

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654040

研究課題名（和文） 冷凍機分離型超小型無冷媒希釈冷凍機の開発

研究課題名（英文） Development of separate type small dry dilution refrigerator

研究代表者

畑 徹 (HATA TOHRU)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10156333

研究成果の概要（和文）：本研究では、液体ヘリウム、液体窒素を用いない次世代の希釈冷凍機として期待されているドライ希釈冷凍機で、かつ冷凍機分離型の超低振動と超小型化を目指した。そのために、まず冷凍機と希釈冷凍機をつなぐ3重管サイフオンの製作およびヘリウムガス循環システムを構築した。次に、希釈冷凍機本体の製作を進め、冷凍機および希釈冷凍機での熱交換器を製作し、リークテストを完了した。性能評価のみが今後の課題として残った。

研究成果の概要（英文）： Dry dilution refrigerator without liquid helium and liquid nitrogen, which is expected next generation of dilution refrigerator, have been developed. To isolate the vibration of a mechanical refrigerator, the dilution refrigerator has been set separately. We have constructed a threefold syphon, a helium gas circulation system and the dilution refrigerator. The rest of this work is a cooling test.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,400,000 | 0 | 2,400,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,900,000 | 150,000 | 3,050,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超低温、希釈冷凍機、無冷媒、ドライ希釈冷凍機

1. 研究開始当初の背景

現在、パルス管冷凍機一体型のドライ希釈冷凍機開発競争が世界的に行われており、市

販品も登場してきている。

しかし、日本ではまだドライ希釈冷凍機開発が行われているものの世界レベルには至っ

ていなかった。

そこで、日本で最も希釈冷凍機開発の実績がある大阪市大で世界レベルのドライ希釈冷凍機開発を開始した。開発は数年にわたり10 mK以下を達成し世界レベルの性能を出すことに成功した。この実績に基づき、信頼性を高める上でも、世界最高の性能を出し技術レベルの高さを証明する必要が出てきた。またパルス管冷凍機からの振動を完全に除去することがドライ希釈冷凍機の応用範囲の拡大には不可欠であることが判明した。そこで、一体型の欠点である振動除去の完全化に向け、冷凍機分離型の希釈冷凍機開発の必要性が出てきた。

2. 研究の目的 研究の目的は、

- (1) ドライ希釈冷凍機の世界レベルの性能開発
- (2) 冷凍機分離型の無振動ドライ希釈冷凍機の開発

の2点である。

3. 研究の方法

- (1) まず、ドライ希釈冷凍機での世界最低温度達成を目指した。
- (2) 次に、技術のノウハウの蓄積のため、機械式冷凍機以外はすべてホームメイドで製作することを目指した。

具体的には、

- ① 50 K窒素ガス循環システムと3 Kヘリウム4ガス循環システム
冷凍機分離型では冷凍機の50 Kステージと3 Kステージの温度を希釈冷凍機側に持ってくる必要がある。そのため、このステージを介して、50 K用として窒素ガスを3 K用としてヘリウム4ガスを循環させて希釈冷凍機に導く必要がある。
- ② 冷凍機用クライオスタットの設計と製作
GM冷凍機用のクライオスタットの設計

を行い、部品設計・製作は外注せず自前とする。

- ③ 希釈冷凍機用クライオスタットの設計と製作

希釈冷凍機用のクライオスタットの設計を行い、部品設計・製作は外注せず自前とする。

- ④ ヘリウム3ガス循環システムは現有用ヘリウム3ガス循環シは真空ポンプ類、バルブ類、動作シーケンスの自動化など、予算的に難しいので現有のものを利用することとした。

- ⑤ 冷凍機用クライオスタットと希釈冷凍機用クライオスタットを」を接続するサイフオンの設計と製作

サイフオンの熱効率を上げるためサイフオンは3重管構造とする。

4. 研究成果

- (1) ドライ希釈冷凍機の世界レベルの性能開発

希釈冷凍機の性能評価には、正確な温度計測が不可欠となる。ところが、20 mK以下数mKの温度領域では、現在のところ最も信頼できる温度計としてはヘリウム3融解圧力温度計しかないが、これは計測システムが複雑で、かつ希釈冷凍機の混合室内の温度ではなく混合室の外壁の温度しか測定できないという欠点があった。そこで、混合液の温度を直接測定できる簡便な水晶振動子温度計を開発し、かつ、希釈冷凍機のステップ熱交換器を3から4に増やし性能評価を行った。その結果、4 mKの最低温度が実現されていることを確認した。この最低到達温度は、世界最低温度であり、ドライ希釈冷凍機がウェット希釈冷凍機と同レベルまで冷却能力があることを世界で初めて示した。

