

綠色整治技術之創新性與未來性

林啟燦¹、黃文彥²

¹ 國立高雄海洋科技大學教授兼海洋環境工程學院院長

² 中國石油化學工業開發股份有限公司安順整治計畫專案經理

一、摘要

全球環保先進國家，對其國土污染地案場，已全面推動搭配最佳控管實務對策與技術之綠色整治。我國「土壤及地下水污染整治法」執法已歷十年，較全面性且較大規模之整治方興未艾。若欲追歐趕美超日整治劣化國土，必須落實綠色整治技術之創新性與未來性，結合其相關最佳控管實務，始能邁入更為環保時代。本文介紹綠色整治之目標、五大要項、最佳控管實務、直接或間接效益，期能將綠色整治技術之創新性與未來性概念構想，提供國內業界參考。

二、背景

美歐日等世界環保先進國家，對於土壤地下水之國土污染案場整治，近年已考量對環境生態更為友善之綠色整治（green remediation），甚至更為節能減碳之健綠色整治（right green remediation）或深綠色整治（deep green remediation），搭配相關策略與創新技術，以淨化其國土污染。其中，美國聯邦環保署（簡稱USEPA）自2008年4月起至2010年底，針對受污染國土案場，陸續提出綠色整治之一系列概念構想與實務通報^[1-12]，促使節能減碳永續發展之綠色整治時代快速來臨。USEPA於2011年，亦將陸續完成下列主題之最佳控管實務通報^[11]，包含：

- （一）「將再生能源與場址整治相互結合（Integrating Renewable Energy into Site Cleanup）」

- (二)「地下貯槽洩漏場址 (Sites with Leaking Underground Storage Tanks)」
- (三)「封閉式掩埋場 (Landfill Covers & Containment Technologies)」
- (四)「場址整治清理環境相關干擾環境因素之足跡分析 (Environmental Footprint Analysis of Site Cleanup)」
- (五)「場址整治清理承包機制 (Contracting Mechanisms for Site Cleanup)」
- (六)「現地熱處理 (In Situ Thermal Technologies)」

2010 年 4 月 21 日，USEPA 亦致函全球化國際標準組織－美國試驗與材料協會 (American Society of Testing & Material, International, 簡稱 ASTM) 建議 ASTM 盡速完成「案場評估與綠色整治清除之永續發展新指引(New Guide for Green and Sustainable Site Assessment and Cleanup)」^[13,14] 之制定。根據 ASTM 該指引初稿內容顯示^[14]，ASTM 不僅將環境因素納入考量以符合綠色整治為依歸，同時亦揭櫫必須兼顧社會和經濟兩大層面，此精神稱為「三重底線 (triple bottom line)」，或者「永續性之三項支柱 (three legs of sustainability)」^[13,14]，即污染整治必須考量環保、社會和經濟三者皆能獲得均衡發展。

此外，USEPA 所轄之固體廢棄物暨應急應變辦公室 (Office of Solid Waste and Emergency Response，簡稱 OSWER)，為推動綠色整治相關策略與技術，亦積極結合其他機構共同合作，希望經由綠色整治之清除修復與復育過程，將遭受污染僻地整治之日常營運操作控管、系統最適化/優化、以及擴大使用再生能源等全面予以整合，並且考量予以活化再甦，一併進行策略技術之通盤性整體規劃設計。

三、綠色整治

USEPA 近年來極力倡導綠色整治，其建構之綠色整治元素如圖 1 所示。USEPA 所揭櫫之綠色整治，意即「執行整治時必須盡量與相關再甦方案結合，詳盡考慮所有對環境可能產生衝擊影響，並採取對環境整體淨化最大效益之清理行動方案」^[1]。綠色整治包含下列五大元素：



圖1 綠色整治最佳控管實務要素圖

資料參考來源：<http://www.clu-in.org/greenremediation/index.cfm>

- (一) 能源：減少能源使用總量和增加使用可替代再生能源。
- (二) 空氣：自整治源頭即減少空氣污染和溫室氣體排放量。
- (三) 水資源：減少水的使用（量）且降低對水資源負面影響。
- (四) 耗材：加強物料耗材管理和致力減少廢棄物之質與量。
- (五) 土地生態：加強土地管理和對生態系統環境保護。

綠色整治具有下列十項明確目標，包含：

- (一) 達成整治行動目標。
- (二) 支持並提升整治系統之可重複再利用性。
- (三) 提高營運操作效能。
- (四) 降低對環境所造成污染物總量，並且減少廢棄物對環境的負擔。
- (五) 儘量保持案場或鄰近受影響地區衰退最小化，並強化維護生態環境景觀。
- (六) 減少廢氣排放與溫室氣體產生。

