

土壤及地下水重金屬污染
整治作業參考指引
(104 年版)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-06B-2015-003

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.....	1-5
第二章 整治技術應用現況與相關法令	2-1
壹、整治技術發展應用現況.....	2-1
貳、國內污染場址整治期間相關環保法令.....	2-17
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.....	3-7
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
附件一 現地整治技術	附件一-1
一、監測式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation).....	附件一-1
二、現地生物整治法(In-Situ Bioremediation).....	附件一-14
三、玻璃化法(Vitrification).....	附件一-25
四、添加土壤改良劑法(Application of Soil Amendments).....	附件一-34
五、滲透性反應牆法(Permeable Reactive Barriers).....	附件一-42
六、反應帶整治法(Reactive Zones).....	附件一-54
七、電動力法(Electrokinetics).....	附件一-66
八、植物整治法(Phytoremediation).....	附件一-80
九、地下水抽出及處理法(Pump and Treat).....	附件一-97
十、圍堵處理法(Containment).....	附件一-117

十一、土壤淋洗法(Soil Flushing)	附件一-124
附件二 離地整治技術	附件二-1
一、高溫礦冶分離法(Pyrometallurgical Separation).....	附件二-1
二、固化/安定化法(Solidification/ Stabilization).....	附件二-5
三、開挖及離場處理法(Excavation and off-site disposal).....	附件二-21
四、土壤清洗法(Soil Washing).....	附件二-28

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.1-1	美國關切污染物種類與場址數量統計..... 2-4
圖 2.1-2	美國重金屬鉛污染物場址整治技術應用..... 2-4
圖 3.1-1	整治技術選取考量重點..... 3-2
圖 3.2-1	台灣中部某場址開挖示意圖..... 3-9

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.3-1	現地整治技術摘要說明..... 1-4
表 1.3-2	離地整治技術摘要說明..... 1-5
表 1.4-1	專有名詞中英文對照表..... 1-5
表 2.1-1	美國超級基金場址土壤污染整治技術應用..... 2-2
表 2.1-2	美國超級基金場址地下水污染整治技術應用..... 2-3
表 2.1-3	民國 80-90 年間國內土壤重金屬污染整治案例彙整表..... 2-7
表 2.1-4	民國 92-98 年間國內土壤重金屬污染整治案例彙整表..... 2-9
表 2.1-5	農地重金屬污染改善方法優缺點比較表..... 2-11
表 2.1-6	土壤及地下水之重金屬污染整治技術篩選矩陣表..... 2-15
表 2.1-7	整治列車技術彙整表..... 2-16
表 3.1-1	地下水重金屬污染整治方法建議..... 3-4
表 3.1-2	土壤及地下水之重金屬污染整治技術篩選矩陣表..... 3-5
表 3.1-3	整治列車技術彙整表..... 3-6
表 3.2-1	台灣中部某場址資訊..... 3-8
表 3.2-2	美國 KOP 場址資訊..... 3-10
表 3.2-3	美國 KOP 場址整治前後土壤重金屬濃度..... 3-10
表 3.2-2	美國奧勒崗州污染場址資訊..... 3-12
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

行政院環境保護署(以下簡稱環保署)「土壤與地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)於民國 89 年 2 月 2 日公告並經 92 年 1 月 8 日與 99 年 2 月 3 日兩次增修,即積極根據此法源,針對全國農地、加油站、儲槽、工廠及非法棄置場址等進行全面性調查。調查結果發現,土壤及地下水污染場址中,以重金屬污染最為嚴重,其次為油品、含氯有機溶劑等。根據環保署訂定發布的土壤及地下水污染管制標準,除了農地主要受重金屬污染外(例如桃園高銀化工附近農地的鎘污染),工廠的重金屬污染亦佔了大部份(例如台灣金屬礦業公司土壤的砷、銅、汞、鋅、鉻污染、正泰化工的汞污泥、台中進玉金屬鑄造廠土壤的鉛污染、中石化安順廠土壤的汞污染、中石化高雄前鎮廠土壤的汞污染等),顯示工業所造成土壤及地下水重金屬污染的問題是不容忽視的。

為提供土壤及地下水重金屬污染整治場址之整治技術選取、系統設計與操作維護等依循規範,環保署特編撰「土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之整治技術選取、系統設計要點與操作維護注意事項參考手冊」,作為環保機關、專業技術顧問機構執行各場址重金屬污染改善時,執行之參考依據;並可作為污染行為人、土地所有人、土地管理人及土地使用人瞭解重金屬污染場址改善之程序及方法,以利選取最適用的改善方法,進行重金屬污染場址的整治作業。

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「土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引」(以下簡稱本指引)。然而,考量到目前國內關切污染物以重金屬為主,故無機陰離子內容不於本指引呈現。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。

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，在土壤及地下水受重金屬污染場址，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，應參照環保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、 本指引並不代表環保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。因此說明污染場址「整治技術選取策略」與「國內污染場址整治期間相關環保法令」，可以建立讀者對於污染場址於整治技術選取時的主要觀念，以及改善污染場址所需瞭解的管理制度。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。

第三章 污染場址整治技術選取策略

說明各種不同場址類型適用之整治技術選取概念，並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

彙整重金屬污染場址於現地進行污染改善之整治技術，共 11 種，彙整如表 1.3-1。在附件中個別說明說明其整治技術之原理、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

彙整重金屬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(摘要說明如表 1.3-2)，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。

表 1.3-1 現地整治技術摘要說明

序號	技術名稱	土壤	地下水	摘要說明
1.	監測式自然衰減法	✓	✓	在有利的土壤及地下水環境中，無人為干預而自然發生的衰變現象，進行污染物質質量、毒性、移動性、體積或濃度。
2.	現地生物整治法	✓	✓	如同監測式自然衰減法，現地生物整治法尚未發展到用於重金屬污染整治的階段，故本節以有機污染物進行說明。
3.	玻璃化法	✓		主要處理受重金屬污染之土壤
4.	添加土壤劑改良法	✓		應用土壤改良法是改變土壤的物理、化學或生物特性，間接限制污染物的暴露途徑(例如土壤覆蓋)，或降低生物的可利用性(例如改變土壤質地、有機質、pH、CEC 等)。
5.	滲透性反應牆法		✓	屬於長期的整治技術並可於短期發揮成效，可利用生物作用(好氧或厭氧環境)、吸附或沉澱方法去除無機陰離子，或以零價鐵還原地下水中的重金屬。
6.	反應帶整治法		✓	反應帶整治法是現地整治技術，利用微生物或化學藥劑，將污染物降解、轉化或沉澱，降低污染物的毒性或侷限污染物的移動。
7.	電動力法	✓	✓	電動力整治技術可以現地或離地方式應用，適用於飽和與不飽和層土壤，處理重金屬與無機陰離子污染物。
8.	植物整治法	✓		植生復育法藉由適當的植物吸收土壤中的污染物質，並且可提高微生物在受污染土壤中的活性，支持其持久性的降解能力，故可用於處理低濃度的重金屬或無機陰離子污染。植生復育法可與電動力法組合成整治列車，前者處理淺層土壤中的污染，後者則處理深層土壤。
9.	地下水抽出及處理法		✓	抽出及處理法是應用普遍、發展成熟的技術，兼具污染物去除與水力控制的功能，抽出的地下水經由物理、化學或生物技術加以處理，達到污染物去除的整治目的。
10.	圍堵處理法		✓	屬於控制技術，隔離受污染地下水，本法不能去除地下水污染物，故不屬整治技術，必須搭配其他整治技術才能達到去除污染物的目的。
11.	土壤淋洗法	✓		利用萃取液或螯合劑將土壤中重金屬，或以氧化鐵、氧化鈣或石灰水將土壤中無機陰離子淋洗至含水層中

表 1.3-2 離地整治技術摘要說明

序號	技術名稱	土壤	地下水	摘要說明
1.	高溫礦冶分離法	✓		主要處理受重金屬污染之土壤，且考量經濟效益，高溫礦冶分離法適用於高污染、低數量的受污染土壤。一般會與具減量成效的前處理方法組合，其後處理則依廢棄物最終處理方法。
2.	固化/安定化法	✓		可處理重金屬與無機陰離子，若考量經濟效益，固化/安定化法適用於高污染、低數量的受污染土壤。一般會與具減量成效的前處理方法組合，其後處理則依廢棄物最終處理方法。
3.	開挖及離場處理法	✓		可處理重金屬與無機陰離子，若考量經濟效益，開挖及離場處理法適用於高污染、低數量的受污染土壤。
4.	土壤清洗法	✓		可處理重金屬與無機陰離子，若考量經濟效益，土壤清洗法適用於高污染、低數量的受污染土壤。

1.4 專有名詞中英文對照表

於本指引中提及之整治技術使用、相關法令或特殊參數與設備名稱之專業用語中英文對照表，請參見表 1.4-1。

表 1.4-1 專有名詞中英文對照表

英文	中文
Air Sparging (AS)	空氣注入法
Alkali content	鹽類
Application of Soil Amendments	添加土壤改良劑法
Backfilling	回填
Bioleaching	生物淋洗
Bioremediation	生物整治法
Cementitious S/S	膠結安定/固化處理
Chelating Resins	螯合樹脂法
Containment	圍堵
Coprecipitation	共沈澱
Cosolvent	共溶劑
Deep soil mixing	深層土混合法
Directional well	導流井
Electrodialysis(ED)	電透析法
Electrokinetics	電動力法
Enhanced biodegradation	加強式生物降解法
Excavation and off-site disposal	開挖及離場處理法
Ex-situ	離地
Extraction well	抽取井

英文	中文
Hot spot	高污染區
Immobilization Mechanism	固定作用機制
Injection well	注入井
In-situ	現地
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
Monitored Natural Attenuation(MNA)	監測式自然衰減法
Performance monitoring	操作性監測
Permeable Reactive Barriers (PRB)	滲透性反應牆法
Phytodegradation	植物降解
Phytoextraction	植物萃取
Phytoremediation	植物整治法
Phytostabilization	植物穩定
Phytotransformation	植物轉化
Pilot test	模場試驗
Precepitation	沈澱
Pump and Treat (P&T)	地下水抽除與處理
Pyrometallurgical Separation	高溫礦冶分離法
Quality Assurance Project Plan(QAPP)	計畫品保規劃書
Reactive Zones	反應帶整治法
Rebound	回升
Remediation technologies screen matrix	整治技術篩選矩陣
Soil Flushing	土壤淋洗法
Soil fracuring	土壤破裂法
Soil Washing	土壤清洗法
Solidification	固化法
Solidification/Stabilization(S/S)	固化/安定化技術
Soluble Microbial Products(SMP)	溶解性微生物產物
Treatment train	整治列車
Vitrification	玻璃化法

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

本指引茲就環保先進國家污染場址管理制度，與整治技術發展應用現況，進行資料蒐集與彙整，並重點式說明我國相關管理制度與整治技術發展應用概況，提供各位讀者參考。

一、 國外

根據美國環保署超級基金發表年報，統計 2009 年到 2011 年共發表 459 處污染改善完成報告，其中有 60% 以上為土壤污染，約有 45% 為地下水污染場址。根據統計共有約一半的場址皆採用兩種以上整治技術，土壤及地下水污染整治技術應用說明於后。

(一) 土壤整治技術

以 2009 到 2011 年與 2005 到 2008 年區間，土壤污染所採用之現地及離地整治技術比較彙整如表 2.1-1。可看出現地整治技術與離地整治技術應用情況，皆各維持在約 50% 與 67% 左右。現地整治技術應用最為頻繁的為土壤氣體抽除、化學處理(包含現地化學氧化, ISCO, 及現地化學還原, ISCR)、固化/穩定化、現地熱處理、生物處理及多相抽除技術。其中，化學處理的應用從 7% 提昇到 14%。近年來，物理分離則是在離地處理中較常被使用的，雖然固化/穩定化處理應用從 19% 下降至 13%，仍為離地處理的第二大宗。

(二) 地下水整治技術

以 2009 到 2011 年與 2005 到 2008 年區間，土壤污染所採用之現地及離地整治技術比較彙整如表 2.1-2。地下水污染整治技術地下水污染整治技術主要為抽出處理、現地處理、監測式自然衰減及管理單位管制。抽出處理技術已經達到穩定應用狀態，約維持在 25% 的使用率。現地處理技術主要以生物整治、化學處理為最大宗，分別佔現地處理技術之二分之一到三分之一。管理單位管制的使用百分比提昇，是因為美國環保署在 2000 年發表 A Site Manager's

Guide to Identifying, Evaluating and Selecting Institutional Controls at Superfund and RCRA Corrective Action Cleanups, EPA 540-F-00-005, OSWER 9355.0-74FS-P, September 2000 有關。

表 2.1-1 美國超級基金場址土壤污染整治技術應用

整治技術分類	2005-2008		2009-2011	
	場址數量	百分比	場址數量	百分比
現地整治技術	72	48%	59	50%
土壤氣體抽除	32	21%	25	21%
化學處理	11	7%	17	14%
固化/穩定化	14	9%	11	9%
現地熱處理	14	9%	7	6%
生物整治	10	7%	4	3%
多相抽除	6	4%	3	3%
建構污染處理溼地	0	0%	2	2%
地下反應阻絕 (Subaqueous reactive cap)	0	0%	2	2%
沖排處理	2	1%	1	1%
壓裂處理 (Fracturing)	1	1%	1	1%
植物整治	2	1%	0	0%
離地整治技術	98	65%	80	67%
物理分離技術	31	21%	33	28%
固化/穩定化	29	19%	15	13%
抽出處理	18	12%	13	11%
非特定的離地處理	10	7%	11	9%
回收	15	10%	10	8%
非特定的現場處理	2	1%	6	5%
植物整治	0	0%	5	4%
離地化學處理	25	3%	4	3%
生物整治	4	3%	2	3%
NAPL 回收	11	1%	1	1%
離地熱處理	1	1%	1	1%
非特定的熱處理	1	1%	1	1%
其他	13	1%	0	0%

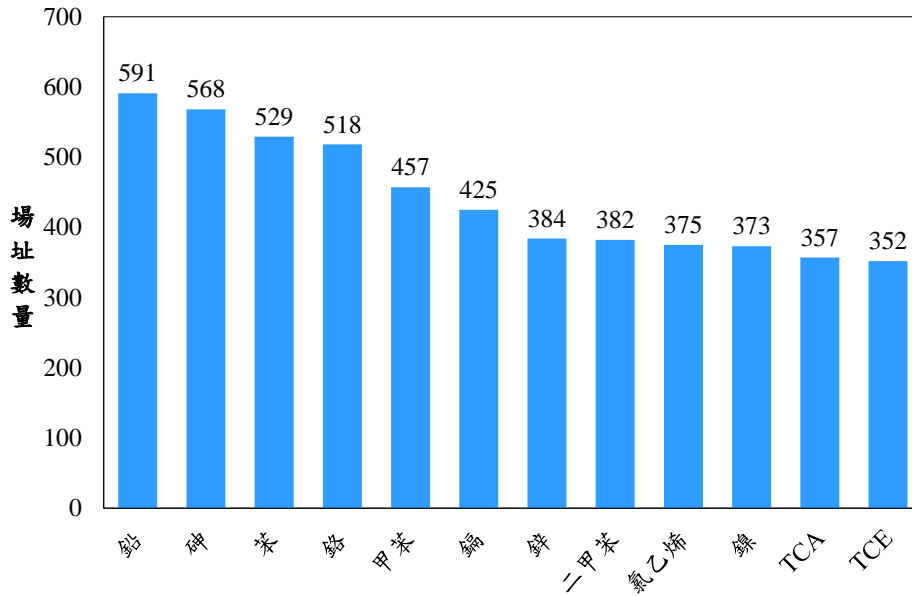
資料來源：USEPA, Superfund Remedy Report: Annual Status Report (14th Edition) (EPA 542-R-13-016) 2013

表 2.1-2 美國超級基金場址地下水污染整治技術應用

整治技術分類	2005-2008		2009-2011	
	場址數量	百分比	場址數量	百分比
抽除處理技術	85	26%	45	22%
地下水抽出處理	82	25%	44	21%
地表水收集處理	5	2%	1	<1%
現地處理技術	97	30%	79	38%
生物整治	60	19%	49	24%
化學處理	38	12%	28	14%
現地注氣法	10	3%	12	6%
通透性反應牆	7	2%	8	4%
井內氣提	0	0%	2	1%
多相抽汲處理	1	<1%	2	1%
植物復育	3	1%	0	0%
壓裂處理 (Fracturing)	1	<1%	0	0%
監測式自然衰減技術	116	36%	56	27%
垂直井 (VEB)	16	5%	6	3%
建構處理溼地	1	<1%	4	2%
處理下水	1	<1%	3	1%
處理地表水	0	0%	1	<1%
其他整治技術	281	87%	177	86%
管理單位管制 (Institutional Controls)	274	85%	173	84%
尋找替代性供應水源	26	8%	12	6%
工程控制	14	1%	2	1%

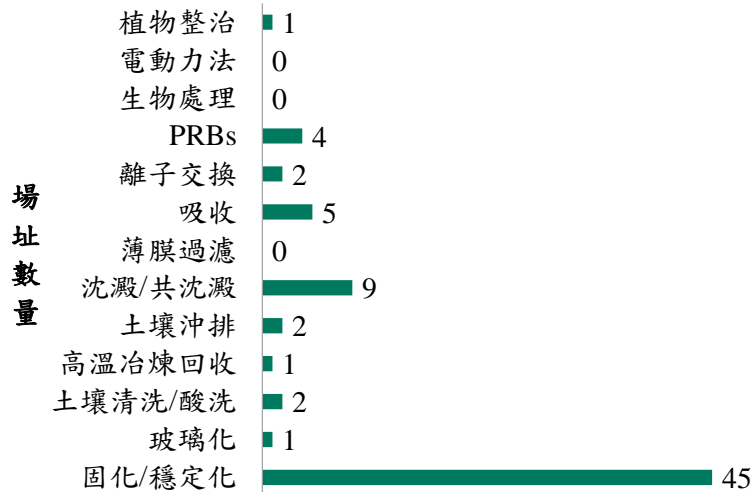
資料來源：USEPA, Superfund Remedy Report: Annual Status Report (14th Edition) (EPA 542-R-13-016) 2013

美國關切前十二項污染物如圖 2.1-1 所示，由場址數量大到小分別為鉛、砷、苯、鉻、甲苯、鎘、鋅、二甲苯、氯乙烯、鎳、TCA 及 TCE。重金屬汚鉛污染整治技術如圖 2.1.1-2 所示，主要為固化/穩定化及沈澱/共沈澱(preceipitation/ coprecipitation)。



資料來源：Arsenic treatment technologies for soul, waste and water, USEPA (EPA-542-R-02-004)

圖 2.1-1 美國關切污染物種類與場址數量統計



資料來源：Arsenic treatment technologies for soul, waste and water, USEPA (EPA-542-R-02-004)

圖 2.1-2 美國重金屬鉛污染物場址整治技術應用

二、 我國

國內近年來工商業蓬勃發展，相關產業於製程產生的廢棄物、廢水，或排放逸散的懸浮微粒與氣態污染物，均可能造成環境不同程度的污染，其中，主要污染土壤的重金屬為砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等 8 種。由於農作物對重金屬之需求不一，有些重金屬土壤含量多時將造成植物的毒害，當重金屬將被作物吸收並累積於植體內，將經由食物鏈影響人類健康。國內農作物遭受重金屬污染的事件，主要為鉛、鎘污染造成糙米中鉛、鎘含量超過食米重金屬限量標準，最受矚目的是民國 71 年發生桃園觀音大潭村高銀化工與蘆竹新興村基力化工，因為排放生產硬脂酸鎘及硬脂酸鉛安定劑製程中含有鎘、鉛之廢水，造成鄰近農地土壤中鎘、鉛含量遠高於環境背景值，並使生產之糙米中鎘含量超過食米重金屬限量標準，此後陸續發現多起糙米重金屬污染事件，顯示台灣地區農地重金屬污染已威脅到民眾之健康。

鑑於國內農地土壤污染事件多因灌溉水遭受污染所致，為保障民眾食用作物之安全，前行政院衛生署環境保護局自民國 72 年起即著手進行土壤污染調查工作，以種植食用農作物之農地土壤列為優先防治重點，展開全國農地土壤重金屬含量調查。民國 89 年土污法施行後，環保署首先針對歷年調查高污染潛勢農地進行查證，並對遭受重金屬污染之農地辦理污染改善及復育工作。

各縣市農地經民國 91 年「農地土壤重金屬調查與場址列管計畫」完成全國 319 公頃農地之污染調查及個案農地污染陳情查證，依前述環保署調查計畫及歷年各地方環保局相關計畫調查結果，已達土壤污染管制標準農地 1,755 筆，面積約 408.78 公頃。

土壤重金屬污染改善方法可概分為離地整治與現地整治兩大類。離地整治技術包括高溫礦冶分離法、固化/安定化法、開挖及離場處理法、土壤清洗法等；現地整治技術包括監測式自然衰減法、現地生物整治法、玻璃化法、應用土壤改良法、滲透性反應牆法、反應帶整治法、電動力法、植物復育法、地下水抽出及處理法、圍堵處理法、土壤淋洗法等。然而，整治技術雖多，但因全國農地土壤重金屬污染的面積龐大、污染種類眾多、污染範圍廣泛、污染深度複雜，並且受限於地號、坵塊、灌

渠等因素的影響，在經費、人力及時間有限的條件下，需以最有效率的方法進行改善，使資源發揮最佳的成效，衍生國內農地土壤重金屬污染改善歷程，彙整說明如后。

(一) 民國 80 年至 90 年間

土污法於民國 89 年公告之前，於 80 年至 90 年間的農地重金屬整治案例彙整如表 2.1-3 所示，整治方法以土壤清洗法、土壤淋洗法、植物復育法、電動力法、固化/安定化法、客土/翻轉稀釋法、排土/客土法、翻轉稀釋法等。其中以採用固化/安定化法的案例較多，總計有 4 件案例；其次為土壤清洗法、土壤淋洗法，各有 3 件案例；翻轉稀釋法、客土/翻轉稀釋法、排土/客土法、植物復育法、電動力法則分別各有 1 件案例。

在污染改善成效方面，土壤清洗法、土壤淋洗法、電動力法等改善技術皆有不錯的污染物去除率，去除率平均約 70% 至 80% 左右；固化/安定化法則可有效降低重金屬移動性及溶出率；排土客土法、翻轉稀釋法等改善技術則可有效降低重金屬濃度；而植物復育法則因天候影響，導致部份作物存活率過低，且農民接受意願不高，污染改善成效受限。

表 2.1-3 民國 80-90 年間國內土壤重金屬污染整治案例彙整表

整治方法	時間	場址或土壤來源 (污染物)	概述
土壤清洗	86 年	台南縣二仁溪 (鉛、銅、鋅)	使用 0.1 M EDTA 土水比 1:10, 萃取 7 天, 去除率: 鉛-100%、銅-100%、鋅-86%。
	86 年	桃園縣觀音鄉大潭村 (鉛、鎘)	使用 0.1 N 鹽酸萃取, 去除率: 鉛-73%、鎘-88%。
	87 年	高雄縣湖內鄉 (鉛、銅、鋅)	0.05 M EDTA 之萃取效果佳, 萃取效率隨使用次數增加而減少。
土壤淋洗	80 年	桃園縣觀音鄉大潭村 (鉛、鎘)	EDTA 對鉛去除效果佳, 檸檬酸對鎘去除效果佳。
	90 年	桃園縣蘆竹鄉中福村 (鉛、鎘)	使用 0.1 N 鹽酸示範處理約 100 立方公尺, 去除率: 鎘近 80%。
	90 年	雲林縣虎尾鎮廉使里 (鉛、鎘)	使用鹽酸 0.05 M+檸檬酸 0.05 M, 土水比 1:5 及 1:2。 鉛濃度低於 73.45 mg/kg; 鎘濃度低於 4.11 mg/kg。
植物復育	86 年	彰化縣花壇鄉白沙村 (鎘)	因天候影響致使部分作物存活率低、農民接受意願不高。
電動力復育	88 年	彰化縣和美鎮 (鉛、鎘、鉻)	去除率: 鉛-70%、鎘-72%、鉻-56%。
固化/安定化	86 年	高雄縣湖內鄉 (鉛、銅、鋅)	使用磷酸鹽與碳酸鹽降低 TCLP 溶出值: 鉛-99%、銅-99%、鋅-97%。
	86 年	桃園縣觀音鄉大潭村 (鉛、鎘)	於現地添加石灰、混凝土。
	86 年	桃園縣蘆竹鄉中福村 桃園縣觀音鄉大潭村 (鉛、鎘)	添加氧化錳、碳酸鈣、石灰、磷酸鹽、豬糞堆肥、沸石, 可降低重金屬溶出量。
	87 年	台南縣西港鄉、台南市灣裡、高雄縣湖內鄉 (鉛、銅、鋅)	添加爐石、堆肥, 其中爐石的添加可降低重金屬移動性: 鉛-60%、銅-75%、鋅-46%。
客土/翻轉稀釋	86 年	桃園縣觀音鄉大潭村	處理後重金屬濃度可達四級標準以下。
排土/客土	86 年	彰化縣花壇鄉白沙村 (鎘)	換土費用高達每公頃 200 萬元。
翻轉稀釋	89 年	桃園縣蘆竹鄉中福地區 (鉛、鎘)	翻轉稀釋土壤深度為 1.5 ~ 2.5 公尺, 處理結果可達四級標準以下。

資料來源: 台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊, 2003

(二) 民國 92 年至 98 年間

自民國 90 年 11 月 21 日「土壤污染管制標準」公告實施後, 土壤重金屬管制標準係以王水消化法之全量基準, 取代原先以 0.1 N 鹽酸可萃取量之溶出基準。因此, 為降低土壤中重金屬的全量濃度, 農地污染改善技術隨之受到限制。

經專家學者研議並考量土壤及地下水污染整治基金的運用效益後, 由環保署擬定之改善技術實施建議: 對於重金屬鉻、銅、鎳

、鋅，原則上建議採「土壤翻轉稀釋法」為主；對於遭重金屬鎘、鉛、汞污染，以及污染濃度較高地區之農地，可採「土壤酸洗法」，或部分污染土壤採「熱處理法」、「排土法」、「客土法」等其他改善方法。

民國 92 年至 98 年間，環保署專案補助的農地污染改善計畫彙整如表 2.1-4 所示，其污染改善技術主要為土壤翻轉稀釋法、排土客土法、土壤酸洗法，以及前述三種污染改善方法互相搭配處理。表 2.1-4 顯示以土壤翻轉稀釋法改善案例最多，計有 8 件；其次為土壤翻轉稀釋法搭配排土客土法，計有 7 件；土壤翻轉稀釋法搭配土壤酸洗法，計有 1 件；土壤翻轉稀釋法、排土客土法、土壤酸洗法三種污染改善方式搭配使用，計有 1 件。

在污染改善成效方面，8 件採用土壤翻轉稀釋法的案例中，大部分均可達到原訂之整治目標，僅 9 筆地號（約 0.357 公頃）未通過驗證須繼續管制、4 筆地號（約 0.443 公頃）未通過驗證須繼續監測；7 件採用翻轉稀釋法搭配排土客土法的案例，全數均完成污染改善，達到原訂之整治目標；1 件採用翻轉稀釋法搭配酸洗法的案例，大部分均已達成整治目標而解除列管，僅 3 筆地號未通過驗證須繼續管制；1 件採用土壤翻轉稀釋法、排土客土法、土壤酸洗法的案例，所有地號均達成原訂之整治目標而解除列管。

整體而言，在民國 80 年至 90 年間，國內農地土壤重金屬污染所使用之改善技術種類較多，以示範及試驗為主，包括土壤清洗法、土壤淋洗法、植物復育法、電動力法、固化/安定化法、翻轉稀釋法、排土/客土法等，均有實際應用的整治案例；而自民國 92 年至 98 年間，為因應以王水消化法分析土壤樣品之全量基準，以土壤翻轉稀釋法、排土客土法、土壤酸洗法等三種污染改善方式為主，其中又以土壤翻轉稀釋法佔最大比例，另外亦有三種改善方式相互搭配使用之整治案例。

表 2.1-4 民國 92-98 年間國內土壤重金屬污染整治案例彙整表

整治方法	時間	場址或計畫名稱 (污染物)	概述
環保署專案補助-農地污染改善計畫			
翻轉稀釋	92 年	北投區八仙段一小段 335 及 344 地號 (銅)	經改善工程土壤現地翻轉回填後鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅等六種重金屬採樣分析驗證結果皆符合原訂整治目標。
	92 年	新竹香山區浸水社區 (銅、鋅、鎳、鉻)	92 年 9 月 15 日新竹香山區浸水社區 3.2 公頃已完成改善並解除列管。
	93 年	北投區八仙段一小段 93-5 地號、140 地號(鉻、鋅)	考量其重金屬毒性較弱、經濟效益及民眾接受度等因素下,採「翻土混合稀釋法」進行污染改善。驗證結果顯示土壤中重金屬鉻、鋅之濃度皆符合原訂整治目標。
	93 年	彰化縣農地土壤重金屬含鉻銅鋅鎳(不含鎘)污染控制場址	分甲、乙、丙、丁、戊、己等六項子計畫,以「土壤翻轉稀釋法」進行農地重金屬污染改善工作。
	95 年	桃園縣蘆竹鄉中福地區大潭地區(鎳、銅、鎘)	土壤污染改善工作,以翻土稀釋法為整治方法後,各地號的土壤重金屬檢測結果皆符合食用作物農地之管制標準,已達整治目標。
	95 年	泰山鄉泰山段、新莊市海山頭段等五筆地號 (銅、鋅)	先後進行泰山場址及新莊場址所有土壤開挖翻堆之改善工作。
翻轉稀釋/ 排土客土	94 年	台中市南屯區(鉻、銅、鎳、鋅)、北屯區(鎘、鋅)	南屯區寶山段以土壤翻土混合稀釋法」處理;北屯區松茂段以「土壤翻土混合稀釋法」及「客排土方式」處理,已達整治目標。
	96 年	桃園縣八德市中華段 (鎘、鉛、鋅)	本計畫八德市中華段 122 地號等 19 筆土地經改善,以土壤翻轉稀釋法及排客土法為主要整治方法進行重金屬污染改善工作,土壤驗證結果低於食用作物農地土壤污染管制標準。
	96 年	鶯歌鎮橋子頭段 (鉛、鋅)	以客土/排土及翻轉稀釋法完成污染改善工作,並完成驗證作業。
	98 年	宜蘭縣冬山鄉、蘇澳鎮、三星鄉等 6 筆地號 (汞)	整治工法應以排土客土法為主,並適度搭配翻轉稀釋法辦理為原則
翻轉稀釋/ 排土客土/ 酸淋洗法	94 年	彰化市(70 筆地號)、和美鎮(37 筆地號)及鹿港鎮(1 筆地號)鎘污染之控制場址	鎘污染濃度低於 10 mg/kg 之地號採取翻土稀釋法作為污染改善工法;鎘污染情形高於 10 mg/kg 之地號,採取固定式酸淋洗法;淋洗後之土壤移回原地號進行後續之翻土稀釋作業;超過管制標準 10 倍以上地號,採排土客土工法。
翻轉稀釋	94 年	台中縣大里市大突寮段及國中段與烏日鄉北里段 (鉻、銅、鎳)	以「土壤翻轉稀釋法」進行農地重金屬污染改善工作;依據四次驗證結果,通過驗證可解除列管者共計 22 筆地號農地,面積約 5.485 公頃。未通過驗證而可解除列管需持續監測地號共計 4 筆,面積約 0.443 公頃。未通過驗證而需持續管制地號共計 9 筆,面積約 0.357 公頃。
	95 年	苗栗縣公館鄉竹南鎮 (汞、鋅)	利用上下翻轉稀釋法,將其土壤中重金屬濃度降低至食用作物農地之土壤污染監測基準之下,並完成整治地號土壤採樣驗證作業。

資料來源：彙整自環保署土壤及地下水污染場址資訊系統

表 2.1-4 民國 92-98 年間國內土壤重金屬污染整治案例彙整表(續)

整治方法	時間	場址或計畫名稱 (污染物)	概述
環保署專案補助-控制計畫			
翻轉稀釋/ 排土客土	97 年	台中縣大里市、后里鄉、潭子鄉、大甲鎮、豐原市等 78 筆農地	針對控制場址，進行土壤污染改善工程監督、驗證工作，土壤污染控制場址計 78 筆地號，共約 10.2875 公頃。以排、客土及翻轉稀釋法進行污染改善。
	98 年	新竹市東區水源段、香山區、忠孝段、香雅段、樹下段等 24 筆地號(鎘、鉻、銅、鎳、鋅)	以「水平稀釋及上下翻轉稀釋法」及「排客土法」工法進行土壤污染改善工程。
	98 年	嘉義市遠東段(鉻)	以排、客土及翻轉稀釋法完成 3 筆地號之整治工程施作，並經驗證機構採檢驗證通過，已達成污染控制計畫之改善目標。
翻轉稀釋/ 酸淋洗法	92 年	台中縣農地土壤重金屬污染控制場址改善計畫，大里市、大甲鎮(鉻、銅、鎳、鋅；鉻、鉛)	遭重金屬鉻、銅、鎳、鋅污染之農地，大里市約有 3.94 公頃、大甲鎮約有 1.95 公頃，共計約 5.89 公頃，採用「土壤翻土混合稀釋法」處理。 遭重金屬鎘、鉛污染之農地，大甲鎮 0.83 公頃。屬高濃度污染區採用「土壤酸淋洗」處理。 仍有大甲鎮福安段 3 筆農地無法解除列管。此 3 筆地號如果能於後續整治時，再客土 20 公分深度後應可通過。

資料來源：彙整自環保署土壤及地下水污染場址資訊系統

除整治目標及土地用途外，技術可行性、經濟可行性、民眾接受度等均會影響場址整治技術之選擇，整治技術需視污染物種類、特性、水文，及地質狀況而決定。整治技術依污染物是否挖掘，可分為離地(ex-situ)與現地(in-situ)方法。離地處理由於具有較高之環境風險，包括牽涉到污染物之移動、土壤開挖、土壤處理、地表逕流及廢水排放問題、廢土運輸等相關法規的限制，目前整治復育技術大都朝向現地處理，或是併同使用。

每一個污染場址的特性，以及污染狀況均具有其特殊性，因此在選擇整治技術前，常常需要於現場進行模場試驗，以取得現場所需的操作參數，確認技術之可行性，解決污染場址特異性的問題。模場試驗證明可行後，再於現場全尺寸(full scale)實施。

台灣地區農地污染主要以重金屬污染為主，而在污染改善技術選擇方面，考量基金運用之資源效益，建議對於重金屬鉻、銅、鎳、鋅，原則上建議採「土壤翻轉稀釋法」為主；對於遭重金屬鎘、鉛、汞污染，及污染濃度較高地區之農地，可配合「排土法」、「客土法」、「土壤酸洗

法」或等其他改善方法。除上述污染改善方法外，尚包括固化/安定化法、玻璃化法、土壤清洗法、高溫分離法及現地土壤淋洗法、電動力法及生物處理法；其中，生物處理法包含植生復育法、微生物之氧化/還原（生物淋洗），以及溶解性微生物產物（Soluble Microbial Products, SMP）螯合作用等方法，當中又以植生復育法較為成熟。各種整治技術之優缺點比較如表 2.1-5 所示。

表 2.1-5 農地重金屬污染改善方法優缺點比較表

污染改善方法	優點	缺點
翻轉稀釋法	<ul style="list-style-type: none"> 在土層厚度足夠情形下，易將表土重金屬濃度依所需翻土深度將重金屬濃度在極短時間內及最少工程費用下來降低污染區表土重金屬濃度至法規標準以下。 標準操作步驟（SOP）易建立及操作，因此施工之工期、效果及時間、成本均易掌握，可於有限時間內完成污染整治。 整治費用相對較低 可在同一污染區多點同時操作整治工作。 	<ul style="list-style-type: none"> 翻轉稀釋法將受污染土壤與未受污染土壤混合，使整體的污染物濃度低於管制值，嚴格的說，不屬於土壤整治技術。 土壤中重金屬濃度偏高及土層深度不足時，依計算公式無法將濃度降低至污染管制濃度以下時，此方法不可行。 雖有 SOP，但在田間操作時如何確實將不同深度之污染土壤混合，使得整塊農地各點的濃度均勻是困難的，因此僅靠推土機及怪手之操作仍不足達預期之目標，翻土稀釋法之結果仍有不合格的風險。 在紅土地區的下層剖面，常有鐵網紋（plinthite）的存在以及鐵錳結核物質，一但翻動至表面並經乾燥後則變成硬塊（如石頭般），對後續農業利用造成極大負面影響。 表土 30 公分土壤中重金屬濃度符合標準，但土壤中原有的重金屬的總量將分配至各土層，總量並未移出於土壤系統，部分人不易接受此作法。 整治後之驗證技術相關的採樣方法、深度及及格與否的標準宜再檢討，以達共識，部分學者對此不同的意見。
酸洗法	<ul style="list-style-type: none"> 使用鹽酸、硝酸、檸檬酸等將污染土壤中重金屬進行交換作用或錯合作用之反應很好，使用之學理清楚，反應迅速可在極短時間內（一小時以內）完成，效果極明顯，污染濃度可立即降低許多。 使用過的酸可回收循環再利用，節省整治成本。 污染物大都存在於土壤細粒中，尤其是黏粒，因此可先將土壤之不同粒徑 	<ul style="list-style-type: none"> 土壤酸洗後之 pH 值迅速降至 2~3，在此條件下，土壤無法耕作，必須施用農用石灰及添加各種元素或堆肥，才可使土壤達到使用目的。 依作物生產的最低要求下，污染區之土壤地力回復的項目及標準值之相關規定雖然已訂定，但仍無法完全令農戶滿意，仍需再溝通，尤其在某些特殊條件下的污染區。 酸液使用一段時間後需排放，在排放

污染改善方法	優點	缺點
	<p>分離，僅處理污染土壤之細粒部份，此部份僅佔全土壤之 40% 以下，可節省成本。</p>	<p>前需做廢水處理，勢必增加許多處理的成本。</p>
<p>固化/安定化法</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 此技術已被廣泛應用並證實能夠有效地降低多種污染物之移動性 • 有害污染物與固化/安定化藥劑之混合可應用於離地整治，即以批次或連續式操作之方式，或應用於現地整治污染土壤，以連續式注入操作方式進行。 	<ul style="list-style-type: none"> • 環境的條件會影響長期固定之污染物質。 • 固化/安定化的過程會增加最終產物的體積。 • 有些污染物質在固化/安定化的過程中會呈現不穩定的狀態，故使用此法時必須加以選擇。 • 時間的長短對固化/安定化產物的影響無法證明，故須對固化/安定化的產物加以長時間的觀測。
<p>玻璃化法</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 現地玻璃化可於較高溫度下進行，相較於一般熔爐的操作溫度，1,100~1,400 °C，現地玻璃化溫度可達 1,600~2,000 °C。且不需使用耐火內襯、處理程序中不需要添加任何藥劑而能節省處理成本。 • 相較於離地處理，現地玻璃化可於較高溫度下進行，因此可產生穩定度較高的玻璃化產物，而減少化學物質溶出性並降低玻璃的風化速率。 • 現地玻璃化能使最終產物有較高的體積減少量，因為過程中無需添加任何額外物質或藥劑。 • 現地玻璃化無須經過前處理即可處理大多數污染物質，也不須為了熔爐進料的尺寸限制，而改變廢棄物之體積。 • 現地玻璃化可應用於深層之污染土壤(20 英尺以上)。 • 現地玻璃化最終產物為一大型玻璃結塊廢棄物，比起熔爐處理產物，有較小的比表面積，因此可降低風化程度和化學物質溶出性。現地玻璃化可減少公共和環境之安全風險，因處理後之產物可留置於原地，無需進行移除。 	<ul style="list-style-type: none"> • 在玻璃化過程中，若有機污染物被熱解而轉換為氣相時，則須經由廢氣處理設備的收集、移除或分解有害氣體，使排放氣體符合排放標準。 • 現地玻璃化法必須破壞污染物或降低其移動性，因此其中受熔融物質必須含有足夠的鹽類(alkali content)(1.4~15 %)以保持電導度和熔融溫度間的平衡。太多的鹽類(> 15 %)會提高電導度使電熱設備產生的電流無法達到足夠的熱度；而鹽類過少將使導電度不足，並導致較高的熔融溫度。
<p>土壤清洗法</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 對於去除高比重的重金屬(如鉛)顆粒而言是有效的 • 有移動式及固定式 2 種土壤清洗設施 • 成本低、縮減後續處理污染物的體積 	<ul style="list-style-type: none"> • 通常土壤清洗技術必須配合其他處理技術，方能達到土壤污染整治目標 • 不適用於細顆粒土壤比例過高的土壤
<p>高溫分離法</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 高溫分離法通常分為兩大程序，第一程序主要包括烘乾、蒸餾、熔煉等三大步驟，此程序通常會產生重金屬熔渣，因而可以進行重金屬回收再利用；第二種程序主要是包括高溫萃取及固定化技術，此程序將使揮發性金屬與土壤分離而轉化到飛灰的部分，而在飛灰部分的重金屬將予以固定化而取代回收再利用，因此在此技術中，重金屬並無法回收再使用。 	<ul style="list-style-type: none"> • 高溫分離法通常多與土壤清洗法一起使用，達到濃縮土壤中污染物的目的。 • 適用高溫分離法污染土壤之濃度(如：鉛、鎘、鉻)，通常要高達 5-20% • 適用於污染濃度低，但是容易得以還原或揮發之重金屬污染土壤之整治，如汞。 • 高溫分離設備屬於非移動性設備(離地土壤整治技術)，因此，污染場址

