

1. 蒸汽基礎知識

蒸汽本身為無色透明氣體，日常生活中在燒開水或是蒸煮飯食時發生的白色霧氣一般稱之為蒸汽或是水蒸氣。事實上正確的說它們應該是「細微的水顆粒」。

蒸汽雖然就在我們身邊產生但是很難說它滲透到我們日常生活中來，對於蒸汽特性進行理解則需要我們掌握一部分專門知識。在學習掌握蒸汽祛水器及其他蒸汽使用裝置相關知識之前，需要我們從掌握蒸汽的基礎知識開始。

據說在歷史上蒸汽最早作為地下抽水的動力源來使用，並在此基礎上發展為蒸汽機在18世紀的產業革命中發揮了巨大作用推動了歷史劃時代的發展。自此以後蒸汽船，織布機，調速機，蒸汽機車等通過蒸汽來運作的機器不斷的被開發及使用。蒸汽作為不可缺少的動力能源為世界的產業發展做出了巨大的貢獻。在此以後動力能源逐漸被汽油，電力等能源所代替。但是與此同時蒸汽則在供熱系統作為熱能搬運工被廣泛的使用，特別是在石油精製，化學，食品等生產過程，滅菌，暖氣及蒸汽渦輪機的動力驅動中蒸汽依然發揮著它的作用，貢獻於各類產業鏈中。

蒸汽能夠作為熱能搬運工或是驅動動力被持續使用的一個重要原因是其本身來源於水。地球上存在著豐富的水資源，並且經濟效益可觀。最重要的是其本身所具有的物理特性及化學特性很容易被掌握和利用。

本章首先將蒸汽的特性及其相關基本用語進行簡明闡述。

1.1 蒸汽相關用語

蒸汽相關的理科學中，（下簡稱蒸汽理科學）飽和蒸汽表的使用是不可缺少的。首先在此有關飽和蒸汽表所使用的專業術語及其相關的基礎用語進行解說。

壓力 (Pressure)

單位面積上作用的力稱之為壓力。

壓力的國際單位 (SI) 為帕斯卡 (Pa)， 1 m^2 面積上作用力為1牛頓時的作用壓力定義為1Pa { $1\text{ Pa} = (1\text{ N}/\text{m}^2)$ }。帕斯卡的單位值相對較小，在蒸汽理科學上通常使用1MPa 或是1kPa。（本資料中以MPa 作為壓力單位表示）。以前通常被使用的壓力單位 kgf/cm^2 與MPa 的換算方式為 $1\text{ MPa} = 10.197 (\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 。

壓力通常有兩種稱呼分別為「絕對壓力」和「表壓」。以絕對真空為基準0 (0MPa) 時所測量的壓力為絕對壓力 (Absolute pressure)。表壓則是使用壓力錶所測量的壓力，即以大氣壓為基準0 (0MPa) 時

所測得的壓力為表壓（Gauge pressure）。表壓與絕對壓力的關係如下。

$$(\text{表壓}) = (\text{絕對壓力}) - (\text{大氣壓力})$$

大氣壓力在使用表壓表示時為0MPa，使用絕對壓力錶示時為0.10133MPa。即在絕對壓力與表壓之間存在0.1MPa的差。為明確表示區分在使用時通常在絕對壓力單位後標注‘a’，而在表壓單位後標注‘g’。

比容積（Specific volume）、比重量（Specific weight）

1kg 的蒸汽所佔有的容積稱之為比容積（或比體積）單位表示為 m^3/kg ，比容積的值基本上由壓力及溫度所決定。壓力及溫度的變化帶來比容積的變化。在變化的程度上與液體狀態的水相比，蒸汽的變化程度將龐大的多。

比重量（又稱密度）為比容積的倒數，單位為 kg/m^3 。

飽和溫度（Saturated temperature）

對水進行加熱會使水的溫度逐漸上升，達到一定溫度時水的溫度則不再上升。持續加熱會使水逐漸的生成為同溫度的蒸汽直至全部的水都生成為蒸汽。此時的溫度稱為飽和溫度。飽和溫度與壓力存在一定的關係，壓力越高飽和溫度點越高，反之壓力越低飽和溫度點越低。

