

希釈冷凍(II)

矢山, 英樹
九州大学大学院理学研究院物理学部門

<https://doi.org/10.15017/14697>

出版情報 : 九州大学低温センターだより. 3, pp.30-38, 2009-03. 九州大学低温センター
バージョン :
権利関係 :

希釈冷凍 (II)

九州大学大学院 理学研究院 物理学部門 矢山英樹

本稿は希釈冷凍についての紹介であるが、分量が多いので分割して掲載する予定である。全体の構成は、次のとおりである。

(I) 1. 希釈冷凍の物理的原理 [九州大学低温センターだより No.2 に既掲載]

(II) 2. 混合器 3. スティル [本号に掲載]

(III) 4. 熱交換器 5. 1K ポット

(IV) 6. 希釈冷凍機の種類 7. 液体ヘリウムを用いない希釈冷凍機

(III)と(IV)は、次号以降に掲載予定である。

2. 混合器 (Mixing chamber)

定常運転状態における混合器の温度 T_m は、外から入ってくる熱量 \dot{Q}_m と戻ってくる ^3He が持ち込む熱量の和に依存する。混合器の温度 T_m は混合器での熱流のバランスを表す方程式を用いて次のように記述できる。

$$\dot{Q}_m + \dot{n}_3 [H_3(x_C, T_i) - H_3(x_C, T_m)] = \dot{n}_3 [H_3(x_D, T_m) - H_3(x_C, T_m)] \quad (2)$$

ここで、 \dot{n}_3 は ^3He の循環速度、 T_i は最終段の熱交換器から混合器に入ってくる濃厚相溶液の温度を表わす。式(2)は、上の相から下の相へ等温条件で ^3He が移動する際に吸収される熱量 (右辺) が、外から入ってくる熱量 \dot{Q}_m と ^3He を T_i から T_m へ冷却するために取り除くべき熱量 (左辺) を補償することを示している。この式では、循環しているガスは ^3He だけであると仮定し、混合器中の溶液の粘性によって発生する熱量については考慮していない。

式(2)に現れるエンタルピーの値を、図 3(a,b)に示す。また、 $H_3(x_D, T)$ と $H_3(x_D, T) - H_3(x_C, T)$ の値を、温度 T および濃度 x_D の関数として表 5 に示す。温度が 0.04 K 以下では、式(2)は 1%以内の誤差で次のように表わされる[1]。

$$\dot{Q}_m = \dot{n}_3 [H_3(x_D, T_m) - H_3(x_C, T_i)] = \dot{n}_3 (96T_m^2 - 12T_i^2) \quad (3)$$

もし、 $\dot{Q}_m = 0$ ならば $T_i/T_m = 2.8$ である。それはすなわち、熱流入がない場合には、連続的な運転によって得られる最低温度は、混合器に入ってくる濃厚溶液の温度の約 1/3 になることを示している。最低温度は、熱流入が制限されているときに得られる。もし、循環速度が与えられて、 $T_m = T_i$ ならば

$$(T_m)_{\min} = 0.11 \sqrt{\dot{Q}_m / \dot{n}_3} \quad (4)$$

である。これは、無限大の表面積をもった理想的な熱交換器を用いたときに到達可能な最低温度である (現実の熱交換器の場合、(4) 式は 4 節に示されるように修正されなければならない)。

