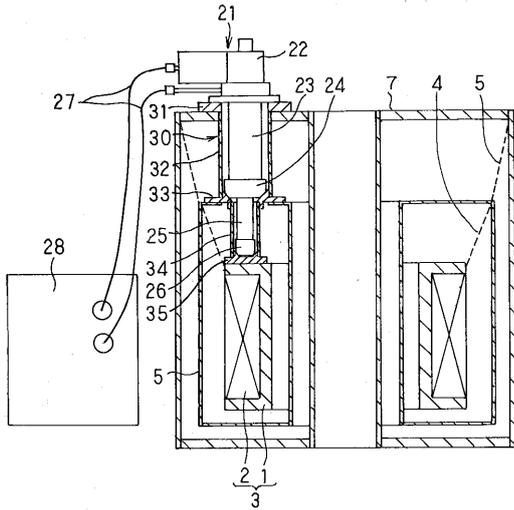


80,81:詰め物

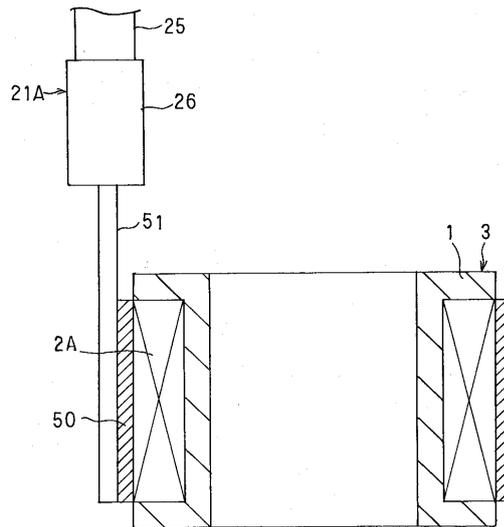
【 図 8 】



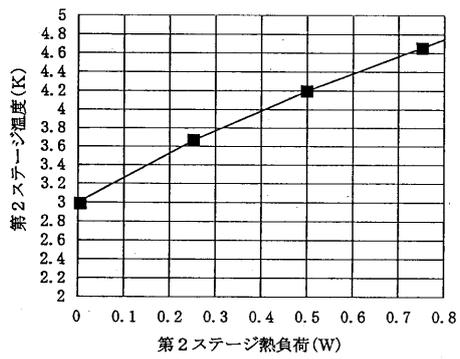
【図 9】



【図 10】



【図 11】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 長尾 政志  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 松本 隆博  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 今井 良夫  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 守田 正夫  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

Fターム(参考) 4M114 AA02 AA07 AA31 BB04 CC16 DA02 DA03 DA04 DA15 DA52  
DA54 DA60 DB63