

## 二氧化碳冷媒應用現況介紹

由於臭氧層破壞與溫室效應，鹵素冷媒的排放代表環保的大挑戰。以今日的全球基準來看，冷媒排放所造成的溫室氣體排放量等同於石化燃料燃燒造成之二氧化碳排放量的 10%(IPCC/TEAP, 2005)。

而冷媒的主要排放量是可以透過改良遏制政策獲得降低。然而，即使由政府引進強烈的重視與獎勵誘因，仍然不易降低冷媒排放量到可接受的程度，特別是某些特定的應用領域。使用更低或零溫室效應潛值之替代冷媒的轉變，代表是一項更長程永續的政策。

二氧化碳是生物圈自然發生的物質。因此，它是一種長期替換冷媒，已知即使被排放到大氣中，也不會對環境造成不利的影響。二氧化碳也是一項無毒性、無可燃性而且性質適用於多種應用領域的替換冷媒。被當成冷媒的二氧化碳可來自工業過程所產生的 CO<sub>2</sub> 廢氣，這些相同的 CO<sub>2</sub> 也可以做成碳酸飲料，此特性也相當重要，即今日全球各地均已有了二氧化碳冷媒良好的可取得性。

臭氧層破壞物質已經由蒙特婁公約受到管制並將逐步禁用。然而，這些物

質仍然廣泛使用在許多國家，尤其是開發中國家在未來幾年內，仍可能使用這些臭氧層破壞物質，即使由環境保護的觀點來看，這是非常不願見到的情形。獨特的是，這些國家可以利用這次機會使用天然冷媒而將它們的技術直接轉換到長程的解決方案上。

由於冷凍、空調與熱泵系統通常會經由動力系統的消耗而產生間接的 CO<sub>2</sub> 排放，無論是經由石化燃料產生的電力，或是經由運輸與汽車應用的引擎系統，因此注重這些系統的排放量及能源效率也是非常重要的議題。處理此項問題的方法之一是透過壽命週期性能評估法 (life cycle climate performance evaluations; LCCP)，將系統整個運轉存續時間內的總排放量都考慮進來。

針對許多不同的應用，二氧化碳已經變成一項可行的替代冷媒，它也許可視為取代造成臭氧層破壞與全球溫升效應之人工冷媒的替代品。本文將再度瀏覽二氧化碳當成冷媒的一些重要觀點以及它成為替代冷媒的重要性。針對不同氣候條件與應用領域進行壽命週期性能評估的計算比較，以證實二氧化碳適合

成爲替代冷媒。本文只聚焦在僅使用二氧化碳爲惟一冷媒的系統上，因此，使用二氧化碳於串級系統或當成二次冷媒並不在討論之內。

首先，先針對二氧化碳冷媒於冷凍空調領域應用時的物理特性作一簡單的介紹。

## 二氧化碳冷媒應用的特性

表 1 所示爲應用於民生冷凍空調常用之人工合成冷媒與二氧化碳冷媒的比較。由表中列示可知，二氧化碳冷媒最大的優點是在其操作壓力之下(壓力將高達 100kgf/cm<sup>2</sup> 以上)，其濃度較傳統冷媒

的操作濃度高出很多，意即密度極高，所以在相同的冷凍能力下，所需的二氧化碳冷媒的體積流率較小，因此，壓縮機的體積可比傳統冷媒壓縮機小很多，其壓縮比也可降低些。不過，因爲二氧化碳冷媒之操作壓力甚高，在壓縮機與系統零組件之設計與選用上，也伴隨衍生出許多機械設計與系統循環設計之困難，其中包含所有運轉機件與管路元件之結構強度、潤滑油選用與潤滑油迴路設計、壓縮室之密封設計與材質選用、驅動馬達之運轉結構強度、繞線絕緣材質與耐溫、系統各部件的配置、系統循環效率低落等問題，皆爲開發二氧化碳應用產品必須面臨的技術挑戰。

