

1. はじめに

高エネルギー物理や核融合などの科学分野においては、超伝導電磁石や超伝導空洞などの超伝導機器が必須のものとなっている。現在までに実用化されている超伝導機器の運転温度は 1.8 K から 4.5 K の範囲にあり、計画中の加速器においても同様の運転温度が予定されている。超伝導機器をこれらの運転温度に保つためのヘリウム冷凍機も、その重要性を増している。また、2.2 K 以下の温度を実現するために、ヘリウムの液相の 1 つである超流動ヘリウム (He II) を使用した冷却システムも一般的になりつつある。

第 2 章ではヘリウム冷凍機についてその原理や特徴を簡単に紹介し、第 3 章では ERL など採用される超流動ヘリウムを用いた 2K 冷凍システムについて議論を行う。超伝導機器を使用する場合に必要なヘリウム冷凍機やヘリウム冷凍システム、あるいは、超流動ヘリウムなどはあまり馴染みのないものであったが、この簡単な解説によって多少なりとも身近なものとなり、興味を持っていただければ幸いである。

なお、ヘリウム冷凍機や超流動ヘリウムなどについて詳細に知りたい方のために、何冊かの教科書や解説レポートを参考文献に掲載しているので、参照されたい。

2. ヘリウム冷凍機

2.1. 液体ヘリウムによる冷却

超伝導空洞の材質として使用されているニオブ (niobium) の超伝導転移温度は 9.288 K、超伝導電磁石用の超伝導線材としてよく使われているニオブ-チタン (Nb-Ti) の転移温度は 9.5 K、ニオブ 3 スズ (Nb₃Sn) の転移温度は 18.3 K などである。実際に超伝導空洞や超伝導電磁石を加速器で使用する場合には、これらの物質の超伝導転移温度に近い温度ではなく、機器の発熱や外乱による温度変化に対する余裕を見込んで、

転移温度よりも低い温度で運転する。超伝導機器を冷却するのに一番簡単で単純な方法は、その運転温度 (operation temperature) で沸騰している液体の中にその機器を浸漬しておくことである。機器からの発熱はその周りの液体の蒸発により、蒸発潜熱 (latent heat of vaporization) として取り去ることが出来る。

超伝導空洞や超伝導電磁石の転移温度以下の温度で液体のままである物質は、ヘリウムしか存在しない。液体水素の温度は 13.8 K から 33.2 K までの範囲であり、ニオブやニオブ-チタンの超伝導転移温度よりも高い温度領域でしか液体ではない。ヘリウムは常圧 (すなわち大気圧) における沸点が 4.224 K であり、絶対零度でも圧力が高くなければ液体のままである。したがって、加速器で使用される超伝導機器の冷却には、もっぱら液体ヘリウムが使用される。以下の節ではヘリウムの液化とヘリウム冷凍機について述べる。

2.2. ジュール-トムソン効果と逆転温度

断熱されている絞り弁の狭い隙間や細孔栓を高圧のガスが通過して圧力が下がる場合、エンタルピー (Gibbs の熱関数) h は変化せず、保存される。この変化を「等エンタルピー膨張」 (isenthalpic expansion)、または、「ジュール-トムソン膨張」 (Joule-Thomson expansion) という。ガスの温度を T 、圧力を P 、体積を V 、定圧比熱を c_p とすると、

$$\begin{aligned}\mu &= \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \\ &= \frac{V}{c_p} (\alpha T - 1)\end{aligned}\tag{2-1}$$

で定義される μ を「ジュール-トムソン係数」という。ここに、 α は体積膨張率 (coefficient of cubical expansion) で、理想気体 (ideal gas) の場合には $\alpha T = 1$ である。したがって、理想気体の場合には等エンタルピー膨張を行っても温度は変化しない。式 (2-1) より、 $\mu > 0$ の場合には

等エンタルピー膨張によって温度も降下するが、 $\mu < 0$ の場合には、逆に等エンタルピー膨張によって温度が上昇する。このような等エンタルピー膨張による温度の変化を「ジュール・トムソン効果」(Joule-Thomson effect) という。ジュール・トムソン係数が $\mu = 0$ となる温度を「逆転温度」(inversion temperature)、逆転温度と圧力の関係を示す曲線を「逆転曲線」(inversion curve) という。ヘリウムの逆転曲線を Fig. 1 に示す。逆転曲線の内側（曲線の低圧側）が $\mu > 0$ の領域で、等エンタルピー膨張によって温度が下がる。このジュール・トムソン効果を利用するための弁が「ジュール・トムソン弁」(Joule-Thomson valve) であり、気体を液化する際に使用されている。

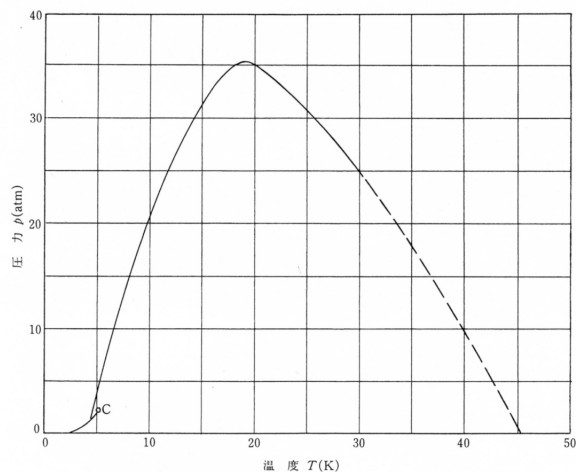


Fig. 1 ヘリウムの逆転曲線

窒素の最高逆転温度は 623 K、酸素は 761 K で、室温で既に逆転温度よりも低い温度であるので、これらの物質を室温で等エンタルピー膨張をさせると温度が低下する。炭酸ガス（つまり、気体の二酸化炭素）を高圧のボンベから大気中へ吹き出させて膨張させるとドライアイス（炭酸ガスの固体）ができるのは、このジュール・トムソン効果によって温度が降下するためである。因みに、液体にならないのは固体の蒸気圧が高いため、二酸化炭素は大気圧では固体または気体としてしか存在しないためである。

一方、水素の最高逆転温度は 202 K、ヘリウムは 43 K であり、室温では逆転温度よりも高い温度になっているので、等エンタルピー膨張をさせると、逆に温度が上昇してしまう。ヘリウムの最高逆転温度は他の気体に比べてかなり低いために一番最後まで液化することが困難であった物質であり、永久ガスと呼ばれた。したがって、ヘリウムを液化するためには、何らかの方法で高圧のヘリウムガスの温度を逆転温度まで下げ、最終的にジュール・トムソン弁による等エンタルピー膨張をさせて液化する必要がある。

逆転温度は、Fig. 2 に示すような縦軸に温度 T、横軸にエントロピー S を取った T-S（温度-エントロピー）線図において、等エンタルピー曲線 (isenthalp) がエントロピーの増加によって右上がり（すなわち温度が上昇する）か、右下がり（すなわち温度が下降する）かの境界に対応している。Fig. 3(a)に、ヘリウムの T-S 線図の高温（100 K 以上）部分を示す。等エンタルピー曲線がエントロピーの増加とともに右上がりになっており、温度が上昇することを表している。中温度（50 K から 100 K）および低温（50 K 以下）での各 T-S 線図を、それぞれ Fig. 3(b) および Fig. 3(c) に示す。温度が低くなるにつれて、等エンタルピー曲線のエントロピーに対する変化が右上がりから横軸に平行になり、やがて右下がりとなって、等エンタルピー膨張によって温度が下がるようになることが理解できる。

