

「經濟部加工出口區臺中園區環保講習會」

空氣品質管理與 RTO 技術

梁正中 教授

逢甲大學環境工程與科學系



大綱

- 一、空氣污染防治理念。
- 二、空氣品質管理。
- 三、蓄熱式熱焚化爐(RTO)。
- 四、案例分享。



一、空氣污染防制理念

1.空氣污染防制實施步驟：

- (1).應該在產生源儘量避免或減少污染物之產生。
- (2).無法避免產生或減量的污染物應儘量以符合環境安全的方式回收。
- (3).無法避免產生或回收的污染物應儘量以符合環境安全的方式處理。
- (4).將污染物排放到環境應視為最後手段，且應該以符合環保的方式實施。

2.一般製程排放的廢氣可採用下列方式之一來控制：

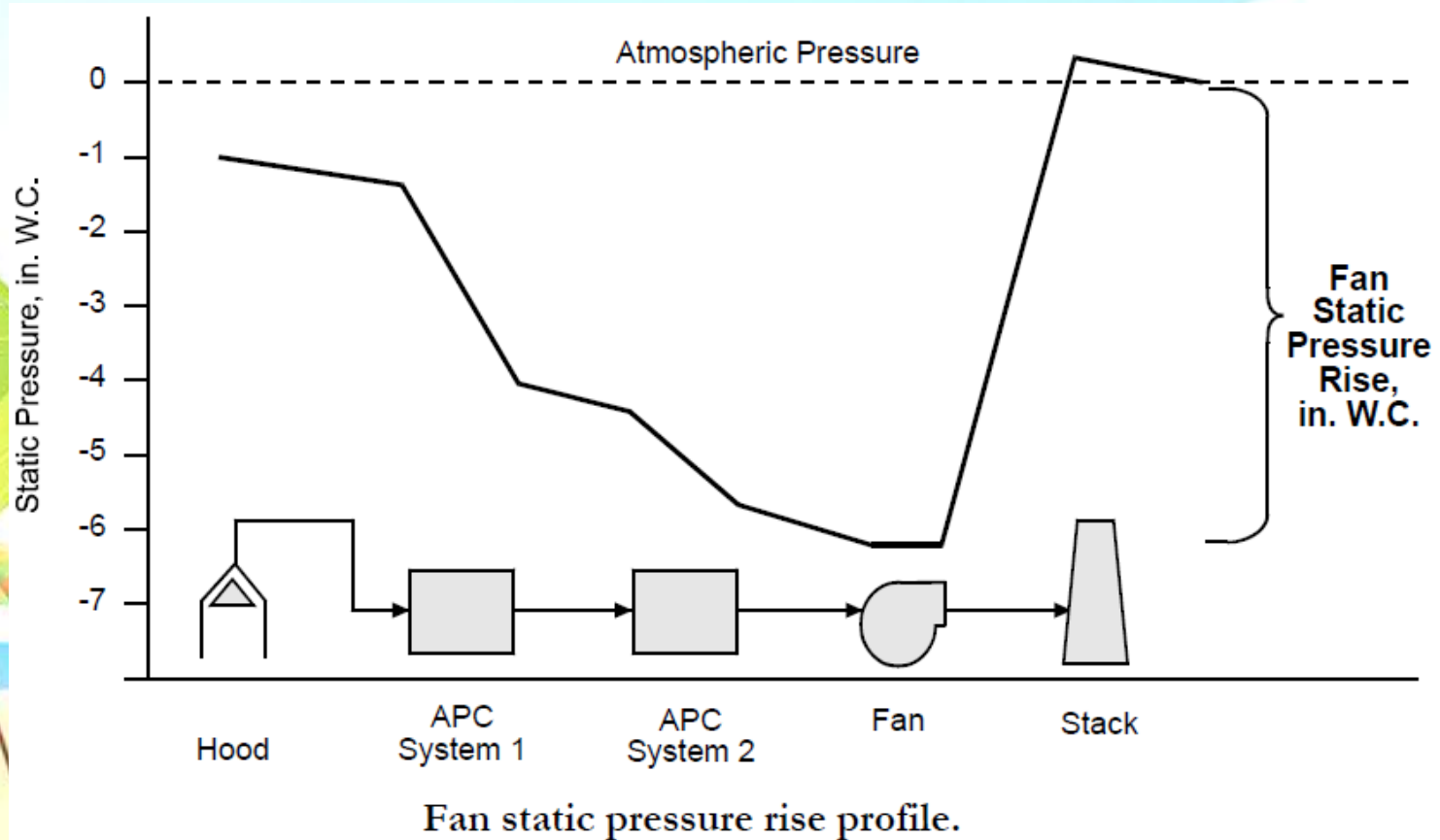
- (1).製程改變：經由修改生產程序或操作條件，使製程變成較不具污染性或降低其排放量。
- (2).原料變更：將較具污染性原料替換成較低污染性原料。
- (3).控制設備之設置：收集污染氣體至污染防制設備，去除污染物或將污染物轉化成較低污染程度。

有時候，最省錢的做法是放棄老舊製程，改用全新較低污染的製程。增加污染控制或回收裝置，可以抵銷部份控制或回收成本。

例如放棄老舊製程設備，改用全新製程要比修改老舊系統以符合環保法規更便宜。

二、空氣品質管理

1. 減少廢氣流量與壓力降—降低設備成本與操作成本



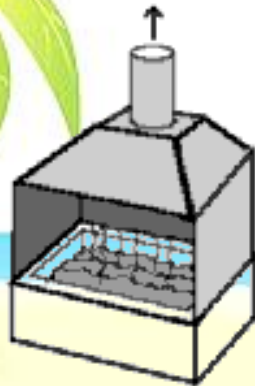
2. 適當補集氣體設備—減少廢氣流量與壓力降

3. 適當防制設備—最佳可行性控制技術(BACT)

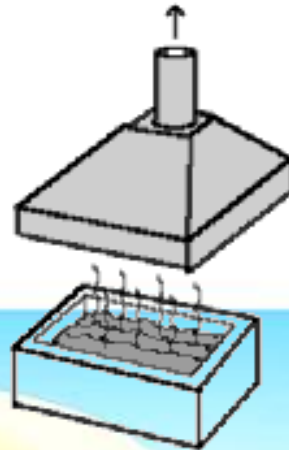
2.適當補集氣體設備-減少廢氣流量與壓力降

補集設備類型

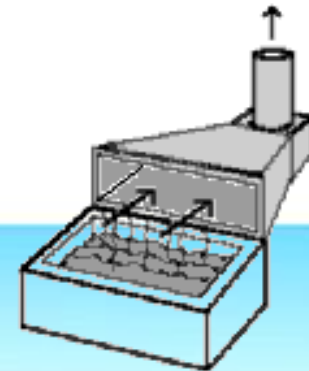
- 排氣櫃(enclosures)
- 抽氣罩(canopy hoods)
- 補捉罩(capture hoods)



排氣櫃



抽氣罩



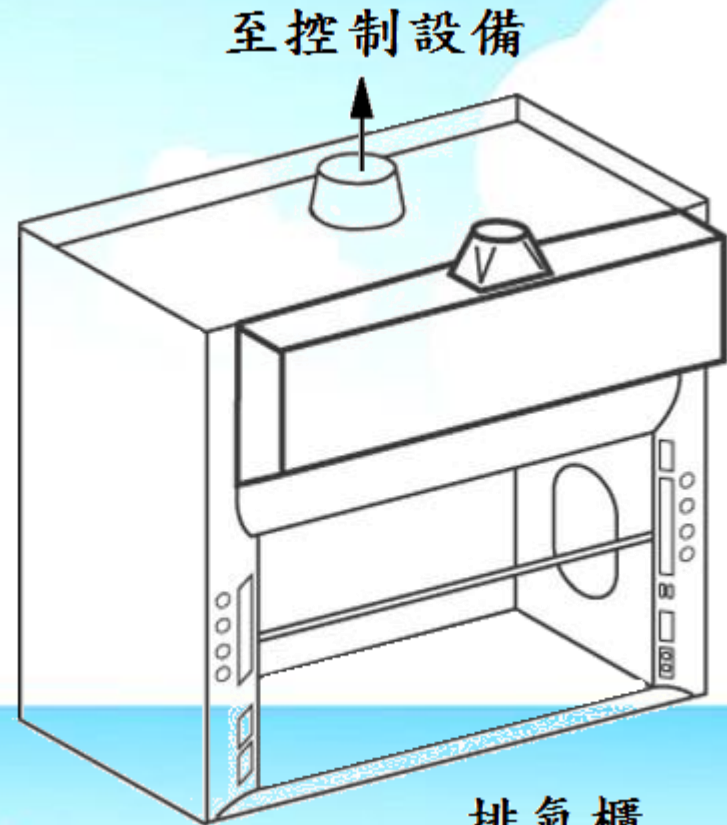
補捉罩

補集效率：排氣櫃 > 抽氣罩 > 補捉罩

排氣櫃(Enclosures)



