



土壤及地下水比水重非水相液體
污染整治作業參考指引
(113年修正版)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-004

版本修正對照表

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	民國 89 年 2 月 2 日土壤及地下水污染整治法(以下簡稱土污法)公告施行以來， <u>行政院環境保護署</u> (以下簡稱環保署)即陸續執行全國性土壤及地下水污染源調查計畫……	民國 89 年 2 月 2 日土壤及地下水污染整治法(以下簡稱土污法)公告施行以來， <u>行政院環境保護署</u> (現已改制 <u>環境部</u>)即陸續執行全國性土壤及地下水污染源調查計畫……	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字修正。	1-1
	三、任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照 <u>環保署</u> 最新公告之標準作業規範。	三、任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照 <u>環境部環境管理署</u> (以下簡稱本署)最新公告之標準作業規範。		1-2
	八、本指引並不代表 <u>環保署</u> 任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。	八、本指引並不代表 <u>本署</u> 任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。		1-2
	專有名詞與法規相關者，則依法規之定義，相關名詞並參考 <u>環保署</u> 「中英文辭彙對照」、「環保統計名詞及定義」與……	專有名詞與法規相關者，則依法規之定義，相關名詞並參考 <u>本署</u> 「中英文辭彙對照」、「環保統計名詞及定義」與……		1-4
	本節參考 <u>環保署</u> 曾於民國 92 年 8 月環保署環署土字第 0920057616 號函……	本節參考 <u>本署</u> 曾於民國 92 年 8 月環保署環署土字第 0920057616 號函……		2-5
	(一)若處理製程(或設備)符合 <u>環保署</u> 公告之「第一批至第七批公私場所應申請設置變更及操作許可」或……	(一)若處理製程(或設備)符合 <u>本署</u> 公告之「第一批至第七批公私場所應申請設置變更及操作許可」或……		2-5
	(二)當土壤開挖、暫存之行為符合環署空字 940073671 號函之解釋：「… <u>環保署</u> 公告第五批各行業/堆置場……	(二)當土壤開挖、暫存之行為符合環署空字 940073671 號函之解釋：「… <u>本署</u> 公告第五批各行業/堆置場……		2-5

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	(二)若污染場址控制或整治計畫之土石堆置，符合 <u>環保署</u> 民國 97 年 5 月 23 日公告「應先檢具水污染防治……	(二)若污染場址控制或整治計畫之土石堆置，符合 <u>本署</u> 民國 97 年 5 月 23 日公告「應先檢具水污染防治……	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字修正。	2-6
	委託處理之再利用機構應依「 <u>行政院環保署</u> 事業廢棄物再利用管理辦法」規定，向環保署申請取得污染土壤類代碼之再利用許可……	委託處理之再利用機構應依「 <u>行政院環境保護署</u> 事業廢棄物再利用管理辦法」規定，向環境部申請取得污染土壤類代碼之再利用許可……		2-6
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」(95.05.30)第 23 條規定：「公私場所應有效收集各種空氣污染物……	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」(95.05.30)第 23 條規定：「公私場所應有效收集各種空氣污染物……		附件一-22
	有關監測式自然衰減之可行性評估準則、設計準則與成效評估準則，應參考 <u>環保署</u> 「應用監測式自然衰減整治法……	有關監測式自然衰減之可行性評估準則、設計準則與成效評估準則，應參考 <u>本署</u> 「應用監測式自然衰減整治法……		附件一-51
	註：有關監測式自然衰減法之可行性評估流程，亦應參閱 <u>環保署</u> 「應用監測式自然衰減整治法之可行性評估準則、……	註：有關監測式自然衰減法之可行性評估流程，亦應參閱 <u>環管署</u> 「應用監測式自然衰減整治法之可行性評估準則、……		附件一-53

目錄

	<u>頁碼</u>
第一章 前言	1-1
1.1 撰寫目的	1-1
1.2 適用範圍及限制	1-2
1.3 指引內容摘要	1-2
1.4 專有名詞中英文對照表	1-4
第二章 整治技術應用現況與相關法令	2-1
2.1 整治技術發展應用現況	2-1
2.2 國內污染場址整治期間相關環保法令	2-5
第三章 整治技術選取策略	3-1
3.1 技術選取策略	3-1
3.2 案例解析	3-6
第四章 工業安全衛生與緊急應變	4-1
4.1 工業安全衛生	4-1
4.2 緊急應變	4-2
參考文獻	參-1
附件一 現地整治技術	附件一-1
一、土壤間隙蒸氣抽除法(Soil Vapor Extraction,SVE)	附件一-1
二、地下水注氣法(Air Sparging , AS)	附件一-13
三、現地生物整治(In-situ Bioremediation)	附件一-24
四、熱處理法 (Thermal treatement)	附件一-36
五、監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)	附件一-51
六、地下水抽出處理法(Pump and Treat)	附件一-63
七、地下水循環井法(groundwater circulation well, GCW)	附件一-72
八、現地化學氧化法(In-situ chemical oxidation, ISCO)	附件一-84
九、現地透水性反應牆(In-Situ Permeable Reactive Barrier, PRB)	附件一-103

十、界面活性劑/共溶劑沖洗法(surfactant/cosolvent flushing).....	附件一-115
十一、開挖與圍堵(excavation and containment).....	附件一-126
十二、電動力整治技術 (Electrokinetic Remediation).....	附件一-136
十三、植物整治法 (Phytoremediation)	附件一-151
十四、奈米科技處理法 (Nanotechnology)	附件一-164
附件二 離地整治技術.....	附件二-1
一、土壤清洗法 (Soil washing)	附件二-1
二、離地土壤生物整治 (Ex-situ Soil Bioremediation)	附件二-9
三、加熱脫附處理法 (Thermal desorption).....	附件二-18
四、焚化 (Incineration).....	附件二-28

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 3.1-1	DNAPL 整治技術及策略選取流程圖.....3-2
圖 3.2-1	比利時某污染場址地下水注氣法模場試驗監測井設置圖3-12
圖 3.2-2	美國海軍陸戰隊空軍基地注氣井與監測井配置圖3-14

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.4-1 專有名詞中英文對照表	1-4
表 2.1-1 美國超級基金 DNAPL 污染場址主要整治技術選用情形.....	2-2
表 2.1-2 美國超級基金 DNAPL 污染場址之整治技術組合.....	2-3
表 3.1-1 整治相對難易度(依污染物特性與含水層特性).....	3-3
表 3.1-2 DNAPL 整治技術之篩選距陣.....	3-5
表 3.1-3 DNAPL 整治技術篩選距陣之評估結果代號定義.....	3-6
表 3.2-1 台灣北部某土壤及地下水污染場址資訊.....	3-7
表 3.2-2 台灣中部某污染場址資訊.....	3-8
表 3.2-3 台灣南部某污染場址資訊.....	3-9
表 3.2-4 比利時瓦隆區跨國製藥廠污染場址資訊.....	3-10
表 3.2-5 比利時某污染場址地下水注氣法模場試驗監測井特性.....	3-11
表 3.2-6 美國北卡羅萊納州海軍陸戰隊空軍基地場址資訊.....	3-13
表 4.1-1 污染場址整治之一般安全措施.....	4-2

第一章 前言

1.1 撰寫目的

民國 89 年 2 月 2 日土壤及地下水污染整治法（以下簡稱土污法）公告施行以來，行政院環境保護署（現已改制環境部）即陸續執行全國性土壤及地下水污染源調查計畫，相關調查結果顯示，國內土壤及地下水污染以「DNAPL」與「油品」污染為主，但亦發現部分場址有「氯化碳氫化合物」之污染。氯化碳氫化合物為比水重非水相液體(dense non-aqueous phase liquid，以下簡稱 DNAPL)，相較於之其他類型污染物，DNAPL 污染場址之整治工作較為棘手，特別是在水文地質條件較複雜的情況下，其整治工程更為困難。故根據 DNAPL 污染物之特性，彙整相關整治技術，並編撰「土壤及地下水比水重非水相液體污染場址整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊」。

隨著土污法於民國 99 年的修訂，歷年土壤及地下水污染調查及整治技術的進步，我國污染調查及整治技術手冊撰寫冊數逐年增加。然而，卻仍未有相關手冊撰寫之統一結構，致使用者於閱讀上的困難度提昇。因此，遂根據原手冊內容重新編制「土壤及地下水比水重非水相液體污染整治作業參考指引」（以下簡稱本指引）。在本次指引編修過程將內容重新調整為統一架構，並更新相關法令規範，以提昇使用者之閱讀便利性。

本指引彙整國內外曾使用於 DNAPL 污染場址之 4 項離地、11 項現地與 3 項其他新穎整治技術，針對其技術之原理、適用環境及其可行性與適用性予以說明。此外，考量將 DNAPL 污染整治至管制標準或回復至土壤或地下水原有用途，有其困難性與技術不可行性，許多國家已逐漸採用「人體健康風險評估」之概念，訂定整治目標，並據以擇定整治技術或整治技術組合(treatment train)，並不一定採用成本最高或是最複雜之整治技術來進行整治。因此，本指引亦另闢專章予以闡釋說明。

1.2 適用範圍及限制

- 一、 本指引設定之使用對象為環保主管機關、目的事業機關、技術顧問機構，以及污染行為人、污染土的關係人等，在土壤及地下水受DNAPL 污染場址，進行污染整治作業之參考。
- 二、 本指引並未提供有關土壤及地下水之基礎理論，如有該方面的基礎知識，可參考本指引參考文獻。
- 三、 任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照環境部環境管理署（以下簡稱本署）最新公告之標準作業規範。
- 四、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，並著重於如何與實務結合進行場址污染改善工作。亦不提供各項技術與相關設備儀器之詳細操作步驟。
- 五、 使用者於執行污染整治各階段工作時，所採取之執行方式、佈點位置、數量及分析項目等，仍應視各場址實際狀況及使用者之專業判斷加以決定，本指引中並無強制規範。
- 六、 本指引主要是完整的彙整論述各項整治技術程序，以及各項技術選擇之方法、適用環境等，本指引中的各項技術並不會相互比較或評斷其優劣，而專注於技術之可行性與適用性討論。
- 七、 本指引各種整治技術之成本與期程僅提供參考，可能隨監測及管制標準修正而有所差異。
- 八、 本指引並不代表本署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。
- 九、 整治技術之選用，因涉及有效與否之主觀認定，以及技術廠商之專利或專業行為，非環保機關之強制性要求或規定之範圍。

1.3 指引內容摘要

第一章 前言

本章說明本指引之撰寫目的、適用範圍及限制，以及指引內容，

使讀者可快速地瞭解本指引的撰寫目的及使用方法。對於整治技術各項資訊的限制已有所知悉者，均能夠透過本指引彙整之技術再行深入研究；若為初學者，則可以快速進入整治技術全面性瞭解及掌握重點。本指引除了提供使用者閱讀前的準備工作外，更重要的是可減少技術內容之誤解與誤用。

第二章 整治技術應用現況與相關法令

本章首先針對國外目前相關污染場址管理制度現況加以說明，其次介紹國外整治技術發展現況，引導使用者將類似的概念應用於國內的相關場址。然而，各種技術均有其限制與適用範圍，對於特定場址，不同類別之技術的可行性與適用性亦有差異。因此說明國內污染場址整治期間相關環保法令，可建立讀者瞭解現污染場址管理制度。

第三章 污染場址整治技術選取策略

然而，各種技術均有其限制與適用範圍，對於特定場址，不同類別之技術的可行性與適用性亦有差異。因此說明污染場址「整治技術選取策略」，建立讀者對於污染場址於整治技術選取時的主要觀念。旨在提供使用者一項原則性邏輯與思考流程，藉以作更精確的決策。最後，輔以國內現況之說明與比較，引導使用者將類似的概念應用於國內的相關場址。

第四章 工地安全衛生與緊急應變

為了強調工地安全衛生管理的重要性，特獨立一章節以說明執行污染改善工作時應注意之安全與衛生管理策略。

附件一 現地整治技術

彙整 DNAPL 污染場址於現地進行污染改善之整治技術，共 14 種。個別說明說明其原理、適用條件、優缺點、整治系統單元、系統設計操作要點、二次污染防治與安全衛生管理、整治系統監測、成本及

期程評估等。

附件二 離地整治技術

彙整 DNAPL 污染場址於離地進行污染改善之整治技術，共 4 種離地的整治技術，個別說明其原理、適用條件、優缺點、整治系統單元、系統設計操作要點、二次污染防治與安全衛生管理、整治系統監測、成本及期程評估等。

1.4 專有名詞中英文對照表

土壤及地下水污染整治涉及不同工程技術領域，包括環境工程、水文地質、化學、生物、機械、電機等，本章蒐集了本指引各項整治技術之常見專有名詞，每一名詞後有中文名稱、英文名稱及中文釋義。專有名詞與法規相關者，則依法規之定義，相關名詞並參考本署「中英文辭彙對照」、「環保統計名詞及定義」與相關整治技術指引之名詞解釋，以實用與淺顯易懂的角度說明，使讀者一目瞭然，容易瞭解詞義，彙整如表 1.4-1。

表 1.4-1 專有名詞中英文對照表

英文	中文
Acid front	酸鋒
Air Sparging (AS)	空氣注入法
Anaerobic bioremediation	厭氧生物整治法
Bioremediation	生物整治法
Brownfield	褐地
Cluster	井叢
Containment	圍堵
Cosolvent	共溶劑
Critical micelle concentration (CMC)	臨界微胞濃度
Critical Micelle Concentration(CMC)	臨界微胞濃度
Dense Non-Aqueous Phase Liquid(DNAPL)	重質非水相液體
Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs)	比水重非水相液體
Destruction and removal efficiency (DRE)	破壞去除效率
Electrokinetics	電動力法
Excavation and containment	開挖與圍堵
Ex-situ soil bioremediation	離地土壤生物整治

英文	中文
Groundwater circulation well (GCW)	地下水循環井
Incineration	焚化
Injection well	注入井
In-situ bioremediation	現地生物整治法
In-situ chemical oxidation (ISCO)	現地氧化法
In-situ chemical reduction (ISCR)	現地還原法
Landfarming	土耕法
Lateral groundwater	側向地下水
Long term monitoring plan	長期監測計畫
Lower shallow aquifer (LSA)	下淺水層
Monitored Natural Attenuation(MNA)	監測式自然衰減法
Nanotechnology	奈米科技處理
Permeable Reactive Barriers (PRB)	滲透性反應牆法
Phytoextraction	植物吸收
Phytoremediation	植物整治法
Phytostabilization	植物穩定
Pump and Treat (P&T)	地下水抽除與處理
Rebound	回升
Soil Vapor Extraction (SVE)	土壤氣體抽取法
Soil Washing	土壤清洗法
Surfactant/ cosolvent flushing	介面活性劑/共溶劑沖洗法
Thermal desorption	加熱脫附處理法
Thermal treatment	熱處理
Transmissivity	流通係數
Treatment train	整治列車
Upper shallow aquifer (USA)	上淺水層

第二章 整治技術應用現況與相關法令

2.1 整治技術發展應用現況

美國環保署 2007 年針對超級基金 DNAPL 整治場址主要整治技術選用情形，彙整如表 2.1-1。主要選用的技術，包括：土壤間隙蒸氣抽除法、焚化法、加熱脫附法、生物整治法、地下水注氣法、透水性反應牆與植物整治法等。本指引彙整國內外曾使用於 DNAPL 污染場址之 4 項離地、11 項現地與 3 項新穎整治技術予以說明。

除了傳統整治技術單一應用之外，整治技術組合係對於受污染場址採取 2 種或 2 種以上污染整治系統。在較困難與複雜的整治場址中，經常會同時採用或依序使用多種污染整治技術，以有效地縮短整治期程，和(或)節省整治經費，以達成最終的整治目標。整治技術組合概念的導入，可大幅提升整治技術之處理效率，而在規劃篩選受污染場址的整治技術上，需充分考量場址受污染之形態與範圍、執行總經費、設定之整治期程、場址條件(營運操作及環境空間限制)等因素，以研擬出最適當的整治技術組合。

例如，對於 DNAPL 的污染，可從污染土壤的開挖與整治開始，而後進行地下水的復育。而對於地下水的污染，則可先採主動式現地整治技術，如現地化學氧化法；再接著執行被動式的地下水污染整治技術，如監測式自然衰減法(MNA)。如此的整治技術組合，才能有效且經濟地完成 DNAPL 的整治。以下說明整治技術組合之考量因子，並列舉可能之 DNAPL 整治技術組合。

一、 整治技術組合之考量因子

(一)場址受污染形態與範圍

首先用所篩選的調查工具，依照受污染場址的環境屬性及其水文特性，進行檢測或監測；再依檢測結果，評估該受污染場址之污染物形態與污染範圍。在篩選適切的整治技術時，針對該場址高濃度污染區域，應採取直接快速的降低方式；而低濃度污染區

域則採取監測式自然衰減法、地下水抽出處理法或生物整治等耗時較長的整治技術。若於檢測時發現，場址內存在著純相的DNAPL，則建議採取直接回收處理，或化學處理劑注入等整治技術。

(二) 整治期程及執行預算

由於整治時程與經費往往互為反比，而環保主管機關又希望污染行為人或關係人能儘速完成受污染場址的整治整治作業，因此計畫執行者在考量經費與時程兩項因素下，大多會從可行的整治技術中遴選幾項技術，規劃出既適切又經濟的整治技術組合，以達成整治目標。

表 2.1-1 美國超級基金 DNAPL 污染場址主要整治技術選用情形

整治技術 \ 污染物種類		揮發性鹵化物	其他半揮發性鹵化物	多環芳香族碳氫化合物(PAH)	多氯聯苯(PCB)
土壤 (污染源) 整治	土壤間隙蒸氣抽除法	217	33	15	1
	焚化法	52	34	27	36
	加熱脫附法	33	12	21	16
	固化穩定化法	20	7	17	35
	生物整治法	22	17	37	2
	電分離法	18	8	9	1
	化學處理法	12	4	1	4
	沖洗法	11	3	3	0
	現地熱處理	8	3	5	0
	機械式土壤氧化法	7	1	0	0
	植物整治法	4	1	1	0
	熔融法	3	1	0	2
	溶劑萃取法	2	0	2	2
	多相萃取法	1	0	0	0
	中和法	0	0	2	0
	物理分離法	0	0	4	4
	土壤清洗法	0	0	1	1
	合計	410	124	145	104
地下水 整治	地下水注氣法	53	5	5	7
	生物整治法	40	7	20	12
	化學處理法	25	9	3	3
	多相萃取法	16	7	6	0
	透水性反應牆	11	0	1	0
	植物整治法	11	3	1	2
	合計	156	31	36	24

註：1982 年至 2005 年間美國超級基金污染場址之資料。

(三)場址條件

在受污染場址之整治技術規劃上，除了須考量上述因素外，亦需考量受污染場址是否仍在營運？且在受污染之區塊上，是否有空間使用上的限制？若受污染的場址仍在營運，且受污染的區塊位於大型建物之下，將無法以直接開挖來移除污染物，或使用注入處理之整治技術，則需因應現況而選取其他適用之整治技術組合，在不影響場址內既有營運操作的條件下，進行污染整治。

整治計畫執行期間對於整治工作需有全面且主動的管理策略，包括事前的規劃研擬不同整治技術的組合與序列，以及整治過程中應於何時轉換到另一個整治技術等等。其中為研判整治場址各整治技術轉換的時間點，可考量使用可攜帶型之現場快速篩選分析工具，並搭配定期的監測資料，以為綜合評估。

二、可能之 DNAPL 整治技術組合

經彙整有關美國超級基金之 DNAPL 污染場址曾使用之整治技術組合如表 2.1-2，可做為未來規劃整治技術組合時之參考。

表 2.1-2 美國超級基金 DNAPL 污染場址之整治技術組合

場址名稱	整治技術	處理量	主要污染物
Smith's Farm	1.離地熱脫附	污染土壤約 16,000 m ³	多氯聯苯(PCB)、鉛、PAH
	2.化學處理法(脫氯)		
FCX-Statesville (OU2)	1.離地熱脫附	污染土壤約 15,000 m ³	五氯酚(PCP)等
	2.化學處理法(脫氯)		
FCX-Statesville (OU3)	1.地下水注氣法	整治範圍約 30,000 m ³	1,2-二氯乙烷、氯乙烯、三氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、四氯乙烯、1,1-二氯乙烯
	2.土壤間隙蒸氣抽除法		
Arkwood Inc.	1.物理分離	污染土壤約 6,700 m ³	五氯酚
	2.離場焚化		
Jadco-Hughes Facility	1.現地界面活性劑沖洗法	整治範圍約 5,600 m ³	氯乙烯、三氯乙烯、四氯化碳、氯仿、四氯乙烯等
	2.土壤間隙蒸氣抽除法		
Cabot/Koppers - Koppers OU	1.離地土壤清洗法	污染土壤約 4,900 m ³	五氯酚

在國外，健康風險評估為土壤及地下水污染整治計畫中不可或缺的步驟。在美國的超級基金整治計畫中，健康風險評估更是決定污染是否該進行整治、整治到何種程度、對何種環境介質進行整治、場址整治後可否作為住宅、商業或工業區用途，以及污染者應該承擔何種責任等之重要依據。歐美國家目前的許多環保法規也逐漸以健康風險評估來擬定整治的目標或標準。

依據國外之經驗與考量 DNAPL 污染整治的困難性，環保機關於污染場址進行整治前，亦應考量採用以健康風險評估訂定適合特定場址整治之整治目標或標準。當污染去除量達某一程度時，殘餘污染量對以後土地利用、居民健康和其他生態不再產生危害時，污染整治應可視為階段性完成。

此外，國外亦在推行將健康風險評估與褐地(Brownfield)再開發的整合，除了可節省整治成本外，更可進一步促成社區的重新活絡、土地價值提昇、促進區域的經濟發展等。在許多歐洲國家的巨型場址(megasite)整治案例中，利用健康風險評估作為褐地再開發的整治工作的評估與決策工具，結合風險管理的概念，採用長期的整治策略，並配合有效的管理，來進行大區域的整治，除可大幅降低整治成本外，且得以維護該區域的經濟價值。

應用健康風險評估於土壤與地下水污染整治工作中，在歐美國家已行之有年，並已與環境策略、土地利用與風險管理等結合，成為一完整的土地永續利用，以及環境管理系統的工作架構，而在我國土污法中，亦已將健康風險評估概念與工作準則導入，且土污法修訂方向將適度開放整治計畫提出者，得以環境與健康風險評估結果，提出整治目標，以及整治計畫提出者可依未來使用目的決定整治目標；整治場址之土地因配合土地開發而為利用者，其土壤、地下水污染整治基準或目標，得由中央主管機關會商有關機關專案核定。環保機關未來更大挑戰，將會是整治計畫提出者依據土污法提出以健康風險評估所建立之整治標準或目標，並與土地利用開發、整體環境管理及風險管理整合之整治計畫之審查與後續追蹤查核的工作。

2.2 國內污染場址整治期間相關環保法令

依土污法相關規定，並未針對執行土壤及地下水污染場址控制計畫或整治計畫時，現場處理設備是否需申請設置及操作許可加以規範。本節參考本署曾於民國 92 年 8 月環保署環署土字第 0920057616 號函，說明應注意的空氣及水污染防治環保相關法規，彙整如下：

一、 空氣污染防制

- (一)若處理製程(或設備)符合本署公告之「第一批至第七批公私場所應申請設置變更及操作許可」或「第八批公私場所應申請設置、變更及操作許可之固定污染源者」，則應依「空氣污染防制法」(以下簡稱空污法)第 24 條規定，以及「固定污染源設置與操作許可證管理辦法」，檢具相關證明文件，向當地環保主管機關申請核發固定污染源設置及操作許可證。
- (二)當土壤開挖、暫存之行為符合環署空字第 940073671 號函之解釋：「…本署公告第五批各行業/堆置場係指同一公私場所，其地平面土粉粒狀物堆置場(如礦物、土石等)之總設計或實際堆置體積在 3,000 千立方公尺以上或堆置量在 6 萬公噸/年以上者，但屬室內儲放場所或位於營建工地內者不在此限」，應檢具相關證明文件，向當地環保主管機關申請核發固定污染源設置及操作許可證。
- (三)依空污法第 31 條規定，在各級空氣污染防制區內不得有造成逸散空氣污染物之行為，有關場址控制計畫或整治計畫開挖之土方堆置等行為，應設置相關之污染防制措施，以避免產生逸散污染。
- (四)若污染場址之土壤開挖作業，經環保機關認定屬空污法第 16 條所指之「營建工程」時，即屬建築法規規定之開挖整地之行為，應依空污法第 16 條規定繳交固定污染防制費「空氣污染防制費」。

二、 水污染防治

- (一)污染場址若屬水污染防治法(以下簡稱水污法)列管事業定義者，其於廠區內進行土壤及地下水污染場址控制計畫或整治計畫，並將所產生之廢(污)水納入該事業原有之廢(污)處理設施時，應依該法相

關規定辦理。如於水污染防治措施變更前，應先檢具水污染防治措施計畫，經直轄市或縣市主管機關審查核准；排放廢污水於地面水體者，應向直轄市或縣市主管機關申請，經審查登記，發給排放許可證後，始得排放廢污水並應符合放流水標準等規定。

(二)若污染場址控制或整治計畫之土石堆置，符合本署民國 97 年 5 月 23 日公告「應先檢具水污染防治措施計畫之事業種類、範圍及規模」規定，包括設計或實際最大廢水產生量每日 50 立方公尺(公噸/日)以上者，以及土石方堆(棄)置場，堆置之礦物、砂、礫石、土、石、石材、土石方之總設計或實際堆置體積達 3,000 立方公尺以上，或作業環境面積達 1 公頃以上者，應檢具「水污染防治措施計畫」請主管機關核准並據以實施。

土壤離場廢棄物清運處理，茲根據環署土字第 1030052280 號文說明，本指引摘錄重點說明如下。

- 一、 民國 103 年 1 月 29 日之「指定廢棄物清理法第二條第一項第二款之事業」修正公告後，自 103 年 7 月 1 日起新增實施第三十四項「採土壤離場處理之土壤或地下水污染場址」為指定事業，並於同年 4 月 11 日依環署廢字第 1030029853 號函修正污染土壤清運之相關廢棄物代碼。
- 二、 於公告緩衝期間(民國 103 年 7 月 1 日至隔年 7 月 1 日止)，離場之廢棄物運送至不同機構處理方式說明如下。

(一)離場至公民營處理機構者

委託處理之公民營處理機構應依「公民營廢棄物清除處理機構許可管理辦法」規定，向所在地環保主管機關申請或變更取得污染土壤類代碼(S)許可證，104 年 6 月 30 日前得以類似之代碼(如 C、D 代碼)收受處理污染土壤。

(二)離場至再利用機構

委託處理之再利用機構應依「行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法」規定，向環境部署申請取得污染土壤類代碼之再利用許可，104 年 6 月 30 日前得以與污染土壤性質類似之廢棄

物代碼收受污染土壤進行再利用。

三、 緩衝期過後，即 104 年 7 月 1 日起各處理機構皆應以污染土壤類代碼收受，不得再以廢棄物代碼收受處理或再利用。

第三章 整治技術選取策略

NAPL 污染整治具有相當大的挑戰，因其污染範圍調查不易，且整治使用藥劑於地下環境的傳輸及整治目的皆不相同(NAPL physical/ chemical characteristics, 2005 年台美研習會)。因此以下說明之整治技術選取策略僅供使用者參考，應依污染範圍調查結果及整治目的不同選取最適當技術。

3.1 技術選取策略

本指引之 DNAPL 污染整治技術選取策略，主要參考美國國家應變計畫(National Contingency Plan, NCP)所提供的應變與整治程序的基本架構，以及美國空軍針對其轄下超過 1,500 個整治場址所發展之整治策略，進一步依據現有 DNAPL 整治技術及現行土污法之規定，選取一個具經濟、可行之整治技術，並期在合理的期程內完成整治，達到整治目標。NAPL 在選擇一個合適的整治技術組合時，需結合技術上的判斷、成本分析、責任歸屬，並符合法規的要求，才可作成最後整治技術選取之決定。DNAPL 污染整治技術選取策略流程，如圖 3.1-1 所示。

一、 建立場址概念模型與確認污染暴露途徑

選取整治技術時，首先應建立正確的污染場址概念模型，續應確認 DNAPL 之污染源是否存在，以決定污染整治的優先順序，如確認污染源存在時，應先將污染源移除，再進行地下水污染帶的整治工作。而在污染帶整治工作方面，則應考量暴露途徑是否存在，例如在調查時發現 DNAPL 污染物且超過管制標準，卻無法確認污染來源或污染來源可能來自於場址外時，則宜先評估污染帶是否會影響潛在的受體(如自來水抽水井、民井、生產井等)，並考量進行土壤及地下水的細密調查或執行必要的應變措施，以進一步確認污染源與避免潛在受體受到影響。如貿然進行污染帶整治工作，僅是治標不治本的工作，常會造成整治工作的失敗與整治費用的浪費。

二、 污染源整治技術選取策略

(一) 污染源移除

經調查發現污染源存在時，應先考量移除污染源，如移除、更換儲槽與管線或高污染濃度土壤挖除等，以避免 DNAPL 污染持續洩漏或溶解於地下水中。

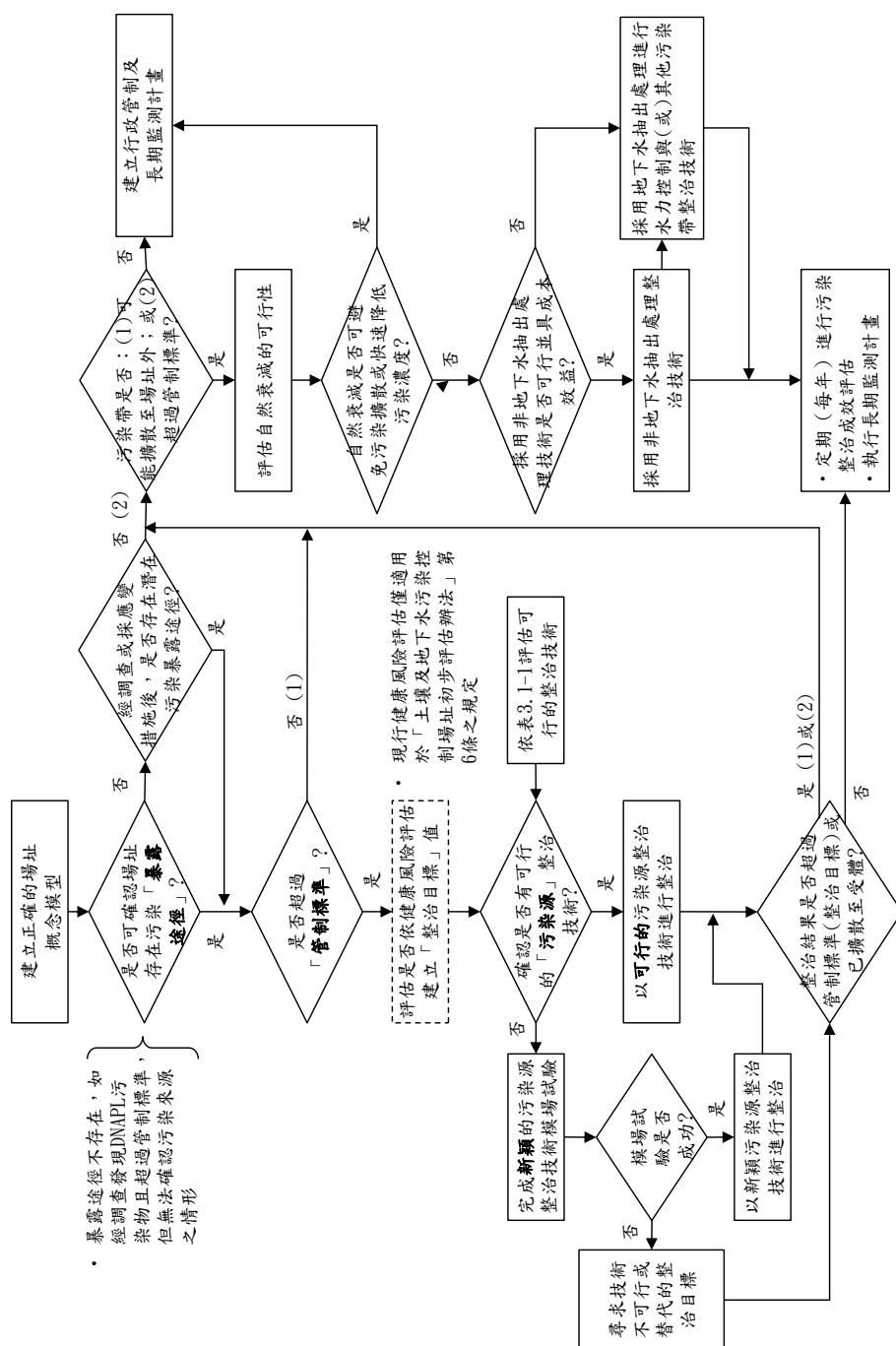


圖 3.1-1DNAPL 整治技術及策略選取流程圖

註：參考AFCEE「Remediation of Chlorinated Solvent Contamination on Industrial and Airfield Sites」（2000）修訂。

(二)評估整治難易度與人體健康風險評估

當污染源移除後，在進行高污染濃度地下水污染帶之整治技術選取前，應先了解 DNAPL 污染物與場址地下水水文地質之特性，以及比較地下水污染管制標準與污染濃度，以評估污染場址整治之相對難易度，請參考表 3.1-1，並決定是否進行人體健康風險評估，建立「整治目標」。

表 3.1-1 整治相對難易度(依污染物特性與含水層特性)

地下水水文地質特性	污染物化學特性					
	可移動溶解相 (具生物分解與揮發性)	可移動溶解相	強吸附溶解相 (具生物分解與揮發性)	強吸附溶解相	LNAPL 純相	DNAPL 純相
均質單一含水層	1 ^{a/}	1-2	2	2-3	2-3	3
均質多含水層	1	1-2	2	2-3	2-3	3
不均質單一含水層	2	2	3	3	3	4
不均質多含水層	2	2	3	3	3	4

註：

1. a/表整治相對難易度，1 為最容易、4 為最難。

2. 資料來源：AFCCE, Remediation of Chlorinated Solvent Contamination on Industrial and Airfield Sites, 2000.

(三)選用可行整治技術進行整治

經評估場址已有可供選擇之可行整治技術時，應再針對污染範圍進行詳細的調查，以確認地下水污染帶的範圍，以作為後續整治技術規劃、設計之依據，避免污染的移動與擴散。

(四)選用新穎整治技術進行整治

經評估污染物特性或場址水文地質條件較差，整治難易度較高或傳統整治技術之整治成本較高時，整治計畫執行者可能考量選用新穎整治技術進行整治。由於新穎整治技術之應用實績較少，計畫執行者應於場址內進行模場試驗，以評估新穎整治技術是否適用於場址，以免正式整治時浪費時間與成本，又達不到預期的整治成效。

(五)技術不可行的替代整治方案

對於整治難度高，現行整治技術無法經濟、有效地完成整治的 DNAPL 污染場址，則應考量採取替代的整治方案或訂定整治目標。例如，不設定整治標準，採以地下水抽出處理系統設置，以防止污染擴散為整治目標。

(六)建立整治成效評估與長期監測計畫

場址進行整治後，應建立整治成效評估與長期監測計畫。因個別整治技術均有其限制，且因 DNAPL 污染物與場址水文地質特性之關係，整治成效之評估非常重要。當發現整治成效未如預期或污染有擴散之虞時，則應考量同時或分階段採用其他的整治技術，亦即評估採用整治技術組合(treatment train)。整治結果未超過整治標準或整治目標時，則應再持續監測 1 年，以了解污染濃度是否有回升(rebound)的情形。

本指引參考美國聯邦整治技術圓桌論壇(Federal Remediation Technologies Roundtable, FRTR)之整治技術篩選距陣，分別就技術發展現況、操作維護、設置成本、系統穩定性與可維護性、整治費用、整治期程，以及對揮發性鹵化物與半揮發性鹵化物之整治成效等，建立整治技術之篩選距陣如表 3.1-2，評估結果代號說明如表 3.1-3。

表 3.1-2DNAPL 整治技術之篩選矩陣

評估結果代號： ●— 大於平均標準 ○— 平均標準 ○— 低於平均標準 ◆— 處理成效與污染物特性及技術應用高度相關 • 其定義請參考表 3.1-3	技術發展現況	相對成本與處理成效					揮發性鹵化物	半揮發性鹵化物
		操作維護	設置成本	系統穩定性	與可維護性	整治費用	整治期程	
離地整治技術								
土壤清洗法	●	○	○	●	○	●	○	○
離地土壤生物整治法								
土耕法	●	●	●	●	●	○	○	○
堆肥法	●	●	●	●	●	○	○	◆
生物堆法	●	●	●	●	●	○	○	◆
泥漿相處理	●	○	○	○	○	○	●	◆
加熱脫附處理法	●	○	○	○	○	●	●	●
焚化法	●	○	○	○	○	●	●	●
電動力整治技術	○	○	○	○	●	○	○	◆
植物整治法	○	●	●	○	●	○	○	◆
奈米科技處理法	○	○	○	○	○	○	○	◆
現地整治技術								
土壤間隙蒸氣抽除法	●	○	○	●	●	○	●	○
地下水注氣法	●	●	●	●	●	●	○	○
現地生物整治法	●	○	○	○	●	◆	◆	◆
熱處理法	●	○	○	○	○	●	●	●
監測式自然衰減法	●	○	○	○	●	◆	○	○
地下水抽除法	●	○	○	●	○	○	○	◆
地下水循環井	●	○	○	○	○	○	○	○
現地化學氧化	●	○	○	○	○	●	○	○
透水性反應牆	●	○	○	●	○	○	●	●
界面活性劑/共溶劑沖洗法	●	○	○	○	○	●	○	○
開挖及圍堵	●	○	○	●	●	○	●	●

Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide , Version 4.0

表 3.1-3DNAPL 整治技術篩選矩陣之評估結果代號定義

評估因子	●大於平均標準	●平均標準	○低於平均標準
技術發展現況 (可用技術之發展程度)	曾在許多場址中使用,技術具豐富文獻資料及充分瞭解。	曾用於全場整治,惟尚待進一步的改良善與驗證。	尚在開發階段度,未有實際場址整治案例。
操作維護(操作維護密集性)	低操作維護頻率。	平均操作維護頻率。	高操作維護頻率。
設置成本(成本密集性)	低投資成本。	平均投資成本。	高投資成本。
系統穩定性與可維護性 (相較其他有效的技術,證明其系統穩定性與可維護性在可期待範圍)。	高穩定性與低維護。	平均穩定性與平均標準之維護。	低穩定性與高維護性。
相對整治費用 (包括主要處理程序之設計、設置、操作維護成本與前處理與最終處置等費用)	相較於其他整治整治技術,整治費用較低	相較於其他整治整治技術,整治費用一般標準	相較於其他整治整治技術,整治費用較高
整治期程 (技術用於標準場址所需時間)	現地土壤	少於 1 年	1-3 年
	離地土壤	少於 0.5 年	0.5-1 年
	地下水	少於 3 年	3-10 年
揮發性鹵化物 半揮發性鹵化物	模場或全場整治證實有效。	模場或全場整治顯示有效資料有限。	模場或全場整治未證實有效。

資料來源：FRTR (2002), Remediation technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0

3.2 案例解析

一、國內案例

(一)台灣北部某土壤及地下水污染場址

該場址污染之基本資料及整治工法彙整如表 3.2-1。案例係位於台灣北部某工業區內，被鄰近工廠鐵路、農田及民宅所包圍。該場址因過去製程產生的含四氯乙烯廢水處理不當，及四氯乙烯使用不慎造成洩漏，導致土壤及部分區域地下水污染。

依據地質鑽探資料顯示，該場址位於由河川沉積物形成之土層，由地表至深約 150 公尺由砂層及黏土層交錯而成，包含多層含水層，經調查確認為第一含水層遭四氯乙烯污染，其他深層含水層未受到污染。地下水調查發現，第一含水層之地下水流流向為東南往西或西北向，地下水位在地面下約 4 至 6 公尺之砂泥及黏土層中；流通係數(transmissivity)為 1,700 m²/日，土壤之滲透係數為 66 公尺/日。

本案例針對場址污染源處之污染土壤直接採用土壤開挖清

理方式，地下水污染帶採抽出處理方式，而場址內次要污染則採持續監測及自然降解。場址內地下水清理是由土壤氣體抽取、地下水抽氣、地下水抽出處理所組合而成，其中地下水抽除系統主要是以抽出處理為主，抽氣及注氣為輔；在土壤污染源周邊區域及地下水流向下游，場址內佈置數口抽水井，以阻絕含四氯乙烯污染物擴散至場址外下游地區，並配合曝氣系統進行後段廢水處理，以收受由地下水抽水井抽出之含四氯乙烯地下水。廢水處理後回收，用於場址內冷卻及消防用水使用，部分則放流。地下水清理期程為民國 90 年至 95 年，共計自地下水中清出含四氯乙烯污染物約 610 公斤。依據地下水質監測資料結果顯示，地下水中污染濃度皆已低於清理目標值(50 µg/L)。

表 3.2-1 台灣北部某土壤及地下水污染場址資訊

項目	說明
場址名稱	台灣北部某土壤及地下水污染場址
關切污染物	土壤：四氯乙烯 地下水：四氯乙烯
整治工法	土壤：開挖清理 地下水：土壤氣體抽取、地下水抽氣、地下水抽出處理
整治期程	民國 90 年至 95 年

(二)台灣中部某污染場址

本案例場址位於台灣中部某一石化儲槽區，該場址污染之基本資料及整治工法彙整如表 3.2-2。該場址自民國 78 年動工興建後即作為化學品倉儲作業用途，儲槽總容積為 6 萬公秉，曾儲存過數種化學品，其中屬地下水污染管制標準所管制之項目有甲苯、氯乙烯及 1,2-二氯乙烷。經調查發現場址之地下水受到揮發性有機物污染，且污染濃度超過地下水污染管制標準數百倍或數千倍以上，污染物包括甲苯（最高初始濃度 240 mg/L）、氯乙烯（最高初始濃度 22.2 mg/L）及 1,2-二氯乙烷（最高初始濃度 1,980 mg/L）等。

該場址地表下之地層可分為 RC 鋪面（10-20 公分）、回填層（平均厚度約 1.0 公尺）、砂土質細砂或中細砂層（平均厚度約 9.0 公尺）、及砂土質細砂層或中細砂偶夾砂質砂土及砂土質黏土薄層（厚度超過 20 公尺）。該場址之平均地下水位近海平面，因受潮汐影響地下水流向及流速不定。

本案例採用化學氧化法、土壤間隙蒸氣抽取與地下水注氣法進行整治，其中化學氧化法係運用於高污染區域，藉由監測井與簡易注入井直接注入調配化學氧化劑（Fenton 與高錳酸鉀），利用污染物與化學藥劑直接接觸反應，達到去除效果。整治期程自民國 93 年 9 月至 94 年 12 月，累計添加藥劑約 450 公噸稀釋化學藥劑。依據改善作業後之最近一次地下水調查結果，該場址之地下水污染物濃度已低於管制標準，並經地方環保局審查解除本場址之管制。

表 3.2-2 台灣中部某污染場址資訊

項目	說明
場址名稱	台灣中部某污染場址
關切污染物	土壤：無 地下水：甲苯（最高初始濃度 240 mg/L）、氯乙烯（最高初始濃度 22.2 mg/L）及 1,2-二氯乙烷（最高初始濃度 1,980 mg/L）
整治工法	地下水：化學氧化法、土壤間隙蒸氣抽取與地下水注氣法
整治期程	民國 93 年 9 月至 94 年 12 月

(三)台灣南部某污染場址

本案例場址位於台灣南部，該場址污染之基本資料及整治工法彙整如表 3.2-3。於民國 90 年發現其地下水遭三氯乙烯污染，濃度達 0.2325mg/L，超過地下水污染管制標準。該場址於民國 91 年被公告為地下水污染場址，其附近之土地利用多為農田，而附近居民設置多口地下水井抽取地下水進行灌溉。

由土壤連續取樣發現，該場址之地質主要由砂土、中粗砂、粗砂夾礫石、砂土夾礫石或黏土質砂土等所組成。地表以下 1~2 公尺左右是為水泥、道路鋪面及回填土石等；其下為黃棕色黏土

質粉土、粉土質黏土及粉土質細砂偶夾礫石等不均勻夾層，深度大約至地下 4~5 公尺處；從地下 4~5 公尺開始，則出現厚層之黑色中細砂，其下則普遍分布透水性良好之黑色中粗砂夾礫石或黑色礫石層。地下水水位多出現於地表下 6~7 公尺左右。依據歷年調查資料顯示，該場址之地下水位及流向乃依循當地地形起伏而變化，故地下水流向與地形走勢幾近一致，由西側山坡地往東側農地流動。

依據本案例污染調查結果，並考量場址之水文地質條件、污染物特性及濃度，選擇以低濃度之化學氧化法作為地下水整治方法，因高錳酸鉀氧化分解三氯乙烯之效率較高、性質較穩定且易於儲存及運送，因此選用高錳酸鉀作為氧化劑（以 1,000 mg/L 為主）。該場址於 93 年 3 月開始正式執行污染改善氧化劑注入之工作，至 94 年 3 月完成整治並停止加藥工作，累計添加約 3,680 公噸之高錳酸鉀，由驗證及改善複驗結果顯示，63 口監測井中之 61 口井三氯乙烯濃度均低於地下水污染管制標準 50 µg/L，另 2 口井三氯乙烯濃度則介於 50~100 µg/L 之間；此外，三氯乙烯之污染範圍亦顯著縮小。

表 3.2-3 台灣南部某污染場址資訊

項目	說明
場址名稱	台灣南部某污染場址
關切污染物	土壤：無 地下水：三氯乙烯
整治工法	地下水：化學氧化法
整治期程	民國 93 年 3 月至 94 年 3 月

二、 國外案例

(一) 比利時瓦隆區跨國製藥廠污染場址

本案例場址位於比利時瓦隆(Walloon)區，該場址污染之基本資料及整治工法彙整如表 3.2-4。場址原為某跨國公司製藥廠，經調查發現，場址內主要有 3 個地區受到污染，第 1、2 區的地下水污染物包括：氯仿(最高濃度 2 g/L)、BETX (最高濃度 5 mg/L) 與甲基異丁酮(最高濃度 1.7 g/L)等，第 3 區主要污染物包括：四氯乙烯、三氯乙烯及其生物降解產物。

在地形上，本案例場址位於山谷地的最低點，並靠近一條小河，場址一邊緊鄰住宅區。場址地質屬沖積層，地面下 0~5 公尺主要由黏土質砂與粗砂所構成，其間又夾雜有礫石，此地層簡稱為上淺水層(upper shallow aquifer, USA)；上淺水層之下 2 公尺為砂層(tertiary sand)，為側向地下水(lateral groundwater)主要流動的含水層，此地層簡稱為下淺水層(lower shallow aquifer, LSA)，其地下水流速約 35 公尺／年，其下為砂質黏土層。高污染濃度區主要位於上淺水層，但污染已透過下淺水層擴散至場址外。

在整治初期，場址首先移除 15 座地下儲槽及其周圍土壤；之後，進行地下水注氣法模場試驗。模場試驗選擇在場址中度污染的區域進行，除利用既有井外，並設置 9 口新井。為節省成本，以場址 1 口既有井(井篩開在地面下 9~11.5 公尺間)作為注氣井，9 口新井分成 3 組井叢(cluster)，其中 6 口設置在含水層，3 口設置在透氣層，各井之開篩深度及配置如表 3.2-5 與圖 3.2-1 所示。監測井配置的方式，係考量能同時觀測到飽和層污染物生物降解的情形，以及不同污染物因注氣產生揮發作用而被去除的效率。

表 3.2-4 比利時瓦隆區跨國製藥廠污染場址資訊

項目	說明
場址名稱	比利時瓦隆區跨國製藥廠污染場址
關切污染物	土壤：無 地下水：氯仿(最高濃度 2 g/L)、BETX (最高濃度 5 mg/L)與甲基異丁酮(最高濃度 1.7 g/L)、四氯乙烯、三氯乙烯
整治工法	地下水：空氣注入法

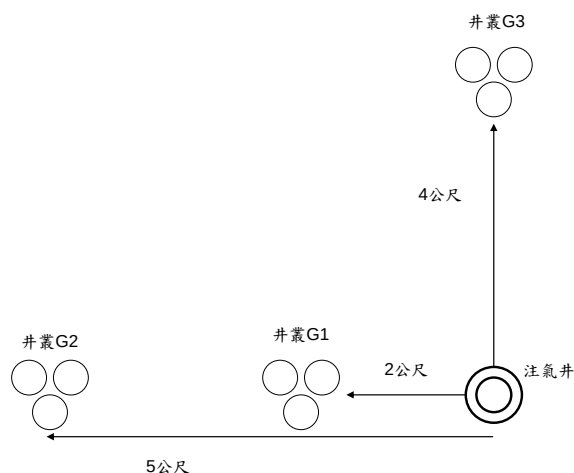
該模場試驗主要在建立相關場址資訊，包括：注氣造成污染物側向移動的情形；空氣注入作用造成污染物垂直方向移動的情形；不同污染物之生物降解情形等。正式模場試驗前，場址即先進行監測，以建立基線資料。模場試驗於 2001 年 6 月 1 日開始注氣，注氣壓力維持在 1 bar (約等於 1 大氣壓)，每隔 12 小時注氣 1 小時，每日注氣 2 小時。12 日後，由土壤氣體檢測結果發現，含氯有機物明顯地被注入空氣帶來。因此，同年 6 月 13 日，注氣頻率改為每日 1 小時，並持續注氣 2 週。模場試驗約進行 1 個月，注氣停止後，場址並持續進行監測 2 週，以評估整治成效與後續場址生物降解的情形。

在 1 個月的模場試驗期間，土壤氣體檢測結果顯示，本法因注入空氣與揮發作用，使含氯有機物明顯去除。污染物生物降解方面，在好氧狀況下，有利於場址內甲基異丁酮與氯乙烯的生物降解，但對於四氯乙烯與三氯乙烯則不具成效。模場試驗結果顯示，注氣井井篩設置在地下水水位面下 3 至 5 公尺間，注氣壓力為 1 bar，注氣影響半徑最小約 5 公尺。此一影響半徑可充分提供下淺水層、上淺水層與未飽和層足夠的氧氣，並使地下水與注入氣體充分混合，以去除地下水中之四氯乙烯與三氯乙烯，以及促進甲基異丁酮與氯乙烯的生物降解。依據模場試驗結果，該場址於 2002 年 7 月開始設置 165 口各類型的井，並於 2003 年 1 月開始進行全場的整治工作。

表 3.2-5 比利時某污染場址地下水注氣法模場試驗監測井特性

井叢	與注氣井間之距離	井號	開篩深度 (地面下，公尺)	含水層類型
G1	2 公尺	G1.0	3.5~4.5	非飽和層
		G1.1	5.5~6.5	上淺水層
		G1.2	8.0~9.0	下淺水層
G2	5 公尺	G2.0	3.5~4.5	非飽和層
		G2.1	5.5~6.5	上淺水層
		G2.2	8.0~9.0	下淺水層
G3	4 公尺	G3.1	3.5~4.5	非飽和層
		G3.2	5.5~6.5	上淺水層
		G3.3	8.0~9.0	下淺水層
既有井 PZV11	—	PZV11	9.0~11.5	

資料來源：Gevaerts, W. et. A Multiphase, Multicomponent contaminations in a Heterogeneous Aquifer: a Simple Solution?, ConSoil 2003 Proceedings, 12~16 May 2003.



資料來源：Gevaerts, W. et. A Multiphase, Multicomponent contaminations in a Heterogeneous Aquifer: a Simple Solution? ConSoil 2003 Proceedings, 12~16 May 2003.

圖 3.2-1 比利時某污染場址地下水注氣法模場試驗監測井設置圖

(二) 美國北卡羅萊納州海軍陸戰隊空軍基地三氯乙烯污染場址

該場址位於美國北卡羅萊納州 Onslow 郡，該場址污染之基本資料及整治工法彙整如表 3.2-6。屬於美國海軍陸戰隊 Camp Lejeune 基地之整治場址(編號 OU20 之 Site 86)之一部分。Site 86 場址之地質，在地面下 0~10.7 公尺為由矽質黏土與細砂所構成，為相對低滲透性地質，之下至地面下約 27.4 公尺處為矽土質砂與礫石所構成之含水層。由微水試驗得知，上、下層地質之平均水力傳導係數(K)分別為 4.1×10^{-4} 與 1.2×10^{-3} cm/sec。

1990 年，場址調查工作主要集中在油品類儲槽區，調查發現，場址內油品污染情形非常嚴重。2002 年後續調查發現有三氯乙烯污染，污染帶已擴散到下游 457 公尺處，污染深度介於 12.2 至 13.7 公尺間，濃度介於 200 至 500 $\mu\text{g/L}$ 間；而 2002 年 1 月前，場址調查 15.2 公尺至 16.7 公尺間的三氯乙烯濃度均小於 100 $\mu\text{g/L}$ 。2002 年的調查亦發現，主要三氯乙烯污染帶內之順-1,2-二氯乙烯濃度非常低，並且幾乎檢測不出氯乙烯，顯示場址的還原脫氯作用速率緩慢。

該場址使用水平鑽井技術，在污染帶濃度大於 200 $\mu\text{g/L}$ 的前緣設置注氣井。該場址使用水平鑽井技術的原因，係考量污染帶

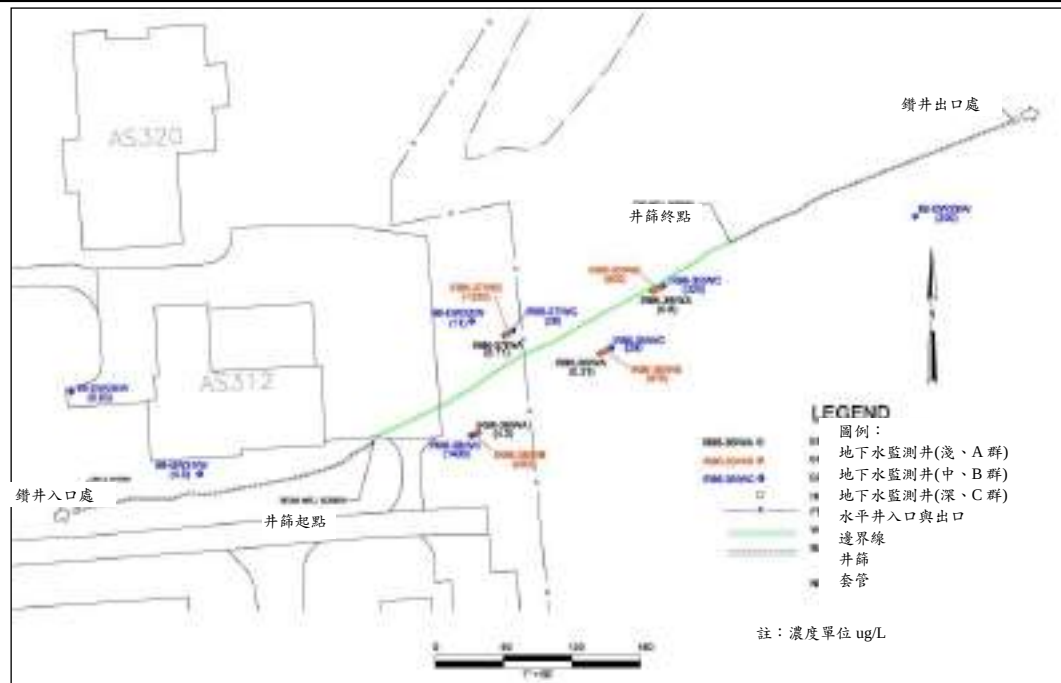
上方為使用中的飛機跑道，並埋設有不同的地下管線，此外，污染帶成細長狀，適合設置水平式的注氣井，以去除低濃度三氯乙烯污染的地下水，故地下水注氣法具有相對成本效益。由於場址地下水水位高，以及透氣層屬低透氣性土壤，故並未配合採用土壤間隙蒸氣抽除法。

2004 年 9 月完成水平式注氣井之設置，注氣井採 6 吋 SDR 11 HDPE 管，開篩長度約 107 公尺，井置於地面下 18.2 公尺處。實際鑽井直線距離約 290 公尺，並依據場址水文地質狀況，於注氣井兩側設置監測井，A 群監測井的開篩深度為 9.14 至 10.7 公尺、B 群監測井 12.2 至 13.7 公尺、C 群監測井 15.2 至 16.7 公尺。2004 年 10 月開始於監測井進行採樣，檢測結果發現，污染帶已擴散至更深的含水層，且主要受污染含水層(12.2 至 13.7 公尺)之污染物濃度亦升高，注氣井與監測井之相關位置，如圖 3.2-2 所示。

2005 年 2 月開始於 1 年內分兩階段進行注氣，前 3 個月僅注氣，第 4 個月停止注氣安裝臭氧設備，以及觀察污染物濃度是否有回升效應(rebound)，並於最後 8 個月，在注入氣體中加入臭氧(最高濃度 47 g/m^3)，後續再利用 3 個月觀察污染物濃度是否有反彈的現象。注氣初期，原氣體流速為 180 scfm，後為降低飛機跑道下的氣體流量及地下水位上升的現象，流速調降為 140 scfm。

表 3.2-6 美國北卡羅萊納州海軍陸戰隊空軍基地場址資訊

項目	說明
場址名稱	美國北卡羅萊納州海軍陸戰隊空軍基地場址
關切污染物	土壤：無 地下水：三氯乙烯
整治工法	地下水：水平式注氣井



資料來源：Mark Strong 等人，Air and Ozone Sparging of TCE Using a Directionally Drilled Horizontal Well。

圖 3.2-2 美國海軍陸戰隊空軍基地注氣井與監測井配置圖

依據 B 群監測井之監測結果顯示，前 3 個月的注氣使三氯乙烯的去除率達到 90 % 以上，而 A 群與 C 群監測井之監測結果顯示去除率較 B 群監測井差；且 A 群監測井在注氣初期，因為三氯乙烯氣體聚積在上層不透水層的下方，三氯乙烯濃度有上升的現象。注氣井之影響區域約達監測井兩側 15 公尺處。在第一階段注氣結束後，2005 年 5 月並未發現污染物濃度反彈的現象。在經過 1 年的整治之後，2006 年 5 月之 16 口監測檢測結果顯示，三氯乙烯的去除效率超過 99 %，其中 2 口監測井之三氯乙烯濃度更低於美國飲用水最高污染限值(MCL)濃度(5 $\mu\text{g/L}$)。

第四章工業安全衛生與緊急應變

4.1 工業安全衛生

污染改善、控制計畫與整治計畫之執行者應依「職業安全衛生法」之相關規定，訂定適合污染場址需要之安全衛生工作守則，詳列安全衛生注意事項、實施作業環境測定，並防範人為意外與災害發生及對於緊急事故之應變措施。計畫執行者亦應於開工前告知外(下)包廠商有關工作環境、危害因素暨有關安全衛生規定應採取之措施。安全衛生管理人員於整治期間應常駐污染場址，隨時注意整治設備及督導工作安全，並應定期舉辦工安講習。一般安全衛生措施如表 4.1-1 所示。

安全衛生工作守則之內容，一般包括下列項目：

- 一、 總則
- 二、 勞工安全衛生管理架構及權責
- 三、 個人安全防護設備之維護及檢查
- 四、 教育及訓練
- 五、 緊急應變措施
- 六、 防護設備之準備、維持及使用
- 七、 事故通知及報告
- 八、 安全衛生要則
- 九、 附則

有關各項整治技術作業環境中之危害因子，如物理性危害因子與化學性危害因子等，本指引主要參考美國陸軍工兵署(USACE)之「Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies」(EM1110-1-4007)，以瞭解不同整治技術作業環境中可能的潛在危害因子、遭遇時機，以及可能造成的傷害，並依各項危害因子，利用各種工程技術、保護措施、個人防護設備與行政管理等方式，免除或減低工作人員暴露機會或劑量。各項整治技術之危害因子及其保護措施與個人防護設備，請詳本指引附件。

表 4.1-1 污染場址整治之一般安全措施

通則	整治計畫執行前應作工作說明，實施預知危險，採取防範對策
	指派勞工安全衛生管理人員
	全體工作人員開工前應接受必要之安全衛生教育訓練
	每日工作開始前，應說明工作內容及安全注意事項
一般安全措施	污染改善或整治作業中應指派專人指揮監督及實施自動檢查
	管制與作業無關人員進入污染場址
	進入污染場址應佩戴安全帽及設置必要之安全防護設施
	進入污染場址嚴禁穿著拖鞋，應穿著安全鞋
	2 公尺以上有墜落危險之高處工作，應設置合格護欄、安全網或使用安全帶
	高差超過 1.5 公尺以上之場所作業，應設置能使勞工安全上下之設備
	遇強風、豪雨等惡劣氣候致勞工有墜落危險時，應使勞工停止作業
	施工用臨時電源開關箱應設有漏電斷路器
	施工用臨時電源須向污染改善或整治計畫執行者申請，嚴禁私自裝設
	動火作業應配置滅火器
	場址四周應設置安全防護或警示設施
	夜間作業人員應穿著反光背心，並使用照明設備、警示燈號及反光標示

4.2 緊急應變

緊急應變計畫措施研擬，須根據「危險性工作場所審查暨檢查辦法-附件四」緊急應變計畫規範，至少必須包含以下內容：

一、緊急應變運作流程與組織

(一) 應變組織架構與權責

(二) 緊急應變控制中心位置與設施

(三) 緊急應變運作流程與說明

二、緊急應變設備之置備與外援單位之聯繫

三、緊急應變演練計畫與演練記錄(演練模擬一般及最嚴重危害之狀況)

四、緊急應變計畫之修正。

參考文獻

1. AFCEE (2000) Remediation of chlorinated solvent contamination on industrial and Aorfield sites
2. FRTR (2002) Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide , Version 4.0, Federal Remediation Technologies Roundtable.
3. Gevaerts, W. et. A Multiphase, Multicomponent contaminations in a Heterogeneous Aquifer: a Simple Solution?, ConSoil 2003 Proceedings, 12~16 May 2003.
4. Mike H. Roulier and Mark C. Kemper, Horizontal Configuration of the Lasagna Treatment Technology – User Guide, p.2, June 2002.
5. Smith, W.L. and G.M. Gadd, Reduction and Precipitation of Chromate by Mixed Culture Sulphate-reducing Bacterial Biofilms, J. Applied Microbiology, 2000.
6. USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 17, EM1110-1-4007, 2003.
7. 行政院勞工委員會，危險性工作場所審查暨檢查辦法，中華民國 104 年 8 月 4 日勞動部勞職授字第 10402023602 號令，2015
8. 行政院環保署，土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之初步篩試調查、查證及驗證作業技術參考手冊，2007
9. 行政院環保署，土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊，2008
10. 行政院環保署，土壤及地下水資訊管理系統，
<http://sgw.epa.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx>
11. 行政院環保署，台美研習會(2005) Napi physical/ chemical characteristics
12. 行政院環保署，空氣污染防制法，中華民國 101 年 12 月 19 日總統華總一義字第 10100279791 號令，2012

13. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法，中華民國 99 年 2 月 3 日總統華總一義字第 09900024211 號，2010
14. 行政院環境保護署，公營廢棄物清除處理機構許可管理辦法，中華民國 101 年 12 月 5 日行政院環境保護署環署廢字第 1010109839 號令，2015
15. 行政院環境保護署，水污染防治法，中華民國 104 年 2 月 4 日總統華總一義字第 10400014261 號令，2015
16. 行政院環境保護署，固定污染源設置與操作許可證管理辦法，中華民國 96 年 11 月 21 日行政院環境保護署環署空字第 0960087681 號令，2007
17. 行政院環境保護署，廢棄物清理法，中華民國 102 年 5 月 29 日總統華總一義字第 10200101291 號令，2015
18. 行政院環境保護署，環境檢驗所，<http://www.niea.gov.tw/>
19. 行政院環境保護署，行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法，中華民國 101 年 1 月 19 日環署廢字第 1010006041 號令，2012
20. 勞動部職業安全衛生署，職業安全衛生法，中華民國 102 年 7 月 3 日總統華總一義字第 10200127211 號令，2013
21. 環保署，土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊，2008。

土壤及地下水比水重非水相液體
污染整治作業參考指引
(附件一)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-004

附件一 目錄

頁碼

一、	土壤間隙蒸氣抽除法(Soil Vapor Extraction,SVE)	附件一-1
1.1	整治技術簡介	附件一-1
1.1.1	原理	附件一-1
1.1.2	適用條件	附件一-1
1.2	整治系統操作與設計	附件一-4
1.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-4
1.2.2	整治系統單元	附件一-9
1.2.3	整治系統監測	附件一-9
1.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-10
1.3	成本及期程預估	附件一-11
二、	地下水注氣法(Air Sparging , AS)	附件一-13
2.1	整治技術簡介	附件一-13
2.1.1	原理	附件一-13
2.1.2	適用條件	附件一-13
2.2	整治系統操作與設計	附件一-17
2.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-18
2.2.2	整治系統單元	附件一-20
2.2.3	整治系統監測	附件一-21
2.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-22
2.3	成本及期程預估	附件一-23
三、	現地生物整治(In-situ Bioremediation)	附件一-24
3.1	整治技術簡介	附件一-24
3.1.1	原理	附件一-24
3.1.2	適用條件	附件一-26
3.2	整治系統操作與設計	附件一-29

3.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-30
3.2.2	整治系統單元	附件一-32
3.2.3	整治系統監測	附件一-33
3.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-34
3.2.5	成本及期程預估	附件一-35
四、	熱處理法 (Thermal treatment)	附件一-36
4.1	整治技術簡介	附件一-36
4.1.1.	原理	附件一-36
4.1.2.	適用條件	附件一-38
4.2	整治系統操作與設計	附件一-40
4.2.1.	整治系統設計與操作要點	附件一-40
4.2.2.	整治系統單元	附件一-43
4.2.3.	整治系統監測	附件一-46
4.2.4.	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-47
4.3	成本及期程預估	附件一-49
五、	監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)	附件一-51
5.1	整治技術簡介	附件一-51
5.1.1	原理	附件一-51
5.1.2	適用條件	附件一-52
5.2	整治系統操作與設計	附件一-56
5.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-58
5.2.2	整治系統單元	附件一-58
5.2.3	整治系統監測	附件一-58
5.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-60
5.3	成本及期程預估	附件一-60
六、	地下水抽出處理法(Pump and Treat)	附件一-63
6.1	整治技術簡介	附件一-63
6.1.1	原理	附件一-63

6.1.2	適用條件	附件一-63
6.2	整治系統操作與設計	附件一-65
6.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-65
6.2.2	整治系統單元	附件一-67
6.2.3	整治系統監測	附件一-68
6.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-70
6.3	成本及期程預估	附件一-71
七、	地下水循環井法(groundwater circulation well, GCW).....	附件一-72
7.1	整治技術簡介	附件一-72
7.1.1	原理	附件一-72
7.1.2	適用條件	附件一-72
7.2	整治系統操作與設計	附件一-75
7.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-75
7.2.2	整治系統單元	附件一-81
7.2.3	整治系統監測	附件一-81
7.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-82
7.3	成本及期程預估	附件一-83
八、	現地化學氧化法 (In-situ chemical oxidation, ISCO)	附件一-84
8.1	整治技術簡介	附件一-84
8.1.1	原理	附件一-84
8.1.2	適用條件	附件一-86
8.2	整治系統操作與設計	附件一-89
8.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-89
8.2.2	整治系統單元	附件一-98
8.2.3	整治系統監測	附件一-99
8.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-101
8.3	成本及期程預估	附件一-102
九、	現地透水性反應牆(In-Situ Permeable Reactive Barrier, PRB).....	附件一-103

9.1 整治技術簡介.....	附件一-103
9.1.1 原理.....	附件一-103
9.1.2 適用條件.....	附件一-105
9.2 整治系統操作與設計.....	附件一-106
9.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件一-106
9.2.2 整治系統單元.....	附件一-110
9.2.3 整治系統監測.....	附件一-110
9.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-112
9.3 成本及期程預估.....	附件一-113
十、 界面活性劑/共溶劑沖洗法(surfactant/cosolvent flushing).....	附件一-115
10.1 整治技術簡介.....	附件一-115
10.1.1 原理.....	附件一-115
10.1.2 適用條件.....	附件一-117
10.2 整治系統操作與設計.....	附件一-118
10.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件一-119
10.2.2 整治系統單元.....	附件一-123
10.2.3 整治系統監測.....	附件一-123
10.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-125
10.3 成本及期程預估.....	附件一-125
十一、 開挖與圍堵(excavation and containment)	附件一-126
11.1 整治技術簡介.....	附件一-126
11.1.1 原理.....	附件一-126
11.1.2 適用條件.....	附件一-127
11.2 整治系統操作與設計.....	附件一-129
11.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件一-130
11.2.2 整治系統單元.....	附件一-131
11.2.3 整治系統監測.....	附件一-131
11.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-131

