

空氣污染與噪音類

靜電集塵器改善提升集塵效率以降低粒狀物排放

蔡東昇*、郭奇亮**、張浣甄***

摘要

空氣污染防治為現今政府施政重點之一。為加速及確實解決國內大型固定污染源的空污問題，政府部門極力推動國營事業及大型企業空污減量、工商業鍋爐改善等相關新作為。然而，根據空氣品質指標顯示，PM 仍有改善空間。究其原因，可能為空污防制設備老舊，發電機組至少都運轉 10 年以上。現今也許勉強可以符合空污法規要求，然而在空污減量的趨勢下，未來要符合新法規仍需做改善與設備升級。

本文以北部與中部火力發電廠為例，探討空污改善方案，在時間、空間等雙重限制之下，如何善用有限的 50 天大修大幅減少 PM_{2.5} 與粒狀物排放。建議政府應督促各廠善用歲修期間來改善靜電集塵器，並力求 3 年內降低現有 PM 排放 30%，或達到低於 15mg/Nm³ 以下排放。未來更應朝向超低排放 5mg/Nm³ 目標邁進。

【關鍵字】大型固定污染源、靜電集塵器、歲修改善、粒狀物排放

* 台耘工業股份有限公司
** 台耘工業股份有限公司
*** 台耘工業股份有限公司

副總經理
業務處經理兼資深工程師
資深業務專員兼執行秘書

一、前言

工業生產規模日益擴大，使得環境資源的消耗與污染問題日趨嚴重。往昔製造工廠只追求利潤最大化，而未將社會責任與環境效益放在政策考量的首位。近年來，由於國際環保意識抬頭，跨國的大型企業也紛紛倡導空氣污染防治等環保議題，呼籲企業需有社會責任之使命感，加上世界各國對於空氣污染防治法規要求也日漸嚴苛，使得企業不得不正視愈來愈多的環保規範與國際產業的綠色競爭。因此，在永續發展 (Sustainable Development) 的思維下，企業經營決策的制定也須納入空氣污染防治等環保考量。從國際發展的趨勢觀之，政府可以身作則擔任企業環保責任之先導，帶領企業同時鼓勵企業響應之。國營企業的空污改善規劃應以達到必要性、急迫性、可行性、持續性與未來性來做規劃。

在必要性方面，產業應力求 3 年內降低現有 PM 排放 30% 或達到 $15\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下排放。而急迫性方面，除役前過渡期仍需有空污減排目標。舉例來說，5 年後除役的電廠，以氣代煤過渡期仍應有所作為，進行設備 ESP 改善 PM 污染排放降低 30%。在可行性方面，50 天內停機大修時則可以改善靜電集塵器效率。而以持續性來說，每一次大修應該都要做改善。在未來性上，建議設立超低排放 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 目標並增設濕式靜電集塵器 (WESP) 控制設備以降低凝結性微粒 CPM(Condensable Particulate Matter) 之排放。

於空氣污染防治方面，靜電集塵器 (Electrostatic Precipitator, ESP) 為目前工業製程常使用且效果顯著的控制設備之一，需每年定期維護保養，以確保 ESP 運轉的穩定性。然而，隨著逐漸加嚴的環保法規，現今許多廠區的 ESP 面臨既有除塵效率不足、內部零件老舊的問題，導致除塵效率無法達到法規要求。若不進行設備維護或升級，很快地將無法符合現行法規。常見的 ESP 改善方式為定期更換內部老舊零件，如極板 (Collecting Plates)、極線 (Discharge Electrodes)，以回復原始效率及運轉可靠度，或是將既有極線升級為硬管式極線 (Rigid Discharge Electrode，簡稱 RDE)。此外，亦可提高放電效率，並藉由將傳統變壓器 (Conventional Transformer Rectifier) 升級為高頻變壓器整流器 (High Frequency Transformer Rectifier) 來達成，工期短且易於施工。

