

# 空氣污染物減量技術案例介紹(下)

粘愷峻

傑智環境科技股份有限公司 資深經理

本案為一彩紋鋼板製造廠，年產量約 8 萬公噸。本案面臨塗裝產品品質問題，主要問題為在高溫接合製程中產生表面起泡、火山口、產品邊緣脫落等；環保問題則以排 VOCs 廢氣為主。根據對現場作業環境及製程操作條件之檢討，提出下列改善方案。

## (一)塗裝品質提升

### 1.彩紋鋼板接著劑之黏度控制

宜添加適當之高沸點溶劑，使接著劑之黏性降低，在上接著劑時與滾輪之摩擦力降低，並降低靜電產生量。高沸點溶劑建議可用環己酮(Anone，Cyclohexanone)，添加量可用簡易型黏度杯，並以檢測數次決定規定值。

### 2.添加少量偶合劑，增加 PVC、PET、PP 等膠片與金屬板之附著強度

矽氧烷(Siloxane)系偶合劑，可使有機物與無機物(包括金屬)之鍵合力增加，少量添加即可發揮附著效果，可以改善疊合產品之擠壓、附著性。

### 3.接著劑之攪拌混合、過濾

接著劑上線前預攪拌混合之勻質塗布劑，宜經過 Cuno Filter 過濾後方可上線。

### 4.添加抗靜電劑

接著劑上線前預攪拌混合時，添加抗靜電劑，可以防止膠片沾塵埃之缺陷。

### 5.接著劑攪拌桶局部排氣設備

攪拌設備無 VOCs 收集回收設備，對於逸散性 VOCs 有一定之貢獻量。建議於攪拌設備施作範圍進行工作區間圍封，並且採負壓抽氣收集後處理。

## 6. Calender Roll 表面除污垢(約 180 ~ 190°C之亮面)

建議可以試用市售的清潔劑(尋找無腐蝕性者)，使用乾淨的白色下腳布，捲於木棒上擦拭。

## 7. 彩紋鋼卷生產線周遭環境之清淨

由於塗裝生產線屬精密塗裝的一環，因此須保持塗裝區及週遭環境絕對的乾淨，尤其避免有塵埃之污染，更不宜使用大型工業風扇，會將現場地面塵埃吹揚漂浮在空中，很容易使彩紋鋼材受污染，因此建議定時以真空吸塵機清除塵埃以消除沾污缺陷。

塵埃中最多的粒徑為 0.3 $\mu\text{m}$ ，而 0.3 $\mu\text{m}$ 以下的微粒有相互吸引形成 0.3 $\mu\text{m}$ 以上的性質；10 $\mu\text{m}$ 以上的塵埃常落在地面，10 $\mu\text{m}$ 以下的塵埃浮游於空氣中，而 10 $\mu\text{m}$ 左右的塵埃隨氣流反覆飄揚與落下。表 1、2 為實驗室及清淨室級別塵埃之容許量資料。

**表 1 實驗室之塵埃容量**

種類	粒子大小( $\mu\text{m}$ )	粒子數目(個/L)	塵埃量( $\mu\text{m}$ )
超精密作業	3 以下	100	1.5
精密作業	5 以下	300	4.5
普通作業	10 以下	600	7.5

資料來源：塗料公會

**表 2 清淨室級別**

級 別	粒子大小( $\mu\text{m}$ )	粒子數目(個/L)
	粒徑( $\mu\text{m}$ )	累積粒子數目(個/L)
100	$\geq 0.5$	$\leq 3.5$
10,000	$\geq 0.5$	$\leq 350$
	$\geq 5$	$\leq 2.3$
100,000	$\geq 0.5$	$\leq 3,500$
	$\geq 5$	$\leq 25$

資料來源：塗料公會

## (二)VOCs 減量

### 1.廢氣收集現況

製程所產生之 VOCs 主要來源為塗裝製程中使用揮發性有機溶劑，溶劑主要成分包括二甲苯、環己酮。VOCs 產生源則包括塗料攪拌區、塗佈機台及烘乾加熱爐。

攪拌區及塗佈機台主要為逸散性 VOCs 產生源(常溫：23°C)，包括 P7 污染源，目前在塗佈區已用圍封式集氣罩(負壓操作)進行 VOCs 蒐集工作，攪拌區則尚無任何集氣設施。

烘乾加熱爐為密閉式收集，VOCs 廢氣可有效收集(高溫：126~176°C)，污染源包括 P3(Oven No.1)、P4(Oven No.2)及 P5(Oven No.3)等。

