



工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control



156

中華民國111年11月
VOL.41 No.3 Nov.2022

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

中華民國一〇一年十一月出刊

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.mocaidb.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



156

中華民國111年11月
VOL.41 No.3 Nov.2022

156 工業污染防治

空氣污染與噪音類

燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

..... 李家聿、辛繼勤、林楷傑、賴俊甫 1

客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

..... 莊育銘、江康鈺 15

廢溶劑處理廠之選擇性觸媒還原法對戴奧辛處理效率

..... 吳義林、張恩愷 51

透過改善燃燒空氣供應系統達成節能減碳與污染防治之探討

..... 古家宇、吳克敏、徐洪陞、陳育群、陳昱志 71

三相高頻寬電極間距之靜電集塵器

..... 蔡東昇、徐榮彬 87

廢（污）水處理類

工業區污水處理廠化學處理單元產生積垢（結晶物）探討－大甲幼獅污水廠實例

..... 蘇育嫻、洪聖智、張淑麗 109

都市污水處理廠放流水以不同再生程序因應工業再利用之處理技術

..... 侯清文、王朝民 129



本期簡介

「工業污染防治」刊物(以下簡稱本刊物)自民國 71 年發刊至今,已出版 155 期,共刊載 1,826 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 7 篇,分別撰述「燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討」、「客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究」、「廢溶劑處理廠之選擇性觸媒還原法對戴奧辛處理效率」、「透過改善燃燒空氣供應系統達成節能減碳與污染防治之探討」、「三相高頻寬電極間距之靜電集塵器」、「工業區污水處理廠化學處理單元產生積垢(結晶物)探討—大甲幼獅污水廠實例」及「都市污水處理廠放流水以不同再生程序因應工業再利用之處理技術」,作者慨賜宏文,提供寶貴經驗,特此致謝。

空氣污染與噪音類

燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

李家聿*、辛繼勤**、林楷傑***、賴俊甫****

摘 要

廢氣燃燒塔 (flare) 是專門設計用來燃燒廢氣的。許多燃燒塔利用蒸氣或空氣輔助增加氧氣並促進混合，以確保燃燒時無煙改善視覺污染。影響燃燒效率的參數有很多，例如廢氣熱值，以及蒸氣廢氣比 (Steam to Vent Gas, 簡稱 S/VG) 等。添加適量蒸氣或空氣對燃燒有所助益，但過量添加則可能冷卻火焰並稀釋廢氣，從而降低熱值，不利於燃燒效率。然而，適用於所有燃燒塔的單一 S/VG 是不存在的。廢氣組成、燃燒塔設計會決定適當區間。一般而言，製造商建議值，S/VG 約為 0.1~1 (US EPA, 2012)。然而，實務操作上會因為廢氣量變動大等因素，該建議值難以達成。本文在確保燃燒效率下，提出 S/VG 合理操作區間。

案例顯示，燃燒塔在歲修等非常態使用，通常為高熱值狀態。對照德州研究報告，高熱值下蒸氣廢氣比即使達到 300%，仍可維持 98% 削減率。在常態使用下，廢氣會由燃燒塔廢氣回收系統 (FGRS) 回收，作為燃料氣使用，進而導致燃燒塔無排放。但此時仍會有最低蒸氣量，以維持系統應變且避免水錘作用。

目前，環保法規規定使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其蒸氣量與廢氣量之重量比較無彈性且未考量廢氣熱值。實務顯示個案狀況有所不同，建議提供彈性操作區間。本研究可提供環保機關審查操作區間，或做為推動相關法令修訂參考。

2 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

【關鍵字】揮發性有機物、排放減量、節能減碳

- | | |
|-------------------|-----|
| * 中油煉製事業部大林煉油廠環保組 | 工程師 |
| ** 中油煉製事業部 | 執行長 |
| *** 環興科技股份有限公司 | 工程師 |
| **** 經濟部工業局 | 科長 |

一、前言

廢氣燃燒塔 (flare) 是石化產業 (含煉油廠) 相當常見的終端處理設備，在正常操作過程中，燃料氣呈現動態的平衡，廢氣經由燃氣回收系統 (FGRS)，利用隔離槽造成的壓力差回收、淨化後，回到廠內作為燃料循環使用，能有效避免酸性廢氣逆流至燃燒塔排出；然而在燃料氣壓力超出安全設定壓力或燃料氣品質不良 (氫氣、蒸氣及其他可能影響監測數據之物質含量過高) 及其他不確定因素發生時，則會使用燃燒塔緊急處理，因此燃燒塔除了是調節系統壓力的工安設備，也是環保關注的重點設備。

富含碳氫化合物之廢氣於燃燒時，燃燒區若無足夠之氧氣混入，常因燃燒不完全而伴隨黑煙之產生，故案例廠廢氣燃燒塔透過添加額外蒸氣輔助燃燒，於焰頂處使用蒸氣噴嘴將蒸氣噴入火焰中，藉以增加焰頂處空氣紊流效應，促使燃燒塔燃燒更完全；然而燃燒塔燃燒時，混入過量的蒸氣或一般空氣，將導致過度充氣 (over-aerated) 而降低出口火焰溫度，反而產生廢氣破壞移除率 (Destruction Removal Efficiency, DRE) 降低、未燃燒完全之碳氫化合物 (Unburnt hydrocarbon, UHC) 排放、燃燒效率 (Combustion Efficiency, CE) 降低及隆隆聲響 (John Zink Company LLC, 2021)。燃燒塔使用不同的蒸氣 / 空氣量與廢氣之重量比與燃燒情形如圖 1 所示。



圖 1 燃燒塔使用不同的蒸氣 / 空氣量與廢氣之重量比與燃燒情形
(John Zink Company LLC, 2021)

4 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

我國環保署針對燃燒塔之操作規範，可參考 102 年 1 月 3 日修正發布之「揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」，其中第 5 條規範蒸氣及廢氣重量比應介於 0.15~0.5，係避免廢氣燃燒塔之 DRE 不足之問題，法規關範內容如表 1 所示。

美國有關燃燒塔之法規規範，參考 SCAQMD Rule 1118 及 US EPA 40CFR63 Subpart CC (Refinery MACT 1)，雖同樣存在針對母火維持、總淨熱值及排放速度之規範，惟均無有關 S/VG 之相關規範，而是要求依燃燒塔之無煙能力 (smokeless capacity) 設計規範操作。若有微量黑煙產生，其連續 2 小時累積不能超過 5 分鐘，因此有關蒸氣用量的許多討論，僅以提供給設計者參考為主，最後由業者或製造商決定如何運用及操作。另美國 EPA 亦與許多煉油廠簽訂了一系列的同意令 (Consent Decrees) 加強管理，參考密西根州與印第安那州發布之同意令，其中有關燃燒效率之規範，首先規定蒸氣量與輔助燃料量均須由全自動系統控制，藉此將廢氣量、熱含量和蒸氣量都由業者按個燃燒塔特性自動調整；另規範 S/VG 應小於 3.0 (重量比) 或 2.7(體積比)，小時平均值；其次燃燒效率應符合 98% 之燃燒效率。

表 1 揮發性有機物空氣污染管制及排放標準第 5 條 (摘錄)

第 1 項	廢氣燃燒塔之母火不可熄滅，且應使用獨立穩定之燃料系統。使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其蒸氣量與廢氣量之重量比應介於百分之十五至百分之五十。但因製程特性報經主管機關核可者，不在此限。	
第 2 項	廢氣燃燒塔之設計及操作條件應符合下表之規定：	
	輔助燃燒型式	總淨熱值 (HT) 與排放速度限值 (V)
	蒸氣輔助 燃燒型式	符合下列三者之一： (1) $HT \geq 12 \text{ MJ/Nm}^3$, $V < 17 \text{ m/sec}$ (2) $HT > 40 \text{ MJ/Nm}^3$, $17\text{m/sec} \leq V < 114 \text{ m/sec}$ (3) $40 \text{ MJ/Nm}^3 \geq HT \geq 12 \text{ MJ/Nm}^3$, $V < V_{\text{max}}$ 且 $V < 114 \text{ m/sec}$

故上述 S/VG 規範與我國規範之 0.15~0.5 有所差異，應屬管制觀念之不同，美國僅訂定最高上限，避免 DRE 降低太多，或甚至吹熄火種，故燃燒塔操作自動化後，業者可自行設定參數，以符合黑煙排放、燃燒效率及操作成本等各項需求。有關我國與美國有關燃燒塔之規範項目比較，如表 2 所示。

表 2 我國與美國有關燃燒塔之規範項目比較

	屬性	燃燒塔規範項目			
		總淨熱值	排放速度	蒸氣 / 廢氣比	燃燒效率
揮發性有機物空氣污染管制及排放標準	中央法令	O	O	O	X
US EPA 40CFR63 Subpart CC	中央法令	O	O	X	X
SCAQMD Rule 1118	地方法令	O	O	X	X
Consent Decree: Marathon Petroleum Company LP, and Catlettsburg Refining, LLC	與指定業者協議	O	O	O	O
Consent Decree: BP Products North America Inc.	與指定業者協議	O	O	O	O

相對於環保署，我國地方環保局考量重點以社會觀感為主，往往更重視燃燒不完全所導致燃燒塔產生明顯粒狀污染物（黑煙或煙塵）散佈於空氣中的視覺污染，以往煉油廠皆以違反空污法第 32 條第 1 項第 1 款作為裁處；現今，燃燒塔的管理除了需要無煙燃燒外，還必須注意輔助蒸氣的用量，這對燃燒塔管理上，形成一鉅大挑戰。

二、蒸氣 / 廢氣比 (S/VG) 與 DRE 變化關係

由於目前我國環保法規規範，使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其 S/VG 與國外差異較大；以下整理國外針對燃燒塔之相關研究文獻，探討蒸氣 / 廢氣比、DRE 及其他操作參數之關係。

1. 美國德州燃燒塔破壞效率實驗 (TCEQ 2010 Flare Study)

美國德州環境品質委員會於 2010 年，為探討於不同廢氣流量、不同 S/VG、及淨熱值之情形下，破壞移除率 (DRE) 與燃燒效率 (CE) 之關係，且是否仍能達到規範之 DRE 不小於 98% 條件，實驗區間在燃燒塔起煙點 (Incipient Smoking Point, ISP) 及鼻煙點 (Snuff Point) (圖 1 (右)) 之間，實驗結果如下：

6 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

(1) 以相同熱值及流量，不同蒸氣 / 廢氣重量比與 DRE 變化關係

實驗使用由丙烯組成熱值 350 BTU/scf (相當於 11 MJ/m³) 及廢氣流量 2,342 lb/hr (相當於 1,062 kg/hr) 之氣體，以不同 S/VG 分別為 0.29、0.54 及 1.05 測試 DRE。可得知於低廢氣熱值及高流量之情形下，介於國內標準 0.15~0.5 之蒸氣廢氣確實有較高之 DRE，如圖 2 所示；惟實驗未考慮實廠上使用廢氣燃燒塔，是在緊急處理情況下之工安設備，廢氣流量的增減速度以及物種熱值的變化是不可控的。



圖 2 相同熱值及流量下不同 S/VG 與 DRE 之關係 (TCEQ 2010 Flare Study)

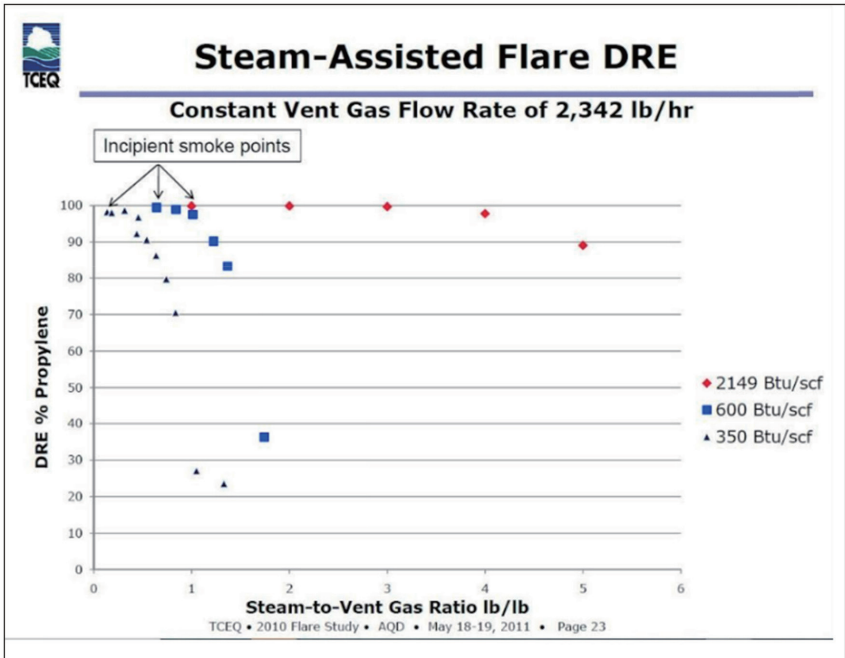


圖 3 相同流量下，不同熱值及 S/VG 與 DRE 之關係 (TCEQ 2010 Flare Study)

(2) 以相同流量，測試不同熱值及蒸氣 / 廢氣重量比與 DRE 變化關係

同樣以丙烯組成 3 種不同熱值，分別為 2,149 BTU/scf、600 BTU/scf 及 350 BTU/scf (相當於 80 MJ/m^3 、 22 MJ/m^3 、 11 MJ/m^3) 之氣體，以不同 S/VG 輔助燃燒測試廢氣之 DRE。可得知於熱值 2,149 BTU/scf 時，蒸氣 / 廢氣重量比介於 1.0~3.0 時，DRE 皆為 99.9%，甚至在比例達 4.0 時，DRE 仍還有近 98%，結論顯示 S/VG 操作範圍，隨廢氣熱值呈正相關，如圖 3 所示。

(3) 其它研究結論

- A. 為了達成 98%DRE 之最佳操作點，是在接近燃燒塔起煙點 (ISP) 附近。
- B. 高熱值下，達成 98%DRE 之 S/VG 區間較寬，低熱值下，達成 98%DRE 之 S/VG 區間狹窄，尤其當 S/VG 過量使火焰消失，燃燒塔 DRE 不佳。
- C. 廢氣熱值 350 and 600 Btu/scf，S/VG 小於 1.1 可以達成 98%DRE。
- D. 廢氣熱值 2,149 Btu/scf，S/VG 小於 3.3 可以達成 98%DRE。
- E. 蒸氣注入點影響不同，由中心注入 (center steam) 在特定狀況下可能會導致 DRE 不佳。
- F. 對於蒸氣輔助和空氣輔助燃燒塔，廢氣成分 (丙烷與丙烯) 對燃燒特性的影響遠小於蒸氣或空氣量和廢氣熱值。

2. 美國埃克森美孚化學公司 (Flare Steam-Assist Optimization, 2012)

透過目視燃燒塔火焰狀況探討法規符合度，如圖 4。圖 4 左一為明顯黑煙狀況違反無煙燃燒規定；左二為起煙點 (ISP)，在符合法規下其所需的空氣或蒸氣量最少，可以兼顧無煙燃燒及最佳 DRE；左三至左五顯示 S/VG 增加之下，火焰變透明，其 DRE 會下降；右一為鼻煙點，為蒸氣煙流且看不到火焰，DRE 將顯著低於 98% 違反規定。

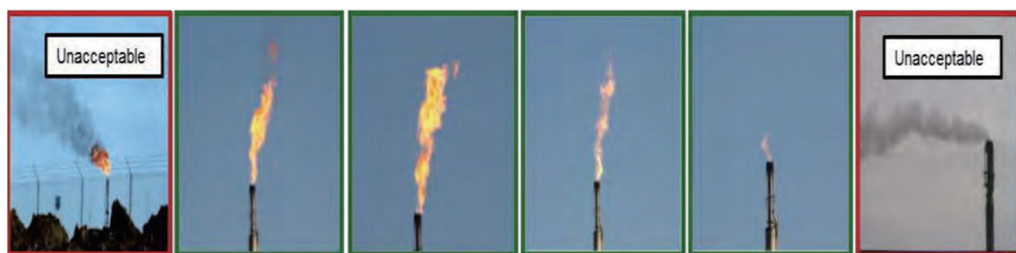


圖 4 不同 S/VG 之燃燒塔運行樣態 (Flare Steam-Assist Optimization, 2012)

8 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

以目前國內揮發性有機物空氣污染管制排放標準第 5 條規定，S/VG 應介於 15~50%，經查應是參考 API 521 訂定，似僅考量到低熱值狀況。圖 3 中不同熱值之 ISP、98%DRE 之 S/VG 區間皆不同，高熱值時 ISP 約為 1，而且 98%DRE 之區間，約為 1~3.3。

三、研究方法

參考 2010 年美國德州燃燒塔破壞效率實驗，在此實驗中，獲得了單一廢氣流量不同熱值及不同蒸氣廢氣重量比下之破壞去除率之實驗圖 (圖 3)，推導 S/VG 及 DRE 數值，如表 3 所示。此外藉由燃燒塔所屬工場之 DCS (圖 5)，紀錄案例廠使用廢氣燃燒塔時之蒸氣用量、廢氣流量及廢氣成分熱值，進一步推算廢氣之破壞去除率。

表 3 以圖 3 實驗圖推導其蒸氣 / 廢氣重量比及 DRE 數值

熱值 (BTU/FT^3)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)	熱值 (BTU/FT^3)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)	熱值 (BTU/FT^3)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)
2149	1	99.9	600	0.65	99.5	350	0.1	98
	2	99.9		0.85	99		0.3	98
	3	99.5		1	98		0.45	96
	4	98		1.25	90		0.55	90
	5	89		1.45	83		0.75	80
				1.75	36		0.85	70
							1.1	27

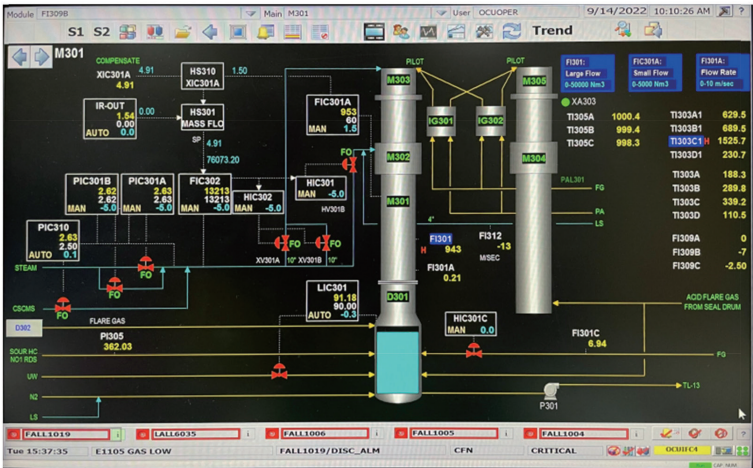


圖 5 廢氣燃燒塔 DCS 監控畫面

四、結果與討論

1. 廢氣物種分析頻率為 15 分鐘，蒸氣量的調整有時間誤差

一般氣相層析儀 (GC-MS) 分析週期為 15 分鐘，甚至更久，且低濃度的誤差值更大，一般石化產業中，煉油廠處理油品製造最前端之原油，除有熱值高的特質以外，也有物種變化大之特性，且案例廠的 GC-MS 量測頻率為 15 分鐘，是故 Flare 在這個時間所調整的蒸氣量是根據前 15 分鐘的廢氣重量所做的調整，蒸氣量的調整有 15 分鐘的誤差，因此在實場操作上，廢氣的流量及熱值（物種分析）是時刻在變化的，S/VG 無法精準的控制 在 15~50% 之間。

2. 維持蒸氣流量之必要性

在快速關閉蒸氣閥時，會引起可壓縮流體在管道中發生振蕩壓力衝擊。這種振蕩的壓力波動我們稱為蒸氣錘（水錘）現象，通常會在毫秒內發生，管道中可能產生劇烈振動和衝擊，導致設備損壞、破裂。

因此為維持系統穩定，平常無廢氣的情況下皆須保持一定流量之蒸氣，否則將導致蒸氣瞬間冷卻為水，堵塞管線，並在蒸氣再度開啟時，將可能導致燃燒塔噴出水柱，損害鄰近工廠之財務問題。

另外，燃燒塔是石化工廠緊急調節燃氣平衡之工安設備，廢氣流量是不可控的，工廠除了要確保 DRE 外，也要保證燃燒塔能無煙燃燒，避免因燃燒不完全產生黑煙，造成視覺污染，影響社會觀感。

3. 民國 100 年 VOCs 法規制定時空背景與現況之差異

民國 100 年是燃燒塔使用的重要分水嶺，在此之前，燃燒塔使用並未有法規約束及管理，石化製程的燃燒塔被經常的使用，因而導致似乎燃燒塔有火才表示工場有正常運作。當時石油在蒸餾、精煉、儲輸的過程中產生大量之油氣，大部分是藉由燃燒塔燃燒處理，因此在廢氣流量及蒸氣量可保持穩定排放之下，S/VG 達 15~50% 技術上是有其可行性。

10 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

直至民國 100 年，環保署公布揮發性有機物空氣污染管制及排放標準第二次修正法案，新增第 4 條：「公私場所正常操作下排放之廢氣，不得使用廢氣燃燒塔處理。」，以及該法第 7 條以廢氣燃燒塔使用計畫書，限制各工廠使用燃燒塔的頻率後，各家公私場所陸續在燃燒塔前端裝設燃料氣回收系統 (FGRS)，以胺洗或鹼洗的方式去除石化製程可燃氣體含硫份後，回收作為製程燃料使用，一方面可節省燃料，使用相對潔淨的能源，另一方面也能減少污染排放，消弭因燃燒不完全，所致視覺污染之負面觀感。

以案例廠為例，未加裝 FGRS 前，每日廢氣排放量約為 $300\sim700\text{ kNm}^3$ ，然而在設置 FGRS 以後，在正常操作狀況下，廢氣排放量降為 0 kNm^3 ，並且在工場開停車、緊急狀況及其他主管機關核可之使用情形下，才會使用到燃燒塔，因此廢氣排放量有明顯下降的趨勢，如圖 6 所示。

該廠在裝設 FGRS (於民國 104 年 9 月建置完成，10 月開始操作) 前，其中 1 座高空燃燒塔 104 年 9 月份平均廢氣流量為 $111.3\text{ kNm}^3/\text{日}$ ，經廢氣人工採樣分析報告密度約為 0.93，換算其重量約為 89,027.7 公斤 / 日，其燃燒塔設計蒸氣使用量為 30,000 公斤 / 日，因此 S/VG 之平均為 33.7%，介於 15%~50% 之法規要求，顯然在民國 100 年前未加裝廢氣回收系統時，S/VG 較易符合現行法規。

該廠裝設 FGRS 後，除了能回收廢氣作為替代燃料，亦有減碳的效果。累計 104 年至 110 年循環使用的燃料氣量，以碳排放係數 ($1.7565346531\text{ 噸 CO}_2/\text{kNm}^3$) 計算，減碳量約有 495,690 噸 CO_2 。(相當於 1,274 座大安森林公園碳吸附量)

承上所述，以現有的技術而言，廢氣的排放不再是連續性，而轉變是批次式排放，因此當燃氣系統壓力過大，燃料氣排放至燃燒塔處理時，廢氣流量會由 0 kNm^3 開始變化，而法規規定 S/VG 需介於 15~50%，已變成有其實務上的困難 (因為流量時刻在變化，而上游廢氣組成又一直在改變)。除此之外，原廠 John Zink 公司建議：「廢氣大量排放時，可能需要 200~300% 的 S/VG 來保持無煙燃燒。」，因此為因應未知廢氣成分，必須維持一定量之蒸氣量，無法以固定之 S/VG 去尋求高 DRE。

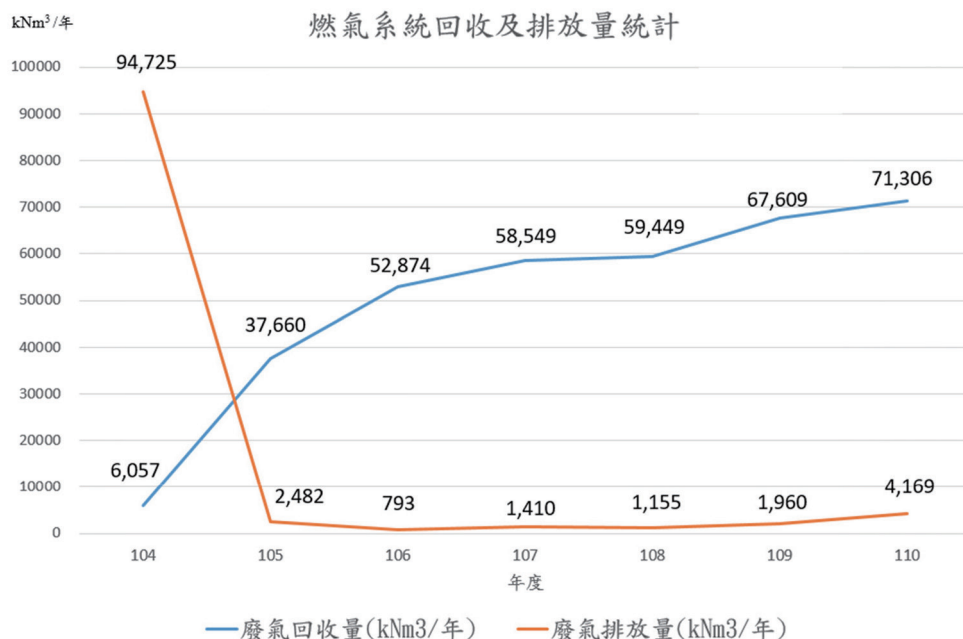


圖 6 案例廠裝設 FGRS 後廢氣回收及排放量

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>

4. 案例廠案例分析

111 年 4 月 22 至 111 年 4 月 23 日案例廠使用第三高空燃燒塔 (編號: A018) 處理廢氣 (由烯烴轉化工場管轄操作), S/VG 超出法規 15%~50%, 違反空污法第 23 條第 1 項, 分析案例廠於該 2 日之廢氣熱值, 維持在大約 2,100 BTU/scf (如表 4)。若以圖 3、2010 年德州破壞效率實驗之圖表, 以內插法的方式帶入案例廠本次事件加以分析, 可發現 DRE 大多數情況下皆達到 99.9%, 僅有少數幾筆 15 分鐘數據會因廢氣流量瞬間驟降而低於 89%, 如表 4。因此 S/VG 是必須依據廢氣熱值高低而定, 方能保證 DRE 之效能良好。

12 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

表 4 案例廠 111 年 4 月 22 日至 111 年 4 月 23 日燃燒塔破壞移除率 (DRE)

時間	廢氣排放量 (Nm3)	Waste gas 重量(kg)	蒸氣重量(kg)	熱值 (BTU/FT ³)	蒸氣/廢氣重量比(%)	DRE(%)
2022/04/22 20:15						
2022/04/22 20:30	0.000	0.00	1099.06	2072.06	∞	----
2022/04/22 20:45	0.000	0.00	1124.43	2062.37	∞	----
2022/04/22 21:00	0.000	0.00	1061.74	2061.69	∞	----
2022/04/22 21:15	0.000	0.00	1164.37	2029.08	∞	----
2022/04/22 21:30	0.000	0.00	1108.08	2000.42	∞	----
2022/04/22 21:45	0.000	0.00	1129.98	2004.75	∞	----
2022/04/22 22:00	0.000	0.00	1118.34	2033.18	∞	----
2022/04/22 22:15	0.000	0.00	1100.99	2033.18	∞	----
2022/04/22 22:30	0.000	0.00	1092.21	1990.42	∞	----
2022/04/22 22:45	0.000	0.00	1085.78	1974.78	∞	----
2022/04/22 23:00	6649.707	12412.86	1073.06	2016.62	8.64	99.9
2022/04/22 23:15	4184.470	7996.28	1050.86	2100.76	13.14	99.9
2022/04/22 23:30	4055.497	7749.03	1024.89	2100.76	13.23	99.9
2022/04/22 23:45	3648.399	7072.67	1053.35	2111.90	14.89	99.9
2022/04/23 00:00	629.416	1222.85	1047.15	2112.72	85.63	99.9
2022/04/23 00:15	560.616	1089.04	1044.19	2108.10	95.88	99.9
2022/04/23 00:30	0.000	0.00	1073.38	2102.80	∞	----
2022/04/23 00:45	137.778	267.66	1053.43	2104.74	393.57	99.5
2022/04/23 01:00	477.831	933.03	1085.50	2132.37	116.34	99.9
2022/04/23 01:15	492.044	961.21	1087.63	2132.37	113.15	99.9
2022/04/23 01:30	2473.508	4839.00	1059.89	2132.37	21.90	99.9
2022/04/23 01:45	1740.489	3417.36	1116.22	2132.68	32.66	99.9
2022/04/23 02:00	1089.492	2145.77	1074.91	2148.15	50.09	99.9
2022/04/23 02:15	178.844	354.28	1088.12	2178.90	307.14	99.5
2022/04/23 02:30	28.152	55.80	1071.85	2178.90	1920.92	<89.0
2022/04/23 02:45	1028.519	2039.67	1095.86	2155.22	53.73	99.9
2022/04/23 03:00	1954.549	3871.88	1101.30	2151.54	28.44	99.9
2022/04/23 03:15	1604.730	3120.32	1066.25	2095.91	34.17	99.9
2022/04/23 03:30	996.467	1897.25	1063.05	2032.03	56.03	99.9
2022/04/23 03:45	25.573	48.56	1056.91	2036.94	2176.42	<89.0
2022/04/23 04:00	0.000	0.00	1092.80	2106.98	∞	----
2022/04/23 04:15	88.443	171.65	1040.27	2106.98	606.04	<89.0
2022/04/23 04:30	271.923	528.05	1078.74	2106.98	204.29	99.9
2022/04/23 04:45	279.737	544.15	1080.00	2107.02	198.48	99.9
2022/04/23 05:00	590.551	1152.26	1077.55	2120.71	93.52	99.9
2022/04/23 05:15	790.781	1550.44	1052.82	2157.11	67.90	99.9
2022/04/23 05:30	556.960	1091.71	1060.39	2157.11	97.13	99.9
2022/04/23 05:45	404.533	785.45	1087.70	2087.99	138.48	99.9
2022/04/23 06:00	553.632	1069.04	1075.30	2077.25	100.59	99.9
2022/04/23 06:15	1362.266	2633.05	1077.34	2087.05	40.92	99.9
2022/04/23 06:30	852.275	1649.35	1070.88	2098.30	64.93	99.9
2022/04/23 06:45	1177.248	2279.66	1048.64	2101.91	46.00	99.9
2022/04/23 07:00	764.006	1495.61	1080.81	2153.43	72.27	99.9
2022/04/23 07:15	976.332	1911.74	1101.44	2153.43	57.61	99.9
2022/04/23 07:30	0.000	0.00	1115.44	2169.94	∞	----
2022/04/23 07:45	0.000	0.00	1044.11	2178.24	∞	----
2022/04/23 08:00	0.000	0.00	1116.39	2181.40	∞	----
2022/04/23 08:15	0.000	0.00	1101.16	2190.12	∞	----

表 4 案例廠 111 年 4 月 22 日至 111 年 4 月 23 日燃燒塔破壞移除率 (DRE)(續)

2022/04/23 08:30	726.971	1468.60	1109.61	2201.96	75.56	99.9
2022/04/23 08:45	327.159	653.42	1096.09	2190.30	167.75	99.9
2022/04/23 09:00	1390.694	2778.52	1119.34	2190.28	40.29	99.9
2022/04/23 09:15	791.289	1576.77	1110.27	2181.00	70.41	99.9
2022/04/23 09:30	462.463	924.64	1108.94	2178.06	119.93	99.9
2022/04/23 09:45	168.627	338.01	1067.71	2183.16	315.88	99.5
2022/04/23 10:00	48.126	96.47	1104.79	2222.97	1145.24	<89.0
2022/04/23 10:15	0.000	0.00	1106.44	2222.97	∞	----
2022/04/23 10:30	0.000	0.00	1098.61	2138.41	∞	----
2022/04/23 10:45	0.000	0.00	1106.21	2107.47	∞	----
2022/04/23 11:00	0.000	0.00	1051.97	2120.37	∞	----

五、結論與建議

高熱值下 S/VG 即使達到 300%，仍可維持 98% 以上之削減率，因此 S/VG 應考量廢氣熱值較高而放寬重量比操作區間。常態廢氣經由 FGRS 回收淨化為燃料使用而無排放下，仍需維持少量蒸氣量，以避免發生蒸氣錘作用外，也要保證在緊急狀況使用燃燒塔時，能達到無煙燃燒。因而在廢氣排放初期，蒸氣量超出 S/VG 難以避免。另因 GC-MS 所監測之物種是來自前 15 分鐘之廢氣，蒸氣量的調整有 15 分鐘的誤差，而廢氣的流量及熱值是時刻在變化的，因此蒸氣量是不可能及時趕上廢氣量的變化。所以適度放寬 S/VG，應可兼顧 DRE 及業者操作之彈性。

此外，未來仍需朝蒸氣廢氣比最佳化操作、及持續廢氣減量來精進。最佳化操作方面，經向原廠 John Zink 尋求解決方法，原廠提供其開發的 1 種 SmokePROOF 控制系統，該系統利用雙波長無煙火炬監測傳感器，直接監測火焰燃燒情形。通過測量火焰底部的碳和氧原子輻射特定波長，即時反饋系統信號，連續監測火焰狀況並直接向蒸氣控制閥與鼓風機提供流量控制信號，以達到接近起煙點 (ISP) 操作。不過此技術要發生黑煙後才能回饋調整蒸氣用量，仍有落後控制及違反現行法規之風險。

持續廢氣減量方面，將朝向不斷精進排氣管理；如計畫性開停爐減排技術，在大修前會召開大修設備及管線吹驅管理討論會議，排定各工場依順序進行吹驅，避免瞬間大量排放而回收不及產生大火及黑煙。此外，落實執行關鍵性設備及機械自動檢查、定期維護，並在歲修期間汰換老舊設備，提升設備妥善率，降低設備故障緊急停俾之狀況，連帶降低燃燒塔使用頻率。

參考文獻

API 521 (2007): PRESSURE RELIEVING AND DE-PRESSURING SYSTEMS

US EPA (2012), EPA Enforcement Targets Flaring Efficiency Violations,

<https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/flaringviolations.pdf>

John Zink Company, LLC (2021), SmokePROOF- Automated Smoke Control,

<https://www.johnzinkhamworthy.com/>

AQMD (2017), Control of Emissions from Refinery Flares,

<https://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/compliance/r1118>

US EPA (2018), Requirements for flare control devices, 40 Code of Federal Regulations, Part 63 Subpart CC, §63.670.

US EPA, Consent Decree: Marathon Petroleum Company LP, and Catlettsburg Refining, LLC. <https://www.epa.gov/enforcement/consent-decree-marathon-petroleum-company-lp-and-catlettsburg-refining-llc>

US EPA, Consent Decree: BP Products North America Inc.

<https://www.epa.gov/enforcement/consent-decree-bp-products-north-america-inc>

TCEQ (2011), 2010 Flare Study Final Report.

https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OAR-2012-0133-0047/attachment_32.pdf

Judy M. Bigon (2012), Flare Steam-Assist Optimization, ExxonMobil Downstream/ Chemicals SSH&E.

