



109年節能推廣研習活動 專題演講

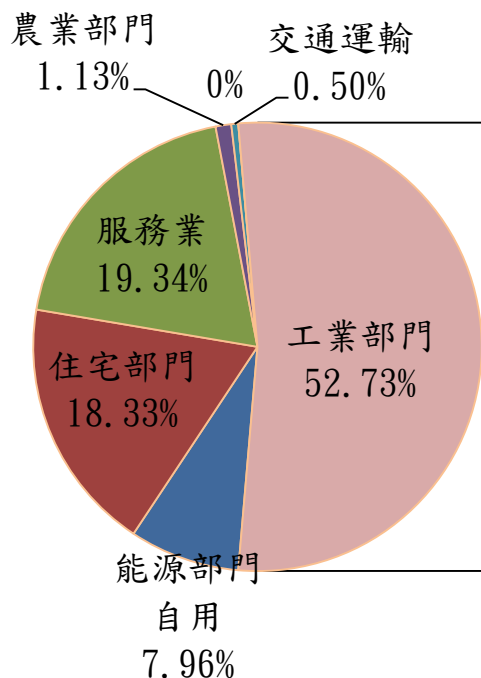
壓縮空氣系統節能技術與低耗能吸附乾燥及其應用

康育豪 博士

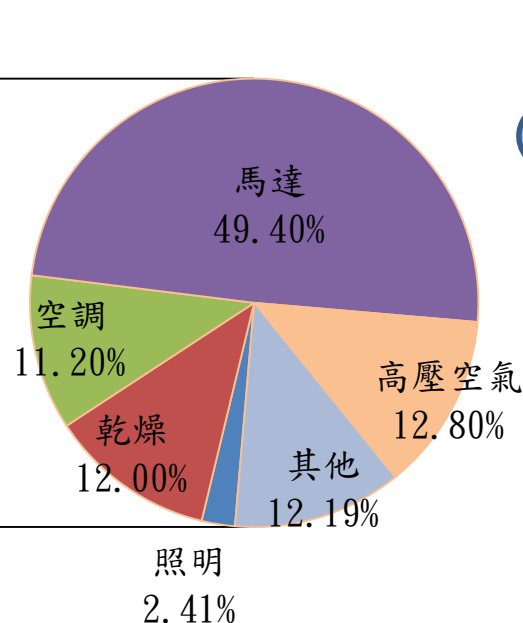
工業技術研究院

中華民國 109 年 7 月 30 日

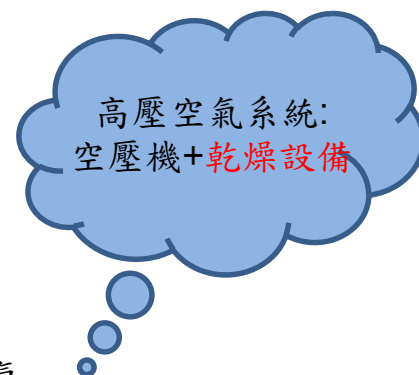
國內壓縮空氣乾燥設備耗能情況



Source: Energy Statistics Hand Book 2011,
BUREAU of Energy, MOEA, R.O.C



Source : Industrial Energy
Consumption ECUK 2011



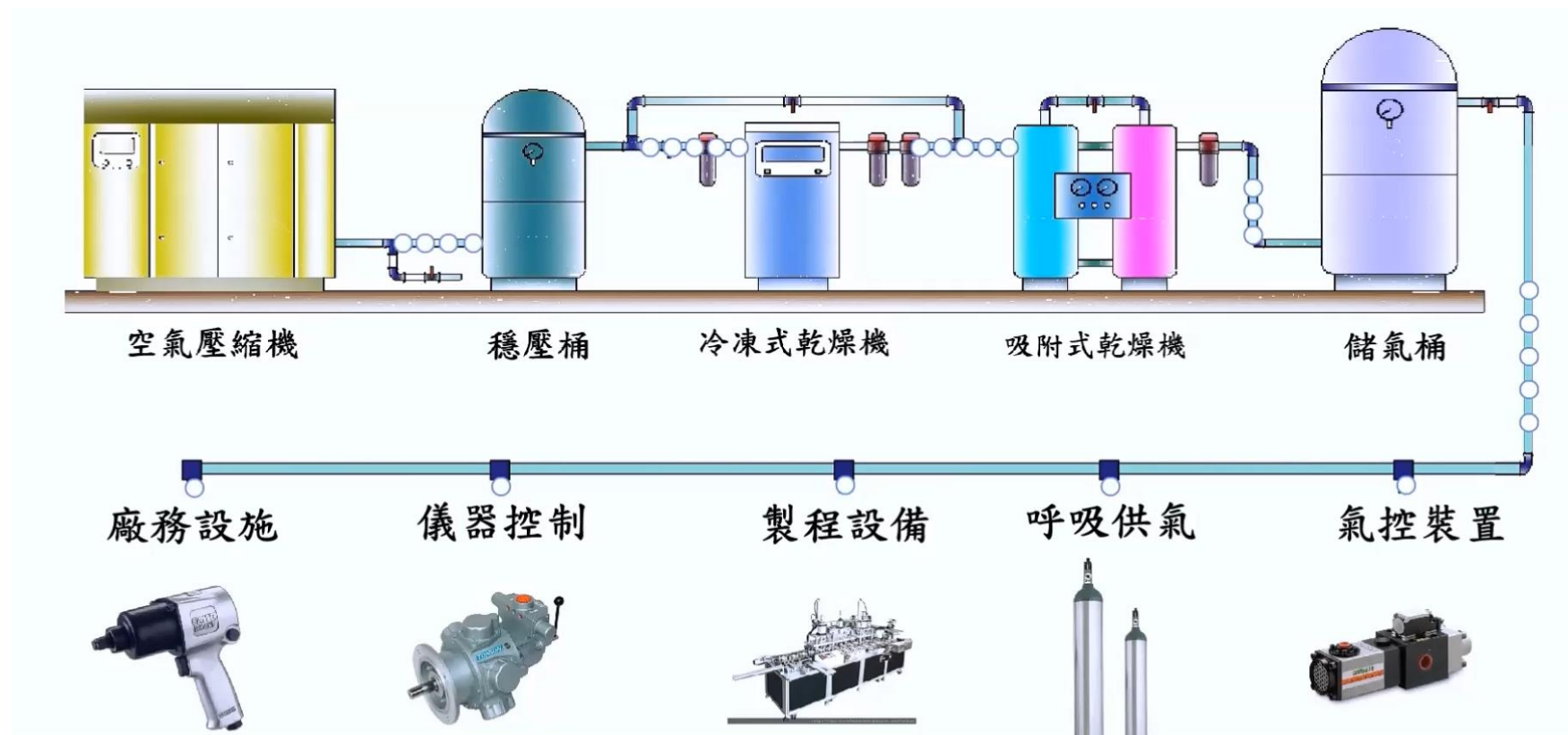
High Energy Consumption

- 壓縮空氣為工業部門基本動力源
- 壓縮空氣系統佔工業部門用電量約**12.8%**
- 壓縮空氣系統約有**15~40%以上的能耗使用**於壓縮空氣(無熱式)**乾燥設備**上

壓縮空氣乾燥設備之產業使用情境

壓縮空氣用途：

提供製程清洗、冷卻、運送、塗裝、曝氣、攪拌、通風、燃燒反應、氣動控制與機械操作等產業製程功能需求。



空壓機=電熱爐

焓(enthalpy)值表

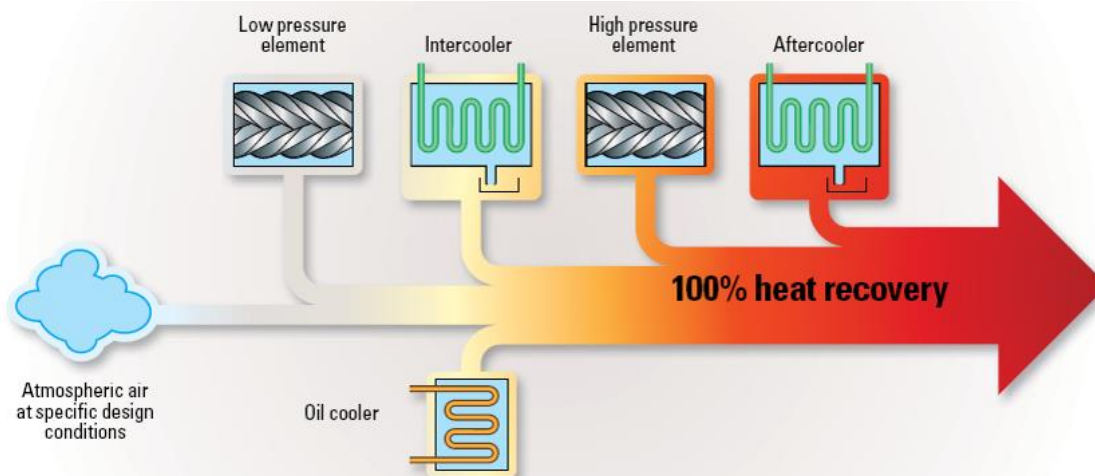
1bar

10 bar

t °C	p = 0.05 MPa (0.5 bar)				p = 0.1 MPa (1 bar)			p = 1.0 MPa (10 bar)		
	v l/kg	s kJ/(kgK)	h kJ/kg	e kJ/kg	v l/kg	s kJ/(kgK)	h kJ/kg	v l/kg	s kJ/(kgK)	h kJ/kg
-50	1280.9	6.7738	223.27	-48.642	639.93	6.5740	223.07	63.114	5.8998	219.32
-40	1338.4	6.8178	233.33	-51.288	668.79	6.6181	233.14	66.120	5.9455	229.73
-30	1396.0	6.8600	243.38	-53.400	697.63	6.6604	243.20	69.110	5.9890	240.09
-20	1453.5	6.9006	253.43	-55.022	726.46	6.7010	253.27	72.089	6.0306	250.41
-10	1511.1	6.9395	263.48	-56.191	755.27	6.7400	263.33	75.056	6.0705	260.71
0	1568.6	6.9770	273.53	-56.943	784.08	6.7775	273.40	78.015	6.1088	270.98
10	1626.1	7.0132	283.59	-57.305	812.88	6.8123	283.46	80.965	6.1456	281.22
20	1683.7	7.0481	293.65	-57.306	841.68	6.8486	293.53	83.909	6.1811	291.45
30	1741.2	7.0818	303.71	-56.970	870.46	6.8824	303.60	86.847	6.2154	301.67
40	1798.7	7.1145	313.77	-56.317	899.25	6.9151	313.67	89.779	6.2485	311.88

313.57 kJ/kg

311.88 kJ/kg



壓縮空氣乾燥系統節能規劃

- 需求為何？

- ☐ 風量(CFM or CMM)
- ☐ 壓力(kg/cm² or bar)
- ☐ 乾燥等級(露點溫度)
- ☐ 空氣品質(含油量、含塵量)

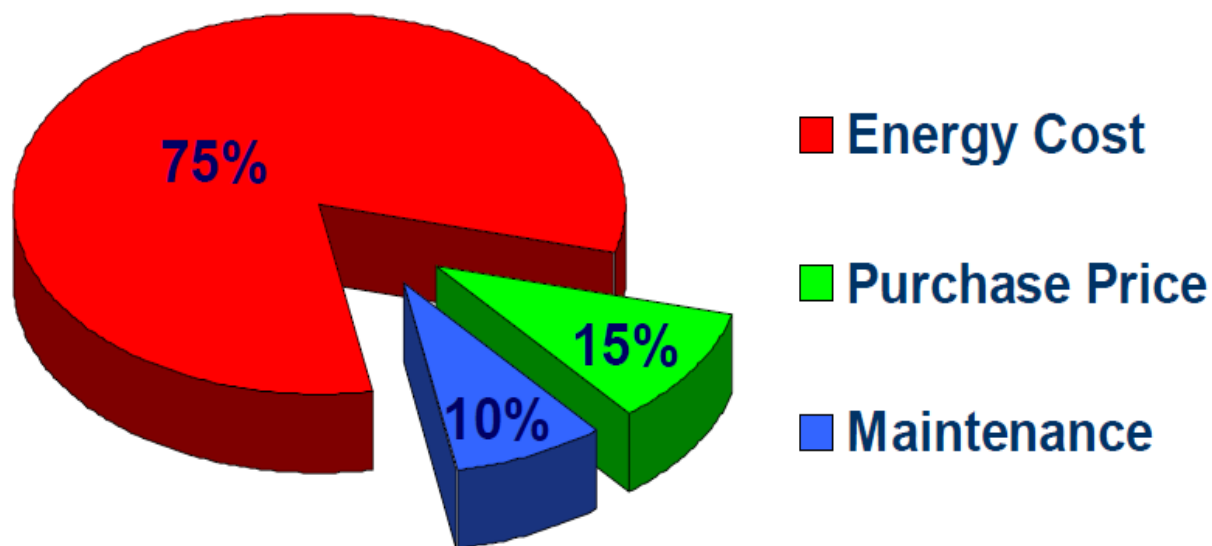
空壓機性能指標：
kW/CMM or CFM/HP

- 壓縮空氣系統該如何規劃？

- ☐ 空壓機種類(往復式、螺旋式、離心式)
- ☐ 機型大小(50HP、100HP、300HP、600HP)
- ☐ 冷卻方式(水冷式、氣冷式)
- ☐ 管路配置(流量vs管徑)
- ☐ 儲氣桶
- ☐ 洩水器型式
- ☐ 乾燥機(冷凍式or吸附式)
- ☐ 濾淨裝置

壓縮空氣系統的成本分析

Compressor Cost of Ownership



Source: Guide 241, E.T.S.U Best Practice Programme
Based on a ten year operating period