比熱焓（Specific enthalpy）

比熱焓是指蒸汽或是水單位品質（1kg）中所含的熱能，經常使用於熱力學。在蒸汽理科學中以下熱量表示用語常被使用並記載於飽和蒸汽表中。

①水的比熱焓（ h' ）

1kg 的水由 0°C 開始上升至所在溫度所需要的熱量稱之為水的比熱焓，又稱為顯熱。

0°C 時水的比熱焓為零可以直觀的進行理解並掌握。大氣壓的情況下水在 100°C 時開始沸騰，1kg 的水由 0°C 上升至 100°C 時所需要的熱量為419kJ（千焦）以水的比熱為 $4.19\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ 來計算。

②蒸發比熱焓（ r ）

將沸騰的1kg 水完全生成為蒸汽時所需要的熱量稱之為蒸發比熱焓。在水與蒸汽共存的狀態下溫度不發生

變化，所有的熱能均被由水轉化至蒸汽的過程中被使用。亦稱為蒸發熱或是氣化熱。

③飽和蒸汽的比熱焓 (h'')

指其飽和蒸汽所含的全部熱量。如同下記計算式其為水的比熱焓與蒸發比熱焓的和來表示。

$$h'' = r + h'$$

顯熱 (Sensible heat)

致使物質的溫度發生變化的熱量稱之為顯熱。顯熱被吸收會使物質溫度變化反之顯熱被釋放就會導致物質溫度下降。在蒸汽理科學中通常指水（液體）所含有的熱量。即在熱量轉換過程中物質的狀態不發生變化而溫度發生變化時此時所使用的熱量稱之為顯熱。

潛熱 (Latent heat)

致使物質的狀態發生變化的熱量稱之為潛熱。在潛熱的熱量轉換過程中不存在溫度的變化。通常也被稱之為融解熱，蒸發熱（汽化熱），液化熱，凝固熱等。蒸汽理科學中常稱為蒸發比熱焓。即在熱量轉換過程中物質的溫度不發生變化而狀態發生變化時此時所使用的熱量稱之為顯熱。

比熱 (Specific heat)

即使用同樣的熱量進行加熱也會因物質的不同導致其溫度上升方法不同。致使某一1kg 物質的溫度上升1°C所需要的必要熱量稱之為改物質的比熱。單位為kJ/kg°C。在比熱而言，當物質的體積保持一定的情況下稱之為「定積比熱」和當所在壓力保持一定的情況下稱之為「定壓比熱」的兩種定義。一般兩者存在差異的問題僅限物質為氣體的情況下。也就是說在液體的狀態下水的比熱正如前

述 ‘①水的比熱焓’ 一樣為4.19kJ/kg°C。

1.2 水的相態

大多數的物質以固相，液相，氣相的三種相態的物理特性存在。並且在各相態下分別稱之為固體，液體，氣體。水的情況下則以冰，水，蒸汽來稱呼。對應相態為固體，液體，氣體。預知蒸汽的特性需要理解物質的分子構造基礎，在此基礎上將冰，水，蒸汽各自結構進行對照則更易理解及掌握。

分子是含有所有該物質化學特性的最小單位。水的分子結構是由2 個氫元素與1 個氧元素結合而成的化合物。化學分子式用H₂O 表示。地球上之所以有著豐富的水資源，主要是因為氫元素與氧元素在宇宙中所占的存在比率最大。碳素也是類似存在的元素之一，分子的活性由其物理狀態（相態）來決定。

1.2.1 冰（固相）

冰的分子因其相互接近並相互貼緊而結合，規律化散佈成格子狀。各分子的活動（振動）僅限於結合部很小的範圍內。隨著持續加熱，分子的振動加強終於致使一部分分子之間的結合力受到破壞。開始由固體逐漸變為液體發生融解現象。此時融解開始時的溫度稱之為融點。

大氣壓的條件下冰的融點為 0°C ，壓力越高融點越高。因受熱格子狀排列的水分子被破壞開始融解時的溫度持續保持冰的溫度，所有熱量均被融解過程所使用。此時的熱量稱之為融解熱。由液體轉化為固體的相變也是存在的，放出同樣的熱量（等同於融解熱）即會凝固，此時的熱量稱之為凝固熱。

