



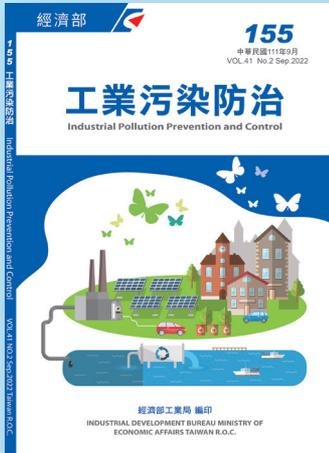
工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control



經濟部工業局 編印

INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU MINISTRY OF
ECONOMIC AFFAIRS TAIWAN R.O.C.



中華民國七十一年一月創刊

中華民國一一一年九月出刊

發行人：連錦漳

總編輯：凌韻生

編輯審查委員：江康鈺、吳義林、李公哲、林文印、林凱隆、凌永健、馬鴻文、
康世芳、張添晉、陳士賢、歐陽嶠暉、鄭福田、盧至人、魏榮宗

顧洋(依姓名筆畫順序)

企劃：陳良棟、潘建成、王義基、洪萱芳

執行編輯：陳見財、吳宜樺、莊茂森、莊倫綱、陳筱薇、陳怡靜

發行所：經濟部工業局

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-3753

網址 <https://www.moeaidb.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，不代表經濟部工業局立場～



工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control



經濟部工業局 編印

INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU MINISTRY OF
ECONOMIC AFFAIRS TAIWAN R.O.C.

155 工業污染防治

空氣污染與噪音類

工商業鍋爐汰換污染改善分析

……………潘一誠、林穎俊、陳筱薇、林志純、謝仁碩、劉智祥、賴俊甫、王義基 1

我國戴奧辛排放管制策略及成果分析

……………羅鈞、陳怡伶、陳秉圻 19

廢棄物類

食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估

……………段紀義、梁世祥、周瑞興 37

廢(污)水處理類

化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實場處理

……………陳致君、王鈞逸 59

LCD 玻璃奈米孔洞材料於電鍍產業水資源循環之應用案例

……………劉倩、李志怡、魏文宜、顏旭明、杜子邦、呂健璋、洪煥毅 73

含氮廢污水綠色處理系統建立

…蔡明瀚、簡偉倫、陳國源、周珊珊、黃思蓁、趙淑如、黃志彬、張莉珣、顏旭明 85

環境規劃管理類

染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究

……………施孟芬、林俊德 103

環境化學與微生物類

土壤及地下水污染整治技術認證制度推動與土水產業發展推動

……………簡慧貞、陳以新、吳雅婷 121



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 110 年底，已出版 153 期，共刊載 1,810 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，置於工業局永續發展組委辦之「產業綠色技術資訊網」，供各界瀏覽下載。

111 年度之文稿範疇包含空污(跨媒介)整治及案例、節水廢水回收再利用、廢水氨氮及重金屬處理技術、綠色材料與永續物料管理、土壤與地下水整治、毒性化學物質管理、再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估及淨零碳排。本期共收錄 8 篇，分別撰述「工商業鍋爐汰換污染改善分析」、「我國戴奧辛排放管制策略及成果分析」、「食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估」、「化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實場處理」、「LCD 玻璃奈米孔洞材料於電鍍產業水資源循環之應用案例」、「含氮廢污水綠色處理系統建立」、「染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究」及「土壤及地下水污染整治技術認證制度推動與土水產業發展推動」，作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

空氣污染與噪音類

工商業鍋爐汰換污染改善分析

潘一誠*、林穎俊**、陳筱薇***、林志純****、謝仁碩*****、
劉智祥*****、賴俊甫*****、王義基*****

摘 要

為達成 106 年 12 月 21 日行政院通過之「空氣污染防制行動方案」，經濟部與環保署分工合作推動工業及商業鍋爐改乾淨燃料政策，包括「油轉氣」、「煤轉氣」及「油轉電熱泵」等 3 種，自 106 年規劃推動，制定「排放標準」與「補助改善」併行的雙重策略，環保署於 107 年 9 月公告實施「鍋爐空氣污染物排放標準」，並配合「補助改善」措施，依不同鍋爐型式申請改善工程補助。

107~110 年工業鍋爐共汰換 4,800 座，其中透過補助作業完成改善者有 2,123 座，另透過輔導工廠自行改善而不適用補助者為 2,677 座(含拆除停用)。促使燃氣鍋爐(包含天然氣、液化石油氣)由 27% 提升至 69%，燃油鍋爐(重油)由 55% 降低至 22%。商業鍋爐汰換 1,420 座(含 310 座拆除停用)，其中 42.4% 改用天然氣等、57.6% 改用熱泵或其他電能加熱設施。

107~110 年工商鍋爐 SO_x 減量合計達 15,961 公噸 / 年，SO_x 空氣品質改善率超過 20% 的地方政府，由北而南分別為基隆市、臺北市、新北市、桃園市、新竹縣、嘉義縣 / 市、臺南市、高雄市、屏東縣及金門縣等 11 縣市。同步促進衍生 PM_{2.5}(硫酸鹽氣膠)空氣品質之改善，行政院推動「空氣污染防制行動方案」之工商鍋爐管制策略，已獲得具體成效。

2 工商業鍋爐汰換污染改善分析

【關鍵字】工商業鍋爐汰換、乾淨燃料、補助改善、污染減量

* 鼎環工程顧問股份有限公司	總經理
** 鼎環工程顧問股份有限公司	資深工程師
*** 財團法人台灣產業服務基金會	工程師
**** 環保署空氣品質保護及噪音管制處	技士
***** 環保署空氣品質保護及噪音管制處	科長
***** 經濟部工業局永續發展組	科員
***** 經濟部工業局永續發展組	科長

一、前言

空氣品質攸關民眾健康，為社會大眾所關注。近年在環保機關積極管制、目的事業主管機關加強輔導及業者配合改善的情況下，空氣品質已逐年改善，行政院環境保護署（以下簡稱環保署）為精進空氣品質改善，乃參考各界意見，修正空氣污染防治法（以下簡稱空污法），具體回應外界訴求，該法已於 107 年 8 月 1 日經總統公布施行，為我國空氣污染防治工作，建立新的里程碑。

空污法修正內容，除加強行政管制面之規範外，亦強化各種污染源之改善輔導規定，依該法第 50 條規定「各種污染源之改善，由各目的事業主管機關輔導之；相關輔導成果，應每年公開於中央主管機關指定之網站，並定期檢討」，以落實資訊公開原則，使民眾瞭解目的事業主管機關採取之輔導措施及成果，並共同監督污染源。

鍋爐改善採用制定「排放標準」與「補助改善」併行的雙重策略，其中 107 年所制定的「鍋爐空氣污染物排放標準」，已於同年 9 月公告實施，新設鍋爐立即生效，既有鍋爐則考量工程施作及天然氣管線鋪設工期等因素，訂定符合標準之期程，並由各地方政府以個案給予適當改善期限。為落實該法規執行成效，採取「補助改善」措施，依不同鍋爐型式，分別可申請新台幣 30~70 萬元補助，最長至 111 年 7 月為止。109 年 7 月 8 日該標準經第一次修訂，新增因遭遇陳情抗爭事故、受蒸汽或氣體燃料管線工程較長影響、受供氣不足影響或其他不可抗力之事由，既存鍋爐可申請展延改善期限，或申請變更改善計畫，重新核定改善期限，最長至 116 年 7 月為止。

為同時達成「提升鍋爐效能」與「降低空氣污染物排放」目標，環保署與經濟部投入經費「補助改善」，並成立鍋爐改善輔導平台，提供污染源改善作法與經驗傳承。經 3~4 年的努力，改善後之鍋爐不但燃燒效率高、作業環境更安全、環境污染也更少，創造環保、能源及經濟之三贏策略。

二、背景資料分析

2.1 環保署固定污染源改善策略

環保署於 105 年 7 月研擬「清淨空氣行動計畫」，並於同年 10 月經行政院核定後，透過各部會與地方政府啟動「空氣污染減量行動督導聯繫會報」，整合各部會、各地方政府空氣污染管制量能，積極推動空氣污染減量工作。復於 106 年 12 月 21 日通過「空氣污染防制行動方案」，設定 108 年底 PM_{2.5} 紅害日數降低至 499 站日數以下、年平均值降至 18 μg/m³ 的目標。該行動方案經過 1 年實際推動及滾動式檢討後，於 107 年 12 月公告修訂版，持續推動精進管制策略。

依據「空氣污染防制行動方案」各類污染源分類方式，統計基準(105)年排放量如表 1 所示。減量管制策略計分為 10 類污染源，其占全國 PM₁₀、PM_{2.5}、SO_x、NO_x、NMHC 排放量，分別為 51%、52%、97%、81%、16%；其中工商業鍋爐 SO_x 及 NO_x 占比分別為 21% 及 16%，若加上國營企業則占比高達 75% 及 40%，又以 SO_x 占比最高。

表 1 「空氣污染防制行動方案」基準(105)年排放量

污染源	TEDS10(公噸/年)				
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO _x	NO _x	NMHC
1. 國營企業	7,894	6,081	59,444	87,988	3,431
2. 工商業鍋爐	3,580	2,781	23,717	62,139	12,346
3. 露天燃燒	4,298	4,140	1,497	3,668	1,890
4. 建築/施工	21,971	4,394	-	-	-
5. 餐飲業(油煙)	2,933	2,056	12	139	39,936
6. 民俗	667	591	5	135	76
7. 裸露地表	21,670	3,586	-	-	-
8. 大型柴油車	8,354	7,232	37	130,327	10,600
9. 二行程機車	805	654	2	303	12,553

10 船舶 - 港區內	2,103	1,698	23,073	21,938	578
小計	74,275	33,213	107,787	306,637	81,410
105 年全國排放量	146,940	64,129	111,609	377,844	521,010
10 類污染源占比	51%	52%	97%	81%	16%
工商鍋爐占比	2.4%	4.3%	21%	16%	2.4%
工商鍋爐及國營企業占比	7.8%	14%	75%	40%	3.0%

資料來源：TEDS10.0

「空氣污染防制行動方案」107~110 年之減量成效如表 2 所示，以基準 (105) 年排放量為基礎，統計至 110 年底 PM₁₀、PM_{2.5}、SO_x、NO_x、NMHC 減量比例分別可達 5.2%、8.1%、26.3%、18.0%、3.4%。其中工業及商業鍋爐 SO_x 及 NO_x 的減量比例，分別可達 14.3% 及 2.2%，加計國營企業合計減量比例可達 19.9% 及 7.7%，再加計港區運輸合計減量比例可達 26.1% 及 7.7%，以 SO_x 減量比例最顯著。

以下茲就工業及商業鍋爐推動策略及具體成果，分別說明如下：

表 2 「空氣污染防制行動方案」107~110 年減量成效

管制措施		預計 期程 (年)	政府投入 (億元) PM ₁₀	年排放量減量成效 (公噸)				
				PM _{2.5}	SO _x	NO _x	NMHC	
固定 污染 源	國營事業及大型企業減量	106-115	661.2	399	240	6,272	21,003	118
	商業鍋爐管制	106-108	3.0	23	18	350	203	-
	工業鍋爐管制	106-108	15.0	445	267	15,611	7,930	-
	農家稻草及果樹枝去化處理	106-108	2.3	513	466	174	425	219
	營建及堆置揚塵管制	106-108	0.0	1,562	312	-	-	-
	餐飲油煙管制	106-109	2.4	841	788	-	-	6,689
	改善民俗活動衍生污染	107-108	2.1	123	88	1	30	14
	河川揚塵防制	107-109	9.3	340	13	-	-	-

6 工商業鍋爐汰換污染改善分析

移動 污染源	鼓勵 1-3 期大型 柴油車汰舊換 新或換中古車	106-108	41.0	2,092	1,896	9	29,804	3,068
	鼓勵 1-3 期大型 柴油車污染改 善或加裝空氣 污染防制設備	106-108	7.6	343	316	-	-	-
	鼓勵淘汰二行 程機車	106-108	16.6	504	409	1	211	7,053
	港區運輸管制	107-109	4.1	393	318	6,949	83	86
	交通管制新作 為(電動公車)	-	80.0	77	62	4	8,425	542
	補助及推廣空 氣牆設置	107-109	0.6	-	-	-	-	-
合計	-	766.8	7,655	5,193	29,371	68,115	17,788	
清冊排放量 (TEDS10 105 年)				146,940	64,129	111,609	377,844	521,010
14 類策略總減量占比				5.2%	8.1%	26.3%	18.0%	3.4%
工商鍋爐減量占比				0.3%	0.4%	14.3%	2.2%	-
工商鍋爐 + 國營企業占比				0.6%	0.8%	19.9%	7.7%	0.02%
工商鍋爐 + 國營企業 + 港區運輸占比				0.9%	1.3%	26.1%	7.7%	0.04%

1. 環保署，整合及考評地方政府執行空氣污染防制成效，109 年度期末報告。
2. 環保署，目的事業主管機關污染改善輔導成果書面報告，111 年 3 月 25 日。

三、工業鍋爐

3.1 工業鍋爐改善策略

工業鍋爐改善工作為行政院核定「空氣污染防制行動方案」項下工作項目之一，並經行政院於 109 年 5 月 22 日核定「空氣污染防制方案(109-112 年)」持續推動加強改善鍋爐污染排放。經濟部自 107 年 4 月 19 日發布實施「經濟部補助直轄市縣市政府辦理工業鍋爐改善作業要點」，由環保署空氣污染防制基金及經濟部石油基金各半支應工業鍋爐燃料改善補助，透過縣市政府合作進行補助作業辦理，鼓勵業者改用低污染性燃料，並輔以污染防制技術輔導雙管齊下，提供最適方案以促使廠商進行改善，協助既存工業鍋爐進行鍋爐汰換及燃料改善，降低空氣污染物及溫室氣體排放。

彙整環保署掌握之公私場所固定污染源管制資料、公協會宣導及工業局調查，截至 110 年 12 月 31 日止，全國工業鍋爐設置數量達 5,598 座。統計各地方政府工廠家數與工業鍋爐座數，結果顯示兩者大致呈現正比關係，工業鍋爐座數以桃園市 (19%) 占比最高，其次為臺南市 (14%) 及彰化縣 (11%)，如圖 1 所示。

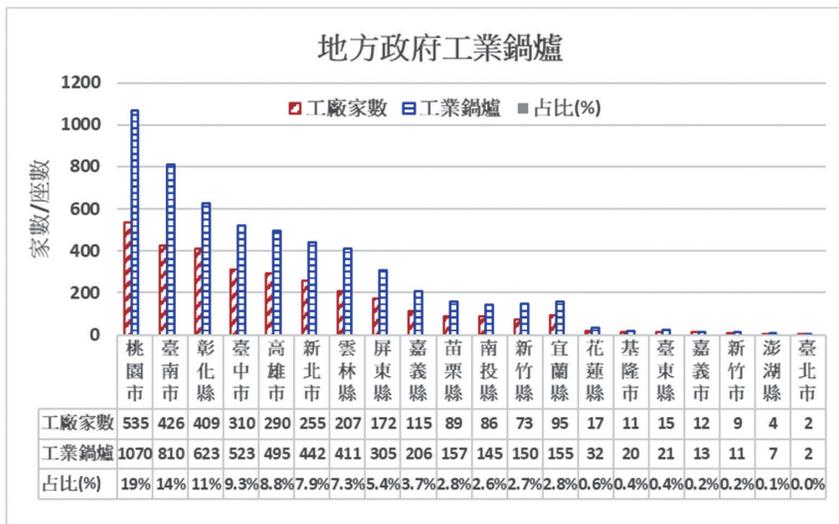


圖 1 全國工業鍋爐設置數量分布圖

8 工商業鍋爐汰換污染改善分析

3.1.1 經濟部工業鍋爐改善輔導訪視

我國產業結構型態以中小企業為主，而鍋爐是生產製程的重要能源設備。鍋爐於燃燒程序中，依照不同燃料特性，伴隨產生不定量的空氣污染物。早期工業鍋爐用戶因考量製程需求、規模大小及成本效益等因素，多採用燃料油（重油）及燃煤做為鍋爐燃料，產生之空氣污染物排放量較大，故政府近年來訂立鍋爐空氣污染物排放標準。新北市及臺中市陸續宣示轄內朝無煤政策邁進，且廠商亦考量環境保護需求，開始推動高污染燃料之汰換。

改善鍋爐之方式並不僅限於燃料改為天然氣，可由源頭燃料、燃燒技術、污染防制等三面向著手改善。因此，政府推動多元改善方案包含多樣化燃料種類，以及加裝空污防制設備等改善建議。在全國工業鍋爐改善統計認定上，除燃料種類改為低污染氣體燃料（如天然氣、液化石油氣及購置蒸汽等）均列入已改善外，另改用柴油、生質燃料、特種低硫燃料油（含硫量 0.1%）與加裝空污防制設備等，亦列為已完成改善對象；此外，部分廠商使用自廠產生的廢棄物為燃料，落實國家循環經濟政策。

配合行政院「空氣污染防制方案」的政策，經濟部工業局積極推動工業鍋爐改善輔導，透過現場訪視與技術輔導，收集業者意見，規劃評估鍋爐改用清潔燃料的可行性方案。依據環保署提供之工業鍋爐名單，將尚未使用清潔燃料之鍋爐列為優先輔導改善對象，並根據各廠之改善條件提供適當改善建議，達成鍋爐空氣污染減量目標，帶動產業能源轉型，降低經濟發展所衍生之環境負荷。

3.1.2 工業鍋爐改善補助

經濟部工業局盤點工業鍋爐名冊，透過輔導及電話調查統計至 110 年底共 3,132 家 5,598 座工業鍋爐，如圖 2 所示，篩選燃油及燃煤之鍋爐列為輔導改善對象，優先推動改用天然氣或輔導使用替代能源等作法，來協助廠商符合環保署發布的「鍋爐空氣污染物排放標準」。



資料來源：110 年度目的事業主管機關污染改善輔導成果書面報告

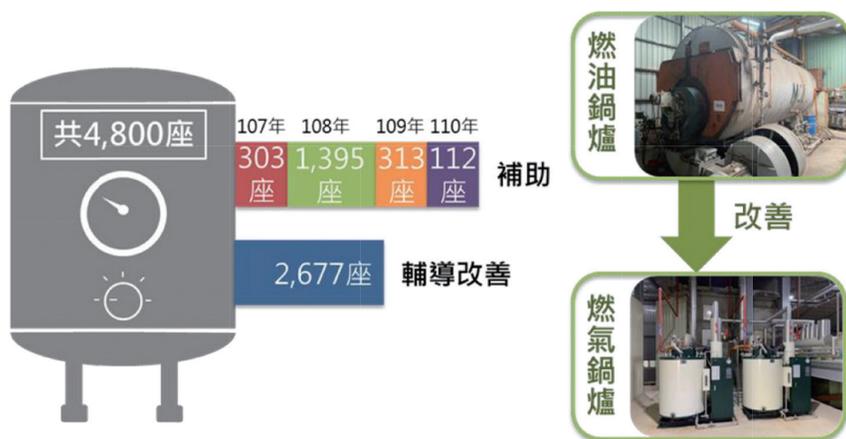
圖 2 工業鍋爐資料盤點及改善措施

經盤點工業局既有計畫資源，如產業綠色技術提升、輔導產業低污染排放技術、區域能資源整合推動、產業低碳科技應用補助等計畫，針對工業鍋爐之改善已有諸多努力作為及成功案例；然而工業鍋爐污染改善工作所需量能及數量龐大，僅由部分專案計畫難以全面兼顧，且上述計畫之主要目的並非僅針對工業鍋爐執行污染減量工作；為此，經濟部爭取相關資源強化輔導量能，提出「工業鍋爐燃料轉換及改善空氣污染行動計畫」，由經濟部石油基金與環保署空氣污染防制基金共同分攤支應工業鍋爐改善所需補助經費，鍋爐相關設備以補助每座 50 萬元為上限，且補助金額不得超過設備改善費用 49%；廠區內管線以補助每座 20 萬元為上限，且補助金額不得超過廠區內管線費用 49%。

行政作業上並整合中央與地方政府的行政能量，建立工作聯繫平台，強化中央、地方及廠商間溝通聯繫，協調天然氣供應系統等，以務實推動工業鍋爐更換清潔燃料。另外，可藉此帶動國內鍋爐設備相關產業蓬勃發展，刺激能源設備技術推廣與活絡相關技術研發能量。

3.2 工業鍋爐改善成果

縣市政府自 107 年 8 月起陸續受理鍋爐補助，截至 110 年底共 2,123 座已完成改善，補助金額達 10.95 億元。另併計已配合政府「空氣污染防治方案」完成改善、但無法獲得補助及拆除停用者達 2,677 座，累計改善座數共 4,800 座，如圖 3 所示。空污減量效益推估為 SO_x：15,611 公噸 / 年、NO_x：7,930 公噸 / 年，減碳效益：129.6 萬公噸 CO₂e / 年。另截至 110 年底，已進行改善但尚未改善完成者計有 657 座，併計已改善之 4,800 座，合計改善 5,457 座。



資料來源：110 年度目的事業主管機關污染改善輔導成果書面報告

圖 3 工業鍋爐改善補助作業成果

工業鍋爐改善後燃料別現況，110 年底由經濟部工業局與環保署進行勾稽比對。統計工業鍋爐使用燃料座數結果顯示，燃氣鍋爐（包含天然氣、液化石油氣）由 107 年 27% 已大幅提升至 110 年 69% 為最大宗；燃油鍋爐（重油）由 107 年 55% 降低至 110 年 22%；燃煤鍋爐由 107 年 5% 降低為 110 年 4%；其他類（柴油及生質能等）由 107 年 13% 降低至 110 年 5%，如圖 4 所示。

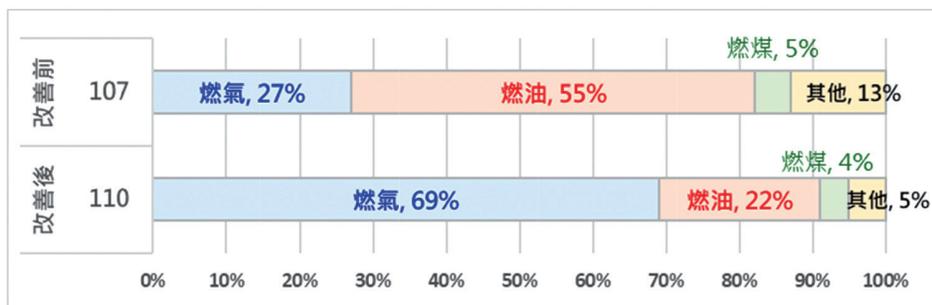


圖 4 工業鍋爐燃料改善成果

由於工業區內多已設有天然氣管線的主幹管，普遍天然氣管線設置距離較區外短、所需施工費用相對較低，經評估可符合成本效益之業者，多選用天然氣為最佳方案；惟部分業者經評估自廠鍋爐燃料用量及製程營運特性，考量經濟效益後，選擇以液化石油氣 (LPG) 或柴油做為改善方案，即毋須投資龐大管線初設成本。針對宜花東區域及部分工業區尚未有天然氣供應，鋪設天然氣管線距離長及費用高的工廠，亦可考量使用 LPG，以符合排放標準降低空氣污染物排放。

針對 110 年度工業區內外工業鍋爐改善規劃輔導統計，共執行 95 座鍋爐 (50 家) 輔導。輔導對象依縣市別分布統計，以桃園市 (57%) 最多，其次為屏東縣 (10%)、彰化縣 (8%) 及臺中市 (6%)。輔導之行業別分布，以食品製造業 (19 家，38%) 最多，其次為紡織業 (6 家，12%) 及化學製品製造業 (6 家，12%)，如圖 5 所示。鍋爐設備產生的蒸汽多用於烘乾製程及產品高溫殺菌用途，工業局輔導鍋爐廠商採用潔淨燃料並搭配防制設備操作，有效改善空氣污染排放量。

工業區外工廠其所在區域若未鄰近天然氣管線，新鋪設天然氣管線工程費用龐大，因此需協調具群聚性之工廠，整合區域天然氣需量，共同鋪設管線及分擔費用，提高改善意願。惟針對改善困難點涉及跨部會之權限，則提至縣市政府協調平台，以排除障礙落實改善。

12 工商業鍋爐汰換污染改善分析

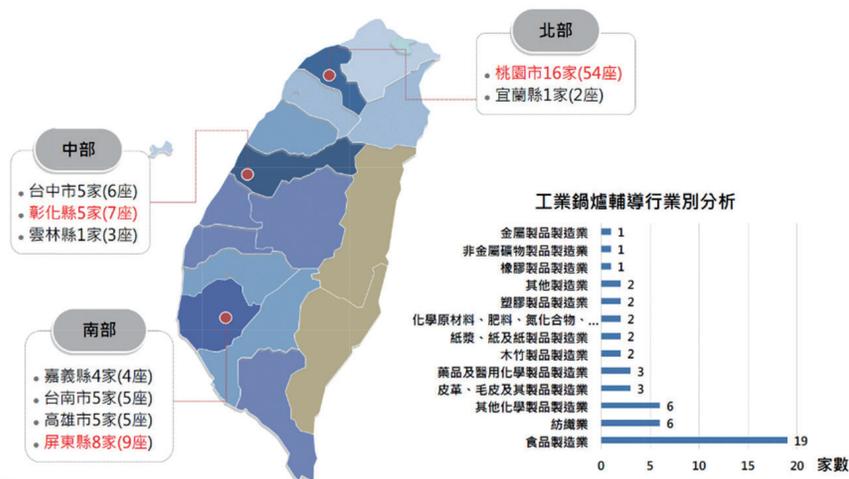


圖 5 工業區內外工業鍋爐改善規劃輔導對象

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

經過經濟部工業局近年的輔導，有部分工廠確定無法於 109 年 7 月 1 日「鍋爐空氣污染物排放標準」生效前改善完成，廠商可檢具空氣污染防制計畫，向所在地環保局申請工業鍋爐改善期限展延，最長不得逾 111 年 7 月 1 日；若改善計畫受管線施作困難、遭遇民眾陳抗等不可抗力因素影響，致使無法如期完工者，既存鍋爐可重新申請展延改善期限，但不得逾 116 年 7 月 1 日。

四、商業鍋爐

4.1 商業鍋爐空氣污染物排放規範

為降低國內鍋爐及加熱設備於燃燒過程產生空氣污染物所造成之影響，環保署於 106 年 4 月 13 日訂定發布「改造或汰換旅宿業醫療社會福利機構學校燃油鍋爐補助辦法」，優先針對旅宿業、醫療社會福利機構學校，改造或汰換燃油鍋爐為低污染性氣體燃料、太陽能或電能之加熱設備，給予補助。

為增加空氣污染物減量效益，擴大適用對象，以加速改善空氣品質，環保署於 107 年 5 月 8 日修正發布「改造或汰換鍋爐補助辦法」，擴大補助適用對象，除工廠管理輔導法管理之工廠、電業法管理之電業及國營事業管理法管理之國營事業外，凡於本辦法訂定施行日（即 106 年 4 月 13 日）起將既存鍋爐改造或汰換為使用低污染性氣體燃料、太陽能或電能加熱設備之公私場所，不論完工與否皆納為本辦法之補助對象。另為給予擴大適用之補助對象足夠時間進行改造或汰換作業，將申請補助期間延長至 108 年 6 月 30 日。109 年 6 月 11 日環保署修正發布「改造或汰換鍋爐補助辦法」除簡化申請程序與流程，並考量既存鍋爐因特殊原因需較長時間改善，將申請補助時間依補助對象區分，分別延長至 109 年 12 月 31 日及 111 年 7 月 31 日，並調整補助上限以新臺幣 30 萬元為限；另為鼓勵小型既存商業鍋爐替換為電能加熱設備，維持補助上限 50 萬元。最後於 109 年 7 月 1 日發布施行「鍋爐空氣污染物排放標準」，透過此辦法加嚴既存鍋爐排放標準，商業鍋爐相關規範公告歷程如圖 6 所示。

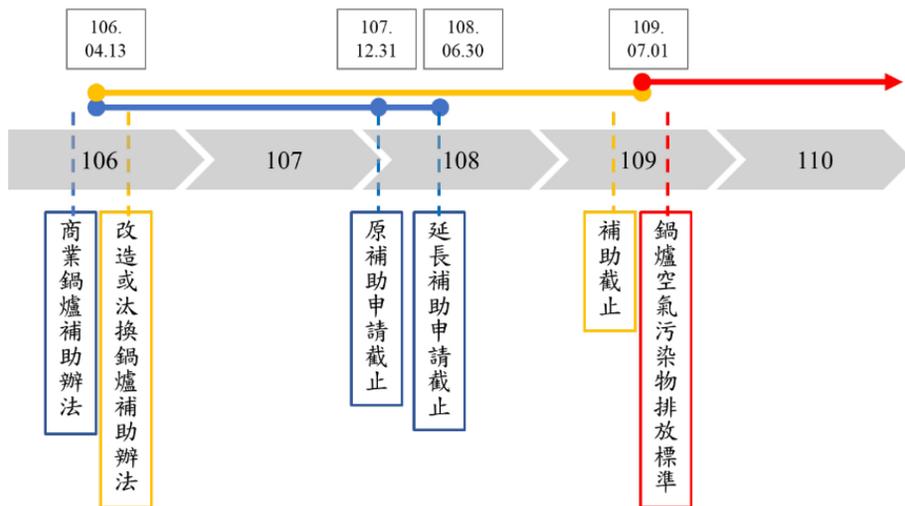


圖 6 商業鍋爐相關規範公告歷程

14 工商業鍋爐汰換污染改善分析

4.2 商業鍋爐改善策略

環保署統計截至 110 年底，已輔導汰換商業鍋爐共 1,420 座，扣除已停工或拆除之鍋爐 310 座，共計補助 1,110 座鍋爐，其中 469 座 (42.4%) 改用天然氣等、637 座 (57.6%) 改用熱泵或其他電能加熱設施；補助數量最多的縣市為臺南市及高雄市，共改善 395 座，占全國商業鍋爐改善 (1,110 座) 的 35.6%，詳如表 3。

表 3 商業鍋爐改善統計 (截至 110 年底)

縣市	停工/拆除 /自行汰換	補助改善	總改善數 (停工拆除+補助改善)	改善方案				
				天然氣	液化石油氣	丙烷混合氣	熱泵	其他電能
臺南市	49	191	240	25	74	0	88	4
高雄市	50	204	254	79	56	0	63	6
宜蘭縣	56	97	153	0	2	0	95	0
花蓮縣	27	75	102	0	1	0	74	0
臺東縣	13	61	74	0	13	0	46	2
桃園市	23	61	84	9	5	0	47	0
臺中市	10	62	72	30	14	0	17	1
新北市	9	58	67	15	9	0	34	0
南投縣	4	39	43	0	7	4	27	1
臺北市	3	40	43	29	0	0	7	4
嘉義縣	34	34	68	2	4	0	28	0
嘉義市	12	32	44	14	9	0	9	0
彰化縣	1	28	29	5	18	0	4	1
屏東縣	4	25	29	2	9	0	13	1
苗栗縣	2	22	24	11	2	0	9	0
新竹縣	2	20	22	5	3	0	12	0
金門縣	0	15	15	0	1	0	13	1
澎湖縣	0	15	15	2	0	0	13	0
雲林縣	1	11	12	2	6	0	3	0
基隆市	6	9	15	2	0	0	7	0
新竹市	4	9	13	4	0	0	5	0
連江縣	0	2	2	0	0	0	2	0
合計	310	1,110	1,420	236	233	4	616	21
占比	21.8%	78.2%	100%	21.3%	21.0%	0.4%	55.5%	1.9%
已補助		1,110		469(42.4%)			636(57.6%)	

前述商業鍋爐改善行業，如圖 7 所示。大宗為餐飲旅宿業 (52%)、其次為學校 (27%)、再其次為醫院及安養中心 (7%)。商業鍋爐規模普遍較工業鍋爐小，但因分布集中於都市人口較稠密區域，改造為乾淨燃料有助都市區域性空氣品質改善。截至 110 年底補助商業鍋爐改善獲得減量 SO_x：350 公噸 / 年、NO_x：203 公噸 / 年。

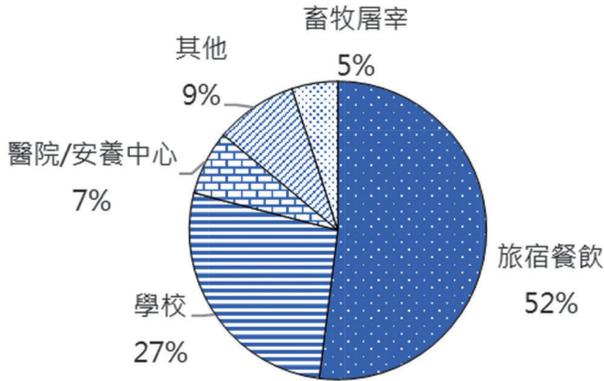


圖 7 商業鍋爐改善行業分布

五、改善成效分析

由本文表 1 可知，工商業鍋爐 SO_x 及 NO_x 排放量占環保署全國排放清冊 (105 年版) 比例顯著，分別為 21% 及 16%，加計國營企業占比可達 75% 及 40%。

由本文表 2 可知，107~110 年經由部會合作推動減量工作，14 類策略 SO_x 及 NO_x 總減量達 26.3% 及 18.0%，其中工商業鍋爐減量比例達 14.3% 及 2.2%，加計國營企業合計減量比例達 19.9% 及 7.7%，加計港區運輸合計減量比例達 26.1% 及 7.7%。

工商鍋爐遍布全台各地，改善後 SO_x 減量比例占 14 類策略總減量的 54.4%，國營企業及港區運輸僅發生於特定地區。表 4 列出環保署排放清冊 105 及 108 年版工業污染源 SO_x 排放量、107~110 年工商鍋爐 SO_x 改善減量及地方政府 SO₂ 空氣品質改善情形，說明如下：

1. 排放清冊兩版本工業污染源 SO_x 全國減量達 38%，篩選 SO_x 減量超過 1,000 公噸 / 年的地方政府，由北而南分別為基隆市、桃園市、臺中市、高雄市等 4 縣市。
2. 107~110 年工商鍋爐 SO_x 減量合計達 15,961 公噸 / 年，篩選 SO_x 減量超過 1,000 公噸 / 年的地方政府，由北而南分別為新北市、桃園市、臺中市、彰化縣、雲林縣、臺南市、高雄市等 7 縣市。

16 工商業鍋爐汰換污染改善分析

3. 同步調閱環保署一般測站，統計對應排放清冊兩版本 (105~108 年之間) SO_x 空氣品質改善率超過 20% 的地方政府，由北而南分別為基隆市、臺北市、新北市、新竹縣、雲林縣、高雄市、金門縣等 7 縣市。統計全國鍋爐鍋爐改善 (107~110 年之間)，SO_x 空氣品質改善率超過 20% 的地方政府，由北而南分別為基隆市、臺北市、新北市、桃園市、新竹縣、嘉義縣 / 市、臺南市、高雄市、屏東縣、金門縣等 11 縣市。
4. 新竹以北地方政府，排放清冊兩版本基隆市及桃園市 SO_x 減量顯著；工商鍋爐 SO_x 減量顯著為新北市及桃園市，影響新竹以北 5 縣市地方政府 107~110 年 SO₂ 空品改善率均超過 20%，又以桃園市改善達 42.1% 最高。
5. 中部以南地方政府，排放清冊兩版本臺中市及高雄市 SO_x 減量顯著；工商鍋爐 SO_x 減量顯著為臺中市、彰化縣、雲林縣、臺南市及高雄市，影響嘉義以南至屏東 107~110 年 SO₂ 空品改善率均超過 20%，又以高雄市改善達 40.6% 最高。
6. 金門縣因境外減量，影響其 SO₂ 空品改善率超過 20%。

表 4 鍋爐 SO_x 減量對應地方政府 SO₂ 空品改善率

序號	縣市	排放清冊SO _x 排放量(公噸/年)				107~110年鍋爐SO _x 減量			SO ₂ 空品改善率	
		105年	108年	減量	減量率	工業鍋爐	商業鍋爐	合計	105~108年	107~110年
1	基隆市	15,049	4,378	10,671	71%	56	2.6	58	23.9%	25.0%
2	臺北市	22.9	0.97	22.0	96%	6	11.9	17	25.5%	24.4%
3	新北市	1,265	1,915	- 650	-51%	1,233	17	1,250	23.3%	30.3%
4	桃園市	5,345	4,281	1,065	20%	2,984	20	3,004	13.1%	42.1%
5	新竹市	381	303	78.5	21%	31	2.6	33	15.8%	12.4%
6	新竹縣	930	720	210	23%	418	5.8	424	21.1%	26.0%
7	苗栗縣	1,379	1,600	- 222	-16%	438	6.4	444	3.1%	14.9%
8	臺中市	19,390	11,196	8,194	42%	1,458	18	1,477	15.4%	16.1%
9	彰化縣	1,741	997	744	43%	1,737	8	1,745	15.9%	14.1%
10	南投縣	172	126	46.8	27%	404	13	417	16.4%	7.1%
11	雲林縣	5,862	5,588	273	4.7%	1,146	3.2	1,149	20.5%	12.3%
12	嘉義市	12.5	6.52	5.94	48%	36	9.3	46	17.8%	37.0%
13	嘉義縣	916	457	459	50%	574	10	585	15.0%	24.8%
14	臺南市	2,102	1,215	887	42%	2,259	65	2,324	16.6%	23.4%
15	高雄市	21,807	12,883	8,925	41%	1,380	64	1,444	50.4%	40.6%
16	屏東縣	340	266	73.7	22%	851	7.3	858	12.1%	24.2%
17	宜蘭縣	629	485	144	23%	432	28	460	10.0%	14.6%
18	花蓮縣	4,447	3,947	500	11%	89	27	116	11.3%	19.7%
19	臺東縣	98	100	- 1.46	-1.5%	59	21	80	1.9%	-1.5%
20	澎湖縣	553	565	- 12.5	-2.3%	20	4.4	24	6.1%	13.6%
21	金門縣	321	239	82	26%	-	4.4	4.4	26.3%	39.1%
22	連江縣	44.9	33.0	11.9	27%	-	0.6	0.6	19.9%	16.3%
	合計	82,807	51,299	31,507	38%	15,611	350	15,961	-	-

六、結論

透過 107~110 年環保署與經濟部工業局的通力合作，推動「排放標準」與「補助改善」併行的雙重策略，截至 110 年底已完成國內工業鍋爐及商業鍋爐燃料乾淨化的目標，不僅 SO_x 排放獲得實質減量成果（總計減少 15,961 公噸 / 年），反映在全國 SO₂ 空氣品質改善，計有 11 個地方政府改善率達 20% 以上，同步促進衍生 PM_{2.5} (硫酸鹽氣膠) 空氣品質之改善。行政院推動「空氣污染防制行動方案」之工商鍋爐管制策略，已獲得具體成效。

參考文獻

行政院環境保護署 (2021)，整合及考評地方政府執行空氣污染防制成效，109 年度期末報告。

行政院環境保護署 (2021)，109 年度目的事業主管機關污染改善輔導成果書面報告。

行政院環境保護署 (2022)，110 年度目的事業主管機關污染改善輔導成果書面報告。

18 工商業鍋爐汰換污染改善分析

空氣污染與噪音類

我國戴奧辛排放管制策略及成果分析

羅 鈞*、陳怡伶*、陳秉圻**

摘 要

我國對戴奧辛排放管制以 1997 年發布廢棄物焚化爐戴奧辛排放及管制標準為開端，爾後陸續對中小型焚化爐及與鋼鐵業製程訂定相關戴奧辛排放管制標準，透過嚴格排放標準實施，達到戴奧辛排放減量，並系統性對排放源展開檢測調查，及對標準生效業別加強稽查，要求排放源落實排放減量，輔以空品監測瞭解管制成效；歸納我國對戴奧辛排放管制工作以排放標準研訂、排放清冊掌握、環境空品監測及加強排放稽查等 4 大要項，建構整體排放管制架構。

