

Industrial Pollution Prevention and Control

工業污染防治





中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一四年十一月出刊

編輯審查委員：

江康鈺、吳庭年、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、胡憲倫、
凌永健、馬鴻文、康世芳、張添晉、陳士賢、歐陽嶠暉、鄭福田
、顧 洋(依姓名筆畫順序)

執行編輯：陳見財、鐘嘉祺、莊倫綱、陳靖瑜

發 行 所：經濟部產業發展署

出 版 所：經濟部產業發展署

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

網址 <https://www.ida.gov.tw/>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02)2784-4188

FAX：(02)2784-4186

網址 <https://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記雜誌交寄

設計印刷：致琦企業股份有限公司

～ 本刊文章版權所有，非經同意不得轉載 ～

～ 本刊文稿屬個人學術發表，不代表經濟部產業發展署立場～

Industrial Pollution Prevention and Control

工業污染防治



164 工業污染防治

空氣污染與噪音類

石化廠區 VOCs 監測網優化及整合應用

..... 林楷傑、郭子豪、吳宜展、黃溢銓 1

水處理與資源再利用

氨氮廢水處理技術現況與未來發展

..... 李中光 23

水污染防治措施計畫及排放許可證書面審查常見問題及建議

..... 李中光 51

環境管理規劃類

應用 ISO 50006 標準強化能源績效管理

..... 張育誠、謝維晃、楊明隆、吳美琪 83

企業如何運用 EICT 提升 ISO 50001 能源管理成效

..... 沈佩玲、黃習為、廖弓普、林庭瑋 101

亞泥公司領航低碳轉型提前達成 SBTi 目標

..... 陳志賢、曾昱中、邱子杰、盧俊澄 123

土壤處理與綠色永續化學

以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中全氟 / 多氟烷基化合物 (PFAS)

..... 簡偉倫、林柔靜、周珊珊、黃志彬 135

本期簡介

「工業污染防治」刊物(以下簡稱本刊物)自民國 71 年發刊至今,已出版 163 期,共刊載 1,887 篇技術論文,為目前環工界歷史最悠久之技術刊物,提供國內產、官、學、研環保人員之專業發表平台。

近年來,國內社會大眾、環保團體及輿情均相當重視各項環保議題,且中央及地方環保主管機關亦積極制修定環保法規。產業界為因應此趨勢與符合法規要求,需多元落實各類工業污染防治(制)技術,據以改善製程及提升管末處理設施效能。為響應環保,本刊物以電子化方式,置於產業發展署永續發展組委辦之「產業綠色資訊網」,供各界瀏覽下載。

114 年度之文稿範疇包含空污防制及案例、減碳議題、節水及廢水回收再利用、再生水系統化(如都市生活污水再利用,以供產業用水)、廢水及重金屬處理技術、資源循環及減碳行動、土壤與地下水整治及調查技術、綠色永續韌性整治、毒性化學物質管理、再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估等。

本期共收錄 7 篇,分別撰述「石化廠區 VOCs 監測網優化及整合應用」、「氨氮廢水處理技術現況與未來發展」、「水污染防治措施計畫及排放許可證書面審查常見問題及建議」、「應用 ISO 50006 標準強化能源績效管理」、「企業如何運用 EICT 提升 ISO 50001 能源管理成效」、「亞泥公司領航低碳轉型提前達成 SBTi 目標」、「以可再生型吸附顆粒(RAP)削減地下水中全氟/多氟烷基化合物(PFAS)」,作者慨賜宏文,提供寶貴經驗,特此致謝。

空氣污染與噪音類

石化廠區 VOCs 監測網優化及整合應用

林楷傑*、郭子豪**、吳宜展***、黃溢銓****

摘 要

我國石化工業區鄰近社區設有特殊性工業區測站，包括光化站每小時連續自動監測 54 項 VOCs 物種。揮發性有機物空氣污染管制及排放標準 (VOCs 標準) 第 47 條規定於周界監測超過固定污染源有害空氣污染物排放標準者，業者需進行指定檢查 (廠內管道 / 洩漏排放檢查)。因此，國內石化業者紛紛優化廠區內 VOCs 監測網，來回應指定檢查機制。王等 (2019) 提出六輕工業區設有由園區內至外共設置 8 層不同監 (檢) 測設備，然對於監測網優化及整合應用於指定檢查做法並未探討。此外，單一業者近年來也紛紛建置戰情室整合廠內維修資訊、工安偵測器、及廠外偵測結果，以回應指定檢查機制。本研究收集產業園區及單一業者因應指定檢查所做的監測網優化及整合應用，並以案例說明由廠內至廠外監測濃度梯度及影響範圍等特徵。案例顯示公部門藉由立法 / 執法改善環境，業者藉由優化監測網，及早發現洩漏 / 管道排放並迅速止漏，公私合作達到安全、衛生、環保之協同改善效果。

【關鍵字】石化廠、揮發性有機物(VOCs)、有害空氣污染物(HAPs)、污染溯源

* 環興科技股份有限公司
** 環興科技股份有限公司
*** 台塑企業總管理處
**** 台塑企業總管理處

工程師
技術經理
處長
資深副總經理

一、前言

我國石化工業區鄰近社區設有特殊性工業區測站，包括光化站每小時連續自動監測 54 項 VOCs 物種。VOCs 標準 (2023) 規定於周界監測超過固定污染源有害空氣污染物排放標準 (2021) 者，業者需進行指定檢查 (廠內管道 / 洩漏排放檢查)。上述法規說明如下：

(一) 廠外社區監測站 (Community Monitoring)

雖然指定檢查的啟動測站是周界監測站，但實務上包括廠外鄰近社區測站，可以分為下列 3 種測站。

光化站 (Photochemical Assessment Monitoring Stations, PAMS) 固定站及移動車：由環境部設置，旨在全方位解析高臭氧事件成因。監測項目包括臭氧本體、其前驅物 NO_x 及 54 項 VOCs，其中亦涵蓋苯等 7 項受關注有害空氣污染物 (HAPs)。全台共建置 11 座固定站與 5 部移動監測車，計 16 個監測點。光化站建置目的非用於監控固定源排放，然而國內工業區鄰近住宅區，使部份光化站位於石化工業區附近。六處站點 (大城、台西、小港，以及行動 15- 仁武、行動 14- 鳳山、行動 06- 林園)，除擔負區域光化學評估外，也兼具社區空品監測功能，提供工業與民生環境交界之長期背景數據。

特工站：依《特殊性工業區緩衝地帶及空氣品質監測設施設置標準》(103.3.5)，特殊性工業區開發者須在園區邊界規劃緩衝帶，並於要點布設空品監測站。目前全國共有 7 處特殊性工業區。其中離島、臨海與林園三區為石化工業區設有 27 站，包括光化站連續自動監測 54 種光化前驅物，及手動監測 52 種 HAPs。特工站網絡鄰近重工業源頭，對排放溯源與事故偵測具高度靈敏度。

大社工業區監測網：高雄市於 110 年 1 月完成大社工業區專屬監測網，整合環保局、環境部及經濟部產發署之空品資料，並透過「大社工業區空品監測網」平台公開。系統核心含三條 OP-FTIR 測線：楠梓區五常里線自 103 年 12 月起連續運行，110 年 4 月新增東側 (三奶里) 測線，南側測線則於同年 9 月底投入服務。緊鄰排放源的高時間解析 (5 分鐘) 監測，能即時捕捉濃度波動與異常排放現象。

技術特性比較：光化站採用 GC-FID 等實驗室級分析技術，靈敏度可達 ppb，每小時監測乙筆。早期設置固定站（如小港、台西站等），累積豐富歷史資料，適合長期趨勢與成效追蹤，近期設置移動站（如林園站、仁武站）等則具機動性，則於鄰近石化工業區設置；特工站設備原理同光化站，布建於工業園區邊界，距污染源更近，易於排放溯源；大社監測網採用 OP-FTIR 長距離量測，雖濃度下限較光化站略高（數百 ppb），但具優異時間解析度（5 分鐘）與空間貼近性，適於捕捉突發逸散事件。在物種辨識能力方面，光化站以偵測光化物種為主，另涵蓋芳香烴（BTEX）等有害物種物種；OP-FTIR 則可偵測丁二烯、氯乙烯等有害物種，然對於 BTEX 偵測靈敏度則略差。

(二) 固定污染源有害空氣污染物排放標準

固定污染源有害空氣污染物排放標準計納管 15 項 VOCs 物種，其中光化站 / 特工站測有 BTEX 等 7 項，OP-FTIR 則有丁二烯及丙烯腈等 2 項，詳表 1。

表 1 固定污染源有害空氣污染物排放標準

項次	物種名稱	周界標準值 (ppbv)	光化站 / 特工站測項	OP-FTIR 測項 *
1	1,2- 二氯乙烷	150		
2	1,3- 丁二烯	15	√ (測試項)	√
3	乙苯	150	√	
4	二甲苯	150	√ (鄰間對二甲苯)	
5	二氯甲烷	100		
6	三氯乙烯	45		
7	三氯甲烷 (氯仿)	90		
8	丙烯腈	27		√
9	四氯乙烯	100		
10	四氯化碳	40		
11	甲苯	150	√	
12	甲醛	60		
13	苯	40	√	
14	苯乙烯	100	√	
15	氯乙烯	20	√ (測試項)	

資料來源：高雄市政府環保局大社工業區空品監測，<https://aqmc.kcg.gov.tw/AirMonitor/>

二、廠內偵測技術及優化

(一) 固定式氣體監測器 (工安偵測器)

工安監測器主要依據《職業安全衛生法》與《毒性及關注化學物質管理法》等工安相關規定設置，如表 2。用於製程區內重要位置的即時警報與長期監控。其監測對象以毒性氣體與可燃性氣體為主，對應環保法規之有害空氣污染物 (如苯) 與 VOCs(如乙烯)。

毒性氣體設有八小時日時量平均容許濃度 (TWA)，如表 2，例如苯之 TWA 為 1 ppmv，對應環保法規周界標準為 40 ppbv。而可燃性氣體以 30% LEL 為警戒基準，如乙烯 LEL 為 2.7%，警戒基準為 8,100 ppm。

濃度達警戒基準時，於 1 分鐘內自動啟動聲光警報裝置，時效性遠高於每小時解析度的環保監測站。系統通常部署於儲槽、反應器周圍等高風險區域，距離排放源近，可即時掌握洩漏狀況。當廠外監測出現異常濃度時，工安偵測器警報亦可作為反查依據。

偵測原理涵蓋觸媒燃燒式、半導體式、光離子化偵測 (PID)、紅外線 (IR)、電化學式及比色法等多種類型，各自對不同氣體具有不同選擇性與靈敏度，詳細彙整於表 3。

表 2 固定式氣體偵測器相關法規及管制項目

工安法規名稱	物種	容許濃度	偵測	警報
勞工作業場所容許暴露標準 (114.4.11)	毒性氣體	✓ (TWA*)		
毒性及關注化學物質應變器材與偵測警報設備管理辦法 (109.1.13)	毒性氣體		✓ (誤差 30%)	✓ (1 分鐘) (10 倍 TWA*)
職業安全衛生設施規則 (111.8.12)	可燃性氣體	✓ (30%LEL)		
高壓氣體勞工安全規則 (111.9.14)	可燃性、 毒性氣體		✓	✓

註：八小時日時量平均容許濃度 (TWA, permissible exposure limit-time weighted average)

表 3 工安偵測器之偵測原理、適用性及優缺點彙整表

偵測原理	適用性 (可測氣體)	優點	缺點	較佳 偵測範圍
觸媒燃燒式	可燃性氣體， 如丙烷等碳氫 化合物	1. 輸出訊號與濃 度呈線性關係 良好 2. 抗環境溫濕度 變化能力強 3. 再現性優	1. 觸媒易中毒導致 性能下降 2. 選擇性低，易受 其他氣體干擾 3. 不適用於氧氣濃 度低於 10% 環境	500 ppm~ 100%LEL
半導體式	毒性及可燃性 氣體，如乙醇	1. 對低濃度氣體 具高靈敏度 2. 結構穩定、壽 命長 3. 相對觸媒式具 較佳耐久性	1. 濃度響應非線性 2. 不適用於高濃度氣 體 3. 易受溫濕度及其 他氣體干擾 4. 無選擇性，易誤 報 5. 可能出現睡眠效 應 (Sleeping)	0~1,000 ppm 部份可測 至 50%LEL
光離子式 PID	含不飽合鍵有 機物，如芳香 烴、烯烴	1. 操作簡單，反 應迅速 2. 干擾少，不受 空氣中主要成 分 (如 O ₂ 、N ₂) 影響	1. 易受水氣影響 2. 探頭表面易污 染，需定期清潔	0~2,000 ppm
紅外線式 IR	含異原子結構 之氣體 (不適用 於 O ₂ 等雙原子 分子)	1. 精確度高，適 合即時濃度量 測 2. 可實現免耗材 之連續監測	1. 攜帶式裝置易受 濕氣與溫度影響 2. 僅適用於具 IR 吸收特性的氣體	0~100 % (體積)
電化學式	可水解為離子 的極性氣體， 如 NH ₃ 、SO ₂ 、 NO、HCl、 H ₂ S 等	1. 構造簡單、價 格低廉 2. 對特定氣體具 高選擇性 3. 低濃度響應具 良好線性	1. 須定期更換電解 液或感測單元 (除一次性拋棄 型) 2. 易受背景氣體干 擾	0~2,000 ppm
比色法 色帶式	特定劇毒氣 體，如 AsH ₃ 、 B ₂ H ₆ 、Cl ₂ 、 C ₆ H ₅ OH、 N ₂ H ₄ 、COCl ₂ 等	1. 適用於極低濃 度偵測 2. 氣體選擇性佳 3. 運作簡便，適 合短期應變偵 測	1. 色帶對濕度敏 感，影響顯色準 確性 2. 須頻繁更換色 帶，耗材成本高	0~100 ppm

資料來源：黃德琪等 (2023)，先進國家化學性直讀式環境監測儀器之制度探討。

(二) 快速質譜儀

快速質譜儀為高靈敏度的現場監測工具，適用於廠區中不易巡檢的設備或高架管線等潛在逸散點的空氣品質監控。其可針對特定毒性或有害氣體進行連續分析，提升對微量洩漏事件的早期偵測能力，降低人員暴露風險。原理為將空氣樣品引入離子源中，氣體分子被游離後根據質荷比（m/z）進行分離與偵測，分析速度快，靈敏度高，對多種 VOCs 能快速定性與半定量，針對《固定污染源有害空氣污染物排放標準》管制物種的周界標準及偵測極限比較如表 4，顯示芳香烴、鹵代烴的偵測極限低於周界標準值，相關原物料製程較適用。生產 VCM 的案例廠中，即部署快速質譜儀於製程區域監測如 1,2- 二氯乙烷、氯乙烯等氣體，並搭配多點取樣系統，每台可連接高達 60 個採樣點，進行 24 小時連續分析。即時數據可上傳，設定閾值進行異常判別，觸發聲光警報與故障通報程序。亦可用於建立濃度趨勢分析，並與歷史資料比對，提升環保及工安管理效益。

表 4 《固定污染源有害空氣污染物排放標準》及快速質譜儀偵測極限比較

項次	物種名稱	周界標準值(ppbv)	比較(高於,>)	快速質譜儀偵測極限(ppbv)*
1	1,2- 二氯乙烷	150	>	20
2	1,3- 丁二烯	15		200
3	乙苯	150	>	5
4	二甲苯	150	>	5
5	二氯甲烷	100	>	20
6	三氯乙烯	45	>	20
7	三氯甲烷（氯仿）	90	>	20
8	丙烯腈	27		100
9	四氯乙烯	100	>	20
10	四氯化碳	40	>	20
11	甲苯	150	>	5
12	甲醛	60		X
13	苯	40	>	5
14	苯乙烯	100	>	5
15	氯乙烯	20		20

資料來源：Thermo Scientific™，Sentinel PRO Environmental Mass Spectrometer。

(三) 污染源連續自動監測系統 (CEMS)

連續自動監測系統 (Continuous Emission Monitoring System, CEMS) 係針對煙道排氣設計，常用於監測大型電廠排氣之 NO_x 、 SO_2 等，評估法規符合度及計算排放量。本文著重探討，石化業者基於自主管理自行監測總碳氫化合物 (THC) 掌握防制設備效能，以及自行監測氯化氫 (HCl) 監控加熱爐爐管破裂釋出的氯化物燃燒後產物，能於污染控制設備異常或洩漏發生初期提供警示，協助快速處置，避免未處理氣體排放至外界。

(四) 技術特性比較

廠內偵測技術之適用情境、優缺點如表 5 所示。工安偵測器因可於 1 分鐘內響應，最適合用於即時性高、長期監控需求之區域，並可依照法規設定警報條件。惟其選擇性與抗干擾能力較弱。快速質譜儀因偵測靈敏度高、干擾少，特別適合部署於高架管線或操作不便區域，提供即時濃度資訊並減少人工巡檢次數，然其建置與維護成本較高，且單點監測頻率較低。CEMS 則屬於污染源管道端監控，若加裝 VOCs 或 HCl 模組，亦可應用於事故早期發現。惟設備設置與維護成本較高。

表 5 廠內偵測器技術特性比較

設備	優點	缺點
工安偵測器	即時響應快 (1 分鐘內)、符合工安法規、適合長期部署與全面佈點	容易受背景干擾 (如車輛廢氣、油漆) 影響，選擇性較低
快速質譜儀	偵測靈敏度高、干擾少、適用於不易巡檢區域，具備多點自動監控功能	設備與分析系統成本高，不符工安警報系統規範，僅適用特定監控需求
CEMS	長期連續監控、法規適用性強、可加裝 THC/HCl 等模組應對 VOCs 防制與事故警示功能	設置及操作成本高、物種選擇彈性較低

(五) 近年優化措施

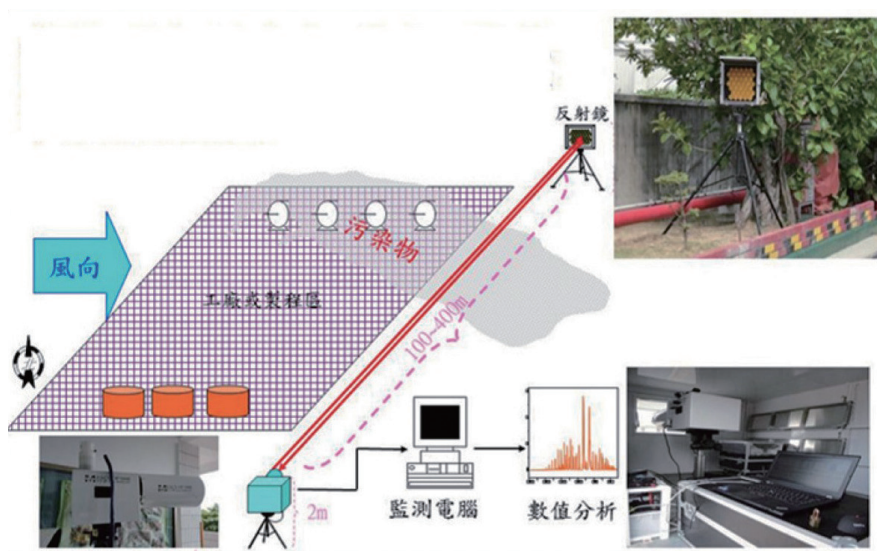
近年廠內監測網優化措施，包括監測點位增加及調整，提高偵測器的靈敏度，及增設快速質譜儀或管道 CEMS 來強化監測網等。

四、周界偵測技術及優化

(一) 開徑式傅立葉轉換紅外線光譜 (Open-path FTIR，簡稱 OP-FTIR)

OP-FTIR 利用紅外線光束穿越大氣路徑並反射回接收器，透過傅立葉轉換紅外線光譜技術，分析氣體分子對特定波段的吸收特徵，以取得其專屬圖譜。經比對標準資料庫圖譜，即可辨識並定量空氣中多種氣體污染物。此系統由紅外光源、反射鏡與接收模組組成，一般安裝於工廠周界的制高點 (約 10 公尺以上)，藉以避開地面移動源與干擾氣流，提升監測準確性。其資料處理過程包括光譜訊號的收集、雜訊排除、波峰辨識與數值比對，能支援多物種同步偵測並建立時間趨勢變化。由於技術屬非接觸式與非破壞性分析，可進行長距離掃描式監測。然其靈敏度受到背景濕度、水氣與陽光干擾影響，低濃度下的準確性有限。為確保數據可靠性，系統需定期進行光學校正並保持光徑清潔，避免光軸偏移或鏡面污染所導致的失真。

近年 OP-FTIR 技術優化包括由人工辨識增設自動判讀辨識，以兼顧即時性及正確性。



資料來源：王信凱等 (2019)，六輕工業園區建構完整空氣品質監測網絡，工業污染防治第 146 期。

圖 1 OP-FTIR 監測原理

(二) 空品感測器 (Sensor Pod, 簡稱 SPod)

SPod 為可攜式氣體感測模組。系統整合多組感測元件、資料傳輸模組與太陽能等供電設備，可連續監控，即時傳輸雲端平台，利於視覺化展示與警示。VOCs 偵測常使用 PID 技術，其藉由紫外光源游離 VOCs 分子後量測離子流強度，對不飽和烴有高靈敏度。此外，也可整合高值觸發式採樣罐，再於實驗室定性與定量分析，以強化感測器本身不足的物種識別能力，使系統兼具即時性與準確性。

(三) 現址式氣相層析儀 (Field Gas chromatography, 簡稱 Field GC)

Field GC 將實驗室常用的 GC 技術進行現場化、自動化後，用於現地對 VOCs 精確分離與濃度量測。原理係將空氣樣品經預濃縮處理後注入層析柱，不同氣體成分因與柱中固定相的親和力與物理特性不同，滯留時間各異而被依序分離。隨後由 PID 等偵測器辨識成分並量化濃度。系統包含進樣模組、分離柱、控制器、資料處理與遠端通訊模組，可將數據即時上傳至監控平台。其靈敏度高 (0.1 ppb)，適用於如苯等 HAPs 之長期監測與趨勢追蹤。因平均功耗低於 100W，可使用市電或太陽能模組，部署靈活度高。

(四) 技術特性比較

OP-FTIR 適合長距離掃描與多物種同步偵測，尤其針對煙囪、反應塔等高架排放源具有優勢；然在濃度偏低或氣候不穩定條件下易受干擾。SPod 具備快速布建、彈性高與成本低的優點，利於建立高密度感測網絡，即時掌握污染趨勢，但物種識別能力較弱，適合與採樣罐結合提高準確性。Field GC 則具備實驗室等級之靈敏度與物種分離能力，適合做為社區監測與污染事件溯源的主力技術，但系統成本與操作複雜度較高，不適用於大規模密集部署。比較詳表 6。

表 6 周界 VOC 偵測系統技術特性比較表

偵測原理	優點	缺點	較佳偵測範圍
OP-FTIR	長距離即時監測多物種，時間解析度高 (5 分鐘)。	易受天候干擾，低濃度靈敏度受限	數百 ppb~ppm
空品感測器 (SPod)	成本低、易部署，可建立高密度感測網，掌握污染趨勢	難辨識個別物種，易受環境干擾	ppb
現址式 GC	高靈敏度 (0.1ppb)，適用於事件追蹤與長期監控	時間解析度約 1 小時、成本較高	ppb

五、案例監測網運作介紹

(一) 戰情室平台整合外部空品監測 ~ 適用單一廠商

圖 2 顯示案例廠區內氣體整合分析系統 (簡稱戰情室)，以視覺化、數位化呈現，除傳統工安偵測器 (毒性氣體、可燃氣體、巡檢結果、風向風速等氣象資料) 外，並整合廠外周界及社區監測站 (SPod、特工站等)，以跨資料源進行聯合分析，協助決策者與現場人員在最短時間內掌握污染擴散動態，並指引後續應對與改善措施，運作步驟包括：

警報發生：當監測到異常濃度並觸發警報後，分散式控制系統 (DCS) 即時於監控畫面標示異常位置，同時現場對應區域之警示燈啟動。

現場巡查：現場人員攜帶手持式偵測器至異常現場確認及比對讀值，並填寫回報表。

後續提出原因對策、數據統計、及改善優化措施等。



資料來源：長春人造樹脂廠，國家職業安全衛生獎，<https://www.osha.gov.tw/>。

圖 2 案例廠區內毒性及可燃性氣體整合分析系統（簡稱戰情室）

（二）建構多層防護網～適用產業園區

為能落實確保空氣品質管理，案例產業園區整合園區內、外共八層監測網，建置智能化溯源系統，異常即時監測後，透過電腦比對各廠原物料及產品，包括製程反應中間物（例如 PTA 對苯二甲酸製程的醋酸甲酯、Phenol 合成酚製程的異丙苯），再查找廠處即時監測資料（氣體洩漏偵測、燃燒塔等）及環保履歷（環保通報單等），並輔以氣象風向驗證溯源結果（溯源系統運作流程如圖 3），以縮短查找異常排放源時間，並即時消除污染異常，避免持續擴大造成工安環保事件，同時深入檢討改善各項作業標準流程，由排放源頭進行削減排放及管末有效防制處理，確保異常不再發生。藉由查核結果及追查經驗回饋溯源系統，逐步提升溯源成功率，如圖 4。本系統透過綜合分析各種數據，如廠區即時監測、氣象條件、產品及原物料檔案，迅速定位污染事件的可能來源，並提供調查依據。

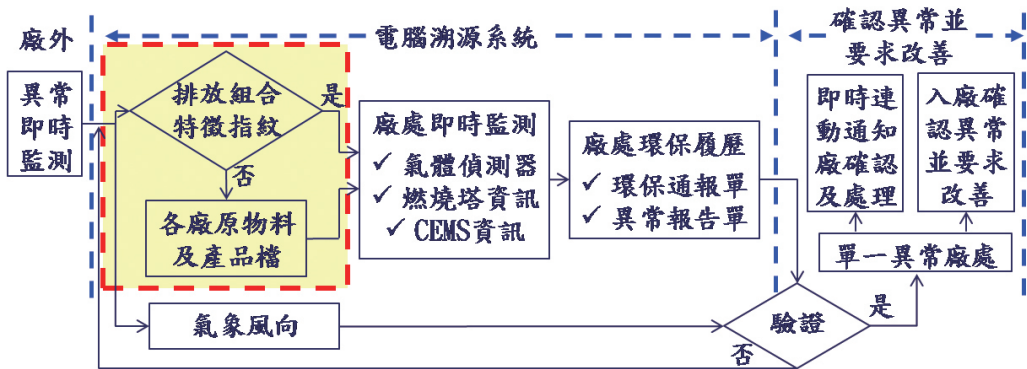


圖 3 案例產業園區智能化溯源系統流程圖



資料來源：吳宜展 (2024)，台塑企業麥寮園區空氣品質維護管理，國際氣膠研討會。

圖 4 智能化溯源系統查核結果回饋更新資料庫

六、產業園區指定檢查案例介紹

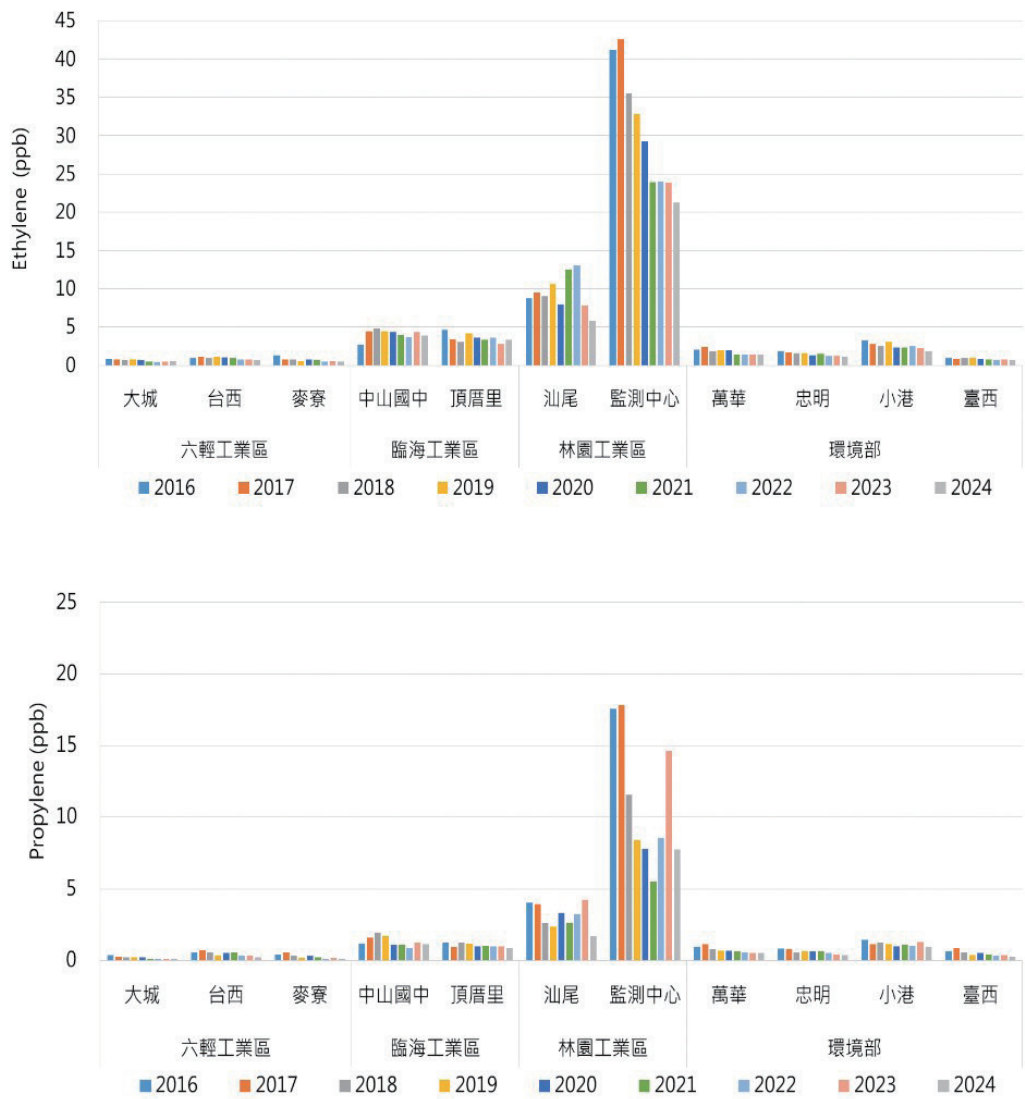
法規指定檢查啟動時機為監測超過固定污染源有害空氣污染物排放標準，以下以案例產業園區監測網為例，分享該園區以標準值 1/10、甚至更低，來當成啟動閾值，說明指定檢查成果。依據檢查結果可迅速改善，降低產業園區對環境之影響；此外，檢查結果也發現可能是鄰近的人為活動對測站造成影響。以下列舉 4 類案例，分別代表固定源排放臭氧前驅物、有害空氣污染物，及人為活動排放（溶劑使用、露天燃燒）影響，說明如下：

(一) 工廠排放臭氧前驅物案例

乙烯及丙烯皆為石化業特有、大量使用物質，且亦係重要臭氧前驅物，當案例產業園區下風之社區測站測得異常高值時，可能受產業園區排放所影響。案例產業園區現行係以優於法規方式訂定內控值 (20 ppb)，當園區內監測設施或區外之周界監測，測得超內控值或尚未超內控值但有突升之情事時，戰情室旋即啟動溯源管理機制，應用園區內 (氣體偵測器、GasFind IR、CEMS、移動式 FTIR、固定式 FTIR) 與園區外 (異味站、空品站、光化站) 共八層之監測系統，回饋要求業園區內落實控管，以減少產業園區營運對環境品質的影響，經前述管理做為下，案例產業園區周邊測站的乙烯、丙烯濃度逐年呈下降趨勢，且均較其他特殊性工業區為低 (圖 5)，經統計 2025 年環境部台西光化站小時值均未有逾限，僅 1 起 (4 月 8 日) 丙烯略有上升。

前述 2025 年 4 月 8 日之監測案例，於案例產業園外光化站於 11 時起丙烯濃度呈上升現象 (如圖 6)，當時風向為北北西風 (如圖 7)，戰情室於 12 時發現丙烯濃度持續上升超過 10ppb，在尚未超內控值前即自主應用溯源系統追溯可能之廠處。經溯源鎖定上風處的某廠，搭配環保通報單資訊顯示，該廠於 2025 年 4 月 7 日申請歲修停車，經入廠追查係因製程停車作業，期間卸除製程冷媒系統冷凍油，因冷凍油要加熱去除丙烯致使丙烯排放至燃燒塔處理過程，略有影響園區外之下風測站 (圖 6)，戰情室旋即要求其立即控管改善，首先要求調整燃燒塔操作參數，即確認蒸氣與處理尾氣比 (Steam to Vent Gas)，透過添加適量蒸氣或空氣來提升燃燒破壞效率 (本案例係以此方式控制)，或確認蒸氣添加是否過量致使熱值降低，而不利燃燒效率 (李等，2022)，因此丙烯濃度自 2025 年 4 月 8 日 13 時起即獲有控制，後續於 18 時仍有上升現象，次而請該廠延長冷媒系統冷凍油停車吹驅 (Purge) 時間，並將冷凍油累積液位下修到 10% 才進行加熱，進而減少冷凍油量及過程之丙烯排放量，因此本案歲修期間園區外之丙烯監測濃度均未超過內控值。

燃燒塔之功能係為維持工業製程安全之設施，於製程跳車之救急，反應槽過熱、過壓，由破裂盤排出之原料半成品尾氣，急速送至燃燒塔以燃料引火燃燒。緊急狀況採用燃燒塔處理，係為避免發生工安事故，儘管已經採取常態廢氣回收，及歲修程序優化，仍有少數難以控制的狀況不得已必須使用。透過溯源系統可以快速優化操作條件，降低對環境的影響。



資料來源：環境部特殊性工業區空氣品質監測管制資訊網。

圖 5 各特殊性工業區及都會區之乙烯、丙烯濃度監測情形

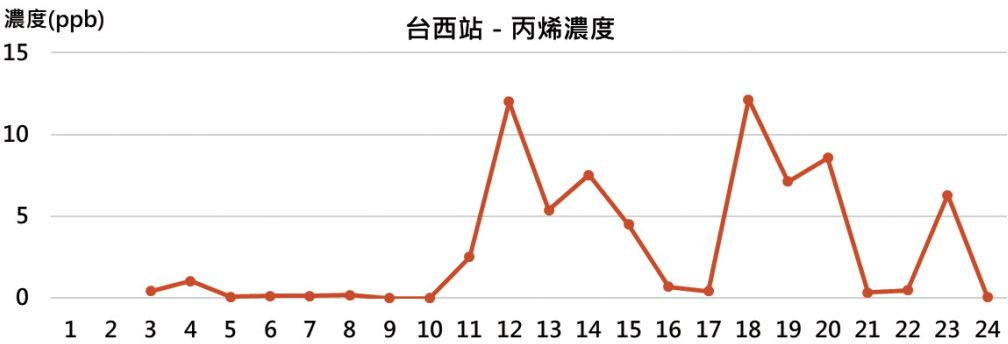


圖 6 台西特工站 2025 年 4 月 8 日丙烯逐時監測濃度趨勢圖 (QA/QC 前數據)

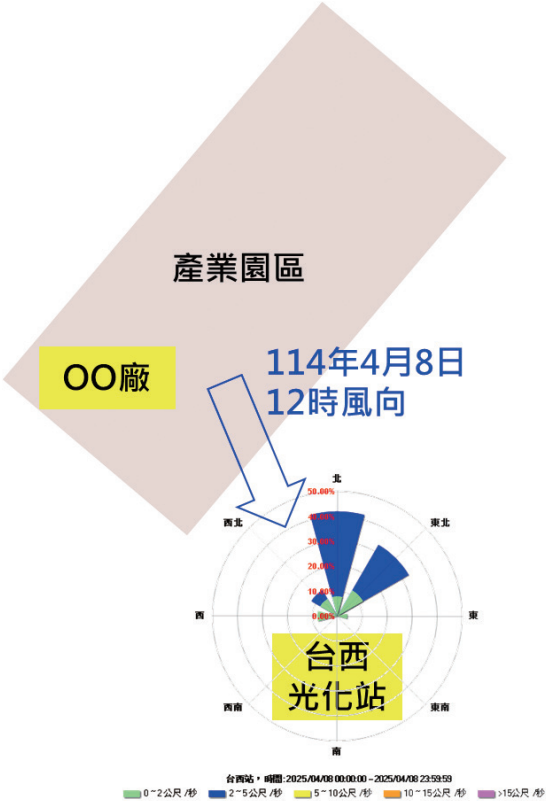


圖 7 台西特工站之丙烯排放來源與當日風玫瑰圖

(二) 工廠排放有害空氣污染物 (HAPs) 案例

案例產業園區於廠內、廠周界及廠外佈設 FTIR 測線，嚴格控制有害空氣污染物 (HAPs)，並自 2019 年 6 月起設定氯化物等以廠外零檢出為目標加嚴管制。以 2025 年 5 月 7 日之案例進行分享，當日 13 時 50 分某廠內氣體偵測器測得 1,2- 二氯乙烷 (EDC)，最高濃度為 4 ppm，當時風向北北東～北風，戰情室立即啟動異常來源追查，經查為該廠執行廢水收集槽內污泥清理作業期間，VOCs 逸散影響所致，於停止該項作業後，產業園區內之氣體偵測器即未再測得，本案例之作業期間，產業園區周界及區外 FTIR 測線皆未測得 1,2- 二氯乙烷 (圖 8)，顯示經妥善應用產業園區內監測網，啟動工安、環保控管下，該起案例之 1,2- 二氯乙烷均未排放、逸散至產業園區外。



圖 8 某廠內氣體偵測器告警紀錄及當時風玫瑰圖

(三) 人為活動溶劑使用案例

園區外光化站之甲苯、苯乙烯等物質超限，經溯源系統排除並非園區營運之影響後，戰情室人員立即前往測站周圍追查影響來源，圖 9、10、11 之案例 (2022/3/16、2022/2/14) 發現係受人為活動之影響，包括油漆、PU 跑道鋪設、防水工程等溶劑使用現象，經向測站設置學校或周邊居民確認施工工期後，同步向學校師生分享測值上升的原因及可能會聞到油漆味道等，分享方式係透過戰情室建置線上網頁呈現系統，向校方代表說明測值趨勢上升時間與現場開始施工作業的時間關聯性，以及超限物種與工程溶劑使用之符合度，並提醒緊閉教室門窗、儘量減少靠近施工區域等自我防護措施。

日期	測站	超限時段	超限物種	測值	內控值	風向	風速(m/s)
3/16	東石	04-09、19-21時	甲苯	21.43~50.65	21(ppb)	北北西~東南	0.40-2.06

