

# 物性測定用小型 GM 冷凍機の性能試験

増山新二\*

## Performance Test of Small Size GM Refrigerator for Physical Properties Measurement

Shinji MASUYAMA

### Abstract

The performance test of a small size refrigerator has been done. The type of the refrigerator is two-stage Gifford-McMahon (GM). The electric power consumption is 1.3 kW at 60 Hz. One of the purposes of this GM refrigerator is to using for physical properties measurement. A hybrid type regenerator material is filled in the 2nd-stage regenerator to obtain the cooling temperature of 4 K level. The 2nd-stage of the GM refrigerator cooled from room temperature to 3.2 K in about 3.5 hours and the 1st-stage temperature was 33.7 K. The cooling power of the 2nd-stage was 50 mW at 4.2 K. It succeeded in the measurement of the resistivity characteristics depending on temperature of copper wire. This GM refrigerator has the acrylic chamber instead of the stainless steel chamber to visualizing the 2nd-stage. It will be enabled to carry out many experiments.

Keywords: Small size GM refrigerator, 4 K level, Physical properties measurement

### 1. はじめに

一般的に冷凍機と呼ばれているものは、150K以下の冷凍温度を対象としている。また、その冷凍機を動作するために必要な所要電力が約 10kW以下のものを小型冷凍機という。小型冷凍機は、蓄冷器を用いる方式と向流型熱交換器を用いる方式に大別できる。本研究に用いられた冷凍機は、比較的小型の実験に向いている蓄冷器方式を利用したもので、冷凍サイクルとしては 1959 年、W. E. Gifford と H. O. McMahon により開発[1]された Gifford-McMahon サイクルであり、Gifford-McMahon 冷凍機、または GM 冷凍機と呼ばれている。

近年、小型冷凍機は、宇宙開発や衛星通信、半導体製造用真空装置や赤外線センサの冷却、また超電導体の冷却などの分野で利用されている。GM 冷凍機は、構造が簡単で信頼性が高いことより、現在もっとも普及している冷凍機の一つである。

本研究では、極低温まで冷却可能な GM 冷凍機を使用し、その性能試験および物性測定をおこなった。

### 2. GM 冷凍機

図 1 に GM 冷凍機の概略図を示す。本研究に使用した GM 冷凍機は二つの冷却ステージを持ち、2 段 GM 冷凍機と呼ばれている。図左側の冷凍機部は、肉薄ステンレスのシリンダ内にディスプレイ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。さらにその内部に冷却温度と大きな関係を持つ蓄冷材が充填されている構造である。1、2 段ディスプレイサは同軸上に配置されており、シリンダ内を上下に往復運動して、作業ガスの移動をおこなっている。この冷凍機部が室温に置かれたコンプレッサとフレキシブルチューブを介して接続され、高・低圧ガスの出し入れがおこなわれている。通常、作業ガスには不活性気体であるヘリウム 4 を使用する。

蓄冷式冷凍機の最低到達温度を左右する大きな要因の一つとして、蓄冷器内に充填される蓄冷材の物性値、特に体積比熱が挙げられる。膨張空間で冷やされたガスは蓄冷材と熱交換をしながら吐出されるため、蓄冷材の比熱が低温側で大きいことは、冷凍機の到達温度を低下させるために有効に働く。通常、2 段 GM 冷凍機の蓄冷材として、

1 段目に銅メッシュ、2 段目に鉛球が使用されている。図 2 に、銅、鉛およびヘリウムの体積比熱の温度依存性を示す。この図から分かるように、室温から 40K 程度の温度領域を補う 1 段目蓄冷材には銅が、それ以下の温度領域を補う 2 段目蓄冷材には鉛が適している。しかしながら、鉛の比熱は温度の低下とともに減少する。それに対し、10K 以下の温度領域では、ヘリウムの比熱が急激に上昇するため、鉛の熱容量では補いきれなくなる。したがって、2 段目ステージの到達温度は、鉛の熱容量とヘリウムの比熱が温度的につりあった 10K 程度が限界となっていた。

