

113淨零宣導與教育訓練

科技廠冷凍空調節能技術

國立高雄科技大學能源與冷凍空調工程系
梁俊德 助理教授

極端氣候



極端氣候頻繁
人類生存考驗日漸嚴峻。

資料搜尋方式的改變

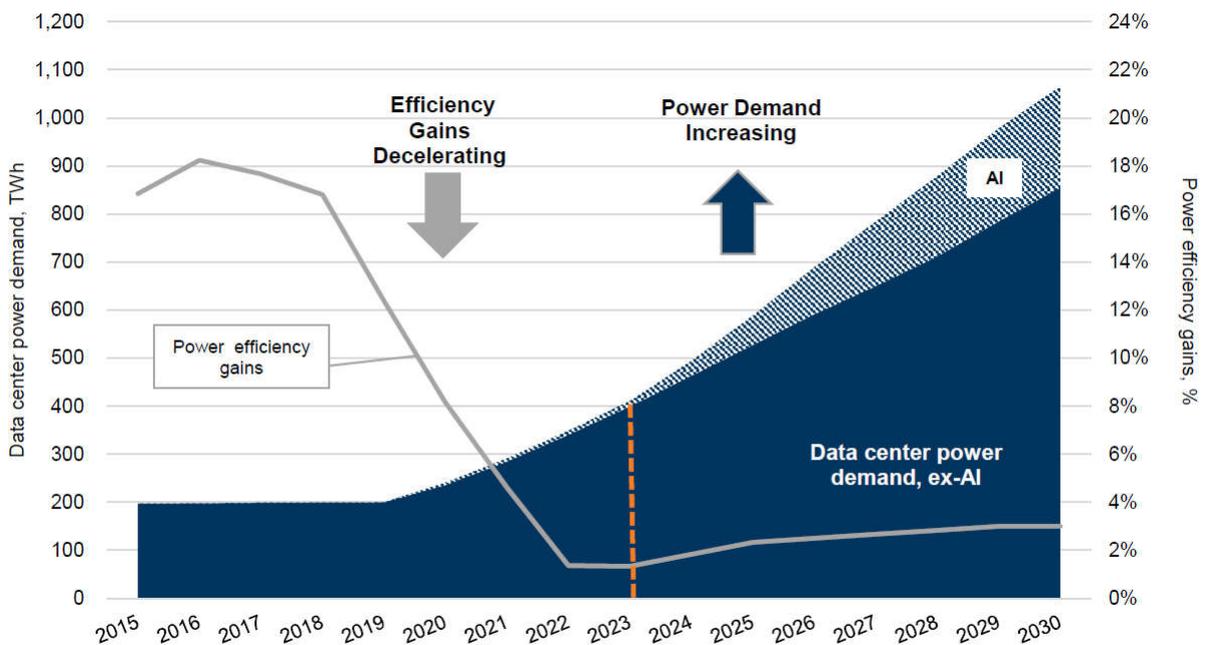


- 過往僅能透過Google等搜尋引擎找尋資料，目前AI可在20秒內自動生成簡報內容。
- Google搜尋僅需要0.3瓦的電力，處理一次ChatGPT查詢所需要的電力為2.9瓦，耗電量相差了近10倍。



Ref. : Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Global Investment Research

資料中心&AI熱潮



- 在 2015-19 年持平之後，預計 2030 年資料中心的電力需求將比 2020 至少年增加兩倍以上。
- AI的導入使得資料中心用電量又進一步提升。

晶片荒？
用電荒？



Ref. : Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Global Investment Research

2023科技業產業用電情況

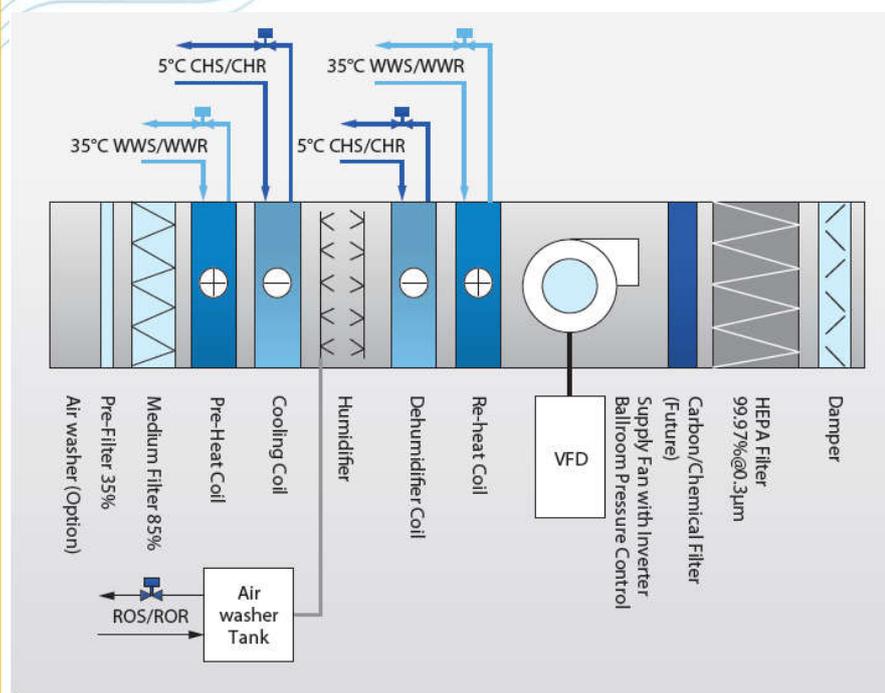
行業名稱	製程動力	空調	空壓機	冷凍冷藏	污水處理	電熱	照明	集塵設備	其他
電機電子業	46.8%	24.3%	10.9%	1.7%	2.9%	1.2%	2.6%	1.5%	8.1%
化工業	63.9%	3.7%	10.4%	3.6%	1.2%	2.9%	1.2%	0.7%	12.5%
金屬基本工業	58.7%	2.0%	4.5%	0.1%	2.4%	23.6%	1.1%	1.7%	5.8%
非金屬礦物 製品製造業	54.5%	11.9%	9.6%	0.4%	1.0%	13.8%	2.0%	1.8%	5.1%
紡織業	58.4%	7.6%	18.9%	4.1%	2.8%	2.2%	2.0%	1.1%	3.0%
造紙業	78.8%	2.8%	4.7%	0.2%	2.8%	4.4%	1.3%	0.9%	4.1%
其他行業	52.1%	9.4%	11.0%	5.7%	2.1%	12.5%	3.3%	1.5%	2.4%
工業部門平均	54.2%	13.8%	10.0%	2.2%	2.3%	6.1%	2.1%	1.3%	8.0%
能源部門	78.8%	3.3%	1.8%	0.0%	5.2%	0.1%	2.4%	0.0%	8.4%
全部平均	54.8%	13.6%	9.8%	2.2%	2.4%	6.0%	2.1%	1.3%	8.0%

- 對於電機電子業冷凍空調耗電量占比近26%，此說明從冷凍空調系統的性能改善，可改善我國電機電子業用電情形。



Ref.: 經濟部能源署·2023生產性質能源查核年報·2023.

