

## 冰水機冷媒的選擇及前景

### Options and Outlook for Chiller Refrigerants

\*James M. Calm, P.E.( Engineering Consultant) 發表於地球科學論壇

10887 Woodleaf Lane, Great Falls, VA 22066-3003 USA, jmc@JamesMCalm.com

(Earth Technology Forum, Washington DC USA, 2000.10.30-11.01)

冷媒的選擇是很簡單的-或至少是較為簡單的-直至 1989 年後期。過去離心式(渦輪)冰水機的冷媒選擇是 R-11、R-12、R-22 及 R-500。在特別的需要下，例如為適合低容量使用或因應熱回收而運轉在高凝溫度狀況下，則 R-113 或 R-114 會被使用。大部份的工程師大多未指明要求的冷媒或在審標時經建議修正為它種冷媒。他們通常只規定容量、操作規格及必要的配管、動力及控制特點。

#### 從前的選擇

R-11，一種氟氯碳化合物(CFC)，是一個經常被使用的冷媒，主要是因為它負壓特性所帶來的效率及冰水機的成本優勢。大約每 3 個離心機中就有 2 個使用這種冷媒。目前使用的 R-11 冰水機仍多過所有其他離心機的總數，即使他們已於 1994 年在已開發國家停產。這個矛盾是由於 R-11 機組已大量的安裝使用而機組設備之更新與機組冷媒轉換(CFC CONVERSION)緩慢所致。

另一個最常用的選擇是 R-12，它能擴大離心機的範圍至低容量，在不強調高效率時能有很好的成本優勢。R-500

被當成離心式冰水機的冷媒使用是因其能在 50Hz 馬達轉速時達到與 R-12 於 60Hz 電力的相似設計中得到相同容量。而後持續被使用於 60Hz 之設備，因其可以擴大容量範圍。在歐洲、日本的一部分及亞洲其他地區的電力標準是 50Hz；在大部分北美及日本其他地區的電力標準是 60Hz。

大部份的冰水機使用渦卷式、活塞式或螺旋式(均為容積式)壓縮機，使用 R-22 為冷媒，它是一種高壓的氫氟氯碳化合物(HCFC)。這種多功能冷媒同時獨佔使用於最大的冰水機 - 超過 5MWt(1400 ton)-使用離心壓縮機。有少數的系統-總數少於 10%-使用 R-717(氨)或吸收式(absorption-cycle)冰水機。吸收式冰水機多數利用水及溴化鋰分別充當冷媒及吸收劑。

#### 目前的選擇

現今之離心式冰水機的選擇，R-22 使用在較小容量及非常大的容量，另外則是 R-123 及 R-134a。使用 R-123 及 R-134a 的比例是類似於 R-11 及 R-12 的比例。幾乎三分之二的新裝置設備使用 R-123(一種低壓的 HCFC)。

其餘的大部分設備使用 R-134a (一種中壓的氟碳氫化合物, HFC)。R-134a 在其他用途的接受度是相當高的, 且它很有可能取代 R-22 而成爲最廣泛使用的冷媒。

軍艦中老舊 R-114 冰水機的轉換, 尤其是潛水艇, 使用 R-236fa(一種中壓的 HFC), 但是沒有製造商有使用它來做一般空調用之冰水機。

雖然 R-22 在容積式冰水機中仍佔絕大多數, 但是情況已經改觀。使用 R-134a 以及 R-407C、R-410A(兩者都是 HFCs 混合物)的設計已經被引入以取代 R-22。少數的小型冰水機, 特別是歐洲, 使用 R-404A(亦是 HFCs 混合物)。雖然 R-407C 的壓力與溫度特質類似於 R-22, 它的使用需要變更設計(例如去掉了滿溢式蒸發器)以避免混合物分餾成份的轉變。一些爲 R-407C 所做的新設計利用它的溫度滑落差之特性, 使用 Lorenz 循環來增進效率。

一個正在增加但是爲數依然很少的小型冰水機使用 R-717(氨)以及-雖然談不上是經常-碳氫化合物例如 R-290(丙烷)、R-600(正丁烷)、R-600a(異丁烷)或他們的混合物。在歐洲的接受度是較其他地區爲高。

吸收式冰水機, 大部分使用水及溴化鋰, 其數目不到北美地區冰水機銷售量的 2%。這個比例沒有包括可與冷氣機匹敵的小型氨/水冰水機, 但在該應用上其市場佔有率少於 0.2%。雖然在日本對離心式冰水機的興趣有恢復的跡象, 在那兒吸收式冰水機仍舊較離心式冰水機

爲普遍。此種地區性的偏好主要是由於能源資源、成本及建築規定的不同所致。

## 什麼改變了?

傳統上是設備製造商, 而不是系統設計工程師或是建築物所有人, 選擇使用的冷媒。業主及工程師對該項選擇只比對其他內部構造多一些的注意。大部份業主是根據成本、性能、本地製造商可供應及維修之選擇、操作的偏好及感受的信賴度而做冰水機的選擇。在適用的範圍內, 他們會排除一些冷媒, 以避開當地特別許可的規定或是需要操作人員在場的特定的冷媒或設備。

這個規則在 1987 年隨著國際協定蒙特婁議定書(Montreal Protocol)之簽定而改變了, 這是歷史上保護同溫層中臭氧層的重要公約。隨著後續的修訂版本他們再次改變, 尤其是在 1990 年及 1992 年, 及稍後因氣候變化而制訂的京都議定書(Kyoto Protocol)。未來對這兩項環境條約的修正實際上是受到科學發展及政治的影響; 這些變化將會推動產生更多的管制措施。

## 環境問題

兩項重大的議題, 同溫層臭氧耗竭及氣候變化, 都是全球共通的問題。

## 臭氧層的破壞

臭氧, 氧的一種形態, 吸收從太陽射入的紫外線(UV-B)可防止對人類、動物及植物造成傷害。 M.I. Molina 及 F.S.

