

空污防制

燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布 探討與分析

李秀霞*、黃志峰**、陳旺***

摘 要

汞為毒性極強的重金屬，其揮發性為金屬中最高者，極易經由呼吸道或消化道侵入內臟並累積於體內。探究大氣環境中汞主要污染來源為人為所致，國內汞主要排放源包括燃燒源及金屬冶煉製程兩大類，並以燃燒源為排放大宗，包括燃煤發電鍋爐、廢棄物焚化爐及水泥旋窯等，佔所有固定污染源汞排放量的 68%。而燃煤發電鍋爐主要包括燃煤電廠及燃煤汽電共生廠，其中燃煤電廠是台灣地區發電的主力，每年消耗近 3,500 萬噸的煤，其汞排放量約佔所有固定污染源 13.42%。

一般燃煤發電鍋爐煙道氣排放汞化合物型態有三種，分別是元素態汞 (elemental mercury, Hg^0)、氧化態汞 (oxidized mercury, Hg^{2+}) 和粒狀物結合汞 (particle-bound mercury, Hg_p)，其產生的多寡受煤組成、形式及燃燒條件而異。本研究主要是探討燃煤發電鍋爐製程中汞主要來源與分佈，研究結果顯示，燃煤發電鍋爐整體汞排放質量平衡為 95.7%，絕大部分汞來自於燃料煤(97.2%)，排放後的汞主要殘留於飛灰中(63.8%)，其次是由煙囪(15.9%)及石膏漿(14.2%)排放。

【關鍵字】元素態汞、氧化態汞、粒狀物結合汞、燃煤發電鍋爐

*工業技術研究院能源與環境研究所 副研究員

**工業技術研究院能源與環境研究所 研究員

***工業技術研究院能源與環境研究所 副工程師

2 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

一、前 言

為維護全球空氣品質，國際逐步發展控制技術、管制策略及研訂法規，以有效控制空氣污染物排放。時至今日，空氣品質較十年前有明顯改善，但是隨著時代變遷與科技高度發展，衍生出更多環境污染問題。而國內空氣污染管制項目已從早期的粒狀物、硫氧化物、氮氧化物，演變至近年的持久性有機污染物(戴奧辛)，可見高科技帶來多變的污染問題，而重金屬汞為繼戴奧辛之後另一受矚目議題。

汞為毒性極強的重金屬，熔點 -38.87°C ，沸點 356.9°C ，揮發性為金屬中最高者，極易經由呼吸道或消化道侵入內臟並累積於體內。汞毒性之高低依其存在的型態而異，其中以有機汞的毒性最強，在人體內的半衰期(half life)約為 75 天，而無機汞約為 42 天^[1]。依據聯合國環境總署於 2002 年完成之 *Globe Mercury Assessment* 報告^[2]及美國環保署於 1997 年完成之 *Mercury Study Report to Congress* 研究調查^[3]發現，汞對環境有重大負面影響，且具有全球流通特性。排氣中的汞大部分都是以元素態汞(Hg^0)存在，其他部分為無機汞，排放於大氣中後會吸附於顆粒中，在大氣中傳輸範圍可達 100 ~ 1,000 公里遠，汞一但沈降於地表中，元素態汞將轉換為甲基汞(methyl-mercury)，甲基汞會經生物濃縮而危害到人體。因此，汞在環境中與生物體內之含量，近年來受到國際間相當地重視。

在自然界中，各類礦石、土壤、岩石、水體、大氣及生物體內即含有微量的汞，在礦石中的汞以 HgS 型式為主，部份以氯化物(HgCl_2)或氧化物(HgO)形態存在，在未受污染的土壤中，汞含量約為 30 至 500ppb；而大部份的岩石中汞含量為 10 至 20,000ppb^[4]。探究大氣環境中汞主要污染來源為人為所致，國內汞主要排放源包括燃燒源及金屬冶煉製程兩大類，其中燃燒源包括燃煤發電鍋爐、廢棄物焚化爐及水泥旋窯等；金屬冶煉製程則包括電弧爐、燒結爐及非鐵金屬冶煉等高溫產源。而汞污染排放以燃燒源為大宗，佔所有固定污染源汞排放量的 68%，其中燃煤發電鍋爐主要包括燃煤電廠及燃煤汽電共生廠，而燃煤電廠是台灣地區發電的主力，每年消耗近 3,500 萬噸的煤，其汞排放量佔所有固定污染源 13.42%^[5]。因應聯合國建議管制汞排放問題，環保署業於 92 年起陸續針對國內潛在污染源進行調查，並研訂相關管制法規，藉以有效控制汞的排放。