- (七) 減少對水質和水循環影響。
- (八) 保育自然資源。
- (九) 藉投資綠能進行綠色整治，以取得更多長期財務回收。
- (十) 提升場址清理整治之可持續性。^[2]

無論對於整治受污染髒地，或者荒蕪延宕懸而未決之褐（棕）地（Brownfields），整治污染過程若能盡量落實綠色整治上述要素，並且妥適落實其最佳控管實務作業（best management practices, BMPs），不僅有助污染整治與淨化環境，對於土地活化再甦之永續發展亦產生極大的實質效益。因此，實施綠色整治在相當範圍內可產生下列益處與優勢：

- (一) 減少石化燃料消耗和溫室氣體排放量。
- (二) 更妥適地保護水與其他自然環境資源。
- (三) 藉由改善處理系統之能源效率，並使用最適化被動性能源處理系統，節省成本並提高能源效率。
- (四) 關於環境管理與可永續發展等持續活動之機會教育。
- (五) 案場與鄰近社區，發展再生能源產業，提供社區居民就業機會，振興經濟。

國土永續發展之案場整治活化再甦工作，必須落實綠色整治及其最佳控管實務始能成功。關於最佳控管實務，乃於整治復育清理修復或活化再甦開發等過程，全程採取可節能減碳的一切行動項目，以減少對環境和能源所產生的“（干擾環境相關因素）之足跡”。綠色整治的最佳控管實務作業，是針對整治目標，於調查、評估、整治、復育等階段，全程皆密切且務實地評估其核心要項，盡量落實環境友善及節能減碳。

為求國土永續發展，在污染案場開始規劃「設施除役、設備拆解、場地清理和資源回收再利用」等過程，即必須將最佳控管實務列入規劃重點，促使案場活化再甦及土地再次利用幾乎能獲同步啟動。並且將綠色整治策略與技術，納入採購發包與案場控管相關文件加以落實。

此外，若能落實綠色及其最佳控管實務，亦有助於下列永續發展要項之節約資源量化評估標準，例如：

- (一) 用水強度(water intensity)，即消除一單位重量污染物所需之用水量。
- (二) 土壤強度 (soil intensity)，即消除單位重量污染物所流失土壤量或其地力肥力喪失量。
- (三) 用料強度，如耗材或下腳料之廢品產量，或處理每單位重量污染物所產生之廢棄物量。
- (四) 能源效率，清除每單位重量污染物，所需耗用能源及其效率。^[2]

根據ASTM目前即將發布之「案場評估與綠色整治之永續發展新指引 (New Guide for Green and Sustainable Site Assessment and Cleanup)」，設計處理系統不一昧僅是追求處理時效，必須將節能減碳且對環境友善，列為優先評估重點。故案場應根據技術發展與實際需求，除動態考量改善既有系統外，亦可設計新系統，以兼顧最適化能源使用效率。該指引亦已揭櫫綠色整治之初步指引綱要架構，並且建議相關最佳控管實務如下：^[14,15]

(一) 盡力減少耗用能源總量，並致力盡可能使用可替代性再生能源，做法例如：

1. 盡量減少能源消耗（如使用節能設備）。
2. 盡量利用案場現場再生能源，以供應整治淨化系統設備之動力來源，減少外購能源之消耗。
3. 若自產再生能源不敷使用，則避免直接採購油電，盡可能採購商轉再生能源。
4. 致力使用再生能源與資源，如潮汐明顯、水利充沛、風勢強勁或日照充足等，即可評估水力、風力或光熱等再生能源，以滿足處理系統電力需求。
5. 產生電力盡可能採用甲烷氣體或二手材料等整治過程之可用再生副產品。
6. 參與發電或建立購買可再生資源能源。若能發展綠能夥伴基礎關係，運用充沛日照、風力、潮汐、水力等案場天然資源，妥善發電或建立購買可再生資源能源，將可產生綠能等諸多直接或間接效益。

(二) 盡力於發生源即減少空氣污染物，並全面控制與降低溫室氣體排放質量，

做法例如：

- 1.盡量減少溫室氣體產生與排放質量。
- 2.現場就地直接抑制空氣污染物之產生。若採取離地或離場整治，開挖和運輸過程必須盡力抑制揚塵，工程機具盡量選用低排碳高效能者，並減少場內運輸或外運離場之輸出距離。
- 3.提高重型工程機具與設備使用效能（例如：實施柴油引擎減碳排放計畫）。
- 4.工程機具、整治設備或運輸車輛，盡可能採用配有先進空污抑制與排放控制之高效能系統。
- 5.採用可使用清潔燃料之動力機械及輔助設備。
- 6.現場封存二氧化碳（例如，就地回注地下，使用土壤改良劑或重建植被等）。