大多數的物質在由固體轉為液體的相變時密度會變小，即相對固體的分子間距而言液體的分子間的距離有增大。但是 H_2O 的情況除外，溶解後密度會增加。冰浮于水即為此原因。

1.2.2 水（液相）

液相的狀態下分子自由的進行活動偶爾會發生分子之間的碰撞。但是相互接近的力量依然存在，分子間間距依然保持很短的距離。持續的進行加熱分子活動更加活性化直至達到該物質的沸點。

1.2.3 蒸汽（氣相）

隨著水的溫度不斷上升，一部分水分子獲取足夠的活動能量，開始瞬間由水的表面向上方飛出或是向水面下方移動。繼續進行加熱則使分子的活動更加活躍，脫離液體的水分子越來越多。在液體中形成蒸汽的氣泡並上升活動，突破液體表面向外散佈。

蒸汽分子間間距遠遠比水分子之間間距要大得多，其密度自然要比水的密度小很多。液體表面以上的空間馬上會被蒸汽分子所充滿。此時與返回液體內的分子相比脫離液面的分子要多得多，水不斷的在被蒸發。至此溫度則達到沸點或是飽和溫度。

壓力在保持一定的情況下，即使繼續進行加熱至水完全變為蒸汽為止溫度不再發生變化。所有的熱量均被由水成為蒸汽的過程所使用。此時的熱量稱之為蒸發熱或是汽化熱。沸騰的水（飽和水）和飽和蒸汽的溫度雖然相同，但是單位品質中各自所含的熱量是截然不同的，蒸汽所含有的熱量要遠遠大于飽和水所含的熱量。同樣蒸發的過程也是可以逆轉的，蒸汽與溫度低的面進行接觸時，所持有的熱量會向外放出本身進行凝縮。該凝縮熱量與蒸發熱量相同稱之為液化熱。蒸汽因凝縮而成為水，此時的水稱之為冷凝水 (Condensate)。

1.3 蒸汽的特性

1.3.1 水的狀態圖

圖1.1 為「1.2 水的相態」中陳述的內容進行表示的結果。該圖是水在大氣壓情況下熱量變化的內容。X 軸（橫軸）為通過加熱（比熱焓增加的過程）而導致相態變化的內容。y 軸為溫度顯示。（圖中左半部分不在蒸汽理科學範圍之中，在此不在贅述。）

