「冷 凍 サ イ ク ル」

信 貴 豊 一 郎

大阪市立大学理学部 大阪府住吉区杉本町

(1972年 9 月 25 日 受理)

“Refrigeration Cycle”

Toyoichiro SHIGI

Faculty of Science, Osaka City Univ.

Sugimoto-cho Sumiyoshi-ku, Osaka-shi

(Received September 25, 1972)

Synopsis :

In this paper are described basic principles of refrigeration, followed by various refrigeration cycles, classical and modern, with special emphasis on their meanings but without recourse to complicated formulae.

§ 1. ま え が き

最も簡単な低温の利用法は物体を液体ヘリウムや液体窒素につけて冷却し、発生する熱量は寒剤の蒸発潜熱によって取除けばよいわけであるが、これでは蒸発ガスの寒冷を利用せずに捨てて了うことになるのでロスが非常に多い。少し大規模な冷却を行なう場合、このロスが重大な問題となる。若し冷すべき物体を冷凍サイクルの中に組込んで了えば、上の方法で捨てられていたガスの寒冷は冷凍作用を行なうガスの予冷に利用できるので、冷却効率を著しく上昇させることができる。冷凍にはサイクルの中で生じた液体で冷却する場合もあれば、また寒冷ガスで冷却する場合もあるので、ガスの液化サイクルも含めて説明を進めることにする。

従来低温の発生といえば、絞弁を使う Joule-Thomson 膨張か、膨張機を利用する断熱膨張に限られていたが、近年それ以外に種々の新しい方法が考案され、実際に使われるようになってきた。以下それ等について主として原理的な面から説明を加えてゆくことにする。

§ 2. 冷凍の原理

普通の冷凍サイクルでは作業ガスを室温で圧縮し、

発生する熱量は水冷または空冷によって取り除く。圧縮された高压ガスは熱交換器または蓄冷器を通して冷却された後、低温部で仕事をしながら膨張する。この時寒冷が発生することになる。膨張ガスは再び熱交換器または蓄冷器を経て圧縮機に戻る。低温で行なわれる仕事には、作業ガスの分子間引力に抗して行なわれるガスの内部仕事を利用する場合と、低温の作業ガスが外部に対して行なう外部仕事を使う場合がある。前者は Joule-Thomson 膨張に対応し、後者には膨張エンジンやタービンを駆動して外部に機械的な仕事を取り出す方法、あるいは低温部の作業ガスが他の部分にあるガスを押しのける寒冷発生法等がある。これ等については後で個々に説明することにする。

ここで、行なわれた総仕事量 W の低温部で発生する寒冷（いいかえれば吸収する熱量） Q_c に対する割合いをできるだけ小さくすることが望ましい。もちろんこの値はいくらでも小さくとれるわけではなく、熱力学の示す理想値が限度である。冷凍サイクルに非可逆過程が混入するにつれて、 W/Q_c の値が大きくなってゆく。その理由は室温部に仕事として取り出さるべきエネルギーを低温部で熱として放出して了うためである。しかし実際にはこのことばかりにこだわってはおれない。特に小型装置の場合、少々エネルギーが落ちても装置の簡便さ、信頼性、耐久力等が優先することが

多い。また理論的には理想的な効率を持つはずであっても、実際に作ろうとすると種々の制約があって理論通りに行かないのが普通である。

さて熱力学第2法則によれば、理想の場合 W/Q_c は次式で与えられる。

$$\frac{W}{Q_c} = \frac{T_h - T_c}{T_c} \quad (1)$$

ここで T_h は室温、 T_c は低温部の温度である。 T_c が室温に比べてうんと小さい場合、近似的に

$$\frac{W}{Q_c} \approx \frac{T_h}{T_c}$$

とかけるから、低温部で一定の冷凍効果を得ようとするれば、温度が低い程それに逆比例した大きな仕事量が要求される。これから絶対零度に到達できないことが了解されるであろう。