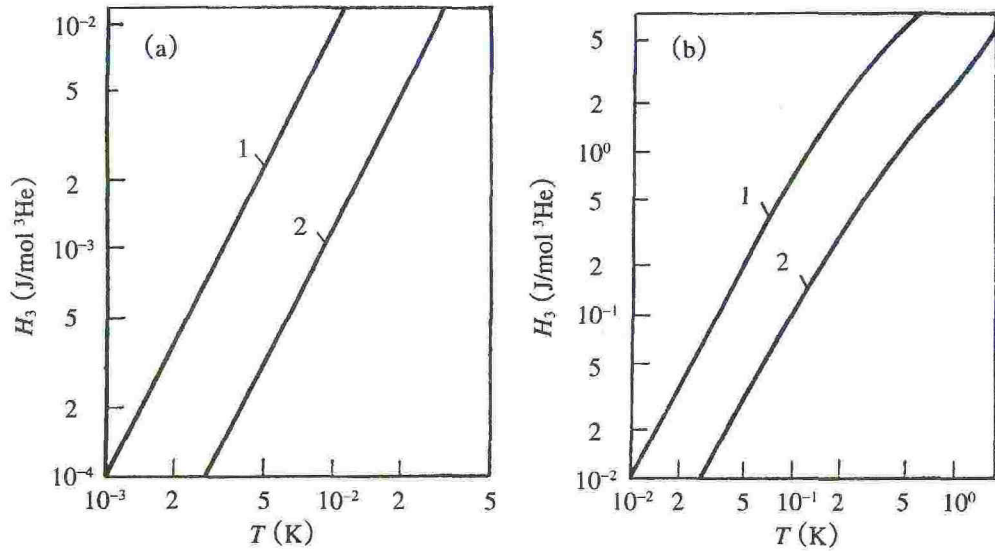


図 3 ${}^3\text{He}$ 1 モル当たりのエンタルピーの温度依存性 [1]. (a) は低温, (b) は高温の部分を表わす.

1 は D 相のエンタルピー $H_3(x_D, T)$, 2 は純粋な ${}^3\text{He}$ のエンタルピー $H_3(T)$.

現実の希釈冷凍機の場合, 循環溶液の中には, ${}^4\text{He}$ も ${}^3\text{He}$ 中に混じって存在している (10%以下). もし, 循環しているガスが 60%以上の ${}^3\text{He}$ を含んでいれば, 混合器の温度が混在する ${}^4\text{He}$ から受ける影響は非常に小さい. しかし, それは冷却能力を減少させることになる [1]. 循環している ${}^3\text{He}$ ガスへの ${}^4\text{He}$ ガスの混入は, 流れの中に超流動ブリッジを形成する. そして, それによって液体の分離が生じ, この分離によって発生した熱は, 熱交換器によって吸収されその温度が上昇する [2,3].

その他に, 混合器の温度に影響を与えるものとしては, 粘性発熱がある. これは, 循環している溶液がパイプの中を通るときに粘性により生じるものであり, 次式で表わされる熱の発生を伴う.

$$\dot{Q} = Z\eta\dot{V}^2 \quad (5)$$

ここで, η は粘性係数, \dot{V} は溶液の体積流速, Z は流体力学的流れの抵抗でありシステムの形状やパイプの直径および長さに依存する. すなわち,

$$Z = \frac{128l}{\pi d^4} \quad (6)$$

で表わされる. 粘性発熱による温度の増加は次の式によって計算される.

$$\Delta T = \frac{Z\eta\dot{V}^2}{\dot{n}_3 C} \quad (7)$$

ここで, C は溶液の熱容量である. 結果的に, (7)式では $\eta \sim T^2$ であり $C \sim T$ であるから $\Delta T \sim T^{-3}$ となる. すなわち, 粘性発熱の問題は, 最低温度付近で重要になる. 混合器内部の最低温度は, 粘性発熱によって制限される.

希釈冷凍機をワンショットで運転すると, 混合器からパイプを通して ${}^3\text{He}$ を取り除くときに熱が発生する. このとき, 溶液の熱容量は有限であるから, その熱が混合器の中に入ってくる. この場合, 最低温度は $T_{m0} = 4d^{-1/3} \text{ mK mm}^{1/3}$ である. すなわち, 出口のパイ

表 5 ${}^3\text{He}$ 1 モル当たりの希薄相のエントロピーとエンタルピーの値 [1].

