

仮想2段スターリング型パルス管冷凍機の作製と評価

石渡洋志

要約：冷凍能力 20K10W を目指し、今年度は 2 段スターリング型パルス管冷凍機(以降:2SPC)に使用する蓄冷器、パルス管、その 2 つを仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機(以降:V2SPC)で使用するために変換フランジを設計した。その基盤となる並列 1 段スターリング型パルス管冷凍機(以降:P1SPC)の動作実験を行い最低到達温度 43.9K を記録した。P1SPC は製品として出来上がっているため、2SPC の蓄冷材最適化実験を行う V2SPC を作製し、実験を行った。

Key words: スターリング型、パルス管、液体窒素、最低到達温度、冷凍能力

1. はじめに

現在のところ、超伝導現象は低温でのみ発現する現象である。そのため、超伝導技術の実用化には冷却技術が必須となる。超伝導機器等の冷却には液体窒素や液体ヘリウム等の寒剤による方法があるが、今後の実用化を考えると冷凍機による冷却、あるいは寒剤と冷凍機を組み合わせた冷却が必須である。代表的な冷凍機には Gifford – MacMahon 冷凍機 (GM 冷凍機)、スターリング冷凍機、パルス管冷凍機がある。本研究で対象にしているパルス管冷凍機は、1963 年に Gifford と Longworth によって発明された蓄冷式の冷凍機である。GM 冷凍機やスターリング冷凍機の低温部に存在する固体ディスプレイサーを取り除き、1 本のパイプで置き換えた形になっている。そのため、低振動、高信頼性、メンテナンスフリーという特徴を備えている。

また運転周波数が高速のスターリング型パルス管冷凍機は低速型に比較して低温を得るのが困難であるとされているが、それでも多段化による低温度の取得を試みる実験は行われてきた。2002 年には、Lockeed Martin 社から運転周波数 31Hz で入力 240W の 3 段スターリング型パルス管を発表し、5.35K(70mW@8K)の達成が報告された。この冷凍機は入力を 60W に下げても 8K が得られたことにより、高速小型

冷凍機に新たな道を開いたといえる。

本研究では冷凍能力 20K10W、COP0.1%のスターリング型パルス管冷凍機の作製を視野に入れて行った。この冷凍機が実現すれば SMES (超伝導電力貯蔵装置) 用の電流リード冷却のための冷凍機として使用できると考えている。圧力振動源として 4kW のリニア対向型のコンプレッサーを使用した。リニア対向型のためメンテナンスフリーで長寿命の冷凍機が実現できると考える。またスターリング型のため高効率を実現できるとも考えている。また、位相制御機構にはイナータンスチューブ方式を採用した。

2. 実験目的

本研究の目的は、上で述べたような高い冷凍能力を持った冷凍機の作製を行うための、2 段スターリング型パルス管冷凍機の作製及び評価である。そのために仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機を作製する。仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機とは 2 段スターリング型パルス管冷凍機の性質に着目し、スターリング型パルス管冷凍機をその性能に擬似的に近づけるため蓄冷器下部の熱交換器に液体窒素を流入したものである。

以上のように仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機を作製し、その特性を調べることにより、2 段

スターリング型パルス管冷凍機の最適設計を行う指針の構築を試みる。

3. 実験条件

3.1 P1SPC 動作実験

P1SPC の外観図を図 1 に示す。パルス管が冷凍ステージに 2 個並列に設置しており、ColdHead を共有している形である。

表 1 の P1SPC の動作条件をそれぞれ示す。

P1SPC は保護装置がプログラミングにより組み込まれているため、運動周波数、作業流体、封入圧力の 3 つしかパラメータを振ることができない。



図 1 P1SPC 外観図

表 1 P1SPC 実験条件

運転周波数	55[Hz]
作業流体	He
封入圧力	2.5[MPa]

3.2 蓄冷器φ60mm での水冷最適化実験

実験条件を表 2 に示す。蓄冷材料に燐青銅 # 325 メッシュを用いている理由は、SUS # 400 メッシュが 150 枚ほどしかなく、燐青銅の比熱は SUS よりも高いため、その代用として充分と考えられるからである。