歷經多年努力，環保署總計發布有 6 項與戴奧辛相關之行業別排放標準，將全國固定污染源所排放之戴奧辛均納入管制；若以 2002 年為基準年，至 2020 年止，國內戴奧辛排放量已經削減高達 84% 以上，成效卓著；在環境空品監測部分，歷年監測濃度皆遠低於日本戴奧辛環境空品基準值，濃度有逐年下降趨勢且發現濃度高低有受季節影響明顯，以區域來看中南部濃度較高、北部及東部地區較低；排放源稽查發現，現行以燃柴鍋爐及火化場排放超標比例較高，而傳統上屬戴奧辛主要排放源之廢棄物焚化爐及煉鋼業製程等超標比例相對較低。本文針對國內戴奧辛管制成效進行分析、檢討及提出未來建議作為。

【關鍵字】戴奧辛、持久性有機物(POPs)、有害空氣污染物(HAPs)

* 環興科技股份有限公司 計畫主任

** 環興科技股份有限公司 工程師

一、前言

戴奧辛列屬持久性有機污染物 (Persistent Organic Pollutants, POPs)，具有致癌、難分解及蓄積等有害特性，會長期累積於環境中並經由食物鏈傳遞而對人體產生危害，故有「世紀之毒」稱謂。依據國內外健康風險評估研究結果均顯示，戴奧辛對人體所造成危害途徑主要都以排放源排放於大氣後，經由擴散、沉降於地表而被植物、動物吸收，最終透過食物鏈累積、傳遞、攝取而危害人體健康。故國際間對戴奧辛管制策略，皆以要求排放源減量為主要手段，透過源頭排放減量可減少環境介質累積，進而降低民眾承受之危害風險，故對行業別訂定嚴格排放管制標準是國際間對戴奧辛管制最普遍所採用之策略。

我國對戴奧辛排放管制起步甚早，於 1997 年環保署即針對大型廢棄物焚化爐發布戴奧辛管制及排放標準，其標準值無論在當時或現今而言堪稱最為嚴格。爾後，透過行業別排放調查、逐步瞭解國內排放現況後，將排放管制對象逐步擴展至中小型焚化爐、煉鋼業電弧爐、鋼鐵業燒結工場及鋼鐵業集塵灰高溫冶煉設施等相關製程，最後更擴大一般性固定污染源，將全國固定源排放之戴奧辛皆予納管。歸納 20 餘年來，環保署對戴奧辛類污染物之排放管制作為，除前述所提之研訂排放標準外，尚包含：排放量更新掌握、環境空品監測調查、加強稽查管制等等，建構完整排放管制策略 (整體架構如圖 1 所示)，以降低民眾所承受之健康風險。

中興工程公司及環興科技公司長期提供環保署在戴奧辛排放管制方面之技術協助，實際參與各項行業別排放標準研訂、協助規劃排放調查對象、執行國內戴奧辛空品監測、更新逐年排放量、協助掌握管制行業別優先順序等等，並持續蒐集國外最新排放管制訊息，以提供環保署在戴奧辛排放管制作為上一切所需之行政與技術支援工作，對現行之管制架構及歷年來排放執行成果有深刻之認知，爰撰文針對歷年來相關之排放管制措施進行介紹及提出分析、檢討、未來建議。



圖 1 我國戴奧辛排放管制架構圖

二、排放標準研訂

早期我國垃圾處理政策係以掩埋為主（「都市垃圾處理方案」，1984 年），故中央協助各地方政府興建衛生垃圾掩埋場，將廢棄物予以妥善掩埋處理；然因國內廢棄物量成長迅速、土地面積有限，在掩埋場覓地逐漸不易及利用掩埋後微生物分解垃圾需時甚久等種種不利因素下，很快地發覺既有掩埋場漸趨飽和、垃圾將面臨無處可去之窘境；故廢棄物處理政策改以減容、減量且無害化為首要標的，而焚化無疑是成為政策轉變後最佳選擇。為解決當年台北市內湖區垃圾處理面臨棘手問題，1987 年國內第一座台北市內湖垃圾焚化廠開始興建，並於 1991 年正式完工運轉；伴隨垃圾焚化廠運作、處理技術日趨成熟，行政院對垃圾處理正式改以「焚化為主、掩埋為輔」之政策，也正式決定於國內各縣市普設大型垃圾焚化廠以解決棘手之廢棄物問題。

22 我國戴奧辛排放管制策略及成果分析

而廢棄物焚化爐向來被視為戴奧辛主要排放源，眼見一座座焚化廠陸續加入運轉，雖然可解決垃圾無處可掩埋之窘境，然為避免戴奧辛又可能衍生成為二次公害污染物，環保署爰於 1997 年發布「廢棄物焚化爐戴奧辛排放及管制標準」，以規範大型廢棄物焚化爐所排放之戴奧辛濃度（孫世勤，1999），而對於法規發布前已經在運轉或興建中之大型焚化爐必需符合既存標準值，而仍在規劃、設計中之廢棄物焚化爐則必須將新設標準值納入設計規範中，確保未來興建完成運轉後，排放濃度可符合發布之新設排放標準值。本項法規最嚴格之處在於新設與既存標準值是一致的 ($0.1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$)，而是對於需符合既存標準值大型焚化爐予以 4 年改善期限，要求於 2001 年前需符合排放標準，正式邁出管制戴奧辛排放之第一步。

由於戴奧辛具高度敏感性議題，大型廢棄物焚化爐戴奧辛排放標準發布後，為持續加強對戴奧辛類之排放管制，陸續對中小型廢棄物焚化爐（行政院環境保護署，2000）、煉鋼業電弧爐（行政院環境保護署，2002）、鋼鐵業燒結工場（行政院環境保護署，2005）、鋼鐵業集塵灰高溫冶煉設施（行政院環境保護署，2006）及一般性固定污染源（行政院環境保護署，2007）都陸續發布戴奧辛排放管制標準，使國內全數固定污染源排放戴奧辛都納入管制，法令完備且標準值也相當嚴格，整理現行已發布之戴奧辛排放標準如表 1 所示。

依排放標準研訂程序而言，嚴謹流程係透過檢測瞭解排放現況，考量各業別排放濃度高低特性及控制技術可行性，並參採國外標準值與健康風險評估結果後提出草案，該草案再經由與業界研商、公聽等行政程序後，最終才能發布實施。

除如上所述之研訂程序外，對於所訂定標準值，環保署對新設標準均會要求以最嚴格標準值要求，標準發布後若有新設排放源要設置，必需確保其戴奧辛排放濃度可達到新設標準方可設置，以期降低最大可能風險；而對於標準發布前即已經設立之既存排放源，則會考量現況可改善程度及技術可行性，並予以合理之改善工程期限，並儘可能分階段性實施不同標準，在逐步加嚴情況下，進一步降低民眾所承受之風險；例如：在大型廢棄物焚化爐，當初對既存排放源均予以 4 年改善期限，而煉鋼業電弧爐及鋼鐵業燒結工場也都予以 4-5 年之改善期限，讓業者有充分時間去評估、選擇可行之技術進行排放改善，同時也有充裕時間籌措所需改善費用；當然若評估技術確實

可以達到，會要求既存與新設標準值需一致，畢竟戴奧辛危害甚鉅，必須盡一切之可能降低其危害風險。

在排放標準發布實施後，環保署也會參採最新技術發展成熟度、國外最新管制趨勢，滾動性對行業別標準值進行檢討，以評估加嚴或修訂之可行性，使國內之排放管制標準可與國外管制趨勢相互接軌。

表 1 我國固定污染源戴奧辛排放標準發布沿革彙整表

管制對象	適用條件		排放標準 (ng I-TEQ/Nm ³)	施行日期
廢棄物焚化爐	10 ton/hr 以上或 300 ton/day	新設	0.1	1997/08/08
		既存		2001/08/08
中小型廢棄物焚化爐 ⁽¹⁾	4 ton/hr 以上	新設	0.1	2001/01/01
		既存		2003/01/01
	4 ton/hr 以下	新設	0.5	2001/01/01
		既存		2004/01/01
煉鋼業電弧爐	無處理規模限制	-	0.5	2002/01/01
				2007/01/01
鋼鐵業燒結工場	無處理規模限制	新設	0.5	2004/06/16
		既存	1.0	2008/01/01
鋼鐵業集塵灰高溫冶煉設施	無處理規模限制	新設	0.4	2005/10/12
		既存	1.0	2006/09/01
一般性固定污染源	無處理規模限制	新設	0.5	2006/01/02
		既存	1.0	2008/01/01

三、排放量推估與更新

要系統性的規劃特定污染物之排放管制工作，對各類排放源之排放量掌握無疑是最重要關鍵；中興公司早於 2001 年即參採 USEPA 戴奧辛排放資料庫分類方法，再依據國內產業特性分類，協助建立我國戴奧辛排放資料庫架構（行政院環境保護署，2002）；後續依據資料庫架構，規劃不同行業別之排放檢測，透過行業別檢測數據而建立本土化戴奧辛排放係數，再透過本土化係數及不同行業別活動量取得，進而推估出逐年戴奧辛排放量；依據行業別排放量推估大小，可規劃行業別管制之優先順序、或作為管制策略成效檢討依據，掌握國內戴奧辛管制重點區域及重大排放源排放狀況，故排放資料庫之重要性不言可喻。

我國歷年戴奧辛排放量變化趨勢整理如圖 2 所示；從圖中可以發現，戴奧辛排放量係呈現逐年下降趨勢，若以 2002 年為基準年（排放量：327.36 g I-TEQ），至 2020 年止（排放量：47.7 g I-TEQ）我國戴奧辛排放量已削減達 84% 以上（行政院環境保護署，資料整理自 2002 年至 2020 年研究結案報告），充分顯示立法管制戴奧辛排放已有良好成效，對降低民眾所承受之風險應有相當大的助益。

進一步分析國內戴奧辛排放源管制熱點可以發現，固定污染源戴奧辛主要排放源在國內共有 3 大集中熱點區域，分別位於：北部桃園觀音工業區（主要排放源為：事業廢棄物焚化爐、煉鋼業電弧爐、銅二次冶煉）、中部台中港附近（主要排放源為：燃煤鍋爐、燒結爐）及鄰近彰化伸港地區（主要排放源為：集塵灰高溫冶煉、事業廢棄物焚化爐、煉鋼業電弧爐及非鐵金屬二次冶煉）、南部高雄臨海工業區（主要排放源為：電弧爐、燒結爐、廢棄物焚化爐），由於該 3 處管制熱點地區均有戴奧辛主要排放源集中，也是建議環保單位重點稽查、管制區域，整理國內戴奧辛排放管制熱點區域詳圖 3 所示。

若進一步分析自 2002 至 2020 年各行業別戴奧辛排放量變化 (整理如表 2 所示) 發現, 若該年有行業別戴奧辛排放標準生效, 排放源進行改善後, 則該行業別排放量立即會有明顯下降, 以事業廢棄物焚化爐而言, 中型及小型焚化爐管制標準分別於 2003 年及 2004 年生效, 故事業廢棄物焚化爐進行改善或關廠則排放量立即下降, 而煉鋼業電弧爐戴奧辛排放標準分二階段生效, 第一階段及第二階段標準分別於 2004 年及 2007 年生效, 煉鋼業集塵灰高溫冶煉設施排放標準於 2005 年生效, 鋼鐵業燒結工場戴奧辛第一階段及第二階段標準分別於 2006 年及 2008 年生效, 不同年度戴奧辛排放量都因不同階段排放標準生效, 業者進行排放改善工程已符合生效之排放標準後, 排放量都有獲得大幅度改善。

從整體戴奧辛排放量結構來看, 主要排放源仍以固定污染源為主 (約占 70%, 移動源並非主要排放源), 從訂定嚴格排放標準管制之策略是相當正確也具有良好成效; 目前以鍋爐燃燒及逸散性排放源 2 行業別排放減量較不顯著, 其中鍋爐燃燒是以燃煤鍋爐為主, 燃煤鍋爐戴奧辛排放特性是濃度低、但活動強度大導致排放量也大, 不易以管末設備達到減量目的, 而國際間也未有其他國家特別針對燃煤鍋爐特別訂定行業別戴奧辛排放標準 (我國將其納入固定污染源戴奧辛排放標準管制); 目前國內能源政策已逐步以天然氣取代燃煤之清淨能源政策, 預計燃煤鍋爐排放量會依能源政策轉型而逐步有所降低。

鍋爐燃燒另一排放源則是燃柴鍋爐, 早期因國際油價高漲, 基於成本考量, 部分中小型企業就將蒸氣鍋爐從燃油改以廢木柴為燃料; 然因廢木材性質複雜、燃燒狀況不佳, 也因操作條件不穩定或防制設備操作不當而造成戴奧辛排放濃度偏高, 目前環保署透過控制技術推廣及實廠減量輔導等措施, 以期有效改善燃柴鍋爐戴奧辛排放問題。

而逸散源主要是以農業廢棄物露天燃燒為主, 歷年來環保單位除積極加強取締露天燃燒外, 也推動多元化農業廢棄物處理政策, 例如: 加強稻草回收再利用、堆肥等多元化機制取代任意露天燃燒, 本項管制政策業已獲得各地方環保、農政單位大力支持, 相信農業廢棄物戴奧辛排放仍有持續改善之空間。

26 我國戴奧辛排放管制策略及成果分析

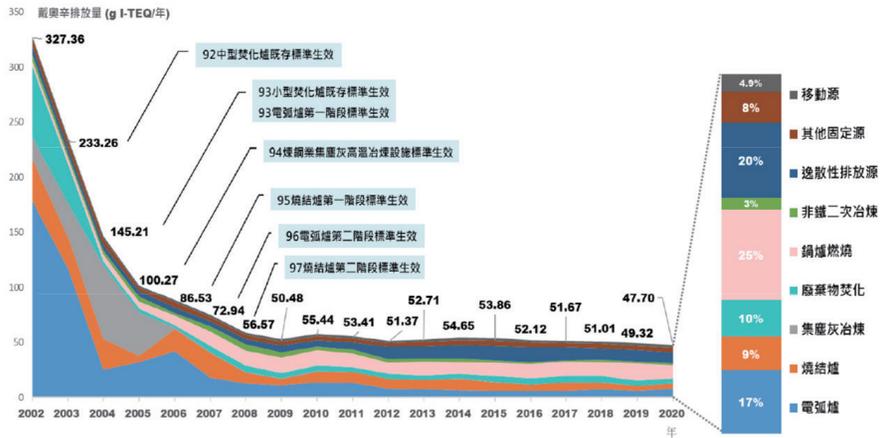


圖 2 我國歷年戴奧辛排放量變化趨勢圖

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

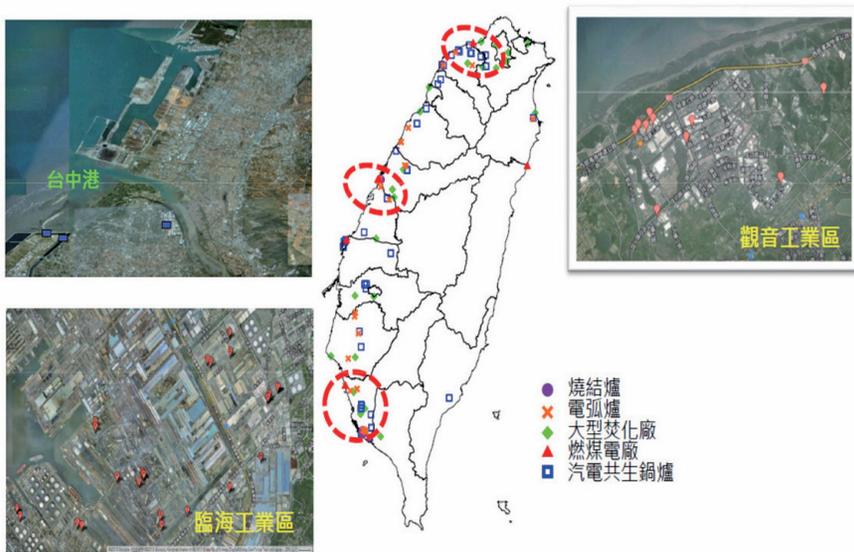


圖 3 我國戴奧辛排放源集中區域分布圖 (2020 年排放量)

表 2 歷年我國各行業別戴奧辛排放清冊彙整表

年度	一般廢棄物焚化爐	事業廢棄物焚化爐	煉鋼業電弧爐	鋼鐵業燒結爐	鋼鐵業集塵灰高溫冶煉設施	非鐵金屬二次冶煉	鍋爐燃燒	逸散性排放源	其他	總計 (g I-TEQ)
2002 年	12.4	51.2	179	37.2	20.7	5.47	5.11	7.65	8.76	327
2003 年	8.14	26.95	117	28.2	31.2	3.61	5.39	5.73	8.82	235
2004 年	3.29	0.624	25.0	28.1	67.3	3.95	5.94	5.13	8.06	147
2005 年	2.10	1.27	32.0	5.77	39.4	4.62	6.64	5.07	5.52	102
2006 年	1.39	0.792	42.0	20.1	1.10	2.04	8.89	5.30	7.02	88.6
2007 年	4.75	1.38	17.7	23.0	0.134	4.62	13.1	4.57	5.89	75.1
2008 年	4.40	1.38	12.5	10.4	0.193	5.61	13.8	4.56	5.79	58.6
2009 年	4.00	1.01	10.9	6.24	0.098	4.54	14.2	6.24	5.60	52.8
2010 年	3.77	0.684	13.9	9.54	0.935	3.27	14.3	5.60	5.87	57.8
2011 年	4.05	0.309	13.2	9.84	0.190	3.63	12.4	6.40	5.73	55.7
2012 年	4.09	0.470	8.17	8.68	0.183	2.97	9.90	11.5	5.52	51.5
2013 年	3.98	0.346	7.60	8.08	0.125	2.65	12.7	11.0	6.30	52.7
2014 年	4.11	0.382	6.44	10.6	0.152	3.06	10.3	12.9	6.78	54.6
2015 年	4.71	0.485	6.02	7.83	0.267	2.19	12.0	13.4	6.92	53.9
2016 年	5.05	0.512	5.73	5.78	0.289	1.68	12.9	13.6	6.58	52.1
2017 年	5.33	0.318	6.14	7.67	0.131	1.48	12.8	11.7	6.11	51.7
2018 年	5.34	0.376	7.29	6.18	0.138	2.13	12.9	10.4	6.31	51.0
2019 年	4.69	0.186	5.81	4.76	0.130	1.85	15.3	10.4	6.27	49.3
2020 年	4.60	0.264	8.14	4.46	0.052	1.51	12.1	10.0	6.53	47.7

資料來源：固定污染源戴奧辛及重金屬排放管制及空品監測成果，環保署「毒物及化學物質局研討會」，2021 年 12 月

四、環境空品現況

為進一步瞭解排放管制成效對空品之影響，環保署自 2006 年底開始針對國內一般空品站、交通測站及排放源集中區進行戴奧辛環境空品監測；其中，一般空品站監測選定原則係以 1 縣市、1 測站為原則，以利各縣市都有戴奧辛背景數據為目的，監測頻率部分，每 1 測站至少監測 2 次 / 年以上，每次監測時間以手動式連續採 72 小時以上，然後將採集樣品送回實驗室分析；而交通測站及排放源集中區之監測係採不定期、非每年固定監測為主。

統計歷年來一般空品站環境空氣戴奧辛年平均濃度介於 $0.016 \text{ pg I-TEQ/m}^3$ 至 $0.051 \text{ pg I-TEQ/m}^3$ (行政院環境保護署，2007-2020)，不同季別 (2、5、8、11 月共 4 季) 之平均濃度值呈現逐年下降趨勢 (整理如圖 4 所示)，空品濃度已顯著低於環境檢驗所於 2002、2003 年之全國監測結果 (平均值 $0.089 \text{ pg I-TEQ/m}^3$)，亦遠低於日本環境空氣戴奧辛品質基準值 ($0.6 \text{ pg WHO2005-TEQ/m}^3$)。戴奧辛季節濃度變化方面，監測結果顯示空品濃度以秋冬季較高、夏季較低，受季節影響相當明顯，與 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物監測結果趨勢相當吻合，顯見戴奧辛空品濃度與大氣擴散條件之良窳有相當密不可分之關係。

以區域性而言，若依環保署所劃分之國內 7 大空品區而言，環境空氣戴奧辛濃度以中部、雲嘉南及高屏空品區濃度較高；而花東及宜蘭空品區濃度較低 (台灣東部地區本就屬於空氣品質較佳區域)，而北部空品區濃度持續降低，戴奧辛濃度已經與花東地區相當接近；當然受限於戴奧辛為隨機性、人工方式採樣，空品監測結果會受到採樣期間氣候擴散不良或偶發性高污染事件影響 (例如：2021 年苗栗測站於監測期間附近發生公墓大火，悶燒數日，致單一測站濃度出現異常偏高現象)，而各年度監測結果因為是採樣當日因素影響，出現高低變化不同，但整體的變化是各空品區都有持續改善；各空品區歷年來戴奧辛濃度變化趨勢整理如圖 5 所示。

至於交通測站、排放源集中區等附近監測濃度部分，交通測站空品濃度與一般空品站差異不大，主要原因在於移動源並非戴奧辛之主要排放源；而排放源集中區之監測目的在於瞭解排放戴奧辛對附近區域的影響，做為進一步加強管制依據，其濃度不與一般空品站濃度比較，監測結果不在本文中討論。

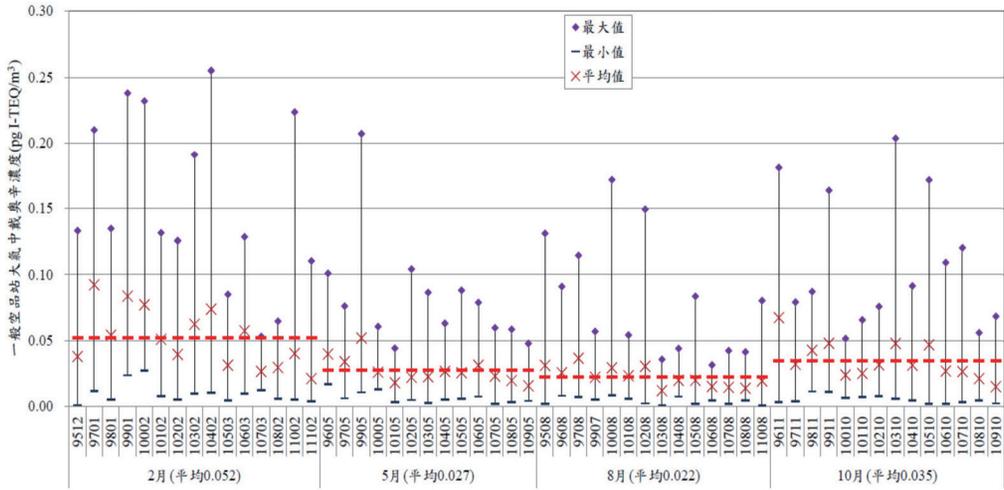


圖 4 我國一般空品站歷年戴奧辛空品濃度變化趨勢圖

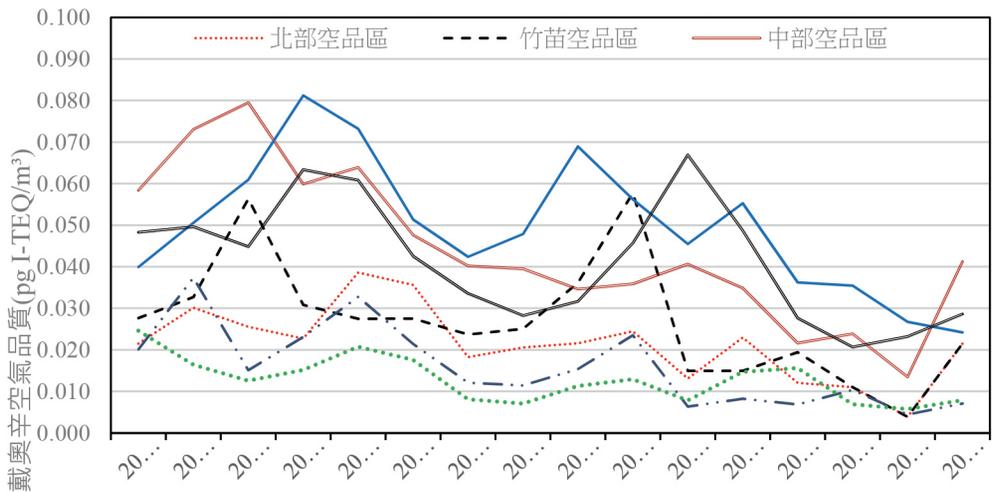


圖 5 我國各空品區歷年環境空氣戴奧辛濃度變化趨勢圖

五、排放稽查管制

針對國內已發布之 6 項戴奧辛行業別排放標準，為確實督促各排放源落實排放標準，除已要求特定行業別之排放源需要自行定期檢測戴奧辛並向環保單位申報排放濃度外，環保署督察總隊及各縣市環保局每年都執行一定數量之排放稽查，對排放源所排放戴奧辛進行煙道檢測；而對被稽查而不合格業者，均由地方環保局予以告發處分，並要求限期改善，改善完成後，再由環保單位進行複測，以確保改善後確實是符合排放標準的。

本文統計自 2013 至 2021 年戴奧辛稽查數量及不合格率資料發現（整理如表 3 所示），歷年來國內戴奧辛稽查數量大約介於 80 至 163 座排放源（每年數量不一），而歷年稽查不合格率大約介於 5% 至 12% 間；在 2016 年以前，稽查超標比例較高，尤其以燃柴鍋爐數量最多，2016 年以後燃柴鍋爐超標數量有明顯下降，主要是各縣市環保單位積極加強管制排放戴奧辛，造成無法符合標準之燃柴鍋爐業者停止操作，是數量銳減是原因之一。另一主要原因是業者有採安裝管末處理設備以符合排放標準規定，可有效降低排放濃度，致稽查不合格率降低。火化場部分，內政部及縣市政府補助安裝空污防制設備後，稽查不合格率也已有所下降。

針對燃柴鍋爐及火化場戴奧辛超標較高問題，探究其主要原因在於其進料性質複雜、燃燒條件不佳且對戴奧辛空氣污染防制設備缺乏適當維護更新所致，甚至部分業者未安裝任何戴奧辛防制設備，或縱使有防制設備但人員對防制設備操作之教育訓練明顯不足所致；環保署對於過往有超標紀錄業者，會邀集學者專家赴現場進行了解可能原因，並依學者專家之專業提出可行改善建議，供業者作為排放改善參考依據，從加強排放管制及有效輔導雙重策略著手。

如上所述，稽查不合格率較高之業別為燃柴鍋爐及火化場，而對於傳統上被視為戴奧辛主要排放源廢棄物焚化爐或煉鋼業，雖然偶有超標情事發生，但整體而言，不合格率反而較低；從稽查統計資料也發現，鋼鐵業燒結爐、水泥旋窯及燃煤鍋爐等 3 項行業別從未有戴奧辛排放超標紀錄。

表 3 歷年固定污染源戴奧辛排放稽查不合格業別、數量彙整表

行業別	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
	稽查數 (超標數)									
1. 大型焚化爐	23 (0)	22 (1)	11 (0)	15 (1)	9 (0)	15 (0)	13 (0)	10 (1)	12 (0)	3 (0)
2. 中型焚化爐	9 (0)	7 (1)	4 (1)	5 (0)	4 (0)	3 (0)	1 (0)	1 (0)	-	-
3. 小型焚化爐	32 (3)	29 (2)	12 (0)	22 (0)	11 (1)	11 (0)	7 (0)	13 (1)	11 (0)	1 (0)
4. 醫療焚化爐	10 (2)	9 (1)	7 (2)	9 (1)	4 (0)	3 (0)	4 (1)	3 (0)	5 (1)	3 (0)
5. 燃材鍋爐及 其他燃料鍋爐	16 (5)	26 (8)	32 (7)	29 (9)	29 (8)	32 (6)	15 (6)	19 (3)	18 (3)	7 (0)
6. 水泥窯爐	4 (0)	1 (0)	-	1 (0)	1 (0)	3 (0)	2 (0)	-	2 (0)	3 (0)
7. 燒結爐	3 (0)	6 (0)	-	-	2 (0)	-	-	-	-	-
8. 電弧爐	15 (0)	14 (0)	6 (0)	5 (0)	2 (0)	4 (0)	6 (0)	1 (0)	4 (1)	1 (1)
9. 集塵灰高溫 冶煉設施	2 (0)	3 (0)	-	2 (0)	-	5 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	-
10. 火化場	13 (2)	12 (1)	7 (0)	11 (2)	7 (3)	9 (0)	5 (2)	4 (0)	5 (0)	2 (0)
11. 燃煤鍋爐	19 (0)	12 (0)	4 (0)	10 (0)	21 (0)	9 (0)	4 (0)	5 (0)	4 (0)	2 (0)
12. 鋁二次冶煉	9 (0)	10 (2)	5 (0)	5 (0)	3 (0)	18 (1)	9 (0)	6 (0)	7 (0)	1 (0)
13. 銅二次冶煉	5 (0)	4 (2)	4 (0)	3 (0)	1 (1)	8 (0)	8 (1)	6 (0)	2 (0)	2 (0)
14. 其他	2 (0)	8 (0)	2 (1)	8 (0)	17 (0)	16 (0)	15 (0)	10 (0)	10 (0)	8 (1)
總計	162 (12)	163 (18)	82 (11)	124 (14)	111 (13)	136 (7)	99 (10)	80 (5)	82 (5)	31 (2)
不合格率 (%)	7	11	7	11	12	5	10	6	6	6

資料來源：行政院環境保護署 (2021)

六、結論與建議

戴奧辛具有高度媒體敏感性且為影響民眾健康甚鉅之有害空氣污染物 (Hazardous Air Pollutants, HAPs)，我國於 1997 年發布廢棄物戴奧辛排放標準為管制戴奧辛之濫觴，迄今已有 24 年之久；伴隨對排放源調查持續開展，對國內排放現況逐步有深入掌握後，環保署有系統性地將重大污染源逐步予以立法管制，現今所有固定污染源排放戴奧辛均已納入標準管制，與國際間其他國家相較，排放標準完整性屬最為完備。

而國內行業別戴奧辛排放標準值與世界各國相較也屬較為嚴格，最主要原因是考量國內地狹人稠之環境特性，有進一步降低風險必要性；雖然於排放標準草案研商過程中，業者經常性反映標準值過於嚴格、恐不易達到；但環保署能充分考量改善工程所需時程，合理地給予業界所需改善期限，對許多行業別標準之實施都採分階段加嚴方式進行，避免對產業帶來短期、過大衝擊，後續也證明嚴格之標準值確實可以達到；而搭配空品監測、排放量全面掌握及加強排放稽查等等策略，確實已可掌握環境背景現況及有效要求排放源減量，整體管制策略方向是相當正確的。

回顧戴奧辛排放管制工作開展迄今，除較早期於 2005 年爆發彰化線西及伸港地區鴨蛋戴奧辛濃度偏高事件，發現附近某集塵灰處理設施因排放高濃度戴奧辛而要求立即進行排放改善工程外，並加速完成該業別排放標準發布及釐清鴨蛋濃度偏高主要原因外；後續一些零星偶發性檢驗發現本土性食品類戴奧辛較高濃度事件（例如：2006 年台北縣八里地區羊肉事件、2009 年高雄縣大寮鄉鴨肉事件及 2017 年苗栗縣雞蛋事件等等），事後經各方查證及檢驗調查均證實，該等偶發事件與空氣排放源無直接關聯性，顯見排放管制策略實施已獲得一定成效。

國內現行戴奧辛管制工作之發展趨勢，已從早期僅針對排放源擬訂空氣污染排放標準之主要策略逐步擴展至其他環境介質，目前環保署已對土壤、放流水、焚化飛灰、爐渣等均已研訂基準值並定期進行檢驗調查，以避免該等介質受到污染；而衛福部也持續修訂「食品含戴奧辛及多氯聯苯處理規範」以保障民眾食安問題，並透過跨部會共同分工努力進行之食品及農業產品戴奧辛含量檢驗工作，避免危害民眾健康，國內戴奧辛管制工作已擴大進入跨部會領域範疇。

面對民眾對環境品質要求日益提升，HAPs 排放管制是現階段空污排放管制施政重點，毫無疑問戴奧辛更是 HAPs 重點管制污染物，故排放管制工作仍需持續推動、許多調查監測項目仍有待繼續執行，例如：針對污染源持續稽查、管制，督促業者做好排放管控；持續辦理環境空品監測及排放調查工作以建置長期環境資料庫等等。針對上述歷年來排放管制成效介紹後，提出應繼續努力之方向與建議如下：

- (一) 戴奧辛是燃燒不完全之產物，排放控制策略以透過良好燃燒控制及安裝合適管末處理設備降低排放濃度為主，然管末處理技術早期大多仰賴活性炭吸附，將氣態戴奧辛吸附後併同飛灰經固化後送至掩埋場處理，機制上僅是氣相移轉至固相，實質上戴奧辛並未分解或破壞，而掩埋場也將逐漸面臨飽和窘境，故控制技術之選用需要進行檢討。近年來，處理技術發展迅速，例如：觸媒濾袋之研發成功，可將廢氣中氣態戴奧辛予以破壞分解並捕捉固態戴奧辛，除可減少活性炭用量及飛灰產量，也適度延長掩埋場土地使用年限，建議類似新發展技術應予積極推廣，取代傳統性吸附處理方式。
- (二) 部分行業別標準值發布迄今已相當久遠，因應時空背景有所變化，標準值也應一併檢討、加嚴；例如：鋼鐵業燒結工場及鋼鐵業集塵灰高溫冶煉設施 2 項戴奧辛排放標準分別發布於 2004 年及 2005 年，且既存污染源標準較新設污染源較為寬鬆，主要當時既存污染源受限於防制設備安裝空間不足，無法全面安裝，而近年來排放源進行空間調整分配，防制設備已裝設完畢且檢測數據已可達到新設標準值，建議可啟動排放標準修訂工作，將既存與新設標準值調整一致。
- (三) 目前已發布之行業別戴奧辛排放標準有 6 大項，而部分業別屬國內重大空氣污染排放源，也會排放之其他污染物且亦發布有其他排放標準予以管制，可能造成同一行業別有 2 項以上空污管制標準，建議應以行業別為基準，整併戴奧辛與其他污染物排放標準，適度簡化法令。
- (四) 戴奧辛是國際間共同管制之有害污染物，建議需持續蒐集國外戴奧辛之排放管制最新技術進展與法規標準、經常性檢討國內管制措施及排放標準適宜性，使國內排放管制工作可與國際間趨勢相互接軌。

誌 謝

中興工程及環興科技公司自 2000 年承辦環保署「中小型焚化爐有害空氣污染物最適化控制系統評估與技術開發計畫」迄今；特別感謝環保署空保處對本研究、調查、監測及管制計畫之長期支持；而歷年空品監測及排放檢測工作，自 2006 年底開始分別由工業技術研究院綠能所及中環科技公司 2 家長期合作團隊分工負責，協助進行戴奧辛採樣及分析工作長達 10 餘年，備極辛勞、一併致謝。

參考文獻

- 孫世勤 (1999)，都市垃圾焚化廠戴奧辛 (PCDD/PCDF) 排放改善方式分析，中興工程顧問社，中興工程季刊 63 期，P 67 – P 104。
- 行政院環境保護署 (2000)，「中小型焚化爐有害空氣污染物最適化控制系統評估與技術開發計畫」結案報告，EPA-89-FA12-03-018。
- 行政院環境保護署 (2002)，「建立台灣地區戴奧辛排放清冊及排放資料庫計畫」結案報告，EPA-90-FA12-03-A158。
- 行政院環境保護署 (2005)，「九十一、九十二、九十三年度建立台灣地區戴奧辛排放清冊及排放資料庫計畫」結案報告，EPA-91-FA12-03-A074。
- 行政院環境保護署、行政院農業委員會、行政院衛生署 (2005)，「彰化縣線西鄉及伸港鄉鴨蛋戴奧辛事件調查報告」。
- 行政院環境保護署 (2006)，「國內有害空氣污染物質排放調查及管制策略研擬計畫」結案報告，EPA-94-FA12-03-A198。
- 羅 鈞、陳怡伶、莊桓齊 (2006)，我國戴奧辛排放管制立法之回顧與展望，中興工程季刊第 93 期，P 67 – P 73。
- 行政院環境保護署 (2007)，「彰化縣線西及伸港地區環境戴奧辛定期監測計畫」結案報告，EPA-95-1606-02-01。

行政院環境保護署 (2007), 「固定污染源毒性空氣污染物 (戴奧辛及重金屬) 管制規範研擬、控制技術評估及排放清冊調查計畫」結案報告, EPA-95-1606-02-01。

行政院環境保護署 (2008), 「固定污染源毒性空氣污染物 (戴奧辛及重金屬) 排放清冊調查及管制計畫」結案報告, EPA-96-FA12-03-A115。

行政院環境保護署 (2009), 「固定污染源毒性空氣污染物 (戴奧辛及重金屬) 排放調查及管制計畫」結案報告, EPA-97-FA12-03-A135。

楊之遠、周淑婉、羅鈞 (2009), 台灣戴奧辛排放管制政策之回顧, 環境保護 32 卷 2 期, P 127 –P 143。

行政院環境保護署 (2010), 「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查與健康風險評估計畫」結案報告, EPA-98-FA12-03-A178。

行政院環境保護署 (2011), 「固定污染源戴奧辛、多環芳香烴 (PAHs) 及重金屬排放調查與管制計畫」結案報告, EPA-99-FA12-03-A194。

行政院環境保護署 (2012), 「固定污染源戴奧辛及重金屬排放區域總量管理計畫」結案報告, EPA-101-FA12-03-A060。

行政院環境保護署 (2013), 「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫」結案報告, EPA-102-FA12-03-A096。

行政院環境保護署 (2014), 「固定污染源戴奧辛及重金屬調查及管制計畫」結案報告, EPA-103-FA12-03-A054。

行政院環境保護署 (2015), 「固定污染源戴奧辛及重金屬管制策略推動與調查計畫」結案報告, EPA-104-FA12-03-A109。

行政院環境保護署 (2016), 「固定污染源戴奧辛及重金屬管制策略與調查計畫」結案報告, EPA-105-FA12-03-A167。

行政院環境保護署 (2017), 「固定污染源戴奧辛及重金屬調查管制及減量策略推動計畫」結案報告, EPA-106-FA12-03-A162。

36 我國戴奧辛排放管制策略及成果分析

行政院環境保護署 (2018), 「環境有毒空氣污染物排放調查、監測與管制策略研擬計畫」結案報告, EPA-107-FA12-03-A122。

行政院環境保護署 (2019), 「固定污染源環境空氣戴奧辛及重金屬排放調查與減量推動計畫」結案報告, EPA-108-FA12-03-A093。

行政院環境保護署 (2020), 「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查、環境空品監測與減量推動計畫」結案報告, EPA-109-FA1203-A163。

行政院環境保護署 (2021), 「固定污染源戴奧辛及重金屬空氣品質監測及輔導減量計畫」結案報告, EPA-109-FA-1203-A124。

環興科技股份有限公司 (2022), 「戴奧辛及重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫」服務建議書。

廢棄物類

食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估

段紀義*、梁世祥**、周瑞興***

摘 要

含有大量有機物質的食品廢棄物，可視為另一種剩餘資源，值得回收再利用，所以如何有效處理食品廠最後產出的廢棄物，實有進一步研究的必要。

現行食品廢棄物處理方式依序可分為脫水、烘乾、堆肥、資源再利用等程序，處理上多工又耗時，本研究應用黑水虻生物處理方法，處理食品廢棄物，並進行效益評估及整合探討。在生產動物膠過程中，由動物皮層萃取動物膠後，最後仍有動物渣等廢棄物留存，研究以黑水虻進行餵養實驗；黑水虻養殖共可分為 4 大階段，分別為卵孵化期、幼蟲成長期、成蛹期、及成蟲期，其中只有幼蟲期需進行餵食。

結果顯示豬皮渣經黑水虻幼蟲進食處理過後，排出蟲糞的殘餘物重量減少約 55%，含水率可由 70% 降低至約 20%，處理過的蟲糞亦可直接作為土壤改良資材利用。應用黑水虻生物處理食品廢棄物，應可取代傳統烘乾及堆肥 2 個處理程序。

整體養殖過程，明顯並無惡臭產生、且可改善廢棄物衍生蚊蟲等環境衛生等問題，在廢棄物存放、清運及處理上均有效改善。對於食品產業而言，黑水虻處理方案或可取代傳統廢棄物烘乾、焚化方式，除可減少燃料油及電力使用，亦可降低 CO₂ 排放，相對於對整個動物膠生產程序，亦可符合綠色工廠要求。

