

GM 冷凍機の 2 段階蓄冷材による冷凍性能評価

今津卓也* 増山新二**

Cooling performance of a GM cryocooler altering 2nd-stage regenerator materials

Takuya IMAZU* and Shinji MASUYAMA**

Abstract

The purpose of this study is to improve the cooling capacity of a two-stage Gifford-McMahon (GM) cryocooler at 4.2 K. We focus on regenerator materials of 2nd-stage regenerator. One of the demanded factors for regenerator materials is a high specific heat at the using temperatures. From the point of view, ceramic material, Gd₂O₂S (GOS), has very attractive property around 4 K. However, effective temperature range of the specific heat of the GOS is narrow. Therefore, we adopted layered structure to the 2nd-stage regenerator. From the experimental results, the cooling power at 4.2 K achieves 0.21 W using the GOS regenerator material. That volumetric ratios of 2nd-stage regenerator are Pb:HoCu₂:GOS = 40:30:20. When filling the regenerator materials of Pb and HoCu₂ (the volumetric ratios are Pb:HoCu₂ = 40:60), the cooling power at 4.2 K is 0.15 W. The results show that the cooling power is 40 % improved using the GOS material.

Key words: GM cryocooler, Gd₂O₂S regenerator material

1. はじめに

極低温環境を人為的に発生させる冷凍機はその環境を利用する立場からの要求を満たすことを前提に開発されてきている。冷凍温度、冷凍能力、効率、寿命、信頼性、価格、振動、重量、大きさ、使いやすさなど、その要求は多岐にわたる。

その中で小型冷凍機は医療用の MRI などでも実用されており、更に磁気浮上列車や超伝導電力貯蔵装置などの応用が期待されている。これらには大きな磁場を発生可能な超伝導磁石が使用され、4K の極低温で冷却することが必要である。そこで利用されているのが液体ヘリウム (He) を冷媒にする方法である。液体 He は液化温度が 4.2K で、蒸発しやすく定期的な補充が必要である。しかしこの液体 He は高価なため、蒸発量を減らす技術が求められている。

Gifford-McMahon (GM) 冷凍機等の小型冷凍機では冷却性能向上に大きく左右する要素として

蓄冷材が挙げられ、特にその比熱が大切である。HoCu₂ や Er₃Ni などの磁性体蓄冷材の開発[1]により、2 段小型冷凍機で 4K レベルの冷却が可能となっている。また次世代の蓄冷材として Gd₂O₂S (GOS), GdAlO₃ (GAP) などのセラミックス蓄冷材[2]も期待されている。本研究ではヘリウム (He) 温度 4.2K 時における冷凍能力の向上を目的とし、GM 冷凍機内の 2 段階蓄冷材に Pb, HoCu₂, GOS を充填させ冷凍性能評価を行っている[3-4]。

2. GM 冷凍機

2.1 GM 冷凍機の概要

1959 年、W. H. Gifford と H. O. McMahon により Gifford-McMahon (GM) 冷凍機が開発[5]された。GM 冷凍機は構造が簡単で信頼性も高いことより、現在最も普及している冷凍機の一つである。図 1 に本研究で使用した GM 冷凍機とコン

プレッサの外観写真を示す。GM 冷凍機は SRDK-101D, コンプレッサは CNA-11 を使用し、いずれも住友重工業株式会社製である。コンプレッサの消費電力が 1.3kW (60Hz) であり、また空冷タイプであるため、実験・計測が手軽に行えることが特徴である。図 2 に本冷凍機の概略図を示す。本 GM 冷凍機は 2 つの冷却ステージを持ち、2 段 GM 冷凍機と呼ばれている。GM 冷凍機の冷凍機本体は、薄肉ステンレスのシリンダ内にディスクプレーサが挿入されており、その内部に蓄冷器がセットされている。さらに 2 段目蓄冷器の内部には冷却温度に応じた蓄冷材が充填されている構造である。冷却ガスはヘリウムが使用される。この冷凍機は全ての実験において同じ 1 段目蓄冷器を使用し、等しい充填圧力で測定を行っている。



