

出國報告（出國類別：實習）

燃煤發電機組有害空氣污染物及 二氧化碳排放控制技術實習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：趙德琛 一般工程師

派赴國家：美國

出國期間：97年11月3日至11月17日

報告日期：98年1月15日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：燃煤發電機組有害空氣污染物及二氧化碳排放控制技術實習

頁數 33 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司人力資源處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

趙德琛/台灣電力公司/工安環保處/一般工程師/02-23668525

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：97年11月3日至11月17日 出國地區：美國

報告日期：98年1月15日

分類號/目

關鍵詞：燃煤發電、有害空氣污染物、全球暖化、溫室氣體減量

內容摘要：(二百至三百字)

對於燃煤發電廠而言，目前最重要的環保議題主要有二項：溫室氣體及有害空氣污染物的排放。美國原管制新設燃煤發電廠之汞排放標準，於2008年初遭聯邦法院取消，現今並無其他對於有害空氣污染物之管制，惟相關防制技術仍在研發中。

美國是唯一未批准京都議定書的溫室氣體排放大國，但是政府主管機關（如美國環保署及能源部）啟動各項計畫，協助業者調適及能力建構，各大廠商也積極進行二氧化碳捕捉與儲存（CCS）技術的大規模試驗，預期在數年內即能邁向商業化的里程碑。

美國二大電力業者（南方公司與美國電力公司）不敢輕忽溫室氣體減量的壓力，研擬相關因應策略，包括發展再生能源、提升機組效率、需求面管理、採用新的發電技術與CCS技術、植樹減碳、參與自願減量計畫及增建核能機組等，範圍廣闊，可作為本公司未來修訂溫室氣體管制策略之參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 次

一、 緣起及目的-----	1
二、 出國行程-----	2
三、 實習內容及心得-----	3
(一) 南方公司 (Southern Company) -----	3
1. 汞研究中心 (Mercury Research Center, MRC)	
2. 碳研究中心 (Carbon Research Center, CRC)	
3. 溫室氣體管制因應策略	
(二) 美國電力公司 (American Electricity Power) -----	10
1. 溫室氣體挑戰、目標及執行進度	
2. 長期減量策略	
(三) Babcock & Wilcox 公司-----	18
1. B&W 公司研究中心 (Babcock & Wilcox Research Center, BWRC)	
2. CO ₂ 排放控制技術	
3. 汞排放控制技術	
四、 結論及建議 -----	32

一、緣起及目的

緣起

近年國內多次傳出戴奧辛污染事件，雖日後證實與本公司無關，惟火力發電亦有微量排放，且行政院環保署亦公告檢測之命令，因此對其議題必須謹慎關注。另因燃煤電廠會排放汞，近年來逐漸受到國際間的重視，美國與加拿大等國家陸續制訂排放標準，並積極研發相關控制技術，故擬派員赴美國的電力公司與設備製造廠商實習有害空氣污染物（包括戴奧辛與汞）的控制技術，以作為未來空氣污染防制規劃之參考。

另因溫室效應議題，本公司數項火力重大電源開發計畫受阻，美國政府主管機關已展開多項計畫，電力業者如何因應碳排放限制的未來，以及目前發展之二氧化碳排放控制技術等，均為本公司可學習的項目。因此有必要併同上述實習有害空氣污染物控制技術之機會，了解美國的電力公司因應策略與相關技術發展現況，以作為本公司後續研訂溫室氣體減量策略之參考。

目的

（一）學習美國對於有害空氣污染物之管制發展與排放控制技術

美國為全世界第一個公告燃煤發電廠汞排放標準的國家，對於相關控制技術研發不遺餘力，藉由本次實習機會，可了解汞及其他有害空氣污染物的相關資訊。

（二）了解美國的電力業者對溫室氣體減量的因應策略

由於美國的發電廠以燃煤為主，溫室氣體排放量甚大，其實施各項因應策略的經驗，可以作為本公司研修與推動溫室氣體減量工作之參考。

（三）了解美國溫室氣體減量技術的發展

美國政府雖未批准京都議定書，但各大廠商積極進行二氧化碳捕捉與儲存技術發展，已近商業規模，本公司之火力發電廠未來將需要適時引進相關技術，應對目前技術發展狀況進行了解。

二、出國行程

出國行程

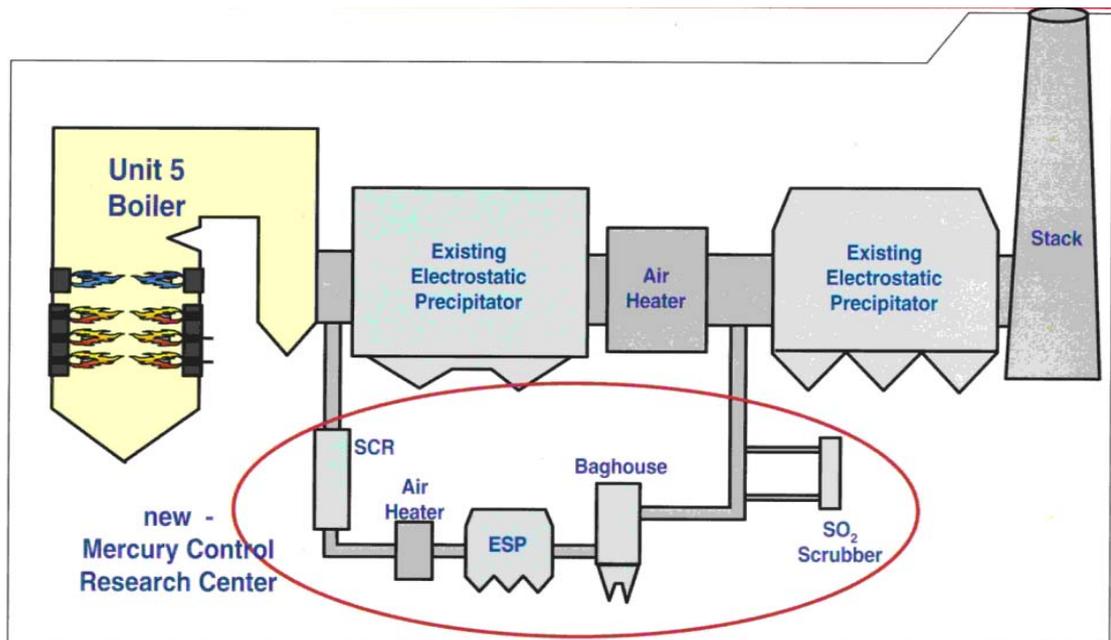
日期	行程	內容
97.11.03	台北→舊金山	往程
97.11.04 AM	舊金山-→伯明罕	路程
97.11.04 PM~ 97.11.07	拜訪南方公司 (Southern Company) 伯明罕及亞特蘭大辦公室	<ul style="list-style-type: none"> ● 實習有害空氣污染物控制技術與溫室氣體管制因應策略 ● 參觀 Mercury Research Center
97.11.08 ~ 97.11.09	亞特蘭大→克里夫蘭	週末及路程
97.11.10 ~ 97.11.11	拜訪 Babcock & Wilcox 公司	<ul style="list-style-type: none"> ● 學習有害空氣污染物及 CO₂ 排放控制技術 ● 參觀研究中心與富氧燃燒試驗工廠
97.11.12	克里夫蘭→哥倫布	路程
97.11.13~ 97.11.14	拜訪美國電力公司 (American Electricity Power)	學習溫室氣體管制因應策略
97.11.15~ 97.11.17	哥倫布→克里夫蘭→洛杉磯 →台北	返程

該公司在有害空氣污染物排放與溫室氣體排放控制技術之研發工作不遺餘力，除了設置汞研究中心 (Mercury Research Center) 與碳研究中心 (Carbon Research Center) 之外，亦計畫於從 2009 年起投資約 170 百萬美元進行實廠之 CO₂ 捕捉與封存 (CCS) 研究，於既有大型燃煤發電廠之煙氣中導出相當於 25MW 發電量之煙氣，CO₂ 經捕捉後，打入地下封存。

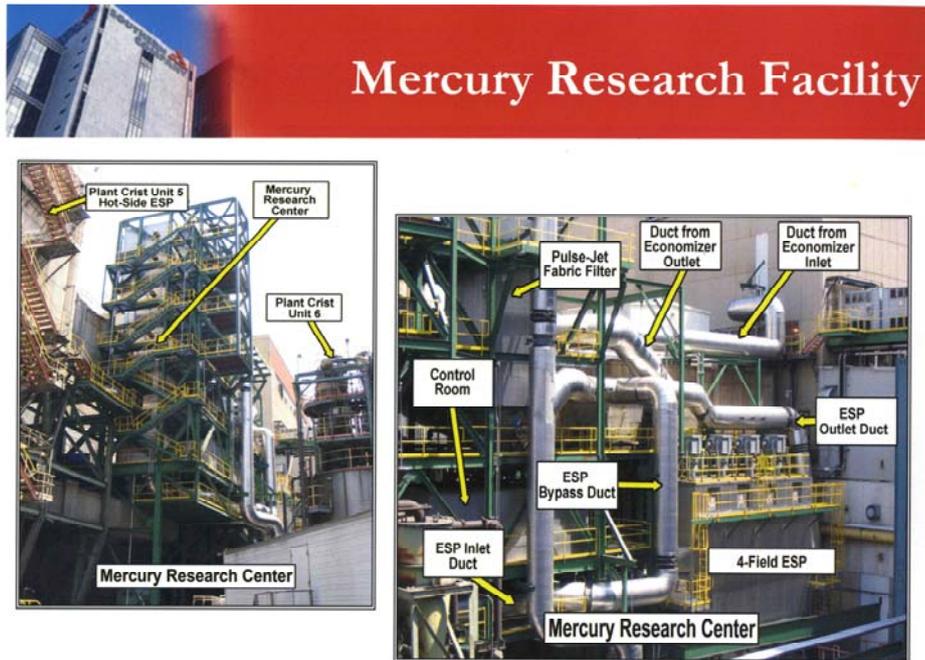
1. 汞研究中心 (Mercury Research Center, MRC)