【關鍵字】食品廢棄物、動物渣、黑水虻

* 新加坡商傑樂生技股份有限公司台灣分公司

經理

** 行政院農業委員會畜產試驗所產業組

助理研究員

*** 新加坡商傑樂生技股份有限公司台灣分公司

副組長

一、前言

食品廢棄物是食品生產及食用過程中最終產出的固體物，含有粗蛋白、粗脂肪等有機物質、灰分等成分。在空氣中暴露，儲存及清運時容易因有機物質腐敗，進而產生臭味，並會招來蚊蟲蒼蠅、致病菌和寄生蟲等環境衛生問題，而使用藥劑除臭及滅蟲也會造成二次污染。近幾年國內經濟成長，食品運用量及種類均大幅增多，相對造成浪費也多，因此食品廢棄物處理量亦大為增加。

食品廢棄物處理的目的為減量化、穩定化、無害化及資源化，一般從食品工廠產出的廢棄物經機械脫水、烘乾減積，最後再經堆肥即可資源再利用。近幾年產業大力提倡綠色生產製程、循環經濟等議題，因此各種解決食品廢棄物的方法，不斷被整合及發展起來，像是利用蚯蚓、昆蟲 (Rehman et al., 2017) 與藻類分解，或做為固態衍生性燃料再利用。黑水虻應用在廚餘上，已有非常多的成功案例 (Nguyen et al. 2015 ; Lalander et al., 2015)，可大量減少廢棄物處理問題。所以食品廢棄物運用黑水虻處理法除可有效降低含水率達到減積目的，更可進一步將食品廢棄物轉化為肥料，可完全取代烘乾及堆肥過程。

本研究針對的食品廠為使用豬皮做為生產原料產製動物膠的生產工廠，最終產物為豬皮渣廢棄物。選取黑水虻二齡幼蟲進行餵養，研究探討動物皮渣經黑水虻幼蟲處理後的去化能力。並與傳統加熱蒸發降低含水率的方式進行比較，評估兩者的操作效益及對環境的影響。主要研究目的在提供食品業者處理廢棄物及資源化處置的較佳處理方案；以往產業界受限專業及環境等問題，在食品廢棄物進行跨領域整合使效益最大化是本研究的重點。

二、文獻回顧

2.1 工業食品廢棄物處理方式

傳統食品廠最終產出的廢棄物，因量過多且含水率過高無法直接進行堆肥再利用。一般會先進行減積處理，將廢棄物內的無用水分去除，如此才不會引起因廢棄物中有機質變異，產生惡臭等環境衛生問題，對於後續儲存、運輸亦可有效執行，並可減少不必要的操作成本及浪費；但對於堆肥再利用過程產生的味道問題，仍無明顯改善效果。常見的脫水設備有帶式壓濾脫水機、板框式壓濾脫水機及離心式脫水機等，脫水後廢棄物的含水率為 60-80% (張添晉等, 2008)；後再經烘乾設備將水分蒸發減積，使含水率降低到約 40% 以下，最後再經由堆肥處理後即可進行資源再利用 (李中光等, 2013)。

由於目前環保問題愈來愈嚴重，傳統上處理到最終成肥料再利用過程所需時間較長，而且處理過程中容易產生惡臭及環境衛生等問題，特別是堆肥過程問題更加嚴重。另外脫水及烘乾過程亦會耗用大量燃油及電力能源，整個處理過程中對於 CO₂ (能源局, 2011) 排放等造成環境暖化的衍生後續污染問題亦是須面對改善的議題之一。

2.2 黑水虻

黑水虻，英文名稱 **Black soldier fly**，亦稱為光亮扁角水虻蟲，是雙翅目水虻科扁角水虻屬的昆蟲，養殖過程只有在幼蟲時期有攝食行為，幼蟲取食範圍非常廣泛，對於廚餘垃圾、腐爛植物、動物屍體及糞便等，均可作為食物來源 (朱芬, 2019)。

黑水虻經由自身的取食機制和消化作用，可以將食物中的有機廢棄物轉化為生長所需的蟲體蛋白，而食物廢棄物經黑水虻消化後的排泄出的虻糞可直接作為生物肥料 (Webster et al., 2016; 梁世祥等, 2019)，也是相當良好的土壤改良資材 (Kumar et al., 2018)。而黑水虻長大的幼蟲，亦可作為雞隻及水產養殖飼料用 (Kumar et al., 2018; 劉興等, 2017)。

整體消化過程為在蟲體內進行厭氧消化，並無臭味產出，因此可有效改善環境衛生等問題 (李峰等, 2016)，並可達到循環經濟地目的 (陳靜瑩, 2021)。楊森 (2010) 研究顯示利用黑水虻處理豬糞，乾的豬糞物質減少了 41~51%，並獲得原乾豬糞重量 10.6~15.1% 的的黑水虻體乾重。Bosch et al. (2019) 的報告中也提到，豬糞、雞糞、牛糞、豆腐渣等廢棄物經由黑水虻處理後，可將廢棄物中的氮轉化成為蟲體蛋白。

黑水虻的許多生物學特性都適合用於禽畜糞便的轉化，例如幼蟲喜食腐食性物品、食物種類性雜、進食量大、生長環境抗逆性強、生活史重疊且彈性很大、預蛹營養價值高、在化蛹前有遷移特性等；因此在研究禽畜糞便轉化為昆蟲蛋白的領域，從眾多雙翅目昆蟲中，很快就發現黑水虻的優異表現，及受到廣泛關注。(Sheppard et al., 1994; Jozefiak et al., 2010)。

早期的研究聚焦於黑水虻的生物學特性和對環境安全性的評估，研究結果發現黑水虻對人類完全無害，對環境亦非常安全；黑水虻成蟲不會攜帶病菌，也不會侵入人類生活的居住環境，對農作物也只取食少量的植物汁液，不會形成任何危害 (安新城等, 2010)。

黑水虻生命週期一般在 30~40 天，如圖 1 中可以區分為卵、幼蟲、蛹和成蟲 4 個階段；朱芬 (2019) 對於黑水虻各階段的相關養殖方法已有詳細說明。



圖 1 黑水虻各時期生活史

實際上，最早開始注意到黑水虻的研究，是因為其能夠有效地控制野生的家蠅種群，研究中觀察發現家蠅的數量在黑水虻繁衍棲息糞堆的附近很少，而且家蠅成蟲也會盡量避免在黑水虻幼蟲取食的糞堆上產卵；研究實驗顯示，在混合飼養黑水虻和家蠅幼蟲的情況下，只有少量家蠅的幼蟲能夠發育到成蟲階段，黑水虻幼蟲能夠經由幼蟲生存競爭環境來抑制家蠅種群 (Sheppard, 1983; Furman et al., 1959)。後續的一些黑水虻研究中，幼蟲在取食過程中可有效消化和分解糞便中的有害病菌，因此對環境的危害性亦可降低 (陸麗珠等，2020)。

三、材料與方法

3.1 研究材料

1. 烘乾設備

研究內食品廠使用的烘乾設備為容積 2,000 L 的臥式橫軸攪拌機，如圖 2 所示，此設備為外層夾套式乾燥設備，夾層內供應高溫蒸氣。內層在充分攪拌下，利用蒸氣冷凝放熱將豬皮渣中水分蒸發，以達到降低豬皮渣含水率的目的。豬皮渣廢棄物每次烘乾投料約 1,000 kg 及含水率約 70%，在充分攪拌烘乾下，鍋內溫度可維持在 60°C，經過 10 小時烘乾後，可將豬皮渣廢棄物含水率烘乾降低到約 20%。

表 1 為攪拌烘乾設備操作參數，烘乾後水量蒸發為 625 kg，蒸發熱量需求為 352,312 kcal (=625×563.7 kcal/kg @60°C 的汽化潛熱)，依表 1 技術參數得到約需要燃料油 36.7 L (=352,312/9,600 kcal/L @ 每公升燃料油熱值 (Smith et al., 1987)，及電力耗用 108kW (=12×(7.5+1.5))。

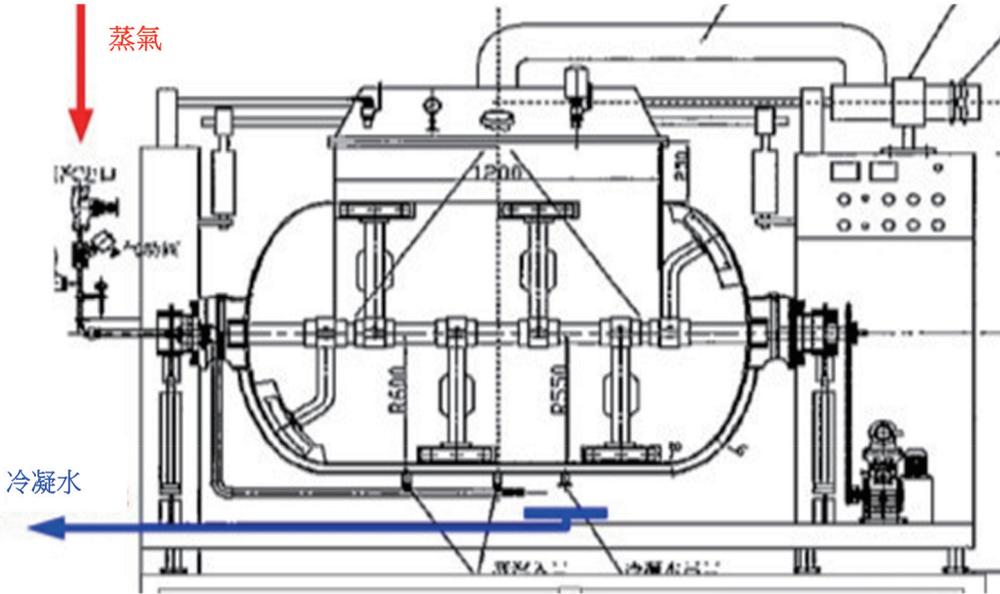


圖 2 卧式橫軸攪拌機設備構造圖

表 1 卧式橫軸攪拌機技術參數

型號	TLHK-2,000 L 卧式橫軸攪拌機
主缸體	容積：2,000 L
	夾套工作壓力：0.3 MPa
	夾套最高溫度：134°C 加熱面積：3.4 m ²
	缸體直徑：Φ1,100 mm 長方體：1,200×1,100×800 mm 夾套：Φ1,200 mm
	蒸氣入口：DN22 mm 冷凝水出口：DN25 mm
	進料管：DN50 mm 排氣管：Φ133 mm
攪拌機	電機功率：440 V、7.5 kW
	鍋輪減速機：WPS155 型、速比 1:50
	變頻器：440 V、1.5 kW
外型尺寸	3,100×1,500×2,250 mm(不含開蓋尺寸)
設備重量	2,540 kg

2. 豬皮渣

研究內使用的食品廢棄物為豬皮渣，取自國內動物膠生產工廠，新鮮豬皮經過 50~60°C 熱水萃取生產動物膠後，最後產出剩餘物質即為豬皮渣 (鄭文勝，2006)。此最後殘存的豬皮渣廢棄物中仍含有大量水分，含水率 95% 以上，含水率過高無法直接進行儲存、運輸處理，所以也無法直接堆肥再利用。基本上生產工廠會先經機械脫水處理將豬皮渣的含水率降至 60~80% 以方便後續處理及應用 (段紀義等，2014)。案例中食品工廠使用轉速 3,000 rpm 的固液分離高速離心機，利用高轉速的離心力使固液分離以達到脫水目的，此高速離心機可將豬皮渣含水率降至約 70%。

然後再經過烘乾設備將豬皮渣內水分進一步蒸發使含水率降低至 40~60%，最後再送至廠外進行堆肥處理及回收再利用。研究內使用的豬皮渣，為取自機械烘乾後含水率降至約 30% 的豬皮渣，餵食前再加水增濕到含水率約 70%，並充分拌合成軟泥狀以利幼蟲進食。若後端採用黑水虻轉換，粒徑彈性相對較大，烘乾要求亦較低，含水量以 60~70 % 左右即可。

3. 黑水虻

研究內使用的二齡黑水虻幼蟲為取自法務部矯正署屏東監獄黑水虻廚餘養殖場，該養殖場面積約 10×4.5 公尺，場內使用密林盆 (60L*47W*16H) 養殖，共計養殖 160 個密林盆。監獄內同學每天的廚餘渣產出量約有 600-1,000 kg，均送至黑水虻養殖場內自行去化處理。

養殖場內蟲卵為自行養殖孵化，取 100 g 的蟲卵放入水桶內，再加入約 7 分滿黃豆渣，混合均勻後，取約手掌大小放入養殖密林盆內，於常溫中約 3-5 天可孵化成幼蟲，後續即以餵養廚餘渣為主。飼養盆中幼蟲蠕動會發熱進而影響食慾，所以需要經常翻堆降溫；另依飼養狀況需進行篩分動作，將蟲及排泄物分離以利餵養工作進行，幼蟲經過 6 個齡期成長後成蛹，蟲蛹需移至網室內等待羽化。

在網室內的蟲蛹羽化成黑水虻成蟲後，並不需要再進行餵食，成蟲會自行交配產卵，羽化後的成蟲約 7 天後會自然死亡，蟲卵取出後可重新孵化成幼蟲再利用。

整體黑水盟蟲養殖由卵孵化、幼蟲養殖、成蟲蛹、最後羽化成蟲至死亡，養殖生命周期約為 1~2 個月的時間，蟲隻可自行繁殖得到，養殖過程中去化廚餘產生的蟲糞等廢棄物亦可做為肥料再利用。

3.2 研究方法

1. 試驗設計

黑水蛇適合生活在溫度 25~35°C、相對濕度 70% 的環境中 (Sheppard et al., 2002)，此生長條件非常適合在國內推廣，特別是在南部高溫潮濕的氣候下，養殖生長環境幾乎不需要的特別準備及維持。

研究內將數量 650g 的二齡幼蟲平均分至 10 個盆餵盆中養殖 (520Lx364Wx178HmmxPP，空盆重 681 g)，每個培養盆內放入 65 g 二齡黑水蛇幼蟲，根據每天秤重後計算餵養盆內水份殘存重量及幼蟲生長情況以判斷需要餵食的時機及量。圖 3 為養殖料架及搭建的網室。

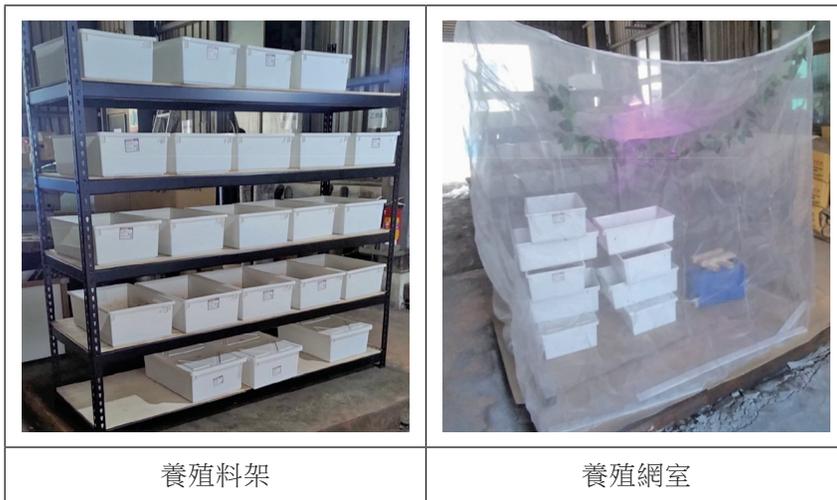


圖 3 養殖設備

動物膠工廠生產最終殘存的豬皮渣廢棄物，經高速離心機脫水後，含水率降至約 70%，在此含水率下可直接將豬皮渣轉作為黑水蛇幼蟲飼料。研究內黑水蛇由二齡蟲開始餵養，至六齡期的預蛹期停止餵食；豬皮渣廢棄物亦先烘乾至含水率約 30% 以便儲存，使用時再加水增濕調配合含水率約 60~70 % 進行餵養。

判斷黑水虻幼蟲養殖到約四齡蟲時期，選取 5 個養殖盆，每個盆內隨機取出最大 100 隻幼蟲分別秤取幼蟲重量，及量取體長，依據幼蟲重量及體長變化，決定幼蟲預蛹的時機，並定出黑水虻幼蟲以豬皮渣餵養最適餵料量。

在篩選餵養黑水虻幼蟲最適餵料量的基礎上，對於黑水虻餵養前的豬皮渣廢棄物及餵養後的殘渣（排出蟲糞）分別秤重及取樣分析含水率，以了解豬皮渣廢棄物經黑水虻轉化後，在重量損失與含水率變化的關係。

研究中針對含水率約 70% 的豬皮渣，分別使用烘乾機乾燥及運用黑水虻幼蟲處理 2 個方案，將豬皮渣內含水率降低到約 20% 後再進行分析比較。

2. 研究試驗流程

圖 4 為本研究的實驗流程。

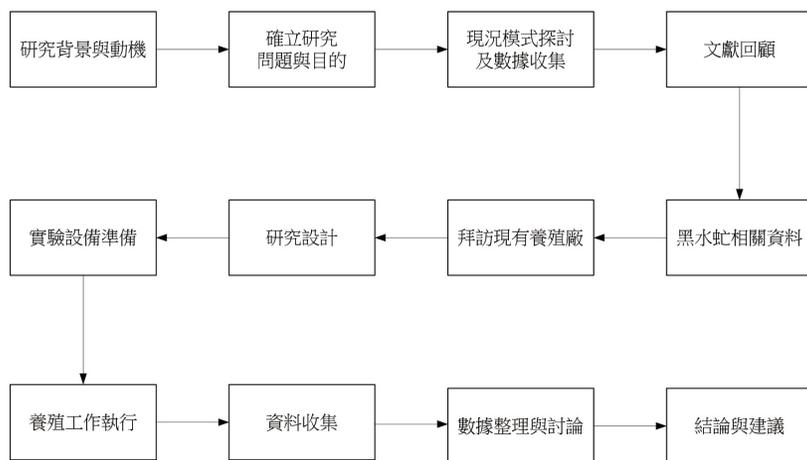


圖 4 研究實驗流程圖

四、黑水虻餵養過程數據整理分析

全部餵養天數為 21 天，表 2 為每天餵養狀況，及加入豬皮渣餵料量的統計數據。表中顯示每盆內放入 65 g 二齡蟲，餵養初期豬皮渣餵料含水率為 55%，觀察幼蟲成長狀況不佳，至第 7 天取樣分析盆內含水率約 35%，因過於乾燥會降低幼蟲食欲，所以每盆再額外加入 500 g 水增加濕度，觀察後續餵養狀況並未明顯改善，所以至第 14

天將豬皮渣餵料直接調升含水率測試，至豬皮渣餵料含水率調升至 73.4% 後，觀察盆內整體含水狀況才明顯改善。

經 21 天餵養後，每盆投入黑水虻二齡蟲及餵養豬皮渣廢棄物後的累計淨重為 7,765g，扣減期初二齡蟲重後的總投入含水豬皮渣廢棄物為 7,700g，其中不含水乾料為 2,707 g，豬皮渣廢棄物平均含水率為 64.84% $(=(7,700-2,707)/7,700)$ 。每盆淨重實秤平均數值為 3,489 g，此數值為實際秤量 10 個餵養盆重量後再扣除空盆重的每盆重量平均值；將每盆淨重累計扣減每盆淨重實秤平均數值後，即為每日養殖盆內豬皮渣廢棄物平均減少量，養殖 21 天後得到損失減少量為 4,276 g，重量減少約 55%。

表 2 養殖盆餵料統計數值 (單位：g)

餵養 天數	初淨重	豬皮渣廢棄物餵料				加入量 累計	淨重 實秤平均值	重量差
		加入量	乾料	水	含水 率 %			
1	65	0	0	0	55.00	65	-	-
2	65	500	225	275	55.00	565	-	-
3	565	300	135	165	55.00	865	603	262
4	865	300	135	165	55.00	1,165	-	-
5	1,165	300	135	165	55.00	1,465	-	-
6	1,465	300	135	165	55.00	1,765	1,286	479
7	1,765	800	135	665	83.13	2,565	-	-
8	2,565	300	135	165	55.00	2,865	1,596	1,269
9	2,865	300	135	165	55.00	3,165	-	-
10	3,165	300	135	165	55.00	3,465	1,789	1,676
11	3,465	300	135	165	55.00	3,765	-	-
12	3,765	300	135	165	55.00	4,065	-	-
13	4,065	300	135	165	58.46	4,365	2,313	2,052
14	4,365	400	166	234	66.77	4,765	2,314	2,451
15	4,765	500	166	334	73.41	5,265	2,849	2,416
16	5,265	500	133	367	73.41	5,765	3,109	2,657
17	5,765	500	133	367	73.41	6,265	3,263	3,002
18	6,265	500	133	367	73.41	6,765	-	-
19	6,765	500	133	367	73.41	7,265	-	-
20	7,265	500	133	367	73.41	7,765	3,929	3,836
21	7,765	0	0	0	-	7,765	3,489	4,276
累計	-	7,700	2,707	4,993	64.84	-	-	-

48 食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估

為確實掌握每盆內幼蟲生長狀況，餵養期間並隨機挑選 5 個餵養盆，於每盆內亦隨機選出較大幼蟲 100 隻，進行 100 隻幼蟲秤重（表 3 為隨機選取 5 個餵養盆，每盆取其中 100 隻最大幼蟲秤重數值）及量測幼蟲體長（表 4 為隨機選取 5 個餵養盆，每盆取 100 隻最大幼蟲量取體長數值），以確實掌握幼蟲生長狀況。

表 3 隨機選取 5 個餵養盆，取 100 隻最大幼蟲秤重數值 (單位：g)

盆數	1	2	3	4	5	平均	
餵養 天數	15	5	6	6	5	6	5.6
	16	5	6	6	5	6	5.6
	17	5	6	7	6	6	6.0
	18	5	5	7	6	7	6.0
	21	5	6	7	7	8	6.6
	23	5	5	5	6	6	5.4
	24	4	5	5	6	6	5.2
	25	5	5	5	5	5	5.0
	28	4	3	4	5	5	4.2

表 4 隨機選取 5 個餵養盆，取 100 隻最大幼蟲量取體長數值 (單位：mm)

盆數	1	2	3	4	5	平均	
餵養 天數	15	13	12	12	13	12	12.3
	16	13	14	13	13	14	13.4
	17	12	13	12	15	14	13.2
	18	13	13	14	14	15	14.0
	21	14	14	15	15	14	14.4
	23	14	14	14	14	15	14.2
	24	13	14	15	14	14	13.9
	25	13	14	14	14	14	13.8
	28	13	14	13	13	12	13.0

圖 5 為 100 隻幼蟲秤重每日數值變化趨勢圖，由圖中可得到黑水虻幼蟲餵養至 21 天的 100 隻幼蟲平均重量增加至 6.6 g 為最大，然後平均重量會下降。圖 6 為 100 隻幼蟲每日體長變化趨勢圖，亦可得到餵養至 21 天的 100 隻幼蟲平均體長達到最大 14.4 mm，隨後也有下降趨勢。

表 5 中為豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲，餵養前後的重量及含水率變化分析數據。表中餵食前豬皮渣廢棄物為 21 日餵食累計總量，餵食期間並未進殘渣篩分等程序，餵食後殘渣為經過 21 日餵食後的全部殘渣量。

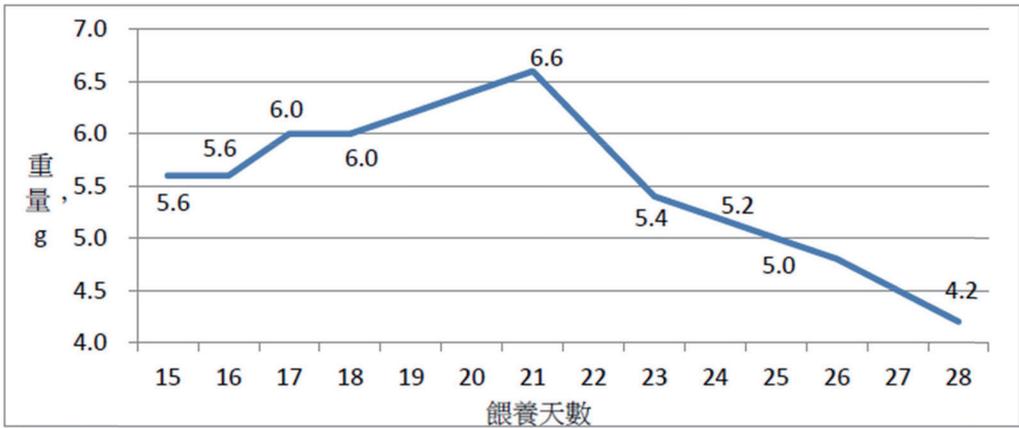


圖 5 100 隻幼蟲秤重每日數值變化趨勢圖

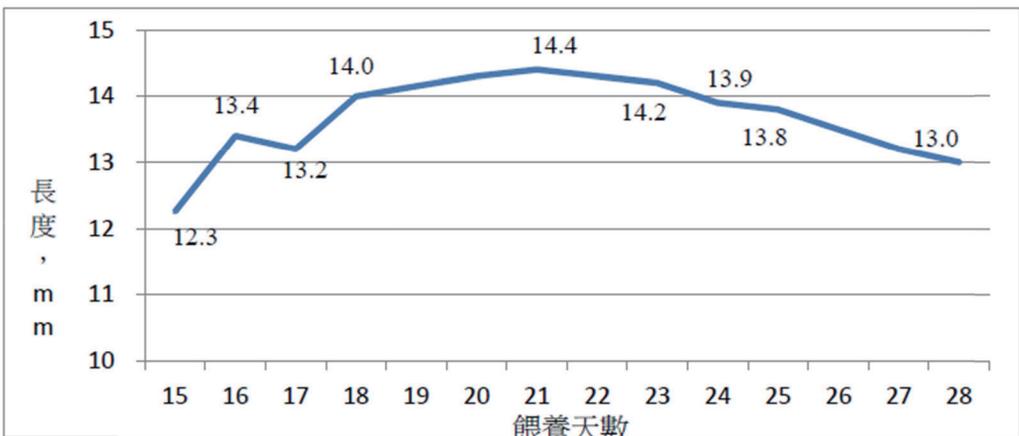


圖 6 100 隻幼蟲量測每日體長變化趨勢圖

表 5 豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲，餵養前後重量及含水率變化分析數值

重量，g	餵食前豬皮渣		餵食後殘渣	
	百分比	重量	百分比	重量
	7,700		3,489	
水份	64.84	4,993	20.39	711
乾料	35.16	2,707	79.61	2,778

五、結果與討論

5.1 豬皮渣作為黑水虻餵料的可行性評估

由表 3 所示，100 隻幼蟲重及表 4 幼蟲體長變化數據中，可以明確看到黑水虻幼蟲長大狀況，所以豬皮渣廢棄物做為黑水虻幼蟲餵料應無問題；測試餵料的含水率以約 70% 的餵養效果較適當，含水率過低會影響幼蟲食欲，含水率過高亦會使餵養盆內環境過於潮濕，造成幼蟲會爬離逃出，主要原因為幼蟲因處相對擁擠空間，過於潮濕時，會有不停爬動企圖離開之行為，而不會安穩待在餵養基質中。圖 7 為幼蟲爬離逃出狀況。



圖 7 餵食料過於潮濕幼蟲爬離逃出狀況

依據黑水虻幼蟲生長狀況，成長到五齡蟲即進入預蛹期，六齡蟲為預蛹期等待成蛹不再進食，但六齡蟲仍會將體內吃進餵食料消化後排出，因此體重會下降，可由此重量變化判斷出幼蟲成長是否達到預蛹期。由表 3、4 中數值及圖 5、6 的趨勢變化，可看到黑水虻幼蟲養殖到 21 天後，100 隻蟲重量到 6.6 g 後開始下降，身體長度到 14.4 mm 亦開始縮小，可據此判斷為五齡蟲要轉為預蛹期，所以餵養至 21 天後即暫停豬皮渣餵料。

與 Holmes et al.(2016) 資料比對，正常黑水虻幼蟲養殖到達預蛹期，100 隻蟲重量約為 19 g，明顯本實驗養殖幼蟲遠小於正常幼蟲的 100 隻蟲重。Gobbi et al.(2013) 提到單獨使用肉粉餵食時，幼蟲生長平均體長 8.06~9.45 mm，遠小於母雞飼料及混料餵食者體長 15.47~16.83 mm，文獻中亦提到只用肉粉飼養時，幼蟲及蛹的死亡率最高。明顯餵食食物的類型及數量對於黑水虻幼蟲成長發育速度有極大的影響，黑水虻幼蟲為雜食性，禽畜糞便、餐廚垃圾、腐爛食物、養殖動物廢棄物等有機廢棄物均可做為餵食料。本實驗使用食品廠之動物渣，主要目的為去化廢棄物，所以並未添加或混拌其它相對營養之材料，由於動物渣營養價值較低，表 6 為豬皮渣主要成分比例，並無碳水化合物，長期餵食造成幼蟲營養不良，進食狀況亦較差，所以幼蟲體重較輕及體長較小，若適當調整混拌餵養基質，應可得品相較好之幼蟲，此結果亦與文獻中結論一致。

表 6 分析豬皮渣內主要成分

	粗脂肪	粗蛋白 *	水份	灰份
成分比例	12.33%	57.49%	34.8529%	0.8369%

* 粗蛋白為分析凱氏氮數值 9.2%，再乘換算係數 6.25 得到

5.2 豬皮渣使用黑水虻去化效能評估

由表 2 所示之餵料統計數據，每個餵養盆中放入 65 g 二齡蟲，餵養 21 天成長至五齡蟲達到預蛹期，期間共餵入含水豬皮渣廢棄物 7,700 g，扣除內部含水後，乾基豬皮渣廢棄物量為 2,702 g；而由 21 天後實際秤取平均每盆淨重量為 3,489 g，兩者間的差異為 4,276 g，重量損失率 55.07% ($=4,276/7,765$)。

因實際秤重時並未進行蟲渣分離，基於質量平衡，所以重量差異應為水分蒸發量。豬皮渣廢棄物經過黑水虻幼蟲處理後，理論加入水量扣除蒸發量後為最後蟲糞中留存水量 717 g ($=4,993-4,276$)，換算含水率為 20.55% ($=717/3,489$)；由表 5 所示之豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲前後重量及含水率比對數值，得到餵養後經幼蟲處理後的蟲糞含水率 20.39%，此分析數據與實際量測數據接近，由此可確認去化率為水份蒸發所致。

豬皮渣廢棄物內水份蒸發的主要原因為幼蟲進食、蠕動及幼蟲排出蟲糞等過程會產生熱量，實際量測餵養盆內溫度可達到 45°C 以上；廢棄物經餵養盆內幼蟲處理後排出的蟲糞因散熱過程使水份蒸發，因此造成最後蟲糞殘渣含水率下降，此水份蒸發過程並不會產生惡臭污染環境，可大為改善豬皮渣廢棄物因烘乾及堆肥過程造成周遭環境不佳及惡臭產出問題。

整體而言，相對豬皮渣廢棄物在經過高速離心脫水後，含水率降至約 70%，此為適當餵料含水率；而運用黑水虻去化動物渣，最後蟲糞含水率同樣可下降至約 20%，此已達到與烘乾設備相同效能。黑水虻養殖系統可重覆再利用，豬皮渣廢棄物為生產工廠最終產出廢棄物，黑水虻可自行養殖育種提供，對於南臺灣養殖環境，養殖過程不須額外提供熱能加熱及電力降溫，所耗費操作成本極低。另對於蟲糞已可直接作為土壤改質劑，與傳統烘乾後尚須經過堆肥過程才能作為肥料，已大為縮短處理時間。整體而言，豬皮渣利用黑水虻處理可以完全取代烘乾及堆肥工作，並可達到循環經濟的目的。

而且黑水虻幼蟲亦可運用作為雞隻及水產養殖飼料，對於蟲糞作肥料及幼蟲作為飼料，此為另一課題，並不在此研究內探討。

5.3 二氧化碳排放減量

燃燒每公升燃料油相當於產出 3.111 kg-CO₂、使用每 kW 電力相當產出 0.612 kg-CO₂ (能源局, 2011)。以本案例豬皮渣廢棄物使用黑水虻處理及與烘乾進行比較，處理每噸豬皮渣廢棄物可減少燃料油使用量 36.7 L，及烘乾電力使用 108 kW。相對可減量 CO₂ 排放量 180.27 kg-CO₂ (36.7*3.111+108*0.612)。案例內食品廠每年產出動物渣廢棄物約 500 噸，預估每年可以減少 CO₂ 排放量 90,135 kg-CO₂。

5.4 整體效益評估

以本案例食品廢棄物減量而言，將每噸豬皮渣廢棄物含水率由 70% 降低到 20%，需脫除水量為 625 kg (=1,000(1-(1-0.7)/(1-0.2)))。將豬皮渣廢棄物內水量移除，分別針對傳統蒸發烘乾法及黑水虻幼蟲處理法進行評估，相關評估數值如表 7 所示。處理每噸廢棄物，在不考慮設備投資固定成本下，清運成本 3,500 元，每噸廢棄物水分減量 625 kg 可降低清運處理成本 2,188 元，操作上使用黑水虻幼蟲處理比使用烘乾設備烘乾，節省成本約 875 元；整體而言，處理每噸豬皮渣廢棄物，全部成本可降低 3,063 元。案例內食品廠每年產出動物渣廢棄物約 500 噸，可減少清運處理成本 1,094,000 元，相對操作成本全年亦可節省為 437,500 元。所以全年節省成本可達 1,531,500 元。

對於環境改善而言，黑水虻處理法並無惡臭產出，Sheppard(1983) 及 Furman et al.(1959) 研究亦指出黑水虻對人類完全無害，對環境非常安全，黑水虻成蟲既不攜帶病菌，也不侵入人類的居住環境。而相對於其他處理方式，則必須注意到有機物發酵產生惡臭、蚊蟲等存放造成環境衛生危害、甚至衍生疾病等問題。而動物渣廢棄物經黑水虻處理後殘渣為幼蟲排出蟲糞，此經過幼蟲體內厭氧消化處理後的蟲糞可直接作為土壤改質劑使用，另預蛹前的五齡幼蟲亦可收集作為動物飼料出售，此部分可完全將廢棄物資源化，所以可再進一步降低處理費用，甚至有額外獲利產出。所以黑水虻處理法應是較為符合食品廠食品廢棄物處理的優良方法。

至於黑水虻處理最大問題點為需要室內空間進行養殖，而養殖過程中需須注意防治螞蟻、蜘蛛、小鳥等其他動物侵入吃黑水虻問題。

表 7 各案例處理每噸豬皮渣廢棄物成本效益評估

項目		單位	烘乾	黑水虻
移除水量		kg/噸	625	
廢棄物處理節省成本		元/噸	2,188	
投資費用		元	1,200,000	50,000
	設備成本	元	1,000,000	50,000
	工程費用	元	200,000	----
操作費用		元	874.5	0
	燃料油需求	L/h	36.7	0
	燃料油單價	元/L	15	
	電力需求	kW	108	0
	單位電價	元/kW	3	
	黑水虻幼蟲	元/g	無	自行養殖提供

六、結論

養殖黑水虻用於去化廚餘等廢棄物已有非常多的成功案例，不僅可將廢棄物量減少，更可將處理後的蟲糞殘渣轉成土壤改質劑使用及成蛹前幼蟲做為動物飼料運用，完全達到廢棄物資源化再利用及循環經濟的目的。

本研究內，將食品廠內生產後的動物渣廢棄物經由黑水虻處理去化，達到廢棄物減量的目的，初步用於豬皮渣廢棄物減量，成果良好重量可減少 55.07%，含水率降至約 20%，完全可取代傳統廢棄物烘乾、堆肥等方法；並可減少燃料油及電力使用，及降低 CO₂ 排放。案例內處理 1,000 kg 豬皮渣廢棄物可減少烘乾設備使用燃料油 36.7 L 及電力 108 kW，降低廢棄物操作處理成本 875 元，及降低 CO₂ 排放量 180.27 kg-CO₂；與降低的清運處理費用合計後，處理 1,000 kg 豬皮渣廢棄物成本可降低 3,063 元。案例內食品工廠，每年產出約 500 噸動物渣，經黑水虻處理後預估可降低廢棄物處理費用 1,531,500 元，對於每年 CO₂ 排放亦可減少 90,135 kg-CO₂。

在環境污染改善方面，亦明顯改善廢棄物產生惡臭、蚊蟲等環境不佳問題，相對在廢棄物存放、清運及處理上均可有效改善。而且產出蟲糞亦可直接作為土壤改質劑取代堆肥處理方式。所以實際操作運用而言，養殖黑水虻法去化食品廢棄物，可完全取代食品廢棄物烘乾及堆肥程序。

食品廢棄物種類繁多，以廢棄物處理角度而言，運用黑水虻處理法是可以將大量食品廢棄物有效資源化的優良方案，以現今我國所面臨食品廢棄物處理問題，應是值得努力推廣方向。

參考文獻

- 王韻萱 (2018)，黑水虻飼養在不同飼料添加益生菌之發育及營養成分，國立中興大學昆蟲學研究所，碩士學位論文。
- 朱芬 (2019)，黑水虻 Black soldier fly，中國農業科學技術出版社，p11-15。
- 安新城、李軍、呂欣 (2010)，黑水虻處理養殖廢棄物的研究現狀，環境科學與技術，第 33 期，p113-116。
- 李中光、劉新校、侯佳蕙 (2013)，淺談污泥脫水及加熱乾燥技術，環保簡訊，第 20 期，p 2.1-2.9。
- 李峰、張可、金鑫等 (2016)，武漢亮斑水虻對豬糞除臭功能的研究，化學與生物工程，第 33 期，p28-33。
- 段紀義、陳庭堅 (2014)，熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估，工業污染防治，第 129 期，p59-76。
- 能源局 (2011)，燃料油及電力使用 CO₂ 排放係數，經濟部能源局。
- 梁世祥、楊庭豪、王思涵 (2019)，黑水虻在友善農耕上之開發與應用，有益昆蟲在友善農耕之應用研討會專輯，p77-84。

陸麗珠、鄧盾、馬平等 (2020)，黑水虻堆肥促畜禽糞便分解的研究進展，廣東農業科學，第 47(8) 期，p 110-117。

陳靜瑩 (2021)，循環經濟商業模式之研究 --- 以黑水虻為例，國立屏東大學行銷與流通管理學系，碩士學位論文。

張添晉、陳俞穎 (2008)，有機污泥之生物減量技術，廢棄物資源化專輯，p 66-77。

楊森 (2010)，熱帶地區連續培養亮斑扁角水虻 (*Hermetia illucens* L.) 和生物轉化豬糞研究，武漢華中農業大學，碩士學位論文。

鄭文勝 (2006)，豬皮明膠之萃取、澄清及應用之研究，國立嘉義大學動物科學系，碩士學位論文。

劉興、孫學亮、李連星等 (2017)，黑水虻替代魚粉對錦鯉生長和 \ 健康狀況的影響，大連海洋大學學報，第 32 期，p 422-427。

Bosch, G., Zanten, H.E.V., Zamprogna, A., et al. (2019), Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: legislation efficiency and environmental impact, *Journal of Cleaner Production*, 222: p 355-363.

Cutrignelli, M.I., Messina, M., Tulli, F., et al. (2018), Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute; Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens, *Research in Veterinary Science*, 117: p 209-215.

Furman, D.P., Young, R.D., Catts, E.P. (1959), *Hermetia illucens* (Linnaeus) as a factor in the natural control of *Musca domestica* Linnaeus, *Journal of Economic Entomology*, 52: p 917-921.

Gobbi, P., Martinez-Sanchez, A., Rojo, S. (2013), The effects of larval diet on adult lift history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), *European Journal of Entomology*, 110: p 461-468.

