

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561064

研究課題名(和文)蓄冷材・蓄冷器構造に注目した高性能極低温冷凍機の開発

研究課題名(英文)Development of high performance cryocooler improved by regenerator material and structure

研究代表者

増山 新二(Masuyama, Shinji)

大島商船高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：00287591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)： 冷凍機の効率を改善することは、電気エネルギーの有効利用につながる。しかしながら、様々な応用に使用されている4K冷凍機の効率は不十分である。本研究では、4Kギフォード・マクマホン(GM)冷凍機の蓄冷材、および蓄冷器構造に焦点を絞り、性能向上を目指した。まずセラミックス蓄冷材(Gd₂O₂S)をGM冷凍機の蓄冷材として充填した。実験結果から、セラミックス蓄冷材を適量充填することで、4.2 Kの冷凍能力が12%向上することを明らかにした。次に、等価的に蓄冷器形状を変化させる方法を考案し、研究を行った。結果から、蓄冷材分量を減らしても冷凍能力が維持できることを証明した。

研究成果の概要(英文)： Improving the efficiency of cryocoolers induces the effective use of electric energy. However, the efficiency of 4K cryocoolers which have been utilized for various applications is not enough. In this study, we focused the regenerator material and structure of a 4K Gifford-McMahon (G-M) cryocooler to improve its efficiency. First, a sphere ceramics of Gd₂O₂S was filled in the G-M cryocooler as the second stage regenerator material. The experimental results show the cooling power improves by 12% at 4.2 K by filling a suitable quantity of ceramics spheres. Next, we developed a novel method for regenerator structure that is able to equivalently change the regenerator configuration. The experimental results prove that this method is able to reduce the filling quantity of regenerator material and keep the cooling power.

研究分野：低温工学

キーワード：極低温 小型冷凍機 エネルギー効率

1. 研究開始当初の背景

近年、目覚ましい発展を遂げている超電導機器において、それらを冷却するためには液体ヘリウム (4.2 K) が使用されている。この液体ヘリウムの蒸発量を減じるための手段として、小型冷凍機が設置されているシステムが多々ある。冷凍機の効率は、システム全体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。高性能冷凍機の開発は、これらを改善するとともに、冷凍機で超電導機器を直接冷却し運転するシステムが構築でき、液体ヘリウムが不要となる。この方式は、小型超電導マグネットでは実現されているが、大型機器には使用されていない。その大きな要因の一つは、冷凍機の効率が低いことが挙げられる。大型機器に適応されれば、液体ヘリウム用液化機、断熱配管、ヘリウムガスの回収といった一連の大型装置も不要になる。

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応して、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。一般的に使用されている金属蓄冷材 (鉛 (Pb), ステンレス (SUS)) は、温度の低下とともに比熱も減少し、10K 以下では、蓄冷材として有効な働きをしない。したがって、これらの蓄冷材を使用した場合、到達温度は 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 4K レベルの到達温度が可能となったのは、今から約 20 年程前である。さらに 2002 年に、次世代の蓄冷材としてセラミックス蓄冷材 (Gd₂O₂S, GdAlO₃) が開発された。図 1 に示す Gd₂O₂S (GOS) と GdAlO₃ (GAP) の比熱を見ると、従来の蓄冷材と比較してその大きさが特徴である。その一方で有効な温度範囲が狭いことが見て取れる。しかしながら、4 K レベルにおいて現在最も比熱の大きい蓄冷材である。

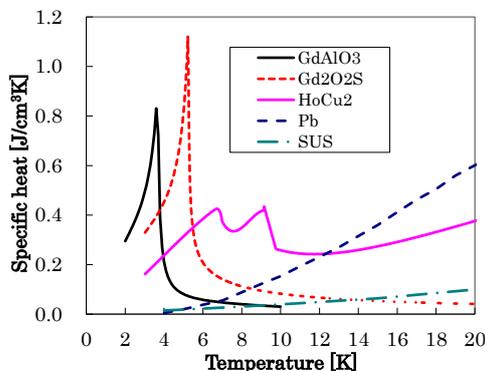


図 1 各種蓄冷材の比熱

2. 研究の目的

本研究では、超電導機器などにおける極低温システムに必須な道具である 4K 冷凍機の高性能化を目指しエネルギーの利用効率を高める。特に、冷凍機の性能に大きな影響を及ぼす蓄冷材ならびに蓄冷器構造について注目する。研究目的は次の二点である。