MRC 設於 Gulf Power 轄下位於佛羅里達州境內之燃煤火力發電廠內，由既有之燃煤發電機組排放煙氣中導引相當於 5MW 發電量之煙氣，並裝設完整之煙氣處理系統，包括 SCR 脫硝設備、靜電集塵器 (ESP)、袋式集塵器 (Baghouse) 及濕式石膏法 FGD 等 (詳見圖二、圖三)，各設備彼此可串聯或予以旁通 (bypass)，以因應不同目的的研究需求。

目前南方公司將 MRC 委託 PCT 公司 (Particulate Control Technology, Inc.) 經營管理，凡是有進行汞排放控制技術相關研究需求之公司或政府機構，均可提出試驗計畫，以合作或由 PCT 代操作方式，利用 MRC 內不同的空污防制設備組合，或注入添加劑 (如 SO₃、活性炭、或 SCR 之注氨)，來建立可應用於全尺度的模式，有助於了解汞在燃煤電廠中的生成機制與特性，並發展可靠的控制技術。

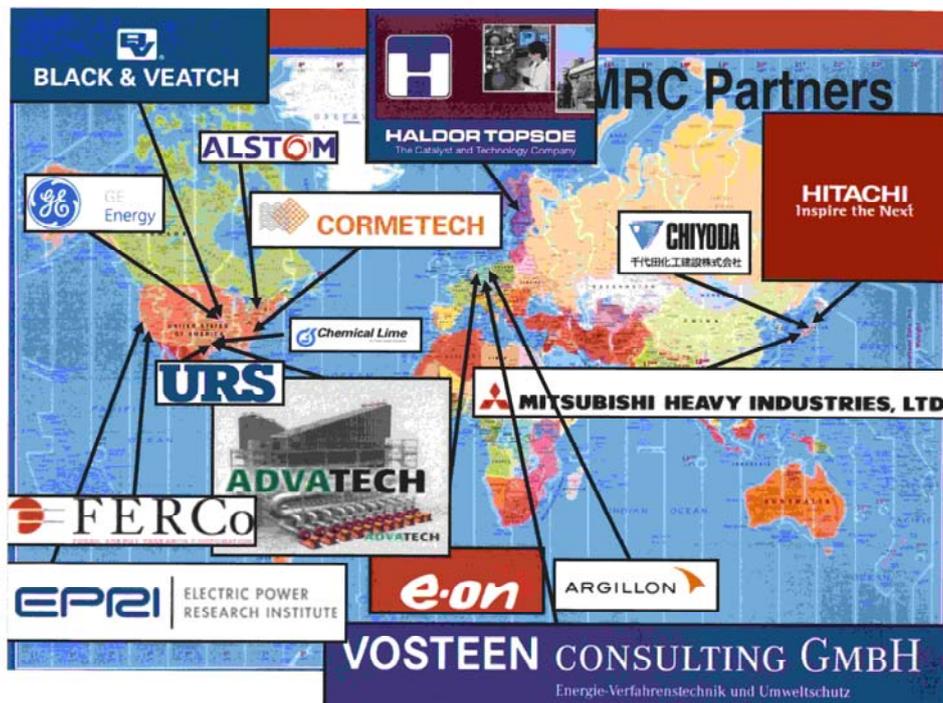


圖二 南方公司之汞研究中心 (MRC) 運轉流程



圖三 南方公司之汞研究中心（MRC）外觀

MRC 成立至今，已有多家跨國公司與研究機構利用其設備進行研究，圖四為全球主要合作者分佈示意圖。



圖四 南方公司之汞研究中心（MRC）全球合作夥伴

2. 碳研究中心 (Carbon Research Center, CRC)

CRC 設於 Mississippi Power 轄下之燃煤火力發電廠內，原由美國能源部 (DOE) 資助成立；目前 CRC 之主要研究著重在三方面：

- 燃燒前的關鍵程序，以減少 CO₂ 捕捉與操作的成本，包括
 - 水與氣的轉換
 - CO₂ 捕捉與分離
 - CO₂ 壓縮
 - 其他合成氣的處理程序
- 改善燃燒後捕捉的程序，包括
 - 吸收劑操作效率
 - 評估氣液接觸系統之改善，減少程序複雜度
 - 評估不同技術之優劣
- 評估富氧燃燒 (Oxy Combustion)
 - 工程研究與試驗

前述提及在 2009 年起進行之 CCS 研究計畫，即為 CRC 主導之大型整合性計畫，計畫主要參與者包括南方公司、日本三菱重工 (MHI) 及美國電力研究院 (EPRI) 等，並開放外界提供資金以分享研究成果。該計畫預定在 4 年內，採用 MHI 公司之 Kansai-Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery (KM-CDR) 製程來捕捉燃煤電廠排放出的 CO₂，並打入電廠所在地下鹽水層中予以封存。MHI 雖已發展 KM-CDR 製程有 15 年經驗，以往主要用於天然氣與化學工業界，這將是首次應用於燃煤機組 (25MW)，計畫執行小組認為研究結果有助於後續 CCS 技術的進一步發展，因為計畫中將評估下列事項：

- CCS 之設備成本 (因為 25MW 的規模已夠大，CCS 成本效益評估的結果應可被信認)；
- CCS 之運轉維護成本，以及在長期的運作下建立規劃指引；
- 燃煤電廠排放煙氣相關數據，以決定煙氣不純度的影響；
- 運轉維護相關數據，以決定對既有與新設電廠設備可利用率的影響。

3. 溫室氣體管制因應策略

身為一家大型電力業者，南方公司認為技術的可利用性、對顧客及股東的經濟影響、燃料多元化、能源安全及全球暖化等各項議題是同等重要的，且在辯論時必須同時被考量。因此，南方公司的氣候變遷政策聲明如下：

『氣候變遷對我們的世界和自然是一個挑戰，在解決技術、環境及經濟等層面的過程中，南方公司承諾扮演領導的角色。我們努力的重點在於發展及應用減少溫室氣體排放的技術，同時確保電力供應的可靠度及經濟性。南方公司相信，為符合環境、顧客及股東的需求，這是最負責任的一個做法。』

南方公司自 1990 年代起即成為 DOE 氣候挑戰方案的資助成員，至今參與計畫超過 20 個，並且種下超過 4,500 萬棵樹，估算自 90 年代中期以來已減少 CO₂ 排放超過 165 百萬噸。目前南方公司重要的減量行動如下：

- 發展先進之煤炭淨化技術
- 密西西比州深鹽水層之 CO₂ 注入計畫
- 阿拉巴馬州廢煤礦層之 CO₂ 注入計畫
- 阿拉巴馬州油田之 CO₂ 儲存計畫
- 採用生質燃料燃燒發電之研究與評估
- 持續植樹減碳
- 能源之星 (ENERGY STAR) 推廣活動

由於美國南方的人口數呈現成長趨勢，面對逐漸增加的用電需求，南方公司將同步進行低排放、發電成本有效及終端使用相關技術的研發與應用，下面摘述該公司的因應方式：

(1) 提升能源使用效率

南方公司近年來不斷提供消費者各式各樣的需求端管理 (DSM) 及提升能源效率的專案，2007 年該公司投入 74 百萬美元，預計在 2020 年前，每年投入資金逐步增加至 100 百萬美元，總投入金額將超過 10 億美元，可

使尖峰負載下降 33%。

南方公司的做法著重在先進科技與顧客教育二方面，範圍包括住商與製造業，主要的專案如下：

- 住戶需求管控
- 時間費率及即時價格通知
- 新屋/新設備專案
- 能源查核
- 能效熱線
- 能源之星合作夥伴
- 低收入戶補助
- 效率改善回饋

(2) 開發再生能源及生質能

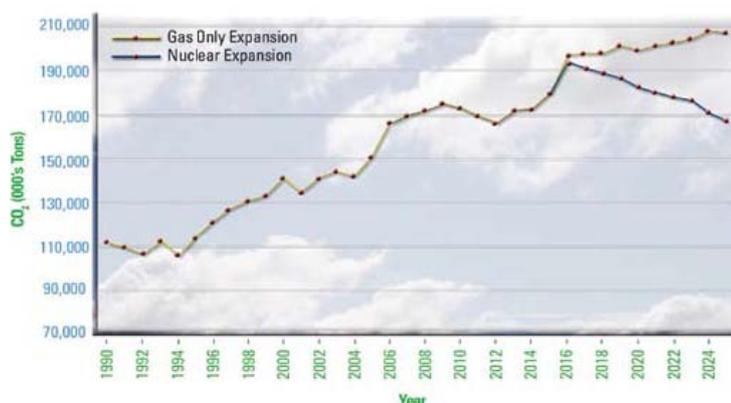
對於美國東南部地區而言，再生能源的發展可說是受到極大的限制，因為此區域之日照與風場不足，風力亦不穩定，因此除了水力發電之外，目前僅進行喬治亞州離岸風力的研究，由於經濟因素使得興建離岸風力並不可行，但是南方公司承諾會持續評估開發風能的可行性。

相對於再生能源，生質能在可靠度與經濟性二方面更有發揮的潛力，南方公司已擴大研究，於既有之燃煤電廠中摻入草及碎木，與煤炭共燒發電，在阿拉巴馬州甚至有少數客戶可以購買此項生質能源；在未來，南方公司不排除將燃煤機組的燃料完全轉換為生質能。

(3) 增建核能機組

南方公司現有 3 座核能發電廠，該公司已於 2006 年向當局提出於既有核能電廠中增設核能發電機組之請求，以因應美國南方逐年成長的電力需求及未來可能面臨的限碳法令。