上述方式皆為目前提升 ESP 效率的主流作法。若廠內有多餘的空間，也可考慮藉由增加集塵面積及提升放電效率來提升 ESP 集塵效率。然而更換內部老舊零件或擴建 ESP 以增加集塵面積，所需工期較長且成本較高，必需提早規劃停機時間方能施工。以下以 2 個研究對象：北部 (研究對象 1) 與中部 (研究對象 2) 燃煤火力電廠之 ESP 主流作法的改善實績為例詳述之。

二、北部某發電廠空污防制設備改善案例介紹

北部某電廠 (研究對象 1) 是台灣少數使用重油做為燃料的發電廠，因此備受該縣市政府的關注，2018 年立法機關於現場勘查指出，由於研究對象 1 要正式除役，但轉為天然氣發電還有很長一段時間，因此要求其在這段過渡期提出具體改善空污辦法。為了達到降低粒狀污染物排放，研究對象 1 已致力於 2019 年完成第 3、4 號機組的改善 (表定除役時間為 2024 年)。

研究對象 1 之 3 號機組 ESP HQA10、HQA20、HQB10、HQB20 (共 4 室) 於 2016 年 2 月至 4 月完成極板與極線的更新工程 (圖 1)。由於極板及其部件之安裝方式為透過吊車由外吊至 ESP 內部，故須先將 ESP 屋頂之浪板與鐵網等部分拆解以利於之後的安裝。以氧乙炔火焰切割將 3 號機 A、B 側之殼體上蓋部分切出適當面積以利於極板及懸吊樑等之吊掛作業。作業時將最上層之 Cold Roof 以片段方式切割後挪開，再移除保溫棉及鐵網，最後切割最下層之 Hot Roof。(圖 2)

22 靜電集塵器改善提升集塵效率以降低粒狀物排放

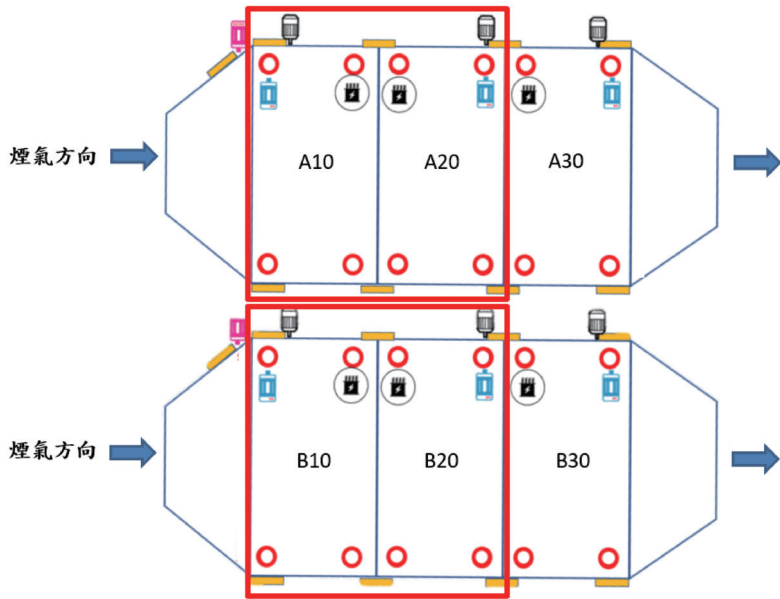


圖 1 極板與極線的改善範圍為 3 號機 HQA10、HQA20、HQB10、HQB20 之殼體上蓋位置共 4 處



圖 2 屋頂拆除後

將 3 號機 A、B 側第一及第二室的極板全數拆除。先將極板底部與敲擊連桿相接的部分切割後再以吊車將極板的數量分批地將 ESP 內的舊極板全部移除 (圖 3)。爾後，將 ESP 內的舊彈簧式極線從極線框上移除 (圖 4)，之後將各層之舊極線框從極線主樑上切割下來，於網綁妥當後以吊車從屋頂吊出 ESP，並將殘餘在極線框座上的鐵料以手持式砂輪機切除及磨除乾淨以利之後的安裝作業。