表 2 水冷実験条件

圧力振動源	リニア対向圧力振動源 (CFIC)
運転周波数	58[Hz]
ピストン変位	10.5, 12, 14.5, 16 [mm _{p-p}]
パルス管径	φ40[mm]
パルス管長	200[mm]
蓄冷器径	Φ70[mm]
蓄冷器長	73[mm]
実験①	リン青銅 # 325 400 枚
	SUS # 250 480 枚
	SUS # 200 200 枚
蓄冷材料 実験②	SUS # 400 150 枚
	リン青銅 # 325 400 枚
	SUS # 250 300 枚
実験③	SUS # 200 200 枚
	SUS # 400 100 枚
	リン青銅 # 325 300 枚
	SUS # 250 500 枚
	SUS # 200 240 枚
冷却水量	4[l/min]
インタータンスチューブ (外形, 肉厚, 長さ)	1/2[inch], 1[mm], 1.5[m]
バッファー	3.78[l]
作業流体	He
封入圧力	2.0[MPa]

3.3 V2SPC 動作実験

水冷最適化実験の実験①の積層条件を用いて V2SPC の動作実験を行った。V2SPC とは通常水冷を行っている下部の熱交換器部に液体窒素を流入することにより仮想的に 2SPC を作製することである。実験条件は表 2 の冷却水量以外同じである。液体窒素流入圧力は 0.225MPa である。また予冷を 3 時間行った。予冷の条件は液体窒素 40l を流入圧力 0.15MPa をかけ続け流し切ることである。

4. 実験結果・考察

4.1 P1SPC 動作実験結果

図 2 に実験結果を示す。最低到達温度が 43.9K であった。

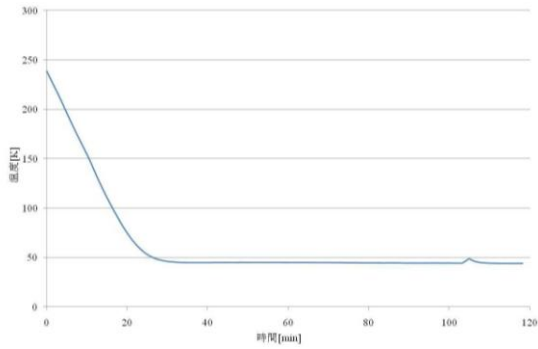


図2 P1SPC 実験結果

P1SPC を動作させてみてわかったことは、プログラミングにより制御されているため実験機としていろいろなパラメータを振ることができないことがわかった。動作周波数はファンクションジェネレータにより制御可能であることもわかった。

冷凍能力は 77K300W と非常に高い数値であるが、最低到達温度が 43.4K と目標の 20K に到達していないことがわかった。我々の行ってきた 1 段の水冷時の最適化実験による実験結果は冷凍能力 80K188W、最低到達温度 33.4K である。このことよりパルス管を並列にし、冷凍機を作製すると 77K 時の冷凍能力は高くなるが最低到達温度の低下にはつながらないことがわかった。

4.2 蓄冷器φ60mm での水冷最適化実験結果
実験結果を図3に示す。

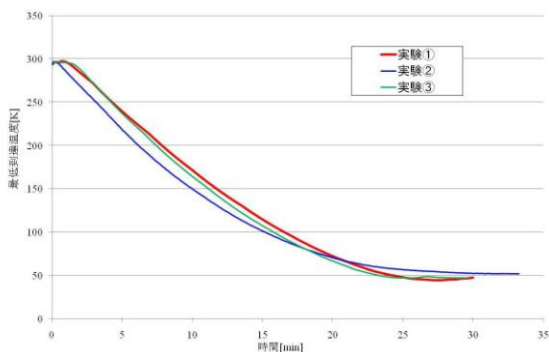


図3 蓄冷器φ60mm の水冷最適化実験結果

実験①、②、③の最低到達温度は実験①が 44.43K、実験②が 52.06K、実験③は 47.22K と

なった。磷青銅を使用した実験①の実験結果が 44.43K となった。我々が行ってきた最適化実験は SUS#400 メッシュを使用し、最低到達温度が 41K であった。このため、SUS#400 メッシュを使用し水冷時実験を行う必要がある。