根據南方公司的評估，要從 2016 年起降低發電的溫室氣體排放量，必須以每年增建 1 部核能機組，至 2025 年前共興建 9 部核能機組，排放情境如圖五所示。



圖五 南方公司增建核能機組之 CO₂ 排放情境

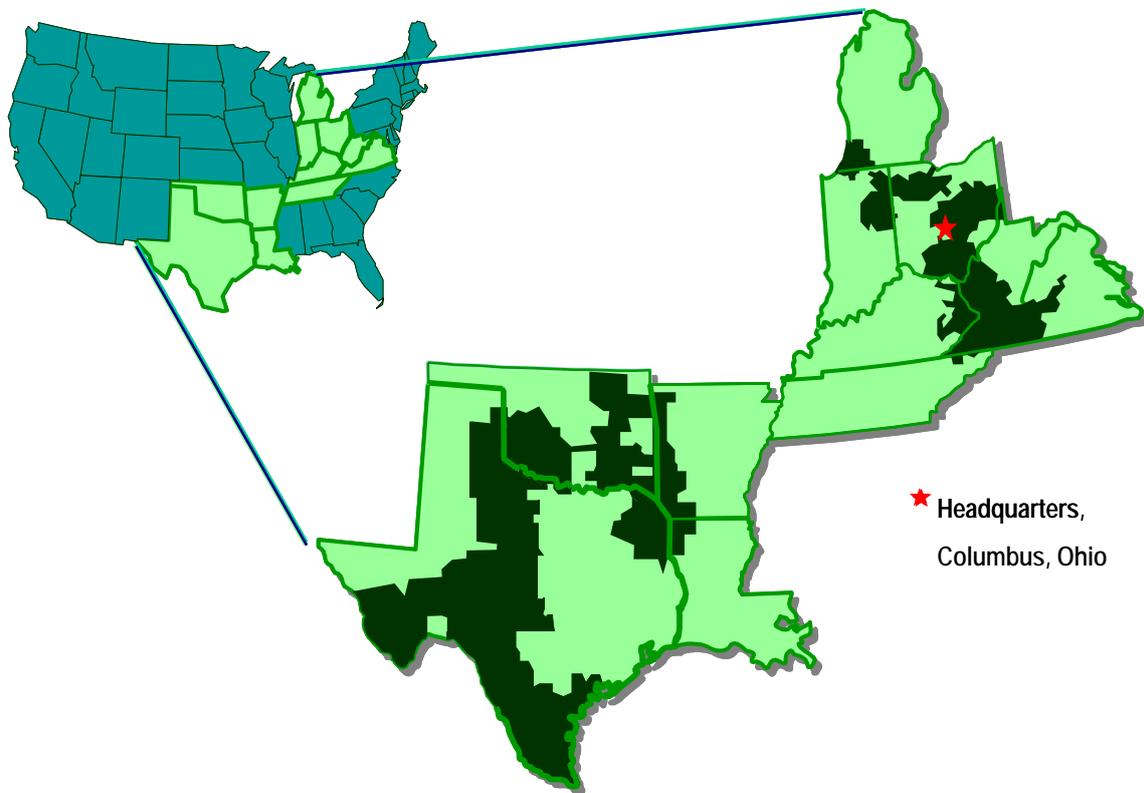
(4) 發展淨煤及 CCS 技術

由於煤炭預估可以再利用 200 年，南方公司認為對美國而言，煤是最穩定與人民可以負擔的電力能源，因此，必須以更清潔的方式來使用煤炭。首先，南方公司引以為傲的是與合作夥伴共同開發的先進煤炭氣化技術—TRIG (Transport Integrated Gasification)，該技術應用於燃燒亞煙煤與褐煤的電廠，能減少 20~25%的 CO₂ 排放量，為目前世上效率最高的煤炭氣化技術。

在 CO₂ 捕捉與封存 (CCS) 技術之發展上，南方公司亦不落人後地積極參與，期能藉由此項技術，有效減少發電所排放的 CO₂。除了前面所提到的在密西西比州深鹽水層、阿拉巴馬州廢煤礦層及油田等地進行的 CO₂ 注入/封存計畫外，南方公司仍不斷地在研究，在該公司的服務轄區中，什麼樣的地質，以及在何處可以進行 CO₂ 地質封存。此外，南方公司也投資進行改善 CO₂ 捕捉技術的研究，例如該公司（投資）加入 EPRI 主導下由 Alstom 公司進行的富氧燃燒發電展示計畫，希望降低捕捉 CO₂ 的成本。

（二）美國電力公司（American Electricity Power）

總部位於俄亥俄州哥倫布市的美國電力公司（American Electricity Power，AEP）同樣為美國前三大電力集團之一，服務範圍包括阿肯色州、印第安那州、肯德基州、路易斯安那州、密西根州、俄亥俄州、奧克拉荷馬州、田納西州、德州、維吉尼亞州及西維吉尼亞州等 11 地，如圖六所示。雖然服務範圍廣闊，但是 AEP 所面臨的議題卻是相同的，諸如協助環境的改善與復原、採用先進的燃煤發電技術、開發再生能源、提升能源效率、提供需求面管理（DSM）專案及改善輸配電系統等。



圖六 美國電力公司之服務範圍

AEP 在超過 38,000MW 之總裝置容量中，燃煤占 73%、燃氣占 16%、核能占 8%、水力、風力及抽蓄占 3%；2007 年該公司發電中，燃煤占 68%、燃氣占 23%、核能占 6%、水力、風力及抽蓄占 3%。由於燃煤發電比例極大，溫室氣體之管控成為該公司最重要的環保議題，除了加入芝加哥氣候交易所（CCX）成為會員外，也積極設定長期減量策略，投入資源；下面將敘述 AEP 相關的努力。

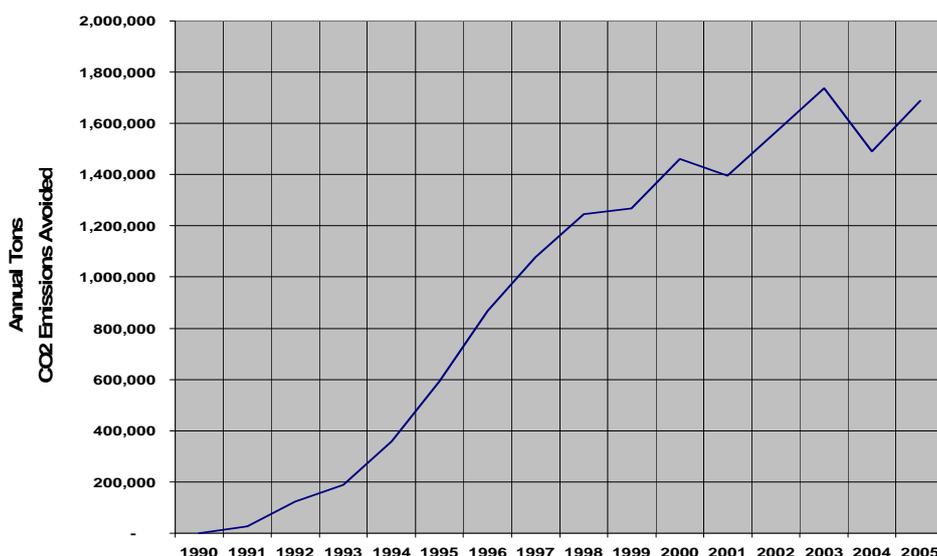
1. 溫室氣體挑戰、目標及執行進度

AEP 每年大約排放 1.5 億公噸的 CO₂，排放強度為 0.78kg/kwh(2005 年)，未來面臨許多挑戰，包括：

(1) 承諾自 2003~2010 年自願減量 46 百萬公噸 CO₂，

爲了達成在 CCX 中的減量承諾，AEP 採取廣泛的行動，如改善發電效率、增加再生能源、系統外溫室氣體減量計畫（如植林…）及直接購買碳權。

至 2007 年止，電廠效率改善的減量已達 43 百萬公噸 CO₂(參見圖七)，並簽署購買同意書，於 2010~2017 年間買入 460 萬公噸 CO₂ 之排放額度；唯一未達成植樹的目標，因爲部份地區土地的利息成本太高。



圖七 AEP 電廠效率改善之 CO₂減量成果

(2) 2010~2020 年因爲新機組上線運轉，CO₂排放量將增加 10~15 百萬公噸

由於 AEP 預估在 2010~2020 年中必須增加 1,200MW 之發電容量，以因應用電成長，故 CO₂排放量將隨之增加，AEP 乃訂定 2010 年後的策略如下，以使每年減少 5 百萬公噸 CO₂ 之排放：

- 採用商業化的 CCS 技術
 - 將於 2009 年起於 Mountaineer 電廠進行冷氨法 (Chilled ammonia)

CCS 計畫

- 預估 2012 年 CCS 技術可商業化運作
- 投資先進的煤炭技術，如 IGCC 及超超臨界（USC）燃煤發電廠
 - 西維吉尼亞州同意興建 IGCC 電廠，但維吉尼亞州否決
 - 阿肯色州與路易絲安納州已有條件同意興建 USC 電廠
- 增加再生能源
 - 目前 AEP 已簽下 3 項長期電力建設同意書，其中包括增建 275MW 之風力發電機組
- 投資可用以抵減排放額度的減量計畫，如甲烷回收及植林減碳
- 持續實施能源效率與需求面管理專案，以減少用電需求
- 持續進行電廠效率改善及淘汰老舊電廠
- 車輛與航空器之自願減量計畫
 - 2008 年採購的 542 輛輕型車中有 31% 為油電混合車（Hybrid）或使用彈性燃料（Flex fuel）

(3) 實施能源效率與需求面管理專案，客戶將減少用電，公司收益下降

當需求減少時，公司獲利會下降，AEP 將與股東們同心協力，以成本有效的方式執行各項能源效率與需求面管理專案，減緩裝置容量與發電量的需求（預估 2012 年前減少 1,000MW 的需求，其中 15% 來自 AEP，85% 來自客戶）；同時，AEP 將在主管機關的支助下，建構智慧型電網，希望於 2015 前安裝 500 萬個智慧型電錶。

目前 AEP 已依各州的要求，提出更明確的能源效率與需求面管理專案，並展開智慧型電網的建置工作—與 GE 公司簽下合約，共同發展相關設備及技術，而印第安納州的公用事業消費者委員會已同意先進行 10,000 個智慧型電錶的實驗計畫。

2. 長期減量策略

爲了確保在碳限制的未來得以永續經營，AEP 設定了長期的溫室氣體減量策略，由四個面向展開，分述如下：

(1) 發展再生能源及生質能之電力

雖然美國尚未訂出聯邦政府的再生能源法案，但有約三分之二的州已有形式上或自願性對再生能源占比的要求，AEP 提出在 2020 年前整個電力系統銷售能源中約 10% 係來自再生能源，包括太陽能、風力、水力及生質能。

目前 AEP 對於發展太陽能的活動主要在教育推廣，已有超過 125 個學校參加該公司的「校園燈光與瓦特的學習」計畫，藉由計畫的執行，AEP 合作夥伴與學校將安裝太陽光電系統，學生們將學到能源使用及太陽能如何成爲電網中的一部分。

