

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：考察)

電力事業空氣污染物管制策略及因應對策

服務機關：台灣電力公司
出國人職稱：工安環保處處長
姓名：杜悅元
出國地區：美國
出國日期：92年07月15日至07月24日
報告日期：92年09月10日

43/109202777

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：「電力事業空氣污染物管制策略及因應對策」

頁數 36 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：杜悅元/台灣電力公司/

工安環保處/處長/02-23667200

出國類別：1考察 2進修 3研究 4實習 5其他

出國期間：92年07月15日至92年07月24日

出國地區：美國

報告日期：92年09月10日

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：電力設施、污染管制策略、總量管制、經濟誘因

內容摘要：(二百至三百字)

為達成國家環境保護計畫規劃之空氣品質改善目標，行政院環保署於民國九十一年底依據空氣污染防治法第六條及第八條規定陸續公告相關子法，進行台灣地區空氣污染總量管制。執行措施將分二階段進行，第一階段總量管制是防制區容許增量限值管制，已自民國九十二年一月一日起於台灣地區實施，第二階段總量管制是排放量總量管制，預定於民國九十六年一月一日起率先於高屏地區實施，並於民國九十二年九月至九十五年期間研擬建置完整之污染源排放量認可準則、排放量查核系統、差額排放量保留、抵換及交易制度等配套措施，俾會同經濟部分分期分區公告實施總量管制。

電力事業為台灣地區主要空氣污染物排放源，環保署實施總量管制，勢必對本公司火力電廠營運管理及電源開發造成莫大衝擊，鑒於行政院環保署之空氣污染管制政策整體架構係依循美國清淨空氣法所建構之空氣污染管制政策，故赴美國電力研究所考察美國空氣污染管制策略推動現況、法規發展趨勢、電力事業空氣污染物總量管制措施以及因應對策，俾汲取美國經驗，以做為本公司規劃因應行政院環保署實施空氣污染總量管制政策之重要參據。另此行亦與美國電力研究所就「毒性空氣污染物—汞」及「電磁場健康效應」二大環保課題技術交流，以瞭解美國在此領域之研發重點及未來發展趨勢，俾供公司參考。

電力事業空氣污染物管制策略及因應對策考察報告

內容大綱

頁次

壹、前言	1
貳、考察工作行程與內容	3
參、美國空氣污染管制策略	4
一、空氣品質標準管制策略	5
二、污染源排放標準管制策略	6
三、總量管制及經濟誘因管制策略	6
肆、美國電力事業空氣污染物總量管制策略	13
一、美國電力事業總量管制措施	13
二、美國電力事業總量管制因應對策	17
伍、毒性空氣污染物—汞在環境中的宿命	19
一、汞的來源	19
二、燃煤電廠汞的傳輸	20
三、汞的循環	22
四、美國相關法案及 EPRI 研究	22
五、汞的控制技術	24
陸、電磁場健康效應評估研究	26
一、電磁場研究回顧	26
二、今日全球性電磁場健康安全議題	27

三、電磁場與兒童白血病關係認知	28
四、EPRI 研究計畫	28
柒、綜合感想	29

壹、前言

根據民國八十七年奉行政院核定的國家環境保護計畫，台灣地區空氣品質改善目標分別為民國九十年空氣品質不良日數比例降至 3%，民國九十五年降至 2%以及民國一百年須降至 1.5%，為有效改善污染源集中地區之空氣品質，行政院環保署進行多次空氣污染防制法的修正，最近一次修正案業已於民國九十一年六月十九日公布實施，此次法規修正，除繼續推動成效良好之污染管制策略外，並在既有管制基礎上引用更積極且具經濟誘因以空氣品質管理思維的「總量管制」制度，以朝向達成國家環境保護計畫規劃目標邁進。

為實施總量管制，行政院環保署正積極研擬相關子法及配套措施，目前業於民國九十一年底依空氣污染防制法第六條及第八條規定，陸續公告「新增（設）或變更固定污染源空氣污染物排放量規模」、「空氣污染物容許增量限值」、「空氣品質模式模擬規範」及「固定污染源最佳可行控制技術」等四項子法，冀期於民國九十二年一月一日起於台灣地區全面實施防制區總量管制，民國九十六年一月一日起率先於高屏地區實施空氣污染物總量管制，並於民國九十二年至九十五年期間研擬建制完整之污染源排放

量申報認可、污染源排放量查核系統、差額排放量保留、抵換及交易制度等配套措施，俾會同經濟部分期分區公告實施總量管制。

電力事業為台灣地區主要空氣污染物排放源，行政院環保署實施總量管制，勢必對本公司火力電廠營運管理及電源開發造成莫大衝擊，審視我國空氣污染防治法總量管制相關條文明顯可發現，我國空氣污染管制政策整體架構是依循美國清淨空氣法所建構之空氣污染管制政策，有鑑於此，爰赴美國電力研究所(EPRI)考察美國空氣污染管制策略推動現況、法規發展趨勢、電力事業空氣污染物總量管制措施及因應對策，冀藉此次考察汲取美國有關空氣污染管制策略最新資訊及電力事業總量管制經驗，俾供本公司做為規劃因應行政院環保署空氣污染物總量管制政策之重要參據。

另此行亦與電力研究所就公司關切之「毒性空氣污染物一汞」及「電磁場健康效應」二大環保課題技術交流，以瞭解美國在此領域之研發重點及發展趨勢，謹將所獲資訊一併摘述於報告中以供參考。

貳、考察工作行程與內容

92.07.15 往程（台北—Palo Alto）

92.07.16-07.22 拜訪美國電力研究所(EPRI)

考察美國空氣污染管制策略、法規發展趨勢、電力事業空氣污染物總量管制措施及因應對策等，並就「毒性空氣污染物—汞」及「電磁場健康效應」二大環保課題與美國電力研究所技術交流。

92.07.23-07.24 返程（Palo Alto—台北）

參、美國空氣污染管制策略

美國空氣污染管制策略係立基於清淨空氣法(Clean Air Act, CAA)，清淨空氣法肇始於 1963 年，是根據 1955 年空氣污染防制法(Air Pollution Control Act, APCA)修訂而成，清淨空氣法立法至今歷經多次法規修正，藉由歷次清淨空氣法修正案增修條文，可清晰地瞭解美國環保署空氣污染管制策略的演繹脈絡。

根據 1970 年清淨空氣法修正案美國環保署須負責擬定國家環境空氣品質標準(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)，包括保障人體健康之初級標準及維護公眾福祉之二級標準，各州須擬定執行計畫並據以執行，以使各州於規定期程能達成空氣品質標準，另各州須對新設之固定污染源，訂定「新污染源操作執行標準」(New Source Performance Standards, NSPS)。

因考量 1970 年至 1977 年期間，美國國內仍有部分地區未能完全達到空氣品質標準，1977 年清淨空氣法修正案規定各州訂定明確的州執行計畫(State Implementation Plan, SIP)，期藉此徹底要求各州努力，以維持全美基本之空氣品質需求，另 1977 年修正案除仍保有 1970 年修正案之空氣污染控制理念外，同時亦徹底檢討空氣污染管制

策略，導入「新污染源審核」(New Source Review, NSR)、預防明顯惡化(Prevention Significant Deterioration, PSD)以及污染源排放量抵換(Offset)交易(Trade)等具經濟誘因的總量管制制度。