図 1 外観写真

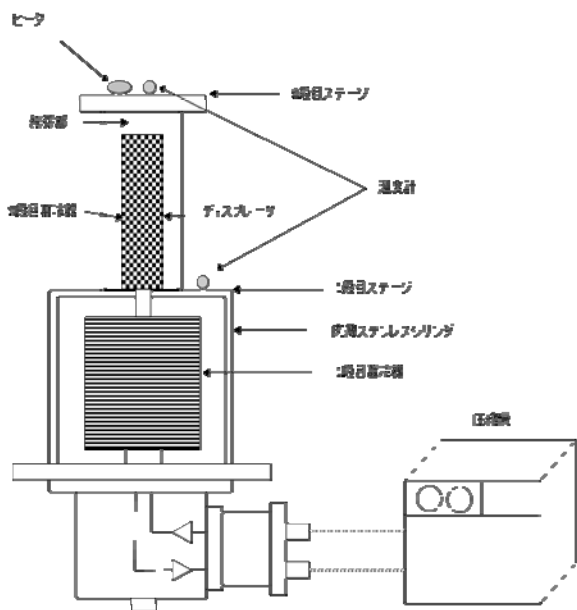


図 2 GM 冷凍機の概略図

2.2 実験用計測器

本研究ではプログラブル直流電源、温度コントローラ、マルチメータを使用する。1 段目、2 段目の各ステージには温度計を (Si-diode) を設置し、2 段目ステージにはヒータを設置する。温度計やヒータは冷却特性試験や冷凍能力試験の際、冷却部の温度測定やヒータに加える電力によって冷凍能力を計測するために用いる。またこれらの機器はすべて PC へ GP-IB ケーブルを通じて接続されている。

3. 試験装置

3.1 2 段目蓄冷材

本実験で使用する蓄冷材は Pb, HoCu₂, GOS である。図 3 は各蓄冷材および He ガスの体積比熱を示す。He ガスの低圧 (0.8MPa) と高圧 (2.1MPa) は GM 冷凍機の運転時の圧力である。従来、極低温発生部の蓄冷材料には Pb が使われていた。しかし Pb の体積比熱は 10K 以下でほとんど無くなってしまいうため、冷凍機による 4K の発生は困難である。これを補うために開発されたのが、HoCu₂ などの希土類金属間化合物である。しかし 4K 以下になると比熱が減少してしまい、より高性能な冷凍機実現の要求に十分に対応できていない。そこで、4K 冷凍機の性能を飛躍的に高める新世代蓄冷材料候補として開発されたのが Gd₂O₂S (GOS) である。GOS は図 3 に示すように 4K~5K 領域で従来の蓄冷材料 (HoCu₂ や Pb) の 2 倍以上の大きな体積比熱を実現している。更に磁場中での比熱変化が少なく、低コスト、加工性、強度・硬度、熱伝導率、化学的安定性に優れた特性がある。

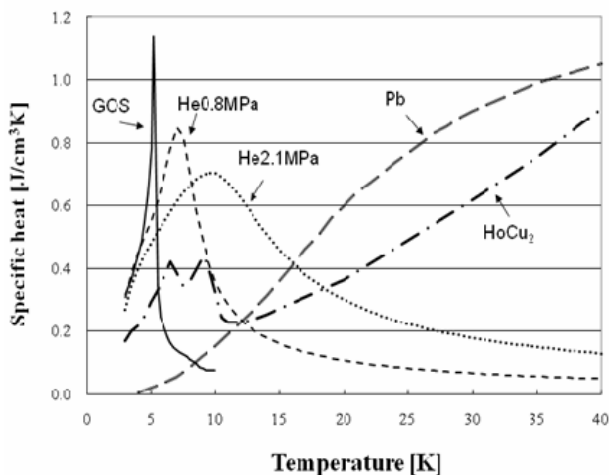


図 3 各蓄冷材および He の体積比熱

3.2 蓄冷器の設定

GM 冷凍機の2段階蓄冷器に注目して研究を進める。図4に2段階蓄冷材の概略図を示す。長さ100 mm, 内径15 mmの円筒空間内に蓄冷材を充填させる。本試験で使用する2段階蓄冷器は低温端(Cold end)は4.2K, 高温端(Hot end)は35Kまで冷却される[3-4]。今回は高温部から高さ40 mm(体積比40%)までPb球(直径0.4 mm)を入れ,これを一定量とした。ここでPbの充填高さを40mm(体積比40%)としたのは,2段階蓄冷器の温度は高温端からの長さが約50%になると,低温端に近い温度まで,すでに冷却されている特性が報告されているためである[6-7]。

残りの60%に HoCu_2 球(直径0.2 mm)を全て充填させ,Pbを40%, HoCu_2 を60%とし,これを初期設定とする。次にGOS球(直径0.25 mm)を徐々に加え, HoCu_2 とGOSの割合を変えながら性能試験を行った。図4で示すように x をGOSの割合とし, $x=0$ でGOS:0%, HoCu_2 :100%の体積比となり, $x=1$ でGOS:100%, HoCu_2 :0%の体積比となる。本試験では x を0~1.0まで変化させる。