AEP 發展風力與水力的時間比較早，1990 年代中期就開始在德州及附近的幾個州研究與測量風力資源，至今在德州裝設的風力發電機組已達 310.5MW，AEP 也同意收購在伊利諾州、印地安納州、奧克拉荷馬州及德州的幾個風力設施（共 742MW）所產生的電力。水力電廠則分布在維吉尼亞州、西維吉尼亞州、俄亥俄州、印地安納州及密西根州共 17 座水力電廠，裝置容量超過 800MW（含抽蓄水力）。

生質能從能源轉換的角度來看屬於碳中和的資源，自從英國於 4,000MW 的燃煤機組共燒生質能後，AEP 也導入生質能於燃煤機組的共燒測試與分析，未來將調查生質能的應用是否能符合包括成本效益在內的需

(2) 需求面與供給面管理、效率提升及淘汰老舊機組

需求面管理（DSM）可以幫助客戶以更佳的方式來使用電力，電力公司因此可以延遲增建發電機組。AEP 目前已在印地安納州、肯德基州、德州及阿肯色州推動 DSM 專案，並持續在其他州尋求推動的契機。例如在西維吉尼亞州的用戶自 2008 年 9 月可以向 AEP 旗下的 Appalachian Power

與 Wheeling Power 購買綠電，除了一般的電費帳單外，用戶會收到一張額外的綠電帳單，價格為每區塊 (block) 1.5 美元，每戶至少購買 2 個區塊，最多購買 50 個區塊，代表用戶支持再生能源的開發與對環境的貢獻。

供給面上，未來 AEP 將以 USC、IGCC 及核能電廠作為基載，中載使用燃氣複循環機組 (替代方案為風力或太陽光電)，尖載則以燃氣渦輪機 (NGCT) 及硫化鈉電池因應。

對於既有機組，AEP 採取常態性地維護與鑑別工作，並改善操作程序，使績效保持在最佳狀態；AEP 估計，只要提升 1% 的效率，每年約可減少 160 萬噸的 CO₂。

透過效率提升及需求面管理專案，AEP 將可在 2012 年底前減少 1,000MW 之尖峰需求。

(3) 採用已商業化的新發電技術與 CCS 技術

有關新的發電技術，AEP 已承諾在西維吉尼亞州蓋一部 620MW 的 IGCC 發電機組，以及一部同型機組在俄亥俄州，可惜因為成本回收的問題，尚未得到主管機關的核可。此外，AEP 也宣布興建全美第一部超超臨界 (USC) 燃煤發電機組，USC 與傳統機組不同處在於它提高了燃燒溫度，使得發電效率提高，進而減少用煤量。

AEP 對 DOE 停止 FutureGen 計畫感到很失望，但該公司表示，FutureGen 有其可行性，不應輕言放棄，並將持續與合作夥伴投資進行相關研究，AEP 願成為該計畫的領導者。

2007 年 AEP 宣布 2 項 CCS 的研究計畫，首先 AEP 將與 Alstom 公司合作，在西維吉尼亞州 Mountaineer 電廠中的 1,300MW 燃煤發電機組，導引出相當於 20MW 之煙氣，經過冷氨法捕集 CO₂ 後，將 CO₂ 打入廠內之地下深鹽水層中封存；該計畫流程詳見圖八，地質封存示意圖詳見圖九。

冷氨法捕集 CO₂ 之程序如下：

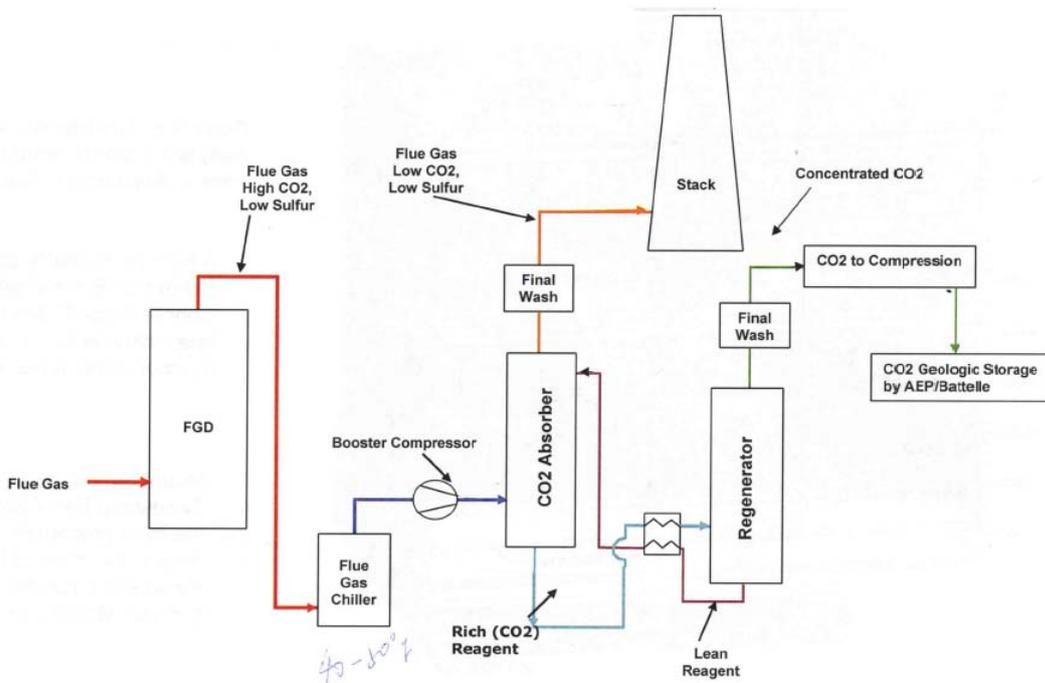
- FGD 出口煙氣通過冷水，溫度降低至 35°F。

- 經過冷卻的煙氣被導入 CO₂ 吸收塔中，與碳酸銨反應後，產生碳酸氫銨。

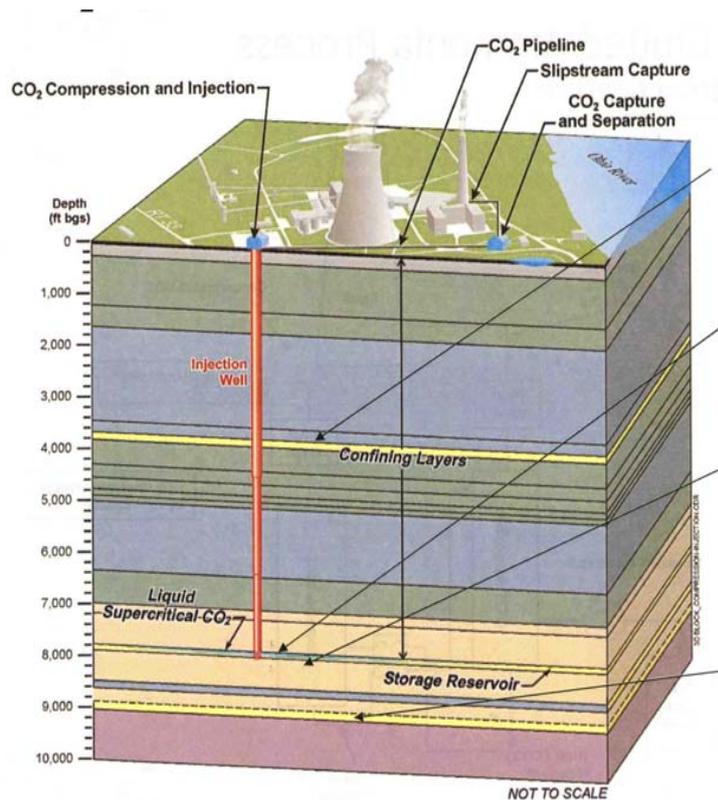


- 碳酸氫銨泥漿被打入再生器（regenerator）中，移除 CO₂，碳酸氫銨還原成碳酸銨，碳酸銨可再重複使用於前一步驟。
- 被移除 CO₂ 後的氣體主要成分為氮、氧及低濃度的 CO₂，即由煙囪排放。
- 再生器中被移除的 CO₂，將可送入地質封存程序中處理。

目前 Alstom 公司在威斯康辛州某電廠內以 1.7MW 煙氣之規模進行冷氨法之試驗，與 AEP 合作放大規模之試驗預估每年可捕集 10 萬公噸 CO₂；如果一切順利，AEP 打算將該計畫予以商業化，並正式安裝於旗下某電廠內使用該技術捕捉 CO₂。



圖八 AEP 採 Alstom 公司冷氨法捕捉 CO₂ 之流程



圖九 AEP 之 Mountaineer 電廠進行 CO₂ 封存示意圖

AEP 宣布的另一項 CCS 研究計畫，則是與 B&W 公司簽訂合作備忘錄，計畫在印第安那州的一座電廠中，將 213MW 之傳統燃煤機組改為富氧燃燒 (Oxy-fuel)，以捕捉 CO₂，本次出國因亦拜訪 B&W 公司，富氧燃燒技術將在下節中敘述。

(4) 價購碳權及系統外減量

雖然 Lieberman-Warner 法案或 Bingaman-Specter 法案在 2008 年均未被美國參議院通過，但 AEP 預估 CO₂ 價格長期看漲；AEP 在 2003 年即加入芝加哥氣候交易所 (CCX)，成為會員並承諾減量或抵換 CO₂ 排放至 2010 年，2007 年 AEP 與環境信用公司 (ECC) 簽約購買約 460 萬噸 CO₂ 排放權，這 460 萬噸 CO₂ 將來自於 2010~2017 年家畜農場中捕集甲烷氣的自願減量成果。

在植樹方面，AEP 目前在公司自有土地上種植超過 6,300 萬棵的樹，並資助多項計畫，包括於玻里維亞與巴西進行的生物多樣化森林計畫、美國

漁業與野生動物服務處（US Fish and Wildlife Service）及保育基金會（The Conservation Fund）在密西西比河河谷地區的水土及生態保育計畫。在相關計畫進行時，AEP 也資助精確查驗森林吸收碳量的新技術的發展。

另外值得一提的是 AEP 在煤灰再利用及推動綠建築的努力，AEP 因為提升煤灰再利用，使得公司減少掩埋及處理的成本；而根據世界企業永續發展協會（WBCSD）之估計，全世界的能源消耗約有三分之一用於建築物，AEP 身為 WBCSD 的會員，因此致力於對所擁有超過 400 座的建物/設施進行節能減碳工作，將在 2008~2013 年投資約一億美元打造具成本效益的綠建築。