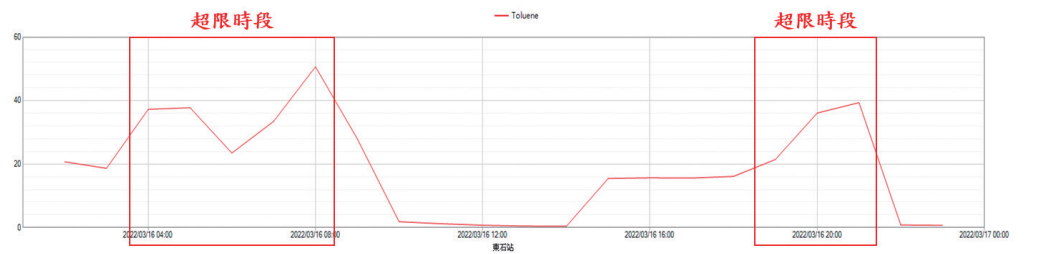


圖 9 學校操場 PU 跑道施工使用溶劑影響，導致甲苯濃度超出內控值

日期	測站	超限時段	超限物種	測值	內控值	風向	風速(m/s)
2/14	土庫	23時	苯乙烯	2223	5(ppb)	北北東	2.11
			非甲烷	1.79	1.5(ppm)		
2/15		02-04	苯乙烯	17.74-33.96	5(ppb)	北-北北東	0.55-1.23

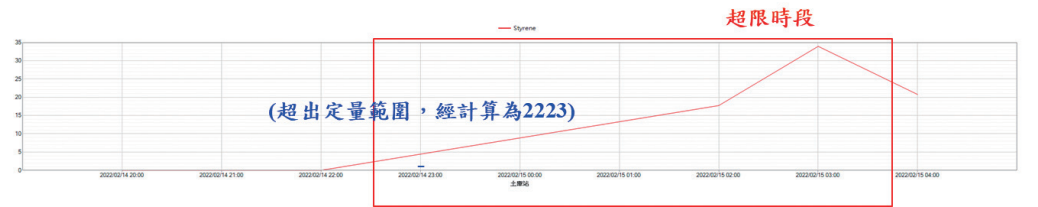


圖 10 民宅頂樓施作防水工程使用溶劑，導致苯乙烯濃度超出內控值

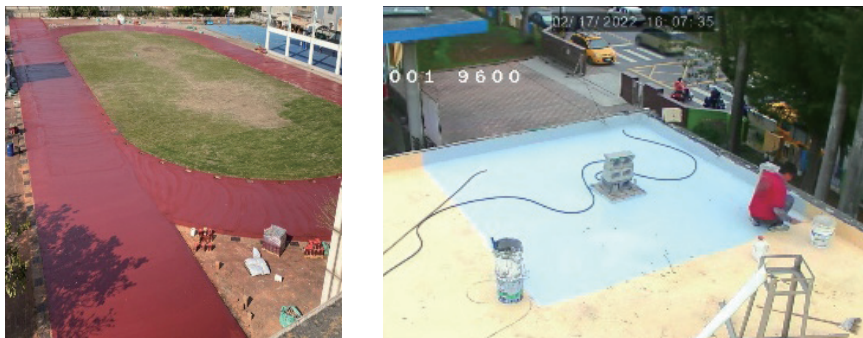


圖 11 學校操場 PU 跑道施工及民宅頂樓施作防水工程現場照片

(四) 人為活動露天燃燒案例

露天燃燒生質物常見於雲林農業大縣，過程會釋放大量傳統污染物（一氧化碳、細懸浮微粒 $PM_{2.5}$ 等）外，其釋放 VOCs 種類及數量，也會隨焚燒物質組成（如稻稈、雜草、落葉、木材、家庭垃圾、塑膠、廢輪胎等）及燃燒條件（如悶燒、大火焚燒）不同而有所差異。戰情室追查園區外測值逾限案例，已累積多起受露天燃燒影響之記錄，摘錄農田露天燃燒伴隨燒窯活動之案例如圖 12，發現後立即於其所經營之企業臉書粉絲頁貼文，提醒民眾減少外出活動及做好健康安全防護。

產業園區外之監測數據均有上網公開，本文指定檢查案例（三）、（四）之現象，亦有專家學者進行研究探討後，陸續於國內研討會發表，謝等 (2023) 以「以光化測站驗證人類活動 VOCs 排放貢獻」為題於環境分析研討會進行分享，據此呼籲應向民眾積極宣導使用低揮發性有機溶劑、減少農藥使用及避免露天燃燒之行為，以維護空氣品質；楊等 (2024) 歸納露天燃燒案例追查結果，顯示排放共同物種除乙烯、乙炔、丙烯及苯外，亦會釋出 1,3- 丁二烯、苯乙烯、甲苯、二甲苯及乙苯等物種，而監測濃度高低則與露天燃燒現場距離遠近、焚燒面積大小有關聯；簡等 (2025) 探討過程，提出雲林地區露天燃燒事件中常見的 VOCs 包含乙烯、丙烯、苯、1,3- 丁二烯，向民眾宣導不應進行露天燃燒，以維護空氣品質及身體健康。

日期	測項	測站	時段	測值	內控值	風向
2/25	PM ₁₀	空品四湖站	06	131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	南
	乙烯	光化四湖站	06	22.81 ppb	20	南
	苯	光化四湖站	06	8.09 ppb	5	南

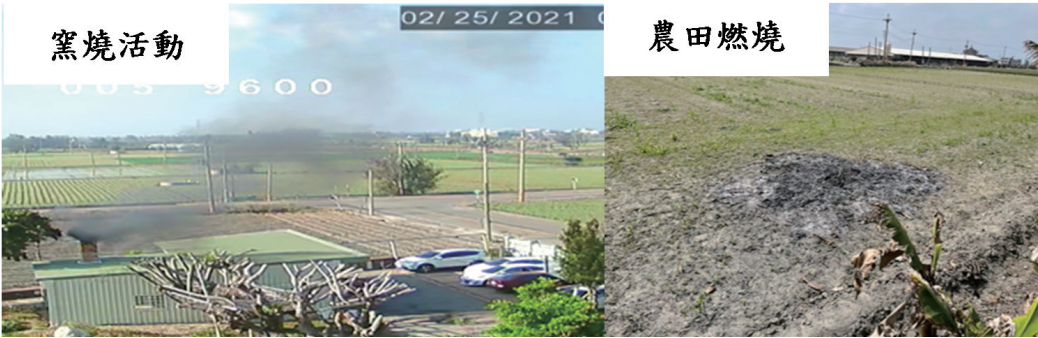
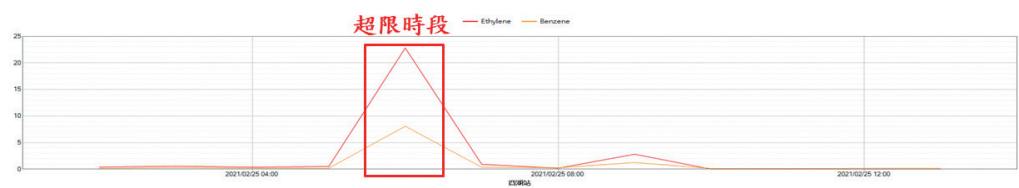


圖 12 測站附近生質燃燒，導致 PM₁₀、乙烯及苯濃度超出內控值

七、結論與建議

本研究針對石化產業推動 VOCs 監測網優化及整合應用之應用現況與成效，進行系統性分析與探討。透過廠內工安偵測器、快速質譜儀、污染源連續自動監測系統 (CEMS)、周界 OP-FTIR、微型感測器 (SPod)、現址式氣相層析儀 (Field GC) 等多元技術的佈建實例，證實不同層級監測系統具備互補特性，可有效覆蓋洩漏偵測的時空盲點。

此外，產業園區外設置之環境部光化站、園管局特工站及環保局建置之大社工業區監測網，目的係用以確保社區居民受體點之環境品質，經與廠內戰情室平台統一呈現，能即時掌握異常濃度變化、快速定位疑似來源，並縮短污染事件之應變時程。

案例分析顯示，產業園區近年推動防制設備、儲槽、廢水場加蓋、及設備元件等改善案，已大幅減少常態排放，使得設備故障或歲修時段之拆清等隨機排放的占比增加。因而，透過監測來降低隨機排放日益重要。為降低隨機排放，逐步加嚴自主管理之內控值，當測值有上升趨勢且尚未達內控值時，戰情室旋即應用八層監測網之數據，啟動自主檢查與管理措施，應證了強化監測可同時提升環保與工業安全外，並可反映產業園區以外之其他人為活動情形（如露天燃燒或溶劑使用等），即早提醒民眾做好防護措施外，也發現人類經常性活動對空氣品質的影響亦不容小覷。本文分享跨層級監測網絡與即時資料整合，有助於提升石化廠污染溯源精度、異常警示效率及環境風險控管能力。

未來石化產業持續推動之建議方向，包括下述四項：

1. 依製程風險分級與環境敏感度，彈性配置多層級監測技術；
2. 建立高解析度資料庫，深化異常分析與趨勢預警；
3. 強化 AI 智能輔助決策功能，提升污染源溯源與事件應變速度；
4. 促進廠內、廠外之監測資料共享與協作，打造更為智慧化的環境管理系統。

透過持續優化監測技術與數據治理，石化產業將能兼顧工安、環保與永續發展目標，朝向智慧減排與高韌性營運邁進。

參考文獻

- 朱國棟、游逸駿 (2002)，質譜儀用於環境氣體偵測之可行性探討，勞工安全衛生簡訊，第 51 期。
- 王信凱、吳宜展、吳宗進 (2019)，六輕工業園區建構完整空氣品質監測網絡，工業污染防治第 146 期。
- 楊政育、張世昌、黃建元、盧建榮 (2013)，台塑公司空氣污染防治成果及減量經驗分享，工業空污減排及製程技術改善與管理成果發表會。
- 李其霈、盧彥廷、郭子豪、曠永銓、戴忠良、謝仁碩 (2024)，建構遠端監控系統即時管理石化業異常排放，中興工程季刊第 163 期。
- 盧彥廷、李其霈、郭子豪、戴忠良、江勝偉 (2024)，升級 NGEM 光化站監控 HAPs-以氯乙烯製程為例，環工研討會。
- 簡孟盈、劉冠廷、許金玉、程裕祥 (2025)，雲林地區露天燃燒排放揮發性有機氣體的物種特徵探討，國際氣膠研討會。
- 楊舒云、謝美珠、賴澐樺、雷孝萱、謝欣成、王介亨 (2024)，以光化測站資料比對驗證露天燃燒釋放之 VOCs，環境分析研討會。
- 吳宜展 (2024)，台塑企業麥寮園區空氣品質維護管理，國際氣膠研討會。
- 謝欣潔、謝美珠、賴澐樺、楊舒云、王介亨 (2023)，以光化測站驗證人類活動對於 VOCs 排放貢獻，環境分析研討會。
- 黃德琪、許雅媛、湯大同、鐘順輝 (2023)，先進國家化學性直讀式環境監測儀器之制度探討，勞動部勞動及職業安全衛生研究所。
- 李家聿、辛繼勤、林楷傑、賴俊甫 (2022)，燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討，工業污染防治第 156 期。
- 長春人造樹脂廠，國家職業安全衛生獎，<https://www.osha.gov.tw/>。

22 石化廠區 VOCs 監測網優化及整合應用

碩傑企業股份有限公司，<http://www.mastek.com.tw>。

創控科技股份有限公司，<https://www.tricorntech.com/>。

環境部特殊性工業區空氣品質監測管制資訊網，<https://aqmsopen.moenv.gov.tw/>。

Thermo Scientific™，Sentinel PRO Environmental Mass Spectrometer。

水處理與資源再利用

氨氮廢水處理技術現況與未來發展

李中光*

摘 要

氨氮是指游離氨 (或稱非離子氨, NH_3) 或離子氨 (NH_4^+) 型態存在的氮物質。環境部考量氨氮排放會消耗水中溶氧影響水體品質, 於 106 年 12 月 25 日依事業製程廢水特性修訂放流水標準, 自 110 年起分 3 階段加嚴管制氨氮之放流水標準。另一方面, 針對廢水之處理, 若從水污染防治法規之管制趨勢變化可知, 其已從傳統將污染物去除之觀點轉換為能資化再利用處理, 具體作法包含源頭化學品替代與減量及製程廢水之分流收集, 以達水資源及化學品之回收再利用, 同時強調智慧化之高效能廢水處理程序, 除降低排放對環境之衝擊外, 亦降低水處理之藥劑添加量、用電量及污泥量, 以符合低碳節能之國際趨勢。本文即是針對氨氮廢水之源頭減量及能資源化與相關處理技術之現況及未來發展作一些回顧及討論, 期望能對相關業者在因應加嚴之放流水標準, 朝新興循環回收發展考量時能有所助益。

【關鍵字】氨氮廢水、能資源化、源頭減量、處理技術

* 中原大學環境工程系

兼任教授

一、氨氮廢水之來源及危害

氨氮是指游離氨(或稱非離子氨, NH_3)或離子銨(NH_4^+)型態存在的氮物質;pH較高時,游離氨的比例較高;反之,離子銨的比例較高。至於水中氨氮之來源,若為生活污水則主要是來自於有機氮物質的氨化所形成;若為工業廢水,則其來源相當廣泛,一種是氨水所形成之氨氮,另一種則是來自於所採用之有機氮物質的氨化所形成,或是來自於所使用之無機氮鹽的溶解所產生。常見會排放含氨氮廢水之產業包含電鍍業(金屬鍍合鹽(如氨基磺酸鎳及氯化銨鋅)、導電鹽(如氯化銨))、金屬污泥浸提液(硫酸銨或氨水浸提金屬離子、金屬表面處理業(表面熱處理原料使用氨氣)、煉鋁業(鋁渣之氯化鋁加水生成氨氣)、光電面板業(剝離液及顯像液含有機氮)、光電LED業(磊晶製程氨氣)、印刷電路板業(銅銨製程)、晶圓製造及半導體製造業(氟氨蝕刻液)、化工、石油化學及皮革業等。另外,則是來自於畜牧及養殖業所排放之氨氮廢水。這些含氨氮的廢水若未經適當處理即排放至承受水體,將會對環境及人體健康造成危害。

廢水中的氨氮是水體優養化和環境污染的重要物質,易引起水中藻類及其他微生物大量繁殖,使自來水處理廠操作困難,造成飲用水異味,嚴重時則會使水中溶解氧下降,魚類大量死亡,甚至會導致湖泊的乾涸死亡。氨氮還會使給水消毒和工業循環用水殺菌處理過程中用氯量增大,另其對某些金屬(例如銅)亦具有腐蝕性。當污水回收再利用時,再生水中之氨氮則會促進輸水管道和用水設備中微生物的繁殖,進而形成生物垢,堵塞管道和用水設備並影響熱交換效率。在對人體的危害方面,氨氮在硝化菌的作用下氧化為亞硝酸鹽及硝酸鹽,存在於飲用水中之硝酸鹽可能誘發嬰兒的高鐵血紅蛋白症;而亞硝酸鹽水解後生成的亞硝酸則具有強烈的致癌性。

二、氨氮放流水標準與管制對象

環境部考量氨氮之排放對水生生物具毒性、為河川污染指數項目及會消耗水中溶氧影響水體品質,於106年12月25日依事業製程廢水特性修訂放流水標準,新增管制金屬表面處理業/電鍍業(許可排放量150CMD以上對象之重金屬)、製革業、

印染整理業 / 紙漿製造業 / 造紙業之放流水加嚴真色色度、氨氮等項目；另又於 113 年 12 月 18 日針對特定事業再度修正發布，增訂或加嚴氨氮、總磷、銅、自由有效餘氯等項目的管制；其中，氨氮管制標準及受影響事業詳如表 1 所示，另新北市大漢溪氨氮放流水加嚴標準則如表 2 所示。隨著氨氮排放標準的加嚴，目前產業的對策主要係著重在原物料的局部替代，但成效有限；另一方面，廢水的一級和二級處理雖然能去除大部分之 COD，但對於放流水中的氮和磷，則由於經濟和技術方面的原因，大部分企業往往未對其作進一步之處理，因此恐難以因應第二或第三階段氨氮放流水的加嚴標準。依此，如何去除廢水中之氨氮已變成一相當重要之環境管理議題。

表 1 放流水標準氨氮增修管制標準 (環境部主管法規查詢系統)

增修管制項目	影響事業別		既設 / 新設	放流水標準新增管制限值 (mg/L)	
氨氮	金屬表面處理業、電鍍業	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	150	110/1/1 施行
				120	113/1/1 施行
				60	116/1/1 施行
			新設	20	
	製革業 (生皮製成成品皮)	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	150	110/1/1 施行
				60	113/1/1 施行
			新設	20	
	廢棄物掩埋場	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	150	110/1/1 施行
				60	113/1/1 施行
			新設	20	
	發電廠	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	150	110/1/1 施行
				100	113/1/1 施行
				60	116/1/1 施行
			新設	20	
	其他工業區專用污水下水道系統	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	100	110/1/1 施行
				75	113/1/1 施行
				30	116/1/1 施行
			新設	20	

增修管制項目	影響事業別		既設 / 新設	放流水標準新增管制限值 (mg/L)	
	製革業 (濕藍皮製成成品皮者)	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	75	116/1/1 施行
				45	120/1/1 施行
			新設	30	
	屠宰業	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	75	116/1/1 施行
				45	120/1/1 施行
			新設	30	
	肉品市場	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	75	116/1/1 施行
				45	120/1/1 施行
			新設	30	
	印刷電路板製造業	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	75	116/1/1 施行
				45	118/1/1 施行
			新設	30	
	醫院、醫事機構	排放於自來水水質水量保護區外者	既設	75	116/1/1 施行
				45	118/1/1 施行
			新設	30	

註： 1. 既設係指 106 年 12 月 25 日 (第一批) 或 113 年 12 月 18 日 (第二批) 前完成建造、建造中或已完成工程招標者。

2. 新設係指 106 年 12 月 25 日 (第一批) 或 113 年 12 月 18 日 (第二批) 前尚未完成工程招標者。

表 2 新北市大漢溪氮氮放流水加嚴管制對象及施行日期

對象	年度			
	114 年發布	115 年	116 年	117 年
新設事業	30 mg/L			
既設事業			30 mg/L	
涉及工程改善措施				30 mg/L

三、氨氮廢水之處理

目前針對廢水之處理，若從水污染防治法規之管制趨勢變化可知其已從傳統將污染物去除之觀點轉換為能資化再利用處理。具體的作法包含源頭化學品替代與減量及製程廢水之分流收集，其中後者將廢水分為低濃度及高濃度兩部分再分別進行處理。針對低濃度廢水，除使用水資源回收再利用技術將大部分廢水循環回收再利用外，剩餘之低濃度廢水則透過智慧化之高效能廢水處理程序除降低排放之環境衝擊外，同時降低水處理之藥劑添加量、用電量及污泥量，以符合低碳節能之國際趨勢；而針對高濃度廢水，則是透過資源化廢水處理程序（例如分離、蒸餾、吸附、電解等程序）將化學品循環回收再利用。一個即將推動的實際案例即是針對高濃度有機廢水事業（造紙、食品、醱酵、石化）及公共污水廠之污泥處理等 5 大具厭氧處理潛勢對象推動厭氧處理及沼氣再利用，以助攻產業節能減碳及資源循環再利用。針對氨氮廢水，其處理邏輯亦和上述觀念相類似，以下即針對氨氮廢水之源頭減量、能資源化及相關處理技術之現況及未來發展作一些回顧及討論。

3.1 氨氮之源頭減量

所謂源頭減量是指在不影響產品品質下，減少含氨氮原料之使用量，或是採用氨氮原物料替代減量措施，減少含氨氮原物料的使用量，進而降低製程氨氮的排放量。舉例來說，在原物料替代方面，電鍍製程（如氨基磺酸鎳）經常使用氯化銨作為導電鹽，對此可以硫酸鎳槽液替代，以降低氨氮排放量，但因所產電鍍品質較軟，目前尚無法全面取代。另外亦可使用氯化鉀替代氯化銨，但成本可能高出 3~5 倍，同時鍍層可能不光亮，品質亦較不穩定且需搭配硼酸為緩衝液，所產生含硼離子廢水亦須處理，因此技術上仍難以完全取代。表 3 為環保型酸鋅電鍍液銨系及鉀系特性之比較，由表可知，鉀系無硼系統因無氨氮及含硼廢水問題，如果產品之品質能穩定，則未來將具有相當大之應用潛能。另一個實際的例子為在皮革業中脫灰醇解階段，傳統用藥為硫酸銨（針對牛皮）或氯化銨（針對豬皮），致使廢水含高濃度氨氮。目前可使用無銨脫灰劑（有機酸鹽與無機鹽混合物）來取代，但成本會高出約 5.4 倍（45.8 元/kg vs. 8.5 元/kg），且在厚料脫灰時，所需處理時間及劑量均會增加，方可達到脫灰的標準（陳

見財，2022)。由上述之例子可知，雖然原物料替代方式能有效降低廢水中之氨氮濃度，然產業在應用時仍有產品規格要求或是成本等限制因素須列入考量。

表 3 環保型酸鋅電鍍液特性 (鉍系鉀系) 之比較 (陳見財，2022)

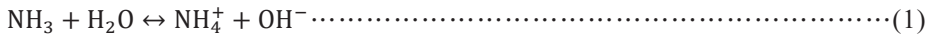
藥水種類	特性說明
鉍系 $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2$	電解液提供緩衝功能，兼具清洗作用，能減少前處理製程。光亮鍍鋅技術，提供高光澤、平整及延展性良好的鍍鋅層，但會產生高濃度氨氮廢水
鉍鉀混合系 $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{ZnCl}_2 + \text{KCl}$	配置導電鹽費用最低。應用在氯化物酸性鍍鋅電解液中，能降低氨氮濃度之排放
鉀系含硼 $\text{KCl} + \text{ZnCl}_2 + \text{H}_3\text{BO}_3$	雖無氨氮廢水問題，但需硼酸作為酸鹼緩衝液，衍生含硼廢水問題
鉀系無硼 $\text{KCl} + \text{ZnCl}_2$	無氨氮及含硼廢水問題，品質如能穩定，將為未來之使用趨勢

3.2 氨氮之能資源化

在氨氮廢水之循環再利用方面，主要是透過加鹼提濃，再氣 (汽) 提，最後進行吸收步驟來完成，其中吸收液若為純水則可產生氨水，若使用硫酸進行吸收則可產生硫酸鉍溶液，而若採用鹽酸進行吸收則產生氯化鉍溶液，此一氯化鉍溶液亦可再經結晶步驟生成氯化鉍結晶以利回收再利用 (環境部，2025)。至於所回收之氨水則可再進行粗餾或精餾而分別獲得工業級液氨 (> 99%) 或電子級液氨 (> 99.9999%)，最終進入資源化產品通路進行銷售或回用。另外液氨亦可經由綠色氨能技術進行能源化再利用，此處所謂的綠色氨能技術是利用再生能源產生的「綠氨」作為儲存和運輸「綠氨」的載體，並透過氨裂解 (氨轉氫) 技術將其轉化為氫氣用於發電或工業用途的減碳技術；此技術的優勢在於氨的儲存和運輸比氫氣更容易，且燃燒過程無二氧化碳排放，可協助企業及產業達成減碳目標，特別在高耗能產業和航運領域具有應用潛力。

3.3 氨氮廢水之各種處理技術

在討論氨氮廢水的各種處理技術前，可先討論水中氮的生物分解循環過程，由此將可對氨氮各種處理技術之學理機制有一初步之概念。如圖 1 所示，水中有機氮物質會先氨化形成氨氮，即 NH_4^+ 及 NH_3 ，至於水中 NH_4^+ 及 NH_3 之分佈比例則和水中之 pH 值有密切關係。針對此，由下列反應方程式及勒沙特列原理可知若加入酸，則平衡往右移動，有利於氨氣之溶解及 NH_4^+ 之形成；相反的，若加入鹼，則平衡往左移動，有利於氨氣之產生。



依據上述原理，在去除氨氮時若以 NH_3 為去除標的（例如氣（汽）提法）則水溶液應調整至高 pH 值以利 NH_3 之產生；相反的，若以 NH_4^+ 為去除標的（例如陽離子交換法、磷酸銨鎂沉澱法、薄膜分離法）則水溶液應調整至低 pH 值以利 NH_4^+ 之形成。

水中氨氮接著於好氧狀態下，經由亞硝菌之作用進行亞硝化將氨氮氧化成亞硝酸鹽氮（氧化數由 -3 變 +3），亞硝酸鹽氮接著於好氧狀態下再經由硝化菌進行硝化反應進一步將亞硝酸鹽氮氧化成硝酸鹽氮（氧化數由 +3 變 +5）。硝酸鹽氮接著於缺氧環境及添加碳源下進行脫氮作用還原成亞硝酸鹽氮，接著再進一步還原成氨氣（氧化數由 +3 變 0）回到大氣中，完成水中氮之循環。經由上面的敘述可知，若採用生物處理進行脫氮則最簡單的方式就是完成 2 個程序：好氧環境下的硝化過程及缺氧環境下的脫氮程序；而隨著各種研究的進展，以圖 1 的氧化還原循環為基礎的各種生物處理型式亦已被提出，例如厭氧氨氧化技術 (Anaerobic Ammonia Oxidation, Anammox) 即是將含氨氮廢水部分硝化為亞硝酸鹽氮，再將亞硝酸鹽氮及原廢水中之氨氮在厭氧環境下，應用 Anammox bacteria (自營菌) 直接氧化還原為氨氣 (即 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$)。

若採用化學方法處理氨氮廢水，則除了使用磷酸銨鎂沉澱法外，由圖 1 可知亦可考慮採用氧化劑將氨氮氧化為氨氣（氧化數由 -3 變為 0）而去除之，常見之化學氧化法為使用氯氣或次氯酸鈉作為氧化劑之折點加氯法。另外，最近亦開始有研究者提出使用具有吸附氧化特性的貴金屬覆蓋多孔活性碳催化劑 (COAC 觸媒) 於水中或氣相

中對氨氮進行催化氧化反應，或採用弱酸性之次氯酸水（稱為新氧水）作為氧化劑以氧化分解氨氮為氮氣。使用化學氧化法時，在學理上是希望將氨氮氧化成 N_2 ，然而實務上，因氮的氧化數可由 -3 至 +5，氧化過程往往不會剛好把氨氮氧化成氮氣，反而會氧化成其他氮化物，甚至過度氧化成硝酸鹽氮（管制標準為 50 mg/L），因此如何選擇性的將氨氮氧化成 N_2 是目前所碰到的實際應用瓶頸。

如上所述，氨氮之去除有多種方式可供採用，大致上可分為物理化學程序及生物處理程序兩大類，表 4 所示即為常見之各種氨氮廢水處理技術、其適用之氨氮濃度範圍及技術成熟度。在這其中，雖然生物脫氮是目前較常用的一種方法，但其除了具有占地大的基本缺點外，在有些場合亦不適用使用此法處理，例如間斷性的小水量或是低 C/N 比之高濃度氨氮廢水（例如垃圾滲濾液），其中後者是因為過低的 C/N 比將使得系統的脫氮效率不高，而高濃度的氨氮則對系統的微生物活性也有抑制作用。依此，如何建立處理效率高及占地少之氨氮廢水處理與回收技術是刻不容緩的議題，在此方面，物理化學處理技術或許可提供一些幫助。在各種物理化學處理方法中，化學沉澱法和氣（汽）提法較適用於高濃度氨氮廢水，但其出水濃度仍然不低，若要達到放流水標準，則還需要再進行其他深度處理。折點加氯法和陽離子交換法則適合用於處理低濃度氨氮廢水，其出水能達放流水排放標準。在實際的應用中，何種方法較合適，仍須取決於廢水的特性、要求達到的處理目標、經濟性及處理後出水的最終處置方法等作相關考量。以下即針對各種處理技術之去除機制及特點作更詳細之說明。

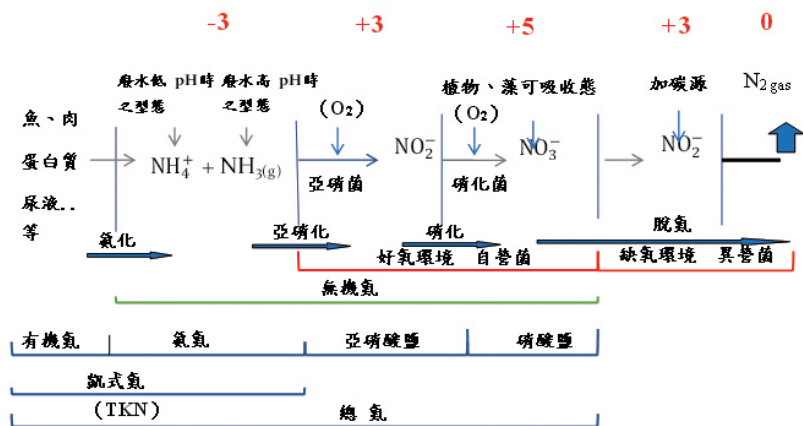


圖 1 水中氮的生物分解循環過程

表 4 氨氮廢水各種處理技術比較說明表 (陳見財，2022)

序號	處理技術	適用濃度 (mg/L)	處理原理	技術限制	技術階段	處理成本資訊
1	氣 (汽) 提 法 / 脫氣膜	100~10,000	提高廢水之 pH 以提升水中非離子氨之濃度，接著再以空氣或水蒸汽將非離子氨從水溶液中吹脫出來	處理後的廢水中氨氮仍可能高於放流標準，無法直接排放，主要作為高濃度氨氮廢水之預處理程序	已有實廠案例	1,000~2,000 元 / m ³ ；另外附加 200~300 元資源化效益
2	流體化床磷酸銨鎂沉澱法	>10,000	含氨氮廢水中添加磷酸鹽及鎂離子以形成磷酸銨鎂結晶	可產生晶體減少污泥量，但需添加鎂鹽及磷酸鹽，主要作為高濃度氨氮廢水之預處理程序	已有實廠案例	150 元 / kg-N
3	折點加氯法	10~100	透過添加氯氣或次氯酸鈉，產生自由餘氯 (次氯酸及次氯酸鹽)，氧化分解氨氮及有機物	添加藥劑多，操作成本較高。需控制 pH 以提高氨氮之氧化效率。反應過程，pH 會將低，需添加液鹼中和	已有實廠案例	100~200 元 /m ³
4	催化氧化型活性炭 (COAC)	100~1,000	添加覆蓋貴重金屬之活性碳觸媒，透過加熱及添加臭氧氧化氨氮	需提供氧化促進劑 (臭氧) 及須於高溫條件下操作	實廠驗證中	-
5	新氧水	10~100	使用弱酸性的次氯酸水溶液作為氧化劑，氧化分解氨氮及有機物	對氨氮之去除效率仍在模廠測試階段	模廠測試	-
6	電解氧化法	100~1,000	電場的作用下以溶液中產生的 OH ⁻ 或 ClO ⁻ 作為氧化劑將氨氮氧化為氮氣	反應時程短，但由於耗電，處理成本較高	實廠驗證中	65 元 /kg-N

序號	處理技術	適用濃度 (mg/L)	處理原理	技術限制	技術階段	處理成本資訊
7	陽離子交換 (吸附) 法	100~1,000	利用樹脂對銨離子之交換性，將銨離子吸附分離	有機物與樹脂結合造成效能降低需前處理，以避免堵塞樹脂床 其他陽離子會與銨離子競爭吸附 再生液需另行處理	已有實廠案例	100 元 / kg-N
8	生物處理法	10~1,000	使用生物處理經過硝化及脫氮 2 個階段將氨氮氧化還原成氮氣而去除	占地面積大、操作參數多及易受毒性物質影響等	已有實廠案例	以高效率生物網模 (BioNET) 為例，約 100 元 / kg-N

3.3.1 氣 (汽) 提法 / 脫氮膜

此法是先將廢水之 pH 提高以使大部分之氨氮以 NH₃ 之型態存在，接著再以氣體將其從水溶液中吹脫出來進而去除氨氮；常用空氣或水蒸汽作載氣，前者稱為氣提法，後者則稱為汽提法。汽提法效率較高，氨氮去除率能達到 90% 以上，但能耗較大，一般應用在煉鋼、化肥、石油、化工等行業，所回收之氨水其濃度可達 30% 以上，如圖 2 所示。另一方面，氣提法對氨氮之去除效率雖較汽提法來得低，但能耗低、設備簡單且操作方便，在氨氮總量不高的情況下，採用氣提法比較經濟，同時可用硫酸作吸收劑吸收吹脫出來的氨氮，生成的硫酸銨則可製成化肥。雖然氣體吹脫法可以將大部分的氨氮脫除及改善碳氮比，但處理後的廢水中氨氮濃度仍可能高於放流水標準，無法直接排放，還需要作後續深度處理，也因此其往往是作為處理高濃度氨氮廢水之預處理程序，例如汽提 + 生物處理 (張士元等人，2013)，氣提 + 磷酸銨鎂沉澱法 (火藥工廠)、氣提 + 觸媒氧化法 (半導體廠) 及氣提 + 電解法 (晶圓再生廠) 等組合方法以去除廢水中之氨氮 (周珊珊，2021)。

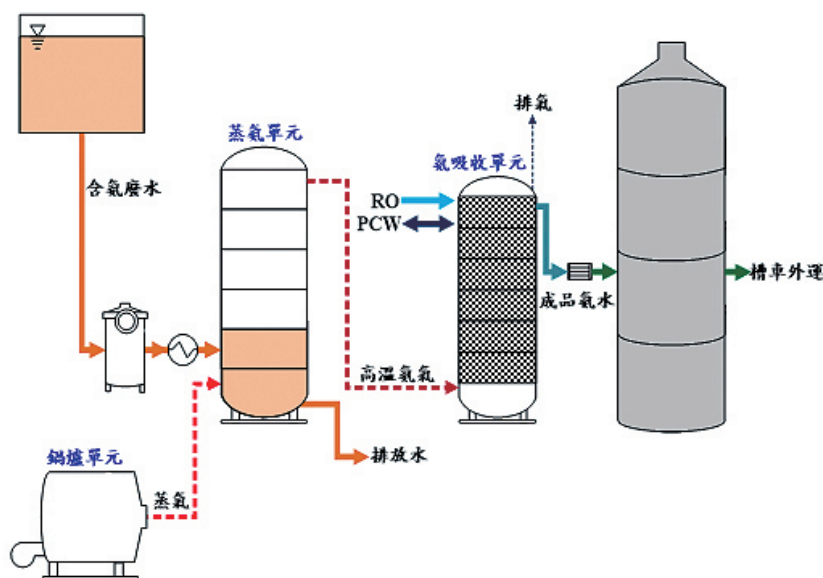


圖 2 蒸氨系統流程示意圖 (周珊珊, 2020)

1. 採高溫模式，將氨水蒸出氨氣後經由吸收器將氨氣洗滌濃縮成 25% 氨水後再利用輸出。
2. 蒸氨單元：短床模式 - 汽提蒸氨，特色為占地空間小，開關機快速 (15 min)，系統參數調整快速反應。
3. 氨吸收單元：原生於洗滌塔理念，將氣、液混合，採空間最小化，吸收最大面積方式提濃氨水。
4. 原水側，進流廢水應調整 pH > 11.5。

氣體吹脫法對氨氮之去除效果會受吹脫時間、pH 值、溫度、氨氮濃度、氣液體積比及水中鹽分之濃度等因素所影響；其中吹脫時間越長，pH 值、溫度、氨氮濃度及氣液體積比越高，均有利於氨氮之吹脫效果但均有其極限，而鹽分之濃度則對吹脫效果具有抑制效應。除了上述因素外，水力負荷、吹脫塔高度和填料佈置也都是重要的影響因素。吹脫塔一般採用逆流塔，塔高一般為 5~10 公尺 (目前若採用超重力旋轉填充床則塔高可降低至 2 公尺)，pH 值為 10.5~11.5，採用石灰調節 pH 值的成本低於使用液鹼調節 pH 值的成本，但使用石灰易產生吹脫塔內的結垢問題，水力負荷為

2.47~7.2 m³/(m².h)，氣液體積比為 2,000~5,500，氨氮去除率為 80~90%。但此法對於年平均氣溫較低的地區存在低溫條件下氣提吹脫無法正常操作和冬季吹脫塔結冰的問題，導致此法之應用受到限制。至於此法在操作上所面臨的問題則是在大規模的氨氣(汽)提過程中水垢及泡沫的產生，雖然經由安裝噴淋水系統可有效解決軟質水垢問題，可是對於硬質水垢，噴淋裝置則仍無法有效消除。另一問題則是在低溫時氨氮去除率低，吹脫的氣體會形成二次污染，而吸收液硫酸氨之不易去化亦需列入考量。

另一和氣體吹脫法類似的處理程序是採用疏水性膜材，其僅允許 NH₃ 通過再以硫酸作為吸收液反應生成硫酸銨再回收利用。此套系統目前為台積電所採用以處理設備機台所產生之高濃度氨氮廢水，所用之硫酸則來自於經處理後之製程廢硫酸，而所產生之硫酸銨則再經精煉後回收再利用。

3.3.2 流體化床磷酸氨鎂沉澱法

此法是利用 NH₄⁺ 的某些複鹽(例如 MgNH₄PO₄、MnNH₄PO₄、NiNH₄PO₄、ZnNH₄PO₄等)具有難溶於水的特性，經由選擇投加適當的離子以產生這些複鹽以將氨氮以沉澱的形式從水中分離去除；在這其中，發現最好添加 Mg²⁺ 和 PO₄³⁻ 使之與廢水中的 NH₄⁺ 生成難溶於水的複鹽沉澱物 MgNH₄PO₄·6H₂O(Magnesium Ammonium Phosphate 簡稱 MAP，俗稱鳥糞石)，再通過重力沉澱使 MAP 從廢水中分離，其反應式為：



理論上當溶液中含有 Mg²⁺、NH₄⁺ 及 PO₄³⁻ 且離子濃度積大於鳥糞石之溶解度積常數 K_{sp}(2.5 × 10⁻¹³) 時就會自發生成鳥糞石沉澱從而去除，但在實際的反應過程中還是會發生許多副反應造成干擾。

此法常用的鎂源有 MgCl₂、MgSO₄、MgO、Mg(OH)₂、MgCO₃ 等，靠近海邊地區還可考慮使用海水作為鎂源來降低成本。至於磷源常用的有 Na₂HPO₄、NaH₂PO₄、K₂HPO₄、H₃PO₄ 等。其中，MgCl₂ 和 MgSO₄ 溶解度高，反應效果好；而 MgO 除作為鎂源外還能提高溶液 pH 值，但其溶解度較低，反應過程中形成的部分鳥糞石晶

體會附著在其表面導致一部分 MgO 不能參與反應。依此，使用此法去除氨氮之效果和所添加之鎂鹽及磷酸鹽種類有密切關係，應特別注意所選用沉澱劑之溶解度及其解離出 Mg^{2+} 及 PO_4^{3-} 之能力，舉例來說，添加 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{MgCl}_2$ 要比添加 $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{MgO}$ (難溶) 或 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{MgCl}_2$ 的效果好很多，此在選擇沉澱劑時應特別注意並且一定要先經過實際測試作確認。