<https://la-awma.org/wp-content/uploads/2017/10/2012-5-3.pdf>

空氣污染與噪音類

客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物 排放總量及空氣品質影響之研究

莊育銘*、江康鈺**

摘 要

本研究係利用船舶噸位計算法方式，探討進出基隆港的客輪排放空氣污染物 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x 之總排放量，並依 2016 年至 2020 年臺灣港棧服務網，共計 1,177 艘次客輪進出港資料，建立基隆港客輪排放清冊資料庫，同時彙整基隆區域氣候條件，探討客輪活動強度排放之空氣污染物，對基隆港港區空氣品質影響。根據研究結果顯示，客輪靠泊狀態為空氣污染物排放之主要來源。2020 年受到 COVID-19 衝擊，客輪航次大幅度降低，但船舶於非營運狀態之長期靠泊，反而增加空氣污染物之排放量。研究進一步比對基隆市空氣污染源排放情況，結果顯示 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x 之排放，主要來自於港區外的移動污染源或固定污染源，客輪活動並非主要影響基隆區域空氣品質之因素。整體而言，客輪若能使用潔淨能源，以及靠泊時，使用岸電設備，均能有效降低船舶活動排放之空氣污染物，並達到港區空氣污染物排放減量及維護空氣品質之效果。

【關鍵字】船舶活動強度、空氣污染物、基隆港、岸電

* 臺灣港務股份有限公司

國立中央大學環境工程研究所碩士在職專班

** 國立中央大學環境工程研究所

助理管理師

碩士

教授

一、前言

臺灣的港口處於環太平洋地區，屬於海運貿易運輸重鎮，其商港服務範圍，主要以執行港埠作業、貨物裝卸及郵輪光觀業務為主，其中基隆港營運方式，則以進出口貨物、國內貨物、本地海事服務及港口運作等幾大類為主要服務對象。然而，基隆港因受到地形因素影響，導致港區產業發展受限，近年來停靠基隆港船舶總噸位與貨物吞吐量，雖有逐年下降趨勢，然客輪部分則有明顯提升。根據交通部統計資料所示，基隆港客輪占總船舶噸位，從2009年5.4%增加至2019年22.4% (交通部資料統計網，2021)，可見基隆港棧埠重心，已呈現逐步轉型的情況。

有鑑於近幾年國際郵輪停靠臺灣各港口次數日益增多，尤其進入臺灣地區的國際郵輪，超過半數以上停靠於基隆港 (交通部資料統計網，2021)。國際郵輪停靠港口數量之增加，除了船舶進出港口時，造成空氣污染物排放量的增加外；郵輪業者在靠泊時，為了服務遊客仍須開啟輔助引擎，以維持基本運作，其中包含啟動空調設備，及提供船艙室內燈光照明等，由於上述之船舶活動，所衍生空氣污染問題，亦可能造成基隆市區環境空氣污染問題 (陳又寧，2016)。

近年來，隨著商業型態改變以及船舶逐漸大型化趨勢，海運活動時，內燃機運作產生廢氣排放變化，對於日益增加的空氣污染，儼然成為全球性議題。國際港口對於船舶空氣污染管制方式，以長灘港與洛杉磯港的綠色港口政策最具代表性，主要以降低港口運營產生的負面影響為目的，計畫性減量港口內所有排放源，並結合港口責任、能力與利害關係人的期許，強化空氣清淨的執行策略 (侯佳芸，2012)。然國際各港口為了符合國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 於1997年公布的國際公約 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) 附錄六修正案之規定，逐年限制船舶廢氣之主要空氣污染物 (包括硫氧化物、氮氧化物)，以及禁止故意排放消耗臭氧層之物質。目前我國亦透過行政管理、輔導減量技術以及自願性減量協議，以期達到臺灣港群區潔淨空氣行動計畫 (陳惠琪，2011)。

本研究查詢行政院環境保護署 (以下簡稱環保署) 於2020年在全國空氣污染物排放量清冊資訊系統中，依國內排放各類污染源排放量公告 Taiwan Emission Data

System (以下簡稱 TEDS) 之空氣污染排放清冊 TEDS 10.1 版本資料，有關移動空氣源的排放來自於內燃機燃燒後所產生，主要為 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x ；然基隆市移動污染源類別中，對於港區內船舶的空氣污染排放量的評估，依環保署 TEDS 公告資料 2016 年基隆港區內船舶各空氣污染物排放量，對基隆市整體的占比情況，分別為 PM_{10} 占整體排放量 11.7%、 $\text{PM}_{2.5}$ 占整體排放量 17.7%、 SO_2 占整體排放量 11.9% 及 NO_x 占整體排放量 13.1% (行政院環保署，2020)。因此，港區內船舶廢氣，會造成影響周邊環境空氣品質不良因素之一。然國內少有文獻對於客輪負荷量增加時，探討空氣污染物排放量變化情況，故本研究依循國際各港計算船舶排放廢氣方法，以船舶活動強度乘上空氣污染物排放係數推估各污染物排放量，並藉由分析臺灣港棧服務網整理基隆港船舶進出港各類資訊後，針對客輪活動強度推估空氣污染物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x 的排放情況，以定量方式評估客輪在整體船舶排放量的占比，並比較近 5 年客輪活動排放之空氣污染物，對基隆市整體空氣污染物排放之貢獻度，進而探討客輪活動強度對降低空氣污染物影響，及研擬可行性策略。研究同時探討受到特殊傳染性肺炎 (COVID-19) 疫情影響，客輪活動對基隆港空氣污染物排放總量之影響。

二、文獻回顧

2.1 基隆港船舶活動發展趨勢

臺灣因四面環海，在國際上具備亞太地區的航運地理優勢，而臺灣商港以基隆港、臺北港、臺中港與高雄港為主要的海上貿易與運輸，其服務範圍以提供港埠作業、貨物裝卸、郵輪光觀業務為主。各國際商港營運方式，除了符合地區性產業需求外，還需考量港內資源與港口位置，如基隆港鄰近華中地區，處於往來亞太重要航道上 (侯佳芸，2012)，並憑著港深、潮差低、交通便利等優越因素，成為臺灣最適合發展國際郵輪港口的地方。

然而，基隆港隨著商業型態的改變，運輸船舶逐漸大型化，以及散雜貨物運送貨櫃化影響，在船舶靠泊的吃水深度不夠，與後線倉儲量不足情況下，漸漸消失天然良港優勢，因此，近年來基隆港調整以客貨雙軸心為方向發展 (鄭艾瑋，2013)。因基隆

港整體潮差平均約在 1 公尺內，具有毗鄰市區和交通路線便利的優點，對於國際大型郵輪而言，具有較佳靠泊的條件，所以，在港內發展受限的時刻，配合國際郵輪旅遊的蓬勃發展，所推動的業務轉變，係臺灣港群轉型發展的指標項目。

2.1.1 基隆商港港埠現況

商港口埠營運方式，以國際及國內進出口貨物裝卸、旅客服務、倉儲等維持港口運作的主要項目，基隆市區因為長期依賴港埠，維持城市運作的因素，導致產業發展瓶頸；另自 2009 年臺北港以新型現代化碼頭營運後，導致基隆港業務量發展趨遲緩（鍾添泉，2013），造成停靠基隆港貨船總噸位逐年降低。然而，2020 年度基隆港進出船舶總噸位降低，其原因為全球遭受 COVID-19 的影響，為了配合世界衛生組織國際（World Health Organization, WHO）的防疫措施，我國政府限制國際郵輪進出境臺灣商港規範，如表 1 所示，客輪總噸位從 2009 年整體總噸位占比為 5.4%，提升到 2019 年整體總噸位占比的 22.4%，2020 年 COVID-19 疫情爆發期間，客輪總噸位量則下降至 7.1%（交通部資料統計網，2021）。

表 1 基隆港 2009~2020 年度船舶總噸位比較

年度	船舶總噸位	客輪類別總噸位	占比
2009	89,600,749	4,805,517	5.4%
2010	102,400,800	5,489,860	5.4%
2011	101,716,159	5,968,941	5.9%
2012	96,511,758	5,969,084	6.2%
2013	96,762,659	8,265,515	8.5%
2014	97,699,244	10,020,344	10.3%
2015	96,720,450	12,023,894	12.4%
2016	93,679,902	14,005,064	14.9%
2017	95,474,985	18,559,153	19.4%
2018	95,584,764	19,948,891	20.9%
2019	92,491,540	20,701,103	22.4%
2020	78,284,256	5,597,043	7.1%

2.1.2 基隆港客輪活動情況分析

基隆地質是岩岸結構天然良港，有著水深、潮差小、低淤沙的優點，如表 2 所示，資料顯示每年透過基隆港進出港的旅客人數，超過臺灣其他港區整體旅客之半數以上（交通部資訊統計網，2021），而經營海上客運業務的要素，除了先天港口條件良好之外，尚需要有便利的交通動線配合，水深、港寬、交通便利以及富含交通景點，便是發展郵輪母港或掛靠港的重要元素。綜合前述條件，基隆港成為全球少數能符合停靠郵輪條件的天然港（鍾添泉，2013），但大型郵輪航行速度較慢，約低於 20 海浬 / 時（海浬為海上距離單位，1 海浬等同於 1.852 公里距離），故基隆港受地理位置因素，導致海上配套行程較少。經彙整交通部統計資訊網資料如表 2，發現自基隆港進、出境旅客人次，在 2016 年至 2019 年皆有明顯增加的情況，且旅客人數遠高於臺灣其他港口的情况，尤其 2019 年有超過 109 萬人次旅客的紀錄，2020 年遇到 COVID-19 疫情影響，除花蓮港、蘇澳港、安平港與臺北港國內線人數提升外，國際線商港旅客皆明顯下降。

表 2 2012 年~2020 年臺灣港群進出港旅客人數

年度	基隆港	高雄港	臺中港	花蓮港	其他	總計
2012	427,845	119,374	138,284	13,210	420	699,133
2013	524,608	141,119	172,551	94,163	58,731	991,172
2014	578,002	214,416	164,102	192,565	229,509	1,378,594
2015	693,956	207,443	134,441	132,307	183,069	1,351,216
2016	782,134	119,521	47,165	117,318	163,448	1,229,586
2017	954,536	196,616	62,566	79,450	133,922	1,427,090
2018	1,064,147	117,130	78,351	41,331	123,618	1,424,577
2019	1,091,360	151,879	99,444	27,251	134,142	1,504,076
2020	25,906	71,844	11,835	27,251	291,479	428,315

備註：其他為蘇澳港、安平港及臺北港的合計人數。

如前所述，基隆港是臺灣最主要的客輪停靠點，分析基隆港歷年來旅客來源 (基隆港務分公司，2021)，如表 3 所示，其中最大的來源是國際郵輪的造訪，隨著船舶大型化後，提高載客數以及吸引顧客的多樣化設施，直至 2020 年為止，以基隆港為郵輪母港靠泊之郵輪，主要包括麗星郵輪系列 (約 5 萬噸)、星夢郵輪系列 (約 10 萬噸)、嘉年華郵輪集團公主系列郵輪 (7~15 萬噸)，其他以掛靠港靠泊，則有皇家加勒比集團海洋系列 (7~17 萬噸)、嘉年華郵輪集團歌詩達郵輪系列 (5~14 萬噸) (郵輪旅遊網，2021)。基隆港郵輪停靠高峰時刻是在 2019 年 11 月期間，同時停靠 4 艘國際郵輪，帶來超過 1 萬名以上旅客進出基隆港區，然 2020 年因受到 COVID-19 疫情的影響，基隆港旅客大幅度下滑，但對照近 10 年客輪人數大幅度成長情況，加上近年來基隆港區積極改善港內不足的設施，例如改造港口碼頭設備，將現有 2 座作業碼頭增加到 5 座、增建旅客大樓加速人員通關速度，未來配合交通政策，進行臺鐵輕軌計畫強化旅客陸上交通運輸，帶動旅客人數的增加，再配合當地政府的旅客服務規劃，可藉由各項軟、硬體層面的提升，增加國際郵輪到達基隆港的意願，對基隆地區經濟結構、民生消費力帶來改變 (基隆港務分公司郵輪旅遊網，2021)。

表 3 2012 年~2020 年基隆港客輪遊客人數分布

年度	郵輪	兩岸渡輪	國內航線	總計
2012	274,151	49,712	103,982	427,845
2013	398,969	29,780	95,859	524,608
2014	448,839	34,026	95,137	578,002
2015	563,345	37,427	93,184	693,956
2016	663,458	19,088	99,588	782,134
2017	829,903	29,476	95,157	954,536
2018	941,663	36,275	86,209	1,064,147
2019	946,372	34,721	110,267	1,091,360
2020	173,040	652	86,114	259,806

2.2 船舶空氣污染防制條例與規範

IMO 致力於減少國際船運活動對於環境的影響，海洋環境保護委員會 (Marine Environment Protection Committee, MEPC) 依 1997 年通過修正 MARPOL 新增附則 VI，逐步減少全球範圍內船舶廢氣中所含的氮氧化物與硫氧化物排放，並於 2005 年 5 月 19 日生效指定排放控制區 (ECA) 更嚴格的標準，以進一步減少指定海域內空氣污染物排放。

我國政府參考於 2016 年 10 月之 MEPC.280 (70) 決議案對燃料油可用性評估，修訂 MARPOL 附則 VI「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條規定 (行政院公報，2018)。限制 2020 年 1 月 1 日起，全球海域船舶使用船用燃油，應執行 0.5% 低燃油硫含量標準，控制排放區 (Emission control area, ECA) 仍嚴格管制執行 0.1% 燃油硫含量標準。對此面對日趨嚴格的硫化物減排限制，迫使全球航運業者必須採取有效控制減排方式，其中主要包括從船舶本身設備改造，如加裝空氣洗滌器、脫硫裝置等空氣淨化裝置，或者是選擇船舶燃料種類，改採用低硫燃油 (LSMGO) 或是液化天然氣 (LNG) 燃料等替代資源。

有關 IMO 對於船舶硫排放限制要求，在波羅的海、北海、北美包括美國和加拿大部分海岸、美洲加勒比海包括波多黎各和美屬維爾京群島等地，為 IMO 在全球特別設置了 4 個 ECA (廖永裕，2016)，係指要求對船舶排放採取特殊強制措施，以防止、減少和控制 NO_x、SO₂ 或粒狀污染物排放，造成空氣污染以及伴隨而來對人類健康和環境的不利影響區域，其船舶使用燃油含硫量不得超過 0.1%；而在排放控管區域以外船舶，則依照 IMO 全球適用含硫量時程規定 (船舶暨海洋產業洋發中心，2018)。

表 4 IMO 海運燃油規範

日期	海運燃油含硫極限	
	ECA	全球
2010 年 7 月前	1.5%	4.5%
2010 年 7 月	1.0%	
2012 年 1 月		0.1%
2015 年 1 月		
2020 年 1 月	0.5%	

22 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

交通部航港局在西元 2018 年 1 月 25 日公告 MARPOL 附則 VI「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條及第 4 條規定，提前於西元 2019 年 1 月 1 日限制不論本國籍或外國籍船舶，只要進入我國國際商港區域者，應採用硫含量以重量計 0.5% 以下之低硫燃油，或具有同等減排效應之裝置或替代燃料案，另於高雄港率先實施國際航線船舶獎勵措施，以推動航商提早使用低硫燃油之政策，獎勵措施於西元 2018 年 7 月 23 日起，擴大至國內各國際商港實施。

行政院環保署於空氣污染防制法提及，移動污染源是以車輛運輸為管制對象，國內尚對於船舶空氣污染防制執行標準，但在交通工具空氣污染排放標準中提及，對於船舶排放粒狀物標準要求不得超過不透光率 40%，但允許主動推進動力 3,000 kW 以上之船舶，啟動時 20 秒內，以及 3,000 kW 以下之船舶啟動時 10 秒，以不超過不透光率 60% 為基準。現況主要透過臺灣國際商港管理方式要求空污防制，例如船舶減速規定、擴大岸電設施使用，配合船舶自動辨識系統 (AIS) 運用，監控船舶入港減速，以期降低空氣污染物排放來源。

2.3 港區控制船舶空氣污染物方式

有鑑於國際知名商港推動綠色港口政策，以降低港區周圍環境負荷概念，依林素如 (2014) 訪談 15 家知名貨櫃航商及 18 個國內外國際商港，認為國際知名港口推動綠色港口，有助於提升社會企業責任形象與永續發展，取自國際各港口推動綠色港口政策之經驗，找出減少棧埠作業產生空氣污染的關注項目。臺灣商港參考美國長灘港與洛杉磯港自 2005 年推動清潔空氣計畫，控制港區內 (船舶、車機與裝卸行為) 空氣污染排放減量方式。胡家聲等人 (2019) 研究高雄港對於綠色港口發展策略分析，認為綠色港口政策儼然是全球港口發展趨勢，港口永續發展的關鍵為兼顧社會、經濟、環境，透過專家訪談與研究分析，高雄港推動綠色港口之精進方案，並借鏡國際知名港口推動環境保護的成效，對於空氣污染防治部分，以船舶排放污染的改善獎勵，以及碼頭建置岸電方式，最能有效減緩港口空氣污染物排放。

根據廖永裕 (2016) 以問卷進行調查，透過單因子變異數分析及重要表現程度分析法，認為基隆港在推動綠色港灣時，防止空氣污染脆弱性層面，主要在於船舶從外港

進入碼頭靠泊時，船舶若能在航行中執行自願減速，或使用低污染海運燃油，此外，港區設置監視系統監視裝卸機廢氣排放，以及對於逸散性污染源防治，使用自動洗車設備與要求車輛覆蓋防塵網，皆能有效直接減少空氣污染物排放。

對於船舶空氣污染行為的排放行為，依 Cooper D.A. (2003) 研究哥本哈根港內靠泊船舶（渡輪、汽車船、貨船）空氣污染排放（ SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ），研究發現船舶於靠泊時，排放量大於進出港的情況。另林佩君 (2009) 研究 1999 年至 2007 年基隆地區船舶活動所產生的大氣懸浮微粒，經環保署與港區空氣品質測站進行迴歸分析後，認為基隆的地形與氣候對於空氣污染物（ PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ）的排放濃度有明顯影響，懸浮微粒在夏季西南氣流旺盛時濃度較低，因風場受到季節變化，冬季自海上吹入北季風帶入境外懸浮微粒。曹兆凡 (2009) 研究 1999 年至 2007 年基隆港區往來商船空氣污染物排放量（ NO_x 與 SO_2 ）情況，以我國交通部國輪船舶登記噸位資料，對 27,495 艘抵達基隆港商船進行統計分析，獲得符合臺灣商港船舶總噸位數與主引擎、輔助引擎的線性回歸關係，以便提供後續臺灣學術單位進行船舶活動強度、空氣污染量排放推估依據。

依據邱永芳 (2011) 研究認為輔助引擎以燃油運作，係港區最大空氣污染來源，因船舶靠泊後，船上仍有用電需求，若以岸上電廠供電，取代輔助引擎燒燃油發電，雖可明顯削減空氣污染物排放，但須考量電力公司排放溫室氣體減量方式。但對於岸電設施使用討論，根據許淑禎 (2016) 提出臺灣港口岸電設施不足情況，肇致無法有效管控船舶在靠泊期間以輔助引擎維持運作，而且檢測空氣污染源相關設備亦有不足現象。葉倉賓 (2016) 指出郵輪種類及規模差異大、靠泊碼頭高低差、國際尚未統一插頭規格，以致岸電設施尚未全面運用於郵輪靠泊，假使能全面性以岸電替代各郵輪的輔助引擎，將可有助於大幅削減 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 排放。

2.4 船舶廢氣排放量推算方式比較

港口內運輸之船舶、裝卸設備、運輸貨車等運輸工具，皆以柴油引擎方式運轉，船舶因船體本身特性不同的因素，導致引擎機械元件複雜。查閱國內外文獻資料，各單位會因取到資料的差異，導致所採用計算方式不同。將船舶廢氣污染物排放計算方

式彙整後，因計算參數差異可分為 3 類：手冊計算法、燃料消耗量計算法以及載重量計算法 (蔡薇，2004)；然這 3 類方法計算船舶空氣污染排放量方法量化評估，本研究收集這 3 類方法的運用單位與特點闡述如下：

- 1. 手冊計算法：計算方式與船舶航行中主引擎、輔助引擎狀態以及航行速度有關，討論不同內燃機負載情況下各類空氣污染物排放，統計船舶艘數、噸位、航行時間、靠泊時間，依據主引擎和輔機負載情況計算排放量，較適合船舶計算大氣污染物的方式。
- 2. 燃料消耗量計算法：根據船舶使用的燃油性質的差異，總計各類海運燃油的消耗量，乘上每個單位燃燒後的空氣污染物質係數，需要正確調查燃料使用量。
- 3. 載重量計算法：參考汽、機車移動發生源的排出量，透過分析航行船舶記載燃油耗量、航速以及載重量，統計出每噸海涅的燃料消費量，有關港區控制船舶空氣污染方式之研究整理如表 5。

表 5 廢氣排放計算方式彙整表

運用計算方式	文獻主題	使用單位或作者	國家
手冊計算法	1. 臺灣港群岸電設施設置及規劃推動可行性 2. 臺灣港埠節能減碳效益提升之研究	交通部運輸研究所	臺灣
手冊計算法	中國船舶大氣污染物排放清單報告	中國環境保護部機動車排污監控中心 (上海港)	中國
手冊計算法	San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report	美國加州佩德羅灣港口排放清單 (洛杉磯港、長灘港)	美國
手冊計算法	Exhaust emissions from ships at berth	Cooper D.A.	丹麥
燃料消耗量計算法	1. 空氣污染排放清冊 2. 台北港物流倉儲區第一、二期開發計畫環境影響說明書	行政院環境保護署	臺灣
燃料消耗量計算法	基隆港郵輪岸電系統之研究	葉倉賓	臺灣

有關船舶空氣污染物計算 3 種方式，依序為手冊計算法依內燃機的運作效率推算，能貼近船舶在航行或靠泊狀態的實際排放；燃料消耗料量計算法依平均油耗推算，但每艘船舶的耗油量資料缺乏公開客觀數據；載重量計算法相關應用文獻不足。綜上述以及國際港口計算船舶空氣污染排放方式之考量，故本研究選擇使用手冊計算法，依船舶航行各狀態（入港、出港、靠泊）下，計算內燃機負載時，空氣污染物排放量。

三、研究方法

3.1 研究對象與範疇

本研究以臺灣港棧服務網收集 2016~2020 年基隆港船舶動態資料，彙集船舶停靠港區時間與船舶噸位量資訊，方能推估入港、出港輸出動力切換情況。依據 IMO 於不同年份下，對於新造船隻環保規範，導入船舶活動下使用各種海運用燃油的空氣污染物排放係數，貼近港內實際港埠作業情況，提出具合理、準確性之分析數據。因基隆港碼頭有公務用碼頭（海關、港勤）、軍用碼頭以及商用碼頭等用途（雜貨、散裝、貨櫃以及油輪類），本研究彙整商用碼頭之客輪活動船隻為主要研究對象，非本研究設定範疇討論之船舶為軍用船及港區內漁船、工作船、清潔船、拖船與港勤所屬船舶，前述類別皆不列入本次推估計算範圍。

依基隆港船舶進出港口安全評估模式（袁順光等人，2011），因受基隆商港內空間限制，為保持安全距離，建議在港內航行速度 4.5~5.5 海浬/時，但基隆港面朝正北，所以天候受到地形因素影響，整年大部分時間受到自東北角度的風向及海浪，以及在堤口外 0.5~1 海浬處，易遭遇橫流、亂流，導致海象惡劣不佳，船舶為了穩定航行方向，須提高航速方能突破風浪，實際上在進入到港內迴旋池前的速度，會介於 5~10 海浬/時之間。故本研究範疇以船隻正常進出港口港埠作業流程為基礎，為求船速一致性，以及考量海象干擾之情況，設定船隻進入港區堤口水域範圍為起始計算點（圖 1），直到船隻靠泊碼頭為移動污染源排放範圍，藉以計算船舶空氣污染物排放量。



圖 1 基隆港海域航道圖

3.2 研究方法

3.2.1 船舶污染排放計算方式

參考 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 報告資料，以及交通部運輸研究所臺灣船舶排放研究 (吳義林等人，2019)，引用船舶排放量公式如下：

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF$$

E(Emissions by mode)：船舶排放量，單位：公克。

Energy (Energy demand by mode)：為所產生的能量，單位：kWh。

EF (Emission factor)：使用公告排放係數，單位：g/ kWh。

FCF (Fuel correction factors)：基準燃油於不同濃度、處理裝置下，燃油的校正係數，無單位。

以船舶實際運作情況所呈現輸出功率的方式，表示如下：

$$\text{Energy} = \text{MCR (AER)} \times \text{LF(LD)} \times \text{H} \times \text{FCF}$$

MCR (Propulsion engine power maximum continuous rated)：船舶主引擎最大引擎動力，單位：kW。

AER (Auxiliary engine power maximum continuous rated): 船舶輔助引擎最大引擎動力，單位：kW。

LF (Load factor)：船舶活動中主引擎運作時負載係數，無單位。

LD (Load defaults)：為輔助引擎負載預設，無單位。

H (Hour)：指活動時間，單位：小時。

船舶於航行時引擎運作模式與使用的海運燃油不一定相同；因此，在推估方法的資料取得與計算方式不盡相同，船舶負載資料與船舶行進速度有關聯性，因轉速與航速具有正向直線關係，依據螺旋槳定律一般在 20~80% 的負載時，主引擎依螺旋槳定律，可估計為實際船速與最大船速比值的 3 次方 (田文國等人，2012)：

$$\text{LF} = (\text{AS} / \text{MS})^3$$

AS (Actual speed)：實際船速，海浬 / 小時。

MS (Maximum speed)：最大船速，海浬 / 小時。

Cooper D.A. (2003) 研究結果顯示，透過經驗公式以船舶總噸位，換算空氣污染排放量，係作為推估空氣污染排放總量的有效工具方式，因此，本研究對於船舶主引

引擎及輔助引擎馬力之推估，引用曹兆凡 (2009) 研究基隆港 1981~2006 年交通部國籍船舶登記系統之統計資料，依船舶總噸位推估主引擎、輔助引擎的馬力 (HP)，以統計學簡單迴歸方式，找出主引擎與載重噸位關係公式，得以總噸重噸位 (GT) 推估得主引擎動力 (HP)。輔助引擎馬力係利用各噸位船舶主引擎及輔助引擎之間馬力關係轉換，在判定係數 R^2 值 = 0.9577 之下，獲得主引擎係數 $HP = 1.1466 \times GT$ ，以及 R^2 值 = 0.8842 之下，獲得輔助引擎係數 = $0.0878 \times GT$ 。最大航速換算部分，依據臺灣國際造船股份有限公司歷年船舶建造實績資料表為根據，引用基隆港船舶交通管理系統船舶資料共計 27,493 筆，推估船舶總噸位與航速關係，利用迴歸分析在判定係數值 $R^2 = 0.9328$ ，獲得總噸位 (x) 與船速 (y) 呈二次曲線模式，迴歸方程式 $y = 2.3903 \ln(x) - 1.4036$ (曹兆凡，2009)。

船舶航行中受推進慣性力影響、船身狹長、港內迴轉空間有限的關係，依基隆港船舶進出港口安全評估模式 (袁順光等人，2011)，保持安全距離建議航速保持 5 海浬 / 時。船舶自入港開始，主引擎降低動力輸出，逐漸由輔助引擎動力取代，並且港勤拖船輔助配合船隻靠泊碼頭；因出港時需要較大動力輸出推動船體，並且主引擎尚需熱機運轉時間，故輔助引擎提高輸出功率，以推動船體運行。綜合前述從參考 2019 年交通部運輸研究所 3 維空氣品質模擬系統資料，對於不同類型船種的輔助引擎在入港、出港和靠泊時負載狀態 (Load defaults) 輸出形況 (如圖 2 與表 6)。

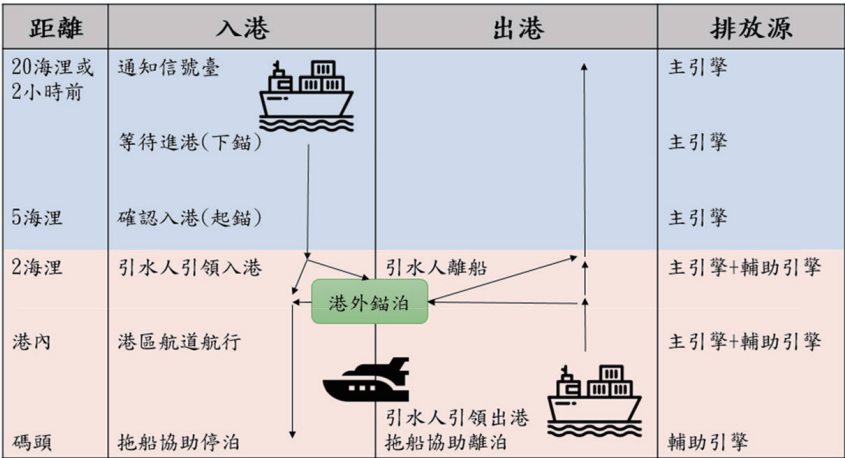


圖 2 船舶入出港示意圖

表 6 輔助引擎負載預設

船種	入港	出港	靠泊
汽車船	0.15	0.45	0.26
散裝船	0.17	0.45	0.1
貨櫃船	0.13	0.5	0.18
客輪	0.15	0.45	0.32
貨船	0.17	0.45	0.22
拖船	0.17	0.45	0.22
其他	0.17	0.45	0.22
冷藏船	0.15	0.45	0.32
駛上駛下船	0.15	0.45	0.26
油船	0.24	0.33	0.26

引用船舶排放公式 $Emissions (E) = Energy \times EF \times FCF$ 綜合各狀態如下：

1. 入港 (Inbound) 與出港 (Outbound) 排放量：

$Emissions (E)$ 來源 = 主引擎排放 (Propulsion engine emission)
+ 輔助引擎排放 (Auxiliary engine emission)

$Propulsion\ engine\ emission = MCR \times (AS / MS)^3 \times H(D / AS) \times EF \times FCF$

$Auxiliary\ engine\ emission = AER \times LD \times H(D / AS) \times EF \times FCF$

MCR (Propulsion engine power maximum continuous rated)：船舶主引擎最大引擎動力，
單位：kW。

AS (Actual speed)：實際船速，單位：海浬 / 小時。

MS (Maximum speed)：最大船速，單位：海浬 / 小時。

D (Distance)：為堤口到靠泊碼頭距離，單位：海浬。

EF (Emission factor)：使用公告排放係數，單位：g / kWh。

AER (Auxiliary engine power maximum continuous rated)：船舶輔助引擎最大引擎動力，
單位：kW。

- LD (Load defaults)：為輔助引擎負載預設，無單位。
2. 靠泊 (Berth) 排放量：只有輔助引擎排放 (Auxiliary engine emission) 之運作
- Auxiliary engine emission = AER × LD× H × EF × FCF
- H (Hour)：為靠泊時間，單位：小時。

3.2.2 空氣污染排放因子

船舶的空氣污染主要來源為主引擎與輔助引擎，且會因船舶加裝空氣污染防制設備，或採用乾淨燃料的船舶，須考慮校正係數，但本研究無法得到各船舶空氣污染防制裝置資料，只能以 IMO 與臺灣地區要求各管制區油料管制為考量，引擎不同排放係數，參考 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 中提到以 Heavy fuel oil (HFO) 含硫 2.7% 基準燃油，作為係數對應 Marine diesel oil (MDO)、Marine gas oil (MGO) 係數之調整 (參考表 7)，再根據 IMO 不同時期環保規範下，主引擎產生空氣污染物的消費量，為空氣污染物排放因子 (參考表 8)。

表 7 海運燃油校正係數

基準燃油	對應燃油	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
HFO (2.7%)	HFO (2.7%)	1.00	1.00	1.00	1.00
HFO (2.7%)	MDO (0.5%)	0.25	0.29	0.94	0.19
HFO (2.7%)	MGO (0.1%)	0.17	0.20	0.94	0.04

表 8 主引擎燃油污染物排放量轉換表

主引擎排放係數 (g/kW · h)						
類別	IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Heavy fuel oil (HFO) (含硫量 2.7%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	18.10	10.50
慢速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	17.00	10.50
慢速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	15.30	10.50
慢速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	3.60	10.50
中速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	14.00	11.50
中速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	13.00	11.50
中速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	11.20	11.50
中速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	2.80	11.50
Marine diesel oil (MDO) (含硫量 0.5%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	17.01	1.94
慢速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	15.98	1.94
慢速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	14.38	1.94
慢速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	3.38	1.94
中速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.16	2.13
中速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	12.22	2.13
中速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	10.53	2.13
中速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	2.63	2.13

船舶使用含硫量高海運燃油主要因素，為使主引擎於運轉中，降低燃油成本以及降低引擎損耗，不同於輔助引擎的結構，因為輔助引擎主要用於靠泊時的燈光、空調、通訊等船上電力的供應，或是船舶調度移動，運轉溫度較低使用高硫海運燃油，會導致燃燒效率不佳。在不完全燃燒情況，除了浪費油料以外，更會衍生更多空氣污染物，

故一般而言，輔助引擎會選擇低硫燃油 (如表 9)。所以船舶慣性力會視作業區域情況，啟動輔助引擎協助，在各個型態的負載的變化情形參考 (如表 6)。

表 9 輔助引擎污染排放消費量轉換表

主引擎排放係數 (g/kW · h)						
類別	IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Heavy fuel oil (HFO) (含硫量 2.7%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	14.70	12.30
慢速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	13.00	12.30
慢速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	11.20	12.30
慢速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	2.80	12.30
Marine diesel oil (MDO) (含硫量 0.5%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.82	2.28
慢速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	12.22	2.28
慢速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	10.53	2.28
慢速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	2.63	2.28

四、結果與討論

4.1 客輪活動強度與排放量分析

依船舶在港區海域的活動情況可分成入港、出港與靠泊 3 種型態，本研究以船隻的總噸位推算，主引擎和輔助引擎的能量消耗基礎 (kW)，加上時間條件 (靠泊時間與出、入港時間)、能量輸出組合係數後，計算出客輪活動強度 (kWh)。

4.1.1 船舶活動強度

船舶空氣污染排放量，係透過活動強度乘上各類空氣污染排放係數，而船舶活動強度來源，來自主引擎與輔助引擎的動力，故船舶推進時的動力，主要來自於引擎的出力，所以船隻建造時，會以該船最大噸位量為考量，設計主引擎與輔助引擎的最大馬力，本研究參考曹兆凡 (2009) 依基隆港營運特性，綜合各載貨類型船隻之主引擎馬力 (hp) 係數 $HP = 1.1466 \times GT$ 以及輔助引擎係數 $= 0.0878 \times GT$ ，依據螺旋槳定律行進中馬力的負荷，主引擎的輸出，近似轉速三次方 (N^3)，航速 (V) 與轉速 (N) 為正向直線關係，因輔助引擎並非主要動力來源，因應不同型態 (入港、出港、靠泊) 參考交通部運輸研究所 (2019) 使用之輔助引擎負載表 6 之參數資料，關於船舶航行時間，依堤口到碼頭距離除以港區內最大限速 5 海浬 / 時為運算依據，本研究參考手冊計算法進行 2016 至 2020 年客輪 1,177 艘次的船舶活動強度計算，並以這 5 年停靠 625 艘次，占比最多的船型寶瓶星號郵輪為例，臚列如下：

表 10 寶瓶星號船舶資料

名稱	噸位 (噸)	主引擎馬力 (hp)	輔助引擎馬力 (hp)	主引擎 MCR (KW)	輔助引擎 AER (KW)
寶瓶星	51,309.0	58,830.9	4,504.9	43,887.9	3,360.7
備註	馬力 (hp) 乘上 0.746 係數轉換 kWh				

1. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算入港各內燃機活動強度：

主引擎入港活動強度 = $MCR \times (AS / MS)^3 \times D / AS$

輔助引擎入港活動強度 = $AER \times LD \times D / AS$

主引擎： $43,887.9 \times (5 / 24.51744)^3 \times 1.92 / 5 = 142.94(kWh)$

輔助引擎： $3,360.7 \times 0.15 \times 1.92 / 5 = 193.58(kWh)$

入港活動強度總和 $142.94 + 193.58 = 336.52(kWh)$

2. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算出港各內燃機活動強度：

主引擎出港活動強度 = $MCR \times (AS / MS)^3 \times D / AS$

34 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

輔助引擎出港活動強度 = AER × LD × D / AS

主引擎：44,123.2 × (5 / 24.51744)3 × 1.92/ 5 = 142.94 (kWh)

輔助引擎：3,360.7 × 0.45 × 1.92/ 5 = 580.73(kWh)

出港活動強度總和 142.94 + 580.73 = 723.67(kWh)

3. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算靠泊內燃機活動強度：

輔助引擎活動強度 = AER × LD× H

輔助引擎：3,360.7 × 0.32 × 7.2= 7,743.05(kWh)

4. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，內燃機活動強度總和：

336.52 (入港) + 723.67 (出港) + 7,743.0 (靠泊) =8,803.19 kWh

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，船舶至堤口進入港區後的整體活動強度為 8,803.19 kWh，本研究以此方式依序計算 2016~2020 年客輪與整體船舶的活動強度總和詳表 11。

表 11 2016~2020 年客輪與總船舶活動強度統計表 (kWh)

項目	狀態	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
客輪	入港	87,082.5	114,532.9	121,429.3	126,055.4	34,618.9
	出港	190,303.8	251,789.0	267,466.9	277,446.7	76,035.8
	靠泊	2,699,688.9	3,904,430.0	4,129,666.0	4,260,158.4	4,186,395.6
	總計	2,977,075.2	4,270,751.8	4,518,562.2	4,663,660.6	4,297,050.3
總船舶	入港	395,287.7	404,010.0	402,580.4	397,701.8	305,775.2
	出港	855,526.9	870,005.0	861,037.4	847,997.7	652,130.3
	靠泊	21,354,845.1	29,125,076.7	23,612,070.0	21,541,673.2	23,014,320.2
	總計	22,605,659.7	30,399,091.8	24,875,687.8	22,787,372.7	23,972,225.7
客輪 / 總船舶 占比	入港	22.0%	28.3%	30.2%	31.7%	11.3%
	出港	22.2%	28.9%	31.1%	32.7%	11.7%
	靠泊	12.6%	13.4%	17.5%	19.8%	18.2%
	總計	13.2%	14.0%	18.2%	20.5%	17.9%

對於表 11 發現總船舶與客輪皆出現出港活動強度，較高於入港活動強度情況，原因係出港時避免受到海浪影響，需要較大的動力輸出，以及港區內低速因素，導致主引擎溫度尚無法完全運轉，需提高輔助引擎輸出功率，本研究查詢國內交通部運輸研究所資料後，作為引用的參數（詳表 6）。

