應用系統思維於揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃

巫健次 [1]　劉偉麟 [2,*]

[1] 新竹縣環境保護局

[2,*] 南亞技術學院土木與環境工程系

摘要

近年來揮發性有機物之排放管制已成為各級環保單位的工作重點之一，然而過去各級環保單位所推動之固定污染源排放揮發性有機物之輔導改善工作，由於較缺乏整體系統的觀點，因此對其污染排放量調查、風險評估、及改善策略規劃等，較難以完整有效的進行。因此本研究之目的在於以系統思維(Systems Thinking)並結合結果管理(Managing for Results, MFR)的方法，發展一套揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃之方法論。本研究首先以系統思維的方法，界定工廠及其排放揮發性有機物所影響之區域為整個系統範圍，而工廠為其中的子系統。在進行污染量調查分析時，工廠同時也被視為一個系統，然後界定其製程、原物料等組成及交互影響作用，以有效掌握工廠完整詳盡的排放量；本研究進行風險評估時，乃是以整個環境區域為系統範圍，而組成包括所有工廠(污染源)及居民(受體)等，依據工廠之排放量而模擬區域內各敏感點之空氣品質，進而評估此空氣品質下居民的污染暴露量以及對民眾健康產生衝擊之風險；再依此評估結果，結合結果管理的方法，訂定工廠之改善目標；而後以系統思維的方法，分析可對哪些污染來源及污染量進行削減，以訂定可達成改善目標的策略與行動計畫。本研究以新竹縣輪胎製造業之甲工廠為案例研究對象，研究結果顯示，因為工廠複雜的製程與原物料關係而致過去管制方法未能完整掌握之排放量，經過本研究之系統化分析後已可完整獲得，進而研擬出完整考量下的改善策略及行動計畫，包括處理方法、時程、所需成本及資源等。綜合以上對於規劃階段的研究成果顯示，本研究結合系統思維與結果管理所發展的揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃之方法論，應該可以協助主管機關提升固定污染源管理之成效。

關鍵字：系統思維、結果管理、揮發性有機物、風險評估、排放量削減

E-mail: wlliu@nanya.edu.tw,　TEL: 03-4361070#5429,　FAX:03-4563674

Applying System Thinking on Risk Assessment and Abatement Planning for Volatile Organic Compound Emissions

Chien-Tzu Wu[1] Wei-Lin Liu[2,*]

[1] Environmental Protection Bureau, Hsinchu County Government

[2] Department of Civil and Environmental Engineering, Nanya Institute of Technology

Abstract

Volatile organic compounds (VOCs) control has become an important task for the environmental protection authorities. Because the current control tasks lack the concept of system, emission investigation, risk assessment, and abatement strategies planning can not effectively integrated. The purpose of this study is to apply Systems Thinking combined with Managing for Results to develop a methodology on risk assessment and abatement planning for VOCs emissions. Based on Systems Thinking, this study identifies the area which was influenced by the VOCs emissions of the factory as boundaries of the system, and the factory is identified as the subsystem. The factory can be also thought as an integral system during the investigation for VOCs emissions. The components and the interactions of process and material are then identified to obtain the complete emission quantity of the factory. During risk assessment, all of the factories and the residents are identified as components. This study simulates the air quality in each sensitive location of the area caused by the emissions of the factories. Exposures and risk on the health of the residents are estimated by the simulated air quality. Based on the assessed results, this study uses Managing for Results to identify the objectives of emission abatement. The abatement strategies and action plans are then generated using the analytical results of VOC emissions by Systems Thinking. A tire-manufacturing factory in Hsinchu County was used as a case study. The analytical results indicate that the VOC emissions which were not completely considered because of the complicated relationships between manufacturing process and materials have been obtained in this study through the systematical procedure. The strategies and action plans, including the treatment methods, schedule, required cost and resources, are

generated based on the complete VOC emissions. The methodology developed in this study can be used to assist the authorities for risk assessment and abatement planning for VOCs emissions.

Keywords: Systems Thinking, Managing for Results, volatile organic compounds (VOCs), risk assessment, emission abatement

E-mail: wlliu@nanya.edu.tw, TEL: 03-4361070#5429, FAX:03-4563674

壹、前言

近年來工業開發及高科技產業之蓬勃發展，為我國帶來經濟成長及人民生活水準的提升，但亦帶來日益嚴重之環境污染問題及空氣品質劣化之隱憂。據環保署統計，近年來的公害陳情案件中，惡臭污染之陳情案件逐年增高，並佔所有空氣污染陳情案件比例六成以上，顯示惡臭問題已成為近年來干擾民眾生活品質的主要因素之一(環保署，2006a)。而且臭味中所含之揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs)，對人體的皮膚及眼睛會產生不良的刺激，更會影響人體的神經、呼吸、消化及血液循環系統，是造成人體器官致癌及產生腫瘤的可能因素之一，因此固定污染源排放惡臭與揮發性有機物之改善已是各級環保單位的工作重點之一。

然而過去各級環保單位所推動之固定污染源排放惡臭與揮發性有機物之輔導改善工作，由於較缺乏整體系統的觀點，因此在污染量調查推估上，面臨工廠複雜的生產製程與污染產生來源，往往難以完全掌握工廠完整的污染量及相互影響關係，造成後續改善工作難以竟其功；而在擬定改善策略時，又大多是以符合排放標準為考量，並未有一套有效的策略規劃與執行機制能使工廠之改善措施足以達到確保民眾健康之目的。

為克服上述缺點，本研究之目的乃在於以系統思維(Systems Thinking)的方法(Chen et al., 2005; Forrester, 1961)並結合結果管理(Managing for Results, MFR)的方法(Chen et al., 2006; Drucker, 1964)，發展揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃之方法論。系統思維是結合系統理論、控制理論及資訊理論所歸結而成的一套思考原則，適用於複雜問題的辨別與界定，為尋求複雜問題的解決方案的關鍵基礎(Senge, 1990)，對於工廠複雜的生產製程與污染產生來源的交互影響關係，具有清楚釐清的作用。而結果管理(Managing for Results, MFR)的方法(Chen et al., 2006; Drucker, 1964)是一種以結果為導向，著重在定義可量測的結果，規劃可達到此結果之策略與計畫，並且確認是否達到結果的管理方式，近年來在許多歐美國家已陸續導入結果管理的方式以改善政府的施政，國內也已開始進行此方面之研究(Chen et al., 2006)。

本研究乃依據此一方法論，並以新竹縣某工廠為研究案例，以系統思維的方法來有效掌握該工廠完整詳盡的污染量，然後分析此一污染量所影響之空氣品質，進而評估此一空氣品質下民眾的暴露量及對健康產生衝擊之風險，再依風險評估結果，以結果管理的方法來訂定該工廠之改善目標，而在此改善目標下，結

