

2023年度低温技術夏合宿における小型冷凍機の性能評価と蓄冷材の検討

小田航大^{#,A)}

A) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

2023年度夏に、低温工学・超電導学会冷凍部会が主催する「低温技術夏合宿」が行われた。本講習は、若手研究者・技術者を対象とし、超伝導や低温技術の理解・技術力の向上を目指すものである。今年度は、液体窒素温度 77 K 付近まで冷却可能な性能を出すことを目標に、パルスチューブ (PT) 冷凍機を組み立て、運転方法による冷凍性能の変化も見ながら冷凍性能評価試験を実施した。また、蓄冷材の比熱と熱伝導率による冷凍性能の変化にも着目し、蓄冷材をステンレス金網のみの構成と、ステンレス金網とリン青銅金網を混合した構成とでそれぞれ冷凍性能を測定した。本稿では、蓄冷材の検討内容に焦点を当てつつ、本講習における小型冷凍機の組立・試験の過程、性能評価試験から得た知見・考察について報告する。

1. 低温技術夏合宿

低温工学・超電導学会冷凍部会が主催する本講習は、若手研究者・技術者を対象とし、超伝導や低温技術の理解・技術力の向上を目的とする。諸般の事情により 4 年ぶりの開催となる今年度は物質・材料研究機構 (NIMS) にて 7 月 31 日~8 月 4 日の 5 日間で行われた。参加者は全 3 チームに分かれ、液体窒素温度 77 K 付近まで冷却可能な性能を出すことを目標とし、各チームでパルスチューブ (PT) 冷凍機を組み立て、性能評価試験を実施した[1][2][3]。

私たちのチームでは、蓄冷材に着目し、冷凍性能の向上を図った。

2. 実習内容

まず、過去の講習時に組み立てられた PT 冷凍機において、寸法測定・蓄冷材の取り出しを行い、冷凍機の構造を理解した。次に、性能評価試験にて使用するパルス管の中間部と冷端部に取り付けてあった熱電対と配管に巻かれたヒーターの導通チェックを行った。その結果、どちらも地絡していることが判明したため、全て取り付け直した。また、輻射熱の侵入防止のため MLI を巻いた。蓄冷材には SUS316 金網 (#300 メッシュ、素線径 0.04 mm) を使用し、図 2 左図のように充填した。

組み立てた PT 冷凍機にて、図 1 に示す実験セットアップを組み、冷凍性能評価試験を行った。コンプレッサに接続された流路切替弁を一定周期で開閉することにより、管内ガスに圧力振動を発生させ、冷やしていく方式である。本実習における流路切替弁は、チームによって異なり、ロータリー弁方式と電磁弁方式に分かれて実施している。本測定はロータリー弁方式で行った。

パルス管の温端部が閉端であるベーシック PT 冷凍機 (第 1 世代)、バッファタンクオリフィス (BO) を開け、バッファタンクをパルス管の温端部に繋いだオリフィス型 PT 冷凍機 (第 2 世代)、さらにダブルインレットオリフィス (DO) をパルス管と蓄冷器の間に設け、開度調整することで位相制御が可能な

ダブルインレット型 PT 冷凍機 (第 3 世代) の 3 方式についてそれぞれ運転を行い、冷凍性能の変化も見ながら、到達温度を確認した。また、第 3 世代において、オリフィスの開度を調整しながら最適条件を調べ、ヒーターによる熱負荷に対する冷却能力を測定した。

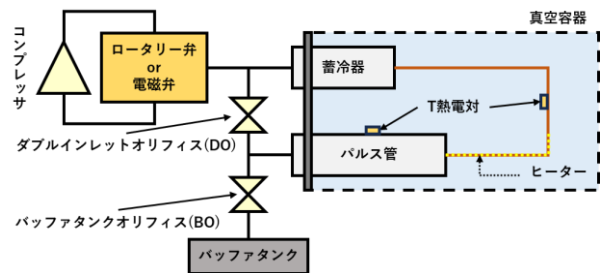


図 1. 実験セットアップの概略図

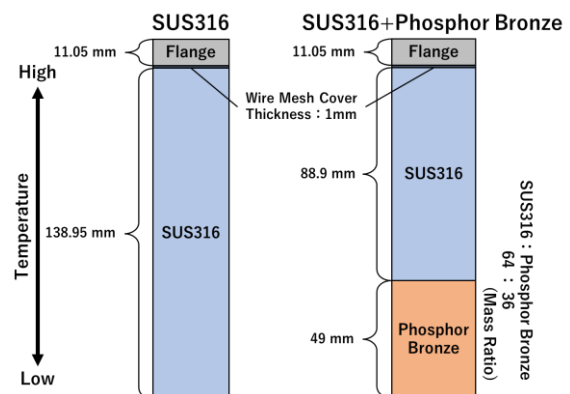


図 2. 蓄冷器内の蓄冷材の構成

3. 冷凍性能評価試験結果 (蓄冷材 : SUS316)

図 3 に測定結果を BO・DO の開度とともに時系列で示す。運転方式の世代ごとの冷凍性能向上を体感しながら、オリフィス開度を調整していった結果、最低到達温度は 94 K となった。

