

光電半導體 VOCs 處理成本分析及 效益評估

主講： 周明顯教授(國立中山大學環境工程研究所)

聯絡方式：周明顯 (07-5252000 轉 4408；0935-424-807；

ms.chou@msa.hinet.net)

摘要

生物濾床法、生物洗滌及轉輪吸附濃縮-RTO 法為半導體業及光電業含揮發性有機物排氣之經濟有效處理法。

在生物濾床法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，含濾料之設備初設費用分別為 NT\$ 412、716、1,516 萬，年操作、人力維護及折舊費用合計分別為 NT\$ 159、249、508 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 73.6、57.6、47.0，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作及人力費用分別為 NT\$ 6.63、10.4、21.2。

在生物洗滌法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，進氣 VOC 濃度為 100 及 200、500 mg/Nm³ 時，含吸收塔及活性污泥設備之初設費用分別為 NT\$ 241、383、705 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 171、203、288 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 79.3、46.9、26.6，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 7.13、8.45、12.0。

在轉輪吸附濃縮-RTO 法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，設備初設費用均為 NT\$ 2,000 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 337、312、251 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 148、68.5、22.0，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 14.1、13.0、10.5。

排氣 VOC 濃度為 100 mg/Nm³ 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之；排氣 VOC 濃度為 200 mg/Nm³ 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之；排氣 VOC 濃度為 500 mg/Nm³ 時，以生物洗滌及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物濾床法次之；排氣 VOC 濃度為 1,000 mg/Nm³ 時，以轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物洗滌法次之。

本研究對空污防治之預期貢獻：本研究所推估排放係數可供半導體及光電等業者污染改善之參考，亦可作為訂定該業別排放標準時之依據。針對不同風量及廢氣濃度所評選出之最佳可行控制技術(BACT)，將有助於業者於衡量實際排放情況後，選擇最適當之處理技術。

關鍵字：揮發性有機空氣污染物、空氣物染控制、半導體業、光電業、排放係數、最佳可行控制技術、生物濾床

一、前言

國內 IC 產業可分 IC 設計、晶圓製造、測試及封裝及電子產品組裝業。至西元 2000 年止，有近 300 家專業廠商投產，產業架構完整。放眼全球，台灣 IC 產業成就可觀。需求方面，2000 年國內 IC 市場需求量達 161 億美元，占亞太市場 34.9%，全球市場 8.93%；供給面方面，國內產值為 92 億美元，占全球 5.1%，排名第四，僅次美、日、韓。另外，我國專業代工產值為 95 億美元，占全球 77%，排名世界第一¹。

台灣光電產品主要為掃瞄器、光碟片、光碟機、液晶顯示器。依光電協會統計，到 2000 年底止，投入光電產業的廠商數約 500 家，以光電顯示器為最多，共 127 家。2000 年台灣光電產值達約 108 億美元，預估 2003 年產值將達 175 億美元。另外，2000 年台灣光電產業總投資額約 1,400 億元，其中光電顯示器佔了近九成，為 1,257 億元，光通訊居第二，約為 89 億元²。

此二產業前景相當被看好，然其污染防治則剛起步，尤其是排氣中揮發性有機物(VOCs)之處理。一些半導體及光電業 VOC 成分及濃度如表 1.1 及 1.2 所示，主要為乙醇、異丙醇、丙酮、丁酮、丙二醇單甲醚乙酸酯(PGMEA)、單乙醇胺(MEA)、雙三甲基矽胺(HMDS)。另依檢測結果³⁻⁹，二行業排放之 VOCs 以異丙醇及丙酮為主，佔排放總量的 50-80%；另外，丁酮、甲苯、二甲苯、乙酸丁酯、PGMEA 及三氯乙烷等亦為排放主要污染物。¹⁰

依近五年資料，新竹科學園區 VOC 污染防制設備概況如表 1.3 所示¹⁰。半導體製造業多以活性碳吸附塔、填充式洗滌塔、濃縮焚化法(沸石濃縮轉輪+燃氣式焚化爐)處理廠內排放 VOC 氣體。活性碳吸附法需常置換新碳，以保持其吸附能力，維持費用高昂；填充式洗滌法一般僅將 VOCs 由氣相轉移至液相，液相在吸收 VOCs 飽和後即無吸收能力，需將廢液排放至污水廠處理，可能有二次污染或吸收去除能力不足之問題；少數工廠採用吸附濃縮焚化法，去除率可達 90% 以上，為目前較佳之控制技術，然有高燃料需求，另高沸點 VOCs (如 DMSO、PGMEA、MEA、HMDS) 吸附於沸石表面無法脫附，致濃縮轉輪再生困難或使用壽命縮短等問題，再加以設備費用高昂(NT\$ 4,000 萬/1,000 NCMM 排氣)，致無法普遍使用。另外，工研院環安中心於 2002 年與華邦電子公司晶圓一廠共同研發臭氧洗滌設備，華邦一廠約 250 NCMM 廢氣先經三座串聯之臭氧洗滌塔設備洗滌，排氣中 VOCs 含量降低為每小時 0.1-0.2 公斤，遠低於每小時 0.6 公斤的標準；洗滌水再經兩座串連之氧化反應槽反應後循環利用；該系統設置成本約 1,100-1,600 萬元，每個月的操作成本約 8 萬元。臭氧洗滌設備的設置成本略低於傳統的轉輪濃縮焚化設備，操作成本則只為傳統的 2/3。如廠房排放廢氣量在 500-1,000 NCMM 之間，傳統轉輪濃縮焚化方式的操作成本每年約需 300 萬元，而環安中心研發出來的臭氧洗滌設備，每年則只需要 200 萬元的操作費用。¹¹

由上述資料知，二行業之 VOC 排放濃度及排放量(表 1.1、1.2)或排放係數(可由表 1.2 之數據計算單位產量之 VOC 排放量)差異極大；另外，二行業之排氣 VOC 處理方法及效率之差異性亦極大(表 1.3)。因此，二行業之 VOC 排放量推估及最佳排放減量技術上需續行探討，以達排放減量之目的。

表 1.1：半導體及光電業排氣揮發性有機物之成分及濃度(資料來源：各工廠)

名稱	分子量	沸點 (°C)	A 廠濃度 (mg/Nm ³)	B 廠濃度 (mg/Nm ³)	C 廠濃度 (mg/Nm ³)	D 廠濃度 (mg/Nm ³)
乙醇(C ₂ H ₆ O)	46	69		308		9.2
丙酮(C ₃ H ₆ O)	58	56	72-77	77	129	58
異丙醇(C ₃ H ₈ O, IPA)	60	83		201	222	161
丙二醇單甲醚乙酸酯 (CH ₃ CH(OCOCH ₃)CH ₂ OCH ₃ , PGMEA)	117	141	6-14	235	89	196
單乙醇胺(monoethanol amine, HOCH ₂ CH ₂ NH ₂ , MEA)	61	171			<1	12.3
雙三甲基矽胺(hexamethyl disilazane, (CH ₃) ₃ SiNHSi(CH ₃) ₃ , HMDS)	161	125			7	10.8
1-甲基-2-酮-環丁胺 (N-methyl-2-pyrrolidinone, -CH ₂ -CH ₂ -CO-CH(CH ₃)-NH-, NMP)	99				4.4	3.5
1,2-二氯乙烯(CHCl=CHCl)	97	84			4.3	
三氯甲烷(CHCl ₃)	120				16	
二甲基一氧化硫(dimethyl sulfoxide, (CH ₃) ₂ SO, DMSO)	78	189			<1	

表 1.2：半導體及光電製程煙道揮發性有機物(VOC)排放質量統計

(資料來源：工研院工安衛中心 黃奕孝 博士，March 3, 1999)

工廠代碼	產品	產能 (p/d)	量測時 產量 (p/d)	煙道主要揮發性有機物濃度(mg/Nm ³)*					排氣量 (Nm ³ /min)	排放量 (g/hr)
				異丙醇 mw=60	丙酮 mw=58	丁酮 mw=72	乙酸丁酯 mw=116	合計		
1.	晶圓	1750	1100	202.2	54.5	ND	1.04	257.7	377	5829
2.	晶圓	1167	1000	16.0	1.55	57.0	ND	74.6	64	284
3.	晶圓	1500	800	92.3	13.1	ND	<LDL	105.3	229	1447
4.	晶圓	1100	950	264.5	28.0	ND	<LDL	292.5	195	3422
5.	晶圓	1150	1100	97.8	14.3	162.5	5.49	280.1	678	11394
6.	二極體	3×10 ⁶	3×10 ⁶	0.35	13.6	**33.4	36.6	84.0	21	106
7.	TFT-L CD	10000	5000	9.59	525.7	<LDL	<LDL	535.3	82	2634

表 1.3：竹科主要積體電路廠商 VOCs 污染防治方法調查結果^{10,12-14}

設備名稱	工廠代號	VOC 去除%	方法說明
活性炭吸附	GAC-1	98.5	在正常操作下，VOC 去除率應可達 90% 以上，但活性炭飽和時，去除效率明顯降低。活性炭需常置換，以保持其吸附能力，維持費用高昂。
	GAC-2	56.3	
	GAC-3	25	
	GAC-4	-1.5	
填充式洗滌	Scrub-1	67.2	廢氣中部份 VOCs 水溶性較低，對其去除率有一定限制。本法一般僅將 VOCs 由氣相轉移至液相，液相在 VOCs 飽和後即無吸收能力，需將廢液排放至污水廠處理，可能有二次污染或吸收能力不足問題。
	Scrub-2	60.7	
	Scrub-3	54.6	
	Scrub-4	33.4	
沸石轉輪+熱焚化	Rotor-1	92.3	本法為較佳控制技術，去除率可達 90% 以上，然有高燃料需求、高沸點 VOCs 吸附於沸石表面無法脫附，致濃縮轉輪再生困難或使用壽命縮短等問題，設備費用高昂(NT\$ 4,000 萬/1,000 NCMM 排氣)，無法普及。
	Rotor-2	88.5	
	Rotor-3 (試運轉)	78	
	Rotor-4	98	
生物濾床	BF-1	60-80	總 VOCs 去除率通常不會大於 90%，需藉由二種以上之控制設備串連，才可符合半導體排放標準。

