

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7208914号
(P7208914)

(45)発行日 令和5年1月19日(2023.1.19)

(24)登録日 令和5年1月11日(2023.1.11)

(51)国際特許分類	F I			
A 6 1 B 5/055(2006.01)	A 6 1 B	5/055	3 3 1	
G 0 1 N 24/00 (2006.01)	A 6 1 B	5/055	3 6 0	
H 0 1 F 6/04 (2006.01)	G 0 1 N	24/00	6 0 0 D	
	H 0 1 F	6/04		Z A A

請求項の数 13 (全12頁)

(21)出願番号	特願2019-551647(P2019-551647)	(73)特許権者	590000248
(86)(22)出願日	平成30年3月16日(2018.3.16)		コーニンクレッカ フィリップス エヌ
(65)公表番号	特表2020-513977(P2020-513977		ヴェ
	A)		Koninklijke Philips
(43)公表日	令和2年5月21日(2020.5.21)		N.V.
(86)国際出願番号	PCT/EP2018/056642		オランダ国 5 6 5 6 アーヘー アイン
(87)国際公開番号	WO2018/172200		ドーフエン ハイテック キャンパス 5 2
(87)国際公開日	平成30年9月27日(2018.9.27)		High Tech Campus 5 2 ,
審査請求日	令和3年3月11日(2021.3.11)		5 6 5 6 AG Eindhoven, N
(31)優先権主張番号	62/475,287		etherlands
(32)優先日	平成29年3月23日(2017.3.23)	(74)代理人	110001690
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士法人M&Sパートナーズ
		(72)発明者	フー ホン
			オランダ国 5 6 5 6 アーエー アイン
			ドーフエン ハイ テック キャンパス 5
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 超電導磁石用のサーマルバス熱交換器

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

液体ヘリウムタンクと、
前記液体ヘリウムタンク内に配置された超電導磁石巻線と、
前記液体ヘリウムタンクの周りを囲む真空ポリウムを含む真空ジャケット壁と、
前記真空ポリウム内に配置され、前記液体ヘリウムタンクの周りを囲むサーマルシールドと、
前記サーマルシールドに固定され、前記液体ヘリウムタンクと流体連通する入口及び周囲空気と流体連通する出口を有する流体通路を含む熱交換器と、
を含む、超電導磁石であって、
前記超電導磁石は、前記真空ジャケット壁に溶接され、前記真空ポリウム内に配置された第1ステージコールドステーション及び前記液体ヘリウムタンク内に配置された第2ステージコールドステーションを有するコールドヘッドを更に含み、
前記熱交換器は、熱伝導性接続部によって、前記第1ステージコールドステーションに接続されるサーマルバスである、超電導磁石。

【請求項 2】

前記真空ポリウムと前記液体ヘリウムタンクとを隔てる、前記真空ジャケット壁の内側真空ジャケット壁を通る入口流体導管を更に含み、前記入口流体導管は、前記液体ヘリウムタンクを前記熱交換器の前記流体通路の前記入口に接続する、請求項1に記載の超電導磁石。

【請求項 3】

前記真空ジャケット壁の外側真空ジャケット壁を通り、前記熱交換器の前記流体通路の前記出口を周囲空気に接続する出口流体導管を更に含む、請求項 1 又は 2 に記載の超電導磁石。

【請求項 4】

前記熱交換器は、サーマルバスであり、前記サーマルバスを通る前記流体通路は、前記サーマルバスの材料が、前記サーマルバスを通る前記流体通路の壁を画定するように前記サーマルバスを通る開口である、請求項 1 から 3 の何れか一項に記載の超電導磁石。

【請求項 5】

前記熱交換器は、サーマルバスであり、前記サーマルバスを通る前記流体通路は、前記流体通路の壁を形成するために、前記サーマルバスとは別箇で、前記サーマルバスに埋め込まれた導管を含む、請求項 1 から 3 の何れか一項に記載の超電導磁石。

10

【請求項 6】

前記熱交換器の前記流体通路は、蛇行流体通路を含む、請求項 1 から 5 の何れか一項に記載の超電導磁石。

【請求項 7】

前記熱交換器の前記流体通路は、複数の流体通路を含む、請求項 1 から 6 の何れか一項に記載の超電導磁石。

【請求項 8】

前記複数の流体通路の入口を接続する入口マニホールドと、
前記複数の流体通路の出口を接続する出口マニホールドと、
を更に含む、請求項 7 に記載の超電導磁石。

20

【請求項 9】

前記サーマルシールドは、互いから離間される 1 つ以上のサーマルシールド層を含み、各サーマルシールド層は、高熱伝導性シートを含み、前記熱交換器は、高熱伝導性材料を含む、請求項 1 から 8 の何れか一項に記載の超電導磁石。