4.3 V2SPC 実験結果

V2SPC 実験結果を図4に示す。

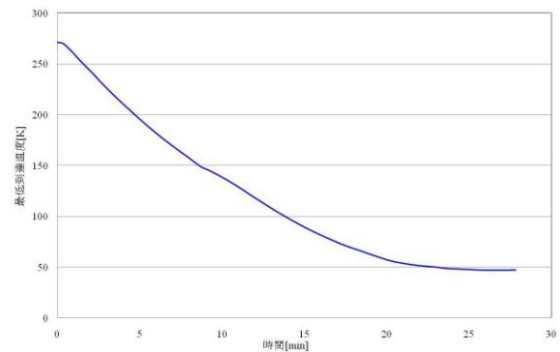


図4 V2SPC 実験結果

図4より V2SPC 実験結果は水冷時よりも 3.4K ほどの温度の上昇となってしまった。予冷により蓄冷器下部の熱交換器部が 100K ほどになり、それを実験中も維持することができていたのならば、最低到達温度が水冷時よりも低下した状態になるはずである。

この結果より予冷の時間が充分ではなかった、液体窒素流入圧力がたりなかったと考える。

5.2SPC 設計

2 段スターリング型パルス管冷凍機を作製するためには P1SPC パルス管を 1 つ外し、そこに蓄冷器をもう 1 つ接続しなければならない。そのため、蓄冷器の直径が φ38.1mm、蓄冷器、ColdHead、パルス管の合計の高さが 202mm でなければならない。

表3にシミュレーションの入力パラメータ、図5に蓄冷器φ38.1mm でのシミュレーション結果を示す。シミュレーションは REGEN3.3 を用いた。Dr. John Gary 氏が作製したフォー

トランによるシミュレーションプログラムのことで表 3 に示すような入力パラメータを打ち込むことでシミュレーションを行っている。

表 3 REGEN3.3 入力パラメータ

平均圧力	2[MPa]
位相差	-40[°]
試行回数	100[回]
高温部の温度	300[K]
低温部の温度	80[K]
動作周波数	55[Hz]
質量流量	0.05[kg/s]
蓄冷器の長さ	43~53[mm]
蓄冷器の断面積	1134[mm ²]
蓄冷材の材質	SUS
蓄冷材の詰め幅	
# 400 メッシュ	13[mm]
# 250 メッシュ	30[mm]
# 200 メッシュ	30[mm]
空隙率	
# 400 メッシュ	0.629
# 250 メッシュ	0.691
# 200 メッシュ	0.629
水力直径	
# 400 メッシュ	0.050850[mm]
# 250 メッシュ	0.089460[mm]
# 200 メッシュ	0.10170[mm]

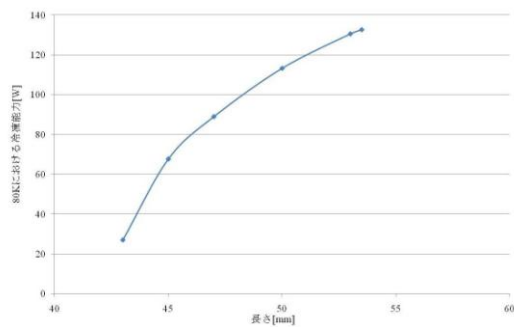


図 5 REGEN3.3 によるシミュレーション結果

この結果により、蓄冷器は長いほうが冷凍能力の向上につながる事がわかった。しかし、ColdHead 部、パルス管部の長さとの合計が 202mm でないといけないため、64mm が最適値である。

