

## 第三章 冷凍系統

4/22/2017

冷凍系統的應用

食物保存：冷凍食品，保鮮蔬果，花卉儲運。

冰塊製作：冰棒，冰淇淋。

液態氣體：液態氮，液化天然氣，乾冰，液態氫。

製程冷卻：金屬脆化，工件夾持固定。

醫療需求：低溫手術，臟器保存。

冷凍系統歷史沿革：

1820 年 人造冰試驗成功。

1843 年 美國工程師柏金斯(Jacob Perkins)發明了製冰機，在英國獲得專利許可。

1892 年 Dewar發明低溫罐。

1895年 Linde與Hampson發明氣體液化機。

1898 年 Dewar液化氫氣成功。

1903 年 Onnes 液化氮氣成功。

1910 年 第一架冷凍機問世。

1911 年 發現超導體。

1918 年 吸收式冷凍機生產。

1926 年 密封式冷凍機用於家庭冰箱，使家庭冰箱成為生活必需品。

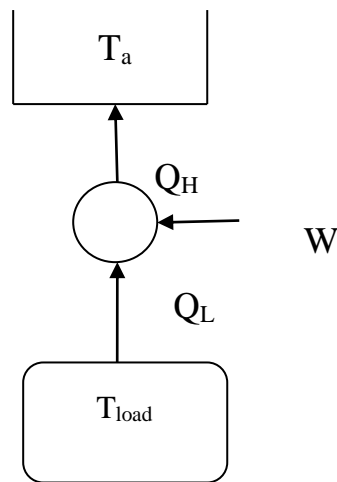


冷凍量單位：冷凍噸數，1 ton = 200 Btu/min = 3.52 kW (1 ton ice/day)

### (3.1)、冷凍原理

#### (3.1.1)、冷凍的可逆功

理論上將物體從常溫冷凍至低溫，所需的最少的功稱為可逆功。可逆功的過程不會造成淨熵增加。



$$\Delta S = \Delta S_{sys} + \Delta S_{ev} = \Delta S_{sys} + \frac{Q_H}{T_a} = 0$$

$$Q_H = -T_a \Delta S_{sys} = -T_a (S_2 - S_1)$$

$$Q_L = m(h_1 - h_2)$$

$$W = Q_H - Q_L = m(h_2 - h_1) - T_a (S_2 - S_1)$$

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_1 - T_a (s_2 - s_1)}$$

#### (1). 固體

$$\Delta S = mcT_a \ln \frac{T_L}{T_a}$$

$$Q_L = mc(T_L - T_a)$$

$$W = mc(T_L - T_a) - mcT_a \ln \frac{T_L}{T_a}$$


---

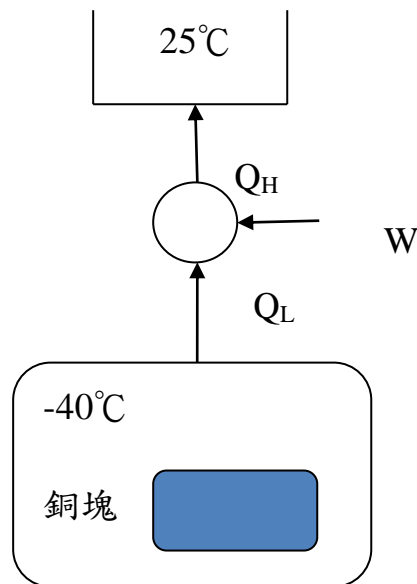
**例：** 請計算理論上將 1kg 的銅塊由 25°C 冷卻至-40°C 所需做的功。

$$W = mc(T_L - T_a) - mcT_a \ln \frac{T_L}{T_a}, \quad w = c(T_L - T_a) - cT_a \ln \frac{T_L}{T_a} = q - T_a \Delta s$$

$$C=0.385 \text{ kJ/kg-K}, \quad w=0.385 \times (-40-25) - 0.385 \times 298 \times \ln(233/298) = 3.20 \text{ kJ/kg}$$


---

**例：** 請計算使用卡諾冷凍機將 1kg 的銅塊由 25°C 冷卻至-40°C 所需做的功。



實際上，若 Carnot 冷凍機來將銅塊冷卻至-40°C，

$$\text{COP} = 233 / (298 - 233) = 3.49,$$

$$\text{吸熱量 } q_L = 0.385 \times (-40 - 25) = 25.025 \text{ kJ}$$

$$\text{做功量 } w = q_L / \text{COP} = 7.17 \text{ kJ}$$

主要的差異是冷卻過程中，冷凍機的溫度一直都維持在-40°C，而不是隨著銅塊的溫度來隨時調整。

---

(2). 液體

發生相變化時，壓力與溫度固定不變。

$$\Delta S = m(s_l - s_s)$$

$$Q_L = m(h_l - h_s)$$

$$W = m(h_l - h_s) - T_a m(s_l - s_s)$$

$$\text{但是 } h_l - h_s = T_s(s_l - s_s)$$

$$W = m(h_l - h_s) - \frac{T_a}{T_s} m(h_l - h_s) = m(h_l - h_s) \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) = m\Delta h \left(\frac{T_a}{T_s} - 1\right)$$

---

**例：**將 1kg 的水由 25°C 冷卻至 -10°C 所需做的功。(製冰)

$$W = mc_w(T_1 - T_2) - mc_w T_a \ln \frac{T_2}{T_1} + m\Delta h \left(\frac{T_a}{T_2} - 1\right) + mc_i(T_2 - T_3) - mc_i T_a \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$w = c_w(T_1 - T_2) + c_i(T_2 - T_3) + \Delta h \left(\frac{T_a}{T_2} - 1\right) - c_w T_a \ln \frac{T_2}{T_1} - c_i T_a \ln \frac{T_3}{T_2}$$

其中  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 0^\circ\text{C}$ ， $T_3 = -10^\circ\text{C}$ ， $c_w = 4.186 \text{ kJ/kg-K}$ ， $c_i = 2.11 \text{ kJ/kg-K}$

$$\Delta h_{fs} = 333.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 4.186 \times (0 - 25) + 2.11 \times (-10 - 0) + 333.4 \times (298/273 - 1) - 4.186 \times 298 \times \ln(273/298) - 2.11 \times 298 \times \ln(263/273) = 37.55 \text{ kJ/kg}$$

---

**例：**將 1kg 的  $\text{H}_2$  由 27°C 液化所需做的功。(燃料電池儲氫問題)

$$\text{Boiling Temp.} = 20.3 \text{ K (1bar)}, \Delta h_{fs} = 443 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 14.2 \times (20 - 298) - 14.2 \times 298 \times \ln(20.3/298) + 443 \times (298/20.3 - 1) = 13481 \text{ kJ/kg}$$

比較：估計將氫氣液化所需能量約 18 kWh/kmole，相當於 32400 kJ/kg，約為理論上最少所需功的 2.4 倍。

---

**作業 3.1：**將 1kg 的  $\text{CH}_4$  由 27°C 液化所需做的功。(LNG 的問題)

---

(3). 理想氣體

$$Q = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta S = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$W = Q - T_a \Delta S$$

---

**例：**將 1kg 的空氣由 40°C 降溫為需 20°C 做的功。(空調問題)

$$Q = 1.0045 \times (20 - 40) = -20.09 \text{ kJ}$$

$$W = -20.09 + 19.76 = 0.324 \text{ kJ}$$

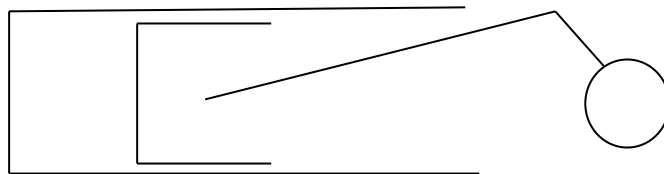
---

(3.1.2)、降溫的方式

降溫的方式有兩種，分別為等熵降壓與等焓降壓。

等熵降壓：空氣在活塞氣缸系統中等熵膨脹

絕熱膨脹是以渦輪機或膨脹器來降壓，在降壓的過程中氣體對外做功，故溫度會下降。



(1). 絕熱膨脹：

$$w_s = \frac{k}{k-1} (P_i v_i - P_e v_e)$$

$$h_2 = h_1 - w_s < h_1$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

對於所有氣體均有降溫效果。但降溫幅度與操作溫度有關，在相同壓力比之

下，降壓前的溫度越低，則降壓後所能達到的降溫效果越小。

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left( 1 - \frac{1}{X} \right)$$

$$X = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

---

**例**：將 25°C，1MPa 的空氣等熵降壓至 100 kPa，溫度為何？

---

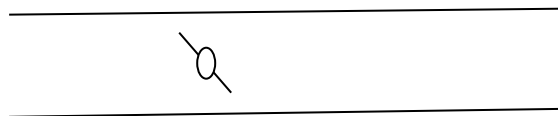
**例**：將 500°C，1MPa 的過熱蒸氣等熵降壓至 100 kPa，溫度為何？

---

## (2). 等焓降壓：Joule Thomson 效應

高壓流體在穩定流動通過阻力元件如節流閥、細管等，壓力下降。如果流體與外界的換熱可以忽略不計，且沒有對外做功，則此節流過程為一等焓過程。

$$h_2 = h_1, P_1 > P_2$$



等焓節流後，流體的溫度是否降低取決於此流體的物理性質。其溫度變化效應稱為焦耳-湯姆森效應。此效應定義為：

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

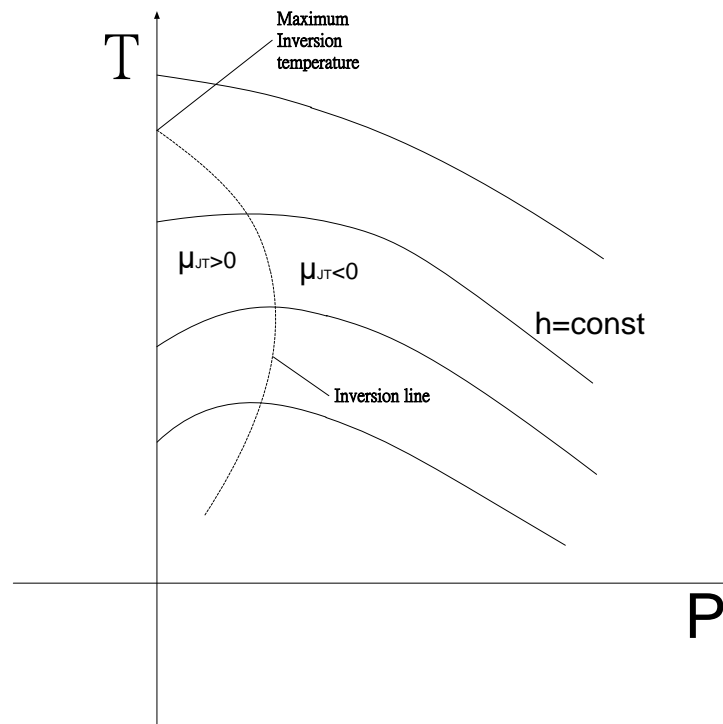
相同溫度之下，氣體的壓力越大，分子間的距離越小，分子間的作用力越大，也就是內能越低。當氣體絕熱降壓後，分子間的距離變大，內能會提高。但因此過程既不做功，也不傳熱，氣體的焓值不變，內能提高後，溫度自然會下降。故Joule Thomson 效應的降溫效果來自氣體分子內能(分子間作用力)與動能(溫

度)之間的轉換。

理想氣體， $h=h(T)$ ，分子間的無作用力，無 Joule Thomson 效應。

非理想氣體，焓值是溫度與壓力的函數，等焓膨脹過程中，溫度升高、不變或下降的三種情況均可能出現，取決於實際氣體在此溫度、壓力區域的熱力性質。若 $\mu_{JT} > 0$ ，則稱為降溫效應，通過節流後，隨著流體壓力亦降低，溫度亦降低。反之，若 $\mu_{JT} \leq 0$ ，則表示節流膨脹後溫度不發生下降的現象。

在一定的壓力下，對應 $\mu_{JT} = 0$ 的溫度定義為逆轉溫度，亦稱轉化溫度，將逆轉溫度和壓力繪製成此物質的逆轉曲線，如下圖所示。

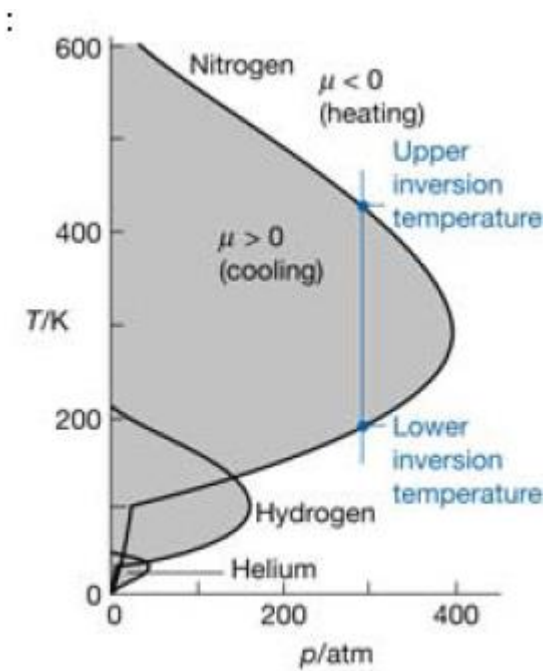


氣體逆轉溫度曲線

將斜率為零的點連接起來，稱為逆轉線。其相對應的溫度稱為逆轉溫度。在壓力為零處的逆轉溫度稱為最大逆轉溫度。逆轉線左側斜率大於 0，右側小於 0。由於節流降壓過程，所以只有在逆轉線左側，才有可能伴隨溫度下降。因此當節流入口之溫度高於最大逆轉溫度時，則不再有冷卻現象之產生。

曲線對於逆轉溫度很高的氣體如空氣，在常溫下節流膨脹即可達到降溫目的。但對於逆轉溫度低的液體如氦氣、氫氣等，則需要預冷至逆轉溫度以下，節流膨脹才能產生降溫的效果。

下表為幾種氣體的逆轉溫度



氣體	$T'_{inv}, K$
氧	771
氮	604
氫	765
氫	204
一氧化碳	644
二氧化碳	1275
甲烷	953

---

例：將 25°C，1MPa 的空氣等焓降壓至 100 kPa，溫度為何？

---

例：將 500°C，1MPa 的過熱蒸氣等焓降壓至 100 kPa，溫度為何？

---

例：將 50°C，1MPa 的水等焓降壓至 100 kPa，溫度為何？

---

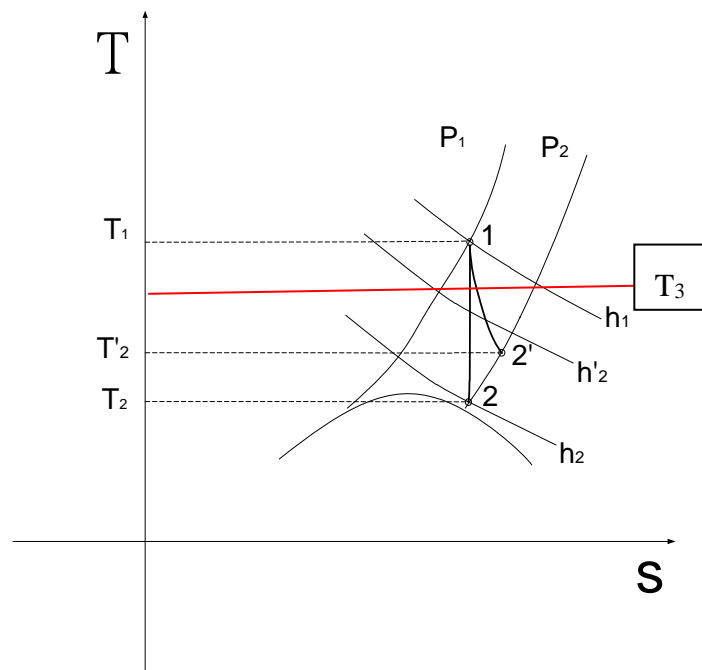
例：將 50°C，1MPa 的氨等焓降壓至 100 kPa，溫度為何？



(3). 等熵降溫與等焓降溫的比較

以降溫效果來說，相同的壓力差，絕熱膨脹的降溫效果較佳。但絕熱膨脹必須使用渦輪機或膨脹器等機械來降壓，而Joule Thomson 效應只需使用膨脹閥來降壓，相對簡單很多，成本也較低，故仍然普遍採用。

由 $P_1$ 降壓至 $P_2$ ，若為等熵過程，則溫度由 $T_1$ 降壓至 $T_2$ ，若為絕熱過程，但不是等熵過程，則溫度由 $T_1$ 降壓至 $T_2'$ ，若為等焓過程，則溫度由 $T_1$ 降壓至 $T_3$ 。



以 $N_2$ 為例，若 $T_1 = 300\text{ K}$ ， $P_2 = 100\text{ kPa}$ ，則Joule Thomson 效應與絕熱膨脹所獲致的 $T_2$ 為

$P_1$ (kPa)	$P_1/P_2$	$T_2$ (JT 效應)	$T_2$ (絕熱膨脹)
1000	10	298.1	189.5
2000	20	296.0	126.9
10000	100	278.3	78.1

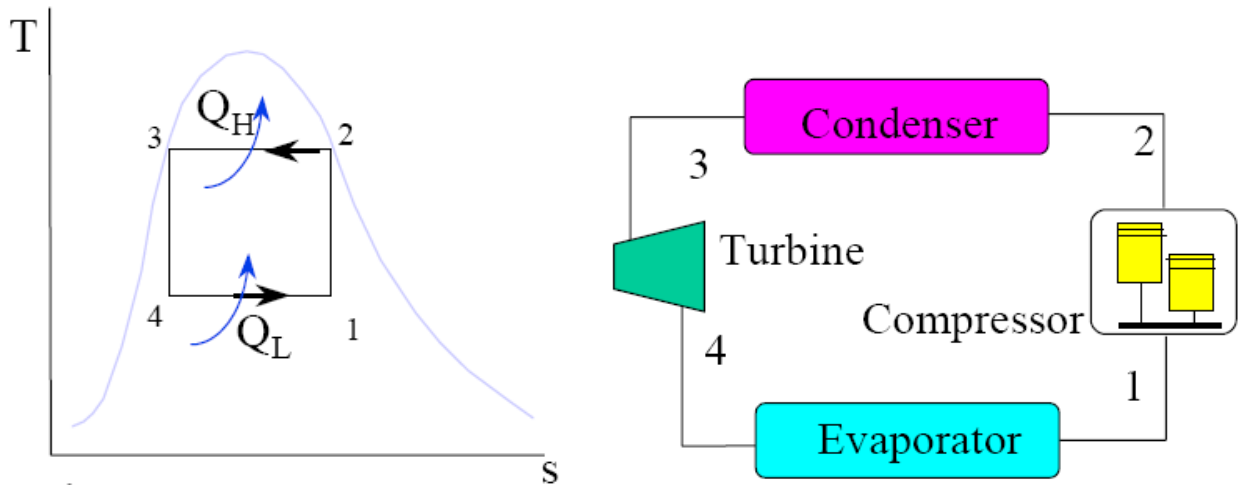
以 $N_2$ 為例，若 $T_1 = 200\text{ K}$ ， $P_2 = 100\text{ kPa}$ ，則Joule Thomson 效應與絕熱膨脹所獲致的 $T_2$ 為

$P_1$ (kPa)	$P_1/P_2$	$T_2$ (JT 效應)	$T_2$ (絕熱膨脹)
1000	10	195.7	155.2
2000	20	193.4	84.6
10000	100	153.5	77.4(液化)

### (3.2)、卡諾冷凍機

等熵降壓的冷凍系統--- Carnot 循環

Carnot 冷凍系統主要由四個組件所構成，包括 Evaporator，Condenser，Compressor，與 Expander。工作原理與 Carnot 熱機正好相反。



$q_L = h_1 - h_4$ ，等壓過程，Evaporator 吸熱

$q_H = h_2 - h_3$ ，等壓過程，Condenser 散熱

$w_C = h_2 - h_1$ ，等熵過程，Compressor 做功

$w_E = h_3 - h_4$ ，等熵過程，Expander 做功

$$\frac{q_H}{q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

$$w_{net} = w_C - w_E = q_{net} = q_H - q_L$$

性能係數計算 COP，
$$COP = \frac{q_L}{w} = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\frac{T_H}{T_L} \rightarrow 1, COP \rightarrow \infty$$

$T_H \approx T_a$ ， $T_L$  越低，COP 越小，所耗費的能量越多，越不容易達到。

$$\frac{T_H}{T_L} = 2, T_L = 0.5T_H \approx 150K, COP = 1$$

$$T_L > 150K, COP > 1, w < q_L$$

$$T_L < 150K, COP < 1, w > q_L$$

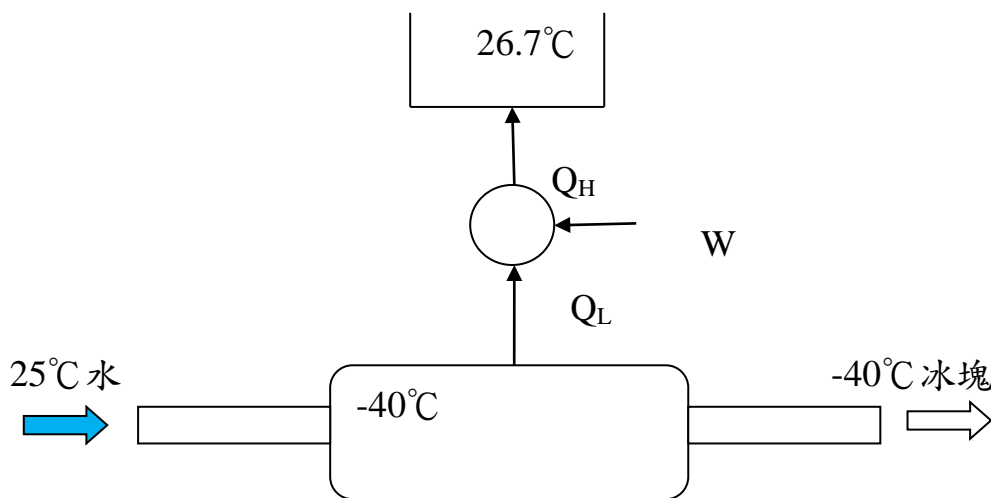
$$T_L = T_{Load}, T_H = T_a$$

$$\Delta S_H = \frac{q_H}{T_a} = \frac{q_H}{T_H}, \Delta S_L = -\frac{q_L}{T_{Load}} = -\frac{q_L}{T_L}$$

$$\Delta S_{net} = \Delta S_H + \Delta S_L = \frac{q_H}{T_H} - \frac{q_L}{T_L} = 0$$