污染改善方法		優點	缺點	
		<ul style="list-style-type: none"> 適用於回收極具有經濟效益的金屬污染土壤，如黃金及白金。回收所得可降低整體污染改善作業成本。 	<ul style="list-style-type: none"> 與處理廠之距離，為決定處理成本的重要因素 由於處理設備之限制，其對於污染土壤的處理量必須有合理處理時間，因此處理廠的儲存容積及處理設施的需求需加以考量；另高溫處理法後續所排出的污染物，必須要有空氣污染防制設備加以處理。 	
現地土壤淋洗法		<ul style="list-style-type: none"> 無須開挖，建造成本比傳統之抽取處理法低。 配合適當之注入技術，例如深層土混合法(deep soil mixing)與土壤破裂法(soil fracturing)，可以深入其他技術無法達到之區域。 淋洗法對於吸附性以及低溶解性污染物尤其有效。 	<ul style="list-style-type: none"> 不適用於低透水性或非均質性的土壤 僅適用於淋洗液與淋洗出的污染物，可以被侷限且捕捉 污染深度範圍大，或地質分層複雜，較難將化學藥劑注入到污染區域，且反應後之產物毒性待進一步研究。 淋洗法可能會造成污染擴散，本身造成之環境污染問題，以及土壤需氧量(SOD)使成本大幅增加問題均待克服。 處理抽取至地面的受污染地下水之成本，提高整治成本 	
電動力法		<ul style="list-style-type: none"> 與挖掘、土壤淋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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	
植生整治法	植物吸收	樹木	<ul style="list-style-type: none"> 高生質(biomass)產率 	<ul style="list-style-type: none"> 將污染物由地層轉移至地表 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
		草類	<ul style="list-style-type: none"> 高累積性 	<ul style="list-style-type: none"> 低生質(biomass)產率及減緩生長速率 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
		農作物	<ul style="list-style-type: none"> 高生質(biomass)產率及提升生長速率 	<ul style="list-style-type: none"> 當草食動物食用後，污染物將進入食物鏈而危及人類。 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	植物穩定	<ul style="list-style-type: none"> 無後續污染植物處理問題 	<ul style="list-style-type: none"> 由於重金屬被圍堵於土壤局部區域，而並未移除，因此污染場址需進行長期監控及維護工作。 	
	根層過濾	<ul style="list-style-type: none"> 金屬去除效果佳 	<ul style="list-style-type: none"> 僅可處理水相污染物 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。 	

資料來源：

- 1.經濟部工業局，土壤及地下水污染整治技術手冊—生物處理技術 2004。
- 2.經濟部工業局，重金屬污染類型之土壤及地下水污染預防及整治技術手冊 2006。

各整治技術分別有其優點、不適用或受限制的條件，必須依場址特性來加以選用，沒有一個整治技術能適用於所有之污染場址，需考量重點包含污染物之特性、分布範圍與濃度、水文地質資料、整治期程、整治經費與預算、模場試驗(pilot test)、整治技術於污染場址之適用性等因。Evanko and Dzombak(1997)，依據整治目標（殘留污染物濃度）、整組處理系統之有無、污染物類型、整治花費時間、操作及處理成本等因素列出常見土壤及地下水重金屬污染之整治技術篩選矩陣(remediation technologies screen matrix)如表 2.1-6 所示(中華民國環境工程學會, 2008)。其中，對於國內農地污染狀況而言，覆蓋法、地下阻絕物法、現地固化/安定化法、透水性反應牆法等改善技術雖不適用，但仍提供相關資訊，藉以對整體之處理技術進行規劃評估。

由國內目前農地整治案例可知，部份場址僅單靠一種污染改善技術，尚無法完全達到預定之整治目標。因此，未來相關農地污染場址，建議可考量該場址特性，依據場址實際污染物分佈、濃度高低、環境因素等，設計整治列車進行污染改善作業。整治列車之相關概念原先由美國環保署於 1995 年提出(Newell et al., 1995)，最近在新穎技術報導中再次被特別提及。整治列車技術係指處理土壤及地下水之污染可以連續串列式或整體並行多方位的方式進行污染整治，在單一整治技術不易處理受污染場址時，整治列車的觀念即會被列入考量；藉由整治列車(treatment train)技術概念之引進，可大幅提升污染改善技術之處理效率與效能，亦可降低相關污染改善費用(葉琮裕等，2006；蔡在唐等，2007)。

經濟部工業局(2006)針對整治列車之含土壤前處理、物理分離程序(以減少處理量)、後續殘渣及排放氣體之處理，以及其他可提升處理效能之技術，提供固化/安定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、現地土壤淋洗法等整治技術之整治列車處理程序如表 2.1-7 所示。建議未來相關農地污染改善計畫，可參考相關整治列車概念，搭配目前國內較常使用之土壤翻轉稀釋法及排土客土法等改善方法，達到污染改善之最大效能。

表 2.1-6 土壤及地下水之重金屬污染整治技術篩選矩陣表

處理技術	重金屬	成本	長時間 效率/ 效能	商業 化 可獲 得性	大眾 觀點	高濃 度 適 用 性	混 合 其 他 廢 棄 物 適 用 性	毒 性 減 低	移 動 性 減 少	處 理 體 積 減 少
覆蓋	1-3	●	X	●	●	X	●	X	●	X
地下阻絕物	1-3,5	●	X	●	●	X	●	X	●	X
離地固化/ 安定化	1-3,5	▲	▲	●	●	●	●	X	●	X
現地固化/ 安定化	1,2,4,6	●	▲	●	●	●	●	X	●	X
現地玻璃化	1-3,5	X	●	▲	▲	●	●	X	●	X
離地玻璃化	1-3,7	X	●	▲	▲	●	●	X	●	X
化學處理	2	---	▲	▲	▲	---	---	X	●	X
透水性反應牆	2	---	▲	▲	▲	---	---	●	●	X
生物處理	1-5	●	X	▲	▲	X	---	●	●	●
物理分離	1-6	▲	●	●	●	●	X	X	X	●
土壤淋洗	1-3,5-7	▲	●	●	●	●	▲	X	X	●
植物復育/ 萃取	1-5,7	X	●	●	●	●	X	X	X	●
現地土壤 沖提	1,2,7	●	X	●	●	●	●	X	X	●
電動力學 法	1-6	▲	●	●	●	●	●	X	X	●

註：1-鉛，2-鉻，3-砷，4-鋅，5-鎘，6-銅，7-汞。 ●：佳，▲可，X 差，---資料不足

資料來源：中華民國環境工程學會，2008

表 2.1-7 整治列車技術彙整表

處理程序	離地固化/ 安定化法	離地/現地 玻璃化	土壤清洗 (酸洗)法	高溫 分離法	現地土壤 淋洗法
前處理					
土壤挖掘	✓	✓	✓	✓	
去除礫石	✓	✓	✓	✓	
減容	✓	✓	✓	✓	
調整酸鹼度	✓				
還原作用(例如 Cr ⁶⁺ 還原至 Cr ³⁺)	✓				
氧化作用(例如 As ³⁺ 氧化至 As ⁵⁺)	✓				
去除有機物	✓				
土壤顆粒物理分離程序	✓	✓	✓	✓	
去除水分	✓	✓		✓	
降低揮發性金屬之揮發性 (As ₂ O ₃ 轉化至 Ca ₃ (AsO ₄) ₂)		✓			
加入高溫還原劑				✓	
顆粒均勻化程序				✓	
淋洗液輸送及萃取系統					✓
設立阻絕層	✓	✓	✓		✓
後處理/殘渣管理					
土壤殘渣處理	✓	✓		✓	
設立阻絕層	✓	✓			✓
排放氣體處理	✓	✓		✓	
場址鋪面以利後續使用	✓				
萃取液回收金屬程序 (如離子交換等)			✓		
滲出液之處理與再利用			✓	✓	
清洗殘渣之固化/安定化			✓		
固相程序之殘渣處理			✓		
液相程序之殘渣處理			✓		✓
爐渣及飛灰之固化/安定化				✓	
爐渣及玻璃化產品再製建材		✓			
金屬/金屬化合物再利用				✓	
金屬/金屬化合物再處理				✓	

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。本節參考環保署曾於民國 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）符合環保署公告之「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：「…環保署公告第五批各行業/堆置場係指同一公私場所，其地平面上粉粒狀物堆置場（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，符合環保署民國 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。

三、廢棄物清理

執行土壤及地下水污染場址控制計畫或整治計畫過程中，涉及廢棄物清理法第 41 條規定「從事廢棄物清除、處理業務者，應向直轄市、縣（市）主管機關或中央主管機關委託之機關申請核發公民營廢棄物清除處理機構許可文件後，始得受託清除、處理廢棄物業務。…」，應依廢棄物清理法相關規定辦理。

第三章 整治技術選取策略

3.1 技術選取策略

任何土壤及地下水污染場址在選取適合污染場址的整治技術組合時，需結合技術的可行性、污染範圍及狀況、場址水文地質概況、經費成本評估、整治時程考量、對附近環境的影響、責任歸屬，以及相關環保法規及地方政府的要求等，然後經過較小規模或範圍的先導試驗後，依其結果進行全面性慎審地評估，始決定最後的整治技術。所有的整治技術皆有其限制及優、缺點，同一整治技術不一定適用於同一類型污染物的所有場址；而污染場址的整治技術亦非一成不變，需隨整治過程中的監測結果，適當地調整或更新技術。

重金屬是土壤及地下水中最普遍的污染物，77%的美國超級基金(國家優先名單)、72%美國國防部(Department of Defense)及 55%美國能源局(Department of Energy)的土壤及地下水污染場址是受重金屬污染(USEPA, 2004)，其來源包括受生活與工業廢水污染的地表水之入滲、垃圾掩埋場與廢棄礦區的淋洗、大氣沉降等。由於重金屬溶解態的 pH 範圍很大，故不易以沉澱法加以去除，再加上地下水中常共存較高濃度的鹼金屬、鹼土金屬及有機污染物，使整治工作變得更複雜。目前土壤及地下水重金屬整治技術，主要將污染源隔離、污染物固定、降低污染物毒性，藉由物理分離、化學反應及生物轉化等機制降低其對環境生態與人體健康的風險。

一、 技術選取重點評估面向

許多環保先進國家中，因於整治方案研擬過程中導入整治列車(treatment train)與健康風險評估概念，可以更有效地推動場址整治的工作。整治列車係對於受污染場址採取兩種或兩種以上污染整治系統，除可提升處理效能，亦可降低整治費用。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，節省整治經費，以達成最終的整治目標。茲就整治技術選取的考量說明(圖 3.1-1)：

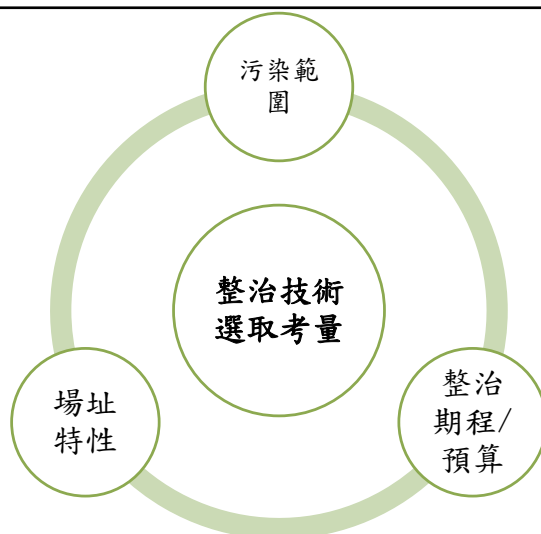


圖 3.1-1 整治技術選取考量重點

(一)場址受污染形態與範圍

整由污染範圍調查結果，評估污染場址之污染物形態、污染範圍，以及污染水文地質環境。在篩選整治技術時，針對該場址高濃度污染區域，可考慮採取較直接且快速的整治方式，或是將其隔離；而低濃度污染區域，則可考慮採取費用較低、人為介入較小、概念較永續的整治技術。

(二)整治期程及執行預算

一般而言，整治時程與整治經費往往兩個關鍵課題，污染行為人或土地關係人常希望能儘速完成污染場址的整治作業，解除場址的列管；因此，在考量經費與時程兩項因素下，應從可行的整治技術中遴選幾項技術，規劃出既適合且經濟的整治技術組合，以達成整治目標。

(三)場址特性

場址現況亦為整治技術選取的重要因子，例如污染場址是否在營運中；污染範圍內是否有足夠空間進行整治；場址內建物是否可以允許直接開挖移除污染物；機具車輛是否能夠進出等。對於營運中的場址，整治技術應在不影響場址內既有營運操作的條件下，進行污染整治作業。

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，事前需規劃研擬不同整治技術的組合與順序，執行過程中，需隨時依監測資料進行調整，使整治作業可順利執行。

二、 技術選取策略

選取適當整治技術，應優先確認場址內污染情況與污染範圍，並建立正確的污染場址概念模型，確認污染源是否存在，以決定污染整治的優先順序，若確認污染源存在時，應先將污染源移除，再進行地下水污染整治工作。而在污染整治工作方面，則應考量暴露途徑是否存在，若在調查時發現無法確認污染來源，或污染來源可能來自於場址外時，則宜先評估污染團是否會影響潛在的受體（例如自來水抽水井、民井、生產井等）。若未經適當評估而逕行污染整治工作，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。表 3.1-1 彙整我國地下水污染重金屬管制項目之整治方法建議。

整治技術選取應為多面向的考量，如成本、期程、社會接受度等，表 3.1-2、表 3.1-3 彙整不同整治技術在各面向的適用性篩選矩陣表，讀者可藉由下表進行適用整治技術篩選。此外，本指引彙整污染整治技術選取應考量基本項目如下，提供各位讀者參考

(一) 污染源移除

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

(二) 評估整治難易度及人體健康風險

針對場址水文地質之特性、污染物污染程度、法規管制標準等，評估污染場址整治之相對難易度，決定是否進行人體健康風險評估，建立「整治目標」。

(三) 選用可行地整治技術

經評估選取可行之整治技術時，先進行先導試驗，依結果作為後續整治規劃、設計之依據。

(四)研擬替代整治方案

對於整治難度高，現行整治技術無法經濟、有效地完成整治的污染場址，則應考量採取替代的整治方案或訂定整治目標。

(五)評估物化性質改變

整治技術選定後應評估整治期間場址的物化性質是否改變，例如 pH 值降低致使土壤母質中的重金屬溶出，造成二次污染。

(六)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。

整治結果未超過整治標準或整治目標時，則應再持續監測一段時間，以瞭解污染濃度是否有回升(rebound)的情形。

表 3.1-1 地下水重金屬污染整治方法建議

項目	地下水 監測/管制標準 (第二類, mg/L)	整治方法概述
重金屬		
砷	監測標準：0.250 管制標準：0.50	設立滲透性反應牆使受污染地下水流經反應牆中的填充物，例如零價鐵，去除毒性較強的三價砷。
鉻	監測標準：0.250 管制標準：0.50	加入還原劑(例如 FeSO_4 或 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)將毒性較高的六價鉻還原為毒性較低的三價鉻並沉澱吸附於土壤上 設立滲透性反應牆使受污染地下水流經反應牆中的填充物，例如零價鐵、活性碳等，去除六價鉻。
汞	監測標準：0.010 管制標準：0.020	設立滲透性反應牆使受污染地下水流經反應牆中的填充物，例如黃鐵礦，去除硫化汞。 利用植物吸收、植物固定，去除重金屬。
銅	監測標準：5 管制標準：10	設立滲透性反應牆使受污染地下水流經反應牆中的活性物質，去除重金屬。 利用植物吸收、植物固定，去除重金屬。
鎳	監測標準：0.5 管制標準：1.0	
鋅	監測標準：25 管制標準：50	

資料來源：韓寧、魏連啟、劉久榮、葉超、陳雲法，地下水中常見無機污染物的原位治理技術現況，城市地質，第 14 卷第 2 期，2009。

表 3.1-2 土壤及地下水之重金屬污染整治技術篩選矩陣表

整治技術	適用重金屬種類							成本	長時間效率 / 效能	商業化可行性	社會觀感	高濃度適用性	混合其他廢棄物適用性	毒性減低	移動性減少	處理體積減少
	鉛	鉻	砷	鋅	鎘	銅	汞									
覆蓋	●	●	●					●	X	●	●	X	●	X	●	X
地下阻絕物	●	●	●		●			●	X	●	●	X	●	X	●	X
離地固化/ 安定化	●	●	●		●			▲	▲	●	●	●	●	X	●	X
現地固化/ 安定化	●	●		●		●		●	▲	●	●	●	●	X	●	X
現地玻璃化	●	●	●		●			X	●	▲	▲	●	●	X	●	X
離地玻璃化	●	●	●				●	X	●	▲	▲	●	●	X	●	X
化學處理		●						--	▲	▲	▲	--	--	X	●	X
透水性反應牆		●						--	▲	▲	▲	--	--	●	●	X
生物處理	●	●	●	●	●			●	X	▲	▲	X	--	●	●	●

整治技術	適用重金屬種類							成本	長時間效率/效能	商業化可行性	社會觀感	高濃度適用性	混合其他廢棄物適用性	毒性減低	移動性減少	處理體積減少
	鉛	鉻	砷	鋅	鎘	銅	汞									
物理分離	●	●	●	●	●	●		▲	●	●	●	●	X	X	X	●
土壤淋洗	●	●	●		●	●	●	▲	●	●	●	●	▲	X	X	●
植物復育/萃取	●	●	●	●	●		●	X	●	●	●	●	X	X	X	●
現地土壤沖提	●	●					●	●	X	●	●	●	+	X	X	●
電動力學法	●	●	●	●	●	●		▲	●	●	●	●	--	X	X	●

註：●佳/適用、▲可、X差、--資料不足

表 3.1-3 整治列車技術彙整表

處理程序	整治技術選項				
	離地固化/ 安定化法	離地/現地 玻璃化	土壤清洗 (酸洗)法	高溫 分離法	現地土壤 淋洗法
前處理					
土壤挖掘	●	●	●	●	
去除礫石	●	●	●	●	
減容	●	●	●	●	
調整酸鹼度	●				
還原作用(例如 Cr ⁶⁺ 還原至 Cr ³⁺)	●				
氧化作用(例如 As ³⁺ 氧化至 As ⁵⁺)	●				
去除有機物	●				
土壤顆粒物理分離程序	●	●	●	●	
去除水分	●	●		●	
降低揮發性金屬之揮發性 (如 As ₂ O ₃ 轉化至 Ca ₃ (AsO ₄) ₂)		●			

處理程序	整治技術選項				
	離地固化/ 安定化法	離地/現地 玻璃化	土壤清洗 (酸洗)法	高溫 分離法	現地土壤 淋洗法
加入高溫還原劑				●	
顆粒均勻化程序				●	
淋洗液輸送及萃取系統					●
設立阻絕層	●	●	●		●
後處理/殘渣管理					
土壤殘渣處理	●	●		●	
設立阻絕層	●	●			●
排放氣體處理	●	●		●	
場址鋪面以利後續使用	●				
萃取液回收金屬程序 (如離子交換等)			●		
滲出液之處理與再利用			●	●	
清洗殘渣之固化/安定化			●		
固相程序之殘渣處理			●		
液相程序之殘渣處理			●		●
爐渣及飛灰之固化/安定化				●	
爐渣及玻璃化產品再製建材		●			
金屬/金屬化合物再利用				●	
金屬/金屬化合物再處理				●	
淋洗液處理/處置					●

3.2 案例解析

本節茲列舉一個國內重金屬整治成功案例，分別為翻轉稀釋法與整治列車概念場址，另外列舉兩個國外成功整治案例，分別為土壤清洗法與地下水抽除處理場址，說明如下。

一、 國內成功整治案例

台灣中部某場址資訊彙整如表 3.2-1。該場址興建營運計畫規劃，擬將地勢較高處的土方移至地勢較低處。然而，經民眾陳請有卡車載運不明廢棄物進入園區內傾倒。由環保署督察總隊於民國 101 年兩度進場採樣查證，首次未發現污染超過管制標準。然而，為確保土壤品質無廢棄物污染之餘，再次進場採樣後確認土壤中重金屬砷超過管制標準。同年，根據土污法第七條第五項命其採應變必要措施。以下將個別說明場址基本資料、整治方法及整治成果說明。

(一)場址基本資料

1. 鄰近區域土地使用

該場址鄰近區域以農牧與山坡地為主，人口分佈多集中於都市計畫區中心，其餘地區適中。

2. 土壤特性

該場址以頁岩為主之砂頁岩母質分化生成之砂質地深層黃壤，構造呈現中等或稍大之鏡塊狀，結構較為緊密，內部排水不易，故對植物生長較不適宜。

3. 地下水特性

該場址地下水水位約位於地表下 6 至 8 公尺。

4. 污染範圍

調查結果顯示在 3 至 3.5 公尺處有重金屬砷污染，其污染土壤面積約 100 平方公尺，估計污染土壤體積約為 50 平方公尺。地下水未有污染檢出。

(二) 整治方法

由於該場址僅土壤污染，未有地下水污染檢出，採取翻轉稀釋整治工法，將表層 0 至 3 公尺未受污染土方開挖暫存於場內，作為稀釋土壤，並開挖 3 至 3.5 公尺受污染土壤進行翻轉稀釋，開挖方式示意圖如圖 3.2-1。

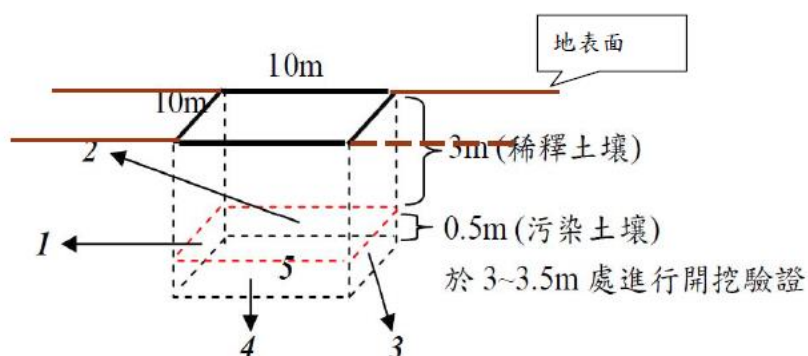
由於採取工法為開挖進行翻轉稀釋，為確保在進行污染改善期間的二次污染預防，進行環境空氣品質監測總懸浮微粒，結果顯示作業期間對空氣品質影響不大。

(三) 整治成果

自民國 101 年由環保署命其採取應變必要措施後，同年提出應變必要措施計畫，並於隔年完成污染改善作業，共歷時約 7 個月完成污染改善作業，將土壤中砷濃度降至土壤管制標準以下。

表 3.2-1 台灣中部某場址資訊

項目	說明
場址名稱	台灣中部某污染場址
關切污染物	土壤：砷 地下水：無
整治工法	土壤：開挖清理、翻轉稀釋 地下水：無
整治期程	7 個月



註：1~5 表示開挖後現場以 XRF 篩測，分析地表下 3.0~3.5m 測剖面四邊及底層土壤砷含量

圖 3.2-1 台灣中部某場址開挖示意圖

二、 國外成功整治案例一

King of Prussia (KOP) Technical Site 場址資訊彙整如表 3.2-2。簡稱 KOP 超級廢棄工廠場址，位於美國賓州費城東南方約 50 公里，佔地約 4 公頃，隸屬於 The King of Prussia PRP Cooperating Group。該區土壤受到重金屬鉻、銅、鎳污染，於 1985 年被美國環保署列入國家優先整治名單(National Priority List, NPL)，1990 年頒布決策記錄書(Record of Decision, ROD)，並決定以土壤清洗法進行整治。KOP 場址土壤中重金屬鉻的最高濃度為 8,010 mg/kg、銅的最高濃度為 9,070 mg/kg、鎳的最高濃度為 387 mg/kg、汞的最高濃度為 100 mg/kg，平均土壤污染濃度分別為鉻 500-5,500 mg/kg、銅 800-8,500 mg/kg、鎳 300-3,500mg/kg 及汞 1-100 mg/kg。

對美國環保署而言，土壤清洗法在當時是一個新穎的整治技術，因此事先亦進行了示範操作(demonstration run)。1992 年 7 月美國環保署先行運送 164 噸污染土壤到荷蘭，由當地 Pan-Consult B.V.公司與 ARCADIS 公司的合作土壤清洗設備進行測試，清洗測試後的濃度：銅 250 mg/kg、鉻 150 mg/kg、鎳 80mg/kg、汞 1 mg/kg，顯示土壤清洗法確實可將土壤重金屬濃度降至 ROD 所設定之整治目標以下。此項示範操作計畫的費用為美金 7,700,000 元。

因此，1993 年 5 月於場址設立每小時可處理 25 噸土壤的土壤清洗設備，並初步針對 1,000 噸土壤進行先導試驗，結果相當成功，處理後土壤之重金屬濃度遠低於 ROD 所設定之整治目標。於是美國環保署正式核准該場址進行大規模整治，自 1993 年 6 月 28 日開始進行，至同年 10 月 10 日完成，歷時不到四個月，總計處理了 19,200 噸的土壤，土壤回收量高達 90% 以上，整治結果平均土壤重金屬濃度含量為銅 110 mg/kg、鉻 73 mg/kg、鎳 25 mg/kg 及汞 0.09 mg/kg，整治前後土壤中重金屬濃度彙整如表 3.2-3 所示。土壤清洗後產出有約 15%-20% 之淤泥，含水率為 50% 至 60%，KOP 選擇桶裝運送離場至廢棄物掩埋場掩埋，當時進行掩埋之淤泥重金屬濃度為銅(5,900 mg/kg)、鉻(4,700 mg/kg)、鎳(2,300 mg/kg)等濃度。

表 3.2-2 美國 KOP 場址資訊

項目	說明
場址名稱	美國 KOP 場址
關切污染物	土壤：鉻、銅、鎳、汞 地下水：無
整治工法	土壤：土壤清洗 地下水：無
整治期程	4 個月

表 3.2-3 美國 KOP 場址整治前後土壤重金屬濃度

	鉻	銅	鎳	汞
污染土壤濃度	500~5,500	800~8,500	300~3,500	1~100
土壤清洗後濃度	110	73	25	0.09
整治目標	150	250	80	1

單位：mg/kg

三、 國外成功整治案例二

美國奧勒崗州 Corvallis, United Chrome 污染場址資訊彙整如表 3.2-4。以下就場址描述、污染改善作業，及整治經費進行簡單說明。以下資料參考來源於 USEPA, Cost and Performance Report: Pump and Treat of Contaminated Groundwater at the United Chrome Superfund Site,

Corvallis, Oregon, 1998。

(一)場址描述

本場址自 1956 年至 1985 年間為製造、維修銘版之電鍍工廠，在 1956 年，在場址建築物西側區域開挖一小池塘，作為廢液棄置區，並且自 1956 年至 1982 年間排放含重金屬銘廢水至該小池塘。1983 年 6 月，美國環保署在本場址進行調查作業，調查結果發現，本場只限地土壤及地下水均遭受重金屬銘污染，因此於 1984 年 9 月將本場址列為 NPL 場址。

(二)污染改善作業

地下水污染改善作業分為兩個階段，第一階段為 1988 年 8 月開始，整治對象為淺層含水層；第二階段為 1991 年 9 月開始，整治對象為深層含水層。目前，淺層地下水抽除作業部份，共有 9 口抽水井；深層地下水抽除作業，則有 1 口抽水井。自地下水抽除作業開始至 1994 年 11 月，所抽除的地下水皆在現地進行處理，兩層地下水銘含量均已降低，但尚未達到整治目標。後續整治工作則依 1998 年調查結果，針對污染土壤區域以及之前的廢液儲存區進行整治。

兩含水層重金屬銘濃度均已降低，淺層含水層平均重金屬銘含量由 1,923 mg/L(1988 年 8 月)降低至 18 mg/L(1997 年 3 月)；深層含水層平均重金屬銘含量由 1.4 mg/L(1991 年 8 月)降低至 0.11 mg/L(1997 年 3 月)。23 口淺層含水層監測井中，有 11 口已達到整治目標；7 口深層含水層監測井中，有 6 口已達到整治目標。淺層含水層已經移除約 31,363 磅的重金屬銘；深層含水層已經移除約 96 磅的重金屬銘，總計約移除 31,459 磅的重金屬銘。

(三)整治經費

實際抽除處理費用約美金\$4,637,160 元，其中\$3,329,840 元為主要設備儀器費用，操作維護費用約美金\$1,307,320 元。其中地下水抽除費用大約是每 1,000 加侖約美金 75 元；污染物移除費用大約是每磅約美金 140 元。

表 3.2-2 美國奧勒崗州污染場址資訊

項目	說明
場址名稱	美國奧勒崗州污染場址
關切污染物	土壤：鉻 地下水：鉻
整治工法	地下水抽出處理
整治期程	1988 年 8 月至 1997 年 3 月

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. Evanko, C.R. and D.A. Dzombak, Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater, GWRTAC Technology Evaluation Report, TE-97-01, 1997.
2. USACE, Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, Chapter 17, EM1110-1-4007, 2003.
3. USEPA (2000) A Site Manager's Guide to Identifying, Evaluating and Selecting Institutional Controls at Superfund and RCRA Corrective Action Cleanups, EPA 540-F-00-005, OSWER 9355.0-74FS-P, September 2000
4. USEPA (2013) Superfund Remedy Report: Annual Status Report (14th Edition) , EPA 542-R-13-016 , 2013
5. USEPA, Abstracts of Remediation Case Studies Vol. 4, EPA 542-R-00-006, 2000.
6. USEPA, Bioremediation of Arsenic, Chromium, Lead, and Mercury, Office of Solid Waste and Emergency Response, 2004.
7. USEPA, Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends, 4th ed., EPA 542-R-04-015, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 2004.
8. USEPA, Cost and Performance Report: Pump and Treat and In Situ Chemical Treatment of Contaminated Groundwater at the Odessa Chromium II South Plume Superfund Site Odessa, Ector County, Texas, 2005.
9. USEPA, Cost and Performance Report: Soil Washing at the King of Prussia Technical Corporation Superfund Site, Winslow Township, New Jersey, 1995.
10. USEPA, Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground water, Chapter 2, April 2004.

11. 中華民國環境工程學會，土壤與地下水污染整治：原理與應用，2008。
12. 台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，2003
13. 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
14. 行政院環保署，土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之整治技術選取、系統設計要點與操作維護注意事項參考手冊，2011
15. 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>
16. 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
17. 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
18. 行政院環境保護署，土壤及地下水重金屬污染調查作業參考指引，EPA-25-III-05B-2015-003，015
19. 行政院環境保護署，土壤污染管制標準，中華民國 100 年 1 月 31 日行政院環境保護署環署土字第 1000008495 號令，2011
20. 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
21. 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
22. 行政院環境保護署，環境檢驗所，<http://www.niea.gov.tw/>
23. 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
24. 經濟部工業局，土壤及地下水污染整治技術手冊—生物處理技術，2004
25. 經濟部工業局，重金屬污染類型之土壤及地下水污染預防及整治技術手冊，2006

26. 葉琮裕、高志明、蔡在唐，整治技術列車概念處理受油品污染場址概述，環保訓練園地雙月刊，第 85 期，2006。
27. 蔡在唐、梁書豪、簡華逸、高志明、葉琮裕，以串聯式整治列車系統處理受燃料油污染之土壤，工業污染防治，第 102 期，33-48，2007。
28. 蔡在唐、梁書豪、簡華逸、高志明、葉琮裕，以串聯式整治列車系統處理受燃料油污染之土壤，工業污染防治，第 26 期，2007。
29. 韓寧、魏連啟、劉久榮、葉超、陳雲法，地下水中常見無機污染物的原位治理技術現況，城市地質，第 14 卷第 2 期，2009。

土壤及地下水重金屬污染
整治作業參考指引
(附件一)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-06B-2015-003

附件一目錄

	<u>頁碼</u>
一、 監測式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation)	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	附件一-2
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	附件一-11
1.3 成本及期程評估	附件一-11
現地生物整治法(In-Situ Bioremediation)	附件一-14
2.1 整治技術簡介	附件一-14
2.1.1 原理	附件一-14
2.1.2 適用條件	附件一-16
2.2 整治系統操作與設計	附件一-18
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	附件一-22
2.2.3 整治系統監測	附件一-22
2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-23
2.3 成本及期程評估	附件一-2
玻璃化法(Vitrification).....	附件一-25
3.1 整治技術簡介	附件一-25
3.1.1 原理	附件一-25
3.1.2 適用條件	附件一-27
3.2 整治系統操作與設計	附件一-28

3.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-28
3.2.2	整治系統單元.....	附件一-30
3.2.3	整治系統監測.....	附件一-31
3.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-31
3.3	成本及期程評估.....	附件一-32
	添加土壤改良劑法(Application of Soil Amendments).....	附件一-34
4.1	整治技術簡介.....	附件一-34
4.1.1.	原理.....	附件一-34
4.1.2.	適用條件.....	附件一-34
4.2	整治系統操作與設計.....	附件一-37
4.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-37
4.2.2	整治系統單元.....	附件一-40
4.2.3	整治系統監測.....	附件一-40
4.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-40
4.3	成本及期程評估.....	附件一-41
	滲透性反應牆法(Permeable Reactive Barriers).....	附件一-42
5.1	整治技術簡介.....	附件一-42
5.1.1	原理.....	附件一-42
5.1.2	適用條件.....	附件一-44
5.2	整治系統操作與設計.....	附件一-46
5.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-46
5.2.2	整治系統單元.....	附件一-50
5.2.3	整治系統監測.....	附件一-50
5.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-52
5.3	成本及期程評估.....	附件一-52
	反應帶整治法(Reactive Zones).....	附件一-54
6.1	整治技術簡介.....	附件一-54
6.1.1	原理.....	附件一-54

6.1.2	適用條件.....	附件一-577
6.2	整治系統操作與設計.....	附件一-57
6.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-58
6.2.2	整治系統單元.....	附件一-61
6.2.3	整治系統監測.....	附件一-6
6.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-64
6.3	成本及期程評估.....	附件一-64
	電動力法(Electrokinetics)	附件一-66
7.1	整治技術簡介.....	附件一-66
7.1.1	原理.....	附件一-66
7.1.2	適用條件.....	附件一-72
7.2	整治系統操作與設計.....	附件一-73
7.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-73
7.2.2	整治系統單元.....	附件一-75
7.2.3	整治系統監測.....	附件一-76
7.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-77
7.3	成本及期程評估.....	附件一-78
	植物復育法(Phytoremediation)	附件一-80
8.1	整治技術簡介.....	附件一-80
8.1.1	原理.....	附件一-80
8.1.2	適用條件.....	附件一-87
8.2	整治系統操作與設計.....	附件一-88
8.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-88
8.2.2	整治系統單元.....	附件一-92
8.2.3	整治系統監測.....	附件一-92
8.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-93
8.3	成本及期程評估.....	附件一-94
	地下水抽出及處理法(Pump and Treat)	附件一-97

9.1	整治技術簡介.....	附件一-97
9.1.1	原理.....	附件一-97
9.1.2	適用條件.....	附件一-107
9.2	整治系統操作與設計.....	附件一-110
9.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-111
9.2.2	整治系統單元.....	附件一-113
9.2.3	整治系統監測.....	附件一-113
9.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-115
9.3	成本及期程評估.....	附件一-116
	圍堵處理法(Containment)	附件一-117
10.1	整治技術簡介.....	附件一-117
10.1.1	原理.....	附件一-117
10.1.2	適用條件.....	附件一-118
10.2	整治系統操作與設計.....	附件一-119
10.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-120
10.2.2	整治系統單元.....	附件一-120
10.2.3	整治系統監測.....	附件一-120
10.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-122
10.3	成本及期程評估.....	附件一-123
	土壤淋洗法(Soil Flushing).....	附件一-124
11.1	整治技術簡介.....	附件一-124
11.1.1	原理.....	附件一-124
11.1.2	適用條件.....	附件一-125
11.2	整治系統操作與設計.....	附件一-127
11.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-127
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.....	附件一-132

11.3 成本及期程評估..... 附件一-133

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 1.1.1-1	自然衰減機制示意圖..... 附件一-2
圖 1.2.1-1	監測式自然衰減法之評估執行流程圖..... 附件一-6
圖 1.2.3-1	評估自然衰減法成效之監測井網規劃設計概念圖..... 附件一-12
圖 3.1.1-1	玻璃化處理程序概念圖..... 附件一-26
圖 3.2.1-1	玻璃化法整治技術操作程序..... 附件一-29
圖 5.1.1-1	各種類型透水牆處理技術圖..... 附件一-43
圖 5.2.1-1	滲透性反應牆之設計流程圖..... 附件一-48
圖 6.1.1-1	含水層中重金屬之交互作用..... 附件一-56
圖 6.2.1-1	重力灌注反應試劑示意圖-淺層污染..... 附件一-60
圖 6.2.1-2	多重反應幕灌注反應試劑示意圖-深層污染..... 附件一-60
圖 6.2.1-3	灌注點反應試劑分佈情形示意圖..... 附件一-61
圖 6.2.2-1	現地反應帶設置位置概念圖..... 附件一-62
圖 7.1.1-1	電動力法處理原理示意圖..... 附件一-67
圖 8.1.1-1	植物整治處理機制..... 附件一-81
圖 8.2.1-1	土壤植物整治法的植物選擇系統設計流程圖..... 附件一-90
圖 9.1.1-1	地下水抽出處理法原理示意圖..... 附件一-98
圖 9.1.1-2	地下水抽出處理法之捕捉區概念圖..... 附件一-98
圖 9.1.1-3	沉澱法及共沉澱法處理系統..... 附件一-99
圖 9.1.1-3	薄膜過濾系統..... 附件一-101
圖 9.1.1-4	薄膜過濾法原理示意圖..... 附件一-103
圖 9.1.1-5	離子交換系統示意圖..... 附件一-104
圖 9.1.1-6	吸附處理系統示意圖..... 附件一-106
圖 9.1.1-7	電透析原理示意圖..... 附件一-107
圖 9.2.2-1	地下水抽出處理法之抽水及停止抽水期間濃度變化圖..... 附件一-112
圖 9.2.3-1	地下水抽出處理系統成效監測程序流程圖..... 附件一-114
圖 11.1.1-1	現地土壤淋洗技術示意圖..... 附件一-125
圖 11.2.1-1	土壤淋洗法-垂直灌注井剖面示意圖..... 附件一-129
圖 11.2.1-2	土壤淋洗法-溝渠入滲系統平面配置示意圖..... 附件一-130

圖 11.3-1 重金屬整治技術之成本與比較..... 附件一-133

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.1.2-1	評估地下環境還原脫氯作用之地球化學參數..... 附件一-3
表 1.1.2-2	監測式自然衰減法技術優缺點比較表..... 附件一-4
表 1.2-1	國外監測式自然衰減法相關法規指引及規範..... 附件一-5
表 2.1.2-1	現地生物處理技術優缺點比較表..... 附件一-18
表 2.2-1	國外生物整治法相關法規指引及規範..... 附件一-19
表 2.2.3-1	現地生物整治系統防止污染擴大措施與監測設備..... 附件一-23
表 2.2.4-1	現地生物整治法潛在之危險..... 附件一-24
表 3.1.1-1	元素在矽酸玻璃中之大約溶解度..... 附件一-27
表 3.2.3-1	玻璃化法污染監測項目設備..... 附件一-31
表 3.2.4-1	玻璃化法潛在之危害彙整表..... 附件一-33
表 4.1.2-1	土壤改良劑適用情形..... 附件一-35
表 4.2-1	國外添加土壤改良劑法相關法規指引及規範..... 附件一-37
表 4.2.1-1	土壤改良劑施用設備技術比較表..... 附件一-39
表 4.2.4-1	添加土壤改良劑法潛在之危害彙整表..... 附件一-41
表 5.1.2-1	各種類型滲透性反應牆處理技術的種類與機制..... 附件一-45
表 5.1.2-1	滲透性反應牆技術優缺點比較表..... 附件一-45
表 5.2-1	國外透水性反應牆相關法規指引及規範..... 附件一-46
表 5.2.4-1	滲透性反應牆整治法潛在之危害彙整表..... 附件一-53
表 6.2-1	國外反應帶相關法規指引及規範..... 附件一-57
表 6.2.1-1	常見地球化學參數列表..... 附件一-58
表 6.2.4-1	反應帶整治法潛在之危害彙整表..... 附件一-65
表 7.1.2-1	電動力法優缺點比較表..... 附件一-72
表 7.2-1	國外電動力法相關法規指引及規範..... 附件一-73
表 7.2.4-1	電動力法潛在之危害..... 附件一-78
表 8.1.1-1	高累積植物物種..... 附件一-84
表 8.1.2-1	植物整治法之優缺點分析..... 附件一-87
表 8.2-1	國外植物整治相關法規指引及規範..... 附件一-88
表 8.2.4-1	植物整治法潛在危害..... 附件一-94

表 9.1.2-1	地下水抽出處理法技術優缺點比較表.....	附件一-108
表 9.2-1	國外地下水抽出處理法相關法規指引及規範.....	附件一-111
表 9.2.2-1	地下水抽出處理法主要系統設備表.....	附件一-113
表 9.2.3-1	地下水抽出處理法整治系統成效監測表.....	附件一-115
表 9.2.4-1	地下水抽出處理法潛在之危害.....	附件一-116
表 10.1.2-1	圍堵法技術優缺點比較表.....	附件一-118
表 10.1.2-2	各種類型垂直阻控系統之適用性.....	附件一-119
表 10.2-1	國外圍堵法相關法規指引及規範.....	附件一-119
表 10.2.3-1	開挖作業期間場址周圍環境監測.....	附件一-121
表 10.2.3-1	圍堵成效監測.....	附件一-121
表 10.2.4-1	開挖作業之潛在危害.....	附件一-122
表 11.1.2-1	應用土壤淋洗法進行土壤整治的美國超級場址.....	附件一-127
表 11.1.2-2	土壤淋洗法可以處理的污染物.....	附件一-127
表 11.2-1	國外土壤淋洗法相關法規指引及規範.....	附件一-128
表 11.2.1-1	土壤淋洗法場址特性評估一覽表.....	附件一-129
表 11.2.3-1	土壤淋洗法整治系統成效監測表.....	附件一-132
表 11.2.4-1	土壤淋洗法潛在之危險.....	附件一-133

一、監測式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

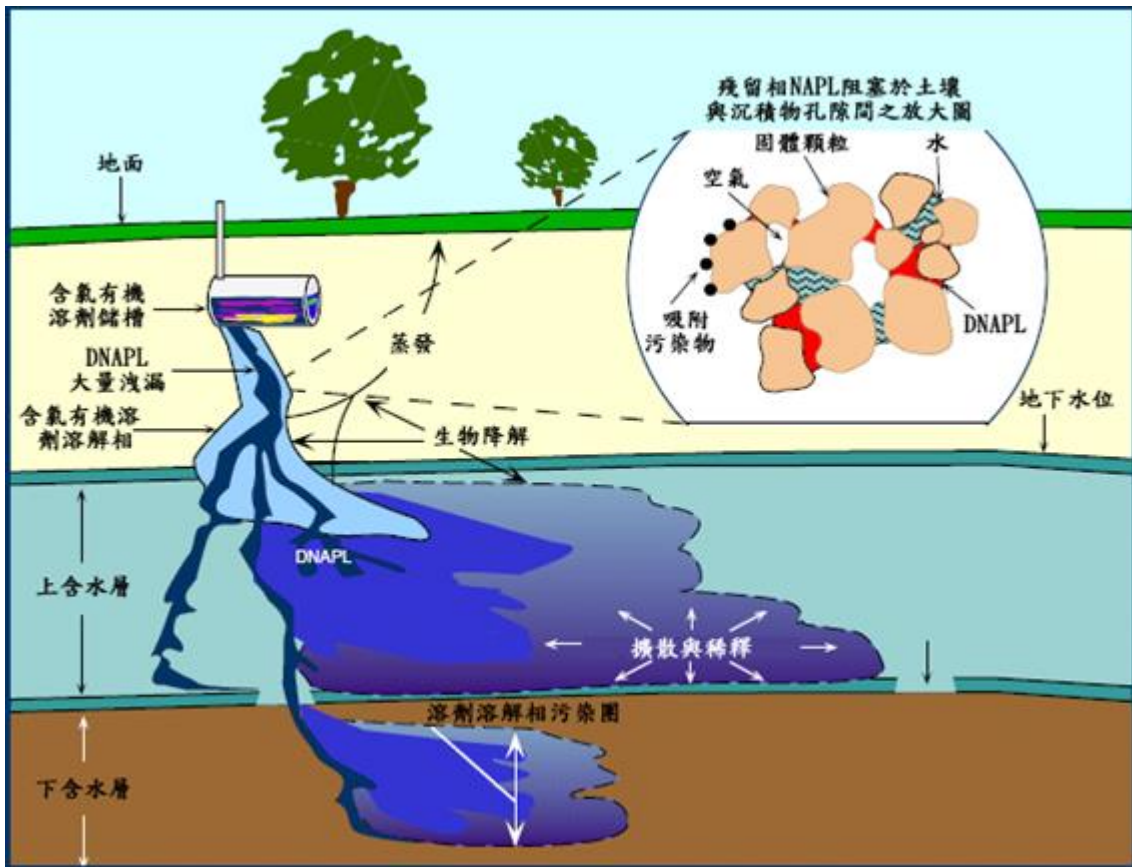
監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)為利用土壤及地下水環境中的物理現象或化學、生物反應過程，例如稀釋、蒸發、吸附、延散、微生物代謝等作用，將土壤或地下水中的污染物予以清除或減少的方法。自然衰減的現象在每一個污染場址中或多或少均會產生；但若要採用監測式自然衰減法進行污染整治，則場址特性需具備適合生物分解之特定條件，例如含有碳源的有機污染物。有關監測式自然衰減之可行性評估準則、設計準則與成效評估準則，可參考環保署「應用監測式自然衰減整治法之可行性評估準則、設計及成效評估等規範建置計畫」所訂定之內容。

目前已有相關的科學研究，發現經由生物作用(例如酶促反應)可改變重金屬在土壤中的化學形態，使重金屬固定或解毒，降低其在土壤環境中的移動性與生物可利用性，然而尚未發展到用於重金屬污染整治的階段，因此本節以有機污染物進行說明。

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，採用本法前應進行縝密的調查與規劃。圖 1.1.1-1 為含氯有機溶劑污染場址

的自然衰減機制示意圖，包括生物降解、擴散、稀釋、吸附、揮發等機制。



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

圖 1.1.1-1 自然衰減機制示意圖

1.1.2 適用條件

自然衰減程序在任何污染場址都會發生，只是發生的程度受污染物種類、污染場址土壤或地下水的物理、化學及生物特性等的影響而有所不同。以含氯碳氫化合物為例，常見用於評估還原脫氯作用之地球化學參數，如表 1.1.2-1 所示，其中氯離子、硝酸鹽、硫酸鹽、硫化物等無機陰離子的濃度，將影響還原脫氯作用的進行。監測式自然衰減法於應用上之優缺點，如表 1.1.2-2 所示。

表 1.1.2-1 評估地下環境還原脫氯作用之地球化學參數

項次	項目	污染源濃度或與背景值差異	說明
1	砷(As^{3+})	濃度上升大於背景值	厭氧狀況造成移動
2	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
3	溶氧(DO)	< 0.5 mg/L	氧濃度太高會抑制還原脫氯作用。
4	乙烷	存在	1,1,1-三氯乙烷還原脫氯可能的產物。
5	乙烯	存在	氯乙烯還原脫氯可能的產物。
6	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。
7	氫氣	> 1 nM	可進行還原脫氯作用。氯乙烯可能累積。
8	氫氣	< 1 nM	氯乙烯可被氧化，不可能進行還原脫氯作用。
9	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。
10	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。
11	鎳	濃度上升大於背景值	厭氧狀況造成移動。
12	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。
13	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。
14	pH	5 < pH < 9	微生物生長最佳範圍
15	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。
16	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。
17	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。
18	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。
19	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 。
20	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 1.1.2-2 監測式自然衰減法技術優缺點比較表

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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.

