

出國報告(出國類別：國際會議)

第五屆全球當前環境挑戰與政府應對措施研討會暨環境高層論壇

服務機關：行政院環境保護署

姓名職稱：蔡鴻德技監兼執行秘書

派赴國家：美國

報告日期：101年9月17日

出國時間：101年8月8日至8月18日

摘要

「第五屆全球當前環境挑戰與政府應對措施研討會暨環境高層論壇」2012年8月9日至16日於美國洛杉磯召開，共有100多位全球華人環保專家與學者參加，本屆研討會共分為兩階段行程，包含三天的專題演講與論文發表，參與人員來自於美國、台灣與中國大陸等地環境保護相關政府官員與學者專家，就各類環境領域做專題報告，以及四天的「污染場地修復和綜合管理」專題會議和培訓講座，介紹美國土壤及地下水污染之管理與整治經驗，並由主辦單位安排現場參觀洛杉磯地區3處污染場地整治案例與污染地下水處理設施等。

會議中針對美國污染場址管理發展與相關法令進行完整的介紹，包含 Superfund 的發展歷史與補助經費的分配、場址風險評估與結案標準的設定、綠色清理技術在污染場址整治中的應用，以及污染場址整治與開發整合案例的介紹等。美國主要採用風險評估概念作為污染土地管理之基準，以可接受之致癌風險基準 10^{-6} 與非致癌風險基準值 1，在既設參數與暴露條件下，計算風險基準濃度，藉以訂立土壤篩選基準值，當場址風險污染物濃度高於篩選基準值時，則表示可能具有人體危害性，需納為列管場址。列管之場址再透過進一步調查評估後，則會依據場址實際狀況，如土地使用型態、污染物暴露途徑與暴露受體類型的確認等，重新以可接受風險標準訂定其整治目標。再透過適當之整治工法與相關風險管理措施，使場址符合其整治目標時，即可解除場址列管 (closure and delist)。

但值得注意的是地下水污染場址，因美國飲用水主要來源為地下水，水源的保護極為重要，因此地下水污染場址之解列標準必須同步考量風險評估結果以及飲用水標準，特別是當污染場址位於水源取水井所在地時，在符合以風險為考量之整治目標條件下，一般僅能達關場標準 (closure)，環保主管機關將同意場址進入 No Further Action 階段；但若場址並非位於飲用水源地區，或地下水污染深度並非飲用水井主要取水層（第二或第三含水層），環保主管機關則同意當場址整治達 remediation goal 時即可 closure site，並在經過長時間控制與觀察後，發現地下水中污染物已無降解之可能性或擴散之風險性時，就可以申請 delist。

除此之外，室內污染氣體的評估亦是近年來頗受關注的污染場址管理議題，主要因美國污染場址早期在透過風險評估訂定整治目標時，通常僅以開放空間之蒸氣揮發土壤揚塵等暴露途徑進行計算，但因地下水污染以及深層土壤污染（通常為 DNAPL 污染物質）通常需要數十年的時間才能完成整治，且整治經費相當龐大，因此為能有效利用土地，美國多先以土壤挖除的方式處理淺層污染土壤，使土壤濃度符合整治目標

後，便結合市政區域發展計畫，一併進行場址開發，而地下水污染則在開發過程中或開發完成後，持續以 SVE 或生物處理等方式整治。如此而為衍生出當地下水含揮發性有機污染物存在時，可能會透過土壤氣的傳輸移動，進入且累積於室內密閉空間中，因而造成長期居住或活動於該空間內的民眾出現健康風險疑慮。為避免地下水中或更深層土壤中的有機污染物濃度揮發至地下室空間內，美國環保署自 2008 年起陸續訂定防止土壤氣進入室內空間之方法與評估指引，如在建築施工過程中必須設置土壤氣隔絕措施，在地下室之牆面與地板層內側鋪設薄板及具耐壓的不透水布，最後灌入水泥牆面。另外，為能持續整治殘留於地下水中之污染物，在建築施工過程中，同步要求設置有雙向式抽除井，當發現監測井中污染物濃度出現變化時，或地下室與一樓室內使用空間的空氣品質出現異樣時，可立即要求管理者啟動抽除系統，移除含污染物之土壤氣與地下水，避免造成人體健康危害。

在場址參訪的部份，大會共安排位於美國加州地區的 Charnock Well Field 與 Shell Site、EI Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station，以及 NASA Industrial Plant 等三處污染場址，其中 Charnock Well Field 與 Shell Site 場址因位於飲用水源取用地區，且含有 MTBE 此水溶性極高之致癌污染物質存在，故立即停止使用當地地下水水源，在透過法律訴訟與協商，污染責任者同意向南加州大都會供水局購買水源，提供當地所需，每年費用為 330 萬元美金，持續約 12 多年之久，並支付懲罰性賠償金 6,400 萬美元給市政府，同時也出資約 2 億美元建造 Charnock Well Field 地下水的處理廠，2010 年已完成設置並開始運作，由該廠先負責處理當地受污染之地下水後，再將處理後之水源運送至自來水處理廠。另外，EI Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station 雖也同樣位於水源取用地區但因該場址範圍內之地下水僅作為再生水系統(澆灌用水系統)所用，因此環保署同意該場址依據風險評估計算後，分別訂定各含水層之整治目標，並利用抽水控制，避免污染擴散影響飲用水源。

目次

一、目的

二、過程

三、心得與建議

四、附錄

附錄一：行程

附錄二：EI Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station 場址資料

附錄三：NASA Industrial Plant 場址資料

一、目的

本研討會由美國南加州華人環保協會 (Southern California Chinese American Environmental Protection Association) 主辦，共有 100 多位全球華人環保專家與學者參加研討，本屆研討會共分為兩階段行程，包含三天的專題演講與論文發表，以及四天的「污染場地修復和綜合管理」專題會議和培訓講座，參與發表的論文已刊載於當期會刊中。主要參與人員來自於美國、台灣與中國大陸等地環境保護相關政府官員與學者專家，就各類環境領域做專題報告，並由主辦單位安排實地現場參觀洛杉磯地區污染場地清理項目，污染地下水處理等設施。細步議程如附錄一所示。

二、過程

(一) 專題演講與論文發表

第一階段專題演講與論文發表部份，分別邀請美國加州環保署與台灣環保署官方代表，以及來自中國大陸之學界代表，共同介紹與探討美國、台灣與中國大陸等地之土壤及地下水污染發展歷史與管理制度方向。加州環保署洛杉磯水質管理局地下水許可證處處長許仙育博士和與會人士分享美國地下水、廢水許可的新法規及南加州的作業經驗，加州環保署在考量財政經費緊縮之故，零污染必須付出龐大的經濟與社會成本，因此加州環保署在今年 7 月 30 日針對加油站型石油類污染場址管理公佈新法規 - UST (Underground Storage Tank) Closure Criteria，以保護水資源、人體健康與環境為目標，推出低風險整治標準 (Low Risk Closure) 規定，其標準之訂定應將 (1) 地下水、(2) 蒸氣溢散滲入室內空氣以及 (3) 室外空氣暴露與直接接觸等暴露途徑納入考量，在確定整治或管理達風險標準後即可關場 (Site Closure)。另外，也針對加州內 Brownfield、Superfund site、Cleanup site、掩埋場 (Landfill)、以及老舊工業類等污染場址案例進行介紹。

本次會議中，亦安排本人代表台灣環境保護署介紹台灣污染場址之管理歷程與現今成果，在會議中表示，美國超級基金法制度是世界上最具有代表性的污染場地管理制度，至今已施行約 60 年，累積無數場址管理制度之經驗，是亞洲地區未來建立土壤污染管理制度的最佳範本。台灣主要即是效法美國場址管理制度，經過十年的努力，已完成全國性的污染場址普查，並且逐步建立場址調查辦法、土污基金收費制度、場址風險評估以及其他配套措施；美國環保署也希望藉由台灣的成就，促成亞洲其它國家提升環保意識並重視土壤及地下水污染整治與管理的問

題。同時，因台灣與中國大陸正洽簽 ECFA，目前中國大陸亦正計畫啓動解決土壤及地下水污染環保問題，在中國起步之際，台灣的完善技術經驗與立法思維將可作為其借鏡。

(二)「污染場地修復和綜合管理」專題會議和培訓講座

本次研討會第二階段為四天的專題會議和培訓講座，其中包含有三天的講座會議與一天的場址參訪行程，主要著重於土壤及地下水污染場址之管理與整治經驗分享，各講座議題內容簡述如下，場址參訪介紹則於第(三)節中說明。

1. 美國聯邦環保署「超級基金」項目管理經驗介紹

本議題由譚思理主任進行介紹說明，譚主任來自中國大陸，目前擔任美國聯邦環保署第九分區中國項目部主任，對於美國超級基金場址的管理與整治作業也豐富的經驗。

美國於 1970 年成立聯邦環保署，陸陸續續針對空氣、水質、廢棄物即有毒物質等各項污染介質訂定相關法規，也因美國紐約發生 Love Canal 事件後，1980 通過了超級基金法，清楚指出「無論何時，只要有有害物質排放至環境中，超級基金法有權執行緊急應變與採取補救行動及相關應變措施，以確保公眾健康、福利或環境不受到危害」，該法案共包含兩種應變措施類型與三類融資途徑。

圖 1 即為超級基金執行政序，當污染場址被發現時先進行調查作業，透過相關歷史資料與現場調查現況等數據的獲得後進行 National Priorities List (NPL) 排序，並透過可行性分析等結果選擇適當的整治工法，進行整治作業，直到場址恢復原狀或達到相關污染介質所訂定之標準後，才能解除列管，場址解列標準的設定，通常需以保障人體健康與生態環境為前提，並考量整治技術、成本與時間等相關因素。整體執行過程中，超級基金法包含了兩大類應變措施，第一類為緊急應變措施 (Emergency Response)，主要是在場址發現後，如有立即危害性物質存在時，進行短期性的緊急清理計畫，通常由州政府或地方政府單位先進行第一時間的救援行動，時間需在 6 個月內完成，費用於 200 萬元美金以內；第二類為整治行動 (Remedial Action)，僅針對 NPL 列管排序後屬優先處理之場址進行長期的整治修復工作。

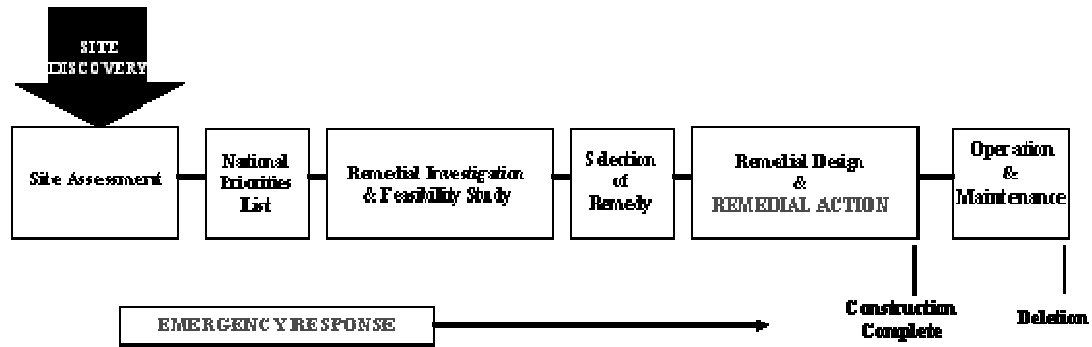


圖 1 超級基金執行程序

超級基金法內提供 3 種不同的融資來源，第一為資金援助 (Fund Financed)，通常針對無主或公有土地，大多屬於污染歷史非常久的大型場址而無法找到污染者或跨州型場址，一般由聯邦政府負責提供資金補助清理整治費用；第二類為強制性融資 (Enforce Financed)，由聯邦環保署強制要求場址所屬企業 (所有者或污染行為者) 承擔清理工作之責任；第三類為整合類型 (Combination)，即由聯邦政府先負責進行場址整治，再透過求償回收成本。