(三) 致力減少用水量，並盡力保育水資源，並且減少對水資源的影響

- 1.盡量節約用水，並減少消耗外來水資源，以減少不利於環境生態之足跡。
- 2.加強收集雨水回收廢/污水，妥適儲存並予再利用（例如，提供含水層涵養水資源灌溉補給調節等）。
- 3.盡量減少種植必須經常澆灌植被（例如，避免使用外來種，盡量使用再地本土原生種）。
- 4.對暴雨預先擬定並採取最佳控管實務（例如：開闢生態溼地，評估兼作沉澱、緩衝、蓄洪、排洪或回注地下等多重功能之可行性）。
- 5.善用經回收處理後的水，有利於諸如灌溉或儲存，並涵養含水層。基於節能減碳並珍惜維護水資源，在質量平衡前提下，案場如需用水宜就地取材盡量使用現場天然地面水或地下水進行整治，盡量不外取自來水或其他水資源，且回收再利用，並對地面水或地下水進行保育涵養。
- 6.盡量減少耗用自來水量，如可考慮就地取用地面水體或地下水，且提高整治處理過程之回收與循環使用率。例如若採洗土（soil washing）整治，用水即可考慮就地取材，並以100%全量回收再循環利用達零排放作為目標。

(四) 減少使用耗材及消耗，並予回收重複使用，減少產生廢棄物，落實分類回收與減量。

1. 致力減少使用耗材。
2. 致力減少產生廢棄物。
3. 就近使用在地材料和再生產品。
4. 加強案場廢棄物、土壤和營建拆解碎片鋼筋土石等之分離回收和循環再利用。

(五) 優化未來土地利用用途，並且顧及保護生態系統

1. 落實清理與建設幾乎同步之策略，將案場土地未來之預期用途或再利用計畫與整治計畫預先整合（畢其功於一役，避免一再重複擾動環境生態）。
2. 致力持續將「活動或使用限制（Activity and Use Limitations, 簡稱AULs）」限縮至最小化（例如：優先將受關切之重度污染設施或設備盡早除污或拆除。回收（recovery）或摧毀（destruction）熱區（hot spot）受關切之高濃/純度化學物質（chemicals of concern），整治受影響環境介質以斷絕其傳輸途徑等。）
3. 盡量減少對土壤和棲息地不必要的人為干擾與破壞，妥適保留生態棲地，減少人為營建設施與活動。
4. 盡量支持並妥適維護當地本土物種的棲息地。
5. 盡量減少噪音、振動和光害干擾。
6. 防止對緊鄰案場水體水質優養化負荷。盡量不使用人工合成之化學整治藥劑，以保護水質與土壤。故可致力開發食品級、環境生態安全之配方，例如：對環境友善生物可分解之萃取劑，且盡量回收循環再利用，除可避免水體水質負荷或優養化，且同步維護並復育土壤地力與肥力。

(六) 藉落實最佳控管實務，致力追求永續發展

1. 藉由定期評鑑、維護和最適化管理，避免生態環境惡化，以使系統整體功能可長期保持在最佳狀態。
2. 在調查、取樣、監測與整治等過程，盡量減少使用能源，消耗材料，更避免

產生廢廢物。

- 3.對行政禁制、工程控制、環境監控、整治復育、案場控管等過程，相關責任主體之功能、組織、履行等權責，予以明確釐清及落實。以確保責任主體和實施過程，其監督控管和維護機制能妥善運行。

關於氣候變遷所引發世人關注，促使全球更為重視節能減碳且全力積極投入，以減少化石燃料消耗，並降低溫室氣體（green house gas, 簡稱 GHG 或溫室氣體）排放。因此，整治污染案場，亦須致力實踐並體現「減少能源與資源消耗，避免或降低排放溫室氣體，以及節約用水保育水資源」。據此，USEPA 近年已通令並要求全美各級案場，皆需致力採取綠色整治技術。而美國軍方、能源部、航太總署等政府機構所轄案場，以及公民營利事業機關亦群起效之，政策引導及經濟誘因機制皆是促成綠技術全面推廣方興未艾之驅動原因。

四、美國案例

以美國為例，結合最先進技術之運用，整合其他領域之複合式創新方法，以及“務實可靠”的設計和工程技術，成為綠色整治核心要項與因應對策成功關鍵。無論是超級基金修正及再認可法案 (Superfund Amendment and Reauthorization Act, SARA)、資源保育及回收法案(The Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)、聯邦設施，褐地/棕地 (Brownfields)，和自願改善行動者等類案場，最佳管理實務作業皆可適用，有關美國相關應用案場如表1所示^[16]。