T (K)	x_D	$H_3(x_D, T)$ (J/mol ${}^3\text{He}$)	$S_3(x_D, T)$ (J/K mol ${}^3\text{He}$)	$H_3(x_D, T)$ $- H_3(x_C, T)$ (J/mol ${}^3\text{He}$)
0.000	0.064000	0.0	0.0	0.0
0.001	0.064000	9.451×10^{-5}	0.10716	8.188×10^{-5}
0.002	0.064002	3.781×10^{-4}	0.2143	3.277×10^{-4}
0.004	0.064007	1.513×10^{-3}	0.4286	1.312×10^{-3}
0.006	0.064016	3.404×10^{-3}	0.6427	2.954×10^{-3}
0.008	0.064029	6.050×10^{-3}	0.8567	5.254×10^{-3}
0.010	0.064045	9.452×10^{-3}	1.0705	8.214×10^{-3}
0.015	0.06410	0.02125	1.604	0.01850
0.020	0.06418	0.03772	2.134	0.03288
0.025	0.06429	0.05881	2.660	0.05132
0.030	0.06443	0.08443	3.182	0.07377
0.035	0.06459	0.11448	3.697	0.10072
0.040	0.06480	0.14884	4.206	0.13028
0.045	0.06503	0.1873	4.705	0.1641
0.050	0.06530	0.2298	5.195	0.2014
0.060	0.06596	0.3257	6.141	0.2857
0.070	0.06680	0.4347	7.032	0.3813
0.080	0.06784	0.5549	7.867	0.4865
0.090	0.06906	0.6844	8.643	0.5995
0.10	0.07042	0.8213	9.362	0.7186
0.12	0.07361	1.1122	10.643	0.9699
0.14	0.07731	1.4190	11.739	1.2328
0.16	0.08157	1.736	12.670	1.502
0.18	0.08628	2.058	13.468	1.774
0.20	0.09144	2.383	14.154	2.046
0.25	0.10618	3.195	15.49	2.718
0.30	0.12363	3.988	16.43	3.364
0.35	0.14373	4.749	17.10	3.975
0.40	0.1665	5.471	17.59	4.541
0.45	0.1918	6.150	17.96	5.061
0.50	0.2201	6.732	18.22	5.478
0.55	0.2527	7.338	18.39	5.916
0.60	0.2908	7.810	18.46	6.216

プの直径が 1 mm であれば, 4 mK の温度が得られることを示している. 更に低温にするためには, T_{m0} の d 依存性は小さいから, 出口のパイプの直径を非常に大きくしなければならない[2,3].

より低温を得るために, 1 つの冷凍機に複数の混合器を用いることが考えられた[4, 5, 6, 7]. 混合器が 2 つの場合の模式図を図 4 に示す. 循環速度 \dot{n}_0 で温度 T_0 の戻ってきた液体が熱交換器から混合器へ入る. この液体の一部が循環速度 \dot{n}_1 で第 1 の混合器 (MC1) で希釈され, インピーダンス Z_1 のパイプを通して熱交換器へ戻る. 流れの残りの

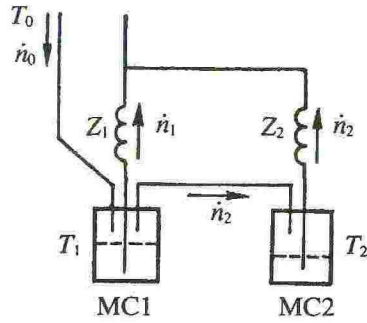


図 4 2つの混合器をもつ場合の模式図 [7].
MC1 は混合器 1, MC2 は混合器 2.

部分 \dot{n}_2 ($\dot{n}_1 + \dot{n}_2 = \dot{n}_0$) は, MC1 で前もって冷やされた後, 第 2 の混合器 (MC2) へ向かい, インピーダンス Z_2 のパイプを通して熱交換器へ戻る. 熱力学的解析によって, 最低温度にある混合器の温度はインピーダンスの比 Z_1/Z_2 と \dot{n}_0 の増加とともに減少することが分かる. この 2 つの混合器によって得られた最低温度は 2.8 mK である. この構造に用いられたインピーダンスの値は, $Z_1 = 2.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ および $Z_2 = 8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ である. 第 1 の混合器のパイプのパラメータは希薄相側が $l_{1D} = 14 \text{ cm}$, $d_{1D} = 0.6 \text{ cm}$ であり, 濃厚相側が $l_{1C} = 15 \text{ cm}$, $d_{1C} = 0.45 \text{ cm}$ である. 一方, 第 2 の混合器のパイプのパラメータは $l_{2D} = 8 \text{ cm}$, $d_{2D} = 0.85 \text{ cm}$ である. また, 両混合器をつなぐパイプのパラメータは, $l = 24 \text{ cm}$, $d = 0.61 \text{ cm}$ である. MC1 に入ってくる溶液の温度は循環速度 $\dot{n}_0 = 4 \times 10^{-4} \text{ mol s}^{-1}$ で $T_0 = 9.5 \text{ mK}$ である. このとき, 混合器への熱流入は粘性発熱を含めて $\dot{Q}_1 = 80 \text{ nW}$, $\dot{Q}_2 = 60 \text{ nW}$ である. この希釈冷凍機が, 1 つの混合器で到達できるのは 5.2 mK である. このように複数の混合器を有する希釈冷凍機は, 1 つしか混合器をもたない希釈冷凍機よりもより低温に達することができる可能性を与えた. しかし, 複数の混合器を有する冷凍機の冷凍パワーは混合器が 1 つの場合より低い.