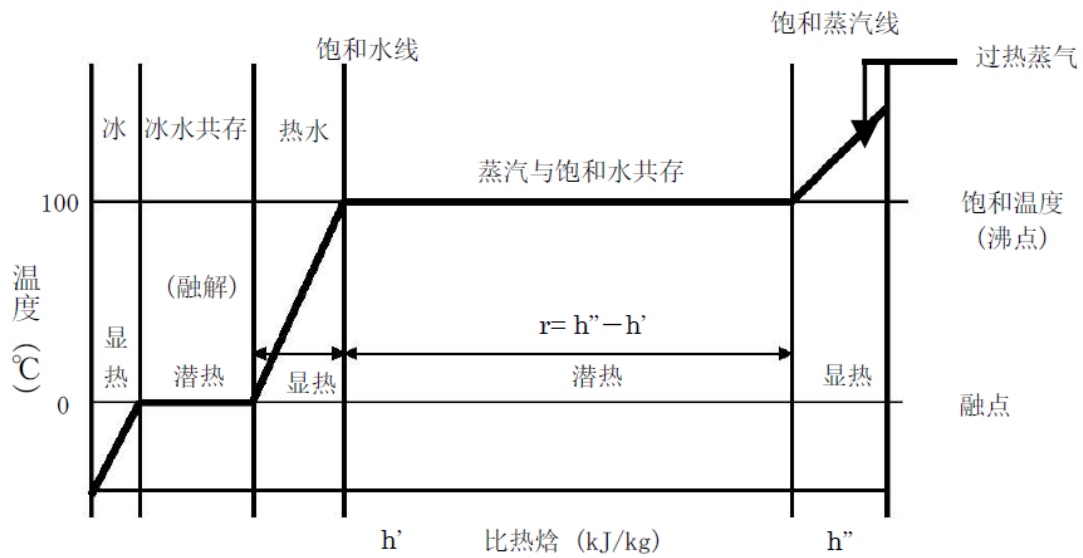


圖1.1 大氣壓下水的狀態變化

溫度由0°C開始通過加熱上升至100°C（沸點）時的顯熱（飽和水的比熱焓 h' ），飽和水完全成為蒸汽時所含的全熱量（飽和蒸汽的比熱焓 h'' ）及水完全成為蒸汽所需的潛熱（蒸發比熱焓 $r=h''-h'$ ）之間的熱量變化均在圖中表示。飽和水逐漸成為蒸汽途中的汽水共存狀態稱之為濕飽和蒸汽。水分完全成為蒸汽時稱之為幹飽和蒸汽，幹飽和蒸汽通過繼續加熱溫度上升超過飽和溫度時稱之為過熱蒸汽，過熱蒸汽的溫度與飽和蒸汽之間的溫度差稱之為過熱度。在以後論述中無特別說明的情況下水的比熱焓以‘顯熱’，蒸發比熱焓以‘潛熱’及蒸汽保有全熱量以‘全熱量’來表示。

1.3.2 蒸汽的能量

如前文所述蒸汽在被使用於加熱等過程中會釋放其含有的潛熱而相態發生變化成為冷凝水，此時冷凝水的溫度與蒸汽的溫度相同。蒸汽正是利用此特性作為有效的熱能源被廣泛的使用於必須要進行此加熱處理的制程，滅菌等生產過程。蒸汽作為熱能搬運工最大的利點為其能含有大量的潛熱能及其是取之不盡用之不竭的物質。

蒸汽所含的潛熱能的多少可以通過飽和蒸汽表來進行確認。表1.2 是由飽和蒸汽表抽出的一部分數據，例如在大氣壓的情況下（表壓0.0MPa）時記載內容如下所示（小數點個位以下四捨五入）。

$$\text{飽和水的顯熱 } h' = 419 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{蒸汽的全熱量 } h'' = 2,676 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{潛熱 } r = h'' - h' = 2,257 \text{ kJ/kg}$$

由此可以知道，

$$(\text{潛熱在全熱量中所佔有的比例為}) = 2,257 / 2,676 = 0.8434 \approx 84\%$$

$$(\text{蒸汽含有潛熱與顯熱之間的倍數}) = 2,257 / 419 = 5.3866 \approx 5.39$$

如上所示潛熱占全部熱量中的84%，同時是顯熱的5.39 倍。

表1.1 是常見的各類物質（水，氨，甲醇及乙醇）的熱性比較表，從中可以得知相對而言蒸汽的蒸發潛熱之大。

表1.1 大氣壓下各類物質的熱性比較表

物质	融点(°C)	沸点(°C)	融解热(kJ/kg)	蒸发热(kJ/kg)
水	0	100	333.5	2,257
氨	-77.8	-33.4	338	1,371
甲醇	-97.7	64.7	99.2	1,190
乙醇	-114.1	78.6	109	855

壓力的上升使之要達到飽和點則需要更多的熱量，此時相態不發生變化溫度上升。換而言之顯熱與飽和溫度都發生了增加。此關係如圖1.2 所示的飽和蒸汽曲線圖。此曲線為水與飽和蒸汽共存狀態，曲線下部分為未達到飽和點的水，曲線上方則為過熱蒸汽。

