

磁浮離心式冰水機的能源效率對減碳效益之評析

一、冰水機能源效率管理制度與磁浮離心式冰水機概述

冰水機為建築物空調與工業製程冷卻的重要設備，佔中央空調總耗電 50% 以上，對應我國總耗電量達 10% 以上，其相關規範已由經濟部公告「蒸氣壓縮式冰水機組容許耗用能源基準與能源效率分級標示事項方法及檢查方式」，於中華民國 109 年 7 月 1 日起實施。冰水機性能係數(COP)之製冷能源效率分級基準，依冰水機組類型分成水冷容積式、水冷離心式與氣冷式三種，以及根據標示額定制冷能力範圍訂定各級之性能係數(COP)，如表 1 所示。以水冷離心式冰水機標示額定制冷能力 $\geq 528\text{kW}$ 、 $< 1055\text{kW}$ 這個級距為例，1 級能源效率的 COP 為 6.4，2 級能源效率的 COP 為 5.95，3 級能源效率的 COP 為 5.55。其中標示為 1 級與 2 級能源效率之冰水機產品，實測所得之額定制冷能力及性能係數應大於其產品標示值 95% 以上。能源效率標示 1 級者比 2、3 級者的省電，其目的主要在教育並鼓勵用戶採用 1 級能源效率冰水機產品，以達節能減碳之效益。

表 1、冰水機組製冷能源效率分級基準表

冰水機組類型		標示額定制冷能力	製冷能源效率分級基準		
			性能係數(COP)		
			3 級	2 級	1 級
水冷式	容積式	< 528kW	4.45	4.80	5.15
		≥ 528kW <1758kW	4.90	5.30	5.70
		≥ 1758kW	5.50	5.90	6.35
	離心式	<528kW	5.00	5.40	5.80
		≥ 528kW <1055kW	5.55	5.95	6.40
		≥ 1055kW	6.10	6.60	7.10
氣冷式		全機種	2.79	3.00	3.20

冰水機組測試規範依照 CNS 12575 條件之全載性能測試[1]，設定冰水出水溫度 $7\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 、冰水流量 $10\text{ LPM/RT}\pm5\%$ ；冷卻水入水溫 $30\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 、冷卻水流量 $12.5\text{ LPM/RT}\pm5\%$ 。部分負載 IPLV(integrated part load value)，依據 AHRI 551/591-2020 標準所定義的部分負載效率為四個製冷能力及冷卻水負載條件下 COP 的加權平均總性能效率，相當於冰水機年平均性能效率。其計算方式如下所示：

$$\text{IPLV} = 0.01A + 0.42B + 0.45C + 0.12D \quad (1)$$

其中

A = COP @ 100% Load

B = COP @ 75% Load

C = COP @ 50% Load

D = COP @ 25% Load

冰水機於 25%、50%、75%、100%負載條件下，IPLV 之權重係數分別為 0.12、0.45、0.42、0.01，各負載之性能係數 COP 為依 AHRI 551/591-2020 性能測試規範[2]設定 AHRI 全載冰水入/出水溫度 $12/7\pm0.3^{\circ}\text{C}$ ，冷卻水入/出水溫 $30/35\pm0.3^{\circ}\text{C}$ ，調整冰水與冷卻水流量符合前述水溫條件，在 AHRI 部分負載依照全載流量及冰水出水溫 $7\pm0.3^{\circ}\text{C}$ ，其中在 IPLV 75 %工況之冷卻水入口水溫設定為 $24.5\pm0.3^{\circ}\text{C}$ ，IPLV 50 %與 25 %工況冷卻水入口水溫設定 $19\pm0.3^{\circ}\text{C}$ 。IPLV 計算方式依據公式(1)將各點冰水機性能係數與加權係數計算得出 IPLV 值。

測試標準 CNS12575 測試條件				
■ 水冷式冰水機				
負載	冰水出口溫度	冰水流量	冷卻水入口溫度	冷卻水流量
100%	7.0±0.5℃	10.0 LPM/RT±5%	30.0±0.5℃	12.5 LPM/USRT±5%
※ CNS 12575 未定義部份負載之權重值				
※ 我國尚未定義與實施部份負載之製冷能源效率管制				
測試標準 AHRI 551/591 2020 IPLV 測試條件與計算方法				
■ 水冷式冰水機				
負載	冰水入口溫度	冰水出口溫度	冷卻水入口溫度	冷卻水出口溫度
100%	12.0±0.28℃	7.0±0.28℃	30.0±0.28℃	35.0±0.28℃
75%	-	7.0±0.28℃	24.5±0.28℃	-
50%	-	7.0±0.28℃	19.0±0.28℃	-
25%	-	7.0±0.28℃	19.0±0.28℃	-
※ 75%、50%、25%負載冰水與冷卻水流量以 100%流量為準				
※ 部份負載性能 IPLV 計算公式：				
IPLV=0.01*A+0.42*B+0.45*C+0.12*D				
A=100%負載之 COP 值、B= 75%負載之 COP 值、C= 50%負載之 COP 值				
D= 25%負載之 COP 值				