資料來源: http://www.aircleansystems.com/process_freestanding.htm



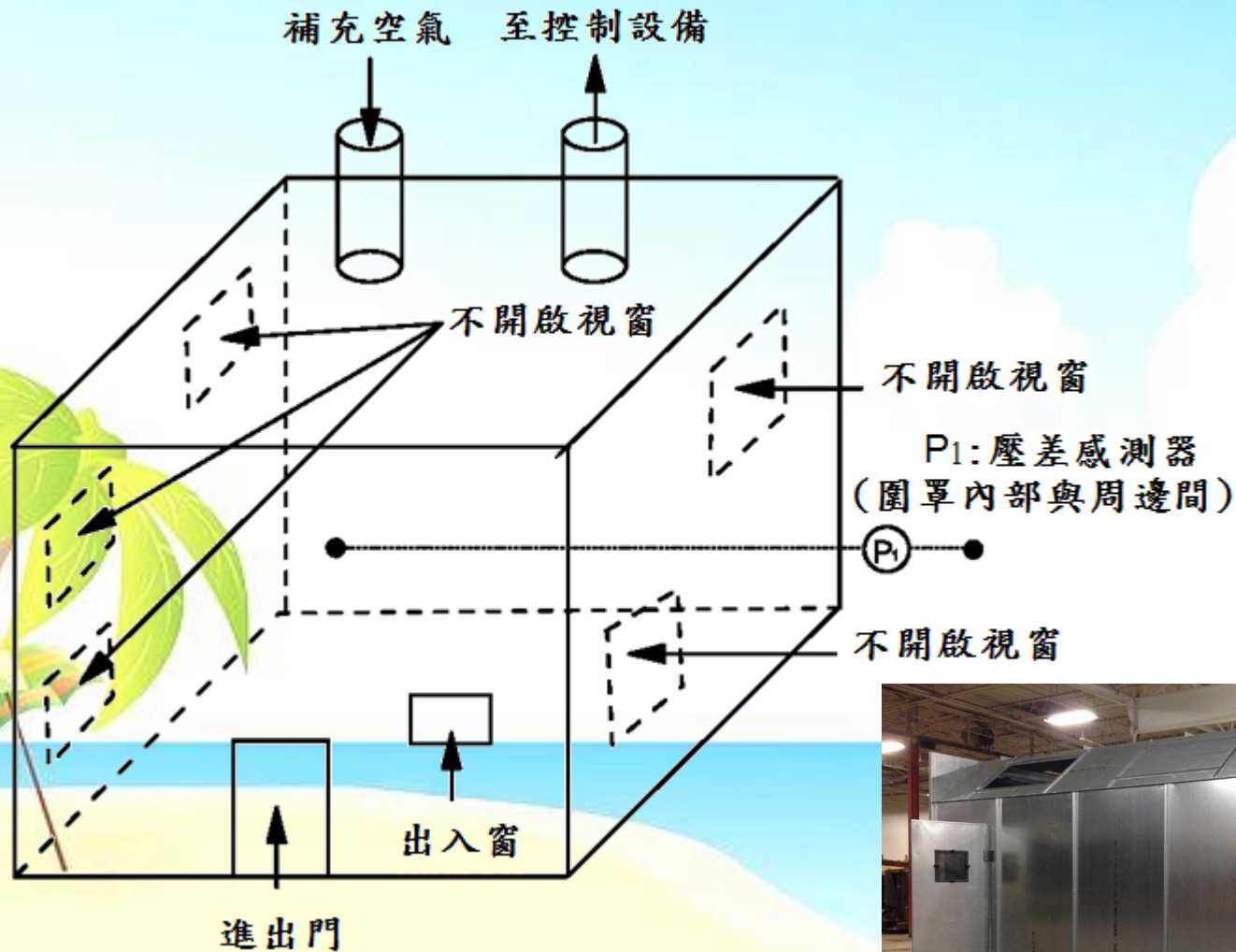
資料來源: Labconco company
<http://www.labconco.com/product/auxiliary-air-plenum-kit-4/3348>

圍封罩(Enclosures)

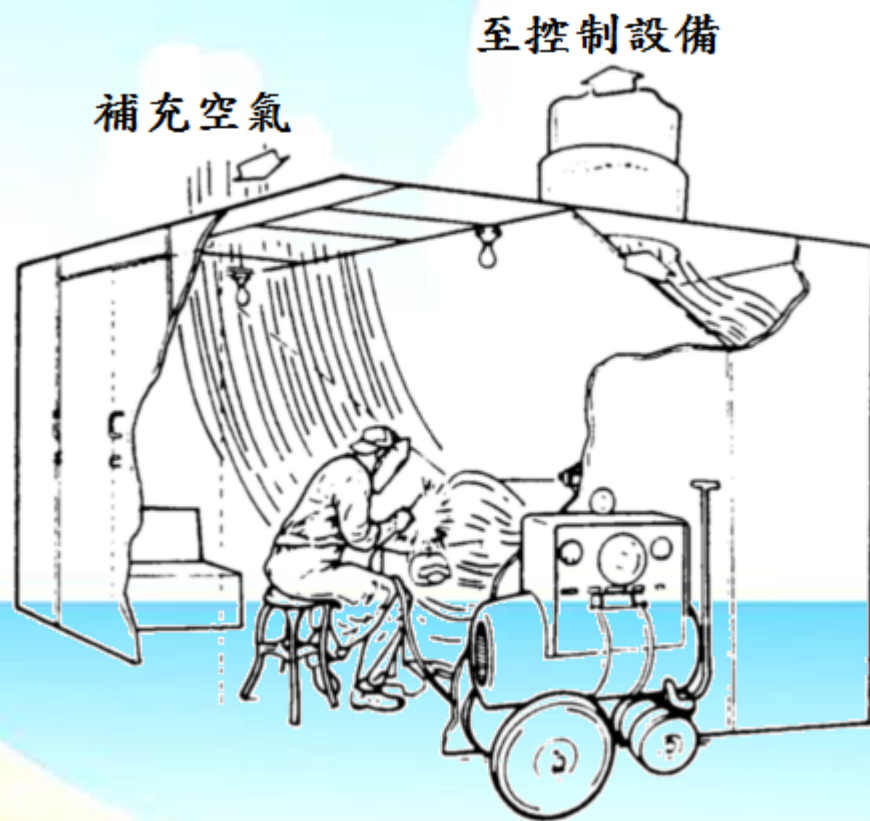
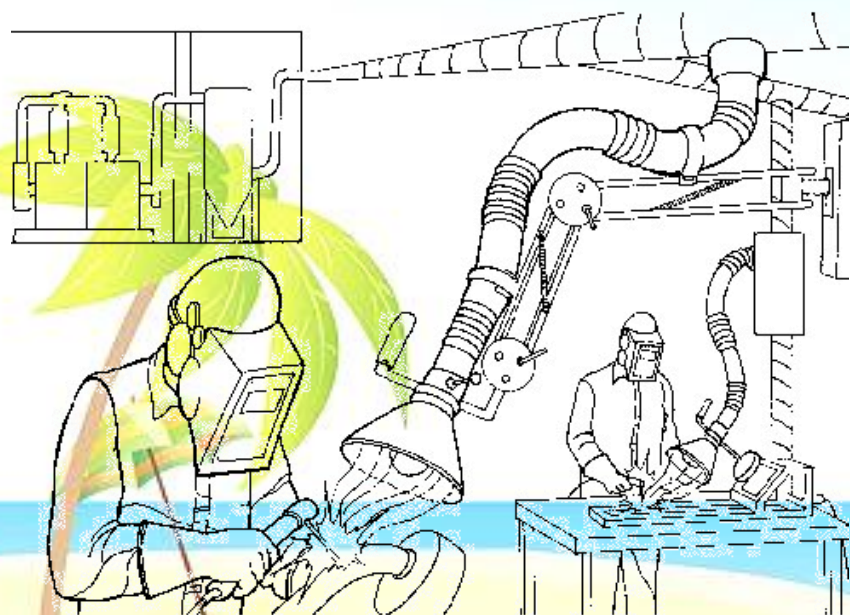
- 總效率是捕集效率與控制裝置效率的乘積
- 全盤固定式 – 100% 捕集效率
- 非全部或部分式 – 捕集效率必須測量來得知



圍封罩(Enclosures)



善用局部排氣通風系統



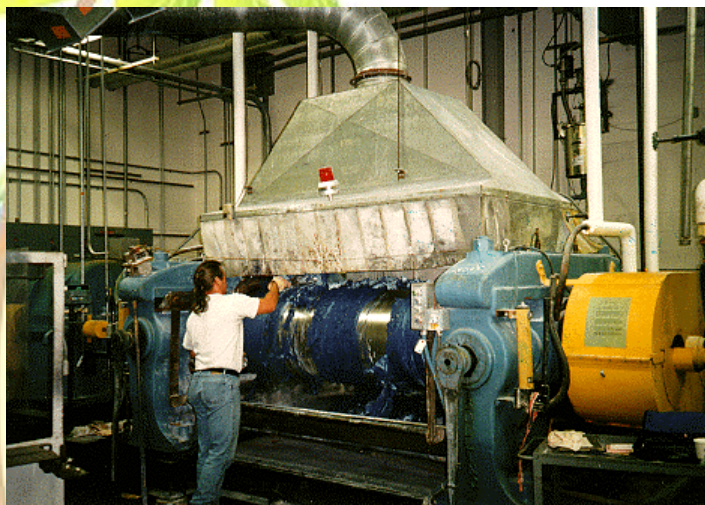
資料來源: International Labour Organization

<http://actrav.itcilo.org/actrav-english/telearn/osh/hazard/controlb.htm>

範例



資料來源：Airflow Systems Southwest. <http://airflowsystems.com/products/hoods/>



資料來源：Ray C. Woodcock
http://www.ilo.org/safework_bookshelf/24english?content&nd=857170974



資料來源：Duversi-Tech Inc.
<http://www.diversitech.ca/case-studies/tayco-panelink.aspx>

收集效率認定

1. 密閉負壓操作

- (1). 污染源與人員均處於負壓封空間內，並設有壓力監測與控制設備，收集效率100%。
- (2). 污染源處於負壓封空間內，未設有壓力監測與控制設備，收集效率90%。

2. 包圍操作

- (1). 污染源設置一般氣罩，且有圍幕設備，收集效率80%。
- (2). 污染源處於包圍型氣罩，收集效率80%。

3. 一般氣罩操作

- (1). 非包圍型之一般氣罩，收集效率60%。

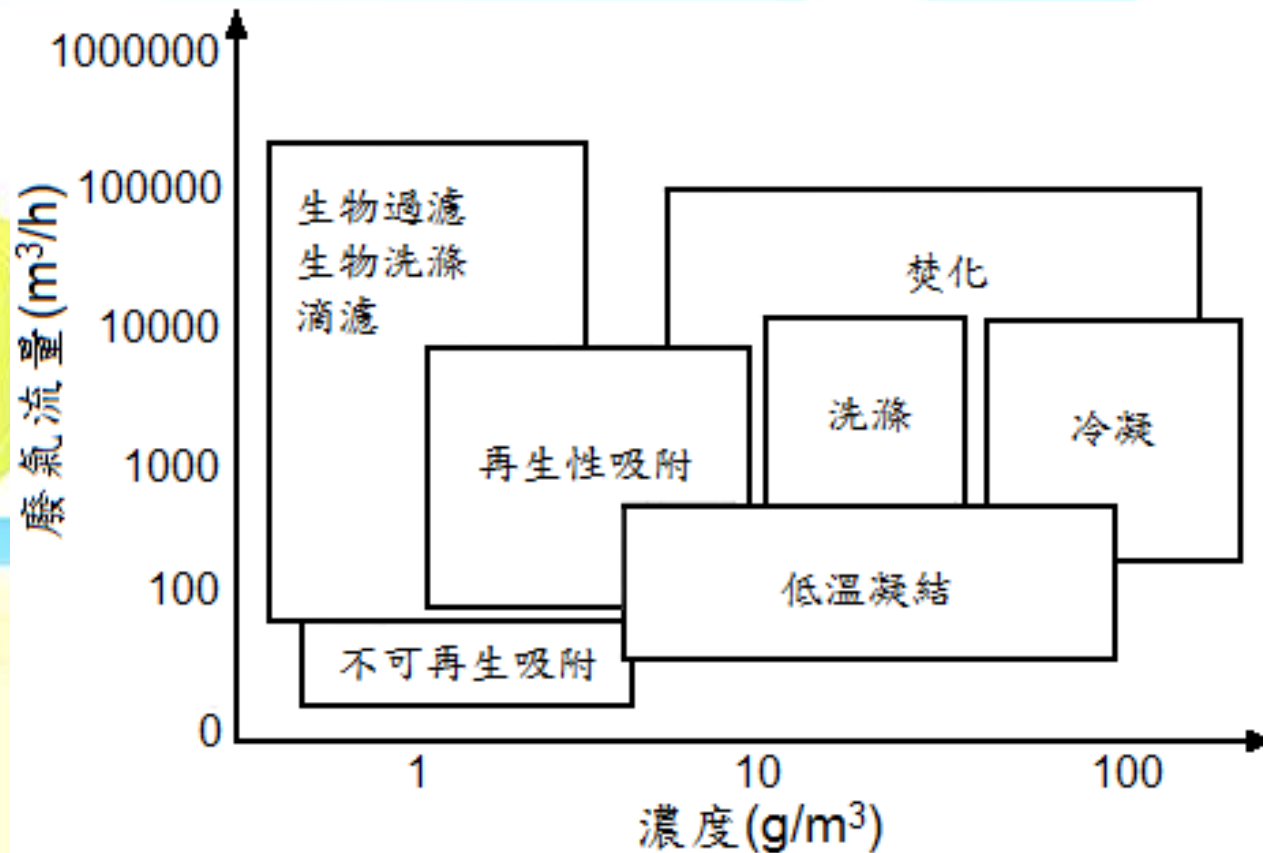
3.適當防制設備-最佳可行性控制技術(BACT)