- Holmes, L.A., Vanlaerhoven, S.L., Tomeberlin, J.K. (2016), Lower temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development, *Journal of Insects as Food and Feed*, 2: p 255-262.
- Jozefiak, D., Jozefiak, A., Kieronczyk, B.(2010), Insects-anatural nutrientl nutrient source for poultry-areview, *Ann. Anim. Sci.*, 16: p 297-313.
- Kumar, S., Negi, S., Mandpe, A., Singh , R.V., and Hussain, A. (2018),. Rapid composting techniques in Indian context and utilization of black soldier fly for enhanced decomposition of biodegradable wastes-A comprehensive review., *Enviro. Manage.*, 227: p 189-199.
- Lalander, C.H., Fidjeland, J., Diener, S.(2015), High waste to biomass conversion and efficient Salmonella spp. Reduction using black soldier fly for waste recycling, *Agron. Sustain. Dev.*, 35: p 261-271.
- Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K., Vanlaerhoven, S., et al. (2015), Ability of black soldier fly (Diptera : Stratiomyidas) larvae to recycle food waste, *Environ Entomol.*, 44: p 406-410.
- Rehman, K.U., Rehman, A., Cai, M.M., et al. (2017), Conversion of Mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.), *Journal of Cleaner Production*, 154: p 366-373.
- Sheppard, C. (1983), Housefly and lesser fly control utilizing the black soldier fly in manure management systems for caged laying hens, *Environmental Entomology*, 12: p 1439-1442.
- Sheppard, C., Newton, G.L., Thompson, S.A., et al. (1994), A value added manure management system using the black soldier fly, *Bioresource Technology*, 50: p 275-279.

Sheppard, D.C., Tomberlin, J.K., Joyce, J.A., et al. (2002), Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae), *Journal of Medical Entomology*, 39: p 695-698.

Smith, J.M., Van Ness, H.C. (1987), *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill International Editions, 4e.

Webster, C.D., Rawles, S.D., Koch, J.F., et al. (2016), Bio-Ag reutilization of distillers dried grains with solubles (DDGS) as a substrate for black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, along with poultry by-product meal and soybean meal as total replacement of fish meal in diets for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, *Aquacult. Nutr.*, 22: p 976-988.

廢(污)水處理類

化工產業廢水以 SBR 和 BioNET 組合程序之實廠處理

陳致君*、王鈞逸**

摘 要

案例廠為一化工製品製造公司，由於製程中使用大量化學有機藥劑且含高濃度有機氮，造成廢水成份複雜處理不易，在現有處理系統以調勻池與化學混凝沉澱做為初級處理、批式活性污泥 (Sequencing Batch Reactor, SBR) 二級生物處理等程序，此程序處理後氨氮濃度最高約還有 160 mg/L 左右。工研院材料與化工研究所生物網膜活性污泥 (Biological New Environmental Technology, BioNET) 處理方法接續在批式活性污泥 (SBR) 二級生物處理之後，擬定 SBR 系統硝化脫硝反應操作策略參數，實場廢水量為 150 CMD，TKN 進流濃度 24~215 mg/L 之間、COD 進流濃度 130~390 mg/L，不足的碳源 (配合廠內每天產生的廢水中有機氮及 COD 濃度高低來進行調整) 則以場內的 IPA (異丙醇) 廢液補充，應用此方式為循環經濟最佳的範例。SBR、BioNET 槽體為 300 m³、100 m³，SBR 硝化反應時間 18 小時；脫硝反應時間 4 小時。BioNET 水力停留時間為 16 小時，在約 3 個月評估結果平均 TKN 濃度從 100 mg/L 降低至 20 mg/L 以下，TKN 去除率為 80% 以上；硝酸鹽氮出流水濃度小於 50 mg/L 以下。有機氮在處理過程中，必須先經水解產生氨氮，再進行硝化與脫硝反應，目前自行排放氨氮管制濃度標準為 20 mg/L，硝酸鹽氮濃度管制標準為 50 mg/L。故，在 SBR 生物處理系統後接 BioNET 喜氣生物處理系統，不但可做殘餘氨氮再硝化亦可同時具有攔截 SS 的功能。

【關鍵字】化工產業廢水、SBR、BioNET、硝化、脫硝

* 工業技術研究院材料與化工研究所 研究員

** 工業技術研究院材料與化工研究所 副研究員

一、前言

工研院材料與化工研究所(簡稱材化所)所開發的 BioNET (生物網膜)廢水高級處理技術乃針對產業廢水含有氨氮物質,將 BioNET 浮動床植入適當 PU 擔體與經馴養之生物污泥,並藉由輸入氧氣使擔體上微生物增殖以進行生物分解作用。在 BioNET 活性生物處理系統中,可藉由多孔性擔體的特性累積大量的硝化菌群繼續將 SBR 生物系統所殘餘的氨氮進行再硝化以及將所流出的 SS 攔截住。化工產業製程為生產紡織染整助劑與塑膠用滑劑,於製程中使用大量化學藥劑,廢水成份複雜,而製程中所產生之廢水乃間歇性排放,廢水濃度與水量變化極大,廢水的主要污染來源為製程中產生的高 COD、高有機氮之反應槽清洗水。目前現有的廢水處理場處理流程為由:調勻池、pH 調整槽與混凝沉澱、中間水槽及批式活性污泥池所組合,主要為處理 COD。然現有的法規之放流水排放標準,則新增加了氨氮以及硝酸鹽氮的濃度管制,於是將現有的批式活性污泥池由以降解 COD 濃度為目標,提升為不僅僅是降解 COD 濃度,又可同時進行水解、硝化脫硝處理之功能。從評估結果獲得 SBR 系統硝化脫硝最適的操作策略以及新增 BioNET 生物處理單元,讓有機氮於 SBR 系統中達到水解、硝化脫硝又可利用製程中廢棄之 IPA 廢液作為 COD 的碳源,於此同時大大減少了廢棄物處理費用,可謂循環經濟的典範案例。故,以新增 BioNET 喜氣生物系統接續在 SBR 生物處理單元的組合程序處理高有機氮廢水,達到了現行放流水標準又同時具經濟效益之生物處理技術。

二、廢水水質

2.1 廢水水質調查

案例廠廢水來自化工產業含氮製程反應槽清洗廢水,初級以化學混凝沉澱後流入中間水池,廢水水質調查的廢水來源為採集中間水池,以每天 24 小時連續自動採樣,設定每 2 小時採取 1 個水樣,每天樣品數總共有 12 個連續 6 次(天),將其每天 12 個樣品數水質結果取其平均值,由表 1 與圖 1 得知,廢水中的 pH 值、COD、氨氮與電導度及硫酸鹽等濃度, pH 值為 7.36~7.58; CODt(總 COD) 濃度為 222~246 mg/L;

CODs(溶解性 COD) 濃度為 201~224 mg/L；氨氮濃度低於 20 mg/L 以下；電導度為 896~1,104 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；硫酸鹽濃度為 354~525 mg/L。

表 1 六次採樣 24 小時平均結果

次數	pH	CODt	CODs	NH ₄ N	EC	SO ₄ ²⁻
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1	7.43	246	211	10	1,074	525
2	7.39	222	201	10	1,104	523
3	7.36	230	210	12	996	466
4	7.41	223	214	16	896	354
5	7.58	234	224	17	990	417
6	7.58	230	222	18	1,029	416

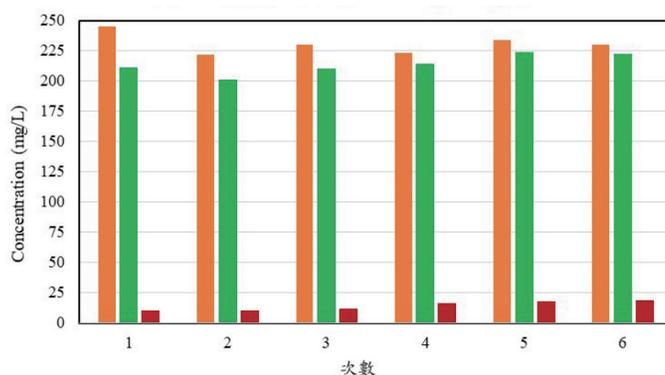


圖 1 6 次 24 小時連續採樣水質結果

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

2.2 實驗室連續式評估廢水水質

有機氮廢水以喜氣生物系統進行水解、硝化脫硝連續式之實驗室處理程序評估，採樣點以中間水池做為進流水的水源，案例廠依實驗室所需的水量，採批式的方式將採取的水樣寄送至工研院，實驗室評估以 24 小時連續式進行評估。批式所採廢水水質檢測結果如表 2 與圖 2 所顯示，pH 值在 7.0~7.7 之間；CODt(總 COD) 濃度為 130~390 mg/L；水中所含鹼度濃度為 72~268 mg/L，由 24 小時連續採樣的水質結果中，氨氮的濃度不高，故推測廢水中所呈現的形態應該是有機氮，因此增加總凱氏氮檢測項目，濃度為 24~215 mg/L。

表 2 實驗室連續式評估水質結果

日期	CODt	TKN	鹼度	pH
7/2	386	79	--	7.54
7/10	290	103	103	7.38
7/17	222	88	72	7.14
7/23	157	101	109	7.09
7/30	200	93	114	7.17
8/5	214	130	180	7.18
8/13	297	24	130	7.60
8/19	133	27	112	7.23
8/26	209	107	123	7.14
9/1	258	142	141	7.00
9/8	250	124	162	7.28
9/16	298	151	168	7.35
9/26	307	152	268	7.16
10/14	292	99	264	7.71
10/20	325	214	118	7.49
平均值	256	109	147	7.30

單位：CODt(mg/L)；TKN(mg/L)

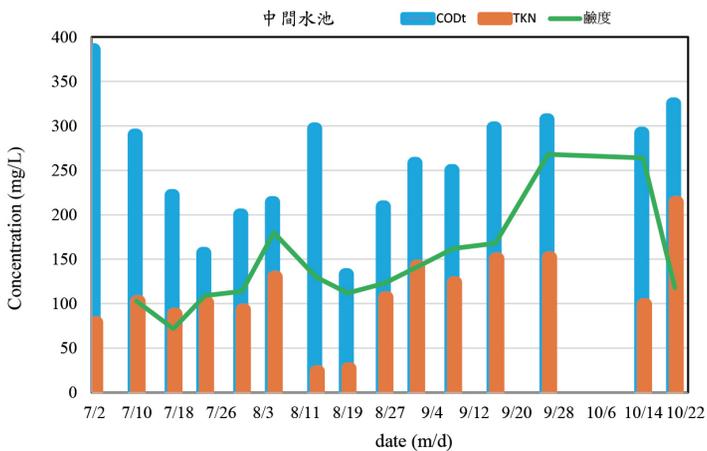


圖 2 實驗室連續式評估水質結果

三、現有廢水處理場性能提升規劃

由於化工產業製程所產生之廢水乃間歇性排放，廢水濃度與水量變化極大，在原有 SBR 處理系統的目的與操作參數只是將部份可生物分解的 COD 去除，並無法處理現行法規規定氨氮濃度之排放標準需求；即該廢水中有機氮物質必需具有水解、氨氮行硝化脫硝反應之能力，因此案例廠評估首要目的為有效降解有機氮，且可達到於舊廠自行排放標準或新廠符合園區納管排放標準，故以擬定 SBR 生物處理系統具水解、硝化脫硝之最佳操作策略方案與評估處理技術的組合，進而達到精進原有的 SBR 系統處理的程序，以提昇廢水處理場之整體處理效率與穩定性。

上述適用性及水質分析所得評估結果與因應廠商要求將現有生物處理池體做性能的提昇，提升工程包括批式活性污泥處理系統的操作策略擬定、新增中間水池與 BioNET 等 3 部份。

3.1 批式活性污泥 (Sequencing Batch Reactor,SBR)

為提升現有 SBR 生物處理池的功能與效率，必須先調整有機氮廢水進入生物池的濃度及修正現有操作條件，讓池內微生物持續微量增殖的狀態下，使其有效地將廢水中有機氮進行水解、硝化脫硝反應在可容許的濃度，同時與 SBR 生物系統的操作策略息息相關。當有機氮於生物活性污泥（曝氣狀態）系統中可產生水解、硝化反應，另亦可在同 SBR 生物系統中於無氧（攪拌）狀態下進行脫硝，達到於同一個系統中，有機氮水解、硝化脫硝的三重反應功能，由評估實驗結果獲得 SBR 生物處理系統硝化脫硝最佳操作條件之策略擬定如表 3 所示，進水時間為 3.84 小時（同時進行攪拌），攪拌時間 4 小時，曝氣反應 18 小時，沉降為 1.5 小時，處理後廢水排放時間為 0.5 小時。

表 3 SBR 生物處理系統操作策略

項目狀態	時間	單位
進水	3.84	小時
攪拌	4	小時
曝氣	18	小時
沉降	1.5	小時
排水	0.5	小時

3.2 生物網膜活性污泥 (Biological New Environmental Technology, BioNET)

生物網膜活性污泥技術為工研院開發之專利技術，結合 PU 擔體與微生物的組合，具有優勢分解功效之廢水高級處理技術，其適用於工業廢水中難分解物質，有助於特殊選擇性優勢菌群生長之處理技術，於多孔性擔體中可附著大量微生物進而形成硝化菌微生物菌群，進行去除廢水中之氨氮與 COD，並同時俱有可攔截大量 SS 的功能，而且多孔性擔體毋需更換，僅須少量補充，操作簡單且費用低，亦無二次污染問題。

3.3 中間水池 II

中間水池 II 為 SBR 生物系統至連續式 BioNET 活性污泥處理系統，2 個系統的出流水與進流水之間連接緩衝貯槽。

四、實驗室處理程序評估結果與討論

含有機氮廢水的處理技術於實驗室評估時，採用案例廠現有的 SBR 處理技術與 BioNET 喜氣生物處理技術的組合程序，SBR 生物處理系統裝置有監測設備 1 組，監測 SBR 生物反應池中進行硝化脫硝反應時，pH 值、DO 與 ORP 值的變化趨勢紀錄，從變化趨勢的結果中獲取硝化脫硝處理的最佳操作條件及操作策略，系統設備如圖 3 所示。

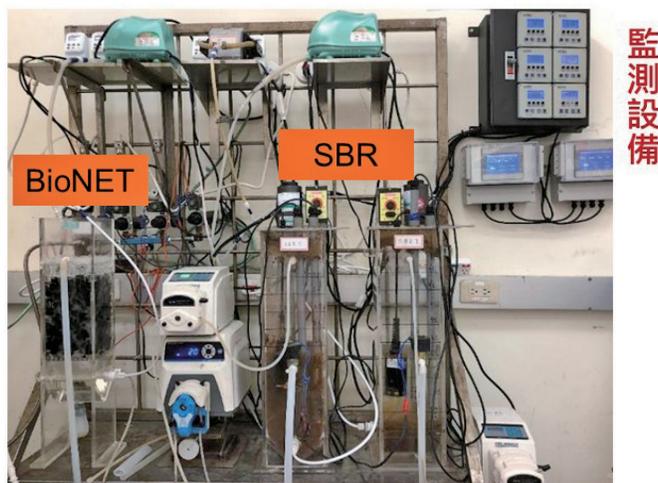


圖 3 實驗室硝化脫氮處理系統

案例廠化工產業製程之洗桶、洗槽水含高濃度有機氮，實驗室的評估裝置系統，應案例廠的委託要求以現有 SBR 生物處理技術進行有機氮硝化脫硝之實驗室評估，擬定最佳硝化脫硝之處理操作策略方案，在評估期間進行水質檢測，由於初期的水質調查結果，氨氮濃度不高所以在系統進行連續式評估實驗中，同時增加分析廢水中 TKN 濃度，結果由圖 4 與圖 5 得知，進流水 TKN 濃度為約 30 mg/L 至 160 mg/L 之間，經由 SBR 生物系統處理，以階段性逐步濃度提升的操作方式作為硝化脫硝處理之可行性評估，以其處理後的出流水再進入 BioNET 喜氣生物處理系統。SBR 生物系統在操作穩定時，於 35 天開始到 46 天之間，出流水 TKN 與氨氮濃度大都在 20 mg/L 以下，去除率為約 77~88%。但在第 47 天開始處理後出流水的 TKN 濃度為 35~147 mg/L，隨著進流水濃度的提高而升高，去除率下降至 51% 以下，然 BioNET 喜氣生物系統從第 52 天時，因 SBR 生物系統有機氮負荷太高，無法有效降解而使濃度累積，造成出流水 TKN 濃度高於 50 mg/L~71 mg/L 之間，但從結果顯示 TKN 濃度還能再降解 76 mg/L，氨氮濃度亦可再分解減少至 60 mg/L 以下，由此瞭解 BioNET 生物系統具有再次水解硝化的功能。於第 51 天將進流水 TKN 濃度降低至 100 mg/L 左右，生物系統出流水 TKN 濃度也有明顯的降低，故，接著調整 SBR 系統實驗進流水的 TKN 濃度將其控制維持著在 100 mg/L 左右，由 SBR 串聯 BioNET 生物處理單元，出流水的 TKN 與氨氮濃度逐漸降低在 20 mg/L 以下。

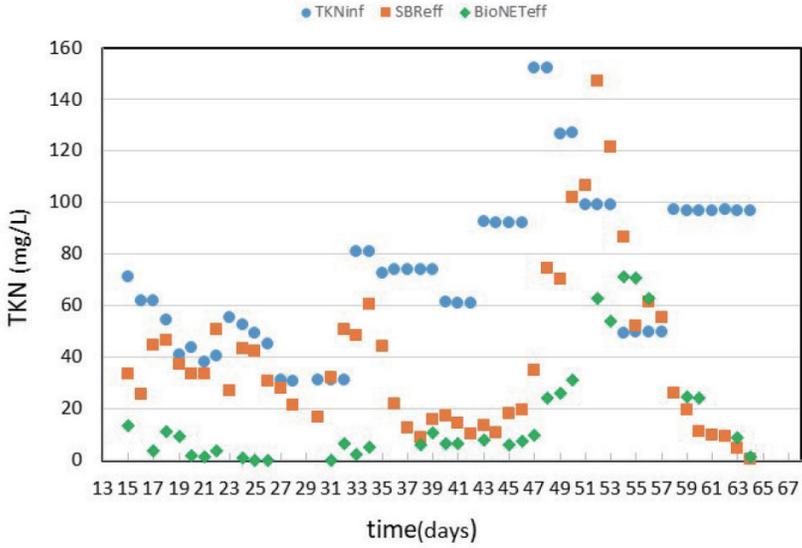


圖 4 進流水 TKN 經過生物系統處理結果

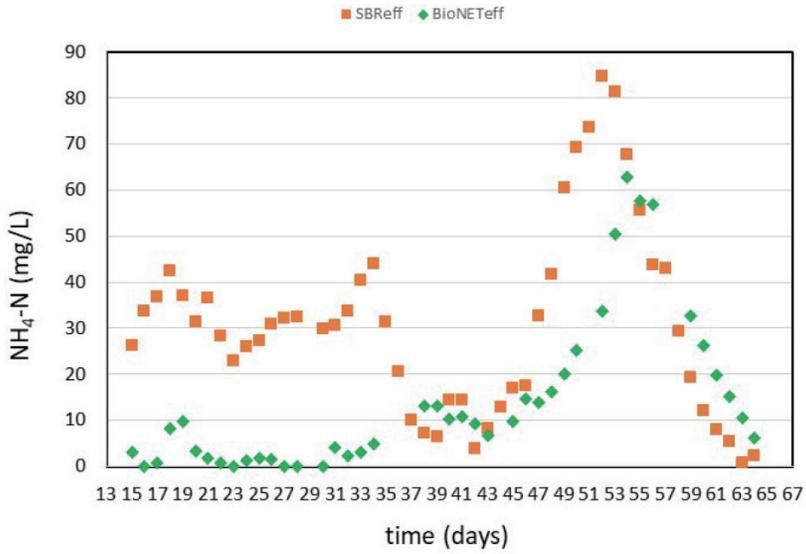


圖 5 進流水經過生物系統硝化之處理結果

SBR 生物系統進行水解、硝化脫硝反應完成後，雖然 TKN 與氨氮濃度高於 30 mg/L，但經由 BioNET 喜氣生物系統處理結果由圖 6 顯示，出流水的硝酸鹽氮濃度大都可以達到自行排放標準 50mg/L 以下，同時也符合新廠於桃科園區納管排放標準 50 mg/L 無須收費的標準，唯當進流水 TKN 濃度高於 120 mg/L 時，反應槽內的 TKN 與氨氮濃度無法有效分解而有累積的情況，造成後段經由 BioNET 喜氣生物系統再硝化後，在第 49 天到第 54 天之間的硝酸鹽氮濃度增加至最高 60 mg/L，雖不符合舊廠硝酸鹽氮自行排放標準 50 mg/L，但在新廠可符合納入桃科污水場的納排標準。然卻可從硝酸鹽氮濃度升高的結果明確知道，BioNET 喜氣生物處理技術可馴養及累積大量硝化菌群以及操作簡單的優勢、還無須進行污泥迴流，將 SBR 生物池中所殘餘的 TKN 與氨氮進行再水解、硝化反應，故出流水氨氮濃度又可再次被降解。從評估結果得知，若須達到硝酸鹽氮自行排放標準則須控制 SBR 生物處理系統進流水的 TKN 濃度在 100 mg/L 以下。

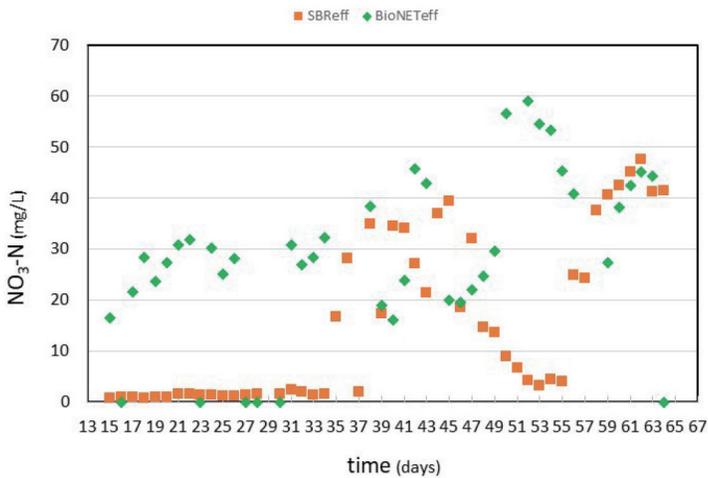


圖 6 生物系統脫硝處理結果

生物處理技術進行脫硝反應，反應中必須要有足夠的碳源才可以將硝酸鹽氮反應完成以氮氣排出，所以 SBR 生物系統的脫硝反應以 COD 碳源 4.3 比值進行生物脫硝反應，從圖 7 結果得知，進流水的 COD 濃度為 200 mg/L~1,200 mg/L 之間，SBR 生物系統操作策略以模擬實場現有的池體體積之下先應用廢水中的 COD，剩下不足的 COD 再添加 IPA 廢液當作碳源進行脫硝反應，滿足碳氮比值的需求降低後段 BioNET 生物系統的池體體積。SBR 生物系統出流水的 COD 濃度都在 200 mg/L 以下，SS 出流水濃度在 20 mg/L~150 mg/L 之間，再進入 BioNET 喜氣生物系統處理，出流水 SS 濃度都低於 6 mg/L 以下，大部分 SS 濃度都小於 2 mg/L 以下，可由圖 8 的結果得知。

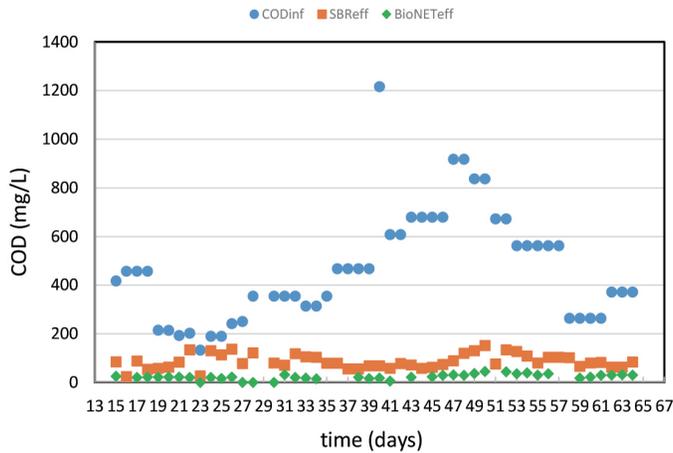


圖 7 生物系統脫硝與 COD 降解結果

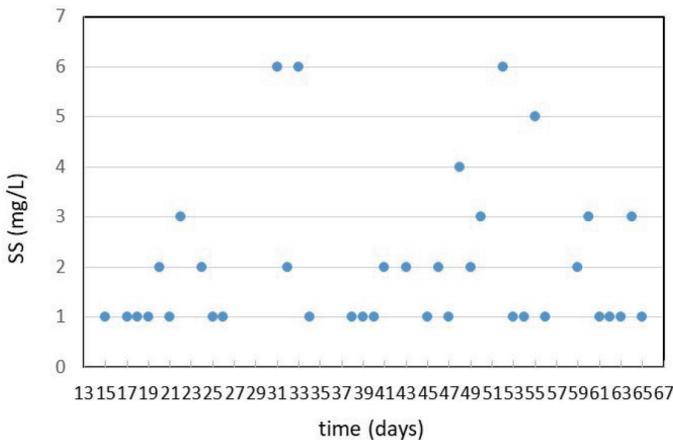


圖 8 BioNET 生物系統 SS 處理結果

五、廢水處理場設計與流程

5.1 廢水處理場設計

以原有 SBR 生物池修正為適合處理有機氮之操作策略方案，進水時即進行攪拌 4 小時，曝氣反應 18 小時，沉降時間 1.5 小時，排水為 0.5 小時，新增網膜式活性污泥系統 (BioNET) 處理池，體積為 100 m³，廢水量 150 CMD，水力停留時間 16 小時。

設計理念：

- 以生物處理為主，降低環境衝擊。
- 設置 SBR-BioNET 生物活性單元組合程序，提高有機氮生物分解效率。
- 增設中間水池連接 SBR-BioNET 生物處理系統，提升 SBR 出流水水質穩定性。

5.2 廢水處理場流程

有機氮廢水現有處理與新增之流程如圖 9，黑線為現有處理流程：暫存池、調勻池、pH 調整、快混池、慢混池、化學沉澱池、中間池、批式活性污泥生物處理池、中間池 II、生物網膜處理池、排入承受水體，化學與生物污泥進行脫水，脫水後濾液回到調勻池，藍色線為新增系統。

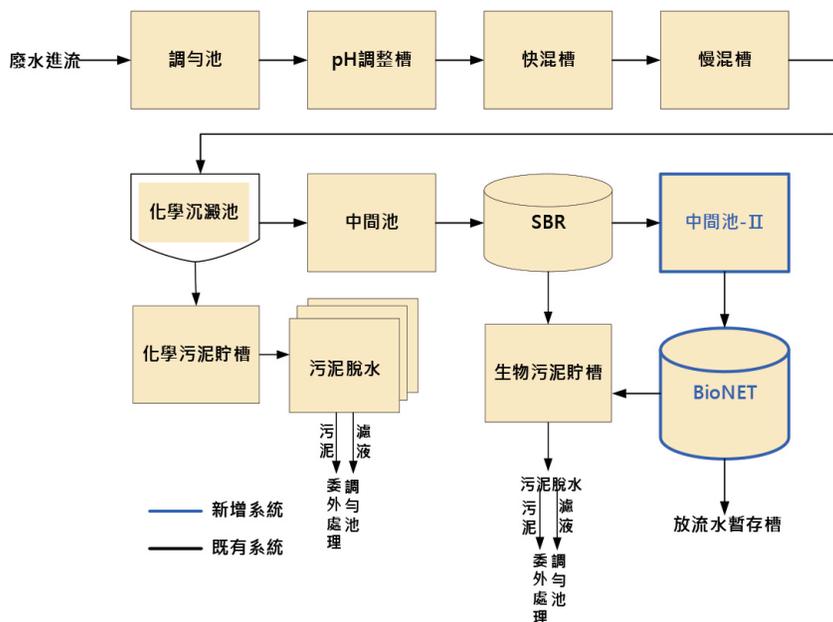


圖 9 現有與新增處理流程圖

六、結論

綜觀上述實驗評估結果，進流水 TKN 濃度需控制使其維持在 100 mg/L 左右，經由 SBR 與 BioNET 生物處理技術串聯組合程序，氨氮與硝酸鹽氮及 SS 的出流水濃度符合舊廠放流水自行排放標準 20 mg/L、50 mg/L 與 30 mg/L 以下，然於新建廠則為納入桃科污水下水道，出流水納排標準氨氮濃度為 30 mg/L、硝酸鹽氮為 50 mg/L 以上。雖然現有 SBR 生物系統負責擔任有機氮廢水之水解、硝化及脫硝處理技術，可以達到自行排放的氨氮及硝酸鹽氮濃度，同時可降低污泥的產生量，因此也相對地大幅減少污泥處理費用，然又因 BioNET 生物處理技術，可負責攔截及把關出流水 SS 以及 SBR 出流水氨氮濃度高於 20 mg/L 以上異常問題發生的困擾。

參考文獻

- 王少波、王淑瑩、彭永綦、李勇智 (2005)，常溫內源反硝化脫氮過程中 pH 和 ORP 變化規律。第 6 卷第 3 期，p 21-24。
- 莊順興、鄒文源等 (1999)，埤塘水質調查暨整治現地研究，經濟部委託研究計畫報告。
- 陳慶華等 (1998)，工業技術研究院，化學工業研究所，高性能整合性廢水處理技術開發，經濟部委託研究計畫報告。
- 陳致君、洪仁陽、姜榮煌、洪政偉、陳威全、廖啟鐘、鄒文源 (2015)，氨氮與正磷酸鹽廢水以 BioNET® 和化學混凝組合程序之實場處理，環保技術與工程實務研討會，p 67-82。
- 陳致君、洪仁陽、蔡松均、梁德明、黃志彬 (2020)，以 UF/EDR 回收 PCB 產業廢水：BioNET 前處理評估，環境工程學會廢水處理研討會。
- Wenjing Chen, Yiming Lu, Quan Jin, Miao Zhang, Jun Wu., (2020) "A novel feedforward control strategy for simultaneous nitrification and denitrification (SND) in aerobic granular sludge sequential batch reactor (AGS-SBR)", *Environ Manage*, 260(12): 110103
- Xinping Yang, Shimei Wang, Lixiang Zho., (2012) "Effect of carbon source, C/N ratio, nitrate and dissolved oxygen concentration on nitrite and ammonium production from denitrification process by *Pseudomonas stutzeri* D6", *Bioresour Technol*, 104: p 65–72.
- Ying-Chih Chiua, Li-Ling Leeb,1, Cheng-Nan Changb, Allen C. Chao., (2007)" Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor", *Internation Biodeterioration & Biodegradation*, 59(1): p 1–7.

廢(污)水處理類

LCD 玻璃奈米孔洞材料 於電鍍產業水資源循環之應用案例

劉倩*、李志怡**、魏文宜***、顏旭明****、
杜子邦*****、呂健瑋*****、洪煥毅*****

摘 要

我國是液晶顯示器 (LCD) 的主要生產國之一，每年可生產數億片 LCD 面板，卻也產出約 8,000 公噸的廢 LCD 玻璃，目前礙於無合適處理方法，僅能以掩埋方式去化，對於地狹人稠的台灣實為一沉重的環境負擔。此外，我國亦為全球水五金的生產重鎮，其中扮演關鍵角色的電鍍產業，每年會產生數百萬公噸的含重金屬廢水，以目前主流的化學沉降法處理，不僅需要加入大量化學藥劑，更會產生大量重金屬污泥形成二次污染，因此亟需符合經濟效益兼具環境永續的處理方式。為解決上述兩項課題，行政院環境保護署 (環保署) 與工業技術研究院 (工研院) 共同投入研發，以專利奈米孔洞化技術在 LCD 玻璃上製造出無數個奈米大小且具有吸附重金屬能力的孔洞，將其轉化為「玻璃奈米孔洞吸附材料」(吸附材料)，並應用於電鍍製程水的吸附處理。當含重金屬的電鍍製程水流經吸附材料時，吸附材料可將重金屬保留在奈米孔洞內，使流出的水回復到自來水品質並導回電鍍製程中循環利用，其中每公斤吸附材料可吸附 100 公克以上的重金屬，且當吸附材料吸附飽和後，可藉由脫附程序將重金屬與吸附材料分離，不僅重金屬可回收，吸附材料亦可重複使用。實廠驗證方面，以吸附材料為核心，搭配活性碳和砂濾床組成噸級模組式吸附系統，安裝於彰濱工業區表面處

74 LCD 玻璃奈米孔洞材料於電鍍產業水資源循環之應用案例

理專區的電鍍廠內，進行氰化銅、焦磷酸銅、硫酸鎳及鉻酸等電鍍製程水之吸附處理及水資源循環回用測試。驗證結果顯示，各類電鍍製程水經過噸級模組式吸附系統處理後，皆可將數十～數百 mg/L 的重金屬含量去除至小於 1 mg/L，並可直接回用於電鍍製程，不須排入污水處理廠，達到水資源循環利用的目的。整體而言，此技術不僅可將 LCD 玻璃轉化為高效能重金屬吸附材料進行高值再利用，更可協助電鍍產業建立更好的水資源循環方式，共同創造多方面的經濟循環新價值，達成資源永續使用的目的。

【關鍵字】LCD玻璃、電鍍製程水、重金屬吸附、水資源循環

* 行政院環境保護署資源回收管理基金管理會	助理環境技術師
** 行政院環境保護署資源回收管理基金管理會	組長
*** 行政院環境保護署資源回收管理基金管理會	副執秘
**** 行政院環境保護署水質保護處	處長
***** 財團法人工業技術研究院材料與化工研究所	技術經理
***** 財團法人工業技術研究院材料與化工研究所	副組長
***** 財團法人工業技術研究院材料與化工研究所	組長

一、液晶面板不良品及報廢品處理現況

液晶面板具輕薄與高亮度、低耗電量、高解析度、無輻射污染等優點，應用非常廣泛，依面板大小分為大尺寸面板如液晶電視、桌上型電腦、筆記型電腦、監視器、平板電腦；中小尺寸面板如行動裝置電話、車用顯示器等；根據電子時報 (DIGITIMES Research) 於 2021 年公布的統計資料 (DIGITIMES Research, 2021)，臺灣於 2016 年~2020 年間每年產出的大尺寸液晶面板達到 2 億 3 仟萬片以上，如所圖 1 所示。近年來顯示器產業蓬勃發展使得產品替換的速度日益變快，造成產品廢棄物數量快速增加；此外，在生產過程中，不良品廢棄物也因產量擴充而逐漸增加，若無法針對廢棄面板進行有效的處理，將造成嚴重的環保問題。

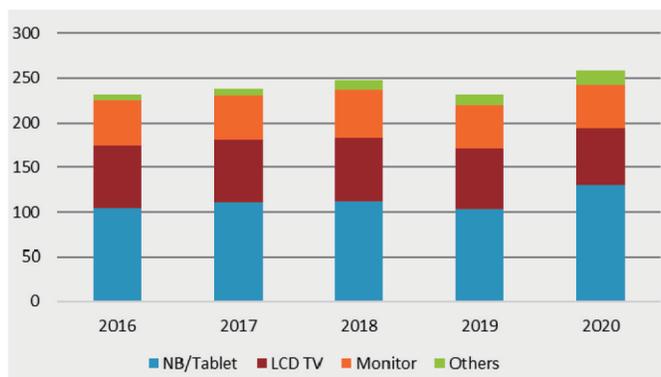


圖 1 2016-2020 年間台灣大尺寸 LCD 面板出貨量 (單位：百萬片)

(資料來源：DIGITIMES Research)

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

廢棄的液晶顯示器經過拆解、分類後，塑膠機殼、背光模組、電路板及其他金屬導線等物料均有適合的回收、再利用管道 (Electrical Waste Recycling Group, 2021)。目前歐洲國家對廢棄液晶顯示器處理技術的開發重點在於去除背光源中汞的污染、提升每日處理量及降低運作成本，許多自動化廢液晶顯示器處理系統陸續被開發出來 (ALR Innovations, 2021)。這些處理系統的運作方式大都是在密閉環境下將整部液晶顯示器進行破碎，期間利用抽氣系統將汞蒸氣抽出收集，剩餘物料再進行分選

(BluBox, 2021)。如此雖然可以提升每日處理量，避免人工拆解時背光源不慎破損而造成的汞蒸氣外洩 (MRT System International AB, 2021)，但是液晶面板中最具回收價值且對環境具危害風險的液晶 (Su, 2019) 則無法進行回收。環保署與工研院共同投入研發，建立液晶回收技術及設備，將不良品面板或面板報廢品，經破碎、萃取、分離等程序後，將回收液晶再利用，避免液晶洩漏至環境中。不含液晶之面板玻璃，佔液晶面板重量的 9 成以上，仍需持續的開發再利用的技術，以進一步降低面板產業對環境的負擔。

普通玻璃的主要原料為矽砂，可回收且不具有毒性，在分類收集且經過再熔融製程後可再製成玻璃產品，為一種可完全再生及再利用的物料，國內對於此類玻璃的再利用技術頗為成熟。但 LCD 玻璃為不含鹼金屬的硼矽鋁玻璃，其鹼金屬含量低，造成在熔融製程的溫度需高達 1,500 °C，且未經材料分離處理的面板玻璃內尚含有機、無機等各式各樣的材料，儘管可經再熔融製程燒結成玻璃，但玻璃表面會產生各種金屬光澤，不僅原面板玻璃製造商不願意使用，一般玻璃再利用廠亦表示這樣的材料無法再用於玻璃製品，所以大部分面板玻璃皆以掩埋方式處理，僅有少部份作為磚、瓦或混凝土等低附加價值磚製品的替代料使用，但再利用價格並不高。開發 LCD 玻璃高值應用途徑，為一項刻不容緩的任務。

二、重金屬廢水處理技術

隨著經濟發展與高科技產業的蓬勃發展，各種工業製程產出大量工業廢水，例如：廣泛被應用於各種生產工具機、電子裝置與家電產品的印刷電路板，為了整合不同功能之半導體積體電路，其製造過程中會使用大量的蝕刻與清洗等濕式製程，因而產生大量重金屬廢水；電鍍廠為了在產品上電鍍各飾金屬，其製程中亦會產生大量含鉛、銅、鉻、鎳、鎳、鋅之重金屬廢水；廢鉛蓄電池處理廠在處理廢鉛蓄電池的過程中會產生高濃度含鉛廢水等。一旦這些工業活動所產生的重金屬廢水未經妥善處理即排放，將嚴重污染河川、溪流、灌溉渠、出海口等水資源，且經由取水灌溉、滲入將造成農地土壤與地下水之污染，而種植於受重金屬污染之農地的作物、水果、蔬菜、稻米等將會吸收土壤與地下水中的重金屬，使得農作物中含有過量重金屬，這些具生

物累積性且不易被分解的重金屬將會經由食物鏈直接危害人體健康，因此重金屬廢水處理技術，是現代工業持續發展不可或缺的重要技術。目前重金屬廢水處理技術中除了化學沉降法外，常見有離子交換法、吸附法與薄膜法，各種重金屬去除技術之均有其優缺點，如表 1 所示。

表 1 各重金屬處理技術之比較

處理技術	原理	材料 / 設備	優缺點
化學沉降法	溶解度積 $>K_{sp}$	OH^- 、 CO_3^{2-}	去除高濃度重金屬 由於 K_{sp} 限制會殘留一定量重金屬 產生大量污泥 設備建置昂貴且佔地面積大 處理成本低
離子交換法	利用離子價數 只對重金屬具有選擇性	陽 (陰) 離子交換樹脂、螯合型離子交換樹脂	僅適用於低濃度重金屬去除 易受廢水中基質干擾影響交換能力 樹脂成本高 技術簡單 可選擇性去除重金屬
吸附法 (活性碳、沸石)	利用凡德瓦爾力、錯合或靜電電荷吸引力 去除重金屬	活性碳、合成沸石、天然沸石、奈米碳管	能去除多種重金屬 去除能力受限於所選擇之吸附基材 需控制 pH~5，才具高吸附能力 成本較低於離子交換樹脂
薄膜法	利用分子篩、半透膜去除重金屬	RO、電透析	僅適用微量重金屬去除 處理製程耗能 設備昂貴、薄膜成本高 技術層面高 薄膜再生使用率低