1.2 整治系統操作與設計

目前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 1.2-1 所示。

1.2.1 整治系統設計與操作要點

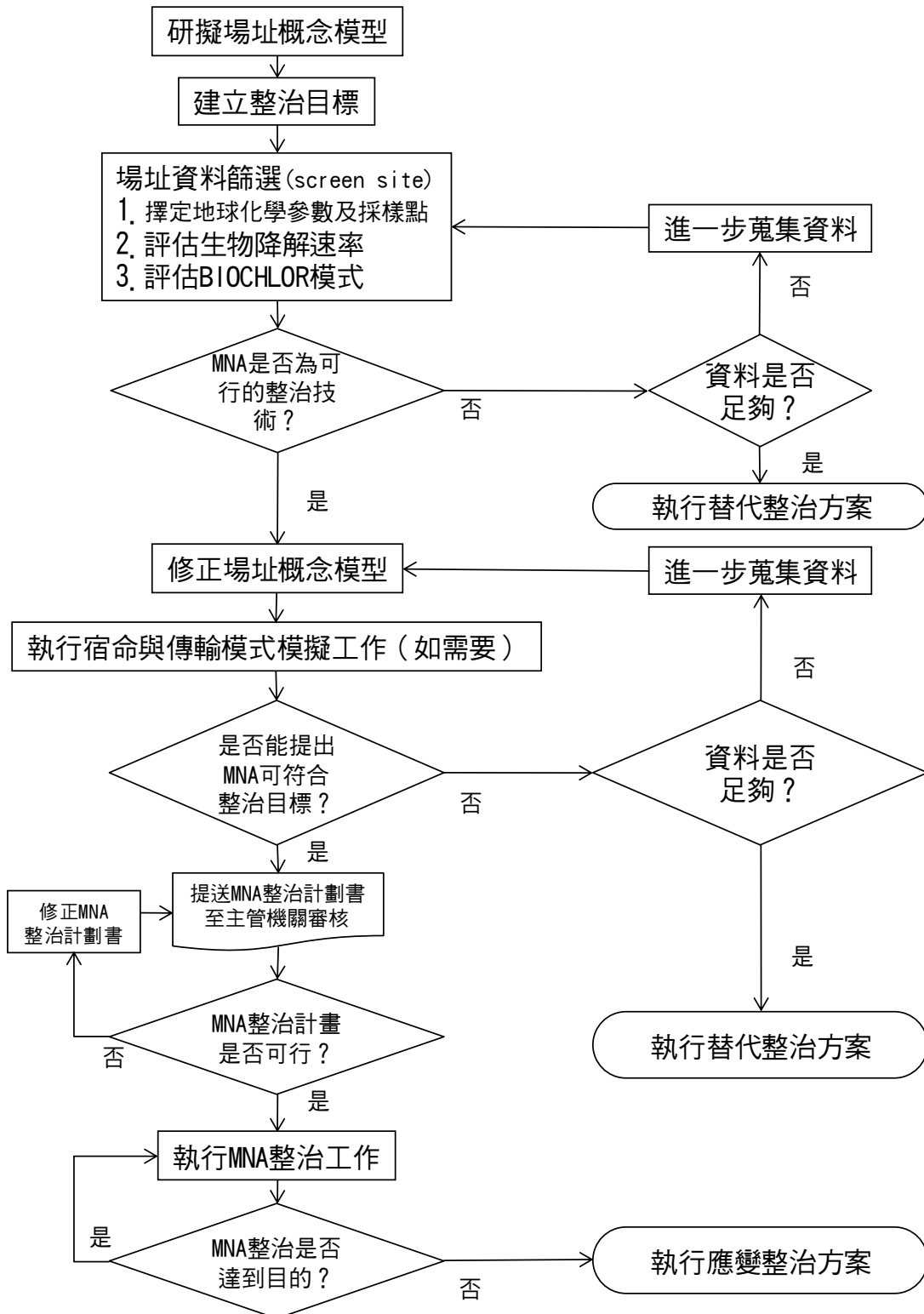
決定是否採用或部分採用監測式自然衰減法為整治方法，應依據場址特徵之調查證據資料與分析結果判斷，評估監測式自然衰減法所需之場址特徵調查資料，較一般整治技術評估所需之資料更為詳細。評估監測式自然衰減法之流程如圖 1.2.1-1 所示，並摘要說明如下：

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。

表 1.2-1 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	
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



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

圖 1.2.1-1 監測式自然衰減法之評估執行流程圖

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。

二、 篩選資料以驗證自然降解現象

足以顯示化學物之減少與自然降解相關。例如污染物濃度會隨時間而降低，或隨地下水流向量測得到之污染物濃度與模式預測值相符。

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流之污染區外。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) 地下水垂直行向。
- (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) 視場址情況之需求，執行更精密之分析，以取得地質或水文地質參數。

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數據以重新評估自然降解之正確性。

七、 曝露途徑分析

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。

九、 非技術之考量

監測式自然衰減法並非「棄之不顧」(walk away)或「零方案」(noaction)，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。

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。

1.2.2 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。

1.2.3 整治系統監測

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。

一、 監測計畫目標

- (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)偵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。

二、 監測井位置

監測式自然衰減法之監測井網設計，如圖 1.2.3-1 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。

三、 監測項目

一般包括關切污染物之重金屬，以及地球化學指標參數，例如 pH、Eh、TOC、DO、NO⁻³、Fe⁺²、SO⁴⁻²、Cl⁻¹ 等。

四、 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

(一)提供潛在受體受影響前的即時警示。

(二)提供污染帶擴大時的警示。

(三)偵測污染帶的大小與濃度變化。

(四)確認不同時間監測數據之變化。

(五)偵測地球化學參數的變化，以提供自然衰減變化的警訊。

(六)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。

1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、 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。

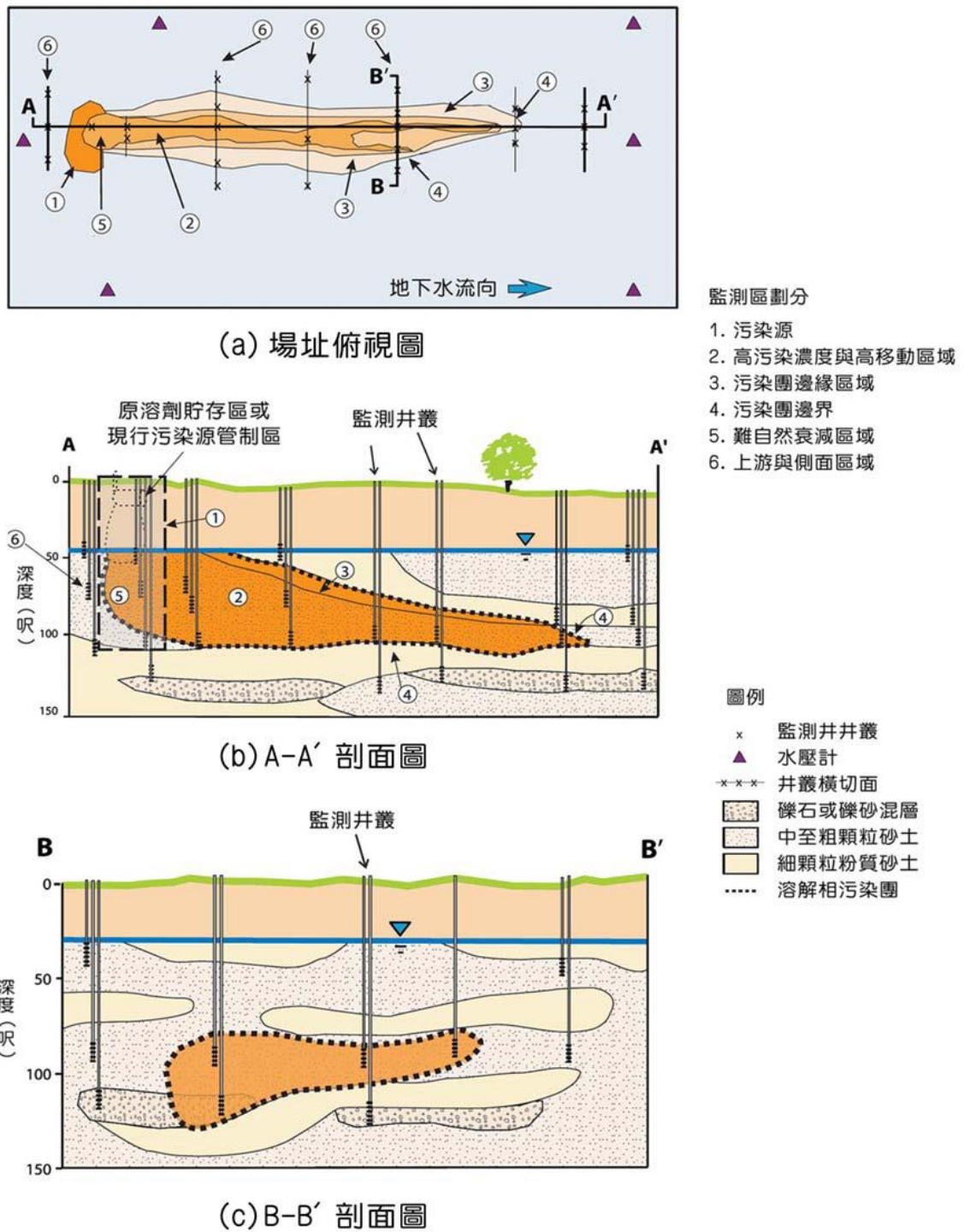
- (一) 污染物濃度顯示持續增加之趨勢。
- (二) 位於污染源區的監測井顯示，污染物濃度大幅上升，可能有新的污染來源或污染物持續洩漏中。
- (三) 污染帶邊緣外之監測井檢測出污染物，顯示污染帶已擴散或移動
- (四) 污染物降解速率未符合原預期整治目標。

1.3 成本及期程評估

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 萬美元(約新台幣 658,000)，或 10,000~750,000 萬美元(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 萬美元(約新台幣 1,120,000)，或 3,000~150,000 美元(約新台幣 105,000~5,250,000)。

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)。



參考資料：USEPA, Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground water, Chapter 2, April, 2004

圖 1.2.3-1 評估自然衰減法成效之監測井網規劃設計概念圖

- 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。

二、現地生物整治法(In-Situ 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。由於重金屬(例如 Cu、Pb、Cd、Cr、As、Zn、Hg、Ag)屬無機污染物，並不像其他有機污染物具有可供微生物分解或礦化的碳源，因此，通常面對重金屬污染所採取的整治工法，考慮對象主要為化學方法或工程技術方法。然而，有時這些方法，或因成本太高，或因對現地造成太大的破壞，或因受其他因素的限制，此時，生物處理方法就可扮演一定之角色。

雖然重金屬污染物是無法被生物降解，但可經由吸附、甲基化、螯合及價態變化而轉化，這些轉化影響了重金屬的流動性與生物利用性。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。本節彙整美國環保署有害廢棄物暨緊急應變管理署(Office of Solid Waste and Emergency Response)編撰的重金屬砷、鉻、鉛及汞生物整治報告(USEPA, 2004)，說明如后。

現地生物整治(in-situ bioremediation)是一種以自然程序來清除環境中有害化學物質的方法。經由人工添加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濃度。

重金屬污染物通常存在於土壤、沉積物及水體中。工業生產的過程，例如採礦、冶煉、電鍍等，都會造成重金屬的污染。雖然重金屬污染物是

無法被生物降解，但可經由吸附、甲基化、螯合及價態變化而轉化，這些轉化影響了重金屬的流動性與生物的利用性。在低濃度的情形下，重金屬是生命過程的重要組成，通常用以幫助酶製造。然而，超過特定的閾值濃度後，這些重金屬對許多生物可能變成有毒害的。幸運的是，微生物可以影響重金屬的反應性與流動性，因此，微生物便可用於降低重金屬的毒性並防止進一步的污染。

葡萄球菌、芽孢桿菌、假單胞菌、Citrobactera、Klebsilla、紅球菌等是生物復育機制常用的有機體。這些機制包括生物添加物，將微生物與營養物質添加到受污染的場址，生物刺激機制即添加營養素和酶藉此補充場址的內部微生物。例如 Alcaligenes 與假單胞菌已用於重金屬鉻的生物復育、大腸桿菌與假單胞菌等有機體亦已用於重金屬銅的生物復育，目前有更多利用微生物降解金屬的研究正在進行中。未來美國聯邦、地方政府及民營工業，每年將投資數十億美元，用於整治被有害廢棄物污染的場址，這項投資證明了利用微生物處理重金屬污染場址的必要性。

美國超級基金是一個由環保署管理的聯邦計畫，用來強制執行為了場址鑑定及清理的環境應變補償和責任歸屬綜合法案(CERCLA)。揮發性有機化合物(VOCs)與重金屬是超級基金場址的主要污染物，截至 2003 年 5 月，在美國國家優先整治名單(NPL)中，共有 456 個聯邦與非聯邦超級基金場址，這些場址至少仍需要一個額外的復育的動作。根據美國環保署的報告，77%的場址需要進行重金屬的復育、78%場址需要進行揮發性有機化合物的復育，以及 71%的場址需要進行半揮發性有機化合物的復育(SVOCs)。根據美國環保署於 2001 年的研究預測，在未來 10 年內，將有 23 至 49 處場址將需要接受最大程度的清理。

重金屬污染物不只出現在超級基金場址，由美國國防部(DoD)與美國能源部(DOE)所管理的場址也有重金屬污染。國防部有責任清理因國防設施所造成污染的場址，例如一些工業、商業、訓練及武器測試的活動。國防部的報告指出，大約有 9,000 個國防部場址需要整治，而最普遍存在於地下水的污染物為揮發性有機污染物與重金屬，這些污染分別出現在 74%與 63%的國防部場址。這也進一步支持重金屬生物復育研究的必要性。值得注意的是，有 63%至 79%的美國能源部場址，發現了重金屬的污染。美國

能源部的場址，包含輻射的危害，包括大量的污染土壤與核廢料，這些場址佔美國需清理場址的三分之一，其中，發現大量的鉛、六價鉻、汞、鋅、鈹、砷、鎘、銅等重金屬，因此，重金屬的生物復育技術將可廣泛的應用於這些場址的整治。

2.1.2 適用條件

生物整治包含使用微生物去幫助破壞污染物，此一過程稱為微生物代謝。這過程涉及一個有機體的生化反應或途徑，造成了這有機體的活動、生長和繁殖。在微生物代謝中的化學過程，包括反應物、污染物、氧氣或其他電子接受者，它將代謝物轉化為明確的產物。該微生物代謝系統使有機體取回用以生存的碳、電子和其他重要成分。在某些情況下，當微生物尋求其他能源或碳的來源時，污染物可能會被轉化。這種反應被描述為「共代謝」，在共代謝中，污染物的轉化物對細胞產生很少或毫無助益。二次利用是另一種方式來描述一個非有益的生物轉化。這個污染物的轉化是一種偶然的酶催化反應，這些酶存在於細胞的代謝系統中。

好氧呼吸是微生物使用氧氣去氧化污染物中碳源的一個過程，許多微生物利用好氧呼吸去破壞有機污染物。在好氧條件下，微生物活躍造成氧濃度出現下降，這有助於在某些生物體的繁殖。在此過程中，氧氣減少造成水的形成。而在代謝過程中，微生物可以不使用氧氣進行使用厭氧呼吸。與好氧呼吸不同，好氧呼吸的氧氣為主要的電子接受者，厭氧呼吸則採用無機化合物，例如硝酸鹽、硫酸鹽及鐵作為電子接受者。無機分子，例如氫、亞硝酸鹽及還原鐵，這些作為電子供應者。一旦這些分子被當成為電子供應者，他們會被氧化，而他們的電子會轉移到電子接受者(通常是氧氣)，進而產生細胞合成所需的能量。微生物的主要電子供應者是一種無機分子，他們的碳來源來自微生物的二氧化碳，這個過程稱為二氧化碳的固定。氫氣、硫化氫、還原形式的重金屬都是厭氧呼吸的副產品。在重金屬被厭氧生物當用作電子接受者的情況下，在地下水的重金屬沉澱物會降低其濃度和流動性。一般厭氧條件下，電子接受者的濃度(例如硝酸鹽與硫酸鹽)將減少。目前的研究著重在當接觸微生物時，重金屬污染物轉換成沉澱的形式，此程序提供關於去除持久性重金屬污染物的最佳解決方案。

發酵是另一種類型的代謝機制，協助將污染轉換的成危害較小的化合物。發酵是一種代謝方法，發生在沒有氧氣的情況下，一系列經由微生物的內部電子轉移催化。發酵產品，例如醋酸、丙酸、乙醇、氫等，可經由細菌進行生物降解。有些細菌種類可以轉換這些產品成二氧化碳、甲烷及水，這種轉換可以幫助一些污染場址的整治。另一種方法是微生物代謝還原脫鹵。還原脫鹵在鹵化有機產品的解毒有潛在重要性。此方法涉及微生物催化污染物上的鹵素原子，並且將它替換成氫原子。這種反應污染物增加了兩個電子到污染物，使得分子轉換成他的還原形式。為了實現上述方法，電子供應者必須來自有別於鹵化污染物不同來源。乳酸、醋酸、甲醇及其他低分子量的有機化合物，皆可能是電子供應者。還原脫鹵通常不為微生物產生能量，但它提供了一種用以消除微生物細胞的有毒物質之方法。

如上所述，微生物可以將污染物轉化成危害較少的產物。然而，除了他們的轉換能力，他們可能去除污染物的移動性。重金屬不移動主要是因為反應造成金屬沉澱，或化學反應使重金屬變成固相。化學與物理特性都能影響重金屬在土壤及地下水中的流動性。在酸性條件(pH 值介於 4.0-8.5)下，陰離子傾向於轉變為氧化無機物，使重金屬陽離子移動。而在高 pH 值條件下，離子吸附到無機物表面，使重金屬陰離子移動。鐵、鋁、錳的水合金屬氧化物會影響重金屬的濃度，因為這些無機物會減少陽離子與陰離子。

「Biocurtain」用來描述大量的生物質停止或污染物緩慢移動的過程，生物質可以進而吸收疏水性有機分子。大型生物質也能阻礙污染物的移動。當微生物氧化或還原物質，這種反應會導致重金屬的沉澱。汞是一個會沉澱的例子，這過程開始於汞(Hg^{+2})被還原成硫化汞，使得汞轉換到沉澱形式。鉻是使用微生物轉換為沉澱形式的另一種金屬，這一過程包含六價鉻(Cr^{+6})還原成三價鉻(Cr^{+3})，接著沉澱成鉻氧化物、硫化物、磷酸鹽。目前的重點在研究會產生沈澱的其他重金屬與放射性污染物。

生物整治法主要優勢為(1)可將污染物轉化成毒害性較小的物質，而非將污染物僅做相的轉移；(2)整治費用較為經濟。生物整治相較於傳統的整治方法亦有許多優點，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、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。現地生物處理技術優缺點比較如表 2.1.2-1 所示。

表 2.1.2-1 現地生物處理技術優缺點比較表

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 整治費用較為經濟。 • 現地進行對場址的擾動較小 • 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。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 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。 • 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。

2.2 整治系統操作與設計

有關國外生物整治已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 2.2-1 所示。

2.2.1 整治系統設計與操作要點

一、環境設計操作特性

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，設計操作之環境條件。

表 2.2-1 國外生物整治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
USEPA	A Citizen's Guide to Bioremediation	2001
USEPA	Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications (EPA542-R-00-008)	2000
其他政府機關出版重要文獻名稱		
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

採用好氧生物整治時，現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。

二、 整治技術特性

以生物處理方式進行土壤或污泥中重金屬之移除的資料，比較其他方法而言，較為有限，以下將針對植物整治(phytoremediation)、微生物之氧化/還原、溶解性微生物產物(Soluble Microbial Products, SMP)整合作用等三種方式進行介紹：

(一) 植物整治(phytoremediation)(Mulligan, Yong & Gibbs, 2001)

植物整治的原理乃是利用植物的生長，透過根部的吸附或吸收，或特殊化合物的釋放，與重金屬形成錯合物而移除。此種方法一般適用於較淺層之污染，例如所謂根域過濾(rizofiltration)，就是利用植物進行吸附，可應用於受污染之地下水的復育；而植

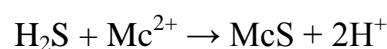
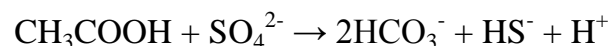
物攝取(phytoextraction)則牽涉到利用樹、草、或其他作物，進行重金屬的吸附，以達土壤處理之效果；植物穩定(phytostabilization)是透過植物釋放特定化學物質，以降低土壤之 pH，並與重金屬形成錯化合物，達到降低污染物的自由態濃度之效果。

以上述方法處理後之植物，必須做適當之處置，通常可以進行如乾燥、焚化、氣化、熱裂解、酸萃取、厭氧消化、提煉生質油等方式，畢竟處理植物比處理土壤簡單。植物整治通常適用於較淺層、低濃度之污染(2.5~100 mg/kg)，而植物的選擇必須考慮到氣候之條件及該重金屬對植物之生物有效性。本法的缺點是通常比其他方法需要更長之整治時間，而有效之提昇方式，則可透過基因選殖(genetic breeding)的改良，或建立重金屬攝取與植體對重金屬物種之可獲性的關係，加以改進。

(二)微生物之氧化/還原

生物淋洗(bioleaching)是指利用微生物(如 *Thiobacillus* sp.)在喜氣及酸性($\text{pH} \leq 4$)之環境下進行重金屬之移除，而移除可透過直接或間接之機制(Mulligan et al., 2001)。直接方式如金屬硫化物的氧化產生硫酸，達到以 H^+ 取代/置換土壤中重金屬的目的；間接方式，如將 Fe^{2+} 轉化成 Fe^{3+} ，再由 Fe^{3+} 氧化硫化物而產生酸，本身則被還原成 Fe^{2+} 。一些研究顯示，可以利用 *Thiobacilli* 進行土壤的復育，含有重金屬硫化物之厭氧污泥，可以此方式處理。

已知一些微生物可對重金屬進行氧化或還原，如銀和鎘可以被氧化，而砷和鐵則可以被還原。六價鉻(Cr^{6+})因被還原成三價鉻(Cr^{3+})，而降低毒性和移動性。微生物像 *Bacillus subtilis* 及硫酸鹽還原菌(Sulfate Reducing Bacteria, SRB)，在有硫存在之情況下，也可進行這些反應。SRB 將重金屬根據下列之反應式，形成硫化物型態，以減少金屬之移動性：



由上式可以看出，在硫酸鹽及電子提供者(如醋酸)存在下，以及低氧化還原電位之環境條件之下，可以促成上式反應的發生

。一項針對底泥中以生物淋洗之試驗發現，重金屬的溶出效率與 pH 有極大的關係，而 pH 又受底泥中之鹼度的影響。透過 pH 的監測，可以根據不同重金屬去除率方程式，估計重金屬的溶出效率，估計淋洗之效果(Chen & Lin, 2001)。

(三)溶解性微生物產物(Soluble Microbial Products, SMP)螯合作用

所謂的溶解性微生物產物(SMP)，通常是指因微生物的活動所產生出來的有機物。哪些因素會造成 SMP 的產生說法不一，不過，通常包括下列幾個因素：

1. 細胞內外平衡濃度的需求：當微生物生長環境受到稀釋時，會釋放出 SMP，以建立細胞膜內外濃度的平衡
2. 基質的存在：當細胞外部能量來源增加時，會刺激 SMP 產生
3. 營養鹽的可獲性：微生物會因本身對營養鹽的需求，尤其當其濃度特別低之際，以釋放出 SMP 的方式，來增加其對營養鹽的生物有效性，Siderophore 就是一種提昇鐵的可獲性之一例
4. 減少生存環境的壓力：微生物透過 SMP 的產生，以因應外部環境急劇的變化，如溫度及滲透壓的改變。幾乎所有的微生物都會因環境的壓力，而誘發蛋白質(stress protein)的產生，以避免進一步導致死亡；
5. 正常之生長與代謝：在正常的情況下，微生物也會因生長與代謝，而產生 SMP。

根據 Rittmann 等對 SMP 的研究發現(Rittmann & McCarty, 2001)，SMP 的產生可分為下列兩大類：(1)UAP(substrate-utilization-associated products)，其產生與基質的代謝有直接的關係；(2)BAP(biomass-associated products)，此部份的產生則直接與微生物濃度有直接的關係。SMP 的成分包括多種有機物，如腐質酸與黃酸(humic and fulvic acids)、多醣類(polysaccharides)、蛋白質、核酸、有機酸、氨基酸、抗生素、類固醇、酵素、細胞結構成分、以及能量代謝之產物等。這些特性通常以分子量的大小及對金屬螯合特性之強度來表示，在分子量的大小方面，Rittmann 等發現在喜氣、固定膜生長系統下，當以

酚(分子量= 94 daltons)為唯一基質時,80 % 以上的分子量大於 500 daltons, 且其中有 30~64 % 的分子量大於 10,000 daltons。

另一個以厭氧完全混合系統(Continuous Flow Stirred Tank Reactor, CSTR)的研究顯示(Kuo & Parkin, 1996), 當以葡萄糖為唯一基質時, 大分子量的 SMP(MW>10,000 daltons)的產生, 有隨著細胞停留時間的增加而增加的趨勢(SRT= 15 天為 48 %, SRT = 25 天為 62 %, SRT = 40 天為 76 %)。在與重金屬的螯合強度方面, 在一項萃取 *Klebsiella aerogenes*. 的外細胞高分子聚合物(extracellular polymers)試驗時發現, 其與鎳的穩定常數(stability constant)為 105.49, 而錯合能力(complexation capacity)則為 1.6×10^{-5} mole Ni/g polymer (Ruddet al., 1984)。另一項以厭氧系統的 CSTR 研究顯示(Kuo & Parkin, 1996), 當以葡萄糖為唯一基質時, 產生之 SMP 與鎳之穩定常數約為 103.62, 強度與一般產生之有機酸(如 phthalate 及 glycolate)相當, 而錯合能力則為 $0.65\sim 5.97 \times 10^{-6}$ mole Ni/mg SMP(平均為 2.49×10^{-6} mole Ni/mg SMP), 與污泥停留時間則無直接關係。

雖然以生物處理方式針對重金屬污染進行整治之探討, 以試驗研究規模較多, 實場經驗有限, 但基礎研究針對 SMP 的產生機制、濃度與螯合特性, 已有相當之了解。因此, 如何結合現地之有利或不利之條件與限制, 配合微生物對 SMP 的產生進行重金屬之螯合, 增加其移動性, 以方便後續之處理與處置上, 還有相當空間可以加以研究與應用。

2.2.2 整治系統單元

現地生物整治主要係透過微生物轉換概念進行污染改善作業, 並無特定常見之整治系統單元, 重點是促進微生物降解污染物作用能力。

2.2.3 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。對

於防止污染擴大措施，列舉本法較常使用共通之項目如表 2.2.3-1 所示；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；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等。

表 2.2.3-1 現地生物整治系統防止污染擴大措施與監測設備

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，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，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，針對特定污染物項目進行檢測。

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、對環境的影響

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、火災與爆炸與觸電等三大類。化學性風險為添加劑、生物降解產物等。詳細內容如表 2.2.4-1 所示。

表 2.2.4-1 現地生物整治法潛在之危險

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	<ul style="list-style-type: none"> 妥善操作鑽井與設井機具 建立夥伴制度 (buddy system)
	可能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	<ul style="list-style-type: none"> 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	觸電	<ul style="list-style-type: none"> 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	添加劑添加過程、生物降解所產生的毒性中間污染物，如有毒物質以氣體存在時，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。	添加劑添加過程 生物降解產物	<ul style="list-style-type: none"> 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.

2.3 成本及期程評估

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、水質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(約新台幣 1,400~2,100)，每加侖 160 到 230 美元(約新台幣 5,600~8,050)範圍內。此外，用以灌注營養源至地表下之灌注井或觀測井，亦為需考量的成本之一。

三、玻璃化法(Vitrification)

3.1 整治技術簡介

3.1.1 原理

玻璃化法(vitrification)為將廢棄物於高溫下處理之技術(高於 1,000°C)，使有機污染物和可燃性物質經由熱分解或燃燒程序以達到穩定/固定化的目的。玻璃化法與其他固化方式的不同之處在於所需熱能之供給方式的不同。主要應用於玻璃化法的加熱方式包括電漿加熱(plasma heating)、電熱加熱(electric heating)、化石燃料燃燒(fossil fuel combustion)、感應加熱(induction)和微波加熱(microwave heating)等方式。

現地和離地(離地處理：高溫熔爐燃燒處理方式)之電熱玻璃化處理方法具有相同的基礎理論，皆以電力產生足夠的熱能以熔融含有矽成分的廢棄物質(silica-based)，而經高溫緩慢冷卻後形成含有非揮發性及不可燃物種之玻璃質物質。在現地玻璃化(in-situ vitrification)應用上，揮發性和可燃性有機污染物將被加熱而揮發，在確認污染土壤中所含之污染物種類後，通常可將石墨電極置入土壤形成一正方形之電能加熱區域。處理深度取決於電極的長度及可供應的電力。土壤在置入電極並通電之後，逐漸被電力所轉換之熱能升溫並熔融，一般土壤可被加熱到 1,600~1,800°C。停止供電之後，受熱土壤逐漸冷卻而呈現玻璃化狀態。現行玻璃化技術可產生重達 1,400 公噸的土壤玻璃結塊，而處理深度可達 20 英尺。在玻璃化過程中，當有機污染物被熱解而轉換為氣相時，則須經由廢氣處理設備的收集、移除或分解有害氣體，使排放氣體符合排放標準。

現地玻璃化法必須破壞污染物或降低其移動性，因此其中受熔融物質必須含有足夠的鹽類(alkali content)(1.4~15 %)以保持電導度和熔融溫度間的平衡。太多的鹽類(> 15 %)會提高電導度使電熱設備產生的電流無法達到足夠的熱度；而鹽類過少將使導電度不足，並導致較高的熔融溫度。大多數的天然土壤皆含有足夠的鹽類以做為現地玻璃化處理之所需含量；然而在某些特殊場址，若土壤中鹽度不足，可藉由注入含鹽類之水溶液，或加入他種土壤及化學物質以彌補鹽類之缺乏。常見的例子如處理磷酸鹽類

物質時，經玻璃化處理後，會形成矽磷酸鹽類物質；其處理程序概念如圖 3.1.1-1 所示。

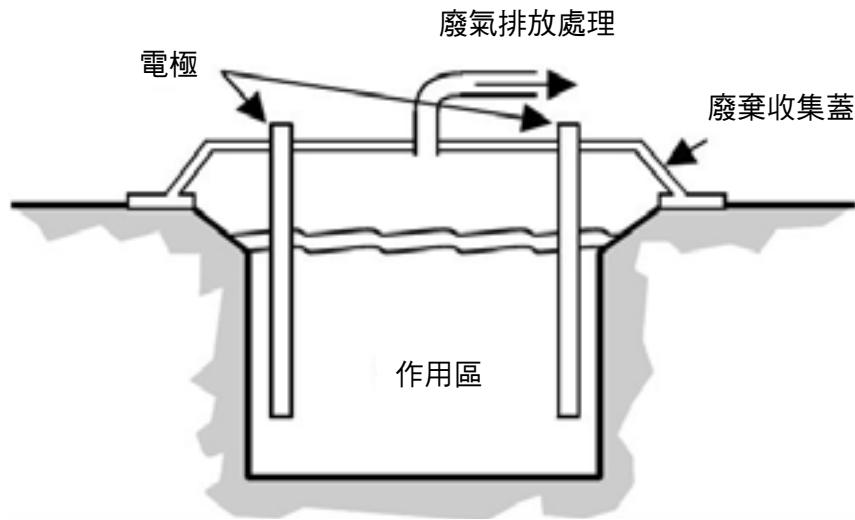


圖 3.1.1-1 玻璃化處理程序概念圖

玻璃化法為一項具吸引力的技術，因其可處理多種類型之廢棄物。除此之外，幾乎週期表中的每種元素或多或少皆能溶解於玻璃中，表 3.1.1-1 顯示元素在以矽質為主要成分之玻璃狀物質中的相對溶解度。只要選擇適當的玻璃化系統(例如分別以矽、鋁、磷或鉛為主要成分)，將可增加廢棄物處理之負荷量，並可因此減少最終產物的體積。

一般而言，對於液態有機廢棄物，以傳統焚化程序處理的效能比使用玻璃化處理較佳。表列之金屬中，唯有汞無法以任何玻璃化技術處理，因其具有較低的蒸發溫度，在處理過程中，將會完全地被蒸發，並須經由廢氣處理設備予以收集、移除；而含其他表列之金屬的廢棄物則均可以玻璃化技術處理。

表 3.1.1-1 元素在矽酸玻璃中之大約溶解度

溶解度	金屬
少於 0.1%(重量比)	銀、氫、金、溴、氫、氫、汞、碘、氫、氫、氫、鈉、鉑、鉑、銻、氫、鈉、氫
介於 1~3%之間(重量比)	砷、碳、氯、鉻、硫、銻、硒、錫、鎳、鎳
介於 3~5%之間(重量比)	溴、鈷、銅、錳、鉬、鎳、鈦
介於 5~15%之間(重量比)	鈾、氟、鈳、鎳、鈳、鎳、鈳、硼、鎳
介於 15~25%之間(重量比)	鋁、硼、鋇、鈣、鉍、鐵、鈣、鉀、鋰、鎂、鈉、鎳、鈳、鈳、鋁、鈳
超過 25%(重量比)	矽、磷、鉛

3.1.2 適用條件

現地玻璃化處理方式有下列幾項優點：

- 一、 現地玻璃化可於較高溫度下進行，相較於一般熔爐的操作溫度，1,100~1,400°C，現地玻璃化溫度可達 1,600~2,000°C。於熔爐加溫程序中，為避免縮短離地熔爐耐火內襯之壽命，化學藥劑必須在處理中途加入於廢棄物中，使熔爐中的溫度降低。除此之外，每隔一段時間便必須關掉熔爐以更新熔爐耐火內襯，現地玻璃化因不需使用耐火內襯而無此項限制，且處理程序中不需要添加任何藥劑而能節省處理成本。
- 二、 相較於離地處理，現地玻璃化可於較高溫度下進行，可產生穩定度較高的玻璃化產物，減少化學物質溶出性並降低玻璃的風化速率。
- 三、 現地玻璃化能使最終產物有較高的體積減少量，因為過程中無需添加任何額外物質或藥劑。
- 四、 現地玻璃化無須經過前處理即可處理大多數污染物質，也不須為了熔爐進料的尺寸限制，而改變廢棄物之體積。
- 五、 現地玻璃化可應用於深層之污染土壤(20 英尺以上)。
- 六、 現地玻璃化最終產物為一大型玻璃結塊廢棄物，比起熔爐的處理產物，通常有較小的比表面積，因此可降低風化程度和化學物質溶出性。現地玻璃化可減少公共和環境之安全風險，因處理後之產物可留置於原地，無需進行移除，而熔爐之處理方式對於處理後之產物則需較嚴格的管理，進行污染物移除清運。

3.2 整治系統操作與設計

3.2.1 整治系統設計與操作要點

在現地(in-situ)進行玻璃化處理時，則於土壤中以等距離矩陣之方式，插入電極加熱；於場址內進行玻璃化處理時，其單一熔爐處理污染土壤量最高可達 1,000 公噸。玻璃化處理程序中，會產生約 1,000 至 2,000°C 的高溫，而高溫會使重金屬(例如：砷)揮發，並產生污染廢氣；通常會使用袋濾室(baghouses)方式處理。

預先處理程序可降低重金屬產生污染廢氣之情形，例如通氣管塵土含有三氧化砷(As_2O_3)污染物，於玻璃化處理程序前，將通氣管塵土與石灰混合後，於 400°C 的溫度下可以使原本揮發性較高的三氧化砷，轉換為低揮發性的砷酸鹽鈣($\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$)；所產生之固體殘渣經回收後可以再投入玻璃化處理單元中。一般玻璃化程序所能處理之最大深度，大約在 20 英尺左右。

操作現地玻璃化時，可能影響操作因素包括：

- 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、融化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。

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。玻璃化整治技術之操作程序如圖 3.2.1-1 所示。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再予以調整。