1977 年以後美國政府仍陸續地在相關之空氣污染防治法規增列或修改空氣品質標準及污染源排放標準，最新的清淨空氣法修正案是 1990 年修正案，該修正案除修正空氣品質標準及污染源排放標準外，並將全球關切的酸性沉降及臭氧洞等環保問題納入法案條款，其中酸性沉降管制條款主要是針對電力設施硫氧化物及氮氧化物排放減量而訂。

根據清淨空氣法美國空氣污染管制策略大致可區分成三種策略：

一、空氣品質標準管制策略

空氣品質標準管制策略係以達成空氣品質標準為管制目標，美國環保署為解決既存工廠的污染改善及新廠設立的污染預防等問題，相繼提出若干政策及規定，如不符合空氣品質標準地區的排放抵換制度、符合空氣品質標準地區的防止空氣品質明顯惡化條款、州執行計畫、SO_x 和

NO_x 的總量削減等，期使各州政府在規定期間內能達成空氣品質標準。

二、污染源排放標準管制策略

污染源排放標準管制策略係由排放端控制來達成空氣污染管制目標，為使固定污染源排放符合排放標準，美國環保署列出管制方法，依嚴格度區分，由高至低依序為最低可排放率 (Lowest Achievable Emission Rate, LAER)、最佳可行控制技術 (Best Available Control Technology, BACT)、及合理可行控制技術 (Reasonably Available Control Technology, RACT)，另外，新廠或既有工廠擴建皆必須滿足新污染源操作執行標準，各行業之 BACT 及 LAER 所採用之防制技術，多有明確規範。

三、總量管制及經濟誘因管制策略

總量管制制度是一種創新且以市場為導向的空氣品質改善措施，不同於過去單純地採行政管制措施來達到改善空氣品質的目的，總量管制採取行政管制與經濟誘因並重之策略，提供污染源較大的選擇彈性，並能節省污染源的防制成本。

清淨空氣法中亦納入經濟誘因總量管制精神，總量管制制度其架構是將全美依空氣品質標準達成狀況，分成符合標準地區 (Attainment Area) 及不符標準地區 (Non-Attainment Area)，分別制訂不同之策略。

在已達成標準地區制訂了防止空氣品質顯著惡化 (PSD) 條款，以防止新廠設置導致該地區空氣品質惡化，其作法是將符合標準地區依空氣品質可容許惡化程度及容許增量限制分成三級，分別規定 SO₂、NO₂、TSP 允許增加之濃度，一級地區為國家公園等乾淨地區，不容許破壞現有空氣品質狀況。二級地區為工業區外的其他一般地區，容許少量濃度增加，但仍宜嚴格地限制空氣品質改變，第三級則為高度開發的地區如工業區，可容許大量工業成長允許增加濃度，三級中以第一級最嚴格，第三級最寬鬆。

在不符標準地區，由於背景空氣品質已超過空氣品質標準為防止空氣污染物濃度增加，既有污染源須逐年減量，新建及改建工廠申請設立於此區，則須符合污染排放量抵換，排放總量不增加之嚴格要求，使工業發展及空氣品質改善得能同步進行，以使該地區空氣品質能逐漸改善，達成空氣品質標準。預防明顯惡化及排放抵換政策之發展，顯現美國兼顧環境保護及經濟發展之政策，根據

1977 年清淨空氣法修正案中規定，空氣污染物排放量超過每年一百噸的二十八類污染性工業，若要新建或改建工廠時，都需要提出申請且必須通過「新污染源審核」，取得「許可證」(Permit)始得開始建廠工作，建造完成通過排放測試，再取得另一許可證後始得開工生產。

關於「新污染源審核」程序是一套細密而周全的過程，審核狀況又因設廠地點而異，粗分為下列兩類：

(一)在符合標準地區設廠：由於該地區原有空氣品質較佳，因此空氣品質標準不但不可以當作該地區空氣品質改善目標，反而變成往後空氣品質破壞極限，故須制訂防止明顯惡化(PSD)之標準。簡言之，一個新污染源若想在符合標準地區設廠，首先必須採用環保單位所認定的「最佳可行控制技術(BACT)」來控制空氣污染物排放，其排放除需符合「新污染源操作標準(NSPS)」外，排放量經空氣品質模式模擬推估後，對當地空氣品質的濃度增量還不能超過規定的 PSD 容許限值，PSD 容許限値之訂定視當地環保主管機關的政策而定，並不是先來者先用，政府需視未來經濟發展的趨勢訂出取捨條件，如此才能確保該地區目前良好的空氣品質，不會因盲目地發展經濟而惡化，反因經濟發展而維持在相當的水準。

(二)在不符標準地區設廠：由於該地區空氣品質已超過空氣品質標準有待改善，當然不應再增加新污染源，然而為顧及經濟發展，又必須讓某些重要工業前來設廠，這就成了兩難局面。

美國環保署為了解決這道難題，於是提出了運用污染排放量抵換的總量管制辦法，即假設該地區罩在一個大氣泡下，祇要氣泡內排放總量不增加，空氣品質相對地也不會變壞，新污染源欲在此設廠，首先要採用環保單位認可的「最低排放量」(LAER)污染控制技術，經防制設備後所產生的排放量，則必須全部抵換掉，抵換的方式則是經由減少該地區既有工廠同種污染物排放量而達成，另1977年修正案亦提出抵換保留(Banking of offset)策略，即若前述之減量遠大於新污染源之排放量則該超量減低部分可被保留，以備將來新增污染源之用。

為加速空氣品質改善，美國環保署延伸了排放抵換制度，陸續地推出許多具有經濟誘因之總量管制策略，諸如「污染泡(Bubble)」、「淨值(Netting)」、「抵換(Offset)」及「保留(Banking)」等，近年則積極推動「排放交易政策」，徹底改變過去以技術為基礎的命令與控制管制方式。

「污染泡策略」，係將傳統式對單一煙源或排放口的

管制方式，改變為整體性、區域性的管理方式，讓工廠污染排放改善或減低計畫更具彈性。亦即將某一地區許多排放源如工業區視成包覆在一個假想的泡泡中，且只有一個煙囪，只要在這個泡泡頂部煙囪所排放之污染量符合政府規定的總量上限，即容許部份污染源排放超過管制標準，而以其他污染源遠低於管制標準之削減量替代之，使泡泡中的任何工廠，可彈性選擇最佳防制成本之污染控制策略或措施。

「淨值策略」是以泡泡概念為基礎，容許舊廠的改建免除新污染源審核(NSR)，但必須有淨污染排放的減少，而且符合新污染源操作執行標準。

「排放抵減信用」(Emission Reduction Credit, ERC)即行政院環保署所稱的差額排放量，排放抵減信用的運作必滿足四個要件，即超餘的(Surplus)、定量的(Quantifiable)、永久的(Permanent)及可執行的(Enforceable)。只有超過 SIP 所列排放量上限、「超餘的」排放削減，始能被認定為有效的「排放抵減信用」。削減之程度及比率必須定量，方法包括排放因子，煙囪檢測、監測數據及使用產品或製程為參數。排放減量的抵減必須是永久且可執行的，此須透過環保單位和工廠間的協商來達成。