二、製程排氣處理方法及評估

2.1 列入評估之排氣質量及初步篩選適用方法

經濟考量為 VOC 排氣處理方法選擇中之最重要者，圖 2.1 比較各排氣處理方法之費用及適用 VOC 濃度範圍。一般而言，低濃度排氣($<10-20 \text{ mg C/m}^3$)適以活性碳吸附處理，中低濃度廢氣($50-1000 \text{ mg C/m}^3$)適以生物法或吸附濃縮/脫附焚化法處理，中濃度廢氣($500-3,000 \text{ mg C/m}^3$)適以蓄熱式焚化法(RTO)處理，中高濃度廢氣($2,000-5,000 \text{ mg C/m}^3$)則以觸媒焚化較經濟，高濃度廢氣($>5,000-10,000 \text{ mg C/m}^3$)則可以火焰焚化、冷凝或活性碳吸附回收處理。含中低濃度硫或氮成分臭氣則可以化學洗滌法處理。

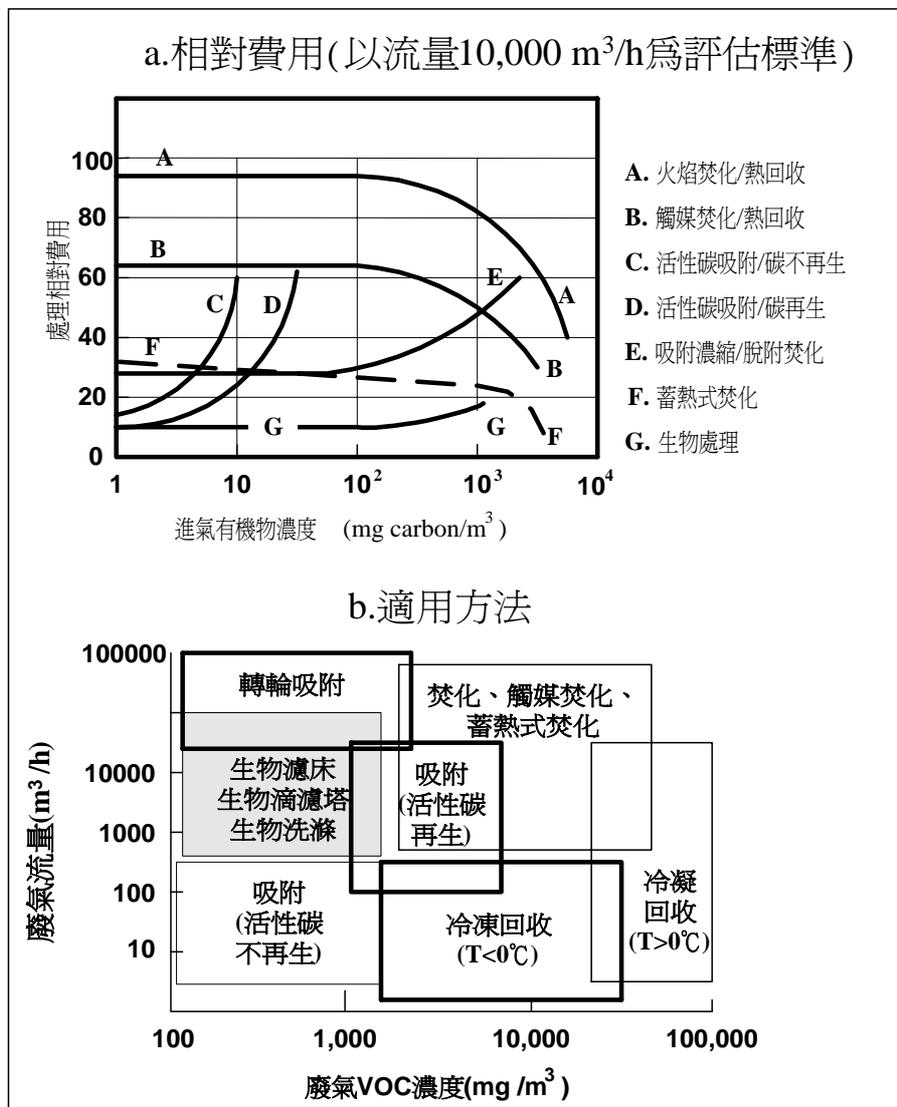


圖 2.1：有機廢氣處理之相對費用及適用方法

由所收集資料，整理各廠操作風量、VOC 排放濃度及去除效率如表 2.1。由此表知，半導體及光電業空氣污染防治技術有四家工廠使用沸石轉輪加蓄熱式焚化爐，其餘使用生物濾床、填充式洗滌塔及生物濾床。針對 VOC 去除率及排放量方面，法定每一半導體廠之 VOC 排放量 < 0.6 kg/hr 或削減率 ≥ 90%，C、D、G 及 H 皆屬於半導體業且都符合其中一項規定；光電業空氣污染物排放標準草案規定每廠之排放量 < 0.6 kg/hr 或削減率 ≥ 90%，A、B、E、F 及 I 皆屬於光電業，且只有 I 廠未符合其中任一項規定(因無任何防制設備)。

依圖 2.1 及表 2.1，二行業適用之 VOC 去除方法以：(1)蓄熱式焚化(RTO)、(2)轉輪吸附濃縮-RTO、(3)生物濾床法為主；本研究另評估生物洗滌及活性碳吸附二法，以供參考。

表 2.1：各廠排氣 VOC 防治概況

工廠代碼	產品別	排氣風量 (Nm ³ /min)	防制設備	防制前 VOC 濃度 (mg/m ³)	VOC 去除率(%)	VOC 排放量 (kg/hr)
A	彩色濾光片	941	填充式洗滌塔	64	90	0.36
	TFT-LCD	1,152 128	沸石轉輪加後燃器	208	95	0.448
B	彩色濾光片	266	活性碳吸附	148	90	0.237
C	12 吋晶圓	894	沸石轉輪加 RTO	59	96.5	0.11
D	3-5 吋晶圓	513	填充式洗滌塔	46	90	0.1429
E	發光二極體	162	沸石轉輪加 RTO	769	98	0.596
F		25	活性碳吸附	24	90	0.0035
G	晶圓封裝	50	蓄熱式焚化爐	1,000	94	0.179
H		76	蓄熱式焚化爐	15	60	0.0232
		142	生物濾床	13	82	0.02
I	CD-R	150*	無防制設備	441	--	3.977

*該廠無空氣污染防治設備，排氣風量為假設。

2.2 經濟評估

各處理技術經濟評估方法如表 2.2 所示。生物濾床法經濟評估結果如表 2.3、2.4 所示，生物洗滌法經濟評估結果如表 2.5、2.6 所示，轉輪吸附濃縮-RTO 法評估結果如表 2.7、2.8 所示，蓄熱式焚化(RTO)法評估結果如表 2.9、2.10 所示，活性炭吸附法經濟評估結果如表 2.11、2.12 所示。

在生物濾床法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，表 2.3 及 2.4 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，含濾料之設備初設費用分別為 NT\$ 412、716、1,516 萬，年操作、人力維護及折舊費用合計分別為 NT\$ 159、249、508 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 73.6、57.6、47.0，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作及人力費用分別為 NT\$ 6.63、10.4、21.2。

在生物洗滌法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，表 2.5 及 2.6 顯示其進氣 VOC 濃度為 100 及 200、500 mg/Nm³ 時，含吸收塔及活性污泥設備之初設費用分別為 NT\$ 241、383、705 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 171、203、288 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 79.3、46.9、26.6，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 7.13、8.45、12.0。

在轉輪吸附濃縮-RTO 法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，表 2.7 及 2.8 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，設備初設費用均為 NT\$ 2,000 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 337、312、251 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 148、68.5、22.0，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 14.1、13.0、10.5。

在 RTO 法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，表 2.9 及 2.10 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，設備初設費用均為 NT\$ 1,289 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 644、619、544 萬，去除每 kg VOC 之年操作、人力及折舊費用分別為 NT\$ 282、136、47.7，處理每 1,000 Nm³ 進氣之操作及人力費用分別為 NT\$ 26.8、25.8、22.7。

在活性炭吸附法方面，以 500 Nm³/min 之氣體流量計，表 2.11 及 2.12 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm³ 時，設備初設不含活性炭費用分別為 NT\$ 83、142、290 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 629、1,175、2,809 萬，去除每 kg VOC 之年操作、人力及折舊費用分別為 NT\$ 291、272、260，處理每 1,000 Nm³ 進氣之年操作、人力及折舊費用分別為 NT\$ 26.2、48.9、117。

以生物處理方法比較如圖 2.2、2.3 所示。生物濾床及生物洗滌分別以固定初設費及去除每 kg VOC 之操作及維護及折舊費用作比較，排氣 VOC 濃度為 100 mg/Nm³ 時，生物濾床法

較經濟，若排氣 VOC 濃度大於 200 mg/Nm^3 時，以生物洗滌法較經濟。以焚化處理方法比較如圖 2.4、2.5 所示。轉輪吸附濃縮-RTO 及 RTO 法分別以固定初設費及去除每 kg VOC 之操作及維護及折舊費用作比較，在任一操作風量或進氣 VOC 濃度都以轉輪吸附濃縮-RTO 法較經濟。

在 $500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之氣體流量下，比較不同處理技術在進氣 VOC 濃度分別為 100、200、500 及 1000 mg/Nm^3 時，各別所需去除每 kg VOC 之操作費用及處理每 $1,000 \text{ Nm}^3$ 進氣之操作費用如圖 2.6、2.7 所示。

圖 2.6 顯示，在不同進氣 VOC 濃度時，去除每 kg VOC 所需操作費用之關係。在 VOC 濃度為 100 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之，RTO 及活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 200 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，RTO 及活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 500 mg/Nm^3 時，以生物洗滌及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物濾床及 RTO 法次之，活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 $1,000 \text{ mg/Nm}^3$ 時，以生物洗滌、轉輪吸附濃縮-RTO 及 RTO 法最經濟。

圖 2.7 顯示，在不同進氣 VOC 濃度時，去除每 $1,000 \text{ m}^3$ 氣體所需操作費用之關係。在 VOC 濃度為 100 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之，RTO 及活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 200 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，RTO 及活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 500 mg/Nm^3 時，以生物洗滌及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物濾床及 RTO 法次之，活性碳吸附法不經濟；排氣 VOC 濃度為 $1,000 \text{ mg/Nm}^3$ 時，以轉輪吸附濃縮-RTO 最經濟，生物洗滌及 RTO 次之。