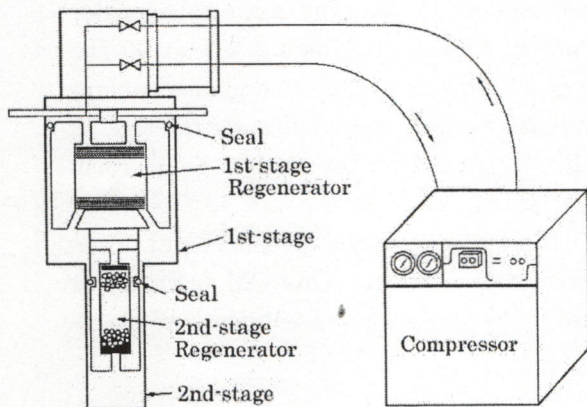


図 1 GM 冷凍機の概略図

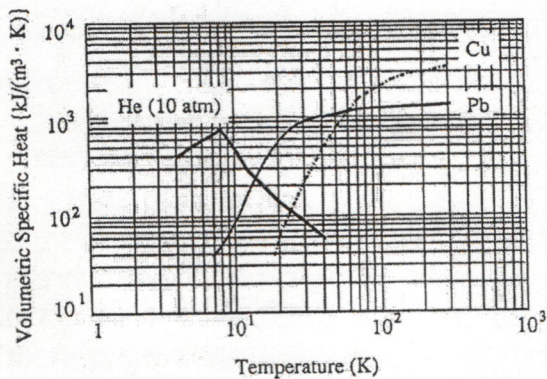


図 2 銅、鉛、ヘリウムの体積比熱の温度依存性

そこで、鉛の代わりに極低温で比熱のピークを持つ磁性体を蓄冷材に用いることが提案[2,3,4]された。図 3 に、代表的な磁性体蓄冷材の比熱の温度依存性[5]を示す。鉛の比熱が小さくなる温度領域において、磁性体の比熱は非常に大きくなっていることが分かる。これを利用することにより、GM 冷凍機で液体ヘリウム温度 (4.2K) が得られるようになった[6,7]。さらに、蓄冷材を蓄冷器中の温度勾配に準じて、その温度で比熱のピークを持つ磁性体を層状に重ねる方法、ハイブリット蓄

冷器が開発[8]された。これは、磁性体の比熱のピークは半値幅が狭く、40K 程度の広い温度領域に渡って動作する蓄冷器を一種類の磁性体でカバーするのは困難となるためである。本冷凍機と同様に、近年では 4K 程度の到達温度を持つ GM 冷凍機では、2 段目蓄冷器にハイブリット型が使用されている。

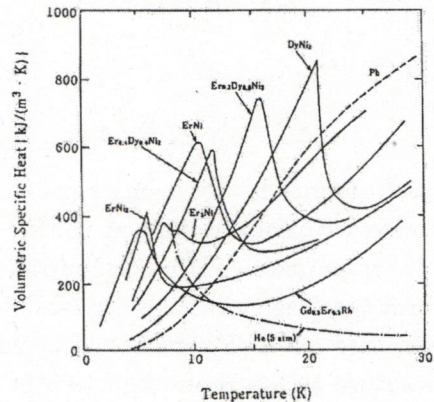


図 3 各種磁性体の比熱の温度依存性

本研究で使用した 2 段 GM 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 (SHI) 製である。2 段目ステージ冷凍能力は、4.2K で 0.1W の仕様となっている。また、冷凍機の外側を覆うステンレスの真空チャンバーなどは、鈴木商館株式会社により製作されたものである。本冷凍機の特徴は、コンプレッサの消費電力が 60Hz の周波数で 1.3kW であり、また空冷タイプであるため、実験・計測が手軽におこなえることである。外観写真を図 4 に示す。従来は、図 1 に示したように、冷却ステージを下向きにして使用する。しかしながら本研究では、物性測定用に利用するため、試料を設置

