

(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2023-26980
(P2023-26980A)

(43)公開日

令和5年3月1日(2023.3.1)

(51)Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
<i>F 2 8 D 15/02 (2006.01)</i>	F 2 8 D 15/02 1 0 4 B	
<i>F 2 8 F 27/00 (2006.01)</i>	F 2 8 D 15/02 R	
	F 2 8 D 15/02 1 0 1 L	
	F 2 8 F 27/00 5 1 1 E	

審査請求 未請求 請求項の数 18 O L (全 24 頁)

(21)出願番号	特願2021-132474(P2021-132474)	(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
(22)出願日	令和3年8月16日(2021.8.16)	(71)出願人	504261077 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 東京都三鷹市大沢二丁目2番1号
		(74)代理人	100163533 弁理士 金山 義信
		(74)代理人	100199842 弁理士 坂井 祥平
		(72)発明者	木村 誠宏 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

最終頁に続く

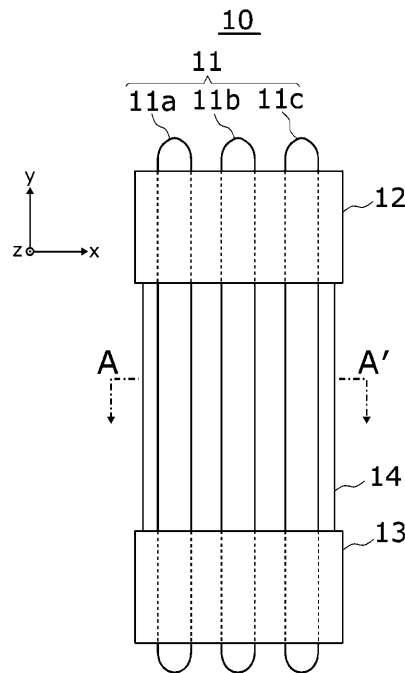
(54)【発明の名称】 冷却器、熱スイッチ機構、冷却システム、及び、冷却方法

(57)【要約】 (修正有)

【課題】 間接冷却法に使用したとき、効率的に被冷却体を冷却できる冷却器を提供する。

【解決手段】 容器と、上記容器に収容された作動流体とを有し、上記作動流体が、沸点が300K未満の少なくとも2種以上の作動流体を含み、上記容器内の少なくとも一部の領域をドライアウト状態にすることを利用して、上記容器と熱的に接触した被冷却体を、300K以下に冷却することを特徴とする冷却器。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

容器と、前記容器に収容された作動流体とを有し、
前記作動流体が、沸点が 300 K 未満の少なくとも 2 種以上の作動流体を含み、
前記容器内の少なくとも一部の領域をドライアウト状態にすることを利用して、前記容器と熱的に接触した被冷却体を、300 K 以下に冷却することを特徴とする冷却器。

【請求項 2】

前記容器を少なくとも 2 つ備え、
前記容器のそれぞれに、異なる前記作動流体が収容された、請求項 1 に記載の冷却器。

【請求項 3】

前記容器の少なくとも 1 つに、
前記作動流体の 2 種以上が収容された、請求項 1 又は 2 に記載の冷却器。

【請求項 4】

前記作動流体が窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、及び、ヘリウムからなる群より選択される少なくとも 1 種を含む、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 5】

前記容器が、金属材料からなるハウジングを有し、前記金属材料の残留抵抗比が 30 以上である、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 6】

前記容器の 293 K における熱伝導率が 24 W / m · K 以下である、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 7】

前記容器中における前記作動流体の 300 K における内圧が 1 MPa 以下である、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 8】

ヒートパイプである、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 9】

熱サイフォンである、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の冷却器。

【請求項 10】

請求項 6 に記載の冷却器を備えた、熱スイッチ機構。

【請求項 11】

請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載された冷却器と
コールドステージを有する冷凍機とを備え、
被冷却体と前記コールドステージとの間に前記冷却器を配設した、冷却システム。

【請求項 12】

前記冷凍機は、
前記コールドステージと前記冷却器とが熱的に接触して構成される凝縮部の温度 T_C を検出する凝縮部温度センサと、前記冷却器と前記被冷却体とが熱的に接触して構成される蒸発部の温度 T_E を検出する蒸発部温度センサと、制御装置とを更に備え、
前記制御装置は、前記温度 T_E を前記冷却器が含む作動流体について予め定められた閾値と比較する温度比較部と、
前記凝縮部の温度を調整する温調部と、を有し、
前記制御装置は、前記温度 T_E が前記閾値未満になるまで、前記作動流体の凝固温度を基準に予め定められた温度 T_M を超えるように、前記温度 T_C を調整する、請求項 11 に記載の冷却システム。

【請求項 13】

前記制御装置は、前記温度 T_E が、作動流体 i についての前記閾値未満の場合、
前記温度 T_C を、式： $T_M(i+1) < T_C < T_M(i)$ の範囲に調整する、請求項 12 に記載の冷却システム。

10

20

30

40

50

(ただし、 i は $1 \sim n - 1$ の整数を表し、 n は前記冷却器が含む作動流体の種類を表す 2 以上の整数であり、 $T_M(i)$ は、前記作動流体 i についての前記温度 T_M を表し、高温順に $T_M(1)$ 、 $T_M(2)$ 、 \dots 、 $T_M(n)$ である)

【請求項 14】

前記制御装置は、前記温度 T_E が作動流体 n についての前記閾値未満であって、かつ、前記温度 T_E が目標温度を超えている場合、前記凝縮部を更に冷却する、請求項 13 に記載の冷却システム。

【請求項 15】

被冷却体と冷熱源との間に請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の冷却器を配設して、前記被冷却体と前記冷熱源との間の熱輸送により、前記被冷却体の冷却を行う、冷却方法。

10

【請求項 16】

前記被冷却体と前記冷却器とが熱的に接触して構成される蒸発部の温度 T_E が、前記冷却器が含む作動流体について予め定められた閾値未満になるまで、

前記冷熱源と前記冷却器とが熱的に接触して構成される凝縮部の温度 T_C を、前記作動流体の凝固温度を基準に予め定められた温度 T_M を超えるように調整する工程 A を含む、請求項 15 に記載の冷却方法。

【請求項 17】

前記調整が、

前記温度 T_C を式： $T_M(i+1) < T_C < T_M(i)$ の範囲に調整する工程 A2 を含む、請求項 12 に記載の冷却システム。

20

(ただし、 i は $1 \sim n - 1$ の整数を表し、 n は前記冷却器が含む作動流体の種類を表す 2 以上の整数であり、 $T_M(i)$ は、作動流体 i についての前記温度 T_M を表し、高温順に $T_M(1)$ 、 $T_M(2)$ 、 \dots 、 $T_M(n)$ である)

【請求項 18】

前記工程 A2 は、前記温度 T_E が作動流体 n についての前記閾値未満であって、かつ、前記温度 T_E が目標温度を超えている場合、前記凝縮部を更に冷却する工程 B を含む、請求項 17 に記載の冷却方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本発明は、冷却器、熱スイッチ機構、冷却システム、及び、冷却方法に関する。

【背景技術】

【0002】

ニオブチタン ($NbTi$) 等によって構成される部材を超電導温度に保つ方法として、一般に、超電導部材を液体ヘリウム等の寒剤に浸漬し、蒸発する寒剤を冷凍機によって再凝縮させる方法、及び、超電導部材と冷凍機 (コールドステージ) とを熱伝導率の高い部材 (例えば、銅ストランド等) を介して接続して冷却する方法 (以下、「間接冷却法」ともいう。) 等が知られている。

【0003】

40

近年、より高い転移温度を有する超電導素材の開発や、小型冷凍機の技術開発の進展に伴い、多量の寒剤を取り扱う必要のない間接冷却法の重要性は益々高まってきている。

このような方法の一つとして、特許文献 1 には、「超電導モータの超電導コイルの周囲あるいは近接位置に作動流体充填部を設けると共に、該超電導モータに近接して冷却機を配置し、該冷却機で前記作動流体充填部内の作動流体を凝固させるまで冷却させて、凝固された固体作動流体により前記超電導コイルを直接冷却あるいは間接冷却する構成としていることを特徴とする超電導モータの冷却装置。」が記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

50

【特許文献1】特開2005-237060号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

特許文献1によれば、超電導部材のような被冷却体を寒剤に接触させる必要はないものの、冷凍機のコールドステージから被冷却体への熱輸送の効率が悪く、被冷却体を目標温度（例えば数十ケルビン）まで冷却するのに多くの時間とエネルギーが必要であることを本発明者らは知見している。

【0006】

そこで、本発明は、間接冷却法に使用したとき、効率的に被冷却体を冷却できる冷却器を提供することを課題とする。また、本発明は、熱スイッチ機構、冷却システム、及び、冷却方法を提供することも課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明者らは、上記課題を達成すべく鋭意検討した結果、以下の構成により上記課題を達成することができることを見出した。

【0008】

[1]

容器と、上記容器に收容された作動流体とを有し、上記作動流体が、沸点が300K未満の少なくとも2種以上の作動流体を含み、上記容器内の少なくとも一部の領域をドライアウト状態にすることを利用して、上記容器と熱的に接触した被冷却体を、300K以下に冷却することを特徴とする冷却器。

【0009】

[2]