11.3 成本及期程預估	附件一-134
十二、 電動力整治技術 (Electrokinetic Remediation)	附件一-136
12.1 整治技術簡介	附件一-136
12.1.1 原理	附件一-136
12.1.2 適用條件	附件一-137
12.2 整治系統操作與設計	附件一-139
12.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-139
12.2.2 整治系統單元	附件一-146
12.2.3 整治系統監測	附件一-147
12.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-148
12.3 成本及期程評估	附件一-149
十三、 植物整治技術 (Phytoremediation).....	附件一-151
13.1 整治技術簡介	附件一-151
13.1.1 原理	附件一-151
13.1.2 適用條件	附件一-152
13.2 整治系統操作與設計	附件一-153
13.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-154
13.2.2 整治系統單元	附件一-160
13.2.3 整治系統監測	附件一-160
13.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-160
13.3 成本及期程評估	附件一-161
十四、 奈米科技處理法 (Nanotechnology).....	附件一-164
14.1 整治技術簡介	附件一-164
14.1.1 原理	附件一-164
14.1.2 適用條件	附件一-166
14.2 整治系統操作與設計	附件一-168
14.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-168
14.2.2 整治系統單元	附件一-169

14.2.3 整治系統監測.....	附件一-169
14.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-170
14.3 成本及期程評估.....	附件一-171

圖目錄

頁碼

圖 1.1.1-1	土壤間隙蒸氣抽除法整治系統原理示意圖	附件一-2
圖 1.1.2-1	土壤間隙蒸氣抽除法技術評估程序流程圖	附件一-3
圖 1.2.1-1	採水平抽氣井設計之土壤間隙蒸氣抽除系統示意圖	附件一-7
圖 1.2.1-2	搭配注氣井之土壤間隙蒸氣抽除系統示意圖	附件一-7
圖 1.2.1-3	土壤間隙蒸氣抽除法整治系統模場試驗示意圖	附件一-8
圖 2.1.1-1	地下水注氣法整治系統原理示意圖	附件一-14
圖 2.1.2-1	地下水注氣法技術評估程序流程圖	附件一-16
圖 2.2.1-1	水平井空氣注入／土壤間隙蒸氣抽除法整治系統示意圖 ..	附件一-20
圖 3.1.1-1	微生物處理有機污染物之概念示意圖	附件一-25
圖 3.1.1-2	生物整治法原理示意圖	附件一-26
圖 3.1.2-1	好氧直接氧化作用反應機制示意圖	附件一-28
圖 3.1.2-2	微生物好氧共代謝反應機制示意圖	附件一-28
圖 3.1.2-3	含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖	附件一-29
圖 3.2.1-1	注入井之現地地下水生物處理法示意圖	附件一-31
圖 4.1.1-1	蒸氣注入整治系統示意圖	附件一-37
圖 4.1.1-2	電阻加熱整治系統示意圖	附件一-37
圖 4.2.1-1	蒸氣注入系統規劃設計流程圖	附件一-42
圖 4.2.1-2	電阻加熱整治技術操作程序流程圖	附件一-43
圖 4.2.2-1	氣注入系統 P&ID 示意圖	附件一-44
圖 4.2.2-2	電阻加熱法主要設備設置情形	附件一-46
圖 5.1.1-1	DNAPL 自然衰減機制示意圖	附件一-52
圖 5.1.2-1	DNAPL 監測式自然衰減法之評估執行流程圖	附件一-54
圖 5.2.3-1	評估自然衰減法成效之監測井網規劃設計概念圖	附件一-61
圖 6.1.1-1	地下水抽出處理法原理示意圖	附件一-64
圖 6.1.1-1	地下水抽出處理法之捕捉區概念圖	附件一-64
圖 6.2.1-1	抽出處理法之抽水及停止抽水期間濃度變化圖	附件一-67
圖 6.2.3-1	地下水抽出處理系統成效監測程序流程圖	附件一-69
圖 7.1.1-1	地下水循環井法整治系統原理示意圖	附件一-73

圖 7.2.1-1	NoVOCs 系統設計圖	附件一-78
圖 7.2.1-2	UVB 系統設計圖	附件一-79
圖 7.2.1-3	DDC 系統設計圖	附件一-80
圖 8.1.1-1	現地化學氧化法示意圖	附件一-86
圖 8.2.1-1	現地化學氧化法評估、設計流程圖	附件一-92
圖 8.2.1-2	利用直接貫入技術傳輸過錳酸鹽示意圖	附件一-97
圖 8.2.1-3	以注入井與抽水井循環系統傳輸過錳酸鹽示意圖	附件一-97
圖 8.2.1-4	以土壤混合法將固體氧化劑顆粒分散於污染區之技術圖 ...	附件一-98
圖 8.2.1-5	MnO ⁴ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表	附件一-99
圖 8.2.1-6	S ₂ O ₈ ²⁻ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表	附件一-99
圖 9.1.1-1	各種類型透水牆處理技術圖	附件一-105
圖 9.2.1-1	透水性反應牆之設計流程	附件一-109
圖 10.1.1-1	界面活性劑沖排移除 NAPL 機制	附件一-117
圖 10.1.1-2	界面活性劑微胞基本結構特性圖	附件一-118
圖 10.2.1-1	界面活性劑/共溶劑提升地下水污染整治概念設計示意 圖	附件一-120
圖 10.2.1-2	界面活性劑/共溶劑提升地下水污染整治評估流程圖	附件一-122
圖 12.1.1-1	受污染土壤現地電動力整治技術原理示意圖	附件一-138
圖 12.2.1-1	電動力法評估流程圖	附件一-141
圖 12.2.1-2	電動力法設計流程圖	附件一-142
圖 12.2.1-3	Lasagna 技術原理示意圖	附件一-147
圖 13.1.1-1	植物復育法機制示意圖	附件一-153
圖 13.2.1-1	植物降解整治技術的處理機制示意圖(有機物)	附件一-156
圖 13.2.1-2	植物萃取整治技術的處理機制示意圖(無機物)	附件一-157
圖 13.2.1-3	不同植物的根部深度圖	附件一-158
圖 14.1.1-1	奈米零價鐵透水性反應牆示意圖	附件一-167
圖 14.1.1-2	奈米零價鐵直接注入示意圖	附件一-168

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.1.2-1	土壤間隙蒸氣抽除法技術優缺點比較表..... 附件一-2
表 1.1.2-2	土壤間隙蒸氣抽除法技術選用查核表..... 附件一-4
表 1.2-1	國外土壤間隙蒸氣抽除法相關法規指引及規範..... 附件一-5
表 1.2.2-1	土壤間隙蒸氣抽除法系統設備表..... 附件一-9
表 1.2.3-1	土壤間隙蒸氣抽除法整治系統成效監測..... 附件一-10
表 1.2.4-1	潛在之危害..... 附件一-11
表 1.3-1	美國土壤間隙蒸氣抽除法之處理成本..... 附件一-12
表 2.1.2-1	部分適用地下水注氣法之揮發性有機污染物之特性..... 附件一-15
表 2.1.2-2	適用地下水注氣法之水文地質參數..... 附件一-15
表 2.1.2-3	地下水注氣法技術優缺點比較表..... 附件一-15
表 2.1.2-4	地下水注氣法技術選用查核表..... 附件一-17
表 2.2-1	國外地下水注氣法相關法規指引及規範..... 附件一-17
表 2.2.1-1	地下水注氣法各項模場試驗..... 附件一-19
表 2.2.2-1	地下水注氣法系統設備表..... 附件一-20
表 2.2.3-1	地下水注氣法／土壤間隙蒸氣抽除法整治系統成效監測... 附件一-22
表 2.2.4-1	地下水注氣法之潛在危害..... 附件一-23
表 3.1.2-1	生物整治法的優缺點比較表..... 附件一-26
表 3.2-1	國外生物整治相關法規指引及規範..... 附件一-29
表 3.2.2-1	生物整治法系統設備表..... 附件一-32
表 3.2.3-1	現地生物整治系統成效監測..... 附件一-34
表 3.2.4-1	潛在之危害..... 附件一-35
表 4.1.2-1	蒸氣注入法技術優缺點比較表..... 附件一-38
表 4.2-1	國外熱處理相關法規指引及規範..... 附件一-40
表 4.2.2-1	蒸氣注入系統設備表..... 附件一-43
表 4.2.3-1	蒸氣注入法整治系統成效監測..... 附件一-47
表 4.2.4-1	潛在之危害..... 附件一-50
表 5.1.2-1	評估地下環境還原脫氯作用之地球化學參數..... 附件一-56
表 5.1.2-2	監測式自然衰減法技術優缺點比較表..... 附件一-57

表 5.2-1	國外監測式自然衰減法相關法規指引及規範.....	附件一-57
表 6.1.2-1	地下水抽出處理法技術優缺點比較表.....	附件一-65
表 6.2-1	國外地下水抽出處理法相關法規指引及規範.....	附件一-65
表 6.2.2-1	抽出處理法主要系統設備表.....	附件一-68
表 6.2.3-1	地下水抽出處理法整治系統成效監測.....	附件一-70
表 6.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-71
表 7.1.2-1	地下水循環井應用性評估.....	附件一-74
表 7.1.2-2	地下水循環井法技術優缺點比較表.....	附件一-74
表 7.2-1	國外地下水循環井法相關法規指引及規範.....	附件一-75
表 7.2.1-1	檢查或紀錄項目及目的.....	附件一-77
表 7.2.2-1	系統設備表.....	附件一-81
表 7.2.3-1	地下水循環井法整治系統成效監測.....	附件一-82
表 7.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-83
表 7.3-1	井內氣提系統建置平均成本(UVB 系統).....	附件一-83
表 8.1.2-1	各種氧化劑處理不同關切污染物之適用性.....	附件一-87
表 8.1.2-2	氧化劑之反應物型態、穩定性與技術發展程度彙整表.....	附件一-88
表 8.1.2-3	現地還原法商業化產品處理不同關切污染物之適用性.....	附件一-88
表 8.1.2-4	現地化學氧化法技術優缺點比較表.....	附件一-89
表 8.2-1	國外現地化學氧化法相關法規指引及規範.....	附件一-90
表 8.2.1-1	現地化學氧化法技術與其他技術之結合方式.....	附件一-94
表 8.2.2-1	現地化學氧化法設備表.....	附件一-99
表 8.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-101
表 9.1.2-1	各種類型透水牆處理技術的種類與機制.....	附件一-106
表 9.1.2-2	透水性反應牆技術優缺點比較表.....	附件一-106
表 9.2-1	國外監測式自然衰減法相關法規指引及規範.....	附件一-107
表 9.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-112
表 9.3-1	透水性反應牆整治成本評估計算表.....	附件一-114
表 10.1.2-1	界面活性劑/共溶劑沖洗法技術優缺點比較表.....	附件一-118
表 10.2-1	國外界面活性劑/共溶劑沖洗法相關法規指引及規範.....	附件一-118
表 10.2.3-1	界面活性劑與污染物之必要監測.....	附件一-125
表 11.1.2-1	開挖圍堵整治技術優缺點比較表.....	附件一-128

表 11.1.2-2	各種類型垂直阻控系統之適用性.....	附件一-129
表 11.2-1	國外開挖與圍堵法相關法規指引及規範.....	附件一-129
表 11.2.2-1	開挖圍堵整治系統單元.....	附件一-131
表 11.2.3-1	開挖作業期間場址周圍環境監測.....	附件一-131
表 11.2.3-2	圍堵成效監測.....	附件一-131
表 11.2.4-1	開挖作業之潛在危害.....	附件一-133
表 11.2.4-2	圍堵潛在之危害.....	附件一-134
表 12.1.2-1	電動力法之污染物移除影響因子.....	附件一-138
12.1.2-2	電動力整治技術優缺點比較表.....	附件一-139
表 12.2-1	國外電動力法相關法規指引及規範.....	附件一-139
表 12.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-148
表 13.1.2-1	植物整治法的優缺點.....	附件一-153
表 13.2-1	國外植物整治相關法規指引及規範.....	附件一-154
表 13.2.4-1	潛在之危害.....	附件一-161
表 13.3-1	成本分析表格.....	附件一-163
表 14.1.2-1	奈米零價鐵適用污染物.....	附件一-167
表 14.1.2-2	奈米科技技術優缺點比較表.....	附件一-168
表 14.2-1	國外奈米科技處理法相關法規指引及規範.....	附件一-168

一、土壤間隙蒸氣抽除法(Soil Vapor Extraction, SVE)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

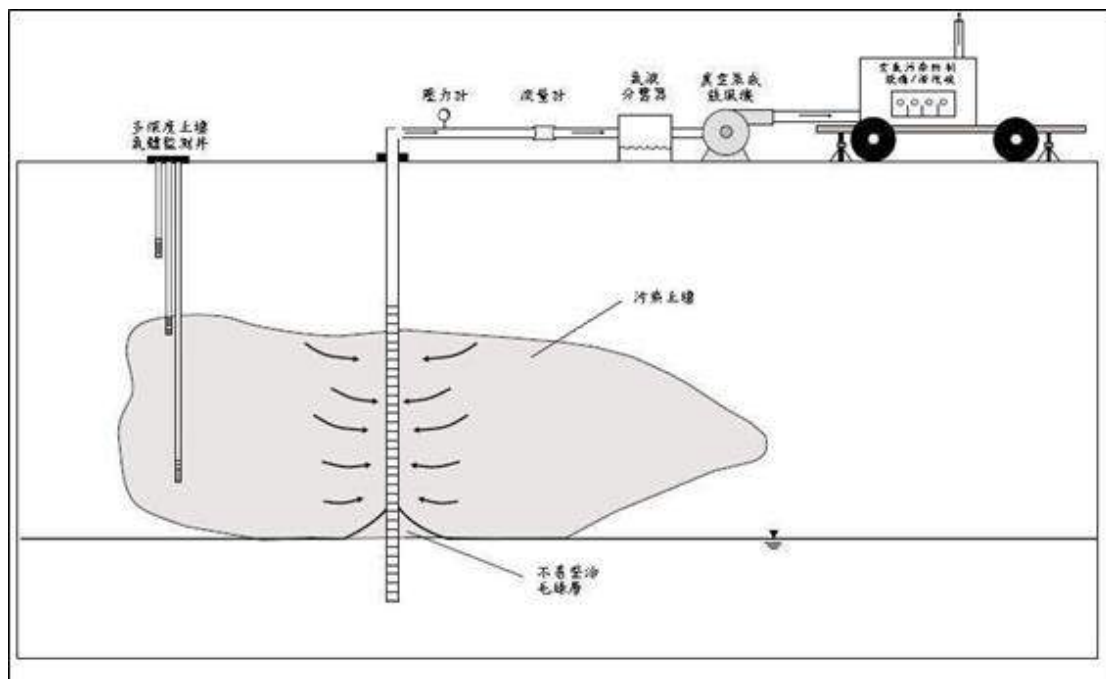
土壤間隙蒸氣抽除法(Soil Vapor Extraction, SVE)係降低土壤孔隙蒸氣壓，土壤中的污染物轉化成為氣相，而加以去除的物理整治技術；適用於受高揮發性化學物質污染土壤之整治，如受四氯乙烯或苯等污染之土壤。此技術在國內之使用已相當普遍，是一種成熟的整治技術。

土壤間隙蒸氣抽除法係針對不飽和層(或稱通氣層 vadose zone)土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。該技術係利用真空泵浦抽除土壤中之氣體，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，將污染物由固相或液相轉移為氣相，並藉由抽氣井抽氣，使污染區土壤產生負壓，迫使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動而被抽出；被抽除的土壤氣體可進行回收或經處理後排放。該技術於操作時，有時會在表面覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加影響半徑及處理效率，原理示意圖請參見圖 1.1.1-1。

1.1.2 適用條件

土壤物化特性對現地土壤間隙蒸氣抽除技術之應用效果有很大的影響，主要影響因素有孔隙度、水分含量、土壤質地、有機質含量、透氣性與地下水水位等；以具有地質質地均一、透氣性強、孔隙度大、水分含量低與地下水水位深等特性之場址，最為適用。

土壤間隙蒸氣抽除法不適用於低揮發性或低亨利定律常數之污染物，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境。雖可以運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治之經費。



資料來源：AFCEE, Section 1, Guidance on Soil Vapor Extraction Optimization, June 2001.

圖 1.1.1-1 土壤間隙蒸氣抽除法整治系統原理示意圖

土壤對揮發性有機物之吸附力，會降低土壤間隙蒸氣抽除系統對揮發性有機物之萃取率，亦即將揮發性有機物轉化為氣體之效率。土壤對污染物吸附力的影響，以整治階段後期最為明顯；故土壤間隙蒸氣抽除法需要較長的操作時間，來處理最後殘留於土壤的揮發性有機物。

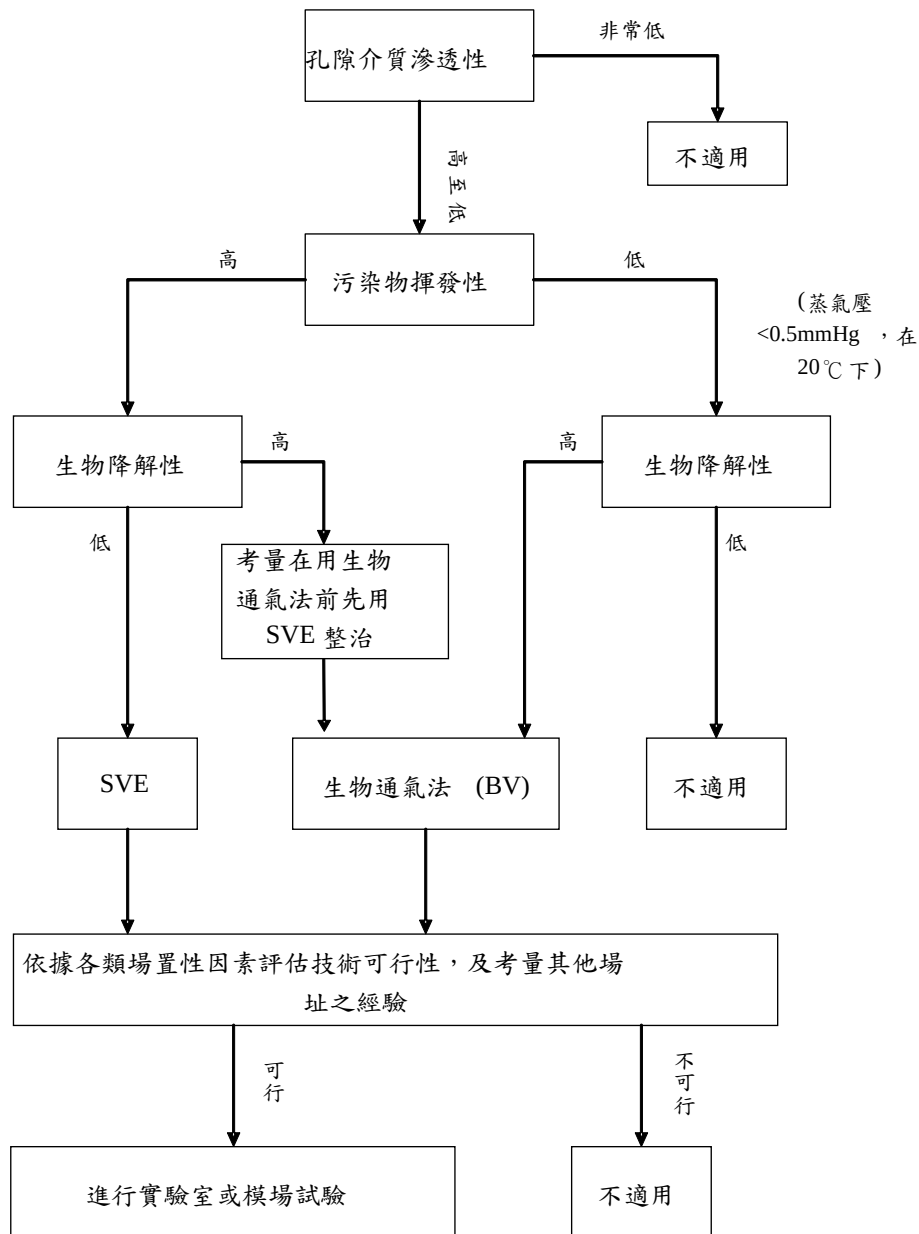
土壤的異質性亦將影響土壤間隙蒸氣抽除系統的成效，氣體易在大粒徑土壤中流動，但不易在粒徑小的黏土中流動；且在一般情形下，揮發性有機物亦會累積在黏土表面。本法應用上之優缺點比較，如表 1.1.2-1。

表 1.1.2-1 土壤間隙蒸氣抽除法技術優缺點比較表

優點	缺點
相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。 對場址運作之干擾最小。 整治期程短：在理想情況下，一般整治期程約 6 個月至 2 年。 整治價格具競爭性。 易與其他技術結合運用，如地下水注氣法、生物整治法、生物吸取法等。 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。	若要降低污染物濃度至 90% 以下不易達成。 當應用於低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其處理效果之可靠性低。 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，其廢氣處理可能需支付較昂貴的處理費用。 僅適用不飽和層土壤污染之整治，飽和層土壤及地下含水層部分需要採用其他整治方法。

資料來源：USEPA, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites-A Guide for Corrective Action Plan Reviewers (EPA 510-B-94-003), p.II-3, 1994.

選擇是否採用土壤間隙蒸氣抽除法時，可參考美國工兵署之技術評估程序(圖 1.1.2-1)，以及參考美國環保署之查核表(表 1.1.2-2)。整治技術評估單位或技術遴選單位可藉回答表中之相關問題，以決定土壤間隙蒸氣抽除法是否適用於個別場址。



資料來源：USACE, Soil Vapor Extraction and Bioremediation (EM1110-1-4001), p.3-17, 2002.

圖 1.1.2-1 土壤間隙蒸氣抽除法技術評估程序流程圖

表 1.1.2-2 土壤間隙蒸氣抽除技術選用查核表

注意事項	查核欄	
1.0、土壤滲透性：	是	否
1.1、土壤滲透性是否大於 10^{-9} cm^2 ？	☐	☐
1.2、地下水位是否低於 0.9 公尺(3 呎)？	☐	☐
1.3、場址土壤是否經常處於乾燥狀態？	☐	☐
2.0、揮發性成分：		
2.1、污染物的蒸氣壓是否大於 0.5 mm-Hg？	☐	☐
2.2、如污染物的蒸氣壓小於 0.5 mm-Hg，是否能藉由相關技術(如注入加熱空氣)，增加污染物之揮發性？	☐	☐
2.3、污染物的沸點是否低於 300℃？	☐	☐
2.4、污染物的亨利定律常數是否大於 100 atm？	☐	☐
3.0、設計上的評估：		
3.1、抽氣井有效半徑是否介於 1.5 至 30 公尺(5 呎至 100 呎)？	☐	☐
3.2、有效半徑是否依據場址各類土壤之特性加以計算？	☐	☐
3.3、各抽氣井流速是否分別符合原整治設計值？	☐	☐
3.4、井的型式(垂直井或水平井)是否切合場址狀況？	☐	☐
3.5、井的密度是否適當?抽氣井有效半徑是否涵蓋整個污染範圍？	☐	☐
3.6、抽氣井開篩位置是否符合場址之污染狀況？	☐	☐
3.7、選用之抽氣設備(blower)是否可達到預定抽除之效率？	☐	☐
4.0、選用設備的評估：		
4.1、是否設置注氣井？	☐	☐
4.2、注氣井設置是否適用於場址？	☐	☐
4.3、是否設置鋪面？	☐	☐
4.4、鋪面材質是否適用於場址？	☐	☐
4.5、是否需要降低地下水位？	☐	☐
4.6、如需降低地下水位，地下水抽水井之設置位置是否正確？	☐	☐
4.7、是否需要廢氣處理系統？	☐	☐
4.8、如需廢氣處理系統，所採用的廢氣處理系統是否能處理產生之廢氣濃度？	☐	☐

資料來源：USEPA, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites-A Guide for Corrective Action Plan Reviewers (EPA 510-B-94-003), p.II-32, 1994.

1.2 整治系統操作與設計

有關國外針對土壤間隙蒸氣抽除法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 1.2-1。

1.2.1 整治系統設計與操作要點

土壤間隙蒸氣的抽除效率，主要受限於有機污染物揮發至土壤孔隙，以及土壤間隙蒸氣抽除之難易度等 2 項主要機制。在進行規劃設計時應特別注意這兩項機制之主要因素，包括污染物之蒸氣壓與亨利常數、土壤透氣性、地質條件、地下水位與土壤水分含量等。以下針對規劃設計的注意事項及技術種類，分別說明如下：

表 1.2-1 國外土壤間隙蒸氣抽除法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國懷俄明環境品質部門水質處	Minimum Design Requirements and Common Accepted Engineering Practices: Soil Vapor Extraction and Bioventing Systems (Groundwater Pollution Control Program Guideline #5)	1998
美國威斯康辛州環境資源部門	Guidance for Design, Installation and Operation of Soil Venting Systems (PUB-RR-185, 64 pp)	2002
美國工兵署 (USACE)	Engineering and Design: Soil Vapor Extraction and Bioventing (EM 1110-1-4001, 424 pp)	2002
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Soil Vapor Extraction Implementation Experiences (EPA 540-F-95-030)	1995
美國環保署	Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction (EPA 542-R-97-007)	1997
美國環保署	Michigan Soil Vapor Extraction Remediation (MISER) Model: a Computer Program to Model Soil Vapor Extraction and Bioventing of Organic Chemicals in Unsaturated Geological Material (EPA 600-R-97-099)	1997
美國環保署/國防部/能源署	Innovative Site Remediation Technology: Design & Application (Volume 7: Vacuum Extraction and Air Sparging)	1998
美國 USACE/NAVFAC/AFCEA	Commissioning and Demonstration for Soil Vapor Extraction (SVE) Systems (UFGS-01810A, 35 pp)	2001
美國環保署	Development of Recommendations and Methods to Support Assessment of Soil Venting Performance and Closure (EPA 600-R-01-070, 435 pp)	2001
美國環保署	Off-Gas Treatment Technologies for Soil Vapor Extraction Systems: State of the Practice (EPA 542-R-05-028)	2006
美國 USACE/NAVFAC/AFCEA	Operation, Maintenance, and Process Monitoring for Soil Vapor Extraction (SVE) Systems (UFGS-02 01 50, 30 pp)	2006

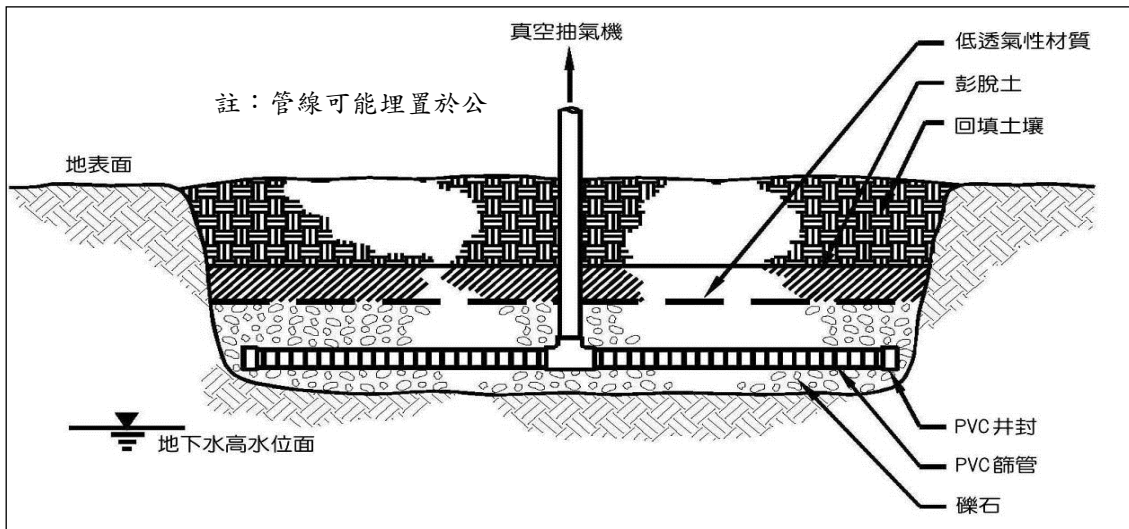
一、 注意事項

- (一)場址如具有非均質或互層之地質構造，或位於低滲透性地質(如砂土或黏土)上的土壤結構，易形成氣體較易流通的區域。當大粒徑土壤污染區域整治完成後，由於吸附於砂土與黏土上的揮發性有機污染物不易被分離出來，造成抽除效率明顯降低。因此，設計時應考量場址的地質構造，並作適當的調整。
- (二)影響半徑常以氣體壓力下降 0.1 英吋(0.25 公分)水柱為判定原則。具有多層不同地質構造之場址，應依各地質構造設計影響半徑。
- (三)全場(full scale)土壤間隙蒸氣抽除系統應依現地模場試驗所量測出來之氣體流量，進行設計。具有多層不同地質構造之場址，則需先測量各地質構造的透氣性，來據以設計每單位井篩可達到的氣體流量。
- (四)低透氣性土壤不易進行土壤間隙蒸氣抽除。
- (五)地下水位太高(地下 1~2 公尺)會降低抽除效果。
- (六)排出的氣體應考量是否需要進一步處理。
- (七)黏土及有機質含量較高的土壤，由於揮發性有機物的吸附性強，故污染物的去除效率很低。
- (八)此法對飽和層(含水層)的整治效果並不好，但藉由降低地下水位，可增加不飽和層土壤體積，以改善不利的整治條件。

二、 技術種類

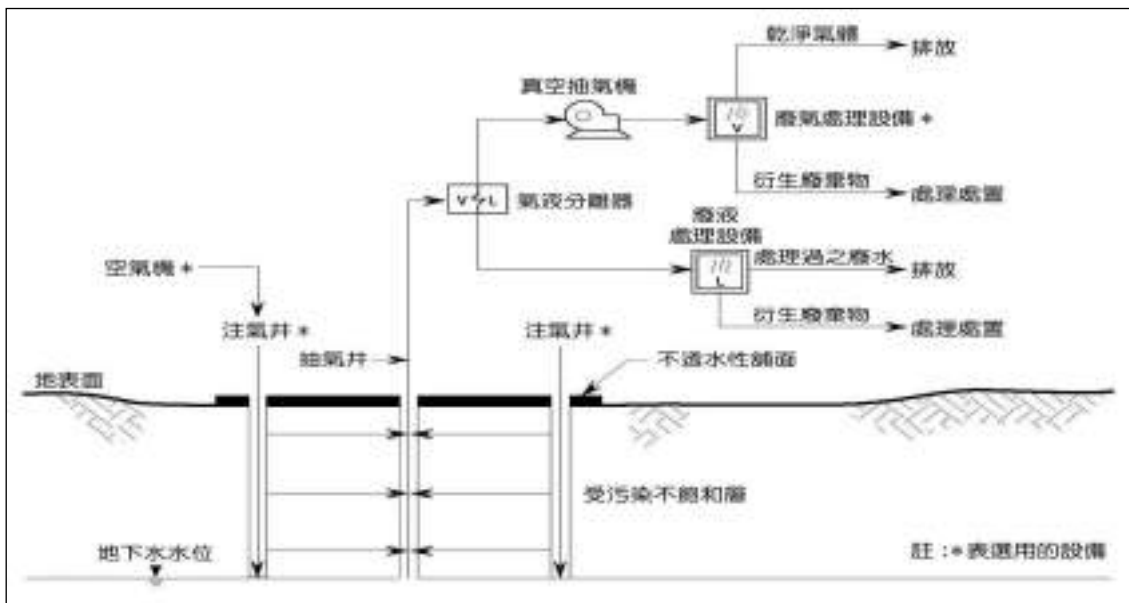
抽氣井依設計方法之不同，可區分為垂直井、水平井、抽氣渠、現地處理、或離地處理等不同技術種類。國內污染場址多採垂直井的設計方式，亦有少部分場址採水平井設計，如圖 1.2.1-1。

此外，當整治區域較深，或週遭為低滲透性土壤時，可考量以注氣井調整氣流流向分布與加強抽氣效率，並預防短流情形發生。設置注氣井之土壤間隙蒸氣抽除系統，如圖 1.2.1-2。另外為提升土壤中污染物的脫附能力，亦有使用加熱器，加熱注入氣體，以提高整治成效。



資料來源：USEPA, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites – A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-R-04-002, p. II-22, May 2004.

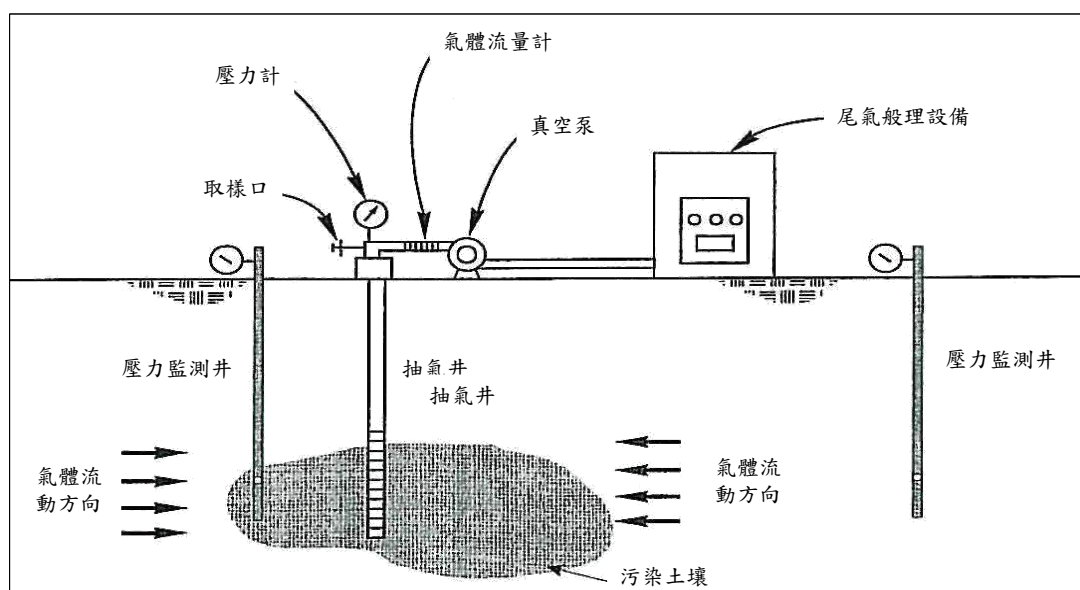
圖 1.2.1-1 採水平抽氣井設計之土壤間隙蒸氣抽除系統示意圖



資料來源：USEPA, Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA, Soil Vapor Extraction, EPA-540-2-91-019A, 1991.

圖 1.2.1-2 搭配注氣井之土壤間隙蒸氣抽除系統示意圖

現地模場試驗(field pilot study)可以確認土壤間隙蒸氣抽除系統在地下環境中氣體的滲透性，與預期污染物去除率，並據以設計後端的尾氣處理設備。此外，現地模場試驗應能提供抽氣井設置規劃(含抽氣井數量)所需之重要設計參數，如影響半徑與抽氣量。模場試驗設置方法(如圖 1.2.1-3)一般包括至少設置 1 口抽氣井與數口監測井，以及安裝抽氣與抽氣設備間的管線另外亦可以 PID/FID 測試抽氣井所抽出之蒸氣濃度(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)。



資料來源：Nyer, E.K. et., In Situ Treatment Technology, p.127, 1996.

圖 1.2.1-3 土壤間隙蒸氣抽除法整治系統模場試驗示意圖

本工法將產生廢氣排放的問題，因此需考量廢氣排放對於環境的影響，及周圍居民對於空氣品質與用水安全的觀感，以避免不必要的非理性抗爭，造成執行之延宕。

在整個操作期間，需要進行測試和調整，藉由試車可確保全部或部分抽氣井是否如預期發揮功效。個別抽氣井的閥門和鼓風機控制閥需要節流以平衡系統，相關機械設備應定期進行潤滑與零件、活性炭更換，並定期進行土壤氣體檢測與壓力監測井的量測工作。系統操作過程中，須記錄相關操作參數，包括：氣體流量、負壓壓力(真空度)、氣體濃度等，以瞭解系統操作狀況是否符合設計流量與處理效率。

1.2.2 整治系統單元

土壤間隙蒸氣抽除整治系統通常包括抽氣井、管線、井頭設備、抽氣設備、儀控設備及尾氣處理設備等。整治設備會隨著不同種類的污染物與場址特性，選取不同的設備，或結合其他整治技術，以提升整體的整治成效。表 1.2.2-1 彙整了較常使用之共通設備。

表 1.2.2-1 土壤間隙蒸氣抽除法系統設備表

項次	各項設備
1	抽氣井
2	管線系統，包括歧管(manifold)
3	井頭設備(如控制閥、壓力計、取樣口、抽氣管、流量計等)
4	抽氣設備，如鼓風機或真空泵
5	尾氣處理設備
6	儀控設備
7	注氣井
8	地下水抽水設備(降低地下水位，增加抽氣井之影響半徑)
9	廢水處理設備
10	成效監測設備(土壤氣體監測井)

1.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

土壤間隙蒸氣抽除法經操作一段時間後，污染物的去除速率將逐漸降低。如停止操作一段時間後，土壤氣體中的污染物濃度再度上升，即所謂的回升效應(rebound)。如土壤氣體監測發現濃度有回升現象時，極可能於土壤氣體監測井(或採樣點)周圍之受污染土壤尚未處理至整治標準。為防止土壤及地下水污染擴大，於整治設備停止操作一段期間內，應持續進行土壤氣體監測，以評估土壤氣體濃度是否有回升的現象。

二、成效監測

有關評估土壤間隙蒸氣抽除系統之成效，因系統設計之不同會有所差異；而正式運轉期間，操作維護的效果亦是影響整治成效的重要關鍵。於此所列成效監測，係依本法較常使用之共通項目為重點：包括抽氣設備、整治設備、與尾氣排放設備等。其監測目的包括相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響、及防止污染擴大。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析

項目及監測頻率，彙整如表 1.2.3-1。

表 1.2.3-1 土壤間隙蒸氣抽除法整治系統成效監測

項目	抽氣設備	土壤間隙蒸氣抽除整治系統	尾氣處理系統
監測目的	系統抽氣設備成效評估	系統整治設備成效評估	尾氣處理設備評估
監測對象	鼓風機或真空泵(入口前)	抽氣設備、抽氣井與監測井	排放口
分析項目	氣體流量	壓力(真空度)	有機氣體濃度
監測頻率	第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次。 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	第一個月每週至少 1 次，每次持續 1~2 小時，每 15 分鐘記錄 1 次。 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	可攜帶型偵測設備，第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次；正式運轉期間，每月至少量測 1 次。 試車階段至少進行 1 次實驗室檢測，正式運轉期間每月或每季 1 次。
備註	試車階段，應量測個別抽氣井之氣體流量。 如氣體流量有顯著變化時，應再量測個別抽氣井之氣體流量。	試車階段，系統與監測井之監測頻率應相同，並應量測個別抽氣井之壓力。 如系統壓力或監測井之壓力有顯著變化時，應再量測個別抽氣井之壓力。	利用可攜帶型偵測設備，如火焰離子化偵測器(FID)或光離子偵測器(PID)進行檢測。 應於試車階段，採集氣體樣品，送實驗室，針對特定 DNAPL 污染物項目進行檢測。

1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上，需考量對附近環境及操作人員之影響，以下針對對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目，分別進行說明如下：

一、對環境之影響

本法對於環境之影響，主要在於尾氣處理。如尾氣處理設置設計不當，可能會造成空氣污染。此外，抽出的受污染地下水亦應經妥善處理後，再行排放。

二、潛在之危害及個人防護裝備

土壤間隙蒸氣抽除法之工安潛在危害及個人防護裝備，略述於表 1.2.4-1。

表 1.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	抽氣井或注氣井設井時，特別是在鑽機拆裝鑽桿的過程中	機具設備危害	- 妥善操作鑽井與設井機具 - 建立夥伴制度(buddy system)
	抽氣井在抽送可燃性氣體時，或地面輸氣管線輸送可燃性氣體時，可能因設備裝置不當，可能引燃火災或爆炸	火災與爆炸	- 可燃性氣體輸送之情況下，應加強人員的操作訓練與緊急應變的能力 - 操作環境利用測爆器進行監測，如測值達到爆炸下限值之 10 %時，宜停止操作，進行逸散氣體的位置
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	DNAPL 生物降解所產生的毒性中間污染物，如四氯乙烯生物降解時，可能產生三氯乙烯與氯乙烯，氯乙烯以氣體存在時，可能累積於鑽孔或系統中，在操作維護過程中，工作人員可能暴露於這些有毒氣體的環境中。	生物降解產物	- 抽氣設置時，應考量避免污染物逸散至地下室、地面與密閉空間中。 - 空氣監測結果顯示有異常時，應配戴適當的呼吸器。 - 整治系統設計者應瞭解整治過程中可能產生氣體。
	設井與操作維護過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於現場所產生的粉塵與揮發性有機物。	粉塵與揮發性有機物之暴露	- 灑水以防塵土飛揚。 - 使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 - 利用攜帶型偵測器，檢查系統的密閉性，並即時修護氣體逸散點。 - 整治系統設計者應瞭解整治過程中可能產生氣體。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 7 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

1.3 成本及期程預估

現地土壤間隙蒸氣抽除法之成本主要與場址大小、污染物特徵與數量、水文地質條件等因子有關。前述因子會影響設井數量、鼓風機抽氣量與整治所需之時間，而尾氣處理成本亦須考量在內。在理想情況下，運用土壤間隙蒸氣抽除法之整治期程約需 6 個月至 2 年。依據美國 FRTR 之統計，依不同類型場址及整治之難易度，其處理成本如表 1.3-1，每立方公尺污染土壤之處理費用介於 405~1,485 美元(約新台幣 13,000~48,000 元)。

正式運期間應定期檢測抽出氣體，與土壤污染成份進行比較，以確認場址地下環境是否已轉換為以非揮發性之污染為主；並考量評估是否改採不同的操作方式，如採脈動式(pulsing)之系統操作，或是增加注氣井與抽氣井之

數量，以提升污染物去除效率。當系統關閉後，污染物濃度低於法規標準時，系統即可停止運轉；反之，若污染物濃度仍高於整治目標，整治者需考量採取其他整治技術如生物通氣法等，進入下一階段之整治。

表 1.3-1 美國土壤間隙蒸氣抽除法之處理成本

單位：美元(新台幣)/立方公尺

場址大小 整治難易度	小型污染場址	大型污染場址
易	1,275 (44,625)	405 (14,175)
難	1,485 (51,975)	975 (34,125)

資料來源：FRTR, Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide (Version 4.0), Section 4.8.

二、 地下水注氣法(Air Sparging, AS)

2.1 整治技術簡介

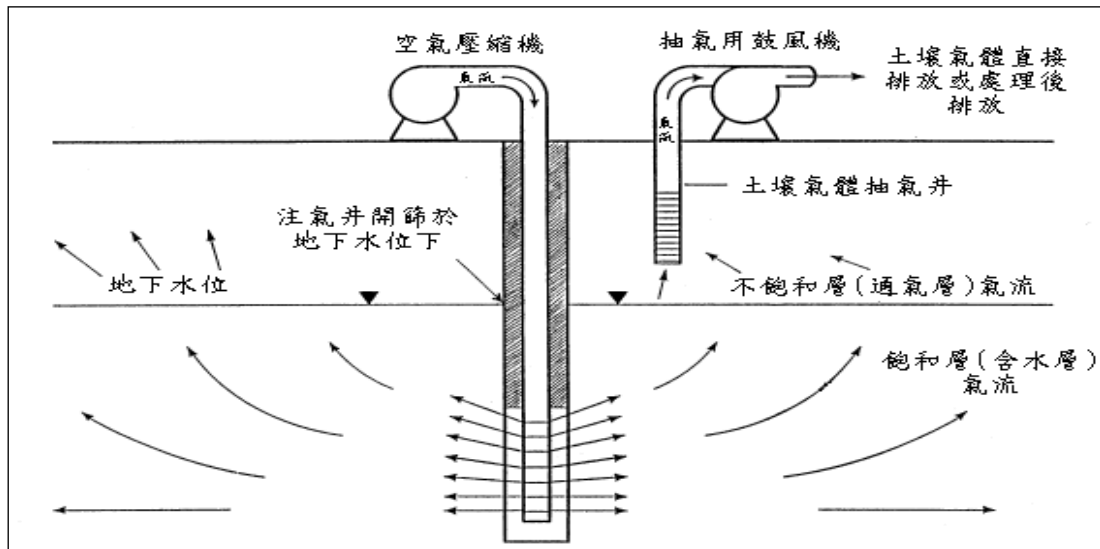
2.1.1 原理

依據美國環保署 2007 年 9 月最新統計，1982 年至 2005 年間美國國家優先整治場址名單(NPL)中，採用現地地下水污染整治的場址總計有 254 個，其中採用地下水注氣法(air sparging, AS)的場址有 72 個(29%)為最多，其次為現地生物整治法有 70 個(28%)場址。地下水注氣法亦為我國現階段污染場址最常採用的現地地下水整治技術，然而大部分係針對 LNAPL 場址，例如加油站之地下水整治等。

地下水注氣法係利用壓力將空氣或氧氣注入地下水中，產生氣泡，促使含水層(飽和層)之地下水污染物溶出，並揮發至氣相進入透氣層(不飽和層)中。為有效控制氣相污染物的流動，通常會結合土壤間隙蒸氣抽除法，將氣體抽出至地面處理後予以排放。由於本法必須注入空氣或氧氣，可增加地下水溶氧量及不飽和層氣體氧氣濃度，促進污染物被好氧微生物降解。此外，在注入空氣中加入甲烷(營養鹽)，則可促進含氯有機物(如三氯乙烯)被共代謝微生物降解。因此，本法去除污染物之機制，高揮性有機物以「揮發」為主，低揮發性有機物則以「生物降解」為主。本法原理示意圖請參見圖 2.1.1-1 所示。

2.1.2 適用條件

本法適用於均質、高透水性之自由含水層之污染，污染物為可被好氧微生物降解之揮發性有機物或汽油。部分適用本法之揮發性有機污染物及其特性，如表 2.1.2-1。本法對於部分異質性、低至中透水性分層之含水層亦有部分效果。



資料來源：US Wyoming DEQ, Groundwater Pollution Control Program Guideline #6, Appendix A, June 1998.

圖 2.1.1-1 地下水注氣法整治系統原理示意圖

實務上，適用本法之污染物可滌性(strippability)係依據亨利常數(H)是否大於 $5.5 \times 10^{-3} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$ 加以研判。有機物蒸氣壓(V_p)大於 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm-Hg}$ 則具高揮發性，但有機物揮發性亦受限於注入氣體流速。表 2.1.2-1 所列之生物降解半衰期(half-life)為有機物在自然地下水環境中，未增強生物降解的情形下，所推出的估計值。另適用本法之水文地質條件如表 2.1.2-2。本法應用上之優缺點，如表 2.1.2-3。

選擇是否採用地下水注氣法時，可參考美國工兵署之技術評估程序(圖 2.1.2-1)，以及參考美國環保署之查核表(表 2.1.2-4)，整治技術評估單位或技術遴選單位可藉回答表中之相關問題，以決定地下水注氣法是否適用於個別場址，回答「否」的問題宜應進一步蒐集相關的資訊，以決定地下水注氣法是否可以達到場址整治目標。

表 2.1.2-1 部分適用地下水注氣法之揮發性有機污染物之特性

污染物	可滌性(strippability) (H, atm-m ³ /mol)	揮發性(volatility) (V _p , mm-Hg @ 20°C)	好氧生物降解性 (t _{1/2} , 小時)
苯	高(H = 5.5 × 10 ⁻³)	高(V _p = 95.2)	高(t _{1/2} = 240)
甲苯	高(H = 6.6 × 10 ⁻³)	高(V _p = 28.4)	高(t _{1/2} = 168)
二甲苯	高(H = 5.1 × 10 ⁻³)	高(V _p = 6.6)	高(t _{1/2} = 336)
乙苯	高(H = 8.7 × 10 ⁻³)	高(V _p = 9.5)	高(t _{1/2} = 144)
三氯乙烯	高(H = 10.0 × 10 ⁻³)	高(V _p = 60)	非常低(t _{1/2} = 7,704)
四氯乙烯	高(H = 8.3 × 10 ⁻³)	高(V _p = 14.3)	非常低(t _{1/2} = 8,640)
汽油	高	高(V _p = 14.3)	高
燃料油	低	非常低	中等

資料來源：Nyer, E.K. et al, In Situ Treatment Technology, 2nd ed., p.186, 2001.

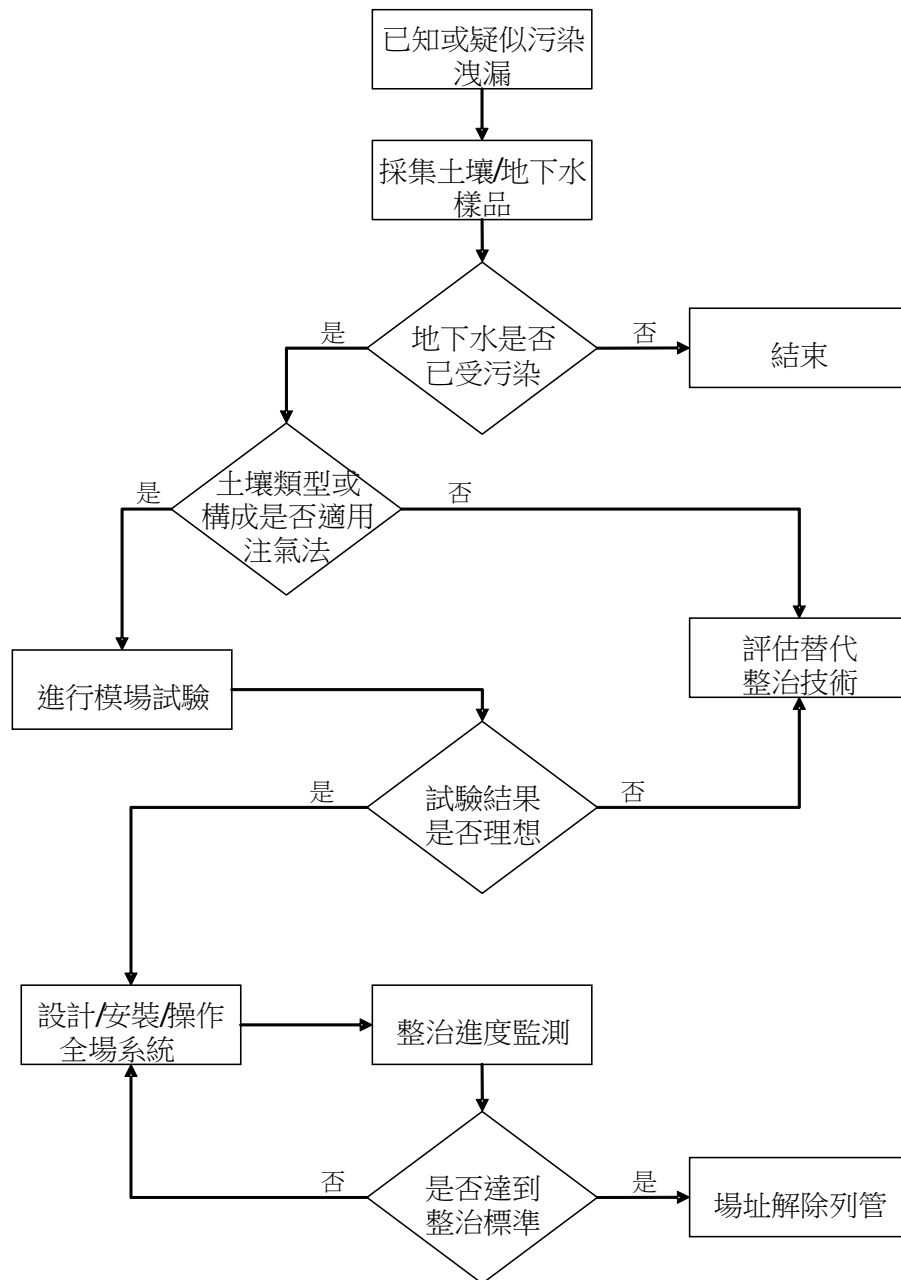
表 2.1.2-2 適用地下水注氣法之水文地質參數

水文地質特性	適用條件	影響
飽和層土壤 透水性(水平)	10 ⁻³ cm/s	適用性、氣體流速 vs. 壓力、物質 的移除效率 vs. 傳輸率
地質分層與 非均相(anisotropy)	砂、礫石土壤均質	適用性、氣體分布、氣流模式(flow pattern)
含水層型態	非侷限含水層	注入氣體回收量
污染物位於水位下深度	小於 40~50 呎(約 12~15 公尺)	注氣深度(注氣壓力)
污染範圍	無分離的污染範圍	適用性與質量移除率
水位上的土壤狀況	透氣層具通氣性土壤厚度應大於 5 呎(約 1.5 公尺)	捕捉抽除氣體污染物的能力

資料來源：Nyer, E.K. et al, In Situ Treatment Technology, 2nd ed., p.186, 2001.

表 2.1.2-3 地下水注氣法技術優缺點比較表

優點	缺點
使用簡單可得之工具器材，容易設置。 操作空間較小。 可加速污染物之揮發及生物降解的速率。 較短的處理時間，在特定條件操作下，整治期程小於 1 至 3 年。 每單位整治費用較其他處理程序便宜。 不須移除、處理、儲存、處置遭受污染的地下水。 結合土壤間隙蒸氣抽除法可提升整治效能。 注入空氣中加入甲烷或營養鹽，則可促進含氯有機物(如三氯乙烯)被共代謝微生物降解。	不能處理遭特殊地質侷限之污染帶。 土壤若有分層，恐造成效能降低。 一些化學性、物理性、生物性的交互作用之機制尚不清楚。 缺乏實場及實驗室數據支持設計考量因子，而場址差異性影響參數不能通用。 過大的壓力會造成污染物的擴散。 低透水性土壤中，氣體傳輸及空氣分布不足。 停止注入空氣後，污染物濃度常會有回升(rebound)之趨勢。



資料來源：USACE，In Situ Air Sparging (EM 1110-1-4001)，p2-25，1997.

圖 2.1.2-1 地下水注氣法技術評估程序流程圖

表 2.1.2-4 地下水注氣法技術選用查核表

1.0 污染物氣相與溶解相分開(Partitioning)之因素：	是	否
1.1 污染物亨利定律常數是否大於 0.01？		
1.2 污染物沸點是否低於 300℃？		
1.3 污染物蒸氣壓是否大於 0.05 mm Hg？		
2.0 土壤滲透性因素：		
2.1 土壤滲透性是否大於 10^{-9} cm^2 ？		
2.2 有無不透氣層或其他可能阻斷氣流之地質狀況？		
2.3 場址亞鐵離子濃度是否 $< 10 \text{ mg/L}$ ？		
3.0 空氣注入技術之設計評估：		
3.1 注氣井有效半徑是否介於 1.5 至 30 公尺(5 呎至 100 呎)？		
3.2 有效半徑是否依據場址各類土壤之特性加以計算？		
3.3 各注氣井流速是否分別符合原分開污染物氣相與溶解相之設計值？		
3.4 各注氣井之空氣壓力是否分別符合所設定克服水頭與毛細管力之設計值？		
3.5 井的數量與位置是否適當？所有井之有效半徑是否涵蓋整個污染整治區域？		
3.6 井開篩位置是否符合場址地下水污染帶分佈的情形？		
3.7 井的配置型式是否適用於污染場址？		
3.8 鼓風機或空壓機之型式是否可以達到設計的注氣壓力？		

資料來源：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, pp.VII-30~31 May 2004.

2.2 整治系統操作與設計

有關國外針對地下水注氣法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表

2.2-1。

表 2.2-1 國外地下水注氣法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國 Army Corps of Engineers(USACE)	Engineering and Design: In-Situ Air Sparging (EM 1110-1-4005)	1997
美國懷俄明環境品質部門水質處(Wyoming DEQ)	Minimum Design Requirements and Common Accepted Engineering Practices: Air Sparging Systems, Groundwater Pollution Control Program Guideline (#6)	1998
美國海軍設備工程服務中心(NFESC)	Air Sparging Guidance Document (TR-2193-ENV)	2001
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Air Sparging	1995
英國環境署(Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 7.7 Air sparging	2002

2.2.1 整治系統設計與操作要點

由於本法常結合土壤間隙蒸氣抽除法，因此模場試驗一般先分別就個別整治方法進行模場試驗後，再同時進行 2 種方法之模場試驗。較大型污染場址建議應進行模場試驗，以取得場置性與全場(full scale)設計所需的參數，包括地下水位深度與變動、場址地質資料高程、污染物分佈與特形如溶解度、蒸汽壓、土壤透氣性與注入空氣壓力、可生物降解性、地下微生物生長情形等(In-situ air sparging, 2009 台美講習會)，以確認整治系統的影響範圍(zone of influence)、氣流通路(airflow pathways)、空壓機(鼓風機)大小等，並據以規劃監測計畫，評估最低氣體注入壓力，以及選擇適當的空氣注入流速範圍。本法各項模場試驗及其試驗目的，彙整如表 2.2.1-1。

計畫執行者於評估地下水注氣井間距時，宜進行表 2.2.1-1 中所列「標準模場試驗」之 6 項試驗；如採用大間距之注氣井設計時，則宜進行「場置性模場試驗」所列之第 7、8 項之試驗。

在評估模場試驗結果以作為後續規劃設計之參考時，宜考量下列注意事項：

- 一、 場址具有非均質與互層的地質結構時，當氣流遇到低透氣層易產生橫向擴散，使得注氣井影響範圍可能會顯得較大。
- 二、 地下水監測井出現氣泡，不可視為注入氣體完全通過含水層的具體證據。
- 三、 模場試驗結果不可作為設計影響範圍唯一的參考數據，影響範圍的大小主要受注氣井週圍含水層水力傳導係數(K)的影響，在水平與垂直方向土壤之異質性與透氣性差異亦十分重要。
- 四、 研究證明，對於均質地質之場址，可用注氣深度之 1~2 倍估算影響範圍之大小。
- 五、 在注氣井影響範圍內之污染物，不應假設有相關的處理速率。
- 六、 地下水中之鐵離子可能因曝氣而產生氧化鐵沉澱，阻塞井篩或土壤孔隙。

本工法將產生廢氣排放之問題，因此需考量廢氣排放對於環境之影響，

及周圍居民對於空氣品質與用水安全之觀感，以避免不必要的非理性抗爭，造成執行之延宕。

表 2.2.1-1 地下水注氣法各項模場試驗

項次	試驗	試驗目的	標準模場試驗	場置性模場試驗
PT1	基線資料採樣：含水層溶氧(DO)、壓力、土氣、地球物理(通氣性)之狀況(在進行PT8試驗時，同時瞭解)。	瞭解地下水注氣法整治前含水層狀況。	√	√
PT2	注氣壓力與流速試驗	瞭解在適當的壓力下是否可達到規劃的流速。	√	√
PT3	地下水壓反應試驗(groundwater response test)	瞭解氣體分布特性，如注入氣體是否呈半圓錐形均勻分布，或是有特別分層的狀況。	√	√
PT4	氮氣示蹤劑試驗	瞭解注入氣體分布的邊界，以及瞭解是否有優先流通路徑(preferred directions)。	√	√
PT5	土氣與尾氣採樣	瞭解揮發率及瞭解是否有立即明顯的安全危害。	√	√
PT6	測量溶氧量	瞭解注入氣體分布的邊界，以及瞭解是否有優先流通路徑(preferred directions)。	√	√
PT7	SF6 分布試驗	瞭解注入氣體在污染範圍內之水平與垂直方向的分布情形。		√
PT8	其他地球物理調查工具	瞭解注入氣體在污染範圍內之水平與垂直方向分布情形，以及瞭解氧在地下水中的傳輸速率。		選擇性

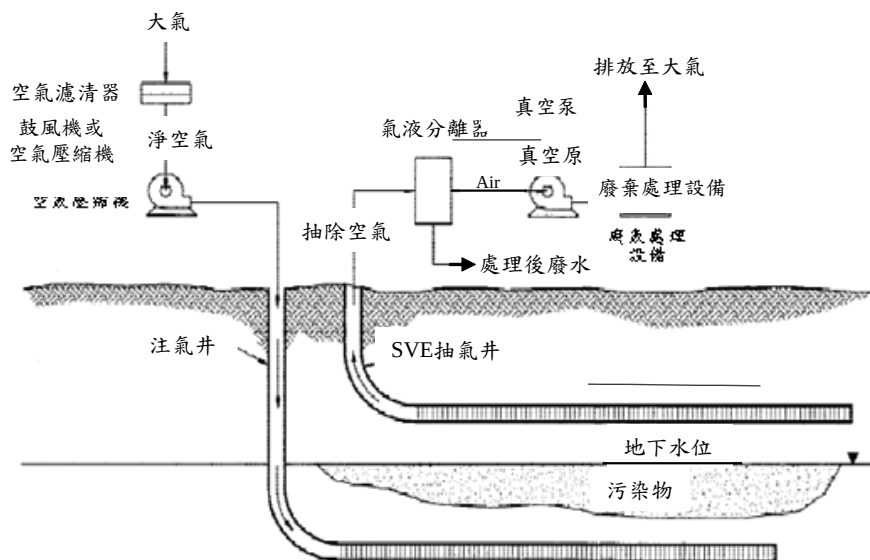
資料來源：Battelle, Air Sparging Design Paradigm, p.16, 2002.

依據場址條件，空氣可藉由垂直井或水平井等不同方式注入至含水層。本法較常採用垂直井(如圖 2.1.1-1)，並以傳統設井方式(如中空螺旋鑽機)設置。水平井(如圖 2.2.1-1)須以較先進的設井方法設置，較適用於建築物下方淺水層的污染及管線滲漏所引起之細長污染帶。

此外，對於透氣性差的不飽和層土壤且地下水位高的場址，則可調整傳統土壤氣抽除方法，以設置透氣性佳的溝渠取代傳統的抽氣井，如圖 2.2.1-1。

在整個操作期間，需要測試和調整各注氣井與抽氣井的壓力及流速。系統正式操作之初，調整注氣壓力時，應注意不得超過最大設計壓力。操作過程中，則應注意是否因重金屬沉澱，或微生物增生，而造成井篩或含水層積垢及阻塞的問題。

本法操作一段時間後，污染物的去除效率會開始降低，為提升去除效率，系統將會轉換成不同的操作模式，如採用脈衝(pulsed)操作的模式，即將空氣注入設備關閉一段時間，僅進行抽氣，再開啟空氣注入設備的操作方式。由於含水層氣體通道的不斷變化，可促使地下水與空氣充分混合，提升揮發性有機物的去除效率。



資料來源：USEPA, Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction, Chapter 3, September 1997.

圖 2.2.1-1 水平井空氣注入／土壤間隙蒸氣抽除法整治系統示意圖

2.2.2 整治系統單元

地下水注氣法整治系統通常包括注氣井、管線、注氣設備、氣體流量計與儀控設備等，如結合土壤間隙蒸氣抽除法，則還需包括抽氣井、抽氣設備與尾氣處理設備等，彙整如表 2.2.2-1。

表 2.2.2-1 地下水注氣法系統設備表

項次	各項設備
1	注氣井(垂直式或水平式)
2	管線系統，包括歧管(manifold)
3	注氣設備，如空氣壓縮機或鼓風機
4	氣體流量計
5	壓力調節閥
6	壓力計
7	儀控設備
8	抽氣井(選用)
9	抽氣設備(選用)
10	尾氣處理設備(選用)

2.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

當場址有下列情形時，宜避免採用本法或規劃防止土壤及地下水污染擴大之相關措施，如規劃監測計畫或採用土壤間隙蒸氣抽除設備。

(一)如場址地質透氣性不佳，氣體垂直傳輸可能因被阻斷而往側向移動，而使得污染物不易被抽除而向外擴散。

(二)對於非均質性的地質，且透氣性差地層位在透氣性佳地層之上方，使用本法可能造成污染帶之擴大。

(三)當自由相 DNAPL 未完全被移除或控制時，注氣可能使 DNAPL 四處移動，並遠離注氣的區域。

(四)注氣所產生的污染氣體，如未經妥善控制，則可能擴散到鄰近的地下水、結構物或管渠中，造成污染的擴大。

二、成效監測

地下水注氣法最佳成效指標為系統在關閉一段時間後，監測場址的地下水污染物濃度，可用來確認污染地下水的改善情形。但於本法操作期間亦需進行監測，方能將系統之處理成效調整至最佳化狀態。本法結合土壤間隙蒸氣抽除法時，監測項目包括：注入壓力與真空壓力、地下水位、空氣流量、地下水之溶氧及污染物濃度、抽除氣體或土壤蒸氣中之 O_2 、 CO_2 及關切污染物。

成效監測詳細內容包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 2.2.3-1。

表 2.2.3-1 地下水注氣法／土壤間隙蒸氣抽除法整治系統成效監測

項目	注氣、抽氣設備	尾氣處理系統	空氣注入系統(整治後)
監測目的	設備調整至最佳化	尾氣處理設備評估	評估系統整治成效
監測對象	注氣井、抽氣井、歧管、鼓風機、排放管	排放口	監測井
分析項目	注入壓、真空壓、氣體流量	有機氣體濃度	污染物項目、土氣濃度、溶氧、氧化還原電位、pH、生物降解產物如 CO ₂ 、水位
監測頻率	- 第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次。 - 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	- 可攜帶型偵測設備，第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次；正式運轉期間，每月至少量測 1 次。 - 試車階段至少進行 1 次實驗室檢測，正式運轉期間每月或每季 1 次。	地下水污染物項目：定期(如每月或每季)採樣，送實驗室進行分析。
備註	- 試車階段，應量測個別注氣井、抽氣井、歧管、鼓風機、排放管之壓力、氣體流量。並同時量測監測井，以評估有效處理範圍。 - 試車階段應每日量測地下水位，以評估注氣造成水位隆起的狀況。	- 利用可攜帶型偵測設備，如火焰離子化偵測器(FID)或光離子偵測器(PID)進行檢測。 - 應於試車階段採集氣體樣品送實驗室，針對特定 DNAPL 污染物項目進行檢測。	- 於整治系統完全關閉後進行。 - 土氣濃度、溶氧、氧化還原電位、pH 與地下水位於現場進行檢測。

資料來源：US Wyoming DEQ, Groundwater Pollution Control Program Guideline #6, Chapter 6 - Minimum Design Requirements and Common Accepted Engineering Practices: Air Sparging Systems, June 1998.