冷凍機の連続的な運転のためには, 相境界が混合器の中にくるようにしなければならない. この相境界の位置は, 最初の溶液濃度 x_0 と, 混合器の容積 V_m , スティルの容積 V_s , およびそれらの温度 T_m , T_s で決まる. 溶液の濃度と総量は, 実際の装置についてのこれらのパラメータの下で, 相境界が混合器の中にくるように適当に調整されなければならない.

いま, n モルの溶液を考えると, 次式が成り立つ.

$$nV(x_0) = V_m + V_s = V_m(1+r) . \quad (8)$$

ここで, $r = V_s/V_m$ であり, $V(x_0)$ は x_0 の濃度をもつ溶液のモル体積である. このモル体積は濃度が $x_0 \leq 30\%$ の場合, 誤差 0.3% 以内で次式のように表わされる.

$$V(x_0) = 27.58 + 7.60x_0 + 1.65x_0^3 \quad (\text{cm}^3/\text{mol}) . \quad (9)$$

希釈冷凍機が動作を開始し, 相分離が起こったとしよう. この場合, 混合器内の一部が, 希薄相で占められる. 全混合器の容積とこの希薄相の体積の比を h_m とし, スティルの容積とスティル内の溶液の体積の比を h_s とする. もし, 熱交換器と凝縮器の容積が, V_s および V_m よりも小さければ, 液体 ^3He と全溶液の量を表わす条件式は次のように書くことができる.

$$\left(\frac{x_D}{V(x_D)} - \frac{c}{V(x_C)} \right) h_m + \frac{r x_s}{V(x_s)} h_s = \frac{(1+r)x_0}{V(x_0)} - \frac{x_C}{V(x_C)} \quad , \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{V(x_D)} - \frac{1}{V(x_C)} \right) h_m + \frac{r h_s}{V(x_s)} = \frac{1+r}{V(x_0)} - \frac{1}{V(x_C)} \quad . \quad (11)$$

希薄相の濃度 x_D と濃厚相の濃度 x_C の温度依存性を、表 2 と表 3 にそれぞれ示す。スティル中の溶液の濃度は、図 8 に示されるデータを用いて求められる。

h_s と h_m の値は式(10)と(11)から得られる。 h_s の温度依存性は小さい (1~5%)。相境界を決定する h_m の値を図 5 に示す。もし、 $h_m \leq 0$ ならば、混合器内は濃厚溶液のみが存在し、希釈冷凍機は動作しない。なぜなら、温度の低下と共に相境界が熱交換器またはスティルへ移動するからである。もし $h_m \geq 1$ ならば、混合器内には希薄溶液のみが存在するが、温度の低下と共に相境界は混合器内に入ってくるができる。最適値は、 $0 < h_m < 1$ であり、それは図 5 から求めることができる。