二、燃煤發電鍋爐汞排放特性

由於分析技術能力的提升，發現燃煤發電鍋爐所排放汞化合物型態有三種，分別是元素態汞(Hg^0)、氧化態汞(Hg^{2+})和粒狀物結合汞(Hg_p)，其產生的多寡受煤組成、形式及燃燒條件而異。其中氧化態汞在煙道氣中主要係指 HgCl_2 (Mercury Chlorination)，另可能含有少量的 HgS 及 HgO ；而粒狀物結合汞則是含汞化合物被結合在飛灰上形成之固相汞。不同的汞化合物有不同的化學特性，亦影響其捕集策略的運用，固相汞(Hg_p)能被傳統之除塵設備去除，如靜電集塵機(electrostatic precipitator, ESP)或袋式集塵機(bag filter, BF)，至於氣相氧化態汞(Hg^{2+})溶於水，故能被排煙脫硫系統(flue gas desulfurization, FGD)去除，唯有元素態汞(Hg^0)會穿越廢氣處理設備，排放至大氣中。因此瞭解汞的分佈(氣相或固相)與物種型態，有助於防制設備的選擇，及提升汞的去除效率。

一般煤中平均含汞量約為 $\sim 0.1\text{mg/kg}$ ，1999 年美國燃煤電廠平均每年消耗約 8 至 9 億噸的煤，推估約有 75 噸的汞被燃燒，其中大約有 60%被排放至環境中^[6]。其煙道排放的汞物種因燃燒煤種而有所不同，燃燒次煙煤比煙煤產生較多的元素汞，主要是煤中的氯含量和灰的特性，均會影響汞在固相與氣相的分佈，以及其在氣相中的物種型態^[7]。Pavlish(2003)之研究指出，美國西部次煙煤含汞量僅為 Appalachian 煙煤的一半，但煙煤中含有較多的氯，易促進汞的氧化，進而提升汞的捕集效果。另外，煤中的鐵亦會催化汞氧化，但鈣和硫卻會抑制汞的氧化。燃煤鍋爐在低溫及高氯煤的操作條件下較易生成氯化汞，美國曾經檢測兩座氯化複循環發電廠(IGCC, Integrated Gasification Combined-Cycle Plants)煙道氣，發現燃煤所產生的汞大部分以元素態存在，雖然在高溫燃燒下會以元素型態排放，但之後隨著排氣溫度降低而有部分氧化(35%至 95%)。在較高溫度下，推估汞於煙道氣中反應生成三種型態： $\text{HgCl}_{2(g)}$ 、 $\text{HgO}_{(g)}$ 、 $\text{Hg}^0_{(g)}$ ，當溫度低於 430°C 時煙道氣中的汞物種以 $\text{HgCl}_{2(g)}$ 為主。而依據熱力學反應，當溫度高於 750°C 時， $\text{Hg}^0_{(g)}$ 是唯一穩定存在的汞物種。除了溫度是主要影響因素外，研究顯示，煤中的氯含量低於 100ppm 時，煙道氣中只有很少的氯化汞形成，相反的，當煤中氯含量大於 150-200 ppm(乾基)時，鍋爐出口的元素態汞(Hg^0)比例會驟降，從 85%下降至 10%，粒狀物結合汞比

4 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

例明顯增加(如圖 1)，當煤中氯含量大於 500 ppm，氯化汞可能是煙道氣中汞存在最主要的形式^[8]。

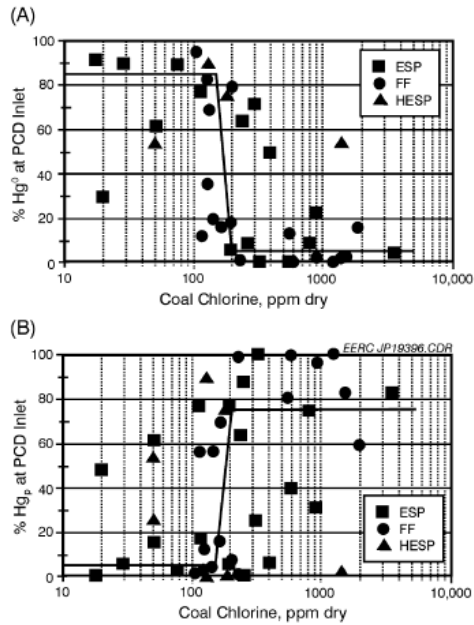


圖 1 粒狀物控制設備入口汞物種(A：Hg⁰，B：Hg_g)變化與煤中氯含量關係圖 (Pavlish et al, 2003)

