

細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>) 減量策略與控制技術專題

## 應用 CMAQ 空品模式評估汽電共生燃煤 機組排放於環境 PM<sub>2.5</sub> 影響— 以某公司為例

郭承彬\*、蔡志賢\*、張章堂\*\*

### 摘 要

本研究以台化公司汽電共生燃煤鍋爐為例，實際進行管道中 PM<sub>2.5</sub> 檢測(含可過濾性微粒(FPM<sub>2.5</sub>)及可凝結性微粒(CPM))，並推估各廠原生性 PM<sub>2.5</sub> 最大排放潛勢。空氣品質模式模擬採用美國環境保護局(USEPA)認可之 CMAQ 模式(Community Multi-scale Air Quality Model)，背景排放量資料庫則使用最新公布之臺灣排放量清冊資料庫 9.0 版(Taiwan Emission Database, TEDS9.0)，針對惡劣氣候條件(大氣擴散條件不佳)下進行各廠排放影響模擬。評估各廠原生性 PM<sub>2.5</sub> 以及衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物(硫氧化物及氮氧化物)排放對於鄰近環境 PM<sub>2.5</sub> 濃度之影響。

研究模擬結果顯示，台化公司各廠對周界測站 PM<sub>2.5</sub> 濃度平均影響比例為 0.262~0.859%，最高影響比例為 1.102~1.602%。而各廠影響特性不一，且各廠排放量大小並非與環境影響比例成正比關係，亦即排放影響仍須考量背景濃度、氣象傳輸條件及地理環境而定。此外，與其他國內針對電廠排放影響研究相比，對於鄰近空品測站之 PM<sub>2.5</sub> 濃度之平均影響比例為 0.57% 左右(最高為台中電廠 0.68%)，顯示本研究之模擬結果與其他學者研究結果相近，亦驗證模擬結果實屬合理。

由本研究結果可知，單一汽電共生燃煤鍋爐機組對環境影響有限，也顯示面對改善環境 PM<sub>2.5</sub> 之困境，管理單位更應以科學合理之論證為依據，提出更有效之管理策略。在目前迫切之缺電危機困境及民眾環境意識高漲的客觀情勢下，期盼本研究採用方法及研究結果可提供學界、社會大眾及各級政府制定政策之參考。

【關鍵字】汽電共生燃煤機組、PM<sub>2.5</sub>、CMAQ

---

- |               |     |
|---------------|-----|
| * 景丰科技股份有限公司  | 工程師 |
| * 景丰科技股份有限公司  | 協理  |
| ** 宜蘭大學環境工程學系 | 教授  |

## 一、前言

臺灣因地理及氣候特性，每年 10 月到隔年 4 月伴隨東北季風之影響，經常導致 PM<sub>2.5</sub> 超標、「紫爆」事件。由於環境中細懸浮微粒 PM<sub>2.5</sub> 濃度攸關人體健康，也受到民眾、政府及產業界高度關切，而空污治理也是政府施政重點之一。

近年來，我國政府對於空氣污染的治理策略，仍為側重於工業固定污染源之加嚴管制，其中也引起了中央與地方權限及環境法治的重要爭議與課題(王晨桓, 2016)。然而，大氣中 PM<sub>2.5</sub> 成因並非為單一來源，交通排放、自然產出及境外影響都不亞於工業製程之貢獻，若過於簡化歸咎於單一因素，除可能誤導政府空氣品質管理施政重點外，亦恐無助於空氣品質的實質改善。若因固定排放源容易明確管制之特性，片面側重於工廠及發電廠管制(如排放標準加嚴、管末排放濃度控制等)，在無相關科學證據支持下，不見得能達成空氣品質改善目標。且過於箝制或限縮其生存發展空間，則所付出之經濟成本與環境實質改善亦可能不符成本效益，以長期施政規劃來看，未必為現階段最佳良方，所造成的經濟與民生損失仍為社會所承擔，因此不可不慎。

在目前迫切之缺電危機困境及民眾環境意識高漲的客觀情勢下，有賴中央政府在經濟發展與環境保護之權衡，而有效的空污治理策略必須奠基於合理科學事實。在政策大幅邁進推動前，對於工業製程環境 PM<sub>2.5</sub> 貢獻影響，期先做出一個科學合理之論述，以合理科學事實之基礎進行量化分析，才能掌握問題關鍵對症下藥。

本研究以工業汽電共生燃煤鍋爐為例，評估燃煤鍋爐排放對環境中 PM<sub>2.5</sub> 之影響。從：汽電共生系統對國內工業與經濟之價值與角色；排放量認定方法，包含近期科學上對管道中可過濾性微粒(Filterable Particulate Matter, FPM)及可凝結性微粒(Condensable Particulate Matter, CPM)各類檢測爭議與貢獻比例探討；以臺灣排放量清冊資料庫 9.0 版(Taiwan Emission Database, TEDS9.0)為環境背景排放量基礎，結合環境大氣條件，進行空氣品質擴散模式之模擬。同時，以期先做出一個科學合理之論述，以台化公司所屬之鍋爐為例，以實際檢測資料，推估台化公司汽電共生燃煤鍋爐排放量。本研究流程如圖 1 所示，係以科學嚴謹之方式，量化汽電共生燃煤鍋爐排放改善之效益，期許為國家環境空氣污染物減量策略研擬參考，做拋磚引玉之用。

