

^ <3>Heクライオスタット

矢山, 英樹
九州大学大学院理学研究院物理学部門

<https://doi.org/10.15017/11071>

出版情報 : 九州大学極低温実験室だより. 6, pp.26-35, 2005-08. Cryogenic Laboratory, Faculty of Science, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :



^3He クライオスタット¹

九州大学大学院 理学研究院 物理学部門 矢山英樹

ヘリウム軽いアイソトープである ^3He の研究が行なわれるようになり、通常の ^4He に比べて重要な利点、すなわち、 ^3He をポンピングすることによってより低温が得られる可能性が発見された。表 1 に、蒸発型のクライオスタットを製作するときに必要な ^3He ガスと液体の主な性質を示す。より詳細なデータは文献[1.2.3]に収録されている。 ^3He と ^4He を比較すると、低温で飽和蒸気圧は ^3He の方が ^4He よりも高いことが分かる ($T=0.5$ K での圧力の比は約 10^3 であり、温度の低下と共に指数関数的に増加する)。この事実が決定的であり、 ^3He の方が蒸発熱が小さいにもかかわらず、同じ排気速度で排気した場合 ^3He の方が ^4He よりも大きな冷却パワーを示す理由である。

^3He を十分な量確保する方法が確立するまでは、 ^3He を利用して低温を得ようとする研究を行なうのは容易ではなかった。 ^3He は 1954 年に初めて低温実験に用いられ[4]、温度 0.37 K が得られた。その後、二つのタイプの冷凍機に分かれていった。1 つはワンショット型であり、液体 ^3He が蒸発してなくなるまで動作する。もう 1 つは循環型であり、 ^3He が循環するため連続運転が可能である。

2.1 ワンショット型クライオスタット

ワンショット型のクライオスタットは、同じ条件であれば循環型より低い温度に到達することができる。最低温度 0.21 K の記録を達成した実験装置の模式図を図 1 に示す[5]。図から明らかなように、この装置は、 ^4He クライオスタットと似た構造や共通の部分を含んでいる。ポンピングは、排気速度 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ の拡散ポンプを用いて肉薄(0.1 mm)のステンレスパイプを通して行なわれる。そのパイプのサイズは式(1.1)を用いて決められた。温度 1.1 K に冷却された ^4He 槽を用いて、 ^3He システムへの熱流入を減少させている。この装置では標準状態で 4 L の ^3He ガスを用い、熱流入 $4 \mu\text{W}$ の状態で、低温を数時間保持することができた。温度は、0.5~1.2 K の範囲で ^3He 蒸気圧によって較正された鉄マグネシウム明礬の磁化率温度計を用いて測定された。

約 0.3 K までの実験装置には、この ^3He ポンピング方式のクライオスタットが広く用いられている。例として、熱量計クライオスタットの模式図を図 2 に示す。この熱量計の最も大きな利点は、熱スイッチが無いことである。すなわち、 ^3He の総量を、最低温度に達したときすべて蒸発してしまうように設定してある(残りはヒーターを ON にしてポンピングすることで取り除くことができる)。したがって、自動的に装置は断熱状態になる。

図 3 に示す実験装置は、光学実験に用いられたものである。チェンバー 12 を ^4He で満たし、その中に試料を浸すことによって試料を冷却するようになっている。 ^3He は、水銀拡散ポンプとロータリーポンプによってポンピングされる。赤外フィルターで光学窓をカ

¹ 本稿は、ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所編、矢山英樹、I.B.ベルクトフ訳「超低温の実験技術」九州大学出版会、2000 年、からの抜粋である。

表 1 ^3He の飽和蒸気圧, 液体と気体の密度, 蒸発熱, 比熱, 冷却パワー 1 mW のときの最小排気速度 [21]

T (K)	P (Pa)	ρ_{liq} (kg/m ³)	ρ_{gas} (kg/m ³)	L (kJ/kg)	C (kJ/kgK)	\dot{V}/q (m ³ /s mW)
0.2	1.6×10^{-3}	82.0	3×10^{-6}	8.08	9.04	.43
0.3	0.25	82.1	3×10^{-4}	8.68	9.80	0.38
0.4	3.75	82.2	3.4×10^{-3}	9.27	10.43	3.2×10^{-2}
0.5	21.2	82.2	8.6×10^{-3}	9.84	11.00	6.7×10^{-3}
0.6	72.6	82.2	4.4×10^{-2}	10.41	11.52	2.2×10^{-3}
0.7	184	82.1	0.1	10.94	12.07	9.6×10^{-4}
0.8	385	82.0	0.17	11.47	12.64	5.0×10^{-4}
0.9	707	81.9	0.28	11.95	13.28	2.9×10^{-4}
1.0	1.18×10^3	81.7	0.43	12.43	13.99	1.9×10^{-4}
1.2	2.69×10^3	81.3	0.81	13.28	15.75	
1.4	5.13×10^3	80.8	1.5	14.02	17.94	
1.6	8.73×10^3	80.0	2.0	14.61	20.55	
1.8	1.37×10^4	79.0	3.0	15.03	23.46	
2.0	2.01×10^4	77.7	4.4	15.24	26.46	
2.2	2.83×10^4	76.0	6.1	15.22		
2.4	3.85×10^4	74.7	8.3	14.90		
2.6	5.07×10^4	71.6	11.2	14.20		
2.8	6.53×10^4	68.5	14.7	12.96		
3.0	8.24×10^4	64.4	18.9	10.69		