合對污染來源及污染量的詳盡掌握，訂定具體明確的策略與行動計畫，以使預期之改善成果能夠有效的達到確保民眾健康之結果。詳細之研究結果說明如下。

貳、方法論

為有效改善固定污染源惡臭與揮發性有機物排放所造成的問題，本研究以系統思維並結合結果管理的方法，發展一套工廠揮發性有機物排放之管理體系架構，如圖 1 所示，分為規劃、執行、管制三大階段，說明如下。

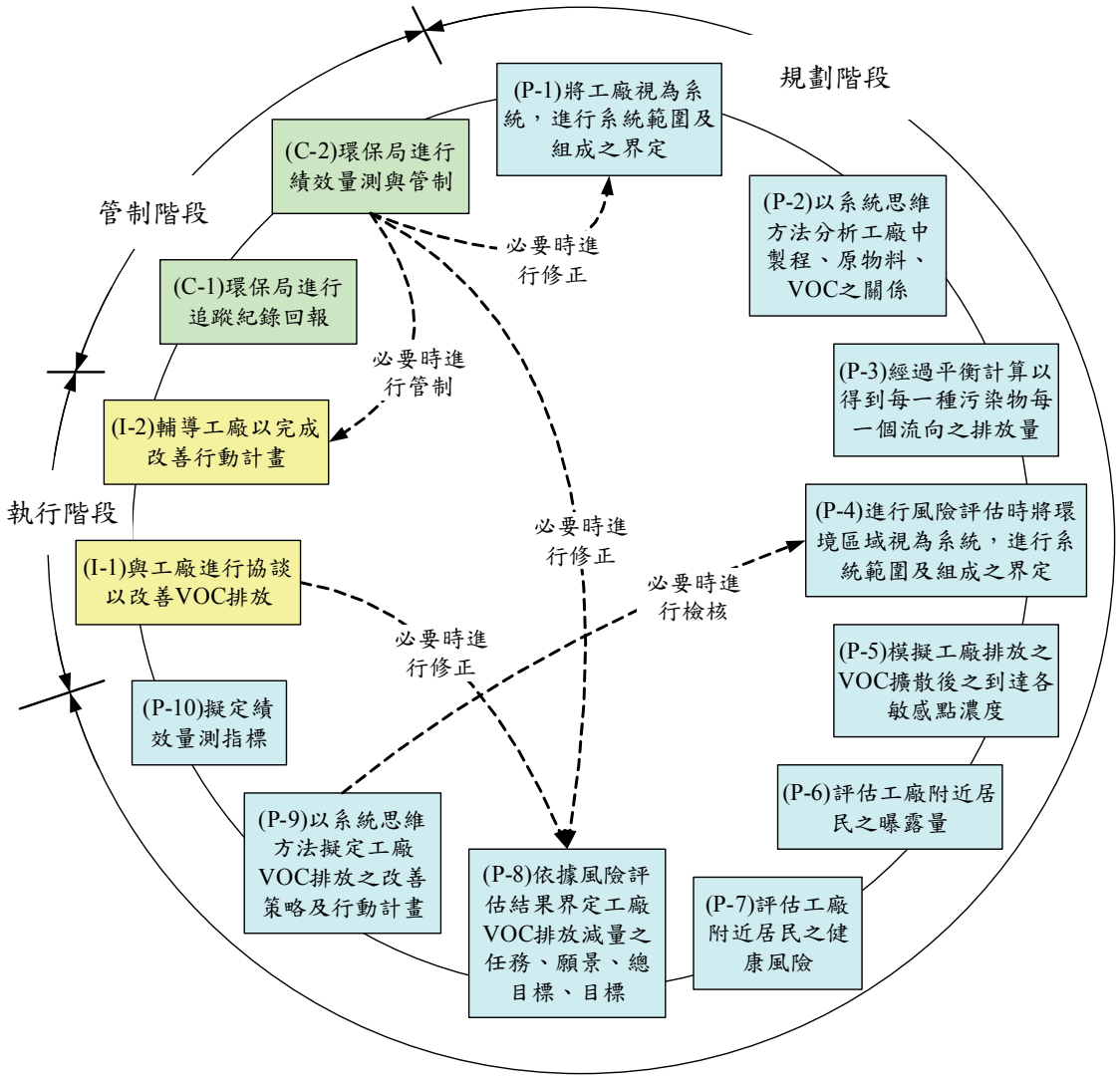

圖 1. 工廠揮發性有機物排放之管理體系架構

一、規劃階段

本研究首先以系統思維的方法，界定工廠及其排放 VOCs 所影響之區域為整個系統範圍，而工廠為其中的子系統。在進行污染量調查分析時，工廠同時也被視為一個系統，界定其組成，包括製程、原物料、及產生的揮發性有機物，如圖 2 所示，製程輸入之 VOCs 來自原物料及回收再利用之 VOCs，這些 VOCs 分別進入產品中、被回收再利用、或是經由不同的途徑進入環境中，例如管道、逸散、或廢棄物中，而這些 VOCs 在整個工廠系統的輸入量與排出量應該相等，而且前一製程未進入環境中的量皆應進入後一製程。依據上述界定，本研究進行的調查內容主要包括：

