

Gifford-McMahon 冷凍機の 2 段階蓄冷材の検討

福田祐介* 田村昂大* 増山新二**

Investigation of the 2nd stage regenerator materials of a Gifford-McMahon cryocooler

Yusuke FUKUDA*, Kota TAMURA* and Shinji MASUYAMA**

Abstract

The purpose of this study is improving the cooling power at 4.2 K of a two-stage Gifford-McMahon (G-M) cryocooler. We take notice of a specific heat of the 2nd stage regenerator materials. The experiments have been conducted from two ways. Firstly, the lead (Pb), HoCu₂ and Gd₂O₂S (GOS) spheres were used as the 2nd stage regenerator materials. The sphere diameter of Pb, HoCu₂ and GOS are 0.4, 0.2 and 0.25 mm, respectively. Their materials were filled in the 2nd stage regenerator as a three-layer structure. Secondly, the Pb spheres were replaced to the stainless steel (SUS) screens (200 mesh) or empty space (Emp). A conventional two-stage G-M cryocooler with an air cooled compressor of 1.3 kW at 60 Hz has been tested. The operating frequency of the G-M cryocooler is 1.2 Hz. From a experimental results, the cooling power of 0.22 W achieved when the volumetric ratio was Pb:HoCu₂:GOS = 40:35:25 %. Next, the Pb spheres were replaced to the SUS screens or Emp. The cooling power were 0.12 W (SUS:HoCu₂ = 20:80) and 0.14 W (Emp: HoCu₂ = 20:80) at 4.2 K. The empty space brought the higher cooling power than the stainless steel screens.

Key words: G-M cryocooler, Gd₂O₂S(GOS), stainless steel meshes, empty space

1. はじめに

近年、小型冷凍機の性能は向上し、4K 小型冷凍機は医療用 MRI や磁気浮上式鉄道で実用化されており、更に超電導電力貯蔵装置や核融合炉などへ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電導電磁石が使用され、4K の極低温で冷却する必要がある。そこで用いられるのが、液体ヘリウム(He)を冷媒にする方法である。しかし、液体 He は液化温度が 4.2K で蒸発しやすいため定期的な補充が必要である。また、価格が高価で取り扱いに高度な技術を必要とされる。そこで、液体 He の蒸発量を抑える冷却手段として高性能な小型冷凍機が必要とされている。

小型冷凍機の性能向上に大きく影響を与える部分として蓄冷材が挙げられ、特にその比熱が大きいこ

とが重要である。従来から用いられている蓄冷材である鉛や銅では、温度の低下とともに比熱が低下し蓄冷器として能力が低下する。そこで、Er₃Ni や HoCu₂ などの磁性体蓄冷材の開発^[1]により、2 段階小型冷凍機での 4K レベルの冷却が可能になっている。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。

一方で、蓄冷材として使用されている鉛は環境や人体への影響が懸念されている。欧州連合加盟国では、RoHS (Restriction of Hazardous Substances) 指令により電気電子機器に含まれる鉛の量を指定の数値以下にする必要がある。現状では超電導機器や冷凍機などは直接的に規制を受けてはいない。しかし、規制が拡大すると蓄冷材に鉛を使用している

Gifford-McMahon(G-M)冷凍機も対象となる可能性は高い。

本研究では、4.2Kにおける冷凍能力の向上を目的とし、2段GM冷凍機の2段目蓄冷材にPb, HoCu₂, GOSを充填させ冷凍性能評価^[3-7]および、鉛蓄冷材を使用しない低コスト4K G-M冷凍機の検討^[8]の2方面から行っている。

2. G-M 冷凍機

本実験で用いられた冷凍機は、1959年 W.E. Gifford と H.O.McMahonにより開発されたG-M冷凍機である^[9]。G-M冷凍機は高性能で信頼性の高いことより、近年ではわが国でも複数のメーカーから年間2000台以上生産されている。