半導體廠的全外氣空調系統



- 無塵室廠務用電佔半導體與面板高科技產業產業耗電量約50%，約215億度(為工業部門14%)。
- 台積電消耗的能源占台灣整體耗能6%左右，預期到了2025年將占12.5%。其中廠務空調即佔了27%。



空調系統耗能為高科技產業積極解決之問題。

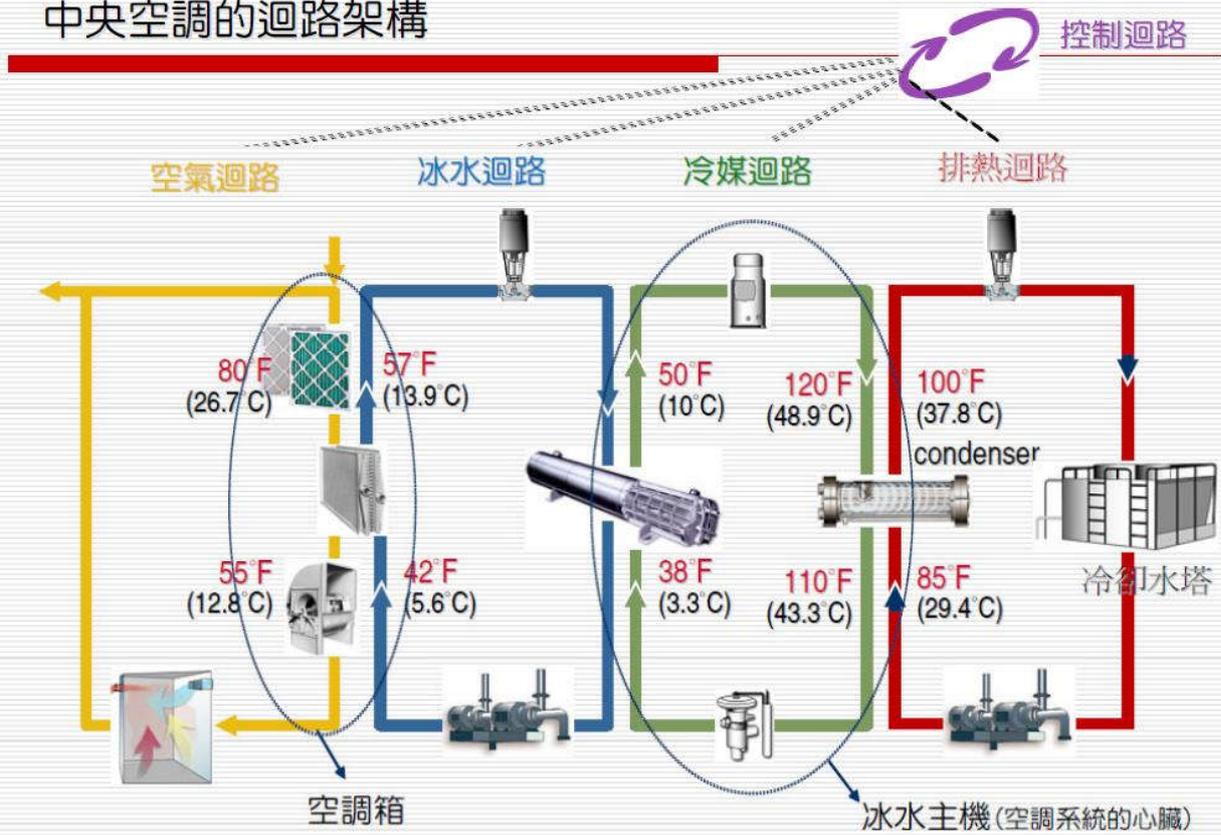
Ref.:

- [1] 陳廷宇·徐家紹·葉俊賢·智能空調箱之節能成效與應用·台灣積體電路股份有限公司·工業工程年會論文·2016。
- [2] 康育豪·無塵室節能技術簡介·工業技術研究院·2022。



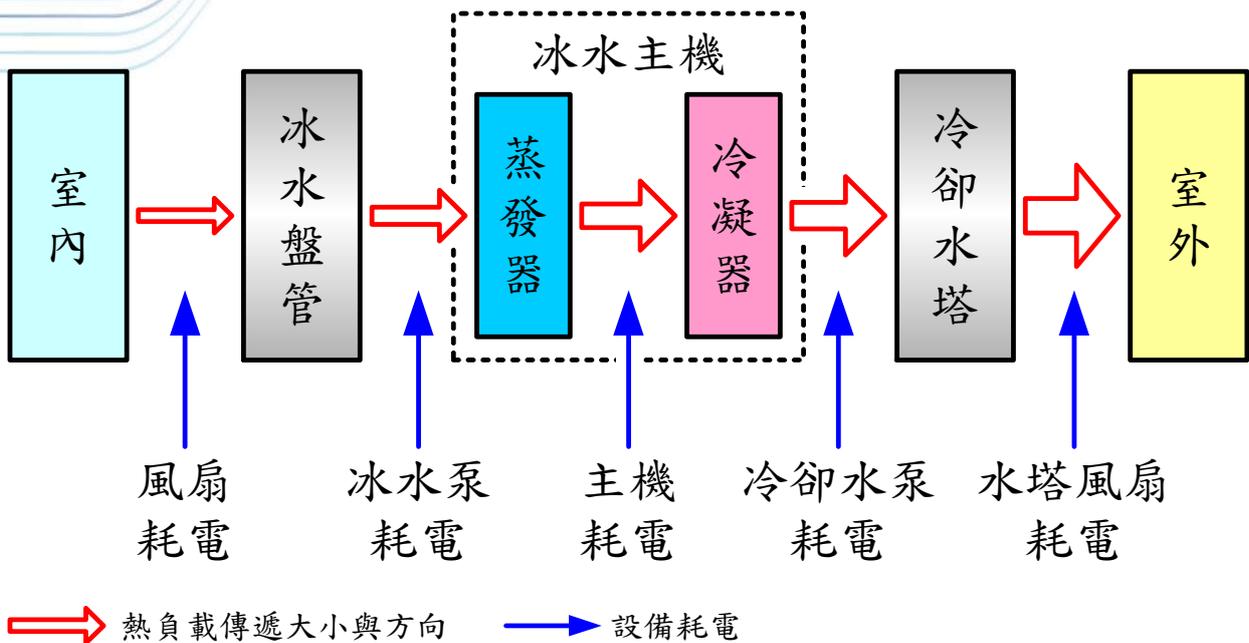
空調系統

中央空調的迴路架構



Ref. : 中華民國冷凍空調技師公會全國聯合會

空調系統



- 若能在系統的室內負載側進行節能工作(即上圖最左側), 則整個空調系統因水泵、風扇、冰水機及冷卻水塔的降載, 而產生更大節能效益。
- 室內負載側的節能方法包含冷能回收、出風口與供風口的位置、室內空氣分布、發熱源位置、降低外氣滲透量及建築保溫等方面。



選用高效率冰水機

112.6.1生效

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	0.683 kW/RT
		≥ 528kW < 1758kW	4.90	5.30	5.70	0.617 kW/RT
		≥ 1758kW	5.50	5.90	6.35	0.554 kW/RT
	離心式	< 528kW	5.00	5.40	5.80	0.606 kW/RT
		≥ 528kW < 1055kW	5.55	5.95	6.40	0.549 kW/RT
		≥ 1055kW	6.10	6.60	7.10	0.495 kW/RT
氣冷式		全機種	2.79	3.00	3.20	1.099 kW/RT