上記容器を少なくとも2つ備え、上記容器のそれぞれに、異なる上記作動流体が收容された、[1]に記載の冷却器。

上記冷却器によれば、それぞれの容器に飽和温度の異なる作動流体が收容されるため、冷却過程で1つの容器内で作動流体が凝固した場合であっても、他の容器に收容された作動流体は、凝固した作動流体の影響（ウィックの閉塞等の影響）をより受けにくく、効率的な熱輸送がより広い温度範囲にわたって継続できる。そのため、内部にウィックを有するウィック付き容器を用いた場合でも、より広い温度範囲で効率的な熱輸送（冷却）を行うことができる。

【0010】

[3]

上記容器の少なくとも1つに、上記作動流体の2種以上が收容された、[1]又は[2]に記載の冷却器。

容器の1つに作動流体の2種以上が收容される場合、全体として容器の数をより少なくでき、冷却器がより小型化できる。クライオスタット等の内部における限られた空間内での使用により適している。また、重力利用型の熱サイフォンとすることによって、一方の作動流体が凝固した後も、他方の作動流体によるより効率的な熱輸送が継続できる点で好ましい。

【0011】

[4]

上記作動流体が窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、及び、ヘリウムからなる群より選択される少なくとも1種を含む、[1]～[3]のいずれかに記載の冷却器。

冷却器が上記の作動流体を含む場合、被冷却体を極低温、具体的には、目標温度として100K以下とした場合に、より効率よく冷却することができる。

【0012】

[5]

10

20

30

40

50

上記容器が、金属材料からなるハウジングを有し、上記金属材料の残留抵抗比が30以上である、[1]～[4]のいずれかに記載の冷却器。

容器のハウジングを構成する金属材料の残留抵抗比が上記数値範囲内であると、極低温領域において、ハウジングの熱伝導による優れた熱輸送効果が得られる。残留抵抗比が上記範囲である金属材料は一般に「高純度」と呼ばれ、特に極低温領域での熱伝導率が、純度の低い同種の金属材料と比較して大きいいため、極低温領域におけるより優れた熱輸送効率が得られる。

しかし、このような金属材料は価格が高い上に、100Kを超える領域では、純度の低い同種の金属材料との熱伝導率の差は小さい。従って、間接冷却の熱輸送媒体としてこれら高純度の金属材料のみを使用すると、100Kを超える領域での冷却、いわゆる予冷のコストが大きくなってしまっていた。すなわち、極低温領域での効率的な熱輸送に必要な分の高純度金属材料を使用しても、予冷に掛かる時間を短くすることはできず、予冷のための効率的な熱輸送に必要な分の高純度金属材料を使用したのでは、冷却器の価格が高くなりすぎてしまっていた。

本冷却器の容器のハウジングが所定の金属材料である場合、予冷はヒートパイプ（熱サイフォン）が担い、多量の高純度金属を必要とせず、極低温領域で作動流体が凍結した後は、極低温領域で熱伝導率が大きく向上する高純度金属製のハウジングの熱伝導に熱輸送の主体を切り替えることができる。従って、上記冷却器は、特に冷却目標温度が極低温である場合に、広い範囲で、より優れた熱輸送効率が得られる。

【0013】

[6]

上記容器の293Kにおける熱伝導率が24W/m・K以下である、[1]～[4]のいずれかに記載の冷却器。

容器の熱伝導率が上記数値以下であると、冷却器を熱スイッチ機構として利用したとき、目標温度までのより効率的な熱輸送と、目標温度に到達した後の被冷却体の冷熱源からの熱的な切り離しをより確実に行うことができる。

【0014】

[7]

上記容器中における上記作動流体の300Kにおける内圧が1MPa以下である、[1]～[6]のいずれかに記載の冷却器。

容器内における作動流体の内圧が上記数値範囲内であると、容器内が完全なドライアウト状態であっても、容器が破裂することがより抑制される。すなわち、被冷却体を室温（約300K）から冷却する場合に、容器の破裂がより抑制される。

【0015】

[8]

ヒートパイプである、[1]～[7]のいずれかに記載の冷却器。

[9]

熱サイフォンである、[1]～[7]のいずれかに記載の冷却器。

[10]

[6]に記載の冷却器を備えた、熱スイッチ機構。

[11]

[1]～[9]のいずれかに記載された冷却器とコールドステージを有する冷凍機とを備え、被冷却体と上記コールドステージとの間に上記冷却器を配設した、冷却システム。

【0016】

[12]

上記冷凍機は、上記コールドステージと上記冷却器とが熱的に接触して構成される凝縮部の温度TCを検出する凝縮部温度センサと、上記冷却器と上記被冷却体とが熱的に接触して構成される蒸発部の温度TEを検出する蒸発部温度センサと、制御装置とを更に備え、上記制御装置は、上記温度TEを上記冷却器が含む作動流体について予め定められた閾値と比較する温度比較部と、上記凝縮部の温度を調整する温調部と、を有し、上記制御装

10

20

30

40

50

置は、上記温度 T_E が上記閾値未満になるまで、上記作動流体の凝固温度を基準に予め定められた温度 T_M を超えるように、上記温度 T_C を調整する、[1 1] に記載の冷却システム。

冷却システムが上記構成を備える場合、蒸発部の温度が、効率的な熱輸送を得るための下限値の温度として定められた閾値未満となるまで、すなわち、ある作動流体によって効率的な熱輸送を行える温度範囲内では、当該作動流体が凝固しない様に凝縮部の温度が制御されるため、当該作動流体によって、より効率的な熱輸送（冷却）ができる。

【 0 0 1 7 】

[1 3]

上記制御装置は、上記温度 T_E が、作動流体 i についての上記閾値未満の場合、上記温度 T_C を、式： $T_M(i+1) < T_C < T_M(i)$ の範囲に調整する、[1 2] に記載の冷却システム。（ただし、 i は $1 \sim n-1$ の整数を表し、 n は上記冷却器が含む作動流体の種類を表す 2 以上の整数であり、 $T_M(i)$ は、上記作動流体 i についての上記温度 T_M を表し、高温順に $T_M(1)$ 、 $T_M(2)$ 、 \dots 、 $T_M(n)$ である）

冷却システムが上記構成を備える場合、複数の作動流体のそれぞれについて、その効率の良い熱輸送が可能な領域を十分利用でき、結果としてより効率的な熱輸送ができる。

【 0 0 1 8 】

[1 4]

上記制御装置は、上記温度 T_E が作動流体 n についての上記閾値未満であって、かつ、上記温度 T_E が目標温度を超えている場合、上記凝縮部を更に冷却する、[1 3] に記載の冷却システム。

冷却システムが上記構成を備える場合、容器等の熱伝導を利用して、被冷却体の冷却を更に進めることができる。このとき、冷却の目標温度が極低温であって、容器の少なくともハウジングが高純度の金属材料で構成されていると、更に効率的な熱輸送ができる。

【 0 0 1 9 】

[1 5]

被冷却体と冷熱源との間に [1] ~ [9] のいずれかに記載の冷却器を配設して、上記被冷却体と上記冷熱源との間の熱輸送により、上記被冷却体の冷却を行う、冷却方法。

[1 6]

上記被冷却体と上記冷却器とが熱的に接触して構成される蒸発部の温度 T_E が、上記冷却器が含む作動流体について予め定められた閾値未満になるまで、

上記冷熱源と上記冷却器とが熱的に接触して構成される凝縮部の温度 T_C を、上記作動流体の凝固温度を基準に予め定められた温度 T_M を超えるように調整する工程 A を含む、[1 5] に記載の冷却方法。

[1 7]

上記調整が、上記温度 T_C を式： $T_M(i+1) < T_C < T_M(i)$ の範囲に調整する工程 A 2 を含む、[1 2] に記載の冷却システム。（ただし、 i は $1 \sim n-1$ の整数を表し、 n は上記冷却器が含む作動流体の種類を表す 2 以上の整数であり、 $T_M(i)$ は、作動流体 i についての上記温度 T_M を表し、高温順に $T_M(1)$ 、 $T_M(2)$ 、 \dots 、 $T_M(n)$ である）

[1 8]

上記工程 A 2 は、上記温度 T_E が作動流体 n についての上記閾値未満であって、かつ、上記温度 T_E が目標温度を超えている場合、上記凝縮部を更に冷却する工程 B を含む、[1 7] に記載の冷却方法。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 0 】

本発明によれば、間接冷却法に使用したとき、効率的に被冷却体を冷却できる冷却器が提供できる。また、本発明によれば、熱スイッチ機構、冷却システム、及び、冷却方法も提供できる。

【 図面の簡単な説明 】

10

20

30

40

50

【 0 0 2 1 】

【 図 1 】 本発明の冷却器の第 1 の実施の形態の平面図である。

【 図 2 】 図 1 の A - A 断面図である。

【 図 3 】 本発明の冷却器の第 1 の実施の形態の正面図である。

【 図 4 】 本発明の実施形態に係る冷却システムのハードウェア構成の説明図である。

【 図 5 】 冷却システムの機能ブロック図である。

【 図 6 】 被冷却体を 3 0 0 K から目標温度まで冷却する場合における冷却システムの制御装置の動作フロー図である。

【 図 7 】 冷却システムに組み込まれた本発明の熱スイッチ機構の説明図である。

【 図 8 】 銅製の容器に窒素、又は、アルゴンを収容したヒートパイプと、同一形状の銅製ロッド（中実）と、銅製パイプ（中空）とによる入力された熱（Heat input）（W）に対する熱抵抗（Thermal Resistance）（K/W）の比較結果である。

