

技術紹介

液体ヘリウムフリー連続運転型³He 冷凍機

Liquid-Helium-Free Helium-3 Refrigerator for Continuous Operation Mode

小池 良浩*

KOIKE Yoshihiro

1. はじめに

冷凍技術の発達により1K以下の低温実験が可能になって以来、超低温での多くの発見がなされている。最近では、超低温技術は基礎研究ばかりでなく応用面でも注目されている。例えば、検出素子を超低温(1K以下)に冷却し原子・分子レベルの熱運動が原因となるノイズを抑えることで、超高感度・超高分解能の検出が可能になるため、その実用化・商品化に向けての研究・開発が進んでいる。このような状況の中、取り扱いが簡単で、超低温技術に関して特に専門的な知識がなくても使える装置の要求が多くなってきている。

1K以下の低温を得るための装置として、現在、希釈冷凍機(DR)、³He 冷凍機、断熱消磁冷凍機(ADR)がある。DR、³He 冷凍機はヘリウムの物性を利用した冷凍機であり、ADRは常磁性体のスピンを利用した冷凍機である。希釈冷凍機は0.1K以下の温度が得られる(原理的には絶対零度に限りなく近づける)冷凍機であるが、構造が複雑で取り扱いが難しい。一方、³He 冷凍機は、最低到達温度は0.3K程度だが、DRに比べると構造が単純で取り扱いが容易なため比較的広く使用されている。しかし通常は温度4.2Kの液体ヘリウム寒剤を用い、これをベースの温度として1K以下の低温を作り出している。そのため寒剤の取り扱いに関する経験と知識が必要で、かつ寒剤を入手し使用できる環境も必要である。このことが冷凍機の取り扱いを難しくしている大きな要因である。これを解決する手段として、最近ではギフォード・マクマホン(GM)タイプの4K冷凍機を用いた、液体ヘリウムフリータイプの冷凍機が市販されはじめています。

ここでは「スイッチを押すだけで誰でも簡単に使える超低温冷凍機」というコンセプトの下に開発した液体ヘリウムフリーの連続運転型³He 冷凍機を紹介する。

2. ³He 冷凍機システム

2.1 ³He 冷凍機概要

³He 冷凍機は³Heの蒸発潜熱を冷却能力に使用している。通常タイプは、液体ヘリウムを減圧することで1Kポットと呼ばれる1.5K程度の部屋を作り、そこで³Heガスを液化し³Heポットと呼ばれる容器に溜めた後減圧し温度を下げる。ヘリウムフリー型の³He冷凍機では、1Kポットがないため³Heはそのままでは液化できない。そこでジュール・トムソン(JT)効果を利用して液化する。仕組みは、まず³Heポットに入ってくる³Heガスを、排気される冷たいガスとの間で熱交換させ冷却する。その後適当なインピーダンスを持ったオリフィスを通してJT膨張させる。排気される³Heと同量のガスを液化し冷凍能力を取り出さねばならないため、熱交換器部分とインピーダンスの調整が重要となる。

2.2 システム概要

図1に³He冷凍機システム全体のフロー図、図2に今回、中性子散乱実験用に製作した冷凍機本体構造の図面を示す。長期運転でのラインの詰まりなどのトラブルをなくすために、排気・循環系にはオイルフリーのスクロール型ドライポンプとダイヤフラムコンプレッサを選定した。本システムの特長をまとめると、

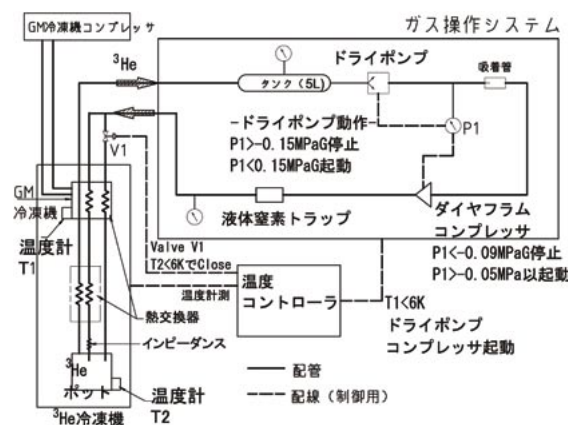


図1 ³He 冷凍機システムフロー図

*開発・エンジニアリング本部超低温プロジェクト

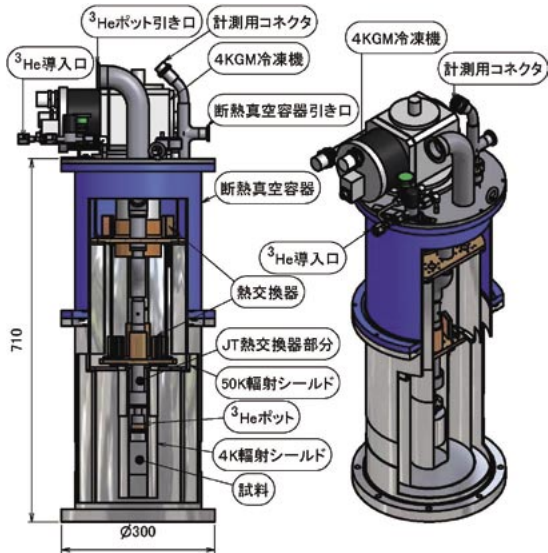


図2 ³He 冷凍機本体構造図

(1) 4 K GM 冷凍機を使用した液体ヘリウムフリー型、(2) JT 弁型・連続運転仕様、(3) 予冷ラインの導入、(4) 運転の自動化、(5) 中性子散乱実験用という点が挙げられる。