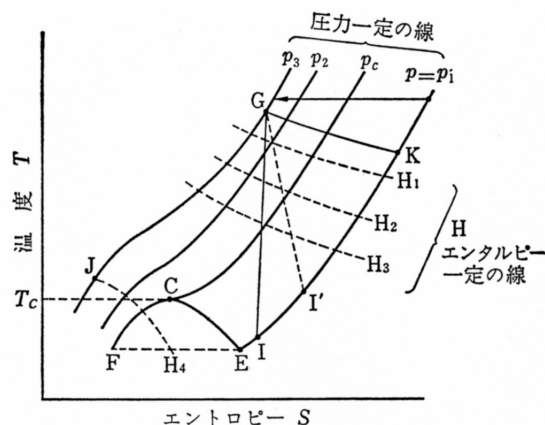
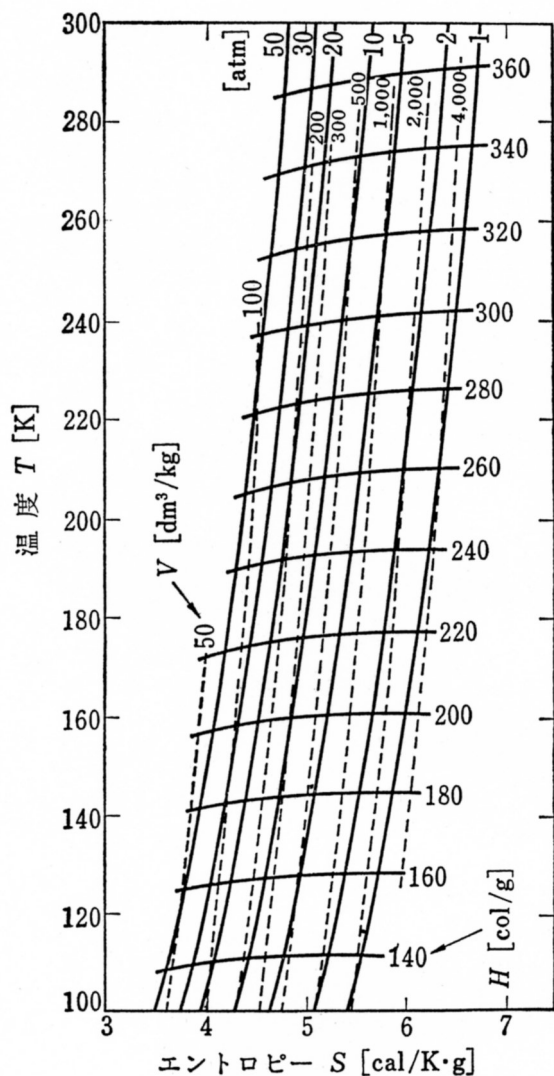
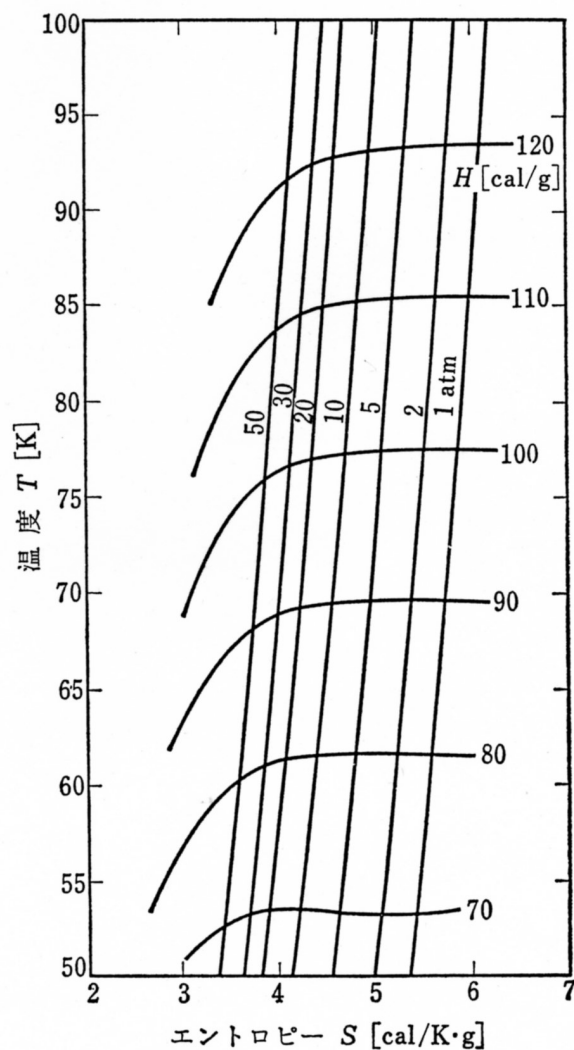


Fig. 2 温度-エントロピー (T-S) 線図



(a) 高 温 度

Fig. 3(a) 高温度でのヘリウムの T-S 線図



(b) 中 温 度

Fig. 3(b) 中温度でのヘリウムの T-S 線図

2.3. ヘリウムの液化

さて、逆転温度を調べる際に使用した物質の T-S 線図には、その物質の液化に関する様々な情報も含まれている。物質の「臨界点」(critical point) とは、その臨界点以上の温度においては、いかなる圧力をもってしてもその物質が液化しない状態を示すが、この点は T-S 線図では「ドーム」と呼ばれる気液二相共存状態範囲の頂点に対応する (Fig. 2 参照)。また、このドームよりもエントロピーが小さい範囲 (T-S 線図ではドームの左側) がその物質の液相、ドームよ

りもエントロピーが大きい範囲 (ドームの右側) が気相に対応する。したがって、T-S 線図上の等エンタルピー線がドームの内部を通るような条件で断熱自由膨張 (すなわち等エンタルピー膨張) をさせなければ、その物質の液化が起こらないことが分かる。その境界のエンタルピーの値がちょうど臨界点を通る等エンタルピー線の値であり、これより大きなエンタルピーでは、温度が逆転温度よりも低くても、液化は起こらない。

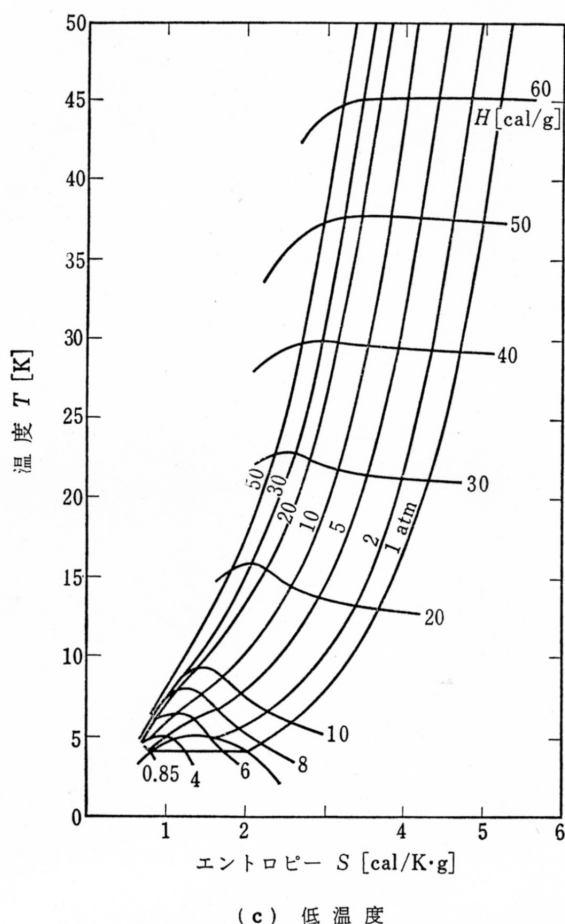


Fig. 3(c) 低温度でのヘリウムの T-S 線図

ジュール・トムソン弁の入口温度（すなわち、等エンタルピー膨張を開始する温度）による液化率の違いを示したのが Fig. 4 である。等エンタルピー膨張を開始する温度が 4.2 K の場合、1.8 K (1.6 kPa) まで膨張させた場合の液化率は 62 % 程度であるが、膨張開始温度を 2.2 K まで下げると液化率は 89 % まで上昇する。このように、ジュール・トムソン弁の入口温度を出来る限り低くするようにすることによって、液化率を向上させ、ヘリウム冷凍液化機の効率を大きくすることが出来る。しかしながら、逆に言えば、例えば熱交換器の性能が十分でなく、ジュール・トムソン弁の入口温度が 4.2 K のままであっても 60 % 程度の液化率は確保できることを示しており、ジュール・トムソン効果それ自体がヘリウムの液化に大きな役割を果たしていることが分かる。

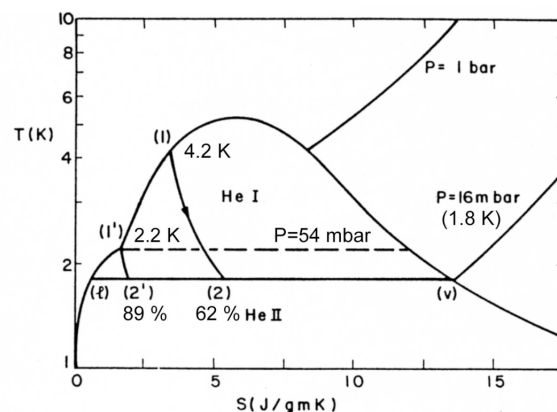


Fig. 4 J-T 弁入口温度による液化率の違い

2.4. ヘリウム冷凍機の熱力学

「冷凍機」 (refrigerator) は熱機関 (heat engine) の一種である。熱機関は高熱源から熱を吸収してその一部を外部への仕事として取り出し、低熱源に残りの熱を放出する。一方、冷凍機は外部から仕事を与えて低熱源から熱を吸収し、高熱源へ熱を放出する。

今、Fig. 5 に示すように、低熱源の温度を T_L 、高熱源の温度を T_H とし、外部からこのサイクルに与える仕事 W_R によって低熱源から吸収する熱を Q_L とすると、高熱源へ放出する熱 Q_H は熱力学第 1 法則 (エネルギー保存則) より

$$Q_H = Q_L + W_R \quad (2-2)$$

となる。また、熱力学第 2 法則 (クラウジウスの原理) より

$$\frac{Q_H}{T_H} \geq \frac{Q_L}{T_L} \quad (2-3)$$

の関係が与えられる。この式で、可逆過程の場合には等式、不可逆過程の場合には不等式となる。式 (2-3) を式 (2-2) に代入すると

$$W_R \geq Q_L \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right) \quad (2-4)$$