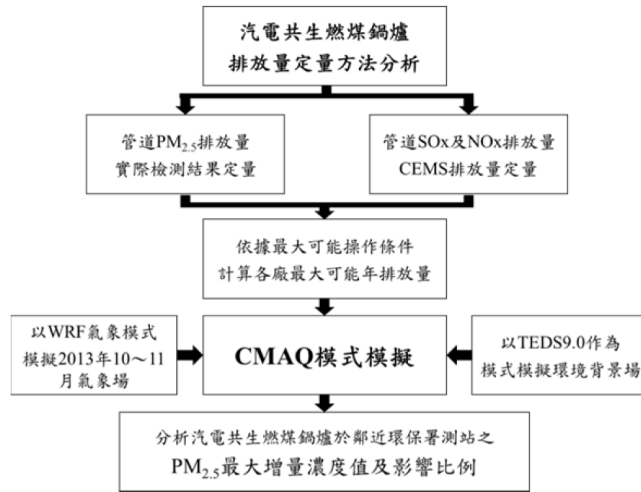


圖 1 本研究流程圖

## 二、我國電力結構與汽電共生系統扮演角色

汽電共生系統(Cogeneration System)，為同時可利用燃料或廢棄物燃燒產生有效汽能與電能兩者的聯產系統，在臺灣能源供應上扮演重要角色。為因應蒸汽需求而設置之汽電共生系統，其特性為伴隨工廠分散於各地，因此可大幅減少因電網輸送造成之能源耗損，進而提升能源使用效率。此外，由於汽電共生系統比傳統燃氣複循環發電機組效率高，依據目前國內現況，合格汽電共生系統的熱效率可達 52% 以上，相較於台電及民營獨立電廠(Independent Power Producer, IPP)現有汽電共生機組的熱效率均高出許多。例如台電除試俾中林口超超臨界機組約達 44%，其餘高壓、亞臨界、超臨界機組效率均在 34~41% 左右，遠遠不及汽電共生的熱效率。在相同能源需求條件下，汽電共生系統具節約能源、分散電源及提高電力供應可靠度之效益(陳玟如等, 2013)。因此，歐盟、美國、日韓及北歐等國，莫不把汽電共生視為節能減碳重要工具。

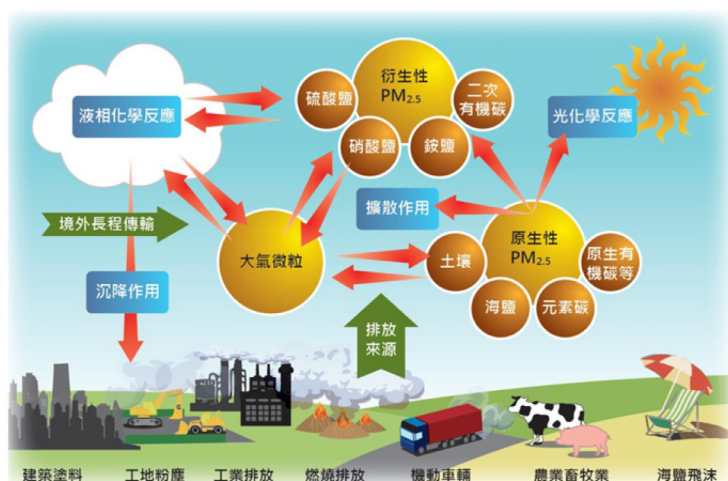
我國由於自產能源幾近為零，為彌補電力供應不足，經濟部於 77 年頒佈《汽電共生系統推廣辦法》，鼓勵民間業者投資興建汽電共生設備，係為民間汽電共生機組設立之濫觴。此後，政府更進一步立法強制要求各工廠產業，在熱能使用達一定比例

時，業者應有設置汽電共生之義務。民國 69 年臺灣汽電共生系統之總裝置容量僅佔全國系統約 3%，而至 101 年總裝置容量達到了 762 萬瓩，占 15.6%，比核能電廠與再生能源合計總裝置容量還高。長期以來，國內因民間業者自設之汽電共生系統，大幅降低台電供電負荷、減少線損及降低輸配電成本，對供電可靠度提升、分散電源及減少 CO<sub>2</sub> 之排放的多重目標，有著無可取代之重要貢獻。

依據資料統計，目前合格的汽電共生業者共計 94 家，其中又以煤炭作為發電燃料為主，占 76.2%，其餘包含燃油(11.9%)、垃圾(8.3%)、天然氣(1.0%)等。近年來，由於環境中 PM<sub>2.5</sub> 議題為社會大眾所關注，汽電共生燃煤機組也備受關注。再者，在汽電共生機組之污染防治設備不斷更新、進步下，汽電共生兼具有節能、環保與經濟各種優勢之特性。

### 三、環境中 PM<sub>2.5</sub> 成因與來源分布

環境中 PM<sub>2.5</sub> 來源並非單一污染源造成，倘若僅歸咎於單一污染源則過度簡化問題。其來源涵蓋人為與自然活動，包括了地表風蝕、河川揚塵、海水飛沫、餐飲烹飪、金紙及農廢燃燒、工業生產活動以及汽機車行駛排放等，如圖 2 所示。



參考來源：行政院環境保護署網頁

圖 2 環境中 PM<sub>2.5</sub> 形成及排放來源

就原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放量結構而言，根據 TEDS 9.0 版統計(蔡志賢等, 2015)，102 年全國 PM<sub>2.5</sub> 排放量 77,182 公噸，工業製程(21%)與移動污染源(24%)相當，其他原生性來源以營建工程、道路揚塵及裸露地等(合計55%)為主，如圖 3 所示。全國發電相關製程之原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放量僅占 5.22%，其中屬電力業電廠排放占 7 成(3.85%)，非屬電力業之汽電共生相關程序(包含鍋爐汽電共生程序、鍋爐發電、渦輪發電、引擎發電等)則占近其中 3 成(1.37%)。

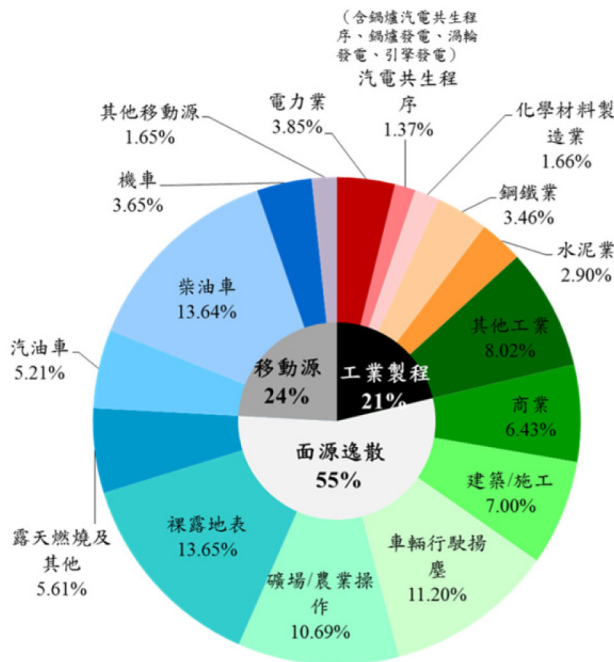


圖 3 臺灣原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放量 (TEDS 9.0) 各污染源占比

由於 PM<sub>2.5</sub> 在大氣化學反應自然合成，以及生成後不易沉降的特性，來自境外傳輸所造成空氣品質影響不容小覷。根據環保署統計，來自中國的境外傳輸對臺灣環境中的 PM<sub>2.5</sub> 貢獻比例均超過 30% (吳義林等, 2014)。換言之，這些來自於鄰近的中國或其他東亞各國與過境船舶所造成之污染，即便國內做再多的減排努力，也無助於國境外傳輸來的影響；此為進行特定污染源 PM<sub>2.5</sub> 貢獻評估時必須考慮之處。