Carnot 冷凍系統為理想循環，沒有淨 entropy 增加，沒有可用能損失。

**例**：有一 Carnot 冷凍以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=26.7^\circ\text{C}$ ， $T_L=-40^\circ\text{C}$ ，今以該冷凍機來製冰，將  $25^\circ\text{C}$  的水製成  $-40^\circ\text{C}$  的冰塊，若製冰率為  $1000\text{kg/hr}$ ，請計算冷媒流量與所需功率。



$$P_1=0.5164 \text{ bar}, T_1=-40^\circ\text{C}, P_2=7.0 \text{ bar}, T_2=26.7^\circ\text{C}$$

$$h_2=261.85, s_2=0.9080, s_1=0.9080, x_1=0.95, h_1=211.69$$

$$h_3=86.78, s_3=0.3242, s_4=0.3242, x_4=0.3391, h_4=75.58$$

$$q_L=h_1-h_4=136.11, q_H=h_2-h_3=175.07, w_C=h_2-h_1=50.16, w_E=h_3-h_4=11.20$$

$$COP=3.49$$

$$\text{Back work ratio} = w_E/w_C=0.223$$

---

## Carnot 冷凍機的問題

expander 輸出功很少，增加系統維護困難。

等溫過程不易達成，熱傳速度太慢，實際執行有溫差。

實際上為了增加熱傳速度， $T_{\text{Load}} < T_L$ ， $T_H > T_a$ 。

---

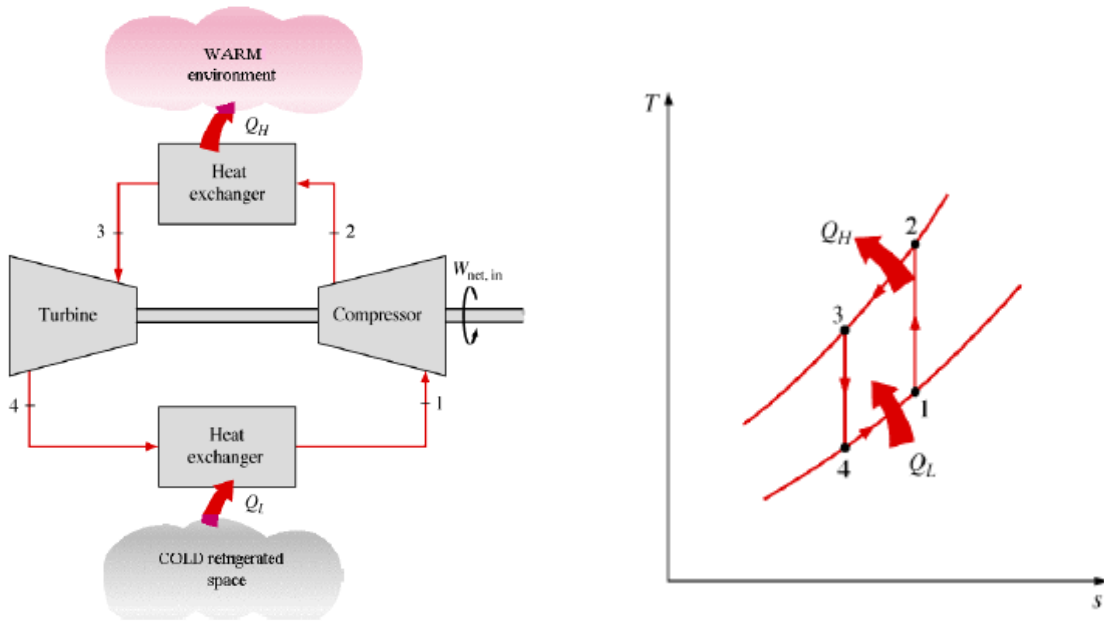
**例**：有一 Carnot 冷凍以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=40^\circ\text{C}$ ， $T_L=-50^\circ\text{C}$ ，今以該冷凍機來製冰，將  $25^\circ\text{C}$  的水製成  $-40^\circ\text{C}$  的冰塊，若製冰率為  $1000\text{kg/hr}$ ，請計算冷媒流量與所需功率。

---

**作業 3.2**：有一 Carnot 冷凍以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=26.7^\circ\text{C}$ ， $T_L=-40^\circ\text{C}$ ，今以該冷凍機來製冰，將  $25^\circ\text{C}$  的水製成  $-40^\circ\text{C}$  的冰塊，若製冰率為  $1000\text{kg/hr}$ ，請計算冷媒流量與所需功率。

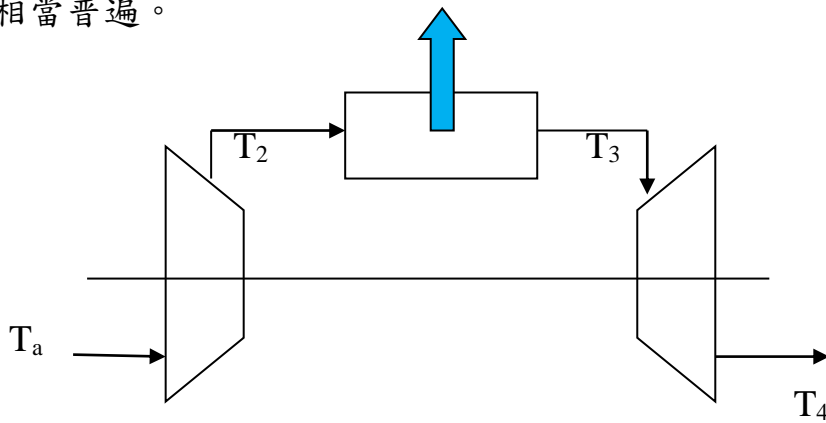
---

(3.3). 等熵降壓的空氣冷凍系統--- Brayton 循環



(3.3.1). 理想開放式 Brayton 冷凍循環

開放循環從大氣中吸氣，降溫後再放回大氣，適用於空調系統，尤其飛機上使用相當普遍。



$T_1=T_a$ ， $T_3=T_a$ ，假設空氣為理想氣體，比熱為常數。

$$\eta_c = 1, \eta_T = 1$$

$$T_2 = T_a \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_a \Phi, \quad T_4 = T_a \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_a}{\Phi}$$

$$\Phi = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$w_c = c_p (T_2 - T_1) = c_p T_a [\Phi - 1]$$

$$w_T = c_p (T_3 - T_4) = c_p T_a \left[ 1 - \frac{1}{\Phi} \right]$$

$$w_{net} = w_c - w_T = c_p T_a \left[ \Phi - 2 + \frac{1}{\Phi} \right] = c_p T_a \Phi \left( 1 - \frac{1}{\Phi} \right)^2$$

$$q_L = c_p T_a \left[ 1 - \frac{1}{\Phi} \right]$$

$$COP = \frac{q_L}{w_{net}} = \frac{c_p T_a \left( 1 - \frac{1}{\Phi} \right)}{c_p T_a \Phi \left( 1 - \frac{1}{\Phi} \right)^2} = \frac{1}{\Phi \left( 1 - \frac{1}{\Phi} \right)} = \frac{1}{\Phi - 1}$$

壓力比越大，COP 越低，這是因為在相同入口溫度下，壓力比越大，則溫度越低。

若總吸熱量為固定，則空氣流量與壓縮機功率為

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_a q_L$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a w_c = \frac{\dot{Q}_L}{q_L} w_c = \dot{Q}_L \frac{\Phi - 1}{1 - \frac{1}{\Phi}} = \dot{Q}_L \Phi$$

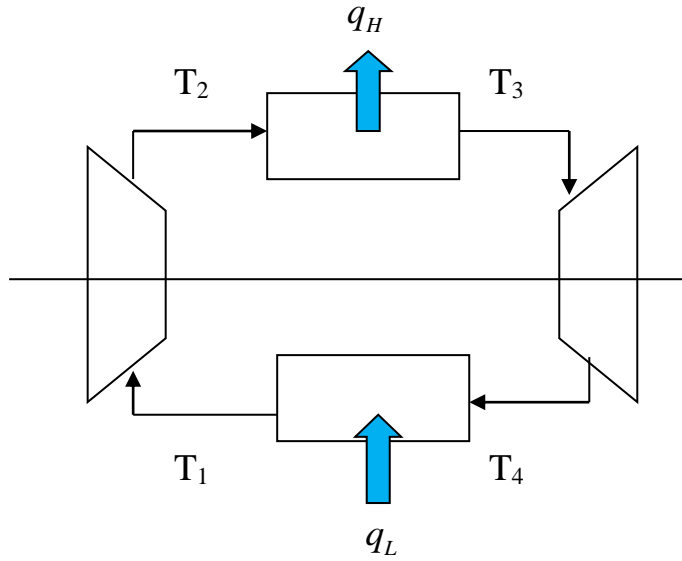
總吸熱量為固定，壓力比越大，所需要壓縮機的容量越大。

**例：**有一空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $P_1=1 \text{ bar}$ ， $P_r=3$ ，請計算吸熱量與做功量。

$$P_1=1 \text{ bar}，T_1=25^\circ\text{C}，P_2=3.0 \text{ bar}，T_2=407.9 \text{ K}，T_3=25^\circ\text{C}，T_4=217.7 \text{ K}$$

$$w_c=110.39，w_T=80.66，q_L=80.66，w_{net}=29.73，COP=2.713$$

### (3.3.2). 理想封閉 Brayton 冷凍循環



封閉循環  $T_1=T_{Load}$ ， $T_3=T_a$ ，假設空氣為理想氣體，比熱為常數。

$$\eta_c = 1, \eta_T = 1$$

$$T_2 = T_{Load} \Phi, T_4 = T_a \frac{1}{\Phi} \leq T_{Load}, Pr > \left( \frac{T_{Load}}{T_a} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$q_L = c_p (T_{Load} - T_4) = c_p \left[ T_{Load} - T_a \frac{1}{\Phi} \right]$$

$$w_c = c_p (T_2 - T_1) = c_p T_{Load} [\Phi - 1]$$

$$w_T = c_p (T_3 - T_4) = c_p T_a \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = c_p T_a \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_{net} = w_c - w_T = c_p \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[ T_{Load} - T_a \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$COP = \frac{q_L}{w_{net}} = \frac{1}{(Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

理想封閉 Brayton 冷凍循環與理想開放式 Brayton 冷凍循環相同，都是壓力比越大，COP 越低。



$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}_L}{q_L}$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a w_c = \frac{\dot{Q}_L}{c_p [T_{Load} - T_a \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}}]} c_p T_{Load} \left[ \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \dot{Q}_L \frac{\left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{1 - \frac{T_a}{T_{Load}} \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

**例：**有一空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{Load}=-40^\circ\text{C}$ ， $P_1=1\text{ bar}$ ， $Pr=4$ ，請計算吸熱量與做功量。

$P_1=1\text{ bar}$ ， $T_1=-40^\circ\text{C}$ ， $P_2=4.0\text{ bar}$ ， $T_2=346.2\text{ K}$ ， $T_3=25^\circ\text{C}$ ， $T_4=200.5\text{ K}$

$w_c=113.71$ ， $w_T=97.94$ ， $q_L=32.65$ ， $w_{net}=15.77$ ， $COP=2.070$

$T_{Load}$  降低， $q_L$  減少，但性能指標不受影響。

但若  $T_{Load}$  不變，擬將  $q_L$  增大，則  $Pr$  必須增加，性能指標變小。

例如若  $q_L=65.2$ ，則  $T_4=168\text{ K}$ ， $Pr=7.433$ ， $T_2=413.3\text{ K}$ ， $COP=1.293$

### (3.3.3). 真實 Brayton 冷凍循環

$$\eta_c < 1, \eta_T < 1$$

$$T_2 = T_{Load} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[ \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\},$$

$$T_4 = T_a \left\{ 1 - \eta_T \left[ 1 - \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} \leq T_{Load}$$

$$q_L = c_p (T_{Load} - T_4)$$

$$w_c = c_p (T_2 - T_1) = \frac{1}{\eta_c} c_p T_{Load} \left[ \left(\frac{1}{Pr}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_T = \eta_T c_p T_a \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_{net} = w_c - w_T = c_p \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[ \frac{1}{\eta_c} T_{Load} - \eta_T T_a \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

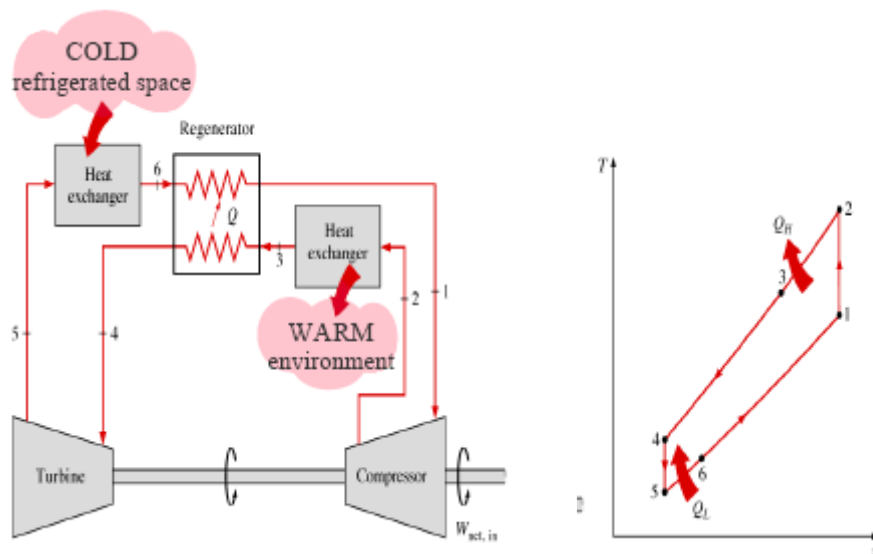
$$COP = \frac{q_L}{w_{net}} = \frac{T_{Load} - T_a \left\{ 1 - \eta_T \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}}{\left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[ \frac{1}{\eta_c} T_{Load} - \eta_T T_a \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

例：有一空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{Load}=-40^\circ\text{C}$ ， $P_1=1\text{ bar}$ ， $Pr=4$ ，請計算吸熱量與做功量。 $\eta_c=0.8$ ， $\eta_T=0.8$ 。

$P_1=1\text{ bar}$ ， $T_1=-40^\circ\text{C}$ ， $P_2=4.0\text{ bar}$ ， $T_2=374.5\text{ K}$ ， $T_3=25^\circ\text{C}$ ， $T_4=220\text{ K}$

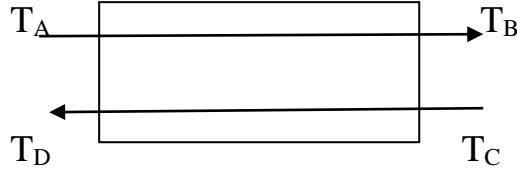
$w_c=142.14$ ， $w_T=78.35$ ， $q_L=13.06$ ， $w_{net}=63.79$ ， $COP=0.205$

### (3.3.4). 再生式 Brayton 冷凍循環



封閉循環  $T_6=T_{Load}$  ,  $T_3=T_a$  , 假設空氣為理想氣體 , 比熱為常數。

熱交換器的效益( $\varepsilon$ )



$$\varepsilon = \frac{T_A - T_B}{T_A - T_C}$$

$\varepsilon = 1$  ,  $T_B = T_C$  , 完美的熱交換器

$\varepsilon = 0$  ,  $T_B = T_A$  , 完全無效的熱交換器

$0 < \varepsilon < 1$  ,  $T_C < T_B < T_A$  , 真實的熱交換器

$$T_B = T_A - \varepsilon(T_A - T_C)$$

假設完美的再生式 Brayton 冷凍循環

$$\eta_c = 1 , \eta_T = 1 , \varepsilon = 1$$

$$T_4 = T_6 = T_{Load} , T_1 = T_3 = T , T_5 = T_{Load} \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$q_L = c_p T_{Load} \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$w_c = c_p T_a \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$w_T = c_p T_{Load} \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$w_{net} = w_c - w_T = c_p \left[ (Pr)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[ T_a - T_{Load} \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$COP = \frac{q_L}{w_{net}} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_{Load}} \left( Pr \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} < \frac{1}{\left( Pr \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

再生式冷凍循環與標準式冷凍循環的比較：

- (1). 若壓力比相同，再生式循環的性能指標較低，但  $T_5$  更低， $q_L$  較大。
- (2). 若  $q_L$  相同，再生式循環的壓力比較低，性能指標相同。
- (3). 再生式冷凍循環的目的是用來產生低溫。

**例：**有一再生式空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{Load}=-40^\circ\text{C}$ ， $P_1=1\text{ bar}$ ， $Pr=4$ ，請計算吸熱量與做功量。

$P_1=1\text{ bar}$ ， $T_1=25^\circ\text{C}$ ， $P_2=4.0\text{ bar}$ ， $T_2=442.8\text{ K}$ ， $T_3=25^\circ\text{C}$ ， $T_4=233\text{ K}$ ， $T_5=156.8\text{ K}$   
 $w_c=145.45$ ， $w_T=76.54$ ， $q_L=76.54$ ， $w_{net}=68.91$ ， $COP=1.111$

**例：**有一再生式空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{Load}=-40^\circ\text{C}$ ， $P_1=1\text{ bar}$ ， $Pr=4$ ，請計算吸熱量與做功量。 $\eta_c = 0.8$ ， $\eta_T = 0.8$ ， $\varepsilon = 1$ 。

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_6}{T_3 - T_6} = 0.8, T_1 = T_{Load} + 0.8 \times (T_a - T_{Load}) = 12^\circ\text{C} = 285\text{K}$$

$$T_3 - T_4 = T_1 - T_6, T_4 = -27^\circ\text{C} = 246\text{K}$$

$P_1=1\text{ bar}$ ， $P_2=4.0\text{ bar}$ ， $T_2=458.1\text{ K}$ ， $T_5=181.6\text{ K}$

$w_c=173.88$ ， $w_T=64.69$ ， $q_L=51.63$ ， $w_{net}=109.19$ ， $COP=0.473$

**例：**有一空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{Load}=-40^\circ\text{C}$ ，比較標準式與再生式的  $Pr$  與做功量。

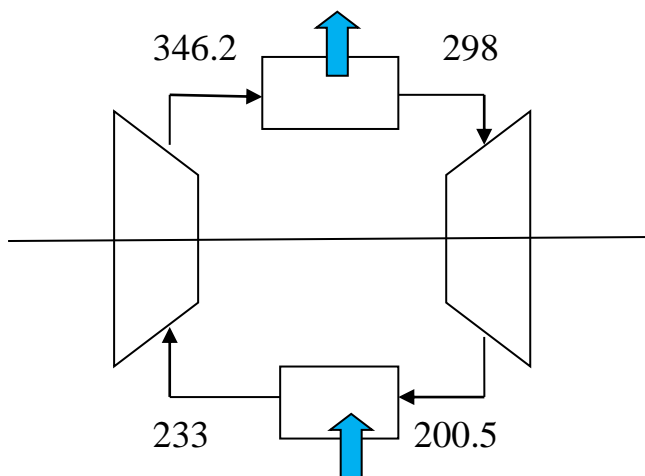
若壓力比相同，再生式可以達到較低溫度，但  $COP$  值也較低。

若所產生的低溫相同，再生式的 壓力比較低，壓縮機的功較少，可以使用較

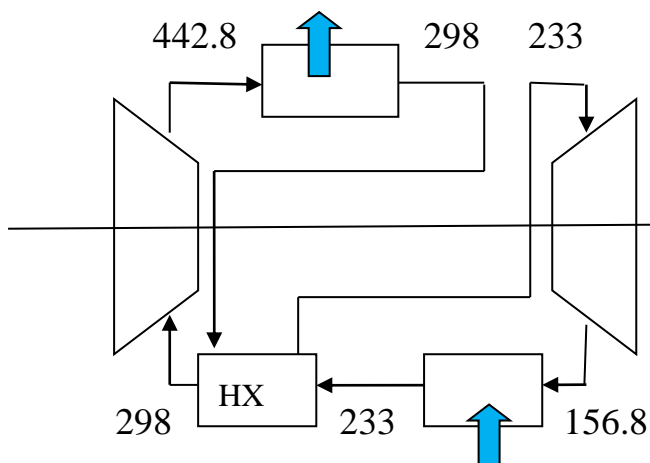
小搭壓縮機，但 COP 值與標準式相同。

	再生式(Pr)	標準式	再生式(T <sub>2</sub> )	兩段式再生
T <sub>Load</sub>	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
T <sub>a</sub>	25°C	25°C	25°C	25°C
Pr	4.0	4.0	1.692	2.0
壓縮前溫度	298	233	298	298
壓縮後溫度	442.8	346.2	346.2	442.8
w <sub>c</sub>	145.45	113.71	48.52	145.45
膨脹前溫度	233	298	233	233
膨脹後溫度	156.8	200.5	200.5	191.1
w <sub>T</sub>	76.54	97.94	32.64	84.18
w <sub>net</sub>	68.91	15.77	15.77	61.27
q <sub>L</sub>	76.54	32.65	32.65	84.18
COP	1.111	2.070	2.070	1.373