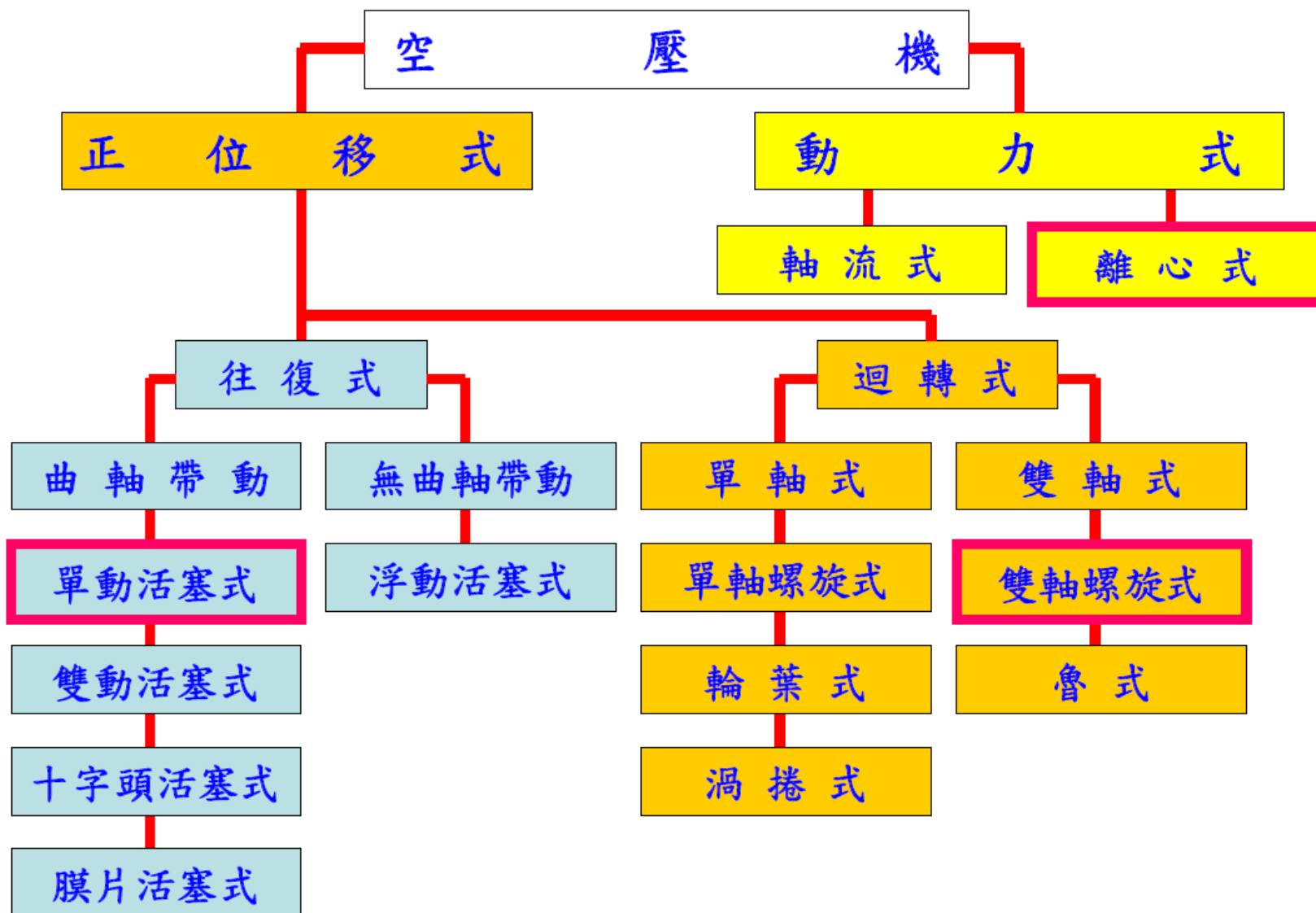
以100HP空壓機為例之成本估算

Year	Equipment	Maintenance	Energy
1	760,000	75,000	1,935,000
2		75,000	1,935,000
3		75,000	1,935,000
4		75,000	1,935,000
5		75,000	1,935,000
6		75,000	1,935,000
7		75,000	1,935,000
8		75,000	1,935,000
9		75,000	1,935,000
10		75,000	1,935,000
Total	760,000	750,000	19,350,000

$$19,350,000 * 5\% = 967,500 > 760,000$$

若設備節能率 > 5%

空壓機分類



各類空壓機壓縮原理



往復式

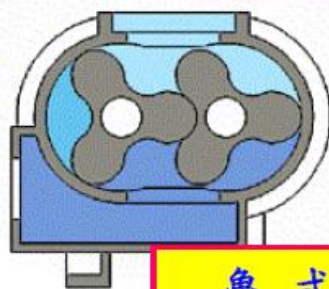


渦捲式



輪葉式

螺旋式

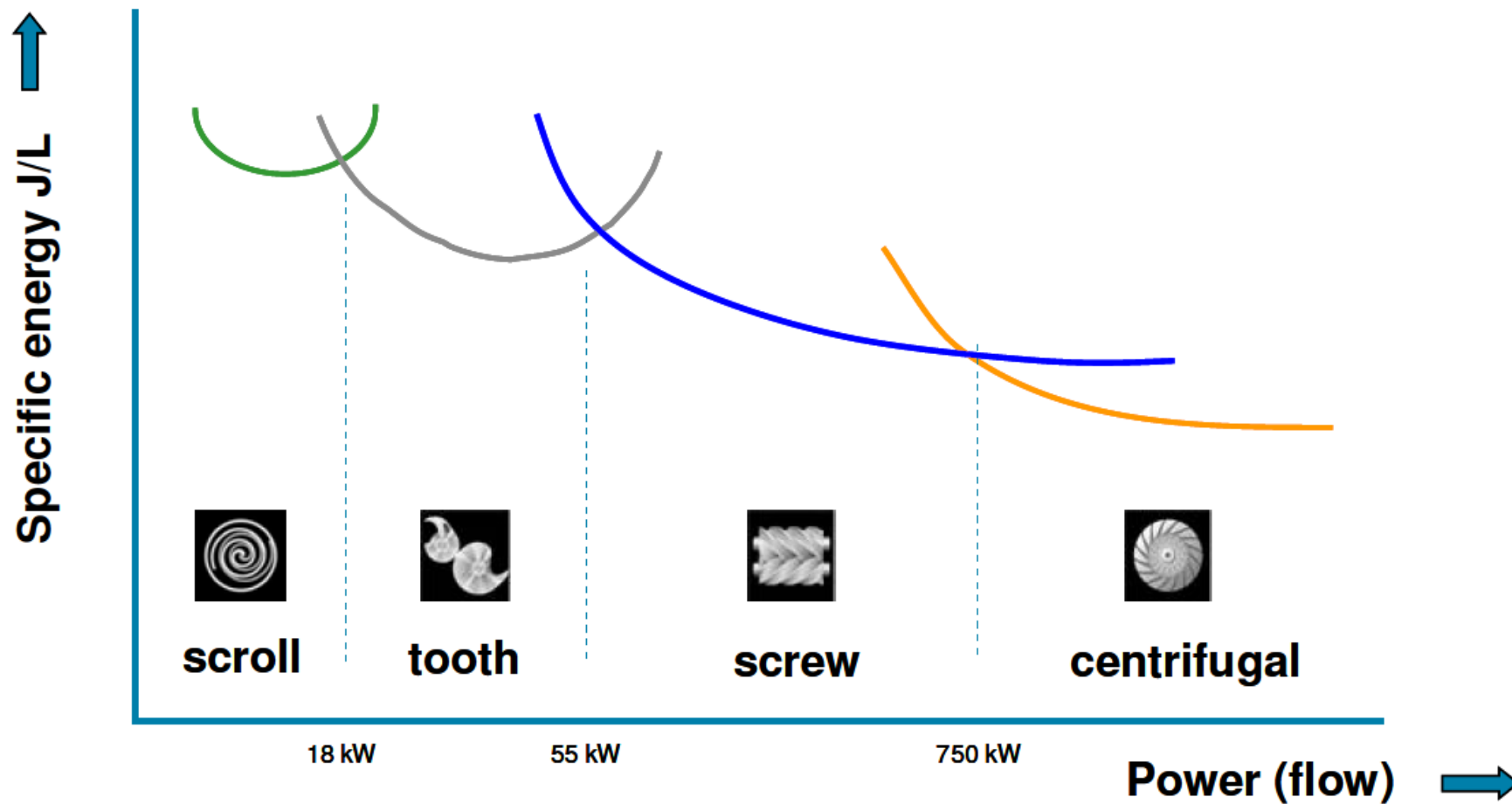


魯式



離心式

各類空壓機之能耗與風量



An appropriate selection can save a lot of energy

空壓機之耗能

◆往復式單位供風耗能為13.06 ~ 8.80 kW/CMM

◆螺旋式單位供風耗能為8.80 ~ 6.60 kW/CMM

◆離心式單位供風耗能為7.46 ~ 5.87 kW/CMM

8 kg/cm²壓力下，每1CMM氣量，相當於6.60kW的電能耗損，相當於0.28元/m³。

◆壓縮出口壓力減少1bar

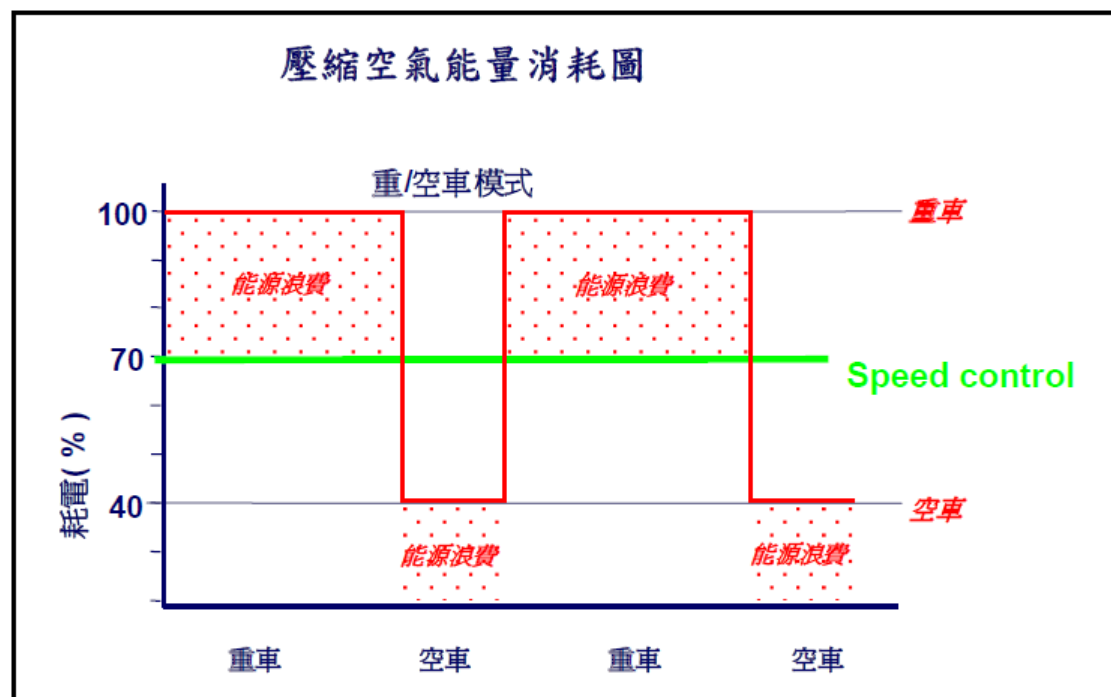
- 可降低6~10%的空壓機耗電
- 減少8~12%的耗氣洩漏量

◆每增加10°C壓縮溫度

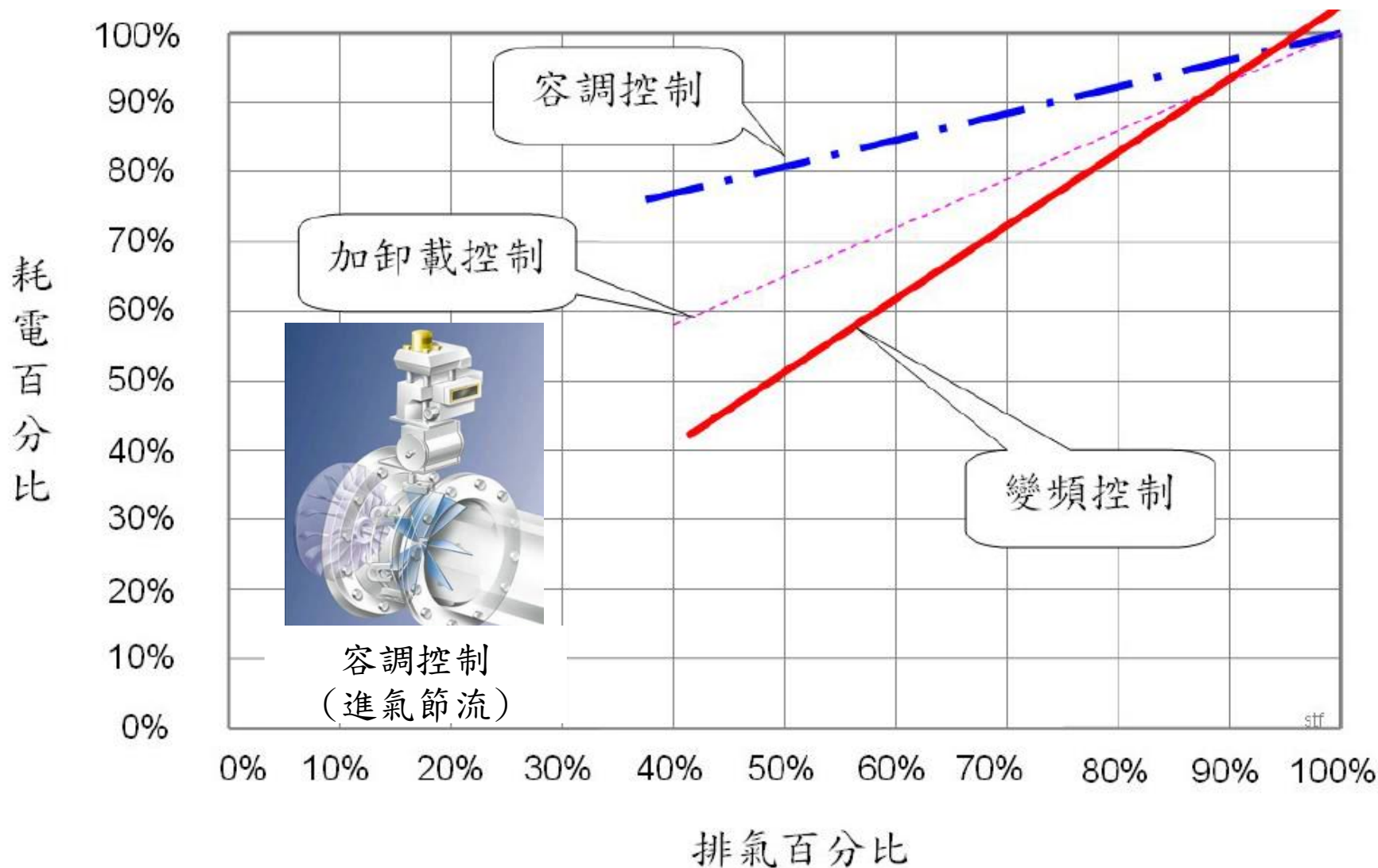
- 增加壓縮空氣濕度20%
- 增加油氣含量50%
- 潤滑油使用壽命減少50%
- 增加空壓機耗能3%