其中，位於美國加州Maywood之Pemaco案場，過去作為化學工廠，佔地約1.14英畝。該案場土壤和地下水受三氯乙烯 (trichloroethene, 簡稱TCE) 污染。其綠色整治策略，乃採用可再生能源發電現場就地處理的能源密集型技術。藉由裝置發電功率每小時3,400瓦 (watt) 之光電再生系統，提供2007年總電力需求，以供應下列污染整治系統，包含：①高真空多相萃取系統 (multiple phase extraction, 簡稱MPE)，②現地加熱氧化系統 (in situ thermal conduction enhanced oxidation)，③現地電阻加熱 (in situ electrical resistivity heating) 系統等現地整治技術，處理受污染地下水和土壤。

表 1 美國污染案場採用綠色整治其核心要項指標一覽表

案 場 名 稱	核 心 要 項 指 標										
	位 處 州 名	節 約 能 源	再 生 能 源	空 污 逸 散 源	或 排 放 質 量	水 資 源 保 育	與 再 循 環 性	土 地 與 生 態	保 育 性	與 耗 材 使 用 量	廢 棄 物 回 收
1.Aerojet-General Corporation	CA										
2.Altus Air Force Base	OK										
3.Apache Powder	AZ										
4.Barksdale AF Base	LA										
5.BP Casper	WY										
6.BP Paulsboro	NJ										
7.California Gulch	CO										
8.Crozet Orchard	VA										
9.De Sale Restoration Area	PA										
10.Delfasco Forge	TX										
11.Former Carswell Air Force Base	TX										
12.Former Nebraska Ordnance Plant	NE										
13.Former St. Croix Alumina Plant	VI										
14.Fort Carson	CO										
15.Frontier Fertilizer Superfund Site	CA										
16.Grove Landfill	TX										
17.Havertown PCP Site	PA										
18.Massachusetts Military Reservation	MA										
19.NASA Jet Propulsion Laboratory	CA										
20.Old Base Landfill	MD										
21.Paducah Gaseous Diffusion Plant	KY										
22.Pemaco Site	CA										

附註：符號說明如下

代表案場之能源使用較為節能經濟

代表案場抑制空污逸散源降低溫室氣體排放量

代表案場採用植生綠化技術保育土地生態

代表案場已使用替代性之再生能源

代表案場就近使用水資源且回收利用節省用量

代表案場耗材用量較少廢棄物回收再利用性佳

Pemaco案場利用再生能源歷時超過九個月，總計產生逾 5,900,000 watt 之電力。每月平均產生約每小時 520,000 watt 電力，相當於一個月可節省總發電購買成本約美金12,000元。每年減少約3.3噸的二氧化碳排放量，相當於每年開車7,600英里。並獲得加州政府約9,000美元國家支持發電補助，且獲得太陽光能/電轉換系統約30,000美元設備補助，故使干擾環境相關因素之足跡 (footprint) 大幅降低減少。此外，整治責任者與Maywood當地政府都發與工務部門通力合作，同步整合污染整治與市政建設，將污染案場變身發展為景觀優美河濱公園，徹底改造案場風貌，於遊憩中心追加光電系統，並聯納入案場電力需求，每月增加每小時 375,000 watt 電力。

五、結語

我國土壤地下水污染整治復育，自西元2000年立法以來已歷十年，且於2010年重新修訂更趨嚴謹、務實而完整^[21]，故正進入全面整治復育關鍵發展期。面對全球歐美日澳等環保先進國家發展已久之策略與技術競爭優勢，我國自當急起直追，發展綠色整治產業。因此，如何全面發展本土化綠色整治產業，與該產業相關策略與技術以將其化為轉機，勢將對我國能否從綠色整治產業落後國，一躍而成為綠色整治產業輸出國，發生至關重要且極為深遠影響。

他山之石足堪借鏡，我國案場不應重蹈他國覆轍，再歷經過去逾30年歐美等國所遭遇慘痛教訓及失敗經驗。運用綠色整治策略與落實最佳控管實務技術，進行髒地或褐地國土污染案場之清除修復，歐美澳等國尚方興未艾，甚至連立法較我國為晚之日韓等國，亦正如火如荼地奮起直追大量推廣運用。我國自然資源短缺且污染負荷沉重，政府、產業、學界、民間等社群，實宜真正體認並共同倡導，凝聚共識共同合作相互協助展開行動，提出具體政策工具與良善實務對策，鼓勵落實綠色整治，始能作到身為地球公民所應盡義務與需負責任。