2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響。以下針對對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目進行說明。

一、對環境之影響

本法之注氣作用可能造成地下含水層的擾動，因此應遵照設計操作參數操作。整治系統如安裝土壤間隙蒸氣抽除(SVE)設備，抽除氣體之排放應符合相關空氣污染防制法令之要求。依本署「空氣污染防制法」(95.05.30)第 23 條規定：「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。

二、潛在之危害及個人防護裝備

採用本法之物理性與化學性風險，如表 2.2.4-1。

表 2.2.4-1 地下水注氣法之潛在危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	中空螺旋鑽設井過程中，如遇可燃性氣體異常累積或高濃度可燃性氣體的狀況時，可能因金屬鑽桿或鑽頭碰撞金屬或石頭所產生火花，造成井內起火燃燒的情形。	火災與爆炸	妥善操作鑽井與設井機具 加強操作人員的訓練與緊急應變的能力 設置消防設備或準備滅火器
	抽氣井或注氣井設井時，特別是在鑽機拆裝鑽桿的過程中	機具設備危害	妥善操作鑽井與設井機具 建立夥伴制度(buddy system)
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	設井過程中，工作人員可能接觸到土壤中的揮發性有機物、粉塵或重金屬，或洗井過程中，吸入、食入或皮膚接觸到污染物	污染物	設井過程中，應適當灑水防止揚塵 使用適當的口罩或呼吸器 依據工作特性，提供工作人員適當的個人防護設備
	系統操作過程中，工作人員可能因吸入、食入或皮膚接觸途徑，而暴露於揮發性有機物、二氧化碳、生物降解有機物的環境	化學物質與副產物	使用適當的通風設備 工作人員穿著適當的個人防護設備 檢查封閉管路 廢氣處理設備排放管高度應高於工作人員的呼吸的高度
	注氣井可能造成揮發性有機物的移動，而進入地下構造物中，如地下室或污水管渠。揮發性有機物如具有毒性或可燃性，可能造成人員化學性暴露、火災或爆炸	揮發性有機物的移動	設計人員應決定系統的壓力範圍，並安裝警報系統，避免過壓的情形發生 定期檢測地下室或其他區域之揮發性有機物濃度，以了解是否超過警戒值 提供訓練，使工作人員了解揮發性有機物可能擴散的模式。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 10 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

2.3 成本及期程預估

依美國環保署資料顯示，以地下水注氣法進行整治，平均每噸土壤處理費用約為 20~50 美元(約新台幣 700- 1,750)。地下水注氣法的處理時間較短，在特定操作條件下，整治期程可小於 1 至 3 年。

三、 現地生物整治(In-situ Bioremediation)

3.1 整治技術簡介

3.1.1 原理

2005 年台美講習會，New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL 指出微生物(除氯溶劑)可提高污染物濃度梯度或分泌生物性界面活性劑(biosurfactant)，增加 DNAPL 的溶解度。此外，有研究指出生物整治亦可作為較為積極之整治技術後(如熱處理、化學藥劑添加或界面活性劑沖排等)，移除最後殘餘之 DNAPL 整治技術。

現地生物整治(in-situ bioremediation)乃是自然界反應過程，藉由碳源(電子接受者)及微生物有機降解過程，去除或降低污染物的毒性，或轉成無毒性的型態，以達到整治之成果，所以微生物的特性是關鍵要素。微生物包括單細胞與多細胞生物，常見的菌種有細菌、真菌、光合成微生物和微小蟲類等。根據能量來源，細菌可分為光合成菌(phototrophs)、異營菌(heterotrophs)及化學自營菌(chemoautotrophic bacteria)等。有些細菌可同時以有機及無機物為其營養鹽，處理外來人工污染物(如鹵化物)；另外，在生物整治中，異營菌為主要降解有機污染物的菌種，光合成菌常應用於處理土壤中重金屬污染物或毒性污染物之生物轉化機制。因此，整治上多利用異營菌降解有機污染物，處理地下水污染問題。

目前國內外生物整治技術之選擇上，已趨向於經費節省、高處理效率及技術整合之方向發展，而就恢復污染場址土地原有使用用途而言，生物整治技術其破壞性較低，並具有有效處理及經費較為經濟之優點。

生物整治法(bioremediation)是一種以自然程序來清除環境中有害化學物質的方法。生活在土壤及地下水中的微生物會吃某些特定的有害化學物質，例如油品類的洩漏物。當微生物消化完這些化學物質後，便將它們轉化為水、無害氣體與二氧化碳等，如圖 3.1.1-1。

生物整治工法是經由人工添加植入或自然發生的過程中，以微生物將污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低或排除污染物之濃度，完成整治作業。本法雖需人工添加或植入營養源，惟成本較低且整治時效長。

本法利用添加外在碳源或氮源等營養源於受污染的土壤或地下水體，使存在於地下環境中之具毒性之污染物因自然界微生物代謝反應產生降解，轉為無害的物質；再藉由抽水井使污染區地下水產生洩降錐，使污染物往抽水井方向移動。而被抽出的地下水可進行回收或經處理後排放。本法原理示意圖請參見圖 3.1.1-2。



資料來源：USEPA, A Citizen's Guide to Bioremediation, EPA 542-F-01-001, April 2001。

圖 3.1.1-1 微生物處理有機污染物之概念示意圖

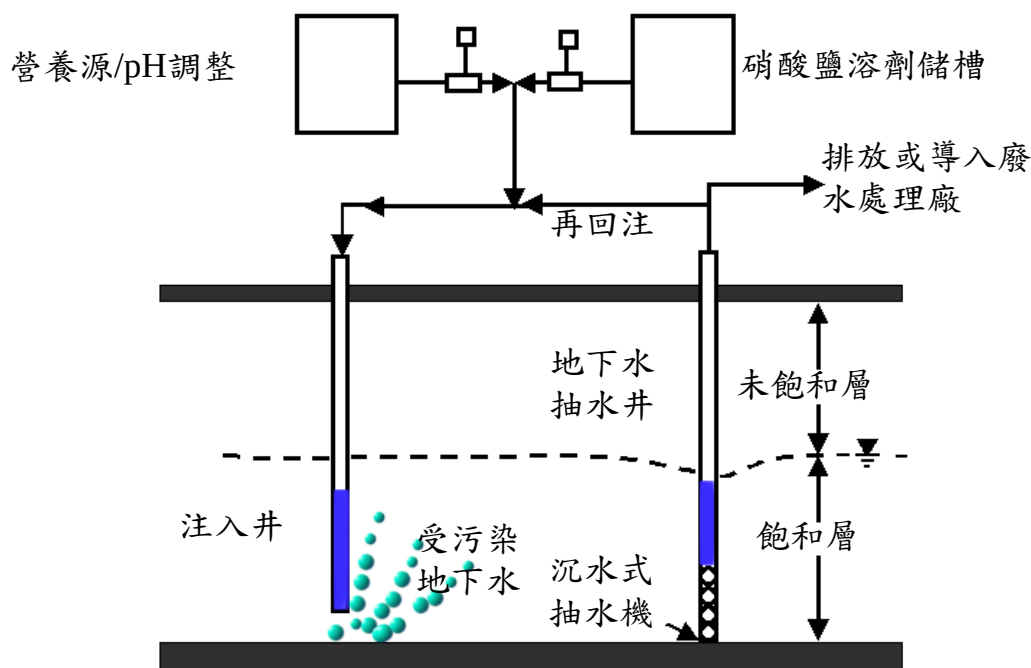


圖 3.1.1-2 生物整治法原理示意圖

3.1.2 適用條件

微生物雖然能夠清除有害化學物質，但必須有適當的溫度、營養物及充分的氧氣或無氧環境。這些條件使微生物能夠生長與繁殖，並進而消化更多的化學物質。當生長條件不對時，微生物生長得非常緩慢，甚至死亡，並可能產生更多的有害化學物質。本法應用上之優缺點比較如表 3.1.2-1。

表 3.1.2-1 生物整治法的優缺點比較表

優點	缺點
- 在現地即可降解污染物 - 可處理其它技術不易處理的低濃度有機污染物 - 環境上較安全可靠且不會產生廢棄物 - 利用微生物族群，且不會產生具潛在危害性之微生物 - 整治經費較低	- 可能受到有機物或重金屬的抑制 - 污染物降解速率慢 - 微生物大量增長可能會造成土壤孔隙阻塞，影響地下水流通 - 透水性低的土壤可能造成所添加之營養鹽無法順利流通 - 營養鹽添加可能危害鄰近區域的水體水質 - 部分代謝產物會產生臭味，或有產生有毒中間產物的疑慮

資料來源：How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers.(EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002).Chapter X, XII, 2004.

實場處理 DNAPL 案例的生物整治法有兩種，一是透過天然的機制，將污染物厭氧降解為毒性較小或是無毒性的物質；另外一種是透過添加有利的物質，活化生物系統中的微生物，以達到強化自然衰減的目的。主要區分為兩大類：(1) 好氧氧化作用(aerobic oxidation)：好氧氧化作用又可分為好氧直接氧化作用與好氧共代謝(cometabolic)氧化作用；(2) 厭氧還原脫氯作用(anaerobic reductive dechlorination)。以下茲就上述兩種作用進行簡易原理描述。

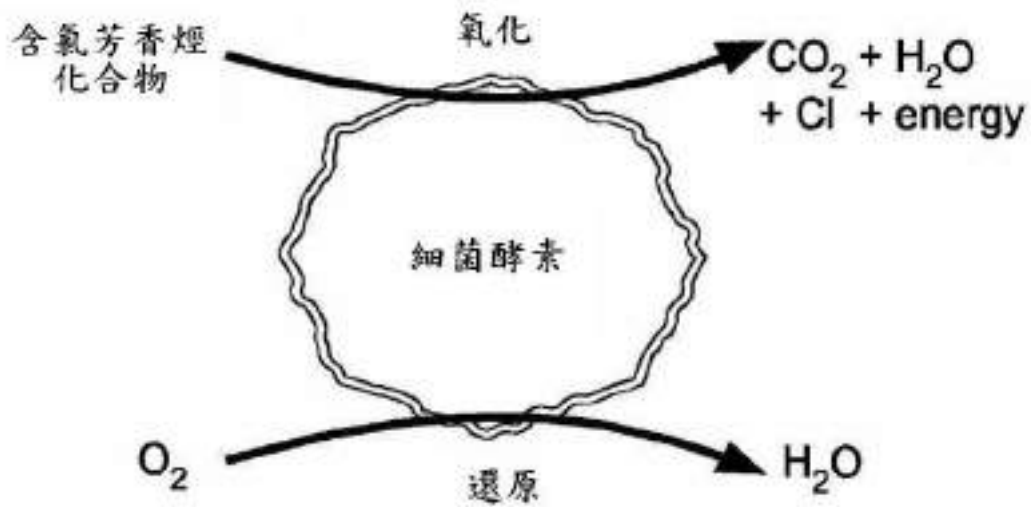
一、 好氧直接氧化作用

好氧直接氧化作用係將污染物利用生物分解的方式降解，污染物同時作為電子供給者和主要生長基質。污染物氧化所產生的電子，傳遞至電子接受者，例如氧。污染物則被氧化成二氧化碳，同時將氧則還原為水，如圖 3.1.2-1 所示。在地表下且有氧存在的好氧環境中，含氯芳香烴化合物(CAHs)僅氯乙烯(VC)可以直接氧化的方式，被氧化成二氧化碳、水。

二、 好氧共代謝氧化作用

好氧共代謝氧化作用係利用微生物的酵素分解某一種污染物的代謝過程中，同時該酵素可附帶地將另一種污染物氧化。微生物在以此種方式將污染物氧化的過程中，並不會伴隨著能量的產生。在好氧狀況下，三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、三氯乙烷、二氯乙烷與氯仿等，可以利用此種微生物共代謝機制降解。

可做為好氧共代謝作用之電子供應者，包括乙烯、甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、芳香烴化合物(如甲苯、酚)和氨。在好氧狀況下，單氧化酶(monooxygenase)，例如甲烷分解菌中的甲烷氧化酶(methanemonooxygenase, MMO)，可催化電子供給者提供電子，使得污染物轉化為不穩定的環氧化物(epoxides)，該不穩定環氧化物會在水中快速地被降解為醇類和脂肪酸，如圖 3.1.2-2。



資料來源：USEPA, Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications, p.2-13, 2002.

圖 3.1.2-1 好氧直接氧化作用反應機制示意圖

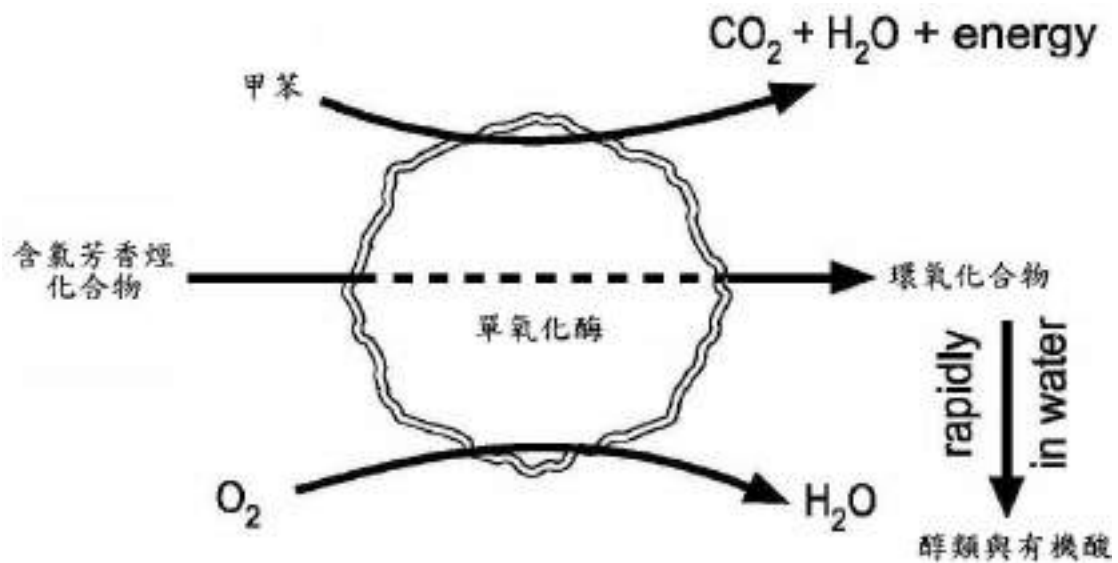


圖 3.1.2-2 微生物好氧共代謝反應機制示意圖

三、 厭氧還原脫氯作用

在厭氧狀況下，微生物利用還原脫氯作用降解含氯有機化合物。還原脫氯作用依序以氫原子置換氯原子，也就是說將四氯乙烯先轉換為三

氯乙烯後，再由三氯乙烯轉換為二氯乙烯，依此類推。在直接還原脫氯反應中，微生物直接利用三氯乙烯和氯乙烯作為電子接受者，驅動氧化還原反應的發生，在這個過程中，會有能量的產生。在共代謝還原脫氯反應中，微生物利用其他物質作為電子接受者，驅動氧化還原反應的發生。在大部分的厭氧狀況下，還原脫氯作用都會發生，主要是透過還原硫酸鹽並生成甲烷的方式。在厭氧還原脫氯作用中，氫是相當重要的電子供給者；而參與反應的細菌，如 *Dehalococcus ethenogenes* 和 *Dehalospirillum multivorans*，會和甲烷生成菌競爭氫氣(圖 3.1.2-3)。脫氯菌(dechlorinating bacteria)可以生存在較低的氫氣分壓之下，約為甲烷生成菌的 1/10，因此，系統中氫氣的添加速率可控制在很低的情況下。另外，在某些情況下，硝酸鹽還原菌或硫酸鹽還原菌與甲烷生成菌競爭的結果，會抑制甲烷生成菌的活性，和厭氧還原脫氯作用的程度。

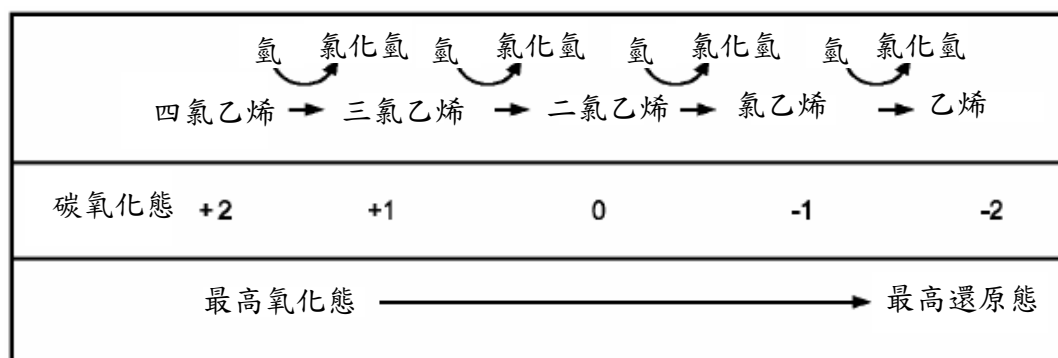


圖 3.1.2-3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖

3.2 整治系統操作與設計

有關國外針對生物整治已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 3.2-1。

表 3.2-1 國外生物整治相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications (EPA 542-R-00-008)	2000

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 8.4 Biodegradation	2002
美國州際環境技術法規委員會(ITRC) DNAPLs 生物整治組	Overview of In Situ Bioremediation of Chlorinated Ethene DNAPL Source Zones (BioDNAPL-1)	2005
美國國防部環境安全技術檢定計畫(ESTCP)	Protocol for Enhanced In Situ Bioremediation Using Emulsified Edible Oil Robert Borden (Solutions-IES)	2006
美國國防部環境安全技術檢定計畫(ESTCP)	Technical Protocol for Using Soluble Carbohydrates to Enhance Reductive Dechlorination of Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons	2006

3.2.1 整治系統設計與操作要點

正式整治前，多會選擇一處進行現地環境監測與微生物適用性分析試驗。模場試驗設置方法，一般包括至少設置 1 口注入井，幾口監測井，以及後續一系列環境監測計畫，藉由環境資料的比對，評估適當的整治參數。如此一來，可確認微生物或細菌在環境之效率。利用添加人工或天然營養鹽等外在營養源，激化微生物或細菌的代謝反應去除受污染物，加速污染物去除之效率，並據以設計後續營養鹽添加頻率與環境監測計畫。

現地生物整治在進行規劃設計時，應考量污染物之特性、微生物特性、地質條件、地下水位與土壤水分含量等。現地生物整治法之配置如圖 3.2.1-1。本法在設計上須注意與考量之事項，彙整如下：

一、場址特性評估

場址如具非均質或互層之地質構造，位於低滲透性地質(如砂土或黏土)上的地層結構，由於吸附於砂土與黏土上的揮發性有機污染物不易被分離出來，因此去除效率將明顯降低。因此，設計時應考量場址的地質構造，並作適當的調整。

二、營養鹽選用及添加頻率。

在整個操作期間，生物整治系統需要定期監測和調整，確保受污染地層之微生物是否如預期發揮功效，定期監測確認未產生抑制微生物或細菌之環境條件。相關系統操作過程中須記錄相關操作參數，包括：營養鹽添加時機、抑制生物之環境條件，與中間衍生物之濃度變化等，以

瞭解系統操作狀況是否符合設計流量與處理效率。以下說明為提供良好微生物生長環境，於操作時應調整之添加物調整方式。

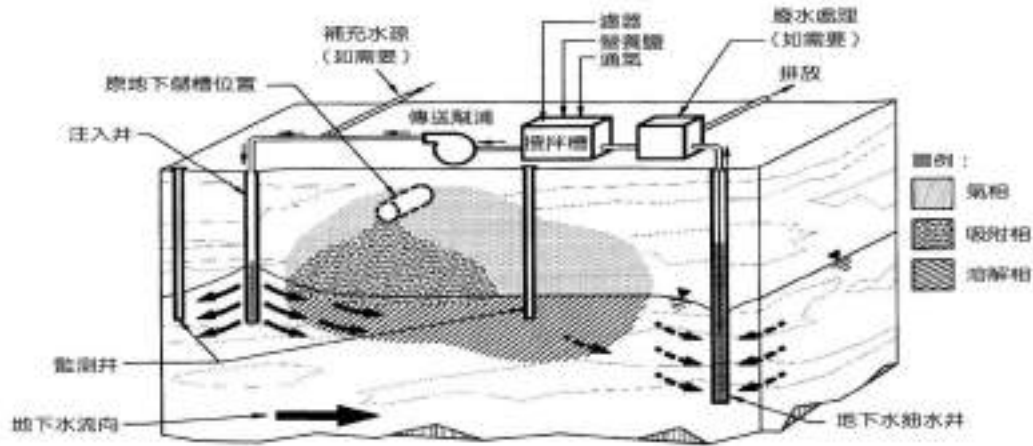


圖 3.2.1-1 注入井之現地地下水生物處理法示意圖

三、 添加微生物／既有微生物活化

生物處理的整治系統添加對污染物具特別分解能力的菌株或族群，這些特定菌株或族群可能購自商業化的生物製劑，或是將取自該污染場址的菌株加以馴養、分離、鑑定及再增殖。前者為具有特定分解能力的菌株，對該污染物的分解能力，應不會是限制因子；但因該菌株並非直接取於污染場址現場，因此對現場環境的適應往往會是主要的限制因子。若屬後者，利用取自污染現場的現地原生菌，經馴養增殖後，再加入污染場址中，此種生物添加方式，由於原菌株是取自污染場址，對現場的適應力較外來添加者為佳，但此原生菌對於該特定的污染物的分解能力則不一定是最佳。不管是添加增殖後的原生菌或非原生菌於擬處理的系統中，目的皆為增加微生物量及活性，提高反應速率。系統操作時，可依據污染物的特性，維持在好氧或厭氧條件下，且添加的微生物須與環境因子的調整配合之，以提高所加入之微生物的活性。

四、 添加營養鹽

添加地下水體中微生物生長必須的營養鹽，以維持整治系統在好氧或厭氧條件的分解效率。維持受污染地下水體中適當的營養鹽濃度是維持或提高代謝分解速率的另一關鍵，且厭氧處理系統的營養鹽需求與好

氧系統並不相同，如厭氧系統對氮、磷的需求量較低，但對一些經常被忽視的微量物質(例如 Co、Mo、Ni、Fe 等重金屬濃度)的需求卻頗為敏感。

五、 添加電子供給者

好氧的處理系統添加甲苯及甲烷等有機物的主要目的是為進行共代謝作用，所謂的共代謝作用是利用添加的有機物作為主要碳源，而微生物利用這些主要碳源的同時，也會經由代謝作用而分解污染物。

六、 添加電子接受者

在生物處理法中，藉由添加碳源或氮源，如精緻乳化油(EOS)、糖蜜、HRC 等物質，以進行厭氧生物降解。例如以共代謝方式去除三氯乙烯等反應機制。將釋氮化合物加入地下水中，以氮作為電子供給者。電子的持續充分供應，以及受污染物質在本系統中的電子競爭力非常重要。系統中即使供應足夠的電子，但受污染的物質無法有效競爭電子，則整治目標仍不易達成。電子供應量、供應方式與改善污染物對電子競爭力的環境條件等，就整治而言是主要的關鍵因子。

3.2.2 整治系統單元

生物整治系統通常包括注入井、管線、井頭設備、監測井、廢水處理設備等。整治設備會隨著不同種類的污染物與場址特性，選取不同的設備或結合其他整治技術，以提升整體的整治成效。於此所列設備以較常使用共通之設備需求為重點，彙整如表 3.2.2-1。

表 3.2.2-1 生物整治法系統設備表

項次	各項設備
1	注入井
2	管線系統，包括歧管(manifold)
3	注入設備(如控制閥、壓力計、取樣口、抽氣管、流量計等)
4	監測井
5	廢水處理設備
6	儀控設備
7	成效監測設備

依污染物質、環境條件，及營養鹽添加之內容，採用下列不同的注入方法。

- 一、 直接注入系統：將微生物、營養鹽、電子供應者或是電子接受者直接注入受污染的地下水體中，以增強生物分解作用。
- 二、 地下水循環系統：地下水循環系統可將受污染的地下水抽至地表，添加營養鹽(或其他物質)或加以處理後，再回注到污染帶的上游端；也可在地表下形成一個內部循環，將所必須加入之物質，直接加到此循環系統中，再回注到污染帶的上游端。
- 三、 透水性反應牆處理系統：透水性反應牆是在地下水污染帶下游設置一人工的回填物(例如釋氮化合物、釋氧化合物或營養鹽等)，而當地下水流經該反應區時，污染物與透水性反應牆產生離子交換反應去除污染物之毒性。
- 四、 生物通氣法：生物通氣法可將空氣加注於地下水含水層或土壤通氣層中，其目的是提供氧作為電子接受者，而促進生物分解污染物；此外亦有可能以空氣注入的方式，促使污染區域的低沸點污染物揮發而被去除。

3.2.3 整治系統監測

有關評估現地生物整治系統之成效，因系統設計之不同會有所差異，但正式運轉整治期間，操作維護整治系統是影響整治成效的重要關鍵。於此所列成效監測，係依本法較常使用共通之項目為重點；監測對象包括注入井/監測井、整治注入設備與廢水處理排放設備等，其監測目的包括相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響及防止污染擴大之監測工作等。

成效監測詳細內容包括監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率彙整如表 3.2.3-1。

表 3.2.3-1 現地生物整治系統成效監測

項目	注入井(污染源)	監測井群	廢水處理系統
監測目的	整治成效評估	周界環境成效評估	處理設備評估
監測對象	鼓風機或真空泵(入口前)	監測井	排放口
分析項目	主要污染物/衍生物	主要污染物/衍生物	主要污染物/衍生物
監測頻率	第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次。 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	第一個月每週至少 1 次，每次持續 1~2 小時，每 15 分鐘記錄 1 次。 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	實驗室檢測，試車階段，至少檢測 1 次，正式運轉期間每月或每季 1 次。
備註	試車階段，應檢測水質。環境特性分析，避免抑制地層中微生物/細菌活化之效率。	試車階段，應檢測水質。環境特性分析，避免抑制地層中微生物/細菌活化之效率。	應於試車階段，採集氣體樣品，送實驗室，針對特定 DNAPL 污染物項目進行檢測。

3.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

本法將除了於環境監測期間產生廢水排放處理之問題，應考量周圍居民對於空氣品質之觀感，本工法可能因添加部分營養鹽後降低地下水原有的溶氧量，產生地下水惡臭問題，及其降解過程中亦可能產生有害中間衍生物，影響民眾用水安全，發生不必要非理性抗爭，造成執行之延宕。

因此，整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下針對對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目進行說明。

一、對環境之影響

本法對於環境之影響，主要在地下水水質狀況之處理成效，如厭氧環境產生水質惡臭之處理，此外，本法亦可能會產生中間衍生物造成地下水污染，亦應妥善處理後，持續監測並採取因應措施。

二、潛在之危害

生物整治法潛在可能之風險，約略分成兩類，分別是物理性及化學性風險。在物理性風險上可能暴露的風險，大致以機具設備危害、火災與爆炸與感電等三大類。化學性風險為生物降解產物。詳細內容如表 3.2.4-1。

表 3.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	注入井/監測井設井時，特別是在鑽機拆裝鑽桿的過程中	機具設備危害	妥善操作鑽井與設井機具 建立夥伴制度(buddy system)
	可能最終產物甲烷因濃度偏高，可能因設備裝置不當，可能引燃火災或爆炸	火災與爆炸	可燃性氣體輸送之情況下，應加強人員的操作訓練與緊急應變的能力
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	DNAPL 生物降解所產生的毒性中間污染物，如四氯乙烯生物降解時，可能產生三氯乙烯與氯乙烯，氯乙烯以氣體存在時，可能累積於鑽孔或系統中，在操作維護過程中，工作人員可能暴露於這些有毒氣體的環境中。	生物降解產物	空氣監測結果顯示有異常時，應配戴適當的呼吸器。 整治系統設計者應瞭解整治過程中可能產生氣體。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 13 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

3.2.5 成本及期程預估

現地生物整治法之成本，主要與場址大小、污染物特徵與數量、水文地質條件等因子有關。前述因子會影響設井數量、營養鹽添加量與整治所需之時間。在理想情況下，運用生物整治法之整治期程約需 3 年至 5 年。依據美國 FRTR 之統計，依不同類型場址及整治方式，若以好氧生物共代謝處理系統，每噸污染水量之地面處理費用介於 10~20 美元(約新台幣 350-700)，每 1000 加侖約 40 至 80 美元(約新台幣 1,400- 2,800)。但往往因污染物的特性及污染深度、所選定添加營養鹽(硝酸鹽)、抽水速率或過氧化氫的生化反應等，影響後續整治費用。然對於使用硝酸鹽為營養鹽之整治費用估計，從水中除去殘餘污染物的每公升 40 美元到 60 美元(新台幣 1,400 - 2,100)，每加侖 160 到 230 美元(新台幣 5,600- 8,050)範圍內。

四、熱處理法 (Thermal treatment)

4.1 整治技術簡介

4.1.1. 原理

現地熱處理蒸氣注入利用有機污染物之揮發性，隨溫度升高而增加之特性，達到加速脫附效果。首先提升地下環境溫度，再利用土壤抽氣法，將揮發之污染物自受污染區抽除。現地熱處理整治過程中可將污染源移除或降解、進行溶解性污染團(dissolved plume)整治、地下水污染控制，然而過程中需使用能源，因此可能造成碳排放(In-situ thermal treatment, 2009 台美講習會)。

現地熱處理最主要的優點，在於受污染土壤不需被挖除並運送至別處進行處理，可以有效地節省整治成本。並可提供為位於低滲透性地層、存在地表建物範圍、地下水位面以下或其他不適合開挖區域的整治作業(2005 台美講習會, In-situ thermal treatment of NAPL contamination)。然而，現地熱處理因土壤之非均質性及地下水透水性質不同之故，難以有效掌控並證實成效。

目前較常被運用之熱處理技術大致有四種，如蒸氣注入法(steam injection)、電阻加熱法(electrical resistive heating, ERH)、射頻加熱法(ratio-frequency heating)、熱傳導加熱(conduction heating) (In-situ thermal treatment, 2009 台美講習會)，本指引將主要針對蒸氣注入法與電阻加熱法做進一步說明。

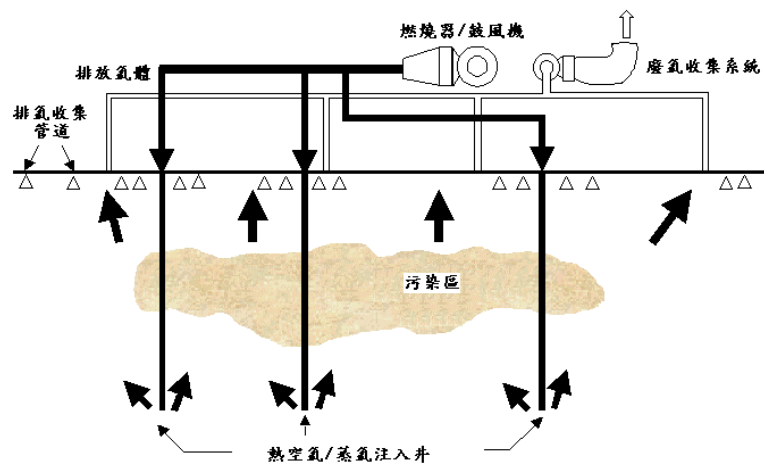
一、蒸氣注入法

蒸氣注入法主要透過注入井將蒸氣強力注入地下水中，利用熱空氣或蒸氣使受污染之土壤加熱，促使污染物從土壤中釋放出來，使揮發性及半揮發性的污染物上升至未飽和層，再從未飽和層中將污染物抽除後另行處理。而地下水中的 NAPL 則會提高其溶解性隨水移動被抽除(2009 年台美講習會, In-situ thermal treatment)。在現地注入熱水或蒸氣之技術包括：廢油回收再利用(CROW)、蒸氣注入及真空抽除法(SIVE)、現地蒸氣加強抽除(ISEE)、蒸氣加強回收程序(SERP)。上述所提之各種工法，可以移除大量的油品類污染物，及延緩有機污染物向外擴散。本法原理

示意圖請參見圖 4.1.1-1。

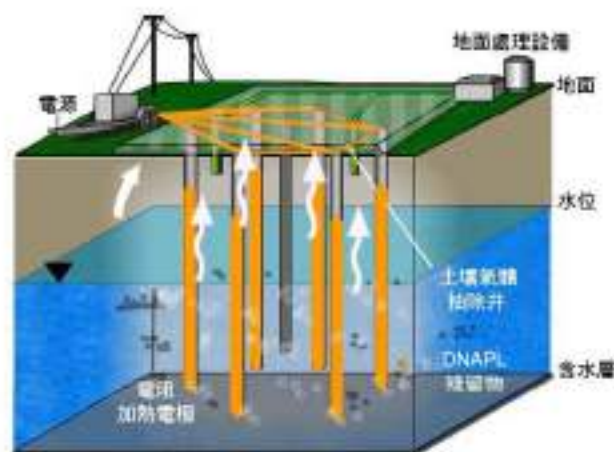
二、電阻加熱法

電阻加熱整治技術係將電流通過飽和層的土壤，以提高地下溫度，通常溫度可達到水的沸點，並將電極間電流流通路徑上的土壤(非將電極)加熱，然而加熱的最高溫度限制至 100℃(2009 台美講習會, In-situ thermal treatment)。電阻加熱整治技術提高地下溫度至污染物沸點以上，使污染物變成氣態，再藉由氣體回收井予以移除，如圖 4.1.1-2。計畫執行者會將地下電阻加熱的地面區域區分出來，以使整治期間地面上的操作可以持續。



資料來源：修改自美國 FRTR 網站，<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-9b.html>。

圖 4.1.1-1 蒸氣注入整治系統示意圖



資料來源：重繪自美國 Environmental Restoration Technology Transfer(ERT2)之 Resistive Heating Case Study Web Site，網址 <http://www.ert2.org/resistiveheating/tool.aspx>。

圖 4.1.1-2 電阻加熱整治系統示意圖

4.1.2. 適用條件

本節茲針對蒸氣注入法及電阻加熱法之適用條件說明，並列舉不同整治方法之優缺點比較。

一、 蒸氣注入法

蒸氣注入法的施作程序可適用於各種不同深淺的污染範圍，並且可任意移動這些整治設備至所需處理的污染區域。熱水或蒸氣注入法所需耗費之整治期程，大約數個星期至數個月左右。土壤內之高含水量會阻礙 SVE 系統，造成 SVE 運作困難，因此注入蒸氣後使土壤中水分蒸發，可有效克服這個問題。蒸氣注入法主要是設計用來處理揮發性及半揮發性有機物，運用此系統加熱達到所需溫度，可提高 SVE 處理半揮發性殺蟲劑及燃料油污染之有效性。經此處理之後，地表下之條件將相當有利於殘存污染物之生物降解作用。

熱水或蒸氣注入法可有效整治的污染物主要是半揮發性有機物及燃料油；揮發性有機物也可利用此技術來處理，但處理過程需要花費較高之成本。本技術適用於氣體工廠、木材加工廠、石油煉製廠的整治，以及去除其他含 LNAPL 及 DNAPL 之污染物質，如煤焦油、五氯酚、雜酚油、含氯有機物或其他石油所提煉出的產物。然而，蒸氣注入對於淺層污染的處理效果較差（2009 年台美講習會，In-situ thermal treatment）。

影響蒸氣注入法適用性及有效性之限制因子包括：土壤型態、污染物特徵及濃度、地質、水文。該整治技術應用優缺點，如表 4.1.2-1。

表 4.1.2-1 蒸氣注入法技術優缺點比較表

優點	缺點
- 在國外，相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。 - 污染物濃度可降低 90% 以上，處理成效高。 - 對場址運作之干擾較少。 - 整治期程短。在理想情況下，一般整治期程約數週至數月。 - 易與其他技術結合運用，如地下水注氣法、抽出處理法、生物整治法等。 - 適用於未飽和及飽和土壤污染之整治 - 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。 - 透過加熱可提高污染物的揮發性或降低	- 當應用於有低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其處理效果較低。 - 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，可能需耗費較昂貴的廢氣處理費用。 - 由於仍須進行地下水抽除，為符合放流水排放標準，需另行支付廢水處理費用。 - 整治價格較高。

優點	缺點
黏滯度，使 NAPL 物質較容易移動，提高回收成效 ^{1,2} - 較不易受到地下環境異質性影響¹ - 對透氣性分佈的要求不高² - 可降低濕度，增加氣體流量²	

參考文獻

1 2005 台美講習會, In-situ thermal treatment of NAPL contamination

2 2009 台美講習會, In-situ thermal treatment

二、電阻加熱法

電阻加熱可利用放置電極至污染範圍，透過電子排列加熱使地表下溫度達到水的沸點，使污染物揮發並配合土壤氣體抽除系統，將污染物抽至地面處理(2005 年台美講習會, In-situ thermal treatment of NAPL contamination)。除利用污染物揮發的原理外，並利用現地的水解、水合熱裂與生物降解原理，進行還原性脫鹵作用，將污染物降解、破壞。水解原理係利用水中的氫，取代污染物上的氯，使污染物不具毒性，反應過程不需處於氧化狀況或需要氧存在的環境。水合熱裂又稱水合熱裂氧化(Hydrous Pyrolysis Oxidation, HPO)，有別於熱裂解技術，水合熱裂是將溶解於熱水中分子較大的污染物，分解成較小的分子，水合熱裂作用則需要在氧化狀況或在有溶氧的環境中，方能進行反應。此外，在電阻加熱過程中，嗜熱菌會被活化，以較一般環境中更快的反應速率，降解含氯揮發性有機物。另在現地在降溫的過程中，油相 DNAPL 與水間的表面張力會形成某種水力坡降，使得油相的 DNAPL 更易於移動，因此，可能需設置抽除井與地面廢水處理設備。

應用電阻加熱法需注意最高加熱溫度僅可達到水的沸點(100°C)、土壤電傳導特性及地下水流、地下建物等皆會限制其作用(2009 年台美講習會, In-situ thermal treatment)。然而，應用電阻加熱法仍具備以下優點：

- (一) 現地處理技術可減少土壤及地下水最終處置的費用。
- (二) 整治期間，場址可持續營運或使用。
- (三) 使用一般可購得的設備。
- (四) 相對於傳統地下水抽除處理技術，整治所需的時間相對較。
- (五) 污染源污染移除的成果，可改善下游地下水水質。
- (六) 可應用於非均質含水層與縫隙較密的土壤。

(七)最新的研究發現，加溫可加強污染物的生物降解速率。

(八)可用於處理 VOCs、SVOCs、已加熱粘土層、通氣層、飽和層，並可與其他加熱技術結合使用(2009 年台美講習會，In-situ thermal treatment)。

4.2 整治系統操作與設計

有關國外針對熱處理已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 4.2-1。

表 4.2-1 國外熱處理相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國陸軍工兵署(USACE)	Design: In Situ Thermal Remediation, DoD Unified Facilities Criteria (UFC 3-280-05)	2006
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction (EPA 542-R-97-007)	1997
美國環保署	Steam Injection for Soil and Aquifer Remediation (EPA 540-S-97-505)	1998
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 7.8 Steam flushing	2002
美國環保署	The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion? Expert Panel on DNAPL Remediation (EPA 600-R-03-143)	2003

4.2.1. 整治系統設計與操作要點

一般而言現地加熱法應於系統設計前應蒐集地層資料(stratigraphy)、NAPL 污染物位置、地表下建物及濕度含量等相關資料。進行全場設計前，建議可以前導試驗測試不同升溫情形對污物移除之影響，並監測回收之蒸氣量(In-situ thermal treatment, 2009 年台美講習會)。本節茲針對蒸氣注入法與電阻加熱法說明系統設計相關參數，與系統操作應注意要點。

一、蒸氣注入法

蒸氣注入主要的組成包含可產生足夠蒸氣容量的鍋爐、管線、蒸氣注入及回收井、地面處理設備及監測系統 (In-situ thermal treatment, 2009 年台美講習會)。應用蒸氣注入法時，應注意蒸氣量、注入壓力、注射深度等參數，以有效控制蒸氣注入的影響半徑，使污染物不至於擴散至場

址外。蒸氣注入法有以下數點原則必須掌握以下原則：

- (一) 蒸氣注氣口位於污染層的最下方。
- (二) 蒸氣壓力不可過高，以免擾動地層，使含水層產生短路或通路(channeling)的現象。
- (三) 蒸氣壓力也不能太低，否則蒸氣無法進入地下含水層，或是地下水溫度擴散提升太慢。
- (四) 蒸氣注入井應視其各場址特性，決定其影響半徑。所影響之範圍需設置鋪面，以避免含氯揮發性有機氣體由地表逸散。
- (五) 蒸氣注氣井四周需設抽氣井，收集自地下水中揮發出的有機物。
- (六) 蒸氣注入至透水性差的黏土，使黏土層中的地下水溫度升高，造成黏土團粒的結構破壞，可使黏土中的污染物質有較大的孔隙途徑釋放至水中，此即所謂裂隙技術(fracturing technology)的主要機制。若黏土層尚未受到污染，則必須注意避免蒸氣破壞黏土層。通常蒸氣注氣口距黏土層 1 公尺以上，即可避免破壞黏土層。

蒸氣注入系統規劃設計流程圖如圖 4.2.1-1，確定土壤地質特性及污染物所在深度後，即可規劃蒸氣注入深度；並依注入深度，計算蒸氣注入壓力；再依據工作期程考量，規劃所需地下水加熱時間；並依所欲加熱時間，計算所需蒸氣注氣量；再依蒸氣注氣量，計算系統影響半徑，如此即可依系統影響半徑，規劃蒸氣注氣井的位置及數量。

二、電阻加熱法

影響操作電阻加熱技術之主要因素，包括：

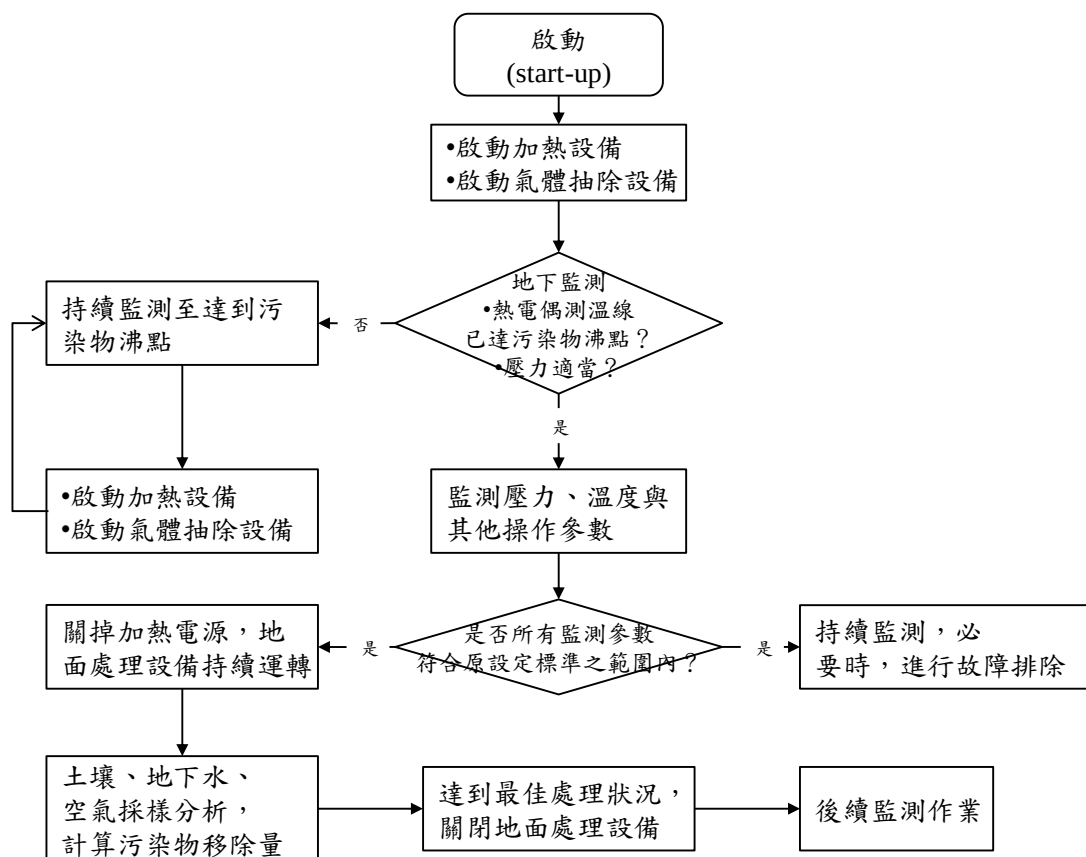
- (一) 開始階段，系統實際需加熱的污染範圍，與污染物處理所需的距離間距。
- (二) 實際加熱、沸騰污染範圍所需的時間。
- (三) 污染整治區內，土壤氣體抽除設備實際的效果。
- (四) 實際揮發性有機物抽除量與生物降解量。

該等因素須依據現場數據，以及適當的模式推估，調整操作參數。一般電阻加熱整治技術採自動操作系統，包括起機(start-up)、監測、通

報與警報等，在初期整治階段，場址會駐留工作人員。電阻加熱整治技術之操作程序如圖 4.2.1-2。在加熱系統啟動前，應先啟動土壤氣體抽除系統，使整治區域內產生負壓，並抽除存在土壤中的氣體與氣態污染物。當加熱至完全運作模式時，應利用具有系統監控和資料擷取功能的電腦系統，以經常量測並記錄總電力輸出、電壓、電流與土壤溫度等資料。土壤中的加熱模式與速率，須依據污染區域內所設置的熱電偶測溫線所量測的溫度，以及在井中所量測的壓力，予以調整。抽除廢水經處理後，進行貯存與最終處置，或重新注入污染區含水層；含揮發性污染物的廢氣，經處理後排放至大氣。地面處理系統應定期檢測與進行監測。此外，電阻加熱處理應包括空氣污染監測計畫，並定期進行土壤與地下水污染採樣、檢測分析的工作，以瞭解電阻加熱處理系統的整治成效。



圖 4.2.1-1 蒸氣注入系統規劃設計流程圖



資料來源：譯自美國 Environmental Restoration Technology Transfer(ERT2)之 Resistive Heating Case Study Web Site，網址：<http://www.ert2.org/resistiveheating/tool.aspx>，點選 Operations 第 2 頁。

圖 4.2.1-2 電阻加熱整治技術操作程序流程圖

4.2.2. 整治系統單元

一、 蒸氣注入法

使用蒸氣注入法主要設備如表 4.2.2-1，其中至少包含以下項目：

表 4.2.2-1 蒸氣注入系統設備表

1	冷凝器	6	活性碳槽
2	氣液分離槽	7	注氣井
3	空氣濾清器	8	SVE(抽氣井)
4	流量計	9	廢水處理設備
5	鼓風機	10	成效監測設備(土壤氣體監測井)

(一) 蒸氣注入系統

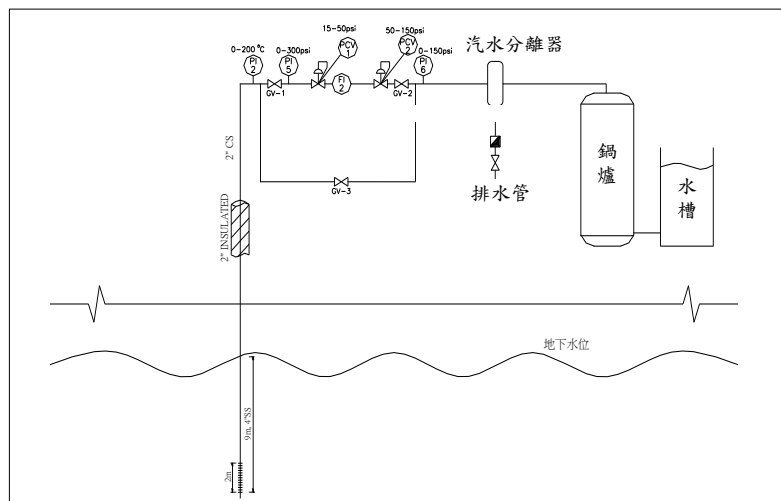
系統之設備配置圖(P&ID)如圖 4.2.2-1。主要元件包括蒸氣鍋爐、卻水器(steam trap)、減壓站。

(二) 空氣注入系統

空氣注入系統之設備配置圖(P&ID)如圖 4.2.2-2，鼓風機或空壓機、流量計、壓力計等。

(三) 土壤間隙蒸氣抽除系統

土壤間隙蒸氣抽除系統之主要元件，包括：冷凝器、氣液分離槽、空氣濾清器、流量計、鼓風機、活性碳槽等。



資料來源：斯克誠，蒸氣注入法去除地下水中有機氯化物之研究，博士論文，台大環工所，2002。

圖 4.2.2-1 氣注入系統 P&ID 示意圖

二、 電阻加熱法

電阻加熱整治技術之主要設備包括氣體回收處理設備(包括氣體抽除井與地面空氣污染防制設備)、電源控制箱、地表遮蓋物、電極與熱電偶測溫線(Thermal couple wire)等。以下茲針對圖 4.2.2-2 所列之相關設備配置說明如下。

(一) 氣體回收處理(vapor recovery)設備

該設備使用傳統土壤間隙蒸氣抽除技術，設置水平式或垂直式氣體抽除井，以抽除水氣與揮發性污染物，水氣經收集後冷凝，廢

氣溫度則會降至環境溫度，繼而利用傳統空氣污染防制設備，將污染物吸附、破壞。一般情形，氣體抽除井會與電極設置在同一鑽孔中。

(二) 電源控制箱(power control unit)

電源控制箱為滑座式(skid-mounted)電力控制系統，包括 1 組變壓器與提供電極的電流供應設備。變壓器將電源轉成 6 個不同電相，以調整各地下加熱用電極至適當的電壓。電源控制箱應能使 1 個獨立的變壓器，促使電阻加熱處理系統內的電流在電極間流動，並在原規劃設計的污染區內流動，不會讓電流轉移到整治區域以外的地方。一般在電源控制箱內或附近會設置緊急電源開關，以便在發現有任何不正常狀況發生時，停止整個系統運作。

(三) 地表遮蓋物

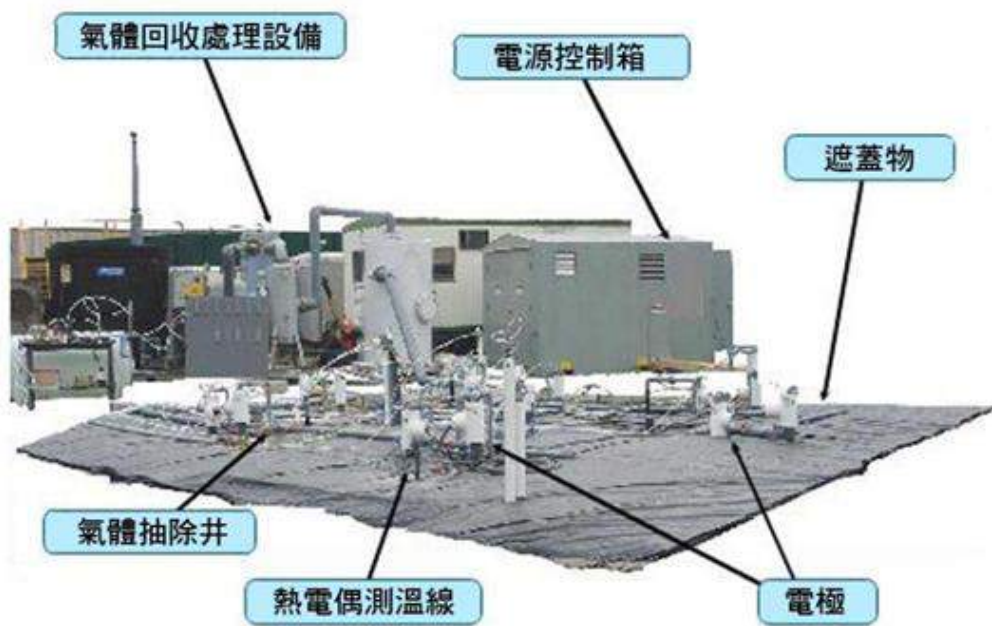
在電阻加熱整治區的地面，一般會鋪設遮蓋物，以確保氣體抽除所產生的負壓，使覆蓋範圍跟其他區域產生隔絕狀態，避免污染物溢散出去。地表遮蓋物包括水平井、礫石、隔熱材料、與隔熱、抗紫外線聚乙烯內襯(liner)。

(四) 電極

電極一般採用鍍鋅鋼管，以類似監測井設置工程，設置於土壤與地下水污染範圍內，並與受污染含水層直接接觸。一般電極與電極水平距離介於 8 至 16 英呎(約 2.4 公尺至 4.8 公尺)，垂直處理深度則由電極設置的深度與電力供給的狀況，予以調整。

(五) 熱電偶測溫線

設置熱電偶測溫線，以量測含水層溫度變化，一般熱電偶測溫線以相同的距離，設置於地下不同深度。



資料來源：重繪自美國 NAVFAC 之 Environmental Restoration Technology Transfer (ERT2)網站，網址：
<http://www.ert2.org/FRTR>。

圖 4.2.2-2 電阻加熱法主要設備設置情形

4.2.3. 整治系統監測

整治系統監測可分為地表下的監測與地面處理系統兩大部份，地表下的監測包含抽氣井內污染物的氣體流動、濃度變化、溫度、壓力及真空度，地表下環境溫度、水頭、飽和層及未飽和層的污染物濃度。地面處理系統則為監測污染物流量、濃度、溫度及進流的真空度等。(2009 年台美講習會, In-situ thermal treatment)。本節另分別就蒸氣注入法之成效監測及防止污染擴大監測設備，以及電阻加熱法之成效評估說明如下：

一、蒸氣注入法

有關評估蒸氣注入系統之成效，因系統設計之不同會有所差異。然正式運轉整治期間，操作維護整治成效亦是影響整治成效的重要關鍵。於此所列成效監測，係依本法較常使用共通之項目為重點；監測對象包括抽氣設備、整治設備與尾氣排放設備、廢水處理設備等，其監測目的包括相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響及防止污染擴大之監測工作等。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析

項目及監測頻率，彙整如表 4.2.3-1。

二、電阻加熱法

評估電阻加熱系統整治成效之方式，包括：

- (一) 關切污染物的濃度、質量與質通量(mass flux)的變化。
- (二) 地下水污染整治區內與下游含水層水質變化。
- (三) 地下水污染整治區內與鄰近地區關切污染物的演變(fate)。
- (四) 驗證系統操作與維護的需求。

表 4.2.3-1 蒸氣注入法整治系統成效監測

項目	蒸氣注入設備	土壤間隙蒸氣抽除整治系統	尾氣處理系統
監測目的	系統加熱設備成效評估	系統整治設備成效評估	尾氣處理設備評估
監測對象	蒸氣鍋爐出口、調節閥	抽氣設備、抽氣井與監測井	排放口
監測項目	壓力、蒸氣流量、蒸氣溫度	壓力(真空度)	有機氣體濃度
監測頻率	- 第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 2 次。 - 正式運轉期間，每週至少量測 1 次。	- 第一個月每週至少 1 次，每次持續 1~2 小時，每 15 分鐘記錄 1 次。 - 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	- 可攜帶型偵測設備，第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次；正式運轉期間，每月至少量測 1 次。 - 試車階段至少進行 1 次實驗室檢測，正式運轉期間每月或每季 1 次。
備註	- 操作之初，慢慢增加注氣壓力，達到所欲溫度後，再開歇性操作 - 如氣體流量有顯著變化時，應再量測個別注氣井之氣體流量。	- 試車階段，系統與監測井之蒐測頻率應相同，並應量測個別抽氣井之壓力。 - 如系統壓力或監測井之壓力有顯著變化時，應再量測個別抽氣井之壓力。	- 利用可攜帶型偵測設備，如火焰離子化偵測器(FID)或光離子偵測器(PID)進行檢測。 - 應於試車階段，採集氣體樣品，送實驗室，針對特定 DNAPL 污染物項目進行檢測。

4.2.4. 二次污染防治與安全衛生管理

使用蒸氣注入處理 DNAPL 污染的土壤時，在升溫過程中可能產生有毒之氣體，因此需考量毒氣之逸散問題及排放之水量對於環境之衝擊外，亦須考量周圍居民之環境品質與觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成執行之延宕。

整治系統於設置操作及維護上，需考量對附近環境及操作人員之影響，

以下針對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目進行說明。

一、對環境之影響

熱處理技術於受污染土壤在蒸氣注入或加熱過程中，若蒸氣注氣井影響半徑或加熱範圍內之地表未設置鋪面、抽氣井密封不全或由尾氣處理系統排出之廢氣及廢水，可能對環境中空氣及水質造成影響，因此建議於操作蒸氣注入系統時，需特別注意設置地表鋪面，並需注意抽氣井管密合及尾氣處理系統的操作情形。

二、水污染防治措施計畫

針對受污染土壤在進行蒸氣注入或加熱時，利用加熱促使污染物從土壤中釋放出來，所產生之氣體揮發性或半揮發性氣體經尾氣設備其轉化為液體，或經過濕式洗滌塔所產生之廢水，再進入後端廢水處理單元處理後，排放至地面水體。而廢水處理設計之量體或廢水中所含之污染物質，則需參考水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法辦理。

「水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法」(95.10.16)，第 5 條規定事業排放廢(污)水於地面水體，且符合下列規定之一者(1)設計或實際最大廢水產生量每日 50 公噸以上、(2)數事業共同設置之廢(污)水(前)處理設施或貯留設施，設計或實際最大廢水產生量總合每日 50 公噸以上、(3)事業或共同設置廢(污)水(前)處理設施、貯留設施之數事業之一，產生之原廢(污)水中所含鉛、鎘、汞、砷、六價鉻、銅、氰化物、有機氯劑、有機磷劑或酚類濃度超過放流水標準等，應申請排放地面水體許可證。因此本技術設置操作前，需事先檢視該系統所產生之廢水排放量與試運轉之水質資料，作為後續是否申請排放需可之依據。

三、空氣污染防治措施計畫

受污染土壤於利用蒸氣注入或加熱後，促使污染物從土壤中釋放出來所產生之氣體，經由末端空氣污染防制措施捕捉懸浮微粒物後，廢氣經由煙囪排入至大氣中。

依據「空氣污染防制法」(95.05.30)第 24 條規定：公私場所具有經中央主管機關指定公告之固定污染源，應於設置或變更前，檢具空氣污染防制計畫，向直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關委託之政府其

他機關申請核發設置許可證，並依許可證內容進行設置或變更。

前項固定污染源設置或變更後，應檢具符合本法相關規定之證明文件，向直轄市、縣(市)主管機關或經中央主管機關委託之政府其他機關申請核發操作許可證，並依許可證內容進行操作。

固定污染源設置與操作許可證之申請、審查程序、核發、撤銷、廢止、中央主管機關委託或停止委託及其他應遵行事項之管理辦法，由中央主管機關定之。

四、潛在之危害

熱處理法潛在可能之風險，約略分成兩類，分別是物理性及化學性風險。在物理性風險上可能暴露的風險，大致以機具設備危害、直接接觸、火災與爆炸、感電四大類。化學性風險大致上分為衍生廢棄物、生物降解產物、粉塵與揮發性有機物之暴露三大類。詳細內容如表 4.2.4-1。

4.3 成本及期程預估

蒸氣注入法處理成本與土壤類型、污染物特徵與濃度、水文地質條件等因子有關，最重要影響成本的要素是整治期程、整治效率及場址大小。

會影響系統設備整治效率之因子，包括：土壤類型、廢棄物型態、現場操作效率。平均而言以現場操作效率 70 %計算，每立方公尺污染土壤之處理費用介於 100 ~ 300 美元(約新台幣 3,500 ~ 10,500 元)。

若現地蒸氣注入法關鍵影響成本因子為每單位面積所設置的注氣井數、相關污染物深度、滲透係數及場址土壤質地。淺處污染源所設置的蒸氣注入井應較淺，需要較小的注入壓力以預防造成地層裂縫，且因注入井較淺、影響半徑較小，因此需設置較密集之注入井。深處污染源所設置的蒸氣注入井應較深，需要較大的注入壓力，由於注入井較深、影響半徑較大，因此設置之注入井不需太密集。因此，蒸氣注入井數量多寡由場址地質而決定，設置較少的井數，亦可達成預期之整治功效，並降低整治成本。此固定式系統之單價分析，每立方公尺污染土壤之處理費用介於 50~300 美元(約新台幣 1,750~10,500 元)，依其不同場址污染之性質而定。

表 4.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	蒸氣注入井或抽氣井設井時，特別是在鑽機拆裝鑽桿的過程中。	機具設備危害	- 妥善操作鑽井與設井機具 - 建立夥伴制度(buddy system)。
	蒸氣注入系統操作。	直接接觸	妥善著 D 級防護及高溫作業防護設備。
	- 蒸氣注入法系統點火加熱設備操作。 - 抽氣井在抽送可燃性氣體時，或地面輸氣管線輸送可燃性氣體時，可能因設備裝置不當，可能引燃火災或爆炸。	火災與爆炸	- 可燃性氣體輸送之情況下，應加強人員的操作訓練與緊急應變的能力 - 操作環境利用測爆器進行監測，如測值達到爆炸下限值之 10 %時，宜停止操作，進行逸散氣體的位置 - 含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強人員訓練與緊急應變的能力 - 通風設備及機具防爆處理 - 高溫作業。
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時。	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行。
化學性風險	- 已處理之污染土壤採樣時 - 尾氣處理系統廢氣及廢水採樣	衍生廢棄物	用適當的個人防護裝備。
	DNAPL 生物降解所產生的毒性中間污染物，如四氯乙烯生物降解時，可能產生三氯乙烯與氯乙烯，氯乙烯以氣體存在時，可能累積於鑽孔或系統中，在操作維護過程中，工作人員可能暴露於這些有毒氣體的環境中。	生物降解產物	- 抽氣設置時，應考量避免污染物逸散至地下室、地面與密閉空間中。 - 空氣監測結果顯示有異常時，應配戴適當的呼吸器。 - 整治系統設計者應瞭解整治過程中可能產生氣體。
	設井與操作維護過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於現場所產生的粉塵與揮發性有機物。	粉塵與揮發性有機物之暴露	- 灑水以防塵土飛揚。 - 使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 - 利用可攜帶型偵測器，檢查系統的密閉性，並即時修護氣體逸散點。 - 整治系統設計者應瞭解整治過程中可能產生氣體。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 7, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

五、 監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)

5.1 整治技術簡介

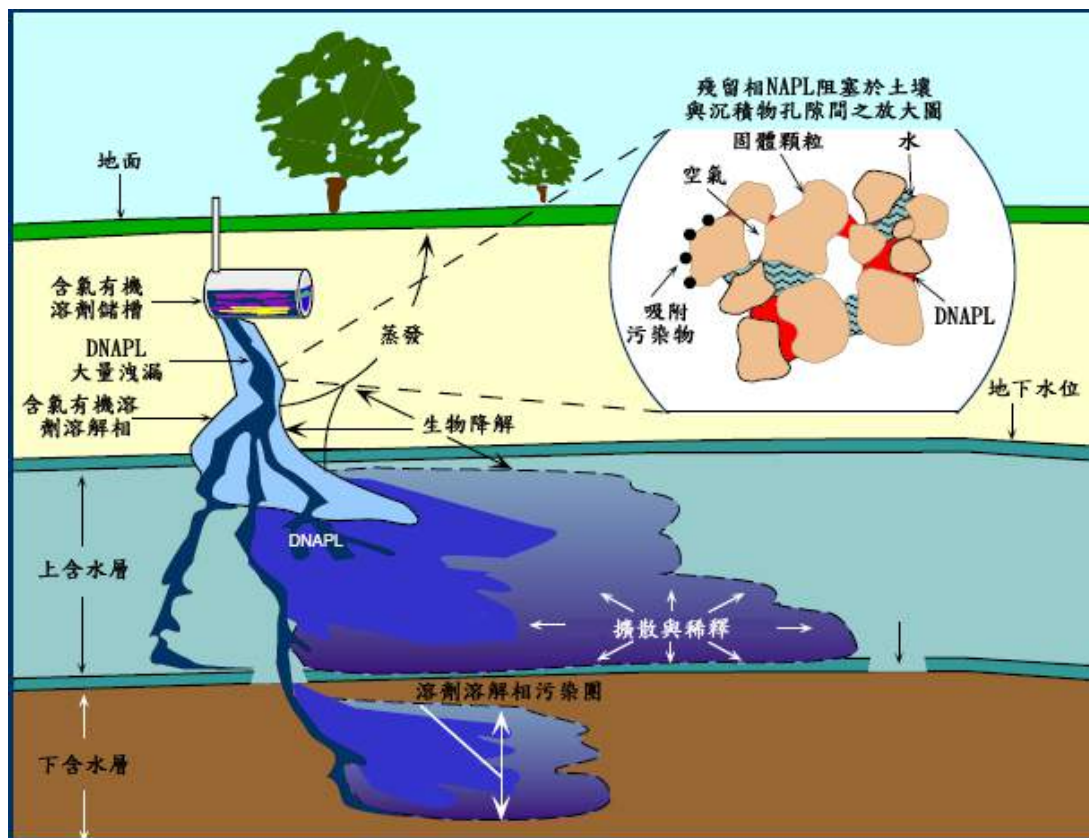
5.1.1 原理

監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)為利用土壤及地下水環境中的物理現象或化學、生物反應過程，如稀釋、蒸發、吸附、延散、微生物代謝等作用，將土壤或地下水中的污染物予以清除或減少的方法。自然衰減的現象在每一個污染場址中或多或少均會產生；但若要採用監測式自然衰減法進行污染整治，則場址特性需具備適合生物分解之特定條件。

本指引僅針對 DNAPL 污染物之特性章節架構撰寫相關內容。有關監測式自然衰減之可行性評估準則、設計準則與成效評估準則，應參考本署「應用監測式自然衰減整治法之可行性評估準則、設計及成效評估等規範建置計畫」所訂定之內容。

依據美國環保署之自然衰減法定義：在有利的土壤及地下水環境中，無人為干預而自然發生之衰變程序，以減少或降低土壤及地下水中污染物的質量、毒性、移動性、體積或濃度；這些於現地所發生之程序包括生物分解、擴散、稀釋、吸附、揮發、污染物之化學性或生物性之穩定或破壞等。污染場址在嚴謹的控制與長期成效監測下，利用監測式自然衰減法達到污染整治目標所需之整治時間仍是合理可接受的。

相較於其他整治技術，本法未針對土壤或地下水污染區域，採用通氣、抽水、開挖、加藥或其他主動或侵入式的整治方式，僅進行定期監測工作，通常被用來彌補傳統整治技術不足。但為避免污染行為人規避整治責任，採用本法前應進行慎密的調查。本法原理示意圖請參見圖 5.1.1-1。



資料來源：USEPA, Monitored Natural Attenuation of Chlorinated Solvents – U.S.EPA Remedial Technology Fact Sheet, May 1999.

圖 5.1.1-1 DNAPL 自然衰減機制示意圖

5.1.2 適用條件

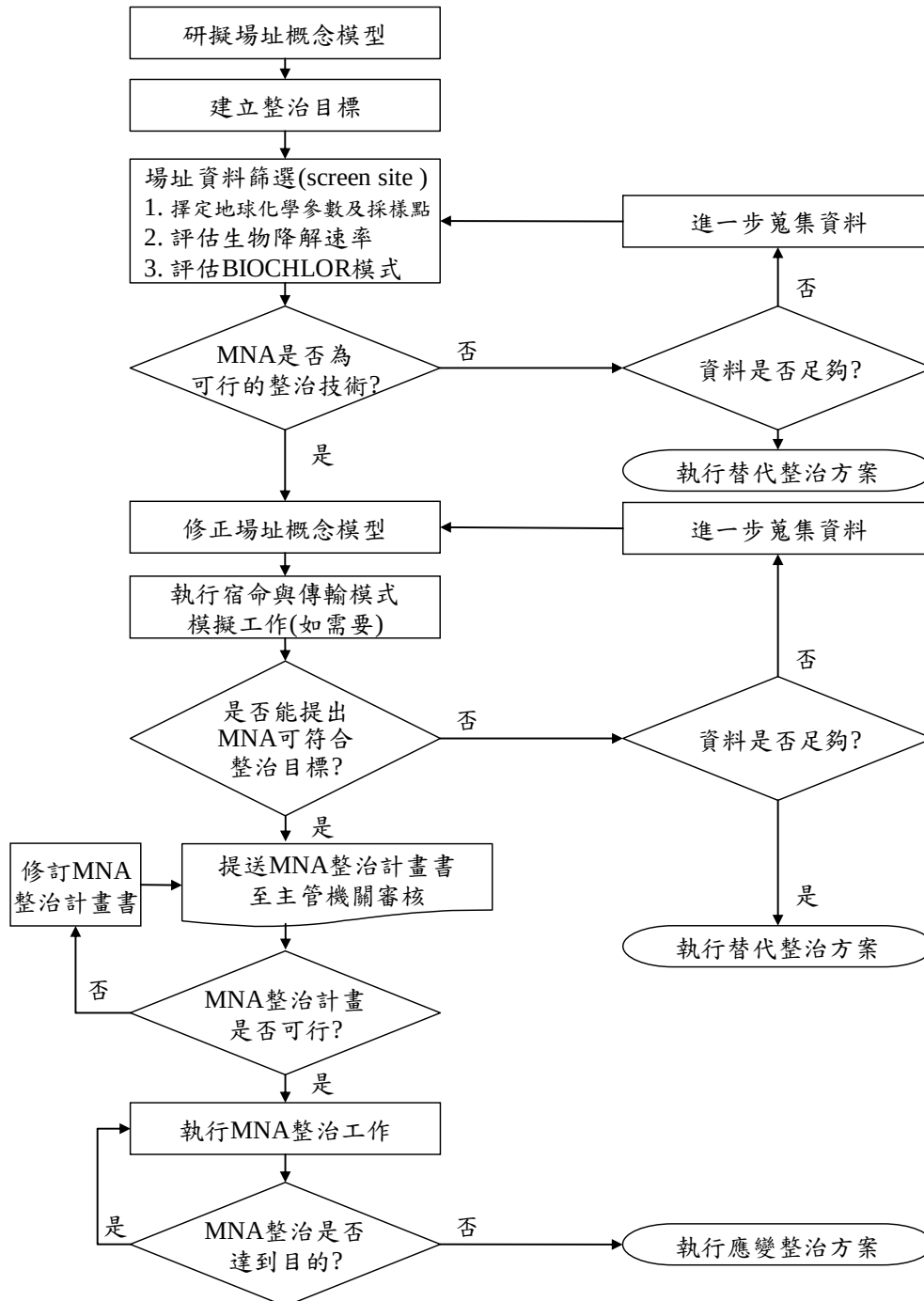
決定是否採用或部分採用監測式自然衰減法為整治方法，應依據場址特徵之調查證據資料與分析結果判斷，評估監測式自然衰減法所需之場址特徵調查資料，較一般整治技術評估所需之資料更為詳細。評估 DNAPL 監測式自然衰減法之流程如圖 5.1.2-1，並摘要說明如下：

一、 審閱污染場址現有資料及研擬初步概念式模型

審閱污染場址既有之資料，並研判污染場址之可能暴露途徑及潛在受體之風險評估。各個污染場址均有其特殊性，故依既有可取得環境屬性污染物特性與範圍之資料，研判該場址自然的生物降解之現地條件，是採行監測式自然衰減法非常重要的一環。

依據現有之地質、生物、地球化學、水文、氣候及檢驗分析資料，研擬初步概念式模型。該概念式模型將有助於指出資料不足之處，並可

依據科學方法與最具經濟效益之方式，選擇設置採樣點及監測點之最佳位置。



資料來源： North Carolina, Division of Waste Management, Hazardous Waste Section, Guidance on Developing a Monitored Natural Attenuation Remedial Proposal for Chlorinated Organics in Ground Water, 2000.