空壓機控制模式

- 自動啟動/自動停止 (<15HP)
- 加卸載控制(空車/重車)
- 容調控制(調節進氣閥門)
- 變頻控制
- 多機聯鎖

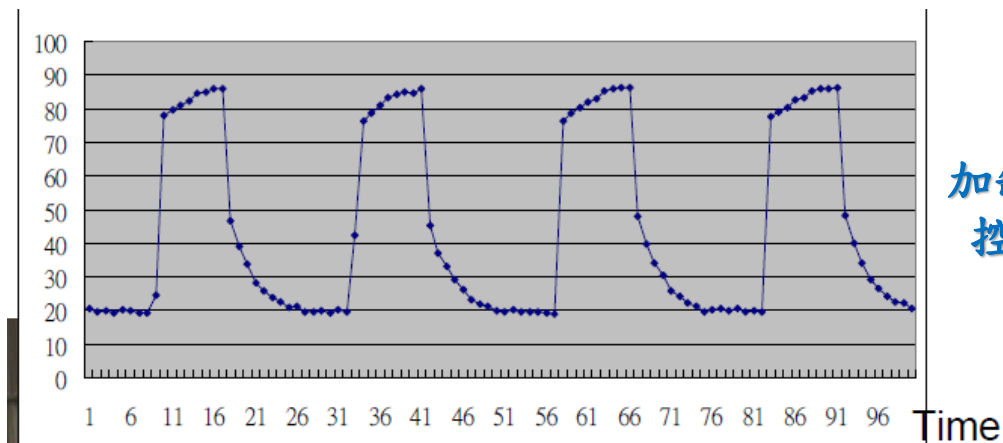


加卸載控制、容調控制與變頻控制

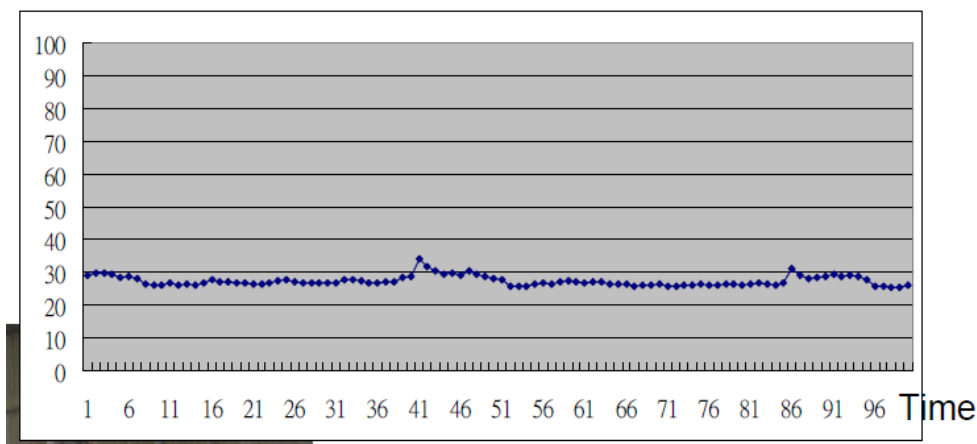


加卸載控制與變頻控制比較

100 hp 螺旋式空壓機



改善前平均功率:45KW



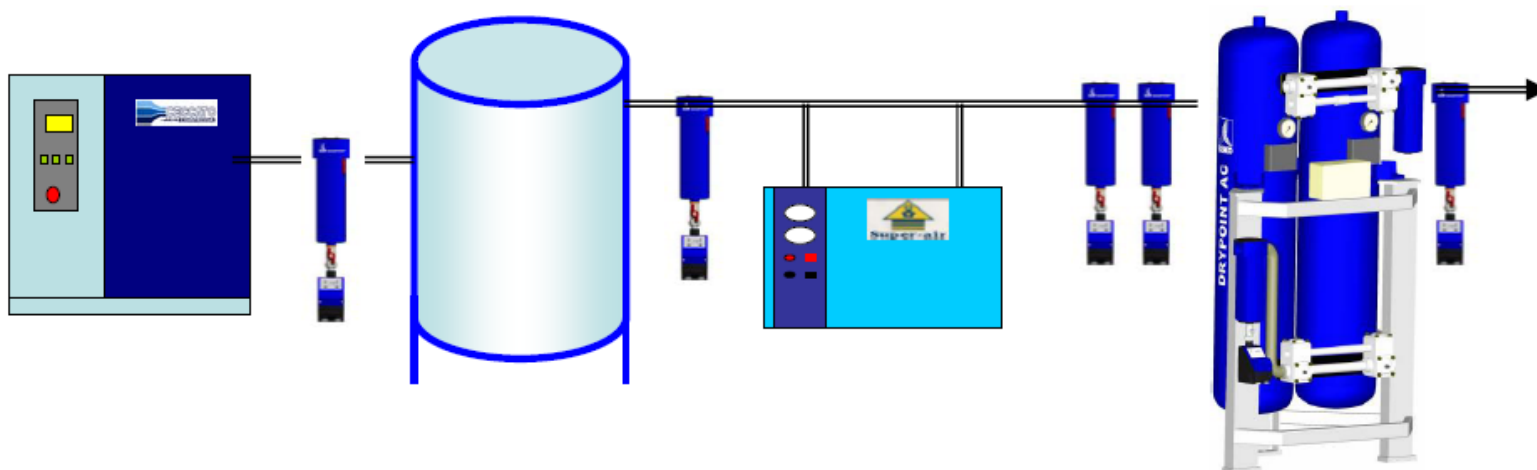
改善後平均功率:27KW

如何使壓縮空氣系統效率提高

- 選擇合適空壓機(IE3馬達)
- 減少空車運轉
- 使用高效率馬達
- 進行熱回收利用
- 系統壓降最小化
- 防止壓縮氣體洩漏

壓縮空氣系統壓降分佈

減少系統壓降



項目 壓降 系統 ΔP	旋風 分離器	前置 過濾器 5Micron	冷凍式 乾燥機	精密 過濾器 1Micron	精密 過濾器 0.01Micron	吸附式 乾燥機	合計
一般 ΔP	0.05	0.35	0.35	0.4	0.4	0.4	1.75
耗能 %	0.3	2.1	2.1	2.4	2.4	2.4	10.5

如何測漏與易洩漏點

- 使用皂泡液測試管路銜接處
- 關機聽取洩漏聲
- 將出口端密封檢查壓力是否下降劇烈
- 以超音波測試

洩漏點易發生處

- 聯結器、膠管、接頭、管路接頭
- 快速接頭、三點組合
- 冷凝水排水器、排水閥
- 法蘭、墊片、密封膠圈
- 氣動設備與系統的連接點

壓縮空氣洩漏是很昂貴的!!

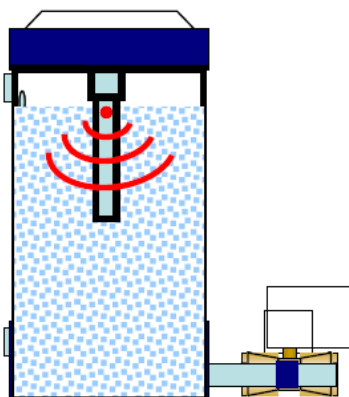
卻水器種類

冷凝水排放方式	特點
手動排放	1. 以人工方式操作 2. 由人員自行判斷操作時機與時間 3. 通常會造成空氣損失
液位控制機械浮球式	1. 浮球控制，可不定時 2. 易被冷凝水中雜質阻塞 3. 若冷凝水量不足以維持排水器內的水位會浪費壓縮空氣
電磁閥控制	1. 有定時裝置，可預訂開啟與關閉時間 2. 閥開啟的持續時間，可能不足以排完累積的冷凝水 3. 即使冷凝水不足，也會定時開啟，造成壓縮空氣浪費 4. 需加裝過濾器，以免雜質阻塞出入口
無耗氣排水器	1. 擁有浮球/液位感應器+電磁球閥 2. 不浪費壓縮空氣 3. 具信賴性 4. 儲水槽需要經常清理，以避免雜質累積

無耗氣式自動卻水器

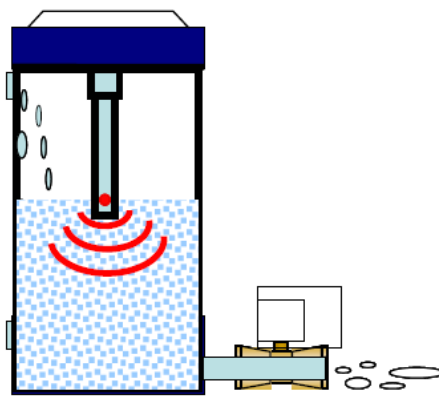
1.

- 冷凝水達高水位
- 液位感測器發出訊號
- 啟動排水球閥，開始排水



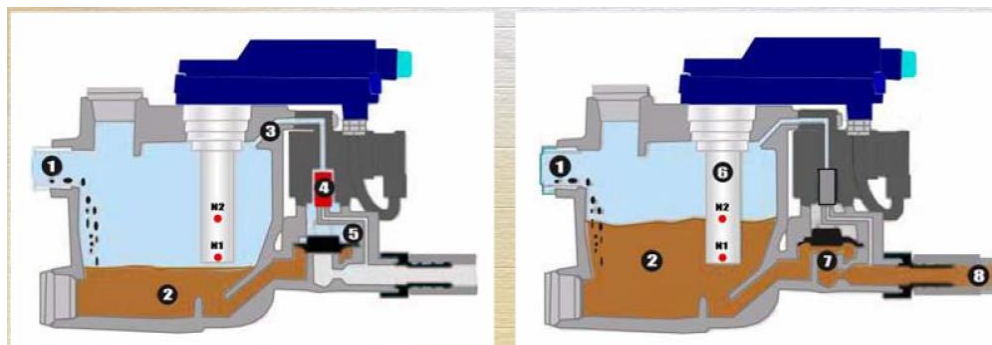
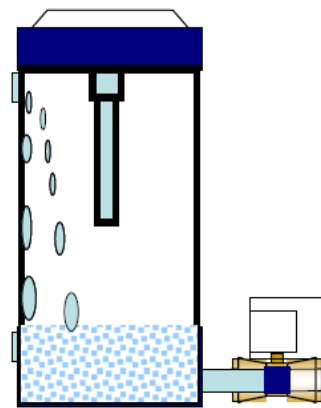
2.

- 冷凝水排放至低水位
- 液位感測器發出訊號
- 通知排水閥關閉。



3.

- 冷凝水排完前，排水閥已關閉
- 殘留些許冷凝水，產生水封，
- 不會排放壓縮空氣

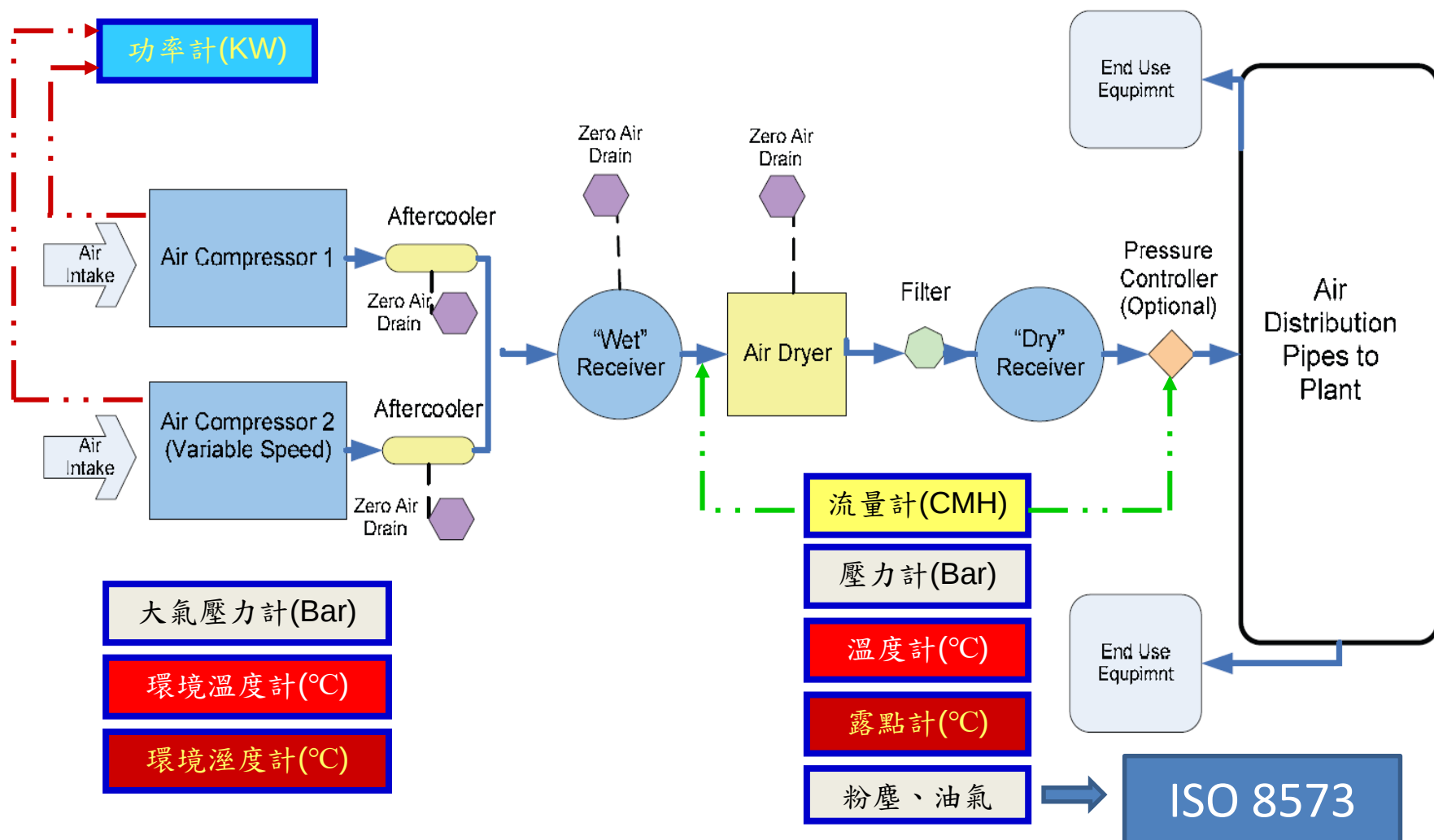


利用此設備可大幅降低壓縮空氣耗氣量

無耗氣式自動卻水器



壓縮空氣系統節能診斷量測示意圖



ISO 8573-1 Compressed air quality

Class		Particles			Humidity and liquid water		Total oil ^[10]	
		0,1.. – 0,5 µm [1,6,9]	0,5.. – 1 µm [1,6,9]	1.. – 5 µm [1,6,9]				
0	↔	As specified and more stringent than class 1			As specified and more stringent than class 1		As specified and more stringent than class 1	
1	↔	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	≤ -70°C	[2,5]	≤ 0,01 mg/m³	[1,3]
2	↔	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	≤ -40°C		≤ 0,1 mg/m³	
3	↔	---	≤ 90.000	≤ 1.000	≤ -20°C		≤ 1 mg/m³	[1,4]
4	↔	---	---	≤ 10.000	≤ +3°C		≤ 5 mg/m³	
5	↔	---	---	≤ 100.000	≤ +7°C			
6	↔	≤ 5 mg/m³			[1,7]	≤ +10°C	[1,8]	
7	↔	5.. – 10 mg/m³				≤ 0,5 g/m³		
8	↔				0,5.. – 5 g/m³			
9	↔				5.. – 10 g/m³			
X	↔	> 10 mg/m³			[1,7]	> 10 g/m³	> 5 mg/m³	[1,4]