Top-Down分析程序決定選擇BACT之技術五個步驟如下：

1. 考慮所有可利用、選擇的污染防制技術，即使是在技術上或經濟上並不合理，或是從未被使用於該類製程廢氣污染防制上的控制技術或控制系統。
2. 將技術上不適合的方案剔除。
3. 將可行控制方案依其處理效率排列，最有效率方案列於最前面。
4. 業者依序自行評估每一控制方案的能源消耗，環境影響與經濟上的衝擊。
5. 在經過能源消耗，環境影響與經濟衝擊等各方面的考慮後，業者所選定之技術即可稱為該污染源的BACT。

揮發性有機物最佳可行性控制技術指引

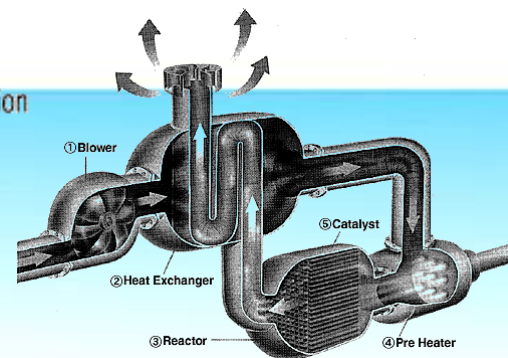
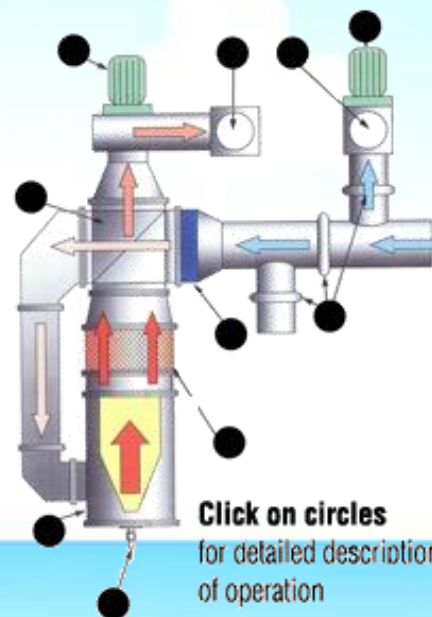
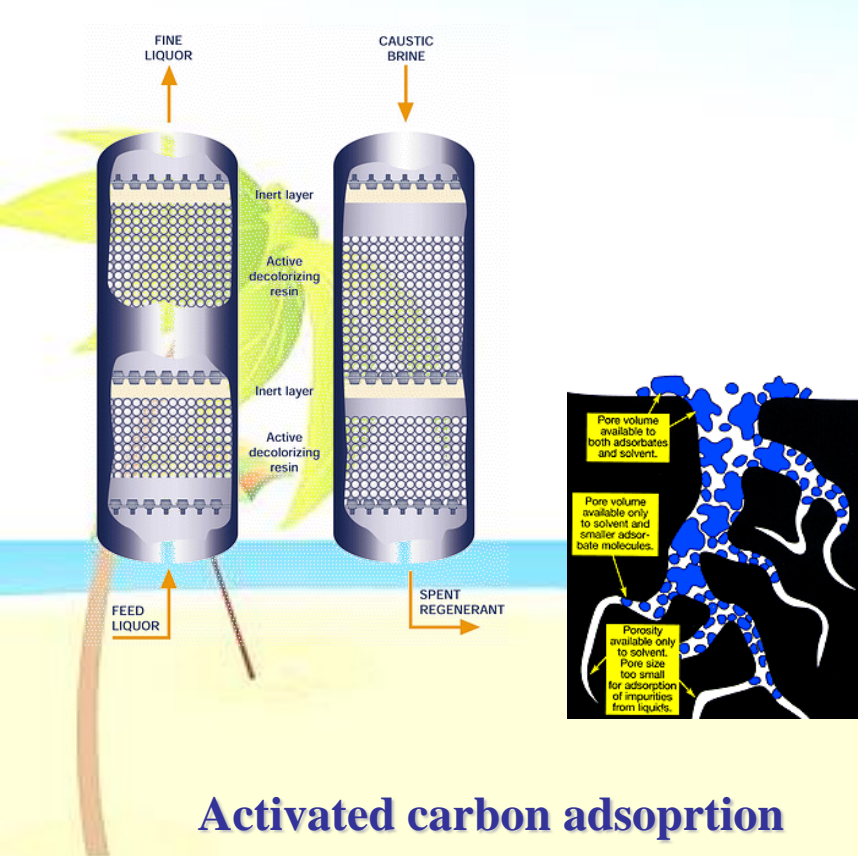
國內常見之技術主要為非燃燒式控制(如吸收法、吸附法、冷凝法及生物處理)及燃燒式控制(如直接焚化、觸媒焚化、蓄熱式焚化爐)等兩大類。其中，生物處理技術較少被採用。



以流量與濃度考慮的VOC控制技術指引

常見揮發性有機物及臭味控制

通常揮發性有機化合物及臭味控制用活性炭吸附法(activated carbon adsorption)或焚化法(incineration)。



Thermal and catalytic incinerations

焚化處理原理

一般揮發性有機物多為溶劑廢氣或臭味有機物，成份含碳、氫、氧、氮、硫、鹵素等元素，因此焚化法之處理原理即在高溫下同時供給足夠的氧氣，進行混合燃燒，轉化成無臭無害氣體。優點為適用於所有揮發性有機物成份，且去除效率高，同時廢熱可回收再利用；缺點為若VOCs濃度不足，燃料消耗量大、操作成本及技術較高、無法回收VOCs。

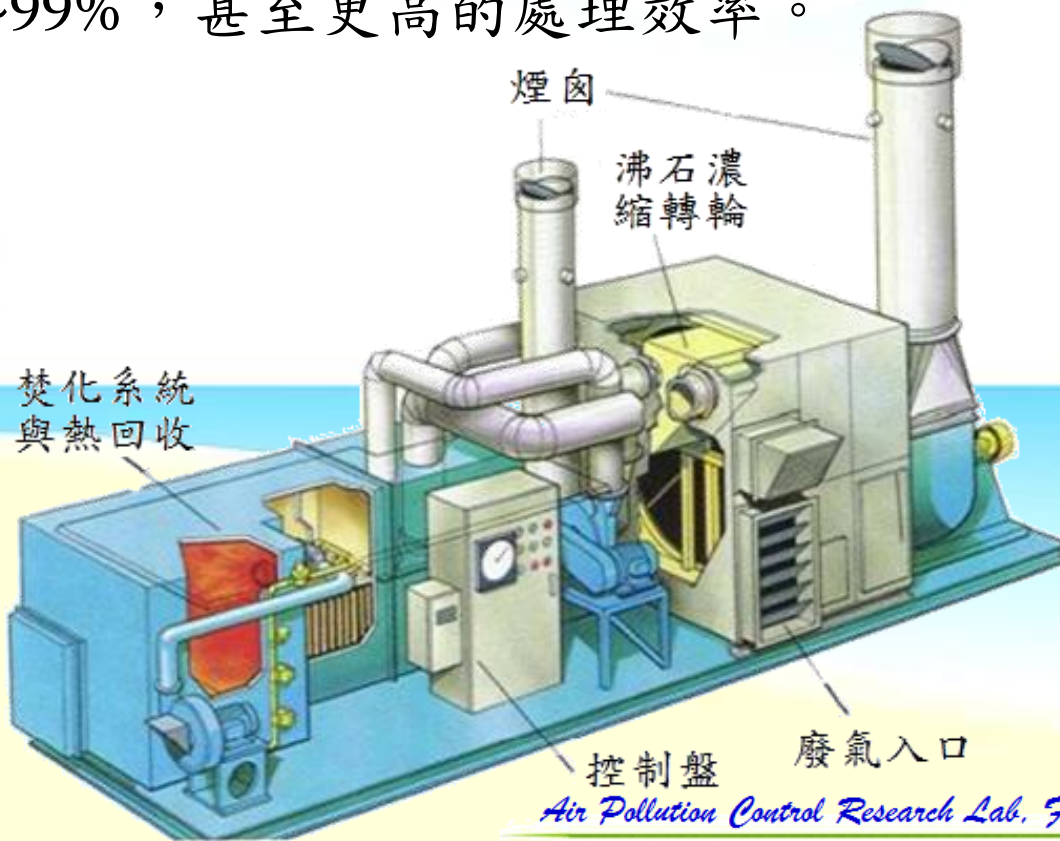
應用

通常熱焚化設備適合處理小風量高濃度高溫之廢氣，幾乎可完全去除VOCs，但含塵濃度高者須前處理，若使用蓄熱式熱焚化爐將可大量減少燃料使用量；若使用觸媒焚化爐或蓄熱式觸媒焚化(regenerative catalytic oxidation, RCO)，需先將會造成觸媒毒化之物質除去。