【請求項 10】

前記熱交換器は、前記サーマルシールドに溶接されるか又はろう付けされる、請求項 1 から 9 の何れか一項に記載の超電導磁石。

【請求項 11】

形状が円筒形で、水平方向ボアを画定する、請求項 1 から 10 の何れか一項に記載の超電導磁石と、

30

前記超電導磁石によって前記水平方向ボア内に生成された静磁場に傾斜磁場を重ね合わせるように配置された 1 組の傾斜磁場コイルと、

を含む、磁気共鳴撮像 (MRI) デバイス。

【請求項 12】

液体ヘリウムタンクと、前記液体ヘリウムタンク内に配置された超電導磁石巻線と、前記液体ヘリウムタンクの周りを囲む真空ポリウムを含む真空ジャケット壁と、前記真空ジャケット壁に溶接され、前記真空ポリウム内に配置された第 1 ステージコールドステーション及び前記液体ヘリウムタンク内に配置された第 2 ステージコールドステーションを有するコールドヘッドと、前記真空ポリウム内に配置され、前記液体ヘリウムタンクの周りを囲むサーマルシールドと、前記サーマルシールドに固定され、前記第 1 ステージコールドステーションに熱的に接続されるサーマルバスと、を含む超電導磁石と共に行われる方法であって、

40

前記コールドヘッドをオフにするステップと、

前記コールドヘッドがオフにされている間に、前記サーマルバスを通る流体通路を介して、前記液体ヘリウムタンクから周囲空気中へと気体ヘリウムを流すステップと、

を含む、方法。

【請求項 13】

前記コールドヘッドがオフにされている間に、前記超電導磁石を輸送するステップを更

50

に含み、これにより、前記サーマルバスを通る前記流体通路を介する前記液体ヘリウムタンクから周囲空気中への気体ヘリウムの流れが、輸送中のヘリウムボイルオフを低減する、請求項 12 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

以下は、概して、超電導磁石技術、磁気共鳴撮像（MRI）技術、熱管理技術及び関連技術に関する。

【背景技術】

【0002】

磁気共鳴撮像（MRI）システムの典型的な超電導磁石では、超電導巻線が、真空ジャケットに周りを囲まれた液体ヘリウム（LHe）タンク内の液体ヘリウムに浸漬されている。シート材料の高伝導性サーマルシールドが真空ジャケット内に配置されて、LHeタンクの周りを囲む。製造後、真空が引かれ、LHeタンクが液体ヘリウムで満たされる。液体ヘリウムを極低温（即ち、4 K 以下）に保持するために、コールドヘッドを使用して LHe 容器が冷凍される。コールドヘッドの第 1 ステージが、真空ボリュームを貫通し、第 1 ステージコールドステーションが、サーマルシールドに取り付けられたサーマルバスに接続する高熱伝導性リンクによってサーマルシールドに接続される。コールドヘッドの第 2 ステージが、LHeタンク内の液体ヘリウムの液面の上方の気体ヘリウム超過圧力内に配置されるように液体ヘリウムボリューム内へと続く。

【発明の概要】

【0003】

以下に、新規かつ改良されたシステム及び方法を開示する。

【0004】

1 つの開示される態様では、超電導磁石が、液体ヘリウムタンクと、液体ヘリウムタンク内に配置された超電導磁石巻線と、液体ヘリウムタンクの周りを囲む真空ボリュームを含む真空ジャケット壁と、真空ボリューム内に配置され、液体ヘリウムタンクの周りを囲むサーマルシールドとを含む。熱交換器がサーマルシールドに固定され、流体通路が、液体ヘリウムタンクと流体連通する入口と、周囲空気と流体連通する出口とを有する。熱交換器はサーマルバスであってよい。第 1 ステージコールドステーションが真空ボリューム内に配置され、第 2 ステージコールドステーションが液体ヘリウムタンク内に配置された状態で、コールドヘッドを真空ジャケット壁に溶接することができ、サーマルバスは、熱伝導性接続部によって第 1 ステージコールドステーションに適切に接続される。

【0005】

別の開示される態様では、磁気共鳴撮像（MRI）デバイスが、前段に説明される超電導磁石を含む。超電導磁石は、ほぼ円筒形で、水平方向ボアを画定する。超電導磁石によって水平方向ボア内に生成された静磁場に傾斜磁場を重ね合わせるために、1 組の傾斜磁場コイルが配置される。別の開示される態様では、前段に説明される超電導磁石と併せて行われる方法が、コールドヘッドをオフにするステップと、コールドヘッドがオフにされている間に、サーマルバスを通る流体通路を介して、液体ヘリウムタンクから周囲空気へ気体ヘリウムを流すステップとを含む。次に、コールドヘッドがオフにされている間に、超電導磁石が輸送され、これにより、サーマルバスを通る流体通路を介した液体ヘリウムタンクから周囲空気中への気体ヘリウムの流れが、輸送中のヘリウムボイルオフを低減する。