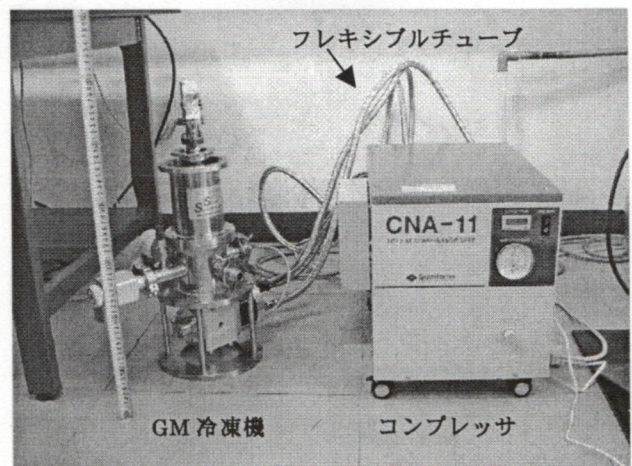


図 4 GM 冷凍機の外観写真

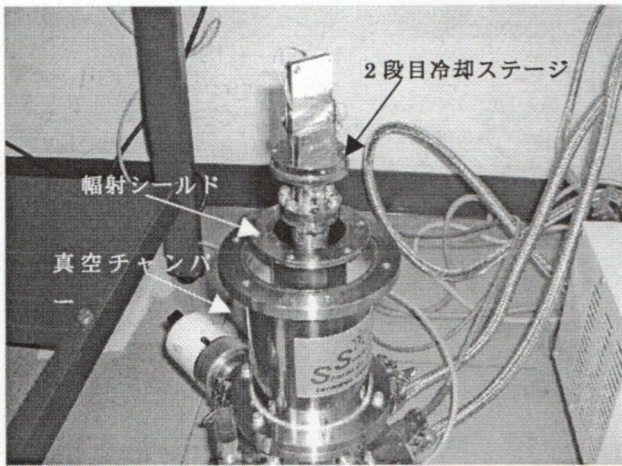


図 5 2 段階冷却ステージ

しやすくするために、逆向きで使用している。冷凍機の全長は約 620mm、幅は約 200mm である。冷凍機とコンプレッサは、フレキシブルホースにより接続されている。

### 3. 性能試験結果

#### 3.1 冷却試験結果

冷却試験は、真空チャンバー内を真空ポンプで  $10^{-2}$ Pa 程度真空引きをしてから、おこなった。温度は、1、2 段階ステージに取り付けられたシリコンダイオード (LakeShore DT-470) により計測し、そのデータを PC に取り込んだ。本冷凍機は、コンプレッサの電源スイッチを押せば自動運転する。冷凍機の運転速度は 70rpm である。図 6 に示すように、本冷凍機の真空チャンバーは、ステンレスで冷却ステージを覆うタイプと、2 段階ステージを目視できるように透明なアクリル製のチャンバーの 2 種類が用意されている。図 7 にステンレスチャンバーを使用したときの冷却試験結

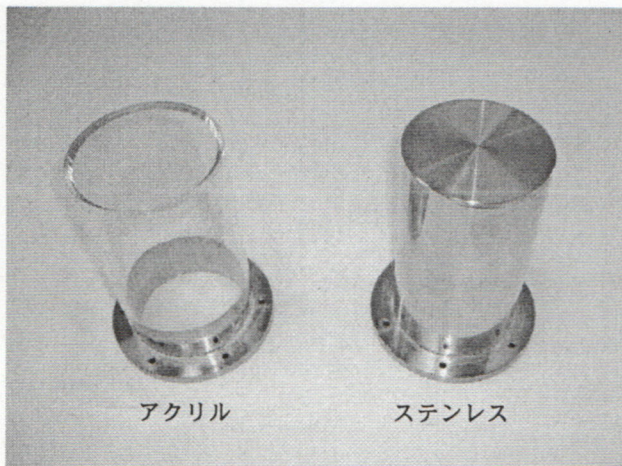


図 6 ステンレスとアクリルチャンバー

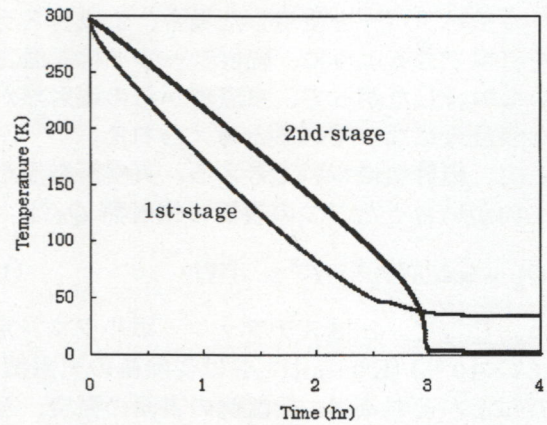


図 7 冷却試験 (ステンレスチャンバー)

果を示す。冷却開始後、1 段階ステージの方が速く温度低下しているが、3 時間程度で 2 段階ステージの温度が低くなっていることが分かる。これは室温から冷却する際に、この温度領域では 1 段階ステージの冷凍能力が大きいためである。冷却開始後、3.5 時間程度で 2 段階ステージが 3.2K となり、以後温度が安定している。また 1 段階ステージは 33.7K となった。

冷凍機を上下反転させて、冷却試験、冷凍能力試験をおこなった結果、上記の結果と同様な性能が得られた。したがって、本冷凍機では、本来の方向と逆向きに使用しているが、それによる影響は無いことが確認された。

図 8 にアクリルチャンバーを使用したときの冷却試験結果を示す。冷却開始後 3 時間程度で 2 段階ステージが 23.9K、1 段階ステージが 39.7K となった。2 段階冷凍機を運転する場合、1 段階ステージに熱的にアンカーされた輻射シールドで 2 段階ステージを覆い、室温部からの輻射熱を低減さ