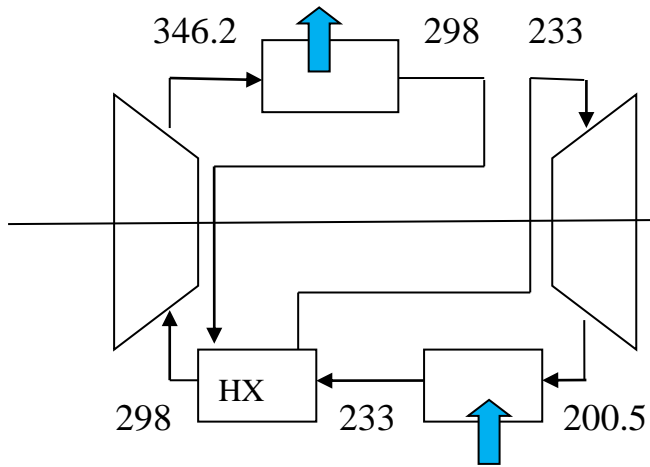
標準式



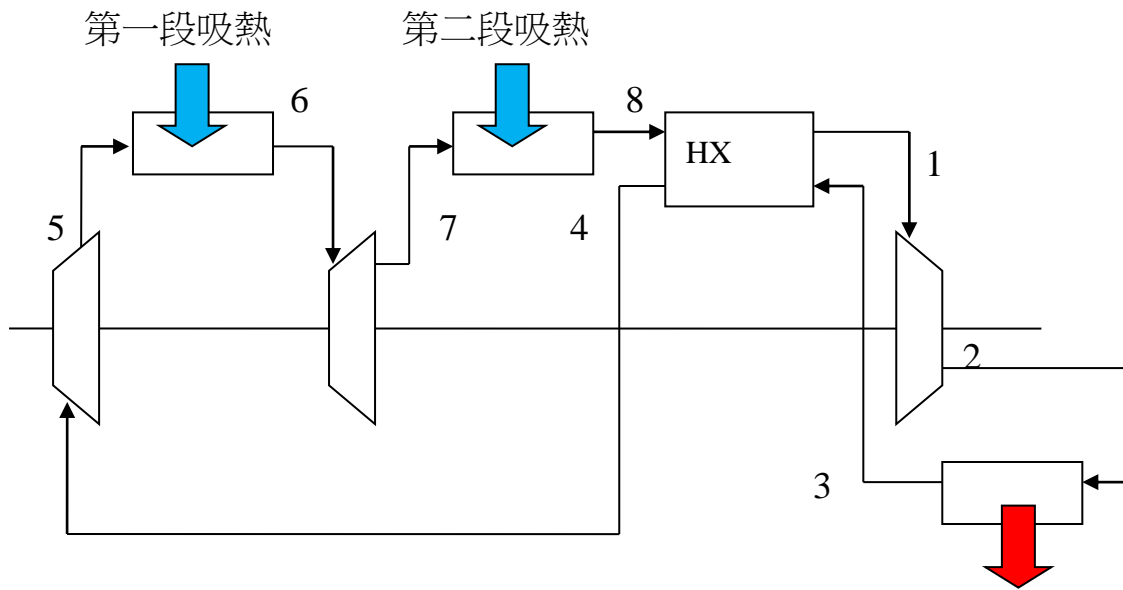
再生式(Pr)--- 相同壓力比



再生式(Pr)--- 相同壓縮後溫度，不同壓力比



兩段式吸熱冷凍機



$$T_4 = T_6 = T_8 = T_{Load}$$

$$T_5 = T_7 = T_L \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{2k}}$$

$$T_1 = T_3 = T_a$$

$$T_2 = T_a (Pr)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$w_c = c_p (T_2 - T_1) = c_p T_a \left( \text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$q_H = c_p (T_2 - T_3) = c_p T_a \left( \text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

$$q_{L1} = q_{L2} = c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

$$q_L = q_{L1} + q_{L2} = 2c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

$$w_t = 2c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

$$w_{net} = c_p T_a \left( \text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - 2c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

$$COP = \frac{2T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]}{T_a \left( \text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - 2T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]} = \frac{2 \frac{T_L}{T_a} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]}{\text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} \left( 1 - \frac{1}{\text{Pr}^{\frac{k-1}{k}}} \right) - 2 \frac{T_L}{T_a} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]}$$

$$1 - \frac{1}{\text{Pr}^{\frac{k-1}{k}}} = \left[ 1 - \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$

$$COP = \frac{2 \frac{T_L}{T_a}}{\text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} + \left( \text{Pr} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 2 \frac{T_L}{T_a}}$$

單段式吸熱量為

$$q_{Ls} = c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$q_L - q_{Ls} = 2c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] - c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = c_p T_L \left[ 1 - \left( \frac{1}{Pr} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]^2 > 0$$

兩段式吸熱量較單段式吸熱量為大，而且渦輪機做功量也比較大。

---

**作業 3.3**：有一再生兩段式空氣冷凍系統，已知  $T_a=25^\circ\text{C}$ ， $T_{\text{Load}}=-40^\circ\text{C}$ ， $P_1=1$  bar， $Pr=4$ ，請計算吸熱量與做功量。 $\eta_c=0.8$ ， $\eta_T=0.8$ ， $\varepsilon=1$ 。

---

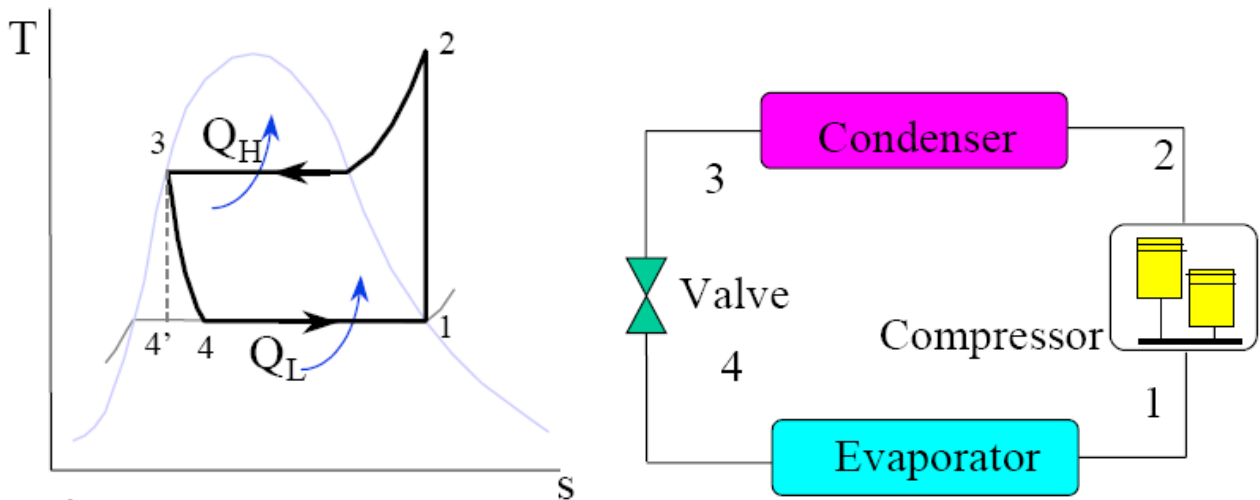


### (3.4). 蒸汽循環冷凍系統

#### (3.4.1). 基本型冷凍系統

蒸汽循環冷凍循環系統為一封閉的管路系統，包括有四個基本機組：壓縮機、凝結器、膨脹閥、蒸發器等，選擇適當的型式組合成系統。

實際冷凍系統：以膨脹閥代替 expander，過熱蒸氣，提高散熱溫差。



$q_L = h_1 - h_4$ ，等壓過程，Evaporator 吸熱

$q_H = h_2 - h_3$ ，等壓過程，Condenser 散熱

$w_C = h_2 - h_1$ ，等熵過程，Compressor 做功

$h_3 = h_4$ ，等焓過程，不做功

性能係數計算 COP， $COP = \frac{q_L}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

可用能損失：過熱損失與膨脹閥損失。

$$q_L = h_1 - h_4, \Delta s_L = -\frac{q_L}{T_{Load}} = -\frac{h_1 - h_4}{T_{Load}}, T_{Load} \geq T_L$$

$$q_H = h_2 - h_3, \Delta s_H = \frac{q_H}{T_a} = \frac{h_2 - h_3}{T_a}, T_a \leq T_H$$

$$\Delta s_{net} = \Delta s_H + \Delta s_L = \frac{h_2 - h_3}{T_a} - \frac{h_1 - h_4}{T_{Load}} > 0$$

冷凍系統性能：冷凍溫度，冷凍量，效率。

冷凍量單位：冷凍噸數， $1 \text{ ton} = 200 \text{ Btu/min} = 3.52 \text{ kW}$  (1 ton ice/day)

---

**例：**有一蒸汽冷凍系統以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=26.7^\circ\text{C}$ ， $T_L=-40^\circ\text{C}$ ，請計算吸熱量與做功量。

$$P_1=0.5164 \text{ bar}, T_1=-40^\circ\text{C}, P_2=7.0 \text{ bar}, T_2=26.7^\circ\text{C}$$

$$h_1=222.88, s_2=0.9560, s_2=0.9560, h_2=276.60$$

$$h_3=86.78, h_4=86.78$$

$$q_L=h_1-h_4=136.10, q_H=h_2-h_3=189.82, w_C=h_2-h_1=53.72$$

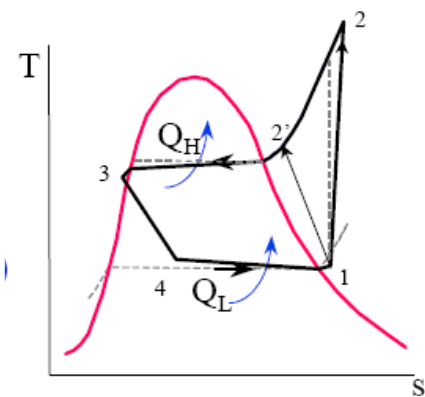
$$\text{COP}=2.53(3.49 \text{ Carnot 冷凍系統})$$

$$\Delta s_{net} = (189.82/299.7 - 136.1/233) = 0.04925 \text{ kJ/kg-K}$$

與 Carnot 系統比較，雖然  $T_L$  與  $T_H$  相同，但  $q_H$  較大(189.82/175.07)， $q_L$  則較小(136.10/136.11)，故  $\Delta s_{net} > 0$ 。

---

影響 COP 的因素： $(T_L < T_{\text{Load}})$ 冷房溫度， $(T_H > T_{\text{air}})$ 環境溫度，熱交換器性能，壓縮機效率，管路壓降，過冷。



---

**例：**有一蒸汽冷凍系統以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=35.5^\circ\text{C}$ ， $T_L=-40^\circ\text{C}$ ，壓縮機

效率為 85%，請計算吸熱量與做功量。

$P_1=0.5164 \text{ bar}$ ， $T_1=-40^\circ\text{C}$ ， $P_2=9.0 \text{ bar}$

$h_1=222.88$ ， $s_1=0.9560$ ， $s_{2s}=0.9560$ ， $h_{2s}=282.15$ ， $h_2=292.61$

$h_3=99.56$ ， $h_4=99.56$

$q_L=h_1-h_4=123.32$ ， $q_H=h_2-h_3=193.05$ ， $w_C=h_2-h_1=69.73$

$\text{COP}=1.77(2.53 \text{ 理想系統}, 3.49 \text{ Carnot 冷凍系統})$

若冷凍機的容量為 100 噸， $\dot{Q}_L = \dot{m}q_L$ ，則冷媒流量為  $\dot{m}=2.854 \text{ kg/sec}$ ，壓縮機功率為 199.03 kW。

$\Delta s_{net} = (193.05/299.7 - 123.32/233) = 0.11487 \text{ kJ/kg-K}$

討論： $h_2=292.61$ ， $T_2=59.3^\circ\text{C}$ ； $h_3=99.56$ ， $T_3=35.5^\circ\text{C}$ ； $h_g=266.18$

從 2→3 的冷卻過程，大部分時候溫度都為  $35.5^\circ\text{C}$ 。

這些影響 COP 的因素都會使  $T_L$  降低， $T_H$  升高， $q_L$  減少， $q_H$  增加。

$$\Delta s_{net} = \frac{q_H}{T_a} - \frac{q_L}{T_{Load}}$$

---

能源效率比值標準(energy efficiency rating, energy efficiency ratio, EER)

COP 與 EER 的差異：馬達效率，風扇，其他耗電品。

箱型冷氣機能源效率比值標準：氣冷式  $\text{EER}>2.84$ ，水冷式  $>3.69$

---

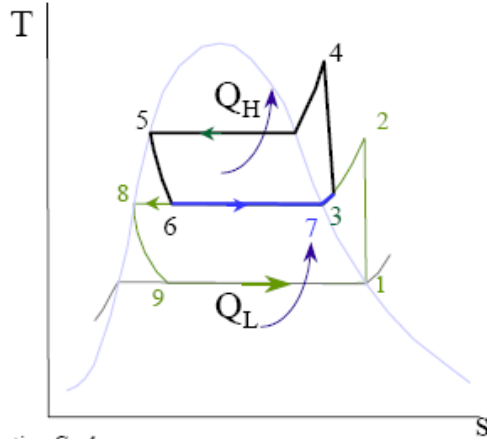
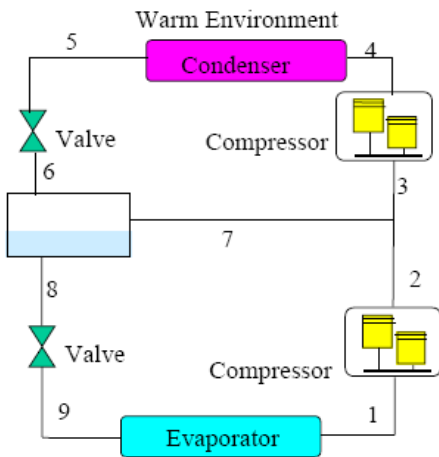
**作業 3.4**：有一製冰廠，以  $25^\circ\text{C}$  的水製作  $-20^\circ\text{C}$  的冰塊，每小時要製 1000 kg 冰塊。製冰機採用 R-134a 冷媒，蒸發室溫度為  $-25^\circ\text{C}$ ，壓縮壓力為 10 bar，壓縮機效率為 85%。已知冰的比熱為  $2.04 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ，冰的溶解潛熱為  $333.4 \text{ kJ/kg}$ 。

(1). 請計算蒸發室吸熱功率。

(2). 請計算壓縮機功率。

(3). 該製冰機的冷凝器為水冷式，冷凝器的冷卻水入口溫度為  $30^\circ\text{C}$ ，出口溫度為  $40^\circ\text{C}$ ，請計算冷卻水流量。

(3.4.2). 多級式冷凍系統(Multistage System)



例：有一蒸汽冷凍系統以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=35.5^\circ\text{C}$ ， $T_L=-40^\circ\text{C}$ ，壓縮機效率為 85%，冷凍機的容量為 100 噸，若以兩級方式進行，請計算做功量。

$$P_1=0.5164 \text{ bar}, T_1=-40^\circ\text{C}, P_2=2.8 \text{ bar}, T_2=-1.2^\circ\text{C}, P_4=9.0 \text{ bar}$$

$$h_1=222.88, s_1=0.9560, s_{2s}=0.9560, h_{2s}=256.59, h_2=262.54$$

$$h_5=99.56, h_6=99.56, x_6=0.2583, h_7=246.52, h_8=48.39, h_9=48.39,$$

$$h_3=x_6 \times h_7 + (1-x_6) \times h_2 = 258.40, s_3=0.9623, s_{4s}=0.9623, h_{4s}=284.21, h_4=288.77$$

$$q_L = h_1 - h_9 = 174.49, m_1 = 2.017 \text{ kg/sec}, w_{C1} = h_2 - h_1 = 39.66, W_{C1} = 80.01 \text{ kW},$$

$$m_3 = 2.719 \text{ kg/sec}, w_{C3} = h_4 - h_3 = 30.37 \text{ kW}, W_{C2} = 82.58 \text{ kW}$$

$$W_C = W_{C1} + W_{C3} = 162.59 \text{ kW} \text{ (單級冷凍 } 199.03 \text{ kW)}$$

用來減少壓縮機所做的功

$$\text{COP} = 2.16 \text{ (單級冷凍 } 1.77, \text{ 理想系統 } 2.53, \text{ Carnot 冷凍系統 } 3.49)$$

作業 3.5：有一製冰廠以兩級式的冷凍機製作冰塊，該製冰廠以  $25^\circ\text{C}$  的水製作  $-30^\circ\text{C}$  的冰塊，每小時要製 1000 kg 冰塊。製冰機採用 R-134a 冷媒，蒸發室溫度為  $-40^\circ\text{C}$ ，第一級壓縮壓力為 10bar，第二級壓縮壓力為 2 bar，兩具壓縮機的效

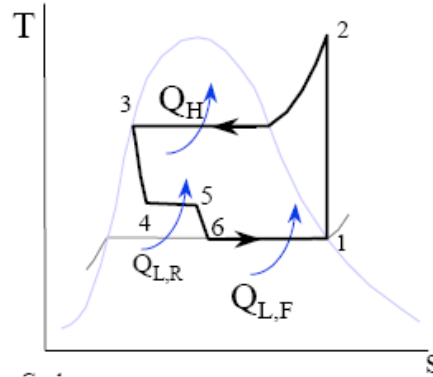
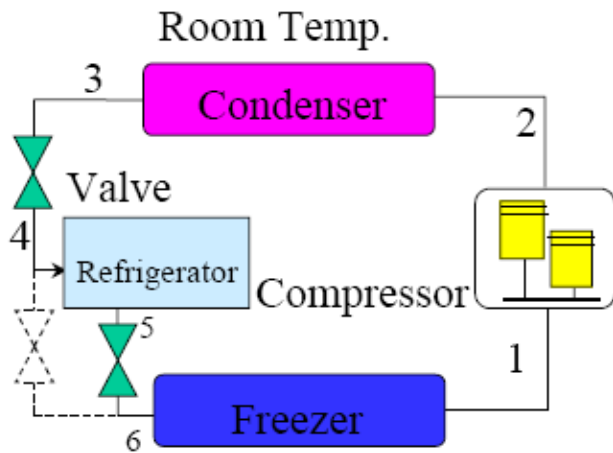
率都為 85%。已知水的比熱為 4.18 kJ/kg-°C，冰的比熱為 2.04 kJ/kg-°C，冰的溶解潛熱為 333.4 kJ/kg。

$T_1 = -40^\circ\text{C}$ ， $P_2 = 2 \text{ bar}$ ， $P_4 = 10 \text{ bar}$

- (1). 請計算蒸發室吸熱功率。
  - (2). 請計算蒸發室冷媒流量。
  - (3). 請計算第二級壓縮機(底下)的功率。
  - (4). 請計算全部的冷媒流量。
  - (5). 請計算 COP
-

### (3.4.3). Multipurpose Vapor-Compression Refrigeration Cycle

可以冷藏與冷凍一次完成。



例：有一蒸汽冷凍系統以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=35.5^\circ\text{C}$ ，冷凍溫度  $-40^\circ\text{C}$ ，冷藏溫度  $-1.2^\circ\text{C}$ ，其中冷凍吸熱量為 60 噸，冷藏吸熱量為 40 噸，請計算做功量。

$P_1=0.5164 \text{ bar}$ ， $T_1=-40^\circ\text{C}$ ， $P_2=2.8 \text{ bar}$ ， $T_2=-1.2^\circ\text{C}$ ， $P_4=9.0 \text{ bar}$

$h_1=222.88$ ， $s_1=0.9560$ ， $s_{2s}=0.9560$ ， $h_{2s}=282.15$ ， $h_2=292.61$

$h_3=99.56$ ， $h_4=99.56$ ， $x_4=0.2583$ ， $h_1-h_4=123.32$ ， $h_1-h_6=0.6 \times 123.32=73.99$

$h_6=148.89$ ， $h_5=148.89$ ， $x_5=0.5072$ ，

$q_L=h_1-h_4=123.32$ ， $m=2.854 \text{ kg/sec}$ ， $w_C=h_2-h_1=69.73$ ， $W_C=199.03 \text{ kW}$

