

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04095

研究課題名(和文) 同軸パイプ蓄冷器による極低温小型冷凍機の高効率化への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to improve the high efficiency cryocooler with a coaxial pipe regenerator

研究代表者

増山 新二 (MASUYAMA, Shinji)

大島商船高等専門学校・電子機械工学科・教授

研究者番号：00287591

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)：2段Gifford-McMahon (GM) 冷凍機に、独自開発の「同軸パイプ蓄冷器」を適用し、4 Kレベルでの評価を行った。実験結果から、GM冷凍機の2段目蓄冷器の高温側を同軸パイプ構造にすることで、4.2 Kでの冷凍能力が改善できることが実証された。数値解析から、蓄冷器内のヘリウムガス密度分布が冷凍能力に大きく影響することが見出された。本研究にて、高性能冷凍機を実現するための蓄冷器特性の解明が進んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型4 K冷凍機は、MRIに代表される超電導応用システムに必要な不可欠な装置として搭載されている。しかしながら、その冷却効率は、カルノー効率の1%程度であり、多く入力電力が必要とされ、システムのランニングコストに過大な影響を与えている。

研究結果より、4.2Kで1.79W、カルノー効率1.8%を達成した。これらの冷凍能力と効率は、同タイプと比較すると、高出力で高効率である。したがって、本研究目的は、一応は達成されたと言える。しかしながら、次世代へ向けて理工学技術をさらに進展させるためには、小型4 K冷凍機のさらなる性能向上が求められるとともに、省電力化にも早急に取り込む必要があると考えている。

研究成果の概要(英文)：A two-stage Gifford-McMahon (GM) cryocooler, to apply our own developed a coaxial pipe regenerator, was evaluated at 4 K level. The experimental results proved that the cooling capacity at 4.2 K can be improved by using the coaxial pipe structure on the high temperature side of the second stage regenerator of the GM cryocooler. From the numerical analysis, helium gas density distribution in the regenerator has been found to significantly affect the cooling capacity. In this study, the characteristics of the regenerator to realize a high efficiency cryocooler have been elucidated.

研究分野：低温工学

キーワード：小型冷凍機 極低温 蓄冷器

1. 研究開始当初の背景

特定の温度以下で電気抵抗が消失する超電導体は、電気エネルギー有効利用の観点から、究極の物質であると言える。この超電導体は、主に液体ヘリウムを使って冷却され、4.2 K という極低温状態に維持されている。ここで大きな問題として、我が国のヘリウム事情は誠に乏しく、100%輸入に頼るとともに、その埋蔵量も将来的に不安視されている。一方、30年ほど前から小型冷凍機で4 Kの冷却が可能となり、全国の病院に設置されているMRIに代表される超電導応用システムに、液体ヘリウムの蒸発を抑制する目的で組み込まれ、昼夜を問わず稼働している。しかしながら、小型4 K冷凍機の最大の問題点は、その効率が非常に悪いことである。理想的な熱力学効率(カルノー効率)と比較して約100倍(カルノー効率で1%)もの入力電力を必要とし、システムの電力量やランニングコストに大きな影響を与えている。

高圧ヘリウムガスを冷媒とする蓄冷式冷凍機において、その到達温度および冷凍能力に大きく影響する要因の一つに、蓄冷材の比熱が挙げられる。冷却される温度範囲に対して、比熱が大きいことが望ましい。各種蓄冷材の比熱の温度依存性を図1に示す。金属蓄冷材(鉛(Pb)、ステンレス)は、温度の低下とともに比熱も減少し、10 K以下では蓄冷材として有効に働かず、これらを使用した時の冷凍機の到達温度も10 K程度となる。より低温を得るために磁性体蓄冷材(HoCu₂など)が開発され、蓄冷式冷凍機において4 Kレベルの到達温度が可能となったのは、今から約25年程前である。さらに2002年に、セラミックス蓄冷材(Gd₂O₂Sなど)が開発された。

また、高圧ヘリウムガスの比熱も図1に示してある。それまで比熱の小さかったヘリウムガスの比熱は、20 K以下から急激に大きくなる。これは冷凍効率を下げる大きな要因となっているものの、われわれには変えることのできない性質である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高出力・高効率小型4 K冷凍機の開発を目指し、効率の悪さを改善することで、電気エネルギーの利用効率を高めることである。研究対象の小型冷凍機は、最も普及している冷凍機の一つであるGifford-McMahon (GM) 冷凍機である。4 Kに到達するために二つの冷却部を有した2段型構造となっており、1段目で300~約50 K、2段目で約50~4 Kレベルの冷却を担当する。本研究では、目的を達成するために、小型冷凍機の心臓部ともいえる「蓄冷器」部に焦点を絞り、研究代表者が開発中の蓄冷器構造(「同軸パイプ構造」と名付けられた)を適用しながら進める。さらに、蓄冷器(蓄冷材も含む)の新たな解析方法を取入れ、その振舞いを検証する。