「排放交易政策」是具經濟誘因機制，使新投資事業之環保與經濟政策能兼籌並顧，排放交易必須合乎下列幾項原則及限制：

1. 既存污染物必須減至 SIP 所定之合法底限以下。
2. 使用者必須說明，排放抵減信用的實施對環境空氣品質之影響具有等量之效果。
3. 排放交易必是相同污染物。
4. 氮氧化物（NO_x）和揮發性有機化合物(VOC)可互為抵換，即一磅的減少可抵一磅的增加，而與煙囪高度和地形無關。
5. 但磅對磅的抵換不適於 SO₂、CO、TSP 等不同污染物間的抵換，必須另以空氣品質模式證實其對環境的影響是否等量，惟須考量地形及煙囪高度等因子。
6. 在不符標準地區，抵換必須與未來削減計畫的成果一致，不能造成違反空氣品質標準或妨礙違規工廠的移除。
7. 排放抵減信用不適用於抵換移除污染防制設備之增量，亦即不可用於淨值程序中以逃避新污染源的審核及 LAER 及 BACT 的要求。

美國環保署對於未符標準地區，依其空氣品質改善目標核配給污染源「容許排放權」(Allowances)，並規範其逐年應削減排放量比例、達成目標年及最終容許排放權，以替代其逐漸加嚴之管制標準，提供業者更具彈性且更經濟之改善方式。各污染源取得容許排放權後，即能於開放性市場中自由交易買賣，且其購買者並不限於污染排放者，舉凡工廠、環保團體、法人或個人等皆能購買，每年年終結算時，各污染源所持有之容許排放權必須大於或等於全年規定的容許排放限值。

排放交易政策賦予污染源所有者較大的彈性，得以選擇最有效且有利之污染排放。如此，污染防制成本高者可向成本低者購買多餘之容許排放權，而污染防制成本低者亦有經濟誘因誘導其主動降低污染，因而可使污染源所有者自由調節控制成本。當總污染量限制愈嚴格，其減量變的愈有價值；當污染物容許排放權的價格上揚時，降低污染的誘因亦增大，減量甚至可變成一種獲利的機會，並促進科技之發展。

肆、美國電力事業空氣污染物總量管制策略

一、美國電力事業總量管制措施

有關美國對電力事業實施之總量管制可分為全國性及區域性兩方面，茲分別說明如下：

(一)美國全國性電力設施空氣污染物總量管制

酸性沉降計畫—硫氧化物及氮氧化物總量管制

美國環保署於 1990 年修正清淨空氣法，特別針對酸性沉降問題制定酸性沉降管制計畫，管制對象為全國的電力設施，這是美國成功實施全國性總量管制案例。歷經三年的規劃，為解決美國國內酸雨問題，酸雨計畫分二階段對全國較大型電力設施的硫氧化物及氮氧化物進行總量管制。

第一階段自 1993 年起實施，硫氧化物限值為 2.5 lb/mmBtu，氮氧化物限值為 0.45-0.5 lb/mmBtu；第二階段自 2000 年起實施，硫氧化物限值為 1.2 lb/mmBtu。削減目標是以 1980 年排放量為基準，至目標年 2010 年，硫氧化物排放量應減至 1980 年排放量的 50%。

美國環保署依單位輸入熱值之排放量限值

(lb/mmBtu)，計算每個電力設施允許之排放總量限值，並於每年年初發給指定污染源硫氧化物及氮氧化物之容許排放權(Allowances)，其間允許污染源自由買賣或儲存，年終時各污染源所持有容許排放權必須大於或等於全年規定的排放量限值，未符合規定者處以 2000 元/噸的罰款且必須於次年補足，且將酌減次年核定排放權。

容許排放權的發放方式係採用各電力設施在 1985～1987 年間所耗用能量的年平均値來加以計算，計算方程式如下：

容許排放 SO₂ 之磅數=

$$2.5(\text{lb/mmBtu}) \times (E_{1985} + E_{1986} + E_{1987})(\text{mmBtu}) / 3$$

爲了確認排放權合法的轉移與追蹤排放權的流向，以利確認污染源持有之排放權數，做爲日後違法時的懲處依據，必須建立一套排放權的登錄系統。例如酸雨計畫要求交易雙方均需經由交易代理人填寫帳號之交易表格，並加以簽名，以便雙方之交易取得合法性。交易完成後，排放權轉移必須登錄(Registration)於「排放權管制系統」ATS(Allowance Tracking System)，以利後續追蹤管制，排放交易的概念如圖 1 所示。美國初期交易價格 400-1000 美元/噸，1996 年曾降至 68 美元/噸，1997 年回升至 115

美元/噸。另美國環保署由第一階段及第二階段電力設施所分配得之容許排放權中各取出 3%之容許排放權作為保留(Reserve)，以鼓勵電力設施裝設更潔淨之燃燒技術、更高效率之防制技術以及防止容許排放權遭到壟斷。

根據資料顯示，美國環保署實施此項措施已有效地削減 40%以上的硫氧化物排放量，電力設施平均每年共削減 9000 噸硫氧化物。

(二)美國區域性電力設施空氣品質污染物總量管制

1.加州區域清淨空氣誘因市場計畫

(RECLAIM：Regional Clean Air Incentives Market)

該計畫自 1994 年實施迄今，架構如圖 2 所示，係由加州南岸空氣品質管理局(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)所推動，這是一個由地方政府成功推動具經濟誘因總量管制措施之典型案例。管制對象係針對硫氧化物或氮氧化物排放量大於 4 公噸/年且依規定應設置連續自動監測設施之指定污染源，包括電力設施、氣電共生及大型化石燃料鍋爐等約有 300 餘家污染源參與總量管制，其總量之核定係依據該污染源於 1988 年~1992 年間最大的活動強度(指產能、原物料量或燃料量)為基礎，再依環保主管機關規

定起始年(1994年)及目標年(2003年)的單位活動強度之排放限值，計算每年容許排放權(RECLAIM Trading Credits, RTCs)，並規定每年應至少削減 8.3% 硫氧化物排放量及 6.8% 氮氧化物排放量，各年容許之排放權將詳細登載於許可證上，以利污染源確實遵循。

污染源在符合管制要求之排放限制下，若能在排放量上加以削減而低於排放限制所產生之差額，即可做為差額排放權(Emission Reduction Credit)之發放依據。對於因歇業、停工、停產或減產所產生之減量，並不允許交易。

對未使用完之排放權或減量額度產生後將其保留儲存(Banking)下來，作為日後自用抵換新增排放量、因應未來可能加嚴的管制標準或進入自由交易市場與其他污染源進行交易買賣。考量減量產生的差額排放權及新設或變更污染源抵換需求量之供需平衡，排放權可存放的時間應給予適當限制。

該計畫實施預期至 2003 年將能有效削 80% 以上的硫氧化物及氮氧化物排放量，其中 1994~1999 年約削減 30% 之污染排放量，2000~2003 年約削減 50% 之污染排放量。

2. 跨州臭氧傳輸委員會之氮氧化物總量管制方案

美國跨州之間的光化學煙霧問題，無法純以各州執行計劃(SIP)解決並改善空氣品質，於是美國東岸十一個州成立臭氧傳輸委員會，負責規劃推動氮氧化物抵換交易制度，內容包括適用範圍、管制期限、氮氧化物容許排放權、排放監測、紀錄申報等。屬於委員會轄內各州應同時發展並公告相關法規，各州政府管制對象為：大於 250mmBtu/小時之電力設施、15MW 以上汽電共生設備及大型蒸氣鍋爐，以污染源歷年平均排放量為基礎，分別核定個別污染源之氮氧化物容許排放權。第一階段預計自 1999 年 5 月開始，氮氧化物排放總量管制目標為 219,000 公噸，第二階段預計於 2003 年開始，氮氧化物排放總量管制目標為 143,000 公噸。

