

研究成果報告書

研 究 題 目	二重パイプ蓄冷器による高出力 4 K 小型冷凍機の実証研究		実 施 年 度
			H29~30 年度
代 表 研 究 者	所 属	大島商船高等専門学校	
	氏 名	増 山 新 二	印

1. 研究の目的・背景

特定温度以下で電気抵抗が消失する超電導体は、電気エネルギーの有効利用の観点から、究極の物質であると言える。この超電導体は、主に液体ヘリウム (4.2 K) により冷却されるが、我が国のヘリウム事情は誠に乏しく、100%輸入に頼るとともに、その埋蔵量も世界中で不安視されている。一方、30 年ほど前から小型冷凍機で 4 K の冷却が可能となり、MRI に代表される超電導応用システムに、ヘリウムの蒸発量を抑制する目的で組み込まれている。しかしながら、4 K 小型冷凍機の最大の問題点は、その効率が非常に悪いことである。1 W の能力を得るために約 10^4 倍もの電気入力が必要としている。そこで本研究では、4 K で高出力の冷凍能力を有する冷凍機の開発を目指し、つぎの 2 項目を実施した。

① 冷凍機全体のブラッシュアップ

② 独自に開発中の「二重パイプ蓄冷器構造」の適用

超電導機器の発展に伴い、高効率冷凍機を早急に待ち望むユーザーが増えている。本研究は、それらの手助けになると考えられる。

ベースとなる小型冷凍機はギフォード・マクマホン (GM) 冷凍機である。GM 冷凍機の概略図と計測システムを図 1 に示す。本冷凍機は、二つの冷却ステージを持つことから、2 段階ステージ型 GM 冷凍機と呼ばれている。圧縮機からフレキシブルホースを介して供給される高圧 (約 2 MPa) ヘリウムガスが、蓄冷器内に充填されている蓄冷材と熱交換を行いながら冷却され、低圧 (約 0.5 MPa) 状態となって戻ってくる。冷凍能力は、1 段階 (約 40 K) と 2 段階 (4.2 K) ステージから取り出すことができる。2 段階ステージの 4.2 K における冷凍能力が、本研究の対象である。2 段階ステージとシリンダーは、輻射熱を低減させるため、1 段階ステージで冷却される輻射シールドで囲われている。また、冷凍機全体は、ステンレス製の真空容器内に設置され、 10^{-4} Pa オーダーの真空状態で運転される。各ステージには温度測定のための温度計、冷凍能力測定のための電気ヒータが付けられ、室温部の計測器へ接続される。

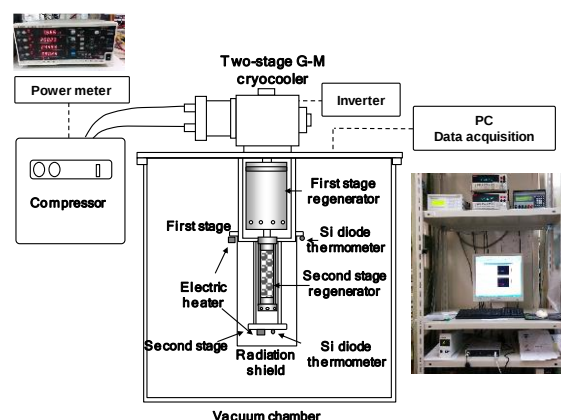


図 1. GM 冷凍機の概略図と計測システム

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

実施方法で掲げた「冷凍機全体のブラッシュアップ」を図るためには、4 K 冷凍機内の仕事の流れを把握する必要がある。その一例を図 2 に示す。この例では、圧縮機を駆動するために 6 kW の電力が供給されているが、冷凍機の入り口までに、それが 1/4 倍の 1.5 kW に低減し、冷凍機の入力仕事として導入される。その後、この仕事が冷凍機内で消費され、1 W at 4 K の冷凍能力が得られている。ここで注目すべきは、2 段階ステージの膨張空間の仕事（図 3）である。膨張空間に 1 W の冷凍能力（Power）の何倍も大きな仕事が供給されているが、ヘリウムガスの実在気体（Real gas）効果と、蓄冷器損失（Rege. loss）により、その仕事が大幅に低減する。そこで、膨張空間の圧力（ Δp ）またはガス質量（ m ）を増加することで、損失も増加するが冷凍能力も同時に大きくなるという考え方ができる。この考えを実証するために、冷凍機内にヘリウムガスを供給する圧縮機に注目した。