Rowland 在 1974 年的論文指出 CFCs 是氯的來源而其會破壞自然的臭氧形成及消滅的平衡。這份論文及後來的調查升高對同溫層中臭氧層因為來自人造化合物的氯及溴而減少變薄的關切。從使用這些化學物質的預計成長率來看，這些研究顯示了臭氧耗竭會更嚴重的可能性。

蒙特婁公約要求有計畫分階段的管制這些破壞臭氧的物質。他們包括含有氯及溴的化學製品，他們被用作冷媒、溶劑、發泡劑、煙霧劑、滅火劑及作為其他的用途。

## 氣候變化

預期全球溫暖化之趨勢已經有一段很長的歷史。在 1827 年數學家 J-B. Fourier 指出大氣中氣體的角色是在決定大氣及地面的溫度。他將此種全球溫度暖化的行爲比喻成爲“溫室”。S. Arrhenius 在 1896 年的論文警告從逐漸增加使用化石能源作為燃料而排放出來的二氧化碳將會增強自然界的溫室效應。

氣候變化由於涉及各種形成原因、自然的抵減及對此二者的敏感性及不確定性太多，所以臭氧的耗竭的現象更爲複雜。不管如何，多數的科學家現在都同意，暖化正在發生當中而結果是愈來愈能夠預測到更嚴重。

不像臭氧的耗竭，一些地區將會因氣候變化而受益。不幸的是，全球暖化將會造成疾病的蔓延及由於海平面的上升造成居住在海平面附近大量的人口冒著被洪水吞噬的危險。而且，快速的變化將會傷害大部分的農作物及其他植物。

主要的科學家們，例如國家海洋及大氣管理機構 (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA) 的 J.D. Mahlman 認爲到 2001 年時，我們已確定將產生 2 倍-及也許是 4 倍-大氣中的二氧化碳。而它是最主要值得關切的溫室氣體。

另一位 NOAA 科學家-D.L. Albritton，早已是臭氧問題的先鋒，提出一個獨到的見解。他建議歷史學家可以將同溫層臭氧耗竭的反應當成是必要的見習，以爲更困難的氣候變化問題作準備。

環境問題的爭辨範圍從否認、或詳述氣候變化的益處以至滅亡命運的警示皆示。在其最近的評估中，氣候變化政府間的專門小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC) 報告結論中表示，氣候變化已經開始有明顯證據。

目前的 HFCs 對造成整個溫室氣體的排放並無太大的貢獻。就算是以等同二氧化碳計算，它也低於 2%，以全球暖化指數 (GWP) 而言。因冷媒所造成的部分更小。但是，整體 HFC 的影響，是以全球爲基礎，比京都議定書所提及的其他氣體影響的成長更爲快速。

## 其他

從臭氧耗竭及氣候變遷得到的一項課題是化學物質的排放在問題被確認或證實之前就已累積。

有愈來愈多對持續的化學污染物 (persistent chemical pollutants) (PCPs)

的累積及其對生態系統的衝擊的關切。該問題在某方面是威脅到有限的適於飲用之水的供給。

另一受到關切的問題是農業上密集的施肥、燃料的燃燒及豆科植物廣泛的栽培而累積大量的氮。一部分的解決方法將要求改善所有能源使用效率，包含冰水機的運作。

空氣污染，受到使用石化燃料的使用，例如提供電力給冷凍系統，及資源的利用似乎成爲令人擔憂的事，但還是會持續的發生。他們將會隨著世界人口的增加-現今已超過 60 億-及經濟及工業的發展而提高。

我們不能正確地預測未來的問題，但是我們應該預期到一些事情將會發生。因此，在得知他們或他們的分解產物將會隨著時間累積而破壞環境，我們必須採取適當的步驟以避免長期破壞自然的化學物質的排放。

### 冷媒

雖然冷媒會造成所提及的環境問題，他們的角色所影響的相對地不大。一項與同樣的化學物質用於其它用途的區別是冷媒並不需要被釋出以產生作用。實際上，避免釋出冷媒能改善系統效率及降低成本。冷媒這個問題不是在於系統內部的冷媒而是在於他們的釋出。

冷凍提供了不可或缺的社會利益。一些是使氣候酷烈的地區變得適合人居，使得食物能夠被儲藏及運輸，使得

醫療品及藥物能夠被生產及儲藏，以及避免疾病的散佈。冷凍同時使得許多重要的生產過程變成可能，增加工人的生產力，及提供舒適的生活。

冷媒是冷凍系統最重要的構成成份。由冷媒的蒸發所移走的熱量就是制冷的能力。將冷媒與空氣或其他被冷卻的物質隔離需要某種熱交換器-蒸發器-以隔離冷媒。

其它在冷凍系統迴路中件只是使冷媒能夠不斷循環。一個壓縮機(或是一個吸-放迴路及一個溶液幫浦)可提升冷媒的壓力，以使得熱量得以在較高溫的溫度排放出來。一個冷凝器液化冷媒而使得它能再次沸騰或蒸發。一個減壓的設計，如膨脹閥或限流孔，控制流量以分離系統迴路的高壓端及低壓端。