二、美國電力事業總量管制因應對策

由美國對電力設施實施的總量管制經驗可知，電力設施需按照環保單位規定之期程及目標逐步削減硫氧化物及氮氧化物排放量，新設污染源亦需取得差額排放權始能設立，電力事業主動發展高效率污染防制技術或淨煤技術，乃是最佳因應之道，亦是未來推動之趨勢。

淨煤技術(Clean Coal Technology)

- Atmospheric or Pressurized Fluidized Bed Combustion
- Integrated Gasification Combined Cycle
- Magnetohydrodynamics
- Direct and Indirect Coal-fired Turbines
- Integrated Gasification Fuel Cells
- Others as determined by EPA

伍、毒性空氣污染物—汞在環境中的宿命

汞在環境中的問題近年來已引起全世界的注目，如早期發生在日本的水俣病公害事件(甲基汞污染)以及國內台塑公司的汞污泥棄置事件，皆引起國人廣泛的注意與關切。此次與美國電力研究所就有關毒性空氣污染物—汞的課題交換意見，茲將所獲資訊摘述如下：

一、汞的來源

汞排放至大氣中的主要來源有三：

- 1.工業排放，如煤的燃燒、都市垃圾焚化，每年約 2214 公噸（加上沉降在排放源附近區域的量）；
- 2.由陸地上釋出，如火山爆發，每年約 2300 公噸；以及
- 3.由海洋釋出，每年約 2000 公噸。

由圖 3 可知，全球工業排放中，以亞洲排放汞的量最多，主要係因中國大陸所致。當汞排放至大氣中後，約 20%會沉降在附近，80%則會擴散到全球，因元素態汞（ Hg^0 ）在大氣中生命週期約 1 - 1.5 年，所以汞可說是全球性的課題。

二、燃煤電廠汞的傳輸

燃煤火力發電廠之所以會排放大量的汞到大氣中，最主要的原因是由於所使用的燃料煤中含有汞，由電廠所排放出的含汞化學物主要有三種，分別是 Hg^0 (又稱元素態汞)、 Hg^{2+} (氧化或離子化汞，在煙道氣中主要係指 HgCl_2 ，另可能含有少量的 HgS 及 HgO) 和 Hg^p (含汞的化合物被結合在飛灰上，通稱粒狀物結合汞)，然而就三種含汞化合物，最重要的是認知到不同的化學物有不同的化學特性，會影響從電廠煙道氣中移除它們可運用的策略，例如：氯化汞 (HgCl_2) 是以晶體存在，在室溫呈現白色細粒或白色粉末，它的融點是 276°C 和 302°C 時揮發，相較於其他汞物種易溶於純水和更易溶於沸水或含氯化氫或氯化鈉的水中；相對的，元素態汞 (Hg^0) 在室溫是一銀白色的液體，在 356°C 揮發和極不易溶於水；粒狀物汞表示汞結合到飛灰上，有關於粒狀物汞的特性較少知道，美國環保署一般假設其主要是由氧化汞組成。

煤的燃燒特性和電廠設計或程序單元明顯的影響到電廠操作期間所產生的含汞化合物，在煙道氣中汞的化學結構主要受到二個因素影響，分別是煤中氯含量和煙道氣最終溫度，其他因素如硫、鐵、灰的含量對汞的物種也有影響；所有的煤皆含有低濃度的汞，在電廠鍋爐燃燒帶(一

般為 2500~2800°F)的高溫中，煤中所有的汞是被汽化且以元素態汞存在，一般濃度範圍為 1~20 $\mu\text{g}/\text{dscm}$ ，在鍋爐出口，一般溫度仍可維持在 2000°F 左右，熱力學的預測所有的汞將持續以元素態存在，氧化反應有可能存在，但祇有在燃燒後氣體冷卻時進行。

空氣污染防治設備在移除汞的效率上，絕大部分與煙道氣中汞的物種型態有關。由美國環保署所提供的數據顯示，煤中氯離子含量在汞的物種與移除關係上是一關鍵因素，增加煤中氯離子含量會造成氯化汞的增加，如同使汞的移除效率增加，可推論出氧化汞較元素汞容易附著在飛灰微粒上，使其易於在粒狀物控制裝置上捕捉，靜電集塵器（ESP）或濾袋集塵器（Baghouse）兩者在移除粒狀物的效果非常好。所以在任何在粒狀物相的汞將可有效的用這些控制裝置移除。

煙氣除硫設備（FGD）在移除氧化汞是非常有效且適當的，但本質上無法移除元素態汞，此外，濕式煙氣除硫設備可捕捉氧化汞，但有部分的汞會再以元素汞被釋放，導致出口比入口有較高濃度元素態汞。

三、汞的循環

有研究顯示，經過 ESP 與 FGD 之去除後，由電廠煙囪排放至大氣中的汞，約為煤中含量的 40%以下，如圖 4 所示。電廠燃煤中的汞有 60%被排放至環境中，其中約 20%沉降，80%擴散至全球，如圖 5；根據 EPRI 建立的汞循環模式（圖 6）顯示，排放出的汞若沉降在水中，會進入水中生物體內而產生所謂的生物累積，一旦該生物被人類食用，將造成對神經系統的危害，因此，汞控制技術的發展實為刻不容緩。

四、美國相關法案與 EPRI 研究

自從 1990 年清淨空氣法修正案提出對毒性空氣污染物的排放管制策略後，美國環保署即開始進行一系列的相關研究，1993 年起開始進行汞的相關研究，到 1999 年為止，針對於燃煤電廠所排放的毒性空氣污染物提供了許多的資料。美國環保署依據清淨空氣法中的 112n1A 條款，宣佈將對燃煤電廠進行相關的管制規範。在 1995 年到 1997 年間，美國能源部(Department of Energy, DOE)所執行的 17 項污染防制計畫中，汞的研究計畫即占了絕大部分，包含有實驗室規模的測試以及對燃煤火力發電廠的防

制策略評估，圖 7 為美國關於汞研究之歷程。在 1998 年 2 月 14 日美國環保署對國會的報告建議依其研究結果來決定是否進行更嚴格的管制，原定排放標準於 2004 年 12 月前訂定，最多延至 2007 年底，因布希政府上台後提出另一套立法之期程，使得目前有兩條路線，如圖 8 所示，惟無論何者，在 2010 年前應會制定出統一的排放標準並實施。

EPRI 針對大氣中的汞發展出多尺度的模擬程式，包括：

- Chemical Transport Model (CTM) – Global Model
- TEAM: Continental Model – Coarse Grid Model
- TEAM: Regional Fine Grid Model
- TRUE Local-Scale Radial Grid Model

這些模式被應用於不同的地方，CTM 用於全球性的化學物質傳輸模擬；TEAM-Coarse Grid Model 用於評估洲際的污染排放，圖 9 為美國各州汞的沉降量-實測與模擬比對的結果；TEAM-Fine Grid Model 可用於電廠汞排放控制的成本效益評估架構中，如圖 10 所示；至於 TRUE 則為一多介質的污染源/路徑/暴露模式，結合了空氣、水體、土壤、及地下水等模式，並考量食物鏈、暴露劑量等因素，以評估對人類健康的風險，其結構如圖 11 所示。