中華民國蒸氣壓縮式冰水機組-能源效率分級標示管理系統網站[3]，可查詢台灣冰水機能源效率分級登錄統計，全面實施冰水機銷售必須登錄能源效率，統計數據相當於銷售台數，如表 2 所示。資料日期更新 2022.08.22 所登記冰水機台數為 2593 台，其中水冷容積式 1308 台、水冷離心式 559 台、氣冷式 726 台。

從表 2 的台灣冰水機市場銷售結果顯示，製冷能力 $\geq 1,758\text{kW}$ 的冰水機組主要為水冷離心式冰水機的 395 台，水冷式離心式僅在此級距的銷售數量大於水冷螺旋式冰水機，在製冷能力 703kW ~1,055kW 為 96 台，製冷能力 1,055kW~1,758kW 為 95 台，製冷能力越小則與水冷容積式冰水機的差距越大，製冷能力 350~703 kW 的水冷離心式冰水機銷售台數僅 54 台，製冷能力<350 kW 的水冷離心式冰水機更下降至 14 台。台灣冰水機銷售台數若以百分比統計，製

冷能力 350~703kW 占比 16%、製冷能力 703~1055kW 占比 10%、製冷能力 1055~1758kW(300~500USRT)占比 10%、製冷能力 1758kW(>500USRT)以上占比 12%，顯見台灣水冷式冰水機市場主要仍以中、小型製冷能力與價格較便宜的水冷容積式冰水機為主。

表 2、台灣冰水機銷售市場需求

製冷能力範圍	水冷容積式	水冷離心式	氣冷式	總計	百分比
<350kW	621	14	707	1342	52%
350~528 kW	243	42	19	304	12%
528~703 kW	98	12	0	110	4%
703~1,055 kW	170	96	0	266	10%
1,055~1,758 kW	165	95	0	260	10%
$\geq 1,758$ kW	11	300	0	311	12%
合計	1308	559	726	2593	100%
資料來源：中華民國蒸氣壓縮式冰水機組-能效分級標示管理系統 資料日期:2020.07~2022.08.22					

製冷能力 350~528kW 主要以水冷容積式與水冷離心式為主，分別為 243 台、42 台。探討能源效率分級基準之銷售台數分布，其中水冷容積式冰水機 1 級 102 台(42%)、2 級 102 台(42%)、3 級 39 台(16%)，1 級與 2 級的占比相近；水冷離心式冰水機 1 級 23 台(54.8%)、2 級 16 台(38%)、3 級 3 台(7.2%)，主要分布於 1 級 COP 為 5.8。2 級水冷離心式冰水機之 COP 為 5.4，仍高於 1 級水冷容積式冰水機的 COP 5.15。水冷離心式冰水機採用磁浮離心壓縮機，具備小型化與高效率化的優勢，已逐漸侵蝕到原本採用螺旋式壓縮機為主流的中、小型水冷容積式冰水機市場。在此同樣能力範圍之 1 級能源效率基準，於水冷容積式冰水機之 COP 為 5.15，而水冷離心式冰水機之 COP 為 5.80，性能效率基準高於水冷容積式冰水機 12.6%，水冷磁浮離心式冰水機也具備高部分負載 IPLV 的特點與優勢，預期未來此級距水冷離心式冰水機銷售數量將逐漸成長並超越水冷容積式冰水機。

表 3、冰水機組製冷能力 $\geq 350 < 528$ kW 能源效率分級基準

冰水機組類型	1 級		2 級		3 級	
	COP	台數	COP	台數	COP	台數
水冷容積式	5.15	102	4.8	102	4.45	39
水冷離心式	5.8	23	5.4	16	5	3
氣冷式	3.2	1	3	6	2.79	12

磁浮離心式冰水機以多壓縮機並聯的設計方式在國外的發展相當成熟，廣泛應用於製冷能力 703kW 以上的冰水機產品，儼然已成為市場的主流，其主要優勢乃可顯著提升部分負載 50%、25%性能效率，50%與 25%部份負載的權重係數分別為 0.45、0.12，共占部分負載計算權重 0.67，是影響 IPLV 效率的關鍵。雙壓縮機並聯設計之冰水機以單壓縮機運轉可滿足負載需求時，可以幾乎使用兩倍的熱交換器面積的好處，使蒸發溫度與冷凝溫度表現較佳，且製冷能力增加對於葉輪入口攻角會大幅降低，可提高壓縮段流力元件性能效率。相較於雙壓縮機同步卸載運轉，單壓縮機運轉效率較高，故單壓縮機運轉應用轉速調節即可達部分負載能力而無需容調機構輔助，應用壓縮機台數控制不僅使雙壓系統冰水機運轉範圍更加寬廣、能源效率也更高[4]。