【0006】

別の開示される態様では、液体ヘリウムタンク内に配置された超電導巻線を含む超電導磁石の上記液体ヘリウムタンクを熱遮蔽するためのサーマルシールド装置が開示される。サーマルシールド装置は、液体ヘリウムタンクの周りを囲むようなサイズ及び形状のアルミニウム合金板金の 1 つ以上のサーマルシールド層を含むサーマルシールドと、サーマルシールドに固定されるサーマルバスとを含む。サーマルバスは、サーマルバスを通る流体

10

20

30

40

50

通路を含む一体型熱交換器を含む。

【 0 0 0 7 】

1つの利点は、液体ヘリウム (L H e) のボイルオフが少ない超電導磁石が提供される点にある。

【 0 0 0 8 】

別の利点は、コールドヘッドが遮断される長い期間中にクエンチが発生する可能性が低減された超電導磁石が提供される点にある。

【 0 0 0 9 】

別の利点は、熱漏れの少ない気体ヘリウムベントを有する超電導磁石が提供される点にある。

10

【 0 0 1 0 】

別の利点は、液体ヘリウムチャージで長距離輸送が可能な超電導磁石が提供される点である。

【 0 0 1 1 】

別の利点は、長距離の輸送、長時間メンテナンス等を容易にするために、長期間コールドヘッドを遮断することができる超電導磁石が提供される点である。

【 0 0 1 2 】

別の利点は、本明細書に開示される一体型熱交換器を有するサーマルバスによるサーマルシールドの冷却により、コールドヘッドがオフにされている期間又は動作できない期間中の液体ヘリウム蒸発が低減された超電導磁石が提供される点にある。

20

【 0 0 1 3 】

別の利点は、本明細書に開示される一体型熱交換器を有するサーマルバスによるサーマルシールドの追加冷却により、より小さく及び/又はよりエネルギー効率の良いコールドヘッドを有する超電導磁石が提供される点である。

【 0 0 1 4 】

本開示を読み理解すれば当業者には明らかとなるように、所定の実施形態は、前述の利点のいずれも提供しない、又は、1つ、2つ以上若しくはすべてを提供するか、及び/又は、他の利点を提供することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 5 】

本発明は、様々なコンポーネント及びコンポーネントの構成、また、様々なステップ及びステップの構成の形を取ってよい。図面は、好適な実施形態を例示することのみを目的とし、本発明を限定するものと解釈されるべきではない。

30

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 図 1 は、一体型熱交換器を有するサーマルバスを含む磁気共鳴撮像 (M R I) システムの側断面図を示す。

【 図 2 】 図 2 は、一体型熱交換器を有するサーマルバスを示す図 1 の側断面図の一部の拡大図を示す。

【 図 3 】 図 3 は、一体型熱交換器を有するサーマルバスの例示的な実施形態の上面図を示す。

40

【 図 4 】 図 4 は、一体型熱交換器を有するサーマルバスの別の例示的な実施形態の側面図、上面図及び端面図を示し、上面図のみに、接続された気体ヘリウム入口マニホールド及び出口マニホールドを示す。

【 図 5 】 図 5 は、図 1 の超電導磁石を液体ヘリウム (L H e) でチャージし、それを工場から目的地まで輸送するプロセスを示す。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 7 】

L H e タンクが充填された後、コールドヘッドがオフにされ、M R 磁石は、液体ヘリウムチャージが投入され、真空が引かれた状態で、目的地に出荷される。航空便の場合、コールドヘッドは、輸送期間中ずっとオフのままにされる。船便の場合、M R 磁石は冷凍さ

50

れる。しかし、この場合でも、積み下ろし及び造船所へのトラック輸送中にコールドヘッドの電源が切られている時間が長い。液体ヘリウムは、能動的に冷凍されないと、ゆっくりとボイルオフする。通常、ヘリウムベントペローズといったベント経路が、ボイルオフによって生成された任意の気体ヘリウム超過圧力の圧力除去経路として設けられている。進入流路及び放出流路（例えば液体ヘリウム充填ライン及び圧力除去ベント経路）は、熱が漏れる経路である。これらの懸念事項により、出荷距離が制限されるか、又は、出荷オプションが制約される可能性がある。

