

^ <4>Heの減圧による低温の生成

矢山, 英樹
九州大学大学院理学研究院物理学部門

<https://doi.org/10.15017/11063>

出版情報 : 九州大学極低温実験室だより. 4, pp. 25-35, 2003-06. 九州大学理学部極低温実験室
バージョン :
権利関係 :

^4He の減圧による低温の生成 *

九州大学 理学研究院 物理学部門 矢山 英樹

1. はじめに

最も手軽に低温を得る方法は、断熱された容器の中に液体を入れそれをポンピングして沸騰させることである。1 K 以下の温度を得るには、最も低い沸点をもつ液体ヘリウムをポンピングするだけでよい。この方法は、最初、通常のヘリウムすなわち ^4He を用いて行われた。同じヘリウムの同位体である ^3He は、天然ガスから採取されたヘリウムガス中には、わずか 10⁻⁴% の濃度しか存在しない希ガスであるが、それを用いることで、より低温を得ることができる。

本稿では、 ^4He を用いて 1 K 以下の温度を得る方法について述べる。もっとも、今日では同じ程度の低温を得る簡便な方法が普及しているため、多くの部分は単に歴史的な興味に対する記述を与えるに過ぎない。しかし、ここで述べる ^4He クライオスタットは基本的冷凍機であるため、今でもしばしば用いられている。また、この方法は低温生成に共通する一般的な技術を含んでいるため、他のタイプの冷凍機を作る際にも役に立つ。

2. ヘリウムについて

ヘリウムは多くの特徴的な性質を有しており、それをうまく利用することで寒剤としての働きをしている。まず第一の特徴として、飽和蒸気圧でヘリウムは三重点をもたない。それは、ヘリウムが絶対零度まで液体のままであることを意味している。第二に、ヘリウムは、絶対温度 $T = 2.172$ K で超流動状態に転移する。この状態では、熱伝導度が大きくなり液体全体の温度が均一になるが、一方で超流動フィルム（膜）により熱の流入が増加する。ヘリウムの蒸発熱は小さいため、クライオスタットの設計には断熱に関する注意が必要である。 ^4He の最も特徴的なパラメータと熱力学的性質を表 1 と表 2 に示す。

3. ポンピングについて

^4He の飽和蒸気圧は、温度の低下と共に指数関数的に減少し、 $T < 1$ K では 10 Pa 以下になる。そのため、ヘリウムをポンピングして低温を得る場合には、到達圧力の低い真空ポンプが必要になる。それに加え、排気速度が大きくなければならない、なぜならヘリウムの蒸発熱は小さいからである。この方法で汲み上げられる単位時間あたりの熱量、すなわち冷却パワー \dot{Q} は式 $\dot{Q} = \dot{V} \rho_v L$ で計算できる。ここで ρ_v はポンピングしている蒸気の密度、 L は蒸発潜熱である。 $\dot{Q} = 1$ mW を得るために必要なポンプの排気速度とヘリウムの飽和蒸気圧を表 3 に示す。表 3 に示されている \dot{V} / \dot{Q} の値は、排気のためのパイプがポンプの排気速度に負けないくらい十分太いときに成り立つものである。

* 本稿は、「超低温の実験技術」矢山英樹, B.I. ベルクトフ共訳, 2000 年九州大学出版会, から一部抜粋したものである。

表 1 ⁴He の物性値 [26]

| ダイアグラム上の点 | P (kPa) | T (K) | ρ (kg/m ³) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|
| 臨界点 | 227.4 ± 0.1 | 5.18988 ± 0.00002 | 69.323 ± 0.003 |
| 1 気圧での沸点 | 101.3 | 4.215 | 125 |
| 液相-気相曲線上の λ 点 | 5.039 ± 0.001 | 2.1720 ± 0.0001 | 146.15 |
| 液相-固相曲線上の λ 点 | 3,012 ± 5 | 1.7633 ± 0.0001 | 180.44 ± 0.3 |
| 絶対零度での結晶化圧力 | 2531.8 | 0 | |
| bcc-hcp 転移点 | | | |
| 最下点 | 2635.5 | 1.464 | 174.33 |
| 最上点 | 3039.4 | 1.772 | 180.65 |
| hcp-fcc 転移点 | 1.1 × 10 ⁵ | 14.9 ± 0.1 | 316* |
| | | | 331** |