今迄低温部での寒冷発生の方に注目していたが、これと室温部を結びつける熱交換器あるいは蓄冷器も忘れてはならない要点である。例えばヘリウム冷凍機の場合交換される熱量は発生寒冷の数10倍に達するから、熱交換率1%の低下は低温での膨張効率30%の減小を凌駕する。

§ 3. 等 entropy 膨張と等 enthalpy 膨張

3-1 等 entropy 膨張

断熱膨張を行ないながら膨張仕事を外に取り出し、作業ガスの温度を下げる方法で、entropy 一定のもとに行なわれるのでこの名がつけられている。普通膨張エンジンをを用いる場合が多いが、大規模な装置では膨張タービンを使用する。この方法は可逆過程で形成されているから、能率は原理的には(2)式の熱力学的理想値と一致する。また作業ガスは理想気体であってもよいから、どんな温度で作動させても有効である。この際の圧力変化に対する温度降下の割合は次式で表わされる。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad (2)$$

ここで C_p は作業ガスの一定圧力の下での熱容量である。膨張タービンでは、高压ガスを小さなノズルから吹き出させて、圧縮された状態のエネルギーをガスの運動エネルギーに変換し、タービンを廻すことによってそれを吸収して外部仕事として取り出している。膨張タービンは実際上現在知られている最も効率のよい寒冷発生法である。

3-2 等 enthalpy 膨張

これは Joule-Thomson 膨張 (JT 膨張) ともいわ

れているもので、ガスが弁の一方から一定の高压のもとに送り込まれ、弁を通して膨張した後、一定の低压で送り出される過程をいう。真空の中にガスを膨張させるいわゆる自由膨張とは異った現象であることに注意されたい。JT 膨張で圧力変化に対応する温度変化の割合は Joule-Thomson 係数と呼ばれ次式で表わされる。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - \frac{V}{C_p} \quad (3)$$

理想気体の場合(3)式は零となり、温度変化は起らない。しかし実在気体のときは条件によってこの値が正になったり負になったりする。丁度 JT 係数が零となる場合を P-T 面に図示すると第1図の曲線となる。これは Joule-Thomson の逆転曲線と呼ばれ、特にこの曲線上の1気圧に対応する温度を逆転温度と名づけている。逆転曲線と横軸で囲まれた領域内では JT 係数は常に正、すなわち膨張によって温度降下が起こり。他の領域では温度が上昇する。従って JT 効果によって寒冷を発生するためにはなんらかの補助手段によって膨張弁の温度を逆転温度以下に下げてやる必要がある。JT 膨張で温度上昇が起るのはガス分子に大きさがあるためであり、温度降下が起る原因は分子間引力に抗して膨張する内部仕事が寒冷を発生するからである。

第1図 Joule-Thomson の逆転曲線

JT 膨張は非可逆過程であるから効率はよいとはいえない。しかし温度が下るにつれて(3)式の第2項が小さくなって、等 entropy 膨張の式(2)に近づいてゆく。その事情は第2図の等 enthalpy 線を見れば了解できるであろう。実際には低温で等 entropy 膨張の損失が大きくなるので、多段冷却の最終段は簡単な JT 膨張を採用することが多い。

3-3 simple Linde cycle

第3図に示すように JT 膨張と熱交換器を組合せて使う方法である。液化率 ϵ は熱交換器高温端の高压ガ

スおよび低圧ガスの enthalpy H_b および H_a , それに液の enthalpy H_{liq} を使って次のように書ける。

$$\varepsilon = \frac{H_a - H_b}{H_a - H_{liq}} \quad (4)$$

今熱交換率を 100% とすれば, 低圧ガスの圧力は普通

第2図 等 entropy 膨脹と等 enthalpy 膨脹

第3図 simple Linde cycle

第4図 Claude cycle

1 気圧であるから, 熱交換器高温端の温度が決っておれば H_a と H_{liq} は定まる。従って ε を大きくするには H_b をできるだけ小さくすればよい。それには T-S 線図で等 enthalpy 線がこの温度でピークを示すところの圧力を選べば宜しい。