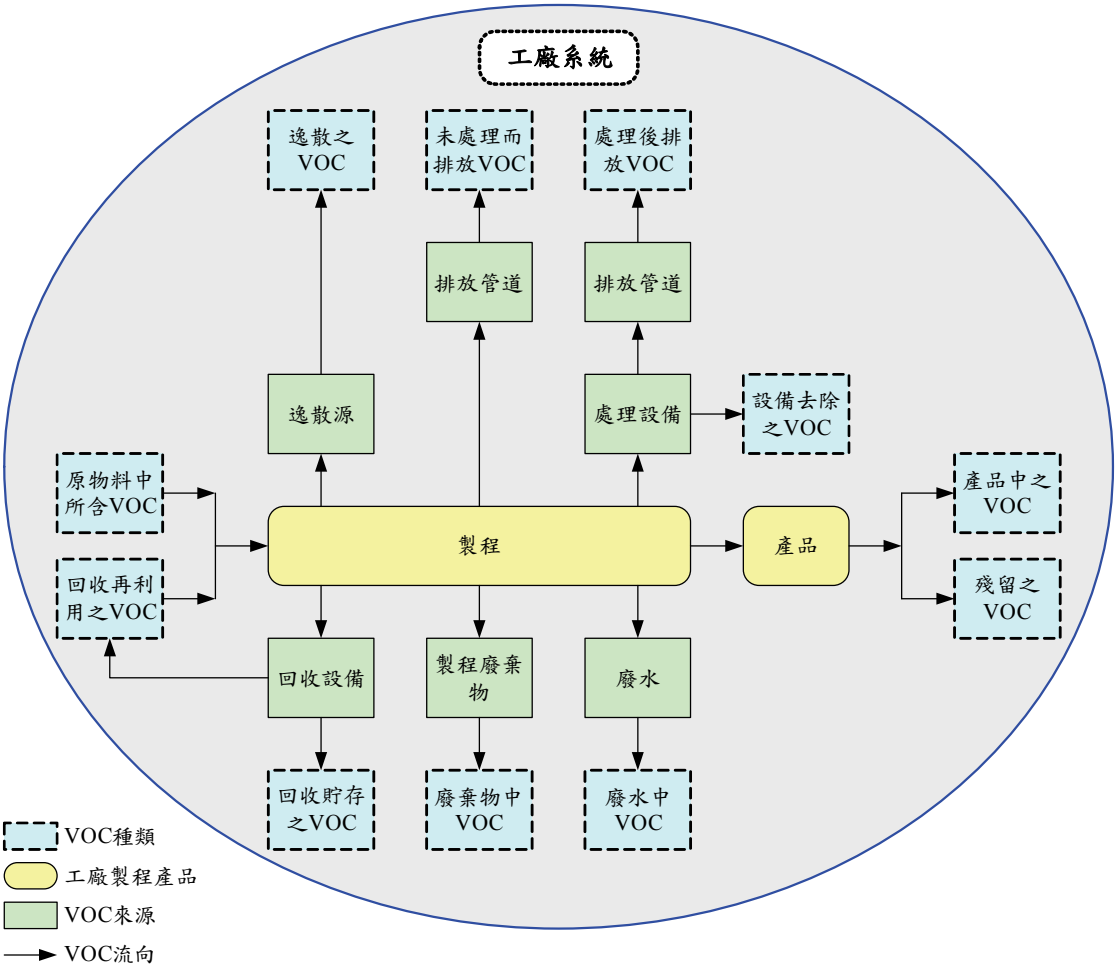

圖 2. 工廠系統範圍及組成

1. 全廠製程清單。
2. 全廠使用原物料之含揮發性有機物種類及含量清單。

3. 原物料量及製程 VOCs 之輸入量。
4. 回收再生利用與儲存 VOCs 總量。
5. 廢氣排放管道及管道排放量：包括廢氣收集後經防制設備處理後排出之 VOCs 量、廢氣收集後直接排出 VOCs 量、被防制設備破壞之 VOCs 量等。
6. 逸散源及逸散之 VOCs 量。
7. 廢棄物、廢水中 VOCs 含量。
8. 產品量及產品中 VOCs 含量。

由於工廠的製程與原物料使用量甚為複雜，在過去管制方法下，因為較缺乏系統觀念，所以難以完整掌握污染發生來源及污染量，本研究系統化的調查推估方法可以克服過去管制方法之缺點，不致遺漏部分污染來源而造成研擬改善策略時考慮不夠完整。

進行風險評估時，本研究乃是以系統思維的方法，將整個環境區域視為一完整系統，界定其組成，包括所有的工廠及周圍受影響之居民，以模擬所有工廠 VOCs 排放擴散後之空氣品質，及評估所有加乘效應下的暴露量與健康風險。本研究以高斯擴散模式(Nevers, 1995)進行模擬，將擴散方向分為八個方位，包括北、東北、東、東南、南、西南、西、西北，並由氣象資料分別求取八個方位的發生機率、風向、風速，然後依據發生機率將污染物排放量分配到各方向，亦即是對各方向有不同的污染貢獻量，再依據風向、風速進行擴散模擬，得到往各方向不同距離的著地濃度。本研究蒐集中央氣象局竹北測候站地面氣象資料所繪成的年平均風花圖。分析結果顯示，竹北地區地面平均風速為 5.25m/s，大氣穩定度以 C 類占大部份，作為擴散模擬之輸入參數。

在工廠所產生之 VOCs 對居民健康之風險評估後，本研究以結果管理的方法進行改善策略之研擬，首先界定其任務、願景、總目標，再根據每一家工廠的情形訂定分年改善目標，而後根據目標，以系統思維的方法，根據污染產生的流程與作用關係，分析對哪些污染來源及污染量進行削減可獲得綜合成效，以及改善措施的預期減量成效，以訂定可達成改善目標的策略與行動計畫，包括期程、方法、經費、人力、預期削減量等，可共同做為工廠及環保局後續推動執行的依據，最後訂定出績效指標，以確保工廠改善的結果與績效。本研究以系統思維結合結果管理的方法應用在工廠風險評估與減量規劃，與過去的工廠污染改善輔導比較，能夠更有系統的訂定完整的策略與行動計畫，並且透過績效量測與結果追蹤回報，能更確實有效達到空氣品質改善的目標。

二、執行階段

根據上述工廠排放惡臭與揮發性有機物之改善策略及行動計畫，進行工廠之協談輔導，以完成工廠排放惡臭與揮發性有機物之改善。

三、管制階段

進行績效指標之量測、追蹤與回報，並由分析績效指標值後進行必要的管制與修正，以確保達成工廠排放惡臭與揮發性有機物之改善成效。

參、案例研究

本研究以位於新竹地區之甲工廠為案例研究對象，甲工廠屬於輪胎製造業。本研究目前是進行規劃階段之步驟，由於規劃完成的行動計畫須由工廠逐年編列經費進行改善，因此本研究並未進行至執行階段與管制階段。