另有一股介於塗佈室及烘乾加熱爐間之 VOCs 廢氣，初步研判因同時抽取部份塗佈常溫廢氣及烘乾加熱爐之高溫廢氣，廢氣溫度約為 74°C。

### 2.廢氣處理現況

目前僅部分廢氣(P3)透過控制設備(觸媒焚化設備：CTO，220NCMM)處理後排放，經業者自行檢測 CTO 之入/出口濃度結果顯示，在燃燒反應溫度為 290°C時，其破壞去除效率(DRE)為 74.5%。但根據檢測數據，P3 之入/出口乾濕基風量差異甚大(理論上應一致)，經以能量平衡判斷，由於 CTO 風車額定馬力為 50Hp，而運轉馬力在 45~46 Hp(以電流判斷)，在此操作條件下，風車運轉之理論風量約在 194.4NCMM，判斷 P3 入口之量測值(201.5NCMM)應與實際值較接近。

若 P3 出口風量以入口相同風量計算，則 CTO 之破壞去除效率則僅約為 61%，效率明顯不佳。

表 3 排放口檢測數據彙整表

項目	P3(入口)	P3(出口)	P4	P5	P6	P7
排氣溫度 (°C)	150	175	130	130	75	25
排氣速度 (m/s)	19	12	20	21	7.5	23
排氣量 (NCMM) 乾基	200	130	135	140	67	143
THC 校正值 (ppm)	125	50	10	25	1900	270
VOCs 排放量(kg/hr)	1.1	0.28	0.0568	0.14	5.6	1.68

\* P：表示廢氣排放口編號

### 3.有機溶劑原物料調查

表 4 為有機溶劑用量估算表，估算基礎是以檢測 2 日之製程有機溶劑之所有原物料用量統計，且每日工作時數以 8 小時為基礎，估算製程中所有有機溶劑之消耗量，再以平均小時之消耗量做為後續排放、減量估算基礎。計算公式如下：

$$\text{總有機溶劑消耗量} = (\text{各塗料用量(kg)} \times \text{含有機溶劑}\%) + (\text{各稀釋溶劑用量}) + (\text{清洗溶劑用量}) - (\text{有機溶劑製程回收量}) - (\text{有機溶劑廢棄量})$$

由於目前尚無有機溶劑回收設備，因此以清洗用溶劑用量作為有機溶劑回收量暫存量，而廢棄塗料則以 80% 溶劑含量估算，經由人員所提供之溶劑用量統計資料及上列公式之計算結果，於檢測 2 日之塗料總消耗量為 315 公斤，實際有機溶劑消耗量為 248.66 公斤，每小時平均之溶劑消耗量約為 15.54kg。

表 4 有機溶劑使用量統計表(2 日)

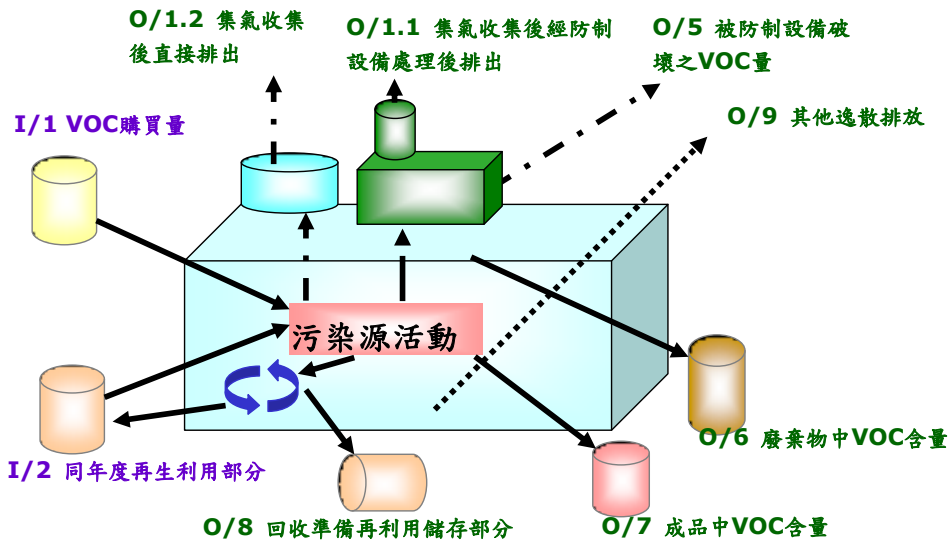
項目	接著劑 A	接著劑 B	接著劑廢棄量	稀釋劑	清洗劑	防指紋液	防指紋液稀釋劑	小計
總用量 (kg)	190	8	7.5	20	50	39	3	317.5
有機溶劑含量 (%)	70	95	80	100	100	80	100	-
總有機溶劑使用量 (kg)	133	7.6	6	20	50	31	3	250.6
有機溶劑平均耗用量 (kg/hr)	8.3	0.5	0.4	1.3	3	2	0.2	15.7