- (1) 次世代セラミックス蓄冷材を使用した高性能 4K 冷凍機の開発を目指した冷凍性能評価
- (2) 新しい蓄冷材充填方法を適用した 4K 冷凍機の冷凍性能評価

3. 研究の方法

本研究で使用するギフォード・マクマホン (GM) 冷凍機の概略図を図 2 に示す。本冷凍機は、二つの冷却ステージから構成され、2 段階型と呼ばれる。室温部に置かれた圧縮機から、高圧ヘリウムガスを冷凍機内に送り、まず 1 段階目ステージで約 40 K まで、さらに 2 段階目ステージで 4 K レベルまで冷却する構造となっている。冷凍機本体は、RDK-408D2 (SHI) で、4.2 K で 1 W の仕様である。また、圧縮機は C300G (SUZUKISHOKAN) で、7.3 kW の電気入力である。

研究目的 1 の達成のために、冷凍機の 2 段階目蓄冷材にセラミックス蓄冷材を充填したときの性能を評価する。図 1 に示した蓄冷材の比熱の温度依存性から理解できるように、4~40 K の冷却を担当する 2 段階目蓄冷器において、セラミックス蓄冷材のみでは、熱容量が不十分である。したがって、2 段階目蓄冷器の高温側から Pb 球、HoCu₂ 球を充填し、低温端側にセラミックス球を充填する。

つぎに、研究目的 2 の達成のために、新たに考案した蓄冷器構造を 2 段階目蓄冷器に適応させる。その構造とは、断熱性のロッド (本研究ではベークライトロッドを使用) を 2 段階目蓄冷器に同軸方向に挿入する方式である。

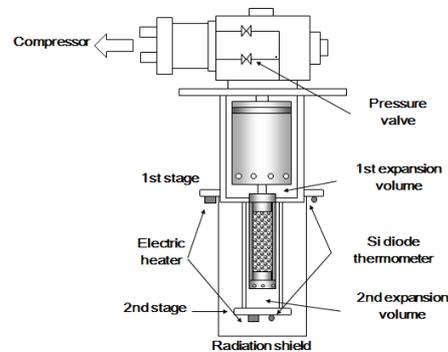


図 2 2 段階 GM 冷凍機の概略図

以後、ベークライト構造とする。本方式において、ベークライトロッドの長さや直径を変えることで、充填される蓄冷材分量を調節することができる。これは従来にはない、まったく新たな取り組みである。本研究では、ベークライトロッドを2段階蓄冷器の高温側半分、または低温側半分挿入した時の冷凍性能を評価した。

4. 研究成果

(1) セラミックス蓄冷材

蓄冷材を三層構造にした2段階蓄冷器の概略図を図3に示す。Pb球は50%一定とし、HoCu₂球とセラミックス球の割合を変化させたときの冷凍性能評価を行った。なお、本概略図には、異種の蓄冷材を分離するための仕切り材(ステンレスメッシュを積層したもの)は省略してある。

セラミックス蓄冷材の分量における4.2 Kの冷凍能力の研究結果を図4に示す。なお、1段階ステージ温度は、すべての条件において40 K一定である。まず、セラミックス蓄冷材を充填しない場合、HoCu₂:Pb = 50:50(横軸の0%)では、1.28 Wの冷凍能力である。

つぎに、低温端側にGOSを充填した場合では、その分量が20%以上において、冷凍能力の改善が見られている。もっとも大きな冷凍能力は、GOSが30%の時で、1.43 Wを発揮している。これは、約12%の能力向上である。つまり、蓄冷材分量は、GOS:HoCu₂:Pb = 30:20:50となる。5 K付近に比熱の鋭いピークを持つGOSが30%必要であるということから、蓄冷器低温端側の内部温度は、温度勾配をほとんど持っていないことが理解できる。一方で、GOSが10%時には冷凍能力の改善が見られていない。これは、ステンレスメッシュから成る仕切り材による損失が含まれているものと考察されており、今後の課題である。

