

空氣污染與噪音類

## 應用先進技術監測隱形汞空氣污染排放 與相對應之去除技術

劉鎧銘\*、柯忠佑\*、白斌傑\*\*

### 摘 要

台灣多年由於工業化、都市化的巨大環境變遷影響，也間接提升人民對生活居住品質的意識。我國政府目標於 2025 年燃氣發電比例提升至 50%，而燃煤電力為 30%，因此在「增氣減煤」趨勢下，燃煤電力部門對污染物減排與發電效率提升勢在必行，否則燃煤電廠面臨退場機制。

根據我國環保署專案報告指出 (2021)，在國內汞年排放量約 1.75 公噸，主要來源為電力能源產源 (即燃煤電廠及燃煤汽電共生鍋爐) 與水泥旋窯。也因此目前我國汞排放標準有針對特定業別之廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準、電力設施空氣污染物排放標準以及廣泛適用的固定污染源有害空氣污染物排放標準來管制各行業。

燃煤發電燃燒產生的汞污染物，以不同型態之氣態汞 (元素汞 ( $\text{Hg}^0$ )、氧化汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ )、粒狀汞 ( $\text{HgP}$ )) 循環流布於空氣、土壤、水體。對於汞的去除技術，除既有空污防制設備 (SCR、FGD、ESP 或 FF) 已具備一定程度的除汞效果，但此皆非專門針對汞的去除技術。煤種的不同，會影響氣態汞的比例，現有氣態汞去除技術有燃料鹵素添加法、觸媒氧化法 (高汞氧化觸媒)、吸附劑注入法、Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 法等，但欲達到除汞最佳化，就需仰賴可同時量測元素汞與氧化汞之汞連續自

### 34 應用先進技術監測隱形汞空氣污染排放與相對應之去除技術

動監測設施，評估元素汞與氧化汞於煙氣中的比例，搭配環境法令面、現地空間、既有空污防制設備、廢棄物 / 廢水處理、經濟效益、運維難易等面向進行選擇；現今已有商業化汞連續自動監測技術如 Zeeman AAS、CVAAS、CVAFS、Au-CVAFS，國內也有燃煤電廠於 2021 年完成 3 套 CVAFS 汞連續自動監測設施，並以 USEPA Method 30B 方法手動採樣方法平行比對驗證汞連續自動監測設施準確性，其結果顯示汞連續自動監測設施數據具有可信度。也因此該電廠於其他廠區既有燃煤機組 AQCS(Air Quality Control System)改善工程的同時，進行 6 套 CVAFS 汞連續自動監測設施安裝。

---

#### 【關鍵字】汞、汞連續自動監測設施

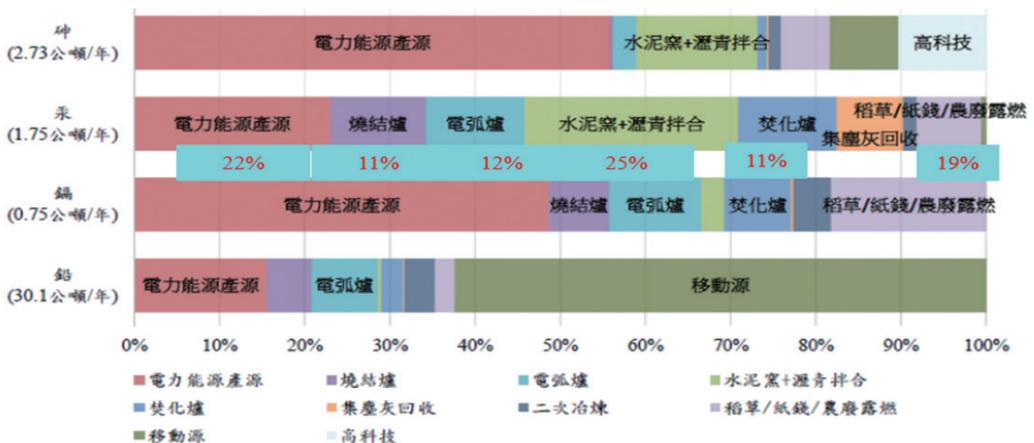
- |    |                 |          |
|----|-----------------|----------|
| *  | 台灣賽默飛世爾科技股份有限公司 | 環境製程監測部門 |
| ** | 肯塔基大學土木系環工組     | 博士       |

## 一、前言

台灣多年來由於工業化、都市化的巨大環境變遷影響，也間接提升人民對生活居住品質的意識，因而對於居住環境的空氣品質特別關注。我國環保機關亦致力於改善空氣品質，於 2016 年行政院特別召集環保署及相關部會針對空氣污染防制召開策略規劃會議，並於 2017 年通過「空氣污染防制策略」全力改善空氣品質，以期建立一個永續、美麗又健康的臺灣。

隨著我國政府積極推動 2025 非核家園、2050 淨零排放能源轉型政策，目標於 2025 年燃氣發電比例提升至 50%，而燃煤電力為 30%，因此在「增氣減煤」趨勢下，燃煤電力部門對污染物減排與發電效率提升勢在必行，否則燃煤電廠面臨退場機制。

燃煤發電是一種會影響空氣品質的發電模式，燃燒排放污染物主要有二氧化硫、氮氧化物、汞以及各種懸浮微粒，其中汞議題之所以熱門，主因為汞的沸點很低，在燃燒過程中它都是以氣態存在，循環流布於空氣、土壤、水體，多重相的轉變增加排放管理複雜度，成為全球性關注的污染問題。根據我國環保署專案報告(行政院環境保護署(2021))指出，在國內汞年排放量約 1.75 公噸，各行業別排放占比如圖 1 所示，主要來源為電力能源產源(即燃煤電廠及燃煤汽電共生鍋爐，22%)與水泥窯(25%)。也因此我國汞排放標準有針對特定業別之廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準、電力設施空氣污染物排放標準以及廣泛適用的固定污染源有害空氣污染物排放標準。



資料來源：行政院環境保護署(2021)，固定污染源戴奧辛及重金屬空氣品質監測及輔導減量計畫，EPA-110-FA12-03-A124。

圖 1 國內 2020 各重金屬之主要排放源

汞跟一般有機性物質不同，它屬物質不滅定律，從固相變成氣相、再從氣相變回固相。附著在粒狀物的汞基本上透過 ESP(electrostatic precipitator) 或 FF(fabric filter) 集塵防制設備就能控制，但氣態汞(元素汞/氧化汞)就很麻煩，因為它本身很不活潑，一旦排放就會隨著大氣層在全球流通。

由於元素汞難溶於水，但氧化汞易溶於水，本文將說明「煙道中汞連續監測系統(Hg CEMS)」來監測元素汞和氧化汞這兩者濃度，透過後端連續監測數據來做為最佳汞控制技術的選擇。