三、檢測作業規劃及分析

為了解燃煤發電鍋爐空氣污染防治設備單元對汞的去除效率，以及汞在經過不同防制設備後的物種變化，本研究規劃檢測對象以防制設備齊全者為主，並現場實際勘察確認採樣位置點，檢測作業規劃說明如下：

1. 廢氣處理流程：測試電廠燃煤發電鍋爐空氣污染防治設備組合為：選擇性觸媒反應器 (selective catalytic reduction, SCR)+ 靜電集塵器 (electrostatic precipitators, ESP)+ 排煙脫硫設備 (flue gas desulfurization, FGD) (如圖2所示)。

2. 採樣點規劃：現場實際勘查燃煤發電鍋爐流程，針對進入與排出燃煤發電鍋爐系統的汞規劃檢測點，其中總汞濃度採樣項目包括：煤塊、石灰、底渣、飛灰及石膏漿等；煙道氣汞物種濃度採樣位置點包括：SCR 入口、SCR 出口、ESP 出口及煙囪等。
3. 汞物種流佈分析檢測：分別於 SCR 入口、SCR 出口、ESP 出口及煙囪等位置，進行排放管道煙道氣汞物種分析，包括元素態汞(Hg^0)、氧化態汞(Hg^{2+})、粒狀物結合汞(Hg_p)等，藉以了解汞於各單元設備的物種分佈及變化，進行現有空污防制設備汞去除效率評估。其中採集 SCR 出口的煙氣僅通過一層觸媒床，由於該 SCR 設有兩層觸媒床，因實際出口採樣孔太小無法取樣，評估會影響製程操作，故無法於運轉中進行開孔作業，僅採集通過一層觸媒床的煙氣。
4. 質量平衡分析：計算汞於燃煤發電鍋爐整體系統中的質量平衡，分析汞於系統中主要的流向與分佈。
 - (1) 輸入(input)：進入燃煤發電鍋爐系統中汞來源，包括：燃料煤、FGD 設備使用之石灰吸收劑。
 - (2) 排出(output)：排出燃煤發電鍋爐系統中含汞物質，包括：鍋爐底渣、ESP 集塵灰、FGD 石膏漿、煙囪排氣。

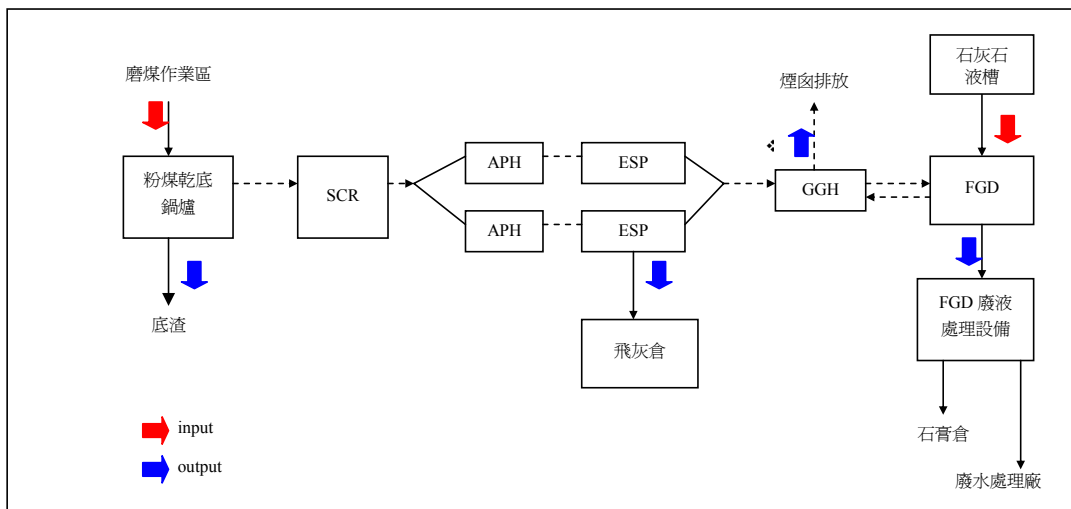


圖 2 燃煤發電鍋爐廢氣處理流程圖

四、汞物種流佈結果分析

4.1 汞的排放特性分析

氣態樣品採樣工作為在 SCR 入出口、ESP 出口、煙囪上，以四組採樣設備進行同步採樣，且在樣品的收集與分析上又分為元素態汞(Hg^0)、氧化態汞(Hg^{2+})及粒狀物結合汞(Hg_p)，煙道氣通過各空氣污染防治設備單元汞物種濃度變化如表 1 及圖 3 所示，分析討論說明如後。