3. 研究の方法

本研究で使用するGM冷凍機の概略図と計測システムを図2に示す。本2段GM冷凍機は、室温部に置かれた圧縮機から、高圧ヘリウムガスが冷凍機内に送り込まれ、それと同時に、1段目と2段目蓄冷器(ディスプレイサ)が上下運動することで、冷却サイクルが構築される。各ステージの蓄冷器は、それぞれの両端温度差を維持するための温度勾配を有することになる。また、各ステージの蓄冷器は同軸上につながっており、薄肉シリンダー内に挿入されている。

3.1. 2段 GM 冷凍機

実験装置として、2段GM冷凍機は1 W at 4.2 K モデル(RDK-408D2, SHI)、圧縮機は定格電力7.5 kW at 60 Hzの水冷式スクロールタイプ圧縮機(SSC-3700, SUZUKISHOKAN)を使用した。圧縮機のヘリウム初期封入圧力は1.6 MPa、GM冷凍機の動作速度は72 rpm一定とした。冷凍機と圧縮機は2本(1本の長さ5 m)のフレキシブルホースで接続された。

3.2. 2段目蓄冷器と同軸パイプ構造

図3に三層構造(three-layer)の2段目蓄冷器の概略図を示す。蓄冷材充填部は、内径15 mm、長さ140 mmである。蓄冷材とその充填割合は、高温側からPb(50%)、HoCu₂(20%)、Gd₂O₂S

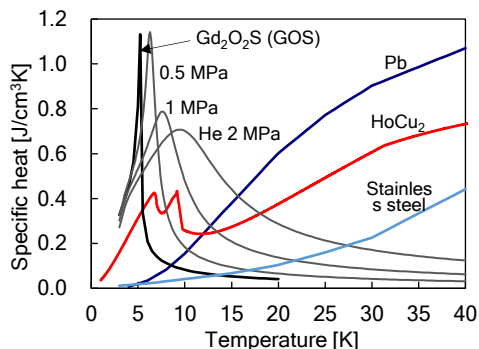


図1. 各種蓄冷材とヘリウムの比熱の温度特性

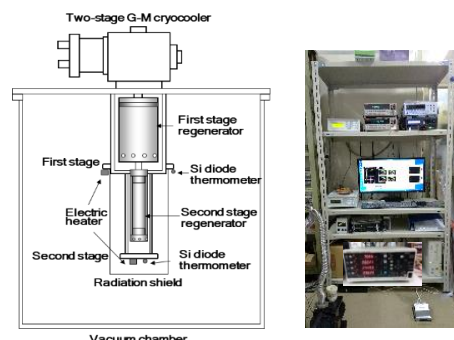


図2. 2段 GM 冷凍機と計測システム

(30%)である。表 1 は、それぞれの蓄冷材の球径が示される。蓄冷器両端と各蓄冷材の境界部には、蓄冷材を完全に分離と固定するため、厚さ約 4 mm の積層されたステンレスメッシュが挿入されてある。

図 4 に、三種類の同軸パイプ構造、(a) Pb タイプ、(b) HoCu₂ タイプ、(c) Gd₂O₂S タイプを示す。蓄冷器の同軸上にステンレスパイプが挿入された構造である。なお、各蓄冷材とそれらの割合は図 3 と同じである。この同軸パイプ構造の狙いは、挿入されたパイプにより、蓄冷器内のヘリウムの流れを整流する。つぎに、その整流されたヘリウムにより、膨張空間へ流入するガス量が増えることで冷凍能力の向上が期待できる、ということである。そこで、同軸パイプを各レイヤーへ独立して適用することで、4.2 K での冷凍能力をそれぞれ評価した。挿入されたパイプは、内径 9 mm、肉厚 0.5 mm で、長さはそれぞれのレイヤー長に調節した。このパイプ内径は、われわれの研究結果 (論文[1], [2]) を参考にしている。図 5 は、Pb タイプの同軸パイプ構造を高温側から見た時のイメージ写真である。