探討冰水機組於製冷能力 $\geq 528 < 1055$ kW 能源效率分級基準台數分布，水冷容積式 1 級 74 台(27.6%)、2 級 104 台(38.8%)、3 級 90 台(33.6%)，主要分布於 2 級 COP 為 5.3。水冷離心式 1 級 21 台(19.4%)、2 級 63 台(58.4%)、3 級 24 台(22.2%)，主要分布於 2 級 COP 為 5.95。

表 4、冰水機組製冷能力 $\geq 528 < 1055$ kW 能源效率分級基準

冰水機組類型	1 級		2 級		3 級	
	COP	台數	COP	台數	COP	台數
水冷容積式	5.7	74	5.3	104	4.9	90
水冷離心式	6.4	21	5.95	63	5.55	24
氣冷式	3.2	0	3	0	2.79	0

冰水機組製冷能力在 $\geq 528 < 1055$ kW 此級距的水冷離心式冰水機組的 1 級

能源效率 COP 為 6.4，為達此 1 級能源效率 COP 6.4 的水冷式離心式冰水機的技術關鍵在於離心式壓縮機單體性能與冰水機系統設計。提升離心壓縮機單體性能效率主要包含壓縮段流力元件葉輪等熵壓縮效率、馬達電機效率與變頻器效率的提升，並應用磁浮軸承技術使之無油化降低摩擦損失、馬達直驅降低增速齒輪的驅動損失。

近年來工研院研發 1054kW 級單段壓縮磁浮離心壓縮機 MBC-300 性能效率可達 1 級能源效率[6]，如圖 1 所示。同一台冰水機系統之三個不同全載額定能力分別為 300、280、250 RT，其 COP/IPLV 分別為 6.45/9.84、6.45/9.63 與 6.28/9.02，在額定能力 300 RT 時之全載與部分負載性能效率表現最佳。



圖 1、國產 1 級能源效率 300 RT 級磁浮離心式冰水機

國產 MBC 系列壓縮機採用可變寬度擴壓器為標配之容調機構，針對葉輪出口流道寬度進行容量調節，如圖 2 所示，可避免葉輪出口氣體在擴壓器過度減速而發生失速與喘震，除了可以配合壓縮機變頻轉速使運轉範圍更寬廣，實際應用於夏季工況降載幅度達 70%、於春秋工況降載幅度達 90%外；更可以改善傳統進氣導葉機構進行容量調節時易產生噪音、以及停機時強制卸載，避免氣流倒灌衝擊以降低對磁浮軸承的衝擊，使壓縮機安靜穩定的狀態下停機。對於使用者來說，以更為簡單便利的控制即可達到壓縮機容量調節的目的，並有效擴大壓縮機的穩定運轉範圍與降低運轉噪音之功效。

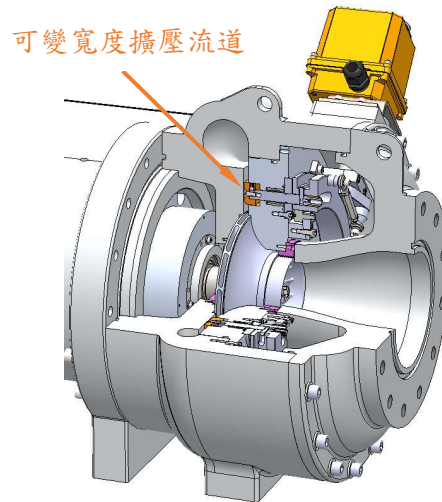


圖 2、可變寬度擴壓器機構示意圖

市售磁浮離心壓縮機之壓縮段可分為單段壓縮與雙段壓縮兩種型式，單段壓縮冷凍循環，從冷凝器飽和液體經由一組膨脹閥降壓至蒸發器形成飽和液氣混合物(乾度約 21.8%)，如圖 3 所示。市場主流所採用的雙段壓縮磁浮離心冷媒壓縮機，是由兩段葉輪來建立系統運轉所需的壓比，其在第一段流力元件葉輪之出口與第二段流力元件葉輪之入口處，注入節能器之飽和氣態冷媒與第一段流力元件葉輪出口之過熱氣態冷媒進行混合降溫，以提高第二段流力元件葉輪性能效率，使整體壓縮機耗功降低與性能效率提升。

