九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 液体ヘリウムを用いない希釈冷凍機

矢山，英樹
九州大学大学院理学研究院物理学部門

https://doi.org/10.15017/11057

出版情報：九州大学極低温実験室だより. 3, pp.20-24, 2002-06. Cryogenic Laboratory, Faculty of Science, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

# 液体ヘリウムを用いない希釈冷凍機*

九州大学理学研究院物理学部門　矢山英樹

希釈冷凍機は，液体ヘリウムを寒剤に用いるのが常識であった．しかし最近，低温でも比熱の大きな蓄冷材が開発されるようになり，それを用いたギフォード・マクマホン（Gifford-McMahon）冷凍機（以下 GM 冷凍機と略す）が液体ヘリウム温度（4 K 以下）を達成できるようになった[1, 2]．そしてそれを用いた“液体ヘリウムフリー希釈冷凍機”が市販されるようになった[3]．このタイプの希釈冷凍機は，GM 冷凍機からの振動があるため核断熱消磁のような実験には向かないが，電源と冷却水のみで簡単に利用でき，ランニングコストが低く，液体ヘリウムの供給が不便な地域での使用も可能である．さらに液体ヘリウムの注ぎ足しなしに長時間運転できるなど，多くの利点を有する．

この冷凍機の原型は早くから提案され，実験が行なわれていた[4, 5, 6]．初期のものは，GM 冷凍機を用いるのではなく，液体ヘリウムを用いて冷却していた．しかし，$^3$He を液化するのに，いわゆる 1K ポットを用いないのが特徴的である．通常の希釈冷凍機では，圧力 3 ~ 20 kPa 程度の循環している $^3$He ガスを 1 K ポットと熱接触させて液化している．しかし，図 1 に示すように，この冷凍機は $^3$He ガスに圧力をかけ 4.2 K の液体ヘリウムと熱交換し，さらにスティルからの排気と熱交換した後，ジュールトムソン（JT）インピーダンス $Z_1$ を通して膨張させ液化する[6]．

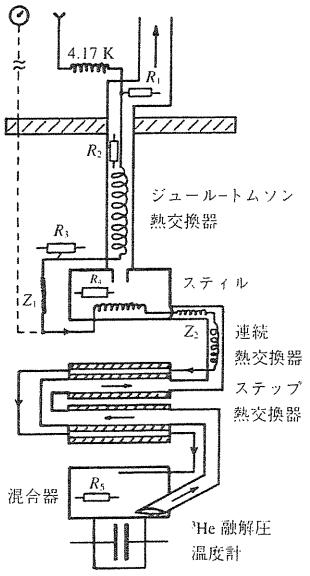


図 1　1K ポットをもたない希釈冷凍機の概略図[6]．$R_1$~$R_5$ は抵抗温度計，$Z_1$ と $Z_2$ はインピーダンスを表わす．

図 2 は $^3$He のエンタルピー線図を示す[6]．液

---

* 本稿は，訳書「超低温の実験技術」ウクライナ化学アカデミー低温物理工学研究所編，矢山英樹・I.B.ベルクトフ共訳，九州大学出版会，(2000 年)の“訳者補遺”部分を抜粋したものである．

体ヘリウムと熱交換した $^3$He ガスの温度が最初 A 点で 4.17 K であると仮定する. AB は熱交換器を通して $^3$He ガスが予冷される過程を表わす. B 点は 2 相共存領域であり, 約 80% が液化している. 熱交換器の出口の温度は $R_3$ で測定される. BC は液体と気体がいっしょに JT インピーダンス $Z_1$ を通して 50 kPa から 6.5 kPa まで膨張する過程を表わす. この圧力は室温の圧力計で測定される. このとき液体の割合は 80%から 50%に減少する. そして温度は 2.6 K から 1.5 K に低下する. この温度は, $^3$He の蒸気圧 6.5 kPa に相当する. 膨張のあと, $^3$He のガス部分はスティルの熱交換器中で液化し, 全ての液体 $^3$He がスティル温度 0.6 K に冷却される.