冷凍系統剩下的其他部件則分別在不同的負載量及熱量排放情況下控制運轉，將熱從產生的地方傳輸至蒸發器，傳輸冷凝器熱量至排放裝置，供應能源以驅動系統，或是改進系統的安全、耐用性及可靠度。

幾乎任何的流體，通常藉著階段性的變化，都能被當成冷媒使用。實際上的差別是在於穩定性、安全性、效果及相容性。

\*冷凍有其他的方法例如使用 magnetocaloric 或 thermoacoustic 過程或利用 Seeback 效應。這些方法未來有發展的空間，但是現今並不實用，除非在特別的應用上，如 magnetocaloric 系統的溫度必須趨近絕對 0 度。這裡的討論提出 Joule-Thomson 效應，因為其效果及多用途是最常被使用的。

## 冷媒歷史

第一個百年中所使用的冷媒是由在幾近典型的機器中對熟悉的液體創新努力使用來主宰-“不論是什麼只要能用即可”。目標是提供冷凍用途，以及後來的，持久性。幾乎所有早期的冷媒都是可燃的、有毒的或兼有二者，且有一些同時是有劇烈作用的。意外事件是常常發生的。就此觀之，丙烷當時因此被當成無味的安全冷媒出售。

第二代的冷媒是源自 1928 年為尋求較為安全的冷媒、能夠廣泛的被使用於家用冰箱而來的。T.Midgley, Jr. 及他的同事 A.L.Henne 及 R.R.McNary 由物質組成表及特性表中找尋適當的候選者，其特性必需是穩定的，既沒有毒也不可燃，並且有著他們需要的沸點。

這個結果使得他們的注意力轉移至先前的尚未使用的有機氟化物，但是由於資料的不足迫使他們轉向其他的方法。Midgley 轉向元素週期表中去尋求。他快速地捨棄那些揮發性不足的元素。他然後根據元素的低沸點的需求除去那些會產生不穩定及有毒的化合物及惰性氣體的元素。他剩下 8 種元素可以選擇：碳、氮、氧、硫、氫、氟、氯及溴。他們聚集在元素週期表相交的行與列上，氟是在接近中央的位置。

經過他人反覆的篩檢，使用較新的資料及技術，都得到相同關於 Midgley 元素適合的結果。很有趣的，所有在 1928 年以前所使用的冷媒就是由這 8 種元素中的 7 種元素所組成-除了氟以外。參考文獻 4 至 7 詳細描述了這個歷史。

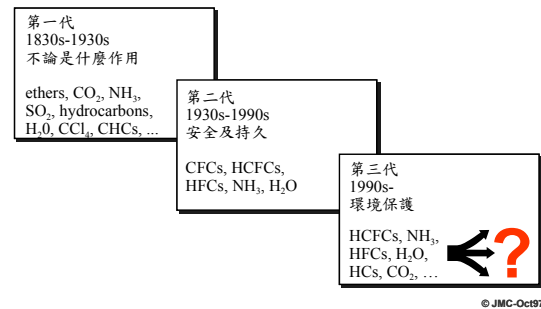


圖 1、冷媒的發展

## 理想的冷媒

除要具備特定的熱力特性外，一個理想的冷媒應是無毒的、不可燃的，及在系統內完全地穩定。它應是環保的-即使其分解後的產物-而且是豐富的或容易製造的。它應是具有潤滑性的且與其他被用來製造及維修冷凍系統的材料是相容的。它應是容易處理及偵測，並且不需要極端的壓力，不論是高壓或低壓。

還有額外的評估標準，但是目前的冷媒沒有一個是理想的，就算是只從部分標準來看。化學及熱物理分析顯示出在需求的分子組成及特性方面的一致性，實質上已排除理想冷媒的可能存在或是可以被人工合成的可能性。

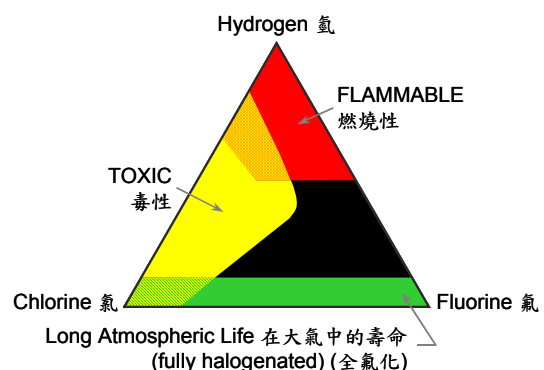


圖 2、隨著氯、氟及氫分子成分的不同其可燃性、毒性及在大氣中的壽命的消長關係 (M. O. McIinden 及 D. A. Didion, 1987)

