

研究成果報告書

研 究 題 目	20K 高効率を目指した1段パルスチューブ冷凍機 の開発		実 施 年 度
			2012 年度
代 表 研 究 者	所 属	大島商船高等専門学校 電子機械工学科	
	氏 名	増 山 新 二	印

1. 研究の目的・背景

近年、酸化物超電導体の性能向上により、次世代の電気エネルギーシステムとして、超電導電力システム（超電導電力貯蔵、超電導電力ケーブル等）の実証研究が各方面で行われている。これらのシステムを安定的に動作するためには冷却が重要であり、特に、超電導電力貯蔵においては、20K レベルでの冷却が必須とされている。この温度で使用できる冷媒としては、液体ヘリウム(4.2K)が挙げられるが、近年のヘリウム供給問題や価格の上昇、取扱いの煩雑さ、ランニングコスト等の欠点が多い。そこで期待されているのが蓄冷式冷凍機である。その中でも、低温側に機械的駆動部を持たないパルスチューブ(PT)冷凍機が注目されている。以上の背景から本研究では、20K 高効率 1 段 PT 冷凍機を開発することを目的としている。

本研究で構築した4バルブ型1段PT冷凍機の概略図を図1に、外観写真を図2に示す。構成要素は主に、PT(ヘリウムガスが充填された薄肉ステンレス円筒管)、蓄冷器(薄肉ステンレス円筒内部に蓄冷材が充填されている)、と四つの電磁バルブ、圧縮機(概略図では省略)から成る。冷却原理は、圧縮機からの高圧ヘリウムガスが冷凍機内に導入され、そこでガスが膨張され、蓄冷材と熱交換を行うことでコールドステージが冷却される。ここで注目すべき点はガスの膨張方法である。PT冷凍機は、一般的に使用されているような固体ピストンを持っておらず、PT内のガスが、あたかも固体ピストンのような働き(ガスピストン)をすることによって膨張を行っている。したがって、設計の自由度が大きくなるとともに、低振動・長寿命を兼ね備えた冷凍機として期待されている。

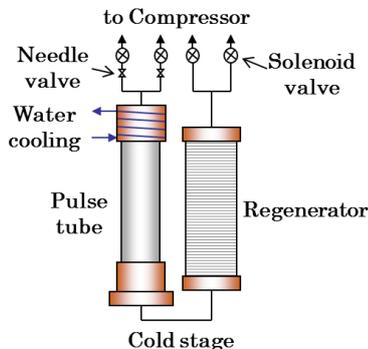


図1 4バルブ型1段パルスチューブ冷凍機の概略図

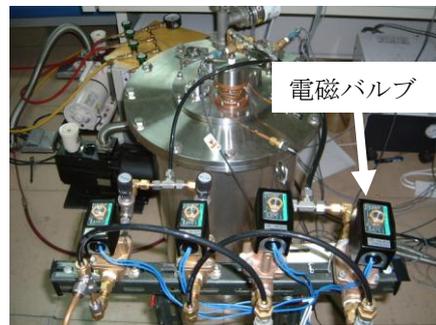


図2 パルスチューブ冷凍機外観写真

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）

蓄冷式冷凍機に分類される PT 冷凍機において、その冷却性能に大きく影響を与える要因の一つに蓄冷材の比熱が挙げられる。冷却する温度領域において、比熱が大きいことが望ましい。代表的な蓄冷材の比熱特性(図 3)より、室温から 70K 付近までは、ステンレス(SUS)、その後、鉛(Pb)、さらに 10K 以下の温度を得るためには磁性体であるホロミウム銅(HoCu<sub>2</sub>)を使用することが冷凍効率向上のために望ましいと言える。したがって、蓄冷器の温度分布に応じて蓄冷材を層状に充填する必要がある。以上の観点から、構築した PT 冷凍機において、到達温度の SUS と Pb の分量依存性(図 4)を実験的に見出した。高温側に SUS、低温側に Pb の二層構造である。なお、冷凍機の運転周波数は 2Hz 一定である。研究結果より、Pb 蓄冷材を充填することにより到達温度は減少し、Pb:SUS = 20:80 において最も低い温度である 19.2K に到達している。