化學沉降法利用重金屬離子於鹼性環境下 (pH 9~11)，形成碳酸鹽與氫氧化物沉澱，缺點在於需要大量化學試劑反應、沉降性差、沉澱時金屬易蓄積團聚，以及產生大量重金屬污泥造成環境負荷影響。

離子交換法利用具可螯合型特性之樹脂，以鈉離子有效將廢水中重金屬離子交換吸附於樹脂表面。優點為可再生使用，缺點為成本較高，且由於離子交換樹脂於高濃度下使用容易飽和，更換頻率高，故較少被使用於高濃度工業重金屬廢水，大部分應用於後端較低濃度重金屬廢水之處理，但仍容易受溶液中有機物質干擾影響其交換能力。

薄膜法利用微孔中空纖維膜做為支撐體，加入不溶於水的有機溶液組合成支撐性液態薄膜系統，再利用二級胺在酸性環境中進行六價鉻去除，可將廢水中 1,000 mg/L 六價鉻去除至小於 0.5 mg/L。

吸附法藉由吸附劑本身之高比表面積及多孔性特質，使重金屬離子與吸附劑進行物理吸附，可透過凡德瓦爾力鍵結吸附或透過吸附劑化學結構進行靜電吸引。重金屬離子於水相 - 固相吸附劑吸附擴散之行為，溶液中重金屬離子先由擴散通過固體吸附劑邊界層，再擴散至吸附劑表面上，最後會進入孔洞內，因此吸附劑表面積與孔洞數量越多，其吸附能力越強，常見用於金屬吸附研究之吸附劑整理如表 2，相關研究證實吸附法對廢水中重金屬離子具有高吸附效率、高吸附能力、能脫附再生使用，且無二次污泥產生問題。但吸附法目前尚未普遍應用，主因為 (1) 活性碳與沸石吸附劑不耐酸，不易脫附再生使用，使得成本較高；(2) 活性碳與沸石吸附劑本身吸附廢水重金屬能力差，必須經過表面結構改質，才可提升吸附效能。而製備此高吸附量之表面結構改質活性碳與沸石之製程複雜，操作成本高且不易量化。利用 LCD 玻璃作為原料，經由奈米孔洞化改質技術，使材料具有多孔性、高比表面積、離子交換與電荷吸附等功能，應用於廢水中重金屬離子吸附，將可有效解決廢棄面板玻璃掩埋與重金屬環境污染之問題。

表 2 不同吸附劑種類吸附重金屬能力之比較

吸附劑種類	Ni ²⁺ 吸附能力 (mg/g)	Cu ²⁺ 吸附能力 (mg/g)	參考文獻
沸石 (4A)	7.94	40.1	Hui, 2005
活性碳粉末	未註明	16.6	An, 2001
離子交換樹脂 (IRC-748)	未註明	69.9	Lin, 2005
玻璃奈米孔洞吸附材料	163.8	167.4	本研究

三、LCD 玻璃改質奈米孔洞吸附材料

由於 LCD 玻璃的硬度、熔點比普通玻璃高出許多，且微量的有機、無機物質會使玻璃產生各種金屬光澤，所以無法回收重複使用；我們的研究中發現，面板玻璃透過合成玻璃的方式製作，組成幾乎不會改變，且因具有 $B_2O_3-SiO_2$ 為主的成份，成為玻璃奈米孔洞材料的合適原料；環保署與工研院共同投入研發，以專利技術（中華民國專利號 I577443- 用於移除廢水中有害物質之無機材料及製造方法以及廢水處理方法）將面板玻璃轉化為可吸附重金屬離子的吸附材料，改質後 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料如圖 2。建立面板玻璃奈米孔洞吸附材料量產設備，其操作單元包括原料固相混合、持溫奈米孔洞化改質、淬冷、分篩等程序，其中奈米孔洞化改質為關鍵步驟，經放大生產設計，奈米孔洞化改質生產設備目前單日產量可達 200 kg。LCD 玻璃原料及改質後之奈米孔洞材料 SEM 照片如圖 3，孔洞化改質後，產生無數奈米級的孔洞，利用 BET 設備進行材料孔洞特性分析如表 3，面板玻璃原比表面積僅 $0.61 \text{ m}^2/\text{g}$ ，孔洞化改質後，可達 $150 \text{ m}^2/\text{g}$ 以上，孔洞體積達 $0.52 \text{ cm}^3/\text{g}$ 以上。



圖 2 LCD 玻璃改質成玻璃奈米孔洞吸附材料，(左) 萃取後廢 LCD 玻璃；(右) LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料

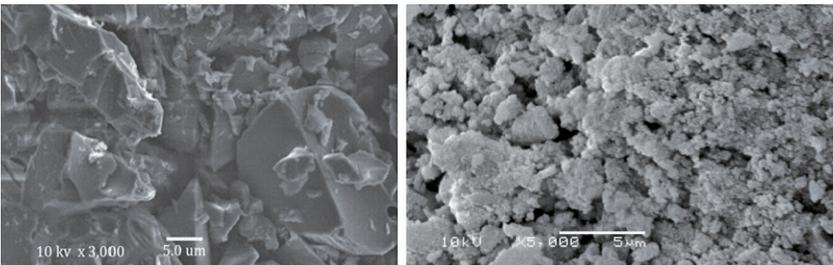


圖 3 SEM 照片 (左) LCD 玻璃原料；(右) LCD 玻璃改質奈米孔洞材料

表 3 LCD 玻璃原料及改質後之奈米孔洞材料 BET 分析

樣品	比表面積 (m ² /g)	孔洞體積 (cm ³ /g)	孔徑大小 (nm)
LCD 玻璃原料	0.61	-	-
LCD 玻璃改質奈米孔洞材料	174.6	0.52	9.9

四、電鍍產業水資源循環之應用案例

電鍍是金屬製程中關鍵且重要的一環，它不僅提供金屬製品防護力，更可美化其外觀提升產品的品質與價值。電鍍製程因應產品需求會產生多種重金屬廢水，例如含銅廢水、含鉻廢水、含鎳廢水、含鋅廢水等。而設置於彰濱工業區的電鍍業者可依規定將製程中的電鍍廢水排入工業區內污水處理廠。污水處理廠主要以廢水的前處理方法將廢水區分為氰系、鉻系及酸鹼系等 3 大類，而非依照金屬種類分類，且氰系及鉻系廢水完成前處理後，再匯入酸鹼系廢水中，故廢水中混合多種重金屬難以分離再利用，僅能以化學沉降法進行處理。以化學沉降法處理重金屬廢水，不僅需要添加大量化學藥劑導致處理成本偏高，更會產生難以處理的重金屬污泥。因此，若能在電鍍業的源頭排放端將僅含單一金屬的重金屬廢水先進行金屬吸附，不僅吸附後的金屬可脫附再利用，再者除去重金屬後的水可重新導入製程再次使用，如圖 4 所示。脫附流程除了可將玻璃奈米孔洞材料之吸附效能再生，脫附液中之金屬透過電解沉積回收，脫附液亦可重複再生使用。

利用 LCD 玻璃改質而成的 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料對銅、鉻、鋅、鎳等重金屬離子具備良好的吸附能力，每公斤吸附材料可吸附 100 公克以上的重金屬，吸附後則呈現不同顏色樣貌，如圖 5。吸附後的材料可脫附再生重複使用，非常適合應用於電鍍製程後單一重金屬廢水的吸附處理，故與彰濱工業區內的電鍍業者合作，於該工廠內設置噸級重金屬廢水吸附處理系統，將其直接連結至電鍍製程產線的製程水出口並搭配 LCD 玻璃奈米孔洞吸附材料進行單一重金屬廢水吸附處理的實廠驗證。

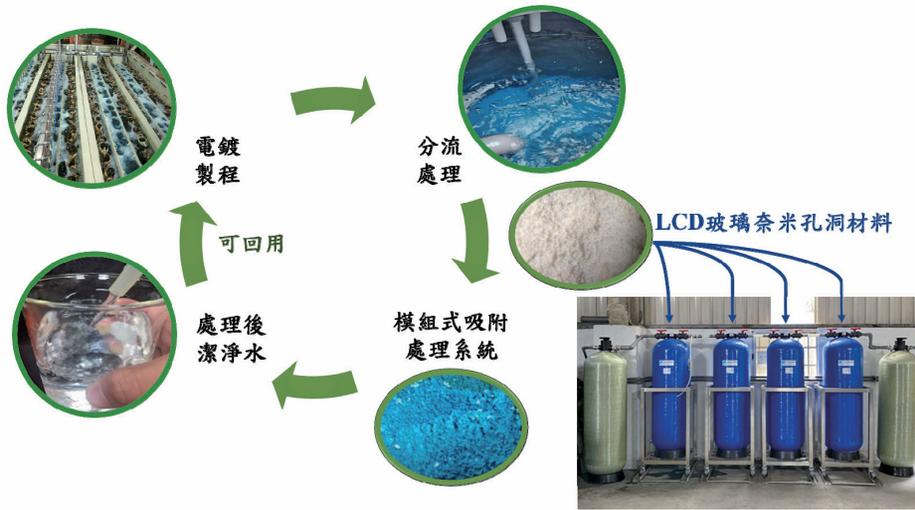


圖 4 LCD 玻璃奈米孔洞材料應用於電鍍製程水循環



圖 5 LCD 玻璃奈米孔洞材料
(左 1) 及吸附不同重金屬後的樣貌 (左 2 開始依序為吸附銅、鎳、鉻金屬)

為了快速的安裝與應用吸附材料，建立模組化吸附管柱，將吸附管柱 (4 組，每組填充 100 kg 吸附材料) 搭配活性碳管柱和砂濾床管柱組成噸級模組式吸附系統，以重金屬含量約 20 mg/L 的電鍍製程水估算，此系統每分鐘入水流量可達 30 L，且處理量可達 2,000 m³ 以上。吸附模組整體外觀如圖 6 所示。



圖 6 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附處理系統

實廠驗證部分，將吸附系統安裝於彰濱工業區表面處理專區的電鍍廠內，分別將焦磷酸銅、硫酸鎳、氰化銅及鉻酸等電鍍製程水，經過分流後導入各吸附系統進行應用測試。以硫酸鎳製程清洗水為例，安裝方式如圖 7，該電鍍業者廠內的含鎳廢水 pH 值約 7~8，廢水中鎳的濃度約 20~60 mg/L，隨著每日電鍍廠的製程與鍍件量而異，而吸附後的鎳離子濃度則可維持在 1 mg/L 以下，符合現場再生水回用的標準。根據長期測試的結果來看，大約運作 3 個月才需要更換 1 座吸附管柱，新的管柱安裝於最末端作為保護管柱，其餘保護管柱依序往前移，第一支保護管柱則成為吸附管柱，經過吸附處理後的水質導電度約在 0.6 mS/cm，如表 4，故合作廠商將水回用於鍍件的前處理及最終端產品清洗製程，運作累計再生回用水達 2,000 m³ 以上。彰濱工業區電鍍專區每日產出 2,500 至 3,000 m³ 重金屬廢水，目前以化學沉降法處理，每年產生約 1,000 公噸的重金屬污泥。以實廠驗證結果估算，本項技術若應用於彰濱工業區電鍍製程水回收，每年可減少 300 公噸的重金屬污泥，並將 300,000 m³ 製程用水循環使用。

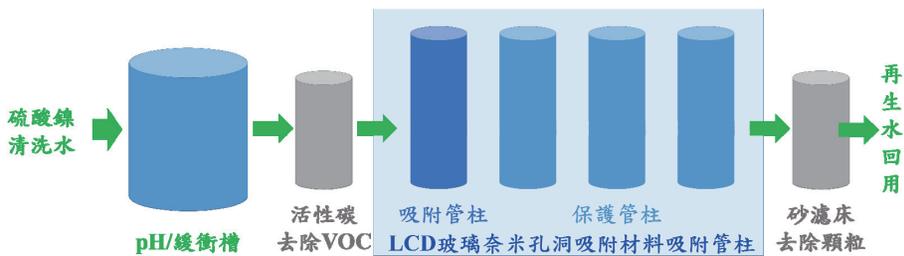


圖 7 電鍍廠以 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附系統處理硫酸鎳製程清洗水

表 4 電鍍廠硫酸鎳製程清洗水以 LCD 玻璃奈米孔洞材料吸附系統處理前後之水質分析

項目	硫酸鎳清洗水	再生回用水
Ni ²⁺	40-60 mg/L	<1 mg/L
SO ₄ ²⁻	40-60 mg/L	40-60 mg/L
Na ⁺	40 mg/L	110 mg/L
COD	10 mg/L	4 mg/L
pH	6-8	8-10
電導度	0.62 mS/cm	0.60 mS/cm

五、結論

臺灣每年產生近 8,000 公噸的廢棄液晶面板，這些廢棄物如果透過掩埋，將可能造成環境危害。環保署與工研院共同投入研發，剖析液晶面板結構，將廢棄的液晶面板中的液晶取出、純化後再製成液晶面板產品，這項液晶回收的技術也技轉給國內的面板廠及國外的廢棄物處理廠使用。而剩下的 LCD 玻璃，國內現有的技術，至多只能經由破碎後添加至水泥、磚瓦等建材，經濟效益並不高。透過特殊的改質技術，在 LCD 玻璃上創造無數個奈米大小，又能吸附重金屬的孔洞，將棘手的液晶面板玻璃，轉變為玻璃奈米孔洞吸附材料，用於處理電鍍製程中產生的重金屬廢水。這整套技術不僅將廢液晶面板中的高值材料循環使用，還能進一步處理重金屬廢水問題，減少重金屬污泥的二次污染並讓水資源能夠重複循環使用。特別是近年來極端氣候在全球不斷發生，2021 年臺灣遭遇 56 年來最嚴重的乾旱，水資源的循環使用在此時此刻顯得更加重要。期望這套技術能廣泛應用於面板、電鍍及廢棄物處理等產業，建立更好的資源循環利用模式，共同創造循環經濟的新價值。

六、參考文獻

An H.K., Park B.Y., and Kim D.S. (2001), Crab shell for the removal of heavy metals from aqueous solution, *Water Research*, 35(15): p 3551-3556.

ALR Innovations(2021), 公司網站, <http://www.alr.ie>。

BluBox(2021), 公司網站, <http://www.blubox.ch>。

DIGITIMES Research(2021), 全球產業數據, <https://www.digitimes.com.tw/tech/rpt>。

Electrical Waste Recycling Group(2021), 公司網站, <http://www.electricalwaste.com>。

Hui K.S., Chao C.Y.H., and Kot S.C. (2005), Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3): p 89-101.

Lin L.C., and Juang R.S. (2005), Ion-exchange equilibria of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with Chelex 100 and Amberlite IRC 748 resins, *Chemical Engineering Journal*, 112(1-3): p 211-218.

MRT System International AB(2021), 公司網站, <http://www.mrtsystem.com>。

Su H., Shi S., Zhu M., Crump D., Letcher R.J., Giesy J.P., and Su G. (2019), Persistent, bioaccumulative, and toxic properties of liquid crystal monomers and their detection in indoor residential dust, *Proc Natl Acad Sci U S A*. Dec 9,116(52): p 26450-26458.

廢(污)水處理類

含氮廢污水綠色處理系統建立

蔡明瀚*、簡偉倫**、陳國源**、周珊珊***、黃思蕓****、
趙淑如***** 黃志彬*****、張莉珣*****、顏旭明*****

摘 要

隨著全球科技業及化工石化業高度發展，因使用大量含氮化學藥品，致使氨氮排放總量大增。環保署自民國 100 年起陸續推動氨氮放流濃度管制，逐漸將氨氮納入放流水管制標準，包括科學工業園區專用污水下水道系統、晶圓製造及半導體製造業、光電材料及元件製造業、石油化學業、化工業、石油化學專業區專用污水下水道系統等。並自民國 110 年 1 月 1 日起，針對金屬表面處理業、電鍍業等特定事業及其他工業區專用污水下水道系統和公共污水下水道系統新增氨氮管制項目，期望能減少水體氨氮排放總量，減緩對生態環境的衝擊影響。現有的技術針對低濃度含氮廢污水多以生物處理方式為主，高濃度則係以氣提方式進行回收；然中濃度含氮廢水在處理上有廢液清運處理等其他問題產生。另外，化工業及金屬表面處理業等含有中高濃度硝酸鹽氮廢水的產業，大多面臨既有單元脫硝功能較差與可擴充空間不足等問題，也亟需新的解決方案。

因此本研究以目前主要有技術缺口的中濃度氨氮與硝酸鹽氮廢污水為標的，研發 3 項具低污泥、低耗能、低成本及低占地空間的含氮廢污水綠色處理技術：「氣提結合觸媒氧化中濃度氨氮廢水技術」、「觸媒還原中高濃度硝酸鹽氮廢水技術」及「聚乙烯醇 (PVA) 生物球處理中低濃度硝酸鹽氮廢水技術」，希望能藉此快速提升國內含

氮廢水的處理技術。在中濃度氨氮廢水處理部分，團隊結合氣提法及催化氧化型觸媒 (catalytic oxidative activated carbon, COAC) 來處理中濃度氨氮廢水 (200~5,000 mg/L)。結果顯示，氣提觸媒氧化方式可以達到 94% 以上的氨氮去除率，且無二次污染產生，水中殘餘的氨氮濃度可銜接生物系統更為經濟。在硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 處理部分，選用脫硝觸媒 (denitrification catalyst, DNC) 搭配還原劑來使用，如此可達到極高的氮氣選擇性。另外，也可使用廢氨水來作為還原劑，兼具可同步處理硝酸鹽氮廢水及氨氮廢水的效益。PVA 生物球技術應用在中低濃度硝酸鹽氮廢水 (<500 mg/L)，在體積負荷為 2.5 kg NO₃-N/m³-d 時，其出流水硝酸鹽氮濃度均能維持在 <30 mg/L，可達到法規放流標準；相較於傳統生物處理生物球可達到 80% 污泥減量。

【關鍵字】 硝酸鹽氮、氨氮、觸媒、氣提、生物球、脫硝

* 國立陽明交通大學 環境工程研究所	博士候選人
** 國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	工程師
*** 國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心	執行長
**** 中華大學 工業產品設計學系	特聘教授
***** 工業技術研究院 材料與化工研究所	研究員
***** 國立陽明交通大學 環境工程研究所	終身講座教授
***** 行政院環境保護署 水質保護處	簡任技正
***** 行政院環境保護署 水質保護處	處長

前 言

含氮污染物若進入河川，將造成藻類大量繁殖引起水體優養化。工業廢水氨氮排放量占總排放量 29.2%，其中含科學園區在內的高科技及石化工業產業，因使用大量含氮化學藥品，致使台灣重點產業的氨氮排放總量，約占全國工業總排放量之 70% (朱等，2012 年)。環保署自民國 100 年起陸續推動氨氮放流濃度管制，逐漸將氨氮納入放流水管制標準，包括科學工業園區專用污水下水道系統、晶圓製造及半導體製造業、光電材料及元件製造業、石油化學業、化工業、石油化學專業區專用污水下水道系統等。並自民國 110 年 1 月 1 日起，針對金屬表面處理業、電鍍業等特定事業及其他工業區專用污水下水道系統和公共污水下水道系統新增氨氮管制項目，期望能減少水體氨氮排放總量，減緩對生態環境的衝擊影響。

低濃度氨氮廢水多用生物處理方式，高濃度廢水可以氣提方式回收成氨水，環保署於民國 110 年執行的「廢污水新興處理技術示範驗證計畫」針對金屬表面處理業和電鍍業，成功研發氨氮氣提及結晶氯化銨之循環經濟創新技術 (吳等，2021 年)；而中濃度氨氮廢水 (數百 ~ 數千 mg/L) 處理則是氣提後以硫酸洗滌成硫酸銨，硫酸銨需進一步純化才能回收，然而不純的硫酸銨會產生廢液清運等後續問題。因此，中濃度氨氮廢水仍亟待研發更友善環境的綠色新興處理技術。由於氨氮放流水管制標準為新增修之法案，對於既設工廠而言，常面臨用地不足，無法增設或擴建氨氮廢水處理單元之問題，因此處理程序選擇上需考量用地較小之方案或修改既有程序上來提昇去除氨氮之功能。

此外，硝酸鹽氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 也是地表水資源中常見的污染物， $\text{NO}_3\text{-N}$ 除了會對環境造成影響外，也會透過生物累積或直接飲用等方式，影響人體的健康。經濟部工業局更於 2019 年起於工業區下水道使用管理規章中，將 $\text{NO}_3\text{-N}$ 納入收費標準。某些廢水中含有中高濃度硝酸鹽氮的產業如化工業、金屬表面處理業及電鍍業等，大多面臨既有單元脫硝功能較差與可擴充空間不足等問題，若使用傳統的生物脫硝來處理 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，需較大的設備面積，對於空間有限的工廠並不合適。為解決氨氮、硝酸鹽氮等含氮廢污水的污染問題，實有必要發展含氮廢污水綠色處理技術來降低含氮污染物的排放濃度。

本研究以目前主要有技術缺口的中濃度氨氮與硝酸鹽氮廢污水為標的，研發具低污泥、低耗能、低成本及低占地空間的含氮廢污水綠色處理技術。

二、含氮廢水處理技術

本研究目的為研發氨氮與硝酸鹽氮廢污水綠色處理技術，中濃度氨氮廢水 (200~5,000 mg/L)、中高濃度硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 與中低濃度硝酸鹽氮廢水 (50~500 mg/L) 分別以氣提/觸媒氧化、觸媒還原與生物球脫硝技術進行處理 (圖 1)。

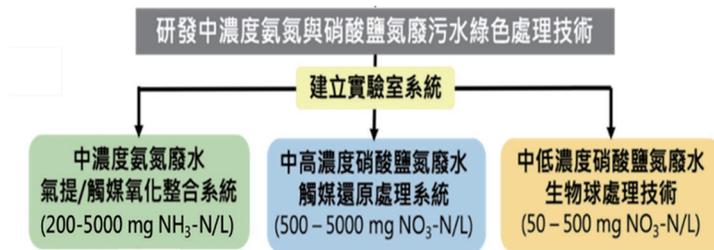


圖 1 研究架構

現今實務上對於高濃度氨氮去除技術主要都需要經過兩階段處理 (圖 2)。首先將水中氨氮在高溫、高 pH 條件下以氣提或脫氣膜將氨吹出，第二階段再藉由冷凝製成液氨、吸收形成硫酸銨進行回收或將氨氣經過熱處理氧化後形成氮氣來把氨氮去除。然而，以吸收的方式通常需要額外的處理成本；利用熱處理則依據操作溫度的高低來決定整體操作成本。(丁等，2020 年、張等，2016 年、傅等，2016 年)

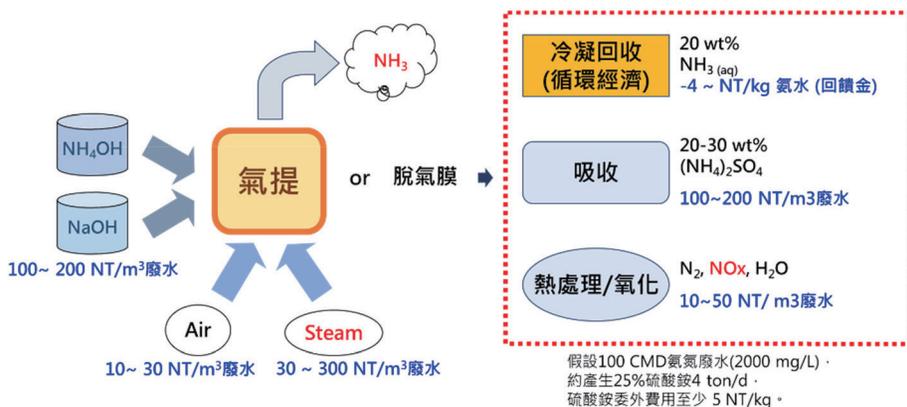


圖 2 氨氮廢水去除技術總論

本研究所選用的觸媒為以椰殼活性炭為載體的多金屬氧化物觸媒 (圖 3)，其主要可分為催化氧化型觸媒 (catalytic oxidative activated carbon, COAC) 及脫硝觸媒 (denitrification catalyst, DNC) 2 大類。活性炭上其中 1 種貴金屬—鈦 (Ru) 具有多種氧化態，其價數在不同氧化條件下可從 +3 ~ +8，使得此觸媒兼具良好的活性炭吸附及催化氧化與還原特性 (周等，2020 年)。

含氮廢污水綠色處理技術-新一代觸媒介紹

• 可循環再生型的催化氧化型活性炭技術

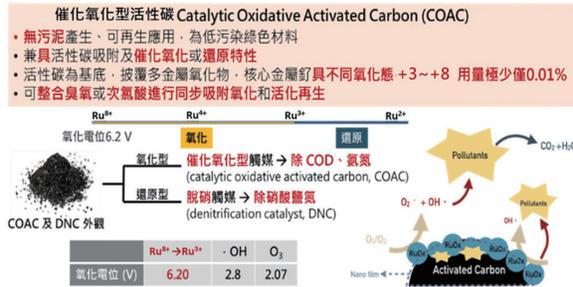
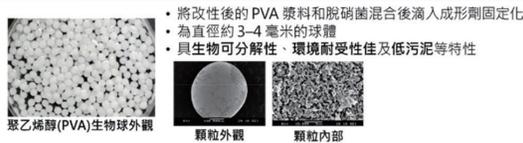


圖 3 可循環再生型觸媒

生物球為本研究團隊自行開發的技術 (圖 4)，適用於處理中低濃度硝酸鹽氮 (50~500 mg/L) 廢水。生物球是將改性後的聚乙炔醇 (PVA) 漿料和脫硝菌混合後滴入成形劑固定化形成直徑約 3~4 mm 的球體，再加入硬化劑使其穩定。PVA 生物球孔隙約 1~10 μm，脫硝菌被包埋其中，故對環境有較高的耐受性如耐鹽度、耐高溫、耐酸鹼及耐藻毒等。此包埋方式可保有更多的生物量，可縮減反應槽體積，提供更大的處理負荷 (黃思尊，2020 年)。

含氮污水綠色處理技術-PVA包埋菌生物球



包埋菌生物球特性	說明
高生物密度	較無傳統生物載體因細菌附著在其外表導致堵塞孔隙之情形發生
生物可分解性	生物球是以聚乙炔醇和水製成，在常溫或堆肥的狀態下可分解
親水性	PVA 具親水性，不會成為海洋微粒
污泥減量	污泥減量至少 50%，甚至可達 80-90%
啟動快速	啟動時間僅 3-5 天，無滯滯期
操作範圍廣	pH 3-10、0-3.5% 鹽度
維護簡單	表面不會有污泥附著，故不需定期清洗

圖 4 PVA 生物球技術

2.1 氣提 / 觸媒氧化系統

氣提 / 觸媒氧化處理法主要係評估處理 1,000~5,000 mg/L 氨氮濃度廢水之適用性。第一階段氣提法係將氨氮廢水調整至鹼性環境，並加熱至適當操作溫度及通入空氣使氨氣吹出。第二階段為觸媒催化氧化法，氣提反應完之氨氣經由冷凝管去除多餘水分，水分除去後之氨氣再與臭氧產生機產生的臭氧 (O₃) 合流，接著流入觸媒氧化固定床進行催化氧化反應，並同時控制反應溫度 (40~100°C) 及觸媒含水率 (30~90%)，以達到觸媒催化氧化反應之最佳操作條件。

2.2 觸媒還原系統

觸媒還原技術乃利用脫硝型觸媒 (DNC) 搭配還原劑 (硫代硫酸鈉) 於不鏽鋼密閉反應釜中進行還原反應。置入中高濃度硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 於密閉反應釜，再使用硫酸及氫氧化鈉調整水樣 pH 值，依序添加適量觸媒及還原劑，安裝上蓋進行密閉反應，並設定反應溫度並開啟攪拌器進行反應。

2.3 生物球脫硝系統

本實驗以生物球包 CC 化工廠厭氧 / 好氧脫硝系統濃縮污泥 (簡稱 CC 菌)，對硝酸鹽氮處理的效能測試。微生物馴養操作因子參照以往脫硝程序經驗，加入基質 (C/N=4)，起始 pH 調整至 6.0±1.0，記錄 pH、ORP 及硝酸鹽氮濃度等數值變化，觀察其脫硝效能，待穩定後即將生物球置入槽體進行試驗。試驗加入定量 10% 生物球 (200 mL) 於 2L 槽體，試驗體積負荷為 1.3~2.7 kg NO₃-N/m³-d，維持約 4.8 h 水力停留時間後，當處理效率穩後提升其負荷。

三、含氮廢污水綠色處理系統開發

3.1 氣提 / 觸媒氧化氮氮處理系統

現有主流氮氮處理技術依據氮氮濃度由低至高分別為生物處理、氣提吸收與汽提回收 (圖 5)。其中，生物處理具有佔地空間大、反應慢等劣勢，而氣提吸收則會有衍生副產物需額外處理的問題。因此，本研究提出氣提 / 觸媒氧化技術期望以更高效率且無二次污染產生的方式去除氮氮。

氣提 + 觸媒氧化技術的氮氮廢水應用標的

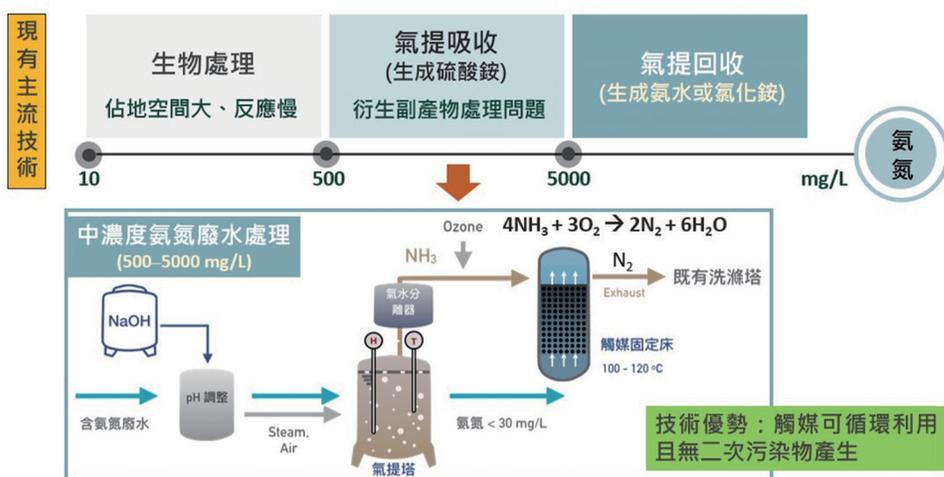


圖 5 氣提 / 觸媒氧化技術應用標的

3.1.1 觸媒含水率及觸媒塔溫度影響

中高濃度氮氮 (3,500 mg/L) 經氣提後，將吹出之氮氮通往觸媒氧化塔進行氧化。結果顯示，觸媒含水率越高，氮氮去除率越高 (圖 6a)。當觸媒含水率固定在 90% 下，氮氮去除率隨著觸媒塔溫度越高而提高 (圖 6b)。當觸媒塔溫度為 80°C 時，氮氮去除率可達近 94%，且吸收瓶中剩餘氮氮濃度可降低至 177 mg/L，此濃度已可銜接生物系統進行後續處理。

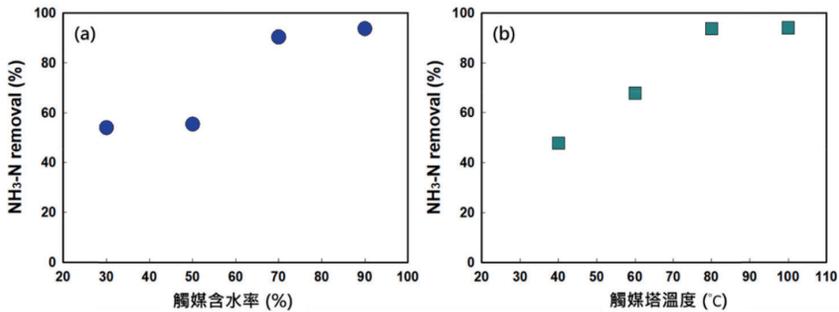


圖 6 (a) 觸媒含水率；(b) 觸媒塔溫度對氨氮去除率影響

3.1.2 模廠操作參數與實驗結果

某電腦周邊設備業金屬表面處理原水氨氮 2,000~4,000 mg/L，氣提 / 觸媒氧化技術模廠 (圖 7) 操作參數如表 1 所列，測試結果顯示，於觸媒含水率 > 95%，氣提塔溫度 90°C 搭配觸媒氧化塔 100°C 時，氣提塔出水氨氮平均濃度為 303~420 mg/L，觸媒氧化氨氮去除率為 94.8~96.5% (表 2)。

表 1 模廠操作參數

處理程序	操作參數	
氣提法	pH值	10.5~12.0
	空壓流量 (Nm ³ /h)	2~5
	氣液比	50~500
	氣提溫度 (°C)	80~100
	停留時間 (min)	10~90
觸媒氧化法	反應溫度 (°C)	95~120
	相對濕度 (%) (或觸媒含水率)	70~80
	臭氧流量 (m ³ /h)	2~5
	空間流速 (h ⁻¹)	2500~5000
	進氣方向	由上往下

表 2 模廠測試結果

控制參數	操作條件與實驗結果	
臭氧流量(m ³ /h)	4	4
空壓流量(Nm ³ /h)	3	3
原水pH	12.01	12.48
平均氣提前氨氮(mg/L)	2,005	3,696
平均氣提後氨氮(mg/L)	303	420
平均氨氮去除率(%)	94.8	96.5
空塔流速(h ⁻¹)	2,350	2,350



圖 7 氣提 / 觸媒氧化整合系統

3.2 觸媒還原硝酸鹽氮系統

目前低濃度硝酸鹽氮廢水主要以生物處理為大宗，高濃度以酸回收樹脂進行處理，然而對於中濃度硝酸鹽氮廢水處理仍缺乏合適技術。因此本研究以觸媒還原技術期望提供中濃度硝酸鹽氮廢水處理之解方(圖8)。觸媒還原技術除了不會產生二次污染外，藉由氨水的添加不僅可以幫助還原硝酸鹽氮且可達到廢棄氨水資源化的效用。

觸媒還原技術的硝酸鹽氮廢水應用標的

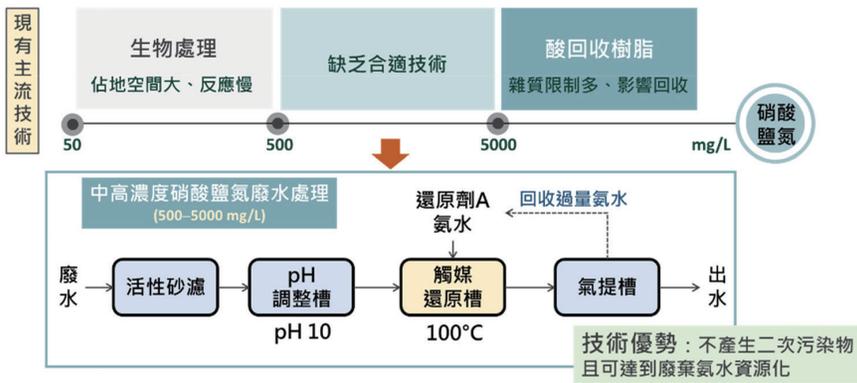


圖 8 觸媒還原技術的硝酸鹽氮廢水應用標的

3.2.1 觸媒與還原劑添加量的影響

圖9為DNC添加量對1,000 mg/L硝酸鹽氮去除率變化，結果顯示未添加DNC時，硝酸鹽氮去除率雖然可以達到約60%，但反應後有96 mg/L NH₃-N生成；有添加DNC反應的實驗組，NH₃-N的生成量則趨近於零。當DNC添加量低於10 mL，其去除率落在70%以下；DNC添加量大於15 mL以上，NO₃-N去除率可達81%。因此，DNC的添加量須為反應總體積的9% (即添加量15 mL)以上，且添加Na₂S₂O₃進行硝酸鹽氮的還原反應，對於硝酸鹽氮去除率與氨氣選擇性皆有正面的效果。還原劑添加量對硝酸鹽氮去除具顯著影響，當NO₃-N : Na₂S₂O₃為1:5增加至1:10，硝酸鹽氮的去除率會由56%增加至80%，另以較便宜的還原粉取代部分Na₂S₂O₃的添加 (即NO₃-N : Na₂S₂O₃ : 還原粉=1:1:5)，也和NO₃-N : Na₂S₂O₃=1 : 5的去除率相當。

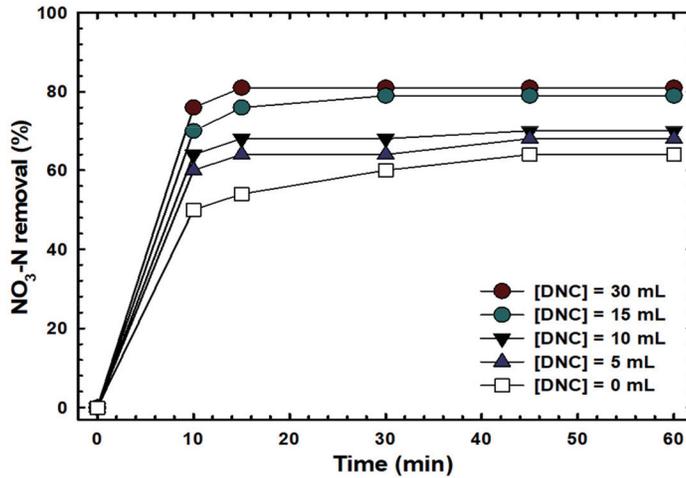


圖 9 DNC 與 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 在不同 DNC 添加量下的硝酸鹽氮去除率變化
(反應條件： $\text{NO}_3\text{-N} = 1000 \text{ mg/L}$ 、 $\text{pH} 9$ 、 25°C 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 10000 \text{ mg/L}$)

3.2.2 加藥模式經濟化：兩階段加藥程序

硝酸鹽氮廢水依據圖 10 之流程進行兩階段加藥測試，分別進行 2 種濃度的硝酸鹽氮廢水處理 (圖 11)，當 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 $3,000 \text{ mg/L}$ ，第一段添加之氨水為 $16,000 \text{ mg/L}$ ，第二段添加硫代硫酸鈉劑量分別以 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 為 1:2 及 1:4 (w/w)。結果顯示結合兩階段處理後，2 種加藥比例的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 最終對硝酸鹽氮去除率皆可達約 60% (圖 11a)。先前實驗曾測試 $\text{NO}_3\text{-N} : \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 在 1:10 的加藥量下亦可達到 60% 去除。說明脫硝觸媒搭配氨水及硫代硫酸鈉做分段添加的模式，有助於減少硫代硫酸鈉之使用量。當 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 $1,000 \text{ mg/L}$ ，第一段添加氨水，第二段添加硫代硫酸鈉劑量分別為 $3,000$ 及 $6,000 \text{ mg/L}$ 時，可分別達到 42.1 與 60.0% 去除率 (圖 11b)。

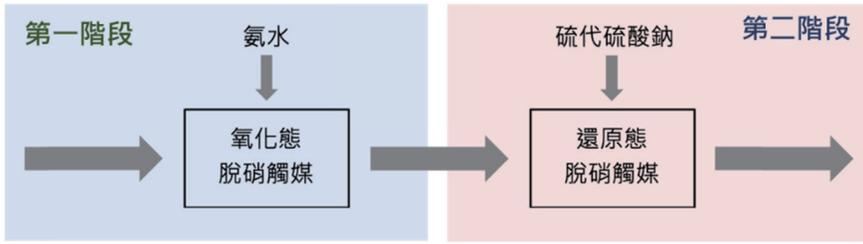


圖 10 硝酸鹽氮廢水 2 階段加藥模式示意

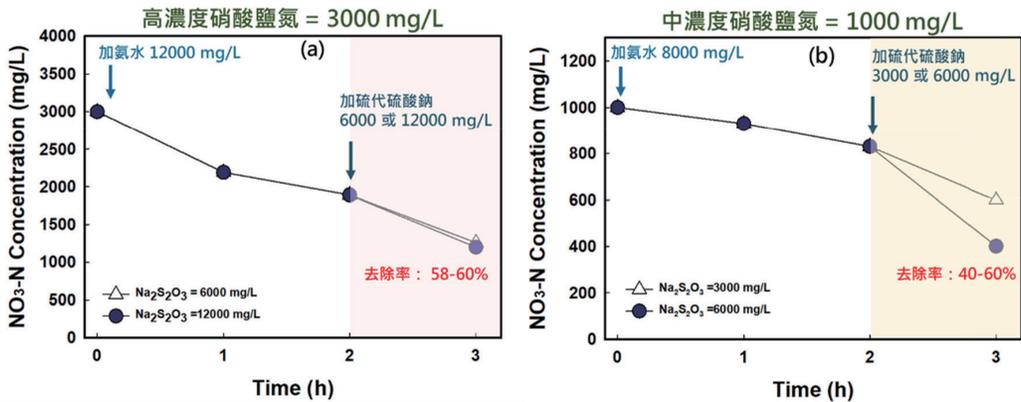


圖 11 硫代硫酸鈉加藥濃度對兩階段加藥模式去除硝酸鹽氮的效能影響
 (a) $\text{NO}_3\text{-N} = 3,000 \text{ mg/L}$; (b) $\text{NO}_3\text{-N} = 1,000 \text{ mg/L}$ (反應溫度：120 °C)