-大廢氣流量、低濃度之VOCs控制方法-

(1).VOCs廢氣先濃縮再處理會更經濟、有效。

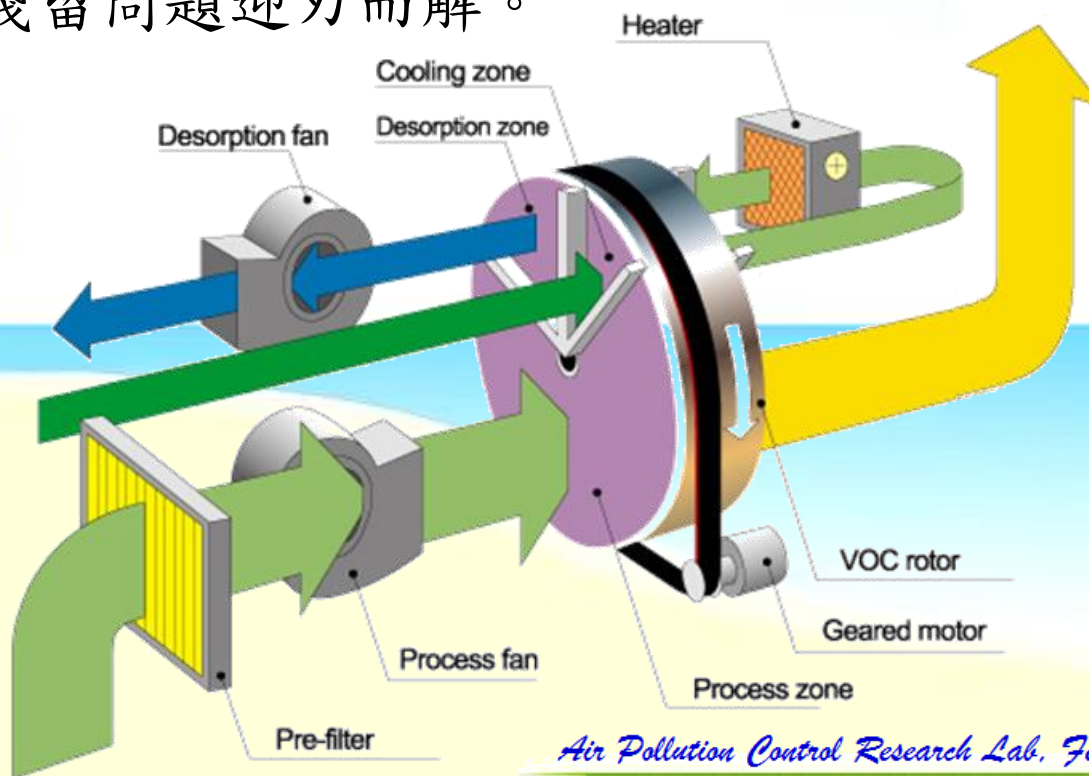
沸石濃縮轉輪-焚化系統已模組化，使全系統具備最小的空間需求，提供持續及自動化的操控模式，更換零組件的少量化更確保長時運轉。當轉輪濃縮倍率介於8到20倍時，VOCs去除率能達到95%~99%，甚至更高的處理效率。



濃縮沸石轉輪

沸石轉輪主要成分為高矽鋁比之沸石吸附劑，利用沸石具高吸附與脫附效率之特定孔洞特性，使高風量、低濃度之VOCs廢氣，經沸石濃縮轉換成低風量、高濃度之廢氣，降低後端終處理設備(焚化或冷凝)成本。

現行轉輪具有高溫脫附($>300^{\circ}\text{C}$)下高效率之脫附能力，使高沸點VOCs殘留問題迎刃而解。

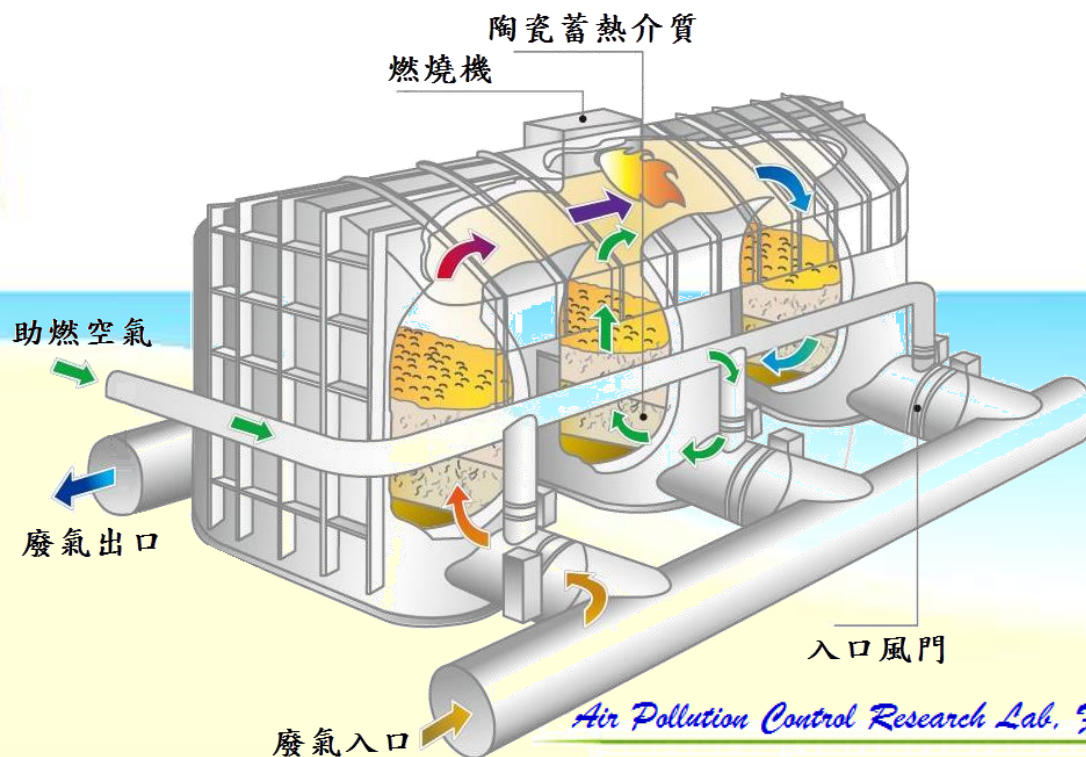


- 沸石濃縮轉輪焚化系統採預組及模組化設計，使轉輪系統具備最小的空間需求，且提供持續性及無人化的操控模式，而少量的更換零組件更確保高度的運轉時間。
- 濃縮沸石轉輪：主要成分為高矽鋁比沸石之吸附劑，可利用沸石特定孔徑具高吸、脫附效率之特性，使原本具高風量、低濃度之VOCs廢氣，經沸石濃縮轉換成低風量、高濃度之廢氣，降低後端終處理設備成本。
- 轉輪需具有高溫脫附之能力，可在 $>300^{\circ}\text{C}$ 溫度下進行高效率之脫附作用，解決高沸點VOCs殘留問題。
- 轉輪系統當濃縮倍率介於8倍到20倍之間時，能夠達到VOCs 95%~99%，甚至更高的處理效率。

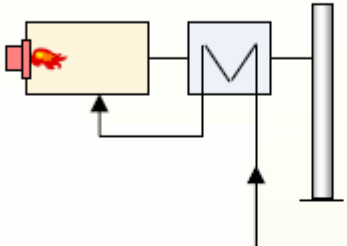
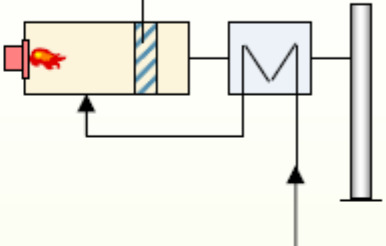
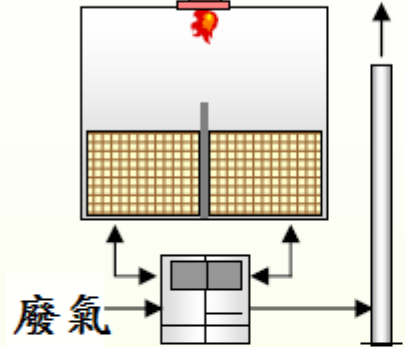
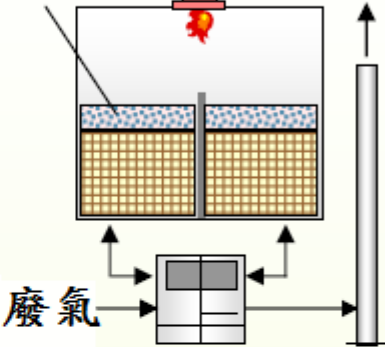
— 中/小廢氣流量、高濃度之VOCs控制方法 —

(2). VOCs廢氣直接焚化

焚化設備適合處理小風量、高濃度、高溫廢氣，VOCs去除率非常高(>90%)。使用熱焚化爐或蓄熱式熱焚化爐(regenerative thermal oxidation, RTO)可大量減少燃料使用量；使用觸媒焚化爐或蓄熱式觸媒焚化(regenerative catalytic oxidation, RCO)，需先將會造成觸媒毒化之物質(含S、P、Cl化合物)除去。

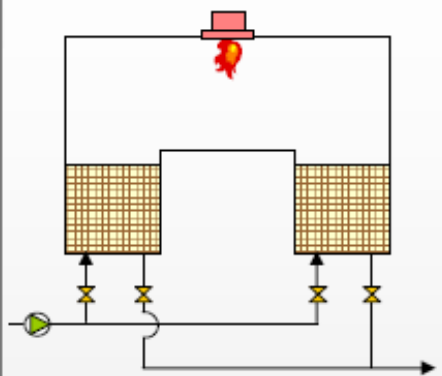
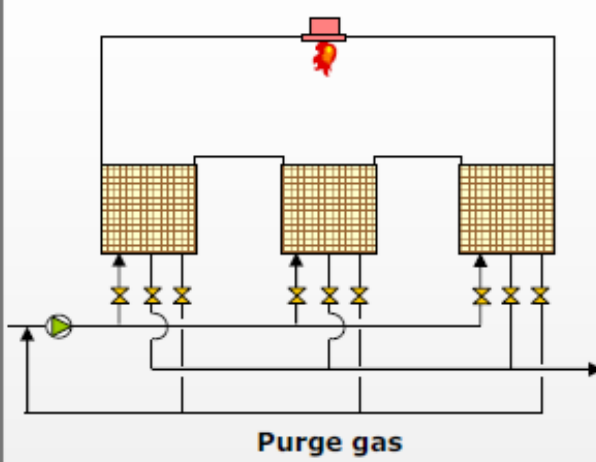
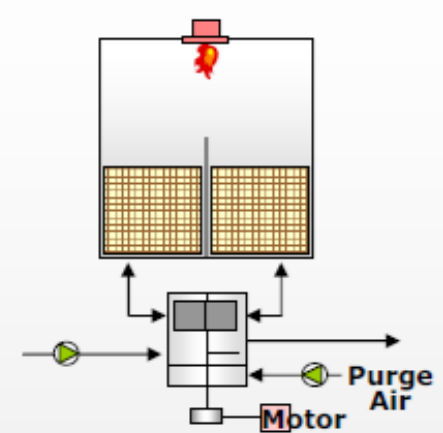