圖 2.8 顯示，在排氣處理流量 200-1000 NCMM 及進氣濃度 100-1,000 mg/Nm^3 範圍內，每處理 $1,000 \text{ Nm}^3$ 排氣之操作、維護、折舊費用(NT\$, 顯示於圖中數字)。生物濾床之單位體積費用與排氣處理流量幾無關係，與濃度則幾成正比；生物洗滌法之單位體積費用與排氣處理流量成弱負關係，與濃度則幾成正比；Rotor+RTO 及 RTO 之單位體積費用與排氣處理流量及濃度均為中負關係。

圖 2.9 顯示，在排氣處理流量 200-1000 NCMM 及進氣濃度 100-1,000 mg/Nm^3 範圍內，每處理 $1,000 \text{ Nm}^3$ 排氣之操作、維護、折舊費用小於 NT\$ 10 及 15 之適用方法範圍。表 4.13 顯示處理方法(排氣處理流量 500 NCMM)選擇優先性摘要。

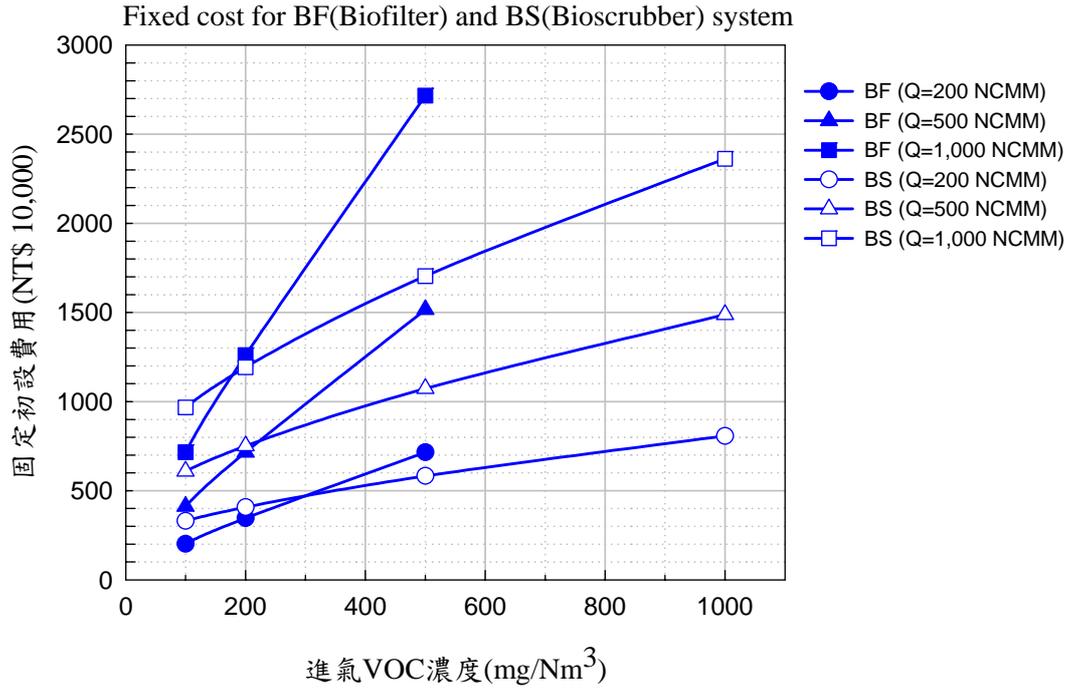


圖 2.2：不同排氣處量(Q)之設備設置費用比較(生物濾床法 BF 及生物洗滌法 BS)

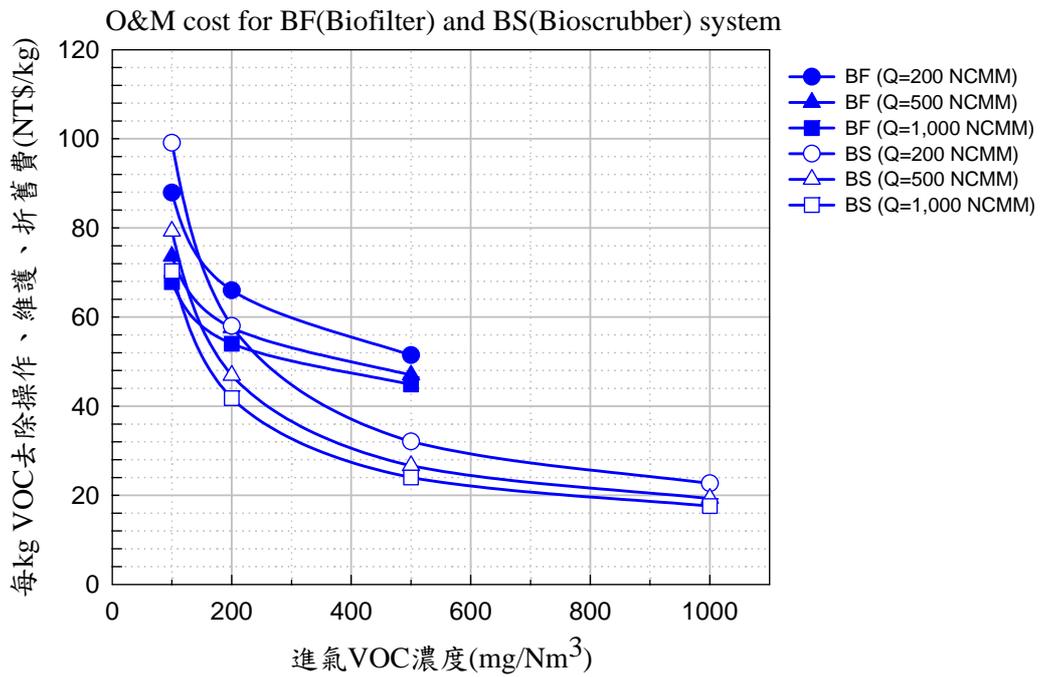


圖 2.3：不同排氣處量(Q)之操作、維護、折舊費用比較(生物濾床法 BF 及生物洗滌法 BS)

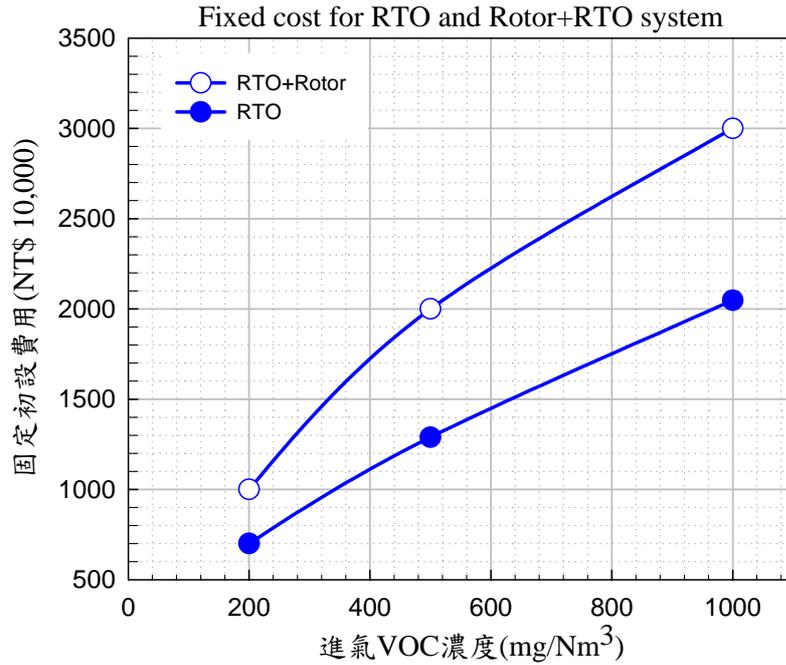


圖 2.4：排氣處量(Q = 200-1,000 NCMM)之設備設置費用比較(RTO 及 Rotor+RTO)

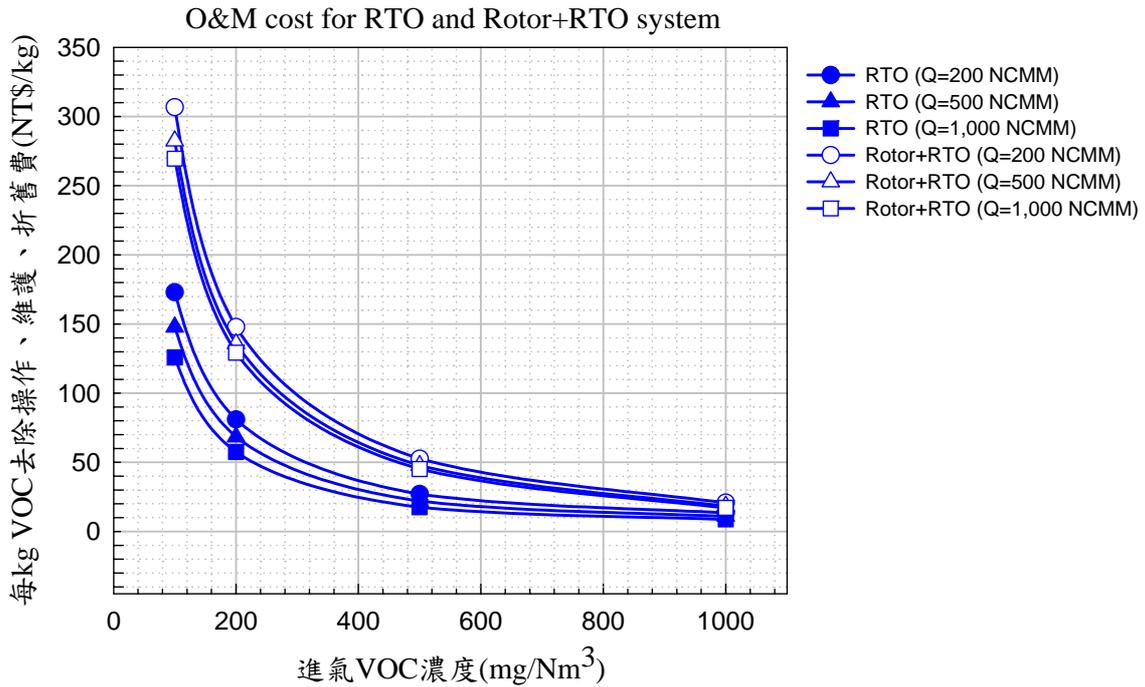


圖 2.5：不同排氣處量(Q)之操作、維護、折舊費用比較(RTO 及 Rotor+RTO)

