

低溫室效應冷媒無油離心式冰水機節能減碳效益之評析

一、冰水機冷媒直接總碳排放量評析

在全球溫室氣體減量與低碳排放量的訴求下，冰水機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。冷媒直接碳排放量 = GWP值×冷媒使用量（公斤），以冰水機冷媒直接總碳排放量=[GWP值×冷媒填充量（公斤）×（1-回收係數）+ GWP值×冷媒填充量（公斤）×年洩漏率（%/年）×運轉年限（年）]。

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) 自然溫度為368℃，根據EN378標準A2L與A1冷媒歸類於相同作業準則3，EN standards小於自然溫度100K，lower flammability limit (LFL) 100~300g/m³，目前國際壓縮機品牌Danfoss Turbocor推出全系列TGS機種，製冷能力範圍140~526 kW、國內由工研院研發兩型R1234ze(E)冷媒525kW級、1000kW級雙段磁浮離心壓縮機，525kW級製冷能力範圍352~703 kW、1000kW級製冷能力範圍703~1054 kW，因低GWP冷媒售價昂貴尚未普及使用，工研院推廣R1234ze(E)冷媒磁浮離心冰水機示範運轉。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。

探討R134a(GWP1300)、R513A(GWP 573)、R1234ze(GWP 1)、R1233zd(GWP 1)冰水機冷媒總直接碳排放量，假設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500RT(1758kW)級水冷離心式冰水機為例，冷媒填充量約600~750kg、回收係數為0、年洩漏率5%、運轉年限20年之冷媒直接總碳排放量，如表1所示。未來水冷離心式冰水機對於淨零碳排發展趨勢，建議採用低溫室效應冷媒(GWP 1)R1234ze(E)、R1233zd(E)以降低冰水機冷媒直接總碳排放量。

表 1、500RT 級水冷離心式冰水機冷媒直接總碳排放量

冷媒	R134a	R513A	R1234ze(E)	R1233zd(E)
GWP	1300	573	1	1
冷媒填充量(kg)	600~ 750	600~ 750	600~ 750	600~ 750
回收係數(0~1)	0	0	0	0
年洩漏率(%/年)	5%	5%	5%	5%
運轉年限(年)	20	20	20	20
冷媒直接總碳排放量 (kg CO ₂ e)	1,560,000~ 1,950,000	687,600~ 859,500	1,200~ 1,500	1,200~ 1,500

二、 冰水機能源效率與間接總碳排放量評析

冰水機由經濟部公告「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 ≥ 1055 kW這個級距為例，1級能源效率的COP為7.10，2級能源效率的COP為6.60，3級能源效率的COP為6.10。

其中標示為1級與2級能源效率之冰水機產品，實測所得之額定製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 2、冰水機組製冷能源效率分級基準表

冰水機組類型		標示額定製冷能力	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 LPM/RT $\pm 5\%$ ；冷卻水入水溫 $30\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 、冷卻水流量 12.5 LPM/RT $\pm 5\%$ 。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±0.3℃，冷卻水入/出水溫30/35±0.3℃，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±0.3℃，其中在IPLV 75 %工況之冷卻水入口水溫設定為24.5±0.3℃，IPLV 50 %與25 %工況冷卻水入口水溫設定19±0.3℃。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				

冰水機間接總碳排放量=[年運轉耗電量(kWh)×電力排碳係數(kgCO₂e/kWh)×運轉年限(年)]，簡易計算年運轉耗電量(kWh)=年平均製冷能力(kW)×年運轉時數×年平均負載率(%) /年平均性能效率COP。進一步較準確計算年運轉耗電量(kWh) [3]，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(kWh)=IPLV100%製冷能力/COP×運轉時數+ IPLV75%製冷能力