式 (2-4) 右辺の

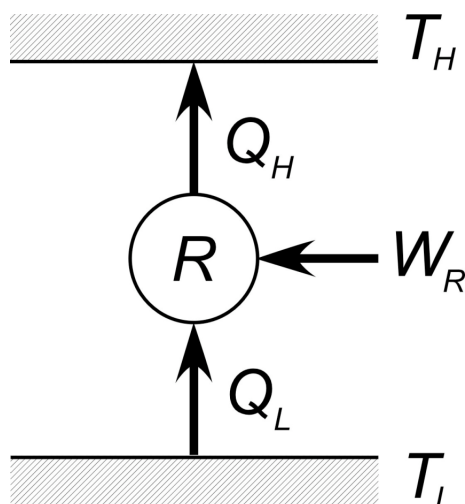


Fig. 5 冷凍サイクル

$$\frac{T_H}{T_L} - 1 \quad (2-5)$$

を「カルノー係数」(Carnot factor)という。

2.5. 可逆カルノーサイクル

「カルノーサイクル」(Carnot cycle)は、等温圧縮と等温膨張の2つの等温変化と、断熱(等エントロピー)圧縮と断熱(等エントロピー)膨張の2つの断熱変化で構成されるサイクルであり、このサイクルでの変化は準静的(quasi-static)で、作業物質は常に平衡状態(equilibrium state)にあり、容器の熱伝導や摩擦などがない理想的なサイクルとする。カルノーサイクルは準静的なサイクルと仮定してるので、このサイクルを逆に操作することができ、これを逆カルノーサイクルという。また、このように逆サイクルを行えるような熱機関を「可逆機関」(reversible engine)という。実際の熱機関では熱伝導や摩擦などの熱損失があり、作業物質の変化も準静的ではなく、また、必ずしも平衡状態にはないため、サイクルを逆に操作しても逆サイクルとはならない。このような熱機関を「不可逆機関」(irreversible engine)という。

ここで、理想的な冷凍機が逆カルノーサイクルで作動していると仮定し、高熱源の温度を室

温(300 K)、低熱源の温度を4.5 Kとする。通常のヘリウム冷凍機では、熱交換器や配管での圧力損失を考慮して大気圧よりも若干高い圧力で運転する場合が多いので、一例として運転圧力を0.13 MPaとすると、飽和蒸気圧が0.13 MPaであるヘリウムの温度が4.5 Kとなる。運転圧力が0.12 MPaの場合には、液体ヘリウムの温度は4.4 Kになる。4.5 Kで1 Wの熱を吸収するために必要な最小仕事は、式(2-4)より65.7 Wとなる。このように、低熱源から吸収する熱 Q_L とそのために必要な仕事 W_R の比を「成績係数」(coefficient of performance)といい、英語表記の略語COPがそのまま使用されることが多い。

$$\begin{aligned} COP &= \frac{Q_L}{W_R} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \\ &= \frac{T_L}{T_H - T_L}. \end{aligned} \quad (2-6)$$

低熱源の温度が4.5 K、高熱源の温度を300 KとしてCOPを計算すると0.015となり、式(2-5)のカルノー係数の逆数となる。

カルノーサイクル以外の可逆サイクルを考えたとしても、高熱源の温度と低熱源の温度がそれぞれ同じであれば、これらの値は変わらない。実際の冷凍サイクルの効率は、理想的な逆カルノーサイクルの効率に対する百分率で表すことが多いが(「%カルノー」という)、良く設計された冷凍機で約30%である。したがって、実際に4.5 Kで1 Wの熱を吸収するために必要な仕事は約220 Wとなる。

2.6. 実際のヘリウム液化サイクル

ここで、実際に使用されているヘリウム液化サイクルについて述べる。ヘリウムを液化するために必要な外部からの仕事を最小にするためには、前述のようなカルノーサイクルが実現できればよい。カルノーサイクルは、T-S線図上では長方形で表される。ヘリウムを液化するためには、このT-S線図上に描かれた長方形の底辺が二相共存状態であるドームと交差しなければ

ならない。前述の温度条件を当てはめて描いたカルノーサイクルを Fig. 6 に示す。この図から、ヘリウムを液化するためには、4.5 K で 1.3 気圧のヘリウムガスを室温で 8 万 2 千気圧まで断熱圧縮 (adiabatic compression) し、さらに 61 万 3 千気圧まで等温圧縮 (isothermal compression) しなければならない。これは現実には不可能である。

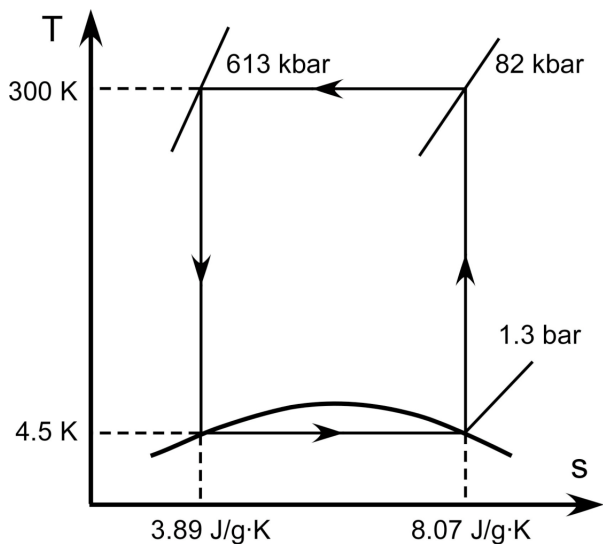


Fig. 6 カルノーサイクルによる液化

実際のヘリウム液化機では、Fig. 7 に示しているような「熱交換器」 (heat exchanger) での等圧変化 (isobar process) や「膨張エンジン」 (expansion engine) による断熱仕事膨張、ジュール・トムソン弁での等エンタルピー膨張 (断熱自由膨張) などの変化を組み合わせることで液化冷凍サイクルを形成している。もっとも単純な液化機 (または冷凍機) は、Fig. 8 に示すジュール・トムソン液化機で、その T-S 線図を Fig. 9 に示す。室温のヘリウムガスを圧縮機で等温圧縮して、熱交換器で高圧を保ったまま冷却し、最終的にジュール・トムソン弁で等エンタルピー膨張して一部が液化する。液化しなかった残りのガスは冷たいガスとして熱交換器の戻り側に入って暖まり、最初の状態に戻る。この方法は非常に簡単であるが、ジュール・トムソン弁の入口で、ヘリウムガスの温度がヘリウムの逆転温度以下

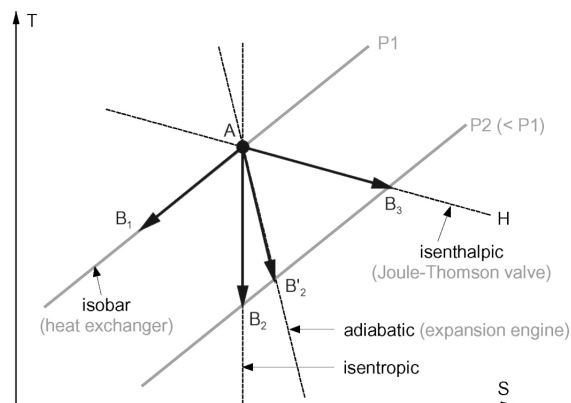


Fig. 7 種々の熱力学的過程

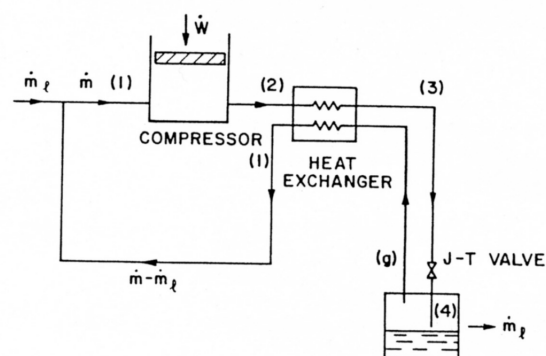


Fig. 8 ジュール・トムソン液化機

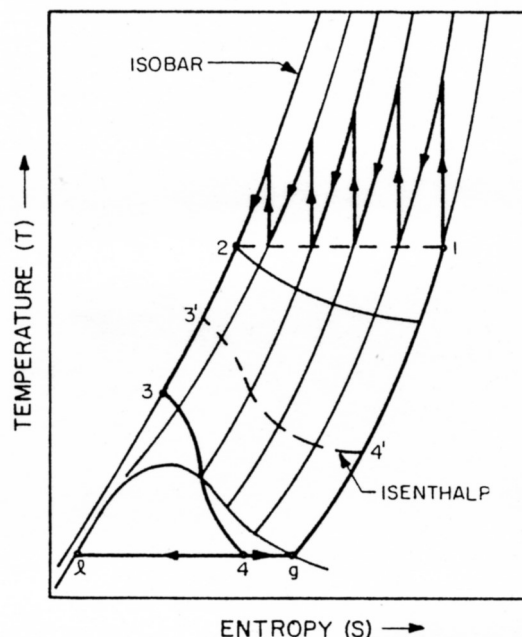


Fig. 9 ジュール・トムソン液化機の T-S 線図

になっている必要がある。クロード液化機 (Claude liquefier) は実際に使用されている最も一般的な液化機で、そのフロー図と T-S 線図をそれぞれ Fig. 10 と Fig. 11 に示す。ジュールトムソン弁入口のヘリウムガスの温度が逆転温度以下になるように、膨張エンジンを導入している。さらに、ヘリウム冷凍液化機の効率を上げるために膨張エンジンを複数にしたり、予冷のために液体窒素による熱交換器を用いるなどの工夫がなされている。