針對聯邦環保署資金援助型場址，一般而言，平均整治每處污染場址所需負擔的資金約 2,700 萬美金，平均清理期程約 11 年，聯邦環保署之基金來源，早期有超級基金(Superfund)，但於 1996 年已停止，目前主要為國會撥付之年度預算費用；州政府通常約負擔 10% 的整治經費，並由各州政府完全負責場址的維護管理費用，而各州政府資金來源不同，如伊利桑納州 (Arizona) 每年約籌措 1,500 萬美金的場址整治管理費用，包含各有害化學物質生產企業所繳納的稅款、一般政府基金，以及聯邦環保署與國防部所補助之資金等；夏威夷州 (Hawaii) 的融資來源則包含石油稅、一般政府基金與聯邦環保署、國防部所補助之資金，每年約籌措 350 萬美金的場址整治管理費用。

以一處地下水污染場址為例，如經過計算約需花費 1,600 萬美金的整治費用，以及 30 年的維護操作費用約 1,500 萬元美金，則聯邦政府將提供 1,440 萬元的整治補助費用 (1,600 萬 \times 0.9=1,440 萬)，場址所在地之州政府則需自行負擔 1,660 萬美金的整治與操作維護費用 (1,600 萬 \times 0.1 + 1,500 萬=1,660 萬)。

截至目前為止，由企業或場址所有者自行負擔之場址清理用費約有 244 億美金，其中有 44 億美金原為聯邦政府先行支付費用進行整治，完成整治工作後再向企業者求償成本。

在美國超級基金法案的推動與制度的分享，對於未來中國大陸污染場址的清理基金設計也提供相關看法，目前中國大陸的優勢在於政府具有強而有力的強制力，應先透過完整的全國性調查後，遵循使用者付費的原則，要求污染行為人或場址所有者需負擔場址之清理費用，除非企業主沒有能力負擔時，再動用整治基金協助場址整治，如果中國無法沿用美國超級基金的持法精神，那中國的整治基金需求量將會非常龐大。另外，也建議中國政府可參考美國的低率貸款制度，提供有意願但能力不足的企業資金需求，使其能有足夠的經費負擔場址整治的責任。中國清理基金的規模也會受到各地方政府所能負擔能力的影響，依據美國現行的執行方法，各州政府需負擔 10%的整治費用以及全額的操作維護費用，若中國各地方政府能配合中央一起負擔場址整治工作，將能減緩中國清理基金的壓力。另外，污染場址的整治目標也是影響成本的重要因素，因此，中國應先訂定哪些污染物是必要管理的標的物，以及各污染物所能接受的整治標準。

在美國，早期污染場址的形成原因一方面是由於污染預防法規不健全，另一方面則是因執法不力；即便是現在，美國在法規的設計與執行力上都已是世界各國效法的對象，但美國仍有污染場址形成。因此，即使國家制定出全世界最好的清理計畫，如果污染預防性法規不完善或執法力不彰，污染場址仍然會持續形成。

2. 污染場址風險評估和結案標準

本議題由加州 Department of Toxic Substance Control 鄭傳羸博士說明，主要介紹風險評估的原理以及美國污染場址結案標準的設定。零污染的標準是難以達到且往往需要付出龐大的成本，因此，透過風險評估的計算以評斷污染物的危害程度，藉以訂定在符合人體健康考量下之整治標準。人體健康風險評估主要即是以量化評估工具計算人體暴露於有害物質環境下之可能的風險性，其計算原理即是以污染物毒性乘上單位時間內人體之暴露劑量，獲得量化之致癌與非致癌風險機率值。透過風險評估的結果可協助評估者，了解受體當前與未來的風險，哪一些族群為需要被關注的受體，以及哪一種暴露途徑與污染物質是主要造成人體危害的主要關鍵，但並無法用以評估過去的風險以及個人的健康條件狀況。

健康風險評估的四大要素即是危害鑑定、暴露評估、毒性分析及風險特徵描述，個別說明如下：

- (1) 何者為標的污染物 (chemicals of concern/COC) 及污染介質種類是危害鑑定最主要的判斷工作，並藉此擬出其場址概念

模式。

- (2) 暴露分析則在於釐清人體可能之暴露途徑，包含皮膚接觸、食入與吸入等，以及介質間可能的傳輸作用，如土壤與地下水中污染物濃度的轉移，並了解各類型暴露途徑可能的暴露頻率與週期。
- (3) 對於人體健康風險，主要將關切污染物之毒性分為致癌毒性與非致癌毒性兩大類；在毒性分析過程中，各類標的污染物的毒性劑量值為重要的關鍵，且非所有化學物質皆具有嚴重之危害性，唯有當存在之化學物質劑量高於或累積達特定濃度時，才會對人體造成傷害。
- (4) 風險特徵描述即是透過量化的評估公式，計算出場址之致癌與非致癌風險性，一般而言，美國環保署認為非致癌風險需小於 1，致癌性風險需小於 10^{-6} ，方屬於不需進行任何整治作為之可接受風險，若當致癌風險性大於 10^{-4} 時，則必須進行積極的整治復育行動，若場址風險屬於 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 區間者，將依據場址特性進行整治與風險管理措施，不同污染場址之風險程度行動如圖 2 所示。

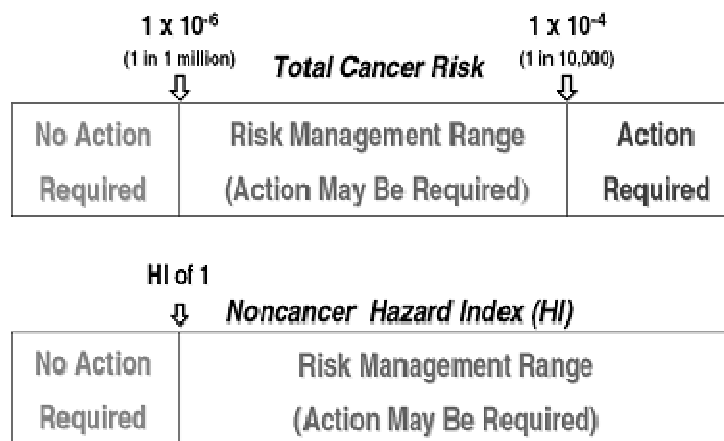


圖 2 不同污染場址之風險程度行動

對污染場址的管控，美國環保署以可接受之致癌風險基準 10^{-6} (商業區基準為 10^{-5}) 與非致癌風險基準值 1，計算風險基準濃度 (Risk-based concentrations, RBC)，主要用於作為場址篩選使用，以此預設之篩選性風險評估方式進行場址風險分析，當場址風險高於篩選基準值時，將納入列管。美國環保署依據 RBC 之計算方式訂定

了 Regional Screening Levels (RSLs)，加州環保署也依據其州內環境特性進行修正，訂立 California Human Health Screening Levels (CHHSL)；以苯污染物為例，透過 RBC 公式計算後，住宅區空氣中之苯污染物篩選值為 $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，計算方式如公式一所示。不同的評估參數也會影響其篩選值的高低，同樣以可接受風險值為 10^{-6} 基準，計算住宅區與工業區土壤之污染物苯、苯(a)駢芘 (Benzo(a)pyrene) 與砷的篩選基準值，可發現不同的土地使用形態，其暴露途徑、頻率與週期等參數皆有所差異，因而各類污染物之篩選基準值也不同 (圖 3)。

$$\text{Risk} \times \frac{AT}{ET \times EF \times ED} \times \frac{1}{IUR} = \text{RBC}$$

$$10^{-6} \times \frac{24 \text{ hr} \times 365 \text{ d} \times 70 \text{ yr}}{24 \text{ hr} \times 350 \text{ d} \times 30 \text{ yr}} \times \frac{1}{3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\mu\text{g}} = 0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad (\text{公式一})$$

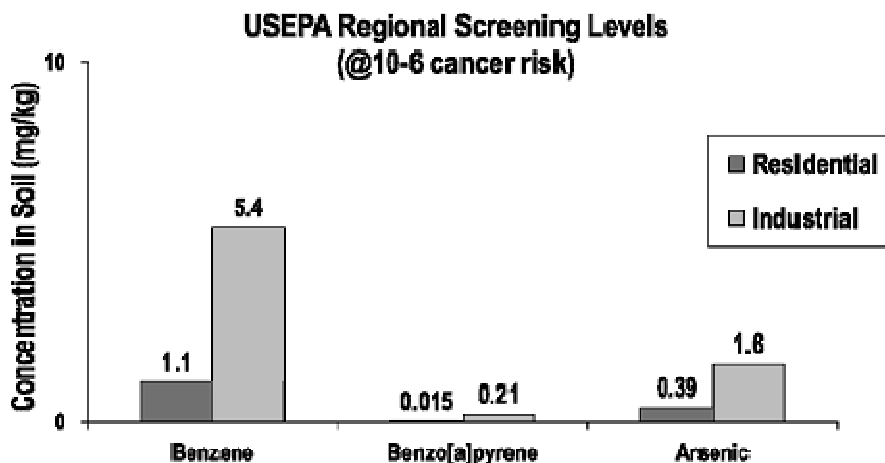


圖 3 不同土地使用型態之土壤篩選基準值

在進行健康風險評估時，錯誤的數據或保守性的參數最常造成風險評估結果的錯誤或高估，因此，列管場址需進行更詳細且符合場址專一性的調查與評估，確認場址實際風險程度，再判定場址是否需要進行整治或風險管理，並以 RBC 計算方式訂出其整治與關場標準 (cleanup/closure criteria)，但 RBC 並不能取代原有之法規標準，如飲用水標準 MCL 或空氣品質標準等。其中，風險管理目標則是在考量社會、政治、法律與技術等面向後，採用最實際的整治期程與

成本的方式，以符合且滿足人體健康與環境品質之保障，使土地發揮最佳的使用效率。

3. 綠色清理技術在污染場地治理中的應用

本議題由加州 Department of Toxic Substances Control 中心張寧武博士介紹說明，主要探討過去在面對污染場址議題時，傳統的污染場址整治計畫僅著重於達到最終整治目標，甚少考量自然資源消耗、能源的使用與廢棄材料再利用的可能性，如運輸過程與整治技術操作、維護的能源消耗，因而採用了許多非永續性且高耗能性的整治技術。美國環保署曾經估計，2008 至 2030 年期間，美國 NPL 場址所採用的高耗能性整治技術將可能消耗掉 14 億千瓦小時 (kWh) 的電力，等於間接導致約 900 萬公噸碳排放當量，因而越來越多人意識到環境污染整治所造成的環境碳足跡影響 (Environmental Footprint)，若能調整工法，或改以 50% 之再生能源做為電力來源，將可減少約 500 萬公噸碳排放當量，故於 2009 年提出 Consideration of Green and Sustainable Remediation Practice in the Defense Environmental Restoration Program，該方案開宗明義特別指出，環境復育應整合綠色與永續性的整治策略，以提升整治計畫的最高整體環境效益，另外，在環境、經濟與社會三大面向的考量下，提出下列 7 點重要未來目標：

- (1) 提高能源效率
- (2) 減少溫室氣體
- (3) 節約並保護水資源
- (4) 消除垃圾、回收利用、防止污染
- (5) 培養可持續發展技術與高環境親和性材料、產品等市場
- (6) 穩定與持續性使用建物
- (7) 加強社區的活力與可居住性

表 1 則是提供執行者進行整治復育時各面向之評估因子範例，如環境面向上應避免機器空轉、降低能源的使用與現場再循環系統的設計等；在社會面向上則可納入社區溝通、訊息的定期發布以及與當地企業的結合等；而經濟面向上則以社區最大經濟效益為主要考量因素。除此之外，每項因子在進行評分時，也可能因場址特殊狀況需考量特定因子的加權性，再決定所選擇之整治方案。

表 1 整治復育之環境、社會、經濟等因素評估因子範例

Environmental	Social	Economic
<ul style="list-style-type: none"> - Minimize idling - Control/mitigate dust and odors - Conduct air monitoring - Set up an on-site recycling program - Minimize fuel/energy use 	<ul style="list-style-type: none"> - Implement community notifications - Conduct community meetings - Post information on project progress - Maximize use of local businesses - Sequence construction activities 	<ul style="list-style-type: none"> - Consider economic benefits to community