註：作業時間為 8 小時/日

### (三)VOCs 流佈分析

#### 1. 質量平衡估算

由業者所提供之溶劑清查及檢測結果，初步協助進行 VOCs 流佈分析估算，計算原理如圖 1 及下列公式所示：



參考資料: 環保署網站

圖 1 VOCs 流佈分析及質量平衡估算示意圖

## 2.理論估算公式

有機溶劑使用量(I) = 購買用量 (I/1) + 同年度再生利用量 (I/2) = 逸散排放量(F) + 防制設備處理後排放量(O/1.1) + 防制設備破壞量(O/5) + 集氣收集後直接排出(O/1.2) + 廢棄量(O/6) + 成品中含量 (O/7) + 回收準備再利用儲存量(O/8).....公式(1)

## 3.實際估算結果

因業者尚無溶劑回收設備，因此無法準確估計溶劑之回收及接著劑廢棄量，先以實際之有機溶劑用量 20%作為逸散性 VOCs 之估算量，而清洗溶劑回收部份以 80%估算(僅回收尚無再利用)，且該廠產品正常下並無含有機溶劑。該廠之有機溶劑用量估算為：

有機溶劑使用量 = 逸散排放量(F) + 防制設備處理後排放量 + 防制設備破壞量 + 集氣收集後直接排出 + 回收準備再利用儲存量 + 廢棄量.....公式(2)

因此依照公式(2)估算業者所逸散之 VOCs 排放量為 4.18kg/hr，此部份氣罩尚未收集到之 VOCs 產生源，可能包括塗料攪拌、塗裝製程未收集到、或其他製程損失所造成，因此可以改善之空間仍然相當大。而既有集氣設備對於 VOCs 之有效收集效率約 67.2%。

若考量對未來空污費之徵收潛勢估算，則可以上式計算 VOCs 對環境之總排放貢獻量如下：

VOCs 對大氣之總排放量(E)=逸散排放量 + 防制設備處理後排放量 + 集氣收集後直接排出 = 11.94kg/hr。也就是說，在尚無溶劑回收設備及僅有 CTO 廢氣防制之控制效率下，該廠若以 15.54kg/hr 之速率使用有機溶劑，就有 11.94kg/hr VOCs 對大氣環境產生污染 (11.94kg/hr×8hr/d×20d/month×12month/yr = 22,925kg/yr)，約佔整廠之有機溶劑消耗用量之 76.8%，相當於整體 VOCs 削減率(包括考量 CTO、溶劑暫存、廢棄量之減量效益)僅約 23.2%。彙整業者之 VOCs 流佈分析結果如表 5 內容所示。

表 5 VOCs 整廠流佈分析結果

項 目		產生量 (kg/hr)	占總用量 比例(%)	備註
有機溶劑使用量(I)	購買用量 (I/1)	15.54	100	1. 逸散排放量：包括製程中尚未收集到可、納入計算之逸散量 VOCs(如塗料攪拌區、集氣收集後直接排出...等)。 2.(O/1.2) 計 7.48kg/hr 佔 (48.1%)。 3.廢棄量估計 20%之 VOCs 逸散量。
	同年度再生利用量 (I/2)	0	0	
逸散排放量(F)		4.18	26.9	
防制設備處理後排放量(O/1.1)		0.28	1.8	
防制設備破壞量(O/5)		0.82	5.3	
集氣收集後直接 排出(O/1.2)	P4	0.0568	0.4	
	P5	0.14	0.9	
	P6	5.6	36.0	
	P7	1.68	10.8	
廢棄量(O/6)		0.38	2.4	
成品中含量 (O/7)		0	0	
回收準備再利用儲存量(O/8)		2.4	15.4	
集氣設備有效收集		8.58	67.2	(O/1.1) + (O/1.2) + (O/5)
對環境之總排放貢獻量		11.94	76.8	(O/1.1) + (O/1.2) + F
現階段整體 VOCs 削減率		3.6	23.2	(O/5) + (O/6) + (O/8)