拡散ポンプへ ロータリーポンプへ

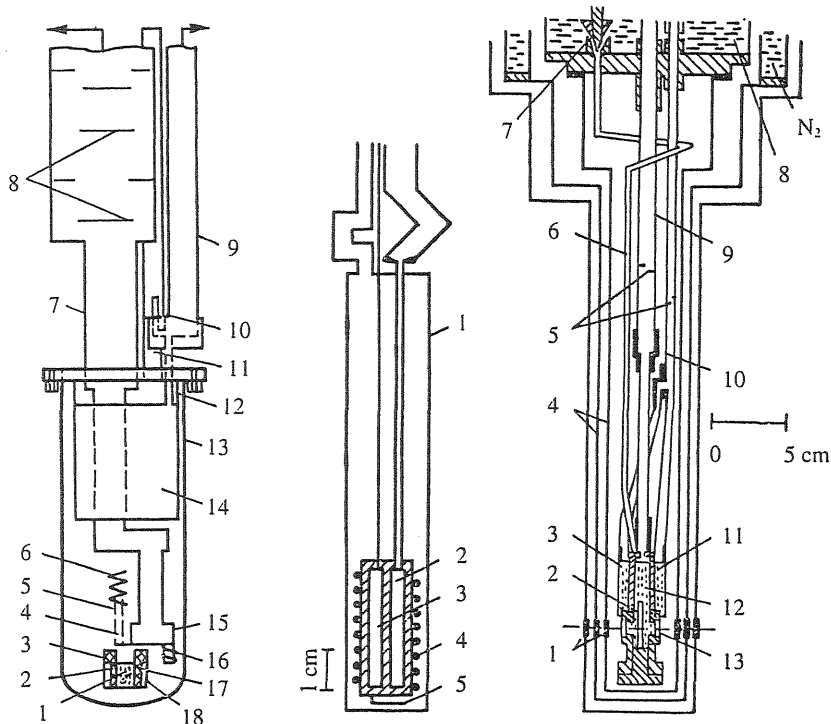


図 1 0.2 K に到達する ^3He クライオスタットの模式図 [5]

1 は常磁性温度計, 2 は二次コイル, 3 は一次コイル, 4 は抵抗温度計, 5 は試料, 6 はヒーター, 7 は ^3He ポンピングパイプ(各部の直径は 6.35, 3.18, 1.5, 1.27 cm), 8 は放射シールド, 9 は ^3He ポンピングパイプ, 10 は ^3He 注入バルブ, 11 は真空ライン, 12 は銅シールド, 13 は真鍮カバー, 14 は ^3He バス, 15 は ^3He バス, 16 はヒーター, 17 はステンレス製コンテナ, 18 は真鍮製のコールドコネクター。

図 2 ^3He で冷却される熱量計 [4]

1 は真空チェンバー, 2 は ^3He チェンバー, 3 は実験空間, 4 はヒーター, 5 は温度計。

図 3 ^3He で冷却される光学クライオスタットの低温部分 [22]

1 は赤外線フィルター, 2 は試料のサポート, 3 と 11 は ^3He バス, 4 は放射シールド, 5 は上からの放射シールド, 6 はフロインチューブ, 7 はバルブ, 8 は液体 ^3He , 9 は ^3He ポンピングパイプ, 10 は ^3He 注入キャピラリー, 12 は実験空間, 13 は石英窓。

バーしたにもかかわらず、熱流入は大きく、最低温度は 0.45 K であった。この装置は 0.6 K を 45 分間維持することができた。 ^3He が蒸発してしまった後、5~10 分でガスを再び凝縮することができた。

熱流入が大きくない場合は、装置を長時間動作させることができる。図 4 に、温度 0.37 K で蒸発速度を $0.03 \text{ cm}^3/\text{h}$ まで減少した実験装置の模式図を示す。容量 5 L の ^4He 槽の温度を 1.05 K に保って、 ^3He 槽への熱流入を減少している。ポンピングは、直径 6 mm の穴のあいたオリフィスを通して拡散ポンプによって行なう。温度は、飽和 ^3He の蒸気圧をマクラウド (MacLeod) ゲージで測定することによって決定する。直径が段々と変化する 3 つのセクションから成るパイプ 7 を用いて圧力測定をすることによって、熱分子補正を最小にし、熱流入を小さくすることができる。 ^3He の排気速度は $7.5 \text{ L}/\text{min}$ である。熱シールドの方法を図 2 と図 3 に示す。小型の石英製ヘリウムデュワー*を用いたミニチュア冷凍機が、EPR (Electron Paramagnetic Resonance) 実験のために作られている[6]**。