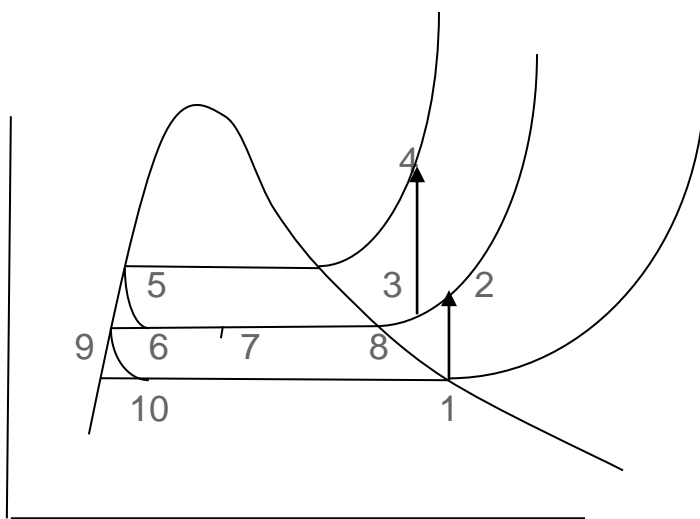
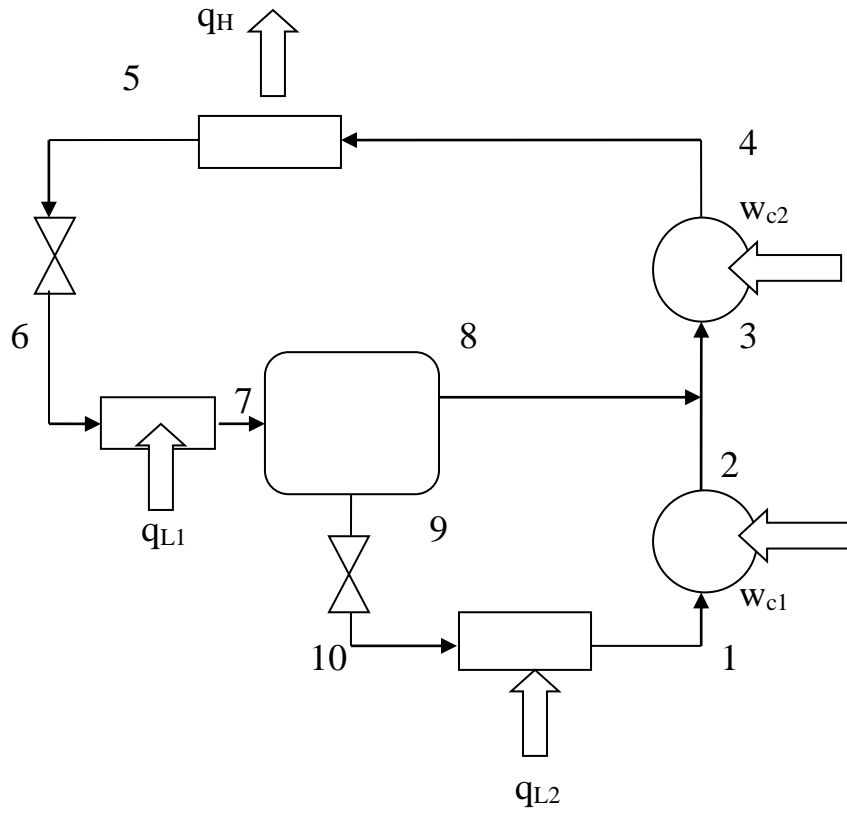
$\text{COP}=1.77$

$$\Delta S_{net} = \frac{q_H}{T_a} - \frac{q_{LR}}{T_{LR}} - \frac{q_{LF}}{T_{LF}} = \frac{q_H}{T_a} - \frac{q_L}{T_L} + q_{LR} \left( \frac{1}{T_{LR}} - \frac{1}{T_{LF}} \right)$$

討論：這比個別使用一台冷凍系統耗電。以 COP 來看，本系統與單級系統相同。但因本系統的吸熱量中有一部份來自較高的溫度 ( $-1.2^\circ\text{C}$ )，其實這部份的效率可以較高。故整體來說，本系統的效率比個別使用一台冷凍系統的效率低。但好處是一機兩用，減少購置成本。

(3.4.4). 兩段壓縮兩段吸熱多用途

使用兩個壓縮機，分兩段不同溫度吸熱，一段冷藏，一段冷凍。



	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s
1	-40	51.8	373.48	1.7620
2s	-0.9	200	400.18	1.7620
2	4.6	200	404.90	
3	-3.4	200	397.96	1.7537
4s	51.3	1000	432.65	1.7537
4	57.1	1000	438.78	
5	39.4	1000	255.56	
6	-10.2	200	255.56	
7	-10.2	200	298.33	
8	-10.2	200	392.14	
9	-10.2	200	186.42	
10	-40	51.8	186.42	

$$\text{已知 } \Omega = \frac{q_{L2}}{q_{L1}} = 2.0$$

$$h_7 = xh_8 + (1-x)h_9$$

$$q_{L1} = h_7 - h_6$$

$$q_{L2} = (1-x)(h_1 - h_{10}) = (1-x)(h_1 - h_9)$$

$$\frac{q_{L2}}{q_{L1}} = \frac{(1-x)(h_1 - h_9)}{h_7 - h_6} = \frac{(1-x)(h_1 - h_9)}{xh_8 + (1-x)h_9 - h_6} = \Omega$$

$$(h_1 - h_9) - x(h_1 - h_9) = \Omega(x(h_8 - h_9) + h_9 - h_6)$$

$$(h_1 - h_9) - \Omega(h_9 - h_6) = x(h_1 - h_9 + \Omega(h_8 - h_9))$$

$$x = \frac{h_1 - h_9 - \Omega(h_9 - h_6)}{h_1 - h_9 + \Omega(h_8 - h_9)} = 0.544$$

$$h_3 = xh_8 + (1-x)h_2 = 397.96$$

$$q_{L1} = h_7 - h_6 = 42.77$$



$$q_{L2} = (1-x)(h_1 - h_9) = 85.30 \text{ kJ}$$

$$w_{c2} = h_4 - h_3 = 40.82$$

$$w_{c1} = (1-x)(h_2 - h_1) = 14.33$$

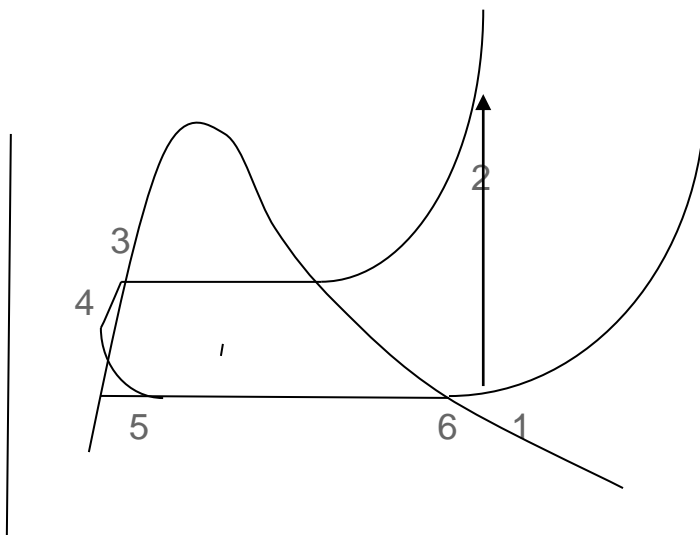
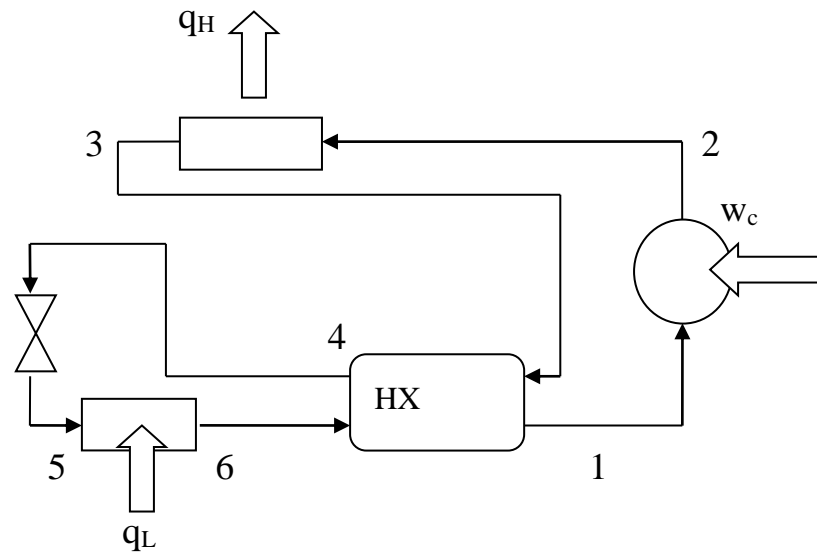
$$COP = \frac{q_{L1} + q_{L2}}{w_{c1} + w_{c2}} = 2.32$$

以 R134a 為冷媒，已知  $T_H = 26.7^\circ\text{C}$ ， $T_L = -40^\circ\text{C}$

	Carnot	理想	單級壓縮 單段吸熱	兩級壓縮 單段吸熱	單級壓縮 兩段吸熱	兩級壓縮 兩段吸熱
COP	3.49	2.53	1.77	2.16	1.77	2.32

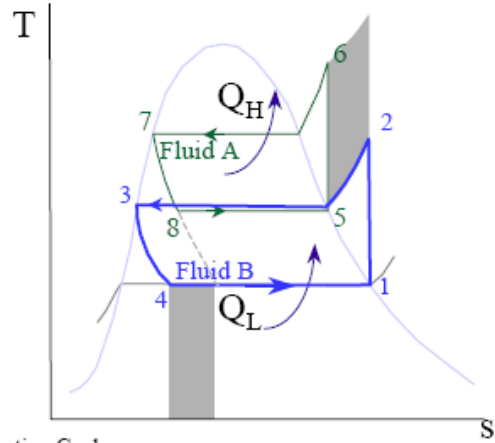
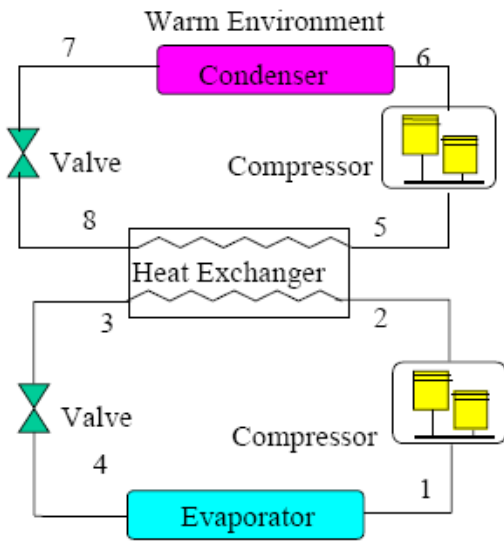
(3.4.5). 一段壓縮加熱交換器

使用兩個壓縮機，分兩段不同溫度吸熱，一段冷藏，一段冷凍。

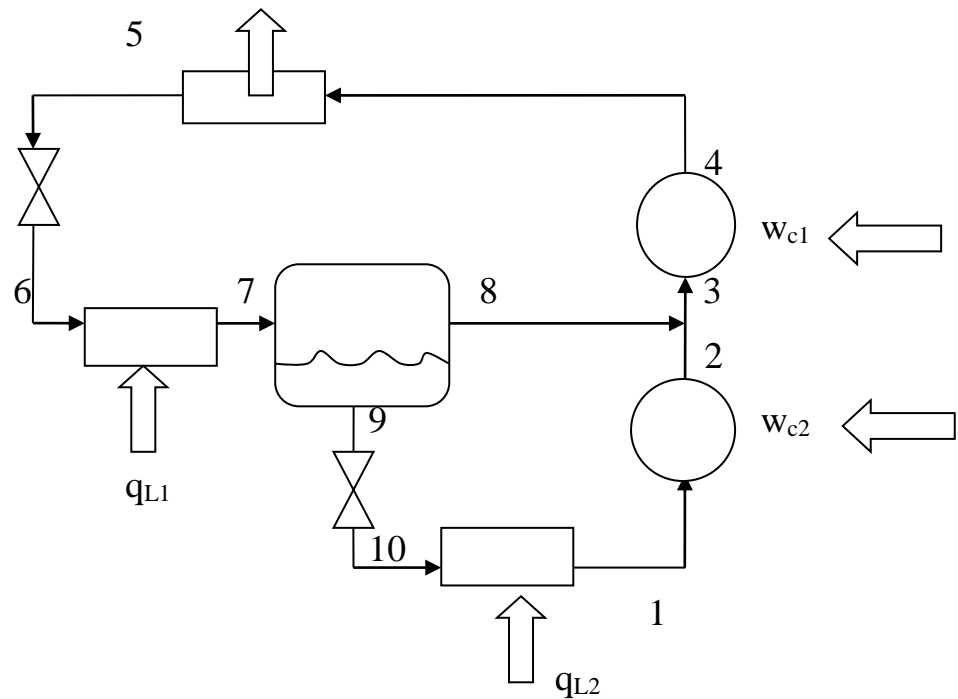


	T (°C)	P (kPa)	h	s
6	-40	51.8	373.48	1.7620
1	-30	51.8		
2		1000		
3	57.1	1000	438.78	
4		1000		
5		51.8		

(3.4.6). 級聯冷凍系統(Cascade)



例：擬將 $35^{\circ}\text{C}$ 的水製成 $-50^{\circ}\text{C}$ 的冰塊，大氣溫度為 $35^{\circ}\text{C}$ 。若冷媒為R410a，壓縮機效率100%，系統高壓3000kPa，中壓600kPa，低壓84kPa。其中第一段冷卻將 $35^{\circ}\text{C}$ 的水製成 $0^{\circ}\text{C}$ 的冰塊，第二段冷卻將 $0^{\circ}\text{C}$ 的冰塊製成 $-50^{\circ}\text{C}$ 的冰塊，請計算該冷凍機製作1kg的冰塊需要做多少功。



用來產生低溫的冷凍系統，使用不同溫度範圍的冷媒，採用 R134a，ethane 與 methane 做為三級的級聯冷凍系統。壓縮機效率為 85%。

	R134a	ethane	methane
P <sub>1</sub>	0.5164 bar	0.4329 bar	1.013 bar
T <sub>1</sub>	-40°C	-103°C (170 K)	-161.3°C (111.7 K)
h <sub>1</sub>	222.88	562.9	223.83
s <sub>1</sub>	0.9560	3.3312	9.5042
P <sub>2</sub>	9.0 bar	10.0 bar	30.0 bar
h <sub>2</sub>	292.61	793.48	568.95
T <sub>3</sub>	35.5°C	-32.1°C (240.9 K)	-95.8°C (177.2 K)
h <sub>3</sub>	99.56	240.75	-16.74
h <sub>4</sub>	99.56	240.75	-16.74
q <sub>L</sub>	123.32	322.15	240.57
q <sub>H</sub>	193.05	552.73	585.69
w <sub>C</sub>	69.73	230.58	345.12
m	1.0	0.223	0.123
COP	1.769	1.397	0.697

單級 COP：1.769

雙級 COP：322.15\*0.223/(69.73+230.58\*.223)=0.593

三級 COP：240.57\*0.123/(69.73+230.58\*0.223+345.12\*0.123)=0.181

第三級已達 CH<sub>4</sub> 液化溫度，可以用來產生 LNG。

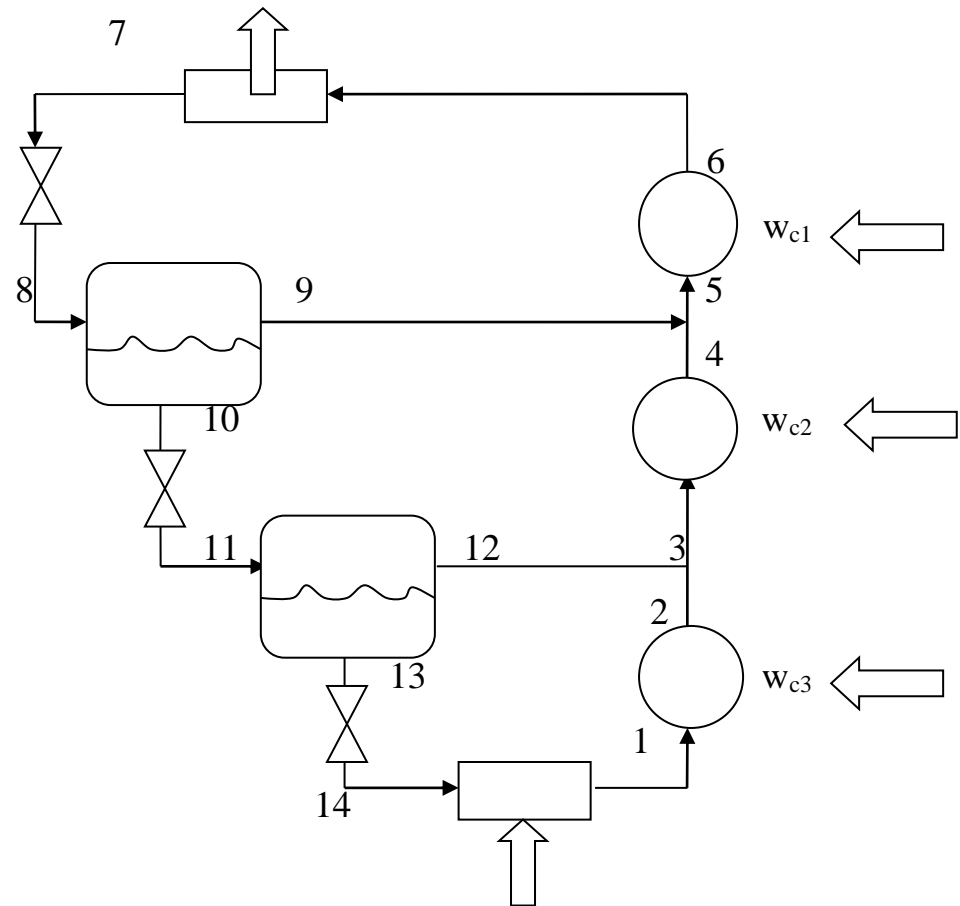
理論上從 T<sub>L</sub> 吸熱所需做的功：

$$COP = \frac{q_L}{w} = \frac{T_L}{T_H - T_L}, \quad w = \frac{T_H - T_L}{T_L} q_L = \frac{\Delta T}{T_L} q_L$$

溫度越低，所需做的功越大。實際上，所需做的功比理論上功更大。

	$T_L$	$\Delta T$	$\Delta T / T_L$	COP	1/COP
單級	233	65 K	0.279	1.769	0.565
雙級	170	128 K	0.753	0.593	1.686
三級	112	186 K	1.661	0.181	5.525

作業3.6：將 $35^{\circ}\text{C}$ 的水製成 $-50^{\circ}\text{C}$ 的冰塊，製冰量為 $1000\text{kg/hr}$ ，若以三段級聯式冷凍機來製冰，請計算將 $1\text{kg}$ 的冰塊，需要做多少功。



### (3.5). 冷媒

冷凍空調系統中，用以傳遞熱能，產生冷凍效果之工作流體。

#### (3.5.1). 冷媒條件

無毒，不爆炸，對金屬及非金屬無腐蝕作用，不燃燒，洩漏時易於察覺，化學性安定，對潤滑油無破壞性，具有較高的蒸發潛熱，對環境無害。

##### 1. 蒸發壓力要高

蒸發溫度會隨應用溫度而變化，例如冰水機之蒸發溫度約為  $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，冷凍庫主機之蒸發溫度約為  $-20\sim -30^{\circ}\text{C}$ ，家用空調機之蒸發溫度約為  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。蒸發溫度愈低，蒸發壓力亦愈低，若冷媒之蒸發壓力低於大氣壓力時，則空氣易侵入系統，系統處理上較為困難，因此希望冷媒在低溫蒸發時，其蒸發壓力可高於大氣壓力。

##### 2. 蒸發潛熱要大

冷媒之蒸發潛熱大，表示使用較少的冷媒便可以吸收大量的熱量。

##### 3. 臨界溫度要高

臨界溫度高，表示冷媒凝結溫度高，則可以用常溫的空氣或水來冷卻冷媒而達到凝結液化的作用。

##### 4. 冷凝壓力要低

冷凝壓力低，表示用較低壓力即可將冷媒液化，壓縮機之壓縮比小，可節省壓縮機之馬力。

##### 5. 凝固溫度要低

冷媒之凝固點要低，否則冷媒在蒸發器內凍結而無法循環。

##### 6. 氣態冷媒之比容積要小

氣態冷媒之比容積愈小愈好，則壓縮機之容積可縮小使成本降低，且吸氣管及排氣管可以用較小的冷媒配管。

##### 7. 液態冷媒之密度要高

液態冷媒之密度愈高，則液管可用較小的配管。

8.可溶於冷凍油，則系統不必裝油分離器

### (3.5.2). 冷媒種類

#### ● 高溫冷媒與低溫冷媒：

冷媒的臨界溫度高於大氣溫度，可以直接使用冷凝器。冷媒臨界溫度低於大氣溫度，無法以大氣來冷凝，必須使用級聯系統，以其他冷媒的蒸發是做為冷凝器。

#### ● 一次冷媒與二次冷媒：

一次冷媒為一般之冷媒，以低壓相變化來吸熱，以高壓相變化來放熱。

二次冷媒：一次冷媒在冷凍系統之蒸發器中蒸發產生低溫，此低溫產生另一種不凍液，此不凍液稱為二次冷媒。一般普遍採用的二次冷媒為氯化鈉及氯化鈣水溶液，其他尚有氯化鎂、酒精、乙二醇、丙二醇等水溶液。

二次冷媒藉液體傳導及對流現象吸熱，為一種不改變型態，始終保持液態的冷熱傳遞媒介物。在應用上其無毒性、無爆炸性、無可燃性的特性，可縮短冷媒所需之管路，減少一次冷媒使用量等優點。

#### ● 自然冷媒與合成冷媒：

自然(Natural)冷媒為自然存在的物質，合成(Synthetic)冷媒為人工合成的物質。

#### ● 鹵素系冷媒：

分子結構與烷類相同，主要為甲烷與乙烷，少部分為丙烷的分子結構。其中全部的氫原子或部分的氫原子被氯原子或氟原子所取代，稱為氟氯烷(Freon)。

CFC：R11( $\text{CCl}_3\text{F}$ )，R12( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ )，R13( $\text{CClF}_3$ )，R113( $\text{CCl}_3\text{CF}_3$ )，

R114( $\text{CCl}_2\text{FCF}_3$ )

HCFC：R22( $\text{CHClF}_2$ )，R123( $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$ )，R124( $\text{CHClFCF}_3$ )，

R141b( $\text{CCl}_2\text{FCF}_3$ )，R142b( $\text{CClF}_2\text{CF}_3$ )