3-4 Claude cycle と Brayton cycle

Claude cycle は第4図に示すように simple Linde cycle と等 entropy 膨脹を組合せた方法である。熱交換器高温端 (b) からはいった高圧ガスの中 $1-x$ の割合いが等 entropy 膨脹を行ない, 残りの x がさらに低温度の熱交換器を通して JT 膨脹を行なうものとする, 液化率は次式で表わされる。

$$\varepsilon = \frac{H_a - H_b}{H_a - H_{liq}} + (1-x) \frac{H_c - H_b}{H_a - H_{liq}} \quad (5)$$

simple Linde cycle に較べて第2項の分だけ能率がよいことがわかる。 ε は x の大きさ, 高圧側の圧力, c 点の温度等の複雑な函数であるが, 詳細は別の項を

参照されたい。

Brayton cycle は等 entropy 膨張と熱交換器のみの組合せで、JT 膨張は用いない。従ってどんな温度領域でも効率のよい冷凍を行なうことができる。

3-5 ヘリウム温度の冷凍

ヘリウムガスの JT 効果を利用するには少なくともその逆転温度 (約 51K) 以下に予冷する必要がある、また全ての温度領域で侵入してくる熱を補償するため、途中の温度で補助冷却を行なわねばならない。最低温度でのみ大きな寒冷を発生して侵入熱を補償しようとするとは莫大な仕事量が必要となるから、できるだけ高い温度で補助冷却を行なった方が賢明である。最後の JT 弁を等 entropy 膨張に変えれば、装置はより複雑になるが、ヘリウムの液化率も増加するし、使用する温度が変わっても冷凍機として有効であるとする例も最近でてきている。第5図右は断熱膨張以外の方法で高压ガスを予冷する方法である。これに液体窒素および減圧液体水素を使う場合 cascade 法と呼ばれている。

JT 弁を通過する際、作業ガスは非常に大きな速度を持っているが、普通この運動エネルギーは熱に変換されて了う。JT 膨張の非効率性はこれに起因しているのである。そこで第6図に示すように、この速いガスの流れを利用して JT 弁をエジェクターポンプとして使い、別の液体ヘリウム溜の温度を下げる方法が最近開発された。

3-3節の simple Linde cycle を今の場合にあてはめると第5図の最終熱交換器以下の部分に相当する。第7図左の T-S 線図では熱交換器は (1→3, 5→6) に対応し JT 膨張が (3→4) の過程に当たっている。ここで注意すべきは、高压ガスの熱交換器出口 (3) 温度が十分低いかかわらず、JT 弁を通過するときガスの温度が一度上昇した後降下していることである。これを改良するには第7図右に示すように、熱交換器の途中で高压回路に絞り弁を挿入して高压を適当な中間圧力まで下げ (2→2'), 主 JT 弁にこのガスがはいる際等 enthal 線のピーク (3') に位置するようにすればよい。こうすれば最終熱交換器の下端付近で高压ガスと低压ガスの温度差が十分大さくなるので、簡単な熱交換器でも十分な熱交換を行なうことができる。

§ 4. Stirling cycle (Kirk cycle)

Stirling cycle はもともと室温以上で動く

熱エンジンであったが、Philips 社の Koehler 等によって冷凍機に利用されるようになった画期的な方法である。従って逆 Stirling cycle といった方が適切かも知れない。その特徴は熱交換器の代りに蓄冷器を使用すること、等温変化と等容変化の組合せで cycle

第5図 He 液化の種々の方法

第6図 エジェクターポンプ JT 弁

第7図 第2の絞り弁を持った JT 膨張

を構成していること、圧縮機と膨張機が混然一体となって非常にコンパクトな装置を構成している点等である。装置の実際については別に説明があると思われるので、それを参照されたい。第8図によって動作原理を説明すると、 $d \rightarrow a$ の変化で低温ガスが体積を一定に保ったままで蓄冷器を経て室温部へ移送される。ここで等温圧縮が行なわれる ($a \rightarrow b$)。圧縮されたガスは再び蓄冷器を通して体積一定のまま低温部へ送られる ($b \rightarrow c$)。このガスが低温部で外部仕事をしながら等温膨張を行ない寒冷を発生する ($c \rightarrow d$)。Stirling cycle は非可逆過程を含んでいないので、その効率は熱力学的理想値に一致する。ただ温度が下るにつれて蓄冷器の熱容量が小さくなり、蓄冷器としての機能を果さなくなるので、実際の効率が低下するという難点がある。これを改善するため、磁気不純物を入れた金属を使って低温の比熱を大きくする工夫が試みられている。