VOCs焚化的種類

系統	熱焚化	觸媒焚化	蓄熱式熱焚化	蓄熱式觸媒焚化
裝置				
操作溫度	750 ~ 850 ℃	300 ~ 350 ℃	750 ~ 850℃	300 ~ 350℃
熱交換型式	預熱式	預熱式	蓄熱式	蓄熱式
熱回收效率	40 ~ 70 %	40 ~ 70 %	95 % 以上	95 % 以上



蓄熱式熱焚化爐的發展

	1 st generation	2 nd generation	3 rd generation
	二床式	三床式	旋轉式
系統流線			
問題與發展	● 閥門開關時未經處理的氣體排出	Develop → ● 未經處理氣體排放的預防	
	● 閥門開關時壓力波動 ● 但便宜得多	● 壓力波動 ● 許多閥門 → 麻煩因子	Develop → ● 沒有壓力波動 ● 單閥（旋轉式）

二床蓄熱焚化爐操作上經常遇到問題：

- (1).閥體切換期間產生間歇性**異味排放**。
- (2).預處理含膠結物之VOCs排氣，進入焚化爐後導致需定期逆洗再生所產生**黑煙排放**問題(如銅箔基板業、膠帶業...)
- (3).處理含有機矽化物，經燃燒後產生二氧化矽粉末進而**阻塞蓄熱床**等問題(如半導體業、光電業、膠帶業...)
- (4).VOCs排氣中含氮基之高沸點水溶性有機物，若不進行前處理，蓄熱焚化爐燃燒後將衍生大量**NO_x排放**之二次污染問題(如PU合成皮製程)。

蓄熱焚化爐優缺點比較

項目	2 BED	3 BED	Rotary type
結構	結構簡單，正常設計不會產生短流現象。	結構較複雜，但正常設計不會產生短流現象。	易有短循環現象，易產生燃燒不完全現象。
臭味	閥件切換時會產生間些性臭味(未處理氣體)。	多一道purge程序，不會產生間些性臭味。	多一道purge程序，不會產生間些性臭味。
閥件	動件較少，故障機率相對較低。	動件較多，故障機率相對較高。	動件較少(旋轉閥)，故障機率相對較低。
SVOC影響	累積過多使蓄熱材毀壞但不會影響結構。	累積過多使蓄熱材毀壞但不會影響結構。	累積過多使蓄熱材毀壞，使金屬格板使變形。
壓損	閥件切換時間短(< 1s)，且會產生大壓力波動。	閥件切換時間長(3~5s)產生較小壓力波動。	旋轉閥持續轉動，壓力波動最小。
施工	結構簡單，施工容易，蓄熱材堆疊容易且整齊	結構複雜施工困難度高但蓄熱材堆疊容易。	結構複雜施工困難度高，且蓄熱材堆疊不均。
成本	設置成本低，維修保養較低。	約2BED 1.3~1.5倍，維修保養較高。	約2BED 1.4~1.6倍，維修保養較低，旋轉閥成本高。
效率	破壞效率：> 98% 熱回收效率：90~93%	破壞效率：> 9% 熱回收效率：93~95%	破壞效率：> 99% 熱回收效率：93~95%
注意事項	閥件切換會產生間些性臭味，不適合臭味源	無不適合之應用情形	若有高沸點成分、矽化物多時較不建議使用。

RRTO系統形狀優缺點

項目	圓型	方形
適用風量	適合中、大風量系統 (> 300 NCMM以上)	適合中、小風量系統。 $(< 400$ NCMM以下)
結構強度	應用於中大風量RRTO系統使用時，圓形爐體結構較強。	應用於中小風量RRTO系統使用時，方形爐體結構較強；相反的大風量RRTO系統使用時，方形爐體結構則較弱。
燃燒室燃燒不足短循環	小風量RRTO系統圓形爐體結構之中心隔離圓柱形成的最短燃燒距離較小(約50 cm)，使得部份廢氣燃燒反應停留時間不足，易產生短流及燃燒不完全現象，易衍生臭味之問題。	方形爐體結構之最小距離至少跨越一個槽體(最短距離較大)，使得廢氣燃燒反應停留時間足夠，可以避免燃燒短流之現象產生。
佔地空間	燃燒室內蓄熱隔區(zone)之蓄熱材堆疊無效區較大，佔地空間較大。	燃燒室內蓄熱隔區(zone)之蓄熱材堆疊無效區幾乎為零，因此佔地空間較小。

項目	圓型	方形
蓄熱材填充及更換	小風量圓形系統因本體非方形，填充蓄熱材易產生無效區縫隙，需以保溫棉或耐火泥填補縫隙，減少蓄熱材之填充體積，增加無效蓄熱區，且填充蓄熱材之技術門檻較高且困難，更換較不易。	槽體呈正方形，因此蓄熱材之填充較工整且完全，填充及更換蓄熱材較容易。
入口氣流壓力波動之影響	圓形RRTO系統因槽體非正方形，因此填充蓄熱材易產生無效區縫隙，需以保溫棉或耐火泥填補縫隙，操作一段時間後，因蓄熱材堆疊及更換較困難，若堆疊不平均，易產生切換時各槽壓力不平衡，容易衍生壓力波動之問題(尤其300 NCMM以下小風量RRTO)。	蓄熱材堆疊及更換容易，且工整，可有效大縛避免產生切換時壓力波動之問題。



- 1.分析污染物之成份與其物化特性。
- 2.計算平均分子量、燃燒熱、濃度、as THC當量濃度。
- 3.計算廢氣風量、濃度、溫度

$$Q_2(\text{NCMM}) = Q_1(\text{ACMM}) \times (273 + 0^\circ\text{C}) / (273 + T_1)$$

$$\text{ppm as THC} = \text{ppm as solvent} \times \text{ppm THC value}$$

- 4.設定廢氣濃縮倍率：10~25倍。
- 5.計算RTO爐風量=廢氣總風量/濃縮倍率。
- 6.設定RTO爐熱回收效率：90%~95%。
- 7.設定RTO爐破壞溫度：自燃溫度+200 °C。
- 8.計算燃燒爐所需熱量(kcal/hr)=總熱需求－回收熱－VOC供給熱＋脫附熱。

$$\text{計算所需燃料 m}^3/\text{hr} = \text{所需熱量(kcal/hr)} / \text{燃料供應熱量(kcal/Nm}^3\text{)}; \text{NG} \div 9000 \text{ (kcal/Nm}^3\text{)}。$$

9.轉輪尺寸選擇

(1).面積比設定(吸附：脫附：purge = 10：1：1)

(2).面風速設定(2m/s~3m/s)

(3).有效截面積計算=廢氣風量(NCMM)/(轉輪截面積 $\text{m}^2 \times 10/12$)/
面風速(m/s)/60(s/min)

(4).轉輪尺寸選擇

10.動力(費用)計算

(1). $Kw = (\text{風量} \text{m}^3/\text{min} \times \text{靜壓} \text{mmAq}) \times \text{安全係數} 1.1 / (6120 \times 0.65 \text{效率})$

(2). 1HP=0.746 kw

(3). 1kwh = 1 度電；

11.操作費用計算

(1). 輔助燃料費用

(2). 動力費用計算

大體積流率與高污染排放量之活性炭吸附並不會較便宜。

[例題] 1 kg活性炭約可吸附0.25 kg之VOCs，則每年每公噸VOCs需要使用活性炭的費用如下：

[解]

現行最便宜活性炭之單價約 NT\$ 80/kg，則

$$\begin{aligned}\text{每噸VOC費用} &= 1 \text{ ton VOC} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ kg AC}}{0.25 \text{ kg VOC}} \times \frac{\text{NT\$ } 80}{1 \text{ kg AC}} \\ &= \text{NT\$ } 320,000\end{aligned}$$