## 二、汞分析量測技術

### 2.1 量測技術

美國環保署於 2011 年年底針對火力發電廠制訂有害空氣污染物排放標準，即 Mercury and Air Toxics Standards (MATS)，並於 2012/4/16 生效，對於重金屬部份分為汞與非汞重金屬進行管制，而非汞重金屬則可以監測粒狀物替代，對於汞重金屬管制標準如表 1 所示【Environmental Protection Agency, 40 CFR Part 63】。其中針對 Solid fuel/IGCC units 汞的監測依不同條件採用汞連續自動監測設施(Hg Continuous Emission Monitoring System, Hg CEMS) 或連續採樣/手動分析的吸附劑採樣分析法(Sorbent trap monitoring)。其他受要求的對象包含水泥製造業(Portland Cement MACT) 需於 2015/9/9 完成、焚化爐系列(Commercial/Industrial Solid Waste Incinerators, CISWI) 需於 2013/8/7 完成、鍋爐(Boiler MACT) 需於 2016/1/31、下水道污泥焚化爐(Sewage Sludge Incinerators) 需於 2016/3/21 完成【Robin Segall (2015)】。

表 1 美國 MATS 法規既有 EGU 設施汞排放標準

	排放限值
燃煤機組	$1.30 \times 10^{-2}$ lb/GWh
IGCC	$3.0 \times 10^{-2}$ lb/GWh
液態燃油裝置 -continental (Liquid oil-fired unit)	$2.0 \times 10^{-3}$ lb/GWh

	排放限值
液態燃油裝置 -non-continental (Liquid oil-fired unit)	$4.0 \times 10^{-4}$ lb/GWh
固體衍生燃油裝置 (Solid oil-derived fuel-fired unit)	$2.0 \times 10^{-3}$ lb/GWh

目前排放管道中汞的採樣分析方法可分為傳統的手動採樣分析與吸附捕捉管 (Sorbent trap monitoring) 分析，其後續採集樣品分析以冷蒸氣原子吸收光譜法 (Cold-Vapor Atom Absorption Spectroscopy, CVAAS) 或冷蒸氣原子螢光法 (Cold-Vapor Atom Fluorescent Spectroscopy, CVAFS) 進行分析定量。國際上常見手動採樣分析法有美國 USEPA Method 29、Method 101A 及 ASTM D-6784-02 Ontario Hydro Method (OHM) 以吸收液進行重金屬或汞的吸收採樣並搭配 CVAAS，在我國則有排放管道中重金屬檢測方法 (NIEA A302.73C)、排放管道中汞檢測方法 (NIEA A303.70C)；而吸附捕捉管方法主要為 USEPA Method 30B (DETERMINATION OF TOTAL VAPOR PHASE MERCURY EMISSIONS FROM COAL-FIRED COMBUSTION SOURCES USING CARBON SORBENT TRAPS)。

而汞連續自動監測技術相對於有手動採樣分析方法更能即時監測，主要分析原理係將氧化汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ ) 於採樣點以轉化器進行轉化，分析得到總汞 (T-Hg Total Hg)，另未經轉化器者，為元素汞 ( $\text{Hg}^0$ )，再將總汞測值減去元素汞測值即得到氧化汞測值，常見分析技術如下，各廠牌彙整如表 2：

表 2 汞連續監測技術彙整表

品牌	Thermo Fisher <sup>註1</sup>	TEKRAN <sup>註2</sup>	SICK <sup>註3</sup>	ENVEA <sup>註4</sup>
型號	Mercury FreedomTM	3300Xi	MERCEM300Z	SM-4
系統結構	模組化設計，包含加熱式樣品傳輸管線、汞分析儀 80i、汞校準儀 81i、汞採樣管控制器 82i、汞採樣管 85、機櫃、附屬氮氣稀釋系統	模組化設計，2537Xi 汞分析儀、3321 樣氣預處理與控制單元、3310Xi 汞校準儀、3342 採樣管	採樣管、帶加熱式雙樣品傳輸管線、汞分析儀 (高溫轉化器 + 光學單元)、射流泵、內置式測試氣體發生器 (選配)	採樣管、採樣管控制模組、稀釋單元、低溫觸媒轉化器、加熱樣品傳輸管線、金汞齊濃縮吸附單元、汞分析儀

38 應用先進技術監測隱形汞空氣污染排放與相對應之去除技術

品牌	Thermo Fisher <sup>註1</sup>	TEKRAN <sup>註2</sup>	SICK <sup>註3</sup>	ENVEA <sup>註4</sup>
採樣方式	稀釋抽取法	稀釋抽取法	直接抽取法	稀釋抽取法
量測原理	CVAFS	CVAFS+ 純金汞齊富集	Zeeman AAS	CVAAS+ 純金汞齊富集
樣品傳輸管線溫度	120°C 樣品傳輸管線	180°C 樣品傳輸管線	185°C 樣品傳輸管線	120°C 樣品傳輸管線
校正方式	具 NIST 追溯的內置汞源 (81i)，可進行元素汞與總汞校準；轉化效率由內置 Hg 源產生的 Hg 蒸氣與已知濃度 Cl <sub>2</sub> (標準氣體) 氧化成已知濃度 HgCl <sub>2</sub>	具 NIST 追溯的內置汞源 (3310Xi)，可進行元素汞與總汞校準；轉化效率由 3425HgCl <sub>2</sub> 產生器產生 (HCl+Hg)	內置測試氣體發生器 (有三種濃度可以設定) 執行校正，選配 HgCl <sub>2</sub> 溶液搭配蒸發器 (vaporizer) 進行轉化效率	具 NIST 追溯的內置汞源，選配離子汞氣體發生器進行轉化效率；也可使用來自外部標準器體如 HovaCal
量測成分	元素汞、氧化汞、總汞	元素汞、氧化汞、總汞	總汞	總汞
量測範圍	0~600 µg/m <sup>3</sup> (effective range before dilution)	0.01~15 µg/m <sup>3</sup> (最大可測 450 µg/m <sup>3</sup> ，稀釋比 30:1 時)	0~1,000 µg/m <sup>3</sup>	0~1,000µg/m <sup>3</sup>
水分與 SO <sub>2</sub> 干擾	無	無	有	有
排放管道實際安裝之數量 (套)	9 套	無	無	無

註 1：Thermo Scientific™ Mercury Freedom System，

<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/80I>

註 2：Series 3300Xi Mercury CEM，

<https://www.tekran.com/products/flue-gas-cem/3300xi-speciating-cem/>

註 3：MERCCEM300Z，

<https://www.sick.com/ag/en/gas-analyzers/extractive-gas-analyzers/mercem300z/c/g175658>

註 4：SM-4, mercury monitor，

<https://www.envea.global/s/process/mercury-monitors-process/sm-4/?compare=9077>

1. Zeeman AAS(Zeeman atomic absorption spectrometry) 塞曼原子吸收光譜法：  
以原子吸收光譜於 254nm 進行測定，無須預富集 (preconcentration) 與脫附，並使用塞曼效應背景校正法進行背景扣除，在中低濃度量測時，消除 SO<sub>2</sub> 干擾，儘管此方法可能有效，但是系統的檢測限和結果的準確性將隨著樣品中存在的背景干擾量而變化，而且使用的燈泡壽命短。【TEKRAN】
2. Cold-Vapor Atomic Absorption Spectroscopy (CVAAS) 冷蒸汽原子吸收光譜：  
使用金富集預濃縮 (gold preconcentration) 技術搭配原子吸收光譜，儘管不需要氬氣，金對汞的吸收保留能力很好，可消除酸性氣體 (SO<sub>2</sub>) 產生的干擾，相對的也會將其他化合物一併吸收，並於分析過程造成干擾。【TEKRAN】
3. Cold-Vapor Atomic Fluorescence Spectroscopy (CVAFS) 冷蒸汽原子螢光光譜：  
利用汞原子吸收波長 253.7nm 的紫外光形成激態汞，當激態汞回到汞原子再發射出所吸收的能量，稱為螢光，其強度由光電倍增管監測，發出的螢光強度與 Hg 濃度成正比。由於紫外光經過濾使其僅允許波長 253.7nm 通過，因此此方法並無 SO<sub>2</sub> 干擾。【Dennis L. 等 (2004)】
4. Au-Cold-Vapor Atomic Fluorescence Spectroscopy (Au-CVAFS) 冷蒸汽原子螢光光譜：  
使用分析原理同 CVAFS，使用金汞齊富集技術，以金將汞氣體吸附捕捉後再加熱使汞蒸發，經載氣氬氣輸送至原子螢光發射器進行分析。可消除氧氣和氮氣影響。【Dennis L. 等 (2004)】