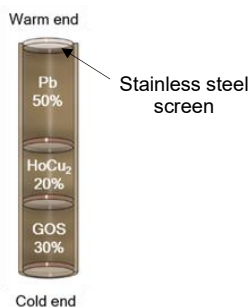


図 3. 三層構造 2 段階蓄冷器

表 1. 2 段階蓄冷材

Material	Sphere diameter [mm]
Pb	0.21 – 0.30
HoCu ₂	0.15 – 0.30
Gd ₂ O ₂ S	0.25 – 0.30

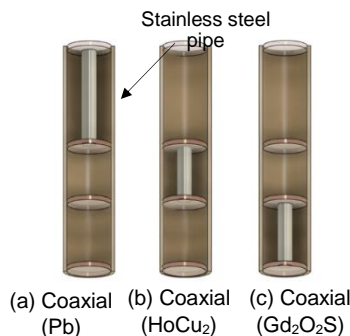


図 4. 3 種類の同軸パイプ蓄冷器構造

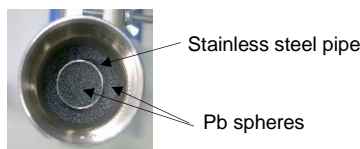


図 5. Pb 同軸パイプのイメージ写真

4. 研究成果

4.1 冷却試験と到達温度

冷却試験は、冷凍機の各ステージに設置されたヒータによる熱負荷を加えない状態で室温から行われた。図 6 に 1 段階目と 2 段階目ステージの代表的な冷却特性を示す。冷却開始後、約 90 分で両ステージが安定している。また、蓄冷器タイプにおいて、冷却特性に大きな違いがないことを確認した。図 7 に 4 種類の蓄冷器タイプの 1 段階目と 2 段階目ステージの到達温度がまとめられている。同軸パイプ構造とすることによる到達温度への大きな影響は見られない。しかしながら、低い到達温度が 4.2 K で大きな冷凍能力を発揮するとは限らないため、到達温度のみの冷凍性能評価は難しい。

4.2 冷凍能力測定

冷凍能力試験は、各冷却ステージにヒータによる熱負荷を加えながら行われた。図 8 は、1 段階目ステージ温度を 24 K (1 段階目ステージの最低到達温度) から 65 K まで変化させたときの、4.2 K の冷凍能力を示す。各蓄冷器タイプとも凸型の特性となっており、その最大値は 1 段階目ス

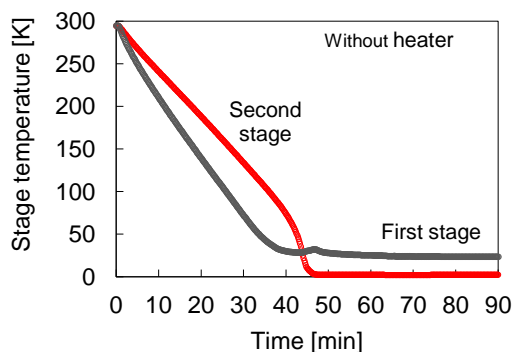


図 6. 冷却試験の一例

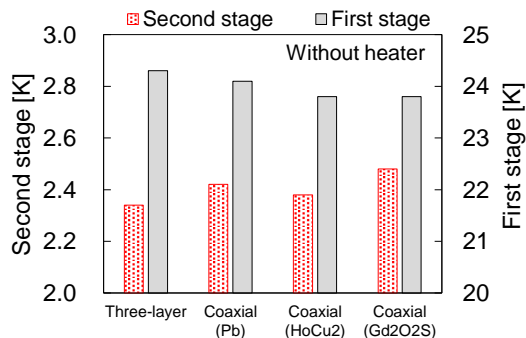


図 7. 蓄冷器タイプによる到達温度

ージがおおよそ 50 K であることが見て取れる。

Pb タイプが、測定された温度範囲のうちの高温側である 65 K 付近を除いて、もっとも大きな冷凍能力を発揮し、その最大値は 1.79 W に到達した。この時の圧縮機の入力電力 7.06 kW より、4.2 K におけるカルノー効率は 1.8% となった。三層構造の冷凍能力 1.70 W と比較すると、Pb タイプの冷凍能力は 5% の改善である。他の二つの同軸パイプ構造は、三層構造と比較すると、Gd₂O₂S タイプは改善効果が見られず、むしろ若干の性能低下である。HoCu₂ タイプは 50 K 以上の温度領域において多少の改善効果が得られた。以上の結果から、4.2 K の冷凍能力は、Pb 層内のヘリウム流の状態に大きく影響を受けることが示された（詳細な解析は、つぎのセクションで行う）。なお 1 段目ステージの冷凍能力は蓄冷器タイプにはほぼ依存しておらず、その代表的な値は 50 K で 68 W となった。