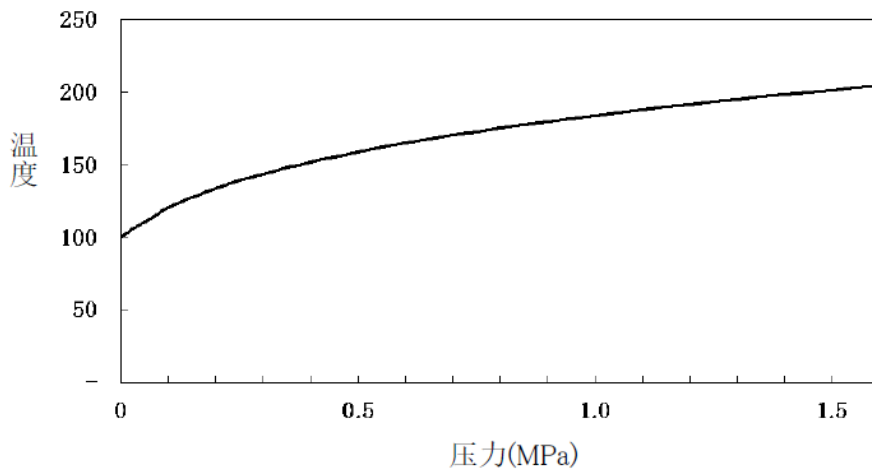


圖1.2 飽和蒸汽曲線

那麼，蒸汽與飽和水的熱量在壓力上升時又會出現什麼樣的變化呢？圖1.3 為其關係變化圖，從中可以得知：

- ①飽和水的顯熱伴隨著壓力的增加亦呈增加趨勢（如上所述）。
- ②蒸汽的潛熱伴隨著壓力的上升而呈減少趨勢。
- ③蒸汽的全熱量（上述①的顯熱與②的潛熱之和）面對壓力的變化，在低壓領域時會有少量的增加基本保持一定。但是在壓力在超過3.2MPa 時會呈減少趨勢，達到臨界點時潛熱則變為零。

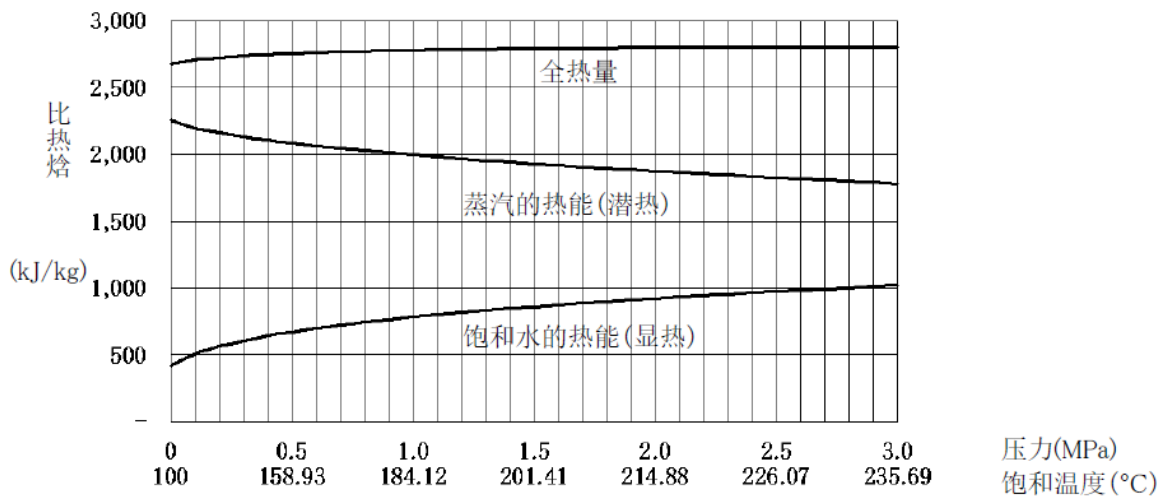


圖1.3 蒸汽及飽和水所含熱量與壓力的關係

在此需要注意的是伴隨著壓力的上升蒸發所必要的潛熱有所減少的現象。也就意味著壓力越高的蒸汽可以利用的潛熱越少。例如表1.2 的飽和蒸汽表中壓力在0.5MPa 和1.0MPa 時各自的潛熱 r 分別為2,085kJ/kg 和1,998kJ/kg，相比之下1.0MPa 時所含的潛熱要小。比大氣壓情況下（0.0MPa時2,257kJ/kg）要更小。