図1に本研究で使用したG-M冷凍機の外観写真を示す。G-M冷凍機はSRDK-101D、コンプレッサはCNA-11でいずれも住友重工業株式会社製である。2段目ステージの冷凍能力は、4.2Kで0.1Wの仕様となっている。コンプレッサの消費電力は60Hzの周波数で1.3kWであり、また空冷タイプであるため、運転が手軽に行えることが特徴である。



図1 G-M 冷凍機の外観写真

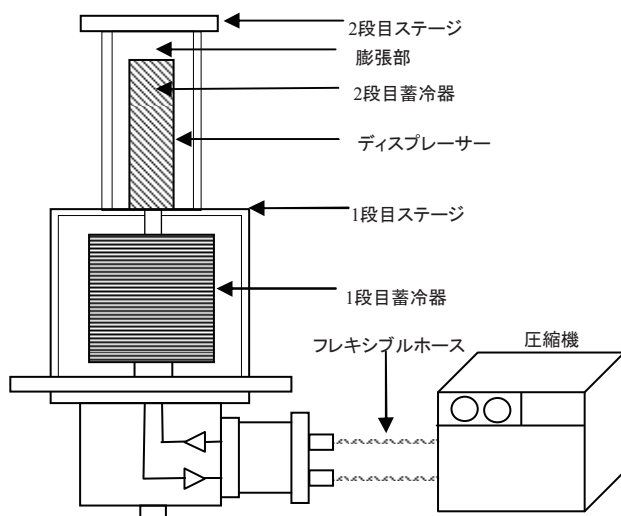


図2 G-M 冷凍機の概略図

図2にG-M冷凍機の概略図を示す。本研究に使用したG-M冷凍機は2つの冷却ステージを持ち、2段G-M冷凍機と呼ばれている。図2の左側の冷凍機部は、薄肉ステンレスのシリンダー内にディスプレイサーが挿入されており、その内部に蓄冷器がセットされている。さらにその内部に冷却温度に応じた蓄冷材が充填されている。作業ガスは不活性気体であるヘリウムを使用する。

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の3種類で行い、鉛蓄冷材を使用しない際はPbの代わりにステンレス(SUS)メッシュまたは空間状態(Emp)で行う。図3に各蓄冷材およびHeの体積比熱を示す。従来、冷凍機に使われる蓄冷材としてPb, Cu, SUS等が主に用いられてきたが、20K以下の極低温で比熱が著しく小さくなる。そのため、極低温に到達させることが困難であった。これを補うために開発されたのが、HoCu₂のように希土類元素と遷移金属元素とから成る金属間化合物を主体とした磁性蓄冷材である。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対応できない。そこで、4K冷凍機の性能を飛躍的に向上させる新世代蓄冷材として開発された蓄冷材は、GOSという酸化物磁性体であり、図3に示すように4~5K領域で従来蓄冷材の2倍以上の大きな体積比熱を実現するものである。

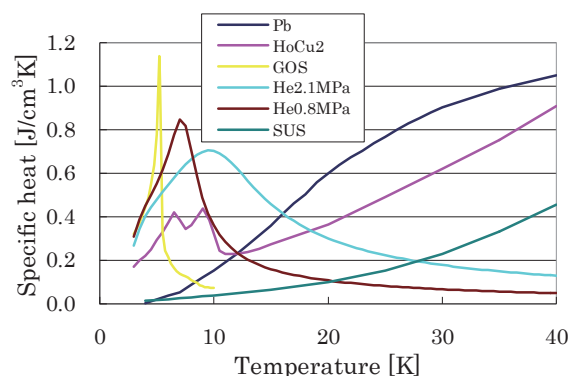


図3 各蓄冷材およびHeの体積比熱

3.2 蓄冷器の数値解析

G-M冷凍機の2段目蓄冷器の冷凍能力向上のために蓄冷器解析ソフト REGEN3.3^[10]を使用し蓄冷材の最適割合計算を行った。計算条件をいくつか抜粋すると、蓄冷材を150分割、高温端・低温端温度をそれぞれ35K、4.2Kとした。また、圧力は、高圧2.1MPa、低圧0.8MPaとした。その他の条件は、Pb:HoCu₂=40:60の時に実験から得られた冷凍能力