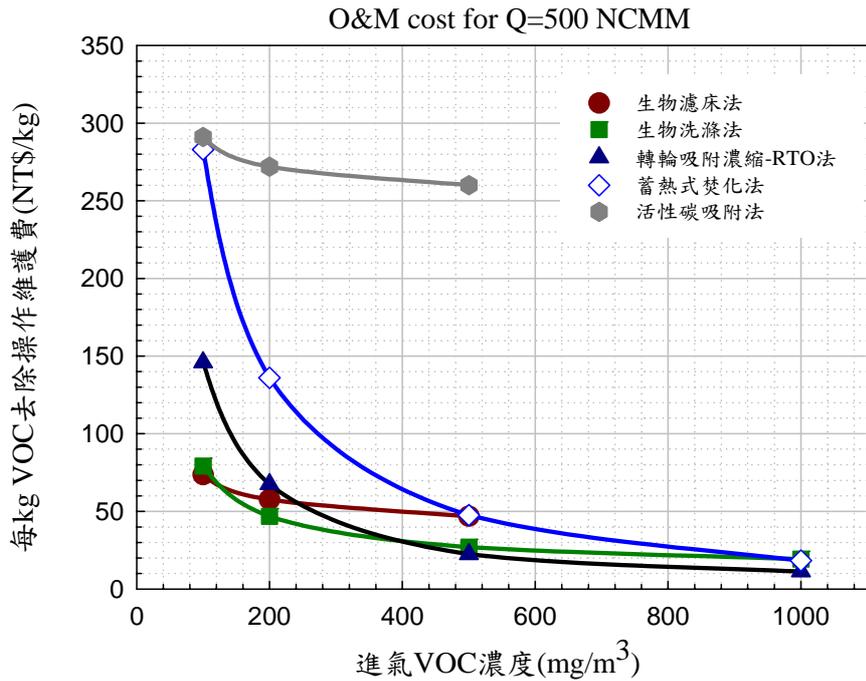


圖 2.6：排氣處量(Q=500 NCMM)之操作、維護、折舊費用比較(每 kg VOC 去除)

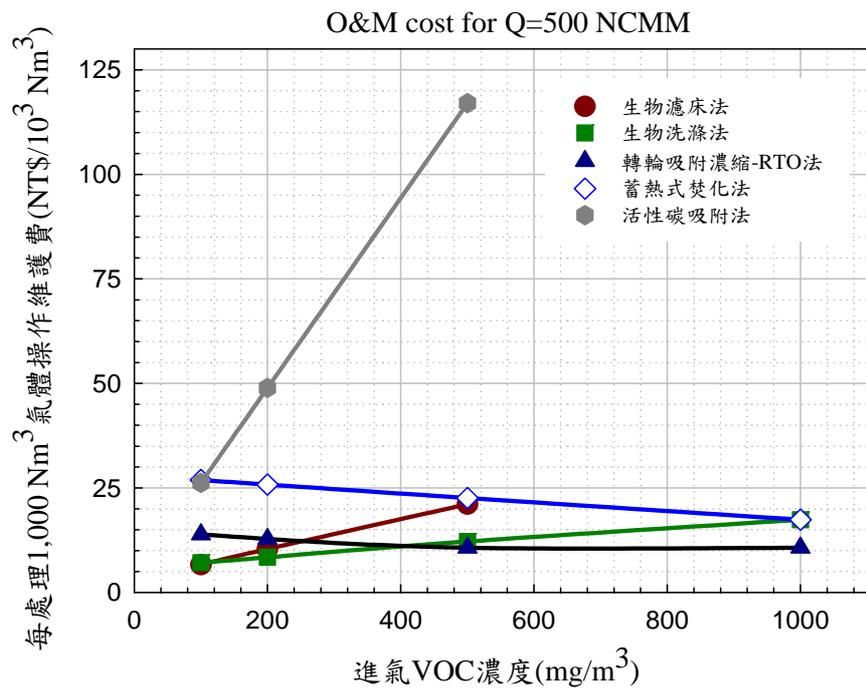


圖 2.7：排氣處量(Q=500 NCMM)之操作、維護、折舊費用比較(每 1,000 Nm³ 排氣處理)

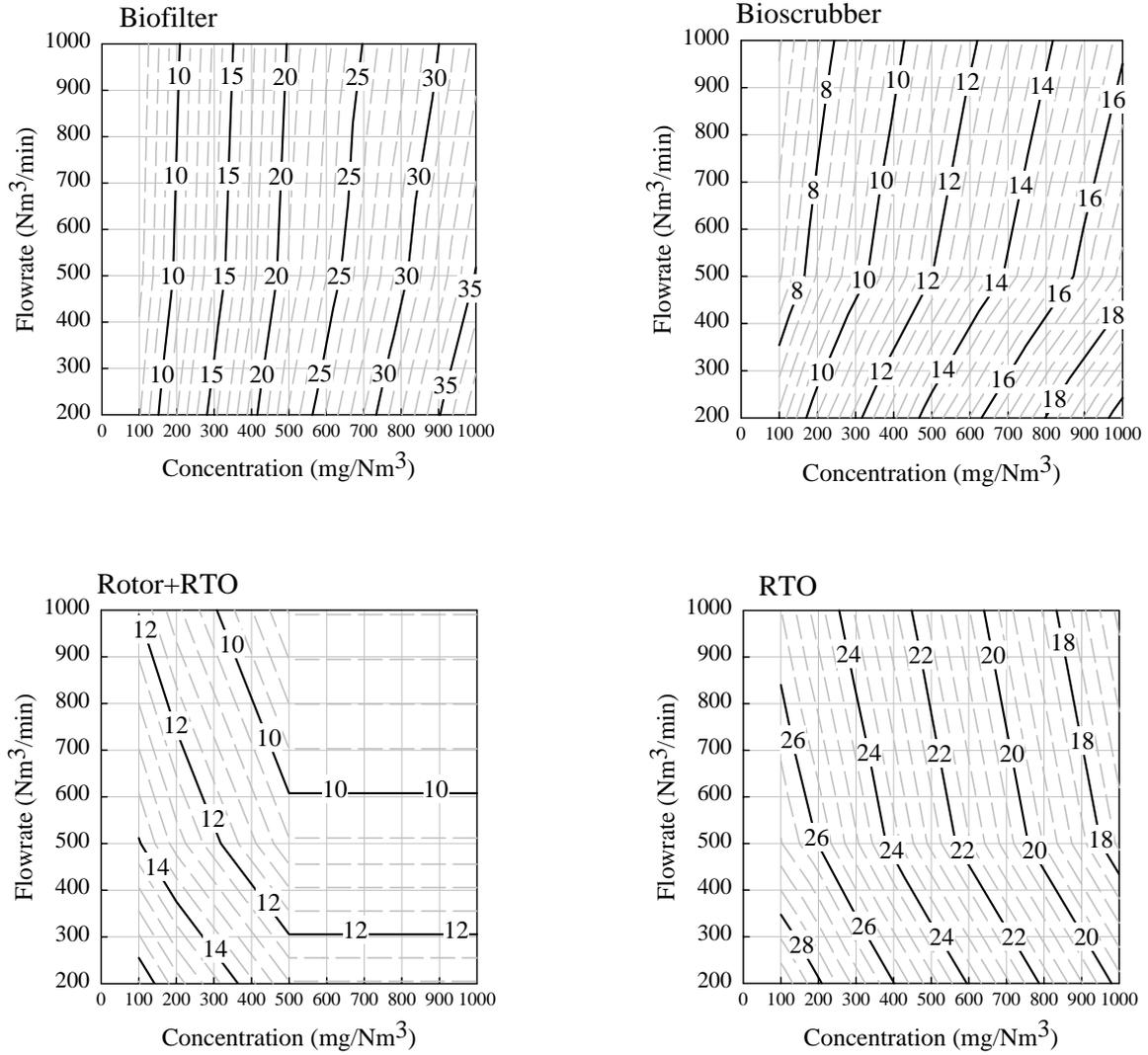


圖 2.8: 在排氣處理流量 200-1000 NCMM 及進氣濃度 100-1,000 mg/Nm³ 範圍內，每處理 1,000 Nm³ 排氣之操作、維護、折舊費用(NT\$, 顯示於圖中數字)

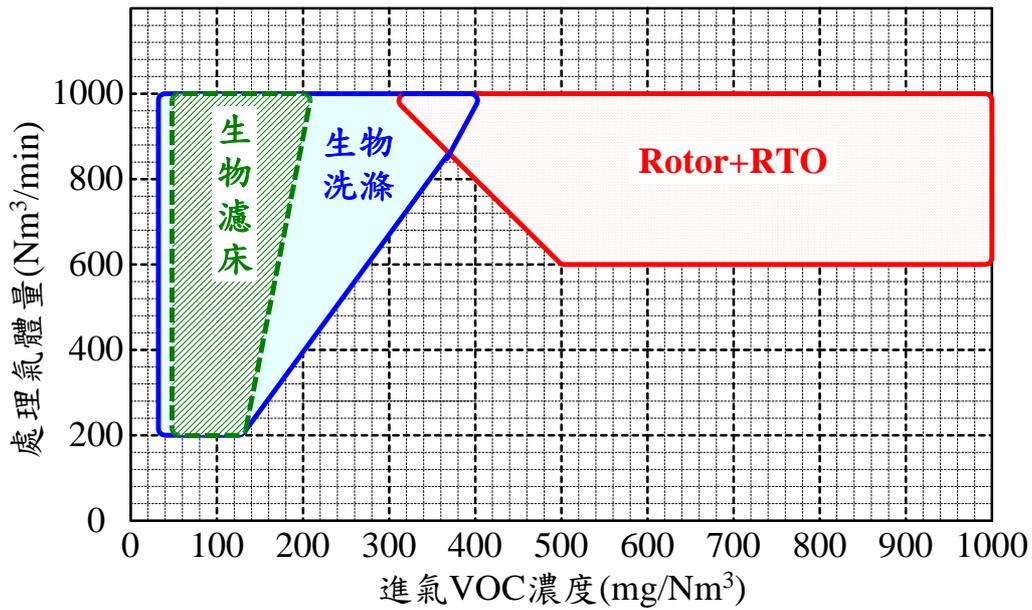


圖 2.9-1: 在排氣處理流量 200-1000 NCMM 及進氣濃度 100-1,000 mg/Nm³ 範圍內, 每處理 1,000 Nm³ 排氣之操作、維護、折舊費用小於 NT\$ 10 之適用方法範圍