接下來再看一下蒸汽的比容積和壓力之間的關係。通過圖1.4 可以明顯發現比容積在低壓領域變化的範圍大，在高壓情況下則變化的範圍小。說明比容積與壓力呈反比狀態變化。雖然壓力越高單位品質（1kg）所含的潛熱越少但是其體積也減小，結果上來看單位體積（1m³）內所含的潛熱有所增加。在實際使用中提高蒸汽的壓力即可使用較小口徑得管道進行大量的輸送。這也是在設計蒸汽管道輸送系統中必須要考慮到的要點之一。

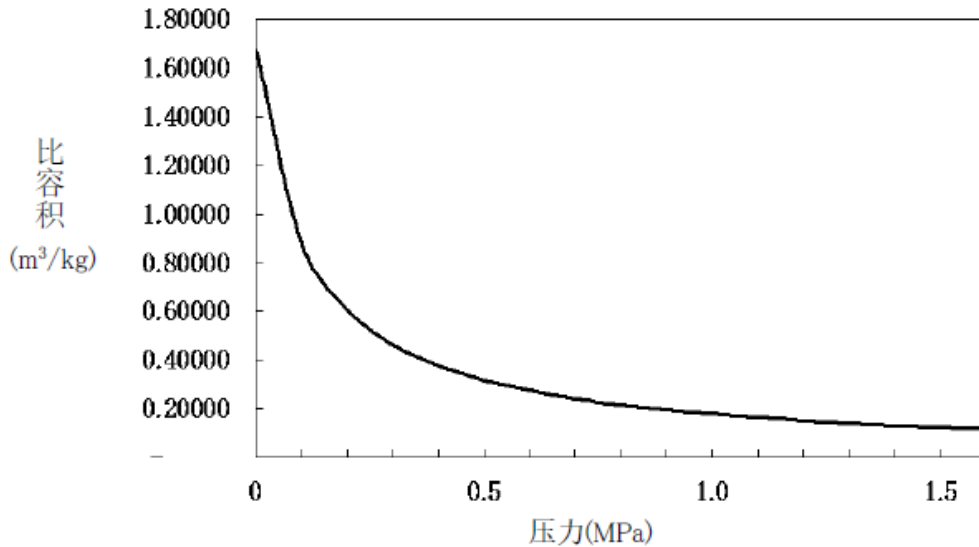


圖1.4 蒸汽壓力與比容積的關係

表1.2 飽和蒸汽表（表壓基準）

表压 (MPa)	饱和温度 (°C)	比容积 (m ³ /kg)		比重量 (kg/m ³)	蒸发热 (kJ/kg)		
		饱和水	饱和蒸汽		显热	全热量	潜热
		v'	v''		h'	h''	r=h''-h'
0.0	100.00	0.0010437	1.67300	0.5977	419.06	2676.0	2256.9
0.1	120.44	0.0010610	0.87999	1.1364	505.58	2706.6	2201.0
0.5	158.93	0.0011096	0.31482	3.1764	670.79	2755.6	2084.7
1.0	184.12	0.0011331	0.17718	5.6440	781.36	2779.7	1998.3

1.3.3 乾度

蒸汽由鍋爐生成後被運往各個使用地點。在生成蒸汽時完全不含水分是不可能的，必不可免的會有水分含在蒸汽內部。但是對蒸汽使用者而言希望能夠得到完全不含水分的蒸汽以利生產使用。含

有水分的多少使用蒸汽乾度（Dryness fraction）來表示。蒸汽的乾度越高其蒸汽的品質（Quality）也就越高。

蒸汽乾度（ χ ）是乾燥蒸汽對蒸汽重量所佔有的比率表示。例如蒸汽內部含有5%的水分時其蒸汽乾度為0.95。同時（ $1-\chi$ ）的量稱之為蒸汽濕度。鍋爐出口處的蒸汽乾度約為0.95~0.98。濕飽和蒸汽所含有的熱量（比熱焓 h ）如圖1.1 的記號所示亦通過以下計算式來表示。

$$h = (1 - \chi) h' + \chi h'' = h' + \chi r$$

1.3.4 閃蒸蒸汽

閃蒸蒸汽（Flash steam）一般是指冷凝水回收罐上部或是蒸汽祛水器出口處大氣開放排凝管處出現的再蒸發蒸汽現象。為什麼沒有進行加熱而又出現蒸汽呢？是因為在一定壓力環境下存在的冷凝水到達較該壓力低的環境時，冷凝水本身的溫度要高於低壓環境的飽和溫度點。冷凝水無法以水的狀態而存在所含有的熱量暫態釋放而氣化產生蒸汽，這種狀況在冷凝水由高壓環境過渡到低壓環境時必然發生的現象。反之在較冷凝水的溫度高的飽和溫度環境下，則不會發生再蒸發現象。