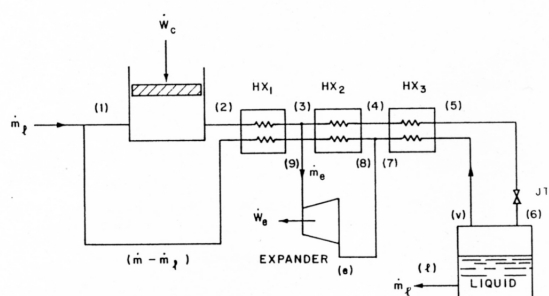


Fig. 10 クロード液化機

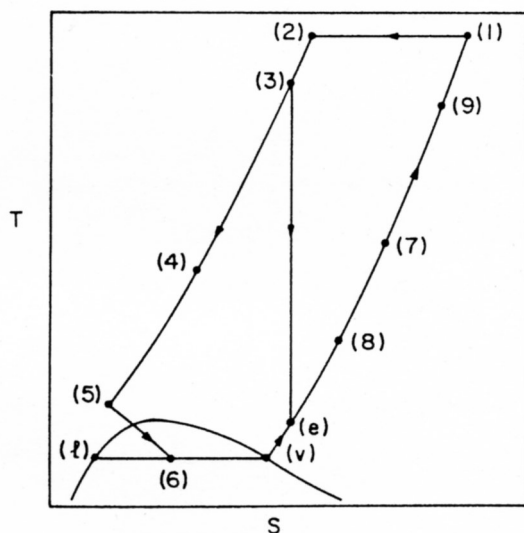


Fig. 11 クロード液化機の T-S 線図

2.7. 冷凍機と液化機

しばしば「冷凍機」(refrigerator) という言葉と「液化機」(liquefier) という言葉が同時あるいは混在して使われることがあるが、両者は装置

としてはほぼ同じものである。したがって、同一の装置が、ある場合には冷凍機として使用され、それ以外の場合には液化機として使われることがある。その装置の冷凍機としての能力は、前述の通り、ある温度の低熱源からどれだけの熱を吸収できるかで表され、例えば「冷凍能力 600 W at 4.5 K」のように表示される。一方、液化機としての能力は、単位時間にどれだけの液を生成できるかで表され、「液化能力 250 L/h」のように表示される。冷凍機と液化機の違いは、Fig. 12 に図示してあるように、液化機では液化した物質を外部へ取り出し、室温のガスとして戻ってくるが、冷凍機の場合は液化した物質が冷却対象物から熱を奪って蒸発し、沸点温度に近い温度のガスとして戻ってくる。したがって、液化機では、戻ってきたガスを室温から温度を下げて再液化する必要があるが、冷凍機の場合には蒸発した冷たいガスが戻ってくるために、熱交換器などを使用して、その冷たいガスのエンタルピーを利用できる (Fig. 13 参照)。

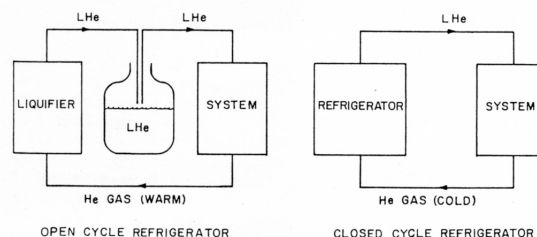


Fig. 12 液化機と冷凍機

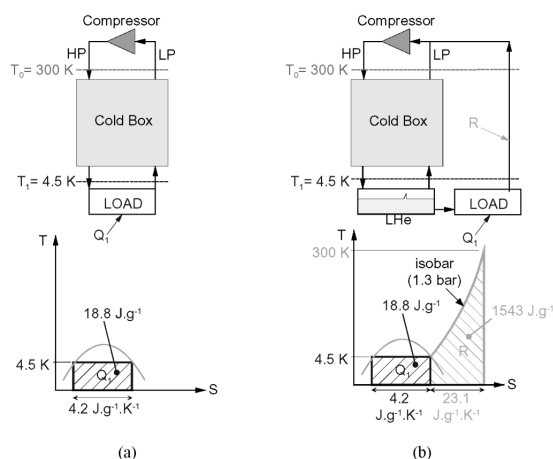


Fig. 13 液化機と冷凍機の熱収支

Fig. 14 は、ヘリウムと窒素、ノーマル水素の蒸発潜熱と顕熱 (sensible heat) を液体 1 L 当たりで示したものである。窒素の場合、蒸発潜熱（黒丸でのエンタルピー）と顕熱（黒丸から 300 K までのエンタルピー差）はほぼ同じ大きさであるが、ヘリウムの場合には、顕熱に比べて蒸発潜熱は非常に小さい。ヘリウム液化機の場合、液体ヘリウムを外部へ取り出し、外部から室温のガスとして戻ってくるため、ヘリウムの顕熱を回収できない。冷凍機の場合には、この顕熱も熱交換器によって回収することが出来る。ヘリウムの場合、4.2 K における蒸発潜熱が約 20 kJ/kg と小さいため、1 L/h で供給される液体ヘリウムが気化して得られる冷凍能力は約 0.7 W にしかない。良く設計されたヘリウム冷凍液化機では、おおよそ 1 L/h の液化能力が約 3 W の冷凍能力に対応している。したがって、蒸発したガスの寒冷（エンタルピー）をいかに回収するかが重要となる。

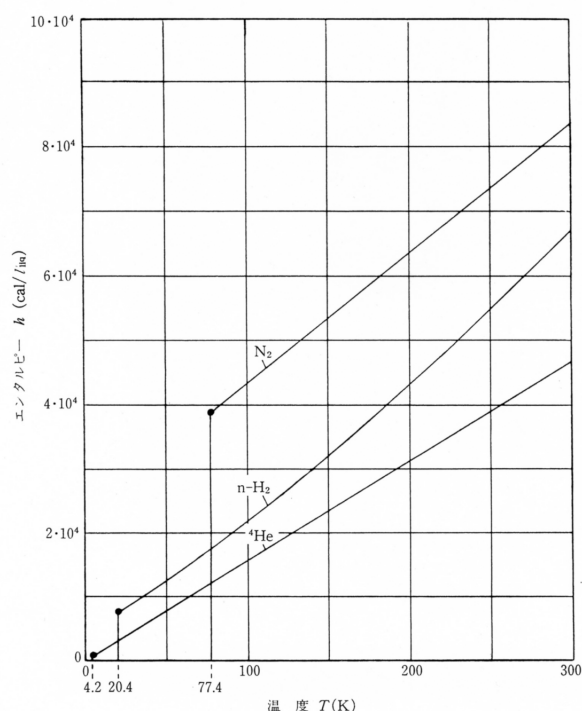


Fig. 14 蒸発潜熱と顕熱

2.8. 液化冷凍システムの構成機器

上述の熱交換器や膨張エンジン（膨張タービン）、ジュール・トムソン弁やヘリウムガスの流れを調整する弁（バルブ）などは、外部からの熱によって温度が上がらないように「コールドボックス」（cold box）と呼ばれる真空断熱容器の中に設置されている。

今まで示したフロー図に記されている圧縮機は、通常「循環圧縮機」（circulation compressor）と呼び、後述する「回収圧縮機」（recovery compressor）と区別する。圧縮機では気密性を高めるために潤滑油を使用している場合が多いので、圧縮されたヘリウムガスにはオイルミスト（oil mist）と呼ばれる微小な油滴が混入してしまう。この油滴がコールドボックス内の配管に流れ込むとヘリウムガスの温度低下に伴って油滴が固化して配管内に付着し、それが蓄積して配管などの閉塞の原因となる。したがって、圧縮機の出口（吐出側と呼ぶ）には必ずフィルターや活性炭、モレキュラーシーブなどを用いた「油分離器」（oil separator）を設置して、油滴や不純物を除去する必要がある。油分離器 1 台では十分に油滴を除去できないので、油分離器を直列に複数個使用することが多い。