【 0 0 1 8 】

同様の問題は、超電導磁石のコールドヘッドが長時間にわたって、例えばメンテナンス中、長時間の停電、MRIシステムの再配置中等に電源が切られているときにいつでも発生する可能性がある。超電導コイルは、超電導電流を継続的に流すので、液体ヘリウムの減少は、MR磁石の「クエンチ」と呼ばれる超電導状態からの転移を引き起こす可能性がある。

10

【 0 0 1 9 】

本明細書において開示する改良点では、サーマルシールドのバスバーが、一体型熱交換器を含むように変更される。一体型熱交換器の入口は、LHeタンク内の気体ヘリウム超過圧力へのパイプ又は他の流体導管に接続され、一体型熱交換器の出口は、雰囲気中へと放出する。したがって、気体ヘリウム（LHeタンク内では、液体ヘリウムの沸点（つまり、 $\sim 4\text{K}$ ）に近い低温にある）は、大気中への放出前にサーマルバスの熱交換器を流れる。これは、気体ヘリウム超過圧力ベント経路を提供する利点があり、これにより、低温の気体ヘリウムの顕熱冷却能力を利用して、コールドヘッドがオフになっている期間のサーマルシールドの継続的な冷却が提供される。

20

【 0 0 2 0 】

図1を参照すると、超電導磁石を使用する磁気共鳴撮像（MRI）デバイス10の側断面図が示されている。磁石は、大部分が液体ヘリウムで満たされているが、液体ヘリウムの液面16の上方にガス状のヘリウム（気体ヘリウム）超過圧力がある液体ヘリウム（LHe）タンク14内に配置された超電導巻線12を含む。例示するMRIデバイス10は、水平方向ポア磁石を使用する。水平方向ポア磁石では、超電導磁石は、ほぼ円筒形で、水平方向ポア18の周りを囲む（即ち、画定する）。しかし、他の磁石形状も考えられる。LHeタンク14の熱的分離を提供するために、周囲の真空ジャケットは、内側真空ジャケット壁20と、外側真空ジャケット壁22とを有し、その間に排気された真空ボリューム24がある。つまり、真空ジャケット壁、例えば内側真空ジャケット壁20及び外側真空ジャケット壁22と、任意選択的に側面真空ジャケット壁26といった追加の壁とは、真空ボリューム24を含む。内側真空ジャケット壁20は、真空ボリューム24とLHeタンク14とを隔てる。外側真空ジャケット壁22は、真空ボリューム24と周囲空気とを隔てる。（図示しない変形実施形態では、外側真空壁22の周りを囲む、例えば液体窒素を含む外側低温ジャケットがあることが考えられる）。図1に、真空ボリューム24はハッチングで示されている。アルミニウム合金板金（又は銅合金板金又は他の高熱伝導性板金）といった頑丈な熱伝導性材料で作られたサーマルシールド30が、真空ボリューム24内に配置され、LHeタンク14の周りを囲む。サーマルシールド30は、内側真空ジャケット壁20から離間されて、サーマルシールド30からLHeタンク14への熱伝導が回避される。幾つかの実施形態では、サーマルシールド30は、互いから離間され、最も内側のシールド層が内側真空ジャケット壁20から離間されている2つ以上のサーマルシールド層を含んでもよい（変形例は図示せず）。

30

40

【 0 0 2 1 】

図1を引き続き参照し、更に図2を参照すると、コールドヘッド40が、ヘリウムを作動流体として使用して冷凍サイクルを実行して、サーマルシールド30及びLHeタンク14の能動的冷却が提供される。このために、コールドヘッド40は、外側真空壁22を貫通して真空ボリューム24の中に入り込む第1ステージ42を含む。第1ステージ42は、溶接、ろう付け又は他の方法によってサーマルシールド30に固定されたサーマルバ

50

ス50と接続する高伝導性サーマルリンク46によってサーマルシールド30に接続される第1ステージコールドステーション44を有する。コールドヘッド40は更に、内側真空壁20を通過してLHeタンク14に入る第2ステージ52を含み、第2ステージ52は、LHeタンク14内の液体ヘリウムの液面16の上方の気体ヘリウムの超過圧力内に配置される第2ステージコールドステーション54を有する。コールドヘッド40は、1つ以上の内部ピストン(図示せず)を駆動して作動ヘリウムを周期的に圧縮して、第1コールドステーション44及び第2コールドステーション54を冷却する冷凍サイクルを行う電動ヘッド又は他の機械的機構56を含む。(なお、コールドヘッド40のコンポーネント42、44、52、54、56は、図2の拡大図にのみ示す)。コールドヘッド40は、第2ステージコールドステーション54をヘリウムの液化温度未満まで、また、第1ステージコールドステーション44をより高い温度(ただし、サーマルシールド30がLHeタンク14の効果的な熱遮蔽を提供するのに十分に冷たい)まで冷却するようデザイン及び操作される。コールドヘッド40は、真空気密シールを提供するために、通常、外側真空壁22及び内側真空壁20に溶接される。