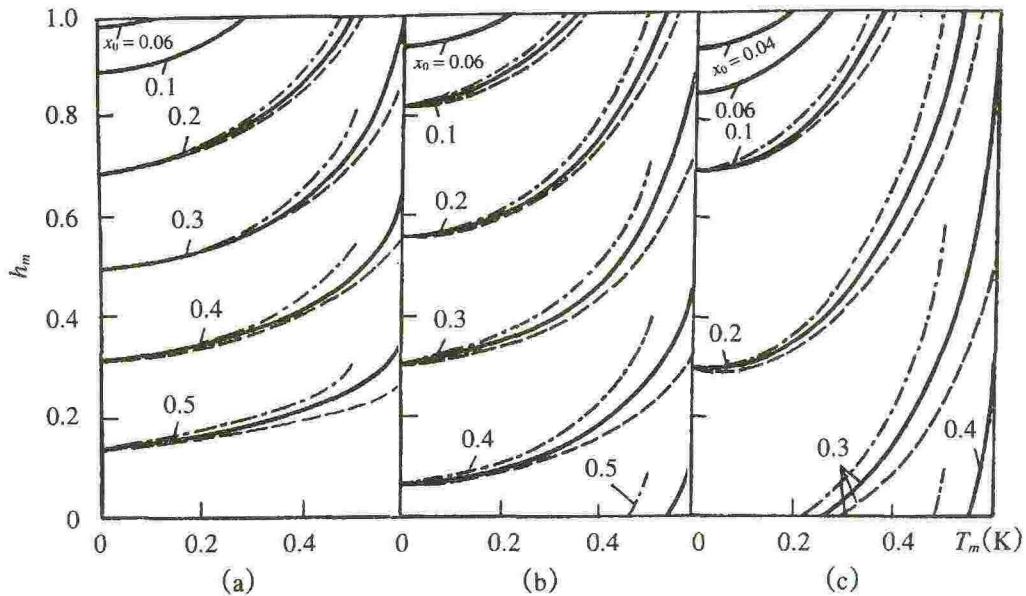


図 5 混合器温度をパラメータとして表わした、希薄溶液の比体積の温度依存性 [1].
(a) は $V_s/V_m = 0.5$, (b) は $V_s/V_m = 1$, (c) は $V_s/V_m = 2$. 一点鎖線は $T_s = 0.5$ K, 実線は $T_s = 0.6$ K, 破線は $T_s = 0.7$ K.

もし、熱交換器や凝縮器の容積が V_s および V_m に比べて無視できないときは、近似的に計算をすることができる。混合器の容積 V_m の代わりに修正した容積 V_m^* を用いる必要がある。 V_m^* の値は、 V_m の値はもちろん、凝縮器の容積、濃厚溶液が入っている側の熱交換器の容積、および希薄溶液が入っている側の熱交換器の容積の半分を加えたものすべてを含んでいる。スティルの容積を修正した V_s^* の値は、 V_s はもちろん、希薄溶液が入っている熱交換器の容積の半分を加えたものである。この場合、図 5 を用いて $r^* = V_s^*/V_m^*$ を定義することができる。しかし、そのときは h_m^* は別の値であることに注意しなければならない。例えば、 $V_s = V_m = 4 \text{ cm}^3$ の場合、熱交換器中の希薄相の体積は 3 cm^3 であり、凝縮器と熱交換器の濃厚相側の容積を合わせたものは 2 cm^3 である。そのとき、 $V_s^* = 5.5 \text{ cm}^3$, $V_m^* = 7.5 \text{ cm}^3$, $r^* = 0.73$ である。図 5(a) と図 5(b) のデータ間の補間をする必要がある。 $T_s = 0.6 \sim 0.7$ K,

$T_m = 0 \text{ K}$ の場合, $x_0 < 0.5$ にする必要がある ($h_m > 0$). $T_m = 0.6 \text{ K}$ の場合, $x_0 > 0.8$ にする必要がある ($h_m > 0$). $x_0 = 0.35 \sim 0.40$ にとるのが適当であり, 溶液の量を式(8)と(9)から見出すことができる.

混合器の構造は, 多くの種類がある. 研究の対象とする試料は混合器の内部の溶液中に浸すこともできるし, また, 実験セルとしてネジまたは特別なコネクターを用いて混合器に固定することもできる. 混合器を作る際の材料としては, 実験条件に応じてさまざまなものが用いられている. 通常は, ステンレス, 銅, またはエポキシ樹脂などである.

液体ヘリウムの研究のためには, 混合器の内部を実験空間とすることができる (図 6 を参照せよ). 混合器と実験セルとの接合は, ネジによって行われる. それらは, すべて銅で作られる. 速やかに熱平衡状態に到達するために, 混合器内の溶液と実験セルの間には, 銅粉でできた小さな熱交換器が用いられる. 混合器内の溶液の体積は 25 cm^3 である. 肉厚の厚い実験セルを用いると, 高圧の実験が可能である. このような実験セルは, インジウムシールを用いて開け閉めが簡単にできるようになっている.

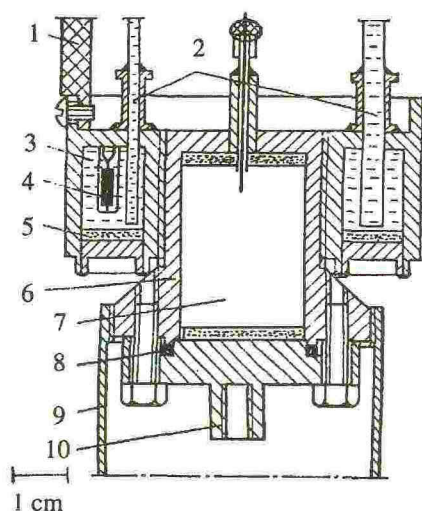


図 6 銅製の混合器の構造と簡単に着脱可能な実験ポット [8].