表 1. CO<sub>2</sub>與傳統人工合成冷媒的性能比較

		CFC12	HCFC22	HFC134a	CO <sub>2</sub>
ODP(臭氧層破壞能力)		1.0	0.05	0	0
GWP(溫室效應)	100 年	7100	1600	1200	1
	20 年	7100	4200	3100	1
可燃性或爆炸性		No	不易	不易	No
分解後產物之毒性/刺激性		是	是	是	否
相對價格		1	1	3-5	0.1
分子量		120.9	86.48	102.03	44.01
臨界點 (Critical)	溫度, °C	112.0	96.2	101.2	31.1
	壓力, bar	41.6	49.9	40.7	73.8
0°C 時壓力, bar		3.09	4.98	2.93	34.85
0°C 時蒸發潛熱, kJ/kg		152.5	204.9	198.4	231.6
0°C 時體積冷凍能力, kJ-m <sup>3</sup>		2,740	4,344	2,860	22,600
COP(0°C/40°C)標準行程效率		5.62	5.55	5.49	2.78*
0°C 時 C <sub>p</sub> 值(kJ/kg k)	飽和液體	0.93	1.17	1.34	2.42
	飽和氣體	0.65	0.72	0.90	0.58
0°C 時 K 值(W/m k)	飽和液體	0.078	0.100	0.092	0.105
	飽和氣體	0.008	0.009	0.012	0.023
0°C 時 v 值(10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s)	飽和液體	0.192	0.184	0.212	0.095
	飽和氣體	0.656	0.565	0.880	0.156
Isentropic exponent, ideal gas		1.14	1.20	1.12	1.30

## 特稿

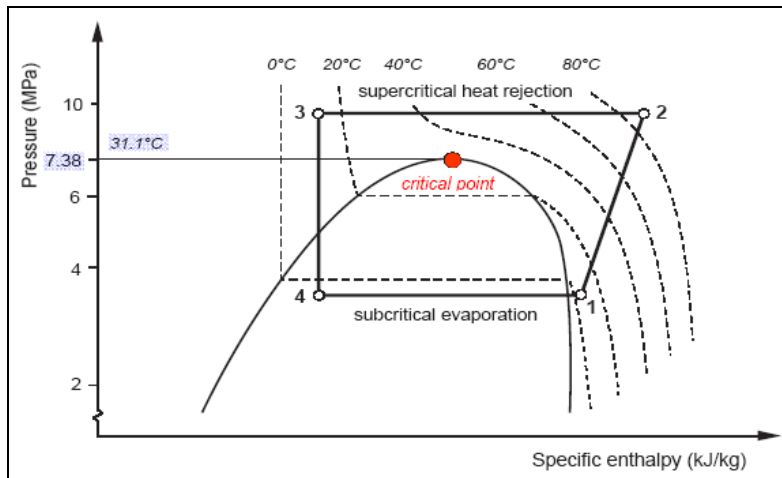


圖 1. 二氧化碳冷媒應用於冷凍空調之熱力循環

圖 1 所示為二氧化碳冷媒的物性示意圖。由圖中可知二氧化碳冷媒臨界溫度相當低，只有 31.1°C(相當於 88°F)，臨界點壓力相當高，高達 7.38MPa。在亞熱帶地區生活的台灣，環境溫度便已常高過此臨界溫度，而進入了超臨界點(SuperCritical)區域中運轉。由於冷媒在臨界點之上的區域，是屬於液、汽態分界不明顯的區域，同時，其溫度、壓力是各自獨立的函數，並不像傳統冷媒，在冷凍空調的熱力循環架構下，大部份皆是在臨界點以下的兩相共存之飽和區內操作，其溫度、壓力是互為相依函數(即一飽和溫度將對應一飽和壓力)，對冷媒物性的變化，是比較容易操控，對應的系統設計也比較單純。

不過，二氧化碳此特性：低臨界溫度、高臨界壓力，應用於熱泵系統時，卻可獲得良好的熱能力之效果，所以應用於熱泵系統來加熱水，其性能可較傳統人工冷媒的熱泵優良許多。

## 能源效率與環境條件

由於二氧化碳熱力性質及系統循環特性與 HFC 冷媒不同，與 HFC 冷媒相比，其效率曲線(性能效率，Coefficient of Performance; COP: 冷凍能力除以消耗功率)與環境溫度顯示出不同的變化特性。二氧化碳在低環境溫度時效率較高，而 HFC 系統則在高環境溫度時效率較佳。