(4.2Kで0.15Wの冷凍能力)に合うように設定した。

REGEN3.3を使用して、4.2KでのPb, HoCu₂, GOSの最適割合計算結果を表1に示す。計算手順はまず、Pbを蓄冷器の高温端から10%で固定し、残りの90%でHoCu₂とGOSの割合を変化させて、最も良い冷凍能力を計算で導く。次に、Pbの割合を徐々に増加させてPbが90%までの冷凍能力を同様の手順で計算する。

最も高い冷凍能力は、0.21WとなりPbが10~60%の時である。この結果から、GOSは25~30%程度充填させることが最適であることが分かる。

表1 4.2KでのPb, HoCu₂, GOSの最適割合計算結果

Pb [%]	HoCu ₂ [%]	GOS [%]	Power [W]
10	60	30	0.21
20	50	30	0.21
30	45	25	0.21
40	35	25	0.21
50	25	25	0.21
60	15	25	0.21
70	15	15	0.20
80	10	10	0.17
90	10	0	0.064

3.3 蓄冷器の設定

図4に2段階蓄冷材の概略図を示す。長さ100mm、内径15mmの円筒空間内に蓄冷材を充填させる。表1を参考にし、高温端から40mmまでPb球(直径0.4mm)を入れ、一定とした。この理由はPbが少ないとコスト面が増えてしまい、多すぎると冷凍能力が減少する可能性がある。そこで、中間付近である40%を使用することにした。残りの60mmにHoCu₂球(0.2mm), GOS球(0.25mm)の順番に充填し、それらの割合を変化させながら性能試験を行った。

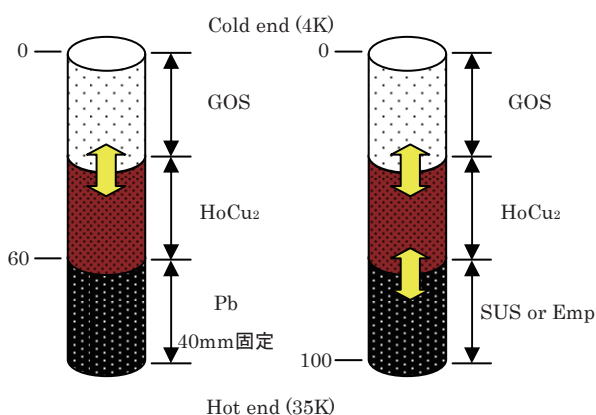


図4 2段階蓄冷材の概略図

鉛蓄冷材を使用しない際は、SUSメッシュ(#200)を使用し、3種類の蓄冷材の割合を変化させながら性能試験を行った。また、SUSの部分に蓄冷材を使用せず、空間状態でも実験を行った。

4. 実験結果

4.1 冷却特性

図5はHoCu₂とGOSの含有量を変化させた時の2段階ステージの冷却特性を示す。どの割合でも約180minで3.1~3.2Kの到達温度で安定した。このように到達温度は等しい値となり、冷却過程にも大きな変化は現れなかった。よって、GOSによる影響はないと考えられる。