待移除舊極板與極線後，即可著手安裝新極板與極線。安裝新極板時，吊車分批地將新極板安裝至極板懸吊樑之吊耳上，並在過程中將每片極板之固定鎖焊至相對應位置 (圖 5)。新極線部分，則是於每層極線框的位置各站 1 名工人，由最上層的工人將彈簧式極線的一端掛勾掛於最上層的相對應掛頭，而另外 1 名工人再將彈簧式極線的另一端掛勾掛於彈簧式極線的未安裝端掛勾接近下層的極線框掛頭即可停止，後由手動方式將彈簧式極線之掛勾與極線框之掛頭結合 (圖 6)。待極板、極線與敲擊等新零件安裝完畢之後，將原有附屬設備復原，屋頂雨遮回復。



圖 3 舊極板移除後



圖 4 舊極線移除後



圖 5 新極板安裝後 (左)、新極板安裝過程 (右)



圖 6 新極線安裝後

研究對象 1 之 4 號機於 2016 年 2 月至 3 月完成靜電集塵設備極板極線更新工程 HQA10、HQA20 共 2 室 (圖 7)。於靜電集塵設備改善之後，由第三方公正單位檢測，粒狀物排放大幅降低 53%，遠低於預設的 40%，且 $PM_{2.5}$ 排放更有效地降低 71%。有鑑於此，研究對象 1 所在地之環保局更稱其為「老舊電廠與城市發展範例」。透過靜電集塵器源頭改善、廠內製程改善、管末處理與管制掌握；綜合來看，研究對象 1 達成 1 年空污費由 1.3 億元降至 3 千萬元。且其中粒狀物透過電廠利用每次大修進行自主改善，由 0.074kg/MWH 降至 0.046kg/MWH，每百萬瓦小時的排放量可降低 37.8%。(基隆市環保局：2019 國際氣膠科技研討會)

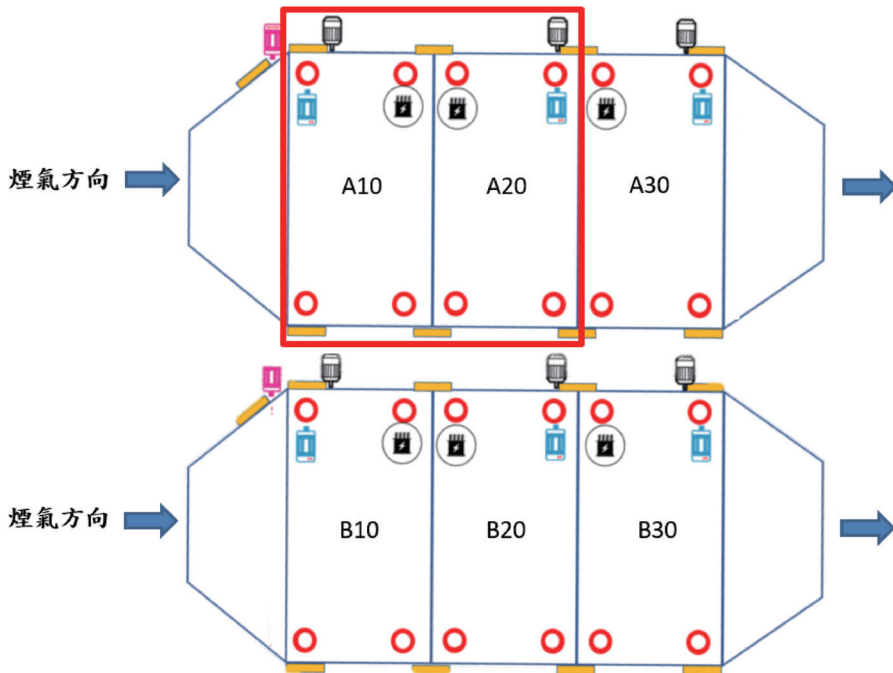
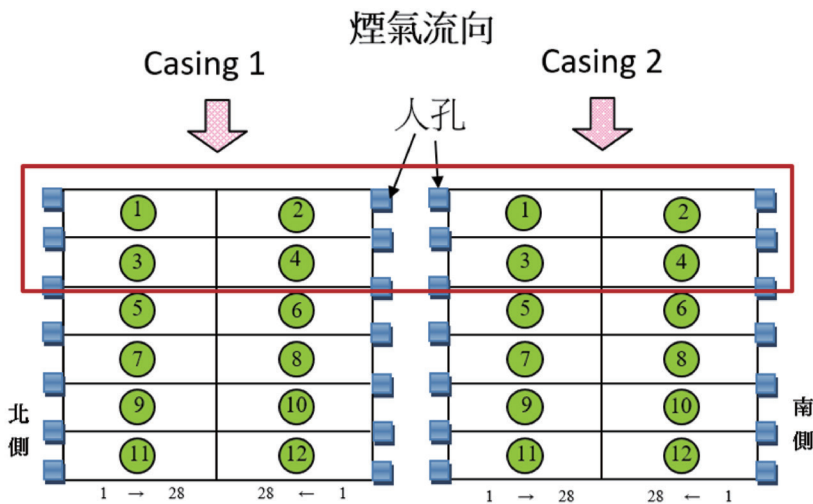


