

空氣污染與噪音類

## 事業廢棄物流體化床焚化爐之空氣污染 防制設備實廠應用

許豐億\*\*、林洋宇\*\*、邵昆佑\*\*、曾好婷\*\*、高佳君\*\*、韓煌吉\*

### 摘要

據環保署統計，111 年臺灣事業廢棄物的產出量高達 2,145 萬公噸，其種類與性質相當複雜，處理需求也隨之增加，本案之事業廢棄物流體化床焚化爐，為考量節能減碳、環評要求及空氣污染物排放標準日趨嚴格等因素，透過提升既有空氣污染防制設備效能，以達前述之目的，藉由將除酸系統藥劑由乾式消石灰改使用乾式碳酸氫鈉，並搭配磨粉機以提升除酸效率，而除氮系統藥劑則由液態尿素改使用氨水，其具較高的去除效率，且可減少溫室氣體之產生，達到減碳之效益。

除針對廢氣處理系統的藥劑改善外，本案亦導入計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模擬技術，模擬實際運轉後的溫度、流場及物質分布情況，作為注藥點選擇輔助工具，此外，搭配煙囪連續監測系統之空氣污染監測值，利用分散式控制系統 (Distributed Control System, DCS) 將訊號值回傳給現場控制盤計算最佳化學藥品噴入量，可使化學藥劑的使用效益最大化。

## 22 事業廢棄物流體化床焚化爐之空氣污染防治設備實廠應用

空污防制設備改善後之硫氧化物、氯化氫、氮氧化物排放量及氨氣逸散量皆有減少，且溫室氣體排放量亦可降低，使本案達成原規劃減碳、減排、減量之設計目標，符合經濟效益及環境永續之目的。

**【關鍵字】**流體化床焚化爐、碳酸氫鈉除酸系統、氨水除氮系統、節能減碳

---

\* 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 工程師

## 一、緣由與目的

本文應用案例為處理事業廢棄物之流體化床焚化廠(以下簡稱本案)，本案收受之廢棄物主要為一般事業廢棄物及有害事業廢棄物，種類估計逾 90 種以上，可分為固狀、液狀及泥狀等 3 種型態之廢棄物。由於收受之事業廢棄物型態多元且複雜，故爐型選用在相同熱負荷下可進行單一廢棄物或混合廢棄物處理之氣泡式流體化床，透過流體化床流動效應增加反應接觸面積，使燃燒效率增加，且此爐床特性可聚存大量熱能，對廢棄物特性變動的包容性較大，藉由多重進料設備之廢棄物混燒之自動切斷控制系統避免於任何情況下之污染物或燃燒不完全產物對外排放，以妥善處理廢棄物，流體化床基本資料摘要如表 1 所示。

表 1 流體化床基本資料

項目	說明
焚化爐爐型	流體化床焚化爐
焚化處理容量	80 公噸 / 日
操作溫度	850~1,050°C
廢棄物種類	製程有害事業廢棄物 (A 類) 毒性有害事業廢棄物 (B 類) 有害特性認定廢棄物 (C 類) 一般事業廢棄物 (D 類)

廢棄物焚燒會產出 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等酸性氣體，排入大氣經由化學反應造成之雨水酸化或產生其他衍生性污染物，對環境造成不同程度的危害，又因本案營運迄今已 20 年，隨著營運年數不斷上升，機電設備逐年劣化及效能降低，在考量節能減碳、環評要求及空氣污染物排放標準日趨嚴格等因素，故本案研擬更新空氣污染防制設備的除酸及除氮系統的加藥程序，以提升空污防制能力，降低空污排放值，達到環境永續之目標。

## 二、防制設備設計理念及執行成效

考量「空氣污染防制法」及其子法之空氣污染防制規範逐漸加嚴，為降低廢氣對於空氣品質之影響，本案空氣污染防制設備採用去除效率高的碳酸氫鈉除酸技術及氨水除氨系統，以降低硫氧化物、氮氧化物及氯化氫等空氣污染物排放濃度，其所使用的化學藥劑共 2 種，其改善前後差異詳如表 2 所示。