此趨勢在不同的應用領域均已被證實，例如在車用空調與超市冷凍的應用均如此。圖 2，資料來源 Hafner 等(2004)[7]，說明此趨勢，此兩條性能曲線之交叉點的溫度將隨著不同因素而變化，例如元件的性能與系統設計等因素。以車用空調系統為例，根據 Hafner 等(2004)的報告，比較使用二氧化碳與 HFC 冷媒的差異，結果顯示交叉點的溫度約為 30°C。

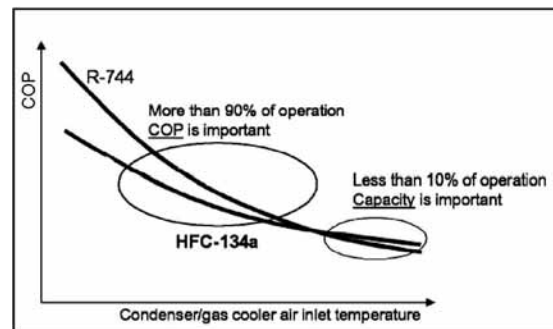


圖 2. CO<sub>2</sub>與 HFC-134a 冷媒在不同環境溫度下的系統性能比較[7]

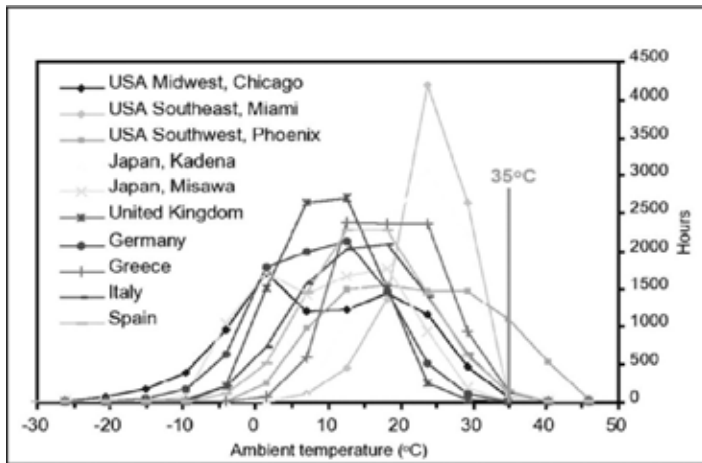


圖 3. 美、日、歐代表性城市環境溫度之年度時數比較[7]

當進行二氧化碳系統與其它替代冷媒技術的能源效率比較時，基於系統運轉一年期間會遭遇的操作條件，如圖 3 所示，為全球各地城市之環境溫度年度時數的比較，進行季節性能的比較是非常重要的比對。僅做額定條件的比較，一般為環境溫度條件 32°C 或 40°C，是無法針對能源消耗產生有意義的比較性。通常額定條件是訂為設備可能遭遇的最嚴苛條件，在這些額定條件下，確保所需求的冷凍能力或加熱能力足夠當然很重要，但是於額定條件下的運轉，對設備的年度能源消耗而言，通常並不重要。結果顯示二氧化碳系統在最高溫的環境條件下，也能滿足冷凍能力的需求。

對於一些應用，基於氣候條件的季節變化進行能源消耗調整，以比較不同系統與技術間的比對已經成為常見的程序。這些應用包括美國的 HVAC 產品、日本之同時供熱與供冷型的自動販賣機，以及車用空調系統等。針對一些應用領域，使用壽命週期性能評估法進行計算比較，將如下所示。