五、汞的控制技術

汞的控制技術發展要符合：花費低，應用範圍廣，對飛灰的品質影響不大且棄置在垃圾掩埋場時安全性佳。汞的控制技術在傳統上搭配的設備有靜電集塵器(ESP)，煙氣除硫設備(FGD)以及氮氧化物(NO_x) 控制設備，此外燃料的替換也是可行的方法，將傳統設備加以改良或添加附屬設備，使其達到最適條件，以提高汞的去除率，是目前普遍採用的方式。新技術的研發亦同時進行中，降低汞排放的技術主要著重在添加適當的吸附劑，以提高汞的去除率。

在發展汞控制技術方面，首先必須能掌握汞的排放量，以及其不同形式如氧化態、金屬態等所佔的比例，才能夠進行控制，因此汞的量測技術也受到相當的注重。元素汞的揮發性高，二價汞的水溶性強，針對不同種類的汞有不同的控制方式。例如降低溫度並配合濕式洗滌處理可增加煙道氣中二價汞的去除率。元素汞所佔的比例則與燃煤原料的種類有關。

根據 EPRI 的研究報告顯示，一個電廠使用何種控制技術的決定程序如圖 12 所示。首先進行全系統的汞排放分析，藉由使用的鍋爐，燃燒的煤炭種類及汞的排放現狀

和目前所使用的控制系統等因素來分析適合的控制技術，並由分析結果決定選用的控制策略，所得到的結果將藉由適當的測試程式來分析針對特定電廠的控制方向。而可選用的控制技術在源頭為煤炭的淨化，管末部分除 SCR、ESP/Baghouse、及 FGD 外，尚包含有吸附劑的注入、氧化劑的選用以及新式吸附劑的使用，如圖 13。

陸、電磁場健康效應評估研究

一、電磁場研究回顧

(一)1960 年代末期至 1980 年代中葉

- －蘇聯工人病徵報告
- －EPRI 於 1973 年獲得研究計畫資助
- －研究著重於電場，尤其是傳輸電線下方區域
- －幾乎所有研究結果均與癌症無關

(二)1980 年代中葉至 1990 年代初期

- －研究由電場轉為磁場
- －以癌症研究為主
- －開始著手居民及職業人員影響研究
- －加強參與國際合作

(三)1990 年代初期至 1990 年代末期

- －完成主要流行病學研究
 - 居民研究（美國、北歐、英國、加拿大）
 - 職業傷害研究（美國、瑞典、加拿大、法國）
- －美國政府發動"RAPID" 電磁場（EMF）研究計畫，並完成 NIEHS 風險評估
- －建立國際化電磁場曝露規範

(四)1990 年代末期至今

– 電磁場風險評估已有多個研究團隊提出報告

- 環境健康科學研究機構(NIEHS)

National Institute of Environmental Health Sciences

- 國立輻射防護委員會(NRPB)

National Radiological Protection Board

- 國際癌症研究機構(IARC)

International Agency of Research on Cancer

- 加州健康事務部(CDHS)

California Department of Health Services

二、今日全球性電磁場健康安全議題

(一)居家電磁場與兒童白血病關係

(二)電磁場曝露準則發展與更新

(三)愈來愈重視員工(如供電公司等)受輻射場(Radiation Field, RF)曝露與其安全之關係

(四)其它，如流產和電磁場關係

三、電磁場與兒童白血病(Childhood Leukemia)關係認知

(一)科學家認知

- 不太可能由電磁場本身造成
 - 在老鼠身上呈陰性反應
 - 由生物物理機制來說亦是似是而非
- 歸咎於研究之人選選擇偏差（生物感受性）
- 和相關曝露有關

(二)一般大眾認知

- 係和電磁場有關之偶發病例
- 必須有適當預防措施

(三)認知落差

- 在相關研究尚未有更進一步了解前，大眾對電磁場的印象將依然如此

四、EPRI 研究計畫

(一)電磁場暴露準則研究

(二)2003 年 RF 計畫

- 極低頻(Extremely Low Frequency, ELF)環境下 RF 測儀性能研究
- 建立 RF 環境強度模擬軟體，如圖 14
- 電暈放電劑量測量技術

柒、綜合感想

- 一、根據空氣污染防治法規定，位於不符合空氣品質標準總量管制地區內之既存固定污染源，應向當地環保主管機關申請認可污染物排放量，並依環保主管機關指定之目標與期限削減，新設或變更之固定污染源則應採用最佳可行控制技術，並取得足供抵換污染物增量之排放量。因此本公司因應行政院環保署實施總量管制，除應繼續研發高效率之污染防治技術，以取得足供抵換或保留之差額排放量外，於既有火力發電機組申請污染物排放量認可階段，各相關單位更應努力爭取，儘可能取得最大污染排放認可量，為公司爭取最大利益以及電廠營運與電源開發空間。
- 二、美國環保署預定於 2010 年訂定毒性空氣污染物—汞的排放標準，此對行政院環保署對汞的排放管制會有誘導作用，因此本公司除須密切注意法規發展趨勢外，亦應積極建置燃煤火力機組煙氣中汞含量資料檔案，並蒐集及研發與汞相關的控制技術預為因應，同時也為地球環保盡一分心力。
- 三、電磁場健康安全效應是全球性關切的議題，目前科學研究的結果與一般民眾之認知尚有落差，若無進一步研究，大眾認知恐無法改變，本公司應繼續蒐集資料，進行相關研究，以善盡電力事業之社會責任。