表 2 空氣污染防制設備使用之化藥差異

空氣污染防制設備	改善前使用之化藥	改善後使用之化藥
除酸系統	消石灰	碳酸氫鈉
除氨系統	尿素	氨水

### 2.1 除酸系統應用及設計理念

本案除酸系統原設計以乾式消石灰除酸系統搭配袋濾式集塵器，其具有占地空間小、操作維護容易、單價低等優點，因此在其他實廠中除酸系統仍以使用乾式消石灰較為普及，因事業廢棄物特性複雜，環保法令日趨於嚴格，本案現有乾式消石灰除酸系統已無法符合未來的使用需求，在歐盟工業排放指令 (Industrial Emissions Directive, IED) 中，廢氣中噴入乾式碳酸氫鈉被認為是去除酸性氣體最可靠的技術之一 (Dal Pozzo et al., 2017)，因此為強化本案除酸系統的功能，藥劑由乾式消石灰改使用具有較高酸性氣體去除效率及反應溫度區間廣的乾式碳酸氫鈉 (徐洪陞, 2014)，經研究顯示，搭配觸媒系統使用，可提升碳酸氫鈉反應效率，且可以降低反應灰的生成量 (張君偉等, 2019)。

本案藉由計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模擬技術，評估乾式碳酸氫鈉最佳噴注藥點 (如圖 1~2)，選定藥劑噴入口位置位於本案製程的鍋爐出口至噴霧冷卻塔入口煙道段，以確保藥劑與廢氣混和均勻，規劃設計之廢氣處理流程如圖 3 所示，因一般市售碳酸氫鈉無法直接噴入焚化爐內，考量乾式碳酸氫鈉顆粒大小與空氣污染物的接觸面積會影響其除酸效率，故設置磨粉機 (如圖 4~5) 將乾式碳酸氫鈉粗顆粒磨至粒徑  $D_{90}$  小於  $35 \mu\text{m}$  (細顆粒)，細顆粒則直接噴入煙道中，此做法除可縮短輸送管

線的距離，亦可解決磨粉後乾式碳酸氫鈉再次結塊的問題，乾式碳酸氫鈉進入煙道後在高溫環境中會產生熱反應，使其表面形成多孔隙的狀態（如圖 6~7），以增加表面積與酸性氣體反應，乾式碳酸氫鈉噴入量則以煙道的連續自動監測系統 (Continuous Emission Monitoring Systems, CEMS)  $\text{SO}_x$  及  $\text{HCl}$  即時監測值，藉由分散式控制系統 (Distributed Control System, DCS) 將訊號值傳送至現場控制盤的可編程邏輯控制器 (Programmable Logic Controller, PLC)，其會依據監測值計算乾式碳酸氫鈉的噴入量，進而達到自動控制，以確保酸性氣體能有效被去除，使廢氣排放值符合排放標準。

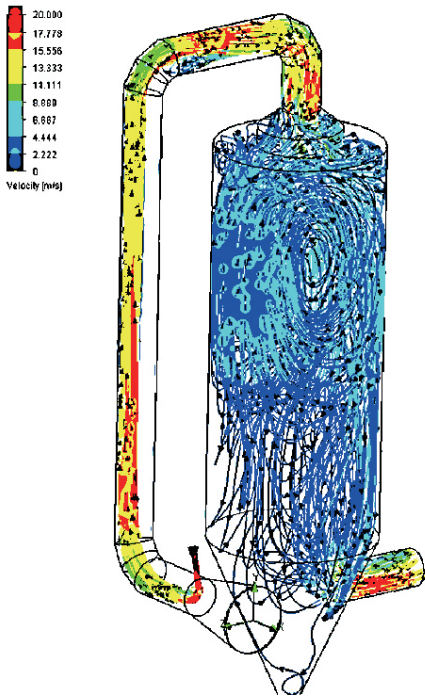


圖 1 CFD 模擬流速變化 (碳酸氫鈉)