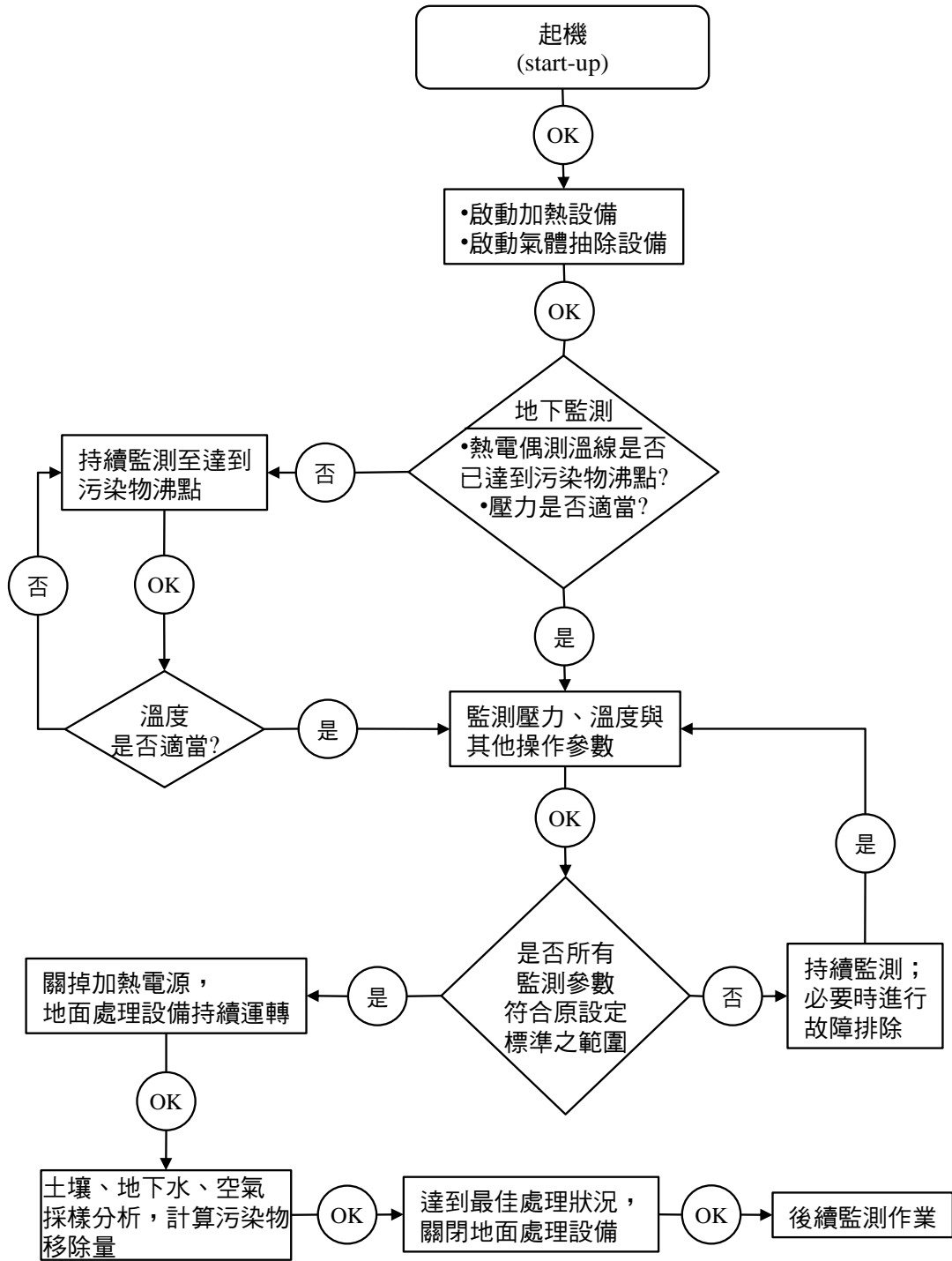


圖 3.2.1-1 玻璃化法整治技術操作程序

3.2.2 整治系統單元

玻璃化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。

一、 氣體回收處理(vapor recovery)設備

該設備使用傳統氣體抽除技術，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，停止整個系統的運作。

三、 地表遮蓋物

在整治區的地面，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。

3.2.3 整治系統監測

使用本污染改善方法，可能於整治過程中產生含揮發性污染物的廢氣，經處理後排放至大氣。因此，地面處理系統應定期檢測與進行監測，表 3.2.3-1 所列為玻璃化整治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。

表 3.2.3-1 玻璃化法污染監測項目設備

項目	土壤間隙蒸氣抽除整治系統	尾氣處理系統
監測目的	系統整治設備成效評估	尾氣處理設備評估
監測對象	抽氣設備、抽氣井與監測井	排放口
監測項目	壓力(真空度)	有機氣體、重金屬濃度
監測頻率	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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

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、空氣污染防治措施計畫

受污染土壤於利用玻璃化法加熱後，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」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。

二、 潛在之危害

玻璃化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、觸電四大類。化學性風險大致上分為衍生廢棄物、粉塵與揮發性有機物之暴露二大類，詳細內容如表 3.2.4-1。

3.3 成本及期程評估

依據現有案例，並無有關場址外處理之成本分析；場址內處理之成本分析，可參考一處化學超級基金整治場址(Parsons Chemical Superfund site)之資訊；該場址以玻璃化方法處理約 3,000 yd³(約 2,293m³)之受污染土壤，其污染物包括重金屬砷、汞、鉛、DDT、地特靈及可氣丹；其成本分析如下：

- 一、 前導試驗費用：美金 50,000-150,000，約新台幣 1,750,000- 5,250,000
- 二、 前置作業費用：美金 150,000-200,000，約新台幣 5,250,000- 7,000,000
- 三、 玻璃化處理程序操作費用：375-425 元(美金)/公噸，約新台幣 13,125-14,875/公噸
- 四、 復原作業費用：美金 150,000-200,000，約新台幣 5,250,000- 7,000,000

表 3.2.4-1 玻璃化法潛在之危害彙整表

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	電阻設置時,特別是在鑽機拆裝鑽桿的過程中。	機具設備危害	<ul style="list-style-type: none"> 妥善操作鑽井與設井機具 建立夥伴制度(buddy system)。
	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 進入前先測試溝槽內之空氣污染度及氧氣含量。
	當需進行控制盤內之配件或線路更新時。	觸電	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 用適當的個人防護裝備。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 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。

四、添加土壤改良劑法 (Application of Soil Amendments)

4.1 整治技術簡介

4.1.1. 原理

添加土壤改良劑法可以藉由限制暴露途徑及穩定污染物來降低污染物的生物可利用性。藉由添加土壤改良劑可以平衡土壤 pH 值、增加有機物質、增加保水能力、重建微生物菌落、減輕土壤遭受壓力(stress)等來恢復土壤原有品質，以達到改善場址污染、恢復耕作以及場址重新使用的目的。

韓國採用土壤與植物管理方式來預防重金屬從污染農地土壤轉移至食米，其中，土壤管理部分包含使用土壤改良劑、肥料及灌溉控制、土壤覆蓋、翻轉及土壤層混合等方式(何建仁，2007)。針對改善農地鎘污染的土壤改良劑，包括零價鐵、石灰、堆肥及組合方式，研究顯示土壤改良劑可降低土壤溶液中有效性鎘濃度，其降低效率依序為堆肥、零價鐵、石灰、液化腐植土，同時，此項阻止稻米吸收鎘之方法，以連續浸泡土壤的效果比間歇灌水的方式較好。

一般常用的土壤改良劑包含都市生物固形物(biosolids)、動物排泄物、甜菜根石灰(sugar beet lime)、木屑、燃燒過的煤渣(飛灰)、伐木工廠廢棄物、中性石灰、污泥堆肥，以及其他農業副產物例如傳統的農業肥料等等。以下針對添加土壤改良劑法說明如后。

4.1.2. 適用條件

大型、小型採礦場址、掩埋場、精煉工廠、鑄造工廠、研磨電鍍工廠，以及其他遭受污染的工廠，通常可藉由土壤改良法進行土壤改善作業。適用之遭受污染狀況包含：

- 一、 遭受污染土壤，尤其是重金屬污染，可能對植物、土壤微生物有害。
- 二、 較高或較低之異常 pH 值，可能造成土壤不肥沃，引起土壤重金屬

- 溶化等。
- 三、超量的 Na 對植物造成毒害性，破壞土壤物理結構、分散性，降低植物根部生長、通風，以及水的滲透性。
- 四、過高的鹽性(例如：硫酸鹽、氯化物等)會限制植物根部對水分、養分的攝取。
- 五、土壤物理性質改變，例如：密度、聚集性、組構等，會降低水的滲透性、土壤保濕能力等。
- 六、微量營養元素不足，例如：Zn、Mn 等，會降低土壤肥力；然而含量過高亦會造成毒害性。某些案例，降低某種污染物毒害性之土壤改善作業，可能降低另一種必要元素的植物有效性。於肥料當中添加營養物可以預防土壤改善所造成的影響。

土壤改良劑主要可以依土壤污染情形分為兩大類：(1)污染物生物利用度/植物有效性，(2)不良土壤狀況/生態系統功能等。解決各種類型問題的方法需依照污染物特性、暴露途徑、影響有害情形，以及污染物與土壤改良劑相互反應情形進行適當調整。有關各種土壤改良劑所適用之污染狀況彙整如表 4.1.2-1 所示。

表 4.1.2-1 土壤改良劑適用情形

	暴露途徑/ 負面影響	影響情形	改善方式
污染物生物利用度/植物有效性			
鋁(Al)	生物利用、逕流、淋洗	pH<5.5 則高毒性； 低磷則高毒性； 高鈣則低毒性	提高 pH 值至 6.0 以上；添加有機物質、磷；添加石膏含鈣物質
砷(As)	土壤攝取、逕流、淋洗	pH>8.0 則高毒性； 高磷則高溶解度	添加有機物質；調整 pH 值介於 5.5-6.5 之間
硼酸鹽 (BO_3^{3-})	生物利用	pH<5.5、pH>8.0 則高毒性	調整 pH 值介於 6.0-7.0 之間
鎘 鋅 比 (Cd:Zn)	食物鏈	高比例則增加生物利用的風險	添加鋅，以降低鎘鋅比
鉻酸鹽 (CrO_4^{2-})	生物利用、逕流、淋洗	pH>8.0 則高毒性	添加還原劑，例如有機物質、生物固形物、加酸降低 pH 值
銅(Cu)	生物利用、逕流、淋洗	pH<5.5 則高毒性； 低有機物質則高毒性；	提高 pH 值介於 6.0-7.0、磷、有機物質
鉛(Pb)	土壤攝取	低磷則高毒性	含砷，提高 pH 值至 6.0 以上； 不含砷，提高 pH 值至 5.5-6.5 之間；添加磷、氧化鐵

資料來源：USEPA, The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization, and Reuse, 2007

表 4.1.2-1 土壤改良劑適用情形(續)

	暴露途徑/ 負面影響	影響情形	改善方式
錳(Mn)	生物利用、逕流、淋洗	pH<5.5 則高毒性；	提高 pH 值至 7.0 以上
鉬(Mo)	食物鏈、銅鉬比	pH>8.0 則高毒性；低銅則高毒性	加酸，使 pH 值介於 5.5-6.5 之間，添加銅
鎳(Ni)	生物利用	pH<5.5 則高毒性；低磷則高毒性	提高 pH 值至 7.0-8.0 之間，添加磷、有機物質
硒(Se)	食物鏈、逕流、淋洗	pH>8.0 則高毒性；	加酸，使 pH 值介於 5.5-6.5 之間
硫酸鹽(SO ₄ ²⁻)	生物利用	—	灌溉土壤
鋅(Zn)	生物利用	pH<5.5 則高毒性；低磷則高毒性	提高 pH 值至 7.0-8.0 之間，添加有機物等
PAH	土壤攝取	低有機物則高生物利用性	添加有機物質、耕地
PCB	土壤攝取	低有機物則高生物利用性	添加有機物質、耕地
有效酸度	逕流、淋洗	控制重金屬溶解度、微生物活動性、增加重金屬可獲得性	添加石灰、其他鹼性土壤添加劑
鹼度	離子溶解度	pH>8.0 則高毒性；高磷則高溶解度	添加等價酸
潛性酸	逕流、淋洗、重金屬/鹽類可力用度	控制重金屬溶解度、微生物活動性、增加重金屬可獲得性	估計需要石灰量，添加 1.25 至 1.5 倍的預估需求量
導電度	生物利用性；植物水壓；氮吸收不平衡	高鈉則高毒性	灌溉；添加有機物
鈉(Na)	生物利用性；	高 SAR 則高土壤離散性	添加鎂、鈣豐富的物質、有機物
集合度	根部、保溼能力	低有機物則較差的集合度	添加有機物質、石膏
密度	限制根部、滲透作用	低有機物則高密度	添加有機物質；耕地
組構	保溼能力、土壤強度	高黏土則不適耕種；高砂量則不易保溼	添加土壤改良劑、有機物質
不良土壤狀況/生態系統功能			
高鈣鎂比	引起植物缺乏鎂；降低生長或殺害植物	強酸會造成可交換離子流失(Ca,K,Mg)，可能造成鎂缺乏；方解石石灰岩可能會造成鎂缺乏	添加鎂
高碳氮比	限制植物取得氮、生長	—	添加氮、或含氮土壤改良劑
高氮	氮淋洗、	—	添加纖維性碳，例如稻殼、木屑等
高磷	溶解磷淋洗；限制鉛之生物利用性；降低 Cu,Cd,Ni,Zn 生物利用性	增加砷的有效性	添加鋁、鐵到酸性土壤；添加鈣到鹼性土壤
低碳氮比	逕流、氮淋洗	—	添加纖維性碳，例如稻殼、木屑等
低氮	限制生長	高碳氮比則低氮獲得性	添加氮或高氮有機物質
低磷	限制生長	增加重金屬可獲得性	添加磷或高磷有機土壤添加劑
缺錳	限制生長	—	添加錳，或降低 pH 值至 6.0

資料來源：USEPA, The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization, and Reuse, 2007

4.2 整治系統操作與設計

有關國外針對添加土壤改良劑法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 4.2-1 所示。

表 4.2-1 國外添加土壤改良劑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
英國環境部 BC Ministry of Environment	Code of Practice for Soil Amendments	2007
英國環境部 BC Ministry of Environment	Land Application Guidelines for the Organic Matter Recycling Regulation and the Soil Amendment Code of Practice	2008
美國環保署 US Environmental Protection Agency	The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization, and Reuse	2007
美國 RCWD, Rice Creek Watershed District	Soil Amendment Guidelines	2009
澳洲 ADAA, ASH DEVELOPMENT ASSOCIATION OF AUSTRALIA	Amendment of Astralian soil by fly ash addition	2009

4.2.1 整治系統設計與操作要點

選擇添加土壤改良劑法做為污染改善作業方式需考慮以下幾個重點，包含土壤改良劑的可取得性、運輸作業、貯藏與保存、改良劑施用混合作業、混合土壤改良劑等重點，相關詳細說明如后。

一、可取得性

土壤改良劑在很多地方均可取得，包含公有處理廠、動物飼料工廠、燃煤火力發電廠、紙漿與造紙工廠等。以美國為例，亦可在相關網站(www.clu-in.org)取得資料。

二、運送作業

以卡車運送到污染場址需要有良好的運送規劃與考量，包含運送過程的清潔作業、運送路線道路、橋樑是否禁得起卡車重量、未處理場址是否有足夠且安全的暫存空間等。某些特殊場址尚須考慮卡車大小、裝卸採樣設備，甚至現地實驗室以迅速瞭解現場物質特性等。或某些土壤改良劑含水量過高、具腐蝕性、或有其他特殊性質，以至於

需鋪設防水布或是需要專門的運送貨車等等，這些因素均可能導致需要較高的運送成本。土壤改良劑來源距離亦須謹慎考慮，過遠的距離會增加改善成本；過於集中的運送班次可能造成的交通阻塞問題亦須考量。

三、 儲藏與保存

一般而言，須額外暫存土壤改良劑。而土壤改良劑的安定性是規劃現場貯藏與保存作業需要考量的因素之一。例如，部份種類土壤改良劑可能因為降雨而淋濕，造成土壤改良劑品質受到改變；部份土壤改良劑具有生物活性，其營養物特性可能於貯存過程中受到影響。

受限於法令規定，某些物質可能需要在現地貯存工廠進行相關防護作業。例如，在美國某些地區，如果需要延長貯存時間(超過 14 天或是整個冬天)，當地政府會要求在貯存區底部設置防護墊，以及在貯存區周圍設置小溝渠等，以防滲漏或是入滲等情形發生。

某些例子顯示，在貯存前預先攪拌混合兩種土壤改良劑(例如生物固形物以及飛灰)可以改善惡臭問題，並可以減輕貯存過程因為暴露在降雨環境所造成的不穩定性。另外，除了混合土壤改良劑外，添加其他添加物也可以達到相同降低惡臭或是增加穩定性的效果。

四、 改良劑施用與混合作業

對生物固形物等某些土壤改良劑而言，過多的場址管理規定可能限制某些改良劑的改善成效。例如飛灰與生物固形物混合攪拌而成的土壤改良劑，在大約 1:1 的傾斜角度可以變成部份膠結的情形，因此可以抵抗移動。在美國，部份州區則針對改良劑堆肥之傾斜角度限制。但是若能允許合理的變動，則可以有較高機率達到原先預期的成效。

另外，改善計畫應預期土壤改良劑受季節性差異所存在之潛在不良影響，例如在耕種季節之後施用豐富營養元素的土壤改良劑，冬天可能會造成過度硝酸鹽氮流失的情形；在雨季施用土壤改良劑，可能降低土壤之可利用性；在旱季施用土壤改良劑，種子發芽可能因為過度乾旱而受到影響；另外，溫度也會影響現地作業的可行性。

土壤改良劑當中的濕度(通常以固體體積之百分比表示)，是考量施用程序與時間之主要因素。運用在復育場址之生物固形物的固體含量

範圍，一般約有 2-8% 含量的爛泥，使生物固形物容易抽取；半固體之生物固形物固體部份則佔 8-18%，雖然比液體狀效率較低，但也可以使用抽取的方式進行；而固體的生物固形物餅固體部份約佔 20-40%。施用比率通常依乾重進行計算，例如，以脫水的生物固形物而言(固體約佔 20%)，原本每英畝需施用 90 公噸乾生物固形物，則每英畝則需施用脫水之生物固形物 450 公噸。

在施用與混合技術方面，雖然有很多技術可有效施用土壤改良劑，但仍需依據現場地形變化、土壤強度、場址平整度、水路等因素進行施用技術、設備的選擇。茲列舉美國一般常見土壤改良劑施用設備，就經費、優缺點等考量因素彙整如表 4.2.1-1 所示。

五、 混合土壤改良劑

針對特定場址，個別之土壤改良劑可與其他土壤改良劑進行混合，以產生適用該場址之最佳化土壤改良劑。例如，依據場址需求，可以混合成具有最佳土壤組構及 pH 值的高營養元素混合土壤改良劑，或者最佳的碳、氮混合比例以降低硝酸鹽類過濾的風險。

混合土壤改良劑需要適當的設備來進行混合作業，包含在現地直接將土壤改良劑與土壤進行混合；或者育先將土壤改良劑與土壤進行混合之後，再施用於現地土壤上。兩個方式均需要大型設備，現地混合需要可移動式混合機具，例如大型耕犁機等；後者，則需避免過度攪拌，致使生物固形物等土壤改良劑外型受到影響以致於不利施用。另外混合作業操作過程需要仔細監控，以確保正確之土壤改良劑混合比例，以及避免土壤改良劑過度攪拌混合。

表 4.2.1-1 土壤改良劑施用設備技術比較表

設備類型	固體百分比	相關費用	優點	缺點
卸卡車，推土機	>12%	主要設備：低 操作維護：低	操作簡單； 快速施肥	需要平坦地形，低速施用較不平均
含噴射器改良貨車	<12%	主要設備：中 操作維護：高	任何地形； 低速施用	需要有力、低速、特殊拖車牽引
含後防濺板改良貨車	15-35%	主要設備：中 操作維護：中	平緩地形； 低速施用	需要有力、低速、特殊拖車牽引
含側向噴灑器改良貨車	15-90%	主要設備：中 操作維護：中	任何地形； 任何速度	需要有力、緩慢速度、特殊拖車牽引
後方噴灑施肥機	>25%	主要設備：低 操作維護：低	平緩地形； 低速施用	受固體百分比限制，需與拖車相連

4.2.2 整治系統單元

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

添加土壤改良劑法應用於相關污染改善作業，在改善過程中可能導致惡臭等空氣相關問題，雖並不會導致土壤污染擴大，但仍需值得注意。另外，因添加土壤改良劑可能導致關切污染物溶解於地下水流中，因此，採用添加土壤改良劑法時，除應定期檢測土壤品質外，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、成效監測及監測設備

採用添加土壤改良劑法時應規劃成效監測，並應考量改良劑之應用性、有效性、安全、整治期程與成本等因素。

(一) 整治過程監測(process monitoring)

整治過程監測可視為整治前、整治中與完成整治時之品質管制的措施，其目的在確認改良劑的種類、劑量、施用頻率對場址之影響，監測目標包含土壤及地下水。在整治前，應建立場址的基線資料；整治過程中，觀測污染物濃度變化、是否影響地下水與移動的情形。整治過程一般監測項目，包括：關切污染物濃度、主要離子(鈉、鉀、鈣、鎂、鐵)、硝酸鹽、硫酸鹽與氯離子、總硬度(以 CaCO_3 計)、氧化還原電位(現場試驗工具)、pH(現場試驗工具)、溫度(現場試驗工具)、導電度(現場試驗工具)等。

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

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。驗證監測建議於地下環境達穩定狀況時定期監測，並至少持續監測一年。

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，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，主要在於臭味逸散，雖不致造成污染擴散，但臭味逸散不良或相關設置設計不當，仍會對周遭環境產生影響。

二、 潛在之危害及個人防護裝備

添加土壤改良劑法之工安潛在危害及個人防護裝備，略述於表 4.2.4-1 所示。

表 4.2.4-1 添加土壤改良劑法潛在之危害彙整表

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
物理風險	運輸、貯存、施撒、攪拌過程中，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。
	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。 確保所有吊貨器距離電纜至少 10 英尺遠。
化學風險	在施撒、攪拌過程中，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。

4.3 成本及期程評估

在選擇土壤改良劑進行污染改善作業之後，土壤改良劑所需體積、可取得性、運送作業、現地貯存問題等，是影響整體改善作業經費最重要的因素。整體改善經費變化相當大，以美國改善經驗而言，一個已經確認適合植物種植之土壤改良劑，每英畝所需費用約美金 1,000 元(約新台幣 35,000)；一個需要添加有機物質的場址，每英畝所需之改善費用約美金 10,000 元(約新台幣 350,000)；如果需要添加其他多種類型土壤改良劑的場址，每英畝所需的污染改善費用可能高達美金 100,000(約新台幣 3,500,000)。

五、滲透性反應牆法 (Permeable Reactive Barriers)

5.1 整治技術簡介

5.1.1 原理

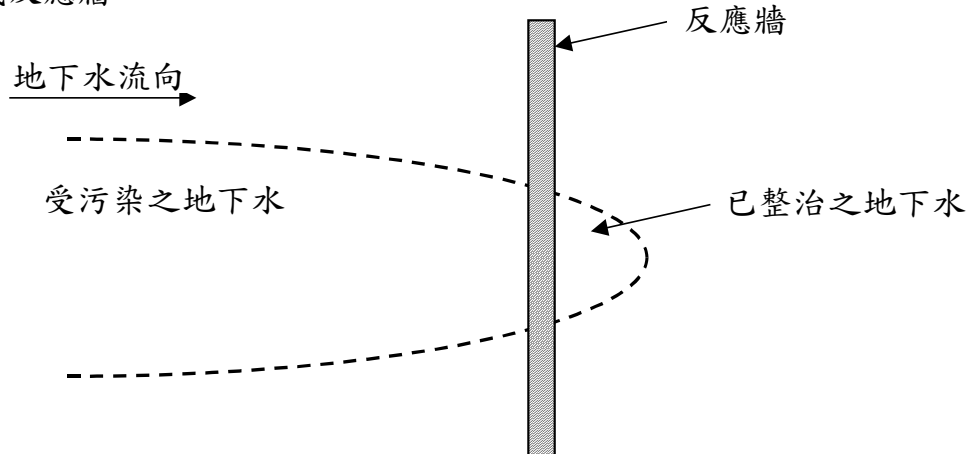
相較於傳統之抽出處理法，現地滲透性反應牆(In-Situ Permeable Reactive Barrier, PRB)為較新穎、現地、被動式之整治技術。滲透性反應牆係指於受污染場址地下建造一個永久性、半永久性或可替代的單元，於單元中置入反應的材料，並使受污染之地下水流經此處理單元。此技術可有效隔絕污染物，藉由使用不同的材料，可用以整治不同的有機或無機污染物，且其所需用到的機械系統非常少，甚至不需要，因此可減少長時間操作及維修之成本而降低許多整治計畫之費用。

滲透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。

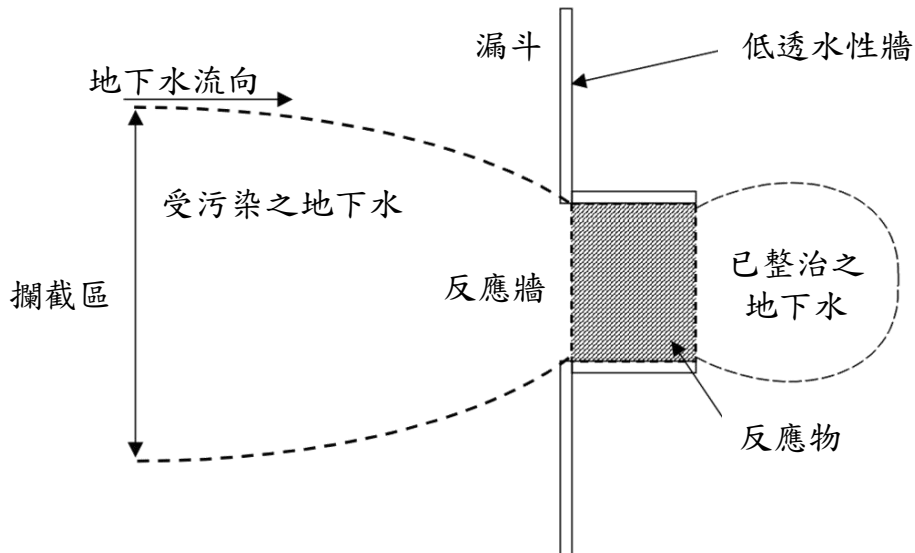
滲透性反應牆之設計主要在地下水污染帶下游，設置一不透水的障壁，藉由此不透水障壁將污染帶引導至位於其內之滲透性、半滲透性或可置換的反應牆。在此反應牆中，會進行關切污染物之處理。處理過之地下水流出反應牆後，再沿著自然水流方向行進。

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。在滲透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 5.1.1-1 所示。

連續式反應牆



漏斗式反應牆



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

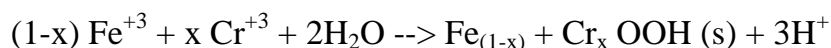
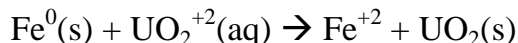
圖 5.1.1-1 各種類型透水牆處理技術圖

滲透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、 重金屬或含氯有機物和零價鐵之反應

重金屬或含氯有機物(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。以下的半反應式，說明金屬鐵與無機離子發生氧化還原反應，將重金屬以不溶性化合物的形式從水溶液中析出，金屬鐵與無機離子間的化學反應過程如下(劉玲等，2006)：



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。

5.1.2 適用條件

藉由使用不同的材料，滲透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、沉澱及降解等三種，其可處理之污染物種類及反應性材料，如表 5.1.2-1 所示。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，這些材料須定期檢視並適時更換，取出的材料應依廢棄物處理流程辦理，以避免二次污染；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，後者最常見的是使用零價鐵降解水中含氯碳氫化合物。金屬鐵對於地下水中一些無機陰離子，例如硫酸根、硝酸根、磷酸根等，可以經由生物降解反應而加以去除。若在有機碳存在的條件下，厭氧微生物可以將硝酸根還原為氮氣。Robertson and Cherry (1995)的研究，顯示 PRB 能將污水處理廠排出的 90 mg/L 硝酸氮，迅速降解至 10 mg/L 以下。

滲透性反應牆適用於處理無機物、VOCs 以及 SVOCs，在應用上之各項可能優缺點，如表 5.1.2-2 所示。

表 5.1.2-1 各種類型滲透性反應牆處理技術的種類與機制

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

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

表 5.1.2-1 滲透性反應牆技術優缺點比較表

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> • 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。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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

5.2 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 5.2-1 所示。

表 5.2-1 國外透水性反應牆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

5.2.1 整治系統設計與操作要點

目前滲透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 5.2.1-1 顯示滲透性反應牆之設計流程。在選擇滲透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)以及場址判定開始，以瞭解場址狀況及進行反應物的選擇。反應物選擇後需進行技術的可行性試驗、模擬及工程設計，如此能夠決定最適合及最有效之整治方法。

以下針對整治技術選取評估面向、規劃設計整治系統要點及注意事項，

到實際開始整治系統建置與操作要點說明：

一、 整治技術選取評估面向

(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滲透性反應牆技術以及滲透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。滲透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滲透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。

(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。

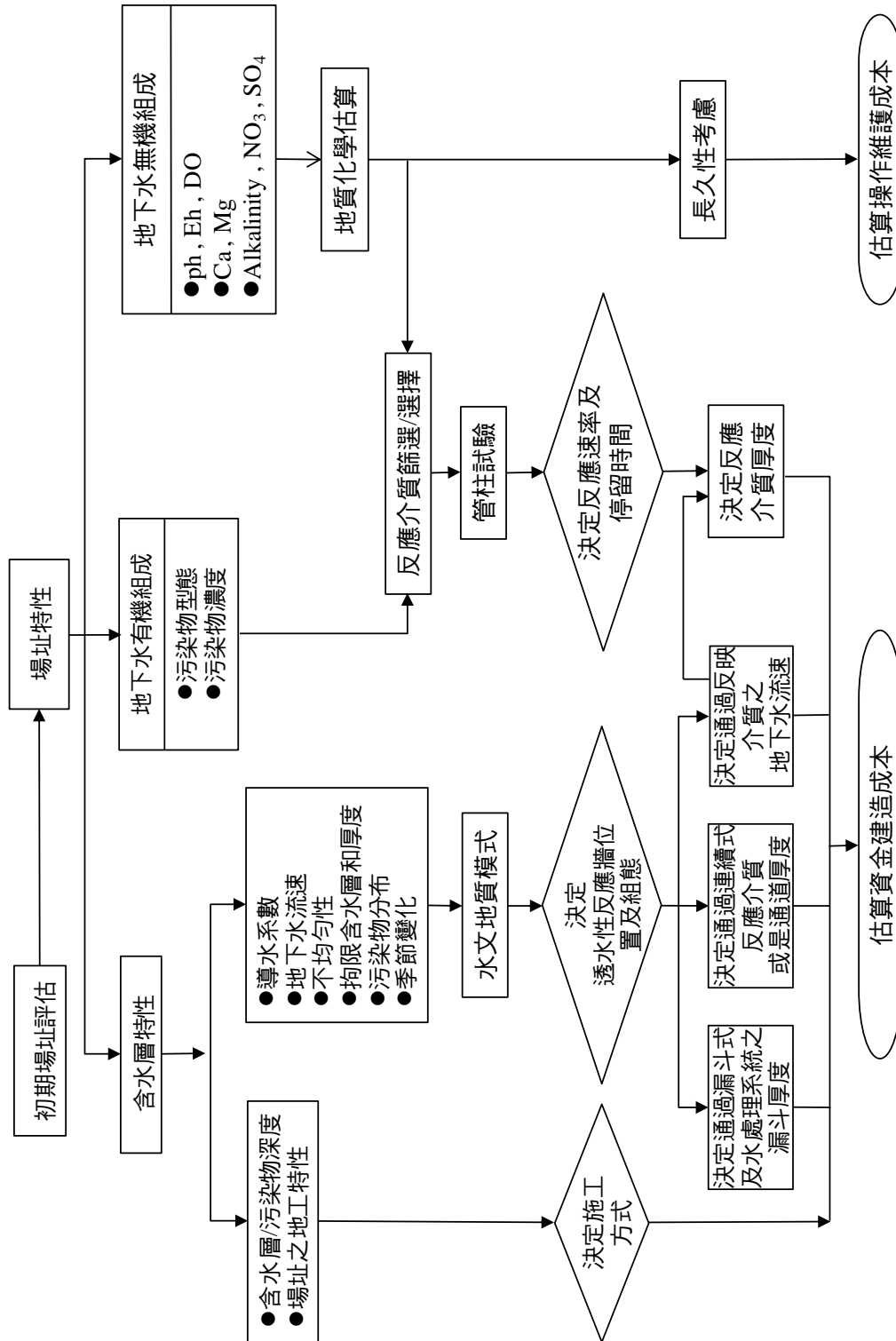


圖 5.2.1-1 滲透性反應牆之設計流程圖

(六)最適當之建造方法

當決定地點、結構及反應牆的大小後，應決定最佳建造方法

(七)模場試驗

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。

(八)非技術之考量

1. 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，也可能隨之受到影響。

2. 污染自底部穿越(underflow of contaminant plume)

污染可能自反應牆的下方通過，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。

二、 規劃設計整治系統要點及注意事項

(一)場址特性評估

在設置反應牆之前，首先必須要先充分瞭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

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。

三、 整治系統建置與操作要點

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。然而，反應牆會依照場址條件不同而使用設置方式，可分成下列幾種(環保署，2008)：

- (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(Megacolumn)
- (四)深層土混合
- (五)泥漿注入
- (六)水力破裂：水力破裂處理技術為設置透水性反應牆的方法之一，先沿著預定設置反應牆之位置，挖掘數口注入井，再透過注入井以高壓方式，使地層產生裂隙，將反應材質(例如鐵凝膠混合物)注入地層中，形成反應牆。

5.2.2 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、 鑽機
- 五、 螺旋鑽

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

(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 reactivegate)。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)。計畫品保規劃書(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之差距。而該監測應由良好的場址調查開始，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。

5.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、 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

在執行透水性反應牆整治法過程中，可能存在之危害可分為物理性危害以及化學性危害兩大類。其中，物理性危害包含機具設備造成的危害、不慎引起之火災爆炸、施工過程開挖溝槽倒塌、不穩定的土壤狀況以及觸電等；化學性危害則主要為污染物所引起之接觸性危害等。相關潛在之危害如表 5.2.4-1 所示。

5.3 成本及期程評估

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，滲透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，以及判定其經濟成本效益。

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 5.2.4-1 滲透性反應牆整治法潛在之危害彙整表

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	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，挖掘過程中毀壞地底電線或氣體管線，亦可能造成起火、爆炸或感電情形。	火災與爆炸	加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 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。 定時於工作區灑水或泡沫滅火劑防止蒸氣自燃。 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。
	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。 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。 確保所有吊貨器距離電纜至少 10 英尺遠。
化學性	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.

六、反應帶整治法(Reactive Zones)

6.1 整治技術簡介

6.1.1 原理

現地反應帶整治法基本概念是將污染物在地表下攔截，並且使污染物永久無法移動或降解成其他無害狀態。成功的反應帶整治法需要兩項成功的反應條件：(1)注入藥劑與移動中的污染物的反應；(2)注入藥劑與地表下環境的生物地球化學產生最佳的反應，以有效進行污染改善作業。這些反應因場址而異，在不同場址有不同的反應狀況，就算在同一個污染場址，也有很多不確定性。因此，如何在多變的、不均質的自然地表下環境創造出一個可控制的反應環境，是一個成功的反應帶整治法最大的挑戰。

有效的反應帶整治法主要決定於主要反應方程式，以及污染物質隨地下水流通過的速率。要創造一個在含水層中固定不動的反應帶，除了反應試劑種類的選擇，反應帶中試劑混合比例的固定也很重要。另外，反應試劑必須是無毒害性的，也必須具有相當的穩定性，以避免產生其他不必要的化學反應。

反應帶整治法去除機制，茲受含水層地下水特性、污染物特性影響，其反應機制說明如下：

一、 含水層地下水基本性質

化學氧化反應可以使土壤或地下水產生酸化或鹼性化反應。當發生還原反應時 pH 值會上升；發生氧化反應時，則 pH 值會下降。而碳酸鹽類則是含水層中有效的緩衝劑。

很多因素可以造成含水層中氧化還原狀態的改變，高溶氧地表水入滲、地下水位面變動、過量有機物、易降解污染物進入、微生物活動增加、土壤結構惡化等因素，都會影響地下環境的氧化還原狀態。氧化反應或還原反應主要取決於電子的提供或接受，因此，在現場地下水環境當中可藉此控制氧化還原反應的狀況。

在設計現地反應帶整治法進行污染改善作業時，需考慮反應帶當

中的反應作用會如何影響附近以及下游區域的氧化還原情形，以及如何在有效的時間內降低污染物。另外，亦需要謹慎評估所選擇的注入藥劑種類對於目標污染物的改善成效，以及對於地下水中其他物質的潛在反應。

藉由短期以及長期的地下水監測系統，可以評估整治過後之地下水環境是否回復原有的平衡狀態。在某些案例當中，維持地表下生物地球化學狀態，可以避免地下環境遭受二次污染。

二、 污染物移除機制

現地反應帶整治法污染移除機制可分為兩大類：轉換(teransformation)、固定作用(immobilization)。在轉換作用部份的例子有：含氯有機物藉由生物或其他非生物反應轉換為 CO_2 、 H_2O 或 Cl^- 等無毒物質的機制；固定作用的例子為：藉由生物或無生物反應，以及土壤基質的過濾，所產生 Cr(VI) 到 Cr(OH)_3 的沈澱作用。

在多數的案例當中，可以預期到轉換作用所產生的最終產物會產生溶解相以及氣相物質，並且對於自然氧化還原反應會有顯著、短暫的影響，但是這些影響可藉由限制反應動力以及移除相關物質進行控制，另外稀釋作用以及溶解氣體的逸散，也會幫助回復反應帶原有的平衡狀態。

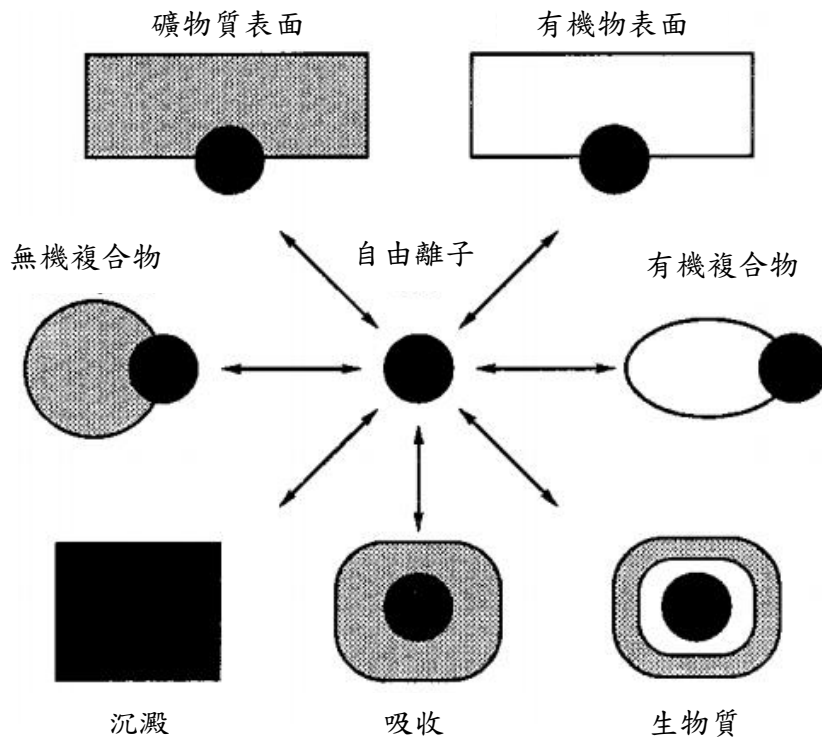
固定作用機制(Immobilization Mechanism)，包含重金屬沈澱反應，將污染物轉變成較低溶解度。而地下水中溶解相重金屬的轉移，可視為兩種狀態的轉移：土壤基質、可流動水溶液相。

現地反應帶所產生的重金屬沈澱物在地下環境中的移動，可能本身隨地下水移動或伴隨膠體(colloid)一起移動。其中，膠體主要是指顆粒大小介於 $0.001-1 \mu\text{m}$ 之間。膠體傳輸行為是藉由膠體的物理、化學特性來決定，因此，膠體污染物傳輸作用可能導致低溶解度沈澱物難以預測的流動性。

重金屬沈澱物可能是純物質(例如， PbS 、 ZnS 、 Cr(OH)_3)或是混合物(例如， $(\text{Fe}_x, \text{Cr}_{1-x})(\text{OH})_3$ 、 $\text{Ba}(\text{CrO}_4, \text{SO}_4)$)，主要因含水層中所含物質間交互作用或是不同元素共同沈澱所造成。含水層中重金屬膠體物質間可能的交互作用如圖 6.1.1-1 所示。

至於含水層底部大於 2 μm 的膠體沉積物，大部分會因為沈積作用或被土壤介質中小孔隙捕捉而從地下水中移除；小於 0.1 μm 的膠體沉積物則大多會產生吸附反應。吸附反應則會受到地下水離子強度、離子成份、數量、懸浮膠體大小、土壤基質質地組成成份、地下水流速等因素影響，另外，地下水中較高的總溶解固體濃度會促進膠體的沈澱作用。

含水層中含有高濃度的水合氧化鐵離子環境，可作為離子交換介質，當水中 pH 值改變時可分別提供氫離子(H^+)或氫氧根離子(OH^-)進行相關離子交換。吸收作用主要與 pH 值以及土壤中離子平均濃度有關。其中，pH 值需介於 5.0-8.5 之間；土壤中平均離子濃度約每立方碼土壤 0.5-2 英鎊的重金屬膠體或複合物。這個現象在移除砷(As)、鉻(Cr)等重金屬時相當有用。



資料來源：R. Schulin, G. Geiger and G. Furre, Heavy Metal Retention by Soil Organic Matter under Changing Environmental Conditions in Biogeodynamics of Pollutants in Soils and Sediments, Salomons, W. and Strigliani, W. M., Eds., Springer, Berlin, 1995