10

【 図 9 】 窒素とアルゴンとをそれぞれ収容した銅製の容器を有する本発明の冷却器（Parallel heat pipe）と、同一寸法の銅製ロッド（2 of OFHCs・Rod）を用い、低温端（凝縮部）の温度を 7 7 K とした場合の被冷却体（蒸発部）の温度の低下にかかる時間を計算したシミュレーション結果である。

【 図 1 0 】 アルゴン、及び、窒素が収容された容器が並列に配置されて構成された 2 本のヒートパイプを有する冷却器を備えた冷却システムにおいて、凝縮部の温度を 7 7 K に維持したときの、蒸発部の温度に対する熱輸送能力を示す実験結果である。

20

【 図 1 1 】 図 1 0 と同様の実験において、凝縮部の温度を 8 2 K とした場合の実験結果である。

【 図 1 2 】 図 1 0 と同様の実験において、凝縮部の温度を 8 4 K とした場合の実験結果である。

【 図 1 3 】 図 1 0 と同様の実験において、凝縮部の温度を 8 7 K とした場合の実験結果である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 2 2 】

以下、本発明について詳細に説明する。

以下に記載する構成要件の説明は、本発明の代表的な実施形態に基づいてなされることがあるが、本発明はそのような実施形態に制限されるものではない。

30

なお、本明細書において、「～」を用いて表される数値範囲は、「～」の前後に記載される数値を下限値及び上限値として含む範囲を意味する。

【 0 0 2 3 】

[冷却器]

本発明の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。図 1 は、本発明の冷却器の第 1 の実施の形態の平面図であり、図 2 は、その A - A 断面図であり、図 3 は、正面図である。

【 0 0 2 4 】

冷却器 1 0 は並列して配置された 3 本の長尺の容器 1 1 a、容器 1 1 b、及び、容器 1 1 c（まとめて、容器 1 1 ともいう。）と、その一方端に取り付けられた直方体状の凝縮ブロック 1 2 と、他方端に取り付けられた直方体状の蒸発ブロック 1 3 とを有している。3 本の容器 1 1 は、その外径に対応する溝部を有する長尺の熱伝導体 1 4 の上記溝部にはめ込まれ、凝縮ブロック 1 2 と蒸発ブロック 1 3 とが、容器 1 1、及び、熱伝導体 1 4 を介して接続され、熱的に接触している。

40

【 0 0 2 5 】

容器 1 1 は、それぞれ中空円筒状であり、その両端は封じ切られて密閉されている。容器 1 1 は、2 重構造になっており、外周のハウジング 2 1 と、上記ハウジングの内壁に沿って配置されたウィック 2 2 とを有しており、その内部（図 2 中「Cav」と示されている）は、空洞となっている。また、容器には、それぞれ熱輸送を担う作動流体が収容され

50

ている。

【0026】

容器11の一方端に配設された凝縮ブロック12は、冷凍機、並びに、寒剤、及び、寒剤が収容された金属容器等の冷熱源と熱的に接触して凝縮部（コンデンサーセクション）を構成し、容器11内の作動流体を冷熱源によって飽和温度に冷却し、凝縮させる機能を実現する。

また、他方端に配設された蒸発ブロック13は、被冷却体と熱的に接触して蒸発部（エバポレーターセクション）を構成し、被冷却体からの熱が投入され、容器11内の作動流体を蒸発させる機能を実現する。

【0027】

容器11は、内部にウィック22を有しており、作動流体が封入された容器11は、毛細管現象を利用したヒートパイプとして機能する。

ヒートパイプの典型的な動作としては、まず、蒸発部に投入された熱がウィック内の作動流体（液体）を蒸発させる。次に、作動流体（気体）は、空洞Cavに入り、凝縮部へと移動する。凝縮部において作動流体（気体）から熱が取り除かれると、上記が凝縮して気化潜熱が放出される。凝縮液は、ウィックの毛細管力によって再度蒸発部に送られる。この一連の熱移動によって、被冷却体が冷却されていく。

【0028】

なお、冷却器10は、作動流体が封入された内部にウィック22を有する長尺の容器11が並列されて構成される、並列型の毛細管式ヒートパイプであるが、本発明の実施形態に係る冷却器の形式としては、上記に制限されず、例えば、回転（Rotating Heat Pipe）式、ガス封入（Gas-Loaded Heat Pipe）式、ループ（LHP）式、キャピラリーポンプ（CPL）式、自励振動（Pulsating Heat Pipe、PHP）式、モノグループ式、及び、逆メニスカス（Inverted Meniscus Heat Pipe）式等の各種形式とすることができる。

それぞれのヒートパイプの形状は公知であり、例えば、Frontiers in Heat Pipes（FHP）、5、1（2014）の4～9頁に記載されており、上記記載は本明細書に組み込まれる。

【0029】

また、冷却器10の容器11は、2重構造になっているが、本発明の冷却器が有する容器としては、上記構造に制限されず、ウィック22を有していなくてもよい（このような容器を「ウィックレス容器」ともいう）。容器11がウィックレス容器である場合、本発明の冷却器は重力利用型の熱サイフォンであることが好ましい。なお、以下の説明では、ヒートパイプ、及び、熱サイフォン等を合わせて「ヒートパイプ等」ともいう。

【0030】

冷却器10において、3つある容器11にはそれぞれ異なる作動流体であって、いずれも標準気圧（1atm）における沸点が300K未満の作動流体が収容されている。本発明の冷却器10の容器11に収容される作動流体には、沸点が300K未満の少なくとも2種以上の作動流体が含まれていればよく、沸点が300K以上の作動流体が含まれていてもよいが、沸点が300K以上の作動流体が含まれていないことが好ましい。すなわち、容器に収容される作動流体は、沸点が300K未満のもの、のみであることが好ましい。

【0031】

沸点が300K未満の作動流体としては、特に制限されないが、例えば、亜酸化窒素、亜硫酸ガス、アルゴン、アルシン、アレン、アンモニア、一酸化炭素、一酸化窒素、エタン、エチルアセチレン、エチレン、塩化エチル、塩化水素、塩化ビニル、塩化メチル、塩素、キセノン、クリプトン、ゲルマン、五フッ化ヒ素、五フッ化リン、三塩化ホウ素、酸化エチレン、酸素、三フッ化窒素、三フッ化ホウ素、三フッ化リン、シクロプロパン、ジクロロシラン、ジシラン、四フッ化イオウ、四フッ化ケイ素、ジボラン、ジメチルエーテ

10

20

30

40

50

ル、ジメチルプロパン、臭化水素、臭化ビニル、臭化メチル、シラン、水素、セレン化水素、二酸化炭素（昇華点）、窒素、トリメチルアミン、ネオン、1,3ブタジエン、フッ化スルフルル、フッ化ビニル、フッ化メチル、フッ素、プロパン、プロピレン、ノルマルブタン、イソブタン、ヘリウム、ホスゲン、ホスフィン、メタン、メチルアセチレン、メチルメルカプタン、硫化カルボニル、硫化水素、六フッ化イオウ、及び、六フッ化タンゲステン等が挙げられる。

【0032】

また、沸点が300K未満の作動流体としては、安全性、及び、取り扱い性等を考慮すれば、例えば、ヘリウム（融点1K、沸点4.21K、以下本段落において同様）、水素（13.8K、20.38K）、ネオン（24K、27.9K）、窒素（63.1K、77.35K）、アルゴン（83.9K、87.29K）、酸素（54.7K、90.18K）、メタン（90.6K、111.4K）、クリプトン（115.8K、119.7K）、エタン（89.9K、184.6K）、クロロジフルオロエタン（113.1K、322.2K）、及び、アンモニア（195.5K、239.9K）等が好ましい。なお、本段落において（ ）内の数値はそれぞれ、標準気圧における融点、及び、沸点を表す。

10

また、作動流体としては、二酸化炭素を用いることも好ましい。

【0033】

なかでも、より優れた本発明の効果を有する冷却器が得られる点で、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、及び、ヘリウムからなる群より選択される少なくとも1種の作動流体を含むことがより好ましく、窒素、及び、アルゴンからなる群より選択される少なくとも1種の作動流体を含むことが更に好ましく、窒素、及び、アルゴンを含むことが特に好ましい。

20

【0034】

なお、冷却器10は、3つの容器11a、11b、及び、11cと、それぞれに收容された3種類の作動流体を有しているが、本発明の冷却器としては、上記に制限されず、容器に收容された少なくとも2種以上の作動流体（沸点が300K未満）を有していればよい。

【0035】

本発明の冷却器は、例えば、1つの容器に收容された2種類以上の作動流体の混合物を有していてもよい。また、容器を3つ以上有していてもよい。この場合、そのうちの1つ以上の容器に、上記の作動流体の混合物が收容されていてもよい。

30

【0036】

冷却器が有する容器の数としては特に制限されないが、作動流体の混合物が收容される場合は、1個以上であればよく、それぞれ別の作動流体（混合物を含む）が收容される場合には、2個以上であればよく、上限は制限されないが、例えば20個以下が好ましく、10個以下がより好ましい。

【0037】

本発明の冷却器10は、容器11にガス状態の各作動流体を常温で收容し、各部材を組み立てることで製造できる。このような特徴を有する冷却器10は、少なくとも作動流体を收容した温度（例えば、300K）までは、すべての作動流体が容器11内で気化したとしても、意図しない内圧の高まりによる容器11の破損が抑制される。