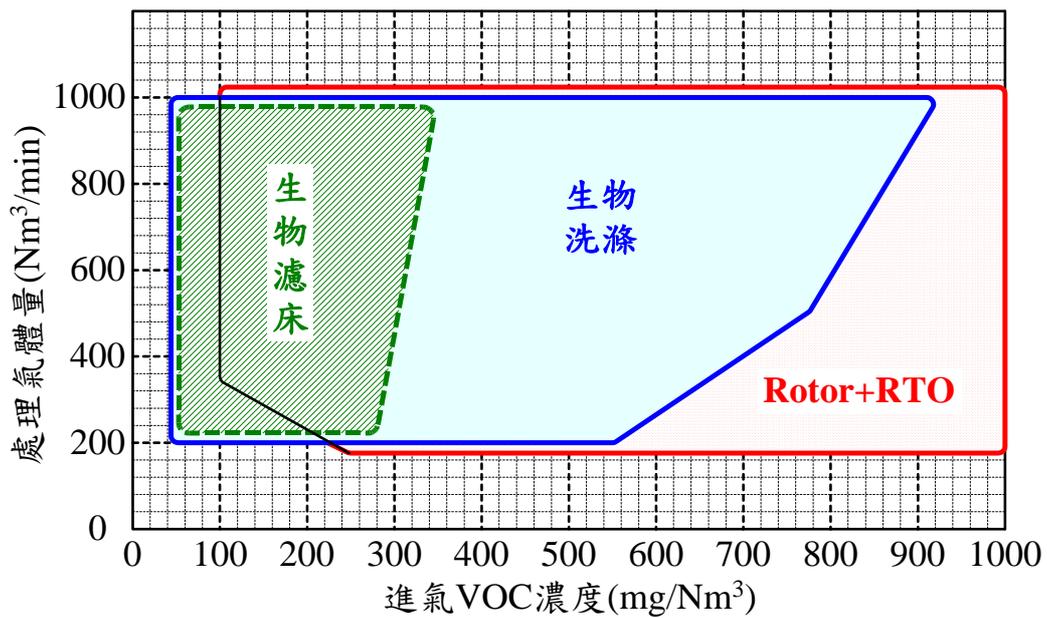


圖 2.9-2: 在排氣處理流量 200-1000 NCMM 及進氣濃度 100-1,000 mg/Nm³ 範圍內, 每處理 1,000 Nm³ 排氣之操作、維護、折舊費用小於 NT\$ 15 之適用方法範圍

表 2.2-1：各處理技術之經濟評估方法(生物濾床法)

1、生物濾床法(操作風量為 200、500、1,000 Nm³/min；評估濃度為 100、200、500 mg/Nm³)

(1)進氣 VOC 質流量(g/hr)=氣體流量(Nm³/min)×進氣 VOC 濃度(mg/Nm³)×0.001 g/mg×60 min/hr

(2)濾床濾料體積(m³)=進氣 VOC 質流量(g/hr)÷濾床體積負荷(20 g/m³.hr)。濾床體積負荷 20 g/m³.hr 時，VOC 去除率>90%。

(3)含濾料之初設費用(萬 NT\$)=濾料之初置費用(1 萬 NT\$/m³×濾料體積 m³) + 不含濾料之濾床及相關設備初設費用((濾料體積 m³÷100 m³)^{2/3}×200 萬 NT\$)

(4)送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7×10⁻⁴×Q (Nm³/min)×ΔP (mmAq)。本處設定濾料堆填高度為 60 cm 時，系統總風阻 ΔP=200 mmAq。

(5)年操作電費(萬 NT\$)=送風機馬力(HP)×0.746 kW/HP×8,000 hr/年×NT\$ 2.0/kWh÷10,000/萬

(6)年人力及維護費(萬 NT\$)=[{濾料置換費(NT\$ 10,000/m³)×濾料置換體積(濾床濾料體積 m³/2 年)] + 年人力費(2 人時/天×365 天/年×NT\$ 200/人時)}÷10,000/萬

(7)年折舊費(萬 NT\$)=不含濾料之初設費用×{i×(1+i)ⁿ}/[(1+i)ⁿ-1]} = 不含濾料之初設費用×0.0963，i=年利率(0.05)、n=折舊年限(15 年)

(8)年費用合計=年操作電費+年人力、維護費、折舊費

(9)年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.9 (去除率)÷1,000 g/kg

(10)年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(11)每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(12)每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.2-2：各處理技術之經濟評估方法(生物洗滌法)

2、生物洗滌法(操作風量為 200、500、1,000 Nm³/min; 評估濃度為 100、200、500、1,000 mg/Nm³)

(1) 進氣 VOC 質流量(g/hr) = 氣體流量(Nm³/min) × 進氣 VOC 濃度(mg/Nm³) × 0.001 g/mg × 60 min/hr

(2) 吸收塔初設費用(萬 NT\$) = [氣體流量(Nm³/min)/(200 Nm³/min)]^{2/3} × 200 萬 NT\$

(3) 活性污泥系統初設費用(萬 NT\$) = [進氣 VOC 質流量(g/hr) × 24 hr/day × 0.001 kg/g ÷ 100 kg VOC/day]^{2/3} × 300 萬 NT\$

(4) 活性污泥系統(HP) = 進氣 VOC 質流量(g/hr) × 0.001 kg/g × 3 HP/(kg VOC/hr); 循環液馬力(HP) = 氣體流量(Nm³/min) × 3 (L 循環液/min) / (氣體流量 Nm³/min) × 0.02 HP/(L 循環液/min)

(5) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力(Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7 × 10⁻⁴ × Q (Nm³/min) × ΔP (mmAq)。本處設定濾料堆填高度為 300 cm 時，系統總風阻 ΔP = 200 mmAq。

(6) 年操作電費(萬 NT\$) = 總馬力(HP) × 0.746 kW/HP × 8,000 hr/年 × NT\$ 2.0/kWh ÷ 10,000/萬

(7) 年人力費(萬 NT\$) = 2 人時/天 × 365 天/年 × NT\$ 200/人時 ÷ 10,000/萬; 年剩餘污泥處理費(萬 NT\$) = 進氣 VOC 質流量(g/hr) × 0.001 kg/g × 8,000 hr/年 × 0.3 kg 乾污泥/(kg VOC) × NT\$ 10/(kg 乾污泥) ÷ 10,000/萬; 年折舊費(萬 NT\$) = 吸收塔及活性污泥系統初設費用 × {i × (1 + i)ⁿ / [(1 + i)ⁿ - 1]} = 吸收塔及活性污泥系統初設費用 × 0.0963, i = 年利率(0.05)、n = 折舊年限(15 年)

(8) 年費用合計 = 年操作電費 + 年人力、維護費、折舊費

(9) 年去除 VOC 質量(kg/年) = 進氣 VOC 質流量(g/hr) × 8,000 hr/年 × 0.9 (去除率) ÷ 1,000 g/kg

(10) 年處理氣體量(10³ Nm³/年) = 氣體流量(Nm³/min) × 60 min/hr × 8,000 hr/年 ÷ 1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(11) 每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg) = 年費用合計(萬 NT\$) ÷ 年去除 VOC 質量(kg/年) × 10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(12) 每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³) = 年費用合計(萬 NT\$) ÷ 年處理氣體量(10³ Nm³/年) × 10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.2-3：各處理技術之經濟評估方法(轉輪吸附濃縮-RTO 法)

- 3、轉輪吸附濃縮-RTO 法(操作風量為 200、500、1,000 Nm³/min；評估濃度為 100、200、500、1,000 mg/Nm³)
- (1)進氣 VOC 質流量(g/hr)=氣體流量(Nm³/min)×進氣 VOC 濃度(mg/Nm³)×0.001 g/mg×60 min/hr
 - (2)含轉輪及 RTO 之初設費用：依 2003 年市價
 - (3)送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7×10⁻⁴×Q (Nm³/min)×ΔP (mmAq)。本處設定轉輪系統風量為廢氣風量、總風阻ΔP = 200 mmAq；RTO 風量為廢氣風量之 1/10、總風阻ΔP = 600 mmAq。
 - (4)年操作電費(萬 NT\$)=送風機馬力(HP)×0.746 kW/HP×8,000 hr/年×NT\$ 2.0/kWh÷10,000/萬
 - (5)年燃料 LPG 費(萬 NT\$)={進入 RTO 氣體流量(Nm³/min，進流氣體量之 1/10)×1.293 kg/Nm³×0.25 kcal/kg.°C×[轉輪脫附加熱溫昇 70°C + RTO 進排氣溫差 30°C - 絕熱燃燒升溫 0.025°C/(mg/Nm³)×進氣 VOC 濃度(進流氣體 VOC 濃度之 10 倍) (mg/Nm³)]×60 min/hr×8,000 hr/年÷燃料熱值(11,500 kcal/kg)×燃料單價(NT\$ 15 /kg)}÷10,000/萬
 - (6)年人力、維護、折舊費(萬 NT\$)=含轉輪及 RTO 之初設費用×0.0963 + 年人力費(1 人時 /天×365 天/年×NT\$ 200/人時)
 - (7)年費用合計=年操作電費+年燃料 LPG 費+年人力、維護、折舊費
 - (8)年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.95 (去除率)÷1,000 g/kg
 - (9)年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)
 - (10)每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)
 - (11)每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.2-4：各處理技術之經濟評估方法(RTO 法)

4、RTO 法(操作風量為 200、500、1,000 Nm³/min；評估濃度為 100、200、500、1,000 mg/Nm³)