因客輪靠泊的碼頭較其他商船路途距離較遠，且基隆港停靠的國際郵輪，以雲頂郵輪系列及公主遊輪系列為主，船舶總噸位約在 5 萬~13 萬噸之間。綜上述 2 項因素，使客輪進出港活動強度，在整體船舶活動較靠泊活動占比為高，整體而言，近 5 年來客輪活動約占整體船舶活動強度之 13~21%；另外對於 2020 年總船舶以及客輪入、出港活動強度明顯下降，但靠泊活動強度卻有增加之情況，屬受到 COVID-19 影響導致各類船舶停滯港區，此情況有可能會增加基隆港區環境負荷。

基隆商港依作業型態而言，以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備（移動式起重機、橋式機）進行裝卸貨物作業，船隻僅須維持最低動力即可。然客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，致使客輪總噸位與輸出動力，普遍高於一般商船種類，導致空氣污染物排放量比例較高。

由船舶整體排放數據可知，空氣污染物排放最大的來源是船舶靠泊行為，活動強度隨船靠泊時隨時間累計增加，另外，2020 年客輪數量受全球疫情爆發影響，進出基隆港船舶艘次下降，使入港及出港客輪強度大幅下降，但因國際上對客輪活動的限制，導致客輪無法出港，需長時間處非營運狀態靠泊的情況，使得客輪進港及出港活動強度大幅下降，但客輪靠泊活動強度，並未有相對性的下降。

表 12 2016~2020 年客輪月平均資料

月份	總噸位	艘次	靠泊 (kWh)	入出港總合 (kWh)
1 月	947,886	17	180,375	18,965
2 月	782,950	14	511,112	15,634
3 月	1,205,738	23	250,654	24,112
4 月	1,440,142	22	306,347	28,416

36 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

月份	總噸位	艘次	靠泊 (kWh)	入出港總合 (kWh)
5 月	1,951,031	23	424,943	37,470
6 月	1,669,403	21	536,431	32,636
7 月	1,487,881	19	292,540	28,822
8 月	1,378,244	20	273,177	27,241
9 月	1,340,335	20	292,989	26,579
10 月	1,220,543	18	239,591	23,802
11 月	1,273,409	20	294,481	25,100
12 月	1,033,231	18	233,426	20,576

根據表 12 資料，分析客輪的航次、進出港口的總噸位，以及船舶與客輪出入活動強度，平均以 5 月為最高峰，平均在 6 月份時，客輪靠泊活動達到最高值，7 月開始基隆港外海受颱風、熱帶氣壓氣候型態影響，國際郵輪逐漸降低航次，直接反映在客輪各狀態的活動強度表現，而 10 月之後東北季風增強，海象逐漸變差，而且氣溫下降，不利於旅遊，所以大多數國際郵輪會在冬季停航，直到春、夏季天候穩定的季節開航，約在每年 5 月前後達到客輪航次的高峰期。

一般而言，2 月份因氣候因素，客輪靠泊活動強度數據，應與航次、噸位及入出港活動強度表現相同低於其他月份，但本研究發現 2 月靠泊活動強度，異常平均高於其他月份的情況，係客輪無法出港而長時間靠泊的情況。

4.1.2 各類船舶空氣污染物排放量推算

依據 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號船舶活動強度計算入港強度 336.52 (kWh)、出港強度 723.67 (kWh) 以及靠泊強度 7,743.05(kWh) 為例，參考各類內燃機空氣污染排放資料 (如表 8 及表 9)，並以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，進行下列計算：

1. 主引擎活動強度 kWh 總合 (入港與出港)：
- $142.94 \text{ (入港)} + 142.94 \text{ (出港)} = 285.88 \text{ (kWh)}$
2. 輔助引擎活動強度 kWh 總合 (入港、出港與靠泊)：
- $193.58 \text{ (入港)} + 580.73 \text{ (出港)} + 7,743.05 \text{ (靠泊)} = 8,517.36 \text{ (kWh)}$
3. 依 $E = \text{Energy} \times EF \times FCF$ 公式，引用 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 報告資料，以及臺灣船舶排放研究報告 (交通部運輸研究所，2019)。本研究依國內規範以 2019 年為基準，2019 年 1 月 1 日以後船舶以含硫量 0.5% 之 MDO 計算，反之以含硫 2.7% Heavy fuel oil (HFO) 計算，而寶瓶星號建造於 1993 年，依 IMO 規範，主引擎環保規範採用 Tier 0 類別，含硫量 0.5% 之 MDO，有關 Emission factor 與 Fuel correction factors 排放係數如表 13 與表 14。

表 13 主引擎空氣污染排放係數

含硫量 2.7% Heavy fuel oil (HFO) (g/kW · h)					
IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	18.10	10.50

表 14 輔助引擎空氣污染排放係數

含硫量 2.7% Heavy fuel oil (HFO) (g/kW · h)					
IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.82	2.28

$PM_{10} = 285.88 \times 1.5 + 8,517.36 \times 0.38 = 3,665.41 \text{ (g)}$

$PM_{2.5} = 285.88 \times 1.2 + 8,517.36 \times 0.35 = 3,324.12 \text{ (g)}$

$NO_x = 285.88 \times 18.1 + 8,517.36 \times 13.82 = 122,884.34 \text{ (g)}$

$SO_2 = 285.88 \times 10.5 + 8,517.36 \times 2.28 = 22,421.32 \text{ (g)}$

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，該客輪各空氣污染排放量總和如表 15。本研究依序計算 2016~2020 年客輪與整體船舶的空氣污染排放總和後，彙整於表 16。

表 15 寶瓶星號空氣污染排放量資料

船名	日期	入港活動強度總和 (kWh)	出港活動強度總和 (kWh)	駐港排放 (kWh)	空氣污染排放量總和 (g)			
					PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
寶瓶星	2016/1/1	336.52	723.67	7,743.0	3,665	3,324	122,884	22,421

表 16 各年度污染物排放總量

年度	PM ₁₀ (噸)		PM _{2.5} (噸)		NO _x (噸)		SO ₂ (噸)	
	客輪	總船舶	客輪	總船舶	客輪	總船舶	客輪	總船舶
2016 年	1.21	9.03	1.10	8.24	40.95	271.33	7.37	54.75
2017 年	1.73	11.99	1.57	10.97	54.90	357.09	10.49	72.53
2018 年	1.83	9.89	1.66	9.04	57.80	288.84	11.10	59.92
2019 年	1.77	8.66	1.63	8.39	57.56	262.05	10.60	51.82
2020 年	1.63	9.11	1.50	8.39	58.74	264.56	9.79	54.55
總計	8.17	48.67	7.48	44.62	269.95	1,443.88	49.35	293.57

受到 COVID-19 影響，2020 年不少船隻長期被迫停留港口無法出航，滯留港口時間異常增加，導致客輪靠泊之空氣污染物增加，如 2020 年 1 月 25 日鑽石公主號群聚感染 COVID-19 的關係，導致部分客輪被迫長時間靠泊基隆商港內，如寶瓶星號郵輪自 2020 年 2 月 10 日無法出港的情況，使之靠泊超過 2 個月。本研究從 2016~2020 年客輪活動特性計算出各類別的空氣污染排放量，參照表 11 資料發現空氣污染排放量，受與船舶噸位與引擎運轉量成正比，客輪部分 PM₁₀、PM_{2.5} 與 SO₂ 以 2018 年的

排放量最高，自 2019 年開始降低，除了與船舶進出艘次與噸位有關係外，同時受到國內法令自 2019 年開始限制 0.5% 低硫燃油有關，惟 NO_x 在 2020 年排放量增加之原因，靠泊郵輪以寶瓶星號為主，其 1993 年建造年份屬於 IMO Tier0 的高排放係數。

依據表 16 資料所示，客輪的艘數並非主要進出基隆港的船舶，基隆商港依作業型態以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備（移動式起重機、橋式機）進行裝卸貨物作業，此時船隻維持最低動力即可，不同於客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，近年來客輪以國際郵輪為大宗，因為基隆港水深限制下，難以停靠與國際郵輪等噸位的貨櫃船、雜貨船和散裝船。所以，客輪總噸位與輸出動力普遍高於一般商船種，導致空氣污染排放量比例高。

4.2 基隆地區空氣污染排放比較

船舶屬於移動式污染源一環，但船舶的廢氣排放，無法顯示對於周邊環境空氣品質有關聯性，為了探討客輪空氣污染物排放對基隆市之貢獻度，參考環保署公告資料，近 5 年 PM_{10} 對於客輪排放量約在 1.1~1.7 噸之間，小於基隆市移動污染源之 1%，主要排放源為非港區外的移動式污染源；近 5 年 $\text{PM}_{2.5}$ 部分之客輪排放量約在 1.2~1.9 噸之間，小於基隆市移動污染源之 1%，主要排放源為非港區外的移動式污染源；近 5 年 SO_2 部分客輪排放量 40~60 噸之間，小於基隆市排放總和之 1%，主要排放源為固定式污染源。近 5 年 NO_x 部分之客輪排放量約在 7~12 噸之間，小於基隆市排放總和之 1%，主要排放源為固定式污染源。雖然基隆港近年之客輪總噸位及航次，有明顯增加的情形，對於基隆市空氣污染物排放之影響並不顯著。且各單位對空氣污染排放量評估不同，如環保署以陸上移動式污染源方式評估船舶資料，對於燃油排放係數及船舶負載狀態，可能會有低估情況，運用本研究整理參考公式，可具代表性之量化客輪空氣污染物排放，有助釐清污染物對環境之貢獻度。

表 17 2016~2020 年船舶與基隆市排放量比較

0	類別	2016	2017	2018	2019	2020
PM ₁₀ (公噸/年)	客輪排放	1.21	1.73	1.83	1.77	1.63
	移動污染源	1,172.86	1,171.07	1,153.48	1,129.34	1,137.28
	全市總和	1,798.51	1,787.91	1,708.56	1,673.01	1,661.52
PM _{2.5} (公噸/年)	客輪排放	1.10	1.57	1.66	1.63	1.50
	移動污染源	455.59	457.03	445.21	440.69	443.60
	全市總和	943.15	936.77	873.82	858.92	845.09
NO _x (公噸/年)	客輪排放	40.95	54.90	57.80	57.56	58.74
	移動污染源	2,247.61	2,260.98	2,157.39	1,663.29	1,676.69
	全市總和	17,305.17	6,987.89	6,271.70	5,785.34	5,676.29
SO ₂ (公噸/年)	客輪排放	7.37	10.49	11.10	10.60	9.79
	移動污染源	2,066.20	2,078.66	1,923.11	1,909.28	1,921.87
	全市總和	12,501.24	8,273.34	7,323.50	7,175.18	6,938.96

4.3 COVID-19 對客輪空氣污染排放之影響

國際航運受到 COVID-19 疫情衝擊，更導致全球郵輪旅遊市場受到嚴重的下降情況，如表 18 所示。自 2020 年 2 月起進出基隆港的國際郵輪艘次大幅降低，同時也發生靠泊中國際郵輪受到限制無法出港情況，本研究以排放強度與總噸位比值探討，發現未受疫情影響之前，比值約在 0.21~0.23 kWh / 噸之間；2020 年疫情發生時，比值為 0.768 kWh / 噸，但是在總噸位 / 艘次的比值未出現明顯差異。經本研究發現 2020 年客輪處於非營運狀態下長時間靠泊，有鑑於船舶靠泊的活動強度為主要船舶排放量來源，故影響該年度整體排放量，然非營運狀況下的輔助引擎運轉效率，則會造成本研究高估情況。

表 18 2016~2020 年客輪活動分析 (表格樣態)

年度	艘次	總噸位 (噸)	排放強度 (kWh)	總噸位 / 艘次	kWh / 噸
2016	224	13,864,704.6	2,977,075.2	61,896.0	0.215
2017	275	18,557,335.5	4,270,751.8	67,481.2	0.230
2018	286	19,947,191.5	4,518,562.2	69,745.4	0.227
2019	305	20,691,044.5	4,663,660.6	67,839.5	0.225
2020	87	5,593,689.6	4,297,050.3	64,295.3	0.768
總計	1,177	78,653,965.5	20,727,100.1	66,825.8	0.264

4.4 客輪使用岸電對空氣污染物排放之影響

為了達到港區空氣清淨的目標，現行以環保署對於船舶空氣污染改善措施有行政管理與自願性減量 (陳惠琪，2011)，行政管理部分以切換低硫燃油和登船抽查方式，現況臺灣各港口以限制使用 0.5% 以下低硫燃油，配合登船抽查配合落實度。自願性減量部分減速計畫、推行船舶減量技術、靠泊使用岸電為主，有鑑於船舶靠泊時空氣污染排放，遠大於航行的情況，若要有效降低應採取岸電措施 (葉蒼賓，2016)，本研究依據臺灣電力公司公告每年實際空氣污染物排放資料 (如表 19)，假設客輪於靠泊時從使用鍋爐燃油方式 100% 全面轉換為臺電公司岸電提供動力之評估如表 20。

表 19 臺電歷年空氣污染物資料 (公斤 / 百萬度)

類別	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
氮氧化物	379	360	317	283	264
二氧化硫	298	278	181	125	102

因岸電設施為船舶靠泊時才能使用的裝置，故只考慮客輪靠泊狀態的空氣污染排放情況，下述以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，進行下述計算：

1. 燃油之空氣污染排放量：

輔助引擎活動強度 = AER × LD × H

輔助引擎：3,360.7 × 0.32 × 7.2 = 7,743.05(kWh)

參考表 14 輔助引擎使用含硫量 0.5% Heavy fuel oil 燃油之空氣污染排放係數，分別為 NO_x 13.82(g/kW · h) 與 SO₂ 2.28(g/kW · h)。

NO_x = 7,743.05 × 13.82 = 107,008.951 (g)

SO₂ = 7,743.05 × 2.28 = 17,654.154 (g)

2. 岸電之空氣污染排放量：

以輔助引擎功率 7,743.05(kWh) 轉換為表 19 臺電公司 2016 年公告的空氣污染物排放係數，分別為 379 (公斤 / 百萬度) 與 SO₂ 298 (公斤 / 百萬度)。

NO_x = 7,743.05 × 379 ÷ 1,000 = 2,934.616 (g)

SO₂ = 7,743.05 × 298 ÷ 1,000 = 2,307.429 (g)

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，靠泊時其燃油的活動強度為 7,743.05(kWh)、NO_x 排放量為 107,008.951 (g)、SO₂ 排放量為 17,654.154 (g)；若完全轉換為岸電後，NO_x 排放量為 2,934.616 (g)、SO₂ 排放量為 2,307.429 (g)。本研究以此方式依序計算 2016~2020 年客輪靠泊狀態下，燃油的活動強度、燃油的空氣污染排放量，與完全轉換成岸電後之空氣污染排放量總和，彙整於表 20。

表 20 客輪岸電污染物轉換評估表

年份	活動強度 (kWh)	燃油 (噸)		岸電 (噸)	
		NO _x	SO _x	NO _x	SO _x
2016	2,699,688.9	36.8	6.2	1.0	0.8
2017	3,904,430.0	49.7	8.9	1.4	1.1
2018	4,129,666.0	52.4	9.4	1.3	0.7
2019	4,260,158.4	52.2	9.7	1.2	0.5
2020	4,186,395.6	57.2	9.5	1.1	0.4
總計	19,180,338.9	248.3	43.7	6.0	3.6

若客輪靠泊時，能以燃油發電 100% 全部轉換成臺灣電力公司供電方式為例，客輪 2016~2020 年 NO_x 排放量總和，從 248.3 噸降低至 6.0 公噸，SO₂ 排放量總和，從 43.7 噸降低至 3.6 公噸的情況，推估假設客輪靠泊時，全面使用岸電設施能大幅度降低 NO_x 及 SO₂ 排放量。

本研究將 2016~2020 年停靠基隆港各系列郵輪資料彙整於表 21，雲頂郵輪、公主遊輪及歌詩達郵輪這 3 系列靠泊共計 1,030 艘次，且活動強度總和為 16,730,291 kWh，佔整體客輪數據 80% 以上，因其餘郵輪系列，並未將基隆港設定為郵輪母港，所以進出基隆港的航次不固定，故為達到有效空氣污染降低可行性目標，將這 3 系列郵輪列為岸電轉換模擬評估情境之討論對象。

- 1. 岸電使用之模擬評估情境一為客輪 100% 轉換岸電設施之最大減量狀態。
- 2. 岸電使用之模擬評估情境二為雲頂郵輪系列全部轉換岸電設施。
- 3. 岸電使用之模擬評估情境三為公主遊輪系列全部轉換岸電設施。
- 4. 岸電使用之模擬評估情境四為歌詩達郵輪系列全部轉換岸電設施。

以模擬評估情境二雲頂郵輪系列 2016 年為例，進行下述計算：

$$\text{NO}_x = 1,318,694 \times 379 \div 1,000 = 499,785.026 \text{ (g)}$$

$$\text{SO}_2 = 1,318,694 \times 298 \div 1,000 = 392,970.812 \text{ (g)}$$

表 21 2016~2020 年各系列郵輪活動強度與艘次資料

郵輪系列	靠泊排放 (kWh)						艘次總和
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	總計	
雲頂郵輪	1,318,694	1,373,287	1,686,347	1,449,441	4,049,380	9,877,148	746
公主遊輪	839,758	1,590,753	1,662,091	1,741,648	72,880	5,907,131	224
歌詩達郵輪	95,394	312,036	231,690	306,894	0	946,012	60
精緻遊輪	57,578	251,315	187,541	90,339	0	586,772	16
皇家加勒比郵輪	223,776	147,889	57,482	116,194	0	545,341	19

44 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

荷美郵輪	0	79,376	132,540	146,698	0	358,614	11
挪威郵輪	0	6,473	84,043	78,936	0	169,452	10
日本郵輪	56,897	11,298	15,432	38,647	18,914	141,188	11
地中海郵輪	0	0	31,609	74,205	0	105,814	2
赫伯羅特郵輪	0	27,918	10,757	33,409	0	72,085	5
愛達郵輪	0	34,400	0	34,473	0	68,873	4
銀海郵輪	14,787	17,127	0	6,081	11,864	49,858	6
維京郵輪	0	0	0	39,641	0	39,641	4
商船三井	5,024	4,938	4,891	18,000	0	32,853	5
世鵬郵輪	7,794	7,533	7,613	7,488	0	30,428	4
麗晶七海郵輪	19,416	10,122	0	0	0	29,538	3
皇后郵輪	21,498	0	0	0	0	21,498	1
鳳凰旅遊	0	0	0	18,689	0	18,689	1
水晶遊輪	0	0	0	13,623	0	13,623	1
其他	39,074	29,965	17,631	45,754	33,358	165,781	44
總計	2,699,689	3,904,430	4,129,666	4,260,158	4,186,396	19,180,339	1,177

以 2016 雲頂郵輪系列 2016 年為例，靠泊時其燃油的活動強度為 1,318,694(kWh)，若完全轉換成岸電後 NO_x 排放量為 499,785.026 (g)、SO₂ 排放量為 392,970.812 (g)。本研究以此方式依序計算 2016~2020 年各模擬評估情境靠泊狀態下，若完全轉換成岸電後，空氣污染排放量總和彙整於表 22。

表 22 岸電使用之模擬評估

單位：公噸

		2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	總和	相較情境一 之總和占比
情境一	NO _x	1.02	1.41	1.31	1.21	1.11	6.05	
	SO ₂	0.80	1.09	0.75	0.53	0.43	3.60	
情境二	NO _x	0.50	0.49	0.53	0.41	1.07	3.01	49.7%
	SO ₂	0.39	0.38	0.31	0.18	0.41	1.67	46.5%
情境三	NO _x	0.32	0.57	0.53	0.49	0.02	1.93	31.9%
	SO ₂	0.25	0.44	0.30	0.22	0.01	1.22	33.9%
情境四	NO _x	0.04	0.11	0.07	0.09	0	0.31	5.1%
	SO ₂	0.03	0.09	0.04	0.04	0	0.20	5.4%

本研究若能達到模擬評估，情境一為最理想削減客輪空氣污染量的情況；情境二為雲頂郵輪系列（往來基隆港的客輪中最多艘次的群體），近 5 年於基隆港活動的客輪總計 1,177 航次，雲頂郵輪系列則停靠 746 航次，而轉由臺電公司所產生 3.01 噸 NO_x 以及 1.67 噸 SO₂，依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，相較於情境一由臺電公司產生空氣污染物 NO_x 的 49.7% 以及 SO₂ 的 46.5%；模擬評估情境三，則為公主遊輪系列屬於大噸位的郵輪群體轉，船舶總噸位介於 7 萬到 15 萬噸之間，而轉由臺電公司產生 NO_x 1.93 噸以及 SO₂ 1.22 噸。依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，相較於情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 31.9% 以及 SO₂ 的 33.9%；模擬評估情境四歌詩達郵輪系列，因基隆未屬於該系列的郵輪母港，故往來基隆港航次相較少於雲頂郵輪系列與公主遊輪系列，尤其 2020 年受到 COVID-19 影響，以致未規劃航次進入基隆港，依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，轉由臺電公司產生 NO_x 0.31 噸以及 SO₂ 0.2 噸，相較於情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 5.1% 以及 SO₂ 的 5.4%。

因岸電設施受到 IMO、國際電工協會 (International Electrotechnical Commission, IEC)、國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) 等國際組織訂定相關基準影響，截至目前尚未有世界統一規格之岸電插頭，國際上通用規格之岸電插頭共計 4 類 (葉倉賓, 2016)，故因國際岸電設施規格的差異因素，導致碼頭設施建置岸電設施成本造昂貴，且無法兼顧所有船舶需求，致使降低船方使用意願，此外，港區管理者對於碼頭規劃困難，以 2019 年國際客輪 305 航次靠泊基隆港為例，只有歌詩達威尼斯號 4 航次與歌詩達大西洋號 3 航次共 7 航次具備有岸電設備 (林啟燦, 2020)，據本研究推估最有效益的方式，為同時執行模擬評估方式二與三，經岸電轉換後之空氣污染排放，能達成情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 81.6% 和 SO_2 的 80.4%。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本研究利用總噸位數推算引擎輸出動力，並計算出客輪於不同輸出功率組合下的活動強度 (kWh)。由船舶整體排放數據可知，空氣污染物排放最大來源是船舶靠泊行為，且活動強度隨船靠泊之時間增加而增加。此外，因客輪靠泊的碼頭，距堤口約 1.8~2 海浬，比起其他商船路途距離較遠，且船舶總噸位約在 5 萬~13 萬噸之間，綜上述 2 項因素使客輪進出港活動強度，在整體船舶活動較靠泊活動占比為高，整體而言，近 5 年來客輪活動約占整體船舶活動強度之 13~21%。
2. 基隆商港依作業型態而言，以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備 (移動式起重機、橋式機) 進行裝卸貨物作業，船隻僅須維持最低動力即可。然客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，致使客輪總噸位與輸出動力普遍高於一般商船，導致空氣污染物排放量比例較高。
3. 經本研究統計資料所顯示，客輪排放的空氣品質污染物濃度比例，小於基隆市移動污染源 1%， SO_2 及 NO_x 主要以非移動污染源排放為主， PM_{10} 與 $\text{PM}_{2.5}$ 則以市內移動式污

染源為主。雖然基隆港近年之客輪總噸位及航次有明顯增加的情形，對於基隆市空氣污染物排放之影響並不顯著。

4. 受到 COVID-19 疫情之影響，2020 年不少船隻滯留港口時間異常增加，導致計算之靠泊空氣污染物排放增加，船舶處於非營運狀態運作，致使影響 2020 年度空氣污染物整體排放量。
5. 客輪於靠泊階段若能使用岸電設施，可有效降低 NO_x 與 SO_2 空氣污染物排放，但因岸電插頭設備種類之差異，以致現階段無法達到客輪於靠泊時，全面使用岸電之限制，可參酌模擬評估情境二、三（雲頂郵輪系列、公主遊輪系列）之情況，設定短、中期計畫逐步汰換、更新碼頭設施。

5.2 建議

1. 經研究使用潔淨能源、使用岸電，能降低船舶活動所帶來的空污問題，除此之外，建議鼓勵船公司或船東自願性減量，如：船舶限速、安裝污染防治設備（排煙脫硫系統、氮氧化物處理），以及定期汰換舊型船隻等。對於建議提高獎勵與規範措施，以及船舶遵守港區環保措施業者，提供優惠或降低港費用，或提高船舶靠泊時，使用燃油設備徵用費，減少港區設備、基礎設施，得以有效降低航運作業，對於港區周邊環境衝擊。
2. 現有陸上、海上移動污染源排放推估方式不一致，如環保署 (TEDS 10.1 版本與環境影響評估書) 不同於國際港口空氣污染排放評估方式 (洛杉磯、長灘港、上海港、臺灣交通部運輸研究所)，是以陸上移動式污染源方式評估船舶資料，對於燃油排放係數、船舶噸位以及船舶負載狀態（入港、出港、靠泊）會有低估情況，尤其環保署排放量清單難以表示船舶對於空氣污染的影響程度，若要有更好的比對成果，建議使用相同評估基礎，故運用本研究整理參考公式，量化客輪空氣排放對於環境貢獻性更具代表性。
3. 依據運研所資料所示，全球目前對於確立目標以執行岸電的政策與法規部分，惟美國與中國較為積極，若政府單位能參考國際已落實岸電的政策與法規，儘速立法執行，對於相關的法規與配套措施能有完整性，方能促成岸電政策推動。

參考文獻

Cooper D.A., 2003, Exhaust emissions from ships at berth. Atmospheric Environment 37, 3817–3830.

Starcrest Consulting Group, 2019, San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report.

Starcrest Consulting group, 2019, The Port of Los Angeles inventory of air emissions for calendar year 2018.

臺灣電力公司，2021 年 5 月查詢。<https://www.taipower.com.tw/>

臺灣中油股份有限公司，2021 年 7 月查詢。<https://www.cpc.com.tw/>

田文國、苗林華、簡光輝，2012，船、機、螺槳在運航操控性能運用之探討，中華海員月刊，第 701 期，頁 35- 頁 40。

交通部，2021 年 3 月查詢，商港法。<https://law.moj.gov.tw/>

交通部航港局，2021 年 3 月查詢。<https://www.motcmpb.gov.tw/>

交通部統計資訊網，2021 年 3 月查詢。<https://stat.motc.gov.tw/>

行政院交通部，2018，行政院公報，第 024 卷，第 020 期。<https://join.gov.tw/>

行政院環保署，2018，空氣污染防治總檢討，空氣品質改善維持資訊網，頁 45-64。
<https://air.epa.gov.tw/>

行政院環保署，2021 年 3 月查詢，空氣污染防治法。<https://www.epa.gov.tw/>

行政院環保署，2021 年 3 月查詢，空氣污染排放清冊。<https://teds.epa.gov.tw/>

吳義林、蔡德明、賴信志 楊榮元、張鴻良、邱慧真，2019，建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統，交通部運輸研究所，頁 4-1– 頁 4-10。

林佩君，2009，基隆地區大氣懸浮微粒受船舶活動影響之研究，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

林秋瑾，2015，臺灣港群建立之生態港之阻礙因素，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

林素如，2014，綠色港口推動策略，國立交通大學，博士論文。

林啟燦、許浩洋、卓明遠，2020，臺灣港群岸電設施設置及規劃推動可行性，交通部運輸研究所。

邱永芳、陳桂清、柯正龍、葉雨松、許真瑜，2011，船舶岸電效益評估，臺灣地區港埠節能減碳研討會論文集，交通部運輸研究所，頁 6-1- 頁 6-19。

侯佳芸，2012，綠色港部永續發站之關鍵成功因素，國立交通大學，碩士論文。

胡家聲、廖宗、康翠芳，2019，高雄港綠港發展策略之探討，航運季刊，第二十八卷，第三期，頁 51- 頁 72。

海域資訊整合平台，2021 年 3 月查詢。<https://ocean.moi.gov.tw/>

袁順光、蔡奇呈、黃俊誠、林晉瑋、陳志立，2011，大型船舶進入基隆港之安全評估模式，航運季刊，第二十卷，第三期，頁 19-37。

曹兆凡，2009，港口營運與周邊環境空氣品質關係之研究－基隆港在港商船 NO_x 及 SO_x 之排放，國立臺灣海洋大學，碩士論文，。

船舶暨海洋產業洋發中心，2018，IMO 船舶硫排放限制之影響及對應措施 (上)，323 期。<https://www.soic.org.tw/>

船舶暨海洋產業洋發中心，2018，IMO 船舶硫排放限制規定 2020 年準時生效，317 期、319 期、320 期。<https://www.soic.org.tw/>

許淑禎，2016，綠色港口空氣污染指標之研究－以基隆港為例，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

陳桂清、柯正龍、葉雨松、許真瑜、徐澄清 洪雅琪、吳明蒼、杜思蘋、陳凱莉、許茗凱、簡嘉霈、李權峰、涂致曄，2019，臺灣港埠節能減碳效益提升之研究，交通部運輸研究所，頁 3-7– 頁 3-22。

陳惠琪，2011，港區空氣污染物管制策略及執行經驗，行政院環境保護署。

黃志輝、丁焰、尹航、王宏麗、馬冬、蕭寒，2016，中國船舶大氣污染排放清單報告，中國環境保護部機動車排污監控中心。

葉倉賓，2016，基隆港郵輪岸電系統之研究，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

廖永裕，2016，基隆港執行率色港灣防止空氣污染之脆弱性分析，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

臺灣港務股份有限公司，2021 年 3 月查詢。<https://www.twport.com.tw/>

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，2020，臺北港物流倉儲區第一、二 -1 期開發計畫環境影響說明書，專案小組第二次審查會議。

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，2021 年 3 月查詢。<https://kl.twport.com.tw/chinese/>

臺灣港務股份有限公司郵輪旅遊網，2021 年 3 月查詢。<https://cruise.twport.com.tw/>

臺灣港棧服務網，2021 年 3 月查詢。<https://tpnet.twport.com.tw/>

蔡薇，2004，船舶大污染排放量的計算方式，武漢大學，博士論文，頁 191- 頁 194。

鄭艾瑋，2013，基隆港轉型之研究 - 以郵輪泊靠為例，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

空氣污染與噪音類

廢溶劑處理廠之選擇性觸媒還原法對戴奧辛處理效率

吳義林*、張恩愷**

摘 要

由於現今焚化爐後端會加裝空氣污染控制設備以減少對環境的危害，而選擇性觸媒還原法 SCR(selective catalytic reduction) 是目前處理氮氧化物較有效且經濟之方法，傳統鈦鈦觸媒因本身具毒性及操作溫度的限制，須將廢氣再加熱造成能源耗損，而中低溫觸媒有較低之操作溫度，可節省能源消耗。因此本研究選用陶瓷纖維濾管作為同時處理戴奧辛類化合物及氮氧化物之中低溫觸媒使用，並分別探討其處理效率。

由 2 次採樣結果顯示戴奧辛類化合物主要以氣相排放，其氣相約占 74~95%，且由各戴奧辛類化合物濃度透過 I-TEF 轉換成毒性當量濃度占比結果顯示在固相及氣相中皆為 5~7 氯 -Furan 占比最高。此外，由各氣 + 固相戴奧辛類化合物在經過 SCR 後之處理效率皆在 95% 以上，顯示陶瓷纖維濾管對於 Dioxins 有很高之去除效率。

【關鍵字】SCR、陶瓷纖維濾管、I-TEF、毒性當量濃度

* 國立成功大學環境工程所

教授

** 國立成功大學環境工程所

研究生

一、前言

我國人口稠密，廢棄物產生量與日俱增，垃圾遂成為各級政府最棘手的問題。在掩埋場一地難求與現有容量限制下，焚化逐漸已成為現階段解決垃圾問題的主要中間處理方法，且施行有年。加裝在焚化爐後端的空氣污染控制處理流程中，選擇性觸媒還原法 SCR(selective catalytic reduction) 是目前處理氮氧化物及戴奧辛類化合物較有效且經濟之方法。

本研究以臺南市某甲級廢棄物處理機構(以下簡稱本廠)之 SCR 系統為研究目標，其營業處理項目包括一般事業廢棄物(D-1504)及有害事業廢棄物(C-0301)。本廠主要製程係將中高熱值之廢溶劑做為輔助燃料，供應燃燒爐(含一次及二次燃燒爐)燃燒產出高溫廢氣($1,050^{\circ}\text{C} > T > 850^{\circ}\text{C}$)，再利用廢熱鍋爐回收蒸汽熱能。廢熱鍋爐下游聯接空氣污染控制設備(APCDs)，用以有效去除氣狀及粒狀空氣污染物。本廠空氣污染控制設備處理流程詳見圖 1，控制單元包括半乾式除酸集塵塔、SCR 陶瓷濾管袋式集塵器、文式洗滌塔、濕式洗滌塔及濕式靜電集塵器等，處理後的廢氣經由誘引風車抽引至煙囪排放，以達成空氣污染有效處理之目標，此外本研究針對 SCR 陶瓷濾管袋式集塵器對於 Dioxins 之去除效率進行探討。

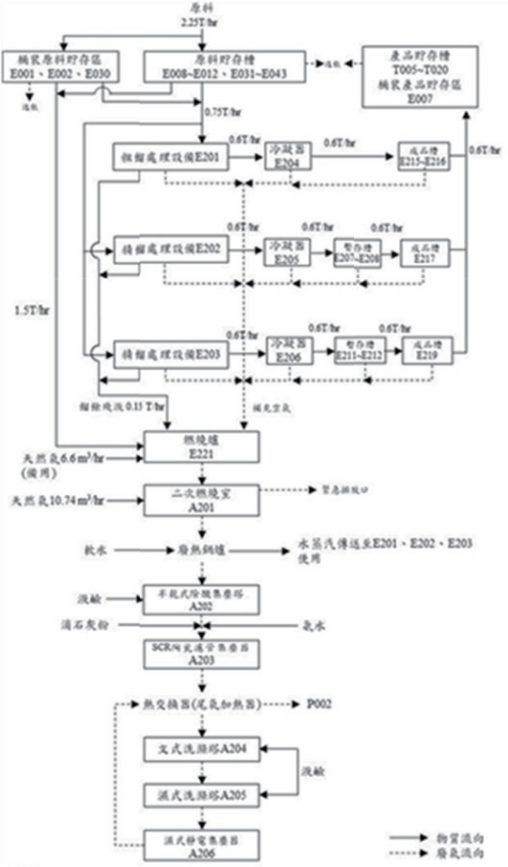


圖 1 某公司熱處理 (焚化) 流程圖

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>」

二、文獻回顧

2.1 戴奧辛類化合物特性

2.1.1 戴奧辛來源

戴奧辛與呋喃 (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated

dibenzofurans, PCDD/Fs，一般簡稱戴奧辛) 首次在都市垃圾焚化爐之煙道廢氣與飛灰被發現後 (Olie et al., 1977) 已在許多國家成為一嚴肅課題。戴奧辛類化合物是由 2 個氧原子連結 1 對苯環類化合物，為約 222 種不同化合物之總稱；包括 75 種多氯二聯苯戴奧辛 (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)、135 種多氯二聯苯呋喃 (Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs) 及 12 種共平面多氯聯苯 (Partially Coplanar Polychlorinated Biphenyls)。戴奧辛產生的來源包括自然生成 (如火山爆發、森林火災)、工業原料製程 (如含氯酚類化合物) 的副產物、特定工業製程的燃燒排放：1. 工業高溫製程 (如水泥窯爐、瀝青拌合廠、煉鋼廠、非鐵金屬熔融冶煉、鑄造廠等) 2. 化學製造 (如殺蟲劑、紙漿、造紙漂白、氯乙烯製造等) 3. 電力與能源利用 (如電廠燃油燃燒、車輛燃料燃燒等)、廢棄物焚化、及其他人為的燃燒行為 (如露天燃燒、火災、抽煙等)。

2.1.2 戴奧辛氣固相討論

戴奧辛在大氣中的宿命和輸送過程被廣泛探討，由於高氯數戴奧辛較具親脂性，在顆粒中有較高濃度分佈；含 4~5 氯戴奧辛因蒸汽壓較大，在氣相中濃度分佈則較高氯數戴奧辛為高，因此具有半揮發性 (semi-volatile) 的特性，一旦進入大氣環境介質後，其相態 (Phase) 與溫度、顆粒都有密切的關係，加上源頭屬於高溫環境 (600°C 以上)，排放初期多以氣相為主，當熱氣碰到周圍的冷空氣時，這些物質將吸附在大氣中懸浮顆粒上 (Edule, 1996；Fiedler, 1996；Halsall, 1997)。

由此可知，戴奧辛在氣相和固相其形態其實是沒有變化的，在固相中只是吸附在懸浮顆粒上，這也造就了戴奧辛的氣、固相檢測上方法是相同的，差別就在於採樣上，氣相使用吸附管，而固相則是使用濾紙收集，後端檢測都是將其溶解於溶劑中再進一步分析的。由於粒徑小的懸浮微粒有較高比表面積，因此，戴奧辛物質的另一個特性便是在次微米直徑的顆粒有明顯之富集現象 (Enrichment)，而這種現象將造成 2 種影響：1. 人體無法過濾如此細微之顆粒，這些化合物將直接經由呼吸系統進入人體內；2. 次微米顆粒有很高的漂浮性及長的滯留時間，在大氣中屬於長距離之輸送，因此即使在人煙稀少的地區 (如高山或南北極圈) 也可偵測出這些物質。