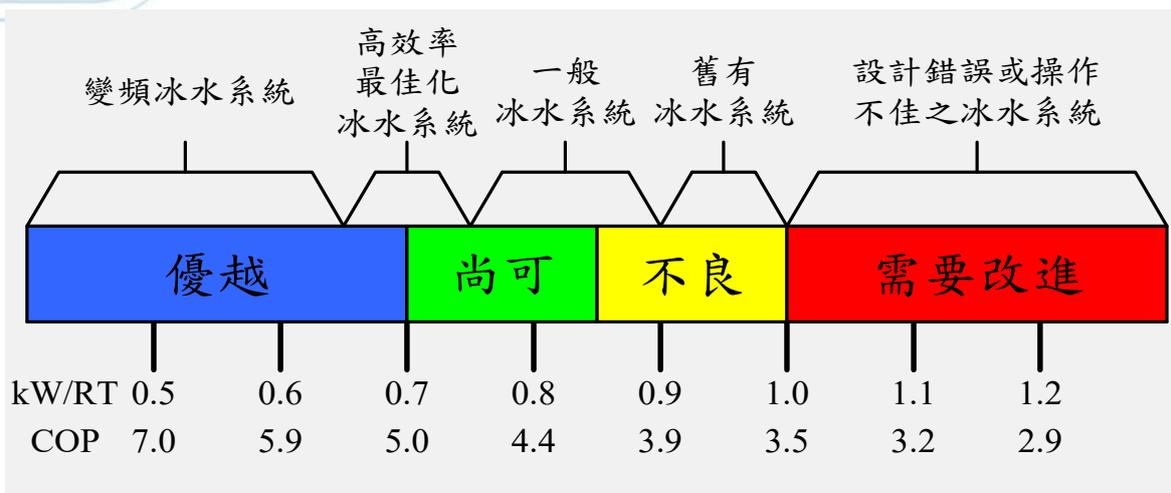
- 傳統空調系統常採用過大設計的方式，進行系統的設計與設備的選用，因而造成業主初設成本較高，且系統處於處於低效率狀態下運轉，必須付出較多的運轉成本。
- 冰水主機之運轉COP最大值，一般出現在部分負載率90%時。



Ref.: 經濟部能源署，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，112.2.18

冰水機房能源效率指標(kW/RT)

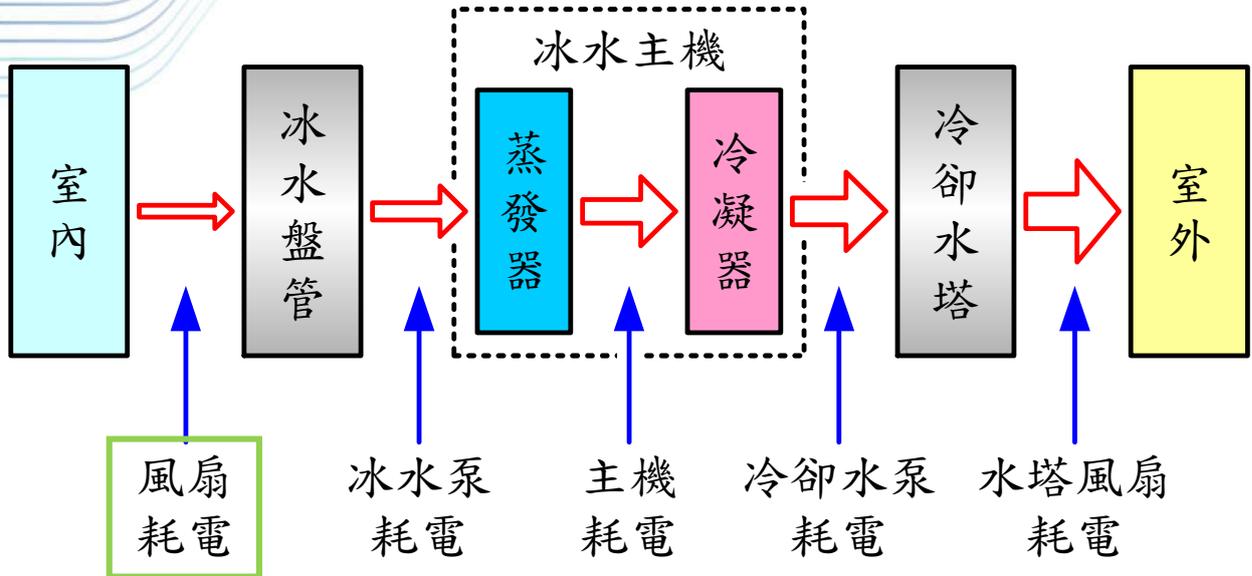
冰水機房效率指標



- 指標評估涵蓋冷卻水泵、冷卻水風扇及循環冰水泵。
- 離心式冰水主機在1970年代耗電率約為0.85 kW/RT，2010年代的冰水主機系統耗電率降到0.53 kW/RT左右，亦即30年來主機的耗電率降低達45%以上。
- 目前國內大約介於1.15~1.50kW/RT，若能改善至0.65~0.85kW/RT，至少可以有40~60%的改善潛力。



空氣側控制

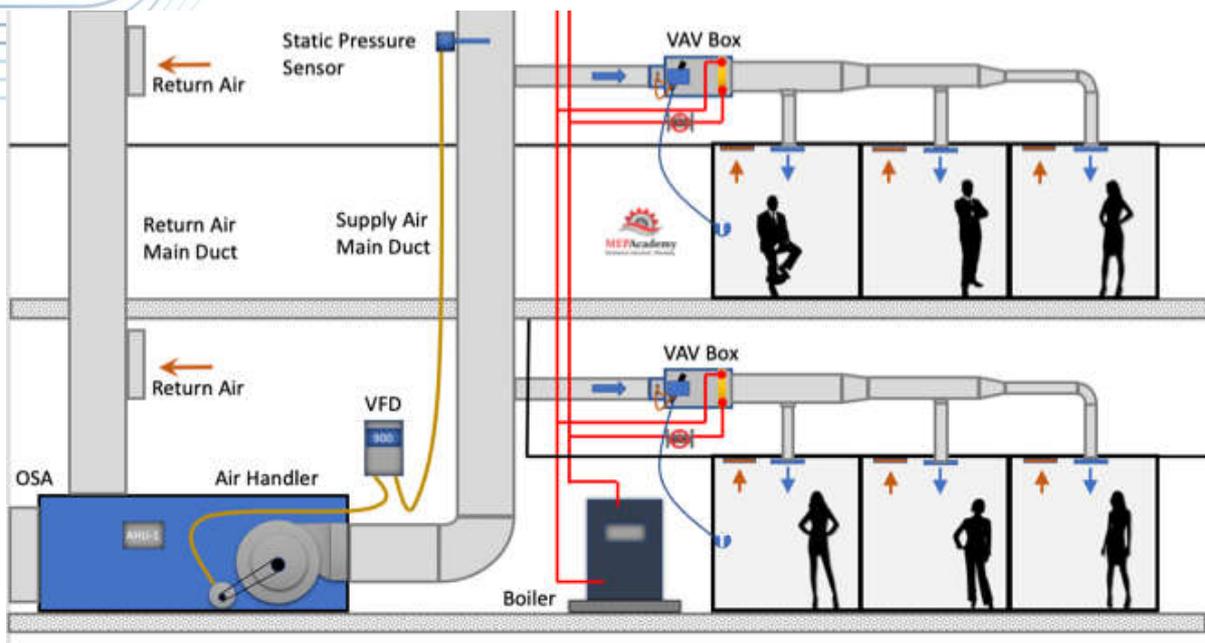


- **定風量系統:** 送風風量固定，藉由冰水(熱水)溫度的改變來達到負荷變化之要求。但有些系統為達到不同區域之溫度要求，以混合不同體積冷熱空氣之方式，因此較不具節約能源效益。
- **變風量系統:** 送風溫度固定、送風風量可變。藉由風量的改變來達到負荷變化之要求。

► 一般而言，空調之負載多在50%左右，降低風量可有效降低耗能。



變風量控制



- **風門控制:** 主要是利用調整風門開啟角度，改變風管阻力的方式達到風量的控制功能。雖可使風機的供風量降低，但風機必須提高全壓來驅動空氣流動，因此並無法使風機的耗能降低
- **風機變頻控制:** 是透過改變風機葉輪轉速的方式調整出風量。