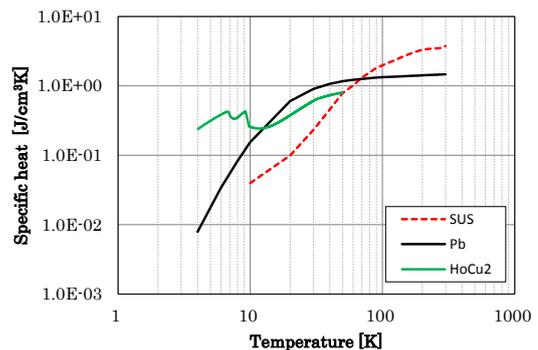


図 3 代表的な蓄冷材の比熱特性

次に、さらなる高効率化を目指し、本助成より購入した HoCu<sub>2</sub> を 10% の体積割合で低温側に充填した。つまり、蓄冷材は HoCu<sub>2</sub>:Pb:SUS = 10:10:80 の割合で三層構造となっている。到達温度と 20K の冷凍能力試験結果を表 1 に示す。HoCu<sub>2</sub> を充填することで、到達温度は 0.9K 低下し、冷凍能力は約 2.4 倍の向上が見られている。

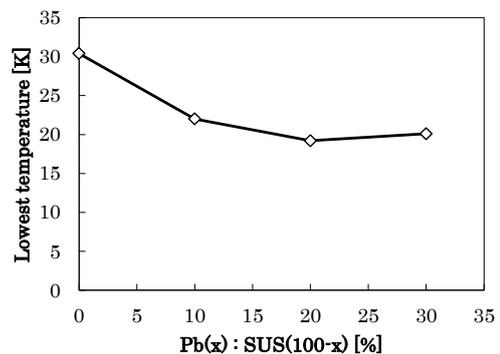


図 4 到達温度の鉛(Pb)とステンレス(SUS)蓄冷材分量依存特性

高効率 1 段 PT 冷凍機を開発することを目的として本研究は実施された。磁性体である HoCu<sub>2</sub> を使用することで、冷却性能が向上したものの、実施計画の 20W@20K には及んでいない（目標達成度 15%程度）。大きな原因の一つとして、HoCu<sub>2</sub> が有効になる温度領域まで到達していないことが挙げられる。しかしながら、本冷凍機が有しているパフォーマンスは高いものがあり、各構成要素の最適化を進めることで、さらなる高効率化を目指していきたいと考えている。

表 1 蓄冷器タイプによる到達温度と 20K での冷凍能力比較

Regenerator type	Lowest Temperature [K]	Cooling power at 20K [W]
Pb:SUS = 20:80	19.2	1.26
HoCu <sub>2</sub> :SUS:Pb = 10:10:80	18.3	2.98

### 3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

本研究に関する経費の使用状況は、以下の通りである。

#### 消耗品費

磁性体蓄冷材(HoCu <sub>2</sub> )160g :	40 万円
その他, 設備備品など	0 円
合計	40 万円
(助成金額 40 万円)	

### 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）

手軽に極低温環境を作り出せる小型冷凍機は、各種小型システムの構築や R&D などを進めるための手助けになっているものの、応用機器の実用化を展開する上で冷凍機の効率はとも十分なものとは言えないのが現状である。さらに、近年のヘリウム供給問題が追い打ちをかけているように、小型冷凍機の効率向上は早急に解決しなければならない大きな問題となっている。本研究で対象としている 20K という温度は、小型冷凍機においてはデッドポイント的な存在となっている。冷却ステージを 2 段型にすることで十分に達成可能な温度領域ではあるものの、それを構築するための部品が多く必要となる。これとは反対に、1 段型での達成は、世界で数例の研究報告のみにとどまっているのが現状である。

本研究では、1 段 PT 冷凍機で 20W@20K という数値目標を掲げ、それを目指した研究が行われた。結果としては 2.98W@20K となり、数値目標には届いていない。しかしながら、研究を進める上でいくつかの課題が見えており、今後それらを改善しながら研究を進める考えである。特に、今回採用した蓄冷器構造は 3 種類(SUS, Pb, HoCu<sub>2</sub>)の蓄冷材を単純に層状に配置したものであるが、新しい蓄冷材配置構造も開発(S. Masuyama(研究代表者) et al.: “Attractive performance of a Gifford-McMahon cryocooler by co-axial layout of regenerator materials,” *Cryogenics* **52** (2012) pp. 695-698)されており、その構造における PT 冷凍機の可能性も調査する予定である。さらに、今回選択した蓄冷材以外に、20K 付近において Pb や HoCu<sub>2</sub> よりも大きな比熱を有する材料の候補が、われわれの研究グループから見出されており、この方面からのアプローチも進める予定である。

本研究を進めることで、20K の温度領域も含めた小型冷凍機全体の効率改善の指針が得られ、今後の極低温機器のさらなる発展に寄与したいと考えている。

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）

今回の研究成果では、学会などでの発表基準に満たないと考えたため、発表はしていない。今後の発展により、国内の「低温工学・超電導学会」、ならびに国際会議での発表を検討している。