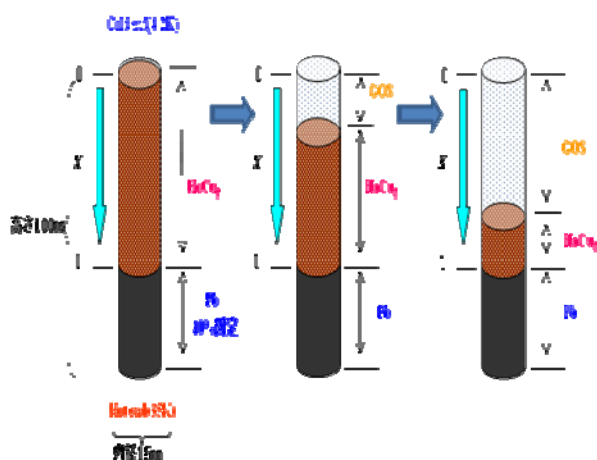


図4 2段階蓄冷材の概略

4. 性能試験結果

4.1 冷却特性試験

図5は2段階ステージの冷却特性を示す。縦軸は2段階ステージの温度,横軸は時間である。冷却開始後,2段階ステージは70minまでは約3.5[K/min]で下がっていき,そこからゆっくりと冷却が進み,約180minで3.1~3.2Kの温度に安定した。最低到達温度は, x を変化させても3.1~3.2Kとほとんど同じであった($x=1.0$ の時は3.4K)。しかし冷却過程に違いが現れた。

図6にその冷却過程を拡大したものを示す。約70~140min間で温度に違いが見られ,GOSを加えていくと全体が冷却されるまでの時間が多く必要になっていることが確認できた。

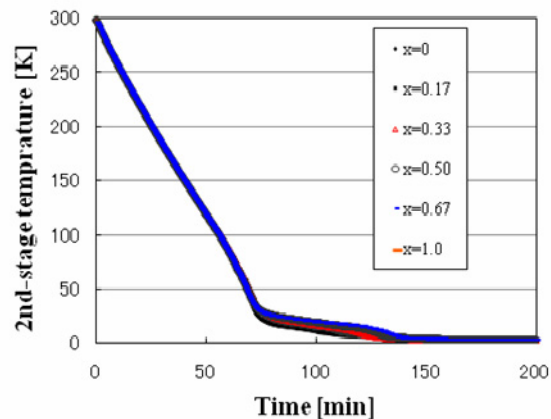


図5 2段階ステージ冷却特性

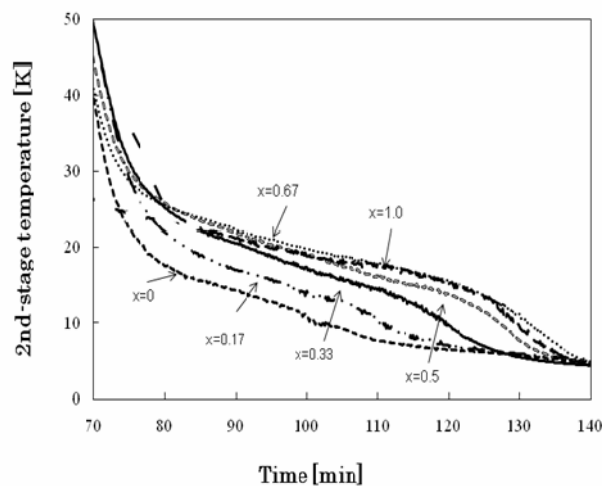


図6 2段階ステージ冷却過程の違い

4.2 冷凍能力試験

図7に2段階ステージの冷凍能力を示す。冷凍能力試験は2段階ヒータへ加える電力を調整しながら行った。縦軸に冷凍能力,横軸に温度を示す。2段階ステージ温度が7K以上になると冷凍能力に大きく差が現れ,GOSの含有量が多いほど冷凍能力が低下していくことが分かる。したがってGOSはこの温度領域で使用することに適していないと考察できる。