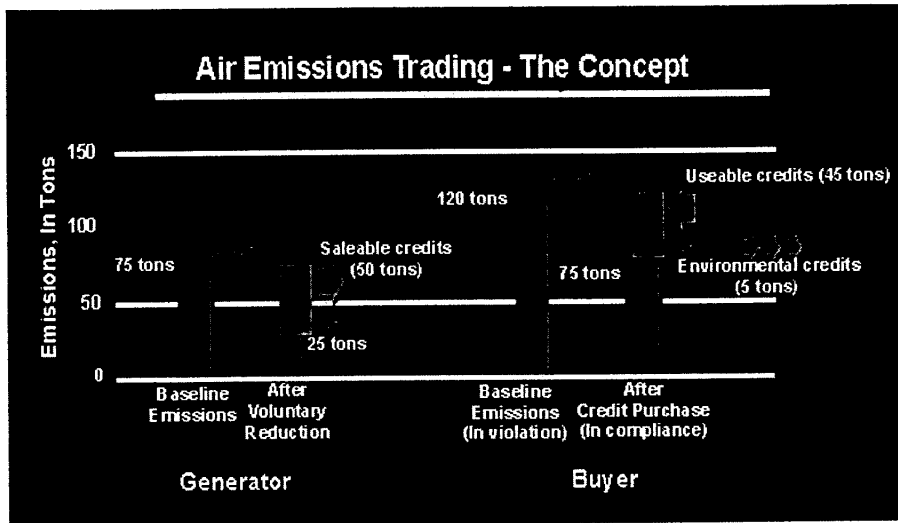


圖 1 排放抵換交易示意圖

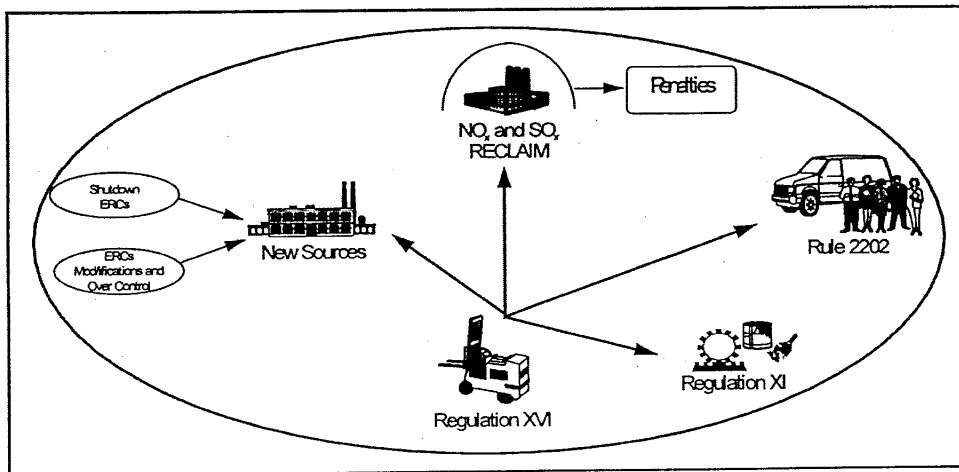


圖 2 加州區域清淨空氣誘因市場計畫示意圖

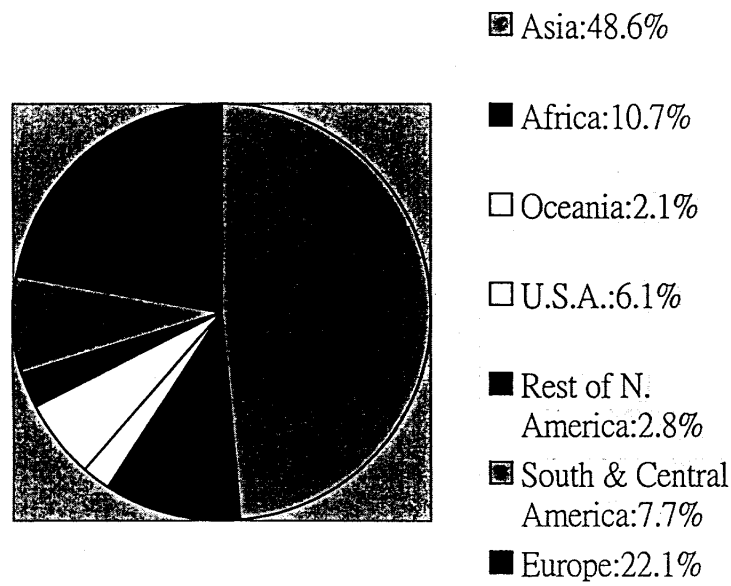


圖 3 全球各洲工業排放汞量百分比

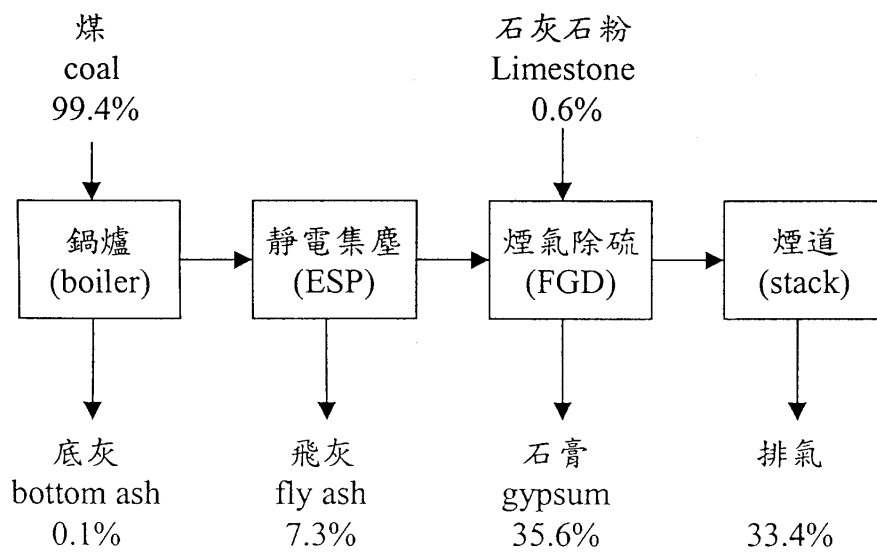


圖 4 美國 AES Cayuga 電廠汞之質量平衡圖

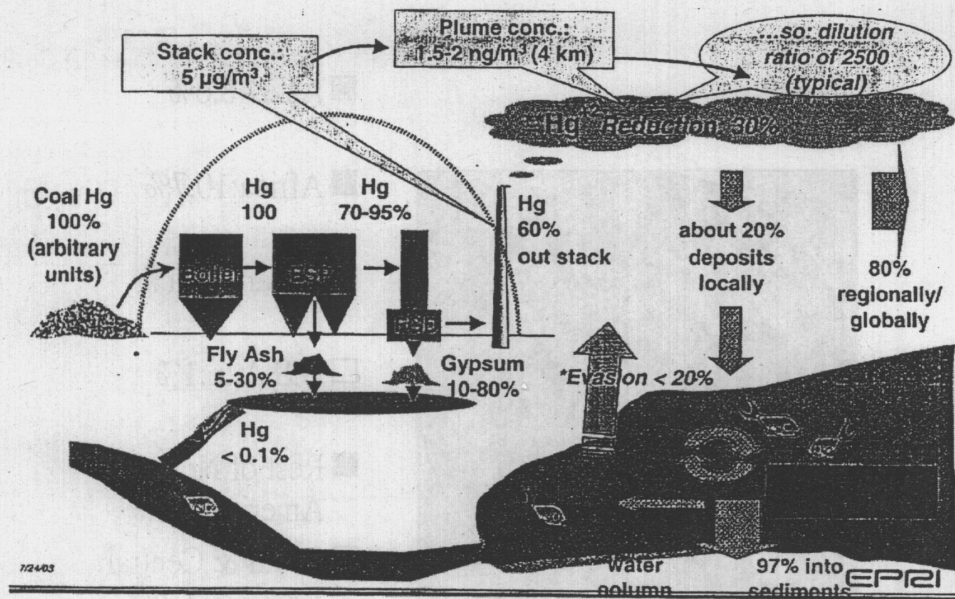


圖 5 燃煤電廠汞在環境中的傳輸

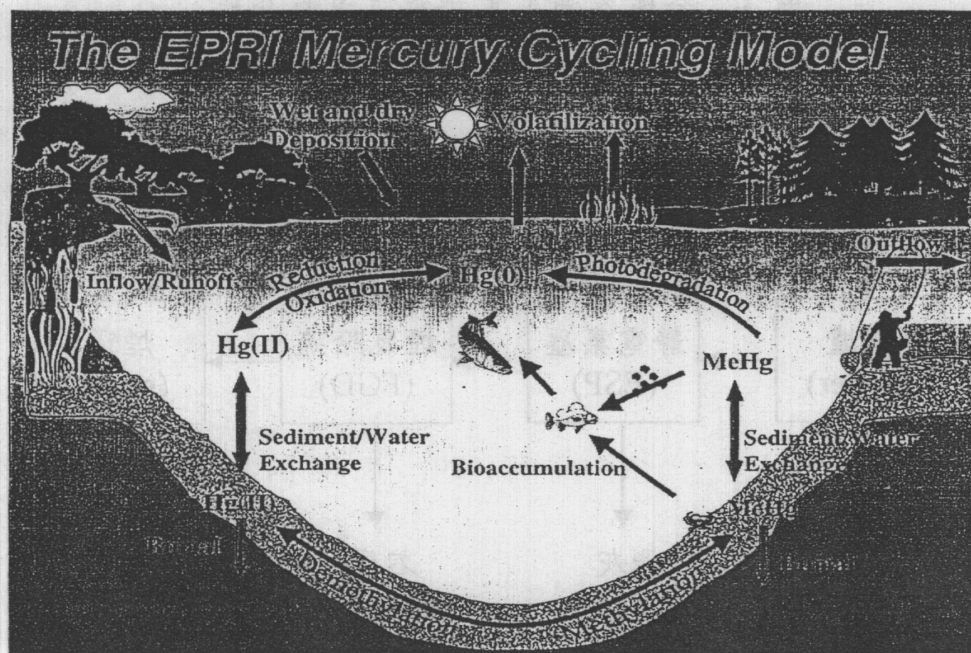