2.2 ^3He 吸着ポンプを用いたクライオスタット

吸着ポンプを用いると、 ^3He クライオスタットをより経済的でよりコンパクトにすることができる。吸着ポンプを用いるもう一つの利点は、 ^3He 配管システムからガスを集めてポンプ中に收容することができ、高価な ^3He を誤って逃がしてしまうのを防止できることである。

最初に用いられた吸着ポンプは、図 5 に示すように装置の中に装備された。 ^3He クライオスタットは、 ^4He のポンピングにより 1.2 K に保持された通常のガラスデュワーの中にある。 ^3He (標準状態で 2 L) は、低温のチェンバー9に凝縮される。吸着ポンプとして、30 g の活性炭を中に収めた円筒容器 6 が用いられる。実験が終わると、別のデュワー中に置いたもう一つの吸着ポンプを用いて ^3He を回収する。このポンプの壁を数気圧の圧力に耐えるだけ十分強く作れば、 ^3He をこの部分だけで保持することができる。冷凍の原理は図から明らかである。熱流入 $60 \mu\text{W}$ のとき、最低温度は 0.29 K、持続時間は 4~5 時間であった。この冷凍機は容器 1 の中に凝縮した ^4He または $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液を冷却するために用いられた。混合液の場合、最低温度は 0.31 K で 2.5 時間持続できた。 ^4He の場合、温度は少し高めの 0.37 K であった。

吸着材による ^3He の吸着に関するデータはあまり多く存在しないが、大まかな見積もりは可能である。活性炭による ^3He と ^4He の吸着等温線を比較してみると、 ^4He のデータを用いて ^3He のデータを推測することが可能であることが分かった[7]。活性炭による ^3He の吸着量は ^4He より 10% 少なく、同じ圧力と温度の条件では吸着熱が 30% 小さい。

図 6 に、吸着材の ^3He 吸着等温線のデータを示す。また、 ^3He の吸着熱を吸着量の関数として図 7 に示す。

同じクライオスタットであれば、吸着ポンプを使用することにより、パイプの排気抵抗を減少することができ、結果的に冷却パワーは吸着過程だけで制限されることになる。こ

* 訳注: 「フィンガー」と呼ばれることがある。

** これと同様な初期の冷凍機の構造が文献[12, 19, 20]に記述されている。

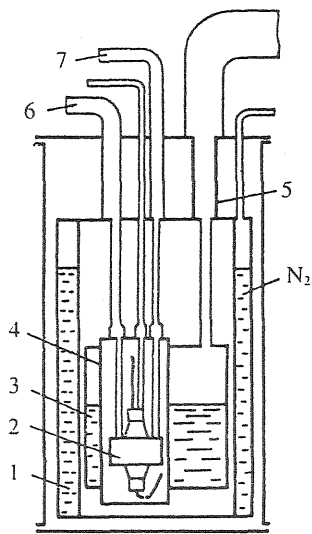


図 4 音響実験用クライオスタット [23]

1 は液体窒素バス, 2 は実験空間と ^3He 冷凍機, 3 は ^4He バス, 4 は真空チェンバー, 5 は ^4He ポンピングパイプ(各部の直径は 150, 100, 63, 26 mm), 6 は ^3He ポンピングパイプ(各部の直径は 26.6, 3 mm), 7 は ^3He マノメータにつながるパイプ(直径は 6 と同じ).

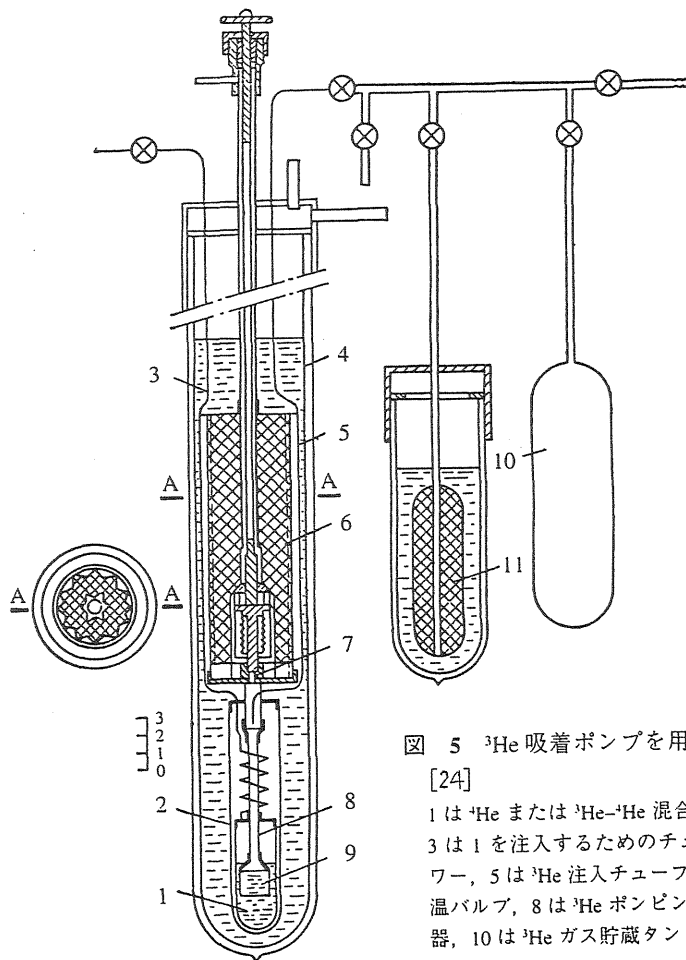


図 5 ^3He 吸着ポンプを用いたクライオスタット [24]