## 2.2 現有臺灣實績汞連續監測分析儀介紹

我國某電廠於 2020 年完成國內第一套汞連續監測設施安裝 (行政院環保署,2021)，並接續於 2021 年第一季完成第二、三套汞連續監測設施。該電廠使用監測設施為 Thermo Fisher Scientific Mercury Freedom<sup>TM</sup> System，整套汞監測系統由 Model 85 Hg Probe、Model 80i Hg Analyzer、Model 81i Hg Calibrator 和 Model 82i Probe Controller 組成，如圖 2。使用分析方法為 CVAFS，搭配該系統特有氬氣稀釋系統作為稀釋氣源，系統最低偵測極限可達 0.008 μg/m<sup>3</sup>(分析儀偵測極限 1 ng/m<sup>3</sup>)。



**Sample  
Analysis**



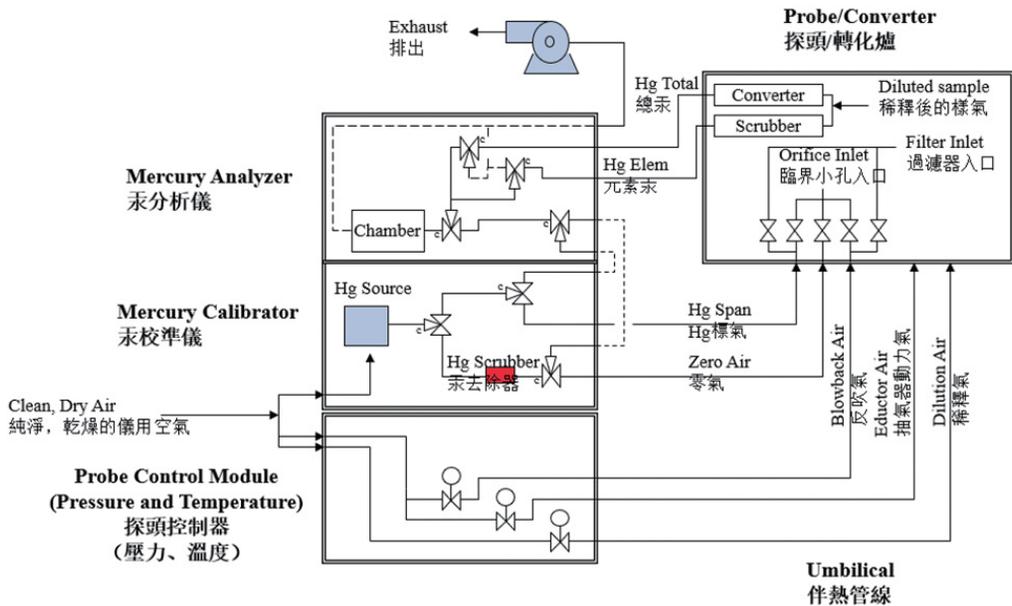
**Model 85 Hg  
Probe**

**Sample Extraction, Dilution &  
Conversion**

資料來源：柯忠佑 (2021)，「煙氣汞排放連續監測系統介紹」，「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」，台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會

**圖 2 Thermo Fisher Scientific Mercury Freedom™ System 現場安裝**

此系統由樣氣處理、樣氣抽取、樣氣傳輸、汞分析儀和校準系統 5 部分構成，稀釋抽取採樣方法，即時測量，比金汞齊富 (Au-CVAFS) 批次量測能更快地反應現場狀況，有利於防制設備控制；氧化汞在排放管道取樣探頭內部即轉化，減少傳輸損失。整體架構如圖 3。



資料來源：柯忠佑 (2021)，「煙氣汞排放連續監測系統介紹」，「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」，台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會

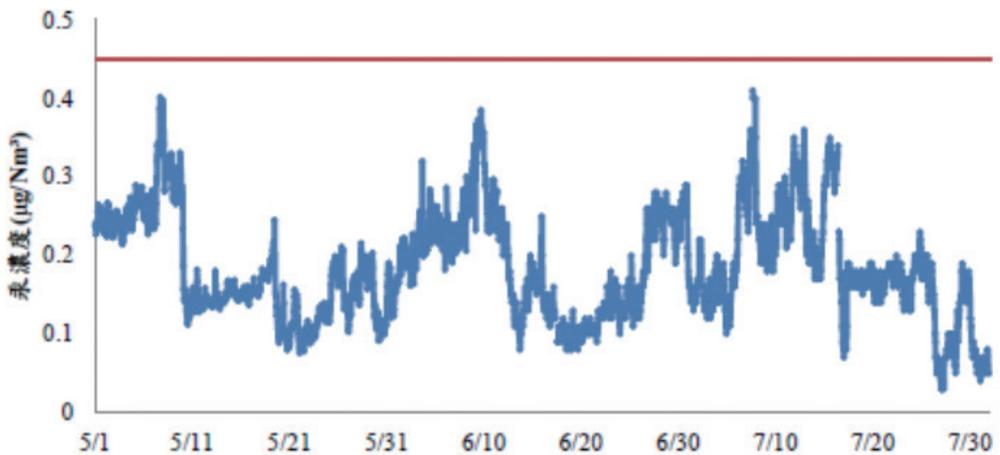
圖 3 Thermo Fisher Scientific Mercury Freedom™ System 架構

相較於 Au-CVAFS 原理系統，Thermo Fisher Scientific Mercury Freedom™ System 無需金汞齊富集系統，除了可實現即時數據傳輸提供監測數據，無使用氫氣、去離子水等附加設施，提高系統易用性，也避免催化管、金汞齊等部件的更換，降低維護成本。對於品保部分，系統校正使用具 NIST-Traceable 可追溯之汞蒸氣發生器，確保分析數據品質可靠。

採樣管 (Probe) 採用不銹鋼殼體，包含轉化器、氧化器、稀釋模組與採樣探棒，為防止煙道內含水氣凝結，所有關鍵部件（過濾器、稀釋模組、氣動抽氣器）都安裝在鋁加熱塊中，可保持加熱溫度在 250℃。該採樣管由採樣管控制器進行控制，汞校準儀產生標準汞氣體濃度經採樣管控制器自動對採樣管進行系統校正作業，並同時確認稀釋比例，採樣管控制器亦可對採樣管進行定時反吹作業、各式溫度設定（轉化器 /

