

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06693

研究課題名(和文) 極低温冷凍機の高性能・高効率化を目指した新しい蓄冷器構造の適応

研究課題名(英文) Adaptation of a new regenerator structure aiming at the high performance and efficiency for cryocoolers

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ギフォード・マクマホン(GM)冷凍機に、「等価的蓄冷器形状変化」の手法を適応し、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段階蓄冷器の高温側を等価的に細くした場合、4.2 Kでの冷凍能力が改善できることが実証された。また数値解析から、蓄冷器の高・低温側において、ヘリウムガス密度が大きく異な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。

研究成果の概要(英文)：An equivalent changing method of regenerator configuration was applied to a Gifford-McMahon (GM) cryocooler. The evaluation tests have been carried out at 4 K level. The experimental result proved that the cooling power at 4.2 K was able to improve when the warm-end side of the second stage regenerator of GM cryocooler was made narrow equivalently. The numerical analysis showed that the density of helium gas is much different between the warm- and cold-end side within the regenerator. From this study, the elucidation of regenerator characteristic that can achieve a high performance cryocooler progressed.

研究分野：低温工学

キーワード：極低温 小型冷凍機 蓄冷器

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、4 K レベルの冷却が可能な小型冷凍機が設置されているシステムが多々ある。しかしながら、現状の 4 K 冷凍機の効率、理想的な熱力学効率と比較して約 100 倍もの電力が必要とされ、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 (SUS)) 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、到達温度も 10 K 程度である。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, 以下 GOS とする) 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

本研究では、超電導機器などにおける低温システムに必須な道具である 4 K 小型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ことを目的としている。それを達成するため、小型冷凍機に、独自に開発中である等価的蓄冷器形状変化を適応させる。本構造により、

- (1) 冷凍能力の向上 (エネルギー利用効率向上へ)
- (2) 蓄冷材分量の減少 (軽量化、磁気ノイズやコスト低減等へ)

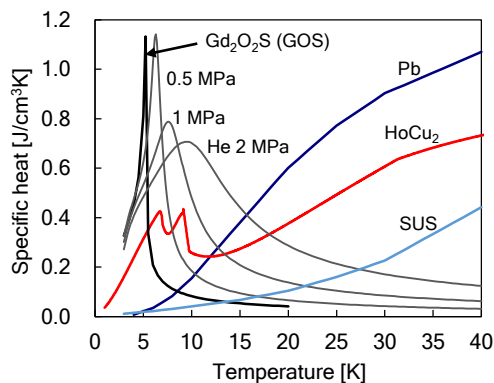


図 1 各種蓄冷材とヘリウムの比熱の温度特性

という、今後の冷凍機分野の大きな発展につながる効果が期待される。

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、高圧ヘリウムガスが冷凍機内に送り込まれ、それと同時に、1 段階目と 2 段階目蓄冷器 (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。各ステージ温度は、1 段階目ステージが約 40 K、2 段階目ステージが 4 K レベルである。各ステージの蓄冷器は、上述の温度を実現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。したがって、それらの断面は当然ながら一様である。しかしながら、図 1 に示された磁性体蓄冷材やヘリウムの比熱の 20 K 以下での振る舞いを考慮したときに、2 段階目蓄冷器の一様な断面形状が、必ずしも最適ではないことが想像できる。

以上の観点から、等価的に蓄冷器形状を変化させる新たな手法が、研究代表者により考案された。

研究に使用された 2 段階 GM 冷凍機本体は、RDK-408D2 (SHI)、4.2 K で 1 W の仕様である。圧縮機は水冷タイプの C300G (SUZUKI SHOKAN) で、7.3 kW at 60 Hz の電気入力である。また、各ステージには温度計と電気ヒータを設置してある。

4. 研究成果

(1) 等価的形状変化の効果

第一ステップとして、等価的形状変化の効果を確認するため、図 3 に示す 5 種類の蓄冷器構造をテストした。ただし、図 3 は蓄冷材充填部のみの概略であり、さらに異種の蓄冷材を分離するために施工されている仕切り材は省略してある。(a) は高温側に Pb 球、低温側に HoCu₂ 球が、それぞれ 50% の体積割合で充填された二層構造 (Two-layer) である。(b)、(c) は円筒状のベークライトロッドを Pb 側、HoCu₂ 側の同軸上に挿入した構造で、それぞ