2.1.3 戴奧辛的生成機制及危害

由於戴奧辛有 75 個同分異構物，每個異構物毒性不一，試驗動物的反應也有極大的差別，戴奧辛具親脂性，進入人體後容易在脂肪進行累積，進而對人體產生毒害，但於酸、鹼溶液中穩定。低氯之戴奧辛較不穩定，若暴露於大氣中，容易吸收輻射能而行光分解反應。它們主要的危害就在於其脂溶性、在環境或生物體內之穩定性，而且具有生物鏈蓄積放大性。這些特點都使戴奧辛一旦進入生物體內，就不容易排出，只進不出，一步一步的疊加，最終在生物鏈最頂部生物體內含量可能達到比原始環境高百萬級別的濃度，並且在環境中其生存半衰期過長，可能要經過數百年才得以分解，所能影響的地區就更加擴大。

形成 PCDD/Fs 之機制經實驗模擬 (250~500℃) 最主要的有 2 種：1. 大分子碳 (亦稱殘留碳) 與飛灰中的有機或無機氯在低溫下 (約 250~350℃) 在後燃燒區再形成，一般稱為 de Novo 機制 (Milligan et al., 1993)。2. 高溫合成 (pyrosynthesis) 即高溫中氣相 PCDD/Fs 形成 (Ballschmiter et al., 1985) 或經由許多不同的有機前驅物質 (precursor) (Dickson et al., 1989)，如多氯聯苯乙醚的氯酚，其可經由不完全燃燒而形成並經由異質化與觸媒化反應與飛灰表面結合在一起。這 2 種機制可以同時發生也可以獨立發生。de Novo 合成反應經由實驗室之高溫爐加熱都市垃圾焚化爐之飛灰後 (Vogg et al., 1986) 發現 de Novo 合成反應。de Novo 合成反應包含 2 個部分，一為低溫碳氧化反應，其能提供 PCDD/Fs 生成所需 2 個芳香族經基之結構；另一為金屬離子催化反應，其能提供 PCDD/Fs 生成所需之氯原子。低溫碳氧化反應可被金屬離子或類似活性碳之碳結構所催化 (Dickson et al., 1992; Luijk et al., 1994)。氯化反應所需之氯則可由飛灰中之金屬氯離子或煙道廢氣中氯原子提供。de Novo 合成反應產生了多種含氯有機物，包含了 chlorophenols, PCDDs, -naphthalenes, PCDFs, and -benzenes 等。

2.1.4 戴奧辛的處理方法

(1) 避免燃燒區生成：

戴奧辛經研究，形成溫度介於 200~500°C 之間，且在 300°C 時達到其最大生成速率。因此，若煙道氣在此溫度區間停留時間越短，所生成戴奧辛的量就越少。

(2) 管末處理：

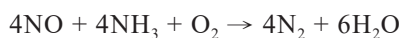
靜電集塵器、洗滌塔、袋式集塵器、吸附劑噴入，及在不同情況下不同設備之組合皆已被測試過，其中以洗滌塔 + 活性炭噴入 + 袋式集塵器之組合被證實是最有效之控制技術；另一種有效方法為使用氧化或還原之觸媒分解技術 (Buckens et al.,1998)。

2.2 選擇性還原觸媒法

選擇性觸媒還原 (SCR) 單元，通常使用於火力發電廠以控制氮氧化物，但在某些都市垃圾焚化廠亦有裝置 SCR，其中較先進者以 V_2O_5/TiO_2 為觸媒。經過研究與實驗驗證指出商業化之氮氧化物控制觸媒亦能減少 PCDD/Fs 之排放 (Fujii et al.,1993；Hums et al.,1996；Krishnamoorthy et al.1998)，結果顯示以 SCR 單元分解煙道器中戴奧辛之去除效率大約介於 61.8% 與 99.9% 之間。

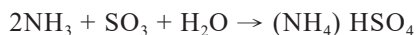
選擇性觸媒還原法的模組依照構造可以分為早期的板狀觸媒、改良版的蜂巢狀觸媒，以及該計畫所採用的陶瓷纖維觸媒，由於高溫陶瓷濾燭的熱化學和機械穩定性以及較高的分離效率，因此建議將其用作支撐結構，歸咎 3 者差異，主要在於比表面積的差距，而比表面積也正比於塗覆的催化劑量以及可處理的污染物總量，進而得到更好的處理效率。

SCR 觸媒是以 TiO_2 為載體，活性物為釩、鉬、鎢之金屬氧化物，在操作上為了安全之顧，以 20%~25% 氨水作為還原劑，在與熱空氣混合之前，將氨水泵入蒸發器。然後將氣態氨作為還原劑注入到在熱交換器中已預熱的煙道氣中，促使氨與 NO 等污染物還原成 N_2 與 H_2O ，SCR 之全反應 (overall reaction) 包含 3 個主要反應，分別示意如下：

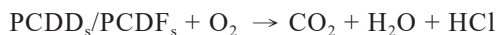




以及副反應為



而副反應所生成之 NH_4HSO_4 為黏稠狀液體，會促使觸媒阻塞失去其效用。所以一般會要求保證 SO_2 氧化成 SO_3 副反應轉化率在一定程度以下。後來發現 SCR 反應觸媒亦可用於戴奧辛裂解，進行氧化反應，將戴奧辛轉化成鹽酸、二氧化碳與水氣，反應式示意如下：



2.3 陶瓷纖維 (Ceramic filter) 操作參數

(Heidenreich et al., 2008) 整合 TiO_2 - V_2O_5 - WO_3 催化劑和陶瓷過濾器，開發添加催化劑之陶瓷過濾器；而 NO_x 去除效率取決於煙道氣的溫度、 NH_3/NO_x 摩爾比與在催化劑床的煙道氣停留時間 (Neuffer et al., 2007)。文獻中研究了過濾速度和操作溫度對催化性能的影響。結果顯示催化陶瓷過濾器在 300°C 和 2 cm/sec 過濾速度下可以達 98% 的 NO 轉化率。因為與 NO 相比， NO_x 的還原被認為更快。因此，研究通常都以 NO 作轉化分析。

1. 溫度

根據 (Heidenreich et al., 2008) 研究在催化劑存在下， NO 還原通常在 250°C ~ 350°C 之間的反應溫度下發生。在溫度操作上，經由條件設定在 2 cm/sec 過濾速度下，由圖 2 可以看出 NO 轉化率隨反應溫度升高而上升，而在 300°C 以上時，2 種不同進流 NO 濃度的轉化率都有 90% 以上，故最適操作溫度為 300°C 。

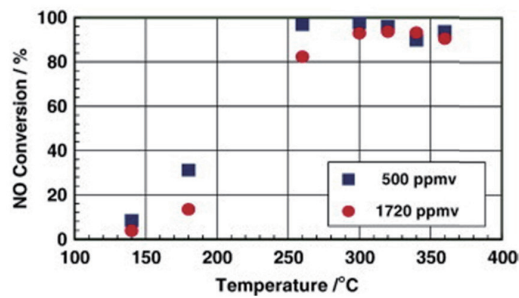


圖 2 溫度對 NO 轉化率的影響 (資料來源：Heidenreich et al., 2008)

2.NH₃/NO_x 摩爾比

研究顯示在較高的 NH₃/NO_x 摩爾比時，氨洩漏會增加。SCR 系統中化學計量的 NH₃/NO_x 摩爾比約為 1；NH₃/NO_x 摩爾比高於 1 時，會顯著增加氨氣的洩漏 (Baukal, 2013)。在實際的 SCR 系統中，氨通常注入以產生 NH₃/NO_x 的 1.05~1.1 摩爾比，以達到 NO_x 的 80% ~90%轉化率與小於 10 ppm 未反應的氨逸散。

3. 流速

Heidenreich et al. (2008) 研究陶瓷過濾器在不同氣體流速對於 NO 轉化率之影響，結果如圖 3 所示，顯示氣體流速在 4 cm/sec 以下時都有相似且良好的轉化率；另外，Hübner et al. (1996) 研究陶瓷過濾器浸漬催化劑的效率，結果顯示由真空形成的氧化鋁、二氧化矽纖維組成的催化濾器對 NO 轉化是在氣體速度小於 4 cm/sec 時，NO 轉化率大於 90%。

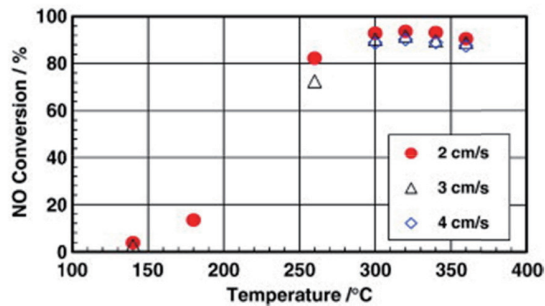


圖 3 在入口同 NO 濃度下，流速及反應溫度對 NO 轉化率的影響 (資料來源：Heidenreich et al., 2008)

三、研究方法

本研究之目的為實廠量測本廠之空污控制設備各處理單元的處理效率，尤其是陶瓷纖維選擇性觸媒對戴奧辛類化合物的處理效率，並提出具體可行之改善建議，俾提升空氣污染控制設備之處理效率。實廠量測各項空氣污染物於控制處理流程的濃度，空氣污染物包含粒狀物、SO₂、TNMHC、HCl、NO/NO₂ 與戴奧辛及廢氣特性，例如壓力、廢氣流量、廢氣溫度與廢氣濕度等，各項目之採樣方法如表 1 所示。以下說明採樣計畫及檢驗方法。

表 1 廢氣特性與空氣污染物檢測方法及檢測點數

檢測項目	檢測方法	檢測點數	備註
壓力	NIEA A101.77C A101.76C	2	選擇性觸媒前端與煙道
溫度	NIEA A101.77C	2	
濕度	NIEA A101.77C	2	
流速 / 流量	NIEA A101.77C	2	
O ₂	NIEA A432.74C	2	
SO ₂	NIEA A413.75C	2	
HCl	NIEA A412.73A	2	
粒狀物	NIEA A101.77C	2	
TNMHC	NIEA A758.70B	2	
NO/NO ₂	NIEA A411.75C	3	選擇性觸媒前端、後端與煙道
氣相戴奧辛辛	NIEA A808.75B	3	
固相戴奧辛	NIEA A808.75B	3	

四、檢測結果與討論

4.1 採樣點位置

本計畫針對 SCR 前後端及排放口 P002 進行採樣，SCR 前端採樣點位於 SCR 陶瓷濾管前，SCR 後端採樣點位於文氏洗滌塔前且熱交換器之後，P002 排放口採樣點則於煙道內，其採樣位置如圖 1 所示。

4.2 氣固相戴奧辛檢測結果及去除效率

由 5/13 戴奧辛三重複採樣結果如表 2，由於 SCR 後端三重複採樣結果流量與含氧率相似，而只有第三個樣品 SCR 後端戴奧辛濃度大於 SCR 前端顯示陶瓷纖維濾管對於戴奧辛無去除效果。因此後續針對此問題於 6/20~21 在相似進料條件下重新進行採樣，以確認是否有相同問題。

表 2 戴奧辛採樣結果 (5/13)

	Dioxins(ng-TEQ/Nm ³)			Q (Nm ³ /min)			O ₂ (%)			
5/13	SCR 前	SCR 後	P002	SCR 前	SCR 後	P002	SCR 前	SCR 後	P002	採樣時間
Dioxins-1	1.535	0.011	0.591	430.4	382.3	344.5	12.6	13.5	16.6	11:55 ~ 13:18
Dioxins-2	1.183	0.018	6.666	429.0	384.0	333.6	12.7	13.6	14.6	14:35 ~ 15:56
Dioxins-3	1.887	2.42	7.731	415.7	390.4	340.8	12.7	13.4	14.4	17:15 ~ 18:37
Average	1.535	0.816	4.996							
Temp (°C)	388	162	166							

6/20~21 之固相及氣相戴奧辛重新採樣三重複結果如表 3 所示，除了固相第三個戴奧辛樣品外，皆顯示 SCR 前端戴奧辛濃度大於 SCR 後端，並由圖 4 固相及氣相總戴奧辛去除效率證明陶瓷纖維濾管對於戴奧辛有去除效果，而後續仍須再確認是否為 SCR 前後端樣品拿反而導致有上述例外情況。

由排放口 P002 與 SCR 後端戴奧辛濃度比值顯示當經過 SCR 處理完後，再通過空污防制設備溼式靜電集塵器後反而會導致戴奧辛濃度上升。根據 Duo and Leclerc (2004) 研究結果顯示若在高 HCl 濃度下，靜電集塵器會形成 Cl radical 而與廢氣中有機物再次反應形成戴奧辛類化合物。此外，根據 Olie et al., (1998) 研究顯示戴奧辛再次生成與靜電集塵器操作溫度及顆粒物中含有之重金屬有關，在靜電集塵器操作溫度下 (205~450°C) 會導致 PCDD/F 產生，若顆粒物中含有銅則會當成催化劑，並發生 Deacon Reaction 形成 Cl_2 再與芳香烴反應生成 PCDD/F。後續學者 Karademir & Korucu (2013). 進一步研究顯示在經過靜電集塵器後，對於氣相戴奧辛類化合物無去除效果，且由於 de novo mechanism 導致飛灰中 KCl、 AlCl_3 和 CaCl_2 發生非均相反應再次形成 PCDF，或透過 NaCl 及 MgCl_2 再次形成 PCDD。

此外，根據 Kolluri and Altwicker (1994) 的研究結果顯示當廢氣經過靜電集塵器後雖然固相戴奧辛濃度下降，但氣相戴奧辛濃度則急劇上升。其原因為在有氧氣存在的電場作用下，會形成 O 及 OH 自由基而導致 chlorophenoxyl 產生，並與 chlorophenol 反應形成 PCDD 造成濃度上升。

由於採樣當天也要同時自動監測 NO_x 及 O_2 ，因此為了避免管線堵塞，在 SCR 前並未添加消石灰，因此導致後端 HCl 濃度太高而以上述機制再次形成戴奧辛，若後續回歸實際操作有添加消石灰後，即可減少上述反應發生而造成的戴奧辛濃度上升。

此外，在 3 個採樣點且三重複結果之戴奧辛氣相占比皆大部分顯示戴奧辛以氣相存在為主，平均約占 74.4~95.3%。

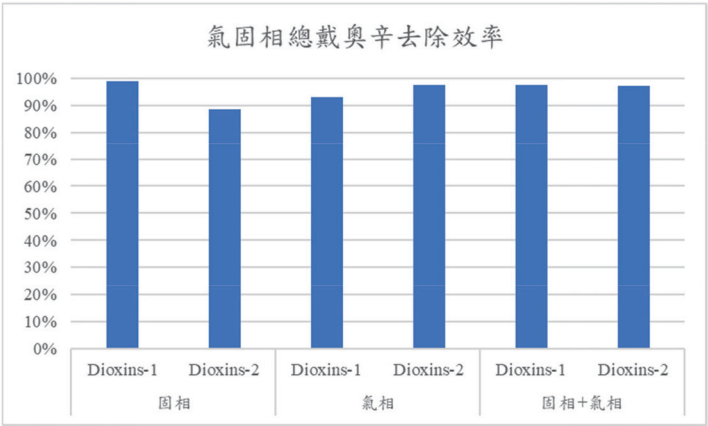


圖 4 氣固相總戴奧辛去除效率

表 3 氣固相戴奧辛採樣結果 (6/20~6/21)

固相	SCR 前	SCR 後	P002	SCR 後 / 前	P002/SCR 後
Dioxins-1	16.3704	0.1973	0.7742	0.0121	3.9240
Dioxins-2	0.2546	0.0297	1.9919	0.1167	67.0673
Dioxins-3	0.5978	18.3835	4.6746	30.7519	0.2543
Average	5.7409	6.2035	2.4802	1.0806	0.3998
氣相	SCR 前	SCR 後	P002	SCR 後 / 前	P002/SCR 後
Dioxins-1	5.5744	0.3853	7.8679	0.0691	20.4202
Dioxins-2	22.5823	0.5974	108.9513	0.0265	182.3758
Dioxins-3	59.9866	39.962	133.4757	0.6662	3.3401
Average	29.3811	13.6482	83.4316	0.4645	6.1130
固相 + 氣相	SCR 前	SCR 後	P002	SCR 後 / 前	P002/SCR 後
Dioxins-1	21.9448	0.5829	8.6422	0.0266	14.8262
Dioxins-2	22.8368	0.6271	110.9434	0.0275	176.9150
Dioxins-3	60.5841	58.3454	138.1504	0.9630	2.3678
Average	35.1219	19.8518	85.9120	0.5652	4.3277
氣相占比	SCR 前	SCR 後	P002		
Dioxins-1	25.4%	66.1%	91.0%		
Dioxins-2	98.9%	95.3%	98.2%		
Dioxins-3	99.0%	68.5%	96.6%		
Average	74.4%	76.6%	95.3%		

將 3 個採樣點之戴奧辛三重複樣品經由實驗室分析各戴奧辛類化合物之濃度並將其乘上國際毒性當量因子，轉換為 I-TEF 濃度，最後以占比分別表示 5/13 之氣相及固相結果如表 4 及表 5。由氣相及固相結果皆顯示占比最高之戴奧辛化合物為 5~7 個氯之戴奧辛類化合物，因為其濃度及 I-TEF 值較高，因此須優先關注 5~7 個氯之戴奧辛類化合物。

表 4 氣相戴奧辛 I-TEF 濃度之比例 (5/13)

I-TEF	氣相 Species	Percentage based on I-TEF 濃度								
		SCR 前			SCR 後			P002		
0.1	2,3,7,8-TeCDF	6.2%	1.9%	1.2%	1.3%	1.5%	0.3%	1.9%	0.4%	0.3%
0.05	1,2,3,7,8-PeCDF	3.6%	1.8%	1.3%	1.1%	1.1%	0.8%	1.9%	1.1%	0.9%
0.5	2,3,4,7,8-PeCDF	53.6%	38.5%	30.0%	24.1%	23.9%	34.4%	41.6%	35.3%	32.9%
0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	6.5%	9.0%	7.0%	10.7%	10.8%	11.4%	13.2%	15.1%	14.0%
0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	7.0%	10.1%	9.7%	15.4%	15.2%	16.2%	16.5%	17.7%	18.1%
0.1	2,3,4,6,7,8-HxCDF	7.1%	19.8%	31.6%	28.2%	28.8%	27.2%	16.0%	20.2%	23.1%
0.1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.4%	0.7%	0.5%	1.0%	0.9%	0.4%	0.3%	0.4%	0.3%
0.01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1.5%	5.6%	8.4%	15.6%	14.7%	8.8%	6.9%	9.3%	9.9%
0.01	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.2%	0.7%	1.1%	1.4%	1.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%
0.001	OCDF	0.1%	0.5%	1.2%	1.0%	0.9%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
1	2,3,7,8-TeCDD	4.7%	2.0%	1.2%	ND	ND	ND	1.1%	0.1%	0.0%
0.5	1,2,3,7,8-PeCDD	6.6%	5.2%	3.3%	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.7%	1.1%	0.7%	ND	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.9%	1.2%	1.0%	0.3%	0.4%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
0.1	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.4%	1.0%	0.7%	ND	ND	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.3%	0.9%	0.8%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.001	OCDD	0.1%	0.2%	0.3%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	總 I-TEF 濃度	0.629	1.177	1.880	0.011	0.018	2.420	0.561	6.611	7.642

表 5 固相戴奧辛 I-TEF 濃度之比例 (5/13)

	固相	Percentage based on I-TEF 濃度								
I-TEF	Species	SCR 前			SCR 後			P002		
0.1	2,3,7,8-TeCDF	1.3%	2.0%	0.8%	ND	8.5%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%
0.05	1,2,3,7,8-PeCDF	1.7%	2.4%	1.5%	1.4%	4.6%	0.2%	0.7%	0.4%	0.3%
0.5	2,3,4,7,8-PeCDF	34.3%	41.2%	24.7%	24.6%	48.1%	9.6%	25.1%	15.7%	9.4%
0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	11.4%	ND	7.5%	10.0%	4.4%	7.1%	13.3%	11.5%	9.3%
0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	12.8%	11.6%	8.5%	15.1%	4.1%	11.7%	17.6%	14.6%	13.9%
0.1	2,3,4,6,7,8-HxCDF	20.4%	20.6%	30.0%	29.0%	4.1%	39.7%	25.4%	32.6%	31.1%
0.1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.9%	ND	ND	1.5%	ND	0.7%	0.8%	0.8%	0.5%
0.01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	6.0%	10.6%	11.1%	15.1%	1.1%	28.0%	15.6%	22.3%	32.6%
0.01	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.6%	1.2%	1.9%	1.4%	ND	1.4%	0.5%	1.0%	1.2%
0.001	OCDF	0.3%	1.4%	4.0%	1.0%	0.2%	1.3%	0.3%	0.7%	1.2%
1	2,3,7,8-TeCDD	1.1%	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
0.5	1,2,3,7,8-PeCDD	3.9%	ND	ND	ND	18.5%	ND	ND	ND	ND
0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDD	1.3%	2.4%	1.6%	ND	1.1%	0.0%	0.1%	0.1%	ND
0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.6%	ND	2.1%	ND	1.9%	ND	0.2%	0.1%	0.1%
0.1	1,2,3,7,8,9-HxCDD	1.4%	ND	1.9%	ND	1.1%	ND	0.0%	0.1%	0.0%
0.01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1.0%	4.4%	2.3%	0.2%	0.7%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
0.001	OCDD	0.1%	1.5%	1.9%	0.1%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%
	總 I-TEF 濃度	0.9064	0.0051	0.0075	0.0059	0.0027	0.3711	0.0301	0.0544	0.0889

由 5/13 及 6/20~21 之 2 次採樣排放口 P002 各氣 + 固相戴奧辛類化合物 I-TEF 濃度三重複樣品之平均占比顯示主要皆為 5~7 氯之戴奧辛占比最高，與上述氣固相分別之結果相似。各戴奧辛類化合物質量濃度之占比顯示 2 次採樣結果相似，且以 7 氯 Furan 為占比最高之戴奧辛類化合物。此外，透過陶瓷纖維濾管對各戴奧辛類化合物

氣 + 固相之去除效率皆在 95% 以上，氣相之去除效率大部分也在 95% 以上，而固相之去除效率除了 1,2,3,7,8-PeCDF、2,3,4,7,8-PeCDF 及 1,2,3,4,7,8-HxCDD 外其餘皆大於 90%，其結果如表 6 所示。

表 6 排放口 P002 各戴奧辛類化合物 I-TEF 及質量濃度之平均占比及其去除效率

Profile based on I-TEF Concentration			based on mass Concentration		去除效率		
Species	5/13/2022	6/20-21/2022	5/13/2022	6/20-21/2022	Gas	Particle	Total
2,3,7,8-TeCDF	0.9%	0.8%	0.3%	0.6%	99.2%	-	98.7%
1,2,3,7,8-PeCDF	1.3%	1.1%	0.9%	1.6%	99.3%	47.7%	99.0%
2,3,4,7,8-PeCDF	36.2%	28.4%	2.3%	4.5%	99.1%	68.8%	99.1%
1,2,3,4,7,8-HxCDF	14.1%	10.0%	4.0%	8.6%	97.6%	99.4%	98.4%
1,2,3,6,7,8-HxCDF	17.4%	15.1%	6.0%	10.7%	96.8%	90.3%	98.0%
2,3,4,6,7,8-HxCDF	20.0%	27.5%	11.0%	12.1%	95.3%	94.3%	97.8%
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.4%	0.6%	0.3%	0.2%	96.5%	98.9%	98.0%
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	9.0%	13.0%	52.1%	54.5%	88.7%	96.4%	95.8%
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.3%	0.7%	2.8%	1.7%	91.5%	98.5%	96.7%
OCDF	0.1%	0.5%	18.5%	5.1%	91.4%	95.8%	95.9%
2,3,7,8-TeCDD	0.4%	ND	ND	0.0%	-	-	-
1,2,3,7,8-PeCDD	ND	1.3%	0.1%	ND	-	-	99.2%
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%	99.5%	75.0%	99.3%
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.0%	0.4%	0.1%	0.0%	99.5%	-	99.5%
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.0%	0.3%	0.1%	0.0%	-	-	99.7%
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.0%	0.1%	0.6%	0.1%	99.4%	95.4%	99.6%
OCDD	0.0%	0.0%	0.9%	0.2%	99.0%	94.9%	99.3%

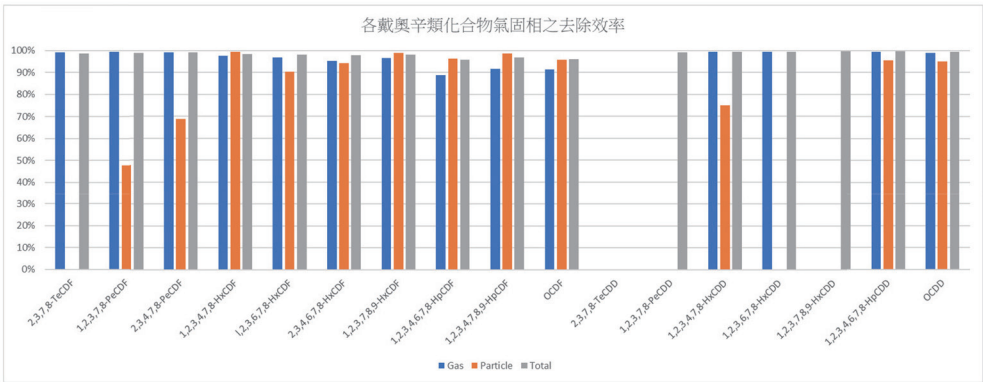


圖 5 各戴奧辛類化合物氣固相去除效率

五、 結論

本研究以實廠同時量測 SCR 前、後與煙道廢氣中氣相及固相 Dioxins 濃度，分析氣相及固相 Dioxins 成分之去除效率，結論如下：

- 1. 本研究包含 5/12~13 及 6/20~21 之 2 次戴奧辛氣固相採樣結果。
- 2. 由文獻回顧顯示在高 HCl 濃度時，經靜電集塵器後會形成 Cl radical，再與有機物反應而形成 Dioxins，或由於飛灰中氯化金屬催化而再次形成 Dioxins。
- 3. Dioxins 排放組成以氣相為主，約占 74~95%。
- 4. 2 次採樣結果各戴奧辛類化合物之質量濃度占比接近，7 氯 Furan 占比最高，毒性當量濃度占比接近，以 5 氯 Furan 占比最高，且以 5~7 氯 Furan 為主。
- 5. 陶瓷濾管對氣相與固相 Dioxins 去除效率分別達 95% 與 90% 以上，而氣 + 固相之去除效率達 98% 以上。

參考文獻

行政院環保署，固定污染源管理資訊公開平台 http://teds.epa.gov.tw/new_main2-0-1.htm

行政院環保署，環境檢驗所，<https://www.epa.gov.tw/nica/A048BA729D1F7D58>

Ballschmiter, K., Zoller, W., Buchert, H., & Class, T. (1985). Correlation between substitution pattern and reaction pathway in the formation of polychlorodibenzofurans. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 322(6), 587-594.

Baukal Jr, Charles E., ed. *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 1-Fundamentals*. CRC press, 2012.

Dickson, L. C.; Lenoir, D.; Hutzinger, O. "Quantitative Comparison of de Novo and Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins under Simulated Municipal Solid Waste Incinerator Postcombustion Conditions" *Environmental Science and Technology*, Vol. 26, pp. 1822-1828, 1992.

Dickson, L. C.; Lenoir, D.; Hutzinger, O. "Surface-catalyzed Formation of Chlorinated Dibenzodioxins and Dibenzofurans during Incineration", *Chemosphere*, Vol. 19, pp. 277-282, 1989.

Duo, W. and D. Leclerc (2004) "Thermodynamic and Kinetic Studies of Dioxin Formation and Emissions from Power Boilers Burning Salt-Laden Wood Waste," *Thermal Process*, 66, 992-1000.

Eduljee, G.H., Dyke, R.A., 1996. An updated inventory of potential PCDD and PCDF emission sources in the UK. *The Science of the Total Environment* 177, pp. 19 303-321.

Ertl, Gerhard, Helmut Knözinger, and Jens Weitkamp, eds. *Handbook of heterogeneous catalysis*. Vol. 2. Weinheim: VCH, 1997.

- Fenimore, C. P. (1971, January). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In Symposium (International) on Combustion (Vol. 13, No. 1, pp. 373-380). Elsevier.
- Fiedler, H., 1996A. Sources of PCDD/F and impact on the environment, *Chemosphere* 32, pp. 55-64.
- Halsall, C.J., Coleman, P.J., Jones, K.C, 1997. Atmospheric deposition of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDD/Fs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in two UK cities, *Chemosphere* 35, pp. 1919-1931
- Heidenreich, S., Nacken, M., Hackel, M., & Schaub, G. (2008). Catalytic filter elements for combined particle separation and nitrogen oxides removal from gas streams. *Powder Technology*, 180(1-2), 86-90.
- Hübner, K., Pape, A., & Weber, E. A. (1996). Simultaneous removal of gaseous and particulate components from gases by catalytically activated ceramic filters, *Conf. Proc. High Temperature Gas Cleaning*, 1.
- Kolluri, R., & Altwicker, E. (1994). The effect of the electric field on the formation of PCDD in electrostatic precipitators. *Hazardous waste and hazardous materials*, 11(1), 145-156.
- Karademir, A., & Korucu, M. K. (2013). Assessment of emissions and removal of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) at start-up periods in a hazardous waste incinerator. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(7), 788-795.
- Milligan, M. S.; Altwicker, E. "The Relationship between de Novo Synthesis of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans and Low-Temperature Carbon Gasification in Fly Ash" , *Environmental Science and Technology*. Vol 911 27, pp. 1595-1601, 1993.

- Olie, K., Addink, R., & Schoonenboom, M. (1998). Metals as catalysts during the formation and decomposition of chlorinated dioxins and furans in incineration processes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48(2), 101-105.
- Schaub, G., Unruh, D., Wang, J., & Turek, T. (2003). Kinetic analysis of selective catalytic NO_x reduction (SCR) in a catalytic filter. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 42(5), 365-371.
- Sillman, S. (1999). The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, 33(12), 1821-1845.
- Wu, R., Jin, J., Li, K., Zhao, L., & Zhang, H. (2021). High-performance FeaTibO_x catalyst loaded on ceramic filter for NO_x reduction. *Materials Research Express*.
- Zeldovich, Y. B. (2014). 26. Oxidation of nitrogen in combustion and explosions. In *Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich, Volume I* (pp. 404-410). Princeton University Press.
- Zürcher, S., Hackel, M., & Schaub, G. (2008). Kinetics of Selective Catalytic NO_x Reduction in a Novel Gas-Particle Filter Reactor (Catalytic Filter Element and Sponge Insert). *Industrial & engineering chemistry research*, 47(5), 1435-1442.

空氣污染與噪音類

透過改善燃燒空氣供應系統達成節能減碳 與污染防治之探討

古家宇 ****、吳克敏 ***、徐洪陞 **、陳育群 *、陳昱志 ****

摘 要

廢棄物完全燃燒需考量 3 個因子 - 溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流程度 (Turbulence)，對於國內某旋轉窯焚化爐 (以下簡稱本廠) 型式的焚化爐而言，擾流程度即是指送入之燃燒空氣需與廢棄物充分混合，並於高溫下有足夠的擾流程度才有好的燃燒效果；一般擾流強度越大，燃燒空氣與垃圾及焚化後廢氣的混合程度越好，可提升燃燒反應與效率。

本廠燃燒空氣原是經由燃燒空氣風機抽取垃圾貯坑空氣，再由前牆上固定盤上之風口與四周環狀方式送入旋轉窯內，因此燃燒空氣係以平均分散方式送入窯體內，其平均風速約 5.6 m/s，因送入風壓較低，燃燒空氣和垃圾無法充分接觸，且廢氣混合效果較低，故原設計必須持續依靠燃燒機噴燒柴油提供熱源才可符合設計的燃燒品質。

本改善案將原設計燃燒空氣由 1 股風供應增加至 3 股風供應，第一股風維持原設計前牆環狀四周空氣；第二股風為前牆上 10 個小風口，由經熱交換器熱能回收後之熱風提供；第三股風為燃燒機下方處增設一強力助燃空氣 (以下簡稱噴射風)，風壓約 500~600 mmH₂O，此改善主要是提高燃燒空氣溫度，以加速乾燥廢棄物，並改善風壓不足問題及增加空氣擾流度。

改善後之旋轉窯燃燒空氣系統，因燃燒空氣溫度提高，可加速垃圾乾燥，外加風量不對稱分配，形成前牆左側風量大於右側，使得爐內風沿爐壁呈順時針螺旋狀運動，並與旋轉窯轉向相同，可充分將垃圾燃燒釋放出的熱能和未燃垃圾混合、攪拌，增加廢氣擾流度與停留時間，同時在垃圾主燃燒區，新增 1 股噴射風，增加燃燒空氣的貫穿力，進而改善空氣與垃圾的混合程度，加速垃圾的燃燒反應，使垃圾燃燒更完全，進而改善底渣灼燒減量、穩定廢氣排放品質、減少燃燒機使用的頻率與輔助燃料使用量，達到節能減碳的效益。

【關鍵字】旋轉窯焚化爐、燃燒空氣系統優化、節能減碳

* 信鼎技術服務股份有限公司	總經理特助
** 信鼎技術服務股份有限公司	經理
*** 信鼎技術服務股份有限公司	廠長
**** 信鼎技術服務股份有限公司	操作組長

一、緣由與目的

本廠採用旋轉窯基本資料摘要如表 1 所示。

表 1 本廠基本資料

項次	項目		相關資訊
1	焚化爐類型		旋轉窯焚化爐 + 二次燃燒室
2	焚化爐容量		60 公噸 / 天
3	尺寸規格		長度：9 m；內徑：2.2 m
4	廢氣處理系統	氮氧化物	噴入尿素溶液 (40%)
		酸性氣體及重金屬	消石灰 + 活性碳 + 袋式集塵器

改善燃燒空氣系統前，本廠處理每噸垃圾用油量相較於現行 24 座大型焚化廠高出許多，主因為燃燒空氣配置、燃燒空氣溫度、廢棄物熱值差異等，使得垃圾無法維持良好自燃的狀態，故本公司透過根因分析 (Root Cause) 方法學，試圖找出問題的所在並提出改善的措施，期能維持相同燃燒品質的情況下，進一步減少用油比例，達成節能減碳的目標。

二、文獻回顧

焚化廢棄物可達成垃圾減量化、無害化及穩定化的目標，而燃燒品質及效率可藉由 3T 控制來確保，所謂 3T 即溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流 (Turbulence)；一般焚化爐操作爐溫越高、廢棄物及廢氣於爐內停留時間長與擾流度大時，燃燒效率佳。以下將就 3T 進一步說明：

2.1 溫度 (Temperature)

為將廢棄物及廢氣燃燒完全，法規規定焚化爐操作溫度不得低於 850 °C，然而焚化爐爐溫穩定可提升焚化品質及燃燒效率如式 2-1 表示。

$$\text{Combustion Efficiency}(\%) = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}] + [\text{CO}_2]} \times 100\% \quad (\text{式 2-1})$$

Girovich 等人將旋轉窯操作溫度控制於 870~1,200℃ 之間，廢氣停留約 2.5 秒，分析其廢氣組成，發現其揮發性有機性氣體去除效率皆達 99%，重金屬及氮氧化物皆有良好去除效果，且廢氣組成結果顯示一氧化碳濃度僅 68 ppm，其燃燒效率亦達 99.88%(Girovich et al.,1989)。

依據燃燒效率公式，採用 110 年度煙道採樣檢測數據換算本廠燃燒效率為 96.15% 至 99.62%。

2.2 時間 (Time)

廢棄物於爐內停留時間過短時，可能使廢棄物燃燒不完全，將使底渣品質下降，而廢棄物停留時間受許多因素影響，如廢棄物種類(固體、液體)、顆粒大小，及爐內徑、爐長、傾斜度及爐體轉速，通常爐長愈長，且爐內徑、傾斜度及爐體轉速愈小，廢棄物停留時間長，反之則停留時間短。

廢棄物於旋轉窯中停留時間如式 2-2 所示，其中 C 為常數，其與廢棄物與爐壁摩擦力有關，亦即隨廢棄物幾何形狀及大小，和耐火磚性質而變異。

$$R_s = \frac{\beta}{2\pi} \frac{L}{NDS} = C \frac{L}{NDS} \quad (\text{式 2-2})$$

其中，Rs：固體停留時間 (sec)

N：旋轉窯轉速 (rpm)

D：旋轉窯爐徑 (m)

S：爐體斜率 (斜高 / 爐長)

β：廢棄物於旋轉窯內最高時之弧度

一般而言，廢棄物於旋轉窯內滯留時間設計約為 0.5 至 2 小時 (李志萍,2004)。若以本廠實際運轉參數代入，可得到理論固體停留時間約為 3.6 小時，實際將一耐火

磚投入旋轉窯內測試本廠廢棄物的滯留時間，發現其滯留時間約為 3.3 小時左右，與理論公式差異不大，顯示本廠旋轉窯設計及操作參數，可使廢棄物於高溫環境下有足夠停留時間，達本廠最佳狀態。

2.3 擾流 (Turbulence)