$\text{年製冷能力總量(kWh)} = \text{IPLV100\%製冷能力} \times \text{運轉時數} + \text{IPLV75\%製冷能力} \times \text{運轉時數} + \text{IPLV50\%製冷能力} \times \text{運轉時數} + \text{IPLV25\%製冷能力} \times \text{運轉時數}$ ，
 $\text{年平均性能效率COP} = \text{年製冷能力總量(kWh)} / \text{年運轉耗電總量(kWh)}$ ， $\text{年平均性能效率kW/USRT} = 3.516 / \text{年平均性能效率COP}$ ，同樣計算方法亦可細分成12個月分計算加總。

根據台電歷年發購電量各能源別占比，在111年總發電量2507.5億度，電力結構占比：燃氣發電為43.4%、燃煤發電為34.8%、核能發電為9.1%、再生能源發電為8.6%、氣電共生發電為1.4%、燃油發電為1.4%、抽蓄水力發電為1.2%，經濟部公告111年電力排碳轉換係數0.495公斤CO₂e/度。

圖1為交通部中央氣象局2022年每月氣象統計資料於臺北、台中、高雄的月平均溫度，冷卻水入水溫與環境溫度息息相關，線性分割成4組區間對應部分負載IPLV。負載100%冷卻水入水溫30°C 占比4個月(33%)、負載75%冷卻水入水溫24°C 占比5個月(42%)、負載50%、25%冷卻水入水溫19°C 占比分別17%(2個月)、8%(1 個月)，簡易計算年平均負載率(%)=100%×4/12+75%×5/12+50%×2/12+25%1/12=75%。

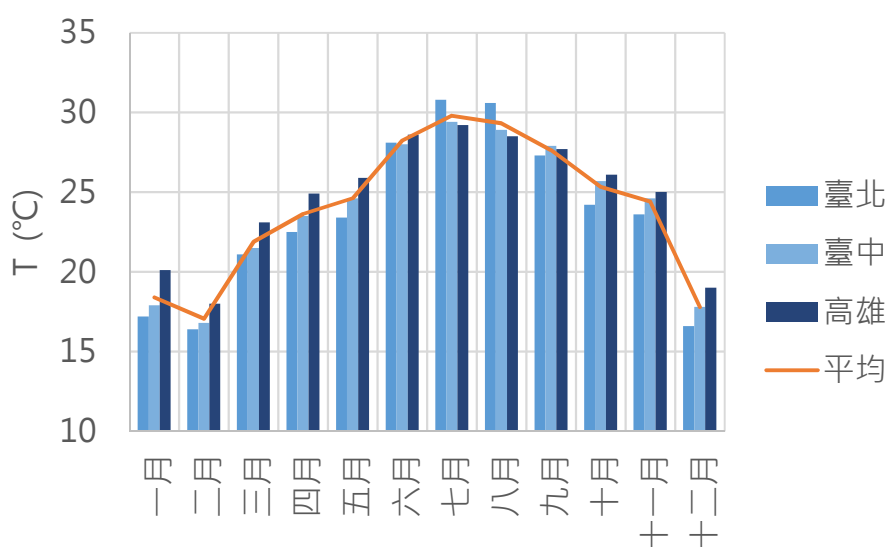


圖 1、2022 年氣象統計月平均溫度

探討額定製冷能力1758kW(500USRT)水冷離心式冰水機於1級(COP 7.10)、2級(COP 6.60)、3級(COP 6.10)能源效率對間接總碳排放量評估，簡易計算年運轉耗電量(kWh)與冰水機間接總碳排放量，假設年運轉時數8640小時、年平均負載率75%、年平均性能效率COP以能源效率分級標示值之計算結果，如表2所示。額定製冷能力1758kW(500USRT)水冷離心式冰水機之年運轉耗電量(kWh)，3級能效為1,867,515(kWh)；2級能效為1,726,036(kWh)、節電量-141,478(kWh)、節電率-8.2%；1級能效為1,604,485(kWh)、節電量-263,030(kWh)、節電率-16.4%，間接總碳排放量分別為18,488,396、17,087,760、15,884,397(kgCo2e)。