(3) の予冷ラインの導入に関して補足しておく。理想的には JT インピーダンス部分を可変にして外部制御し、最適な値に調整するのが望ましい。しかし、制御シーケンスと構造が複雑になるため、本装置では 1K 程度で効率が良くなるように調節した固定インピーダンスを採用した。このインピーダンスでは 10K 以上の高温の冷却能力が少なくなる。この問題を解決するために、GM 冷凍機 4 K ステージとの熱交換後に ³He ガスが JT 膨張過程なしで直接 ³He ポットに入る予冷ラインを設け、温度によって使い分けようとした。これは予冷時間の短縮に効果をあげており、予冷ラインを使わないと 20 時間以上かかる冷却時間が半分以下に短縮された。

(5) に関しては、中性子ビームに対して透過性の良いアルミニウムで、外部容器、シールドを作成し、実験に適した形状に設計した (図 2 参照)。

2.3 ガス操作系の自動化

本システムでは誰もが簡単に使用できるように、通常運転は自動化し、スイッチを押すだけで 1K 以下に到達できるようにした (以下、記号・名称は図 1 参照)。動作の流れは、まず GM 冷凍機が作動し、T1 (4K ステージ) 温度計が 6K 以下になった時点で、自動的にダイアフラムコンプレッサ及びドライポンプが起動する。ポンプとコンプレッサは P1 圧力計の圧力で制御される。³He コールドヘッド温度 T2 が 6K になった時点で V1 バルブが閉じ、最低温度に到達する。以後は温度コントローラーによって任意の温度が得られる。

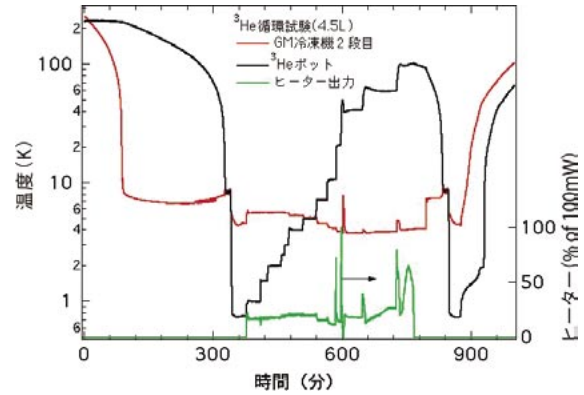


図3 冷却試験結果

安全性に関しては、制御プログラムにいくつかのチェック項目を設け、圧力上昇など運転を続けると危険な場合にはシステムが自動停止するようにした。さらに異常個所を表示し、異常が解消されリセットされるまで再起動できないよう、インターロックがかかるようになっている。

2.4 冷却試験

図 3 に冷却試験の結果を示す。起動後約 2 時間半程度でガス操作系のドライポンプとダイアフラムコンプレッサが起動し ³He ガスの循環が開始し、徐々に ³He ポットの温度が下がっていく。約 6 時間後に予冷ラインのバルブを閉めた後は、数分で最低温度約 0.7K に到達した。冷凍能力は 1K で 15~20mW であった。その後 100K までの温度コントロールテストを行った。

³He 冷凍機は液体ヘリウム 3 の蒸発潜熱を冷却に用いている。1K での潜熱は約 20J/mol であり、1 mol/s の蒸発量で最大 20W の冷凍能力があることになる。しかし実際は JT 膨張により循環しているすべての ³He ガスが液化されるわけではなく、一部は気体のまま ³He ポットに入っていく。そのため、計算では潜熱の 50~80% 程度が冷凍能力として利用できる。循環系のポンプ、コンプレッサの能力と設定インピーダンスから、循環量としては、 10^{-3} mol/s 程度が上限と推定されるため、ほぼ予定していた冷凍能力が得られている。

3. まとめ

³He 冷凍機システムの自動化を行い、使いやすさを向上させることができた。今回は中性子散乱実験用ということであまり振動を気にする必要がないためコスト面を考慮し 4K GM 冷凍機を用いた。しかし、振動を嫌う研究分野は多く、今後 4K パルス管冷凍機を用いた低振動タイプが必要であろう。

ここで紹介した技術は希釈冷凍機の自動化に対しても転用可能と考えている。希釈冷凍機のガス操作系の自動化は、今後是非とも実現させたいと考えている。