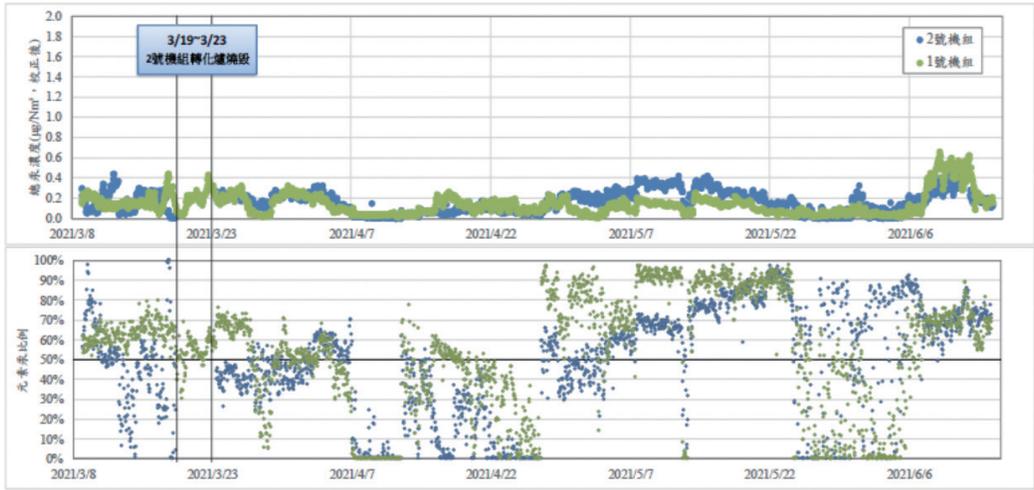
氧化器 / 伴熱管)。

根據該電廠於 2020 年 5 月至 7 月監測結果 (圖 4)(行政院環保署,2021), 3 號機汞排放濃度低於  $0.5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  以下; 另由該電廠 2021 年 08 月 27 日參加「我國的 HAPs 排放監測與控制研討會」中, 發表「台電火力電廠 HAPs 排放盤點與健康風險評估」報告內, 1 號與 2 號機汞排放濃度大多低於  $0.5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  以下 (圖 5), 且由於 Thermo Fisher Scientific Mercury Freedom™ System 可同時區別元素汞與氧化汞, 因此可提供該電廠即時元素汞所占比例。同時該電廠為確認汞連續自動監測系統準確性, 同時以 USEPA Method 30B 方法手動採樣方法平行比對驗證儀器準確性, 總共執行 13 筆數據, 其結果  $R^2=0.8133$ , 兩者數據相近, 顯示汞連續自動監測設施數據具有可信度 (圖 6)。



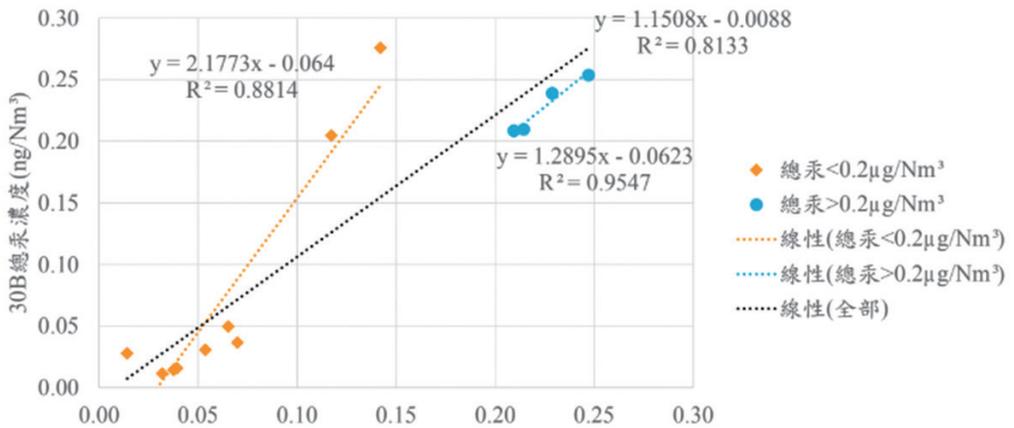
資料來源：行政院環境保護署 (2021), 固定污染源戴奧辛及重金屬空氣品質監測及輔導減量計畫, EPA-110-FA12-03-A124

圖 4 電廠 3 號機汞連續監測結果



資料來源：吳政宏 (2021)，「台電火力電廠 HAPs 排放盤點與健康風險評估」，「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」，台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會

圖 5 電廠 1 號 / 2 號機汞連續監測結果與元素汞比例變化圖



資料來源：吳政宏 (2021)，「台電火力電廠 HAPs 排放盤點與健康風險評估」，「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」，台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會

圖 6 電廠使用 USEPA Method 30B 方法手動採樣方法平行比對結果

#### 44 應用先進技術監測隱形汞空氣污染排放與相對應之去除技術

另由於現行我國固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法並未將汞氣狀污染物列入監測項目，因此現有臺灣實績汞連續監測分析儀性能規範主要係參考美國環保署 40 CFR Part 63 Subpart UUUUU—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Coal- and Oil-Fired Electric Utility Steam Generating Units 進行測試，其相關性能規格如表 3。