圖 2 表示出有機鹵化物的分子間之消長關係，特別是碳化合物與包含氯、氟及氫原子間之關係。增加氫的成分將會縮減其在大氣中的壽命，但是卻使物質具備可燃性。增加氟的成分將會減少可溶混性，至完全氟化時冷媒通常需要合成的潤滑劑以回油。增加氯的成分通常會增加其毒性。然而，許多毒性的形式是如致命的、刺激心臟的、致癌的及導致遺傳因子突變，以及麻醉的、影響生殖的及呼吸的效果等。一些毒性是本質上就實際存在的而其他的則是因為化學變化；氯的成份只許多決定性變數其中之一。

增加氟或氯的成份會增加在大氣中的穩定性，將延長其大氣存活壽命。就如圖 3 所示，增加冷媒分子中氯的成分通常會提高臭氧破壞之能力(ozone depletion potential) (ODP)。

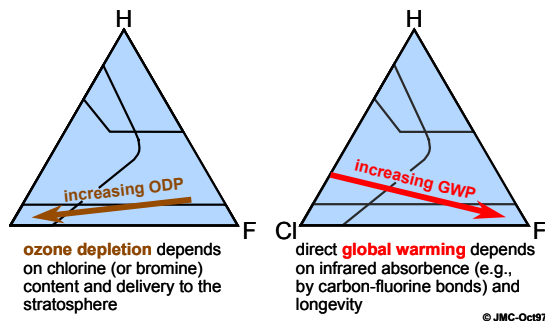


圖 3、氯及氟對臭氧破壞及全球暖化的衝擊

化合物中不包含溴或氯者，其 ODPs 值通常很接近於 0。同樣地，增加氟的成分通常會提升溫室效應的潛能(GWP)。用氫來取代者通常會減少其大氣的壽命。化合物有著較短的大氣壽命者，將有很低的 ODPs 值，因為在到達同溫層之前大部分的排放的物質將會被分解。他們亦將有很低的 GWP 值，因為他們在大氣中的持續存在期間是相當短的。

## 選擇標準

在認知沒有理想的冷媒及不可能發現理想的冷媒後，使用者必須在它可利用的冷媒中加以運用。從它們其中來挑選是很令人有挫折感的，因為未來對這些冷媒的選擇之接受度似乎是不確定的。而且，所知的選擇標準需要檢驗多項因素。它們包含從環境的、安全的考量以至於效果及相容性的議題均需加以衡量。

設備製造商對其產品中所使用的冷媒，通常會描述為其唯一合乎邏輯的選擇。化學品製造商及獨立維修公司也都會致力於市場行銷，但是他們對冷媒的選擇並無太大影響。不令人意外的，矛盾、誤導及有時不正確的資訊會充塞於市場中。這個結果通常會在市場上造成一些恐懼的、不確定的及懷疑的(fear, uncertainty and doubt)(FUD)氣氛。這些 FUD 因素包含：

- 根據環境保護管制(分階段或禁用)的未來之可利用性，
- 效率，
- 毒性，
- 可燃性，及
- 未來成本的上升。

## 未來可利用性

R-22 及 R-123 都是蒙特婁公約及國家規定中計畫要分階段管制的而停用的。公約呼籲工業國家在 2030 年之前，開發中國家在 2040 年之前停止生產。它更進一步規定所有的 HCFCs 的 ODP 加權總值的減低步驟。國家對使用於新設



備、生產或進口及-在極端的情形下-對所有的用途，規定相同或較早的期限。R-22 的期限通常較早，因它的 ODP 值較高。

HCFC 主要令人憂心的是在於他們作為發泡劑時會排放出 R-141b 及 R-142b。這個應用原本就會排放出氣體，且他們的 ODPs 分別為 0.086 及 0.043，以 HCFCs 而言，是偏高的。相對之下，冰水機使用的冷媒則排放的很少，且 R-22 及 R-123 的 ODPs 分別為 0.034 及 0.012，是較為低的。

嚴密的分析顯示 R-123 被當成冷媒使用對臭氧破壞的影響是很小的，最多也低於尖峰值的 0.001%。進一步的研究顯示它對環境的益處超過它對臭氧的影響並且證明重新考慮分階段管制是合理的。

雖然暫緩或放鬆管制 R-123 有科學上修正的根據，但政治層面上是很難去預測的。公約中准許繼續生產 HCFC 30 年(開發中國家則是 40 年)還是沒有被重新考慮延長。現存的及新的 R-123 冰水機所需要的冷媒數量應該至少是要足夠另外的數十年使用才是。注意到 R-11 在已開發國家於 1994 年或更早的時期已經停產，但是維修存量仍然很高。設備淘汰及替換的冷媒回收再利用，這是蒙特婁公約所准許的，應該能提供較足夠的數量更多且負擔的起的成本。主要的關鍵是在於機組洩漏率之降低及維修的改善以降低所需冷媒補充的數量。

HFCs 並不在蒙特婁公約規定的範圍內，因為他們的 ODPs 值幾乎是 0。HFC 的排放是被規定在京都議定書中，

但是這個條約尚未實施而且看起來在開發中國家提出實施管制方法前將不會施行。

目前的京都議定書所訂出之減低排放的目標，根據 6 種特定氣體或族群的 GWP 加權計算值來做排量久管制，其中也包含了 HFCs。HFCs 是總數的一小部分，但卻是增加最快速的一種成分。