図1に、水晶振動子温度計が如何に温度に対

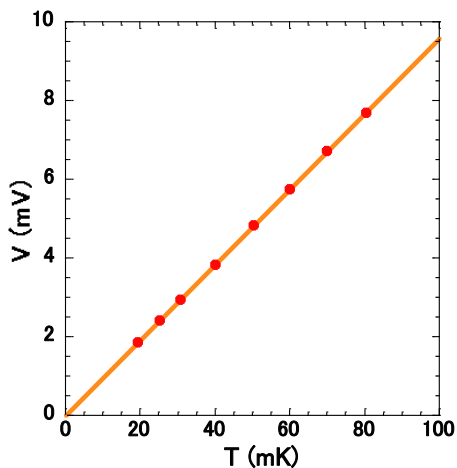


図1. 水晶振動子の振幅の温度依存性

し直線性があるかを示す。

次に、この温度計を用いて測定した最低到達温度とヘリウム3循環量との関係を図2に示す。

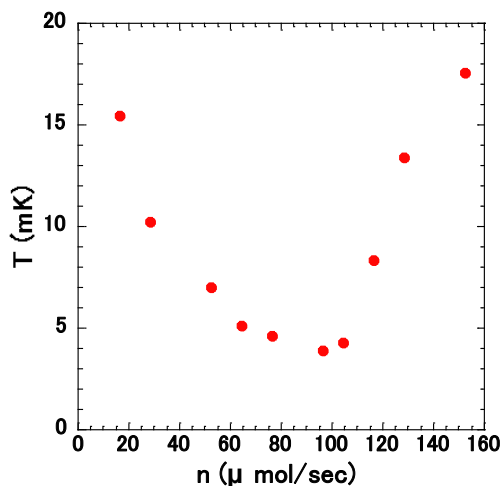


図2. ヘリウム3循環量と最低到達温度の関係

100 $\mu\text{mol/s}$ の循環量で4 mKが得られた。また、これ以上循環量を増やすと急激に温度が上昇することが分った。これは、希釈冷凍機内の温度分布から、この循環量以上で急激にパルス管冷凍機の予備冷却効率が下がっていることが原因と分かった。

(2) 冷凍機分離型の無振動ドライ希釈冷凍

機の開発

① 50 K窒素ガス循環システムと3 Kヘリウム4ガス循環システム

冷凍機分離型では冷凍機の50 Kステージと3 Kステージの温度を希釈冷凍機側に持ってくる必要がある。そのため、このステージを介して、50 K用として窒素ガスを3 K用としてヘリウム4ガスを循環させて希釈冷凍機に導く必要がある。そのための循環システムの設計・製作を行い、完了させた。

② 冷凍機用クライオスタットの設計と製作

GM冷凍機用のクライオスタットの設計を行い、部品製作を完了し、組み立てを行い、リークチェックも完了した。

③ 希釈冷凍機用クライオスタットの設計と製作

希釈冷凍機用のクライオスタットの部品設計・製作を行い、組み立てを行い、リークチェックも完了した。また、温度計の設置も完了させた。

④ 冷凍機用クライオスタットと希釈冷凍機

用クライオスタットを」を接続するサイフオンの設計と製作

サイフオンの熱効率を上げるためサイフオンは3重管構造とし、設計・製作を完了した。

(3) 熱交換器の最適化

冷凍機の熱交換器の最適化を図るため、直径と長さの異なる銅パイプのヘリウムガスの流量に対する性能評価を行った。液体窒素温度を通過させた後の出口温度を白金温度計で測定した。白金温度計の示す温度は、この温度計にリード線や輻射として入ってくる熱量と冷却されたヘリウムガスによる冷却とのバランスで決まる。その結果を図3に示す。いずれも場合も、流量として9 L/min

以上が必要であることを示している。

実際には、加工のしやすさと熱交換器サイズの制限から内径 2 φ の銅パイプを用いることにした。

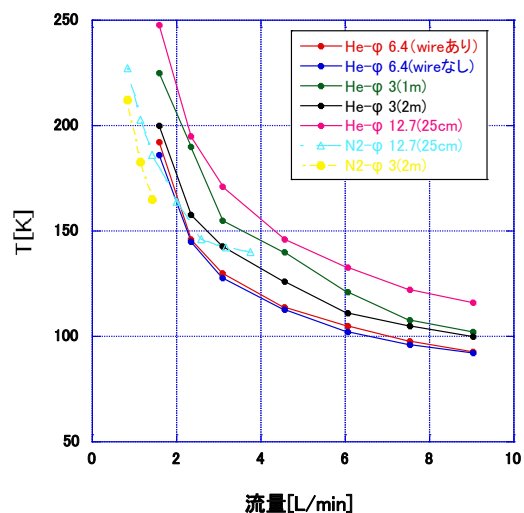


図 3. 出口温度と流量の関係

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)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 山口晃史、小原顕、矢野英雄、石川修六、畑徹、半田梓、研谷昌一郎、西谷富雄
「寒剤を用いない希釈冷凍機の開発と水晶振動子による温度測定」 第 9 回低温工学・超伝導若手合同講演会、2011 年 12 月 10 日、大阪市立大学
- ② 山口晃史、小原顕、矢野英雄、石川修六、畑徹、半田梓、研谷昌一郎、西谷富雄
「ドライ希釈冷凍機の開発と音叉型水晶振動子による温度測定」日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学
- ③ 畑徹、山口晃史、小原顕、矢野英雄、石川修六、半田梓、研谷昌一郎、西谷富雄
「Development of Dry Dilution Refrigerator and Temperature Measurement with Quartz Tuning Fork」
第 26 回低温物理国際会議、2011 年 8 月 15 日、中国・北京

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/ult/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畑 徹 (HATA TOHRU)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10156333

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし