

9. ヘリウム冷凍システム

高エネルギー加速器研究機構

中西 功 太

目 次

ヘリウム冷凍システム

1	はじめに	9-1
2	ヘリウムの性質	9-1
2.1	一般的性質	9-1
2.2	不凍性	9-2
2.3	超流動性	9-2
3	熱力学的な準備	9-3
3.1	熱力学の第一法則	9-3
3.2	等圧操作	9-4
3.3	断熱操作	9-5
3.4	断熱	9-8
3.5	等温操作	9-10
3.6	カルノーサイクル	9-11
4	冷凍機の種類	9-12
4.1	理想的な液化機	9-12
4.2	リンデ-ハンブソン冷凍機	9-13
4.3	クロード冷凍機	9-14
4.4	磁気冷凍機	9-14
4.5	希釈冷凍機	9-15
4.6	小型冷凍機	9-15
5	加速器で使用された冷凍機の例	9-16
5.1	SuperKEKB	9-16
5.2	Tevatron	9-17
5.3	cERL	9-18
5.4	LHC	9-19
5.5	共通する課題	9-20
	参考文献	9-21

ヘリウム冷凍システム

1 はじめに

近年、大型加速器では超伝導電磁石や超伝導加速空洞等の超伝導機器が採用されることが多くなっている。超伝導機器は冷却を必要とするが、加速器はそれぞれ独自の構成であるため、超伝導機器の設計や台数、運転条件などが異なり冷凍システムに対する要求もさまざまに異なる。大型の加速器での応用においては、多数の超伝導電磁石や超伝導空洞を冷却するため、超伝導機器が広範囲に分散し、トータルの熱負荷が大きくなる傾向がある。本セミナーのテーマは「超伝導電磁石」であるが、超伝導空洞用の冷凍システムも本質的に変わるものではないので区別せずに取り扱っていく。

SuperKEKBにおいては、超伝導収束電磁石システム(QCS)に使用されている超伝導体はNbTi(ニオブチタン)であり、超伝導加速空洞に使用されている素材はNb(ニオブ)である。これらの物質の超伝導転移温度はそれぞれ約9.5K、9.3Kである。超伝導機器の運転温度は、電流密度や表面磁場、周波数など様々な条件で決定されるが、少なくとも超伝導転移温度以下でなければならない。図1に各種冷媒の温度(三重点から臨界温度)を示す。図からも明らかのように、超伝導機器を冷媒に浸して冷却する浸漬冷却を前提とすると、9.3K以下の極低温環境を実現できるのは、 ^3He か ^4He に限られる。もちろん、超伝導転移温度18.3Kの Nb_3Sn のような高性能な素材の躍進によって、浸漬冷却が前提とされなくなるなど状況が変化する可能性はあるが、現在のところ、必要とされる温度からも、加速器トンネル内に分散した各機器への冷媒の供給という観点からも大規模な超伝導機器の応用に対しては液化ヘリウムの利用が合理的である。大規模なヘリウム液化冷凍機を中心に、ヘリウム冷凍システムの仕組みや実際の取り組みについて紹介する。

なお、冷凍システムの観点から、超伝導電磁石と超伝導空洞で最も大きな違いは、クエンチ時の振

舞いである。超伝導電磁石はしばしば大電流で励磁され、その蓄積エネルギーは100MJを超えることもある。クエンチ時にはこのエネルギーの多くの部分が熱として液化ヘリウム中に排出される。そのため、液化ヘリウムが急激に蒸発し、大きな圧力上昇を引き起こす。一方、超伝導空洞内に蓄積される電磁場のエネルギーは10J程度でヘリウム中に放熱されても特に問題にならない。実際、クエンチを検出した後に、速やかにRF電力の供給を止めれば顕著な圧力上昇は見られない。

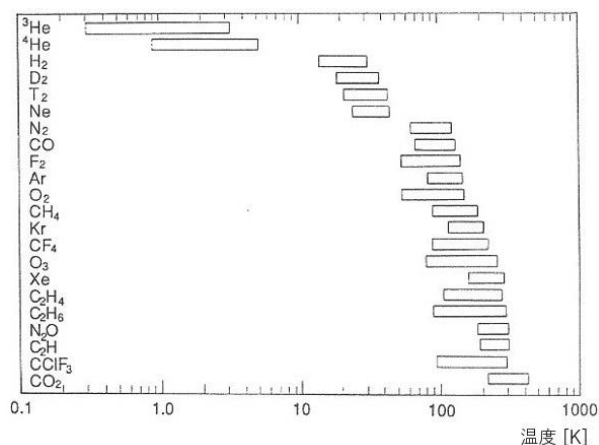


図 1: 冷媒の種類と温度 [1]

2 ヘリウムの性質

2.1 一般的性質

ヘリウムや窒素は、非常に扱いやすいガスであり、広く冷媒として利用されている。反応性に乏しいため、機器や容器を腐食させることもなく、可燃性ガスのように火災を起こすこともない。毒性もなく、環境に放出したとしても問題はない。もちろん、高圧ガスである以上、破裂しないように設備を管理しなければならないし、無味無臭であることから、大量に漏れ出した場合にも発見が遅れる可能性が高いので、酸欠事故にならないように警報機を付けたり、十分な換気を行うなどの注意が必要である。

大気の主成分である窒素と異なり、ヘリウムは希少資源である。国内で使用されるヘリウムはその全量を輸入に頼っており、主に米国やカタールから購入されている。米国から購入するヘリウムガスはこれまで製造設備の故障や保守の問題で供給が滞ったり、米国の輸出に対する方針の変更に影響されたりすることがあった。また、輸出国周辺の紛争などにより輸送に影響が出ることもある。図2に示すように、国内のヘリウムの用途割合を見ると、冷媒としての利用は限定的であり、製造業での使用が大部分である [2]。したがって、半導体生産の状況により価格が変動するなど外的要因の影響を受け易い傾向にある。

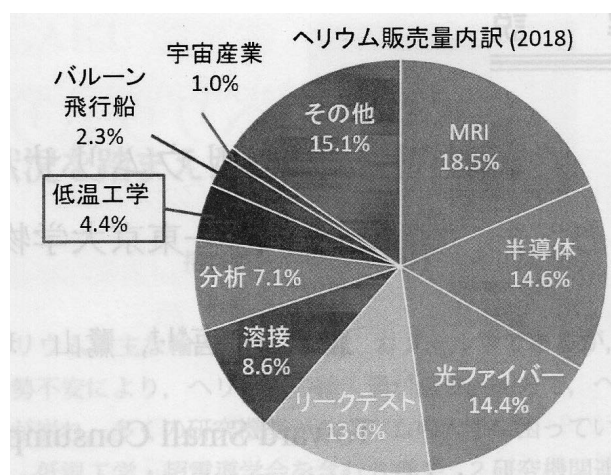


図 2: 国内におけるヘリウムの用途割合 [2]

ヘリウムは比重の小さなガスとしてよく知られている。同じ圧力と温度で比較すると、気体の密度は分子量に比例するので、ヘリウムガスの密度は、窒素ガスの密度の 1/7 である。なお、このような比較を行う際にしばしば標準状態のガスの性質を調べるが、標準状態を表す温度については 0°C と 25°C を基準にする流儀があり、圧力についても、101.325kPa(1atm) と 100kPa を基準にする流儀がある。混同して使用しないように注意が必要である。

2.2 不凍性

冷媒の性質として、その不凍性は重要な特性である。図3に⁴Heの状態図を示す。⁴Heは約2.5MPa以上の圧力に加圧しなければ個体にならない。ヘリウム液化冷凍機の圧縮機の圧力は通常2.5MPaまで上げることはないので、ヘリウムは凍らない流体として扱っても差支えない。このような顕著な性質は、質量が小さいために絶対零度において期待されるゼロ点エネルギーが比較的大きいことと、相互作用の小ささからそもそも固化しにくいことのバランスによるものである [5]。実際の冷凍システムの運用において、冷媒を通して各種配管の閉塞は深刻な問題である。ヘリウム自体が系内に存在する圧力条件下では固化しないということは、特により低い温度を目指した実験などでは重要な利点である。ヘリウム自体は事実上固化しないことが分かったが、ヘリウム冷凍システムにおいては、特に負圧での運転を行う場合に不純物を系内に取り込む可能性があり、吸い込む不純物が、窒素、酸素、水のいずれの場合でも個体となって配管を閉塞させるため、十分に対策しておく必要がある。

2.3 超流動性

図3にHe IIと書かれている領域が存在する。He IIは超流動状態にある液化ヘリウムを示している。超流動の発生は、超伝導と同じボーズ-アインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein condensation) によるものなので、本セミナーの中ですでに説明されているものと思う。超伝導と同等の現象であることから、通常なら抵抗が大きく実質流れないような狭隘な隙間からも液化ヘリウムが漏れ出てしまう現象があり、通常の液化ヘリウム (He I) に比べてリークのリスクが高まる。このようなリークは「スーパーリーク」と呼ばれる。常温での検査ができないので修理が難しく、発生する可能性のある場所 (ポートやフィードスルー) を極力少なくするような設計が好まれる。冷凍機運用上の影響としては、計測器を挿入するためのポートが十分確保できないので、液面計の数は最

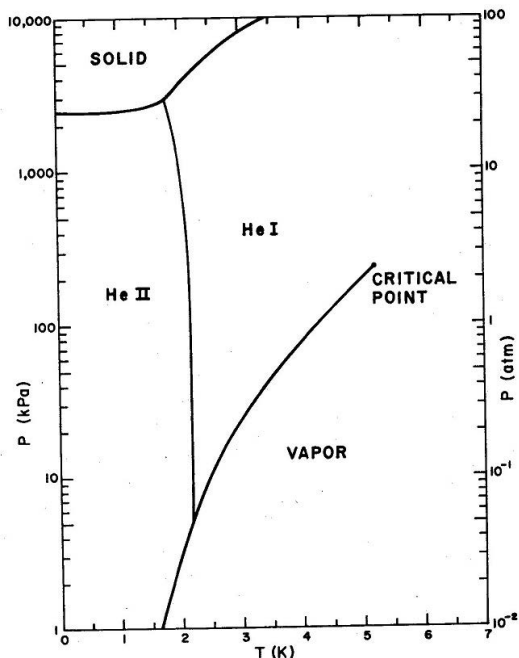


図 3: ^4He の状態図 [3]

小限にしなければならないし、温度計測も配管の外から行わざるを得ないことが多い。

超伝導機器を超流動ヘリウムを用いて冷却するメリットは単純に He I に比べて He II の温度が低いことに加え、その超流動性からくる熱伝導率の高さも無視することができない。図 4 に示すように、He II は超流動成分と常流動成分の混合物であり、その混合比は温度に依存する。すなわち、He II の中で発熱すると、超流動成分の一部が常流動成分に変換され、超流動成分の密度が変化し、それぞれの成分が均一な分布になる方向に拡散していく。熱力学的に言えば化学ポテンシャルが一様でなくなり、これを一定にするような流れが生じる。ここで、超流動成分は抵抗なしに流れることができるので、周囲から、熱源周辺に向かって超流動成分が流れ込むことになる。超流動成分の流れ込みにより、逆に常流動成分が熱源周辺から排出される。このようにして、同じ空間を超流動成分と常流動成分が逆方向に流れる対

向流が生み出される。一般に物質の流れを伴った熱の移動は、伝熱の場合よりも効率的である。He II の場合も、見かけの熱伝導率は $100\text{kW/m}\cdot\text{K}$ 程度になり、同じ温度帯の高純度金属より 2 桁程度大きな値を示す [3]。超伝導状態が臨界電流密度以上で維持できなくなるように、超流動による対向流もある限界を持つので、最大熱流束が許容値に収まるように考慮して設計しなければならない。

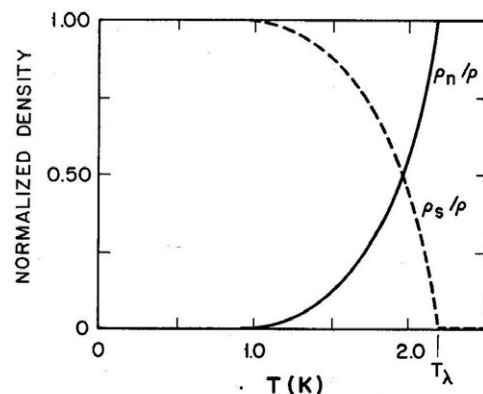


図 4: ^4He の超流動成分の温度依存性 [3]

3 熱力学的な準備

3.1 熱力学の第一法則

熱力学の第一法則はエネルギー保存の法則である。系が外界から受け取る熱を ΔQ 、外界にする仕事 ΔW によって、内部エネルギーの変化 ΔU を以下のように表現できる。

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

内部エネルギー U は系の状態を同じにするといつても同じ値になる状態量であり、状態は 2 つの状態量と物質量の 3 つの変数で表現できる。状態の例としては、(温度 300K 、圧力 100kPa 、物質量 2mol) とか、(体積 0.0249m^3 、圧力 100kPa 、物質量 1mol) など。単位物質質量当たりの物質の状態は 2 つの状態量

の関数としてあらわすことができるので、2つ変数を使って、冷凍システム内の作業流体の状態変化を表現することができる。ヘリウム冷凍システムにおいては、温度 T とエントロピー S を使って状態を表すことが多い。

3.2 等圧操作

系の圧力が固定された操作を等圧操作 (isobaric operation) と呼ぶ。大気圧下での実験ではありふれた条件といえる。体積一定の条件下での気体を加熱する場合と比較して、圧力一定の条件下では気体が膨張して外部に仕事をして内部エネルギーを消費するため、系を加熱して同じだけ温度上昇させるのにより多くのエネルギーを必要とする。内部エネルギーと体積変化を合わせて以下のような状態量 H を考えると、見通しが良くなる。

$$H = U - pV$$

H はエンタルピーと呼ばれる量で、等圧変化においては外部とやり取りしたエネルギーの量に等しい。

冷凍機の構成機器として等圧操作を担当するのは熱交換器である。多くの場合、入り口の流体の条件が与えられ、出口の状態を計算することになる。熱交換器によって熱をやり取りするが、圧力変化がなければ、一方の流れが与えるエンタルピーともう一方が受け取るエンタルピーは等しくなり、エンタルピーの和が変化しないことは自明である。それぞれの流体が出口で相手側の流体と同じ温度になると仮定した場合のエンタルピー変化をそれぞれ計算し、その小さいほうが実現可能な最大のエンタルピー変化である。図5に示すように、熱交換器を通じて低温のガスを送り、室温の容器を冷却できるか考える。ヘリウムガスの定圧比熱は $\frac{5}{2}R$ で温度や圧力によらないので、熱交換器の性能が良ければ容器はいつまでも冷えることはない。

低温のガスの代わりに液化ガスを供給した場合についても同様に考察する。蒸発潜熱がわかれば、冷媒を熱交換器を通して供給した場合に容器を冷却でき

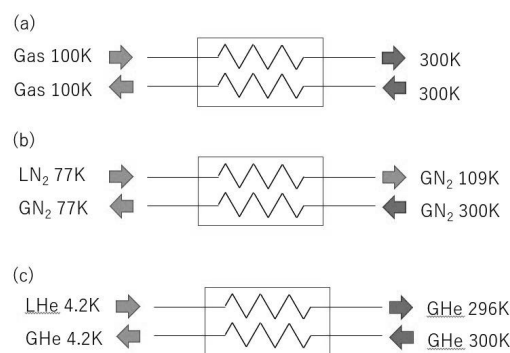


図5: 熱交換器の働き (a) 理想的な熱交換器により、100Kの理想気体と等しい質量流量の300Kの理想気体を熱交換した場合。(b)1気圧の液化窒素と等しい質量流量の300Kの窒素ガスを熱交換した場合。(c)1気圧の液化ヘリウムと等しい質量流量の300Kのヘリウムガスを熱交換した場合。

るか見積もることができる。表1および図6に様々な冷媒の蒸発潜熱と沸点の関係を示す [6]etc. ほとんどの冷媒のモル当たりの蒸発潜熱は沸点に比例していることがわかる。これはトルートンの規則として知られている [7]。

液化窒素を熱交換器を通して300Kの容器に供給すると、109K程度の窒素ガスが容器に供給されるために速やかに冷却出来ることがわかる。供給した液化窒素と熱交換器から戻ってくる窒素ガスの温度が同じであるが、蒸発潜熱分のエンタルピーが容器から取り去られるのである。液化ヘリウムを同じ条件で送った場合、296Kのヘリウムガスが容器に供給されることから、なかなか冷却できない。この現象は図7に示したヘリウムと窒素のエンタルピーの温度依存性を見ると一目瞭然である。液化ヘリウムの蒸発潜熱は4.2Kから300Kまで温度上昇させるのに必要な「顕熱」に比べて極めて小さいために、蒸発潜熱分の冷却の効果も小さい。

ヘリウム液化冷凍機から超伝導機器まで液化ヘリウムを送る際には、断熱配管が用いられる。KEKB向けに開発された高性能トランスファーラインの断面図を図8に示す。同じ設計のトランスファーライ

冷媒	沸点 [K]	蒸発潜熱 [J/g]	蒸発潜熱 [J/mol]
^4He	4.2	20.9	83.7
H_2	20.27	443	893
Ne	27.09	85.9	1733
N_2	77.36	199.3	5584
F_2	85.24	166.3	6319
Ar	87.28	161.9	6468
O_2	90.18	213	6816
Kr	119.93	108	9080
Xe	164.8	95.8	12580
エタノール	351.5	838	38600
H_2O	373.15	2260	40700
Hg	629.88	294.7	59110

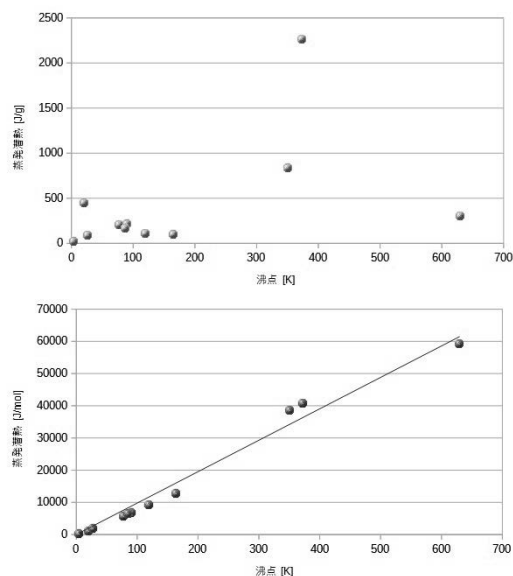


図 6: 蒸発潜熱と沸点の関係

ンは cERL 等の別の加速器施設でも採用され、実際に 10K 以下の極低温で蒸発ガスを冷凍機の戻して冷凍能力の向上に役立っている。液化ヘリウムを移送するトランスファーラインの断面は図 8 の a に示した。配管の内部は断熱のために真空になっており、中心付近に液化ヘリウムを送るための細い配管と、蒸発ガスを冷凍機に戻すための少し太い配管が通っている。ヘリウムの配管の周りにはアルミ合金製の窒素シールドが設置され、室温から輻射によってヘリウム配管に入熱するのを防いでいる。窒素シールドは液化窒素の送りと戻りの両方の配管に接している。液化窒素は環境からの入熱によって徐々に蒸発し気体の割合が多くなっているが、完全に蒸発するまでは温度上昇しないので、温度はほぼ一定である。液化窒素の配管は、送りと戻りの配管がアルミ合金製のシェルを通じて熱的に接触している。この構成は熱交換器そのものであり、図 5(b) と酷似した機器構成である。この断熱配管の窒素シールドをガスや液化ヘリウムで冷却したい場合は、戻りの配管をシェルに接触させないなど配管内で熱交換しないように設計変更を行う必要がある。超伝導機器のクライオスタットの設計をする際には、シールドやサーマルアンカーを冷却の際に、上下流のパイプの間で

熱交換器のような働きが起こらないように注意してほしい。

3.3 断熱操作

断熱操作 (adiabatic operation) では外界との熱のやり取りがないように断熱壁などで囲んだ系内での操作を考える。ジュールにより行われた断熱容器の中で羽根車を回して内部の水の温度上昇を測定し、熱の仕事当量を決定したジュールの実験が有名である。また、断熱自由膨張の実験もジュールの実験と呼ばれ、よく知られている (図 9)。この実験では、気体の入った容器と真空の容器をバルブでつなぎ、バルブを開いてふたつの容器をつないだ際の温度変化がないことが示された。外部との熱及び仕事のやり取りがないので、内部エネルギーが保存されると考えられ、内部エネルギーが体積によらず、温度のみ関数であるとされた。

断熱壁で囲んだピストンを準静的に体積 ΔV だけ膨張させた場合、気体はピストンを押して仕事をし、 $p\Delta V$ の内部エネルギーを失う。このような操作を断熱仕事膨張とよぶ。断熱自由膨張は不可逆であ

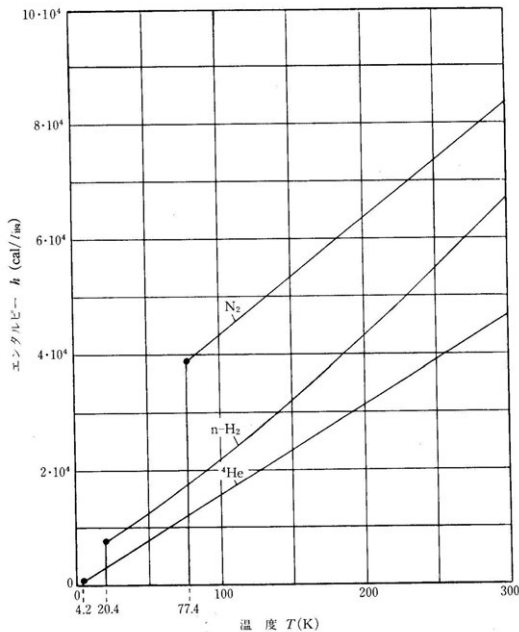


図 1.1 N₂, H₂ および ⁴He の液体 1l 当たりのエンタルピー。
 (●印は液体 1l 当たりの蒸発潜熱である。
 沸点における液体のエンタルピーを零とする。)

図 7: エンタルピーの温度依存性 [8]

るが、断熱仕事膨張は可逆である。通常、準静操作 (quasistatic operation) は熱平衡に近い状態を保ちながらゆっくりと変化するような操作だと表現され、可逆である。この断熱準静操作においては、エントロピー S が保存される。ピストンを押すモデルにおいて、ピストンが粒子速度より速く動けば断熱自由膨張になるだろうと理解できる。また、断熱自由膨張と断熱仕事膨張の中間的な操作も可能である。

ガス分子の平均速度 \bar{v}_m は次式で示される。

$$\bar{v}_m^2 = \frac{3RT}{m}$$

関連深い速度である音速 v_s も示しておく。

$$v_s^2 = \frac{\gamma RT}{m}$$

ただし、 R は気体定数 $8.31\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 T は温度 [K]、 m は 1mol あたりの質量 [kg/mol]、 γ は比熱比 (単分子であるヘリウムの場合は $5/3$) を表す。これらの関係式から、音速と分子速度は 1.3 倍程度異なるが、かなり近い値である。

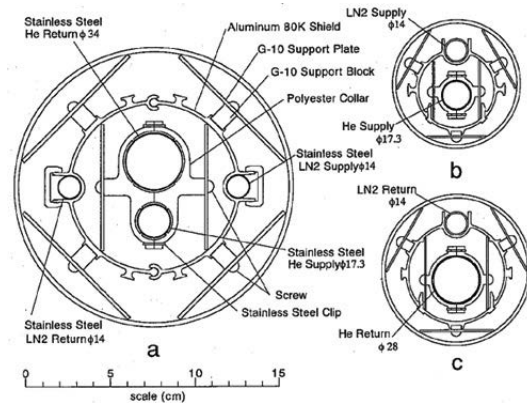


図 8: 高性能断熱配管の断面図

るが、かなり近い値である。具体的な粒子速度については、300K と 10K のヘリウムガスの場合にそれぞれ、1370m/s, 250m/s である。したがって、ピストンをゆっくり動かすという制限はこれらの速度と比較してのことなので、断熱膨張を実現するための機器は十分に実用的な速度で動作させられようである。

断熱仕事操作の温度 T と圧力 P の関係は次のようになる。

$$p^{(1-\gamma)} T^\gamma = \text{const}$$

ヘリウムの場合を想定して、 γ を $5/3$ とし、始状態、終状態の組をそれぞれ添え字で表すと次のような関係になる。

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0.4}$$

冷凍機の中で断熱仕事膨張を実現する構成機器は膨張タービンであり、断熱仕事圧縮を実現するのはコールドコンプレッサである。

先ほど、ジュールの実験により、断熱自由膨張では温度変化が見られなかったことを書いたところであるが、より精密なジュール・トムソンの実験により補正されている。理想気体においては内部エネルギーは温度の関数であり、その他の状態量に影響されない。実際の気体が理想気体に近いふるまいをするのは、圧力がそれほど高くなく、温度がそれほど低くない場合、すなわち気体の密度が低い場合である。実験の結果、私たちが今問題にしている気体が液化するような温度と圧力の領域においては断熱自

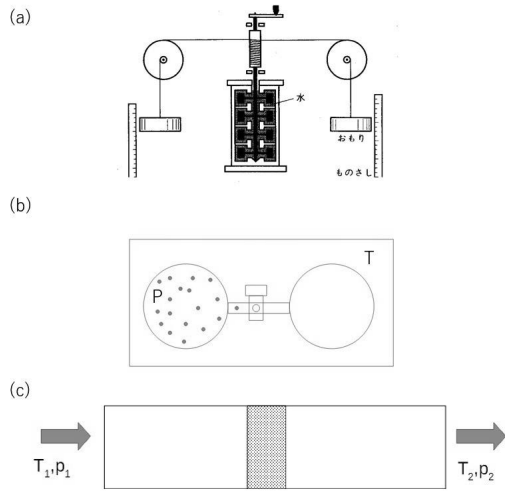


図 9: (a) ジュールの実験 1 熱がエネルギーであることを実証した [4]。 (b) ジュールの実験 2 断熱自由膨張の前後で温度変化がないことを示した。 (c) ジュール=トムソンの実験 断熱自由膨張の前後の温度変化を精密に調べ、顕著に温度変化する領域があることを見出した。

由膨張により著しく温度変化をすることが示され、ジュール=トムソン (Joule-Thomson) 効果としてよく知られている。図 9(c) に示すように小さな隙間や多孔体のような気体を通しにくい構造物を通して定常的な気体の流れを作る。構造物のために入り口圧力 p_1 は出口圧力 p_2 に比べて高くなっている。図 10 に示すように、ジュール=トムソンの実験と同じ状況を、両側にピストンを付けた実験装置で実現したとする。上流側のピストンが体積 ΔV_1 押し出す間に、下流側のピストンは体積 ΔV_2 下流側の体積を広げている。障害物の上流部分の体積が ΔV_1 減少しそこに含まれる気体の内部エネルギー ΔU_1 を減ずる必要があるが、同様の理由により、下流側の体積増加分の ΔU_2 はくわえられる。定常的な流れであれば、 ΔV_1 と ΔV_2 に含まれる物質量は同一である。

この流されたガスのエネルギー保存則は次のとおりである。

$$\Delta U = Q - W$$

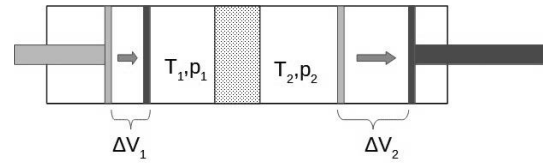


図 10: ジュール=トムソン効果を計算するための配置: ピストンの移動による体積変化を ΔV 、その体積に含まれていた気体の内部エネルギーを ΔU とする。

断熱変化のため $Q = 0$ であり、

$$\Delta U_2 - \Delta U_1 = p_1 \Delta V_1 - p_2 \Delta V_2$$

ここから、以下のように断熱自由膨張の前後でエンタルピーが変化しないことが求められる。

$$\Delta U_1 + p_1 \Delta V_1 = \Delta U_2 + p_2 \Delta V_2$$

こうして、等圧操作の指標として導入されたはずのエンタルピーが圧力変化を伴う断熱自由膨張で保存量として活躍することになる。断熱自由膨張を実現するコンポーネントは JT (Joule-Thomson) バルブである。

ヘリウムガスの状態を示す T-S 線図を図 11 に示す。断熱操作は T-S 線図上で表現するとわかりやすい。縦軸に温度 T、横軸にエントロピー S を表しており、通常、圧力一定のラインとエンタルピー一定のラインが描かれている。したがって、この図を使えば等温操作、断熱仕事膨張 (圧縮)、断熱自由膨張、等圧操作の変化を追うことができる。T-S 線図の右下のほうにドームと呼ばれる山形の構造が描かれている。液体と気体では同じ温度と圧力であってもエントロピーが異なる。ドームの左側が沸騰する冷媒の液体部分、右側が蒸発ガスを示している。ドームの内部の点は液体と気体が混じった状態を示している。JT 膨張の際には、状態はエンタルピー一定の線の左から右に向かって移動する。常温で圧力がそれほど高くない領域に注目するとエンタルピー一定の線は水平になり温度変化がないことがわかる。ジュールの実験で初めに断熱自由膨張で温度変化がないとしてしまったのはこの部分に注目したからであり、こ

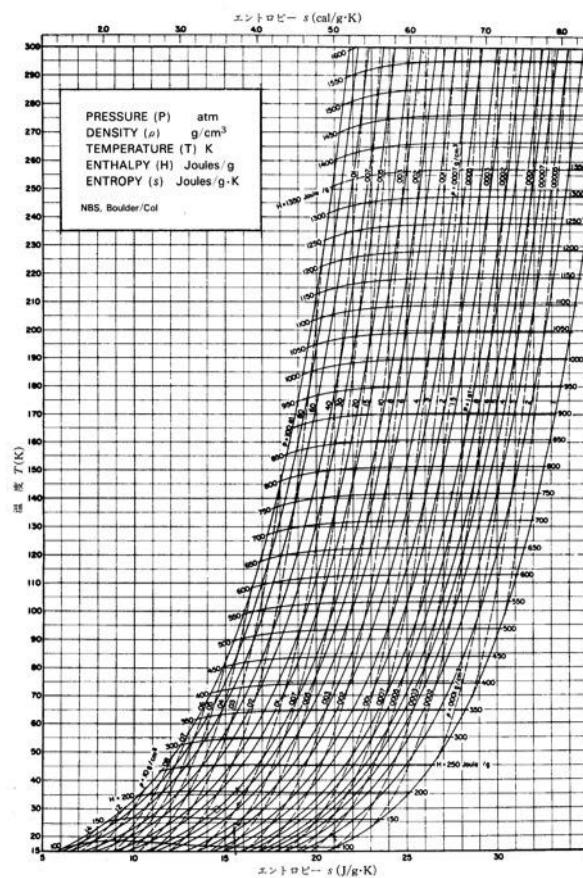
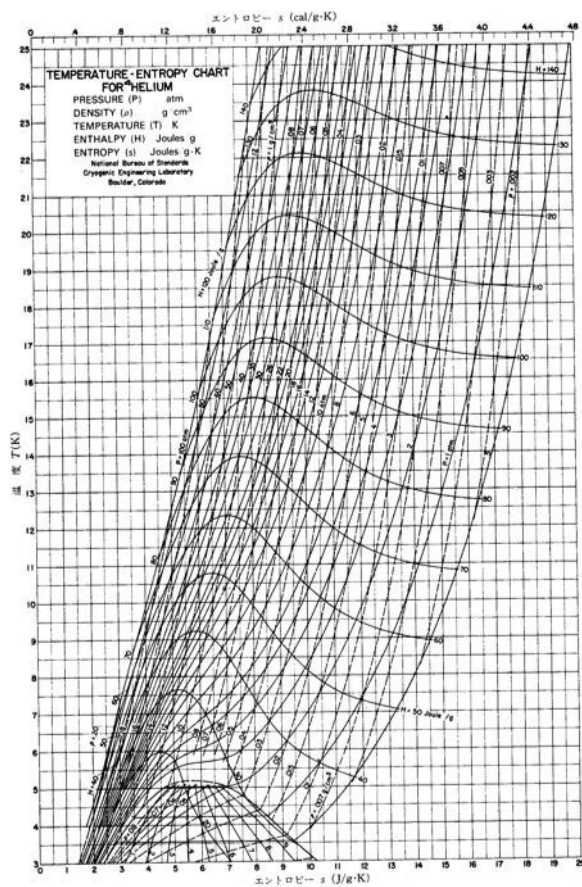


図 11: ヘリウムの T-S 線図

これは理想気体の性質である。実際の気体では高圧の場合や低温の場合に JT 膨張前後で温度変化が見られる。これは密度が大きい状態であり、分子間の相互作用が無視できるとした理想気体の条件から逸脱するためである。図 11 からは、JT 膨張によって、温度が下がる場合と上がる場合があることがわかる。

3.4 断熱

液化した冷媒を長期間保存したり、配管を通して長距離を移送するうえで、室温からの入熱を防ぐ断熱を考慮する必要がある。熱の移動形態として、熱伝導、対流、輻射があげられ、それぞれ対策が必要である [3]。

冷媒の入った容器は、支持構造物によって支えられる。支持構造体は最終的には室温に足場があるので、あまり丈夫な構造にすると入熱が大きくなる問題がある。入熱量は支持構造体の温度差 × 断面積 × 熱伝導率 ÷ 長さで求められる。温度差は低温側は 4.4K や 2K といった極低温であるが、高温側を下げる工夫は可能である。液化窒素などをふんだんに使用できるのであれば、高温側を液化窒素温度にすることで液化ヘリウムへの入熱を低減することができる。デュア-容器など特に断熱性能が求められるうえに、低温の蒸発ガスが利用可能な設備では、蒸発ガスを使ってポートなどの入熱が大きくなりがちな部分を冷却するといった工夫もされている。断面積を小さくする方法としてワイヤー状のサポートで釣

る方法がある(図12)。張力を調整することで、構造を安定させる工夫は自転車の車輪を支えるスポークなどを想像すると理解しやすい。重量が非常に大きかったり、運転時に力がかかったりする電磁石の場合は、支持構造体に圧縮力がかかる柱のようなタイプが使われることも多い。柱タイプの場合は、パイプ状の素材を使うなどして、断面積当たりの強度(断面二次モーメント)を上げる工夫がされている。構造体の素材としては、熱伝導率の小さいG10(ガラス繊維強化プラスチックの一種)が好まれるが、ステンレス鋼等が使用されることもある。長さについてはスポークタイプの場合は比較的長く設定することは容易である。柱タイプの場合でも、折り返し構造を設けるなど実効的な伝熱距離が大きくなるように工夫されているものもある。

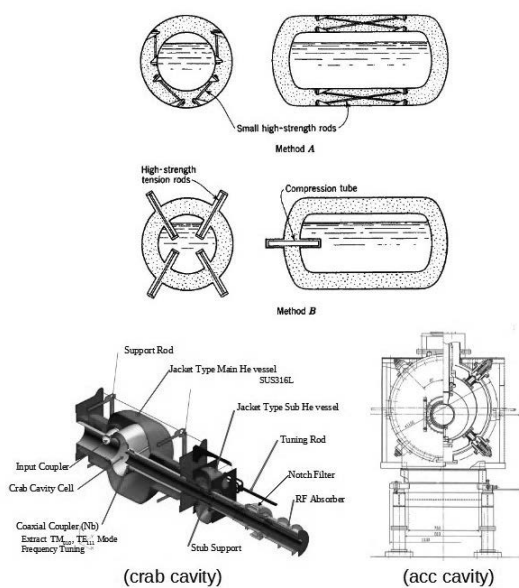


図12: クライオスタット内部の低温容器の支持構造

断熱容器壁は内部に断熱真空層を設けることにより対流による入熱を防ぐ構造となっている。必要とされる真空の圧力は 1.0×10^{-2} Pa 程度である。特に液化ヘリウムを扱う場合には、極低温の表面が断熱真空中に現れるため、ほとんどの気体分子はその表面に吸着され断熱真空の圧力が低下する。冷却開始前の真空が 1Pa 程度であれば冷却による圧力の低下

により、性能の低下が問題にならないことがほとんどである。断熱真空に漏れている気体がヘリウムであったり、連続的な漏れがある場合は十分な断熱が得られなかったり、場合によっては既定の温度まで冷却できない場合もある。液化窒素の容器では、この吸着による圧力の低下があまり期待できないので、冷却前に十分に断熱真空槽を排気しておかなければならない。また、クライオスタットの内部で蒸発ガスの対流を防止するために、バッフル板を施工する場合がある。

物質は次式に示すように単位面積当たり、その温度 T の4乗と輻射率 ϵ に比例したエネルギーを電磁波として放出している。

$$Q = \epsilon \sigma T^4$$

ここで、 σ はシュテファン=ボルツマン (Stefan-Boltzmann) 定数と呼ばれる比例乗数で値は $5.67 \times 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ である。温度 T_h の物体と温度 T_l の物体を向かい合わせて真空中に置いた場合、輻射による定常的なエネルギーの流れが発生する。輻射によるエネルギーのやり取りがある場合でも、熱平衡時には2つの物質は同じ温度に落ち着くはずである。したがって、輻射のエネルギーを吸収する割合と放出する割合は同じになるべきである。そのような理由で、輻射率は名前としては光を放出する割合であるが、吸収する割合としても利用できる。輻射率は、光を常に完全に吸収する物質に対して1、反射する物体について0とする係数で、輻射率1の物体を黒体と呼ぶ。実際の物質には色があるので、光の吸収率は波長依存性がある。黒体から放出される電磁波の波長分布は温度によって異なるため、温度によって主にやり取りされる電磁波の波長が異なる。従って、輻射率は温度依存性を持つことになる。低温機器によく使用される材質の輻射率を表2に示す。輻射率はなるべく低温のものを選んだが一部室温のものも混じっている。

向かい合った平衡平板の間に流れる単位面積当たりの輻射のエネルギー(熱流束) \dot{q} は次式のようにになる。

$$\dot{q} = \frac{\sigma(T_h^4 - T_l^4)}{\frac{1}{\epsilon_h} + \frac{1}{\epsilon_l} - 1}$$

低温機器が黒体でできている場合、300K から 4.2K への入熱は $459\text{W}/\text{m}^2$ である。表 2 から分かるように、金属の表面は輻射率が小さく、低温容器を輻射率の小さい材料で作るか、表面を覆うだけで容易に入熱を 95%程度低減することができる。しかし、残りの 5%で $20\text{W}/\text{m}^2$ 程度の入熱もまだ十分小さいとは言えない。高温部と低温部の間に輻射を遮る板を置くと、板は高温側と低温側のそれぞれと釣り合う温度になり、熱流束は板がない場合の約 1/2 に低減される。中間の板の数を 2 枚、3 枚、 \dots n 枚と増やしていくと、熱流束は $1/3, 1/4, \dots, 1/(n+1)$ と変化していく。低温機器でよく使用される積層断熱材はこのような原理に基づくもので、アルミ蒸着した透明なポリマーシートとシートを支えるための支持材を交互に重ねて輻射を多段にさえぎる構造になっている (図 13)。支持材は、各シートとの接触が小さく、輻射を通過させるための大きな開口率が求められるため、メッシュ状の構造のものが採用されている。以上の結果から、積層断熱材の層をなるべく多く巻きたいと考えるものだが、シートの中に挟んだ支持材を強く圧縮すると各層が接触し断熱性能が低下する。断熱真空の厚みが十分とれない場合は、無理に厚く (多層に) 巻かないほうが性能が良い場合もある。また、面内方向の伝熱にも注意が必要で、温度差がつく領域に施工する場合は、断熱材を伝わって熱が入ってくることも考慮するべきである。

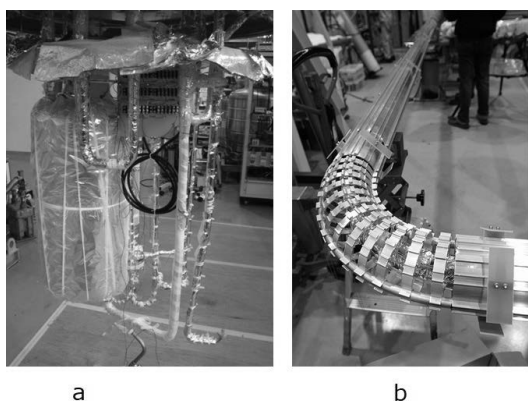


図 13: a: 積層断熱材の施工例 b: 77K シールドの施工例

表 2: 各種物質の輻射率 [9]

材質	輻射率
アルミニウム (磨いた面)	0.011 ~0.027
アルミニウム (蒸着面)	0.014 ~0.021
真鍮 (磨いた面)	0.018
銅 (磨いた面)	0.006 ~0.06
ステンレス (磨いた面)	0.055 ~0.13
GFRP	0.52 ~0.68
紙 (室温)	0.92

伝熱の低減のために液化窒素温度の温度定点を設けたのと同様に輻射による入熱の低減にも窒素温度のシールド板の導入が有効である。液化窒素温度は 77K で室温の 1/4 程度である。輻射によるエネルギーの移動は温度の 4 乗に比例するので、窒素温度のシールドからの輻射は室温からの輻射に比べて 1/200 以下に低減される。

3.5 等温操作

等温操作 (isothermal operation) 時に系が外界にする仕事は操作の急峻さによって異なる。このことは、断熱過程で議論した自由膨張と仕事膨張の差と同様である。始状態と終状態を同じくする操作のうち、系が外界にする最大の仕事 W_{max} を実現するのは、等温準静操作時である。準静操作が可逆であることを利用すれば、最大仕事を利用してポテンシャルエネルギーに相当する状態量を定めることができる。状態 1 から状態 2 に系を等温準静操作で変化させたとして、それぞれの状態に対応した F は次のように示される。

$$W_{max} = F(1) - F(2)$$

このポテンシャルをヘルムホルツ (Helmholtz) の自由エネルギー F と呼ぶ。 F を異なる温度で比較するための定義は、エントロピーの定義の際に簡単に紹介する。熱力学の第一法則から、この操作の間に系が吸収する熱量を以下のように計算することがで

きる。内部エネルギーは状態量であるため、始状態と終状態の差は途中の操作によらず一定になる。エネルギー保存の式から、最大吸熱量が実現する操作と最大仕事を実現する操作は共に等温準静操作であることがわかる。

$$U(2) - U(1) = Q - W$$

等温操作の実現を目指している冷凍機の構成機器は圧縮機である。

3.6 カルノーサイクル

高温源の温度 T_h と低温源の温度 T_l を決めて、それぞれの温度を断熱準静操作で結ぶことのできる 2 組の状態を定める。図 14 の状態 A と D、及び B と C はそれぞれ断熱準静操作で行き来することができる。状態 A と B、及び D と C はそれぞれ同じ温度なので等温過程で結ばれる。状態 $A \rightarrow B$ と $D \rightarrow C$ のそれぞれの操作における最大吸熱量 $Q_{max}(A \rightarrow B)$ と $Q_{max}(D \rightarrow C)$ には以下のような関係が成り立ち、これをカルノー (Carnot) の定理と呼ぶ。

$$\frac{Q_{max}(A \rightarrow B)}{Q_{max}(D \rightarrow C)} = \frac{T_h}{T_l}$$

この関係式をヘルムホルツの自由エネルギーと内部エネルギーで書くと、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{U(B) - U(A) - F(B) + F(A)}{T_h} \\ &= \frac{U(C) - U(D) - F(C) + F(D)}{T_l} \end{aligned}$$

ここで、次の状態量を定義する。

$$S = \frac{U - F}{T}$$

カルノーの式は次のように変形され、見通しが良くなる。

$$S(B) - S(A) = S(C) - S(D)$$

2 組の等温準静操作で状態量 S の変化量が等しいことがわかる。偶然変化量が等しいと考えるよりも、

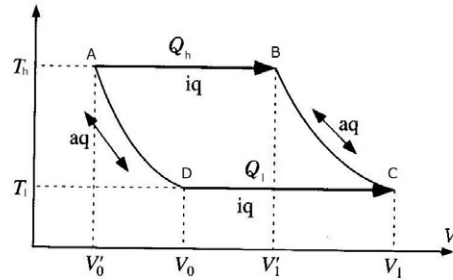


図 14: V-T 平面に投影したカルノーサイクル

断熱準静操作を通じて S が変化しないと考えたほうが自然である。F は温度ごとに自由に基準点を決められる自由度が残っているので、断熱準静操作を通じて S を変化しないように調整することができる。断熱準静操作を通じて変化しない量はすでに紹介したようにエントロピーである。

カルノーサイクルは、等温準静操作と断熱準静操作を組み合わせて作られた仮想的な熱機関のひとつである。図 14 で示した状態 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ と状態変化して元の状態に戻る。カルノーサイクルは準静操作のみを利用しているため、可逆過程である。このため、逆回転させることで冷凍機として機能する。カルノーサイクルのエネルギーの流れを図 15 に示す。効率を計算するうえで必要な関係は以下の 2 式となる。

$$\frac{Q_h}{T_h} = \frac{Q_l}{T_l}$$

$$Q_h = Q_l + W$$

ここで、 $Q_{max}(A \rightarrow B) = Q_h$ 、 $Q_{max}(D \rightarrow C) = Q_l$ と置きなおした。熱機関は燃料を使って熱を供給して仕事を取り出す装置であるから、効率は次のように表される。

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{T_h - T_l}{T_h}$$

同様に、冷凍機は動力 (仕事) を使って低温源から熱を取り去る装置であるから、効率は次のように表される。

$$\eta = \frac{Q_l}{W} = \frac{T_l}{T_h - T_l}$$

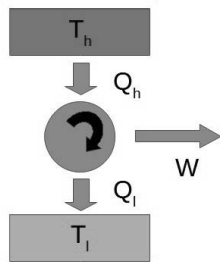


図 15: カルノーサイクルの熱と仕事の流れ

図 16 に示すようにカルノーサイクルと冷凍サイクルを同時に運用する場合を考える。カルノーサイクルを使って仕事 W を生み出す。冷凍サイクルにこの仕事を投入し低温源から高温源に熱を移動させる。冷凍サイクルはカルノーサイクルとは異なる仕組みでもよいものとする。低温源は冷凍サイクルによって冷却されるので、熱浴でなくてもよく、カルノーサイクル化が供給される熱と冷凍サイクルにより取り去られる熱が釣り合った状態でもよい。このことにより、関係する熱浴は 1 つのみとなる。

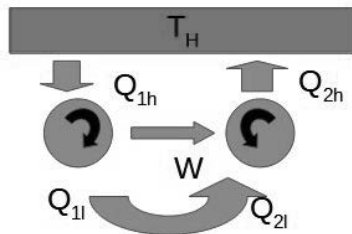


図 16: 2 つの可逆機関を並べた配置

冷凍サイクルの効率がカルノーサイクルよりも高い場合を考える。低温源に出入りする熱は等しい ($Q_{1l}=Q_{2l}$) としているので、エネルギー保存則より、冷凍サイクルがカルノーサイクルで発生した仕事より小さい仕事を受け取り ($W_1 > W_2$)、高温側に戻す熱もカルノーサイクルより小さくなる ($Q_{1h} > Q_{2h}$)。全体的にみると、この 2 つの組み合わせられたサイクルは、高温側から $Q_{1h}-Q_{2h}$ の熱を取り出し、それをすべて仕事に変換する機関となっている。このような機関は第 2 種永久機関と呼ばれ、熱力学の第 2 法

則により存在しないものとされている。

熱力学の第 2 法則には様々な表現があるが、第二種永久機関に関係した表現を紹介すると、「等温サイクルが外界に対して正の仕事をすることはあり得ない(ケルビン (Kelvin) の原理)」というものである [10]。なお、等温サイクルとは、熱浴を 1 つだけ使うサイクルということで全工程において内部の温度変化を許さないわけではない。

これらの考察より、カルノーサイクルよりも高効率な冷凍サイクルは存在しないことがわかる。同様に、カルノーサイクルより低効率な可逆機関が存在する場合にも第二種永久機関ができてしまい、熱力学の第 2 法則をみたさない。従って全ての可逆機関の効率は等しくなければならない。このように求められた理論的な熱効率の限界をカルノー効率と呼ぶ。

4 冷凍機の種類

4.1 理想的な液化機

図 17 に示すように圧縮機で等温圧縮した後に断熱仕事膨張させることで液化が可能であるはずだ。液化機の状態変化は縦軸を温度 T 、横軸をエントロピー S で表した T - S 線図上に示すと分かりやすい。出発点である常温 (300K) 常圧 (100kPa) のヘリウムガスと、常圧 (100kPa) で沸点 (4.2K) の液化ヘリウムの位置を確認する。常温、常圧のヘリウムガスを等温圧縮すると、エントロピーが減少する。すでに、理想気体においては内部エネルギーが温度のみの関数で、体積によらないことを紹介した。したがって、圧縮に要した仕事に比例した量のエントロピーが減少する。液化ヘリウムのエントロピーと等しいエントロピーになるまで常温のヘリウムガスを圧縮する。圧縮したガスを断熱仕事膨張させて液化する。断熱仕事膨張は等エントロピー変化である。したがって、状態は T - S 線図をまっすぐ下に移動して、沸点の液化ヘリウムの場所まで移動する。このようにして、液化ヘリウムが得られるはずであるが、実際にはそのような簡単な液化機は存在しない。ヘリウム液化冷凍機でよくみられる 1.5MPa (15 気圧) 程度の圧力であ

れば断熱仕事膨張により、300Kの気体を約100Kまで冷却できるが、液化ヘリウム温度には到達しない。高圧ガスポンプの最大圧力である14.7+0.1MPa(148気圧)まで加圧しても約40Kまでしか冷却できず、やはり液化しない。断熱仕事膨張の効率が1でないことを無視しても、常温で液化ヘリウムと同じエントロピーになるように圧縮するには、70GPa(70万気圧)程度まで、部分的に液化する場合でも約4.3GPa(4万3千気圧)以上に加圧しなければならない。このような圧力領域で動作する実用的な圧縮機は存在しない。

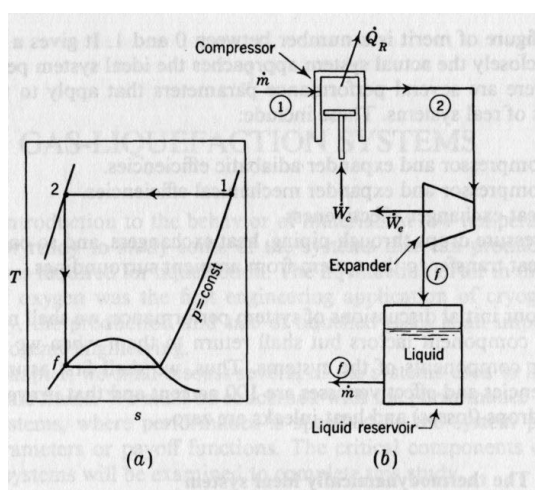


図 17: 理想的な冷凍機

4.2 リンデ-ハンブソン冷凍機

リンデ-ハンブソン (Linde-Hampson) 冷凍機は空気の液化のために開発された。図 18 にリンデ-ハンブソン冷凍機の模式図と T-S 線図を示す。この冷凍機は圧縮機と熱交換器と JT バルブにより構成されている。特に低温を発生させる構成機器として JT バルブのみが使用されている点が特徴である。JT バルブは断熱自由膨張を実現する構成機器であり、理想気体に対しては温度変化を起こさないことはすでに述べた。ヘリウムガスの T-S 線図 (図 11) からわかるように、300K のヘリウムガスは断熱自由膨張によってほとんど温度変化が見れないか、圧力が高い領

域においてはわずかに温度が上昇する。図 19 示されたごく限られた範囲内のみが断熱自由膨張により温度が下降する領域である。これらの状況から、この冷凍機はヘリウムガスを作業流体とした場合、室温から起動することができない。圧縮機で 1.5MPa まで加圧するとして、ヘリウムを部分的に液化するためには、JT バルブ入り口の温度が少なくとも約 7.7K まで冷却されていなければならない。なお、図 20 に示すように、窒素ガスは常温でも JT バルブを用いて温度を下げるができるため、液体空気のプラントとしては成立した。

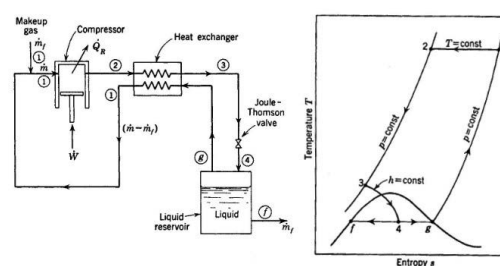


図 18: Linde-Hampson 冷凍機 [6]

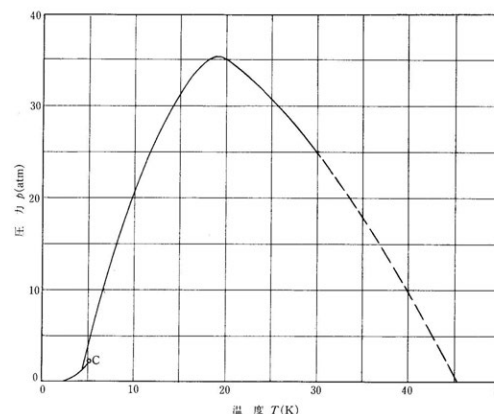


図 19: ^4He の逆転曲線 [8]

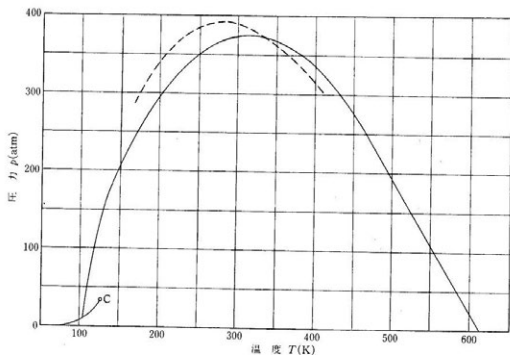


図 20: N₂ の逆転曲線 [8]

4.3 クロード冷凍機

熱交換器と断熱仕事膨張を組み合わせることで他の冷媒を用いることなくヘリウムガスを液化することができる。クロード (Claude) 冷凍機の模式図と T-S 線図を図 21 に示す。液化機の効率を向上させるために複数の膨張タービンを利用する場合があります、これを Collin 冷凍機と呼ぶこともある。同様に、熱交換器の段数が増えることもあるが、これらも含めてクラウド冷凍機に分類することができる。クラウド冷凍機は実用化されているヘリウム液化冷凍機の主流となる概念である。デュアーの直前に配置された熱交換器に注目すると、デュアーが室温の場合、先に議論したようになかなか冷却が進まない構成になっている。デュアーに液化ヘリウムがたまる前は行きと帰りのガスのどちらかをバイパスするなどして質量流量のバランスを崩すことでデュアーと熱交換器を冷却することができる。

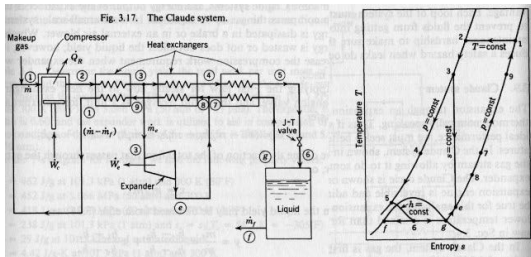


図 21: クロード冷凍機 [6]

ヘリウム液化冷凍機を運用する際にしばしば、冷凍機モード、液化機モードという用語を耳にする。液化機の能力は単位時間あたりに供給する液化ヘリウムの量で評価される。蒸発潜熱から計算すると、液体ヘリウムの供給能力 1L/h は約 0.7W に相当する。液化能力はデュアーの液面上昇速度で評価することが多いが、より正確には液面を一定に保ってポート f から取り出せる液化ヘリウムの量で評価すべきである。これは、デュアーのガス層が減少し、その分のガスが余分に液化機に戻されるからである。液化機モードの能力は液化ヘリウムを取り出さず液面が上昇しないようにデュアーの中でヒーターに通電するなどして評価する。冷凍機モードでは蒸発したヘリウムガスが低温のまま冷凍機に戻り、その顕熱が利用できるため液化ヘリウムの供給量が増加する。液化機モードでの液化能力 1L/h は冷凍機モードの 2~3W の冷凍能力に相当する。

4.4 磁気冷凍機

常磁性物質と磁場を利用した冷却により、液化ヘリウムを利用して実現可能な温度よりも低温を実現することができる。ある温度で常時性物質に磁場をかけると分子が規則正しく並びやすくなり、同じ温度であれば磁場をかけないときよりエントロピーが小さくなる。系を断熱した状態で磁場を弱くしていくと、エントロピーは低いまま分子の磁気的な規則性が失われて、常磁性物質の温度が低下する。図 22 に磁気冷凍機の例を示す。このシステムでは系を断熱したり、透熱したり制御するのに thermal valve というコンポーネントが描かれているが、これは鉛の薄い板でできており、外部磁場にかけて鉛を常伝導状態にすると、超伝導状態に比べて熱伝導が良くなることを利用している。したがって、この冷凍器のサイクルは全て外部磁場によって制御できる。減圧した液化ヘリウム温度をベースに磁気冷却により 1.4mK に到達した報告がある。低い温度が実現できるが、冷凍能力は小さく加速器の構成機器を冷却する方法としては適していない。

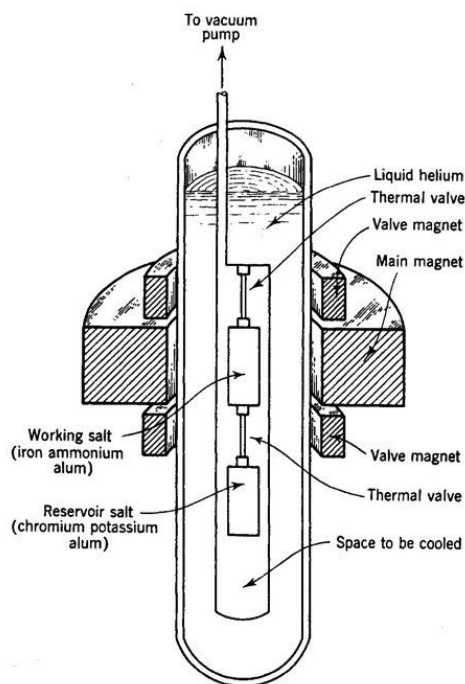


図 22: 磁気冷凍機 [6]

4.5 希釈冷凍機

^3He と ^4He を利用して 1 成分系の液化ヘリウム温度よりも低い温度を実現する希釈冷凍機もよく知られている。もともと、 ^3He は蒸気圧が ^4He より高いので、 ^4He に ^3He を混ぜることで減圧による温度を下げる操作が容易になる (cERL の項目を参照)。しかし、流路を少し見直すことでさらに低い温度を得ることができる。希釈冷凍機の模式図を図 23 に示す。図 23 に示すように ^3He と ^4He の混じった液化ヘリウムは低温 (0.87K 以下) では超流動相と常流動相の 2 相に分離する。超流動相が含むことができる ^3He は 6.5% 程度と小さいので、界面で大きな密度差が生じる。超流動層側のみを減圧することで ^3He を回収することができ、 ^3He を多く含む相から連続的に ^3He が供給される。 ^3He の密度のみに注目すると、 ^3He の密度が希薄な超流動相に拡散していく際に温度が低下する。この方式で約 2mK まで冷却するこ

とができる。

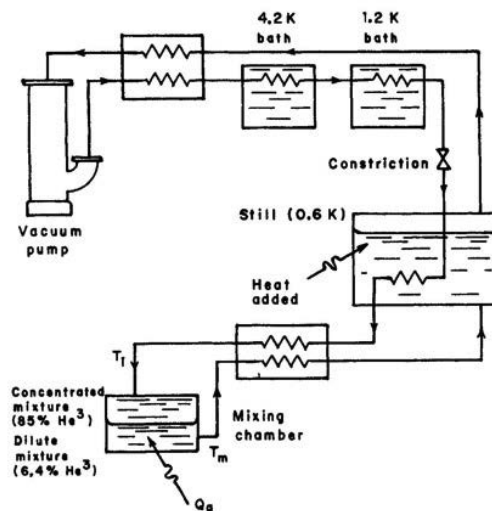


図 23: ^3He - ^4He 希釈冷凍機 [6]

4.6 小型冷凍機

低温工学・超電導学会のホームページから、現在入手可能な冷凍機の一覧を見ることができる [11]。一覧では小型冷凍機に分類される機器が数多く紹介されている。極低温に対応できる冷凍機の中でも非常に小型であり、低温になるヘッド部分を被冷却対象に接触させて冷却することができる。扱いが容易であるが、冷凍能力は大きくなく、低温工学のサイトのリストの中から 5K 以下に冷却可能なものに注目すると最大冷凍能力は 5W である。代表的な小型冷凍機である Gifford-McMahon (G-M) 冷凍機の模式図と T-S 線図を図 24 に示す。小型冷凍機にはいくつかの異なる冷凍サイクルが採用されており、G-M サイクルのほかに、Solvay サイクルや Stirling サイクルが採用されたものもある。また、G-M サイクルをベースに JT バルブを備えたものもあり様々なタイプの冷凍機が市販されている。これらのサイクルでは内部にピストンやディスプレイサが組み込まれており、往復運動をしているために振動が問題となることがある。これに対し、ガスピストンにより動

作するパルス管冷凍機は往復運動する機械部品がないため振動が少ない。

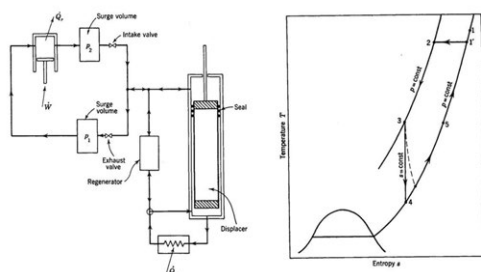


図 24: Gifford-McMahon(G-M) 冷凍機 [6]

5 加速器で使用された冷凍機の例

5.1 SuperKEKB

KEK は、現在 SuperKEKB の超伝導加速空洞の冷却用に使われている冷凍機の運用を通じて大型冷凍機の長期運用の実績を持っている。この冷凍機はもともとは 1988 年から超伝導加速空洞を利用した運転を開始した TRISTAN 加速器のために建設されたもので、4.4K における設計冷凍能力は 6.5kW (実績値は 8.1kW) である。TRISTAN 加速器が運転を終了した後も、同じトンネル内に建設された KEKB, SuperKEKB の超伝導加速空洞の冷却を続けている。この冷凍機の模式図と T-S 線図を図 25 と図 26 に示す。圧縮機や膨張タービンの数が多いが、基本的な構成はクラウド冷凍機とかわらない。

圧縮機には、スクリーューコンプレッサが使用されている。冷凍機の電力は大部分が圧縮機により消費される。スクリーューコンプレッサは噛み合った回転するらせん状の軸に沿ってガスを圧縮する体積型の圧縮機である。等温操作として圧縮する仕組みが理想的ではあるが、環境に熱を逃がす十分な時間をかけられないため圧縮による温度上昇が発生する。圧縮機で実現すべき圧力は吸入圧力が 1.2 気圧、吐出圧力が 16 気圧である。300K の He ガスを 120kPa から 1600kPa まで加圧するのに必要な仕事は 1mol

あたり断熱圧縮で 11.3kJ 必要で、圧縮後の温度も 845K まで上昇する。一方等温操作が可能であれば必要な仕事は 6.5kJ に抑制される。間を取って、吐出ガスの温度が一定になるように圧縮を 2 段に分けると、必要な仕事は 8.5kJ、吐出温度は 504K とかなり低減される。段数を 3 段、4 段と増やすと、それぞれ必要な仕事は 7.7kJ、7.4kJ、吐出温度は 424K、388K と等温圧縮に近づいていく。図 25 に示すように、SuperKEKB の冷凍機では 6 台の圧縮機が組み合わせられて構成されており、中間圧力のガスを室温に冷却する仕組みも導入されている。