爲了兼顧環境保護性、安全性與降低環境碳足跡，在綠色整治技術的整體理念設計，也應納入生命週期概念 (Life-Cycle)，圖 4 爲污染場址在進行整治過程中應考量之生命週期示意圖，釐清各因子可能的關連性與影響性，藉以達到完整性的評估，並透過計算獲得最適當的整治工法；污染場址在整治工法的選擇時，可以下列五大因素爲其思考核心。

- (1) 總能源使用量與再生能源使用量
- (2) 空氣污染與溫室氣體排放量
- (3) 水資源使用與水源的影響
- (4) 物質管理與廢棄物減量
- (5) 土地管理與生態系統的保護

另外，除整治工法設計與過程中需考量綠色整治的效益外，在完成整治後，整治工具的移除與再利用也應該一併納入考量。

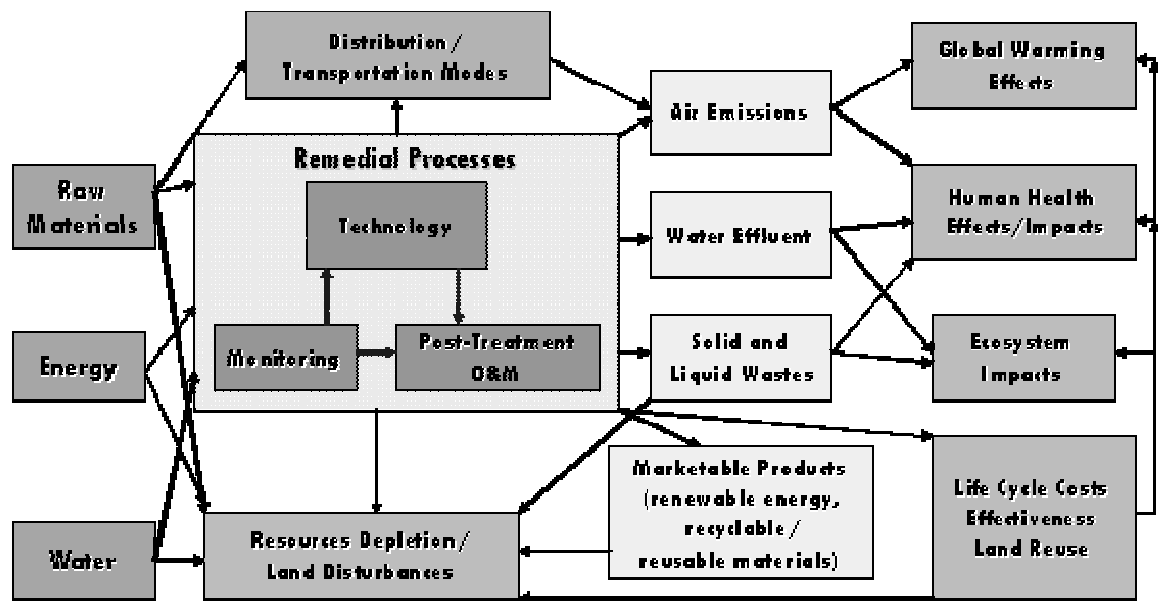


圖 4 綠色整治技術之生命週期示意圖

4. 利用零價鐵對受污染地下水和土壤的修復

本議題由 AMEC 環境整治公司熊忠博士進行介紹，針對零價鐵對於污染物處理的基本原理介紹，以及 AMEC 公司曾經應用零價鐵於現地污染場址之整治案例分享。零價鐵屬於一強還原劑，近年來已廣泛的被使用在污染場址的整治，可有效處理含氯有機化合物與部分重金屬類污染物，包含 (1) 三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯(perchloroethylene, PCE) 與農藥等有機化合物，(2) 硝酸鹽、高氯酸鹽等無機化合物，以及 (3) 鉻、砷、鎘等重金屬污染物，公式二即是零價鐵將含氯化合物脫氯之還原反應式。



奈米鐵球體具有高表面積及高反應速率的優點，如果在其表面鍍上的 Pd 重金屬將能加速催化反應，且反應過程中不會生成具高毒性之二氯乙烯及氯乙炔等中間代謝產物，相當適用於現地整治使用，但卻有彼此容易團聚而沉澱的缺點存在，其反應示意圖如圖 5 所示。為克服奈米鐵球體的群聚反應，美國 AMEC 環境整治公司利用一種穩定化技術，以一種低成本的可分解性生物纖維 (biodegradable Carboxymethyl Cellulose, CMC) 包覆奈米零價鐵，使其表面帶負電

荷，使彼此間產生靜電斥力，使配置完成之奈米級穩定化零價鐵微粒可懸浮於溶液中，並於美國一處 TCE 空軍污染場址實際進行整治測試，該場址位於 Utah 州的空軍基地，由美國 Air Force Center for Engineering and the Environment (AFCEE) 提供整治經費，並與 Auburn University 共同合作。

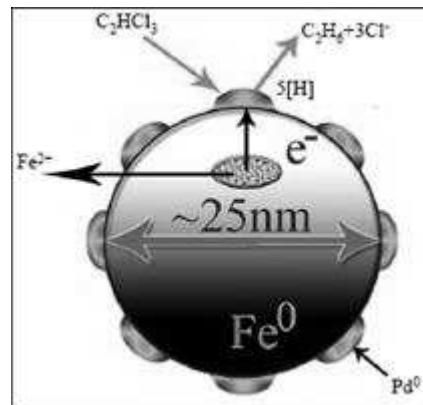


圖 5 奈米鐵球體反應示意圖

2009 年整治團隊先進行場址取樣分析工作，發現土壤及地下水中皆含有高濃度的 TCE 污染，且該場址土壤屬坩質粘土，透過微水試驗後，現地土壤的水力傳導係數約為 1.33×10^{-7} ，並於 2011 年開始進行設廠，以及實場傳輸效能（流動性）與降解效果的測試，並分析 pH、ORP、DO、TOC 等參數因子，藉此以找到最佳化的注藥壓力、生物穩定劑濃度與奈米鐵含量等，並於 2011 年 4 月與 5 月進行兩批次的注藥，共計注入約 2,500 公升之穩定化零價鐵藥劑，並於注藥後持續進行一年期的監測工作，現場藥劑注射情形與井管配置如圖 6(A) 所示，配置完成之穩定化零價鐵藥劑有 75% 可順利通過 450 nm 的濾膜測試（圖 6(B)），顯示穩定化零價鐵粒徑的確達奈米等級；由監測井之分析結果也顯示穩定化零價鐵藥劑於地下水中之傳輸途徑最遠在 3 公尺以內，一年後反應時間下，在 1.5 米處的 TCE 污染物濃度約降低 92%，並於監測井中測得乙烯和乙烷等最終代謝產物，證實 TCE 污染物濃度的下降是受到奈米鐵的還原反應，而非稀釋作用，各監測井之 TCE 污染物濃度以及代謝產物乙烯之濃度隨時間變化結果如圖 6(C)、(D) 所示。

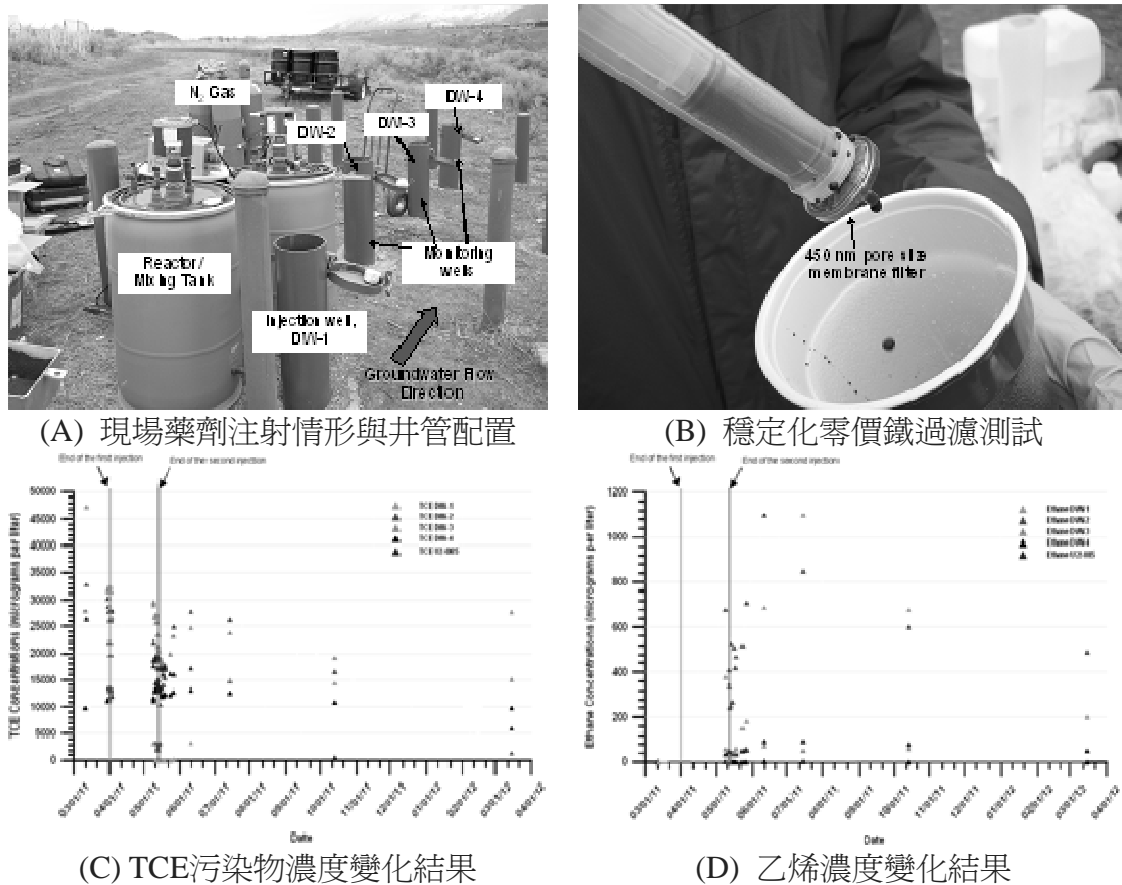


圖 6 穩定化零價鐵之 TCE 污染場址測試

5. 地下儲油槽污染場址調查與修復-污染場址清理案例分析

本議題講師為加州環保署洛杉磯地區水質管理局高級工程地質師陸誼博士，分享一處實際管理之地下儲油槽類污染場址整治與開發經驗。地下儲油槽污染場址在美國非常普遍，通常 UST 場址多指加油站類型的污染場址，所介紹的案例即原為一處舊加油站場址 (Econdo Lube)，後來改為一家洗車廠，該場址位於一低收入地區，早年因黑人暴動事件而造成該地區一直屬於經濟發展緩慢的地區，因場址所在位置鄰近該地區之交通要道，因此地方政府收購土地，決定將場址與其相臨之廣場結合，總開發面積為 1.1 萬平方公尺，部分土地開發成為四層樓型住商混合式建築，一樓為商業店面，二到四樓則為一般住家，另外一部分則建造老人公寓，場址配置如圖 7 所示，其中虛線區域為開發基地。開發方式採用類似我國 BOT 方式進行，由建商負責建造開發與經營，但土地仍屬市政府所有，並且為吸引建商願意協助場址進行整治工作，因此市政單位與建商簽訂合約，市政府將保證建物出租率達 70%，並由建商負責開發區域內

所有的整治復育費用。開發區域共含有兩處污染地區，包含 Econdo Lube 場址與相臨商店廣場內的一家舊乾洗店皆被發現有土壤及地下水污染，此兩處污染區域在 2005 年及 2008 年陸續完成土壤、土壤氣與地下水污染程度調查，以及現場設井工作，由調查結果顯示，Econdo Lube 場址內主要皆屬油品類污染，而舊乾洗店下方則發現有 TCE 污染。