電子業節約能源及使用能源效率規定

經濟部公告

中華民國104年03月04日

經能字第10404601080號

前略

三、能源用戶使用冰水機群組、風機、吸附式乾燥機及壓縮空氣系統，自中華民國一百零四年十一月一日起，應符合下列規定：

(三)吸附式乾燥機：依下列方法之一計算之吹淨損失率，不得超過百分之十五：

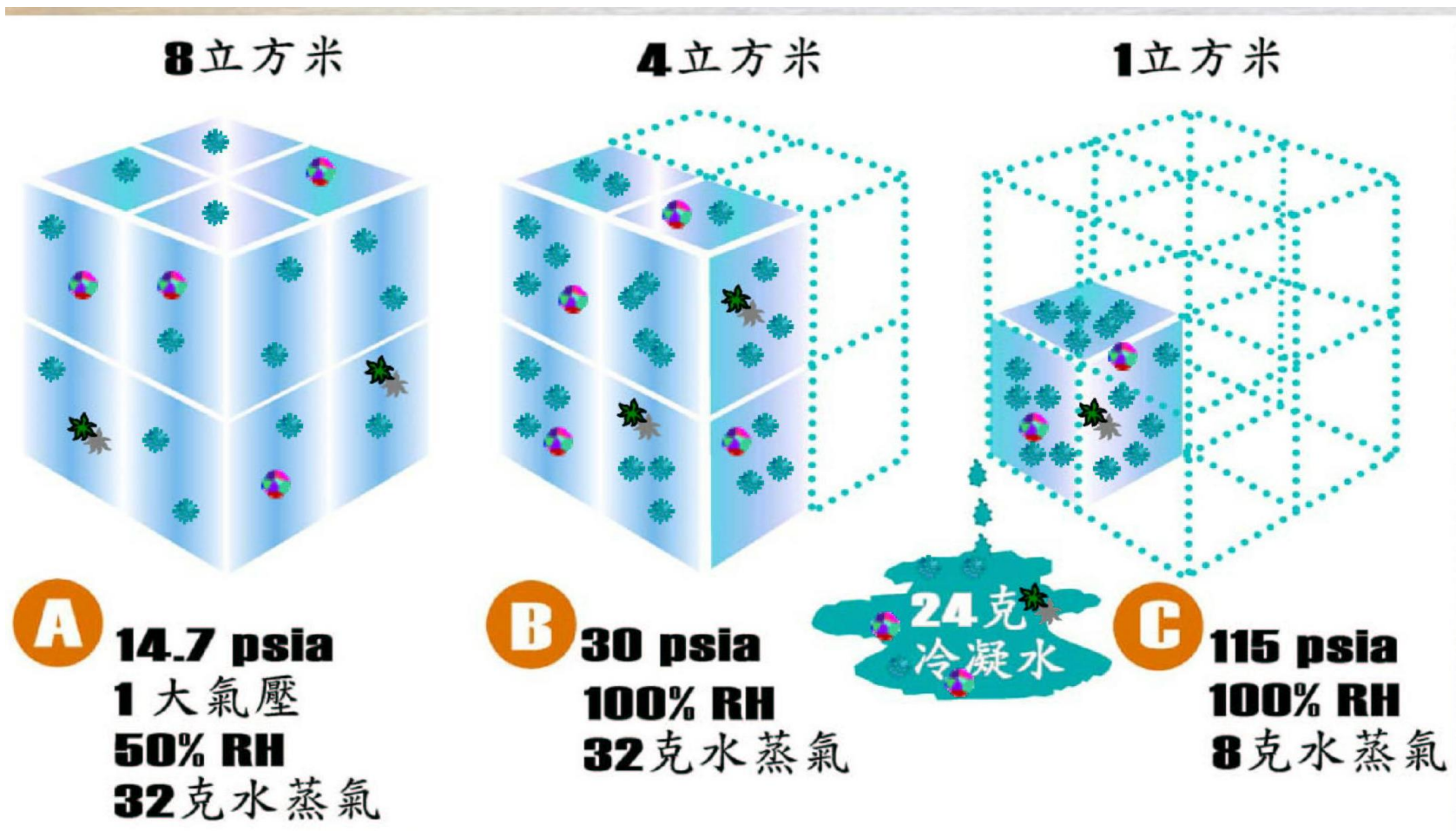
1. 提供中央主管機關或中央主管機關委託專業機構吸附式乾燥機實際操作壓力露點溫度及其所對應之吹淨損失率。
2. 依據國際標準(ISO) 7183:2007規定，連續監測吸附式乾燥機完成再生循環期間之入口壓縮空氣流量、出口壓縮空氣流量至少十次再生循環，分別計算各次再生循環之吹淨損失率後，取其算數平均值。

(四)壓縮空氣系統：單一廠區內設有三臺以上，且總功率達一百五十馬力以上之經常運轉空壓機者，需實施壓縮空氣系統負載調控。但無適當設備實施壓縮空氣系統負載調控，經中央主管機關同意後，得不適用之。

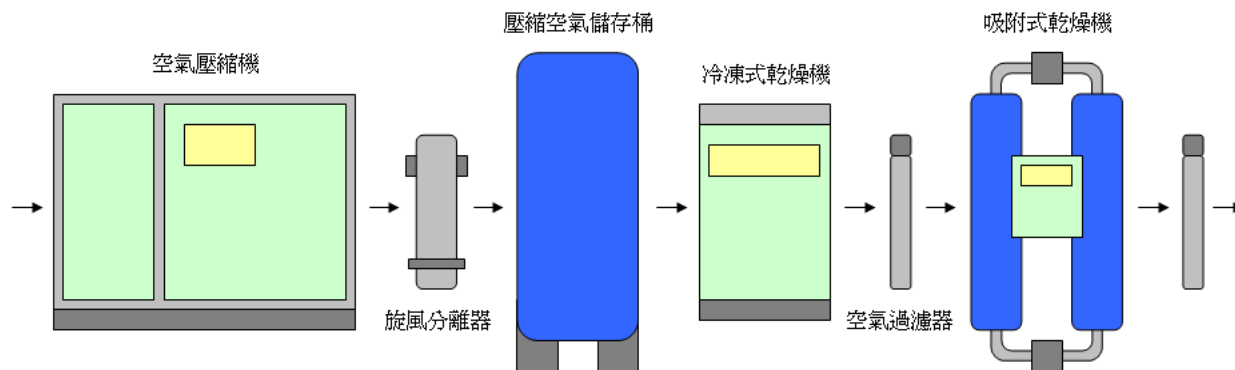


吸附式乾燥設備

壓縮空氣過程



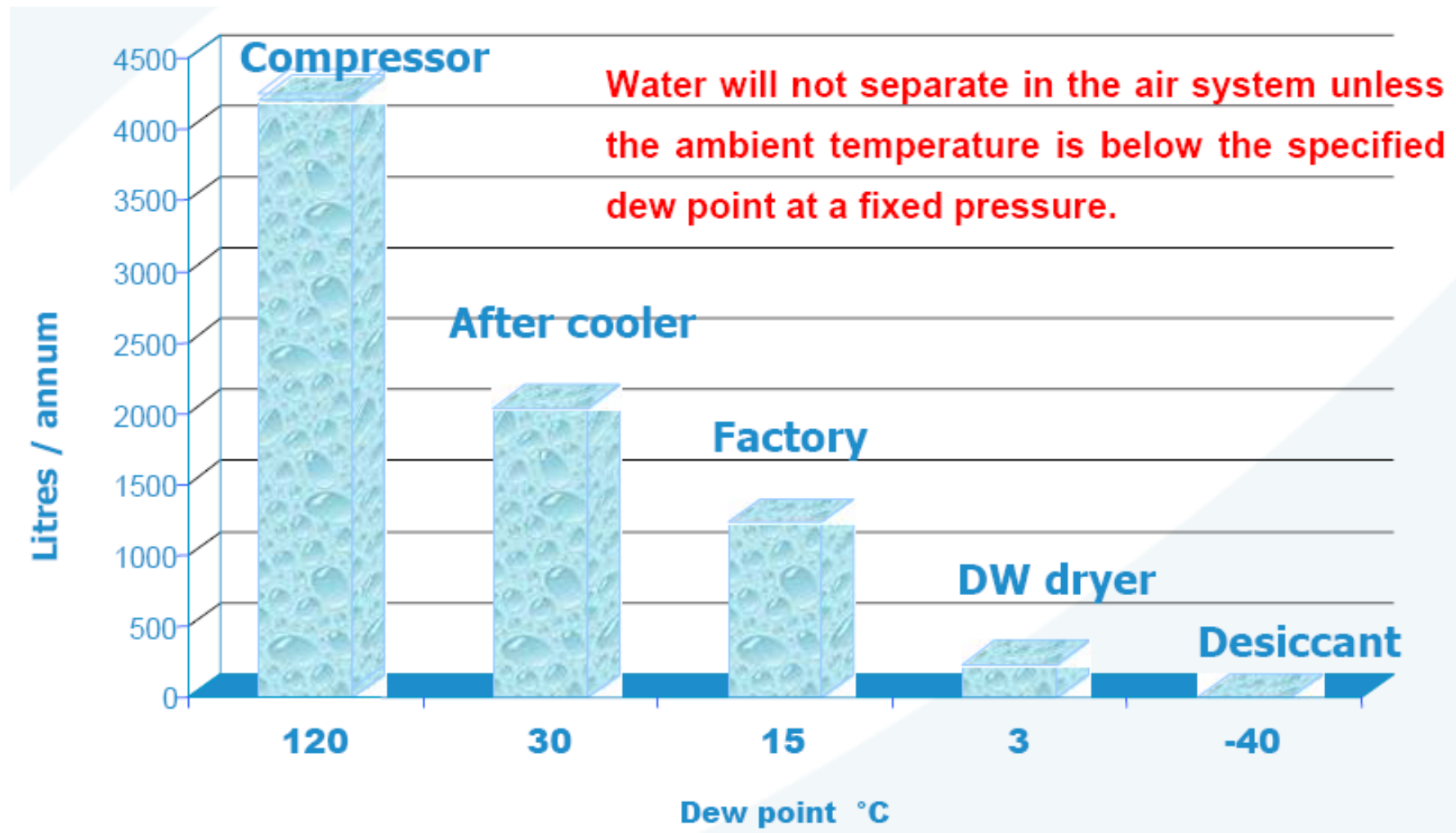
壓縮空氣系統各階段之溫濕條件



壓縮空氣系統各階段之壓力、溫度、相對濕度與壓力露點值

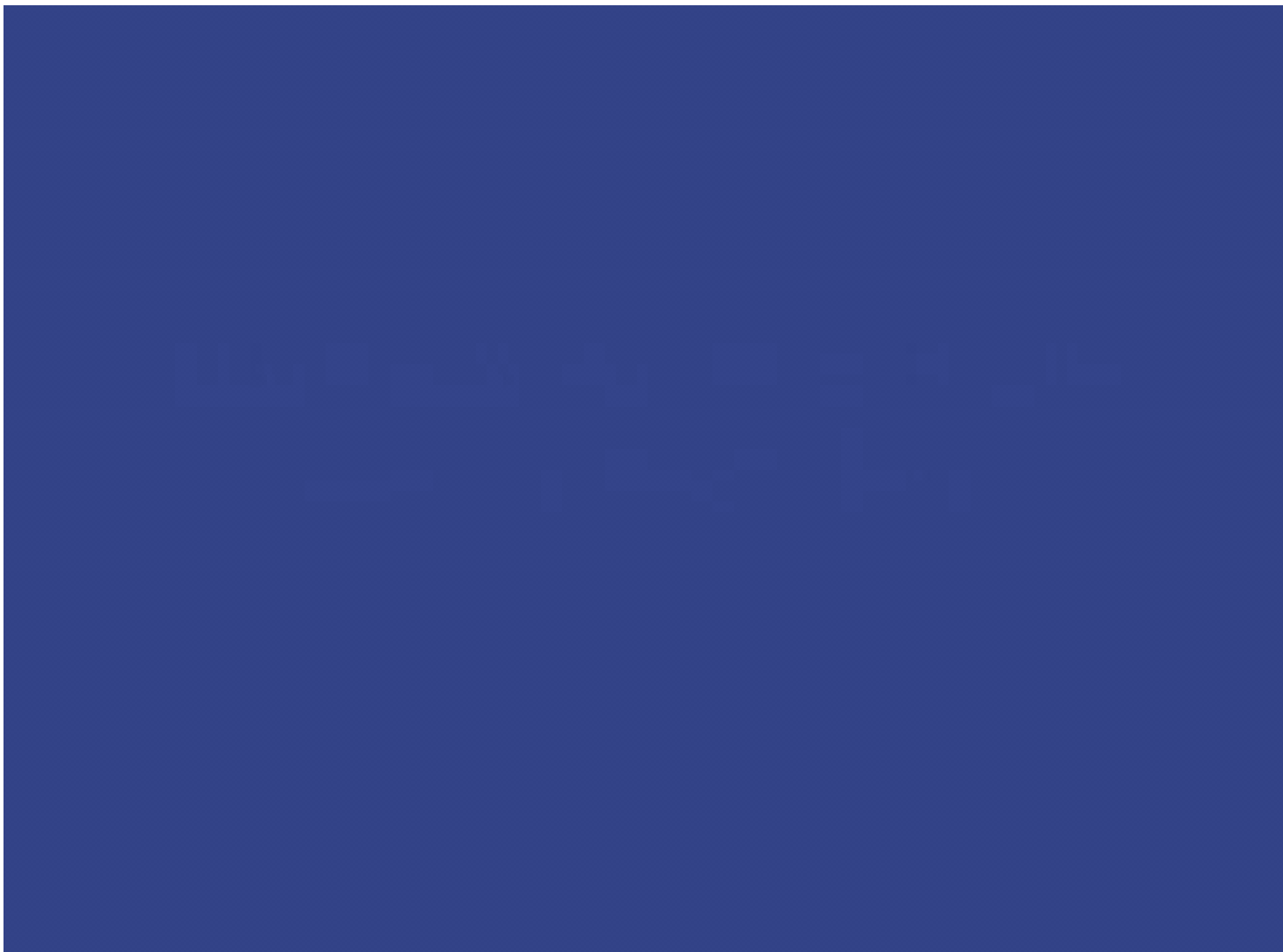
	單位	外氣	空壓機後	空氣儲存桶後		冷凍式 乾燥機	吸附式 乾燥機前	吸附式 乾燥機後	
絕對壓力	kg/cm ²	1	9	8.9	8.9	8.8	8.7	8.5	8.5
溫度	°C	30	43	38	25	3	20	25	25
相對濕度(高壓)	%RH	-	100%	100%	100%	100%	26%	4.5%	0.04%
相對濕度(大氣壓)	%RH	80%	28.6%	22.5%	11.2%	2.9%	3.0%	0.5%	0.004%
壓力露點	°C	-	43	38	25	3	3	-17.89	-60
大氣露點	°C	25.9	4.52	0.99	-8.19	-22.89	-22.89	-40	-70
高壓空氣含水量	g/m ³	-	59.23	46.14	23.01	5.943	5.943	1.0353	<0.009
大氣壓下含水量	g/m ³	24.26	6.58	5.18	2.59	0.675	0.683	0.12	<0.001

壓縮空氣系統各階段之含水量(除水量)





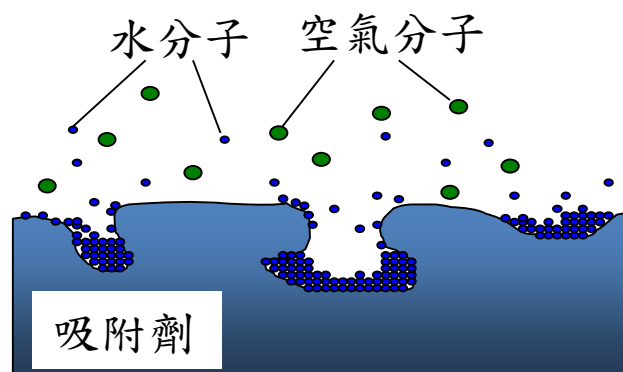
空氣乾燥技術-吸附/脫附原理(影片)