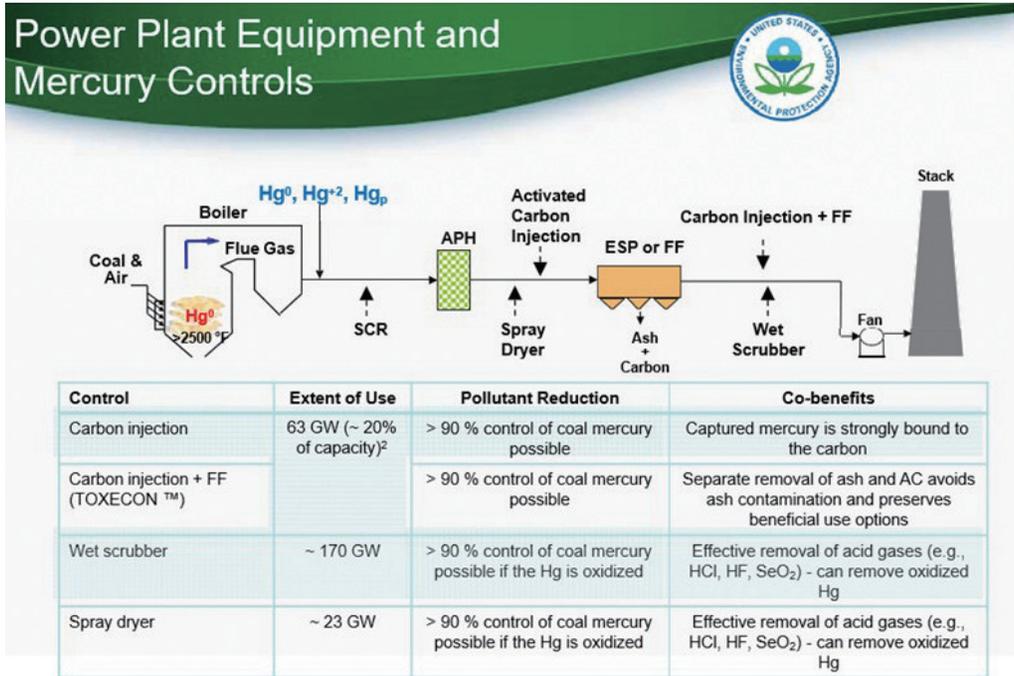
表 3 汞連續監測分析儀性能規格

項目	主要規格	替代規格	替代條件
連續 7 日校正誤差 測試標準 7-days Calibration Error Test	$ R-A  \leq 5\% \text{ of Span value (連續 7 日, 每一天的 Zero 與 Span Gas)}$ 註：使用元素汞當標準氣體 註：R 為標準氣體濃度值， A 為分析儀讀值	$ R-A  \leq 1.0 \mu\text{g/scm}$	任何一天都可以
系統線性確認 (3 種濃度) Linearity Check	$ R-A_{\text{avg}}  \leq 10.0\% \text{ of the reference gas Concentration(3 種低、中、高 參考氣體濃度值)}$ 註：使用元素汞當標準氣體 註：R 為標準氣體濃度值， Aavg 為特定標準氣體 濃度下分析儀反應的平均值	$ R-A_{\text{avg}}  \leq 0.8 \mu\text{g/scm}$	任何參考氣體下都可以
系統轉化率確認 (3 種濃度) 3-Level System Integrity Check	$ R-A_{\text{avg}}  \leq 10.0\% \text{ of the reference gas Concentration (3 種低、中、高 參考氣體濃度值)}$ 註：使用離子汞當標準氣體	$ R-A_{\text{avg}}  \leq 0.8 \mu\text{g/scm}$	任何參考氣體下都可以

項目	主要規格	替代規格	替代條件
<p>相對準確度確認 Relative Accuracy Test Audit(RATA)</p>	<p>RATA &lt; 20%</p>	<p><math> RM_{avg} - C_{avg}  +  CC  \leq 0.5 \mu\text{g}/\text{scm}</math>            註：其中 <math>RM_{avg}</math> 為參考標準方法，<math>C_{avg}</math> 為 Hg-CEMS 之氣態汞濃度，<math> CC </math> 為信賴係數  <math display="block">CC = t_{0.975} \frac{S_d}{\sqrt{n}}</math></p>	<p><math>RM_{avg} &lt; 2.5 \mu\text{g}/\text{scm}</math></p>
<p>反應時間測試 Cycle time test</p>	<p>15 minutes where the stability criteria are readings change by &lt; 2.0% of span or by <math>\leq 0.5 \mu\text{g}/\text{scm}</math>, for 2 minutes            允許 15 分鐘之穩定讀值，穩定之定義為讀值需在 2 分鐘內之變化 &lt; 2.0% 之 Span Gas 或是 <math>\leq 0.5 \mu\text{g}/\text{scm}</math>            註：使用元素汞當標準氣體</p>		

### 三、空氣污染物除汞技術方案介紹

燃煤電廠以煤碳做為燃料，燃煤中含有汞成份，燃煤經燃燒後，汞隨之進入煙氣中並排放，同時不同煤種燃燒後汞的組成也有差別，一般而言煙煤鍋爐中的氣態汞大部分為氧化汞 ( $Hg^{2+}$ )，而次煙煤和褐煤鍋爐中的大部分是元素汞 ( $Hg^0$ ) (Ravi K 等 (2006)。因汞之物化特性，煙氣中汞可以既有 (或新增設) 空氣污染物防制設備去除，如 SCR 設備去除氮氧化物 ( $NO_x$ )、BF(袋式集塵器) 或 ESP(靜電集塵器) 去除粒狀物 (PM)、FGD(排煙脫硫) 使煙氣汞濃度可符合排放標準，如圖 7。



資料來源：Kevin Culligan (2012)，「EPA's GHG and MATS Rule for Power Plants」。

圖 7 燃煤電廠除汞控制設備

煙道氣中汞以不同型態之汞存在，可分為元素汞 ( $Hg^0$ )、氧化汞 ( $Hg^{2+}$ )、粒狀汞 (P-Hg)，並可透過不同空氣污染防制設備中去除，粒狀汞 (P-Hg) 因附著於飛灰上，可經由粒狀物除塵設備捕集去除；氧化汞 ( $Hg^{2+}$ ) 因易溶於水，可以透過 FGD(排煙脫硫) 設備，捕捉於石膏或脫硫廢水中；元素汞 ( $Hg^0$ ) 具有較高的蒸汽壓且不溶於水，因此需將其氧化或直接以活性炭吸附劑吸附捕捉，可於鍋爐或燃煤中添加鹵素添加劑 (如

溴鹽溶液) 或選擇性觸媒還原設備 (SCR)，將其轉化為氧化汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ )。鍋爐後煙道氣經過 SCR 反應後，較多元素汞氧化成氧化汞，且部份氧化汞再附著至粒狀物上，以粒狀汞型態存在，但 SCR 氧化機制程度會受到煙氣內鹵素濃度與氨氣吸附在觸媒床含量多寡的影響 (Sargent & Lundy(2011))，注入過多的氨反而不利於元素汞的氧化；然採用活性碳吸附劑捕捉技術去除元素汞，由於燃煤電廠煙氣內的  $\text{SO}_3$  會降低活性碳吸附有效率 (Sargent & Lundy(2011))，隨著  $\text{SO}_3$  濃度高於 5~7 ppmv，必須增加活性碳的進料率以維持元素汞去除率，因此目前另有其他商業化技術 Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 使用吸附劑聚合物催化劑複合材料改善前述問題。

綜觀除汞技術，目前已有相關應用技術包括燃料鹵素添加法，吸附劑注入法、濕式煙道脫汞法、低溫氧化法、電催化氧化法、觸媒氧化法、Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 等方法，基本上燃料鹵素添加法、濕式煙道脫汞法、低溫氧化法、電催化氧化法的應用並不普遍或有限制，以下茲就常見各技術進行說明。

### 3.1 燃料鹵素添加法 (Kevin (2012))

燃煤機組中，於煤碳中直接添加鹵素進行元素汞氧化是最直接且易於維護保養的技術，主要鹵素如氯、溴、碘，並搭鍋爐下游的空污防制設備進行除汞，最常使用為溴化鈣溶液 (calcium bromide)，一般注入點如圖 8 所示；於搭配 SCR 脫硝系統下，相對於未裝設 SCR 可節省 50~80% 溴化鈣，同時於 SCR 反應器出口汞的氧化率可達到 90~97%。使用上需考量現場是否有藥劑槽貯存空間，另也需額外配置加藥管線。

