

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04848

研究課題名(和文) 低温ヒートパイプに高純度金属を組み合わせた新しい極低温機器用冷却導体の開発

研究課題名(英文) Development of cryogenic conduction cooling conductor having a unique structure made by combination of heat pipe and very high purity aluminum

研究代表者

木村 誠宏 (KIMURA, Nobuhiro)

東京大学・宇宙線研究所・特任専門員

研究者番号：10249899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：窒素ガス、アルゴンガス、ネオンガスなど臨界温度の異なる作動流体を封入した低温ヒートパイプの基本特性について、次の成果を得た。

・異なる作動流体を個々に内蔵したヒートパイプの並列化で作動領域が拡張され、高純度金属製伝導冷却導体比べて並列化ヒートパイプは100倍程度改善されることを実証。・臨界温度が異なる作動流体の並列化によりヒートパイプの作動温度範囲が拡大できることを実証。・作動流体を内包したヒートパイプの並列化使用について特許出願。・有効温度の異なる作動流体のヒートパイプ(アルゴンと窒素)を並列の配置することによって、ヒートパイプとして作動する有効温度範囲が拡大できることを実証。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、極低温ヒートパイプのドライアウト領域が優れた熱伝導特性を示し、且つ超伝導磁石等の予冷時間が短縮できることが示された。従来、ヒートパイプのドライアウト領域は熱伝導素子の性能領域外とされていたが、極低温ヒートパイプに限ってはヒートパイプのドライアウト領域においても優れた熱伝導特性を示した。これは極低温ヒートパイプを冷却に使用した超伝導磁石がその予冷に必要なエネルギーを軽減(省エネルギー硬貨)できることを意味する。

研究成果の概要(英文)：The following results were obtained on the basic characteristics of low-temperature heat pipes containing working fluids with different critical temperatures, such as nitrogen gas, argon gas, and neon gas.

The parallelization of the heat pipes containing different working fluids extended the working range, and demonstrated that the parallelized heat pipes were about 100 times better than the conductive cooling conductor made of high purity metal. The parallelization of working fluid with different critical temperatures can expand the working temperature range of heat pipes. Patent application was filed for the use of heat pipes containing working fluid in parallel. Demonstrated that the effective temperature range of a heat pipe can be expanded by arranging heat pipes (argon and nitrogen) containing different working fluids with different effective temperatures in parallel.

研究分野：超電導低温工学

キーワード：並列化極低温ヒートパイプ ハイブリッド構造 ドライアウト 臨界温度 伝導冷却 超電導磁石

1. 研究開始当初の背景

磁気プラズマセイル計画では、超伝導磁石の搭載を前提として検討が進められている^[1]。宇宙機に搭載する超伝導磁石に限らず極低温を利用する観測機器の冷却は、伝導冷却の利用が最も効率的で有ると考えられ、その利用も進んでいた^[2,3]。伝導冷却は、超伝導磁石などの極低温利用機器から $RRR=1000$ 以上の高純度銅又はアルミニウム製導体を介して冷熱源(冷凍機又は冷媒容器)に熱流を流す間接冷却法である。高純度金属は図1で示されるように 10 K 付近で熱伝導率のピークを持つが、その温度が高くなるのに従って熱伝導率が低下する。100 K 以上の温度では熱伝導率が低純度の金属とほぼ等しくなる^[4]。この特性により、低温域では高純度金属製の冷却導体はそれ自身の高い熱伝導率によって性能を発揮できるが、中低温域では超伝導磁石の初期冷却や再冷却時間が長くなってしまふなどのマイナス点を生じる。また、極低温センサーを使用した天文観測機器では、その冷却時間の長期化が観測時間のデッドタイムとなって、この間の観測を中断せざるを得なくなる。これは突発的な天体イベントを観測対象とする天文機器にとって大きな問題であり、観測機器の冷却時間の短縮が最大の課題となっていた。