また、2 段スターリング型パルス管冷凍機は

前に述べたように、実験パラメータを振ることができないため、仮想 2 段でも同じ蓄冷器で実験を行えるよう変換フランジを設計する。

図 6、7 に変換フランジの連結部平面図と断面図を示す。

図 8、9 に 2 段スターリング型パルス管冷凍機の蓄冷器、ColdHead、パルス管の連結部平面図と断面図を示す。

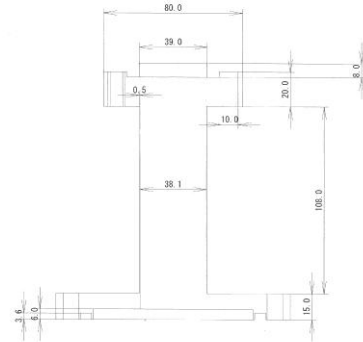


図 6 変換フランジ断面図

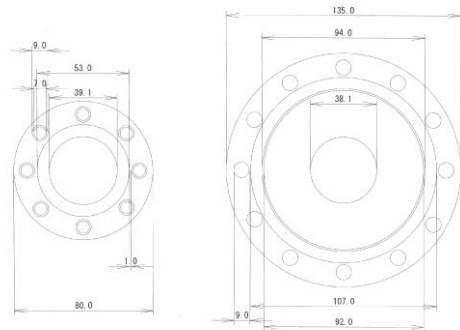


図 7 変換フランジ連結部平面図

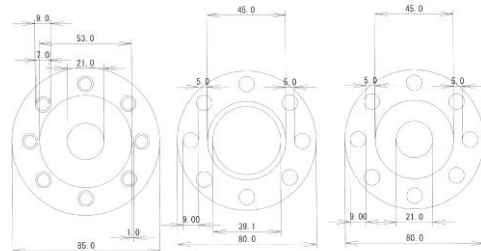


図 8 2 段の蓄冷器とパルス管の連結部平面図

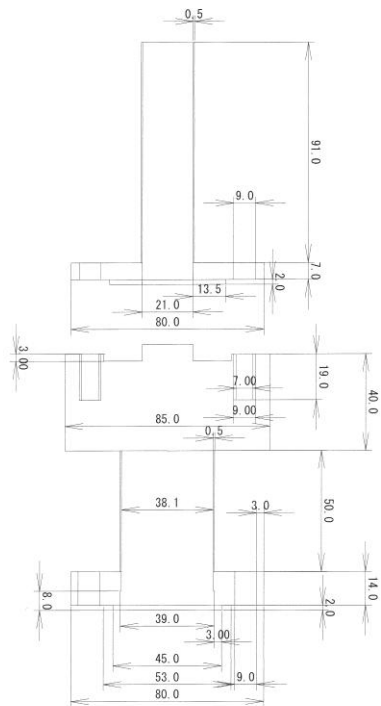


図 9 2 段の蓄冷器とパルスの管断面図

6. まとめ

仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機の作製と評価を行った。

スターリング型パルス管冷凍機の蓄冷器下部の熱交換器部に水ではなく液体窒素を流入することにより、“仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機”とした。蓄冷器の温度が通常の室温よりも冷えることにより、冷凍能力の向上につながると考えた。

実験は最初に、並列 1 段スターリング型パルス管冷凍機（以降 P1SPC）実験を行った。P1SPC はプログラミングで動作しており、動作条件が限られるが、最低到達温度 43.9 であった。

蓄冷器 $\phi 60\text{mm}$ で水冷実験を行った。実験結果は蓄冷材料に磷青銅 #325 メッシュ 400 枚、SUS #250 メッシュ 500 枚、SUS #200 メッシュ 200 枚を使用したときに、最低到達温度 44.4K となった。

その蓄冷材料を利用し、仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機を評価するために実験を行った。3 時間予冷を行い実験を行ったところ、流動体の漏れ

はなかったが 46.87K と水冷時より 3.4K ほどの温度の上昇となってしまった。

今後の課題として予冷時と実験時の熱交換器の温度を測定することより、100K で実験を行えているかを考察し改善する必要がある。そのため、改善点として

- ・液体窒素流入圧力を高くする。
- ・予冷を長時間行い、液体窒素の温度に近い状態にする。

が挙げられる

また、2 段スターリング型パルス管冷凍機の設計を行った。P1SPC のパルス管を 1 つ取り外し、そこに蓄冷器、ColdHead、パルス管を取り付けるよう考えた。そのため蓄冷器の直径が $\phi 38.1\text{mm}$ に決定した。蓄冷器の高さはシミュレーションを行い、ColdHead、パルス管の必要な高さを考慮したうえで 64mm に決定した。また、2 段スターリング型パルス管冷凍機は実験パラメータを振れないため、V2SPC で実験を行う必要がある。そのため、変換フレンジも作製した。

7. 参考文献

- [1] 萩原宏康、低温工学概論、東京電気大学出版局
- [2] 小林清志、工業熱力学、理工学社
- [3] 富永昭、熱音響工学の基礎、内田老鶴園
- [4] 早坂寿雄、音響工学入門、日刊工業新聞社
- [5] 田沼静一、馬宮孝好、近低温、共立出版株式会社
- [6] 低温工学協会 関西支部 海外低温工学研究会、低温工学ハンドブック、内田老鶴園
- [7] 低温工学協会、超伝導・低温工学ハンドブック、オーム社
- [8] 佐藤友彦、パルス管冷凍機の位相制御特性、日本大学理工学部電子情報工学科 卒業論文 2005

- [9] 井村純之介、高出カスターリング型パルス管冷凍機の最適化、日本大学院電子工学専攻 修士論文 2007
- 井村淳之介、パルス管冷凍機の蓄冷器最適化及び特性評価、日本大学理工学部電子情報工学科 卒表論文 2003