3.2.3 模廠操作參數與實驗結果

本團隊於某金屬表面業進行觸媒還原硝酸鹽氮實廠廢水模廠測試 (圖 12)，該廠廢水 10 CMD，硝酸鹽氮濃度約 5,000 mg/L，經過既設的機械蒸氣再壓縮系統 (Mechanical Vapor Recompression, MVR) 處理後會產生 500 kg/day 鹽類污泥，導致整理處理成本相當高。本團隊測試以兩階段處理方式進行 (圖 13)，第一階段將氨水 (50,000 mg/L) 添加於原硝酸鹽氮 (4,763 mg/L) 廢水，此時可去除 30.2% 硝酸鹽氮。第二階段添加硫代硫酸鈉 (25,000 mg/L) 後可使兩階段硝酸鹽氮去除率達 58.7%，剩餘硝酸鹽氮濃度約 1,970 mg/L。測試結果說明，利用氨水取代部分硫代硫酸鈉可有效去除高濃度硝酸鹽氮，預估每噸水之操作成本可較原有 MVR 減少 50% 以上。

觸媒還原模廠建置

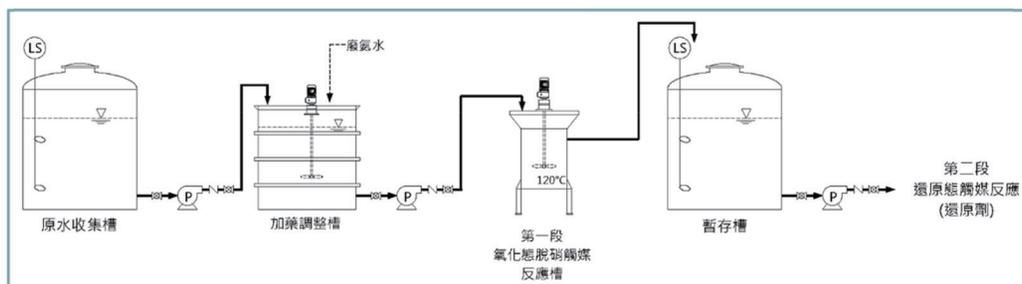
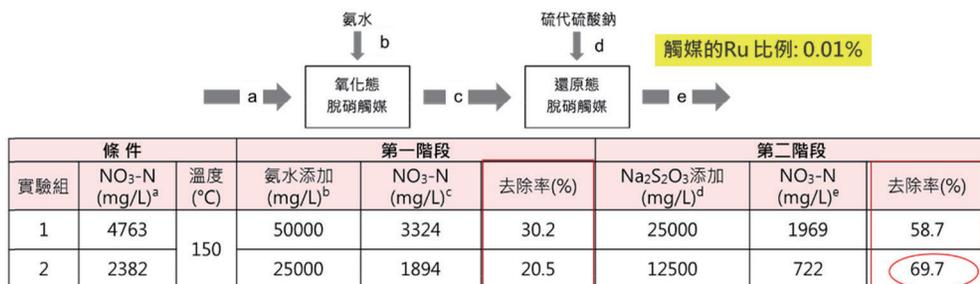


圖 12 觸媒還原模廠



- 利用氨水取代部分硫代硫酸鈉可有效去除高、中濃度 NO₃-N
- 將觸媒的 Ru 比例提升至 0.02%，兩階段法可提升 NO₃-N 去除率至約 84%

增加第 3 階段另添加還原粉可再提升 NO₃-N 去除效率至約 82%

圖 13 某 T 廠金屬基本工業廢水測試

3.3 PVA 生物球脫硝處理系統

3.3.1 碳氮比與初始硝酸鹽氮濃度影響

本實驗以生物球包埋某化工廠厭氧 / 好氧脫硝系統濃縮污泥 (簡稱 CC 菌) ，進行對硝酸鹽氮處理的效能測試。圖 14 為 CC 菌在不同 C/N 比與初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 ($\text{NO}_3\text{-N} = 100$ 和 300 mg/L) 下經脫硝 12 小時的硝酸鹽氮濃度變化。初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度為 100 mg/L 時，當 $\text{C/N} = 3$ ，經 4 小時反應後， $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度由 95 mg/L 降低至 56 mg/L ，經 8 小時後才可達到放流標準 (圖 14a)。當 $\text{C/N} = 4$ 時，反應僅需 4 小時即可將 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度降至 20 mg/L ，再延長反應至第 8 小時後幾乎完全去除。初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度提高為 300 mg/L 時 (圖 14b)， $\text{NO}_3\text{-N}$ 經 8 小時反應後，仍殘留約 100 mg/L ，經 12 小時反應可完全去除。綜上所述， $\text{C/N} = 4$ 為最理想的參數， 100 和 300 mg/L 之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分別可在第 4 與 12 小時內完全去除。

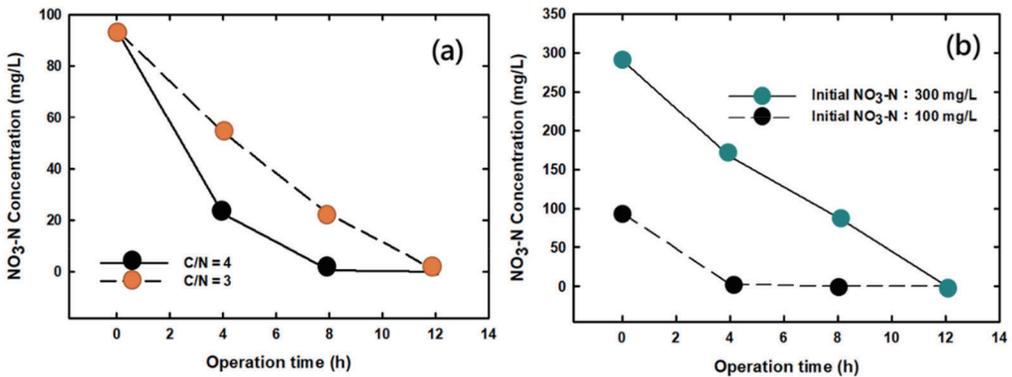


圖 14 CC 菌生物球脫硝試驗 (a) 不同 C/N；(b) 不同初始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

3.3.2 體積負荷影響

圖 15 為 CC 菌於各體積負荷下硝酸鹽氮進出流濃度變化，進流合成廢水的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度設定為 $100\sim 540 \text{ mg/L}$ ，結果顯示 CC 菌的生物球槽體經長時間反應，在體積負荷為 $2.5 \text{ kg NO}_3\text{-N/m}^3\text{-d}$ 以下時，其出流水硝酸鹽氮濃度能維持在 $< 30 \text{ mg/L}$ ，可達到放流水標準 (低於 50 mg/L)。

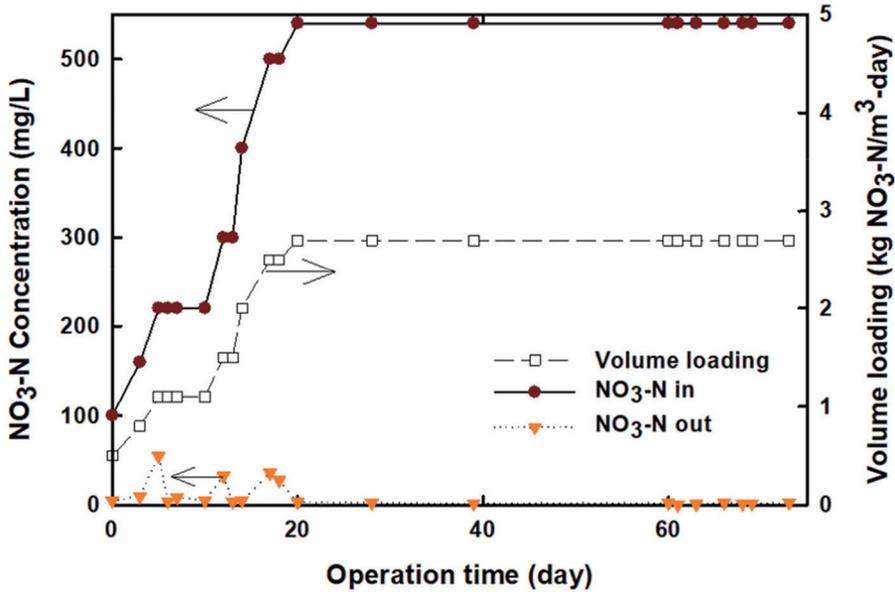


圖 15 體積負荷對 CC 菌生物球長期脫硝影響

3.3.3 生物球脫硝污泥產生量

為判斷脫硝生物球槽體之污泥產生量，以式 1、式 2 計算污泥產率。

$$\Delta SS = SS_{out} - SS_{in} + SS_{accumulate} \dots \dots \dots (1)$$

$$Sludge\ yield = \Delta SS / \Delta NO_3N \dots \dots \dots (2)$$

污泥產量實驗設計 CC 菌生物球連續流槽體 (2 L)，CC 菌槽在長期馴養下，其脫硝狀態穩定，體積負荷為 2.7 kg NO₃-N/m³-d 時 (流量 =10 L/d)，出流皆可達放流水標準。污泥產率實驗歷程共 5 天，每天記錄硝酸鹽氮變化，進流水體幾乎無 SS 故忽略；出流之 SS 為連續流出之水體，取適量過濾之。在第 1 天及第 5 天將槽體內均勻混合後取出含 SS 水樣以玻璃纖維濾紙過濾過濾，計算污泥產率。

實驗結果顯示，當體積負荷為 2.7 kg NO₃-N /m³-d 時，CC 菌槽體污泥產率僅為 0.16 g SS/g NO₃-N，相較於傳統懸浮性脫硝菌污泥產率理論值 0.8 g SS/g NO₃-N，CC 菌槽體污泥減量可達 80%。生物球由於顆粒內主要為休止細胞因此不會產生大量污泥。

3.3.4 某金屬表面處理業生物球脫硝實績

某金屬表面處理業硝酸錫廢液處理後清洗廢水中含有高濃度硝酸鹽氮約 4,000 mg/L，經生物球脫硝後可使硝酸鹽氮濃度降低至 100~300 mg/L (圖 16)。此實績顯示生物球除了能夠處理低濃度硝酸鹽氮，即便對於高濃度硝酸鹽氮亦可有效將其去除。生物球脫硝系統模組如圖 17 所示。

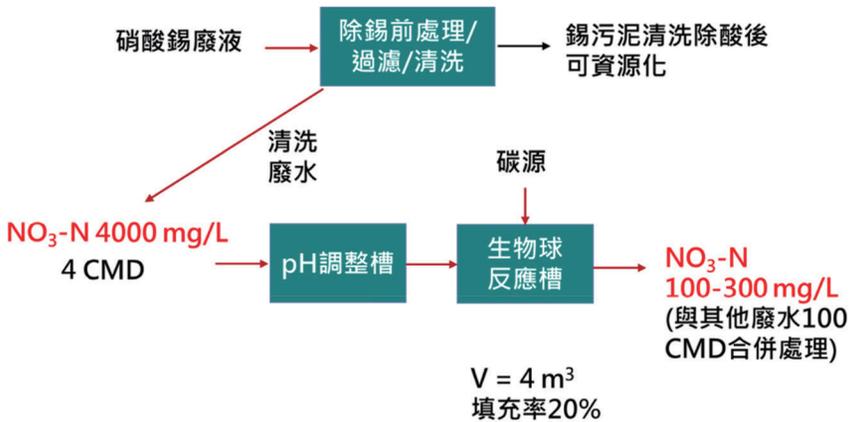


圖 16 某金屬表面處理業硝酸鹽氮廢水處理流程



圖 17 生物球脫硝系統模組

四、結論

對於中濃度氨氮 (200~5,000 mg/L) 廢水，本團隊以氣提法搭配催化氧化型觸媒整合進行處理。結果顯示，當觸媒含水率越高 (70~90%)、氧化塔溫度 80°C 以上時，可以達到 94% 以上的氨氮去除率，且水中殘餘的氨氮濃度可銜接生物系統更為經濟。

對於中高濃度硝酸鹽氮廢水 (500~5,000 mg/L) 處理，選用脫硝觸媒 DNC 搭配還原劑可以達到 80% 的硝酸鹽氮去除，且不太容易產生氨氮。另外，以廢氨水來取代部分硫代硫酸鈉進行兩階段加藥模式下，亦可在減少加藥成本的情況下有效的達到硝酸鹽氮去除。

對於中低濃度硝酸鹽氮廢水 (< 500 mg/L)，研究證實以 PVA 生物球技術在體積負荷為 2.5 kg NO₃-N/m³-d 時，長時間操作下可以維持其出流水硝酸鹽氮濃度在 < 30 mg/L，達到法規放流標準。此外，生物球所產生的污泥產量相較於傳統懸浮性污泥系統可大幅減少約 80%。

致 謝

本文承行政院環境保護署水質保護處 111 年度「含氮廢污水綠色處理系統示範驗證計畫」支持，特此致謝。

參考文獻

朱敬平、鍾裕仁、許國恩、黃欣栩、江家菱、王郁萱、許家銓、黃育德、胡雁翠、烏春梅、吳碩傳 (2012)，事業廢水特性調查及污染管制措施研議計畫，行政院環境保護署。

丁立文 (2020)，氣提 / 觸媒燃燒方式處理半導體業氨氮廢水，2020 臺灣水務產業發展研討會。

吳柏璋、侯嘉洪、賴進興、官文惠、駱尚廉、蔡人傑、張莉珣、顏旭明 (2021)，含氮物質之新興物化處理技術評析，工業污染防治，第 153 期。

周珊珊、何心平、賴怡芬、梁文龍、黃志彬 (2020)，新型觸媒處理難降解 COD 與含氮廢水之技術與應用介紹，中華民國環境工程學會電子報，第 3 期。

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，第 120 期。

傅正貴、李玫、許哲彰、王俊元 (2016)，創新氨氮廢水資源化，新竹科學園區廠務技術研討會。

黃思尊 (2020)，109 年護城河水質改善試驗計畫，新竹市政府。

環境規劃管理類

染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究

施孟芬*、林俊德**

摘要

紡織業在台灣屬於工業部門八大能源密集產業之一，其能耗率占總能耗的 3.9%。紡織業從原料到成品之製程繁複，染整為其中提高紡織產品價值鏈重要之中游製程，同時也是高度耗用能源與水資源之一段。染整廠主要能源除了電力外、主要為提供定型機蒸汽之鍋爐，其使用之燃料有煤、重油及天然氣。燃料之種類與用量直接影響溫室氣體與各種空氣污染物之排放量，基於能源轉型及固定空氣污染排放源管制加嚴之趨勢，目前傳統的化石燃料逐漸被淘汰為更環保經濟之替代能源。而水資源之耗用在近年缺水越來越嚴峻，亦為染整業面臨之緊急挑戰。本研究以尚○染整大園廠為分析個案，運用生命週期評估軟體 SimaPro(v.8.4) 及 Ecoinvent 數據庫 (v.3)，利用 IPCC 2013 GWP 100a、WDI(Berger et al., 2014)、CML-IA baseline 2000，以上 3 種衝擊評估方法，量化並分析該廠自 2017 年起逐漸淘汰化石燃料(煤及重油)為主能源供應型態之環境效益。該廠在 2020 年已全面使用大園工業區汽電共生廠配送之低壓與中壓蒸汽於所有染整製程(退漿、染色)上，成為紡織業能源轉型及綠色生產成功之案例。該廠之能源轉型，依 4 個年度之生產量與盤查資料，計算其相應之碳排放、水足跡以及對環境衝擊與資源耗損進行評估。結果顯示更替後的能供模式(2020 年)可讓全廠 1 年減少 19.2% 的碳排及 33.2~100% 的硫氧化物與 27.7~100% 的氮氧化物，同時耗水

量降低 20.9%，紡織污泥排放量也降低 67.4%。該廠之能源轉型亦減少該廠之淡水中生物毒性 13.2%、海洋生態毒性 19.0%、陸地生物毒性 17.0%、優養化 12.2%、臭氧層破壞 6.8%、人類毒性 14.4%、光化學煙霧 26.8%、酸沉降 33.9%、資源耗損 14.4% 及全球暖化 19.2%，10 項特徵化環境衝擊。本研究將個案能源轉型之多重環境效益，具體量化各項友善環境指標，可提供使用鍋爐相關產業作為評估及規劃節能、減碳與企業永續發展之參考。

【關鍵字】染整廠、生命週期評估、碳排放、水足跡、鍋爐燃料、能源轉型

* 逢甲大學環境工程與科學學系永續奈米科技研究室 博士後研究員
** 逢甲大學環境工程與科學學系 教授

縮寫詞 (Abbreviation) 總覽

項目	縮寫詞	原文	中文 / 含義
評估工具	LCA	Life Cycle Assessment	生命週期評估
	SimaPro	由荷蘭 Leiden 大學開發的生命週期評估工具，於國際上普遍使用	
	Ecoinvent	由瑞士專研生命週期盤查之組織所建立的資料庫	
評估方法	IPCC 2013 GWP 100a	Intergovernmental Panel on Climate Change	以聯合國政府間氣候變遷委員會所提出之溫室氣體排放指南為標準的衝擊評估方法
	WDI	water depletion index	以 Berger 等人提出的耗水量指數評估方法
	CML-IA	以荷蘭 Leiden 大學所開發、包含生命週期影響評估之特徵因素資料庫的評估方法	
影響評估指標	FAETP	freshwater aquatic ecotoxicity	水中生物毒性
	MAETP	marine aquatic ecotoxicity	海洋生態毒性
	TETP	terrestrial ecotoxicity	陸地生物毒性
	HTP	human toxicity	人類毒性
	EP	eutrophication	優養化
	ODP	ozone depletion	臭氧層破壞
	POCP	photochemical oxidant creation	光化學煙霧
	AP	acidification	酸沉降
	ADP	abiotic depletion	資源耗損
	GWP	global warming	全球暖化

一、前言

自 50 年代開始，紡織工業已成為台灣僅次於食品工業的第二大工業；80 年代上半期更是到達了高峰。隨著時代變遷，產業轉型，紡織工業在台灣逐漸朝向以資本、技術密集與特殊功能導向的化學纖維為主的貿易與生產型態。在持續為台灣取得可觀的經濟效益同時，也消耗了大量的能源並帶來生態環境上的影響。其中紡織產業鏈中游階段之染整過程，在處理程序中消耗大量的能源，所帶來的環境衝擊與成本需要多面向謹慎評估。一般染整廠使用工業鍋爐燃燒大量燃料來產生蒸汽以提供製程所需，除了需要大量的水量和高耗電量，染料及助劑之使用亦帶來後續處理的問題 (Yin et al., 2015)。因此在進行評估時，需要考量相關之環境衝擊，例如對於水生與陸地生態毒性的影響、或是對人類的毒性傷害等。

高密集的能源使用量是紡織業品製造過程中碳排放主要貢獻。在製程中，如何減少能源使用以及降低溫室氣體排放，已成為全球製造業在環境、社會和企業治理 (Environmental、Social、Governance, ESG) 的必要訴求與主要行動方案。Huang 等人 (2016) 指出全球經濟衰退加劇了在節能、綠色能源，以及零污染技術的需求，透過例如廢棄物或廢熱、廢能回收與再利用技術，將成為減少溫室氣體排放、降低資源浪費的有效解決方案 (Zhang et al., 2013)。此外，全球工業水污染的 20% 以上來自於紡織業，其製程所使用的化學藥劑超過 8,000 種，使得紡織廢水成為造成環境退化與人類疾病的原因之一，特別是其中可能包含的已知致癌物質。水資源使用的水足跡評估包含 2 大類，分別為水資源可用量 (water availability) 和水質惡化 (water degradation)，其有助於了解人類活動或生產過程中消耗的水資源對環境的潛在影響 (ISO, 2014)。該評估結果可協助企業與決策者了解產業製程可能帶來的水源風險，提高水資源效率並了解其對環境的影響。

本研究分析個案為尚○染整加工大園廠，該公司自 2011 年接受經濟部中小企業節能減碳輔導計畫輔導以來，透過內部能源結構調整與監測，逐步建構企業節能減碳執行藍圖。在應對全球氣候變遷議題之下，跨國貿易企業相繼對高耗能、高排碳產業所帶來的迫切減碳需求，亦加速該企業能源轉型速度，於 2019 年完全淘汰使用廠內

所有工業鍋爐，成為全台第一個全面改用蒸汽動力能源的紡織染整廠。本個案研究旨在評估染整廠於更換蒸汽供應來源之期程前後，於碳足跡、水足跡，與環境影響評估各方面的變化與表現。所得結果可供產業背景相近者參考。

二、研究背景與評估執行方法與工具

2.1 評估盤查範疇與邊界說明

本研究分析個案位於台灣北部，負責業務為紡織中游的染整階段，包括前處理、染色、定型、整理等多個單元。2017 年至 2020 年期間，透過廠內能源轉型規劃，將原本使用化石燃料的工業鍋爐逐年更替為蒸汽動力能源。紡織廠 2017 至 2020 年平均年產量為 4,368 公噸功能性布匹，主要原物料為尼龍和聚酯纖維 2 種胚布。表 1 所示為 4 年間主要的投入與產出盤查清單，製程中所使用的化學品，例如退漿使用的助劑、精練劑，染整需要的染劑與助劑等，也包含在評估盤查清單中。紡織廠從 2017 年到 2018 年逐步淘汰了工業鍋爐使用的常規化石燃料，如煤與重油。同時，從 2018 年至 2020 年，使用蒸汽以低壓與中壓的形式分別於製程各階段，逐漸取代原本使用的化石燃料和鍋爐。此外，4 年間淡水和電力的平均消耗量分別為 574,015 立方公尺和 8,203 千度。除產品外，產出包括硫氧化物 (SO_x) 和氮氧化物 (NO_x) 排放 (僅 2017 和 2018 年)、廢水排放 (平均 533,706 立方公尺)、紡織污泥 (平均 37 公噸)、紡織廢料和一般廢棄物 (平均 19 和 24 公噸)，亦列在表 1 的盤查清單中。

評估的邊界屬於“搖籃到大門”(cradle-to-gate)，包括原物料輸入、染整廠完整製程至完成品產出。此外，廢水排出的廠內前處理也做了計算，但不包括最終的廢棄物處理，也不包含成品完成後的運輸。本研究的評估範疇與系統邊界於圖 1 中表示。評估功能單位以該染整廠每年的年產量為基礎，功能單位 (functional unit) 為“每生產 1 公斤完成品”為比較單元。

表 1 染整廠 2017~2020 年投入與產出之物資與能源盤查清單

	內容	年度	2017	2018	2019	2020
		單位				
投入	胚布(尼龍)	公噸	3,008.9	2,781.1	2,928.3	2,576.5
	胚布(聚酯纖維)	公噸	2,269.9	2,275.5	2,300.8	1,790.4
	液鹼	公噸	646.5	571.9	570.2	451.6
	精練劑	公噸	252.6	216.4	223.1	165.0
	染色助劑	公噸	413.3	328.9	362.3	234.3
	酸性染劑	公噸	61.4	55.3	64.3	53.4
	分散性染劑	公噸	46.3	45.1	50.7	36.8
	定型用助劑	公噸	97.8	78.2	100.8	91.3
	三米煤*	公噸	3,948	2,276	-	-
	低硫重油	公乘	170	35	-	-
	低壓蒸汽	公噸	45,919	43,727	54,467	32,700
	中壓蒸汽	公噸	-	8,978	22,202	20,577
	用水量	立方公尺	628,787	617,439	552,139	497,694
	用電量	度	7,904,328	8,726,560	9,402,868	6,779,131
產出	完成產品	公噸	4,586.5	4,485.4	4,657.5	3,742.1
	硫氧化物(SO _x) 排放	公斤	8,352.2	5,583.3	-	-
	氮氧化物(NO _x) 排放	公斤	9,483.2	6,854.1	-	-
	廢水排放量	立方公尺	582,210	566,550	507,539	478,523
	紡織污泥(R0906)	公噸	76.4	22.8	24.9	24.4
	紡織廢料(D0899)	公噸	25.9	14.7	16.8	17.6
	一般廢棄物(D1801)	公噸	23.8	25.4	27.5	17.8

註：為廠商提供之燃煤名稱，屬高等發熱量(5,500~5,800kcal/kg)之燃煤。

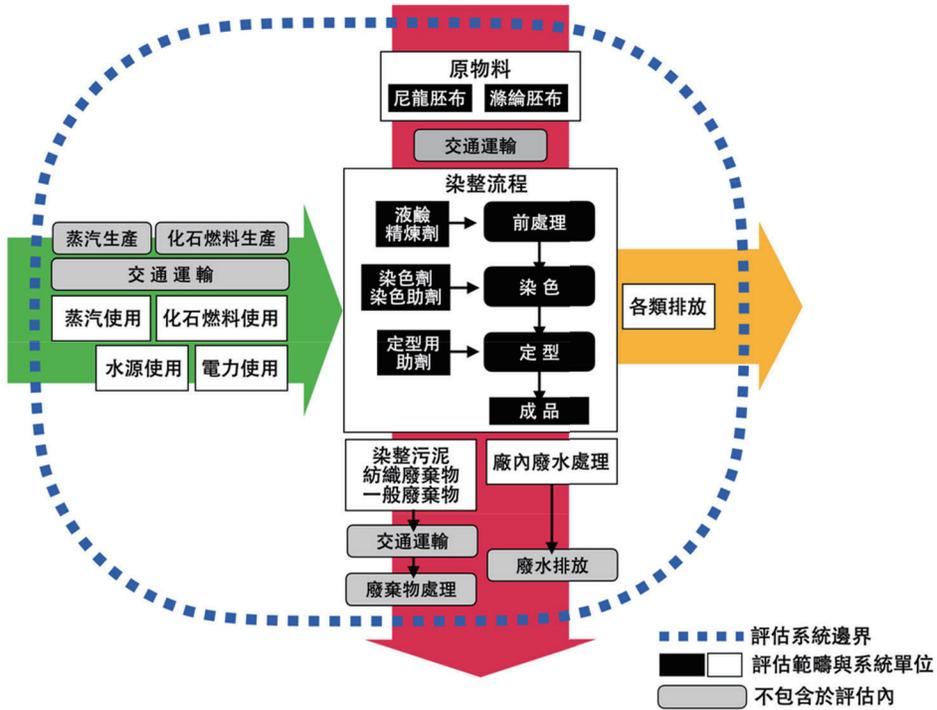


圖 1 本研究生命週期評估之系統邊界與範疇說明

2.2 生命週期評估方法

考量紡織業對環境所帶來的潛在影響，本研究採用的衝擊評估方法包括評估碳足跡 (carbon footprint) 的 IPCC 2013 GWP 100a(IPCC, 2013)；水足跡 (water footprint) 包含 Berger 等人提出的耗水量指數 (WDI) (Berger et al., 2014)；CML-IA(2016) 中的淡水與海洋生態毒性 (FAETP/MAETP) 與優養化 (EP) 則用於評估水質惡化情況。環境衝擊評估則採取 CML-IA baseline(Guinée et al., 2001) 方法，評估面向包估：資源耗損 (ADP)、臭氧層破壞 (ODP)、人類毒性 (HTP)、水中生物毒性 (FAETP)、海洋生態毒性 (MAETP)、陸地生物毒性 (TETP)、光化學煙霧 (POCP)、酸沉降 (AP)、優養化 (EP)，亦包括全球暖化 (GWP) 等 10 個與紡織染整業密切相關的特徵化項目。對於水資源與能源鏈結 (Water-energy Nexus) 則以 ReCiPe2016 Endpoint(Huijbregts et al.,

2017) 方法加權評估後結果作為分析依據。所採用的 LCA 工具為本研究室已建置的工具 SimaPro Software v.8.4(PRè Sustainability Consultant, 2017) 與 Ecoinvent 數據庫 v.3(Weidema et al., 2013)。

三、評估結果與討論

3.1 碳足跡評估

評估結果發現，採用新措施之後，研究個案在 2017 至 2020 年間，碳排與總燃料消耗相對比率逐年降低，而年度產能關鍵績效指標 (KPI) 達成率仍能平均維持 96% 以上 (表 2)。值得一提的是，2019 年為該廠第一年完全淘汰使用工業燃料鍋爐，燃料消耗的相對降低比亦較前一年 (2018) 降低 8.5%，結果表明該年生產能力不僅沒有受到影響，甚至有所增加。雖然用電量 (表 1) 較前一年 (2018) 略增加約 7%，但由於完全淘汰使用化石燃料，2019 年的整體碳足跡比 2018 年減少了 10%，每生產 1 公斤產品約減少了 2.7 公斤二氧化碳當量 (kg CO₂ eq)，按 2019 年產品總量計算，該年減少了碳足跡約 1.26 萬噸二氧化碳當量。該廠透過製程所需之能源供應模式的轉型，在同時維持產能的要求下，仍可達到降低碳排的需求。相關數值計算式說明如下：

$$\text{碳足跡降低比 (\%)} = \frac{\text{(該年碳足跡排放量} \div \text{基準年 (2017) 碳足跡排放量)} \times 100}{\dots\dots\dots} [1]$$

$$\text{燃料消耗相對降低比 (\%)} = \frac{\text{(該年燃料總消耗熱值量} \div \text{基準年 (2017) 燃料總消耗熱值量)} \times 100}{\dots\dots\dots} [2]$$

$$\text{產能目標達成率 (\%)} = \frac{\text{(該年度實際產品產量} \div \text{該年度產量目標)} \times 100}{\dots\dots\dots} [3]$$

表 2 2017~2020 年紡織廠年度碳足跡排放率 (基於 2017 年排放量)、產能達成率 (基於年度產量 KPI 目標)、燃料消耗相對減少率和供應方式對照

年度	碳足跡降低比 (%)	燃料消耗相對降低比 (%)	產能目標達成率 (%)	燃料採用比例以及供應方式				
				工業燃料鍋爐	三米煤 * (5,800 kcal/kg)	低硫重油 (9,200 kcal/kg)	低壓蒸汽 (435 kcal/kg)	中壓蒸汽 (27 kg/cm ²)
2017	100	100	97.6	有	40%	10%	50%	-
2018	90.7	18	94.4	有	23%	2%	50%	25%
2019	80.8	25	101.4	無	-	-	50%	50%
2020	83.5	47.9	114.1	無	-	-	50%	50%

* 註：為廠商所提供之燃煤名稱，屬高等發熱量之燃煤。

3.2 水足跡評估

水足跡評估方面，耗水量指數與碳足跡評估結果呈現符合的趨勢：耗水足跡逐年下降；減少率約為 18%。從圖 2(a) 中的年度耗水量、廢水排放量和耗水指數之間的關係可以看出逐年下降的趨勢。此外，與水質惡化足跡評估相關的化學藥劑消耗和紡織污泥排放在圖 3(b) 中也顯示出類似的趨勢。2018 年以來所有化學藥劑用量和紡織污泥排放量均呈下降趨勢。其中，從表 1 可以看出，在 2017~2020 年之間，精練劑、染色助劑、酸性染劑、分散性染劑和定型用助劑在 2019 年出現用量高峰，平均增長約 12%。隨後，2020 年各項用量再次下降，但水質惡化相關指數，如水中生物毒性 (FAETP)、海洋生態毒性 (MAETP)、優養化 (EP) 在 2020 年反而呈現小幅上升。與 2019 年相比，染色階段的助染劑和分散性染劑分別在使用量減少的幅度最大，均減少 31%。預處理階段的精練劑次之，減少了 23%。然而與 2019 年相比，2020 年在定型階段的整理助劑用量雖然減少了 10%，但仍比 2018 年增加了 13%。對應水質惡化評估結果，推測 2020 年在製造過程中所使用的定型助劑可能是提高數值的主要因素之一。總體而言，水質惡化足跡在施行新措施之後，平均減少 15%。

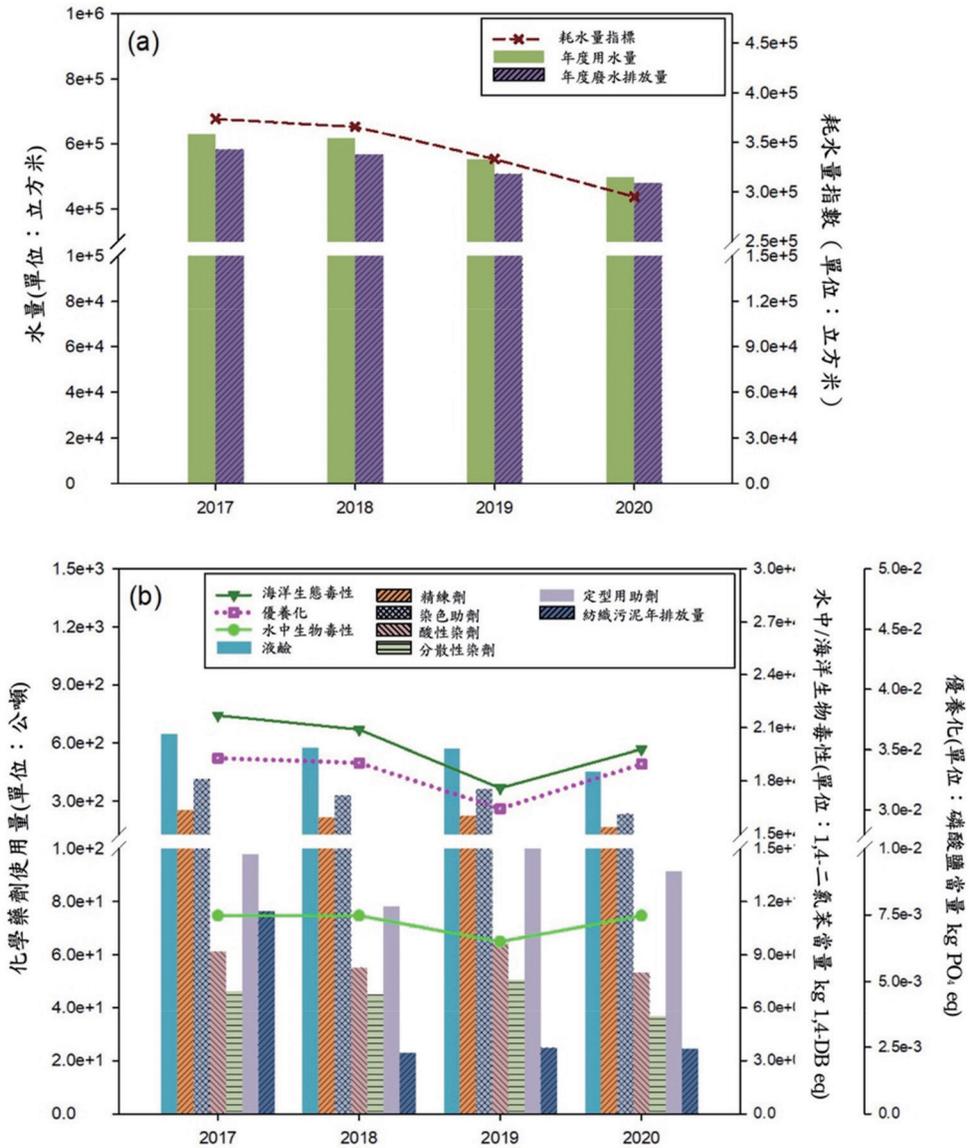


圖 2 紡織廠 2017 年到 2020 年每年水資源可用量和水惡化情況

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

圖 3(a) 至 (c) 個別顯示了 3 種與水質惡化有關的評估項目 (即 FAETP、MAETP 與 EP) 與產品製程中主要階段 (預處理、染色與定型) 的相互關係。圖 3 顯示各評估項目受到製程個階段影響的比例, 呈現與圖 2(b) 相似的趨勢。在前處理與染色階段的影響比例自 2017 年之後逐年下降, 而 2019 至 2020 年在定型階段的影響比例則在 2018 年之後呈現上升現象。因此得知, 透過將製程中能源供應方式更替, 直接以汽電共生廠提供蒸汽, 取代原本透過鍋爐燃燒產生蒸氣的方式, 對於水量耗損方面都能帶來改善。然而不可避免的在製程中使用的化學物質所造成的水質惡化影響仍需注意。除了定型助劑之外, 預處理階段所使用的化學藥劑一直是製程中對環境影響占比最大的。

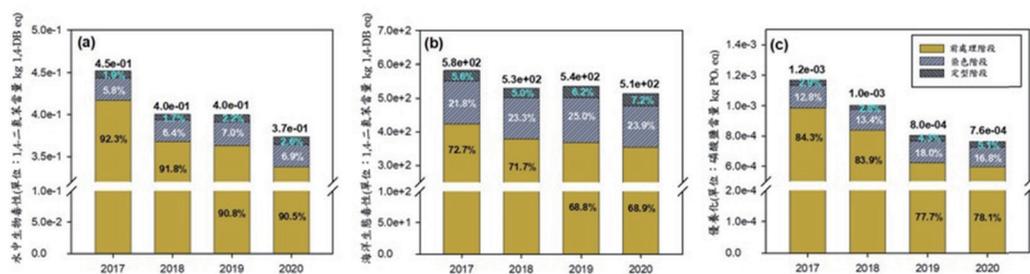


圖 3 製程中主要階段對 3 種水質惡化評估項目影響比例：
(a) 水中生物毒性 (b) 海洋生態毒性 (c) 優養化

3.3 環境衝擊評估

圖 4 以盤查範疇對每個環境影響項目的百分占比, 顯示 2017 年至 2020 年染整廠對環境的影響。各項目由左至右, 依次為 2017 至 2020 年的數值。本研究環境衝擊評估, 包括從原物料的輸入至廠內前處理階段, 與後續加工過程至最終產品之所有環節, 其中也包含了廢水在排放前的處理, 涵蓋以下部分: 原物料、生產製造、燃料使用、用水量、用電量、廠內廢水處理、能源回收再利用等 7 個部分。經評估結果得知, 原物料部分在化石資源耗損 (ADP-fossil fuel)、全球暖化 (GWP)、陸地生物毒性 (TETP)、光化學煙霧 (POCP) 和酸沉降 (AP) 等項目影響占比最高; 而在資源耗損 (ADP, 非化

石燃料)項目則僅次於生產製造部分的占比。該廠因更換主要製程所需的能源供應方式,當停止使用化石燃料以及完全淘汰鍋爐後,在減少碳排以及水資源耗損上,確實有所助益,然而關於生產最終產品所需要的主要原物料(胚布),以及處理過程必須使用的助劑等,仍對環境造成衝擊性影響:該結果與作為主要原物料的人造纖維(尼龍及聚酯纖維)胚布,不可避免地使用化石燃料原料有很大的關聯,評估結果確實顯現了後續加工過程帶來的聯動效應。生產製造部分對資源耗損(ADP)的影響最大,其次是陸地生物毒性(TETP),再者是臭氧層破壞(ODP),這與生產過程中使用的多種化學藥劑有關,例如前面提及的染整劑和各種助劑。ODP評估可顯示物質對臭氧層可能帶來的破壞,而GWP則常使用於衡量化學物質對全球暖化的影響,因此同時觀察有助於評估化學物質對環境的影響。從整體評估結果看來,生產製造階段對於GWP的影響占比極小,而是與水質惡化方面有較高的關聯性,此部分在後述廠內廢水處理的部分也可得見。燃料使用部分則在AP、POCP、GWP和ADP-fossil fuel類別中顯示出較為明顯的比例,並且從結果明確地顯示自2018年後,染整廠徹底汰換了化石燃料與工業鍋爐,使得此部分原本對環境衝擊影響降至最低。這意味著新的蒸汽供應方式確實為減少環境損害帶來了良好的效果。廠內廢水處理是另一個在環境衝擊評估具有極大占比的部分,特別是在人類毒性(HTP)、FAETP、MAETP、TETP和EP中的占比明顯高於廠內其他部分,並且大部分與水質惡化有密切關聯。值得注意的是,能源回收再利用部分從評估結果顯示出其在減少環境影響方面的優勢。應證染整廠利用汽電共生廠直接提供的回收蒸汽,替代鍋爐燃料並淘汰鍋爐使用,可有效減少對環境的破壞,特別是在ADP-fossil fuel、GWP、POCP和AP等項目,效果顯著。然而對於HTP、FAETP、MAETP,與EP則無明顯影響。得知,此部分對於化石燃料相關項目確實有直接影響,而對廠內化學藥劑使用相關項目,則沒有直接效益。