註：有關監測式自然衰減法之可行性評估流程，亦應參閱環管署「應用監測式自然衰減整治法之可行性評估準則、設計及成效評估等規範建置計畫」期末報告。

圖 5.1.2-1 DNAPL 監測式自然衰減法之評估執行流程圖

二、 篩選資料以驗證自然降解現象

- (一) 足以顯示化學物之減少與自然降解相關。例如含氯污染物濃度會隨時間而降低，或隨地下水流向量測得到之含氯污染物濃度與模式預測值相符。
- (二) 可以說明地球化學、生物化學指標參數傾向自然降解。例如地下水中發現生物分解之產物或中間產物，碳源之消耗、產生或無機化合物之產生與已知之生物分解反應相符。

三、 確認是否需要補充資料

監測式自然衰減法之監測點及採樣點選擇與判定，應依污染場址特性決定。基本上，監測點及採樣點應包括污染源附近及污染區地下水之上、下游區域，至少應有一監測點或採樣點位在下游之污染區外。須特別提醒的是，在高污染濃度區內設置監測點或採樣點時，應注意進行時所可能造成污染情況之改變。

四、 補充資料之收集

收集補充資料應建立樣品之品保品管系統，如標準採樣分析方法、QA/QC 程序，以建立資料之可信度。

五、 修正初步概念式模型

在取得最新的檢驗分析數據資料後，應將原先研擬之初步概念式模型進行檢討並修正，重新說明污染場址之現況。例如：

- (一) 地下水位之高低及地下水之水平流向。
- (二) 地下水垂直流向。
- (三) 以圖示方法表現地下水中化學參數之濃度對時間及距離之變化情形
- (四) 預測污染物(含中間產物)之質量平衡情形。
- (五) 預測污染物及其產物之可能流向。
- (六) 預測被吸附及殘餘之化學物質。
- (七) 預測地下水對長期自然降解之涵容能力。
- (八) 比較概念式模型中所使用之生物分解反應速率常數，污染物濃度對

時間之變化。

(九)視場址情況需求，執行更精密之分析，以取得地質或水文地質常數。

六、 利用更新之概念式模型驗證自然降解現象

將現階段所收集之資料進行分析及模擬，並比較更新之概念式模型是否符實。若是，則進行下一步驟之暴露途徑分析。反之，則應用現有最新資料或收集更多之數據以重新評估自然降解之正確性。

七、 暴露途徑分析

更新後之概念式模型應用已知相關之污染受體及生態風險加以驗證，分析自然降解是否能達到降低污染物濃度至人體健康及生態環境可以接受之程度。若是，則可將監測式自然衰減法納入長期整治策略中。反之，則須考慮是否能再使用工程技術之控制方法，以降低污染物濃度，使監測式自然衰減法更具效率。

八、 使用監測式自然衰減法作為長期整治策略

污染場址考慮使用監測式自然衰減法進行最後整治方法之前，應先確認生物自然降解之各項地球化學指標參數，能長期存在或可以人工之方式補充。在證明自然衰減可符合場址之預定整治目標後，尚需擬定長期成效監測計畫，以確認自然衰減之機制持續進行，在保護人體健康及生活環境之前題下，只要污染物濃度未達預定之整治目標，監測工作應持續進行，並且在污染物濃度達到預定整治目標後，監測工作應延續 1 至 3 年，以確保污染物濃度之穩定與維持在整治目標濃度之下。長期成效監測計畫，同時應擬定適合場址狀況之替代整治方案，以備不時之需。

適用監測式自然衰減法之地下環境，應能使含氯有機物藉還原脫氯作用進行生物降解。常見用於評估還原脫氯作用之地球化學參數，如表 5.1.2-1。本法應用上之優缺點，如表 5.1.2-2。

監測式自然衰減法並非「棄之不顧」(walk away)或「零方案」(no action)，而是「機警地等待」(watchful waiting)，因此對於社區民眾的解釋與溝通非常重要。

5.2 整治系統操作與設計

有關國外針對監測式自然衰減法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 5.2-1 所示。

表 5.1.2-1 評估地下環境還原脫氯作用之地球化學參數

項目	污染源濃度或與背景值差異	說明
砷(As^{3+})	濃度上升大於背景值	厭氧狀況造成移動。
氯離子(Cl^-)	濃度大於 2 倍背景值	脫氯作用生成。環境因素可能造成干擾。污染物的濃度可能太低，以致於無法檢測出氯離子濃度的顯著變化。
溶氧(DO)	< 0.5 mg/L	氧濃度太高會抑制還原脫氯作用。
乙烷	存在	1,1,1-三氯乙烷還原脫氯可能的產物。
乙烯	存在	氯乙烯還原脫氯可能的產物。
二價鐵離子(Fe^{2+})	濃度上升大於背景值	在鐵還原條件下的環境可能會進行還原脫氯作用。如氯乙烯於此條件下被氧化。
氫氣	> 1 nM	可進行還原脫氯作用。氯乙烯可能累積。
氫氣	< 1 nM	氯乙烯可被氧化，不可能進行還原脫氯作用。
錳離子(Mn^{2+})	濃度上升大於背景值	在錳處於還原狀況下，還原脫氯作用不易產生。
甲烷	濃度上升大於背景值	顯示地下環境處於還原條件上最重要指標。
鎳	濃度上升大於背景值	厭氧狀況造成移動。
硝酸鹽(NO_3^-)	< 1 mg/L	硝酸鹽會抑制還原脫氯作用。但 methylene chloride、氯乙烯與低氯化物可於此條件下被生物降解。
氧化還原電位	< -100 mV < 50 mV	可能進行還原脫氯作用。 可能進行還原脫氯作用。
pH	5 < pH < 9	微生物生長最佳範圍
電導度	上升大於背景值	一般水質參數，有助於瞭解採集自同一地下系統之水質狀況。
硫酸鹽(SO_4^{2-})	濃度下降低於背景值	可能進行還原脫氯作用，但濃度太高時亦會抑制還原脫氯作用。
硫化物(S^{2-})	濃度上升大於背景值	可能進行還原脫氯作用，但因硫化物會與鐵離子反應沉澱，可能無法被檢測出來。
溫度		影響微生物的活性。在低溫、低氫氣濃度的情形下，可行脫氯作用。
總無機碳(TIC)	濃度上升大於背景值	檢測微生物共代謝作用下所產生之 CO_2 。
總有機碳(TOC)	> 20 mg/L	提供還原脫氯作用所需的有機碳源，異營性碳源包括 BETX。

資料來源：USEPA, Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in groundwater, EPA/600/R-98/128, Section 2, 1998

表 5.1.2-2 監測式自然衰減法技術優缺點比較表

優點	缺點
- 減少整治過程中廢棄物之產生量；與離地處理比較，可降低不同介質間之交錯污染；降低人體暴露於污染物、污染介質或其他危害之風險，以及降低對生態受體之干擾。 - 監測式自然衰減法部分反應機制可達到現地破壞污染物之效果。 - 地面設施少，對外界造成的干擾較少。 - 視場址狀況及整治目標，監測式自然衰減法可能作為特定污染場址全部或部分之整治方法。 - 可與其他整治技術配合使用或作為後續之整治方法。 - 相較於其他積極性整治技術，監測式自然衰減法可降低整治總成本。	- 相較於其他積極性整治技術，監測式自然衰減法達到整治目標所需之時間較長。 - 場址特徵調查所需的時間較長、費用較高。 - 經監測式自然衰減所產生之物質，其毒性或(及)流動性可能大於原污染物。 - 長期成效監測一般較為廣泛且所需之時間長。 - 為確認長期保護人體健康，可能有必要進行行政管制。 - 可能持續存在污染物移動之現象，會造成污染物在不同介質間轉移。 - 場址水文或地球化學條件可能隨時間改變，可能使原先穩定不動的物質，重新開始移動，造成對整治效果不利的影響。 - 為使民眾接受監測式自然衰減法進行污染場址之整治，需要致力於更廣泛的教育宣導作業。

資料來源：USEPA, Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites, OSWER Directive 9200.14-17P, p.9~10, April 1999.

表 5.2-1 國外監測式自然衰減法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國威斯康辛州自然資源局 (Wisconsin Department of Natural Resources)	Understanding Chlorinated Hydrocarbon Behavior in Groundwater: Investigation, Assessment and Limitations of Monitored Natural Attenuation (RR-699)	2003
美國環保署	Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites (OSWER Directive 9200.14-17P)	1999
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water (EPA 600-R-98-128)	1998
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater: Principles and Practices	1999
英國環境部	Technical Summary - Natural Attenuation of Petroleum Hydrocarbons and Chlorinated Solvents in Groundwater	1999
美國空軍污染整治技術研究單位(AFCEE)	Designing Monitoring Programs to Effectively Evaluate the Performance of Natural Attenuation	2000
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 9.3 Monitored natural attenuation	2002
美國環保署	Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground water	2004
美國能源部	Characterization and Monitoring of Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water: A Systems Approach (WSRC-STI-2006- 00084)	2006
美國能源部	Scenarios Evaluation Tool for Chlorinated Solvent MNA (WSRC-STI-2006-00096)	2007
美國 ITRC	Enhanced Attenuation: Chlorinated Organics	2008

5.2.1 整治系統設計與操作要點

以下茲針對整治系統設計之注意事項及常見之技術種類進行說明。

一、 注意事項

(一)地下水污染源與受污染土壤應已被移除或已被控制不再洩漏，且不再對人體健康或環境造成危害。

(二)DNAPL 污染物的特性，在滲入地下含水層後，確切的位置不易準確掌握，且不易分解，即使使用較積極的整治技術都不一定具有成效，除極少數條件上有利於含氯有機物的降解外，一般皆難達預期成效與目標。

二、 技術種類

監測式自然衰減法不應作為唯一的整治方法，宜與其他技術配套使用或做為其他處理技術的後續整治方法。

5.2.2 整治系統單元

監測式自然衰減法系統，基於非主動式處理方法之特殊性，除地下水監測設備外，整治機具部分並無需求。

5.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

本法因不外加其他任何物理、化學或生物之機具、設備或原料，僅以地下環境之微生物之生物降解能力，將污染物逐漸去除，以達預定整治目標。惟在應用監測式自然衰減法時，為防止污染有擴大之虞，應改採適合場址狀況之替代整治方案。執行替代方案之時機如下：

- (一) 特定地點之土壤或地下水污染物濃度呈上升之趨勢。
- (二) 接近污染源之監測井顯示，污染物濃度明顯上升，顯示有新的或污染重新釋放的情形。
- (三) 在原污染帶邊緣以外之監測井查出污染物，顯示污染物重新移動
- (四) 污染物濃度降低速率，無法達到預定整治目標。

(五) 土地或地下水之用途改變，造成本法無法有效保護人體健康。

二、成效監測

場址長期監測計畫應依位置、項目與頻率，考量預定的整治期程與整治目標等進行規劃，只要污染物濃度未達成預定整治目標，監測工作應持續進行。監測計畫設計應能達成下列目標。

- (一) 證明自然衰減如預期般發生，並且沒有意外情況。
- (二) 辨識生物降解可能產生的有毒中間產物。
- (三) 決定污染帶是否有向下游、橫向或垂直方向擴大的趨勢。
- (四) 確保下游受體未受到影響。
- (五) 測環境中可影響自然衰減成效之新釋放出之污染物，以及降低自然衰減速率之環境變化。
- (六) 驗證整治目標的達成度。

為了有效達到上述污染擴大監測目標，以下說明監測井設置位置、監測項目及監測頻率等方式，提供各位讀者參考。

(一) 監測井設置位置

監測式自然衰減法之監測井網設計，如圖 5.2.3-1 所示。監測區域宜涵蓋污染源區、高污染濃度與高移動區域、污染帶邊緣、上游與側面等。此外，監測井開篩位置應考量污染帶的深度與含氯有機物之傳輸特性。

(二) 監測項目

監測項目一般包括：關切污染物之含氯有機物及其降解中間產物、降解產物，以及地球化學指標參數，如：pH、Eh、TOC、DO、 NO_3^- 、 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等。

(三) 監測頻率

一般而言，前幾年應每季監測一次，以建立季節性的變化與污染物的降解速率等基線資料，並重新評估污染概念式模型假設的正確性，必要時，應依污染帶與降解趨勢，重新調整監測點及設置新的監測井。如果監測結果顯示與原預期之結果相符，則可考量降低

採樣頻率。反之，如結果與預期相去甚遠，則應增加採樣頻率。此外，當地下水流速很快或污染帶與潛在受體間的距離很近，則應提高監測頻率。監測頻率的考量因素，包括：

1. 提供潛在受體受影響前的即時警示。
2. 提供污染帶擴大時的警示。
3. 偵測污染帶的大小與濃度變化。
4. 確認不同時間監測數據之變化。
5. 偵測地球化學參數的變化，以提供自然衰減變化的警訊。
6. 取得評估污染物降解速率與達成預定整治時間所需的必要資訊。

5.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

由於本法非採主動式或侵入式處理方式，因此，預期在整治過程中不致於產生廢氣、廢水與廢棄物；但對於土壤及地下水的主要污染區而言，其污染持續存在，且有擴散的可能性。

二、潛在之危害

當監測結果顯示下列現象時，應改採其他替代之整治方案，避免造成對人體健康與環境的危害。

- (一) 污染物濃度顯示持續增加之趨勢。
- (二) 位於污染源區的監測井顯示，污染物濃度大幅上升，可能有新的污染來源或污染物持續洩漏中。
- (三) 污染帶邊緣外之監測井檢測出污染物，顯示污染帶已擴散或移動
- (四) 污染物降解速率未符合原預期整治目標。

5.3 成本及期程預估

一、整治成本分析

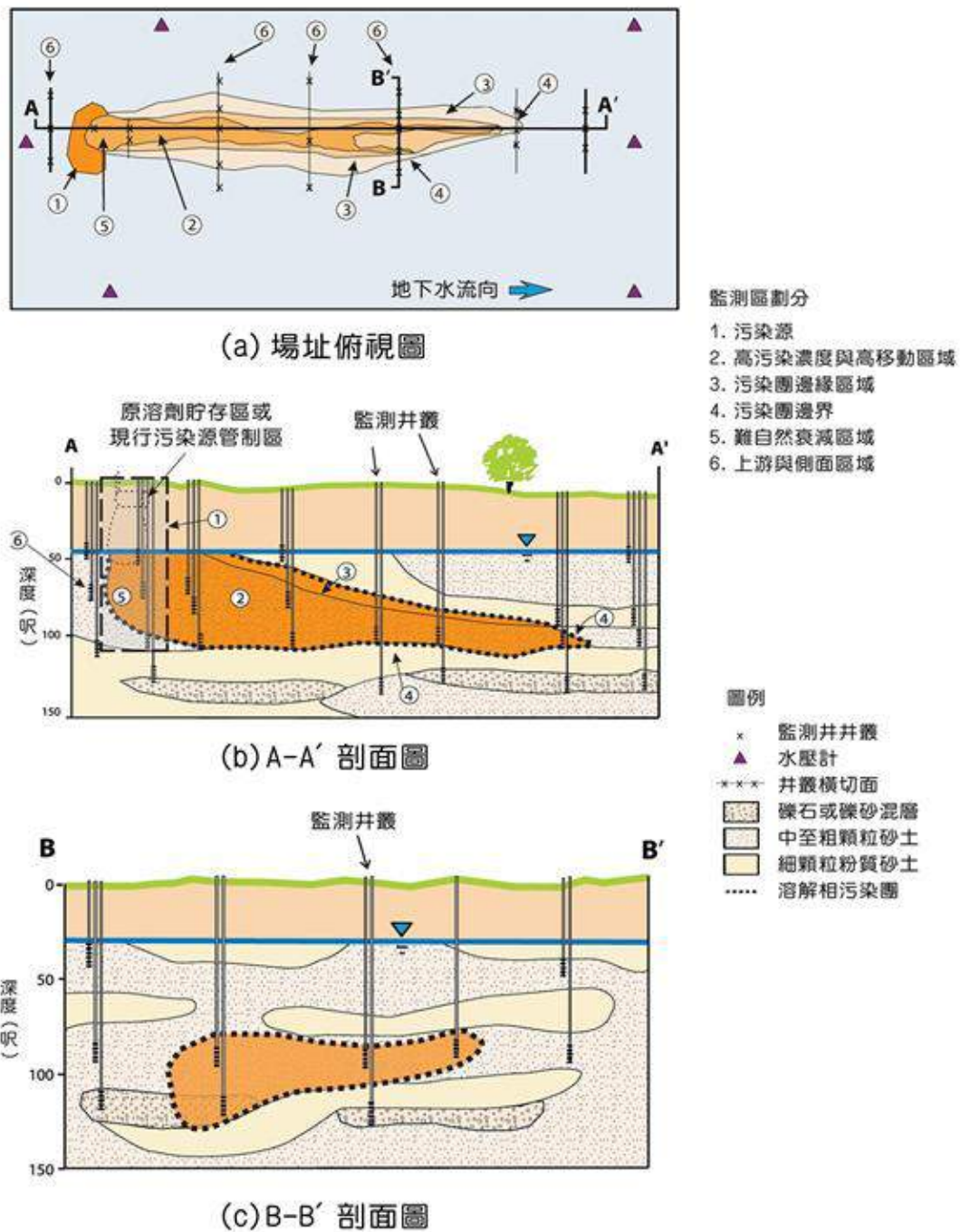
依據美國能源部針對 178 處採用監測式自然衰減法的污染場址的一項調查，監測式自然衰減法之平均初步調查費用約 188,000 美元(約新台

幣 6,580,000)，或 10,000 ~ 750,000 美元(約新台幣 350,000- 26,250,000)。後續每年所需之平均監測費用約 32,000 美元(約新台幣 1,120,000)，或 3,000~ 150,000 美元(約新台幣 105,000 - 5,250,000)。

二、整治期程

監測式自然衰減法因場址地下水水文、地球化學和污染物種類及濃度等因素之不同，所需整治期程由數年至數十年之久。依據美國環保署行政指引(OSWER Directive 9200.14-17P)，評估合理整治時程，所應考量之因素包括：

- (一) 受影響之資源分類(如飲用水水源、農業用水源)和資源之價值
- (二) 受影響地下水層未來可能需要做為水源供應之相關時程(包括替代供應源之可用度)。
- (三) 在地表下污染物量和預測分析之不確定因素(例如整治時程、未來所需時間及污染物移動至產生暴露之時間)。
- (四) 長期成效監測與行政管制(institutional control)之可行性，如整治場址禁止進入、使用或開發。
- (五) 公眾對延長整治時間之接受度。
- (六) 整治期間內，責任團體支應整治所需之監測與功能評估所需之適當經費。



資料來源：USEPA, Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground water, Chapter 2, April 2004.

圖 5.2.3-1 評估自然衰減法成效之監測井網規劃設計概念圖

六、地下水抽出處理法(Pump and Treat)

6.1 整治技術簡介

6.1.1 原理

地下水抽出處理法(pump & treat)是最常使用的地下水整治技術之一，傳統的地下水抽取處理法是將污染地下水抽除至地表進行處理，為美國超級基金場址過去最主要的整治方法。

地下水抽出處理法係藉由抽水井或抽水渠(drain)等抽除系統，將受污染地下水抽除至地表進行處理。抽除系統於操作過程會形成一個捕捉區(capture zone)，可將經過捕捉區之受污染地下水抽除。地下水抽出處理法之原理示意圖及捕捉區概念圖，分別如圖 6.1.1-1 及圖 6.1.1-2。由於本項技術簡單、處理成本較為經濟、技術門檻較低，為最常用之地下水整治技術。

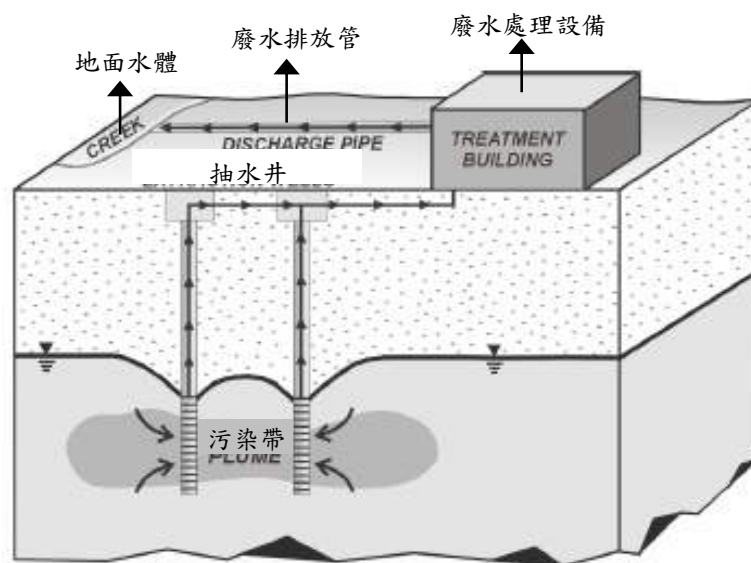
地下水抽出處理法主要可達到兩種目的，一為水力控制，即控制受污染地下水的移動，以避免污染區域的繼續擴散；二為污染處理，即降低地下水中溶解污染物的濃度，以達到整治目標。其中水力控制常作為地下水污染場址緊急應變的措施，而當其作為污染處理的規劃時，則常與其它整治技術一併使用，如地下水注氣法(air sparging)等。實際應用本法時，可視目的之不同而有不同設計，一般而言，作為水力控制所需的抽水流量較小，所需經費可較為便宜。

本法應用於受 DNAPL 污染的場址時，由於 DNAPL 會持續且緩慢地自溶解相釋出，若以回復原水質狀況為整治目標較不易達到，因此目前較常規劃作為污染帶之水力控制。

6.1.2 適用條件

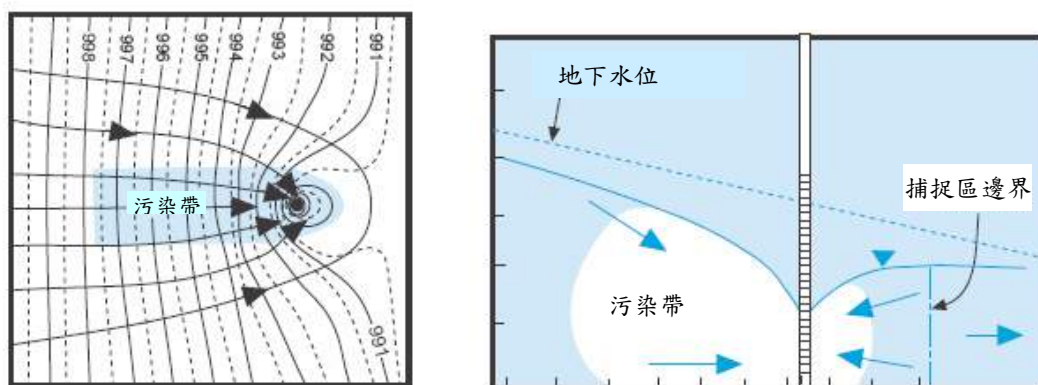
本法適用地下水含水層中溶解相污染物的移除及進行水力控制。若抽除地下水含溶解性污染物時，則一般水井水力學原理均適合於評估地下水污

染物的抽除。若場址水文地質條件是滲透性較低或地質結構較為複雜且非均質時，則採取本法整治較不適當。若場址滲透性較佳，除抽水外，甚至可以将抽出處理後之地下水進行補注，或搭配其他整治方式加強處理，則可更有效地移除水中污染物，亦是整治技術組合序列常選用本法為初期整治方法的原因。本法應用上之優缺點，如表 6.1.2-1



資料來源：USEPA, Pilot Project to Optimize Superfund-financed Pump-and-Treat Systems: Summary Report and Lessons Learned, Cover, EPA 542-R-02-008a, 2002.

圖 6.1.1-1 地下水抽出處理法原理示意圖



資料來源：USEPA, Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems, Section 2, EPA 540-S-97-504, September 1997

圖 6.1.1-1 地下水抽出處理法之捕捉區概念圖

表 6.1.2-1 地下水抽出處理法技術優缺點比較表

優點	缺點
• 設置簡單、快速，操作經驗需求較低。 • 設置及維護成本較低。 • 對於污染區域較小，或是污染濃度不高的場址，容易達成整治目標。 • 容易同時搭配其他土壤或地下水的整治方法，形成多重組合的整治序列，提高整治效能。	• 部分 DNAPL 物質，溶解於水中的速率相當緩慢，導致污染物無法隨地下水快速有效地抽出。 • 污染物從水力傳導的區域擴散到水力傳導高的區域速率緩慢。 • 含水層中，已被土壤吸附污染物質的脫附速率較為緩慢，因此，當在地下水中污染物濃度已被抽除降低之後，若停止抽水，仍有可能因緩慢的脫附作用，使得水中濃度再度緩慢的提升。 • 死角區域(dead-end zone)的水動力會遭到隔絕(hydrodynamic isolation)。

資料來源：

1. Jafvert, C.T. (1996) Technology Evaluation Report-Surfactant/Cosolvent, Groundwater Remediation Technologies Analysis Center, TE-96-02.
2. 「地下水的污染整治」，盧至人譯，國立編譯館出版，1997。

6.2 整治系統操作與設計

有關國外針對地下水抽出處理法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 6.2-1。

表 6.2-1 國外地下水抽出處理法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Basics of Pump and Treat Ground Water Remediation Technology (EPA/600/8-90/003)	1990
美國環保署	Methods for Monitoring Pump-and-Treat Performance (EPA/600/R-94/123)	1994
美國環保署	Pump-and-Treat Ground-Water Remediation: A Guide for Decision Makers and Practitioners (EPA/625/R-95/005)	1996
美國環保署	Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems (EPA/540/S-97/504, EPA-68-C4-0031)	1997
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 6.2 Pump and Treat	2002

6.2.1 整治系統設計與操作要點

本節將說明整治系統初始之模場試驗、整治系統設計規劃，及實際系統操作應注意要點說明。

一、模場試驗

為了得到初步的場址調查資料，進一步規劃全場整治系統，通常需

進行模場試驗，然而模場試驗通常是指第一階段的抽水井及監測井設置，與現場抽水試驗及初步數學模式的執行。

二、 整治系統設計規劃

完成模場試驗後整治系統設計之主要規劃設計要點及注意事項，說明如下：

(一)井抽取區域規劃設計

井抽取區域的規劃設計重點在地下水的抽出速率及抽水井的數量及位置等。其中，抽出速率可以現地抽水試驗之數據資料決定：依據抽水試驗的結果，分析地下水影響半徑、回水速率等，再依據設置之抽水井口網、數量及位置，得最佳之抽水速率。

而這些抽水井設置及抽水速率之計算，必要時，可以數學模式推估，如捕捉區分析(capture zone analysis)及最佳化模擬(optimization modeling)等。推估抽出速率時，需特別注意避免超出水力負荷及全面性的抽水，以減少下陷坍塌的風險。

(二)設計濃度

初步必須調查所有地下水中，可能之污染物種類及濃度分布情形；除了背景調查之外，應在抽水負荷內進行抽出濃度分析，以做為設計操作濃度的計算與規劃。

(三)設計移除率

依據抽出速率與抽出濃度，推算污染物之抽出移除量，除據以估算存在於地下環境中的污染物總量外，並可預估總移除率及推估移除時間。

依據抽出速率與抽出濃度，推算污染物之抽出移除量，除據以估算存在於地下環境中的污染物總量外，並可預估總移除率及推估移除時間。

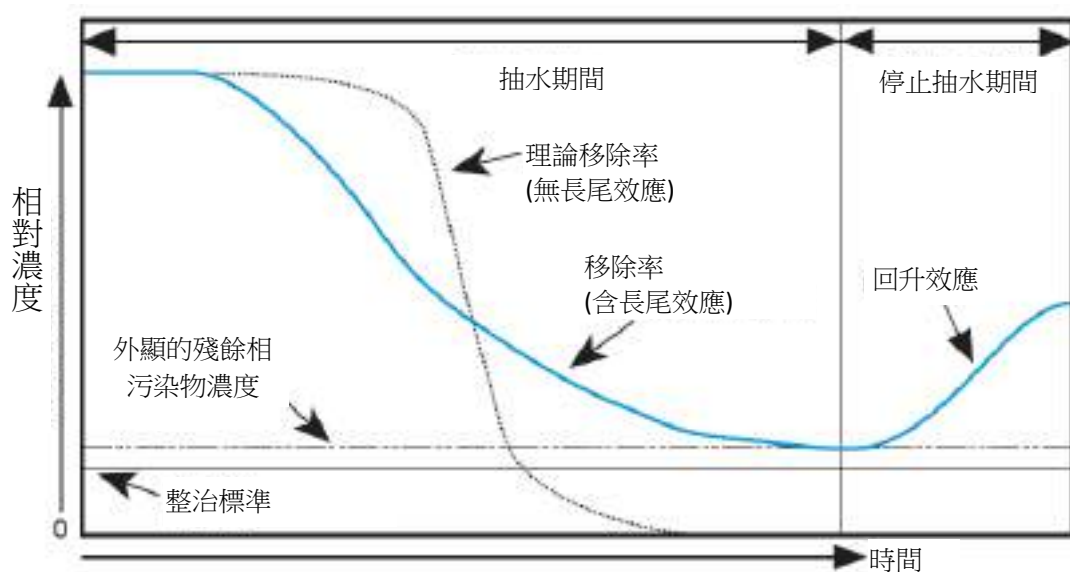
三、 整治系統操作

地下水抽出處理法於系統操作過程中須記錄相關操作參數，包括：抽水速率及抽水量、水頭壓力(hydraulic head pressure)、地下水水質監測

等，以瞭解系統操作狀況是否符合設計處理量與處理效率。

本整治方法應用於受 DNAPL 污染之場址時，因 DNAPL 的殘餘相及自由相會緩慢、持續地釋出污染物，需特別注意長尾效應(tailing)及回升效應(rebound)。於抽出處理法操作初期，地下水中溶解相濃度快速降低後，會因為 DNAPL 的持續釋出，造成溶解相濃度無法繼續降低，因此需要長時間操作整治系統，此即長尾效應；而回升效應則因相同原因，於抽出處理法之抽水作業停止後，濃度持續上升，甚而超過整治標準。

抽出處理法抽水及停止抽水期間之溶解相污染物濃度變化情形，如圖 6.2.1-1 所示，可明顯看到此兩種效應對於整治效率的影響，也因此應用本法時，須注意即使有較長的整治時間，仍然無法達到較低、較嚴格的整治目標；此外，停止抽水作業後，地下水濃度上升的問題，也常發生在實際案例的應用。



資料來源：USEPA, Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems, EPA 540-S-97-504, Section 4, September 1997

圖 6.2.1-1 抽出處理法之抽水及停止抽水期間濃度變化圖

6.2.2 整治系統單元

地下水抽出處理法主要處理單元，包括：地下水抽取單元、地上處理單元、地下水最終處理單元、地表地下水監測單元、地下水處理廠的成效監測單元等，相關設備彙整如表 6.2.2-1。

表 6.2.2-1 抽出處理法主要系統設備表

項次	各項設備
1	地下水抽取單元：抽水井或抽水渠
2	地上處理單元：GAC 活性碳吸附或廢水處理廠等
3	地下水最終處理單元：排放至河渠或回注至地下水層

6.2.3 整治系統監測

監測程序之設計目的，主要用來測定地下水抽出處理系統的有效性及其效率，以了解設計之系統是否可以達到水力控制或污染整治之目的。一般而言，成效監測包含數個部分：(1)測量水頭壓力，確認地下水抽出處理系統產生的水力梯度，可以阻止溶解於地下水中之污染物質移動到阻隔週界外；(2)地下水水質監測，確認污染濃度分布狀況隨著時間及空間的變化，顯示出一致的狀況(例如，在水力控制區域內無更多污染物質流出或增加污染總量)；(3)污染監測活動，包括結合數個系統之水頭壓力監測、地下水採樣與分析、追蹤劑(tracer)監測以及抽水速率測量等。

污染成效監測計畫在一個完整的污染整治計畫中，須視需要作常態性的檢視及修改，其程序請參考圖 6.2.3-1。成效監測必須隨時依據場址污染現況或概念式模型之修正等訊息，予以適度地更新及改進，以正確掌握地下水抽出處理之功效。主要監測水力控制系統參數，說明如下：

一、水力梯度及捕捉區分析

水力梯度的分布及調查主要是定期測量及記錄各觀測井的水位高度。詳細的水力梯度分布可以利用配置於污染區域的成對水力計(Piezometer)而取得，主要為位於抽水區域之地下水下游方向。水頭壓力和水力梯度等資料主要是用來評估水力捕捉區域。

二、地下水質分析

在地下水化學分析項目方面，若檢驗結果得知污染濃度大於環境背景濃度時，可考量污染場址中之污染特性，以移動速度最快之污染物質為設定目標。

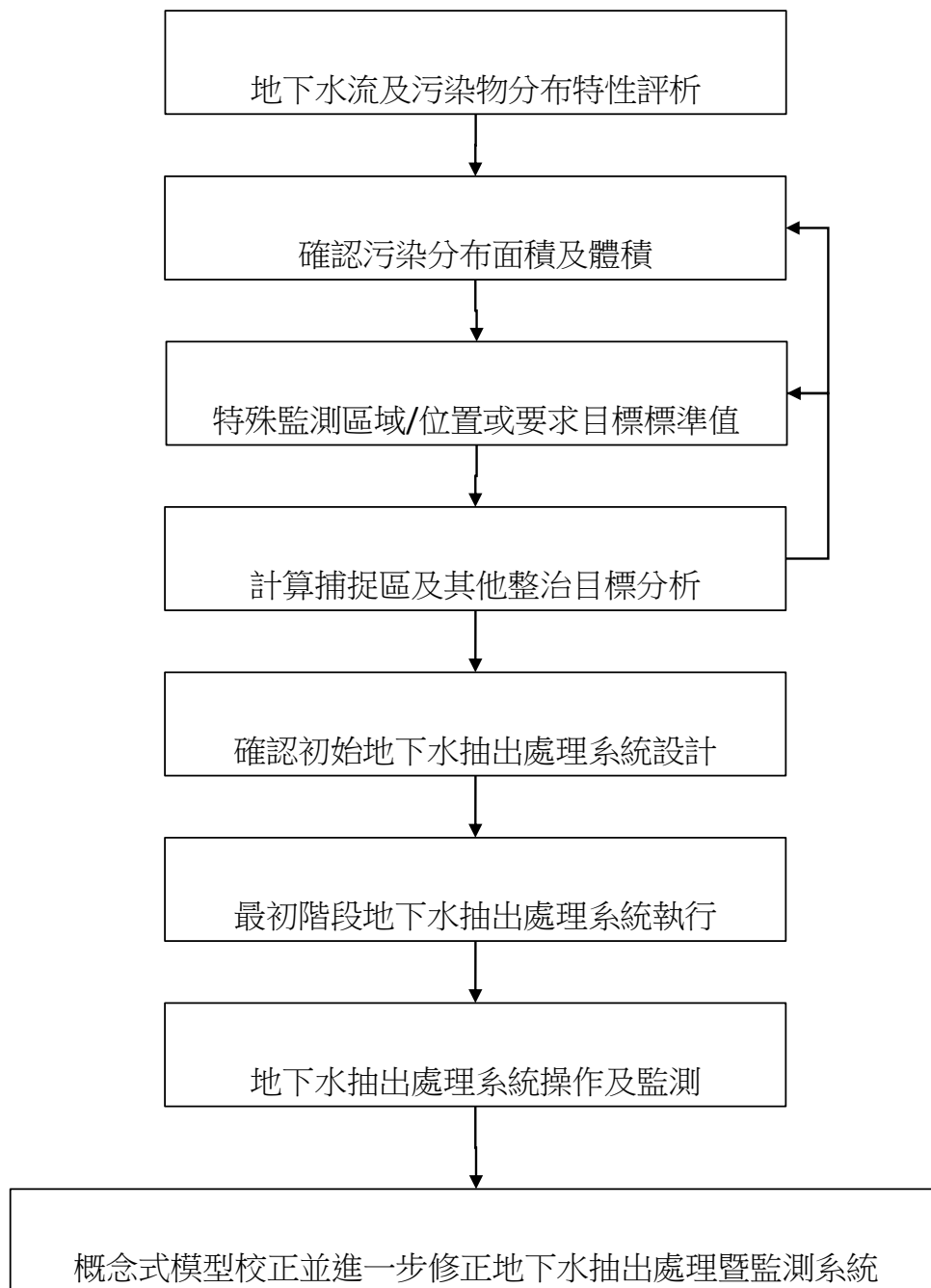


圖 6.2.3-1 地下水抽出處理系統成效監測程序流程圖

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 6.2.3-1。

表 6.2.3-1 地下水抽出處理法整治系統成效監測

	抽水系統	水力控制範圍	地下水水質監測
目的	設備調整至最佳化	確認水力控制之捕捉區域	評估系統整治成效 評估處理系統處理成效
對象	流量計	抽水區域之地下水下游方向監測井	監測井，處理系統之放流口
分析項目	瞬間流量、總流量	水位高程	監測井：pH、導電度、溫度、溶氧、氧化還原電位、污染物項目 處理系統放流口：污染物項目
監測頻率	- 第一週每日至少量測 1 次，之後第一個月每週至少量測 1 次。 - 正式運轉期間，每月至少量測 1 次。	水位計，系統運轉前一個月及運轉後兩個月每日至少量測 1 次，之後每一個月每週至少量測 1 次。	- 監測井：地下水污染物項目，進行定期(如每月或每季)採樣 1 次，送實驗室進行檢測。 - 處理系統放流口：污染物項目，進行定期(如每月)採樣 1 次
備註	試車階段應每日量測地下水位，以評估系統運轉造成水位下降的狀況。	- 於整治系統運轉前一個月開始進行背景水位監測。 - 應建立長期水位觀測紀錄，以觀察系統運轉與季節性變化及其他可能之抽水來源。	- 於整治系統運轉期間進行。 - 監測井：pH 值、導電度、溫度、溶氧、氧化還原電位與地下水位於現場進行檢測。

6.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下就環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目，進行說明如下：

一、對環境之影響

在地下水含水層中的抽水可能造成地層擾動，因此務必在規劃井網之設計抽水參數下，遵照設計操作參數操作，以避免水力負荷過大，造成地層坍塌的風險。

在地表設置之水處理單元部分，依據不同的地面廢水處理設備，必須在操作負荷之下操作。抽出地下水之後續排放方面，若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之廢水處理設施處理，但必須符合廢水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之廢水處理設備，應符合

我國水污染防治相關規定，在無法符合放流水質標準之情況下，必須另行設置廢水處理設施。

二、潛在之危害

地下水抽出處理系統運轉過程中，主要之潛在危害性為人體可能暴露或接觸受污染之地下水，其他潛在之危害請參見表 6.2.4-1。

表 6.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	設置地下水抽水井或抽水渠等抽取系統	機具設備危害	妥善操作大型鑽井機具 人員於操作機具附近，應戴聽力防護設備
	系統運轉中	火災與爆炸	含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強操作人員的訓練與緊急應變的能力
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	系統進行維護作業時	接觸污染地下水	操作人員宜著防護手套並佩帶防護口罩
	廢水處理時	衍生廢棄物與污泥等	於密閉系統中操作 使用適當的個人防護裝備

6.3 成本及期程預估

在美國加州前燧石(Firestone)工廠超級基金場址中，使用抽出處理方式處理地下水中污染物，經歷 7 年時間，並花費 12,884,813 美元(約新台幣 450,968,455)才達成整治目標。共抽出 1,800 百萬加侖(約 9.284×10^{22} 立方公尺)之地下水，去除之揮發性有機物約為 225 公斤。平均移除每公斤之揮發性有機物需花費 57,266 美元(約新台幣 2,004,310)。

七、地下水循環井法(groundwater circulation well, GCW)

7.1 整治技術簡介

7.1.1 原理

地下水循環井法(groundwater circulation well, GCW)在國內又可稱為井內氣提法(in well air stripping)或井內曝氣法，此法在國內已有使用於 DNAPL 場址之案例，針對國內常見 DNAPL 污染物，如三氯乙烯及其降解之產物，有其移除功能，相較於大部分之化學氧化法或其它物理整治方法，地下水循環井法之設置及操作費用較為經濟。

本法係綜合氣提(air stripping)、土壤間隙蒸氣抽除(soil vapor extraction)及加強式生物降解(enhanced biodegradation)等整治方法，以達到去除地下水中污染物之目的。

整治原理為將井內受污染之地下水，經由氣提程序或氣提設備處理，使地下水中揮發性污染物由溶解相轉變為氣相，進行氣相污染物收集工作；氣相污染物藉由揮發性有機物處理設備進行整治，或回注至通氣層(vadose zone)中，以生物整治方式進行處理；而經過氣提作用處理後之污染濃度降低，地下水則回注入井內補注含水層，藉由此補注及抽除之程序，以循環方式處理含水層中之污染地下水，過程中同時進行土壤間隙蒸氣抽除。

地下水循環區域會形成垂直向沖提，有助於垂直分層間透水係數較低之地層中污染物的移除，也可強化污染源區域的污染物的釋出，加速整治效率。本法之原理示意圖，如圖 7.1.1-1。

7.1.2 適用條件

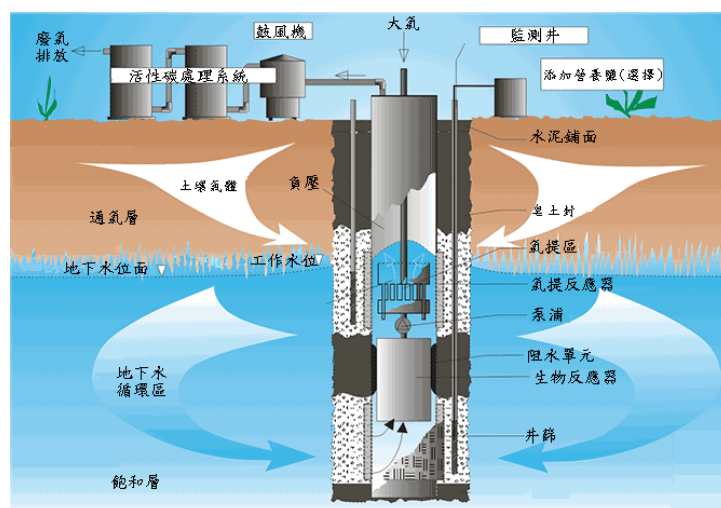
地下水循環井法係針對移除地下飽和層中的污染物之技術，為地下水現地整治技術之一種，亦可同時處理通氣層土壤；其應用範圍包括：氯化有機溶劑、碳氫化合物、低溶解度/高蒸氣壓污染物、可被生物降解以及其他可

被氣提之污染物(2009 年台美講習會, In-situ thermal treatment)。其設計比其他常用注氣或抽出處理簡單, 僅需日常維護即可連續運轉, 維護相對容易。

目前現地應用主要是針對揮發性鹵化物(如三氯乙烯)以及油品類之組成(如 BTEX)。部分應用經過適當的修改後, 可應用於半揮發性有機物及殺蟲劑污染的移除。至於地質條件部分, 其應用範圍之土壤特性涵蓋粉土質黏土至砂質礫石(silty clay to sandy gravel), 亦是相當廣泛, 在相對較均質的區域, 其效果較佳。本指引彙整地下水循環井應用於不同污染物型態、整治策略、飽和/未飽和層厚度、含水層特性等面向之可行性評估, 如表 7.1.2-1。

本法為現地處理技術, 因此相較傳統的地下水抽出處理技術, 具有較高經濟效益的優點; 並藉由地下水垂直向沖提, 加強垂直分層間透水係數較低之地層中污染物的移除, 因而加速整治效率。

但由於本法直接於地下水中進行氣提, 對於地下環境之化學特性有一定的影響, 包括地下水的碳酸鹽平衡、pH 值、氧化還原態以及溶氧等, 並可直接造成地下水中沉澱物的增加、溶氧的提升以及地下水緩衝能力的改變, 因此設計時應對這些環境衝擊予以考量、說明。此外, 在井中氣提的過程中, 是否有逸散至地表的情形, 如果有類似的情形發生, 則應確認逸散濃度對環境不會造成風險。表 7.1.2-2 為本法於應用之優缺點比較。



資料來源: IEG Technologie GmbH, <http://www.ieg-technologie.com>

圖 7.1.1-1 地下水循環井法整治系統原理示意圖

表 7.1.2-1 地下水循環井應用性評估

考量項目	條件	可行性評估
污染物型態	揮發性有機物	★★★
	半揮發性有機物	★★
	重金屬	★
	物理放射性核種	★
整治策略	污染源整治	★★★
	污染帶整治	★★
	污染帶攔截	★
未飽和層厚度	0-1.5 公尺	★
	1.5-300 公尺	★★
飽和層厚度	0-1.5 公尺	★
	1.5-35 公尺	★★
	>35 公尺	★
含水層特性	孔隙介質	★★
	破碎介質	★
	石灰岩	★
背景流速	低(如： >0.0003 m/day)	★★★
	中(如： $0.0003-0.3$ m/day)	★★
	高(如： >0.3 m/day)	★
水平水力傳導係數	中度(如： $0.009-0.3$ m/day)	★★
	高(如： >0.3 m/day)	★★★
水平/垂直水力傳導係數	非等向性(3-10)	★★
	高非等向性(>10)	★
含水層化學性質	水中高含量鐵質	★
	水中高含量鈣質	★
	水中高含量鎂質	★

★★★：本技術較為適用

★★：本技術中度適用

★：本技術應用上有限制或不適用

資料來源：Naval Research Laboratory, Groundwater Circulation Well Technology Assessment, NRL/PU/6115-99-384, May 1999.

表 7.1.2-2 地下水循環井法技術優缺點比較表

優點	缺點
- 為現地處理技術，具有可連續將地下水中揮發性有機物抽除之現地處理的優點。 - 採用垂直向沖提，有助於垂直分層間透水係數較低之地層中污染物的移除，也可能強化污染源區域的污染物的釋出，加速整治效率。 - 部分系統設計沒有回注之需求，因此可降低回注時的法規限制。 - 由於其運作為垂直向的循環，對地下水位的影響較小，特別適用於對地下水位變化敏感的區域(溼地或單一補注源的地下含水層)。	- 對地質水文條件相當敏感，當地下環境之不等向性高時，可能明顯影響循環效能與影響半徑。 - 如果井未能適當設計，可能將未處理完全之地下水導引至影響半徑外區域。 - 處理效能受到污染物揮發性與系統設計的限制。 - 氣提效應可能造成地下水中地球化學性質的改變；其中常見的一種情形為地下水中二氧化碳濃度因為氣提作用而減少，進而改變地下水的緩衝能力並導致 pH 值提高，因此產生鐵與鈣的沉澱，造成井的堵塞及限制地下水循環流量。

表 7.1.2-2 地下水循環井法技術優缺點比較表(續)

優點	缺點
- 部分系統設計為無需將地下水抽出地表或設置地上處理系統(如氣提塔與儲存槽)，可減少地上設施所需空間。活性炭設備是抽出的揮發性有機物氣體最常使用的處理設施。 - 井內氣提除了降低地下水中之揮發性有機物濃度進而降低對生物的毒性，也因為氣提過程的曝氣可使地下水中的溶氧高於週遭的溶氧，所以可以強化好氧生物降解。 - 與其他整治技術結合，可以成為其他整治技術的平台，如氧化劑、界面活性劑與觸媒等的傳送，也可以藉以送入營養鹽與電子接受者，以強化生物整治。	- 井的設計與設置困難度較高，在設置過程必須確實避免上下井篩之間相通，同時其間之井封也必須確實，以免造成地下水經由井封位置互相流動，未能形成大的循環單元。 - 井內氣提並不適用於地下水層厚度太薄的區域。 - 其原理與一般之氣提塔相同皆為氣提作用，所以無法處理不具揮發性的污染物；具有較高的亨利常數的污染物較容易移除。

資料來源：Naval Research Laboratory, Groundwater Circulation Well Technology Assessment, NRL/PU/6115-99-384, May 1999.

7.2 整治系統操作與設計

有關國外針對地下水循環井法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 7.2-1 所示。

表 7.2-1 國外地下水循環井法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國 Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center	Technology Overview Report: In-well Vapor Stripping (TO-97-01)	1997
美國環保署	Field Application of In Situ Remediation Technologies: Ground-Water Circulation Wells (EPA 542-R-98-009)	1998
美國 Naval Research Laboratory	Groundwater Circulating Well Technology Assessment (NRL/PU/6115-99-384)	1999

7.2.1 整治系統設計與操作要點

整治系統設計前應蒐集地層分佈、水位變動、不同飽和度的水力傳導係數、未飽和土壤的透氣性、污染務農度、地下水水文地質特性及生物降解的可能性(2009 年台美講習會，In-situ thermal treatment)。應在上述資料蒐集完善後始進行規劃與設計。

在地下水循環技術的規劃設計主要考量，為阻水單元及地下水循環井結構的設計需能讓揮發性有機物揮發程度達到最高，並能將足夠的地下水導入

通氣層中。以下針對本法現地模場試驗、規劃設計的注意事項及技術種類、系統操作之要點說明。

一、 現地模場試驗

現地模場試驗主要目的係在評估地下水循環井法之現場設計因子，以進行全場整治系統設計；於現地模場試驗過程中，先進行地下水循環井系統安裝、測試及校調，期間並定期進行地下水水位與水質監測，水位監測之對象需包括鄰近之水位觀測井，於確認地下水循環井成效評估良好時，彙整相關資料作為後續全場整治系統之規劃。

二、 規劃設計注意事項

- (一)須注意本系統的使用會造成土壤及地下水的化學變化，如沉澱或氧化等情況發生，並可能化學沉澱物導致井篩阻塞，因而限制循環的地下水量。
- (二)須注意淺層含水層由於有限空間造成循環水量及再過濾效果受限制，因而降低系統處理效率。
- (三)若未適切的設計及設置地下水循環井，污染帶可能將未處理完全之地下水導引至系統影響半徑外區域。
- (四)本法於估算污染處理總量時，須注意地下水回注至通氣層土壤中可能會擾動累積於其中的污染物，因而造成含水層中污染物總量增加

三、 技術種類

(一)NoVOCsTM

由美國史丹福大學開發成功，此系統採用空壓機將空氣送入受污染之地下水中，有氣泡的混合水上升至發生最佳揮發的高度後，碰到反射板。此時氣泡開始結合，而地下水由上層井篩流出井外，氣泡則由真空抽氣帶至地上揮發性有機物處理設施。適當的化學物質(造成沉澱或吸附)，則放置於 NoVOCs 的週邊隨水流釋放，使得地下水得以與之接觸；系統設計圖如圖 7.2.1-1。

(二)UVB 系統

此種系統採沉水式泵浦保持標準水流量。此外，使用氣提反應

器，於地下水回到水體之前，加速揮發性污染物的揮發。位於散氣盤下方的管路則可增加接觸時間，藉以提高揮發效能；系統設計圖請參見圖 7.2.1-2。

(三)DDC 系統

此系統強調生物整治效能的強化，將抽出之氣體導入不飽和層，由生物作用自然降解。營養鹽或是氧氣均可加入 DDC 井中，同時提供飽和層與不飽和層，提升自然好氧程序，如圖 7.2.1-3。

四、系統操作

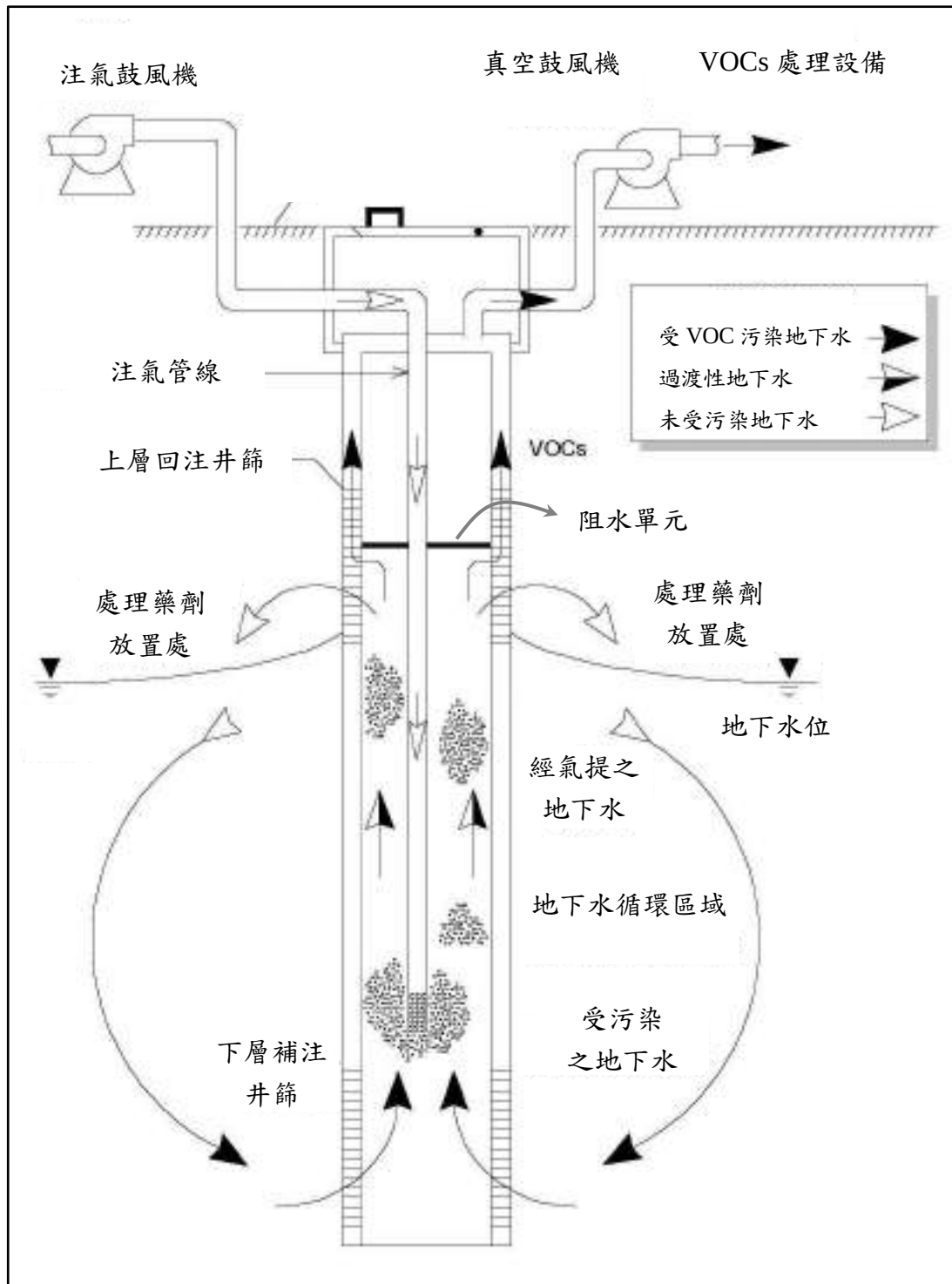
地下水循環井法整治系統主要為應用氣提作用的原理，且不將污染地下水抽出地表，因此相較傳統整治方法如地下水抽出處理，系統操作維護較為簡單。一般系統採全自動操作，並不需要額外配置系統操作人員，僅於地下水採樣、系統定期維護時間或不明原因造成之系統停機時，需指定系統操作維護小組人員，進行狀況記錄及排除。

系統運作過程中，於下列情況時需派員進行記錄工作：

- (一)定期記錄。
- (二)不明原因系統停擺。
- (三)計畫性系統關機：由指定之系統操作維護小組人員負責。
- (四)系統重新啟動：由指定之系統操作維護小組人員負責。
- (五)地下水與空氣採樣：由指定之系統操作維護小組人員負責。
- (六)重點檢查及記錄項目，彙整如表 7.2.1-1。

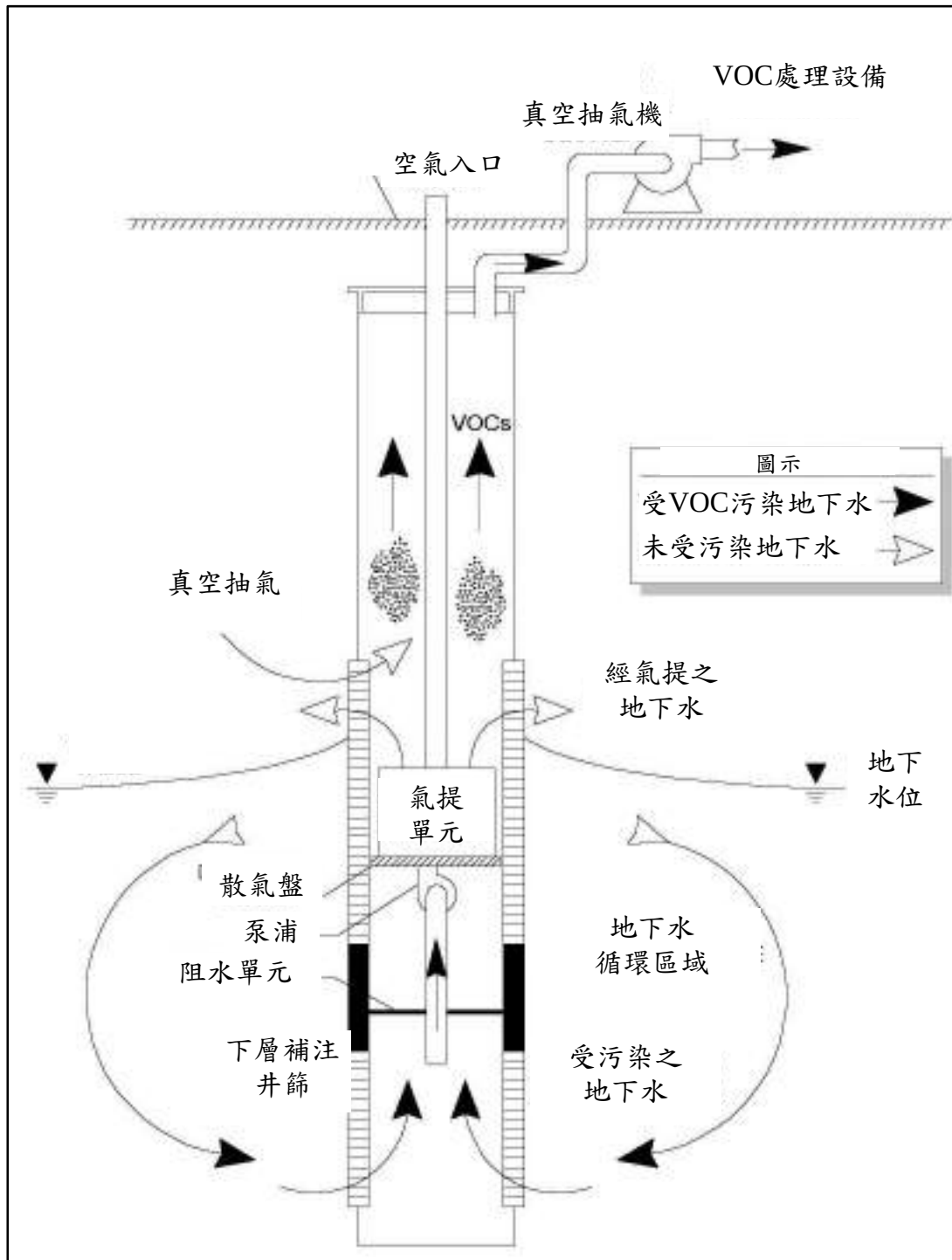
表 7.2.1-1 檢查或紀錄項目及目的

檢查/記錄項目	檢查/記錄目的及重點
地下水阻水單元壓力計讀值	若阻水單元為氣囊式，需注意其充氣情形，以確實達到阻隔地下水的功能，進一步使地下水循環效果好，整治效果才能顯現。
揮發性有機物處理系統讀值	依據處理系統不同，檢查並記錄其操作數值，如活性碳槽壓力計讀值等
地下水進入整治系統總體積	依據流量計可記錄抽出之地下水總量及瞬間流量。
實際地下水抽水率	依據流量計可記錄抽出之地下水總量及瞬間流量。
地下水循環井中之地下水位面	了解循環井內回注水進入地層狀況，地下水位面若長期處於高點，表示井篩及地層中可能有積垢現象。



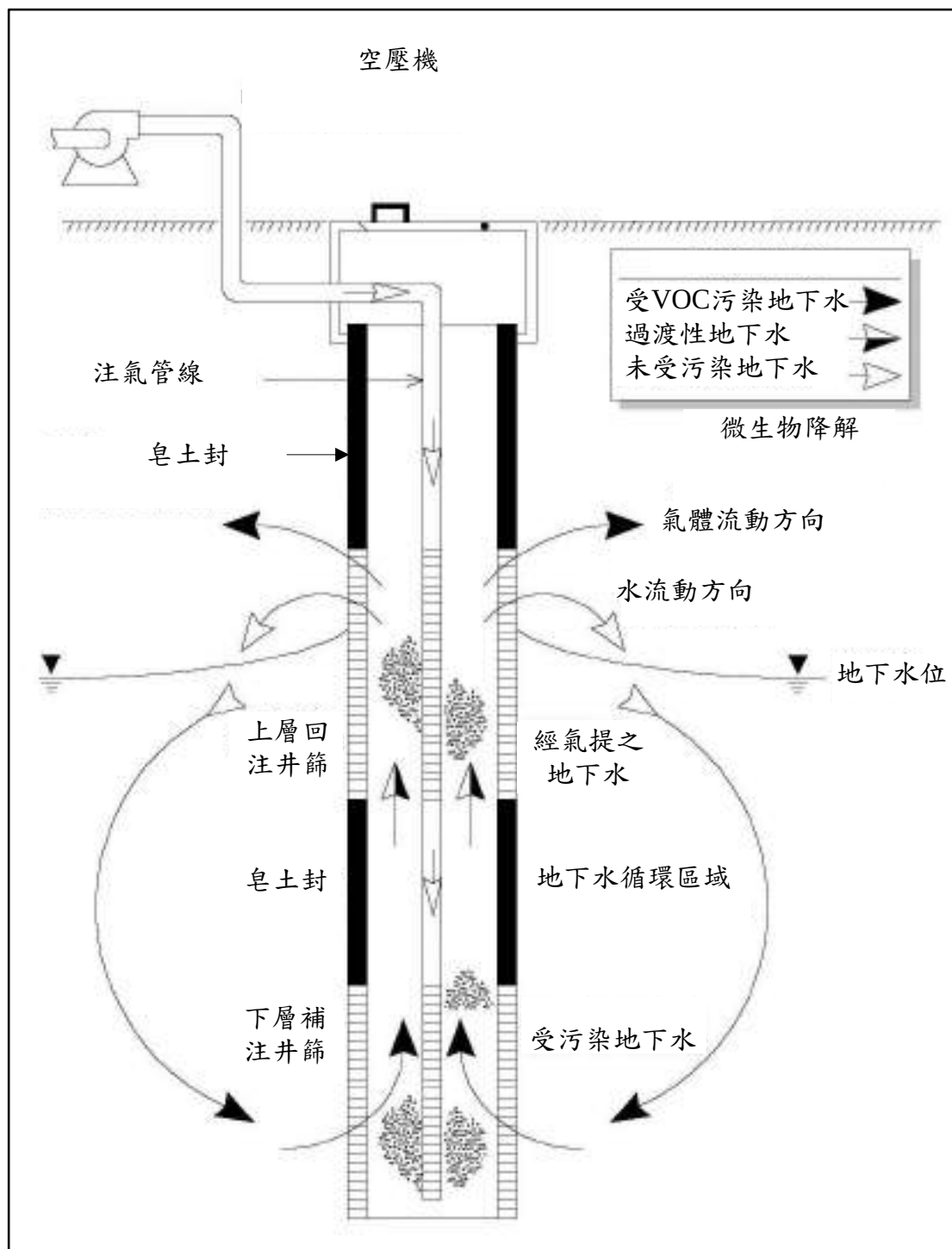
資料來源：Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, In-well Vapor Stripping, Technology Overview Report, TO-97-01, February 1997.

圖 7.2.1-1 NoVOCs 系統設計圖



資料來源：Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, In-well Vapor Stripping, Technology Overview Report, TO-97-01, February 1997.

圖 7.2.1-2 UVB 系統設計圖



資料來源：Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, In-well Vapor Stripping, Technology Overview Report, TO-97-01, February 1997.

圖 7.2.1-3 DDC 系統設計圖

7.2.2 整治系統單元

有關建置地下水循環井法之整治系統的必要設備，會隨著不同種類的系統有所差異，於此所列設備以較常使用共通之設備需求為重點，彙整如表 7.2.2-1。

表 7.2.2-1 系統設備表

項次	各項設備
1	地下水循環井(至少二段以上之井篩)
2	阻水單元(氣囊式或隔板式)
3	氣提單元(井內氣提設備或曝氣槽)
4	抽出氣體之揮發性有機物處理設備(活性碳吸附槽或熱分解系統或觸媒處理)
5	導氣系統(注氣/抽氣泵浦及注氣/抽氣管線)

7.2.3 整治系統監測

監測系統應可進行相關參數的紀錄(如氣體流量、地下水及土壤氣體濃度等)、常設型的偵測器、流量控制閥、流量量測裝置等，並配有系統可進行週期性及例行性的檢查作業(2009 年台美講習會，In-situ thermal treatment)。

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

本法防止土壤及地下水污染擴大之措施，為進行周圍地下水監測井之地下水或地下水循環井周圍不同深度通氣層土壤監測工作(土壤監測僅適用 DDC 系統)，以避免對環境造成影響，並可同時達到系統成效監測的目的。

二、成效監測

有關評估地下水循環法整治系統的成效，會隨著不同種類的系統有所差異，於此所列監測工作以較常使用共通之項目為重點；監測對象，包括：地下水循環井及地下水監測井的地下水、VOC 處理設備的空氣及通氣層土壤等；其監測目的，包括：相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響及防止污染擴大之監測工作等。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 7.2.3-1。

表 7.2.3-1 地下水循環井法整治系統成效監測

項目	地下水循環井	VOC 處理設備	地下水監測井	通氣層土壤
監測目的	- 系統設備成效評估 - 整治成果評估	- 以避免對環境造成影響 - 處理設備成效評估	- 以防止污染擴大監測工作 - 整治成果評估	- 以防止污染擴大監測工作 - 通氣層微生物整治成效評估
監測對象	- 循環井進流端地下水 - 循環井回注端地下水	揮發性有機物處理設備出口端空氣	周圍地下水監測井之地下水	地下水循環井周圍不同深度通氣層土壤
分析項目	pH 值、導電度、溫度、溶氧、氧化還原電位、揮發性有機物、總量及溶解性的鐵、鈣、鎂等礦物質	揮發性有機物、流速、壓力、相對溼度、溫度	pH 值、導電度、溫度、溶氧、氧化還原電位、揮發性有機物	DNAPL 污染項目
監測頻率	- 設置後 6 個月內每個月一次 - 設置後 6 至 18 個月內每 2 個月一次	- 設置後 6 個月內每個月一次 - 設置後 6 至 18 個月內每 2 個月一次	- 設置後 6 個月內每個月一次 - 設置後 6 至 18 個月內每 2 個月一次	設置時、設置後 12 個月及 18 個月各一次
備註				適用 DDC 系統

7.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

本工法將產生廢氣排放之問題，因此需考量廢氣排放對於環境之影響，並應考量周圍居民對於空氣品質之觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成執行之延宕。

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下就對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目，進行說明。

一、對環境之影響

本法可能對環境中空氣造成影響；污染地下水經氣提單元處理後之空氣污染物若未謹慎處理，會造成空氣二次污染。

二、潛在之危害

潛在危害彙整如表 7.2.4-1。

表 7.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	當需進行控制電盤之零配件或電線更新	感電	控制電盤維修時，應停止運轉並關閉電源方可進行，並由合格之電氣技術員執行
化學性風險	- 地下水採樣 - 設備維護，如曝氣槽體拆洗、循環井內水位感應器或管線清洗	揮發性有機物之暴露	為避免接觸未經處理之地下水，須確實佩戴防護手套(如乳膠手套)與佩戴防護口罩
	若系統使用開放式循環(open-loop)操作時，現場利用光離子化偵測器(photo-ionization detector, PID)監測周界空氣濃度	污染危害	當可能吸附揮發性化學性氣體時，需佩戴防護口罩

7.3 成本及期程預估

依據美國環保署統計，以全球採用井內氣提進行整治案例中，有 58%達到整治目標並完成關閉場址的目標，具相當高的成功率；而達成關閉場址的平均操作時間為 21 個月，其範圍為 2 至 71 個月間，平均使用井數為 6 口，平均處理水體厚度為 8.7 公尺。

以操作成本而言，若以 UVB 系統循環 60-90%的循環地下水量為計算基準的成本預估下，可計算出 1、3、5 及 10 年操作費用分別為 26 萬、34 萬、44 萬及 71 萬美元，若以每年處理約 4 立方公尺的地下水為計算基準，不同操作年限之平均每立方公尺污染物的整治費用分別為 65,000、27,500、22,000 及 17,750 美元(新台幣 2,275,000、962,500、770,000、621,250)。井內氣提系統之平均費用，彙整如表 7.3-1。

表 7.3-1 井內氣提系統建置平均成本(UVB 系統)

類別	費用(美元)	費用(新台幣)
系統初設成本	180,000	6,300,000
第一年操作 與維護費用	72,000	2,520,000
後續每年之操作與維護費用	42,000	1,470,000

資料來源：Naval Research Laboratory, Groundwater Circulation Well Technology Assessment, NRL/PU/6115-99-384, May 1999.