HFC：R134a( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ )，R152a( $\text{CHF}_2\text{CH}_3$ )，R125( $\text{CF}_3\text{CHF}_2$ )，

R143a( $\text{CF}_3\text{CH}_3$ )，R32( $\text{CH}_2\text{F}_2$ )，R23( $\text{CHF}_3$ )，R227ea( $\text{CF}_3\text{-CHF-CF}_3$ )，

R236fa( $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{-CF}_3$ )

● 非鹵素系冷媒：

$\text{NH}_3$ ， $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ， $\text{C}_3\text{H}_8$ ， $\text{C}_3\text{H}_6$ ， $\text{C}_2\text{H}_6$ ， $\text{C}_2\text{H}_4$ ， $\text{CH}_4$ ， $\text{N}_2$ ， $\text{O}_2$ ， $\text{H}_2$ ， $\text{CO}_2$ ，Ar，He，

Ne

(3.5.3). 常用冷媒

氨(R-717)：氨( $\text{NH}_3$ )，又稱為阿摩尼亞，是最早被用作冷媒的物質。氨目前仍為各種工業冷凍系統及吸收式系統中，最主要被使用之冷媒，因此提高安全偵測及防護措施，為專業之重要課題。

其優點為：

- (1) 蒸發潛熱值大，冷凍效率極高。
- (2) 運轉壓力低，冷凍系統運轉材料成本低。
- (3) 洩露時極易由氣味和測漏試紙偵察出。
- (4) 不溶於油，卻極易溶於水，故為吸收式冷凍系統之主要冷媒。
- (5) 對鋼鐵無腐蝕性。
- (6) 壓縮冷凍系統中若稍含水份，不阻礙其運轉，無損害襯墊材料。
- (7) 常溫及低溫下化性穩定。

其缺點為：

- (1) 有毒性，並具有強烈刺激性氣味。對眼、鼻、喉、肺及皮膚會造成強烈刺激。
- (2) 若與空氣混合，濃度佔空氣容積之 16~27% 時，容易產生爆炸。
- (3) 對銅、錫、鋅及銅合金屬類腐蝕性大，會侵蝕電化絕緣，故不適合密封式冷凍壓縮系統。



Freon-12 分子式( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) 編號 R-12 : 此本為應用最廣且最適合於家用冷凍系統之冷媒，其優點為：

- (1) 冷媒中最安全無毒之一種。
- (2) 化學穩定性極強，無腐蝕性、爆炸性及可燃性。
- (3) 冷凝溫度高，適合一般空氣冷卻。
- (4) 沸點低，故適用於冷凍冷藏系統。

其缺點是，若散發至空氣中易與大氣臭氧層作用，造成對地球環境的傷害，現已在國際環保組織的建議下停產及停用。

Freon-22 分子式( $\text{CHClF}_2$ ) 編號 R-22：為目前應用最廣泛的冷媒之一，優點為：

- (1) 化學性質極穩定，對金屬無腐蝕性或可燃性。
- (2) 安全性高、無毒、無刺激性。
- (3) 適合大型往復式壓縮機之空調系統。

空調常用冷媒有 R134A 或其他。

冷藏常用冷媒有 R134A，R404A 或其他。

冷凍常用冷媒有 R134A，R404A，R507 新冷媒。

#### 各種常用冷媒對環境之影響

	冷媒名	臭氧層破壞係數 ( ODP )	地球溫暖化係數 ( GWP )
CFC 冷媒 (生產限制)	CFC-12	1.0	8,500
	R-502	0.33	5,600
HCFC 冷媒 (生產限制)	HCFC-22	0.055	1,700
	HCFC-142b	0.065	2,000
HFC 冷媒 (排出限制)	HFC-134a	0	1,300
	R-404A	0	3,300
	R-410A	0	1,700
	R-507A	0	3,300
自然冷媒 (NWFs)	$\text{CO}_2$	0	1
	$\text{NH}_3$	0	0
	丙烷	0	3

#### (3.5.4). 蒙特婁議定書 (Montreal Protocol)

基於繼續使用 CFCs 等化學物質，將導致地球臭氧層被破壞之共識，聯合國環境規劃署(UNEP)召集世界各國共商對策，1985 年共有 28 個國家於維也納達成保護臭氧層協議(Vienna Convention)，並決定研議一國際管制公約以補該協議之不足。1987 年 9 月 16 日再於加拿大蒙特婁市舉行國際會議，並由全世界二十六個國家共同簽署「蒙特婁破壞臭氧層物質管制議定書(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer)」，管制氟氯碳化物使用之國際公約，也於 1989 年 1 月起正式生效。而後，為挽救日益惡化之臭氧層，於 1990 年 6 月在倫敦召開之蒙特婁議定書締約國第二次會議，對議定書內容作了大幅之修正，其中最為重要者即為擴大列管物質，除原先列管之 CFC-11、CFC-12、CFC-113、CFC-114、CFC-115 等五項及三項海龍外，另增加 CFC-13 等 10 種，四氯化碳及三氯乙烷，計 12 種化學物質，並加速管制時程，提前於 2000 年完全禁用氟氯碳化物、海龍及四氯化碳。最近更由於臭氧層仍日趨惡化，1992 年 11 月在丹麥哥本哈根召開之第四次締約國大會，決議將氟氯碳化物禁產時程提前於 1996 年 1 月起實施，而消費量除必要用途外應減為零。我國身為國際社會的一份子，亦須遵行，加強列管化學品之管制使用，並積極研發替代品以順應此一世界性的環保潮流。

簽訂日期：1987 年 9 月

生效日期：1989 年 1 月 1 日

執行國：目前 91 國

主要內容：

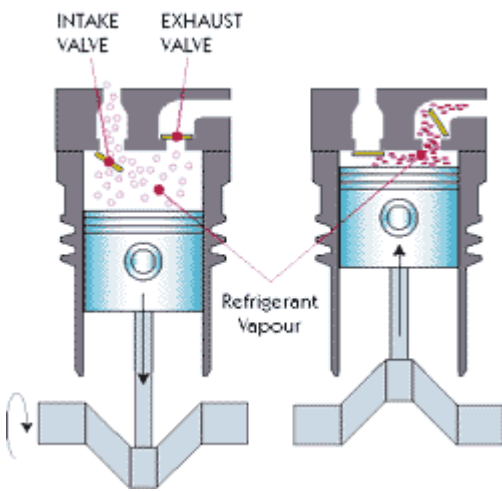
1. 從 1987 年始至 1993 年，共召開 5 次會議。
2. 控制氟氯碳化物(CFCs)排放量，明定 CFCs 和海龍的削減時程。
3. 1994 年 1 月全面禁止生產海龍。
4. 1996 年 1 月 1 日起，除了部分開發中國家，全面禁用 CFCs。

### (3.6). 冷凍系統

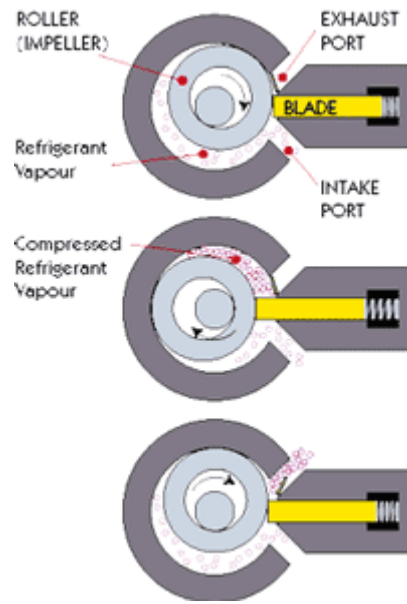
冷凍循環系統為一封閉的管路系統，包括有四個基本機組：壓縮機、凝結器、膨脹閥、蒸發器等，選擇適當的型式組成系統。

#### (3.6.1). 冷媒壓縮機

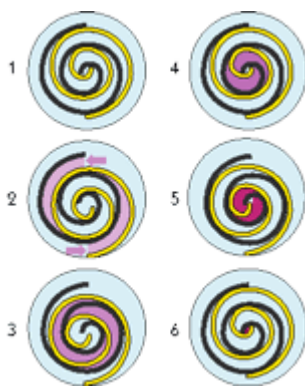
##### 往復式壓縮機



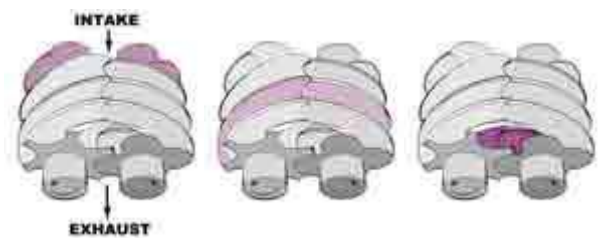
##### 迴轉式壓縮機



##### 渦卷式壓縮機



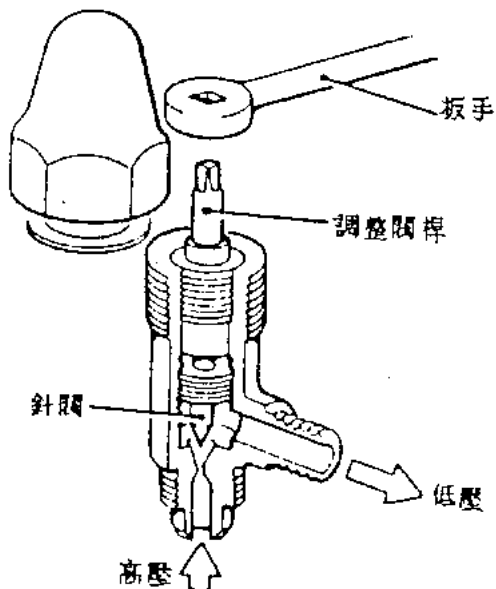
##### 齒輪式壓縮機



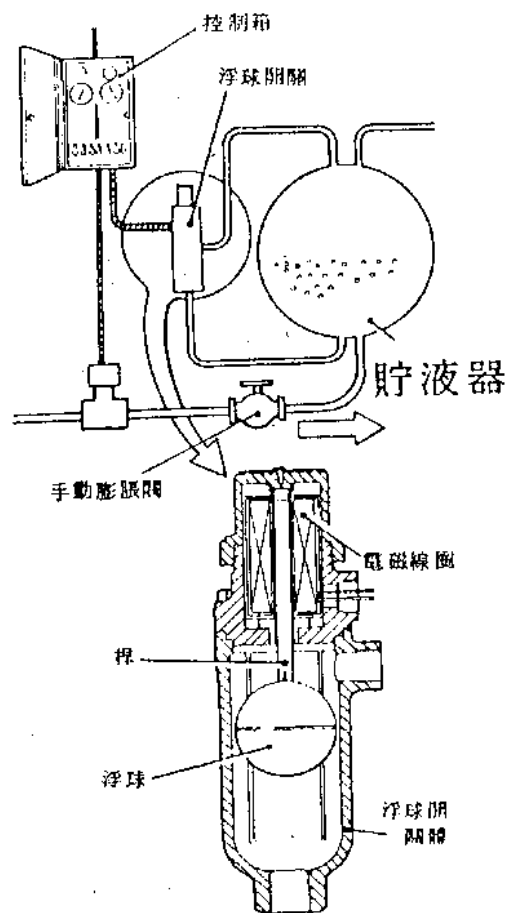
##### 變頻壓縮機

傳統式的冷氣壓縮機轉速是固定的，約 1710 rpm。當冷氣負載改變時，必須靠停機來控制室內的冷度。壓縮機常關開關開，由於起動時之瞬間耗電頗大，壓縮機常開關，不但耗電而且噪音大。變頻式的冷氣壓縮機可以改變供電頻率來控制轉速，改變範圍由 800rpm 到 3300rpm。因轉速改變，冷度可以精確控制，運轉聲音較低，用電量也較少。傳統式冷氣機運轉模式，常讓使用者感覺時冷時熱的不舒適，變頻控制可將室內的溫度變化範圍縮小，而提供使用者需求的舒適環境。

### (3.6.2). 膨脹閥

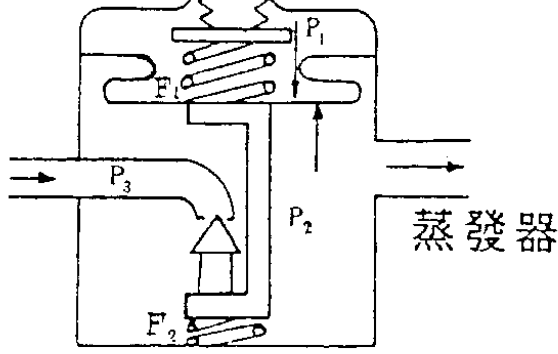


人工調整膨脹閥

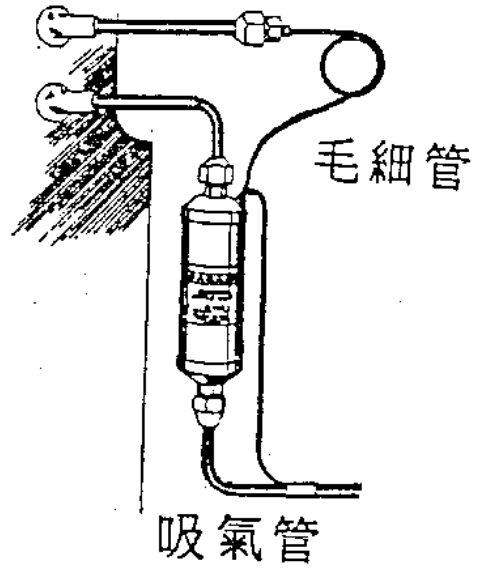


液位浮球控制膨脹閥

調整螺桿

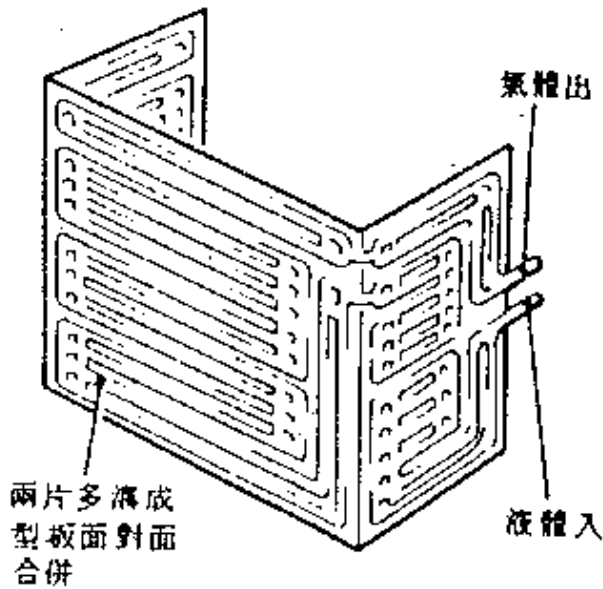


定壓膨脹閥

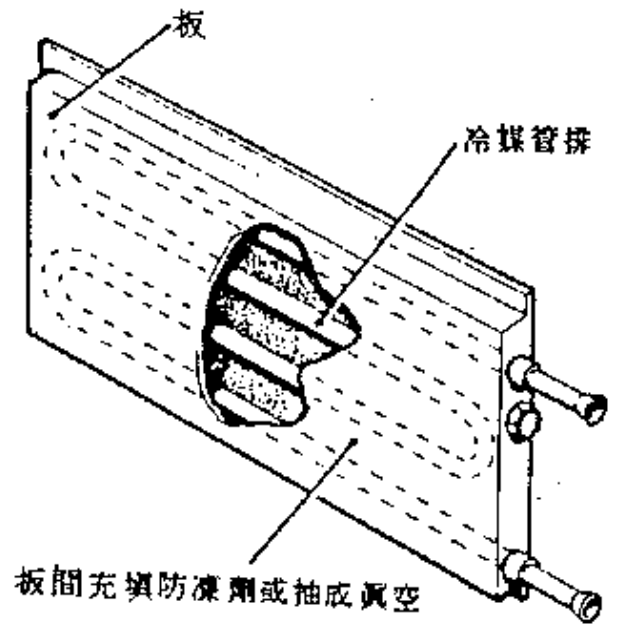


毛細管

板管式



(A)



(B)

蒸發室

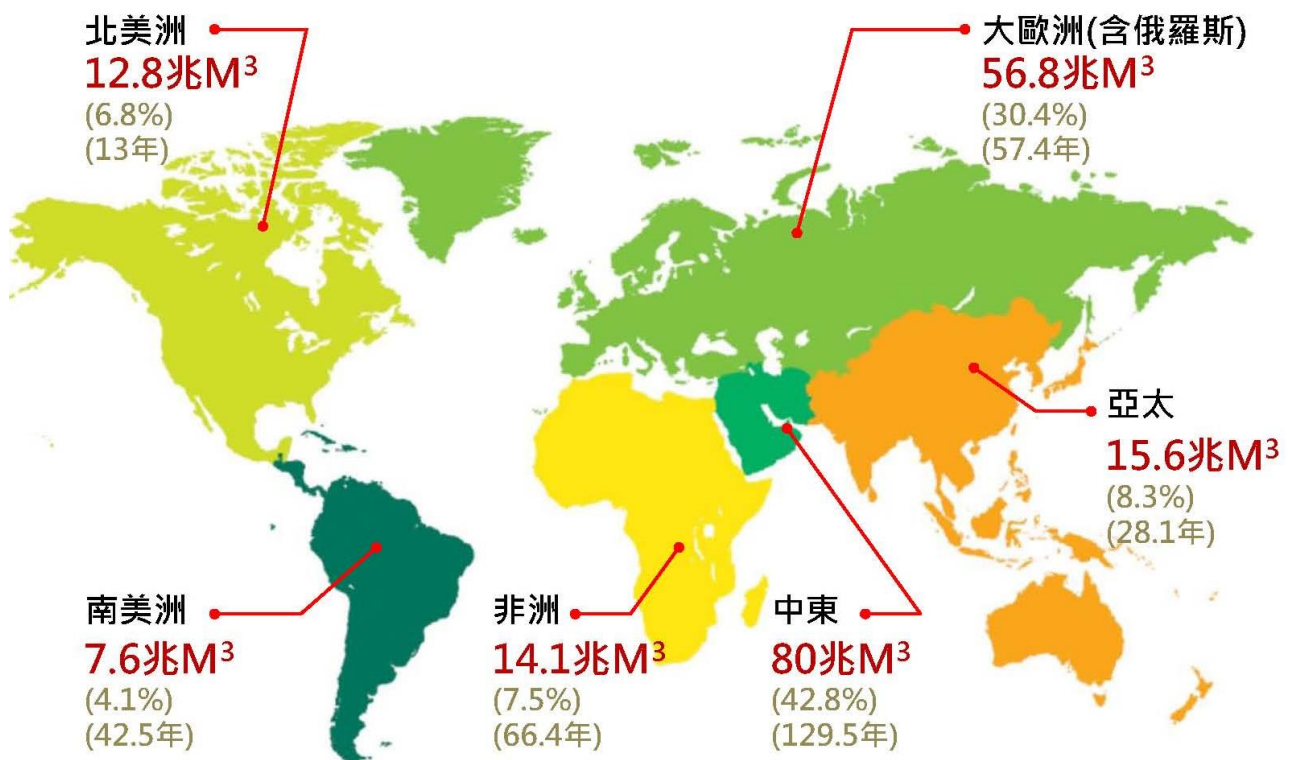
### (3.7). 低溫冷凍系統(Cryogenic Refrigeration)

#### (3.7.1). 氣體液化的應用

氣體	沸點	用途
CO <sub>2</sub>	-57°C	冷藏，食物保存。
CH <sub>4</sub>	-162°C	天然氣運儲。
O <sub>2</sub>	-183°C	醫療用氧氣，火箭燃料，工業氧化劑。
N <sub>2</sub>	-196°C	低溫冷卻劑。
H <sub>2</sub>	-253°C	火箭燃料，氫氣車輛與燃料電池車輛。
He	-269°C	低溫冷卻劑，低溫科學研究。

#### 全球 LNG 市場

- 全球儲量**186.9兆M<sup>3</sup>**，約可使用**52.8年**。
- 排名前三國家分別為：伊朗占18.2%、蘇聯占17.3%、卡達占13.1%。



生產國	BCM	占全球比例
美國	767.3	21.7%
俄羅斯	573.3	16.2%
伊朗	192.5	5.4%
卡達	181.4	5.1%
加拿大	163.5	4.6%
中國大陸	138.0	3.9%
挪威	117.2	3.3%
沙烏地阿拉伯	106.4	3.0%
阿爾及利亞	83.0	2.3%
印尼	75.0	2.1%

消費國	BCM	占全球比例
美國	778.0	22.4%
俄羅斯	391.5	11.3%
中國大陸	197.3	5.7%
伊朗	191.2	5.5%
日本	113.4	3.3%
沙烏地阿拉伯	106.4	3.1%
加拿大	102.5	3.0%
墨西哥	83.2	2.4%
德國	74.6	2.2%
義大利	61.4	1.8%
<b>台灣</b>	<b>18.4</b>	<b>0.5%</b>

資料來源: BP Statistical Review of World Energy 2016

2015年LNG主要進口國交易量及占比

國家	進口量 (萬噸)	占全球LNG 交易量比例
<b>日本</b>	<b>8312</b>	<b>34.9%</b>
南韓	3078	12.9%
中國大陸	1846	7.7%
印度	1529	6.4%
<b>台灣</b>  	1317	5.5%
西班牙	922	3.9%
英國	902	3.8%
巴西	500	2.1%

2015年LNG主要供應國交易量及占比

國家	出口量 (萬噸)	占全球LNG 交易量比例
<b>卡達</b>	<b>7495</b>	<b>31.5%</b>
澳洲	2804	11.8%
馬來西亞	2409	7.7%
奈及利亞	1937	6.4%
印尼	1542	5.5%
千里達	1197	3.9%
阿爾及利亞	1141	3.8%
俄羅斯	1021	2.1%