* 液体

** 固体

表 2 ⁴He の主な熱力学的物性値

| T (K) | P (Pa) [27] | ρ_L (kg/m ³) [28] | C (J/kgK) [29] | $L \times 10^3$ (J/kg) [27] | ρ_s (kg/m ³)* |
|---------|-------------------------|---|------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 0.5 | 2.18 × 10 ⁻³ | 145.2 | 2.5 | 17.4 | 2 × 10 ⁻⁶ |
| 0.6 | 3.75 × 10 ⁻² | 145.2 | 4.4 | 17.9 | 3 × 10 ⁻⁵ |
| 0.7 | 3.03 × 10 ⁻¹ | 145.2 | 9.8 | 18.4 | 2.1 × 10 ⁻⁴ |
| 0.8 | 1.53 | 145.2 | 22.2 | 18.9 | 9.2 × 10 ⁻⁴ |
| 0.9 | 5.54 | 145.2 | 51.0 | 19.5 | 3.0 × 10 ⁻³ |
| 1.0 | 16.0 | 145.1 | 104 | 20.0 | 0.0077 |
| 1.2 | 83.3 | 145.1 | 322 | 21.0 | 0.033 |
| 1.4 | 287 | 145.2 | 780 | 21.9 | 0.099 |
| 1.6 | 760 | 145.2 | 1.57 × 10 ³ | 22.7 | 0.230 |
| 1.8 | 1.66 × 10 ³ | 145.4 | 2.81 × 10 ³ | 23.2 | 0.455 |
| 2.0 | 3.17 × 10 ³ | 145.7 | 5.18 × 10 ³ | 23.3 | 0.798 |
| 2.2 | 5.39 × 10 ³ | 146.2 | 3.98 × 10 ³ | 22.7 | 1.255 |
| 2.4 | 8.44 × 10 ³ | 145.4 | 2.38 × 10 ³ | 22.9 | 1.83 |
| 2.6 | 1.25 × 10 ⁴ | 144.4 | 2.27 × 10 ³ | 23.2 | 2.56 |
| 2.8 | 1.77 × 10 ⁴ | 143.0 | 2.34 × 10 ³ | 23.4 | 3.445 |
| 3.0 | 2.43 × 10 ⁴ | 141.3 | 2.49 × 10 ³ | 23.5 | 4.515 |
| 3.2 | 3.23 × 10 ⁴ | 139.4 | 2.69 × 10 ³ | 23.4 | 5.79 |
| 3.4 | 4.19 × 10 ⁴ | 137.1 | 2.97 × 10 ³ | 23.2 | 7.30 |
| 3.6 | 5.34 × 10 ⁴ | 134.5 | 3.26 × 10 ³ | 22.9 | 9.08 |
| 3.8 | 6.67 × 10 ⁴ | 131.6 | 3.60 × 10 ³ | 22.4 | 11.2 |
| 4.0 | 8.22 × 10 ⁴ | 128.6 | 3.99 × 10 ³ | 21.6 | 13.65 |
| 4.2 | 9.99 × 10 ⁴ | 125.2 | 4.48 × 10 ³ | 20.6 | 16.6 |

* ビリアル係数を用いた計算値(例えば [30] 参照)

表 3 ⁴He ポンピングによる冷却パワーの計算に用いられたパラメータ

| T (K) | $\bar{V} \times 10^3$ $\frac{\dot{Q}}{m} \text{ (m}^3/\text{s mW)}$ | v_m (m/s) | n_i (g/sm ²) | $\frac{D_0}{4}$ (m/s) | v_i | \dot{Q}_i (mW) | $\dot{V}_i \times 10^3$ (m ³ /s) |
|---------|--|-------------|----------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--|
| 1.0 | 1.9 | 4.1 | 80 | 4.6 | 18 | 1.2 | 2.4 |
| 0.9 | 5.6 | 3.9 | 30 | 4.4 | 7 | 0.5 | 2.9 |
| 0.8 | 21 | 3.7 | 8.1 | 4.1 | 1.9 | 0.12 | 3.7 |
| 0.7 | 110 | 3.4 | 1.7 | 3.9 | 0.4 | 0.03 | 10.5 |
| 0.6 | 1,850 | 3.2 | 0.07 | 3.6 | 0.05 | 1.3 × 10 ⁻³ | 520 |

システムの排気速度 \dot{V} はコンダクタンス F をもつパイプの流体抵抗とポンプの排気速度 \dot{V}_0 を用いて $\dot{V}^{-1} = \dot{V}_0^{-1} + F^{-1}$ と表わされる。

分子流領域すなわち $r \leq \lambda$ （ここで、 r は排気パイプの半径、 λ はガスの平均自由行程）の条件が満たされる場合、コンダクタンスは式

$$F = AKv_a / 4$$

で計算できる。ここで、 A はパイプの断面積、 v_a は分子の平均熱速度、 K はクラウジング

(Klausing) 係数でありパイプの長さ l と半径 r の比に依存し、通過確率を表わす。円筒型のパイプについてのクラウジング係数の値は表4に示されている。粘性流領域では、コンダクタンスがずっと大きくなり r/λ の最大値に対して $F_\infty = 0.147 r/\lambda$ である。パイプのコンダクタンスと分子流の関係を r/λ の広い範囲に亘って表5に示す。

もし、パイプが、長さ l と半径 r の異なる n 個のセクションが直列につながったものから構成され、それぞれの部分の温度が一定の場合には、分子流状態が維持される最大圧力（そしてそれに対応する温度）は、次の式によって決定される[1]。

$$P_K T_K^{-1/2} - P_0 T_0^{-1/2} = \frac{3}{4} \rho Q \left(\frac{R}{2\pi} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{r_i^3} \quad (1)$$

ここで、 P_0 と T_0 はポンプの入口でのヘリウムの圧力と温度である。ガス流が完全な分子流領域にないときは、式(1)は P_K と T_K の近似値を与える。 ^4He ポンピングシステムの計算に必要な ^4He ガスの性質を表6に示す。

4. 実験装置

1922年、カマリン・オンネス(H. Kamerlingh Onnes)はヘリウムのポンピングで0.81 Kを得た[2]。この方法を更に改良するために、よりパワフルなポンプを用い熱流入を最小にするクライオスタットの構造が研究された[3,4,5,6,7,8]。この方法で最低温度に達したクライオスタットの模式図を図1に示す。空気に対する排気速度 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ をもつ拡散ポンプが、圧力 0.1 Pa で用いられた。ポンピングは、直径 305 mm のパイプを通して行われた。遮蔽容器を温度 2 K のヘリウムで満たし、最低到達温度は 0.734 K であった。遮蔽容器の目的は、主デュワーへの熱流入の低下ではなくて、それによって冷却されたヘリウム蒸気の粘性を減少させるためである。