40

【0038】

一般に、ヒートパイプ等は、熱負荷が増加し、熱輸送能力を超えると、内部に收容された作動流体がすべて蒸発してしまい、ヒートパイプ等としての優れた熱輸送機能が停止する（ドライアウト状態となる）。ドライアウト状態となると、容器の内圧が上昇し、破裂の虞がある。そのため、一般のヒートパイプ等、特に常温で液状の作動流体を收容して製造されるヒートパイプ等においては、ドライアウト状態はもちろん、容器内の少なくとも一部が（典型的には、蒸発部の周辺が）ドライアウト状態（部分的ドライアウト状態）であっても、これが積極的に使用されることはなかった。

【0039】

50

また、被冷却体の冷却の目標温度が100 K以下になるような極低温領域では、作動流体としてヘリウム、アルゴン、及び、酸素等が使用されることがあったが、これらは気化熱が小さく、粘度が高く、更に、表面張力が小さいため、ヒートパイプ等を用いても輸送できる熱量は少ないと考えられていたため、極低温領域で冷却用にヒートパイプ等を用いることの検討の妨げとなってきた。

【0040】

本発明者らは上記の技術常識にとらわれず、極低温領域でのより効率的な冷却方法を鋭意検討し続けた。

【0041】

まず、本発明者らは、従来の間接冷却法の問題点について、再度検討した。その結果、被冷却体と冷熱源とを繋ぐ、熱伝導体（一般に銅ストランド等が用いられる）の熱伝導率に問題の一つがあることを突き止めた。

【0042】

一般に、100 K以下の極低温領域では、金属材料の熱伝導率は金属材料の純度に大きく影響を受ける。すなわち、銅、及び、アルミ等の金属材料の熱伝導率は極低温領域では純度が高いほど高まる。

しかし、100 Kを超える領域では、熱伝導率に及ぼす純度の影響は小さく、金属材料（例えば銅ストランド）の高純度化だけでは、300 Kから極低温領域まで被冷却体を冷却するための時間を短縮することは難しかった。

【0043】

この300 Kから100 K程度までの冷却（以下「予冷」ともいう。）の時間の短縮は、冷却時間の短縮に大きな影響を与えるため、特に予冷、更には、目標温度までの冷却時間の短縮の方法を、本発明者らは更に検討した。

【0044】

その結果、従来、検討されてこなかった、ヒートパイプ等を用いて、更に、従来、使用範囲外と思われていた部分的ドライアウト状態からの使用によれば、金属ストランドをはるかに超える効率的な熱輸送が実現することを遂に知見し、本発明を完成させた。

【0045】

すなわち、沸点が300 K未満の作動流体を収容した容器で構成されるヒートパイプを用いて、被冷却体を300 K以下に冷却することによれば、従来高純度金属による恩恵を得にくかった予冷領域においても、ヒートパイプによる優れた熱輸送効率を得られ、全体として、目標温度までの冷却時間を顕著に短縮せしめることができたのである。

【0046】

図8は、銅製の容器に窒素、又は、アルゴンを収容したヒートパイプ（それぞれ、「N₂」と記載された三角のプロット、「Ar」と記載された星形のプロット）と、同一形状の銅製ロッド（中実）と、銅製パイプ（中空）とによる入力された熱（Heat input）（W）に対する熱抵抗（Thermal Resistance）（K/W）の比較結果である。

【0047】

図8によると、入力された熱（Heat input）の大きさによらず、銅製ロッド（Cal. Copper Tube）や銅製パイプ（Cal. Copper Rod）の計算値と比較して、それぞれの作動流体を収容したヒートパイプの方が熱抵抗は小さいことがわかる。更に、驚くべきことに、矢印D1、及び、矢印D2よりも横軸右側方の領域、すなわち、部分的ドライアウト状態（凝縮部で作動流体の液化は起こるが、容器内には液状の作動流体が存在しない領域がある）であっても、なお銅製ロッドや銅製パイプと比較してより小さな熱抵抗率であることが明らかになったのである。

【0048】

更に本発明の冷却器はヒートパイプ等を並列化、又は、複数の作動流体を混合したヒートパイプ等（この場合は熱サイフォン式が好ましい）等を用いるため、ヒートパイプ等による効率的な熱輸送の作動温度領域をより広く取ることができるとともに、これも冷却時間の

10

20

30

40

50

短縮に貢献している。

【 0 0 4 9 】

作動流体は、冷却の目標温度に応じて適宜選択すればよいが、高純度金属による高熱伝導率の優位性を十分にうけにくい予冷領域での冷却速度をより向上する観点では、作動流体は、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、ヘリウム、メタン、クリプトン、エタン、クロロジフルオロエタン、及び、アンモニアからなる群より選択される少なくとも1種を含むことが好ましく、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、ヘリウムメタン、クリプトン、エタン、及び、クロロジフルオロエタンからなる群より選択される少なくとも1種を含むことがより好ましく、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、ヘリウム、メタン、クリプトン、及び、エタンからなる群より選択される少なくとも1種を含むことが更に好ましく、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、ヘリウム、メタン、及び、クリプトンからなる群より選択される少なくとも1種を含むことが特に好ましく、窒素、水素、キセノン、アルゴン、ネオン、酸素、二酸化炭素、及び、ヘリウムを含むことが最も好ましい。

10

【 0 0 5 0 】

更に、容器、（及び、熱伝導体14）を高純度の金属材料により形成すれば、予熱ではヒートパイプ等の効率的な熱輸送、およそ100K以下の温度領域では、更に高純度金属による効率的な熱伝導による熱輸送の効果が得られ、予冷～目標温度までの冷却の全体をより効率的に行うことができる。

20

【 0 0 5 1 】

容器の材質としては特に制限されないが、銅、及び、アルミニウム等が好ましく、残留抵抗比（RRR）が30以上（以下、単に「高純度」ともいう。）であることが好ましく、100以上であることがより好ましく、300以上であることが更に好ましい。上限は特に制限されないが、一般に3000以下が好ましい。

【 0 0 5 2 】

特に、容器に収容された作動流体のうちで、最も凝固点の低い作動流体の凝固点よりも、被冷却体についての冷却の目標温度が低い場合であって、及び/又は、上記目標温度が、100K以下（好ましくは90K以下、より好ましくは80K以下が、更に好ましくは70K以下、特に好ましくは60K以下、最も好ましくは50K以下）である場合、容器の材質が上記の残留抵抗比（RRR）が30以上の金属材料であると、更に効率的な冷却を行うことができる。

30

【 0 0 5 3 】

上記のような場合、高純度金属材料の熱伝導率の優位性が発揮されにくい100Kを超えるような温度領域（予冷）では、作動流体が収容されたヒートパイプ等としての稼働による、より効率的な熱輸送を享受でき、被冷却体の冷却が進み、高純度金属材料の熱伝導率の優位性が発揮される領域では、作動流体がすべて凝固してしまうような場合であっても、容器の熱伝導による、より効率的な熱輸送が可能となる。すなわち、ヒートパイプ等、及び、高純度金属材料を組み合わせることによって、特に目標温度が極低温領域の場合に、より効率的な冷却が可能になる。

40

【 0 0 5 4 】

高純度金属の熱伝導率は温度に対して極大値を有し、そのピーク温度は、純度が高くなると、低温側にシフトすることが知られている。そのため、容器の金属材料の純度は、その熱伝導率の極大となる領域をより効率的に使えるように、目標温度に応じて定めればよい。すなわち、目標温度が、熱伝導率のピーク温度以上（ピーク温度以上に高温側に）になるよう選択されることが好ましい。

【 0 0 5 5 】

一方、作動流体が、ヘリウム、水素、及び、ネオンからなる群より選択される少なくとも1種を含む場合、目標温度がより低くてもヒートパイプの効率的な熱輸送の効果をj得ることができる。

50

【 0 0 5 6 】

図 9 は、窒素とアルゴンとをそれぞれ収容した銅製の容器を有する本発明の冷却器 (P a r a l l e l h e a t p i p e) と、同一寸法の銅製ロッド (2 o f O F H C s ・ R o d) を用い、低温端 (凝縮部) の温度を 7 7 K とした場合の被冷却体 (蒸発部) の温度の低下にかかる時間を計算したシミュレーション結果である。

図 9 の結果から、同一寸法の銅製ロッドを使用した場合と比較して、本発明の冷却器を用いた場合には、冷却時間をおよそ 1 / 3 にできることが明らかになった。

【 0 0 5 7 】

次に、典型的な冷却器 1 0 の使用方法について説明する。

冷却器 1 0 は、被冷却体と冷熱源との間に、それぞれと熱的に接触するよう配設される。典型的には、被冷却体と蒸発ブロック 1 3 とが接触して蒸発部を構成し、冷熱源と凝縮ブロック 1 2 とが接触して凝縮部を構成するよう配設される。

このような構成によって、被冷却体を 3 0 0 K 以下の目標温度まで冷却する方法について説明する。

【 0 0 5 8 】

まず、冷却器 1 0 の容器 1 1 には、それぞれ沸点の異なる作動流体が収容されている。そのため、容器 1 1 内における各作動流体の飽和温度もそれぞれ異なっている。ここでは、容器 1 1 に収容されている各作動流体をそれぞれ作動流体 1、2、3 とし、その飽和温度をそれぞれ高温側から、 $k(1)$ 、 $k(2)$ 、 $k(3)$ [単位は K] とする。