另一方面，由於溶液 pH 值會影響參與反應的 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 及 PO_4^{3-} 的存在形式和數量及鳥糞石的溶解度，因此 pH 值亦對氨氮之去除效果扮演重要之角色。一般認為，pH 值在 7.0~10.5 時生成鳥糞石是主要的化學反應；當廢水的 pH 值小於 7.0 時，溶液中 PO_4^{3-} 的濃度低，不利於主反應進行；而當溶液 pH 值大於 9.5 時，溶液中的銨離子將開始變成氣態氨揮發；另一方面，溶液中的 Mg^{2+} 將與 OH^- 生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉澱，此將不利於 MAP 沉澱；當 pH 值大於 11 時，體系中還將生成溶解度更低的 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉澱 ($K_{\text{sp}} = 9.8 \times 10^{-25}$)。

在沉澱劑之配比方面，由反應式 (2) 可知生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的各離子濃度的理論配比为 1 : 1 : 1，但在實際反應中由於其他共存污染物的干擾，若要達到較佳的氨氮去除率則最佳配比並不是 1 : 1 : 1。依照勒沙特列原理，氨氮的去除率會隨 Mg^{2+} 及 PO_4^{3-} 濃度的增加而升高，然後隨 Mg^{2+} 及 PO_4^{3-} 濃度的增加，氨氮去除率升高的趨勢將會減緩，但添加過量的 PO_4^{3-} 會使反應後殘磷增加，帶來新的污染。針對此點，仍須透過實驗才能獲得符合經濟效益及去除率的沉澱劑最佳配比。

在溫度效應方面，在室溫 (20~35 °C) 條件下，溫度對氨氮去除率的影響不大；低溫時 (10~20 °C) 則不利於反應的進行，氨氮去除率相對較低；而在高溫時 (35~65 °C)，溫度不僅影響反應體系的電離平衡而且沉澱物的溶解度相對較高，使氨氮的去除率相對較低，所以鳥糞石結晶反應通常在室溫下進行。

至於其他的影響因素，因在反應開始的幾分鐘內氨氮的去除就已經完成，反應時間僅會影響鳥糞石之顆粒大小，對去除率影響不大。另外，廢水中的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 CO_3^{2-} 等陰陽離子因可與 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 及 PO_4^{3-} 反應，此不但影響氨氮之去除率，還會影響反應的生成物純度及顆粒的粒徑大小。

磷酸銨鎂沉澱法的脫氮效能一般均能維持在 90% 以上，但有關藥品消耗量（鎂源價格較高）、沉澱物之去處及殘餘之氨氮及磷之去除則是採用此法必須考慮的項目。實務應用上，建議應先了解廢水中是否已含磷酸鹽，若已含磷酸鹽則採用此法不但可去除磷酸鹽亦可省下添加磷酸鹽所需之藥品費，達到以廢治廢之目的。另外，值得注意的是，化學沉澱法可以處理各種濃度的氨氮廢水，但用於低濃度氨氮廢水時（氨氮濃度小於 25 mg/L）處理費用較高。

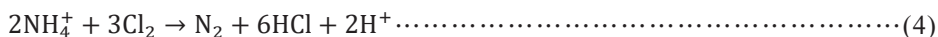
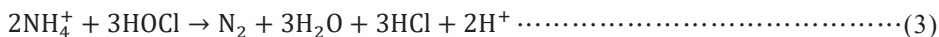
此法頗適合作為高濃度氨氮廢水之預處理程序且在上述的沉澱反應中，若經過化學沉澱後， NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的殘留濃度還是很高，則可考慮將化學沉澱放在生物處理前，則經過生物處理後 N 和 P 的含量可再進一步降低。此法若與生物處理綜合處理高濃度氨氮廢水，則曝氣池體積會比硝化－脫氮法縮小 1 倍，能耗亦可大大節省，反應也較不受溫度及有毒物質的干擾。

至於此沉澱法之產物鳥糞石，其為圓柱形晶體，無吸濕性，在空氣中可很快乾燥，沉澱過程中很少吸收有毒物質，不吸收重金屬和有機物且釋放速率緩慢，故可將其作為肥料、堆肥、花園土壤等，此將可節省土地處理費用。雖然此法具有上述優點，但要具有更實際之應用價值，則仍須尋找更廉價及更高效的沉澱劑及開發 MAP 作為肥料的價值才能達成。

3.3.3 化學氧化法

3.3.3.1 折點加氯法

折點加氯法是將氯氣或次氯酸鈉通入廢水中，當其投加量達到某一點時，水中游離氯濃度達最低而氨氮的濃度降為零，當氯氣通入量超過該點時，水中的游離氯又會增多，該點稱為折點，而該狀態下的氯化反應則稱為折點氯化。折點加氯法除氮的機制為氯氣與氮反應生成無害的氮氣，其反應方程式為：



由上式可知若有足夠之氯與水中之氨反應，則氨可從水中以氮氣之形式去除。在折點處，基本上全部氨都被氧化而全部的氯則都被還原，進一步加氯就會產生自由餘氯。此法會有少量硝酸鹽氮和 NCl_3 等副產物產生，但不會產生 N_2O 、 NO 及 NO_2 等副產物。使用此法去除氨氮時，所需的實際氯氣量和 pH 值、溫度、接觸時間及氨和氯的初始比值有密切關係。理論上，折點之 $\text{Cl}:\text{N}$ 之原子比為 3:1，質量比則為 7.6:1，但實際進行廢水處理時，因氯會與廢水中的有機物反應，故所需之 Cl/N 比應比理論值 7.6 高些，通常為 10。在氯系氧化劑之使用方面，由於 NaOCl 溶液一般含有 10% 以上的有效氯且使用時較安全無氯氣外洩的危險，故以 NaOCl 較為合適，惟需注意的是次氯酸鈉溶液在儲存期間的含氯量會逐漸衰減，因此無法保存過久。

此外，在氧化過程中，反應槽內水體之 pH 值宜保持在 4 左右，以獲致較高的反應效果而反應時間則控制在 30~60 分鐘以提供足夠的氧化還原反應時間。至於次氯酸鈉的加藥量則可用氧化還原電位計來控制，以便能添加適量之 NaOCl 來完全氧化水體中之氨氮使其形成氮氣而去除。此外，為降低水中的殘餘氯對承受水體所造成的毒性影響，在排放前一般需用 SO_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 或活性碳等還原劑以除氯；其中活性碳吸附移除殘餘氯的同時還具有去除其他有機物的特點。

折點加氯法在氨氮濃度較低時為自廢水中去氨之有效工具，其最大的優點是經由合理控制氯的添加量，可以把氨氮完全去除（一般而言其處理率可達 90~100%）且反應速度快，處理效果穩定，亦不受水溫影響。另其亦具有殺菌作用，同時還可使一部分有機物氧化分解為無機物，進而降低 COD。至於此法的缺點則是所需化學藥劑多（氯氣、 NaOH 等等），成本高（約為氣提脫氮法的 2~3 倍），程序中需精準控制 pH 值以避免產生副產物氯胺和氯代有機物（例如可能在水質差的廢水中產生三氯甲烷致癌物）造成二次污染，液氯的安全使用和貯存要求高，同時因反應過程中酸的產生，需添加液鹼中和，增加了水中總溶解性固體的含量，進而降低 SS 之去除率，所以此方法目前只適用於處理低濃度氨氮廢水或作為高濃度氨氮廢水之深度處理程序。

3.3.3.2 催化氧化型活性炭 (COAC)

此種新型的氧化型觸媒是以椰殼活性炭為基材，於其上覆蓋多種有效貴重金屬成份製成，顆粒大小約 20~40 目，比表面積則可達 $880 \text{ m}^2/\text{g}$ 。所採用之貴重金屬具有多種氧化數（例如釕之氧化數為 +3 ~ +8），因此當其位於高氧化數時其可作為氧化劑以便將有機物（氨氮）氧化成 H_2O 及 CO_2 (N_2)，本身則被還原成氧化數較低之狀態，此時若將其溫和再生成原來之氧化數則可回收再利用，因此其是可重複使用的，此在實務應用上較符合經濟效益。學理上，此一負載型觸媒在去除污染物時，活性炭表面之吸附作用除可吸附去除部份有機污染物外，其亦具有將污染物吸附濃縮後再由貴重金屬進行氧化分解之功能，此將可加速反應之進行。另一方面，由於貴重金屬具有多種氧化數，因此亦可經由調降其氧化數而將其作為還原型觸媒（即本身被氧化），於此情況下，其將可用於還原水中之硝酸鹽氮成氨氮（周珊珊，2020；2021；2022；2023）。

值得注意的是，此一新型觸媒不但可用於處理廢水中之氨氮，亦可選擇性氧化氣相中之 NH_3 成 N_2 及 H_2O （即 $4\text{NH}_3+3\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{N}_2+6\text{H}_2\text{O}$ ，去除率可達 99%）。汽提 + COAC 觸媒氧化系統包含了 2 組氨氮處理單元，雖然其建置成本及操作費用仍有待進一步最佳化以提高其實務應用性，但因其解決了氣提吹脫後氨氮的去處問題，因此仍值得期待。實際應用上，觸媒表面貴重金屬塗佈之再現性，水中其他污染物之干擾（例如雙氧水）、觸媒之毒化問題及各操作參數之優化是必須解決之問題（環境部，2025）。

3.3.3.3 新氧水

氯在水中共有 3 種型態，分別是氯氣、次氯酸及次氯酸根離子，這 3 種型態的氯化物又會隨著 pH 值的變化而互相變換。在 pH 5 時，其完全以次氯酸的形態存在，隨著 pH 值的漸增會開始生成少量次氯酸根離子；換句話說，形成次氯酸與次氯酸根離子共存而以次氯酸佔優勢的一種狀態；直到 pH 7.5，次氯酸根離子的含量開始超越次氯酸；到了 pH 10 以上就會完全是次氯酸根離子了。另一方面，如果將 pH 從 5 開

始降低，則當 pH 低於 4 以下時，次氯酸就會少部分轉變成氯氣存在；而當 pH 低於 2 以下時，就會有大量的氯氣產生。所謂的新氧水其主成份就是弱酸性的次氯酸水溶液，其特色就是生成設備可直接設置於廢水處理系統中，於生成新氧水的同時，即以混合或加藥方式來執行廢水處理，達到以更少的藥劑總量即可更高效能的進行氨氮處理、分解有機物、除臭、或殺菌等功效 (周珊珊，2021)。

表 5 所示為新氧水對實廠廢水處理效能之測試，由測試結果可知，新氧水對氨氮及 COD 之去除率均高於次氯酸鈉且殘留之總餘氯濃度亦遠低於次氯酸鈉，意謂新氧水作為氧化劑具有相當不錯之實際應用潛能。

表 5 新氧水處理某半導體廠氨氮廢水之效能測試 (周珊珊，2021)

項目	原水	新氧水 500 mg/L	NaOCl 500 mg/L
pH	7.04	5.9	8.9
NH ₄ -N (mg/L)	120	10	22
COD (mg/L)	740	370	630
總餘氯 (mg/L)	-	3.5	115

3.3.3.4 電解氧化法

電化學氧化法去除氨氮是指在電場的作用下以溶液中產生的 OH 或 ClO⁻ 作為氧化劑將氨氮氧化為氮氣的過程。此法可使氨氮去除率達 100%，同時去除大部分 COD，反應時程短，但目前大都屬於實驗室規模且由於耗電，處理成本較高。

3.3.4 陽離子交換 (吸附) 法

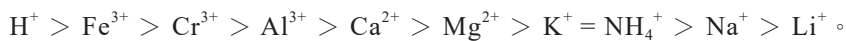
吸附法去除氨氮主要是依靠吸附劑與氨氮發生物理吸附、化學吸附和陽離子交換 3 種機制使氨氮吸附在吸附劑上以達到去除的目的；其中，陽離子交換可以看成是一種特殊的吸附過程，其主要是吸附水中的陽離子態物質，並進行等量陽離子交換。常用的吸附材料則有活性碳、蛭石、蒙特石、沸石、廢棄物吸附劑、陽離子交換樹脂等。

蛭石、蒙脫石及沸石均屬於黏土礦物，其離子交換性能取決自身的特殊結構，這些材料具有來源廣和價廉易得的特點，另外，透過改質程序亦能提高其陽離子交換量和吸附效果。陽離子交換樹脂則由於其內的活性基團成酸性，因此它能與溶液中的陽離子進行交換。在常溫及低濃度溶液中，陽離子交換樹脂對溶液中陽離子的選擇交換性大致有如下之排序：

強酸性陽離子交換樹脂的選擇順序：



弱酸性陽離子交換樹脂的選擇順序則為：



由上述之排序可知陽離子之交換能力往往和其所帶電荷成正比，銨離子因僅帶正一價，故交換能力之排序相當後面，此也意謂在實際應用時，若廢水中存在有其他高價陽離子，則銨離子之去除將會受到相當大之干擾。另一方面，水中存在的有機污染物也會與 NH_4^+ 在吸附劑表面形成競爭吸附。由於有機污染物的分子一般比較大，停留聚集在吸附劑的表面時，不僅會減少吸附 NH_4^+ 的比表面積，還會使 NH_4^+ 與吸附劑隔離，進而減少兩者進行離子交換的機會。若是有機物被吸附進吸附劑的孔道內則更會堵塞孔道或增加孔道阻力，使水中的氨氮較難進入吸附劑的孔道內，造成吸附量的降低。

值得注意的是，對於以陽離子交換程序去除溶液中之 NH_4^+ 而言，pH 值扮演著重要的決定因子。如前所述，水溶液的 pH 值對氨氮的存在型態有相當大的影響，當 pH 值大於 11.5 時，水中主要存在的是 NH_3 ，此將有利於物理及化學吸附能力較強的吸附劑對其進行吸附，但隨 pH 值的降低， NH_3 的含量不斷減少，當 pH 值小於 7.5 時，廢水中主要存在的是 NH_4^+ ，此將有利於離子交換能力較強的吸附劑與其發生陽離子交換反應。如圖 3 所示，鈦酸鹽奈米管對銨離子之吸附量和 pH 值有密切關係；在 pH 值較低時 (2~4)， H^+ 的濃度較高，會與 NH_4^+ 競爭交換位置導致去除率較低；在 pH 4~8 之間吸附量幾乎維持恆定；但在 pH 超過 8 以後，由於 NH_3 濃度漸增，吸附量將快速下降，意謂鈦酸鹽奈米管對銨離子之吸附是屬於陽離子交換機制 (Lee et al., 2014)。

陽離子交換樹脂採購成本較一般吸附劑而言相對較高，但其機械強度、熱穩定性及吸附再生效果較穩定且離子交換樹脂經改質後還可增強其選擇性交換能力。基本上，陽離子交換樹脂的優點是去除效率高，設備簡單，易於操作，水溫影響小，通常對濃度 10~50 mg/L 的氨氮廢水其去除率可達 93~97%，出水氨氮之濃度在 1~3 mg/L。但其缺點則是再生時所產生的高濃度廢液之處理問題及操作維護費高。另外，對於高濃度氨氮廢水之處理，其缺點則是會造成樹脂再生頻繁，進而導致操作困難。

綜合而言，吸附法適用於中小型企業處理中等以下濃度之氨氮廢水，也可以作為其他廢水處理方法的輔助措施，例如在生物處理法中當微生物中毒時即可採用吸附法來代替，或在冬季無法使用氣提吹脫法去除氨氮時，也可考慮使用吸附法來代替。若將吸附法與生物處理法相結合使用，利用微生物再生循環協同處理氨氮廢水，則不僅出水水質好，而且能大大降低操作成本，是一值得發展的處理技術。

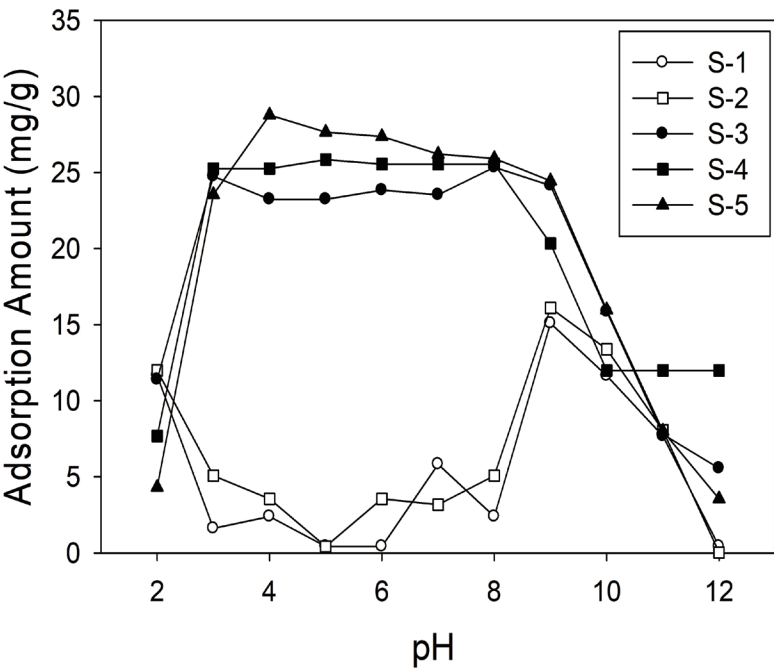


圖 3 溶液 pH 值對鈦酸鹽奈米管吸附銨離子之影響

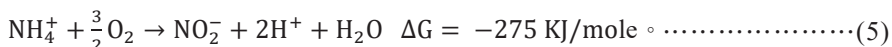
實驗條件：30 °C 及銨離子初始濃度 100 mg/L

3.3.5 生物處理法

由圖 1 氮的循環可知使用生物處理脫氮時需經過硝化及脫氮 2 個階段才能將氨氮氧化還原成氮氣而去除之，以下即先針對此 2 階段之作用原理作一些說明 (張士元，2013)。

1. 硝化反應

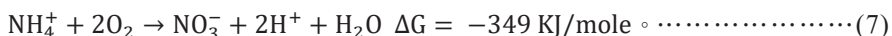
硝化反應是將氨氮轉化成硝酸鹽氮的過程，可分為亞硝化反應及硝酸化反應。亞硝化反應是在好氧狀態下，由統稱為氨氧化菌的自營菌屬以氨為基質 (電子供應者)，以無機碳化合物 (如 CO_3 、 CO_2 、 HCO_3^-) 為碳源，在氧 (電子接受者) 充足供應情況下將氨轉換為亞硝酸，從中獲得能量進而生長繁殖，反應式如下所示：



硝酸化反應則是由亞硝酸氧化菌以亞硝酸鹽為基質，在氧及無機碳化合物的存在下，將亞硝酸鹽氮再氧化為硝酸鹽氮，反應式如下所示：



總反應可寫為：



由自由能 $\Delta G < 0$ 表示反應可以自發進行，亞硝酸菌及硝酸菌獲取能量以合成細胞，整個硝化反應速率決定於氨氮轉化為亞硝酸鹽的速率。另由上列反應式可知氧化 1 kg 之氨氮總理論需氧量為 4.57 kg 且會消耗 7.14 kg 之鹼度 (以 CaCO_3 計)。綜合上述可知，硝化反應進行時將消耗廢水中鹼度、溶氧及產生 H^+ 離子，因此需要補充鹼劑以調整 pH 至適當值。另硝化作用所得的反應熱，僅有少部份 (約 5 ~ 14 %) 被硝化細菌所利用，其餘以熱量方式散發至水體中。

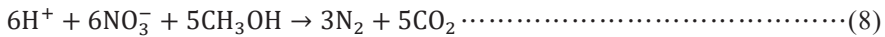
至於影響生物硝化反應的因素則有：(1) 溫度：適合之溫度約為 25~35 °C 左右。(2) pH 值：硝化反應最適 pH 在 7.5 ~ 8.0 之間，過低或過高之 pH 值均會抑制硝化反應之進行。由於硝化作用會消耗鹼度導致 pH 值降低，因此需要謹慎監控曝氣槽內的 pH 值，提供必要的鹼度以維持適當之 pH 值。(3) 溶氧：經驗上曝氣槽中 DO

最佳應控制在 2.5~3.5 mg/L，使其有充足的氧，又不至於過高浪費動能。(4) 停留時間：需要較長的水力停留時間或污泥停留時間，來促使硝化反應發生。(5) 有機負荷：欲進行有效的硝化作用，C/N 比應小於 0.25 硝化菌才會成為優勢菌種使硝化作用更明顯。(6) 氨氮的濃度：不論硝化菌株容忍氨氮的濃度為何，突增的氨負荷會使生物系統暫時喪失部份的硝化能力，故保持系統進料的穩定是相當重要的。

2. 脫氮反應理論

脫氮反應或稱反硝化反應，是硝酸鹽或亞硝酸鹽還原為氮氣的反應。在此過程中，脫氮菌以有機物為電子供應者及以硝酸鹽為電子接受者，在缺氧的情況下將硝酸鹽氮還原成氮氣。脫氮作用的過程包含幾個步驟： $\text{NO}_3(+5) \rightarrow \text{NO}_2(+3) \rightarrow \text{NO}(+2) \rightarrow \text{N}_2\text{O}(+1) \rightarrow \text{N}_2(0)$ ，所涉及到的氣態氮化物有 NO、 N_2O 及 N_2 ；其中由於 NO 對微生物的毒性較大，因此以 NO 為最終產物的細菌較難存活，故通常把能夠還原硝酸鹽及亞硝酸鹽產生 N_2O 及 N_2 的細菌統稱為脫氮菌。

生物總脫氮反應過程可以下列反應式表示：



由上式可知脫氮反應過程需要補充碳源，理論上每 Kg 硝酸鹽氮需要 2.86 Kg COD，同時亦會產生 3.57 kg 之鹼度（以 CaCO_3 計）。綜合上述可知，脫氮反應進行時將增加廢水的鹼度及消耗 H^+ 離子，造成 pH 值的上升。

至於影響生物脫氮反應的因素則有：(1) 溫度：溫度越高，生物脫氮速率也越高，在 30~35 °C 時最佳；當低於 15 °C 時，脫氮速率將明顯降低，當低至 5 °C 時，將趨於停止。(2) pH 值：最適合的 pH 值範圍是 7.0~7.5，當 pH 值高於 8 或者低於 6 時，脫氮速率將明顯下降。(3) 外加碳源：廢水的 C/N 比值是影響生物脫氮效果的重要因素，有機物越充分，反應速度越快；一般希望 $\text{BOD}/\text{TKN} = 3\sim 4$ ，當廢水中的 BOD/TKN 小於 3 時，需要外加碳源才能達到理想的脫氮目的。(4) 溶氧：脫氮菌以在厭氧、好氧交替環境中生活為宜，溶解氧應控制在 0.5 mg/L 以下。

傳統生物脫氮程序有下列幾種方式：三段生物脫氮程序、缺氧 好氧 (Anoxic/Oxic, A/O) 程序、厭氧 缺氧 好氧 (Anaerobic/Anoxic/Oxic, A2/O) 程序及批次式

生物反應程序 (Sequencing Batch Reactor, SBR)。三段生物脫氮程序的處理單元分為曝氣槽、硝化槽及脫氮槽 3 個獨立槽體，此程序可以得到非常好的脫氮及有機物去除效率，但缺點是建造費及操作成本高。A/O 程序如圖 4 所示，透過在缺氧和好氧的不同環境下，利用不同的微生物作用將水中的氨氮轉化為氮氣逸出，達到脫氮的目的，同時也可配合除磷的生物過程。A2/O 程序是一種多步驟的生物處理方法，透過厭氧、缺氧和好氧等不同處理單元，分階段移除廢水中的氨氮、有機氮和硝酸鹽氮，常被用來處理家庭污水，是最典型最簡單的脫氮除磷程序。SBR 程序則是在同一個槽內依次進行進水、反應、沉澱、排水排泥及靜置的動作，如圖 5 所示，其可分別在有氧的情況下進行硝化及在缺氧、厭氧的情況下進行脫氮及除磷。實務應用上目前較常見的仍是 A/O 程序，以下即對此程序略作說明。

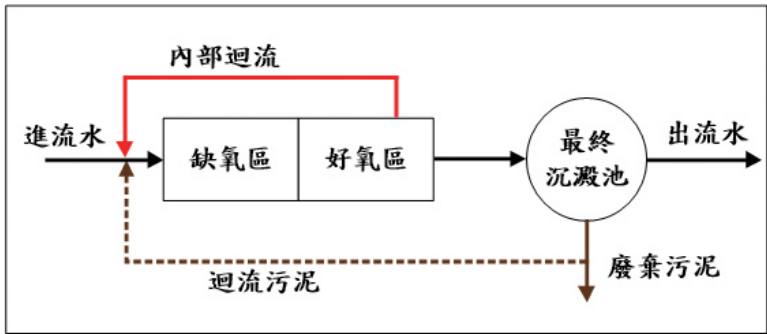


圖 4 傳統脫氮技術：缺氧 - 好氧（Anoxic/Oxic, A/O）程序 (蔣世安及林高洲，2012)

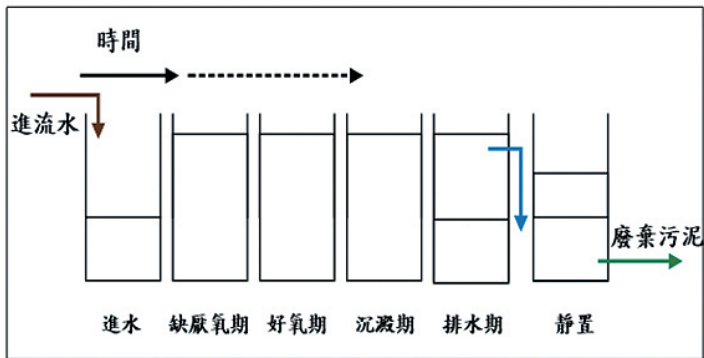


圖 5 傳統脫氮技術：SBR 處理程序示意圖 (蔣世安及林高洲，2012)

A/O 法生物去除氨氮的原理為廢水中的氨氮在 O 段充氧的條件下被硝化菌硝化為硝酸鹽氮，再將大量硝酸鹽氮迴流至 A 段，在缺氧的條件下，通過兼性厭氧脫氮菌作用，以廢水中有機物作為電子供體，硝酸鹽氮作為電子受體，使硝酸鹽氮被還原為無污染的氮氣，逸入大氣從而達到最終脫氮的目的，如圖 1 及圖 4 所示。

A/O 技術將前段缺氧段和後段好氧段串聯在一起，A 段 DO 不大於 0.2 mg/L，O 段 DO 為 2~4 mg/L。在 A 段異營菌將污水中的澱粉、纖維、碳水化合物等懸浮污染物和可溶性有機物水解為有機酸，使大分子有機物分解為小分子有機物，不溶性的有機物轉化成可溶性有機物，當這些經缺氧水解的產物進入 O 段進行好氧處理時，可提高有機物的生物可降解性及溶氧的效率。另在 A 段，異營菌亦會將蛋白質、脂肪等污染物進行氨化游離出氨氮，在充足供氧條件下，O 段自營菌的硝化作用將氨氮氧化為 NO_3^- ，通過迴流控制返回至 A 池，在缺氧條件下，異營菌的脫氮作用將 NO_3^- 還原為氮氣，完成 C、N、O 在生態中的循環。A/O 法雖具有操作簡單及處理效率高等優點，但仍存在有下列問題：

1. 由於沒有獨立的污泥迴流系統，因此很難培養出具獨特功能的污泥，生物難降解物質的降解率較低；
2. 若要提高脫氮效率，必須加大內循環比，因而加大操作費用。另外，內循環液來自曝氣池，含有一定的溶氧，使 A 段難以保持理想的缺氧狀態，影響脫氮效果，脫氮率很難達到 90%；
3. 生物處理技術之應用主要受限於空間，近來亦有朝向提升生物處理效能之相關改進流程，例如加入具高比表面積之填充濾料於槽體（如生物球）或是使用 MBR，目的都在於提高每單位之微生物含量，進而提高生物處理效率，減少反應槽體積，最終節省占地面積及空間。然而所增加的設備或耗材亦將同步提高建置費及操作成本，使得此法之經濟效益有所降低。

綜合而言，物理化學法處理氨氮廢水具有操作費用高、技術成熟度相對較低、回收再利用產物之去處有待克服（如氣提法所得之硫酸銨或氯化銨產品）等缺點，但因使用生物處理法處理氨氮廢水時，具有占地面積大、操作參數複雜、溫度影響效能及

易受毒性物質影響等缺點，因此物理化學法仍有其應用潛能，但如何加速研發以提高其技術成熟度及對其回收產物提出適當之去化措施，則是待解決之議題。

國內業界大都以生物處理法來去除氨氮及硝酸鹽氮，很少見到有業者會採用物理化學法來去除氨氮。圖 6 所示之實際處理案例共採用了 3 種物理化學方法來處理氨氮，分別是氣提吹脫法、磷酸銨鎂結晶法及陽離子交換樹脂法，可算是一個相當特殊的處理案例。處理過程首先添加液鹼提高氨氮廢水之 pH 值以使氨氮大都以 NH_3 的狀態存在，接著進入氣提塔將水中 NH_3 吹脫出來並使用硫酸作為吸收液將 NH_3 吸收下來產生硫酸氨水溶液以回收再利用。吹脫完之氨氮廢水接著進入化學混凝單元，經由添加氯化鎂及磷酸鈉沉澱劑並經由添加 NaOH 調整 pH 至最適值以和水中之 NH_4^+ 產生磷酸氨鎂沉澱，同時添加 polymer 以利沉澱物之沉降及分離。經由上述二步驟，已將水中大部分之 NH_3 及 NH_4^+ 去除，殘餘之氨氮則經由先添加硫酸進行中和反應及降低 pH 值，一方面使氨氮盡量以 NH_4^+ 的狀態存在以利後續進行陽離子交換程序而使氨氮符合放流水標準，另一方面則是於此進行中和反應，產生鹽類及水，並於後續進行過濾降低水中 SS 對陽離子交換樹脂之堵塞危害，同使亦可降低水中其他離子污染物對 NH_4^+ 之離子交換程序所造成之干擾。此案例明確說明了使用物理化學方法處理高濃度氨氮廢水的流程，首先使用氣提法及磷酸氨鎂沉澱法進行預處理以去除水中大部分之氨氮並回收再利用相關產品後，殘餘之少量氨氮再使用陽離子交換樹脂進行深度處理以符合氨氮放流水標準，此也意調針對高濃度氨氮廢水使用單一種氨氮處理方法並不符合經濟效益，運用多種處理技術之聯用應是較明智之選擇。

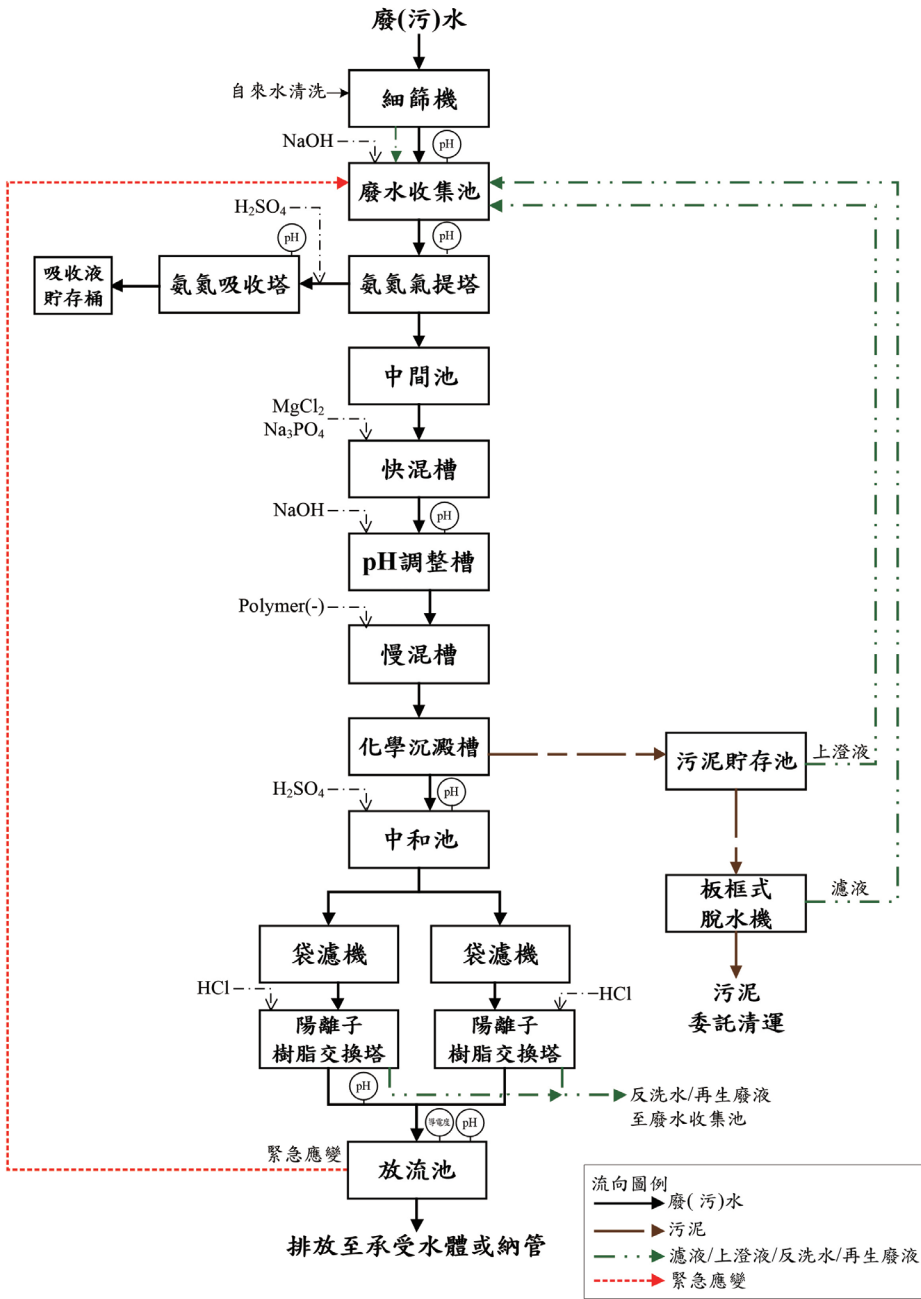


圖 6 氨氮實際處理案例

四、氨氮廢水處理技術選用通則

如上所述，氨氮廢水有相當多種處理技術可供選擇，在實際的應用中，何種方法較合適，仍須取決於廢水的特性、要求達到的處理目標、經濟性及處理後出水的最終處置方法等作相關考量。以下僅對選用通則作一些初步的建議以供相關業者參考(張冠甫等人，2016)：

1. 應先透過原料盤存管理、環境稽核、產品配方改變、製程中回收再利用及高濃度廢液委外處理等方式進行氨氮之源頭減量，降低氨氮進入廢水的濃度。
2. 製程端產出之高濃度、低水量之氨氮廢水(液)可優先以氣提吹脫法處理為主，除可降低後續處理程序之氨氮濃度外，也可回收高品質之含氮產品以降低原物料使用量。另亦可視廢水之 pH 值及其中是否含磷酸鹽來決定是否採用磷酸銨鎂沉澱法而達到以廢治廢之目的。處理後之氨氮廢水再以其他低濃度氨氮廢水處理技術作後續深度處理。
3. 各股廢水匯流後之低濃度、大水量之含氨氮綜合廢水，可視場地充足與否及是否含足夠有機物濃度等擬定處理程序：
 - (1) 場地不足，建議以化學氧化處理程序作為首要評估對象。
 - (2) 場地充足且含有機物濃度，建議可以傳統生物硝化 / 脫氮程序因應，考量重點為有機物濃度是否足夠進行生物脫氮反應。
 - (3) 場地充足，但有機物濃度不足，則可以考量生物自營性脫氮程序，如厭氧氨氧化技術等。
4. 最後，一個有趣且常見的問題是園區內廠商(部分為倉儲業)其生活污水中氨氮濃度超過產業園區聯合污水廠之納管標準而場地空間又不足以加大生物處理程序之情況。之所以會造成生活污水氨氮濃度超標的原因是由於部分工廠辦公室只將廁所馬桶排水接管到建築物廢污水處理設施，其餘清洗水則排放到雨水排水溝，使得建築物廢污水處理設施如同化糞池操作使用。建築物污水處理設施的設計是可將建築物內所有排放之污水(含廁所、衛浴、廚房、洗滌等)全部收集處理者，其與一小型的污水處理廠幾乎無異，而化糞池則僅具處理一般廁所排放糞尿功能之設施，主要的功能是處理 BOD 及 SS，因而導致排放水氨氮濃度較高，無法符合產業園區內事業污水之氨氮納管標準。

為解決建築物廢污水處理設施排放水氨氮過高之問題，或許可考慮下列方法：

- (1) 將各式生活清洗污水接管到建築物廢(污)水處理設施用，以降低排放水之氨氮濃度。
- (2) 建築物廢(污)水處理設施之接觸曝氣槽單元加大曝氣機容量，使槽內溶氧濃度大於 2 mg/L，以達到生物硝化反應。或是經由加入具高比表面積之接觸濾材(例如生物球)以增加生物膜量及提高處理效率。
- (3) 建築物廢(污)水處理設施之消毒放流槽單元加大次氯酸鈉之劑量，以達折點加氯氧化去除氨氮之效果。
- (4) 建築物廢(污)水處理設施之放流水再以新增之接觸曝氣槽進行硝化處理。

參考文獻

- 周珊珊 (2020)，難降解 COD 與氨氮 / 硝酸鹽氮廢水處理技術與案例介紹，桃園市大學校院產業環保技術服務團講習會。
- 周珊珊 (2021)，高濃度廢水處理技術與案例介紹，桃園市大學校院產業環保技術服務團講習會。
- 周珊珊 (2022)，氨氮與硝酸鹽氮廢水處理技術與應用案例，桃園市大學校院產業環保技術服務團講習會。
- 周珊珊 (2023)，含氮廢污水綠色處理系統與應用案例，桃園市大學校院產業環保技術服務團講習會。
- 張士元、涂茂園、蕭愛芬、曹蓮桂 (2013)，煉油廠放流水氨氮及硝酸鹽氮改善實例，石油季刊，第 49 卷第 2 期，p 91-110。
- 張冠甫、徐樹剛、黃盟舜、李茂松、張王冠 (2016)，氨氮廢水處理與回收技術及案例，產業綠色技術與法規資訊電子報，120 期，p 1-12。

蔣世安、林高洲(2012)，工業廢水除氮處理方式探討及經驗分享，中華技術專題報導，第 96 期，P 56-67。

陳見財(2022)，氨氮廢水處理與回收技術推廣及輔導策略研析，經濟部工業局產業綠色技術提升計畫，財團法人台灣產業服務基金會。

環境部，新興廢水處理技術應用平台，<https://ewtti.moenv.gov.tw/EWTTI>，2025。

Lee C.K., Lai L.H., Liu S.S., Huang F.C. and Chao H.P. (2014), Application of titanate nanotubes for ammonium adsorptive removal from aqueous solutions, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 45(6): p 2950-2956.