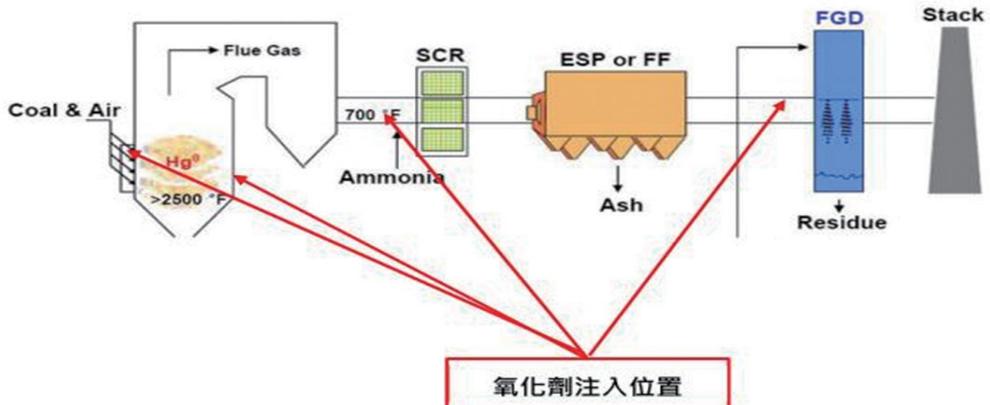
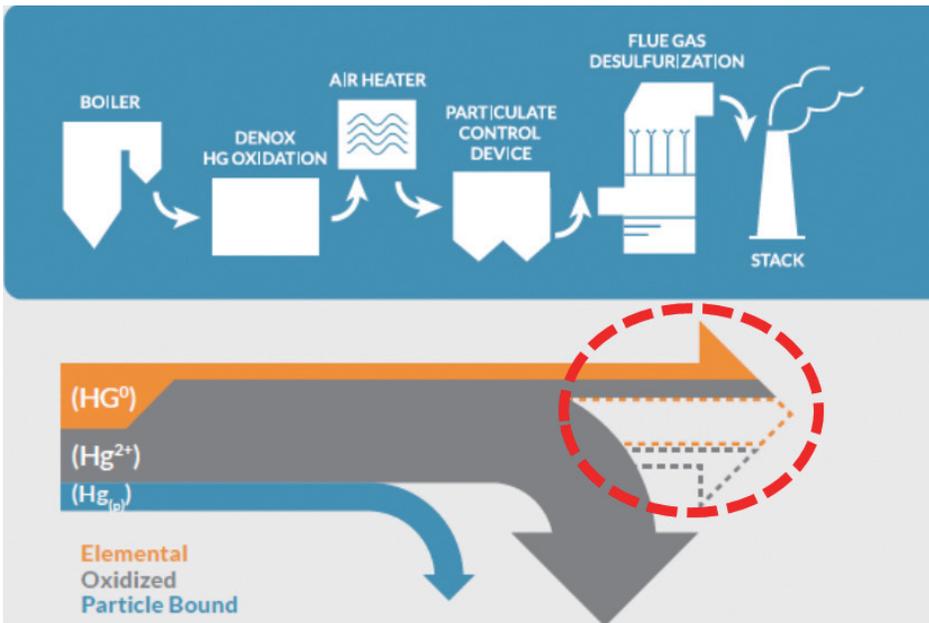


圖 8 注入氧化劑 (鹵素) 位置圖

### 3.2 觸媒氧化法 (建崑科技股份有限公司)(CORMETECH (2015))

燃煤機組使用空污防制設備 SCR 與 FGD 常伴隨著可對於汞進行去除，由於氣體中含微量 HCl 與煙氣溫度高會降低元素汞於 SCR 觸媒氧化程度，如能提升 SCR 觸媒氧化程度，對於元素汞氧化去除更為有效。由於 SCR 觸媒也會導致煙氣中  $\text{SO}_2$  氧化成  $\text{SO}_3$ ，進而與  $\text{NH}_3$  形成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  銨鹽結晶物附著於觸媒的表面並影響其活性，因此高汞氧化觸媒的設計重點為提高汞的氧化反應，可同時最大限度地減少  $\text{SO}_3$  生成，並大大提升元素汞的氧化，以利後續 FGD 設備去除氧化汞達到除汞最佳化。CORMETECH 汞保證測試反應器系統 (Mercury Assurance Testing Reactor System, MATRS) 為一最先進的微型反應器，用於新觸媒和失活觸媒的參數研究，煙氣中 3 種形式的汞去除機制如圖 9。最底層藍色箭頭代表透過粒狀物防制設備去除的粒狀汞；中間灰色箭頭表示在 FGD 系統中去除的氧化汞；其餘如圖 9 中虛線圈圈部分表示在沒有 SCR 和濕式 FGD 的情況下離開煙囪的汞含量，因此 CORMETECH 反應器可將紅色虛線圈內的虛線部分汞進行去除，提升汞的去除效率。對於高汞氧化觸媒，為一模組化設備，安裝後無需額外運轉操作，且不需注吸附劑，另使用需考量現場既有 SCR 觸媒裝設是否有額外空間可以使用。



資料來源：CORMETECH, <https://www.cormetech.com/advancedscrcatalysts/>

圖 9 COMETTM: Mercury Oxidation for Enhanced Removal

### 3.3 吸附劑注入法 (Ravi K 等 (2006))

於粒狀物防制設備上游注入吸附劑，常見吸附劑為活性碳，注入活性碳於煙道氣中均勻分布，藉由活性碳與汞進行吸附反應後，再經由後端的粒狀物防制設備達到去除汞之目的，如圖 10。活性碳吸附汞的能力與活性碳表面積與孔體積有關，吸附劑的孔必須足夠大，以便元素汞和氧化汞自由進入活性碳內表面積，同時避免先前吸附的反應物過度堵塞 (Sargent & Lundy(2011))。另活性碳選擇可以是非溴化或溴化的，非溴化活性碳只能去除煙氣中的氧化汞；而溴化活性碳可同時去除氧化汞和元素汞，因為活性碳中的溴充當汞氧化劑，且元素汞與氧化汞吸附能力不同，因此活性碳可根據煙氣中元素汞與氧化汞比例做選擇。現場使用需考量是否有空間設置活性碳貯槽，盡可能安裝於鄰近粒狀物防制設備 (如袋式集塵器) 附近。