爐內擾流度越大可促使氧氣與廢棄物及廢氣充分接觸燃燒，如有足夠擾流度及迴流區，可使廢氣停留時間增加，故可提升廢氣燃燒效率與穩定廢氣品質，擾流可受許多因素而變，如過剩空氣量、一次及二次風比例 ... 等。

吳氏模擬焚化爐內流場及擾流分析，發現增加二次風風量可於燃燒室內可形成回流區，增加廢氣停留時間 (吳中興,1988)，且增加過剩空氣量可提高燃燒效率 (吳中興,2004)。

葉氏模擬旋轉窯燃燒木材時之流場，使用不同過量空氣比進行試驗，發現當增加過剩空氣時，其爐內溫度顯著下降，且因二次燃燒室體積固定，輸入空氣量增加時，會使氣體停留時間縮短，但卻可增加爐體內擾流程度 (葉永富,1998)。

林氏研究不同過量空氣及預熱一次風對旋轉窯操作之影響，發現過量空氣增加，可以提升旋轉窯內擾流度，且不影響燃燒效率，但燃燒室出口溫度會下降；而將一次風溫度提升後，其對流場擾流度及燃燒室出口溫度無顯著影響，但可增加旋轉窯爐內溫度。提高預熱溫度發現燃燒效率有提升之情形，並提升出口廢氣品質 (林玉川,1999)。

Salvador 等人嘗試增加燃燒室裡之擾流程度，燃燒室中置入 12 或 24 隻擾流管，並研究擾流管設置處與燃燒機之距離，對於 VOC、CO 及 NO_x 之影響。由結果發現，設置 12 支擾流管實驗組別，其 CO 濃度由 1,990 ppm 到 780 ppm；將擾流改為 24 支，增加燃燒室擾流度，可使 CO 濃度下降至 600 ppm，但對於 NO_x 排放濃度則無明顯變化 (Salvador et al.,2005)。

Sharifah 等人使用 XCN 公司發展之空氣注入旋轉窯系統制技術，此技術可使含水率高之垃圾於低過量空氣下燃燒，且二次燃燒室溫度達 800℃ 時，垃圾可自燃且無

需使用燃燒機，根據其結果，垃圾燃燒釋放熱能，於自然輻射散失及下批次進料垃圾乾燥所吸收，爐溫有上升後下降之重複性結果。因垃圾成分變化大，故其廢氣分析結果中並無明顯趨勢變化，但程式模擬旋轉窯內流況結果，可發現任一時刻其擾流度很高，燃燒空氣與廢棄物有好的接觸，故有好的燃燒效率 (Sharifah et al.,2008)。

AVR 公司操作之旋轉窯，前牆進料口左右分別是污泥燃燒機及主燃燒機，而 Yang 等人以 3 種不同模式模擬其操作下，爐內流況與溫度分布。發現無論是何種模式下，其爐內流況都呈現高度不對稱，並以逆時鐘方向於旋窯內旋轉，而溫度則有分層現象，推論是因前牆燃燒機注射燃燒空氣量不同及其他因素所導致，故有好的擾流效果，但研究報告並未分析其燃燒效率及廢氣組成 (Yang et al.,1999)。

綜上，旋轉窯在調整一次風與二次風支配比及風溫，使爐內流場擾流度增加，可有效提升廢氣燃燒效率。

三、改善燃燒空氣系統案例說明

探討本廠熱能利用狀況，發現本廠燃燒空氣並未利用廠內既有熱能來提高溫度，因此必須持續使用燃燒機來提供垃圾乾燥所需熱源，為妥善利用廠內既有的熱能，且在不影響原規劃設計的前提下，本改善將引用本廠熱交換器熱風出口管線之廢熱，將熱風導引至前牆小風口，因此本工程須增加一熱風送風機，以便將熱風抽引至旋轉窯內，其熱風溫度約 250℃ 左右。

為提高擾流度，將燃燒空氣重新配置並分成 3 部分 (詳圖 1)，說明如下：

原燃燒空氣鼓風機所供應的風是由前牆環狀四周進入旋窯爐內，其空氣通道面積約 0.216 m²，平均風速為 1.93~3.22 m/sec。

將圖 1 右上方 4 個小風口盲封，其空氣通道面積將從原先 14 個風口約 0.087 m²，減少到僅有 0.062 m²，平均風速為 13.44~17.92 m/sec。

利用燃燒機鼓風機連接原污泥進料管進入旋窯爐內，此股風為具有噴射功能的燃燒空氣，空氣通道平常操作僅有 0.0029 m²，平均風速為 76.62~95.78 m/sec。

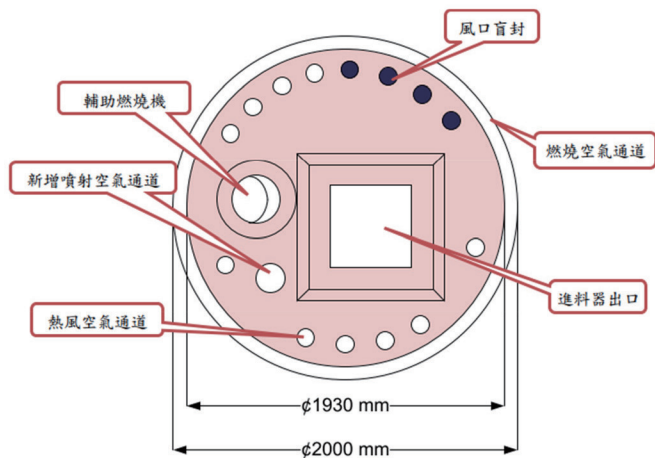


圖 1 前牆燃燒空氣配置示意圖

四、案例效益分析

經預熱燃燒空氣與配置改變，比較改善前後差異，其中每日用油量彙整如圖 2，從趨勢圖可明顯發現，改善後的確對於用油量有顯著的改善，符合預期的目標，而在廢氣排放與底渣品質部分，則維持與改善前相同。

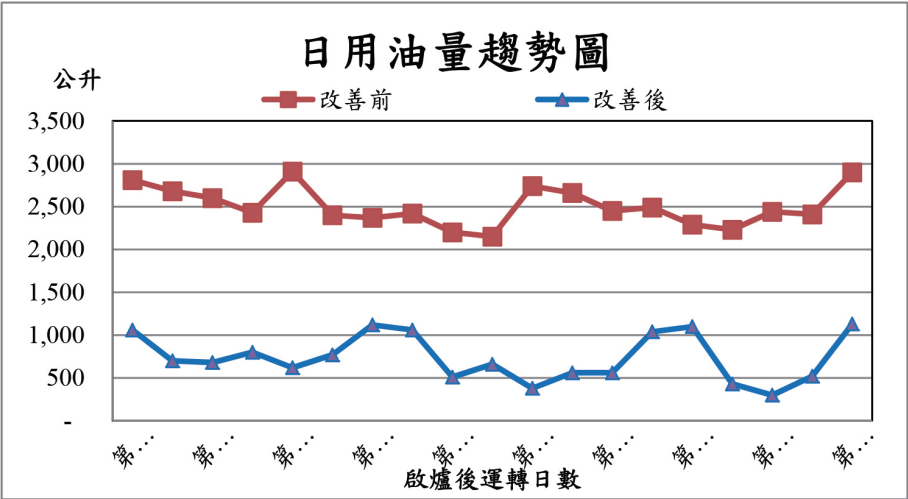


圖 2 改善前後連續運轉之日用油量趨勢圖

為進一步有系統分析本廠改善對於廢氣品質的影響，重新規劃以近似操作條件模擬燃燒環境，以利能更精確比較分析，其實驗規劃內容如下：

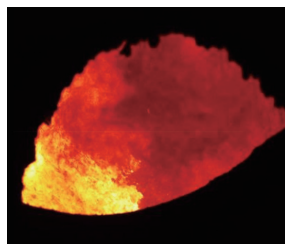
以固定總燃燒空氣量 ($5,500\sim6,500\text{ Nm}^3/\text{hr}$)、垃圾與污泥投料配比 (20:1) 左右、旋轉窯轉速維持 0.1 rpm 與二次燃燒室爐溫維持在 $900\sim1,000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右之操作條件下，調整燃燒空氣配置差異，如下：

1. 改善前：燃燒空氣直接抽取垃圾貯坑空氣，燃燒空氣量設定為 $5,500\sim6,500\text{ Nm}^3/\text{hr}$ ，燃燒空氣未預熱之狀況。
2. 改善後：燃燒空氣 ($1,500\sim2,000\text{ Nm}^3/\text{hr}$)、熱風 ($3,000\sim4,000\text{ Nm}^3/\text{hr}$) 與新增噴射風 ($1,000\text{ Nm}^3/\text{hr}$) 各自由獨立風機直接送入旋轉窯內的燃燒狀況。

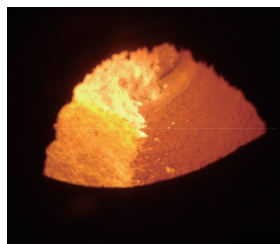
上述燃燒空氣配置操作條件，分別連續運轉 4 小時，觀察與紀錄爐內燃燒火焰的位置、油量、廢氣排放品質等結果，探討分析如下：

4.1 爐內燃燒火焰位置探討

改善後之熱風溫度約 250°C 左右，且出口位於進料器下方，能與垃圾直接接觸，因此乾燥效果佳，加上新增噴射風能夠有效與垃圾充分混和，提供垃圾層內足夠的燃燒空氣，使燃燒更加劇烈。另觀察改善後之空氣擾流強度增加，且主要風量配置都在左邊，形成前牆左側風量大於右側不平等之比例，自然使廢氣沿爐壁呈現順時針漩渦現象，加速垃圾乾燥與燃燒，在此情況下，即使停止燃燒機，垃圾自燃的情形仍可維持，火焰線可長時間維持在旋窯長度前 1/3 的位置 (詳圖 3)，此結果也正好與文獻回顧中 Sharifah 等 (2008) 的研究成果類似。



改善前



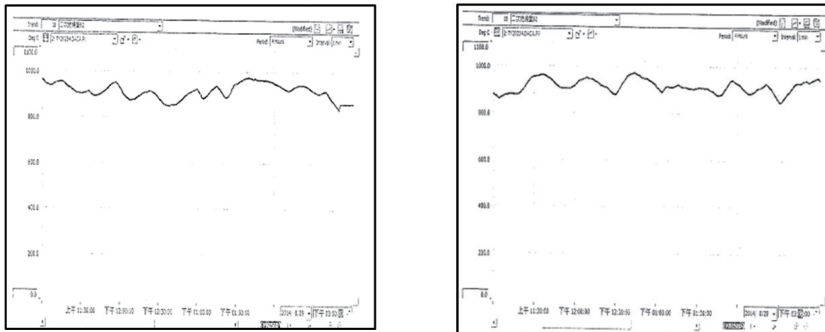
改善後

圖 3 改善前後垃圾燃燒火焰線位置圖

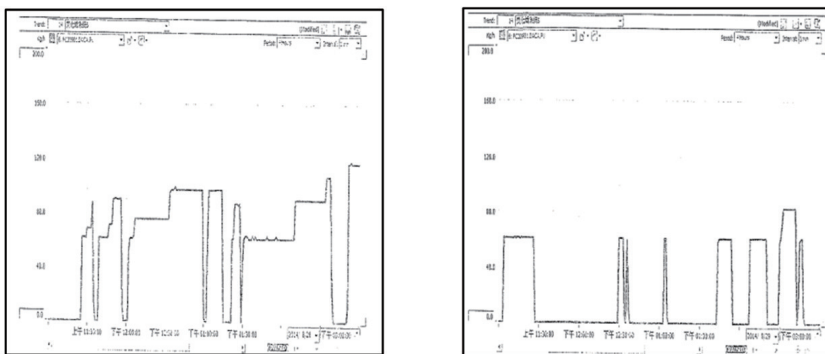
4.2 燃燒機用油量探討

燃燒機使用目的為維持爐溫大於 850 °C 與確保垃圾燃燒品質，因此本操作條件設定二次燃燒室出口溫度維持在 900~1,000 °C 的情況下 (圖 4)，投入性質相似的垃圾與垃圾量 (1.5~1.6 噸 / 小時)，探討改善對於燃油用量的影響，從圖 4 之燃油使用量趨勢圖中，可獲知改善後之燃油使用量明顯比改善前降低許多，其中改善前燃油使用最高約 90~110 L/hr，改善後用量則降到僅有 60~70 L/hr，另改善後使用燃燒機頻率也相對減少，證明提升燃燒空氣溫度與增加燃燒空氣擾流度，能夠維持爐溫並減少使用燃燒機的現象。

二次燃燒室出口溫度曲線



旋轉窯燃燒機油量使用曲線



改善前

改善後

圖 4 爐溫與燃油使用量趨勢圖

改善案執行前每噸垃圾平均用油量為 86.74 L/ton，110 年時每噸垃圾用油量則降至 18.13 L/ton，以 IPCC 公告係數換算燃燒每公升之柴油排放約 2.61 kg-CO₂，本廠 110 年度總計處理 8,199 噸廢棄物，節省約 562.54 公秉之燃油 (共減少 1,465.7 噸 CO₂)。

4.3 一氧化碳排放濃度的探討

一氧化碳可代表其當下燃燒情況的好壞，為確保本改善並不會因為減少用油量，而對燃燒品質會有很大的影響，在實驗過程中，透過煙囪所裝設之連續監測設施 (CEMS)，紀錄各階段即時的一氧化碳排放濃度 (詳圖 5)，並計算含氧校正 (11%) 後之小時平均數值彙整如表 2 所示，顯示不論從即時曲線圖或是小時平均值差異均不大 (改善後 CO 的平均排放濃度略低於改善前)。

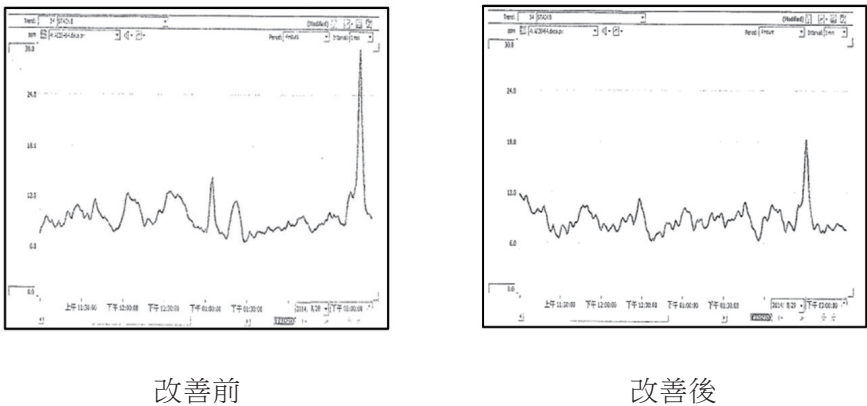


圖 5 改善前後煙囪一氧化碳即時排放原始濃度曲線圖

表 2 改善前後煙囪一氧化碳小時平均排放濃度彙整表

項次	改善前 (ppm)	改善後 (ppm)
第 1 小時	18.68	17.90
第 2 小時	21.88	14.54
第 3 小時	16.12	16.69
第 4 小時	23.17	17.92
平均值	19.96	16.76

註：法規排放標準值為 100 ppm。

本公司測試於固定用燃燒機用油量，比較改善前後爐溫與 CO 排放濃度差異，惟一次燃燒室出口爐溫超過 1,050 ℃ 將會手動置入減少用油或停止燃燒機，反之爐溫低於 870 ℃ 會加大油量。

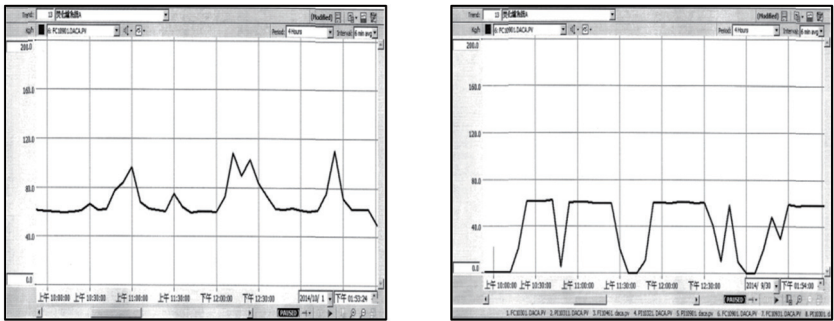
從圖 6 之趨勢圖可發現，在固定用油量的情況下，改善後平均爐溫 1,013 ℃ 大於改善前平均爐溫 927 ℃，其表示改善能使垃圾產生較劇烈的燃燒反應，相對釋放較多的熱能。

另從圖 6 之 CO 排放趨勢圖及表 3 日報表小時平均值，可發現改善後小時平均濃度低於改善前，顯示在相對穩定的燃燒條件下，改善案能提升燃燒效率，降低 CO 排放濃度。

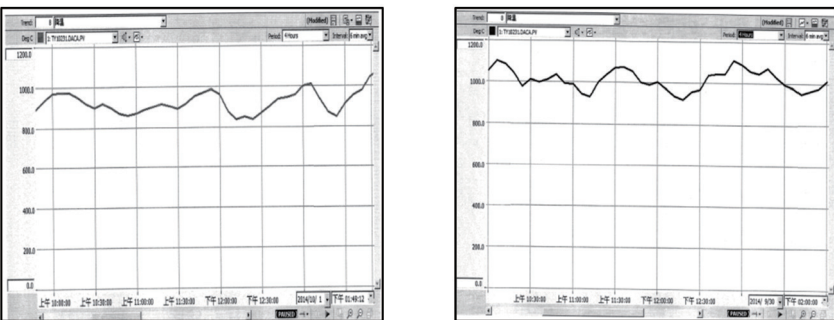
本次測試期間每小時採底渣樣品分析灼燒減量，分析結果數據如表 4 所示，可發現改善後之底渣平均灼燒減量 3.6%，小於改善前之底渣平均灼燒減量 5.7%，近 2 年委託第三方公正單位執行灼燒減量數據結果如表 5 平均值為 3.3%。

綜上之測試結果顯示，改善後可提供垃圾良好的燃燒反應環境，並能妥善利用垃圾自體燃燒所產生的熱能，讓下批次進料的垃圾達到自燃溫度，而不需外來火源，且能維持良好燃燒品質，可說是兼顧能源使用效率及燃燒效率，以達到污染減排及節能減碳之目標。

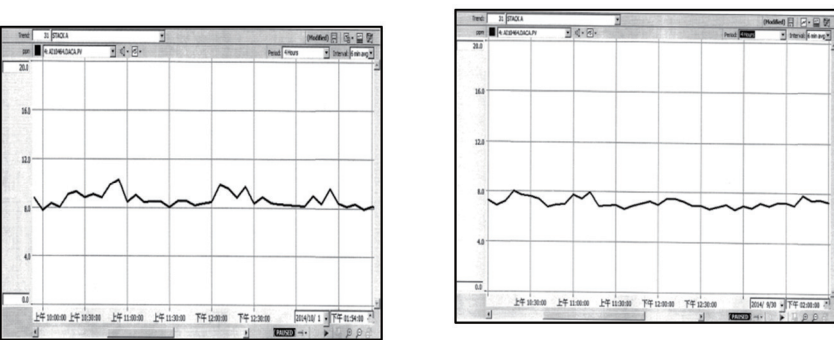
旋轉窯燃燒機油量使用曲線



二次燃燒室出口溫度曲線



一氧化碳即時排放原始濃度曲線圖



改善前

改善後

圖 6 爐溫與一氧化碳排放原始濃度趨勢圖

表 3 各階段煙囪一氧化碳小時平均排放濃度彙整表

項次	改善前 (ppm)	改善後 (ppm)
第 1 小時	27.57	17.58
第 2 小時	24.05	16.98
第 3 小時	26.25	16.76
第 4 小時	23.27	18.32
平均值	25.29	17.41

註：法規排放標準值為 100 ppm。

表 4 各階段底渣灼燒減量分析結果彙整表

項次	改善前 (%)	改善後 (%)
第 1 個樣品	5.0	3.7
第 2 個樣品	6.6	3.6
第 3 個樣品	5.6	3.4
平均值	5.7	3.6

註：本實驗日期為 103 年 9 月並依照環保署環境檢驗所公告之焚化灰渣之灼燒減量檢測方法 (R216.02C) 進行分析，法規排放標準值為 7%。

表 5 近 2 年底渣灼燒減量分析結果彙整表

時間	灼燒減量 (%)	時間	灼燒減量 (%)
109 年 Q1	4.2	110 年 Q1	4.7
109 年 Q2	0.9	110 年 Q2	3.0
109 年 Q3	3.5	110 年 Q3	3.6
109 年 Q4	3.4	110 年 Q4	3.3

五、結論

最佳的燃燒控制通常係指能夠使用較少的輔助燃料，又能降低污染排放的情況，因影響燃燒效率的因素眾多，因此如何有效穩定控制燃燒品質，本就是相當困難之課題，需隨時調整燃燒空氣的壓力、風量、溫度等，又因垃圾性質多變且無法預知的情況下，更增添其控制之困難度。

因此垃圾焚化操作是需依靠經驗累積，自垃圾攪拌與配比、燃燒空氣的分配、輔助燃燒機啟停時機及旋轉窯轉速等，都需要經過調適，並因應垃圾性質的改變做即時操作參數調整，始能確保較佳的燃燒品質，而這些參數的調整主要都是在確保能夠保持在良好的燃燒條件，本公司透過過往操作大型焚化爐之經驗，針對 3T 溫度 (Temperature)、時間 (Time) 及擾流 (Turbulence) 進行探討並施以改善，依實驗結果顯示本廠於提升燃燒空氣溫度及擾流度，使得燃燒空氣在旋轉窯內產生漩渦現象，並可利用垃圾燃燒過程所釋放的熱能，使下批次進料之垃圾足以乾燥並持續燃燒，在垃圾性質穩定且持續進料之情況，可有效減少燃燒機使用頻率、次數及用油量，且降低 CO 排放濃度及減少底渣灼燒減量，進而達到減少污染排放及節能減碳之目標。

六、參考文獻

- 吳中興 (1988)，國立台灣大學生物產業機電工程學系，玉米穗軸燃燒爐紊流分析，中國農業工程學報，第 34 卷，61 至 75 頁。
- 吳中興、李志萍 (2004)，國立台灣大學生物產業機電工程學系，使用旋轉窯焚化爐焚化稻殼之數值模擬分析，農業機械學刊第一期第 13 卷。
- 李志萍 (2004)，國立台灣大學生物產業機電工程學研究所，博士論文，旋轉窯焚化爐操作特性及應用於處理事業廢棄物之研究。
- 林玉川 (1999)，國立中山大學環境工程所，碩士論文，旋轉窯焚化爐三維紊流火焰結構及操作性能之研究。
- 葉永富 (1998)，國立台灣大學機械工程學系，碩士論文，旋轉窯焚化爐特性之分析。

- Du, J. C., Huang, Q. X., Yan, J. H.,(2012). Method for determining effective flame emissivity in a rotary kiln incinerator burning solid waste. Journal of Zhejiang University SCIENCE A 13.12, 969-978.
- Girovich, M. J., (1989). Performance of high-temperature slagging rotary kiln incinerator. JAPCA 39.6: 884-888.
- IPCC, (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2: Energy , Table 2.5.
- Lemieux, P. M., Pershing, D. W., (1989). Design and construction of a rotary kiln simulator for use in studying the incineration of hazardous waste. Review of scientific instruments, 60(8), 2768-2776.
- Salvador, S., Kara, Y., Crussol, J-M., (2005). Improving VOC recuperative incinerators performances by increasing turbulence levels inside the combustion chamber—experimental results. Applied Thermal Engineering. Volume 25, pp 1871-1881.
- Sharifah, A. S., Abidin, H. Z., Sulaiman, M. R., Khoo, K. H., Ali, H., (2008). Combustion characteristics of Malaysian municipal solid waste and predictions of air flow in a rotary kiln incinerator. Journal of Material Cycles and Waste Management. Volume 10, Issue 2, pp 116-123.
- Woodruff, P. H., Larson, G. P., (1968).Combustion Profile of a Grate-Rotary Kiln Incinerator. Proc. 1968 Nat. Incin. Conf., ASME.
- Yang, Y., Rakhorst, J., Reuter, M. A., Voncken, J. H. L., (1999). Analysis of gas flow and mixing in a rotary kiln waste incinerator. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 6-8.

空氣污染與噪音類

三相高頻寬電極間距之靜電集塵器

蔡東昇*、徐榮彬**

摘 要

自 1980 年代開始，靜電集塵器（Electrostatic Precipitator, ESP）就是大型工業用戶最主要控制粒狀物排放的主要設備之一，這些用戶包括電力、水泥、煉鋼、紙漿和造紙等產業。現今，隨著空氣中極細粉塵微粒對健康的威脅被逐步證實，各政府迫於民眾對環保意識高漲而逐步修訂更加嚴格的排放標準。因此，對於使用靜電集塵器的用戶而言，其面臨到最緊迫的問題就是對既設靜電集塵器改善以符合更嚴格的排放標準。

目前，新式三相高頻變壓整流器已逐步取代單相傳統變壓整流器而成為新建靜電集塵器的電源供應系統，而排放標準越嚴格的地區，這股更新及改換的趨勢則越明顯。本文除了探討單相傳統變壓整流器與三相高頻變壓整流器的技術差異外，並藉由一燃煤電廠的老舊靜電集塵器（極間距 9 英吋）更新三相高頻變壓整流器的案例來比較更新的效益。最後期能藉由本技術的探討，與其他使用靜電集塵器的同業作經驗之交流。

【關鍵字】靜電集塵器、三相高頻電源

* 台耘工業股份有限公司

副總經理

** 台耘工業股份有限公司

資深系統 / 製程工程師

一、前言

在諸多大型工業用戶中，靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 皆是其控制粒狀物排放的主要設備。其工作原理是利用在放電極施加直流高壓形成電暈放電效果，使氣體電離釋放大量游離電子，當含塵煙氣通過靜電集塵器所組成的電場時，煙氣中原本不帶電的粉塵粒子會因此而被荷電。在電場力的作用下，形成一驅進速度 (migration velocity)，向極性相反的極板 (接地極) 移動，當荷電粉塵到達極板後，荷電電子會被導入大地而粉塵則被吸附在極板上，最後通過敲擊方式使吸附在極板上的粉塵抖落，從而達到煙氣淨化效果。下圖 1 為靜電集塵器工作原理示意圖。

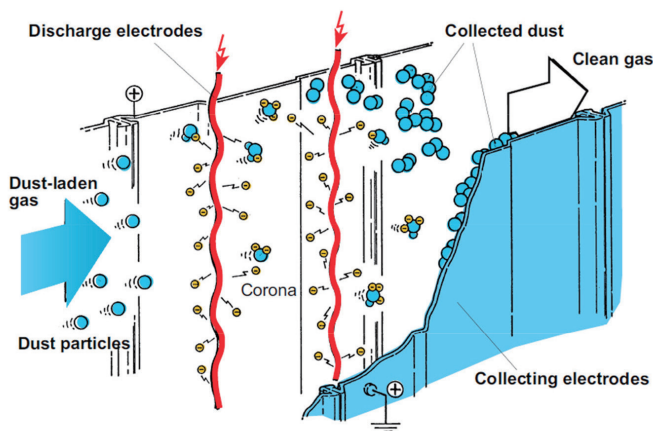


圖 1 靜電集塵器工作原理示意圖 (Alstom, D. Levesque, 2010)

靜電集塵器係由集塵器機械本體 (主要包含殼體、極板、極線及除灰機構)、直流高壓供電系統 (變壓整流器) 與低壓附屬設備系統等 3 大系統所組成。目前，這些 1970~1980 年代所興建的靜電集塵器，至今仍然有為數眾多的機組仍然還在運轉。然而這些早期設計的靜電集塵器，由於受限當時的技術，其電極間距的設計多為 8 英吋至 10 英吋，而非現今主流的 16 英吋。這些老舊的靜電集塵器，由於本身在設計上的極間距就相對狹窄，且因經年累月的運轉而容易導致內部放電極線與極板產生彎曲變形的狀況，致使實際極間距比設計所需的極間距更為窄小。此情況更容易導致運轉時產生過多的火花及電弧，而抑制變壓整流器的輸出功率，最終影響靜電集塵器的集塵效果。

三相高頻變壓整流器 (switch mode power supply, SMPS) 相較於單相傳統變壓整流器，其不僅具有高功效轉換及低漣波率特性，也由於其使用 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 作為觸發控制單元，相較於單相傳統變壓整流器所使用的 SCR(silicon controlled rectifier) 作為觸發控制單元，除了可有效降低二次側輸出的峰值電壓外，更可以在發生火花或電弧後快速消弧並回復輸出功率。而這些特性對於老舊靜電集塵器的改善，尤其在窄小極間距的狀況下，更能發揮提升輸出功率的效用，進而改善收塵效率。

二、靜電集塵器效率改善的理論基礎

靜電集塵器的集塵效率可透過 Deutsch-Anderson equation (Paker,1997) 推導而出。

$$\text{Eff} = 1 - \text{Exp}\left[-\left(\frac{K_e \times P_c}{Q_a}\right)\right]$$

其中，

Eff：靜電集塵器的集塵效率 (%)

A：靜電集塵器的集塵面積 (m²)

ω ：粉塵驅進速率 (m/sec)

Q_a：煙氣真實氣流量 (m³/sec, wet basis)

根據 Deutsch-Anderson equation，欲提高靜電集塵器的集塵效率，其一是增加靜電集塵器的集塵面積。在實際應用面上，增加集塵面積即代表必須增加收塵區室，又或是增高或增長極板與極線系統。如此必然牽涉整個靜電集塵器機械構造的改造與改建，因此除必然須投入大量金額以及冗長停機安裝時間外，靜電集塵器安裝現場是否具有足夠空間以及原負重基礎是否足夠承擔等因素更是一大挑戰，因此採用增加集塵面積選項並不符合經濟效益。

而另外方法則是提高粉塵驅進速率，粉塵驅進速率代表被荷電的粉塵粒子在靜電集塵器內，由極線至極板的移動速率，該速度可由以下公式所定義：

$$\omega = \frac{C_0 q E_p}{3\pi\mu d_p}$$

其中，

ω : 粉塵驅進速率 (m/sec)

C_0 : Cunningham 修正係數

q : 飽和充電的粉塵粒子量

E_p : 粉塵粒子被捕集的電場力 (V/m)

μ : 流體黏度 (Pa·S)

d_p : 粉塵粒子直徑 (m)

根據以上粉塵驅進速度的公式，在煙氣與粉塵條件不變的情況下，施加的電場力與粉塵驅進速度成正比關係，因此當施加的電場力越高，則粉塵驅進速度越快。換句話說，當靜電集塵器的直流高壓供電系統（變壓整流器）施加於電場的功率越高，電場內的粉塵驅進速率越快，則該電場的收塵效率越好。

此外，根據 H.J. White equation，靜電集塵器的集塵效率與其直流高壓供電系統（變壓整流器）所施加功率的關係如下：

$$Eff = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_e \times P_c}{Q_a}\right)\right]$$

其中，

Eff : 靜電集塵器的集塵效率 (%)

K_e : 修正常數

P_c : 電場（電暈）功率 (Watts, kVavg x mA)

Q_a : 煙氣真實氣流量 (m³/sec, wet basis)

另外，亦有其他研究分析靜電集塵器的集塵效率與電場（電量）功率以及煙氣量相互之間的關係，並繪製出圖 2 的特性曲線。

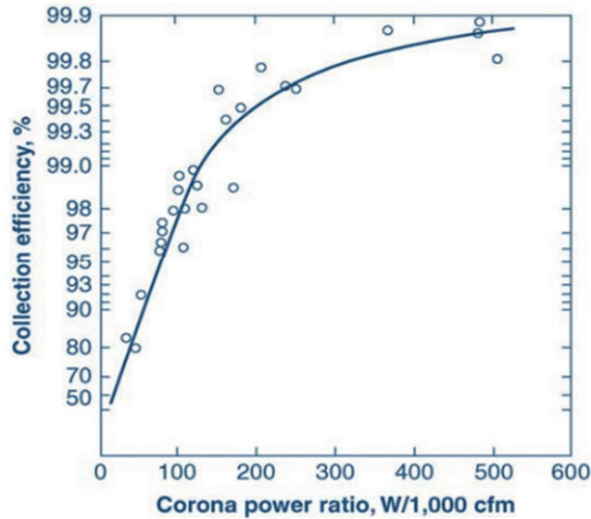


圖 2 靜電集塵器集塵效率與電量功率及煙氣量的特性曲線 (David H. F. Liu, Bela G. Liptak, 1997)

因此，透過對直流高壓供電系統（變壓整流器）的改善，使靜電集塵器內各電場的輸出功率增加，以提升粉塵驅進速率進而提升各電場的集塵效果，就變成提升靜電集塵器效率的方案中，最省時也最符合經濟效益的做法。

三、靜電集塵器高壓直流電源系統分析比較

目前在靜電集塵器的市場上，主流的高壓直流電源系統主要可分為 3 類：單相低頻 SCR 觸發供電系統、三相低頻 SCR 觸發供電系統、三相高頻 IGBT 觸發供電系統。

以下將分別介紹這 3 種電源的原理與差異：

1. 單相低頻 SCR 觸發供電系統

此高壓直流電源系統，於輸入端採用單相電源，並以 SCR 作為觸發控制單元，用以調控輸出之高壓直流電壓與電流。其電氣迴路如圖 3 所示：

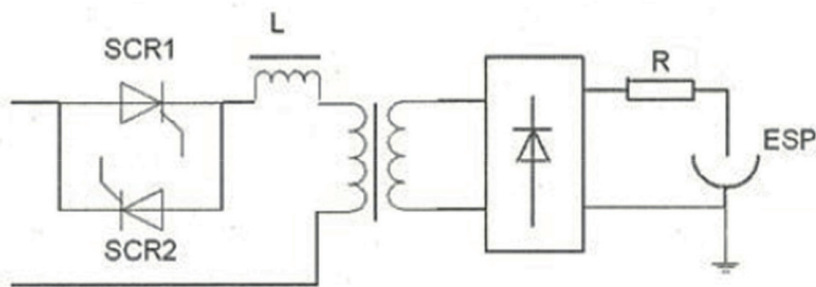


圖 3 單相低頻 SCR 觸發供電系統電氣迴路圖

此電源系統是目前技術最成熟，在靜電集塵器的市場上佔有量最大的供電系統。然由於受控制原理的侷限性，使得單相低頻 SCR 電源具有以下缺點：

- (1) 變壓器體積龐大，重量重，製造須消耗大量銅、鐵、絕緣油等材料，隨著各式材料價格的上揚，價格優勢逐漸消失。
- (2) 使用 SCR 做相位控制方式，易導致電源側嚴重諧波問題。
- (3) 使用單相電源，除導致低功率轉換因數（約 57%），須耗用大量一次側電流外；在以多區室為設計條件的靜電集塵器，亦容易造成電源側相電流不平衡的負載問題。
- (4) 受 SCR 相位控制方式與低單相工作頻率（50/60Hz）影響，火花（Spark）與電弧（Arc）熄滅與再回復時間長，且輸出二次側高壓因受漣波因素過大（約 35~45%）影響，無法達到最佳集塵效果。
- (5) 間歇放電（IE, intermittent energization）的調整受限工作頻率，無法達到最適化的設定，在高濃度與高灰阻的粉塵狀況下，無法達到最佳集塵效果。

隨著現今環保法規日益嚴苛的狀況下，傳統單相低頻 SCR 觸發供電系統已難以滿足靜電集塵器供電的要求。

2. 三相低頻 SCR 觸發供電系統

針對傳統單相低頻 SCR 觸發供電系統的缺點，部份靜電集塵器的電源設計與製造商，設計出三相低頻 SCR 觸發供電系統，其輸入端採用三相電源，在控制部分則沿用 SCR 作為控制單元，使用 3 組 SCR 模組控制輸入的三相電源，調控輸出之高壓直流電壓與電流，其電氣迴路如圖 4 所示：

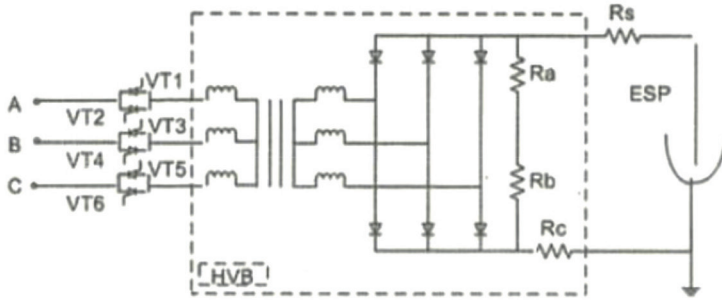


圖 4 三相低頻 SCR 觸發供電系統電氣迴路圖

它的出現，一定程度解決了單相低頻 SCR 觸發供電系統的某些先天設計上問題，例如：

- (1) 使用三相電源，提升轉換功率因數 (約 82%)，降低一次側電流消耗外，亦可解決電源側相電流不平衡負載問題。
- (2) 使用三相 SCR 控制方式，降低二次側漣波因素 (約 8~15%) 影響，提供較穩定及較高的二次輸出電壓，進而提高集塵效果。