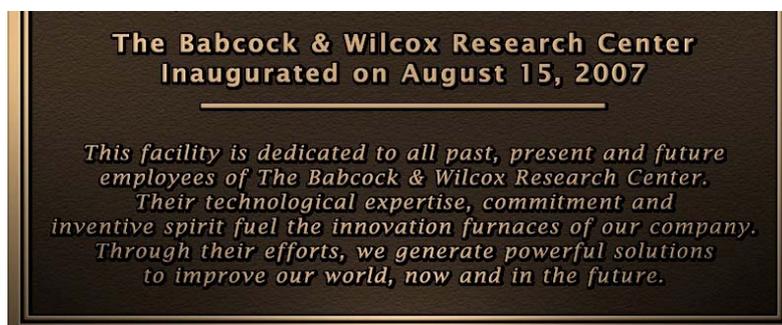
(三) Babcock & Wilcox 公司

Babcock & Wilcox 公司（以下簡稱 B&W 公司）成立於西元 1867 年，由 Stephen Wilcox 與 George Babcock 二位先生共同創立，以銷售 Wilcox 先生所發明之水牆管式鍋爐，目前營業範圍涵蓋民生及國家安全等重要設備。2006 年該公司研發出富氧燃燒（oxy-fuel）技術來捕捉二氧化碳，雖然尚未商業化，卻是值得發電業關注其未來發展的一項 CO₂ 減量技術。

B&W 公司為完全隸屬於 McDermott International 之子公司，總部設於美國維吉尼亞州，此次拜訪其下位於俄亥俄州的電力部門，主要負責發電與環境控制設備的研發與售後服務。

1. B&W 公司研究中心（Babcock & Wilcox Research Center，BWRC）

2007 年 B&W 公司啓用一座嶄新的研究中心（見圖十），該中心耗資 14 百萬美元，佔地 55,000 平方英尺，備有全新的實驗室與精密儀器，希望研發出新一代的發電設備與污染防制技術，包括從燃煤電廠中捕捉二氧化碳。



圖十 B&W 公司研究中心之外觀及落成碑

BWRC 的任務是作為公司商業策略的支柱，目前設有三大技術領域：

- 能源轉換領域—化石燃料燃燒、燃燒器的發展、氮氧化物控制、反應動力

學的研究…

- 環境技術領域—反應化學與動力學、化學模型、觸媒反應器設計、排放控制系統…
- 材料工程領域—冶金學、鍋爐腐蝕、焊接、結構力學、有限元素分析…

上述三大技術領域之研發活動著重在既有產品改善、先進技術發展及基礎研究，爲了達成任務，BWRC 中每個技術領域都有專業的人員與實驗室/設備，包括：

- 小型鍋爐模擬器—一座每小時輸入 600 萬 Btu，可燃燒液體、氣體或固體燃料的鍋爐，並裝置濕式 FGD、乾式 FGD 及袋式集塵器。
- 水力模型—研究 FGD 內相關部份（如噴嘴、托盤及除霧器）設計之流體力學模式。
- 空污排放控制實驗室—進行濕式 FGD 及汞化學的研究。
- 觸媒實驗室—準備觸媒及進行汞、NO_x、NH₃的研究。
- CO₂控制實驗室—進行 CO₂捕捉所使用溶劑吸收技術及再生的相關研究。
- 化學實驗室—進行化學分析、化學清潔及電化學相關研究。
- 其他實驗室—如 Wer Lab、Fireside Corrosion Lab、Weld Lab 及 Metallographic Lab 等。

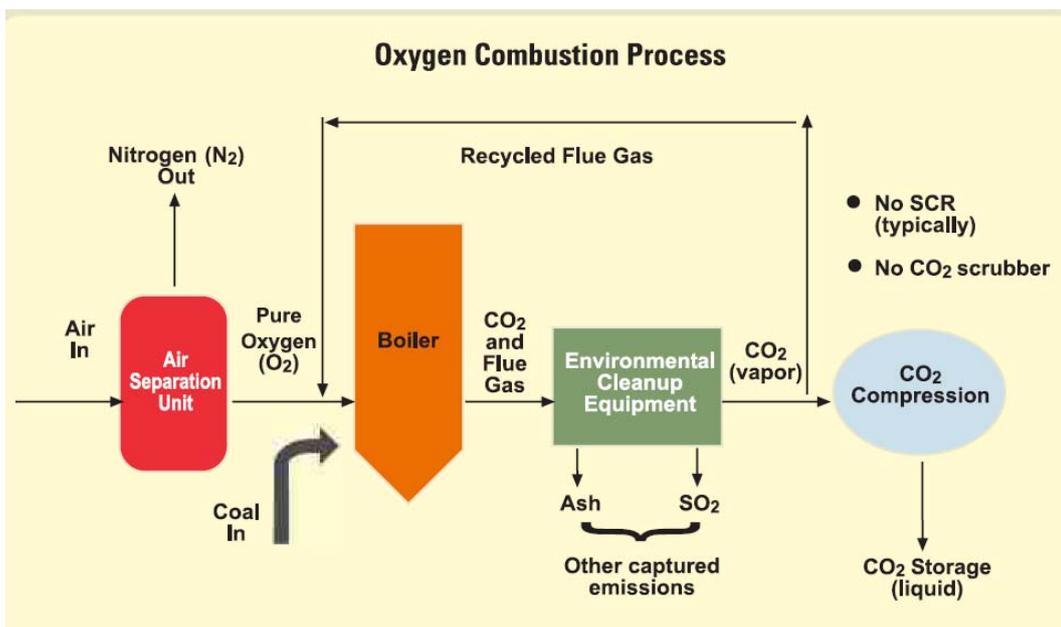
2. CO₂排放控制技術

針對火力發電廠排放的二氧化碳捕集，目前主要有 3 種技術領域，包括：燃燒後捕捉、燃燒前捕捉及富氧燃燒技術：

- 燃燒後捕捉 CO₂：此類技術主要以化學溶劑吸收法程序爲基礎，也是當前僅有的已進入工業規模試驗的技術。針對發電廠排氣中 CO₂分壓低、處理量大，且同時含有少量氧氣的特點，美國在上世紀 90 年代後期即已建立了數個利用乙醇胺（MEA）法脫除 CO₂的工業示範裝置。

爲了解決既有燃煤發電廠的 CO₂ 排放問題，各大設備製造廠無不竭盡心力發展先進的燃燒後捕捉 CO₂ 系統，本報告前面所提及的 MHI 公司 KM-CDR 製程及 Alstom 公司的冷氨法製程均屬於此類技術。

- 燃燒前捕捉 CO₂：此技術的關鍵是煤炭氣化、轉化製氫及高溫下氫氣的薄膜分離系統，開發的重點是薄膜式轉化裝置及高溫薄膜分離材料，與傳統醇胺法相比，估計可降低捕集成本 60% 左右。目前發展中的 IGCC 發電技術及美國能源部 (DOE) 之前推動的 FutureGen 計畫均屬於燃燒前捕捉 CO₂ 的技術型態。
- 富氧燃燒技術 (Oxy Combustion Technology)：此技術是將除氮後的空氣 (幾近純氧) 與燃料 (煤) 混合燃燒，產生含高濃度 CO₂ 的煙氣，CO₂ 將易於分離及壓縮後儲存 (流程詳見圖十一)，接下來將簡述 B&W 公司研發本技術之相關事項。



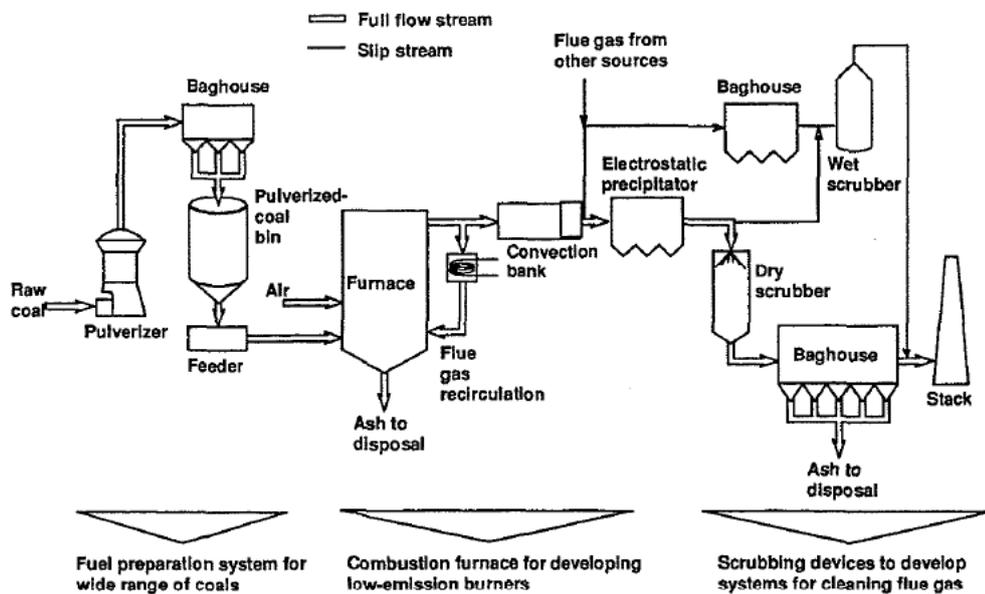
圖十一 富氧燃燒技術流程

B&W 公司進行富氧燃燒試驗的「清潔環境發展設施」(CEDF, 見圖十二) 位於俄亥俄州的 Alliance 鎮，建於 1993 年，由 B&W 公司、美國能源部及俄亥俄州煤炭發展辦公室共同出資成立，原設計是以每小時可輸入 100MBtu (約 30MW) 熱量之商業規模，裝置完整的煙氣處理系統(原始配置流程見圖十三)，