液化したヘリウムは「デュワー」（Dewar）と呼ばれる断熱された低温容器に一旦貯蔵する。必要に応じて、このデュワーから液体ヘリウムを取り出して使用する。液体ヘリウムは、「トランスファーライン」（transfer line）と呼ばれる低温用断熱配管で超伝導空洞や超伝導電磁石が納められているクライオスタットへ輸送する。小型で単純な構造のものは「トランスファーチューブ」（transfer tube）と呼ばれる。液体ヘリウムの輸送はデュワーの内圧を上げて、あるいは、クライオスタット内を減圧して生じた圧力差によって行う。このため、液体ヘリウムの温度を 1 気圧の飽和蒸気圧温度である 4.2 K ではなく、1.3 気圧での飽和蒸気圧温度である 4.5 K に設定している。また、大きな冷凍システムでは、トランスファーラインの長さが数百メートルにも及ぶため、トランスファーライン自体の

断熱性能がシステム全体の効率に影響してくる。良く設計されたトランスファーラインでは、トランスファーライン 1 m 当たりの熱負荷が 0.1 W 未満にすることができる。Fig. 15 にトランスファーラインの断面の例を示す。このトランスファーラインは液体ヘリウムと液体窒素の両方を 1 本のトランスファーラインで輸送するので、行きと戻りの液体窒素で液体ヘリウムの配管の熱シールドを形成し、液体ヘリウムへの熱負荷を軽減している。また、これらの配管を機械的に支えている部品にはガラス繊維強化プラスチック (glass-fiber reinforced plastic; GFRP) などを使用したり、薄肉のステンレス管を採用して、熱伝導による熱負荷も減らす工夫をしている。

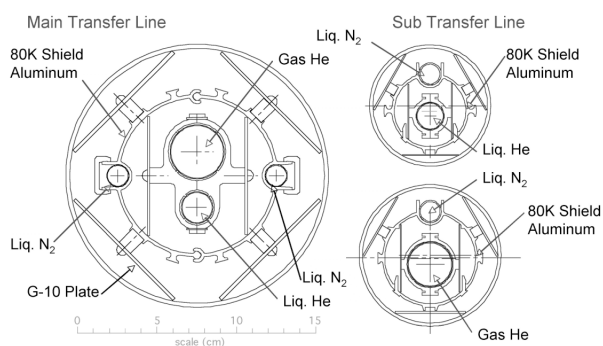


Fig. 15 トランスファーライン

2.7 節で述べたように、冷凍機の場合には、クライオスタット内で蒸発したヘリウムガスはそのまま循環圧縮機の入口（吸入側と呼ぶ）に接続して再び液化するが、液化機の場合には、液体ヘリウムは一旦外部に取り出し、実験や測定などで蒸発した常温のヘリウムガスを回収することになる。この場合、回収した常温のヘリウムガスは「ガスバッグ」(gas bag) という大きくて丈夫な風船に貯める。ガスバッグに貯まったヘリウムガスには空気や水分などの不純物が含まれている可能性があり、圧縮機からの油滴と同様に配管等の閉塞の原因となる。そのため、そのままコールドボックスへ流すことは出来ない。ガスバッグ内の不純ヘリウムガスは回収圧縮機によって圧縮した後、「ヘリウム精製器」

(helium purifier) によってヘリウムガス内の不純物を除去し、純ガスにしてからコールドボックス内へ戻す。

ヘリウム冷凍液化機の停止時などは、次の運転に備えて出来るだけ液化してデュワー内に貯めておくことが多いが、デュワーでも完全な断熱は不可能であるので、運転停止が長期間に亘ると最終的にシステム内のヘリウムは全てガスとなってしまふ。ヘリウムの場合、液体が全て蒸発して気体になると体積が約 700 倍になる。このガスをシステム内の配管やガスバッグの体積だけで保持するの大変であるので、カードルと呼ばれる長いポンペを積み重ねたユニットや中圧タンクと呼ばれる大きなタンクに加圧して貯蔵する。

これらの機器の他に、予冷やクライオスタットの熱シールドとして液体窒素が用いられることが多いので、この液体窒素の貯槽なども設置されている。この液体窒素貯槽は CE とも呼ばれるが、これは英語の“cold evaporator”の略である。巨大な冷凍システムでは液体窒素の消費量も膨大となるため、予冷や熱シールドでも蒸発しなかった液体窒素を回収し、また蒸発した冷たい窒素ガスを再び液化して液体窒素の消費量を抑えるための「窒素循環装置」(nitrogen circulation system) を備えているシステムもある。窒素循環装置を備えたヘリウム冷凍機の例として、高エネルギー加速器研究機構の KEKB 加速器で使用されている 6.5 kW (at 4.4 K) ヘリウム冷凍機のフロー図を Fig. 16 に示す。

3. 超流動ヘリウムと 2K 冷凍システム

3.1. ヘリウムの状態図

温度と圧力で決まる物質の状態を示す図を「状態図」または「相図」(phase diagram) と呼ぶ。物質の状態には「気相 (気体)」(vapor phase) と「液相 (液体)」(liquid phase)、 「固相 (固体)」(solid phase) の 3 つの状態 (物質の三

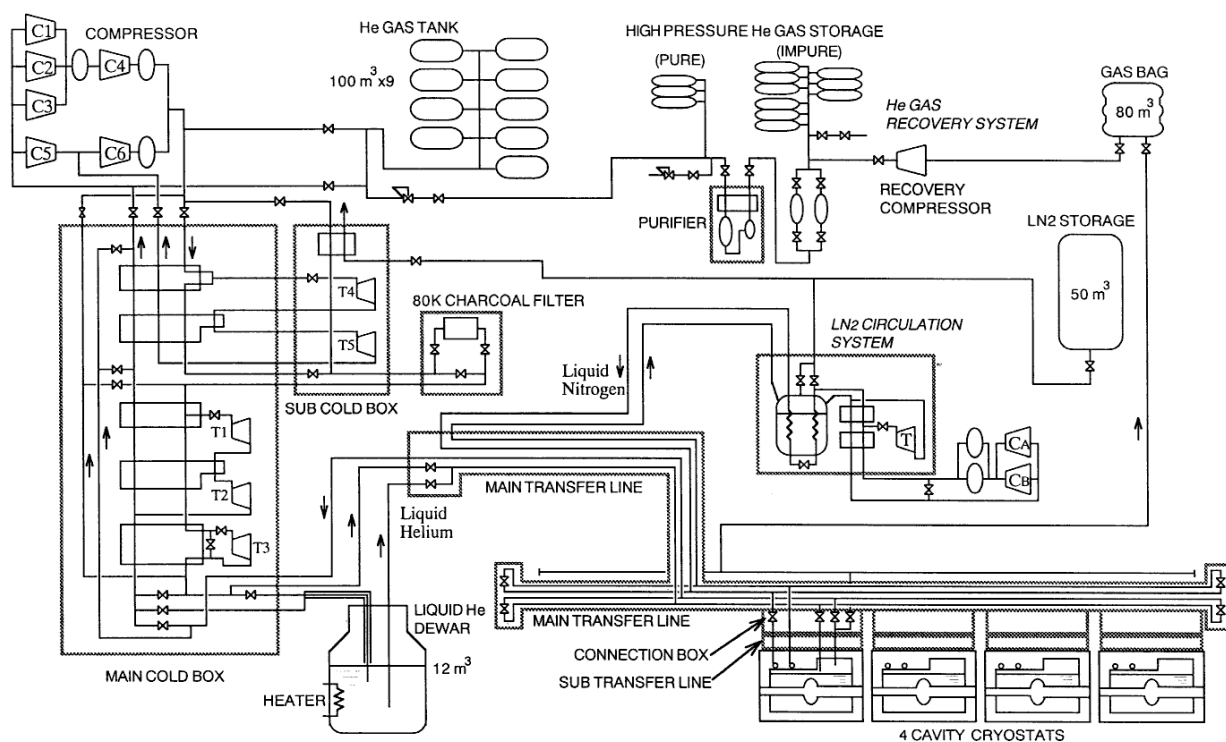


Fig. 16 KEKB 6.5 kWヘリウム冷凍システムのフロー図

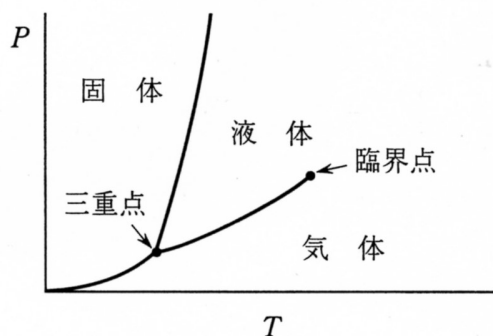


Fig. 17 通常の物質の状態図

態）があるが、状態図では、その物質がある温度と圧力でどの状態にあるかを示している。例として、窒素などの通常の物質の状態図を Fig. 17 に示す。固相と液相の境界線を「融解曲線」（melting curve）、固相と気相の境界線を「昇華曲線」（sublimation curve）、そして、液相と気相の境界線を「（飽和）蒸気圧曲線」（saturated vapor pressure curve）または「蒸発