經現場應用，三相低頻 SCR 觸發供電系統確實對集塵效率提升有幫助，亦具有一定的節能效果，但三相低頻 SCR 觸發供電系統仍然存在一些問題，例如：

- (1) 變壓器體積較傳統單相 SCR 觸發方式的變壓器更龐大，消耗材料更多，單價昂貴。
- (2) 由於仍然使用 SCR 做相位控制，對電源側諧波問題仍無法改善。
- (3) 火花與電弧控制困難，導致短路電流衝擊問題。
- (4) 間歇放電控制困難，應用於高濃度與高灰阻的粉塵環境有一定難度。

綜合以上所述，三相低頻 SCR 觸發供電系統雖可彌補部份單相低頻 SCR 觸發供電系統的缺點，亦對集塵效率提升與節能有一定的幫助，但由於其價格昂貴，且操控上亦相對困難，故在靜電集塵器的新設或更新市場，其應用實績相對稀少。所以基本上我們可將其視為單相低頻 SCR 觸發系統發展至三相高頻 IGBT 觸發供電系統前的過

渡產品。

3. 三相高頻 IGBT 觸發供電系統

現今由於電力電子與數位控制技術的快速發展，靜電集塵器的電源設計與製造商設計出新型三相高頻 IGBT 觸發供電系統，其輸入端採用三相電源，在控制部分則使用 IGBT 作為控制單元，使用 IGBT 模組調控輸出之高壓直流電壓與電流，其電氣迴路如圖 5 所示：

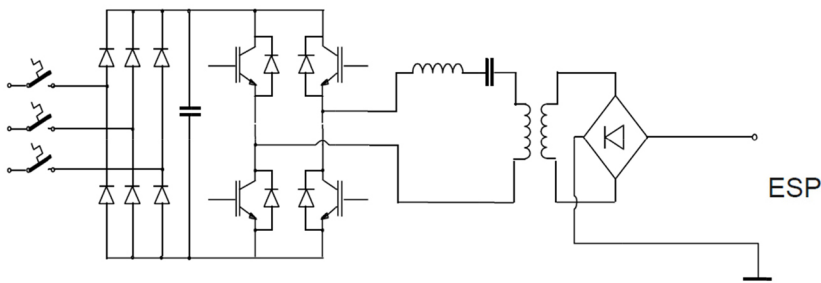


圖 5 三相高頻 IGBT 觸發供電系統電氣迴路圖

上述之電氣迴路可依據功能可分解為下列 4 個區塊來說明：



圖 6 三相高頻 IGBT 觸發供電系統電路分解圖 (NWL)

- (1) AC/DC 區塊：三相 480V 交流電源輸入，並經整流及濾除電源電磁 (EMI) 後，輸出平滑穩定的 650V 單相直流電壓。
- (2) DC/AC 區塊：由 IGBT 全波電橋電路組成，此電路將輸入的 650V 單相直流電壓轉換成高頻 50kHz 交流電壓。
- (3) Resonant Tank：吸收二次側發生火花或電弧的衝擊電流突波以及濾整 IGBT 觸發後輸入的高頻交流電壓與電流波形。
- (4) AC/DC 區塊：將輸入的高頻 50kHz 交流電壓經升壓整流後，轉換成高頻高壓直流電壓輸入靜電集塵器內。

4. 比較與分析

表一比較上述 3 種靜電集塵器高壓直流電源供應，當二次側輸出功率設計值 (70kW) 相同時，各設計參數的差異：

表 1 靜電集塵器高壓直流電源供應系統設計比較表

參數	單相低頻	三相低頻	三相高頻
kVdc	70	70	70
mAdc	1,000	1,000	1,000
Output kW	70	70	70
Peak kVdc	108	77	72
Ripple (%)	35-45	8-15	3-5
Line Aac	264	107	94
Heat Loss (kW)	4.5	3.5	2.4
Power Factor (%)	57	82.5	92.6
Input kVA	127	89	78
Operation Frequency (Hz)	50/60	50/60	50kHz
EMI Filter	無	無	有
Spark/Arc Responsible Time	10/8.33 ms	6.7/5.6 ms	30 μ s
Volume Envelope (ft3)	60	68	35
Weight(lb)	3,860	4,350	1,000
Gallons of Insulation Oil	135	152	27
Cooling	自然風冷	自然風冷	強制風冷

由表 1 可歸納出三相高頻電源系統最主要的 3 大優點。首先是三相高頻電源系統的漣波率遠低於其他 2 種系統，這使得三相高頻電源系統在相同平均輸出電壓 (kV) 的

條件下，其峰值電壓遠低於傳統低頻電源的峰值電壓，進而降低火花或電弧的發生率，使二次側可輸出更多功率(kW)進入靜電集塵器內，而達到提升 ESP 集塵效率的效果。其次是三相高頻電源系統在 IGBT 觸發前，先已將三相輸入電源整流輸出單向直流電源，如此能克服傳統單相低頻電源系統先天上受輸入頻率直接影響，導致轉換功率因數低下所引致的電源諧波與耗功問題。另外一個優點是其輸出頻率可高達 50kHz，搭配快速反應的 IGBT 元件與快速偵測的數位電控系統 (DSP)，其響應速度較其他兩種傳統低頻電源系統快 100 倍以上，如此可快速偵測到極小的短路電流時，就迅速執行消弧的動作，並再快速回升至火花發生前的電壓與電流輸出準位，以避免如其他兩種傳統低頻電源系統，若遇到連續與大量的火花與電弧時，因需長時間的消弧反應時間，導致需長時間抑制電壓與電流輸出，而影響集塵效率。以下針對該 3 優點作詳盡說明：

1. 提高輸出功率

由於靜電集塵器內部火花與電弧的形成與高壓直流電源系統輸入的二次側峰值電壓 (kV_{peak}) 高低有關，而三相直流高頻電源系統輸出的二次側電壓 (kV) 波形具有極低的漣波率特性，在與傳統低頻直流電源系統輸出相等二次側平均電壓與電流 (意即相同輸出功率) 的條件下，如圖 7 所示，三相高頻直流電源系統輸出的峰值電壓會遠低於傳統低頻直流電源系統所輸出的峰值電壓。

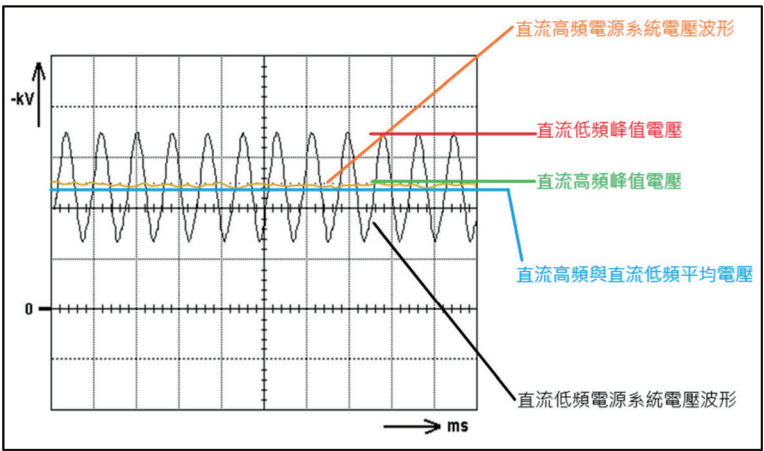


圖 7 直流低頻與直流高頻電源電壓波形比較圖

此低漣波率特性意謂若假設當下靜電集塵器內發生火花或電弧的電壓與傳統直流低頻電源系統的峰值電壓相同時，此時，傳統直流低頻電源系統會為了消弧而降低二次側平均電壓與電流的輸出，因而降低輸入至靜電集塵器內的功率，因此導致靜電集塵器的收塵效果下降；而在與上述相同的製程與煙氣條件下，三相高頻電源系統因為其輸出的峰值電壓相當趨近於輸出的平均電壓，因此其距離發生火花或電弧的電壓仍有一大段距離，故三相高頻電源系統可以在未發生任何火花或電弧的狀況下，提高輸出的二次側平均電壓與電流直至三相高頻電源系統當時輸出的峰值電壓趨近於發生火花或電弧的電壓值，此意即三相高頻電源系統可以輸出更多功率進入靜電集塵器內，以達到提高集塵效率效果。

圖 8 顯示傳統低頻電源系統與三相高頻系統 VI 曲線，假設靜電集塵器內發生火花或電弧的平均電壓為 34 kV(峰值電壓 44 kV)。此時若使用的是傳統低頻電源系統，則此時輸出的二次平均電流約為 750 mA，輸出至靜電集塵器內的功率約為 25.5 kW。若是在相同條件的情況下使用三相高頻電源系統，因為其低漣波率的特性，因平均電壓可運轉至趨近於峰值電壓，則此時輸出的二次平均電流可達 1,450 mA，輸出至靜電集塵器內的功率可達到 63.8 kW，較傳統低頻電源系統約提高了 2.5 倍。

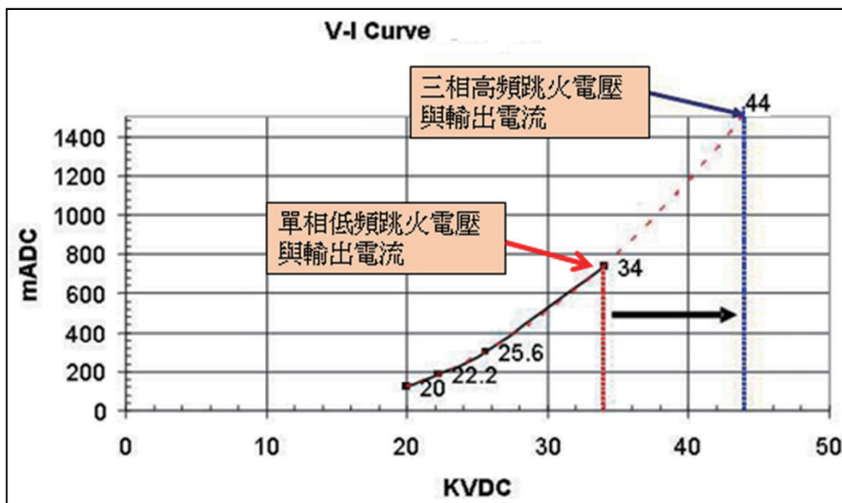


圖 8 傳統低頻電源與三相高頻電源 VI 曲線示意圖 (NWL)

2. 改善功率因素

由表 1 靜電集塵器高壓直流電源供應系統比較表可知，在相同的二次輸出功率 (kW) 下，三相高頻電源系統的輸入功率 (KVA) 是單相低頻電源系統的 61%；是三相低頻電源系統的 87%。而這些低頻供電系統都是使用 SCR 做相角控制，經全波整流後導入靜電集塵器內，故當漣波率越大，則平均輸入的直流電壓 (kV) 越低，意即一次側需提供更多功才能達到所需的平均輸入的直流電壓 (kV)。圖 9 是傳統低頻電源系統與三相高頻電源系統的三角功率因素比較圖。

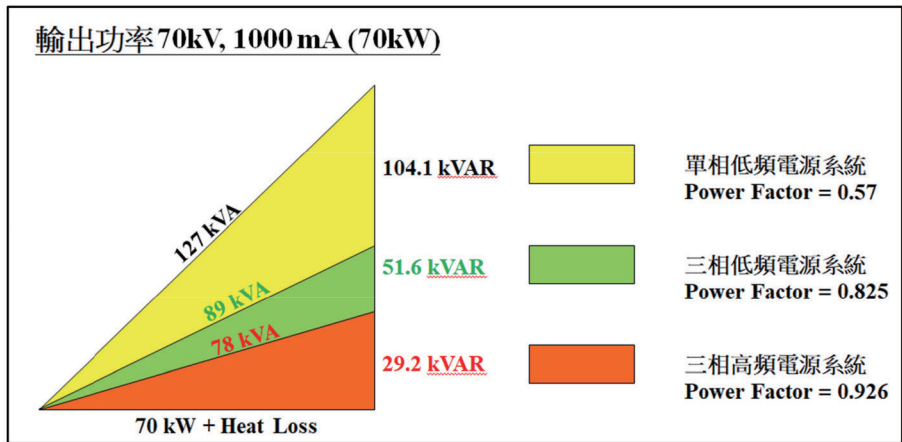


圖 9 傳統低頻電源與三相高頻電源功率因素比較圖

由上圖的三角功率因素比較圖可知，在相同的二次側輸出實功率 (kW) 的條件下，三相高頻電源系統所需耗用的無效功率 (kVAR) 僅是三相低頻電源系統的 56%，更是單相低頻電源系統的 28%。因此，三相高頻電源系統相較於單相或三相低頻電源不僅可降低耗用的無效功率，提高迴路上的功率因素，更可改善單相低頻電源系統所造成的相電流不平衡對前端電源線路損耗以及變壓器的過熱的問題。

3. 快速響應的 IGBT 觸發模組與電控系統 (DSP)

傳統單相或三相低頻電源系統，由於受限輸入頻率以及觸發元件 (SCR) 的反應速度，容易發生電源諧波干擾及火花電弧回饋所產生的短路電流衝擊問題。而三相高頻電源系統使用新式的 IGBT 動力電子元件控制觸發並搭配可快速響應的電控系統，因此可將輸出頻率提升至最高達 50 kHz，當此狀況下偵測到火花或電弧，電控系統最快

可在 $30\ \mu\text{s}$ 時間內關閉 IGBT 的輸出以達到消弧的效果，因此相較於單相或三相低頻電源系統，電源側並不會因此汲取到火花或電弧的所累積的大量諧波干擾與短路電流能量。此外，三相高頻電源的電控系統 (DSP)，更具備下列特點，可自動對靜電集塵器做適應性的調整：

單相或三相低頻電源系統，其電控系統操作間歇放電 (IE) 模式時，最小時間控制範圍為 $8.33\ \text{ms}$ ；而三相高頻電源系統，其電控系統操作間歇放電 (IE) 模式時，最小時間控制範圍為 $0.1\ \text{ms}$ ，因此其較單相或三相低頻電源系統更可靈活的調控間歇放電 (IE) 模式的運轉參數，使其有更佳的能力去處理高濃度與高灰阻的粉塵所導致的逆電暈現象 (back corona)。

當靜電集塵器內發生火花或電弧時，三相高頻電源系統較單相或三相低頻電源系統可更快消弧並快速提升輸出電壓電流至略低於前一個火花發生點的電壓電流，因此，在相同單位時間，若火花與電弧持續發生，則三相高頻電源系統較單相或三相低頻電源系統可輸出更多功率（如圖 10 所示，斜線所圍出之面積）至靜電集塵器內，進而提高集塵效率。

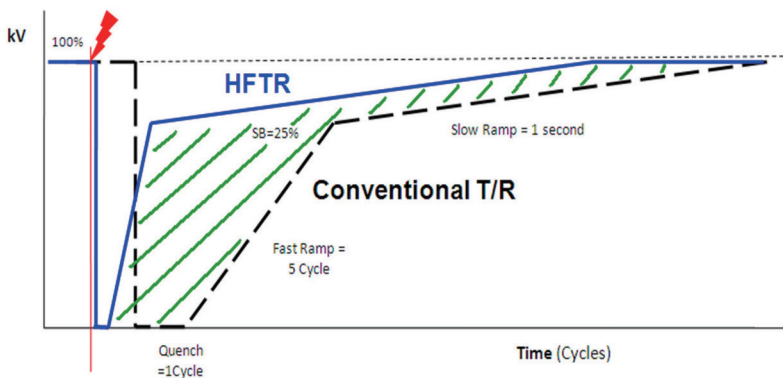


圖 10 三相高頻與單相低頻輸出電壓 / 火花反應示意圖 (NWL)

三相高頻電源的 DSP 電控系統具自動調整 (auto tuning) 模式，此功能可最佳化火花電弧的降載時間、回復電壓與回升速度，並使靜電集塵器在火花發生過程仍可維持較高的輸出功率。

四、改善案例

香港某電廠 B2 燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案，該廠共設有 8 部燃煤發電機組，其中分為 4 部 350MW 發電機組 (A1-A4) 與 4 部 677 MW 發電機組 (B1-B4)，所有發電機組皆使用靜電集塵器作為空污防治設備以補集煙氣中懸浮粒子。該 B2 發電機組所使用的靜電集塵器，就機械構造而言，由 2 個相同的設計規格與容量的靜電集塵器 Precip. A 與 Precip. B 所組成，每個 Precip. 又依據煙氣方向的左右兩側平分為 A Chamber 與 B Chamber，而每個 Chamber 由煙氣入口至出口再分成相等收塵面積的 6 個區，故以機械結構分區而言，該機組之靜電集塵器共分為 24 個區。而以電氣系統的高壓電源分佈而言，每個 Precip. 的煙氣入口的前 3 區，每區左右 2 個 Chamber 皆共用 1 組高壓電源系統，至於後 3 區，則每個區各自獨立使用 1 個高壓電源系統，因此若以高壓電源分佈來區分，則該機組之靜電集塵器共分為 18 個區。下圖 11 為該機組靜電集塵器的分區架構圖以及其既設高壓電源系統容量。

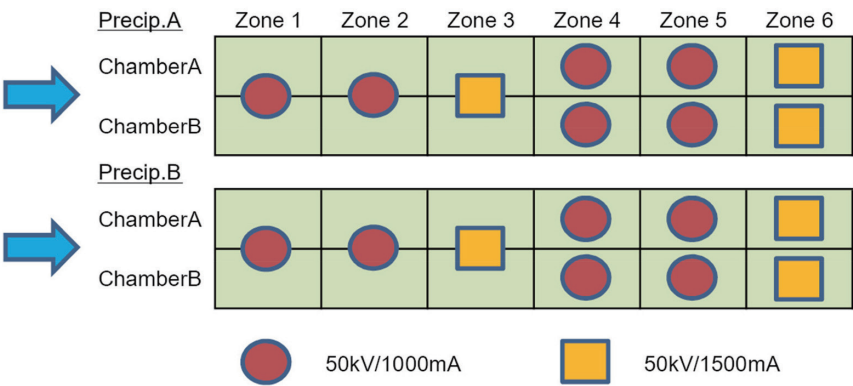


圖 11 B2 機組靜電集塵器分區架構與高壓電源分佈圖

目前該發電機組靜電集塵器所使用的高壓電源系統皆使用傳統單相低頻電源系統，自 1980 年代啟用運轉至今已超過 30 年以上。是故，該客戶在靜電集塵器的操作與保養上，面臨以下幾個問題。靜電集塵器原設計內部電極間距窄小，導致發電機組在高負載時，因負載增加，致使靜電集塵器內部各區火花與電弧頻繁發生，而導致收塵效果下降。靜電集塵器已使用逾 30 年，內部機械因結構老舊，導致內部極

板、極線因而產生彎曲變形現象，使原本已經狹窄的間距又更為狹小，造成部分區室運轉時易發生火花與電弧過多而跳脫狀況。為了彌補靜電集塵器因老舊或異常所降低的收塵效果，致使廠內操作部門必須增加靜電集塵器前的煙氣調質系統 (flue gas conditioning system) 的注射量與濃度，此除了導致增加營運成本外，注射過多的溶劑進煙氣內亦會導致黏漬性粉塵被靜電集塵器內的極板、極線所吸引而造成包灰現象，長時間運轉後反而會導致靜電集塵器收塵效果下降。

由於靜電集塵器的效能下降，導致後端的煙氣脫硫系統 (flue gas desulfurization) 因粉塵而造成經常性的堵塞而影響效能。此外，為了復原效能，必須增加煙氣脫硫系統停機清洗頻率，如此不但造成停機頻率增加，亦會使營運成本大幅上升。既有設備老舊，已超過使用年限，且設備製造商大部分皆以停產，備品取得困難。根據上述所面臨的問題，經廠內評估後，決定將老舊的單相低頻電源系統更新為三相高頻電源系統。此升級改善案的目的除了提升既設靜電集塵器的收塵效率，用以解決或減緩上述運轉之問題外，隨著此電源系統的更新，一併改善或升級靜電集塵器其他老舊附屬系統，以降低未來運轉上的風險，其中包括以下情況。伴隨傳統單相低頻電源系統更新為三相高頻電源系統，更新其老舊且以停產的單相低頻電源系統控制器、操作界面及其附屬控制盤箱。為了獲得更快速穩定的通訊系統，隨著此次系統更新，三相高頻電源系統至現場控制室以及中央控制室之間使用 100 Mbps 速率的光纖以太網路架構取代其既有僅 19.2 kbps 速率的通訊網路架構。為了實現整體靜電集塵器的可靠度與可維護性，依據三相高頻電源系統功能重新設計敲擊控制盤用以取代既設的敲擊控制盤。依據新設三相高頻電源系統的輸出電壓等級，更新其連接至靜電集塵器的高壓纜線。為了提高操作的便利性，於中央控制室 (CCR) 中安裝遠程監控系統，以顯示靜電集塵器的運轉狀態、警報指示與歷史記錄。此外，亦保留通訊渠道，以利未來 B1 至 B4 機組的靜電集塵器更新改善後，整合該遠程監控系統內。

而本案所需的三相高頻電源系統規格與容量，根據電流密度計算以及效能評估後，使用 70 kV/1,430 mA 的三相高頻電源系統取代既有 50 kV/1,000 mA 的單相低頻電源系統，另外，以 70 kV/1,975 mA 的三相高頻電源系統取代既有 50 kV/1,500 mA 的單相低頻電源系統，其新設之三相高頻電源安裝分佈如圖 12 所示。

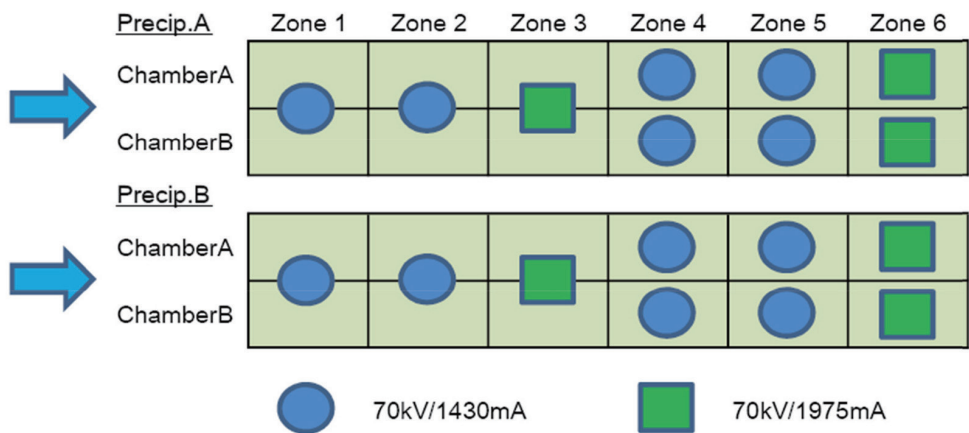


圖 12 2 機組靜電集塵器新設三相高頻電源分佈圖

此 B2 燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案，將利用該機組年度大修時程完成既有設備之拆除以及新設設備之安裝、試車與調校。為了比對改善效率，本案於機組年度大修停機前，委託第三方檢測單位量測該 B2 機組靜電集塵器後端之粒狀物排放濃度以作為改善前之基準線測試值；並於新設設備安裝完成以及 B2 發電機組起機後 1 個月及 2 個月後，再同樣委請第三方檢測單位量測該 B2 靜電集塵器後端之粒狀物排放濃度，以做為改善後之驗收測試值。此外，為了使改善前後數值的具可比較性，於執行基準線測試以及驗收測試時，亦將當時燃煤條件以及機組發電量等變因控制在 $\pm 5\%$ 內，並停止鍋爐吹灰及煙氣調質系統的運作，用以排除外部設備運轉的干擾。

根據合約之需求，廠內的目標是透過更新三相高頻電源系統後，其既設靜電集塵器後的粒狀物排放濃度可降低 25%(含) 以上，以表 2 至表 4 是本案改善前與改善後，委託第三方檢測單位量測該 B2 機組靜電集塵器後端的粒狀物排放濃度結果。

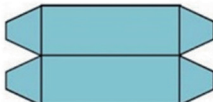
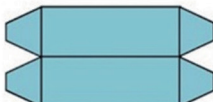
Baseline			Precip. outlet	
	Precip.A		Particle Emission	
	ChamberA		405.9*	mg/m ³
	ChamberB		78.4	mg/m ³
	Precip.B			
	ChamberA		58.8	mg/m ³
	ChamberB		68.2	mg/m ³
Average :			152.8	mg/m ³

表 2 B2 機組靜電集塵器改善前粒狀物排放檢測數據

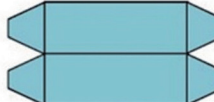
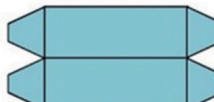
Performance 1			Precip. outlet	
	Precip.A		Particle Emission	
	ChamberA		178.8*	mg/m³
	ChamberB		53.5	mg/m³
	Precip.B			
	ChamberA		22.8	mg/m³
	ChamberB		35.1	mg/m³
Average :			72.5	mg/m³

表 3 B2 機組靜電集塵器改善後粒狀物排放第一次檢測數據

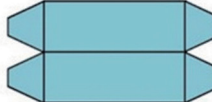
Performance 2			Precip. outlet	
	<u>Precip.A</u>		Particle Emission	
	ChamberA		219.2*	mg/m ³
	ChamberB		27.8	mg/m ³
	<u>Precip.B</u>			
	ChamberA		28.6	mg/m ³
	ChamberB		16.7	mg/m ³
Average :			73.1	mg/m ³

表 4 B2 機組靜電集塵器改善後粒狀物排放第二次檢測數據

註：Precip.A ChamberA 經檢驗後發現因有殼體破損造成潛流的問題，致使有部分氣流所攜帶之粉塵未經過收塵區域而直接排出，導致排放數據偏高。

依據本文第 2 節所討論的靜電集塵器效能提升理論，當施加的電場（電量）功率越高，則靜電集塵器的集塵效率越好。因此，為了比對改善前後靜電集塵器各區電量功率的差異，分別在執行基準線測試以及驗收測試的當下，同步收集該靜電集塵器各區的輸出電量功率，圖 13 與圖 14 比較改善前後靜電集塵器 Precip.A 與 Precip.B 各分區的輸出功率比較圖，圖 15 則為 Precip.A 與 Precip.B 總輸出功率比較圖。

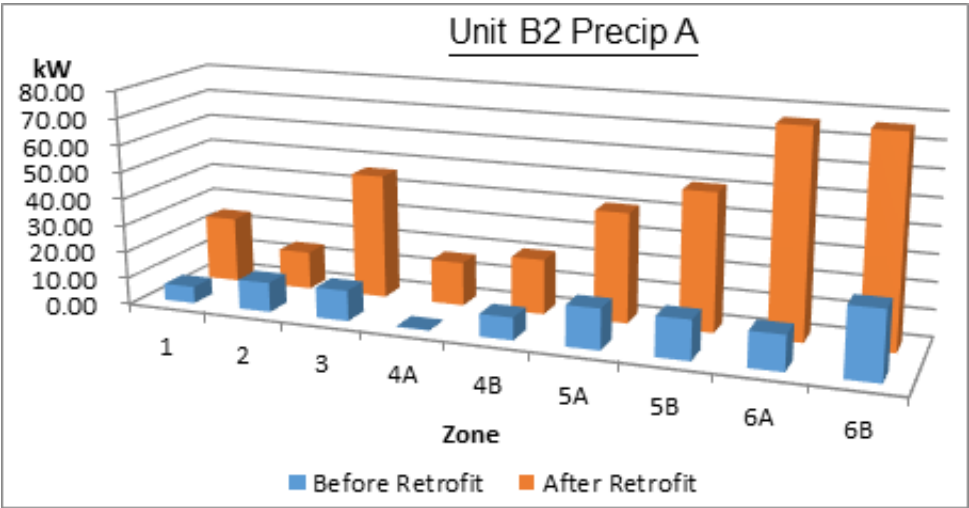


圖 13 B2 機組靜電集塵器 Precip.A 改善前後各區輸出功率比較圖

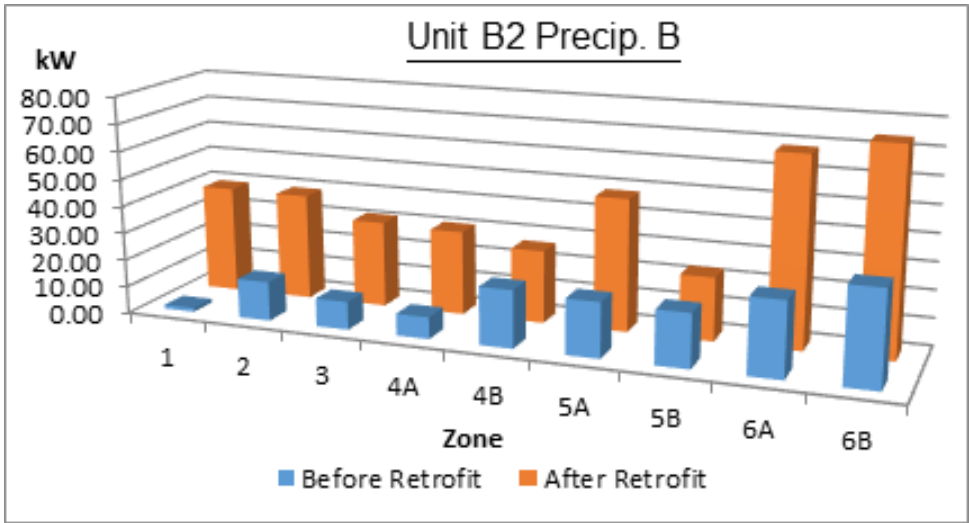


圖 14 B2 機組靜電集塵器 Precip.B 改善前後各區輸出功率比較圖

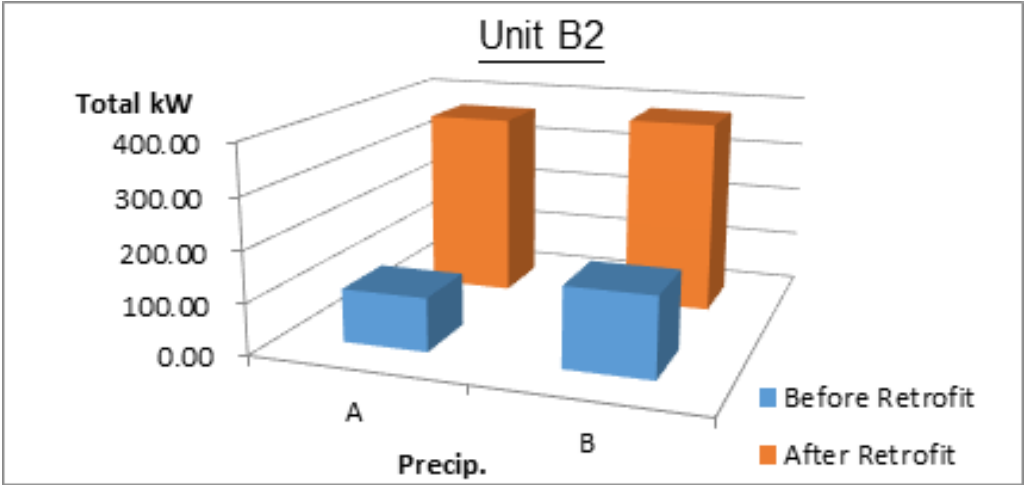


圖 15 B2 機組靜電集塵器改善前後 Precip A & B 總輸出功率比較圖

依據圖 13 至圖 15 之紀錄結果可知，該靜電集塵器更新三相高頻電源系統後，其輸出功率在大部分各區皆有大幅上升，而以各 Precip. 來分，其 Precip.A 的總輸出電量功率由 104.8 kW 上升至 365.4 kW，升幅約為 250%；而 Precip.B 的總輸出電量功率則由 156 kW 上升至 381.3 kW，升幅約為 140%。而根據上述靜電集塵器效能提升理論，輸出電量功率的增加與靜電集塵器的收塵效率成正比，而表 2 至表 4 的第三方檢測公司在改善前後所量測的粒狀物排放濃度亦可證明此次改善成效，根據檢測報告，此次粒狀物排放濃度的平均改善比率如表 5 所示。

表 5 B2 機組靜電集塵器平均改善比率

基準線測試 (Baseline Test) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	第一次驗收測試 (Performance Test 1) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	改善 比例 (%)
152.8	72.5	52.5
	第二次驗收測試 (Performance Test 2) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	改善 比例 (%)
	73.1	52.1

若排除受潛流影響的 Precip.A ChamberA 的部分，則平均改善比率如下表 6 所示：

表 6 B2 機組靜電集塵器平均改善比率 (排除 Precip.A Chamber A)

基準線測試 (Baseline Test) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	第一次驗收測試 (Performance Test 1) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	改善 比例 (%)
152.8	72.5	52.5
	第二次驗收測試 (Performance Test 2) (mg/m ³ , dry basis at 0°C , 1atm & correct to 12% CO ₂)	改善 比例 (%)
	73.1	52.1

由表 5 與表 6 得知，此次 B2 燃煤發電機組靜電集塵器更新三相高頻電源系統後，其靜電集塵器後之粒狀物排放濃度平均改善效率可達 52%，若排除受潛流影響的煙道，則平均改善效率可達 55%。此改善效率不僅符合客戶合約所設定的 25% 改善設定，更較原目標大幅擴增約 25% 以上，由此可知悉三相高頻電源系統對老舊靜電集塵器尤其是窄間距靜電集塵器排放改善的效用。

五、 結 論

根據此燃煤發電機組靜電集塵器效能改善案例，並觀察分析該靜電集塵器起機後運轉數值以及後端的排放檢測數據，該 B2 燃煤發電機組靜電集塵器經過更新為三相高頻電源系統後，其靜電集塵器後之粒狀物排放濃度可大幅降低約 50% 以上，因此可以證實即使機組已經運轉超過 30 年，仍然可以於機組年度的大修時程內，透過三相高頻電源系統的更新，達到對老舊靜電集塵器效率改善的成效。

而對於老舊靜電集塵器的效能提升，該三相高頻電源系統不僅可以應用於電力產業用之靜電集塵器，其他例如水泥、煉鋼、紙漿和造紙等產業所使用之靜電集塵器亦可應用此技術而達到靜電集塵器效能提升以及排放粒狀物濃度降低之效果。

參考文獻

Ken Parker (1997), Applied Electrostatic Precipitation, London, UK, Blackie Academic & Professional.

Ken Parker (2003), Electrical Operation of Electrostatic Precipitators, London, UK, The Institution of Electrical Engineers.

David Seitz, Helmut Herder (Nov. 2002), Switch Mode Power Supplier for Electrostatic Precipitators Technology and Supplier Capabilities, NWL.com.

White, H.J. (1977), Electrostatic Precipitation of Fly Ash – Precipitator Design, the journal of the air pollution control association, 27, 214.

David H. F. Liu, Bela G. Liptak (1997), Environmental Engineers' Handbook – Second Edition, Page 372-380, Fig 5.17.7, Collection efficiency as a function of the corona power ratio.

NWL, DSP PowerPlus Series 7 Product Manual.

NWL, Sizing a PowerPlus Unit to replace T/R Sets.

Gary J. Grieco, SMPS: Present Application & Future Investigation.

Alstom, D. Levesque , ICRC 2010, Improved Operation of Recovery Boiler Precipitators, Page 8 , picture 1.