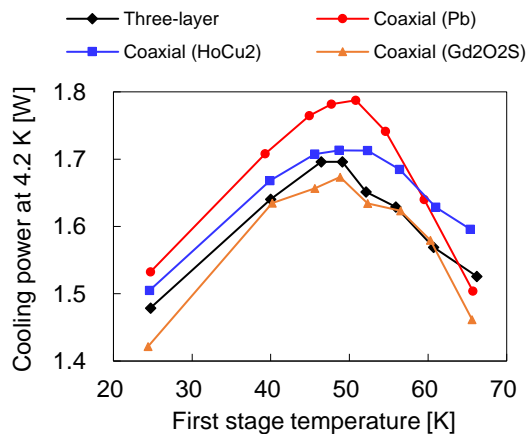


図 8. 4.2 K の冷凍能力の 1 段目ステージ温度依存結果

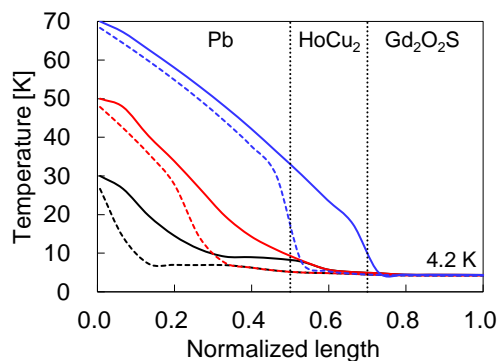


図 9. 蓄冷器内の温度分布の計算結果。実線は圧縮過程、点線は膨張過程を示す。

4.3 数値解析

2 段目蓄冷器内の蓄冷材、ヘリウムの振る舞いを予測する目的で数値解析が行われた。計算には NIST がリリースしている一次元の蓄冷器計算ソフト「REGEN3.3」を利用した。このソフトは、おおまかな蓄冷器の現象を把握するために多方面から利用されている。計算モデルは図 3 に示した三層構造である。低温端（規格化長さ 1）温度を 4.2 K 一定とし、三種類の高温端（規格化長さ 0）温度 30, 50, 70 K による計算を行った。蓄冷器温度分布の結果を図 9 に示す。実線が圧縮、点線が膨張過程時を示している。高温端温度が低いほど、蓄冷器内の 4 K レベルの長さが長いことが見て取れる。高温端温度 50 K で、規格化長さの約 0.5 ですでに 4 K レベルに到達している。また、膨張過程の方が 4 K レベルの長さが長い。これらは、ヘリウムの比熱特性から生じるものと考えられる。なお、実機を用いて蓄冷器内の温度分布を計測した結果（栗山透ら、低温工学 31 1996 pp 203-208）からも同様な振る舞いが得られている。

つぎに、上記の結果をもとに蓄冷器解明の新たな手法として、ヘリウム密度分布に注目した数値解析を行った。図 10 に計算結果を示す。結果から、規格化長さ約 0.5 を境にしてヘリウム密度分布に大きな差が生じていることが明らかになった。冷凍機の動作中は、高圧・低圧の圧力振動が繰り返されることで、連続的に冷却サイクルが構築される。その過程の中で、蓄冷器内は同一圧力を保ちつつ、その圧力振動に追従している。したがって、ヘリウム密度の小さい蓄冷器高温側は、同一圧力を維持するために、密度の大きな低温側と比較して、大きな運動エネルギーを保持しなければならない。この運動エネルギーの差のため、高温側ではヘリウムの流れが乱れやすいことを示唆している。

図 10 に示した蓄冷器内のヘリウム密度の計算結果、ならびに同軸パイプ蓄冷器の効果をより明確にするために、三層構造蓄冷器内に内在するガス量を求めた。図 11 に三種類の高温端温度における蓄冷器内のガス量の平均値を示す。この図から、二つの興味ある結果が見出された。一つ目は、蓄冷器内全体のガス量は高温端温度が上昇するにつれて減少すること。二つ目は、それぞれの層においてガスの量が異なっていることである。これらの結果は、蓄冷器内の圧力を維持するために、それぞれの層においてガスの運動エネルギーが異なるということである。このヘリウムガスの振舞いは図 10 の結果から、すでに予測されていた。図 11 の計算結果は、それぞれの層のガス量を具体的に示している。これらの結果より、ガス量の少ない層、Pb 層の 0.6 と 0.2 g、ならびに HoCu₂ 層の 0.7 g は、ヘリウム流の乱れ度合いが大きいと考えられる。