變風量控制

- 室內負載增加，即當室內溫度提升時，變頻器即以增加風機轉速提高供風量；當室內溫度過低時，則以降低供風量。
- 根據風扇定律，當空氣密度不變時，

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{W_1}{W_2}, \quad \frac{SP_1}{SP_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^3$$

Q = 體積流率，m³/s

W = 轉速，r/s

SP = 通過風扇的靜壓上升，Pa

P = 風扇所需功率，W

風量	轉速	靜壓	功率
100%	100%	100%	100%
70%	70%	49%	34%
40%	40%	16%	6%



冷卻水側性能評估

- 冷卻水塔噸數以冰水主機噸數的1.25倍左右為宜。可採多台並聯組合型，配合溫度控制，開啟運轉台數。
- 冷卻水泵的揚程及流量須配合冰水主機之噸數，選用泵效率在70%以上，並應配合使用高效率馬達。



- 性能評估標準:

接近溫度 $T = (T_{in} - T_w)$ 3°C以下

冷卻水塔近似效率 = $\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_w} \times 100\%$ 50~70%

T_{in} = 入口水溫

T_{out} = 出口水溫

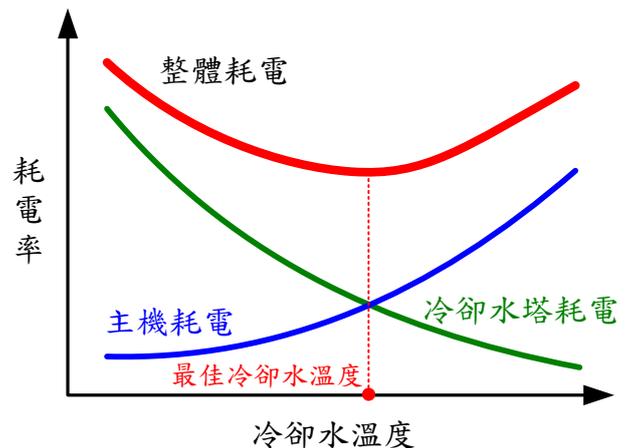
T_w = 大氣濕球溫度



冰水機與冷卻水塔最佳化運轉

- 冷卻水溫度每降低1°C，冰水主機耗電可減少1.5~2.0%。
- 降低冷卻水溫度可降低冰水主機耗電，但冷卻水塔風扇的耗電將會提高，**整體系統的運轉將具有最低耗電量的最佳的操作點。**
- 同樣地，冷卻水泵流量降低時，水泵耗電量下降，冰水主機的效率則因冷凝溫度提高而降低。**冷卻水泵與冰水主機間亦有一個最佳操作點存在。**
- 可透過最佳化方法，針對冷卻水塔風扇、冷卻水泵與冰水主機進行運轉操作策略探討。

主機形式 (採用水冷式冷凝器)	性能提升百分率 (% kW/°C 冷凝水溫)
往復式	2.0 ~ 2.5
渦卷式	2.5 ~ 2.7
螺旋式	2.9 ~ 3.2
離心式	1.8 ~ 2.9
變頻離心式	4.3 ~ 4.7
吸收式	2.5 ~ 2.7



Ref.: 陳輝俊博士·空調系統節能技術·103年度空調運用技術研討會·2014.

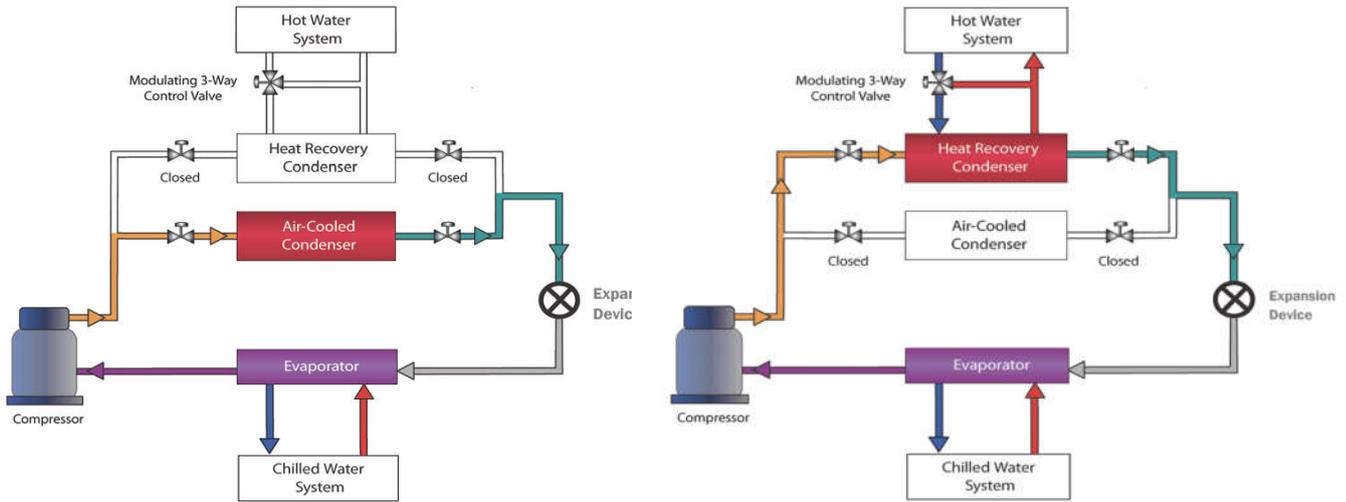
冷卻水塔節能方法

- 冷凝器通常為開放水路系統(除非使用密閉式水塔)，冷凝器積垢會造成熱傳能力下降，**通常水垢厚度每增加0.3mm，會使系統耗能量增加約10%。**
 - 冷卻水塔及冷凝器定期加藥清洗，減少系統結垢或是青苔成長。
 - 加裝固液分離器、磁化抑垢器
- 冷卻水塔安裝地點需空氣流暢，避免裝設於排煙、排氣等易影響水質之地點。
- **遠離如鍋爐、空壓機等熱源**，距離過近會使冷卻水塔與空壓機之系統性能降低。



冷卻水塔節能方法

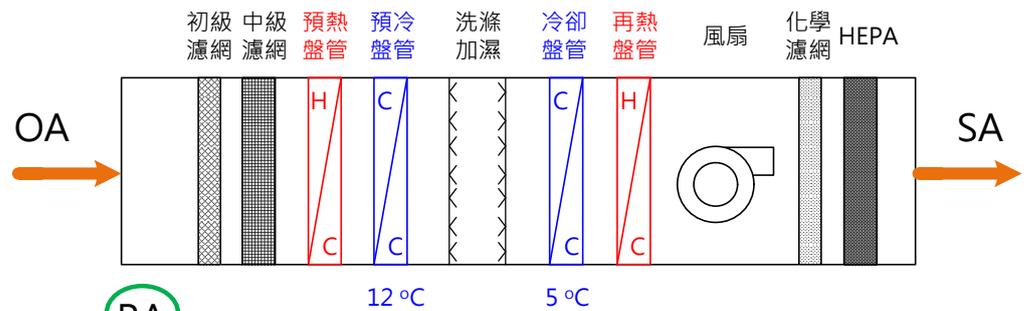
- 避免冷卻水泵過大設計，水泵操作效率在70%以上較佳。
- 冷卻水塔風扇、冷卻水泵導入變頻系統，建立冰水機與冷卻水塔最佳化運轉操作點，並將夜晚環境溫度差異列入評估。
- 空氣側冷凝水可回收至冷卻水塔，減少水資源浪費。
- 使用熱回收式冰水主機，即回收冰水主機之冷凝熱，可降低冷卻水塔所需容量與耗電量，並作為廠區其他熱源供應。