1 は ^4He または ^3He - ^4He 混合液, 2 は真空チェンバー, 3 は 1 を注入するためのチューブ, 4 はヘリウムデューワー, 5 は ^3He 注入チューブ, 6 は吸着ポンプ, 7 は低温バルブ, 8 は ^3He ポンピングパイプ, 9 は液体 ^3He 容器, 10 は ^3He ガス貯蔵タンク, 11 は補助吸着ポンプ.

の吸着過程は、明らかに吸着材の冷却条件と細孔中の流体抵抗によって決定される。事実、吸着ポンプの排気速度は、パイプのコンダクタンスに比べて、常に小さいことが確認されている。

クライオスタット中の吸着材の状態は、吸着速度（すなわち排気速度）に強い影響を与える（図 8 参照）。実際に用いる場合に知っておくべき重要なことは、吸着されたガスの総量が最大容量の 60~70%以内であれば、吸着速度は吸着量にあまり強く依存しないということである（図 9 参照）。

吸着能力が温度に強く依存するため、吸着材の温度を変化させて排気速度（そして冷却パワー）を制御することが可能である。この種の実験装置を図 10 に示す。吸着材はガラスデュワーをひっくり返したもののの中に置かれ、それを上下することによりヘリウムの液面位置を変化させ温度を調節ことができる。この冷凍機の冷却パワーの温度依存性を図 11 に示す。ポンプの排気速度が分かれば、冷凍機の冷却パワーは、（もし必要ならパイプのコンダクタンスを考慮して）簡単に計算できる。実験データは計算値とよく一致する。

吸着ポンプが平衡状態に落ち着く速さは、吸着ポンピングの重要なファクターである。しかし、これまでに得られている多くのデータは矛盾が多い。活性炭が平衡状態に落ち着くまでの時間は、最低圧力 (10^{-4} Pa) のときでも、5 分以下である[8]。しかし、モレキュラーシーブの場合、数日かかることが分かった[9]。

^3He をジュールトムソン (Joule-Thomson) 効果によって凝縮し、移動型吸着ポンプによって冷却されるタイプのクライオスタットが作られている[10]。この場合、 ^4He のポンピングは必要ない。ヘリウムバス（浴槽）の温度が 4.2 K の場合、 ^3He の圧力 0.4 MPa から始めて凝縮率は 59%であった。

3.5 L という大量の液体ヘリウムを 0.5 K まで冷却する吸着ポンプ型クライオスタットが作られている[11]。これは核反応の実験的研究のために用意されたもので、それだけで長期（数日）間使用できるように設計されている。また、 ^3He 吸着型クライオスタットとしては、ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所で図 12 の製品が製造され出荷された。冷凍機とポンプが、スーパーインシュレーションによって断熱された 1 つのデュワー内に収められている。液体窒素トラップを用いて、不純物がチェンバー 1 に入るのを防いでいる。冷凍機は分解できる構造になっていて、容易に内部にアクセスできる。全体は、 ^3He を保持したり不純物を取り除いたりするシステムと、測定と制御のための装置など一式から構成されている。クライオスタットと全システムは、一つのラック ($0.92 \times 0.54 \times 2 \text{ m}^3$) に収められている。

2.3 連続運転型クライオスタット

ワンショット型のクライオスタットは、1 K 以下の温度に到達した後、それをある時間維持することができる。熱流入が小さいときは、この低温維持時間は数時間であるが、1 K 以下の温度で長時間実験したり熱流入が大きいときにはこれでは不十分である。 ^3He のポンピングが拡散ポンプとロータリーポンプで行なわれている冷凍機の場合には、それを連続運転型の冷凍機に作り変えるのは比較的簡単である。そうするためには、ポンプの吐き

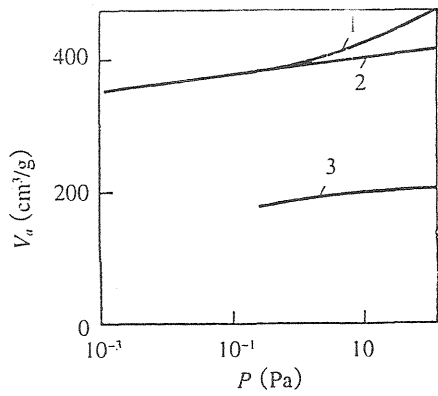


図 6 $T=4.2$ Kでの活性炭とモレキュラーシープの吸着等温線
1は活性炭[7], 2も活性炭[8], 3はモレキュラーシープ 5A [25].