吸附式乾燥機技術介紹

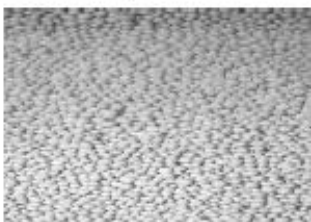
吸附劑之吸脫附原理

- 吸附劑以凡得瓦爾力將水分子**吸附**在孔洞中。
- 吸附劑吸附飽和之後，必須**脫附再生**，才能持續使用，通常藉熱空氣加溫將水分子汽化或孔洞內外水分子濃度差來**脫附**。



Types of desiccant:

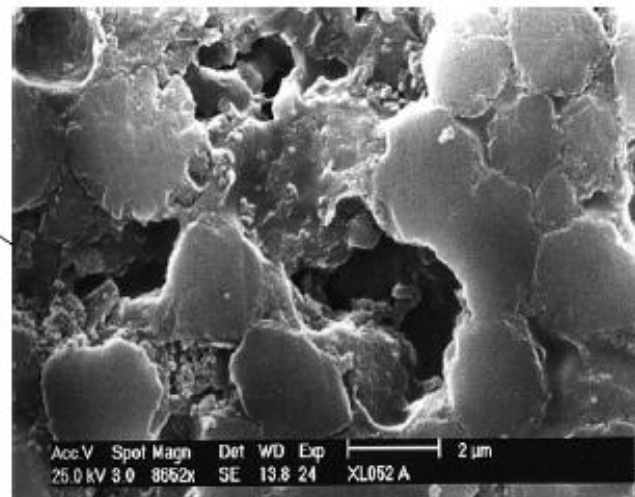
Activated
Alumina



Molecular
Sieve



Sorbead
WS + N

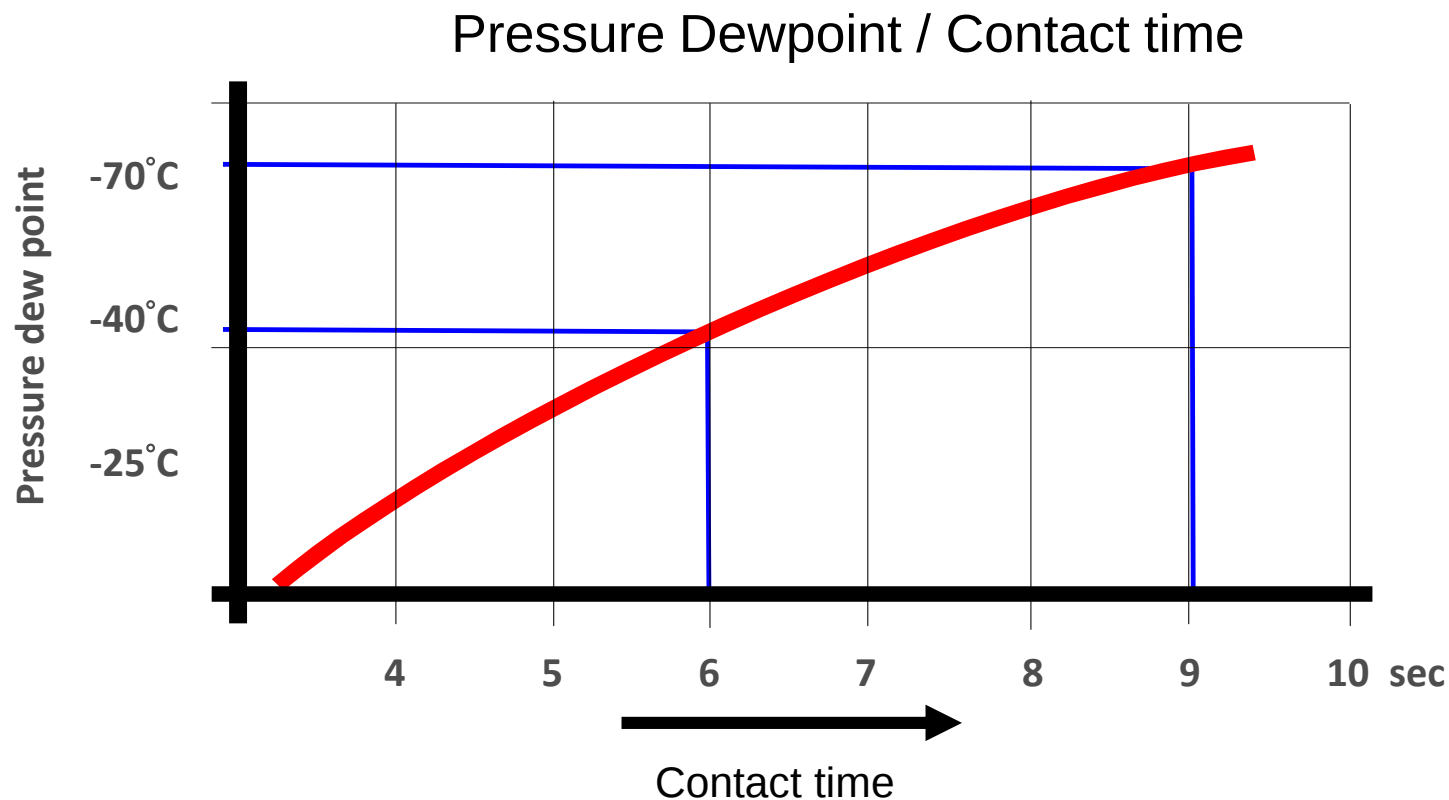


吸附劑與氣流接觸時間

設計值：

PDP: -40°C 6.5 Sec 以上

PDP: -70°C 9 Sec 以上



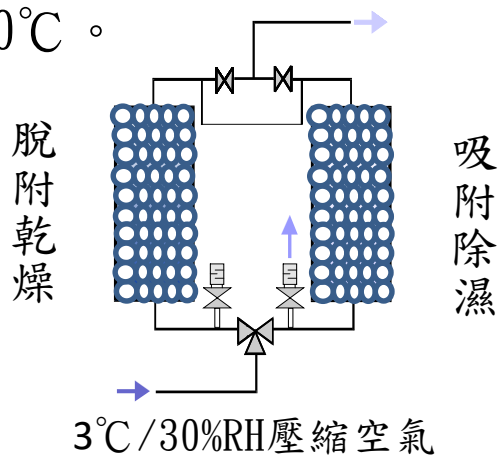
傳統吸附劑特性

特性	特殊矽膠	活性氧化鋁	沸石分子篩
顆粒尺寸 (mm)	2 ~ 8	2 ~ 9	2 ~ 6
孔隙率 (%)	50 ~ 65	50 ~ 60	45 ~ 60
比表面積 (m ² /g)	300 ~ 800	100 ~ 400	500 ~ 900
孔容積量 (ml/g)	0.4 ~ 1.0	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 1.1
孔徑 (nm)	1 ~ 10	1.5 ~ 10	0.4 ~ 1.5
比熱 (kcal/kg °C)	0.22 ~ 0.25	0.21 ~ 0.25	0.19 ~ 0.31
比重(kg/m ³)	700 ~ 800	750	720
靜態吸附量 (kg/kg)(%)	20 ~ 40	20 ~ 30	3 ~ 9
吸附溫度 (°C)	5 ~ 40	0 ~ 40	5 ~ 60
脫附溫度 (°C)	100 ~ 150	120 ~ 200	140 ~ 280
再生熱能 (kcal/kgH ₂ O)	700	830	990

吸附式乾燥機種類

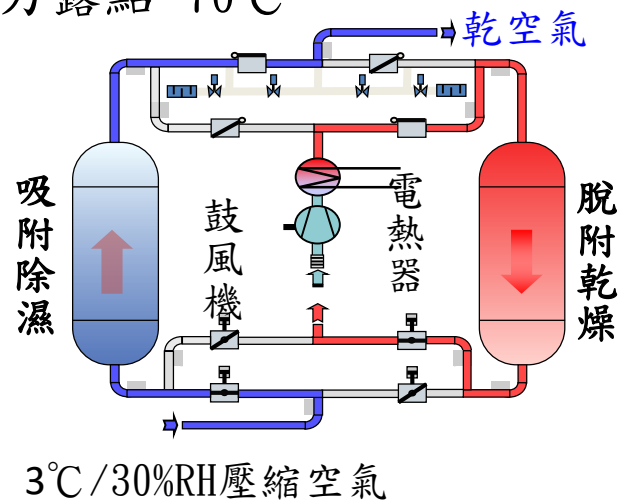
無熱式吸附乾燥機

利用部分乾燥壓縮空氣通過吸附劑，**降壓後**藉濃度差來脫附，**然後直接排放到大氣**，最大可乾燥至壓力露點 -40°C 。



熱風式吸附乾燥機

利用電熱器加熱壓縮空氣後，將吸濕之吸附劑內水份脫附後排放，可乾燥至壓力露點 -70°C 。



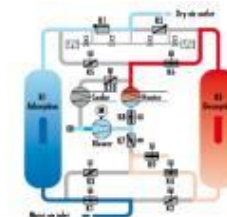
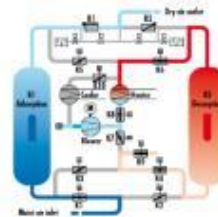
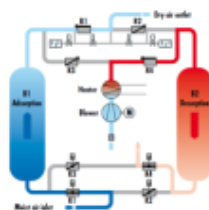


加熱式乾燥機VS無熱式乾燥機

項目	加熱式乾燥機	無熱式乾燥機
成本	2~3倍	1倍
氣耗損失	0~8%	15~30%
性能	露點:-20~-40°C	露點:-40~-70°C
雙塔循環輸出時間	12~24小時	4~10分鐘
吸附劑壽命	5年	2~3年
吸附劑吸附量	12~20%wt	1%wt
空氣品質穩定度	較佳	較差(易產生粉塵)
控制閥件壽命	較長(6小時一次)	較短(5分鐘一次)
運轉噪音值	低於80 dBA(鼓風機)	90~100dBA(洩氣)
運轉穩定度	較高	較低
操作難易度	系統較複雜	簡單
所需空間	較大約10~20%	較小
控制模式	時間or輸出壓力露點值	時間

Benchmark與技術指標

	無熱式	熱風加熱式		
		高壓空氣加熱與高壓空氣冷卻 (氣冷式)	外部鼓風機加熱與高壓空氣冷卻(氣冷式)	外部鼓風機加熱與零耗氣冷卻 (水冷式)
再生氣耗量	15 ~ 40%	6~8%	1~3%	0%
設備成本	低	中	高	較高
吸附劑壽命	2~3年	3~5年	3~5年	3~5年
閥壽命	切換次數頻繁、壽命短	處於高溫條件、壽命短	處於高溫條件、壽命短	處於高溫條件、壽命短
閥件數量	4件	6件	8件	>12件
性能指標	露點:-20~-40°C	露點:-40~-70°C	露點:-40~-70°C	露點:-40~-70°C
單位供風耗能 kW/CMM	1.5 ~ 4.0	1.34	1.18	0.90
市場主要廠商	Atlas Copco、Beko、SPX集團(Hankison、Delair、DelTech、Pneumatic products)、Domick hunter、Mellcon、Ingersoll Rand、Sullair、Quincy、Pneumatech、Kahn、Kemp、冠揚、石大、新寧、家盟、山盛、青昊、勇日、高乾、唯盛、漢桓、聯興實業、奧利安、旭裕、元寧			



電子業節約能源及使用能源效率規定

經濟部公告

中華民國104年03月04日

經能字第10404601080號

前略

三、能源用戶使用冰水機群組、風機、**吸附式乾燥機**及壓縮空氣系統，自中華民國一百零四年十一月一日起，應符合下列規定：

(三)**吸附式乾燥機**：依下列方法之一計算之吹淨損失率，不得超過**百分之十五**：

1. 提供中央主管機關或中央主管機關委託專業機構**吸附式乾燥機**實際操作壓力露點溫度及其所對應之吹淨損失率。
2. 依據國際標準(ISO) 7183:2007規定，**連續監測吸附式乾燥機**完成再生循環期間之入口壓縮空氣流量、出口壓縮空氣流量至少十次再生循環，分別計算各次再生循環之吹淨損失率後，取其算數平均值。

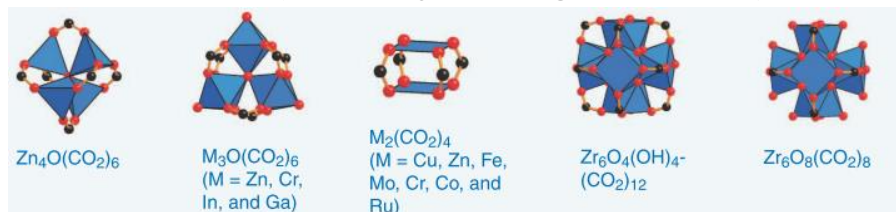
(四)**壓縮空氣系統**：單一廠區內設有三臺以上，且總功率達一百五十馬力以上之經常運轉空壓機者，需實施壓縮空氣系統負載調控。但無適當設備實施壓縮空氣系統負載調控，經中央主管機關同意後，得不適用之。

金屬有機框架(MOF)材料簡介

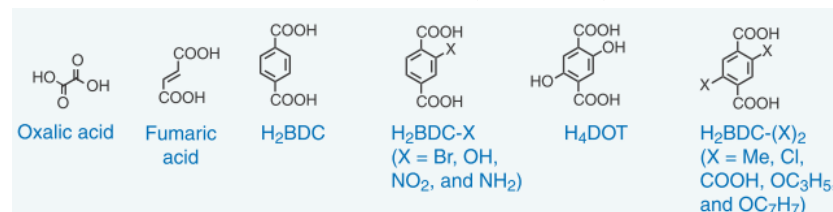
■ 金屬有機框架 (Metal Organic frameworks, MOFs):