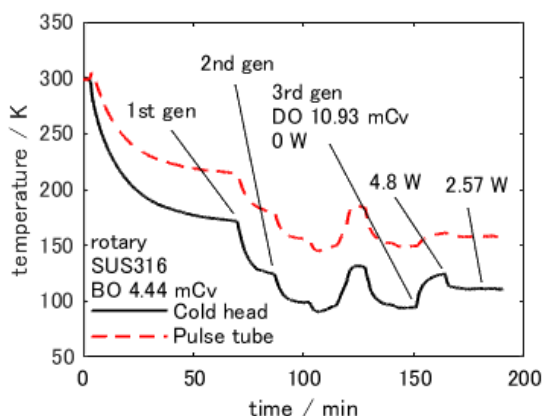


図3. 評価試験における到達温度 (SUS316)

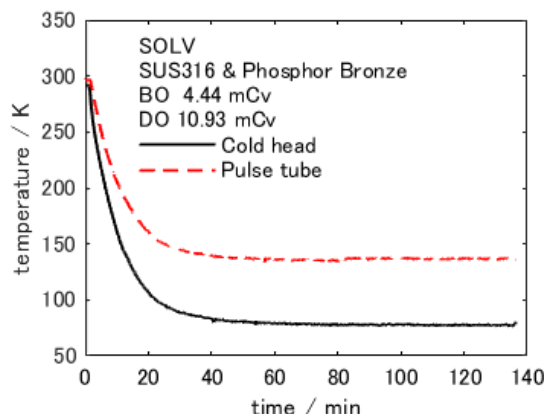


図4. 評価試験における到達温度
(SUS316+リン青銅)

4. 蓄冷材の検討

冷凍性能評価試験にて目標である 77 K に到達出来なかった。さらなる冷凍性能向上のため、蓄冷材に着目し、構成を検討した。

蓄冷材の効率を決めるパラメータの中に比熱と熱伝導率がある。比熱と熱伝導率がともに高い材料を選定することが望ましい一方、いずれも温度依存性を持つ。そこで、蓄冷材の材質を変更し、蓄冷材の比熱・熱伝導率が冷凍能力に与える影響を調査した。比較対象としてリン青銅金網 (#250 メッシュ、素線径 0.04 mm) を使用し、SUS316 金網とリン青銅金網を図 2 右図のような配分構成で再充填した。熱伝導率はどの温度域においても銅の方が高い[4]。一方比熱においては、高温域でステンレスの方が高く、低温域で銅の方が高いことから[4][5]、各温度域で有利に熱交換ができるよう高温域に SUS316 を配置し、低温域にリン青銅を配置した。

以上の改良を施し、再び冷凍性能評価試験を行った。オリフィス開度は一度目の試験時に得た最適条件に合わせた。ただし、本測定直前にロータリー弁駆動系が故障し、電磁弁方式で代用し測定する形となったため、完全な対照実験を行うことが出来なかった。本稿では、電磁弁方式とロータリー弁方式の違いによる性能の差異はないとして議論を進める。

5. 冷凍性能評価試験結果 (蓄冷材 : SUS316+リン青銅)

測定結果を図 4 に示す。最低温度は 77 K まで到達した。SUS316 のみを充填した時に比べ冷凍性能は向上し、蓄冷材の構成変更による効果を確認することができた。今回は各温度域における比熱の大小関係により各材料の配置を決定した。しかし、銅は熱伝導率が高く、温度勾配が大きい域ほど短時間で蓄冷材内部へ熱移動するため、低温域より高温域に配置した方がより蓄冷材として機能した可能性がある。リン青銅と SUS316 の配置を逆にする、材料比率や蓄冷材形状の変更等、選定を重ねることで、さらなる冷凍性能の向上が見込まれると考える。

6. まとめ

2023 年度低温技術夏合宿が開催され、PT 冷凍機の組立・性能試験を通して小型冷凍機の構造・低温技術に対する理解を深めた。

実習では、ベーシック PT 冷凍機から、各オリフィスの開度を調整し、位相制御による冷凍性能の変化を体感できた。また、ダブルインレット型 PT 冷凍機において、蓄冷材の構成変更による冷凍性能の変化を見ることができ、蓄冷材選定の重要性を学んだ。

7. 謝辞

低温技術夏合宿の開催にあたり、講師を務めてくださった森江孝明氏 (住重)、藤岡耕治氏 (クライオウェア)、星野勉氏 (明星大)、淵野修一郎氏 (東大)、吉田茂氏 (NIFS)、西島元氏 (NIMS) に深く感謝する。

夏合宿での実習において、ともに実験装置の組立・評価試験を行い、議論を深めていただいた石井輝氏 (明星大)、永井敏也氏 (住重) に深く感謝する。

参考文献

- [1] S. Kessoku, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.95, 2P-p01
- [2] T. Kanayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.96, 2P-p02
- [3] K. Oda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.97, 2P-p03
- [4] <https://www.csj.or.jp/handbook/index.html>
- [5] https://tech-tip.info/copper/c5191/#outline_1_2