*残留抵抗比(RRR)は金属の純度の指標として用いられる。

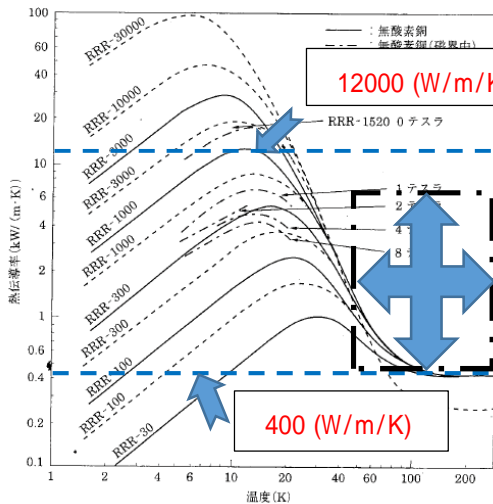


図1. 銅とアルミの熱伝導率の純度依存性^[4]

高純度金属が熱伝導冷却体として優位性を持ち始めるのは 100 K 以下、100 K 以上の温度では冷却導体に高純度金属を使用するメリットは無い。

2. 研究の目的

本研究は、ヒートパイプ複合型冷却導体の開発を行い、最終的に極低温利用機器の冷却時間の短縮を目的としている。これまで作動温度の異なるヒートパイプの並列化に加えて、高純度金属とのハイブリッド化された冷却用熱伝導体の開発研究は提案されていなかった。(図3)

一方、作動温度の異なるヒートパイプを並列化して1つの熱伝導体を構成することから、熱伝導体中の1つのヒートパイプが作動している際には他のヒートパイプは液が固化しているか、又はヒートパイプ特有のドライアウトを起こしている。

本研究では極低温流体を使用するため、常温のヒートパイプでは危険で実験不可と思われるドライアウト領域について安全に精緻な実験を行うことが可能であり、副次的な学術的成果としてヒートパイプのドライアウト領域における物理現象の一般化の追究が可能となっている。

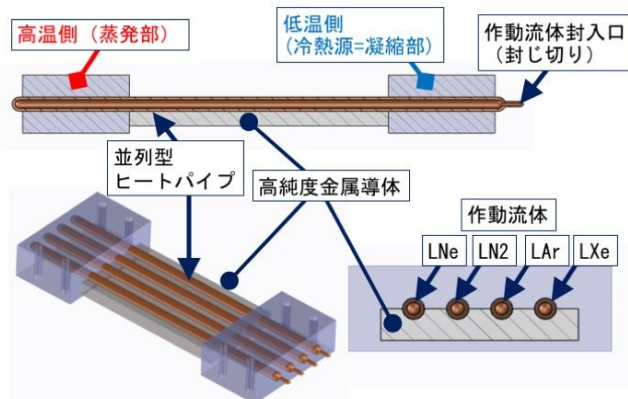


図3: 新しいヒートパイプ複合型冷却導体のイメージ図

高純度金属導体上に動作温度の異なるヒートパイプを並列化して接合する。

3. 研究の方法

本研究の最も重要な課題は、高純度金属製導体との複合化に向けて作動流体（ネオン、アルゴン、キセノン、窒素等）が異なるヒートパイプの特性を明らかにし且つ高純度金属との組み合わせの最適化を図ると云う点にある。先行実験で測定された最大熱輸送量にヒートパイプ内部形状の相違と推測されるバラつきが確認された^[5]。

ヒートパイプ研究を進展させ、最大熱輸送量のバラつきを減らし高信頼性を持つヒートパイプの構成法についても明らかにする必要がある。加えて、中低温域にあっては低温ヒートパイプがドライアウトしている可能性が高い。このため、この状態を別途詳しく調べておく必要もあった。

本研究では小型冷凍機を冷熱源とする凝縮部温度領域と温度の可変可能な装置に新たに設計・製作した。(図2-図3)