超流動ヘリウムの発見とその後の研究[9,10]によって、ヘリウムのポンピングによって温度を減少させる方法の場合、物体の表面を覆う超流動フィルム(膜)が障害となることが明らかになった。超流動フィルムは、装置の温度が高い部分に熱機械効果によって移動し、そこで蒸発してポンプの負荷になる。その影響は特に低温で大きくなる。その理由は、蒸気圧および排気速度は低温で急激に減少するが、超流動フィルムの輸送速度は(図2から分かるように)一定であるからである。

超流動フィルムの影響を減少させるための最初の試みは、文献[11]に示されている。それは、ポンピングラインの途中に直径 $0.3 \sim 1 \text{ mm}$ のパイプを用いる方法である。排気速度

表 4 クラウジング係数の Ur 依存性 [31]

| Ur | K | Ur | K | Ur | K |
|------|--------|------|--------|-------|----------|
| 0 | 1 | 1.8 | 0.5384 | 9 | 0.2131 |
| 0.1 | 0.9524 | 2.0 | 0.5136 | 10 | 0.1973 |
| 0.2 | 0.9092 | 2.2 | 0.4914 | 12 | 0.1719 |
| 0.3 | 0.8699 | 2.4 | 0.4711 | 16 | 0.1367 |
| 0.4 | 0.8341 | 2.6 | 0.4527 | 20 | 0.1135 |
| 0.5 | 0.8013 | 2.8 | 0.4359 | 30 | 0.0797 |
| 0.6 | 0.7711 | 3.0 | 0.4205 | 40 | 0.0613 |
| 0.7 | 0.7434 | 3.2 | 0.4062 | 50 | 0.0499 |
| 0.8 | 0.7177 | 3.6 | 0.3809 | 60 | 0.0420 |
| 0.9 | 0.6940 | 4.0 | 0.3589 | 70 | 0.0363 |
| 1.0 | 0.6720 | 5 | 0.3146 | 80 | 0.0319 |
| 1.2 | 0.6320 | 6 | 0.2807 | 90 | 0.0285 |
| 1.4 | 0.5970 | 7 | 0.2537 | 100 | 0.0258 |
| 1.6 | 0.5659 | 8 | 0.2316 | 1,000 | 0.002658 |

表 5 r/λ の関数として表わしたパイプのコンダクタンスと分子流コンダクタンスの比 [31]

| r/λ | F/F_0 | r/λ | F/F_0 | r/λ | F/F_0 |
|-------------|----------|-------------|---------|-------------|---------|
| 10^4 | 1,472.81 | 1 | 1.004 | 0.1 | 0.970 |
| 10^3 | 148.01 | 0.5 | 0.959 | 0.05 | 0.981 |
| 10^2 | 15.23 | 0.323 | 0.952 | 0.01 | 0.997 |
| 10 | 2.288 | 0.2 | 0.962 | 0 | 1.000 |
| 5 | 1.558 | | | | |

表 6 ^4He ガスの性質

| T (K) | 第 2 ビリアル係数 B (cm^3/mol) | エンタルピー H (J/kg) | 粘性係数 $\eta \times 10^7$ (Ns/m^2) | 熱伝導度 κ (mW/Km) |
|---------|--|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| | [32] のデータ | [33] のデータ | [34]* のデータ | [30] のデータ |
| | | $P = 10 \text{ kPa}$ | | |
| 1 | | | 3.2 | 3.4 |
| 2 | -187 | | 4.9 | 3.8 |
| 3 | -117 | 29.6 | 7.5 | 5.8 |
| 4 | -82 | 35.0 | 10.4 | 7.9 |
| | [42] のデータ | | | [43] のデータ |
| 5 | -62 | 40.3 | 14.2 | 10 |
| 10 | -23 | 66.5 | 22.3 | 17 |
| 20 | -4.0 | 118.5 | 34.9 | 27 |
| 30 | 2.4 | 170.5 | 45.4 | 34 |
| 40 | 5.6 | 222.5 | 54.6 | 42 |
| 50 | 7.6 | 274.4 | 63.1 | 48 |
| 70 | 9.8 | 378.3 | 78.5 | 59 |
| 100 | 11.2 | 534.1 | 98.8 | 75 |
| 150 | 11.6 | 793.7 | 128.5 | 97 |
| 200 | 11.6 | 1,053.4 | 155 | 117 |
| 250 | 11.5 | 1,313.1 | 179 | 135 |
| 300 | 11.4 | 1,572.7 | 201 | 153 |

* $T > 4 \text{ K}$ では $\eta = 5.023 \times 10^{-7} T^{0.647}$ が用いられている [35].