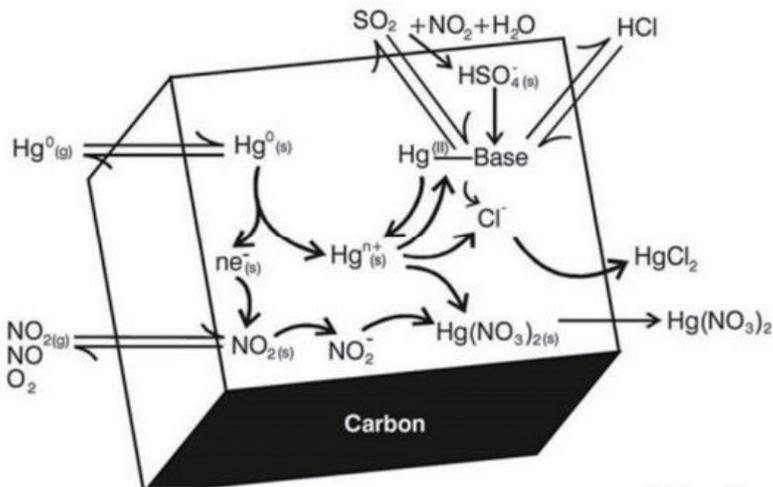


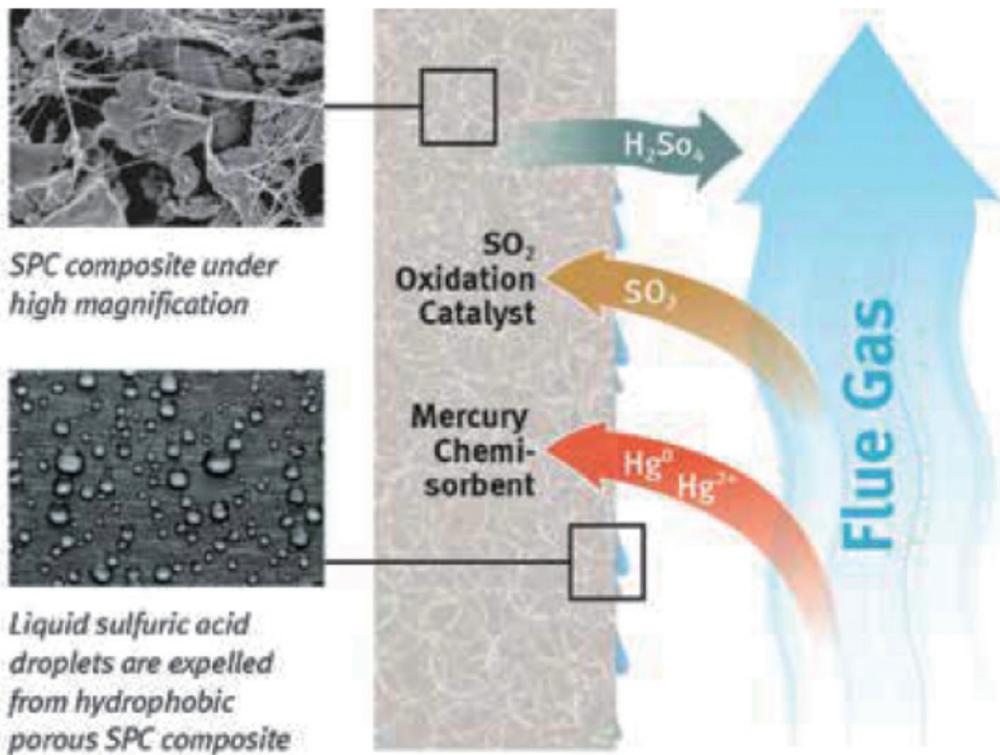
圖 10 煙道氣中活性碳吸附汞示意圖

### 3.4 Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 法 (Gore)

Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 是一種獨特的固定式吸附系統，為吸附、聚合及催化 3 種技術合體，以達到吸附去除元素汞與氧化汞的技術，除了汞以外，也可同時吸附  $\text{SO}_2$ ，其吸附機制如圖 11，主要安裝於粒狀物防制設備下游處或濕式洗滌塔 (如 FGD) 煙氣出口處。吸附材料為一氟聚合物為主體的吸附劑聚合物催化劑複合材料，

可有效捕捉煙氣中的元素汞和氧化汞，該材料可以通過化學吸附作用將汞吸附於 SPC 中，不同於許多活性碳吸附劑，SPC 對汞的吸收不會受  $\text{SO}_3$  的影響。由於沒有注入吸附劑，不會受到飛灰特性的影響，也不用擔心粒狀物污染或生成粒狀物。當 SPC 材質吸附達飽和後進行一次性的全面汰換，僅需汰換吸附模組。

SPC 系統採模組化可依需求採分離式安裝或可由既有濕式洗滌塔改造，節省現場空間，模組設計為一獨特的開放式通道結構提供極低的壓降，避免需要額外的增壓風扇，當煙氣排氣流速 4~5 m/s 時，其產生的壓降約 6~8mm  $\text{H}_2\text{O}$ 。該系統操作簡單，模組不含移動性部件，所以當製程操作改變時，也不需任何調整就可維持性能。另這些模組可抗污染或堵塞，主因是 SPC 光滑、不粘的特性，其次由於  $\text{SO}_2$  轉化為液體硫酸，從疏水性多孔 SPC 複合材料中排出，可由持續酸洗模組表面進行  $\text{SO}_2$  與粒狀物去除。處理汞的能力，根據模組容量，大多數發電廠模組壽命通常可超過 10 年。



資料來源：GORE™ Mercury Control System for Coal-Fired Utilities Brochure

圖 11 Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 除汞吸附機制

表 4 除汞技術優缺點比較

原理	技術	優點	缺點
氧化 + 濕式脫硫系統去除	燃料鹵素添加	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氧化法無法去除元素汞，仍需透過 FGD 將氧化汞溶於水，以達到從氣相中去除的效果。</li> <li>• 噴嘴易堵塞。</li> <li>• 氯元素含量低時，汞的氧化效果有限</li> <li>• 造成廢水含汞量的提高及石膏含汞量的增加。</li> <li>• 造成廢水中鹵素 (Br、Cl) 增加，提高廢水處理難度。</li> </ul>
	脫硝觸媒還原反應器 (SCR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可同時控制氮氧化物及氧化元素汞</li> <li>• 無須添加設備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氧化法無法去除元素汞，仍需透過 FGD 將氧化汞溶於水，以達到從氣相中去除的效果。</li> <li>• 氯元素含量低時，汞的氧化效果有限。</li> <li>• 氧化汞與去除氮氧化物的反應會相競爭，須注意去除氮氧化物效率的降低。</li> <li>• 觸媒會因毒化、阻塞等問題須定期活化、更新。</li> <li>• 廢棄觸媒的處理費用高。</li> <li>• 觸媒還原反應器非汞去除技術，只能保證氧化汞的效率，需靠濕式脫硫系統洗滌，將汞分子溶入廢水中，造成廢水、石膏、污泥濾餅含汞濃度提高。</li> <li>• 濕式脫硫系統中的化學反應複雜，氧化汞的洗滌效率受下列因素：ORP、pH、二氧化硫濃度、氯濃度、L/G、溫度等因素影響，造成洗滌效率不穩定。</li> <li>• 氧化汞在 FGD 中會有逆反應，逆轉化為元素汞造成污染，逆反應不容易控制，汞排放不穩定。需添加藥劑 TMT15 加以控制。</li> <li>• SO<sub>2</sub> 氧化成為 SO<sub>3</sub> 的機率提高。SO<sub>3</sub> 造成後段設備腐蝕問題。</li> </ul>

原理	技術	優點	缺點
氧化 + 濕式脫硫系統去除	CORMETECH (MATRS) CORMETECH (MATRS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可同時控制氮氧化物及氧化汞元素</li> <li>• 無須添加設備，對於原製程設有 SCR 的系統，僅是提高費用更換效果更好的新式觸媒</li> <li>• 提高汞的氧化率，減少 <math>\text{SO}_3</math> 生成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氧化法並無法去除元素汞，仍需透過 FGD 將氧化汞溶於水，以達到從氣相中去除的效果。</li> <li>• 氯元素含量低時，汞的氧化效果有限。</li> <li>• 氧化汞與去除氮氧化物的反應會互相競爭，須注意去除氮氧化物效率的降低。</li> <li>• 觸媒會因毒化、阻塞等問題須定期活化、更新。</li> <li>• 廢棄觸媒的處理費用高。</li> <li>• 觸媒還原反應器提升元素汞氧化，仍需靠濕式脫硫系統洗滌，將汞分子溶入廢水中，造成廢水、石膏、污泥濾餅含汞濃度提高。</li> <li>• 濕式脫硫系統中的化學反應複雜，氧化汞的洗滌效率受下列因素：ORP、pH、二氧化硫濃度、氯濃度、L/G、溫度等因素影響，造成洗滌效率不穩定。</li> <li>• 氧化汞在 FGD 中會有逆反應，逆轉化為元素汞造成污染，逆反應不容易控制，汞排放不穩定。需添加藥劑 TMT15 加以控制。</li> </ul>
吸附	活性炭吸附床	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 燃煤硫份高時，去除效率低。</li> <li>• 除汞效率受 <math>\text{SO}_3</math> 及煙氣中的水分影響。</li> <li>• 活性炭吸附床效率低，需要的空間較大。</li> <li>• 活性炭吸附床的容量有限，容易飽和，更換將產生額外的廢棄物處理成本。</li> </ul>