➤ 為金屬離子團簇(A)與有機配位基(B)，所架構出來重複且具有結晶性的多孔隙材料

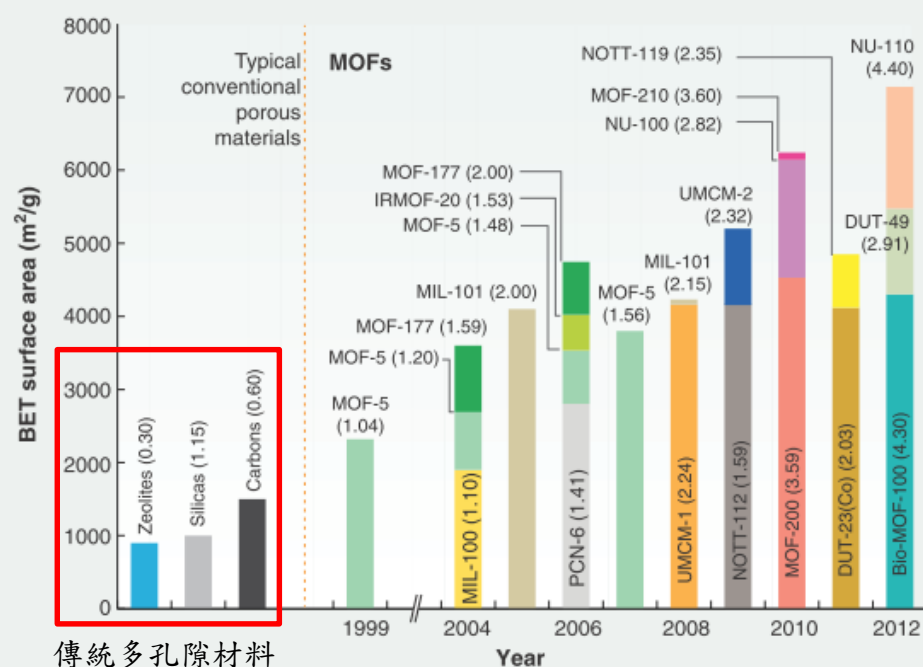
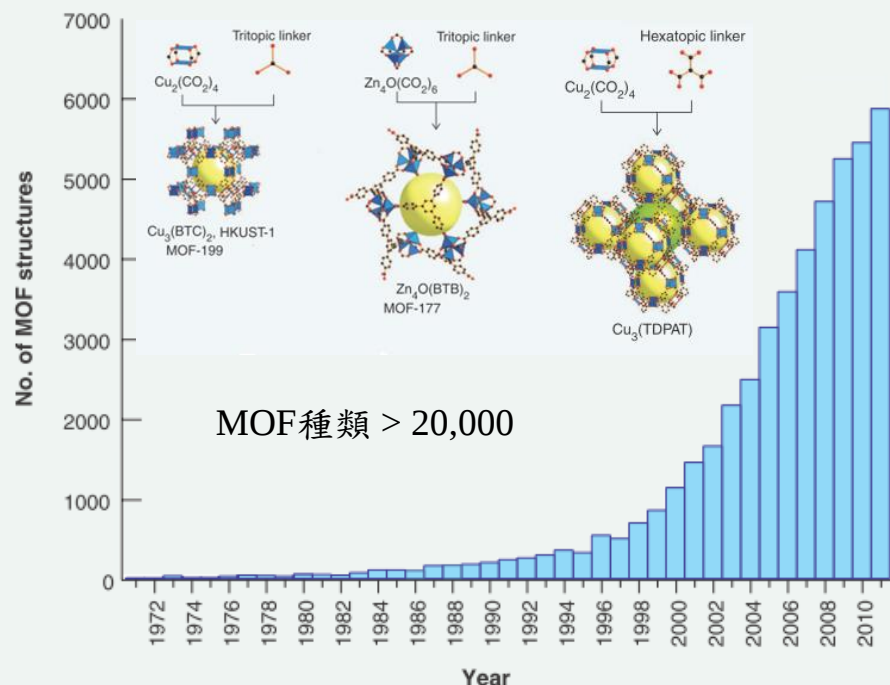
A. 金屬團簇(secondary building units, SUBs)



B. 有機配位基 (Linkers)



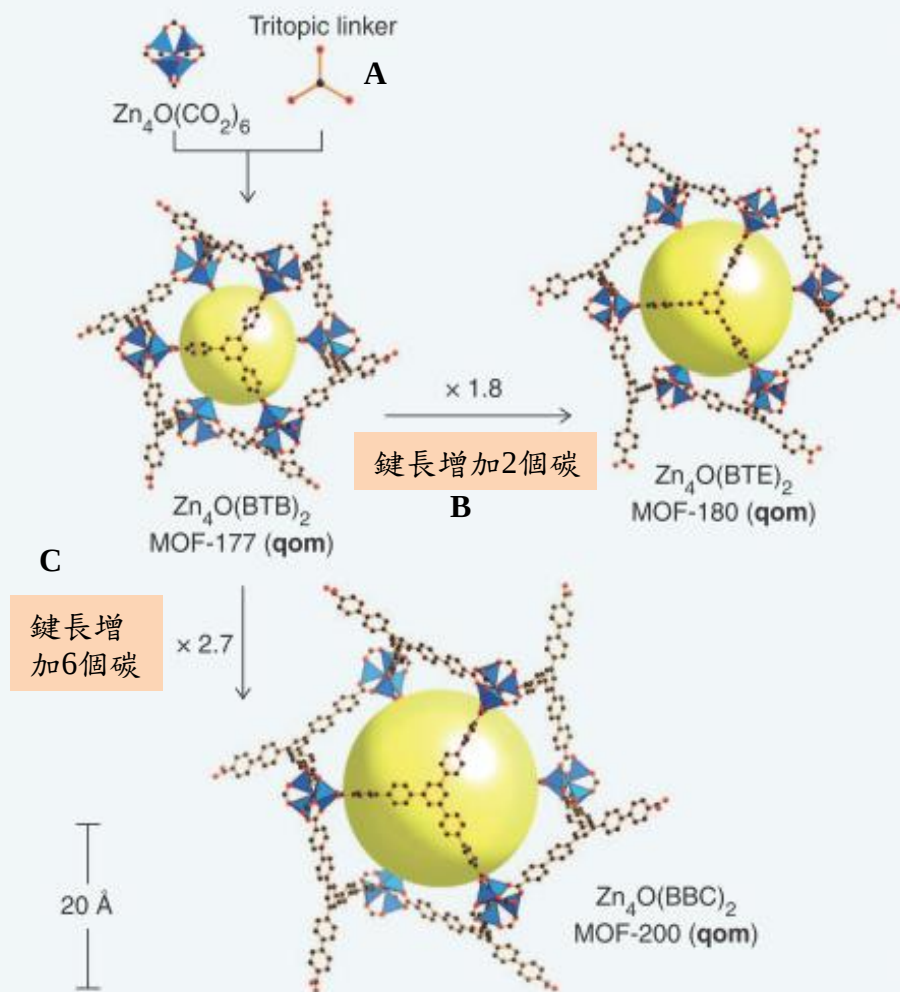
■ MOF材料優勢



金屬有機框架(MOF)簡介(續)

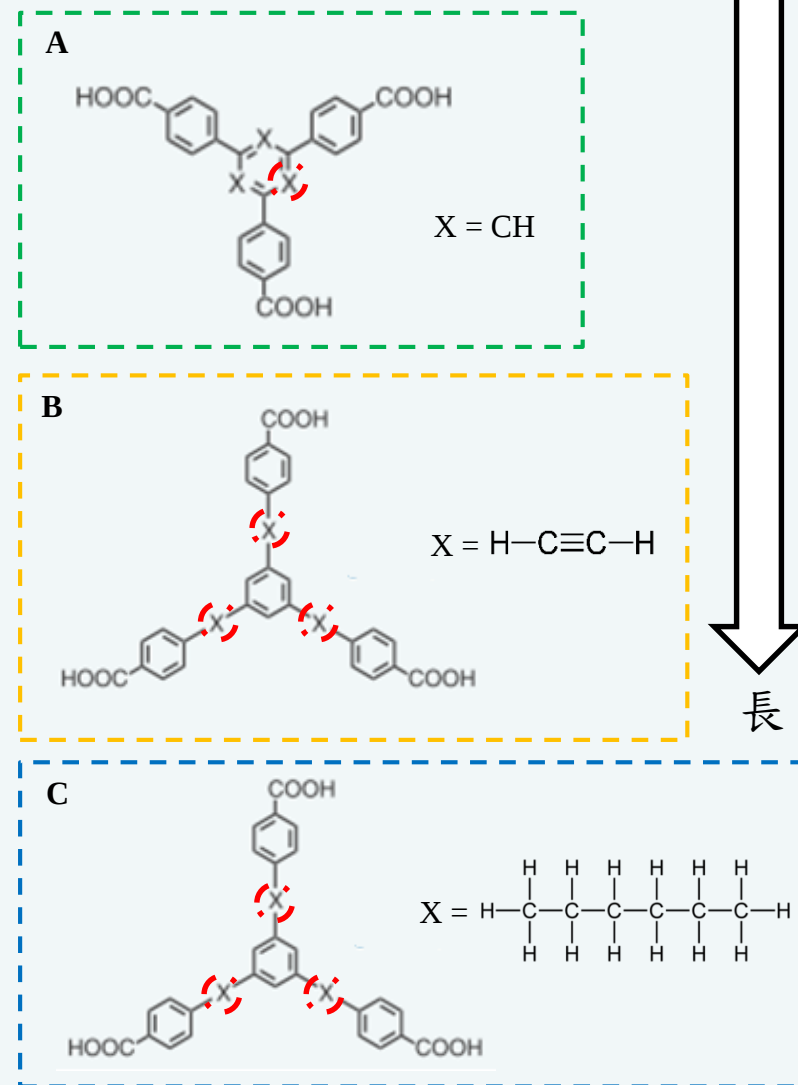
MOF材料優勢

3. 孔洞可調性



不同的應用領域，設計MOF的孔洞大小

配位基長度

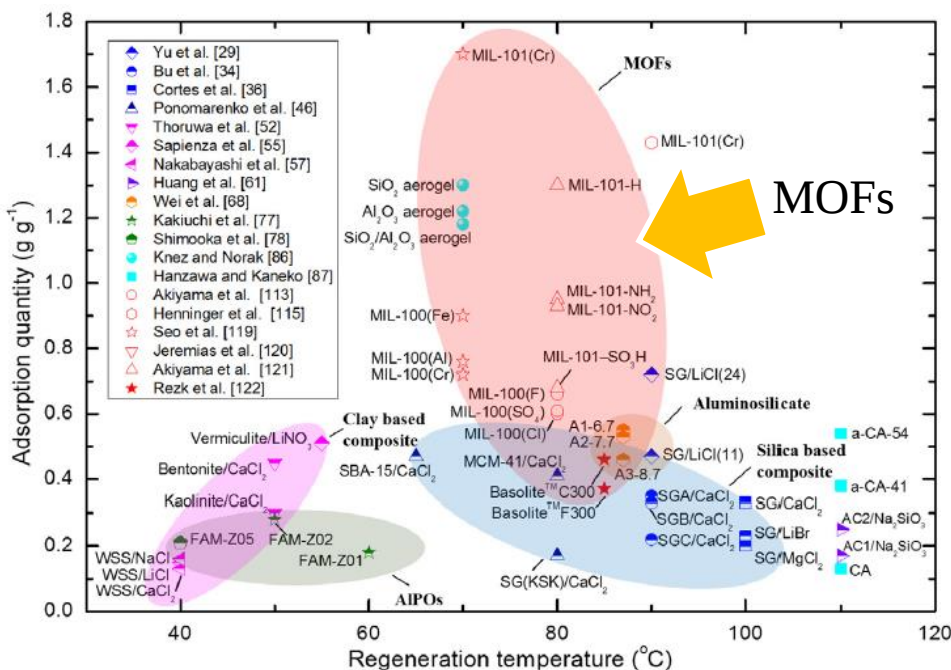


■ 金屬有機框架(MOFs)之應用

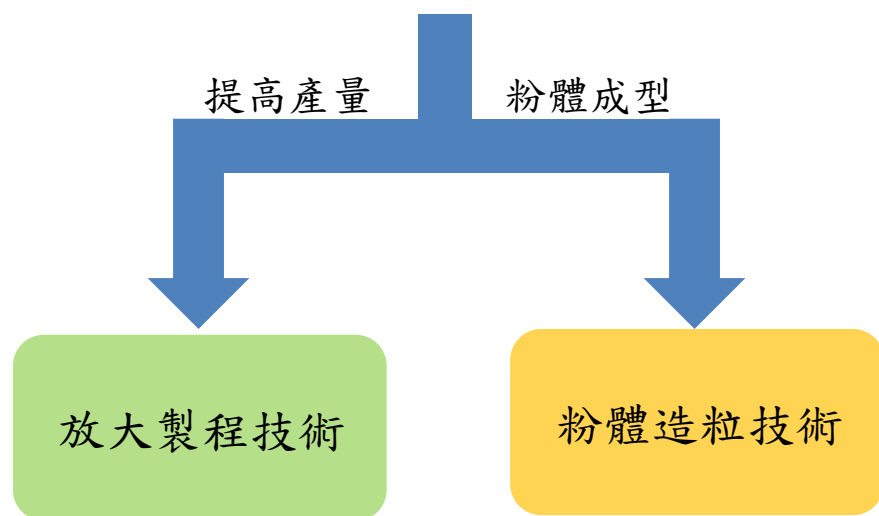
1. 氣體儲存與純化(H_2 、 CH_4 、VOCs...等)
2. 催化劑載體
3. 碳捕捉(CO_2 capture)
4. 水氣吸附(吸附式製冷設備、乾燥設備)

- ## □ MOFs 做為吸附劑之優勢

- 比表面積大
- 孔洞可調性
- 再生溫度低(80°C) ➡ 工業節能



□ MOF (Metal +Linker)



金屬有機框架(MOF)簡介(續)

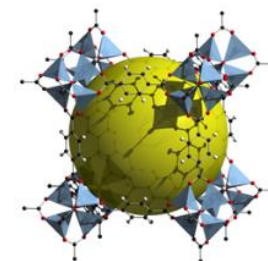
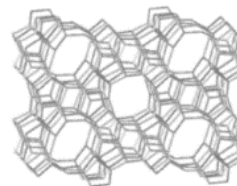
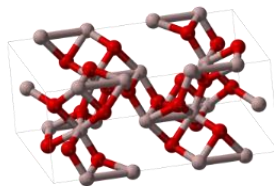
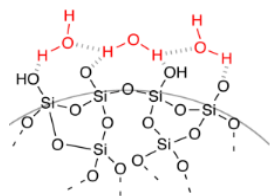
金屬有機骨架(MOF)是由無機金屬鹽類和有機配位體所建構而成的多孔隙材料，1克的MOF比表面積最高可為 $10000 \text{ m}^2/\text{gram}$ ，相當於一個足球場的大小。



MOF與傳統孔洞吸附材料性能比較

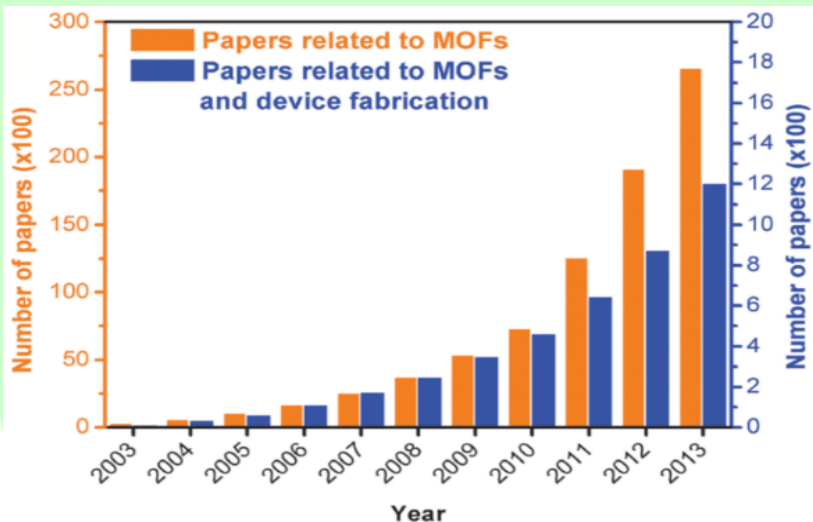
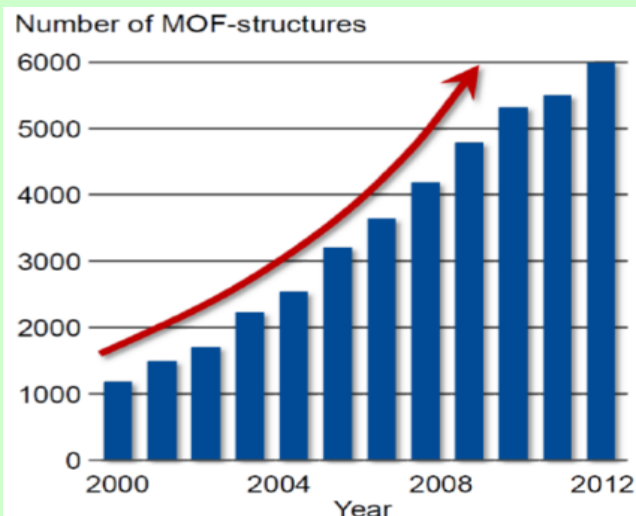
✓ More capacity, less volume, low regeneration temperature