10 L/s のポンプを用いて、最低到達温度 0.77 K が得られた。パイプの直径を減少することは排気速度の減少につながる。そのため、小さな穴をもったオリフィス*を通して大きなパイプでヘリウム容器をポンピングするのが合理的である。

粘性流領域で、面積 A の小さな穴（オリフィス）を通して移動するガスの輸送量は、次の式で計算できる（例えば[12]を参照せよ）。

$$Q = AP_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma} \left[\frac{RT}{M} \cdot \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

ここで、 P_1 と P_2 はオリフィスの入口と出口の圧力、 M はガスの分子量、 $\gamma = C_p/C_v$ は定圧比熱と定積比熱の比熱比を表わす。 $P_1 =$ 一定の場合、ガスの輸送速度は P_2 の減少と共に増加し、 $P_1/P_2 \approx 0.5$ のとき最大になる。これは、ガスの流速が音速と一致する条件のときである。この場合、平均流速は次のようになる。

$$\bar{v} = \frac{Q}{AP_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{RT}{M} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

ヘリウムの場合、 $\bar{v} = 41T^{1/2} \text{ m s}^{-1} \text{ K}^{-1/2}$ である。 \bar{v} の値とガスの輸送速度 $\dot{m} = \bar{v}\rho_v$ （ここで ρ_v は飽和ヘリウム蒸気の密度）が、温度に対して表 3 に示されている。

分子流状態は、低温でオリフィスの穴が小さいときに実現され、そのとき平均流速は $v_d/4$ である（表 3 参照）。これらのデータから分かるように、粘性流領域と分子流領域でのガス輸送速度の差は小さい。そのため、実際には、オリフィスの穴の最適値は、ガス流を解析しなくても十分精度良く求めることができる。表 3 にはまた、直径 1 mm のオリフィスを通して排気されるガスの輸送速度と図 2 のデータから計算された超流動フィルムの輸送速度との比 ν や、この場合の冷却パワー Q_1 の値や、排気パイプのコンダクタンスに関連するポンプの最低排気速度なども示されている。

超流動フィルムの流速は、パイプの径の最も小さい部分の一周の長さに比例する。したがって、 ν はオリフィスの大きさに比例し、いずれのサイズの場合にも計算できる。図 2 に示されたデータは、ガラス基板の場合に得られたものであるが、多くの実験結果から超流動フィルムの流速は材料にあまり依存しないことが分かっている。基板の表面が非常に汚れていたり非常に荒い場合にのみ、流速の増加が見られる。

オリフィスを通して排気する実験は、Cook と Hull [13]によって最初に行なわれ、排気速度 10 L/s のポンプを用いて 0.74 K が得られた。このタイプのクライオスタットによる最低温度の記録 0.72 K [14]をもつ実験装置を図 3 に示す。排気は、排気速度 15 L/s のポンプを用いて、直径 0.05 mm のオリフィスを通してなされた。この方法の主な欠点は、冷却パワーが小さいことである。このクライオスタットの場合、最低温度で $2 \mu\text{W}$ であった。

* 超流動フィルムが這い上がらないように薄い金属板に小さな穴をあけたもの。

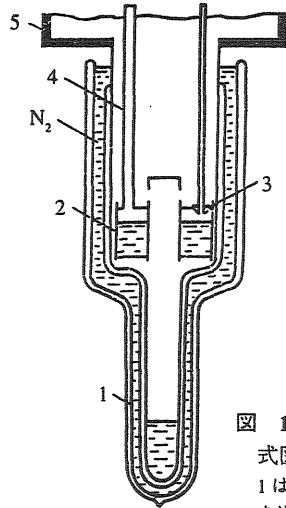


図 1 最低温度 0.734 K が得られた ^4He クライオスタットの模式図 [36]

1 はヘリウムデューワー, 2 は輻射シールド容器, 3 は容器 2 にヘリウムを注ぎ込むためのバルブ, 4 は容器 2 のポンピングパイプ, 5 は主デューワーのポンピングパイプ.

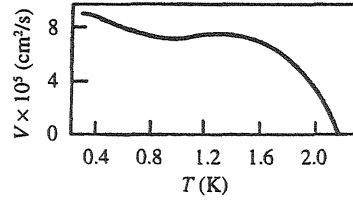


図 2 超流動フィルムの輸送速度の温度依存性 [26]

周囲長 1 cm に規格化されている.