圖 6.1.1-1 含水層中重金屬之交互作用

6.1.2 適用條件

利用現地反應帶整治法進行地下水污染改善的優點如下：

- 一、 現地技術：不需要地下水抽除與處理系統(pump and treat)所需要的昂貴設備，也沒有廢水或廢棄物的產生。
- 二、 便宜的設備：主要成本支出為注入井的設置費用。
- 三、 便宜的操作系統：注入反應試劑僅需要低濃度的試劑，因此，所需成本也相當低；只有在地下水質監測時需要採樣；就算有處理大量的污染體積，操作過程中也沒有廢棄物產生。
- 四、 可以處理深處的污染場址：藉由設置深層的注入井叢，可以處理深層污染。
- 五、 低度關注性：一旦系統完成設置，場址改善作業可以在低度關注下持續進行污染改善。
- 六、 現地污染物降解：有機污染物可藉由適當地反應進行降解。
- 七、 污染物固定作用：藉由土壤、沉積物的吸附、過濾等作用，可以阻擋無機污染物，將污染物固定在現地。

6.2 整治系統操作與設計

有關國外針對反應帶之相關法規指引及規範大多與透水性反應牆相關，故列舉相關指引與規範，彙整如表 6.2-1 所示。

表 6.2-1 國外反應帶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
Suthan S. Suthersan	Remediation engineering: design concepts "In Situ Reactive Zones"	1999
美國陸軍工兵署	Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents	1997
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

6.2.1 整治系統設計與操作要點

執行地下水污染團反應帶整治的地下環境有許多必要條件。就像執行地表上地下水抽除與處理(Pump and Treat)作業時相同，反應時間是改善作業重要一環。處理低流速的地下水污染團時，污染物在反應帶中有較長的停留時間可以有較佳的改善成效。

執行現地反應帶污染改善法的三個主要設計要點包含，(1)創造與維持理想氧化還原環境以及生物地球化學參數(例如，pH 值、溶氧、溫度等參數)；(2)主要反應式的選擇以及選擇適當反應試劑來達到預定的反應作用；(3)在側向以及垂直方向上，達到整個污染區反應帶所需的反應試劑量與投遞分佈情形。相關設計操作因素詳細說明如后。

一、 孔隙水化學特性(Optimum Pore Water Chemistry)

孔隙水的成份可作為污染物與水溶液反應試劑之間反應的指標，測定現地環境的地球化學參數對設計現地反應帶有極大的幫助。相關參數可以明確提供現地狀況，藉以評估規劃達到最佳反應環境所需採取步驟。表 6.2.1-1 列出一般常見之地球化學參數，然而實際需要測定的參數仍需依據各場址所規劃要產生之反應式而有所不同。

表 6.2.1-1 常見地球化學參數列表

常見地球化學參數		
溶氧	S ²⁻	微生物數量
pH 值	Fe	其他與反應式有關之有機或無機參數
溫度	Mn	NO ₃ ⁻
總有機碳	碳酸鹽含量	NO ₂ ⁻
總溶解固體	鹼度	SO ₄ ²⁻
總懸浮固體	溶解氣體濃度(CO ₂ , N ₂ , CH ₄ 等)	

二、 反應與試劑(Reactions and Reagents)

藉由地表下環境的初步評估結果，需選擇適當地反應試劑來達到最佳反應環境。例如，稀釋的蜜糖溶液(blackstrap molasses solution)可促使重金屬離子與硫酸根離子在厭氧環境中產生沈澱作用。

三、 試劑注入作業(Injection of Reagents)

反應試劑注入系統的設計規劃需要深入評估，並且需要瞭解場址

反應帶水文地質特性，特別是污染團所在區域之水文地質特性。需要瞭解的項目包含不同沈積層之間宏觀的、全場址，以及微觀的相關特性。相關設計現場反應帶所需之地質、水文地質參數如表 6.2.1-2。

現地反應帶污染改善的成功與否，與灌注反應試劑時反應試劑的混合狀況、分佈情形等因素有關。而反應幕中各注入井之位置、深度、開篩範圍等，亦影響著試劑注入成功與否的關鍵因素。

反應試劑的灌注可以由兩個方式執行，(1)重力灌注；(2)加壓灌注至灌注井深部。重力灌注方式僅適合使用在淺層污染物的狀況(如圖 6.2.1-1 所示)，使用重力灌注，反應試劑會以片流(sheet flow)的形式在地下水水位面流動，並主要以擴散的方式混合到整個反應帶。

當污染物深度較深時，則需要在反應幕中進行多重深度灌注注作業(如圖 6.2.1-2 所示)，反應試劑溶液必須以加壓的方式在注入井底部進行灌注，如果有需要，亦可以在各注入井中循環抽水進行混合。這種情形之下，反應試劑會以擴散、對流的方式進行傳輸，而反應試劑溶液需要適當稀釋，才可以避免因為密度造成向下沈澱的現象。

在重力灌注過程中，反應試劑側向分佈主要來自於片流傳輸所致，然而在加壓灌注的狀況下，反應試劑的混合區可能會因為水文地質狀況而較為狹窄(如圖 6.2.1-3(A)所示)。可以藉由縮短注入點距離避免發生混合區狹窄的現象，但是此方法將會提高整體改善成本。在相鄰井進行重複抽取灌注作業可以在灌注井下游創造出較大、較寬的混合區(如圖 6.2.1-3(B)所示)，而抽除出來的地下水可以用來稀釋反應試劑，保持反應試劑濃度。

四、實驗室研究

一般而言，通常希望藉由實驗室研究，來決定反應式是否可達預期效果。實驗室研究可獲得相關數據：(1)反應試劑在地表下的化學性質；(2)水溶液中氧化還原作用的反應與操作情形；(3)反應作用所需時間；(4)生物誘發反應所需適應環境之時間；(5)放大到現地尺度之所有需求；(6)含水層中最終產物的宿命以及相關反應所產生的副作用。

若實驗室研究數據是由研究預定污染改善場址所得，例如地層剖面研究、土壤分析樣品、地下水相關資訊等相關數據，則可以作為更

具代表性之參考依據。

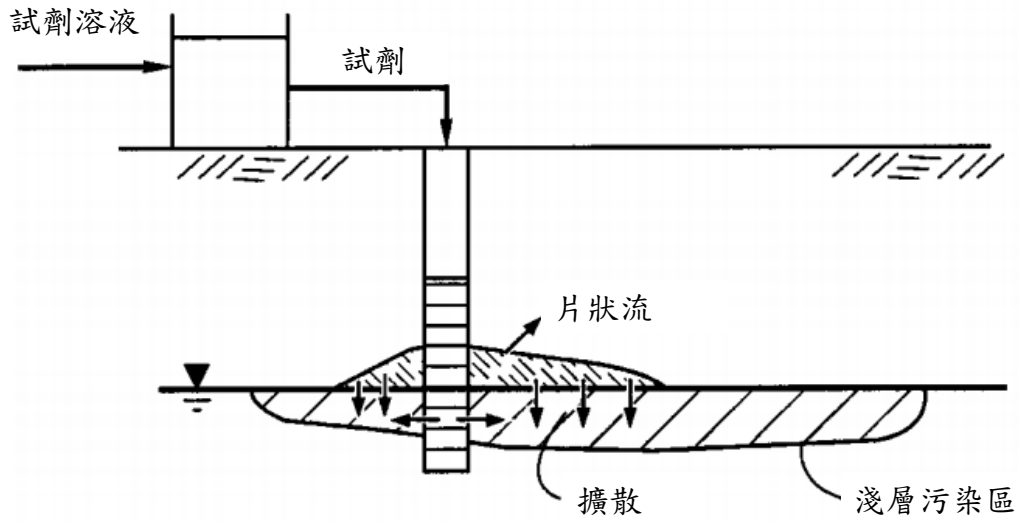


圖 6.2.1-1 重力灌注反應試劑示意圖-淺層污染

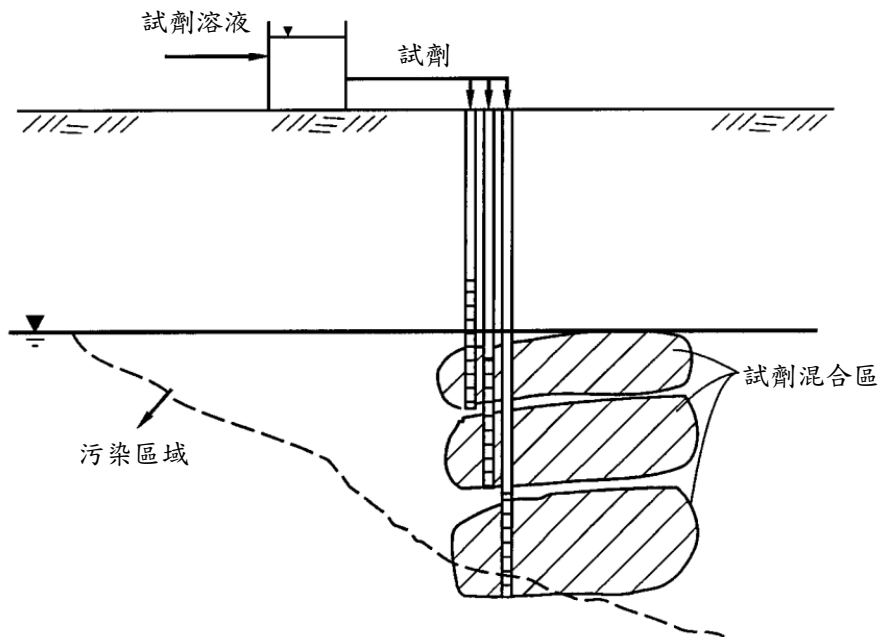
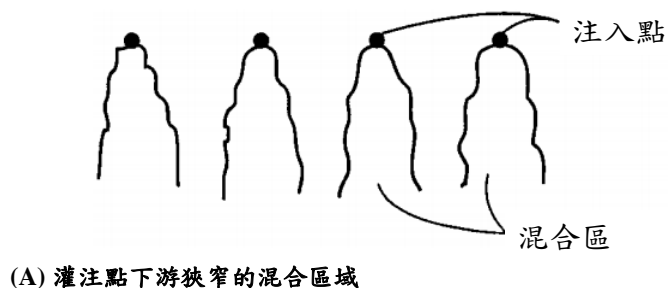
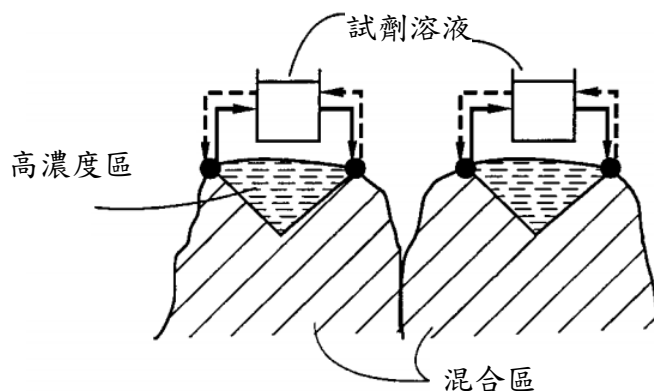


圖 6.2.1-2 多重反應幕灌注反應試劑示意圖-深層污染



(A) 灌注點下游狹窄的混合區域



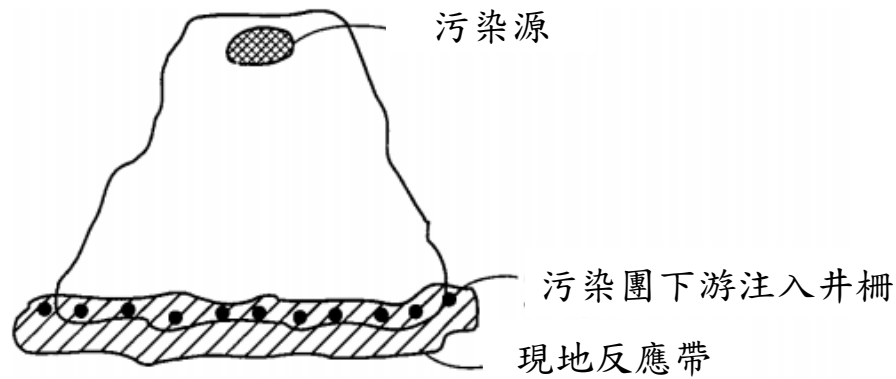
(B) 相鄰井之重複灌注循環

圖 6.2.1-3 灌注點反應試劑分佈情形示意圖

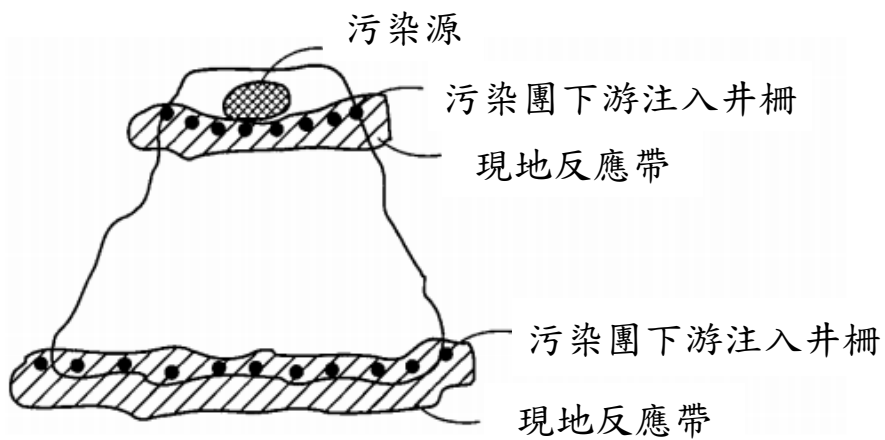
6.2.2 整治系統單元

現地反應帶改善法可以在不同地點設置反應幕(curtain)或設置多重反應幕，使移動中的污染團進行反應作用。反應幕的選擇地點一般多在污染團下游邊界處，主要用來防止污染團往更下游移動，設置位置示意圖如圖 6.2.2-1(A)所示；反應幕除可設置在污染團邊界外，也可以設在污染團內污染源附近，目的是避免污染源污染物質的移動，也可以迅速縮減污染團大小，相關設置示意圖如圖 6.2.2-1(B)所示；如果污染改善時間有所限制，可以在前述兩個反應幕中間增設一道反應幕，針對污染團中間區域進行相關反應，相關設置示意圖如圖 6.2.2-1(C)所示。

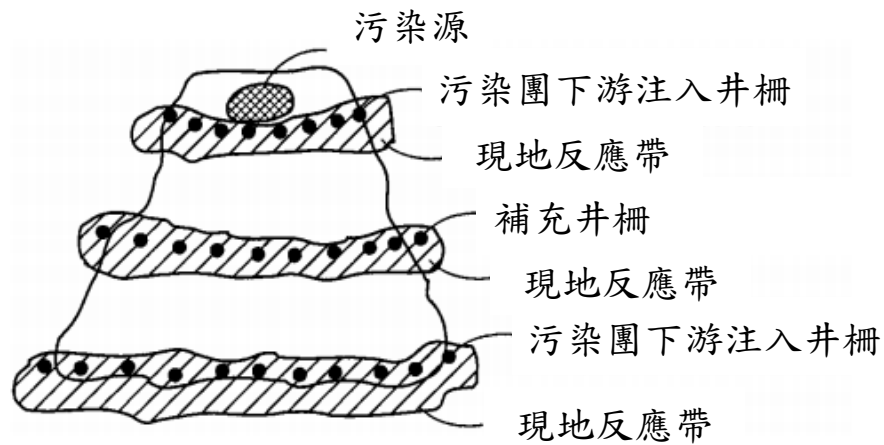
另一個現地反應帶設計概念，是藉由網格方式的注入點來創造一個遍佈整個污染團的反應帶。值得注意的是，注入井的設置費用佔整體污染改善經費的一大部分，因此，降低注入井數量便可同時降低整體污染改善費用。由此可知，前述反應幕的設置方式是執行現地反應帶污染改善法較為經濟的方式。



(A) 一道反應幕位於污染團下游邊界



(B) 二道反應幕，一道位於污染團下游邊界，一道位於污染源下游



◎ 三道反應幕快速進行污染改善

資料來源：Suthersan, SS "Insitu Reactive Zones", Remediation engineering: design concepts, 1999

圖 6.2.2-1 現地反應帶設置位置概念圖

6.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

監測是設置反應帶整治法重要的一環，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)。計畫品保規劃書(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

- (一)採樣目的
- (二)採樣前之活動
- (三)採樣
- (四)現場分析及設備校準
- (五)樣品保存及處理
- (六)設備除污
- (七)樣品監管紀錄表(chain-of-custody)之控制及紀錄管理
- (八)實驗室及現場方法之分析步驟及數量限制
- (九)現場實驗室品質保證、品質控制
- (十)安全衛生

二、合格性監測

反應帶整治法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。監測井之設置應與反應帶保持足夠距離，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帶的效果。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

操作性監測著重於反應帶整治系統本身，以了解操作與設計間之

差距。而該監測應由良好的場址調查開始，俾利日後可有效地比較整治前後地下水質之差異。反應帶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帶之處理能力喪失、透水性降低、污染物於反應區停留時間以及短路。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。

6.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、 環境之影響

開挖及設置反應帶灌注井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

在執行反應帶整治法過程中，可能存在之危害可分為物理性危害以及化學性危害兩大類。其中，物理性危害包含機具設備造成的危害、不慎引起之火災爆炸、不穩定的土壤狀況以及觸電等；化學性危害則主要為污染物所引起之接觸性危害等。相關潛在之危害如表 6.2.4-1。

6.3 成本及期程評估

反應帶整治法之整治成本依照不同之場址以及反應帶所使用藥劑而有所差別，而注射井深度、數量是影響其整治成本之重要因素。反應帶壽命和整治技術之價值息息相關，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。

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。反應帶整治法之設計

要素包含所選擇之反應物、灌注井、監測井深度、數量及反應物對污染物質之吸收性等因素。

表 6.2.4-1 反應帶整治法潛在之危害彙整表

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	在設井過程中，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，設井過程中毀壞地底電線或氣體管線，亦可能造成起火、爆炸或感電的情形。	火災與爆炸	加強相關人員的訓練與緊急應變的能力。 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。 定時於工作區灑水或泡沫滅火劑防止蒸氣自燃。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。
	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	在開挖設井過程中，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。

七、電動力法(Electrokinetics)

7.1 整治技術簡介

7.1.1 原理

在污染場址的物理、化學或生物整治技術中，電動力整治技術為一種新穎的現地整治技術，可直接於污染場址，將污染物加以移除、處理或侷限。一般而言，電動力法具有以下之優點：(1) 能於現地將污染物由污染介質中去除；(2) 不受污染物種類限制；(3) 可有效控制電滲透流之方向；(4) 高移除效率及具安全性；(5) 對於低滲透性土壤之處理效果十分顯著；(6) 具有與其他整治技術搭配之彈性。在過去十餘年間，電動力法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的整治，早期多應用於低滲透性土壤重金屬污染物之移除，後續應用於有機污染物之去除，或搭配其他技術將污染土壤中的有害物質去除。由於電動力技術操作毋需大規模開挖，適用於無機或有機污染物質，且無生物毒害之問題，在國外已有許多應用成功的案例。

電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，施加適當大小之直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場，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質另可藉由電滲透之傳輸，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，其原理示意如圖 7.1.1-1，並說明於后。

一、電動力法原理

(一)電解反應

電動力法進行時，陽極槽產生氧化反應，以致大量氫離子之持續累積，使得 pH 值將降至 2 左右(式 1)，而陰極槽產生還原反應，大量之氫氧離子而使 pH 值升至 12 左右(式 2)。陽極端產生之氫離子，會隨電滲透流往陰極。因酸性溶液之流動，將逐漸降低土壤之緩衝能力，有改變污染物在土壤中分布關係之可能。處

理後污染物將隨電滲透流匯集於電極端，可抽取去除之或藉其他方法處(如生物分解)。

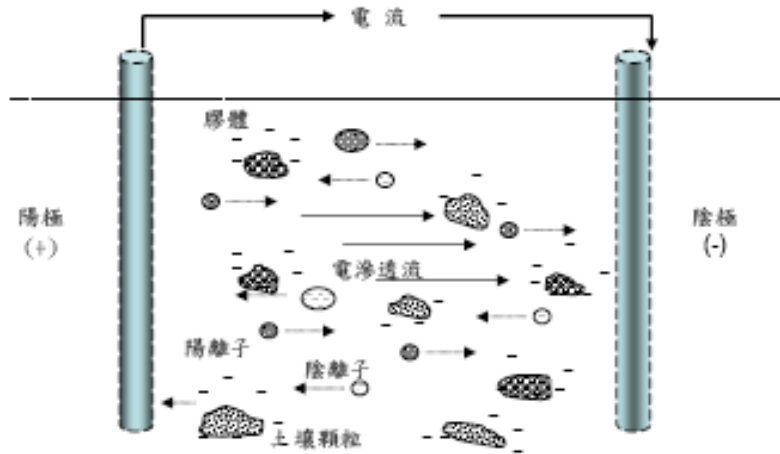
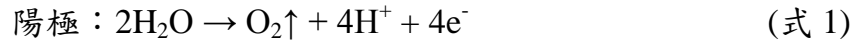


圖 7.1.1-1 電動力法處理原理示意圖

(二)電滲透率

土壤顆粒之土壤之物化特性、操作流質、電壓等因素為影響電滲透處理的重要因子。電滲透流率 Q_e (mL/d)，可由(式 3)表示

$$Q_e = \frac{\zeta \epsilon q}{4\eta L} \cdot \frac{E}{L} \cdot A \quad (\text{式 3})$$

L =土壤管柱長(length of soil core, cm)；

A =截面積(cross-section area, cm^2)；

E =電位差(potential difference, Volt)；

ζ =界達電位(zeta potential, mV)；

η =流體黏滯係數(viscosity of fluid)；

ϵ =流體介電常數(dielectric constant of fluid)；

q =經驗常數(與土壤特性有關)

而電滲透流率 Q_e 又可修正成類似達西公式：

$$Q_e = K_e i_e A \quad (\text{式 4})$$

K_e ：電滲透係數(EO permeability, $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)，一般而言，介

於 10^{-5} 至 10^{-6} $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 之間，高 K_e 值顯示高含水量。

i_e ：電位梯度(potential gradient，V/cm)

(三) 質量傳輸

應考慮污染物受擴散、離子移動，電滲透流動，水流動向，液固相間之反應(諸如吸附、溶解、氧化還原反應)等影響。因此在電動力處理過程中，控制質量傳輸之重要土壤因子，如土壤 pH 值、土壤界達電位(表面電荷)、土壤粒徑、土壤中污染物的含量，土壤對污染物吸附特性，以及控制操作流質之成分、電壓、電極槽之 pH 值應列入考慮並加以分析。

經由電極對建立化學電場後，產生若干反應，主要可分為兩部分：(1)因施加電位而發生的反應，例如：電滲透(electroosmotic flow)、離子遷移(ionic migration)、水的電解(electrolysis of water)、電泳(electrophoresis)、在陰極的電沉積反應(electrodeposition at the cathode)；(2)不論是否施加電位均會發生的反應，例如：吸附/脫附(sorption / desorption)、錯合/沉澱(complexation/precipitation)、酸鹼反應(acid-base reactions)、擴散(diffusion)。在現地復育應用上，電動力法除可適用於各種污染土壤外，對於低滲透性之土壤(例如：淤泥及黏土等)尤具優勢；此外，適用之污染種類相當廣泛，包括：重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等，此整治技術可同時處理飽和層及不飽和層土壤，其處理費用亦較一般傳統技術為低。除此之外，電動力技術亦具有水文控制功能及可與其他整治方法組合之特性。

二、 電動力法去除機制

電動力法造成土壤中污染物之去除機制有以下 4 種：1.離子遷移：離子於孔隙間移動；2.電滲透流：環境介質中流體之移動，施加電壓時水分子之移動；3.電泳：為帶電顆粒之移動，包括膠體或微胞；4.電解：電場所造成水分子分解之化學反應等，土壤系統(包括：土壤顆粒、孔隙流體及空氣)在電場作用下，帶電荷離子向其相反電性的電極移動，在離子移動的同時拖曳水分子移動，藉此引導孔隙流體的移動，而形成電滲透流。

一般而言，在地下水與土壤系統中，土壤顆粒表面通常帶負電荷，因此，電滲透流的流動方向為由陽極向陰極流動。造成電滲透流現象主要係由於水具有很高的介電常數(dielectric constant)及容易與其他離子形成水合離子(hydrated ion)的特性，一個陽離子可以和數個水分子帶負電的一端連結形成穩定的排列，至於陰離子的水合作用並不明顯，因此，陽離子往陰極移動的同時也使得水分子往陰極移動。電動力法之化學反應完整程序如下敘述：

- (一) 陽極表面進行氧化反應，產生氫離子(H^+)
- (二) 陰極表面進行還原反應，產生氫氧離子(OH^-)：
- (三) 陽極產生的氫離子藉由離子遷移(ion migration)效應、電滲透效應、水力坡降及濃度擴散(concentration diffusion)的作用下，循著孔隙往陰極流動。
- (四) 氫離子在往陰極輸送時，移動的過程中，會不斷地與土壤所吸附的陽離子污染物進行離子交換反應。
- (五) 土壤中的孔隙流體因電滲透、水頭及濃度擴散而往陰極流動，故重金屬因孔隙流體的流動而被帶出土壤，達到淨化土壤的目的。
- (六) 陰極除了電解水反應外，亦會發生勻相與非勻相兩種反應。其中勻相反應包含了 H^+ 與 OH^- 中和反應與重金屬離子的錯合反應。事實上，這些反應對整個處理程序具有關鍵性的影響。例如，沉澱反應所形成的固體顆粒也許會累積在土壤孔隙中，直至填滿整個通道而造成堵塞。

三、 電動力法影響因子

影響電動力技術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。

(一) 鄰近電極之化學反應

於電動力進行時，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。活性極化主要來源為電極反應期間，由於中間物的產生，或電極上因產生氣體而吸附於電極上，影響電極的電位差而使電極的反應速率變慢，造成電極之電阻增加。濃度極化則為電動力技術操作時，兩電極處的電解質濃度與最初平衡值不同，形成一濃度梯度而致電極之電位改變之現象。另外，當電極表面附有一層雜質(例如金屬電極之氧化物、不溶性鹽類、油脂或其他金屬等)時，會造成電極之電阻增加，此現象稱為電阻極化或歐姆極化。上述 3 種極化現象為電動力操作過程電流密度降低之可能原因。

(二) 土壤含水率

土壤之含水率之多寡將影響電動力法對於污染物種移除之成效，為保持合適之操作狀態，有人會在陽極處連續地注入清潔劑或清水，以確保污染物得持續由陰極處移出。

(三) 土壤型態與結構

由於土壤不同物化特性，將使其整治成效受到影響，如 pH 值之變化、水解及氧化/還原反應等。Krishna 等人曾針對 3 種不同型態的土壤進行電動力實驗，結果發現，當土壤的碳酸鹽含量較高時，會阻礙酸鋒的形成，因此，處理過程中土體呈鹼性；而當土壤的碳酸鹽含量較低時，明顯地會有酸鋒的形成，且土壤由陽極處至陰極處產生 pH 值變化梯度。因此，若土壤的碳酸鹽含量較低，將有助於陽離子於土壤表面脫附並隨電滲透流移出土體。此外，Vane 與 Zang 亦曾針對高嶺土與皂土等不同種類之黏土進行土壤顆粒界達電位對於電滲透流率影響之探討，結果發現黏土於 pH=5 時電滲透流為 pH=3 時之 3 倍，若能選擇適當的電解液條件(例如：較低之離子強度、較高之 pH 值及較低之二價陽離子濃度等)將有助於電滲透率的增加。

(四) 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，將顯著影響土體之界達電位、物種溶解度、離子狀態與電荷數及污染物種之吸附等。此外，在低 pH 值狀態下，將有助於金屬性污染物種之脫附，並形成可溶性之化合物，增進其移除效果。Lee 與 Yang 曾利用電解液迴流方式控制處理液之 pH 值，進行電動力整治受鉛污染之高嶺土試驗，藉此避免電滲透流之降低與重金屬之沉積。試驗結果顯示於迴流流過程中，黏土 pH 值之降低速率明顯減緩，以 1.1L/min 迴流速率可將陽極槽液 pH 值由 2 增加至 4、陰極槽液 pH 值由 12 降至 8。此外，陰極槽液中之鉛明顯地鍍於電極表面，並未沉積、吸附或進入測試的黏土中。然而，當 pH 值過低將致使界達電位極性之改變，而使電滲透流改向。為增進污染物種之移除成效，如何控制合適之 pH 值是電動力法成功應用的重要因素。

(五) 污染物種類與濃度

電動力法對於高溶解性無機離子物種之移除尤具成效，即使是低滲透性土壤仍具效果；對於不溶解性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。電動力技術對於高濃度污染物之整治，通常需要較長之操作時間。此外，不同之金屬初始濃度與土壤吸附容量，將使得土壤表面之負電荷降低，並於 pH 值達零電位點時，轉變為帶正電，相同地，陰離子之化學吸附將使土壤顆粒表面負電荷增加。另外，文獻中曾針對土壤中離子物種對電動力影響效應進行研究，發現當土壤中 Al^{3+} 含量較高時， Al^{3+} 遷移至陰極時受到高 pH 值環境的影響會形成停滯，直至被 H^+ 再度溶解，此結果並造成土體前段部分擴散現象及電泳效應的不明顯與電位梯度平緩，而於土體中後段部分擴散現象及電泳效應則明顯劇降，電位梯度變得明顯。

(六) 施加之電流密度

Hamed 等人以不同電流密度針對高嶺土探討電滲透流率，在經由施加 0.123 mA/cm^2 至 0.615 mA/cm^2 等不同電流密度的結果發現，施加的電流密度愈大，其電滲透流率愈大，可減短達到

預定電滲透流流率之時間，及縮短酸鋒由陽極至陰極所需時間。

7.1.2 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。

電動力整治技術的主要作用機制包括：(1)電滲透、(2)外在水力梯度、(3)酸鋒(acid front)趨向陰極處之擴散及陰、陽離子向其相反電性電極移動所造成之平流(advection)作用、以及(4)電動力操作過程中，在電極鄰近的電解反應等，但通常必須考量的兩個範疇則是：電動力傳輸—包括電滲透、電遷移與電泳等3種主要之傳輸機制，以及土體中誘發之電化學反應。此外，利用電動力技術將污染物藉由前述之作用向電極遷移後，可再利用電析、沉降或共沉降、離子交換樹脂或近電極處抽水等方式將污染物種予以去除。

本指引將電動力法的優缺點彙整如表 7.1.2-1 所示。

表 7.1.2-1 電動力法優缺點比較表

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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.

7.2 整治系統操作與設計

表 7.2-1 為美國環保署針對電動力法制定之法規指引及規範。

表 7.2-1 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
USEPA	Horizontal Configuration of the Lasagnd treatment Technology-User Guide	2002

7.2.1 整治系統設計與操作要點

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。

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、砂質粉土層、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，過程中可加入適度酸性溶液，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。必須注意的是，本技術並不會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。

7.2.2 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

7.2.3 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(A_{dc})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。

7.2.4 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

本法執行時可能造成之危害彙整如表 7.2.4-1 所示，可概為物理性危害及化學性危害。

表 7.2.4-1 電動力法潛在之危害

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，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.

7.3 成本及期程評估

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

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。

八、植物整治法 (Phytoremediation)

8.1 整治技術簡介

8.1.1 原理

植物整治(phytoremediation)係利用植物以達到移除、濃縮及溶解環境污染物，因此所有受植物影響且有助於污染物清除之生物、化學、物理程序均可稱為植物整治。植物本身進行多種新陳代謝反應，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，因此其可調整適應於環境中重金屬及有機污染物之存在，植物根部組織由於提供大量之比表面積，故對土壤中污染物之汲取多由此區域開始，因此植物可藉由根部降解有機污染物及減緩其移動，亦可將重金屬由土壤中濃縮至植物莖、葉部而達到去除污染物之目的。植物整治處理機制如圖 8.1.1-1 所示，其除污物理程序主要包含：

- 一、 控制水力坡降，減低地下水流速，減少污染物之擴散速率。
- 二、 加速有機物降解或伴隨根層微生物的作用而促進降解。
- 三、 使無機污染物能在植物部分達到濃縮的目的。
- 四、 本身污染物與植物的組織達到吸附的情形。
- 五、 有機污染物將自根層吸附後至葉部揮發，而擴散至大氣。

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(2005 台美講習會, New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL)。

植物整治法適用於被重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，土壤中的污染物質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。

一、 植物整治計畫的設計及執行基本步驟：

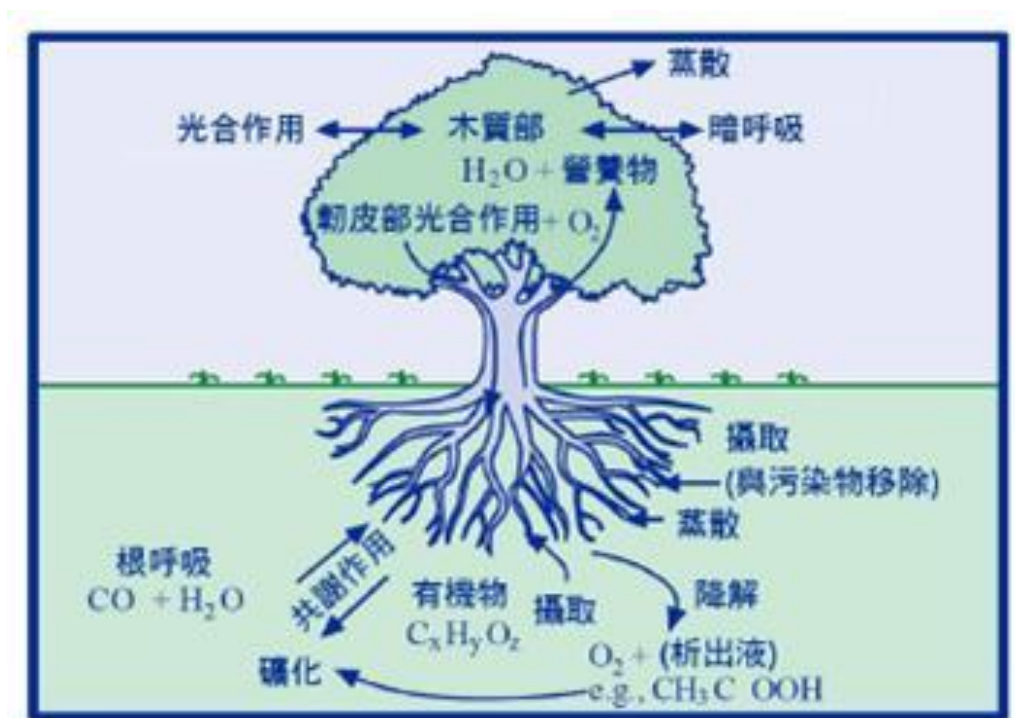


圖 8.1.1-1 植物整治處理機制

- (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。

二、 植物整治法的適用場址環境

當土壤污染物質被限制於地表下 3 英尺(約 1 公尺)處或地下水水面下 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。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) 殺蟲劑類廢棄物
- (九) 核種(radiounclides)
- (十) 營養鹽廢棄物(nutrient waste)，例如磷和氮鹽類。

三、植物整治法技術概述

依植物整治技術的特性，可分為植物降解整治技術及植物吸收整治技術等二種主要方法，茲說明於后。

(一)植物降解整治技術(Phytodegradation)

植物降解整治技術使用於地表水體的整治計畫，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(例如，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或重金屬予以吸收，然後降解成低毒性或無毒性之物質。

(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。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。

植物與微生物共生的關係可以想像成生物反應器一個自然平衡的機制，而此平衡機制控制微生物降解地下污染物的所需環境條件及物質，當提供太陽能、二氧化碳、水、無機營養物質，植物本身提供很多在生物分解工程上所需之條件而達到去除污染物，而其僅需極低花費。選擇植物整治物種所需的條件包含下列：根部的成長速率及範圍、蒸散速率、適應污染物的能力、植物在整治場址中得以生長適宜的能力。植物整治技術依其不同之應用性可區分為植物吸收(phytoextraction)、植物穩定(phytostabilization)及根層過濾(rhizofiltration)等 3 大類，植物選擇之指標包括 1. 生長速率及產量、2. 蒸散能力、3. 具降解功能酵素之產生、4. 根部區域生長深度、5. 對污染物之容忍力、6. 生物累積能力。茲就 3 大類應用技術說明於后。

(一)植物吸收

植物吸收技術係使用高累積植物(hyperaccumulator plant)將土壤中重金屬濃縮至根部及地表上之植物組織，所謂之高累積植物定義為葉部含有 0.01% (乾基)以上之鎘，或 0.1% (乾基)以上之

鎳、鈷、銅、鉻，或 1% (乾基)以上之鋅、錳之物種，而與金屬污染濃度無關。高累積植物之生長受到地域環境之影響，文獻顯示，在新英格蘭、菲律賓、古巴、巴西發現適合處理鎳之高累積植物，在歐洲及亞洲發現處理鎳及鋅之高累積植物，植物物種及對應污染物彙整如表 8.1.1-1 所示。

由於高累積植物具有生物質量高產率特性，因此當其達到萃取土壤重金屬之目的後，此濃縮重金屬之植物組織需經過完善處理，才不致對環境造成危害，同時亦應注意落葉之處理，以免重金屬經由落葉與土壤之接觸，又回到土壤傳輸途徑。

表 8.1.1-1 高累積植物物種

重金屬	植物物種	葉部重金屬含量 (%, 乾基)	生長國別
鈷	Haumaniastrum robertii (蒿莽草屬)	1	薩伊
銅	Aerolanthus biformifolius	1	歐洲
鎳	Phyllanthus seroentinus(葉下珠屬)	3.8	新英格蘭
	Alyssum bertoloni (亭薺植物) and 50 other species of alyssum	> 3	歐洲南部及土耳其
	Sebertia acuminata	25	新英格蘭
	Stackhousia tryonii	4.1	澳洲
鉛	Brassuca juncea	< 3.5	印度
鋅	Thlaspi calaminare(蘆葦葉蔴)	< 3	德國
	Viola species(堇菜屬)	1	歐洲

(二)植物穩定

植物穩定係利用植物限制土壤中重金屬的移動性及生物利用性。理想上，具備植物穩定功能之整治植物應該能容忍高濃度之重金屬，且藉由吸附、沉澱、複合作用或改變金屬價數而使減低其在土壤中之移動性。同時該類植物之組織亦應具備有對重金屬低濃縮之特性，如此可防止重金屬累積於莖、葉部，而成為有害性的廢棄物。此外，該類植物除可以將重金屬穩定存在土壤外，其實可以減少土壤的沖蝕及底土的移動。研究顯示，白楊樹(Popular)是植物穩定功能最好的深根性植物，其根部可以達到土

壤下數公尺的範圍，能將重金屬穩定於土壤，當其他整治技術不具經濟效益時，植物穩定技術可以列為重要替代處理技術選項之一。在英國被發現許多植物可以達到植物穩定的功能，例如：

1. *Agrostis tenuis*, cv Parys：用於處理受銅污染之土壤。
2. *Agrosas tenuis*, cv Coganin：用於處理受鉛及鋅污染之酸性土壤
3. *Festuca rubra*, cv Merlin：用於處理受鉛及鋅污染之鹼性土壤。

(三) 根層過濾

根層過濾主要是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱以處理受污染水。主要使用是陸生植物而非水生植物，因為陸生植物有長且纖細的根部系統，具備有大量的比表面積，可達到上述去除重金屬污染物的目的。根層過濾所移除重金屬的步驟中，並未包含任何生物程序，因此利用此作用來移除污染物的速率要比植物吸收來的低。利用根層過濾最被大家所熟悉例子為人工溼地的建造，其對於處理大量且低濃度重金屬廢水，非常具有經濟效益，已成功用於受污染水及滲出水的處理。

植物根部的析出物可能為有機物或無機物，根部析出物的碳成分來自於植物吸收二氧化碳，之後再以醣類型態存在，1-40%之光合作用產物都有可能從植物的根部釋放到土壤。根層析出物有機部分以許多形式存在，包括單醣、氨基酸、有機酸、酚類。植物析出物在現地整治扮演的功能尚未被研究出來。研究顯示，所扮演的角色可能為營養物、抗生素或化學反應的誘導者，植物的根部會藉由傳送氧氣或改變土壤的透水性來影響土壤氧化還原的能力，另外植物可以藉由蒸散系統及根部析出物持續釋出保水性的有機物質，可以改變土壤水體的水面關係。

四、 植物整治的影響因子

假若整治場址中的污染物深度非常接近地表，且其擴散性不大，並且對人體的危害性極低，其實植物整治技術是非常具有潛力的整治技術。其影響整治復育效率的因子有二：

(一) 場址特性

植物整治技術的處理效率通常被限制在根部生長區域之表土附近，因此影響植物整治的最重要限制因子就是根部的深度，通常在地表下 20-100 公分，當然實際深度要依據植物及土壤之型態決定，所以最適合利用植物整治的污染場址必須是污染物位於表土附近。而土壤的種類，在於植物去除重金屬物質扮演著重要的角色，因此在選取植物之前，可能必須先做污染特性的調整，可能包括土壤的 pH 值、營養成分、測試生物活性，如此才可更加瞭解此場址是否能執行植物整治的技術。當然除了土壤本身的特性外，尚有天候、灌溉水的頻率及是否加以施肥，也都影響到植物生長的情形，同時也影響到污染物去除的效率。

(二) 污染物特性

受重金屬低度及中度污染的場址最適合種植高累積性的植物。研究發現，最難被植物所吸收或穩定為鉛金屬，若將土壤特性進行調整，如降低 pH 值及減少磷酸鹽和硫酸鹽的含量，就可提升鉛金屬之處理效率。土壤特性將影響植物的生長情形，所以進行整治前，應先對當地的土壤特性及植栽先行測試，方可選取最適的處理條件。

五、 未來研究方向

目前植物整治技術並未全面商業化使用，宜針對此技術在安全上、法規制度層面進行深入的探討，方能將植物整治技術建立為一個可行且標準化的整治復育技術，屆時此技術會成為具有經濟性、非侵害性、太陽能動力及具有現地處理特性之環境友善技術。根據 1994 年美國國防部「Summary Report of a Workshop on Phytoremediation Research Needs」報告指出，植物整治技術未來 3 個重要研究方向如下：