吸附材料	矽膠	活性氧化鋁	沸石(zeolite)	金屬有機骨架(MOF)
比表面積 (m ² /g)	400~700	260~280	600~700	2000~10000
水氣吸附率 (25°C, 80%RH)	25~30%	15~20%	15~20%	40~80%
再生溫度 (°C)	120~160	120~160	160~260	60~80
吸附熱(KJ/Kg)	~2700	~3800	3300~4200	2500~2700
可調性	無序孔洞	無序孔洞	藉由不同矽鋁 比、晶型結構 合成均一孔洞	孔隙度、孔徑大小 及官能基等都可經 由分子設計來調控

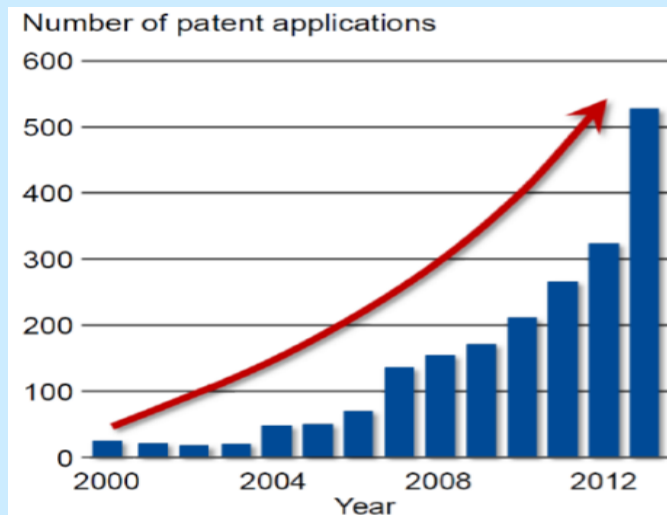


MOF @ 學術研究 vs 產業開發

ACADEMIA



INDUSTRY



- 依據市場調查，2016~2021全球MOF市場年複合成長率為高速成長達47.2%，由2016年的**23.6 噸**成長至2021年的**163 噸**。
- BASF、Stream Chemicals、MOFapps、MOF Technologies等已將MOF產業化生產。

- [1] Paolo Falcaro, Raffaele Ricco, Cara M. Doherty, Kang Liang, Anita J. Hill and Mark J. Styles, Chem. Soc. Rev. 2014, 43, 5513–5560
 [2] <https://dailyhover.com/global-metal-organic-frameworks-market/>
 [3] QYR Chemical & Materials Research Center, Jan 2018

商業化MOF應用產品

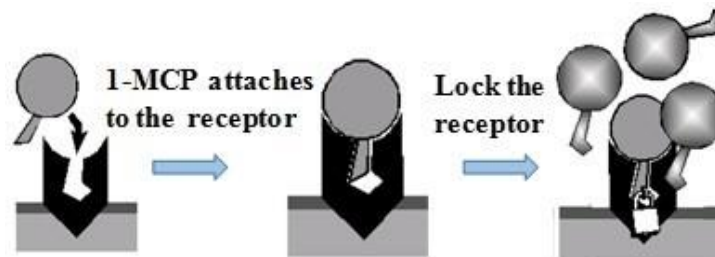


pear

1 ppm 1-MCP, 5 months RA, 0°C



- ✓ ION-X為電子級毒性氣體儲存筒，用於儲存 AsH_3 、 PH_3 、 BF_3 等半導體特用毒性氣體。
- ✓ 藉由填充MOF多孔材料，ION-X可在較低壓力下裝載。
- ✓ 半導體工作環境濃度控制嚴密(<10ppb)，ION-X提供低壓儲存與運輸，大幅降低洩漏風險，且洩漏時會降低洩漏速度，提高整體安全性。
- ✓ 新創MOF Technologies與蔬果運送公司Decco Post Harvest合作，開發出蔬果運輸保鮮產品Trupick。
- ✓ Trupick為膠體包裝型態，內含吸附1-MCP之MOF材料。
- ✓ 當Trupick置入一密閉空間時，會穩定釋放1-MCP於環境中，並與蔬果表面的乙烯受體產生鍵結，進而抑制蔬果提早成熟或腐敗。



[1] Rubio-Martinez M, Avci-Camur C, Thornton AW, Imaz I, Maspoch D, Hill MR, Chem. Soc. REV., 2017,46,3453-3480

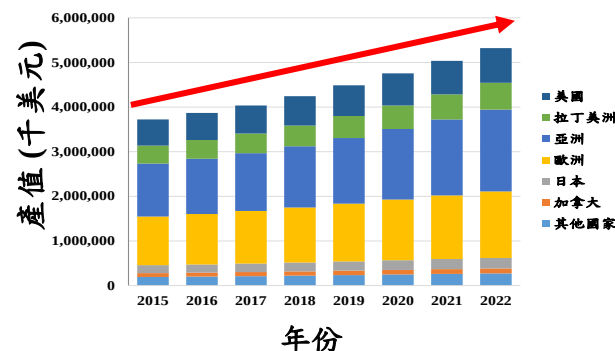
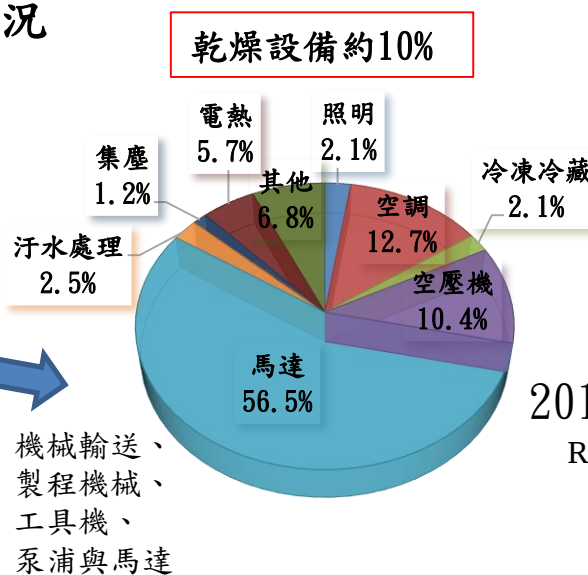
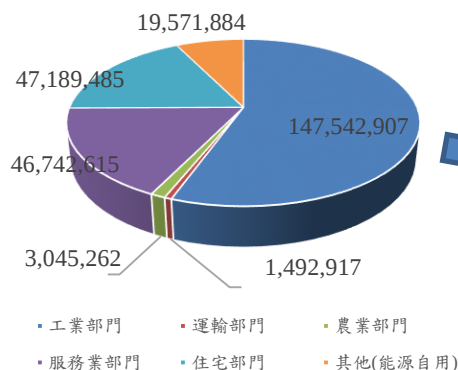
低耗能吸附乾燥及其應用

願景設定：

針對**工業節能技術領域**，進行**工業吸附/熱風乾燥設備**節能產品開發，藉由**核心關鍵MOF吸附劑技術**建立，提升國內**乾燥除濕設備性能**，以彌補產業技術缺口。

工業部門電力耗能佔比現況

2019年全國電力使用量：
2655億度電
(工業部門1475億度電)

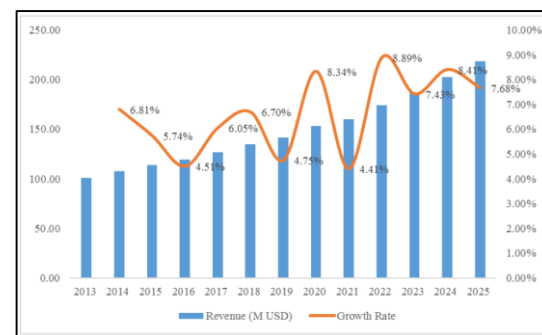


2019年全球乾燥設備產值約**4500億台幣**

Ref. Industrial Dryers, Global Industry Analysts, Inc., 2016

資料來源：經濟部能源局能源平衡表 (2020年統計資料)
2019年能源查核申報平衡統計資料

- **除濕與乾燥**是工業與民生必備的基礎設備與設施
- 文獻指出**乾燥設備**耗電佔工業部門總耗電**10~15%**。
(Arun S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition, 2014)
- 台灣乾燥設備年產值約**65億台幣**。



2019年除濕轉輪元件全球市場**45億**

Source: Experts Interview, Secondary Sources and QYR Machinery & Equipment Research Center, Oct 2018

吸附乾燥技術之應用市場

吸附乾燥核心技術應用

壓縮空氣乾燥



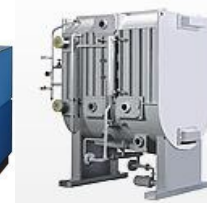
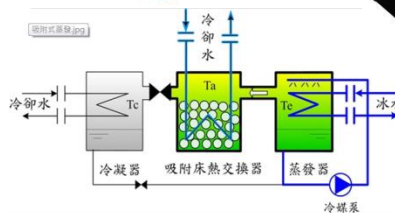
常壓工業乾燥



常壓極低濕乾燥



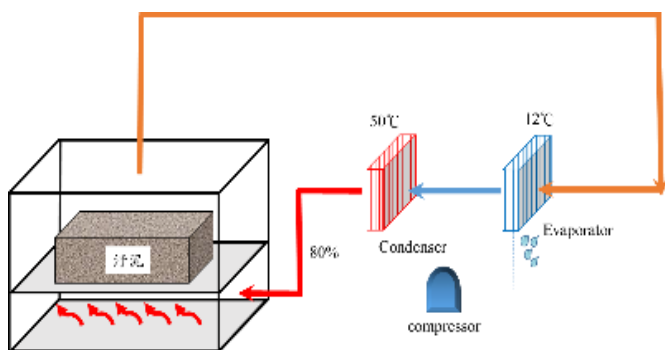
空調吸附製冷



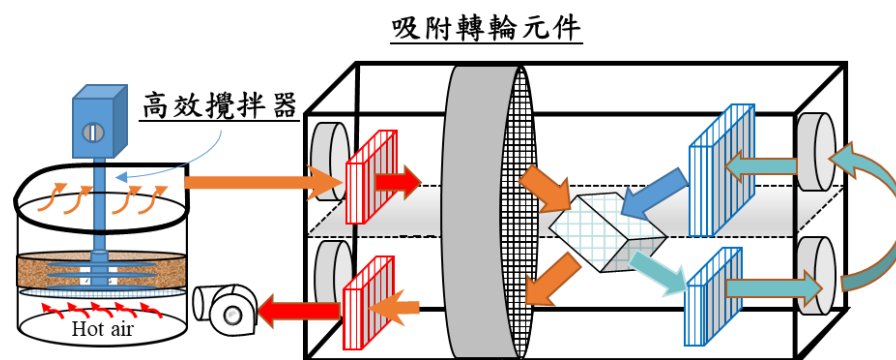
吸附乾燥技術應用於污泥乾燥

- 台灣每年有**240萬噸**污泥處理量，含水率由70wt%降至40wt%，將減少**120萬噸**，預估潛在應用產值達80億。
- 國內每噸污泥處理費用約**7000~8000元/噸**，導入污泥乾燥設備1~2年即可回收。
- 熱泵低溫乾燥設備(<60°C)**乾燥速率過慢**，造成推廣難以普及。
- 以熱泵結合低耗能吸附元件及高效輔助攪拌設備，**提高乾燥速率**，進而降低設備能耗。

	市售系統	熱泵結合吸附乾燥系統
乾燥能力(kWh/kg)	0.5~0.8	0.4
EF值 (kg/kWh)	1.25 ~ 2.0	2.5



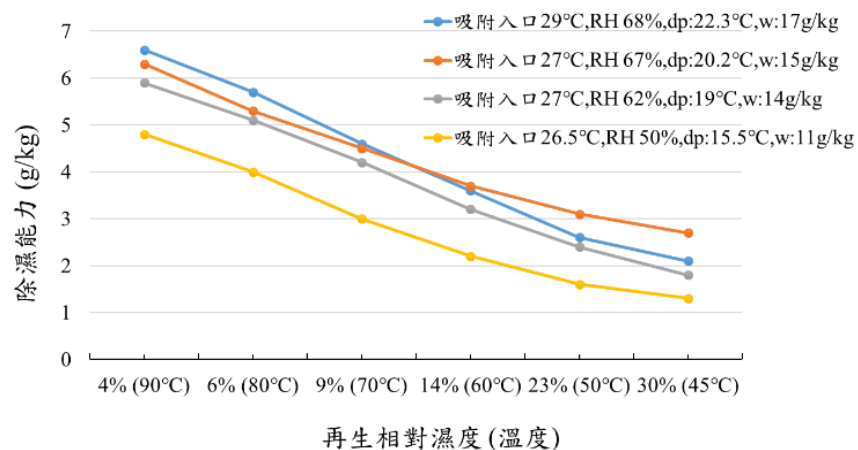
傳統熱泵污泥乾燥設備



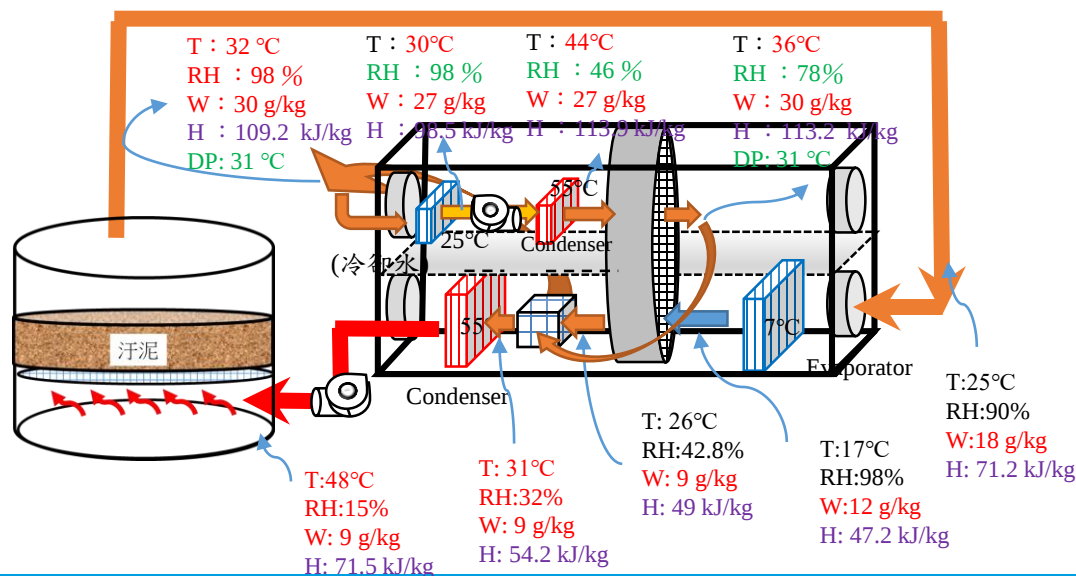
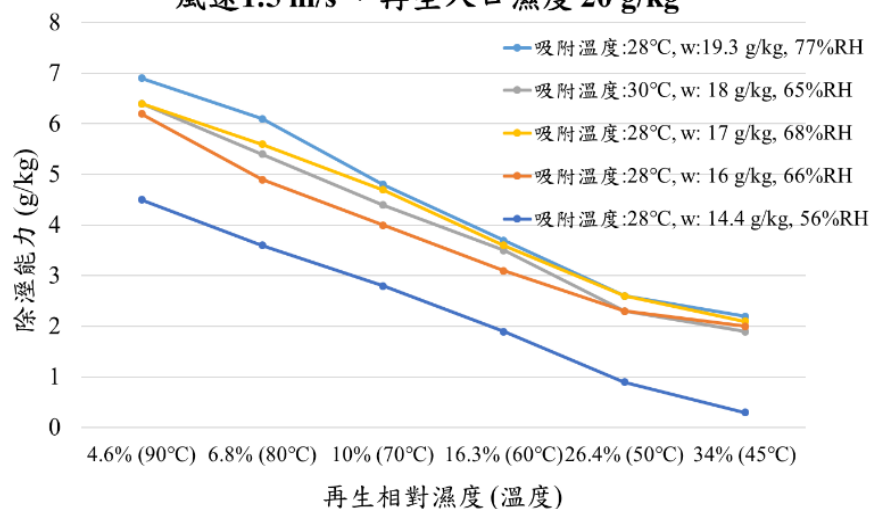
熱泵結合低耗能除濕元件乾燥設備