表3、500RT級水冷離心式冰水機之簡易計算年運轉耗電量(kWh)
與冰水機間接總碳排放量

能源效率分級	3 級(COP 6.10)	2 級 (COP6.60)	1 級 (COP7.10)
年平均製冷能力	1758	1758	1758
年運轉時數	8640	8640	8640
年平均負載率	75%	75%	75%
年平均性能效率 COP	6.10	6.60	7.10
kW/USRT	0.576	0.533	0.495
年運轉耗電量(kWh)	1,867,515	1,726,036	1,604,485
節電量(kWh)		-141,478(-8.2%)	-263,030(-16.4%)
運轉年限(年)	20	20	20
電力排碳係數 (kgCo2e/kWh)	0.495	0.495	0.495
間接總碳排放量(kgCo2e)	18,488,396	17,087,760	15,884,397

部分負載IPLV計算計算年運轉耗電量(kWh)與冰水機間接總碳排放量，參考ASHRAE Standard 90.1- 2019 標準於額定製冷能力1758kW(500USRT)水冷離心式冰水機之Path A(COP6.286、IPLV7.041)、Path B(COP6.018、IPLV9.264)，1級 (COP 7.10、IPLV10.42)、2級 (COP 6.60、IPLV9.75)、3級 (COP 6.10、IPLV9.03)於年運轉時數8640小時之年運轉耗電量(kWh)與冰水機間接總碳排放量，如表4所示。年運轉耗電量之3級能效為1,611,067(kWh)；2級能效為1,490,958(kWh)、節電量-120,109(kWh)、節電率-7.5%；1級能效為1,390,896(kWh)、節電量-

220,170(kWh)、節電率-13.7%，間接總碳排放量分別為15,949,562、14,760,480、13,769,875 (kgCo2e)。冰水機年製冷能力總量為11,391,840 (kWh)、年平均負載率75%，計算年平均性能效率COP與kW/USRT 之3級能效7.07、0.497kW/USRT、2級能效7.64、0.460kW/USRT、1級能效8.19、0.429kW/USRT。進一步探討部分負載IPLV個別計算年運轉耗電量(kWh)，如表5、圖2所示。部分負載IPLV節電量在IPLV100%、IPLV75%顯著差異，在IPLV100%採用2級能效節電量-62,879(kWh)、1級能效節電量-116,902(kWh)；在IPLV75%採用2級能效節電量-45,699(kWh)、1級能效節電量-82,084(kWh)，而IPLV50%、IPLV25%因製冷能力較小及運轉時數較短使節電量無顯著差異。冰水機年運轉耗電量之節能建議，鼓勵採用採用1級能源效率及部分負載IPLV 75%的COP值之冰水機產品，或依照長時間運轉條件選定高效率機種，以達節能減碳之效益。

表4、500RT級水冷離心式冰水機之部分負載IPLV計算年運轉耗電量(kWh)
與冰水機間接總碳排放量

製冷能力 kW	總運轉時數	3 級(COP 6.10)	2 級 (COP6.60)	1 級 (COP7.10)
1758	8640			
IPLV	運轉時數 hr	COP	COP	COP
100%	2880	6.10	6.60	7.10
75%	3600	7.60	8.20	8.75
50%	1440	10.50	11.30	12.05
25%	720	8.80	9.60	10.45
IPLV		9.03	9.75	10.42
年製冷能力總量 (kWh/year)		11,391,840	11,391,840	11,391,840
年平均負載率(%)		75%	75%	75%
年運轉耗電量 (kWh/year)		1,611,067	1,490,958	1,390,896
年平均性能效率 COP		7.07	7.64	8.19
kW/USRT		0.497	0.460	0.429
節電量(kWh)			-120,109(-7.5%)	-220,170(-13.7%)
運轉年限(年)		20	20	20
電力排碳係數 (kgCo2e/kWh)		0.495	0.495	0.495