八、 現地化學氧化法(In-situ chemical oxidation, ISCO)

8.1 整治技術簡介

8.1.1 原理

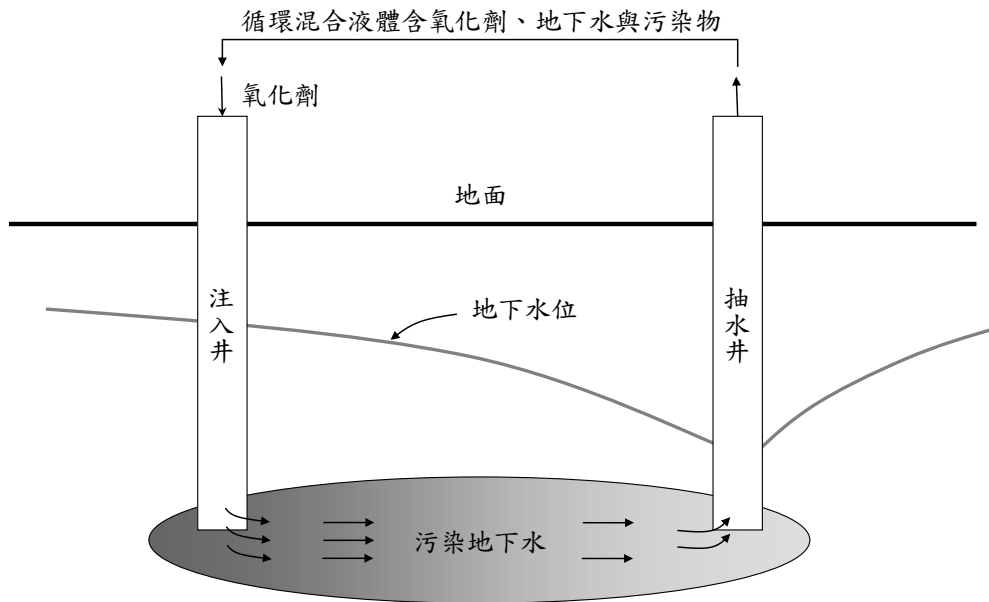
現地化學氧化法(In-situ chemical oxidation, ISCO)發展初期著重於清除碳氫化合物污染的研究，之後亦有不少研究用於解決含氯有機溶劑污染的問題，本法用於處理含氯有機溶劑已陸續由實驗室、模場，進展到現地驗證與現地整治的階段。現地化學氧化法為具發展潛力之土壤及地下水污染整治方法之一，近年來國內外已廣泛應用本法於石油碳氫化合物與含氯有機溶劑之污染場址。近年來也逐漸受到美國環保署及其他相關研究機關重視，根據各場址特殊之現地情況(site specific)不同，某些場址適合採用現地化學還原法進行整治，將可較使用現地化學氧化法更節省經費且有效。

該整治技術係將化學氧化劑注入至土壤或地下水環境，透過氧化劑與污染物所產生的化學反應，使污染物降低其質量、降解或轉化成低毒、低移動性產物的一種現地整治技術；同樣地，現地化學還原法(In-situ chemical reduction, ISCR)亦可以注入還原劑至土壤或地下水環境中，驅使污染物質經還原程序進行降解。以下分別對現地化學氧化法，及現地化學還原法說明其原理。

一、 現地化學氧化法

現地化學氧化法不需將污染土壤挖除或將污染地下水抽除，而是在污染區域(污染帶)中設置不同深度的注入井，再利用泵浦加壓，將化學氧化劑透過井注入地下環境中。氧化劑與污染物混合、反應，使土壤與地下水中的污染物破壞、分解成較不具危害性的物質，理想狀況下，可轉化成二氧化碳、水與無機鹽類，但亦可能產生有毒的中間副產物。如為縮短整治期程，通常會利用一個井注入化學氧化劑，另一個井將污染地下水抽除出來，並且設置氧化劑循環再利用設備。較常用的氧化劑種類有過錳酸鹽(MnO_4^-)、Fenton 試劑(過氧化氫+鐵離子， $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$)、臭

氧(O_3)及過硫酸鹽($S_2O_8^{2-}$)等 4 種，其中以過錳酸鹽較為廣泛應用，示意圖如圖 8.1.1-1。



資料來源：USEPA, A Citizen's Guide to Chemical Oxidation, April 2001.

圖 8.1.1-1 現地化學氧化法示意圖

二、 現地化學還原法

目前現地化學還原法兩種主要的產品，一為較常見的零價鐵(zero-valent iron, ZVI)，另為二價鐵(dual-valent iron, DVI)；其中零價鐵經常與其他物質混合，複合成多效產物以加強污染物質的還原程序，商業化產品包括加入可緩慢釋放之碳(Carbon)源，可增加生物活性；此外，現地化學還原法之特性會創造一個低氧化還原電位環境，驅使污染化學物質降解逐步轉化生成氫氣，其優點為本技術降低污染化學物質降解過程中產生的衍生物(daughter products)。其複合之整治原理包括：

- (一)直接接觸還原反應：地層中加入還原劑(如零價鐵)作為電子供應者(electro donor)，污染物質成為電子接受者(electro acceptor)，迫使污染物質降解並生成氫離子；
- (二)非直接接觸還原反應：經上述反應產生之氫氣作為電子供應者，被微生物分解利用；

(三)生物降解反應/同時會消耗環境中氧氣及其他電子接受者，如硝酸鹽或硫酸鹽等化合物。

簡而言之，地層中加入可緩慢釋放之碳源後，其內含之長鏈高分子脂肪轉化成小分子脂肪酸，非常適宜在含水層中做為細菌附著的載體。異營性細菌(heterotrophic bacteria)吸附營養源後，會消耗地下水中的溶氧、分解含碳營養源、且釋放出各種的揮發性脂肪酸(如乙酸、丙酸)，這些揮發性脂肪酸會進入地下水污染團中，促進分解鹵化物菌種(dehalogenator species)分解含氯有機物。並藉其引入多種的物理、化學及生物反應，以營造一個能加速含氯有機物分解的還原環境；一般而言，厭氧環境含較高濃度的有機碳，當有機碳發酵或降解產生氫氣，因氫氣做為電子供應者而含氯有機污染物為電子接受者，將多氯有機鍵結的碳氯鍵打斷後，無害的氯離子則游離存在於水中。例如四氯乙烯(PCE)可依次降解並產生三氯乙烯(TCE)、二氯乙烯(DCE)、氯乙烯(VC)、乙烯及乙烷。此外，厭氧生物處理亦對於氯苯、有機氯農藥(氣丹)、多氯聯苯、五氯酚、火藥類(TNT,RDX, HMX)及 Cr^{6+} 等污染物有顯著的整治效果。

8.1.2 適用條件

場址地下水文地質與地球化學特性變異性大，且影響化學氧化劑在地下環境的演變及移動。影響本法適用性與處理成效之主要因素，包括：(1)氧化劑與關切污染物是否會產生化學反應；(2)氧化劑是否能接觸到污染物，亦即是否有方法可以將氧化劑注入至污染區域(污染帶)；(3)氧化劑的持久性(oxidant persistence)，亦即氧化物與污染物可發生反應的時間。

現地化學氧化法適用於低滲透性或高度分層(highly stratified soil)土壤、低揮發性污染物、現地降解動力常數(in-situ degradation kinetic constants)低污染物及 DNAPL 污染物(In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會)。例如三氯乙烯、四氯乙烯、二氯乙烯、多環芳香族碳氫化合物、苯、甲苯、二甲苯、乙苯，以及其他有機化合物。不同氧化劑處理不同種類的污染物之適用性，如表 8.1.2-1。

表 8.1.2-1 各種氧化劑處理不同關切污染物之適用性

氧化劑	可處理之污染物	勉強可處理之污染物	不易處理之污染物
過氧化氫/鐵	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯、總酚、1,4-環氧己烷、甲基第三丁基醚、第三丁醇、爆炸物	二氯乙烷、二氯甲烷、多環芳香族碳氫化合物、四氯化碳、多氯聯苯	三氯甲烷、農藥
臭氧	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯、總酚、1,4-環氧己烷、甲基第三丁基醚、第三丁醇、爆炸物	二氯乙烷、二氯甲烷、多環芳香族化合物	三氯乙烷、四氯化碳、三氯甲烷、多氯聯苯、農藥
臭氧/過氧化氫	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯、總酚、1,4-環氧己烷、甲基第三丁基醚、第三丁醇、爆炸物	二氯乙烷、二氯甲烷、多環芳香族碳氫化合物、四氯化碳、多氯聯苯	三氯甲烷、農藥
過錳酸鹽(鉀、鈉)	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、多環芳香族碳氫化合物、總酚、爆炸物	苯、農藥	三氯乙烷、四氯化碳、三氯甲烷、多氯聯苯、農藥
活性過硫酸鹽	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烷、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、總酚、1,4-環氧己烷、甲基第三丁基醚、第三丁醇	多環芳香族化合物、爆炸物、農藥	多氯聯苯

資料來源：ITRC, Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, p.17, January 2005.

氧化法顧名思義，氧化劑為一重要之影響因素，其反應物型態、穩定性、技術發展程度與氧化能力，彙整如表 8.1.2-2。低滲透性與非均質性地下環境，影響氧化劑的注入、傳輸、抽取、回收與再利用，如採本法進行整治將極具挑戰性。採用現地化學氧化法的理想環境條件如下：

- 一、計畫目標旨在移除 50 至 90 % 的污染物。
- 二、氧化劑易注入至污染區。
- 三、無工安問題。
- 四、污染區具中至高度透水性。
- 五、場址附近無敏感受體。

六、 土壤氧化劑需要量(soil oxidant demand, SOD)低。

七、 高溶氧或好氧環境。

八、 土壤中未具有反應性礦物(如含鉛礦物)。

表 8.1.2-2 氧化劑之反應物型態、穩定性與技術發展程度彙整表

氧化劑	反應物	反應物型態	藥劑持久性*	技術發展程度
過錳酸鹽	MnO_4^-	粉末、液態	>3 個月	發展中(developing)
Fenton 試劑	$\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 、 HO_2^-	液態	數分至數小時	實驗性/新興技術
臭氧	O_3 、 $\cdot\text{OH}$	氣態	數分至數小時	實驗性/新興技術
過硫酸鹽	$\cdot\text{SO}_4^{2-}$	粉末、液態	數小時至數週	實驗性/新興技術

*：藥劑持久性與場置性條件有所不同，表列為一般所見藥劑持久期間。

資料來源：USEPA, Engineering Issue – In-Situ Chemical Oxidation, 600-R-06-072, p.2, 2006.

現地化學還原法對於鹵化化合物之降解經證實很有效，對於其他如氯化芳香族類化合物等可作為良好地電子接受者亦有其效果。一般而言，若目標場址之地質環境屬於缺氧狀態(如低氧化還原電位或負值；溶氧值偏低)，可考慮採用現地化學還原法技術；然而，若採用可滲透性反應牆法充填零價鐵作為反應基質，較不需擔心場址環境位屬厭氧或好氧環境。現有不同商業化產品處理不同種類的污染物之適用性，如表 8.1.2-3。本法在應用上之各項可能優缺點，如表 8.1.2-4。

表 8.1.2-3 現地還原法商業化產品處理不同關切污染物之適用性

產品	成分	可處理之污染物	不易處理之污染物
EHC	微米級零價鐵、多纖維碳化合物、無機營養物等	鹵化化合物(如三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯等)、芳香烴族(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯)、有機氯農藥(氣丹)、多氯聯苯、五氯酚、火藥類(TNT,RDX, HMX)、烷類(如二氯乙烷等)及 Cr^{6+}	
EOS	食用級大豆油、乳酸鹽、無機營養物等	鹵化化合物(如三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯等)、芳香烴族(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯)、有機氯農藥(氣丹)、多氯聯苯、五氯酚	烷類
SRS	食用級食用油、乳劑、水	鹵化化合物(如三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯等)、芳香烴族(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯)、有機氯農藥(氣丹)、多氯聯苯、五氯酚、火藥類(TNT,RDX, HMX)及 Cr^{6+}	烷類
HRC	三乳化甘油、乳酸、甘油	鹵化化合物(如三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯等)、芳香烴族(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、氯苯)、有機氯農藥(氣丹)、多氯聯苯、五氯酚、	烷類

表 8.1.2-4 現地化學氧化法技術優缺點比較表

優點	缺點
• 適用於處理較廣泛的污染物類型。 • 現地破壞污染物。 • 相較於其他整治技術(如抽水處理法與自然衰減法)，現地化學氧化法可能可以降低整治成本。 • 可處理水相、吸附相與非水相的污染物。 • 可強化物質傳輸(如強化脫附作用與 NAPL 物質的溶解)。 • 過氧化氫的反應熱可加速物質傳輸、反應速率與微生物活動。 • 可能強化化學反應後之微生物活動強度與自然衰減速率。 • 相較於其他候選整治技術可能具成本競爭優勢。 • 整治期程較短。	• 因含水層異質性與反應運移(reactive transport)造成氧化劑傳輸上的問題。 • 在某些土壤與含水層中，天然可氧化物質之氧化劑消耗量可能相對偏高。 • 部分氧化劑因在地下環境反應速率快，持久性(使用時間)短。 • 運作強氧化劑所衍生的工業安全衛生問題，例如 30 % ~ 40 % 的過氧化氫溶劑可能造成嚴重的灼傷；化學品的不穩定性亦可能引起火災與爆炸。 • 造成污染物移動的潛在問題。 • 降低滲透性(造成土壤孔隙阻塞)的潛在問題。 • 可能不適用於嚴重污染場址。 • 對混合污染物處理需採用整治技術組合(treatment train)

資料來源：

USEPA, Engineering Issue – In-Situ Chemical Oxidation, 600-R-06-072, p.4, 2006.

化學氧化整治發展至今仍有許多挑戰，詳細說明如下(In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會)：

- 一、 氧化劑與目標污染物接觸的不確定性高
- 二、 氧化劑是否足以處理目標污染物
- 三、 對原生生物族群的影響

8.2 整治系統操作與設計

有關國外針對現地化學氧化法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 8.2-1。

8.2.1 整治系統設計與操作要點

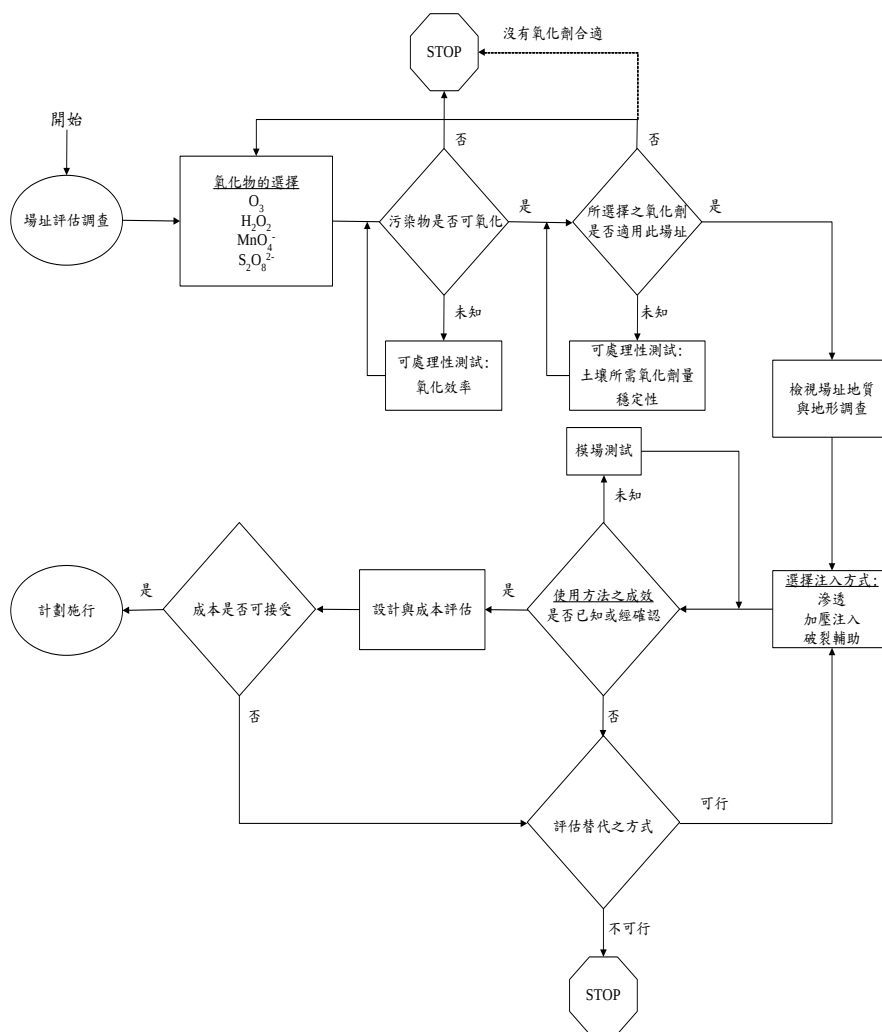
化學氧化法的成功條件為添加足量的氧化劑與目標污染物接觸並在足夠的時間中與污染物持續、有效的反應(ISCO field scale implementation and engineering design considerations, 2007 台美講習會)。現地化學氧化技術之設計、評估程序，應先收集污染場址之地形、地質資料，以評估化學劑量，並在整治前，評估該技術對於土壤及地下水污染之有效性。

設計流程分成幾個階段，先選擇氧化劑，其次選擇傳輸與注入的方式，

最後將前面 2 個階段予以結合。因氧化劑與傳輸方式有不同的選擇，故試驗往往先於實驗室中進行，以便測試選擇方式之可行性，最後並應在現地進行模場試驗，整個設計、評估程序，如圖 8.2.1-1。以下個別針對煤場試驗、規劃設計注意要點、技術種類及系統操作要點進行說明。

表 8.2-1 國外現地化學氧化法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國環保署	Engineering Issue Paper: In Situ Chemical Oxidation (EPA 600-R-06-072)	2006
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Technical and Regulatory Guidance for in Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, Second Edition	2005
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 8.2 Chemical oxidation/8.3 Chemical reduction	2002
Ground-Water Remediation Technologies Center (GWRTAC)	Technology Evaluation Report: In Situ Chemical Treatment	1999



資料來源：Dijkshoorn P., In-situ Chemical Oxidation of Chlorinated Solvents with Potassium Permanganate on a Site in Belgium. Proceedings of ConSoil, 2003 - 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, 1686-1691, May 12-16, Gent, Belgium, 2003.

圖 8.2.1-1 現地化學氧化法評估、設計流程圖

一、模場試驗

模場試驗應能提供全場設計所需的資料，包括藥劑注入井間的距離、藥劑的注入速率，並比較不同氧化劑注入方式，以及估算整治成本。在模場試驗階段，亦應確認複雜地質構成、可能的中間產物、重金屬的移動性、氧氣需求量(ISCO bench and pilot-scale studies, 2007 台美講習會)，以及對關切污染物的處理成效等。一般模場試驗之技術考量，包括：

- (一)在最具場址特性的地點進行模場試驗，該地點僅代表場址的一小區域，並可連續性的操作不被中斷。模場試驗若未涵蓋整個污染帶，應擇污染帶側面的地區進行試驗，且未來不會再被污染。

- (二)利用既有井、新井、直接貫入法注入或結合各種方法，規劃氧化劑注入計畫；關鍵在擇定適當注入井間隔，以使氧化劑能均勻的注入污染帶中，且各注入井的影響區域應重疊；氧化劑注入量應藉由分析污染物量與土壤氧化劑需要量決定。
- (三)依注入井位置規劃地下水污染監測計畫，監測井應靠近或位於注入井下游處，因此有必要時應設置臨時監測井。監測井與注入井間應有不同的距離，藉由追蹤、收集監測數據，以評估氧化劑的擴散情形。至少應能監測污染帶邊界，以確保氧化劑與污染物未擴散至場址外。
- (四)建立可有效評估氧化劑三維擴散與處理成效的採樣監測計畫，氧化劑擴散的檢測頻率應較關切污染物檢測頻率高。
- (五)模場試驗可藉由壓力變化、溶氧的上升、氦氣追蹤、水位上升或注入液體的濃度，以確認氣體注入系統之有效影響範圍。
- (六)模場試驗可藉由壓力變化、溶氧的上升、水位上升或注入液體的濃度，以確認液體注入系統在不同溶液注入速率的有效影響範圍。

二、 規劃設計要點及注意事項

(一)注入氧化劑濃度與注入量之設計宜考量下列因素

- 1 注入氧化劑之總劑量應能破壞、分解吸附相、溶解相與自由相之污染物，並考量因天然還原劑與氧化劑消除者(如有機碳、還原性礦物、碳酸鹽)所消耗之氧化劑量；
- 2 氧化劑的反應速率與其在地下環境的持久性；
- 3 設計的影響半徑。

(二)應用各種氧化劑應行注意事項

1. 過錳酸鉀

- (1)工業級過錳酸鉀含有微量鉻的不純物。在利用現地化學氧化法的整治場址中，如發現地下水鉻含量持續上升，通常係因注入的氧化劑含有不純物所致。此外，在許多整治場址中亦發現使用工業級過錳酸鉀，造成地下水鎳含量上升之情形，以及由整治區域所擴散出來的微量重金屬可於含水層中自然

衰減之情形。

- (2) 運作過錳酸鉀要小心謹慎，但安全危害不若過氧化氫。
- (3) 建議一般過錳酸鉀注入劑量之濃度為 0.1 % ~ 3 %，低注入劑量可有效降低二氧化錳於注入井週圍形成沉澱而造成阻塞。
- (4) pH 值介於 7~8 最適合。

2. Fenton 試劑

- (1) 依關切污染物(contaminants of concern, COC)特性及 DNAPLs 油相是否存在，一般過氧化氫的注入濃度約 0.5 % ~ 12 %。
- (2) 過氧化氫的穩定性具有高度不確定性，並影響有效處理半徑，一般注入井的配置間隔較過錳酸鉀近。
- (3) 可能造成地下水酸化 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)
- (4) pH 值介於 2~4 最適合。
- (5) 由於反應會產生氧氣，可能降低透氣性導致試劑傳輸受限、污染物可能隨氣體傳輸遠離試劑注入點、地下壓力增加導致地表鋪面損壞等問題 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)
- (6) 反應造成之溫度上升可能損壞管線並增加污染物的移動力 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)

3. 臭氧

- (1) 臭氧是活性非常強、對物質的腐蝕也較強的化學物質，因此應用時必須現場生成。
- (2) 臭氧在土壤下反應速率快，從注入點向周圍傳送的距離不夠遠。
- (3) pH 值介於中性至酸性。

4. 過硫酸鹽

- (1) 過硫酸鹽為較新的現地化學氧化技術，尚有許多理論待釐清，其應用可行性主要仍在實驗室試驗研究階段。
- (2) 過硫酸鹽與 Fenton 試劑類似，均以自由基氧化方式為反應作用機制，皆可以二價鐵予以活化產生自由基，然而傳統之活

化過硫酸鹽程序並不類似 Fenton 反應，非僅以控制 pH 值於酸性條件，即可造成持續性自由基氧化劑生成，因此活化步驟為過硫酸鹽應用的一項重要影響因素。

三、 技術種類

本法因場址特性，經常需搭配其他整治技術，美國現地化學氧化法結合其他整治技術之方式，如表 8.2.1-1。

表 8.2.1-1 現地化學氧化法技術與其他技術之結合方式

初始採用技術	後續或同時採用之技術
地下水抽出處理法	各種氧化劑
氣提法／土壤間隙蒸氣抽除法	各種氧化劑
電阻加熱法	各種氧化劑
界面活性劑	各種氧化劑
過硫酸鹽或過氧化氫	過錳酸鉀
各種氧化劑	加強式生物整治法(enhanced bioremediation)

資料來源：ITRC, Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, p.19, 2005.

四、 系統操作要點

成功的現地化學氧化技術離不開從注入井加入氧化劑的適當輸送技術，常見的輸送方式有垂直井、水平井、反應牆、直接貫入加注入法(如 GeoProbe、lance permeation)、液體霧化(liquid atomization)、循環井(ISCO bench and pilot-scale studies, 2007 台美講習會)、土壤混合法(soil mixing)與水力破裂法(hydraulic fracturing)等。其中，垂直井與水平井可用於不飽和層(透氣層)注入氣態氧化劑，研究顯示，在不飽和層注入臭氧方面，水平井比垂直井更有效。

過氧化氫(Fenton 試劑)最少的注入量應能涵蓋整個待處理污染區域，可能需注入數倍孔隙體積(pore volume)的過氧化氫。同樣地，於不飽和層將臭氧溶液注入或臭氧注氣的方式，最少的注入量亦應能涵蓋整個待處理污染區域。而高濃度的過錳酸鹽與過硫酸鹽因密度驅動傳輸(density-driven transport)與擴散傳輸作用，一般不需注入 1 倍孔隙體積，即可涵蓋整個擬處理的污染區域。

注入任何一種氧化劑至污染區域，能導致污染區域的地下水被置換出來，而被置換出之地下水可能被排至未污染區域，氧化劑由污染團外圍向內(outside-in)的傳輸設計方式，可降低污染地下水橫向位移(lateral displacement)的影響。依據污染場址特性，需研擬場址性的氧化劑輸送策略，以避免受污染地下水的擴散。

過錳酸鹽與過硫酸鹽的傳輸技術相似，可採用的傳輸技術包括直接貫入加壓法、注入井、注入井與回收井(push-pull in wells)、水力破裂等方法。直接貫入加壓注入法如圖 8.2.1-2，係利用短井篩(長度約 0.15 至 0.6 公尺)內，於 0.2 至 0.45 m³/hr，20 至 30 psi 之壓力下，將過錳酸鹽(或過硫酸鹽)溶液注入含水層，形成一過錳酸鹽溶液薄層，於擬整治區域每隔 1.5 至 3 公尺深度注入一層過錳酸鹽，並利用密度驅動與擴散傳輸作用將過錳酸鹽散布於層於層間的污染區域，此種氧化劑的輸送策略可降低污染地下水橫向位移的影響。直接貫入的鑽孔於鑽入工具抽出後，應立即回填水泥與皂土，以避免短流現象。

此外，利用注入井與抽水井(或稱回收井)所形成的循環系統有助於過錳酸鹽的擴散與傳輸，圖 8.2.1-3 為此項技術的示意圖。注入井與抽水井的型式與配置之選擇因場址特性而異，基本設計時應考量抽取出之污染物應於地面處理設備內處理，於回注過錳酸鹽前，應於廢水處理程序將污染物破壞、分解，並將產生的二氧化錳沉澱物過濾、移除，再將過錳酸鹽溶液回注於地下環境中。

在許多案例中，亦有將固體顆粒的氧化劑(如過錳酸鹽或過氧化氫)利用大型螺旋鑽頭(auger)與污染土壤混合之技術，圖 8.2.1-4 為此項技術的示意圖。對於滲透性較低的土壤，可考量使用此種技術將氧化劑分散到污染區域。這種技術採用一系列特別的鑽頭，配以混合板，使他們旋轉時達到混合土壤的目的。為提高整個混合區域氧化劑的分散度，可以用空氣流吹散氧化劑，使其以細霧狀進入混合區。

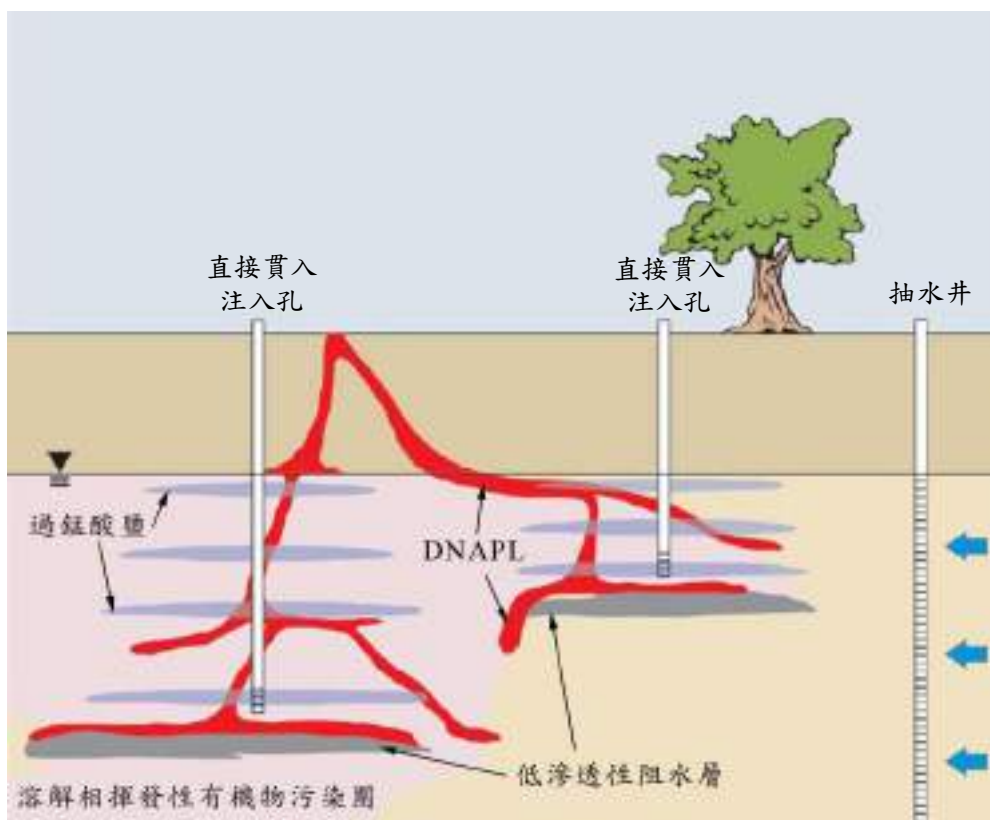


圖 8.2.1-2 利用直接貫入技術傳輸過錳酸鹽示意圖

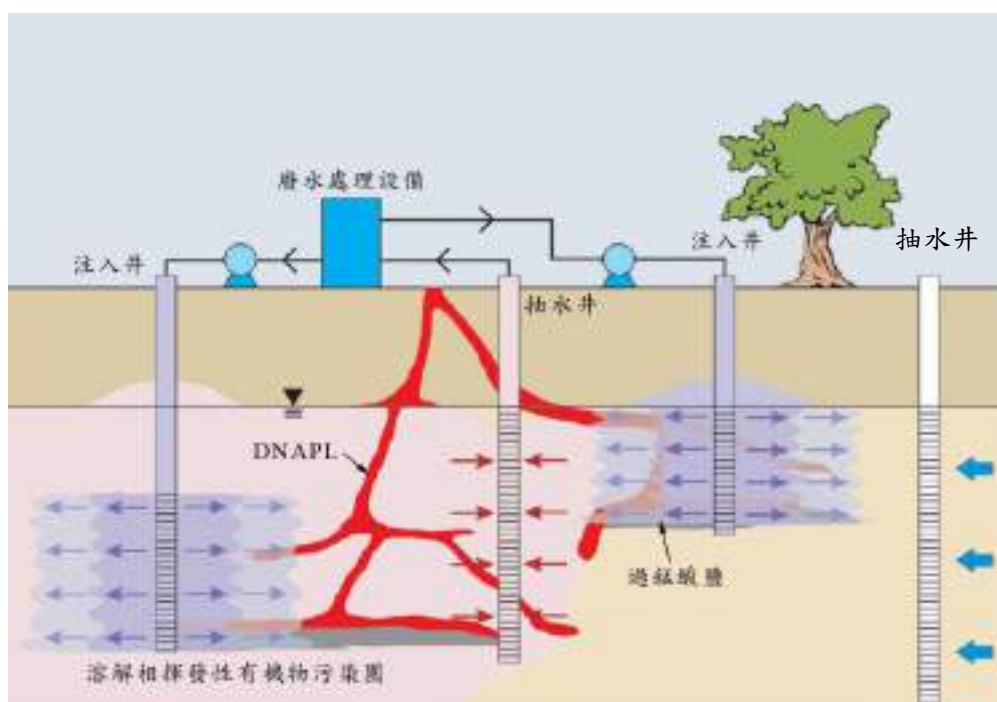


圖 8.2.1-3 以注入井與抽水井循環系統傳輸過錳酸鹽示意圖

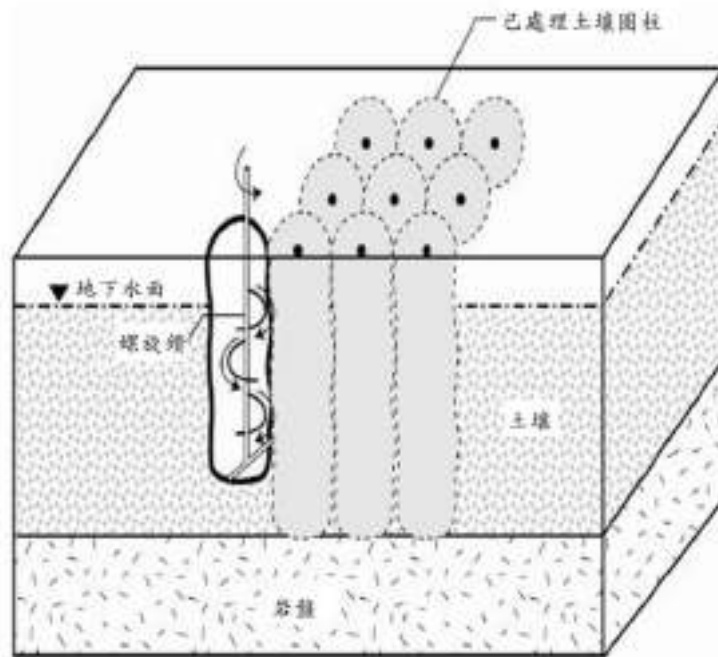
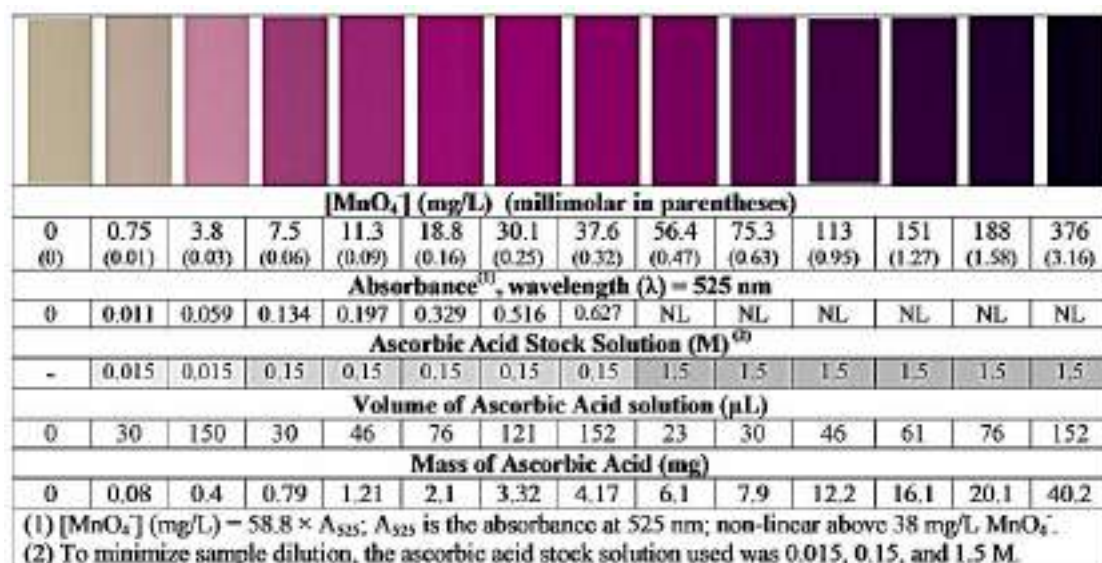


圖 8.2.1-4 以土壤混合法將固體氧化劑顆粒分散於污染區之技術圖

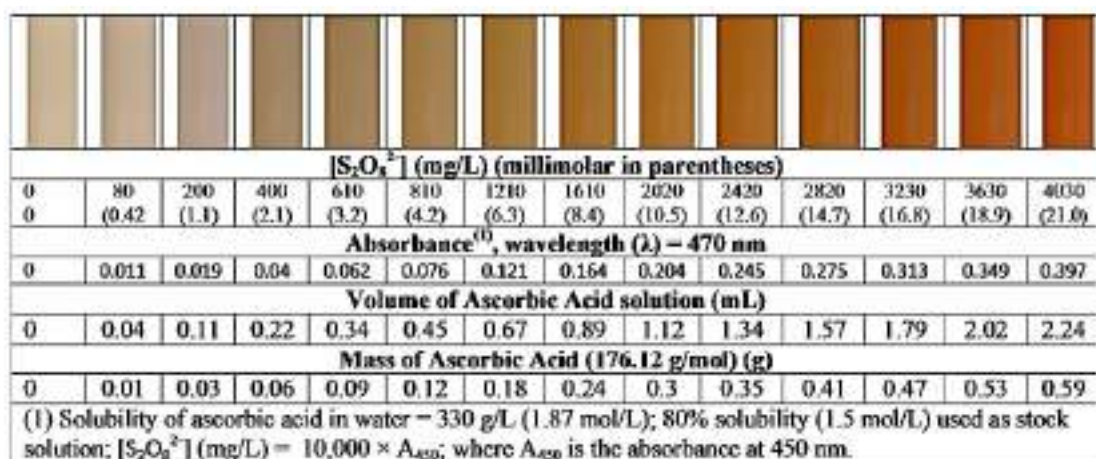
此外，根據 2013 年台美講習會 Groundwater sample preservation methods and guidelines, ISCO Sites 演講中，Scott G. Huling 表示當地下水採樣中若發現 MnO_4^- 或 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 的藥劑殘留時，最好的作法為停留一段反應時間後，再次進行地下水採樣，確保化學氧化劑已與污染物完全反應，避免採樣結果失真。然而，若欲於藥劑殘留條件下進行採樣結果分析，必須確保在樣品運送過程中污染物不得再與化學氧化劑持續反應，而出現採樣結果誤差。故此時就需要添加樣品保存藥劑，抗壞血酸(ascorbic acid)。本次演講重點為利用地下水採樣樣品呈色，進行樣品中化學氧化劑， MnO_4^- 或 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 的殘留濃度的預估，分別如圖 8.2.1-5 及圖 8.2.1-6。利用樣品色卡協助評估應加入多少抗壞血酸以保存樣品。以圖 8.2.1-5 為例，當 MnO_4^- 殘餘濃度為 113mg/L 時，建議使用 12.2mg 的抗壞血酸進行地下水樣品的保存。又如圖 8.2.1-6，當 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 殘餘濃度為 610mg/L 時，建議添加 0.09g 抗壞血酸保存樣品。



參考文獻：Groundwater sample preservation methods and guidelines, ISCO Sites, 2013 台美講習會

註：NL 表示在該 MnO₄⁻ 殘餘濃度後之添加藥劑比例未呈線性趨勢

圖 8.2.1-5 MnO₄⁻ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表



參考文獻：Groundwater sample preservation methods and guidelines, ISCO Sites, 2013 台美講習會

圖 8.2.1-6 S₂O₈²⁻ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表

8.2.2 整治系統單元

各種現地化學氧化法所需之設備與設施如表 8.2.2-1，過硫酸鹽與過錳酸鹽傳輸技術相似，可參考過錳酸鹽之設備與設施。

表 8.2.2-1 現地化學氧化法設備表

設備單元	內容
過氧化氫	
抽氣井／抽水井	收集在氧化反應過程中所產生的氣體，可埋設、開篩於不飽和層的抽氣井，進行土壤孔隙中氣體之抽除，亦有埋設、開篩於含水層中的抽水井，進行地下水位控制，協助氧化劑的傳輸。
注入井／水平滲漏井	注入化學藥劑粉末、溶液或是氣體，亦或讓液態溶液由土壤不飽和層漫流入滲至地下水中。
泵、儲槽及管線	計量泵控管各項抽出、注入等流量。儲槽則貯存液態氧化劑溶液。
鼓風機	抽氣井內抽氣引力所需之動力機械，可以抽出土壤氣體中的 VOC 及過量的氧氣，保持場址的作業安全。
廢水(廢氣)處理設備	抽出的地下水或是土壤氣體，經處理後排放，以確保符合排放標準。
自動控制設備	控制各項整治單元設備及管件之儀表設備，讓整治措施能自動化作業及控制。
監測井	長期觀察及監測地下水濃度品質。
高錳酸鹽	
抽氣井／抽水井	收集氧化反應所產生的氣體，可埋設、開篩於不飽和層的抽氣井，進行土壤孔隙中氣體之抽除，亦有埋設、開篩於含水層中的抽水井，進行地下水位控制，協助氧化劑的傳輸。
注入井／水平滲漏井	注入化學藥劑粉末、溶液或是氣體，亦或讓液態溶液由土壤不飽和層漫流入滲至地下水中。
泵、儲槽及管線	計量泵控管各項抽出、注入等流量。儲槽則貯存液態氧化劑溶液。
廢水處理設備	抽出的地下水可以經處理後排放之，確保排放水之標準。
自動控制設備	控制各項整治單元設備及管件之儀表設備，讓整治措施能自動化作業及控制。
Lance 注入設備	將混有高錳酸鹽粉末之泥漿，以直接貫入方式埋入飽和層土壤中。
大口徑螺旋鑽混合設備	直接將高錳酸鹽顆粒於螺旋鑽挖出之井洞內混合。
監測井	長期觀察及監測地下水濃度品質。
臭氧	
曝氣井	將臭氧注入地下水中。
空氣壓縮機	產生製造臭氧所須之空氣。
臭氧產生機	製造臭氧氣體。
SVE 氣體抽除設備	視需要設置，抽除土壤層中過量的臭氧。
自動控制設備	控制各項整治單元設備及管件之儀表設備，讓整治措施能自動化作業及控制。
監測井	長期觀察及監測地下水濃度品質。

資料來源：USEPA, How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites – A guide for corrective plan reviewers, EPA 510-R04-002, May 2004.

8.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

現地化學氧化法整治完成後，即使在大量 DNAPL 物質被清理掉，關切污染物(COC)濃度於降低後可能還會再上升。可能的原因包括：因現地化學氧化法會增加土壤的滲透性，可能導致關切污染物於土壤孔隙間的對流與擴散能力增加，而進入地下水流中；此外，土壤有機質的氧化亦可能將吸附相的污染物釋放出來，溶解於地下水流中。此種現象隱

含著當達到新的平衡時，必須再進行第二次(或更多次)氧化劑的注入工作。因此，採用現地化學氧化法時，應建置適當的地下水監測井網與長期的監測計畫，以充分掌握地下水質狀況，並防止地下水污染的擴大。

二、成效監測

採用現地化學氧化法時應規劃成效監測，並應考量氧化劑之應用性、有效性、安全、整治期程、濃度回升效應與成本等因素。

(一) 整治過程監測(process monitoring)

整治過程監測可視為整治前、整治中與剛完成整治時之品質管制的措施，其目的在確認注入的濃度、劑量、流速與影響半徑等。部分氧化劑則需同時監測注入井中的溫度與壓力變化，亦可視為安全衛生作業環境監測的一部分。整治前，建立場址的基線資料；整治中，觀測污染物被破壞、分解、釋放與移動的情形。一般而言，整治過程監測或成效監測較整治完成後之後續監測與驗證監測所需的頻率高。整治過程一般監測項目，包括：

- 1、關切污染物
- 2、氧化劑(現場試驗工具)
- 3、重金屬
- 4、主要離子(鈉、鉀、鈣、鎂、鐵)
- 5、硝酸鹽、硫酸鹽與氯離子
- 6、總硬度(以 CaCO_3 計)
- 7、氧化還原電位(現場試驗工具)
- 8、pH(現場試驗工具)
- 9、溫度(現場試驗工具)
- 10、導電度(現場試驗工具)

(二) 後續監測與驗證監測(post-treatment and closure monitoring)

任何現地處理技術都需要考量濃度回升(contaminant rebound)之問題，在使用現地化學氧化法將污染物濃度降至管制標準後，污染物可能再經由低滲透性的地層中釋放，造成此濃度回升現象的因子多樣，不完全的氧化作用、原吸附於固體的污染物脫附、NAPLs

的溶解都可能導致污染物的濃度回升，因此需要進行持續的監測 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)。

後續監測與驗證監測旨在提供整治工作是否符合預期的整治目標或依法解除列管所需的數據。在進行後續監測與驗證監測前，可藉由溫度、氧化劑的殘留狀況與 LEL 值(適用地下水與公共管線)的變化，瞭解地下環境應在氧化劑注入後一段時間，氧化劑是否完成反應，達到平衡與穩定狀況。

驗證監測建議於地下環境之氧化劑完全反應後，並達穩定狀況時，每季監測一次，並至少持續監測一年，當關切污染物濃度無回升現象後，始解除列管。如關切污染物濃度連續兩季有回升的現象，則可能在飽和土壤中有污染物存在，造成溶解相污染物濃度上升。

8.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

使用化學藥劑應盡可能避免安全性的問題，應進行員工教育防護訓練課程，並重視在處理設計與操作監測過程可能產生的熱、高溫、大量廢氧氣量、大量可燃性有機污染物蒸氣(In-situ chemical oxidation, 2005 台美講習會)。本項整治技術有關勞工安衛生之潛在危害，如表 8.2.4-1。

採用本法結合土壤間隙蒸氣抽除或抽水井等，則應考量產生廢氣排放與廢水處理之問題，並考量周圍居民對於空氣品質與用水安全之觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成執行之延宕。

本法對於環境之影響，如結合土壤間隙蒸氣抽除法，應注意尾氣處理成效，如尾氣處理設置設計不當，可能會造成空氣污染。此外，本法亦可能會產生受污染地下水，亦應妥善處理後再排放。

表 8.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	某些反應性氧化劑與污染物不相容可能會造成火災、系統過度加壓、環境排放或爆炸	氧化劑與污染物之不相容性	加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力。 使用適當的液體輸送設備 使用自動警報系統。

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
			執行適當的化學品貯存與運作程序。 提供貯存有害化學品的桶槽適當的圍堵設施。
	不適當的運作化學品可能會導致系統產生高熱或高壓，並造成不可控制的化學反應、火災或爆炸	化學反應	加強人員貯存與運作化學品程序的訓練與緊急應變的能力。 監測氧化劑注入過程與特定時間點的系統溫度。 提供緊急沖眼/沖洗器。
	當操作人員或設備破壞電線或於潮濕的區域接觸電力設備可能會造成感電	感電	加強人員貯存與運作化學品程序的訓練與緊急應變的能力。 使用加裝防止感電設備的電力系統。 相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行。
化學性風險	工作人員可能接觸到反應性的化學氧化劑。 不適當的貯存方式可能會產生衍生危險的化學反應或於貯存區域產生高熱/高壓甚至火災、爆炸。 工作人員之皮膚與呼吸系統可能與化學氧化劑或其副產品直接接觸。	化學氧化劑之使用、貯存、接觸與相容性	提供化學品儲槽與管線適當的標示、分隔與防溢裝置。 建立伙伴制度(buddy system)。 確保工作人員佩帶適當的個人防護具。 加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力。 預先參考物質安全資料表(MSDS)並確認氧化劑的相容性。 使系統有足夠的通風。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 7, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

8.3 成本及期程預估

一、整治成本分析

現地化學氧化法之成本視氧化劑、整治目標、氧化劑再生可行性、污染物特性及注入方法等因素而定。整治成本會因場址差異產生極大不同，建議宜依模場試驗詳細估算。

二、整治期程

影響現地化學氧化法整治期程之因素，包括：

- (一) 污染帶的大小與深度。
- (二) 土壤類型及其構成。
- (三) 地下水流過土壤的情形(如多快、流過的途徑等)。

現地化學氧化法較其他整治技術所需的整治期程較短，整治期程一般以「月」計。

九、 現地透水性反應牆(In-Situ Permeable Reactive Barrier, PRB)

9.1 整治技術簡介

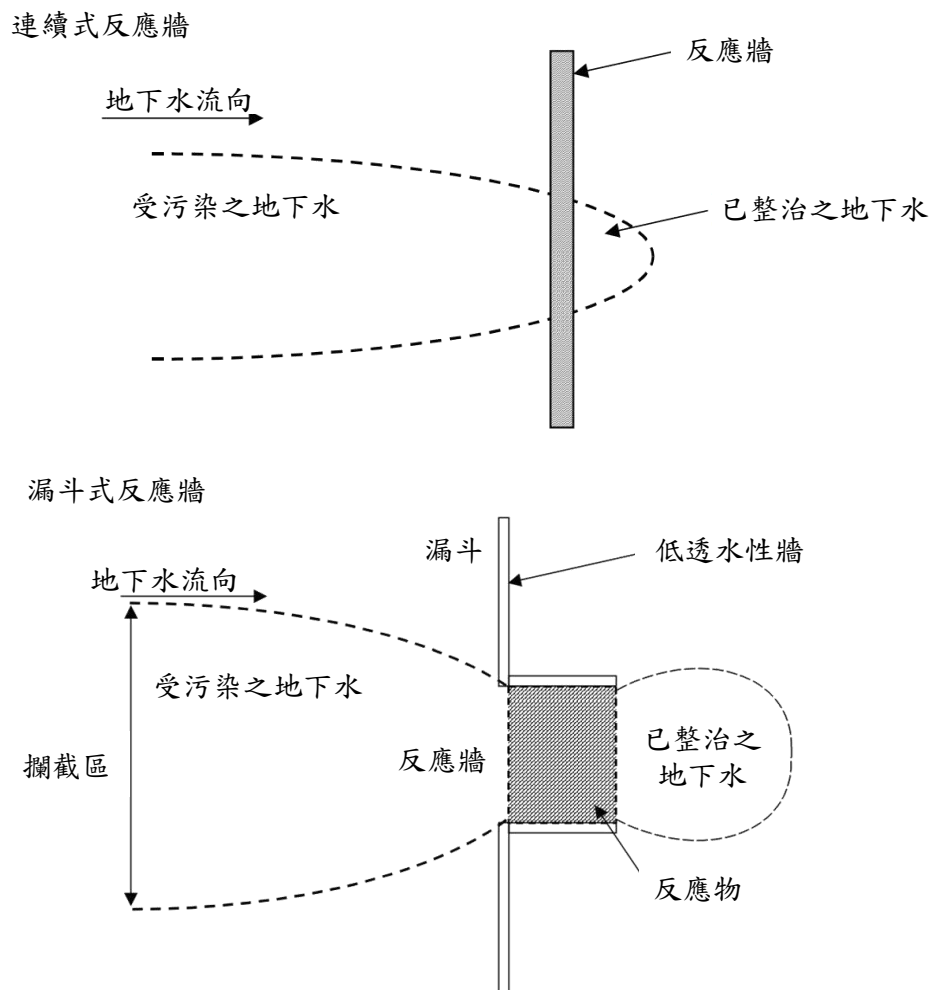
9.1.1 原理

相較於傳統之抽出處理法，現地透水性反應牆(In-Situ Permeable Reactive Barrier, PRB)為較新穎之整治技術。透水性反應牆係指於受污染場址地下建造一個永久性、半永久性或可替代的單元，於單元中置入反應的材料，並使受污染之地下水流經此處理單元。此技術可有效隔絕污染物，藉由使用不同的材料，可用以整治不同的有機或無機污染物，且其所需用到的機械系統非常少，甚至不需要，故可減少長時間操作及維修之成本而降低費用。

透水性反應牆之設計主要在地下水污染帶下游，設置一不透水的障壁，藉由此不透水障壁將污染帶引導至位於其內之滲透性、半滲透性或可置換的反應牆。在此反應牆中，會進行關切污染物之處理。處理過之地下水流出反應牆後，再沿著自然水流方向行進。

透水性反應牆原採連續式反應牆與漏斗通道反應牆為主，所能達到之設置深度為 20 公尺左右，但近年來配合泥漿注入、水力破裂與深層土混合等施工方法，可以使整治含水層之深度達到 35 公尺以上。本方法最大的優勢在於採用地下水自然流過的方法，無須消耗能源，且無須將地下水抽出，無廢水處理問題，但必須考慮監測費用及系統使用期限問題。

此外，反應牆可設置在污染帶邊緣的下游當作一阻絕系統，以防止污染帶的移動超過原先預期的程度。在透水性反應牆內可能包含某些物質，以利用物理、化學或生物的處理程序處理污染物，當污染帶隨地下水通過反應牆時，反應牆中之反應物質會對污染物產生生物性或非生物性的降解，使污染物被分解成較無害之副產物，進而阻止污染物穿過污染場區邊界或切斷污染帶來源，再由自然衰減過程，侷限污染帶。本法不同類型透水性反應牆之原理示意圖，如圖 9.1.1-1。



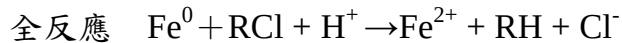
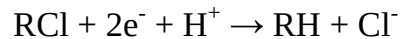
資料來源：UK Environment Agency, Guidance on the Design, Construction, Operation and Monitoring of Permeable Reactive Barriers, March 2002

圖 9.1.1-1 各種類型透水牆處理技術圖

透水性反應牆可利用物理、化學或生物之程序將地下水中的污染物移除，其機制包括沉澱、吸附/吸收、氧化/還原、固定或降解等。各種反應機制簡述如下：

一、含氯有機物和零價鐵之反應

含氯有機物(包括三氯乙烯及四氯乙烯等有機溶劑)和零價鐵之反應是屬於非生物性(abiotic)之還原脫氯作用，此反應也造成了零價鐵之鏽蝕現象。以下的 2 個氧化還原半反應式說明了零價鐵如何使含氯有機物脫氯，使之形成毒性較低或無毒性之有機物。



雖然，目前的研究結果顯示零價鐵，可用以處理許多種有機物及重金屬污染之地下水，但仍有部分的有機物及重金屬被證實無法或不確定可與零價鐵發生氧化還原反應而被去除。

二、 氫氣釋放物質(hydrogen releasing compound)

氫氣釋放物質可藉由還原脫氯(reductive dechlorination)成功地促進四氯乙烯之生物整治。氫氣釋放物質的優點在於能夠長時間內緩慢的釋放出氫氣，由於還原脫氯仰賴穩定之電子供應者(electron donor)以達成分解之作用，氫氣又是目前有效之電子供應者，所以氫氣釋放物質之應用生物降解性之反應牆能夠大幅的提升四氯乙烯之分解。

9.1.2 適用條件

藉由使用不同的材料，透水性反應牆適用於處理 VOCs、SVOCs 以及無機物，但對於 LNAPL 效果則較不佳。常見的反應牆可分成吸附/吸收、沉澱及降解等 3 種，其可處理之污染物種類及反應性材料，如表 9.1.2-1。

吸附/吸收性材料(例如活性炭、沸石及有機性皂土等)可用於處理無機物與有機物；而沉澱性處理牆則用於重金屬之去除；降解性的反應牆則包括生物降解及非生物降解等兩種。前者包括如使用氫氣釋放物質，而非生物性的降解最常見的是使用零價鐵降解水中含氯碳氫化合物。

透水性反應牆適用於處理 VOCs、SVOCs 以及無機物，在應用上之各項可能優缺點，如表 9.1.2-2。

表 9.1.2-1 各種類型透水牆處理技術的種類與機制

污染物	反應型態	反應物材料
有機物		
二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、苯、甲苯、乙苯、甲苯、硝基苯、多氯聯苯、多環芳香烴	降解作用	零價鐵、固定態微生物、氫氣釋放物、連二亞硫酸鹽
	吸收/吸附作用	沸石、有機性皂土、活性碳
無機物		
重金屬 (鎳、鉛、鎘、鉻、汞) 放射性元素 (鈾、鐳、鋇、銻、鎘) 硝酸鹽	吸收/吸附作用	泥炭土(peat)、鐵氧化物、皂土、沸石
	沉澱作用	零價鐵、聯二亞硫酸鹽、石灰岩
	降解作用(硝酸鹽)	堆肥、木屑

資料來源：美國 Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center，Treatment Wall - Technology Evaluation Report，1996。

表 9.1.2-2 透水性反應牆技術優缺點比較表

優點	缺點
• 成本花費上較傳統之地下水抽出處理法低。 • 設置及處理污染物上較其他技術快速。 • 安裝設置過程簡單，只和該地區土壤型態有關。 • 操作成本低。 • 維護成本低，設置後，只須定期監測地下水及更換處理單元。 • 較少之場址表面破壞及人力成本。 • 現地處理，沒有廢水排放的問題。	• 反應材料有反應容量限制，可能需定期更換材料。 • 滲透性可能因為金屬鹽類沉澱或生物活動副產物增加而降低。 • 反應材料的整治效率可能會因時間而減弱。 • 反應材料會影響地下水化學反應之生物化學習性，對滲透性造成影響。

資料來源：UK Environment Agency, Guidance on the use of permeable reactive barriers for remediating contaminated groundwater. September 2002

9.2 整治系統操作與設計

有關國外針對透水性反應牆已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 9.2-1。

9.2.1 整治系統設計與操作要點

目前透水性反應牆之技術有很多種，因此其技術之選擇會依各場址以及污染物之不同而各有所考量，而圖 9.2.1-1 顯示透水性反應牆之設計流程。在選擇透水性反應牆技術時應參考該流程圖所敘述的步驟，從初步評估(含技術與成本評估)、場址判定開始，了解場址狀況及選擇反應物，接著進行技術的可行性試驗、模擬及工程設計，以利決定最適合、有效之整治方法。

表 9.2-1 國外監測式自然衰減法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國陸軍工兵署	Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents	1997
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國國防部	Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation	2000
美國環保署	Economic Analysis of the Implementation of Permeable Reactive Barriers for Remediation of Contaminated Ground Water	2002
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 9.2 Reactive barriers downstream	2002
美國國防部	Evaluating the Longevity and Hydraulic Performance of Permeable Reactive Barriers at Department of Defense Sites. ESTCP Cost and Performance Report	2003
美國環保署	NATO/CCMS Pilot Study on Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III) 1998 Special Session: Treatment Walls and Permeable Reactive Barriers	1998

一、 初步技術評估

初步技術評估主要是在決定該場址是否適合運用透水性反應牆技術以及透水性反應牆之種類選擇，而所需考量之要點如：污染物種類、污染群大小及分布、含水層深度、地理技術考量、弱透水層狀態以及該場址地下水流速。

二、 初步成本評估

成本預估可以在初步評估階段執行，而該成本預估應包含設置反應牆以及其他整治選擇之比較。透水性反應牆之壽命可能影響該整治技術之長期成本計算。

三、 場址判定

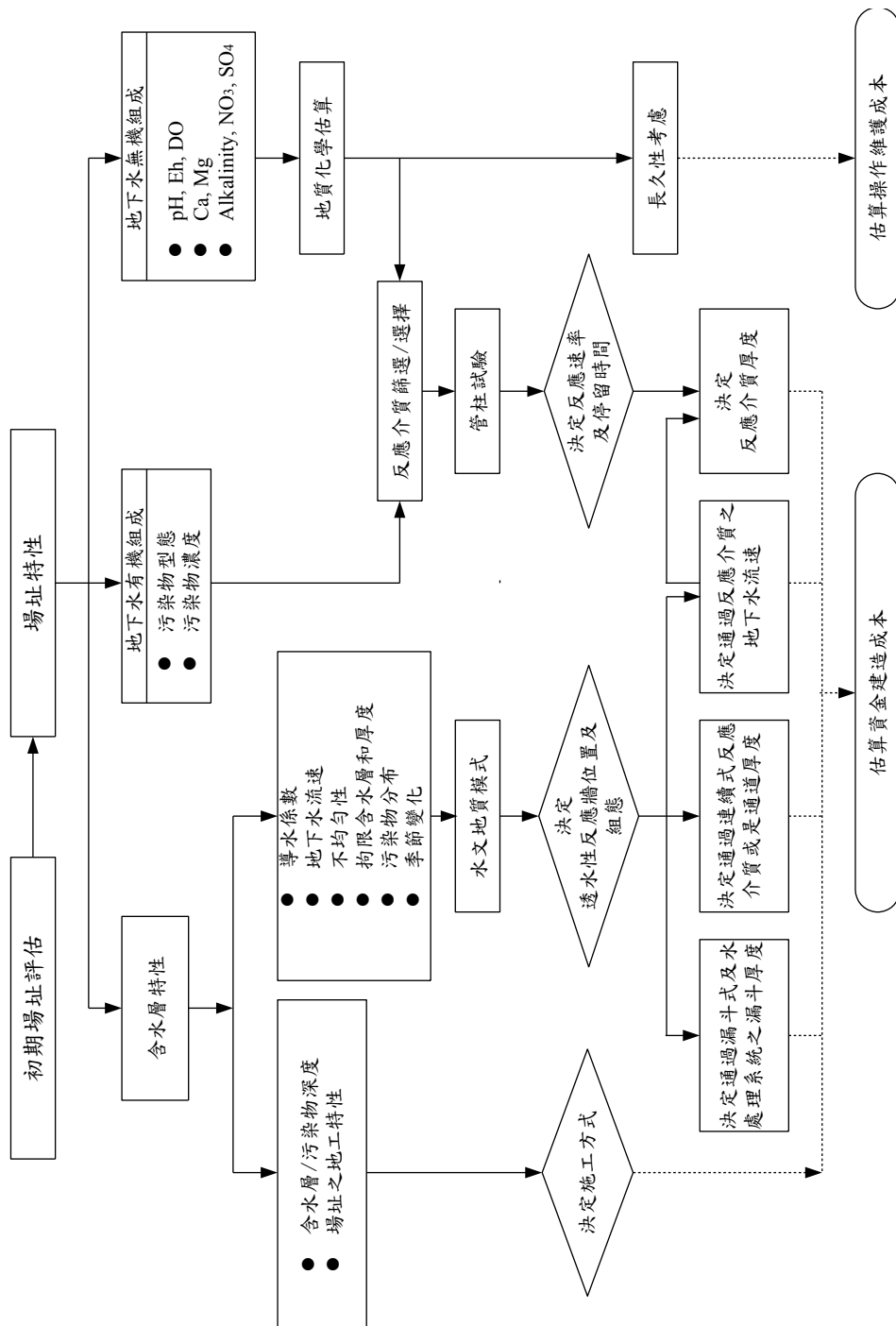
當初步評估顯示該場址適合裝置透水性反應牆整治技術時，下一階段將決定該場址判定資料是否足以決定反應牆之位置及設計。場址判定所需重要資訊包括：該場址含水層特性、地下水有機及無機物成分、地球物理技術以及地形考量。

然而，許多場址特性皆會影響反應牆之處理成效，以下項場址特性亦為系統整體設計之重要考量：

(一) 水力坡降控制(gradient control)

由於場址的整體分佈之水文傳輸性並非一致，因此污染物流經反應牆之流向，也可能隨而受到影響。

(二) 污染帶往下流之可能 (underflow of contaminant plume)



這可能導致反應牆無法完全發揮該整治技術之功能，進而造成下游污染。

圖 9.2.1-1 透水性反應牆之設計流程

資料來源：經濟部工業局，工廠土壤及地下水污染整治手冊-石化業，2003年6月。

四、反應物選擇

當場址判定資料取得後，下一步應是鑑定反應物以及討論各種反應物對該場址的污染物之影響。主要考量因素應包含：水文性質、穩定度、所產生之副產品是否與環境相容、反應牆建造方法、可獲取性以及反應物的價格。

五、模擬及工程設計

場址判定及實驗室檢驗所取得的資料可用於模擬各種水文地質、地球化學以及工程設計，以提供反應牆地點、方位、構造和大小之決定。模擬也可以協助規劃監測計畫，包含監測井位置及監測頻率。進行設計需需注意場址特性評估、反應材料的選擇。

(一)場址特性評估

在設置反應牆之前，首先必須要先充分了解受污染場址現地之特性，這包括水文、地質及化學，由污染帶大小、地下水移動方向及速度、含水層之透水性及邊界等，決定反應牆之設置方位與大小。

(二)反應材料選擇

反應材料的選擇包含材料種類、粒徑分布及混合成分。這主要考慮污染物的種類，設計上通常可由可行性研究取得所需要之參數。

六、最適當之建造方法

當決定地點、結構及反應牆的大小，則需進一步決定其最佳建造方法。一般而言，反應牆設置後，除了定期之監測工作以外，其餘在完工後無須人員操作。以下說明依照場址條件不同而使用之反應牆設置方式：

(一)連續式反應牆：設置於與污染帶一樣寬度之反應牆。

(二)開挖及回填

(三)鋼柱

(四)深層土混合

(五)泥漿注入

(六)水力破裂

當無法確定所建議的反應牆之效力，和優化反應牆設計有可能降低成本時，模場試驗有必要執行以方便更適合、更節省成本之方案。

9.2.2 整治系統單元

反應牆裝置時之開挖所需的設備一般包括：

- 一、 開挖重型機具設備(如挖土機、推土機、沉箱挖掘機、挖溝渠機)
- 二、 土壤載運工具(如吊車、裝料機)
- 三、 高壓注射器
- 四、 鑽洞器
- 五、 大型旋轉鑽

9.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

(一)反應牆建造

開挖及裝置反應牆有可能會造成該場址水文傳輸性之更改，因而導致污染物無法流過反應牆。因此開挖後回填注入反應物時應控制其溶度及密度。此外，在漏斗通道反應牆系統需建造不透水牆，以引導污染帶至高透水性反應門(high permeability reactive gate)。建造時需注意不透水牆之接縫有無因置入時遭損壞，可導致污染物洩漏以及造成反應牆功能受損。

(二)監測

監測是設置反應牆重要的一環，每當設計施工完成，只要是污染物還存在，該系統就必須進行長期監測。根據監測系統的功能類別，可分成合格性監測(compliance monitoring)及操作性監測(performance monitoring)。計畫品質規劃書(quality assurance project plan, QAPP)必須要在進行任何地下水採樣以前完成，而監測計畫是

計畫品保規劃書中重要的一部分，因此計畫品保規劃書應該包含以下之項目：

- 1、採樣目的
- 2、採樣前之活動
- 3、採樣
- 4、現場分析及設備校準
- 5、樣品保存及處理
- 6、設備除污
- 7、樣品監管紀錄表(chain-of-custody)之控制及紀錄管理
- 8、實驗室及現場方法之分析步驟及數量限制
- 9、現場實驗室品質保證、品質控制
- 10、安全衛生

二、合格性監測

反應牆之監測包括法規合格性監測以及成效監測。法規監測是指位於污染區內之關切污染物有無超過法規標準限值。在設計監測系統時，監測的數目應視場址及整治系統而定，以及應確認受污染地下水不會自阻絕牆及反應牆之上、下或左右流移動至下游。監測井之設置應與反應牆保持足夠距離，不可太近造成代表性不足，或太遠導致必須耗費太久時間才能判定反應牆的效果。監測內容通常包含一般地下水水質監測，如 pH、鹼性度、電導度。