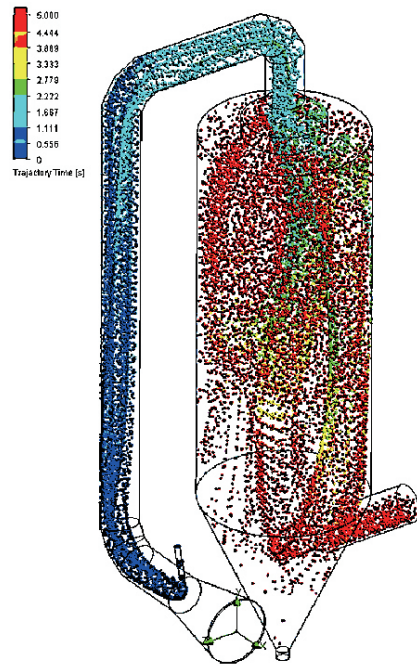


圖 2 CFD 模擬軌跡時間 (碳酸氫鈉)

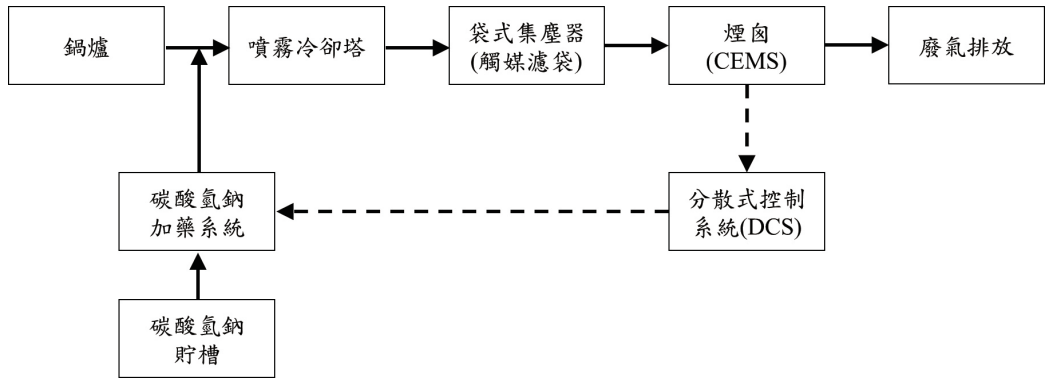


圖 3 除酸系統流程示意圖



圖 4 磨粉機實廠設置



圖 5 磨粉機內部構造

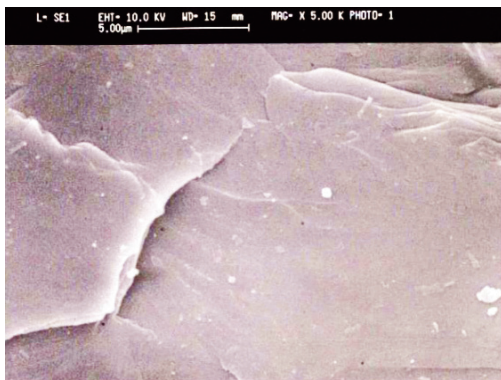


圖 6 碳酸氫鈉表面孔隙 (未加熱)

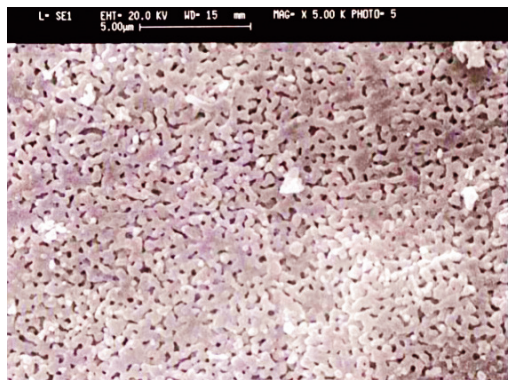


圖 7 碳酸氫鈉表面孔隙 (熱反應後)



## 2.2 除氮系統應用及設計理念

本案原設計除氮系統採用液態尿素，於焚化爐乾舷區噴入爐內，因廢棄物多重進料模式使得氮氧化物排放濃度變化很大。一般氮氧化物主要來源包含燃料型氮氧化物 (Fuel  $\text{NO}_x$ ) 及熱力型氮氧化物 (Thermal  $\text{NO}_x$ )，燃料型氮氧化物 (Fuel  $\text{NO}_x$ ) 主要是廢棄物中氮元素於燃燒過程中氧化生成，熱力型氮氧化物係由高溫下 (1,200~1,600 $^{\circ}\text{C}$ ) 燃燒空氣中氮氣氧化而形成 (簡聰文, 2022)，因一般流體化床燃燒乾舷區操作溫度約 950 $^{\circ}\text{C}$ ，在此溫度下，不易形成熱力型氮氧化物，因此本案主要的氮氧化物來自於燃料型氮氧化物。