## 不同應用領域使用二氧化碳為替代冷媒

由 R&D 的觀點，在某些應用領域的二氧化碳系統已經完成開發而可以商業化了。但在其它不同的應用領域，則仍在發展中。

### 商業冷凍

在冷凍領域裏，商業冷凍代表著因冷媒洩漏而造成溫室氣體排放量最大的區塊，在冷凍領域裏超過 40% 的二氧化碳排放當量是由商業冷凍所造成。

圖 4 顯示一家超市整年度的二氧化碳排放當量之總量，單位為二氧化碳公斤當量。假設條件為：HFC-404A 冷媒充填量 600 公斤，年洩漏量 30% (全球平均值)，設備使用壽命終止後的回收率為 50%，冷凍設備的季節性能係數為 2.5，全年設備運轉時間為 75%，額定能力為 250kW。以下列出歐洲各國電力系統之平均電力產生的二氧化碳當量值，歐洲平均值為 0.51 公斤/每度電 (0.51 kg CO<sub>2</sub>/kWh)，挪威零公斤/每度電 (挪威使用水力發電)，丹麥 0.84 公斤/每度電 (0.84 kg CO<sub>2</sub>/kWh)，而全球的平均值為 0.57 公斤/每度電 (0.57 kg CO<sub>2</sub>/kWh)。圖 4 的資料來源是 Neksa 與 Lundqvist (2005)[5]。主要的排放量來源為冷媒洩漏的直接排放。即使洩漏可以經由更好的遏制政策與再充填技術而降低，但仍可看出非 HFC 系替代冷媒的強烈需求。

特稿

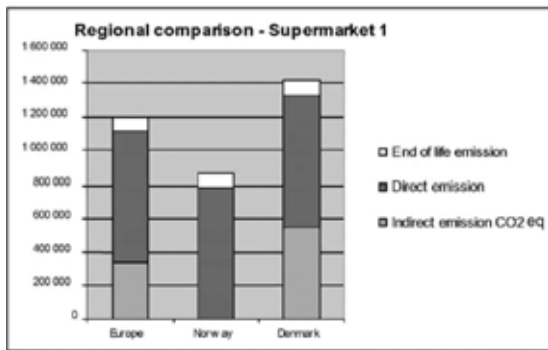


圖 4. 超商在各國的冷媒排放量比較[5]

二氧化碳在商業冷凍系統中，是替代 HFC 冷媒之一種重要的冷媒。許多主要公司已經導入只使用二氧化碳當做冷媒的直接系統，並依據環境溫度進行穿臨界或次臨界循環應用於低溫及中溫冷凍領域。目前在歐洲，從南方的義大利到北方的挪威共有約 10 至 20 家超級市場已建立此種設計的系統。同時，與現今直膨式 R404A 系統及間接式系統的能源消耗與成本進行比較，如 Girotto 等人(2004)。基於正在進行的開發技術，二氧化碳擁有較低的成本與較高的能源效率是可以預期的。進一步的壽命週期性能評估圖表與成本降低的資料可以在 Harnish 等人(2003)及 IPCC/TEAP(2005)中尋得。

在輕型商業冷凍領域也是如此，如飲料罐冷飲機與販賣機等直立機種，許多主要公司也引進二氧化碳技術(RefNat 2004)。Jacob 等人(2006)報導已有 4000 機組進入準商業化的發展測試了。與同等 HFC 系統的效率比較結果顯示，二氧化碳系統即使在全球大部分的熱帶氣候下仍深具競爭力。Zimmermann 與 Maciel(2006)表示在中溫及低溫展示櫃的應用中，二氧化碳系統都是極具能源效率潛力。

車用空調

車用空調應用，由於冷媒的排放，是最大的 HFC 冷媒直接排放與第二大的二氧化碳當量之溫室氣體排放的領域。這也是歐盟從 2011 年開始規定所有新汽車的車用空調系統均禁用 HFC-134a 的理由之一。

Hafner 等人進行詳細的壽命週期性能評估，根據全球不同城市的氣候資料與實驗資料，進行二氧化碳車用空調系統與 HFC-134a 及 HFC-152a 系統的比較。調查顯示，相較於 HFC-134a 系統，二氧化碳系統的壽命週期性能評估降低了 18~48%，因此降低了溫室氣體排放量。最少降低量發生在氣候非常炎熱的美國亞利桑納州鳳凰城，而最大降低量是發生在氣候適中的德國。圖 5，資料來源 Hafner 與 Neksa(2006)[4]，顯示熱帶氣候印度新德里與義大利羅馬之二氧化碳系統與 HFC-134a 系統的壽命週期性能評估值之比較。洩漏率 120 公克/每年，是代表 HFC-134a 系統現今的全球平均排放率，而洩漏率 30 公克/每年則是代表 HFC-134a 系統在未來最佳應用例時的排放率。而由圖中也可知，改用二氧化碳當冷媒可以顯著地降低排放量。