三、操作性監測

操作性監測著重於透水性反應牆之系統本身，以了解操作與設計間差距。而該監測應由完善的調查開始，俾利日後可有效地比較整治前後地下水質之差異。反應牆之成效監測需要包含物理性、化學性及礦物性的監測參數，而且應針對設置設計更改以及能夠偵測反應牆之處理能力喪失、透水性降低、污染物於反應區停留時間以及短路或者是反應牆滲漏。另外，除了監測污染物及地下水品質以外，污染物降解物、水文範圍及地球化學指標參數也應該需要了解。因此，掌握關切污染物之轉變、破壞或者是在反應區固化的運作模式，是解譯成效監測資料的重點。

9.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

開挖及設置反應牆所產生的受污染土壤，不論是在開挖過程或是在場址暫置時，可能會有高度的風險存在，因為其潛在與人體的皮膚接觸或吸入的可能性以及污染物因自然狀況造成污染物徑流至地表水或其他週界之敏感環境受體，藉由適當之暫存場設置與設計可以減低開挖工程對於環境的衝擊。

二、潛在之危害

本指引將使用反應牆之潛在危害彙整如表 9.2.4-1。

表 9.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	在裝置樁板牆過程中，工作人員可能因重型機具而受傷或死亡。	機具設備危害	- 於重型機具上安裝備用警報器以警告工作人員。 - 當靠近機具時，確保於機具前方或是操作者視線範圍內移動。 - 確保工作人員佩帶聽力護具。 - 加強相關人員有關潛在危害以及操作重型機具之相關安全訓練。
	當挖掘受爆炸性或可燃性物質污染之土壤，可能因機械之金屬元件碰撞金屬或石頭所產生火花，造成起火燃燒的情形。另外，若挖掘過程中毀壞地底之電線或是氣體管線，亦可能造成起火、爆炸或是感電的情形。	火災與爆炸	- 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 - 在開挖工作開始前預先定位地底電力設施之位置。 - 使用不會產生火花之金屬元件。 - 定時噴灑水或泡沫滅火劑於工作區以防止蒸氣自燃。 - 操作環境利用測爆器進行監測，如測值達到爆炸下限值之 10 % 時，宜停止操作，進行逸散氣體的位置。 - 當升起機具時，配置週邊觀測人員。

表 9.2.4-1 潛在之危害(續)

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	當工作人員進入挖掘區時，可能會暴露於挖掘牆倒塌的危險。淹水可能導致溺水或感電(有使用電力設施時)的情形。	開挖溝槽牆倒塌/淹水	- 於潮濕的工作環境中穿戴救生衣。 - 使開挖牆之坡度至少離牆緣 1.5 公尺。 - 避免工作人員進入不穩定的開挖環境中。 - 於開挖周界至少每 25 英尺提供緊急出口。 - 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 - 提供良好的通風設備並再必要時採用進入侷限空間之相關規定。 - 在進入前先測試溝槽內之空氣污染度及氧氣含量。
	當於不穩定之土地操作重型機具，可能會造成地面沉陷，並因此造成操作者受傷。	不穩定的土壤狀況	- 預先評估場址之土壤狀況。 - 避免工作人員進入不穩定的開挖環境中。 - 僅容許受過良好訓練之人員可操作機具。
	工作人員可能與電相關之設備接觸，暴露於危險造成嚴重傷亡。	觸電	- 於設計階段確認上方電纜位置。 - 確保所有吊貨器具離電纜至少 10 英尺遠。
化學性風險	在開挖過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於含揮發性有機物或粉塵的環境中。	污染危害	- 確保工作人員使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 - 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 - 灑水以防塵土飛揚。 - 檢測土壤是否含有高反應性、易燃或腐蝕性物質。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 17, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

9.3 成本及期程預估

一、整治成本分析

反應牆之整治成本依照不同之場址以及反應牆性能而有所差別，而深度及反應牆之長度是影響其整治成本之重要因素。反應牆壽命和整治技術之價值息息相關，透水性反應牆建造成本可能較傳統整治技術高，但其操作及監測成本相當低，因此該技術使用時間越長久，所支出的經濟回饋會越大。加速長期管柱試驗(accelerated long-term column test)可協助判定反應牆之使用壽命及判定其經濟成本效益。

使用生命週期分析是一種有效的整治成本分析方法，以目前的價值

看待長期之應用。該價值可與抽出處理法系統作比較，以便經濟分析以及整治技術之選擇。表 9.3-1 為整治成本推估所使用的表格。

二、整治期程

整治期程將依地下水流速、地質、地形、水力坡降、水力傳導係數、污染物濃度及所使用之整治方法、設計而有所不同。透水性反應牆之設計要素包含所選擇之反應物、反應牆厚度、寬度及反應物對污染物質之吸收性。

表 9.3-1 透水性反應牆整治成本評估計算表

項目	小計	總開銷
<i>資本投資</i>		
標準規模測試		
場址判定		
模擬及工程設計		
場址準備		
反應牆建置		
監測井設置		
廢土棄置(現場、非現場)		
場址還原		
分攤成本		
總資本投資		
<i>操作及監測</i>		
年操作(每年監測之成本)		
維修		
總操作及監測成本		

資料來源：US DOD, ESTCP Cost and Performance Report (CU-9907), January 2003。

十、 界面活性劑/共溶劑沖洗法 (surfactant/cosolvent flushing)

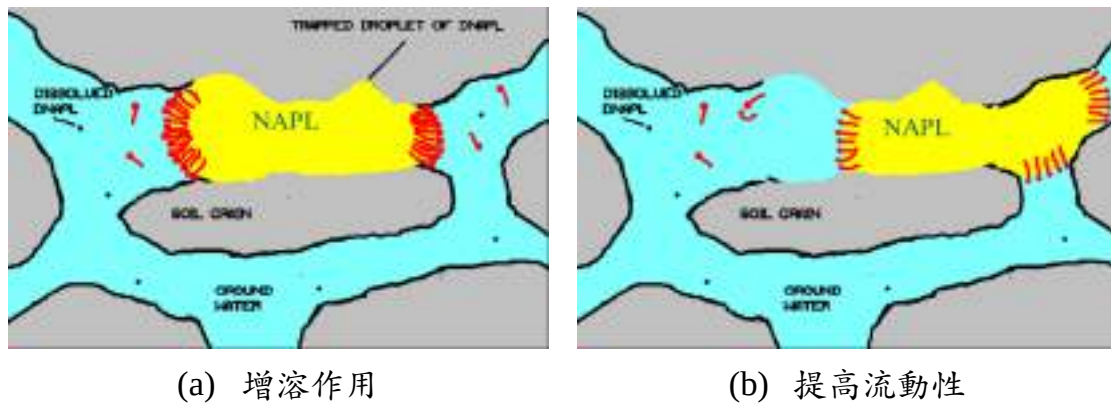
10.1 整治技術簡介

10.1.1 原理

界面活性劑/共溶劑沖洗法(surfactant/cosolvent flushing)是一項可以縮短整治期程的特殊技術，利用注入界面活性劑與(或)共溶劑的組合，以達到移除地下環境中含氯溶劑污染之目標。污染物對於有機物的親和力比對水的親和力高，因此污染物在地下水中的溶解、擴散以及脫附都相對的低，過去利用地下水抽出處理法整治可溶性、可吸附或非水相液體(NAPL)污染物的經驗發現，污染物對水的親和度低，造成直接抽出處理的效率不佳。為了提高污染物的溶解度，解決上述的困難，而添加界面活性劑以溶容(solubilize)有機污染物，並減少整治時所需要沖洗的體積，提高污染物的溶解度，進而縮短整治時間。

界面活性劑/共溶劑沖洗系統通常為包含成對的注入井與抽出井之系統。將已針對整治場址與污染物性質調整為適當濃度之界面活性劑/共溶劑經由注入井加入地下水層中，當沖洗污染區域時，可使 DNAPL 溶入微胞(micelle)內部，減少界面張力且增加其移動性及溶解性，接著 DNAPL 與地下水經由抽出井抽出，最終將 DNAPL 完全移除。界面活性劑沖排移除 NAPL 機制有以下二種(Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會)：

- 一、 增溶作用(solubilization)：利用界面活性劑之增溶作用，使 NAPL 形成微胞(數十到數百個界面活性劑分子聚集而形成的小胞狀結構)，並溶入地下水流(圖 10.1.1-1, (a))。
- 二、 提高流動性(mobilization)： NAPL 形成液滴後，將提高對地下水的表面張力並隨之移動(圖 10.1.1-1, (b))。



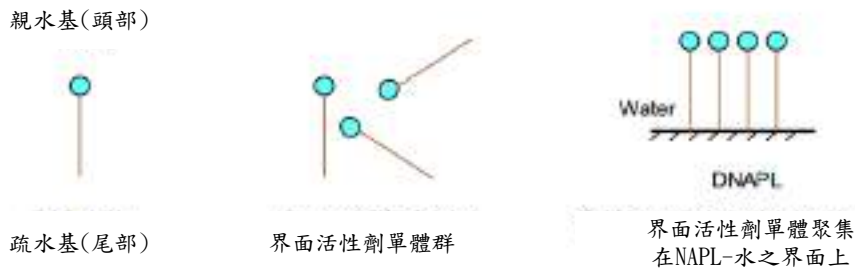
參考文獻： Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會

圖 10.1.1-1 界面活性劑沖排移除 NAPL 機制

界面活性劑之英文“surfactant”一詞為表面活性劑(surface active agent)之組合，其主要的分子結構特性，是同時具有疏水性及親水性的官能基，通常前者為對水溶解性很差之長碳鏈分子，而後者通常為對水有相當親和性之極性分子，使得界面活性劑在水中成為一種相當特殊的介質。界面活性劑獨特的化學特性是，當在低濃度時界面活性劑以單體(monomer)的形式存在，單體會持續在油水或土水界面累積，當單體濃度持續增加到所謂的臨界微胞濃度(critical micelle concentration, CMC)時，單體開始聚集成為微胞。當濃度高於臨界微胞濃度時，單體與微胞結構同時共存，而單體會維持在臨界微胞濃度的濃度，多於臨界微胞濃度的部分，則因為疏水基互相吸引而聚集成為一表面為親水性，而內部為疏水性核心的微胞結構。微胞的典型基本結構，如圖 10.1.1-2。微胞所具備的疏水性核心可以讓疏水性有機物分配或溶容(solubilize)於其中，進而提高有機物在水中的整體溶解度。

除了界面活性劑之外，某些污染場址可能發生界面活性劑黏附或吸附於土壤中，使得去除 NAPLs 所需使用的劑量隨之增加，此種情況可添加共溶劑加以避免。其目的是為了使污染物從土壤顆粒中脫附，並使得污染物容易溶解分散於水中，而水中的溶解度增加之後，可以提升界面活性劑的利用率。

界面活性劑濃度在臨界微胞濃度(CMC)以下之情形



界面活性劑濃度在臨界微胞濃度(CMC)以上之情形

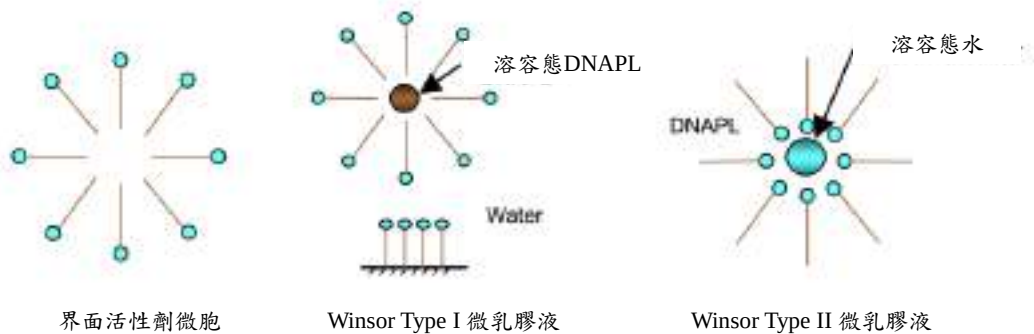


圖 10.1.1-2 界面活性劑微胞基本結構特性圖

10.1.2 適用條件

界面活性劑/共溶劑沖洗法相當適合用於地下水含水層介質中 DNAPL 污染之去除，對於溶解相、揮發相之污染物則較不適合。另外，本技術也可與其他處理技術，如生物處理法、化學氧化法等結合，以完全移除污染物。界面活性劑/共溶劑沖洗法在應用上之各項可能優缺點，如表 10.1.2-1。評估單一場址的適用性，需考慮三個主要因素：

- 一、 場址之水文地質情形：使用界面活性劑/共溶劑沖洗法時，污染物需在一定的時程內有效的於污染區域流動至抽出井抽出，因此，土壤之流動性亦相當關鍵，所以本技術於滲透性較高的砂質、沉泥質或礫質土壤比低滲透率之黏土質或岩層土壤適合。
- 二、 污染物之特性：DNAPL 污染物本身的流動性也會影響本技術之適用性。高黏性的 DNAPL，如煤焦油(coal tars)與雜酚油(creosotes)因流動性較差，因此常需透過添加膠黏劑(viscosifier)的方式達到整治功效。

三、 先期實驗研究與化學品選用：包括界面活化劑與共溶劑之種類選擇、規劃最佳整治系統之組成元素，與評估所需注入的化學品總量。

10.2 整治系統操作與設計

有關國外針對界面活性劑/共溶劑沖洗法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 10.2-1。

表 10.1.2-1 界面活性劑/共溶劑沖洗法技術優缺點比較表

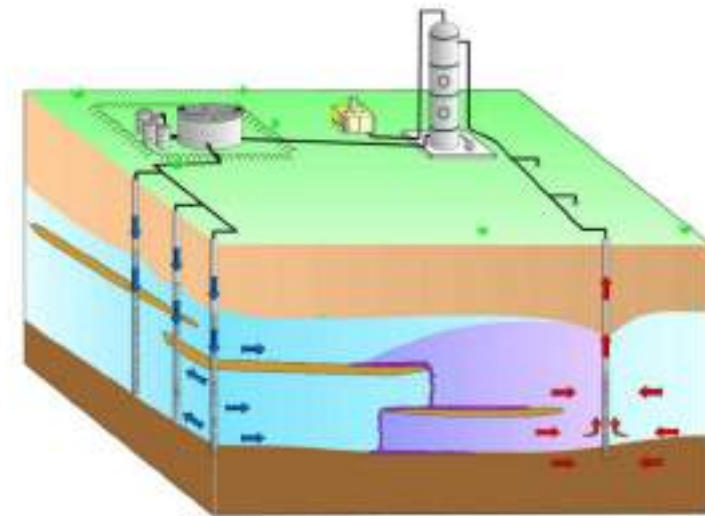
優點	缺點
• 可將地下水介質中大部分之 DNAPL 快速的去除。 • 地表面足跡較小之現地整治技術，因此可適用於建物下方之污染場址。 • 避免開挖、處理與運送大量的污染土壤/沉積物。 • 可提升傳統的地下水抽出處理法的整治效率。 • 適用於許多污染物之整治，包括去脂溶劑(三氯乙烯與三氯乙酸)、乾洗溶劑(四氯乙烯)、重油類、含 PCB 油類等。 • 可單獨運用，亦可與其他整治技術結合。	• 界面活性劑或共溶劑配方之調配成本較高，在開始整治之前，需投入大量經費進行實驗室與模擬作業。 • 整治系統之設計須針對個別之場址情形以及污染物濃度而變化，必須重新調配之可能性較高。 • 目前尚無長期性研究以確認整治後之反彈作用。 • 不適用於低滲透性土壤，如黏土質或岩層。 • 增加 DNAPL 移動性的同時，可能會造成污染帶轉移至原本未被污染之含水層。 • 生物不可分解或難分解之界面活性劑，可能殘存於地下環境中，因此提高需採用藥品以降低風險之成本。

表 10.2-1 國外界面活性劑/共溶劑沖洗法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Technical and Regulatory Guidance for Surfactant/Cosolvent Flushing of DNAPL Source Zones	2003
US NAVFAC	Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) Design Manual	2002
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 7.4 Surfactant floods	2002

10.2.1 整治系統設計與操作要點

系統設計前應事先了解污染物的分佈、場址特性、模擬軟體使用、模場放大測試、界面活性劑化學特性等(Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會)。界面活性劑/共溶劑沖洗系統之基本配置，如圖 10.2.1-1。不同的整治場址可能會使用非常不同的界面活性劑/共溶劑組合溶液，然而，其基本的設計概念是一致的，主要包括三部分：



資料來源：NAVFAC, Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) Design Manual, Technical Report TR-2206-ENV, p. 5, April 2002.

圖 10.2.1-1 界面活性劑/共溶劑提升地下水污染整治概念設計示意圖

- 一、 可行性研究與藥劑選用：包括界面活性劑與共溶劑種類之選擇，以及規劃最佳整治系統之設備單元，與評估所需注入的化學品總量。
- 二、 整治系統規劃與設計：包括注入系統、傳輸與回收系統(注入井與抽出井)、化學混合、控制與監測系統之規劃與設計。

依據可行性研究結果，於場址現場調製界面活性劑/共溶劑溶液，將其貯存於混合槽後，由泵浦經注入井將界面活性劑傳送至待整治區域，再將移除污染物與界面活性劑從抽出井抽出後，將污染物與界面活性劑分離，並將廢液導至油水分離設備中，以移除溶解其中之污染物。廢液接著被導至前過濾系統，以移除大型固體顆粒，最後，此主要由界面活性劑單體與微量污染成分組成之廢液，經過超過濾系統處理後，即送往廢水處理系統作最終處理。詳細的設計、評估程序可參考圖 10.2.1-2。以下針對系統可行性模擬研究作

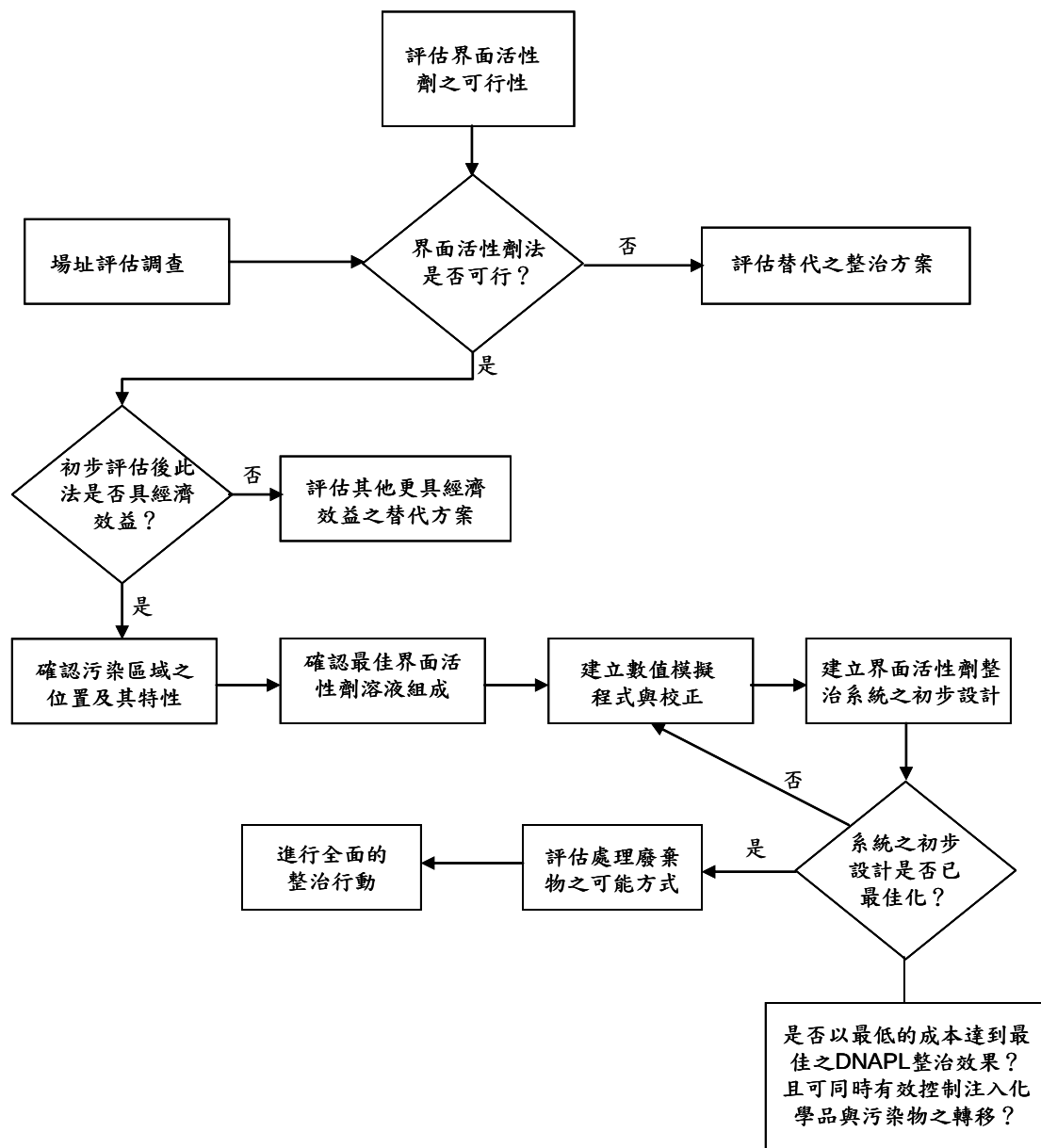
業、系統設置與操作相關要點說明。

一、 可行性研究與電腦模擬研究作業

在實際執行界面活性劑/共溶劑沖洗技術之現地作業前，常需先進行實驗室之可行性研究，以篩選及設計界面活性劑與(或)共溶劑系統，以達到最有效移除整治場址之 DNAPL 污染物的目的。值得注意的是，適用於某一場址之化學品組成往往並不適用於另一場址，因此，每個整治個案皆須針對其場址特性作個別之評估，以期能達到最佳整治效果。取得場址之土壤與地下水樣本後，實驗室篩選分析包括污染物溶容、界面活性劑之吸收與沉澱、界面活性劑於非水相液體中之特性，以及污染物抽出之管柱系統等分析。

界面活性劑依其親水基的電荷特性可歸類成四大類，分別為陰離子性、陽離子性、非離子性，及雙離子性。其中，陰離子性與非離子性可適用於大多數之沖洗案例，但仍有數百種化學構造可供選擇，因此，我們可歸納出以下的篩選要點：

- (一) 之前的使用經驗；
- (二) 針對目標場址的整治有效性；
- (三) 成本；
- (四) 法令規範；
- (五) 生物降解性與可降解之產品；
- (六) 對人體、動物，以及植物的毒性；
- (七) 處理抽出液體之容易度。



資料來源：US NAVFAC, Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) Design Manual, p.3, 2002.

圖 10.2.1-2 界面活性劑/共溶劑提升地下水污染整治評估流程圖

除了實驗室作業之外，為確認界面活性劑能有效且適當的被傳送至污染場址，將水文地質資訊，如水力傳導係數、孔隙率、總體密度與儲水係數等，輸入三維電腦模式中，以模擬含水層的狀況。透過電腦模擬作業分析，可達到下列目標：

- (一) 確認可能的注入/抽出井設置位置；
- (二) 評估設井之水力捕捉能力；
- (三) 評估抽出井可能抽出之地下水量；
- (四) 評估未回收之界面活性劑之長期演變。

二、系統設置與操作要點

有關系統設置與操作之作業要點，可分為系統穩定性確認、界面活性劑沖排操作要點，以下茲就該兩項進行說明。

(一)系統穩定性確認

當注入及抽出之操作開始階段，主要確認系統的穩定，確認事項包括：

1. 確認測漏設備及流量校正設備，均顯示系統保持在正常之操作壓力條件下，沒有洩漏之虞。
2. 確認注入流率的水力控制數據，確保流量在設計參數之下運作。
3. 確認廢水處理系統之運作及排放水符合排放標準。
4. 確定自動化系統顯示之數據以及記錄資料的正確性。
5. 測試警示系統及自動化設備的自動斷電及重開功能。

(二)界面活性劑沖排之操作

確保界面活性劑之品質，注入前之準備工作，必須依據下列順序辦理：

1. 將批次混合槽注水。
2. 加入電解質鹽類，並使其溶解。
3. 添加界面活性劑，並攪拌完全。
4. 裝入共溶劑(視需要)，並攪拌完全。
5. 注水至混合槽全滿，並攪拌完全。

確認界面活性劑效能最簡單的方式，就是確認地下環境中實際存在的界面活性劑濃度，至於注入環境中之界面活性劑濃度，以及與污染物反應之後的殘餘濃度，應由先期之實驗室試驗結果來評估

。

對於沖洗的操作比較重要的是，如何因應整治過程中，地下水環境中的污染物或界面活性劑的濃度變化，調整注入流率。一般為了節省採樣分析經費，以及操作的便利性，不會特別去更改操作濃度及操作流率，但若是能夠減少採樣分析的程序，或是簡化化學分析的程序及時間，將可採用即時監測系統，達到以即時之資訊反應注入量及濃度之調整需求。

10.2.2 整治系統單元

一個完整之界面活性劑/共溶劑沖洗法，包括下列設備或設施：

- 一、 界面活性劑溶液以及其他共溶劑等注入地下水之化學品的準備區及設備，例如現地藥品混合槽、藥品儲存桶存放區等。
- 二、 注入及抽出操作系統，包括抽出井、注入井、管線以及泵等。
- 三、 設置監測系統，包括存在於土壤、地下水環境中污染物、界面活性劑、共溶劑等化學藥劑取樣之監測井或一般工作井(注入井或抽出井)，自動化機械操作的壓力、流率等監控系統，以及水文地質監測項目，如地下水位等。
- 四、 程序控制系統，包括數據資料蒐集、各項自動化監測設備之操作控制數據等。
- 五、 廢水處理系統。

10.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

在開始沖洗之前，應有系統地收集地下水水質資料，以建立場址基線資料，一般於即將開始沖洗之前，執行相關採樣工作；沖洗完成後，也應執行地下水監測，以偵測可能的污染物濃度反彈。監測頻率可依照地下水通過場址之流速，調整頻率為3個月、6個月或12個月，進行一次檢測。

另外，在污染場址外圍收集額外的地下水樣品，可協助確認 DNAPL

與界面活性劑有無遷移至其他區域。於場址之地下水上、下游處，亦可設置預警式監測井(sentinel well)，以確認原未受 DNAPL 污染之含水層，是否遭受遷移污染物之影響。

二、成效監測

採用界面活性劑/共溶劑法時，應進行成效監測，以評估界面活性劑之應用性、有效性、安全、整治期程、污染物轉移，與所需之整治成本等。監測工作如下：

(一)界面活性劑/共溶劑污染物分析

本技術成功與否之關鍵，在確認界面活性劑/共溶劑是否達到原設計之整治目標，微小的電解液濃度或比例變化可能會造成整治成果顯著的不同，應持續監測注入液體的遷移，以確認界面活性劑是否有效地流向目標整治區域。此外，由關切污染物於抽出液中之濃度，可具以評估達成整治目標所需之時間。因此，在界面活性劑/共溶劑沖洗過程中，同時監測界面活性劑與污染物之濃度是非常重要的。至於監測的地點與頻率，宜視場址特性而定，一般來說，至少需 20-30 次採樣，必要的監測對象與分析項目，如表 10.2.3-1 所示。

(二)注入/抽出流速監測

在沖洗過程中，應密切監測注入與抽出之流速，以確實估計抽出之污染物與界面活性劑/共溶劑之數量。注入與抽出流速之不平衡，可能會造成去除率與污染區域之水力捕捉效果不佳。

(三)成效評估

界面活性劑/沖洗系統之成效可透過下列參數評估：

- 1、最終 DNAPL 飽和狀態(指仍含有 DNAPL 之孔隙比例)；
- 2、污染物移除比例；
- 3、污染源散出之污染物強度或其質量流；
- 4、注入化學品之回收比例；
- 5、整治工作結束後仍殘留之 DNAPL 其可能的風險。

表 10.2.3-1 界面活性劑與污染物之必要監測

監測對象	目標分析項目
抽出液	界面活性劑/共溶劑、鈉離子/鈣離子(添加物)、關切污染物
注入之沖洗液	界面活性劑/共溶劑、鈉離子/鈣離子(添加物)
單位處理元件	界面活性劑/共溶劑、關切污染物
監測井	界面活性劑/共溶劑、關切污染物

10.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

設井與設置、操作地面上界面活性劑整治系統之設備、管線與泵浦等，均可能對工作人員造成潛在之工安風險。界面活性劑與共溶劑沖排時，附帶產生大量的注入及抽出行為，若未妥善規劃，有可能在產生遭沖洗溶出之污染物不慎與人員或民眾接觸之風險，而 DNAPL 污染物之毒性普遍上較高，因此極需在整治的過程中確保工作人員與其他民眾與污染物的接觸可以減到最低。此外，也應避免污染物自地面管線與回收儲槽之洩漏，除了可能造成二次污染之外，也會提高人員接觸傷害的危險。

界面活性劑一般毒性較低，因此並不會顯著增加整治過程中的危害。然而，用作共溶劑之醇類物質，如乙醇，其特性為可燃且具爆炸性，含有乙醇之混合物，其運輸、貯存與運作均需特別注意，以避免潛在之工安危害。

10.3 成本及期程預估

一、整治成本分析

界面活性劑/共溶劑沖洗法之整治成本與整治場址特性有關，如污染區之大小、水力傳導性、污染物濃度、種類與數量、沖洗方式，以及法令規定之整治目標等，因此，界面活性劑之整治成本變化很大。此外，回收再利用沖洗液，往往可顯著減少大型場址之整治費用，且可同時大幅減少廢棄物之產出，而因此可減低廢棄物處置之成本。

二、整治期程

界面活性劑/共溶劑沖洗法較其他整治技術所需的整治期程較短，整治期程一般以「週」與「月」計。

十一、 開挖與圍堵(excavation and containment)

11.1 整治技術簡介

11.1.1 原理

早期圍堵處理技術主要運用於防止外側的土壤及地下水不會崩坍及滲入興建工程基地內，而鋼板樁是全世界各地普遍運用的圍堵技術。1970 年代後期至 1980 年代初期間，美國開始使用泥漿牆(slurry wall)隔離受污染地下水。由於圍堵處理成本較高，一般作為長期或永久性設施。圍堵處理之成效與所需成本，主要取決於污染物的性質與污染程度、地質與水文條件、是否結合地面覆蓋系統以及其他水力措施。就土壤污染整治而言，圍堵處理技術主要的不穩定性在於圍堵系統的材料與污染物之間的化學相容性。

開挖與圍堵(excavation and containment)技術廣泛使用於各類型污染場址，可開挖之污染物質種類並無絕對之限制，幾乎可應用於各種場址情況。相較於其他整治技術，開挖處理通常較適用於土壤污染場址或污染源移除，其優點除較為快速外，實施成效之評估也較為容易。近年來，國內常見於重金屬及油品污染場址之整治，亦有應用於含氯有機物污染場址之案例。惟在深層或複雜水文地質環境中，所需開挖費用相對較高。以下將針對開挖及圍堵作業個別說明其作業原理。

一、 開挖

開挖之原理係經確認範圍後，直接以重型施工機具，如挖土機、推土機將受污染土壤挖除，並將其運送至離地處理設施，進行後續處理。如果處理後之土壤可達乾淨土壤之標準，則可將原移除之土壤再放回開挖處，此稱之為「回填」(backfilling)，或自其他地方取得乾淨土壤填補開挖處，則稱之為「客土回填」。

二、 圍堵

圍堵為安裝於污染介質周圍的地下溝渠、地牆或地膜所組成之「垂

直阻絕系統」，有時亦與地面生態覆蓋系統結合。垂直阻絕系統主要有兩方面的功能：(1) 把污染介質或污染物隔離起來，防止污染物橫向或側向遷移、擴散；(2) 改變局部的地下水流模式，減少、阻止以及避免污染土壤與地下水的相互接觸。阻絕系統主要可分成以下幾種基本類型：

- (一) 取代法：把阻絕系統安裝在地下而地面不受任何大的干擾。其中，鋼板樁(steel sheet piling)是最常用的一種方法，鋼板樁能夠被植入、敲入或打入地下環境，振動打入深度可達 30 公尺，噴氣推入深度為 10 公尺。
- (二) 挖掘法：將土壤挖出，然後用阻隔材料代替原有土壤，即建置一低滲透率之垂直阻絕系統，將其插入土壤至更深層的不透水層。例如，交叉樁法(secant piling)由一系列連鎖相鄰的樁形成完整的牆；淺層截水牆(shallow cut-off wall)的建造過程是先用切割機挖出一個足夠深的狹槽，然後插入地膜，再用壓實的黏土填充；泥漿溝渠(slurry trench)建造過程是先挖一條溝渠，然後用不同混合的泥漿(如皂土—水泥混合，有時還加入挖出的土壤進行混合)進行填充，形成不同型式的泥漿溝渠，包括黏土阻絕系統、皂土—水泥阻絕系統、膜阻絕系統和混凝土橫隔牆等。
- (三) 注射法：向土壤中注入一定的材料，填充土壤的空隙、孔隙和裂隙，降低土壤滲透性的過程。注射法形成的垂直阻絕系統，包括：化學灌漿阻絕、深層土壤混合(通常是皂土和水泥混合)技術、噴射灌漿和噴射混合灌漿等。
- (四) 其他方法：包括電動力學阻絕技術、地面冰凍、化學阻絕和生物阻絕等。其中，電動力學阻絕技術是指通過控制電荷形成對污染物遷移進行阻絕的系統。地面冰凍也可以形成垂直阻絕系統，用於控制土壤中污染物的遷移，在這方面美國已有應用。目前，生物阻絕方法也在發展當中。

11.1.2 適用條件

開挖及圍堵系統幾乎可應用於全部之場址情況，主要考量其材質與污染

物之間的化學相容性。開挖及圍堵法在應用上之各項可能優缺點如表 11.1.2-1。以下分別對開挖及圍堵作業方式之技術篩選方式說明。

表 11.1.2-1 開挖圍堵整治技術優缺點比較表

	優點	缺點
開挖作業	1. 適用於各種污染物。 2. 可直接移除污染源。 3. 可短時間內快速移除土壤中之污染。 4. 可選擇在場址內進行處理或場址外進行清理。 5. 技術較普遍。 6. 開挖費用低。	1. 處理易爆性、反應性或高度毒性污染有潛在的勞工安全衛生問題。 2. 在深層或在複雜水文地質環境中費用較高。 3. 須避免客土回填造成二度污染。 4. 若將後續處理一併考慮，整個開挖處理的時間就會拉長。
圍堵作業	1. 可防止污染物橫向或側向移動擴散。 2. 可改變局部的地下水流模式減少。 3. 阻止及避免污染土壤與地下水之相互接觸。 4. 可阻隔污染並保護鄰近區域。 5. 常用於出水量大或污染來源複雜的地區。 6. 提供低水力傳導係數。 7. 可有效爭取整治時程。	1. 非處理方式。 2. 設置費用高。 3. 不適用於小場址。 4. 有潛在滲漏及移動之風險。

一、開挖作業技術篩選

開挖常應用在清除有害廢棄物污染場址之緊急應變處理措施，對於開挖之污染物種類並無絕對之限制，但是在開挖具高反應性或高毒性污染物質時，工作人員之健康和安全必須優先考慮。其他因素尚包括污染物之移動性、現場圍堵或就地處理之可行性，和開挖後後續處置之限制。土壤開挖常應用於清除「高污染區」(hot spot)之受污染土壤，亦為處理對環境或人體有立即危害之污染物最迅速之方法，若考量欲於短時間內快速移除土壤中之污染，開挖法可優先列入評估考量。開挖處理之侷限性為其通常僅適用於土壤污染處理，但若經過妥善之規劃設計，亦可透過鋼板樁打設阻絕及點井抽水方式，挖除較深層之飽和含水層之污染土壤，並配合實施開挖區下方之現地化學氧化或施放釋氧化合物、釋氮化合物等，同樣可達到地下水污染整治之效果。

開挖時，應妥善設計開挖支撐系統及其附屬構件，使其足以承載臨時覆蓋板系統、土壤壓力、靜水壓力、管線荷重、交通及施工載重、地震力、臨近建築物及其他地表超載重等，而不致引起地表之移動或沉陷。對臨近建築物、構造物、路面及管線等亦應避免造成損害或移位。開挖支撐之擋土牆應貫入開挖底部以下，其深度應足以防止土壤之垂直及側

向移動。

於 DNAPL 污染案例中，一旦發現範圍較大之「純相」，不論搭配合何種整治工法，一般均建議優先進行純相移除工作，如經評估場址特性後確認可採行開挖處理，通常亦建議優先開挖移除高污染源，以降低後續整治之困難度。

二、圍堵作業技術篩選

涉及土壤介質的取代、挖掘和處理時，垂直阻絕系統可以分成取代法、挖掘法、注射法等基本類型，各類型之適用性如表 11.1.2-2。

表 11.1.2-2 各種類型垂直阻控系統之適用性

類型	舉例	適用性	特徵
取代法	銅板樁 震動波牆 膜牆	大多數土壤類型，但大石頭、岩石或大量廢棄物存在或許會影響安裝	問題是低 pH 土壤一般對苯和甲苯等污染物具有抗性；銅板樁的地方也需要結構上或機械的支持
挖掘法	橫切堆積牆 淺層切斷牆 噴射灌漿 泥漿溝渠 混凝土橫隔牆	大多數土壤和岩石類型	廣泛應用；需要對系統的損壞進行處置
注射法	水泥或化學灌漿 噴射灌漿 噴射混合	最好是粒狀土壤或破碎的岩石，而黏土或廢棄物較少成功	
其他	地面冰凍 電動力學 生物阻控 化學阻控	在美國，地面冰凍只在一定顆粒大小的土壤(主要是砂土)上有過成功的實例	在國外受到廣泛重視

11.2 整治系統操作與設計

有關國外針對開挖與圍堵已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 11.2-1。

表 11.2-1 國外開挖與圍堵法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
USEPA	Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites	1998
英國環境署 (Environmental Agency)	Source Treatment for Dense Non-Aqueous Phase Liquids: Technical Report (P5-051/TR/01), 6.3 Barriers/7.9 Excavation	2002

11.2.1 整治系統設計與操作要點

本節茲就開挖及圍堵所需注意之要點個別說明。

一、 開挖

開挖處理之前置作業，包括：現場操作區之設計和施工；實施環境與安全衛生管理計畫，以使環境排放量最低，並保護工作人員之安全；和設備之選擇和機動化。

工作地區之適當配置(包括支撐設施)對施工安全和節省開挖和移除費用頗具關鍵性。利用可用的資料，將污染場址先行依照不同的污染程度，分為隔離區、緩衝區(除污區)及支援區，這些區域位置應決定工作實施之處，例如任何疊置工作或現場處理須於污染區進行；人員除污須於緩衝區實施；行政和緊急醫療須於支援區實施。

另外，應備有明顯之操作地區，供疊置、處理、儲存和運送污染物及設備之除污。每個現場操作區應設計有足夠空間供調遣設備並供緊急撤出，決定不同操作區間之最小安全距離，則需要周詳之評估。

二、 圍堵

設計垂直阻絕系統時應考量：(1)系統安裝所需的深度；(2)可接受的完整性程度(如初使有效性)；(3)與當地環境的相容性。至於選擇何種類型的垂直阻絕系統，主要取決於所要完成的目標或需要解決的問題，以及是否還需要安裝地面覆蓋系統。

垂直阻絕系統主體設計的要求，在於阻止污染物遷移的能力與穩定性。因此，需要考慮的因素包括：(1)污染物遷移的驅動力和潛勢；(2)阻止污染物遷移阻絕的能力；(3)系統的設計壽命。其中，驅動污染物遷移的潛勢包括：(1)流體靜力學作用，即因水壓之差異隨水流產生的遷移；(2)電動力學作用：即由電動勢差引起的污染物遷移；(3)化學作用：即由污染物濃度或其他化學介質濃度不同引起的污染物遷移；(4)熱力學作用：即由水溫梯度引起污染物隨水的遷移；(5)滲透作用：即由化學滲透壓之差異引起的污染物遷移。阻絕之成效與是否解決以上這些作用有密切的關係。

另外，阻控材料的選擇，關鍵在於其滲透性。在許多場合，阻絕

材料或阻絕系統與當地環境介質之間需要有滲透性上的不同。其次，阻絕材料或阻絕系統的吸附性能也是一個關鍵的因素。此外，在水分變乾或再飽和條件下，阻絕系統的自我復原特性也相當重要。

11.2.2 整治系統單元

本指引彙整開挖及圍堵所需使用設備如表 11.2.2-1。

表 11.2.2-1 開挖圍堵整治系統單元

開挖	圍堵
1、開挖重型機具設備(如挖土機、推土機) 2、土壤載運工具(如吊車、裝料機) 3、測爆器 4、現場土壤氣體或揮發性有機物偵測器(如PID/FID) 5、防止揚塵之設施(灑水系統) 6、暫存場 7、後續處理或處置設施(如掩埋場)	1、開挖重型機具設備(如挖土機、推土機)、打樁機 2、土壤載運工具(如吊車、裝料機)

11.2.3 整治系統監測

開挖作業及圍堵工作場址周圍環境監測方式與頻率，個別彙整如表 11.2.3-1 及表 11.2.3-2。

表 11.2.3-1 開挖作業期間場址周圍環境監測

類別	項目	監測項目	監測地點	監測頻率
場址環境	空氣品質	總懸浮微粒	敏感點	每季 1 次
	施工噪音	L_{eq} 、 L_{max}	敏感點	每季 1 次
二次污染 監控點	廢水處理設備之放流水質	pH 水溫 懸浮固體 關切污染物	廢水放流口	初期每 2 星期 1 次，穩定後每季 1 次

表 11.2.3-2 圍堵成效監測

項目	標準
地下水水質	地下水下游至少設置 3 口監測井
地下水水位	阻絕系統內外設置水壓計

11.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

(一) 開挖

開挖所產生的受污染土壤不論是在開挖過程或是在場址暫置時，可能會有高度的風險存在，因為其潛在與人體的皮膚接觸或吸入的可能性以及污染物因自然狀況造成污染物逕流至地表水或其他週界之敏感環境受體，藉由適當之暫置場設置與設計可以減低開挖工程對於環境的衝擊。

開挖工作進行中，應隨時保持良好之排水狀況，不得有積水之現象，並應建造臨時排水設施或備置抽水機等，以利開挖區水之宣洩。排水設施出水口之位置，應避免設於對路幅或路基可能發生沖刷之處。設置沉砂池，收集及處理初期降雨及洗車平台之廢水。此外，覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲漏和揚塵。

離場處理之土壤已於民國 103 年 1 月 29 日之「指定廢棄物清理法第二條第一項第二款之事業」修正公告後，自 103 年 7 月 1 日起新增實施第三十四項「採土壤離場處理之土壤或地下水污染場址」為指定事業。離場處理事業單位需取得合格之土壤清運之相關廢棄物代碼，始得處理或再利用污染土壤。

(二) 圍堵

圍堵工程施工中應保持工地及環境之清潔，挖出之廢土及廢液經處理後應立即清理，對四週排水溝污染沉泥等，應定期清除與檢測。如需進行挖掘、打樁時，不得造成地表土壤移動或危及鄰近建築物或火車軌道等，挖掘、打樁時必須使地面振動減至最低程度。

二、潛在之危害

開挖與圍堵之潛在危害，分別如表 11.2.4-1 與表 11.2.4-2。

表 11.2.4-1 開挖作業之潛在危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	在開挖土壤過程中，工作人員可能因重型機具而受傷或死亡。此類重型機具亦會產生嚴重的噪音問題。	機具設備危害	於重型機具上安裝備用警報器以警告工作人員。 當靠近機具時，確保於機具前方或是操作者視線範圍內移動。 確保工作人員佩帶聽力保護具。 加強相關人員有關潛在危害以及操作重型機具之相關安全訓練。
	當挖掘受爆炸性或可燃性物質污染之土壤，可能因機械之金屬元件碰撞金屬或石頭所產生火花，造成起火燃燒的情形。另外，若挖掘過程中毀壞地底之電線或是氣體管線，亦可能造成起火、爆炸或是感電的情形。	火災與爆炸	加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 在開挖工作開始前預先定位地底電力設施之位置。 使用不會產生火花之金屬元件。 定時噴灑水或泡沫滅火劑於工作區以防止蒸氣自燃。 操作環境利用測爆器進行監測，如測值達到爆炸下限值之 10 %時，宜停止操作，進行逸散氣體的位置。
	當工作人員進入挖掘區時，可能會暴露於挖掘牆倒塌/淹水的危險。淹水可能導致溺水或感電(有使用電力設施時)的情形。	開挖牆倒塌/淹水	於潮濕的工作環境中穿戴救生衣。 使開挖牆之坡度至少離牆緣 1.5 公尺。 避免工作人員進入不穩定的開挖環境中。 於開挖周界至少每 7.5 公尺提供緊急出口。 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 提供良好的通風設備並再必要時採用進入侷限空間之相關規定。
	當於不穩定之土地操作重型機具，可能會造成地面沉陷，並因此造成操作者受傷。	不穩定的土壤狀況	預先評估場址之土壤狀況。 僅容許受過良好訓練之人員可操作機具。
化學性風險	在開挖過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於含揮發性有機物或粉塵的環境中。	污染危害	確保工作人員使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 灑水以防塵土飛揚。 檢測土壤是否含有高反應性、易燃或腐蝕性物質。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 3 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

表 11.2.4-2 圍堵潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	在開挖土壤過程中，工作人員可能因重型機具而受傷或死亡。此類重型機具亦會產生嚴重的噪音問題。	機具設備危害	於重型機具上安裝備用警報器以警告工作人員。 當靠近機具時，確保於機具前方或是操作者視線範圍內移動。 確保工作人員佩帶聽力保護具。 加強相關人員有關潛在危害以及操作重型機具之相關安全訓練。
	在泥漿牆之施工過程中，若不慎造成地下之電線、氣體管線、下水道等，可能造成起火、爆炸或是感電的情形。 於施工過程中，若不慎碰撞到構造物之地基，可能導致機具突然被迫停止，並可能造成嚴重的機具相關危害。	設備或地下構造物	加強相關人員有關在地下構造物附近施工之必要訓練。 加強相關人員於重大災害發生時之緊急應變相關訓練，包括急救與隔離程序。 在開挖工作開始前預先定位地底電力設施之位置。
	重型機具於陡坡或不穩定之土地上可能會翻覆或滑落，造成操作人員嚴重受傷。 裝滿回填土的卡車可能會陷在溝渠中無法移動。	重型機具危害	設計可使重型機具翻覆的可能性減到最小的坡度。 確保工作人員穿著有適當顏色標線之工作背心。 使用配備有防止翻覆設備(ROPS)之重型機具，並避免於陡坡或不穩定的土地上操作。 加強相關人員有關潛在危害以及操作重型機具之相關安全訓練。
化學性風險	在開挖過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於含揮發性有機物、粉塵或土壤皂土混合物中之游離二氧化矽的環境中。眼睛也可能會間接接觸到這些物質。	泥漿/污染	確保工作人員使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 灑水以防塵土飛揚。 於土壤混合的過程中避免過度攪動。 檢測土壤是否含有高反應性、易燃或腐蝕性物質。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 7 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

11.3 成本及期程預估

一、整治成本分析

(一) 開挖

挖土機之租用費用，包括勞力、設備、經常費與利潤等。

(二) 圍堵

圍堵工程之成本，依場址特性而有很大的差異，且依阻絕系統設置的材質與型式，其設置成本差異性亦大，一般鋼板樁較其他方式之設置成本低，泥漿牆較混凝土牆成本低；圍堵工程所需的操作維護費相關其他方法為低。

二、整治期程

開挖與圍堵法較其他整治技術所需的整治期程較短，整治期程一般以「週」與「月」計。

十二、 電動力整治技術 (Electrokinetic Remediation)

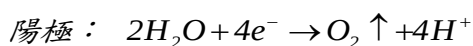
12.1 整治技術簡介

12.1.1 原理

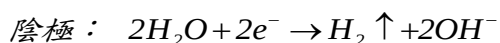
電動力整治技術(electrokinetic remediation)係從飽和土壤層、不飽和土壤層、污泥、沉積物中分離並提取重金屬或有機污染物的整治方法，可直接於污染場址現地將污染物加以移除、處理或侷限。電動力法相較於熱處理、穩定法或固化等常見的現地整治技術，可應用的範圍更為廣泛，因為該技術並不會因土壤或污染物種類不同而受到限制。由於電動力法操作毋需進行大規模開挖，適用於無機或有機污染物，且無生物毒害之問題，在過去十餘年來，其高移除效率及具安全性已持續地吸引了研究人員及政府官員的注意，並嘗試將此種技術應用於污染場址中有機污染物之去除。

電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，使污染區域被包圍，並施加適當直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極(陰極)；相反地，帶負電荷之離子則向正極(陽極)移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流(electroosmotic flow)之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的，其原理示意圖如圖 12.1.1-1。

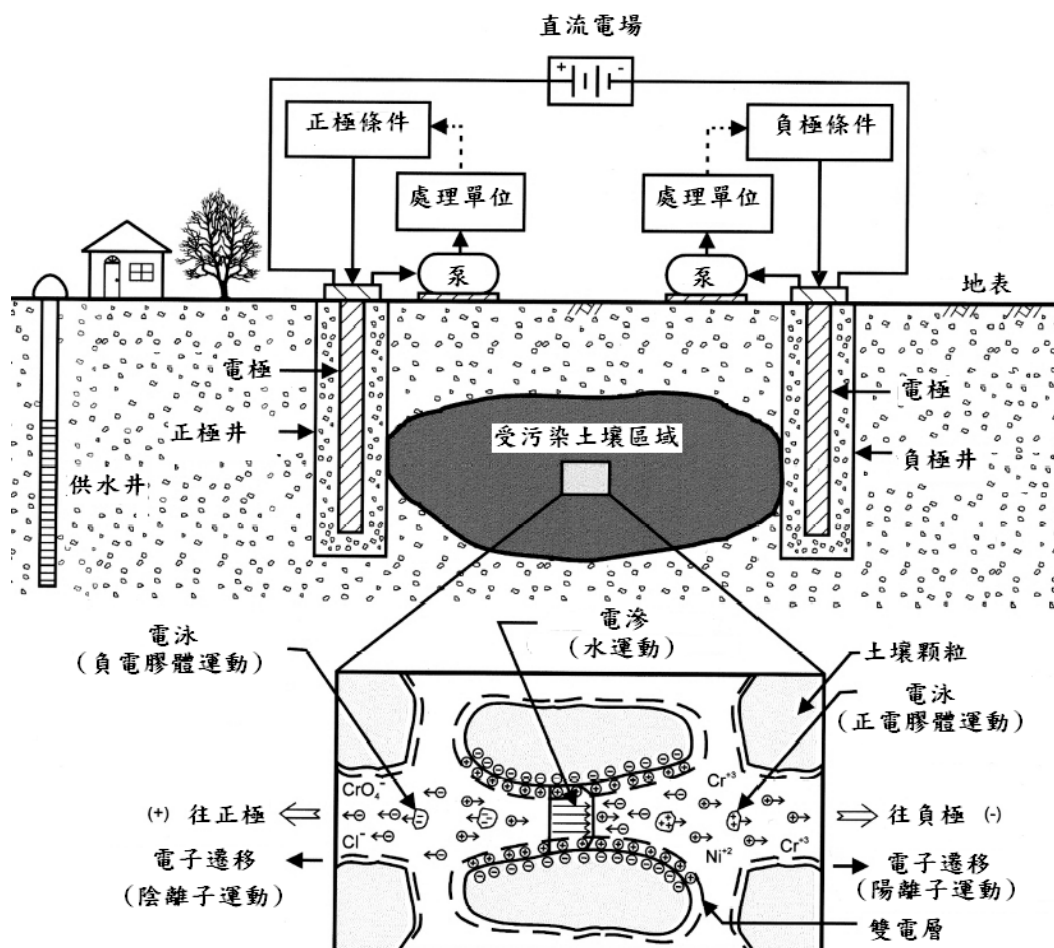
在陽極區由於 H^+ 的濃度增加，將形成一酸鋒(acid front)，而在陰極增加的 OH^- ，亦將促使一鹼鋒(base front)的形成。電極鄰近會發生水的電解反應，其反應如式 1 及式 2。由於土壤顆粒的同構取代作用與斷鍵的存在，使得大部分土壤顆粒表面都帶負電，當陽極附近的酸鋒開始向土壤毛細移動，將打破污染物與土壤的結合鍵，此時，大量的水以電滲透方式在土壤中流動，土壤毛細孔中的液體被帶到陽極附近，這樣就將溶解到土壤溶液中的污染物吸收至土壤表層而得以去除。



式 1



式 2



資料來源：Richard E. Saichek and Krishna R. Reddy, Electrokinetically Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Compounds in Soils: A Review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 35: p.-161, 2005.

圖 12.1.1-1 受污染土壤現地電動力整治技術原理示意圖

12.1.2 適用條件

電動力技術不僅適用於飽和層土壤，亦可應用於不飽和層土壤，其中，污染物質之傳輸方向與量，則受污染物濃度、污染離子移動性、土壤結構與性質及土壤孔隙水界面化學與傳導性所影響。電動力法可適用於有機污染物的移除，如污染土壤中之三氯乙烯、石油碳氫化合物、苯酚與六氯苯

等。迄今已整治成功之案例包含 BTEX(苯、甲苯、乙苯、間-二甲苯)化合物、自高嶺石樣本中將三氯乙烯抽除至低於該化合物之最低溶解率等。電動力技術於酚與醋酸之去除力可達 94%。電動力法可適用於有機污染物的移除，如污染土壤中之三氯乙烯、石油碳氫化合物、苯酚與六氯苯等。

影響電動力法之污染物移除因子，主要包括：鄰近電極之化學反應、土壤含水率或飽和度、土壤組成、pH 值及其梯度、污染物種類與濃度及施加之電流密度等，詳細說明如表 12.1.2-1。

電動力法適用於水力傳導係數低之土壤(介於約 10^{-7} cm/s 之間)。除須考量水力傳導係數及離子濃度外，於選用電動力法時，應一併考量電力需求、最大深度(一般小於 20 公尺)、土壤中可能改變之化學特性，如礦物質之分解、沉澱物之合成、pH 值之改變等因素。基於大多 DNAPL 皆屬無極性，若僅是於污染區域間生成電場，恐不足以促使 DNAPL 之移動，可利用其電化學反應機制或其他改善技術(例如界面活性劑之添加)達到整治成效。本法在應用上之各項可能優缺點，如表 12.1.2-2。

表 12.1.2-1 電動力法之污染物移除影響因子

影響因子	說明
鄰近電極之化學反應	於電動力法操作期間時，鄰近電極處所產生極化現象，將造成能量傳輸的障礙，因而降低污染物移除之效率。極化現象包括：活性極化(activation polarization)、濃度極化(concentration polarization)及歐姆極化(ohmic polarization)等。上述三種極化現象為電動力操作過程電流密度降低之可能原因。
土壤含水率	土壤之含水率之多寡將影響電動力技術對於污染物種移除之成效，土壤之含水率須符合需求之最小值，以促使電子遷移(electromigration)的產生。為保持合適之操作狀態，可在陽極處連續注入清潔劑或清水，以確保污染物得持續由陰極處移出。
土壤型態與結構	土壤型態與構成可影響污染物之移動速率與整治效率。研究顯示，當土壤的碳酸鹽含量較高時，會阻礙酸鋒的形成，並於處理過程中，使土土壤呈鹼性；而當土壤的碳酸鹽含量較低時，明顯地會有酸峰形成，且土壤由陽極處至陰極處產生 pH 值梯度之變化。
pH 值及其梯度	當水電解反應所生成之 H^+ 離子與 OH^- 離子未被移除或中和時，將顯著影響土壤之界達電位、物種溶解度、離子狀態與電荷數及污染物種之吸附等。當控制正負極之 pH 值時，將有助於電滲透流(electroosmotic flow)，並減少移除污染物的時間或增加移除效率。
污染物種類與濃度	電動力法對於高溶解性無機離子物種具成效外，即使是低滲透性土壤仍具效果；對於不溶解或非離子性之有機物種，則可利用其電化學反應機制或其他改善技術(例如界面活性劑之添加)達到整治成效。
施加之電流密度	研究顯示，當施加的電流密度愈大，其電滲透流率愈大，並可減短達到預定的電滲透流率之時間，及縮短酸峰由陽極至陰極所需的時間。

資料來源：MOEA, Remediation Technical Guidance for Soil and Groundwater Contamination in Petrochemical Industry, p.100-103, June 2003.

12.1.2-2 電動力整治技術優缺點比較表

優點	缺點
- 與挖掘、土壤沖洗等離地整治技術相比，電動力學法對場址之現有景觀、建築和結構等之影響最小。 - 與酸洗技術不同，電動力學法改變土壤中原有成份的 pH，使金屬離子活化，這樣土壤本身的結構不會遭到破壞，且該過程不受土壤低滲透性的影響。 - 可適用於飽和層與不飽和層。 - 特別適用於水力傳導性較低及黏土含量較高的土壤。	- 整治成功率會受到污染物的溶解性和污染物於土壤膠體表面之脫附性能的影響。 - 需要電導性的孔隙流體來活化污染物。 - 存在於土壤中的地基、碎石、大塊金屬氧化物、大石塊等將會降低處理效率。 - 金屬電極電解過程中可能會發生溶解，並產生腐蝕性物質，因此電極需採用惰性物質如碳、石墨、鉑等。 - 土壤含水量低於 10 % 的場合，將大幅降低處理效果。

資料來源：GWRTAC, Technology Overview Report – Electrokinetics, TO-97-03, p.6-7, 1997.

12.2 整治系統操作與設計

有關國外針對電動力法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 12.2-1。

表 12.2-1 國外電動力法相關法規指引及規範

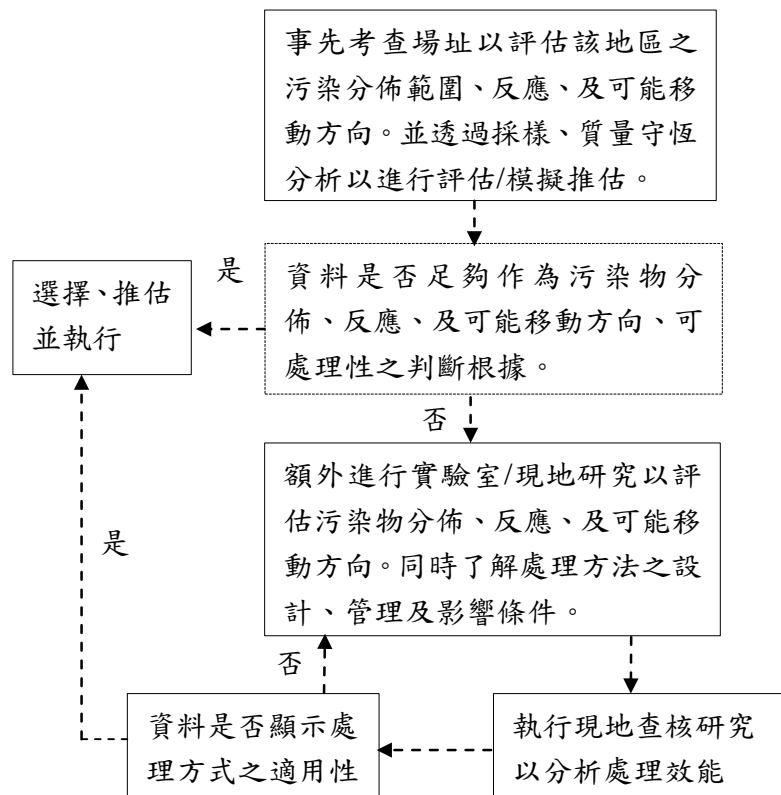
政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
USEPA	Horizontal Configuration of the Lasagnd Treatment Technology-User Guide	2002

12.2.1 整治系統設計與操作要點

在於目標場址施行電動力法之前，應先進行一系列之現地與實驗室篩選測試，以了解該場址是否適用於本技術。測試應包含項目如下：

- 一、 現地傳導性調查：整治前應就該場址之土壤傳導性加以調查，了解該場址是否埋有可能影響土壤傳導性及電壓坡(voltage gradient)之金屬性或絕緣物體。若存有具高傳導性之沉積物質，則將降低本技術之效能。
- 二、 孔隙水之 pH 值及傳導性：係因孔隙水之 pH 值具影響原子價、溶解度、及污染物離子之吸附性特質，整治前應就該場址孔隙水中 pH 值進行測量。同時，孔隙水傳導性量測為分析電動力整治法效能不可或缺之重要步驟。

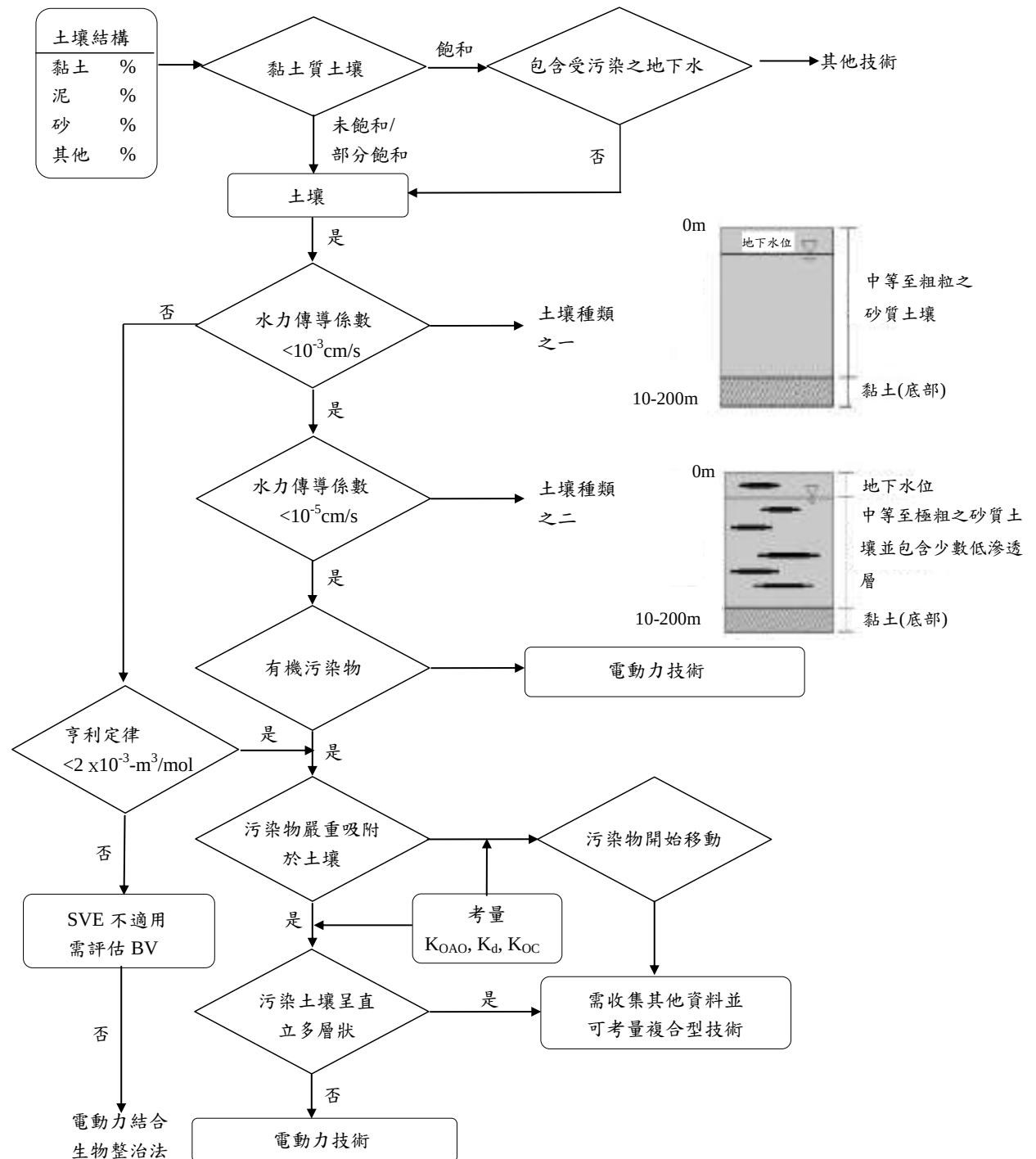
- 三、 孔隙水之化學分析：包括主要溶解之正負離子及污染物濃度等項目
- 四、 土壤之化學分析：包括緩衝能力、地球化學特性等項目。
- 五、 在選擇適用之整治技術時，必先了解場址之污染物特性以分析其效益，應先收集污染場址之污染分佈及特性等資料，並在整治前，評估該技術對於土壤及地下水污染之有效性，電動力法之評估流程，如圖 12.2.1-1 所示。



資料來源：Sang-Jae Han, Electrokinetic Remediation Strategy Considering Ground Strate: A Review. Geosciences Journal, Vol.6, No.1, p.57-75, March 2002.

圖 12.2.1-1 電動力法評估流程圖

因土壤之水力傳導係數會隨著土壤組成方式而有所變異，因此在進行適用性評估時，需將土壤組成之分析列為首要評估項目，並針對不同性質之土壤，判別電動力法是否適用，或需要結合其他技術(如生物整治)，加以選擇。評估程序如圖 12.2.1-2。



資料來源：Sang-Jae Han, Electrokinetic Remediation Strategy Considering Ground State: A Review. Geosciences Journal, Vol.6, No.1, p.57-75, March 2002.