沒有其他的方法可以預測是否在未來將會有特定的生產上限。一些國家-特別是歐洲-正單方面的朝向制訂一些使用 HFC 的限制及甚至是禁令。設備製造商已經避免使用 R-236fa 於新的設備，因為它有非常高的 GWP 值 9400 (相對於 R-123 及 R-134a 其分別為 120 及 1600)。

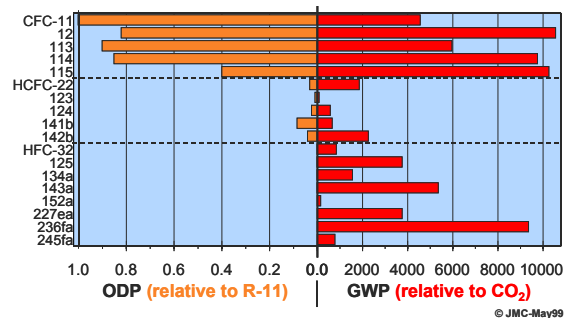


圖 4、主要的單一化合物冷媒(以參考文獻 14 的資料為基礎)臭氧破壞潛能(ODP)與溫室效應全球暖化效應潛能(GWP)的對比：CFCs 通常有較高的 ODP 及 GWP。HCFCs 通常有較低的 ODP 及 GWP。HFCs 的 ODP 幾乎是零，但是卻有相當高的 GWP 值。

圖 4 對照主要單一化合物冷媒的 ODPs 值及 GWP 值。它建議幾點值得注意的事項。

首先，CFCs 確保能管制臭氧耗竭及溫室氣體。

其次，只有 2 種冷媒表示出很低的(或接近 0)ODP 及 GWP，那即是 R-123 及 R-152a(一種 HFC)。R-152a 是相當容易點燃的，且因此只充當冷媒的混合成分之用(尤其是 R-401 及 R-500 中一系列的液體)。

第三，在臭氧破壞的管制之前若是已經施行對付全球溫暖化的措施，一個非常不同的景像可能會出現。圖左邊的 ODP 顯示出為何蒙特婁公約的制訂者特別注重 CFCs，准許 HCFCs 當作中介的液體，並且認為 HFCs 是長期解決的答案。右邊的 GWP 提出一個不同的結果，若是首先處理全球溫暖化之議題。化合物大概將會被單獨考量而不是考量化合物整體的組成分類。很有可能的 R-123 會在第 2 次的篩選之後仍然存在，因為就 ODPs 來說，只剩少數的選擇及考量它們對整體環境的益處。在下面將進一步討論他們。

在既定強制的管制條件下及尋求可能暫時免除管制 R-123，以及得知一些組織已經尋求對 HFCs 更為嚴厲的管制，空調及冷凍產業需要對科學的決定做一個明確的範例。他們要求對所有環境議題的整體的評估，將有利及不利的影響都考慮進去。

## 效率

幾乎任何揮發性的物質都能夠被當成冷媒使用。另外，不同的流體，在修正其理想操作循環後來配合其流體之特性，均有可能得到相同的性能係數(COP)。然而，可達成的性能效果於個別液體在簡單的循環中是有所差別的。這些差別在實際的設備上會更大。

在使用於離心機的冷媒中，R-123 較其他選擇在理論效率上有 3-5%的優勢。空調及冷凍機構(Air-Conditioning and Refrigeration Institute)(ARI)在 1996 年 11 月所做的研究發現 R-123 對最好的可利用設備有 9-20%的效率優勢。然而，自從那時起 R-123 已較其他選擇出現很大的效果改善，這個差別已經擴大。這並不表示 R-123 冰水機的效果總是超越其他選擇，因為可利用的效率範圍重疊。當強調最高的效率時，它代表 R-123 冰水機有明確的優勢。

這個效果利益成爲區分總等值溫暖化效應(total equivalent warming impact)(TEWI)或是壽命循環暖化效應(life-cycle-warming impact)(LCWI)的要點，其指出以等值的二氧化碳排放量來表示的釋出冷媒及較大的系統能源的綜合暖化效果。

圖 5 比較了用最好的冰水機按照冷媒分類的 TEWIs 值。它也包含了冷卻塔及冷卻水幫浦能源消耗。它是以參考文獻 4 的計算方法及較早的提及的研究資料爲基礎。使用的 GWP 值是從最近的國際評估資料中攫取出來。就如同所示，淘汰用於效率最好的冰水機中之 R-123 將會提高淨全球暖化影響達 14-20%。

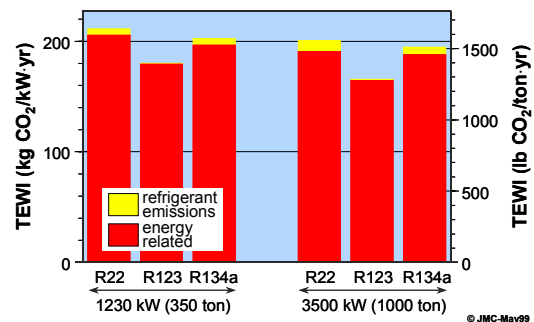


圖 5、溫室氣體的排放(以等價二氧化碳表示)年單位的冷卻-TEWI-在 2 個代表容量中對目前最好的冰水機而言



## 毒性

R-22、R-123、R-134a 及最常見的冷媒有輕微或很輕微的急性毒性(當意外地短時間單次洩露出來)會對皮膚及呼吸系統造成傷害。他們之中沒有一種是致癌的、妨礙生殖或成長的、影響基因的、妨礙呼吸的刺激物。R-717(氨)是例外。它對皮膚及眼睛是具有腐蝕性的。它同時也會刺激呼吸器官，但是它的刺鼻氣味則會告知它的外洩。