1 はサポート, 2 は希薄溶液と濃厚溶液のパイプ, 3 は混合器, 4 は抵抗温度計, 5 は焼結熱交換器, 6 はネジで着脱可能な実験ポット, 7 は実験空間, 8 はインジウムシール, 9 は輻射シールド, 10 は CMN 温度計のコネクター.

パワーの大きな希釈冷凍機の混合器は, 核断熱消磁の核ステージを冷却するのに用いられる (図 7 の模式図を参照せよ). 混合器には, グリセリンと石鹼を 50 : 50 に混ぜたシール剤を用いるエポキシ製のコーン型の擦り合わせ接合部が用いられている. 主接合部の直径は 30 mm である. 濃厚溶液および希薄溶液が出入りするのためのパイプとの接合部分は, 直径がそれぞれ 6 mm と 13 mm である. 混合器の全容積は 100 cm^3 であり, この容積の 80 % は希薄溶液で占められている. 銀粉製の熱交換器は, 銀線を束ねた熱伝導体につながれ核ステージから混合器へ熱を運ぶ. この混合器の下部は細くなって「フィンガー」と呼ばれている. そこには, NMR 温度計と振動ワイヤー粘性計が装備されており, 温度測定がなされる.

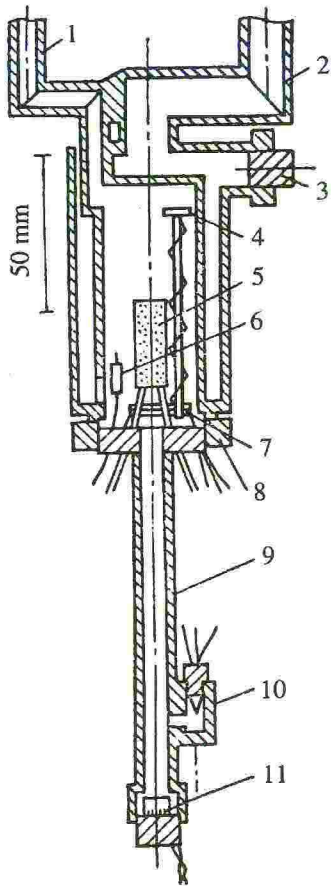


図 7 エポキシ製混合器の構造 [5].

1は濃厚溶液のパイプ, 2は希薄溶液のパイプ, 3は補助擦り合わせコネクター, 4はヒーター, 5は焼結銀熱交換器, 6は抵抗温度計, 7はCMN温度計とSQUID, 8は主擦り合わせコネクター, 9は「コールド・フィンガー」, 10は振動ワイヤー型粘性計, 11はプラチナNMR温度計.

3. スティール

スティールでは, 外からの侵入熱 \dot{Q}_s と, 戻ってくる ^3He が凝縮器の温度 T_c からスティールの温度 T_s まで冷却される際に持ち込む熱量とが, ^3He の蒸発によって吸収される熱量とバランスしている. 理想的な熱交換器の場合には, それは次式で表わされる.

$$\dot{Q}_s + \dot{n}_3 [H_3(x_C, T_c) - H_3(x_C, T_s)] = \dot{n}_3 L_{3D}(x_{D_s}, T_s) \quad (12)$$

ここで, $L_{3D}(x_{D_s}, T_s)$ は, 濃度 x_{D_s} , 温度 T_s での ^3He 1モル当りの蒸発潜熱を表わす. 式(12)を用いる際に必要な値, $H_3(T_c)$, $H_3(T_s)$ を図 3 に示す. スティール中の溶液の濃度 x_{D_s} は, T_s と T_m に依存する. ケミカルポテンシャル一定の場合の x_{D_s} の計算を図 8 に示す. もし, スティールの温度が 0.7 K であれば, ^3He 濃度は $x_{D_s} \approx 0.9\%$ である. 蒸発熱を循環速度で規格化したものを, スティールの温度の関数として図 9 に示す. このデータと式(12)を用いて, $\dot{n}_3 = 5 \times 10^{-5} \text{ mol/s}$, $T_c = 1.2 \text{ K}$, $T_s = 0.7 \text{ K}$ のとき $\dot{Q}_s = 1.2 \text{ mW}$ が得られる. すなわち, 外部からの侵入熱は十分吸収されることがわかる. 実際には, 必要な循環速度を維持するために, 通常, スティールに熱を供給して温度を確保する必要がある.