其次，在近 7 成  $PM_{2.5}$  的貢獻應係來自臺灣本土境內人為活動及自然界產生之貢獻。其中，又有相當比例為二次衍生性  $PM_{2.5}$  (Secondary  $PM_{2.5}$ )。所謂衍生性  $PM_{2.5}$ ，即是最初形態非為粒狀  $PM_{2.5}$ ，而是各類酸鹼氣體如硫氧化物( $SO_x$ )、氮氧化物( $NO_x$ )、揮發性有機化合物(VOCs)、氨( $NH_3$ )等，即二次衍生性  $PM_{2.5}$  的前驅物，在特定條件下化學反應而成。當其以低濃度單獨存在於空氣中時，並不會變化成  $PM_{2.5}$ ，且本身對人體之影響極其輕微。以目前國內環境監測數據來看，前驅物之濃度皆遠低於國家標準。

就  $PM_{2.5}$  管制策略來說，原生性  $PM_{2.5}$  污染來源通常較具有明確目標得以直接進行排放管制。但是來自於境外或衍生性  $PM_{2.5}$  由於牽涉大氣化學反應機制、氣象條件等不確定因素，難以歸咎於特定污染來源，使得  $PM_{2.5}$  管制更為複雜。如石化燃料燃燒過程中會產生硫氧化物與氮氧化物，這些原始為酸性之氣態物質，必須要與大氣中其它之鹼性物質(如氨等)中和後才會形成鹽類之  $PM_{2.5}$ 。換言之，單獨之酸鹼氣體並不會構成  $PM_{2.5}$  之產生，就二次衍生性  $PM_{2.5}$  產生之重要性來看，硫氧化物、氮氧化物與氨幾乎為同等重要。因此，若降低大氣環境中之鹼性物質使其不足以與酸性氣態前驅物反應，亦有助於降低環境  $PM_{2.5}$ 。

對於汽電共生燃煤鍋爐而言，在模擬評估其排放影響時，除考量原生性  $PM_{2.5}$  排放外，亦必須考量氣態污染物硫氧化物、氮氧化物等所造成之衍生性  $PM_{2.5}$  濃度，才可完整評估汽電共生程序對於鄰近空氣品質之影響。因此，排放影響評估所採用之空氣品質模式，必須可同時處理原生性  $PM_{2.5}$  及衍生性  $PM_{2.5}$  前驅物(硫氧化物、氮氧化物等)排放、擴散及傳輸行為，模擬結果才足具代表性。本研究採用之模式—CMAQ 空氣品質模式，除可考量大氣中污染物間化學反應、空間網格內的交互作用以及質量守恆等化學反應外，亦為美國國家環境保護局(USEPA)所認可之空氣品質模式之一。



## 四、固定源管道 PM<sub>2.5</sub> 排放量推估

### 4.1 固定源管道 PM<sub>2.5</sub> 排放量推估方法

一般燃燒性污染源管道，所排放污染物包含：粒狀污染物(TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>)、硫氧化物(SO<sub>x</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、揮發性有機化合物(VOCs)等，如圖 4 所示。管道中所排放之粒狀污染物除 PM<sub>2.5</sub> 外，還包括了氣動粒徑大於 PM<sub>2.5</sub> 之 PM<sub>2.5-100</sub> 微粒，一般通稱為 TSP。

目前國際上未見直接對於 PM<sub>2.5</sub> 進行限制之管道排放管制標準，而我國對於粒狀污染物之濃度限值、許可證核發、排放量申報及空污費繳納等各類管制制度，都是以 TSP 作為標的進行管理。因此長期以來，國內缺乏大量 PM<sub>2.5</sub> 檢測數據，對於汽電共生機組之 PM<sub>2.5</sub> 實際排放係數與排放量研究，也缺乏詳實之科學依據。

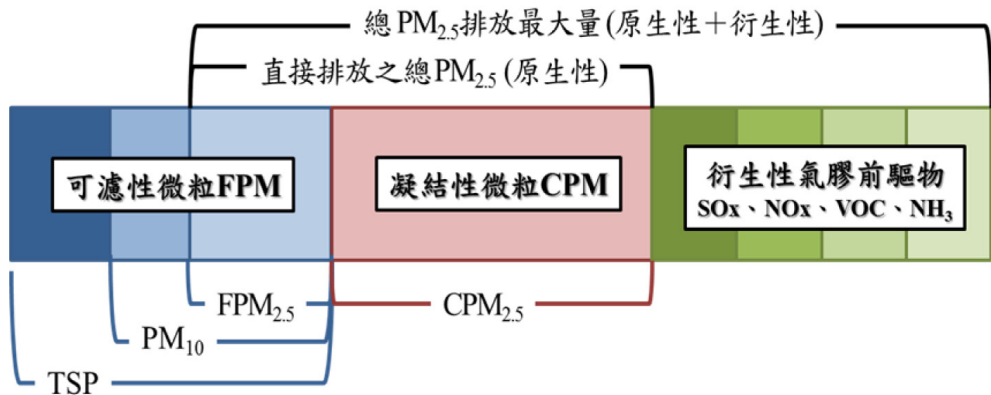


圖 4 固定污染源排放污染物種類

基於管道 PM<sub>2.5</sub> 檢測技術門檻及採樣成本較高，亦無法全國逐根管道進行檢測制定排放係數，因此，國際主流之 PM<sub>2.5</sub> 排放定量方法，為美國環保署與加州環保局採用之 PM<sub>2.5</sub> 比例推估法。該方法係指以已知的 TSP 排放量乘以 PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例，計算 PM<sub>2.5</sub> 排放量，其推估公式為：

$$\text{PM}_{2.5} \text{ 排放量} = \text{TSP 排放量} \times \text{PM}_{2.5}/\text{TSP 比例}$$



國內的 TEDS 排放清冊採用此方法進行推估，對於「PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例」的準確度在工廠 PM<sub>2.5</sub> 排放量的定量上至為重要。而「PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例」中 TSP 的部分，以汽電共生廠而言，為因應法規之排放量申報，每季會進行 1 次之手動採樣定檢，故資料取得尚為餘裕。但有系統之同步 PM<sub>2.5</sub> 檢測資料獲得，就相當困難。故在定量「比例」研究時，實際與台化公司各廠(彰化廠、嘉義新港廠、宜蘭龍德廠)合作，進行 PM<sub>2.5</sub> 與 TSP 之同步採樣，且各廠皆進行採樣，以取得之檢測結果估算該廠「PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例」。