欲執行綠色整治落實最佳控管實務，國內仍有極大進步空間，更需政府政策工具引導。政府若欲要求民間貫徹執行，自當身先表率未雨綢繆，建立完整政策與相關配套誘因機制等法規條例。藉立意良善政策工具，協助業者加速落實節

能減碳綠色整治。此外，對於髒地或褐地之污染整治，除必須符合工安與環保等現行法規標準，亦應採用最佳控管實務作業，將符合綠色整治項目之整治清理復育技術及設備，全程納入規劃、設計、施工、控管與營運等各階段之採購發包管理體系。對於杜絕二次污染、落實節能減碳之任何干擾環境因素相關不利足跡，亦應釐清不確定性，並予定量評估，以控管綠色會計環境成本潛在風險。

對於國土污染案場整治，若能為受創環境生態與社區居民等社群，創造生機與商機等願景，將使負責整治者及協助整治政府官方其正面形象加分。同時藉由大幅提升研究開發質量，使產業與學術研究能相互結合，可落實節能減碳從事真正環保污染改善。更期待行銷案場經驗技術、創造居民就業機會，建立業者優質形象、營造社區總體產業，使整治責任者、改善污染者、當地社區居民、各級政府、學術機構、環保團體等社群，皆能在推動綠色整治全部過程中，一起成長、相互學習與共同獲益。

參考文獻

1. Incorporating Sustainable Practices into Site Remediation, Office of Solid Waste and Emergency Response of United States Environmental Protection Agency, EPA 542-F-08-002, April 2008.
2. Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-R-08-002, April 2008.
3. Green Remediation: Best Management Practices for Excavation and Surface Restoration, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-08-012, December 2008.
4. Incentives for Greener Cleanups, Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials (ASTSWMO), Prepared by the Greener Cleanups Task Force Under the Sustainability Subcommittee, June 2009.
5. Green Remediation Best Management Practices: Pump and Treat Technologies, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-09-005, December 2009.
6. Green Remediation Best Management Practices: Site Investigation, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-09-004, EPA 542-F-09-004, December 2009.
7. Green Remediation Best Management Practices: Bioremediation, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-10-006, March 2010.
8. Green Remediation Best Management Practices: Soil Vapor Extraction & Air Sparging, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-10-007, March 2010.
9. Green Cleanup Standard Initiative , U.S. EPA's Office of Solid Waste and

Emergency Response (OSWER), July 2010 Update.

10. Green Remediation Best Management Practices: Clean Fuel & Emission Technologies for Site Cleanup, Office of Solid Waste and Emergency Response of U.S. Environmental Protection Agency, EPA 542-F-10-008, August 2010.
11. Green Remediation Best Management Practices: Fact Sheets on Specific Remedies and Other Key Issues, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation of U.S. Environmental Protection Agency, September 2010 Update.
12. Superfund Green Remediation Strategy, Office of Solid Waste and Emergency Response & Office of Superfund Remediation and Technology Innovation of U.S. Environmental Protection Agency, September 2010.
13. Green and Sustainable Site Assessment and Cleanup Standard Draft Outline Recommendations Letter issued by USEPA Office of Solid Waste and Emergency Response's (OSWER 's) to the ASTM International, 21th April 2010
14. New Guide for Green and Sustainable Site Assessment and Cleanup, ASTM WK23495, American Society of Testing & Material, International, <http://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK23495.htm> Initiated Date:03-19-2009.
15. Internal meeting of the notification letter announced by E50 Subcommittee of American Society for Testing and Materials, International, http://www.astm.org/COMMIT/E50_Green_cleanup.doc.
16. Profiles of Green Remediation, Technology Innovation and Field Services Division of U.S. Environmental Protection Agency, http://www.clu-in.org/greenremediation/tab_d.cfm.

【作者簡介】



林啟燦最高學歷為美國康乃狄克大學環境工程博士、美國康乃狄克州環工技師（PE License），現職於國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系教授兼海洋工程學院院長。曾任美國環保署第二分區科技顧問小組環境工程師（USEPA Region II, Technical Assistance Team），專長與研究興趣為有害廢棄場址調查與整治技術、環境污染調查、儀器分析、空氣品質工程、環境法醫調查、土壤及地下水污染調查，並現任 Environmental Engineering Science (EES) 國際期刊副編輯（Associate Editor）。

電話：07-3617141 ext. 3571

傳真：07-3662985 or 07-3651472

電子信箱：ctlin@mail.nkmu.edu.tw