#### (四)VOCs 減量技術建議

以業者所提供之排放管道檢測結果，建議未來針對 VOCs 之減量策略包括製程減量、現有設備效率提升及增設防制設備 3 方面。

##### 1.製程減量

建議設置溶劑回收設備，由於回收設備可有效將被污染之溶劑透過淨化方式，將可用之溶劑予以回收再利用，因所回收之溶劑可評估其在製程或機台擦拭用，可有效節省有機溶劑之使用量，一般回收率應可達到 90%。

##### 2.現有 CTO 設備之效率提升

根據業者所提供之原廠設計資料及一般觸媒資料，觸媒轉化效率欲達到 97%，其操作溫度依經驗必須控制在 340°C 以上，若以系統操作溫度約 290°C 時，系統正常之轉化率應為 85% 左右，但之前實測 CTO 系統效率僅為 74.5% (若以風量 201NCMM 來推測計算，效率僅約 61%)，表示已有約 10%~25% 的觸媒老化(毒化)現象。因此建議可先嘗試將 CTO 系統操作溫度調升至 340~350°C，預期可以有效提升系統之破壞去除效率。若無法提升，需考量請原廠對於觸媒進行效能測試，若觸媒確實有效率衰減而無法符合工廠之需求，則需考量進一步更換觸媒。

##### 3.評估加裝防制設備

除了設置溶劑回收設備及提升現有 VOCs 控制設備之效率外，由業者所提供之檢測資料顯示，主要 VOCs 污染貢獻較大者為 P3(1.1kg/hr，占整廠有機溶劑貢獻量 15.54 Kg/hr 的 7%)、P6(5.6Kg/hr，占 36%)及 P7(1.68 kg/hr，占 11%)。至於 P4 及 P5 其 VOCs 之排放量僅為 0.056 及 0.14 kg，占總排放量之 1.3%，所以建議 P4、P5 應可暫時不考慮裝設 VOCs 控制設備。但是 P6、P7 則必須增設有效削減設備，因其占整廠 VOCs 對環境排放總量之 47% 左右，為對環境之主要污染源。

##### 4.VOCs 控制設備選用成本效益

一般適用於 VOCs 控制設備包括吸附(活性碳)設備及焚化技術，其優缺點如表 4 所示。VOCs 之主要成份為甲苯(Xylene)及環己酮(CHN)，酮類在活性碳吸附的過程易放熱，因此容易造成熱量累積，產生熱點(hot spot)，讓活性碳吸附設備起火燃燒，而流體化床雖可克服碳床著火之危險，但因 VOCs 廢氣並無回收價值，因此不適合以活性碳吸附方式處理。



若以去除效率較高之焚化設備而言，經常使用之設備包括直燃式(TO)、蓄熱式(RTO)、觸媒式(CTO)。直燃式其破壞去除率高，也最穩定，但其能源耗用量較大；觸媒式則有低能源耗用之優點，但其觸媒相當昂貴且須定期更換；蓄熱式焚化設備具有高破壞去除效率及高熱回收效率之優點，可將 VOCs 廢氣焚化後所產生之廢熱回收再利用，除了可提供系統本身燃燒所需之自持溫度，也有機會再透過熱交換設備回收多餘廢熱，提供製程烘乾廢氣所需之熱源，較適用於同時需具備 VOCs 減量及製程熱源需求之製程。

表 6 各種 VOCs 控制技術比較

項目	能源回收效率 (%)	去除率 (%)	適用濃度 (ppmv)	適用風量 (CMM)	溫度範圍 (°C)	前處理	二次污染	
熱焚化	直燃法	50-70	95-99	100-2,000	30-1,500	650-10,00	稀釋、預熱	NOx
	觸媒焚化	70	90-98	100-2,000	30-1,000	300-400	稀釋、預熱、粒狀、毒化物去除	廢棄觸媒
	蓄熱焚化 (R)RTO	65-97	95-99	100-1,000	<1,500	800-1,000	稀釋、矽化物	NOx
吸附	固定床活性碳	-	90-95	20-5,000	5-1,700	常溫	冷卻、除濕、稀釋、粒狀物去除	廢棄活性碳
	流體化床活性碳吸附	-	70-95	300	50-1,500	常溫	冷卻、除濕、高沸點物質、粒狀物去除、高中低沸點物質分流	廢棄活性碳、冷凝液