表 1 燃煤發電鍋爐煙道氣通過各防制設備單元汞物種檢測結果

汞物種	SCR 入口 ($\mu g/Nm^3$)	SCR 出口 ($\mu g/Nm^3$)	ESP 出口 ($\mu g/Nm^3$)	煙囪 ($\mu g/Nm^3$)
Hg_p	3.78	3.09	0.03	0.01
Hg^{2+}	0.65	1.14	1.18	0.42
Hg^0	0.53	0.95	0.38	0.42
Total(Hg_t)	4.96	5.18	1.59	0.85

[註]：三次檢測數據平均值

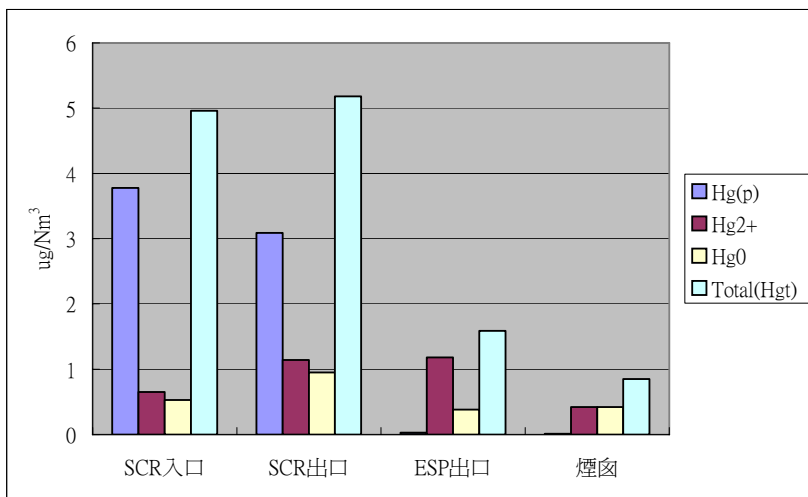


圖 3 燃煤發電鍋爐煙道氣通過各防制設備單元汞物種濃度變化

1. 空氣污染防治設備對汞去除效率分析

(1) 選擇性觸媒反應器

測試電廠 SCR 入口操作溫度為 365°C，其總汞含量為 4.96 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ；而出口操作溫度為 361°C，總汞含量為 5.18 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。本計畫所採集 SCR 出口煙氣僅通過一層觸媒床，由於該 SCR 設有兩層觸媒床，因實際出口的採樣孔太小無法取樣，評估會影響製程操作，故無法於運轉中進行開孔作業，僅採集通過一層觸媒床的煙氣，因而無法由檢測結果顯示 SCR 對總汞的去除效率。

(2) 靜電集塵器

ESP 出口溫度為 134°C，當煙道氣通過 ESP 之後，其粒狀物結合汞濃度由 3.78 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (SCR 入口)降為 0.03 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，總汞含量亦由 4.96 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (SCR 入口)降至 1.59 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，顯見 ESP 對粒狀物結合汞(Hg_p)去除效率達 99%，總汞去除率約為 67.9%。

(3) 排煙脫硫設備

由 ESP 排放之煙道氣再經 FGD 處理後，由煙囪排放至大氣中，煙囪排氣溫度為 92°C。檢測結果顯示，氧化態汞(Hg^{2+})濃度由 1.18 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 降至 0.42 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，去除效率為 64.4%；而粒狀物結合汞(Hg_p)和元素態汞(Hg^0)濃度變化不大，總汞含量由 ESP 出口的 1.59 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 降至 0.85 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

由上述可知，隨著煙道氣經過選擇性觸媒反應器、靜電集塵器、排煙脫硫設備等防制設備處理後，汞的含量有遞減的現象，整體汞的去除效率可達 82.9%。

2. 汞物種變化分析

測試電廠主要採用大陸煙煤，由檢測結果顯示，煙道氣中粒狀物結合汞(Hg_p)含量明顯高於氧化態汞(Hg^{2+})及元素態汞(Hg^0)，且隨著煙道氣經過 SCR 後，氧化態汞(Hg^{2+})增加，而元素態汞(Hg^0)降低；當煙氣經過 ESP 後，粒狀物結合汞(Hg_p)被有效補集，補集率達 99%。在煙氣經 FGD 由煙囪排放的濃度變化顯示，氧化態汞(Hg^{2+})被有效去除。