(一) 研究污染物之汲取、傳輸及累積之機制

有關於植物整治的研究於物理方面、生化方面及遺傳學的程序上應進行深入探討，因為這方面的研究將有助於更加瞭解重金屬於植物中的吸附及傳輸的機制，以利於我們可以選取最適合的植物來進行整治。

(二)高累積性植物在遺傳學方面的評估

從遺傳學的角度及分子生物工程技術面，積極進行植物篩選技術的研究，以便培育適合的品種來進行污染場址的植物整治。

(三)實場評估及有效性測試

應積極進行植物整治實場的整治，以便提供完善的技術資料，俾於建立實場技術操作標準手冊，以便研究學者及業者遵循。

8.1.2 適用條件

各項植生技術之優缺點分析彙整如表 8.1.2-1。以植物吸收為例，其處理效能可藉由比較污染物濃度、污染土量、植物生質產率，以及植物累積重金屬容量而獲得，每單位面積所需去除污染物之植物生質量(W_b)及處理年限(T)計算如下：

$$W_b = W_m / F$$

W_b ：每單位面積所需去除污染物之植物生質量(公噸/英畝)

W_m ：每單位面積之重金屬污染總量(公噸/英畝)

F ：累積因子，每單位重量之植物生質量所濃縮之重金屬量

$$T = W_b / R$$

T ：處理年限(年)

R ：植物產率(公噸/英畝/年)

表 8.1.2-1 植物整治法之優缺點分析

植生技術		優點	缺點
機制	植物		
植物吸收	樹木	高生質(biomass)產率	<ul style="list-style-type: none"> 將污染物由地層轉移至地表 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	草類	高累積性	<ul style="list-style-type: none"> 低生質(biomass)產率及減緩生長速率 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	農作物	高生質(biomass)產率及提升生長速率	<ul style="list-style-type: none"> 當草食動物食用後，污染物將進入食物鏈而危及人類。 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
植物穩定		無後續污染植物處理問題	<ul style="list-style-type: none"> 由於重金屬被圍堵於土壤局部區域，而並未移除，因此污染場址需進行長期監控及維護工作。
根層過濾		金屬去除效果佳	<ul style="list-style-type: none"> 僅可處理水相污染物 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。

8.2 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 8.2-1 所示。

表 8.2-1 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
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

8.2.1 整治系統設計與操作要點

一、 場址特性的判定

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。

二、 場址的植物考量

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率、其根可深及地下水水位面、具高蒸發率 and 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 8.2.1-1 所示。

(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、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(15 m × 15 m)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、苯類及重金屬等)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。

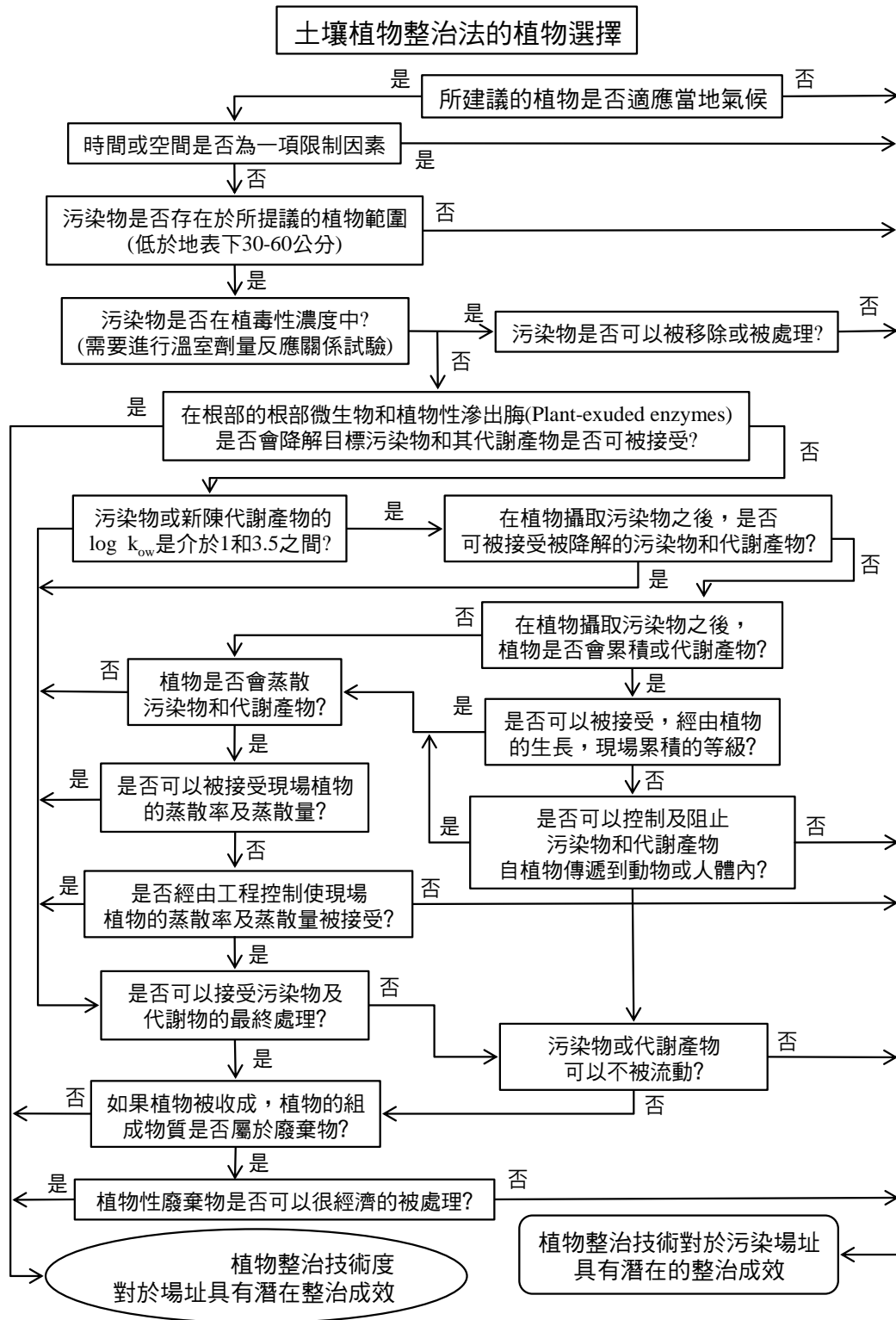


圖 8.2.1-1 土壤植物整治法的植物選擇系統設計流程圖

(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，若改以種植在溝渠中(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。

三、 場址農業的考量

植物整治法中現址農業上的考量包括場址的灌溉、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) 農業輸入

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面區域，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，植物年齡亦決定了污染容忍力。例如，在 Perelta-Videa 的研究指出，金屬(鎘、銅和鋅等)的植物毒性會隨著紫花苜蓿(alfalfa)類植物的植物年齡而被降解。

8.2.2 整治系統單元

該整治工法著重於場址土壤地質特性與植物選用兩大重點，操作設備的安裝並非為採用該整治工法之重點項目。

8.2.3 整治系統監測

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。

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率。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。監測的重點有二：

一、整治現址的操作成效

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。

8.2.4 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

植物整治法潛在的風險彙整如表 8.2.4-1 所示。

表 8.2.4-1 植物整治法潛在危害

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	在種植整治植物過程中，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。
	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.

8.3 成本及期程評估

用植物整治技術的目的通常是降低污染場址整治的費用，此技術的整體經濟分析須包含植栽的植種、植栽收割及後續生長之植物生長所需處理之費用。植生技術通常與其他技術共同串聯使用，使得植生技術在整個經濟效率分析上也愈顯困難。其經濟分析項目可分為下列 12 類。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，一般而言，其成本大都低於傳統整治技術。

- 一、 場址整理費用(site preparation)
- 二、 法規許可證照費用(permitting and regulatory requirements)
- 三、 初設設備(capital equipment)
- 四、 啟動及固定費用(start-up and fixed costs)
- 五、 人事費(labor)

-
- 六、 消耗材料費用(consumables and supplies)
 - 七、 水電費用(utilities)
 - 八、 廢水處理及處置費用(effluent treatment and disposal)
 - 九、 廢棄物運送及處置費用(residual waste shipping, handling, and disposal costs)
 - 十、 分析費用(analytical services)
 - 十一、 維修費用(maintenance and modification)
 - 十二、 封場費用(demobilization)

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發散量及污染吸收而有所差異。如以混種白楊樹(hybrid poplar trees)為例，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率：

$$U = (TSCF)(T)(C)$$

U = 污染物吸收率，mg/day

$TSCF$ = 蒸發流濃度因子

T = 植物蒸發散率，L/day

C = 土壤或地下水中水相濃度，mg/L

其中，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，該運算公式如下：

$$k = U / M_o$$

k = 吸收一階動力常數，yr⁻¹

U = 污染吸收率，kg/yr

M_o = 最初污染數，kg

再者，任何時期污染物量的推估可使用公式運算如下：

$$M = M_o e^{-kt}$$

M = 剩餘污染物量，kg

t = 時間，yr

計算運用已知整治技術之所需整治時間的運算公式如下：

$$t = -(\ln M/M_o) / k$$

t = 達到整治目標(action level)所需整治時間，yr

M = 整治目標所允許之污染量，kg

M_o = 最初污染量，kg

九、地下水抽出及處理法(Pump and Treat)

9.1 整治技術簡介

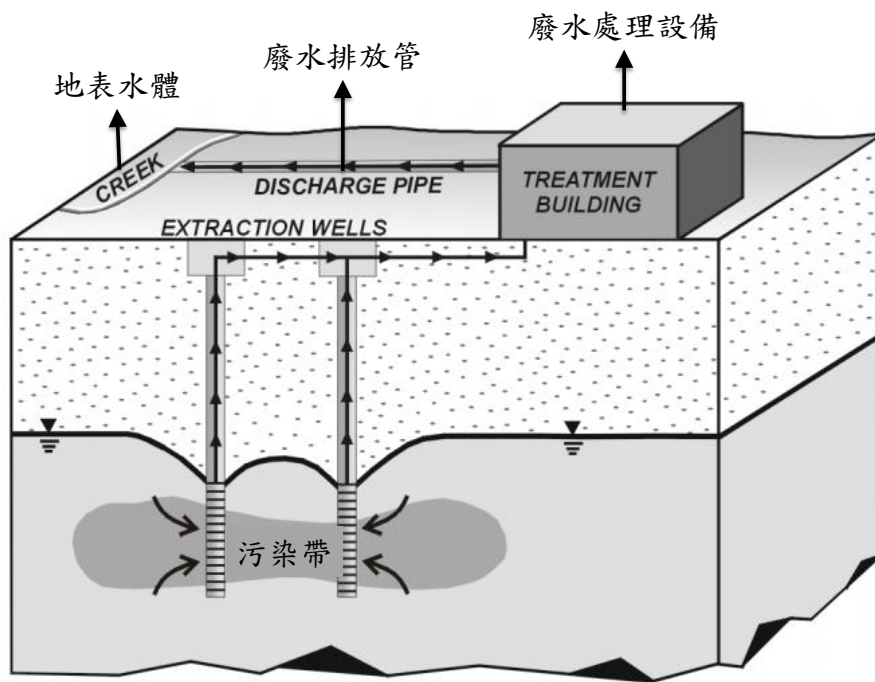
9.1.1 原理

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，傳統的地下水抽出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 9.1.1-1 及圖 9.1.1-2 所示。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。

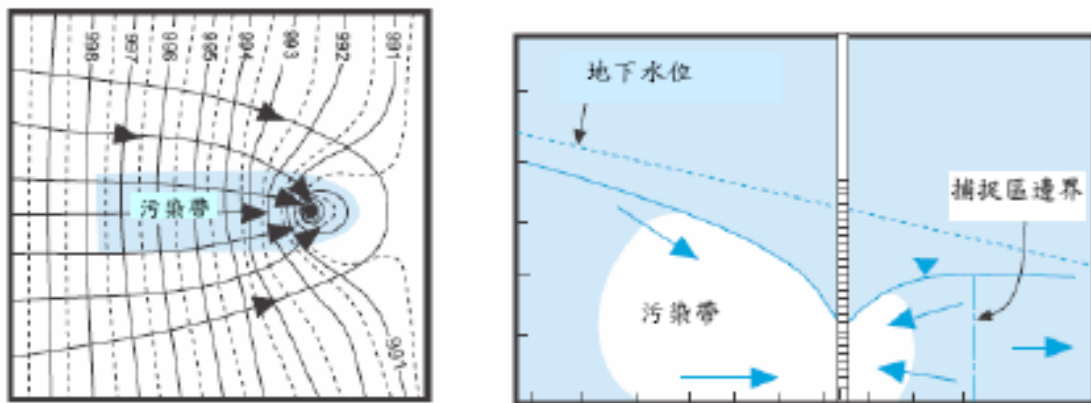
地下水抽出處理法主要可達到兩種目的，一為水力控制，即控制受污染地下水的移動，以避免污染區域的繼續擴散；二為污染處理，即降低地下水中溶解污染物的濃度，以達到整治目標。其中水力控制常作為地下水污染場址緊急應變的措施，而當其作為污染處理的規劃時，則常與其它整治技術一併使用，如地下水注氣法(air sparging)等。實際應用本法時，可視目的之不同而有不同設計，一般而言，作為水力控制所需的抽水流量較小，所需經費可較為便宜。

抽出的地下水處理方法包括沉澱法(Precipitation)、過濾法(Filtration)、離子交換或螯合樹脂法(Ion Exchange or Chelating Resins)、吸附法(Adsorption)、逆滲透法(Reverse Osmosis)、電透析法(Electrodialysis)，茲說明於后。



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 9.1.1-1 地下水抽出處理法原理示意圖



Section 2, EPA 540-S-97-504, September 1997

圖 9.1.1-2 地下水抽出處理法之捕捉區概念圖

(一) 沉澱法及共沉澱法

沉澱法係使用化學藥劑直接將溶解態之污染物轉化為非溶解狀態之程序；而共沉澱法係將膠凝態(colloidal form)或懸浮態(suspend form)之污染物與其他沉澱物(外加化學藥劑)結合後而沉澱之程序。因此沉澱及共沉澱法必須包含下列步驟：

1. 處理之化學藥劑與待處理液充分混合
2. 藉由沉澱及共沉澱機制，或兩者兼具，產生固體物
3. 進行固體物與處理液分離程序。

圖 9.1.1-3 為典型之沉澱及共沉澱法之處理程序，其視需要進行氧化及還原之前處理程序，然後進行 pH 值調整及添加沉澱劑或膠凝劑，經適當時間反應後，再經由過濾或沉澱機制將固體物與澄清液分離。常使用之化學藥劑包括：

1. 鐵鹽(如氯化鐵、硫酸鐵、氫氧化鐵)
2. 硫酸銨、硫酸鎂、硫酸銅
3. 氫氧化鋁
4. 石灰、氫氧化鈣
5. 硫化物

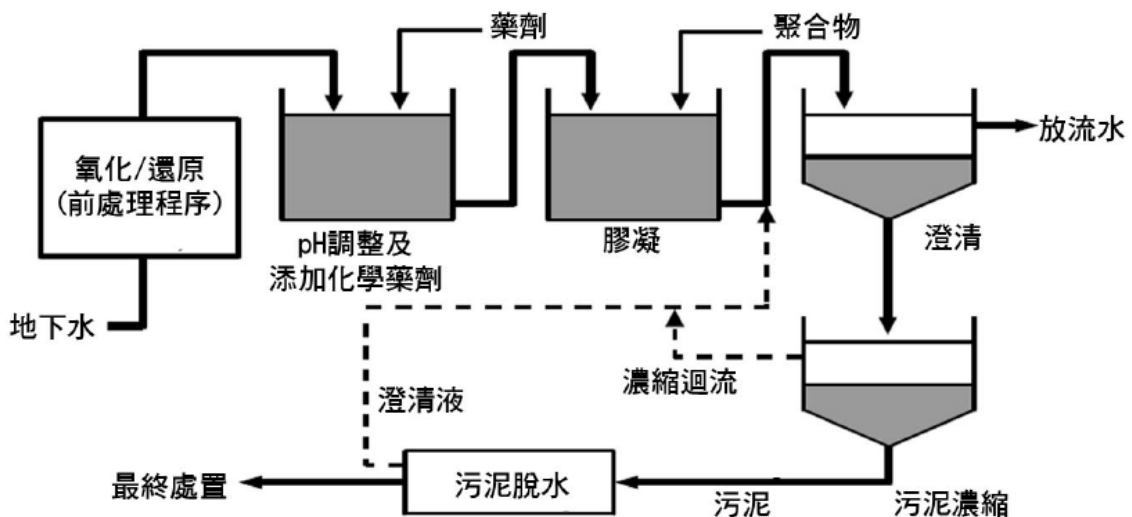


圖 9.1.1-3 沉澱法及共沉澱法處理系統

影響沉澱法之因子包括：

1. 重金屬氧化態：由於重金屬之氧化態影響其溶解度、移動性、降解性等性質，因此也影響其處理效能。如以砷(As)為例，As(III)之溶解性較高，將降低沉澱及共沉澱法之處理效率，因此若將其氧化為 As(V)將提升處理效率。而砷金屬之溶解度尚與 pH 值、金屬化合物型態、及其他共存離子之影響。
2. pH 值：環境酸鹼度與重金屬存在型態有密切關係，應在重金屬溶解度最小之酸鹼度環境下進行，方可使沉澱及共沉澱法處理效率最適化。
3. 其他共存離子：其他離子之存在將直接影響處理效率。對於以氯化鐵為膠凝劑處理砷金屬之程序中，如硫酸根存在時，將與氯化鐵反應，而降低砷金屬之去除效率，然而若鈣或鐵離子之存在，則將提升此程序之去除效率。

(二) 薄膜過濾法

薄膜過濾為利用半滲透性薄膜來分離水相污染物，如圖 9.1.1-4 所示，而此半滲透性薄膜對於通過物質具選擇性。薄膜過濾分為 4 種形式：微過濾(microfiltration)、超過濾(ultrafiltration)、奈米過濾(nanofiltration)及逆滲透(RO)，以上 4 種形式均需施加壓力再利用污染物粒徑與薄膜孔徑之差異而達到分離之目的。施加壓力大小與污染物顆粒尺寸有關，奈米過濾與逆滲透需施加較高之壓力(50~150 psi)，而微過濾與超過濾則僅需 5~100 psi 壓力，低壓程序係以物理篩除(sieving)機制去除污染物，而高壓程序則透過薄膜表面之化學擴散(chemical diffusion)機制。

微過濾則通常與沉澱/共沉澱法共同處理與固體物結合之金屬，其適合去除分子量大於 50,000 或粒徑大於 0.05 μm 之顆粒；對於溶解於水中且顆粒相當小之金屬(如砷)，只有奈米過濾及逆滲透可有效除之，逆滲透為一高壓程序，主要移除與總溶解固體物結合之金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 1~20,000 (the molecular cut off)；奈米過濾亦為一高壓程序，適合處理造成硬度之二價金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 150~20,000(the

molecular cut off)。

影響過濾法之因子包括：

1. 懸浮性固體物、高分子量溶解性固體物、有機物、及膠凝物：
上述物質存在將造成薄膜垢化(fouling)現象，降低處理效率。
2. 重金屬氧化態：不同氧化態之重金屬顆粒尺寸有異，因而影響處理效率，如 As(V)之薄膜過濾處理效率較 As(III)為佳，乃因 As(V)較 As(III)為大而容易被薄膜過濾之故。
3. pH：環境酸鹼度將影響薄膜表面之帶電性，進而影響薄膜對重金屬之吸附效能。
4. 溫度：處理液溫度較低時將減低薄膜流通量(membrane flux)，降低處理效率，此時可提升系統壓力或增加薄膜面積來克服。

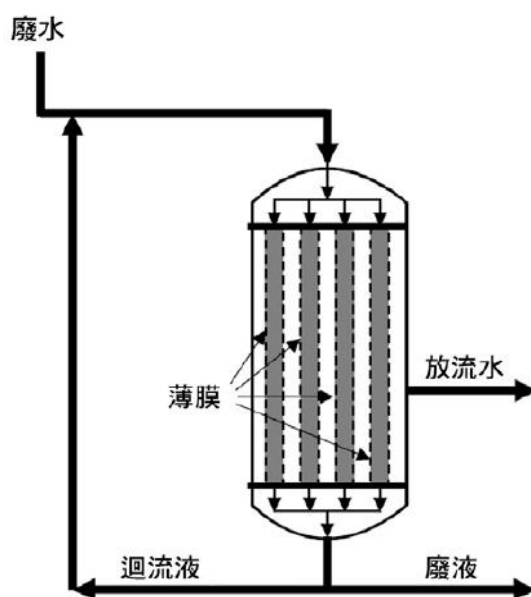


圖 9.1.1-3 薄膜過濾系統

逆滲透法可有效的清除溶解於水中的無機物，有機物，細菌，熱原及其它顆粒等。要了解"逆滲透"原理之前，要先解釋"滲透(osmosis)的觀念。所謂滲透是指以半透膜隔開兩種不同濃度的溶液，其中溶質不能透過半透膜，則濃度較低的一方水分子會通過半透膜到達濃度較高的另一方，直到兩側的濃度相等為止。在還沒達到平衡之前，可以在濃度較高的一方逐漸施加壓力，則前述

之水分子移動狀態會暫時停止，此時所需的壓力叫作「滲透壓」(osmotic pressure)。

如果施加的力量大於滲透壓時，則水份的移動會反方向而行，也就是從高濃度的一方流向低濃度的一方，這種現象就叫作「逆滲透」。逆滲透的純化效果可以達到離子的層面，對於單價離子(monovalent ions)的排除率(rejection rate)可達 90%-98%，而雙價離子(divalent ions)可達 95%-99% 左右。

逆滲透水處理常用的半透膜材質有纖維質膜(cellulosic)，芳香族聚醯胺類(aromatic polyamides)，polyimide 或 polyfuranes 等，至於它的結構形狀有螺旋型(spiralwound)，空心纖維型(hollow fiber)及管狀型(tubular)等。至於這些材質中纖維素膜的優點是耐鹼性高，但在鹼性的條件下($\text{pH} \geq 8.0$)或細菌存在的狀況下，使用壽命會縮短。polyamide 的缺點是對氯及氯氨之耐受性差。至於採用那一種材質較好，則目前還沒有定論。

如果逆滲透前沒有作好前置處理則滲透膜上容易有污物堆積，例如鈣，鎂，鐵等離子，造成逆滲透功能的下降；有些膜(如 polyamide)容易被氯與氯氨所破壞，因此在逆滲透膜之前要有活性碳及軟化器等前置處理。逆滲透雖然價錢較高，因為一般逆滲透膜的孔徑約在 10A 以下，它可以排除細菌，病毒及熱原甚至各種溶解性離子等。

逆滲透法(Reverse Osmosis)係利用一能透水之半透膜(Semi-permeable Membrane)來排斥其它離子而進行除鹽操作。當兩種不同濃度之溶液以半透膜(Semi-permeable Membrane)隔開，此半透膜僅容許溶劑通過，而不允許溶質通過，由於兩端之濃度梯度產生化學勢(Chemical Potential)之不平衡，導致溶劑由稀濃度一方移向高濃度之一方，此現象稱為滲透(Osmosis)，如圖 9.1.1-4(A)。滲透乃自然發生之現象，此現象將持續至達平衡為止，此時濃溶液端之液面將高出稀溶液端之液面 π 高度，如圖 9.1.1-4(B)所示，靜水壓力差 π 即為濃溶液之滲透壓(Osmosis Pressure)；今若在濃溶液端施一大於 π 之壓力，則溶劑分子之滲透方向將相反，改由濃溶液流向稀溶液，如圖 9.1.1-4(C)所示，可

藉此濃縮或分離溶質，此即為逆滲透(Reverse Osmosis)之原理。

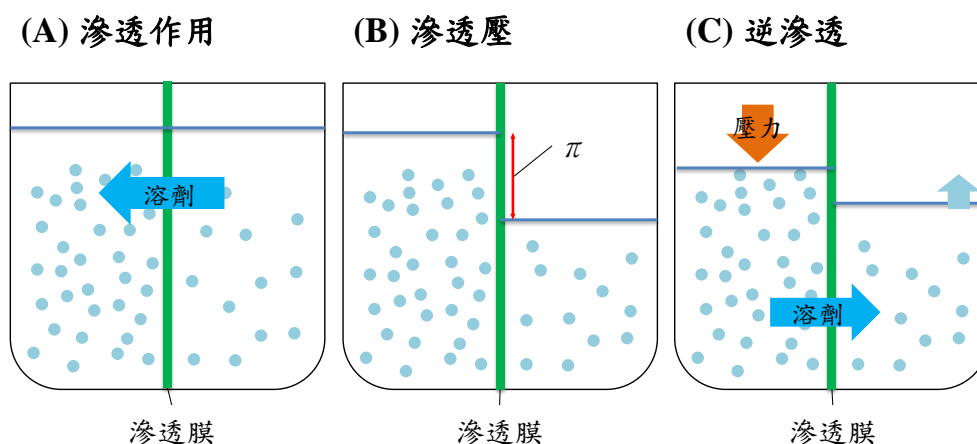


圖 9.1.1-4 薄膜過濾法原理示意圖

(三)離子交換或螯合樹脂法

離子交換法係一種物理/化學分離技術，將液相中污染離子與固相中離子進行交換，進而達到液相淨化之目的，如圖 9.1.1-5 所示。而此固相介質稱為離子交換樹脂，其係合成聚合物，表面帶有許多官能基，可與污染離子進行交換，其主要有 4 種型態：

1. 強酸型
2. 弱酸型
3. 強鹼型
4. 弱鹼型

強酸型及弱酸型離子交換樹脂主要用於處理陽離子，而強鹼型及弱鹼型離子交換樹脂主要用於處理陰離子。因此對於重金屬而言，應使用強酸型及弱酸型離子交換樹脂，而對於類金屬(如砷)，因其以陰離子型態存在於液相，故以鹼型離子交換樹脂進行處理，尤以強鹼型為佳。

離子交換樹脂達到飽和時，必須定期再生，以維持交換能力，再生程序有 3 個步驟：

1. 反沖洗
2. 再生

3. 洗滌

一般而言，當處理達 300~60,000 個離子交換柱體積後，樹脂需進行再生，而再生液通常可重複使用 25 次後再進行處理，最後洗滌步驟僅需數個柱體積即可。

離子交換管柱可串聯使用，以減低再生頻率，通常前端處理之管柱先進行再生，再生後置於後端使用。

影響離子交換法之因子包括：

1. 重金屬氧化態：文獻顯示，處理效率受重金屬氧化態之影響，如 As(III) 無法以離子交換法移除之。
2. 競爭性離子之存在：當競爭性離子存在時，將與待處理金屬競爭樹脂位置，導致需增加再生頻率，方可維持處理效能。
3. 垢化：總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵之存在，皆會引起離子交換樹脂垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。
4. 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大離子交換效率，如以強鹼氯離子型樹脂，對於砷廢水處理之最佳 pH 值為 6.5~9，在此範圍外處理時，去除效率明顯下降。

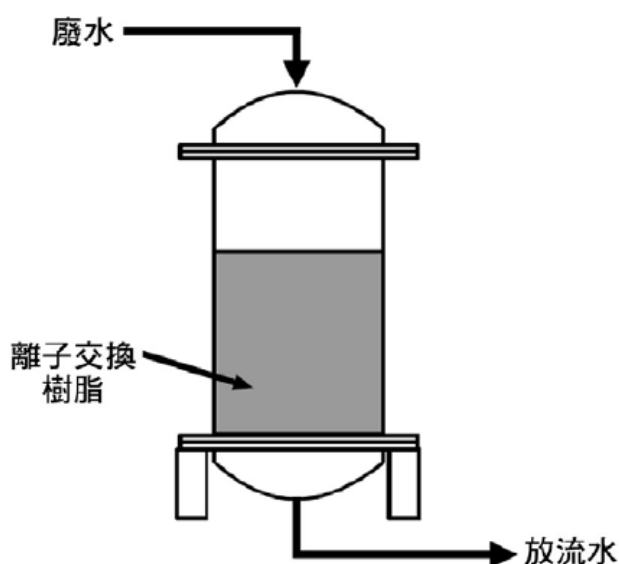


圖 9.1.1-5 離子交換系統示意圖

(四) 吸附法

吸附技術係採用吸附劑置於固定床管柱中，使待處理液經過吸附劑表面達到濃縮，而降低液相濃度，如圖 9.1.1-6 所示。吸附技術有時會與沉澱/共沉澱、離子交換、過濾共同使用，然而吸附往往成為最主要去除機制。當吸附劑達到飽和，則需進行反沖洗、再生、中和、洗滌等 4 步驟之再生程序，以維持吸附劑效能。常用之吸附劑為：

1. 活性鋁(activated alumina)：可利用氫氧化鈉進行再生，中和液則採用硫酸，進行此程序將產生污泥，需進行後續處理。
2. 活性碳(activated carbon)：大多用於地下水及自來水中有機物之移除，將活性碳與銅離子或鐵離子進行反應後，將可用於砷之吸附，其吸附量分別為 0.048 g/g-Cu-AC 及 0.2 g/g-Fe-AC。
3. 粒狀銅-鋅複合金屬
4. 粒狀氫氧化鐵、氧化鐵砂：可被利用於自來水中砷之移除，且通常與氧化、沉澱/共沉澱、離子交換或過濾一同使用，其再生程序與活性碳類似，利用氫氧化鈉再生，再以強酸(如：硫酸)中和即可。
5. 經界面活性劑改質之沸石：將沸石與界面活性劑(如：hexadecyltrimethylammonium bromide)反應，其對於砷之吸附量達 0.0055 g/g。

影響吸附法之因子包括：

1. 垢化：總懸浮固體物、有機物、固體物、二氧化矽及雲母之存在，皆會引起吸附劑垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。
2. 重金屬氧化態：文獻顯示，吸附效率受重金屬氧化態之影響，如 As(V)之吸附處理效率較 As(III)為佳。
3. 處理流量：增加吸附處理單元之流量時，將降低污染物之吸附。
4. 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大吸附效率，例如以活性鋁(activated alumina)處理砷廢水，

在酸性情形下吸附較佳。

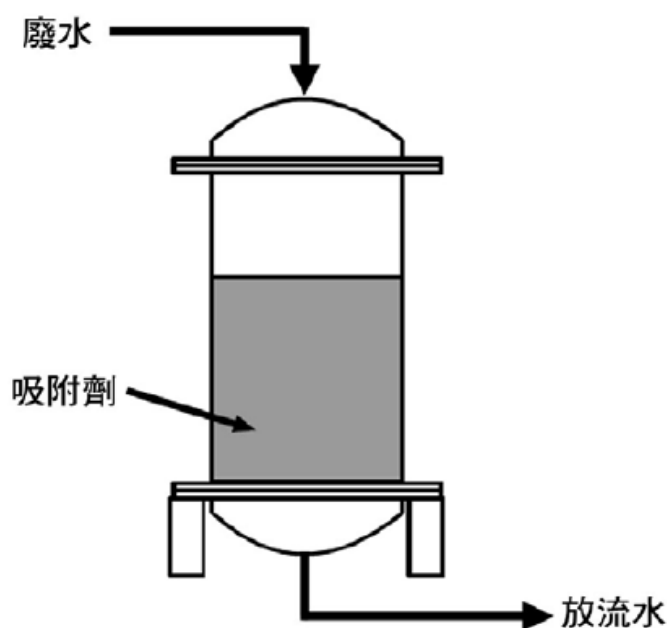


圖 9.1.1-6 吸附處理系統示意圖

(五)電透析法

電透析法(Electrodialysis, 簡稱 ED)是一種使用電力將溶液淡化及濃縮之製程(Ionics Electrodialysis, 2003)。水中之鹽份會分離成帶正電(positively charged ions)和帶負電的離子(negatively charged ions)。電透析法的關鍵在於半滲透障礙物(a semi-permeable barrier), 這個障礙物只允許帶正電的離子(positively charged ions)/陽離子(cations)或帶負電的離子(negatively charged ions)/陰離子(anions)通過, 並且排除拒絕相反電荷離子的通過, 如圖 9.1.1-7。這個半滲透障礙物就是一般我們所知道之離子交換(ion-exchange)、離子選擇(ion-selective)或電透析膜(electrodialysis membrane)。

電透析法亦屬薄膜程序(Membrane process)之一種, 只有電透析法只適用於帶有電荷之離子的分離收集, 其電透析法利用電極產生電流來分離陰陽離子, 再透過半透膜去除陰陽離子, 最後產生乾淨水與濃縮廢液兩股水, 早期用於鹽水(Brackish water)的去礦化處理(De-mineralization)後製成為飲用水。商業化的電透析製

程開始於 1960 年代，比逆滲透製程約早 10 年，技術以至成熟。其中往復式電透析法(Reversal Electrodialysis, RED)可大幅改善積垢的問題，使得往復式電透析法有效解決各種問題，包括懸浮物質、有機物、含礦物質之排放等。然而電透析法的好壞取決於膜的品質而定。

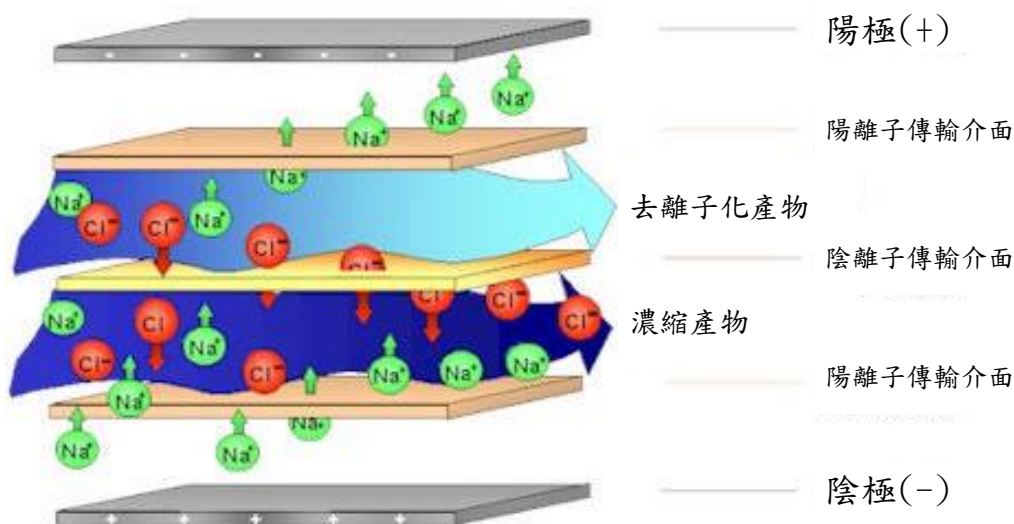


圖 9.1.1-7 電透析原理示意圖

9.1.2 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。若抽除地下水中含溶解性污染物時，則一般水井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，甚至可以將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。

地下水抽出及處理法應用上之優缺點，如表 9.1.2-1 所示。各種不同地下水處理方法之優缺點，說明於后。

表 9.1.2-1 地下水抽出處理法技術優缺點比較表

優點	缺點
1. 設置簡單、快速，操作經驗需求較低。 2. 設置及維護成本較低。 3. 對於污染區域較小，或是污染濃不高的場址，容易達成整治目標。 4. 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。	1. 部分污染物質，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。 2. 污染物從水力傳導低的區域擴散到水力傳導高的區域速率緩慢。 3. 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。 4. 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。

一、 沉澱法及共沉澱法

- (一) 沉澱及共沉澱法為一離地處理技術。
- (二) 適合受污染之地下水、滲出水、礦區排放水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 處理後將會產生污泥，需進行脫水及最終處置，將衍生處理經費之增加。
- (四) 由於化學藥劑之存在及重金屬污染物本身之濃縮作用，此法處理後產生之污泥極有可能成為有害性廢棄物，須經固化/穩定化等技術處理後，再進行最終處置。

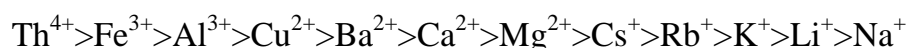
二、 過濾法

- (一) 薄膜過濾廣泛適合處理溶解性污染物及懸浮性固體物。
- (二) 適合受污染之地下水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 逆滲透及奈米過濾不須添加化學物質及可達到分離效果。
- (四) 薄膜過濾系統可採連續或批次操作。
- (五) 處理效率將受到處理液中污染物及其他固體物、有機物之影響，因此較適合用於處理雜質較少之水體，如地下水與自來水。
- (六) 薄膜過濾通常當作其他技術之後續處理程序，以達處理目標。

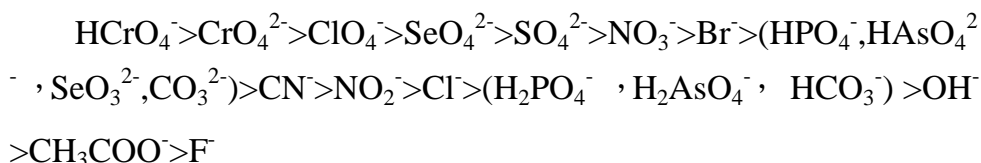
三、離子交換或螯合樹脂法

- (一) 適合受污染之地下水、地表水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵存在時，將造成樹脂垢化，影響處理效能。
- (三) 若使用氯離子型交換樹脂，處理液將含高濃度氯離子，造成腐蝕性；離子交換程序亦會降低處理液 pH 值。
- (四) 廢棄樹脂含有大量金屬，需進行妥善處理，以維護環境。
- (五) 置換能力將影響處理效能

1. 對於金屬離子而言，置換優先順序為



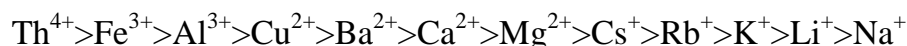
2. 對於類金屬(如：砷、硒)化合物，其置換優先順序為



四、吸附法

- (一) 適合受污染之地下水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、二氧化矽存在時，將造成吸附劑垢化，影響吸附效能。
- (三) 活性碳再生多以熱脫附為主，後續需裝設空氣污染防制設備，以處理揮發性金屬蒸氣。
- (四) 競爭吸附將降低吸附效率

1. 對於金屬而言之吸附優先順序為



2. 對於類金屬(如：砷)化合物，其吸附優先順序為



五、逆滲透法

- (一) 應用於廢水處理，透過液可再利用以節省製程用水量及降低水體

污染量，濃縮液可回收有用之金屬或化學藥品。

- (二)操作系統僅需泵浦加壓所需之能量，若使用超低壓(Ultra-low Pressure, ULP)複合膜(Thin-film Composite, TFC)，操作壓力僅需7~10 kgw/cm²，更能降低耗能50%以上。
- (三)操作系統幾乎為自動化且維修容易，節省人工及維護費用。
- (四)薄膜系統設備排列均相當緊密且多為連續式操作，佔用空間小。
- (五)選擇適當之薄膜及操作條件，一般均可獲得極佳之去除效果。
- (六)連續濃縮處理可增加清水量，濃縮液易於脫水乾燥及最終處置。

六、電透析法

- (一)在物理與化學性質方面要具穩定性因為膜的使用可能在具有還原性、氧化性、酸性、鹼性等介質當中，則品質不好的膜容易受到各種因而破裂或收縮。
- (二)電阻要小，離子選擇透過性要高因為電流要通過離子交換膜，故電阻需要小，另外膜的選擇性要高，才能有效分離多種離子。
- (三)水的滲透與電解質的擴散都要小當離子在膜內電泳時，有些水分子隨離子一起移動，也就是與水共同遷移，這些現象會使電流效率降低。

為有效確認整治系統操作之可行性，建議可採取模場試驗。本法的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，以得到初步的場址調查資料，進一步規劃全場整治系統。此外，本整治技術將造成地下水水位明顯洩降，故應考量周圍居民對於地層下陷等安全上的考量，以避免不必要之非理性抗爭，造成執行之延宕。

9.2 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 9.2-1。

表 9.2-1 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
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

9.2.1 整治系統設計與操作要點

地下水抽出處理法主要規劃設計要點及注意事項如下：

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數量及位置，得出最佳之抽水速率。

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

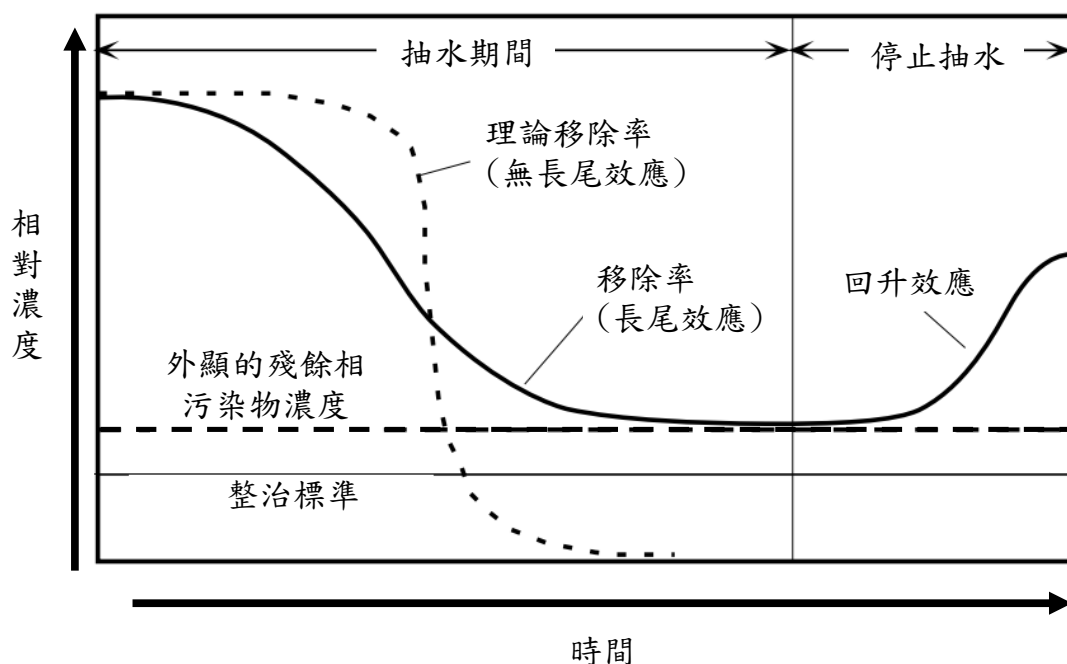
依據抽出速率與抽出濃度，推算污染物之抽出移除率，除據以估算存在於地下環境中的污染物總量外，並可預估總移除量及推估移除