來測試燃燒器對不同煤質的功能，並為後續商業化作準備。



圖十二 B&W 之 CEDF 外觀及其他參與富氧燃燒試驗的團隊

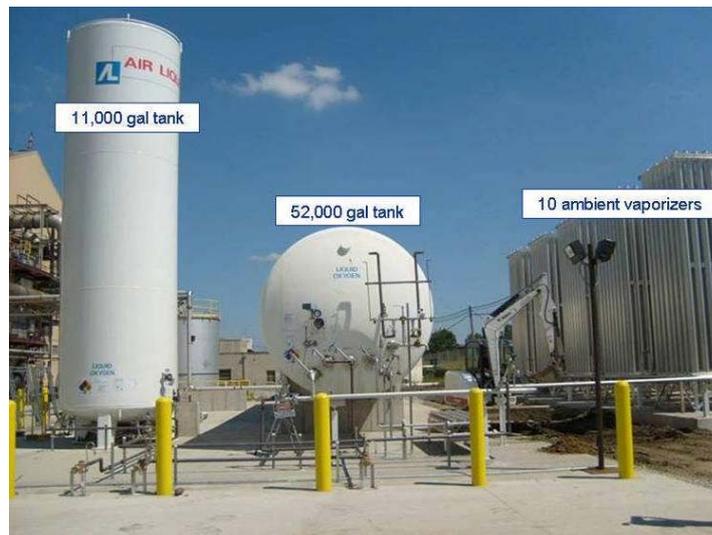


圖十三 CEDF 之原始設計流程

富氧燃燒的發展早自於 1979 年，當時為了石油公司的強化取油（EOR）作業，必須製造 CO₂ 來注入油井，以增加原油的產量；一直到 2000 年後，才列

入對於CCS相關技術研發的領域。在CEDF進行富氧燃燒試驗的團隊包括B&W公司、American Air Liquide公司及電力公司組成的顧問團（包括此次拜訪的南方公司與美國電力公司）。

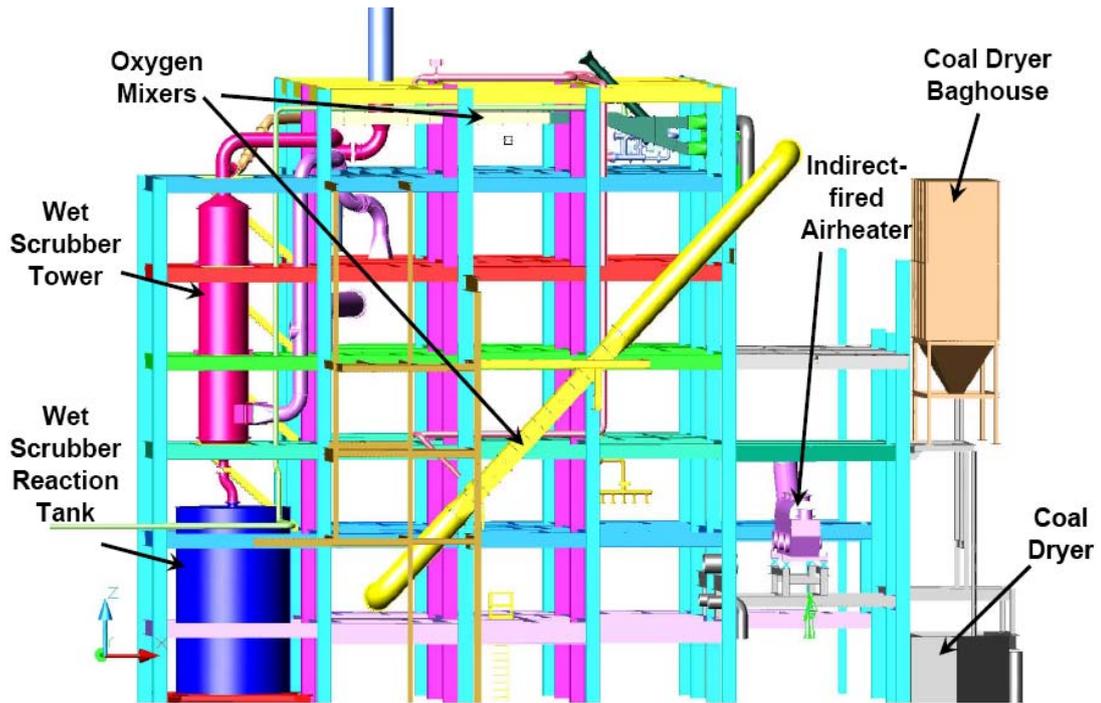
爲了富氧燃燒試驗，CEDF 必須進行修改，2007 年 1 月開始進行建造工作，包括增加一套氧氣供給系統（見圖十四）、煙氣與氧氣混合系統、濕式石膏法 FGD、額外的燃煤準備裝置及儀控系統，改建完畢之 CEDF 詳見圖十五。其中氧氣供給系統是藉由將儲存在大型儲槽中的液態氧予以汽化，送至和煙氣混合後再進入鍋爐中，而氧氣與煙氣的混合方法是 Air Liquide 公司的 Floxynator 專利技術，可以將氧氣混合在煙氣中心位置，保護管壁不受高濃度氧的影響，並且有較低的壓力降。



圖十四 富氧燃燒技術之氧氣供給系統

此次的試驗計畫在 2008 年 6 月順利完成，目的在展現 30MW 規模燃煤機組以富氧燃燒法捕捉 CO₂ 技術之主要發電元素是否正常，包括：

- 針對 3 種煤（亞煙煤、褐煤及 PRB 煤）最佳的燃燒器設計
- 氮氧化物排放結果
- 運用 Floxynator 技術的成效
- 粉煤機的效果



圖十五 改建後之 CEDF 示意圖

- 鍋爐出口溫度
- 熱傳相關數值
- 硫氧化物排放及 WFGD 之效果
- 煙氣溼度控制
- 富氧燃燒對汞物種的生成影響
- ESP 的效率
- 內部材料的狀況
- CO₂ 壓縮及純化單元 (CPU)

試驗結果顯示鍋爐能夠維持穩定的燃燒，而且相對於傳統以空氣燃燒的方法，去除 NO_x 的效率可以提升到 60%，CO 與未燃碳也很低。B&W 公司將試驗成果摘要如下：

- 氧氣與煙氣混合後對煤炭的燃燒能力已達商業規模

- 機組由空氣-火焰模式轉移至富氧燃燒模式是安全、平順的
- 氧氣系統與燃燒器管理系統之間的控制與通訊機制已被證實及發展出來
- 氧氣與煙氣的混合是安全與有效的
- 濕式 FGD 與 ESP 能保持良好的效率
- 程序及鍋爐設計之預測工具已被確認可行

3. 汞排放控制技術

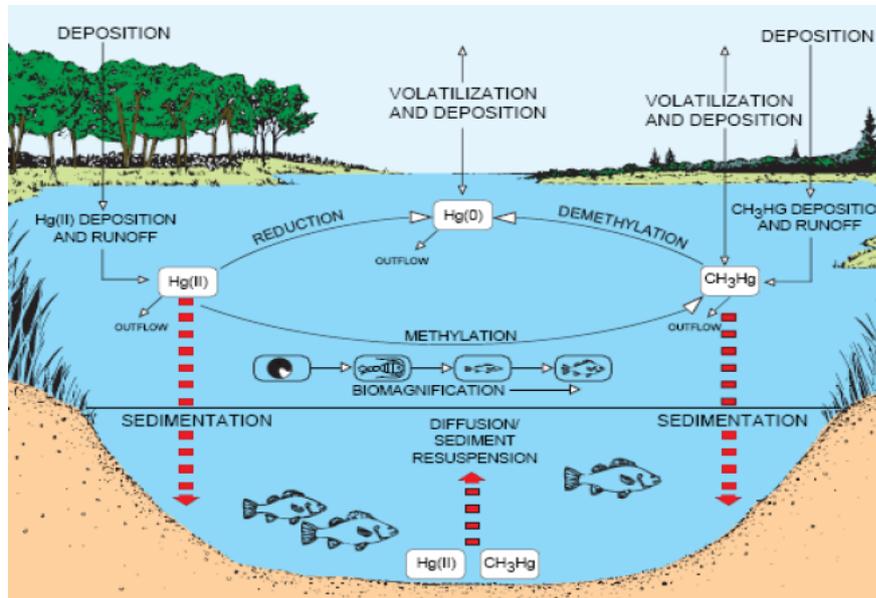
(1) 汞的生成機制

汞為自然界元素，存在於土壤或石塊中，常濃縮於煤炭或礦石，沸點低且具高揮發性，一般有四大主要來源，分別為(1)自然界產生(火山爆發、水侵蝕岩石)；(2)現階段人類活動排放所造成：一般認定與煤的使用有關。(3)現階段人類活動所造成：產品製造過程產生(如日光燈及水銀溫度計)(4)沈降於地表後，因人類活動揚起，而再次進入環境中。

大氣中汞都是以元素汞狀態存在居多，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，無機汞離子在微生物的作用下會轉換為甲基汞(CH_3Hg)，因此它很容易在河流或湖泊中發現，且環境中發現之有機汞大部分以甲基汞型態存在，甲基汞會經生物濃縮而危害到人體(對人體神經系統危害甚大)，尤其是累積到水中魚體內，在魚體內汞都是以甲基汞方式存在，縱使在南、北極無汞排放源，魚體內仍檢驗出甲基汞存在，有關汞的循環見圖十六。

燃煤電廠排放汞型態，主要包括氣相元素汞(Hg^0)、固相汞(Hg_p)及氣相氧化汞(Hg^{2+})等三大類；其中固相汞可以被一般電廠除塵設備(靜電集塵器 ESP 或袋式集塵器)所捕集；氣相氧化汞性質溶於水，一般電廠如安裝排煙脫硫(FGD)，可有效去除氧化汞；唯有氣相元素汞會穿越既有電廠之空污防制設備，排放至大氣中。故現行燃煤電廠所排放的汞，以氣相元素汞為主；但因為空污防制設備捕集到許