10

【0022】

更に、真空ボリュウム24を排気するために適切な真空ライン接続(図示せず)が設けられ、また、充填ライン(図示せず)が溶接シールを介して真空壁20、22を貫通し、液体ヘリウムチャージをLHeタンク14に投入するための進入経路が設けられる。充填ライン又は適切な溶接シールを有する別の進入経路は、磁石巻線12に接続し、磁石巻線12を励磁するためのリード線等を挿入することも可能にする。これらの巻線12を流れる静電流は、水平方向ボア磁石の例示する場合は、図1に示されるように、水平方向である静磁場 B_0 を生成する。磁石巻線12の電流を所望の磁場強度 $|B_0|$ を提供するように選択されたレベルまで上昇させた後、接点が引き抜かれ、その後の超電導磁石巻線12のゼロ電気抵抗によって、電流が持続的に流れ続けることが保証される。この時点以降、LHeタンク14内の液体ヘリウムチャージは保持されるべきである。さもなければ、超電導巻線12は、磁石巻線12の超電導臨界温度を超える温度まで温まって、磁石のクエンチをもたらす可能性がある。(液体ヘリウムチャージを取り去らなければならない場合に制御された運転停止を提供するためには、リード線を再度挿入し、液体ヘリウムチャージを取り去る前に磁石電流をゼロまで下げることが好適である)。

20

【0023】

MRIデバイスは、x、y及び/又はz方向において B_0 磁場に選択された傾斜磁場を重ね合わせるための1組の傾斜磁場コイル58、磁気共鳴信号を励起及び/又は検出するための全身無線周波数(RF)コイル(図示せず)、患者又は他の撮像対象を、撮像のためにMRIデバイス10のボア18内に入れるための患者台(図示せず)等といった当技術分野において知られている様々な他のコンポーネントを任意選択的に含む。

30

【0024】

従来では、第1ステージコールドステーション44をサーマルシールド30に(例えば編組銅線46により)接続するサーマルバスは、アルミニウム、銅、アルミニウム合金、銅合金、又は、サーマルシールド30への取付けに適している他の高熱伝導性金属の固体棒又は他の固体片である。

40

【0025】

図1及び図2を引き続き参照すると、サーマルシールド30のサーマルバス50は、前述の従来の固体金属サーマルバスに対して改良されて、熱交換器が組み込まれている。つまり、サーマルバス50は熱交換器を含む。又は、別の言い方では、サーマルバス50は一体型熱交換器を含む。このために、サーマルバス50は、サーマルバス50を通る流体通路60を含む。流体通路60は、LHeタンク14と流体連通する入口を有する。例示する実施形態では、気密開口部を介して内側真空壁20を通るパイプ又は他の入口流体導管62を経由して、LHeタンク14内の気体ヘリウムの超過圧力から流入する気体ヘリウムを受け取るように接続される入口を有する。流体通路60は、周囲空気と流体連通する出口を有する。例示する実施形態では、溶接開口部を介して外側真空壁22を通るパイ

50

ブ又は他の出口流体導管 64 を経由して周囲空気中へと放出するように接続される出口を有する。流体通路 60 は、サーマルバス 50 の材料が流体通路 60 の壁を画定するように、サーマルバス 50 を通る開口部であってもよい。又は、他の実施形態では、流体通路 60 は、流体通路 60 の壁を形成するようにサーマルバス 50 に埋め込まれた別個のパイプ又は他の別個の導管であってもよい。

【0026】

サーマルバス 50 に流入するサーマルシールド 30 からの熱は、流体通路 60 を流れる低温気体ヘリウムに流れ込むことができるため、流体通路 60 及びサーマルバス 50 は熱交換器として動作し、これにより、熱は、気体ヘリウムの流れを介して放出ライン 64 から運び出される。有利には、この熱伝達プロセスは、コールドヘッド 40 がオフにされたときに作動している。コールドヘッド 40 の動作によるサーマルバス 50 の能動的冷却の欠如は、熱交換器を介した熱伝達を駆動するための温度差を提供する。