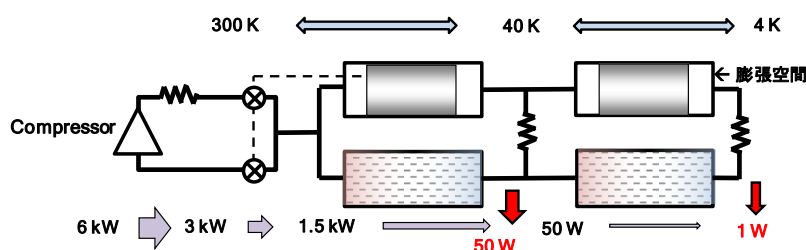


図 2 4 K 冷凍機の仕事の流れの一例

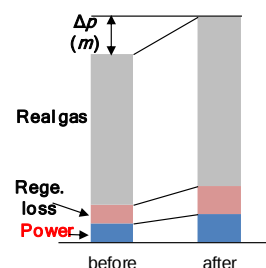


図 3 膨張空間での仕事

圧縮機は、電気エネルギーを機械エネルギーへと変換する。変換の方式には、旧型のロータリー式と新型のスクロール式の二種類に分けられる。現在所有の圧縮機は前者である。そこで、本財団の助成により、新型のスクロール式圧縮機を購入した。2 台の圧縮機の外観写真を図 4 に示す。左側がロータリー式（C300G），右側がスクロール式（SSC-3700）で、いずれも鈴木商館製であり、定格電力は 2 台とも 7.3 kW at 60 Hz であり、水冷式である。

まず、圧縮機の性能を把握するために、圧縮機単体での質量流量、等温効率を実測した。結果は、質量流量が約 50%，効率が約 15%，SSC-3700 が大きな値を示した。ただし、この試験は、ヘリウムガスの DC フローの実験であるため、これらの数値結果がそのまま冷凍能力へは結びつかない。しかしながら、スクロール式圧縮機の性能が高いことが理解できる。

つぎに、それぞれの圧縮機を冷凍機本体へつなぎ 4.2 K での性能試験を行った。使用された GM 冷凍機は、RDK-408D2（住友重機械工業）であり、1 W at 4.2 K の仕様となっている。外観写真を図 5 に示す。



図 4 圧縮機（左: C300G, 右: SSC-3700）



図 5 2 段階 GM 冷凍機（RDK-408D2）

圧縮機による性能試験を実施するにあたり、4.2 K 冷凍性能に特に大きく影響を及ぼす 2 段目蓄冷材は、われわれが実施してきた研究成果から、三種類の球体材料 (Pb, HoCu₂, Gd₂O₂S) を図 6 (a) に示される体積割合で、三層構造として充填した。ここで、蓄冷器の内径は 30 mm、長さは 140 mm であり、それぞれの蓄冷材の球径は約 0.2~0.3 mm である。また、図には示していないが、蓄冷器両端と異種材料の境界部には、蓄冷材を固定する目的で、積層されたステンレスメッシュが挿入されてある。

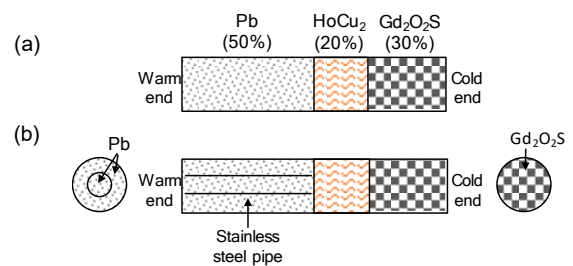


図 6 2 段目蓄冷器の概略図, (a): 三層構造, (b): 二重パイプ構造

冷凍機入り口部における圧力測定結果を図 7 に示す。結果から、2 台の圧縮機において、低压側はほぼ同じ圧力変位であるが、高压側ははっきりとした差異が現れており、SSC-3700 が大きな値を示している。図 8 に、4.2 K における冷凍能力の 1 段ステージ温度依存性の測定結果を示す。いずれの圧縮機を使用した場合も 1 段ステージ温度の変化に対して凸型の特性となっている。SSC-3700 を使用した場合は、すべての温度範囲において C300G を上回っている。また、約 47 K にピークを持ち、1.70 W を発揮しており、C300G の 1.60 W と比較し 6% の性能向上である。この結果は、ブラッシュアップの効果が得られたことを示す。