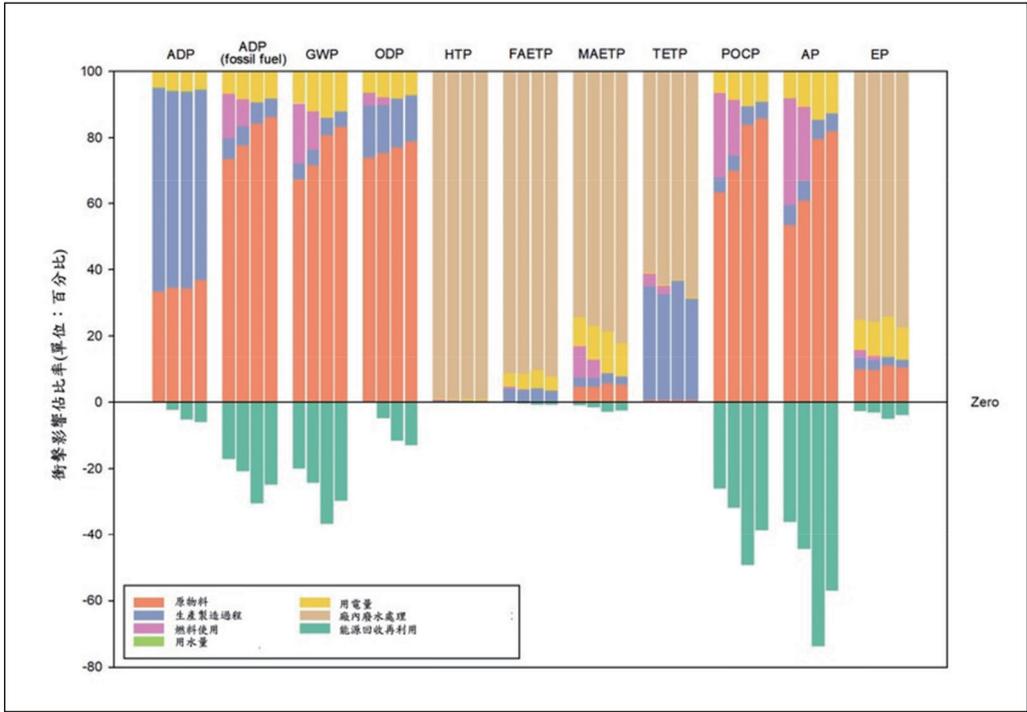


圖 4 染整廠各部分在各環境衝擊影響項目中的占比評估
(每個項目由左至右依序為 2017 至 2020 年)

圖 5 顯示了正規化 (normalized) 後的評估結果，可見新措施執行後，環境衝擊項目的影響數值大致呈現逐年下降的情形，除了 2020 年在 HTP 項目上，相較 2017 年還增長了 0.23% 外。就整體生命週期評估來看，染整廠在 ADP、HTP、FAETP、MAETP 等項目帶來較明顯的衝擊影響。與圖 4 對應，ADP 的影響主要來自原材料和生產製造部分。2017 年至 2020 年的評估結果確實驗證了改變鍋爐燃料與淘汰工業鍋爐使用對減少環境損害有所助益。但是，在 HTP、FAETP 和 MAETP 的影響仍有限，因來自於生產製造過程所使用的化學藥劑，以及後續也對廠內廢水處理部分產生了影響。4 年評估當中，2019 年在所有項目中的數值皆為最低，而產量最高 (圖 5、表 1)。除去可能因潛在的外部因素迫使生產項目與過程必須改變的 2020 年，2019 年的評估結果證明了使用汽電廠直接供應的回收蒸汽取代舊有的化石燃料使用與供應方

式，所帶來有效減少環境影響與破壞的效益，尤其在降低 AP(34%)、POCP(27%)、GWP(19%)、MAETP(19%)、TETP(17%) 等項目，更具效果。

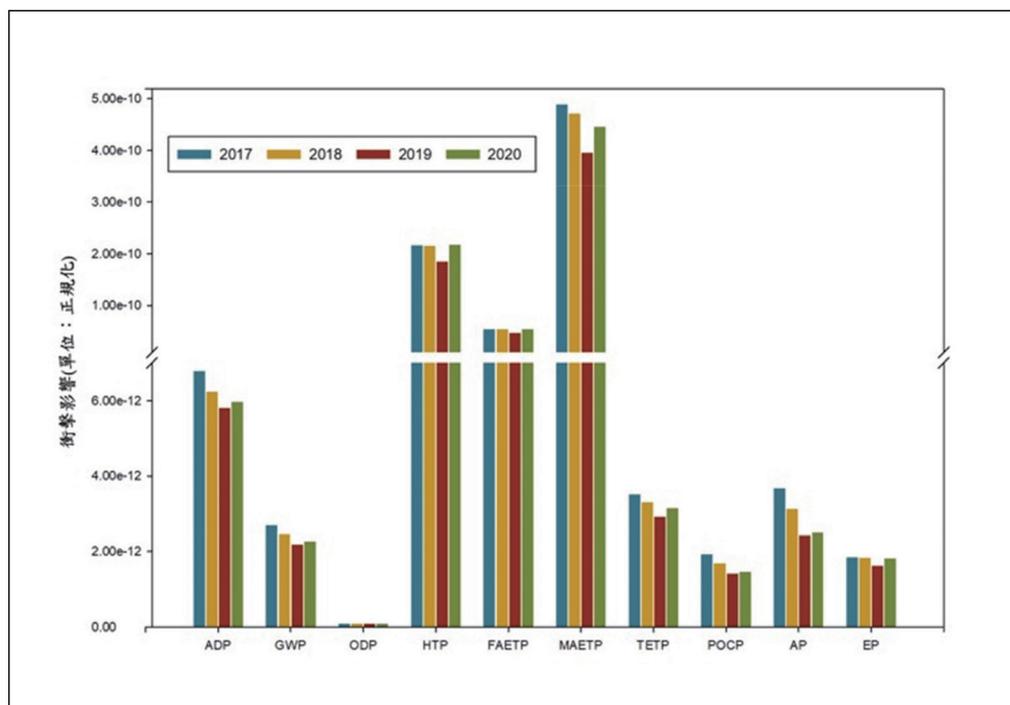


圖 5 2017 年至 2020 年，每個環境衝擊影響項目的正規化評估結果

本研究評估之結果顯示，相較於以傳統化石燃料使用，鍋爐燃料類型採用汽電共生廠所提供之蒸汽，對於減少大部分的環境衝擊影響確實有所助益。它有效的協助製程中減少甚至無化石燃料燃燒後所產生的污染物，並且因提供回收蒸汽的汽電共生廠即位於同一工業區，直接輸入的回收能源發揮了很好的能源效率，協助該染整廠更順暢的淘汰鍋爐之使用。總體的效益包括逐步實現年度減碳目標，降低燃料成本，以及因能源效率提高而促進生產效能。圖 6 顯示了原物料消耗、年產量、固定污染源空氣污染物排放、碳排放和年度燃料成本的關係趨勢；可見，隨著燃料種類和供應方式的逐年變化，燃料成本和碳排放指數也隨之下降。總體而言，本研究的評估結果，對於發展製造產業的綠色生產、區域能源網絡的未來建構規劃，具有啟發意義與可實踐性。

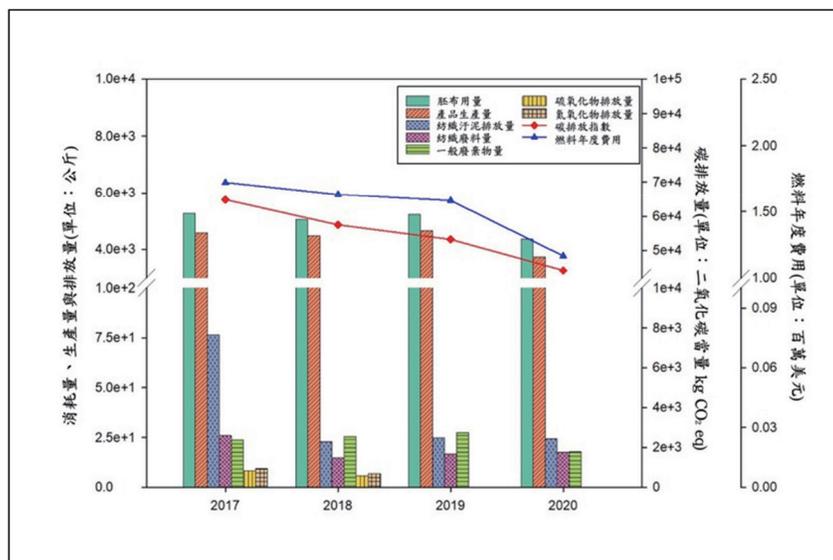


圖 6 原物料消耗量、產品年產量、固定污染源空氣污染物排放量、碳排放指數與年度燃料成本關係與趨勢圖

3.4 水資源與能源鏈結觀察

Robert White 於 1994 年提出工業生態學 (White, 1994) 觀點，對工業活動中原物料與能源的流動，以及經濟、政策、社會資源等轉換現象，之於環境的影響提出相關探討。水 - 能關係屬於雙向鏈結關係，包含供水耗能至產能需水，自然資源開發所需之廢水處理技術與管理，甚至碳與水資源價格評估，皆屬此討論範圍。本研究所使用的 ReCiPe2016 Endpoint 方法，將特徵項目加權化之後，以相關質量單位顯示該項目的損害程度與關聯性。生態系統質量單位為物種與時間年 (species x year) 的關係呈現，意味評估區域物種隨著時間推移的損失。資源缺稀化單位則以未來礦產與化石資源開採所產生的額外費用 (additional cost) 為準。研究個案在 4 年間水、電、燃料資源消耗與衝擊項目損害指標之相互關係，於圖 7 呈現評估結果。以 2017 年使用量與造成的衝擊指標數值為基準，年度用水量呈現明顯逐年下降之趨勢；以生產製程所需燃料總熱值計算，隨著個案逐年減少化石燃料使用量以及最終淘汰鍋爐之步驟，此數

值呈現與用水量接近的下降趨勢。值得注意的是，水資源使用損害指標在 2018 年以 10.6% 與 2019 年以 10.1%，出現降幅曲線些微停滯情形，而資源缺稀指標曲線則呈現 2018 年以 1.9% 微幅下降後於 2019 年上揚 0.2% 的趨勢，此現象呼應了在 2018 年 9.4% 與 2019 年 15.9% 略為增長的年度用電量。此 2 年之間，正逢研究個案在新舊措施交接階段，同時，2019 年產品生產總量為 4 年間最高。此現象呈現用電量與水資源運用及資源耗損相關損害指標的直接鏈結關係。若針對廠內各部分用電模式與量能，能做更詳盡的單位監管，則更能將資源有效的運用與分配，具體模擬不同情境的資源供需情況，評估整體系統的乘載力與回復力，有助優化提升在水 - 能鏈結的協同效益 (synergistic benefits)。

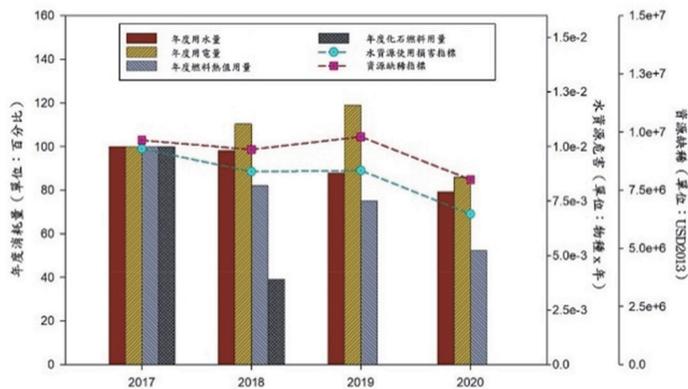


圖 7 水資源與能源鏈結關係圖

四、結論

本研究個案透過汽電共生廠回收之蒸汽以低壓與中壓蒸汽方式直接提供廠內製程使用，取代長期倚賴的化石燃料與工業用燃料鍋爐，經生命週期評估後發現，碳足跡、水足跡、環境衝擊影響等結果均有所改善：年度碳足跡可減少 19% 的排放率，水資源耗損足跡和水質惡化足跡則可以分別減少 18% 和 15% 的損耗率。在染整廠所有評估範疇中，原物料輸入的部分對環境的影響較大的原因來自於該人造織物原料與化石燃料的高度關聯性。此外，製程中所使用的化學物質則對水質惡化造成了很大的影響，其中預處理階段是其中影響最大者。最後，在停用化石燃料，改以直接輸入的蒸汽後，

燃料部分不再為環境帶來衝擊影響。在評估能源回收再利用的結果發現，該措施對於減少環境損害、降低年度燃料成本，與空氣污染防制具有相當的優勢，並具有轉型綠色產業發展前景、符合經濟面考量且容易施行，適合現行使用燃料鍋爐於製程的產業作為參考。

參考文獻

- Berger M., van der Ent R., Eisner S., Bach V., Finkbeiner M. (2014), Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. *Environmental science & technology*, 48(8), 4521-4528.
- CML-Department of Industrial Ecology (2016). CML-IA Characterisation Factors, Institute of Environmental Sciences, Leiden University: Leiden, The Netherlands.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Helias A., de Haes H.A.U., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J., Lindeijer E., Roorda A.A.H., van der Ven B.L., Weidema B.P. (2001), *Life Cycle Assessment-An Operational Guide to the ISO Standards: Characterization and Normalization*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Centre of Environmental Science, Leiden, The Netherlands.
- Huang R., Riddle M., Graziano D., Warren J., Das S., Nimbalkar S., Cresko J., Masanet E. (2016), Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135(1), 1559–1570.
- Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M.D.M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R. (2017), ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147.

International Organization for Standardization (ISO) (2014), 14046-Environmental Management-Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

PRè Sustainability Consultant, 2017. SimaPro v.8.4 software, PRè Consultant: Amersfoort, The Netherlands.

Weidema B.P., Bauer C., Hischer R., Mutel C., Nemecek T., Reinhard J., Vadenbo C.O., Wernet G. (2013), Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen, The ecoinvent Centre, Switzerland.

White R. (1991), The Greening of Industrial Ecosystems. Allenby, B.R. and Richards, D.J., (Eds.). National Academy Press, Washington DC.

Yin H. and Guo H.(2015), Energy and exergy analyses of finishing process in cotton textile production. *International Journal of Exergy*, 18(3), 251–274.

Zhang N., Smith R., Bulatov I., Klemes J. (2013). Sustaining high energy efficiency in existing processes with advanced process integration technology. *Applied Energy*, 101, 26–32.

環境化學與微生物類

土壤及地下水污染整治技術認證制度推動 與土水產業發展推動

簡慧貞*、陳以新**、吳雅婷***

摘 要

土壤及地下水污染整治工作的推動，迄今已經超過 20 年，在環保單位與產業共同努力下，已經完成超過 8,000 處場址污染改善工作，訓練與培養出許多專業公司與技術人才，並累積技術實力。隨著國內場址數量逐漸下降，土水產業將面臨更大的競爭。國際市場，特別是土壤及地下水污染預防、管制及整治相關法規仍待建構的東南亞國家，對臺灣土水產業而言是個新的藍海。但要進入國際市場，需要站在技術能力的基礎上，擁有核心技術才是面對國際競爭的致勝關鍵。因此，環保署研擬短、中、長期技術認證制度可行性，提出 3 階段土水技術證明核發制度，逐步推動技術認證事宜，幫助國內產業取得符合進入國際市場需求的實績證明與技術能力證明。同時也透過產業媒合平台的發展，替國內有污染整治需求的場址與優良的廠商進行媒合，以加速國內場址污染改善工作。

短期策略為建立污染場址整治技術應用案例彙編，採專家審查方式，於污染場址完成整治申請解除列管行政程序階段，對整治執行單位的總體執行能力進行綜合評價，包括執行整治過程的工法設計、操作與管理各項工作品質及報告書撰寫品質等內容確認與審核，核給「污染場址完成整治技術證明」，並透過公開資訊平台，將整治歷程與廠商資訊以污染場址整治技術應用案例彙編方式予以揭露，供大眾參考，讓污染行為人可依污染場址特性、預算與時間需求，選擇合適的廠商及整治技術。

中期策略將研訂「土壤及地下水整治技術有效性自我宣告證明作業要點（草案）」，針對國內的技術執行單位、技術擁有者或發明者所持有的技術項目之技術能力與表現，組成專家小組進行評價，並核予有條件之有效性技術自我宣告證明，進而達到提升國內技術品質的目標，屬具官方認可的證明。

而長期策略，將依據國際標準組織發布之 ISO14034「環境技術查證 (Environmental Technology Verification)」，針對技術的表現、創新性、市場性與環境友善程度規範及系統性評估方式，於國內同步推動相關技術規範與審查制度，評估與輔導可行機構，以利未來與國際認證系統銜接，讓國內整治廠商在進行海外市場競爭時，經過臺灣官方與第三公正方認可技術證明。惟國際間 ISO14034 規範與制度尚未完全成熟之際，環保署將優先推動國對國相互技術認證，透過目前「亞太土壤及地下水污染整治工作小組 (ReSAG)」12 個成員國平台及「土壤及地下水污染永續整治技術論壇 (SuRF)」平台 10 個成員國，建立認證機制，從土壤及地下水整治技術出發，未來逐步推及環境領域相關的技術。

【關鍵字】 土壤及地下水污染、技術認證、環保技術認證制度、污染場址完成整治技術證明、有效性技術證明、環境技術查證、ISO-ETV、土水產業、技術媒合

* 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

執行秘書

** 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

組長

*** 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

環境技術師

一、前言

土壤及地下水污染整治法(以下簡稱土污法)施行至 2022 年已有 20 餘年的歷史,近年環保署平均每年花費新臺幣 13 億元資金辦理國內土壤及地下水品質管理工作。在前 15 年的政策推動上,環保署以完善法規與管理制度、地下水污染監測與調查、高污染潛勢場址調查、技術引進與應用、教育宣傳與國際交流為主要的目標,推動一系列調查計畫,對國內各類高污染潛勢產業與潛在受體進行系統性的調查,已完成國內 2.1 萬公頃高污染潛勢農地調查、2,700 家加油站、2,203 家運作中與停止運作工廠調查。同時也針對如工業區、軍事營區、航空站、公有土地等潛在污染類型的場址進行污染調查工作,迄今共計已列管 8,014 處土壤或地下水污染控制或整治場址(土壤及地下水污染整治網(<https://sgw.epa.gov.tw/Public/>)、2021 年 6 月 13 日下載),包含有 6,424 處農地、154 處工廠、137 處加油站、5 處儲槽、19 處非法棄置場址與 36 處其它類場址。

受到土壤及地下水污染的土地被公告為場址後,便立即會面臨土地利用的問題。對農地而言,會因為污染物對農產品的累積風險而限制其種植;對營運中的工廠或加油站,污染改善工作執行將直接或間接影響其營運;換言之,污染場址數量的累積對公私部門在行政與經濟上造成沉重的負擔。因此在近 5 年環保署對於污染場址的政策,更加著重在對污染土地加速解除列管與土地活化的推動,包含土壤資源再利用、已解列農地光電產業發展、污染土地分區解列與褐地再利用等主要行政措施,來活化土地資源的利用,並且從社會公義角度,投入資源辦理國內特定污染土地與污染農地的改善工作,期望可以從加速土地資源活化的角度,在兼顧環境品質的前提下,幫助國內整治產業的發展。

相較於空氣污染、水污染及廢棄物等可以從視覺、嗅覺發現的污染問題,土壤及地下水的污染對於一般民眾或工廠而言,仍然是相對陌生的問題,即使在過去的 20 餘年,國內已經累積許多技術與經驗,建立一套完整而成熟的土壤及地下水污染整治產業鏈,如圖 1 所示。但一般民眾或工廠,一旦面臨土壤及地下水污染問題,仍然常面臨不知如何解決的窘境,或是透過口耳相傳的方式尋商,這使得污染場址整治工作的執行品質良莠不齊,對場址整治工作產生負面影響。

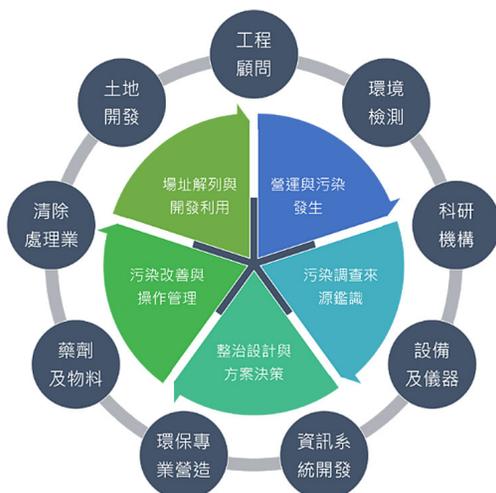


圖 1 臺灣土壤及地下水污染場址生命週期與整治產業鏈

污染整治工作的執行並不僅只是移除污染物，而是必須要在確保整治成效的前提下，同時兼顧公共安全、二次污染防治、對其他利害關係人的影響問題。因此，具有良好的工程技術且執行品質優良的整治廠商便成為污染整治成功與否的重要影響因素。

此外，有別於空、水、廢、毒的管理，需要較高頻率的定期檢測與申報（通常是每季或每半年 1 次），土壤及地下水污染事件的生命週期大多很長，污染場址完成整治後再度發生污染的情形相對較少，屬於一次性的消費市場，當污染場址數量逐漸減少後，技術與經驗很容易產生斷層，對於國內整治產業將造成不利的影響。

經過與國內各領域專家學者及整治產業長期的討論，環保署從技術品質、技術功能、工程管理品質等面向，規劃具有公信力的「認證制度」作為長期推動方向，並透過媒合平台建立，將國內污染整治寶貴經驗與廠商實績、技術適當公開，同時達到產業媒合與技術經驗傳承的目的。透過技術認證，提供國內整治廠商經環保署認可的實績證明與技術證明，幫助國內土水整治產業進入國際市場。

本文從目前臺灣的土壤及地下水管理現況、技術能力與市場現況來分析國內面臨的問題與對於認證制度的需求，並說明環保署規劃之土壤及地下水污染整治認證相關

制度，以及未來的資訊公開方式。期望藉由 3 階段技術認證制度的推動，幫助國內場址尋找優良的整治廠商，同時也幫助國內整治廠商持續提升土壤及地下水污染整治技術能力，並拓展市場上的發展機會。

二、土水整治技術發展現況與產業現況評析

2.1 土壤及地下水污染場址列管概況與趨勢評析

圖 2(a) 為至 2021 年 6 月 13 日為止我國歷年曾列管污染與解除列管的場址數量，在公私部門的共同努力下，已經有 6,775 處控制或整治場址完成污染改善工作解除列管。

不同類型污染場址累積的速度，與環保署當年度推動的主要污染調查目標有關。以農地為例，我國自 1982 年第一次以系統網格法進行全國農地污染潛勢調查污染工作，環保署於 2002 年啟動 319 公頃高污染潛勢農地調查，並於 2010 年~2016 年間起針對污染機會較高的縣市辦理污染調查工作，這使得農地污染場址在 2012 年開始大幅增加。然而，這些列管的污染農地因為食品安全問題而被禁止耕種，對於農民生計造成極大的影響；因此站在維護社會公義的角色，自 2016 年起，環保署啟動一系列污染農地污染整治計畫，幫助農民在短時間內完成污染改善，恢復農地使用 (圖 2(b))，在環保署與地方環保局的共同努力下，總計已完成 6,424 處農地污染改善工作，預計 2022 年將可全數完成，還地於民。

工廠類場址則與運作中工廠與廢棄工廠的調查工作有關，因此場址自 2006 年開始逐年增加，然而工廠類場址的整治場需要兼顧工廠的運作，整治較為困難，除了少數污染範圍與面積較小者，大部分的場址都需要較長的整治時間，隨著我國土壤及地下水污染整治工作的推進，場址解列的數量穩步提升 (圖 2(c))。

加油站場址亦有類似的情況，環保署自 2001 年啟動加油站污染調查工作，從 20 年以上老舊加油站開始盤查，逐步完成全國 2,700 家加油站調查工作，同時亦完成了「地下儲槽系統防止污染地下水體設施及監測設備設置管理辦法」的公告與修正，建立申報管理系統，推動加油站自主管理工作 (簡慧貞, 2021)。因此加油站類場址列管

數量自 2006 年起大幅增加，自從加油站自主管理工作上軌道後，每年列管的加油站類場址數量增加的速度趨緩，並從 2012 年逐漸下降 (圖 2(d))。儲槽類工廠亦為環保署關切的對象，此類型場址的污染大多難以被察覺，特別是地下管線或槽底的破損或洩漏，一旦發生污染大多難以整治，從圖 2(e) 便可以發現，場址解列的數量變動幅度較低。

非法棄置類場址與其他類場址在污染整治上的難度最高，這些場址常難以尋找污染行為人，或污染範圍較大，除了少數場址已經完成污染改善外，大多需要較長的時間進行改善，因此解列數量少且列管數量穩定 (圖 2(f)、(g))。

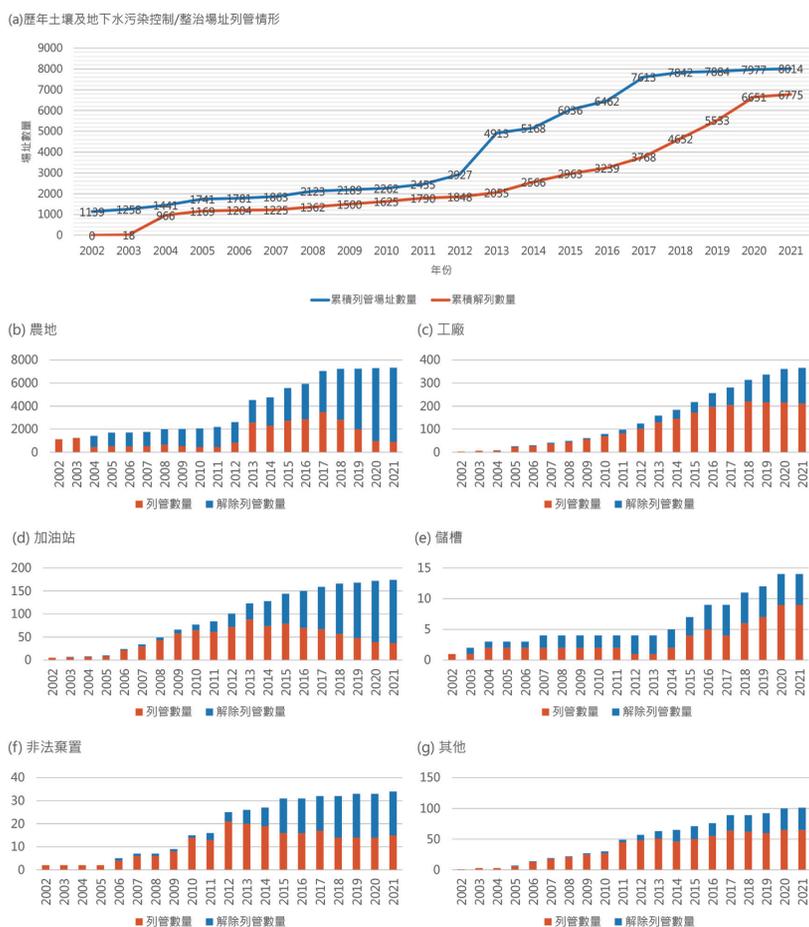


圖 2 臺灣歷年污染場址列管情形

2.2 土壤及地下水污染整治技術應用現況與國際趨勢

總體而言，在目前環保署政策的推動下，污染場址列管的數量正穩步的減少，目前僅餘 1,239 處場址尚待整治，其中有 901 處為農地類場址、212 處為工廠類場址、31 處加油站類污染場址，其他類則尚餘 65 處。在過去的 20 年間，我國已導入與應用各類污染整治技術，為了解臺灣土水整治業者近期技術應用現況，透過環保署土壤及地下水管理資訊系統彙整 2014 年以後解列之 218 處場址報告，統計我國污染場址改善技術應用情形如表 1 與表 2 所示。

表 1 2014~2017 年臺灣常用土壤污染整治技術

技術類別	技術名稱	應用次數	技術應用比例	說明
生物性處理技術				
	生物堆	25	8.4%	
	土耕法	3	1%	
	生物通氣法	3	1%	
	植物整治	1	0.3%	
化學性處理技術				
	化學氧化	13	4.3%	
	酸洗 / 淋洗	5	1.7%	
物理性處理技術				
	離場處理與客土	120	40%	離場處理與客土
	翻轉稀釋	49	16%	
	土壤氣體抽除	47	16%	包含 SVE 與 DPE
	空氣注入法	31	10%	同時處理土壤及地下水污染
熱處理技術				
	離地熱脫附	2	1%	

表 2 2014~2017 年臺灣常用地下水污染整治技術

技術類別	技術名稱	應用次數	技術應用比例	說明
生物性處理技術				
	現地生物整治	29	16.7%	包含好氧與厭氧生物整治
	生物曝氣法	4	2.3%	
	生物反應牆	2	1.1%	
化學性處理技術				
	現地化學氧化	37	21.4%	
	現地化學還原(NZVI)	3	1.7%	
	被動式反應牆	1	0.6%	
物理性處理技術				
	抽出處理	31	17.9%	
	空氣注入法	31	17.9%	同時處理土壤及地下水污染
	多相抽除	19	11%	DPE/MPE/TPE
	界面活性劑沖排	4	2.3%	
	浮油回收	3	1.7%	
	循環井	1	0.6%	
熱處理技術				
	熱處理	1	0.6%	
監測式自然衰減				
	監測式自然衰減	7	4%	包含 5 處因多次監測無超標而解列場址

由於國內控制及整治場址大多為 2 種以上污染物，且國內場址相較於歐美國家場址而言，占地面積相對較小，也因為國內土地利用特性，係屬農業、工業、住宅的土地利用難以明確區分，或距離很近的情形，而國內整治工作大多追求短時間解列，因

此污染場址內採用單一整治技術者甚少，多以整治列車方式進行規劃，甚至部分僅有單一污染物之場址亦採用 2 種以上整治技術，但由於國內法規特性與國人對於環境污染風險的認知不足，我國土壤及地下水污染整治工作對特定的整治技術應用傾向，使得國內土壤及地下水污染整治技術發展發生傾斜。

在土壤污染整治技術應用比例上，即使排除了農地場址，排客土與耕犁法（翻轉稀釋）比例仍高，總計約 56%，其次為土壤氣體抽除（soil vapor extraction, SVE）與空氣曝氣法（air sparging, AS），約占 26%，生物整治法（包含植物整治）約占 10.7%，其它如化學氧化、離地熱處理等，應用比例仍低。這顯示在土壤污染整治技術上，國內場址普遍會選擇快速移除的方式進行處理，然而土壤應視為資源，雖然使用此 2 類技術可以快速解決當下的污染問題，但長期使用離場處理工法或使用耕犁法（翻轉稀釋），並未實際移除或破壞污染物，對於資源的應用與環境是負面影響，因此未來在土壤資源的管理上，環保署亦將調整目前管理方式，來加強土壤資源的循環使用。

SVE/AS 是利用物理特性強迫揮發性有機物自土壤或地下水中遷移至土壤間隙中而被移除，因此也被應用在地下水油品類污染或揮發性有機物污染的處理上，只是在應用比例上較偏於土壤，多項抽除（multi-phase extraction, MPE）也扮演類似的角色，但 MPE 包含了地下水或污染物的抽除，因此被歸類為地下水污染整治技術。無論如何，SVE/AS 與 MPE 等物理性整治技術在國內整治技術的應用比例高，顯示這類技術在國內的應用已趨於成熟。

在地下水處理上，現地化學氧化（in-situ chemical oxidation, ISCO）應用的比例最高為 21.4%，其次現地生物整治（in-situ bioremediation）為 20.1% 與抽出處理（pump and treat, P&T）為 17.9%，而現地化學還原（in-situ chemical reduction, ISCR）、界面活性劑沖排、現地熱處理等技術，應用比例則較低。

若以污染場址類型分別區分與觀察，農地為國內數量最多、面積最大之污染場址，土壤重金屬污染為主，少數場址是總石油碳氫化合物（Total Petroleum Hydrocarbons, TPH）污染，較無地下水污染問題。在早期曾有使用土壤清洗或土壤淋洗等技術的案例，但此類技術以酸移除土壤中的重金屬，對農地土壤本身特性傷害較大，容易造成

難以回復破壞。因此目前農地類場址均以排客土(離場掩埋/再利用)或耕犁法為主要改善工法。

加油站的污染多來自汽、柴油洩漏造成，主要污染物為 BTEX 與 TPH，地下水有時可見到二氯甲烷同時存在，主要的整治技術包含排客土、耕犁法、生物堆、生物通氣法、SVE/AS、抽出處理、ISCO、現地生物整治等。

工廠類型污染場址，以重金屬與 TPH 為土壤主要污染物，而含氯有機化合物為地下水主要污染物，因此在技術上應用工法較多元，如排客土、耕犁法、SVE/AS、抽出處理、ISCO、現地/離地生物整治、界面活性劑沖排、奈米零價鐵等技術均常被利用。

2.3 美國超級基金土壤及地下水污染整治技術與國際技術發展趨勢分析

美國環保署針對超級基金(Superfund)所投入整治的污染場址，每隔3年會進行1次整治技術應用的統計與趨勢評析，筆者自2020年美國環保署出版之超級基金整治技術報告中整理2015~2017年超級基金整治技術應用情形的資料如表3及表4所示。在美國環保署出版報告中，將污染整治技術區分為污染源整治技術、底泥整治技術與地下水整治技術3類，其中污染源整治技術涵蓋了土壤、地下水與底泥的處理，而我國尚無底泥整治的案例，因此僅討論報告中土壤及地下水相關的整治技術。

由表3與表4可知，相較於臺灣，美國在土壤及地下水污染整治技術的應用上較為多元。在污染源處理的部分，美國在土壤污染整治技術上，同樣依賴物理性的整治工法，特別是離場處理；但在物理分離技術，如土壤清洗與分選，應用比例高，這可以將污染物濃縮，減少土壤資源的浪費。此外，美國以健康風險為基礎評估污染整治目標，因此與風險阻斷相關工法，如固化/穩定化、包圍技術、防漏處理等應用相對廣泛。但在其他技術上，如土壤氣體抽除、空氣曝氣法、離地生物復育、離地化學處理等，均與臺灣的狀況相似。

表 3 美國超級基金整治技術 - 污染源整治技術

技術分類與技術名稱	出現次數
現地處理 (in-situ treatment)	
生物性處理技術 (biological treatment)	
生物整治 (bioremediation)	6
化學性處理技術 (chemical treatment)	
固化 / 穩定化 (solidication/stabilization)	9
化學處理 (chemical treatment)	5
底泥藥劑添加 (amendments (sediment))	2
底泥表面覆蓋 (cap, amended, in-situ sediment)	2
土壤藥劑添加 (soil amendments)	1
物理性處理技術 (physical treatment)	
土壤氣體抽除 (soil vapor extraction)	9
多相抽除 (multi-phase extraction)	2
電動力 (electrokinetics)	1
沖排 (flushing)	1
熱處理技術 (thermal treatment)	
熱處理 (thermal treatment)	8
離地處理 (ex-situ treatment)	
生物性處理技術 (biological treatment)	
生物整治 (bioremediation)	1
人工濕地 (consturcted treatment wetland)	1
化學性處理技術 (chemical treatment)	
化學處理 (chemical treatment)	1
固化 / 穩定化 (solidication/stabilization)	3
物理性處理技術 (physical treatment)	
物理分離 (physical seperation)	22
污染源抽出處理 (source P&T)	7
循環利用 (recycling)	5

技術分類與技術名稱	出現次數
土壤氣體抽除 (soil vapor extraction)	2
曝氣 (aeration)	1
熱處理技術 (thermal treatment)	
熱處理 (thermal treatment)	4
離場焚化 (incineration (off-site))	2
露天焚燒 (open burn/open detonation)	1
無明確說明之離場處理 (unspecified ex-situ treatment (off-site))	9
無明確說明之離地處理 (unspecified ex-situ treatment (on-site))	1
包圍 / 離場掩埋 (containment/disposal)	
現場包圍 (containment (on-site))	
工程覆蓋 (cap, engineered cap)	43
疏濬 / 侵蝕控制 (drainage/erosion control)	37
土壤覆蓋 cover (soil))	24
包圍 (containment (other, onsite))	12
垂直工程阻絕牆 (vertical engineered barrier)	7
管線修復 (repair (pipe/sewer/tank/structure))	4
底部防漏處理 (bottom liner)	2
建物防漏處理 (building sealant)	2
滲出液控制 (leachate control)	2
封裝式包圍 (containment (encapsulation))	1
離場掩埋 (disposal (off-site))	79
監測式自然整治 / 加強式監測式自然整治 (MNR/EMNR)	
底泥加強式監測式自然整治 (sediment EMNR)	4
底泥監測式自然整治 (sediment MNR)	4

* 註：統計 2015-2017 年美國超級基金場址 175 份整治決策文件，其中有 75 份報告有提出執行整治工作。

表 4 美國超級基金整治技術 - 地下水整治技術

技術分類與技術名稱	出現次數
現地處理 (in situ treatment)	
生物性處理技術 (biological treatment)	
厭氧現地生物整治 (anaerobic, in-situ)	21
生物添加 (bioaugmentation, in situ)	11
好氧現地生物整治 (aerobic, in situ)	5
無特定說明之現地生物整治技術 (unspecified bioremediation, in situ)	4
植物整治 (phytoremediation)	1
化學性處理技術 (chemical treatment)	
現地化學氧化 (ISCO)	19
現地化學還原 (ISCR)	8
化學中和 (neutralization)	1
被動式反應牆 (PRB)	5
固化 / 穩定化 (solidication/stabilization)	2
物理性處理技術 (physical treatment)	
多相抽除 (multi-phase extraction)	4
空氣曝氣法 (air-sparging)	3
蒸氣抽除 (vapor extraction)	1
電動力 (electrokinetics)	1
沖排 (flushing)	1
熱處理技術 (thermal treatment)	
熱處理 (thermal treatment)	6
無明確說明之現地處理技術 (Unspecific in situ treatment)	3
離地處理 (ex-situ treatment)	
抽出處理 (P&T)	22
包圍 (containment)	
現場包圍 (containment (on-site))	
垂直工程阻絕牆 (vertical engineered barrier)	1
監測式自然衰減 (MNA)	
監測式自然衰減 (MNA)	22

* 註：統計 2015-2017 年美國超級基金場址 110 份整治決策文件，其中有 71 份報告有提出執行整治工作。

在地下水污染整治技術上，臺灣在 2014~2017 年間的整治技術中，現地化學處理技術，包含現地化學氧化與現地化學還原，應用比例較現地生物整治高。但在美國則相反，這可能是因為在美國地下水污染中，場址地下水中存在含氯有機物污染比例達 70% 以上 (USEPA, 2020)；除此之外，在美國的生物整治技術中，生物添加與厭氧生物刺激法比例約為 1:2，這顯示生物添加法在美國已被廣泛接受，但截至目前為止，臺灣尚無生物添加進行全場整治經驗。