(1)進氣 VOC 質流量(g/hr)=氣體流量(Nm³/min)×進氣 VOC 濃度(mg/Nm³)×0.001 g/mg×60 min/hr

(2)初設費用(萬 NT\$)=[氣體流量(Nm³/min)/200 (Nm³/min)]^{2/3}×700 萬 NT\$

(3)送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7×10⁻⁴×Q (Nm³/min)×ΔP (mmAq)。本處設定總風阻ΔP=600 mmAq。

(4)年操作電費(萬 NT\$)=送風機馬力(HP)×0.746 kW/HP×8,000 hr/年×NT\$ 2.0/kWh÷10,000/萬

(5)年燃料 LPG 費={進入 RTO 氣體流量(Nm³/min)×1.293 kg/Nm³×0.25 kcal/kg.°C×(RTO 進排氣溫差 40°C - 絕熱燃燒升溫 0.025°C/(mg/Nm³)×進氣 VOC 濃度 mg/Nm³)×60 min/hr×8,000 hr/年÷燃料熱值(11,500 kcal/kg)×燃料單價(NT\$ 15 /kg)}÷10,000/萬

(6)年人力及維護費+折舊費(萬 NT\$)=年人力費(1 人時/天×365 天/年×NT\$ 200/人時÷10,000/萬 NT\$)+折舊費(初設費(萬 NT\$)×0.093)

(7)年費用合計=年操作電費+年燃料 LPG 費+年人力、維護、折舊費

(8)年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.95 (去除率)÷1,000 g/kg

(9)年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(10)每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(11)每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.2-5：各處理技術之經濟評估方法(活性碳吸附法)

- 5、活性碳吸附法(操作風量為 200、500、1,000 Nm³/min；評估濃度為 100、200、500 mg/Nm³)
- (1)進氣 VOC 質流量(g/hr)=氣體流量(Nm³/min)×進氣 VOC 濃度(mg/Nm³)×0.001 g/mg×60 min/hr
 - (2)活性碳所需重量(kg)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×使用時間設定(以 336 hr 計)×0.001 kg/g×0.9 (去除率)÷活性碳飽和吸附能力(0.08 kg VOC/kg 活性碳)
 - (3)碳床截面積(m²)= 所需活性碳之重量 kg÷500 kg/m³(活性碳填充比重)÷1.3 m (碳床填充高度)。
 - (4)不含活性碳之初設費用(萬 NT\$)={修正係數[3.62×(Q, Nm³/min)^{-0.133}]×不含活性碳之活性碳床及相關設備初設費用[58,499×吸附及脫附床截面積(S, m²)^{0.778}]}÷10,000/萬。
 - (5)送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7×10⁻⁴×Q (Nm³/min)×ΔP (mmAq)。本處考慮廢氣通過碳床之壓損及氣體通過管線及管件之壓損，系統總風阻ΔP=300 mmAq。
 - (6)年操作電費(萬 NT\$)=送風機馬力(HP)×0.746 kW/HP×8,000 hr/年×NT\$ 2.0/kWh÷10,000/萬
 - (7)年人力及維護費(萬 NT\$)=[{活性碳再生換置費(NT\$ 20/kg 活性碳)×進氣 VOC 質流量 (g/hr)×10⁻³ kg/g×8000 hr/年×0.9(去除率)÷0.08 kg VOC/kg 活性碳]+年人力費(2 人時/天×365 天/年×NT\$ 200/人時)]÷10,000/萬
 - (8)年折舊費(萬 NT\$)=不含活性碳之初設費用×{i×(1+i)ⁿ}/[(1+i)ⁿ-1]}=不含活性碳之初設費用×0.0963, i=年利率(0.05)、n=折舊年限(15 年)
 - (9)年費用合計=年操作電費+年人力、維護費、折舊費
 - (10)年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.95 (去除率)÷1,000 g/kg
 - (11)年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)
 - (12)每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)
 - (13)每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.3：生物濾床法經濟評估結果(初設及操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	進氣 VOC 質流量 (g/hr)	濾床濾料 體積 (m ³)	不含濾料之 初設費用 (萬 NT\$)	送風機 馬力 (HP)	年操作 電費 (萬 NT\$)	年人力 、維護、 折舊費 (萬 NT\$)	年費用 合計 (萬 NT\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)+(9)	(10)
200	100	1,200	60	142	15	18	58	76
	200	2,400	120	226			96	114
	500	6,000	300	416			205	222
500	100	3,000	150	262	37	44	115	159
	200	6,000	300	416			205	249
	500	15,000	750	766			463	508
1,000	100	6,000	300	416	74	88	205	293
	200	12,000	600	660			378	467
	500	30,000	1,500	1,217			882	970

- (1) 氣體流量：以代表性之 200、500、1,000 Nm³/min 評估
- (2) 進氣 VOC 濃度：以代表性之 100、200、500 mg/Nm³ 評估，代表性 VOC 為丙酮及異丙醇
- (3) 進氣 VOC 質流量(g/hr) = 氣體流量(Nm³/min) × 進氣 VOC 濃度(mg/Nm³) × 0.001 g/mg × 60 min/hr
- (4) 濾床濾料體積(m³) = 進氣 VOC 質流量(g/hr) ÷ 濾床體積負荷(20 g/m³.hr)。濾床體積負荷 20 g/m³.hr 時，VOC 去除率 > 90%。
- (5) 含濾料之初設費用(萬 NT\$) = 濾料之初置費用(1 萬 NT\$/m³ × 濾料體積 m³) + 不含濾料之濾床及相關設備初設費用((濾料體積 m³ ÷ 100 m³)^{2/3} × 200 萬 NT\$)
- (6) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP) 與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7 × 10⁻⁴ × Q (Nm³/min) × ΔP (mmAq)。本處設定濾料堆填高度為 60 cm 時，系統總風阻 ΔP = 200 mmAq。
- (7) 年操作電費(萬 NT\$) = 送風機馬力(HP) × 0.746 kW/HP × 8,000 hr/年 × NT\$ 2.0/kWh ÷ 10,000/萬
- (8) 年人力及維護費(萬 NT\$) = {[濾料置換費(NT\$ 10,000/m³) × 濾料置換體積(濾床濾料體積 m³/2 年)] + 年人力費(2 人時/天 × 365 天/年 × NT\$ 200/人時)} ÷ 10,000/萬
- (9) 年折舊費(萬 NT\$) = 不含濾料之初設費用 × {i × (1 + i)ⁿ / [(1 + i)ⁿ - 1]} = 不含濾料之初設費用 × 0.0963，i = 年利率(0.05)、n = 折舊年限(15 年)
- (10) 年費用合計 = 年操作電費 + 年人力、維護費、折舊費 = (7) + (8) + (9)

表 2.4：生物濾床法經濟評估結果(每處理 1000 Nm³ 及 kg VOC 去除之操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	年去除 VOC 質量 (kg/年)	年處理氣 體量 (10 ³ Nm ³ /年)	年費用合計 (萬 NT\$)	每 kg VOC 去 除操作、維護、 折舊費 (NT\$/kg)	每處理 1000 Nm ³ 氣體操作維護費 (NT\$/10 ³ Nm ³)
(1)	(2)	(11)	(12)	(10)	(13)	(14)
200	100	8,640	96,000	76	87.92	7.91
	200	17,280		114	65.98	11.88
	500	43,200		222	51.47	23.16
500	100	21,600	240,000	159	73.61	6.63
	200	43,200		249	57.60	10.37
	500	108,000		508	47.00	21.15
1,000	100	43,200	480,000	293	67.82	6.10
	200	86,400		467	54.00	9.72
	500	216,000		970	44.91	20.21

(10) 年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.9 (去除率)÷1,000 g/kg

(11) 年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(12) 每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(13) 每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.5：生物洗滌法經濟評估結果(初設及操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	進氣 VOC 質流量 (g/hr)	吸收塔 初設費 用(萬 NT\$)	活性污泥 系統初設 費用(萬 NT\$)	活性污泥 系統+循 環液馬力 (HP)	送風 機馬 力 (HP)	年操作 電費 (萬 NT\$)	年人力 、維護、 折舊費 (萬 NT\$)	年費用 合計 (萬 NT\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
200	100	1,200	200	131	3.6+12	15	36	49	86
	200	2,400		208	7.2+12		41	60	100
	500	6,000		383	18+12		53	85	139
	1,000	12,000		607	36+12		75	121	196
500	100	3,000	368	241	9+30	37	91	80	171
	200	6,000		383	18+30		101	101	203
	500	15,000		705	45+30		134	154	288
	1,000	30,000		1,119	90+30		187	230	417
1,000	100	6,000	584	383	18+60	74	181	122	304
	200	12,000		607	36+60		203	158	361
	500	30,000		1,119	90+60		267	251	518
	1,000	60,000		1,777	180+60		375	386	761

(1) 氣體流量：以代表性之 200、500、1,000 Nm³/min 評估

(2) 進氣 VOC 濃度：以代表性之 100、200、500、1000 mg/Nm³ 評估，代表性 VOC 為丙酮及異丙醇。

(3) 進氣 VOC 質流量(g/hr)=氣體流量(Nm³/min)×進氣 VOC 濃度(mg/Nm³)×0.001 g/mg×60 min/hr

(4) 吸收塔初設費用(萬 NT\$)=[氣體流量(Nm³/min)/(200 Nm³/min)]^{2/3}×200 萬 NT\$。

(5) 活性污泥系統初設費用(萬 NT\$)=[進氣 VOC 質流量(g/hr)×24 hr/day×0.001 kg/g÷100 kg VOC/day]^{2/3}×300 萬 NT\$

(6) 活性污泥系統(HP)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×0.001 kg/g×3 HP/(kg VOC/hr);循環液馬力(HP)=氣體流量(Nm³/min)×3 (L 循環液/min)/(氣體流量 Nm³/min)×0.02 HP/(L 循環液/min)

(7) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力(Power, HP)與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP)=3.7×10⁻⁴×Q(Nm³/min)×ΔP(mmAq)。本處設定濾料堆填高度為 300 cm 時，系統總風阻ΔP=200 mmAq。