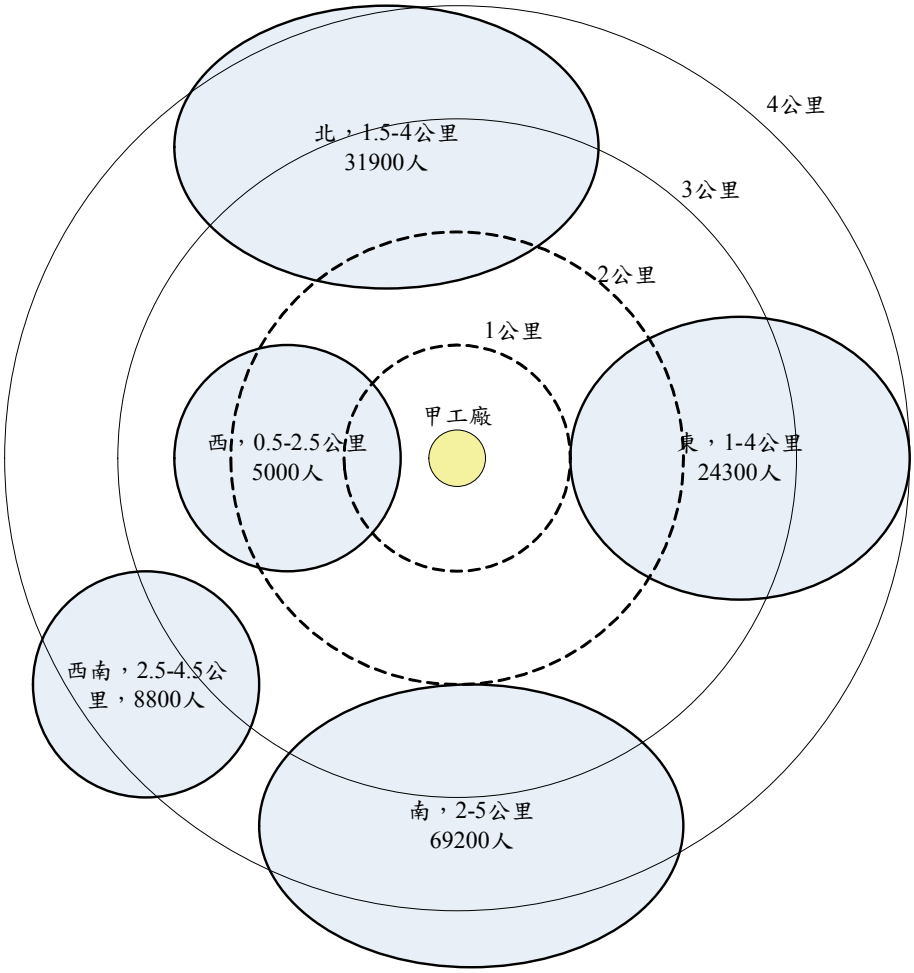

圖 3. 甲工廠向外影響之範圍及人口涵蓋圖

一、界定系統範圍及組成

本研究首先以系統思維的方法，以新竹縣全縣為系統範圍，系統組成包括所有產生惡臭及揮發性有機物之工廠(污染來源)，以及新竹縣內之居民(受體)，以綜合分析每個居民受到所有工廠排放所造成的健康風險，從而訂定各工廠的後續改善策略。但因為本研究之主要目的在建立方法論，因此先以甲工廠為對象，進行工廠周圍 5 公里內居民之風險評估。本研究假設暴露量及健康風險乃是有加乘效果，因此將分別計算甲工廠之單一污染物及加乘後之暴露量及健康風險。圖 3 是甲工廠向外影響範圍及人口涵蓋圖，周圍人口約為 14 萬人，距離最近之敏感點位於西側 0.5 公里處。

二、工廠排放量之現場調查與推估

工廠乃是本研究所界定系統中的一個子系統，在進行污染量調查分析時，工廠同時也被視為一個系統，完整考量其所有的製程及原物料間的關係，經過平衡計算後而得到其排放量推估值。甲工廠之主要製造流程及產生之污染如圖 4 所示，主要經過精煉混合等 6 道程序，原料中之有機溶劑主要為橡膠溶劑及甲苯，其中橡膠溶劑為混合物，主要成分中目前已知對人體健康產生風險者為正己烷，含量為 6%。

本研究針對各製程調查結果，並經過質量平衡計算後，得到甲工廠之 VOCs 質量平衡圖如圖 5 所示，其中 VOCs 排放廢氣之濃度與量均已計算成為 VOCs 污染負荷量。以橡膠溶劑(含正己烷 6%)為例進行說明，本研究依據質量平衡關係而訂定的計算式如下：

輸入量(I_1)+回收利用量(I_2)

=處理後管道之排放量($O_{1.1}$)+未處理管道之排放量($O_{1.2}$)+廢水中含量(O_2)+殘留於產品量(O_3)+逸散量(O_4)+處理設備削減量(O_5)+廢棄物中含量(O_6)+產品中含量(O_7)+回收儲存量(O_8)

由於橡膠溶劑在此製程並未回收利用，也未有廢棄物及排入廢水中，因此，回收利用量(I_2)、廢水中含量(O_2)、廢棄物中含量(O_6)、產品中含量(O_7)、回收儲存量(O_8)等項為 0，所以此階段所用之計算式為：

輸入量(I_1)

=處理後管道之排放量($O_{1.1}$)+未處理管道之排放量($O_{1.2}$)+殘留於產品量(O_3)+逸散量(O_4)+處理設備削減量(O_5)

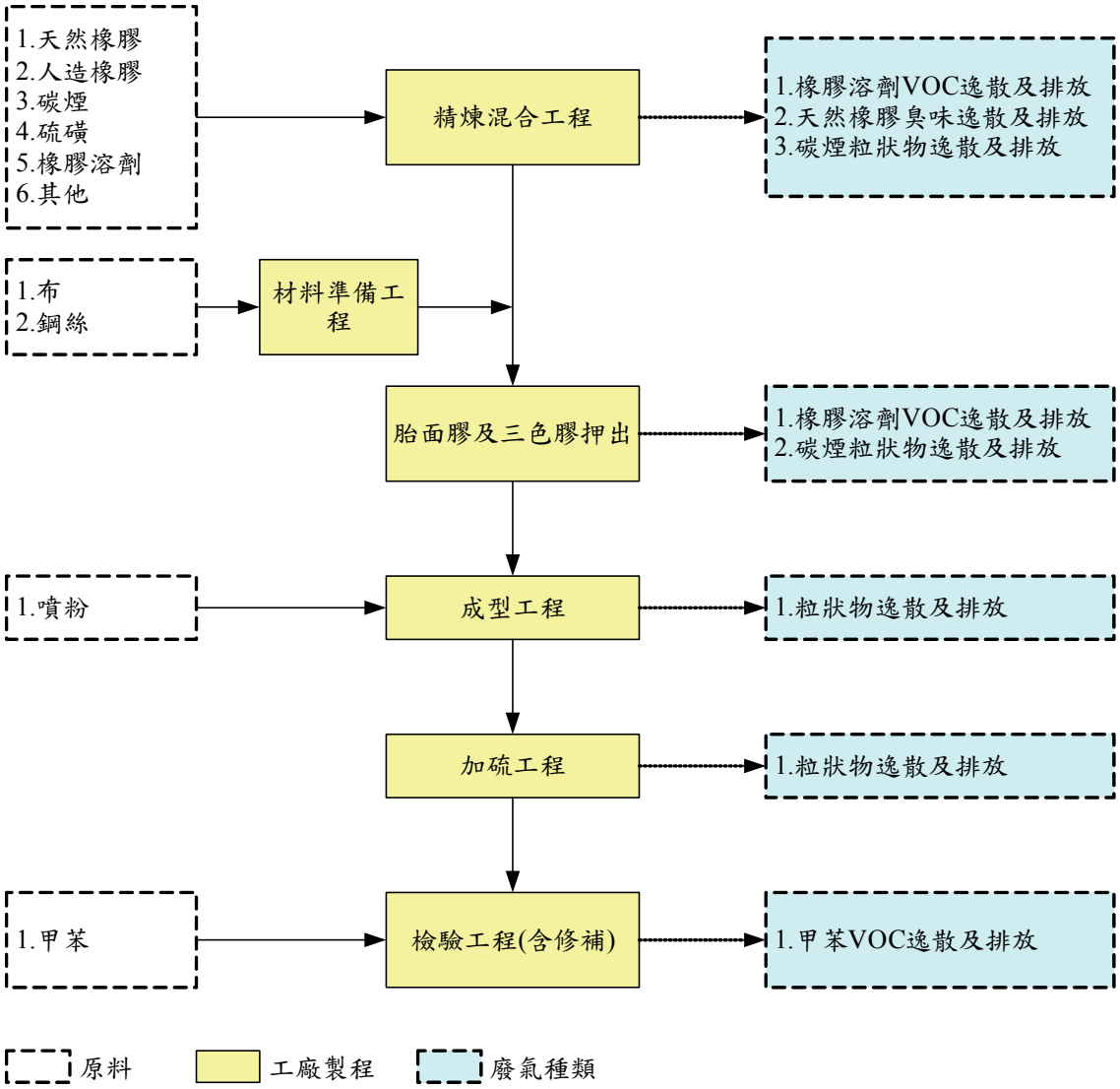

圖 4. 甲工廠主要製程流程圖

1.輸入量(I_1)