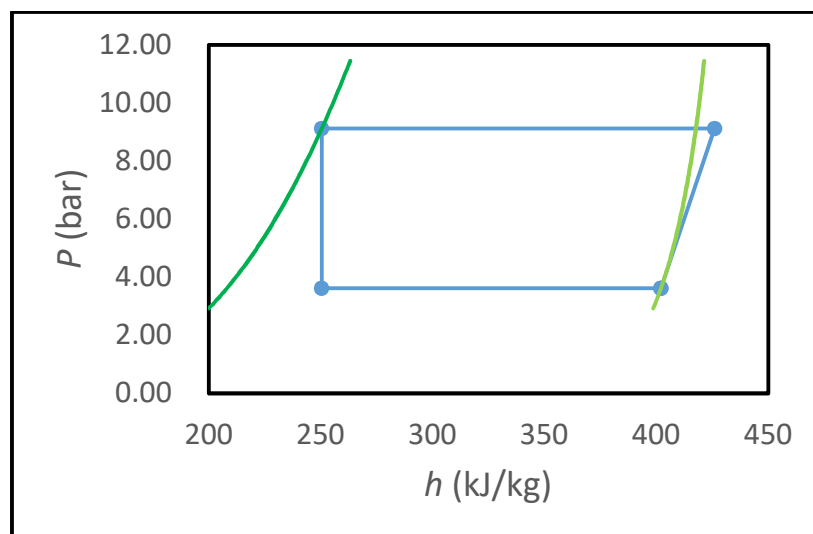


圖 3、單段壓縮冷凍循環之壓-焓圖

冰水機系統設計配合雙段壓縮冷凍循環之冰水機具備節能器與兩組膨脹閥迴路[5]，節能器的設計可分成閃蒸筒(flash tank)或過冷卻器(subcooler)兩種型式，如圖 3、圖 4 所示。目的皆是降低進入蒸發器的冷媒焓值，增加蒸發器進出口冷媒的焓差以提高製冷量。閃蒸筒型式為一種液氣分離裝置，從冷凝器飽和液體經由膨脹閥降壓至中間壓力形成飽和液氣混合物(乾度 11.9%)，在閃蒸筒液氣分離後之液態冷媒通往第二組膨脹閥迴路、氣態冷媒則通往壓縮機中壓入口。過冷卻器型式為產生主循環迴路冷媒之過冷度，從冷凝器飽和液體分成主循環(約 88.1%)與節能器循環迴路(約 11.9%)，從節能器迴路液態冷媒經膨脹閥(感溫式或電子式)降壓至中間壓力後降溫產生冷卻源，應用過冷卻器熱交換使主循環迴路產生具有較大過冷度後再經過主膨脹裝置降壓後進入蒸發器。節能器循環迴路則從飽和液氣混合物變成氣態冷媒，理想最佳狀態為飽和氣體，為了避免液壓縮則降低節能器迴路膨脹閥之流量控制(小於 11.9%)，使出口狀態為過熱冷媒氣體。