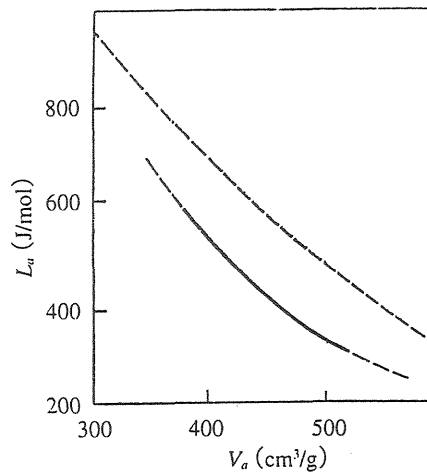


図 7 活性炭による ^3He の吸着熱[7]
---は ^4He のデータ.

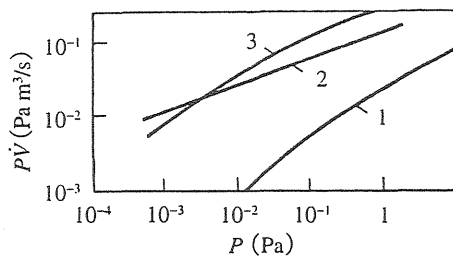


図 8 吸着材の置き方による排気速度の違い[8]

1は活性炭を銅網で包んだもの, 2は活性炭をアラルダイトで壁に付けたもの, 3は活性炭を銅の薄板で挟みそれを壁に半田付けしたもの.

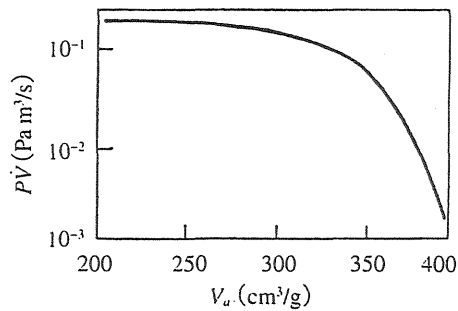


図 9 吸着ポンプの排気速度と吸着量の関係
温度と圧力は $T=4.2$ K, $P=0.2$ Pa [8].

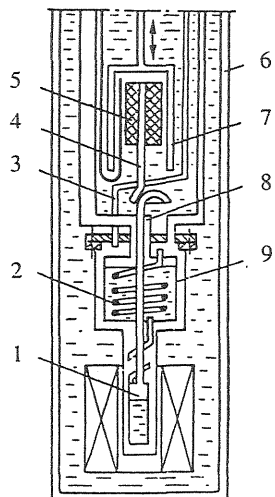


図 10 移動型吸着ポンプによる温度制御を備えたクライオスタット[26]

1は ^3He 容器, 2は ^3He コンデンサー, 3は ^3He 注入キャピラリー, 4はポンピングパイプ, 5は活性炭, 6は外側のデューワー, 7はガラスデューワーをひっくり返したもの, 8は ^4He 注入バルブ, 9は補助 ^4He チェンバー.

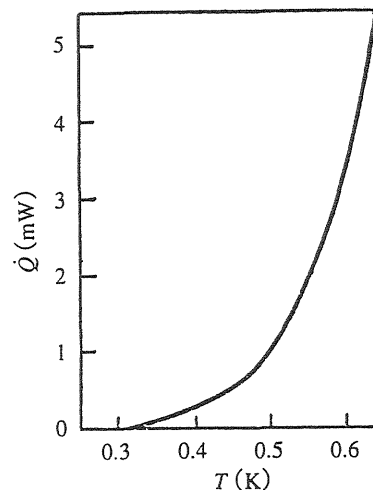


図 11 ^3He 冷凍機の冷却パワー[26]

$T=0.32$ Kで $P=0$.

出し口と低温のチェンバーを ^3He が冷却されて凝縮されるラインで連結するだけでよい。もしチェンバーが 1 K 以下であれば、 ^3He の循環は高い背圧 (2.5 kPa) をもつ拡散ポンプだけでできる[12, 13]。冷凍機の構造と配管を図 13 に示す。この装置は ^3He と ^4He のために 2 つのデュワーを有する。外側のデュワー1 の温度は荒引きポンプを用いて 1.5 K に保たれている。内側のデュワーは拡散ポンプによって約 1 K に保たれている。 ^3He は容器 8 からデュワー2 に凝縮され、拡散ポンプ DPN-50 によってポンピングされ、配管や熱交換器、バルブを通してデュワーに再び戻ってくる (図 13 b 参照)。動作時間は、内側の容器中にある ^4He の量に依存する。文献[13]中の同様な装置では、ヘリウムは外側の容器から中間の装置へ流れる構造になっている。

循環速度が大きいときや戻ってくる ^3He からの熱流入を減少する必要がある場合には、熱交換器を装備するとよい。最も簡単な熱交換器の構造を図 14 に示す。ここで、 ^3He は排気パイプ中に設置されたスパイラル 3 を通して戻ってくる。そのスパイラルがリブ構造であれば、蒸気圧が低くても十分熱交換がなされる。この冷凍機は、液体 ^4He 試料を冷却するためのポット 6 をもっている。このポットへのヘリウムの流入は、かなりの熱流入を伴い、温度が 0.5 K に上昇する。