圖 6 EPRI 汞循環模式

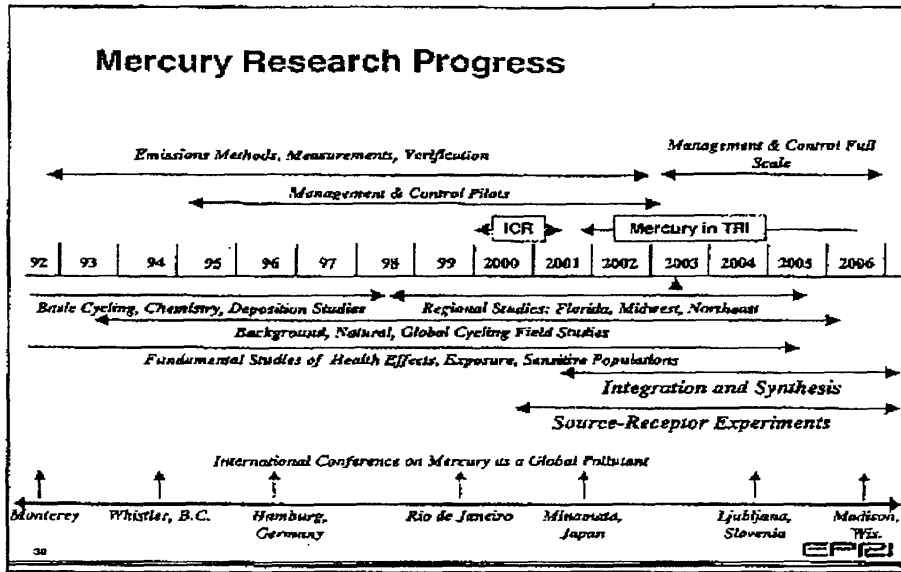


圖 7 美國有關汞的研究歷程

EPA Mercury MACT Schedule vs. Clear Skies Act of 2003

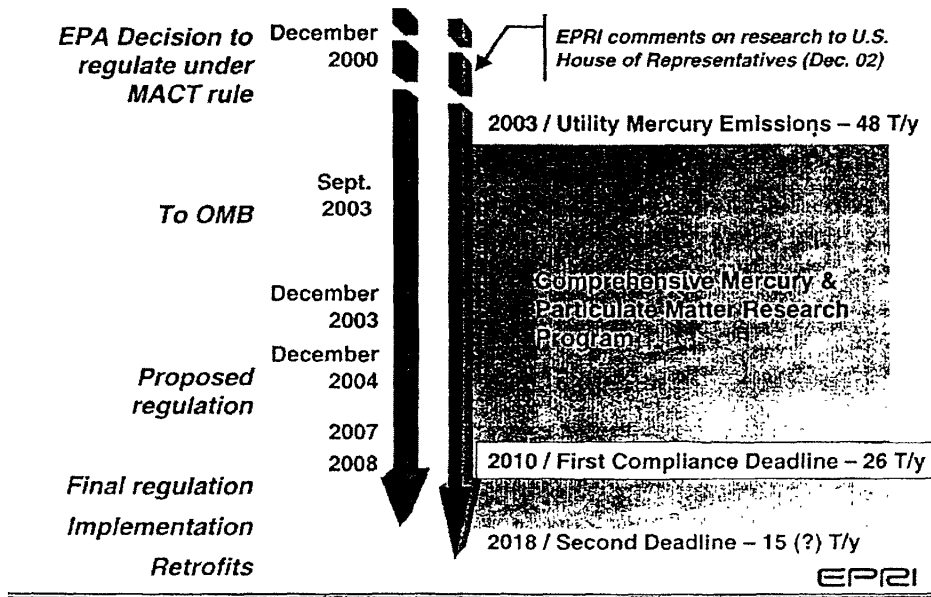


圖 8 美國有關汞的立法時程

Performance Evaluation, EPRI TEAM Model (Coarse Grid) vs. Observation, State Averages, Wet Deposition, Mercury Deposition Network