§ 5. Simon 膨張

5-1 Simon 膨張の原理

ボンベに充填された高压ガスが大気中に放出するとボンベが冷たくなることは誰も経験することである。これが Simon 膨張であって、彼はこの原理を使ってヘリウム液化に成功した。Simon 膨張を等温的に使えばもちろん熱の吸収が起る。この際ボンベに発生する寒冷はボンベ中にあるガスが外部のガスを押しのける仕事量に等しい。しかしボンベに残っているガスの量は膨張が進むにつれて、即ちボンベの圧力に比

例して減ってゆくことに注意すると、次のように書くことができる。

$$Q_c = \int_{P_1}^{P_0} P \times (P/P_1) dV = (P_1 - P_0) V_c \quad (6)$$

ここで P_1 , P_0 はそれぞれ膨張前と膨張後の圧力で、 V_c はボンベの内容積である。この過程は作業ガスが理想気体であってよいので、どんな温度でも有効であるが、非可逆過程であるため、熱力学的理想値に比べて効率は落ちる。しかし圧縮機が行う仕事は $\ln(P_1/P_0)$ に比例するから、 P_0 を大きくする程同じ仕事量に対して発生する寒冷は増大する。

5-2 Gifford-McMahon cycle

蓄冷器と Simon 膨張を組合わせた非常に巧妙な方法である。その動作原理を第9図に示した。室温から低温部にいるピストン状の displacer があって、室温の O-リングによってシリンダー上部と下部を遮断している。両者は蓄冷器によってつながれていて常に同じ圧力にあるため、displacer の上下運動は機械的な仕事を全く伴わない。このことは高压弁と低压弁が共に室温にあるのと相俟って、この装置を無理のない耐久力あるものにしている。先づ displacer が最低位置にある時低压弁を閉じ高压弁を開けると、高压ガスがシリンダー室温空間に充填される ($d \rightarrow a$)。この際ガスつめ込み仕事のためシリンダー上部の温度は上昇する。次いで弁はそのままで displacer を最高位置に移動させると、高压ガスは熱交換器を経て冷却されてシリンダー下部に移される ($a \rightarrow b$)。この変化は体積一定のもとに行なわれるので、余分の高压ガスが弁を通

第8図 Stirling cycle の原理図

って補給されることになる。ここで高压弁を閉じ低压弁を開いて蓄冷器を経て低温部の高压ガスを放出すると、前述の Simon 膨張が行なわれて(6)式の寒冷が発生する ($b \rightarrow c$)。最後に displacer が最低位置に下り、シリンダー下部のガスを全部追出して下り ($c \rightarrow d$)。この方法の長所は持久力があり、また機械的振動が少い無理のない冷凍機が作れることである。

5-3 Solvay cycle

この方法の歴史は19世紀に始り、種々の改良が加えられて現在にいたっている。また McMahon cycle 等斬新な方法を生み出す源になったのではないかと筆者はひそかに考えている。蓄冷器と displacer を用いるのは McMahon cycle と同様であるが、シリンダー上部が作業ガスの系と連絡されていないため、displacer の上下運動は機械的な仕事を伴う。第10図に Gifford 等によって改良された Solvay cycle を示した。シリンダー上端に細孔があってその上の部屋に通じており、ここにガスが封入されている。このガスの圧力を、体積が一番大きくなった時作業ガスの低压 P_0 より大きく、また体積が一番小さくなった時高压

P_1 より小さくなるように選んでおけば、室温の高压弁と低压弁の開閉によって displacer に上下運動を行なわせることができる。displacer 移動時、細孔を通る封入ガスの運動に時間がかかるため、シリンダー上部で一時的に P_1 あるいは P_0 に等しい圧力が発生することに注意されたい。シリンダー下部における寒冷の発生は、大部分は不完全な Simon 膨張によって、一部は機械の仕事に伴う膨張によって行なわれる。