#### 4.2 FPM<sub>2.5</sub> 及 CPM 採樣方法應用現況及文獻回顧

對於實際進行管道 PM<sub>2.5</sub> 採樣用於計算排放量，關鍵之處在於標準採樣方法之確認。對於原生性 PM<sub>2.5</sub> 來說，管道中所排放之原生性 PM<sub>2.5</sub> 包含了物理特徵完全不同之可過濾性微粒(Filterable Particulate Matter, FPM)及可凝結性微粒(Condensable Particulate Matter, CPM)。FPM 為管道出口直接以固態或液態粒狀物排放至大氣之微粒，得以用濾紙收集並分析。然而，當管道溫度較高時，污染物是以氣態之方式排放，當進入大氣環境降溫後，污染物將凝結成固態或液態粒狀物，當微粒凝結後，凝結微粒粒徑大部分小於 2.5 微米，此即為 CPM。由於這類 PM<sub>2.5</sub> 非經化學反應合成，所以亦屬於原生性排放。

相較於 FPM，固定源管道中 CPM 排放為近年受重視的議題。本研究針對 FPM 採樣，採用環保署公告之 NIEA A212.10B 標準採樣方法(行政院環境保護署, 2013) 進行 FPM<sub>2.5</sub> 採樣。CPM 則參考美國環保署(USEPA)作法，以 2008 年公告之 Method 202 標準方法(U.S. EPA, 2008)進行採樣。環檢所後於 105 年 5 月 12 日公告之「排放管道中可凝結性微粒(CPM)檢測方法(NIEA A214.70C)」(行政院環境保護署, 2016)，其檢測方法及原理與 USEPA Method 202 方法完全相同，該方法於同年 8 月 15 日生效。因此，本研究中對於 CPM 微粒之採樣與定量，同步於國際上及國內最新方法技術。

然而，國內外學者針對此一 CPM 採樣方法(USEPA Method 202 或 NIEA A214.70C)，以其他採樣方法驗證比較後，結果顯示該方法存在高度不確定性，且

可能有高估疑慮(郭承彬等, 2016)。如吳至晏等人針對以煤炭為燃料的燃燒型排放源(吳至晏等, 2016), 使用 NIEA A212.10B 及 A214.70C 標準採樣方法採樣, 並同步以稀釋採樣法(CTM-039)進行比較。研究結果顯示 NIEA A212 及 A214 所採集的 PM<sub>2.5</sub> 濃度均高於稀釋採樣法濃度, 平均 2.69 倍, 其中 CPM 濃度又高於 FPM<sub>2.5</sub> 濃度, 而 CPM 主要組成無機成分, 平均 69.8%。此外, 國外研究針對燃氣鍋爐(Wien et al., 2001)、金屬冶煉(Sheya et al., 2008)等製程同樣進行採樣比較, 亦發現同樣高估之情形。

相較於目前公告之採樣方法, 另一種採樣法「稀釋採樣法(CTM-039)」(U.S. EPA, 2004)被認為是更準確的 PM<sub>2.5</sub> 採樣方式。稀釋採樣法之原理, 為通過一段採樣管將高溫煙氣從煙道中引出, 然後再與不含粒狀污染物的乾淨空氣混合, 經稀釋降溫後, 煙氣溫度接近大氣環境溫度, 最後用大氣中粒狀污染物的標準採樣方法進行測定。該方法是理論上最符合實際大氣環境情境的方法, 且所採集的 PM<sub>2.5</sub> 既包括 FPM<sub>2.5</sub>, 也包含可凝結 CPM。惟該採樣法並未公告為國內標準採樣方法, 且目前國內一般依據《檢查鑑定公私場所空氣污染物排放狀況之採樣設施規範》設置之採樣平臺, 無法滿足其所需要之最小空間, 在國內使用上有實務操作之困難。

### 4.3 本研究採樣方法及採樣結果

本研究之合作對象為台化公司彰化廠、嘉義新港廠及宜蘭龍德廠, 3 廠共計 9 組燃煤汽電共生鍋爐機組, 分別位於彰化縣彰化市北區、嘉義市西北方之新港鄉及宜蘭縣龍德工業區, 採樣期間為 104 年 12 月至 105 年 5 月。

彰化廠之 3 部汽電共生機組, 其中 2 部(G6及G7)後接之空氣污染防制設備為靜電集塵器(Electrostatic Precipitator, ESP)及濕式排煙脫硫設備(Flue Gas Desulfurization, FGD), 另一 G8 機組則在最前端加裝了選擇性觸媒還原設備(Selective Catalytic Reduction, SCR)。嘉義新港廠 4 部汽電共生機組中, SK4 機組採用 SCR、ESP 及 FGD 作為空氣污染防制設備, SK1、SK2 及 SK3 機組除無 SCR 外其餘同為 ESP 及 FGD。宜蘭龍德廠為 2 部汽電共生機組 LT2 及 LT3, 皆採用 SCR、ESP 及 FGD 作為空氣污染防制設備, 詳如圖 5 所示。

採樣時，所有管道(9根次)皆針對 FPM 進行採樣，且工廠端同步配合於鍋爐同批操作時進行 TSP 當季定檢採樣，用以決定「PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例」數據。囿於 CPM 標準採樣方法爭議性較高，因此 CPM 採樣僅針對各廠具代表性之 3 根管道(彰化廠 G6 機組、嘉義新港廠 SK2 機組以及宜蘭龍德廠 LT3 機組)進行採樣。本研究採樣工作委請環檢所認證合格之東典環安科技股份有限公司執行，採樣品保品管則由宜蘭大學環境工程學系張章堂教授進行現場監督及分析查核工作。

彰化廠	G6	靜電集塵器	FGD 濕式排煙脫硫
	G7	靜電集塵器	FGD 濕式排煙脫硫
	G8	SCR 觸媒反應器	靜電集塵器 FGD 濕式排煙脫硫
龍德廠	LT2	SCR 觸媒反應器	靜電集塵器 FGD 濕式排煙脫硫
	LT3	SCR 觸媒反應器	靜電集塵器 FGD 濕式排煙脫硫
新港廠	SK1	靜電集塵器	FGD 濕式排煙脫硫
	SK2	靜電集塵器	FGD 濕式排煙脫硫
	SK3	靜電集塵器	FGD 濕式排煙脫硫
	SK4	SCR 觸媒反應器	靜電集塵器 FGD 濕式排煙脫硫