轉輪低溫再生測試

風速1.5 m/s 轉輪性能，再生入口濕度 18 g/kg



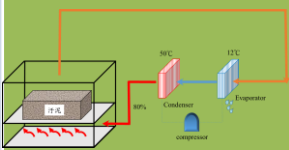
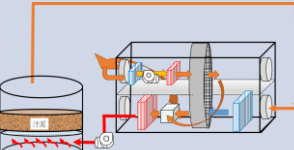
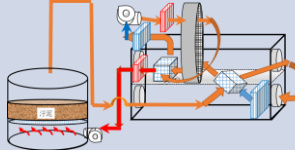
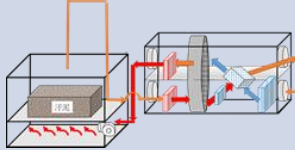
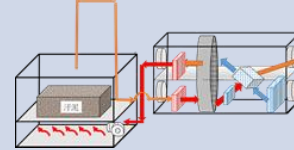
風速1.5 m/s，再生入口濕度 20 g/kg



熱泵結合吸附轉輪系統模擬結果

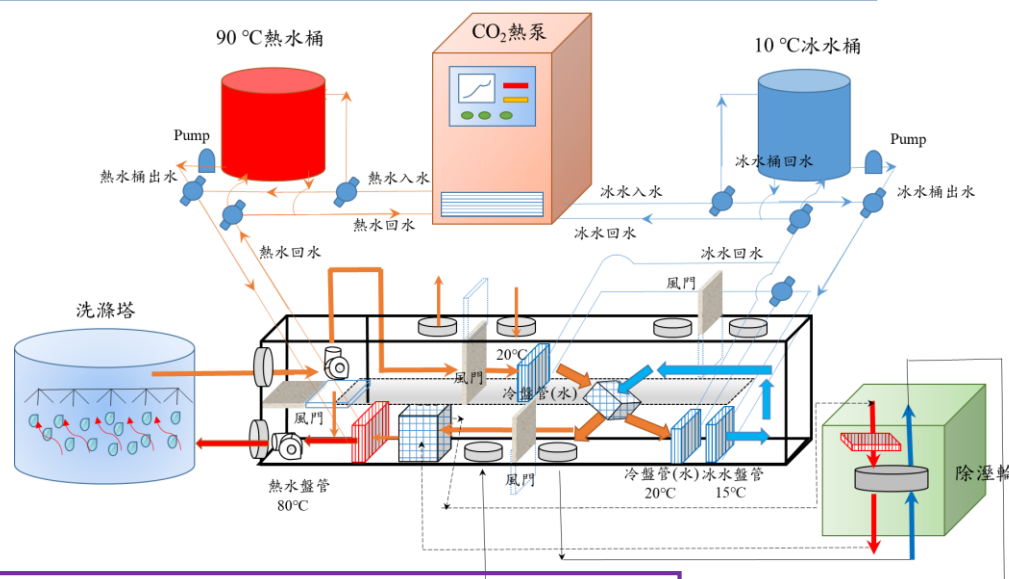
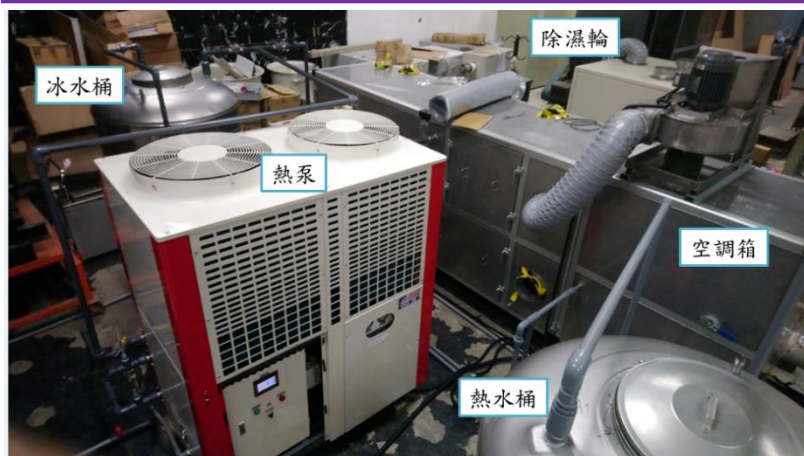
□ 低溫熱泵乾燥系統各項性能改善比較表

- 設計樣式能效指標 $> 2.0 \text{ kg/kW}\cdot\text{h}$

污泥含溼率 70% → 40% (一噸汙泥)	熱泵乾燥系統	熱泵+除濕輪系統 樣式一	熱泵+除濕輪系統 樣式二	熱泵+除濕輪系統 樣式三	熱泵+ITRI除溼輪 系統三
系統原理					
乾燥速率(g/s)	6	9	10	8 (市售轉輪)	9 (MOF)
功率(kW)	11.4	14.9	14.9	11.4	11.4
時間(hr)	24	16	14.4	18	16
總耗電量(kWh)	273.6	238.4	214.56	205.2	182.4
價錢(萬)	120	120+39	120+40	120+32	120+42
能效 (kg/kW·h)	1.89	2.17	2.43	2.52	2.84
回收年限(年)	-	10.1	6.1	4.3	4.2

熱泵結合吸附轉輪系統實際測試結果

1. 結合熱泵與吸附元件雛型乾燥系統



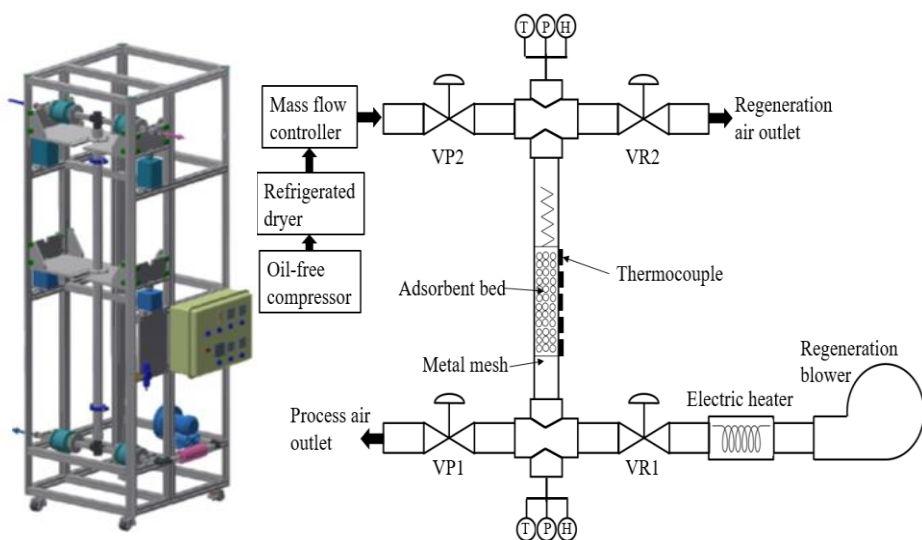
2. 結合熱泵與吸附元件雛型乾燥系統高溫型測試結果 (乾燥溫度:70°C)

污泥含溼率 70%→40% (一噸汙泥)	高溫熱泵系統	高溫型設備 樣式 2	高溫型設備 樣式 3	高溫型設備 樣式 4	高溫型設備 樣式 5
系統原理					
除濕速率 (實測) (g/s)	9.5 (9.4)	13.4 (11.8)	13.4 (10.8)	17.6 (16.9)	18 (15.5)
能效指標 (實測) (kg/kW*h)	1.87 (1.84)	2.22 (1.90)	2.70 (2.12)	2.40 (2.31)	2.46 (2.14)

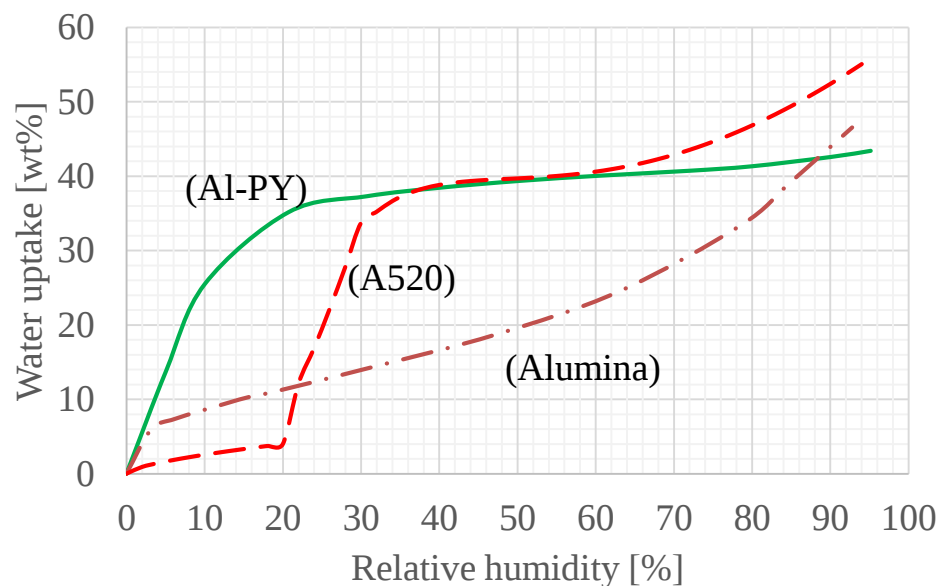
MOF應用於壓縮空氣乾燥機

• 測試吸附劑: 市售氧化鋁、ITRI-MOF

- 市售氧化鋁: 等溫吸附曲線含蓋低相對濕度，壓縮空氣可達低露點，但再生需高溫。
- Al-PY(MOF): 吸水量高於氧化鋁2倍，曲線較徒緩，再生所需溫度較低。
- A520(MOF): 吸水量高於氧化鋁2倍，曲線較徒緩，再生溫度最低，但欲達低露點需與他種吸附劑混合使用。



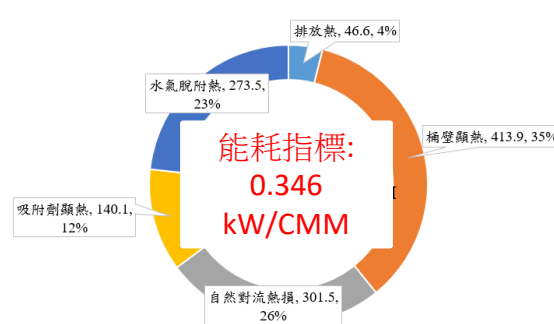
壓縮空氣乾燥離型機測試示意圖



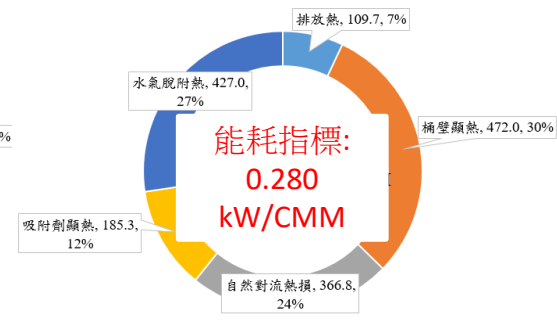
各種吸附劑之吸附等溫線

MOF應用於壓縮空氣乾燥機

- 小型雛型機實驗結果→**實際大型乾燥機能耗指標**(再生耗能/氣量)。
- AP-PY(MOF)再生所需溫度較低，消耗於顯熱損失之比例較低。
- Al-PY(MOF)能耗較氧化鋁低**10%**。



氧化鋁

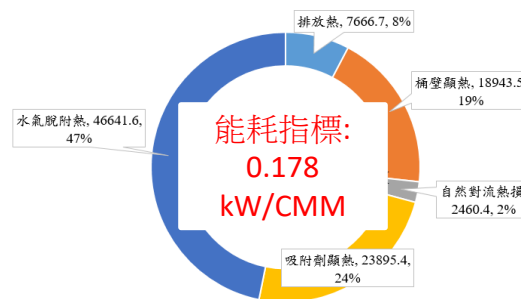


Al-PY (MOF)

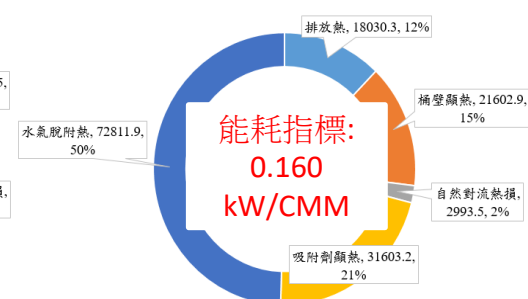
再生階段各部能耗比例及能耗指標(雛型機)

雛型機實驗條件(乾燥要求露點-40 °C)

	吸附	再生
溫度 [°C]	23 ~ 25	130 ~ 140
壓力 [bar]	7	1
面速度 [m/s]	0.13	0.62
入口氣流 露點溫度 [°C]	-11 ~ -13	15 ~ 17



氧化鋁



Al-PY (MOF)

再生階段各部能耗比例及能耗指標(實際系統)

結論-空壓系統與吸附乾燥節能技術

- 選擇合適的空壓機(使用高效率IE4馬達)
- 減少空車運轉時間(空車耗能約全載35~50%)
- 空壓機廢熱回收再利用
- 進氣口環境溫度控制
- 系統壓降或管件壓阻最小化
- 減少高壓空氣洩漏
- 卻水器型式與排水方式
- 以加熱式代替無熱式吸附乾燥設備
- 定期量測評估空壓系統性能狀況(kW/CMM)