水處理與資源再利用

水污染防治措施計畫及排放許可證書面 審查常見問題及建議

李中光*

摘 要

根據水污染防治法第 13 條之規定，事業於設立或變更前，應先檢具水污染防治措施計畫（以下簡稱水措計畫）及相關文件，送直轄市、縣（市）主管機關或中央主管機關委託之機關審查核准。水措計畫及許可證申請的共通性注意事項首重資料之正確性、完整性、一致性及合理性，而資料之正確性及完整性的達成除了應依撰寫格式說明詳細填寫並注意數據之單位及有效位數外，更重要的是，資料必須和操作實際狀況相一致才能克竟全功。至於文件前後之一致性則有賴詳細之校稿，而合理性則端賴撰寫者對污染物之去除機制具完整之專業知識，及對操作具豐富之實務經驗方能達成。

一般來說，由於水措計畫及許可證之申請往往是由申請廠商、代辦廠商及簽證技師共同完成，若代辦廠商缺乏足夠之專業技能及實務經驗，對製程了解度不足及對廢水特性認識有限，若再加上技師過於相信業主、操作單位及代辦，導致文件及現場查核過程不完整，未能於查核中發現問題，此時若申請廠商抱著花錢委辦而未詳細查核代辦所提文件資料之正確性，則所提出之申請文件往往會出現處理流程不符合學理機制、文件前後不一致，甚且和操作現況多所不合之狀況，進而衍生出相關爭議，甚至違法受罰。本文即在討論水措計畫及許可證書面審查常見問題並提出相關建議，期望能對廠商在申請水措計畫及許可證時能有所助益，提高文件品質。

52 水污染防治措施計畫及排放許可證書面審查常見問題及建議

【關鍵字】水污染防治措施計畫、書面審查、正確性、完整性、一致性、合理性

* 中原大學環境工程系

兼任教授

一、前言

根據水污染防治法第 13 條之規定，事業於設立或變更前，應先檢具水措計畫及相關文件，送直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關委託之機關審查核准(環境部，2018)；水污染防治措施是指下列各項防治水污染之方法：(1)設置廢(污)水處理設施，(2)設置廢(污)水前處理設施，(3)納入污水下水道系統，(4)土壤處理，(5)委託處理，(6)設置管線排放於海洋，(7)受託處理，(8)貯留廢(污)水，(9)稀釋廢(污)水，(10)回收使用廢(污)水及(11)逕流廢水污染削減措施(環境部，2024(1))。至於檢具水措計畫或許可證之程序階段則可分為：(1)設立階段：指辦理水措計畫之規劃、設計，至水措計畫經審查核准之期間，(2)營運前階段：指依審查核准之水措計畫辦理設施之建造、裝置，至申請核發許可證(文件)之期間，(3)營運階段：指取得許可證(文件)後，開始營運產生廢(污)水之期間(環境部，2024(1))。另依據水措計畫及許可證申請審查辦法之規定，有下列情形之一者，應邀請專家學者協助審查：(1)廢(污)水全量回收使用。(2)稀釋廢(污)水。(3)土壤處理。(4)以餘裕量受託處理不同業別之廢(污)水。(5)廢棄物掩埋場返送滲出水至掩埋面。(6)海洋放流管線之設置或變更。(7)申請日前 5 年內曾經主管機關依本法第 73 條第 1 項第 2 款至第 7 款認定情節重大裁處停工(業)紀錄者。(8)申請日前 5 年內有繞流排放違規紀錄者。(9)違反本法規定，經主管機關撤銷、廢止水措計畫核准文件、許可證(文件)後之重新申請者。(10)其他經核發機關認有必要時(環境部，2024(1))。本文即在討論水措計畫及許可證書面審查常見問題並提出相關建議，期望能對廠商在申請水措計畫及許可證時能有所助益，提高申請文件品質，使申請文件內容能真實反映現場之操作現況。

二、水措計畫及許可證申請審查流程及重點

一般來說，水措計畫及許可證申請審查流程可分為程序審查及實體審查 2 階段；其中，程序審查主要是環保局承辦人員在接獲申請文件時所作之初步審視，以確認申請文件之完整性，若有遺漏，可通知申請者及時補正，以進行後續之實體審查。實體審查則包含書面審查及現場勘查；書面審查主要是就申請文件所填資料之適法性及合

理性作一審查；而現場勘查之重點則在比對申請文件所列內容和現場操作現況之一致性。詳細之審查內容如下所述。

2.1 程序審查重點

主要是在審查申請文件之完整性，包含申請應檢附之填寫表格種類及相關文件之完整性，包含確認申請該項許可所應填寫之表格種類完整性、各類附件是否依規定提出、各類佐證證明文件是否齊全，及申請所填寫之表格資料內容之完整性（查核需簽章之資料是否已簽章且其所蓋之印信及戳記是否為正本，確認各類申請表格中各欄位資料是否填寫完整）。

此部份審查常見之缺點為：(1) 申請類別錯誤，例如應先檢具水措計畫之新設事業逕行申請排放地面水體許可證或簡易排放許可或貯留許可，(2) 證件影本未完整檢附，(3) 申請表格未完整檢附，(4) 工程計畫書未完整檢附，(5) 必要之相片未完整檢附，(6) 用印簽名欄位空白或不完整或技師簽證不完整，(7) 申請變更，但變更內容勾選錯誤，例如申請「基本資料變更」或「一般性功能變更」，但申請內容卻是「應事先取得核准之功能性變更」。

2.2 實體審查重點：書面審查

2.2.1 適法性

主要在確認申請文件所填內容是否和相關之法律規定相一致，或是主管機關指定應檢附之文件或法律規定應設置之設施是否有所遺漏，包含：

1. 排放水質狀況是否符合管制標準。
2. 依規定檢附主管機關指定之事項及文件：
 - (1) 依規定取得工廠登記證或公司執照或營利事業登記證或其他證書之證明文件影本。
 - (2) 是否依規定設置放流口告示牌、專用獨立電表、水量計測設施或計量方式。

- (3) 廢(污)水處理設施所產生之污泥是否妥善處置。
- (4) 已完成環境影響評估報告之主管機關核准公文或報告書(需環境影響評估者檢附)。
- (5) 是否依規定檢附中央主管機關指定之事項及文件。

2.2.2 合理性

主要是在審查所填資料之合理性及一致性，包含：

1. 文件資料明顯不合理處之判定

- (1) 各項表格填寫資料之一致性。
- (2) 各項資料內容之合理性，包含事業類別、製程流程、製程原物料之一致性與合理性，「原廢水水量、污染量、污染特性」與「製程用水量、製程流程、製程原物料特性與用量」之一致性與合理性。

2. 處理流程、引用參數及數據資料合理性之判定

- (1) 是否符合水量平衡關係。
- (2) 廢水處理流程、質量平衡引用參數及數據資料之合理性。
- (3) 處理設施功能計算、單元設計及操作參數是否合乎學理機制。

2.3 實體審查重點：現場勘查

1. 了解操作現況

了解廢水廠之操作及管理現況是現勘一個非常重要的目的，一個廢水廠如果未正常操作及管理雜亂無章，就很難期待其放流水會達到排放標準。針對此點，可檢視及比對其廢水廠操作紀錄、定期申報紀錄文件、污泥清運紀錄及現場估算量，並輔以現場製程原物料使用紀錄，即可瞭解該廠平日操作情形。

另外，針對廢水廠之操作紀錄，應詳細查核資料之完整性及正確性(包含用電量、水量、加藥量及各操作參數之數值及單位)及是否與申請文件相符;更重要的是，

是否與操作現況相符合(例如現場未進行加藥,但操作記錄內卻有加藥記錄),同時了解處理設施操作維護情形及處理廠之公共安全情況。

2. 查核現場製程與污染特性之連結

查核現場製程原物料類型(含各類製程藥劑)及用量,以了解廢水污染特性是否與製程原物料特性相符,並據以查核是否漏列污染物。

3. 用水及用電之查核

針對用水量,若廠商使用自來水則可由自來水水費單來估算用水量;若使用地下水則以水權證明或抽水水表估算(水權內容含抽水量與抽水時間)或以管徑及抽水時間估算;若有回收廢水則以回收水表紀錄估算水量,最後將該廠用水量與廢水排放量互相對照,以瞭解水量平衡情形是否合理。另亦應注意總用水量之使用分布情形,包含製程廢水量、損耗或逸散量、產品含水量及生活用水量等以輔助查核水量平衡之正確性。於此過程中亦可查核廠商是否有抽取使用未具水權之地下水。針對用電量,則以現場所用之機電設備馬力估算之,並應注意用電量之登錄是否漏乘倍率導致登錄值遠低於實際用電量。

4. 廢水處理流程/設施與申請文件之一致性查核

主要查核內容為申請文件處理流程及單元設施與現場之一致性及合理性,包含原廢水收集管線及流向之一致性、處理單元名稱及數量之一致性、處理單元相對位置之一致性、各槽體尺寸及設施配置方式之一致性及合理性、廢(污)水流向之一致性及合理性、污泥流向之一致性及合理性、各處理單元及連結管線標示完整性及合理性、逕流廢水污染削減措施及流向之一致性及合理性、放流口位置及設施之一致性及合理性、廢水排放量及用電量之一致性、污泥量及清運頻率與處理量之一致性等項目。

5. 廢水處理設施單元之功能性查核

主要是透過對下列事項進行查核,以了解各處理單元及流程之有效性及可能之缺點,包含廢水收集之完整性、調勻及貯留設施之緩衝功能、水質及水量、處理單元之污染物去除率、處理流程之合理性、處理單元尺寸及停留時間、控制參數類型

及範圍、藥品種類及加藥量、機具設施及計量設施、污泥處理設施功能及污泥量合理性等。

6. 污泥量與清除處理方式 / 頻率查核

主要查核內容包含清除及處理合約書 (處理廠商是否具相關資格及合約期限是否過期)、清運紀錄 (數量 / 頻率)、污泥量及含水量與現場污泥處理設施處理功能 (污泥量可由製程廢水及處理方式經驗概估或經由合理正確之質量平衡圖獲得)。

7. 稀釋、繞流或偷排查核

一般來說，會懷疑廠商有稀釋行為是因為在文件審查過程中發現廢水設備處理功能明顯不足，但放流水卻能符合排放標準，因此合理懷疑可能有稀釋問題。而之所以會懷疑繞流或偷排則是在於用水量與排放量差異太大，或當污泥產生量差異太大或污泥處理設施無法負荷時，則會懷疑污泥偷排。為查核上述情況，現勘時會特別注意廢水處理現場是否有下列情況：不明管線、漏列原廢水、廢水流向明顯不合理且未於申請文件中填列、不明流水混入放流水、污泥貯槽或污泥濃縮池之流向和申請文件不符等。

三、書面審查常見問題

水措計畫及許可證申請表之內容主要包含下列事項須填寫：(1) 申請項目，(2) 基本資料表，(3) 廢 (污) 水產生與水污染防治措施流向示意圖，(4) 水質水量平衡示意圖，(5) 廢水、廢 (污) 水及生產、服務量彙總表，(6) 廢 (污) 水 (前) 處理設施資料表，(7) 廢 (污) 水貯留資料表，(8) 廢 (污) 水回收使用資料表，(9) 逕流廢水管理資料表，(10) 排放地面水體放流口資料表，(11) 採樣及檢 (監) 測資料表，(12) 水污染防治措施計畫及許可申請資料確認書，(13) 水污染防治措施資料技師簽證表，(14) 水污染防治措施計畫及許可申請文件檢核表，(15) 其他附件。有關上述事項之填寫方式可參閱環境部編印之「水污染防治措施計畫及許可申請表填寫說明」(環境部，2024(2))，以下針對填寫上述各事項常見之問題作一敘述及討論。

3.1 申請項目

1. 聯絡人姓名和附件檢附之身份證明資料不一致。
2. 「所採行之污染防治措施及其他後續行為」勾選錯誤或漏勾。一般來說，至少會勾選「設置廢(污)水(前)處理設施」、「逕流廢水管理措施」及「排放於地面水體」3項。當廢(污)水採廢(污)水(前)處理設施處理後，部份回收使用、部分排放於地面水體時，則應勾選「設置廢(污)水(前)處理設施」、「逕流廢水管理措施」、「回收使用廢(污)水」及「排放於地面水體」。
3. 申請類別勾選變更，但未附上變更前後對照表，或是變更前後對照表內容過於簡略，或申請文件內容部份資料和變更前後對照表所附之內容不符，造成比對困難及混淆。
4. 申請「基本資料變更」或「一般性功能變更」，申請內容卻為「應事先取得核准之功能性變更」。

3.2 基本資料表

1. 開始營運日期早於核准設立登記日期，雖然有可能成立，但在大部分情況下都是錯的。
2. 負責人姓名全文不一致。
3. 所填工廠地址和工廠登記證之地址不合或登錄錯誤。
4. 漏列逕流廢水放流口相關資料。
5. 用地總面積、作業環境總面積及工廠登記證編號和工廠登記證所登載之資料不一致。

3.3 廢(污)水產生與水污染防治措施流向示意圖

1. 原廢水相關問題

- (1) 原廢水未給予適當之水流編號及未標示流量，或是來源標示不清，導致難以比對。
- (2) 漏列主要製程或漏列廢水產生源(例如處理地下水產生之反洗廢水直接排放，未進入廢水處理單元；漏列洗砂機廢水、鍋爐冷卻水、洗滌塔廢水、實驗室或化驗室廢水；漏列高濃度廢液、空污防制設施廢水、廢棄物滲出水、應收集處理之逕

流廢水、可納入廢水處理設施處理之純水系統再生廢水等)。

(3) 製程和廢水產生源之連結性不合理。

2. 處理流程相關問題

(1) 原廢水未作適當之分流處理，處理效率堪慮。

(2) 特定污染物之主要去除單元及去除機制明顯錯誤。

(3) 一個處理單元先後進行多項批次反應，但未對操作步驟作適當說明，難以理解。

(4) 處理流程不符學理機制或違反實務操作經驗，處理效率堪慮，甚或有工安疑慮（例如氰系原水偏酸性、於酸性狀態下添加硫化鈉沉澱重金屬離子）。

3. 藥品相關問題：漏列藥品濃度及加藥量。

4. 污泥相關問題

(1) 漏列污泥產出單元（例如油脂截留器、剝膜顯影廢水之酸化槽、沉砂池、初沉池）之污泥產出量。

(2) 漏列污泥脫水機之污泥日產量、含水率及最終去向。

5. 廢水流向相關問題

(1) 漏列砂濾槽及活性碳吸附塔反洗水之來源及反洗廢水之去向。

(2) 漏列污泥濃縮槽上澄液或污泥脫水機濾液之流向。

(3) 未明確了解圖中每條曲線均代表一股水流，圖中曲線交錯標示不清，造成混淆。

6. 回收再利用相關問題

(1) 進流水表、貯留水表及回收水表個數眾多，未給予適當分類及編號，不利紀錄及比對。

(2) 貯留設施未標示貯留設施編號及回收使用編號。

(3) 回收水未標示水量及流向不明確。

7. 水量相關問題

- (1) 總用水量和製程廢水量不一致，此時應於此處標示說明總用水量之使用分布情形，包含製程廢水量、逸散或損耗量、產品含水量及生活用水量等，以利查核水量平衡之正確性。
- (2) 欠缺水量平衡之概念，圖內進、出系統之水量未平衡，造成所標示之水量失真，難以確認真偽。

8. 全文不一致的問題

此處所標示之名稱或數字，例如處理設備名稱及設備序號，藥品名稱、濃度及加藥量，污泥量及含水率、原廢水量、放流量等資料，有時因撰稿者疏於校稿，造成全文前後不一致，引發爭議及混淆。

9. 活性碳吸附裝置的使用問題

此單元往往被申請為「備而不用」之單元，而使用之時機則界定為水質不佳時，問題是如何判定水質不佳呢？廠商的答覆往往是憑經驗或憑目視或使用快速檢驗包，其實真正目的仍是為降低活性碳之更換頻率。但是此種作法仍有其風險存在，且活性碳吸附塔久未使用仍會堵塞，進而導致失效，因此建議將其列為正式之處理單元，按時正常操作以確保放流水水質之穩定。若真的不需要，就應從處理流程中移除。

10. 其他問題

- (1) 漏列非主要處理設施之槽體。
- (2) 圖示說明不明確，造成混淆。
- (3) 緊急應變處理措施必要時應另頁繪製，避免造成圖面過於擁擠，難以閱讀及比對。
- (4) 應標示以設計值多少百分比申請。
- (5) 未標示放流水之承受水體名稱。

3.4 水質水量平衡示意圖

3.4.1 水量平衡示意圖

1. 漏列來自砂濾槽或活性碳吸附塔之反洗廢水、污泥濃縮槽上澄液及污泥脫水機迴流濾液之水流編號。
2. 此處所標示各股廢水之水流編號應和「處理單元之進出水質資料」中各股廢水之水流編號完全一致，以避免造成混淆。

3.4.2 處理單元之進出水質資料

1. 前後不一致相關問題

- (1) 此處所標示之各股原廢水之水質資料有時會和「廢水、廢(污)水及生產、服務量彙總表」中所列各股原廢水之水質資料不一致，造成混淆。原廢水之水質數據應保持全文一致，避免前後不一，造成難以判定後續之質量平衡是否正確。
- (2) 某單元之進流水水質應和前一處理單元之出流水水質完全一致，否則後續之水質質量平衡均應重新計算。
- (3) 此處所標示各股水流之編號應和「水量平衡示意圖」中相對應之各股水流之編號完全一致，以避免造成混淆。

2. 水質資料相關問題

- (1) 進出處理單元之水質數據之排列方式最好依序列出，不要跳來跳去，除了易於自行檢查是否有誤外，也有利於後續之審查。
- (2) 由於進出各處理單元之質量平衡往往是採用電腦計算，因此所得水質數據之小數位數過多。在填寫相關水質資料時針對小數點位數應作適當之取捨，避免填入過多無意義之小數點位數。
- (3) 多股廢水進入同一處理單元，但漏列部分水流之水質資料(最常見為上澄液、反洗廢水及迴流濾液)，造成難以查核質量平衡之正確性。

- (4) 申請文件中之水質數值乃是以一範圍表示之，一般來說，申請者往往只注意高濃度部份之質量平衡，但對於低濃度部份則隨意給一數值，未確實進行質量平衡，造成低濃度值在質量平衡之邏輯上有明顯之錯誤。舉例來說，2 股廢水其 COD 分別為 10~200 及 40~400 mg/L，混合後其 COD 變為 5~300 mg/L，在高濃度部分其可能合理，但在低濃度部分則明顯不對。

3. 污染物去除率相關問題

- (1) 調勻池計入 SS 及有機物之去除率 (無處理功能之單元，不宜計入去除率)，沉砂池類之物理單元對有機物去除率過高，攔污柵對 SS 去除率過高 (甚至達 30%)。

(2) 針對化學混凝系統

- a. 其 SS 會增加，但其對 COD、油脂及重金屬離子並無去除效果，僅是形成膠羽及沉澱物，其對 COD、油脂及重金屬離子之去除效果應在後續之沉澱系統或加壓浮除系統才會顯現出來。
- b. 其對 COD 之去除率勿過度高估 (甚至高達 90%)。
- c. 化學混凝處理後，色度未降低，處理效果估算不合理。
- d. 過度高估其對氨氮、硝酸鹽氮及硼之去除效果；基本上，化學混凝系統對上述污染物幾無去除效果。

(3) 針對生物處理系統

- a. 經生物處理系統後，BOD/COD 比值不變或升高，此不合學理機制。
- b. 經生物處理系統，BOD 及 COD 均降解，但 SS 無變化，此不合學理機制。
- c. 活性污泥曝氣池 + 生物沉澱池之 COD 或 BOD 之複合去除率大於一般活性污泥曝氣系統之整體 COD 或 BOD 經驗去除率。

- (4) 過濾單元加計對真色色度之去除率 (無處理功能之單元，不宜計入去除率)。

(5) 針對重金屬離子

- a. 鉻離子在水溶液中是以三價及六價鉻存在，因此當將六價鉻離子還原成三價鉻離子後，總鉻離子濃度仍是不變的。
- b. 廢水中同時存在有銅及鎳離子，在加鹼沉澱時未注意最適 pH 值之控制。
- c. 廢水中同時存在氨及重金屬離子，未注意其可能形成螯合態重金屬離子進而造成後續重金屬離子難以加鹼沉澱之問題。

(6) 在含氰化物之水溶液中，pH 值卻低於 7，此有可能使氰化物形成氰化氫，造成工安疑慮。

(7) 一般在計算質量平衡時，是以放流水符合放流水標準為基準再逆算回去“平均分配”各處理單元之污染物去除率，此種作法往往會使各處理單元之污染物去除率失真，此在未來當水量擴充或原物料變動時，或當水質不佳而有超標疑慮時，將會很難對主要處理單元進行真正之評估而找到合適之操作參數範圍來解決問題。解決之道應是趁功能試車時，好好規劃量測各主要處理單元對污染物之真正去除率，以取得具代表性之結果並藉由原水、放流水及進出各主要處理單元之水質檢測資料重新計算進出各處理單元之水質資料，並修正許可文件相關資料，以符合操作現況。

4. pH 值相關問題

- (1) 添加 PAC、硫酸鋁、氯化鐵等混凝劑時，pH 值應降低；而添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 時則 pH 值應升高，但添加 CaCl_2 時則 pH 值變化不大。
- (2) 添加酸或鹼，但 pH 值不變，或僅變化 pH 之上限或下限值，此均不合學理機制。
- (3) 此處所標示之 pH 範圍，有時會和「廢(污)水(前)處理設施資料表」處所標示之值不一致，造成混淆。

3.5 廢水、廢(污)水及生產、服務量彙總表

1. 漏列原料或產品，由申報之原物料無法和產品作適當之連結，此種情況有時是因為表達方式錯誤，未將個別製程作適當之分類及描述而致；但更嚴重之情況則是漏列污染源，此時必須由其製程作詳細之分析才能得知其到底可能漏列那些污染物。
2. 原料或產品之數量或單位有誤。
3. 漏列作為原料之水量致水量不平衡。
4. 回收水使用率計算錯誤。
5. 低估廢水量及污染物之濃度。
6. 部分原物料乃屬混合物，此時必須透過廠商提供之 SDS 資料才能判別是否含有受管制之污染物。
7. 未依據製程產生廢水來源及污染特性，適當分為多股原廢水並分別列出水質水量，據以進行水質水量平衡計算。
8. 水質項目漏列部份污染物，最常見漏列者為陰離子界面活性劑、油脂、氨氮、硝酸鹽氮及硼等污染物。此可經由詳細檢視所使用之原物料來進行分析，比較特殊的是，有時廠商雖然未使用硝酸鹽作為原料，但因使用亞硝酸鹽作為原料，於廢水處理過程中因曝氣或水中含其他氧化劑，進而將亞硝酸鹽氧化為硝酸鹽氮，最後雖然在原水中未檢測出硝酸鹽氮，但卻在放流水中檢測到高濃度之硝酸鹽氮。無論如何，只要覺得有疑慮時，就應要求廠商於試車時加測相關污染物，以作確認並作適當之後續處理。
9. 針對會產生重金屬離子廢水之廠商，應特別注意其所使用之原料中是否含有螯合劑，並據此以檢視其廢水處理流程是否足以去除螯合態重金屬離子。

3.6 廢(污)水(前)處理設施資料表

1. 全文不一致相關問題
 - (1) 此處所標示之設備名稱、藥品名稱及加藥量、污泥量和「廢(污)水產生與水污染防治措施流向示意圖」中所標示之名稱或數值不一致。
 - (2) 此處所標示之原水及放流水水質資料、pH 值操作範圍和「水質水量平衡示意圖」中所標示之數值不一致。

2. 操作參數相關問題

- (1) 液位範圍和有效水深不一致。
- (2) 文件申請變更，但新版文件之操作參數之範圍及相關數值資料完全抄襲舊版文件，未作適當之變更。
- (3) 藥品相關問題
 - a. 藥品未標示濃度或漏列藥品名稱。
 - b. 加藥機之流量控制機制不明確。
 - c. 實際加藥量與設計量差距過大。
- (4) 雖裝設 pH 計，但因未添加酸鹼，無法調控 pH 值，不宜將 pH 值設為操作參數，只能於相關機具設施中將 pH 計設定為只監不控。
- (5) 參數值與經驗或學理值差異過大，例如沉澱池表面負荷達 5 m/hr；快混槽與慢混槽體積相同；活性污泥系統之食微比 F/M 達到 0.5，MLSS 僅 500 mg/L 等情況。
- (6) 加壓浮除系統引用參數不當；操作參數僅考慮停留時間，未考慮表面負荷、氣固比、迴流比、加壓壓力等參數。
- (7) 生物處理系統引用參數不當；操作參數僅考慮停留時間，未考慮 MLSS、F/M、DO、污泥迴流比等參數。
- (8) 砂濾槽引用參數不當；操作參數僅列停留時間，未列入操作壓力及反洗頻率等參數。
- (9) 活性碳吸附裝置引用參數不當，操作參數漏列活性碳之更換頻率及反洗頻率，針對前者，提供活性碳吸附塔理論使用期限計算範例如下：

假設廢水量為 30 CMD，原廢水 COD 為 300 mg/L，經化學混凝沉澱處理後，處理水之 COD 為 120 mg/L，放流水管制值為 90 mg/L，活性碳吸附比率為 0.2 g COD/g 活性碳，吸附塔內裝 100 kg 顆粒狀活性碳，則理論使用期限為：

$$30 \text{ m}^3/\text{日} \times 103 \text{ L/m}^3 \times (120-90) \text{ mg COD/L} \times 1 \text{ kg}/10^6 \text{ mg} \times 1 \text{ kg 活性碳} / 0.2 \text{ kg COD} = 4.5 \text{ kg 活性碳} / \text{日}$$

$$100 \text{ kg 活性碳} \times 1 \text{ 日} / 4.5 \text{ kg 活性碳} = 22.2 \text{ 日}$$

亦即約 22.2 日就應更換活性碳。

(10) 頻率之單位為次 / 時間，而週期之單位則為時間 / 次，文件中常將此二者搞混。

3. 設備名稱不符實之問題

例如調勻槽未具任何調勻設備、混凝槽或反應槽未進行任何加藥、放流池進行加藥、泥濃縮槽不具污泥濃縮功能等情況。

4. 污泥相關問題

(1) 總污泥量漏列來自其他污泥產出單元之產出量 (例如油脂截留槽、沉砂池等)。

(2) 污泥量之設計量和實際產量差異過大。

(3) 污泥清運頻率與現況不合。

(4) 漏列污泥處理單元之操作參數及其計算方式及記錄頻率。

(5) 一般或有害污泥勾選錯誤。

5. 廢水處理設施操作現況和申請內容不符之問題

一般來說，申請書內容之撰寫是根據當初工程設計書所設定之操作參數及所評估之數值來填寫，但是操作現況往往和當初之設定有很大之差距 (尤其是在各處理單元之質量平衡方面)，此時若未藉由試車後所得之功能測試報告對申請文件之內容作適當之修正，則所核准之許可文件只是聊備一格，毫無意義。針對此點，應善用試車期間所得之資料作適當之評估及分析，以找出最適之操作參數範圍進而提高處理效能及降低操作費用。另一方面，亦應根據這些資料針對各處理單元之質量平衡重新作計算，並將新的質量平衡結果併同藥品加藥量、用電度數及污泥產生量之更新值，重新修正水措計畫內之相關資料，以使許可文件登載之相關資料和操作現況相符合。

6. 其他問題

- (1) 每日用電度數和水量不成比例，另用電度數和電費不成比例。
- (2) 緊急應變之貯存設施容量過小或貯存容量計算錯誤。
- (3) 漏列藥品或藥品濃度。

3.7 廢(污)水貯留資料表、廢(污)水回收使用資料表

1. 申請貯留設施、回收使用設施，但漏填相關資料表格。
2. 此處所標示之回收水量和「廢(污)水產生與水污染防治措施流向示意圖」中所標示之回收水量不一致。
3. 貯留來源水流編號填寫錯誤。

3.8 逕流廢水管理資料表

1. 收集

- (1) 缺少完整收集之管渠或收集溝規劃流程。
- (2) 缺作業場址之高程分布及水流方向圖說。

2. 處理

- (1) 沉砂池之容積計算原則不清楚。
- (2) 沉砂池之位置和欲收集處理之逕流廢水的流向其間之關係不明確。另外，沉砂池底泥清除方式未說明。
- (3) 於圖示中，缺乏沉砂池之標示或標示不清楚。另沉砂池和逕流廢水放流口間之關係未清楚標示。

3. 放流

- (1) 逕流廢水放流口設置位置未標示清楚或排放水體未說明。
- (2) 漏填放流口資料。

- (3) 逕流廢水放流口之配置設施未勾選「設置於作業環境外可供主管機關直接採樣」。
4. 逕流廢水流向示意圖應包含製程區、貯油區、行政區、原物料貯存區、廢棄物貯存區、廢(污)水處理設施等逕流廢水污染產生端與雨水排放口關係等資料，應注意是否有漏列。另亦應清楚標示指北方向、大門位置及道路名稱。
5. 逕流廢水污染削減措施勾選不完整。

3.9 排放地面水體放流口資料表

放流口之放流水量和「廢(污)水產生與水污染防治措施流向示意圖」中所標示之放流水量不一致。

3.10 採樣及檢(監)測資料表

1. 漏填採樣及檢測資料表或檢測項目有遺漏。
2. 若有多股原廢水，則應於檢測資料表中標示清楚，以利查核及比對。
3. 原則上，每股原廢水均應採樣分析，有時會有申請者將多股原廢水混合後再採樣分析，此時應補充說明原因。

3.11 其他附件

1. 相關影本資料
 - (1) 漏列負責人或連絡人之身分證影本。
 - (2) 檢附非所屬轄區農田水利主管機關之「各類放流水未介入灌溉專用渠道證明公函」影本。
 - (3) 事業用地(含水污染防治設施、放流口位置、放流管路線)未取得所有權人同意設置使用證明。
 - (4) 放流水介入私人水體或私人排水路，未取得所有權人同意或委託處理。

- (5) 事業取用地下水、河川水及其他需取得相關主管機關同意之水源，未檢附或未取得水權證明文件。

2. 工程計畫書未完整檢附

一般來說，工程計畫書應詳細說明工廠製程和產生廢水間之連結性、廢水之水質及水量特性、各處理單元之功能性及進出之水質及水量平衡等資訊；亦即，應包含下列內容：

- (1) 製程之詳細說明，含完整用水量、原物料類型與用量、產物量之推估計算過程。
- (2) 製程流程圖，含各階段原物料量、產品量、各階段之各股用水量、廢水量及各股廢水之污染項目。
- (3) 各股原廢水之水量、各水質污染項目濃度及污染量之推估計算過程。
- (4) 廢水處理流程規劃及各處理單元功能說明。
- (5) 廢水處理系統之設計量與申請量的水質水量平衡計算過程。
- (6) 各處理單元設計量及申請量之功能計算過程。

應注意的是，在說明上述事項時皆應提供所引用數據之佐證依據，以利審查。

3. 試車部分

- (1) 試車日期不合。此部分主要是試車日期未評估好，使得試車日期落在申請文件之審查期間內。
- (2) 試車計畫書所列之原料名稱或數量和申請文件所列之原料名稱或數量不合。
- (3) 試車計畫書所列之廢水量和申請文件所列之廢水量不一致。
- (4) 試車計畫書所附之「廢(污)水產生與水污染防治措施流向示意圖」和申請文件所列之示意圖不一致，造成混淆。

4. 功能檢測報告

- (1) 功能檢測所得之水質數據未落在申請文件所列之水質數值範圍內，若所得之檢測數據為真，則須修改申請文件之水質數值範圍，並將後續之水質質量平衡一併修改之。
- (2) 功能檢測報告出現某種污染物成分，但申請文件內漏列此項污染物，此時需修正申請文件並作相關之質量平衡。
- (3) 報告與記錄不符：報告與操作紀錄不相符、用電量及水量報告記錄與現場操作記錄不符、加藥使用量與記錄值相差過大。
- (4) 完整性不足：功能測試期之水量未達設計值之固定比例、操作記錄不完整，缺用電、用水、藥劑添加量、污泥產生量等記錄。

四、實際案例解析

以下提供 2 個從環境部水污法相關資訊公開平台 (環境部，2025) 隨機挑選之許可證實際案例，經由對這些經審查核可之許可證進行詳細檢視以了解可能存在於文件撰寫過程之缺點。

4.1 A 廠案例

A 廠為金屬表面處理業，主要使用之原料包含磷酸、硼酸、硫酸鎳、氯化鎳、鎳溶液、鋅化劑、分散劑、可濕性粉劑、深黑染劑、冷封孔劑、(熱)封閉槽添加劑、皮膜劑、清潔劑、清洗劑、濃硫酸、硝酸、氫氟酸、氫氧化鈉，申請水量為 30 CMD，許可登載之原廢水水質成份包含硼、六價鉻、氨氮、硝酸鹽氮、氟鹽、氰化物、鎳、總鉻、鋅、油脂、COD 及 SS 等污染物，水質成分複雜，廢水處理流程之主要目標污染物為氰化物、氟鹽、鎳、鋅、油脂、COD 及 SS 等，對硼及硝酸鹽氮之去除則並未著墨。

該廠之廢水處理流程 (見圖 1) 及操作參數 (見表 1) 如下所述：

1. 共有 4 股原廢水，分別為綜合廢水、一般廢水、氟系廢水及氟系廢水。綜合廢水因 pH 值變動大，先於 T01-01 添加 NaOH 將 pH 調控至 2~13，之後再於 T01-02 添加 NaOH 及 H_2SO_4 將 pH 調整至 6~10。調勻處理後之綜合廢水再和其他三股經處理後之廢水進行混合以進行後續之化學混凝沉澱處理。
2. 針對一般廢水，先於 T01-03 曝氣調勻，之後於 T01-04 添加 CaCl_2 產生 CaF_2 沉澱以去除氟鹽並於 T01-05 添加 NaOH 將 pH 調升至 6~9 再和其他三股廢水混合作後續化學混凝沉澱處理。在此宜注意，若按許可所登載之水質資料來看，此股原廢水含有大量氟鹽且其初始 pH 為 1~6，於此偏酸情況下，已有產生氫氟酸危害之疑慮了。從工安的角度來看，此股原廢水應於 T01-03 進行收集時就應先添加液鹼以調控 pH 至鹼性狀態下再進行後續鈣鹽除氟之處理以避免產生工安意外（在鈣鹽添加量足夠之情況下，pH 值對氟鹽之去除率影響不大）。
3. 針對氟系廢水，先於 T01-06 攪拌調勻，接著於 T01-07 及 T01-08 添加 NaOH 將 pH 調控在 6~9 並添加 CaCl_2 產生 CaF_2 沉澱以去除氟鹽後再和其他三股廢水混合作後續處理。此處 T01-06 所收集之氟系原廢水其 pH 為 2~7，因此如同第 2 點所述，應先添加液鹼以調控 pH 至鹼性狀態下再進行後續鈣鹽除氟之處理以避免產生工安意外。
4. 針對氟系廢水，先於 T01-09 曝氣調勻，接著於 T01-10 及 T01-11 添加 NaOH 及 NaOCl 進行兩階段氧化反應並以 pH 及 ORP 計進行監控，之後再和其他三股廢水混合作後續處理。
5. 四股廢水混合後準備去除鎳及鋅離子。首先於 T01-12 添加 PAC 混凝劑及重金屬捕集劑，之後於 T01-13 添加高分子助凝劑進行膠凝並於 T01-14 進行固液分離。在此宜注意，T01-12 所添加之鋁鹽除具有聚集氟化鈣沉澱物之功能外，同時所產生之氫氧化鋁沉澱物亦是水中殘餘氟離子的有效吸附劑。放流之前為避免 SS 超標於 T01-16 進行過濾後再行放流。

值得一提的是，此案例雖使用大量硝酸，但以目前之處理流程來看並無法有效去除廢水中之硝酸鹽氮，廠商仍應確實量測原水之硝酸鹽氮濃度，以確認是否須對硝酸鹽氮進行處理。另一方面，因使用硼酸及氫氟酸，兩者在水中極易形成氟硼錯離子或四氟化硼化合物（因硼缺電子而氟可提供多餘之電子對以形成共價鍵結），以目前之

處理流程來看不論是對硼或是氟硼錯離子其幾無去除效果，因此廠商亦應確實量測原水中硼之濃度以確認是否需針對硼進行處理。另氟硼錯離子中之氟離子以目前公告之檢測方法是無法檢測出來的，未來若需除硼則在水解氟硼錯離子時氟離子將會被釋放出來，進而使水中氟離子濃度升高，此點在加鈣除氟時應特別注意。

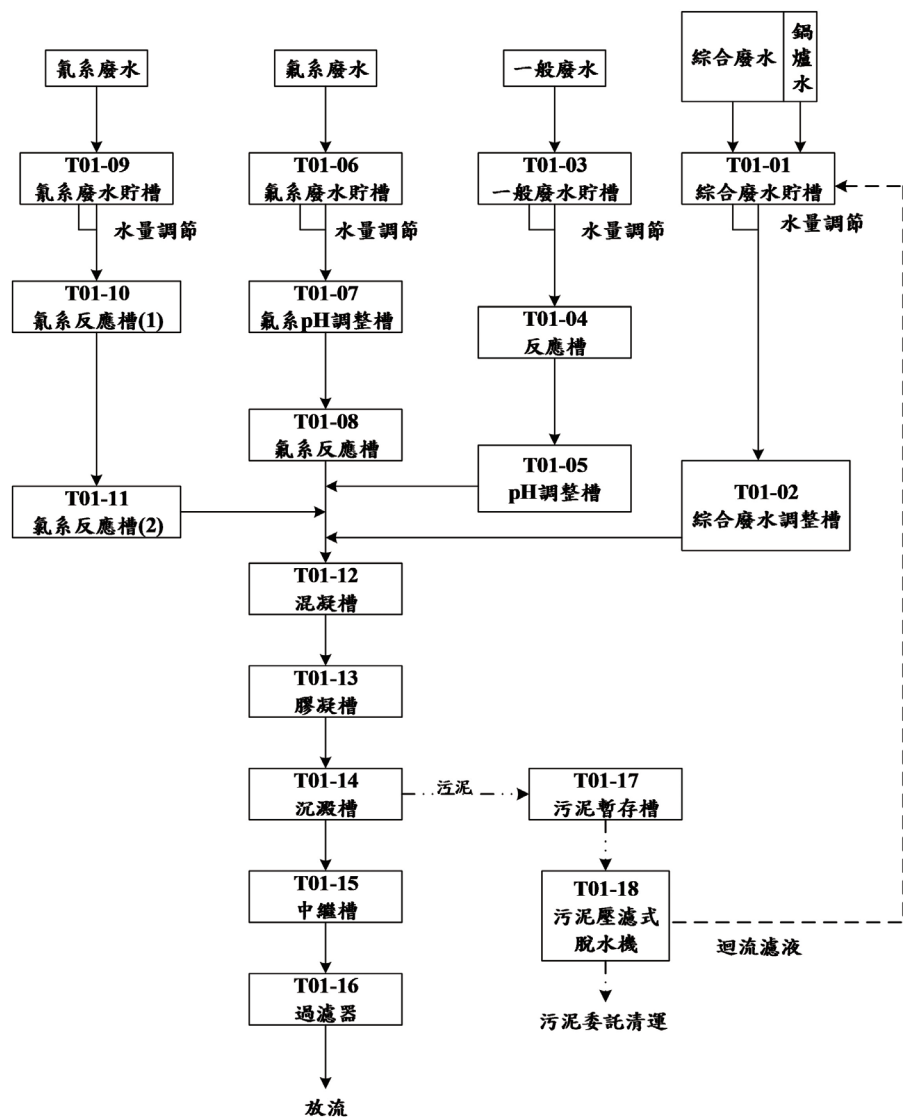


圖 1 A 廠之廢水處理流程

表 1 A 廠各處理單元之操作參數

單元名稱	控制參數
T01-01	pH 2~8(NaOH)
T01-02	pH 6~10(添加 H ₂ SO ₄ 及 NaOH)
T01-04	氯化鈣、pH 0~10
T01-05	pH 6~9(添加 NaOH)
T01-07	氯化鈣、pH 6~9(添加 NaOH)
T01-08	氯化鈣、pH 6~9(添加 NaOH)
T01-10	NaOH、NaOCl、pH 9~13
T01-11	NaOCl、pH 6~9(H ₂ SO ₄)
T01-12	PAC、重金屬捕集劑、pH 6~9
T01-13	高分子助凝劑