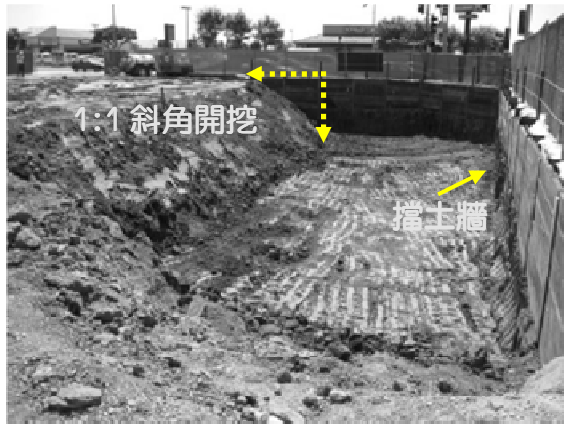
場址整治施工現況如圖 8 所示，為加速整治工作並與建造工程結合，針對土壤污染整治部分採用開挖方式，挖除後之污染土壤則送至焚化廠焚燒後掩埋，同時為了防止開挖過程中造成土石崩塌的現象，加州環保署要求採用 1 比 1 角斜角方式開挖，而場址邊界則需設有擋土牆支撐（圖 8(A)）；又因場址主要污染物皆具有揮發性，其中苯污染物濃度即高達 15,000 ppb，因此，為避免開挖過程中大量 VOC 溢散，故要求需開挖過程中噴灑除味藥劑（圖 8(B)），並留意工安及噪音問題。在整治作業開工前，市政府曾要求施工單位需招開說明會，向當地居民解釋說明，但因執行單位並未確實落實，當地居民時常聞到異味卻不了解狀況，因而引起居民抗議，市政府於接獲多次檢舉後，立即要求施工單位停工，並禁止場址繼續開挖，而無法達到預定計畫所設定之開挖深度。為解決殘留於土壤中的污染物與地下水污染問題，整治公司改採現地氧化整治工法，注入過硫酸鹽氧化劑至土壤與地下水中，以自由基破壞地下水與土壤中之有機污染物，每桶藥劑透過分流閥（圖 8(D)），同時注入 10 口注藥井中，且注藥井也分成兩種深度設計，一類為注入不飽和含水層之土壤區，以多孔噴嘴方式將化學藥劑注入土壤孔隙中，其注藥噴嘴設計如圖 8(E) 所示，另一類則直接注入飽和含水層，透過地下水流動，同時分解土壤及地下水中之污染物；由於化學氧化過程中會產生大量二氧化碳氣體，為避免注藥井壓力過大，每口注藥井上方皆設有壓力閥，限制壓力不可超過 5 psi。圖 9 為現地氧化法注藥井設置與地層剖面示意圖，其中紅色網格處為開挖地區，黑色虛線處為經過填土後之地平面，虛線上方空間未來將作為建築物之地下停車庫使用。

在初步完成土壤整治，使土壤濃度符合整治目標後，將進入建設階段；為避免地下水中或更深層土壤中的有機污染物濃度揮發至地下室空間內，因此，在建築施工過程中必須設置蒸氣隔絕措施，地下先填入穩固的土壤層，地下建物側邊則設有擋土牆，並且在地下室之牆面與地板層內側先鋪設約 7.6 公分厚的薄板再鋪上耐壓強度 4,000 psi，厚度 1.2 mm 的不透水布，最後灌入水泥牆面。另外，為能持續整治殘留於地下水中之污染物濃度，在建築施工過程中，同

步設置有雙向式抽除井，在發現監測井中污染物濃度出現變化時，可啓動抽除系統，抽除含污染物之土壤氣與地下水。目前該地區之建設工程已部分完成，開發管理單位也承諾定時啓動地下車庫之空調系統，並定期監測地下空間之空氣品質，避免污染蒸氣溢散至室內空間，如有發現異狀將會立即啓動雙向抽除系統，以控制污染物濃度，開發後之場址狀況如圖 10 所示。原 Econdo Lube 場址已建設爲住商混合大樓，而位於場址後方之商店廣場所改建之老人出租公寓也即將完工，市政府更邀請原商店賣家再次進駐。



圖 7 場址配置圖



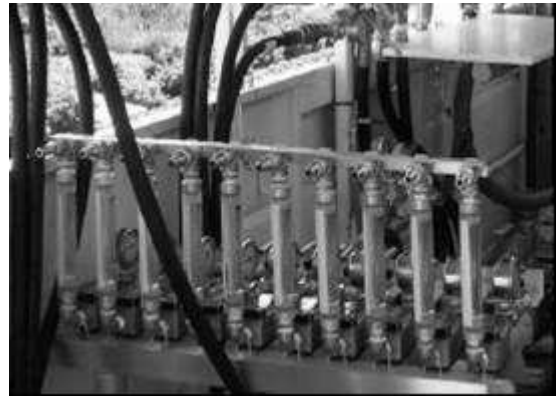
(A) 場址開挖現況



(B) 開挖地區噴灑除味藥劑



(C) 現地氧化注藥現況



(D) 藥劑分流閥



(E) 多孔型藥劑注入噴嘴



(F) 注藥井壓力監控設計

圖 8 場址整治現況

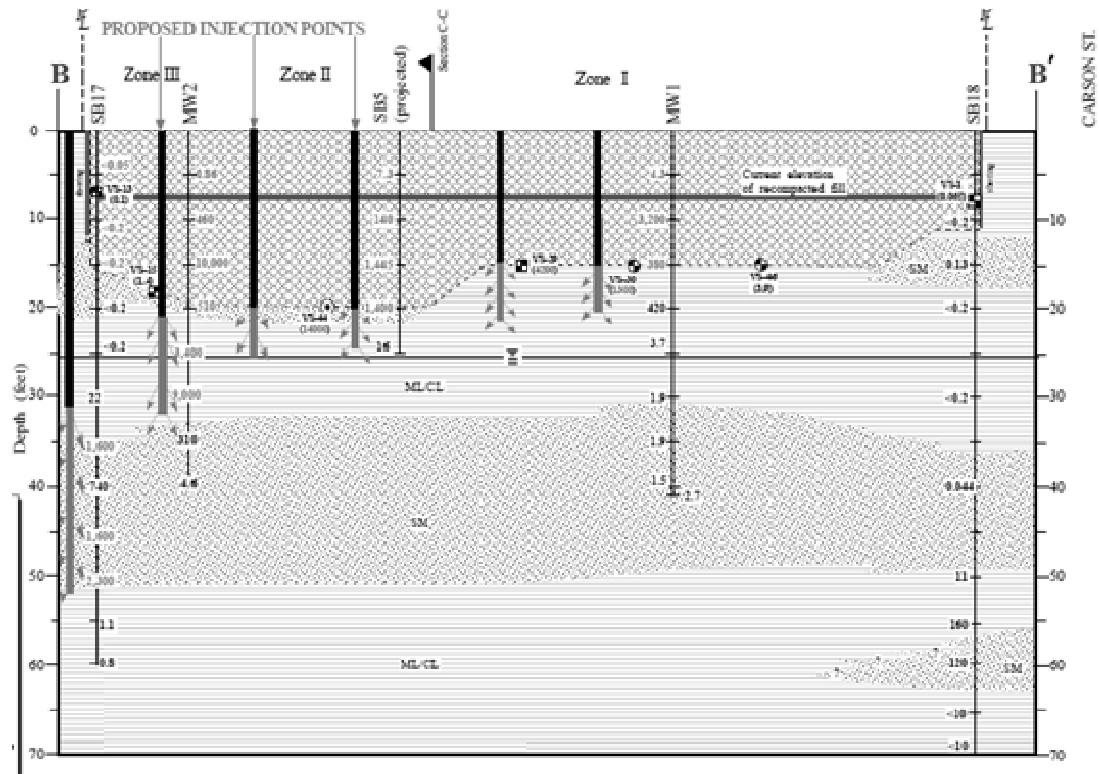


圖 2-11 現地氧化法注藥井設置與地層剖面示意圖



(A) 建造完成之住商混合型建築

(B) 即將完工之出租老人公寓

圖 10 場址開發後狀況

6. 加州室內毒氣入侵風險評估和執法

本議題由加州環保署洛杉磯地區水質管理局地下水許可證和垃圾掩埋場處處長許仙育博士負責介紹，許博士目前主管業務為地下水整治，並具有數十年污染土地再利用之實務執行經驗，曾參與多處南加州的褐地再開發推動計畫。

加州政府自 2001 訂定 California Land Environmental Restoration and Reuse Act (CLERRA) - California Human Health Screening Levels (CHHSLs)，針對污染場址提出以保護人體健康為前提之篩選標準，2008 年再修訂法案，增訂納入評估室內空氣品質之要求；針對 VOC 等揮發性有機污染物可能入侵而累積於室內空氣中，造成高頻率的接觸機會，致使較一般傳統風險評估中所計算的吸入性污染物風險性更高，而提高長期居住或活動於室內空間者的風險機率。另外，Department of Toxic Substances Control (DTSC) 也在 2011 年增訂評估與減少有機污染物進入室內空氣之指引手冊，圖 11 即為地下污染環境中所含 VOC 污染物擴散入侵室內之示意圖。評估有機氣體入侵的相關條件與步驟包含

- (1) 確定洩漏源或排放源
- (2) 了解場址特徵
- (3) 確認是否有完整的暴露傳輸途徑存在
- (4) 對於建物是否有直接性威脅
- (5) 進行篩選評估
- (6) 蒐集更多資料
- (7) 進行建模評估
- (8) 室內空氣採樣
- (9) 如發現具風險性則立即減緩氣體入侵

土壤氣的評估應以所有深度土壤層中最高濃度者為基準，建立由土壤層擴散至室內之計算模式，所測得之土壤氣濃度值應符合 95% 信賴區間才具代表性，加州環保署提供了土壤氣評估模式所需之參考參數，以及 Johnson and Ettinger (J&E) Screening Evaluation 土壤氣評估計算模式，用以分析土壤或地下水中 VOC 濃度透過擴散與延散機制，進入室內空氣之濃度，表 2 為計算所需之預設參數值。

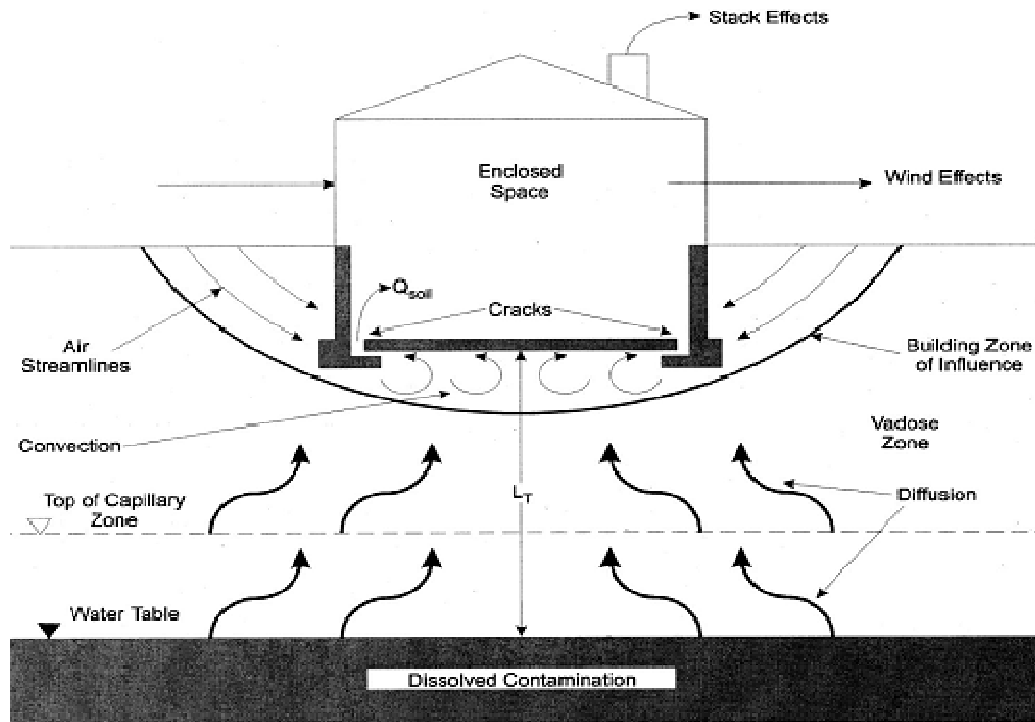


圖 11 地下污染環境中所含 VOC 污染物擴散入侵室內之示意圖

表 2 室內空氣風險評估預測參數

參數	預設數值	單位
樓地板厚度	10	cm
土壤與建物壓差	4	Pa
室內密閉空間高度	2.44	m
樓地板/牆面裂縫	0.1	cm
室內空氣交換率	0.25	hr ⁻¹
暴露頻率	365	days/yr
暴露週期	30	yr
致癌風險標準	1 x 10 ⁻⁶	-