図 9 にはまた, 液体-気体ダイアグラムから計算されたガス中の ^3He 濃度も, T_m をパラメータとした T_s の関数として示されている. このグラフから, $T_s = 0.7 \text{ K}$ のとき ^3He 濃度は 97% であることがわかる. しかし, 実際にはこの濃度より小さくなる, なぜなら ^4He の超流動膜による輸送があるからである. 循環ガスの中に ^4He が混入すると, 冷凍機の冷

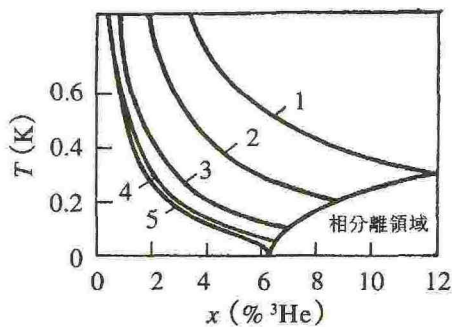


図 8 混合器の温度をパラメータとして表わした，希薄相濃度の温度依存性. $\mu_4 = \text{const}$ [1].
1: $T_m = 0.3$ K, 2: 0.2 K, 3: 0.1 K, 4: 0.05 K, 5: 0 K.

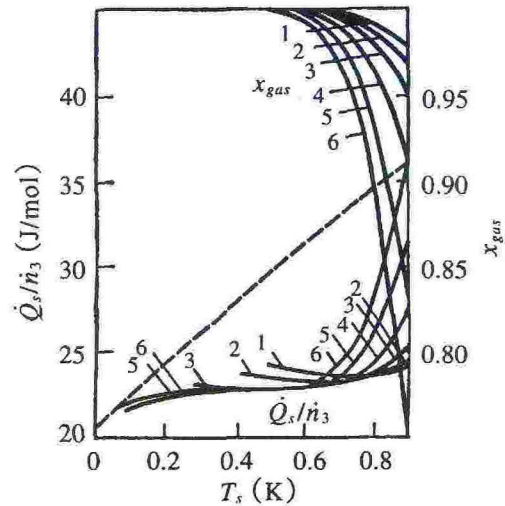


図 9 スティール温度に対する，スティール中の蒸発熱と蒸気中の ^3He 濃度. 超流動フィルムによる熱流入は無視して計算したもの [1].
1: $T_m = 0.5$ K, 2: 0.4 K, 3: 0.3 K, 4: 0.2 K, 5: 0.1 K, 6: 0 K, --- は純粋 ^3He の蒸発熱.

却能力が減少し動作が不安定になるため，この超流動膜を抑える必要がある．最も簡単な方法は，直径 0.5 ~ 2 mm の穴の空いたオリフィスと呼ばれるくびれをポンピングラインに入れることである．しかし，このオリフィスは ^3He に対しては十分に大きな循環速度を与えなければならない．超流動膜による ^4He の輸送を抑えるために，特別なスティール構造が考えられている．

スティール中の液体表面はヘリウムの蒸発速度を大きくするために十分広くなければならない．スティールの容積は，循環溶液の量と濃度，および冷凍機の他の部分のサイズに依存する (2 節を参照すること)．スパイラル熱交換器は，通常，銅のパイプをスティールの中に巻いて作られ，戻ってくる溶液を温度 T_s まで冷却する．この熱交換器のサイズはあまり重要ではない．通常，内径 0.3 ~ 1 mm，長さ 1 ~ 5 m である． ^3He がガスのままスティールの熱交換器にまで来るのはよくないので，これを防ぐため，スティールの熱交換器入り口近くにフローインピーダンスを設けて，凝縮温度よりも高い圧力差 ΔP をつける．もし，凝縮温度が $T_c = 1.1 \sim 1.2$ K ならば， $\Delta P > 4$ kPa であり，インピーダンス中の流れが層流であると仮定すれば，次の式が成り立つ．

$$\Delta P = Z\eta\dot{V} \quad (13)$$

温度 1.2 K では，粘性係数は 2.5×10^{-5} poise であり， ^3He に対して体積循環速度は $\dot{V} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ，モル循環速度 $5 \times 10^{-5} \text{ mol s}^{-1}$ である．この場合，流体力学的流れの抵抗は，式(13)から $Z \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ でなければならない．このような大きな値を得るには，通常，内径 0.2 ~ 0.5 mm のキャピラリーに，それとほぼ同じ外径の線を挿入したものが用いられる．抵抗値は実験的に決められる．すなわち，室温か液体窒素温度でガスを流して \dot{V} と P を測定し，ガスの粘性を考慮して式(13)を用いて Z を計算する．