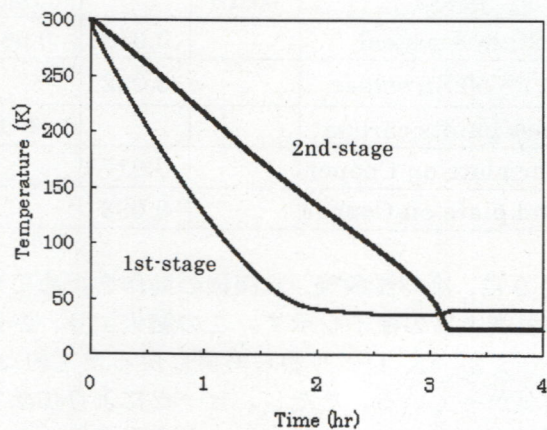


図 8 冷却試験 (アクリルチャンバー)

せる構造が取られる。しかしながら、本冷凍機でアクリルチャンバーを使用した場合、2 段階目ステージを目視できるように、輻射シールドは設置されていない。したがって、室温部からの輻射熱が大きな熱浸入になっていると考えられる。

ここで、輻射熱について考える。真空断熱層を隔てて向かい合った二つの表面の輻射熱  $Q_R$  は

$$Q_R = \sigma A_1 E (T_2^4 - T_1^4) \quad [W] \quad (1)$$

となる。ここで、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} [J/(K^4 m^2 s)]$ )、 $A_1$  は受熱側の表面積、 $T_2$ 、 $T_1$  はそれぞれ高温、低温側の表面の温度、 $E$  は両表面の輻射率である。表 1 には、代表的な低温材料の輻射率 [9] を示す。実際の輻射率は汚れなどの影響によりこの表に示された値より大きくなる。本冷凍機の 2 段階目ステージは、金メッキが施されており、それを考慮して室温部からの輻射熱を計算すると 1 ~ 2 W 程度の熱浸入があると予測される。

表 1 代表的低温材料の輻射率

Surface	Surface Temperature (K)		
	4	77	300
Copper	0.005	0.008	0.018
Gold		0.01	0.02
Silver		0.008	0.02
Aluminum		0.018	0.03
Magnesium			0.07
Chromium		0.08	0.08
Nickel		0.022	0.04
Rhodium		0.078	
Lead	0.012	0.036	0.05
Tin	0.012	0.013	0.05
Zinc		0.026	0.05
Brass	0.018		0.035
Stainless steel		0.048	0.08
50 Pb 50 Sn solder		0.032	
Glass paints carbon			>0.9
Silver plate on Copper		0.017	
Nickel plate on Copper		0.033	

図 9 に、冷却試験後、冷凍機の動作を止めてからの温度上昇の様子を示す。この結果より、2 段階目ステージが 4K レベルから室温に戻るまで約 20 時間かかっている。ただし、ヒータにより加熱すれば、室温まで戻る時間は短くなると考えられるが、いずれにせよ、室温まで戻りきってから真空

チャンバーを開なければならない。

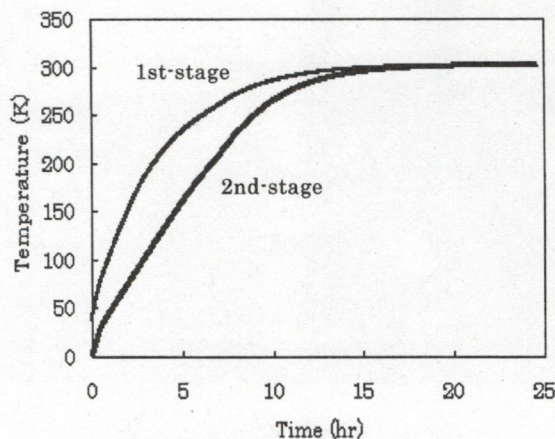


図 9 冷凍機停止後の温度上昇

### 3.2 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は、2 段階目ステージにヒータを設置し、温度コントローラ (LakeShore 331 Temperature Controller) により、任意の温度に設定したときのヒータ入力を測定しながらおこなった。図 10 に、2 段階目ステージの冷凍能力結果を示す。この結果より、本冷凍機は 4.2K で 50mW 程度の冷凍能力を有していることが分かる。この値はメーカ仕様より低い、その理由は、温度計測用などのリード線が室温部から多数導入されており、その熱浸入によるためであると考えられる。また、20K での冷凍能力を測定すると 2.2W となった。これは、アクリルチャンバーを使用した時の室温部からの輻射熱値とオーダー的に良い一致が見られた。したがって、アクリル使用時の到達温度は、輻射熱が原因であることが理解できる。