圖 5 台化各廠區汽電共生機組所採用之污染防制設備

採樣結果如表 1 所示，由於各鍋爐設計條件與操作狀況各有不同，故採樣檢測濃度或有高低，採樣結果顯示，台化公司之原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放中，相較於 FPM<sub>2.5</sub>，CPM 存在相當高比例。以不計 CPM (僅含 FPM<sub>2.5</sub>)之檢測結果中，平均比例為 36.99%。而考量檢測同時含 FPM 與 CPM 之結果，平均比例為 97.05%。其中，彰化廠 G6 機組 PM<sub>2.5</sub>(CPM 與 FPM 合計)之檢測濃度略高於 TSP 濃度，除可能為該排放管道排放溫度較高導致較高濃度 CPM 外，也有可能來自前節所討論之檢測方法本身的限制所致。

表 1 本計畫各廠管道 PM<sub>2.5</sub> 採樣成果

廠區	汽電共生機組	PM <sub>2.5</sub> 檢測濃度 (mg/Nm <sup>3</sup> )	該季 TSP 定檢 (mg/Nm <sup>3</sup> )
彰化廠	G6	8.05 *	7.0
	G7	1.13	9.0
	G8	3.23	4.0
嘉義新港廠	SK1	3.4	4.0
	SK2	10.25*	13.0
	SK3	0.91	11.0
	SK4	1.22	8.0
宜蘭龍德廠	LT2	2.21	11.0
	LT3	12.65*	13.0

\*管道採樣同時包括 FPM<sub>2.5</sub> 及 CPM

## 五、空氣品質模式模擬量化排放影響程度

對於環境中由燃煤鍋爐對 PM<sub>2.5</sub> 貢獻所進行之研究不乏少數。臺中市環保局以 CMB 受體模式解析臺中地區 PM<sub>2.5</sub> 污染源貢獻(程萬里等, 2015)，結果指出沙鹿地區來自燃煤鍋爐之貢獻影響約 2.2%。詹長權等人以 APCA 受體模式解析中部空品區 PM<sub>2.5</sub> 來源(詹長權等, 2014)，結果指出中部地區所有燃油、燃煤及海鹽貢獻約在 27.3%。上述研究皆是包含了環境中所有電廠、工業製程等燃煤設備之貢獻，並非針對單一特定污染源，但一致性之結論皆顯示燃煤造成之環境 PM<sub>2.5</sub> 貢獻不高，若僅針對燃煤所造成的排放量進行削減，對環境 PM<sub>2.5</sub> 改善的效果應該有限。

對於特定工業源對環境 PM<sub>2.5</sub> 增量影響研究，環保界與學術界其實不乏先例。蔡德明等人(2013)及吳義林等人(2015)曾針對全臺電廠(電力業)之環境 PM<sub>2.5</sub> 增量進行模擬研究，在所有大型燃煤電廠中，以台中電廠對環境平均影響貢獻 0.68% 為最高，全臺大型燃煤電廠之平均貢獻為 0.57%，也證明針對臺灣環境 PM<sub>2.5</sub> 的問題，絕非單一工廠改善就能見成效。

然而，其餘污染來源如交通源排放、地表揚塵及二次氣膠等，其影響貢獻亦不容小覷。根據彰化縣環保局於 103 年 10 月彰化站採樣後執行受體模式 CMB 之成果(張立鵬等, 2014)顯示，當地交通排放貢獻 28.78%、二次氣膠(硫酸銨及硝酸銨)貢獻 39.96%、營建工程貢獻 10.95%；臺中市環保局以 CMB 受體模式解析臺中地區 PM<sub>2.5</sub> 污染源貢獻(程萬里等, 2015)，結果指出 102 年衍生性氣膠總貢獻 55.1%、交通源 15.7%、地殼元素 13.3%。綜觀目前針對臺灣中部地區之污染源解析研究，衍生性氣膠及交通污染源應為 PM<sub>2.5</sub> 主要貢獻來源。

針對特定污染源對空氣品質影響定量方法，主要模擬污染物從排放源排出後，經過大氣的傳輸、擴散、轉化及沉降等過程後，對於空氣品質之濃度增量影響程度。本研究採用美國國家環境保護局(USEPA)所認可之第 3 代空氣品質模式 CMAQ 模式 (Community Multi-scale Air Quality Model)進行空氣品質模擬，考量大氣中污染物間化學反應、空間網格內的交互作用以及質量守恆等化學反應特性，同時模擬污染源排放之原生性 PM<sub>2.5</sub> 及衍生性氣膠前驅物對環境 PM<sub>2.5</sub> 造成的影響。網格模式中，影響至為關鍵之因素為氣象條件，因此本研究以中央氣象局氣象數值模擬所使用之 WRF 氣象模式產生。

由於衍生性 PM<sub>2.5</sub> 之生成與背景環境大氣濃度有關，本研究使用環保署公告之 TEDS 9.0 版排放資料庫(蔡志賢等, 2015)作為模擬環境背景排放量。針對模擬期程則選取大氣環境擴散條件不佳、最易致空氣品質不良之 10 月及 11 月份進行。所有模擬過程之參數設定，皆符合環保署公告之《空氣品質模式評估技術規範》作業方法(行政院環境保護署, 2015)。

## 六、最大影響潛勢之模擬情境設定

如前所述，以本研究所採用之 CPM 標準檢測方法，已有數篇研究證實其採樣方法存在高估疑慮及高不確定性，但較適合之稀釋採樣法在國內有實務操作困難。因此，在評估國內實際汽電共生排放對環境影響貢獻時，以標準方法評估排放量之方式進行，不失為較謹慎之作法。

參考本研究實際採樣結果，台化公司之汽電共生鍋爐排放管道中 FPM 與 CPM 加總之於 TSP 的平均比例 97.05%，亦即有 97.05% 之 TSP 皆為 PM<sub>2.5</sub>，幾近 100%。因此，後續假設汽電共生程序管道所排放之粒狀物 TSP 皆為 PM<sub>2.5</sub>(即 PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例為 1)，即採最大排放可能排放情境進行模擬。該情境所假設煙道中粒狀污染物皆為 PM<sub>2.5</sub>，此排放濃度假設應可視為燃煤汽電共生鍋爐之粒狀物濃度上限。此外，基於最大影響考量，評估時選用的運轉時數不以特定單年操作時數做設定，而以各廠各機組未來最大可能運轉時數為評估分析條件，各廠各機組未來實際操作時數都將不超過此上限。