多固相汞，故在飛灰及底灰中，亦可能含有汞化合物存在。燃煤所含之汞，經鍋爐燃燒之煙氣經過 ESP、FGD 及煙道進入大氣中，整體流布情形如圖十七、十八所示。



圖十六 汞在自然界中的循環

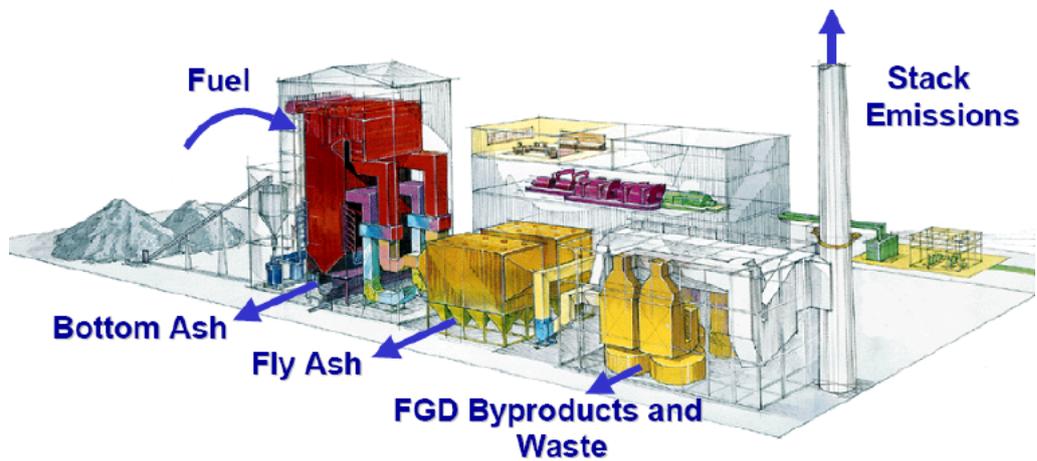
(2) 管制法規

由於汞對人類健康影響極大，國際間對管制汞排放變成刻不容緩議題，且要求是全球一致性減量方案，畢竟汞具有長程傳輸特性。

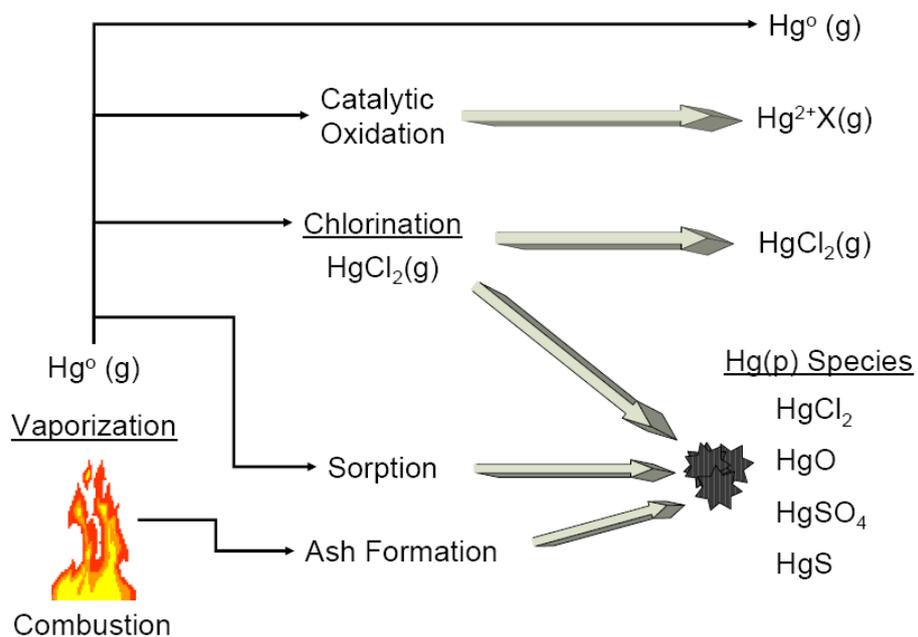
美國是全世界首先發布管制燃煤發電廠汞排放標準的國家（加拿大是第二個），美國環保署（US EPA）於 2006 年 5 月公告 Clean Air Mercury Rule (CAMR) final rule，預估實施後全美之燃煤電廠在不影響穩定發電之情況下，汞排放總量將限定在 38 噸/年之內，管制標準對新設燃煤電廠要求之排放限值詳如表一。

表一 美國對新設燃煤電廠要求之汞排放限值

燃煤種類		汞排放標準	
		Hg (10 ⁻⁶ lb/MWh)	Hg (ng/J)
煙煤		21	0.0026
亞煙煤	Wet FGD	42	0.0053
	Dry FGD	78	0.0098
褐煤		145	0.0183
IGCC		20	0.0025
燃燒廢物燃料		1.4	0.00017



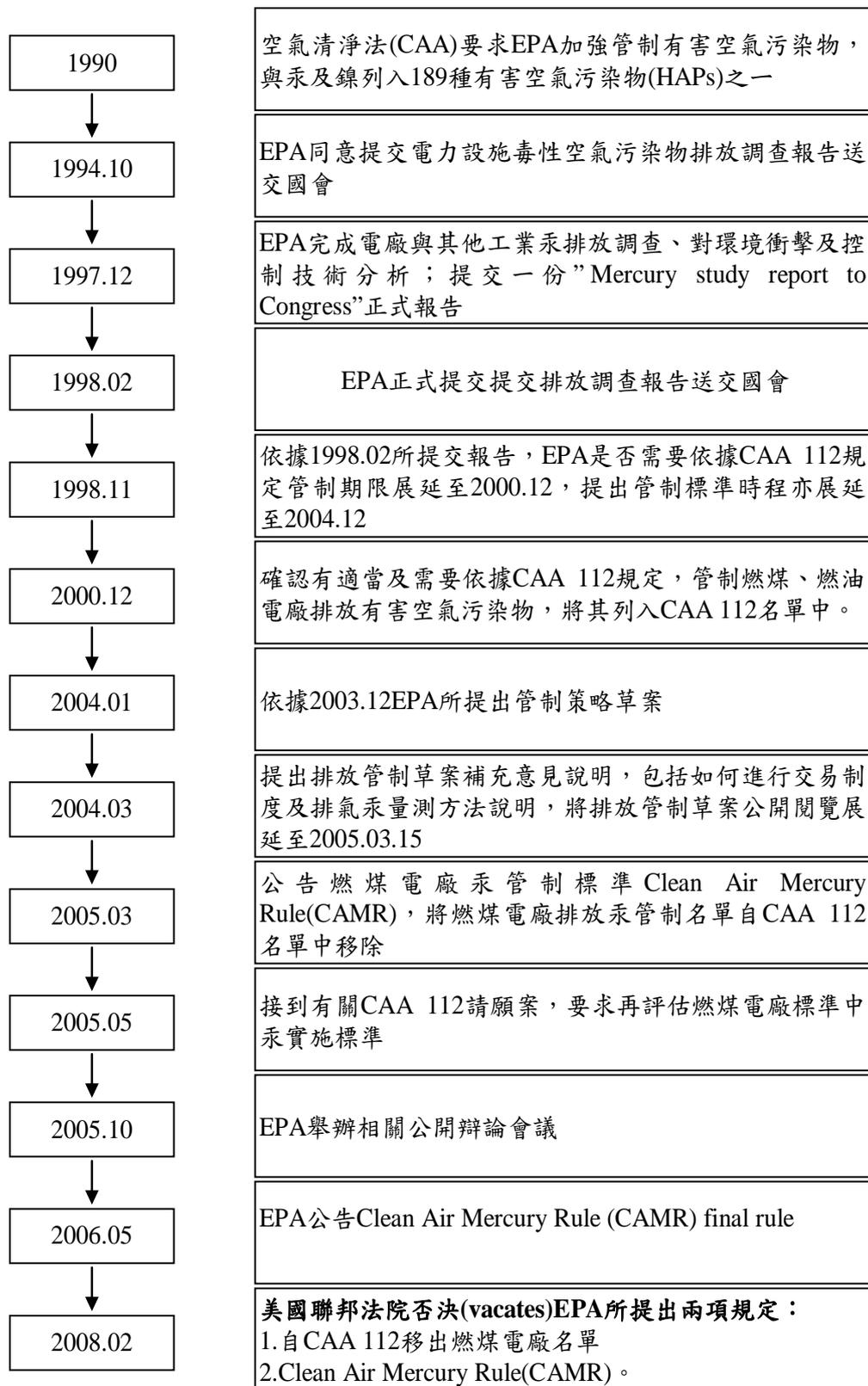
圖十七 燃煤電廠之汞流布示意圖-1



圖十八 燃煤電廠之汞流布示意圖-2

US EPA 公告燃煤發電廠汞排放標準後，由於程序違法，2008 年 2 月聯邦法院判決 CAMR 無效，目前待 2009 年召開公聽會，最終決議可能會延宕至 2010 年，有關美國管制燃煤發電廠汞排放之立法沿革詳見圖十九；聯邦法院之理由如下：

- 聯邦法院認為當初 EPA 經過相當長時間調查後，確認燃煤電廠所排放汞有必要依據 CAA 112 法令精神予以管制，於 2000 年正式將其納入 CAA 112 名單。然 2004 年經評估、重新審閱所提確認有適當及需要管制燃煤、燃油電廠排放有害空氣



圖十九 美國管制燃煤電廠汞排放之立法沿革

污染物後，又推翻原先作法將燃煤、燃油電廠排放有害空氣污染物自 CAA 112 名單中移除，顯見作法上相互矛盾。因 EPA 考量燃煤電廠汞既然已列入 CAA 112 法令下管制，針對既存污染源要用 CAA 111 進行管制應被禁止。故須先將燃煤電廠名單自 CAA 112 法令中移出，再以 CAA 111 法令訂定管制標準才可行，EPA 自認相關程序十分合理，然訴訟者認為 EPA 違反 CAA 112 法令依據。最後聯邦法院認定，在沒有新事證情況下，EPA 擅自移出 CAA 112 管制名單程序，確實違反 CAA 112 法令依據；因此，判決該法令無效。

- 移出名單法令無效，而發布 CAMR final rule 係依據 CAA 111 法令下訂定管制標準，自然不具法令效力，等同否決 USEPA 管制燃煤電廠汞排放標準。

(3) 控制技術

汞因高揮發性，因此最難控制，針對燃煤鍋爐汞的控制技術，目前只有極少數可以達到 90% 以上的去除效率，此外，並沒有可以適用於所有電廠的方法，各國也積極研究中。汞控制必須先瞭解實際的燃煤種類、燃燒設備、操作條件、排氣溫度、既存的空污防制設備等，依照現行的排放狀況，評估及選擇可行的汞控制技術。