所有那些引述的冷媒除了 R-717(氨)及 R-718(水)之外都是會刺激心臟的。而所有的冷媒都是會令人窒息的物質。

在那些提及的冷媒中，所有的冷媒均會對技術人員及其他靠近或與他們一起工作的人僅造成相當低的職業風險，通常是慢性(長期，反覆的暴露)。R-123 是較 R-22 及 R-134a 具有較高的毒性，就如表現在它的可容許暴露極限(permissible exposure limits) (PEL)及它在 ASHRAE Standard 34(Designation and Safety Classification of Refrigerants)的安全分類上。R-717(氨)的毒性更強，但是他們之中沒有一種是在聯邦規定或當地建築法規(建築、消防及機械設備)中被定為”劇毒”或甚至是”毒”的物質。

在有適當的設備及良好的系統設計並且遵照建議的使用規則下，所有的這些冷媒都能被安全地使用。ASHRAE Standard 15(Safety Code for Mechanical Refrigeration)及建築物、消防及機械設備的法規皆明確指出所需之最低的安全標準。

單獨的毒性指數並不描述相對的危險性。大部分此種指數及暴露極限都是以無單位之體積的濃度表示，ppm v/v (parts per million by volume)，或以相等的質量體積(mass per unit volume)來表示。因為不同的低壓或高壓冷媒會因其揮發性、破裂或其他排放情形之不同，在同量之漏情形下，會造成在同一室溫中不同的濃度集中情形。正常的沸點 27.8°C(82.0°F)下，大部分的 R-123 將在地板上冷凝成液體且在空氣中的濃度會很低。相反地，R-22 或 R-134a 將有較高的啓始濃度，但是他們會消散地更快。因為冷媒從漏洞溢出的推動力是壓力，高壓冷媒較低壓冷媒從同樣大小的漏洞逃離的冷媒量將較為多。

就未來觀之，R-123 是比 R-11，就其在使用之評比上，亦是安全或更為安全的。R-134a 是最不具毒性而已商業化的冷媒。但是若不當使用下他們全部都會有危險發生的可能，冷凍系統最容易發生危險的部分是在工作場所。冷媒暴露的致死率，除故意的濫用外，是比閃電致死的機率小上 20 倍。這個記錄在目前使用冷媒洩漏偵測器及遵守現今的安全標準及法規後應得到更好的改善。

至於 FUD 爭議中，R-22 在毒性的測試中真的會使老鼠長出惡性腫瘤。至於 R-123 及 R-134a 二者-後者只在濃度非常高時-使老鼠在長期的暴露下於老年時長出良性(非惡性)腫瘤的機率增加。以進一步的組織及其他測試為基礎的重複毒性評量得到的結論是這些結果並不相關且不會對人類造成不尋常的危險。聲稱在 R-134a 及 R-227ea 的人體實驗中

有一個自願者瀕臨死亡及被急救的說法粗略地扭曲發生的事實。後續的調查發現反應是因爲實施測試的方法所引起的，而不是因爲化學作用而造成的。多次在對動物及人體之高濃度測試中，以及非故意的暴露測試中所進行的測試已證實了該項發現。

參考文獻 19、21 及 22 提供了進一步的冷媒毒性資訊。

## 可燃性

在所提到的冰水機冷媒中，除氨及碳氫化合物之外，沒有一種是在一般用來辨別冷媒的安全性的測試中具有可燃性。氨的可燃性是中等的，且它不容易被點燃。R-123 及 R-236fa 在商業上被當作滅火劑使用。

除了水之外，所有提過的冷媒對加壓冷媒中的壓縮機潤滑油在噴霧的狀況時都能保證防火。對可燃或有低滅火能力的冷媒，此種評論是特別真實的。

## 未來的成本

對未來的冷媒成本簡短的回答是他們不需要很高。整個系統成本或甚至是設備成本中冷媒的成本是很低的。降低冷媒成本的策略方法是減低補充的需要。主要的關鍵是對新設備於工廠或工地的洩漏測試，遵守製造商所提的預防維修方法的建議，技術人員的訓練及快速地對洩漏做出反應。他們包含加添冷媒的需要、洩漏偵測裝置的使用及排氣裝置 PRURGE 運轉時間的增加。

## 冰水機大戰

冰水機大戰這個名詞描述出現於 1990 年代的市場行銷活動、或 FUD 運動，其因爲必須對冷媒及設備做出選擇。

每一個冰水機的應用都有其適用的特別目的，但是大部分則是適用於一般的狀況。下列的評論對一些 FUD 行銷做出回應。

低壓的設計通常成本較低，特別是對有高效率的冰水機而言。他們需要排氣裝置以除去滲入的空氣，但是在負壓的運轉可以降低冷媒的洩漏(空氣流入而不是冷媒漏出)。機組排氣(排放移除的空氣)同時也釋放冷媒已是過去的看法。這個論點不符合現今採用幾乎零洩漏的冷凝式排氣裝置之使用，特別是那些透過活性炭或其他回收的容器裝置。