以最大排放濃度、最大運轉時數的條件計算下，研究中 3 處燃煤汽電共生廠之排放量占所在縣市之總排放量其實仍屬有限(如表 2 所示)，以新港廠占嘉義縣之比例近 3% 為最大，由此可知，若只單看原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放量，本研究標的之 3 座燃煤汽電共生廠占所有環境背景排放量並不算高。

本研究方法力求嚴謹，目的即為在最嚴苛之條件下，檢驗台化公司對於周遭環境之最大影響潛勢，相關研究設定情境及模式模擬設定如下：

- (一) 以 FPM 與 CPM 實際採樣以驗證台化汽電共生機組之 PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例。
- (二) 各廠假設最大運轉時數條件及最大排放濃度排放，估算各廠汽電共生程序 PM<sub>2.5</sub> 排放量。
- (三) 使用美國環保署認可之 CMAQ 空氣品質模式，可同時處理排放污染源之原生性 PM<sub>2.5</sub> 及衍生性氣膠前驅物對環境 PM<sub>2.5</sub> 造成的影響。
- (四) 採用最新 TEDS 9.0 版排放資料庫做為環境背景資料庫。
- (五) 針對污染物不易擴散之惡劣氣象條件下(10 月、11 月)進行模擬。



表 2 本計畫各廠污染物模擬使用排放量

模擬使用排放量(公噸) (佔全縣排放量比例 %)		彰化縣	嘉義縣	宜蘭縣
原生性 PM <sub>2.5</sub>	全縣排放量(TEDS 9.0)	3,628	2,220	3,568
	縣市工業排放量(TEDS 9.0)	506 (13.9%)	267 (12.0%)	1,083 (30.4%)
	台化各廠排放量(104 年*)	24 (0.7%)	64 (2.9%)	74 (2.1%)
SO <sub>2</sub>	全縣排放量(TEDS 9.0)	2,576	1,663	1,172
	縣市工業排放量(TEDS 9.0)	2,319 (90.0%)	1,166 (70.1%)	754 (64.3%)
	台化各廠排放量(104 年)	174 (6.8%)	654 (39.3%)	108 (9.2%)
NO <sub>x</sub>	全縣排放量(TEDS 9.0)	17,042	12,013	12,920
	縣市工業排放量(TEDS 9.0)	4,258 (25.0%)	4,182 (34.8%)	7,573 (58.6%)
	台化各廠排放量(104年)	576 (3.4%)	2,619 (21.8%)	449 (3.5%)

\*以 PM<sub>2.5</sub>/TSP 比例為 1，最大排放潛勢做模擬條件

## 七、研究成果及討論

本研究以最大排放潛勢，即設定各廠最大排放濃度及最大運轉時數，並於最惡劣氣象條件下，同時以 CMAQ 模式進行綜合原生性及衍生性之 PM<sub>2.5</sub> 模擬後，比較台化公司 3 廠對環保署各監測站濃度之貢獻量與所佔比例，如表 3 及圖 6 所示，討論如下：

- 一、台化公司所屬 3 座燃煤汽電共生廠(彰化廠、嘉義新港廠及宜蘭龍德廠)，PM<sub>2.5</sub> 及衍生性前驅物排放量規模各自不同、所處環境地理與氣象條件亦迥異，但對各測站 PM<sub>2.5</sub> 平均濃度貢獻比例為 0.262~0.859%，最大濃度貢獻比例為 1.102~1.602%，皆在 2% 以下。以宜蘭龍德廠對冬山為最高，僅為 1.602%，而冬山站為影響範圍內背景值最低之測站，實際濃度增量貢獻僅為 0.152μg/m<sup>3</sup>。此模擬結果為假設一切環境負荷假設皆在最惡劣情況，可知若以削減燃煤汽電共生廠排放量作為改善環境 PM<sub>2.5</sub> 濃度方案之效益，應該十分有限。
- 二、由模擬結果顯示，原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放影響是近距離測站，衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物排放之影響是距離較遠之測站，各廠影響特性不一，其模擬結果如圖 7~圖 9 所示，詳述如下：



- (一) 彰化廠發生最大濃度增量之位置皆為廠區所在縣市，且為距離廠區最近之彰化站(PM<sub>2.5</sub> 增量濃度 0.214μg/m<sup>3</sup>，增量濃度影響比例為 1.102%)，顯示對環境 PM<sub>2.5</sub> 濃度貢獻多半與原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放有關。因此，若需減少對環境排放之影響程度，則應針對原生性 PM<sub>2.5</sub> 進行減量。
- (二) 嘉義新港廠最大影響地區則非為鄰近測站，甚至超過所在縣市境外，遠至高雄美濃地區(PM<sub>2.5</sub> 增量濃度為 0.115μg/m<sup>3</sup>，增量濃度影響比例為 1.130%)，顯示該廠是以前驅物轉化之衍生性 PM<sub>2.5</sub> 對環境有最大貢獻，由於衍生性 PM<sub>2.5</sub> 生成需要較長時間反應，因此最大影響才會發生在較遠之位置。因此，若需減少對環境排放之影響程度，則應針對衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物如硫氧化物及氮氧化物進行減量，則較具有成效。
- (三) 宜蘭龍德廠則因所在區域測站密度較低，較難以判讀該廠之影響以原生性 PM<sub>2.5</sub> 或衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物之排放影響為主。
- 三、此外，模擬結果也顯示，排放量大小並非與環境影響比例成正比關係。若僅單看各廠模擬輸入之 PM<sub>2.5</sub> 排放量，宜蘭龍德廠為最高，次之為嘉義新港廠，但實際之環境濃度增量並非成正比關係。換言之，在模擬排放源貢獻 PM<sub>2.5</sub> 的增量中，除了排放量大小外，對於背景濃度、氣候傳輸條件及地理環境等因素都具一定影響，也符合實際狀況。

表 3 台化汽電共生程序對鄰近測站 PM<sub>2.5</sub> 影響指標 (CMAQ 模擬 10 月~11 月)