由於流體化床操作平均溫度在 850~950 $^{\circ}\text{C}$  之間，此一反應溫度非既有還原劑尿素之最佳反應溫度 (Horton, 2006)，以致還原劑用量增加，加上尿素於高溫分解反應時會釋放  $\text{CO}_2$  及產生少量  $\text{N}_2\text{O}$  (Kim, 2012)， $\text{N}_2\text{O}$  及  $\text{CO}_2$  屬於溫室氣體， $\text{N}_2\text{O}$  全球變暖潛能值 (GWP) 為  $\text{CO}_2$  的 296 倍，也會增加碳排，故還原劑選用氨水可達較高的去除效率 (Østberg et al., 1997) 及減碳之效益。此外， $\text{N}_2\text{O}$  於大氣中會與氧原子反應形成一氧化氮 (NO)，NO 在臭氧層中再次與臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 發生反應並破壞之，故選用氨水的同時也可達到保護臭氧層的效果，因此為強化本案除氮系統的功能，藥劑由液態尿素改使用具有較高去除效率的氨水，經研究顯示，搭配觸媒進行催化還原反應，為有效的除氮技術 (Radojevic, 1998)。

本案經由 CFD 模擬技術分析流體化床燃燒過程和污染物排放，以評估藥劑最適當之製程反應溫度區段，用以規劃藥劑注入點位置，模擬完成之溫度等高線圖 (如圖 8~9 所示)，搭配氨水噴入濃度分布圖，決定最佳之噴入位置，規劃設計之廢氣處理流程如圖 10 所示，通常氨水反應的溫度約在 900~1,100 $^{\circ}\text{C}$  之間，故選擇於流體化床焚化爐乾舷區 (實際溫度約 900~950 $^{\circ}\text{C}$ ) 作為最佳噴入點，此噴入點提供足夠的停留時間可以使氨水與氮氧化物充分混合，確保氮氧化物的去除效率，氨水噴入量則以煙道 CEMS 的  $\text{NO}_x$  即時監測值，於 DCS 系統將訊號值傳送至現場控制盤的 PLC，其會依據監測值計算氨水水溶液的噴入量，以達到自動控制的目的，另空污防制設備袋式集塵器搭配觸媒濾袋，以確保氮氧化物能有效被去除及控制氮的逸散量，避免造成臭味

逸散、煙囪產出白煙及銨鹽沉積在鍋爐爐管上發生積垢等問題，確保可降低 NH<sub>3</sub> 排放濃度，並進一步降低 NO<sub>x</sub> 排放濃度，達到環境友善之目的。

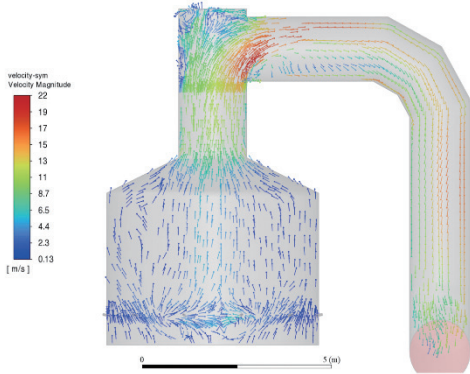


圖 8 CFD 模擬流速變化 (氨水)

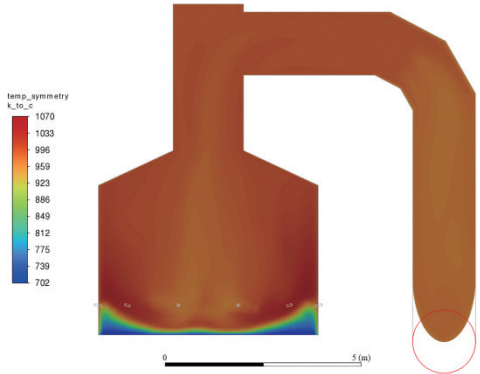


圖 9 CFD 模擬溫度變化 (氨水)