四、案例分享

除空氣污染控制設備外，各種輔助單元與控制設備的排列組合方式，也非常重要而常被忽視。下面介紹三種案例：

1.局部排氣與淨化系統—

局部排氣設備有時較淨化設備更為重要。

2.抽引風車規格需求—

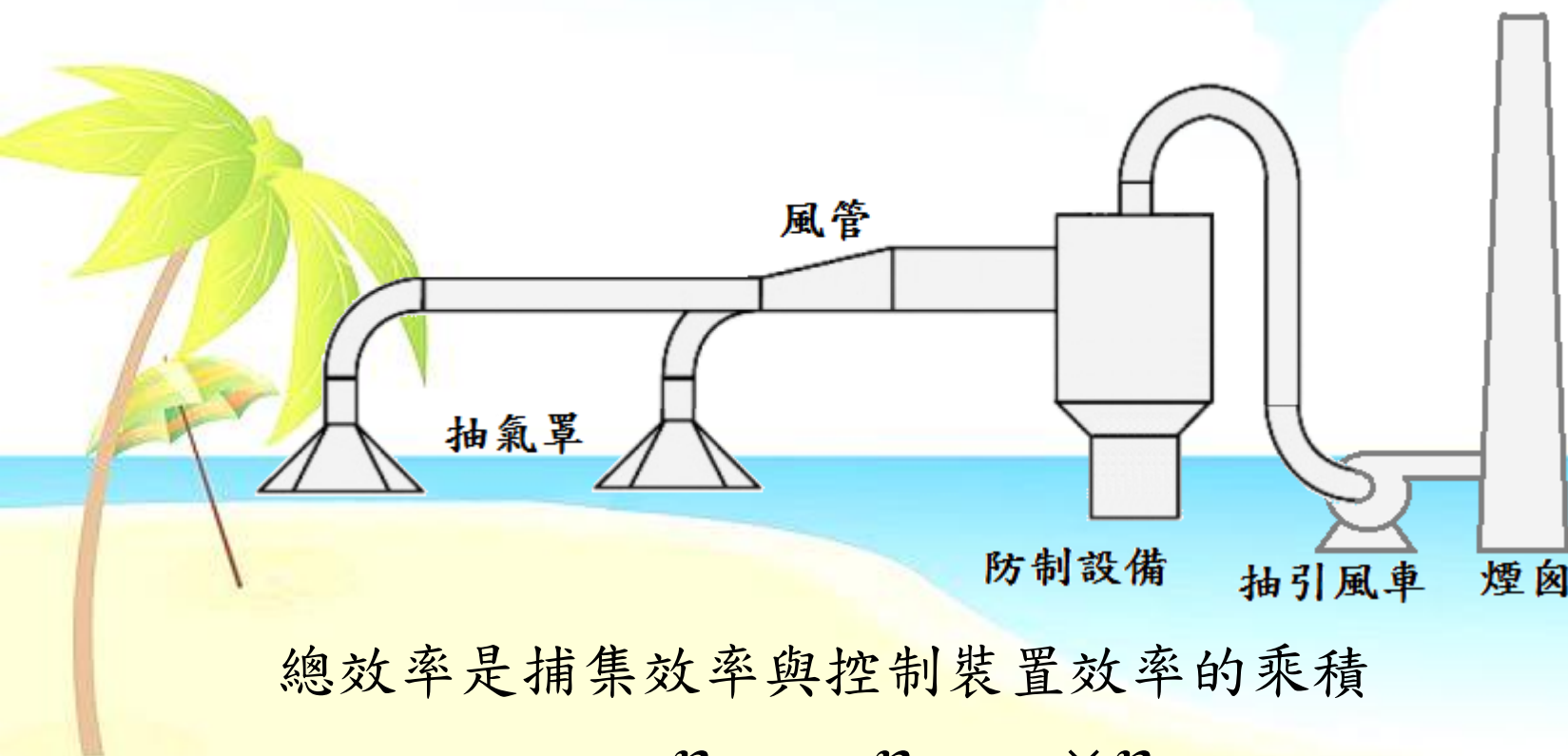
正確風車規格可以節能、省錢。

3.控制設備的排列組合

錯誤的控制設備排列組合會嚴重降低了控制效率。

1.局部排氣與淨化系統

對於小範圍的工作區域或污染區域，設置必要的局部抽氣罩、通風管道與防制或回收系統。如此方可以降低所需處理廢氣的量，有利污染防制的操作，並且可降低成本。



總效率是捕集效率與控制裝置效率的乘積

$$\eta_{total} = \eta_{capture} \times \eta_{control}$$

[例題] 某工廠製程之揮發性有機物(VOCs)產生量為100 kg/hr，其中該廠製作過程中先以補集效率為80%之集氣罩收集VOCs，再抽至控制效率為90%之VOCs防制設備。計算該工廠揮VOCs之(1).逸散排放，(2).煙囪排放量與(3).總排放量。

[解]:

1. 計算逸散量.

$$\begin{aligned}\text{逸散量} &= \text{排放總量} - \text{集氣罩補集量} \\ &= 100 \text{ kg/hr} - (100 \text{ kg/hr} \times 0.80) = 20 \text{ kg/hr}\end{aligned}$$

2. 煙囪排放量

$$\begin{aligned}\text{煙囪排放量} &= \text{集氣罩補集量} \times (1 - \text{控制效率}) \\ &= (100 - 20) \text{ kg/hr} \times (1 - 0.90) = 8 \text{ kg/hr}\end{aligned}$$

3. 計算總排放量

$$\begin{aligned}\text{總排放量} &= \text{逸散量} + \text{煙囪排放量} \\ &= 20 \text{ kg/hr} + 8 \text{ kg/hr} = 28 \text{ kg/hr}\end{aligned}$$

由本例題可以看出集氣罩的補集效率決定總排放量。

2.抽引風車規格需求

一般領有空氣污染控制專責人員證照者，仍不清楚如何選擇適當的風車，而不適宜的風車不僅降低控制設備的去除率，並且浪費能源與增加操作成本。

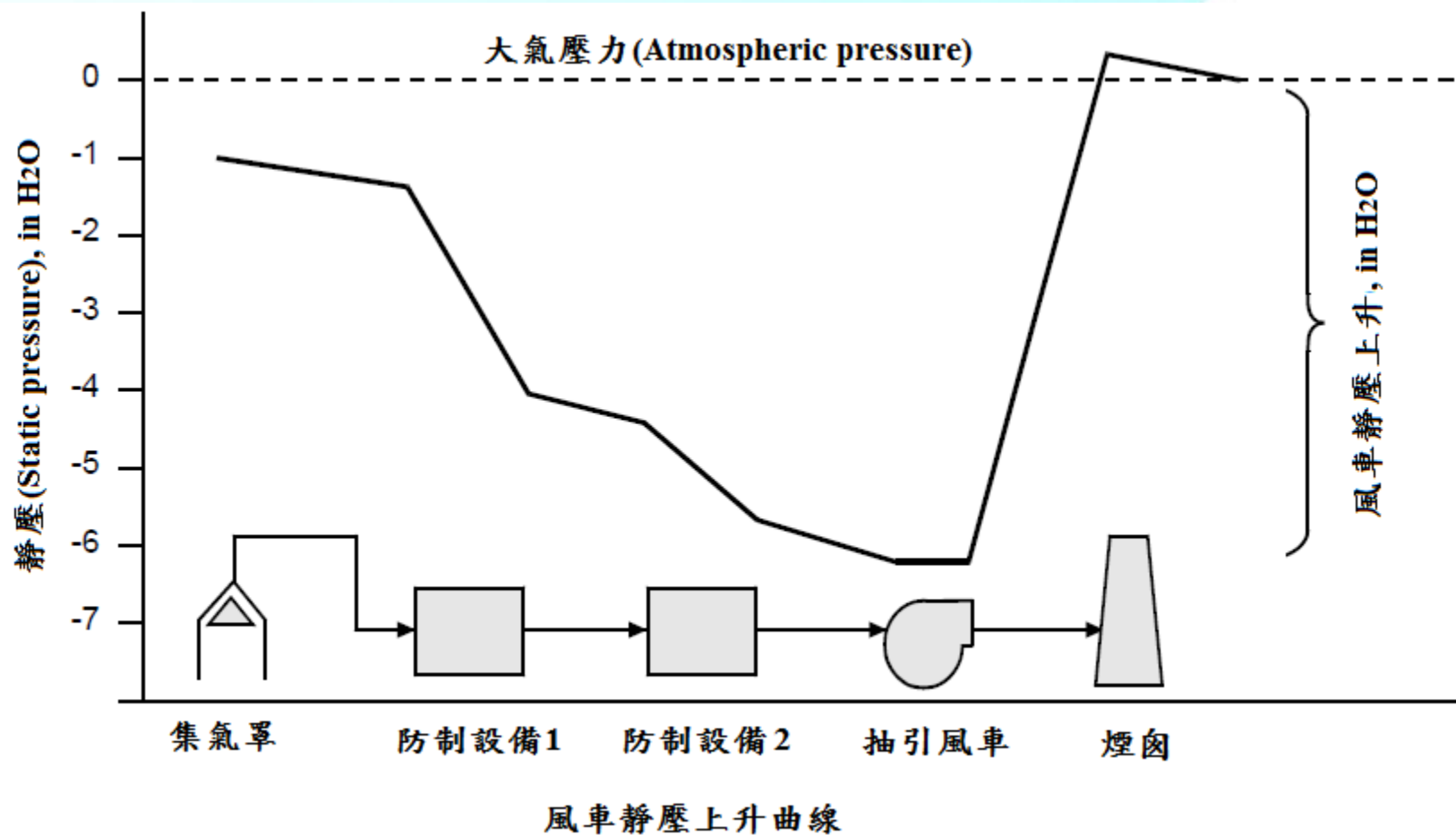
風車規格表(Fan Rating Tables)

每個風車在一定速度下有其單獨的風車曲線，廠商提供的風車規格表含蓋用戶所需的整個操作範圍，並且每種尺寸的風車均提供一個風車等級表。

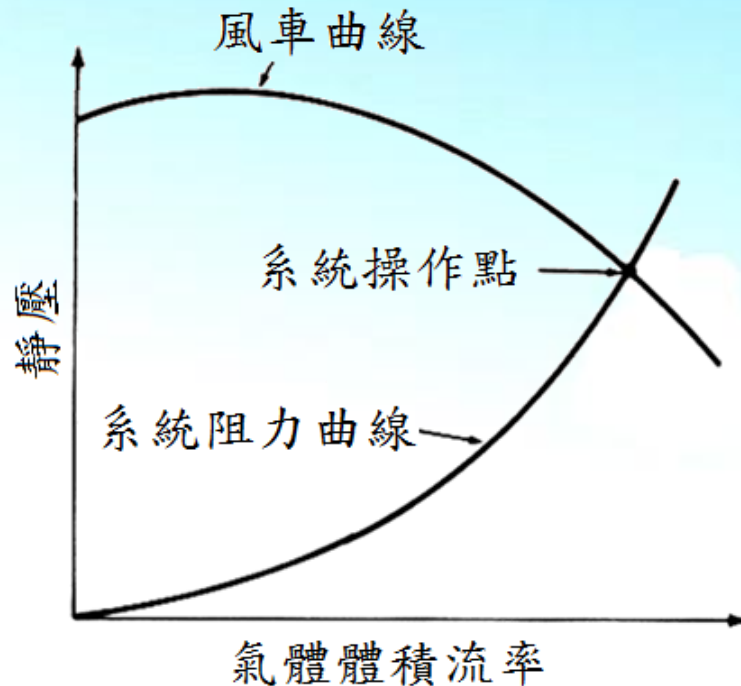
表中的數據包含為不同狀況下的流量(Q)、靜壓(SP)、轉速(N)與制動馬力(w)。大範圍的體積流率與靜壓都可以依該系列風車的幾何相似來求得。即以表中數據的線性內插值來找出最佳風車。

精算廢氣控制系統來求得之體積流率與壓力損失，再使用風車規格表來查出最適當的風車規格。

準確計算廢氣收集與防制設備至煙囪的廢氣流量
與壓力損失。



風管系統阻力與風車操作線



風車的靜壓(FSP)相對於風管系統的壓力如下：

$$FSP = TP_{outlet} - TP_{inlet} - VP_{outlet}$$

$$FSP = (SP_{outlet} + VP_{outlet}) - (SP_{inlet} - VP_{inlet}) - VP_{outlet}$$

其中TP與VP分別為總壓與速度壓。風管系統的壓損如下：

$$FSP = \Delta P_{suction\ side} + \Delta P_{discharge\ side} - VP_{inlet}$$

[例題] 某廠空氣污染控制系統之廢氣流量與壓損分別為 $6000 \text{ ft}^3/\text{min}$ 與 $7.5 \text{ in H}_2\text{O}$ 。請運用風車規格表來選擇一台風車，並求出該風車之轉速與制動馬力。