由國外文獻顯示^[9-10]，SCR 可將元素態汞轉化成氧化態汞(Hg^{2+})及粒狀物結合汞(Hg_p)，提昇 FGD 對汞的去除效率。雖然本計畫僅採集通過 SCR 一層觸媒床的煙氣，但由於 ESP 僅對粒狀物結合汞(Hg_p)有去除效率，並不會改變物種型

8 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

態，故可將 ESP 出口的氧化態汞(Hg^{2+})及元素態汞(Hg^0)含量，視為經 SCR 後的物種變化，由此可見，SCR 可將氧化態汞(Hg^{2+})濃度由 $0.65\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 提昇至 $1.18\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，而元素態汞(Hg^0)濃度由 $0.53\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 降至 $0.38\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。當煙氣通過 ESP 後，粒狀物結合汞(Hg_p)由 $3.78\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 降至 $0.03\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，足見 ESP 對粒狀物結合汞(Hg_p)捕集效率佳，而後煙氣通過 FGD 由煙囪排放，氧化態汞(Hg^{2+})濃度由 $1.18\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 降至 $0.42\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ，粒狀物結合汞(Hg_p)及元素態汞(Hg^0)濃度變化不大。

3. 煤中氯含量與汞物種生成的關係

由燃煤發電鍋爐汞排放特性分析可知，影響汞物種生成的因素很多，主要包括燃燒溫度及煤的氯含量。而粒狀物結合汞(Hg_p)的生成亦受到煤的含氯量及飛灰中未燃燒碳的影響，文獻資料指出含氯量較高的煤，較有利於低溫狀態下形成放熱反應生成 HgCl_2 ，而 HgCl_2 揮發性低且黏性較高，在適當的操作溫度下，易冷凝附著於飛灰上形成粒狀物結合汞(Meij et al, 2002)。Laudal 亦指出，飛灰中的未燃燒碳增加亦有利於粒狀物結合汞的生成。美國環保署假定粒狀物結合汞主要是以氧化態汞化合物組成(包括氯化汞及少量硫化汞和氧化汞)，因為元素態汞(Hg^0)相對的有較高的蒸氣壓，使其較不易結合到粒狀物上。由測試電廠煤成分分析結果顯示，氯含量為 $0.030\sim 0.049\%$ ，由 SCR 入口汞物種排放濃度顯示，粒狀物結合汞(Hg_p)為汞排放主要物種，推估其原因，主要是燃燒煙煤中含有較高濃度的氯含量所致。

4.2 質量平衡分析

經由檢測得到各個採樣位置點的流量(Q_1)及汞濃度(C_1)，即可計算各個採樣點汞的質量流率。其計算式如下：

$$\text{汞質量流率} = \text{汞檢測濃度} \times \text{流量}$$

由表 2 及表 3 可計算出各採樣點汞的質量流率，數據詳如表 4 所示。其中表 2 各採樣點汞的濃度係實際檢測值，而表 3 流量部分，除煙道排氣為實測值外，其他數值由測試電廠提供檢測當日操作紀錄。

本研究係採用環檢所公告之標準檢測方法及美國材料測試協會 (ASTM)