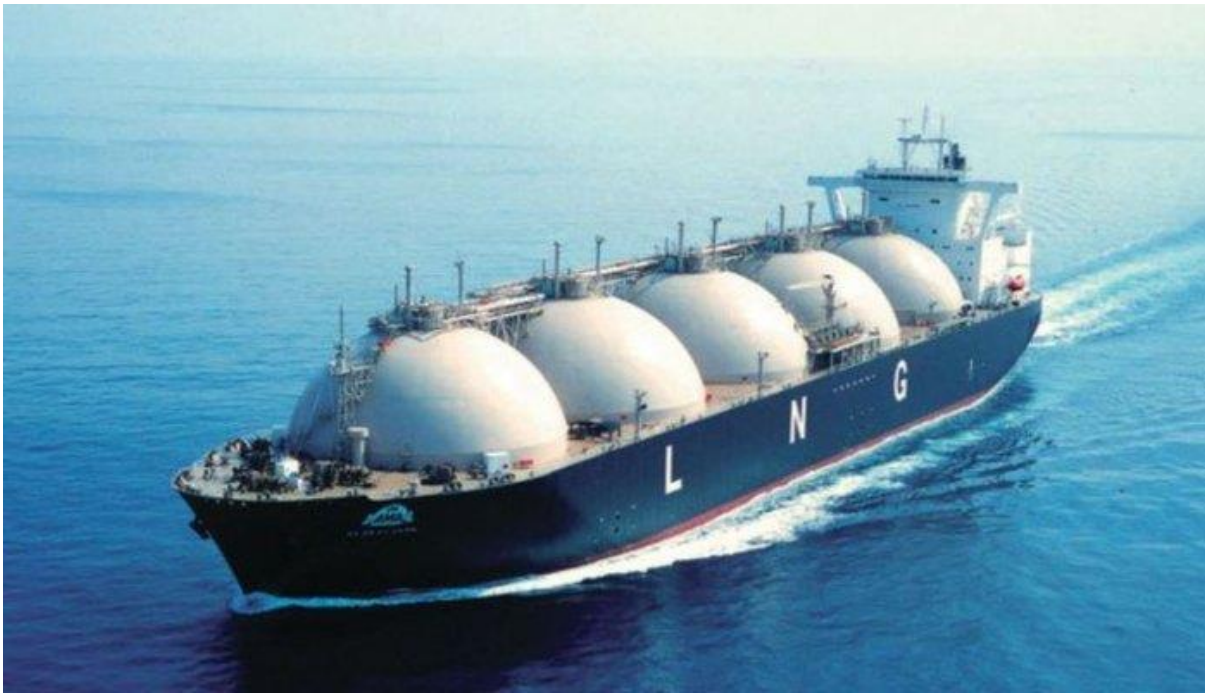
## 台灣LNG進口來源



台灣LNG交易量佔全球LNG交易量約5%，貨源來自世界各LNG出口國

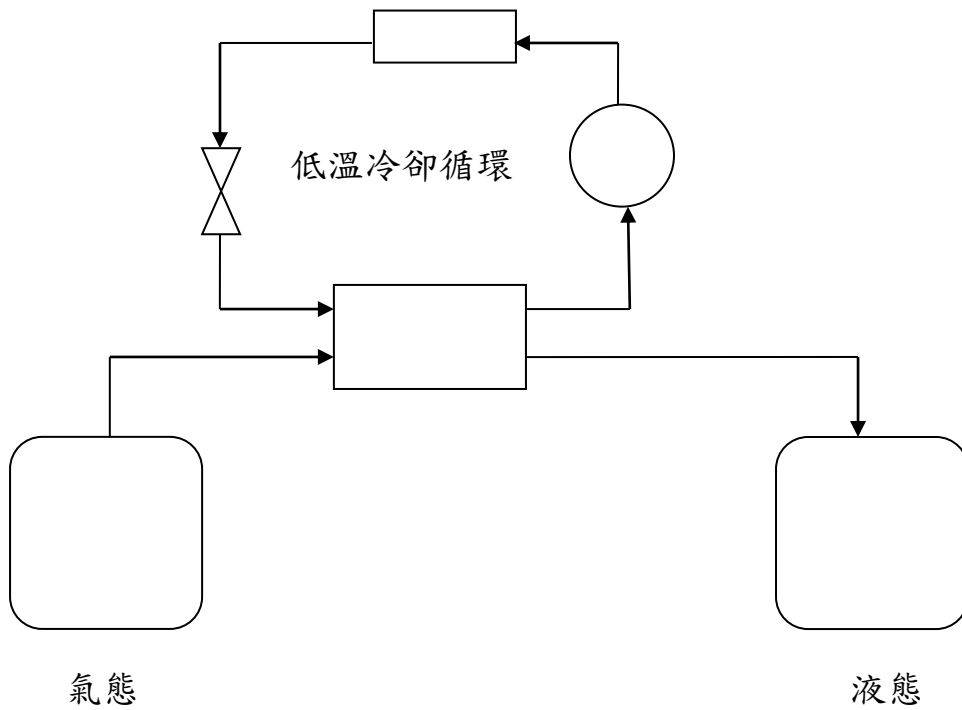






### (3.7.2). 氣體液化的操作方式

氣體液化的操作方式：常壓→冷卻→分離

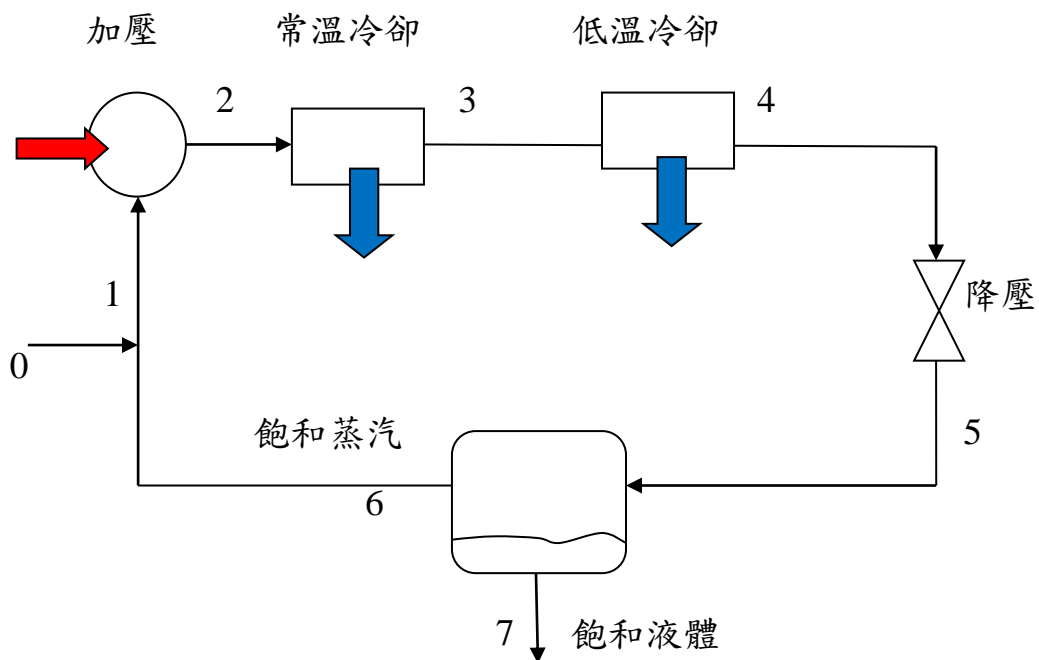


問題：必須以更低溫的循環才能將氣體液化。

溫度越低，耗能越大，成本越高。

將氣體由常溫直接降溫，耗能太大。

氣體液化的操作方式：加壓→冷卻→膨脹→分離



1→2：加壓，將常壓的氣體加壓至非常高壓

$$w_C = h_2 - h_1$$

2→3：常溫冷卻，將加壓後的氣體利用大氣來冷卻

$$q_H = h_2 - h_3$$

3→4：低溫冷卻，利用其他冷凍方式將加壓後的氣體冷卻至低溫

$$q_L = h_3 - h_4$$

4→5：膨脹降壓

$$h_4 = h_5$$

5→6：液氣分離

$$h_5 = h_f + xh_{fg}$$

$$x = \frac{h_5 - h_f}{h_{fg}}$$

$$h_6 = h_g$$

$$h_7 = h_f$$

6→1：補充氣混合

$$xh_6 + (1-x)h_0 = h_1$$

液化的條件：

$h_5 < h_g$ ，才有機會液化。其中  $h_4$  為加壓冷卻後的焓值， $h_g$  為降壓後飽和氣態的焓值。

$$y = 1 - x = 1 - \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}} = \frac{h_{fg} + h_f - h_4}{h_{fg}} = \frac{h_g - h_4}{h_{fg}}$$

$y > 0$  的條件為  $h_4 < h_g$ 。 $h_4$  越低，液化比例越高。

加壓後氣體溫度相當高，必須冷卻。冷卻有兩個階段，第一個階段是在大氣中冷卻，先降溫至大氣溫度。第二個階段則需要再冷卻至更低溫度。

液化天然氣：

甲烷在常壓下(101.3 kPa)， $T_g = 111.7\text{K} = -161.4^\circ\text{C}$ 。

$$h_g = 223.83 \text{ kJ/kg}, h_f = -286.50 \text{ kJ/kg}, h_{fg} = 510.33 \text{ kJ/kg}。$$

$h_4 < 223.83 \text{ kJ/kg}$ ，至少要加壓至4000kPa以上，冷卻後降壓，才可能液化。加壓的壓力越高，冷卻後的溫度可以較高，就開始液化。

加壓後壓力(kPa)	冷卻後溫度(K)
4000	201.3
6000	208.7
8000	217.2
1000	224.1

以加壓至8000kPa為例，冷卻後至少要降溫至217.2K以下，再降壓至101.3 kPa，才可以得到液化甲烷。冷卻後所降溫度越低，則降壓後所能得到的液化甲烷越

多。

### 液化氮氣：

氮氣在常壓下(101.3 kPa)， $T_g = 77.3\text{K} = -196^\circ\text{C}$ 。

$h_g = 76.69 \text{ kJ/kg}$ ， $h_f = -122.15 \text{ kJ/kg}$ ， $h_{fg} = 198.84 \text{ kJ/kg}$ 。

$h_4 < 76.69 \text{ kJ/kg}$ ，至少要加壓至10000kPa以上，冷卻後降壓，才可能液化。

加壓後壓力(kPa)	冷卻後溫度(K)
4000	135
6000	147
8000	155
10000	160

以加壓至8000kPa為例，冷卻後至少要降溫至155k以下，再降壓至101.3 kPa，才可以得到液化氮氣。冷卻後所降溫度越低，則降壓後所能得到的液化氮氣越多。

---

**例：**將氮氣加壓至 10000kPa，必須將氮氣冷卻至甚麼溫度，再膨脹至一大氣壓，才可能液化。

(1). 若以冷凍機將高壓氮氣冷卻至 140K，請計算液化比例。

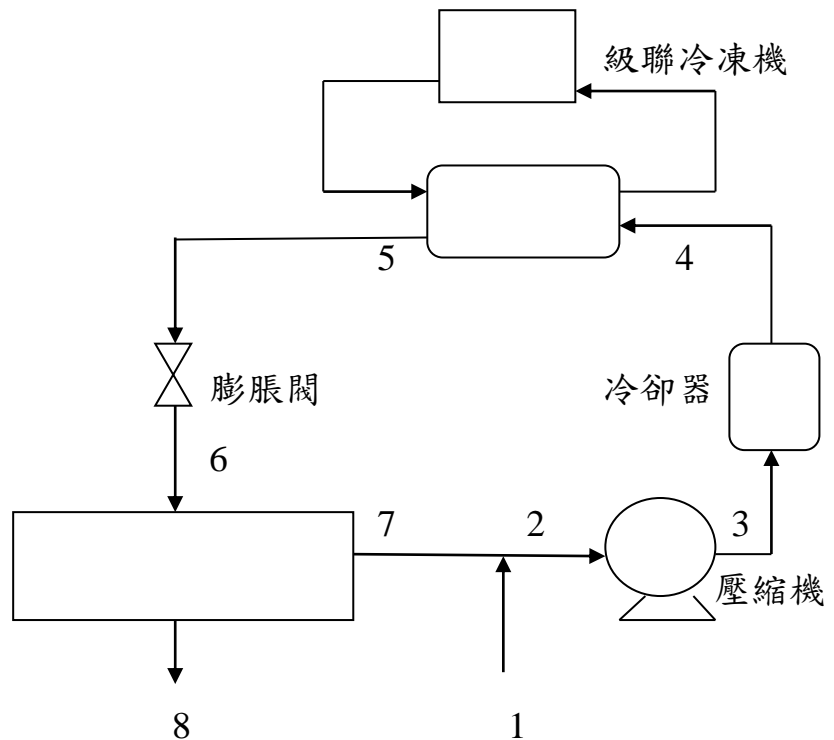
(2). 若以冷凍機將高壓氮氣自 300K 冷卻至 140K，冷凍機的 COP 為 0.7，請計算每液化 1kg 氮氣，冷凍機所需做的功。

---

### (3.7.3). 液化甲烷

將 $27^{\circ}\text{C}$ ， $101.3\text{ kPa}$ 的甲烷加壓至 $80\text{ bar}$ ，冷卻後至少要降溫至 $217.2\text{K}$ 以下。第一個階段是在大氣中冷卻，先以空氣將甲烷冷卻至 $27^{\circ}\text{C}$ ，再以級聯冷凍系統將甲烷冷卻至 $200\text{ K}$ ，然後膨脹降壓至 $101.3\text{ kPa}$ ，即可將甲烷液化。

#### (1). 基本型



		壓力	溫度	h
1	進氣狀態	101.3 kPa	300 K	627.58
2	混合後狀態	101.3 kPa	161.4 K	330.86
3	壓縮後狀態	80 bar	491.5K	1085.0
4	大氣冷卻後	80 bar	300 K	548.15
5	冷凍機冷卻	80 bar	200 K	88.54
6	降壓後狀態	101.3 kPa	111.7 K	88.54
7	飽和蒸氣	101.3 kPa	111.7 K	223.83
8	飽和液態	101.3 kPa	111.7 K	-286.50

採用R134a與ethane兩級的級聯冷凍系統，即可達到220K低溫，系統的COP為0.593。

$$h_6 = 88.54 = -286.5 + 510.33x, \quad x = 0.7349;$$

即每壓縮1 kg的甲烷可以產生0.2651 kg的液態甲烷。剩下0.7349 kg的氣態甲烷會回去與補充的甲烷混合，重新壓縮。

$$P_2 = 101.3 \text{ kPa}, \quad h_2 = xh_6 + ((1-x)h_1) = 330.86, \quad T_2 = 161.4 \text{ K}, \quad s_2 = 10.2990$$

$$P_3 = 80 \text{ bar}, \quad h_3 = 1085.00, \quad T_3 = 491.5 \text{ K}$$

$$\text{壓縮機所做的功：} w_C = h_3 - h_2 = 754.15$$

$$\text{冷凍機吸熱量：} q = h_4 - h_5 = 459.61$$

$$\text{冷凍機所做的功：雙級 COP} = 0.593, \quad w_{CC} = 459.61 / 0.593 = 775.06$$

$$W = 754.15 + 775.06 = 1529.21 \text{ kJ/kg}$$

這只是將 0.2651 kg 甲烷液化所做的功，故將每 1 kg 的甲烷液化所做的功為 5768 kJ/kg。

理論做功量：

$$w = T_a(s_8 - s_1) + h_1 - h_8 = 300 \times (4.9336 - 11.6286) + 627.58 - (-286.5) = -1094.4 \text{ kJ/kg}$$

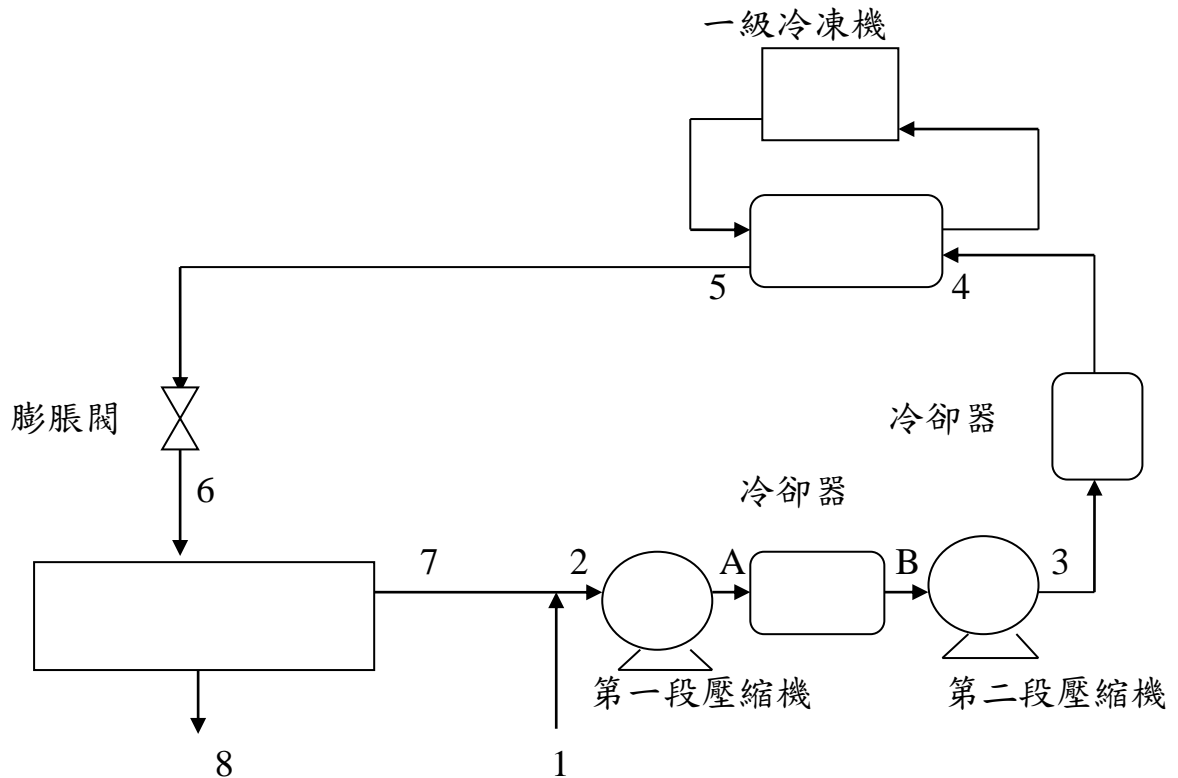
理論上將 1 kg 的甲烷液化所做的功為 1094.4 kJ/kg，實際上所做的功為 5768 kJ/kg，為理論做功量的 5.27 倍。

改進的空間：

- (1). 分級壓縮，中間冷卻，減少壓縮所做的功。
- (2). 在不同溫度範圍採用一級與二級冷凍機，提高整體效率。
- (3). 補充氣冷卻，減少壓縮所做的功。
- (4). 自我冷卻，減少壓縮所做的功。

(2). 分級壓縮，中間冷卻。

將甲烷分兩段壓縮，分別為 1bar→10bar，10bar→80bar。假設中間冷卻器可以將甲烷冷卻至 300K，壓縮機效率 85%。除了壓縮機改為兩段壓縮外，其餘各狀態不變。



		壓力	溫度	h	s
2	壓縮前狀態	1bar	161.4 K	330.86	10.2988
A	第一級壓縮後	20 bar	362.2	758.91	
B	第一級冷卻後	20 bar	300 K	608.85	10.0303
3	第二級壓縮後	80 bar	427.8	899.62	
4	第二級冷卻後	80 bar	300K	548.15	9.1598

第一級壓縮機所做的功： $w_{C1} = h_A - h_2 = 428.05$

第二級壓縮機所做的功： $w_{C2} = h_3 - h_B = 290.77$



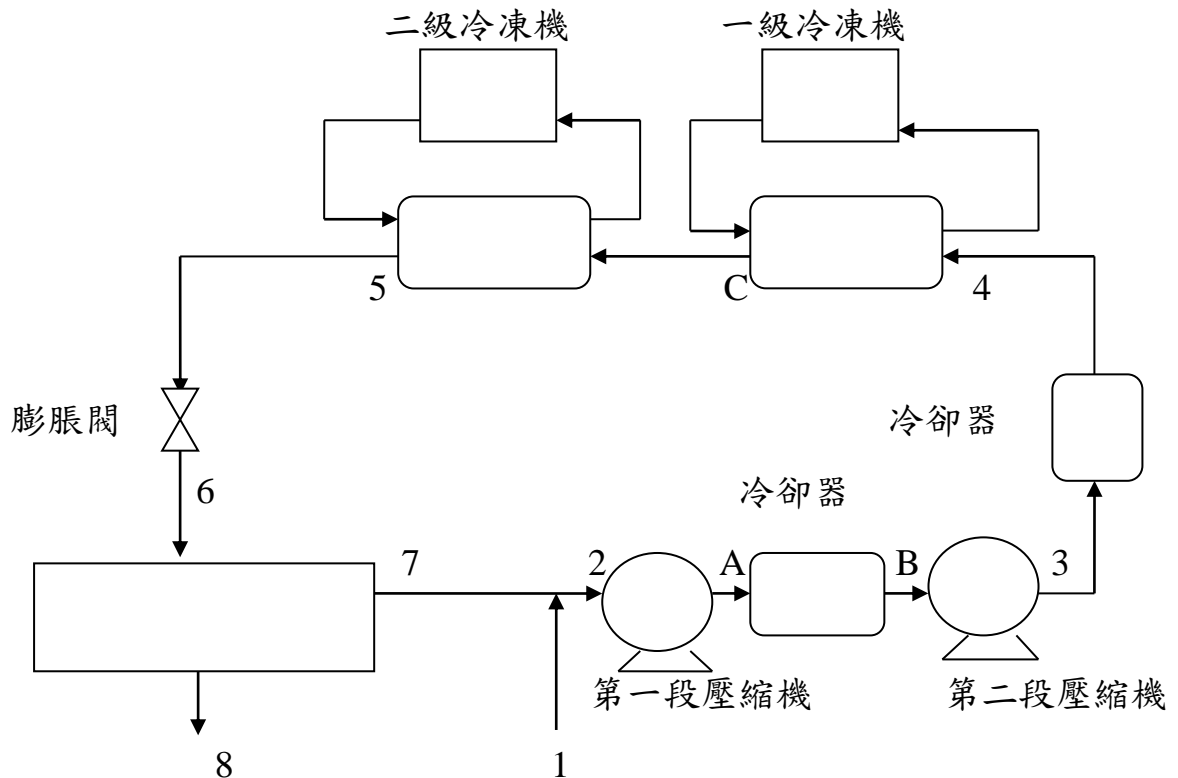
壓縮機所做的功： $w_c = 428.05 + 290.77 = 718.82 \text{ kJ/kg}$