4.2 B 廠案例

B 廠亦為金屬表面處理業，主要使用之原料包含鹽酸、鉻酸、氯化銨及脫脂劑，申請水量為 50 CMD，許可登載之廢水水質成份主要為總鉻、六價鉻、鋅、COD 及 SS 等。很明顯的，其水質成份漏列了氨氮及油脂，另亦應查核脫脂劑之 SDS 資料以確認是否須將陰離子界面活性劑列入水質資料。由於原水氨氮之濃度可能已超出放流水標準，因此應將其列入水質成分並進行質量平衡之計算。

該廠之廢水處理流程 (見圖 2) 及操作參數 (見表 2) 如下所述：

1. 共有三股原廢水，分別為高濃度廢水、鉻系廢水及酸鹼廢水；其中高濃度廢水及鉻系廢水先混合收集並於 T01-03 曝氣調勻後準備進行六價鉻之還原反應。於 T01-05 添加重亞硫酸鈉 (Na₂S₂O₅) 作為還原劑，其添加量則經由將氧化還原電位計 (ORP 計) 設定於 200~380 mV 來進行調控，並另添加 H₂SO₄ 將還原反應調控於 pH 2~3.5 間進行以提高還原效率。

2. 六價鉻還原成三價鉻後之廢水則和另一股原水（酸鹼廢水）混合，經 T01-08 之曝氣後準備進行化學混凝沉澱處理。於 T01-09 加入 FeCl_3 混凝劑，因 FeCl_3 水解後廢水之 pH 會降低，因此添加 NaOH 將 pH 控制在 8~10，之所以將 pH 調控在偏強鹼性狀態有部分原因是為了產生氫氧化鉻及氫氧化鋅沉澱以去分別除三價鉻離子及鋅離子。由於重金屬氫氧化物之結晶顆粒大多相當細小，沉降性不佳，因此大都選用沉澱效果較好之 FeCl_3 作為混凝劑以提升其沉降性；選擇 FeCl_3 的另一個原因是其 pH 操作範圍較寬廣，在 pH 4~12 時均可使用，因此氯化鐵經常用於電鍍業及金屬表面處理業所產生廢水之化學混凝程序中作為混凝劑使用。另添加硫化鈉以保證重金屬離子（包含螯合態重金屬離子）之完整去除，及添加活性碳以吸附去除部分有機物以補強化學混凝程序對有機物去除之不足。之後，於 T01-10 添加高分子助凝劑進行慢混並於 T01-11 及 T01-12 進行兩階段沉澱分離後放流。

金屬表面處理業及電鍍業經常會使用到氨水及無機銨鹽，例如氨基磺酸鎳、氯化銨鋅、氯化銨、氟化銨及硫酸銨等，這些原料進到廢水後均會產生氨氮的處理問題。由於對既設之金屬表面處理業及電鍍業，目前已公告氨氮將分 3 階段管制：分別為民國 110 年 1 月 1 日為 150 mg/L，民國 113 年 1 月 1 日為 120 mg/L，民國 116 年 1 月 1 日則為 60 mg/L。廠商仍應檢視工廠所使用之原料是否會產生氨氮廢水及其濃度之高低並及早做好相關因應措施，包含源頭減量及管末處理以符合法規要求。

由上面 2 個實際案例可知，廠商對於之前公部門稽查強度較弱之污染物（例如硼、氨氮及硝酸鹽氮）並未積極進行處理，而是將處理重點聚焦在那些較易超標之污染物（例如 COD 及重金屬離子），此情況之形成亦和為其設計處理流程之工程顧問公司欠缺處理相關污染物之專業能力有密切關係。無論如何，隨著公部門對相關污染物稽查強度之增強，廠商應未雨綢繆，除及早作好源頭減量或尋找原料替代品以降低污染物之排放濃度外，亦應積極尋找具去除效率及符合經濟效益之管末處理技術，以維企業之永續經營。另一方面，廠商除應精進各項污染物之去除技術，優化廢水處理流程以降低藥品添加量及污泥量，進而降低操作費用外，對於廢水及水中化學品之回收再利用亦應多所涉獵，以因應廢水處理能資源化及智慧化之未來趨勢。

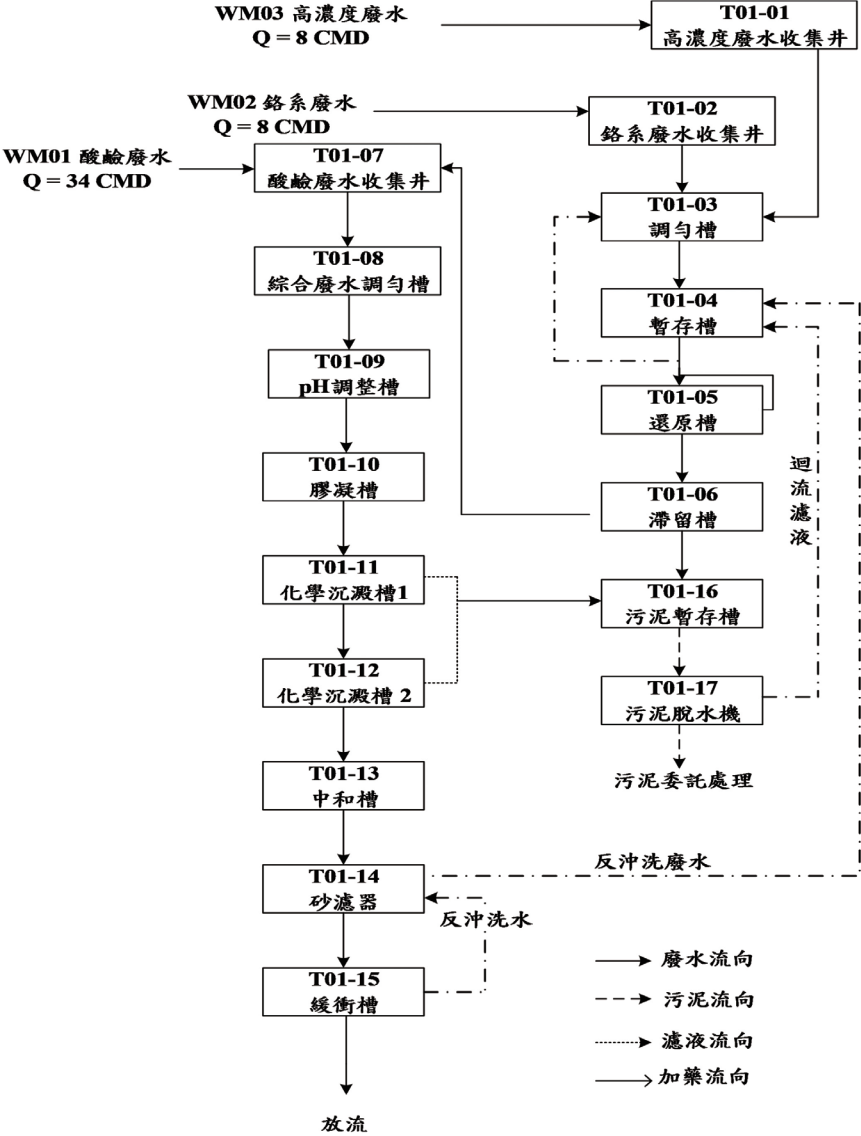


圖 2 B 廠之廢水處理流程 (環境部，2025)

表 2 B 廠各處理單元之操作參數 (環境部，2025)

單元名稱	控制參數
T01-05	重亞硫酸鈉、pH 2~3.5(H ₂ SO ₄)、ORP 200~380 mV
T01-09	FeCl ₃ 、Na ₂ S、活性碳、pH 8~10(NaOH)
T01-10	高分子助凝劑
T01-11	水力停留時間 1.62 小時～，表面溢流率 ~0.86 m ³ /(m ² ×hr)
T01-12	水力停留時間 1.11 小時～，表面溢流率 ~1.26 m ³ /(m ² ×hr)
T01-13	pH 6~9(H ₂ SO ₄)

五、建議事項

5.1 提高水措計畫及許可證申請資料之正確性

水措計畫及許可證申請的共通性注意事項首重資料之正確性、完整性、合理性及一致性，而資料之正確性及完整性的達成，除了應依撰寫格式說明填寫並注意數據之單位及有效位數外，更重要的是，資料必須和操作實際狀況相一致才能克竟全功。一般來說，由於水措計畫及許可證之申請往往是由申請廠商、代辦廠商及簽證技師來共同完成，若代辦廠商缺乏足夠之專業技能及經驗，對製程了解度不足及對廢水特性認識有限，若再加上技師過於相信業主、操作單位及代書，導致查核過程不完整，未能於現場查核中發現問題，則所提出之申請文件往往和操作現況多所不合。相反的，若代辦廠商及簽證技師能與廠方就製程、廢水產生源及現場操作之實際狀況作完整之溝通及了解，則將可以大幅提高申請文件和操作現況之符合度。

另外，值得注意的是申請文件內容之正確性、完整性及前後一致性是申請者必須自負之文責，也是提高申請文件可讀性的必備條件，尤其前後一致性 (包含設備名稱、操作參數、水量、水質資料、污泥量等) 之保持乃是文件達到完整性及正確性之先決條件。申請者 (包含代辦廠商、簽證技師及操作單位) 在送出文件前應仔細校稿以提

高文件之正確性及後續之審查速度，切勿抱持僥倖之心態，便宜行事認定審查委員會幫其校稿，後續只要依其意見修改即可，省時又方便。此種作法不但喪失本身之專業能力，對於付費請其代辦之廠商亦相當不公平。

此外，申請廠商即使本身因相關專業能力不足或是無時間撰寫申請內容而請人代辦相關申請業務，其本身亦應對申請內容有充分之了解，此不但可提高申請內容之正確性，亦可保護自身之權益，避免未來碰到現勘或公部門入廠稽查時一問三不知，完全置身於狀況外，或是錯過應辦變更、展延、換證等事項之時機而受罰。針對代辦業及簽證技師而言，除了協助廠商填寫正確之內容外，亦應指導廠商正確之廢水處理程序及措施，避免因為自身利益或自身作業之方便，而給予申請廠商錯誤或違法之觀念，造成日後害其受罰。

5.2 水量及質量平衡相關問題

1. 針對水量的平衡問題，應先了解水量平衡之真義；換句話說，總用水量 = 製程廢水量 + 製程及處理過程之損耗或逸散量 + 產品含水量 + 污泥中之水份 - 加入液態藥劑之水份，因此總用水量往往不會等於製程廢水量。理論上，若製程廢水量小於總用水量是很合理的；相反的，若製程廢水量大於總用水量則應懷疑是否有使用地下水或其他非自來水之水源。
2. 針對污染物處理前後之質量平衡問題，應了解在廢水處理過程中，處理前之污染量 = 處理後之污染量 + 去除量，其中去除量可能由沉澱污泥、浮除污泥、生物分解、化學氧化、過濾、吸附等機制來貢獻，因此在考慮污染物之去除率時應多方考量，不應只侷限於某單一之去除機制（雖然它可能是最大貢獻者），才能獲得較完整之數值。另外，污泥量之計算可考慮下列 3 種情況：(1) SS 去除所產生之污泥 = (進流 SS × 進水量 - 出流 SS × 出流量) × 10^6 噸 / 天，(2) 生物處理所產生之污泥 = (進流 COD × 進水量 - 出流 COD × 出流量) × 0.2×10^6 噸 / 天，其中 0.2 為有機物轉化係數，(3) 重金屬沉降污泥 = (進流【M】 × 進水量 - 出流【M】 × 出流量) × F × 10^6 噸 / 天；其中，F 為金屬氫氧化物分子量 / 金屬離子原子量（傅崇德，2014）。

5.3 規劃廢水處理流程時應注意事項 (陳見財, 2014)

1. 作好廢水特性調查

- (1) 廢水應作好適當之分類收集，例如有機性與無機性廢水應分類收集、高濃度廢液與低濃度廢水應分類收集、高色度廢水應儘可能單獨收集、含鉻廢水應單獨收集處理、含螯合劑廢水亦應單獨收集處理、具反應性廢水需分類收集 (例如強酸與強鹼廢液、酸性廢水(H^+)與氰系廢水(CN^-)易產生氰化氫(HCN)，含硫化鈉(Na_2S)廢水與酸性廢水易產生硫化氫(H_2S))。
- (2) 作好廢水量之評估，避免因調查期程短，未能包含不同產品之生產期程或製程，或當產能改變時，廢水量未作適當之調整，進而使設計量與實際廢水量差異過大，影響處理單元負荷。另外，在作廢水量測量時應注意下列事項：
 - a. 應於各製程安裝流量計，以準確估算各製程所產生之廢水量。
 - b. 為避免漏估用水來源及準確作好水量平衡應參考自來水費單或地下水抽取量資料。
 - c. 為了解水量之波動特性及處理系統可能需面對之處理負荷應調查最大廢水產生量及平均廢水量。
 - d. 需考量未來可能增產之廢水量變化，以預留操作空間及調整之彈性，避免未來措手不及。
- (3) 作好廢水水質之檢測。在進行廢水水質檢測時應注意下列事項：
 - a. 隨機採樣，水質不具代表性，應在檢驗費用及數據具代表性間取得適當之平衡點詳細規劃採樣計畫。
 - b. 應採取週期性之廢水分析以顧及不同製程與產品種類。
 - c. 水樣應委由環境部認可之檢測機構分析，不宜以簡易測試包分析，造成檢測數據之誤差。
 - d. 應依製程或產品之特性，分別進行水質檢測，避免遺漏關鍵性之污染物質。

2. 依廢水水質規劃適當之前處理設施，包含細節機、沉砂池、除油設施、氧化 / 還原單元、高濃度廢液前處理等單元。
3. 依廢水水質檢測結果 (SS、重金屬離子成份及濃度、毒化物成分及濃度、BOD 值、COD 值、BOD/COD 比值、溶解性 COD/ 總 COD 比值或處理水質訴求 (符合園區納管標準、符合放流水標準、水資源回收) 規劃主要處理單元 (化學處理、生物處理、化學處理 + 生物處理、生物處理 + 化學處理、高級處理) 。
4. 若有規劃生物處理系統，應先去除有害物質以利生物處理系統操作。這些有害物質 (例如重金屬離子、氯鹽、氰化物、硼、硫離子、氟離子、酚等) 對生物系統中之微生物的活性是有抑制性的，因此需於廢水進入生物處理系統前預先除去，避免對生物處理系統之操作造成影響。
5. 不同處理系統間應設置中間 (緩衝) 槽，避免水質波動過大，以利後續處理系統之操作。

5.4 審慎評估活性碳吸附塔單元之目的與必要性

一般來說，活性碳吸附塔大都設置於放流水之前，中和槽之後，此種規劃之目的，是為了使放流水之 COD 能達到放流標準，但此種作法到底是為了確保處理水質符合工廠需求以保障工廠抑或是為了確保處理水質符合合約需求以保障工程顧問公司則是必須深思的。另外，多數工廠並未如期更換活性碳，設備形同虛設或是定位為處理水質不佳時之「備用」單元，針對前者，廠商應了解活性碳之吸附是很容易飽和的，一旦吸附達飽和污染物開始貫穿時，其即已失效而無任何處理效果；針對後者，廠商應檢視及調整活性碳吸附塔之處理流程與操作方式，並與水措計畫登載內容相符，避免依自行之判斷操作而遭環保單位認定為「與許可內容不符」之違規疑慮。最後，在設置活性碳吸附塔時應考量下列項目：(1) 新鮮活性碳能有效吸附有機物，但短期內活性碳即可能因吸附飽和而需更換。(2) 活性碳價格高。(3) 更換之活性碳需以 (有害) 事業廢棄物處理。同時亦應了解活性碳之吸附量會受吸附質、pH 值、吸附時間、吸附劑量所影響，一般申請書皆缺乏這些佐證資料，無法判斷其處理效果之真偽，而其真正之處理效果亦令人懷疑。

5.5 酸鹼中和之問題

酸鹼中和在廢水處理過程中相當常見，但現場操作人員對酸鹼中和及酸鹼之添加量有時並無明確之概念，下面提供 2 個例子供作參考：

範例 1. 若加 0.02 N 之 KOH 310 ml 於 15 ml 之 0.4 N H_2SO_4 中，求 pH 變為若干？

解：

酸之毫克當量數為： $N_A V_A = 0.4 \times 15 = 6.0$ 毫克當量

鹼之毫克當量數為： $N_B V_B = 0.02 \times 310 = 6.20$ 毫克當量

依 $N_A V_A = N_B V_B$ ，知中和後，鹼剩餘 $6.2 - 6.0 = 0.2$ 毫克當量

，但其體積為 $310 + 15 = 325$ ，故

$$[\text{OH}^-] = \frac{0.2}{325} = 6.15 \times 10^{-4} \text{ N}$$

$$\Rightarrow \text{pOH} = -\log(6.15 \times 10^{-4}) = 4 - \log 6.15 = 4 - 0.79 = 3.21$$

$$\Rightarrow \text{pH} = 14 - \text{pOH} = 10.79$$

範例 2. 將 500 ml 之 0.235 N 之 H_2SO_4 和 250 ml 之 0.196 N HCl 混合，問需用若干升 0.242 N 的 NaOH 中和？

解：

硫酸之毫克當量數為 $N_A V_A = 0.235 \times 500 = 117.5$ 毫克當量

鹽酸之毫克當量數為 $N_A V_A = 0.196 \times 250 = 49$ 毫克當量

$\Rightarrow$ 酸之總毫克當量數為 $117.5 + 49 = 166.5$ 毫克當量，故

$$\text{依 } N_A V_A = N_B V_B \text{ 可知須 NaOH 體積為 } V_B = \frac{166.5}{0.242} = 688 \text{ ml}$$

5.6 加強內部管理並隨時注意水污染防治法之修正情形

根據環境部的統計，違反水污染防治法的違規樣態有很多是企業管理所引起的，例如未申請取得廢水排放、貯留或稀釋廢水許可、未依規定檢測、申報或申報不實，未定期檢視校正自動監測系統，遇到異常狀況未報備和立即採緊急應變措施等，企業如能透過內部自主檢視管理，這些違規其實多可避免。另外，由於水污染防治法之規定和廠商之權益息息相關，因此應隨時注意水污染防治法之修正重點，以保障自身權益。以先前較大的修法為例，由於 102 年底發生某電子公司廢水污染河川及陸續發生多起重大環境污染事件，環境部為加強相關作為並依立法院提案建議，強化水污染防治法管理及罰則。廠商應注意這些修正內容，避免觸法受罰。

參考文獻

傅崇德 (2014)，水污染防治措施計畫書實務 (二)：撰寫指引及常見缺失，桃園市產業環保技術服務團講習會。

陳見財 (2014)，廢水處理常見問題與對策，(一)化學處理、(二)生物處理，桃園市產業環保技術服務團講習會。

環境部，水污染防治法，<https://oaout.moe.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015486>，2018。

環境部，水污染防治措施計畫及許可申請審查管理辦法，

<https://oaout.moe.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=GL005950>，2024(1)。

環境部，水污染防治措施計畫及水污染防治許可證（文件）申請表填寫說明，2024(2)。

環境部，環境部水污法相關資訊公開平台，<https://waterpollutioncontrol.moe.gov.tw/>，2025。

環境管理規劃類

應用 ISO 50006 標準強化能源績效管理

張育誠*、謝維晃**、楊明隆***、吳美琪****

摘 要

國際標準化組織促進不同類型的管理系統進行整合，並引進管理系統標準高階結構 (High Level Structure, HLS)，讓不同類型的管理系統標準擁有共通的核心結構，再依不同管理需求加入特定的專業內容，作為制定不同類型管理系統標準之基礎藍圖。2018 年更新 ISO 50001 能源管理系統標準，遵循此一架構協助企業持續強化能源管理系統之運作。另外，國際標準化組織於 2023 年更新公布 ISO 50006 標準，幫助企業使用能源績效指標與能源基線評估能源績效之改進成果。

ISO 50006 標準能協助組織開發、應用及更新能源績效指標與能源基線，用於監督及評估其能源績效，證明其能源績效已獲得持續改進。組織為量測能源績效表現，選擇能源績效指標回應預期使用者的需求與期待，也可以考慮能源管理目標、能源標準的及作業型態，建立適當的能源基線，以解釋組織能源績效之變化。

本會於 2019 年輔導衛生福利部資訊處依 ISO 50001 標準建置能源管理系統，以能源審查的方式檢討所轄資料中心之能源使用狀況，包括：鑑別重大能源使用項目、設定能源績效指標、建立能源基線及制定能源數據蒐集計畫。本案例以 ISO 50006 標準建議的績效管理程序，說明資料中心落實能源績效管理的經驗。

【關鍵字】能源管理系統、能源績效指標、能源基線、能源績效管理	
* 財團法人台灣綠色生產力基金會	經理
** 財團法人台灣綠色生產力基金會	處長
*** 衛生福利部資訊處	約聘設計師
**** 衛生福利部資訊處	科長

一、前言

隨著全球淨零排放議題與歐盟碳邊境調整機制之影響，國際對於淨零排放已逐漸形成全球共識，我國也在 2021 年正式宣示 2050 淨零轉型目標，於 2022 年發布「臺灣 2050 淨零排放路徑與策略」及「十二項關鍵戰略的行動計畫」，展現與世界各國共同邁向淨零排放之決心。同時，我國也在 2023 年制定《氣候變遷因應法》，作為臺灣邁向淨零排放路徑奠定法制基礎。

經濟部認為國內企業應透過強化能源管理的方法，做好因應能源轉型之準備。所以，經濟部能源署因應國際標準化組織發布 ISO 50001 能源管理系統標準的機會，2011 年率先推動服務業能源管理系統示範輔導計畫，2013 年再聯合產業發展署共同推動製造業能源管理系統示範輔導計畫，一起幫助國內業者健全能源管理制度，持續改進能源績效。

二、能源管理系統標準發展現況

國際標準化組織 (ISO) 與國際電工委員會 (IEC) 為解決不同管理系統標準之整合困境，已於 ISO/IEC Directives Annex SL 管理系統標準協調方法的文件中，提出管理系統標準之高階結構 (High Level Structure, HLS)，讓不同的管理系統標準擁有共通的核心結構，再依不同管理系統的個別需求，加入特定的專業內容，作為制定國際管理系統標準之基礎藍圖。此結構不僅可以統一管理系統核心要項與編碼架構，也以 PDCA(Plan-Do-Check-Act) 管理循環重新詮釋各類型管理系統標準之運行模式。

國際標準化組織於 2008 年 2 月成立 ISO/TC 242 技術委員會負責研訂有關企業能源管理系統的國際標準，並於 2011 年 6 月公告 ISO 50001 能源管理系統國際標準。2016 年再經國際標準化組織技術管理理事會 (ISO/TMB) 批准，將 ISO/TC 242 與 ISO/TC 257 合併，成立 ISO/TC 301 能源管理與節約能源 (Energy management and energy savings) 技術委員會，負責推動企業能源管理與節約能源標準化工作，繼續協助企業健全能源管理制度及持續改進能源績效。

國際標準化組織配合 ISO/IEC 指令 (ISO/IEC Directives) 針對 ISO 管理系統標準之統一修正，遵循制定管理系統標準 (Management System Standard, MSS) 之基礎架構，已於 2018 年重新公布 ISO 50001 能源管理系統標準，強化能源管理系統對於能源績效持續改進之要求。

經濟部標準檢驗局也為促進我國標準化體系發展，主動依 WTO/TBT 協定將我國國家標準與國際標準組織 (如：ISO、IEC) 公告的國際標準進行調和，並將 ISO 50001 系列國際標準轉換為我國國家標準，以利國內企業直接引用，ISO 50001 能源管理系統系列標準制定動態如表 1 所示。

表 1 ISO 50001 能源管理系統系列標準制定動態

標準編號	標準名稱	國際標準 (ISO) 公告進度	國家標準 (CNS) 公告進度
ISO/CNS 50001	能源管理系統－附使用指引之要求事項	2018 年公告	2020 年公告
ISO 50002-1	能源稽核－第一部分：附使用指引之要求事項	2025 年公告	沒有公告
ISO 50002-2	能源稽核－第二部分：建築物使用 ISO 50002-1 標準建構能源稽核之指引	2025 年公告	沒有公告
ISO 50002-3	能源稽核－第三部分：過程使用 ISO 50002-1 標準建構能源稽核之指引	2025 年公告	沒有公告
ISO/CNS 50003	能源管理系統－對提供能源管理體系審查和認證的機構的要求	2021 年公告	2024 年公告
ISO/CNS 50004	能源管理系統－實施、維持及改進 ISO 50001 能源管理系統之指引	2020 年公告	2023 年公告
ISO/CNS 50005	能源管理系統－分階段實施之指引	2021 年公告	2023 年公告
ISO/CNS 50006	能源管理系統－使用能源績效指標與能源基線評估能源績效	2023 年公告	2025 年公告

標準編號	標準名稱	國際標準 (ISO) 公告進度	國家標準 (CNS) 公告進度
ISO 50009	能源管理系統－多重組織執行共同的能源管理系統之指導綱要	2021 年公告	沒有公告
ISO/TS 50011	能源管理系統－使用 ISO 50001:2018 評估能源管理	2023 年公告	沒有公告
ISO/CNS 50015	能源管理系統－組織能源績效量測與查證：一般原則與指引	2014 年公告	2023 年公告

資料來源：國際標準化組織 (ISO) 網站 <https://www.iso.org/standards.html>
國家標準 (CNS) 網路服務系統 https://www.cnsonline.com.tw/?locale=zh_TW

三、能源績效管理標準簡介

由於因應氣候變遷與實施節能減碳已是全球重點關注的議題，所以，企業得藉由改進能源績效的過程，減少各種與能源相關的溫室氣體排放。其中，應用監督與量測能源績效的方法，就是確保此類活動能獲得適當結果之重要關鍵。

國際標準化組織 (ISO) 為促進企業強化能源績效管理的能力，制定幾項有關能源績效評估的標準，例如：ISO 50006 標準協助組織應用能源績效指標 (EnPIs) 與能源基線 (EnBs) 量測與監督能源績效、ISO/TS 50011 標準可以建立企業評估其能源管理系統績效的方法、ISO 50015 標準可以幫助企業建立量測與查證能源績效的方法。

ISO 50006 標準要求組織應建立能源績效指標與能源基線，用以證明能源績效改進。其中，能源績效指標用於組織向利害相關者 (例如：內部員工、外部供應鏈廠商) 提供能源績效資訊，並採取適當的能源管理行動。所以，組織選擇能源績效指標前，需要對其能源績效指標邊界進行分析，決定是否適合用於監督及量化能源績效。

能源績效指標可以使用能源消耗或能源效率作為報告主題，也可使用統計模型表示其量化過程。當組織發現會影響能源績效的相關變數時，考量使用相關變數進行正規化 (normalization) 過程，讓能源績效指標可以用於監督及評估能源績效，也能用於確認能源績效持續改進之證據。

ISO 50006 標準提供組織如何開發、應用及更新能源績效指標與能源基線，用以監督及評估其能源績效，證明能源績效已獲得改進，主要執行步驟說明如下：

3.1 取得能源績效相關資訊

組織應鑑別目前使用的能源類型，用以評估現在與過去的能源消耗與能源效率，同時分析影響能源績效之相關變數、鑑別重大能源使用 (SEUs)、以及決定能源績效改進機會之優先順序。

另外，為量測能源績效表現，組織需要每個能源績效指標設定合適的量測邊界，不僅需考慮現實環境需求，也要用於回應預期使用者的需求與期待。包括：

- 1. 組織對其能源績效之控管程度或影響能力。
- 2. 組織鑑別的重大能源使用項目。
- 3. 組織希望管理的設施、設備、系統或能源使用過程。
- 4. 組織設定能源績效指標邊界之容易程度。
- 5. 組織運作能源管理系統的地理邊界。
- 6. 能源消耗與相關變數之可用數據。

最後，組織需要鑑別及量測跨越不同能源績效指標邊界之能源流向，所以，組織需決定建立能源績效指標所需的能源資訊，包括：其他相關資訊。另外，組織也需要量測跨越能源績效指標邊界之能源流向。

表 2 常見的能源績效指標邊界層級與內容

層級	內容
設 施 / 設 備 / 能源使用過程	以組織希望管理的設施、設備或能源使用過程作為實質邊界。 如：區隔蒸汽鍋爐使用能源的過程與其他設施使用能源的過程。
系統	以組織想要控制或改進的設施 / 設備 / 能源使用過程作為實質邊界。 如：生產蒸汽的設備 (蒸汽鍋爐) 與使用蒸汽的設備 (烘乾機) 。
組織	以指定的個人、小組、團體或業務單位之管理責任作為實質邊界。 如：組織特定部門購買之蒸汽。

資料來源：ISO 50006:2023 標準第五節

3.2 決定能源績效指標

組織選擇能源績效指標時，除考慮會影響能源績效的相關變數與預期使用者需求，要考慮組織量測與監督這些相關變數的能力。組織不僅對重大能源使用項目設定能源績效指標，也可以對組織的能源管理系統設定能源管理績效指標。組織決定能源績效指標需要滿足以下目的：

- 1. 瞭解設施、設備、系統或能源使用過程之能源績效。
- 2. 溝通與組織的能源績效有關之資訊。
- 3. 追蹤能源標的之執行進度。
- 4. 管理與監控重大能源使用項目。
- 5. 監督及量測能源績效變化。
- 6. 評估與證明能源績效持續改進。

ISO 50006 標準附錄 C 也提供有關能源績效指標類型之應用範例，如表 3 所示。

表 3 能源績效指標類型

類型	典型用途	能源績效指標及其應用範例	說明
無相關變數 (簡單度量)	- 量測能源消耗量之變化值。 - 滿足基於絕對節省之監理要求事項。 - 瞭解能源消耗之趨勢。 - 沒有影響能源消耗的相關變數，可以用於監督並決定能源績效改進。 - 以能源使用量作為基本能源績效指標，用於瞭解實際能源使用情況。	- 能源消耗量 (kWh, GJ)。 - 照明用電量 (kWh)。 - 鍋爐燃料消耗量 (GJ)。	沒有將相關變數納入考量，容易產生誤導。方便從量測儀表或付費賬單取得相關資訊。

類型	典型用途	能源績效指標及其應用範例	說明
單一相關變數 (比值型)	- 能源使用設備或系統在標準情況或同等條件之能源效率。 - 監督具有單一相關變數且無基本負載之能源效率。 - 滿足法規要求之能源效率。	- 單位產品重量之用電量 (kWh/ t)。 - 單位產品銷量之耗能量 (GJ / 產品數量)。 - 1 /100 km。	僅有單一相關變數且無基本負載，容易產生誤導。 可能還要再進行統計檢定，確認不存在基本負載及其他相關變數。
統計模型	- 具有一或多個相關變數及其基本負載之能源效率。 - 於基線期內決定相關變數之能源績效改進。 - 可以評估潛在的能源績效改進機會。 - 可以查證既有的能源績效改進機會所節省的能量。	- 一或多種類型的生產設施或設備之能源績效模型。 - 旅館的住房率及室外溫度之能源績效模型。 - 泵浦的能源消耗量與流量之關聯模型。	針對單一設施監督能源績效及決定能源績效改進時，可使用具有一或多個相關變數之線性迴歸模型。
工程模擬	- 量測能源流向，從相關變數推斷或計算其能量流。 - 能在設計階段為特定能源績效改進行動優化其能源績效或估算能源績效改進。	- 依據工程模擬方法計算能源績效指標值。 【煉油廠模型】 相關變數非相互獨立(如：溫度及壓力)，仍可使用的模型。 【電弧爐模型】 量測製程的用電量，也計算爐中添加用以調整鋼胚化學成分的碳粉。 - 通常用於計算能量貢獻。	工程模擬可獲取簡單或複雜系統及設施之能源績效。 工程模擬可以涵蓋多個相關變數，並對其性能進行適當校正以及提供正規化基礎，以決定能源績效之改進。

資料來源：ISO 50006:2023 標準附錄 C

3.3 建立能源基線

能源基線係用於組織監督能源績效及證明能源績效改進，建立能源基線過程可以依循以下步驟進行：

1. 決定能源基線之特定用途。
2. 決定合適的數據蒐集期間。
3. 蒐集數據。
4. 分析數據。
5. 決定並評估能源基線。

組織建立能源基線的過程，需要考慮其能源管理目標、能源標的及作業型態，用以決定合適的數據蒐集期間。設定能源基線期間應儘可能延長，確保決定的能源績效指標與能源基線應用的期間（生產之季節性、氣候型態等），可以合理解釋組織運作型態之變化。

3.4 監督及報告能源績效改進結果

組織可以考量預期使用者之需求與期待，向使用者呈現能源績效改進結果，也可以基於以下目的，使用能源績效指標或能源基線監督其能源績效：

1. 確保使用能源過程之作業管制效果是有效的。
2. 可以證明能源績效已獲得其持續改進。
3. 監督能源標的是否已達成或獲得進展。

組織可藉由固定的時間頻率（逐月、逐日或逐時）比較實際能源消耗（能源績效指標值）與預期能源消耗（能源基線值）差異，用以表達能源績效之變化。

組織可比較能源績效指標值與其相對應的能源基線值之差異，並用下列方式調查能源績效產生重大偏離的原因：

1. 若因能源績效偏差結果導致耗能量急遽增加，可以調查各項作業管制內容是否落實。
2. 若因能源績效偏差結果造成耗能量急遽下降，可以用適當的管理行動改正其作業管制內容。

3. 檢查用於量化能源績效的能源數據是否正確。
4. 考慮靜態因子是否發生重大變化。

3.5 維護能源績效指標及能源基線

當組織的設施、設備、系統或能源使用過程發生變化，其能源效率、能源消耗及相關變數都可能受到影響。組織宜確保目前的能源績效指標、能源績效指標邊界及能源基線，在量測能源績效方面仍然有效。倘若已不再合適，組織應重新審查或開發能源績效指標及能源基線。

ISO 50006 標準提供判斷能源績效指標與能源基線是否適當或持續有效的方法，包括：

1. 靜態因子：假若靜態因子發生變化，可能就要開發新的能源績效指標及能源基線。利用統計檢定的方法，可以決定組織是否需要開發新的能源績效指標或能源基線。
2. 相關變數：當相關變數發生重大變化且顯著超出當初建立能源基線的範圍時，組織需要建立新的能源績效指標及能源基線。
3. 能源使用類型：當能源使用類型發生改變時，需要追蹤能源使用類型的內容，並調整其能源使用類型與能源基線有關的權重。
4. 數據可用性：當組織改進能源數據蒐集系統，若發現可取得更高品質的能源數據或新的相關變數，需要修訂能源績效指標或能源基線。
5. 數據頻率：若可以採用更規律的間隔或更高的頻率蒐集數據，可以讓新的能源績效指標或能源基線進行更有效的管理。
6. 基線期：組織可透過更新基線期鎖定已完成的能源績效，專注於當前而非過去期間的能源績效，並進行能源績效改進。此種作法將基線期更新為最近的期間（如：去年），作為新的能源績效比較點。
7. 依預定之方法：組織可以依其設定的條件，主動更新並鑑別能源績效指標或能源基線。如：許多組織每年會主動更新能源基線。

四、能源績效管理案例解析

以往各級政府機關為推動資訊業務，各自建置維護資訊系統、伺服器主機及資訊機房，不僅造成系統重複開發、伺服器主機數量激增及機房資源利用率下降，還會導致資訊資源無法共享及整合，造成各級機關每年度需花費大量預算在採購資訊硬體及維持機房維運方面。資訊機房若能廣泛應用伺服器主機虛擬化技術，不僅可以幫助政府機關減少採購資訊設備，也能提供一個資訊整合與資源共享平台。

衛生福利部於 2009 年曾採用虛擬化主機架構健全電子病歷交換制度的資訊環境，用以解決龐大的電子病歷資料儲存之沉重負擔。2010~2015 年期間更加速推動各級醫療院所健全電子病歷系統，雖然當時對後續虛擬主機擴充與應用之推動方向還不夠明確，但是，虛擬主機的概念開始引進至國內的醫療管理體系。國家發展委員會 2018 年推動「以部會為中心整併所屬機關之電腦機房」之政策方向，衛生福利部資訊處也開始規劃加速推動虛擬化主機平台，期望在有限的電腦機房空間中，利用虛擬化技術節省伺服器主機用電量，並提升資訊系統運作效率與穩定性。

衛生福利部資訊處從 2019 年開始引進 ISO 50001 標準建立能源管理系統，要透過能源審查檢討資料中心的能源使用狀況，包括：鑑別重大能源使用、設定能源績效指標、建立能源基線及制定數據蒐集計畫。本案例以 ISO 50006 標準建議的管理程序，說明衛生福利部資訊處落實推動能源績效管理的經驗。

4.1 取得能源績效相關資訊

衛生福利部資訊處每年定期實施能源審查，評估資料中心過去與現在的能源消耗及效率，並鑑別重大能源使用 (SEUs) 項目。依能源使用設備盤點結果，考量各項能源使用設備之耗電比例、老舊度以及運轉時數等項目，分別賦予權重與評分，再以加權平均法決定重大能源使用項目。經重大性判定結果，該中心重大能源使用設備包括：冰水主機 (5 台) 及伺服器主機 (3 排機櫃)，占其全年用電量 92% 以上。所以，該中心考量選擇空調設備或伺服器設備作為能源績效指標邊界。