橡膠溶劑使用量，年平均量 447,300 公升，依據 MSDS 資料密度約為 0.7 g/cm^3，因此重量約為 309 噸。依近 2 年資料，使用量有隨輪胎產量逐步減少趨勢，因此以目前之年平均量為基準，應屬合理。

2.殘留於產品量(O_3)

橡膠溶劑原為 309 噸，經過調膠後剩餘 249 噸(請見第 6 點逸散量)，進入母膠混合機，由於加熱精練，因此釋出 237 噸，剩餘 12 噸在產品之中。產品中有 50%進入下一階段之押出工程，另外 50%產品送至其他廠區進行後續作業，因此有 6 噸橡膠溶劑進入下一階段之押出工程，另外 6 噸橡膠溶劑送至其他廠區，而不在本廠區中排出。

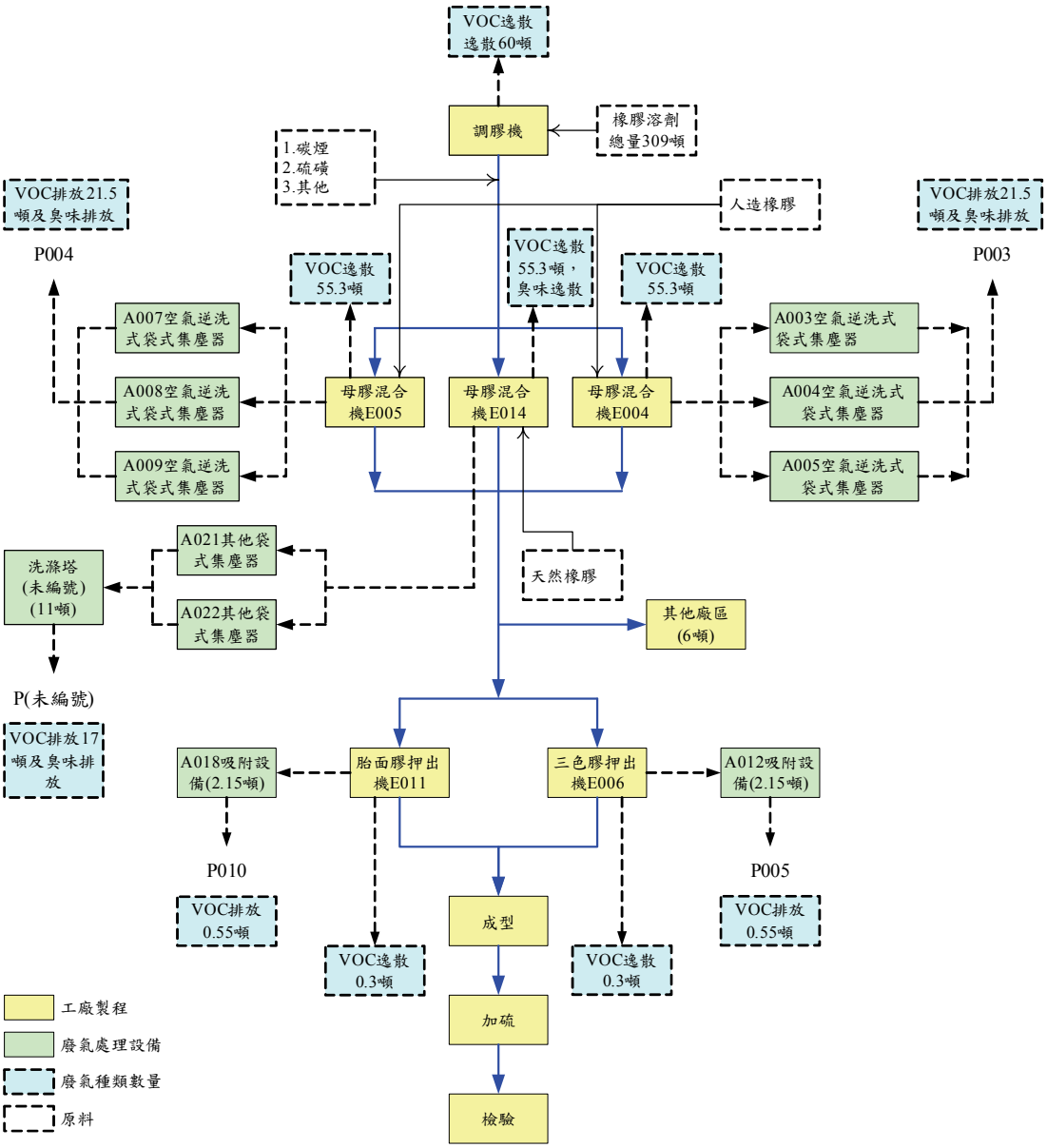

圖 5. 甲工廠 VOC 質量平衡圖

3.處理設備削減量(O_5)

橡膠溶劑在進入母膠混合機時為 249 噸，由於加熱精鍊，因此釋出 237 噸(請見第 2 點產品中含量)，由於氣罩設計不佳，收集效率估計為 30%，因此母膠混合機之收集量為 71 噸。

其中 40% (28 噸)從母膠混合機 E014 收集，經過洗滌塔處理，但洗滌塔目前之檢測數據僅有臭味，未檢測其他 VOC，而其臭味削減率約為 70%，但由於橡膠溶劑之主要成分為正己烷及正庚烷，揮發性高且不溶於水，因此削減率推估僅有

40%，則處理設備削減量為 11 噸。另外 60% (43 噸)從母膠混合機 E004 及 E005 收集，但袋式集塵器無處理效果，因此處理設備削減量為 0 噸。以上共計 11 噸。

4.處理後管道之排放量($O_{1.1}$)

橡膠溶劑 28 噸從母膠混合機 E014 收集，經過洗滌塔處理削減 11 噸(請見第 3 點處理設備削減量)，因此處理管道之排放量為 17 噸。

5.未處理管道之排放量($O_{1.2}$)

橡膠溶劑 43 噸從母膠混合機 E004 及 E005 收集，未經有效處理(請見第 3 點處理設備削減量)，因此未處理管道(P003 及 P004)之排放量為 43 噸。

6.逸散量(O_4)