[解]

所需處理的 $6000 \text{ ft}^3/\text{min}$ 流量(CFM) 與 $7.5 \text{ in H}_2\text{O}$ 壓損(SP)對15 SISW規格的風車而言太高，對30 SISW規格的風車則太低。

由20 SISW表獲知CFM與SP均落在此表中，所以20 SISW風車適合該廠。

使用雙線性內插值法，算出風車轉速 $N = 2245 \text{ rpm}$ 與制動馬力 $w = 10.0$ 馬力。

15 SISW

WHEEL

16-3/16 in.
diameter

OUTLET

14-5/8 × 13-1/16 in.
inside

1.32 sq. ft.
inside area

MAXIMUM BHP = $.212 \left(\frac{\text{RPM}}{1000} \right)^3$

CLASS I - RPM 3302

CLASS II - RPM 3586

TIP SPEED, fpm = 4.24 × RPM

CFM	OV FPM	1/4" SP		1/2" SP		3/4" SP		1" SP		1-1/4" SP		1-1/2" SP		1-3/4" SP		2" SP		2-1/2" SP		3" SP		3-1/2" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
660	500	559	.03																				
792	600	607	.04	752	.08																		
924	700	662	.06	787	.10																		
1056	800	719	.07	834	.12	942	.17																
1188	900	778	.09	887	.14	983	.20	1080	.26														
1320	1000	839	.11	942	.17	1031	.23	1118	.29	1205	.36	1290	.44										
1452	1100	902	.14	998	.20	1085	.27	1164	.33	1242	.40	1321	.48	1400	.56								
1584	1200	966	.17	1057	.24	1139	.31	1214	.38	1287	.45	1359	.53	1432	.61	1504	.70						
1716	1300	1031	.21	1117	.28	1196	.35	1268	.43	1336	.50	1402	.58	1469	.67	1536	.76	1668	.95				
1848	1400	1098	.25	1178	.33	1253	.40	1323	.48	1389	.56	1451	.64	1513	.73	1575	.82	1700	1.02				
1980	1500	1165	.30	1240	.38	1312	.46	1379	.54	1444	.63	1504	.72	1562	.80	1619	.90	1735	1.10	1851	1.31		
2112	1600	1234	.35	1304	.44	1373	.52	1437	.61	1499	.70	1558	.79	1613	.89	1667	.98	1775	1.18	1885	1.40	1994	1.64
2244	1700	1302	.41	1369	.50	1433	.59	1496	.69	1556	.78	1613	.88	1668	.98	1718	1.07	1820	1.28	1923	1.50	2025	1.74
2376	1800	1370	.47	1434	.57	1495	.67	1557	.77	1613	.87	1669	.97	1722	1.07	1773	1.17	1869	1.39	1966	1.61	2063	1.85
2508	1900	1439	.54	1500	.65	1559	.75	1617	.86	1673	.96	1725	1.07	1778	1.17	1828	1.28	1921	1.50	2012	1.73	2104	1.97
2640	2000	1508	.62	1566	.73	1623	.84	1678	.95	1733	1.06	1783	1.17	1834	1.28	1882	1.40	1976	1.63	2062	1.86	2150	2.11
2904	2200	1647	.81	1702	.93	1753	1.05	1803	1.17	1853	1.29	1904	1.41	1950	1.53	1996	1.65	2084	1.90	2169	2.15	2248	2.41
3168	2400	1787	1.02	1839	1.15	1855	1.28	1931	1.41	1978	1.55	2024	1.68	2070	1.82	2114	1.95	2197	2.21	2278	2.48	2356	2.76
3432	2600	1927	1.28	1975	1.42	2020	1.56	2063	1.70	2106	1.84	2148	1.99	2190	2.13	2233	2.28	2313	2.56	2390	2.85	2466	3.14
3696	2800	2071	1.58	2115	1.73	2156	1.88	2195	2.03	2236	2.18	2275	2.33	2315	2.49	2355	2.64	2432	2.96	2505	3.26	2578	3.57
CFM	OV FPM	4" SP		4-1/2" SP		5" SP		5-1/2" SP		6" SP		7" SP		8" SP		9" SP		10" SP		11" SP		12" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
1980	1500	2070	1.78																				
2112	1600	2096	1.89	2199	2.13																		
2244	1700	2128	1.99	2225	2.25	2319	2.52																
2376	1800	2159	2.10	2256	2.37	2346	2.64	2435	2.92														
2508	1900	2195	2.23	2288	2.50	2378	2.78	2469	3.07	2549	3.36	2712	3.98										
2640	2000	2235	2.36	2324	2.64	2410	2.92	2497	3.22	2578	3.52	2737	4.13	2889	4.81								
2904	2200	2327	2.68	2406	2.96	2484	3.25	2564	3.55	2644	3.86	2799	4.51	2945	5.18	3085	5.90						
3168	2400	2429	3.04	2502	3.32	2573	3.62	2645	3.93	2718	4.25	2863	4.91	3007	5.62	3143	6.35	3273	7.10	3405	7.89		
3432	2600	2537	3.45	2605	3.75	2671	4.05	2738	4.37	2805	4.69	2938	5.37	3072	6.08	3207	6.85	3335	7.63	3458	8.42	3581	9.25
3696	2800	2647	3.89	2715	4.22	2778	4.54	2840	4.86	2902	5.19	3026	5.89	3150	6.62	3275	7.39	3399	8.19	3522	9.03		
3960	3000	2759	4.38	2825	4.72	2887	5.07	2949	5.42	3007	5.76	3122	6.47	3237	7.22	3353	7.99	3471	8.82	3586	9.65		
4224	3200	2874	4.93	2937	5.29	2998	5.65	3059	6.01	3116	6.39	3226	7.12	3335	7.88	3442	8.68	3550	9.50				
4488	3400	2992	5.54	3052	5.90	3111	6.28	3169	6.66	3225	7.05	3335	7.84	3437	8.62	3540	9.43						
4752	3600	3113	6.19	3170	6.58	3225	6.97	3282	7.37	3338	7.78	3444	8.60	3546	9.43								
5016	3800	3234	6.90	3291	7.32	3344	7.73	3397	8.14	3451	8.56	3555	9.42										
5280	4000	3355	7.64	3412	8.11	3464	8.55	3518	8.99	3567	9.41												

WHEEL	32-3/8 in. diameter	OUTLET	29-3/16 × 26-1/8 in. inside	5.27 sq. ft. inside area	MAXIMUM BHP = 6.01 $\left(\frac{\text{RPM}}{1000}\right)^3$	30 SISW
CLASS I RPM 1647		CLASS II RPM 1807		CLASS III RPM 2166	TIP SPEED, fpm = 8.48 × RPM	

CFM	OV FPM	1/2" SP		1" SP		1-1/2" SP		2" SP		2-1/2" SP		3" SP		3-1/2" SP		4" SP		4-1/2" SP		5" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
5270	1000	459	.58	552	1.01	626	1.45	697	1.95	768	2.51										
5797	1100	482	.67	575	1.14	647	1.62	713	2.13	777	2.69	841	3.31								
6324	1200	507	.78	599	1.29	670	1.81	732	2.33	792	2.91	851	3.53	909	4.19						
6851	1300	536	.90	623	1.45	693	2.00	754	2.56	810	3.15	865	3.78	919	4.46	973	5.17				
7378	1400	565	1.04	646	1.62	717	2.22	777	2.82	831	3.42	882	4.07	934	4.76	984	5.48	1034	6.24	1085	7.05
7905	1500	595	1.19	668	1.79	741	2.44	800	3.08	853	3.73	902	4.39	951	5.08	999	5.82	1046	6.59	1092	7.40
8432	1600	625	1.36	692	1.98	765	2.68	824	3.36	877	4.05	925	4.74	971	5.45	1016	6.20	1061	6.99	1105	7.80
8959	1700	656	1.55	718	2.21	788	2.94	848	3.66	900	4.39	948	5.12	992	5.85	1035	6.61	1078	7.41	1121	8.24
9486	1800	687	1.76	746	2.45	810	3.19	872	3.98	924	4.74	971	5.51	1015	6.29	1057	7.07	1098	7.87	1138	8.72
10013	1900	719	1.98	775	2.72	833	3.46	895	4.31	948	5.11	995	5.92	1039	6.74	1080	7.56	1119	8.38	1157	9.23
10540	2000	751	2.23	805	3.00	858	3.77	918	4.64	972	5.51	1019	6.35	1062	7.21	1103	8.07	1142	8.93	1179	9.80
11594	2200	815	2.79	865	3.64	913	4.49	963	5.35	1019	6.34	1066	7.28	1110	8.21	1150	9.15	1189	10.10	1225	11.05
12648	2400	880	3.44	927	4.37	971	5.30	1015	6.22	1063	7.19	1113	8.28	1158	9.31	1198	10.33	1236	11.35	1272	12.38
13702	2600	945	4.20	989	5.20	1031	6.21	1071	7.21	1112	8.22	1158	9.30	1204	10.48	1246	11.61	1284	12.70	1319	13.81
14756	2800	1012	5.08	1052	6.15	1092	7.24	1130	8.32	1167	9.40	1206	10.49	1248	11.66	1292	12.94	1331	14.17	1367	15.35
15810	3000	1078	6.08	1116	7.23	1154	8.39	1190	9.55	1225	10.71	1260	11.86	1296	13.04	1336	14.30	1377	15.67	1415	17.00
16864	3200	1145	7.22	1181	8.43	1216	9.66	1250	10.91	1284	12.14	1316	13.38	1349	14.61	1384	15.87	1421	17.21	1460	18.67
17918	3400	1212	8.49	1246	9.78	1280	11.08	1312	12.40	1344	13.72	1375	15.03	1406	16.34	1437	17.65	1469	18.99	1504	20.40
18972	3600	1279	9.91	1312	11.28	1344	12.65	1375	14.04	1405	15.44	1435	16.84	1464	18.22	1493	19.61	1522	21.00	1553	22.41
20026	3800	1347	11.50	1378	12.93	1408	14.38	1438	15.85	1467	17.32	1495	18.79	1523	20.26	1550	21.73	1578	23.19	1606	24.66
CFM	OV FPM	6" SP		7" SP		8" SP		9" SP		10" SP		11" SP		12" SP		13" SP		14" SP		15" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
8959	1700	1203	9.99	1286	11.88																
9486	1800	1218	10.50	1295	12.39	1374	14.42														
10013	1900	1234	11.04	1308	12.96	1382	14.99	1457	17.15												
10540	2000	1252	11.63	1324	13.58	1394	15.63	1464	17.78	1535	20.07										
11594	2200	1294	12.95	1360	14.94	1426	17.05	1490	19.25	1554	21.54	1618	23.94	1682	26.46						
12648	2400	1340	14.44	1403	16.52	1463	18.66	1524	20.91	1584	23.27	1643	25.71	1701	28.22	1759	30.83	1818	33.56	1878	36.40
13702	2600	1387	16.03	1449	18.27	1507	20.51	1564	22.81	1619	25.20	1675	27.70	1730	30.28	1785	32.93	1838	35.65	1892	38.46
14567	2800	1434	17.72	1496	20.12	1554	22.53	1608	24.95	1661	27.40	1713	29.92	1765	32.54	1817	35.26	1868	38.05	1918	40.90
15810	3000	1482	19.54	1543	22.09	1601	24.66	1655	27.24	1707	29.82	1756	32.43	1805	35.09	1853	37.83	1902	40.67	1950	43.59
16864	3200	1529	21.48	1591	24.18	1648	26.90	1702	29.64	1753	32.40	1802	35.15	1850	37.92	1896	40.72	1941	43.59	1986	46.53
17918	3400	1576	23.49	1639	26.41	1696	29.28	1749	32.18	1800	35.09	1849	38.01	1896	40.94	1941	43.87	1985	46.82	2028	49.82
18972	3600	1620	25.49	1686	28.75	1743	31.82	1797	34.85	1848	37.92	1896	41.00	1943	44.09	1988	47.19	2031	50.29	2073	53.40
20026	3800	1666	27.68	1731	31.09	1791	34.47	1845	37.70	1895	40.90	1944	44.14	1990	47.39	2035	50.65	2078	53.92	2120	57.19
21080	4000	1716	30.20	1775	33.50	1836	37.15	1892	40.67	1943	44.06	1991	47.43	2038	50.83	2082	54.25	2125	57.69	2166	61.12
22134	4200	1769	32.94	1822	36.24	1880	39.84	1938	43.69	1991	47.36	2039	50.92	2085	54.46	2129	58.02				
23188	4400	1826	35.88	1874	39.30	1926	42.81	1982	46.70	2037	50.72	2087	54.55	2133	58.27						
24242	4600	1883	39.03	1929	42.57	1976	46.16	2027	49.91	2081	54.05	2133	58.24								
25296	4800	1942	42.37	1985	46.07	2030	49.78	2076	53.55	2126	57.54										