時間。

地下水抽出處理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 或重金屬污染之場址時，因污染物會緩慢、持續地釋出，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，會因為污染物的釋出，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 9.2.1-1 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 9.2.2-1 地下水抽出處理法之抽水及停止抽水期間濃度變化圖

9.2.2 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 9.2.2-1。

表 9.2.2-1 地下水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

9.2.3 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，以瞭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 9.2.3-1。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，可考慮污染場址中之污染物特性，以移動速率最快之污染物質為設定目標。

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 9.2.3-1。

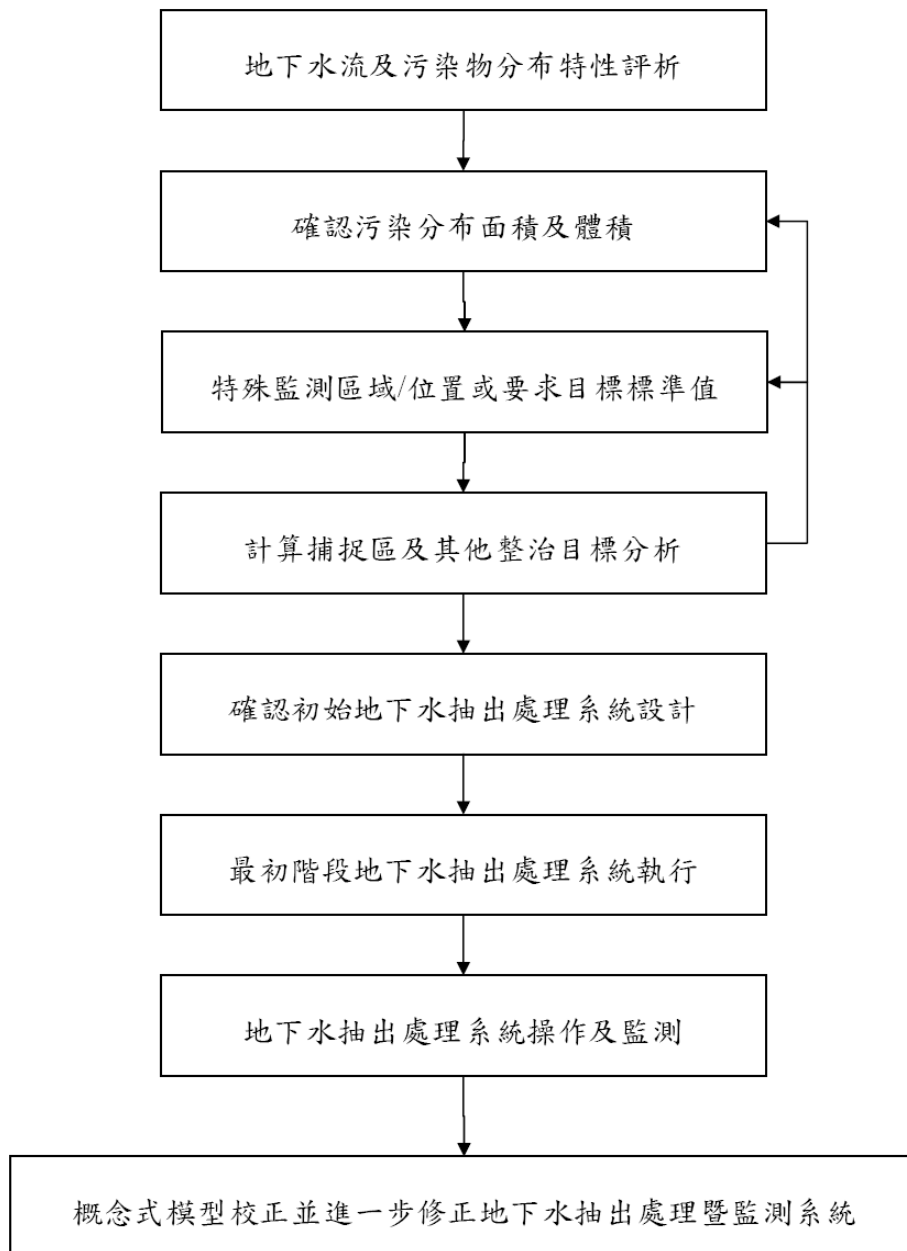


圖 9.2.3-1 地下水抽出處理系統成效監測程序流程圖

表 9.2.3-1 地下水抽出處理法整治系統成效監測表

項目	抽水系統	水力控制範圍	地下水水質監測
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
監測對象	流量計	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

9.2.4 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慮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 9.2.4-1。

表 9.2.4-1 地下水抽出處理法潛在之危害

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

9.3 成本及期程評估

以抽出處理法進行污染改善作業所需費用，依各場址特性而有所不同，主要影響整治費用因素包含，場址大小、污染源/污染團分佈大小、污染深度、污染物種類、污染物濃度、地下水流速、水文地質狀況、處理設備種類、操作期程等等因素。

以美國德州 Odessa, Odessa Chromium 污染場址污染改善作業為例，設置抽水、處理設備等主要污染改善費用為美金\$1,927,502 元(約新台幣 67,462,570)；而進行三年的操作維護費用為美金\$560,232 元(約新台幣 19,608,120)。

十、圍堵處理法(Containment)

10.1 整治技術簡介

10.1.1 原理

圍堵(containment)技術廣泛使用於各類型污染場址，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。圍堵處理法僅能侷限污染團，但不能去除污染物質，故不是整治技術，必須搭配其他的整治技術才能夠達到整治目的。

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。

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。

圍堵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，即建置一低滲透度

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。

10.1.2 適用條件

圍堵系統之適用環境，主要考量其材質與污染物之間的化學相容性。圍堵法在應用上之可能優缺點如表 10.1.2-1。

表 10.1.2-1 圍堵法技術優缺點比較表

優點	缺點
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. 適用於小場址。 4. 有潛在滲漏及移動之風險。

由於涉及土壤介質的取代、挖掘和處理，垂直阻絕系統可分成取代法、挖掘法、注射法等基本類型，各類型之適用性如表 10.1.2-2。

表 10.1.2-2 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	鋼板樁 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；鋼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

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。

10.2 整治系統操作與設計

有關國外針對圍堵已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 10.2-1。

表 10.2-1 國外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
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

10.2.1 整治系統設計與操作要點

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 and 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。

10.2.2 整治系統單元

圍堵法所需的設備一般至少包括：

- 一、開挖重型機具設備（如挖土機、推土機）、打樁機
- 二、土壤載運工具（如吊車、裝土機）

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

雖然有許多通用方法可應用於所有場地，但是開挖和移除期間供控制環境排放量所需之預防性和緩和性措施之本質和範圍，乃因地而異。供壘置和處理污染土壤之操作區，應加以分階以防止形成水坑，須襯以聚乙烯或黏土，並加設護路或築堤。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。在污染之範圍擴散到地下水層中或可滲透非飽和區時，則可使用合成不透水布之系統。設備除污區應屬硬表面地區，方能以周邊邊石截留沖洗水，並藉中央水槽和周邊水坑收集液體。

除了上述之預防措施外，許多其他措施可用來緩和和減少排放量，包括：

- (一) 覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲漏和揚塵。
- (二) 操作全程使用吸附劑、泵或其他設備以立即清理潑散物。
- (三) 場地周圍構築地面分水渠以控制逕流。
- (四) 在場地下坡處構築貯留池以圍堵受污染之逕流。

二、成效監測及監測設備

(一) 開挖作業環境監測：開挖作業場址周圍環境監測方式與頻率彙整如表 10.2.3-1。

(二) 圍堵成效監測：圍堵工作環境監測方式彙整如表 10.2.3-2。

表 10.2.3-1 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	Leq、Lmax	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 10.2.3-1 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

10.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

圍堵過程中所進行的開挖工程，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。

二、潛在之危害

圍堵之潛在危害如表 10.2.4-1。

表 10.2.4-1 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。
	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.

10.3 成本及期程評估

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。

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。

十一、土壤淋洗法 (Soil Flushing)

11.1 整治技術簡介

11.1.1 原理

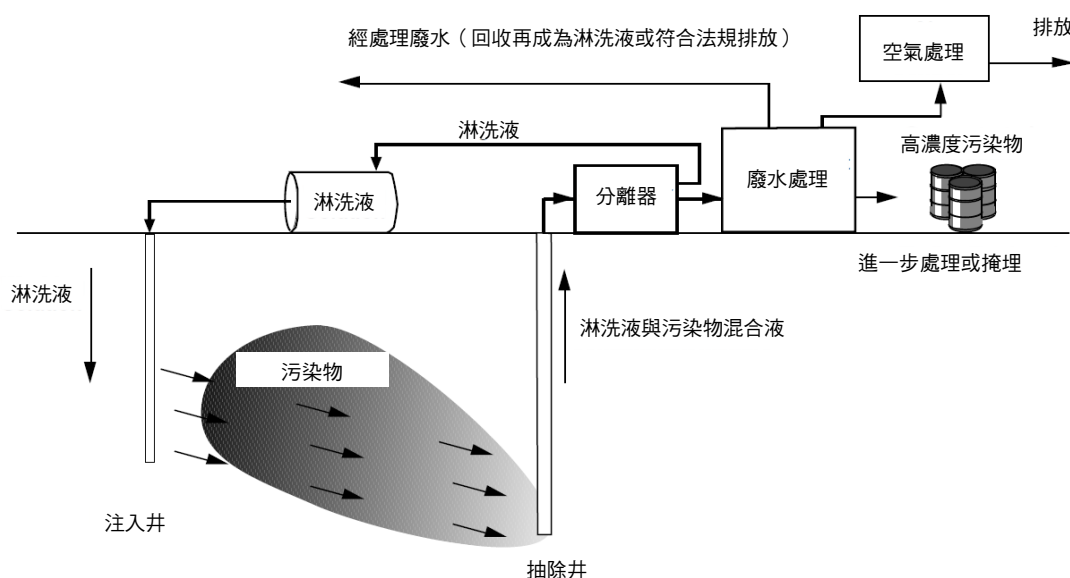
土壤淋洗法，是一個現地(In Situ)整治的技術，將淋洗液直接灌注或噴灑在未開挖的土地上，經由重力的入滲將土壤中的污染物淋洗至含水層中，因此適用於粉土或黏土較少的土壤質地。此外，進入到含水層中的污染物與淋洗液須抽取至地面處理，因此相較於其他整治方法，土壤淋洗法必須對於場址的水文地質有更多的掌握。以下說明土壤淋洗法相關的技術選擇、系統設計、成本/期程分析、法規指引及國外成功案例。

現地淋洗法係將溶液注入或使其滲透至受污染的土壤及地下水中，並在下游對地下水及溶離液(淋洗液與污染物之混合物)萃取，接著再於地面上做處理，處理後之地下水再回注入地下或排放。土壤淋洗法與土壤水洗法並不相同，土壤水洗法通常用以描述使用溶液或機械的程序將污染物自土壤移除之非現地處理過程。

使用土壤淋洗法時，淋洗液可使污染物之移動性或溶解性增加，或使沖洗之速率加快。淋洗液之成份可能包含界面活性劑、共溶劑(cosolvent)、酸、鹼、氧化劑、螯合劑、溶劑或水，其中，界面活性劑主要為化學界面活性劑，由於對環境生態可能造成毒害(例如陰離子界面活性劑之MBAS)，或是本身低毒害，但代謝衍生物卻是具有害(例如非離子界面活性劑之壬基酚聚乙氧基醇 NPEOS 類是低毒害，其衍生物壬基苯酚 NP 卻具有環境荷爾蒙效應)。因此，近幾年來生物界面活性劑(biosurfactant)、生物乳化劑(bioemulsifier)，因具有與化學合成界面活性劑同等之乳化作用，且低(或無)毒，可以生物降解、消化，不會在環境中殘留，對環境生態友善，故廣受重視。大部份的生物界面活性劑為糖脂質(glycolipids)，其碳氫化合物端具有長鏈的脂肪酸，另一端則為脂肽類(lipopeptides)、脂蛋白(lipoproteins)及異多醣類(heteropolysaccharides)，故具有很強的清潔除污性能，除了作為清潔劑、乳化劑外，亦可作為污染整治、漏油阻斷、促進油污回收、貯油槽清洗等用途。目前用於土壤淋洗、廢水處理，以清除土壤重金屬污染、

農藥污染等。

土壤淋洗法藉由增進地下水中污染物之移除或加速自然沖洗速率，使傳統的抽取處理法效率為佳。通常設置注入井(injection well)、導流井(directional well)、溝渠(trench)、水平井(horizontal well)、滲透道(infiltration gallery)、抽取井(extraction wells)及收集渠(collection trenches)等，使淋洗液與污染區域有較直接或顯著的接觸並收集溶離液。現地淋洗法亦可與其他技術，例如加強式生物降解法(enhanced biodegradation)結合，以達到整治目標。圖 11.1.1-1 為土壤淋洗法的示意圖，淋洗液自注入井灌注至地表下的土壤層中，經過污染區的溶離液，在另一端被抽取至地表處理，經過廢液處理後，原先在地表下的污染物被濃縮成較高濃度的污泥，然後再接續適當的處理。



資料來源：USEPA, 1996. Citizen's Guide to Cleanup Methods: Citizen's Guide to Cleanup Methods: A Citizen's Guide to In Situ Soil Flush EPA 542-F-96-006

圖 11.1.1-1 現地土壤淋洗技術示意圖

11.1.2 適用條件

評估是否適用土壤淋洗整治技術時，應考量場址特性需求、污染源、目標移除污染物類別等進行適用性的分析。以下茲針對各種適用性評估進行詳細說明。

一、場址特性需求

現地土壤淋洗法適用在有適當孔隙的土壤，使淋洗液可以通過，並將污染物移除。如果土壤質地中的粉土或黏土比例過高，淋洗液不易通過土壤與污染物接觸，這將會限制土壤淋洗法的效能。此外，如果淋洗液含有添加劑，若不能完成清除，將會成為新的地下水污染物，因此，在可行性評估時必須納入考量。以下是土壤淋洗法需要注意的議題：

- (一)場址的地下水流場必須充分瞭解，才能據以設計注入/抽水井系統。若有必要，應擴大水文地質的調查範圍。
- (二)地表下的土層組成與分布必須充分瞭解，才能掌握淋洗液與污染物的路徑，並且確保污染物擴散的範圍不會超過設計的捕捉區
- (三)現地土壤淋洗法只能針對特定污染物，若土壤中的污染物混合其他有害物質(例如同時有金屬與油品的污染)，則整治效率會不佳。如果希望利用土壤淋洗法，同時處理混雜不同污染物質的土壤，則淋洗液的選擇將會非常困難。

二、 污染源

表 11.1.2-1 彙整美國超級場址中，利用土壤淋洗法作為土壤整治的場址資料，這些污染場址的類型有掩埋場、事業廢棄物掩埋場、生產殺蟲劑工廠、回收溶劑工廠、木材防腐工廠、鍍鉻工廠及貯存爆炸性物質倉庫等，顯示土壤淋洗法的適用對象非常廣泛。

污染物移除效率視污染物種類及土壤型態而定，現地淋洗法對揮發性鹵化物、半揮發性非鹵化物及非揮發性金屬化合物之處理極為成功，並適用於中滲透性至高滲透性之土壤。

三、 污染物類別

土壤淋洗法可處理各種有機及無機污染物，有機污染物包括非水相液體(NAPL)、揮發性有機物、半揮發性有機物、多氯聯苯(PCBs)、含鹵殺蟲劑、戴奧辛及夫喃、氰化物及腐蝕性物質；無機污染物包括揮發性及非揮發性金屬、腐蝕性物質、氰化物及放射性物質。表 11.1.2-2 彙整土壤淋洗法可以處理的污染物。

表 11.1.2-1 應用土壤淋洗法進行土壤整治的美國超級場址

場址名稱	現況 ¹	工廠類型	污染物
紐澤西州 Lipari 掩埋場	運作中	掩埋場	揮發性有機物(VOCs)、半揮發性有機物(SVOCs)、重金屬(鉻、汞、鉛)
紐澤西州 Vineland 化學公司	設計中	生產殺蟲劑	重金屬
密西根州第九街垃圾場	已完成	事業廢棄物掩埋場	揮發性有機物(VOCs)、多環芳香族碳氫化合物(PAHs)
密蘇里州 Lee 化學公司	運作中	溶劑回收	揮發性有機物(VOCs)
蒙大拿州 Idaho 電桿公司	設計中	木材防腐	半揮發性有機物(SVOCs)、多環芳香族碳氫化合物(PAHs)
俄勒岡州聯合鉻製品公司	運作中	鍍鉻	重金屬
俄勒岡州 Umatilla 陸軍儲藏庫	已完成設計	爆炸性物質貯存場	爆炸性物質、火箭推進燃料

註：

- 欲進一步瞭解使用或選用創新整治技術的超級場址，可逕洽美國環保署出版資訊中心(National Center for Environmental Publications and Information, NCEPI)索取「創新整治技術年報(第七版)」(Innovative Treatment Technologies: Annual Status Report (7th Ed.), EPA 542-R-95-008)。
- 資料來源：EPA, 1996. A Citizen's Guide to In Situ Soil Flushing, EPA 542-F-96-006.

表 11.1.2-2 土壤淋洗法可以處理的污染物

污染物	事業類別
重金屬(鉛、銅、鋅)	電池回收業、金屬電鍍業
鹵化溶劑(三氯乙烷、三氯乙烷)	乾洗業、電子組裝業
芳香族碳氫化合物(苯、甲苯、甲酚、酚)	木材處理業
汽油與燃料油	石化業、汽車製造業
多氯聯苯(PCBs)與氯化酚	農藥生產業、除草劑生產業、電力業

資料來源：EPA, 1996. A Citizen's Guide to In Situ Soil Flushing, EPA 542-F-96-006.

11.2 整治系統操作與設計

有關國外土壤淋洗法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 11.2-1。

11.2.1 整治系統設計與操作要點

土壤淋洗法的系統設計可以分為四個部份，分別是場址規劃、注入、回收及成效評估，分別說明如后。

表 11.2-1 國外土壤淋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
USEPA	A Citizen's Guide to In Situ Soil Flushing, Technology Fact Sheet, EPA/542/F-96/006.	1996
USEPA	In Situ Soil Flushing, Engineering Bulletin, EPA/540/2-91/021.	1991
USEPA	Innovative Site Remediation Technology: Soil Washing/ Soil Flushing, Volume 3	1993
USEPA	Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb, Engineering Bulletin, EPA/540/S-97/500	1997
Naim Kosaric, W.L. Cairns, Neil C.C. Gray	Biosurfactants and iotechnology, Surfactant Science Series; v. 25, Marcel Dekker, Inc.	1987
Laurier Lincoln Schramm	Surfactants: fundamentals and applications in the petroleum industry, Cambridge University Press	2000
P.K. Andrew Hong, Chelsea Li, Weimin Jiang, Ting-Chien Chen, Robert W.Peters	Chelating Agents for Extraction of Heavy Metals from Soil	2007

一、場址特性

場址特性需要掌握水文地質、地質化學、導水性性，以及污染物所在與其上下的地層。一般而言，土壤淋洗法在均質、透水性佳(水力傳導係數大於 10^{-4} cm/sec)的土壤中，會有很好的整治效能。如果使用水作為淋洗劑，則必須進一步掌握毛細特性、含水量及水力傳導係數之間的關係。以碳氫污染物為例，其影響的因子有：

- (一)碳氫污染物的溶解性
- (二)在碳氫化合物、水及污染物彼此間的界面張力
- (三)污染物與水之間的相對透水係數

表 11.2.1-1 為評估場址特性與污染物特性，瞭解是否可以使用土壤淋洗法的評估表。在場址特性部分，需評估的項目包括主要污染物存在物理相、水力傳導係數、土壤表面張力、碳含量及岩層破碎度；在污染物特性部分，需評估的項目包括溶解度、土壤吸附係數、蒸氣壓、液體黏滯度及液體密度。此外，可考慮使用界面活性劑增加整治成效。

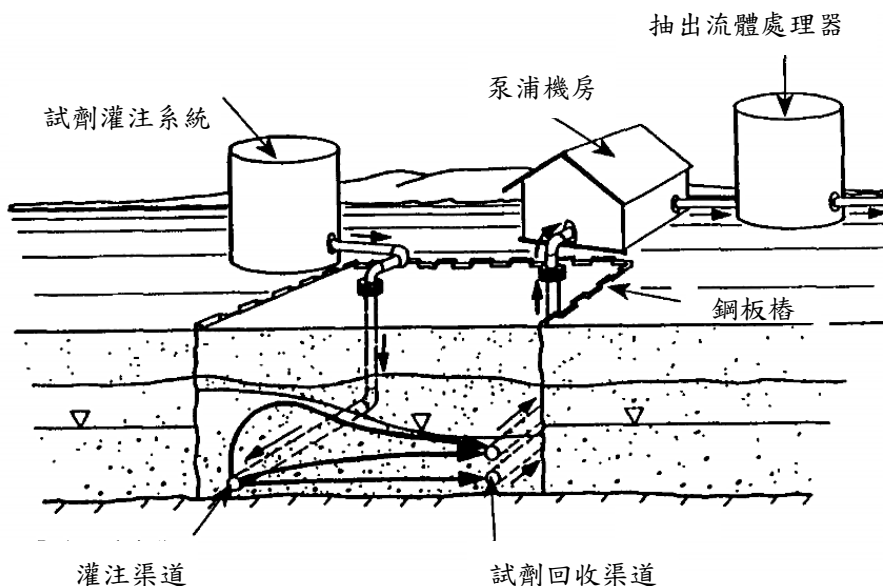
表 11.2.1-1 土壤淋洗法場址特性評估一覽表

關鍵因子	單位	可能無法達成整治	可能可以達成整治	較易完成整治
場址特性				
主要污染物存在物理相	相	氣相	液相(例如 NAPL)	溶解相
水力傳導係數	cm/sec	低($< 10^{-5}$)	中($10^{-5} \sim 10^{-3}$)	高($> 10^{-3}$)
土壤表面張力	m ² /kg	高(> 1)	中(0.1~1)	低(< 0.1)
破含量	% (重量)	高($> 10\%$)	中(1~10%)	低($< 1\%$)
岩層破碎度	無因次	有	不顯著	無
污染物特性				
溶解度	mg/L	低(< 100)	中(100~1,000)	高($> 1,000$)
土壤吸附係數	L/kg	高($> 10,000$)	中(100~10,000)	低(< 100)
蒸氣壓	mm Hg	高(> 100)	中(10~100)	低(< 10)
液體黏滯度	cPoise	高(> 20)	中(2~20)	低(< 2)
液體密度	g/cm ³	低(< 1)	中(1~2)	高(> 2)

資料來源：EPA, 1993. Innovative Site Remediation Technology: Soil Washing/Soil Flushing, Vol. 3, EPA 542-B-93-012.

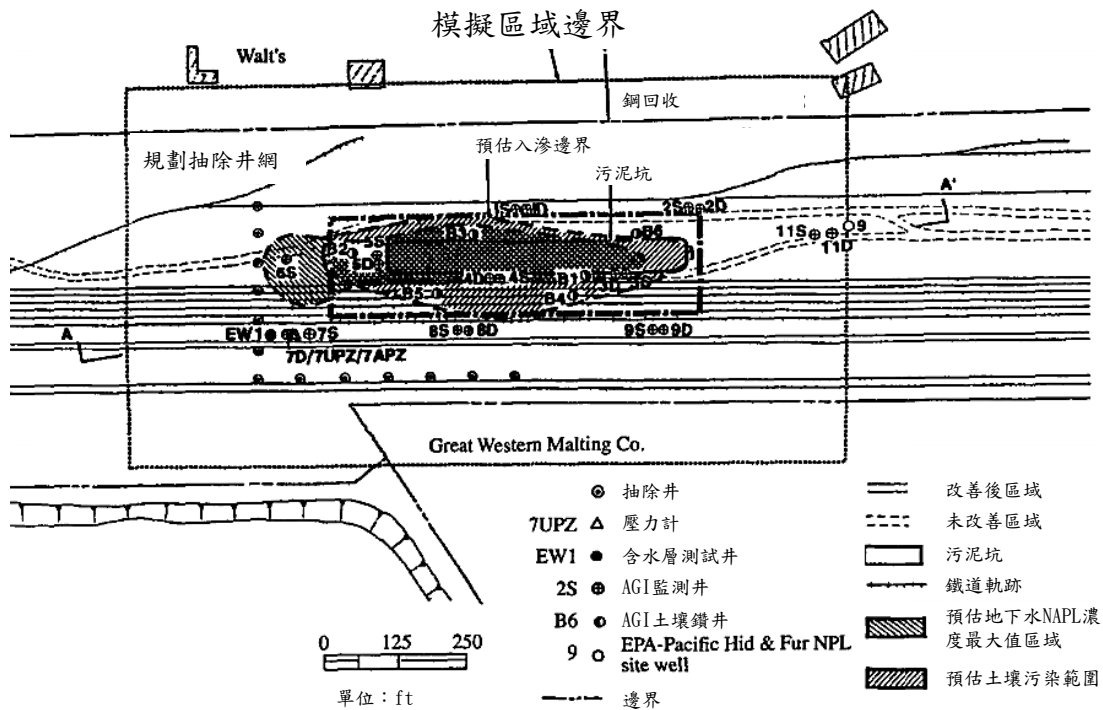
二、 注入

現地淋洗法必須使淋洗劑與污染物接觸，常用的方法有地表淹漫 (surface water flooding)、地面噴灑 (surface sprinklers)、滲水池 (leach fields)、廢液池 (septic systems)、垂直與水平注入井 (vertical and horizontal well) 或溝渠入滲系統 (trench infiltration system)。圖 11.2.1-1 與圖 11.2.1-2 分別是垂直灌注井與溝渠入滲系統的注入示意圖。



資料來源：EPA, 1993. Innovative Site Remediation Technology: Soil Washing/Soil Flushing, Vol 3, EPA 542-B93-012

圖 11.2.1-1 土壤淋洗法-垂直灌注井剖面示意圖



備註：整治系統位置與影響範圍，因含水層之地下水污染特型與模擬結果而異

圖 11.2.1-2 土壤淋洗法-溝渠入滲系統平面配置示意圖

三、 回收

依照是否加入添加劑，土壤淋洗法分為兩類，第一類是僅使用水作為淋洗劑的傳統土壤淋洗技術，第二類是添加了化學物質或生物製劑的非傳統土壤淋洗技術。傳統土壤淋洗技術需要以下的程序：

- (一) 自然復育
- (二) 通氣層抽水井捕捉方法(well-and capyure method)
- (三) 飽和層抽水處理系統(pump-and-treat system)

地面上的處理系統是傳統的廢水處理系統，與抽水處理系統相似，其規模的大小與回收系統的處理量、抽水率有關。處理系統的功能是移除並回收(例如污泥)污染物，並且提供符合回灌至地下水的水質。

針對有機污染物的處理系統，通常包括氣提、活性炭吸附及生物處理等設備。針對無機污染物的處理系統，通常包括沉澱系統、電化學交換、離子交換及超微過濾系統。有些場址會同時出現有機與無機污染物，由於淋洗劑很難同時兼顧兩種或兩種以上的污染物質，因此

可以考慮採用整治列車(treatment trains)的概念，將污染物依序處理。此外，所有的廢水處理都會遇到相同的問題，那就是處理程序最後產出的污泥體積與濃度。

對於非傳統的土壤淋洗技術，主要的處理程序有：

1. 主要回收
2. 二次回收
3. 三次回收

主要回收可以使用自然的能源，包括自然水力、重力排水、溶解氣趨動(solution gas drive)及氣頂趨動(gas cap drive)；二次回收包括注水與壓力維持技術；三次回收則是利用注入現地沒有的物質來移除污染物，例如注入二氧化碳的強化石油回抽技術，惟這個方法因為壓力很大，僅適用於深地層，較少應用在處理環境問題上。

四、 成效評估

土壤淋洗法的成效評估，需要使用現地的監測，瞭解土壤水的流通量、毛細管壓力的變化及含水量。毛細管壓力的變化可以利用壓力感應傳送器(transducerized transmitters)量測；含水量的變化可以利用中子測定儀或頻域反射儀量測。至於污染物的濃度變化，可以利用現地土壤氣體探測儀、移動式氣相層析儀、離子探測儀、放射性探測儀等篩試工具量測。

11.2.2 整治系統單元

土壤淋洗整治主要包含注入井與回收污染物的設備，詳細整治系統設計要點請參考 11.2.1 節。

11.2.3 整治系統監測

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

土壤淋洗法一般於場址內將化學藥劑注入或使其滲透至受污染的土壤及地下水中，經過污染區的溶離液，在另一端被抽取至地表處理，經過廢液處理後，原先在地表下的污染物被濃縮成較高濃度的污泥，然後再適當的處理，避免廢液及污染濃度高的污泥對環境造成二次污

染。

一般而言，廢液收集後續處理排放至自然界，環保主管機關仍須針對場址地下水進行監測，以確保污染有處理完善並符合法規標準。

二、成效監測及監測設備

成效監測及監測設備詳細內容，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 11.2.3-1。

表 11.2.3-1 土壤淋洗法整治系統成效監測表

項目	回收溶離液收集設備	廢水處理系統	經處理土壤及衍生高濃度污泥
監測目的	<ul style="list-style-type: none"> 收集設備成效評估 避免對環境造成影響 	<ul style="list-style-type: none"> 處理設備成效評估 避免對環境造成影響 	整治成果評估
監測對象	回收溶離液	放流（或回流）廢水	處理完成土壤及高濃度污泥
分析項目	溶離液成份、pH 值	廢水流量、pH 值、污染物項目	污染物項目（總量或 TCLP）
監測頻率	每週 1 次	<ul style="list-style-type: none"> 排放水之檢測：每日 功能性檢測：每月一次 	每批次或每噸 1 次

11.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

本法於污染土壤直接淋洗過程中，可能對底層未受污染土壤及地下水造成影響；其淋洗受重金屬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，另外經淋洗劑處理濃縮的高濃度污泥如隨意丟棄，未經回收再處理降低污染程度，將會對環境造成二次污染。

二、潛在之危害

土壤淋洗法潛在可能之風險，約略分成兩類，分別是物理性及化學性風險，詳細內容如表 11.2.4-1。

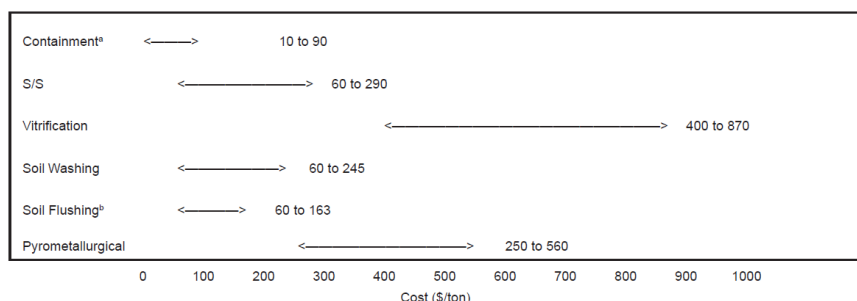
表 11.2.4-1 土壤淋洗法潛在之危險

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	設置注入井過程	機具設備危害	妥善操作大型設井機具 人員於操作機具附近，應戴聽力防護設備
化學性風險	淋洗劑注入及反應單元中，工作人員可能會曝露於洩散或揮發的淋洗化學藥劑之環境中	淋洗化學藥劑 淋洗劑與污染物不相容時	於注入井加入淋洗劑使用適當的安全防護裝備
	廢水處理時	衍生廢棄物與污泥等	使用適當的個人防護裝備

11.3 成本及期程評估

土壤淋洗法是現地處理技術，它不需要挖掘土壤，亦不需要清運至其它地區處理。因此，土壤淋洗法減少開挖、處理(或運輸)有害物質的作業與經費。

圖 11.3-1 為土壤淋洗法與其他重金屬整治技術(包括圍堵處理法、固化/安定化法、玻璃化法、土壤水洗法、高溫礦冶分離法等)的估算成本，顯示土壤淋洗法處理每立方英尺污染土壤的成本是美金 60 至 163 元(約新台幣 2,100- 5,705)，略高於圍堵處理法(美金 10 至 90 元，約新台幣 350-3,150)。不過，圖 11.3-1 估算的成本通常不包括污染土壤的前處理、場址的整地、遵循法規的成本、整治後的二次或殘渣處理(例如灰渣安定化或金屬濃縮液的處理)、利潤等，實際執行整治的成本會與此估算值有差異，因此僅可參考該估算成本的數量級(order-of-magnitude)，例如土壤淋洗法的處理成本是美金 100 元(約新台幣 3,500)。



a. 包括地表覆蓋與泥漿牆(以 20 英尺深度估算)

b. 費用是以每立方碼的土壤為計價單位，土壤體密度假設為 100 lb/ft³

參考來源：EPA, 1997. Engineering Bulletin: Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb.

圖 11.3-1 重金屬整治技術之成本與比較

土壤及地下水重金屬污染
整治作業參考指引
(附件二)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-06B-2015-003

附件二目錄

	<u>頁碼</u>
一、 高溫礦冶分離法(Pyrometallurgical Separation).....	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.....	附件二-1
1.2 整治系統操作與設計.....	附件二-2
1.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件二-2
1.2.2 整治系統單元.....	附件二-3
1.2.3 整治系統監測.....	附件二-3
1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-3
1.3 成本及期程評估.....	附件二-4
二、 固化/安定化法(Solidification/ Stabilization).....	附件二-5
2.1 整治技術簡介.....	附件二-5
2.1.1 原理.....	附件二-5
2.1.2 適用條件.....	附件二-12
2.2 整治系統操作與設計.....	附件二-14
2.2.1 整治系統設計與操作要點.....	附件二-14
2.2.2 整治系統單元.....	附件二-15
2.2.3 整治系統監測.....	附件二-17
2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-18
2.3 成本及期程評估.....	附件二-19
三、 開挖及離場處理法(Excavation and off-site disposal).....	附件二-21
3.1 整治技術簡介.....	附件二-21
3.1.1 原理.....	附件二-21
3.1.2 適用條件.....	附件二-21
3.2 整治系統操作與設計.....	附件二-22

3.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件二-23
3.2.2	整治系統單元.....	附件二-24
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.....	附件二-26
3.3	成本及期程評估.....	附件二-26
四、	土壤清洗法(Soil Washing).....	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.....	附件二-29
4.2	整治系統操作與設計.....	附件二-31
4.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件二-31
4.2.2	整治系統單元.....	附件二-33
4.2.3	整治系統監測.....	附件二-33
4.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-34
4.3	成本及期程評估.....	附件二-35

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.2.2-1	離地固化/穩定化處理流程示意圖..... 附件二-16
圖 2.2.2-2	現地安帝化及安定/固化處理技術..... 附件二-17
圖 3.2-1	日本污染土壤管理票交付流程..... 附件二-22
圖 4.1.1-1	現地土壤清洗技術示意圖..... 附件二-30
圖 4.2.1-1	美國環保署建議之土壤清洗技術操作流程圖..... 附件二-32

表目錄

		<u>頁碼</u>
表 1.2.3-1	高溫礦冶分離污染監測項目設備.....	附件二-3
表 1.2.4-1	高溫礦冶分離法潛在之危險.....	附件二-4
表 2.1.1-1	水相固化/安定化處理方式彙整表.....	附件二-6
表 2.1.2-1	離地固化作用可能影響因素.....	附件二-13
表 2.2.1-1	國外固化整治法相關法規指引及規範.....	附件二-15
表 2.2.4-1	離地固化法潛在之危害.....	附件二-18
表 3.1.2-1	開挖法技術優缺點比較表.....	附件二-22
表 3.2-2	國外開挖與圍堵法相關法規指引及規範.....	附件二-23
表 3.2.3-1	挖作業期間場址周圍環境監測.....	附件二-25
表 3.2.4-1	開挖作業之潛在危害.....	附件二-27
表 4.1.1-1	土壤清洗法與土壤淋洗法比較表.....	附件二-29
表 4.2.1-1	土壤清洗設備規格一覽表.....	附件二-33
表 4.2.3-1	土壤清洗法整治系統成效監測表.....	附件二-34
表 4.2.4-1	土壤清洗法潛在之危險.....	附件二-35

一、高溫礦冶分離法 (Pyrometallurgical Separation)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

高溫礦冶分離法(pyrometallurgical separation)係利用溫度提升來達到重金屬萃取及再利用目的，而此高溫技術增加反應速率，因而降低最終產物體積。高溫分離法通常分為兩大程序，第一程序主要包括烘乾、蒸餾、熔鍊等三大步驟，此程序通常會產生重金屬熔渣，因而可以進行重金屬回收再利用；第二種程序主要是包括高溫萃取及固定化技術，此程序將使揮發性金屬與土壤分離而轉化到飛灰的部分，而在飛灰部分的重金屬將予以固定化而取代回收再利用，因此在此技術中，重金屬無法回收再使用。

1.1.2 適用條件

- 一、 高溫分離法通常很少單獨使用，多與土壤清洗法一起使用，達到濃縮土壤中污染物的目的。
- 二、 適用高溫分離法污染土壤之濃度（例如鉛、鎘、鉻），通常要高達5-20%。
- 三、 適用於污染濃度低，但容易得以還原或揮發之重金屬污染土壤整治，如汞。
- 四、 適用於回收極具有經濟效益的金屬污染土壤，如黃金及白金。

至1997年止，在美國有35個工廠用高溫分離法處理重金屬污染土壤，其中7個處理廠回收汞，另外16個處理廠進行鉛的回收，至於其他處理廠是進行其他重金屬的回收。適合處理的廢棄物種類，包括：

- 一、 含鎘電池
- 二、 含汞廢棄物

- 三、 三酸電池
- 四、 含汞廢水及底泥的處理
- 五、 含鉛廢液
- 六、 含鋅廢液
- 七、 含汞廢液

1.2 整治系統操作與設計

1.2.1 整治系統設計與操作要點

以高溫爐進行污染土壤處理，通常需要很有效的熱傳效應，以使得在排放廢氣中，減少粒狀污染物的排放。為達到此目的，土壤顆粒的均勻化即變成影響高溫礦冶分離技術一個重要的因素。當處理土壤中含有大量的土塊及礫石，將會降低土壤熱傳的效應，為求使顆粒均勻化，進行顆粒粒徑分離或將大顆粒的土壤變成小顆粒球狀的前處理步驟是必要的。惟小顆粒的土壤其實不利於高溫分離程序之進行，因為這將增加排放粒狀污染物的含量。因此，進流的土壤介質有時需要進行球狀處理的設施，以及達到顆粒均勻化的目的。因此，在進行高溫處理時，通常會加入還原劑，及提供足夠的空氣流量，使得土壤的顆粒能與處理的藥劑及污染物質達到充分接觸的程序，改善在反應器及氣體流況的情形。

由於汞的沸點只有 357 °C，遠低於砷、鎘、鉛、鉻等四種重金屬。汞只要經過烘乾、蒸餾的程序，就可以得到高溫分離的效果，然而，目前備受爭議的中石化安順廠之汞及戴奧辛污染，由於國內外尚無同時處理汞及戴奧辛混合污染的案例，該場址的整治技術仍在多方研議中；而對於砷、鎘、鉛、鉻等四種重金屬，由於其沸點較高，因此要達到良好高溫分離技術的效果，通常要加入還原劑、助熔劑以增加熔化的效率，及得到良好熱能的來源。高溫爐的溫度通常低於待處理金屬的沸點，這是由於有助熔劑(例如鈣)，因此才可以在未達到沸點的情形下得以熔解，例如鎘、鉛等金屬將會在尾氣予以收集；而鉻與鎳等金屬則將以溶解性金屬的型態在高溫爐後加以收集。至於雜質部分，將以爐渣形式予以收集後再進行後續的處

理。因此，高溫礦冶分離法排放物之型態通常可分為固體、液體及氣態等三種形式。

1.2.2 整治系統單元

由於高溫分離設備係屬於非移動性設備，因此高溫分離法是離地(Ex-situ)土壤整治技術，因此，污染場址與處理廠之距離，便成為決定處理成本的重要因素；由於處理設備之限制，其對於污染土壤的處理量必須有合理處理時間，因此處理廠的儲存容積及處理設施的需求需加以考量；另高溫處理法後續所排出的污染物，必須要有空氣污染防制設備加以處理。

1.2.3 整治系統監測

使用本高溫礦冶分離法改善，可能於整治過程中產生含重金屬的廢氣，應該妥善收集處理。因此，尾氣處理系統應定期檢測與進行監測，表 1.2.3-1 所列为高溫礦冶分離法較常使用共通之項目為重點；監測對象包括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之監測工作等。

表 1.2.3-1 高溫礦冶分離污染監測項目設備

項目	高溫分離設備	尾氣處理系統
監測目的	系統整治設備成效評估	尾氣處理設備評估
監測對象	高溫分離設備	排放口
監測項目	溫度、壓力	重金屬濃度
監測頻率	<ul style="list-style-type: none"> • 第一個月每日至少 1 次。 • 正式運轉期間，每週至少量測 1 次。 • 視實際運作情形調整監測頻率。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 視實際運作情形調整監測頻率。

1.2.4 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，主要在高溫分離設備釋放出來廢氣會對環境中的空氣造成影響，應必須要有空氣污染防制設備加以處理，避免二次污染產生。此外，本法高溫分離後產生的雜質部分，將以爐渣形

式予以收集後再進行妥善的後續處理，避免產生有害廢棄物再次污染土壤及地下水體。

二、潛在之危害

高溫礦冶分離法潛在可能之風險，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、觸電三大類。化學性風險大致上分為衍生廢棄物與粉塵之暴露二大類。詳細內容如表 1.2.4-1。

表 1.2.4-1 高溫礦冶分離法潛在之危險

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	操作高溫分離設備時	機具設備危害	妥善操作設備。 建立夥伴制度(buddy system)。
	高溫分離設備可能因設備裝置不當，可能引燃火災或爆炸。	火災與爆炸	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 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。	觸電	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	尾氣處理系統廢氣及爐渣	衍生廢棄物	用適當的個人防護裝備。
	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。	粉塵之暴露	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。