Ontario Hydro Method 檢測方法，由數據顯示，各樣品項目中汞及其物種的殘留皆相當微量，檢測結果不可避免的會有明顯的跳動，本研究以 3 組數據平均值作為質量平衡與流佈評估依據，計算所得之平衡誤差尚在合理誤差範圍(80%~120%)^[11]。圖 4 至圖 8 為燃煤鍋爐各單元設備及整體系統汞排放質量平衡分析圖，其中圖 4 係鍋爐單元設備汞排放質量平衡，除極少量殘留在底渣(1.9%)中，大部分的汞(98.9%)隨著煙道氣進入 SCR，單元質量平衡為 100.8%；圖 5 係 SCR 單元設備汞排放質量平衡，理論上汞隨煙氣經 SCR 後全部進入 ESP，其單元質量平衡為 104.8%，僅代表通過一層觸媒床之平衡(該 SCR 設有兩層觸媒床)，並非煙道氣完整通過 SCR 後之平衡；圖 6 為 ESP 單元設備汞排放質量平衡，其中有 66.4%的汞留在飛灰中，其他隨著煙道氣進入 FGD(31.7%)，單元質量平衡為 98.1%；圖 7 係 FGD 單元設備汞排放質量平衡，其中石膏漿中佔 42.6%，其餘 47.8%的汞則由煙囪排出，單元質量平衡為 90.4%；圖 8 係燃煤發電鍋爐整體系統汞排放質量平衡，顯示絕大部分汞係來自於燃料煤(97.2%)，僅有少量來自石灰石粉(2.8%)，在排放方面，飛灰及底灰各佔 63.8%及 1.8%，石膏漿佔 14.2%，煙道排氣佔 15.9%，顯示大多數汞存在於飛灰當中，整體汞排放質量平衡為 95.7%。

4.3 汞污染排放流向分析探討

1. 汞主要污染來源說明

由表 2 各採樣項目汞排放檢測結果顯示，煤和石灰石中汞的含量相當，但是由於煤的使用量遠高於石灰石(如表 3 所示)，故燃煤發電鍋爐汞主要污染來源為煤。

2. 汞污染排放流向說明

由圖 8 所示，燃燒後產生的汞污染物大部分經 ESP 收集後由飛灰排放(63.8%)，其次是由煙囪廢氣排放(15.9%)。另外，由環保署 94 年「固定污染源重金屬排放量調查與控制技術評估及減量管制策略研擬」計畫，以排放係數方式推估由煙囪排放的汞約為 0.1566 噸/年，同理，推估由飛灰排放的汞約為 1.009 噸/年，顯見汞主要由飛灰排放。

10 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

表 2 燃煤發電鍋爐各採樣項目汞排放檢測結果

項目 次數	SCR 入口 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	SCR 出口 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	ESP 出口 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	煙囪 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	煤(mg/kg)		石灰石 (mg/kg)	底渣 (mg/kg)	飛灰 (mg/kg)	石膏漿 (mg/kg)
					澳洲煤	大陸煤				
第一次	5.91	6.92	2.52	1.26	0.025	0.108	0.046	0.046	0.497	0.048
第二次	3.78	3.90	0.76	0.29	0.021	0.067	0.075	0.068	0.321	0.020
第三次	5.20	4.71	1.51	0.97	-	0.036	0.053	0.012	0.486	0.030

表 3 燃煤發電鍋爐各採樣項目流量

項目 次數	SCR 入口 (Nm^3/hr)	SCR 出口 (Nm^3/hr)	EP 出口 (Nm^3/hr)	煙囪 (Nm^3/hr)	煤(kg/hr)		石灰石 (kg/hr)	底渣 (kg/hr)	飛灰 (kg/hr)	石膏漿 (m^3/hr)
					澳洲煤	大陸煤				
第一次	2,003,072	2,008,016	2,003,504	1,934,316	93,620	110,000	4,480	2,540	16,240	46.17
第二次	1,999,952	2,009,530	1,975,699	1,964,448	107,000	98,170	4,910	5,850	17,690	40.00
第三次	2,017,284	2,025,547	1,958,564	2,000,650	-	199,000	5,450	4,460	12,500	45.88

表 4 燃煤發電鍋爐各採樣項目汞質量流率

日期	SCR 入口 (g/hr)	SCR 出口 (g/hr)	EP 出口 (g/hr)	煙囪 (g/hr)	煤(g/hr)		石灰石 (g/hr)	底渣 (g/hr)	飛灰 (g/hr)	石膏漿 (g/hr)
					澳洲煤	大陸煤				
第一次	11.83	13.93	5.04	2.43	2.34	11.88	0.21	0.12	8.07	2.22
第二次	7.55	7.84	1.50	0.57	2.25	6.58	0.37	0.40	5.68	0.80
第三次	10.48	9.54	2.95	1.93	-	7.16	0.29	0.05	6.08	1.38
平均值	9.96	10.44	3.16	1.65	10.07		0.29	0.19	6.61	1.47