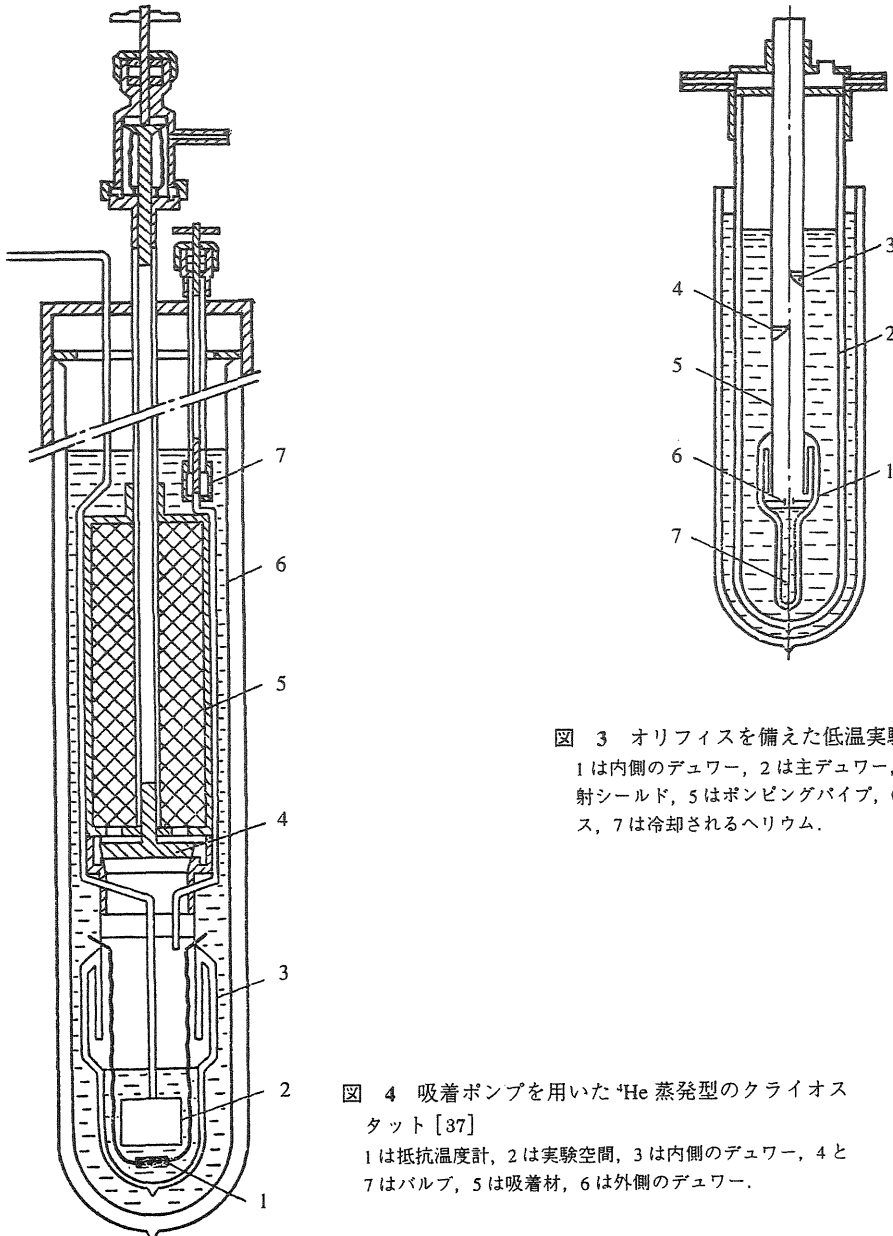


図 3 オリフィスを備えた低温実験装置 [14]

1 は内側のデューワー, 2 は主デューワー, 3 と 4 は輻射シールド, 5 はポンピングパイプ, 6 はオリフィス, 7 は冷却されるヘリウム.

図 4 吸着ポンプを用いた ^4He 蒸発型のクライオスタット [37]

1 は抵抗温度計, 2 は実験空間, 3 は内側のデューワー, 4 と 7 はバルブ, 5 は吸着材, 6 は外側のデューワー.

5. 吸着ポンプの使用

ポンピング方法を改良するために、吸着ポンプの使用が採用された。吸着材を用いてヘリウム蒸気をポンピングする方法は、1939年にZamenhof [15]によって最初に提案され、B.N. Eselson, B.G. Lazarev, A.D. Shvets [16]によって実現された。この方法は、コンパクトな装置を構成でき便利であるため、広く用いられている。

図4に、0.76 Kまでの温度を生成維持できる、活性炭吸着ポンプを用いたクライオスタットの模式図を示す。このクライオスタットの動作は次の通りである。液体ヘリウムを外側のデュワーに注入し、荒引きポンプを用いて温度が1.3~1.5 Kに下げられる。バルブ4を閉じ、バルブ7を通して必要な量のヘリウムを内側のデュワーに導入する。バルブ7を閉じ、バルブ4を開くことによって吸着材を用いてヘリウム蒸気をポンピングし、デュワー3と実験空間2の温度を下げる。温度は、抵抗温度計1で制御される。

クライオスタット中に吸着材を装備することにより、外部ポンプを必要としないコンパクトな構造が可能になる。その場合、ポンピングのためのパイプを短くできるばかりでなく、配管の温度が低いため蒸気の粘性が低下することも加わり、排気速度が増加する。排気速度は、多くの場合、吸着材の冷却条件および吸着熱の取り除きの条件によって決まる。その条件についてはあまりよく分かっていないが、ガスによる熱リークが重要な役割を果たすことが想像できる。これについては、ガスの圧力が吸着材の冷却速度に強く依存するという事実がある[17]。その研究結果を、図5に示す。明らかに、吸着材の装備の仕方が重要である（文献[18]を参照）。

吸着ポンプを用いて低温を得る場合に用いられる吸着材の性能を決定するのは、吸着能すなわち吸着材1 gあたりの吸着されたガス量（標準状態での体積、 cm^3 で表わす）である。この値は、吸着材の品質や、温度、圧力に依存して非常に大きく変わる。最も一般的な吸着材は、活性炭であるが、モレキュラーシーブやパラジウムシリカゲルも用いられる。温度4 Kおよび4.2 Kでのいろいろな吸着材の吸着等温線図を、図6に示す。温度範囲2~80 K、圧力範囲 $10^5 \sim 10^{-7}$ Paでの活性炭のデータを補間するために、次の式が提案されている[19]。

$$\log P = [153 \log(V_a + 112)](T^{-1} - 0.016) + \log V_a + 4.025 \quad (4)$$

活性炭の吸着能の温度依存性を図7に示す[19]。温度の増加による吸着能の大きな減少は、特に温度範囲10~30 Kで、活性炭を再生するのに利用できる。吸着材が25~30 Kに加熱されると、数%のヘリウムが吸着材の中に残るが、圧力は 10^2 Paを超えない。活性炭は、再生の後、4 K以下の温度範囲で吸着材として再び利用できる。