廠別	測站名稱	模擬 平均濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> 模擬結果 (最大情境)	
			增量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	增量濃度 影響比例 (%)
彰化廠	彰化站	26.68	0.214	1.102
	二林站	22.63	0.009	0.056
	線西站	24.19	0.010	0.036
	西屯站	29.00	0.035	0.087
	埔里站	27.32	0.064	0.198
	平均	25.96	0.066	0.296
嘉義 新港廠	新港站	25.33	0.018	0.085
	朴子站	23.63	0.002	0.044
	嘉義站	37.61	0.099	0.154
	新營站	29.08	0.032	0.207
	善化站	33.11	0.046	0.250
	美濃站	43.59	0.115	1.130
	橋頭站	40.04	0.042	0.212
	仁武站	51.86	0.052	0.166
	鳳山站	48.15	0.063	0.171
	大寮站	51.48	0.080	0.235
	林園站	49.13	0.076	0.222
	楠梓站	44.19	0.055	0.270
	平均	39.77	0.057	0.262
宜蘭 龍德廠	宜蘭站	10.63	0.009	0.115
	冬山站	10.20	0.152	1.602
	平均	10.42	0.081	0.859

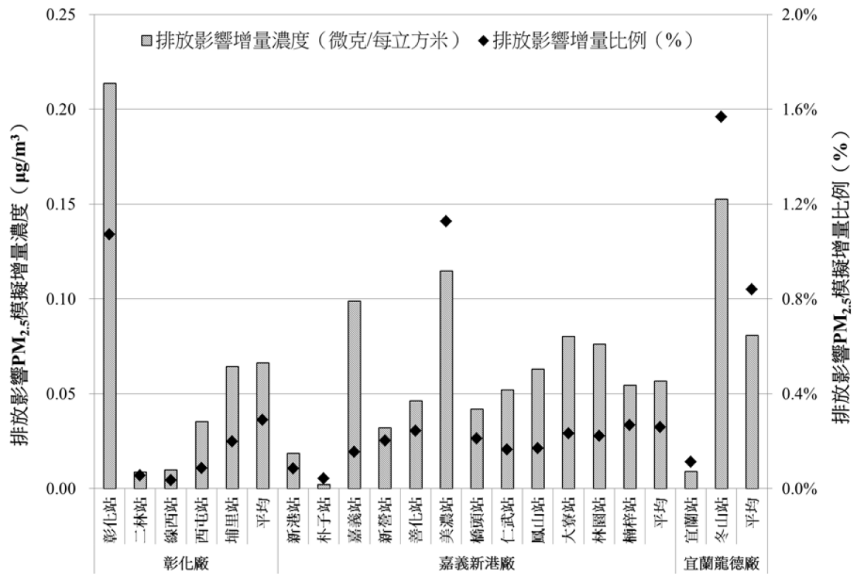


圖 6 台化汽電共生程序對鄰近測站 PM<sub>2.5</sub> 影響模擬成果 (CMAQ 模擬 10 月~11 月)