【 0 0 5 9 】

まず、凝縮部の温度が、作動流体 1 の飽和温度よりも高い場合には、いずれの作動流体も気化しており、いわゆるドライアウト状態となっている。

従来、ドライアウト状態では、熱輸送の効率が下がること、及び、内圧が上がって容器が破裂する可能性があると考えられていたが、本発明の冷却器においては、それぞれの容器には沸点が 3 0 0 K 以上の作動流体が収容されているため、ドライアウト状態であっても破裂の虞はほとんどない。

【 0 0 6 0 】

次に凝縮部の温度が、作動流体 1 の飽和温度 [$k(1)$] K 程度になると、容器 1 1 内部の凝縮部の周辺で作動流体 1 が凝縮し始め、ウィック 2 2 が完全に乾いたドライアウト状態から、容器の少なくとも一部 (ウィック 2 2 の一部) に液状の作動流体 1 が発生し始める。この状態は、容器内が部分的なドライアウト状態になっているということができ、この領域を積極的に利用することにより優れた熱輸送効率を得られる。

【 0 0 6 1 】

この部分的なドライアウト状態、及び、通常のヒートパイプとして動作する状態を経て、被冷却体 (蒸発部) が一定水準まで冷却されると、冷熱源の温度等によっては、凝縮部の温度が作動流体 1 の凝固温度より低くなる。すると、作動流体 1 は、容器 1 1 内にて凝固する。すると、作動流体 1 が収容された容器 1 1 による熱輸送は、容器 1 1 の筐体 (ハウジング 2 1) の熱伝導が主体となり効率が下がる。

【 0 0 6 2 】

一方、冷却器 1 0 は、作動流体 1 よりも飽和温度の低い作動流体 2、及び、作動流体 3 が収容された容器 1 1 を更に有している。そのため、凝縮部の温度が下がるに従って、順次、作動流体 2 が収容された容器 1 1、作動流体 3 が収容された容器 1 1 が上記と同様に作動していく。

【 0 0 6 3 】

このようにして、本発明の冷却器は、間接冷却法に適用した場合、効率よく被冷却体の温度を下げるができる。

【 0 0 6 4 】

なお、冷却器 1 0 は、本発明の実施形態の一例であり、本発明の効果を奏する限りにおいて、種々の変更が可能である。また、各部の寸法等についても用途等に応じて、公知の方法によって適宜変更である。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 5 】

例えば、冷却器 1 0 は、凝縮ブロック 1 2、蒸発ブロック 1 3、及び、熱伝導体 1 4 を有しているが、本発明の実施形態に係る冷却器としては、上記各部材の一部、又は、全部を有していなくてもよい。

その場合、並列して配置された複数の容器 1 1 の一方端が冷凍機のコールドステージに熱的に接触していたり、及び/又は、他方端が被冷却体に熱的に接触していたりする形態であってもよい。

【 0 0 6 6 】

また、冷却器 1 0 において、凝縮ブロック 1 2、及び、蒸発ブロック 1 3 は、それぞれ容器 1 1 の両端に配置されているが、凝縮ブロック 1 2、及び、蒸発ブロック 1 3 と、容器 1 1 との相対的な位置関係は任意に変更することができる。

また、本冷却器 1 0 は、凝縮ブロック 1 2 と蒸発ブロック 1 3 とを 1 組有しているが、上記に制限されず、冷却器は、複数の凝縮ブロックと蒸発ブロックとを有していてもよい。

【 0 0 6 7 】

また、容器 1 1 の形状、及び、大きさも特に制限されず、用途に応じて適宜変更可能である。容器 1 1 は中空円筒状であるが、矩形、錐形、環状、及び、波形等のいずれであってもよい。

本実施形態に係る冷却器は、超電導部材等を冷却するための間接冷却法に用いると、効率的に冷却を行うことができ、従来よりも冷却にかかる時間（特に予冷にかかる時間）を大幅に減少させることができる。

【 0 0 6 8 】

[冷却システム]

図 4 は、本発明の実施形態に係る冷却システムのハードウェア構成の説明図である。

冷却システム 4 0 は、冷凍機 5 2 と、被冷却体 4 4 との間に配設された冷却器 1 0 とを有する。

【 0 0 6 9 】

冷凍機 5 2 は、コールドヘッド 4 1、1 段目のコールドステージ 4 2 a、及び、2 段目のコールドステージ 4 2 b からなる冷凍ユニット 4 3 と、圧縮ユニット 5 0 と、制御装置 5 1 とから構成されている。

【 0 0 7 0 】

被冷却体 4 4 は、クライオスタット 4 9 内に配置された輻射シールド 4 8 内に配置されており、冷却器 1 0 の蒸発ブロック 1 3 と熱的に接触して蒸発部を構成しており、クライオスタット 4 9 内の輻射シールド 4 8 内に挿入された二段目のコールドステージ 4 2 b は、凝縮ブロック 1 2 と熱的に接触して凝縮部を構成している。

なお、図示は省略されているが、凝縮ブロック 1 2 と蒸発ブロック 1 3 との間には熱伝導体 1 4 も配設されている。なお、冷却システムは、熱伝導体 1 4 を有していなくてもよい。

【 0 0 7 1 】

作動流体が収容されている容器 1 1 は、各作動流体のバッファータンク 4 5 と、弁 4 6、及び、配管 4 7 を介して接続されていて、内部の作動流体の量を調整することができるようになっている。なお、冷却システムは、上記バッファータンク 4 5 を有していなくてもよい。

また、本実施形態に係る冷却器 1 0 は、容器の内部にウィックを有するヒートパイプであるが、熱サイフォン（重力還流式ウィックレスヒートパイプ）であってもよい。

【 0 0 7 2 】

また、冷却システム 4 0 は凝縮部の温度 T C を検出する凝縮部温度センサと、蒸発部の温度 T E を検出する蒸発部温度センサとを有している。また、冷却システム 4 0 は、凝縮部を加熱するための再熱ヒータを有している。なお、いずれも図示は省略されている。

【 0 0 7 3 】

次に、冷却システム 40 の機能について説明する。図 5 は、冷却システム 40 の機能ブロック図である。

冷却システム 40 は、制御装置 51 と、冷却部 61 と温調部 62 と、温度比較部 63 とを有しており、各部は相互にデータのやり取りが可能ないように構成されている。

【0074】

まず、制御装置 51 は、CPU (Central Processing Unit)、ROM (Read Only Memory)、及び、RAM (Random Access Memory) 等を含む周知のコンピュータとその周辺回路から構成されている。制御装置 51 は、その ROM 内に記憶された制御プログラムに基づいて各種演算、処理を行う。制御装置 51 は、凝縮部温度センサ、及び、蒸発部温度センサの入力をもとに、冷却部 61、温調部 62、及び、温度比較部 63 を制御し、冷却システム 40 の各機能を実現する。

10

【0075】

なお、制御装置 51 の全部、又は、一部を FPGA (Field Programmable Gate Array) 及び、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 等の回路を用いて構成することも可能である。

すなわち、図 9 に記載された各機能ブロックの機能は、例示されたコンピュータをベースに構成することもできるし、その全部、又は、一部を FPGA、及び、ASIC などの回路を用いて構成することができる。

20

また、各機能ブロックの機能の少なくとも一部は、アナログ回路によって構成することも可能である

【0076】

制御装置 51 の入力側には、蒸発部の温度 TE を検出する蒸発部温度センサ 64 と凝縮部の温度 TC を検出する凝縮部温度センサ 65 とが接続されている。そして、制御装置 51 には、これらのセンサ群の検出信号が入力される。

【0077】

冷却部 61 の機能は、制御装置 51 の記憶デバイスに記憶されたプログラム (冷却部制御 PG 61a) が、CPU によって実行され、冷凍ユニット 43、及び、圧縮ユニット 50 に接続された 1 段目のコールドステージ 42a、及び、2 段目のコールドステージ 42b が制御されて実現される。

30

【0078】

温調部 62 の機能は、制御装置 51 の記憶デバイスに記憶されたプログラム (温調部制御 PG 62a) が、CPU によって実行され、再熱ヒータ 62b が制御されて実現される。温調部 62 によって凝縮部の温度が (典型的には加熱されて) 調整される。

なお、本冷却システム 40 は、再熱ヒータ 62b を有しているが、冷却システム 40 が再熱ヒータ 62b を有していない場合、温調部 62 は、圧縮ユニット 50、及び/又は、冷凍ユニット 43 の出力を制御して、凝縮部の温度を調整する形態とすることもできる。

【0079】

温度比較部 63 の機能は、制御装置 51 の記憶デバイスに記憶されたプログラムが、CPU によって実行されて実現される。温度比較部 63 は、蒸発部温度センサの検出信号 (蒸発部の温度 TE) を作動流体ごとに予め定められて ROM に記憶された閾値 (詳細は後述する) と比較する TE / 閾値比較部 63a と、凝縮部温度センサの検出信号 (凝縮部の温度 TC) と作動流体の凝固温度を基準に予め定められた温度 TM とを比較する TC / TM 比較部 63b を有している。

40

【0080】

次に、冷却システム 40 の動作について、制御装置 51 の動作フローに基づいて説明する。

【0081】

図 6 は、被冷却体を 300 K から目標温度まで冷却する場合における冷却システム 40

50

の制御装置 5 1 の動作フロー図である。

なお、以下の説明において、冷却器 1 0 の容器 1 1 に収容された作動流体を、沸点の高い順に、それぞれ、作動流体 1、作動流体 2、・・・、作動流体 n という（冷却器 1 0 については、 $n = 3$ となる）。