高壓冰水機通常較精簡，有助於在擁擠的空間或狹窄的通路中進行更換。他們通常以較低效率設計提供較低的設備-不是操作-成本。

R-22、R-123 及 R-134a 都是可以接受的選擇。雖然 R-22 的設計將會是下一批將遭到淘汰的，R-22 的存量及回收再利用的數量應能滿足目前及新的冰水機未來多年的需求。主張使用者將會面臨短缺或因價格的提高而被把持是有點言過其實。至於對 R-11、R-12 及其他 CFCs 或混合物含有 CFCs(如 R-500 及 R-502) 之使用機組而言，重點在於減少系統之洩漏、改善維修習慣，及控制目前的冷媒存量，包含那些正在使用中的機組。這些方法對所有的冷媒來說都是必要的，不只是那些必須較早停產的冷媒。

R-717(氨)也是值得考慮的。在適當的應用中它是一種優良的冷媒。例如包括工業製程，如食品及飲料加工及倉儲，及溜冰場的冷凍系統等。氨不適用在意外的洩漏會威脅到大眾安全的場所。

吸收式冰水機通常是較大型及較昂貴的，但是當它由其他廢熱或低成本的熱氣或燃料驅動時卻享有較低的操作成本。如考慮到電力時，他們也是減低尖峰時間電力需求的一種方法。吸收式冰水機的效率是比蒸汽壓縮式還要來得低很多，其結果會造成在大部份地區及應用上，產生較高或很高的 TEWI 或 LCWI。

此種現象，有一個老故事可以比喻，關於一個部分填充的玻璃瓶的窘境。哲學家爭論它是半滿或是半空的；工程師則認為玻璃瓶不需要這麼大。冷媒一半的事實也可以用類似的方式表示。這個答案不是他們是一半正確或一半不正確，而是他們通常並未提出適當的問題。

## 未來冰水機的冷媒

在未來較新的設計中使用 R-134a、R-407C、R-410A、其他的混合物或 R-717(氨)將會取代 R-22。R-134a 將來仍舊將被使用，並且它在大容量，超過 15MW(4300 ton)冰水機的特定市場中將位居支配的地位。

較為困難的是 R-123 的替代，因為其所有可能的替代品都必須在效果及安全中做出妥協。明確的解決方法則是將 R-123 從蒙特婁公約及國家規定分階段的管制中免除。該項免除可以是在限制

作為冰水機冷媒使用的生產規定的條件。科學上要免除 R-123 管制的理由是很充分的，因為 R-123 對同溫層臭氧的衝擊是微乎其微的，它在降低全球暖化的效益是很大的，並且它的大氣壽命是在冷媒中是很短的其中之一。

R-245fa 在大容量，3-15MW<sub>t</sub> (850-4300 ton)並且備有多級的壓縮機時，其效率可趨近於 R-123 的效率。但它並不確定能成為商業化冷媒。該項利用將會依照其成為發泡劑的市場接受程度而定，以達到可供應的生產量。儘管如此，R-245fa 是很有可能比其他的冷媒還昂貴，因為其生產過程的成本緣故。對設備製造商來說，決定性的因素很可能是是否能夠長期取得的保證。

建議使用 R-601(正戊烷)、R-601a(異戊烷)或是他們的混合物將是非常危險的。這些碳氫化合物是易燃的，且離心機需要使用很大的冷媒充填量，很容易導致爆炸。此外，在負壓下的運轉操作將使空氣容易滲入，而在壓縮過程時有產生爆炸的可能。而除了安全的議題外，碳氫化合物及 R-717(氨)均不能趕上 R-123 在冰水機運作時的效率，就如參考文獻 4 及 9 所示。

## 結論

目前大多擔憂的是轉換成新冷媒的選擇是沒有任何保證的。工程師、建築物所有人及其他在決定冰水機規格時相關的人員應該回復到傳統的冰水機決定條件，以其成本、效果、當地製造商的支援、維修項目及信賴度為基礎。我們會預期有更嚴格的環境保護規定，而同

時採取所有可能的步驟以降低冷媒的洩漏並且提高冰水機組之效率。

FUD 行銷運動已經使得老舊、低效率、易洩漏、及容易故障的設備的汰換變得遲緩。這個結果不僅傷害環境、且增加成本及使得冰水機市場變的狹小。

另外在認知到理想冷媒並不存在或不可能被發現，所有相關的人員必須堅持科學上對接受性的決定而不是受市場操縱。如果沒有如此，產業競爭將會倒回至較不安全的選擇而會惡化氣候的變化。在降低的效率及更多能源使用的結果，那些選擇亦將使其他迫近的議題更加惡化，例如氮的累積對大氣環境之影響。