図 15 に、より一般的な連続運転型冷凍機の構造を示す。これまでに述べた装置との主な違いは、コールドプレートの存在である。最も簡単なコールドプレートは、スパイラル状のパイプが銅板の上に半田付けされているものである。このスパイラルの一端はインピーダンスを通して ^4He 槽につながっていて、他の一端は荒引きポンプにつながっている。この装置[14]は、実際に広く用いられており ^4He ポンピングポットをコンパクトに改良した構造である。 ^3He リターンラインに入れられたインピーダンスは、圧力勾配をつけて ^3He を凝縮するのに必要である。(図 13 のバルブ 6 と図 14 のバルブ 2 はそれぞれの装置のインピーダンスである)。戻ってくる ^3He の不純物を取り除くフィルタ (トラップ) は重要な部品である。通常、それは数ブロックから成るオイルミストフィルタと、最終段にある液体窒素で冷却された吸着トラップでできている。

0.5 K 以下の温度が必要なければ、単に ^3He を荒引きポンプで排気するだけでよい[15]。高い冷却パワーが必要な場合には、ジュールトムソン効果による付加的冷却効果が用いられることがある。そのような装置は加速器の偏極ターゲットを冷却するために用いられている[16, 17]。この場合、 ^3He はリターンラインに 10^5 Pa 近くで入り、インピーダンスの後でパワフルな真空ポンプを用いてポンピングされる。排気速度 $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ のポンプを用いると、背圧 50 kPa、0.5 K で冷却パワー 200 mW が得られ、背圧が大気圧よりわずかに高い場合 400 mW が得られた。

2 つの吸着ポンプが交互に機能するタイプの連続運転型冷凍機も作られている[18]。この構造をより完全にしたものが、希釈冷凍機の循環に用いられている。

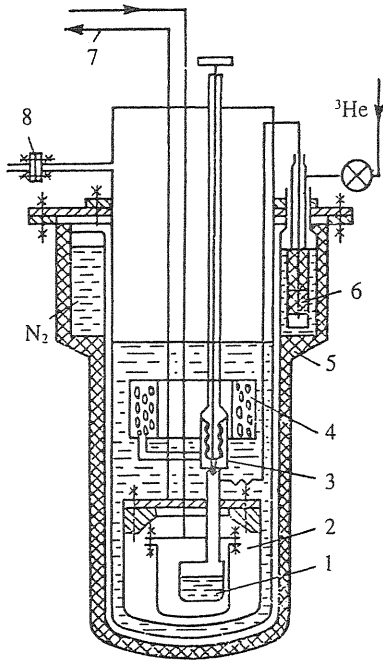


図 12 ^3He 冷凍機の低温部分の模式図 [2]

1は ^3He 容器, 2は真空チェンバー, 3は ^3He のバルブ, 4は吸着ポンプ, 5は主デューワーのスーパーインシュレーション, 6は窒素トラップ, 7は真空チェンバーの排気パイプ, 8はデューワーのポンピングパイプ.

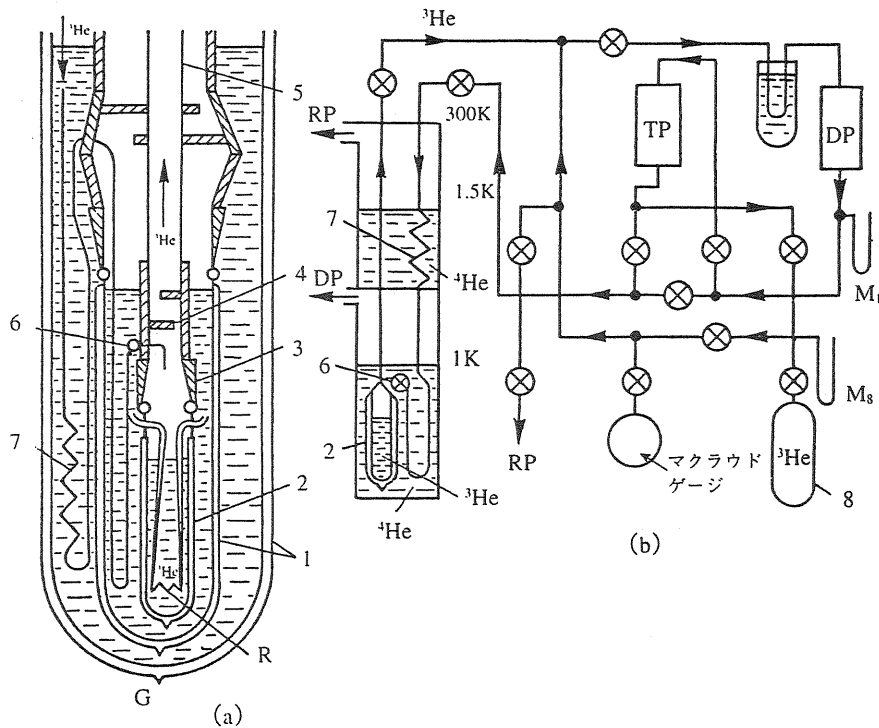


図 13 ^3He のポンピングで低温を作る装置. (a) はクライオスタット, (b) はガスハンドリングシステム [12]

1は ^3He デューワー, 2は ^3He デューワー, 3はガラスとつなぐための銅パイプ, 4は輻射シールド, 5は ^3He ポンピングパイプ, 6はバルブ, 7は戻ってくる ^3He を冷却するためのスパイラルチューブ, 8は ^3He ガス貯蔵タンク, RPはロータリーポンプ, DPは拡散ポンプ, TPはテプラー (Tepler) ポンプ.