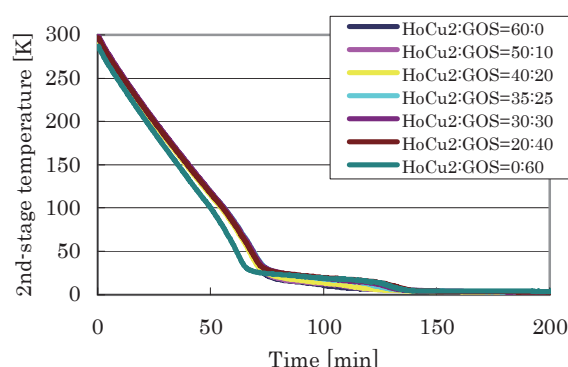


図5 2段階ステージの冷却特性

4.2 冷凍能力

図6にHoCu₂とGOSの含有量を変化させた時の2段階ステージの冷凍能力を示す。冷凍能力試験は2段階ステージに取り付けた電気ヒータにより測定する。温度が7K以上になると冷凍能力に大きな違いが現れ、GOSの割合が多くなるほど冷凍能力が低下していくことがわかる。そのため、GOSはこの温度領域で使用することに適していないことが確認できる。

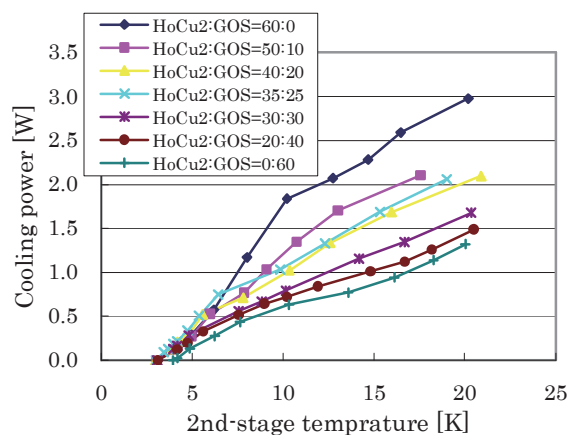


図6 2段階ステージの冷凍能力

本研究の目的である 4.2K における冷凍能力の実験結果、および数値解析結果を図 7 に示す。今回の実験では、GOS を使用していない状態(Pb:HoCu₂=40:60)から GOS を加えていくと冷凍能力が増加していき、GOS の割合が 25%の時に最大を示した。更に GOS を加えていくと冷凍能力が減少することが分かった。冷凍能力の最大値は 0.22W であった。この時の蓄冷材の体積比は Pb:HoCu₂:GOS=40:35:25 であり、GOS を使用していない状態と比較して約 45%冷凍能力が向上した。また、数値解析結果と比較していくつかの違いが現れた。この原因として、蓄冷材を区切るために使用しているフェルトが影響していると考えている。