4.2 決定能源績效指標

因應全球環保意識高漲與全球化競爭環境變化之影響，資訊產業已開始發展綠色計算 (Green Computing) 觀念，要以虛擬化技術 (Virtualization) 與電源管理 (Power Management) 的方式善用電腦硬體資源，用以降低伺服器用電量，提高運算資源動態管理能力。所以，該中心以「伺服器主機用電量」作為能源績效指標，並分析影響伺服器主機用電量之相關變數。虛擬主機 (Virtual Host) 本身是一種因應使用者需求將實體伺服器分割出多個獨立空間給不同用戶共享之概念。傳統的資料中心會藉由實體主機滿足使用者的資訊需求，但是面對日益增加的資訊需求，無限制地增加實體主機的採購需求，只會增長伺服器主機用電量，間接增加資料中心的用電量。

所以，該中心配合衛生福利部推動虛擬主機平台之政策目標，逐步增加虛擬主機的使用比例，減少伺服器主機用電量，選擇以「實體主機開機數量」及「虛擬主機開機數量」作為影響伺服器用電量之相關變數。

4.3 建立能源基線

該中心為監督伺服器主機的能源績效，並證明能源績效已獲得持續改進，特對能源績效指標建立能源基線，並探討多個自變數與應變數間的關係，以線性迴歸模型建立能源基線。該中心已蒐集 109~110 年的每日伺服器用電量作為應變數 (Dependent Variable)，並取得實體主機開機數量與虛擬主機開機數量作為自變數 (Independent Variable)，其迴歸分析結果如圖 1 所示。

為解釋自變數變異比例，該中心採用決定係數 (Coefficient of determination, R^2) 作為線性迴歸模型的擬合度與解釋力之依據。對簡單線性迴歸模型而言，決定係數為樣本相關係數的平方 (R^2)，若是加入其他自變數進行迴歸分析，其決定係數會變為多重樣本相關係數的平方 (調整後的 R^2)。當 R^2 越接近 1，表示線性迴歸模型能更好解釋數據中的變異，模型配適度越好，所以，該中心以 $R^2 > 75\%$ 判斷迴歸模型的變數解釋力，並以 P value 判別是否具有顯著性，採取 P value < 0.05 作為判斷依據。

該中心依迴歸模型建立的能源基線方程式為「伺服器用電量 = 215.8253 + 3.324 x 實體主機開機數量 + 0.9535 x 虛擬主機開機數量」。

摘要輸出									
迴歸統計									
R 的倍數	0.880067113								
R 平方	0.774518123								
調整的 R 平方	0.773898667								
標準誤	48.91671148								
觀察值個數	731								
ANOVA									
	自由度	SS	MS	F	顯著值				
迴歸	2	5983645.112	2991822.556	1250.320425	3.4091E-236				
殘差	728	1741990.914	2392.844662						
總和	730	7725636.026							
	係數	標準誤	t 統計	P-值	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%	
截距	215.8253031	140.2326095	1.539052178	0.024226073	-59.48327272	491.133879	-59.48327272	491.133879	
實體機開機數量	3.3240	0.153622914	21.63745135	1.48413E-80	3.022411532	3.625605123	3.022411532	3.625605123	
虛擬機開機數量	0.9535	0.023445224	40.66756226	1.4744E-189	0.907431806	0.999488445	0.907431806	0.999488445	

圖 1 伺服器主機虛擬化之迴歸模型分析

4.4 監督及報告能源績效改進結果

該中心以「伺服器主機用電量」作為能源績效指標，逐日調查 109~110 年每日實體主機開機數量、虛擬主機開機數量及伺服器主機用電量，透過迴歸分析結果建立能源基線方程式。本案例將 111.01~113.10 間每日量測實體主機開機數量、虛擬主機開機數量代入能源基線方程式計算，獲得伺服器主機用電量，當作「能源基線值」。再紀錄當日實際量測伺服器主機用電量之結果，當作「績效指標值」。最後計算每日績效指標值與能源基線值之差異，作為當天伺服器主機操作實體主機開機數量與虛擬主機開機數量之能源績效。

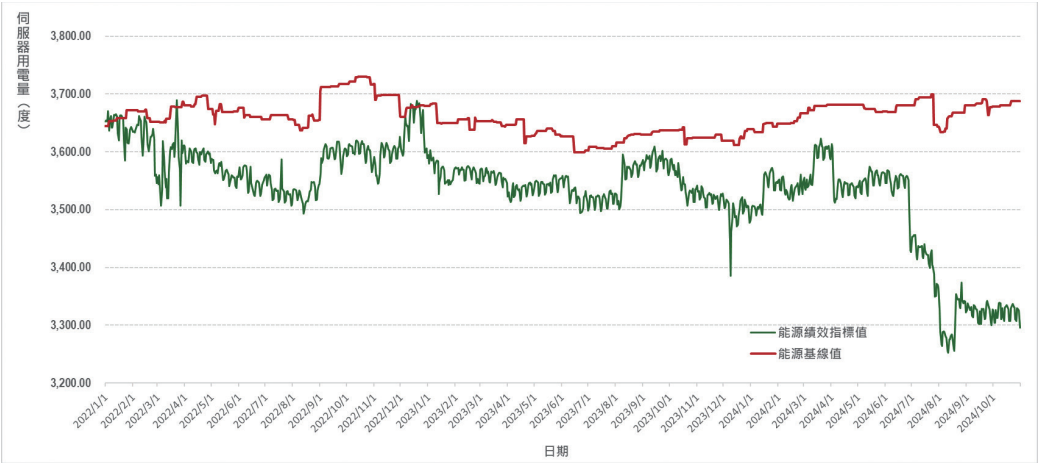


圖 2 虛擬伺服器主機能源績效表現

該中心自 111 年起逐步增加採購虛擬主機數量，利用虛擬主機滿足資訊服務能量，用以回應日益擴增的資訊服務需求。111 年 01 月至 113 年 10 月間，該中心每日啟用虛擬主機的服務能量從 463 台 / 日擴增至 548 台 / 日，累積節電 128,304 度，平均年節電率約 3.51%。

表 4 各年度伺服器主機使用情形

年度	2020.01~ 2021.12	2022.01~ 2022.12	2023.01~ 2023.12	2024.01~ 2024.10
伺服器主機每日開機 需求量 (台 / 日)	1,396	1,372	1,395	1,430
實體主機每日開機數 量 (台 / 日)	891	909	881	882
虛擬主機每日開機數 量 (台 / 日)	505	463	514	548
伺服器主機每日用電 量 (度 / 日)	3,539	3,588	3,543	3,265

資料來源：本研究整理

4.5 維護能源績效指標及能源基線

該中心每年依 ISO 50006 標準提供的管理程序，持續檢討能源績效指標、能源績效指標邊界及能源基線，用以確保能源績效量測結果持續有效，包括：

1. 靜態因子：該中心以資訊機房的樓地板面積作為靜態因子，111.01~113.10 間沒有明顯變化。
2. 相關變數：該中心以實體主機開機數量與虛擬主機開機數量作為相關變數，111.01~113.10 間沒有顯著超出當初建立能源基線的範圍。
3. 能源使用類型：該中心使用的能源使用類型為電力，111.01~113.10 間沒有改變用電模式。
4. 數據可用性：該中心持續改進能源數據蒐集系統時，沒有新增的能源數據或相關變數，目前數據蒐集方式仍然有效。
5. 數據頻率：該中心以日為單位，持續蒐集能源數據，沒有變更。
6. 基線期：該中心使用相同時間 (109.01~110.12) 建立的能源基線，用以提供一致的比較基準。

五、結論

台灣在面對全球淨零排放的趨勢下，積極鼓勵能源用戶實施深度節能，打造符合能源永續的經營空間。導入 ISO 50001 能源管理系統，不僅可以幫助組織健全能源管理機制，也能協助組織持續改進能源績效。所以，國際標準化組織持續更新 ISO 50006:2023 標準，幫助已建置能源管理系統的組織更有效地應用能源績效指標與能源基線，落實能源績效管理，達到持續改進能源績效之目的。這個標準可以提供能幫助組織符合 CNS 50001 要求事項之技術資訊，用以量測、監督、分析及評估能源績效，進一步使用合適的能源績效指標與能源基線持續改進能源績效。

衛生福利部資料處導入 ISO 50001 能源管理系統後，決定重大能源使用項目為空調主機設備及伺服器設備。由於該中心要配合衛生福利部推動虛擬主機平台之政策目標，選擇以伺服器設備用電量作為能源績效指標，並建立能源基線，用以量測、監督、分析及評估能源績效之變化。

回顧過去資訊科技發展歷程，各級政府機關因行政作業需求推動資訊業務，分別購置許多軟硬體資訊設備，也持續擴充購置資訊系統、伺服器與機房空間。長期累積結果，伺服器數量不斷增加，相關部門的資訊資源也無法整合與共享，導致整體資源利用率下降，每年還需要支付高額費用維持各項軟硬體資訊設備與機房之有效運作。如果能採用購置虛擬主機取代部分實體主機的方式，不僅可以提高資訊系統利用率，也能節省資訊設備採購支出，還可以節省資料中心的容納空間、用電量需求、基礎設施管理負荷及資訊設備維護成本。

採購虛擬主機不僅減少實體主機與資訊軟體的採購支出，也能減少實體主機運轉的用電量。利用線性迴歸模型建立能源基線，可以量化使用虛擬主機替代實體主機之能源績效，當虛擬主機的每日服務能量從 430 台擴增至 580 台，累積減少用電約 122,512 度，平均節電率達 3.40%。

參考文獻

行政院 (2023)，「行政院及所屬各機關資料中心設置作業要點」。

牟永祥 (2014)，「行政院及所屬委員會共構機房簡介」，政府機關資訊通報，第 322 期，p.30-p.34。

官生平 (2022)，「解讀 ISO Annex SL MSS」，品質月刊，第 58 卷 10 期，p.40-p.48。

林文祥 (2018)，「國內資料中心能源使用效率現況調查與分析」，冷凍空調 & 能源科技，第 112 期，p.66-p.72。

林宜儒 (2024)，「淨零排放下我國製造業 ISO 50001 推動成效」，工業污染防治期刊，第 162 期，p.55-p.70。

溫福星 (2013)，「社會科學研究中使用迴歸分析的五個重要概念」，管理學報，第 30 卷 2 期，p.169-p.190。

International Organization for Standardization (2018), “Energy management systems - Requirements with guidance for use” , Geneva, Switzerland.

International Organization for Standardization (2023), “Energy management systems - Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines” , Geneva, Switzerland

環境管理規劃類

企業如何運用 EICT 提升 ISO 50001 能源管理成效

沈佩玲*、黃習為**、廖弓普***、林庭瑋***

摘 要

ISO 50001 為 ISO 國際標準化組織於 2011 年公告的能源管理系統標準，主要目的係藉建立 PDCA「計畫（Plan）－執行（Do）－查核（Check）－改善（Act）」之機制及相關準則與方法，提供組織、企業必要程序架構可依循，透過制度引導企業實現節能減碳，建立持續改善之機制，自主提升能源使用效率，並經由能源使用及成本的降低、溫室氣體排放的減量，進而達到永續經營與環境友善的目標。

順應國際能源總署（IEA）將「節能」視為淨零首要路徑的全球趨勢，我國已宣示 2050 淨零排放目標，並規劃「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略」積極佈署淨零轉型，訂定節能關鍵戰略行動計畫，將推動 ISO 50001 能源管理系統作為工業部門減碳的重要基礎，更設定 2030 年須達 60% 覆蓋率的關鍵指標（KPI）。

然而，傳統 ISO 50001 的推動高度依賴人力，其數據分析往往缺乏即時性，形成管理瓶頸，難以發掘潛在節能機會。本文探討如何依循 ISO 50001 能源管理系統精神，結合能源資訊技術（EICT）進行系統整合、資料蒐集與運算分析，透過「能源績效監視分析系統」，完成績效指標視覺化、能源基線資訊化建置，進行監督任務與能源模型之監測及評估，做為後續能源監測與管理能源績效的依據，提升 ISO 50001 能源管理系統管理成效並找尋節能改善空間與方向。

【關鍵字】能源管理系統、ISO 50001、能源資訊技術、EICT、EMS

- | | |
|--------------------|------|
| * 財團法人台灣綠色生產力基金會 | 副理 |
| ** 財團法人台灣綠色生產力基金會 | 專案經理 |
| *** 財團法人台灣綠色生產力基金會 | 協理 |
| *** 經濟部產業發展署永續發展組 | 科長 |

一、前言：能源管理轉型的關鍵契機

國際能源總署（IEA）明確指出，「節能」是邁向淨零碳排的「第一順位能源」（First Fuel）。相較於開發新興能源需要龐大投資與漫長建設週期，節能措施具備成本效益高、見效速度快等優勢，能在最短時間內達成最顯著的減碳成果。因此，在全球能源轉型的初期階段，提升能源使用效率不僅是選項，更是最關鍵且迫切的優先行動。順應此全球共識，我國於 110 年宣示「2050 淨零排放」的國家目標，並將「綠色成長與淨零轉型」列為「國家希望工程」的八大施政核心之一。其中，「數位與綠色的產業雙軸轉型」策略，正是要透過智慧科技與淨零科技的雙軸發展，協助廠商建置 ISO 50001 能源管理系統，全面推動產業的綠色製造升級。此舉不僅是回應國際趨勢，更是提升我國能源自主、強化國家與企業韌性的重要基石。

為將宏觀的淨零藍圖轉化為具體行動，政府擘劃了「十二項關鍵戰略」及「深度節能推動計畫」等政策框架，從能源、產業、科技、金融等多個面向，全面推動轉型。在工業部門的減碳路徑中，能源效率提升與製程改善被視為關鍵施力點。政府的推動路徑非常明確：核心策略為推動一個整合性的解決方案，即以 ISO 50001 能源管理系統為制度框架，並透過智慧化能源監控與數位管理技術，藉此協助企業從根本提升能源效率、減少二氧化碳排放。為強化執行力與評估效果，政府更設定具體目標：要求工業部門能源大用戶在 2025 年導入 ISO 50001 能源管理系統的覆蓋率達 50%，2030 年達 60%，並將其納入工業節能戰略中作為關鍵績效指標（KPI）。此舉不僅為節能政策奠定制度基礎，也為企業提供具體行動指引與衡量標準。

然而，就能源大用戶而言，雖具較佳資源與管理基礎，但提升 ISO 50001 導入覆蓋率仍面臨數項挑戰，包括各廠區能源管理成熟度不一、既有監測與自動化系統規格差異大、跨部門協調與資料整合不易，以及高階主管對導入效益、投資回收期仍有疑慮。此外，傳統的 ISO 50001 運作模式高度依賴人力進行數據蒐集、抄表與分析，此過程不僅耗時費力，其產出的分析報告也往往因時間差而失去即時性，導致潛在的節能機會流失，難以作為管理階層進行快速決策的有效依據，形成管理上的瓶頸。為突破此困境，若能結合能源資訊系統（Energy Information and Communication Technology, EICT）建置「能源績效監視分析系統」，即可進行能源數據即時蒐集、

視覺化呈現、異常警示與趨勢分析等功能，協助能源管理人員快速識別問題、採取矯正措施，降低管理負擔與人力投入。同時，透過大數據分析與歷史資料比對，不僅能掌握能源使用基線與波動趨勢，更能於改善行動後即時驗證節能成效，強化決策依據與管理信心。

二、ISO 50001 能源管理系統簡介與執行要點

2.1 ISO 50001 能源管理系統標準架構說明

能源管理系統前身為英國 BSI 於 2009 年 7 月發佈的歐洲標準 EN 16001，國際標準組織則以 ISO 9001/14001 為架構，發展 ISO 50001 能源管理系統 (ISO 50001；Energy Management System；EnMS)，目前最新版本為 2018 年 8 月修訂 ISO 50001：2018。

該標準架構主要提供給所有管理系統標準使用，一共分為 10 個章節，如表 1 所示。其中第 4 至第 10 章為實質性要求，整理內容如表 1。ISO 50001 以 PDCA「計畫 (Plan)－執行 (Do)－查核 (Check)－改善 (Act)」的管理循環來詮釋標準的運行。

表 1 ISO 50001 各章節實質要求

章節	章節名稱	內容
四	組織處境與利害相關者分析	要求組織瞭解其營運脈絡、內外部議題、利害相關者的期望，並辨別出能夠影響能源績效的因素。
五	領導與承諾	高階主管需對能源管理系統 (EnMS) 提供資源與支持，確保能源政策、角色職責與溝通管道明確。
六	規劃	建立能源基線 (EnB)、能源績效指標 (EnPI)，針對重大能源使用 (SEU) 制定目標與行動計畫。
七	支援	確保人力資源具備能源管理知識，並透過文件化資訊與內部溝通支援系統運作。
八	運作	將能源目標落實於營運流程中，包括設施設備操作與工程維護的最佳化。
九	績效評估	透過監測、量測、分析與能源稽核等方式，確保能源改善目標的實現。
十	改善	當發現偏差或潛在改善機會時，應實施矯正措施與持續改善機制。

2.2 ISO 50001 能源管理系統執行重點

在企業導入 ISO 50001 過程中，為確保能源績效持續精進，須建立系統化且可執行之管理流，執行重點說明如下。

1. 系統化的能源管理規劃

企業應由最高管理階層提出能源政策與持續改善承諾，提供推動能源管理所需資源。依據能源管理規劃結果，研擬符合組織特性的管理策略與目標，明確界定能源標的、行動計畫及績效指標等，並將重要作業管制項目文件化及保留紀錄。主要內容包括：(1) 執行能源審查（Energy Review）；(2) 建立能源基線（EnB）與能源績效指標（EnPI）；(3) 規劃具體行動計畫（Action Plans），形成完整 PDCA 管理循環。

2. 建立能源績效指標及能源基線

能源績效指標及能源基線為相互關連的關鍵概念，在早期推動的過程中企業往往不清楚如何透過能源績效指標與能源基線來進行重大能源使用分析與改善。標準明確規範相關要求與提供指引，以協助組織建立與實施遵循，並提供企業對於建立、使用及維持能源基線，以及利用能源績效指標量化能源績效及其變化，以符合能源管理系統標準的相關要求。

3. 具體的能源管理行動計畫

能源行動計畫需明確列出改善項目、執行方式、責任單位、時程與預期效益，企業應依其營運特性設定能源管理目標與標的，擬訂具體的能源管理行動計畫並落實執行，企業可針對照明、空調、鍋爐等其他生產設備進行量測，分析潛在節能改善空間，以規劃適當的能源管理行動計畫。

4. 能源數據收集計畫

ISO 50001 標準要求企業需事先規劃要收集哪些數據、如何收集數據以及如何有週期性地確保維持能源審查和監督、量測、分析和評估過程所需數據的完整性、可用性及正確性，能源數據為能源績效分析與決策的基礎，應依據 EnPI 與 SEU 建立完整的數據收集架構，包括計量設備規格、數據頻率、記錄方式與責任人員。資

料需具準確性、時效性與可比性，並透過自動化系統或儀表整合技術提升數據可靠度。

2.3 ISO 50001 導入現況與未來挑戰

在全球邁向淨零碳排與能源轉型的背景下，ISO 50001 能源管理系統的推動已成為企業節能減碳的重要手段。然而，實務導入過程中仍面臨諸多挑戰，如表 2 所示。以下從制度、技術、人員與組織文化 4 個層面，說明企業常見困難及對應的改善建議。

在「制度與組織」層面，高階主管的承諾與跨部門協作是基石，對策為透過量化的投資回報爭取支持，將能源績效納入 KPI，並成立能源委員會以克服部門壁壘，形成權責分明、流程順暢的協作機制。在「技術與資訊」層面，數據的品質是能源管理的基石。許多企業因缺乏完整的分項計量設備，導致不清楚能源流向，無法精準聚焦能耗使用。解決之道在於優先針對重大耗能設備（SEU）加裝智慧電表與感測器，並導入能源資通訊技術（EICT）建構中央監測分析系統。此舉不僅能實現數據的自動化蒐集，更能運用統計模型，排除產量、氣候等變因的干擾，建立穩定可靠的能源基線與績效指標（EnPI），讓數據真正成為管理的眼睛。此外，「人力資源」的關鍵在於專業能力與全員參與。除了培育內部能源管理師並提供簡易分析平台外，更需透過教育訓練與獎勵機制，將節能意識擴散至基層，化為全員行動。最後，為確保系統的「文化與持續運作」，必須破除「為驗證而建」的迷思。透過每年至少 1 次的管理審查會議，確保管理目標與策略能與時俱進。更重要的是，利用 EICT 平台持續監控改善專案的實際成效，形成一個數據驅動、即時回饋的持續改善循環。

表 2 ISO 50001 導入困難與對策建議

面向	導入挑戰	說明	對策建議
制度與組織	高階管理承諾不足	若高階主管僅視導入為應付稽核，將難以有效推動系統運作	✓ 透過能源審查量化節能潛力與投資回報 ✓ 將能源績效納入 KPI 與預算分配
	缺乏跨部門協作機制	能源管理涉及生產、設施、採購、維運等單位，易出現職責模糊或執行斷層	✓ 成立能源管理委員會，明確職掌與協作流程 ✓ 導入責任分配矩陣
技術與資訊	能源數據蒐集不完整	多數企業尚未建置完整的分項計量與即時監控設備，導致能源流向不明	✓ 優先於重大耗能設備加裝智慧電表與感測器 ✓ 採用能源資通訊技術（EICT）建構監測分析系統
	能源績效指標與基線不易建立	生產變異、環境因素等常影響能源使用，造成基線偏移、EnPI 不穩定	✓ 採用正規化統計模型處理變因 ✓ 運用資料視覺化追蹤基線偏離狀況
人力資源與能力	欠缺專責能源管理人力	多數企業未設專職能源管理員，或人員未具備數據分析能力	✓ 培育內部能源管理師導入簡易能源績效平台，降低操作門檻
	基層員工參與度低	能源管理常被視為管理階層或工程部門工作，基層人員缺乏參與感	✓ 辦理能源教育訓練與節能提案活動 ✓ 將部門能耗納入內部績效考核指標
文化與持續運作	系統僅為驗證而建	系統文件齊全但缺乏持續改善機制，長期未更新或進行能源績效回顧	✓ 每年至少 1 次管理審查會議，確保系統滾動更新 ✓ 導入 EICT 平台監控節能改善成效並即時調整

綜觀以上挑戰，可見 ISO 50001 雖為架構完整之能源管理工具，但其真正效益來自於「制度內化」與「資訊化整合」雙軸的深度並進。若僅停留在傳統的管理模式，數據分析不夠完整，使系統的潛力未能完全發揮。其中，「資訊化整合」的實踐，便是透過導入能源資通訊技術，促使傳統管理模式升級。

傳統 ISO 50001 在執行上，常需依賴人力抄表與文書作業，其數據的即時性與準確性難免受到限制，形成管理上的瓶頸。透過建置智慧電表、感測器與能源管理系統（EMS），企業能將散落於各廠區的能源數據進行自動化、即時性的蒐集，從而建立清晰的能源流向，為精準管理奠定基礎。因此，能源資通訊技術不僅是工具，更是推動「制度內化」的基石，進而驅動企業實現制度化、數據化、智慧化的能源管理。

三、EICT 能源資通訊技術說明

3.1 能源資通訊技術概述

能源資通訊是利用「資訊科技」所著重之資訊編碼解譯與通訊傳輸方式，以程式語言與通訊技術進行資訊系統設計與開發，並以日益快速準確且不受距離限制之「通訊技術」克服資料交換與網路通訊（如無線、光纖、衛星、專網）等技術困難。以資通訊技術針對能源使用進行即時監控與最佳化管理，將能源使用效率資訊分析決策為核心，藉由 EICT 技術的整合應用，使達到即時獲取大量能源使用資料並進行分析，以改善能源消耗情況，提高節約能源效益，達成節能減碳的目標。能源管理結合資通訊技術應用層面相當廣泛，目前常見應用範圍主要包括電力系統之輸配電自動化設備與系統（T&DAS）、先進讀表基礎建設（AMI）及能源管理系統（EMS）等 3 個應用領域。

電網基礎建設運用資訊科技與網路通訊技術，可針對發電、輸電、配電及用電等過程進行資料收集與自動監控管理，以充分反應電力供需情況，達到能源效益之最佳化管理。此外，若將能源資通訊技術用於工廠進行能源管理除了可提升能源使用效率之外，對於生產排程優化與提升產能；於建築與家庭節能應用上，採用建築物能源管理可管理整體建築能耗，家庭中則可將智慧家電結合能源管理資訊平台，將室內照明、空調進行優化管理，以提供舒適且節能之生活環境，這些都是 EICT 的應用成果，各領域應用與發展彙整如表 3 所示。

表 3 能源資通訊技術應用與效益

應用領域	項目	技術應用與發展	效益
電力基礎建設應用	輸配電自動化	智慧電表、電表資訊管理系統、能源管理平台等相關軟硬體元件、產品與設備	預估可達到 15% * 以上之節能效益
	先進讀表基礎建設		
能源管理系統應用	工廠能源管理	感測器、自動化控制裝置、能源管理系統、專家系統、節能技術服務	根據美國能源部估計，針對高耗能產業進行能耗管理，可達到 5-25%** 以上節能效益，同時也可透過單位耗能指標降低生產成本並提升產能。
	家庭節能產品	感測器、控制元件、能源管理系統、低能耗待機技術、變頻技術	省電照明、舒適空調與智慧家電管控。
	建築能源管理系統	感測器、自動化控制裝置、能源管理系統、創新節能服務	透過資通訊技術及自動化控制使管理整體建築的能耗。
其他	遠距工作	視訊會議軟硬體產品、遠距監控設備、電子報表、電子商務應用	透過網路通訊技術，使達到遠距工作能力，減少人員出差頻率與里程數，以減少企業的碳排放量，並提高工作效率。

* 依輸配電自動化與 AMI 回饋合併情境，參考 DOE/NREL 與英國 NEED 分析。

** 見 DOE/IEA 案例

3.2 能源資通訊技術應用於管理系統

資通訊技術應用於能源管理系統 (EMS) 架構可分為設備層、控制層、應用管理層、雲端平台 4 大區塊，透過前端設備感測器偵測用電狀況，藉由控制層軟體進行用電監控、預測、控制、管理，再藉由管理伺服器整合資訊，透過能源閘道器進行平台整合與未來雲端連結，以展開更廣泛的節能監測管理。常見範圍包括：工廠能源管理系統 (FEMS)、家庭能源管理系統 (HEMS)、建築能源管理系統 (BEMS) 與零售業能源管理系統 (REMS) 等。

工廠能源管理系統（FEMS）架構如圖 1，主要透過網路將現場生產資訊與機台設備計量儀表蒐集之電力、水、空氣、燃料等能源耗用資料，能源管理權責人員可依用電資訊進行電力流向分析，以掌握能源使用情況。經由資料彙整分析，進而出生產製程中之品質不穩定性、設備稼動及生產效率等問題，作出生產設備預防性維護及計算出詳細的生產成本，即時監視能源消耗，另可結合產線現場回饋訊息，幫助工廠清楚了解設備的能源使用情況，透過改善計畫研擬並推行後，可以有效降低能源使用。



圖 1 工廠能源管理系統（FEMS）架構示意圖

製造業以生產設備能耗占工廠總能耗比例較大，因此詳細測量、記錄能源的使用量，以及增加從供電機房到生產設備之間的測量點是必需的。生產每個產品所消耗的能量，即「單位產品能耗」是最適合當作工廠使用的單位產品耗能指標，因此目前政府大力推廣 ISO 50001 能源管理系統制度中訂定能源績效指標即可與 FEMS 結合。

四、EICT 整合 ISO 50001 之應用方式

4.1 EICT 強化 PDCA 循環的管理效能

EICT 建置包括軟硬體設備、人力與經費資源投入。硬體設備方面，需配置智慧電表、流量與壓力感測器、閥控與開關模組等末端量測與控制裝置，並建置工業級網路設備及伺服器或雲端主機，以支撐大量即時數據之穩定傳輸與儲存。軟體則包含能源管理平台、資料庫與視覺化儀表板，並搭配資料前處理、報表匯出及警示通知等功能，必要時可整合既有 SCADA、BMS 或生產管理系統。人力配置上，除需由高階主管指派專責能源管理與決策窗口外，尚須 IT/OT 工程人員負責系統建置與維運，並培養能分析數據的種子人員，負責指標設定、異常判讀與改善方案追蹤。投資成本除硬體設備與軟體授權或雲端服務費用外，尚包含系統設計與導入工程、資料盤點與標準化、教育訓練以及後續維護升級等費用。實務導入步驟大致可分為現況盤點與需求分析、系統架構與點位規劃、試點區建置與測試驗證、逐步擴大至全場域，以及最終導入管理制度與績效檢討機制等階段。

ISO 50001 能源管理系統以「計畫 (Plan)－執行 (Do)－查核 (Check)－改善 (Act)」為核心架構，強調持續改善能源績效的循環流程。EICT 整合後的能源儀表板能以圖形化介面即時顯示工廠能耗與績效指標，如圖 2，子圖 (a) 呈現全廠總用電資訊，以儀表與長條圖顯示用電量與負載分布；(b) 為能源績效指標管理介面，彙整各區域或機組之 KPI 與目標達成率；(c) 顯示單一設備即時與歷史運轉數據，供比較不同負載條件下能耗變化；(d) 則進行效率分析，以折線圖與色帶標示效率高低與異常時段，協助管理者掌握節能空間並支援決策。

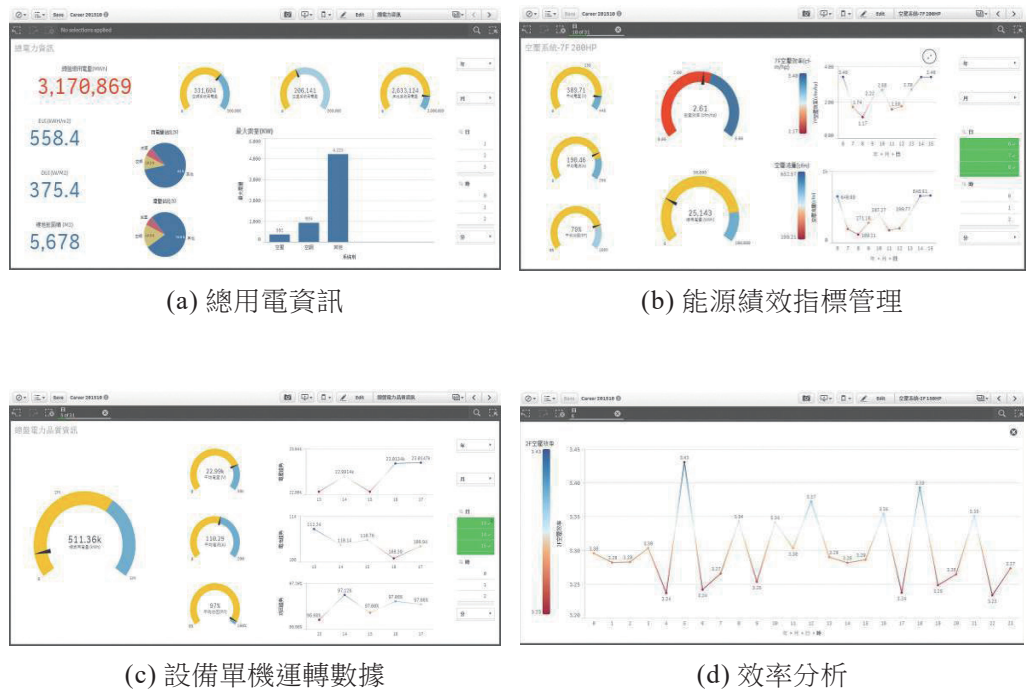


圖 2 能源績效監視分析系統示意圖

在「計畫（Plan）」階段，EICT 可協助企業快速了解能源使用流向、建立能源績效指標（EnPI）與基線，並透過智慧儀表與歷史數據分析，精準掌握重大耗能項目與改善潛力。在「執行（Do）」階段，透過即時數據監控與操作可視化介面，可強化設備操作與用能行為的即時回饋，協助現場人員依據實際負載調整參數，提高操作效率。於「查核（Check）」階段，EICT 平台可自動產出趨勢分析、異常警示與統計報表，省去傳統人工抄表與彙整作業，提升稽核效率與準確性。而在「改善（Act）」階段，企業可依據系統蒐集的長期數據比對結果，驗證節能行動成效，進一步調整能源管理策略，形成可持續優化的循環。表 4 呈現依「能源績效監視分析系統」功能項目可支援 ISO 50001 PDCA 四階段。

表 4 能源績效指標分析系統功能對應 ISO 50001

	ISO 50001 章節名稱	能源績效監視 分析系統項目	能源績效監視分析系統功能
規劃	6.3 能源審查	能源使用分析	1. 電力用量、油量及瓦斯等能源使用趨勢 2. 用電、油量及瓦斯等能源逐日統計 3. 用電、油量及瓦斯等能源比例 4. 設備運轉狀態 5. CO ₂ 排放量統計
	6.4 能源績效指標 6.5 能源基線	能源績效指標 監視	1. 儀表板能以圖形化介面即時顯示工廠 能耗與績效指標 2. 可以線圖呈現歷史數據
	6.6 能源數據蒐集	能源報表查詢	1. 資訊類別：可選擇每分鐘資料、每小 時資料、每日資料。 2. 查詢目標：依各油、電及瓦斯表等能 源 3. 查詢時間：設定時間 / 日期區段查詢 4. 資料內容：日期 / 時間、電量、電壓、 電流、功率因數、視在功率、無效功 率、油量、瓦斯量等。 5. 報表以 Excel 格式匯出
執行	8.1 運作規劃與管 制	警報與事件 紀錄	供使用者可以查詢超約用電及停復電事 件訊息。
		需量控制與 超約警示	透過此系統進行契約容量設定及超約警 示，並直接進行廠內非重要設備（如冷 氣或非必要用電）之自動卸載機制。
查核	9.1 能源績效與能 源管理系統之 監督、量測、 分析及評估	能耗量測監視	依電力系統單線顯示契約容量、即時需 量及燃油、天然氣、蒸氣等能源使用 量，以確認節能績效。

4.2 能源績效監視分析系統架構與實務案例

某精密製造廠（以下簡稱 A 公司）為我國航太發動機零組件的重要供應商，其生產製程涉及大量金屬加工與熱處理，屬於能源密集型產業。為響應政府節能政策及提升企業競爭力，A 公司自 2014 年起導入 ISO 50001 能源管理系統，並於 2015 年參與經濟部產業發展署「製造業能源管理示範輔導計畫」，建置能源績效監視分析系統，期望透過數位化工具，深化能源管理效益。

1. 系統架構與建置

A 公司的能源績效監視分析系統建置，依循 ISO 50001 的 PDCA(規劃 - 執行 - 檢查 - 行動) 管理循環，其系統架構主要分為 2 階段進行：

(1) 第一階段：系統整合與基礎指標建立

規劃 (Plan)：首先盤點廠區內主要的能源使用，包括外購電力、燃料油與天然氣等。分析顯示，電力占總能源使用近 9 成，主要用於製程動力（如各式加工機台）、空調與壓縮空氣系統。故建立 17 項重大耗能設備指標，涵蓋真空爐、立磨機、空壓機及冰水主機等。

執行 (Do)：整合既有的電力需量控制系統、各廠房的多功能電表，並針對空壓機建置專門的監控系統。透過流量計與智慧電表的裝設，將即時的運轉數據（如耗電量、壓縮空氣流量、運轉壓力等）匯入能源績效監視分析系統，系統架構如圖 3。

檢查 (Check)：系統上線後，管理人員可透過視覺化的儀表板，即時監看各項設備的能耗趨勢與效率指標，例如空壓系統的單位產氣效率（cfm/hp）。系統能自動生成報表，並與設定的能源基線進行比較，一旦出現異常，便會觸發警報。

行動 (Act)：透過系統數據，管理階層能迅速識別能源使用效率低落的環節，並採取相應的改善措施。例如，系統顯示某台空壓機效率明顯衰退，便可立即安排維修保養。

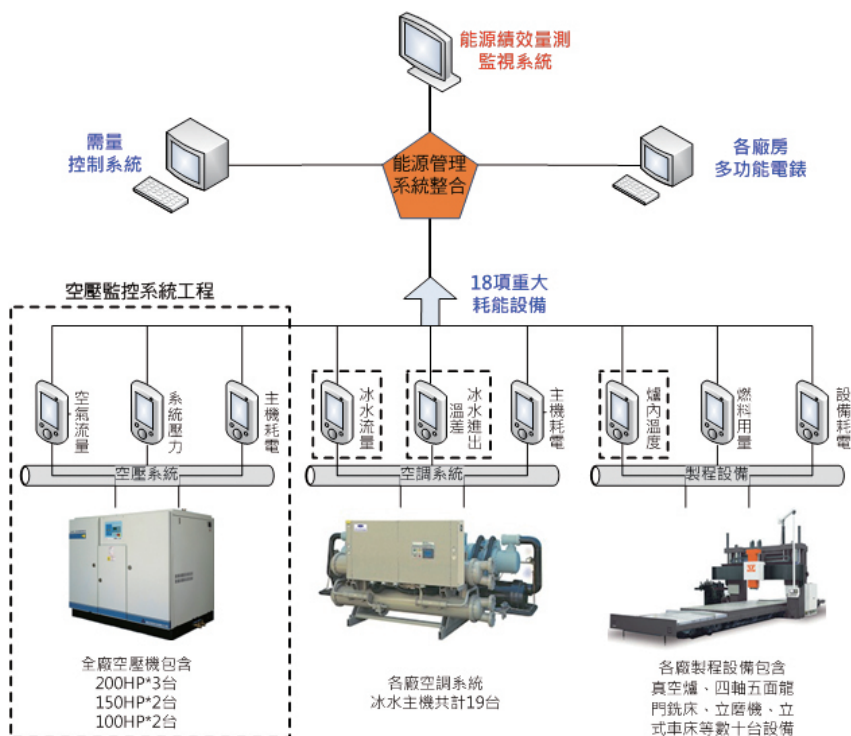


圖 3A 公司的能源績效監視分析系統架構

(2) 第二階段：擴大監控範圍與深化應用

隨著新廠區的擴建，系統進入第二階段，擴大監測範圍並深化數據分析應用。新增納管超過 60 台製程加工機台與 2 台空壓機，並將水資源耗用也納入監測，使系統管理的能源績效指標擴展至 105 項。此外，利用異常警報管控機制建置設備操作 SOP，以發揮最佳運轉效率，若指標發生異常警報時，管理者必須依系統指示操作將故障排除點檢項目逐一確認後才得以將該項警報予以解除，以確保設備運轉參數皆為正常狀態。同時，異常點檢項目可視為該設備異常排除之資料庫，可提供經驗傳承與交接，不因人員異動或斷層影響生產運作，另外也可供預知保養參考，而不必等待設備異常時再予以檢修，可防範於未然，避免因異常事故造成損失。

2. 能源績效監視分析系統內容介紹

(1) 空壓監控頁面

空壓監控畫面包含 10 台空壓機及附屬設備（冷凍式乾燥機、冷卻水泵及冷卻水塔）之設備連結、管路配置、運轉狀態、壓縮空氣流量、系統壓力及運轉效率等資訊，如圖 5。除了儀表傳輸與收集之外，結合每年空壓機量測所得之性能曲線數據，透過數據比對可立即掌握各空壓機產氣效能，針對效率異常設備亦可盡快安排檢修，透過預知保養維護以維持系統最佳運轉效率。