冷凍機所做的功：雙級  $\text{COP} = 0.593$ ， $w_{cc} = 775.06$

$W = 718.82 + 775.06 = 1493.88 \text{ kJ/kg}$

這只是將  $0.2651 \text{ kg}$  甲烷液化所做的功，故將每  $1 \text{ kg}$  的甲烷液化所做的功為  $5635.16 \text{ kJ/kg}$ 。由於  $T_2$  很低，第一級壓縮後的溫度不高，兩段壓縮的效果不明顯。

(3). 在不同溫度範圍採用一級與二級冷凍機，提高整体效率。



		壓力	溫度	h
4	大氣冷卻後	80 bar	300 K	548.15
C	冷凍機冷卻	80 bar	250 K	393.92
5	冷凍機冷卻	80 bar	200 K	88.54

第一級冷凍機吸熱量： $q=h_4-h_C=154.23$

第一級冷凍機 COP： $1.769$

第一級冷凍機所做的功： $w_{CC}=154.23/1.769=87.18$

第二級冷凍機吸熱量： $q=h_C-h_5=305.38$

第二級冷凍機 COP： $0.593$

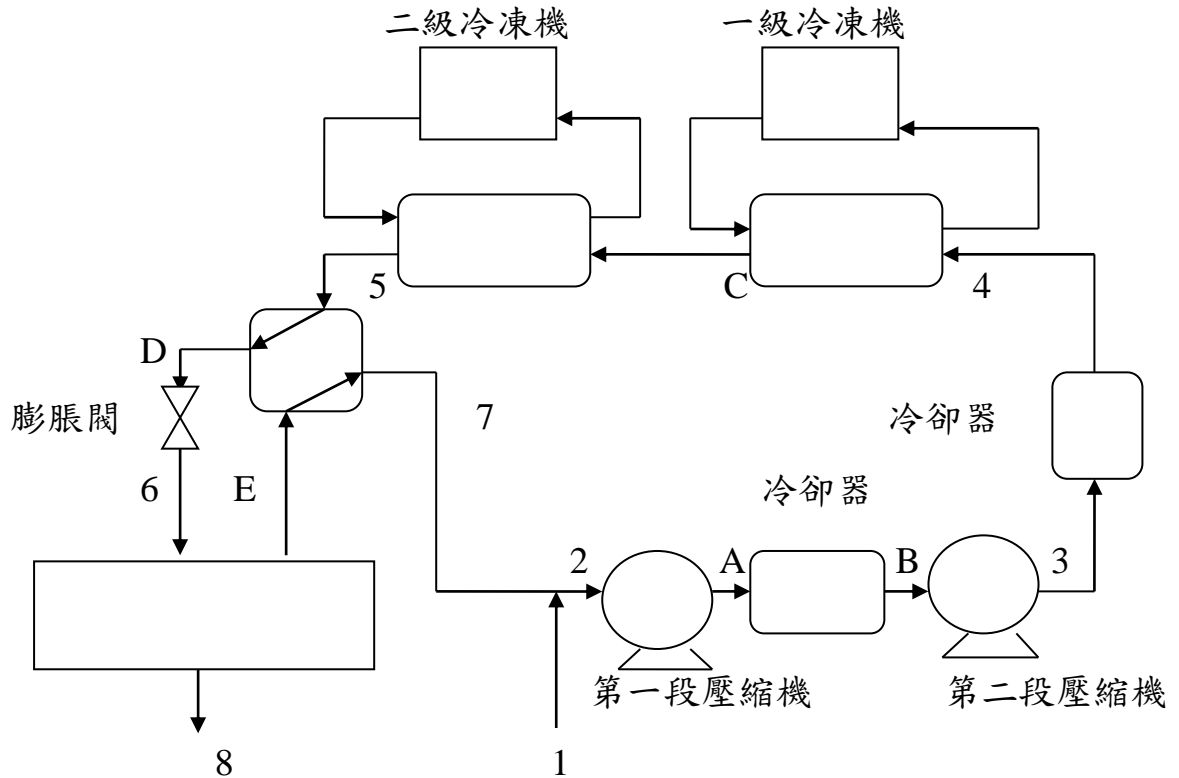
第二級冷凍機所做的功： $w_{CC}=305.38/0.593=514.97$

冷凍機所做的功： $w_{CC}=602.15$

$$W = 718.82 + 602.15 = 1320.97 \text{ kJ/kg}$$

這只是將 0.2651 kg 甲烷液化所做的功，故將每 1 kg 的甲烷液化所做的功為 4983 kJ/kg。

(4). 自我冷卻



		壓力	溫度	h
1	進氣狀態	1 bar	300 K	627.58
2	混合後狀態	1 bar	228.3	472
A	第一段壓縮後	15 bar	452	995.70
B	大氣冷卻後	15 bar	300	613.82
3	第二段壓縮後	80 bar	456	979.21
4	大氣冷卻後	80 bar	300 K	548.15
C	一級冷凍機冷卻	80 bar	250 K	393.92
5	二級冷凍機冷卻	80 bar	200K	88.54
D	自我冷卻後	1 bar	190 K	9.75

6	降壓後狀態	1 bar	111.7 K	9.75
8	飽和液態	1 bar	111.7 K	-286.50
E	飽和蒸氣	1 bar	111.7 K	223.83
7	自我加熱後	1 bar	175K	359.56

壓縮機效率：85%

熱交換器效益：71.7%

$$(T_7 - T_E) / (T_5 - T_E) = 0.717$$

$$T_7 = 175\text{K}, h_7 = 359.56\text{K}$$

由熱交換器的能量平衡可得

$$h_5 - h_D = x(h_7 - h_E)$$

但膨脹閥的焓值不變

$$h_6 = h_D = -286.5 + 510.33x,$$

$$88.54 - (-286.5 + 510.33x) = x(359.56 - 223.83)$$

$$x = 0.5805;$$

$$h_6 = h_D = 9.75,$$

即每壓縮1 kg的甲烷可以產生0.4195 kg的液態甲烷。剩下0.5805 kg的氣態甲烷會回去與補充的甲烷混合，重新壓縮。

$$P_2 = 101.3 \text{ kPa}, h_2 = xh_7 + (1-x)h_1 = 472.0, T_2 = 228.3 \text{ K}, s_2 = 10.2990$$

$$P_3 = 80 \text{ bar}, h_3 = 1085.00, T_3 = 491.5\text{K}$$

$$\text{壓縮機所做的功：} w_C = h_A - h_2 + h_3 - h_B = 889.09$$

$$\text{第一級冷凍機吸熱量：} q = h_4 - h_C = 154.23$$

$$\text{第一級冷凍機所做的功：} w_{CC} = 154.23 / 1.769 = 87.18$$

$$\text{第二級冷凍機吸熱量：} q = h_C - h_5 = 305.38$$

$$\text{第二級冷凍機所做的功：} w_{CC} = 305.38 / 0.593 = 514.97$$

$$\text{冷凍機所做的功：} w_{CC} = 602.15$$

$$W=889.09+602.15=1491.24\text{kJ/kg}$$

這只是將 0.4195 kg 甲烷液化所做的功，故將每 1 kg 的甲烷液化所做的功為 3354.8kJ/kg。

液化甲烷所需的功

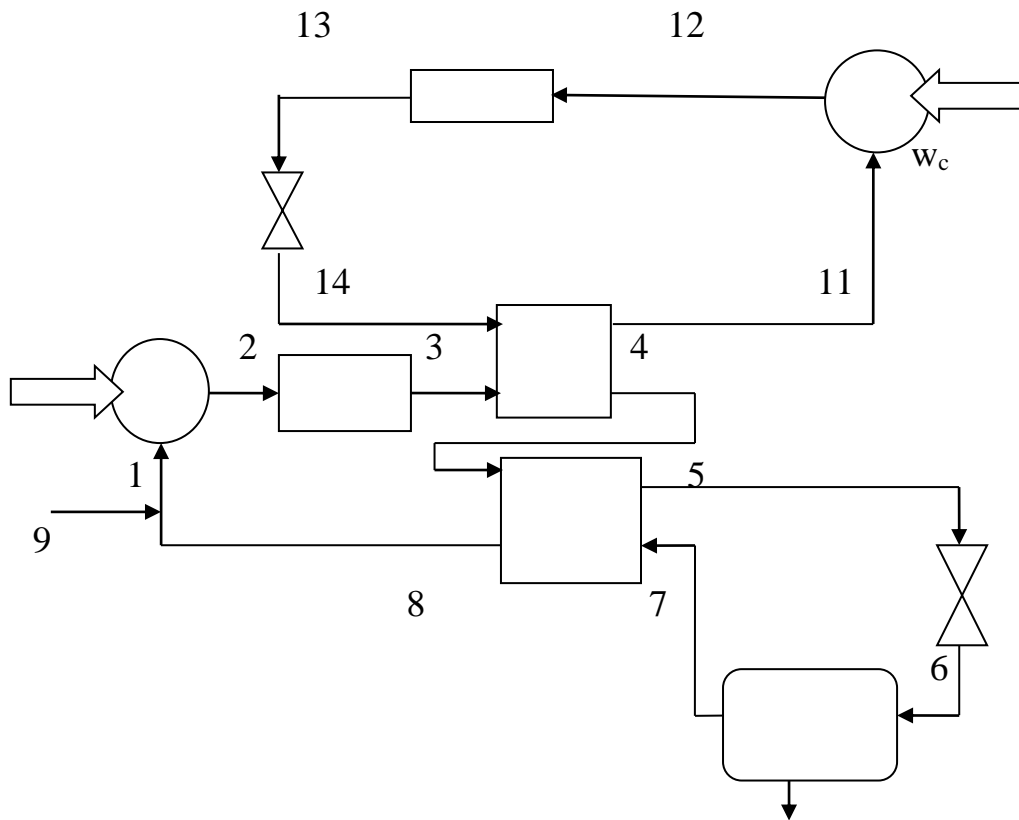
	壓縮機的功	冷凍機的功	液化比例	液化所需的功
基本型	754.15	775.06	0.2651	5768
兩段壓縮	718.82	775.06	0.2651	5635
兩段冷卻	718.82	602.15	0.2651	4983
自我冷卻	889.09	602.15	0.4195	3355

---

**作業 3.7**：請計算將 1 kg 的常溫常壓(300K，100kPa)甲烷液化成常壓低溫的飽和液體，理論上要做多少功。

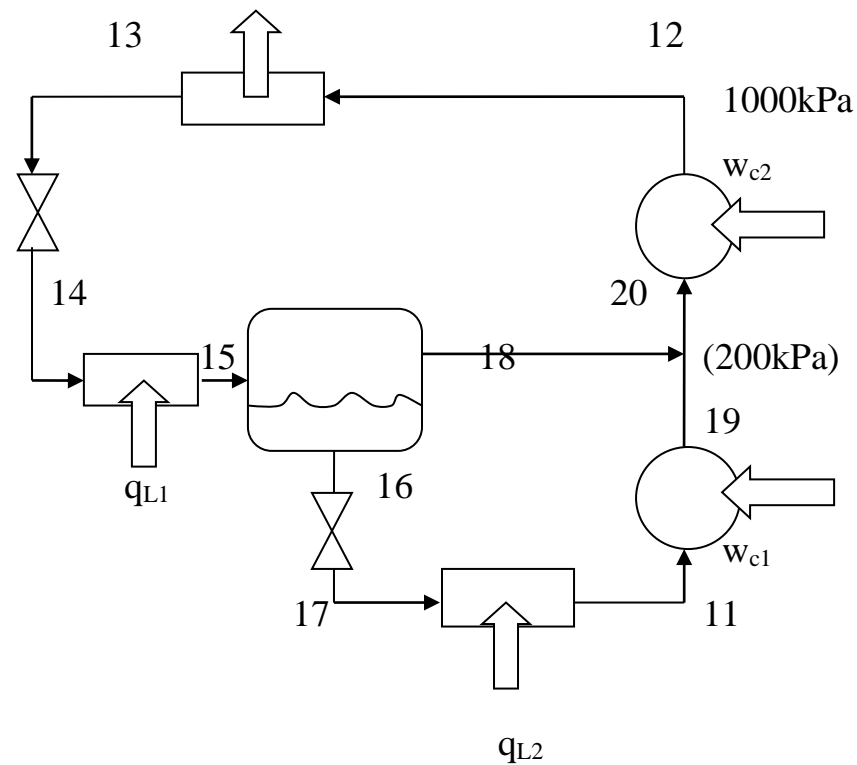
(1). 以預冷式的林德循環來液化甲烷，先將甲烷加壓到 8000 kPa，冷卻至 300K 後，再一段直接預冷至 250K，熱交換器的效率為 80%，請計算液化率。

(2). 以 R134a 冷凍循環來進行甲烷預冷，已知蒸發器溫度 $-30^{\circ}\text{C}$ ，壓縮後壓力 1000kPa，壓縮機效率 85%，請計算每液化 1kg 甲烷，預冷要做多少功。



-----

**作業 3.8**：若改以兩段式預冷，先將甲烷由 300K 降為 275K，此時 R134a 的蒸發器溫度為  $-10^{\circ}\text{C}$ ，再將甲烷由 275K 降為 250K，此時 R134a 的蒸發器溫度為  $-30^{\circ}\text{C}$ ，壓縮後壓力 1000kPa，壓縮機效率 85%，請計算每液化 1kg 甲烷，預冷要做多少功。



(本系統的中間壓力為 201.7kPa，為方便計算，狀態 19 與狀態 20 的性質可以直接查 200 kPa 的過熱蒸汽，但是狀態 14，15，16，與 18 還是用  $-10^{\circ}\text{C}$  的飽和蒸汽與飽和液體。)

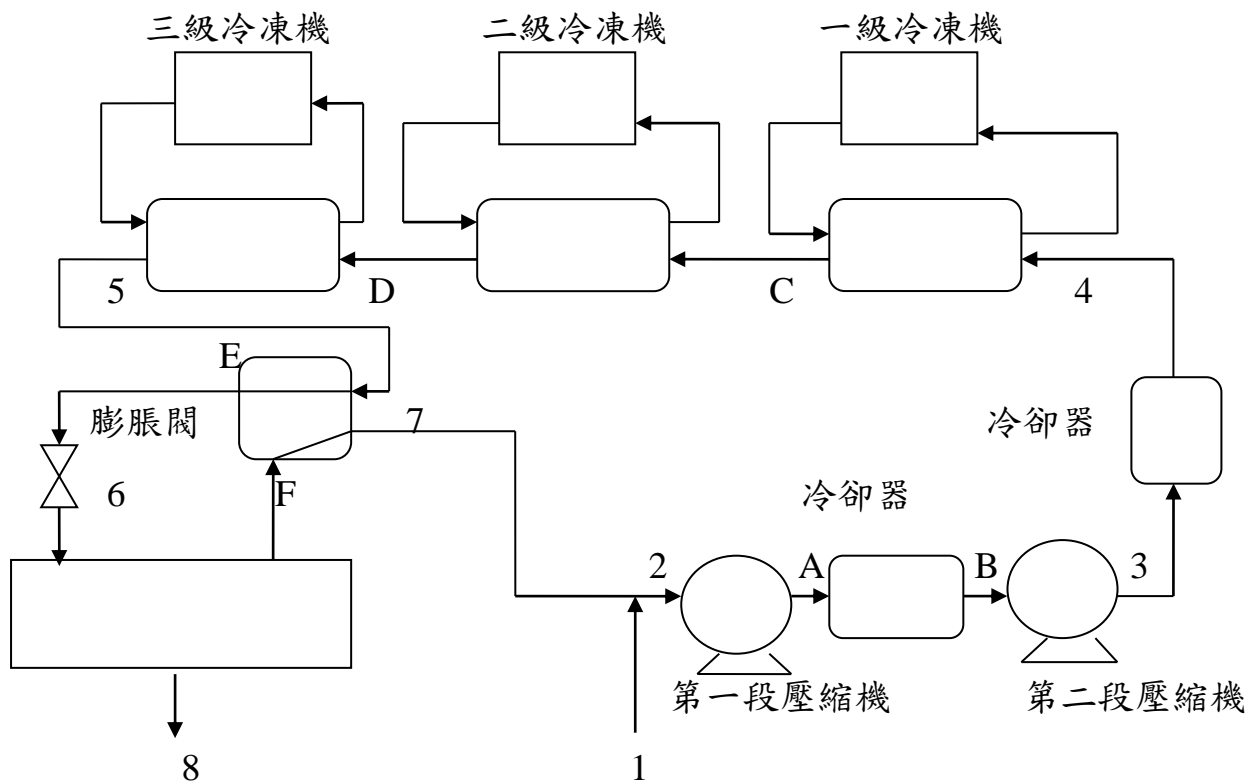
-----



### (3.7.4). 液化氮氣

氮氣在 101.3 kPa 壓力下的沸點是 77.3 K，液化氮氣是將氮氣從 25°C 降溫至 77.3 K。可採用採用 R134a，乙烷，與甲烷的三級式級聯冷凍系統。

氮氣的臨界壓力為 33.9 bar，將 25°C，101.3 kPa 的氮氣加壓至 100 bar，先以空氣將氮氣冷卻至 25°C，再以級聯冷凍系統將氮氣冷卻至 140 K，然後膨脹降壓至 101.3 kPa，及可將氮氣液化。



壓縮機效率：85%

熱交換器效益：68.1%

$$(T_7 - T_F) / (T_5 - T_F) = 0.681$$

$$T_7 = 120\text{K}, h_7 = 123.15\text{K}$$

由熱交換器的能量平衡可得

$$h_5 - h_E = x(h_7 - h_F)$$

但膨脹閥的焓值不變

$$h_6 = h_D = -122.15 + 198.84x,$$

$$20.87 - (-122.15 + 198.84x) = x(123.15 - 76.69)$$

$$x = 0.5830;$$

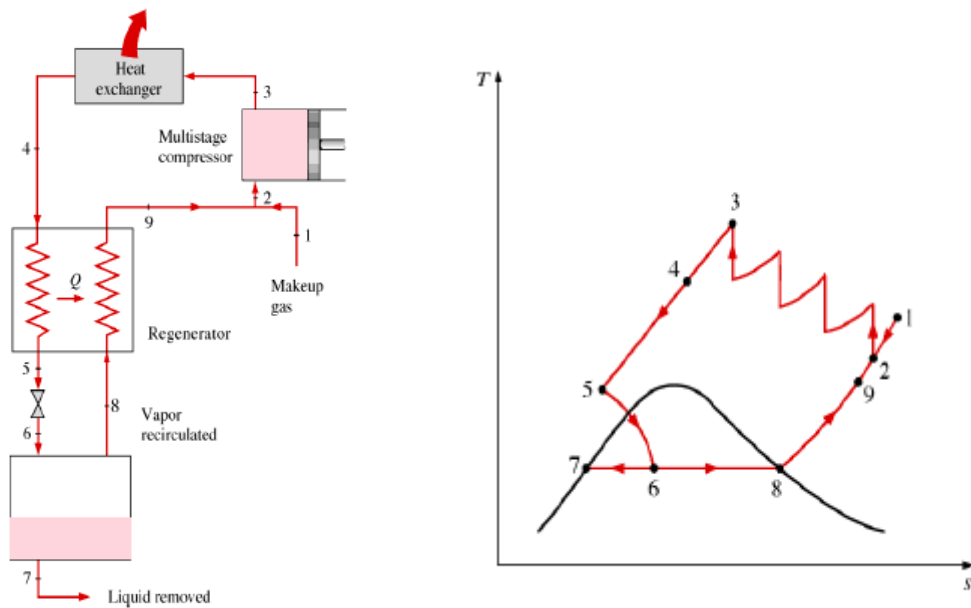
$$h_6 = h_D = -122.15 + 198.84x = -6.22$$

$$h_2 = xh_1 + (1-x)h_1 = 232.76$$

		壓力	溫度	h
1	進氣狀態	1 bar	300 K	311.16
2	混合後狀態	1 bar	224.7K	232.76
A	第一段壓縮後	15 bar		
B	大氣冷卻後	15 bar	300K	308.10
3	第二段壓縮後	100 bar		
4	大氣冷卻後	100 bar	300 K	291.90
C	一級冷凍機冷卻	100 bar	250 K	229.68
D	二級冷凍機冷卻	100 bar	200K	158.35
5	三級冷凍機冷卻	100 bar	140K	20.87
E	自我冷卻後	100bar		-6.22
6	降壓後狀態	1 bar	77.3K	-6.22
8	飽和液態	1 bar	77.3K	-122.15
F	飽和蒸氣	1 bar	77.3 K	76.69
7	自我加熱後	1 bar	120K	123.15