すべての吸着材の表面は多孔質である。そのため吸着熱は吸着されたガスの量に強く依存する（図8を参照）。これらのデータは次の依存性によって表わされる。

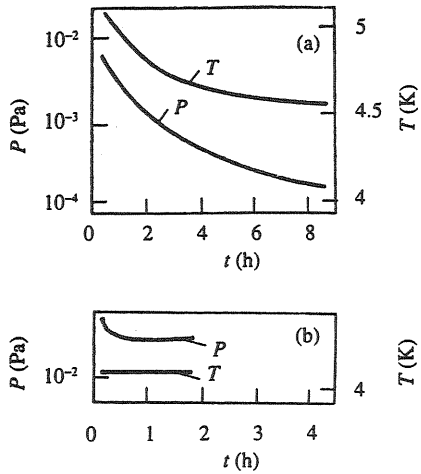


図 5 ^4He 蒸気圧とパラジウムシリカゲルの温度の時間変化 [17]
 吸着されたガス量は a: $57 \text{ cm}^3/\text{g}$, b: $158 \text{ cm}^3/\text{g}$ である。ヘリウムバスの温度は 4.2 K である。

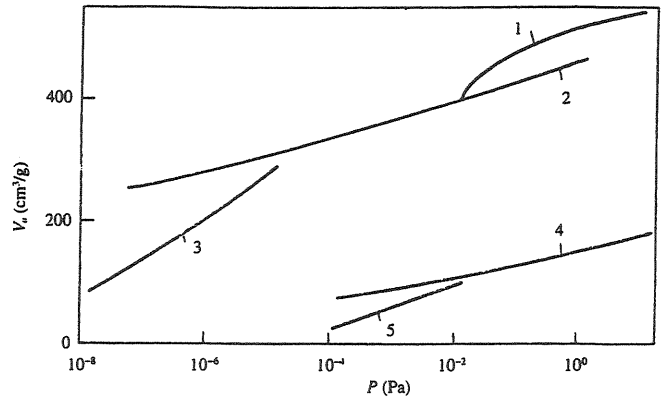


図 6 吸着材の吸着等温線
 1 は活性炭 Saran で $T=4.2 \text{ K}$ [20], 2 は活性炭 Supersorbon で $T=4 \text{ K}$ [19], 3 はモレキュラーシーブ 5A で $T=4.2 \text{ K}$ [38], 4 はパラジウムシリカゲルで $T=4.2 \text{ K}$ [20], 5 は活性炭 BAU で $T=4.2 \text{ K}$ [39]。

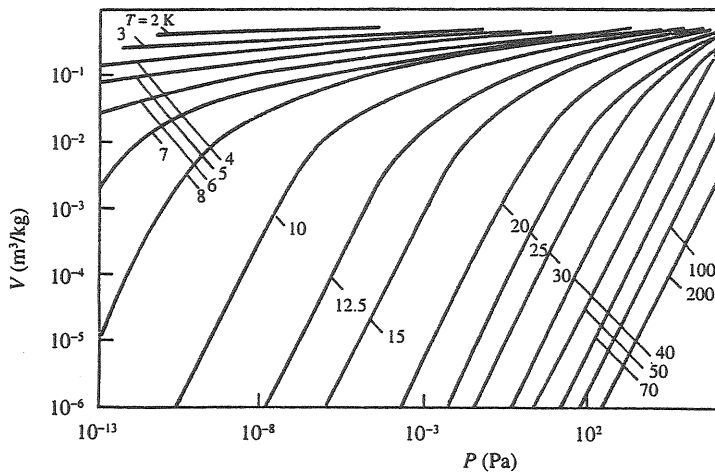


図 7 活性炭の吸着等温線 [19]

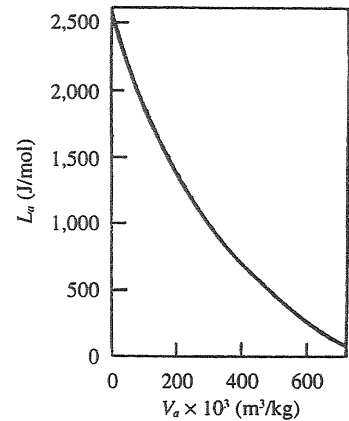


図 8 活性炭の吸着熱対吸着量の関係 [19]

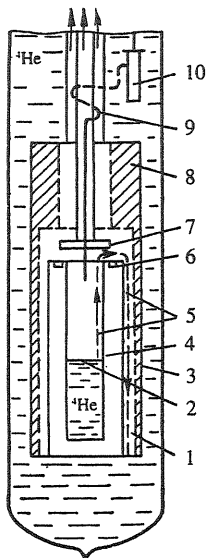


図 9 0.5 K が得られた実験装置の模式図 [40]
 1 は銅容器の底部, 2 は液体ヘリウム表面, 3 は銅容器, 4 は ^4He デューワー, 5 は超流動フィルムの移動経路, 6 はインジウムシール, 7 は真空バルブ, 8 は吸着材, 9 はヘリウム注入キャピラリー, 10 はバルブ。

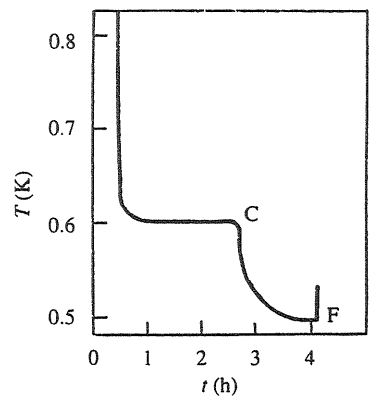


図 10 吸着ポンピング開始後のヘリウム温度の時間変化 [40]

$$L_a = 8600 - 2920 \log(V_a + 112) . \quad (5)$$

ここで、 L_a は吸着熱であり単位は J/mol である。文献[20]ではこの式に基づき吸着熱が計算されている。図 8 には吸着熱の研究結果[19]が示されている。 ^4He の吸着に関する他の情報が、文献[21]の研究に見られる。