図 8 の冷凍能力結果に示された Pb タイプは、1 段目ステージの高温側を除いて 4.2 K で大きな冷凍能力を示している。Pb 層のガス量は、図 11 に示したように、二つの磁性体層と比較して少ない。つまり、この領域ではヘリウム流の乱れが大きく、このヘリウム流の乱れが同軸パイプによって整流される。結果として、4 K 冷凍能力の向上に結び付く 2 段目膨張空間へのヘリウム流量が増加したのと考えられる。一方で、高温側では能力が低下している。この理由は、同軸パイプにより過多のヘリウムガスが蓄冷器内を流れ、蓄冷器損失が増大したためと考えられる。

HoCu₂タイプは、三層タイプと比較して、50 K 以上において能力が向上している。この温度領域では、HoCu₂ 層内のガス量は少なくなるため、同軸パイプにより膨張空間内の流量が増加したことが、その理由である。これとは逆に、50 K 以下ではガス量は変化していない。したがって、50 K 以下での HoCu₂ タイプの冷凍能力結果は、三層タイプのそれと同等となっている。

Gd₂O₂S タイプの冷凍能力結果は、全温度領域において三層タイプとほぼ同じである。これは、すべての温度領域において Gd₂O₂S 層内のガス量が変化しないことに起因していると考えられる。しかしながら、冷凍能力の若干の低下が見られることから、同軸パイプがヘリウムの流れを妨げているようにも見受けられる。このことから、4 K 冷凍機の低温端側のヘリウム流は、一次元のきれいな流れが必ずしも理想的な流れではないのかもしれない、ということが考えられる。この議論については、蓄冷器の新たな学術的な問いとしての今後の課題である。

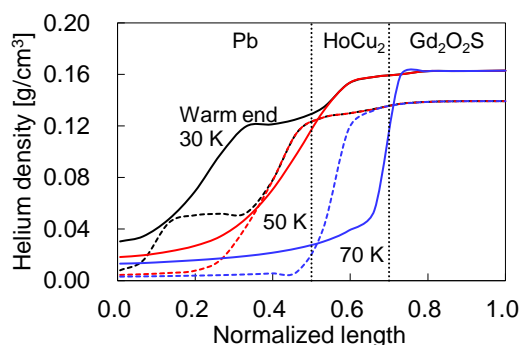


図 10. 3 種類の高温端温度におけるヘリウム密度分布計算

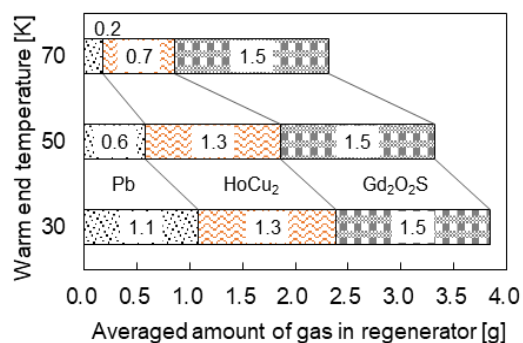


図 11. 3 種類の高温端温度における 2 段階蓄冷器内のヘリウムガス量の計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 増山新二 松本宏一 沼澤健則
2. 発表標題 同軸パイプ蓄冷器の4 K冷凍能力の奇妙な特性
3. 学会等名 2019年度春季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Masuyama K. Matsumoto T. Numazawa
2. 発表標題 Improvement of 4 K cooling power by coaxial pipe regenerator for a Gifford-McMahon cryocooler
3. 学会等名 10th ACASC/ 2nd Asian ICMC/ CSSJ Joint Conference, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増山新二 谷田広士 沼澤健則
2. 発表標題 圧縮機性能による4K-GM冷凍機の冷凍能力への影響
3. 学会等名 2018年度春季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増山新二 松本宏一 沼澤健則
2. 発表標題 高出力4K-GM冷凍機開発への試み
3. 学会等名 2018年度秋季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増山新二 松本宏一 沼澤健則
2. 発表標題 同軸パイプ蓄冷器の4 K冷凍能力の奇妙な特性
3. 学会等名 2019年度春季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	沼澤 健則 (NUMAZAWA Takenori) (30354319)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・NIMS特別研究員 (82108)	
研究分担者	松本 宏一 (MATSUMOTO Koichi) (10219496)	金沢大学・数物科学系・教授 (13301)	

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
---------	---------