この装置を用いて作動温度が異なる低温ヒートパイプの特性の測定を実施し、低温ヒートパイプと高純度金属を組み合わせた新しい冷却用熱伝導体の開発研究を推進した。

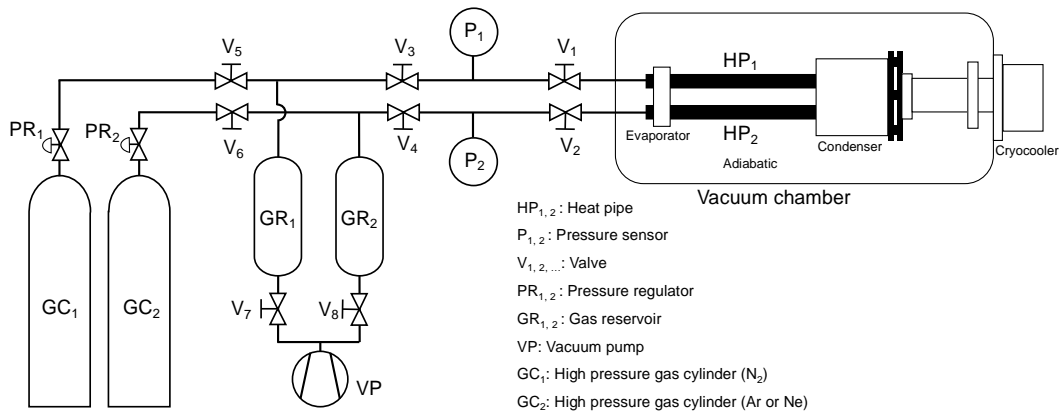


図2. 極低温平行ヒートパイプシステムの実験セットアップのブロック図^[7]

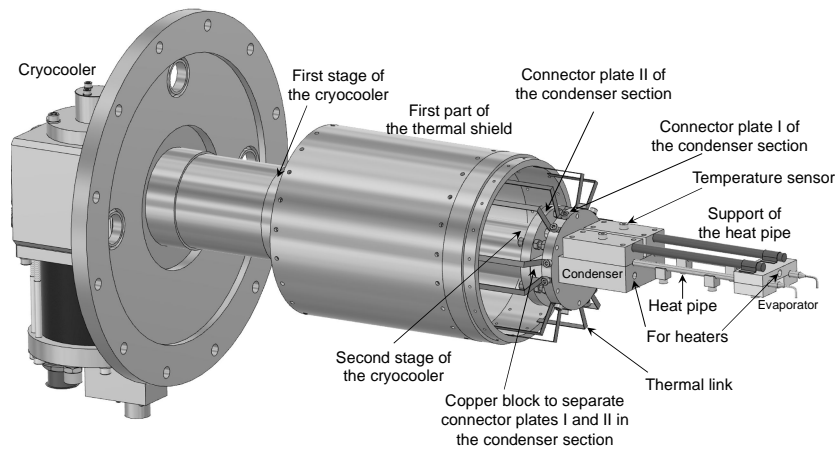


図3. クライオクーラー2段目のコンデンサー部の設置^[7]

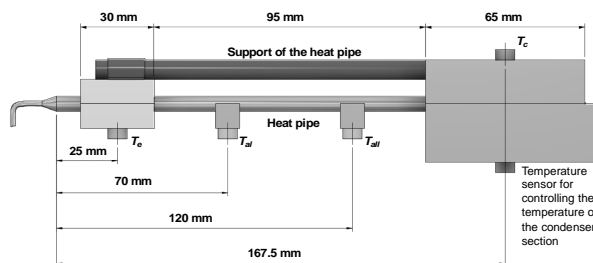


図4. ヒートパイプ上の温度センサーの配置^[7]

4. 研究成果

本研究により次の成果を得た.

- 異なる作動流体を個々に内蔵したヒートパイプの並列化により、その作動領域が拡張された. この結果、従来の高純度金属製伝導冷却導体の欠点であった50~300Kの温度帯域での熱伝導性能に比べて並列化ヒートパイプは100倍程度改善されることを実証した. (図5)
- ヒートパイプの限界熱輸送率についてこれまでのヒートパイプの計算式からの予測と概ねの傾向が一致していることを確認した.