(8) 年操作電費(萬 NT\$)=總馬力(HP)×0.746 kW/HP×8,000 hr/年×NT\$ 2.0/kWh÷10,000/萬

(9) 年人力費(萬 NT\$)=2 人時/天×365 天/年×NT\$ 200/人時÷10,000/萬；年剩餘污泥處理費(萬 NT\$)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×0.001 kg/g×8,000 hr/年×0.3 kg 乾污泥/(kg VOC)×NT\$ 10/(kg 乾污泥)÷10,000/萬；年折舊費(萬 NT\$)=吸收塔及活性污泥系統初設費用×{i×(1+i)ⁿ/[(1+i)ⁿ-1]}=吸收塔及活性污泥系統初設費用×0.0963，i=年利率(0.05)、n=折舊年限(15 年)

(10) 年費用合計=年操作電費+年人力、維護費、折舊費=(8)+(9)

表 2.6：生物洗滌法經濟評估結果(每處理 1000 Nm³ 及 kg VOC 去除之操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	年去除 VOC 質量 (kg/年)	年處理氣 體量 (10 ³ Nm ³ /年)	年費用合計 (萬 NT\$)	每 kg VOC 去 除操作、維護、 折舊費 (NT\$/kg)	每處理 1000 Nm ³ 氣體操作維護費 (NT\$/10 ³ Nm ³)
(1)	(2)	(11)	(12)	(10)	(13)	(14)
200	100	8,640	96,000	86	99.10	8.92
	200	17,280		100	57.99	10.44
	500	43,200		139	32.08	14.44
	1,000	86,400		196	22.70	20.43
500	100	21,600	240,000	171	79.26	7.13
	200	43,200		203	46.94	8.45
	500	108,000		288	26.64	11.99
	1,000	216,000		417	19.32	17.39
1,000	100	43,200	480,000	304	70.28	6.33
	200	86,400		361	41.80	7.52
	500	216,000		518	23.99	10.79
	1,000	432,000		761	17.61	15.85

(11) 年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.9 (去除率)÷1,000 g/kg

(12) 年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(13) 每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(14) 每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.7：轉輪吸附濃縮-RTO 法經濟評估結果(初設及操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	進氣 VOC 質流量 (g/hr)	含轉輪及 RTO 之 初設費用 (萬 NT\$)	送風機 馬力(HP)	年操作 電費 (萬 NT\$)	年操作 燃料費 (萬 NT\$)	年人力 、維護、 折舊費 (萬 NT\$)	年費用 合計 (萬 NT\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
200	100	1,200	1,000	19	23	35	100	158
	200	2,400				25		148
	500	6,000				0		123
	1000	12,000				0		123
500	100	3,000	2,000	48	57	86	193	337
	200	6,000				62		312
	500	15,000				0		251
	1000	30,000				0		251
1,000	100	6,000	3,000	96	115	173	286	574
	200	12,000				123		524
	500	30,000				0		401
	1000	60,000				0		401

- (1) 氣體流量：以代表性之 200、500、1,000 Nm³/min 評估
- (2) 進氣 VOC 濃度：以代表性之 100、200、mg/Nm³ 評估，代表性 VOC 為丙酮及異丙醇
- (3) 進氣 VOC 質流量(g/hr) = 氣體流量(Nm³/min) × 進氣 VOC 濃度(mg/Nm³) × 0.001 g/mg × 60 min/hr
- (4) 含轉輪及 RTO 之初設費用：依 2003 年市價
- (5) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP) 與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7 × 10⁻⁴ × Q (Nm³/min) × ΔP (mmAq)。本處設定轉輪系統風量為廢氣風量、總風阻 ΔP = 200 mmAq；RTO 風量為廢氣風量之 1/10、總風阻 ΔP = 600 mmAq。
- (6) 年操作電費(萬 NT\$) = 送風機馬力(HP) × 0.746 kW/HP × 8,000 hr/年 × NT\$ 2.0/kWh ÷ 10,000/萬
- (7) 年燃料 LPG 費(萬 NT\$) = {進入 RTO 氣體流量(Nm³/min，進流氣體量之 1/10) × 1.293 kg/Nm³ × 0.25 kcal/kg.°C × [轉輪脫附加熱溫昇 70°C + RTO 進排氣溫差 30°C - 絕熱燃燒升溫 0.025°C/(mg/Nm³) × 進氣 VOC 濃度(進流氣體 VOC 濃度之 10 倍) (mg/Nm³)] × 60 min/hr × 8,000 hr/年 ÷ 燃料熱值(11,500 kcal/kg) × 燃料單價(NT\$ 15 /kg)} ÷ 10,000/萬
- (8) 年人力、維護、折舊費(萬 NT\$) = 含轉輪及 RTO 之初設費用 × 0.0963 + 年人力費(1 人時/天 × 365 天/年 × NT\$ 200/人時)
- (9) 年費用合計 = (6) + (7) + (8)

表 2.8：轉輪吸附濃縮-RTO 法經濟評估結果(每處理 1000 Nm³ 及 kg VOC 去除之操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	年去除 VOC 質量 (kg/年)	年處理氣 體量 (10 ³ Nm ³ /年)	年費用合計 (萬 NT\$)	每 kg VOC 去 除費用 (NT\$/kg)	每處理 1000 Nm ³ 氣體費用 (NT\$/10 ³ Nm ³)
(1)	(2)	(10)	(11)	(9)	(12)	(13)
200	100	9,120	96,000	158	173.06	16.44
	200	18,240		148	81.07	15.40
	500	45,600		123	27.03	12.84
	1000	91,200		123	13.52	12.84
500	100	22,800	240,000	337	147.86	14.05
	200	45,600		312	68.47	13.01
	500	114,000		251	21.99	10.45
	1000	228,000		251	11.00	10.45
1,000	100	45,600	480,000	574	125.86	11.96
	200	91,200		524	57.47	10.92
	500	228,000		401	17.59	8.36
	1000	456,000		401	8.80	8.36

(10) 年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.95 (去除率)÷1,000 g/kg

(11) 年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(12) 每 kg VOC 去除費用(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(13) 每處理 1000 Nm³ 氣體費用(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.9：RTO 法經濟評估結果(初設及操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	進氣 VOC 質流量 (g/hr)	RTO 初設費用 (萬 NT\$)	送風機 馬力(HP)	年操作 電費 (萬 NT\$)	年操作 燃料費 (萬 NT\$)	年人力 、維護、 折舊費 (萬 NT\$)	年費用 合計 (萬 NT\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
200	100	1,200	700	45	54	152	75	280
	200	2,400				142		270
	500	6,000				112		240
	1000	12,000				62		190
500	100	3,000	1,289	111	134	380	131	644
	200	6,000				355		619
	500	15,000				280		544
	1000	30,000				156		420
1,000	100	6,000	2,047	222	269	760	204	1,229
	200	12,000				710		1,179
	500	30,000				561		1,030
	1000	60,000				312		781

- (1) 氣體流量：以代表性之 200、500、1,000 Nm³/min 評估
- (2) 進氣 VOC 濃度：以代表性之 100、200、500、1,000 mg/Nm³ 評估，代表性 VOC 為丙酮及異丙醇
- (3) 進氣 VOC 質流量(g/hr) = 氣體流量(Nm³/min) × 進氣 VOC 濃度(mg/Nm³) × 0.001 g/mg × 60 min/hr
- (4) 初設費用(萬 NT\$) = [氣體流量(Nm³/min)/200 (Nm³/min)]^{2/3} × 700 萬 NT\$
- (5) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP) 與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7 × 10⁻⁴ × Q (Nm³/min) × ΔP (mmAq)。本處設定總風阻 ΔP = 600 mmAq。
- (6) 年操作電費(萬 NT\$) = 送風機馬力(HP) × 0.746 kW/HP × 8,000 hr/年 × NT\$ 2.0/kWh ÷ 10,000/萬
- (7) 年燃料 LPG 費 = {進入 RTO 氣體流量(Nm³/min) × 1.293 kg/Nm³ × 0.25 kcal/kg.°C × (RTO 進排氣溫差 40°C - 絕熱燃燒升溫 0.025°C / (mg/Nm³) × 進氣 VOC 濃度 mg/Nm³) × 60 min/hr × 8,000 hr/年 ÷ 燃料熱值(11,500 kcal/kg) × 燃料單價(NT\$ 15 /kg)} ÷ 10,000/萬
- (8) 年人力及維護費 + 折舊費(萬 NT\$) = 年人力費(1 人時/天 × 365 天/年 × NT\$ 200/人時 ÷ 10,000/萬 NT\$) + 折舊費(初設費(萬 NT\$) × 0.093)
- (9) 年費用合計 = (6) + (7) + (8)

表 2.10：RTO 法經濟評估結果(每處理 1000 Nm³ 及 kg VOC 去除之操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	年去除 VOC 質量 (kg/年)	年處理氣 體量 (10 ³ Nm ³ /年)	年費用合計 (萬 NT\$)	每 kg VOC 去 除費用 (NT\$/kg)	每處理 1000 Nm ³ 氣體費用 (NT\$/10 ³ Nm ³)
(1)	(2)	(10)	(11)	(9)	(12)	(13)
200	100	9,120	96,000	280	306.64	29.13
	200	18,240		270	147.86	28.09
	500	45,600		240	52.59	24.98
	1000	91,200		190	20.83	19.79
500	100	22,800	240,000	644	282.38	26.83
	200	45,600		619	135.73	25.79
	500	114,000		544	47.74	22.68
	1000	228,000		420	18.41	17.49
1,000	100	45,600	480,000	1,229	269.55	25.61
	200	91,200		1,179	129.31	24.57
	500	228,000		1,030	45.17	21.46
	1000	456,000		781	17.13	16.27

(9) 年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.95 (去除率)÷1,000 g/kg

(10) 年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(11) 每 kg VOC 去除費用(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(12) 每處理 1000 Nm³ 氣體費用(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.11：活性碳吸附法經濟評估結果(初設及操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	進氣 VOC 質流量 (g/hr)	活性碳所 需重量 (kg)	碳床 截面 積 (m ²)	不含活性 碳之初設 費 (萬 NT\$)	送風機 馬力 (HP)	年操作 電費 (萬 NT\$)	年人力 、維護、折 舊費 (萬 NT\$)	年費用 合計 (萬 NT\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)+(10)	(11)
200	100	1,200	4,347	6.7	46	22	26	235	262
	200	2,400	8,694	13.4	79			454	481
	500	6,000	21,735	33.4	161			1,110	1,137
500	100	3,000	10,868	16.7	83	56	66	563	629
	200	6,000	21,735	33.4	142			1,108	1,175
	500	15,000	54,338	83.6	290			2,743	2,809
1,000	100	6,000	21,735	33.4	130	111	132	1,107	1,240
	200	12,000	43,470	66.9	222			2,196	2,328
	500	30,000	108,675	167.2	453			5,458	5,591