## 參考文獻

- [1] Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, United Nations (UN), NEW York, NY, USA, 1987
- [2] United Nations Environment Programme (UNEP), Handbook for the INTERNATIONAL TREATIES FOR THE Protection of the Ozone Layer (fifth edition), Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya, 2000
- [3] Kyoto Protocol to the United Nations FRAMEWORK Convention on Climate Change, United Nations (UN), New York, NY, USA, 1997
- [4] J. M. Calm and D. A. Didion, "Trade-Offs in Refrigerants for the 21<sup>st</sup> Century, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, USA, 6-19, 1997; in Japanese (translation by s. Sakaida) in Reito, 73(184):433-444, May 1998; International Journal of Refrigeration, 21(4): 308-321, June 1998
- [5] R.C. Downing, Fluorocarbon Refrigerants Handbook, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1988
- [6] B. A. Nagengast, "A History of Refrigerants," CFCs: TIME OF Transition, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, USA, 1989
- [7] R. Thevenot, A History of Refrigeration Throughout the World, International of Refrigeration(IIR), Paris, France, 1979
- [8] M. O. McLinden and D. A. Didion, "Quest for Alternatives," ASHRAE Journal, 29(12):32-36,38,40,and 42,December 1987
- [9] J. M. Calm, "Emissions and Environmental Impacts from Air-Conditioning and Refrigeration Systems," Joint IPCC-TEAP Expert Meeting on Limiting the Emissions of HFCs and PFCs (Petten, The Netherlands, 26-28 May 1999), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, and Technical and Economic Assessment Panel (TEAP) of the United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 1999
- [10] J. M. Calm, D. J. Wuebbles, and A. K. Jain, "Impacts on Global Ozone and Climate from Use and Emission of 2,2-Dichloro-1,1,1-Trifluoroethane (HCFC-123)," Journal of Climatic Change, 42:439-474, June 1999
- [11] C. Kroeze and L. Reijnders, "Halocarbons and Global Warming," Science of the Total Environment, Part I-111(1):1-24, Part II-112(2-3):269-290,and Part III-112(2-3):291-314,1992
- [12] S. O. Anderson and E. T. Morehouse, "The Ozone Challenge," ASHRAE Journal, 39(9):33-36, September 1997
- [13] D. J. Wuebbles and J. M. Calm, "An Environmental Rationale for Retention of Endangered Chemicals," Science, 278(5340):1090-1091, 7 November 1997
- [14] World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, chaired by D. L. Albritton, P. J. Aucamp, G. Megie, and R. T. Watson, report 44, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva, Switzerland ; United Nations Environment Program (UNEP), Nairobi, Kenya; National Oceanic and Atmospheric

- Administration (NOAA), Washington, DC, USA; National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, DC, USA; and the European Commission, Directorate General XII-Science, Research and Development, Brussels, Belgium; February 1999
- [15] P. A. Domanski, D. A. Didion, and J. P. Doyle, "Evaluation of Suction Line-Liquid Line Heat Exchange in the Refrigeration Cycle," *International Journal of Refrigeration*, 17(7):487-493, September 1994
- [16] P. A. Domanski, "minimizing Throttling Losses in the Refrigeration Cycle," *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration*, International Institute of Refrigeration (IIR), Paris, France, Ivb:776-773, 1995
- [17] Inputs for AFEAS/DOE Phase 3 Study of Energy and Global Warming Impacts, Arlington, VA; Air - Conditioning and Refrigeration Institute (ARI), November 1996
- [18] Designation and Safety Classification of Refrigerants, ANSI/ASHRAE Standard 34-1997, American Society of Heating, Refrigerating, and Air- Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, 197
- Addenda to Number Designation and Safety Classification of Refrigerants, Addenda 34h, 34j, and 34k, ASHRAE, 2000
- [19] J. M. Calm, "Refrigerant Safety," *ASHRAE Journal*, 36(7):17-26, July 1994
- [20] Safety Code for Mechanical Refrigeration, ANSI/ASHRAE Standard 15-1994, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA, August 1994
- Emergency Interim Standards Action for ANSI/ASHRAE Standard 15-1994, ASHRAE, May 1998
- Addendum to Safety Code for Mechanical Refrigeration, ASHRAE, Addendum 15c, 2000
- [21] J. M. Calm, "The Toxicity of Refrigerants," *Proceedings of the 1996 International Refrigeration Conference at Purdue University*, West Lafayette, In, 157-162, July 1996
- [22] J. M. Calm, "Toxicity Data to Determine Refrigerant Concentration Limits," report DOE/CE/-23810-110, Air- Conditioning and Refrigeration Technology Institute (ARTI), Arlington, VA, USA, September 2000

## Originally published as:

J. M. Calm, "Options and Outlook for Chiller Refrigerants," *Proceedings of the Earth Technologies Forum (Washington, DC, USA, 30 October - 1 November 2000)*, International Climate Change Partnership and the Alliance for Responsible Atmospheric Policy, Arlington, VA, USA, 2390248, October 2000

## 譯者註：

過去 10 年來，冰水機之冷媒選擇與效率要求之紛紛擾擾，在世界各地都經常出現，台灣也是。筆者從不少國外論文資料中覺得許多可以值得參考的，雖然眾多的資料中各方的觀點未必相同。

另外，筆者要感謝 Mr. James Calm 的授權與信任，由筆者來做其論文的中文翻譯。筆者以最大的努力呈現原著的內容，此內應代表 Mr. Calm 的觀點而不是譯者的觀點。此點望請各界先進了解。

未來，倘有機會，對於其它不同的論文，在原著者之同意下，筆者亦會嘗試將其翻譯成中文，提供國內相關人仕參考。謹此致謝。(790637@itri.org.tw)

**Copyright; 2000 Jame M. Calm, Engineering consultant---reproduced with permission.**