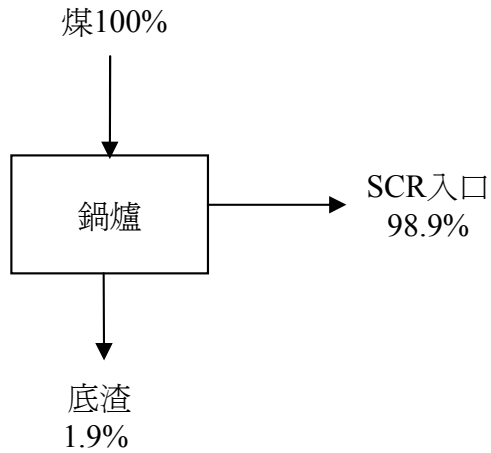


圖 4 鍋爐單元設備汞排放質量平衡分析

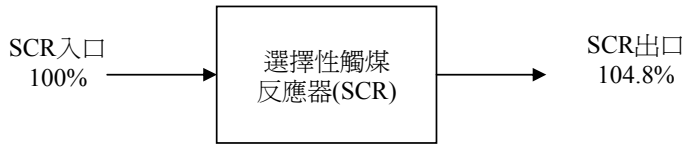


圖 5 選擇性觸煤反應器(SCR)單元設備汞排放質量平衡分析
(煙氣僅通過一層觸煤床)