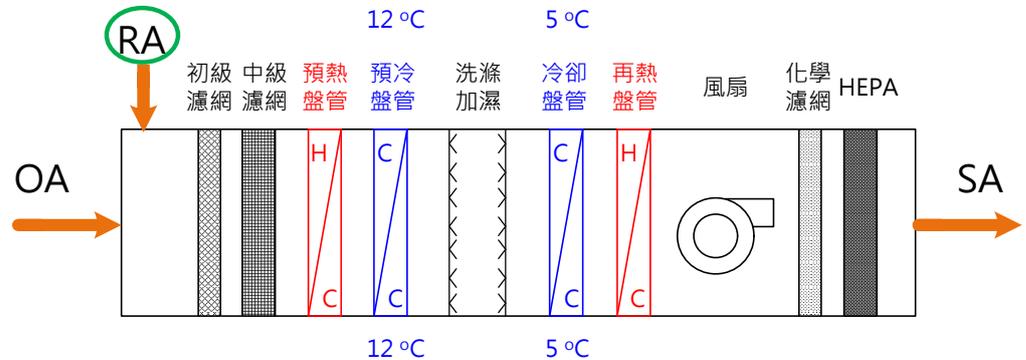
Ref. : Carrier · HEAT RECOVERY FROM AIR-COOLED CHILLERS · 2009.