5-4 Vuilleumier cycle

これはもともと Taconis によって考案された方法で、Taconis cycle と呼ばれ、その後 Vuilleumier 等によって改良された。圧縮機を使わないことが最大の特徴である。第11図に Vuilleumier cycle の模型図を示した。displacer を持つ2つのシリンダーから構成されていて、上部空間 V_h は最高温度 T_h にあり、中程の2つの空間 V_{m1} と V_{m2} は中間温度 T_m をとり、下部の空間 V_c は最低温度 T_c で作動する。これ等の空間は蓄冷器によってつながれ弁が全く存在しないので、どの空間の圧力も常に等しい。従って displacer は仕事をしないことになる。これは圧縮機を

第9図 Gifford-McMahon cycle

使用しないことと相俟ってこの装置を最も振動の少ないものとしている。displacer を動かすと、封入された

第10図 Solvay cycle

作業ガスは異った温度の空間に移動するため、系の圧力が変化する。第12図に displacer の運動と、それに
 応ずる各空間の圧力変化を示した。最低温度にある空間 V_c では、 $a \rightarrow b$ の過程で圧力減小による V_c 内の
 ガスの膨張仕事に対応した寒冷が発生し、 $b \rightarrow c$ の過

第11図 Vuilleumier cycle

第12図 Vuilleumier cycle の動作原理

第13図 Pulse tube refrigeration

程で Simon 膨張による最大の熱吸収がある。c→d の過程では a→b の場合とは逆に僅かの熱が発生する。1 サイクル当り V_c で吸収される熱量の合計は第12図右下の面積 abcd に等しくなる。この熱量は中間温度の空間 V_{m2} に運ばれ、ここで放出される。機械的仕事なしに熱量がより高い温度へ運ばれるのは熱力学の法則に反するように見えるが、上部のシリンダーでは第12図右上の dabc に相当する熱量が最高温度の空間から中間温度空間に運ばれていて、これが圧縮機の仕事の代りをつとめているのである。この方法は考えとしては大変面白いが、実用に供せられたという話は聞いている。

§ 6. Pulse tube 冷凍

閉管内に、流れが乱れないようにして速かにガスを

圧入すると、管の長さの方向に大きな温度勾配が生ずる。この原理を利用したのが pulse tube 冷凍で、第13図にその構造と動作原理を示した。pulse tube の一端は封ぜられ、冷却器が設けられている。他端は蓄冷器につながるが、ここに低温熱交換器があって冷凍作用が行なわれる。先ず加圧過程から考えると、一団のガスが蓄冷器により T_c まで冷却されて pulse tube に入る。このガスは pulse tube 内を右方に移動するにつれて圧力が増加し、断熱圧縮による温度上昇が起る。最後に T_m の温度で冷却器に入り、 T_h まで冷される。次に圧力減小過程にはいり、このガスは断熱膨張を行ないつつ左方に移動する。このため左に行く程温度が下り、 T_c の温度で低温熱交換器にはいり、熱量 Q_c を奪って最初の温度 T_c まで温まる。発生された寒冷 Q_e は冷却器で放出した熱量に等しくなる。pulse tube 冷凍は低温部で機械的に動くものが全くない非常に簡単な構造を持っているのが特徴である。しかしまだ歴史が浅く、研究段階にあるのが現状である。

参 考 文 献

- 1) Gifford-McMahon cycle : H. O. McMahon & W. E. Gifford, Adv. Cry. Eng. 5 355, 1960
- 2) Solvay cycle : W. E. Gifford & R. C. Longsworth, ASME, March, 1964
- 3) Vuilleumir cycle : E. F. Yendall, Adv. Cry. Eng. 2 188, 1960
K. W. Taconis, Proc. ICEC 1, 1967, p. 204
- 4) pulse tube refrigeration : W. E. Gifford & R. C. Longsworth, Adv. Cry. Eng. 10 Sec. M. U. 69, 1965