圖 7 極板與極線的改善範圍為 4 號機 HQA10、HQA20 之殼體上蓋位置共 2 處

三、中部某火力發電廠降低粒狀物污染排放

中部某縣市因細懸浮微粒 $PM_{2.5}$ 與臭氧 8 小時平均值，有時會有不符合國家空品標準，導致在該縣市設廠之企業在空污防制方面，除符合法規標準外，尚需努力自主改善，而中部某火力發電廠（研究對象 2）也不例外。研究對象 2 於近幾年間持續針對廠內老舊設備進行升級。以下以第 8 號機組為例敘述之。

研究對象 2 於 2018 年 10 月至 12 月大修期間規劃改善第 8 號機組。由於電廠的靜電集塵器已經運轉超過 30 年，經長時間運轉後造成金屬材料疲勞變形有部份的極線已經鬆弛、當極線有鬆弛的情況時，煙氣通過時會造成極線容易晃動而靠近極板，此會直接縮短電場正負極的距離，產生火花使得二次側電壓無法提升，極線鬆弛嚴重時也可能會直接斷裂掉落，直接碰觸到極板系統導致短路跳機，此次改善為靜電集塵器管式極線框 448 組及 8 台高頻變壓器更新工程（圖 8）。



※ 煙道排數由人孔處開始算至殼體中線 1 ~ 28

圖 8 ESP 配置俯瞰圖。紅色框線部分為 2018 年改善範圍

機械方面，由於第一排倉室為煙氣進來最先收塵的區域，一般靜電集塵器設計都以第一排收塵量為最多，但電廠由於第一排都很容易因為前端注氮關係導致極線容易包灰，故更新極線框，並將原有極線改為新款的硬管式極線 (RDE)(圖 9)。硬管式極線 (圖 10) 之優點如下：

1. 分岔尖刺的設計可得到較低的起暈電壓；在相同的二次側電壓之下，會有比較高的電流輸出，進而提高收塵效率。
2. 使用冷軋式鋼板，不易斷裂，使用年限長。
3. 兩側針刺與極線本體為一體成型，無另外焊接，極線牢固不易斷裂、脫落。
4. RDE 極線本體上方開口處另加上密封設計，避免粉塵進入極線本體造成極線彎曲變形。

硬管式極線不但可延遲產生極線包灰之問題，並增加放電強度，更可以減少因極線斷裂導致異常跳機所造成的損失，對於所有的 ESP 使用者而言是最好的選擇。



圖 9 新極線框與新極線安裝中



圖 10 硬管式極線

電氣方面，將一般傳統變壓器升級為高頻變壓器整流器 (圖 11) 的優勢為：

1. 提高設備可靠度。
2. 收塵效率提升：可有效降低火花發生頻率，並快速回復火花降載 (Quench Time)，因此平均輸出放電功率較傳統高。(圖 12)
3. 省電：在相同運轉條件 (電流密度) 下，可有效減少一次側電流輸入，達到省電效率。