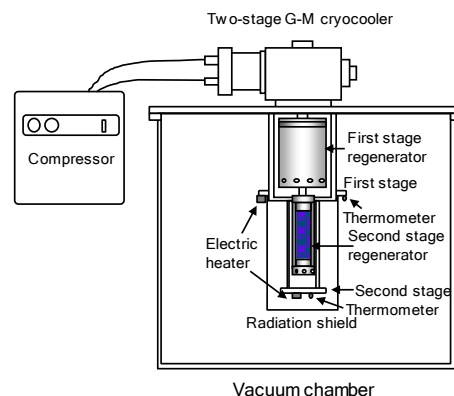


図 2 2 段階 GM 冷凍機と圧縮機の概略

れ Pb-rod, HoCu₂-rod と呼ぶ. 挿入されたベークライトは, 蓄冷効果を持っていない. したがって, ベークライトが挿入された蓄冷器部分を細くすることが可能となり, 等価的形狀変化が実現できている. (d), (e) は円錐状のベークライトを挿入した構造で, それぞれ Pb-cone, HoCu₂-cone と呼ぶ. これにより, 蓄冷器をテーパー上に変化させることができています. 図 4 には, 挿入されたベークライトの一例の写真を示す.

図 5 と図 6 に, ベークライト体積による 2 段階目ステージの 4.2 K と, 1 段階目ステージの 40 K での冷凍能力結果を示す. ベークライト体積 0 cm³ は Two-layer での冷凍能力である. なお, 蓄冷器の Pb 部と HoCu₂ 部の空間容積は, それぞれ 50 cm³ である.

まず, 4.2 K の冷凍能力に注目すると, 高温側の Pb 部にベークライトを挿入した場合の Pb-rod, Pb-cone 構造において, いずれも Two-

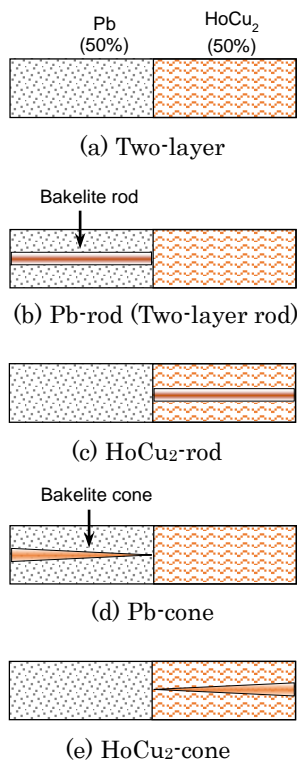


図 3 等価的形狀変化による 5 種類の 2 段階目蓄冷器の概略



図 4 ベークライト外観写真

layer の冷凍能力より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. その体積は約 5 cm³ であり, Pb 部, HoCu₂ 部容積の 1/10 に相当している. 冷凍能力の改善は, 等価的に蓄冷器形状を細くすることで, 蓄冷器内に流入するヘリウム流量が減少し, 冷器損失に結びつくエンタルピー損失が低減することが要因であると考察された. 逆に, HoCu₂ 部に挿入した場合は, いずれも二層構造よりも能力低下となっているが, HoCu₂-cone での能力低下が大きい. このことから, 4.2 K での冷凍能力を維持するためには, 蓄冷器低温側, その中でも低温端側での熱容量が重要であることが明らかとなった.

一方, 40 K での冷凍能力は, どの構造においても二層構造より改善が見られている. これもヘリウム流量の減少が要因であると考えられる.

(2) 三層構造による冷凍能力比較

等価的形狀変化が冷凍能力へ与える効果が確認されたことを受けて, 2 段階蓄冷器の蓄冷材を図 7 (a) に示す三層構造 (Three-layer) に変更して, 冷凍能力試験を実施した. 充填された蓄冷材は高温側から Pb, HoCu₂, GOS 球であり, その割合は今までの研究結果を参考にして 50, 20, 30% としている. 等価的形狀変化の効果は, Pb 側にロッドを入れた構造