【0082】

まず、ステップ S 7 1 において、制御装置 5 1 によって、冷却部 6 1 が制御され、1 段目のコールドステージ 4 2 a、及び、2 段目のコールドステージ 4 2 b の冷却が開始される。コールドステージ（4 2 a、4 2 b）の冷却が開始されると、凝縮部が冷却されると共に、冷却器 1 0 による熱輸送によって蒸発部も冷却されていく。

【0083】

冷却が開始され、凝縮部の温度 T_C が、作動流体 1 の飽和温度に達すると、凝縮部において作動流体 1 の凝縮が始まり、作動流体 1 が収容された容器内では、部分的ドライアウト状態になってヒートパイプとしての動作が始まり、凝縮部と蒸発部との間で効率的な熱輸送が開始され、蒸発部の温度が迅速に低下していく。

【0084】

次に、ステップ S 7 2 において、制御装置 5 1 によって、温度比較部 6 3 が制御され、蒸発部温度センサによって検出される蒸発部の温度 T_E と、作動流体 1 について予め定められた閾値とが比較される。この閾値は、効率的な熱輸送を得るための下限値の温度として予め定められる値である。

【0085】

この閾値は、典型的には作動流体 1 が収容された容器がヒートパイプとして効率的に熱輸送するために必要な蒸発部と凝縮部との温度差、飽和圧力等を考慮して定められる。

閾値の定め方は特に制限されないが、一例として、以下のような実験結果に基づき定めることもできる。

【0086】

図 1 0 ~ 1 3 は、アルゴン、及び、窒素が収容された容器が並列に配置されて構成された 2 本のヒートパイプを有する冷却器を備えた冷却システムにおいて、凝縮部の温度を 7 7 K（図 1 0）、8 2 K（図 1 1）、8 4 K（図 1 2）、及び、8 7 K（図 1 3）に維持したときの、蒸発部の温度に対する熱輸送能力を示す実験結果である。横軸は蒸発部の温度（K）、縦軸は熱伝達率（Heat Transfer Rate）（W）を示している。なお、各図中、Parallel-Heat pipe とあるのは、上記冷却器の測定値、OFHCs-Rod とあるのは、銅製ロッドの測定値、及び、OFHCs-Tube とあるのは、銅製チューブの測定値である。

【0087】

図 1 0 ~ 1 3 の結果から明らかなように、蒸発部の温度が常温付近である状態（約 3 0 0 K）から冷却を開始すると、蒸発部の温度がおおよそ 9 0 K 以上であるときには、熱伝達率が高く維持されていることがわかる。これは、部分的ドライアウト状態を経て開始されるヒートパイプとしての動作によって優れた熱輸送効率が得られるためだと推測される。

【0088】

一方、蒸発部の温度がおおよそ 9 0 K 未満になってくると、凝縮部と蒸発部との温度差は徐々に小さくなって、結果として熱伝達率は下がって行くことがわかる。

このような実験結果によれば、作動流体としてアルゴンを対象とした場合には、その閾値を 8 4 ~ 8 9 K に定めるという方法がある。

【0089】

各作動流体の閾値は、容器内に封入する作動流体の圧力によって異なるものの、一例として、ヘリウムは 2 ~ 3 K、水素は 1 4 ~ 2 0 K、ネオンは 2 7 ~ 3 2 K、窒素は 7 0 ~ 7 5 K、アルゴンは 8 4 ~ 8 9 K、酸素は 7 3 ~ 7 8 K、メタンは 9 1 ~ 9 6 K、クリプトンは 1 1 6 ~ 1 2 1 K、エタンは 1 5 0 ~ 1 5 5 K、クロロジフルオロエタンは、1 9 3 ~ 1 9 8 K、及び、アンモニアは、2 1 3 ~ 2 1 8 K 等が挙げられる。

【0090】

10

20

30

40

50

次に、上記比較の結果、温度 T_E が作動流体 1 の閾値以上である、すなわち、温度 T_E が閾値未満「ではない」場合（ステップ S 7 3 : N O）、依然として、蒸発部の温度は十分に高く、作動流体 1 による効率的な熱輸送が可能な領域である。

そのため、制御装置 5 1 は、凝縮部温度センサによって検出される凝縮部の温度 T_C を、作動流体 1 の凝固温度を基準に予め定められた温度 $T_M(1)$ を超えるように調整する（ステップ S 7 4）。すなわち、制御装置 5 1 は、凝縮部において作動流体 1 が凝固して熱輸送効率が下がらない様、温度 T_C を監視して、必要に応じて温調部 6 2 を制御し、凝縮部の温度を調整する（工程 A）。

【 0 0 9 1 】

温調部 6 2 の機能として説明したとおり、凝縮部の温度制御の方法は特に制限されないが、例えば、再熱ヒータによって加熱したり、電力供給を調整することによってコールドステージの出力を調整したりする方法が挙げられる。

このようにすることで、作動流体 1 が収容された容器が、ヒートパイプとして十分に稼働し、凝縮部と蒸発部との間での効率的な熱輸送が得られる。

【 0 0 9 2 】

なお、この温度 $T_M(1)$ は、作動流体 1 の凝固点等を参考に定めることができる。例えば、図 1 0 ~ 1 3 の実験結果において、作動流体であるアルゴンに着目すると、温度 $T_M(1)$ は、7 7 K を超える値とすることが好ましく、8 2 K 以上の値が更に好ましい。なお、 $T_M(1)$ の上限は特に制限されないが、作動流体 1 の飽和温度以下が好ましい。

【 0 0 9 3 】

一方、上記比較の結果、温度 T_E が閾値未満の場合（ステップ S 7 3 : Y E S）、蒸発部の冷却が進んだことにより、温度 T_C と温度 T_E との差が小さくなり、既に作動流体 1 で効率的な熱輸送が行える範囲の下限を温度 T_E が下回っている状態であるため、次に、熱輸送の主体を作動流体 2 が収容された容器に切り替える。

【 0 0 9 4 】

すなわち、制御装置 5 1 が温調部 6 2 を制御して、温度 T_C を、式： $T_M(i+1) < T_C < T_M(i)$ の範囲に調整する（ステップ S 7 5、工程 A 2）。

式中、 i は 1 ~ $n - 1$ の整数を表し、 n は冷却器が含む作動流体の種類（すなわち種類の合計）を表す 2 以上の整数であり、 $T_M(i)$ は、作動流体 i についての温度 T_M を表し、高温順に $T_M(1)$ 、 $T_M(2)$ 、 \dots 、 $T_M(n)$ である。

【 0 0 9 5 】

具体的に説明すると、ステップ S 7 3 において、 T_E が作動流体 1（すなわち $i = 1$ ）について定められた閾値未満である場合（ステップ S 7 3 : Y E S）、制御装置は、1 回目のステップ S 7 5 として、温度 T_C を $T_M(2) < T_C < T_M(1)$ の範囲に制御する。

【 0 0 9 6 】

凝縮部が $T_M(1)$ 以下となると、作動流体 1 は既に容器内で凝固しはじめている（又は、完全に凝固している）ため、作動流体 1 が収容された容器は、ヒートパイプ動作による効率的な熱輸送ができなくなっているが、一方で、収容されている作動流体の中で次に T_M が高い作動流体 2 の作動範囲内で温度 T_C を維持することによって、作動流体 2 が収容された容器のヒートパイプ動作によって効率的な熱輸送を行うことができる。

【 0 0 9 7 】

次に、ステップ S 7 6 において、再度、蒸発部の温度 T_E と、作動流体 $i + 1$ （1 回目のステップ S 7 6 では、 $i + 1$ は 2 である）について予め定められた閾値とが比較される。この閾値は、作動流体 1 の場合と同様に定めることができる。

【 0 0 9 8 】

この結果、温度 T_E が作動流体 $i + 1$ の閾値未満であって（ステップ S 7 6 : Y E S）、温度 T_E が目標温度を超えている、すなわち目標温度以下「ではない」場合であって（ステップ S 7 7 : N o）、 $i + 1$ が n 未満である（すなわち、最後の種類の作動流体でない）場合（ステップ S 7 8 : Y E S）、 i に 1 が加えられて（ $i = i + 1$ ）（ステップ S

10

20

30

40

50

79)、ステップS75～ステップS78が繰り返される。

この繰り返しによって、冷却器に複数含まれる作動流体のそれぞれを、部分的ドライアウト状態～ヒートパイプとして効率よく動作する状態で順次利用することができ、より短時間で冷却を行うことができる。

【0099】

一方、温度TEが作動流体i+1の閾値未満「ではない」場合、すなわち、閾値以上である場合(ステップS76:NO)、作動流体i+1が収容された容器の効率よいヒートパイプ動作は依然として可能であるため、再度、温度TCが $T_M(i+1) < T_C - T_M(i)$ の範囲に制御される(ステップS75)。

【0100】

また、温度TEが作動流体i+1の閾値未満であって(ステップS76:YES)、温度TEが目標温度に達している、すなわち、温度TEが目標温度以下である場合(ステップS77:YES)、冷却は終了する。

【0101】

また、上記繰り返しの結果、i+1がnと等しくなった場合、すなわち、i+1がn未満「ではない」場合(ステップS78:No)、繰り返しは終了する。この状態はすなわち、最も低い閾値(つまり、最も低い温度TM)を持つ作動流体nによる効率のよいヒートパイプ動作が可能な領域よりも蒸発部が更に冷却されていることを示している。