表二是燃煤鍋爐汞之控制技術，可從現有空氣污染防制設備（包括：煤炭淨化、燃料置換、洗滌塔更新及袋式集塵器等）的組合與新式空污控制技術（注入活性碳吸附劑、過濾床、流體化床及其他披覆技術的應用等）兩方面著手。汞排放控制技術目前在國際間已被廣泛討論及研究，伴隨科技日新月異，應隨時注意相關成熟發展技術，降低汞對環境危害。

表二 燃煤電廠汞排放控制技術一覽表

控制方法	控制技術
1. 污染預防方法 (Pollution Prevention)	(1) 生質能替代(Biomass substitution) (2) 淨煤技術(Coal Cleaning) (3) 使用低汞煤(Low Mercury Coal) 或改用天然氣 (4) 新設燃煤機組(New Coal Plant, IGCC) (5) 新設燃氣機組(New Gas Plant)

2.傳統污染物之控制技術 (除塵、脫硫、脫硝)	(1)靜電集塵機(ESP) (2)袋式集塵機(FF) (3)煙道脫硫(FGD)：濕式、半乾式、乾式 (4)選擇性還原(SCR) (5)非選擇性還原(SNCR) (6)半乾式吸收塔(SDA)
3.傳統技術組合或修改	(1)集塵設備前端注入活性碳(PAC)或含溴活性碳(BAC) (2)增設 COHPAC+注入活性碳 (3)碳質濾袋(Carbon Bags for FF) 或 觸媒分解濾袋 (4)觸媒氧化床+濕式洗滌塔 (5)化學氧化劑+濕式洗滌塔 (6)將 ESP 改為濕式洗滌塔 (7)將 ESP 改為 pulse-jet FF (PJFF) (8)提昇洗煤(enhanced coal washing) (9)注入霧狀鈣質吸附劑
4.針對汞新開發之技術 (包含多污染物之技術)	(1)於爐內或 SDA 注入其他吸附劑(如溴化等鹵素劑) (2)Duct Modification/ Contacting Bed (3)Fixed Metal/ Activated Carbon Catalyst Bed (4)PowerSpan Electro Catalytic Oxidation

表三為燃燒不同煤種，使用各種控制技術對汞之去除比較，分析表中數據可得到以下結果：

- 燃燒不同煤種之影響

- 一 煙煤

燃燒煙煤的鍋爐在空污防制設備入口可產生較高比例的 Hg^{2+} 、 $Hg_{(p)}$ 及少量 Hg^0 ，因此比較容易被下游的設備捕集去除。不過由於熱端靜電集塵機(HS-ESP)操作溫度較高，故會生成最高比例 Hg^0 ，因此不容易被去除，若使用半乾式脫硫/袋式集塵機(SDA/FF)則有最高的總汞去除率。

- 一 亞煙煤

燃燒亞煙煤的鍋爐，HS-ESP 及 CS-ESP 設備入口 Hg^{2+} 與 $Hg_{(p)}$ 的生成比例與 Hg^0 相近。使用 HS-ESP 及 CS-ESP 對總汞的去除率極低(分別為 3%及 6%)。若使用 FF 及 SDA/FF 會有較高的捕集率。

表三 不同煤種及控制技術對各類汞之去除比較

煤種與控制技術	入口			出口			去除率
	Hg _(g)	Hg ⁽²⁺⁾	Hg ⁽⁰⁾	Hg _(g)	Hg ⁽²⁺⁾	Hg ⁽⁰⁾	Hg(T)
1.煙煤(Bituminous)							
CS-ESP	35	58	7	2	78	20	36
SNCR and CS-ESP	92	3	5	20	35	45	91
HS-ESP	9	53	37	4	59	37	9
FF	92	4	4	1	52	47	90
SDA/FF	59	28	15	1	22	77	98
SCR and SDA/FF	82	17	1	5	46	48	98
2.亞煙煤(Subbituminous)							
CS-ESP	5	25	70	0	31	69	3
HS-ESP	2	15	83	0	17	83	6
FF	33	23	44	1	87	12	72
SDA/ESP	13	26	61	0	5	94	35
SDA/FF	1	6	84	1	5	94	24
3.北達克達州-褐煤(North Dakota lignite)							
CS-ESP	1	1	98	0	4	96	-4
SDA/FF	3	4	93	0	3	97	0
4.德州-褐煤(Texas lignite)							
CS-ESP+FF	9	31	60	0	70	30	NA
CS-ESP+WFGD	0	52	47	1	14	85	44

註：1.CS-ESP：冷端靜電集塵器；HS-ESP：熱端靜電集塵器；SDA：半乾式排煙脫硫；
FF：袋式集塵器；SCR：選擇性觸媒還原法；SNCR：選擇性非觸媒還原法；WFGD：
濕式洗滌塔；FBC：流體化床鍋爐

2.資料來源：ICR, 2002

一 褐煤

燃燒北達克達州褐煤比德州褐煤產生更高比例的 Hg⁰，各種控制設備對於褐煤中的汞去除效率皆不高。

由以上分析可知：進行燃煤電廠汞之可行控制技術評估，首先必須先瞭解電廠燃燒的煤種類及其物化性質，燃燒煙煤的電廠，煙煤含有較高量的氯含量，燃燒過程生成較高量的 Hg²⁺，是比較容易被去除的物種。

● 既設控制技術之效率分析

一 集塵設備對汞的去除效率比較

FF>CS-ESP>HS-ESP

一既有脫硫設備對汞的去除效率比較

濕式 FGD 能溶解 Hg^{2+} ，因此若煙氣中含有高量的 Hg^{2+} ，應能有效被濕式 FGD 捕集，不過實測結果 CS-ESP+WFGD 的去除效率皆不高(10-70%)，可能是 WFGD 對於 Hg^0 無去除效果；乾式或半乾式脫硫設備(SDA)通常是搭配 FF，對於燃燒煙煤的電廠，有不錯的汞去除效率，但對於其他煤種(如褐煤)的去除效率則不佳。

● 新式汞控制設備之效率分析

一 活性炭注入

本法是較為成熟且接近商業化的一項汞控制技術，在設備方面屬於低中成本的等級，適合現有的機組設備，是目前提升汞排放捕捉效率與降低費用成本的主要改善方案。

一 其他新型或複合式控制技術

目前仍屬於示範廠測試階段。然而，與現有的其他控制技術比較，在固定成本、後續費用成本和空氣污染排放控制等方面，複合式控制技術均具備相當高的競爭力，適合未來新廠建立空氣污染防治設備時的評估標準。

四、結論與建議

結論

1. 對於氣候變遷議題的因應，正如同南方公司總裁兼 CEO 在其 2008 年的行動報告書中所言，應避免政治辯論的偏鋒，著重在尋求環境、能源及經濟需求之間達成平衡的答案。
2. 美國雖未批准京都議定書，但是國內各界陸續展開對於減量技術的研發，期待能夠以新技術來解決問題。在管制之前，政府主管機關（如 US DOE、US EPA）均投入大量經費協助業者調適及進行能力建構，以務實的態度面對碳限制的未來，相較之下，突顯我國的做法過於急躁與激進。
3. 南方公司與美國電力公司同屬美國前三大電力集團之一，對於全球暖化與氣候變遷之議題不敢輕忽，因應措施包括需求面管理、提升效率、開發再生能源與生質能、植樹減碳、發展淨煤技術及二氧化碳捕捉和封存技術等。而由於外地人口湧進美國東南方地區，造成用電需求增加，爲了滿足用電成長與抑制二氧化碳排放，南方公司規劃新增核能機組作爲絕對減量的工具。
4. 捕捉二氧化碳的技術研發如火如荼展開，2009 年南方公司將與日本三菱重工合作，採用 KM-CDR 製程進行商業規模試驗；同年美國電力公司也將與 Alstom 公司合作，進行冷氨法（Chilled Ammonia）製程的商業規模試驗；B&W 公司更是在 2008 年以富氧燃燒（Oxy Combustion）技術完成商業規模試驗，將進行大型機組的測試。儘管各家的方法不同，重要的是在於誰能夠發展出最低能源消耗與最少成本支出，就能掌握未來的碳市場。
5. 有害空氣污染物的防制方面，目前尚未對燃煤電廠管制戴奧辛的排放，管制重點放在汞的排放方面，由於美國的煤中含汞量較高，且燃煤電廠安裝全套空污防制設備（SCR、ESP 或 Baghouse 及 FGD）的比例較低，因此汞排放必須嚴格管制。對於既設電廠無全套空污防制設備者，可藉由添加活性炭等物質幫助汞的去除，對於新設電廠而言可考慮在全套空污防制設備外，添加吸附劑或增設其他新型處理設施。

建議

1. 他山之石可以攻錯，美國的電力公司所採行各項溫室氣體管制因應策略可以提供本公司檢視本身策略的完整性與確實性。而現階段我國應加強溫室氣體減量技術的研發，在政府主導下，結合產業及學術機構，共同找出未來的路。
2. 由於我國自有能資源不足，在無碳與低碳能源受限下，日後對用電需求的增長，在限制碳排放的壓力下，電源開發勢必將面臨嚴峻的挑戰，因此本公司應突破窠臼，對於各項開發案應創新思考，如搭配減碳技術試驗性質的投資計畫、新的發電技術引進…等，期能獲取民眾的信任，減少電源開發的障礙。
3. 鑑於國外紛紛展開二氧化碳捕捉與儲存技術的大型研究，我國應透過國際合作全程參與其中的計畫，以深入了解操作技術及相關研發重點，避免引進技術發生錯誤，並可建立技術諮詢管道，更有助於國內相關產業的發展。
4. 近來燃煤電廠汞排放的議題在國內漸受重視，本公司應主動了解各排放源之危害性，並適時澄清外界疑慮。由於美國電廠排放汞的比例偏高，未來應加強在歐洲或日本等地的管制及相關措施。新設電廠應藉由提高污染防制設備效率，以加強對汞的去除。
5. 因產業結構與我國特殊之國際地位關係，未來國內推動溫室氣體減量之成本必定高於其他國家，本公司應未雨綢繆，及早經營碳權，可藉由投資國內外減量計畫，或於適當之碳市場中價購碳權，以確保公司永續發展。
6. 本公司身為國內最大溫室氣體排放源，涉及議題包羅萬象，從技術研發、機組效率提升，到推廣節電及植樹減碳的工作，範圍既廣且雜，非單一部門可以處理，建議公司內部成立督導辦公室或專責單位，以更有效、更專業的方式來因應未來的變革。