本結果より、物性測定用の冷凍機として、4K レベルまでの冷却が可能であることが証明された。

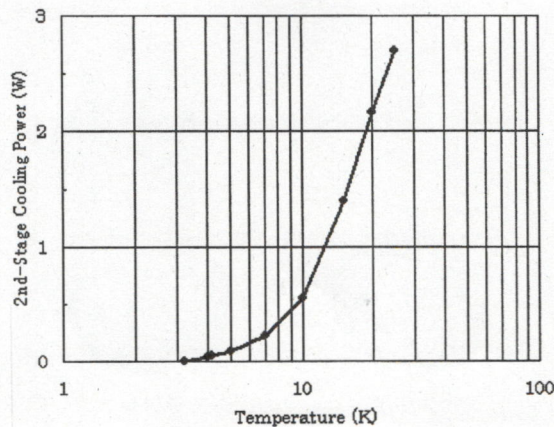


図 10 冷凍能力特性

#### 4. 物性測定結果

本冷凍機を使用して、室温から 4K レベルまで、銅線の抵抗率測定をおこなった。使用された銅線は、直径 0.2mm φ のポリウレタン被覆銅線である。この銅線を冷凍機の 2 段階冷却ステージに固定された銅柱に 11.42m 巻き付けた。抵抗測定は四端子法を用い、室温部から 10mA の定電流を流し、出力電圧をデジタルマルチメータ (KEITHLEY 2000) で読み込み PC に保存した。各温度で測定された抵抗値を式(2)を使って抵抗率へ変換した。

$$\rho(T) = R(T) \cdot \frac{S}{L} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (2)$$

ここで、 $\rho(T)$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] は各温度における抵抗率、 $R(T)$  [ $\Omega$ ] は各温度における抵抗値、 $L$  [m] は銅線の長さ、 $S$  [ $\text{m}^2$ ] は銅線の断面積である。

各温度で得られた抵抗値を抵抗率に換算した結果を図 11 に示す。この図より、低温では抵抗率が一定になるといふ銅の特性が得られていることが分かる。また、本冷凍機により、この銅線の残留抵抗比 (residual resistance ratio : RRR) が 100 程度であることが測定できた。

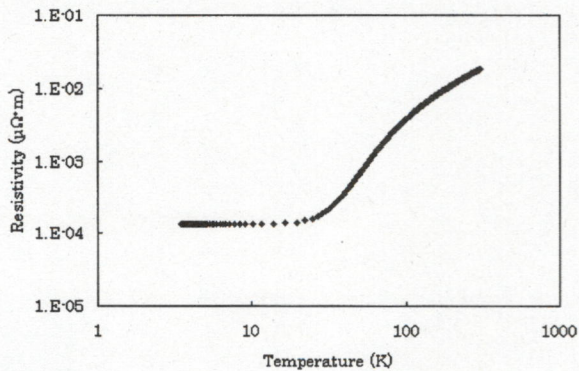


図 11 銅線の抵抗率特性

#### 5. まとめ

100V で動作する小型 2 段階 GM 冷凍機の性能評価をおこなった。本結果より、冷凍機は冷却開始後、約 3.5 時間で最低温度 3.2K に達した。冷凍能力は 4.2K で 50mW であった。

物性測定を使用目的の一つとしており、それを実証するため銅線の抵抗率測定をおこなった結果、銅の持つ特性を得ることができた。

また本冷凍機は、真空チャンバーの一部をアクリル製のチャンバーに取り替えることができる。この場合、輻射熱の浸入により、最低温度は高くなるが、冷却ステージを目視できるため、さまざまな実験をおこなうことが可能となっている。

なお、本冷凍機システムは、平成 14 年度、教育充実設備費により購入されたものである。

#### 参考文献

- [1] H. O. McMahon and W. E. Gifford : Adv. Cryog. Eng. 5, 354, 1960
- [2] M. Sahashi, et al. : Adv. Cryog. Eng. 35, 1175, 1990
- [3] R. Li, et al. : Cryogenics 30, 521, 1990
- [4] Y. Tokai, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 31, 3332, 1992
- [5] 低温工学協会 : 超伝導・低温工学ハンドブック, 1096, 1993
- [6] T. Kuriyama, et al. : Adv. Cryog. Eng. 35, 1261, 1990
- [7] M. Nagao, et al. : Proc. of 6th Intl. Cryocooler Conf., 495, 1991
- [8] T. Hashimoto, et al. : Cryogenic Materials 2, 667, 1988
- [9] 松原洋一 : 冷凍 49, 40, 1973