10

【0027】

サーマルバス 50 の一体型熱交換器は、気体ヘリウム超過圧力ベント経路を提供することと、低温気体ヘリウムの顕熱冷却能力を利用して、コールドヘッド 40 がオフにされている期間にサーマルシールド 30 の継続的な冷却を提供することとの二重の利点を有する。有利には、一体型熱交換器を含めるためのサーマルバス 50 の変更は最小限で済み、流体通路 60 を追加し、流路 62、64 を、真空壁 20、22 を通る溶接通路に接続することが必要である。サーマルバス 50 は、コンパクトなコンポーネントであり、例えば通常は、サーマルシールド 30 に溶接された 1 つの金属棒又は金属横材 (beam) (又は、幾つかの実施形態では、追加の熱的接触を提供するように複数の棒又は横材) のフォームファクタを有し、流体通路 60 を組み込むためにサーマルバス 50 を機械加工する又は処理するための取り扱いが便利になる。サーマルバスが複数の棒又は横材を含む実施形態では、これらの棒又は横材のそれぞれを通るか又はこれらの一部のみを通る流体通路 60 を設けることが考えられる。

20

【0028】

サーマルバス 50 の一体型熱交換器はまた、ヘリウムガスが熱交換器を流れ続けるように磁石がゼロボイルオフ (ZBO) 磁石でなければ、コールドヘッドがオンにされても追加の冷却力を提供することができる。他方で、磁石が ZBO 磁石であるならば、サーマルバス 50 の一体型熱交換器は、この状態では、一体型熱交換器をヘリウムガスが流れないため、追加の冷却力を提供しない。

30

【0029】

原則として、入口流体導管 62、サーマルバス 50 を通る流体通路 60 及び出口流体導管 64 を含む流体経路は、周囲空気が LHe タンク 14 に入る可能性がある流路をもたらず。実際には、液体ヘリウムは、この流路 62、60、64 を通る流れが (周囲空気が LHe タンク 14 に流れ込むのではなくて) LHe タンク 14 から周囲空気に流れる気体ヘリウムを含むことを保証する気体ヘリウムの超過圧力を LHe タンク 14 内で発生させる。しかし、流路 62、60、64 に 1 つの逆止弁 (又は 2 つの逆止弁からなる冗長セット) を含めて、周囲空気の LHe タンク 14 への「逆流」の可能性を阻止することが考えられる。考えられる別の変形例では、流路 62、60、64 に手動弁又は自動弁が取り付けられて、(例えばコールドヘッド 40 が動作しているときに) 超電導磁石の通常の動作中に流路 62、60、64 を閉じることが可能にされる。

40

【0030】

図 3 を参照すると、一体型熱交換器を有するサーマルバス 50 の第 1 の非限定的な例示の実施形態が示されている。図 3 の実施形態では、サーマルバス 50₁ は単一の蛇行流体通路 60₁ を含む。当該手法は、構造的に簡単であるが、蛇行流体通路 60₁ を、サーマルバス 50₁ を形成するブロック内に形成することができる製造プロセスを必要とする。又は、蛇行流体通路 60₁ を形成する別個のパイプを、サーマルバス 50₁ を形成するブロックに埋め込むことができる製造プロセスを必要とする。これは、通常、例えば流体通路 60₁ の経路を画定する型を使用して鑄造することにより、サーマルバス 50₁ が形成

50

されるのと同時に流体通路60₁を形成又は導入することが伴う。流体通路60₁の蛇行経路は、直線経路と比較して、熱伝達のための大幅に大きな表面積を有利に提供する。

【0031】

図4の実施形態では、サーマルバス50₂は、入口マニホールド72によって入口が外側で接続され、出口マニホールド74によって出口が外側で接続された例示的な3つの並列直線流体通路60₂を含む。並列流体通路60₂の数は、2つ、3つ、4つ、5つ又はそれ以上であってよく、好適には、サーマルバス50₂の構造的完全性を維持しながら、熱伝達のための十分な表面積を提供するように選択される。直線流体通路60₂の利点は、サーマルバス50₂の金属ブロックを形成した後に行われる穿孔プロセス又は他の機械加工プロセスによって直線流体通路が形成可能である点である。マニホールド72、74は、溶接、ろう付け又は別のプロセスによって流体通路60₂に適切に接続される。

10

【0032】

図4の実施形態の変形例(図示せず)では、入口マニホールド及び出口マニホールドをサーマルバス50内に一体に形成することができる。これにより、流体通路60は、サーマルバス50を単一の入口及び単一の出口として通るが、サーマルバス内の複数の流路に分岐する。なお、図3及び図4の実施形態は、サーマルバス50を通る流体通路60が、複数の蛇行流体通路を含むことができるように、様々に組み合わせられてもよい。