つぎにGAPを充填した場合では、10%までは冷凍能力に大きな差が生じていないが、その後は、大幅な性能の低下が見られる。GAPの分量が増えるにつれて、それは大きくなっていく。これは、比熱の鋭いピークが3.6 K付近にあるため、4.2 Kで冷凍能力を維持するには、熱容量が不足していることが要因である。そこで、4 K以下での冷凍能力にも注目したが、目立った能力の改善は見られなかった。これは、今回使用した冷凍機の運転

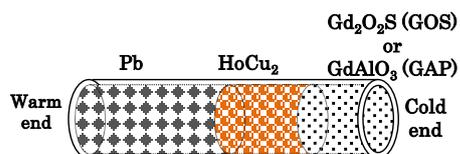


図3 三層構造蓄冷材

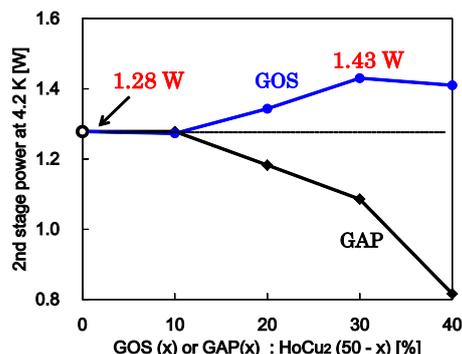


図4 セラミックス蓄冷材分量における4.2 Kの冷凍能力試験結果

スピードが72 rpmであり、4 K以下での能力改善を目指す場合は、より遅い運転スピードが必要なのかもしれないと考察された。

(2) ベークライト構造

2段階蓄冷器内にベークライトロッドを挿入した、ベークライト構造の概略図を図5に示す。(a)が低温側、(b)が高温側のそれぞれ同軸方向にベークライトロッドが挿入された状態である。以後、(a)をHoCu₂-rod、(b)をPb-rodとする。今回は、長さを一定として、直径が異なる数種類のベークライトロッドを挿入して、性能評価を行った。図6にベークライトロッドの体積における2段階ステージの4.2 Kの冷凍能力、および1段階ステ

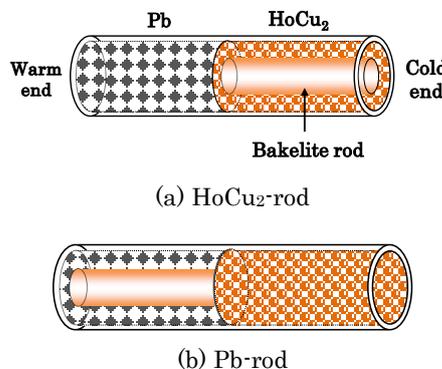


図5 ベークライト構造の概略図

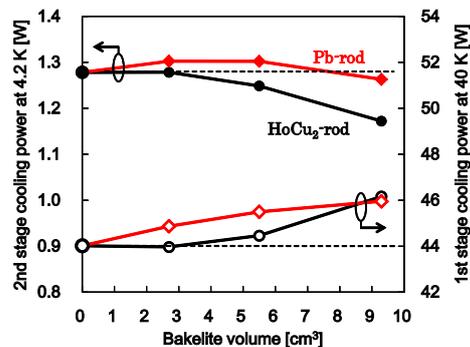


図6 ベークライトロッドの体積と4.2 Kおよび40 Kの冷凍能力の関係

ージの 40 K の冷凍能力結果を示す。まず、(a) の HoCu_2 -rod の結果において、ベークライトロッドの体積を大きくするにつれて、4.2 K での冷凍能力の低下が見られる。これは、ベークライトロッドの体積が大きくなり、 HoCu_2 蓄冷材分量が少なくなることにおける 4 K レベルでの熱容量が減少することが原因であると考えている。しかしながら、 9.3 cm^3 のベークライトロッドを挿入した状態に注目してみる。ベークライトロッドを挿入しない場合と比較して、 HoCu_2 の分量が 18% も少ないにもかかわらず、冷凍能力の減少割合は、8% に抑えられており、その値は 1.17 W である。また、 2.7 cm^3 のベークライトロッドを挿入した場合には、 HoCu_2 の分量は 5% 少ないが、冷凍能力の低下はほぼ見られない。以上のことから、低温側にベークライトロッドを挿入する構造では、高価な磁性体蓄冷材の使用量を少なくすることが可能であることが見出された。