圖 12.2.1-2 電動力法設計流程圖

以下進行電動力法之模場試驗、系統設備規劃及設計要點，及技術種類相關內容說明。

一、模場試驗

模場試驗目的為提供電動力法於抽除土壤中污染物所需的資料，收集所需之成本、作業、成果資料以作進一步估算。一般模場試驗之目的，包括：

- (一)進行處理可行性及成果研究之確認作業。
- (二)評估使用該技術達到整治目標之效能分析。
- (三)評估使用該技術於人為限制與非限制範圍內進行之控制影響力。
- (四)可能產生尾氣之調查。
- (五)監測電動力抽除工作對土壤中污染帶之影響。
- (六)辨別可能影響成效之場址特性。
- (七)根據場址特性進行成本分析。
- (八)估逸散氣體對工作人員之健康影響。
- (九)估算成本。

工作內容可分為

- (一)在最具場址特性的地點進行模場試驗，該地點僅代表場址的一小區域，並可連續性的操作不被中斷。模場試驗若未涵蓋整個污染帶，應擇污染帶側面的地區進行試驗，且未來不會再被污染。
- (二)設置一組測試電場以將目標污染帶包圍，放置電極所設置的井必須使用耐熱之絕緣材質如 PVC 或 CPVC 等。而電極之材料則屬石墨效果較佳，因其傳導性較高，足以在電極斷口(electro fracture)及周圍土壤之間製造出較大的反差，因此電力可以僅藉由電極斷口被傳導而不受到干擾。
- (三)電極間距將會影響電動力法的效能及處理速度的快慢，係因處理速度會受到電場強弱的影響，而電場強弱又與電極間距息息相關。一般而言，於設定電場強弱時一開始會以不超過 50V/m 為原則，隨後由於電極將隨著時間增長而溫度增高，因此需降低電壓以調整電場強度。而電極間距的設定應將系統可承受之電壓量納入考

量。

二、系統設備規劃及設計要點

在電動力法之整治過程中，傳輸、吸附、沉降及溶解等反應將影響整治效果，通常為獲取有效與可靠之整治成效，電動力法應用於土壤整治之操作，通常採穩態(steady state)之操作條件。研究指出，影響電動力法設計之因子不少，包括操作過程電極所產生之熱與氣泡、污染物於土壤表面之吸附與釋出等，因此，如何降低電動力法操作過程所產生之極化現象，與控制 pH 值，顯得相當重要。通常，對於陰極處的 pH 值控制，可藉由添加低濃度鹽酸或乙酸達成；而陽極處的 pH 值控制，可藉由添加氫氧化鈣來控制。

此外，因疏水性有機污染物之低溶解度特性，電動力法之處理效果有限，即便為相對溶解度較高之有機污染物，將其自土壤中脫附則仍有一定程度之困難度，若僅單獨以電動力技術處理，並無法達到移除之目的，因此需以提升厭水性有機污染物之水溶解度為優先考量。由於界面活性劑對於厭水性有機物具有高溶解度特性，部分研究將其作為電動力法之操作流質應用於有機物之移除，處理效果明顯提升。目前已應用於含氯有機物與苯環有機物(BTEX)之土壤污染整治。

三、技術種類

本法因特性與一般常見整治方式不同，技術較為創新，迄今尚未廣泛被使用，且經常需搭配其他整治技術，如結合生物整治、氧化、氣體抽除等技術。目前已知可使用電動力整治有機污染物技術如下：

(一)ELECTRO-KLEAN 電動分離法

本技術利用電動力原理移除或捕捉存在於非飽和性砂質層、砂質礫土層、黏土層、或沉積物中之重金屬、放射性原子、及特定有機污染物。本技術同樣使用正負電極將污染帶包圍並導入直流電，過程中可加入適量酸性溶液，以加速電解反應。當污染物開始往電極方向移動時，便使之自土壤顆粒脫附，分離出來之污染物將集中於電極附近，並可進行後續處理程序。本技術可將污染濃度降至其溶解度可允許之範圍以下，但處理效率會因污染物

之特性、濃度、及土壤的緩衝度而有所不同。本技術針對濃度達 500 mg/kg 的酚，已被證實有 85-95 %之移除效率，對其他重金屬也有介於 75-95 %之移除效率。

(二) 電動力生物整治法

生物整治法是一種以自然程序來清除環境中有害化學物質的方法。本技術透過電動力法以活化土壤中暫停活動的微生物族群，促進微生物分解土壤中有機污染物，且過程中不需額外添加其他微生物。透過電動力技術可使土壤中的水分均勻流動，並將營養成分均勻分佈於土壤之中，更可減少額外成本支出。本技術適用於砂質層、砂質粉土層及砂石黏土層。因自然界中的微生物族群多存在於有機污染物周圍，但除非有足夠的營養可供微生物族群生長，並分解這些有機物，否則複合有機物(complex organic compound)並不被視為微生物族群成長之能量來源。因此，透過電場的設置，將可促使可溶性有機物的移動並將微生物所需的營養成分帶至污染物(如碳氫化合物)所存在的區域。

須注意的是，本技術並無額外添加其他微生物族群，因此對於高濃度之污染帶其整治效率將有一定限度。且特定有機污染物之組合所產生之生成物也可能會毒害微生物並終止整治工作。

(三) 電動化學自然氧化法(electrochemical geooxidation, ECGO)

本專利技術由德國 ManTech 公司所建立，用於整治無機化合物及有機化合物污染之土壤與地下水。其原理係利用電動力產生之電流，以創造適合氧化還原反應發生之環境，並促使有機成分發生礦化作用，或固定無機成分。ECGO 技術仰賴於土壤或岩石中自然存在導電特性，以製造極化現象，該類土壤組成通常含有鐵、鎂、鈦，及碳元素。自然存在之重金屬雜質，亦可催化還原反應之發生。ECGO 整治所需時程約 60-120 天，但確切所需時間則會因場址狀況、適用性及目標成分而有所差異。

(四) 電力化學氧化法整治法

本技術由美國加州丁戴爾空軍基地之阿姆斯壯實驗室所研

發之地下水整治技術，其原理係將具滲透性之電力化學氧化劑(PEOR)置入含水層之機械設備中，於污染帶移經範圍內並設置一組由多孔碳電極和鐵基為基底(iron-based)之催化劑所構成之獨立阻絕系統，當地下水流經該阻絕系統時，即形成過氧化氫，經由鐵基的催化而分解為可氧化有機污染物之氫氧自由基。本技術結合氧化技術及電子化學法的優點，以控制氧化劑之製造速率。

(五)電子化學離子交換技術 (Electrochemical Ion Exchange)

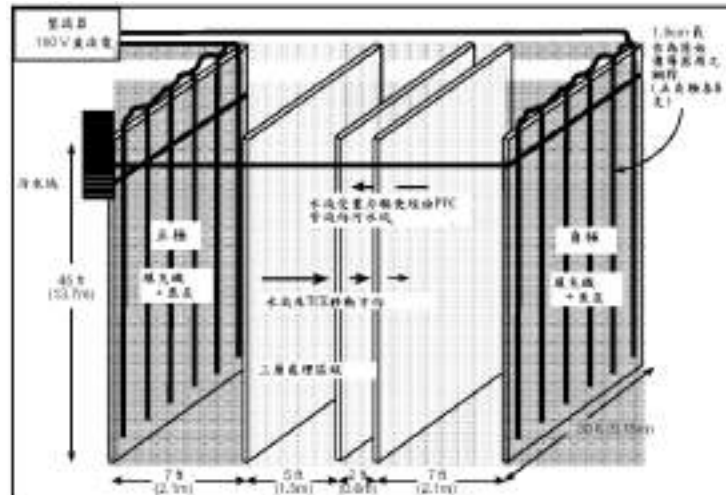
Geokinetics 公司結合電動力法及地面電子化學離子交換器之原理以移除環境中的離子性污染。當離子性污染源透過電動力法被電極捕捉後，該污染物將被抽取至地面，經過選擇性處理、復原後，再將可重新使用之污染物重新注入。要處理濃度較低的污染物，其成本效益較低，EIX 技術可協助將污染物中的重金屬、鹵化物及特定有機物隔離並復原。一般而言，本技術可將抽出的污染物濃度由 10-500 mg/kg 降至 1 mg/kg 以下，其整治所需費用介於每立方公尺 200-325 美元之間。

(六)Lasagna 技術

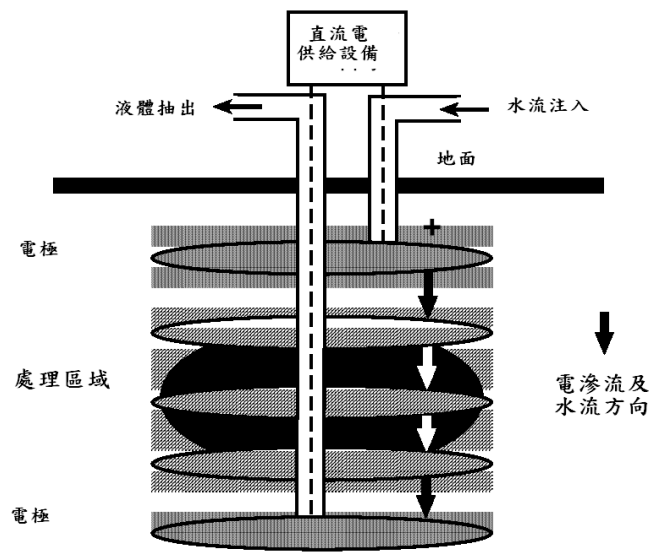
本技術是由美國環保署與其他私人機構所合作開發之整治技術。Lasagna 的名稱取自於其多層次處理面之特徵，本技術結合電滲透、生物降解、及物理化學等原理，處理受無機物及有機物污染之土壤。當直流電被導入電極層時，上方的電極將呈正極而下方則呈負極。當該電場被導入土壤中時，水、離子、其他存在於土壤中之污染物，將穩定地透過電滲透流而移動。這將促使存在於自然水流外之污染物，得以被收集並自負極端抽出。在污染物移動的過程中，將會經過處理層而被降解。該原理最適用於促使位於低滲透層區之污染物，透過電動力之方式被移動，如圖 12.2.1-3 所示。

一般而言，直式僅適用於深度 15 公尺以內之淺層污染，而直式則可處理較深層之污染區域。本技術優點在於可處理水力傳導係數小於 10^{-5} cm/s 之低滲透率土壤，且抽取出之污染物可於地面處理，設置快速，低噪音且整治時間較短等。

(a)



(b)



USEPA, Horizontal Configuration of the Lasagna Treatment Technology – User Guide, p.2, June 2002.

(a)直式 (b)橫式

圖 12.2.1-3 Lasagna 技術原理示意圖

12.2.2 整治系統單元

一、 現地電動力法所需之主要系統如下：

- (一)程序控制拖車 (process control trailer)
- (二)電力供給設備 (power supplies)
- (三)電極井 (electrode wells)

(四)化學品儲槽 (chemical storage tanks)

(五)流體控制與配電系統 (fluid control and distribution system)

二、 現地電動力技術整治系統所需之主要設備如下：

(一)電極配置

(二)電力分配與控制系統

(三)自動程序監測設備

(四)管線配置(可將調整用化學品配給至所需之電極井中，並做抽取污染源時使用)

(五)pH 值控制系統

(六)尾氣抽除及處理系統

(七)可處理自電極井產生之氣體設備

(八)其他可支援系統運作之設備

12.2.3 整治系統監測

採用電動力法時，應定時進行整治情形之監測，其目的在於確認整治活動是否順利進行，並可作為調整與維護整治系統之依據。主要的監測對象包括電極井中之下列參數：

一、電位與電流

藉由轉換多接頭隔離變壓器之間的連結，調整系統之電位值使其在電極接頭處之加熱問題最小，且效率最高。在輸出端持續監測電位以確認電力供給之運作正常，接著透過電腦監測系統定時監測電位、電流、溫度等主要參數。當使用定電位供電設計時，電流(Adc)會隨整治層中的電阻而有劇烈變化，而電阻的變化主要發生在供電系統的電纜線與電極斷口(electrode fracture)之接觸面上。在整治層中之電流下降通常代表連結狀態不佳，而溫度常不可避免的隨電流的下降而升高。在溫度升高至沸點之前，偵測到不良的連結狀態，可及時重新建立連結以避免不可挽回的損壞。

二、溫度

監測溫度亦可用來評估電力導線管與電極斷口間之連結狀況。當溫度急遽上升時，表示連結狀態正在惡化，亦即電阻正在增加。若溫度升至沸點，重新建立連結將會變的非常困難，因此應持續監測溫度以避免這種狀況的發生。而溫度監測點應該盡可能靠近電極井中電力導線管與電極之接觸面。

三、液位(fluid level)

在所有的電極井監測液位，可協助確認是否需要添加或移除液體，並且檢視整治系統的運作情形。若沒有用唧筒抽吸累積於陰極井之液體，水頭會逐漸產生並對抗電動力之傳輸，其結果為傳輸停止或是整治效率降低；此外，陽極井之液位若升至靜力水面，亦會導致地下水丘(groundwater mound)的形成與污染物橫向遷移出整治層。因此，監測液位可預先偵測水位變化，以避免發生上述的問題。

12.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

本法對於環境之影響，如結合土壤間隙蒸氣抽除法，應注意尾氣處理成效，如尾氣處理設置設計不當，可能會造成空氣污染。此外，本法亦可能會產生受污染地下水，亦應妥善處理後，再排放。

二、潛在之危害

彙整如表 12.2.4-1。

表 12.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	某些反應性氧化劑與污染物不相容可能會造成火災、系統過度加壓、環境排放或爆炸	氧化劑與污染物之不相容性	- 加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力。 - 使用適當的液體輸送設備 - 使用自動警報系統。 - 執行適當的化學品貯存與運作程序。 - 提供貯存有害化學品的桶槽適當的圍堵設施。
	不適當的運作化學品可能會導致系統產生高熱或高壓，	化學反應	加強人員貯存與運作化學品程序的訓練與緊急應變的能力。

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
	並造成不可控制的化學反應、火災或爆炸		• 監測氧化劑注入過程與特定時間點的系統溫度。 • 提供緊急沖眼/沖洗器。
	當操作人員或設備破壞電線或於潮濕的區域接觸電力設備可能會造成感電	感電	• 加強人員貯存與運作化學品程序的訓練與緊急應變的能力。 • 使用加裝防止感電設備的電力系統。 • 相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行。
化學性風險	工作人員可能接觸到反應性的化學氧化劑。不適當的貯存方式可能會產生衍生危險的化學反應或於貯存區域產生高熱/高壓甚至火災、爆炸。工作人員之皮膚與呼吸系統可能與化學氧化劑或其副產品直接接觸。	化學氧化劑之使用、貯存、接觸與相容性	• 提供化學品儲槽與管線適當的標示、分隔與防溢裝置。 • 建立伙伴制度(buddy system)。 • 確保工作人員佩帶適當的個人防護具。 • 加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力。 • 預先參考物質安全資料表(MSDS)並確認氧化劑的相容性。 • 使系統有足夠的通風。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 7 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

12.3 成本及期程評估

一、整治成本分析

電動力法之成本需視場址之水文及化學特性而定，影響整治成本之主要因素如下：

- (一) 目標污染物之濃度
- (二) 非目標性離子濃度或孔隙水之傳導力
- (三) 土壤特性及含水量
- (四) 污染物深度
- (五) 殘餘廢物處理
- (六) 準備事項
- (七) 電力使用與工資

其中總電力耗損將會導致成本增加，其費用會根據整治時間之長短而有所不同。整治成本分析應包含以下等項目：

- (一) 電力耗損費用
- (二) 電極之製造及設置費用

(三) 輔助藥劑費用

(四) 後續處理費用

(五) 固定處理費用

二、整治期程

污染帶的大小與深度將影響現地電動力法之整治期程，一般而言，土壤孔隙水中溶解成分之移動速率約為 2.5 cm/day，以電極間隔 2-3 m 而言，約需費時 100 天左右。

十三、植物整治法 (Phytoremediation)

13.1 整治技術簡介

13.1.1 原理

植物整治法(phytoremediation)技術係利用綠色植物根部之新陳代謝活動，以達到固定、降解、萃取和揮發土壤環境中的污染物。本整治技術可將土壤中的污染物轉化成毒性較小或無毒性的物質，或直接去除的物質型態，最終可將污染物完全移除，其優點在於不會造成二次土壤及地下水的污染，同時也達到淨化空氣、水體及綠化環境的目的。植物整治法亦稱為綠色整治或綠色植物整治法。

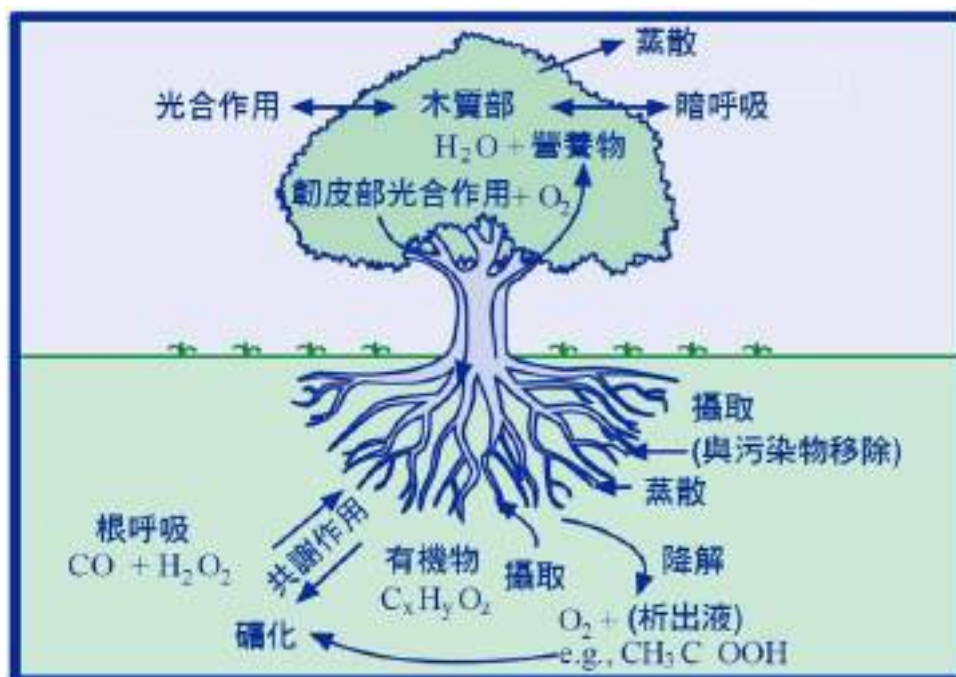
利用植物整治法一般可提供兩種功能：一為污染源控制，可避免污染物溶解於地下水中而流動到其他區域。二為污染團的捕捉，植物的根系可將污染團侷限於一定的範圍內，避免污染擴散而造成對受體的影響(New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL, 2005 台美講習會)。

植物整治法適用於被金屬或有機污染物污染之土壤、地下水和地面水體。植物整治法係利用植物將土壤中污染物予以吸收、固定、轉化或累積，同時亦提供有利於生物整治的條件，以促進土壤中的微生物，將污染物予以降解或無害化。研究顯示，植物通常經由直接及間接的方式來移除地下環境中的污染物。一般而言，污染物進入植物組織的途徑，可以經由植物的吸附或吸收作用，達到移除部分的土壤污染物質。此外，土壤中的污染物也可經由植物的代謝過程而被轉化或礦化成低毒性或無毒性的物質。

植物整治處理機制，如圖 13.1.1-1，由於植物根部組織提供大量之比表面積，故對土壤中污染物之汲取大多由此區域開始。因此，植物可經由根部組織來降解土壤中有機污染物及減緩其移動，亦可濃縮土壤中的重金屬污染物至植物的莖、葉各部，進而達到去除污染物之目的。植物本身可行

多種新陳代謝作用，亦具有相當顯著之吸附容量，及與土壤間具有離子選擇性之傳輸系統，因此可調整適應於環境中重金屬及有機污染物之存在。植物整治計畫的設計及執行基本步驟：

- 一、 污染場址特性的檢測，包括檢測土壤及水體的化學狀態、環境氣候和污染物的擴散。
- 二、 污染場址整治力的研究，以決定污染場址的整治率和適當植物品種的選擇、植物種植的密度及位置等。
- 三、 初步的現場測試工作，在於監測現場的結果及設計參數的推估。
- 四、 全區域整治計畫的執行。
- 五、 影響植物整治能力的物質特性。



資料來源：經濟部工業局，鋼鐵冶煉業土壤地下水污染預防及整治技術手冊，p.150，民國 95 年 12 月。

圖 13.1.1-1 植物整治法機制示意圖

13.1.2 適用條件

當土壤污染物被限制於地表下 3 英尺(約 1 公尺)處或地下水水位面下 1 英尺(約 30 公分)處，採行植物整治法及植物性相關生物整治技術，可達到最大處理成效。再者，這些土壤整治技術可適用於大範圍、中或低土壤污

染程度之區域，以及大量低污染濃度地下水之區域。適用於植物整治法的場址型態，如：輸油管、事業及鄉鎮市垃圾掩埋場、農業區域、軍事基地、燃料儲槽、加油站、污水處理廠及礦場等。使用該整治技術之優缺點彙整如表 13.1.2-1。

由植物整治法的使用及評估結果指出，植物對於下列多種的污染物型態具有其潛在的增強整治能力：

- 一、 石油碳氫化合物
- 二、 苯、甲苯、乙苯、二甲苯(BTEX)
- 三、 多環芳香烴碳氫化合物
- 四、 多氯聯苯
- 五、 三氯乙烯及其他含氯的溶劑
- 六、 軍火廢棄物及炸藥
- 七、 重金屬
- 八、 殺蟲劑類廢物
- 九、 核種(radiounclides)
- 十、 營養鹽廢棄物(nutrient waste)，例如磷和氮鹽類。

表 13.1.2-1 植物整治法的優缺點

優點	缺點
• 相對於傳統方式，成本較低 • 衍生廢棄物量小 • 增加環境的美觀 • 棲息地的建立-生物多樣性 • 綠色技術 • 更高的大眾接受度 • 減少粉塵的溢散 • 減少土壤的暴露風險 • 低破壞性的衝擊	• 整治期程較長 • 場址整治受限於植物根部深度 • 植物毒性(phytotoxicity)限制 • 污染物的性質一般都不清楚 • 氣候的變化 • 季節性的效果 • 潛在的污染物轉化 • 屬較大規模的整治技術

資料來源：USEPA, Phytoremediation Field Studies Database for Chlorinated Solvents, Pesticides, Explosives, and Metals, p.3, 2004。

13.2 整治系統操作與設計

有關國外針對植物整治已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表

13.2-1。

表 13.2-1 國外植物整治相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
GWRTAC	Phytoremediation	1998
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Decision Trce-phytoremediation	1999
USEPA	Introduction to Phytoremediation	2000
ITRC	Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document	2001

13.2.1 整治系統設計與操作要點

本節說明植物整治技術種類，並提供場址特性篩選、植物選取建議、及應注意之場址農業行為，最後為整治操作及維護要點。

一、技術種類

(一)植物降解整治技術(Phytodegradation)

植物降解整治技術可用於地表水體，通常應用於溼地及池塘類的區域。此外，植物降解整治法亦可使用於地下水的整治，當整治場址的地下水位可接觸於深根性植物(如白楊類的植物)的根部。同時植物降解整治技術亦可使用於非現地(外地)的場址，其方法則將地下水抽到人工溼地，而該溼地則含有適當處理能力的植物。植物會將其中的有機污染物予以吸收，然後降解成低毒性或無毒性之物質。植物降解整治技術的處理機制如圖 13.2.1-1。

(二)植物吸收整治技術(phytoextraction)

植物吸收整治技術是植物直接將金屬類和某些有機污染物(例如石油碳氫化合物)直接吸收進入到植物的組織中。植物吸收整治計畫的執行，包括種植 1 種或多種對於污染物具有高度累積性的植物(hyperaccumulator plant)。經由初步現場實驗，可以提供對本整治技術一些適當的修正方案，例如使用的肥料種類或灌溉的供水量等，均為確保植物在場址中可順利地生長。同時，經由初步現場實驗得知，植種的使用週期止於該植物的收成期之前。一

一般而言，收成期之後，該植種會被移除而植入新的植種。雖然，現場實驗會集中於單一的植物的除污成效，但其他的植種也會陸續的被使用於污染場址的整治實驗，以達到多種污染物移除的目的。植物吸收整治技術的處理機制，如圖 13.2.1-2 所示。適用於植物吸收整治技術的植物特質：

1. 對於高污染的污染物的累積力及容忍力的考量；
2. 植物的高速生長率；
3. 高生物生產量。

二、 場址特性篩選

一個完整的現場分析包含了對於污染物特性、地質現況、水文特性及土壤調查。一般而言，場址基線資料及植物毒性(phytotoxic)狀況的界定、污染物潛在的移除和處理目標的達成，都是必要的現場分析。美國州際環境技術法規委員會(ITRC)於 1999 及 2001 制定及執行樹狀決策文件(decision tree document)有助於在潛在植物整治場址的評估，其中相關的重要考量因素，包括：污染物種類、場址範圍及活動、地質及水文狀況、土壤形式、氣候環境和時間限制。

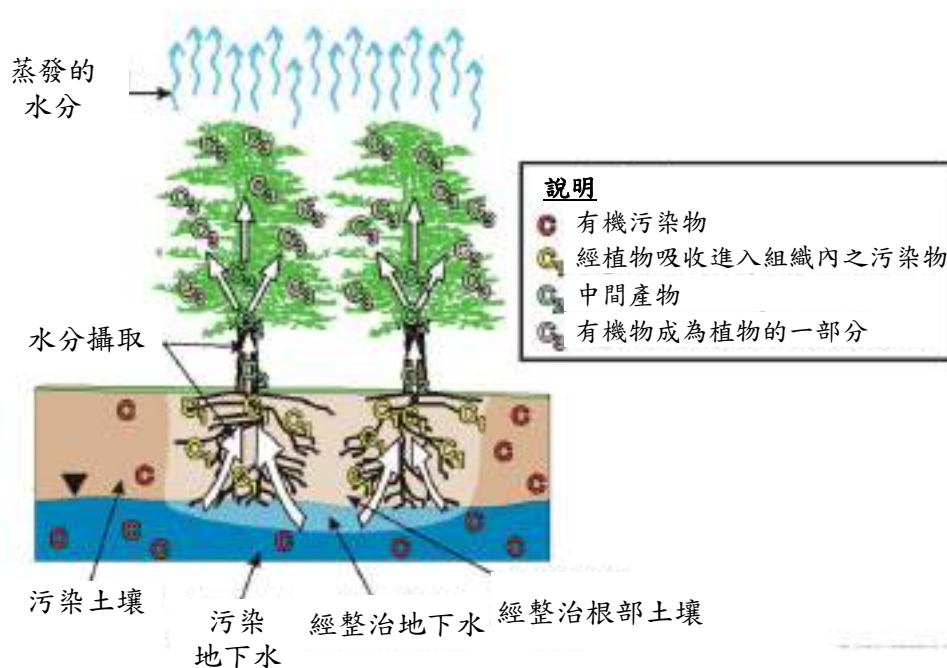


圖 13.2.1-1 植物降解整治技術的處理機制示意圖(有機物)

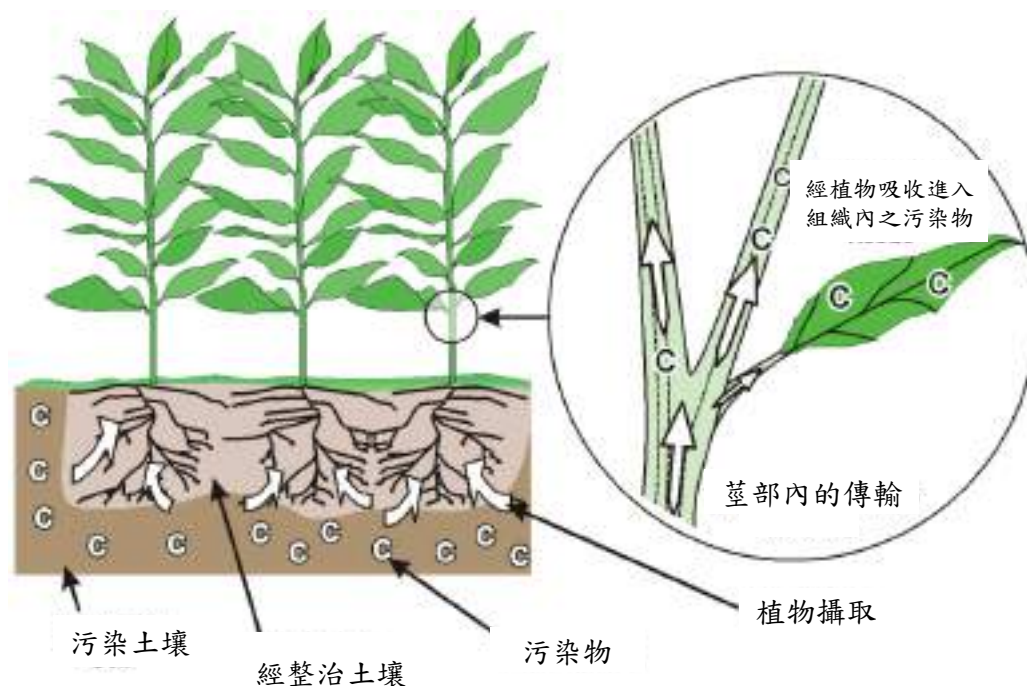


圖 13.2.1-2 植物吸收整治技術的處理機制示意圖(無機物)

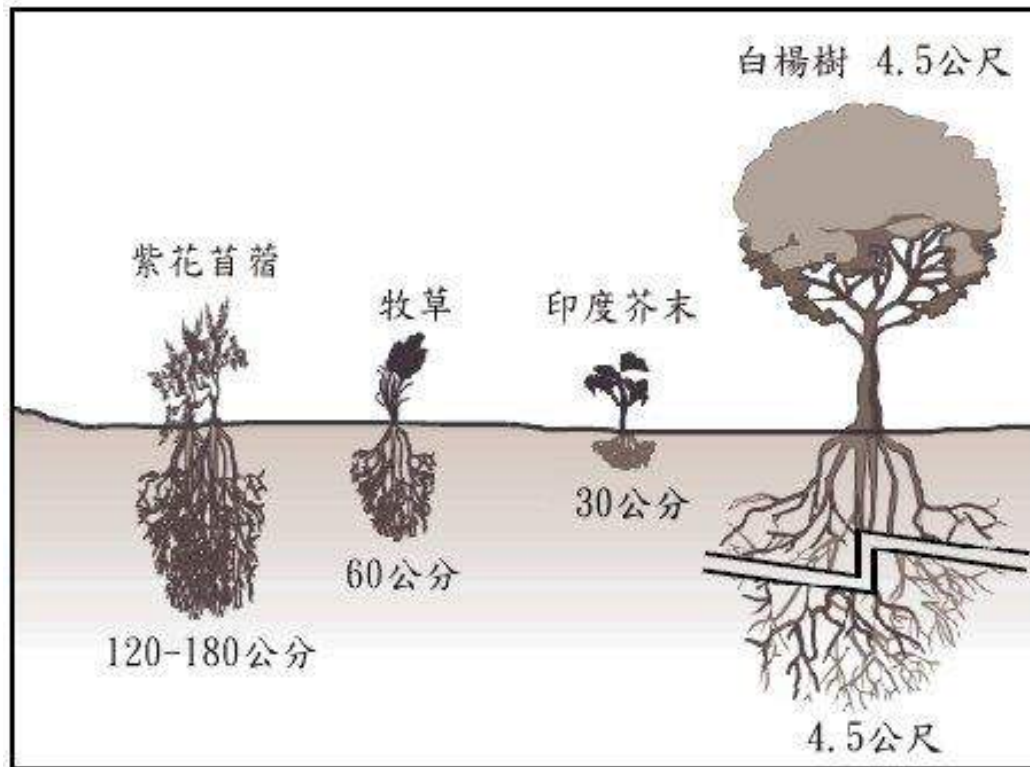
三、 植物選取

植物整治法設計場址的植物考量，會根據現場的污染物種類、場址現況、整治目標與污染場址的使用狀況等來決定。大致而言，植物整治法的現址植物考量包括了植物品種的選擇、植物整治能力的評估、植栽密度及種植形式等。

(一)植物品種的選擇

植物整治法的植物選擇是根據不同的技術使用及污染物的特性而定。例如，植物轉化整治法(phytotransformation)對於有機污染物的設計規範，在於選用的植物必須具備成長快速與高密度品種，且具有易栽種與易維持的特性，水則提供大量蒸氣，使污染物轉化成非毒性或低毒性的產品。深根吸水植物(phreatophyte)，例如，混種白楊(hybrid poplar)、楊柳(willow)、楊木(cotton wood)和白楊(aspen)等，通常會被廣泛的使用於溫帶的氣候地區，因為其具有快速的成長速度、其根可深及地下水水位面、具高蒸發率

和此品種存在於大多數的國家之中。土壤植物整治法的植物選擇詳細的設計、評估程序可參考圖 13.2.1-3。



資料來源：USEPA, Introduction to phytoremediation, EPA/600/R-99/1011,2000.

圖 13.2.1-3 不同植物的根部深度圖

(二)植物整治能力(treatability)

為了使植物整治法達到預期的處理成效，當在設計與執行該項整治計畫之前，應對植物整治能力進行相關研究。植物整治能力的研究結果，可以提供各類污染物對於植物的毒性及其轉化的相關資料。基本上，污染物對不同種類植物間之毒性及轉化速率有顯著的差異，其中以硼、鋅、氨氮類、重金屬及鹽類等對於植物的毒性特別明顯。因此，當文獻資料不夠備齊時，常需藉由實驗室或溫室實驗來評估植物之植物整治能力。一般而言，連續性設計資料的取得，需透過傳統的研究，從水栽研究(hydroponic studies)到小型盆栽研究(small pot studies)，以及進一步的現地溫室與小區域範圍(15m×15m)研究等。在這些實驗與研究中，應就

不同污染物濃度對植物之毒性進行分析，同時，對於被收成的植物組織，則進行其代謝物或母體化合物(parent compound)分析。

植物整治能力的實驗室研究，應評估在植物系統中的污染事件，例如，潛在揮發性化合物(三氯乙烯和苯類等)可經由植物本身蒸散至大氣之中，形成空氣污染物，因此在實驗室研究部分，也需對於這些空氣污染物進行實驗分析。

(三)植物種植密度及種植形式

種植密度是根據處理標的。利用混種白楊樹(hybrid poplar trees)作為植物性過濾帶(riparian zone buffer strips)、垃圾掩埋場的覆土層及有害事業廢棄物污染場址。例如，就混種白楊樹的種植密度而言，傳統樹木的種植方式，每英畝地大約種植 1,000-2,000 株的樹木，而種植深度大約是 30-45 公分，若改以種植在壕溝中(trenched rows)，則種植深度大約 30-180 公分。就壕溝式種植模式而言，樹與樹之間會保持約 60 公分的間距，而溝槽與溝槽之間會保持在 3 公尺的間距。若經過第 1 個 6 年的種植期間，雜種白楊樹將可順利地成長，往後每隔 6 年種植輪替之後，該等樹木將被修剪或砍伐，而被修剪或砍伐下的枝幹可作為木材燃料或是造紙用的紙漿，新生的枝幹將自被砍伐的部分增生。一般而言，雜種白楊樹(例如 *Populus deltoides* x *nigra* DN-34)之生命週期約 30 年，這足以處理現地的植物整治計畫。

四、場址農業行為

植物整治法中現址農業上的考量包括了場址的灌溉、農業輸入(agronomic inputs)、植物的年齡及其新陳代謝狀態等。

(一)場址的灌溉

通常在實施陸地型的植物整治法，計畫中應考量灌溉成本，植物灌溉水量大約為每年 25-50 公分高。灌溉系統係為確保植物在旱季時，依然有充足的供水；因此，需以水力數學模式推估灌溉系統之地下水滲透率。植物整治法亦應考量操作維護成本，包括：割草、再植、修剪、收割、監測污染物和施肥等之支出。

(二) 農業行為

農業輸入包括提供適當的營養源給植被及其根球菌，該等營養源包括含氮、磷、鉀之混合性商業用肥料、碳的添加劑及土壤調節劑(例如，堆肥或生活污水)。使用於石化場址中細根性植物的肥料，這種肥料成份比例為每年每英畝 22.68 公斤的磷肥及 45.36 公斤的氮肥；再者另一項對於植被及細根生長有著密切關係的因素，是場址中土壤的含水量是否充足。有時，當使用石灰添加劑來調整土壤中的 pH 值，就標準的現地土壤農業分析中 pH 調整是一個必要性的評估。

(三) 植物年齡及其新陳代謝狀態

就植物的新陳代謝狀況而言，水份、日照、溫度、休眠及結霜日數都是重要的決定因素，而其中又以結霜日數的長短對於植物新陳代謝影響最大。植物年齡決定了植物的尺寸和全部的葉部表區域，而植物的蒸散率取決於前述的兩項狀況。例如，白楊樹的蒸散率在頭兩年大約是每天 6~37.8 公升，但在經過 10 年之後，其蒸散率會增加至每天 49~756 公升。再者，植物齡亦決定了污染容忍力。例如，Perelta-Videa 研究指出，金屬(鎘、銅和鋅等)的植物毒性會隨著紫花苜蓿(alfalfa)類植物的植物齡而被降解。

五、 整治操作及維護要點

植物整治法處理系統必須建立定期監測及檢定系統，其功能在於監測控制的操作效率，有助於達成整治場址的成效。現場監測系統有助於調整連續操作與維護於最有效率的方向。

(一) 整治現址的操作及維護要點

現場維護工作係為確保植物能健康生長，雜草控制和灌溉系統是兩項最重要的工作。種植作物的經常性輪替，則有助於維持生物量的增加，且會有效地減少特殊性雜草、掠食者及疾病在場址中的出現。雜草的控制技術可分為機械方式(植種培育)或化學方式(除草劑)。一般而言，灌溉水的用途在於補充植物因蒸發及蒸散作用所損失的水份，因此場址的現地灌溉，對於維持植物整

治法的成敗有其關鍵性。噴灑式的澆灌法有助於降低水份的蒸發，提高灌溉效率及降低成本。就長期溼地系統的維護需要而言，現場監測系統包括植被分布監測、水位監測與植被及污染物移除監測等。

(二)植物整治衍生廢棄物處理

在植物整治系統之中，污染物會累積在植物中，植物曾經收割，進行後續處理。因含有污染物的植物進入食物鏈，且被昆蟲或動物所攝取，則會產生污染擴散的危害，因此，整治場址植物在被收割之前，應避免野生動物或家畜吃到，且定期檢測植物體中是否含有危害物質是相當重要的。若檢測結果危害物質並不存在植物體中，這些植物可進行堆肥或使用於整治場址的土壤中；當植物體中檢測出污染物或被認定有害之虞，應依廢棄物清理法相關規定進行清理。

13.2.2 整治系統單元

13.2.3 整治系統監測

在進行短期植物整治法成效評估時，應考量污染物濃度及降解產物，並進行監測，監測項目包括土壤、地下水、植物根部及蒸氣的蒸散量。嚴密與系統性的處理成效評估，有助於調整系統的處理能力，以達到整治目標。由於植物整治法是屬於較新穎的處理技術，且尚未建立標準作業規範，因此宜依現場情形規劃整治方案。於完成階段性植物整治法的整治目標後，應建立長期監測系統，以持續觀察植物整治法對於長期環境生態系統的影響。

13.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

種植植物整治法之植物所產生的受污染土壤不論是在種植過程或是在場址維護時，可能會有高度的風險存在，因為潛在與人體的皮膚接觸或吸入的可能性，以及污染物因自然天候狀況造成污染物流至地

表水或其他週界之敏感環境受體。藉由適當之暫存場設置與設計，可以減低植栽對於環境的衝擊。

二、潛在之危害

本指引彙整潛在之危害如表 13.2.4-1。

表 13.2.4-1 潛在之危害

潛 在 風 險	可能遭遇時機	可 能 暴 露 風 險	保護措施及個人防護裝備
物 理 性 風 險	在種植植物整治法植物過程中，工作人員可能因重型機具(挖土機、吊車)而受傷或死亡。	機 具 設 備 危 害	於重型機具上安裝備用警報器以警告工作人員。 當靠近機具時，確保於機具前方或是操作者視線範圍內移動。 確保工作人員配帶聽力保護具。 加強相關人員有關潛在危害以及操作重型機具之相關安全訓練。
	當於不穩定之土地操作重型機具，可能會造成地面沉陷，並因此造成操作者受傷。	不 穩 定 的 土 壤 狀 況	預先評估場址之土壤狀況。 避免工作人員進入不穩定的開挖環境中。 僅容許受過良好訓練之人員可操作機具。

表 13.2.4-1 潛在之危害(續)

潛 在 風 險	可能遭遇時機	可 能 暴 露 風 險	保護措施及個人防護裝備
物 理 性 風 險	工作人員可能受到直接或非直接的陽光及其紫外線之曝曬，可能導致曬傷及皮膚的損傷。過熱及過濕的環境可能造成熱耗損、中暑。	紫 外 線 曝 曬	穿著帽子、長袖上衣、長褲以及塗抹防曬油。 工作人員應禁止在動力機械附近穿著寬鬆衣物。 所有紫外線之皮膚防護霜必須預先核准。
	工作人員可能與電相關之設備接觸，暴露於危險造成嚴重傷亡。	觸 電	於設計階段確認上方電纜位置。 確保所有挖土器具及植物離電纜至少 3 公尺遠。
化 學 性 風 險	在種植過程中，工作人員之皮膚與呼吸系統可能暴露於有害化學殺蟲劑、肥料、含揮發性有機物或粉塵的環境之中。	污 染 物	確保工作人員使用個人防護裝備，如口罩或呼吸器。 分析工作性質和與污染物接觸之可能性，以便決定個人防護裝備之選擇。 針對該危害物提供工作人員該污染物之訓練及危害控制。

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 17 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

13.3 成本及期程評估

一、整治成本分析

植物整治法之整治成本會因種植植物類別、數量及場址面積而調

整，不過一般而言其成本大都低於傳統整治技術。整治成本分析表格，如表 13.3-1。

二、整治期程

與其他傳統整治技術比較，植物整治法所需之整治期程較漫長，這也是該技術之缺點之一。該整治期程會依植物整治法種類、種植植物選擇、植物類別、物種以及該植物之蒸騰散量及污染吸收率而有所差異。如以混種白楊樹(hybrid poplar trees)為舉例，其總整治期程需要約 30 年。

整治期程能以污染物吸收率計算公式而推算污染物預估之整治速度，如式 1：

$$U = (TSCF)(T)(C) \quad \text{式 1}$$

U ：污染物吸收率，單位： mg/day

$TSCF$ ：蒸發流濃度因子

T ：植物蒸發散量，單位： L/day

C ：土壤或地下水中水相濃度，單位： mg/L

一階動力常數(first order kinetics)可用於推測整治所需之時間，而污染吸收率應除與土壤剩餘之污染量，該運算公式如式 2：

$$K = U/M_0 \quad \text{式 2}$$

K ：吸收一階動力常數，單位： yr^{-1}

U ：污染物吸收率，單位： kg/yr

M_0 ：最初污染量，單位： kg

任何時期皆可使用式 3，進行污染物量的推估。

$$M = M_0 e^{-kt} \quad \text{式 3}$$

M ：剩餘污染量，單位： kg

T ：時間，單位： yr

計算運用以知整治技術之所需整治時間的運算公式如式 4：

$$t = -(\ln M/M_0)/k \quad \text{式 4}$$

t ：達到整治目標(action level)所需整治時間，單位：yr

M ：整治目標所允許之污染量，單位：kg

M_0 ：最初污染量，單位：kg

表 13.3-1 成本分析表格

成本分類	細分	成本(元)
不動成本		
1.資本成本	計畫/準備	
	場址作業	
	設備	
	結構	
	過程設備	
	開始及測試	
	其他資本成本	
	非過程設備	
	工程及管理輔助	
小計 \$：		
非固定成本		
2.運作及維修	勞工	
	物質	
	設施及燃料	
	效能測試/分析	
	其他直接成本	
小計 \$：		
3.其他技術成本	長期監測、法規監督、法律符合測試、分析	
	土壤、廢水、瓦礫之挖掘，收集及控制	
	殘餘處理	
小計：		
總計：		
總技術成本：		
整治面積：		
處理後之數量：		

資料來源：US DOD, In-Site Remediation of a TCE-Contaminated Aquifer Using a Short Rotation Woody Crop Ground Water Treatment System, October 1997.

十四、奈米科技處理法 (Nanotechnology)

14.1 整治技術簡介

14.1.1 原理

自 1990 年奈米科學技術誕生以來，至今奈米科技(nanotechnology)成了近 10 年來的新興科技領域；奈米科技已被公認是 21 世紀最重要的科技產業之一，代表了創造更好材料與產品之契機。在美國，奈米材料已廣泛運用在市場上，包括電腦、運動器材及醫療設備等；同時，奈米科技的運用亦涵蓋了環保技術領域，包括直接改善環境(污染整治及預防)及創造較清潔製程與環保產品。在我國，政府為積極推動奈米科技及產業的發展，於 2003 年至 2008 年 6 年間，成立國家型奈米科技計畫，總經費約 5,600 多萬元，執行 17 項分項計畫，旨在推動奈米研發及產業環境，以及應用奈米科技在環境保護工作。

近年來，美國已有使用奈米零價鐵(nanoscale zero-valent iron, NZVI)進行 DNAPL 污染整治的成功案例。然而，國際上奈米微粒的環境毒理及健康毒理資訊上不充分也未定論，世界各國法規建置亦付之厥如，此議題已逐漸受到重視。

一奈米相當於十的負九次方公尺(10^{-9} m)，小於人體頭髮直徑約十萬倍，小於紅血球一千倍，或一半 DNA 直徑的大小。奈米科技係指原子、分子或高分子等級(3 個空間維度中，至少有 1 個維度的長度是介於 1 至 100 奈米之間)之研究與技術發展。

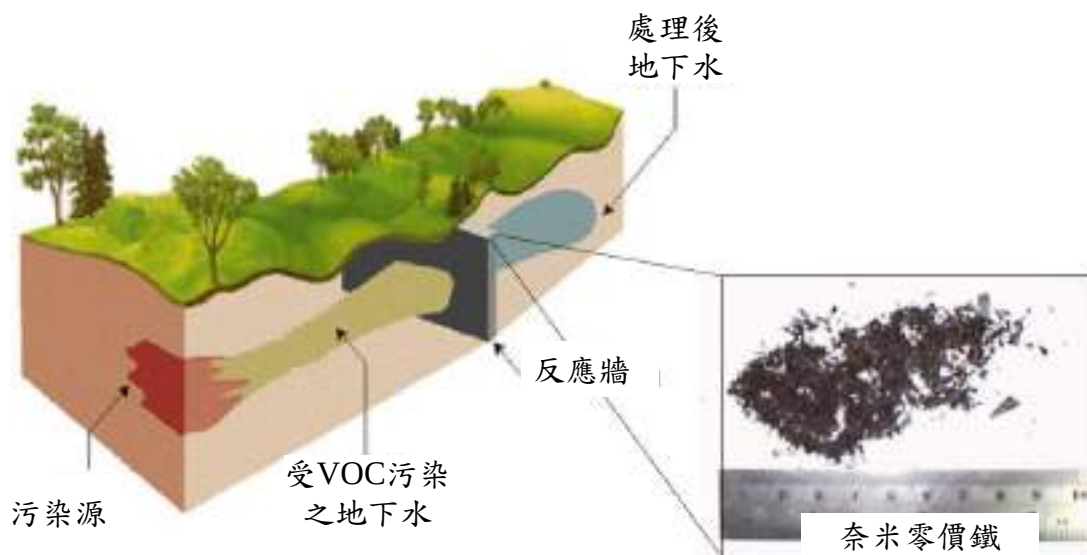
在目前 DNAPL 地下水污染整治的領域中，奈米科技之主要應用，係結合原有零價鐵還原脫氯技術，藉由將零價鐵的顆粒奈米化，以強化零價鐵脫除地下水含氯有機物之能力，並增進反應速率。利用奈米金屬微粒於現地處理受污染地下水的型式，一般有反應牆及直接注入等 2 種，分別如圖 14.1.1-1 與圖 14.1.1-2。

合成奈米零價鐵最普遍的方法，係藉著強還原劑硼氫化鈉(NaBH_4) (0.2M)與氯化鐵($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (0.05M)以體積 1:1 混合發生氧化還原反應，使三價鐵還原成奈米鐵金屬，其反應式如下：



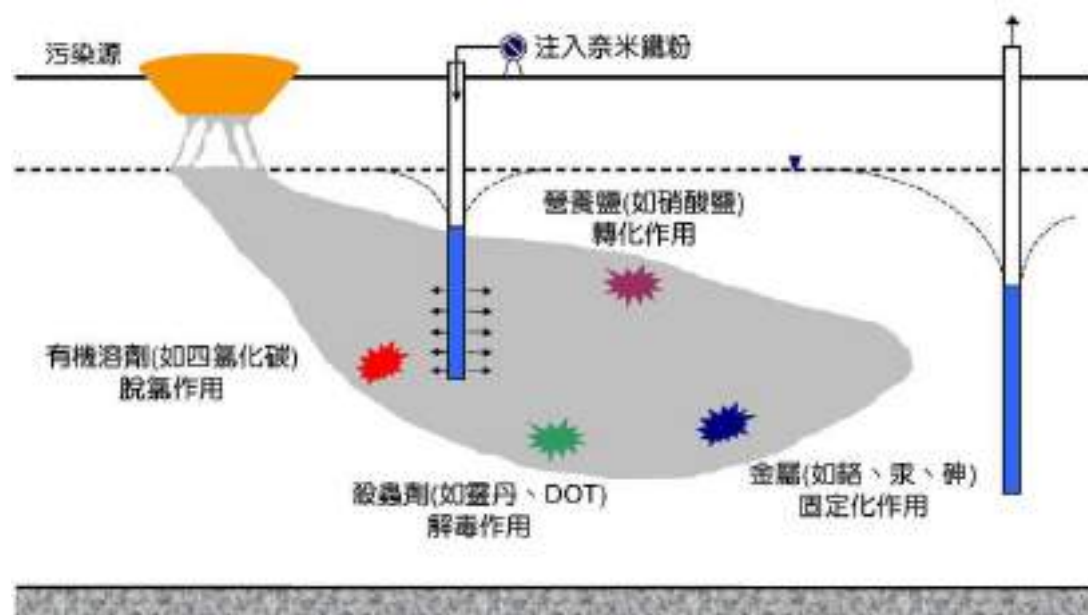
為了加速合成奈米零價鐵之反應速率和確保鐵結晶能一致性的形成，所添加的硼酸氫鹽還原劑必須比氯化鐵相對多量。合成奈米零價鐵不侷限使用三價鐵，以二價鐵也可以配置合成；奈米零價鐵複合金屬也是利用氧化還原原理，將複合金屬離子藉著鐵提供電子使其在金屬表面附著，如醋酸鈀(palladium acetate)還原吸附在鐵表面上。利用相同的合成原理可順利合成 Fe/Ag、Fe/Pt、Fe/Ni、Fe/Co、Fe/Cu 等複合金屬。(如 $\text{Pd}^{2+} + \text{Fe}^0 \rightarrow \text{Pd}^0 + \text{Fe}^{2+}$)。

除了上述方法以外，也可透過真空電鍍、高溫(200-600°C)下，以氫氣還原針鐵礦與赤鐵礦顆粒，於有機溶劑或氫氣中分解五羰基鐵($\text{Fe}(\text{CO})_5$)，或亞鐵鹽之電著等方式製造奈米零價鐵。



資料來源：Zhang, W.X., "Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview," Journal of Nanopartical Research, Vol. 5, pp. 323-332, 2003

圖 14.1.1-1 奈米零價鐵透水性反應牆示意圖



資料來源：美國國家科學基金會(US National Science Foundation)網站，網址：<http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm>。

圖 14.1.1-2 奈米零價鐵直接注入示意圖

14.1.2 適用條件

奈米微粒具有粒子小及表面積大等特性，奈米零價鐵之表面積為一般鐵粒子之 30 倍，而其反應性可能高達一般鐵粒子之上千倍，因此，奈米零價鐵常被用於高污染區(hot spot)之整治。而又因粒子顆粒小及微細結晶構造所展現之特殊化學反應與行為，更顯示其優越性。有研究顯示，以一般的零價鐵反應牆及現地生物整治技術處理受含氯溶劑污染地下水，常會將原四氯乙烯或三氯乙烯等污染物分解為毒性更強之二氯乙烯或氯乙烯，但若使用奈米合成金屬微粒(如 Ni-Fe 或 Pd-Fe)，這些難分解物質會被完全分解，而不會產生更毒之衍生化合物。

奈米零價鐵在各項試驗中已初步證明可還原包括含氯溶劑(TCE, TCA)、有機農藥與多氯聯苯等各類污染物、金屬類如鉻、汞、鉛等(New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL, 2005 年台美講習會)。表 14.1.2-1 為奈米零價鐵可處理的污染物種類。

由於奈米微粒具有顆粒小、表面積相對較大之特性，如此小的結晶可以在土壤顆粒內滑行，而不被黏著。其優勢可使其顆粒不受土壤酸性、溫度或有機質濃度之影響，且反應性比一般金屬微粒強 10~1,000 倍，又可將

其調置成泥漿的方式，由注入井直接打入污染場址內，並隨著地下水流進行還原脫氯反應。本法應用上之優缺點比較表，如表 14.1.2-2 所示。

表 14.1.2-1 奈米零價鐵適用污染物

含氯甲烷	三鹵甲烷
- 四氯化碳 (CCl₄) - 氯仿 (CHCl₃) - 二氯甲烷 (CH₂Cl₂) - 氯甲烷 (CH₃Cl)	- 三溴甲烷 (CHBr₃) - 二溴一氯甲烷 (CHBr₂Cl) - 一溴二氯甲烷 (CHBrCl₂)
含氯苯類	含氯乙烯
- 六氯苯 (C₆Cl₆) - 五氯苯 (C₆HCl₅) - 四氯苯 (C₆H₂Cl₄) - 三氯苯 (C₆H₃Cl₃) - 二氯苯 (C₆H₄Cl₂) - 氯苯 (C₆H₅Cl)	- 四氯乙烯 (C₂Cl₄) - 三氯乙烯 (C₂HCl₃) - 順式二氯乙烯 (cis-C₂H₂Cl₂) - 反式二氯乙烯 (trans-C₂H₂Cl₂) - 二氯乙烯 (C₂H₂Cl₂) - 氯乙烯 (C₂H₃Cl)
殺蟲劑	其他含多氯之碳氫化合物
- DDT(C₁₄H₉Cl₅) - 靈丹(C₆H₆Cl₆)	- 多氯聯苯(PCBs) - 戴奧辛(Dioxins) - 五氯酚 (C₆HCl₅O)
有機染料	其他有機污染物
- 橘色二號(C₁₆H₁₁N₂NaO₄S) - 金黃偶氮染料(C₁₂H₁₃ClN₄) - 樹脂酚黃 O (C₁₂H₉N₂NaO₅S) - 酸性染料橙色(Acid Orange) - 酸性染料橙色(Acid Red)	- N-亞硝二甲胺(NDMA)(C₄H₁₀N₂O) - TNT(C₇H₅N₃O₆)
重金屬離子	無機性陰離子
- 汞(Hg²⁺) - 鎳(Ni²⁺) - 銀(Ag⁺) - 鎘(Cd²⁺)	- 重鉻酸根離子(Cr₂O₇²⁻) - 砷(AsO₄³⁻) - 過氯酸根離子(ClO₄⁻) - 硝酸根離子(NO₃⁻)

資料來源：Zhang, W.X., "Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview," Journal of Nanopartical Research, Vol. 5, pp. 323-332, 2003.

表 14.1.2-2 奈米科技技術優缺點比較表

優點	缺點
1. 體積小，約 100~200nm* 2. 為電子提供者，具有強還原性，反應速率快 3. 具較高的表面積(30m²/g*)，表面積的增加可顯著提高反應的活性。 4. 減少毒性副產物之生成，利用奈米零價金屬可顯著降低還原脫氯反應過程中毒性中間產物之生成。 5. 具有操作的機動與便利性，由於奈米顆粒粒徑極小，除可藉由地下水井直接注入受污染之地下水中，亦可直接注入高濃度之污染源進行整治 6. 整治期間可地上不需設置設備。	1. 奈米鐵會鈍化(iron passivation)* 2. 以直接注入奈米鐵方式，可能在後期產生反彈效應(rebound effect)* 3. 因為凝聚作用(agglomeration)降低有效處理範圍* 4. 奈米級零價鐵之最終演變以及對環境與人體健康的衝擊仍待進一步的了解。 5. 國內對於奈米技術的研發尚未趨成熟，不確定性與製造奈米微粒之成本仍高。 6. 若為大範圍污染區，其成本較高，技術尚未成熟。 7. 消耗量較高，奈米級零價鐵會快速的與水反應而產生氫氣。

*參考文獻：New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL, 2005 年台美講習會

14.2 整治系統操作與設計

有關國外針對奈米科技處理法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 14.2-1。

表 14.2-1 國外奈米科技處理法相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
—	—	—
其他政府機關出版重要文獻名稱		
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency Nanotechnology White Paper	2007

14.2.1 整治系統設計與操作要點

目前，奈米零價鐵在環境中之移動與最終演變仍不明確。研究顯示，奈米微粒在地下水中之移動距離可介於數公分至超過 20 公尺以上。奈米微粒在地下環境中之流動性與許多因素有關，包括微粒的尺寸、環境的酸鹼度、離子強度、土壤成分，以及地下水流向與流速等。舉例來說，地下水常具有相當高的離子強度，因此會降低微粒間的靜電排斥作用，並增加微粒聚集的情形。

此外，奈米微粒反應之有效處理半徑到底為何仍不清楚，奈米合成金屬微粒之製造、污染物在奈米微粒與水分子界面之傳輸與反應機制、奈米

微粒之最終演變、對環境與人體健康之影響與風險，都是在實際應用前須進一步探討之研究議題。雖有研究顯示，利用可食用等級油品作為奈米零價鐵注入地下環境之助劑，有助於延長零價鐵之壽命，使零價鐵難以被土壤水中的溶氧氧化。此外，加入油能在油—水界面形成很大的難溶合表面，對氯化碳氫化合物產生補獲效應，使零價鐵對氯化碳氫化合物的脫氯還原作用得以加強。

當材料由巨觀的尺度縮小至奈米尺度時，雖然化學組成是不變的，然而許多物質特性則有所不同，如光學特性、磁性、電性、導熱性等。奈米材料之微小尺寸可使其暴露於表面之原子數增加與表面積增加。就環境與人體健康風險的角度而言，下列奈米材料之特性為影響風險程度的重要關鍵：

- 一、 表面反應性：奈米材料之表面反應性較高，因此意味著較高的生物活性。
- 二、 數量濃度：由於奈米顆粒的粒徑與體積小，在相同的質量下，奈米顆粒比一般較大粒徑之顆粒具有較多的顆粒數目。
- 三、 對水之溶解度：當奈米材料透過不同的暴露途徑進入人體時，特別是吸入性，其在肺部之停留時間長短與溶解性大小將是影響該物質是否造成顯著傷害的重要因素之一。一般而言，對水之溶解度愈高，傷害愈低；同樣的，對環境的影響也愈低。

對奈米級零價鐵而言，其特性會隨著製造、合成方式之不同而有所差異，大致上，奈米零價鐵為高反應性之物質，其表面特性會隨時間、溶液化學特性以及不同的環境情形之變化仍未可知。

14.2.2 整治系統單元

由於奈米鐵為一材料粒徑的改良，並非為整治技術的突破，故整治設備單元隨搭配之整治技術而異，無特定應包含項目。

14.2.3 整治系統監測

由於奈米材料的應用，並未有明確文獻可證實在環境中的移動情況，

及對人體危害。當應用於現地整治時，應定期監測污染排放情況，並小心避免對環境及人體造成危害的風險。

14.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

奈米材料應用於現地整治時，其理想的優勢包括穩定的延散(dispersion)與低過濾作用，以及奈米微粒與污染物之相互影響。目前，我們對奈米科技運用於土壤地下水整治工作中可能帶來的風險尚無充分了解，而此風險會因不同的接受程度以及奈米微粒之毒性而有所不同。因此，監測奈米材料在環境中之暴露途徑、演變、轉化以及毒性可幫助了解實際的風險。

參與合成或製造奈米材料的人員應於通風良好的工作區域，並於密閉容器中進行合成，以避免其洩漏。奈米材料具有通過「生物屏障」(如細胞膜、皮膚)與肺部之能力，此外，其高表面積更使其影響程度較一般材料為高。奈米零價鐵亦為可直接進入細胞膜的一種奈米材料，因為無電荷的緣故，奈米零價鐵可更自由的進入細胞膜，但其影響至今仍無明確的研究結果。

現階段，因為基本之物化與毒理特性之相關數據相當缺乏，要針對單一的奈米材料進行風險評估是相當困難的。現有之奈米毒理學對奈米材料對生物體的影響可歸納如下：

- 一、 當吸入時，奈米材料較一般顆粒更有效的沉積於呼吸道之所有區域，他們會侵犯特定的體內防護機制，也能轉移出呼吸道。
- 二、 當進入血液循環系統時，奈米材料會分散到各器官吸收。
- 三、 當與皮膚接觸時，奈米材料會穿透至真皮，移轉至淋巴，且可能為感覺神經所攝入。

因此，當工作人員可能在製造/合成奈米材料、使用奈米產品，或棄置/回收奈米產品的過程中直接接觸奈米材料。在工作環境中人員容易接觸到大量且高濃度之奈米材料，因此應特別注意人員之工安情形。當採行混合硼氫化鈉與氯化鐵的方式還原奈米鐵金屬之方式時，需在排煙櫃中進行以防止副產物之一的氫氣之危害。此外，應採用防爆混合物減低火花產生。

14.3 成本及期程評估

過去數十年來，製作或合成奈米零價鐵的成本已顯著降低(每公斤大於 500 美元(新台幣 17,500)，降至每公斤約 50~100 美元(1,750- 3,500)，然而，與傳統零價鐵相比，其價錢仍明顯高上許多。

土壤及地下水比水重非水相液體
污染整治作業參考指引
(附件二)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-004

附件二目錄

	頁碼
一、 土壤清洗法 (Soil washing).....	附件二-1
1.1 整治技術簡介.....	附件二-1
1.1.1 原理.....	附件二-1
1.1.2 適用條件.....	附件二-2
1.2 整治系統操作與設計.....	附件二-3
1.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件二-3
1.2.2 整治系統單元.....	附件二-5
1.2.3 整治系統監測.....	附件二-6
1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-7
1.3 成本及期程評估.....	附件二-8
二、 離地土壤生物整治 (Ex-situ Soil Bioremediation).....	附件二-9
2.1 整治技術簡介.....	附件二-9
2.1.1 原理.....	附件二-9
2.1.2 適用條件.....	附件二-9
2.2 整治系統操作與設計.....	附件二-10
2.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件二-11
2.2.2 整治系統單元.....	附件二-11
2.2.3 整治系統監測.....	附件二-15
2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-16
2.3 成本及期程評估.....	附件二-17
三、 加熱脫附處理法 (Thermal desorption).....	附件二-18
3.1 整治技術簡介.....	附件二-18
3.1.1 原理.....	附件二-18
3.1.2 適用條件.....	附件二-19
3.2 整治系統操作與設計.....	附件二-19

3.2.1	整治系統設計與操作要點	附件二-19
3.2.2	整治系統單元	附件二-22
3.2.3	整治系統監測	附件二-24
3.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件二-25
3.3	成本及期程評估	附件二-27
四、	焚化 (Incineration)	附件二-28
4.1	整治技術簡介	附件二-28
4.1.1	原理	附件二-28
4.1.2	適用條件	附件二-28
4.2	整治系統操作與設計	附件二-29
4.2.1	整治系統設計與操作要點	附件二-29
4.2.2	整治系統單元	附件二-30
4.2.3	整治系統監測	附件二-31
4.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件二-33
4.3	成本及期程評估	附件二-35

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 1.1.1-1	土壤清洗整治系統原理示意圖 附件二-1
圖 1.1.2-1	適合土壤清洗整治系統之土壤粒徑分布圖 附件二-2
圖 2.2.2-1	密閉式土耕法概念流程圖 附件二-12
圖 2.2.2-2	離場生物堆肥處理系統概念圖 附件二-13
圖 2.2.2-3	生物堆通氣之生物整治概念示意圖 附件二-13
圖 2.2.2-4	泥漿相生物降解程序及泥漿相生物反應槽示意圖 附件二-14
圖 3.1.1-1	典型之加熱脫附法之流程圖 附件二-18
圖 3.2.1-1	加熱脫附法技術評估程序流程圖 附件二-21
圖 4.1.1-1	焚化技術原理流程圖 附件二-28

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.1.2-2	土壤清洗法技術優缺點比較表..... 附件二-3
表 1.2-1	國外土壤清洗相關法規指引及規範..... 附件二-3
表 1.2.2-1	土壤清洗法系統設備表..... 附件二-6
表 1.2.3-1	壤清洗法整治系統成效監測..... 附件二-7
表 1.2.4-1	潛在之危害..... 附件二-8
表 2.1.2-1	離地生物處理技術優缺點比較表..... 附件二-10
表 2.2-1	國外土壤清洗相關法規指引及規範..... 附件二-10
表 2.2.3-1	離地土壤生物整治系統成效監測..... 附件二-16
表 2.2.4-1	潛在之危害..... 附件二-16
表 3.2-1	國外加熱脫附相關法規指引及規範..... 附件二-20
表 3.2.3-1	加熱脫附整治系統成效監測..... 附件二-25
表 3.2.4-1	潛在之危害..... 附件二-26
表 4.1.2-1	焚化技術優缺點比較表..... 附件二-29
表 4.2.3-1	土壤焚化整治系統成效監測..... 附件二-33
表 4.2.4-1	潛在之危害..... 附件二-34
表 4.3-1	焚化處理經費分析..... 附件二-35

一、土壤清洗法 (Soil washing)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

土壤清洗法(soil washing)始於 1980 年，由美國環保署主導開始研究，在歐美、日本等國家已有許多應用的案例，美國最早於 1993 年紐澤西州之 King of Prussia 場址實際應用本技術進行污染場址整治；在荷蘭，由於土地被視為珍貴的資源，因此亦是熱衷於此項技術開發的國家之一。此法在國內多以酸洗法處理農地重金屬污染場址，國外則有應用於整治受石油碳氫化合物、易揮發性有機物、多氯聯苯與多環芳香族碳氫化合物污染場址整治之案例。此外，土壤清洗法結合界面活性劑，因界面活性劑有降低表面張力與增加溶解度之功能，可將 DNAPL 從污染土壤中轉移到洗滌液內，再經廢水處理單元處理之。

土壤清洗法係將污染土壤挖除後，利用水與洗滌劑(溶於水的化學藥劑)將附著在土壤顆粒上之污染物與土壤分開，再處理含有污染物的廢水或廢液，最後再將處理的土壤回填或運至掩埋場掩埋。本法原理示意圖請參見圖 1.1.1-1 所示。

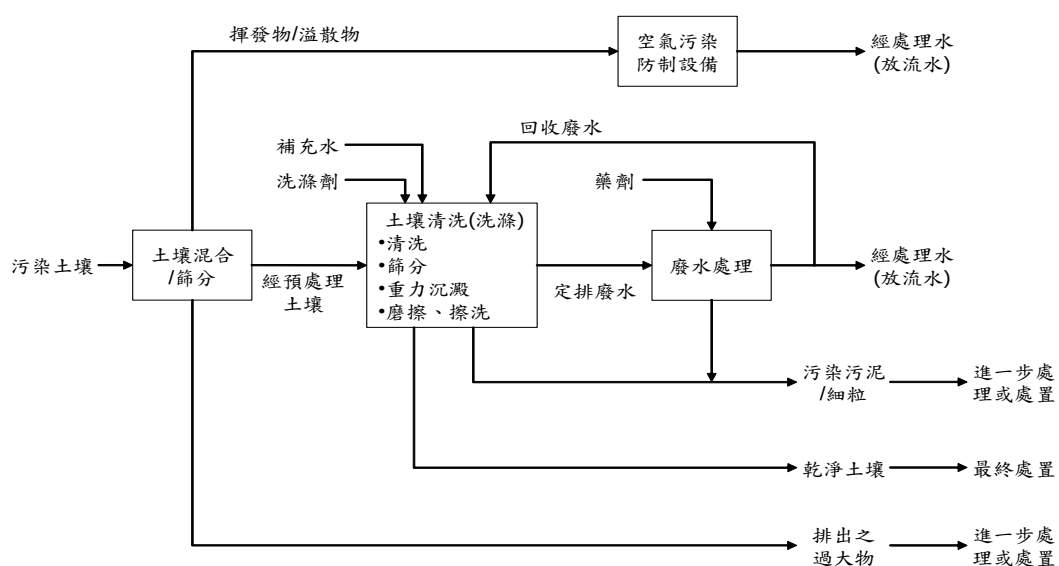


圖 1.1.1-1 土壤清洗整治系統原理示意圖

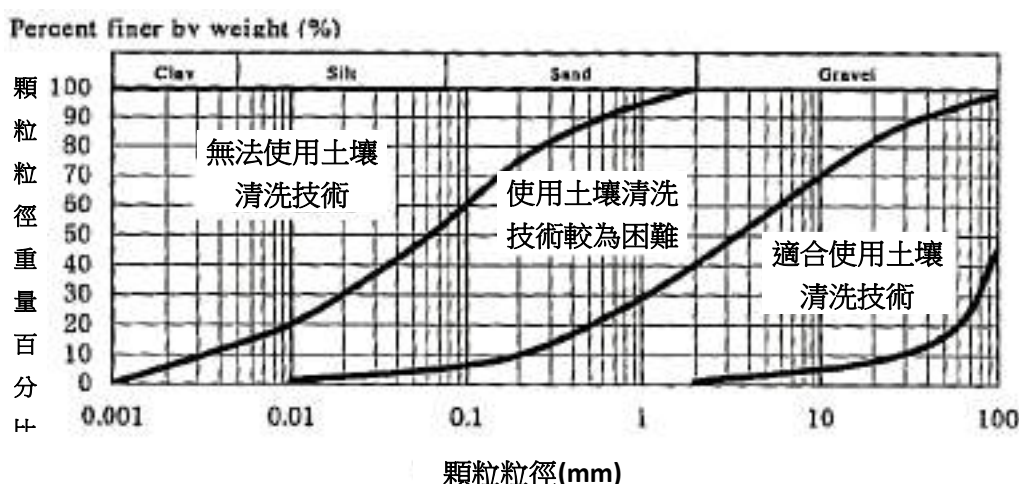
1.1.2 適用條件

土壤清洗法適用於重金屬、放射性物質、農藥、有機物或有機物混合物或其他無機物污染土壤之整治或前處理，本法已成功用於整治許多無機物、有機物同時污染的土壤，包括比水輕非水相液體(Light non-aqueous phase liquid，以下簡稱 LNAPL)、DNAPL、多氯聯苯與多環芳香族碳氫化合物等，目前國內應用主要針對重金屬污染，對 DNAPL 的整治則較少見。

適用土壤清洗法之土壤粒徑如圖 1.1.2-1 所示，一般而言，於礫石、粗砂、中砂、細砂與相似土壤組成中的污染物較易被成功處理；砂土與黏土較難清洗，土壤中含有 25 % ~ 30 % 的黏粒，則建議不要考慮採用本法。

土壤清洗法為離地處理技術，因此相較傳統的現地處理技術，具有較短整治期程的優點；並藉由移動式與模組式的設備，使本法具有靈活調度與可調整之特點。

但由於本法操作過程中，可能會衍生揮發性有機物、有害污泥與有害廢棄物等，因此在設計過程中應對這些環境衝擊予以考量說明。此外，在應用土壤清洗法時，並非所有分離的土壤都要清洗，如果大部分污染物被吸附在某一特定土壤粒徑範圍時，且此一特定粒徑只佔土壤體積的一小部分時，僅處理該部分污染土壤是最經濟的選擇。表 4.1-1 為本法於應用上之優缺點比較表。



資料來源：Motoyuki Asada 等，Remediation Technology of Contaminated Soil and Groundwater，第十一屆土壤及地下水污染整治研討會論文集，台灣土壤及地下水環境保護協會，民國 96 年 6 月 28 日。

圖 1.1.2-1 適合土壤清洗整治系統之土壤粒徑分布圖

表 1.1.2-2 土壤清洗法技術優缺點比較表

優點	缺點*
- 土壤清洗使用洗滌劑時，可處理難以從土壤中去重的污染物，如 DNAPL 與重油等。 - 相較於現地處理技術，土壤清洗法所需整治的時間較短。 - 使用移動式與套裝設備，可於場址現場組裝，不必將污染土壤運輸到其他處理設施處理，可節省清運費。 - 處理土壤可回填節省土壤處置費用。 - 洗滌劑可回收再利用。	- 土壤受多種污染物(如有機物與重金屬)污染時，不易選擇適當的洗滌劑種類。 - 土壤含水量高時，可能需進行前處理。 - 整治工作完成後，須處理整治系統中所殘留的廢液、廢水或洗滌劑。 - 處理過程所衍生的有害殘渣，可能需要進一步進行清除與處理。 - 不易移除吸附於黏土上的污染物。

資料來源：*Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide, Version 4.0, Federal Remediation Technologies Roundtable.