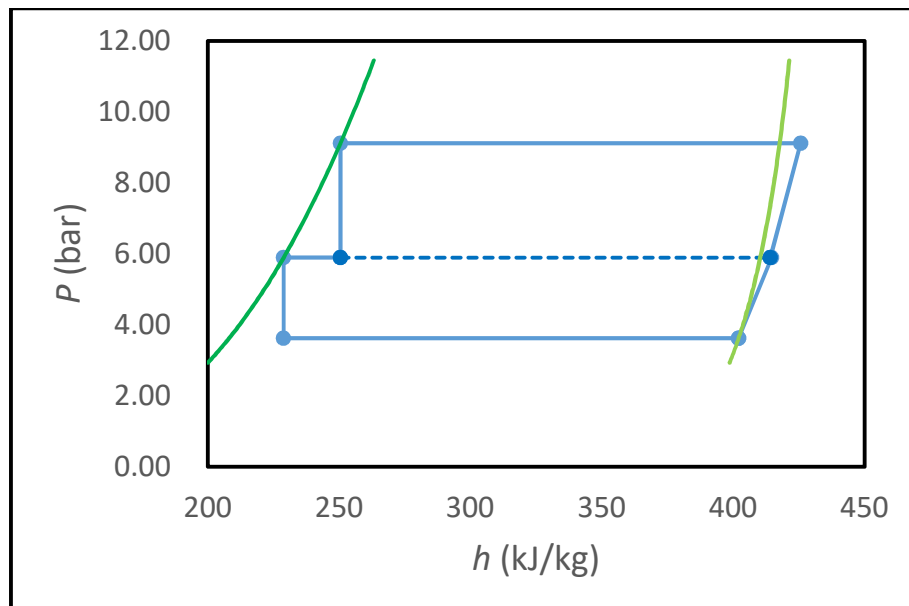


圖 4、雙段壓縮應用閃蒸筒(flash tank)型式冷凍循環之壓-焓圖

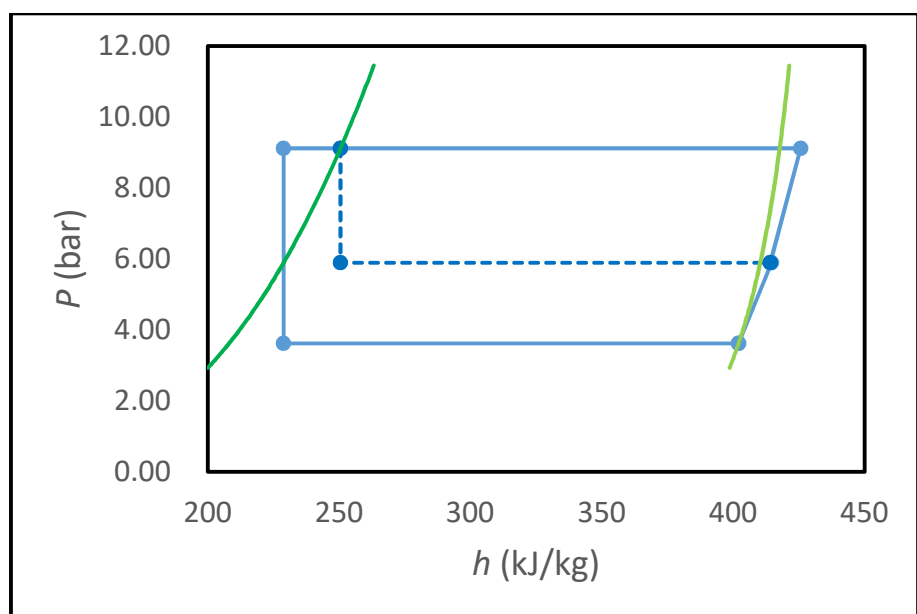


圖 5、雙段壓縮應用過冷卻器(subcooler)型式冷凍循環之壓-焓圖

理論上不論使用何種型式之節能器，其增加蒸發器製冷能力的效果均相同。然實務上過冷卻器因膨脹閥過熱度控制之限制，相較於閃蒸筒型式為飽和狀態，因注入壓縮機的氣態冷媒過熱度較高(密度較飽和狀態低)，無法提供如飽和狀態般的蒸氣密度進入二級壓縮葉輪，因此性能效率提升的效果並不如採用閃蒸筒型式來得顯著，然採用過冷卻器以及膨脹閥的成本相對較低、控制上也較簡單。

從冷凍循環理論分析雙段壓縮可提高蒸發器進出口冷媒的焓差 14.9%，相較於單段壓縮冷凍循環系統之理論性能效率可提升 6.6%。水冷離心式冰水機組製冷能力在 $\geq 528 < 1055 \text{ kW}$ 主要分布於 2 級 COP 為 5.95，此級距 1 級能源效率 COP 為 6.4，國產 1054kW 級單段壓縮磁浮離心壓縮機 MBC-300 能源效率可達 1 級冰水機產品，單段壓縮冷凍循環系統省去節能器、一組膨脹閥、節能器配管迴路，製造成本、控制與維護上更具備產品競爭力。國產單段壓縮磁浮離心壓縮機導入國內示範商轉已裝置 45 處(57 套)，包含醫院場域 12 處(14 套)、學校與公營機構 13 處(18 套)、研究單位 7 處(7 套)、私人機構/企業 13 處(18 套)，國內已成立國產磁浮離心機商業化產業聯盟。

二、磁浮離心式冰水機的能源效率與碳排放量

磁浮離心式冰水機能源效率對碳排放量的影響，乃參考AHRI 551/591-2020部分負載IPLV性能測試數據，估算冰水機年運轉耗電量(千瓦時)=IPLV100%製冷能力/COP×運轉時數+ IPLV75%製冷能力/COP×運轉時數+ IPLV50%製冷能力/COP×運轉時數+ IPLV25%製冷能力/COP×運轉時數，年平均性能效率COP=年製冷能力總量(千瓦時)/年運轉耗電總量(千瓦時)。

根據台電歷年發購電量各能源別占比，在110年總發電量2488.1億度(千瓦時)，電力結構占比：燃氣發電為42.5%、燃煤發電為35.5%、核能發電為10.8%、再生能源發電為6.3%、氣電共生發電為2.1%、燃油發電為1.6%、抽蓄水力發電為1.3%，110年電力排碳轉換係數0.509公斤CO₂e/千瓦時。