【0033】

例示する実施形態は、低温気体ヘリウムの顕熱冷却能力を利用して、コールドヘッド40がオフにされている期間にサーマルシールド30を継続的に冷却する熱交換器として動作する二次機能を行うように変更されたサーマルバス50を有利に利用する。しかし、サーマルバスとは別箇のコンポーネントとして熱交換器を設けることが考えられる。例えばサーマルバスとは別箇の熱交換器を、その入口が液体ヘリウムタンクに流体連通し、出口が周囲空気と流体連通した状態で、サーマルバス又はサーマルシールドに追加的に取り付けられることもできる。

20

【0034】

図5を参照して、図1のMRIデバイス10の液体ヘリウムチャージを投入して、超電導磁石を輸送するプロセスを説明する。磁石が製造された状態から開始して、ステップ80において、真空ボリューム24は、外側真空壁22上の適切な真空連結器(図1には図示せず)を使用して排気される。ステップ81において、LHeタンク14を排気する。ステップ82において、コールドヘッド40がオンにされ、ステップ84において、液体ヘリウム(LHe)チャージが、外側真空壁22を通る充填ライン(図1には図示せず)を介して投入される。当然ながら、ステップ82、84は、異なる順序で行われてもよく、及び/又は、当技術分野において知られている追加のステップが行われてもよい。通常、ステップ84は、液体ヘリウムをLHeタンク14に入れる前に、LHeタンク14から空気を抜くことが伴う。超電導磁石を液体ヘリウムでチャージした後、ステップ86において、コールドヘッド40がオフにされた後、輸送ステップ90において、(液体ヘリウムチャージが充填された)超電導磁石が輸送される。ステップ90の間、サーマルバス50の熱交換器は、サーマルシールド30の冷却を提供すると共に、LHeタンク14内の気体ヘリウムの超過圧力のためのベント経路を提供するように動作する。LHeタンク14内の気体ヘリウムは、液体ヘリウムの液面16の上方の超過圧力であるため、気体ヘリウムは、液体ヘリウムの沸点より高いが比較的近い温度、つまり、大気圧において(大気圧の近くで)で約4Kにある。したがって、コールドヘッド40が動作していなくても、サーマルバス50の熱交換器が、サーマルシールド30を冷却するための受動的機構を提供するように動作し、これは、次に、LHeタンク14内の液体ヘリウムの蒸発率を減少させる。液体ヘリウム蒸発率のこの減少により、より長い輸送時間が可能になり、したがって、より長い輸送距離を達成することができる。目的地に到着した後、ステップ92において、コールドヘッド40が再びオンにされ、その後、LHeタンク14の能動的冷却が提供される。磁石がZBO磁石である場合、サーマルバス50の熱交換器によって提供されていた追加の冷却は、ヘリウムガス流の停止により、ゼロボイルオフ状態が達成さ

30

40

50

れると停止される。他方、磁石がZBO磁石ではない場合、サーマルバス50の熱交換器は、ステップ92においてコールドヘッド40がオンにされた後も追加の冷却力を提供し続ける。したがって、非ZBO磁石の場合、サーマルバス50の熱交換器は、よりエネルギー効率の良いコールドヘッド、例えばより小さいコールドヘッドを、及び/又は、より低い電気エネルギー入力でを使用することを可能にする。

【0035】

図5を参照して、磁石の輸送中の一体型熱交換器を有するサーマルバス50によってもたらされる利点が説明されたが、当然ながら、例えばメンテナンス中にコールドヘッド40がオフにされる間、長時間の停電の間、若しくは、コールドヘッドを介する能動的冷却に支障を来す若しくは妨げるコールドヘッド40の故障中の間等、コールドヘッド40がオフにされるか、若しくは、長時間の間動作させられる任意の手順又は状況について、同様の利点が得られる。このような状況では、液体ヘリウムの蒸発が少ないため、液体ヘリウムチャージが過度に枯渇する可能性が低くなり、液体ヘリウムの枯渇による磁石のクエンチが生じる可能性が低くなる。

10

【0036】

本発明は、好適な実施形態を参照して説明された。前述の詳細な説明を読んで理解すると、他の人が修正態様及び変更態様を想到することができるであろう。本発明は、添付の特許請求の範囲又はその均等物の範囲内にある限り、このようなすべての修正態様及び変更態様を含むと解釈されることが意図されている。