逸散量分 2 部分，調膠機及母膠混合機。調膠機為 24 小時攪拌，並無任何廢氣收集設備，而且目前並無檢測資料，因此推估逸散比例為 20%(參考烷類之逸散比例)，因此調膠機之逸散量為 60 噸。

經過調膠後剩餘 249 噸，進入母膠混合機，由於加熱精鍊，因此釋出 237 噸(請見第 2 點產品中含量)，由於氣罩設計不佳，收集效率估計為 30%，因此母膠混合機之逸散量為 166 噸。以上二者合計逸散量為 226 噸。

綜合以上分析，可得到精煉混合之橡膠溶劑輸入量與排出量皆為 309 噸，符合平衡關係。以同樣方法計算製程其他步驟以及甲苯之輸入量與排出量，可得到整個工廠系統完整的 VOCs 質量平衡分析表如表 1 所示。

表 1. VOCs 質量平衡分析表

項目	處理後管道之排放量($O_{1.1}$)	未處理管道之排放量($O_{1.2}$)	殘留於產品量(O_3)	逸散量(O_4)	處理設備削減量(O_5)	合計量
正己烷(噸)	1.1	2.6	0.4	13.6	0.9	18.5
百分比	6%	14%	2%	73%	5%	100%
甲苯量(噸)	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	5.6
百分比	0%	0%	0%	100%	0%	100%
其他(噸)	17.0	40.4	5.6	213.0	14.4	290.5
百分比	6%	14%	2%	73%	5%	100%
合計(噸)	18.1	43.0	6.0	232.2	15.3	314.6
百分比	6%	14%	2%	73%	5%	100%

三、風險評估

本研究以系統思維的方法，將整個環境區域視為一完整系統，界定其組成，包括工廠及周圍受影響之居民，以高斯擴散模式模擬工廠 VOCs 排放擴散後所有敏感點之空氣品質，及評估所有敏感點居民之暴露量及健康風險。模擬結果顯示，最大地面濃度發生在距離工廠西南方 134 m 處，而且由於距離廠區 500 公尺及 1000 公尺已有敏感點，因此將模擬結果之最大地面濃度(134 m)、500 公尺及 1000 公尺之地面濃度列於表 2。

依據圖 3 顯示，離工廠最近敏感點為廠區西側距離 500 公尺之住戶，本研究將此敏感點之最大暴露量計算列於表 3。

此外，本研究將最大可能暴露量列於表 4 作為參考之用，不過表中的最大可能暴露量所發生位置為距離排放點西南方 134 公尺處，該處並無居民或敏感點，暴露量乃是假設有居民的情況而計算。

表 2 甲工廠各風向廠外地面濃度模擬結果(單位：$\mu g/m^3$)

VOC	正己烷			甲苯		
距離 (m)	134	500	1000	134	500	1000
西南	21.15	4.05	1.14	6.88	1.32	0.37
平均	8.41	1.61	0.46	2.74	0.52	0.15

表 3 甲工廠最近敏感點之最大暴露量(單位：mg/kg-day)

項目	正己烷	甲苯
成年男性	0.0009	0.00028
成年女性	0.0009	0.00030
兒童(7-12 歲)	0.0020	0.00064
幼童(1-6 歲)	0.0018	0.00057

表 4 甲工廠之最大可能暴露量(並無居民或敏感點) (單位：mg/kg-day)

項目	正己烷	甲苯
成年男性	0.007	0.0023
成年女性	0.007	0.0024
兒童(7-12 歲)	0.016	0.0052
幼童(1-6 歲)	0.014	0.0046

本研究蒐集美國環保署之整合風險資訊系統(Integrated Risk Information System, IRIS)中關於正己烷及甲苯之劑量與效應關係來進行風險評估。根據 IRIS 資料庫之資料顯示，正己烷及甲苯目前並無致癌性之證據，因此以呼吸途徑之參考濃度(Reference Concentration for Chronic Inhalation Exposure, RfC)來進行評估(USEPA, 2007;許惠悰, 2003)。正己烷之 RfC 為 0.7 mg/m^3，相當於呼吸之參考劑量(Reference Dose, RfD)為 0.23 mg/kg-day；甲苯之 RfC 為 5 mg/m^3，相當於呼吸之 RfD 為 1.64 mg/kg-day。因此在離工廠最近敏感點之暴露量下之非致癌危害指數計算如表 5 所示，該處為廠區西側距離 500 公尺之住戶。對最近敏感點計算出來的非致癌危險指標的值小於 1，表示該化學物質在評估的暴露條件下，不會對健康產生不利的影響。

此外，本研究將最大可能暴露量下之非致癌危害指數計算如表 6 所示，不過表中的最大可能非致癌危害指數所發生位置為距離排放點西南方 134 公尺處，該處並無居民或敏感點，危害指數乃是假設有居民的情況而計算，僅供參考之用。

表 5 甲工廠最近敏感點之非致癌危害指數

項目	正己烷	甲苯	合計
成年男性	0.0038	0.00017	0.0039
成年女性	0.0040	0.00018	0.0042
兒童(7-12 歲)	0.0086	0.00039	0.0090
幼童(1-6 歲)	0.0076	0.00035	0.0080

表 6 甲工廠之最大可能非致癌危害指數(參考值)

項目	正己烷	甲苯	合計
成年男性	0.030	0.0014	0.032
成年女性	0.032	0.0015	0.034
兒童(7-12 歲)	0.069	0.0031	0.072
幼童(1-6 歲)	0.061	0.0028	0.064

四、工廠 VOCs 排放減量之規劃

本研究以結果管理的方法(Chen et al., 2006; Drucker, 1964)進行改善策略之研擬，首先界定其任務、願景、總目標，再根據甲工廠的情形訂定分年改善目標，而後以系統思維的方法，對哪些污染來源及污染量進行削減可獲得綜合成效，以

及改善措施的預期減量成效，以訂定具體的改善策略及行動計畫。

1.界定任務、願景、總目標、目標

依據本研究分析結果(如表 1)，甲工廠 VOCs 總產生量為 314.6 噸/年，而總排放量(含逸散)為 295.3 噸/年，其中橡膠溶劑佔 287.7 噸/年，甲苯總排放量佔 5.6 噸/年，總削減率僅有 6.1%。雖然風險評估結果，在評估的暴露條件下，不會對附近居民健康產生不利的影響，但由於排放量相當大，削減率太低，而且甲工廠目前對臭味的改善工作仍未有足夠而有效的防制措施，因此建議應適當改善。

本研究界定任務為「保障民眾健康，避免受到惡臭及揮發性有機物之影響」，願景為「無惡臭味之生活環境」，總目標為「工廠所排放之廢氣不致受到民眾陳情為惡臭案件」，目標為「民國 98 年前，達到 VOCs 總削減率 50%以上，亦即達到 157.3 噸/年之削減量，並減少臭味」。

2.規劃改善策略

本研究已經以系統思維的方法，界定出製程、原物料、及產生的 VOCs 之關係，因此可進一步對哪些污染來源及污染量進行削減可獲得綜合成效，以及改善措施的預期減量成效，以訂定可達成改善目標的策略。