つぎに、(b) の Pb -rod の結果では、4.2 K の冷凍能力がわずかながら改善されるベークライト体積が存在することが見て取れる。その最適値は、約 5 cm^3 である。これは、 Pb 側の蓄冷器体積 50 cm^3 のおよそ 1/10 に相当する。この結果は、蓄冷器断面が長さ方向に、必ずしも一樣である必要がないことを示唆している。

一方で、1 段目ステージの 40 K での冷凍能力は、 HoCu_2 -rod ならびに Pb -rod とも、ベークライトロッドを挿入することで、改善されることが分かった。

ベークライトロッドの効果は、次のように考えられている。ベークライトロッドを挿入することで、冷凍機に流入するヘリウムの流量が減少する。これにより、蓄冷器の圧力損失、エンタルピー損失が低減するポジティブな効果が働く。しかしながら、ベークライトロッドの体積分、蓄冷器の熱容量減少というネガティブな効果も働く。これらの効果のトレードオフで、冷凍能力が決定されている。 Pb -rod は、蓄冷器高温側にベークライトロッドを挿入しているため、ネガティブな効果による影響が少なく、結果的に冷凍能力が改善されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) 増山新二, 平塚善勝: Gifford-McMahon 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に挿入されたベークライト棒の効果, 低温工学, Vol. 48 No. 7 (2013) pp. 358-363 査読有

(2) S. Masuyama, T. Nagao, T. Numazawa: Magnetic regenerator material economizing method for 4K Gifford-McMahon cryocoolers using bakelite rod, Advances

in Cryogenic Engineering, Vol. 1573, 59B (2014), pp. 1162-1168 査読有

(3) S. Masuyama, Y. Hiratsuka, T. Numazawa: A Novel Approach to Optimize the 2nd Stage Regenerator Configuration of a 4K Gifford-McMahon Cryocooler, Cryocooler 18, (2015), pp. 271-276 査読有

[学会発表] (計 7 件)

(1) 増山新二, 長尾望宏, 松井康平: GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に挿入されたベークライト棒の効果(1) 鉛蓄冷材の場合, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86, 2012, p. 83

(2) 増山新二, 鈴木雄文, 長尾望宏: GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に挿入されたベークライト棒の効果(2) 2 台の GM 冷凍機の比較, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87, 2013, p. 106

(3) S. Masuyama, T. Nagao, T. Numazawa: Magnetic regenerator material economizing method for 4K Gifford-McMahon cryocoolers using bakelite rod, Cryogenic Engineering Conference 2013, p. 57

(4) 増山新二, 鈴木雄文, 長尾望宏, 沼澤健則: 4K-GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器の等価的形狀変化, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88, 2013, p. 71

(5) 増山新二, 鈴木雄文, 平塚善勝, 沼澤健則: 蓄冷器形状の等価的变化による 4K-GM 冷凍機の冷凍性能改善, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89, 2014, p. 115

(6) S. Masuyama, Y. Hiratsuka, T. Numazawa: A Novel Approach to Optimize the 2nd Stage Regenerator Configuration of a 4K Gifford-McMahon Cryocooler, International Cryocooler Conference 18, 2014, p. 57

(7) 増山新二, 沼澤健則: 蓄冷器形状の等価的变化による 4K-GM 冷凍機の冷凍性能改善, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90, 2014, p. 62

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

沼澤健則 (NUMAZAWA TAKENORI)

物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料萌芽ラボ・主席研究員

研究者番号: 30354319