^4He の吸着ポンピングを用いた冷凍機の構造の改良は、温度 0.7 K [22], 0.64 K [23], および 0.5 K [24] に到達する可能性を与えた。0.5 K に到達した装置[24]の模式図を図 9 に示す。この装置の利点は、容積 250 cm³ の内側のデュワーが、吸着ポンプのキャビティーの中に直接置かれ、それに加えて外部ポンプもいっしょに用いられている点である。この装置の動作原理は、前に述べたものと同様である。外部からの熱流入が無い場合について (図 9 を参照)、主バルブを開けた後の冷却過程の温度変化を、図 10 に示す。明らかに、点 C で急に温度が下がり、超流動フィルムがすべて蒸発したことを示している。この温度は消費電力 10⁻⁹ W のスピーア(Speer)抵抗温度計で測定された。同じく、温度対印加パワーの関係を図 11 に示す。温度 $T = 0.7$ K での冷却パワーは 10 mW であり、このときの排気速度は、室温で動作するポンプの排気速度 1 m³/s 以上に相当する。

これまでに述べた構造は、ワンショット型の動作を意図していた。低温を生成するための過程を繰り返すタイプの構造が作られた。そのような構造の模式図を図 12 に示す。吸着ポンプ 3 をクライオスタットの暖かい部分に持ち上げることによって、吸着材の再生が行われる。ここで吸着されたヘリウムは脱着され、外の 1.2 ~ 1.3 K のヘリウムによって冷やされたパイプの冷たい壁で凝縮され、デュワーに流れて戻り、冷却過程が繰り返される。活性炭を 15 g 用いたときの最低温度は 0.704 K であり、40 min 持続できた[25]。活性炭を持ち上げた後で、次の冷却過程の繰り返しを 20 min 以内に行うことができた。

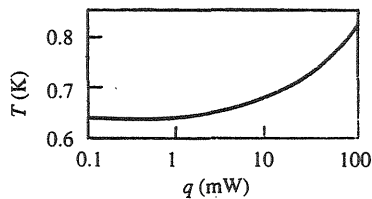


図 11 印加パワーに対するヘリウムの温度 [40]

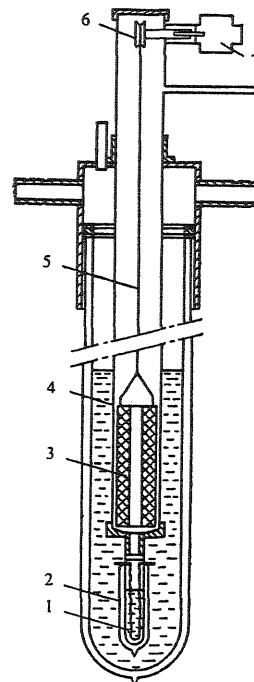


図 12 移動型吸着ポンプを装備したクライオスタットの模式図 [41]