クラウド冷凍機で使用される膨張タービンを通して作業流体は、その寒冷を利用される一方で、圧縮機に戻され、それ自体は液化されることはない。しかし、図 25 の T3 のタービンはタービンで冷却したガスを J-T 弁に送る構成となっており用途が異なる。T-S 線図でドームの左側の温度変化に注目すると、急激な温度上昇を伴っていることがわかる。この部分を温度上昇させながら J-T 膨張させるより、タービンで温度を下げながら減圧したほうが液化率が上昇するのは明らかである。膨張器の内部で液化する機構 (wet-engine) も存在するが、高速で動作する膨張器の中で作業流体の一部が液化するような設計は難易度が高いようで、少なくとも主流にはなっていない。この冷凍機では、液化の直前までタービンによる断熱仕事膨張を行い、その後 J-T バルブで液化する構成になっている。このタービンは超臨界タービンと呼ばれる。冷凍機モードによる効率的な運転には、蒸発ガスを低温で冷凍機に戻す必要があるが、SuperKEKB のように超伝導機器と冷凍機の間には距離がある場合は輸送途中である程度の温度上昇は避けられない。超臨界タービンの入り口温度は J-T バルブの入り口温度よりも高く設定できるので、少し温度上昇したガスの寒冷の回収にも有利である。

SuperKEKB のヘリウム液化冷凍機は高温タービンにより液化窒素温度相当のヘリウムガスを作り出すことができるので、定常的な運転に液化窒素を必要としない。一方で、トランスファーラインや超伝導空洞クライオスタットの輻射シールド板の冷却に

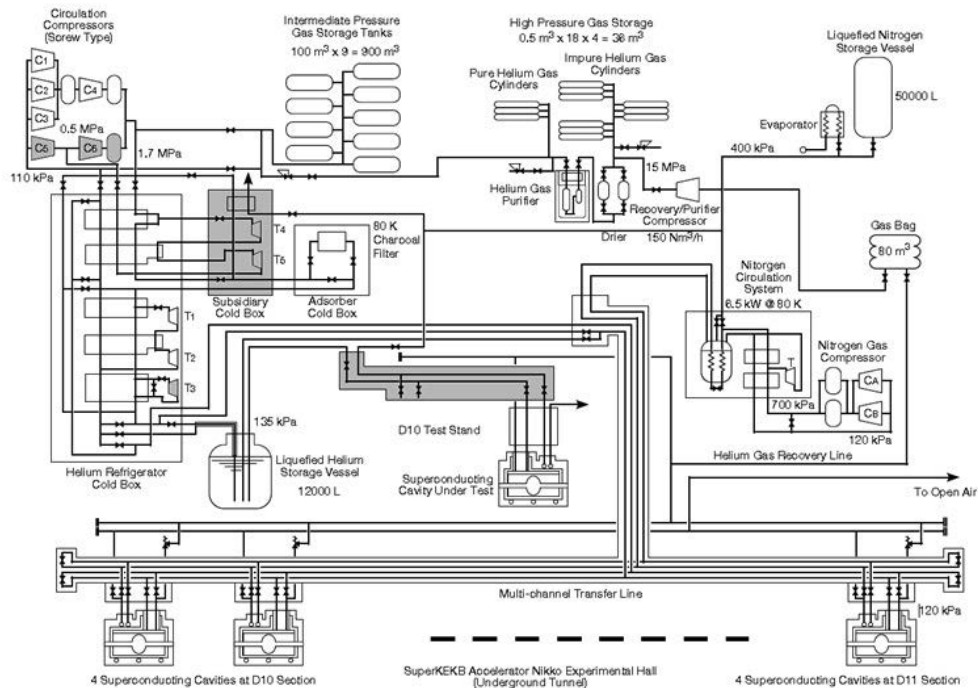


図 25: SuperKEKB の冷凍システム

は液化窒素を利用している。これらのシールドの冷却は先に述べたように窒素シールドの往復の配管の間で熱交換をするため先端部付近の温度が最も高くなる。この問題の解決方法の一つは、復路の配管から液化窒素が戻ってくることを許容することであり、そうすることで、全ての配管部分で液化窒素温度を保つことができる。SuperKEKB では窒素循環装置を用いて、戻ってきた液化窒素を大気放出することなく、蒸発した窒素ガスの一部を再液化して循環している。窒素ガスの再液化の際には、戻ってきた液化窒素の潜熱だけでなく冷たい蒸発ガスの顕熱まで利用し、省エネルギー運転を実現している。

5.2 Tevatron

Tevatron は周長約 6.3km の巨大な加速器で、4.2T で運用される 774 台のダイポール電磁石や、240 台の 4 極電磁石など、多数の超伝導電磁石が使用されている [15]。戻りガスを低温のまま長距離移送し、液化機

に戻して冷凍機モードで運用することは困難である。このため、液化ヘリウムを受け取った超伝導機器の近くで顕熱まで利用することで、システム全体の熱効率を向上させる方式が考え出された。広範囲に分散した超伝導機器を冷却するために、Tevatron の冷却システムは中央ヘリウム液化機とサテライト冷凍機を持つ特殊な構造となっている (図 27)。中央ヘリウム液化機は 5000L/h の液化能力を持つ大型の冷凍設備である。中央ヘリウム液化機で作られた液化ヘリウムがトランスファーラインを通じて 24 個のサテライト冷凍機に送られる。そこで、サテライト冷凍機では蒸発したヘリウムガスの顕熱を利用して蒸発したヘリウムガスの一部を再液化する仕組みとなっている。サテライト冷凍機から、共用の 2MPa (約 20 気圧) の常温の高圧ヘリウムガスラインと 105 k Pa (約 1 気圧) が利用できるようになっており、サテライト冷凍機そのものの動力が大きくなるように設計されている。

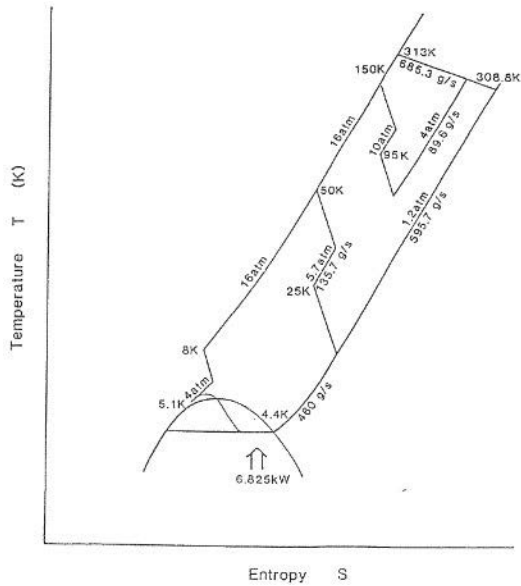


図 26: SuperKEKB の冷凍システムの T-S 線図

表 3: ITS-90 で定められた定数 [16]

温度領域	1.25 ~ 2.1768	2.1768 ~ 5.0
	[K]	[K]
対応する圧力	0.114 ~ 5.04	5.04 ~ 196
	[kPa]	[kPa]
A ₀	1.392408	3.146631
A ₁	0.527153	1.357655
A ₂	0.166756	0.413923
A ₃	0.050988	0.091159
A ₄	0.026514	0.016349
A ₅	0.001975	0.001826
A ₆	-0.017976	-0.004325
A ₇	0.005409	-0.004973
A ₈	0.013259	0
B	5.6	10.3
C	2.9	1.9

5.3 cERL

超伝導機器の要請から、運転温度を 4K よりも低くしたい場合がある。cERL では共振周波数 1.3GHz の超伝導加速空洞が約 2K で運用されている。液化ヘリウムの沸点は図 3 の気相と液相のラインが示すように液化ヘリウム槽の圧力に依存して変化する。国際温度目盛 (ITS-90) において、液化ヘリウムの沸点 T_{90} は飽和蒸気圧に関数として次の多項式で与えられているのでこれを利用するのが便利である [16]。A_i, B, C は表 3 に示す定数である。各定数は He I と He II で異なる値が設定されている。

$$T_{90}/[K] = A_0 + \sum_i A_i \left\{ \frac{\ln(P/[Pa]) - B}{C} \right\}^i$$

液化ヘリウムを大気圧 (100kPa) から減圧していくと、約 5kPa で 2.18K となり He II に相転移し、約 3.1kPa で 2K に到達する。液化ヘリウムを連続的に供給しながら 2K の実験環境を維持するための仕組みを図 28 に示す。この設備では蒸発ガスが 2K であり、4.45K の液化ヘリウムを 2K のヘリウム槽に供給する前に熱交換器を利用してあらかじめ温度を下

げるようになっている。2K の蒸発ガスは 3kPa と圧力が低く、同じ温度の大気圧のガスに比べて希薄なため熱交換の効率が低くなりがちである。また、減圧ポンプとヘリウム槽の間に設置されることから圧力損失を抑えた設計でなければ限られた減圧ポンプでヘリウム槽の圧力を十分に下げられないという問題もあることから、十分に最適化された熱交換器を準備する必要がある。実際に STF, cERL といったプロジェクトで利用されている熱交換器も KEK 所内で開発されたものである。

同様の設計で飽和超流動ヘリウムを利用した大型設備としては、アメリカの LCLS-II の冷凍システムがあげられる。ただし、ポンプの代わりにコールドコンプレッサを使用している。LCLS-II のコールドコンプレッサ群の吸入と吐出の圧力はそれぞれ 2.7kPa、120kPa で温度は 3.5K、30K である [17]。断熱仕事圧縮は吸入と吐出の圧力比が決まると吸入温度と吐出温度の比が決まる。LCLS-II の場合はコールドコンプレッサの吸入と吐出圧力の比は約 44 倍である。したがって、理想的な断熱仕事膨脹を仮定すると出入り口の温度の比は 4.6 倍になるはずで、実際の設