加州環保署進行位於 Norco 區之 Wyle 場址的室內監測，以確認地下水中之污染物是否會造成地表建物內空氣品質的影響，該場址總面積約有 173.6 萬平方公尺，自 1957 年開始營運，主要從事航空器材製作，常使用火藥類化學物品、含氯有機溶劑，以及火箭發射燃料等物品，至 2004 年已停止營業，由 DTSC 接手場址的整治工作，

場址附近有三處地區學校並鄰近住宅地區，因此在管理上需要特別注意，調查結果顯示，場址內主要污染物包含有三氯乙烯、二氯乙烯與氯乙烯等，透過風險評估計算後，在地下水 TCE 污染物濃度達 10 ppb 的地區範圍內，可能會因蒸氣擴散而造成人體健康之風險影響，推估可能受影響之住戶約有 40 戶，因此，加州環保署針對可能受影響之住戶及三所學校分別進行室內空氣採樣，採樣過程中需要求所有住戶移除或使用香水、芳香劑、指甲油等所有可能的干擾性物品，並針對一般人體呼吸區域之高度進行空氣樣品採樣，採樣時間可區分為 1 小時之急毒性與連續 8 小時、24 小時等亞慢毒性測試，採樣瓶通常會放置於室內桌面處，且為確認室內空氣是受地下水中污染物濃度逸散累積之影響，採樣過程中需同步進行室外空氣採樣，以作為對照組；採樣狀況如圖 12 所示。

經過分析後發現僅有三戶之室內空氣中污染物濃度風險高於可接受風險，約為 10^{-5} ，但由分析圖譜可發現，主要造成風險之標的污染物並非地下水中所存在之含氯化合物類型，故經環保署人員實際訪查後發現，造成 3 戶住家風險超標之污染物主要來源是住戶所使用的新家具黏膠及地毯洗劑所產生，因此僅要求超過標準之住戶應加裝空調設備，加強室內空氣循環。



(A)室內空氣採樣現況

(B) 對照組-室外採樣

圖 12 空氣品質採樣狀況

(三) 場址參訪

本次研討會安排有兩天的場址參訪行程，分別參觀位於美國加州地區的 Charnock Well Field 與 Shell Site、El Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station，以及 NASA Industrial Plant 等三處污染場址。

1. Charnock Well Field 與 Shell Site

位於美國南加州 Santa Monica City 的 Charnock Well Field 地下水抽水井是當地主要飲用水供水來源之一，在 1996 年 6 月時被發現受到汽油添加物甲基第三丁基醚 (Methyl Tert-Butyl Ether, MTBE) 的污染，而緊急關閉供水抽取系統，造成當地民眾用水不足，自此市政單位改由 Metropolitan Water District of Southern California 提供水源供給該地區用水需求。事件發生後，加州環保署立即進行大規模調查，發現地下水 MTBE 污染主要是受到距離約 180 公里外的一處加油站 (Shell Site) 儲油槽破裂所影響，因汽油洩漏到泥土中，其中所含的 MTBE 水溶性很高，很快便進入到地下水和各水源中，Charnock Well Field 與 Shell Site 所在位置分布如圖 13 所示，Shell Site 參觀現況如圖 14 所示。

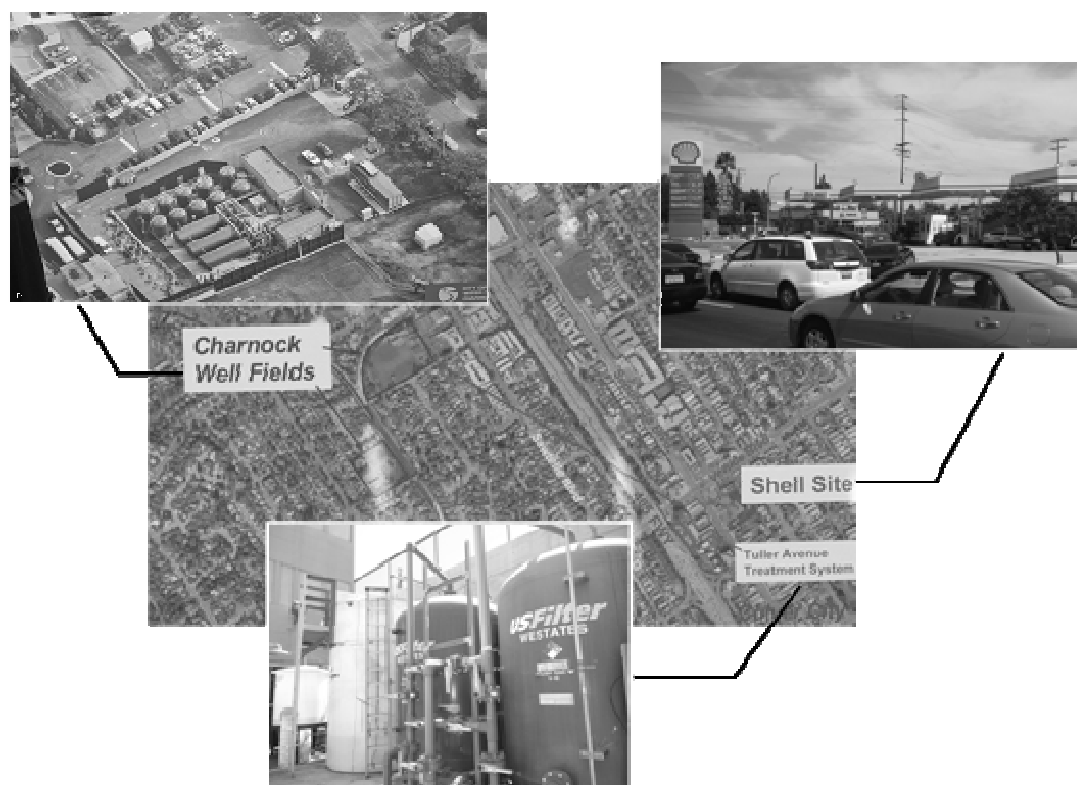


圖 13 Charnock Well Field 與 Shell Site 所在位置分布



圖 14 Shell Site 參觀現況

經市政府與油品公司進行法律訴訟與協商，加油站所屬油品公司，即殼牌石油公司 (Shell Oil Company) 同意負責進行其場址內土壤與地下水整治工作，殼牌石油公司於 1999 年起先大規模挖除漏油油槽與 3,000 立方公尺之受污染土壤，並採用土壤氣體抽除法 (Soil Vapor Extraction, SVE) 移除殘餘至土壤中約 7,700 公斤的碳氫化合物。針對地下水污染部分，則設立 Tuller Avenue Remediation System 進行地下水中石油碳氫化合物、MTBE 與苯等污染物質處理，另因調查過程中還發現當地地下水中含有重金屬硒且超過管制標準，雖然此污染物非加油站油品所污染，但殼牌石油公司仍願意於其處理廠中同步設置設備處理。Tuller Avenue Remediation System 共串連生物反應槽處理設施、氣提法 (Air Stripping) 以及顆粒狀活性炭吸附系統等，各單元系統配置如圖 15 所示，每分鐘最高處理量約可達 350 加侖。以 Pump and Treatment 方式抽取當地淺層與深層地下水，將抽取出之地下水與有機碳源糖蜜先送入第一段生物反應槽中，於缺氧環境下兼性菌(facultative bacteria) 以糖蜜作為碳源，地下水中之 selenate 與 selenite 則做為電子接受者，使離子化硒轉換為元素態重金屬硒，微生物移除硒污染物反應公式如圖 16 所示。第二段氣提法則負責移除地下水中之石油碳氫化合物、MTBE 與苯等污

染物，最後殘餘之 MTBE 污染物及元素態重金屬硒則透過活性炭過濾系統移除，各類污染物降解狀況如圖 17 所示，該處理廠已運作約 12 年，目前仍持續針對地下水污染物進行處理，在運作處理過程中，USEPA 與區域管理單位 (Regional Board) 也會定期要求殼牌石油公司提出相關場址整治與監控報告。

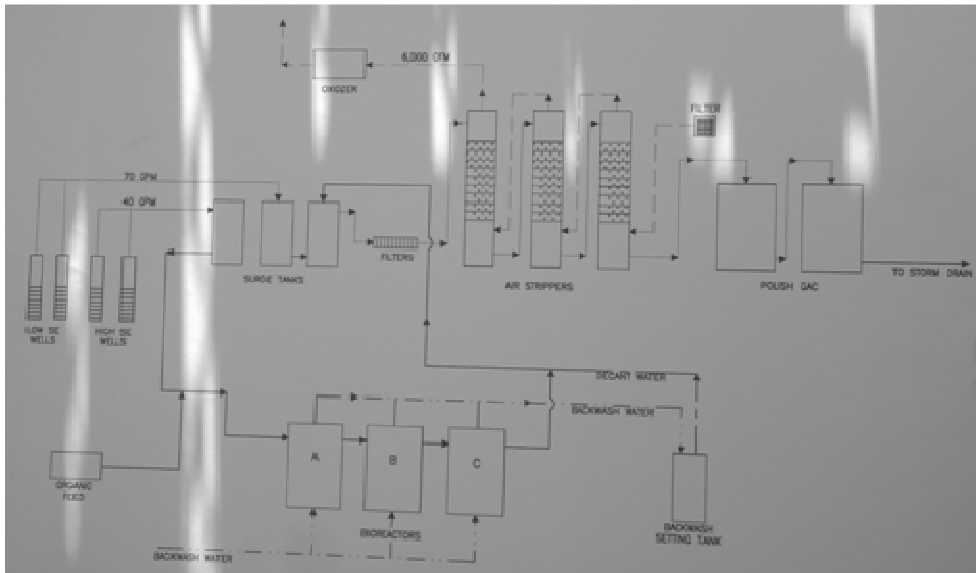


圖 2-15 Tuller Avenue Remediation System 地下水處理單元配置

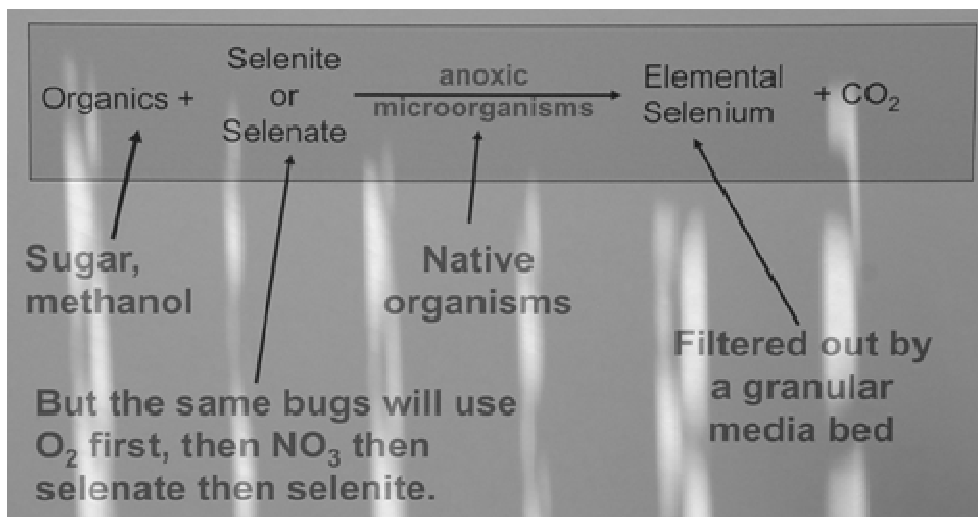
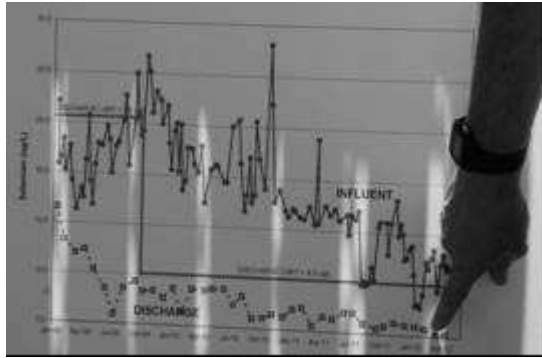
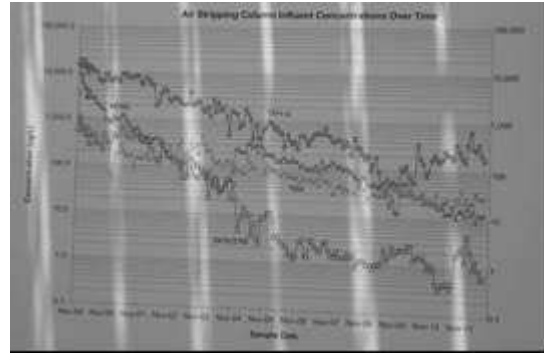