2018 年的改善案，請第三方公正單位於改善前、後於煙囪出口採樣檢測，確認粒狀污染物減排效果良好，降低了 12% 的粒狀物排放 (mg/Nm^3)，從 $10.86 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $9.55 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (圖 13)，因此在 2020 年大修期間進一步推展第 8 號機組的南北側第 3、4 排共 8 小區極線框更新，並將一般傳統變壓器升級為高頻變壓器整流器 (圖 14)。改善後亦請第三方公正單位測試，雖然在燃煤混合配比條件改變，澳洲煤比例由 40% 增加至 60% 的情況下，煙囪出口粒狀物仍然能從 $11.56 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $9.47 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ，降低了 18% (圖 15)。



圖 11 高頻變壓整流器安裝完成

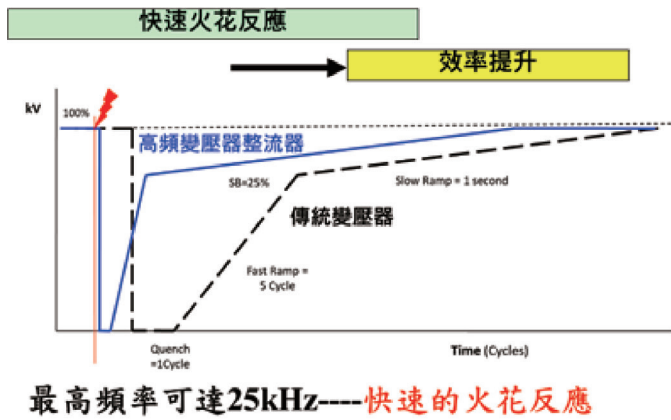
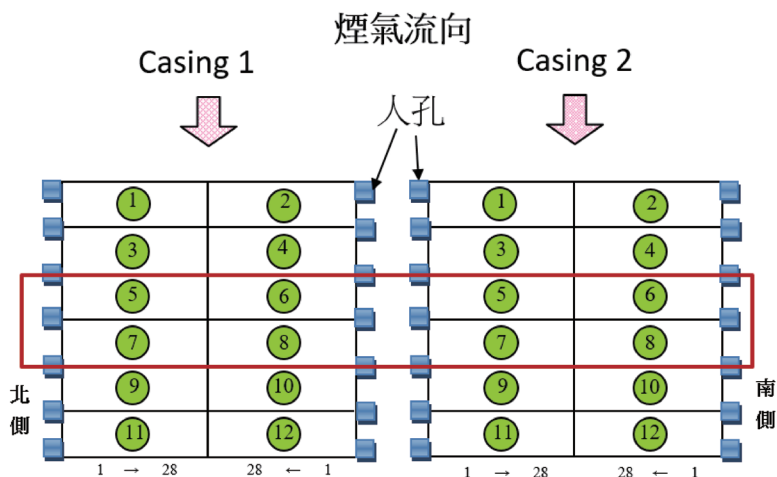


圖 12 高頻變壓整流器的火花反應時間 (30 μ sec) 較傳統變壓器 (8.33msec) 快 278 倍

	負載 (MW)	溫度	燃煤配比	粒狀物排放 (mg/Nm ³)		改善成效
				改善前	改善後	
2018	509.7	144.7	2澳3印	10.86	9.55	12%

圖 13 前兩排於改善後粒狀物降低了 12%



※ 煙道排數由人孔處開始算至殼體中線 1 ~ 28

圖 14 ESP 配置俯瞰圖。紅色框線部分為 2020 年改善範圍

	負載 (MW)	溫度	燃煤配比	粒狀物排放 (mg/Nm ³)		改善成效
				改善前	改善後	
2020	549	159.8	3澳2印	11.56	9.47	18%