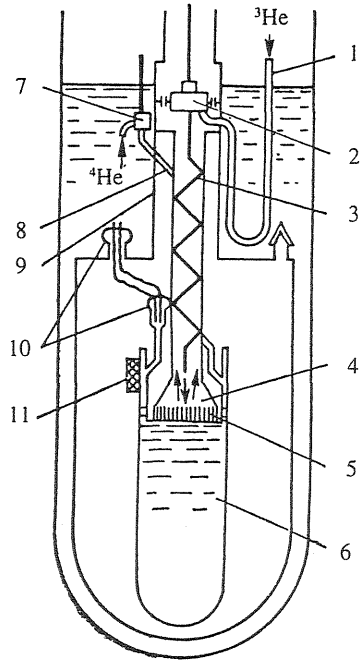


図 14 熱交換器を有する冷凍機 [13]

1は ^3He リターンライン, 2はバルブ, 3は熱交換器, 4は ^3He 容器, 5は銅フィン, 6は実験空間, 7は ^4He を6に注入するバルブ, 8は洋銀製のキャピラリー, 9は真空チェンバー, 10は電線フィードスルー, 11は温度計.

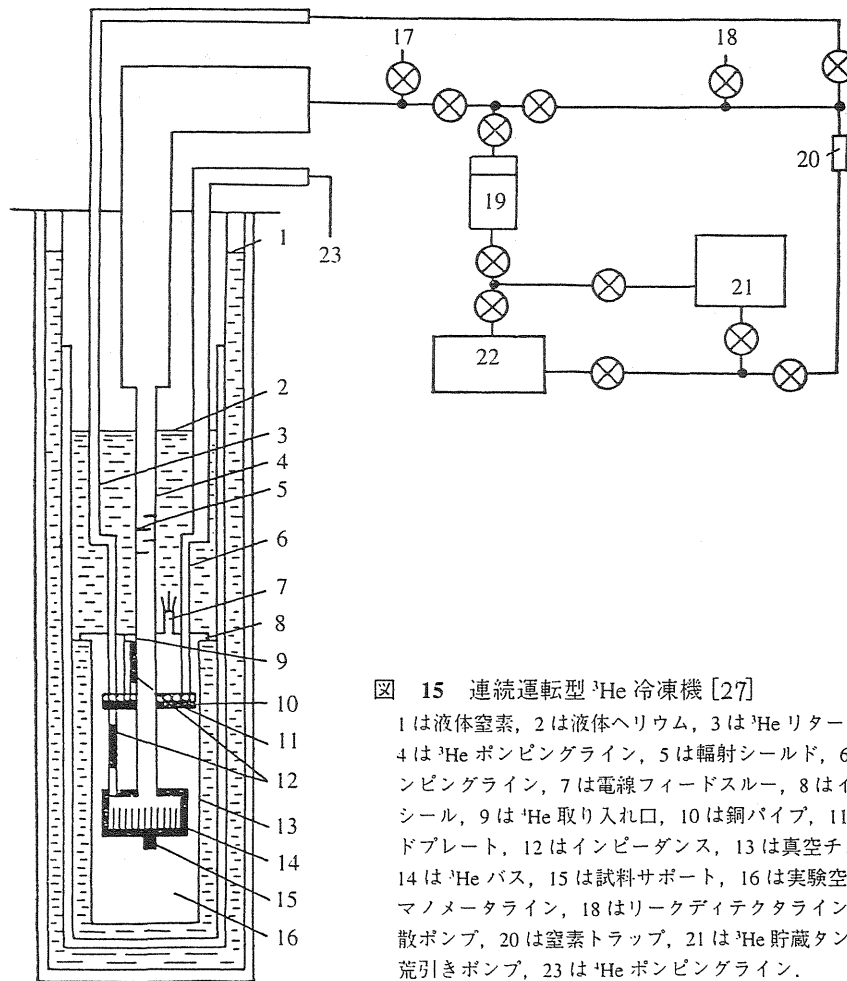


図 15 連続運転型 ^3He 冷凍機 [27]

1は液体窒素, 2は液体ヘリウム, 3は ^3He リターンライン, 4は ^3He ポンピングライン, 5は輻射シールド, 6は ^4He ポンピングライン, 7は電線フィードスルー, 8はインジウムシール, 9は ^4He 取り入れ口, 10は銅パイプ, 11はコールドプレート, 12はインピーダンス, 13は真空チェンバー, 14は ^3He バス, 15は試料サポート, 16は実験空間, 17はマンメータライン, 18はリークディテクタライン, 19は拡散ポンプ, 20は窒素トラップ, 21は ^3He 貯蔵タンク, 22は荒引きポンプ, 23は ^4He ポンピングライン.