以額定製冷能力1,054.8kW(300USRT)磁浮離心式冰水機為計算案例，IPLV部分負載性能效率COP分別為6.38、8.51、11.35、9.10，IPLV加權平均計算結果為9.84。假設全年連續運轉時數為8,760小時，依比例分配於各負載運轉時數，如圖7所示。可計算IPLV負載製冷能力與耗電量(千瓦時)與對應占比，如圖8、圖9所示。冰水機年製冷能力總量為6,186,141(千瓦時)、年運轉耗電量713,206(千瓦時)所計算年平均COP為8.674，相較於IPLV= 9.84差異於運轉時數的分配，本計算案例提高夏季100%冷卻水入水溫30°C的運轉時數占比12%、秋季75%冷卻水入水溫24°C的運轉時數占比45%。計算冰水機每年碳排放量為年運轉耗電量×電力排碳轉換係數= 363,022 公斤 CO₂e、等於363.02公噸CO₂e。在部分負載IPLV100%運轉時數1,051小時遠小於IPLV50%運轉時數3,679小時，IPLV100%製冷能力總量1,107,966(千瓦時)小於部分負載IPLV50%製冷能力總量1,938,940(千瓦時)，透過COP分別為6.38、11.35，計算耗電量分別為173,662、170,832(千瓦時)，透過電力排碳轉換係數計算碳排放量88,394、86,953公斤CO₂e。