間接總碳排放量(kgCo2e)	15,949,562	14,760,480	13,769,875
-----------------	------------	------------	------------

表5、500RT級水冷離心式冰水機之部分負載IPLV個別計算年運轉耗電量(kWh)

	3 級(COP 6.10)	2 級 (COP6.60)	1 級 (COP7.10)
IPLV	總耗電量 kWh/year	總耗電量 kWh/year	總耗電量 kWh/year
100%	830,007	767,127	713,104
75%	624,553	578,854	542,469
50%	120,549	112,014	105,042
25%	35,959	32,963	30,281
合計	1,611,067	1,490,958	1,390,896

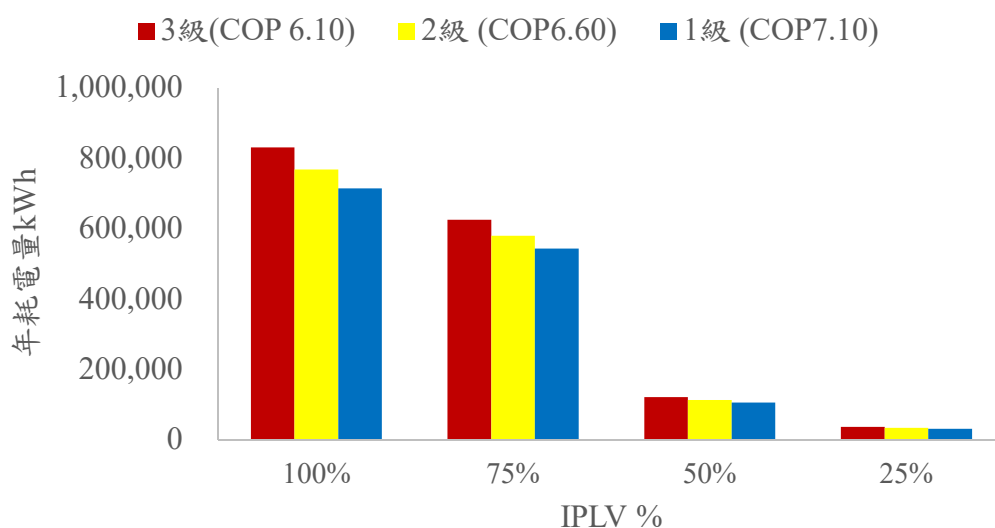


圖2、500RT級水冷離心式冰水機之部分負載IPLV個別計算年運轉耗電量(kWh)

圖

簡易計算年運轉耗電量與部分負載IPLV計算年運轉耗電量結果討論，兩者差異在年平均性能效率COP所帶入數值不同。將簡易計算年運轉耗電量帶入部分負載IPLV所計算的年平均性能效率COP可計算出相同的年運轉耗電量。因此，使用簡易計算方法在年平均性能效率COP是重要的參數，探討部分負載IPLV加權平均性能效率與年平均性能效率COP差異，以及IPLV權重係數，如表6所示。

使用1級能效 (COP 7.10、IPLV10.42)數據分析，權重系數分別以部分負載之 AHRI-551/591、年製冷能力、年運轉時數、年運轉耗電量之加權平均計算結果，分別為10.42、8.43、8.89、8.19，其中在年製冷能力權重系數之加權平均計算結果與年平均性能效率COP差異3%，在年耗電量權重系數之加權平均計算結果與年平均性能效率COP差異0%。冰水機汰舊換新前可紀錄製冷能力、運轉時數、耗電量數據，線性分割成4組區間對應部分負載IPLV，可作為未來選購高效率冰水機之部分負載用戶自訂IPLV權重係數預測年平均性能效率COP。