参考文献

- [1] Есельсон Б.Н., Григорьев В.Н., Иванцов В.Г. и др., Растворы квантовых жидкостей ^3He - ^4He , Москва, Наука, 1973, 424 с.
- [2] Есельсон Б.Н., Иванцов В.Г., Коваль В.А. и др., Свойства жидкого и твердого гелия: Растворы ^3He - ^4He : Справочник, Киев, Наук.думка, 1982, 232 с.
- [3] Wilks J., The properties of liquid and solid helium, Oxford, Clarendon Press, 1967, 763p.
- [4] Roberts T.R., Sydoriak S.G., The specific heat of liquid ^3He , Phys. Rev. Vol.93, No.6, 1954, p.1418.
- [5] Walton D., ^3He cryostat for operation to 0.2 K, Rev. Sci. Inst., Vol.37, No.6, 1966, pp. 734-736.
- [6] Rettori C., Kim H.M., Davidov D., ^3He cold finger cryostat for EPR experiments, Cryogenics, Vol.14, No.5, 1974, pp.1 285-287.
- [7] Menetrier C., Roubeau P., Adsorption de l'hélium-3 par le carbon actif, Rev. Phys. Appl., Vol.14, No.2, 1979, pp. 131-133.
- [8] Wiedemann W., Smolic E., A hermetically sealed helium-3 cryostat with a charcoal adsorption pump, Proc. 11th Int. Cryog. Conf., Brighton, UK, 1968, pp. 59-61.
- [9] Halama H.J., Aggus J.R., Measurements of adsorption isotherms and pumping speed of helium on molecular sieve in the 10-11-10-7 Torr range of 4.2 K, J. Vac. Sci. Tech., Vol.11, No.1, 1974, pp. 333-336.
- [10] Daunt J.R., Lerner E., A closed-cycle Joule-Thomson liquefier and cryostat for ^3He , Cryogenics, Vol.10, No.6, 1970, pp. 476-479.
- [11] Bogoyavlenskii I.V., Milenko Yu.Ya., Karanatsevich L.V., *et al.*, A cryostat for investigating inelastic scattering of neutrons on liquid ^4He between 4.2 and 0.5 K, Cryogenics, Vol.23, No.9, 1983, pp. 498-500.
- [12] Пешков В.П., Зиновьева Е.Н., Экспериментальные работы с ^3He , Успехи Физических Наук, 1959, т.47, №2, с.193-244.
- [13] Ambler E., Dove R.B., Continuously operating ^3He refrigerator for producing temperatures down to 1/4 K, Rev. Sci. Inst. Vol.32, No.6, 1961, pp.737-739.
- [14] De long L.E., Symko O.G., Wheatley J.C., Continuous operating ^4He evaporation refrigerator, Rev. Sci. Inst., Vol.42, No.1, 1971, pp. 147-150.
- [15] Васильев Д.И. Простая установка для получения температур до 0,55 К откачкой гелия-3, Приборы и Техника Эксперимента, 1967, №2, с.243-244.
- [16] Fukushima M., Norikawa N., Kajikawa R., *et al.*, A ^3He cooled cryostat with large cooling power for polarized targets, Nucl. Instrum. And Meth., Vol.140, No.2, 1977, pp. 275-278.
- [17] Getman V.A., Germanov A.I., Derkach A.Ya., *et al.*, Continuous flow ^3He cryostat for polarized targets, Cryogenics, Vol.20, No.1, 1980, pp. 98-100.
- [18] Babiichuk V.P., Golub A.A., Esel'son B.N., Serbin I.A., A continuous adsorption refrigerator for producing temperatures below 1 K, Cryogenics, Vol.15, No.5, 1975, pp. 254-256.
- [19] Швец А.Д. Использование жидкого ^3He для получения температур до 0,3 К, Приборы и Техника Эксперимента, 1965, №6, с.5-11.
- [20] Taconis K.W., ^3He cryostats, Progress in low temperature physics, Amsterdam, Vol.3, 1961, pp. 153-169.
- [21] Keller W.E., Helium-3 and helium-4, New York, Plenum Press, 1969, p. 431.
- [22] Lausch J., A ^3He cryostat for optical spectroscopy, J. Phys. E, Vol.9, No.2, 1976, p. 100-101.
- [23] Roberts T.R., Sydoriak S.G., Sound velocity, phase separation and lambda transition of ^3He - ^4He mixtures, Phys. Fluids Vol.3, No.6, 1960, pp. 895-902.
- [24] Есельсон Б.Н., Лазалев Б.Г., Швец А.Д., Простой криостат с ^3He , Приборы и Техника Эксперимента, 1962, №3, с. 198-199.
- [25] Fruneau M., Lacaze A. Weil L., Helium-3 cryostat with adsorption pump, Cryogenics, Vol.7, No.3, 1967, pp. 135-137.
- [26] Rogacki K., Trojnar E., A ^3He cryostat with charcoal sorption pum for easy control of temperature, Cryogenics, Vol.23, No.1, 1983, pp. 7-8.
- [27] O.V. Lounasmaa, Experimental Principle and Methods Below 1 K, Academic Press, London and New York, 1974.