WHEEL	21-9/16 in. diameter	OUTLET	19-7/16 × 17-3/8 in. inside	2.34 sq. ft. inside area	MAXIMUM BHP = $.894 \left(\frac{\text{RPM}}{1000} \right)^3$	20 SISW
CLASS I - RPM 2469			CLASS II - RPM 2885		TIP SPEED, fpm = 5.65 × RPM	

CFM	OV FPM	1/4" SP		1/2" SP		3/4" SP		1" SP		1-1/4" SP		1-1/2" SP		1-3/4" SP		2" SP		2-1/2" SP		3" SP		3-1/2" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
1170	500	419	.06																				
1404	600	455	.08	564	.15																		
1638	700	496	.10	590	.18																		
1872	800	539	.13	625	.21	707	.31																
2106	900	584	.17	665	.26	737	.35	810	.46														
2340	1000	629	.21	706	.31	774	.41	839	.52	904	.65	968	.78										
2574	1100	676	.26	748	.36	813	.48	873	.59	932	.72	991	.85	1050	1.00								
2808	1200	725	.31	793	.43	854	.55	911	.67	965	.80	1019	.94	1074	1.09	1128	1.25						
3042	1300	774	.37	838	.50	897	.63	951	.76	1002	.90	1052	1.04	1102	1.19	1152	1.35	1251	1.69				
3276	1400	823	.45	883	.58	940	.72	992	.86	1042	1.01	1088	1.15	1135	1.31	1181	1.47	1275	1.82				
3510	1500	873	.53	930	.68	984	.83	1035	.97	1083	1.12	1128	1.28	1171	1.44	1214	1.60	1302	1.96	1389	2.34		
3744	1600	925	.62	978	.78	1030	.94	1078	1.09	1125	1.25	1169	1.42	1210	1.58	1250	1.75	1331	2.11	1414	2.50	1495	2.91
3978	1700	976	.73	1027	.89	1075	1.06	1122	1.23	1167	1.39	1210	1.56	1251	1.74	1289	1.91	1365	2.28	1442	2.68	1519	3.09
4212	1800	1028	.84	1076	1.02	1121	1.19	1167	1.37	1210	1.55	1252	1.73	1292	1.91	1330	2.09	1402	2.47	1474	2.87	1547	3.30
4446	1900	1079	.97	1125	1.16	1169	1.34	1213	1.53	1254	1.72	1294	1.90	1333	2.09	1371	2.29	1441	2.67	1509	3.08	1578	3.51
4680	2000	1131	1.11	1175	1.31	1217	1.50	1258	1.69	1300	1.90	1337	2.09	1376	2.29	1412	2.49	1482	2.90	1547	3.31	1612	3.75
5148	2200	1235	1.44	1276	1.65	1314	1.86	1352	2.08	1390	2.29	1428	2.52	1463	2.73	1497	2.94	1563	3.38	1627	3.84	1686	4.29
5616	2400	1340	1.83	1379	2.06	1414	2.29	1449	2.52	1483	2.76	1518	2.99	1553	3.23	1585	3.47	1648	3.94	1708	4.42	1767	4.92
6084	2600	1445	2.28	1481	2.53	1515	2.78	1547	3.03	1580	3.28	1611	3.54	1643	3.79	1675	4.06	1735	4.56	1793	5.07	1849	5.60
6552	2800	1553	2.81	1586	3.08	1617	3.35	1646	3.61	1677	3.88	1706	4.16	1736	4.43	1766	4.70	1824	5.27	1879	5.80	1933	6.36
CFM	OV FPM	4" SP		4-1/2" SP		5" SP		5-1/2" SP		6" SP		7" SP		8" SP		9" SP		10" SP		11" SP		12" SP	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
3510	1500	1552	3.17																				
3744	1600	1572	3.35	1649	3.79																		
3978	1700	1596	3.54	1669	4.01	1739	4.50																
4212	1800	1619	3.74	1692	4.22	1760	4.71	1826	5.20														
4446	1900	1647	3.97	1716	4.45	1784	4.95	1852	5.46	1912	5.99	2034	7.10										
4680	2000	1676	4.21	1743	4.70	1807	5.20	1872	5.73	1934	6.28	2053	7.36	2167	8.52								
5148	2200	1745	4.77	1804	5.26	1863	5.78	1923	6.31	1983	6.87	2099	8.03	2208	9.24	2314	10.46						
5616	2400	1822	5.41	1876	5.91	1929	6.45	1984	6.99	2038	7.56	2147	8.74	2255	10.01	2358	11.25	2455	12.60	2554	13.98		
6084	2600	1903	6.14	1954	6.67	2003	7.21	2054	7.77	2103	8.35	2204	9.56	2304	10.83	2405	12.19	2501	13.54	2594	14.98	2686	16.45
6552	2800	1985	6.93	2036	7.51	2084	8.08	2130	8.65	2176	9.25	2269	10.49	2362	11.78	2456	13.15	2549	14.58	2641	16.06	2729	17.48
7020	3000	2069	7.80	2119	8.41	2165	9.03	2212	9.64	2255	10.25	2342	11.52	2428	12.85	2515	14.22	2603	15.68	2689	17.17	2776	18.76
7488	3200	2155	8.77	2203	9.41	2248	10.05	2294	10.70	2337	11.37	2419	12.68	2501	14.03	2582	15.45	2663	16.90	2746	18.45	2827	20.01
7956	3400	2244	9.85	2289	10.50	2333	11.18	2377	11.86	2419	12.55	2501	13.95	2578	15.34	2655	16.78	2731	18.29	2807	19.83	2885	21.44
8424	3600	2335	11.02	2378	11.72	2419	12.40	2462	13.12	2503	13.84	2583	15.30	2659	16.78	2732	18.26	2805	19.78	2877	21.37		
8892	3800	2426	12.28	2468	13.03	2508	13.76	2548	14.48	2588	15.23	2666	16.75	2741	18.32	2814	19.87	2882	21.43				
9360	4000	2516	13.59	2559	14.43	2598	15.21	2638	15.99	2675	16.74	2751	18.33	2824	19.93	2895	21.60						

風車定律

$$\frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3} = \text{constant}$$

$$\frac{\text{FSP}_1}{\rho_1 N_1^2 D_1^2} = \frac{\text{FSP}_2}{\rho_2 N_2^2 D_2^2} = \text{constant}$$

$$\frac{w_1}{\rho_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{w_2}{\rho_2 N_2^3 D_2^5} = \text{constant}$$

其中 Q = 體積流率

N = 風車速度

D = 風車直徑

ρ = 空氣密度

w = 風車制動馬力

1, 2 = 不同操作點之註腳標示

[例題] 一風車操作於抽取 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 標準氣體($\rho = 1.183 \text{ kg/m}^3$)與驅動 900 N/m^2 SP於 1000 rpm 下，若氣體密度改變至 1.00 kg/m^3 ，請計算新體積流率、FSP與所需功率減少。

[解] 體積流率不變為 $10 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\begin{aligned} \text{FSP}_2 &= \text{FSP}_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \\ &= 900 \times \left(\frac{1.00}{1.183} \right) = 761 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$w_2 = w_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) = 0.845 w_1$$

$$\begin{aligned} \text{功率減少}(\%) &= \frac{w_1 - w_2}{w_1} = \frac{w_1 - 0.845 w_1}{w_1} \times 100 \\ &= 15.5\% \end{aligned}$$

3.控制設備的排列組合

錯誤的控制設備排列組合，會嚴重降低控制效率。

空氣污染防治設備排列準則：

- (1).風車應盡量裝在所有防制設備之後，即採用抽引方式，避免酸性氣體的腐蝕與塵粒的磨損。
- (2).一般除塵設備先於除氣設備(如活性炭吸附塔、濕式填充塔、觸媒轉化器等)，以避免阻塞設備。
- (3).活性炭吸附宜在40°C下操作，並且前端不宜有洗滌塔，以避免水份進入活性炭孔洞，降低VOCs吸附。
- (4).袋濾除塵器前端裝設幾個並聯旋風分離器，如此可以降低廢氣溫度來保護濾袋，同時減少粗粒對濾袋衝擊也可以延長濾袋壽命。
- (5).以濕式洗滌塔來除塵效率雖佳，但造成新的污水需要再額外處理，且處理不易，因此不建議採用。

謝謝聆聽

Q & A