電子廠空調箱

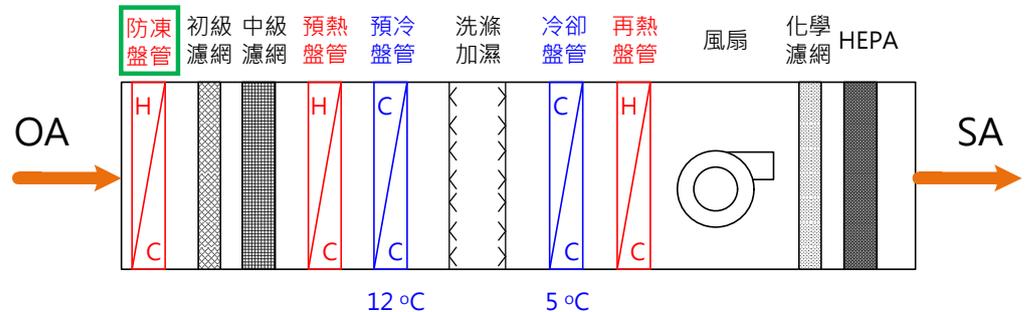
抽風式外氣空調箱



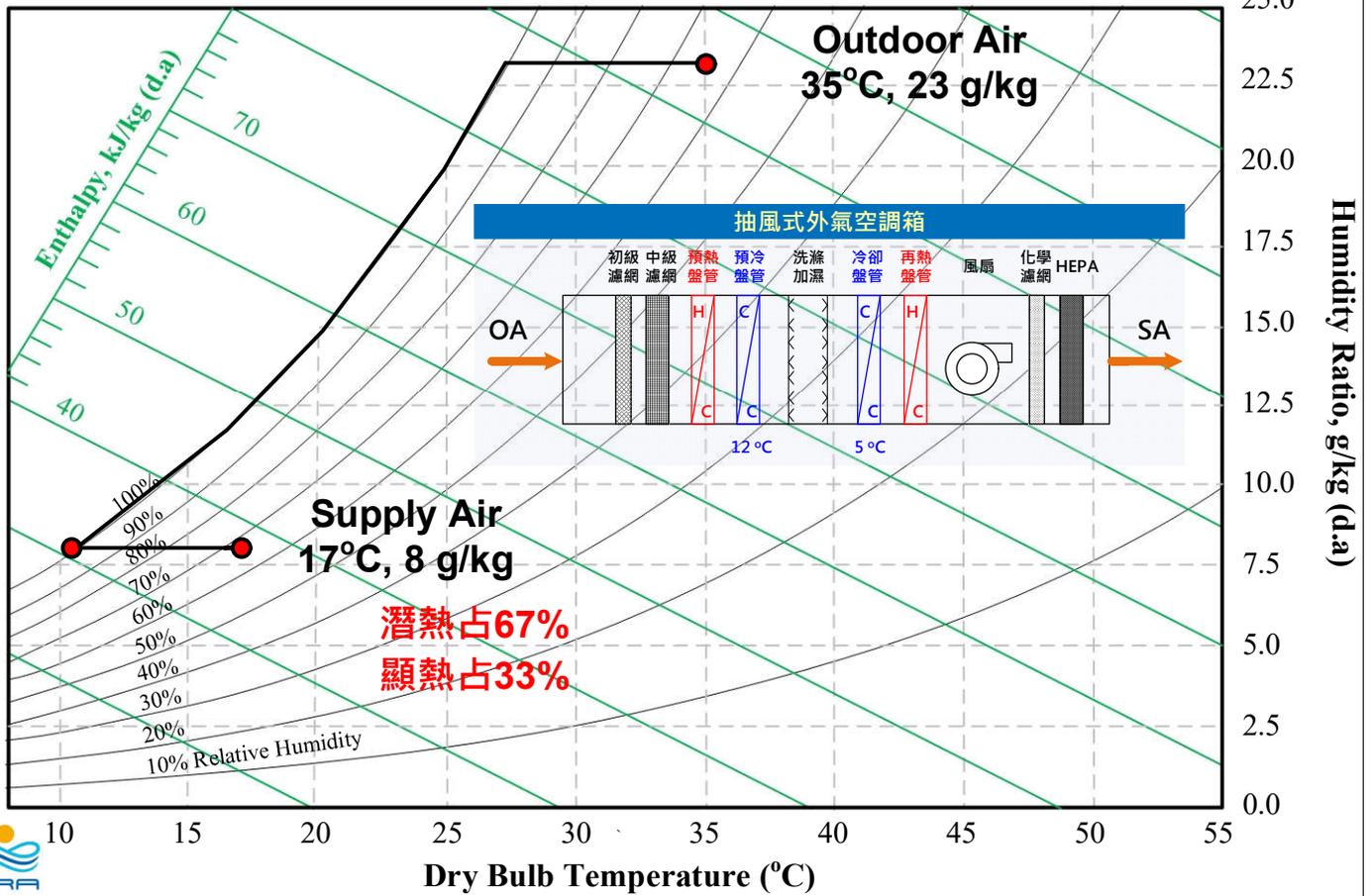
部分回風旁通之空調箱



具防凍盤管之空調箱



電子廠空調箱外氣處理方法

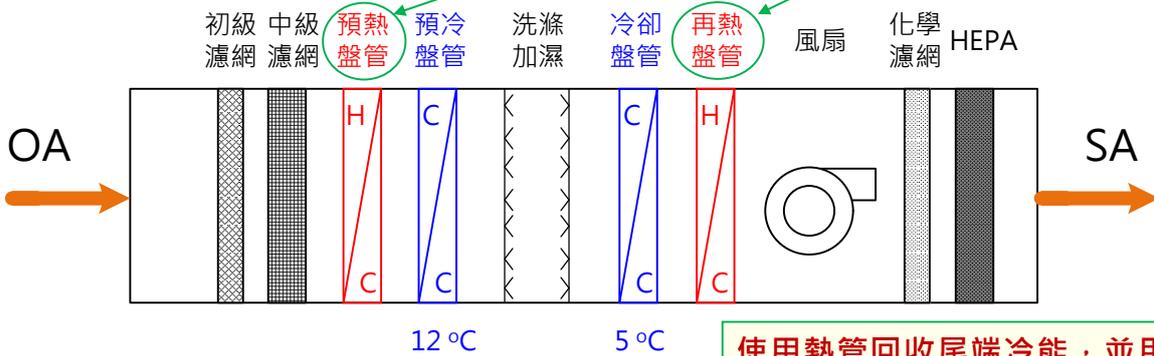


外氣空調箱節能方法

使用熱回收冰水機再熱

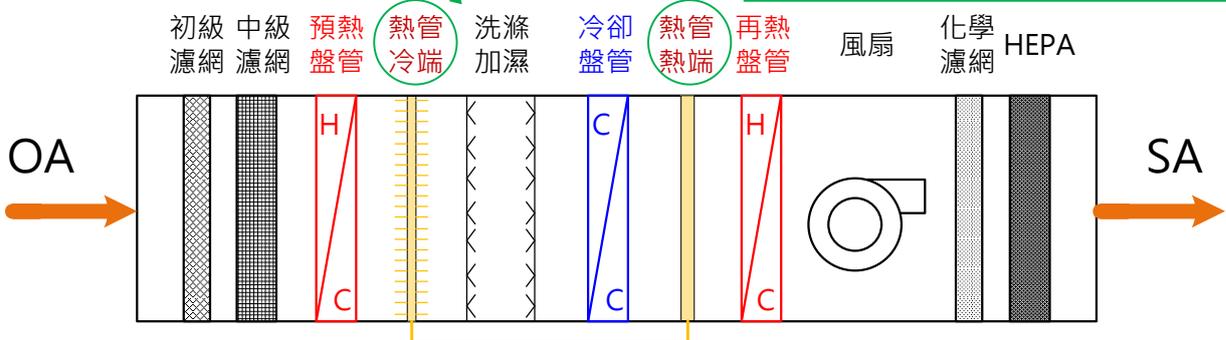
可使用製程廢熱

熱回收式冰水主機冷凝熱
可用於再熱空氣，減少額外製熱需求。



冷能回收裝置

使用熱管回收尾端冷能，並用於
前端預冷空氣，並可提供除濕後
之升溫需求。



冷能回收

Thermal Wheel Heat Recovery

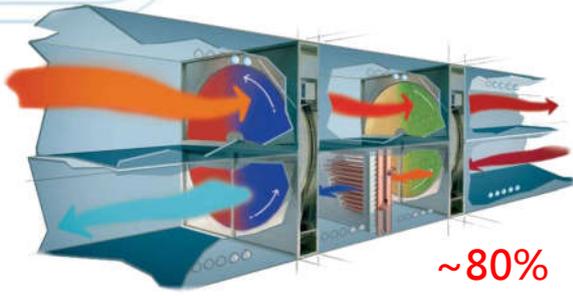
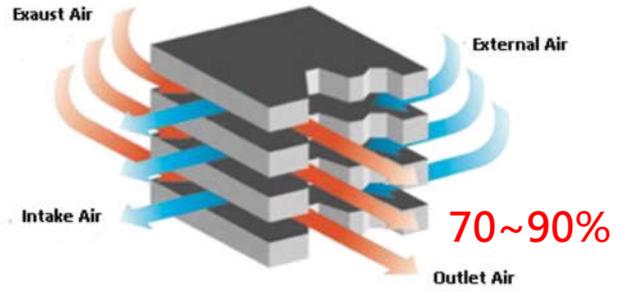
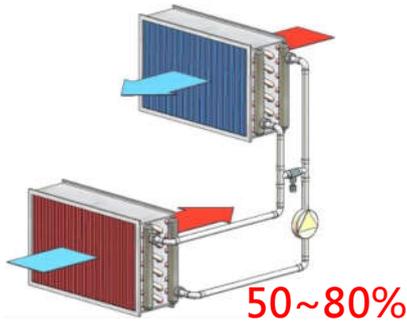


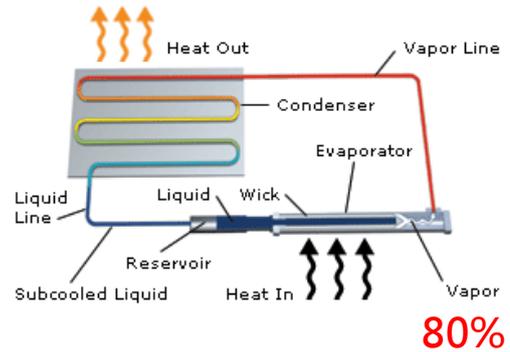
Plate Heat or Recuperator Technology



Run Around Coil or Closed Loop Technology



Heat Pipe Technology

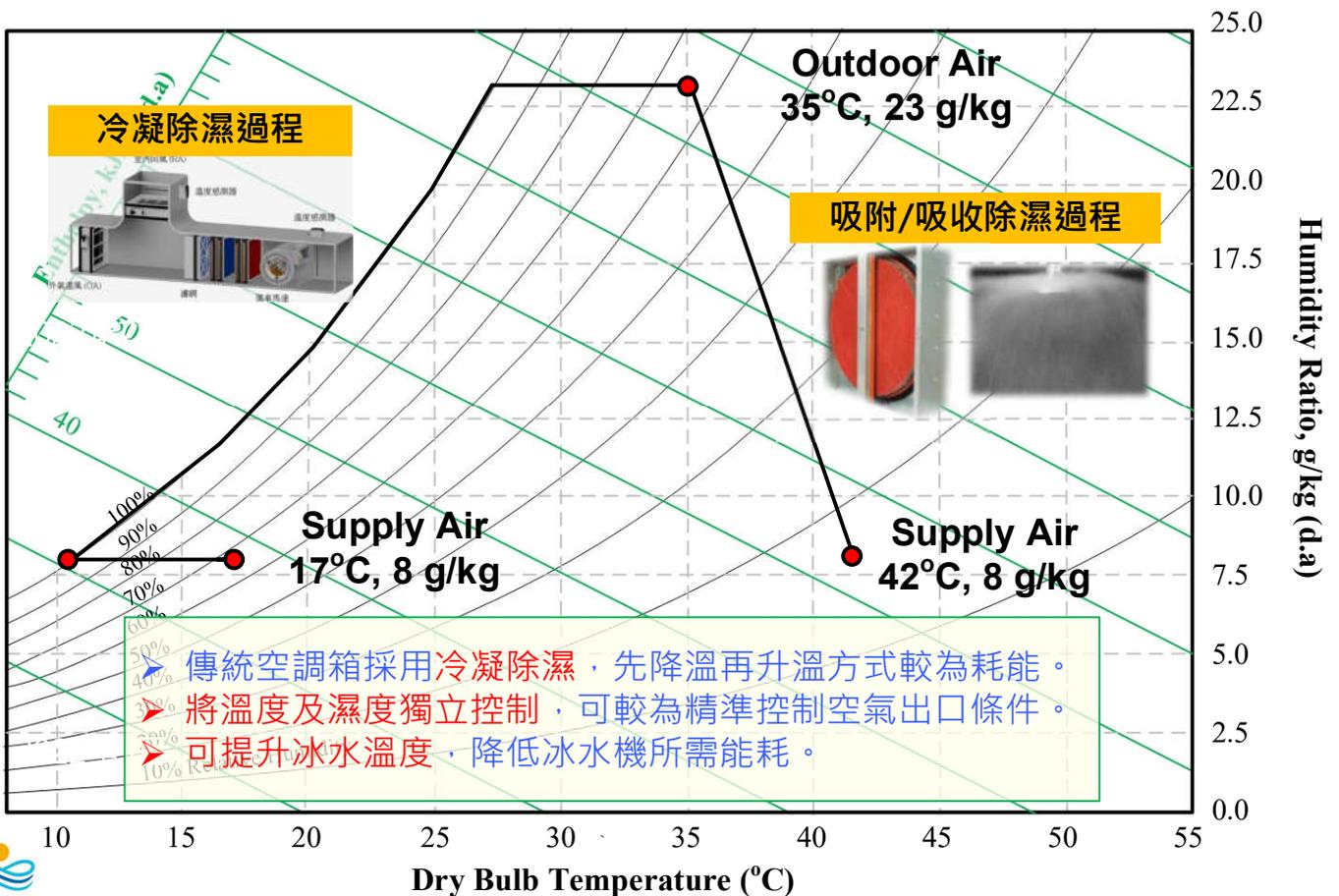


Ref. :

1. J. Richardson, R. Burdett-Gardiner, Types of Heat Recovery System Available in the UK, The Renewable Energy Hub, 2024.6.25.
2. O'Connor, D., Calautit, J.K. and Hughes, B.R. (2016) A Review of Heat Recovery Technology for Passive Ventilation Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, pp. 1481-1493.