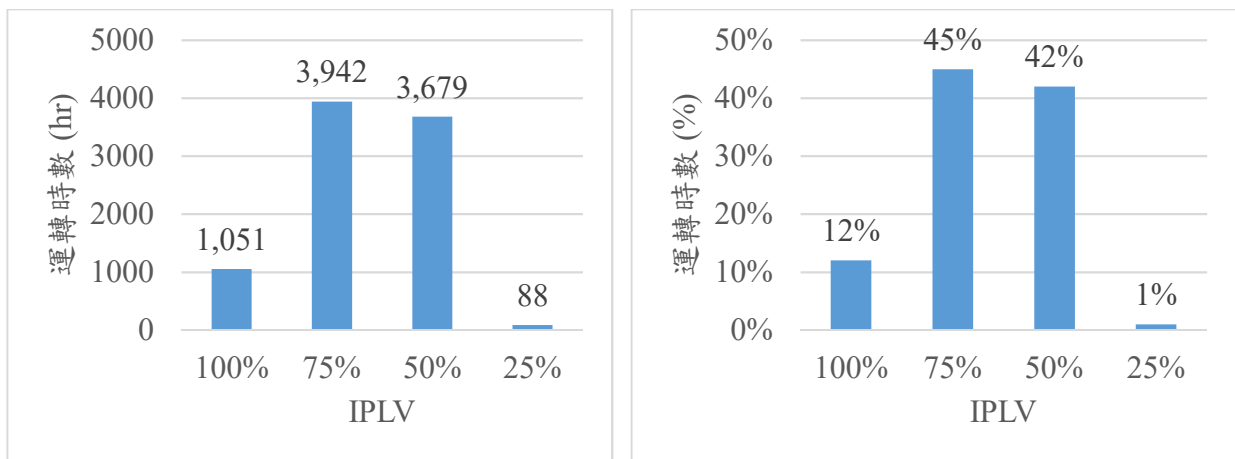


圖7、300USRT冰水機IPLV負載運轉時數與百分比模擬案例計算

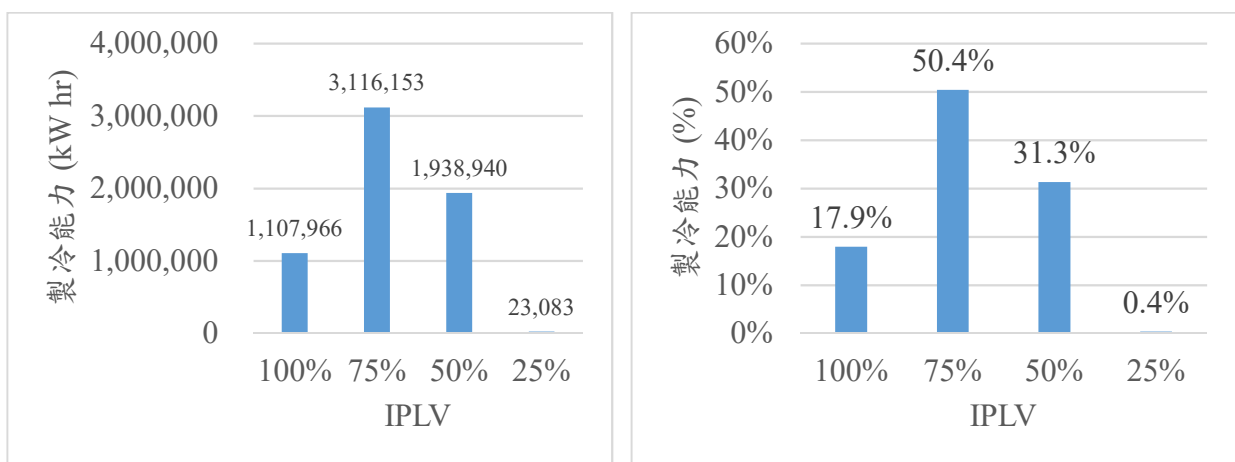


圖8、300USRT冰水機IPLV負載製冷能力kW hr與百分比模擬案例計算

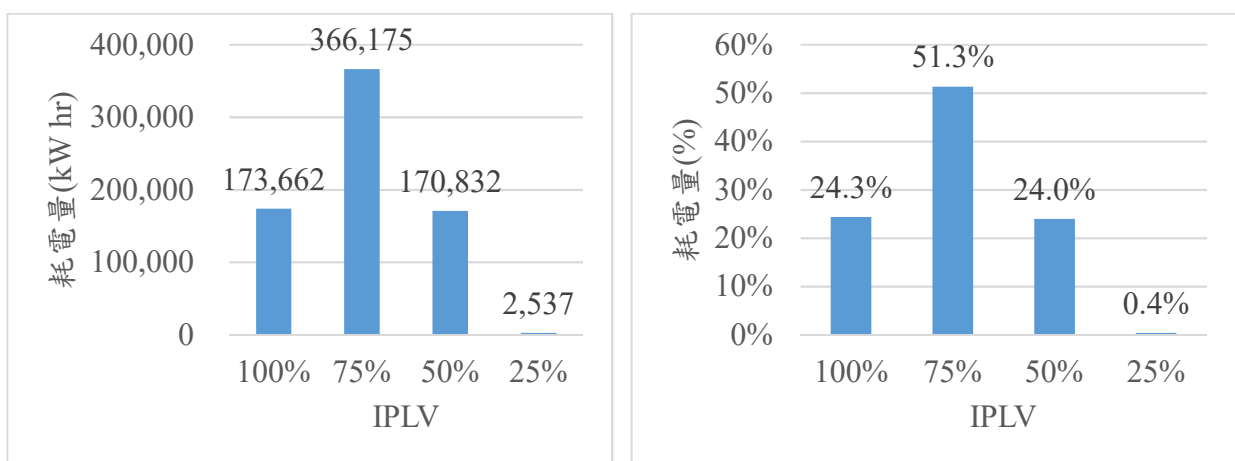


圖9、300USRT冰水機IPLV負載耗電量kW hr與百分比模擬案例計算

假設另一台離心式冰水機選用3級能源效率COP為5.55，IPLV部分負載效率降低分別為5.55、7.40、9.87、7.92，IPLV加權平均計算結果為8.56。在相同製冷能力需求與運轉時數計算年運轉耗電量819,866（千瓦時）每年額外增加106,660(千瓦時)耗電量，所計算年平均性能係數COP為7.545降低13%，冰水機每年碳排放量為4173,312公斤CO₂e每年額外增加54,290公斤CO₂e，相較於IPLV9.84增加15%碳排放量。在全載條件3級能效碳排放量101,613公斤CO₂e，相較於1級能效增加13,219公斤CO₂e增加15%，採用1級能源效率與高部分負載IPLV冰水機產品，以達節能減碳之效益。