ヒートパイプ内部の加熱前ウィック部全体が液相で満たされた状態を充てん率100%と定義すると、水では100%で最も低くなる熱抵抗がアルゴンや窒素では約85%の時に最小になることが観測された. さらに有効温度の異なる作動流体のヒートパイプ(アルゴンと窒素)を並列の配置することによって、図6に示すようにヒートパイプとして作動する有効温度範囲が拡大できることを実証した. また、加熱側がヒートパイプ有効温度以上の状況でも、放熱側で部分的にヒートパイプのメカニズムが機能し、全体としての熱抵抗は通常の伝熱板(純銅板など)より低くなることが実測された. 従来、ヒートパイプのドライアウト領域は熱伝導素子の性能領域外とされていたが、極低温ヒートパイプに限ってはヒートパイプのドライアウト領域においても優れた熱伝導特性を示し、且つ超伝導磁石等の予冷時間が短縮できることを示した.

- 研究成果を基に異なる作動流体を内包したヒートパイプの並列化使用について特許を出願した.
- 研究協力者の学位(博士)論文として纏められ、その取得に貢献した.

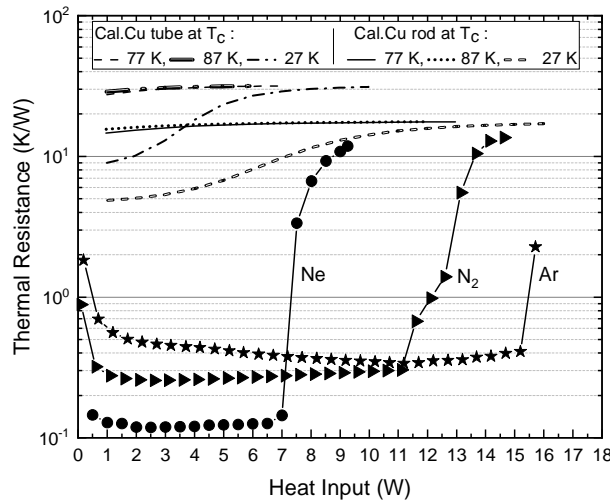


図5. N₂-、Ar-、Ne-ヒートパイプのQeの関数としての熱抵抗の比較 [7]

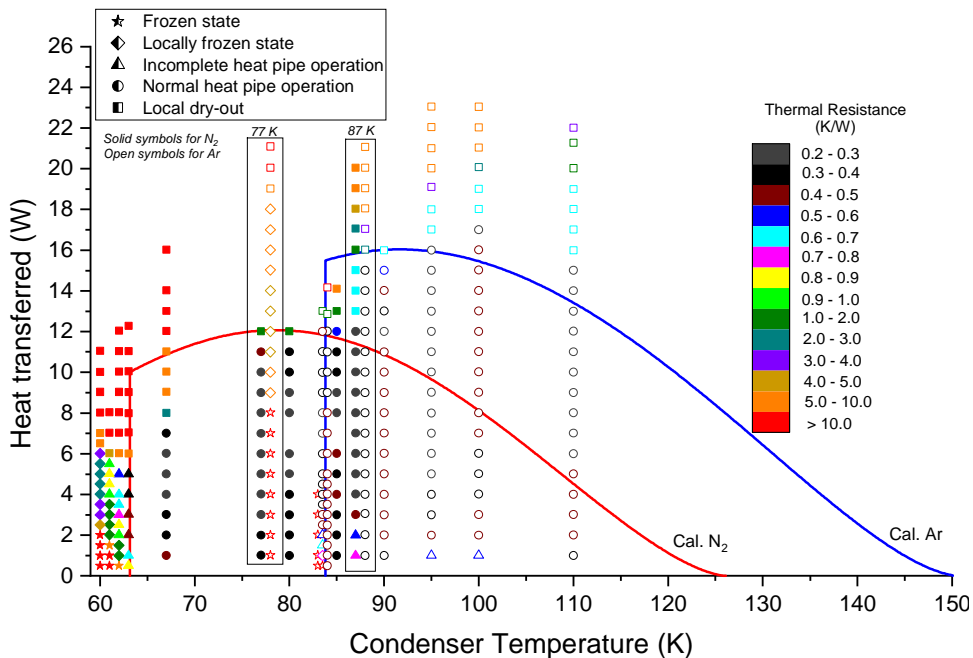


図6. N₂-ヒートパイプとAr-ヒートパイプの作動モードマップ [7]