曲線」（evaporation curve）という。融解曲線と昇華曲線、そして飽和蒸気圧曲線の3本の曲線の交点は「三重点」（triple point）といい、3つの相が共存している状態である。また、飽和蒸気圧曲線の高温側は「臨界点」（critical point）と呼ばれる状態で終わっている。この臨界点温度より高い温度では、いくら圧力を高くしてもその物質は液体にならないために、飽和蒸気圧曲線も臨界点温度より高温側では定義できない。この臨界点よりも低温側の気相を「蒸気」（vapor）、臨界点温度よりも高温側の状態を「気体」（gas）と呼んで、厳密に区別する場合もある。

一方、ヘリウムの状態図を Fig. 18(a) および Fig. 18(b) に示す。Fig. 17 に示した通常の物質の状態図と異なる点は、ヘリウムは単に温度を下げるだけでは固体にならず、圧力が約 2.53 MPa 以上になって初めて固相が現れる。したがって、通常の物質に存在する厳密な意味での三重点がヘリウムには存在しない。ヘリウムの臨界点温度は 5.201 K、臨界点圧力は 0.227 MPa である。また、ヘリウムの液相には2つの状態

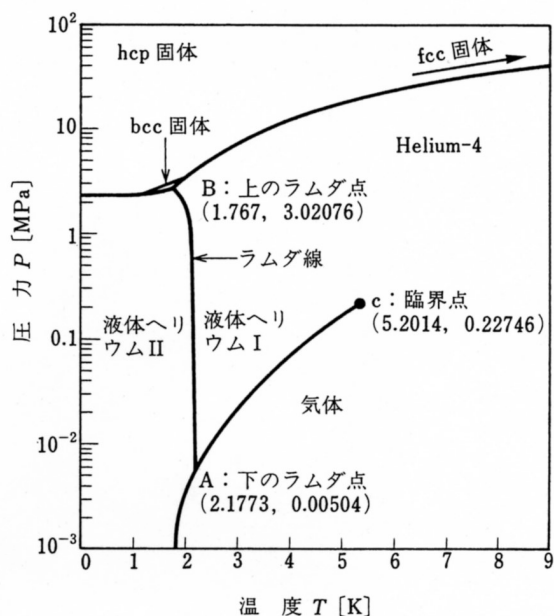


Fig. 18(a) ヘリウムの状態図（片対数）

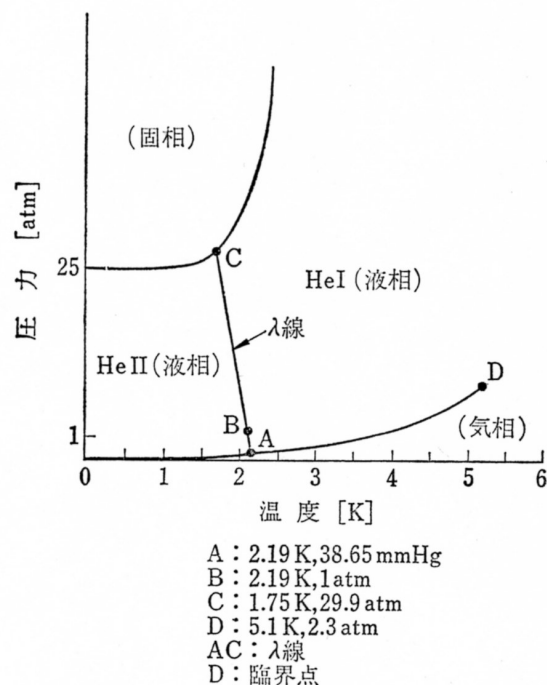


Fig. 18(b) ヘリウムの状態図

が存在し、低温側の液相を超流動相 (He II) と呼ぶ。「超流動ヘリウム」(superfluid helium) とは、この低温側の液相を指す。高温側の液相は常流動相 (He I) と呼ばれる。超流動相と常流動相の境界線は「ラムダ線」(lambda line)、こ

のラムダ線と飽和蒸気圧曲線との交点は「下のラムダ点」(lower lambda point) という。ラムダ線と融解曲線との交点は「上のラムダ点」(upper lambda point) というが、単に「ラムダ点」という場合は、通常「下のラムダ点」を意味する。したがって、相の種類はともかく、異なる3つの相が共存する点という広義の三重点の定義では、ヘリウムには三重点が2つ存在することになる（上および下のラムダ点）。（下の）ラムダ点の温度は 2.177 K、圧力は 5.040 kPa である。また、固相や液相、気相のそれぞれの間の相転移では潜熱 (latent heat) を伴うが、ヘリウムの2つの異なる液相である超流動相と常流動相との間の相転移は潜熱を伴わない「2次の相転移」である。

3.2. 超流動ヘリウム

ヘリウムの液相の1つである常流動相は水や液体窒素などの通常の粘性流体と同様の性質を示すが、もう1つの液相である超流動相、すなわち超流動ヘリウムは幾つかなの特異な性質を有している。

1つ目の特徴は、その名称の通り、粘性を示さずに流れることが出来る「超流動性」(superfluidity) である。通常の粘性流体（気体や液体）では粘性のために流ることが出来ないような微小な隙間や固体壁に形成している吸着膜の中でも流ることが出来る。この吸着膜内の超流動現象を「薄膜流」(film flow) という。この性質のため、直接超流動ヘリウムに漬かっていない部分の固体壁でも吸着膜の中を超流動ヘリウムが流れ、超流動ヘリウムによる冷却が行われるという利点がある。

2つ目の特徴は、「超熱伝導性」(thermal superconductivity) である。超流動ヘリウムの見かけ上の熱伝導率は、例えば 1.9 K では高純度の銅の熱伝導率の約 100 倍に達する。これは、超流動ヘリウムの熱伝導が、通常の液体での熱伝導とは全く異なった機構で起こるためである。超流動ヘリウムの中、あるいは超流動ヘリウムが接している固体壁面で局所的に発熱があった

としても、きわめて短時間で熱が輸送されるため、超流動ヘリウムでは沸騰現象が起こらず、気液界面（自由表面）で蒸発が起こるだけである。

これらの超流動ヘリウムの特異な性質は、「二流体モデル」(two-fluid model) によって良く理解することが出来る。このモデルでは、超流動ヘリウムを「超流動成分」と「常流動成分」の2つの部分から出来ていると仮定する。常流動成分は通常の粘性流体と同様に粘性とエントロピーを持ち、熱を輸送する。一方、超流動成分は粘性とエントロピーは0で、熱を輸送することが出来ない。この2つの成分それぞれの密度の和が、超流動ヘリウム全体の密度 ρ となる。

$$\rho = \rho_n + \rho_s \quad (3-1)$$

ここに、 ρ_n , ρ_s は、それぞれ常流動成分と超流動成分の密度である。Fig. 19 に示すように、2つの成分の割合は温度によって決まり、ラムダ点温度では常流動成分が全体を占めるが、絶対零度では超流動成分が全体を占める。もちろん、実際に超流動ヘリウムの原子一個一個がどちらの成分かを区別できるわけではなく、その温度によって2つの成分の割合が決まるだけに過ぎない。したがって、超流動成分と常流動成分という誤解を招く表現ではなく、「超流動流」と「正常流」という表現も使われている。2つの成分はそれぞれ独立に流れ場を作り、お互いに干渉せずに流れることが出来る。超流動成分の駆動力は化学ポテンシャルの差、つまり超流動成分の密度差（割合の差）である。超流動成分の割合は、低温で大きく、高温で小さくなるために、超流動成分は温度の高い方へ向かって流れる。一方の常流動成分は通常の粘性流体であるから、圧力差によって流れを生じる。超熱伝導の場合、見かけ上の質量移動（つまり超流動ヘリウム全体の流れ）はない。発熱部分（高温部）に向かって超流動成分が流れるが、それとは逆向きに常流動成分が流れ、全体としての流れは生じない。これを「対向流」(counterflow)

という。しかし、熱を輸送しない超流動成分が高温部に集まり、熱を輸送する常流動成分だけが発熱部分から遠ざかるため、見かけ上の流れはないにも拘わらず、熱だけが高温部から低温部へ輸送されることになる。この現象は「内部対流」(internal convection) と呼ばれ、超流動ヘリウムの超熱伝導性を生み出す原因となっている。