1.2 整治系統操作與設計

有關國外針對土壤清洗已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 1.2-1。

表 1.2-1 國外土壤清洗相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國陸軍工兵署(USACE)	Soil Washing Through Separation/ Solubilization: Guide Specification for Construction (CEGS-02 54 23)	2006
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Fixed Facilities for Soil Washing: a Regulatory Analysis	1997
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Technical and Regulatory Guidelines for Soil Washing	1997
美國環境工程學會(American Academy of Environmental Engineers)	Innovative Site Remediation Technologies: Design and Application (Vol. 3: Liquid Extraction Technologies Soil Washing, Soil Flushing, Solvent/Chemical, ISBN: 1-883767-19-9, 432 pp)	1998

1.2.1 整治系統設計與操作要點

本法處理技術之選定係與受污染土壤基質、污染物特性、洗滌劑之選用及後端洗滌廢水處理系統等單元相關聯，因此執行計畫前應先進行小規模之實驗室試驗(lab-trial)，以瞭解處理過程中可能影響或干擾處理成效之因子，進而作為全場整治作業選用適切洗滌劑、後端二次污染控制處理單元之設計依據，此外社會觀感亦應納為整治系統設計考量。

規劃設計時應依據處理土壤的物理狀況，先將其分成不同的部分，再

依後續處理、再利用或進行最終掩埋之需求，處理至不同的程度。依土壤粒徑的不同進行篩分，是進行土壤清洗前必要的步驟，使不同粒徑的顆粒可以分開處理。以下針對本法規劃設計的注意事項及技術種類說明進行：

一、 選用適切洗滌劑

本法可使用於 DNAPL 污染物之整治，以運用界面活性劑洗滌污染土壤中的污染物為主。洗滌劑多由水或其他藥劑所組成，可以將酸、鹼、界面活性劑、螯合劑或其他化合物溶於水中。

洗滌劑(界面活性劑)沖洗 DNAPL 污染物，將產生沖洗後廢水排放之問題，因此需向地方環保機關確認，是否依水污染防治法規之要求申請放流水排放許可。如污染場址屬水污法列管事業定義者，其於廠區內進行土壤及地下水污染場址控制計畫或整治計畫，並將所產生之廢(污)水納入該事業原有之廢(污)處理設施時，應依該法相關規定辦理，例如於水污染防治措施變更前，應先檢具「水污染防治措施計畫」，經直轄市或縣市主管機關審查核准；排放廢污水於地面水體者，應向直轄市或縣市主管機關申請，經審查登記，發給排放許可證後，始得排放廢污水並應符合放流水標準等規定。

二、 後端二次污染控制處理單元

如土壤開挖、貯存行為符合水污法之「土石方堆(棄)置場」之定義者，且堆置之礦物、砂、礫石、土、石、石材、土石方之總設計或實際堆置體積達 3,000 立方公尺以上，或作業環境面積達 1 公頃以上者，應檢具「水污染防治措施計畫」請主管機關核准並據以實施。

土壤清洗系統由一系列物理操作單元與化學反應過程所組成，並且在安全、體積可控制的反應器或槽體中進行，由土壤中清洗或洗滌出來的污染物被轉移到液相中，廢水進一步由類似於工業廢水處理後，放流水予以回收再利用或排放。

三、 社會觀感

此外在評估此技術之可行性，除考量排放之水量對於環境之衝擊外，亦須考量周圍居民之用水安全與觀感，以避免不必要之非理性抗爭，造成整治作業之延宕。

四、 操作過程應紀錄參數

操作過程中，為瞭解系統操作狀況是否符合設計處理量與處理效率。此外，亦應記錄衍生廢棄物的產生量。

- (一)進料速度
- (二)廢水流量
- (三)pH 值
- (四)洗滌時間(contact time)
- (五)處理粒徑(cut size)

五、 其他應注意事項

- (一) 砂土、黏土及污泥在污染土壤中的數量。
- (二) 污染物的種類與數量。
- (三) 土壤清洗設備的處理容量。
- (四) 土壤清洗技術必須在可行性研究的基礎上，依照特定的污染土壤特性進行規劃設計，洗滌劑的選取亦需經過仔細的研究才能確認
- (五) 選擇特定洗滌劑時，其後續洗滌劑回收處理或廢水處理的影響應事先考量。
- (六) 廢水經檢測確認符合排放標準後，排放至場址周邊之水體，並藉由定期公告監測結果，消弭不必要抗爭。

1.2.2 整治系統單元

有關建置土壤清洗技術之設備是可運輸的，且可隨時隨地組裝、拆卸與改裝，一般多採用單元操作系統，包括前處理、儲槽、進料、輸送、粉塵控制、清洗(洗滌)、分離、洗滌劑再生處理與廢水處理等。

有關設置土壤清洗法之整治設備會隨著不同種類的污染物與洗滌劑的選取而有所差異，於此所列設備以較常使用共通之設備需求為重點，彙整如表 1.2.2-1。

表 1.2.2-1 土壤清洗法系統設備表

項次	各項設備
1	前處理設備，如土壤開挖、機械破碎、篩分設備等
2	原水與藥劑儲槽及其輸送設備
3	進料、輸送設備，如泥漿泵
4	粉塵控制設備
5	清洗(洗滌)與分離設備(使土壤與洗滌劑分離，如採用沉澱槽、過濾槽)
6	廢水處理設備
7	洗滌劑再生處理設備

1.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

採用本法進行 DNAPL 整治時應設置明顯區別之作業區，污染土壤清除及處理工作應於污染區內進行，並設置除污之工具。而受污染土壤開挖、移除與運輸期間之環境污染控制措施，亦應依場址特性與污染範圍，研擬適當的預防性措施；供貯存與處理受污染土壤之作業區，亦應加以區隔並防止形成水坑，若需使用臨時蓄水池來貯存受污染之廢水或廢液，在蓄水池用完後應挖除受污染土壤。長期貯存受污染之廢水或廢液或因水文地質之因素(例如場址地質屬易滲透區)，蓄水池應鋪設不透水布，避免污染物因洩(滲)漏，造成污染擴散之現象，而除污廢水應妥善收集、處理。

其他可用來防止土壤及地下水擴大之污染措施包括：

- (一)覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲透和逸散灰塵。
- (二)操作全程應備有吸附劑、抽水泵等，以立即清理散(滴)落物。
- (三)準備儲桶或其他形式容器於作業區之重要位置，並供迅速清理散(滴)落於進出道路之污染土壤。
- (四)開挖區周圍構築地面分水渠，以控制逕流。
- (五)在開挖區下坡處構築儲流池，以圍堵受污染之逕流。

二、成效監測或防止污染擴大監測設備

有關評估離地土壤清洗系統的成效，會隨著不同種類的系統有所差異，於此所列監測工作以較常使用共通之項目為重點；監測對象包

括受污染土壤處理成效與二次污染防治處理設備等，其監測目的包括相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響及防止污染擴大之監測工作等。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 1.2.3-1。

表 1.2.3-1 壤清洗法整治系統成效監測

項目	土壤清洗整治系統	廢水處理系統	洗滌劑回收處理系統	經處理土壤或衍生廢棄物
監測目的	系統設備成效評估	避免對環境造成影響 處理設備成效評估	處理設備成效評估	整治成果評估
監測對象	進料區之污染土壤 洗滌槽(反應槽)內 泥漿相土壤	放流(或回流)廢水	回收洗滌劑	處理後土壤 污泥或衍生廢棄物
分析項目	進料速度、pH 值、 洗滌時間(contact time)、處理粒徑(cut size)	廢水流量、pH 值、 污染物項目	洗滌劑回收量、pH 值、洗滌劑項目	污染物項目(總量或 TCLP)
監測頻率	每週 1 次	排放水之檢測：每日 功能性檢測：每月 一次	每週 1 次	每批次或每噸 1 次

1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下針對對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目進行說明。

一、對環境之影響

本法於污染土壤挖掘與清洗過程中，可能對環境中空氣造成影響；其沖洗 DNAPL 污染之廢水經廢水處理設備處理後，如排放至水體，若未妥善處理，會造成水污染。

二、潛在之危害

彙整如表 1.2.4-1。

1.3 成本及期程評估

本法之整治期程與污染土壤中的砂土、黏土與雜質的含量、污染物的種類與數量，以及土壤清洗設備之處理容量等因素有關。依據美國環保署 A Citizen's Guide to Soil Washing (2001.4)，整治期程約數週至數月。

若就本法之處理成本而論，待處理污染土壤的數量會影響到處理成本，依據美國聯邦整治技術圓桌論壇(Federal Remediation Technologies Roundtable，以下簡稱 FRTR)之 Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide (Version 4.0)之資料，大型場址之污染土壤處理費用(含挖掘費)約 70 美元(新台幣 2,450)／每立方公尺，小型場址約約 187 美元(新台幣 6,545)／每立方公尺；而在荷蘭，採用本法之處理成本約 20～45 歐元(新台幣 1,000- 2,250)／公噸。

表 1.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	污染土壤開挖時	機具設備危害	妥善操作大型開挖機具機具人員於操作機具附近，應戴聽力防護設備
	輸送污染土壤時	輸送設備危害	輸送帶或傳動軸應設置箱蓋
	揮發性有機物污染，於破碎與粉碎時 洗滌劑蒸餾回收時	火災與爆炸	含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強操作人員的訓練與緊急應變的能力 蒸餾設備設置洩壓閥與緊報系統
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	洗滌劑輸送及反應單元中，工作人員可能會暴露於洩散或揮發的洗滌劑之環境中	洗滌劑	於密閉系統中加注洗滌劑或設置適當的通風設備 使用適當的呼吸防護裝備
	廢水處理時	衍生廢棄物與污泥等	於密閉系統中操作 使用適當的個人防護裝備

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 6 EM1110-1-4007, 15 August 2003.

二、離地土壤生物整治 (Ex-situ Soil Bioremediation)

2.1 整治技術簡介

2.1.1 原理

生物整治之發展約始於 1970 年代，當時主要利用此技術處理汽油、柴油與其他石油碳氫化合物之污染。至 1980 年代中期，由於生物整治此技術之成效有顯著的提升，因此漸漸被應用於現地/離地整治受污染之 LNAPL 或 DNAPL 場址。通常離地土壤生物整治(ex-situ soil bioremediation)工作多使用於腹地較大或有多餘空間的場址。

離地生物整治是一經由人工添加、植入或利用自然發生的過程，以微生物或細菌將污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低污染物之濃度，完成整治作業；相對的，本法具有成本低，整治期程長特性。

目前國內外生物整治技術之選擇上，已趨向於經費節省、高處理效率及技術整合之方向發展，而就恢復污染場址土地原使用用途而言，生物整治技術具破壞性較低，與整治經費較合理之優點。

2.1.2 適用條件

生物整治法主要優勢在於：(1)可將污染物轉化成毒害性較小的產物，而非將污染物僅做相的轉移；(2)整治費用較為經濟。而生物整治相較於傳統的整治方法亦有許多優點存在，包括：可在現地進行、較具經濟性、對場址的擾動較小、可分解污染物而非做相的轉移、無需負清運受污染介質之責任、大眾接受度較高，並且可與其他物理或化學的整治技術結合。

儘管本法在許多情形下都是有利的，例如可轉化毒性物質，使之成為較無害之物質，但仍有其使用的限制及標準。本法的使用限制因子包括整治目標的可達成性、達成整治目標的時效性及產生毒性污染物的可能性。此外，某些污染物無法利用生物降解方式去除，且可能產生具毒性的副產

物。生物整治法亦不適合處理滲透性低的土壤，其微生物生長可能造成土壤孔隙的阻塞。

採用離地生物整治技術時，進行可行性試驗十分重要。可行性試驗係於實驗室以人為控制之條件下，模擬實場之可能狀況，以評估其適宜性；同時，必須瞭解生物體本身之極限、工程極限及自然機制等因素，因此在實務經驗上之累積亦相當重要。

本法為離地處理技術，因此相較傳統的現地處理技術，具有較短整治期程的優點；並藉由移動式與模組式的設備，使本法具有靈活調度與可調整之特點。表 2.1.2-1 為本法之優缺點比較。

表 2.1.2-1 離地生物處理技術優缺點比較表

優點	缺點*
1.利用批次式模組配合其他工法(蒸氣注入)，處理難以從土壤中去重的污染物，如 DNAPL 與重油等。 2.使用移動式與套裝設備，可於場址現場組裝，不必將污染土壤運輸到其他處理設施處理，可節省清運費用。 3.處理土壤可回填節省土壤處置費用。	1.需建造臨時處理場所，並調節/控制適合生物整治之環境條件。 2.濃度去除率 > 90 %，但殘餘濃度需耗時較長，且高濃度污染土壤恐抑制微生物作用。 3.土壤受多種污染物(如有機物與重金屬)污染時，不易選擇適當的生物菌種。 4.不易移除吸附於黏土上的污染物。

資料來源：Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide, Version 4.0, Federal Remediation Technologies Roundtable.

2.2 整治系統操作與設計

有關國外針對土壤清洗已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 2.2-1 所示。

表 2.2-1 國外土壤清洗相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國陸軍工兵署(USACE)	Soil Washing Through Separation/ Solubilization: Guide Specification for Construction (CEGS-02 54 23)	2006
其他政府機關出版重要文獻名稱		
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Fixed Facilities for Soil Washing: a Regulatory Analysis	1997
美國州際環境技術法規委員會(ITRC)	Technical and Regulatory Guidelines for Soil Washing	1997
美國環境工程學會(American Academy of Environmental Engineers)	Innovative Site Remediation Technologies: Design and Application (Vol. 3: Liquid Extraction Technologies Soil Washing, Soil Flushing, Solvent/Chemical, ISBN: 1-883767-19-9, 432 pp)	1998

2.2.1 整治系統設計與操作要點

離地生物整治法係利用存在於環境中的有機污染物可在好氧或厭氧狀態下被微生物分解。為不添加其他物質，所以需視其所選定之生物整治技術為好氧或厭氧整治技術，設計操作離地之環境條件。

採用好氧生物整治時，離地環境需存在足夠的氧氣(好氧狀態下)及營養鹽，微生物可轉換代謝有機污染物成為二氧化碳及水。整治期間，必須監測液相的含氧量是否大於 1.0 mg/L。而在氣相中，含氧量必須大於 2 - 4 % (以體積計)，使有機污染物的好氧生物整治保有充足的氧氣；而採用厭氧生物整治時，污染物最終可代謝成甲烷、二氧化碳及微量的氫氣。好氧生物整治的過程通常較厭氧生物整治快，且有機物的降解亦較完全。

在好氧環境之生物整治，氧會優先做為電子接受者並提供最大的能源，產生微生物、大量細胞產物及微生物生長，電子供給者(受污染物)亦會被耗用。

2.2.2 整治系統單元

常用於處理 DNAPL 污染土壤的離地生物整治技術主要有固相處理(solid phase treatment)如土耕法(land farming)、堆肥法(composting)、生物堆法(biopiles)及泥漿相處理法(slurry phase treatment)等技術。茲將上述各種方法簡述如下：

一、 土耕法

土耕法(land farming)亦可稱為田間處理法，係由土壤中之微生物分解遭污染土壤之生物整治技術。本法採用翻動表層土壤，以提高土壤的通氣性，並添加營養鹽及控制水分，以促進微生物對 DNAPL 之生物降解能力(圖 2.2.2-1)。污染土壤定期翻攪，有利於生物降解污染物。

經由土壤通氣及翻動，即可藉由揮發而去除污染物(當然需考量 VOC 排放之二次污染防制)之外，而所規劃之整治區域，建議採以密閉空間場所進行抽氣處理，以及有利於控制整治場所之相關適用環境條

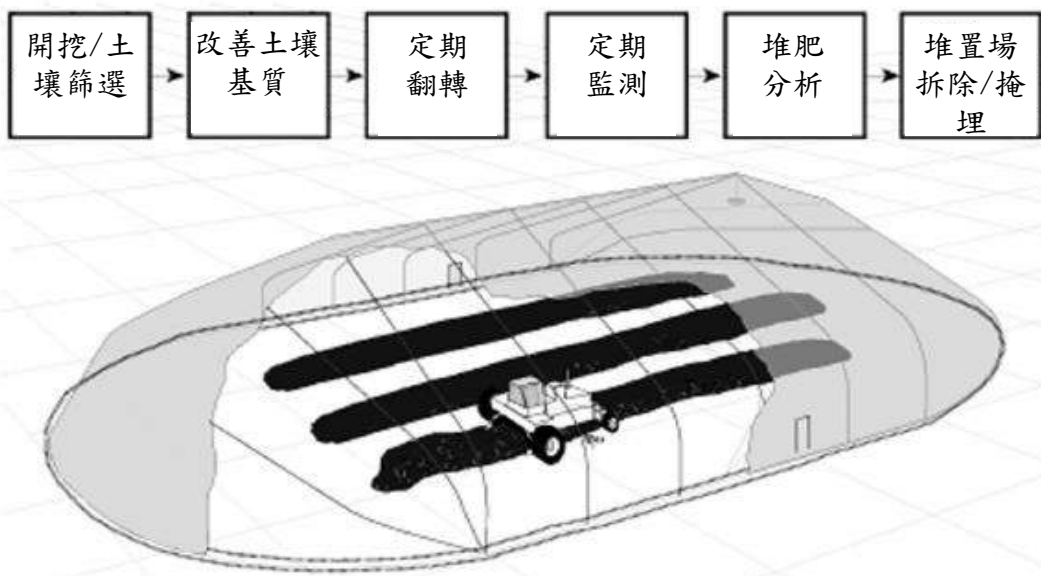
件。

本法適用於分解速率較慢的 DNAPL 污染物。但要將污染濃度大幅降低恐難以達成，倘若污染物濃度過高往往產生抑制性。

二、堆肥法

利用堆肥法(composting)處理受污染土壤時，會將受污染土壤與膨鬆性介質，如稻草或木材碎片混合，增加受污染土壤之孔隙。另以肥料、庭院廢棄物及廚餘做為添加劑，提高營養程度，進而增加有機物質的降解性。此方式常刺激有能力降解目標污染物的嗜高溫菌之生長。堆肥處理的型式可分為成堆及反應槽系統(enclosed reactor system)，如圖 2.2.2-2 所示。

堆肥法可處理爆炸物(如三硝基甲苯，TNT)、製造推進燃料時所產生的廢棄物、煤焦油、重金屬、農藥、木材防腐劑、柴油、含氯及不含氯之碳氫化合物、VOC 與多環芳香族碳氫化合物等。



資料來源：USEPA，Use of Bioremediation at superfund Sites, EPA 542-R-01-019，2001

圖 2.2.2-1 密閉式土耕法概念流程圖

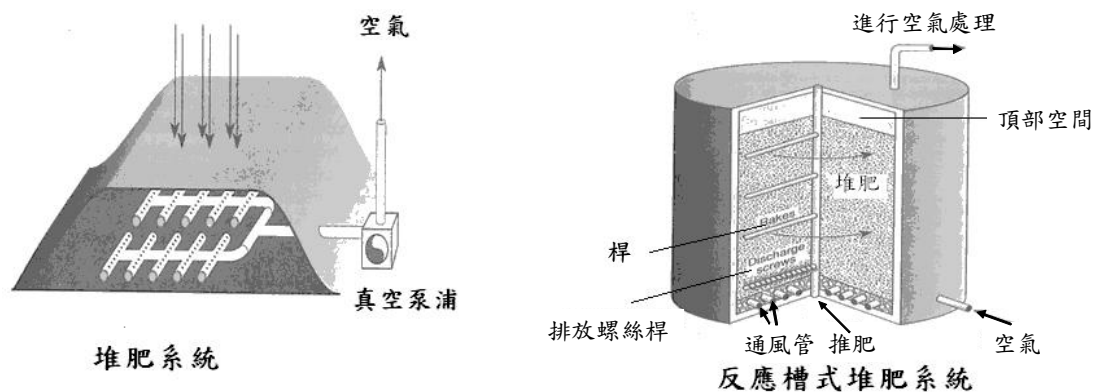


圖 2.2.2-2 離場生物堆肥處理系統概念圖

三、 生物堆法

生物堆法(biopiles)又稱生物堆肥法，污染土壤藉由開挖移除並離場堆積後，土壤堆中經由空氣供應管供應空氣，利用土壤中好氧微生物之分解作用，而達到降解污染物之目的(圖 2.2.2-3)。一般除通入空氣外，仍需補充養分及水分，以增強微生物活性，達到降解有機污染物之效果。生物堆法與土耕法不同之處，土耕法藉由耕犁或翻堆而獲得氧氣，並有相對更好的攪拌效果，生物堆法則藉由強制送風或藉由多孔管進行供氣。生物堆法相關原理與操作參數和土地農耕法類似。

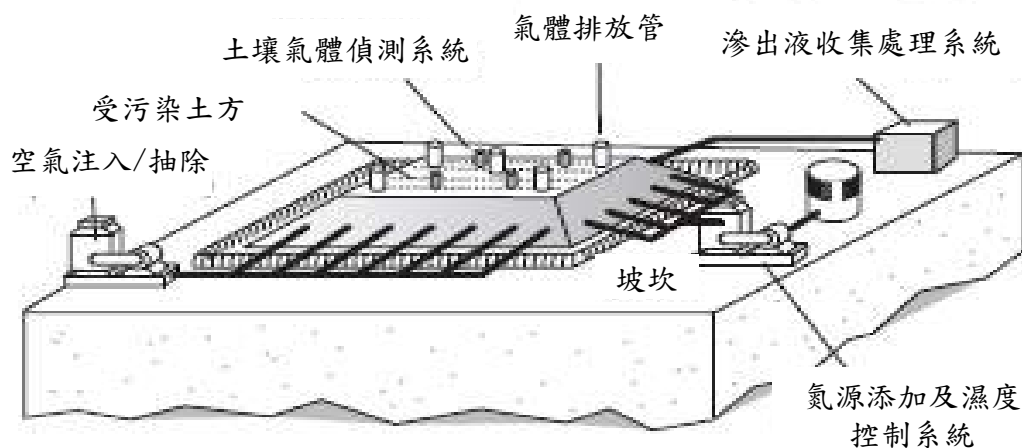
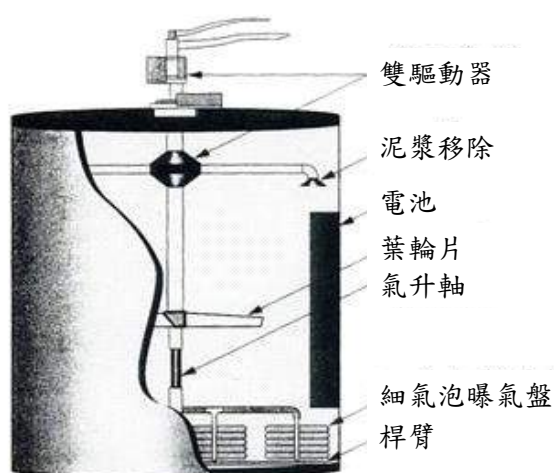
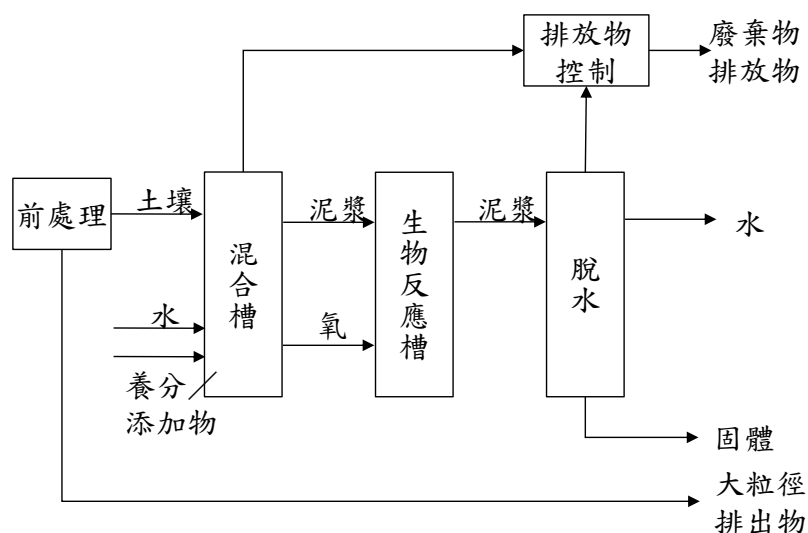


圖 2.2.2-3 生物堆通氣之生物整治概念示意圖

四、泥漿相處理(slurry phase treatment)

泥漿相生物降解是將水加入受污染的介質(土壤或污泥)，並在好氧狀況下處理污染物。此法在處理槽(生物反應槽或泥漿塘)內，利用混合攪拌，在好氧環境下，增加微生物與污染物的接觸頻率，進行生物整治處理。

圖 2.2.2-4 為泥漿相生物降解程序及泥漿相生物反應槽(Emico Biolift Reactor)示意圖，泥漿相生物降解法可處理許多有機污染物，如：農藥、石油、木焦油(creosote)、五氯酚(PCP)、多氯聯苯(PCB)及揮發性鹵化物。



Emico Biolift™ 泥漿相生物反應槽

圖 2.2.2-4 泥漿相生物降解程序及泥漿相生物反應槽示意圖

2.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

離地整治技術之場址配置對防止土壤及地下水污染擴大頗具關鍵性，應設置明顯區別之作業區，受污染土壤清除、處理工作應於污染區內進行，並設備除污之工具。受污染土壤開挖、移除與運輸期間之環境污染控制措施，應依場址特性與污染範圍，研擬適當的預防性措施，供貯存與處理受污染土壤之作業區，應加以區隔並防止形成水坑。若需使用臨時蓄水池來貯存受污染之廢水或廢液，在蓄水池用完後應挖除受污染土壤。長期貯存或因場址狀況(例如場址地質屬易滲透區)，蓄水池應鋪設不透水布，避免污染物因洩(滲)漏，造成污染擴散之現象。設備除污區應屬硬表面地區，除污廢水應妥善收集、處理。

其他可用來防止土壤及地下水污染擴大之措施包括：

- (一)覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲透和逸散灰塵。
- (二)操作全程應備有吸附劑、泵或其他設備，以立即清理散(滴)落物
- (三)準備儲桶或其他形式容器於作業區之重要位置，並供迅速清理散(滴)落物之進出道路。
- (四)開挖區周圍構築地面分水渠，以控制逕流。
- (五)在開挖區下坡處構築儲流池，以圍堵受污染之逕流。

二、成效監測或防止污染擴大監測設備

本法之監測對象包括整治期間處理廠房之基本參數(土壤之 pH、溼度、營養鹽-碳源/氮源)、VOC 處理設備的空氣及環境溫度等，其監測目的，包括：成效評估、作業環境控制與調整、避免對環境造成影響及防止污染擴大之監測工作等。此外，監測影響微生物活性的重要指標，包括：溶氧、pH、溫度、比電導度、鹼度、氧化還原電位、二氧化碳、甲烷、硝酸鹽、亞硝酸鹽、硫酸鹽、亞硫酸鹽、鐵及錳等，並藉由這些指標判定自然生物處理是否可繼續進行。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 2.2.3-1。

表 2.2.3-1 離地土壤生物整治系統成效監測

項目	密閉處理系統	通風處理系統	周界環境監測系統	經處理土壤或衍生廢棄物
監測目的	控制作業環境	避免對環境造成影響	避免對環境造成影響	整治成果評估
監測對象	- 密閉環境條件 - 處理土壤條件	- 通風系統 - 機具尾氣	環境周界	- 乾淨土壤 - 污泥或衍生廢棄物
分析項目	溫度、溼度、土壤 pH 值、營養鹽	空氣及污染物項目	空氣及污染物項目	污染物項目(總量或 TCLP)
監測頻率	每月 1 次	每季 1 次	每季 1 次	每批次或每噸 1 次

2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

本法於污染土壤翻轉與通氣處理過程中，可能對作業環境空氣造成影響，因此建議採可控制環境條件之密閉式負壓廠房或設施為優先考量，以隔絕並降低現地自然環境之衝擊。另宜依空氣污染防制法、水污染防治法規定或其他相關辦理，如定期環境監測與分析，以掌控場址環境之變化與衝擊。

二、潛在之危害

本指引將潛在的危害彙整於表 2.2.4-1。

表 2.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	污染土壤翻轉時	機具設備危害	- 妥善操作機具 - 人員應戴聽力防護設備
	採集污染土壤時	直接接觸	妥善著 C 級防護及呼吸面罩
	高濃度揮發性污染，翻轉生物處理時	火災與爆炸	- 含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強人員訓練與緊急應變的能力 - 通風設備及機具防爆處理
化學性風險	工作人員暴露於溢散或揮發的作業環境中	營養鹽之添加	- 於密閉系統中設置適當的通風設備 - 使用適當的呼吸防護裝備
	除污時	衍生廢棄物與污泥等	- 於密閉系統中操作 - 使用適當的個人防護裝備

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 11-12, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

2.3 成本及期程評估

本技術整治期程與污染土壤中的砂土、黏土與雜質的含量，污染物的種類與數量，以及土壤離地生物整治場處理容量等因素有關。整治期程可由數月至數年之久。

以生物整治之處理成本而言，待處理污染土壤的數量會影響到處理成本以及後續長時間的人員操作維護等費用，在美國，依據美國 FRTR 之 Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide (Version 4.0)，大型場址之污染土壤處理費用(不含開挖及回填費)生物堆之處理費約 130~260 美元(新台幣 4,550- 9,100)/每立方公尺，而土壤翻土翻轉處理費約 100 美元(新台幣 3,500)/每立方公尺；此外，由於為確認受污染物的特性與生物菌種之適應性，建議在進行實場整治前需進行實驗室模場試驗評估，預估約 25,000 至 50,000 美元(新台幣 875,000- 1,750,000)，而後再進行實場模場測試，預估將約不超過 100,000 美元(新台幣 3,500,000)。

三、加熱脫附處理法 (Thermal desorption)

3.1 整治技術簡介

3.1.1 原理

離場加熱脫附(thermal desorption)處理系統係將受污染物質藉由熱能將有機污染物及水予以揮發、汽化之程序。國內在民國 86 年已有使用移動式加熱脫附設備處理受 DANPL(二氯乙烷、二氯乙烯、三氯乙烯)污染之土壤整治案例。

加熱脫附處理係一種「物理分離」的程序，並不設計做為破壞有機物。污染物質受熱後，使其水分及污染物質揮發，並使用真空抽除系統或載流氣體(carrier gas)來傳輸，蒸發之水蒸氣及揮發的有機物至後段之尾氣處理系統(如熱氣化系統或回收單元)，而脫附系統設計之爐床溫度及停留時間僅會將選處理之污染物質揮發，而不會予以氧化燃燒。加熱脫附處理流程，如圖 3.1.1-1。

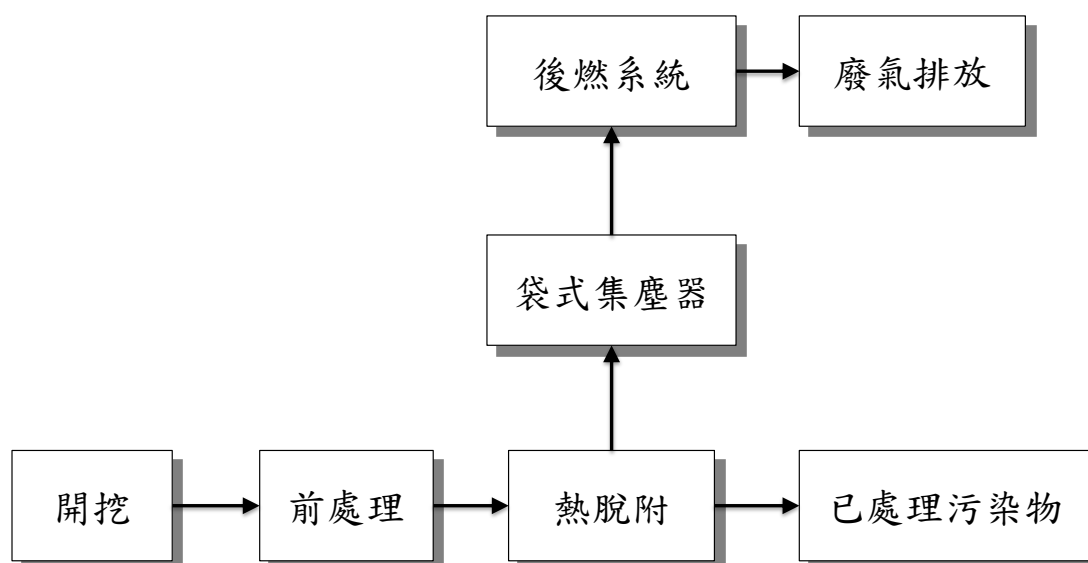


圖 3.1.1-1 典型之加熱脫附法之流程圖

3.1.2 適用條件

低溫加熱脫附法主要處理之污染物族群為揮發性非鹵化物及燃料油。但在降低處理效能下，亦可以處理半揮發性有機物。

而高溫加熱脫附法主要處理之污染物為半揮發性有機物、多環芳香族碳氫化合物、PCB 及殺蟲劑，同樣也可處理揮發性有機物及燃料污染的土壤，如 DNAPL，只是較不符合經濟效益。高溫加熱脫附法亦可應用在煉油廠之廢棄物、煤焦油之廢棄物、木材處理之廢棄物、受木餾油污染之土壤、受石油碳氫化合物污染的土壤、混合性污染物(放射性及有害性)、廢橡膠、殺蟲劑及廢漆。

加熱脫附處理過程中可能限制其應用性及有效性的因子，包括：

- 一、 污染物之粒徑大小及前處理之需求，將會影響加熱脫附系統之應用性及成本。
- 二、 依土壤的溼度高低，可能需要進行脫水程序。
- 三、 污染土壤中的大顆粒固體物會削弱系統傳熱功能，污染物之粒徑大小篩分或前處理。
- 四、 處理完成的土壤若含有重金屬物質則需再加以固化穩定化。
- 五、 黏土、砂土及含高腐植土成份之土壤與污染物質結合在一起時，會增加反應時間。

3.2 整治系統操作與設計

有關國外針對加熱脫附已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 3.2-1。

3.2.1 整治系統設計與操作要點

選擇是否採用加熱脫附法時，技術評估程序可參考圖 3.2.1-1，以決定加熱脫附法是否適用於個別場址。

本法係與受污染土壤之基質、污染物特性與間接加熱脫附系統尾氣處理單元等因素相關聯，因此整治前應先進行小規模之模場試驗或試燒計畫，以瞭解處理過程中可能影響或干擾處理成效之因子，進而作為全場整治作業熱脫附爐及二次污染控制處理單元之設計依據。

本法係以加熱脫附處理受 DNAPL 污染土壤，無論是低中溫脫附或高溫裂解之處理，在升溫過程中可能產生有毒或惡臭之氣體，因此需考量氣味的逸散問題與排放水對於環境之衝擊外，亦須考量周圍居民之環境品質與觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成在執行之延宕。

依加熱脫附器的操作溫度，可分為高溫加熱脫附法及低溫加熱脫附法兩大類，分述如下：

一、 高溫加熱脫附法(high-temperature thermal desorption, HTTD)

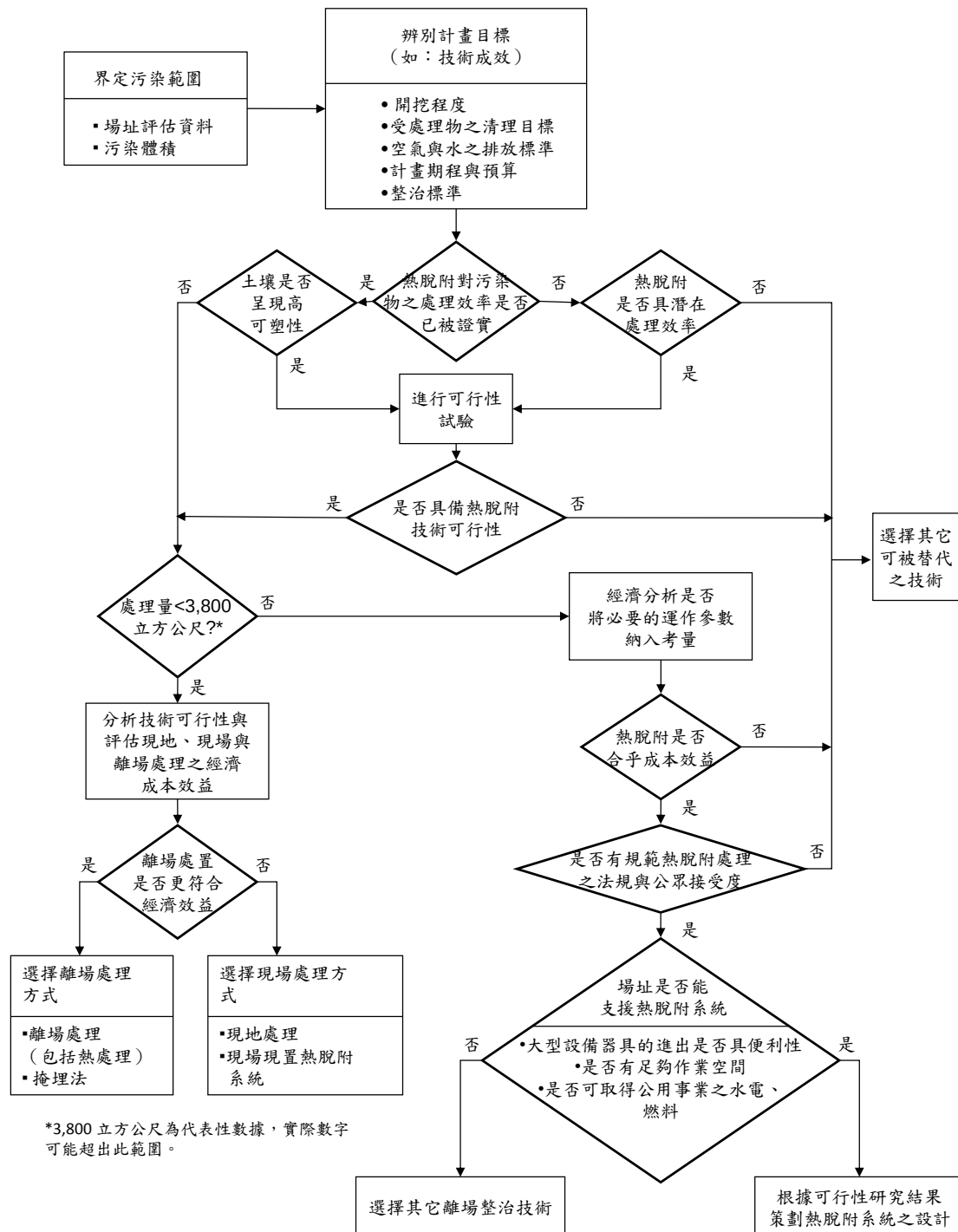
HTTD 係將脫附床的溫度加熱到 320°C 到 560°C 之間，並依場址特性，搭配脫氯、焚化、固化、穩定化之處理系統，合併處理。此技術實能將欲去除之目標污染物濃度降至低於 5 mg/kg 之下。

二、 低溫加熱脫附法(low-temperature thermal desorption, LTTD)

LTTD 是將脫附床的溫度提高到 90°C 到 320°C 之間。此技術可以成功地處理石油碳氫化合物污染的各類型土壤，目標污染物之破壞效率可達 95 % 以上。且處理後土壤除非被加熱至 LTTD 溫度範圍中較高的溫度外，亦可以保持原來的物理特性，使土壤的有機化合物並不會被破壞，保持了土壤當中的生物活性。

表 3.2-1 國外加熱脫附相關法規指引及規範

政府機關或單位	法規指引及規範名稱	制定或公告時間
美國環保署	Low Temperature Thermal Treatment (LT3) System (EPA/540/MR-92/019)	1992
美國環保署	Low Temperature Thermal Aeration (LTTA) System (EPA/540/MR-93/504)	1993
美國環保署	X-TRAX Model 100 Thermal Desorption System Chemical Waste Management (EPA/540/MR-93/502)	1993
美國環保署	Thermal Desorption System (EPA/540/R-94/507a)	1994
美國環保署	Thermal Desorption Treatment (EPA/540/5-94/501)	1994
美國環保署	Best Management Practices (BMPs) for Soil Treatment Technologies: Suggested Operational Guidelines to Prevent Cross-media Transfer of Contaminants During Clean-Up Activities (EPA/530/R-97/007)	1997



資料來源：NFESC, Overview of Thermal Desorptions Technology, p.8, 1998

圖 3.2.1-1 加熱脫附法技術評估程序流程圖

3.2.2 整治系統單元

本法已有許多商業化的產品，許多廠商的低溫加熱脫附系統的各項單元皆安裝在拖車上，以增加其機動性。主要設備分為加熱脫附系統及尾氣處理設備，個別說明如下。

一、 加熱脫附系統

脫附系統的點火加熱方式有三種型式，簡要說明如下：

(一)直接點火(direct fired)

直接點火的方式是直接污染物質的表面上點火，以脫附土壤上的污染物質，但是會有造成某些污染物質被氣化之缺點。

(二)間接點火(indirect fired)

間接點火之乾燥式脫附系統加熱系統中之空氣，藉由熱空氣與受污染土壤之直接接觸，脫附土壤中的水及有機污染物。在商業上由 CESC(Canonie Environmental Services Corporation)所發展的低溫加熱脫附系統(low-temperature thermal aeration)已成功地使用由土壤中去除 DDT 族群之污染物質。

(三)間接加熱(indirect heated)

主要是利用外部的點火旋轉脫附器，使污染物質中之水及有機污染物揮發，並導入一個由惰性氣體作為攜帶氣體的氣流中，將脫附的污染物質帶出，並由後端尾氣器處理系統將污染物回收或移除。前述國內使用之移動式加熱脫附處理系統是一種使用間接加熱脫附的方式，並採用氣體洗滌器的單元，使得該系統可以成功有效地去除土壤中的污染物質。

較常見的兩種加熱脫附系統為旋轉乾燥式加熱脫附系統及螺旋桿加熱脫附系統，摘要說明如下：

(一)旋轉乾燥式脫附器(rotary dryer)

旋轉乾燥式脫附器為一水平的圓柱體，其可以藉由間接或直接點火的方式加熱脫附器內的溫度。該類系統經常以自然的傾斜

及旋轉之方式設置，使得在污染物質脫附的過程中，溫度能夠均勻的分佈，可有效提高污物質脫附的效能。

(二)螺旋桿式加熱脫附器(thermal screw)

螺旋桿式加熱脫附器主要是利用中空的螺旋桿，熱藉由流體或蒸氣通過螺旋桿內部，加熱中空螺旋桿之外套管或葉片，以間接接觸加熱的方式，以脫附受污染物質，來間接加熱螺旋鑽外欲脫附的污染物質。

二、尾氣處理設備

前述的加熱脫附系統均需尾氣處理的設備，以去除微粒及氣相污染物，微粒以傳統之去除微粒的處理設備，例如溼式洗滌器(wet scrubbers)或袋式集塵器(fabric filters)去除，而氣相污染物則以濃縮的方式並伴隨著活性碳吸附之方式去除，或者設置第二燃燒室或加裝觸媒氧化器，將其脫附所產生的氣相污染物加以破壞。

三、加熱脫附系統點火方式

脫附系統的點火加熱方式有三種型式，簡要說明如下：

(一)直接點火(direct fired)

直接點火的方式是直接污染物質的表面上點火，以脫附土壤上的污染物質，但是會有造成某些污染物質被氣化之缺點。

(二)間接點火(indirect fired)

間接點火之乾燥式脫附系統加熱系統中之空氣，藉由熱空氣與受污染土壤之直接接觸，脫附土壤中的水及有機污染物。在商業上由 CESC(Canone Environmental Services Corporation)所發展的低溫加熱脫附系統(low-temperature thermal aeration)已成功地使用由土壤中去除 DDT 族群之污染物質。

(三)間接加熱(indirect heated)

主要是利用外部的點火旋轉脫附器，使污染物質中之水及有機污染物揮發，並導入一個由惰性氣體作為攜帶氣體的氣流中，將脫附的污染物質帶出，並由後端尾氣器處理系統將污染物回收

或移除。前述國內使用之移動式加熱脫附處理系統是一種使用間接加熱脫附的方式，並採用氣體洗滌器的單元，使得該系統可以成功有效地去除土壤中的污染物質。

3.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

離地整治技術之場址配置對防止土壤及地下水污染擴大頗具關鍵性，應設置明顯區別之作業區，受污染土壤清除、處理工作應於污染區內進行，並設備除污之工具。受污染土壤開挖、移除與運輸期間之環境污染控制措施，應依場址特性與污染範圍，研擬適當的預防性措施，供貯存與處理受污染土壤之作業區，應加以區隔並防止形成水坑。若需使用臨時蓄水池來貯存受污染之廢水或廢液，在蓄水池用完後應挖除受污染土壤。長期貯存或因場址狀況(例如場址地質屬易滲透區)，蓄水池應鋪設不透水布，避免污染物因洩(滲)漏，造成污染擴散之現象。設備除污區應屬硬表面地區，除污廢水應妥善收集、處理。

其他可用來防止土壤及地下水污染擴大之措施包括：

- (一)覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲透和逸散灰塵。
- (二)操作全程應備有吸附劑、泵或其他設備，以立即清理散(滴)落物
- (三)準備儲桶或其他形式容器於作業區之重要位置，並供迅速清理散(滴)落物之進出道路。
- (四)開挖區周圍構築地面分水渠，以控制逕流。
- (五)在開挖區下坡處構築儲流池，以圍堵受污染之逕流。

二、成效監測或防止污染擴大監測設備

評估土壤加熱脫附系統的成效與後續處理與處置的方式有關。如土壤加熱脫附法作為單一的整治技術，經處理後之土壤應符合土壤污染整治標準，如處理後土壤規劃送掩埋場掩埋，另應進行毒性特性溶出試驗(TCLP)檢測。

成效監測詳細內容包括監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率彙整如表 3.2.3-1。

表 3.2.3-1 加熱脫附整治系統成效監測

項目	加熱脫附整治系統	尾氣處理系統	經處理土壤
監測目的	系統設備成效評估	避免對環境造成影響 處理設備成效評估	整治成果評估
監測對象	進料區之污染土壤 熱脫附器	尾氣處理系統排出氣體或微粒污染物 尾氣處理系統	經處理土壤
分析項目	進料速度、進料土壤粒徑及溼度、熱脫附器系統溫度	排出氣體或微粒污染物之污染物項目檢測 尾氣處理系統相關操作參數 如廢氣處理量、集塵氣壓降、產生廢水之污染物含量	污染物項目(總量或 TCLP)
監測頻率	每週 1 次	每月 1 次	每批次 1 次

3.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下針對對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目進行說明。

一、對環境之影響

本法於受污染土壤加熱脫附過程中，於尾氣處理系統排出之廢氣及廢水，可能對環境中空氣及水質造成影響，因此建議於操作加熱脫附系統時，需特別注意尾氣處理系統的操作情形。

二、水污染防治措施計畫

針對受污染土壤在進行加熱脫附時，所產生之氣體經尾氣處理設備轉化為液體，或經過濕式洗滌塔所產生之廢水，再進入後端廢水處理單元處理後，排放至地面水體。而廢水處理設備之量體或廢水中所含之污染物質，則需參考水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法之相關規定辦理。

「水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法」(95.10.16)中，第 5 條規定事業排放廢(污)水於地面水體，且符合下列規定之一者(1)設計或實際最大廢水產生量每日 50 公噸以上、(2)數事業共同設置之廢(污)水(前)處理設施或貯留設施，設計或實際最大廢水產生量總合每日 50 公噸以上、(3)事業或共同設置廢(污)水(前)處理設施、貯留設施之數事業之一，產生之原廢(污)水中所含鉛、鎘、汞、砷、六價鉻、銅、氰化

物、有機氯劑、有機磷劑或酚類濃度超過放流水標準等，應申請排放地面水體許可證。因此本技術設置操作前，需事先檢視該系統所產生之廢水排放量與試運轉之水質資料，作為後續是否申請排放許可之依據。

三、空氣污染防治計畫

受污染土壤於脫附爐中所產生之氣體，經由末端空氣污染防治措施捕捉懸浮微粒物後，廢氣經由煙囪排入至大氣中。

依據「空氣污染防治法」(95.05.30)第 24 條規定：公私場所具有經中央主管機關指定公告之固定污染源，應於設置或變更前，檢具空氣污染防治計畫，向直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關委託之政府其他機關申請核發設置許可證，並依許可證內容進行設置或變更。

前項固定污染源設置或變更後，應檢具符合空污本法相關規定之證明文件，向直轄市、縣(市)主管機關或經中央主管機關委託之政府其他機關申請核發操作許可證，並依許可證內容進行操作。

固定污染源設置與操作許可證之申請、審查程序、核發、撤銷、廢止、中央主管機關委託或停止委託及其他應遵行事項之管理辦法，由中央主管機關定之。

四、潛在之危害

潛在之危害彙整如表 3.2.4-1。

表 3.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	• 加熱脫附系統	• 機具設備危害	• 妥善操作機具 • 人員應戴聽力防護設備
	• 加熱脫附系統操作	• 直接接觸	• 妥善著 D 級防護及高溫作業防護設備
	• 加熱脫附系統點火加熱設備操作	• 火災與爆炸	• 含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強人員訓練與緊急應變的能力 • 通風設備及機具防爆處理 • 高溫作業
化學性風險	• 已處理之污染土壤採樣時 • 尾氣處理系統廢氣及廢水採樣	• 衍生廢棄物	• 於密閉系統中操作 • 使用適當的個人防護裝備

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 22, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

3.3 成本及期程評估

一、成本分析

(一) 主要之成本因素

加熱脫附系統之成本係取決下列因素：

1. 經濟規模：處理之受污染物數量對處理成本之高低其有重要之決定因素。
2. 處理物質之濕度：若欲處理之受污染物其濕度愈高，則需要更多的熱能輸入，亦即會增加燃料/能源之成本。

(二) 成本分析

茲依據場址之大小及處理容易與否，假設不同之處理情況進行成本估算，其處理費用約為每公噸 44 美元至 252 美元，新台幣 1,540- 8,820。

二、合理整治期程

整理期程需視所使用之加熱脫附處理系統之設計處理效率及欲處理之受污染物質之量而定，並無一定之整治期程，惟於估算整治期程仍需考量熱脫的處理系統之設置期程及完成整治後離場之設備拆除時程。

四、焚化 (Incineration)

4.1 整治技術簡介

4.1.1 原理

焚化(Incineration)技術為一成熟且商業化之處理技術，本法係直接以高溫破壞受 LNAPL 或 DNAPL 污染土壤、污泥與廢液中之有機污染物，破壞去除效率可達 99.999 % 以上。焚化設備可以移至污染場址進行處理，亦可將污染土壤運到固定式焚化設施進行處理。在各種有害物質處理方法中，就兼具安定、無害、減量之效果而言，焚化處理是最佳的方法。

本法是利用溫度 870℃ 到 1,200℃ 間之高溫，破壞分解及移除污染物，其移除污染物之效率可達 99.999%，幾乎可以把污染物完全加以破壞，但於焚化過程所產生的廢氣及灰渣都必須進一步地加以處理，以符合環保法規之要求，焚化處理之流程如圖 4.1.1-1 所示。

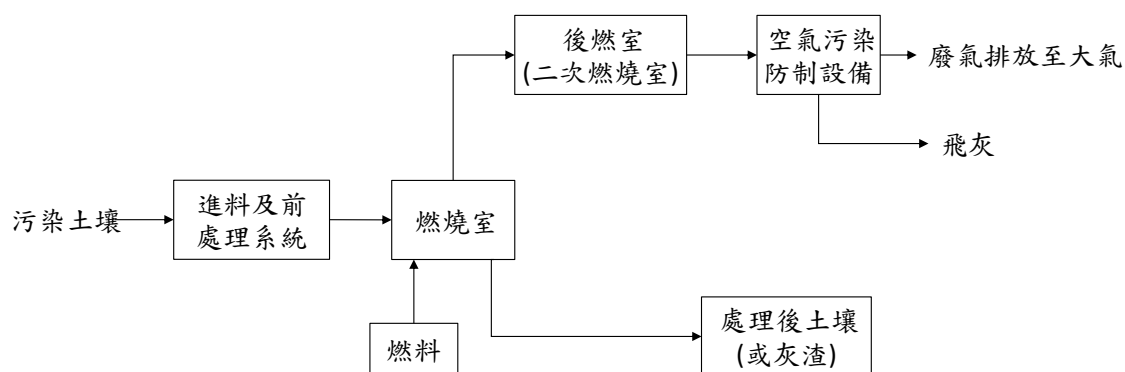


圖 4.1.1-1 焚化技術原理流程圖

4.1.2 適用條件

焚化法多廣泛應用於整治受有機污染物污染之土壤，包括揮發性有機物、半揮發性有機物、農藥、溶劑、PCB、戴奧辛、石油碳氫化合物之污染土壤。

焚化技術係利用高溫氧化燃燒，將土壤中的污染物轉變為安定之氣體

或物質的方法。受污染土壤在燃燒室中被加熱至特定的溫度，使污染物從土壤中轉移至氣體中，燃燒室出口中心溫度應保持 1,000 °C 以上，燃燒氣體在二次燃燒室之滯留時間至少在 1 秒以上，方能有效地破壞污染物。

本法操作與相關處理設施之優缺點，如表 4.1.2-1 所示。

表 4.1.2-1 焚化技術優缺點比較表

優點	缺點
1. 利用污染物特性，升溫分解、裂解有毒的物質，而以無害物質存在。 2. 整治期程較短 3. 焚化產生蒸氣或電力等能源，出售這些能源可沖抵焚化爐操作成本。	1. 焚化後灰渣的處理問題 2. 氣體排放(戴奧辛和呋喃)及重金屬蒸氣(水銀)的影響 3. 處理單價高，經濟回收卻很小

資料來源：參考自美國 Federal Remediation Technologies Roundtable(FRTR) 網站，
<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-23.html>。

4.2 整治系統操作與設計

4.2.1 整治系統設計與操作要點

本工法處理技術之選定係與受污染物土壤基質、污染物特性、污染物熱值及焚化系統尾氣處理排放單元等因素相關聯，因此整治前應先進行小規模之模場試驗或試燒計畫，以瞭解焚化處理過程中可能影響或干擾處理成效之因子，進而作為全場整治作業焚化爐及二次污染控制處理單元之設計依據。

焚化處理係以直接加熱處理受 DNAPL 污染土壤，無論是中溫或高溫焚化之處理，在升溫過程中可能產生有毒或惡臭之氣體，以及土壤水分因隨溫度升高而蒸發，排放至空氣污染控制單元，因此除需考量氣味的逸散問題及排放空氣對於環境之衝擊外，亦須考量周圍居民之環境品質與觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成在執行之延宕。

過程中可能限制其應用性及有效性的因子包括：

- 一、 於特定的場址受污染物質之粒徑大小及前處理之需求，將會影響焚化處理系統之應用性及成本。
- 二、 焚化處理完成的殘留土壤中，若含有重金屬則需再加以固化穩定化後掩埋。

- 三、 焚化系統需加裝尾氣處理設施，以移除焚化所產生重金屬蒸氣(如鉛、鎘、汞及砷)，並經檢測確認無污染之虞，於煙道排放。
- 四、 在焚化處理爐中之重金屬易與其他如硫化物、氯化物反應，產生更具毒性或揮發性之化合物；所產生中間產物亦將在空氣污染防制單元中處理。
- 五、 焚化過程所產生低熔點鈉、鉀金屬之飛灰，往往沾黏煙道管路中。

4.2.2 整治系統單元

一、 燃燒室系統

(一)旋轉窯(rotary kiln)

旋轉窯焚化爐主要包括微傾(傾斜度5度以下)可轉動的爐體、二次燃燒室及空氣污染防制設備。污染土壤或廢棄物則由較高的爐體一端進入，在爐內水平移動並通過爐體，處理後的土壤或廢棄物灰爐於較低的一端排出；二次燃燒室用以延長廢氣滯留時間，使污染物可被充分燃燒破壞，使戴奧辛物質被氧化為無害的氣體；空氣污染防制設備通常包括驟冷段(防止戴奧辛再產生)、填充式吸附塔、集塵器及其他處理設備。焚化效率與爐內氣體的擾動、溫度及滯留時間有關，旋轉窯對污染物的破壞去除率可達到99.9999%或更嚴格的破壞去除率。

(二)循環流化床(circulating bed combustor)

循環流化床燃燒技術係利用高速氣流產生擾流燃燒區，將固態受污染物在燃燒室充分均勻加熱，以破壞有毒的碳氫化合物，而相較傳統焚化爐的燃燒室溫度為 1,450 to 1,600 °F 具有較低處理溫度，且循環流化床之燃燒室溫度因熱氣旋擾流而產生周遭相同的溫度，此外，在燃燒期間由於完全混合污染物及低的燃燒溫度，可降低氮氧化物(NO_x)和一氧化碳(CO)氣體濃度與減少排放。一般而言，循環流化床燃燒技術係以煤和吸附劑(石灰石)加入燃燒室的床層中，從爐底鼓風使床層上之受污染物懸浮，進行流化燃燒。

(三) 流體化床(fluidized bed)

流體化床使用高速空氣，在一個燃燒循環過程中，循環加熱懸浮受污染物，本法處理溫度可升溫至 870 °F。流體化床焚化爐係於爐體內無任何機械結構或元件，於爐底充填石英砂，將石英砂加熱到預定溫度後，將擬焚化之污染物投入爐內，藉由污染物內含熱質保持石英砂之熱度不墜，也因此流體化床焚化爐於冷啟爐時需燃料外，於正常焚化操作之下，無需輔助燃料，除非該焚化爐所焚化之廢棄物熱質過低，或為達環保法規所規定之爐內焚化溫度(如醫療或感染性廢棄物)得藉助輔助燃料提升溫度；流體化床焚化爐係相當省能源及環保之焚化爐，爐內所使用之石英砂有其必要條件：顆粒大小參配比、硬度、砂含量等為其要件，其爐內焚化溫度約為攝氏 850～950 度，投料焚化前須有絞碎作業，使污染物細化，投入爐內可充分燃燒，也因此它與其他型式焚化爐有別，底渣僅約 2%，而飛灰則達約 10%。在操作上，起爐程序是否符合要領影響成敗甚鉅，正常操作下爐內溫度之穩定性則是廢氣排放是否可符合環保標準以及停爐維修期間長短之依據。

二、尾氣處理系統

焚化爐尾氣處理系統需透過一個空氣污染控制系統，以除去懸浮粒子並中和、去除酸性氣體(HCl、NO_x 與 SO_x)，相關設備包括利用袋式集塵器、文式洗滌塔或濕式靜電集塵器去除懸浮粒子，以及利用袋式洗滌塔和水霧乾燥器除去燃燒反應產生的酸氣體。

土壤中的瓦礫或其他大型物體將導致操作上的困難，應先行篩分出來。當污染土壤面積過於廣大或污染擴及深層土壤時，實際開挖移除受污染之土壤，將使得本法在經濟或技術層面考量上有所限制。此外，含氯有機物所產生酸性氣體的排放必須列入考量，並採用適當的空氣污染防制設備，以避免對環境可能造成的傷害。

4.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

工作地區之適當配置(包括支撐設施)對防止土壤及地下水污染擴大頗具關鍵性。供疊置和處理桶裝廢棄物和以防染土壤之操作區，應加以分階以防止形成水坑。若需使用臨時蓄池來儲存液體，可採用厚黏土不透水層，並在蓄池用完後挖除受污染土壤。長儲存期限或不良場地狀況(例如廢棄物在地下水層中或可滲透非飽和區)，則必須使用合成不透水布之系統。設備除污區應屬硬表面地區，方能以周邊邊石截流沖洗水，並藉中央水槽和周邊水坑收集此類液體。

其他可用來防止土壤及地下水污染擴大之措施包括：

- (一)覆蓋以開挖之污染土壤，以防止污染物之滲透和逸散灰塵。
- (二)操作全程使用吸附劑、畚或其他設備以立即清理潑散物。
- (三)保持儲桶、補強桶或其他形式容器於工作地區之重要位置，和供迅速清理潑散物之進出道路。
- (四)場地周圍構築地面分水渠以控制逕流。
- (五)在場地下坡處構築儲流池以圍堵受污染之逕流。
- (六)避免不相容廢棄物之任意混合。立即補強或輸送滲漏中或即將滲漏之任何桶內物質，採樣後立即再密封儲桶。
- (七)使用砂、泡沫等於星火蔓延前加以壓制。
- (八)避免儲存爆炸物或反應性廢棄物於建築物附近或封閉地區內。
- (九)覆蓋已知具水反應性之廢棄物。

二、成效監測或防止污染擴大監測設備

焚化處理系統之成效會隨著不同種類的加熱系統有所差異，於此所列監測工作以較常使用共通之項目為重點；監測對象包括受污染土壤處理成效與二次污染防制處理設備等，其監測目的包括相關系統設備成效評估、整治成果評估、避免對環境造成影響與及防止污染擴大之監測工作等。

成效監測詳細內容，包括：監測項目、監測目的、監測對象、分析項目及監測頻率，彙整如表 4.2.3-1 所示。

表 4.2.3-1 土壤焚化整治系統成效監測

項目	土壤整治系統	廢水處理系統	尾氣處理系統	經處理土壤或衍生廢棄物
監測目的	系統設備成效評估	避免對環境造成影響 處理設備成效評估	避免對環境造成影響 處理設備成效評估	整治成果評估
監測對象	進料區之污染土壤	放流(或回流)廢水	尾氣單元	乾淨土壤 污泥或衍生廢棄物
分析項目	進料速度、土壤基質、處理粒徑(cut size)、污染濃度	廢水流量、pH 值、污染物項目	煙道排放檢測、底灰檢測	污染物項目(總量或 TCLP)
監測頻率	每週 1 次	每月 1 次	每週 1 次	每批次或每噸 1 次

4.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

整治系統於系統設置操作及維護上仍需考量對附近環境及操作人員之影響，以下就對環境之影響、潛在之危害及個人防護裝備等項目，分別進行說明。

一、對環境之影響

本法於污染土壤挖掘與以焚化處理過程中，會對環境中之空氣造成影響；亦有廢水排放之問題，如排放至地面水體，若未妥善處理，會造成二次污染。

二、水污染防治措施計畫

污染土壤焚化時所產生之氣體，經尾氣處理設備將其轉化為液體，或經過濕式洗滌塔所產生之廢水，再進入後端廢水處理單元處理後，排放至地面水體。而廢水處理設計之量體或廢水中所含之污染物，則需參考水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法之相關規定辦理。

「水污染防治措施計畫及許可申請審查辦法」(95.10.16)中，第五條規定事業排放廢(污)水於地面水體，且符合下列規定之一者(1)設計或實際最大廢水產生量每日 50 公噸以上、(2)數事業共同設置之廢(污)水(前)處理設施或貯留設施，設計或實際最大廢水產生量總合每日 50 公噸以上、(3)事業或共同設置廢(污)水(前)處理設施、貯留設施之數事業之一，產生之原廢(污)水中所含鉛、鎘、汞、砷、六價鉻、銅、氰化物、有機氯劑、有機磷劑或酚類濃度超過放流水標準等，應申請排放

地面水體許可證。

三、空氣污染防治措施計畫

受污染土壤在進入爐內焚化時所產生之氣體，經由末端空氣污染防治措施捕捉懸浮微粒物後，廢氣經由煙囪排入至大氣中。

依據「空氣污染防治法」(95.05.30)第 24 條規定：公私場所具有經中央主管機關指定公告之固定污染源，應於設置或變更前，檢具空氣污染防治計畫，向直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關委託之政府其他機關申請核發設置許可證，並依許可證內容進行設置或變更。

前項固定污染源設置或變更後，應檢具符合本法相關規定之證明文件，向直轄市、縣(市)主管機關或經中央主管機關委託之政府其他機關申請核發操作許可證，並依許可證內容進行操作。

固定污染源設置與操作許可證之申請、審查程序、核發、撤銷、廢止、中央主管機關委託或停止委託及其他應遵行事項之管理辦法，由中央主管機關定之。

四、潛在之危害

彙整潛在危害於表 4.2.4-1。

表 4.2.4-1 潛在之危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護裝備
物理性風險	污染土壤開挖時	機具設備危害	妥善操作大型開挖機具機具人員於操作機具附近，應戴聽力防護設備
	輸送污染土壤時	輸送設備危害	輸送帶或傳動軸應設置箱蓋
	揮發性有機物污染，於破碎與粉碎時 洗滌劑蒸餾回收時 焚化能源添加/使用時	火災與爆炸	含高濃度揮發性有機物污染之情況下，應加強操作人員的訓練與緊急應變的能力 蒸餾設備設置洩壓閥與緊報系統
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時	感電	當有任何工作需接觸配電盤時，需停止運轉並關閉電源才可進行，相關電氣工作應由合格之電氣技師負責執行
化學性風險	工作人員可能會暴露於尾氣處理單元洩散或揮發之環境中	尾氣處理單元	確實裝設監測系統及防漏預警機制 使用適當的呼吸防護裝備
	廢水處理時	衍生廢棄物與污泥等	於密閉系統中操作 使用適當的個人防護裝備

資料來源：USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 23, EM1110-1-4007, 15 August 2003.

4.3 成本及期程評估

離地焚化對於土壤處理的成本，包含所有程序約為每公噸 914 美元到 1,540 美元(表 4.3-1)；若現地處理則可降低搬運土壤的費用，其中受 PCB 及戴奧辛污染的土壤焚化的費用約每公噸 1,650 美元到 6,600 美元，新台幣 57,750- 231,000。

整治期程需視所使用處理系統之設計處理效率及欲處理之受污染物質之量而定，及完成整治後離場之設備，因此無一定之整治期程。

表 4.3-1 焚化處理經費分析

技術難度	方案一	方案二	方案三	方案四
	小規模		大規模	
	簡易	複雜	簡易	複雜
污染物基質	Soil	Sediment	Soil	Sediment
污染物特性	SVOC	SVOC	SVOC	SVOC
系統規模				
污染物性質	Soil	Sediment	Soil	Sediment
污染物量體(CY)	15,000	15,000	100,000	100,000
粒徑處理	No	Yes	No	Yes
安全防護等級	D	D	D	D
廢棄物：				
濕度 (%)	20	55	20	55
灰飛 (%)	78	40	78	40
密度 (Lbs/CY)	2,430	2,430	2,430	2,430
其他花費：				
整治設計規劃 (3%)	美金	347,647	511,396	2,024,029
	新台幣	12,167,645	17,898,860	70,841,015
焚化設備建造	美金	11,588,242	17,046,523	67,467,651
	新台幣	405,588,470	596,628,305	2,361,367,785
合計	美金	11,935,889	17,557,919	69,491,680
	新台幣	417,756,115	614,527,165	2,432,208,800
每 1m ³ 處理費	美金	1,047	1,540	914
	新台幣	36,645	53,900	31,990

資料來源：參考自美國 Federal Remediation Technologies Roundtable(FRTR) 網站
<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/Incineration.pdf>