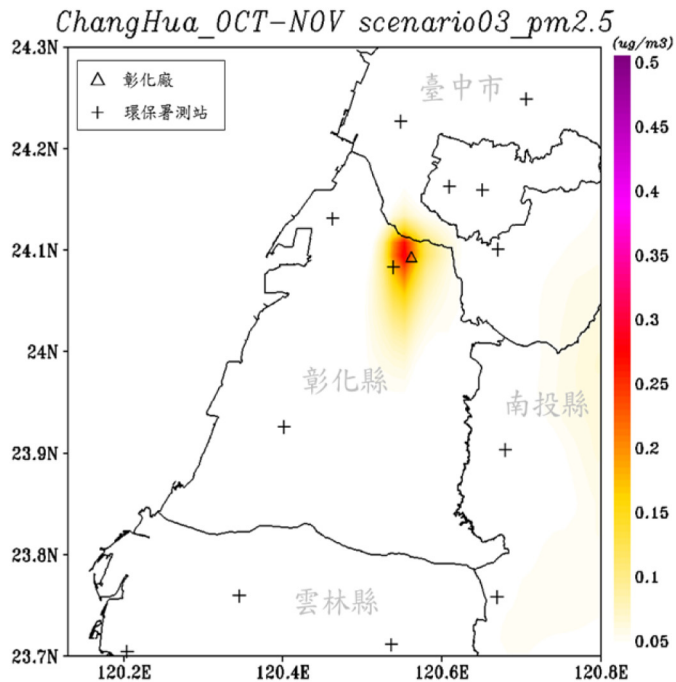


圖 7 彰化廠汽電共生程序 PM<sub>2.5</sub> 排放增量影響模擬

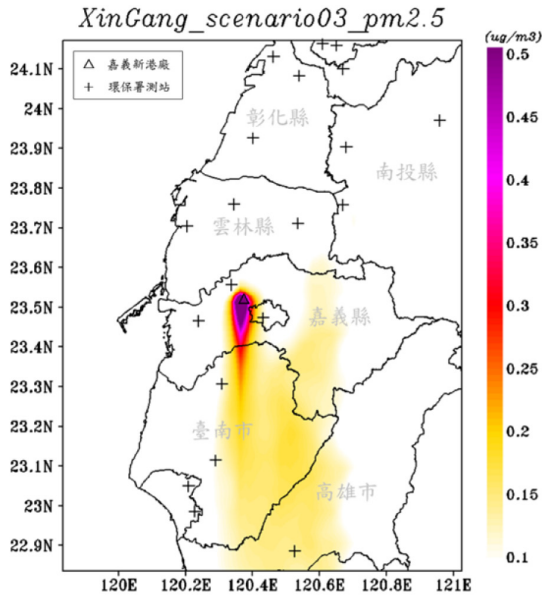


圖 8 嘉義新港廠汽電共生程序 PM<sub>2.5</sub> 排放增量影響模擬圖

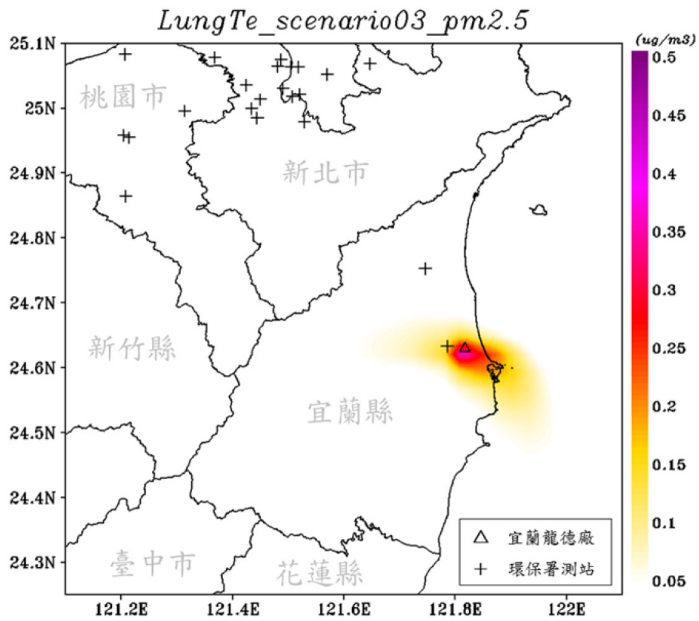


圖 9 宜蘭龍德汽電共生程序 PM<sub>2.5</sub> 排放增量影響模擬圖

## 八、結論

本研究針對汽電共生燃煤鍋爐機組，以台化公司彰化廠、嘉義新港廠及宜蘭龍德廠之汽電共生燃煤鍋爐為例，並以最大可能排放潛勢之空氣品質模擬策略，針對惡劣之氣候條件，利用美國認可之 CMAQ 模式進行模擬，以評估各廠原生性 PM<sub>2.5</sub> 以及衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物(硫氧化物及氮氧化物)排放對於鄰近環境 PM<sub>2.5</sub> 濃度影響。

由研究結果可知，各廠對周界測站 PM<sub>2.5</sub> 濃度平均影響比例為 0.262~0.859%，測站最高影響比例為 1.102~1.602%。其中，各廠影響特性不一，如彰化廠以原生性 PM<sub>2.5</sub> 排放影響為主，嘉義新港廠則以衍生性 PM<sub>2.5</sub> 前驅物排放影響為主。模擬結果也顯示，排放量大小並非與環境影響比例成正比關係，亦即排放影響仍須考量背景濃度、氣候傳輸條件及地理環境而定。另與其他國內針對電廠排放影響研究相比，對於鄰近空品測站之 PM<sub>2.5</sub> 濃度之平均影響比例為 0.57% 左右(最高為台中電廠 0.68%)，亦驗證本研究模擬結果實屬合理。

總結而言，單一汽電共生燃煤鍋爐機組對環境影響仍相當有限，也顯示改善環境 PM<sub>2.5</sub> 之困境，管理單位更應以科學合理之論證為依據，提出更有效之管理策略。

## 參考文獻

王晨桓(2016)，我國空氣污染治理的困境，汽電共生報導，第86期，p49-52。

行政院環境保護署(2015)，空氣品質模式評估技術規範。

行政院環境保護署(2017)，認識環境保護政策

<http://kids.ey.gov.tw/cp.aspx?n=11C0476A10437757>

行政院環境保護署環境檢驗所(2014)，排放管道中細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)檢測方法(NIEA A212.10B)。

行政院環境保護署環境檢驗所(2016)，排放管道中可凝結性微粒檢測方法(NIEA A214.70C)。

吳至晏、羅紹璋、李奎廷、謝岳書、許雅婷、楊錫賢(2016)，稀釋採樣法與煙道內熱採樣法應用於固定源  $PM_{2.5}$  檢測比較研究，2016 細懸浮微粒 ( $PM_{2.5}$ )管制與健康照護研討會。

吳義林、蔡德明、王錫豐(2014)，細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )管制策略研擬及減量成效分析，行政院環境保護署專案計畫，計畫編號:EPA-102-FA11-03-A082，財團法人成大研究發展基金會。

吳義林、蔡德明、王錫豐(2015)，臺灣細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )成分與形成速率分析，行政院環境保護署專案計畫，計畫編號:EPA-103-FA11-03-A321，財團法人成大研究發展基金會。

張立鵬、廖琦峯(2014)，103年彰化縣細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )來源分析及管制計畫，彰化縣環境保護局專案計畫，計畫編號:1020061206，臺境企業股份有限公司。

郭承彬、蔡志賢、張章堂(2016)，本土固定污染源  $PM_{2.5}$  檢測係數與美國 PM Calculator 資料庫比較，105 年綠色技術與工程實務研討會。

陳玟如、林唐裕、蔡欣欣、沈文瀾、梁志堅、李文興、陳斌魁、呂理平、林大惠、辜志承、曾文智、陳春豐、林弘謀、陳玉坤、洪萌馥、吳昭吟、李岡明、周寶源、葉偉寧、李俊茂、陳碧輝、黃賢中、陳華華、林素蘭、張景閔、張維、蘇家祥、謝慧瑩、沈雅盛、張娟娟(2013)，推動汽電共生系統輔導設置與經濟效益分析之研究，行政院經濟部能源局專案計畫，計畫編號:102C008，財團法人臺灣綜合研究院。

程萬里、白珏玲、林佩吟、王瑋琦、卓冠宇、楊中明、江柏欣、沈育安、顧長軒(2015)，104 年臺中市細懸浮微粒( $PM_{2.5}$ )管制計畫，臺中市政府環境保護局專案計畫，計畫編號:P0526，臺灣綠基科技股份有限公司。

詹長權、邱嘉斌、鍾明基、李睿桓(2014)，中部空品區細懸浮微粒暴露評估及成因分析，行政院環境保護署專案計畫，計畫編號:EPA-102-FA11-

## 102 應用 CMAQ 空品模式評估汽電共生燃煤機組排放於環境 $PM_{2.5}$ 影響 - 以某公司為例

03-A271，國立臺灣大學職業醫學與工業衛生研究所。

蔡志賢、陳勳融、葉富豪、郭承彬、周佳穎、梁佳修、陳昱均、楊于昕、陳韋伶 (2016)，新版空氣污染物排放清冊建置，行政院環境保護署專案計畫，計畫編號:EPA-104-FA11-03-A182，景丰科技股份有限公司。

蔡德明、賴信志、王錫豐、吳義林(2013)，火力電廠空污排放對細懸浮微粒 ( $PM_{2.5}$ )之影響與因應對策研究，台電綜合研究所委託研究計畫，計畫編號 061010000601，崑山科技大學。

Sheya, S. A., Glowacki, C., Chang M. C. O., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2008), Hot filter/impinger and dilution sampling for fine particulate matter characterization from ferrous metal casting processes. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 58(4): p553-561.

U.S. EPA (2004), Measurement of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  Emissions by Dilution Sampling (Constant Sampling Rate Procedures), CTM-039.

U.S. EPA (2008), Methods for Measurement of Filterable  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  and Measurement of Condensable PM Emissions From Stationary Sources, Method 202.

Wien, S., England, G., Loos, K. et al. (2001),  $PM_{2.5}$  Speciation profiles and emission factors from petroleum industry gas-fired sources[A], In: International emission inventory conference, one atmosphere, one inventory, many challenges[C], Denver, CO, p1-13.