表6、500RT級水冷離心式冰水機之部分負載IPLV加權平均性能效率與年平均性能效率COP差異

	COP	AHRI-551/591 權重係數	年製冷能力 權重係數	年運轉時數 權重係數	年耗電量 權重係數
100%	7.10	0.01	0.444	0.333	0.513
75%	8.75	0.42	0.417	0.417	0.390
50%	12.05	0.45	0.111	0.167	0.076
25%	10.45	0.12	0.028	0.083	0.022
IPLV		10.42	8.43	8.89	8.19
deviation %		27%	3%	9%	0%
年平均性能效率 COP		8.19			

三、冰水機總碳排放量評析

冰水機總碳排放量為[冷媒直接總碳排放量+間接總碳排放量]合計為Total Equivalent Warming Impact (TEWI)。探討500RT級水冷離心式冰水機不同冷媒 R134a(GWP1300)、513A(GWP 573)、R1234ze(GWP 1)、R1233zd(GWP 1)與1級(COP 7.10)、2級(COP 6.60)、3級(COP 6.10)能源效率等級之總碳排放量TEWI，以及相對於R134a冷媒之3級能效水冷離心式冰水機之TEWI相對百分比，如表7、8、9所示。綜合冷媒與能源效率分級之冰水機總碳排放量可分成5個等級，5級(R134a &

3級能效)、4級(R134a & 2級能效、R513A & 3級能效)之TEWI相對百分比降低6~7%、3級(R134a & 1級能效、R513A & 2級能效、R1234ze/R1233zd & 3級能效) TEWI相對百分比降低11~13%、2級(R513A & 1級能效、R1234ze/R1233zd & 2級能效) TEWI相對百分比降低18%、1級(R1234ze/R1233zd & 1級能效)TEWI相對百分比降低23%。R134a與R513A冷媒之TEWI相對百分比降低6%、R134a與R1234ze冷媒之TEWI相對百分比降低11%；3級能源效率與2級能源效率之TEWI相對百分比降低7%、3級能源效率與1級能源效率之TEWI相對百分比降低12%。為了減少水冷離心式冰水機之總碳排放量TEWI，在冷媒直接總碳排放量建議採用低溫室效應冷媒(GWP1)R1234ze(E)、R1233zd(E)，在間接總碳排放量建議採用1級能源效率冰水機產品，為臺灣2050淨零排放節能關鍵戰略重要貢獻。

表7、500RT級水冷離心式冰水機不同冷媒與能源效率等級之總碳排放量TEWI
(kgCo2e)

	R134a (GWP1300)	R513A (GWP573)	R1234ze(E) R1233zd(E) (GWP1)
3 級(COP 6.10)	17, 899, 562	16, 809, 062	15, 951, 062
2 級 (COP6.60)	16, 710, 480	15, 619, 980	14, 761, 980
1 級 (COP7.10)	15, 719, 875	14, 629, 375	13, 771, 375

表8、500RT級水冷離心式冰水機不同冷媒與能源效率等級之總碳排放量TEWI相對百分比

	R134a (GWP1300)	R513A (GWP573)	R1234ze(E) R1233zd(E) (GWP1)
3 級(COP 6.10)	0%	-6%	-11%
2 級 (COP6.60)	-7%	-13%	-18%

1 級 (COP7.10)	-12%	-18%	-23%
---------------	------	------	------

表9、500RT級水冷離心式冰水機不同冷媒與能源效率等級之總碳排放量等級

總碳排放量 等級	R134a (GWP1300)	R513A (GWP573)	R1234ze(E) R1233zd(E) (GWP1)
5 級	3 級能效		
4 級	2 級能效	3 級能效	
3 級	1 級能效	2 級能效	3 級能效
2 級		1 級能效	2 級能效
1 級			1 級能效

六、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。
- [2] 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] 中壓冷媒注入對雙段磁浮離心壓縮機性能與碳排影響之研究，冷凍空調與能源雜誌，林俊傑；鐘震麒；劉中哲；蘇立康；洪國書。