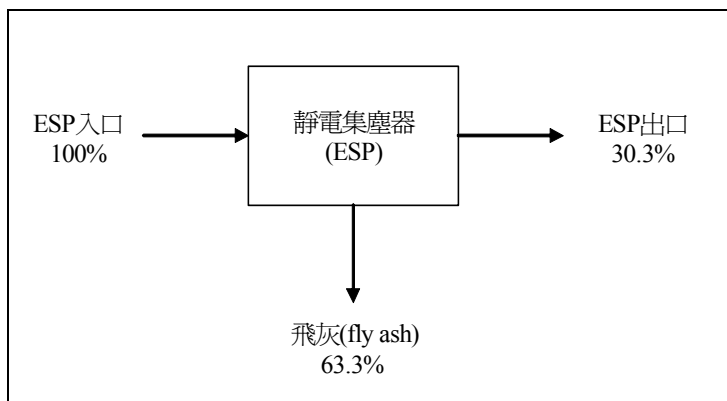


圖 6 靜電集塵器(ESP)單元設備汞排放質量平衡分析

12 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

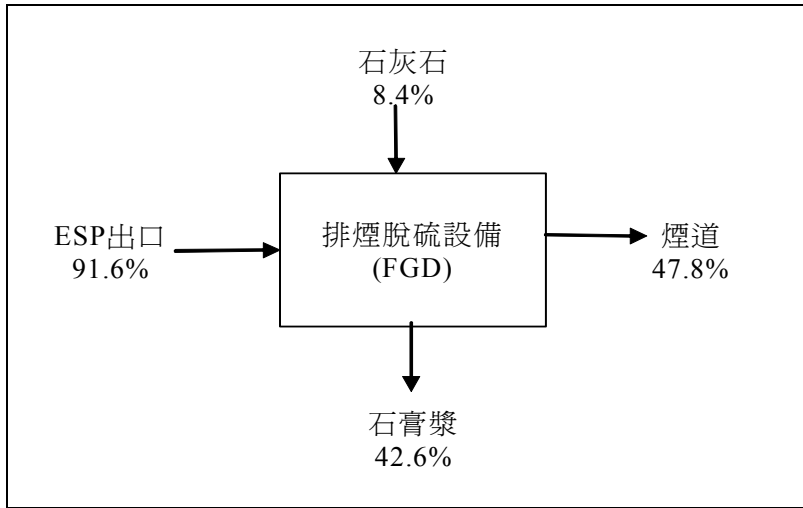


圖 7 排煙脫硫(FGD)單元設備汞排放質量平衡分析

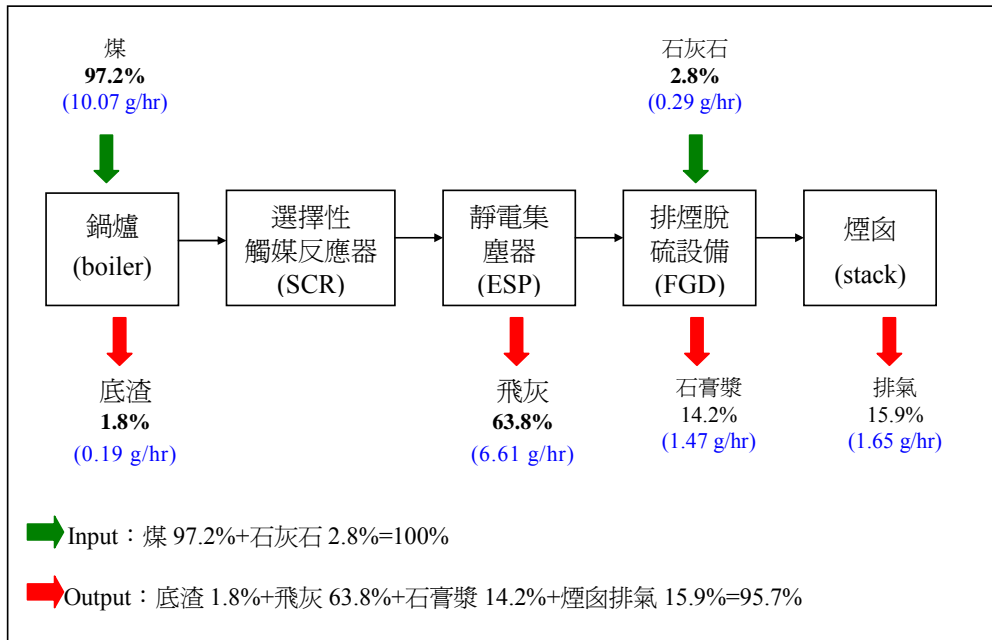


圖 8 燃煤發電鍋爐整體系統汞排放質量平衡分析

五、結 論

綜合以上分析結果，選擇性觸媒反應器(SCR)主要是改變汞物種型態，將元素態汞(Hg^0)轉化為氧化態汞(Hg^{2+})，而靜電集塵器(ESP)則是補集粒狀物結合汞(Hg_p)，排煙脫硫設備(FGD)主要是處理氧化態汞(Hg^{2+})。影響汞物種生成之因素很多，主要包括燃燒溫度及煤的氯含量，而測試電廠使用氯含量較高的煤，其燃燒產生的汞物種以粒狀物結合汞(Hg_p)為主。燃煤發電鍋爐整體汞排放質量平衡為 95.7%，絕大部分汞係來自於燃料煤(97.2%)，排放後的汞主要殘留於飛灰中(63.8%)，其次是由煙囪(15.9%)及石膏漿(14.2%)排放。推估每年由煙囪排放的汞約為 0.1566 噸/年，而由飛灰排放的汞約為 1.009 噸/年，顯見汞主要由飛灰排放。由檢測結果顯示，煤和石灰石中汞的含量相當，但是由於煤的使用量遠高於石灰石，故燃煤發電鍋爐汞的主要污染來源為「煤」。

六、參考文獻

- 1.陳威錦，”熱重分析法探討球狀活性碳吸附氣相氯化汞之吸附動力研究”，中山大學環境工程研究所論文，2004。
- 2.UNEP, ”Gobal Mercury Assessment”, December 2002.
- 3.US EPA, ”Mercury Study Report to Congress”, December 1997.
- 4.US EPA, ”Locating and Estimating Air Emissions From Sources of Mercury and Mercury Compounds”, December 1997.
- 5.行政院環境保護署，固定污染源重金屬排放量調查與控制技術評估及減量管制策略研擬，2005。
- 6.Boylan, H.M., Cain, R.D. and ”Skip” Kingston, H.M., ”A New Method to Assess Mercury Emissions: A Study of Three Coal-Fired Electric-Generating Power Station Configurations” Air & Waste Management Association, 53, pp.1318-1325, 2003.
- 7.US Department of Energy, ”Full-Scale Testing of Enhanced Mercury Control Technologies for Wet FGD Systems”, May 7 2003,.

14 燃煤發電鍋爐煙道排氣中汞物種流布探討與分析

8. Pavlish, J.H., Sondreal, E.A., Mann, M.D., Olson, E.S., Galbreath, K.C., Laudal, D.L. and Benson, S.A., "Status review of mercury control options for coal-fired power plants", *Fuel Processing Technology*, 82, pp89-165, 2003.
9. Laudal, D.L., Thompson, J.S., Pavlish, J.H., Brickett, L., Chu, P., Srivastava, R.K., Lee, C.W. and Kilgroe, J., "Mercury Speciation at Power Plants Using SCR and SNCR Control Technologies", *EM Feature*, February 2003.
10. Meij, R., Vredendregt, L.H.J. and Winkel, H.t., "The Fate and Behavior of Mercury in Coal-Fired Power Plants", *Air & Waste Management Association*, 52, pp912-917, Aug 2002.