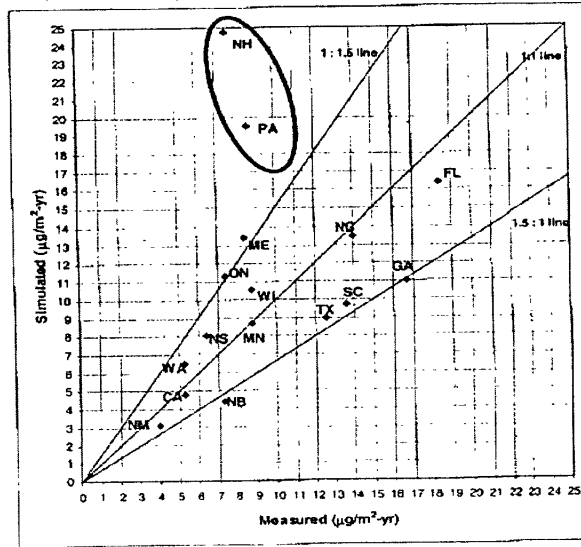


圖 9 TEAM:Coarse Grid 應用案例

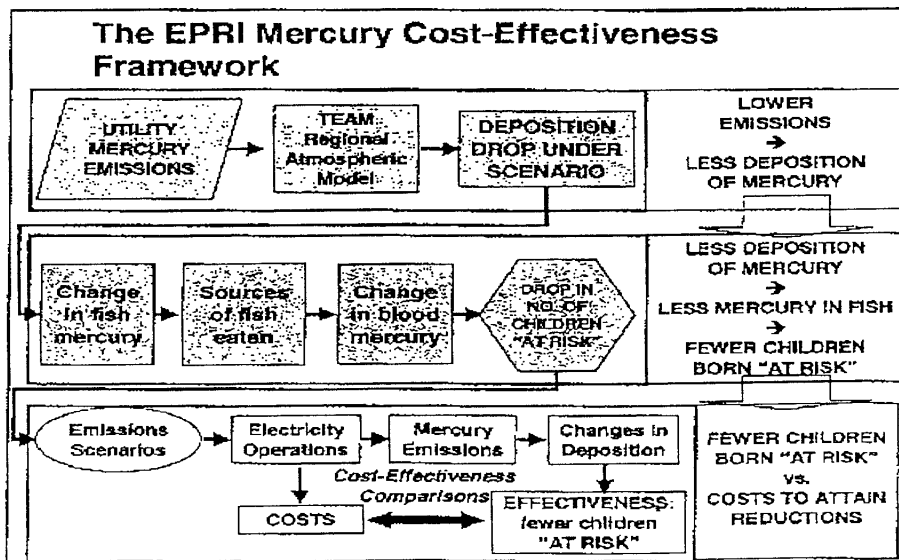


圖 10 EPRI 汞成本效益架構

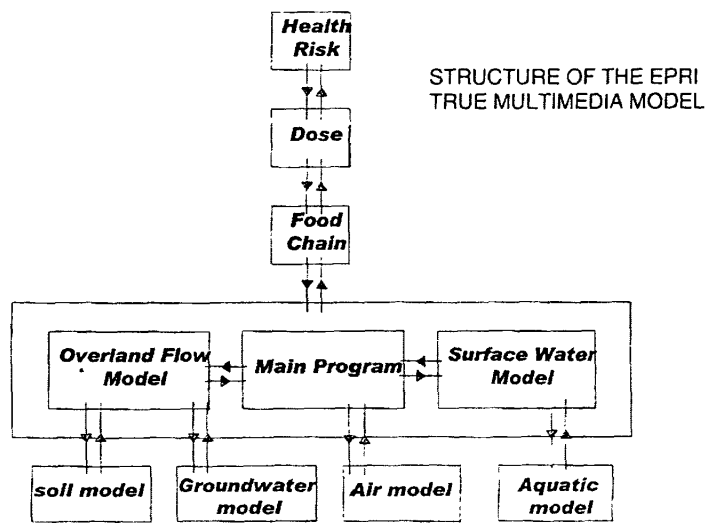


圖 11 TRUE 模式結構

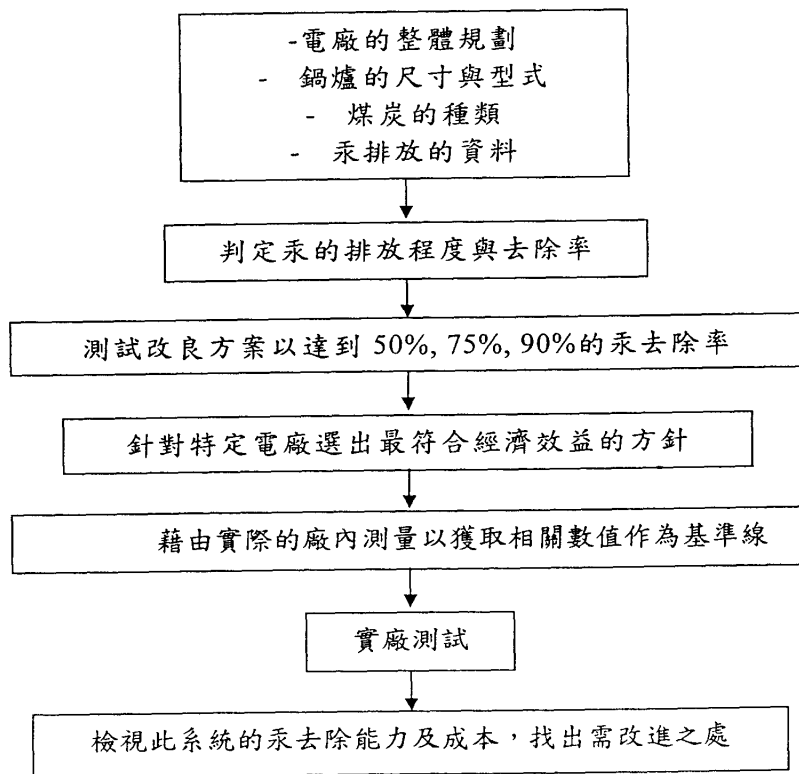


圖 12 EPRI 針對汞控制方案的評估分析方式

Power Plant Mercury Control Options

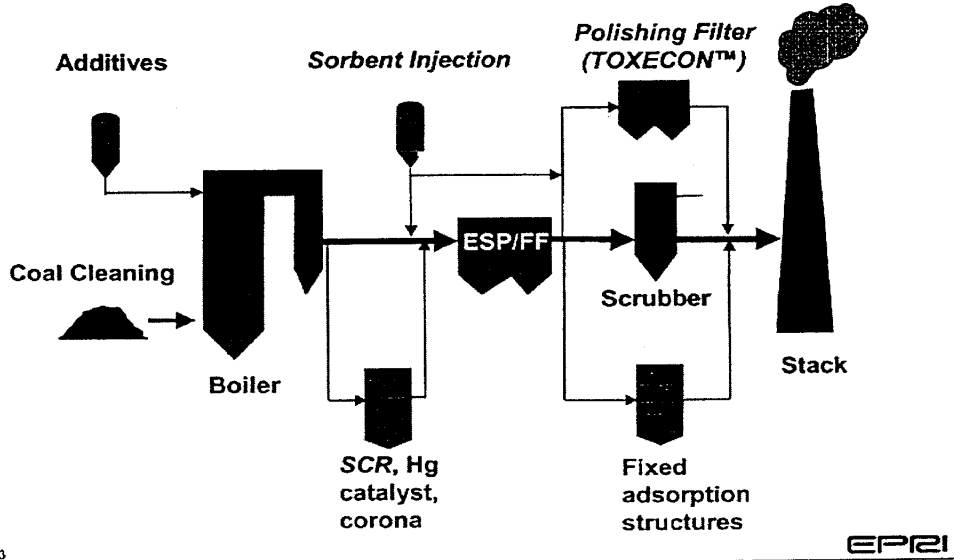


圖 13 EPRC 之電廠汞控制技術方案示意圖

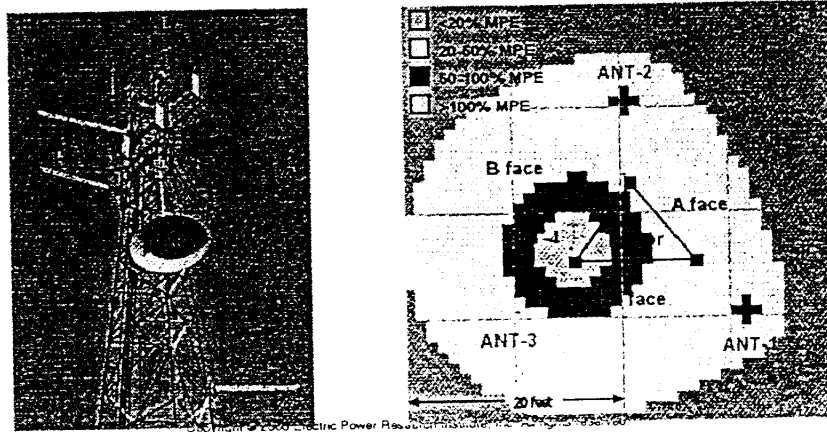


圖 14 RF 環境模擬示意圖