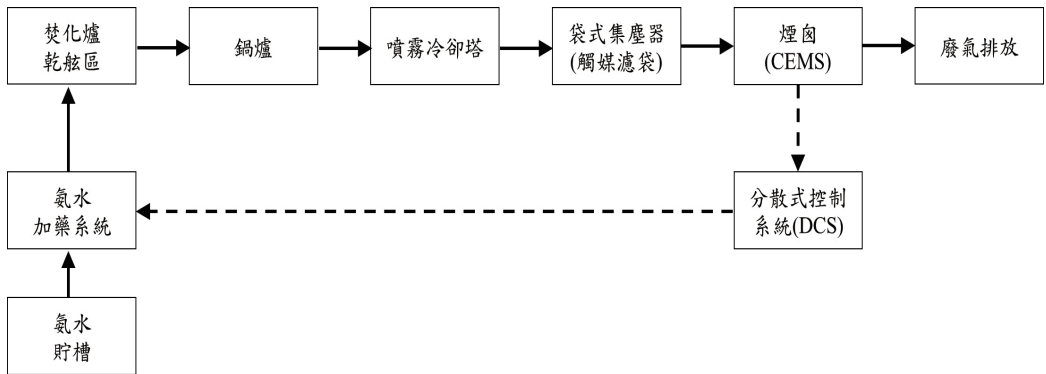


圖 10 除氮系統流程示意圖

### 2.3 除酸、除氮系統執行成效

本案以自動連續監測系統監測結果比較改善前 (2022/01~04) 與改善後 (2023/01~04) 之差異，由表 3 可得每月硫氧化物排放濃度平均值可降低 65%，排放量減少 589.30 公斤 (約減少 7.07 公噸/年)，計算焚化每公噸廢棄物之硫氧化物排放量由 0.40 公斤降至 0.13 公斤，由表 4 可得每月氯化氫排放濃度平均值可降低 50%，排放量減少 14.5 公斤 (約減少 0.17 公噸/年)，計算處理每公噸廢棄物之氯化氫排放量



由 0.010 公斤降至 0.004 公斤；除氮系統由尿素改用氨水，由表 5 可得每月氮氧化物排放濃度平均值可降低 47%，平均排放量減少 498.3 公斤（約減少 5.98 公噸 / 年），計算焚化每公噸廢棄物之氮氧化物排放量由 0.44 公斤降至 0.23 公斤，由表 6 可得每月氨氣逸散濃度平均值可降低 61%，平均逸散量減少 18.9 公斤（約減少 0.23 公噸 / 年），計算焚化每公噸廢棄物之氨氣逸散量由 0.013 公斤降至 0.005 公斤。

導入 CFD 模擬技術模擬流體化床的溫度及流場分布，選擇藥劑噴入點並模擬還原劑擴散，除可有效去除氮氧化物外，亦可減少噴入尿素所反應生成的二氧化碳排放量約 30 公噸 CO<sub>2</sub>e / 年，達成原規劃減碳、減排、減量之設計目標，使本案朝環境永續處理更邁進一步。

表 3 除酸系統 - 硫氧化物減量成效

項目	2022/01~04	2023/01~04	減量成效
硫氧化物月平均值 (ppm)	22.2	7.8	65%
硫氧化物排放量 (公斤 / 月)	866.6	277.3	589.30
廢棄物焚化處理量 (公噸 / 月)	2,181	2,070	-
每公噸廢棄物焚化 - 硫氧化物排放量 (公斤)	0.40	0.13	0.27

表 4 除酸系統 - 氯化氫減量成效

項目	2022/01~04	2023/01~04	減量成效
氯化氫月平均值 (ppm)	1.0	0.5	50%
氯化氫排放量 (公斤 / 月)	22.7	8.2	14.5
廢棄物焚化處理量 (公噸 / 月)	2,181	2,070	-
每公噸廢棄物焚化 - 氯化氫排放量 (公斤)	0.010	0.004	0.006