例如當冷凝水在通過蒸汽祛水器時，入口側的高溫冷凝水以水的狀態存在，因出口側所處在的環境的壓力要比入口側的壓力低，冷凝水在被排出時基本上都會出現閃蒸蒸汽現象。

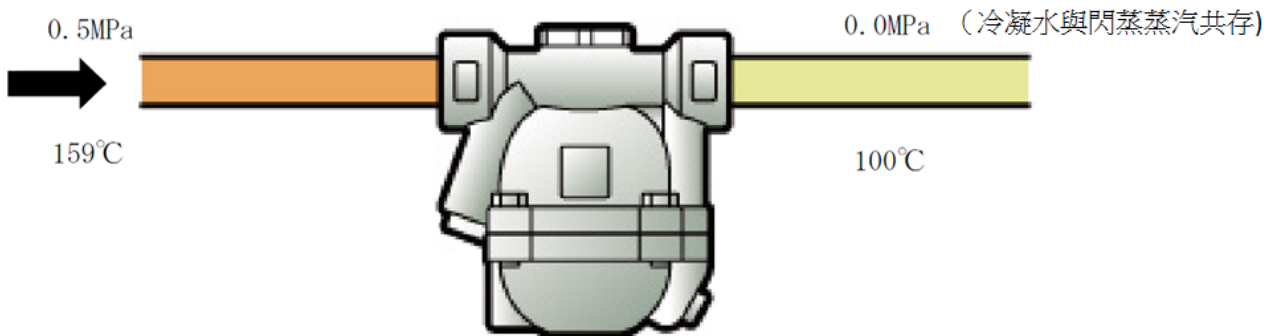


圖1.5 閃蒸蒸汽的生成

如圖1.5 為蒸汽祛水器入口側的蒸汽壓力為0.5MPa，其飽和溫度為159°C的1kg 冷凝水由蒸汽疏水閥出口側的排凝管排向大氣（0.0MPa）時的狀態。

參照表1.2 在壓力為0.5MPa 時1kg 飽和溫度的冷凝水所含有的熱量為671kJ。遵照熱力學第一法則（能量守恆定律）流體的全熱量在蒸汽祛水器入口側與蒸汽祛水器出口側相同的定律，（此時蒸汽疏水閥的放熱及流路抵抗能力所導致的熱損失不計的情況下）流向蒸汽祛水器出口側的1kg 的冷凝水也應該含有671kJ 的熱量。但是在壓力為0.0MPa 的環境下冷凝水所能夠含有的熱量僅為419kJ，即會有671-419=

252kJ 的熱量差出現。這一部分的熱量使冷凝水沸騰生成再蒸發蒸汽也稱之為閃蒸蒸汽。

總而言之在蒸汽祛水器高壓側以液體狀態存在的1kg 冷凝水在低壓側以液體和一部分蒸汽的狀態存在。

所生成的閃蒸蒸汽量通過以下計算式來進行計算。

$$\begin{aligned} \text{閃蒸蒸汽} &= \frac{(\text{入口側壓力時的潛熱量 } h') - (\text{出口側壓力時的潛熱量 } h')}{(\text{出口側壓力時的全熱量 } r)} \\ &= \frac{(671\text{kJ/kg} - 419\text{kJ/kg})}{2,257\text{kJ/kg}} = 0.11 \end{aligned}$$