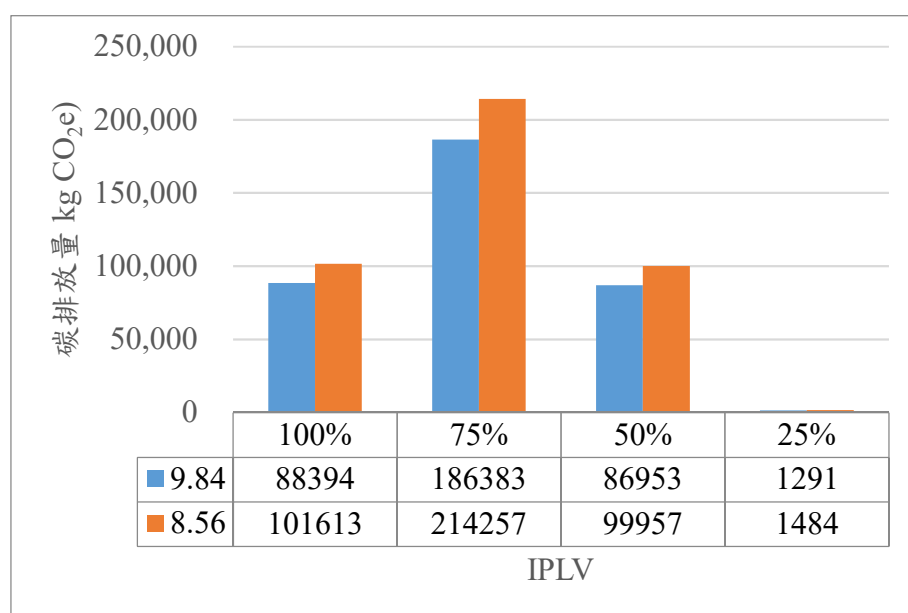


圖10、300USRT冰水機IPLV負載碳排放量模擬案例計算

三、未來低GWP冷媒離心式冰水機之發展趨勢

在全球溫室氣體減量與低碳排放量的訴求下，冷凍空調市場所採用的冷媒與其他各種溫室氣體一樣，使用全球暖化潛勢（Global Warming Potential，簡稱GWP）來衡量其對全球氣候變化的貢獻程度為指標，所謂GWP值是相對於二氧化碳（CO₂）在一定時間內的貢獻程度。冷媒碳排放量 = 冷媒使用量（公斤）x GWP值，以現行離心式冰水機大量採用的R134a冷媒為例，其GWP高達

1,300，每台採用滿液式蒸發器的冰水機冷媒填充量約1.2~1.5 kg/USRT，1USRT=3.516 kW，以1054kW(300USRT)水冷磁浮離心式冰水機冷媒填充量約360~450kg。每台在其壽命週期的冷媒未回收，以及維修與運轉的洩漏等情況下，其冷媒碳排放量相當於468,000~585,000 公斤二氧化碳(CO₂)等於468~585公噸二氧化碳。假設冰水機壽命週期20年，每年碳排放量 = 冷媒碳排放量 / 冰水機壽命，每年碳排放量23.4~29.25公噸二氧化碳。

基於現行R134a冷媒之GWP值高達1300，國際上許多國家已公告禁用R134a冷媒時間，國外標竿產品已推出中長期替代R134a冷媒的低溫室效應冷媒R513A(GWP 573)與R1234ze(E)(GWP 1)的磁浮離心式壓縮機/冰水機產品，R513A為混合冷媒(R134a冷媒占比44%+R1234yf冷媒占比56%)冷媒性質與R134a相近，R134a冷媒磁浮離心式壓縮機置換R513A冷媒性能效率COP降低約2~6%；R1234ze(E)冷媒安全性評比為AL2(微可燃)，國際壓縮機品牌Danfoss Turbocor推出全系列TGS機種，製冷能力範圍140~526kW，國內因低GWP冷媒售價昂貴尚未普及使用。

近年來國際冰水機品牌陸續推出R1233zd(E)無油離心式冰水機GWP為1，安全性評比為A1，包含Carrier、York、Daikin、Trane、Mitsubishi，國際壓縮機品牌Danfoss Turbocor也發表了近期推出R1233zd(E)冷媒機種VTCA400。其中Carrier、Daikin、Trane採用葉輪背對背於兩側排列之雙段壓縮，製冷能力範圍650~2800 kW。R1233zd(E)冷媒系統蒸發器操作於負壓，長時間空氣將逐漸滲入系統，因此需要具備不凝結氣體排除裝置避免冷凝溫度提高造成的製冷能力與效率降低，以維持冰水機的性能效率。從雙段壓縮冷凍循環理論效率最高，相同條件下高於R134a冷媒性能效率3.56%，預期水冷離心式製冷能力>1055kW之1級能源效率COP為7.1將採用R1233zd(E)冷媒。未來水冷離心式冰水機對於淨零碳排發展趨勢，採用低溫室效應冷媒(GWP 1)R1234ze(E)、R1233zd(E)，性能效率達1級能源效率及高部分負載效率IPLV可大幅降低碳排放量。

四、參考文獻

- [1] 蒸氣壓縮式冰水機組容許耗用能源基準 CNS12575 與能源效率分級標示事項方法及檢查方式。
- [3] AHRI Standard ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI), Performance Rating of Water-chilling and Heat Pump Water-heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2020.
- [3] 中華明國蒸氣壓縮式冰水機組-能源效率分級標示管理系統網站。
- [4] 雙壓磁浮冰水機應用案例研究，冷凍空調與能源雜誌，林俊傑；鐘震麒；劉中哲；劉敏生；洪國書。
- [5] 雙段壓縮磁浮離心冰水機之節能器壓力影響性能研究，冷凍空調與能源雜誌，林俊傑；鐘震麒；劉中哲；蘇立康；洪國書。
- [6] 國產 1 級能源效率單壓 300 RT 級磁浮離心式冰水機之性能分析，冷凍空調與能源雜誌，林俊傑；鐘震麒；劉中哲；蘇立康；洪國書。