(1) 調膠機之橡膠溶劑收集處理

目前調膠機並無任何防制設備，橡膠溶劑逸散量為 60 噸/年。本研究建議進行半密閉式收集處理，亦即調膠機裝設蓋板，在調膠攪拌過程盡量密閉，以減少橡膠溶劑逸散量；同時設置全罩式集氣設備，將橡膠溶劑收集至處理設備，以削減橡膠溶劑排放量；周圍並可裝設透明簾幕以進一步減少橡膠溶劑逸散量。以上方式預計收集率可達 80%。

在處理設備方面，由於橡膠溶劑之主要成分為正己烷及正庚烷，揮發性高且不溶於水，因此建議以活性碳方式處理，在設備容量足夠且正常操作下，預計可達 80%之處理率。

以上措施建議於 97 年完成，預計橡膠溶劑可削減：

60 噸/年×80%×80% = 38.4 噸/年。

(2) 母膠混合機之橡膠溶劑及臭味收集處理

目前 3 台母膠混合機都設有氣罩收集廢氣，但收集效率不佳，而且僅有 1 台有經過洗滌塔處理，其他 2 台所連接之防制設備對橡膠溶劑及臭味並無作用，橡膠溶劑逸散量為 119 噸/年，管道排放量 84 噸/年。

因此本研究建議，在收集方面，加大集氣罩面積並降低氣罩高度，並在輸送過程加裝透明簾幕，以進一步提高收集效率。而且在處理效率容量足夠下，提高

集氣罩入口風速。以上方式預計收集率可達 70%。

在處理設備方面，由於橡膠溶劑之主要成分為正己烷及正庚烷，揮發性高且不溶於水，因此建議在現有洗滌塔外，其他以活性碳方式處理，在設備容量足夠且正常操作下，預計可達 80%之處理率。

以上措施建議於 98 年完成，預計橡膠溶劑可削減：

237 噸/年×70%×80% = 132.7 噸/年

原此處之削減量為 11 噸/年，因此可增加 121.7 噸/年之削減量。

(3) 押出機之橡膠溶劑收集處理

目前押出機有接近密閉之廢氣收集，並經活性碳處理，橡膠溶劑逸散量為 0.6 噸/年，管道排放量 1.1 噸/年。本研究建議應於 97 年加強防制設備之操作維護管理，尤其是活性碳應定期更換，以維持良好之處理效果。

(4) 修補作業區之甲苯收集處理

目前修補作業區並無任何防制設備，甲苯逸散量為 5.6 噸/年。本研究建議設置氣罩式收集處理，亦即修補作業區裝設抽氣櫃，而且在處理效率容量足夠下，維持足夠之抽氣櫃入口風速，將甲苯 VOCs 收集至處理設備，以削減甲苯排放量；周圍並可裝設透明簾幕以進一步減少甲苯逸散量。以上方式預計收集率可達 70%。在處理設備方面，建議以活性碳方式處理，在設備容量足夠且正常操作下，預計可達 80%之處理率。

以上措施建議於 97 年完成，預計甲苯可削減：

5.6 噸/年×70%×80% = 3.1 噸/年

表 7 甲工廠排放惡臭與揮發性有機物之改善策略

目標	策略內容	削減量
民國 98 年前，達到 VOCs 總削減率 50%以上，亦即達到 157.3 噸/年之削減量，並減少臭味	1.在 97 年底前改善調膠機之橡膠溶劑收集處理 2.在 97 年底前改善修補作業區之甲苯收集處理 3.在 97 年底前維持押出機之橡膠溶劑正常收集處理	52.5 噸/年
	4.在 98 年底前改善母膠混合機之橡膠溶劑及臭味收集處理	121.7 噸/年 (並減少臭味)
	以上合計	174.2 噸/年 (並減少臭味)

3.規劃改善行動計畫

根據上述策略，本研究擬定甲工廠之改善行動計畫，權責分工如下：

(1) 甲工廠主要進行各項污染防治設備之設置，所需人力為 2 人，設備之設置成本約為 290 萬元，操作維護成本另計。

(2) 環保局主要進行技術輔導及改善進度管制，所需人力為 3 人，所需經費約為 16 萬元，包括委託專家學者之輔導費用。

(3) 建設局主要進行行政面與經濟面之輔導，所需人力為 1 人，所需經費約為 0.2 萬元。

本研究研擬改善行動計畫之管理流程如圖 6 所示，界定各相關單位(包括甲工廠、環保局、建設局等)在各自權責下的工作，以及相互間之作業關係，以做為各單位推動行動計畫之依據，管理流程之主要步驟說明如下：

(1) 在 96 年 10 月前，由環保局通知工廠已列入減量協談對象。

(2) 在 96 年 11 月前，由環保局及技術輔導團隊，提出建議工廠在民國 98 年前，達到 VOCs 總削減率 50%以上，亦即達到 157.3 噸/年之削減量，並減少臭味之目標及改善方法之規劃；建設局則同時提供相關行政面及經濟面之建議。工廠在確認經濟面、生產面等皆可配合後，向環保局提出改善計畫書。

(3) 在 96 年 12 月前，技術輔導團隊完成工廠改善計畫書之審查，必要時提出修正建議。

(4) 在 98 年 9 月前，工廠依據審查通過之改善計畫書編列經費，完成各階段之改善措施及污染削減工作。在此同時，環保局訂定管制計畫，並追蹤管制工廠之改善進度；而建設局進行各種行政及經濟輔導措施，包括租稅減免及低利貸款等。

(5) 在 98 年 11 月前，工廠完成改善並達到污染量削減目標後，向環保局申報污染削減量，而由環保局審查、核定及登記工廠之污染削減量。

(6) 在 98 年 12 月前，環保局協助工廠將污染削減量列入未來可供交易或抵減者，並且彙整工廠之污染削減量以輔助評估 VOCs 排放管理績效；建設局則彙整輔導措施執行結果以輔助評估輔導績效