(2) 空壓機運轉排程

空壓機自動啟停時間設定頁面可提供設備操作管理人員自行規劃空壓機群組啟停順序與執行時間，系統會根據前述性能曲線將效率較佳之設備做為系統基載，變動負載部分則由變頻主機因應，另可依工廠行事曆進行週休及例假日排除，避免空壓機於廠內休停期間因人員疏忽而造成不必要之運轉浪費。

(3) 重大耗能製程設備指標頁面

此頁面將 15 項製程設備耗電資訊納入，透過系統計算該項設備有效運轉時間，計算各設備單位時間耗電量，藉此掌握待機過久及產能異常降低之生產設備，提供生產單位調整生產排程與設備稼動，如圖 4 所示。此外，本頁面亦將加熱爐與烘箱之能源使用納入管理，即時計算處理單位原料所需之天然氣用量，以維持加熱設備能源使用效率，做為保養維護及汰換保溫材料之參考。

(4) 歷史報表與趨勢曲線

歷史報表依廠內現行格式進行設計，能源管理人員可利用匯出功能即可製作所需之報表資料或產出 Excel 檔案進行資料彙整，而趨勢曲線功能則可利用歷史記錄與曲線圖橫向比較多項指標之差異，近而檢討同質性能源績效指標之優劣。

3. 導入成效與效益驗證

(1) 空壓系統效率顯著提升

維護保養效益：系統上線初期即發現 1 台空壓機效率衰退約 6.89%，經維修後效率提升 8.75%，使整體空壓系統運轉效率由 3.78 scfm/hp 提升至 3.84 scfm/hp，年節省電力約 7.6 萬度。汰舊換新驗證：為因應擴廠後的壓縮空氣需求，公司新增 2 台高效率空壓機作為系統基載。根據系統紀錄，改善後系統平均效率提升至 4.07 scfm/hp，相較改善前，每年可減少約 74.5 萬度的電力使用，節省電費超過 220 萬元。

(2) 生產製程優化

結合系統的耗能指標與廠內的精實生產管理，A 公司推動了「節省生產工時」方案。透過分析各機台的待機耗能，優化生產排程，減少不必要的待機時間。累計節省了 94,073 小時的生產工時，實際節電約 326 萬度。

A 公司的案例證明，在 ISO 50001 的管理框架下，導入能源績效監視分析系統是製造業邁向智慧化能源管理的成功途徑。此系統不僅將抽象的能源數據轉化為具體的管理指標，更透過即時監控、異常警示與數據分析，協助企業發掘節能潛力、驗證改善成效。結合管理制度與數位工具，不僅能帶來可觀的經濟效益，更是企業在淨零時代下，提升綠色競爭力的關鍵基石。



空壓系統畫面

製程系統畫面

圖 4A 公司能源績效監視分析系統頁面

4.3 能源管理資訊化效益總結

能源績效監視分析系統以能源管理系統為核心，訂定能源績效指標搭配能源資訊技術，靈活運用量測儀表蒐集數據透過分析運算，使得複雜數字簡單且有效化，且提供直覺的視覺化顯示介面供能源管理人員使用，使其掌握各項受納管之能源績效指標且數位化數據能夠長期紀錄與保存，並藉由圖形化趨勢分析掌握各項指標差異情況，以客製化的報表資料，提供能源管理高層作為實施矯正措施決策之依據。系統引入後，資訊化的能源管理可帶來多項整合效益，包括：

1. 即時監測與自動報表：能源數據從「週月統計」進化為「即時追蹤」，大幅提升企業對能源異常的反應速度與決策品質。透過儀表數據自動收集與異常預警功能，系統可隨時更新各類指標趨勢，協助企業提早發現設備異常、基線偏離與超過契約容量等問題，協助管理者快速發現問題並時時檢討。
2. 快速異常響應並監督驗證改善措施成果：能源績效監視分析系統透過現場儀表資料蒐集，可將能源使用效率即時呈現，使企業相關部門瞭解其能耗狀況，而能源績效監測結合異常警報功能，可即時提醒能源管理組織之管理代表執行矯正措施。此外，對於企業落實改善亦可透過實際數據驗證其節能成效，以提高推行節能措施之決策依據與執行信心。
3. 系統整合與減少人力投入：EICT 可整合既有的電力、空調、照明等監控系統數據，將多系統運轉資訊彙總分析。整合後的效率指標提供完整的能源視圖，操作人員可透過效率指標了解目前設備運轉調整是否合理，使決策者能依此調整節能策略並減少人工監測工作。

五、智慧化能源管理系統之未來發展

未來智慧化能源管理的發展核心，在於如何在 ISO 50001 既有架構下，善用 EICT 所建構之數據基礎，將管理模式由「人工判讀」推進至「AI 輔助決策」甚至「自動優化」。人工智慧的強大能力並非憑空而來，其效能高度依賴大量、高品質且即時的數據；因此，建構一套穩定可靠的數據來源，將是企業持續精進能源管理的首要關鍵。

EICT 在此扮演智慧化能源管理的基石。未來系統發展將更著重於打破數據孤島，持續整合電力、空調、照明、生產設備等異質系統資訊，形成可長期累積與分析的統一數據池；同時藉由智慧電表與各式感測器，大幅提升數據時間解析度，由傳統日、週、月資料，進一步朝向分鐘甚至秒級的即時監測，讓 AI 得以掌握更細緻的能源變化趨勢。此外，透過持續優化的前處理與標記機制，將雜亂的原始訊號結構化為標準化資料，亦是未來精進方向之一，以確保後端 AI 模型能穩定運作。

在應用層面，預測性維護將是智慧化能源管理的重要發展趨勢。相較於目前仍以定期保養或故障後維修為主，未來可望導入 AI 分析冰水主機、空壓機等關鍵設備之振動、溫度、壓力與電流等監測數據，建立設備健康指標與預測模型。透過長期數據累積與模型修正，系統可提前數週甚至數月發出警訊，協助管理者由「事後處理」轉為「事前預防」，在更適當的時間點安排檢修，降低無預警停機風險與能源損失，同時維持設備運轉效率。

能耗模型與最適化運轉亦是未來系統精進的重點方向之一。隨著 EICT 逐漸累積完整之歷史能耗與運轉紀錄，AI 將能整合產線排程、訂單需求、天氣預報乃至台電尖離峰電價等多元資訊，建立自我學習之能耗模型。未來系統將不僅呈現能耗資訊，而是主動進行最適化運算，提出具體運轉策略建議，甚至自動執行控制，例如：在離峰時段預先儲冰或儲冷、依據即時負載調整多台空壓機之啟停組合與壓力設定等，實現由單機節能邁向系統整體節能。

另一方面，智慧異常偵測與診斷功能將逐步取代現行僅以單一數值超標為主的警報機制。未來 AI 將可針對能源使用行為模式進行長期學習，識別出傳統警報難以發現的「隱形浪費」，例如在產量與氣溫變化不大情況下，單位產品能耗於一段期間內緩慢上升等。系統不僅可即時發出異常警訊，亦可透過交叉比對相關數據，輔助推論可能根因，如冷卻水塔效率下降或熱交換器結垢等，縮短現場人員故障排除時間，提升改善行動之精準度。

總結而言，未來智慧化能源管理的發展趨勢，將建立在 EICT 所構築的「數位神經系統」之上，持續朝向數據更即時、模型更精準、決策更主動之方向精進。企業唯

有穩健建構數據基礎，並以務實步驟導入 AI 於預測性維護、運轉最適化與智慧異常診斷等應用，方能真正實現能源管理由「可視化」邁向「智慧化」，進而轉化為提升營運效率與永續競爭力的關鍵力量。

六、結論

在全球淨零排放的趨勢與我國「數位轉型」和「淨零轉型」的國家政策雙軸驅動下，企業能源管理的智慧化已是必然的發展方向。導入結合能源資訊技術（EICT）的能源管理系統，其價值不僅僅是提升內部營運效率或節省人力成本，更深遠的意義在於，這是企業順應國家政策、提升產業綠色競爭力的關鍵一步。

過去，能源管理常被視為滿足法規的被動任務。然而，透過建構數位化與智慧化的管理系統，企業能將能源數據從靜態的報表轉化為動態的決策依據。這套系統所產生的精準、即時的能源績效數據，不僅能發掘更多節能潛力，更是企業向外界（如供應鏈夥伴、投資人）證明其永續承諾的有力證據。當綠色供應鏈成為國際貿易的主流，這這些有數據支持的減碳成果，能直接轉化為企業的綠色競爭力。

展望未來，這套智慧化系統的效益將持續發酵。穩固的數位基礎建設，為導入更先進的人工智慧（AI）應用鋪平了道路，例如 AI 預測性維護、動態最適化運轉等。這代表企業的能源管理將從「即時監控」進化到「事前預測與主動優化」，能更靈活地應對能源價格波動與生產排程變化，實現更深度的系統節能。

綜上所述，將能源管理系統推向智慧化，不僅是企業邁向淨零永續的關鍵工具，更是提升能源效率、降低成本、強化競爭力的有效途徑。在政府政策引導、企業積極參與、以及能源管理人才培育等多管齊下，臺灣製造業必能實現能源轉型，為產業永續發展奠定基礎，達成我國深度節能的目標，並進一步推動綠色與數位產業雙軸轉型，共同為臺灣打造淨零永續的綠色未來。

參考文獻

IEA(2023) , <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>

財團法人台灣綠色生產力基金會 (2020) , 能源績效監視分析系統評估作業指引 , 經濟部產業發展署委辦計畫。

國家發展委員會 (2022) , 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明 , https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76

產業節能減碳資訊網 , <https://ghg.tgpf.org.tw/>

經濟部 (2022) , 製造部門 2030 淨零轉型路徑 , <https://www.go-moea.tw/carbonReduceZeroPath/manufacture>

財團法人台灣綠色生產力基金會 (2024) , 製造業能源管理系統推動報告書 , 經濟部產業發展署委辦計畫。

Energy star.(2017), Conservation voltage reduction /voltage VAR optimization EM&V practices, January 19

Paolo Zangheri ,Tiago Serrenho,Paolo Bertoldi (2019), Energy Savings from Feedback Systems: A Meta-Studies' Review, Energys

U.S Department of energy. (2013), Superior Energy Performance™:Recognizing Excellence in energy management, DOE/EE-0743

環境管理規劃類

亞泥公司領航低碳轉型 提前達成 SBTi 目標

陳志賢*、曾昱中**、邱子杰***、盧俊澄****

摘 要

面對全球氣候變遷與淨零轉型壓力，亞泥公司為導入水泥業科學基礎減量目標 (SBTi)，自 2019 年起以系統化碳管理、循環經濟、產品與製程創新及政策議合為核心策略，持續推動低碳轉型。公司建立涵蓋全場域盤查、內部碳定價、氣候與自然風險管理的「海納百川碳管理系統」，精準計算各措施減碳配額並由永續推行委員會與淨零小組每季追蹤。

亞泥公司於 2020 年承諾參與科學減碳目標倡議，依據 IEA B2DS (優於 2°C 情境 Beyond 2°C Scenario, B2DS) 建立第一階段目標為 2025 年相較於 2019 年，每噸水泥膠結材範疇 1 及範疇 2 溫室氣體排放強度降低 8%。2024 年實際排放強度為 0.797 噸 CO₂e/噸水泥膠結材，相較基準年排放強度 0.878，降低 9.2%，不僅優於 2024 年 SBTi 目標值 0.819，也提前超越 2025 年強度目標 0.807 (減量幅度 8%)，提前達成 SBTi 目標。

由於減碳努力及良好的減碳效益，也使亞泥公司獲得碳揭露 CDP 氣候變遷及水安全獲得 A⁻ 評級，供應鏈議合獲得 A 評級、2024 台灣永續評鑑 AAA、MSCI ESG 評級 BBB、TSAA 與遠見 ESG 多項獎項，並十度獲「產業溫室氣體自願減量績優廠商」。

亞泥公司承諾以 2050 年淨零為目標，深化低碳水泥、資源循環、前瞻技術 3 大策略，持續擴大減碳成效與永續競爭力。

【關鍵字】科學基礎減量目標（SBTi）、低碳水泥、循環經濟、碳管理系統	
* 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	首席副廠長
** 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	研究室副研究員
*** 亞洲水泥股份有限公司花蓮製造廠	研究室工務員
**** 財團法人台灣綠色生產力基金會	副理

一、前言

隨著全球氣候變遷問題日益嚴峻，「減碳」已成為各國政府與企業的共同課題。從《巴黎協定》到各國淨零宣示，國際社會紛紛提出更嚴格的排放目標與規範，要求產業必須積極轉型。水泥業作為碳排放密集度極高的產業，受到的影響尤其顯著，若無法快速採取行動，未來勢必將面臨嚴重的競爭與成本壓力。

在台灣，政府早期雖透過環境部推動先期減碳專案，以及經濟部產發署輔導計畫，鼓勵企業投入減碳行動，但這些措施多屬自願性質。亞泥公司便在此階段率先響應，積極參與多項先期減量計畫，亞泥花蓮廠並成為國內獲頒最多自願減量獎項的水泥工廠。除了在廠內導入減碳技術，亞泥也提早完成全場域的溫室氣體盤查，展現出領先同業的碳管理能力。

隨著《溫室氣體減量及管理法》修正為《氣候變遷因應法》，我國減碳政策邁入新階段，新增碳費徵收、產品碳足跡、效能標準等規範，正式將企業減碳由「自願」轉為「強制」。面對此一轉變，亞泥公司不僅持續精進碳管理體系，更以前瞻視野導入科學基礎減量目標（SBTi），成為台灣首間水泥業導入 SBTi 減碳目標，積極與國際標準接軌。

二、減量規劃

亞泥公司自參與政府推動的先期減碳專案以來，便積極投入溫室氣體盤查，深入掌握水泥產業的主要排放熱點。透過這些基礎工作，不僅建立了完整的碳排放數據庫，更累積了寶貴的碳管理經驗，為後續的系統化減碳規劃奠定了穩固基礎。為了與國際接軌並確保減碳行動的科學性，亞泥公司選擇採用全球具公信力的「科學基礎減量目標（SBTi）」規劃長期減碳路徑。

依據溫室氣體盤查結果，參考國際水泥及混凝土協會（GCCA）等專業組織的減碳策略後，因應水泥產業的減碳挑戰「多面向、減碳長期規劃、且牽涉跨產業協作」，單一方法無法全面應對，因此需整合「管理制度、製程技術、資源利用與外部環境」等關鍵層面，系統性邁向淨零碳排。以「先碳管理、發展減碳策略、創新產品、後政

策議合」擬定了四大減碳執行策略，作為企業邁向淨零的核心方向：

1. 海納百川的碳管理系統：建立涵蓋全場域碳盤查、內部碳定價與氣候風險管理的完整制度。
2. 力行循環經濟：積極導入替代原料與燃料，將廢棄物資源化，降低製程與燃燒排放。
3. 產品及製程創新：研發低碳水泥與固碳技術，推動水泥產業的技術轉型。
4. 持續政策議合：與政府、產業及學界合作，共同推動低碳標準、稅制調整與公共工程規範修訂。

為確保這些減碳措施能確實落地，亞泥公司也將各年度的減碳比例與規劃納入行動計畫中，並由「企業永續推行委員會」每季定期查核執行進度，確保所有策略與措施能有效推動，並隨時依據外部環境與產業趨勢進行調整。

三、執行策略

1. 海納百川的碳管理系統

面對國內外減碳趨勢，亞泥公司「海納百川的碳管理系統」以科學基礎減量目標（SBTi）為核心，依據工廠的工程、替代原料、燃料種類、低碳水泥推廣的進度等數據，精準計算每年各項措施的減碳配額，確保減碳行動有依據且能持續推進。同時成立「企業永續推行委員會」與「淨零排放小組」，採取自上而下的治理模式，每季追蹤減碳績效，確保碳管理不僅是理念，更是切實可行的行動。在氣候風險財務面，亞泥導入內部碳定價制度，並建立氣候與財務及自然風險管理機制（TCFD 及 TNFD），將碳風險納入決策流程，進一步提升資源配置效率，強化企業邁向淨零的行動力。

2. 力行循環經濟

水泥產業中約 60% 溫室氣體排放源自製程、35% 來自燃料燃燒的高碳排特性，因此亞泥將「循環經濟」視為核心減碳策略，透過低碳原燃料替代及製程優化，有效降低碳排放強度，同時推動資源再利用，創造環境與經濟雙重效益。循環經濟對於熟料製程的直接排放具顯著減量效果，主要包括 2 種模式：(1) 低碳燃料替代：

以生質或低碳排放係數燃料，如漿紙污泥、木屑、油泥、固體再生燃料與廢塑膠片等，取代傳統化石燃料，以降低熟料高溫製程所產生的燃燒排放；(2) 原料替代：利用非碳酸鹽類含鈣工業副產品，如轉爐石、還原渣等，取代天然石灰石，減少熟料煅燒過程中碳酸鹽分解所產生的製程排放。

(1) 低碳燃料替代

亞泥花蓮廠將環境保護與產業升級緊密結合，在燃料選擇上，積極引進漿紙污泥、下水道污泥及廢塑膠等高熱值、低碳排或具有生質特性的燃料，部分取代燃煤與柴油等高碳排放化石燃料燃燒排放。可有效降低溫室氣體排放量，減少水泥生產過程的燃料排放。在執行層面，必須建立嚴謹的替代燃料來源篩選，並透過檢驗確保所有進廠的替代燃料在成分、熱值及碳排係數等關鍵指標上，均符合花蓮廠製程運作的技術要求與減碳目標。

除了燃料端的把關，亞泥也同步推動製程端的優化。透過設備升級與工程改造，如：亞泥花蓮廠過去將替代燃料於窯尾預熱爐上升風道投入，但考量重力與風壓影響，粒徑較大的替代燃料可能因燃燒緩慢而進入生料量大的區域，導致燃燒不完全，進而影響燃燒效率。亞泥參考各方文獻，將替代燃料的投入口新設於風速較快的風道窄口上方及增加階梯式鍛燒爐，增加替代燃料燃燒時間。經過此項改造後，較輕的替代燃料可隨氣流往上升風道移動，而較重的替代燃料則可在充足通風處進行燃燒反應與分解，隨後亦可進入預熱機供給熱量。此舉有效降低 CO 的產生，同時提升了燃燒效率與替代燃料的使用量，不斷提升窯爐燃燒效率與製程廢熱回收的效率，替代燃料能在高效且穩定的條件下使用。廠內團隊持續進行不同替代燃料來源測試及評估，探索更多可行的替代燃料種類，並根據試驗結果逐年提高替代燃料的使用比例。這項策略的成效不僅體現在減碳數據上，還在於推動廢棄物資源化的貢獻。同時減少廢棄物在運輸與處理過程中可能產生的二次污染，形成「減碳」與「減廢」的雙重效益。

(2) 替代原料

在水泥製程中，氧化鈣需與矽、鋁等氧化物反應生成水泥礦物，這必須依靠精準的配比與嚴格的品管，確保替代原料在化學成分與物理性質上都符合製程需求。亞泥在原料替代策略上成效顯著，推動以轉爐石、還原渣、脫硫渣等「非碳酸鹽類」含鈣副產品，取代部分石灰石。這些工業副產物在高溫煅燒過程中不會產生 CO₂，不僅能大幅降低製程碳排，同時在維持產品品質穩定條件下，實現副產品資源再利用。因此亞泥公司積極與鋼鐵產業與政府建立跨產業合作模式，回收利用生產副產品，實現資源循環再生的價值；目前仍持續提升品管與配料能力，提高替代原料比例，進一步降低製程排放。

3. 產品及製程創新

(1) 低碳水泥

製造「熟料」為水泥生產製程中碳排放最高的製程，水泥中熟料的添加比例（熟水比），為影響溫室氣體排放的重要指標。目前國內大宗使用的卜特蘭水泥，其熟料占比約為 92%，若能生產熟料占比較低，性能相近或更優於傳統卜特蘭水泥的低碳水泥，如「卜特蘭石灰石水泥」、「墘砌水泥」、「三元混合水泥」等如表 1，將能有效降低單位水泥排放。亞泥公司生產各式低碳水泥熟料比例如表 1 所示。

表 1 亞泥公司各式低碳水泥熟料比例

水泥類型	應用	熟料比例	碳排放 （相對市售卜特蘭水泥）
市售產品：卜特蘭水泥	通用	92%	高
亞泥產品：卜特蘭水泥	通用	87%	略低
亞泥低碳產品：墘砌水泥	泥作、砌磚	75%	低
亞泥低碳產品：卜特蘭石灰石水泥	通用	77%	低
亞泥低碳產品：三元混合水泥（實驗階段）	通用	25-50%	極低

亞泥公司自 2009 年即前瞻性投入墾砌水泥研發，並於 2011 年成功量產，奠定低碳水泥的技術。目前所生產墾砌水泥熟水比約 75%，相較於市售卜特蘭水泥熟水比降低約 17%，可有效降低熟料製程排放。

透過研發試驗開發卜特蘭石灰石水泥（PLC），以提高石灰石取代比例，產品在確保強度與耐久性與卜特蘭水泥相等情況，所研發生產之卜特蘭石灰石水泥熟水比約 77%，相較於市售卜特蘭水泥熟水比降低約 15%，亦可有效降低熟料製程排放。亞泥公司花蓮廠研究室持續研究具卜作嵐性質相關材料、工業副產物等新型膠結材，計畫在保有相同品質情況下，提升熟料替代率，建立實現低碳轉型的重要里程碑，並有助於達成 SBTi 與淨零目標。

(2) 創新減碳技術應用

a. 廢風機葉片處理

善用水泥旋窯具備的「3T」特性（高溫、長時間停留及強湍流混合），實現廢風機葉片的高效協同處理。透過旋窯內溫度可達 1,400°C 以上的焚燒環境，確保葉片中複合材料（如玻纖增強塑膠）徹底分解，將葉片作為替代燃料來源，提升能源利用效率並減少煤炭使用量。

b. 走私冷媒協同處理

亞泥協助政府處理不肖業者走私進口冷媒，透過研發出國內第一套水泥窯專用的冷媒進料設備，將常見之系列冷媒如 R22、R32，於水泥窯 850~1,600°C 範圍內即可完成分子裂解，可確保完全裂解且不生成二次污染物。裂解後之氟化物及其他殘留物會與熟料中的鈣、鋁反應形成穩定化合物，無逸散疑慮，同時此過程兼具替代燃料的燃燒效益，提升系統整體碳排放減量表現。

(3) CCUS 新創技術開發

亞泥投入創新減碳技術的實驗與應用，希望從源頭捕捉碳排增加淨零的可能性。亞泥公司與國內研究機構攜手研發「超重力高效固碳技術」，將二氧化碳有效封存於工業副產物中，目前於實驗室等級機台，利用超重力旋轉床提升氣液固

三相質傳效率，使碳酸化反應速率成倍提高。目前每公噸副產品可吸收高達 200 kg CO₂，具備未來工業化放大的可行性。為碳捕捉、利用與封存（CCUS）技術的實用化打下基礎。

4. 持續政策議合

亞泥公司為響應我國 2050 淨零排放目標，陸續在標準、稅制與公共採購 3 大面向推動有利推廣低碳水泥措施，以協助水泥產業轉型並促進低碳水泥的採用。作為國內主要水泥製造商之一，在技術端研發低碳產品，更積極透過產官學協作推動制度變革。在標準制定方面，經濟部標準檢驗局於 2022 年（民國 111 年）完成修訂國家標準 CNS 15286（水硬性混合水泥），增訂 IL 型（卜特蘭石灰石水泥）與 IT 型（三元混合水泥），使此類低碳替代型水泥具備合法檢驗分類，並可正式進入市場使用。

在低碳水泥財政激勵方面，財政部自 2024 年 1 月 1 日起，依《貨物稅條例》第 7 條第 3 項對符合減碳認定基準的 2 類水泥（如水硬性混合水泥與礮砌水泥）實施貨物稅分級調降，原本每公噸應徵稅額新臺幣 440 元，若符合 CNS 15286 標準並達添加物比率門檻，依減碳程度分別降為 260 元或 220 元，降幅約 40% ~ 50%。這項政策的形成過程中，亞泥公司多次與政府部門及產業公會座談，提出以減排放量為基礎的稅率設計建議。

在公共採購政策面，亞泥推動行政院公共工程委員會已修訂《公共工程施工綱要規範》第 03050 章—混凝土基本材料及施工一般要求，允許經第三方驗證並機關同意後，在公共工程中使用 IL 型水泥並添加礦物摻料，增加低碳水泥於公共工程的應用性。亞泥公司為建構利於推廣低碳水泥環境，從提出標準修訂使產品有標準可依循、低碳水泥稅制降低、修訂公共工程於低碳水泥限制，加速低碳水泥的大規模市場擴散與產業轉型。

四、績效

自 2019 年起，亞泥公司全面啟動減碳行動，以科學基礎減碳目標 SBTi 為依據，結合低碳產品推廣、循環經濟實踐與創新技術研發，成功為水泥產業的低碳轉型樹立標竿。透過系統化策略與嚴謹管理，自 2019 年基準年以來，累計減碳超過 58.7 萬噸 CO₂e，不僅連續 5 年達成 SBTi 科學基礎減量承諾，累計減碳幅度達 9.2%，更提前達成 2025 年第一階段減碳目標。

亞泥公司水泥事業範疇 1 及範疇 2 的實際排放強度為 0.797 噸 CO₂e/ 噸膠結材，相較基準年降低 9.2%，不僅優於 2024 年 SBTi 目標值 0.819，也提前超越 2025 年既定強度目標 0.807（減量幅度 8%），提前達成第一階段目標（如圖 1 所示）。此成果展現亞泥公司在碳管理上的持續領先，透過前瞻布局與實際行動，持續推動低碳轉型，為產業樹立永續發展典範。

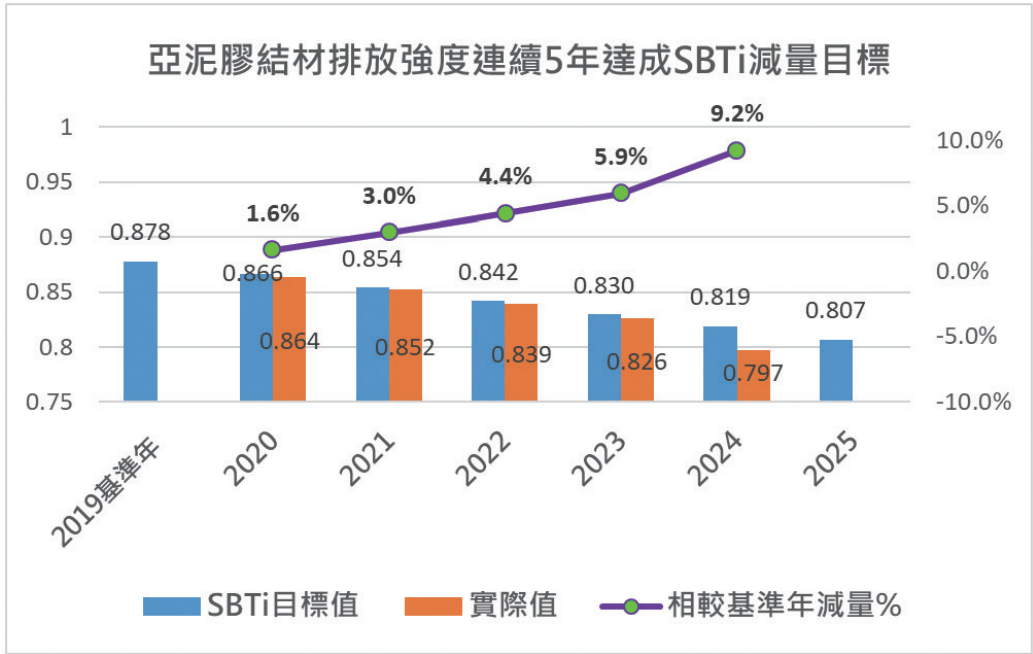


圖 1 亞泥連續 5 年達成 SBTi 減量目標

彙整亞泥公司減碳績效如下：

1. 減量績效

- (1) 亞泥投入預熱器風道改造、窯尾投料口優化、階梯式鍛燒爐增設 2024 年單年度處理 36.4 萬噸替代燃料，減少製程排放 9.5 萬噸 CO₂，展現資源循環與減碳雙效益。
- (2) 亞泥過規範修訂，2024 年將傳統卜特蘭水泥額外添加高爐石，使熟料比由 0.92 降至 0.89，持續降低製程碳排。
- (3) 亞泥透過成立低碳水泥推廣小組，從 2019 至 2024 年累計銷售 36 萬噸低碳水泥，其中 2024 年銷售量達 4.9 萬噸，持續擴大市場規模。
- (4) 與工研院共同開發「超重力高效固碳技術」，已投入實驗室級設備、材料測試，並規畫 2026 年中試廠與 2030 年吸碳 18,000 噸之技術部署。

2. 減量措施推動

- (1) 循環新創技術：成功運用旋窯高溫特性，協同處理廢風機葉片及走私冷媒，兼顧廢棄物減量、替代燃料利用與減碳效益，發揮水泥產業的靜脈經濟角色。
- (2) 低碳水泥標準議合：2023 至 2024 年推動 CNS 15286 修訂及水泥 PCR 修訂，建立低碳產品標準化基礎，推動低碳水泥生產。
- (3) 低碳水泥研發：持續優化低熟料水泥配方，增加水淬高爐爐渣、石灰石等二次資源摻配比例，降低水泥碳排放強度，同時保持或提升強度與耐久性；並開發新型膠結材料，布局未來低碳水泥市場。
- (4) CCUS 新創技術開發：2023 年啟動「超重力高效固碳技術」研發計畫，透過高效碳酸化反應，將 CO₂ 固化於工業副產物中，依實驗室等級反應器，每噸工業廢棄物最高可固碳 200 公斤 CO₂，未來將持續於參數研究，以開發出工業及 CCUS 系統。

五、結語

亞泥公司深知面對全球氣候危機，企業必須肩負起引領產業轉型的責任。推動從碳管理、循環經濟到低碳水泥研發、政府議合及創新技術的全方位行動，累積超過 10 年的減碳成果與多項國內外永續殊榮，證明減碳不僅是責任，更是創造競爭力的最佳解方。亞泥公司將持續深化「低碳水泥、資源循環、前瞻技術」三大核心策略，攜手政府、供應鏈與社會各界，共同打造低碳水泥新篇章，推動低碳水泥用於工程落地，並以創新引領我國水泥業與國際接軌。承諾將以 2050 淨零為目標，持續擴大減碳行動的深度與廣度，讓每一項產品，成為通往永續未來的力量。

六、參考文獻

- CEMBUREAU (2020), Cementing the European Green Deal-Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf
- CEMBUREAU (2023), CEMBUREAU KEY FACTS&FIGURES, <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>
- GCCA (2021), The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>.
- IEA and WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/897b7ad9-200a-4314-b870-394dc8e6861a/CementTechnologyRoadmap-CarbonEmissionsReductionsupto2050.pdf>
- IPCC (2018), Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C approved by governments, <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>.

UNEP (2017), Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/25281>.

土壤處理與綠色永續化學

以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中全氟 / 多氟烷基化合物 (PFAS)

簡偉倫*、林柔靜**、周珊珊***、黃志彬****

摘 要

全氟 / 多氟烷基物質 (per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 為持久性有機污染物，具有疏油性、疏水性、熱穩定和化學穩定等特性，難以自然降解，會在環境中長期存留，對人體健康造成危害。目前，台灣半導體、染整、電鍍等產業週邊環境，如廢水或地下水，均已偵測到 PFAS 污染，亟需開發適當的處理技術。因此，本研究係採用可再生型吸附顆粒 (regenerative adsorption particles，簡稱 RAP) 取代傳統活性炭，利用其優異的吸附與催化氧化特性，破壞 C-F 鍵以達到削減成效，並藉由再生程序使 RAP 可重複使用，解決廢棄物處理問題。

研究結果顯示，RAP 具有與原始活性炭相當的 PFAS 吸附能力。在最關鍵的吸附 / 催化氧化及再生試驗中，使用 RAP 技術搭配不同氧化促進劑，取得了顯著的 PFAS 削減效果，其中以臭氧曝氣反應最快 (0.5 小時)，其次為雙氧水輔以空氣曝氣 (4 小時)，空氣曝氣則需 48 小時，顯示這與氧化促進劑的氧化能力有關。另考量到地下水中 PFAS 濃度較低 (僅為數 ppt 至 ppb)，經由 NF (nanofiltration，納濾) 預濃縮仍能有效截留低分子量的全氟丁酸 (PFBA)，對於較高分子量的全氟庚酸 (PFHpA) 及全氟辛酸 (PFOA)，濃縮倍數可分別提高至 11.7 倍和 45.9 倍，顯示 NF 系統具極佳的 PFAS 預濃縮效能。由此可見，應用 NF 系統作為預濃縮單元，並結合 RAP 技術能

136 以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中全氟 / 多氟烷基化合物 (PFAS)

有效提升整體削減效能，此整合處理策略具備高度應用潛力，可作為產業未來削減全氟 / 多氟烷基物質之技術方案參考。

【關鍵字】全氟/多氟烷基化合物、納濾、活性碳、催化氧化、再生

* 國立陽明交通大學 環境工程研究所	博士生
** 國立陽明交通大學 環境工程研究所	碩士生
*** 國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	執行長
**** 國立陽明交通大學 環境工程研究所	講座教授

一、前言

全氟 / 多氟烷基物質 (per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 為持久性有機污染物，其家族包含全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulfonic acid, PFOS)、全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA) 與全氟己烷磺酸 (perfluorohexane sulfonic acid, PFHxS) 等多種物質，於國際上已陸續禁 / 限用多種 PFAS，同時進行源頭管制及評估管理程序 (Brunn et al., 2023; Cotruvo et al., 2023)。然環境部目前於水污染防治措施及檢測申報管理辦法中公告，自民國 115 年起，多種行業別的原廢水及放流水須每年檢測 1 次水中 PFOS、PFOA 與 PFHxS，其濃度分別不得高於 0.12、1.7 及 2.1 $\mu\text{g/L}$ 。我國正致力於蒐集國內外 PFAS 管制動態、掌握國內 PFAS 物質流向及評估管制範疇等事項，接軌國際管制趨勢 (環管署土基會，2023 年)。

國外地下水 PFAS 改善技術，在考量此類物種具有長鏈疏水性全氟化碳鏈和親水性官能基，其化學穩定性高且具水溶性的特性，常見的處理方法如 (1) 顆粒活性炭吸附 (Eschauzier et al., 2012)、(2) 離子交換樹脂 (Dudley et al., 2015) 及 (3) 薄膜過濾法等 (Safulko, et al., 2023; Lu et al., 2020)，但多有建置及營運成本高、處理過後的廢棄耗材仍需處理及能源使用高等缺點。

台灣高科技產業、傳統產業如紡織業與電鍍業等產業別發展興盛，製程使用的光阻劑、防水性塗料及電鍍用抑制劑等，皆含不同 PFAS 物種。國內在各環境介質如地下水、土壤及工業廢水等，已陸續調查檢驗出 PFAS 存在，表 1 為國內地下水 PFAS 的調查成果，主要調查對象為潛在運作事業如科學園區、紡織產業及其他產業別，調查區域為淺層地下水 (非飲用或農業澆灌水源)。調查數據顯示 (表 1)，台灣特定區域地下水 PFOS、PFOA 及 PFHxS 現況，雖主要濃度範圍皆低於國外調查濃度，但因 PFAS 無法自然衰減，若未經適當處理，對於環境或人類將會造成負面影響。

因此，為解決削減 PFAS 主流技術產生的廢棄耗材棄置，衍生二次污染之疑慮，本研究應用新開發的綠色材料之可再生型吸附顆粒 (regenerative adsorption particles, RAP)，對 PFAS 化學鍵結產生破壞，以達到削減水中 PFAS 的目標。另可藉由添加氧化促進劑及活化液，分別清除孔洞積碳與回復流失的貴金屬氧化物催化劑，使其重複

使用以減少廢棄物產生，為一復育地下水環境綠色永續友善的新工法，讓環境治理朝 4L+C (低污染、低耗能、低成本、低空間及循環經濟) 發展。

表 1 103~111 年國內地下水全氟化合物調查成果 (環管署土基會，2023 年)

國家	調查對象	PFOS	PFOA	PFHxS
日本	東京地區 (n= 53)	< 0.25~990	< 0.25~1,800	< 0.25~56
美國	美東飲用水水源 含水層 (n= 254)	1.5~98	1.1~1,500	1~81
台灣	科學園區 (n= 81)	N.D. ~22.8 (5.3)	0.72~100.5 (40.2)	N.D. ~39.9 (n= 17) (N.D.)
	紡織產業 (n= 33)	N.D. ~26.6 (15.6)	1.2~89.3 (31.9)	N.D. ~21.2 (n= 4)
	其他產業 (n= 23)	N.D.	N.D. ~5.5 (1.3)	-

註：濃度單位為 ng/L；括弧內數值為中位數，無括號者表示未列出；「-」表示無調查數值

二、研究方法

2.1 可再生型吸附颗粒

可再生型吸附颗粒之粒徑大小約為 20~40 mesh，係以椰殼活性碳為基底 (圖 1)，並透過奈米薄層製備技術，使有效成分 Ru-A-B 金屬氧化物均勻覆蓋於多孔活性碳上，其中鈦 (Ruthenium, Ru) 披覆量僅 0.01%，約為市場上一般的貴金屬觸媒所需量之 1%。相較於傳統活性碳，RAP 更具催化臭氧產生氫氧自由基 (•OH) 的效果，為一具有吸附、催化氧化特性的貴金屬覆蓋多孔活性碳催化劑。



圖 1 可再生型吸附颗粒 (RAP) 外觀

傳統高級氧化程序與 RAP 覆蓋 Ru 的氧化電位比較整理如圖 2 所示。Ru(III)-Ru(VII) 的氧化電位高達 3.65 V，明顯高於氫氧自由基 (2.80 V) 及臭氧 (2.07 V)。相較於傳統以產生氫氧自由基為主的高級氧化程序，RAP 技術展現出更優異的氧化能力，能在短時間內催化氧化有機污染物，並具備活性更強、成本更低，以及可重複活化使用等優勢，為一項綠色處理技術。RAP 技術在工業廢水領域已證實對難降解有機廢水的處理效能優於 Fenton 法，並兼具可再生與重複使用特性，不僅能減少廢棄物產生，且幾乎無污泥生成。在地下水整治的應用上，RAP 主要以取代顆粒活性炭為主，定位為可再生型的活性碳，目前已在 LNAPL 與揮發性有機物 (VOCs) 的處理上獲得良好的成效。綜上所述，RAP 技術具備以下優勢：(1) 具優異的氧化還原特性、(2) 適用於各種具生物抑制特性廢水 (包括地下水)、(3) 易回收再利用以及 (4) 可進行原位活化，以有效提升空間利用率與操作靈活性。