1 はヒーター、2 は低温デュワー、3 は活性炭ポンプ、4 は直径 35 mm のパイプ、5 は吸着ポンプのサポート、6 はプリー、7 はモーター。

参考文献

1. D. Walton: ^3He cryostat for operation to 0.2 K, *Rev. Sci. Instr.* 37 (1966) 734-736.
2. H. Kamerlingh Onnes: Further experiments with liquid helium, On the lowest temperature yet obtained, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 15 (1922) No. 159.
3. B.P. Peshkov: Operedelenie skoposti btorogo zvyka v He II do 0.85 K, *JETP* 27 (1954) 351-354.
4. B.P. Peshkov: Dvoistva ^3He i ego rastvorov v ^4He , *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* 94 (1968) 607-640.
5. K. R. Atkins, M.H. Edwards, G.T. Rullan: Booster cryostat for temperature down to 0.74 K, *Rev. Sci. Instr.* 26 (1955) 49-50.
6. W.H. Keeson: A cryostat for temperatures below 1 K, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, (1929) No. 195.
7. W.H. Keeson: Experiments to decrease the limit of the temperatures obtained, *ibid* (1932) No. 219a
8. R.D. Maurer, M.A. Herlin: Second sound velocity in helium II, *Phys. Rev.* 76 (1949) 948-950.
9. P.L. Kaptza: Byazkosti jidkogo geliya pri temperaturakh nije T-lambda, *Doklady Akademii Nauk USSR*. 18 (1938) 21-23.
10. B.V. Rollin, F. Simon: On the "film" phenomenon of liquid helium II, *Physica* 4 (1939) 219-230.
11. B.S. Blaisse, A.H. Cooke, R.A. Hull: On the attainment of low temperature by pumping liquid helium II, *Physica* 6 (1939) 231-239.
12. R. Khefer: *Kriovakuumnaya Tekhnika*, M.: Energoatomizdat, (1983) 45 s.
13. A.H. Cooke, R.A. Hull: Experiments on pumping liquid helium to low temperatures, *Nature* 143 (1939) 799-800.
14. B.G. Lazarev, B.N. Eselson: Pribor dlya polucheniya temperatur nije 0.8 K, *JETP* 12 (1942) 549-552.
15. S. Zamenhof: On the production of high vacua for obtaining low temperatures, *Physica* 6 (1939) 47-48.
16. B.N. Eselson, B.G. Lazarev, A.D. Shvets: Polyuchnie temperatur nije 1 K otkachkoi parob jidkogo geliya adsorbtsionnmi nasosami, *PTE* (1961) No. 5, S. 160-161.
17. V.P. Babiitsyak, L.S. Dikina, B.N. Eselson *et al.*: Adsorbtsiya geliya palladirobannim silikagelem pri nizkikh temperaturakh, *Tam je* (1968) S. 223-230.
18. R.G. Amantsyan, S.T. Boldarev, P.P. Kalutin *et al.*: Refrigerator ^3He - ^4He promshlennogo izgotovleniya, *LT-21:XXI Bsesoyuz. sovesh. po fizike nizkikh temperatur: Tez. dokl.* (Kharkov, p. 23-26, 1980), *Fiziko-Tekhnicheskii Institut Nizkikh Temperatur Akademii Nauk USSR Kharkov*, (1980) 224-225.
19. P. Roubeau, G. der Nigohossian, D. Avenel: Adsorption de l'helium 4 par le carbon actif, *Colloque International "Le vide et le froid"*, Grenoble, 1969, p. 49-55.
20. J.R. Darey, M.H. Edwards: Adsorption of helium four on Saran charcoal at temperatures below 5 K, *Can. J. Phys.* 42 (1952) 241-250.
21. L.P. Seliverstova, V.S. Kogan, K.G. Breslavets: Adsorbtsiya geliya na razlicheskikh adsorbentakh pri nizkikh temperaturakh, *Kharkov*, 1983, 43 s. (Preprint / *Kharkov Fiziko-Tekhnicheskii Institut*, No. 83-6)
22. A.G. Voloshkevich, V.A. Moiseenko: A cryostat for reaching 0.7 K by pumping ^4He with adsorption pump, *Cryogenics* 13 (1973) 247.
23. J.M. Goldschwartz, W.P. van der Merwe, A. Kollen: Reaching a temperature of 0.64 K in an ^4He cryostat with a new geometry, *Cryogenics* 15 (1975) 153-154.
24. J.M. Goldschwartz, W.P. van der Merwe: Temperatures of 0.5 K obtained by pumping ^4He , *Cryogenics* 16 (1976) 615-616.

25. P.F. Koshlev: Mekhanicheskie svoistva splavov dlya kriogennoi tekhniki: Sprav. posobie. – M. : Mashinostroenie, 1971. – p. 367.
26. B.N. Eselson, V.N. Grigor'ev, V.G. Ivantsov, *et al.*: Svoistva hidkogo i tverdogo geliya, – M. : Izd-vo standartov, 1978. – P. 128.
27. H. Dijkvan, M. Durieux: Temperature scale in the liquid helium region, *Prog. Low Temp. Phys.*, Amsterdam, 1957, Pt. 11., p. 431-464.
28. E.C. Kerr, R.D. Taylor: The molar volume and expansion coefficient of liquid ^4He , *Ann. Phys. (New York)*, 26 (1964) 292-306.
29. J. Wilks: The property of liquid and solid helium, Oxford, Clarendon Press, 1962, p. 763.
30. W.E. Keller: Helium-3 and helium-4, New York, Plenum Press, 1969, p. 431.
31. S. Deshman: Nauchenie osnovi vakuumnoi tekhniki, – M. : Mir, 1964 – p. 716.
32. W.E. Keller: Pressure-volume isotherms of ^4He below 4.2 K, *Phys. Rev.* 100 (1954) 1790-1792.
33. V.V. Siychev, A.A. Vasserman, A.D. Kozlov *et al.*: Temprodinamicheskie svoistva geliya, M. Izd-vo standartov, 1984, p. 230.
34. E.W. Becker, R. Misenta, F. Schmeissner: Viscosity of gaseous ^3He and ^4He between 1.3 K and 4.2 K, *Phys. Rev.* 93 (1954) 244.
35. B.G. Keezom: Gellii, M. Izd-vo inostr. lit., 1949, p. 542.
36. K.R. Atkins, M.H. Edwards, G.T. Rullan: Booster cryostat for temperature down to 0.74 K, *Rev. Sci. Instr.* 26 (1955) 49-50.
37. B.N. Eselson, B.G. Ivantsov, A.D. Shvets: λ -tochka kontsentrirrovannykh rastvorov ^3He - ^4He , *JETP* 42 (1962) 944-947.
38. H.J. Halama, J.R. Aggus: 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. Techn.* 11 (1974) 333-336.
39. M.F. Feborova: Issledovanie fizicheskoi adsorbtsii i ee prakticheskoe primenenie, Kharkov, 1966, p. 19, (Preprint / Akademii Nauk USSR, Fiziko-Tekhnicheskii Institut).
40. J.M. Goldschwartz, W.P. van der Merwe: Temperature of 0.5 K obtained by pumping ^4He cryostat with a new geometry, *Cryogenics* 15 (1975) 153-154.
41. A.D. Shvets: Poluchenie temperatur nize 1 K metodom otkachki parov nad jidkim ^4He , *Pribory i Technika Eksperimenta* 1965, No. 5, p. 5-12.
42. E. Ambler, R.B. Dove: Continuously operating ^3He refrigerator for producing temperatures down to 1/4 K, *Rev. Sci. Instr.* 32 (1961) 737-739.
43. M.P. Malkov, I.G. Danilov, A.G. Zeldovits *et al.*: Sprabochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki, M. Energiya, 1973, p. 392.