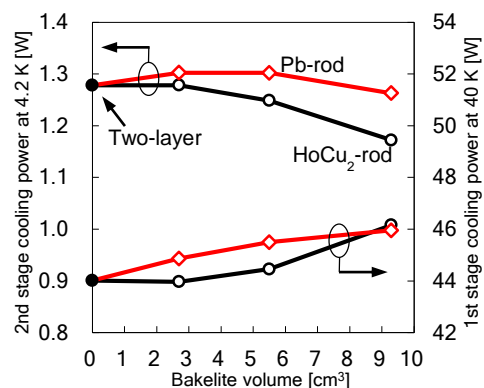


図 5 ロッド形状による 4.2 K と 40 K の冷凍能力結果の比較

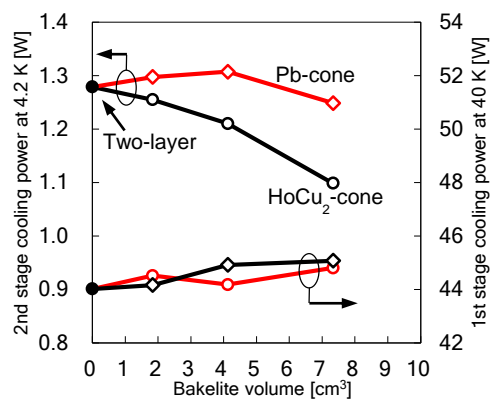


図 6 円錐形状による 4.2 K と 40 K の冷凍能力結果の比較

(Three-layer rod) を採用し、ベークライト体積は 5.5 cm^3 である。その概略図を図 7 (b) に示す。ベークライトを挿入することで、Pb の充填量を 6% (20 g) 減少できている。

図 8 は、4.2 K での冷凍能力の 1 段階目ステージ温度依存性結果である。三層構造との比較のために二層構造の Two-layer (図 3 (a)) と Pb-rod (図 3 (c), Two-layer-rod) の結果も合わせて示してある。まず、レイヤー構造での冷凍能力を比較すると、低温端側に GOS を充填した三層構造にすることで、その冷凍能力が約 13% 改善されている。つぎに、ベークライトロッドが挿入された構造を比較すると、二層、三層構造とも、冷凍能力がさらに改善される温度領域が存在していることが示されている。最も大きな冷凍能力は、1 段階目温度が 40~53 K の領域で 1.47 W である。Two-layer と比較すると、20% 近くも冷凍能力の向上に成功したことになる。その一方で、1 段階目ステ

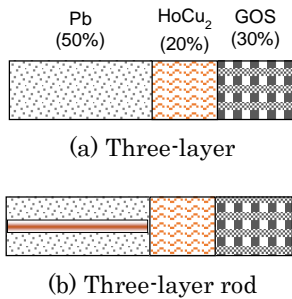


図 7 三層構造と三層ロッド構造の概略

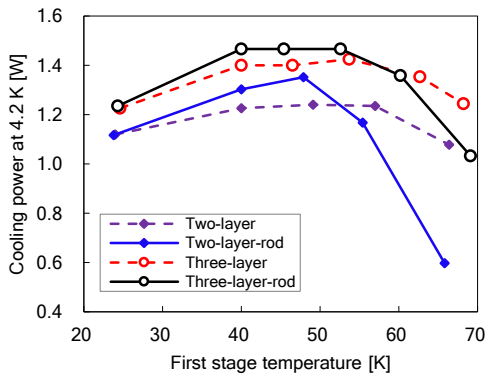


図 8 4.2 K の冷凍能力と 1 段階目ステージ温度依存結果

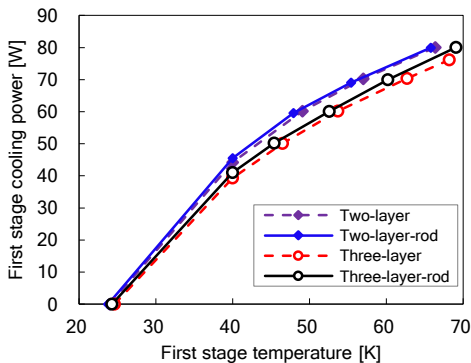


図 9 1 段階目ステージ冷凍能力結果

ージ温度が約 55 K 以上になると、ロッド構造の冷凍能力は、レイヤー構造のそれを下回る結果となった。これは、ヘリウム流量の不足が要因と考えられる。以上の結果から、4 K 冷凍機の冷凍能力は、充填される蓄冷材の比熱と、蓄冷器構造に大きく依存することが理解できる。

図 9 は、1 段階目ステージの冷凍能力を示す。GM 冷凍機では、2 段階目ステージの熱負荷は 1 段階目ステージで吸収される。したがって、2 段階目ステージに、より大きな熱負荷が加わっている三層構造が二層構造より冷凍能力が全温度領域に渡って低下している。これは、GM 冷凍機の構造上、避けられない。注目すべき点は、ロッド構造での結果である。レイヤー構造よりも大きな熱負荷が加わっているにも関わらず、レイヤー構造と同程度の冷凍能力を持っている。つまり、ロッド構造とすることで、2 段階目ステージの 4.2 K での冷凍能力が改善されるが、その熱負荷が 1 段階目に影響を与えていない。これも本手法の等価的的形状変化の大きな特徴の一つであると言える。