表 5 除氮系統 - 氮氧化物減量成效

項目	2022/01~04	2023/01~04	減量成效
氮氧化物月平均值 (ppm)	34.4	18.3	47%
氮氧化物排放量 (公斤 / 月)	965.0	466.7	498.3
廢棄物焚化處理量 (公噸 / 月)	2,181	2,070	-
每公噸廢棄物焚化 - 氮氧化物排放量 (公斤)	0.44	0.23	0.21

表 6 除氮系統 - 氮氧化物減量成效

項目	2022/01~04	2023/01~04	減量成效
氨氣月平均值 (ppm)	2.8	1.1	61%
氨氣逸散量 (公斤 / 月)	28.9	10.0	18.9
廢棄物焚化處理量 (公噸 / 月)	2,181	2,070	-
每公噸廢棄物焚化 - 氨氣逸散量 (公斤)	0.013	0.005	0.009

### 三、結論與建議

#### 3.1 結論

在本案廢氣處理系統升級除酸 (碳酸氫鈉) 及除氮系統 (氨水) 的加藥程序, 以面對複雜的廢棄物種類, 藉由導入此先進的控制技術, 除可與嚴謹的空氣污染排放標準接軌外, 亦達到友善環境的目的。本次化學藥劑改使用乾式碳酸氫鈉及氨水, 搭配煙囪連續監測系統的空氣污染監測值, 利用 DCS 系統將訊號值回傳給現場控制盤的 PLC 計算最佳化學藥品噴入量, 以合理範圍使用化學藥劑。乾式碳酸氫鈉有易結塊之特性, 亦需注意其噴入廢氣煙道中的顆粒徑大小, 研磨粒徑越細去除效率越高, 氨水相較於尿素屬於碳排放量較少的化學藥劑, 另經由計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模式模擬分析流體化床燃燒過程和污染物排放分析, 選擇本案製程中最佳的化學藥品噴入點, 以確保藥劑能與廢氣充分混和均勻, 能有效降低酸性氣體及氮氧化物, 達到符合經濟效益及降低污染物排放量環境永續之目的。

#### 3.2 建議

與原設計的除酸藥劑乾式消石灰、除氮藥劑液態尿素相比, 乾式碳酸氫鈉及氨水操作成本仍較高, 建議評估時除藥劑經濟成本外, 亦需考量環境效益, 如注入藥劑的溫度區間、使用量、噴入粒徑及煙道廢氣中混和情況, 皆會影響污染物排放量, 另本案搭配之觸媒濾袋亦需考量其使用壽命、濾袋毒化及粉塵造成的磨蝕與阻塞等問題。

## 參考文獻

- 古家宇 (2018)，崑鼎操作流體化床焚化爐－維持連續五年滿載運轉，崑鼎電子報，第 4 期。
- 徐洪陞 (2014)，都市垃圾焚化爐廢氣處理系統除酸功能穩定度提升之研究。
- 張君偉 (2019)，碳酸氫鈉於廢棄物焚化爐除酸系統之應用，工業污染防治，第 147 期，p207~216。
- 簡聰文 (2022)，探討東部某水泥廠改善 SNCR 煙氣脫硝之效益，中華民國環境工程學會 2022 空氣污染控制技術研討會。
- Dal Pozzo, A., Guglielmi, D., Antonioni, G., & Tugnoli, A. (2017). Sustainability analysis of dry treatment technologies for acid gas removal in waste-to-energy plants. *Journal of Cleaner Production*, 162, p1061~1074.
- Horton J., Miller, F.M. (2006). Use of SNCR to control emissions of oxides of nitrogen from cement plants. 2006 IEEE Cement Industry Technical Conference Record, p 316 – 344.
- Radojevic, M. (1998). Reduction of nitrogen oxides in flue gases. *Environmental Pollution*, 102(1), p 685-689.
- Østberg, M., Dam-Johansen, K., & Johnsson, J. E. (1997). Influence of mixing on the SNCR process. *Chemical Engineering Science*, 52(15), p2511~2525.
- Kim, J. M. (2012). A Study on the Reduction Mechanism of NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O in Urea-SNCR Process (Doctoral dissertation, School of Environmental Engineering, The University of Seoul).

## 32 事業廢棄物流體化床焚化爐之空氣污染防制設備實廠應用