資料來源：經濟部工業局，揮發性有機物廢氣減量及處理技術手冊，2004 年。

蓄熱式焚化爐可分為雙槽式 RTO、三槽式 RTO 及旋轉式 RRTO 爐。雙槽式設置成本較低，操作上其可動元件數量較少，因此設備維護費用較低，但因其需定時(約 90 秒)進行兩槽體處理之切換，因此在切換時之短暫時間內(1 秒)會產生未處理之高濃度廢氣(peak)排放，也易產生間斷性之廢氣臭味問題，因此若考量不要產生任何臭味，則建議評估採用三槽 RTO(不會有槽體切換)或旋

轉式 RRTO，因兩者皆不會有未處理之廢氣排放問題。但三槽式的閥件較多(9個，雙槽式 4 個)，因此在設備零件之維護保養或消耗備品更換費用較高。

甲苯之燃燒熱為 9,801kcal/kg、環己酮燃燒熱為 8,020(kcal/kg)，取平均燃燒熱為 9,000 kcal/kg.voc 計算之。業者已設有 1 套 CTO(處理 P3)，而 VOCs 主要貢獻量之 P6 及 P7 廢氣尚無進行處理，因此，可朝下列 2 方案進行評估：

方案一：增設 1 套蓄熱式焚化爐處理 P6 及 P7 廢氣 (處理風量為 209.61NCMM)。

方案二：增設 1 套蓄熱式焚化爐處理 P3、P6、P7 廢氣 (處理風量為 410.61NCMM)，可操作風量為 100~400NCMM。

以上改善方案，可評估搭配熱氣(尾氣)熱回收系統供應 Oven 熱源之經濟價值，可同步達到節能與環保之雙重功效。估算條件是以一般狀態下 RTO 對 VOCs 之破壞去除效率(DRE) > 99%以上，燃燒溫度在 800°C，設備本體之熱回收效率≈ 95%來估算。

## 1.設備本體 LPG 耗能估算

< 方案一 >

$$\begin{aligned} & \text{焚化爐所需外加熱能(以 LPG 燃燒熱 12,000 kcal/Kg 估算)} \\ & = \{ [ (\rho_{\text{air}} \times C_{\text{pair}} \times Q(\text{NCMH}) \times \Delta T_{\text{C}}(\text{°C})) ] - \text{VOCs 燃燒放熱} \} \\ & = \{ 1.293 \times 0.26 \times (209.61 \times 60) \times [ (800-41) \times (1-95\%) ] \} \\ & - [ (1.68 + 5.6) \times 9,000 ] = 94,933 \text{ kcal/hr (LPG)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LPG 耗量} & = 94,933 \text{ kcal/hr} \div 12,000 \text{ kcal/Kg} \\ & = 7.91 \text{ kg/hr.LPG} \times 8 \text{ hrs/day} = 63.28 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

每日燃料費用 = 63.28 kg/day × 19.23 元/kgLPG = 1,217 元/day(若以 20 工作日/月估算，燃料費為 24,340 元/月)

< 方案二 >

$$\begin{aligned} & \text{焚化爐所需外加熱能 kcal/hr} = ( 1.293 \times 0.26 \times (410.61 \times 60) \times [ 800-97 ] \\ & \times (1-95\%) ] \} - [ (1.68 + 5.6 + 1.1) \times 9000 ] = 215,704 \text{ kcal/hr} \end{aligned}$$

LPG 耗量 = 215,704 kcal/hr ÷ 12,000 kcal/Kg = 18kg/hr.LPG；每小時為 346 元 NT/hr(2,769 元/日；55,382 元/月)

## 2.熱回收效益

### < 方案一 >

當焚化爐同時處理 P6 + P7 廢氣時，蓄熱式焚化爐入口溫度為 41°C，焚化爐廢氣出口溫度 = 41°C + (1 - 95%) × (800 - 41) = 79°C。由於焚化爐的熱回收效率高而焚化爐廢氣出口溫度已不高，已無須再加裝回收裝置。

### < 方案二 >

當焚化爐同時處理 P3 + P6 + P7 廢氣時，蓄熱式焚化爐入口溫度可達 97°C，焚化爐廢氣出口溫度 = 97°C + (1 - 95%) × (800 - 97) = 132°C。因此可在焚化爐後端裝設尾氣熱回收熱交換器，加熱烘乾加熱爐前空氣之預熱用，預估可達到節能(熱烘乾加熱爐 LPG 耗用費)40 ~ 50%左右。

## 3.節能效益

以 Oven 1(風量 201.5NCMM)為例：

### < 無熱回收：現況 >

由於烘乾加熱爐入口空氣為常溫 25°C，因此烘乾加熱爐需要熱量(kcal/hr)  
= P × CP × ΔT × Q = 1.293 × 0.25 × (180 - 25) × (220 × 60) = 66,139 kcal/hr。