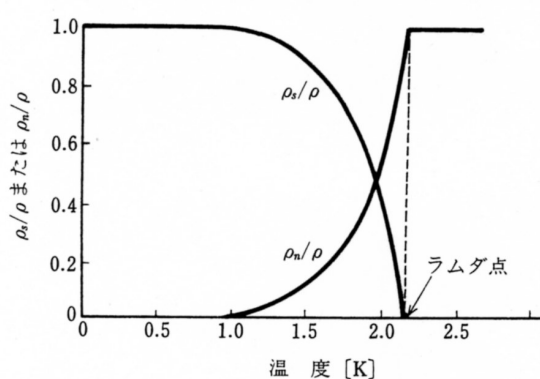


Fig. 19 超流動成分と常流動成分の割合

3.3. 超流動ヘリウムの生成

超流動ヘリウムを生成する一般的な方法は、液体ヘリウムを真空ポンプなどの減圧装置で減圧して強制的に沸騰を起こし、蒸発潜熱を奪うことによって液体ヘリウム全体の温度を下げることである。Figs. 18(a), (b) に示したヘリウムの状態図では、飽和蒸気圧曲線に沿って圧力および温度が降下することに対応する。圧力および温度が下がって、状態が（下の）ラムダ点に達すると蒸発せずに残った液体ヘリウムは超流動ヘリウムとなる。このようにして生成した超流動ヘリウムを「飽和超流動ヘリウム」(saturated superfluid helium) と呼ぶ。さらに減圧を続ければ、2.2 K 以下の温度を実現できるが、超流動ヘリウムの飽和蒸気圧が低くなるために、温度が低くなるにつれて減圧の困難さが増大する。1.8 K まで温度を下げるためには 1.66 kPa まで、1.4 K にするためには 287 Pa までと非常に低い圧力まで減圧する必要があり、

大容量の減圧装置を使用しなければならない。

3.4. 超流動ヘリウム冷凍システム

前節で述べたように、超流動ヘリウムはそれ自体の温度が低い（約 2 K 以下）という他にも超熱伝導性などの優れた熱的特性があるために、超流動ヘリウムを用いた冷却が採用されるようになった。超流動ヘリウム冷凍システムの概念図を Fig. 20 に示す。ヘリウム液化機で 0.1 MPa, 4.2 K の液体ヘリウムを生成し、デュワーに貯蔵する。超伝導機器を収納しているクライオスタット内は減圧装置で必要な温度に対応する飽和蒸気圧まで減圧している。デュワーからの液体ヘリウムは、クライオスタットからの冷たい戻りガスと熱交換をして温度を下げ、ジュール-トムソン弁で等エンタルピー膨張をして必要な温度の超流動ヘリウムになってクライオスタットへ供給される。クライオスタット内の超伝導機器を冷却して蒸発したヘリウムガスは、熱交換器を経由して減圧装置でほぼ大気圧まで圧縮され、ヘリウム液化機の循環圧縮機の吸入側へ戻る。また、液体ヘリウムは超伝導機器の予冷や 5 K 熱シールドにも使用される。実際の超流動ヘリウム冷凍システムでは、液体ヘリウムを貯めておくためのタンクと超流動ヘリウムを貯めておくためのタンク、熱交換器とジュール-トムソン弁を 1 つの断熱容器内に配置し、超流動ヘリウム冷凍機コールドボックスとしている。

超流動ヘリウム冷凍システムを構築する際に注意すべき点がいくつかある。前項で述べたように、液体ヘリウムの蒸発潜熱が小さい（23.5 J/g 以下）上に、超流動ヘリウムは飽和蒸気圧が低い（5 kPa 以下）ため、超流動ヘリウムを生成するための減圧装置の排気容量を非常に大きくする必要がある。また、非常に温度の低い蒸発したヘリウムガスを排気し続けるために、排気配管や減圧装置そのものが冷やされてしまい、蒸発したヘリウムガスの顕熱（エンタルピー）が無駄になってしまう。そこで、排気側にも熱交換機を設けて蒸発ガスのエンタルピーを

回収し、ヘリウム冷凍システムの冷凍能力を向上させるために再利用することを検討する必要がある。また、ヘリウム冷凍機ではなく、ヘリウム液化機を使用している場合には、減圧装置の排気容量が大きくなるにつれてヘリウム液化機に戻ってくる室温のヘリウムガス量も増大するため、ヘリウムガス回収系（ガスバッグや回収圧縮機の容量）も大きくしなければならない。

また、減圧による超流動ヘリウム冷凍システムでは、減圧配管内の圧力が大気圧に対して負圧となるため、ヘリウムガスの中に空気などの不純物が混入する可能性が増大する。また、超流動ヘリウムの超流動性のために、真空漏れが生じやすいという問題点もある。液体の状態で微小な隙間や穴から流出するため、真空度が悪化するだけではなく、温度の高い部分に接触して蒸発すると体積が膨張して急激に圧力が上昇する危険性もあるので、十分な注意が必要である。

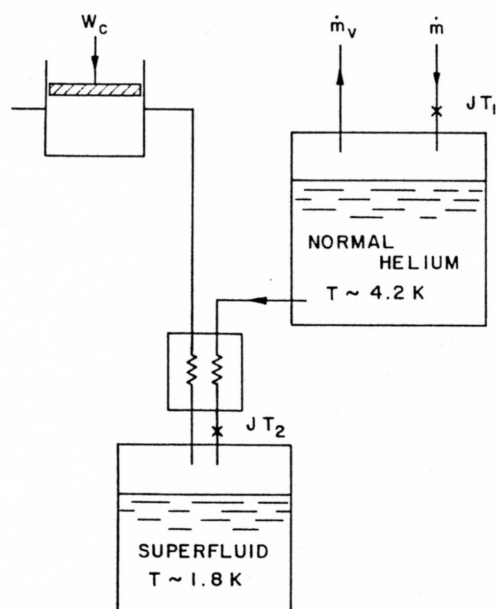


Fig. 20 超流動ヘリウム冷凍機のフロー図

3.5. コンパクト ERL 用 2K ヘリウム冷凍システム

次世代放射光光源として計画中のエネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) に向けて要素技術開発が行われているが、これらの総合的な動作試験のために小型 ERL 装置 (コンパクト ERL) の建設が予定されている。このコンパクト ERL で用いられる 2 K ヘリウム冷凍システムについて、概要を述べる。コンパクト ERL で使用される超伝導機器は、9 セルの超伝導加速空洞 4 台を 1 台のクライオモジュールに収納した主加速器が 2 台と、2 セル超伝導加速空洞 3 台を収納した入射用超伝導加速器 1 台である。

コンパクト ERL 用 2K ヘリウム冷凍システムでは、液体ヘリウムの生成に Sulzer 社 (現在は Linde 社) の TCF200 ヘリウム冷凍液化機を使用する。この冷凍液化機の冷凍能力は 4.4 K で 600 W、液化能力は毎時 250 L である。主加速器と入射用加速器をそれぞれ独立に冷却し、かつ、超流動ヘリウムへの熱負荷を軽減するため、それぞれの加速器の近くに 2 K 冷凍機コールドボックスを配置する。また、冷凍システム全体への熱負荷を減らすために、液体窒素を用いた 80 K 熱シールドを採用する。液体窒素循環装置を用いて蒸発した窒素ガスを再液化し、液体窒素の消費量を減らすことが可能となる。

Fig. 21 にコンパクト ERL 用 2K ヘリウム冷凍システムの機器配置を、Fig. 22 にフロー図を示す。液体ヘリウムと液体窒素の両方を 2 K 冷凍機コールドボックスまで 1 本で輸送するための主トランスファーラインの長さは約 10 m と見積もっている。ヘリウム冷凍システムで回収への熱負荷を減らすために、このトランスファーラインの断熱性能を非常に良くする必要がある。

4. まとめ

加速器に使用される超伝導機器の冷却に必要な液体ヘリウムを生成するための液化の原理やヘ

リウム冷凍液化機、超流動ヘリウムとその特徴、超流動ヘリウムを用いた冷凍システムについて、非常に簡単ではあるが解説を行った。実際に超流動ヘリウム冷凍システムを設計あるいは運転する際には、もっと詳細な内容について十分検討する必要があるが、その内容については参考文献に譲る。

超伝導加速空洞や超伝導電磁石などは先端技術とされ、今後も加速器その他の装置に採用されるであろう。しかし、これらの機器が性能を発揮するためにはヘリウム冷凍システムが必須であるにも拘わらず、ややもするとヘリウム冷凍システムはブラックボックス化し、「必要悪」と考えられがちである。OHO 高エネルギー加速器セミナーでのこのような解説によって、ヘリウム冷凍システムや低温工学について少しでも理解してくださる方々が増えることを希望して止まない。

参考文献

- [1] 小林俊一, 大塚洋一: 「物理工学実験 7 低温技術 第 2 版」 東京大学出版会 (1987)
- [2] 田沼静一 編集: 「実験物理学講座 15 低温」 共立出版 (1974)
- [3] 低温工学協会関西支部 訳: 「低温工学ハンドブック」 内田老鶴圃新社 (1982)
- [4] 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)
- [5] 細山謙二: 「ヘリウム冷凍機」 OHO '92 高エネルギー加速器セミナーテキスト (1992)
- [6] Van Sciver, S. W., "Helium Cryogenics", Plenum Press (1986)
- [7] Barron, R., "Cryogenic System", McGraw-Hill (1966)
- [8] Putterman, S. J., "Superfluid Hydrodynamics", North-Holland (1974)
- [9] Donnelly, R. J., "Experimental Superfluidity", University of Chicago Press (1967)