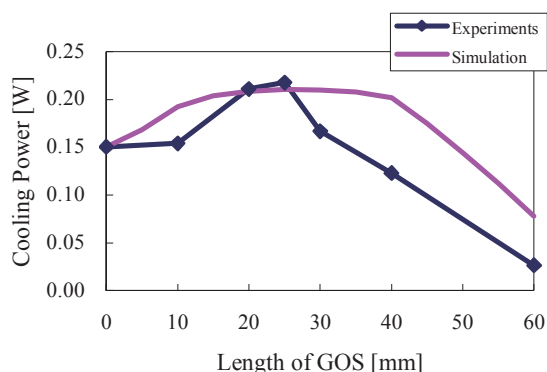


図 7 4.2K における冷凍能力

4.3 鉛蓄冷材を使用しない冷凍能力

図 8 は、4.2K における冷凍能力の実験結果と蓄冷材の割合を示す。

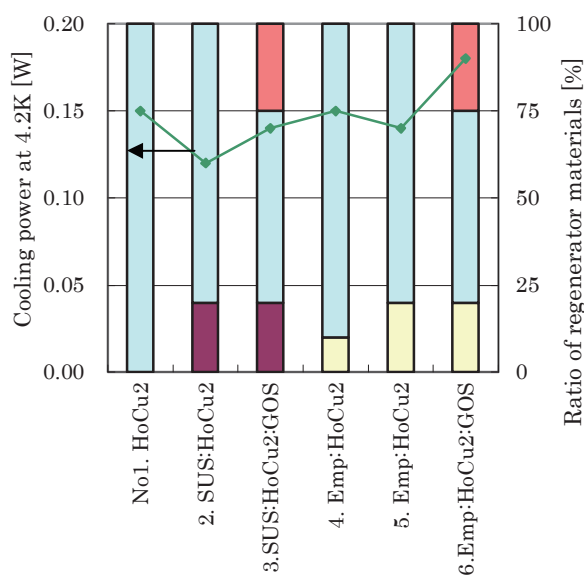


図 8 4.2K における冷凍能力と蓄冷材の割合

No.2 と 3 では、高温端から 20%に SUS を使用した。No.4 では 10%、No.5 と 6 では 20%を空間状態

である。また、No.3 と 6 は低温端から 25%GOS を使用している。今回の実験では、高温端に SUS を使用するよりも空間状態であるほうが高い冷凍能力を得られた。また、No.6 の Emp:HoCu₂:GOS=20:55:25 の時、最もよい冷凍能力を示し、その値は 0.18W が得られた。このことから、HoCu₂=100 (No.1)と比較して約 20%冷凍能力が向上した。

5. まとめ

2 段 G-M 冷凍機の 2 段目蓄冷材に Pb, HoCu₂, GOS を充填させ冷凍性能評価および、鉛蓄冷材を使用しない低コスト 4K G-M 冷凍機の検討の 2 方面から実験を行った。

冷却特性実験では、HoCu₂ と GOS の割合を変化させても到達温度は 3.1~3.2K とほとんど同じで、冷却過程にも大きな変化は現れなかった。また冷凍能力試験では、7K 以上の温度領域では冷凍能力の減少がみられた。しかし、低温端に GOS を 25%加えることにより、研究目的である 4.2K での冷凍能力が約 45%向上した。

高温端に SUS を使用して実験を行った結果、冷凍能力が HoCu₂100%と比較して低下したが、冷凍機の仕様である 4.2K で 0.1W を上回る結果が得られた。また、高温端から 20%を空間状態で HoCu₂ と GOS を充填することにより、本研究の目的である 4.2K での冷凍能力は、約 20%向上した。

従って、GOS を使用することで従来の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 の約半分)。また、RoHS 指令等の規制拡大により鉛蓄冷材の使用が制限されても、従来同様の冷凍能力が見込めると考えている。

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して頂いたものです。

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 HoCu₂, 東芝レビュー-Vol.55. No.1.2000
- [2] 沼澤健則: 新冷却技術 セラミックス磁性蓄冷材の実用化に成功, 独立行政法人 物質・材料研究機構, 2003.5. Vol.3. No.5
- [3] 増山新二, 福田祐介, 今津卓也, 沼澤健則: Characteristics of a 4 K Gifford-McMahon cryocooler using the Gd₂O₂S regenerator material, Cryogenics, to be published
- [4] 福田祐介, 今津卓也, 増山新二, 沼澤健則: GM 冷凍機の 2 段目蓄冷材による冷凍性能評価(3), Abstracts of CSJ Conference, Vol.81.2009 p.74

- [5] 今津卓也, 福田祐介, 増山新二, 沼澤健則 : GM 冷凍機の2段目蓄冷材による冷凍性能評価(2), Abstracts of CSJ Conference, Vol.80.2009 p.79
- [6] 増山新二, 今津卓也, 沼澤健則 : GM 冷凍機の2段目蓄冷材による冷凍性能評価, Abstracts of CSJ Conference, Vol.79.2008 p.156
- [7] 今津卓也, 増山新二 : GM 冷凍機の2段目蓄冷材による冷凍性能評価, 大島商船高等専門学校紀要, 第43号, 2009 p.53-57
- [8] 福田祐介, 田村昂大, 増山新二, 沼澤健則 : 鉛蓄冷材を使用しない4K Gifford-McMahon 冷凍機の検討, Abstracts of CSJ Conference, Vol.82.2010 p.97
- [9] H.O.McMahon, W.E.Gifford : Adv.Cryog. Eng. 5, (1960) p.354
- [10] <http://math.nist.gov/~AOGallagher/auxfiles/rogenstart.html>