スティルからの排気は圧力が低いため, 熱交換の表面積を大きくして効率を上げる工夫

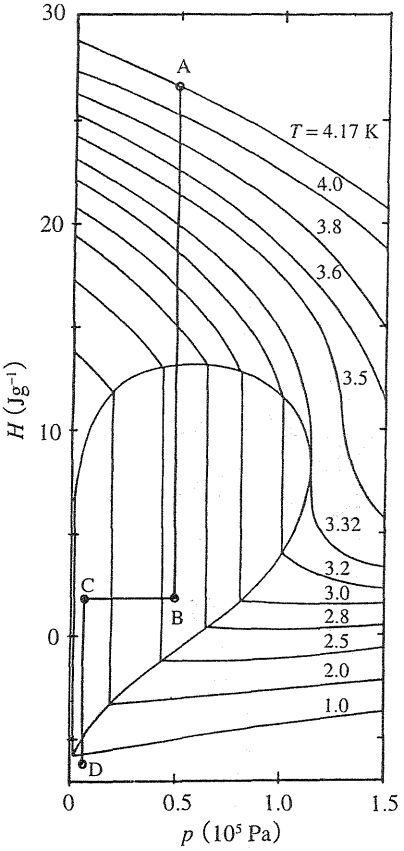


図 2 $^3$He のエンタルピー対圧力線図[6].
A-B-C-D は $^3$He の液化過程を表わす
(本文参照).

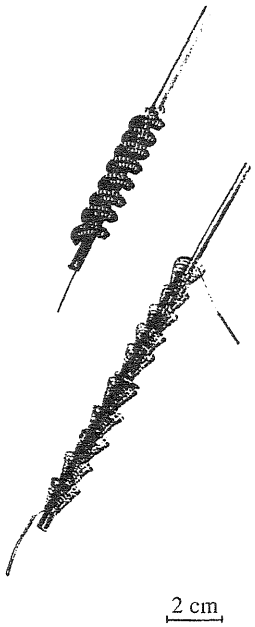


図 3 二種類の JT 熱交換器の写真 [6].

が必要である．図 3 はその 2 つの例を示す．いずれもキュプロニッケルの細いパイプをスパイラルに巻いて表面積を増やし，排気パイプの中に設置して熱交換する．どちらも良好に動作することが確認されている．この装置の最低温度は，循環速度が 90 μmol/s のとき $T_{min}$ = 8 mK であった[6].

液体ヘリウムの代わりに GM 冷凍機を用いた希釈冷凍機も実験されている[7]．この実験で用いられた GM 冷凍機が作り出す最低温度は 9 K に過ぎないため，液化のための圧力がロータリーポンプの背圧だけでは足りず，そのあとにコンプレッサーを用いる必要がある．この冷凍機の最低温度は，循環速度が 100 μmol/s のとき $T_{min}$ = 43 mK であった．

最近市販されている GM 冷凍機の多くは，2 ステージで構成され，第 1 ステージが約 20 K，第 2 ステージが約 4 K を作り出す[1, 2]．第 1 ステージには，銅の網を重ねた蓄冷材が用いられる．第 2 ステージの高温側には鉛が用いられる．鉛が用いられている理由は，その柔らかさから容易に想像されるように，デバイ温度が低く格子比熱が低温で大きいという性質があるためである．しかし，格子比熱は $T^3$ に比例して減少するため，低温で急激に減少する．そのため，第 2 ステージの低温側には $Er_3Ni$ などの反強磁性体が蓄冷材として用いられ，磁気転移点付近の大きな磁気比熱が利用されている．これらの高性能蓄冷材が開発されたため，4 K 以下の温度を作り出すことが可能になってきた[1, 2].

これらの蓄冷材は，熱交換面積を大きくするため粒状にされ，冷却ユニットの中のディスプレーサーと呼ばれるピストンのような働きをする部分に置かれている．そして，冷凍サイクルの過程に応じて上下に移動し，ヘリウムガスと熱交換す

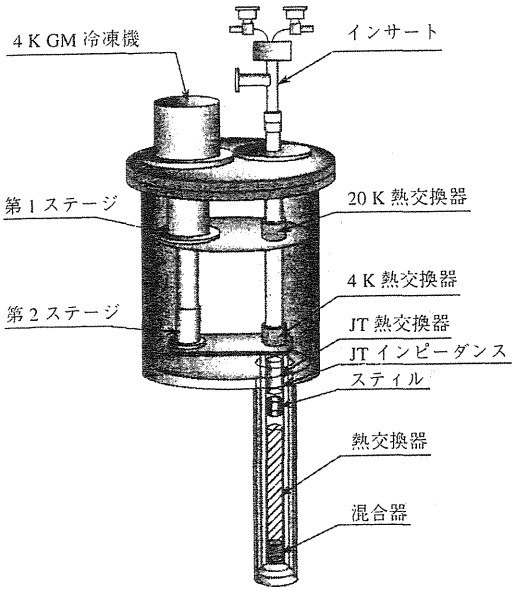


図 4　GM 冷凍機を用いた“液体ヘリウムフリー希釈冷凍機”の概略図[3].