圖 2-16 地下水中硒元素生物降解反應公式



(A) 地下水砷濃度移除變化



(B) 地下水各類有機污染物移除變化

圖 17 Tuller Avenue Remediation System 地下水污染物濃度變化

2003 年 Santa Monica City 與殼牌石油公司雙方協商並簽定 Settlement Agreement，市議會同意由市政管理單位建造當地地下水處理廠 Charnock Well Field，油品公司成立基金資助該廠運作費用，總設備投資費用約 5,000 萬美金，設計營運時間約 20 年，每日處理水量約 2.7 萬噸，2010 年已完成設置並開始運作，由該廠先負責處理當地受污染之地下水後，再將處理後之水源運送至自來水處理廠。整體處理系統配置與廠內設備參觀現況如圖 18 與圖 19 所示，Charnock Well Field 廠內約自地下 120 公尺處抽出 MTBE 污染之地下水，屬第二含水層地下水，並採用綠砂過濾系統 (Greensand Filtration) 去除水體中所含有之溶解性鐵、錳金屬離子 (圖 19(C))，再透過顆粒狀活性炭 (Granular Activated Carbon, GAC) 過濾系統 (圖 19(D))，吸附處理地下水中之 MTBE 污染物達飲用水管制標準後，將過濾處理後之地下水結合當地水源管網運送至 Santa Monica Water Treatment Plant，進入自來水處理系統。自來水處理系統，共包含四道處理程序，第一道為預處理過濾系統，主要為保護過磷的水質直接進入逆滲透 (Reverse Osmosis, RO) 過濾系統，而造成 RO 濾膜的耗損；原水先以 Greensand 與 Cartridge 過濾系統初步去除水體中所含有之鐵、錳金屬與殘留與水體中的泥土砂礫。第二道採用三段式 RO 過濾系統淨化水質 (圖 19(E)(F))，移除水體中之金屬鈣、鎂等無機礦物質。第三道程序則進行水質的調整 (圖 19(G))，包含適當劑量微量元素的添加、pH 調整，以恢復飲用水體的口感，並加入氯胺 (Chloramine) 作為水體運送過程中的消毒劑。第四道程序則採用曝氣技術 (Air Stripping) 移除殘留於水體中之揮發性有機物質，在經過完整的處理程序後，透過自來水配送管網進行輸送。

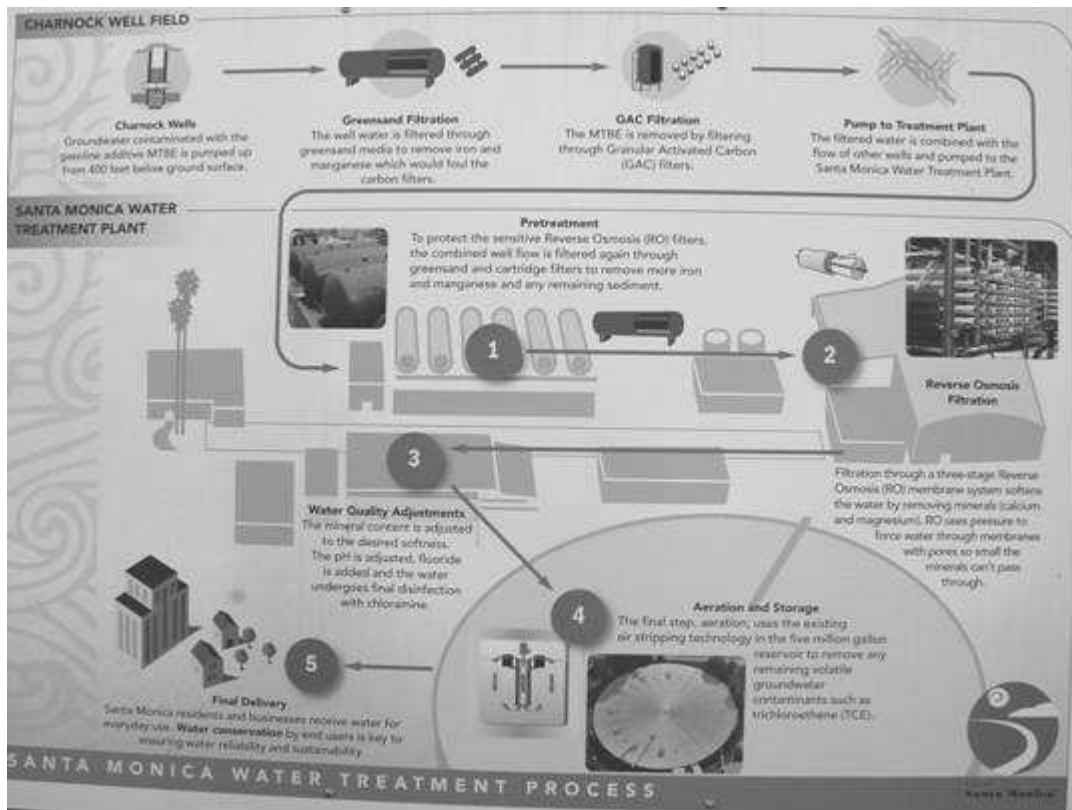


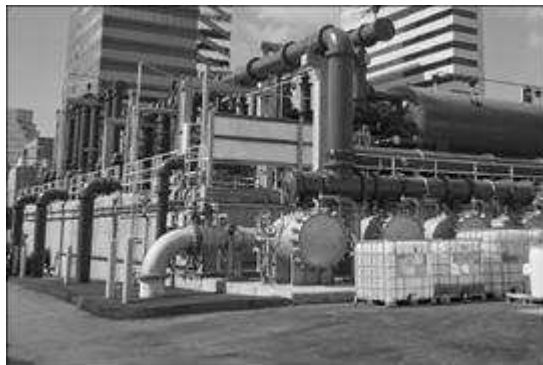
圖 18 Charnock Well Field 與 Santa Monica Water Treatment Plant 處理系統配置



(A) Charnock Well Field處理廠
講解現況



(B) Santa Monica Water Treatment Plant
管理人員講解現況



(C) 綠砂過濾系統



(D) 顆粒狀活性炭過濾系統



(E) 逆滲透過濾系統



(F) 逆滲透過濾膜



(G) 水質調整系統

圖 19 Charnock Well Field 與 Santa Monica Water Treatment Plant 廠內設備參觀現況

2. EI Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station

EI Toro Marine Corps Air Station (EI Toro MCAS) 與 Tustin Marine Corps Air Station (Tustin MCAS) 同樣於二次世界大戰時期成立，位於南加州橘郡，EI Toro MCAS 為美國海軍戰機主要基地之一，Tustin MCAS 則為海軍飛船 (Blimp) 基地。

因早期航空站內常使用含氯類有機溶劑作為工業清洗劑，再加上各類飛機燃料油的使用以及基地內有害物質掩埋場等問題，因而造成當地土壤與地下水遭到長期污染，隨著戰爭的結束，90 年代後航空站的使用頻率過低，且該地區土地已逐漸朝商業、輕工業和住宅型態發展，兩處場址位置距離當地社區僅約數百公尺，因此決定於 1999 年關閉此兩處海軍航空站基地，進行場址土地整頓、復育與開發。

兩處海軍飛行基地場址背景相同，皆於 1980 年代被發現在軍機停放區出現嚴重的 TCE 與 MTBE 等有機溶劑污染現象，1989 年軍方單位先於場址內污染地區設置抽除井，但仍無法解決地下水污染問題，因此於 1990 年由美國環保署將兩處海軍基地皆納入超級基金列管場址 (Superfund Site)，1994 年由美國聯邦海軍機構編列 2.5 億美金，進行大規模調查分析 (包含 EI Toro 與 Tustin MCAS 等軍方場址)，圖 20 為場址所在位置與抽水井分布位置，圖 21 則為場址參觀現況。EI Toro MCAS 場址中以 TCE 及 1,2,3- 三氯丙烷 (1,2,3-Trichloropropane, TCP) 等含氯化合物污染最為嚴重，其污染團非常穩定，無明顯移動現象，深度約於地下 50 公尺處 (第三含水層)，另發現有 MTBE 等揮發性有機物 VOC 污染。經過 6 年的法律協商談判後，2001 年美國聯邦海軍機構同意支付場址內 MTBE 等 VOCs 污染物之清理整治費用，並於 2004 年起陸續籌備與裝設場址內之整治設備，至 2007 年由橘郡水質管理單位與美國聯邦海軍機構共同提出、執行地下水長期整治計畫，以達到保障人體健康與生態受體安全，以未來作為住宅型土地再利用之風險為基準，提出整治目標。

在整治計畫 (Cleanup Project) 中，對於污染源的移除先進行位於熱點 (Hot-Spot) 之污染土壤挖除，以 EI Toro MCAS 場為例，至 2005 年共移除 10,000 噸受污染土壤，並於 2008 年針對現地土壤樣品殘留濃度進行健康風險評估，結果顯示其非致癌風險值為 0.291，符合可接受風險；致癌風險值為 1.68×10^{-5} ，小於場址之背景土壤風險 2.20×10^{-5} ，因此解除土壤列管，因場址所在位置非屬保育類生物

活動地區，故無生態風險影響性。另因場址為退役之海軍飛行基地，因此進行污染源地區土壤開挖時，地面原鋪設之飛機跑道等基材皆被保留，預期未來將可作為再生建材使用（圖 21(C)）。

美國海軍負責機構也針對受 MTBE 污染之地下水提出其符合風險評估條件之整治目標 (Remediation Goal)，因美國主要使用第二與第三含水層之地下水作為飲用水，因此依據不同含水層訂定其標準，第一含水層之 MTBE 污染物整治目標為 $400 \mu\text{g/L}$ ，第二含水層與第三含水層之整治目標則為符合飲用水水質之 MTBE 標準，分別訂為 $40 \mu\text{g/L}$ 與 $13 \mu\text{g/L}$ 。受 MTBE 污染之地下水主要於現地採用空氣注入法 (Air Sparging, AS) 與 SVE 法進行處理，抽出後氣體經過 GAC 過濾槽吸附有機污染物後再排出，現場抽氣管線系統與 GAC 過濾槽如圖 21(D)、(E) 所示，在 4 個月的運作處理後，使地下水中 MTBE 濃度由 $4,000 \mu\text{g/L}$ 降至 $1 \mu\text{g/L}$ 以下，但於停止運作後發現，污染物濃度又有再釋出的現象，監測井中地下水中的 MTBE 濃度又恢復至 $2,400 \mu\text{g/L}$ ，因此再次啟動 AS 系統，在經過 3 個月的整治期後，使 MTBE 濃度又降至 $1 \mu\text{g/L}$ 以下，符合美國環保署所公告之飲用水 MTBE 含量標準，成功完成整治作業，目前 AS/SVE 系統已停止運作，但仍定期每 3 個月進行一次監測井採樣分析，以確保污染物無再釋出現象。