通過計算得知1kg 的冷凝水其閃蒸蒸汽量為0.11kg。

閃蒸蒸汽的生成比率源自於其所在最終壓力時含有的全熱量與原壓力時所含有的全熱量之間存在的餘剩熱量的所占比例。

重要之處是閃蒸蒸汽並不單是發生於蒸汽系統內或是蒸汽祛水器出口的現象，而是應該積極的利用此物理特性來實施有效活用。一部分的冷凝水閃蒸後的蒸汽可以在低壓環境得到再利用是有效活用方法之一。在「1.3.3 乾度」中已有陳述蒸汽所含有的水分越少蒸汽品質越高，通過讓含在蒸汽中的水分進行再蒸發可以有效抑制換熱裝置的換熱效率下降現象。具有閃蒸蒸汽代表性的利用裝置為蒸汽閃蒸罐。

1.3.5 其它特性

蒸汽作為熱能搬運工被廣泛使用的理由除既述的因其可保有巨大潛熱能量及其在地球上擁有豐富的存在量以外，其他的優良特性如下所示。

- 對人體無害。
- 無腐蝕性並無引火的可能性，化學性質穩定。
- 較其他熱源媒體相比可以進行均勻的加熱。
- 通過改變使用壓力可以控制其飽和溫度，可以應對要求的加熱溫度進行調解及供給。
- 蒸汽與冷凝水之間的比體積存在很大的差，蒸汽凝縮時後續蒸汽可馬上補充供給。

在蒸汽使用時所存在的問題點如以下所述。

- 在鍋爐製造蒸汽及蒸汽在被使用的過程中必不可免的會存在空氣等非溶解性氣體的混入，並因此所帶來的傳熱效率低下的可能性。
- 生成蒸汽所使用的水中或多或少的會融入其他不純物質，並存在因此不純物質造成酸化腐蝕現象可能性。此類物質在生成過程中無法完全被去除亦是問題點之一。
- 還有對蒸汽祛水器而言因水的凝固點為 0°C ，需要根據所在地域情況實施防凍對策。

1.4 蒸汽與冷凝水的氣液兩相流

在本章的最後，對蒸汽輸送管內的蒸汽與冷凝水的流動狀態進行簡單的論述。在同一流路內氣相與液相兩種流體同時存在的流動狀態稱之為氣液兩相流。例如在蒸汽輸送時蒸汽管道內中存在蒸汽與冷凝水兩種相態的現象即屬於氣液兩相流的一種。

在蒸汽與冷凝水的氣液兩相流狀態下，通常會被認為密度大的冷凝水於管道底部流動而速度較快密度較小的蒸汽在冷凝水上面流動。但是實際上會因蒸汽與冷凝水的流動速度的不同出現流動位置上的不同。有關此詳細流動狀態的變化內容及說明請參照「氣液二相流技術ハンドブック（日本機械學會編）/氣液兩相流技術手冊（日本機械學會編制）」。

據「氣液兩相流技術手冊（日本機械學會編制）」中記述，蒸汽輸送管內的蒸汽流速一般設計為 $20\text{m/s}\sim 40\text{m/s}$ 。在此蒸汽速度下如圖1.6所示，以環狀流動狀態或是環狀噴霧流動狀態來流動。並不是常認為的蒸汽在上部流動而冷凝水在下部，而是冷凝水環繞管道內壁隨同蒸汽一起流動。

一般為有效排除蒸汽管道記憶體內的冷凝水，通常在管道的底部連接排凝管進行排出，但是在上述情況下完全將存在於管道內部的冷凝水排出是很困難的。因此可以判斷蒸汽在抵達使用裝置時內部已含有一定量的冷凝水，所以MIYAWAKI 通常建議在蒸汽使用裝置前設置氣水分離器來有效分離蒸汽與冷凝水。

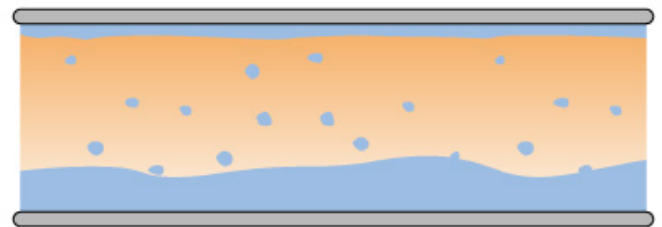


図 1.6 復水の環状流