<参考文献>

- [1] ”磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦”, 船木 一幸, 山川 宏,
J. Plasma Fusion Res. **83**, pp.281-284 (2007)
- [2] C.Tokoku, N.Kimura, et al: “Cryogenics System for the Interferometric Cryogenics Gravitational Wave Telescope, KAGRA -Design, Fabrication, and Performance Test -,”
Adv. Cryog. Eng. 59B (2014), pp.1254-1261.
- [3] 木村 誠宏; “KAGRA における極低温冷却装置”, 日本機械学会誌 **第 120 巻** (2017), pp.20-23.
- [4] 低温工学協会編: 超電導・低温工学ハンドブック, オーム社, (1993)
- [5] R. Wanison, et al; “A study of thermal behavior of nitrogen heat pipe for wide range of heat loads at several filling ratios”, *Int. Cryo. Conf.* 27, Oxford England, (2018)
- [6] “超高純度金属細線による伝導冷却 I”, 都丸 隆行他、低温工学 46, pp.415-420 (2011)
- [7] R. Wanison, et al; “Thermal performance of a cryogenic parallel heat pipe system”, *Cryogenics*, **128**, DOI [10.1016/j.cryogenics.2022.103589](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103589), (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 R. Wanison, N. Kimura, M. Murakami, H. Nakai, and S. Takada	4. 巻 128
2. 論文標題 Thermal performance of a cryogenic parallel heat pipe system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 103589
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cryogenics.2022.103589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wanison R, Kimura N, Murakami M	4. 巻 755
2. 論文標題 A study of thermal performance change of cryogenic heat pipes by wick structures for wide range of working fluid filling ratio	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012109 ~ 012109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/755/1/012109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 R Wanison, N Kimura and M Murakami	4. 巻 502
2. 論文標題 A study of the thermal behavior of a nitrogen heat pipe for a wide range of heat loads at several filling ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: 27th International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018 (ICEC-ICMC 2018) 3-7 September 2018, Oxford, United Kingdom	6. 最初と最後の頁 12093
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/502/1/012093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 R. Wanison, N. Kimura, M. Murakami, H. Nakai, S. Takada and P Suttakul	4. 巻 3086
2. 論文標題 A study on the effect of working fluid filling ratio and inclination for cryogenic heat pipes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings: THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING (TSME-ICoME 2022)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0204749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 R. Wanison
2. 発表標題 A study on the effect of working fluid filling ratio and inclination for cryogenic heat pipes
3. 学会等名 The 12th International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2022) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 WANISON Ramnarong, et al
2. 発表標題 A study of thermal behavior of cryogenic heat pipe for heat switch application at liquid nitrogen temperature
3. 学会等名 低温工学超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 WANISON Ramnarong, et al
2. 発表標題 A study of performance of nitrogen heat pipe for different wick structures and filling ratios under liquid nitrogen temperature
3. 学会等名 The 2019 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference/CASC/2nd Asian-ICMC/CSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 WANISON Ramnarong, et al
2. 発表標題 Experimental study on the effect of wick structure and filling ratios of working fluid on argon heat pipe thermal performance
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 木村 誠宏、高田 卓、Ramnarong WANISON	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2021-132474	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

2021 at KEK : Annual Report https://www2.kek.jp/library/ar.html 学位論文 学位取得者名：Ramnarong WANISON 学位論文題目：伝導冷却超伝導磁石への応用を目指した極低温パラレルヒートパイプシステムの研究 https://ir.soken.ac.jp/records/6445
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高田 卓 (Takada Suguru) (30578109)	核融合科学研究所・研究部・助教 (63902)	
研究 分担者	村上 正秀 (MURAKAMI Masahide) (40111588)	筑波大学・システム情報系(名誉教授)・名誉教授 (12102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	ワニソン ラマナロング (WANISON Ramnarong)	総合研究大学院大学・加速器科学専攻・博士課程学生 (12702)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------