- [10] Khalatnikov, I. M., “An Introduction to the Theory of Superfluidity”, W. A. Benjamin (1965)
- [11] Tilley D. R. and Tilley J., “Superfluidity and Superconductivity, 2nd ed.”, Adam Hilger (1986)
- [12] London, F., 井口家成 訳:「超流体 II -超流体ヘリウム-」 講談社 (1975)
- [13] 山田一雄, 大見哲巨 著:「新物理学シリーズ 2 8 超流動」 培風館 (1995)
- [14] 押田勇雄, 藤城敏幸:「基礎物理学選書 7 熱力学」 裳華房 (1970)

- [15] McCarty, R. D., “Thermodynamic Properties of Helium 4 from 2 to 1500 K at Pressures to 10^8 Pa”, J. Phys. Chem. Ref. Data **2** (1972) 923
- [16] Lebrun, Ph., “An Introduction to Cryogenics”, CERN/AT 2007-1 (2007)
- [17] Wagner, U., “Refrigeration”, CERN-2004-008 (2004) 295
- [18] 羽島良一他 編集:「コンパクト ERL の設計研究」 KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008)

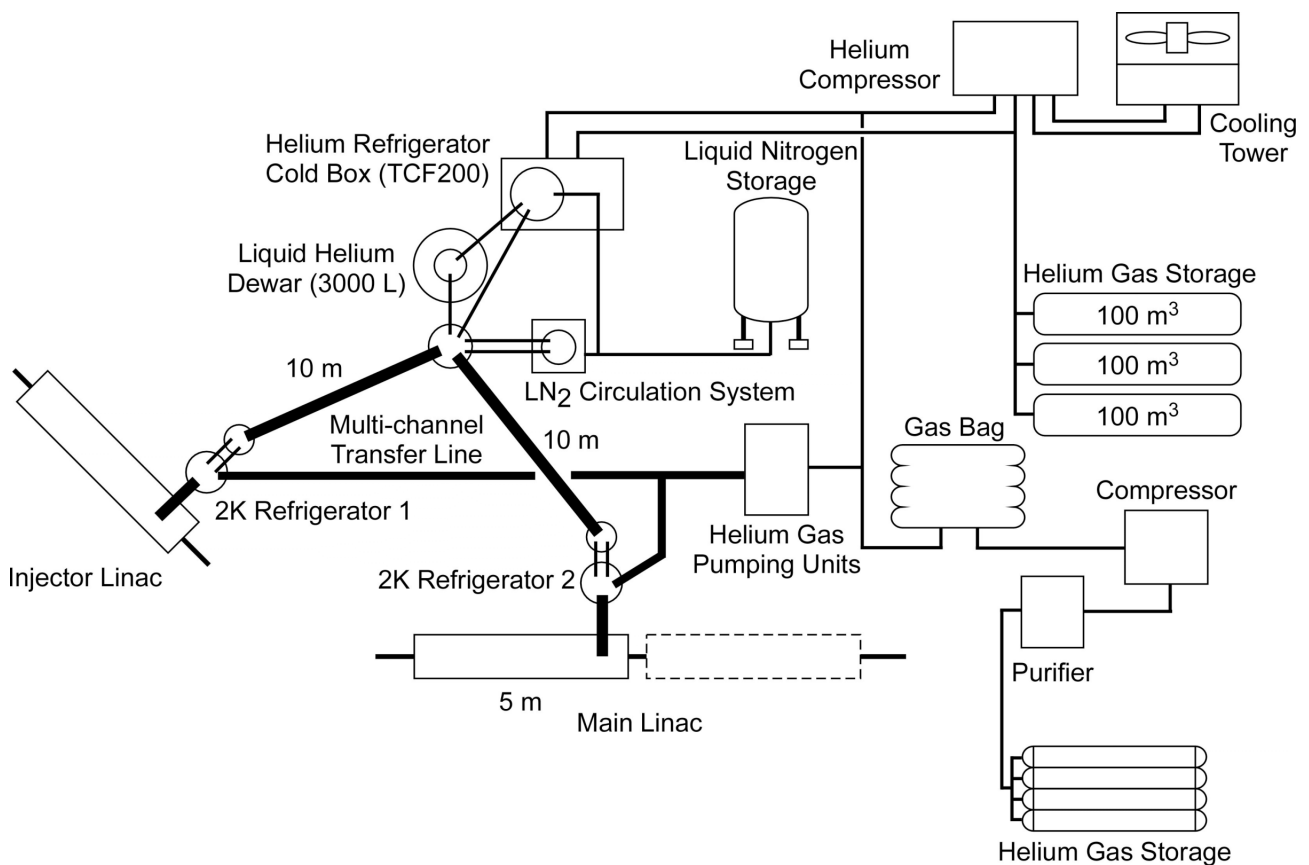


Fig. 20 コンパクト ERL 2K ヘリウム冷凍システムの機器配置図

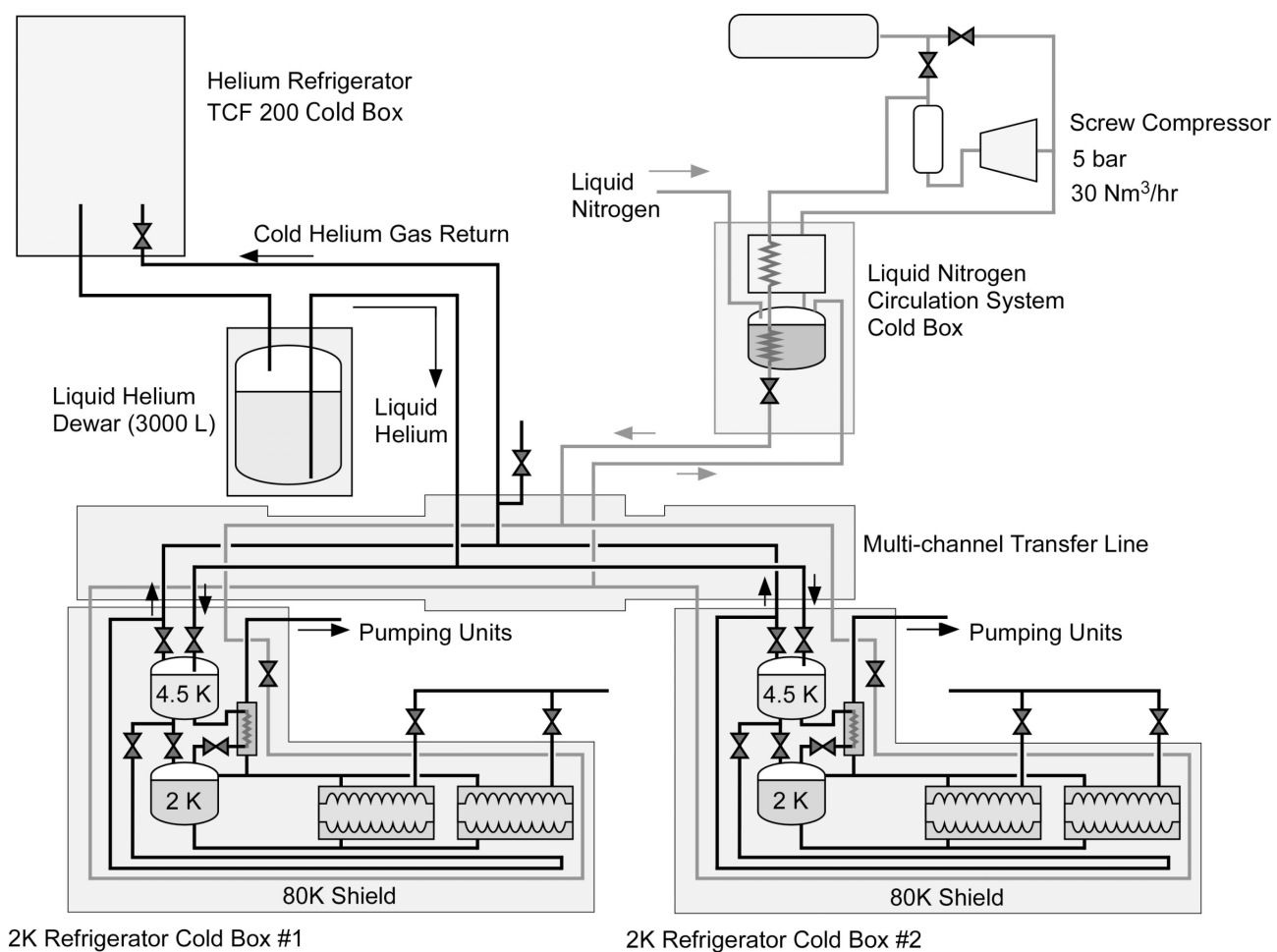


Fig. 21 コンパクト ERL 2K ヘリウム冷凍システムのフロー図