【0102】

このとき、蒸発部の温度TEが、目標温度に以下である場合には(ステップS80:YES)、冷却は終了する。

一方、TEが目標温度を超えている場合、すなわち、目標温度以下「ではない」場合(ステップS80:NO)、制御装置51は、温調部62を制御して、コールドステージ42bを更に冷却することによって凝縮部を更に冷却する(ステップS81、工程B)。

【0103】

この工程Bにおいては、典型的には容器内の作動流体nをはじめとする各作動流体は少なくとも凝縮部において凝固しており、そのため、ヒートパイプとしての優れた熱輸送効率は発揮されにくい。

このとき、冷却器10の容器11の少なくとも1つの材質が、高純度金属であると、より優れた冷却効率が得られる。この傾向は、目標温度が、極低温領域(具体的には100K)以下である場合に特に顕著である。その理由は、銅、及び、アルミ等の熱伝導率が極低温領域において純度によって大きく変わるためである。

【0104】

すでに説明したとおり、銅、及び、アルミ等の金属材料の熱伝導率は、極低温領域で、極大値を有し、その極大温度は、金属材料の純度が高まるに従い低温側にシフトすることが知られている。

冷却の目標温度との関係では、より効率的な熱輸送が実現し、より短時間で冷却が行える観点で、容器の材質によって定まる熱伝導率の極大温度以上の(高い)温度に目標温度を設定することが好ましい。

【0105】

なお、本冷却器は、すでに説明したとおり、冷却システム40のように冷凍機52と組み合わせて用いることもできるが、冷凍機以外の冷熱源と組み合わせて被冷却体の冷却に用いることもできる。

このような冷熱源としては、例えば、各種寒剤を収容した金属容器等、及び、各種寒剤そのもの等が挙げられる。また、このような冷熱源を使用した場合であっても、上記と同様の冷却方法を適用することができる。

【0106】

[熱スイッチ機構]

次に、本発明の冷却器を用いた熱スイッチ機構について説明する。熱スイッチ機構とは、例えば、冷熱源と被冷却体との間に冷却器を配置し、被冷却体を所定の温度まで冷却し

10

20

30

40

50

た後、両者の間の熱伝導を減少（遮断）する熱伝導の切り替えスイッチ機構を意味する。

【0107】

被冷却体である超電導部材等の冷却に際し、目標温度まで冷却が終了しても、更に冷凍機を運転し続けると消費エネルギーが大きくなる。一般に、超電導部材等は抵抗が小さく、発熱量も小さいため、一旦、冷却の目標温度に達した後は、冷凍機の運転を停止したとしても、冷凍機と被冷却体との間を熱的に切り離せば、極低温の動作環境を保つことができる。

【0108】

このような熱的な切り離しは、機械的な機構をもって行うこともできる。しかし、特に被冷却体が超電導部材等である場合、機械的な機構によって生ずる熱や振動が、大きな問題となってしまう場合がある。また、機械的な機構をクライオスタット内に収めるには、構造的な制約もあり、物理的な接触やその解除を伴わない、熱スイッチ機構が求められている。

10

【0109】

図7は、冷却システムに組み込まれた本発明の熱スイッチ機構の説明図である。なお、以下では、すでに説明した冷却システム40との違いについて主に説明し、すでに説明した冷却システム40と同様の部分は説明を省略する。

【0110】

冷却システム90は、熱スイッチ機構92を備えており、熱スイッチ機構92は、容器91と、その両端に配置された凝縮ブロック12と、蒸発ブロック13とを有する。この容器91には、すでに説明した冷却器10と同様に、それぞれ異なる種類の作動流体が收容されている。

20

【0111】

熱スイッチ機構92の特徴点の一つは、容器91の293Kにおける熱伝導率が24W/m・K以下である点である。容器91の熱伝導率が低いため、容器91自体による熱伝導による凝縮部と蒸発部との熱輸送は無視できるほどに小さい。なお、熱伝導率の下限としては特に制限されないが、一般に、0.01W/m・K(293K)以上であってよい。

【0112】

冷却システム90は、冷却の目標温度を作動流体nが凝縮部において凝固する温度程度に設定して使用する。

30

【0113】

冷却がスタートすると、すでに説明した冷却システム40と同様に蒸発部の冷却が効率的に進んでいく。そして、目標温度に達すると、作動流体nは凝縮部において凝固するため、各容器91のヒートパイプとしての動作は停止する。

【0114】

このとき、凝縮部と蒸発部とは、容器91によって接続されているものの、容器91の熱伝導率が低いため、ヒートパイプとしての動作が止まったのちは、凝縮部と蒸発部との熱輸送が殆ど起こらなくなる。これによって、機械的な機構を全く備えなくとも熱スイッチ機構が実現される。

40

【0115】

なお、熱スイッチ機構92の容器91の材質としては、熱伝導率が所定の範囲にあれば、特に制限されないが、ステンレス鋼等が好ましい。

【産業上の利用可能性】

【0116】

本発明の冷却器によれば、従来知られていたヒートパイプ/熱サイフォンについて極低温に沸点のある作動流体を複数種組み合わせることで幅広い動作範囲で高い熱伝導度を実現することができ、極低温機器の冷却速度を飛躍的に短縮することができる。

【0117】

一形態として15~90K程度で液化するガス（アルゴン、酸素、窒素、ネオン、キセ

50

ノン、及び、水素)をそれぞれ充填した容器を並列で、又は、これらを混合して充填した容器を組み合わせることで幅広い温度領域での熱輸送能力の劇的な改善が可能になった。

【0118】

本発明の冷却器を用いれば、従来、熱輸送効率が高めにくいとされていた水平方向における使用であっても、300 Kから温度約80 Kまでに冷却する時間が従来の1/3程度に短縮され、冷却に必要なエネルギーも大幅に削減することが可能である。また、従来知られた各種ヒートパイプ/熱サイフォンの技術をそのまま適用できるため、応用の幅は広い。

【0119】

また、特徴点の一つとして、ヒートパイプの(部分的)ドライアウト状態も極低温ヒートパイプでは活用可能であることに着目して、これを実験的に証明したことでヒートパイプが動作可能な領域を広げた。

【0120】

本発明の冷却器、熱スイッチ機構、冷却システム、及び、冷却方法は、宇宙科学分野(人工衛星に搭載される極低温機器の冷却等)、医療分野(超電導部材を利用した磁気共鳴映像装置の冷却等)、及び、物性科学分野(各種の超電導部材を用いた装置の冷却等)において、利用可能である。

【符号の説明】

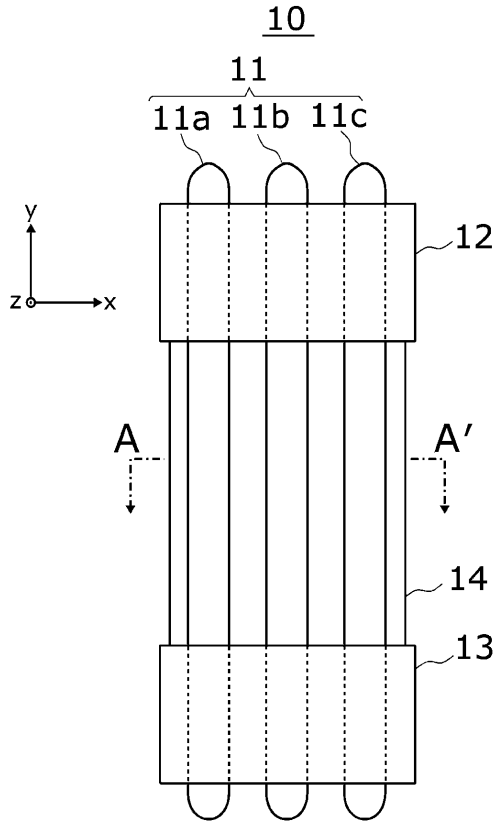
【0121】

1：作動流体、2：作動流体、3：作動流体、10：冷却器、11：容器、12：凝縮ブロック、13：蒸発ブロック、14：熱伝導体、21：ハウジング、22：ウィック、40、90：冷却システム、41：コールドヘッド、42a、42b：コールドステージ、43：冷凍ユニット、44：被冷却体、45：バッファータンク、46：弁、47：配管、48：輻射シールド、49：クライオスタット、50：圧縮ユニット、51：制御装置、52：冷凍機、61：冷却部、62：温調部、63：温度比較部、91：容器、92：熱スイッチ機構