廢(污)水處理類

工業區污水處理廠化學處理單元產生積垢 (結晶物)探討—大甲幼獅污水廠實例

蘇育嫻*、洪聖智**、周穎達**、林蔚宣**、張淑麗***

摘 要

廢水中污染物質排放後遷移變化規律差異大，工業廢水中所含各種污染物的性質差別更多更大，有些具強毒性、蓄積性及穩定性。隨著工業快速的發展，生活相關產業也伴隨著產業及工業化程度的提高，在消費性電子產業、高科技產業及電子產業的快速發展下，提升了臺灣經濟的發展，電子產業、高科技產業及電子產業使用氫氟酸。其中含氟廢水的排放有呈遞增趨勢，對自然環境的影響日益加劇。而含有氫氟酸廢液進入廢水處理系統後，主要以化學混凝法去除氟離子以達放流水標準，並產生氟化鈣污泥；然而因廢水氟離子含量高、利用價值低，目前多以委託污泥清運處理。近年來循環經濟概念意識上升，而現今高科技產業含氟廢水已朝向再生資源化利用。

經濟部工業局因應環保署加嚴放流水標準及考量污染者付費及處理成本等因子，業於 2021 年 2 月 20 日公告施行「經濟部所屬產業園區管理機構下水道使用管理及收費規定」，各工業區下水道用戶(納管廠商)也已陸續改善「含氟廢水」，改善後所有排放水經由下水道系統收集至工業區所屬污水處理廠，惟該改善之「含氟廢水」進入處理單元進而發生化學反應，產生積垢(結晶物)，致影響單元效能；因下水道用戶(納管廠商)所排入之改善之「含氟廢水」濃度不高，無再生資源化價值，大甲幼獅污水處理廠除執行行政管制及清除積垢(結晶物)，更積極參考相關文獻及探討積

垢(結晶物)成分及形成因素，可作為往後操作、資源化再利用或輔導廠商改善參考依據。

【關鍵字】用戶(納管廠商)、積垢(結晶物)、氟離子、氟鹽

- | | |
|------------------------|-------|
| * 經濟部工業局大甲幼獅工業區污水處理廠 | 化驗技術員 |
| ** 經濟部工業局大甲幼獅工業區污水處理廠 | 操作技術員 |
| *** 經濟部工業局大甲幼獅工業區污水處理廠 | 環保組長 |

一、前言

氟 (fluorine) 為非金屬化學元素，化學符號為 F，原子序數為 9，為已知元素中非金屬性最強的元素，是淡黃色、劇毒的氣體。氟氣的腐蝕性很強，化學性質極為活潑，具強氧化性之物質，可以和部分惰性氣體在一定條件下反應。氫氟酸 (Hydrogen Fluoride, HF)，亦名氟化氫，俗稱氟酸、化骨水，於 1720 年由英國玻璃工人第一次製造出來，19 世紀末至 20 世紀初被用來蝕刻玻璃，於 1931 年商業製造生產，用於製造烷化反應之觸媒；在一般工業上則用於除污、除銹、蝕刻、酸洗等。近幾年臺灣高科技產業發展，而積體電路半導體業、液晶顯示面板業與太陽能產業在製程中，均利用高純度氫氟酸或氫氟酸混酸進行 IC、TFT-LCD 面板與太陽能矽晶片濕式蝕刻或進行表面清洗，透過清洗水或洗滌塔洗下排入廢酸收集系統，產生含氟廢水，一般含氟廢水氟離子濃度約 1,000~3,500 毫克 / 公升 (mg/L)，部分甚至可能大於 10,000 毫克 / 公升以上。我國事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之放流水標準氟鹽之排放標準為 15 毫克 / 公升。

金屬表面處理業為降低成本，可能採用上述產業廢酸做為製程原料進行金屬製品表面處理或清洗，部分工業區中屬前述產業之納管廠商該含氟廢水則經由污水收集系統進入工業區污水處理廠。有鑑於含氟廢水恐造成部分污水處理廠無法符合放流水標準，經濟部所屬工業區針對氟鹽污染物在 2021 年 2 月 20 日前並無計收污水處理費；基於使用者付費原則，2021 年 2 月 20 日開始施行「經濟部所屬產業園區管理機構下水道使用管理及收費規定」，其中針對「氟鹽」污染物以 1,000 元 /kg 計費。另在前述規定第 14 條：用戶使用下水道，其使用費之費率及計算公式如附表二，使用費之計收方式如下…；及第 20 條：用戶排放廢（污）水之懸浮固體、化學需氧量、重金屬、pH 值及其他特殊項目超過下水水質標準時…。惟計徵污水處理費僅為促使廠商改善的手段之一，並非唯一方法。

自 2020 年起，大甲幼獅污水廠（以下簡稱本廠）化學處理及放流單元（含快混、慢混、沉澱、中間貯槽及放流池），池體、管線及相關監測設備產生嚴重積垢（結晶物）情況，積垢具硬度，需施力方可清除或破碎，造成管線阻塞、溢流堰效果不佳、部分

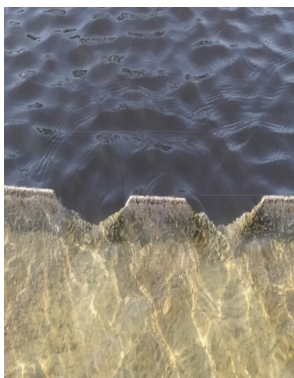
設備故障等異常狀況(見圖 1 所示),影響沉澱池排水功能。該系統相關操作參數與先前相較並未進行任何調整,此狀況若無法改善,恐將影響後續處理效能、造成設備故障或無法預見之困境,爰針對積垢成分及可能產生原因進行探討,冀望相關改善經驗能提供其他污水廠或廠商改善之參考。



積垢(結晶物)具硬度



管線阻塞



溢流堰出口積垢



積垢附著於 pH 計

圖 1 化學處理單元積垢(結晶物)及設備狀況圖

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>

二、積垢（結晶物）探討因素與方法

2.1 探討因素

有鑑於本廠現有設施化學處理及放流單元及池體、管線及相關設備之積垢（結晶物）造成管線阻塞、溢流堰效果不佳、部分設備故障等異常狀況，影響沉澱池排水功能，污水廠遂自行監測進流水及放流水質，發現進流水偶有發生未符合下水道水質標準 15 毫克 / 公升狀況，放流水則有 3 次稍超出未符合放流水標準 15 毫克 / 公升（見圖 2 及圖 3 進、放流水監測變化圖）。依監測結果顯示，處理水質狀況雖尚未嚴重惡化，然如積垢問題未能適時改善，日後恐嚴重影響污水廠操作及放流水質。

經尋求專家委員提出意見，提出建議，主要建議為，積垢可能原因為本區納管廠商其排入污水廠之排放水質產生變化所致，應朝向納管廠商水質變化方向探討。有鑑於「經濟部所屬產業園區管理機構下水道使用管理及收費規定」自 2021 年 2 月 20 日開始施行，基於使用者付費原則，納管廠商於前述法規施行前後大多著手進行改善之污染物以氨氮、硝酸鹽氮及氟鹽污染物為主，其中改善氨氮、硝酸鹽氮多採生物處理系統，對於氟鹽之改善有限，故本廠朝向改善氟鹽污染物之化學處理法方向進行探討。

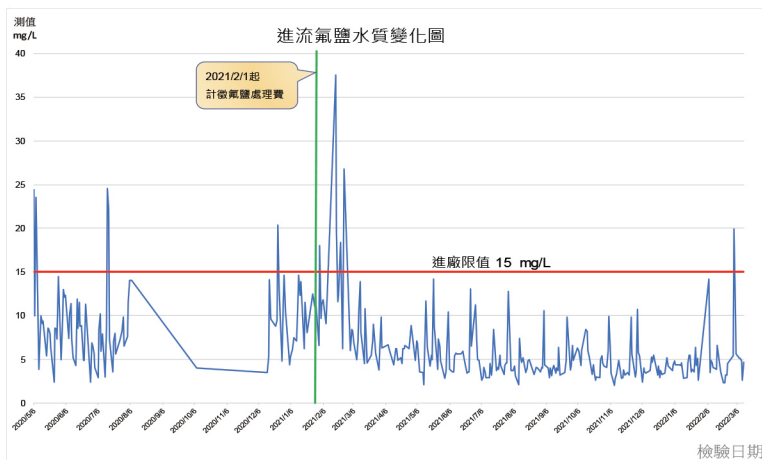


圖 2 大甲幼獅污水處理廠進流水氟鹽濃度變化圖

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 大甲幼獅污水處理廠放流水氟鹽濃度變化圖

2.2 大甲幼獅污水處理廠化學處理單元系統概述

大甲幼獅工業區為綜合性工業區，除部分行業屬不得引進行業，其產業性質分別為金屬、機械、運輸工具、電機、電子、化工、製紙、製藥、紡織、食品等類別，又以金屬、化工及紡織業佔大宗。另設有郵局、電灣電力公司、變電所、自來水淨水場、中華電信公司、電信機房公用事業，污水廠收受區內產業包含金屬表面處理、食品製造業、製藥業、染整業……等數 10 種用戶（納管廠商）廢（污）水。廢（污）水來源係經由污水下水道管線收集至污水廠，處理流程簡述：污水收集管線系統 → 前處理 → 初級化學處理 → 二級生物處理 → 三級化學處理 → 三級過濾處理後，經由放流井進入排放專管排放至 4 號大排（大甲幼獅工業區污水廠放流承受水體）。初級污泥、二級活性污泥及三級化學污泥，收集至污泥混合槽，直接進入污泥乾燥曝曬瀝乾或經污泥濃縮池濃縮後，經履帶式脫水機處理後送至污泥乾燥機或污泥儲存場暫存。現正執行「大甲幼獅工業區污水廠處理系統效能加值及優化工程」將於深氧化渠「1」增建缺氧池及增建水肥接收井（圈選單元為增建），其處理流程圖如圖 4。

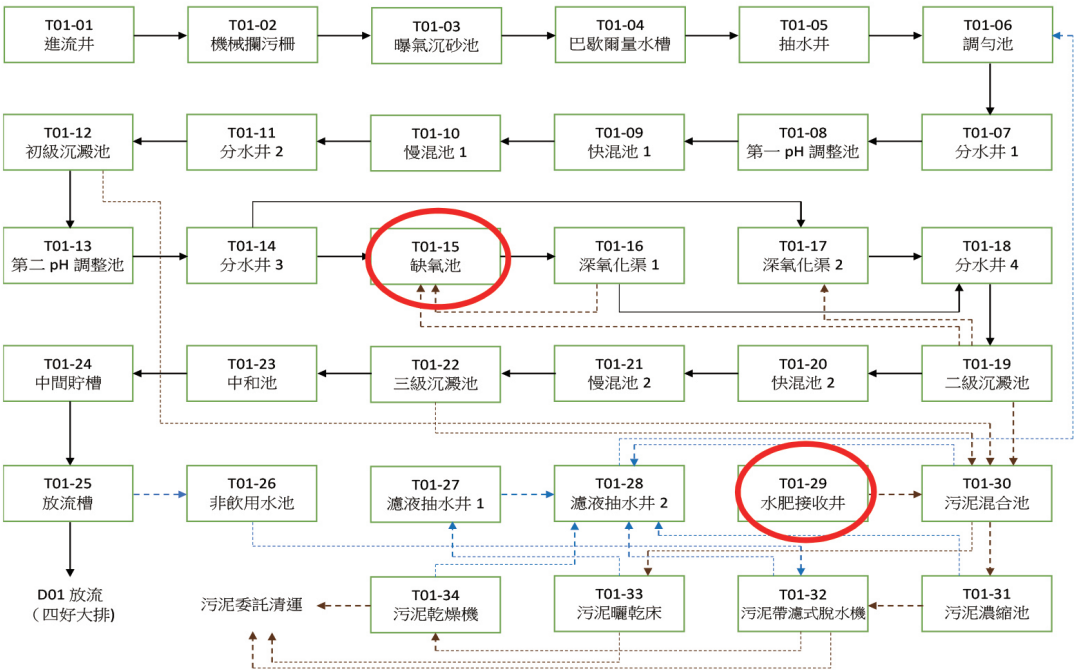


圖 4 大甲幼獅污水處理廠處理流程圖

化學處理法主要利用物理及化學之攪拌、碰撞、電荷中和、凝聚及重力沉降等原理，提供適量混凝劑破壞污水中微細顆粒之膠體粒子穩定性，而後藉助凝劑作用及慢混方式逐漸形成較大膠羽，以利重力沉降後予以分離。主要設置目的為去除 COD、SS 及進一步淨化水質。

本廠化學處理系統單元包括快混池、慢混池、三沉池及中和池等，二沉池後之污水進入快混池，於快混池中加入適量之 45% 氫氧化鈉並由攪拌機快速攪拌；添加適量陰離子助凝劑，進入慢速攪拌之慢混池，提供膠羽生成之最佳條件，以利形成粗、中顆粒之膠羽，與處理水一併流入三沉池中，利用重力沉降分離水中膠羽。沉降之膠羽則以刮泥機刮集至污泥貯坑，以污泥泵抽除至污泥處理系統中待處理；分離固體後之澄清液則經由溢流堰進入中和池。

2.3 積垢(結晶物)成分與來源探討

本廠化學處理單元僅使用藥劑 45 % 氫氧化鈉及陰離子助凝劑 2 種，未添加其他混凝劑。本廠研擬朝使用藥劑、積垢成分 / 含量及性質、處理系統單元水質與下水道用戶(納管廠商)水質等 4 面向執行，期能找出積垢貢獻來源，相關檢驗或試驗探討，分述如下。

2.3.1 化學處理單元使用藥劑成分檢驗

氫氧化鈉分成工業級、食品級、試藥級，其區別主要在於純度及所殘留的雜質可能不同。通常純度為：試藥級 > 食品級 > 工業級，而本廠用藥僅須符合工業級即可。本廠委外檢驗 45 % 氫氧化鈉成分，檢驗項目包含：鋁(Al)、鈣(Ca)、鎂(Mg)、鉀(K)、鈉(Na)、矽(Si)及銦(Sr)等元素含量。檢驗方法參考 USEPA 3502，檢驗結果：鈉成分含量最高，為 255,162 mg/L；鉀含量：142 mg/L；鈣含量：54 mg/L，其餘鋁、鎂、矽及銦等元素均為 ND，顯示本廠購置之氫氧化鈉並無雜質。

2.3.2 積垢(結晶物)溶解度試驗、成分及元素含量檢驗

1. 積垢(結晶物)溶解度試驗

將積垢分別加入 15 mL 之純水、檸檬酸、1+1 鹽酸、濃鹽酸、1+1 硫酸、濃硫酸、1+1 硝酸及濃硝酸等，觀察積垢溶解狀況。其中，加入純水及檸檬酸並無明確溶解狀況或反應；加入 1+1 鹽酸、1+1 硫酸、1+1 硝酸僅些微溶解狀態；加入濃鹽酸、濃硫酸及濃硝酸即立即產出氣體並具溶解狀況，溶解變化詳見圖 5 及圖 6。積垢靜置 48 小時後，濃鹽酸及濃硝酸溶解性較佳；濃硫酸雖溶解性亦佳，惟液體呈現濃稠及黑色狀，詳見圖 7，經溶解度試驗顯示該積垢已形成穩定固體物，無法溶於水。

	
積垢純水	積垢加檸檬酸
	
積垢加 1 + 1 硝酸	積垢加濃硝酸

圖 5 積垢 (結晶物) 溶解狀態圖

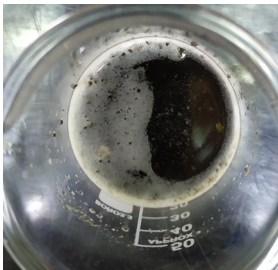
	
積垢加 1+1 硫酸	積垢加硫酸
	
積垢加 1+1 鹽酸	積垢加濃鹽酸

圖 6 積垢 (結晶物) 溶解狀態圖

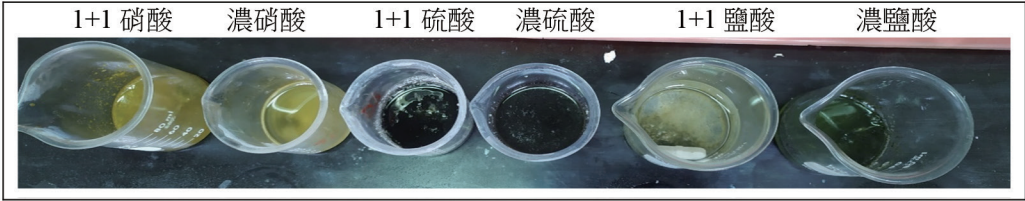


圖 7 積垢(結晶物)加酸靜置 48 小時狀態圖

2. 積垢(結晶物)重金屬定性分析

因對於積垢組成(成分、含量)完全不清楚，僅就本廠實驗室可自行分析之檢測執行，故將積垢溶解後針對重金屬部分進行定性分析，前處理方法參考 NIEA W312.51C 水中元素萃取消化法－微波輔助酸消化法，取積垢 1 g 加入 40 mL 之純水，再加入 5 mL 濃硝酸以微波消化儀進行消化，過濾後再以感應耦合電漿原子發射光譜儀進行半定量分析(定性分析)，檢驗方法利用軟體內建單點濃度檢量線的工作表格，不需配製及分析標準品，直接進行樣品分析，可簡單並快速獲得產品中可能含有的元素及大致濃度。

半定量分析結果顯示，70 種元素未檢出的約有 16 種元素，其餘 54 種元素中鈣(Ca)、鈉(Na)及銦(Sr)儀器顯示「####」，表示濃度極高已無法顯示其測值；其次鋁(Al)、銫(Cs)、鉀(K)、鎂(Mg)、錳(Mn)、鎳(Ni)、磷(P)、鈀(Pd)、硫(S)、矽(Si)、銅(Cu)、鐵(Fe)及鋅(Zn)濃度均含數百 mg/L 以上。高濃度之元素半定量分析結果詳見表 1。

表 1 大甲幼獅污水處理廠積垢(結晶物)半定量分析結果表

元素 / 波長	半定量濃度 mg/L
Ca 393.366 nm	####
Na 589.592 nm	####
Sr 407.771 nm	####
Al 396.152 nm	939.369388
Cs 697.327 nm	2,489.683307
K 769.897 nm	1,732.579839

元素 / 波長	半定量濃度 mg/L
Mg 280.270 nm	3,024.391484
Mn 257.610 nm	313.474076
Ni 216.555 nm	464.759378
P 177.434 nm	13,877.706583
Pd 229.651 nm	509.015071
S 181.972 nm	2,823.961233
Si 288.158 nm	2,347.460000
Cu 324.754 nm	228.32069
Fe 238.204 nm	168.469482
Zn 213.857 nm	123.600338

3. 積垢 (結晶物) 元素濃度

學者建議可利用土壤和底泥檢測方法進行測試，故本廠委外進行積垢以 WDXRF 元素半定量分析及燒失量檢測，檢驗結果鈣 (Ca) 元素占 32.4% 最高，其次為磷 (P) 占 15.7 %，鎂 (Mg) 占 1.22 %，其餘元素均占 1 % 以下，燒失量為 14.2 %。半定量分析結果詳見表 2。

表 2 大甲幼獅污水處理廠積垢 (結晶物)WDXRF 元素半定量分析結果表

項目	單位 %
Na	0.816
Mg	1.22
Si	0.269
P	15.7
S	0.0961
K	0.0498
Ca	32.4
Mn	0.0596
Fe	0.0657
Ni	0.101
Cu	0.0272
Zn	0.0273
Sr	0.123

2.3.3 廢水處理單元水質檢驗

本廠各處理單元氯鹽測值自 2020 年起，其濃度多為 500 ~1,000 mg/L 提高至 1,500 ~ 2,000 mg/L；另進流水、二沉池及三沉池等單元之出水，委外檢測鋁、鈣、鎂、鐵、鈉、硬度、氯鹽及氟鹽等元素分析。水的硬度可被區分為 4 個等級：1. 軟水：總硬度 0~60 mg/L；2. 中等軟水：總硬度 60~120 mg/L；3. 硬水：總硬度 120~180 mg/L；4. 超硬水：總硬度 180 mg/L 以上。硬水容易附著於管壁中產生結垢物。依檢測結果，參考文獻其中所含的鈣及鎂為總硬度貢獻元素，本下水道收集系統之水質已達超硬水；另鈣、鎂及氯鹽，測值均不低，檢測結果詳如表 3 所示。

表 3 大甲幼獅污水處理廠進流水、二沉池及三沉池單元之出水檢測結果

項目	單元		
	進流水	二沉池出水	放流水
總硬度 (mg/L)	467	327	317
鈣 (mg/L)	81.9	85.1	82.7
鎂 (mg/L)	19.8	22.7	23.1
鈉 (mg/L)	1,060	1,510	1,550
鋁 (mg/L)	6.06	0.243	0.0868
鐵 (mg/L)	18.8	0.054	0.036
氟鹽 (mg/L)	13.4	3.82	3.58
氯鹽 (mg/L)	874	635	628

2.3.4 下水道用戶（納管廠商）水質檢驗

大甲幼獅工業區下水道用戶（納管廠商）包括金屬製品製造業、基本金屬製造業或相關金屬加工業約有 30 家，排放廢（污）水約占全區廢（污）水量 26%，其製程大

多使用氫氟酸、磷酸鐵、磷酸鋅或向高科技業購買廢酸進行原料除鏽(銹)，廢(污)水中含有矽(68 mg/L)、鋁(426 mg/L)及鎂(35 mg/L)，濃度高。依產業污染特性區分，目前有 15 家排放水含有「氟鹽」污染物。

針對前述用戶(納管廠商 A ~ O)「氟鹽」污染物監測，其測值最高者為 H 廠商，2020 年 7 月 7 日測值達 808 mg/L，已超出下水水質標準 53 倍以上，該廠商已於 2021 年 6 月完成改善；2021 年 6 月 25 日測值為 6.93 mg/L，迄今均符合本工業區下水水質標準(15 mg/L)。自 2021 年 2 月 1 日開始計徵「氟鹽」污染物處理費後，15 家廠商中有 10 家已陸續進行或完成改善，廠商測值也多符合下水道水質標準，檢驗結果詳如圖 8 所示；另針對已進行或完成改善之用戶排放水質及積垢定量檢驗，檢驗結果排放水質以鈣及鈉濃度含量多超出 100 mg/L 最高，其次為鎂。檢測結果詳如表 4。

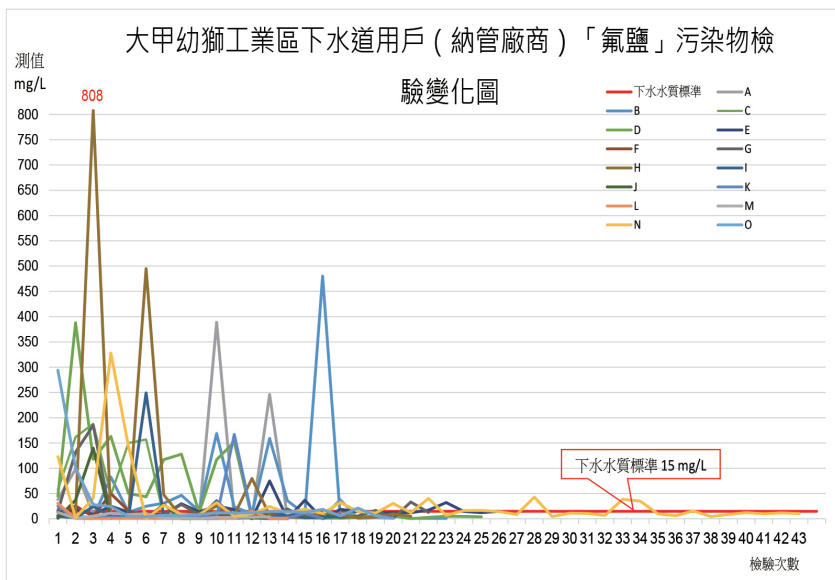


圖 8 大甲幼獅工業區下水道用戶(納管廠商)「氟鹽」污染物檢驗變化圖

表 4 大甲幼獅工業區下水道用戶(納管廠商)改善「氟鹽」污染物水質檢測結果

項目 濃度 編號	鋁	硼	鈣	鉻	碳	鐵	鎳	鎂	鈉
B	0.72	0.10	492	*	*	1.04	*	11.3	251
E	3.87	0.34	153	*	*	0.07	*	13.5	347
G	0.42	0.11	191	*	*	*	*	19.0	90.8
H	0.20	0.09	98.7	*	*	0.17	*	19.1	110
J	0.24	0.21	320	*	0.23	0.08	*	3.85	416
K	0.25	0.08	105	*	*	0.24	*	17.2	112
M	4.25	1.22	4.77	0.07	0.13	0.10	*	2.16	3,317
N	0.17	0.12	150	*	*	0.12	*	19.5	134
O	20.7	0.38	336	*	*	8.86	0.02	9.57	789
P	0.62	0.09	162	*	*	*	*	19.6	156
積垢	5,665	77.8	8,957	27.1	861	1,061	*	15,647	114,451

註：1. 編號：為依產業污染特性排放水含有「氟鹽」污染物下水道用戶(納管廠商 A～O)
2. 測值顯示「*」為未檢出。
3. 單位：mg/L。

本廠化學處理單元池體積垢經前章節相關檢驗及測試顯示磷及鈣含量高，另外統計自公告施行「經濟部所屬產業園區管理機構下水道使用管理及收費規定」，本廠 2021 年 2 月 1 日~2022 年 6 月 30 日 8 大檢項總計收費金額 6,328,979 元；其中，計徵氟鹽處理費占收費比例最高約 70.31%(2021 年為 4,253,756 元)。經本廠輔導廠商前處理改善「氟鹽」污染物後，2022 年目前計徵 533,200 元，明顯降低，各項收費及比例詳見圖 9 及圖 10。足可見在「污染者付費」的前提下，確實是促使改善的有效之策略之一。綜上，研判可能為新增 8 項收費項目，本廠輔導廠商前處理改善「氟鹽」污染物後，廢水經化學處理單元加藥(氫氧化鈉及 polymer)後與水中鈣、磷、矽、鋁及鎂產生鹽類之化合物，日積月累沉積管內、槽體或附著於相關監測設備。

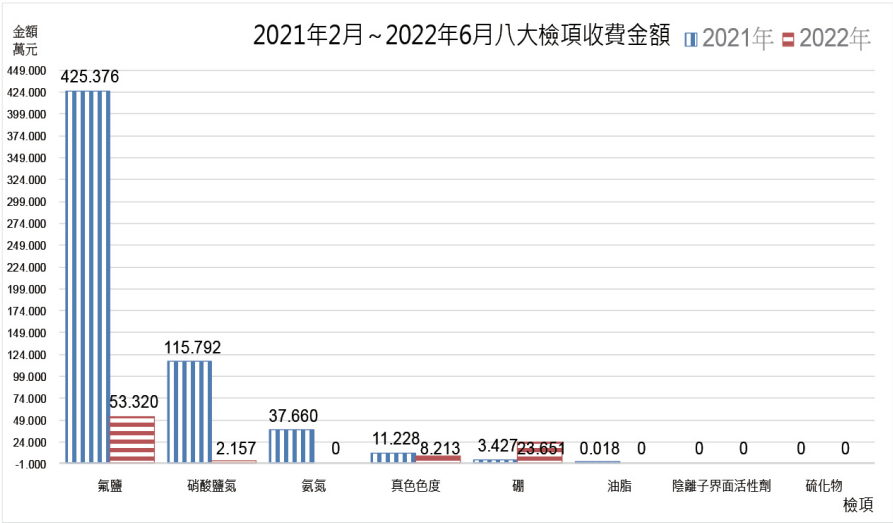


圖 9 大甲幼獅污水處理廠 2021 年 2 月~ 2022 年 6 月八大項增加收費金額

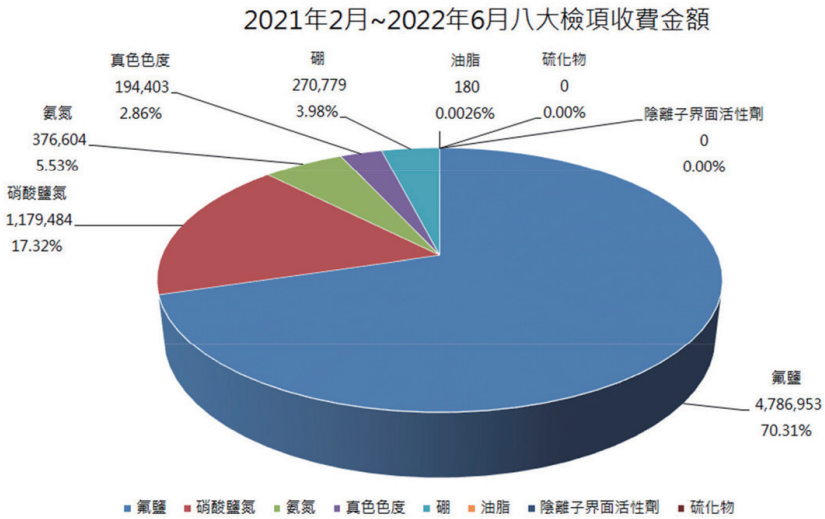


圖 10 大甲幼獅污水處理廠 2021 年 2 月~ 2022 年 6 月八大項增加收費金額比例圖

2.3.5 「氟鹽」 污染物用戶 (納管廠商) 排放水與廠內氫氧化鈉反應試驗

針對上述部分「氟鹽」 污染物用戶 (納管廠商 A ~ I) 之排放水及本廠二沉池出水量測 pH 值，如未達 pH 8 者再以本廠氫氧化鈉調整至 8 ~ 8.5 之間，調整期間觀察是否有懸浮物、沉澱物產生…等現象；調整完 pH 值之水樣各 50mL 則予以過濾。過程中，廠商 A、B、D、E 及本廠二沉池明顯產生懸浮物或沉澱物現象，詳如圖 11 所示。

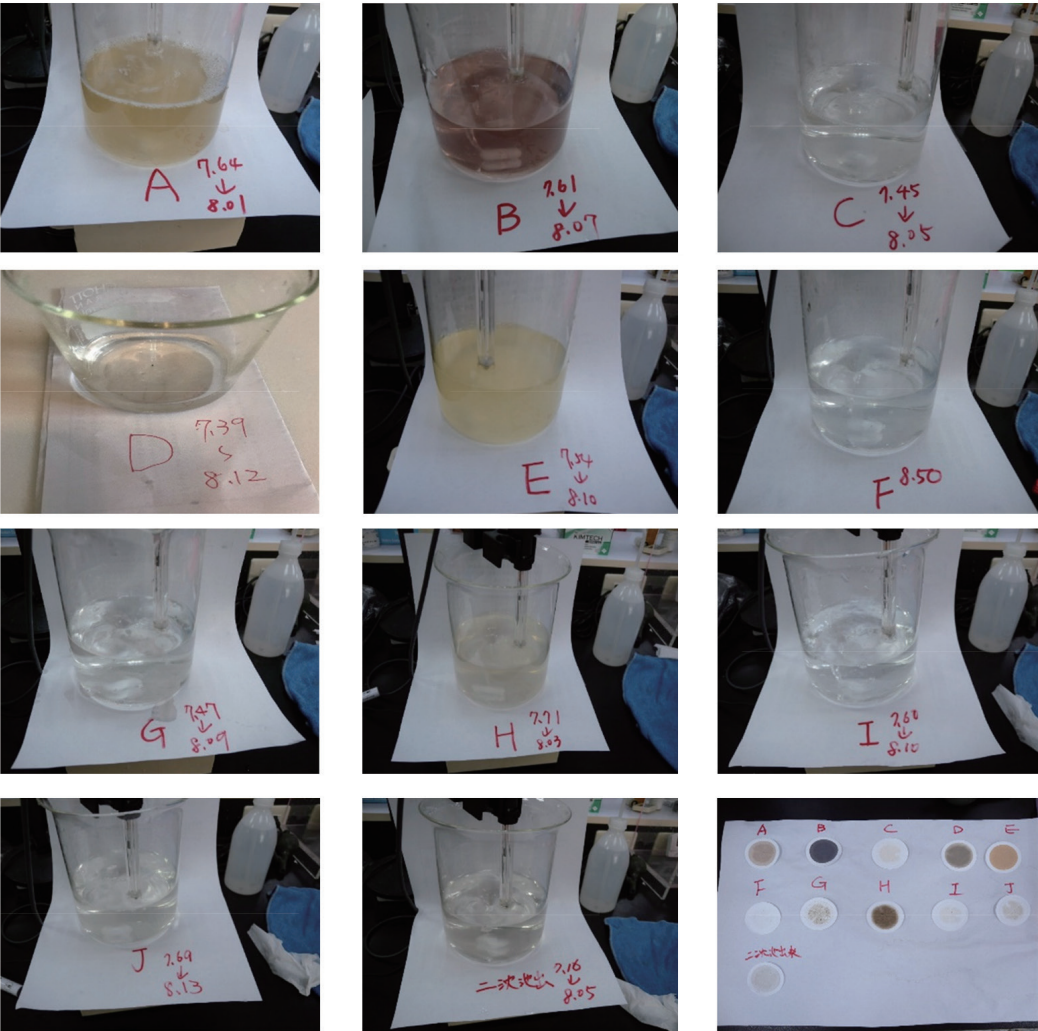


圖 11 大甲幼獅工業區下水道已改善「氟鹽」 污染物用戶 (納管廠商 A~J) 與及本廠二沉池出水與廠內氫氧化鈉反應及過濾試驗圖

2.3.6 「氟鹽」 污染物用戶 (納管廠商) 改善處理技術探討

現今含「氟」廢水處理已發展出很多技術，目前國內主要選擇混凝沉澱法處理較為彈性。摘錄本區部分改善「氟鹽」 污染物用戶 (納管廠商) 之廢 (污) 水處理設施改善資料，顯示去除「氟化物」均採用藥劑含有「鈣」之藥劑，摘錄改善處理資料，詳見表 4。

表 4 大甲幼獅工業區下水道用戶 (納管廠商) 改善「氟鹽」 污染物處理資料摘錄

壹>基本資料、設計基準

- 1. 廠房位置：台中市大甲幼獅工業區。
- 2. 廢水種類：金屬表面處理類廢水。
- 3. 廢水量：最大處理廢水量：15M³/DAY。(CMD)

4.設計廢水水質：

水質項目	設計水質標準	單位
酸鹼值(PH)	2.0~12.0	無單位
化學需氧量(COD)	<640	mg/L
硝酸鹽氮	<500	mg/L
氟鹽	<200	mg/L
鎳	<20	mg/L

5. 處理後水質：

水質項目	放流水質標準	單位
酸鹼值(PH)	5.0~9.0	無單位
化學需氧量(COD)	<640	mg/L
硝酸鹽氮	<50	mg/L
氟鹽	<15	mg/L
鎳	<0.7	mg/L

6. 藥劑需求

Item	Concentration	Start up ,L / day	備註
液鹼	45%		液態
氟化鈣	37%		液態
石灰液	10%		粒狀泡製
助凝劑	0.1%		顆粒狀泡製

20.石灰液桶槽

- (1).數量：1 座。
- (2).編號：T-05。
- (3).尺寸：0.9mØ ×1.2mH(H_W1.9)=0.763m³
 ◇總體積：0.9mØ ×1.2mH=0.763m³
 ◇有效體積：0.9mØ ×0.9mH=0.572m³
- (4).材質：SUS304-3.0mm³ 鋼板焊製。
- (5).表面處理：表面酸洗處理。
- (6).備註：槽體上方活動蓋、桶槽補強及必要之出入口。

21.石灰液泵浦

- (1).數量：壹台。
- (2).設備編號：MP-06
- (3).型式：氣動雙隔膜式泵浦。(Dual Diaphragms Pump)
- (4).用途：輸送石灰液至 pH 調整池。
- (5).性能及規格：
 處理流量：28L/min。(max)

七、 藥劑名稱與泡藥操作說明

1. 液鹼：NaOH

容量 1000 公升，於四分之一量時，應事先通知藥劑廠商準備罐裝藥槽車，以補滿藥劑。

2. 氯化鈣：CaCl₂

容量 1000 公升，於四分之一量時，應事先通知藥劑廠商準備罐裝藥槽車，以補滿藥劑。

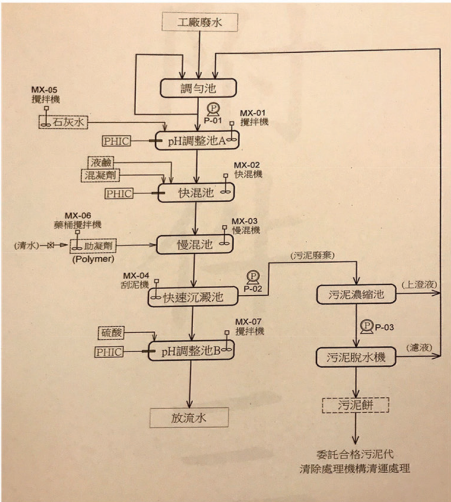
※注意事項：泡藥時請確實戴上安全口罩及防護眼罩、手套，避免直接吸入人體或接觸腐蝕灼傷造成永久傷害。

3. 助凝劑：Polymer

容量 1000 公升，泡藥方式：一次為 1 公斤；先加滿 800~950 公升的水，開啟大量空氣攪拌，請小心以微量散撒式慢慢加入高分子助凝劑 1 公斤，視水中濃度至 3 個手指拉絲，大概筆心蜘蛛絲狀態，即可完成動作(如無此狀態請再增加藥劑量)，待 15~20 分鐘後再轉為正常空氣流量攪拌均勻。

藥劑比例為 1kg：1000L PPM(濃度)

※注意切勿整杯全部列入，此時會瞬間凝結成球狀，造成管路堵塞。



2.4 積垢(結晶物)清除探討

針對本廠化學處理單元池體已形成之積垢，為避免影響功能，委由廠商清除管內積垢，使管線暢通，另亦清理溢流堰恢復單元效能(費用新台幣 6 萬元)，詳見圖 12 所示。自 2021 年底清除後，本廠持續降低氫氧化鈉加藥量(同時減少污泥產生量)後，廠內化學處理單元池體積垢已明顯減少。

	
三沉池至中和池管路管壁結晶打除	三沉池至中和池管路管壁結晶打除
	
三沉池至中和池管路管壁結晶打除	三沉池(南池)溢流堰結塊打除
	
三沉池(北池)溢流堰結塊打除	三沉池(北池)溢流堰結塊打除後

圖 12 大甲幼獅污水處理廠化學處理單元池體積垢(結晶物)清除

三、結論

為能穩定處理區內廠商納管之廢水，並避免積垢（結晶物）再度大量產生，本廠擬定上、中、下管理策略；上策：針對產出造成化學處理單元池體積垢對象，拒絕納入或加嚴下水水質標準；中策：針對產出造成化學處理單元池體積垢水質收費；下策：維持輔導用戶（納管廠商）改善，提供合宜操作參數（現行管制方式）。