つぎに、独自に開発中の「二重パイプ (Double pipe) 蓄冷器構造」を 2 段目蓄冷器に適用した。概略図を図 6 (b) に示す。これは、蓄冷器の同軸上にステンレスパイプが挿入された構造である。現在までに、2 段目蓄冷器の高温側を二重パイプ構造とすることで、その効果が大きいことが明らかとなってきた。試験結果を図 8 に示す。圧縮機は SSC-3700 を使用している。SSC-3700 の三層構造と比較して、さらに大きな能力向上となり、最高値で 1.79 W が得られている。これは、蓄冷器内のヘリウム流が軸方向のみの理想的な一次元流ではなく、半径方向へ乱れた成分も有しており、二重パイプ構造を適用することで、その乱れを抑制し、膨張空間へのガス流量が増したことが性能向上の理由と考えられる。

本研究成果は、申請時の 90% の達成度であるものの、高効率 4 K 冷凍機の実現へ向けての確実な第一歩になったと考えられる。助成頂いた貴財団へ感謝する。

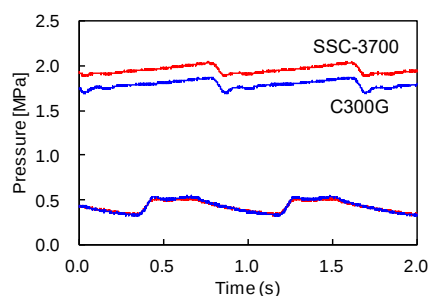


図 7 冷凍機入り口の圧力波形測定結果

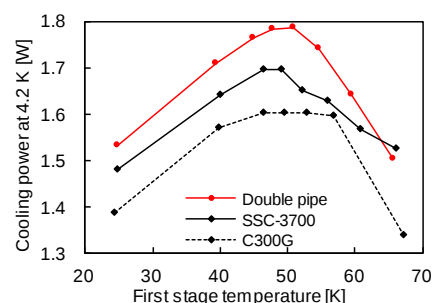


図 8 4.2 K の冷凍能力の 1 段ステージ温度の依存性結果

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

助成された金額の内、申請書に記載通り、圧縮機（SSC-3700）の購入（助成額の 9 割）し、残金は実験に必要な消耗品の購入に充てられた。

経費はすべて支出され、かつ適正に処理された。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究で使用したベースの GM 冷凍機は、1 W at 4.2 K の仕様である。本研究において、それをブラッシュアップし、また独自の蓄冷器構造を適用することで 1.79 W at 4.2 K の性能を発揮することができた。

現在市販されている、もっとも大きな冷凍能力を有している GM 冷凍機は、1.8 W 機である（住友重機械工業が昨年リリースした）。詳細が不明な部分もあるが、本研究の冷凍機との大きな違いは、2 段目シリンダーの大きさであり、2 段目蓄冷器の熱容量を増やす構造となっているようである。なお、電気入力は同じである。

したがって、この 1.8 W 機に、二重パイプ構造を適用することで、さらなる能力向上が期待される。冷凍機メーカーの研究者も、本構造に興味を示しており、お互いの協力体制のもと、研究が実施できるように準備を進めているところである。

冷凍機ユーザーからは、2 W クラスかそれ以上を要求する声を多く聞く。この要望に応えられる冷凍機開発は、今後 5 年以内には実現できると考えている。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載．予定を含む）

[1] 同軸パイプ蓄冷器の 4 K 冷凍能力の奇妙な特性：増山新二 松本宏一 沼澤健則, 2019 年度春季 低温工学・超電導学会 Vol. 98, 2019, p. 51

[2] 高出力 4K-GM 冷凍機開発への試み：増山新二 松本宏一 沼澤健則, 2018 年度秋季 低温工学・超電導学会 Vol. 97, 2018, p. 54

[3] 圧縮機性能による 4K-GM 冷凍機の冷凍能力への影響：増山新二 谷田広士 沼澤健則, 2018 年度春季 低温工学・超電導学会 Vol. 96, 2018, p. 103