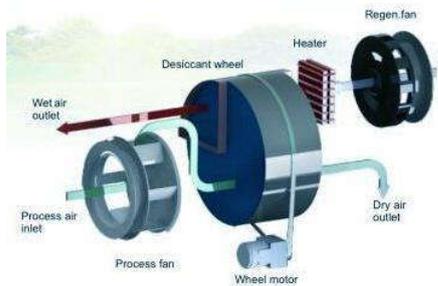


電子廠空調箱外氣處理方法



吸附/吸收除濕材料

- 常見的吸附除濕系統，如除濕轉輪。吸收除濕系統又稱為液態除濕系統。
- 吸附/吸收除濕材料包含除濕端與再生端兩部分。

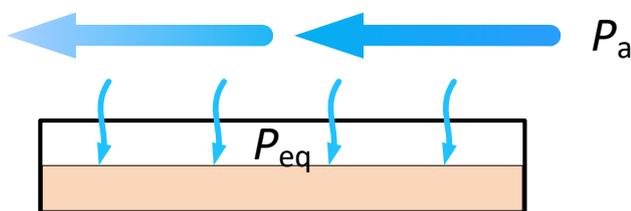


EAA

液態除濕吸收原理

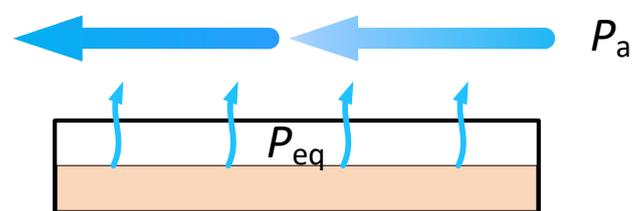
除濕過程

$$P_a > P_{eq}$$



再生過程

$$P_a < P_{eq}$$



- P_{eq} 表示除濕表面水氣分壓力， P_a 表示週遭環境空氣中的水氣分壓，液態除濕溶液利用 P_{eq} 與 P_a 的壓差來對空氣除濕過程及對溶液再生。
- 與固態除濕材料相比有較佳的除濕能力、低再生溫度、低壓降。
- 液態除濕溶液除濕端與再生端可分離，系統設計較為靈活。
- 液態除濕溶液具殺菌及吸收懸浮粒子之效益。

EAA

鹵化物鹽類-結晶現象



- 傳統鹵化物鹽類，如LiCl、CaCl₂，可能會有**結晶問題**。
- 結晶會造成系統停止運作、管路堵塞及水泵損壞。

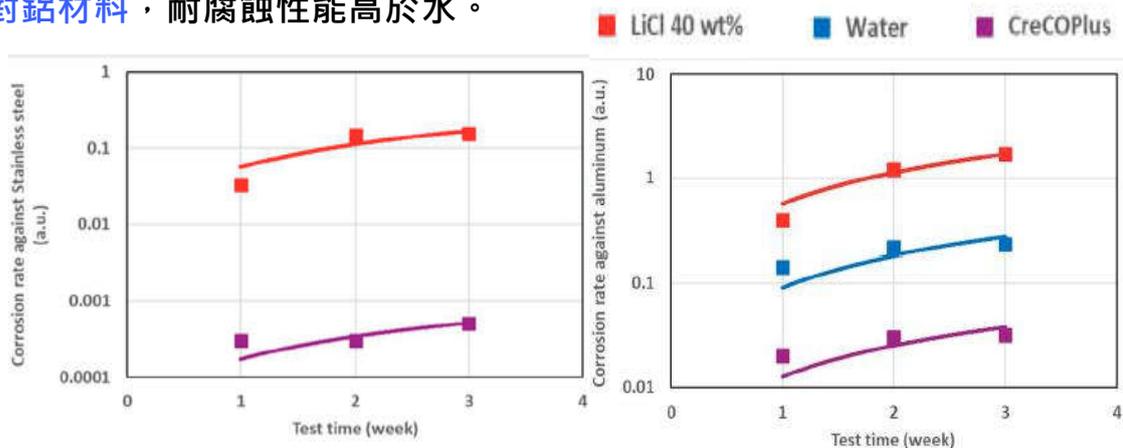


離子溶液

- 近年離子溶液被視為取代傳統鹵化物鹽類(LiCl, CaCl₂, LiBr)的液態除濕溶液。
- 離子溶液對金屬腐蝕性低，可殺菌及抑制病毒[1]。
- 可減少系統防腐蝕處理成本。
- 離子溶液**無結晶問題**。

金屬耐腐蝕性測試

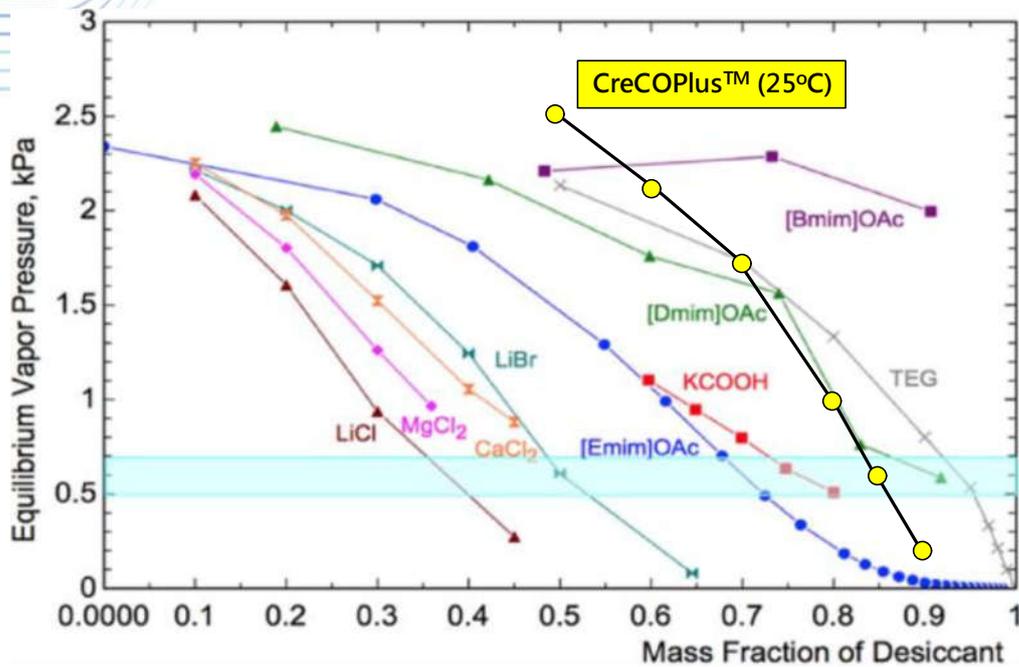
- 對不銹鋼材料，耐腐蝕性能高於氯化鋰2個數量級。
- 對鋁材料，耐腐蝕性能高於水。



Ref. Evonik, CreCOPlus™ 贏創的離子液體。



離子溶液與常見除濕溶液之比較



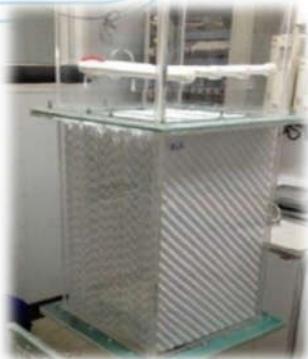
- 上圖各種液體除濕溶液在 20 °C 時的平衡蒸氣壓 [1]。
- 25°C且濃度80~85%離子溶液與20°C、30~35%LiCl溶液有相近平衡蒸氣壓。



Ref.: X. Liu, M. Qu, X. L. Wang, Membrane-based liquid desiccant air dehumidification: A comprehensive review on materials, components, systems and performances, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 110, pp. 444-466, 2019.