考量區內廠商之持續營運與現行「經濟部所屬產業園區管理機構下水道使用管理及收費規定」，前述上及中策略並無法推動或執行，惟僅能維持現行管制策略（下策）。另污水廠操作端為避免大量積垢產生蓄積影響處理效能，則優先源頭管制、調整化學單元 pH 控制參數，並定期加強清除少量積垢（結晶物）。因化學處理為本廠必要處理單元，倘積垢產生已無法避免，建議未來需考慮在化學處理單元端採設置明渠，以方便觀察及清除積垢，或採用其他處理系統。

近年來循環經濟概念意識上升，促進高科技業者處理含氟廢水產生之氟化鈣污泥朝向採再生資源化利用，如氟化鈣污泥再製水泥副原料、再製人造螢石、流體化床結晶－螢石及六氟鋁酸鈉－冰晶石等技術。本區為綜合性工業區，含氟廢水占 26%，廢水含氟濃度與高科技業無法相提並論；本廠刻正執行「大甲幼獅工業區污水廠處理系統效能加值及優化工程」，完工運轉後，將確認氟化鈣污泥量及成分，以進一步評估朝向採再生資源化利用或調整行政管制策略。

參考文獻

台北好水電子報，104 年 1 月 10 日出刊，第 16 期，p1-2。

110 年大甲幼獅工業區污水廠處理系統效能加值及優化工程委託規劃設計監造技術服務工作(案號：201-110SEV-05)細部設計報告及招標文件，工作說明書及改善後流程圖。

李奇旺、梁洋銘，含氟廢水處理方法專利-TWI588097B，p1，2017。

邱聖壹、張婷婷，高科技產業含氟廢水與廢棄物循環應用，工業材料雜誌，第 393 期，p62-68, 2019。

黃淑芬，氟系廢水中加鈣去氟之顆粒形成影響因子研究，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，2007。含氟廢水處理方法的研究，<https://kknews.cc/zh-hk/news/eq49naz.html>，2020。

廢(污)水處理類

都市污水處理廠放流水以不同再生程序 因應工業再利用之處理技術

侯清文*、王朝民**

摘 要

鑑於傳統水源供應穩定性常受限於氣候變遷影響，開發更穩定的新興水源日益重要。人類日常活動產生之生活污水，若能經過適當處理後轉變為再生水，不失為另一種穩定的新興水源，且相較於海水淡化每產 1 噸水約耗電 4 度左右，生活污水再生處理每產 1 噸水約耗電 1.0~1.5 度左右，將更為經濟。水處理技術日新月異，不同處理技術效率及成本(含能耗)大不相同，因此進行都市污水處理廠放流水回收再利用評估時，應依照再生水用途，選擇節能、有效之處理程序及技術，方能達成綠色永續循環目標。

本文以北部 A 廠、中部 B 廠及南部 C 廠，較具規模之都市污水處理廠為例，探討因應回收用途不同所對應之放流水再生處理程序。其中，A 廠放流水回收再利用計畫第一期工程，擬供應再生水至桃園龜山地區、觀音工業區及南坎工業區附近之工廠，再生水主要用於製程、鍋爐及冷卻用水，其處理程序為放流水經濾布濾池、超濾(UF)、逆滲透(RO)等再生處理單元，因其處理等級較高，操作成本相對昂貴。而 B 廠放流水回收再利用擬供應再生原水至臺中港工業專區，其處理程序為放流水經快濾及加氯等再生處理單元，避免長距離輸送時管線內產生沉積或滋生細菌，因處理單元簡易，

操作成本相對便宜。C 廠放流水回收再利用擬供應鄰近工廠再生水，以取代部分自來水用量，被取代之自來水用量則交換至南科園區供半導體廠商使用，充分達到水資源經濟有效分配，同時符合南科園區使用一定量再生水之環評承諾。

【關鍵字】污水處理廠、水資中心、再生水、再生水廠、換水、節能減碳

* 環興科技股份有限公司水務工程部	計畫主任
** 環興科技股份有限公司水務工程部	協理

一、前言

根據國外成功推動污水回收再利用案例，再生水大致分成 5 大用途，分別為工業用水、農業灌溉用水、生活雜用水、景觀用水與地下水補注等。以目前台灣需求特性而言，農業灌溉用水因涉及灌排渠道取水點分散、水質需求與安全風險議題，現階段污水處理廠放流水用於農業灌溉用水前，需較長時間試驗，確保放流水重金屬等污染物濃度穩定達標；生活雜用水如澆灌、沖廁用水，除需佈設中水道管線外，尚需建築物內設置二元供水系統配合，較適合小規模案；至於地下水補注，因面臨水質要求嚴格及環保議題推動不易，故現階段以工業用水與景觀用水為較能推廣且可行之用途。

國內每年約有 16 億噸之工業用水需求量，考量處理生活污水之污水處理廠（以下簡稱水資中心）放流水水質及水量穩定，經再生處理後作為工業用水具有供水穩定之優點，且較無人體健康風險之疑慮；此外工業用水具有需水量大、用水集中之特性，採專管供水具經濟效益。行政院除 102 年核定「公共污水處理廠放流水回收再利用示範推動方案」，106 年及 109 年陸續核定「前瞻基礎建設計畫-水環境建設（水與發展）再生水工程推動計畫」及「公共污水處理廠再生水推動計畫」，由經濟部水利署、內政部營建署、相關地方政府及特定園區（含工業區或科學園區）主管機關等單位，於桃園、新竹、臺中、臺南及高雄等地區共同推動 12 座再生水示範計畫（分布如圖 1 所示）。即便示範計畫均取用水資中心放流水作為再生水原水，因再生水用途不同，各示範計畫所設計之再生水處理流程亦有所不同。

北部某水資中心（以下簡稱 A 廠）放流水回收再利用計畫，供水用戶主要為桃園龜山地區、觀音工業區及南坎工業區附近之工廠，用途為製程、冷卻、鍋爐用水。

中部某水資中心（以下簡稱 B 廠）放流水回收再利用計畫，用水簽約對象雖然為臺中港工業專區，但提供再生原水過程中須避免長距離輸送中產生 SS 沉積及滋生細菌。

南部某水資中心（以下簡稱 C 廠）放流水回收再利用計畫，由台南市政府與 C 廠鄰近之工廠簽訂再生水用水契約，同時與南科園區內半導體廠商簽訂再生水使用量交換契約，由南科半導體廠商補貼負擔再生水與自來水水價差額。C 廠再生水用途為製

程、冷卻、鍋爐用水，因非直接供半導體高階製程使用，故無需針對尿素、硼加強去除。

由以上 3 種案例可知，因用途不同，所需再生水處理程序及成本也不同。

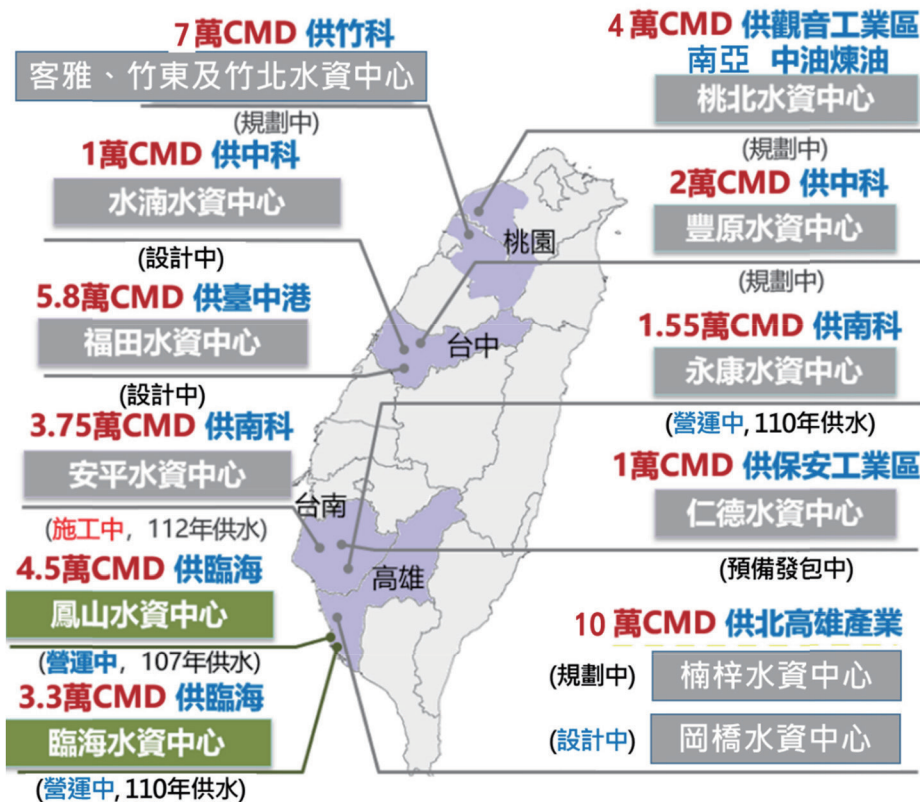


圖 1 台灣推動中再生水開發案例示意圖

二、廢（污）水回收處理技術

廢（污）水處理技術基本方法，為使水與污染物分離，因此設計處理單元應先針對欲去除之污染物特性，再決定採用物理性、生物性或物化性單元或其組合，污水處理廠同時涵蓋物理性的攔污、沉砂、沉澱、過濾、濃縮、脫水，生物性的氧化、吸附、吸收，物化性的中和、混凝、加氯等單元。隨著科技及法令進步，污水處理逐步進化到回收再生層次，須結合到早期造水技術，例如微濾 (MF)、UF、納濾 (NF)、RO、

高級氧化、臭氧、消毒 (HOCl、紫外線 UV)、活性碳 (AC)、離子交換 (IE)、電透析 (ED)、倒極式電透析 (EDR)、電容去離子 (CDI) 等，或者與傳統生物處理結合，例如：薄膜生物反應器 (MBR)、BioNET、流動床生物膜反應器 (MBBR)、膜曝氣生物反應器 (MABR) 等，各類再生水利用類別所需水再生處理技術單元如表 1 所示。

表 1 各類再利用類別所需之水再生技術單元

	去除標的	去除 SS 及膠體		去除溶解性有機物		去除 SS、膠體、溶解性有機物及生物有機物			去除生物性有機物
	技術單元	過濾	MF/UF	吸附	氧化	RO	ED	IE	消毒
工業用水	冷卻用水	○	※	※	※	※	※	※	○
	鍋爐用水	※	○	○	○	○	○	○	○
	製程用水	○	※	※	※	※	※	※	○
農業用水	灌溉用水	○	※	※	※	※	※	※	○
	養殖用水	○	※	※	※	※	※	※	○
環境補注	河川	△	△	△	△	△	△	△	△
	水庫	※	○	※	※	○	○	○	○
	地下水	※	○	※	※	○	○	○	○
生活雜用	沖廁用水	○	※	△	△	△	△	△	○
	景觀澆灌	○	※	△	△	△	△	△	○

- ：表示欲符合再利用標的水質之基本技術單元
- △：表示欲符合再利用標的水質之非必要技術單元
- ※：表示欲符合再利用標的水質之必須考量選用之技術單元

資料來源：財團法人中技社 100 年「推動新生水水源開發成功案例分享 (2011)- 廢污水回收再利用技術評估 (莊順興)」

綜整目前台灣已發包之再生水示範計畫，其再生水處理流程及成本彙整如表 2 所示。

表 2 再生水示範計畫處理流程及成本彙整表

用途	水質需求	再生程序	售水價格	案例
再生水 原水	濁度:2NTU BOD:15mg/L 氨氮:5mg/L		3.5 元/m ³	福田 ↓ 台中港
鍋爐製程用水	濁度:0.2NTU TOC:0.5mg/L 氨氮:0.5mg/L TDS:100mg/L		19.28 元/m ³	臨海 ↓ 中鋼
			18.8 元/m ³	鳳山溪 ↓ 中鋼
高科技製程用水	濁度:0.3NTU TOC:1.0mg/L 硼:0.1mg/L 尿素:5μg/L		23.67 元/m ³	永康 ↓ 南科
			30.92 元/m ³	安平 ↓ 南科

註 1：實際決標營運費率高於售水價格，售水價格係參考「公共污水處理廠再生水推動計畫(110 至 115 年度)」

註 2：高科技製程用水尿素水質要求係參考經濟部水利署 108 年「臺南地區仁德再生水廠開發可行性規劃」

三、北部 A 廠放流水再生案例

A 廠為國內污水下水道 BOT 案所興建之水資中心，占地面積約 15.3 公頃，全期設計處理量每日 20 萬立方公尺，配合污水下水道接管進度分成 4 期興建，處理流程如圖 2 所示，污水經過初級處理、分水後，一部分採去氮除磷活性污泥法程序 (TNCU) 處理，二沉池出水經過 UV 消毒後直接放流；另一部分則採 AO-MBR 處理程序，MBR 之產水經過消毒後可供廠內回收使用 (清洗、消泡、景觀用水)，回收剩餘後水再溢流至放流池，與二沉池出水一起放流。

TNCU 係中央大學針對 A2O 程序採迴流硝化混合液以致增加操作上的動力和設備、降低脫硝槽反應時間之缺點所開發出來。為提供碳源供脫硝所需部分進流水引入各脫硝槽供利用，本程序分 3 段進流，各段進流流量比 $Q1:Q2:Q3$ 以 70%:20%:10%，迴流污泥比以 $0.2Q\sim0.5Q$ ，而處理水出流之前再予提升溶氧，則其放流水之硝酸鹽可被充分去除排出，同時可達避免迴流污泥影響釋磷之現象。

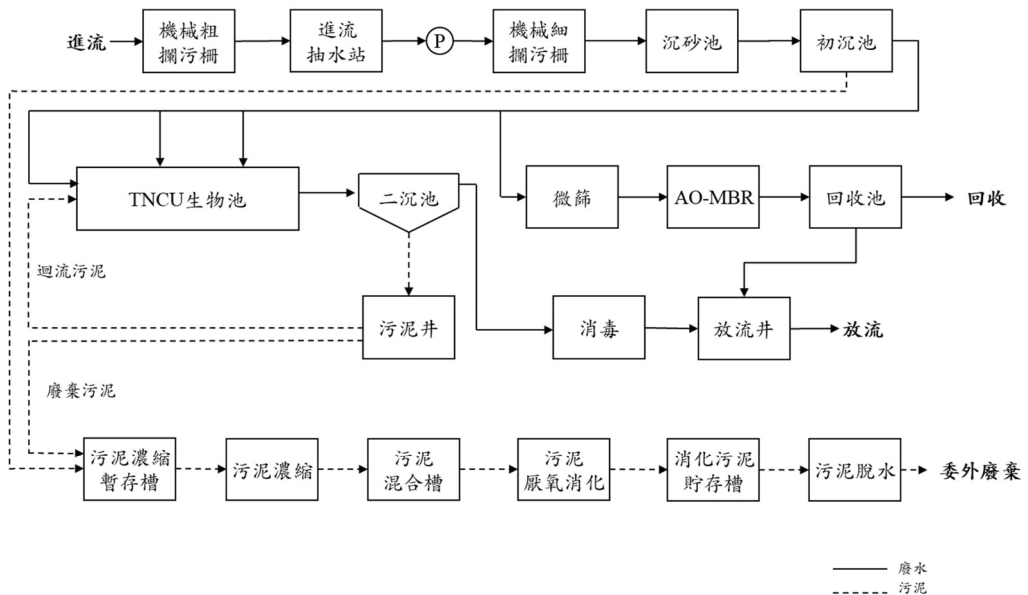


圖 2 A 廠處理流程示意圖

A 廠第二期興建工程已於 109 年底完成，目前設計處理量提升至每日 10 萬立方公尺，其中可以 MBR 處理之污水量達每日 3.1 萬立方公尺，截至 111 年 7 月統計平均放流量約每日 7 萬立方公尺。

A 廠雖然未納入內政部營建署 102 年「公共污水處理廠放流水回收再利用示範推動方案(核定本)」6 座示範廠之一，但所屬地區為工業科技大市，近年因升格為直轄市，大量人口及產業進入，使該地區工業需水量增加，為避免未來氣候變遷影響無法提供工業戶穩定用水，市政府 105 年曾辦理該市再生水評估規劃，先行調查水資中心臨近工業區之再生水需求量，並擬定 A 廠放流水回收再利用供給觀音工業區內使用為優先推動方案。行政院 110 年並核定 A 廠再生水 BTO(Build-Transfer-Operate 建設-移交-營運)計畫之先期計畫，同意引進民間資金、技術及效率，參與放流水再利用計畫之建設。

依照 A 廠再生水 BTO 計畫招標文件內容，再生水廠位於 A 廠用地範圍內，其中再生水廠用地面積占 2.5 公頃，全期設計量每日 11.2 萬立方公尺，第一期至少提供每日 4 萬立方公尺之再生水。預計 113 年 6 月開始供應桃園龜山地區煉油工廠每日 1 萬立方公尺再生水、114 年 6 月供應觀音工業區內石化廠每日 1.5 萬立方公尺再生水及南崁工業區附近工廠每日 1.5 萬立方公尺再生水。

依照 A 廠放流水回收再利用可行性評估及後續作業委託專業服務案，調查桃園地區工業用水需求主要仍以製程、鍋爐及冷卻用水為主，再生水廠出水允收標準如表 3 所示。

表 3 北部 A 廠現況放流水質及再生水廠產水允收標準

項目	現況放流水質	放流水標準	再生水水質標準	允收標準
SS(mg/L)	3.6~15.8	≤ 30	-	< 3
COD(mg/L)	11.5~36.6	≤ 80	-	< 10
pH	6.7~7.1	6.0~9.0	6.0~8.5	6.0~8.5
濁度 (NTU)	1.5*	-	≤ 5	< 0.2
總有機碳 (mg/L)	3.6*	-	≤ 10	< 5
氨氮 (mg/L)	5.75~9.15	≤ 30	≤ 10	< 0.5
導電度 (μS/cm)	440~532*	-	-	< 100

註：現況放流水質，除 * 者截錄自 A 廠放流水回收再利用可行性評估報告放流水質補充調查表，其餘截錄自「全國公共污水處理廠資料管理系統」

再生水廠配合前述產水水質及產水率至少 66% 以上之要求，設計處理程序如圖 3 所示，原水自 A 廠放流水出流井取水，設置管線連接至再生水廠原水池，再以抽水機將原水送進入濾布濾池過濾，出流水以重力流方式流入 UF 進流水貯池，後續以抽水機泵送至 UF 過濾系統處理，隨後進入 UF 產水池，最後以抽水機泵進 RO 處理系統完成再生程序，再生水於 RO 產水池內加氯暫存，之後再以抽水機經輸水管線泵送至再生水用戶。

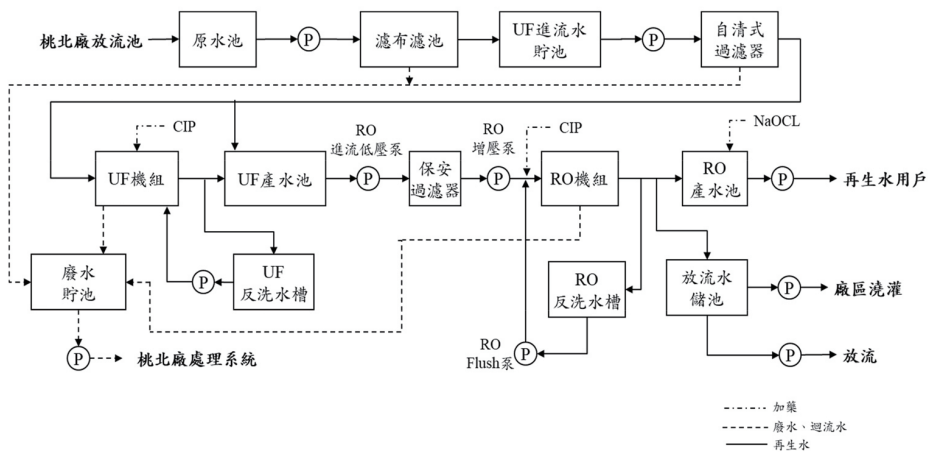


圖 3 A 廠再生水處理流程圖

RO 處理系統排出之濃排水則用於再生水廠區及 A 廠澆灌，澆灌剩餘之濃排水若符合放流水標準就直接排放；若不符合放流水標準，則送回 A 廠處理。UF 處理系統所產生廢水及濾布濾池反洗廢水，則收集於廢水貯池後送回 A 廠處理。

再生水原水取自 A 廠放流水，為符合前處理單元產水水質污泥阻塞指標 (Silt density index, SDI) ≤ 3 、濁度 ≤ 1 之要求，前處理單元設計上採用占地小、易維護之濾布濾池 (濾速 8~16 m/hr) 作為 UF 預處理。在 UF 系統前端並設置可自動反洗之自清式過濾器 (過濾精度 250 micron) 保護後端正壓式 UF 薄膜 (0.1~0.01 μm ，通量 $\leq 60 \text{ LMH}$)，UF 本身可濾除原水中大部份 SS、膠體，提供 RO 最佳進水條件。

UF 產水後設有保安過濾器，又稱為精密過濾器，可對進 RO 前再做 1 次濾前安

全保護，採兩段式 RO 提高回收率，第一段 RO 分離後之濃縮液接續第二段 RO 系統進行第二次分離與濃縮；第一段 RO 與第二段 RO 總產水率達到 75%，即符合用戶要求之水質水量。由於前段 UF 產水中 SS 趨近於零，故 RO 濃縮液可用於沖廁用水等非人體接觸用水；剩餘符合放流水標準直接排放至放流井，不符合則導入 A 廠污水收集系統返送處理。

依照市政府估算，再生水廠因為產水水質要求較高，每噸回收水處理成本約 15 元（含人事費、電費、藥品費、設施維護費、營運管理費、營業稅等），若單純以增設再生水處理廠，估計增加主要設備包括濾布濾池進流泵 2+1 台（100 Hp/ 台）、UF 進流泵 8+2 台（50 Hp/ 台）、RO 進水泵 8+2 台（60 Hp/ 台）、RO 加壓泵 8+2 台（225 Hp/ 台），若再加計加藥系統、公用設施及管理中心，水再生處理廠電力耗能約為 4,200 Hp。每年增加用電量導致碳排放量增加 10,230 噸 CO₂e（產水量每日 4 萬立方公尺）。

四、中部 B 廠放流水再生案例

B 廠為中部地區大型水資中心，占地面積約 13.6 公頃，原規劃全期設計處理量每日 20.2 萬立方公尺，預計分 4 期興建，處理流程如圖 4 所示。第二期興建工程 105 年底完成，目前設計處理量每日 15.2 萬立方公尺，截至 111 年 7 月平均每日放流水量約 9.9 萬立方公尺。

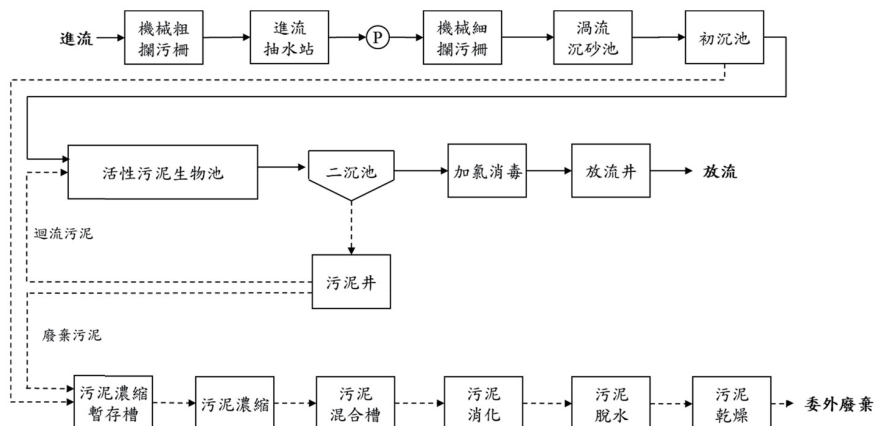


圖 4 B 廠處理流程示意圖

由於臺中港工業專區內鋼鐵公司 101 年環境影響差異分析報告承諾每日利用水資中心 5.8 萬立方公尺放流水供冷卻水塔之補充用水，營建署在 106 年提出，由公務預算出資辦理 B 廠放流水回收再利用統包工程，將原本 B 廠放流水經過快濾及消毒後送至臺中港工業專區內。市政府分別與臺中港工業專區、統包商完成簽約，預計 114 年底提供臺中港工業專區每日 5.8 萬立方公尺放流回收水，由於該水質條件尚無法滿足所有工廠製程使用，若臺中港工業專區有廠商對水質有更高要求，再另由臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司自行辦理再生水廠興建以提供部份廠商較嚴格的要求，使能源有效利用。

考量預留臺中港工業專區用水需求，B 廠放流水回收再利用統包工程規劃用地 0.6 公頃，再生水前處理設施全期設計處理量每日 10.5 萬立方公尺，興建內容至少包含抽水井、重力式快濾池、出水池及機房等土建設施，及相關機械設備管線與機電儀控設施，其處理流程調整如圖 5 所示。放流水回收再利用工程目前快濾採多層濾料定濾率快濾池，並以無煙煤及濾砂作為濾床，濾水器則採雙通道濾水器或長頸濾水器。

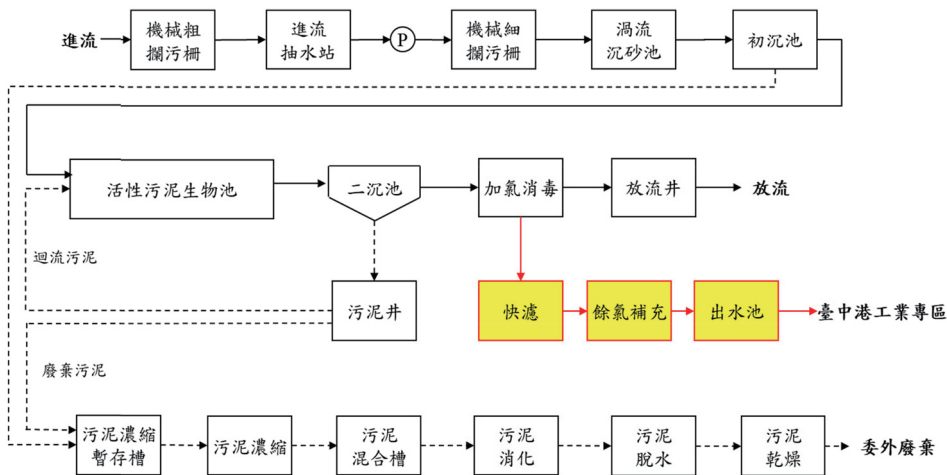


圖 5 B 廠再生處理流程示意圖

B 廠現況放流水質及回收再利用統包工程要求水質整理如表 4 所示，其中現況放流水氨氮濃度仍高於臺中港工業專區再生水前處理設施允收標準，由於 B 廠營運已超

過 20 年以上，廠內設備如生物池鼓風機、散氣設備等已面臨老舊需汰換問題，後續統包商未來除增設快濾單元及加氯系統外，恐須透過既有設備汰換更新，以提高既有生物處理硝化功能，方能符合於臺中港工業專區用水水質要求。

表 4 中部 B 廠現況放流水質及再生水前處理設施允收標準

項目	現況放流水質	放流水標準	再生水 水質標準	允收標準
SS(mg/L)	2.5~5.8	≤ 30	-	≤ 13
BOD(mg/L)	4.6~8.7	≤ 30	-	≤ 30
pH	6.7~7.2	6.0~9.0	6.0~8.5	6.0~8.5
濁度 (NTU)	2.1~4.6	-	≤ 5	≤ 5
總有機碳 (mg/L)	2.7~5.8	-	≤ 10	≤ 10
氨氮 (mg/L)	10.2~27.9	≤ 75(截流 > 20%)	≤ 10	≤ 10

依照市政府估算，B 廠因應臺中港工業專區再生用水所辦理回收再利用統包工程，每噸回收水處理成本約增加 3~3.5 元 (含人事費、電費、藥品費、設施維護費、營運管理費、營業稅等)，若單純以增設再生水前處理設施 (不含既有設備因老舊汰換)，估計增加設備包括快濾池進水泵 5+1 台 (40 Hp/ 台)、快濾池反洗水泵 1+1 台 (75 Hp/ 台)、快濾池反洗鼓風機 1+1 台 (75 Hp/ 台)、出水池攪拌機 1 台 (3 Hp/ 台)，每年增加用電量導致碳排放量增加 1,177 噸 CO₂e (處理量每日 5.8 萬立方公尺)。

五、南部 C 廠放流水再生案例

C 廠占地面積約 10 公頃 (含徵收用地後)，全期設計處理量每日 5.88 萬立方公尺，預計分 4 期興建，第一期處理流程如圖 6 所示，第一期設計處理量每日 1.55 萬立方公尺。

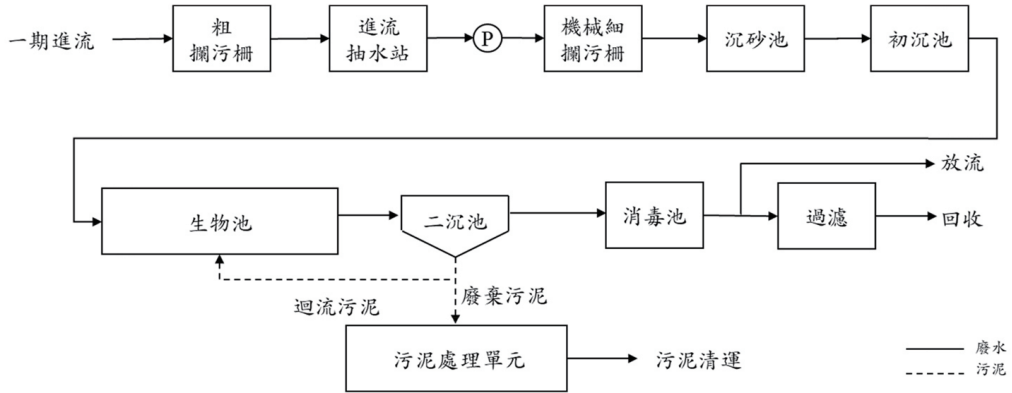


圖 6 南部 C 廠處理流程 (第一期) 示意圖

截至 111 年 6 月 C 廠平均每日放流水量約 0.7 萬立方公尺。

由於南科半導體產業發展迅速，用水量大增，在南科用水計畫第二次修正，要求南科使用再生水量為每日 8.3 萬立方公尺，113 年後由永康、安平、南科自設等 3 座再生水廠每日只能供應 7.3 萬立方公尺，因南科再生水供應量尚有缺口，有必要積極開發新興水源，故 108 年行政院通過「前瞻基礎建設計畫 - 水環境建設 (水與發展) 再生水工程推動計畫」，並核定 C 廠之再生水廠每日可提供最大再生水量為 1 萬立方公尺。

由於 C 廠距離南科至少 30 公里以上，再生水若供應到南科，其輸水管線建設及營運成本皆高，整體經濟效益偏低，且管線施工對環境影響較大。而離 C 廠約 3 公里處之某石化廠有意願使用再生水，因此透過臺南市政府、南科管理局、石化廠及南科半導體廠商，4 方共同簽訂再生水使用量交換契約。亦即原本以自來水為水源供給石化廠，部分水源改用再生水，空餘出來的自來水額度則透過台南地區既有自來水管網系統輸送至南科，大幅降低輸水管線建設成本、營運成本及環境影響，成為國內第一次「以水換水」模式案例，相關用水端與供水端位置如圖 7 所示。



圖 7 南部 C 廠再生水與自來水換水機制四方相對距離示意圖

另外因南科半導體高階製程所需水質有嚴格的硼 ($<0.1 \text{ mg/l}$)、尿素 ($<5 \text{ } \mu\text{g/l}$) 項目要求，一般自來水可符合，而該石化廠所需再生水質項目並無尿素一項，且硼濃度較為寬鬆 ($<1.0 \text{ mg/l}$)，因此再生水廠僅需設置 1 階 RO 即可，處理流程如圖 8 所示，亦降低未來再生水廠建設成本及營運成本，創造雙贏結果。

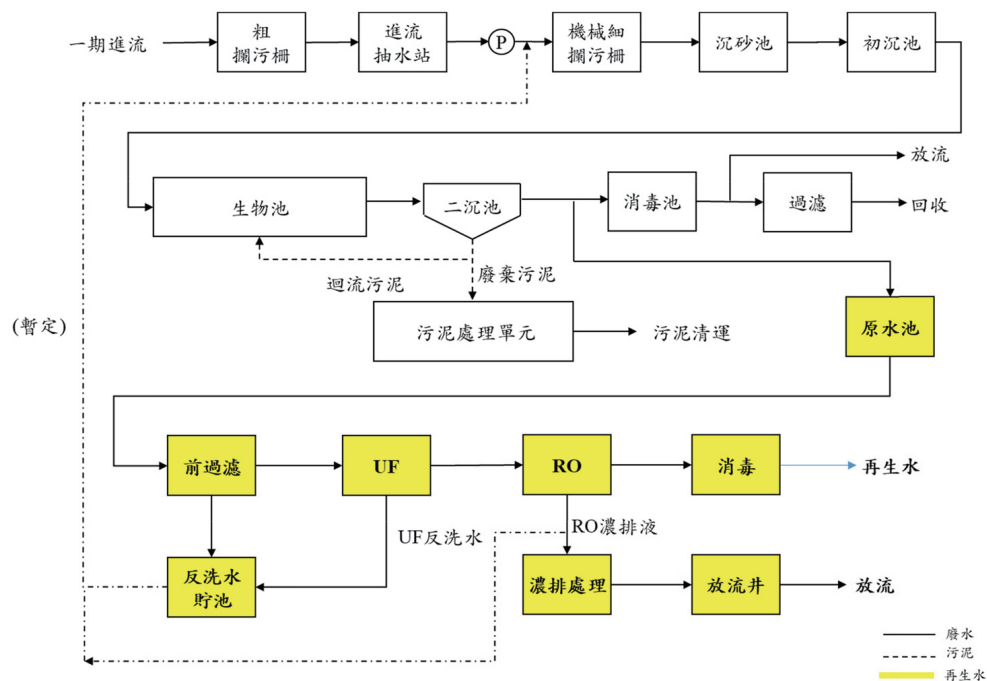


圖 8 C 廠再生處理流程示意圖

六、結語

由於全球面臨氣候變遷影響，傳統水源的供應日益缺乏穩定性，發展新興水源實為刻不容緩之課題。水資中心放流水因具有水量穩定、水質容易處理之特性，若能透過成熟處理技術產出再生水，即可取代一定比例之自來水用量。惟水處理技術本身大多耗能，為兼顧節能減碳，除了研發更高效處理設備外，放流水回收再利用規劃時，應依照再生水用途評估適合之處理流程，避免浪費能源，增加建設及營運成本。

另外，不同用水戶如果水質要求不同時，能透過協商達成用水交換，縮短輸送及處理成本，雙方各自以較低的能耗成本取得適合用水來源，更能有效利用資源，不失為後續積極推動水回收再利用的另一種作法。

雖然水資中心放流量水質具有穩定性，回用於工業用途已成為國內水資源循環再利用之推動政策，但再生水推動與污水下水道發展密不可分，再生水原水來自於水資中心放流水，水資中心放流水又來自於污水下水道接管收集之污水，因此透過污水下水道接管率的提升，方能使水資中心處理量增加，再生水量亦將有所提升，因此未來在進行再生水計畫推動時，應一併考慮污水下水道普及及接管興建期程，方能妥適媒合水資中心及工業用戶用水供需平衡。

參考文獻

財團法人中技社 (2011)，推動新生水水源開發成功案例分享。

經濟部 (2020)，公共污水處理廠再生水推動計畫 (110 至 115 年度) 核定版。

內政部營建署 (2016)，臺中市福田水資源回收中心放流水回收再利用可行性評估及後續作業委託技術服務案第四階段成果報告概念設計報告 (定稿本)。

臺中市政府 (2017)，臺中市福田水資源回收中心放流水回收再利用推動計畫 (核定本)。

臺中市政府水利局 (2020)，臺中市福田水資源回收中心放流水回收再利用統包工程 (含營運維護) - 概念設計報告。

臺中市政府水利局 (2021)，臺中市福田水資源回收中心放流水回收再利用統包工程 (含營運維護) - 基本設計報告書。

桃園市政府 (2021)，桃園北區水資源回收中心再生水 BTO 計畫先期暨建設及財務計畫 (定稿本)。

桃園市政府 (2019)，桃園北區水資源回收中心放流水回收再利用可行性評估及後續作業委託專業服務案可行性評估報告 (定稿本)。

經濟部水利署水利規劃試驗所 (2011)，福田水資源回收中心再生水供應台中港工業專區可行性規劃。

內政部營建署 (2014)，公共污水處理廠放流水回收再利用推動計畫期末報告書 (修正稿)。

寶鼎再生水股份有限公司 (2022)，桃園市政府桃園北區水資源回收中心再生水 BTO 計畫基本設計報告書

臺南市政府水利局 (2021)，仁德再生水廠新建工程統包計畫委託專案管理 (含監造) 技術服務推動計畫



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

本刊特點



1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，至今已發行155期，專業論著已逾1,826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



經濟部工業局 廣告

「工業污染防治」廣邀各界投稿

一、本刊特點

1. 為國內歷史最悠久之環保期刊之一，於 71 年 1 月創刊，至今已發行 155 期，專業論著已逾 1,816 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. 本刊闢有下列類型領域，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/>