原理	技術	優點	缺點
吸附	Gore Mercury Control System (SPC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可吸附各種型態的汞。</li> <li>• 無須維護保養，吸附容量高，使用壽命高達 10 年以上（依含汞量而定。）</li> <li>• 可同時吸附 SO<sub>2</sub>。</li> <li>• 無須額外安裝空間，可裝設於既有的 FGD 中。</li> <li>• 被動式設備，無須人員主動操作。</li> <li>• 汞被吸附在模組內，轉化為極為穩定的硫化汞，經 TCLP 溶出試驗證明，幾乎無溶出。</li> <li>• 模組式設計，可依所需的效率決定所需的層數。</li> <li>• 不會產生額外的廢棄物。</li> <li>• 不會影響飛灰再利用。</li> <li>• 不會影響廢水及石膏中的含汞量。</li> <li>• 控制各種型態的汞，而非轉化入廢水。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置溫度要求 90℃ 以下，一般裝設在 FGD 中。</li> <li>• 產品適用性端看 FGD 空間是否足夠。</li> </ul>

## 四、結論與建議

燃煤發電燃燒產生的汞污染物，屬於固定污染源有害空氣污染物列管物質。由於汞的沸點很低，且以不同型態之汞（元素汞 ( $\text{Hg}^0$ )、氧化汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ )、粒狀汞 ( $\text{HgP}$ )) 循環流布於空氣、土壤、水體，多重相的轉變增加排放管理複雜度，成為全球性關注的污染問題。美國環保署於 2011 年針對火力發電廠制訂有害空氣污染物排放標準，對於汞的監測主要以手動分析的吸附劑採樣分析法執行，隨著科技進步，現今已有多種汞連續自動監測技術如 Zeeman AAS、CVAAS、CVAFS、Au-CVAFS，同時在台灣也有電廠於 2021 年完成 3 套 CVAFS 汞連續自動監測設施，並以 USEPA Method 30B 方法手動採樣方法平行比對驗證汞連續自動監測設施準確性，其結果顯示汞連續自動監測設施數據具有可信度。也因此該電廠於其他廠區既有燃煤機組 AQCS(Air Quality Control System) 改善工程的同時，進行 6 套 CVAFS 汞連續自動監測設施安裝。

由於煙道氣中汞以不同型態之汞存在，可透過不同空氣污染防制設備中去除，粒狀汞 ( $\text{HgP}$ ) 因附著於飛灰上，可由粒狀物防制設備去除；氣態汞部分則可由燃料鹵素添加法、觸媒氧化法（高汞氧化觸媒）、吸附劑注入法、Sorbent Polymer Catalyst (SPC) 法等技術來提升去除率。惟煤種的不同，會影響氣態汞的比例，因此如可以具分別量測元素汞與氧化汞之汞連續自動監測設施，評估元素汞與氧化汞於煙氣中的比例，搭配環境法令面、現地空間、既有空污防制設備、廢棄物 / 廢水處理、經濟效益、運維難易等面向，來選擇最佳除汞技術。

即使目前各燃煤電廠既有空污防制設備已具備良好的除汞效果，如能透過汞連續自動監測設施裝設與增設除汞設備，即時量測元素汞與氧化汞比例，反饋給空污防制設備調整，有助進一步降低煙氣中汞污染物的排放。

## 參考文獻

- 行政院環境保護署 (2021), 「固定污染源戴奧辛及重金屬空氣品質監測及輔導減量計畫」結案報告, EPA-110-FA12-03-A124。
- Environmental Protection Agency (40 CFR Part 63) ( Review. Federal Register / Vol. 88, No. 78 / Monday, April 24, 2023 / Proposed Rules.), National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Coal- and Oil-Fired Electric Utility Steam Generating Units Review of the Residual Risk and Technology.
- Robin Segall (2015), Mercury CEMS and Sorbent Trap System Certification Under New Rules TEKRAN, A Comparison between Atomic Fluorescence (AF) Based and Atomic Absorption (AA) Based Mercury Monitors.
- Dennis L. Laudal , Jeffrey S. Thompson, John H. Pavlish , Lynn A. Brickett , Paul Chu(2004), Use of continuous mercury monitors at coal-fired utilities. Fuel Processing Technology Volume 85, Issues 6–7, 15 June 2004, Pages 501-511
- Thermo Scientific™ Mercury Freedom System , <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/80I>
- Series 3300Xi Mercury CEM , <https://www.tekran.com/products/flue-gas-cem/3300xi-speciating-cem/>
- MERCEM300Z , <https://www.sick.com/ag/en/gas-analyzers/extractive-gas-analyzers/mercem300z/c/g175658>
- SM-4, mercury monitor , <https://www.envea.global/s/process/mercury-monitors-process/sm-4/?compare=9077>
- 柯忠佑 (2021), 「煙氣汞排放連續監測系統介紹」, 「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」, 台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會
- 吳政宏 (2021), 「台電火力電廠 HAPs 排放盤點與健康風險評估」, 「我國 HAPs 的排放監測與控制研討會」, 台灣 PM<sub>2.5</sub> 監測與控制產業發展協會

Ravi K Srivastava 1, Nick Hutson, Blair Martin, Frank Princiotta, James Staudt (2006),  
CONTROL OF MERCURY EMISSIONS FROM COAL-FIRED ELECTRIC UTILITY  
BOILERS, Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 5, 1385–1393

Sargent & Lundy, 2011, IPM Model – Revisions to Cost and Performance for APC Technologies  
Mercury Control Cost Development Methodology.

Kevin Culligan (2012) , 「EPA’ s GHG and MATS Rule for Power Plants 」

Babcock & Wilcox Company , 2015. Mercury Emissions Control Technology Selection – Let  
Installed Air Quality Control System (AQCS) Equipment Guide Technology Choice

建崙科技股份有限公司 , [https://www.greatwaves.com.tw/empty\\_14043.php](https://www.greatwaves.com.tw/empty_14043.php)

CORMETECH, (2015), Cormetech\_Brochure

CORMETECH, <https://www.cormetech.com/advancedscrcatalysts/>

Gore, <https://www.gore.com/products/gore-mercury-control-systems>

GORETM Mercury Control System for Coal-Fired Utilities Brochure

泰興工程顧問股份有限公司 (2020) , 空氣污染物除汞技術方案評估報告