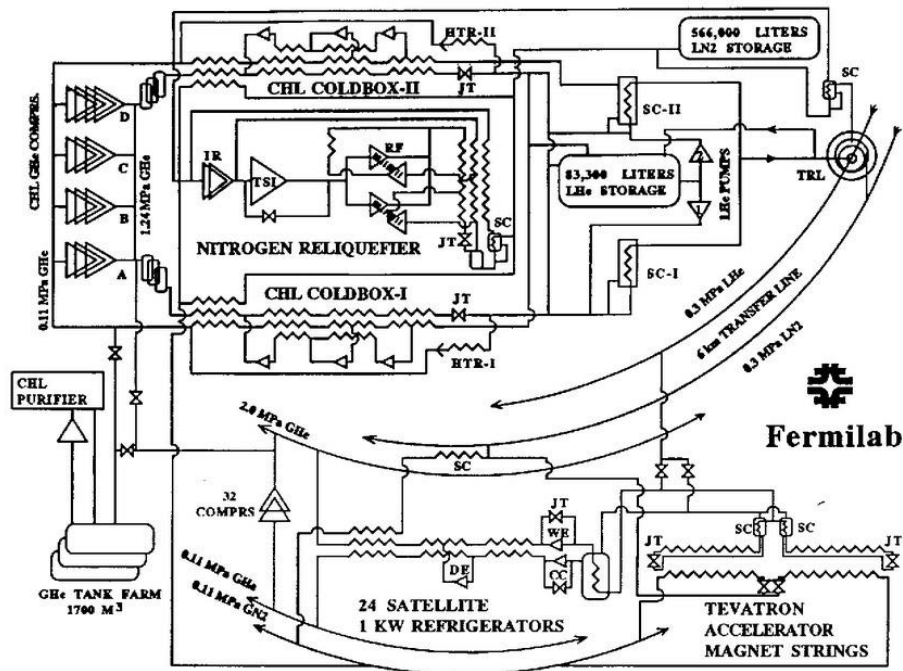


図 27: Tevatron のサテライト冷凍機システム [14]

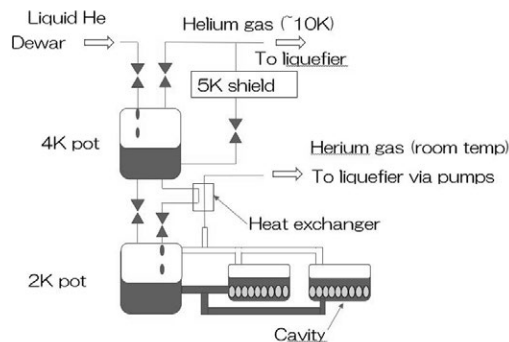


図 28: cERL の 2K 冷凍システム

計の約 8.5 倍と矛盾はない。この例から、吸入温度を低くすることは冷凍システムの効率的な運転に大きく寄与することが理解できる。吸入温度を 300K とした理想的な断熱圧縮ができた場合、吐出温度は約 1370K となり取り扱いは簡単ではない。また、1mol 当たりの仕事も 22kJ 必要である。等温圧縮とした場合でも、1mol 当たり約 9.5kW の仕事が必要である。

吸入温度を 3.5K とした場合、吐出温度は約 16K となり、必要な仕事も 1mol 当たり約 260W と大幅に低減される。実際の吐出温度は 30K であるが、まだ十分に寒冷を回収する価値のある温度であり、実際に冷凍システムに戻されて冷凍能力の増強に利用される。また、熱交換器による寒冷の回収を行う場合にも、常圧のガスは低圧の希薄なガスに比べて扱いが容易である。

5.4 LHC

LHC は周長約 27 km の円形の加速器で、Tevatron 以上に広範囲に分散した超伝導機器を運用している。超伝導電磁石は 1232 台のダイポールマグネットと 392 台の主 4 極電磁石を含む多数の電磁石群から構成されている [18]。超伝導電磁石を高い磁束密度で運用するために、冷却温度は 1.9K に設定されている。超伝導機器を直接冷却している液化ヘリウムは飽和超流動ヘリウムを利用して間接的に冷却された

加圧超流動ヘリウムである。加圧超流動ヘリウムは 1.8K の飽和超流動ヘリウムから熱交換により冷却されており、その温度は飽和超流動ヘリウムよりわずかに高い約 1.9K である (図 29)。必要とされる冷凍能力も大きく、4.4K 換算で 18kW の冷凍システムが 8 式も導入されている。

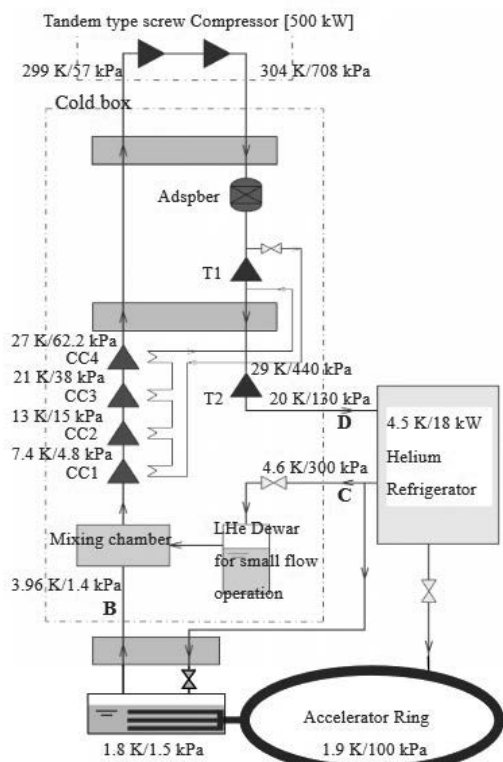


図 29: LHC の 2K 冷凍システム [19]

LHC の冷凍システムは加圧超流動を利用するため一見 cERL や LCLS-II とは異なった設計のように見えるが、飽和超流動を加速器のすぐ近くで発生させたうえで、加圧超流動と熱交換する方式であり、飽和超流動の供給システムまでは基本的に同じである。超流動ヘリウムは見かけの熱伝導率が高く、蒸発する表面で寒冷を生み出せる性格上、広範囲にわたって分布した超伝導機器を均一に冷却することが容易である。このような性質から、ILC をはじめとした大型の加速器の冷却も導入が予定されており、今後

も広範囲にわたる均一な冷却が必要な大規模加速器計画に採用されると考えられる。

5.5 共通する課題

冷凍機の効率が次式のように表されることはすでに述べた。

$$\eta = \frac{Q_l}{W} = \frac{T_l}{T_h - T_l}$$

このような冷凍機を家庭用の空調に使う際には、40℃の外気温に対し 28℃の室内温度を維持するような運転になるので、効率は $\eta = (28 + 273)/(40 - 28) \approx 25$ 等となり、効率は 1 を大きく上回ることになる。エアコンの暖房についても同様に計算ができて、ヒーターによるジュール熱で加熱するよりも高効率であることがわかる。一方、300K の外気温に対して 4.5K の冷凍機を運転する場合は、効率は $\eta = (4.5)/(300 - 4.5) \approx 0.015$ となり、効率は 1 よりずっと小さい。この小さな数字のままでは扱いにくいので、逆数を取って表現することが多い。理想的な冷凍機の効率の逆数は液化ヘリウムデュアーの圧力や外気温の設定により変動するが、65 ~ 75 程度である。実際の冷凍機の効率は時代とともに改善されているが、最も近代的な冷凍機でも理論効率よりも 3 倍以上大きなエネルギーを消費している。様々な冷凍設備の効率の比較を図 30 に示す。4.5K で 1W 冷却するために数百 W の電力が必要である。デュアーの液化ヘリウムの温度や、液化窒素の使用等も補正されて単純に比較できるように工夫されている。2K 冷凍機は 4.5K をベースに 2K を作っていく必要があり、さらに消費電力が数倍になる。

冷凍機は超伝導機器を定常運転の温度まで冷却する際や、エージングなどで超伝導空洞に大きな RF 電力を投入している際に冷凍能力を必要とする。一方で、定常的な運転で最大冷凍能力を必要とすることはなく、定格に対して小さな冷凍能力で長時間運転しなければならない。冷凍能力を下げた運転で定格と同じ効率を出すのは実際は難しい。まず、大型の冷凍機は時定数が大きく、最適なパラメータを見

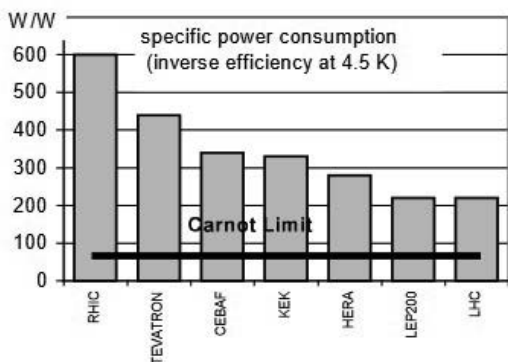


図 30: 大型冷凍機の効率の比較

つけるのが難しい。パラメータの調整がうまくいかなかった場合に、熱的なバランスを崩してしまうことを恐れて、熱負荷の変動をヒーターで打ち消して見かけの熱負荷を安定化させることがしばしばある。さらに、圧縮機の出力を小さくできるような運転条件を見つけても、流量や圧力の減少に見合っただけ消費電力を削減することが難しいといった大電力機器の制御の問題がある。ヘリウム冷凍システムの高効率化は現在も重要な開発課題である。

参考文献

- [1] 細山謙二, "ヘリウム冷凍機" OHO'92.
- [2] 勝本信吾 他, 「ヘリウムリサイクルへの取り組み」低温工学 56 (2021).
- [3] S.W.Van Sciver, Helium Cryogenics, Plenum Press, New York and London (1986).
- [4] 戸田盛和, 岩波物理入門シリーズ "熱・統計力学" (1983).
- [5] 長岡洋介, 岩波基礎物理シリーズ "統計力学" (1994).
- [6] Randall F. Barron, Cryogenic Systems, OXFORD UNIVERSITY PRESS, NEW YORK (1985).
- [7] アトキンス 物理化学第 10 版 東京化学同人 (2017).
- [8] 低温工学ハンドブック 内田老鶴圃新社 (1982).
- [9] 超電導・低温工学ハンドブック 低温工学協会編 (1993).
- [10] 田崎清明 新物理シリーズ "熱力学" (2000).
- [11] 低温工学・超電導学会 <https://www.csj.or.jp/>
- [12] 住友重機械工業ホームページ <https://www.shi.co.jp>
- [13] D.J.Cousins et al. "An Advanced Dilution Refrigerator Designed for the New Lancaster Microkelvin Facility" J Low Temp Phys, 114 (5) (1999), pp. 547-570
- [14] B.Norris et al. "Cryogenic System for the Tevatron" felmilab-cod 96/296 (1998).
- [15] Robert R Wilson "The Tevatron" felmilab-TM-763 (1978).
- [16] 櫻井弘久 応用物理 59 (1990).
- [17] LCLS-II Final Design Report (2015).
- [18] L.Rossi. "THE LHC SUPERCONDUCTING MAGNETS" proceedings of PAC2003 (2003).
- [19] 佐治脩好 et al. "CERN LHC の 1.8K/2.4kW ヘリウム冷凍システムとコールドコンプレッサーの技術"
- [20] Philippe Lebrun, "Cryogenic refrigeration for the LHC" MaTeFu(Magnet technology for fusion) Spring Training School のスライド
- [21] H.Lierl, "Technology of cryogenics for storage rings" EPAC (1998)