在現地化學處理技術中，臺灣大部分採用現地化學氧化技術，僅有少數場址採用現地化學還原，但在美國，現地化學氧化與現地化學還原的比例約為 2.4:1，這也顯示臺灣在化學處理技術上，大多依賴化學氧化法，化學還原技術的應用經驗較少。此外，無論是在土壤或地下水的整治，現地熱處理技術在美國已經有一定程度的應用，但我國目前在熱處理技術上的全場應用仍然很少。

依據 Condit 等人對於 2006 年~2016 年美國 Battelle 紀念研究中心每 2 年舉辦的含氯及難分解有機物研討會將近 4,000 篇發表文件的研究，可以歸納出過去 10 年間主要的研究標的。在污染物的標的，主要探討重質非水相液體 (Dense Non-aqueous Phase Liquid, DNAPL)、輕非水相液體 (light non-aqueous phase liquids, LNAPL), 砷及 1,4-dioxane。在整治技術研究上，主要以生物整治與現地化學氧化最為熱門。污染物的生物地質化學轉化、蒸氣入侵以及綠色及永續整治則為新興的研究議題，Condit 等人預期，在整治技術發展上將有 3 項重要的發展趨勢，包含 (Condit et. al., 2017)：

1. 整治決策支援工具發展，包含綠色永續型整治、高解析度場址調查，以及可支持複雜場址的長期管理決策；
2. 著重於可能會讓場址再次被公告的潛在污染物研究，如全氟 / 多氟烷基化合物 (Per-and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 等新興污染物、土壤氣體入侵問題；
3. 現地整治技術與診斷工具的優化與發展，包含被動式整治技術 (如緩釋型、長效型藥劑)、藥劑分散技術、分子生物診斷工具等。

Suthersan 等人回顧含氯有機溶劑生物整治發展 (Suthersan et. al, 2017a) 與現地化學技術 (Suthersan et. al, 2017b) 應用歷程時，提出類似觀點。在調查部分，高解析度場址調查或是整合各類調查技術與診斷工具「智慧調查 (smart characterization)」為下

一個階段調查技術發展方向。大數據應用與預測，亦幫助土壤及地下水污染整治發展 (Suthersan et. al, 2016)，新興污染物，如 1,4-dioxane, PFAS 等的調查、分析與整治，亦將成為未來的發展重點。在整治技術方面，跨領域技術應用及精準整治，為下一個世代整治技術發展方向。

目前環保署在綠色永續型整治、高解析度調查、分子生物診斷工具等技術，均開始投入經費進行技術導入與試驗。從 2003 年起，環保署亦持續與學術界合作，補助學術界發展適合國內應用的調查與整治技術。

2.4 從列管場址概況看待臺灣土水整治需求

本文從目前已經解除列管 159 處污染場址列管歷程進行分析，在已經完成解列 159 處場址中，有 30 處僅土壤污染、有 65 處僅地下水污染，64 處同時存在土壤與地下水污染。圖 3 整理了 159 處場址在整治過程中，計畫變更的情形與整治時間的關係。從數量來看，有 77 處場址的控制 / 整治計畫書並無變更，36 處場址變更 1 次、20 處場址變更 2 次、7 處場址變更 3 次、8 處場址變更 4 次。其中有一個有趣的趨勢：場址變更次數與列管時間呈現正相關；換言之，列管時間越長，變更次數越多。且無論是何種污染介質，場址變更 2 次以上的平均列管時間均超過 5 年，約占已解列場址數量的 24% 左右。

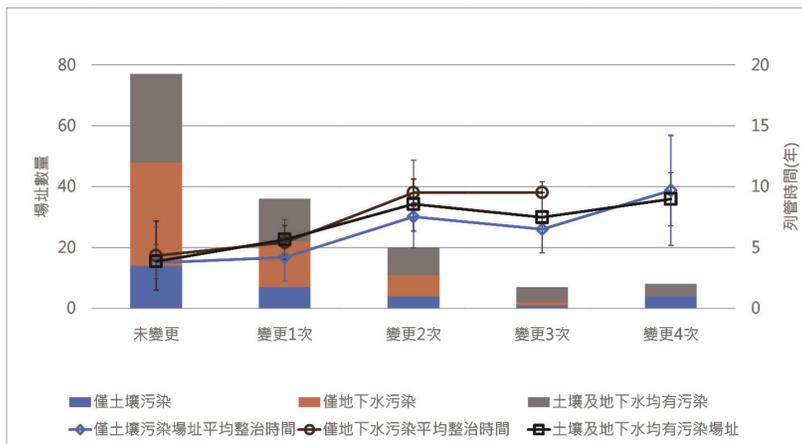


圖 3 控制 / 整治計畫書變更次數與列管時間關係

這些場址變更理由包含：(1) 驗證未通過、(2) 污染範圍、深度與預期不同、(3) 工法變更、(4) 更換整治廠商等；其中又以驗證未通過最為普遍。這些變更原因，顯示國內污染行為人在尋商過程中，缺乏對於廠商或技術的認識。因此在進行整治工作時，無法選擇合宜的整治執行單位，或無法判斷技術是否適合場址特性或污染特性所致。

從前面 2.1 節的分析當中可知，由於環保署目前土壤及地下水相關政策的推動與執行方式，在高污染潛勢場址調查力度逐漸降低，並強化污染改善管理後，國內污染場址數量將持續減少。當污染場址數量逐漸下降後，可以預期土壤及地下水污染整治技術與市場也將進入發展遲滯期。長期來說，需要協助產業維持發展動能，鼓勵技術創新，並設法將既有技術經驗傳承。

剩餘尚未整治污染場址，其整治難度大多很高，因此污染行為人或土地關係人在尋商時，需要對廠商與技術的適用性有更多的認識，才能有效掌握場址的整治工作執行品質、效果、時程與費用。而污染場址整治成功與否，最重要的是利害關係人之間的合作，其中整治執行單位扮演執行者與溝通者的重要角色，但目前國內缺乏合適方式評價整治技術或整治廠商的執行品質。

為了因應臺灣土壤及地下水污染整治市場的變動，也保持國內污染整治廠商的競爭力，環保署透過與地方主管機關、污染行為人、整治產業對話，聆聽各界需求，將從技術認證與產業媒合平台等 2 個方向進行規劃，透過對國內廠商的總體工作品質、既有整治技術能力、新穎技術查證等 3 項內容建立短中長期認證制度，期望可以透過認證制度的推動，幫助產業技術的發展與升級，並落實在污染場址整治中，加速污染場址解列，同時也幫助國內污染行為人或土地關係人能從廠商實績、整治技術能力宣告、環境技術查證等證明中，選取合適的廠商，也透過一系列的認證制度，幫助國內土壤及地下水污染整治相關業者，能夠累積實績與技術，增加市場機會，並透過國際認證方式，減低進入海外市場門檻（如圖 4 所示）。

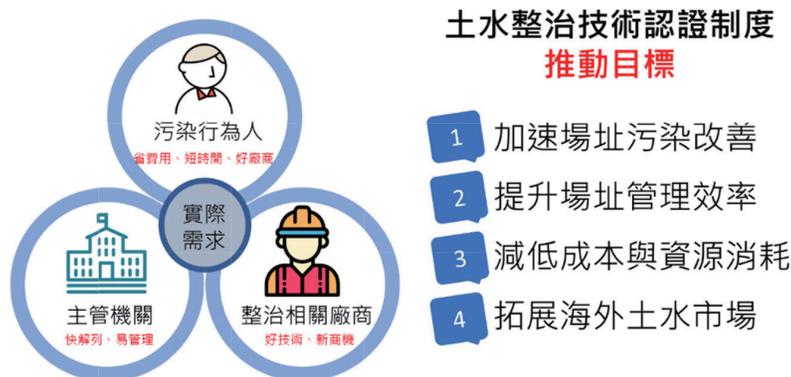


圖 4 3 階段土壤及地下水技術認證制度推動目的

三、3 階段土壤及地下水技術認證制度推動規劃

由 2.1 節與 2.2 節回顧內容可知，過去 20 餘年中，臺灣的土壤及地下水污染整治工作已累積許多優秀從業人員、廠商與技術，行政院於 2017 年 9 月 12 日核定新南向政策推動計畫時，亦將我國土壤及地下水污染整治技術列為五大工程輸出類別團隊中的環保工程技術之一（行政院，2016 年），次年行政院公共工程委員會發表之「工程產業全球化推動方案（政策白皮書）第 2 期」中也顯示，2016 年在越南即已獲得土壤及地下水污染相關顧問與現場工作標案（行政院公共工程委員會，2017），顯見我國土壤及地下水相關技術的水平。

然而，土壤及地下水是污染物最終的受體，對一般企業體或個人來說，土水的污染問題與其改善方式大多是陌生的，一旦發現自己的土地存有污染的問題，不易判斷與選擇合適的廠商與整治技術。但如前一節所述，成功的場址整治工作，仰賴利害關係人的共同合作，但主管機關、污染行為人、整治業者，基於對場址的目標不同，對於調查與整治技術的需求與要求也不盡相同。

對於主管機關而言，污染場址整治工作執行的品質、能否在核定的時間內完成污染改善並解除列管、避免污染整治過程產生二次污染與對場址附近居民的干擾，以及加速污染土地的再利用，為主要關切的議題。污染場址整治的費用、整治過程是否能維持營運、場址整治時程、能否有效協助與主管機關溝通協調，則是污染行為人或

土地關係人關切的重點。對於整治執行單位或廠商而言，所持有的技術或服務是否能夠被應用到污染場址、整治工作是否能夠獲利、市場是否能永續經營則是他們關切的重點。

因此，為提供國內污染場址可信賴且實惠的土壤及地下水污染整治技術，同時也幫助我國土壤及地下水污染整治產業與技術能在國內與國際間推廣與深耕，環保署規劃以 3 階段方式，推動短中長期土水認證制度與產業推廣與媒合平台，從廠商的總體執行能力到技術的認證，逐步建立系統性的認證系統，如圖 5 所示。逐步強化對國內土壤及地下水調查與整治技術服務供應商資訊的統整，幫助一般民眾得以在發生土壤及地下水污染事件得以在第一時間獲得技術資訊與協助；並藉由的認證的發給，強化本土技術能力的證明，使國內廠商在進行海外市場競爭時，有一份經過臺灣官方與第三公正方認可的實績與技術能力證明。如此，在解決國內各界需求的同時，也協助國內整治技術的精進與技術推廣，推動產業永續發展。

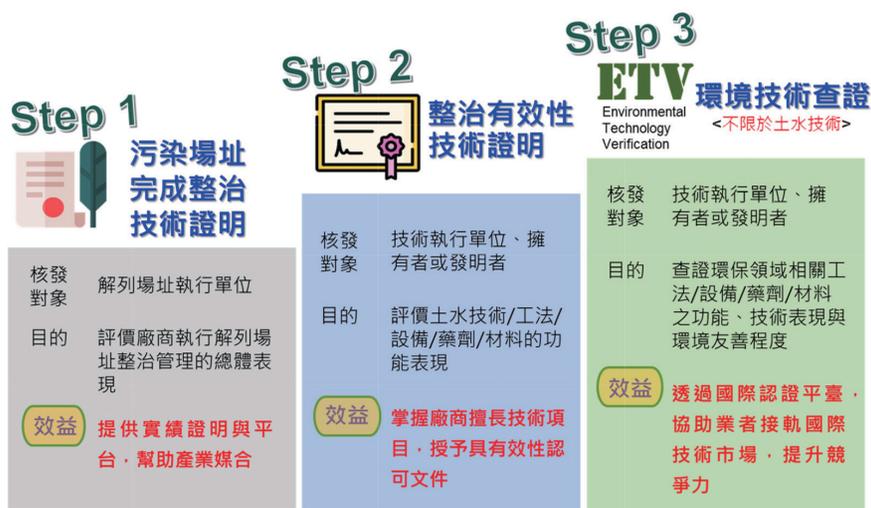


圖 5 3 階段認證制度推動內容與執行作法

3.1 污染場址完成整治技術證明核發

尋找可提供整治技術服務的供應商，是污染行為人面臨土壤及地下水場址公告後第一個問題。而技術服務的品質、整治的效果、費用，都是這些污染行為人期望可以獲得的資訊。過去環保署對於污染場址整治資訊的揭露，僅有基礎的污染場址資訊，缺乏整治成功案例與整治廠商的資訊。

因此在認證制度推動的第一個階段，環保署將整合污染場址整治工作執行現況，由參與技術審查的專家委員，對場址整治的執行單位進行整治技術服務的總體能力進行評價。圖 6 為目前污染場址完成整治技術證明申請與核發的實施程序，污染場址於場址改善完成時，一併填妥申請文件資料，併同改善完成報告提交審查，環保局將邀集土壤污染改善工作推動小組之專家委員，依據整治廠商在執行期間的報告書內容品質、整治工作執行過程的工程管理品質、是否因為整治操作問題被裁罰、最終整治成效等因子進行評核。如為整治場址改善完成並申請解列，相關文件將於環保局土壤污染改善工作推動小組審查通過後，提交至環保署申請辦理整治場址解除列管，併同核發「污染場址完成整治技術證明」。

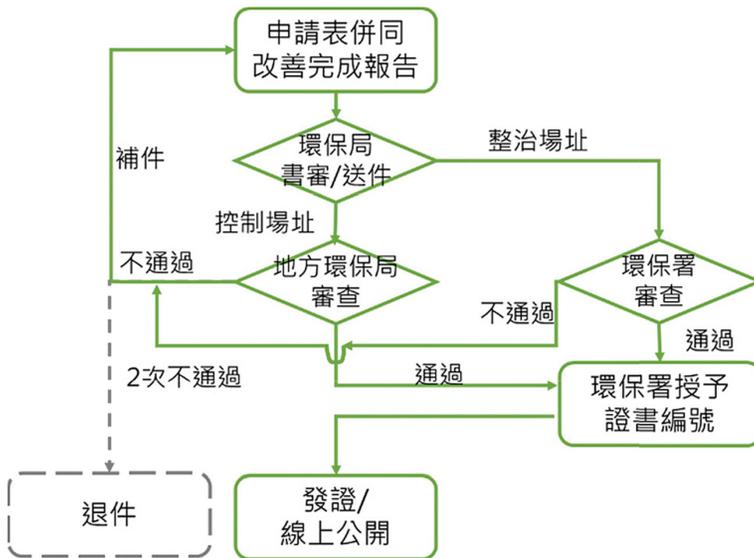


圖 6 污染場址完成整治技術證明申請審查程序

符合資格的整治執行單位與場址，將核發中英文版本「污染場址完成整治技術證明」，做為整治廠商於場址整治之實績與技術可行的佐證資料，本項工作已於 2021 年啟動，截至本文投稿前，環保署已開放「污染場址完成整治技術證明」的申請與核發工作，目前已針完成 7 處之「污染場址完成整治技術證明」的核發，圖 7 為某公司之證明書、圖 8 則為該場址公開於環保署網站的場址公開資訊。未來環保署將會把這些資料公告於媒合平台網頁上，並提供分類查詢功能，方便使用者可依據污染物種類、污染場址類型等需求進行查詢，如此未來國內污染行為人或民眾可以透過這個公開網站的資料，取得國內優良廠商執行的經驗與案例。同時，環保署亦將蒐集與篩選出經典的整治技術案例進行案例彙編，將整治技術經驗製作成參考手冊，提供未來污染場址整治的參考。

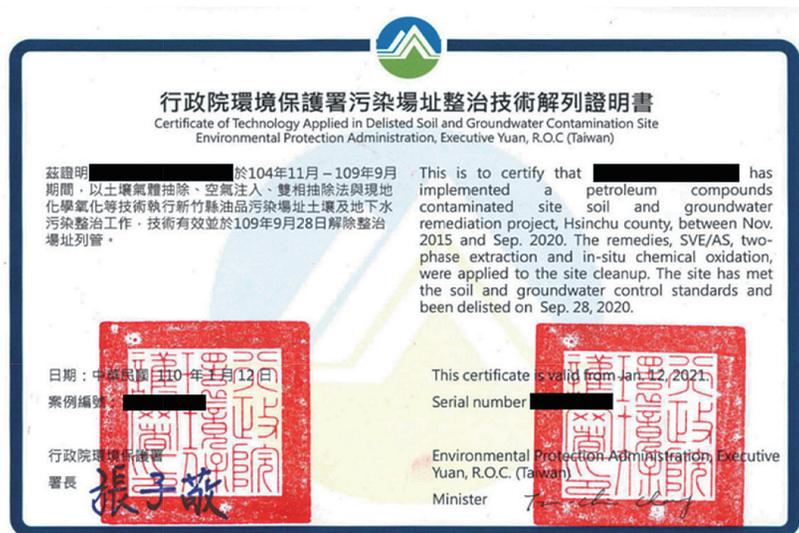


圖 7 國內某解列場址整治技術證明

場址名稱	JI0038		
場址所在地	新行鎮		
場址列管類別	整治場址		
場址類型	加油站		
場址污染介質	土壤及地下水		
場址污染物	介質	污染物與濃度	最大面積 (m ²)
	土壤	苯：102 mg/kg 甲苯：561 mg/kg 二甲苯：826 mg/kg 總石油烴氫化合物：7,920 mg/kg	336
地下水文地質特性	地下水	苯：43.0 mg/L 甲苯：72.2 mg/L 萘：0.484 mg/L 甲基第三基胺：427 mg/L 總石油烴氫化合物：75.5 mg/L	337
	平均水位 (m, bgs)		3.5 (bgs)
地質特性與分布描述	平均流速 (cm/sec)		9.11 X 10 ⁻³ (cm/sec)
	平均水力傳導係數 (cm/sec)		4.53 X 10 ⁻³ (cm/sec)
	0-0.3m 回填物 0.3-2.0m 均土夾礫石 2.0-3.0m 均土 3.0-4.5m 均土夾礫石 4.5m-10m 均土夾礫石		
整治執行時間	104年11月 - 109年9月		
場址整治費用	總計約1155萬元		
整治廠商聯絡資訊			
整治技術	雙相抽除處理法、土壤氣體抽除法、空氣注入法、化學氧化		
整治歷程與整治策略	104年12月至105年2月期間進行全場整治系統設置作業 105年2月至108年9月期間進行操作運轉土壤氣體抽除及雙相整治系統 105年9月至108年9月期間操作確空氣注入整治系統 107年5月間增設2口地下水曝氣井 108年9月間進行Fenton-Like化學氧化灌注		
整治技術執行成果概述	<p>一、雙相抽除處理法及土壤氣體抽除法 本場址於105年2月啟動抽水及抽氣系統，地下水位約控制在地表下3.8~4.35 m，抽氣初期系統尾氣均有明顯濃度，且隨系統調整呈起伏變化，抽氣系統累積污染物移除量共約266.34 kg。</p> <p>二、空氣注入法 105年7月由抽氣設備尾氣監測結果顯示，場內尾氣濃度已有明顯下降，且監測井均無浮油現象，故進行曝氣系統測試，並於105年9月全面啟動曝氣系統，將飽和層內之揮發性有機污染物驅趕出來，以加強飽和層之改善成效。</p> <p>三、化學氧化法 至108年8月場址地物理整治系統(SVE/AS)污染物移除效率已逐漸降低，考量本場址土壤質地較為鬆軟且有不均質之情形，為加強深層改善成效，於108年9月間針對深層開闢區域進行地化學氧化(Fenton-Like)灌注作業，累計灌注量約為300 L。</p>		
整治成效	土壤		
	地下水		

圖 8 某公司解列場址整治技術應用案例說明

3.2 技術有效性證明

技術本身的表現與能力，是整治成功與否的重要指標，也是環保機關或整治業者關注的另一個重點，因此第 2 階段與第 3 階段工作，將著重於土壤及地下水相關的「技術」或「工法」本身的能力與效果進行認證。

在第 2 階段認證工作中，將特別強調技術、工法、設備、藥劑或材料的能力與效果進行評價與認證。因此，技術有效性證明的申請對象將縮小至整治技術應用單位與技術擁有者或發明者。而認證標的，則是針對技術、工法、設備、藥劑或材料本身的功能與其成效與表現，由該領域的技術專家來進行審查與評核。

由於土壤及地下水污染調查或整治技術，在應用的過程中會受到污染場址特性，包含地下水文、地層構造、地質組成、水化學條件、微生物族群條件等因子的影響，同一種技術，在不同場址常會有不同的整治效率或效果，這使得土壤及地下水污染調查或整治技術的「能力」或「表現」，通常難以用單一標準評斷。

因此在第二階段認證的設計中，環保署將參考 ISO14020 的自我宣告以及對宣告內容的審核方式執行。透過申請者對於所申請的技術，在特定條件下污染改善表現的自我宣告，並提供符合基本操作參數要求下的現場執行結果做為佐證資料，由專家小組來透過書面審查的方式，來查證自我宣告內容的真實性，並確認這些申請的技術是否符合科學的原理。

技術有效性認證的行政管理架構如圖 9 所示。環保署將成立技術審議小組，依據各項技術的科學原理、水文地質適用條件、功能評估方法、操作參數與國內外應用效果等內容，建立各項技術的審查原則。未來技術有效性認證的受理申請與管理工作，將由環保署委託公正之第三方辦理。

當這些資料通過審查後，便由環保署授予中英文版本「技術有效性證明」，做為整治業者特定整治技術之技術能力與技術有效的佐證。這個證明文件可以做為整治業者在應用該技術進行污染改善時，有關技術是否適用於特定場址條件的證明文件。

但相較於第一階段認證是對於整治廠商的技術服務進行總體性的評價，第二階段是針對「技術」本身的能力進行評價，而為避免污染行為人或民眾對技術有過度的期待，證書的內容將涵蓋該項技術的適用條件、限制條件與在這個適用條件下的技術效果。

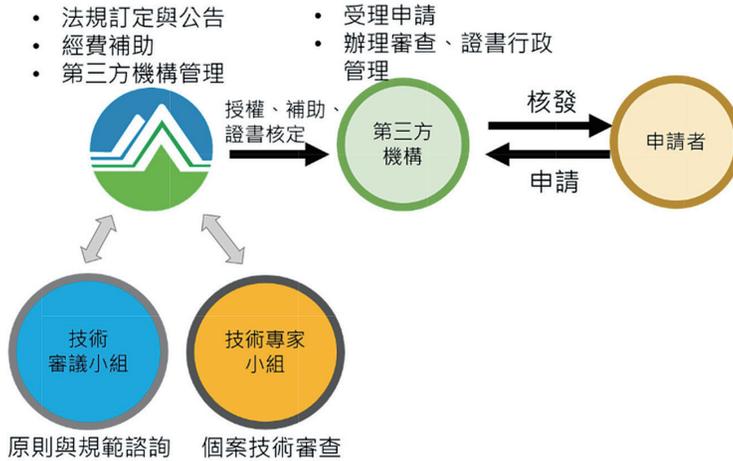


圖 9 技術有效性證明申請與審查行政管理架構

本項工作已於 2021 年啟動，環保署已參考「行政院環境保護署綠色消費暨環境保護產品推動使用作業要點」、「行政院環境保護署海洋廢棄物循環產品標章推動作業要點」及「行政院環境保護署室內空氣品質自主管理標章推動作業要點」等行政規則，就證書之授予、管理及撤銷、廢止等訂定規範，擬具「土壤及地下水污染整治技術有效性證明作業要點(草案)」(如圖 10)，以加速核發，並達落實相關技術發展之目標。

本項證明書將以「聲明書」的方式來提供技術能力的證明，內容將涵蓋說明申請之技術內容、自我宣告之技術適用條件與條件、審查結果之聲明等，土壤及地下水污染整治技術有效性證明範例如圖 11 所示，透過完整的資訊揭露，使得申請者的技術資訊、技術能力與成效可以正確的被傳達，而使得這個有效性技術證明更具有公信力。



圖 10 土壤及地下水污染整治技術有效性證明作業要點草案內容架構

行政院環保署土壤及地下水污染整治技術有效性技術證明 EPA Soil and Groundwater Remediation Technology Performance Statement of Technology Name		行政院環保署土壤及地下水污染整治技術有效性技術證明 EPA Soil and Groundwater Remediation Technology Performance Statement of Technology Name	
證書編號: 000001	發證日期: XXXXXXXXXX	Serial number: 000001	Date of issue: XXXXXXXXXX
技術名稱 土壤蒸餾抽除	技術提供者 OO科技股份有限公司	Technology Soil vapor extraction	Provider OO Technology Co., Ltd.
技術提供者地址 中興路與高橋路OO號OO號	技術提供者聯絡電話 +886 7 3333333	Address No. 000, OO Rd., OO Dis. Kaohsiung City, Taiwan, R.O.C.	Phone +886 7 3333333
技術提供者電子信箱 OO@OOtech.com.tw		E-mail OO@OOtech.com.tw	
技術能力表現自我宣告 Technology Performance Self Declaration:		Technology Performance Self Declaration:	
<ol style="list-style-type: none"> 技術描述: 於蒸氣室中建立負壓，抽除存在於土壤空隙中的氣態揮發性有機物，並於地面以活性炭吸附法處理抽出之污氣物，使排放至大氣之揮發性有機物濃度低於100ppmV。 技術能力宣告: 在單一抽氣井中，達2.1-10cmHg之負壓，以1.5-10L/min之流量抽出濃度高於100ppmV、含甲苯、甲苯、二甲苯及乙苯等氣態揮發性有機污染物的蒸氣。 技術適用條件宣告: 本技術適用於地質為礫石、砂、細砂或砂質粘土之土壤蒸氣層，並適用於蒸氣壓力大於1.05 mmHg之揮發性有機物。 技術適用限制宣告: 本技術不適用於黏土、黏土質粉土等物質，且不適用於含水層中。 		<ol style="list-style-type: none"> Description: SVE can establishing negative pressure in the aeration zone of soil to remove gaseous volatile organic compounds, and treat the extracted pollutants with activated carbon adsorption on the ground. The exhaust gas of treatment system is less than 100ppmV. Capability declaration: For each extraction well, a negative pressure of 3-10cmHg would be established by SVE, and the soil gas with gas-phase volatile organic pollutants such as benzene, toluene, xylene and ethylbenzene is extracted out at a flow rate of 1.5-10L/min. Applicable conditions: This technology is suitable for soil aeration layers with gravel, sand, fine sand, and sandy silt. It is suitable for VOCs with vapor pressure greater than 1.05 mmHg. Restriction of application: This technology is not suitable for clay and sily clay. It is not applicable for aquifers. 	
技術能力表現審查結果聲明 Technology Performance Statement:		Technology Performance Statement:	
經本署及專家小組技術審查，確認OO科技股份有限公司所提之土壤蒸餾抽除技術，在符合其自發宣告之適用條件下，可以在礫石、砂、細砂與砂質粘土之蒸氣層土壤空隙中，抽除苯、甲苯、二甲苯及乙苯等蒸氣壓力大於1.05之氣態揮發性有機物，並於地上以活性炭吸附法處理抽出氣體，總處理量最大可達150m ³ /day。處理後之蒸氣揮發性有機物濃度低於100ppmV。		After the technical review of EPA and the expert team, it is confirmed that the SVE proposed by OO Technology Co., Ltd. can be used in the aeration zone with gravel, sand, fine sand and/or sandy silt under the applicable conditions of its self-declaration. The SVE can extract gas with benzene, toluene, xylene and ethylbenzene and other gas-phase VOCs with vapor pressure greater than 1.05, and treat the extracted gas with activated carbon adsorption on the ground. The total treat volume can reach up to 150m ³ /day. The total concentration of volatile organic compounds in the exhaust gas is less than 100 ppmV.	
行政院環境保護署 署長		Environmental Protection Administration, Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan) Minister	
免責聲明 No Warranty Clause 本有效性證明僅證明本公司所提出申請技術文件符合科學原理與工程設計，並且在該條件下可達到宣告的技術目標。當現場條件改變時，不保證本項技術的適用性。		No Warranty Clause This statement only confirms that the technical documents submitted by OO Technology Co. Ltd. are reasonable and align with scientific principles and engineering design, and the technology can achieve the capability declaration under specific conditions. When the site conditions change, the applicability of the technology is not guaranteed.	

圖 11 中英文版本土壤及地下水污染整治技術有效性技術證明 (草案)

3.3 環境技術查證

我國對於認證與驗證有相對標準的定義，依據標準法第三條之定義，認證 (accreditation) 是指主管機關對特定人或特定機關 (構) 給予正式認可，證明其有能力執行特定工作之程序，而驗證 (certification) 則是由中立之第三者出具書面證明特定產品、過程或服務能符合規定要求之程序。而依據驗證目的之不同，又可以將之區分為查證 (Verification) 與確證 (Validation)。所謂的查證，是經由客觀證據之提供，證實

業已達成規定之要求，通常是用來確認是否達成「規格」所要求的內容，查證可包括活動包含：執行交替的計算、將新的設計規格與類似經認可的設計規格做比較、從事試驗與展示。而確證經由客觀證據之提供，證實業已達成特定意圖用途或應用之要求，用以確認是否達成「目的」。

「環境技術查證」(Environmental Technology Verification, ETV) 為歐盟、美國、加拿大等國家近年來推動的環保技術規範，依據 ISO14034 的定義，ETV 期望透過嚴謹的查證程序，更制度化的針對應用於環境各領域技術的「性能」、「創新」與「環境表現」進行評估、查證與宣告，幫助技術在進入市場前，能夠確保該技術的能力與市場性 (ISO, 2017)。歐盟提出 ETV 的通常性查證程序 (General Verification Protocol, GVP) 後，國際標準組織 (International Standard Organization, ISO) 亦於 2017 年發表 ISO14034 環境技術查證指引。可預期，ETV 的認證將成為在環境產業的各項技術的技術門檻，從品質、性能、創新性到環境表現等面向來使這些技術發展與應用，能符合歐盟「綠色政綱 (Green deal)」或「美國綠色新政 (Green New Deal)」的未來發展策略。

圖 12 為 ISO14034 目前 ETV 的標準執程序，技術申請者需依據查證機構的文件與程序，填寫申請文件，並由查證機構辦理資格審查，當技術符合申請資格且文件內容足以進行申請時，才正式提出申請文件，並與查證機構簽訂合約，執行 ETV 工作。

在 ISO14034 的精神中，申請者需對申請的技術性能與規格進行宣告，並與查證組織討論該項技術的規格內容與其性能表現是否能夠相符，從而擬定查證計畫書。在 ISO14034 的程序中，是可以接受申請者提出足夠的、經過符合 ISO17025 或 ISO17020 之單位執行而提出的測試結果數據，來佐證該項技術符合其技術規格的宣告。當查證機構認為該數據內容不足以證實該項技術符合技術規格宣告時，便可要求申請者追加新的測試數據。這個測試工作，由申請者向查證單位認可的測試組織共同規劃，並由測試組織依據測試計畫書執行，直到測試結果能夠確認技術的效果符合技術規格的宣告。當確認數據符合技術規格宣告後，查證機構與申請者，對查證結果報告、查證結果聲明與 ETV 證書內容進行協商，確認可以公開之事項，最後由查證機構核發 ETV 證書。

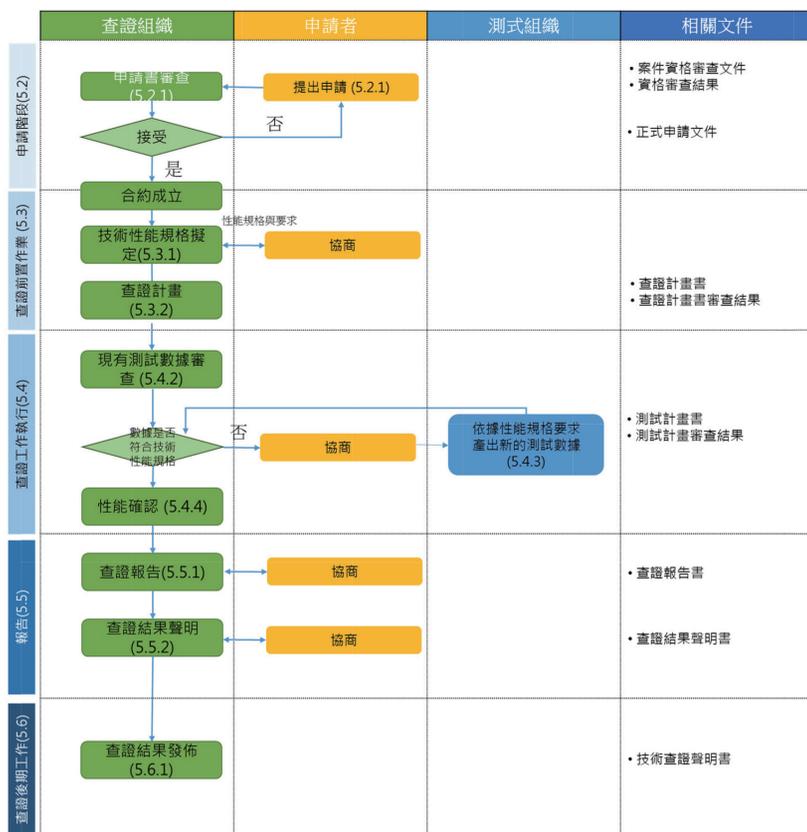


圖 12 ISO 14034 ETV 執行程序

在第三階段的認證制度中，環保署將以 ISO 14034 環境技術查證指引為架構，針對環境領域相關技術，由第三方公正單位進行系統性的查證工作，確認其新穎性、創新性以及對於環境永續性的幫助。與土壤及地下水相關的環境技術查證工作，則將以技術、工法、設備或產品（包含藥劑）為主要的標的，包含應用於土壤及地下水污染調查或整治過程的技術，透過 ISO 系統，提供國際性通用的查證結果，幫助國內廠商在推動國外技術行銷時，可以降低市場進入的門檻。

第三階段推動土壤及地下水相關技術 ETV 工作的推動規劃如圖 13 所示，截至目前為止，環保署已經依據 ISO14034 內容與歐盟 GVP 內容擬訂土壤及地下水技術相關執行程序，開始與國內第三方認證機構討論以土壤及地下水污染整治技術為出發點，擴大推動發展 ETV 並與國際認證機構相互認證的可行性。



圖 13 ETV 發展與推動架構

四、產業發展推動與未來展望

臺灣土壤及地下水污染整治工作，經過 20 餘年的發展，已經進入技術與市場的成熟期，這麼多年來土壤及地下水相關從業人員技術與經驗的累積，是這個產業的重要資產。

土壤及地下水污染整治通常需要很長的時間，但場址整治完成後再次發生污染的機會低，屬於一次性的工作。隨著環保署場址調查力度趨緩以及污染場址逐步改善解除列管，污染場址數量將逐年降低，土壤及地下水領域從業人員面臨的產業競爭將更為激烈。而目前尚待整治場址的整治難度高，在全球土水污染整治工作朝向「精準整治」的發展趨勢下，需要國內的學術界與產業持續投入技術的發展。

爰此，環保署將持續投入費用，鼓勵學術界投入人力研究與精進土壤及地下水污染調查與整治技術的開發，並透過示範場址的方式，媒合產業與學術界資源與技術，使學術研究從實驗室邁向實場，藉由示範場址測試過程克服實驗室與實場落差，在幫助技術市場化的同時，也解決國內場址問題 (圖 14)。



圖 14 土壤及地下水污染整治技術推廣策略

在技術與應用實績累積的過程，環保署亦將建構技術推廣平台，將國內場址的案例經驗、科技研究成果公開，並設計媒合平台，提供國內場址行為人查詢。環保署也會持續辦理訓練課程與國際研討會，幫助國內技術的推廣。

鼓勵技術提升、引導產業技術精進與發展，是環保署在環境領域工作的隱形任務，環保署透過 3 階段認證制度的設計，先以「污染場址完成整治技術證明」出發，對於整治廠商於該場址執行整治工程管理的能力進行評價。接著以「有效性技術證明」，針對既有技術的技術能力、成效進行書面資訊的查證，透過廠商的自我宣告、佐證資料審查等方式，進行技術有效的適用條件、使用限制等因子的確認。最後則是整合國際標準系統的查證方式，對新穎技術的新穎性、創新性、技術能力表現、環境附加價值，進行書面或實體的查證，授予符合國際標準的「環境技術查證」證明書，幫助國內創新技術進入國內外市場。最後再整合技術推廣媒合平台的功能將認證的資訊揭露，提供國內各界查詢。

環保署預計透過 3 階段認證制度，協助國內場址與主管機關對國內廠商與技術建立篩選基礎門檻，也幫助國內具有優良技術的廠商，能夠取得由主管機關或國際認證機構所認可的技術，有利於場址的污染改善工程品質的提升，間接幫助廠商的技術行銷。未來也期望透過此方式，與國際認證組織能夠接軌，透過環境技術查證的效果，降低國內技術進入國際市場的門檻。

參考文獻

- 經濟部工業局。(2014)「產業永續發展整合資訊網，新聞動態」，2014年9月10日。
- 行政院。(2016)。「新南向政策工作計畫」，2016年5月9日。
- 經濟部工業局。(2016)「國際永續發展資訊動態電子報」，2016年12月。
- 行政院公共工程委員會。(2017年)。「工程產業全球化推動方案(政策白皮書)第2期(107~110年)」，2017年9月18日。
- 簡慧貞、陳以新、張富傑。(2021)。貯存系統環境保護整合管理策略。工業污染防治，151期，1-28頁
- 環保署。2018「土壤及地下水污染整治綠色創新技術推動與技術驗證示範計畫」。
- Condit W, Hawley E, Rectanus H, Deeb R. Global trends in the environmental remediation industry. *J Environ Manage.* 2017 Dec 15;204(Pt 2):705-708.
- International Standard Organism. (2016), Environmental Management – Environmental Technology Verification (ETV), ISO14034:2016 (E).
- Suthersan, S., Gentile, M., Bell, C., Quinnan, J. and Horst, J. (2016), Big Data and Environmental Remediation: Gaining Predictive Insights. *Groundwater Monit R*, 36: 21-31.
- Suthersan, S., Schnobrich, M., Martin, J., Horst, J.F. and Gates, E. (2017), Three Decades of Solvent Bioremediation: The Evolution from Innovation to Conventional Practice. *Groundwater Monit R*, 37: 14-23.
- Suthersan, S., McDonough, J., Schnobrich, M. and Divine, C. (2017), In Situ Chemical Treatment: A Love-Hate Relationship. *Groundwater Monit R*, 37: 17-26.
- USEPA, (2020), Superfund Remedy Report 16th Edition.

工業污染防治刊物徵稿

主辦單位：IDB 經濟部工業局 執行單位：財團法人台灣產業服務基金會

「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治之技術及管理工具，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110年已發行153期，專業論著已逾1,810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. 空氣污染與噪音類：空污減量、多污染與跨媒介之整治案例
2. 廢(污)水處理類：節水廢水回收再利用、廢水氨氮及重金屬處理技術
3. 廢棄物類：綠色材料與永續物料管理
4. 環境化學及微生物：土壤與地下水整治、毒性化學物質管理
5. 環境規劃與管理：再生能源發展與應用、永續發展策略、生命週期評估及淨零碳排

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；或透過計畫網站線上投稿<https://proj.ftis.org.tw/oss/index.html#/>
2. 檔案下載：徵稿啟事、撰寫格式及範例、著作權讓渡同意書
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



陳怡靜工程師 專線電話：(02)7704-5157
E-mail：yj.mg@ftis.org.tw
陳筱薇工程師 專線電話：(02)7704-5167
E-mail：sabinachen@ftis.org.tw



「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 110 年已發行 153 期，專業論著已逾 1,810 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) 空氣污染與噪音類
 - (2) 廢(污)水處理類
 - (3) 廢棄物類
 - (4) 環境化學與環境微生物類
 - (5) 環境規劃與管理類
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:yj.mg@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 5157 「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)、a 依序類推為原則，章節編寫系統範例如下：一、

→1.1→1.1.1→1.→(1)→a。

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，p 3-9。

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.

附件

著作權讓渡同意書

作 者：_____

題 目：_____

作者通訊處：_____

一、保證本篇文章除本次投稿外，相同內容未投國內外其他有版權之期刊，或有抄襲之情事；如有上述情形願抽回本文。

二、同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給經濟部工業局，財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部工業局計畫，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，但須註明本文章作者。作者保留引用文章在自己著作之權利。如爾後有抄襲、版權、著作權等之法律紛爭，文責由作者自負。

此 致

財團法人台灣產業服務基金會

作者：_____ 簽章

年 月 日



本期刊下載

發行所：經濟部工業局

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：<https://proj.ftis.org.tw/eta/>

ISSN 2042783

GPN 2007100008

工本費 250元