常見熱質傳交換裝置

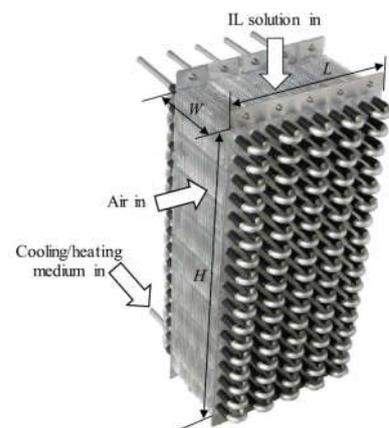
Packing Tower Type [1]



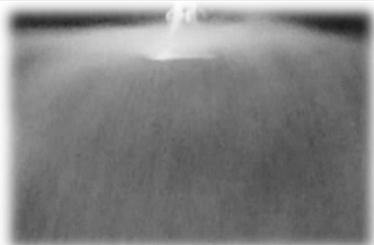
Membrane Type [2]



Internal Cooling [5]



Droplet Type [3]



Falling-film Type [4]



Ref. [1] L. Zhang, X. Liu, H. Wei, X. Zhang, *Energy and Building*, Vol. 158, pp. 150-161, 2018.

[2] H. Bai, J. Zhu, Z. Chen, L. Ma, R. Wang, T. Li, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 119, pp. 119-131, 2017.

[3] Z. Yang, B. Lin, K. Zhang, Z. Lian, *Energy and Building*, Vol. 93, pp. 126-136, 2015

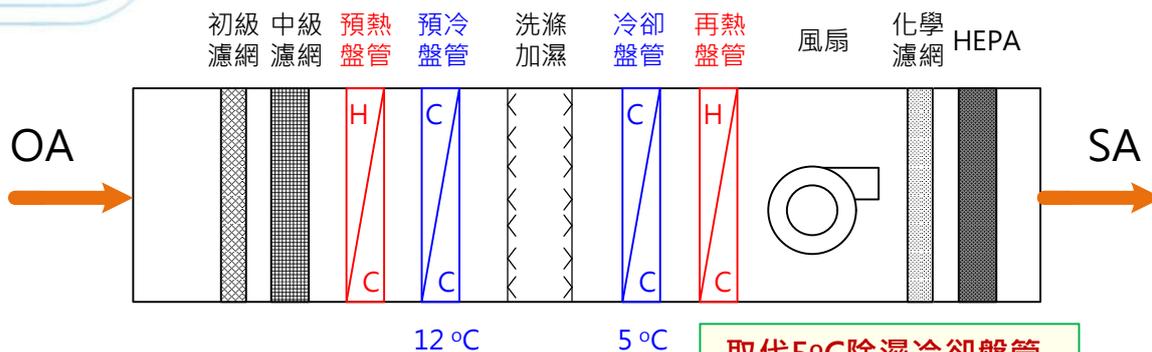
[4] J. Emhofer, B. Beladi, P. Dudzinski, T. Fleckl, H. C. Kuhlmann, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 91-102, 2017.

[5] R. J. Varela, N. Giannetti, K. Saito, X. Wang, H. Nakayama, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 210, p. 118343, 2022.

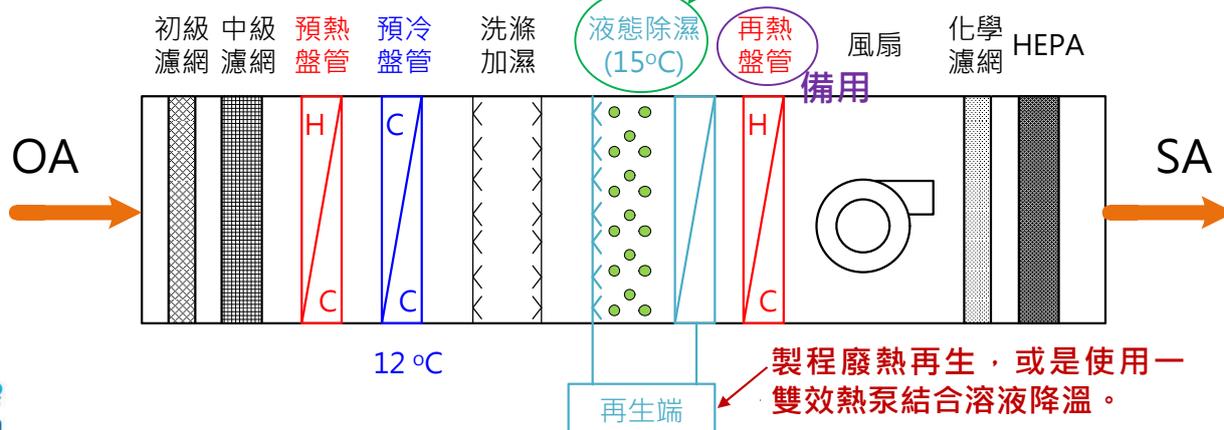


液態除濕應用於外氣空調箱

使用熱回收冰水機再熱



液態除濕應用於外氣空調箱



節能量評估(僅除濕再熱部分)

- 假設處理風量為3000CMH
- 經過預冷盤管及洗滌加濕後的出口狀態為18°C · 100%
- 空調箱出風狀態為17°C · 65%
- 5°C冰水機(COP=4)，冷凝除濕後再熱使用冰水機回收廢熱
- 假設液態除濕採用熱泵(COP=3)，同時提供冷源對溶液降溫及熱源再生溶液
- 112電力排碳係數 0.494 kgCO_{2e}/度，工業用電價格3.38NTD/度，碳費價格3000NTD/噸CO_{2e}

	使用熱回收冰水機再熱	液態除濕應用於外氣空調箱
5°C冰水機	$21.59/4 \times 3000/3600 \times 1.2 = 5.4\text{kW}$	-
再熱	0(假設由冰水機回收廢熱)	-
液態除濕	-	$13.95/3 \times 3000/3600 \times 1.2 = 4.6\text{kW}$
年耗電量(8400hr)	45,360 kWh	38,640 kWh
節能率	-	14.8%
電費	153,316	130,603
排碳量	22.4 噸	19.1 噸
碳費	67,200	57,300

結論

1. 空氣側節能

- 冷能回收、冷凝水回收

2. 選擇高效率冰水機

- 避免系統過大設計
- 耗電量 $0.65\sim 0.85\text{kW/RT}$

3. 變風量系統

- 風機變頻控制

4. 冷卻水塔系統

- 接近溫度 3°C 以下

5. 熱回收式冰水主機

- 廢熱回收應用於廠區其他地方

6. 溫濕度獨立控制

- 採用液態或固態除濕方式來處理濕度



感謝聆聽
敬請指教

梁俊德 博士
jdliang@nkust.edu.tw