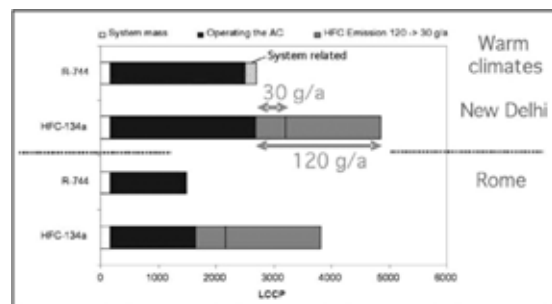


圖 5. 車用空調使用 CO<sub>2</sub>與 HFC-134a 冷媒之壽命週期性能評估法的排放當量比較[4]

## 熱泵與空調機

熱泵加熱器，使用熱泵加熱自來水，2001 年已在日本商業化了，包含家用系統以及商用系統。於 2005 年銷售了大約 21 萬台，主要是家用系統，相較於 2004 年，2005 年銷售率成長了 60%。由於季節性能效率高於 4，比起燃氣型與直接電熱型，這些二氧化碳熱泵系統顯著地降低了溫室氣體的排放。適合歐洲氣候條件的機種也正在開發中。比起 HFC 熱泵系統，二氧化碳熱泵系統的另一項重要優點是可以將水加熱到更高的溫度。Stene 等人(2006)發表非住宅建築使用結合加熱與冷卻能力的二氧化碳系統。理論評估顯示二氧化碳熱泵系統比起使用 HFC 冷媒的熱泵系統，可以達到相等或更高的季節性能因子。空氣對空氣之可逆式家用熱泵系統目前正在開發中。

## 其它應用領域

幾種其它應用領域的二氧化碳系統的研發也正在進行。運輸冷凍，貨櫃與公車空調均是產生溫室氣體大排放量的應用領域。這些應用領域進行冷媒替代系統的開發將是非常的重要。

## 誌謝

本研究計畫承蒙經濟部能源局之能源基金所贊助，謹此誌謝。

## 參考文獻

[1] 余培煜、張鈺炯、楊錚忠、湯岳儒、洪景華、劉陽光，「二氧化碳冷媒應用於熱泵之關鍵技術開發」，海峽兩岸冷凍空調學術暨技術研討會，A12-1~8 頁，民國 96 年 12 月。

[2] 張鈺炯、楊錚忠，「二氧化碳冷媒應用技術介紹」，冷凍與空調雜誌，48-56 頁，民國 96 年 2 月。

[3] Petter Neksa, SINTEF, NORWAY ;"CO<sub>2</sub> as Refrigerant, an Option to Reduce GHG Emissions from Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Systems", web site:www.R744.com, 2007.

[4] Hafner, A., Neksa, P.;"Factors influencing life cycle environmental impact calculation of MACs", MAC Summit, Saalfelden, Austria, February 17, 2006.([http://www.mac-summit.com/files/presentations/3\\_6\\_armin\\_hafner.pdf](http://www.mac-summit.com/files/presentations/3_6_armin_hafner.pdf))

[5] Neksa, P., and Lundqvist, P.;"Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Commercial Refrigeration Systems. What Matters? ", IIR Conference on Commercial Refrigeration, Vicenza, Italy, July 1, 2005.

[6] IPCC/TEAP Special Report, "Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons",Cambridge University Press, ISBN 92-9169-118-6,IPCC/TEAP, 2005.

[7] Hafner, A., Neksa, P. And Pettersen, J.;"Life Cycle Climate Performance (LCCP) of Mobile Air-Conditioning Systems with HFC-134a, HFC-152a and R-744", 15<sup>th</sup> Annual Earth Technologies Forum and Mobile Air Conditioning Summit, Washington, USA, April 13~15, 2004.

[8] M. Branas, SINTEF, NORWAY ;IEAS Annex 27; "Selected Issues on CO<sub>2</sub> as Working Fluid in Compression Systems", 4<sup>th</sup> IIR-Gustav Lorentaen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, pp.1-8, July 25-28, 2000.