20

30

40

50

【 図面 】

【 図 1 】

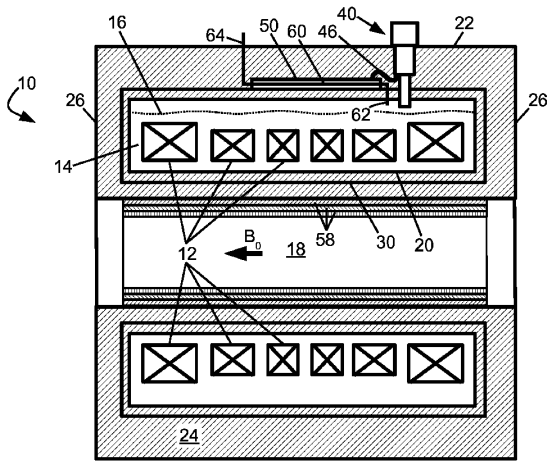


Fig. 1

【 図 2 】

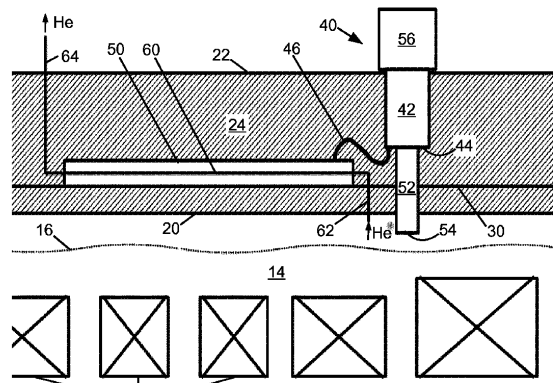


Fig. 2

【 図 3 】

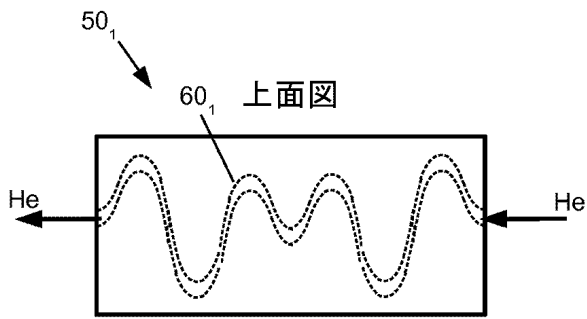


図 3

【 図 4 】

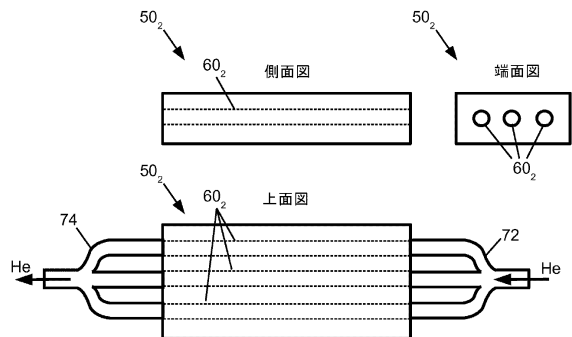


図 4

10

20

30

40

50

【 図 5 】

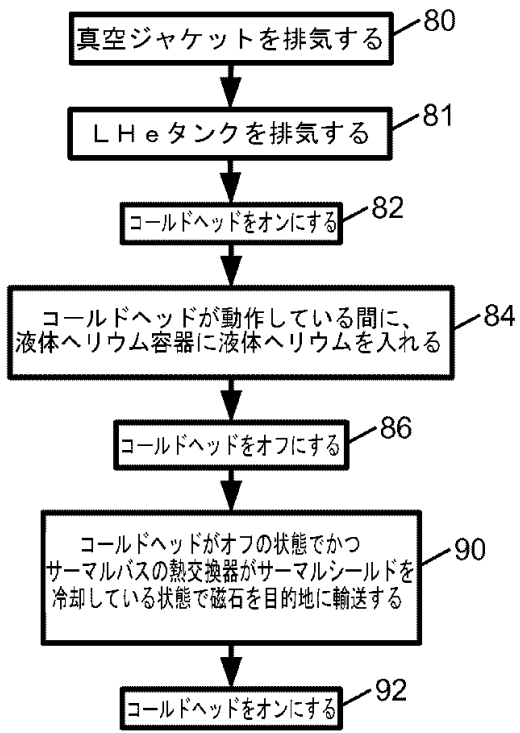


図 5

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 ヒルデルブランド ヨシュア ケント
オランダ国 5656 アーエー アインドーフェン ハイ テック キャンパス 5

(72)発明者 プファイデラー グレン ジョージ
オランダ国 5656 アーエー アインドーフェン ハイ テック キャンパス 5

審査官 蔵田 真彦

(56)参考文献 特開2003-303713(JP,A)
特開平06-163251(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0236260(US,A1)
特開2011-235090(JP,A)
特開平04-287903(JP,A)
特開平10-189327(JP,A)
実開平03-101504(JP,U)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

A61B 5/055
G01N 24/00 - 24/14
G01R 33/00 - 33/64
H01F 6/00 - 6/06
H01F 7/20