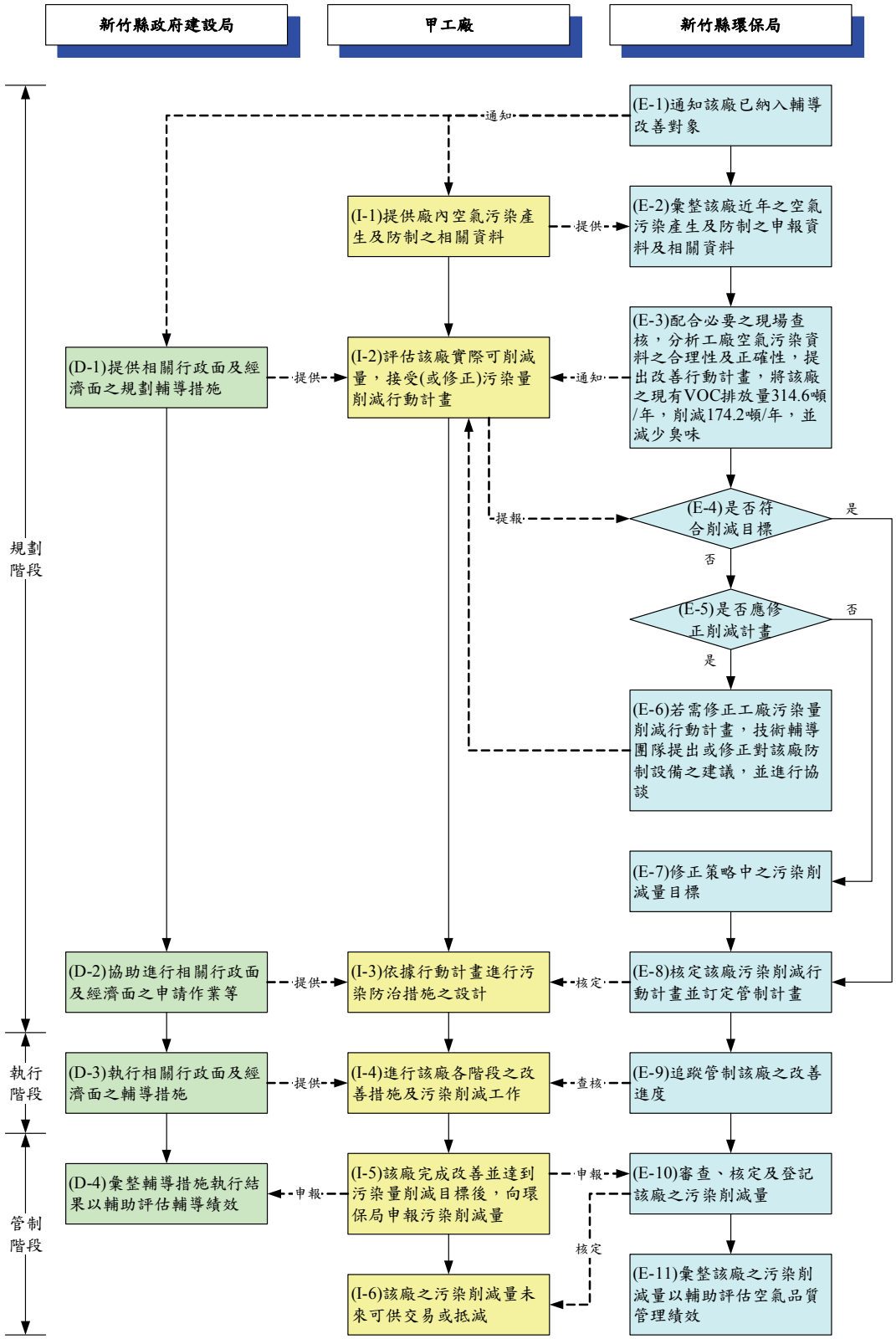

圖 6. 甲工廠排放惡臭與揮發性有機物之改善管理流程

肆、結論與建議

本研究以系統思維結合結果管理的方法，發展一套揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃之方法論，本研究首先以系統思維的方法，界定工廠及其排放VOCs所影響之區域為整個系統範圍，而工廠為其中的子系統。在進行污染量調查分析時，可將工廠同時視為一個完整系統，界定其製程、原物料等組成及交互影響作用，以有效掌握工廠完整詳盡的污染量；然後在進行風險評估時，再將整個環境區域界定為系統範圍，界定所有工廠(污染源)及居民(受體)等為組成，分析工廠 VOCs 排放所造成之各敏感點空氣品質，進而評估此一空氣品質下居民的污染暴露量，並依此而評估對民眾健康產生衝擊之風險；再依此評估結果，結合結果管理的方法，訂定工廠之改善目標，而在此改善目標下，以系統思維的方法，根據污染量調查推估結果，分析得到工廠內可有效削減排放量的方法，以訂定具體明確的策略與行動計畫。

本研究以新竹縣輪胎製造業之甲工廠為案例研究對象，以上述方法論進行VOCs排放之風險評估與減量規劃，研究結果顯示，在過去管制方法下，由於甲工廠的製程與原物料使用量甚為複雜，因此難以完整掌握之污染發生來源及污染量，而經過本研究系統化分析後，已得到完整的污染排放量；而從風險評估結果發現，雖然目前對於周圍居民之健康影響並不高，但是其總體 VOCs 所造成的風險仍不可忽視，而且目前的削減率亦太低，並仍有臭味產生，因此確有進行排放減量的必要。而由本研究經過系統化分析後所擬定的改善策略及行動計畫顯示，包括處理方法、時程、所需成本及資源等，已針對污染發生來源進行適當的減量規劃，應能克服過去該工廠未能以系統觀點而進行改善所致效果不彰之缺點。本研究目前是進行規劃階段之步驟，由於規劃完成的行動計畫須由工廠逐年編列經費進行改善，因此本研究並未進行至執行階段與管制階段。然而綜合以上對於規劃階段的研究成果顯示，本研究結合系統思維與結果管理所發展的揮發性有機物排放之風險評估與減量規劃之方法論，應該可以有效協助主管機關提升固定污染源管理之成效。

伍、參考文獻

1. Chen, C. H., W. L. Liu, S. L. Liaw, and C. H. Yu, “Development of a Dynamic Strategy Planning Theory and System for Sustainable River Basin Land Use Management,” Science of the Total Environment, Vol. 346, pp. 17-37. (2005)
2. Chen, C. H., W. L. Liu, and H. G. Leu, “Sustainable Water Quality Management Framework and a Strategy Planning System for a River Basin,” Environmental Management, Vol. 38, pp. 952-973. (2006)
3. Drucker, P. Managing for Results. Harper and Row, NY, USA. (1964)
4. Forrester, J. W., Industrial dynamics. MIT Press, Cambridge, MA, USA (1961).
5. Maryland State Government, Managing for Results Guidebook. Maryland State Government, Annapolis, MD, USA. (1997)
6. Nevers, N. D., Air pollution control engineering. McGraw-Hill, New York, NY, USA (1995).
7. Senge, P. M., The fifth discipline: The art and practice of the learning organization. Doubleday, New York, NY, USA (1990).
8. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS), http://www.epa.gov/iris/. (2007)
9. 邱英嘉、黃富昌、林紘原、廖述良、陳士賢、劉偉麟等，95 年度新竹縣重大固定污染源排放惡臭與揮發性有機物之探討分析及輔導改善計畫，新竹縣環境保護局委託研究報告，南亞技術學院，中壢。(2007)
10. 行政院環境保護署，中華民國環境保護統計年報(95 年)，行政院環境保護署，台北。(2006a)
11. 行政院環境保護署，一般性固定污染源揮發性有機空氣污染物質量平衡排放量計算說明會教材，行政院環境保護署，台北。(2006b)
12. 許惠悰，風險評估與風險管理，新文京開發出版公司，台北。(2003)