針對深層地下水之 TCE 污染，在技術不可行的考量下進行風險評估後，同意場址採用風險管理的方式，雖然場址內之污染地下水非位於當地飲用水抽取地區，然而若不採取適當措施，TCE 污染源區地下水仍有可能移動而污染飲用水井，因此目前於場址內設置 Shallow Groundwater Unit (SGU) 處理廠，並於 TCE 污染團周圍與場址控制範圍內設置抽水井（圖 21(F)），以每分鐘 35 加侖速度抽取含 TCE 污染之地下水，送至 SGU 處理場內進行三段式 GAC 過濾去除系統（圖 21(G)），平均每半年更換一次活性碳濾料，以控制污染不隨地下水移動擴散，經持續性整治工法，總整治計畫期程預計約需要 40 年才能完成。

當地地下水由 IRVINE RANCH WATER DISTRICT (IRWD) 淨水場負責處理，共設有兩套淨水設施，第一組為澆灌用水淨化系統，以 AS 串聯 GAC 過濾系統處理澆灌水井抽出之地下水，主要為淨化受污染之地下水，去除水中之 TCE 及其他 VOCs 污染物，EI Toro MCAS 場址內抽出且完成處理後之地下水將併入當地淨水廠，透過澆灌用水淨化系統處理後，EI Toro MCAS 地區每年可提供 5.9 億公升之非飲用地下水，供應附近社區 526 萬平方公尺的景觀綠地澆灌使用。第二組為飲用水淨水系統，取用當地未受污染之地下水源，

經過 RO 等水質淨化處理後，每年足夠提供 50,000 人使用。

目前兩處海軍飛行基地除仍持續進行整治之主要污染區外，其他地區（已完成整治或未受污染地區）已逐漸進行開發，其中佔地 1,300 英畝橘郡大公園（Orange County Great Park）即興建於原 EI Toro MCAS 地區（圖 21(H)），是南加州近幾年最新開發的都會公園之一，也是南加唯一可以免費搭乘熱氣球的公園，目前設有熱氣球搭乘區及少數遊樂設施。橘郡大公園未來還將計畫建造包括體育公園、大峽谷景觀、退伍軍人紀念博物館、文化太陽台，野生生物走廊等設施，相信到時會吸引更多遊人前往參觀。場址相關介紹資料附於附錄二。

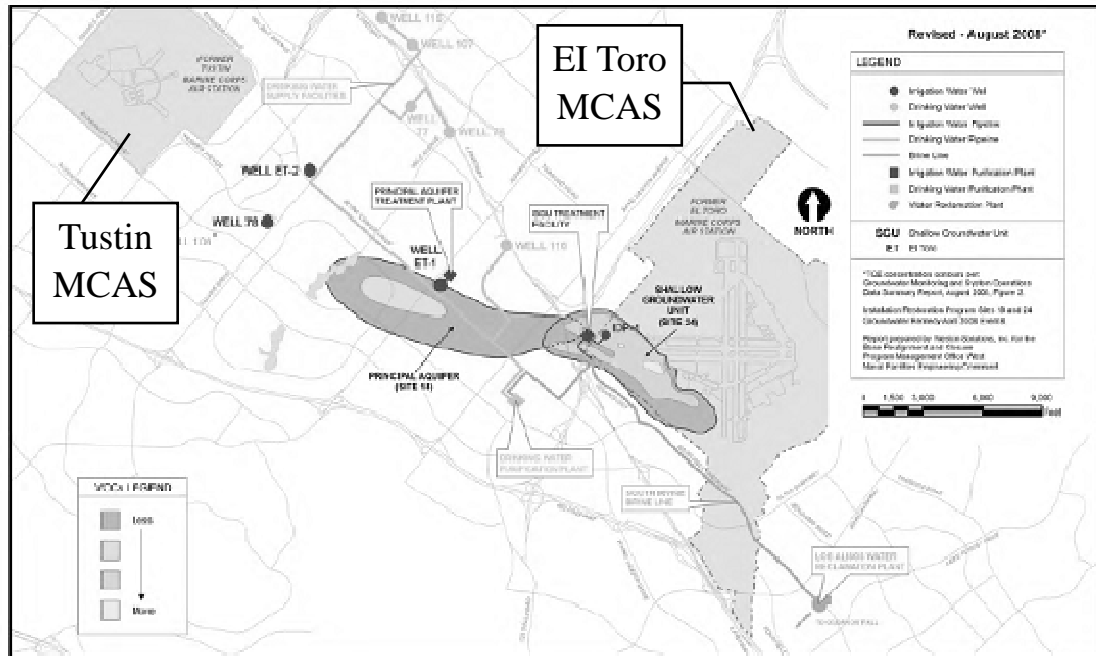


圖 20 EI Toro 與 Tustin MCAS 場址位置及飲用水、澆灌用水地下取水井分布



(A) 出發前場址介紹會議



(B) EI Toro MCAS場址現場講解



(C) 回收廢棄飛機跑道基材



(D) AS/SVE處理設施



(E) SVE抽取氣體過濾設施



(F) 含TCE污染地下水抽除井



(G) 三段式GAC過濾處理設施



(H) 橘郡大公園

圖 21 EI Toro MCAS 場址參觀現況

3. NASA Industrial Plant 場址

NASA Industrial Plant 場址位於美國南加州 Downey 市，1929 年場址土地主要作為傳統飛機製造工廠，直到 1960 年代改為航空車輛的研究開發基地，主要進行航空器的維修及火箭的測試。1997 年場址停止運作，1998 年由 Downey 市政府向國防部買下 NASA Industrial Plant 場地，2003 年再次購買整併附近土地，推動當地再開發計畫，並獲得美國環保署協助支持進行污染場址之清理計畫，參與計畫單位包含加州政府、NASA 市政單位與聯邦環保署等，共投入約 8 億美金進行整治開發，包含 Underground Storage Tank Cleanup Fund 的補助，以及 Cleanup Loans 貸款申請，2002 年 DTSC 提出自願清理協議 (Voluntary Cleanup Agreement)，負責 11.1 萬平方公尺面積場址整治工作，整體復育開發區域如圖 2-22 所示。



圖 2-22 場址整治與開發區域分布

場址內主要污染物為重金屬砷、TCE 與 PCE，可能之暴露介質包含土壤、土壤氣、室內空氣、地下水使用等，屬環保署所列管之 Superfund 場址。在 2003 年起，Downey 市政府採用一邊整治一邊釋出土地開發的方式進行，在配合開發的過程中，已經受污染土壤先行挖除，針對局度高污染含氯化合物地區採取 SVE 整治技術，約移

除 550 公斤含量的 VOCs 污染物，在進行分子生物鑑定後，確認現地環境中具有厭氧脫氯功能之微生物，因此搭配現地生物復育技術復育地下水，垂直地下水流方向，設置 10 排 155 口注藥井與監測井，每口注藥井約添加 2 萬公升 4% 含量之糖蜜基質，定期每 3 個月進行一次基質的添加，以強化脫氯菌的共代謝反應，持續性降解地下水中之含氯污染物，至 2012 年 4 月，該場址已取得加州環保局之 NO Further Action 許可，目前僅需定期進行污染物與其代謝產物之濃度監測。

成功的復育計畫與褐地再利用，Downey 市獲得美國環保署頒發 Phoenix 獎項，將該新興重建地區命名為 Downey Landing，Downey 市於目前已於當地完成推動四項重要建設，各項重要開發建設說明如下，各開發地區之現況如圖 2-23 所示。

(1) Downey Studio

第一個被完成建設的是位於 NASA Industrial Plant 場址地區的場址，Downey Studios 拍片場 (圖 2-23(A))，總面積約 5.4 萬平方公尺，是一座藝術生產工廠，廠內保留有許多歷史建物與早期太空航空建造設施，由 Industrial Realty Group (IRG) 開發公司負責管理，IRG 是美國一間被公認成功開發褐地場址的企業，曾重建許多 Superfund 與關閉的軍方場址，因近年來拍片使用頻率越來越低，Downey Studios 可能會拆除部分拍片廠房，重新規劃其未來用途。

(2) Downey Landing Retail Center

Kaiser Downey Medical Center 綜合醫學中心包含醫院及醫療辦公大樓 (圖 23(B))，總面積約 2 萬平方公尺，開發者 Kaiser Health Foundation 為了確保原場址污染不會影響當地綜合醫院的開發，開發前進行場址地區之初步危害評估 (Preliminary Endangerment Assessment)，環保署為確保場址之 VOCs 污染團不會因擴散傳輸而影響綜合醫院之地下水質，於 2004 年 Regional Water Quality Control Board 實施 VOCs 污染團補救計畫，避免醫學中心下方之地下水受到污染。

(3) Kaiser Downey Medical Center

位於場址北區的 Downey Landing Retail Center 購物中心 (圖 2-23 (C))，佔地約 3.4 萬平方公尺，在場址開發復育過程中，Downey Landing Retail Center 因有擴建停車場的需求而買下鄰近土地，其土地之地下水因同樣受到有 TCE 等含氯污染物影

響，故定期皆由負責承包之顧問公司進行生物處理作業，停車場區仍設有定期注藥井及監測井（圖 2-25(D)）。

(4) Columbia Memorial Space Learning Center & Discovery Sports Park

哥倫比亞學習中心 (Columbia Memorial Space Learning Center) (圖 2-25(E)) 與佔地 8,700 平方公尺的運動公園 (Discovery Sports Park) (圖 2-25(F)) 則位於場址南區，提供附近中小學生參觀與太空相關資訊之教育學習，運動公園則為公共開放空間供當地民眾休閒使用。

Downey 是政府規劃多面向的開發型態，預計可提供高達 6,000 個專業工作機會，至 2020 年更預期市政單位可獲得約 4,500 萬美金的土地租金及物價稅、房物稅等稅務收入。

另外，因加州地區降雨量極低缺乏水資源，雨水的收集也是都市建設中重要的工作之一，因此在參觀的過程中可以發現，Downey 市馬路中間的分隔島都較兩旁馬路地面略低，分隔島牆每隔一小段距離皆有凹槽設計 (圖 2-25(G))，當雨水落在地表後將往中間分隔島等花圃裸地處流動，裸地下方皆鋪設濾石，可過濾滲入之雨水，達到有效截流雨水以補助地下水的功能，其他公園綠地等裸地處亦皆採用此設計，其示意圖如圖 2-26 所示。除此之外，加州地區回收之廢水再經過處理後，可作為非飲用之再生水使用，主要用途為澆灌用水及浴廁用水，以達到節約及有效利用水資源的目的，圖 2-25(H) 即為 Columbia Memorial Space Learning Center 前花圃之再生水使用告示牌，說明此再生水不能飲用，且於接觸後應洗手避免誤食。場址相關介紹資料附於附錄三。