以上の結果から、本研究目的である、冷凍能力の向上と、蓄冷材分量の減少は、達成できたと言える。しかしながら、さらなる向上を目指して、つぎの蓄冷器数値解析が行われた。

(3) 蓄冷器数値解析

4 K 小型冷凍機の冷凍能力向上のためには、磁性体蓄冷材が充填される蓄冷器の振る舞いを理解することが重要である。その観点から

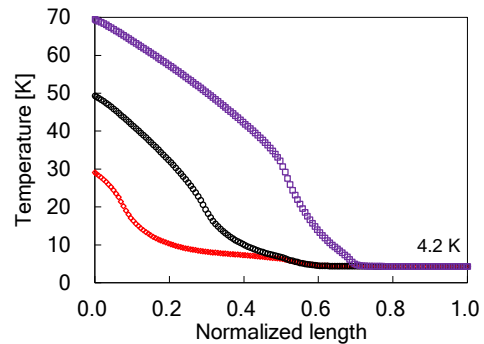


図 10 三層構造蓄冷器内の温度分布

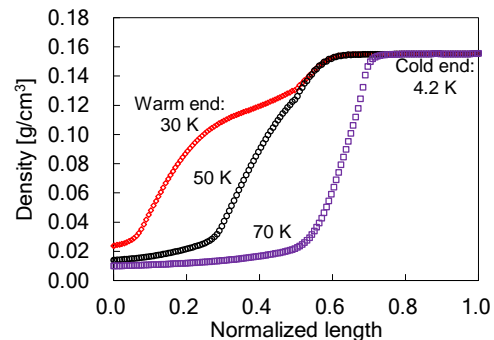


図 11 三層構造蓄冷器内のヘリウム密度分布

Three-layer (図 7 (a)) の蓄冷器解析を行った。まず、蓄冷器解析ソフト REGEN3.3 を使用し、本研究での実験条件を入力パラメータとして蓄冷器内の温度分布を計算した。三つの高温端温度 (30, 50, 70 K) による温度分布を図 10 に示す。規格化長さ (蓄冷器長さ) 0 が高温端, 1 が低温端 (4.2 K 一定) を示す。特徴的なことは、温度勾配は非線形であり、特に高温端温度が 30, 50 K において、蓄冷器長さの約 0.5 までに大きく温度が減少し、その後の温度変化は小さいことである。高温端温度が 70 K では、蓄冷器長さ 0.7 程度でようやく温度が安定している。高温端温度が高くなりすぎると蓄冷器損失が大きくなり、冷凍能力の低下に結びつくと考えられる。図 8 に示した冷凍能力結果からも、その傾向が見て取れる。

つぎに、図 10 の結果を基に、新たな蓄冷器解析手段として、蓄冷器内のヘリウム密度を計算した結果を図 11 に示す。結果から、蓄冷器高温側では、ヘリウム密度は大きく変化するが、逆に低温側では、ほぼ一定値となっている。本解析結果は、4 K 冷凍機の蓄冷器内におけるヘリウムガスの振舞いを理解するための、重要な手がかりにつながると考えている。

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) 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

(2) 増山新二: 極低温小型冷凍機用蓄冷器, 低温工学, Vol. 51 No. 8 (2016) pp. 391-397 査読有

(3) S. Masuyama, T. Numazawa: A Double Pipe Regenerator for a 4K Gifford-McMahon Cryocooler, Cryocooler 19, (2017) pp. 307-312 査読有

[学会発表] (計 4 件)

(1) 増山新二: GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に挿入された円筒パイプによる冷凍能力の改善, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p. 98

(2) 増山新二: 第 2 段目蓄冷器形状の等価的变化による冷凍能力への効果, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 87 (2016) p. 48

(3) S. Masuyama, T. Numazawa: Achievement of 1.5 W at 4.2 K by Using a Double Pipe Regenerator, 1st Asian ICMC-CSSJ 50th Anniversary Conference, (2016) p. 81

(4) 増山新二: 1.6 W-GM 冷凍機の開発, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2017) p. 71

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・強磁場ステーション・特別研究員

研究者番号 : 30354319