圖 2 可再生型吸附顆粒 (RAP) 與傳統高級氧化法之氧化電位

RAP 於工業廢水的應用實例眾多，包含 COD、氰化物與有機氮等難降解廢水。然而因各式廢水種類複雜，水中若含有導致 RAP 毒化物質 (如高濃度重金屬、懸浮固體與油脂類等)，通常會先進行適當前處理將之移除後再進行 RAP 處理。以某鋼鐵廠煉焦廢水為例，該股廢水 COD 平均濃度約 4000 mg/L，硫氰酸鹽 (SCN) 平均濃度約 300 mg/L。本案採用前處理程序結合 RAP+ 臭氧曝氣技術，設定水力停留時間為 1 小時，並添加 250 mg/L 次氯酸鈉進行流動床連續試驗。結果顯示，出流水 COD 平均濃度約 2,000 mg/L，SCN 平均濃度則低於 30 mg/L，RAP 活性能維持至少 14 天，期間無須進行小活化程序，污染物降解效率保持穩定，展現本技術在重複使用性與操作穩定性的優勢。

2.2 RAP 材料對 PFOA 吸附容量

本研究設定的吸附試驗的固 / 液比為 1:1.5 (g:L)，PFOA 配置濃度約為 3.11 mg/L，並在不調整溶液 pH 值情形下，於不同時間採樣 (0、15、30、45、60、90、180、360、1,440 及 2,880 分鐘)，再依照「水中全氟與多氟烷基物質檢測方法 - 液相層析串聯式質譜儀法 (NIEA W542.52B)」分析 PFOA 吸附前後濃度變化，計算出吸附材料對污染物的吸附容量，流程示意如圖 3 所示。水中氟離子濃度係依照「水中氟鹽檢測方法 - 氟選擇性電極法 (NIEA W413.53A)」進行分析。

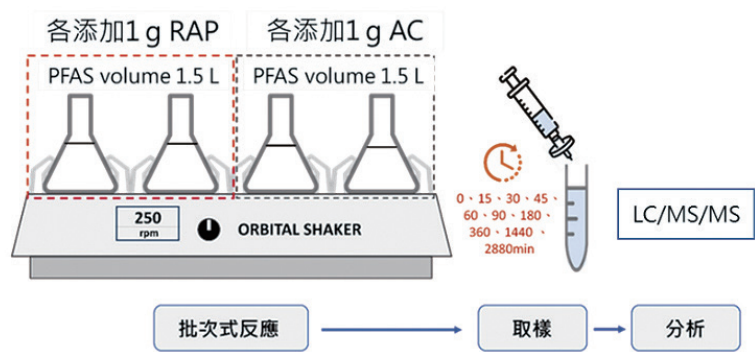


圖 3 2 種吸附材料 (RAP 及 AC) 對 PFOA 的吸附試驗流程

2.3 RAP 技術削減 PFOA 試驗

本研究主要利用添加氧化促進劑 (如空氣) 提升貴金屬氧化態數，對吸附於孔洞上的目標污染物進行氧化斷鍵與去除，並同步活化 RAP，使其維持催化氧化功能。在工業廢水的應用上，由於污染物濃度較高，氧化促進劑多用氧化力較強的臭氧，其次為氧化力較弱的雙氧水或次氯酸鈉。然而，本團隊曾以 RAP 技術進行受 LNAPL 污染的地下水場址模場試驗，發現針對柴油水樣，RAP 以單獨曝空氣 24 h 與臭氧曝氣 4 h 之再生效果相當。因此本試驗係以不同氧化促進劑，包括臭氧、雙氧水 (輔以空氣曝氣) 與單獨空氣曝氣對 PFOA 進行削減，評估其氧化斷鍵成效、反應時間、中間產物生成情形等參數，建立 RAP 技術削減 PFOA 最適操作條件。另多篇研究指出，單純使用氧化劑對於不同 PFAS 皆無降解效果，主要因為 C-F 鍵結構具有極大之解離能，造就化學性質穩定，故本研究不探討單純氧化試驗 (不添加 RAP) 對 PFOA 的削減情形。

2.4 RAP 氧化功能指標測試方法與再活化程序

2.4.1 RAP 氧化功能指標測試方法

為了評估 RAP 的吸附 / 催化氧化功能，也便於瞭解 RAP 是否已經毒化而須進行再活化程序，參考本團隊針對難降解工業廢水高級氧化處理技術所建立的觸媒氧化功能指標測試方法，修正後訂定 RAP 的氧化功能指標測試流程如圖 4 所示。本測試方法以性質穩定且不易揮發的苯甲酸為測試對象，配置濃度 50 mg/L 之苯甲酸合成廢水 (相當於 TOC 濃度 35 mg/L)，以合成廢水體積為 300 mL、RAP 量 75 mL 進行反應，使用迴旋往復式振盪箱 (250 rpm) 進行 10 個循環批次氧化測試，每批次反應時間為 30 分鐘，重覆試驗只須執行換水程序，不更換 RAP。每批次實驗後均分析反應後的 TOC 濃度，其中在 5~7 次的 TOC 平均去除率需落在 80~85%，8~10 次平均值不低於 80%，即表示 RAP 的氧化功能狀態良好。

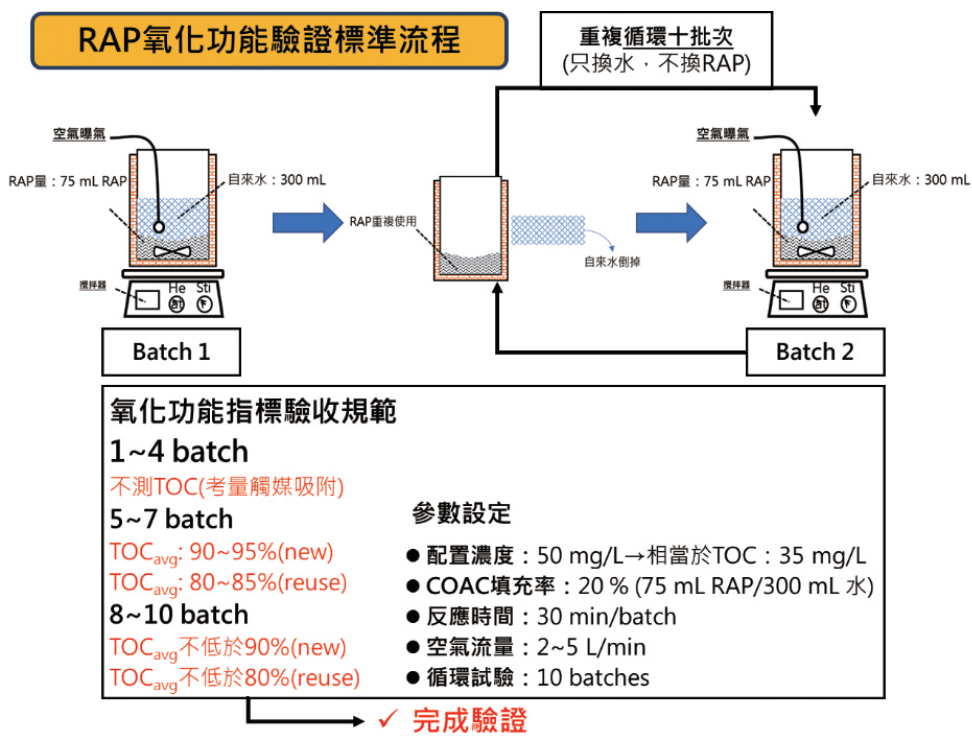


圖 4 RAP 氧化功能指標驗證程序

2.4.2 RAP 再活化程序

倘若 RAP 因某些因素導致失活 (氧化功能指標降至 < 20% , 即已吸附飽和 RAP) , 亦可透過小活化與大活化 2 種不同目的之再生程序使其恢復原有活性 , 其流程示意如圖 5 所示。小活化程序為維護型活化 (maintenance activation, MA) , 其目的是清除 RAP 孔洞的積碳 , 藉由添加適量氧化促進劑 (如臭氧或次氯酸鈉等) , 進而在水中形成電子電洞產生自由基 , 以提高系統的氧化還原電位。此過程能促進 Ru 金屬的氧化價態提升 , 以有效去除因有機物造成的孔洞積碳 , 使 RAP 恢復原有催化氧化功能。若 RAP 因長期運轉造成的貴金屬氧化物磨損或發生不可逆失活後 , 則需進行大活化程序 , 即在 80℃ 溫度條件下添加活化劑 (含 Ru-A-B 金屬氧化物) , 作為回復型活化 (recovery activation, RA) , 使流失的貴金屬氧化物重新披覆於 RAP , 其中披覆後 Ru 含量須符合 0.001~0.007% (w/w) 之標準。此外 , 本團隊先前研究 (Chen et al., 2024) 亦證實 , 在使用觸媒搭配臭氧氧化促進劑 , 設定催化氧化反應時間 60 分鐘 , 確認在 pH 5~10 正常操作狀態下 , 無檢測到 Ru 溶出至水相中 , 進一步說明該技術不會造成環境二次污染。

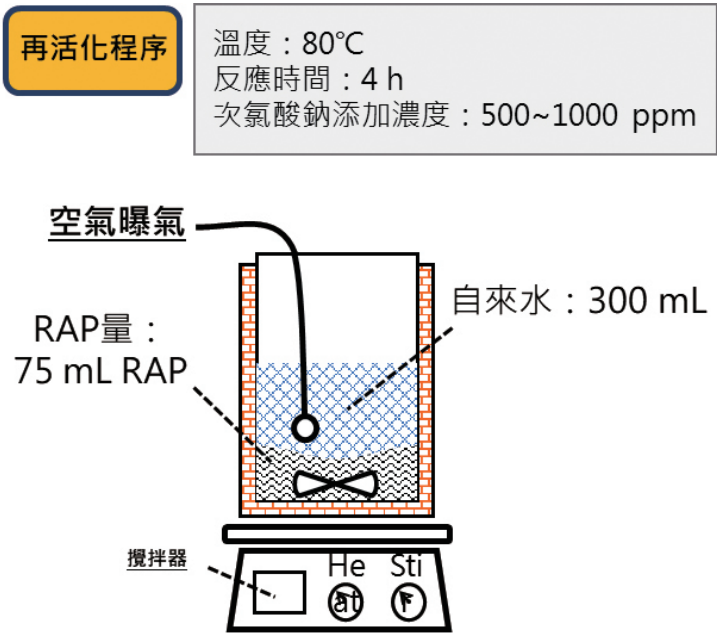


圖 5 維護型活化程序示意圖

2.5 預濃縮納濾膜

納濾系統對分子量介於 300 至 2,000 Dalton 之間的有機物具有良好的截留效果，且隨分子量的增加，其截留率與濃縮效率亦相應提升。此外，NF 膜對二價離子與 COD 具有優異的去除性能。由於其孔徑大於反滲透膜 (reverse osmosis, RO)，可在較低操作壓力下實現較高的水通量，顯示其操作效率與節能潛力優於 RO 膜。

國外 NX Filtration BV 公司已有使用 NF 膜對 PFAS 地表水污染場址進行現地試驗，其對多種 PFAS 皆有極佳的截留率。NF 膜在各種不同長短碳鏈 PFAS 的截留率皆可 > 90% (如圖 6 所示)。因此，在地下水 PFAS 濃度相對較低的情形下，應用 NF 系統作為預濃縮單元，並與 RAP 技術串接以強化整體削減成效，展現高度可行性，具進一步研究與應用發展之價值。

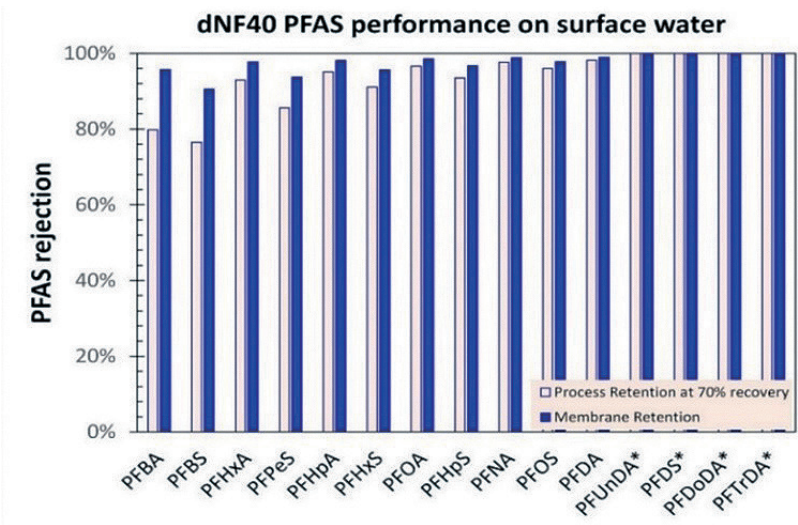


圖 6 NF 膜在各種 PFAS 上的截留率 (NX Filtration BV)

本研究於實驗室預濃縮測試採用的 NF 膜組件參數如表 2 所示。內部由聚醚磺 (polyethersulfone, PES) 改性中空纖維所組成，表面具選擇性帶電特性，在保留所有中空纖維納濾膜優點同時，可依實際應用需求選擇性地去除水中重金屬、硬度和有機化學物質等有害雜質，且能保留水中一定的礦物質含量。

表 2 NF 膜組件參數

膜參數	膜材質	改性 PES
	膜纖維內徑	0.7 mm
	膜電荷	負電
	過濾方式	由內到外，錯流
	截留分子量 (MWCO)	300 Dalton
	最大跨膜壓力	4.5 bar
	純水通量 (25℃ 條件下)	20~25 LMH/bar
進水限制條件	最高總懸浮固體	~100 mg/L
	最高濁度	~30 NTU
	最高粒徑	~160 μ m
	溫度	10~40 $^{\circ}$ C
	pH	0~14
	最大耐氟範圍 (pH 9 條件下)	250,000 mg/L-hr

三、結果與討論

3.1 RAP 材料物化特性

為確定全新可再生型吸附颗粒 (RAP) 與基底活性碳 (AC)2 種吸附材料的基本物化特性，本研究使用高解析比表面積分析儀 (BET) 與感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES)，分別檢測材料的比表面積、孔洞特性與貴金屬含量。表 3 整理為 RAP 和 AC 之孔洞特性與貴金屬含量，RAP 之 BET 比表面積、孔洞容積分別為 938 m²/g、0.45 cm³/g、僅略低於 AC 之 961 m²/g，說明儘管金屬氧化物沉積於部分孔洞中，RAP 仍具備良好的吸附能力。由貴金屬鈦含量數據得知，RAP 的鈦含量為 0.005 wt.%，AC 則為未檢出，顯示 RAP 材料較 AC 材料更具催化氧化效果，利於有機物的降解與去除。兩者之孔洞直徑皆落在 1.9 nm 之間，屬於微孔材料 (<2 nm)。

表 3 可再生型吸附顆粒 (RAP) 和活性碳 (AC) 之比表面積、孔洞特性與貴金屬含量

孔洞特性 與貴金屬含量	材料	全新 AC	全新 RAP
比表面積 BET surface area (m ² /g)		961	938
孔洞體積 Pore volume (cm ³ /g)		0.45	0.45
孔洞直徑 Pore width (nm)		1.89	1.90
鈦 (Ru) 含量 (wt.%)		未檢出	0.005

3.2 RAP 材料對 PFOA 吸附容量

由圖 7 顯示，經過 2,880 分鐘的吸附過程後，吸附容量曲線已趨於平緩，表明 2 種吸附材料的吸附容量已接近飽和，計算其吸附容量分別為活性碳 4.45 mg PFOA/g AC 與 RAP 吸附容量 4.36 mg PFOA/g RAP，與表 3 孔洞特性相互應證。綜上所述，雖然 RAP 與 AC 吸附材料的吸附速率略顯不同，但因為 RAP 技術削減 PFAS 的機制是以催化氧化為主，依照過去本團隊在工業廢水的研究結果，吸附速率對處理 PFAS 無影響。另外，鄭郁欣 (2021) 和孫澹澤 (2020) 的研究指出，全氟丁烷磺酸在 pH 值為 3 時，有最好的吸附容量；於 pH 值為 5~9 時，其吸附容量無明顯差異，即正常 pH 值範圍 5~9 情形下，不影響 RAP 技術吸附 / 催化氧化程序進行。

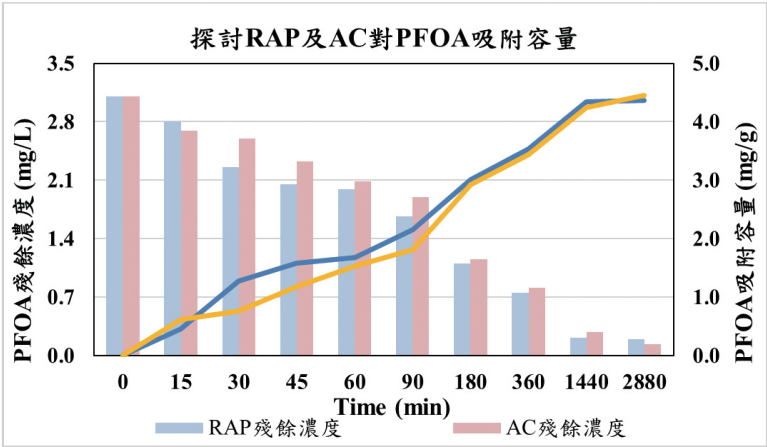


圖 7 兩種吸附材料 (RAP 及 AC) 對 PFOA 的吸附容量

3.3 RAP 吸附 / 催化氧化 PFOA 之能力

本研究設定全氟辛酸 (PFOA) 濃度約為 2.50 mg/L，反應體積為 1 L，RAP 填充量為 1 g，並使用不同種類的氧化促進劑於常溫條件下進行測試。氧化促進劑種類依其氧化能力強弱，可區分成 (1) 臭氧曝氣 (1.88 g O₃/h)，反應 0.5 小時、(2) 添加 50 mg/L 雙氧水 (輔以空氣曝氣)，反應 4 小時與 (3) 單獨空氣曝氣反應 2 天，合計 3 種實驗組進行比較。初始 pH 值除 RAP 搭配臭氧曝氣實驗組參照實驗室工業廢水經驗，設定為 9.0 外，其餘實驗組初始 pH 值皆為 7.5。

根據前節吸附容量評估可知，RAP 對 PFOA 吸附容量約為 4.36 mg PFOA/g RAP，因此本研究分別以同一批 RAP 重複進行 5 批次實驗，即每批次反應後只執行換水程序不換 RAP，並考量在前 2 批次主要為吸附作用，選擇第 3~5 批次的實驗結果進行討論，試驗結果如圖 8 所示，說明如下。

1. 單獨 AC 及單獨 RAP 對照組：兩實驗組明顯呈吸附飽和狀態，無氟離子生成；
2. RAP+ 臭氧曝氣 (1.88 g O₃/h) 實驗組：反應 0.5 小時即能將 PFOA 削減至 0.0957 mg/L，同時生成 1.55 mg/L 氟離子；
3. RAP 添加 50 mg/L 雙氧水 (輔以空氣曝氣) 實驗組：反應 4 小時後可將 PFOA 削減至 0.244 mg/L 及產生 1.44 mg/L 氟離子；
4. RAP+ 空氣曝氣實驗組：反應 2 天後可將削減 PFOA 至殘餘濃度 0.601 mg/L 及生成 1.19 mg/L 氟離子。

綜上所述，本研究結果顯示，RAP 技術搭配不同氧化促進劑皆能有效降解 PFOA，而氟離子生成亦間接證明三氟乙酸 (TFA) 已被部分礦化，進一步凸顯 RAP 技術在處理難降解之 PFAS 具明顯優勢。後續研究將著重於建立三氟乙酸的分析方法，以釐清降解機制，從而更全面展現此技術的應用潛力。

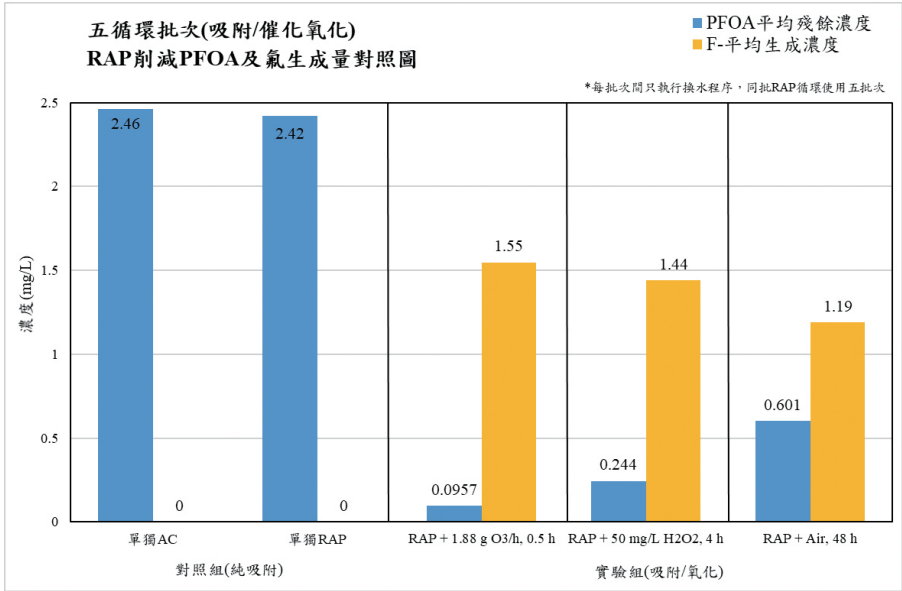


圖 8 5 循環批次 (吸附 / 催化氧化)RAP 削減 PFOA 與氟生成量試驗結果

另於 RAP+ 空氣曝氣實驗組，有觀察到中間產物生成，分別產生 2.28% 的全氟己酸與 0.25% 的全氟庚酸，其他短鏈 (C4 及 C5) PFAS 則無檢測出。然 RAP 搭配臭氧曝氣與 RAP 搭配雙氧水實驗組，於 PFOA 氧化斷鍵後，初步評估應無中間產物生成。

3.4 再活化評估

完成 RAP 技術削減 PFAS 程序建立後，另為模擬 RAP 經高濃度 PFAS 污染後，其孔洞的活性點位被污染物占滿，致使失去活性 (氧化功能指標降至 < 20%，即已吸附飽和 RAP)，需以較強的氧化促進劑進行再活化程序，使 RAP 恢復原有處理效能。因此本研究使用章節 3.3 的 5 循環批次對照組吸附飽和 RAP 進行再活化程序試驗，並依循團隊於工業廢水領域調整適用土水領域的再活化條件，係將 2,000 mg/L 次氯酸鈉加溫 80℃ 曝空氣 4 小時條件，調整為 (1) 500 mg/L 次氯酸鈉及 (2) 1,000 mg/L 次氯酸鈉兩種次氯酸鈉劑量，以加溫 80℃ 曝空氣 4 小時進行再活化程序，評估失活 RAP 其

氧化功能指標恢復情形，不同再活化程序之 RAP 對 TOC 之平均去除率如表 4 所示。結果顯示，失活 RAP 的平均 TOC 去除率僅為 13% 左右，比表面積小於 10 m²/g（以焦化廢水催化處理為例）；加入 500 mg/L NaOCl 再活化後，其平均 TOC 去除率可提高約至 60%；加入 1,000 mg/L NaOCl 再活化後，其活化效率顯著增加至 83~86.9%。

表 4 不同再活化程序之 RAP 對 TOC 之平均去除率

樣品	批次	TOC 平均去除率	比表面積 (以觸媒處理煉焦廢水為例)
失活 RAP (5 循環批次單獨 RAP 吸附 對照組)	B5~B7	14.5%	< 10 m ² /g (全新為 900~950 m ² /g)
	B8~B10	12.1%	
再活化 -1 (次氯酸鈉 500 mg/L)	B5~B7	60.3%	-
	B8~B10	59.0%	
再活化 -2 (次氯酸鈉 1,000 mg/L)	B5~B7	86.9%	
	B8~B10	83.0%	

* RAP 量：20% (75mL RAP/300mL 水)；溫度：80℃；反應時間：4 小時；曝氣方式：空氣

由上述數據得知，失活 RAP 可藉由次氯酸鈉清除孔洞上積碳，使其恢復原有處理效能。若活性點位積碳尚未清除乾淨，須調整劑量或活化時間等方式加以去除。另 1 個失活可能原因為披覆於 RAP 的貴金屬鈥流失，此情況則要進行大活化程序將貴金屬氧化物重新披覆至 RAP 上，披覆後 Ru 含量須符合 0.001~0.007% (w/w) 之標準。

3.5 NF 預濃縮試驗

由於環境中 PFAS 濃度通常僅為數 ppt 至 ppb，本研究採用兩段式 NF 膜串聯作為預濃縮單元，並進一步評估其與 RAP 技術整合之可行性，期望為未來現地 PFAS 場址提供一項高效削減的技術方案。

NF 系統的操作條件為壓力 4 kg/cm²、回收率 90%、進水 PFAS 濃度約 200 ppb，並針對不同碳數 PFAS 進行濃縮效能評估。實驗採兩段串聯方式，第一階段將原水樣循環 15 分鐘後，分別收集產水與濃縮液；第二階段則以前述濃縮液作為進水，進一

步提升 PFAS 的濃縮倍數，以強化整體處理效率。研究結果顯示於表 5，NF 系統即使對低分子量 (C4) 的全氟丁酸，亦能達到一定的截留效果，而對於較高分子量 (C7~C8) 的全氟庚酸與全氟辛酸，其濃縮倍數更分別提升至 11.7 及 45.9，顯示出極佳的濃縮效能。此外，產水中的 PFAS 濃度均未檢驗出 (N.D.)，此結果與章節 2.5 的文獻研究結果相當。由此可見，NF 系統在場址應用中具備高度可行性，特別是在濃縮長碳鏈的 PFOA 或 PFOS 時，能作為前端預濃縮單元以有效提升整體處理效率。

表 5 兩段 NF 膜串聯操作對不同碳數 PFAS 之濃縮倍數

物 種	全氟丁酸	全氟庚酸	全氟辛酸
化學式	C ₄ HF ₇ O ₂	C ₇ F ₁₃ CO ₂ H	C ₈ F ₁₅ CO ₂ H
分子量	214	364	414
濃縮倍數	4.17	11.7	45.9

四、結 論

採用不同氧化劑的 RAP 製程對 PFOA 的降解表現出了良好的效果。臭氧曝氣反應最快（0.5 h），其次為過氧化氫 + 空氣曝氣（4 h），而空氣曝氣則需 48 h。在 PFOA 降解過程中，僅 RAP+ 空氣曝氣組觀察到極少量的中間產物（2.28% 的全氟己酸和 0.25% 的全氟庚酸）的生成，其餘各組均未觀察到中間產物，顯示氧化劑的氧化能力顯著影響降解效果。氧化能力大小順序為臭氧曝氣 > 過氧化氫（+ 空氣曝氣）> 空氣曝氣。

再活化試驗中，失活的 RAP（氧化功能指數降至 <20%，即已吸附飽和 RAP），在 80℃ 下加入次氯酸鈉，暴露在空氣中 4 h，其氧化功能指數分別恢復至 85%（次氯酸鈉濃度為 1000 mg/L）和 60%（次氯酸鈉濃度為 500 mg/L）。由此可知，次氯酸鈉能有效清除 RAP 孔洞上的積碳，使其恢復原有的處理效能。

150 以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中全氟 / 多氟烷基化合物 (PFAS)

在實廠操作上，削減水中 PFAS 建議採用質傳效率較佳的流動床技術，並填充 10~20% 的 RAP 量，使 RAP 得以維持良好的反應性並保持穩定降解效率。此外，為避免吸附材完全飽和後才進行再活化，建議於去除率降至原有效率約 70% 或吸附容量達 50% 時，即提前啟動再活化程序。此作法不僅可確保 RAP 活性維持穩定，亦可於較低劑量下完成活化，提高操作效率與經濟性。

綜上所述，在地下水中 PFAS 濃度較低的條件下，採用 NF 系統作為預濃縮單元，並結合 RAP 技術，能有效提升整體削減效能。此整合處理策略具備高度應用潛力，可為未來產業全氟 / 多氟烷基物質削減方案提供參考。

致 謝

本研究承環境部環境管理署 112-113 年度「應用地下水抽出處理 (P&T) 系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中 PFAS」支持，特此致謝。

參考文獻

- 周珊珊、簡偉倫、陳國源、陳銘健、吳芳鈴、郭宥妍 (2023)，應用可再生型吸附顆粒 (RAP) 搭配多介質水力沖洗循環系統 (HFS) 去除受 LNAPL 污染之土壤及地下水案例介紹。環保署環訓所環境教育及訓練電子報 / 環保技術新知。
- 孫塘澤 (2020)，以顆粒活性碳吸附全氟丁烷磺酸及其微波再生之研究 (碩士論文)，國立臺灣大學。
- 鄭郁欣 (2021)，以摻鈣和錳之活性碳去除全氟丁烷磺酸之研究 (碩士論文)，國立臺灣大學。
- 環境部水質保護司 (2023)，PFAS 於放流水與飲用水國際管制趨勢及國內現況與展望，全氟及多氟烷基物質管理現況暨未來展望研討會。
- Birk, G.M. (2016). Immobilization of PFASs using activated carbon and aluminum hydroxide. Emerging Contaminants Summit, March 1-2, 2016, Westminster, Colorado.
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. Environmental Sciences Europe, 35(1), 1-50.
- Chen, C. P., Chen, Y. M., Nguyen, T. N. A., Chou, S. S., & Huang, C. (2024). Effective treatment of cyanide containing coking wastewater by catalytic ozonation with a novel ruthenium-supported catalyst. Environmental Chemical Engineering, 12(6), 114356.
- Cotruvo, J. A., Goldhaber, S. B., & Cohen, A. J. (2023). EPA' s Unprecedented Interim Drinking Water Health Advisories for PFOA and PFOS. Groundwater, 61(3), 301-303.

- Crimi, M. (2016). PFAS Treatment Options for Soil & Groundwater. NEWMOA PFAS Treatment & Remediation Webinar.
- Dudley, L. A., Arevalo, E. C., & Knappe, D. R. U. (2015). Removal of perfluoroalkyl substances by PAC adsorption and anion exchange. Water Research Foundation: Denver.
- Eschauzier, C., Beerendonk, E., Scholte-Veenendaal, P., & De Voogt, P. (2012). Impact of treatment processes on the removal of perfluoroalkyl acids from the drinking water production chain. *Environmental science & technology*, 46(3), 1708-1715.
- Gu, Y., Dong, W., Luo, C., & Liu, T. (2016). Efficient reductive decomposition of perfluorooctanesulfonate in a high photon flux UV/sulfite system. *Environmental science & technology*, 50(19), 10554-10561.
- Huang, J., Wang, X., Pan, Z., Li, X., Ling, Y., & Li, L. (2016). Efficient degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) by photocatalytic ozonation. *Chemical Engineering Journal*, 296, 329-334.
- Lu, D., Sha, S., Luo, J., Huang, Z., & Jackie, X. Z. (2020). Treatment train approaches for the remediation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review. *Journal of hazardous materials*, 386, 121963.
- NX Filtration BV. <https://nxfiltration.com/solutions/pfas-retentions-of-direct-nanofiltration-validated-by-kwr/>
- Ochoa-Herrera, V., Sierra-Alvarez, R., Somogyi, A., Jacobsen, N. E., Wysocki, V. H., & Field, J. A. (2008). Reductive defluorination of perfluorooctane sulfonate. *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3260-3264.
- Safulko, A., Cath, T. Y., Li, F., Tajdini, B., Boyd, M., Huehmer, R. P., & Bellona, C. (2023). Rejection of perfluoroalkyl acids by nanofiltration and reverse osmosis in a high-recovery closed-circuit membrane filtration system. *Separation and Purification Technology*, 326, 124867.

徵稿

工業污染防治刊物



經濟部產業發展署
Industrial Development Administration, MOEA



財團法人台灣產業服務基金會
FOUNDATION OF TAIWAN INDUSTRY SERVICE

「工業污染防治」刊物自民國71年發刊至今，提供產業界各類工業污染防制之技術及管理工具，據以改善製程及提升管末處理設施效能，透過學術研究與實務技術發表，提供產、官、學、研技術交流之機會。本刊物竭誠歡迎**不限期徵稿**，惠請各界踴躍投稿。

本刊特點



1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，至114年已發行164期，專業論著已逾1,894篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館永久保存。

徵稿範疇與方向



1. **空氣污染與噪音**：空污防制及案例、減碳議題
2. **水處理與資源再利用**：節水及廢水回收再利用、再生水系統化(如都市生活污水再利用，以供產業用水)、廢水及重金屬處理技術
3. **資源循環與再利用**：資源循環及減碳行動
4. **土壤處理與綠色永續化學**：土壤與地下水整治及調查技術、綠色永續韌性整治、毒性化學物質管理
5. **環境管理規劃**：再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估

投稿辦法



1. 投稿稿件，請以電子郵件寄至工業污染防治刊物編輯組
2. 檔案下載：徵稿啟事、撰寫格式及範例、著作權讓與同意書
3. 稿件請勿一稿多投，來稿將依收件情況及範疇分期審查刊載

聯絡窗口



陳靖瑜 助理工程師

專線電話：(02)7704-5156

E-mail：watch8630@ftis.org.tw



經濟部產業發展署 廣告

「工業污染防治」廣邀各界投稿

一、本刊特點

1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，於71年1月創刊，至 114 年已發行164期，專業論著已逾 1,894篇。
2. 列入國內重要專業期刊，專業技師投稿將取得60分之積分。
3. 本刊物納入國家圖書館期刊文獻資訊網，各期紙本刊物於國家圖書館中永久保存。

二、徵稿內容

1. 本刊關有下列類型領域，凡有處理技術、工程規劃設計、操作維護、污染防治實例、清潔生產、污染預防、資源循環技術及法令規章等稿件均歡迎。
 - (1) 空氣污染與噪音
 - (2) 水處理與資源再利用
 - (3) 資源循環與再利用
 - (4) 土壤處理與綠色永續化學
 - (5) 環境管理規劃
2. 來稿限未在其他刊物發表過之文稿。稿件請勿一稿兩投，文稿篇幅盡量勿超過25頁(含圖表)，請附中文摘要(300字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權歸本刊所有，請檢附「著作權讓渡同意書」。
3. 來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。
4. 本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願被刪改，請在來稿中註明。
5. 來稿請寄「工業污染防治編輯組」E-mail:watch8630@ftis.org.tw；或透過計畫網站線上投稿 <https://proj.ftis.org.tw/oss/index.html#/>
6. 詢問本刊相關事宜，請電(02)2784-4188轉5156「工業污染防治」編輯組。

三、刊物編寫格式(文稿格式範例請洽本刊編輯組)

1. 版面設定：文稿請以 A4 規格 21cm*29.7 cm 編排，本文版面規格則為上界 4.9cm、下界 4.9cm、左界 3.7cm、右界 3.7cm；內文段落則採固定行高 20 pt。
2. 字型設定：除標題(21號粗體字，置中)、作者(12 號，靠右)、摘要、章標題(16 號粗體字，置中) 及節標題(12號粗體字，靠左)採標楷體字型外，其餘內容請採用新細明體(內文為10號，左右對齊，首行首字須位移2字元；圖名及表名則採10.5號粗體字並置中)；英文及數字請用Time News Roman。
3. 章節編序：一、→1.1→1.1.1→1.→(1)→a，依序類推為原則。

4. 圖表配置：文中之圖表請隨文插入，序號請依撰文順序依次編號，如表1、表2，圖1，圖2等；圖表則須清晰可供辨識，另圖表中之說明文字請採用中文。
5. 文稿篇幅：請依上述格式編排並盡量控制於25頁以內(含圖表)。
6. 外文引述：翻譯名詞應採易通易懂者，首次出現請附原文，如沉澱(sedimentation)；原文名詞為首字則不必大寫，如活性污泥法(activated sludge process)；一般通用之縮寫文字亦不必加點，如BOD、SS等(不必寫成S.S)。
7. 數據規範：文中數字請採用阿拉伯數字，年份則以西元紀年，可量化數字每超過3位數請以逗點區隔，如1,250；文中所用數據單位應為公制單位，如mg/L、m/d、kg/m³、d、m、min、℃等。數字及英制單位之間請空半形1格，如12mg/L，改為12 mg/L。
8. 行文要求：文句簡明，用字通俗即可，請儘可能避免如“的”、“之”混用情形。
9. 文獻格式：文獻引用請隨文以文獻作者、年份註解於括號內，如陳國城等(1991)、(Gzara, 1991)；參考文獻以中文在前，英文在後之原則序列，中文請依第一作者姓名筆劃順序排列，英文則依作者姓氏字母順序羅列。

期 刊：作者(出版年)。篇名。出處。卷期。頁數。

書 籍：作者(出版年)。篇名。出處。頁數。

機關出版品：編寫機構(出版年)。篇名。出版機構。頁數。

研討會論文：作者(出版年)。篇名。會議論文冊名稱。主辦單位。頁數。

報 告：作者(出版年)。報告名稱。○○○委託之專題研究報告(若是政府委託需填寫報告編號)。出版地點：出版商。

網 頁：作者(網頁日期)。資料名稱。網站站名網域網址。

【參考文獻 格式範例】

王義基(2014)，製造業產品碳足跡輔導歷程與成果，永續產業發展季刊，第66期，p3-9。

林靜宏翻譯(1999)，儀器分析，美亞書版股份有限公司。

林振誠(2012)，IBP 塑網，「丙烯市場展望」，<http://goo.gl/ypB800>。

楊正邦、劉志成(2004)，快濾地反沖洗廢水之處理技術及回收再利用，自來水會刊第23期，p81-86。

經濟部工業局(2011)，放流口線上光學COD/SS 監測開發計畫，100 年度 CITD 專案計畫結案報告。

Gzara, L. and Dhahbi, M. (2001), Removal of chromate anions by micellar-enhanced ultrafiltration using cationic surfactants, Desalination, 137(1-3): p241-250.

著作財產權讓與同意書

著作名稱		
作者	姓名	
	通訊處	
作者	姓名	
	通訊處	
作者	姓名	
	通訊處	

※如不敷記載可自行增列

- 一、本著作全部作者保證除本次投稿外，相同內容未投稿至國內外其他刊物；如有類似一稿多投之情形同意無條件抽回本文，不得異議。
- 二、本著作全部作者同意將著作財產權自「工業污染防治」刊物(下稱本刊)接受刊登日起，讓與給經濟部產業發展署，但作者保留引用文章在自己著作之權利。如爾後有版權、著作權等法律糾紛，文責由作者自負。
- 三、財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部產業發展署計畫，有重新製作並將本篇文章置於該會所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但須註明本著作之作者。
- 四、本著作全部作者同意由_____代為領取稿酬，其分配與本刊無涉。

此 致

經濟部產業發展署

作者：_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日

_____ 簽章
年 月 日



本期刊下載

發行所：經濟部產業發展署
台北市106信義路三段41-3號

TEL:(02)2754-1255

FAX:(02)2704-3753

本期刊全文網址：sdd.nat.gov.tw/eta/index.aspx