- (1) 氣體流量：以代表性之 200、500、1,000 Nm³/min 評估
- (2) 進氣 VOC 濃度：以代表性之 100、200、500 mg/Nm³ 評估，代表性 VOC 為丙酮及異丙醇
- (3) 進氣 VOC 質流量(g/hr) = 氣體流量(Nm³/min) × 進氣 VOC 濃度(mg/Nm³) × 0.001 g/mg × 60 min/hr
- (4) 活性碳所需重量(kg) = 進氣 VOC 質流量(g/hr) × 使用時間設定(以 336 hr 計) × 0.001 kg/g × 0.9 (去除率) ÷ 活性碳飽和吸附能力(0.08 kg VOC/kg 活性碳), 吸附能力是針對丙酮及異丙醇。
- (5) 碳床截面積(m²) = 所需活性碳之重量 kg ÷ 500 kg/m³(活性碳填充比重) ÷ 1.3 m (碳床填充高度)。
- (6) 不含活性碳之初設費用(萬 NT\$) = {修正係數[3.62 × (Q, Nm³/min)^{-0.133}] × 不含活性碳之活性碳床及相關設備初設費用[58,499 × 吸附及脫附床截面積(S, m²)^{0.778}]} ÷ 10,000/萬。
- (7) 送風機馬力：依美國環保署(USEPA)資料(1991)，設定送風機效率為 65%，馬達馬力 (Power, HP) 與送風量(Q, Nm³/min@25°C)、系統總風阻(ΔP, mmAq)之關係為 Power (HP) = 3.7 × 10⁻⁴ × Q (Nm³/min) × ΔP (mmAq)。本處考慮廢氣通過碳床之壓損及氣體通過管線及管件之壓損，系統總風阻 ΔP = 300 mmAq。
- (8) 年操作電費(萬 NT\$) = 送風機馬力(HP) × 0.746 kW/HP × 8,000 hr/年 × NT\$ 2.0/kWh ÷ 10,000/萬
- (9) 年人力及維護費(萬 NT\$) = {[活性碳再生換置費(NT\$ 20/kg 活性碳) × 進氣 VOC 質流量 (g/hr) × 10⁻³ kg/g × 8000 hr/年 × 0.9(去除率) ÷ 0.08 kg VOC/kg 活性碳] + 年人力費(2 人時/天 × 365 天/年 × NT\$ 200/人時)} ÷ 10,000/萬
- (10) 年折舊費(萬 NT\$) = 不含活性碳之初設費用 × {i × (1 + i)ⁿ / [(1 + i)ⁿ - 1]} = 不含活性碳之初設費用 × 0.0963, i = 年利率(0.05)、n = 折舊年限(15 年)
- (11) 年費用合計 = 年操作電費 + 年人力、維護費、折舊費 = (8) + (9) + (10)

表 2.12：活性炭吸附法經濟評估結果(每處理 1000 Nm³ 及 kg VOC 去除之操作維護費)

氣體流量 (Nm ³ /min)	進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	年去除 VOC 質量 (kg/年)	年處理氣 體量 (10 ³ Nm ³ /年)	年費用合計 (萬 NT\$)	每 kg VOC 去 除操作、維護、 折舊費 (NT\$/kg)	每處理 1000 Nm ³ 氣體操作維護費 (NT\$/10 ³ Nm ³)
(1)	(2)	(12)	(13)	(11)	(14)	(15)
200	100	8,640	96,000	262	302.68	27.24
	200	17,280		481	278.17	50.07
	500	43,200		1,137	263.09	118.39
500	100	21,600	240,000	629	291.12	26.20
	200	43,200		1,175	271.88	48.94
	500	108,000		2,809	260.07	117.03
1,000	100	43,200	480,000	1,240	286.94	25.82
	200	86,400		2,328	269.50	48.51
	500	216,000		5,591	258.83	116.47

(12) 年去除 VOC 質量(kg/年)=進氣 VOC 質流量(g/hr)×8,000 hr/年×0.9 (去除率)÷1,000 g/kg

(13) 年處理氣體量(10³ Nm³/年)=氣體流量(Nm³/min)×60 min/hr×8,000 hr/年÷1,000 Nm³/(10³ Nm³)

(14) 每 kg VOC 去除操作、維護、折舊費(NT\$/kg)=年費用合計(萬 NT\$)÷年去除 VOC 質量(kg/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

(15) 每處理 1000 Nm³ 氣體操作、維護、折舊費(NT\$/10³ Nm³)=年費用合計(萬 NT\$)÷年處理氣體量(10³ Nm³/年)×10,000 NT\$/(萬 NT\$)

表 2.13：適用處理方法(排在前者優先，排氣處理流量 500 NCMM)

進氣 VOC 濃度 (mg/Nm ³)	操作維護及折舊 (以 kg VOC 去除費 用為基礎)	操作維護及折舊 (以 1,000 Nm ³ 排氣 處理費用為基礎)	以設置費用為基礎	以操作性能及管理 為基礎
<200	生物洗滌 生物濾床 Rotor+RTO	生物洗滌 生物濾床 RTO	生物洗滌 生物濾床 RTO	RTO 生物洗滌 Rotor+RTO
200-500	生物洗滌 Rotor+RTO 生物濾床	生物洗滌 Rotor+RTO RTO	生物洗滌 RTO 生物濾床	
500-1,000	Rotor+RTO 生物洗滌 RTO	RTO Rotor+RTO 生物洗滌		

三、結論及建議

針對光電及半導體業揮發性有機物之排放減量技術評估。由資料研析，獲下列結論及建議：

生物濾床法、生物洗滌、轉輪吸附濃縮-RTO 法為二行業排氣之經濟有效處理法。

在生物濾床法方面，以 $500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之氣體流量計，表 4.3 及 4.4 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm^3 時，含濾料之設備初設費用分別為 NT\$ 412、716、1,516 萬，年操作、人力維護及折舊費用合計分別為 NT\$ 159、249、508 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 73.6、57.6、47.0，處理每 $1,000 \text{ Nm}^3$ 進氣之操作及人力費用分別為 NT\$ 6.63、10.4、21.2。

在生物洗滌法方面，以 $500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之氣體流量計，表 4.5 及 4.6 顯示其進氣 VOC 濃度為 100 及 200、500 mg/Nm^3 時，含吸收塔及活性污泥設備之初設費用分別為 NT\$ 241、383、705 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 171、203、288 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 79.3、46.9、26.6，處理每 $1,000 \text{ Nm}^3$ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 7.13、8.45、12.0。

在轉輪吸附濃縮-RTO 法方面，以 $500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之氣體流量計，表 4.7 及 4.8 顯示其進氣 VOC 濃度為 100、200、500 mg/Nm^3 時，設備初設費用均為 NT\$ 2,000 萬，年操作、人力及折舊費用合計分別為 NT\$ 337、312、251 萬，去除每 kg VOC 之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 148、68.5、22.0，處理每 $1,000 \text{ Nm}^3$ 進氣之操作、人力維護及折舊費用分別為 NT\$ 14.1、13.0、10.5。

排氣 VOC 濃度為 100 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之；排氣 VOC 濃度為 200 mg/Nm^3 時，以生物法(生物濾床及生物洗滌法)最經濟，轉輪吸附濃縮-RTO 法次之；排氣 VOC 濃度為 500 mg/Nm^3 時，以生物洗滌及轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物濾床法次之；排氣 VOC 濃度為 1,000 mg/Nm^3 時，以轉輪吸附濃縮-RTO 法最經濟，生物洗滌法次之。

四、參考文獻

- 1 鄭慧明、呂正欽，「IC 產業經營與展望」研討會記要，九十年六月八日，
<http://www.jcic.org.tw/010701.htm>
- 2 台灣光電產業現況分析，
http://www.eetc.globalsources.com/ART_8800121992_617717,622964.HTM
- 3 科學工業園區管理局，科學工業園區空氣品質監測規劃－揮發性有機物(VOCs)背景濃度調查及監測點規劃，新竹(1995)。
- 4 科學工業園區管理局，科學工業園區空氣品質監測揮發性有機物(VOCs)背景濃度調查，新竹(1998)。
- 5 科學工業園區管理局，科學工業園區空氣品質監測規劃-無機性氣體背景濃度調查及監測點規劃，新竹(1996)。
- 6 新竹市環境保護局，新竹科學園區工廠污染排放調查與空氣品質影響評估，新竹(1996)。
- 7 新竹市環境保護局，新竹科學園區工廠污染排放調查與空氣品質影響評估，新竹(1997)。
- 8 新竹縣環境保護局，新竹科學園區空氣品質管理計畫，新竹(1998)。
- 9 新竹市環境保護局，新竹科學園區空氣品質管理及污染源稽查管制計畫期中報告，新竹(1998)。
- 10 張書豪及張木彬，科學園區空氣污染物排放特性之探討，國科會研究報告(2000)。
- 11 吳信賢，林樹崧，賴慶智，應用於半導體業有機廢氣處理的氧化洗滌技術，2001 產業環保工程技術研討會，(2001)
- 12 新竹市環境保護局，新竹科學園區工廠污染排放調查與空氣品質影響評估，新竹(1996)。
- 13 新竹市環境保護局，新竹科學園區工廠污染排放調查與空氣品質影響評估，新竹(1997)。
- 14 黃俊傑、賴慶智、王耀銘，電子半導體廠之有機廢氣處理：生物濾床處理案例研究，化工資訊月刊，第 12 卷，第 5 期，第 4-15 頁(1998)。
- 15 A 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 16 B 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 17 C 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 18 D 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 19 E 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 20 F 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 21 G 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 22 H 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 23 I 廠(2002)，工廠固定污染源操作許可，民國九十一年。
- 24 USEPA, "Handbook: Control Technologies for Hazardous Air Pollutants," EPA/625/6-91/014, June, 1991. (工業技術研究院化學工業研究所翻譯，民國 83 年 1 月)。