圖 15 第 3、4 排於改善後粒狀物降低了 18%

四、國營企業的空污改善規劃建議

在空污改善方面，建議政府應著手要求各國營事業及大型企業之商業鍋爐在每年歲修期間逐步改善，並同時規劃長停機時間整體改善。倘若該年度歲修沒有立即改善，待下次停機又要再等至少 1 年（例如發電廠每部機組約 2 年停機 1 次），時間勢必會拖延太久。對於國營企業的空污改善規劃，建議可往以下幾點著手：

1. 3 年內降低現有 PM 排放 30% 以上，可先將乾式 ESP 出口排放改至 $15\text{mg}/\text{Nm}^3$

a. 改善要考慮時間限制、空間限制、商轉可靠度與成效

從資料上來看，現有固定污染源之排放都符合法規；然而，符合法規只是政策上分數及格，實際上卻與社會民眾期待有相當落差。如何協助台灣的工廠在未來 5 年內有動力、有方向弭平這段差距，則是政府的積極作為。除時間壓力與成效外，尚須考慮新技術、新設備之商轉可靠度。

b. 把握每次的大修 (停機 40 天 ~60 天) 的機會，並於每次大修都要做改善，而非只做傳統的檢修

政府目前為電廠規劃的改善計畫皆是從大方向著手，以興建燃氣機組替補舊燃煤機組，但是推行這個方向有 3 點考慮。首先，新廠計畫需時長，為了機組品質，再如何壓縮也需要 5 年 ~7 年。其二，未淘汰燃煤電廠在未來的 30 年依然需保留做為基載機組，以維持台灣的供電需求。其三，將現有之燃煤電廠進行有計畫之設備改善，來達到設備穩定和降低環境影響。

2. 設定超低排放 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下的目標 (含 CPM)

a. 搭配濕式靜電集塵器等技術控制 CPM

固定污染源之粒狀物可略分為過濾性微粒 (Filterable Particulate Matter, FPM) 與凝結性微粒 (Condensable Particulate Matter, CPM)。FPM 在一般工廠是以乾式靜電集塵器或者濾袋控制，乾式靜電集塵設備的最佳化可將 FPM+CPM 控制在 $15\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，既存設備的最佳化包含機械改善和電氣改善。機械改善可以將傳統極線改為硬管式極線，電氣改善可以將傳統變壓器改為高頻變壓器，機械與電氣都提升即增加集塵效率。進一步配合新設備如濕式靜電集塵器、Low Nox Burner、FGR 等控制 CPM，將排放進一步降低至 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，為現行業界達到目標的可行方案。

b. 採改善既有設備、新增控制技術的方式，雙管齊下控制固定污染源的粒狀物

既有設備得到改善，也會延長後方新增的控制設備的壽命，從管末控制整體達到減排 50% 的成效。相較於電廠，鋼鐵廠與煉油廠在空污改善方面仍有很大的進步空間。待國營企業的排放數值均已達到最佳化，搭配立法降低移動式污染源，

以國營事業的空污改善作為樣板，也對往後對民營電廠抑或是中南部的小型鍋爐推動空污防制提供參考榜樣。

參考文獻

- 基隆市環保局 (2019)，基隆市燃油電廠管制成效與作為，2019 國際氣膠科技研討會。
- 張凱欣 (2018)，新頭殼，「協和電廠重油改天然氣 林右昌：五大要求可減空汙」，
<https://newtalk.tw/news/view/2018-03-28/119031>。
- 俞肇福 (2018)，自由時報，「協和電廠換燃油，省錢減少污染」，
<https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/2330986>。
- Berthelot, S., D. Cormier, and M. Magnan(2003), Environmental disclosure research : Review and synthesis, *Journal of Accounting Literature* 22 : 1-44.
- Ken Parker(2014)，靜電集塵技術應用，台耘工業。
- Ken Parker(2003), *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*, The Institution of Engineering and Technology.
- Mili D. Eri (2018), Results of the modernization of the electrostatic precipitator at unit B1 of the Thermal Power Plant Kostolac B, *Thermal Science* 22(Suppl. 5) : 1623-1634.