(A) Downey Studio



(B) Kaiser Downey Medical Center



(C) Downey Landing Retail Center



(D) 生物注藥井



(E) Columbia Memorial Space Learning Center



(F) Discovery Sports Park



(G) 逕流雨水收集系統



(H) 再生水使用標誌

圖 23 NASA Industrial Plant 場址參觀現況

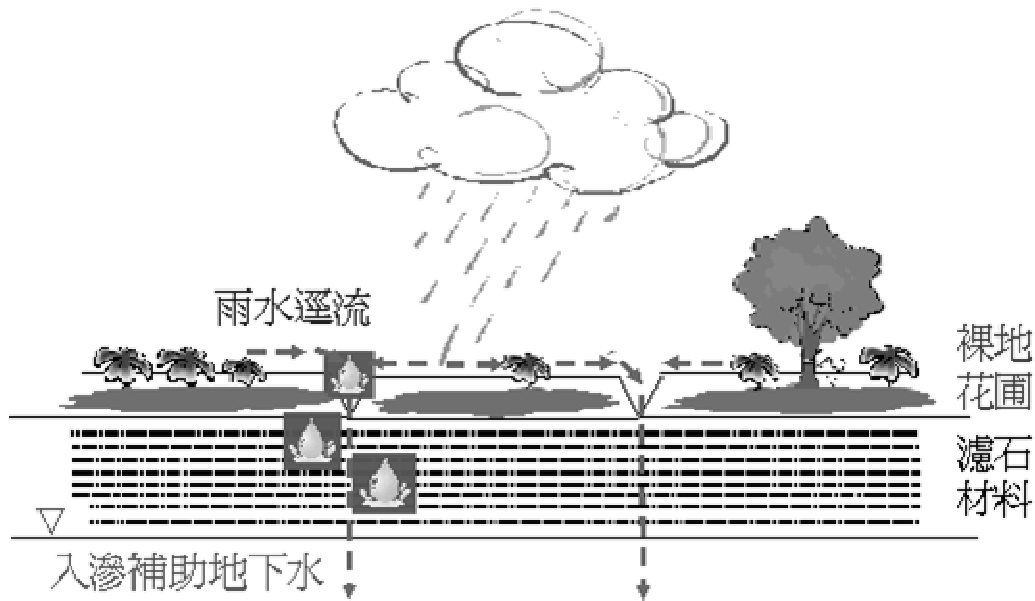


圖 24 逕流雨水補助地下水系統示意圖

三、心得與建議

本次研討會及培訓講座主軸為介紹美國對於土壤及地下場址之管理方式及相關法規的應用，並由加州環保署官員與當地顧問公司分享污染場址之整治與管理實務經驗，以下將針對本次會議之感想心得與建議分項說明。

1. 參考美國補助基金政策並落實污染責任者求償責任

美國政府對於污染場址的整治管理責任與經費分配上非常明確，屬私人污染土地或具有明確污染行為人時，土地所有者及污染行為人將需負擔完全的整治責任，若因污染嚴重須立即進行整治，或尚未釐清污染行為人之場址，可由聯邦（州）政府先協助進行場址整治工作，事後再透過法律求償程序向污染責任人拿回經費。以本次參訪場址為例，Charnock Well Field 與 Shell Site 場址因位於飲用水源取用地區，且地下水含有水溶性極高之致癌污染物質 MTBE 存在，故於發現污染後立即停止使用當地地下水水源，在透過法律訴訟與協商後，污染責任者 Shell Oil Company 同意向南加州大都會供水局購買水源，提供當地所需，每年費用為 330 萬元美金，持續約 12 多年之久，並支付懲罰性賠償金 6,400

萬美元給市政府，同時也出資約 2 億美元建造 Charnock Well Field 地下水的處理廠，2010 年已完成設置並開始運作，由該廠先負責處理當地受污染之地下水後，再將處理後之水源運送至自來水處理廠。

若因場址污染歷史悠久已無法釐清污染行為人，或屬國家所有之公有土地，此類污染場址則由州政府或土地所有機構負責整治，聯邦環保署也針對 Superfund 與 Brownfield 場址提供了調查及整治經費的補助制度，如 Superfund 法案中即清楚指出，州政府可向聯邦環保署申請 90% 的整治費用補助，而剩下的 10% 整治費用以及後續場址的操作與管理費用則必須由州政府自行負擔；而 Brownfield Act 中也針對再利用之污染場址，提供每場址最高 20 萬元美金的調查或整治補助金，其餘經費則必須由地方政府自行編列預算。美國的補助基金制度可有效協助並加速場址的整治與再利用，由中央（聯邦）與地方主管機關共同負擔場址整治成本的作法，將能有效減輕中央基金款項的支出壓力；反觀我國土污法第二十八條中，雖已效法美國 Superfund 基金制度，提供地方環保機關辦理場址查證、評估與施行計畫等補助費用與相關申請辦法，但仍建議可參考美國之補助款分配方式，由中央與地方共同分攤場址之整治與管理費用，使有限的土污基金能協助更多場址完成整治工作，且未來我國在推動污染土地再利用政策時，也能仿效美國 Brownfield Act 的補助精神，提供適當的補助款項，加速地方政府進行場址復育與開發之動力。

2. 以風險評估概念作為場址管理與再利用之基準

對於污染場址的管理，美國主要採用風險評估概念作為管理基準，在預設之參數與暴露條件下，以可接受之致癌風險基準 10⁻⁶ 與非致癌風險基準值 1，計算風險基準濃度，美國環保署及加州等地方性環保主管機關，皆訂立相關之篩選基準值，用於作為場址篩選使用；當場址污染物濃度高於篩選基準值時，則表示可能具有人體危害性，需納為列管場址。列管之場址再透過進一步調查評估後，則會依據場址實際狀況，如土地使用型態、污染物暴露途徑與暴露受體類型的確認等，重新以可接受風險標準訂定其整治目標。對於單純僅含有土壤污染的場址而言，再透過適當之整治工法與相關風險管理措施，使場址土壤之污染物濃度符合其整治目標時，即可解除場址列管 (delist)。

但值得注意的是地下水污染場址，因美國飲用水主要來源為地下水，水源的保護極為重要，因此地下水污染場址之解列標準必須同步考量風險評估結果以及飲用水標準，特別是當污染場址位於水源取水井所在地時，在符合以風險為考量之整治目標條件下，一般僅能達關場標準 (closure)，環保主管機關將同意場址進入 No Further Action 階段；以加州為例，要求場址管理者每年需定期提報相關風險管理措施之維護報

告，並於每五年提出一次複審報告，確認場址中地下水污染無擴散情形，通常需直到地下水中污染物濃度符合飲用水標準時，才能解除場址列管 (delist)；但若場址並非位於飲用水源地區，或地下水污染深度並非飲用水井主要取水層 (第二或第三含水層)，環保主管機關則同意當場址整治達 remediation goal 時即可 closure site，並在經過長時間控制與觀察後，發現地下水中污染物已無降解之可能性或擴散之風險性時，就可以申請 delist。本次參訪的 EI Toro Marine Corps Air Station 場址即是利用風險進行最佳管控的場址之一，該場址雖位於飲用水源取水區，但場址區段的水源僅作為再生水 (澆灌用水) 系統所用，因此，環保署同意執行者依據不同含水層提出其 remediation goal，並在場址污染外圍設地抽水井，控制受污染之地下水不向外擴散，而造成其他飲用水源區域的污染。

由本次參訪之案例也發現，美國多數場址皆採用 pump & treatment 整治工法進行地下水整治，整治完成之地下水可選擇排入河川、海域，或再注入地下水層，但不論以何種方式處理皆需向場址所在地環保主管機關申請排放許可。

另外，當列管場址涉及生態敏感地區時，則必須同步考量生態風險之影響性，一般而言，環保機關將以人體與生態標準較為嚴格者作為其場址之整治目標，但因生態風險評估之不確定性較高，且若土壤之生態標準值難以達到時，環保署原則上接受執行者仍以人體健康風險標準為整治目標，但必須提出適當之風險管理措施，確保敏感生物受體不會接觸到受污染之污染土壤，且須經進行長時間的生態調查結果，確認敏感受體不受場址污染影響，如生物個體數量、體型、繁殖力等變化，才能同意解除場址列管。

除此之外，室內污染氣體的評估亦是近年來頗受關注的污染場址管理議題，主要因美國污染場址早期在透過風險評估訂定整治目標時，通常僅以開放空間之蒸氣揮發土壤揚塵等暴露途徑進行計算，但因地下水污染以及深層土壤污染 (通常為 DNAPL 污染物質) 通常需要數十年的時間才能完成整治，且整治經費相當龐大，因此為能有效利用土地，美國多先以土壤挖除的方式處理淺層污染土壤，使土壤濃度符合整治目標後，便結合市政區域發展計畫，一併進行場址開發，而地下水污染則在開發過程中或開發完成後，持續以 SVE 或生物處理等方式整治。如此而為衍生出當地下水中含揮發性有機污染物存在時，可能會透過土壤氣的傳輸移動，進入且累積於室內密閉空間中，因而造成長期居住或活動於該空間內的民眾出現健康風險疑慮。為避免地下水中或更深層土壤中的有機污染物濃度揮發至地下室空間內，美國環保署自 2008 年起陸續訂定防止土壤氣進入室內空間之方法與評估指引，如在建築施工過程中

必須設置土壤氣隔絕措施，在地下室之牆面與地板層內側鋪設薄板及具耐壓的不透水布，最後灌入水泥牆面。另外，為能持續整治殘留於地下水中之污染物，在建築施工過程中，同步要求設置有雙向式抽除井，當發現監測井中污染物濃度出現變化時，或地下室與一樓室內使用空間的空氣品質出現異樣時，可立即要求管理者啟動抽除系統，移除含污染物之土壤氣與地下水，避免造成人體健康危害。

在保障人體健康與生態環境、土地有效利用，以及國家經濟負擔之多重因素考量下，結合場址整治與開發之併行策略，已成為歐美等國家對於污染土地之管理趨勢。國內土壤及地下水污染整治法與相關管理辦法主要皆參考美國污染管理制度所訂定，目前也正效法歐美各國推行污染土地再利用，建議應採用開發與整治同步併行之策略，先挖除淺層污染土壤，快速有效解決土壤污染問題，待初步完成土壤整治後之場址，即可直接作為建物地基用地；時應針對地下水與土壤氣溢散問題，搭配建物之建造設計，設置防止地下水與土壤氣入滲之設施，以及抽水或抽氣井等整治設施，在確保建物內之民眾不受到污染影響之前提下，即可加速土地妥善利用，而所創造出之土地使用價值，也能作為長期整治與監控地下水及土壤氣污染的經費來源。目前我國除在污染土地管理與開發法規、制度需進行整合外，為加速土壤污染問題的解決，土壤離場整治制度需先被建立，才能避免現地土壤整治時程過長而影響開發期程，另外，開發過程中如何防止受污染之地下水與土壤氣入滲室內使用空間，造成人體健康的影響，在開發過程中即應參考國外作法，要求同步設置長期性整治與防止污染擴散設備，並訂定室內空間土壤氣之監測與評估管理辦法，以及開發後場址持續管理責任的釐清與稽核機制的建立，才能使民眾安心且願意生活於再利用之污染土地上。

3. 污染土地再利用納入綠色整治概念

綠色整治技術也是未來值得關注的議題之一，主要因目前對於場址整治多著重於如何快速達到最終整治目標，甚少考量自然資源的消耗、能源的使用與廢棄材料再利用的可能性，且許多整治工法與藥劑的使用常常會造成更嚴重的環境影響，如破壞土壤本質而無法再作為耕種使用，以及注入之藥劑或其副產物殘留而導致更多未知的污染現象，因此，美國已於 2009 年提出 **Consideration of Green and Sustainable Remediation Practice in the Defense Environmental Restoration Program**，此項整合綠色與永續性的整治策略，同步考量環境、經濟與社會等效益，力求減少環境碳足跡。事實上，污染土地再利用恰可為表現綠色整治技術的最佳舞台，在整體開發與整治過程中，即可納入綠色整治技術的概念，以保障人體與生態環境之風險評估為基礎；選擇耗能性較低且能有效整治與管控污染物擴散的技術；依據場址特性，搭配風力、太陽

能、生質能源等綠色能源設施，提供整治時之機具動力；利用廢棄建材重複使用，減少外運及購置的成本，將不只能解決環境污染問題，還可增加土地開發後當地民眾之社會效益並提升經濟活躍度。

四、附錄

附錄一：出席「第五屆全球當前環境挑戰與政府應對措施研討會暨環境高層論壇」行程

日期		工作內容
月	日	
8	9	Environmental Summit Forum Soil and Groundwater Remediation
8	10	場址參訪 Soil and Groundwater Remediation Site
8	11	Platform Session 3 Soil and Groundwater Remediation (oral presentation)
8	13	污染場地修復與綜合管理專題會議與培訓講座 (Day 1)
8	14	污染場地修復與綜合管理專題會議與培訓講座 (Day 2)
8	15	污染場地修復與綜合管理專題會議與培訓講座 (Day 3-場址現場參觀)
8	16	污染場地修復與綜合管理專題會議與培訓講座 (Day 4)

附錄二：EI Toro 與 Tustin Marine Corps Air Station 場址資料

附錄三：NASA Industrial Plant 場址資料