LPG 需求量 = 55kgs/hr；LPG × 8hrs/day = 440kg/day-LPG；每日為 8,461 元；169,224 元/月。

### < 有熱回收：加裝 RTO 及熱回收設備後 >

因入口空氣可先藉由蓄熱式焚化爐回收之廢熱，進行預熱至約 100°C，此時烘乾加熱爐需要熱量 kcal/hr = P × CP × ΔT × Q = 1.293 × 0.25 × (180 - 100) × (220 × 60) = 341,351 kcal/hr

LPG 需求量 = 28.45kg/hr × 8hr/day = 227kg/day

每天 4,365 元；每月 87,300 元，節能效益將近 50%。

因此估算，在有熱回收設備之節能效益上，正常操作下每月可節省 LPG 耗用 169,224 - 87,300 = 81,924 元，每年可減少 LPG 耗用 983,088 元。若包含 Oven 2 (132.4NCMM) 及 Oven.3 (139.5NCMM) 則每年估計共可節省約 200 萬元之 LPG 費用。

#### 4.設置成本概估：(僅供參考)

< 蓄熱式焚化爐 >

方案一估算如表 7。

**表 7 方案一所需之設備費用估算**

項目	雙槽式 RTO	三槽式 RTO	旋轉式 RRTO
設備本體費用	800	1,000	1,000
風車費用	45	45	45
工程費用 (風管、配電、控制、安裝工程)	260	260	260
其他費用	150	150	150
小計	1,255	1,455	1,455

註：風量為 200NCMM，成本單位為萬元。

方案二估算如表 8。

**表 8 方案二所需之設備費用估算**

項目	雙槽式 RTO	三槽式 RTO	旋轉式 RRTO
設備本體費用	950	1,200	1,200
風車費用	75	750	75
工程費 (風管、配電、控制、安裝)	280	280	280
其他費用	150	150	150
小計	1,455	1,705	1,705

註：風量 400NCMM，成本單位：萬元。

熱回收系統設置成本估算如表 9。

**表 9 熱回收系統設置成本估算**

項目	熱交換器
設備本體費用	180
工程及雜項費用	90
小計	270

註：以 200NCMM，效率 70%熱交換器估算，成本單位：萬元。

若採方案一，則需特別將現有 CTO 之觸媒更換費用納入考量，由於一般觸媒壽命只有 2 年左右，一般觸媒價格為 70,000~85,000 元/ft<sup>3</sup>(不含更換費用及運費)，該廠 CTO 之觸媒充填量為 12ft<sup>3</sup>，由於觸媒價格甚高，因此若維持現有系統持續運作，此部分應納入考量。

上述兩方案所產生之環境、成本及節能效益歸納比較如表 10。

**表 10 建議方案之環境、成本及節能效益比較表**

項目	對環境排放量 kg/hr(比例%)	整廠 VOCs 削減 kg/hr(%)	溶劑回收再利用 量 kg/hr(%)	空污費 (萬元/年)	LPG 耗用成 本 (萬元)	設置成本 (萬元)
現況 (改善前)	11.94(76.8)	3.6(23.2)	0	48	454	-
方案一	4.46(28.7)	11.08(71.3)	2.4	18	454	1,480
減量效益	減少 14.4 公噸/年	增加 14.4 公噸/年	增加 4.6 公噸/年	減少 30	-	增加 1,480
方案二	4.46(28.7)	11.08(71.3)	2.4	18	234	2,540
減量效益	減少 14.4 公噸/年	增加 14.4 公噸/年	增加 4.6 公噸/年	減少 30	減少 220 /年	增加 2,540 · 減少觸媒更 換費用

註：1.蓄熱式焚化爐以 2T-RTO 為估算依據。

2.兩方案均納入增設溶劑回收設備，成本估計 25 萬元/套。

3.方案二建議增設熱回收設備，方案一不建議。

4.溶劑回收再利用量僅估計稀釋劑回收暫存部份，並以 80%回收率估計。

5.操作日數以 20 日/月估計。

#### (五)結語

本案例主要針對塗裝製程之塗裝產品品質、使用有機溶劑，所產生之 VOCs 排放問題進行探討，並提供提升塗裝產品品質之改善方案，VOCs 流佈分析評估方式及考量解決 VOCs 廢氣問題及節能效益等重點，做為往後 VOCs 減量技術評估及選擇之參考。