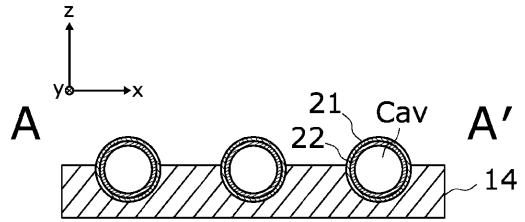
10

20

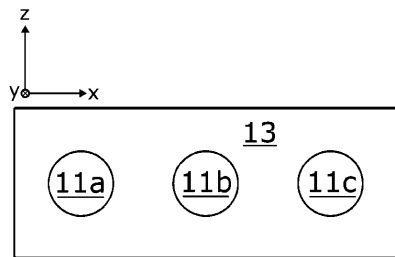
【図 1】



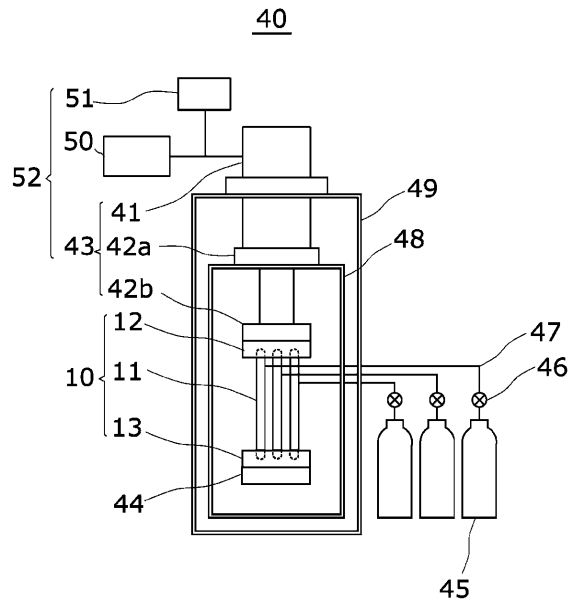
【図 2】



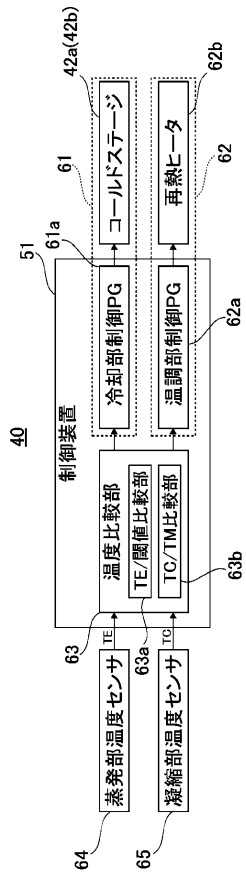
【図 3】



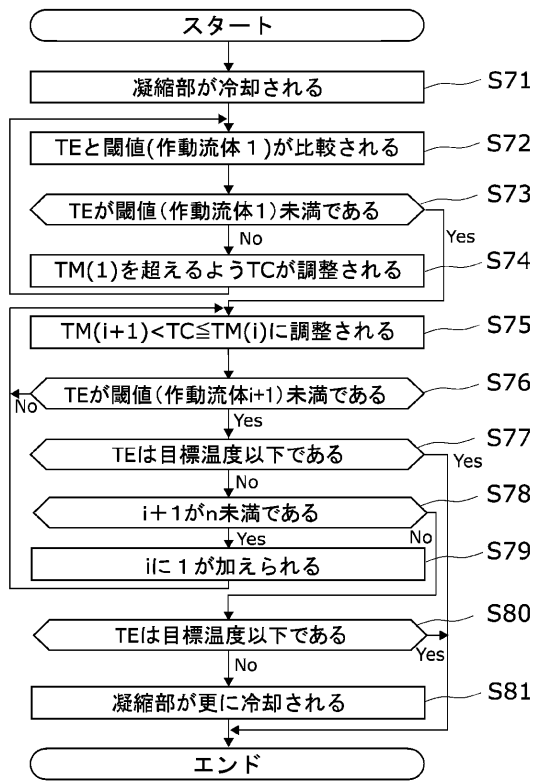
【図 4】



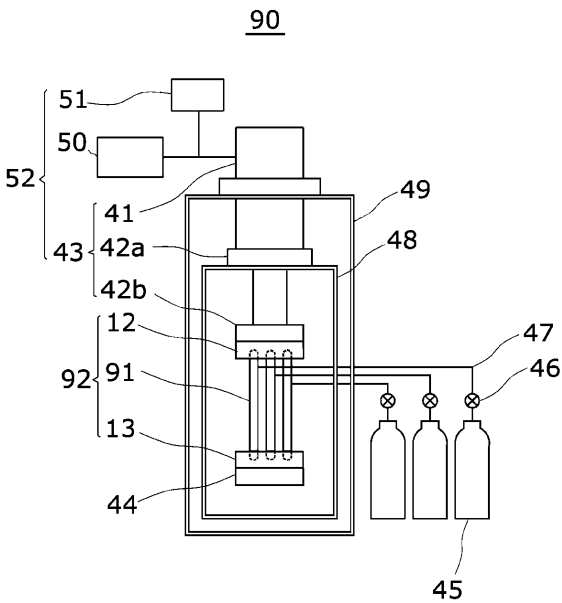
【図5】



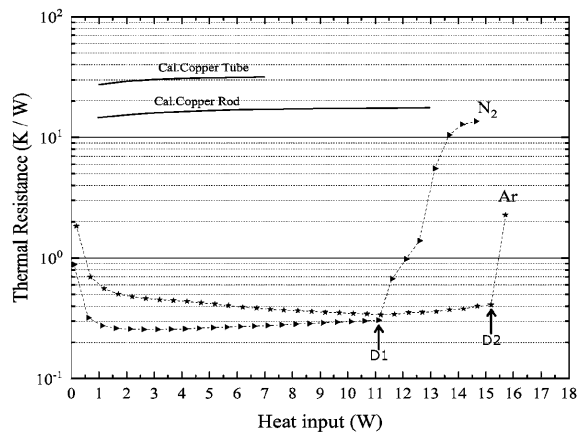
【図6】



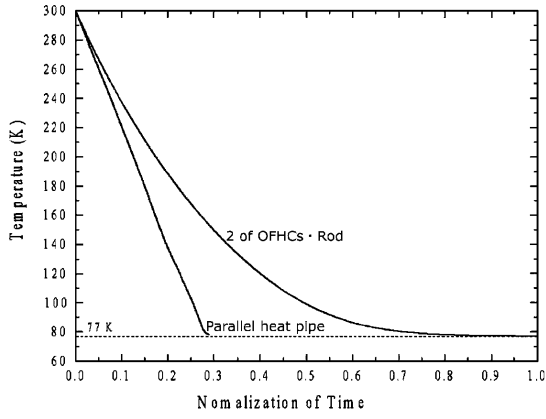
【図7】



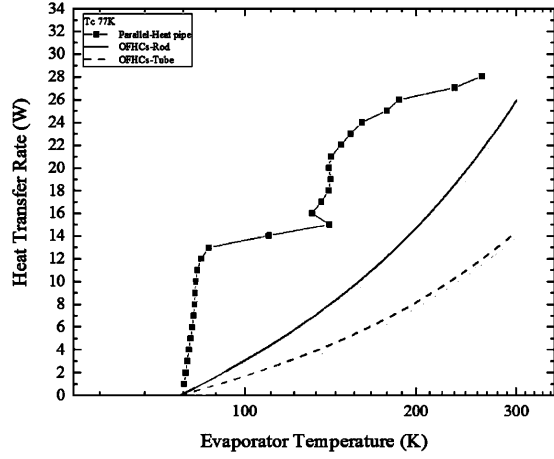
【図8】



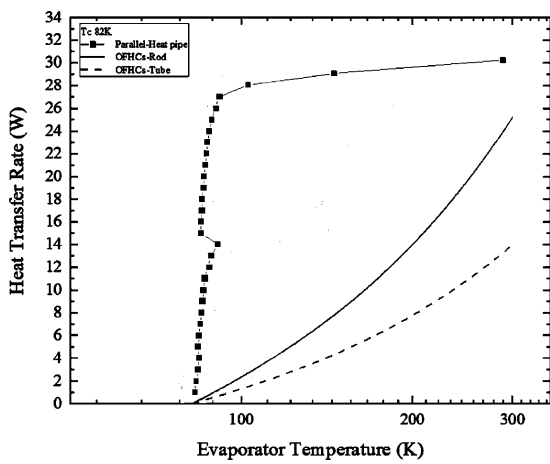
【 図 9 】



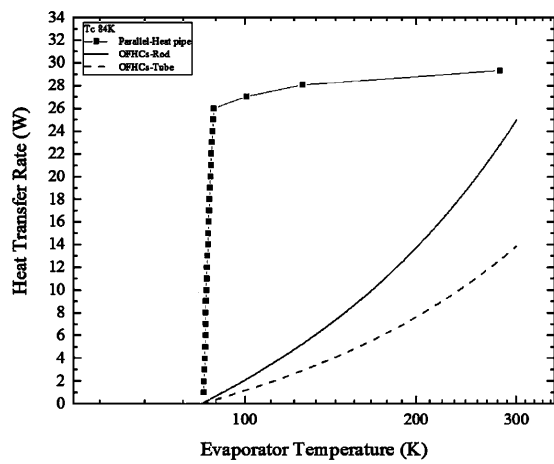
【 図 1 0 】



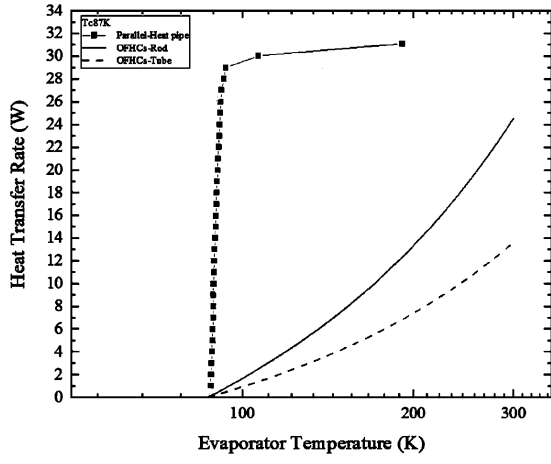
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



フロントページの続き

(72)発明者 高 田 卓

岐阜県土岐市下石町322-6 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所内

(72)発明者 ラムナロング ワニソン

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