スティールの構造の一例を，図 10 に示す．銅製のスティールの容積は 80 cm^3 である．銅の

熱交換器と表面積 315 cm^2 の銅チューブでできた循環溶液を冷却するための熱交換器がスチール中に置かれている。スチールは、超流動フィルムを蒸発させるための銅パイプとヒーターから成る超流動フィルムバーナーを装備している。これは、肉薄のステンレスパイプによってスチール本体とつながっている。銅パイプとステンレスパイプの隙間は 0.1 mm であり、そこでは熱い壁の上で超流動 ^4He 膜の蒸発が起こり、冷たい壁の上で凝縮が起こる。凝縮した液体は特別なパイプを通過してスチールに戻ってくる。温度計とヒーターは、スチールの外部に置かれている。

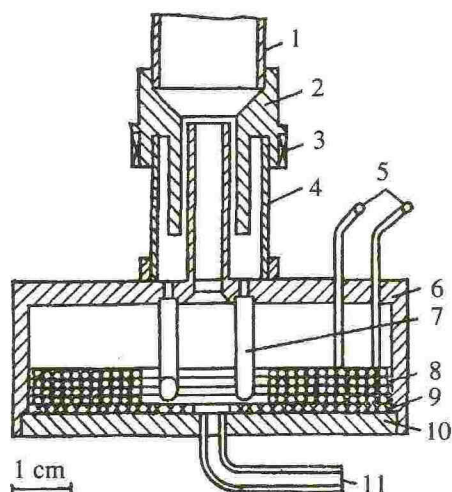


図 10 フィルムバーナーを備えたスチールの構造 [9].

1 はポンピングライン, 2 はフィルムバーナー, 3 はヒーター, 4 はステンレスパイプ, 5 は濃厚相の入口と出口のパイプ, 6 はスチール本体, 7 は凝縮した液体が流れ落ちるためのパイプ, 8 は戻っていく溶液の熱交換器, 9 は焼結熱交換器, 10 は下の蓋, 11 は希薄相の入口。

参考文献

- [1] Radebaugh R. Thermodynamic properties of ^3He - ^4He solutions with applications to the ^3He - ^4He dilution refrigerator, Nat. Bur. Stand. Techn., 1967, Notes 362, pp. 1-137.
- [2] Wheatley J.C., Rapp R.E., Johnson R.P., Principles and methods of dilution refrigeration II, J. Low Temp. Phys., 1971, vol. 4, No. 1, pp. 1-39.
- [3] Wheatley J.C., Vilches O.E., Abel W.R., Principles and methods of dilution refrigeration I, Physics, 1968, Vol. 4, No. 1, pp. 1-64.
- [4] De Waele A., Reekerc A., Gijsman H., Poclodnie dostigeniya v razrabotke kriostatov rastvoreniya (Russian), Kvantov'e jidkosti i kristall', M: Mir, 1979, pp. 322-334.
- [5] Breadley D.I., Gradshow T.W., Guenault A.M., A dilution refrigerator combining low base temperature high cooling power and low heat leak for use with nuclear cooling, Cryogenics, 1982, Vol. 22, No. 6, pp. 296-304.
- [6] De Waele A., Reekers A.B., Gijsman H.M., A ^3He circulating dilution refrigerator with two mixing chambers, Physica BC, 1976, Vol. 81, No. 2, pp. 323-324.
- [7] Frossati G., Hebral B., Schumacher G. *et al.*, Double mixing chamber system on dilution refrigerator, Cryogenics 1978, Vol. 18, No. 5, pp. 277-280.
- [8] Rudavskii E. Ya., Chazovets V.K., Prostoi refrigerator rastvoreniya dlya fizicheskikh issledovaniy (Russian), Tez. dokl. XXI Mejdunar. konf. stranchlenov SEV po fizike i tekhnike nizkikh temperatur, Sofiya, 1983, pp. 295-298.
- [9] Gohchrov V.A., Grizorbev V.N., Lukashov V.N. *et al.*, Moshnyi refrigerator rastvoreniya ^3He v ^4He (Russian), Kharkov, 1985, p. 10, (Preprint, AN USSR, FTINT; No. 10-85)