る．そのため，機械的振動が発生するという欠点はあるが，クローズドサイクルであるためメンテナンスが長時間不要であり，冷却水を供給しスイッチオンするだけで簡単に低温が得られるという特長を有する[1, 2].

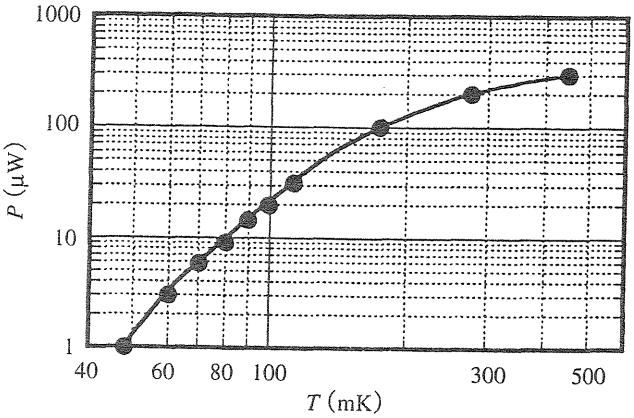


図 5　冷却パワーの温度依存性[3].

図 4 に，最近市販されるようになった液体ヘリウムフリー希釈冷凍機の概略を示す[3]．希釈冷凍機ユニットと GM 冷凍機ユニットが同じ真空容器の中に組み込まれている．希釈冷凍機ユニットは，GM 冷凍機の第 1 および第 2 両ステージと上部および下部で機械的に接触して，熱伝導により直接冷却される．図の希釈冷凍機は，低温真空封止を持たない構造のものであるが，オーソドックスなタイプのものでも原理的には同じである．

図から明らかなように，まず $^3$He ガスを第 1 ステージと熱交換し，4K 熱交換器を通して第 2 ステージで予冷する．さらに JT 熱交換器を通してスティルからの排気で予冷する．そのあと，JT インピーダンスを用いて $^3$He ガスに約 140 kPa の圧力をかけ，JT 膨張によって液化する．この JT 熱交換器の構造は前述のものとほぼ同じものである．

図 4 の装置の場合[3]，冷却の所要時間は，室温から 4 K までの予冷に約 1 日，ガスの循環開始から最低温度 50 mK に到達するのに約 5 時間である．液体ヘリウムを用いる希釈冷凍機と比べて予冷に時間がかかるが，スイッチを入れて待つだけであるので大きな欠点とはならない．図 5 は，冷却パワーの温度依存性を示す．$^3$He の循環速度が 80 μmol/s のとき，最低到達温度は $T_{min}$ = 50 mK，また 100 mK での冷凍能力は 20 μW である．これは，同じ大きさの通常の希釈冷凍機と比較しても能力に大差ないと言える．

この装置の最大の欠点は，GM 冷凍機の動作に伴う振動が存在することであろう．一般に，希釈冷凍機を使う実験は振動を嫌うものが多いが，電気伝導の測定などの場合にはほ

とんど問題にはならないであろう．そのような，限定された用途には簡単に低温を作る装置として，今後広く普及する可能性がある．また，最近急速に発展しているパルスチューブ冷凍機を組合せることで，振動の少ない希釈冷凍機が作られる可能性がある．

## 参考文献


[1] 低温工学協会 編：超伝導･低温工学ハンドブック，オーム社，1993.

[2] 田沼静一，馬宮孝好 編：近低温，共立出版，1998.

[3] 梅野高裕，今健一，吉田茂：液体ヘリウムフリー希釈冷凍機，第62回2000年度春季低温工学･超電導学会講演概要集，p. 48.

[4] J. Kuraus: New condensation stage for a $He^3$-$He^4$ dilution refrigerator, Cryogenics 17 (1977) 173-175.

[5] A.T.A.M. de Waele, A.B. Reekers, and H.M. Gijsman: A dilution refrigerator without pumped $He^4$ bath, Cryogenics 17 (1977) 175.

[6] K. Uhlig: $^3He$-$^4He$ dilution refrigerator without a pumped $^4He$ stage, Cryogenics 27 (1987) 454-457.

[7] K. Uhlig and W. Hehn: $^3He$-$^4He$ dilution refrigerator with Gifford-McMahon precooling, Cryogenics 33 (1993) 1028-1031.