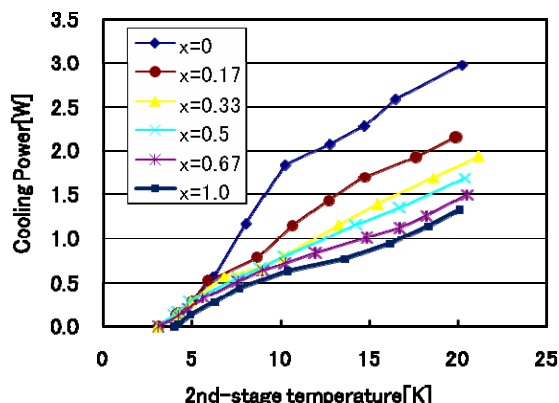


図7 各温度による冷凍能力

図8は2段階ステージが4.2Kにおける冷凍能力の実験結果を示す。縦軸は冷凍能力、横軸はGOSの含有量を規格化した割合である。また表1は2段階蓄冷器に充填した各蓄冷材の体積比と冷凍能力を示す。実験結果から、初期条件からGOSを加えていくと冷凍能力が増えていきGOSの割合(x)が33%の時、冷凍能力が最大となる。更にGOSを加えていくと冷凍能力は減少することが分かった。最大冷凍能力の値は0.21Wであった。この時の蓄冷材の体積比は全体積を100%とすると、表1-③(Pb: HoCu₂: GOS=40:40:20)であり、GOSを加えていない時の表1-①(Pb:HoCu₂:GOS=40:60:0)の冷凍能力0.15Wと比較すると40%冷凍能力が向上することが明らかになった。本試験は同じ方法で繰り返し行った結果、測定誤差が3%以内であることを確認している。

GOSを使用することで、PbとHoCu₂の2層構造の蓄冷器より同じ冷凍能力でコストを下げることができる(GOSの製作コストはHoCu₂の約1/2)。またGOSの含有量を調節することで、冷凍能力が変化することから、ユーザの希望にあった冷凍能力の蓄冷器を開発することもできると考えられる。

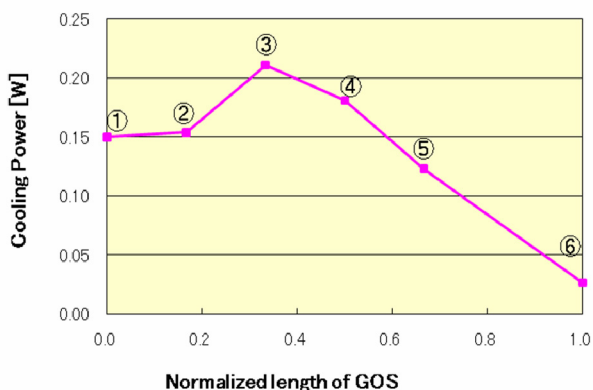


図8 4.2K時の冷凍能力

表1 各蓄冷材の体積比と冷凍能力

含有量	Pb[%]	HoCu ₂ [%]	GOS[%]	冷凍能力[W]
①	40	60	0	0.15
②	40	50	10	0.15
③	40	40	20	0.21
④	40	30	30	0.18
⑤	40	20	40	0.12
⑥	40	0	60	0.03

5. まとめ

GM冷凍機の2段階蓄冷器に充填するPb, HoCu₂, GOSの体積比の割合を変化させ冷却特性、冷凍能力の変化を測定した。冷却特性試験では、GOSの含有量を変化させても3.1~3.2Kとほとんど同じであったが、冷却過程に違いが現れた。GOSを加えると全体が冷却されるまでの時間が多く必要になっていることが分かった。冷凍能力試験では、2段階ステージ温度が7K以上の場合、GOSを加えると冷凍能力が下がることが分かった。またステージ温度が4.2Kの時、低温端側に、GOSを加え体積比をPb: HoCu₂: GOS=40:40:20で計測した結果、本研究目的である4.2Kでの冷凍能力を40%向上させることができた。GOSを使用することでPbとHoCu₂の2層構造の蓄冷器と同じ冷凍能力でコストを下げることができると分かった。またGOSを調節することで、ユーザの希望する冷凍能力の蓄冷器が開発できると考えている。

謝辞

本研究で使用したGOSは共同研究を行っている物質・材料研究機構の沼澤健則博士からご提供頂いたものです。

参考文献

- [1] 岡村正巳, 大谷安見, 斉藤明子, 高性能磁性蓄冷材, 東芝レビューVol.55 No.1(2000)
- [2] 沼澤健則, 独立行政法人 物質・材料研究機構, 2003.5. May Vol.3 No.5
- [3] T. Imazu, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 79 (2008) p.156
- [4] T. Imazu, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 80 (2009) p.79

- [5] H. O. McMahon and W. E. Gifford : Adv. Vol. 48 (1992) p.36
Cryog. Eng. 5, (1960) p.354
- [6] T. Eda, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 48 (1992) p.278
- [7] T. Inaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 48 (1992) p.278