### (3.7.5). Linde-Hampson 系統

Linde-Hampson 系統完全利用自我冷卻，不需靠外加的冷卻設備來降溫。



假設每 1 kg 的氣體有  $(1-x)$  kg 被液化，剩下  $x$  kg 的氣體回去循環中繼續冷卻。其中再生器(regenerator)是利用回去的蒸氣來冷卻壓縮後的氣體。氣體加壓必須超過其臨界壓力，才能液化。

$$h_5 = h_6 = (1-x)h_7 + xh_8 = h_7 + xh_{fg}$$

再生器的能量平衡為

$$h_4 - h_5 = x(h_9 - h_8)$$

$$h_4 - h_7 - xh_{fg} = x(h_9 - h_8)$$

$$h_4 - h_7 = x(h_{fg} + h_9 - h_8) = x(h_9 - h_7)$$

$$x = \frac{h_4 - h_7}{h_9 - h_7}$$

值得注意的是，因  $x \leq 1$ ，且被液化的氣體  $h$  值相當低，由上式可知  $h_9 > h_4$ 。但再生器是利用回去的蒸氣來冷卻壓縮後的氣體，用來冷卻的氣體溫度( $T_9$ )會低於被冷卻的氣體溫度( $T_4$ )，即  $T_4 > T_9$ 。若氣體為理想氣體， $h=h(T)$ ，則不可能發生  $h_9 > h_4$  且  $T_4 > T_9$  的情況。故理想氣體無法被液化。

再生器的熱傳效率

$$\varepsilon = \frac{T_9 - T_8}{T_4 - T_8}$$

因  $T_9 \leq T_4$ ，最理想的情況是  $T_9 = T_4$ ，實際上

$$T_9 = T_8 + \varepsilon(T_4 - T_8)$$

若設定液化壓力 ( $P_7$ )，則  $h_7, h_8$  均可知。若已知  $T_4$ ，則可知  $h_4$ ；若已知再生器的熱傳效率，則可知  $T_9$  與  $h_9$ 。

若液化率為零， $x=1$ ， $h_5 = h_8$

$$h_4 - h_5 = x(h_9 - h_8) = h_9 - h_8$$

則  $h_4 = h_9$

若  $T_4=300\text{K}$ ， $P_4=100\text{bar}$ ，則  $h_4=291.90\text{ kJ/kg}$

$P_9=1\text{bar}$ ， $h_9=291.90\text{ kJ/kg}$ ，則  $T_9=281.5\text{K}$

$$\text{這相當於 } \varepsilon = \frac{T_9 - T_8}{T_4 - T_8} = 0.917$$

也就是若再生器的熱傳效率低於 0.917，則液化率為零。

故 Linde-Hampson 系統對再生器的熱傳效率要求很高。

---

**例：**以氮氣液化為例，設定液化壓力為 1 atm，液化溫度為 77 K，壓縮機散熱器出口溫度  $T_4=300\text{ K}$ 。氮氣的臨界壓力為 3.39 MPa，今設定氣體壓縮壓力為 10 MPa。

$P_3=P_4=P_5=10\text{ MPa}$ ， $P_6=P_7=P_8=P_9=P_2=P_1=101.3\text{ kPa}$ ，

假設再生器的熱傳效率 0.955，則  $T_9=290\text{ K}$

$T_4=300\text{ K}$ ， $h_4=291.90\text{ kJ/kg}$ ； $T_9=290\text{ K}$ ， $h_9=300.75\text{ kJ/kg}$ ；

$h_7=-122.15\text{ kJ/kg}$ ， $h_8=76.69\text{ kJ/kg}$ ；

$T_6=T_7=T_8=77\text{ K}$

$$h_4 = (1-x)h_7 + xh_9, 291.9 = (1-x)(-122.15) + x300.75, x=0.9791$$

$$h_5 = h_6 = xh_8 + (1-x)h_7 = 72.53 \text{ kJ/kg}, T_5 = 158.6 \text{ K}$$

$$h_2 = xh_9 + (1-x)h_1 = 300.97 \text{ kJ/kg}$$

每 1 kg 的氮氣只有 0.0209 kg 被液化，剩下 0.9791 kg 的氮氣回去循環中繼續冷卻。

若再生器的熱傳效率不佳， $T_9=280 \text{ K}$ ， $h_9=290.33 \text{ kJ/kg}$ ；因  $h_9 < h_4$ ，氮氣無法被液化。

若再生器的熱傳效率 100%， $T_9=300 \text{ K}$ ， $h_9=311.16 \text{ kJ/kg}$ ，則  $x=0.9556$ ，每 1 kg 的氮氣有 0.0444 kg 被液化。

壓縮機所做的功：

假設使用三段式壓縮機，分別將氮氣的壓力從  $100 \text{ kPa} \rightarrow 400 \text{ kPa} \rightarrow 2000 \text{ kPa} \rightarrow 10000 \text{ kPa}$ ，每一段壓縮之間都使用冷卻器，將氮氣的溫度冷卻至  $300 \text{ K}$ 。每一段壓縮機的效率都是 85%。

$$P_2=100 \text{ kPa}, h_2=300.97 \text{ kJ/kg}, s_2=6.8106 \text{ kJ/kg-K};$$

$$P_A=400 \text{ kPa}, h_{AS}=447.98 \text{ kJ/kg}, h_A=473.93 \text{ kJ/kg};$$

$$P_B=400 \text{ kPa}, T_B=300 \text{ K}, h_B=310.50 \text{ kJ/kg-K}, s_B=6.4322 \text{ kJ/kg-K};$$

$$P_C=2000 \text{ kPa}, h_{CS}=493.64 \text{ kJ/kg}, h_C=525.96 \text{ kJ/kg};$$

$$P_D=200 \text{ kPa}, T_D=300 \text{ K}, h_D=307.03 \text{ kJ/kg-K}, s_D=5.9438 \text{ kJ/kg-K};$$

$$P_E=10000 \text{ kPa}, h_{ES}=494.63 \text{ kJ/kg}, h_E=527.74 \text{ kJ/kg}$$

$$W = h_E - h_D + h_C - h_B + h_A - h_2 = 172.96 + 215.46 + 220.71 = 609.13 \text{ kJ/kg}$$

這只是將 0.0209 kg 氮氣液化所做的功，故將每 1 kg 的氮氣液化所做的功為 29145 kJ/kg。

---

將 1kg 的  $N_2$  由  $27^\circ\text{C}$  液化所需做的功。

$$T = 77.3 \text{ K (1bar)}, \Delta h_{fs} = 198.84 \text{ kJ/kg}$$

$$W = m(h_2 - h_1) - mT_a(s_2^0 - s_1^0) + m\Delta h\left(\frac{T_a}{T_s} - 1\right)$$

$h_2=76.69 \text{ kJ/kg}$  ,  $h_1=311.16 \text{ kJ/kg}$  ;  $s_2=5.4033 \text{ kJ/kg-K}$  ,  $s_1=6.8457 \text{ kJ/kg-K}$  ;

$$w=(76.69-311.16)-300\times(5.4033-6.8457)+198.84\times(300/77.3-1)=771.10 \text{ kJ/kg}$$


---

若壓縮之後，能以其他冷凍系統來冷卻氮氣，降低  $T_4$ ，可使氮氣液化比例提高。例如將  $T_4$  降低至  $-33^\circ\text{C}$ 。

$T_4=240 \text{ K}$  ,  $h_4=216.64 \text{ kJ/kg}$  ;  $T_9=230 \text{ K}$  ( $\varepsilon=0.938$ ) ,  $h_9=238.25 \text{ kJ/kg}$

$$h_4 = (1-x)h_7 + xh_9 , 216.64 = (1-x)\times(-122.15)+x238.25 , x=0.9400$$

$$h_2 = xh_9 + (1-x)h_1=242.62\text{kJ/kg}$$

$P_2=100 \text{ kPa}$  ,  $h_2=242.62 \text{ kJ/kg}$  ,  $s_2=6.5870 \text{ kJ/kg-K}$  ;

$P_A=400 \text{ kPa}$  ,  $h_{AS}=360.70 \text{ kJ/kg}$  ,  $h_A=381.54 \text{ kJ/kg}$  ;

$$W = h_E - h_D + h_C - h_B + h_A - h_2 = 138.92 + 215.46 + 220.71 = 575.09 \text{ kJ/kg}$$

另外，以其他冷凍系統來冷卻氮氣，例如以 R134a 為冷媒，已知  $T_H=35.5^\circ\text{C}$  ,  $T_L=-40^\circ\text{C}$  , 壓縮機效率為 85% , 冷凍機的容量為 100 噸，若以兩級方式進行，做功量  $W_C = W_{C1} + W_{C3} = 162.59 \text{ kW}$  , 相當於吸熱量為 1 kJ 的做功量為 0.4619 kJ。

將  $T_4$  300 K 降低至 240 K，所需吸熱量為  $291.90 - 216.64 = 75.26 \text{ kJ/kg}$ ，所需做功量為  $34.76 \text{ kJ/kg}$ 。

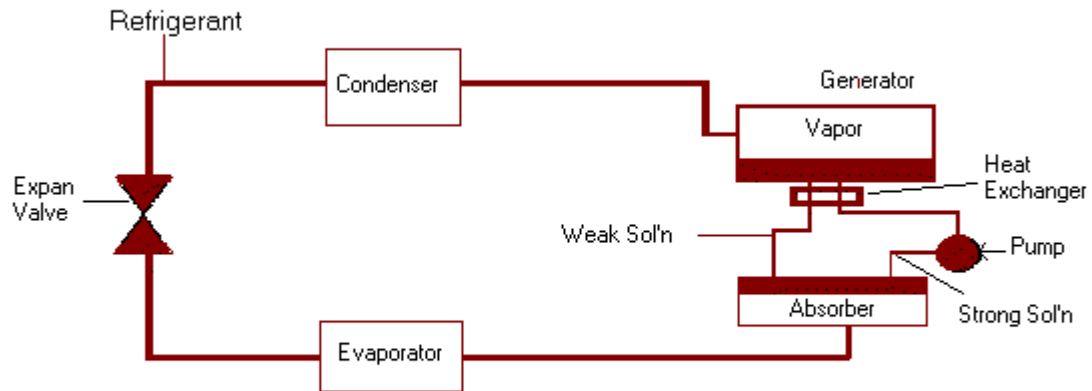
全部所需做功量為  $575.09 + 34.76 = 609.85 \text{ kJ/kg}$ ，可產生 0.06 kg 的液態氮，故將每 1 kg 的氮氣液化所做的功為 10164 kJ/kg。

---

(3.8)、其他冷媒壓縮方式

吸收式(absorption)，吸附式(adsorption)，噴射式(ejection)

Absorption Refrigeration System Using Lithium Bromide



(3.9)、其他冷凍系統：熱電式，渦流管

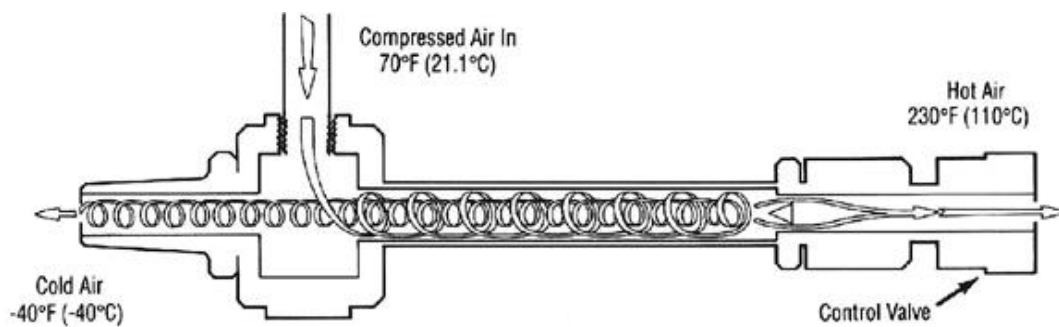
(3.10.1). 熱電冷凍系統(Thermoelectric Refrigeration)

(3.10.2). 渦流管(Vortex Tube)

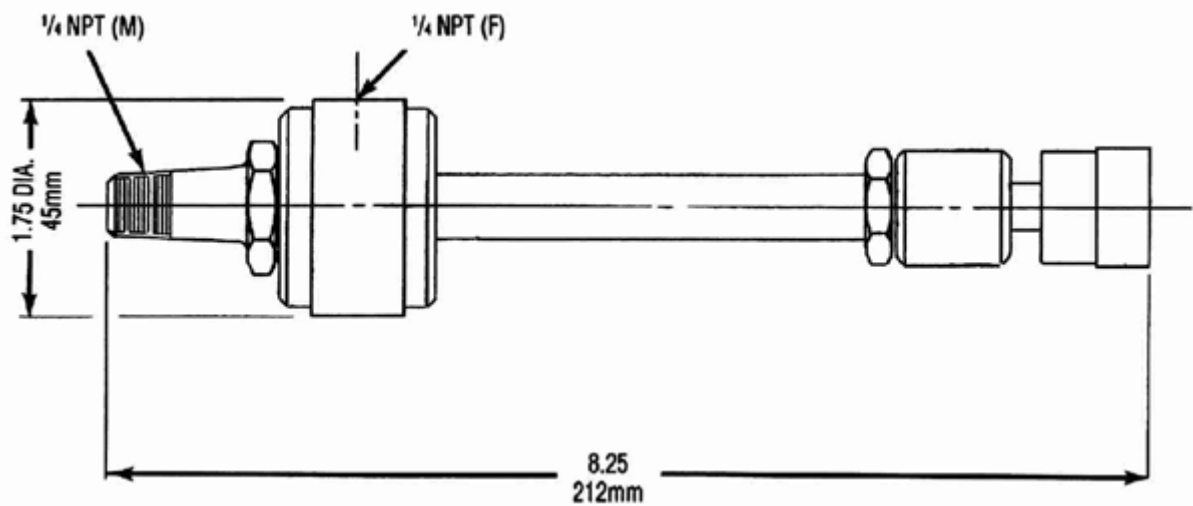
(1). 什麼是渦流管

一般冷凍空調所使用的方式為壓縮式的蒸氣循環，這是利用冷媒蒸發吸熱的特性，使用壓縮機將冷媒蒸汽加壓液化後循環使用。但是利用渦流管(vortex tube)也能產生冷凍的效果，它沒有任何可移動的部份，沒有散熱片、沒有熱交換器，故障性低，而且不需熱機的時間。渦流管可以應用的地方很多，只要有壓縮空氣就可以產生冷空氣或熱空氣。雖然它的冷凍效率與蒸汽壓縮冷凍相較甚低，但是其仍有發展的空間。

渦流管被認為是法國人 Georges Ranques 在 1928 年發明，但是到 1946 年 Rudolph Hilsch 所提出的論文後，渦流管才引起興趣與受到注意。渦流管的主要構造如圖一所示：





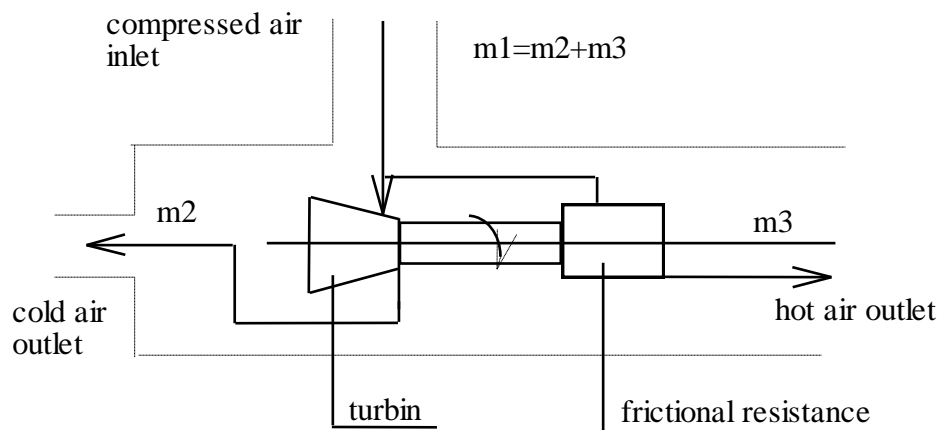


圖一：渦流管的主要構造

這是一隻很簡單的長直管，在此管的兩端各有一出口，分別為一大一小的孔，而在靠近小端出口處有一個噴嘴。高壓空氣沿切線方向由噴嘴噴入管中，由於管中的壓力接近大氣壓，膨脹的空氣以接近音速的速度離開噴嘴，在管中造成一個渦流。由於管壁摩擦及其他因素的影響，整個管內氣體的角速度成為一個定值，這相當於一個強制渦流(forced vortex)，其速度與半徑成比例。因此在接近中心部份的空氣，其速度會降低，角動量減少；而在接近外圍部份的空氣，其速度會提高，角動量增加。這相當於接近中心部份的空氣產生扭矩來轉動外圍的空氣，以抵抗管壁的摩擦。所以在接近中心部份的空氣對外做功，其溫度會下降，而在接近外圍部份的空氣被做功，所以溫度上升。在渦流管內，其外圍的圓周速度接近音速，並且軸心為冷空氣而周圍為熱空氣，而冷空氣和熱空氣分別從兩端的大孔和小孔各自被分離出來。

## (2). 渦流管的原理

我們可以用一個渦輪機和一個摩擦阻尼來說明以上的過程，如圖二所示。我們可以想像高壓空氣在渦流管內分離與做功的過程相當於渦流管內有一個渦輪機和一個摩擦阻尼。當高壓空氣進入渦流管時，部份空氣( $m_2$ )穿過渦輪機，帶動渦輪機對軸做功，所以空氣的溫度與焓均會下降，此時冷空氣就從左邊排出。剩下的空氣( $m_3$ )被渦輪機做功，速度提高，動能增加，但隨即穿過摩擦阻尼，壓力降低，動能轉成熱能，而使溫度與焓都會上升，此時熱空氣從右邊排出。



圖二：渦流管的工作原理--渦輪機和摩擦阻尼的模擬

### (3). 渦流管的熱力分析

整個過程可分析如下：假設進入渦流管的高壓空氣流量為( $\dot{m}_0$ )，冷空氣流量為( $\dot{m}_c$ )，熱空氣流量為( $\dot{m}_H$ )，由質量守恆可得

$$\dot{m}_c + \dot{m}_H = \dot{m}_0$$

由於整個過程為絕熱，且沒有對外做功，由熱力學第一定律可得

$$(\dot{m}_c + \dot{m}_H)h_0 = \dot{m}_c h_c + \dot{m}_H h_H$$

這相當於渦輪所做的功等於阻尼所消耗的功

$$\dot{m}_2(h_1 - h_2) = \dot{m}_3(h_1 - h_3)$$

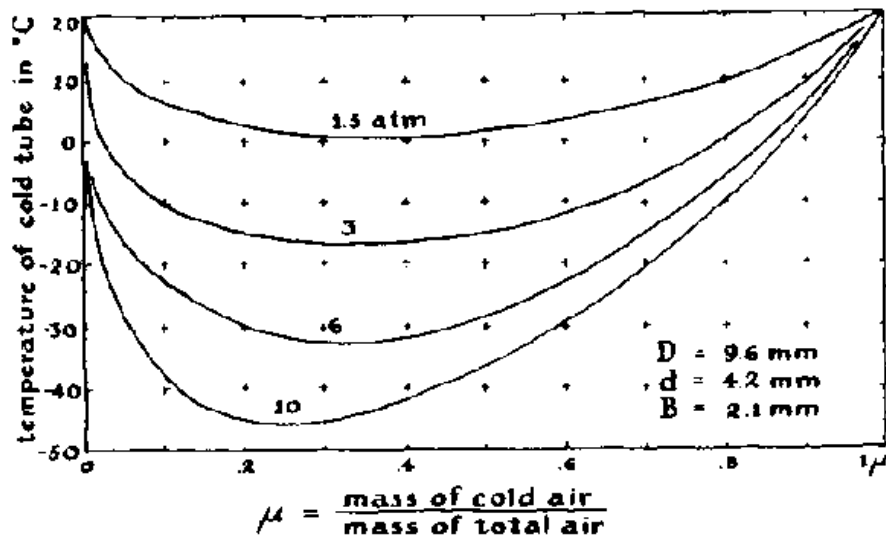
若假設空氣為理想氣體，且比熱為常數，則

$$\dot{m}_1 T_1 = \dot{m}_2 T_2 + \dot{m}_3 T_3$$

入口溫度與出口溫度之間有這樣的關係：

$$T_1 = x T_2 + (1-x) T_3$$

其中  $\dot{m}_1$  為入口高壓空氣的流量， $\dot{m}_2$  為冷端出口空氣的流量， $\dot{m}_3$  為熱端出口空氣的流量。 $x = \dot{m}_2 / \dot{m}_1$ ，為冷空氣質量分率(cold fraction)。  $T_1$  入口高壓空氣的溫度， $T_2$  為冷端出口空氣的溫度， $T_3$  為熱端出口空氣的溫度。



238

Performance graph of Hilsch tube showing effect of hot-tube stopcock adjustment for various input pressures

整個過程的熵值變化可計算如下：

$$\Delta S = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_1 s_1 = \dot{m}_2 (s_2 - s_1) + \dot{m}_3 (s_3 - s_1)$$

若假設空氣為理想氣體，且比熱為常數，則

$$s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2 / T_1) - R \ln(P_2 / P_1)$$

$$s_3 - s_1 = c_p \ln(T_3 / T_1) - R \ln(P_3 / P_1)$$

其中  $P_1$  為上游壓力， $P_2$  與  $P_3$  為冷空氣與熱空氣的壓力，即為大氣壓力。

定義 COP 值為冷凍量與做功量的比值：

$$COP = \frac{\dot{m}_2 (h_2 - h_1)}{W_a}$$

(3.11)、冷凍系統所面臨的挑戰 --- 臭氧，溫室氣體，能源損耗。