1.3 成本及期程評估

目前國內尚無相關成本及期程評估成果。

二、固化/安定化法(Solidification/Stabilization)

2.1 整治技術簡介

2.1.1 原理

固化法(solidification)係以包覆壓縮有害之污染物，使污染物之毒性溶出及流動性降至最低，並將其匣限於固化體中，此過程亦稱匣限化(encapsulation)，其中固化劑與污染物間通常不發生反應，而僅是機械性的拌合作用。安定化法(stabilization)是指利用化學劑與有害之污染物混合或反應，將污染物之毒性、溶解性及流動性降至最低，使污染物有害成分安定或降低其危害性之處理方法，主要有吸附、離子交換及沉澱等。

一般常見多使用固化法搭配安定化法進行相關整治作業，固化/安定化技術(solidification/stabilization, S/S)乃是經由減少污染物與外界接觸之表面積或降低有害之污染土壤、污泥或廢棄物滲透性及溶出性的處理方式，此技術已被廣泛應用並證實能夠有效地降低多種污染物之移動性，可處理之污染物質包括重金屬、特定放射性廢料、部分有機污染物等物質。固化/安定化污染土壤大致可區分為離地固化處理與現地固化處理，前者是經由挖掘設備移除污染土壤後，依一般固化程序處理；後者則不經挖掘程序，直接於現地進行安定化。

離地土壤固化/安定化處理技術，在國內已有多項整治實績，此技術並廣泛運用於我國有害事業廢棄物處理。惟我國對於土壤固化物並未定有相關處理標準或規範，目前國內實際運作方式多比照事業廢棄物處理方式辦理，並將固化後之固化物，進入事業廢棄物掩埋場進行分區掩埋。

以下針對水相固化/安定化，及聚合物安定/固定化，兩種方式的原理進行說明。

一、水相固化/安定化 (aqueous solidification/stabilization)

早期固化/安定化處理技術是指水相中之安定化及固化，因為化學

反應只在水相中發生，然而普遍在文獻中只稱作安定化及固化。此項技術漸漸的被區分為單獨安定化處理及膠結安定/固化合併處理，個別處理方式與可用化學物質彙整如表 2.1.1-1。安定化程序中需加入化學藥劑使污染物產生強大的物化力量，將污染物轉變成較不具水溶性、不溶出、不具移動性及轉變成無毒性之結構體，因此，於固化/安定化合併處理過程所添加之膠結黏接劑或固化劑通常也提供安定化所需之藥劑。

表 2.1.1-1 水相固化/安定化處理方式彙整表

分類	種類一：安定化處理	種類二：膠結安定/固化合併處理
原理概述	將金屬及無機污染物安定化後，降低其有機物之移動性。	藉由無機固化劑的特性與廢棄物反應，形成一物化性質安定的擬似礦物(pseudo-mineral)固體結構。
可用工法/材料	<ul style="list-style-type: none"> • 金屬及無機污染物安定化 <ul style="list-style-type: none"> ✓ ProFix™ ✓ 可溶性磷酸鹽 • 降低有機物移動性 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 橡膠顆粒 ✓ 有機黏土 	<ul style="list-style-type: none"> • 以波特蘭水泥為基礎(主要組成為水泥)* • 波特蘭水泥/石灰 • 波特蘭水泥/黏土 • 波特蘭水泥/飛灰* • 波特蘭水泥/可溶性矽酸鹽* • 石灰/飛灰* • 水泥或石灰、水泥窯灰* • 爐灰

註：*表示現今應用上較常見方式

(一) 安定化

1. 金屬及無機污染物安定化

為達到金屬及無機污染物安定化，可使用 ProFix™ 法及可溶性磷酸鹽安定法(soluble phosphates)，個別說明如下：

(1) ProFix™ (EnvironGuard, Inc., Houston, Texas, USA)

即以稻穀灰(rice hull ash)為主要原料之商業化產品，其成分為非定型(amorphous)、生物性矽土(biogenetic silica)。稻穀灰具有吸附功能並可與鹼反應，當存在於鹼性環境下會產生溶解性矽酸鹽，其與有毒之金屬離子作用後形成低溶解度之金屬矽化物，可增加金屬之安定性，避免有毒金屬之移動。

(2) 可溶性磷酸鹽安定

此法是利用加入含有磷酸鹽之藥劑，使其與污染土壤中之重金屬形成金屬複合物，此磷酸鹽金屬複合物通常於

一般 pH 環境中具有低溶解性，因此而降低重金屬之移動性，然而對某些特定金屬之複合(例如鎘)則需高 pH 之環境，此時強鹼可一併加入以控制 pH，由於磷酸鹽複合金屬並不形成一固體物，而為膠體顆粒狀，因此磷酸鹽之使用可同時加入固化劑以加強處理後之固化物理性質。法

2. 降低有機污染物移動性

早期針對於土壤或污泥中低濃度之有機污染物常添加活性碳配合安定/固化程序，降低其移動性，以達到 TCLP 溶出試驗之規定。然而，依據較新之 TCA (total constituent analysis)測試方法，此類添加物質(如活性碳)並不能有效降低污染物之移動性。因此，陸續有多項新穎之有機污染物安定程序及藥劑被研發並應用，其中包含：

(1) 橡膠顆粒(rubber particulate)

商業化產品主要由磨細的橡膠材質顆粒特製而成，此材質對於處理半揮發和非揮發性有機物非常有效，例如：殺蟲劑、除草劑和多氯聯苯，此外，也可用於處理某些特定揮發性有機物及有機金屬化合物。經由 TCA 檢測方法測試發現：KAX-100TM 橡膠顆粒可有效應用於約 60 多種有害性有機物之安定化。

(2) 有機黏土(organo-clays)

有機黏土是由 4 個鋁離子取代黏土礦物中的 I A 和 II A 族金屬離子，黏土礦物是低成本天然礦物，為層狀的矽鋁氧化合物結構，而有機黏土是利用有機陽離子取代黏土礦物中的 IA 與 IIA 族金屬離子，進而增加內層空間，使原本具親水性的黏土轉變為疏水性，可有效的吸附非離子型有機污染物。此方法至今仍不斷革新，許多國外代處理公司(例如：Silicate Technology Corporation (STC)，International Waste Technologies (IWT)、Hazcon 及 Soliditech 等公司)皆可提供完整的現場實際有機黏土處理技術。

(二)膠結安定/固化處理(cementitious S/S)

膠結安定/固化處理藉由無機固化劑的特性與廢棄物反應，形成一物化性質安定的擬似礦物(pseudo-mineral)固體結構，使固體物之質地與土壤及岩石類似。大部分商業化的膠結安定/固化處理皆利用類似波特蘭水泥(Portland cement)予以固化之方式，波特蘭水泥是以石灰石和黏土或其他矽酸鹽混合物於高溫燃燒形成為水泥熟料(cement clinker)，而後將其研磨成粉狀製成；而以卜作蘭反應(Pozzolanic reaction)為基礎之固化方式則是添加如飛灰或水泥窯灰(kiln dusts)等物質，其中含有較多二氧化矽及氧化鋁，而些微有別於波特蘭水泥固化。而在這些化學反應中，水為不可缺少的角色，其可提供化學反應中水合反應所需之水量。以下列舉幾項傳統商業上常見的固化程序，加註星號部分為現今應用上較常見方式：

1. 以波特蘭水泥為基礎(主要組成為水泥)*
2. 波特蘭水泥/石灰
3. 波特蘭水泥/黏土
4. 波特蘭水泥/飛灰*
5. 波特蘭水泥/可溶性矽酸鹽*
6. 石灰/飛灰*
7. 水泥或石灰、水泥窯灰*
8. 爐灰

以下列舉 3 項膠結固化/安定化程序之化學反應及使用案例：

1. ProFix™

當進行硬化之化學反應時，需要以物理吸附方式除去低固體含量廢棄物中多餘的水分。

廢棄物中微溶性的金屬化合物可能會隨時間而逐漸地溶解於水中，ProFix™ 的存在會持續產生可溶性矽酸鹽，因此當金屬自廢棄物中溶出時，即可生成金屬矽酸鹽物種產生固化沉澱。

ProFix™ 因具有高吸附量、多孔性結構及巨大表面積，因此也能用於固定有機物。其中部分灰渣由於含有高達5%的含碳量，

因此其具有類似活性碳的吸附功能。

2. Chemfix

美國 Chemfix 公司之方法為將溶解性矽酸鹽類及矽酸鹽沉降劑(silicate setting agent)，如水泥、石灰、石膏等，在控制狀態下與廢棄物產生反應，而生成高安定性易成粉末之結構。國內有固化廠有此技術之應用實例。

3. 水淬爐渣(cement-slag)

爐渣常合併使用於多種安定化程序中，或和其他試劑共同使用。當煉鐵高爐中所產生之爐渣，於高溫時經噴水快速冷卻形成水淬爐渣，其中含矽、鈣、鋁等具有活性之玻璃質成分，經搗碎成細粉後可取代部分水泥作為混凝土的膠結材料，水淬爐渣可藉水泥水化後產生之氫氧化鈣進行波特蘭反應，生成具有膠結性之矽鈣膠體。另外，因為爐渣中含有亞鐵離子及還原態含硫化合物，使其可做為金屬的還原劑，某些在還原狀態較不具移動性的金屬則可利用此一特性得以還原並達到安定固化，例如：將六價鉻還原成三價鉻予以沉澱並降低毒性。然而經緩慢冷卻而形成結晶的高爐爐渣(常溫下自然冷卻的爐渣)，則無法產生膠結凝固。

二、 聚合物安定/固定化(polymer stabilization/solidification)

聚合物安定/固定化能以液態聚合物在相對較低之溫度下，將廢棄物包覆或與其結合，經過冷卻、凝固之後，形成固體狀產物。雖然聚合物主要用於固化程序，然而聚合物與其他安定劑混合後之應用，仍可歸納為安定/固定化技術。聚合物安定/固定化不論在離地或現地皆可進行。聚合物依其使用目的可分為 2 種：

(一) 熱塑性固化劑(thermoplastic binder)

熱塑性固化劑具有直鏈狀分子結構，經加熱後形成熔融狀態之流體，而冷卻後會固化硬化。聚乙烯(polyethylene)、硫化聚合物(sulfur polymer)、瀝青(bitumen)皆屬熱塑性固化劑。當熱塑性固化技術用於微匣限時，須將熔融之固化劑與廢棄物混合，使較小之廢棄物顆粒散佈於熔融之聚合物中，經冷卻形成堅硬的固體。若應用於巨匣限時，則需將廢棄物置於承裝廢棄物之容器中，

再將熔融之熱塑性固化劑倒入，待聚合物冷卻後，即可形成一層聚合物固體物包覆於廢棄物質外圍。

(二)熱固性固化劑(thermosetting binder)

熱固性固化劑為多種液態物質成分的結合，例如：聚合物單體(monomer)、催化劑(catalyst)、促進劑(promoter)，始能進行聚合反應，並硬化形成固體。熱固性固化劑無法具有可流動狀態，於固化硬化過程中，該物質原有的特性將會改變。常用於廢棄物固化處理的熱固性固化樹脂有乙烯酯苯乙烯(vinyl ester-styrene)、聚酯苯乙烯(polyester-styrene)及環氧樹脂(epoxy)，不僅可應用於微匣限或巨匣限中，也能夠用於現地安定/固定化處理。此項熱固性固化聚合程序於商業化的應用已超過 20 年以上。

1. 聚乙烯(polyethylene)

聚乙烯是一種結晶過程緩慢、熔融溫度相對較低的熱塑性物質，由乙烯氣體聚合生成，可藉由改變結構產生不同性質的產物。例如高密度聚乙烯(high-density polyethylene，下稱 HDPE)是由較少分支的長鏈聚合物組成，如此可使聚合物各層之間緊密結合。典型的 HDPE 密度介於 0.94~0.96 g/cm³ 之間。而低密度聚乙烯(low-density polyethylene，下稱 LDPE)則由高度分支的長鏈聚合而成，每 1,000 個碳原子當中約有 10~20 個支鏈，如此可使各層各自分散，形成較鬆散的結構。典型 LDPE 密度介於 0.91~0.93 g/cm³ 之間，相較於高密度聚乙烯，LDPE 具有較低的熔點(LDPE 熔點：120°C，HDPE 熔點：180°C)和較低的熔融後之黏滯度，因此 LDPE 較容易應用於廢棄物的匣限作用處理。聚乙烯可抵抗多種化學物質和溶劑、冷熱溫度變化、微生物分解。

2. 硫聚合水泥(sulfur polymer cement，SPC)

硫聚合水泥，又稱硫聚合物(sulfur polymer)，由美國 Bureau of Mines 公司(USBM)為處理石油提煉過程所產生的硫化物及含二氧化硫(SO₂)排放氣體處理後之產物，所研發之專利產品，其商業名稱為 Cement 2000，此產品即將 5%(重量比)的二環戊二烯(dicyclopentadiene)與硫元素結合製造而成，二環戊二烯主要是用

以抑制固相間之不安定性。硫聚合水泥為一熱塑性材質，而非水硬化水泥，具有相對較低之熔點， 120°C ，和較低之熔融黏滯度，25 厘泊(cP)，因此容易在加熱攪拌混合器中操作。相較於水硬化之波特蘭水泥，硫聚合水泥有幾項優點，例如：其壓縮力及張力為波特蘭水泥的 2 倍，且可在數小時內達到最大的結合強度，不需數週的反應時間。添加硫聚合水泥所製成的混凝土可抵抗大部分的酸性和鹽類物質的侵蝕，一般所知會破壞水硬性水泥結構的硫酸鹽，其對硫聚合水泥產物的影響相當小，甚至無任何影響。經測試暴露於 108 里達(rad)之 γ 射線照射後的硫聚合水泥，在結構體物理特性上並無明顯改變。

3. 熱固性聚合物(thermosetting polymers)

熱固性聚合物是由未飽和的單體(例如：methacrylates)經過一連串的聚合反應所生成。聚合反應的起始作用階段通常是經由化學催化劑或由促進劑來推動反應進行。連接 2 個氧原子之間的化學鍵一旦斷裂，將會產生含有不成對電子、高活性的自由基，自由基打斷單體中的雙鍵，而開始進行鍵結，此階段即為單體持續加入主鍵的反應，當單體耗盡或長鏈兩端相結合時，反應即停止。溫度、催化劑與促進劑的結合及其濃度，及其他添加物的存在(例如廢棄物)皆會影響反應速率。凝膠時間(gel time)為樹脂黏滯度快速增加直到無法流動時所需的時間，會因製造廠商或催化劑、促進劑種類不同而有差異。

熱固性聚合樹脂在許多離地與現地之應用皆證實具有極高的耐久性，因黏滯性低(3~300 cp)，使其應用於現地時容易注入土壤層中；而當樹脂和廢棄物粒料結合成聚合水泥時，將可產生極佳的抗壓強度(可承受 48.3 MPa 以上的壓力，但須視其土壤粒料型態而定)。在污染場址經現地處理所形成的聚合水泥能有效抵抗具破壞性物質(例如酸或鹼)、溫度及濕度之變化、微生物降解，及 108 rad 之輻射，並且具有小於 2×10^{-11} cm/sec 的水力傳導係數及低溶出性。熱固性聚合物之使用與熱塑性聚合物不同的是，當熱固性聚合物一旦聚合，便無法予以改變。

聚合物安定/固化程序主要的優點之一為能夠廣泛應用於不

同類型的廢棄物。任何安定/固化的應用及選擇必需考慮許多因素，例如：廢棄物特性、廢棄物體積、處理及後續處置成本，及法規管制要求等。對於聚合物匣限技術，某些特定因素會影響聚合物種類之選擇(例如：有機或無機，熱塑性或熱固性)，及處理方式的選擇(例如：微匣限或巨匣限，現地或離地)，其中更包含廢棄物本身之物化特性、處理後產物之最終處置、處置場址貯存廢棄物之標準、最終產物的安定性、資金和操作成本、原料來源、處理程序難易度及可靠性。

2.1.2 適用條件

影響此法的適用性包括：土壤的特性、土壤顆粒的大小、含水量、重金屬的濃度、硫酸鹽的含量、有機物的含量、密度、滲透性、自由壓縮力。

一般而言，固化/安定化方式較適用於處理難揮發性重金屬(例如銅與鉻)。普遍應用於固化/安定化處理之藥劑或物質有波特蘭水泥(Portland cement)、生石灰(quicklime)或石灰石(limestone)、飛灰(fly ash)、有機黏接劑(organic binders)(例如柏油)、上述物質之混合物等物質。有害污染物與固化/安定化藥劑之混合可應用於離地整治，即以批次或連續式操作之方式，或應用於現地整治污染土壤，以連續式注入操作方式進行。有害污染顆粒物質直接與添加藥劑進行包匣作用，稱為內匣限或微匣限(micro-encapsulation)；若有害污染物顆粒或已經微匣限處理之物質由整體外圍包裹密封之方式聚集污染物，則稱為外匣限或巨匣限(macro-encapsulation)。

固化/安定化法利用化學藥劑與污染物結合可達到以下目的：

- 一、 藉由形成固體物改變廢棄物之物理性質
- 二、 降低污染物溶解度
- 三、 降低廢棄物接觸表面積
- 四、 降低廢棄物透水性以減少與水體接觸的機會

離地固化/安定化處理之使用缺點或限制包含：

- 一、 環境的條件會影響長期固定之污染物質。
- 二、 固化/安定化的過程會增加最終產物的體積。
- 三、 有些污染物質在固化/安定化的過程中會呈現不安定的狀態，故使用此法時必須加以選擇。
- 四、 時間的長短對固化/安定化產物的影響是無法證明的，所以必須對固化/安定化的產物加以長時間的觀測。

針對固化技術應用於一特定污染土壤之處理，必須經由初步之可行性試驗(treatability test)方可得知此整治方式之預期處理成效及其實際應用之可行性。而處理方式及程序之取決依各污染場址之特特地質土壤特性而定；固化技術之選用、設計、處理成效及其處理之最終產物，則需考慮包含污染物之物化特性、處理程序所需之設施、最終產物之管理、相關法規規定、經濟效益等。而實際進行固化作用時常見之可能影響因素如表 2.1.2-1。

表 2.1.2-1 離地固化作用可能影響因素

影響因素	可能的影響
金屬(鉛、鉻、鎘、砷、汞)	如果金屬濃度過高，將延長硬化所需時間。
硝酸鹽、氰化物	將延長硬化時間，降低以水泥為基礎之安定化產物的耐久性。
鎂、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	使無機物質之最終固化產物膨脹或破裂，使結構體曝露更多表面積，增加金屬溶出可能性。
降低整體 pH 值之環境及廢棄物特性	導致最終結構物退化。
凝結劑(例：氯化鐵)	影響水泥及波特蘭水泥固化物之硬化。
土壤中超過 0.01% 或水中超過 150 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將破壞水泥固化產物。
土壤中超過 0.5% 或水中超過 2,000 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將嚴重地破壞水泥固化產物。
脂肪族及芳香族碳氫化合物	延長水泥所需硬化時間。
含氯有機物	如果濃度過高，將延長水泥硬化時間，並降低耐久性。
金屬之鹽類及複合物	延長水泥或黏土/水泥的硬化時間，並降低耐久性。
無機酸	降低水泥(第一類波特蘭水泥)或黏土/水泥的耐久性。
無機鹼	降低黏土/水泥的耐久性。氫氧化鉀和氫氧化鈉會降低第三類和第四類特蘭水泥的耐久性。

表 2.1.2-1 離地固化作用可能影響因素(續)

影響因素	可能的影響
有機化合物	有機物可能會干擾廢棄物和無機固化劑的結合。
半揮發性有機物或多環芳香族碳氫化合物	有機物可能會干擾廢棄物的結合。
油脂	油脂會包覆顆粒，降低廢棄物和接著劑顆粒的結合。
細質微粒	由於細質微粒(通過#200 篩網的不可溶顆粒)會包覆較大顆粒物質，降低廢棄物顆粒和固化劑或其他試劑的結合。
鹵素	阻礙固化物質形成，容易由水泥或波特蘭水泥固化物質中釋出，或使熱塑性固化物質脫水。
錳、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	對各金屬鹽類之存在，其各所需硬化時程的差異性，將可導致最終結構體之穩定性或降低產物的物理結合力量，增加金屬滲出的風險。
氟化物	氟化物干擾廢棄物的結合。
砷酸鈉、硼酸鹽、磷酸鹽、碘酸鹽、硫化物及碳水化合物	減緩固化或硬化時程，減弱最終固化產物的強度。
硫酸鹽	減緩硬化時程，並導致水泥安定/固定化之產物膨脹或碎裂。於熱塑性的固化程序中，造成脫水及再水化(rehydrate)，而使結構物破裂。
酚	高酚含量會導致壓縮力明顯減弱。
煤或褐煤	煤和褐煤會影響固化程序及最終產物的強度。
硼酸鈉、硫酸鈣、重鉻酸鉀及碳水化合物	矽酸鈣和鋁酸水合物的形成會阻礙波特蘭水泥固化反應。
非極性有機物(油脂、芳香族碳氫化合物、多氯聯苯)	影響水泥、波特蘭水泥，或有機聚合物的硬化，降低結構物長期的耐久性。對於熱塑性固化物質，高溫將使有機物揮發。
極性有機物(醇、酚、有機酸、乙二醇)	高濃度的酚會減弱硬化程度，降低水泥、波特蘭固化物質的短期及長期耐久性。熱塑性固定/安定化將會造成有機物揮發，而乙醇會減弱波特蘭水泥固化物之硬化。
固體有機物(塑膠、瀝青、樹脂)	對尿素甲醛聚合物之形成效果不佳，或許也會對其他聚合物之硬化程度有影響。
氧化劑(次氯酸鈉、過錳酸鉀、硝酸，或重鉻酸鉀)	對於熱塑性及有機聚合固化物存在可能會破壞結構體，或導致起火燃燒。

2.2 整治系統操作與設計

2.2.1 整治系統設計與操作要點

有關國外針對固化法已制定或公告之法規指引及規範，彙整如表 2.2.1-1。

表 2.2.1-1 國外固化整治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
USEPA	A Citizen's Guide to Solidification/ Stabilization	2001
USEPA	Solidification/Stabilization Resource Guide	1999
美國 DOA Department of the Army ¹	Guide Specification for Construction, Solidification/Stabilization (S/S) of Contaminated Soil	1998
USEPA	Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes	1986
USEPA	Innovative Site Remediation Technology: Design and Application, Stabilization/Solidification, Volume 4.	1997
USEPA	Innovative Site Remediation Technology: Volume 4, Solidification/Stabilization	1994
USEPA	Technical Resource Document: Solidification/Stabilization and Its Application to Waste Materials	1993
美國 DOA Department of the Army	Treatability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material	1995
USEPA	Engineering Bulletin: Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics.	1993
USEPA	Superfund Innovative Technology Evaluation Program: Technology Profiles, 9th Edition	1996
Adaska A., and others. Second Edition	Solidification/Stabilization of Wastes Using Portland Cement	1998

資料來源：Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Guide Specification for Construction, Solidification/Stabilization (S/S) of Contaminated Soil, CECS-02160, 1998.

2.2.2 整治系統單元

以離地固化法進行污染改善作業，主要作業流程包含，開挖、分類、固化/安定化試劑添加、混合、廢棄處理等。其中，在開挖過程需要同時進行可能之揮發性有機化合物氣體蒐集；在分類過程中，需要配合過篩、顆粒大小分類，將過大粒徑之顆粒移除，並進行搗碎成較小顆粒後，再次進入作業系統；混合過程中，加入水以及相關固化/安定化反應試劑，進行攪拌混合，最後變成固化/安定化產物；另外，在混合過程中，亦有可能有廢氣的產生，需進行相關廢棄的蒐集與處理。相關作業流程如圖 2.2.2-1。

在現地固化/安定化法的應用中，利用專門的機具開鑿、鑽孔，將固化/安定化試劑注入受污染土壤區域。現地和離地固化/安定化各有其優缺點，對於淺層污染地區或大型機具無法進入的場址，由於離地處理方式對於試

劑的混合添加及品質有較好的控制，因此較具可行性；而對於深層的污染及大規模之整治範圍，現地處理則較為適用，可利用開鑿機具將固化試劑和受污染土壤直接混合，如此可降低整治所需的成本。

如圖 2.2.2-2 所示，經由一垂直、空心管柱，將稀泥狀之安定/固化藥劑以螺旋槳葉打入受污染土壤。圖 4.9-1 所示土鑽設備可產生高達 41,500 kg-m 的扭力，能有效的將污染土壤和藥劑均勻混合，使其獲得良好處理，處理深度通常可達 30 公尺，而影響範圍直徑可達 4.3 公尺。後續再將圓筒狀處理範圍移動至其他區域，以涵蓋所有污染範圍區域，即可有效處理整個污染場址。當使用斗篷狀集氣罩覆蓋於開挖土壤鑽孔機具上方，則可有效控制或收集現地固化/安定化處理時，管柱處理區域所產生的揮發性或微粒物質。

土鑽形式的現地安定/固化處理系統在以下兩種情況非常適用：

- 一、 在必須同時控制揮發性有機物及臭氣逸散的污染場址。
- 二、 當污染源位於深度超過 7.6 公尺之深層土壤，或傳統挖掘機具使用受到限制時。土鑽形式的處理方式對於垂直和水平的處理位置皆能有效地掌控。

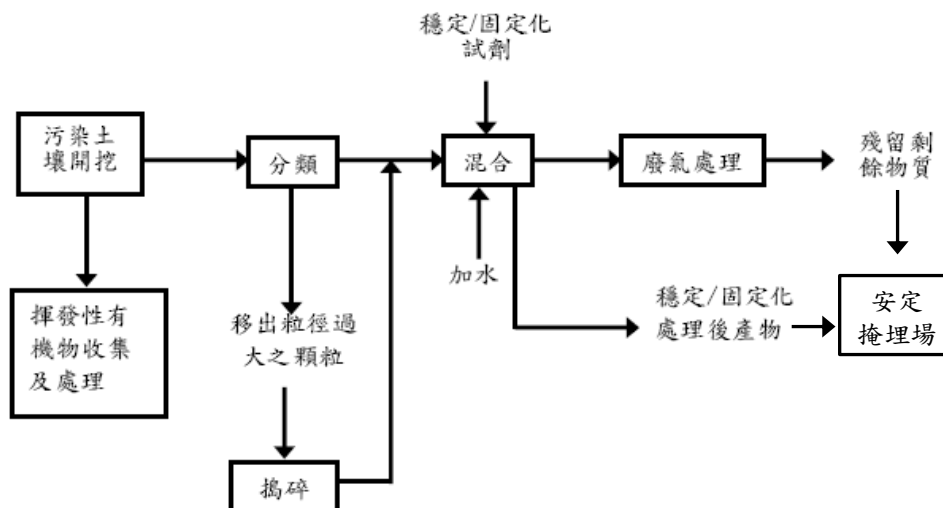
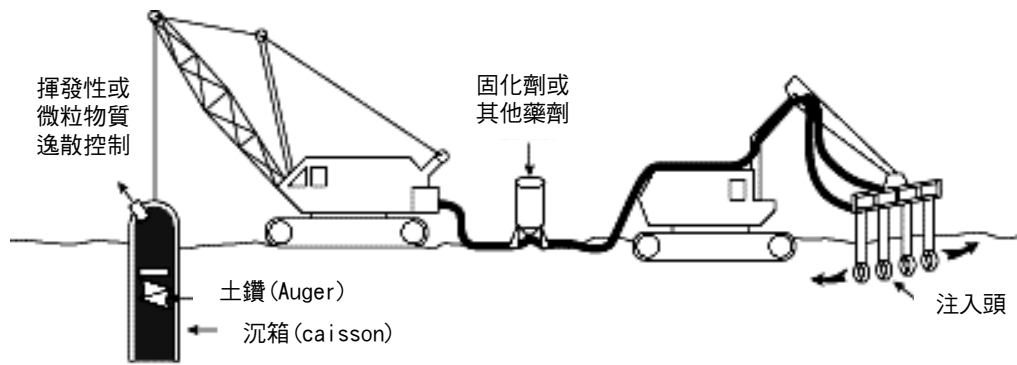
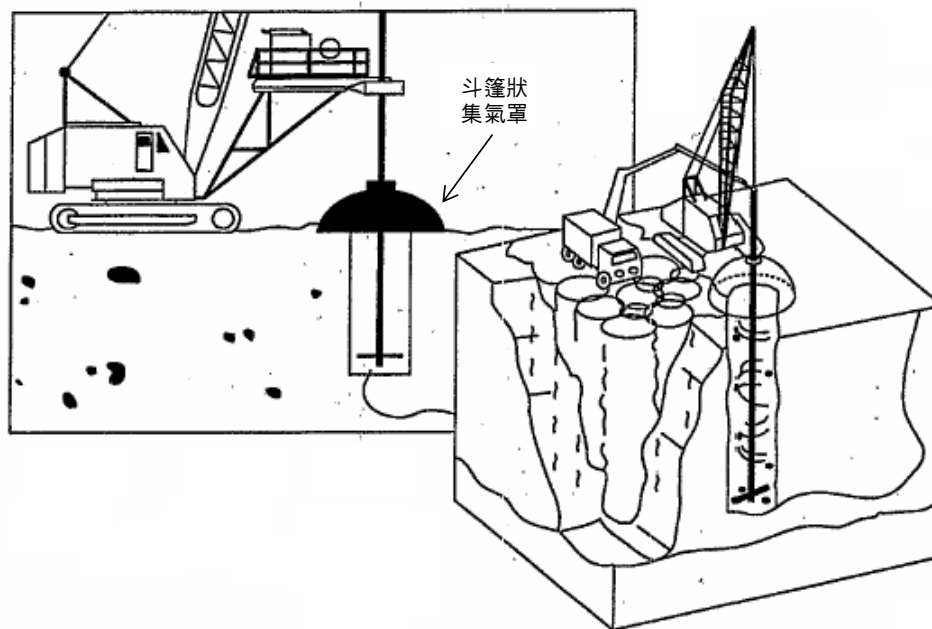


圖 2.2.2-1 離地固化/穩定化處理流程示意圖



(a) 現地穩定化及穩定/固化處理示意圖



(b) 使用斗篷狀護罩之現地穩定化及穩定/固化示意圖

圖 2.2.2-2 現地安定化及安定/固化處理技術

2.2.3 整治系統監測

任何安定/固化的應用及選擇必需考慮許多因素，例如：廢棄物特性、廢棄物體積、處理及後續處置成本，及法規管制要求等。採用安定化法時，應注意化學藥劑與有害之污染物混合或反應，其目的在於確認污染物有害

成分穩定或降低其危害性。

安定/固化法主要可能造成的污染擴大的途徑，在於灌注相關反應試劑時所產生的垂直影響，以及灌注後污染物與反應試劑的反應期間造成其他之副作用反應。因此避免污染擴大可採取措施部份，建議於相關施工之前應有妥善設計規劃，例如可於污染範圍邊界透過鋼板樁打設阻絕設施，並於污染邊界設置監測井進行監測。監測頻率與時間點可分為改善前的背景瞭解、改善過程中的環境監控，以及改善過後的防止污染擴大監測。

2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

本法對於環境之影響，應注意化學藥劑與有害之污染物混合或反應所造成的化學變化間接污染土壤及地下水，亦應妥善處理並監測其中有害物質的基本物性、化學品在環境中的傳播途徑。

二、潛在之危害

本法執行時可能造成之危害彙整如表 2.2.4-1，可概為物理性危害及化學性危害。

表 2.2.4-1 離地固化法潛在之危害

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。	機具設備危害	<ul style="list-style-type: none"> • 重型機具安裝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。 • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 加強相關人員的訓練與緊急應變能力。 • 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。

表 2.2.4-1 離地固化法潛在之危害(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。	開挖牆倒塌 / 淹水	<ul style="list-style-type: none"> 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安定開挖環境中。 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。
	於不安定之土地操作重型機具，可能造成地面沉陷，造成操作受傷	不安定的土壤狀況	<ul style="list-style-type: none"> 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。
	某些反應性化學藥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	化學藥劑與污染物之不相容性	<ul style="list-style-type: none"> 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。 提供有害化學品桶槽適當圍堵設施。
	不明確的有害污染物物理化學性質加上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	<ul style="list-style-type: none"> 設置標示牌，標示廢棄物種類、成份、物理化學基本性質等資訊 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。 監測注入過程與特定時間點系統溫度。 提供緊急沖眼/沖洗器。
	處置地點設施不完善所造成的工安上危害及間接污染土壤及地下水	工安上危害	<ul style="list-style-type: none"> 設置防止廢棄物飛散的措施。 依廢棄物之特性及處置地點地形地質設置水土保持措施。
化學性風險	工作人員可能接觸反應性化學氧化劑。 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。

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

2.3 成本及期程評估

固化/安定化整治成本依各場址狀況而有所不同，包含污染物種類、濃度、現地處理或離地處理等因素。相關整治成本分析，以 1982 年至 2005 年之美國 NPL 場址統計分析資料說明如后。

一般而言，離場處理經費主要受到土壤含水量、污染物種類、場址大小所影響。高含水量會增加反應試劑需要量；污染物種類以及污染物濃度決定反應試劑的種類以及需要量，若添加過多反應試劑，會增加待處理體

積以及處理費用。另外，選擇適當大小的車輛進行污染物運送也可以有效降低整治費用。離地處理通常需開挖土壤，因此操作維護時間受到污染土方量、操作速度等影響，約 1,000 立方碼污染場址之離場處理費用，平均每立方碼約需美金 125~185 元(約新台幣 4,375- 6,475)；約 50,000 立方碼污染場址支離場處理費用，平均每立方碼約需美金 70~145 元(約新台幣 2,450- 5,075)。

離地固化整治法所需要的反應試劑量，約佔待整治土壤污染體積的 5~30%。實際需要添加的反應試劑量，可以藉由關切廢棄物或介質的先導試驗研究結果進行詳細估算。

三、開挖及離場處理法(Excavation and off-site disposal)

3.1 整治技術簡介

3.1.1 原理

開挖處理技術早於 1984 年以前就已經被廣泛應用於清除廢棄物場址，而且視為所有離地處理的第一步。開挖處理(excavation)即是將現場受污染的土壤，經確認範圍後，直接以開挖設備(挖土機、推土機)，將受污染土壤直接由現地挖除，並將其運送至適當之掩埋場或其他的離地處理設施(如土壤淋洗與生物堆)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)。如果是自其他地方取得乾淨土壤填補開挖處，則稱之為客土回填。在完成回填之後，可於地表進行植栽或鋪面，以避免回填區域的風化或做為其他土地利用的準備。

開挖處理可適用於相當廣泛且完整的污染物族群，並未有特定的應用對象。但開挖處理一般而言並不是經濟的整治技術，甚至有時候考量工作安全或後續處置的限制，採用開挖處理是不被允許的作法。所以其應用時機大部分是當其他整治技術均不適用或經費過高的情況下才考慮採用開挖處理。此外，土壤開挖後，於地面上加以處置或處理經常也是處理對環境或人體有立即危害之污染物最快的方法，所以於緊急應變時亦可考慮採用開挖處理。然開挖處理通常僅適用於土壤污染的處理，無法應用於地下水的處理。

3.1.2 適用條件

開挖技術幾乎可應用於全部之場址情況，開挖及圍堵法在應用上之各項可能優缺點，如表 3.1.2-1。

表 3.1.2-1 開挖法技術優缺點比較表

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> • 適用於各種污染物 • 可直接移除污染源 • 可短時間內快速移除土壤中之污染 • 可選擇在場址內進行處理或場址外進行清理 • 技術較普遍 • 開挖費用低 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 • 在深層或在複雜水文地質環境中費用較高 • 須避免客土回填造成二度污染 • 若將後續處理一併考慮，整個開挖處理的時間就會拉長。

3.2 整治系統操作與設計

使用開挖法之主要考量係為快速移除高污染區土壤，以避免危害擴大並降低後續處理之困難度，但是於離場外運過程不能造成他處場址之二次污染，因此離場處理；或經過之評估及中間處理後，運送至合乎規定之掩埋場進行最終處置，對其流向均應嚴格管控。建議參考日本「土壤污染對策法」所規範之「搬出土壤管理票」(流程如圖 3.2-1 所示)，並參酌我國廢棄物清理處置之管制聯單制度後，研擬合理之程序，詳細交代污染土壤離場後之處理方式及流向。據瞭解，針對污染土壤離場處理之流向管控，我國環保機關刻研商合理可行之管理草案，未來應依中央主管機關之規定辦理。(日本土壤污染對策法, 2002。)

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 3.2-2 所示。

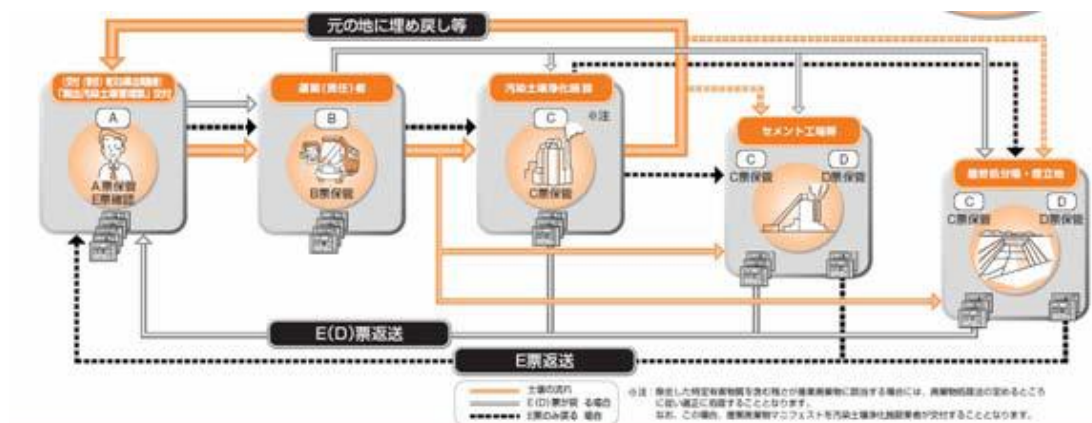


圖 3.2-1 日本污染土壤管理票交付流程

表 3.2-2 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

3.2.1 整治系統設計與操作要點

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。

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 safety 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、釋氫化合物等，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。

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。如開挖污染物擬採離場處理或進行最終掩埋，應提出「土壤污染離場處理計畫書」，並檢核相關環保法規，送主管機關審核通過後據以實施。

3.2.2 整治系統單元

開挖法所需的設備一般至少包括：

- 一、 開挖重型機具設備（例如挖土機、推土機）、打樁機
- 二、 土壤載運工具（例如吊車、裝料機）
- 三、 現場土壤重金屬篩試儀器（例如 XRF）
- 四、 防止揚塵之設施（灑水系統）
- 五、 暫存場
- 六、 後續處理或處置設施（例如掩埋場）

3.2.3 整治系統監測

開挖法主要可能造成的污染擴大的途徑包括揚塵與逕流，因此於污染擴大控制上，至少應設置揚塵控制系統(例如灑水系統、暫置與運送時的遮罩等)，以及逕流控制系統。於逕流控制部分，可於暫置場周界設置截流溝並設置遮蔽棚，並以暫存槽收集截流水，依其污染物之濃度再進行處理或

逕行放流。

開挖法通常不適用於地下水污染整治，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劑、釋氫劑等，同樣可達到地下水污染整治之效果。

一、防止土壤及地下水污染擴大之措施

雖然有許多通用方法可應用於所有場地，但是開挖和移除期間供控制環境排放量所需之預防性和緩和性措施之本質和範圍，乃因地而異。供壘置和處理污染土壤之操作區，應加以分階以防止形成水坑，須襯以聚乙烯或黏土，並加設護路或築堤。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。在污染之範圍擴散到地下水層中或可滲透非飽和區時，則可使用合成不透水布之系統。設備除污區應屬硬表面地區，方能以周邊邊石截留沖洗水，並藉中央水槽和周邊水坑收集液體。除了上述之預防措施外，許多其他措施可用來緩和和減少排放量，包括：

- (一) 覆蓋已開挖之污染土壤，以防止污染物之滲漏和揚塵。
- (二) 操作全程使用吸附劑、泵或其他設備以立即清理潑散物。
- (三) 場地周圍構築地面分水渠以控制逕流。
- (四) 在場地下坡處構築貯留池以圍堵受污染之逕流。

二、成效監測及監測設備

開挖作業場址周圍環境監測方式與頻率彙整如表 3.2.3-1。

表 3.2.3-1 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	Leq、Lmax	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

3.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、環境之影響

開挖所產生的受污染廢土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(例如下雨、揚塵)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，例如規劃適當的挖除土壤暫存區，底部鋪設阻水層、四周設置排水溝，以及設置足夠高度的防塵網，避免造成二次污染。

此外所開挖之土壤有時會被用於說明氣體揮發對於建築物或週邊設施的風險，或者做為對表面水/飲用水的衝擊指標。這些對於開挖法的要求(包括篩選濃度或移除之土壤體積)則會因場址特性而有所差異，所以應該在整治工程規劃設計中加以說明這些風險的影響。

二、潛在之危害

開挖之潛在危害，如表 3.2.4-1 所示。

3.3 成本及期程評估

一般開挖法的開挖與處置成本在每噸美金 300 至 510 元之間(約新台幣 10,500- 17,850)，其費用高低取決於土壤的污染特性與開挖方法。前述之費用範圍包含開挖、搬運與僅送至最終處置場進行處置之費用，但如果後續是以土壤處理與再利用為標的，則費用可能更高。此外，開挖前的初步場址調查工作費用，會因調查需求而有高低，因此亦未包含於上述之成本計算中。開挖處理受污染土壤所需之時間從一天至數個月都有可能，其與開挖面積有關，而處理受污染土壤可能需要更長的時間。挖土機之租用費用，包括勞力、設備、經常費與利潤等，亦會影響整治成本。

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。

表 3.2.4-1 開挖作業之潛在危害

潛在風險	可能遭遇時機	可能曝露風險	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安定的開挖環境中。 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.

四、土壤清洗法 (Soil Washing)

4.1 整治技術簡介

4.1.1 原理

在許多土壤污染整治的方法中，土壤清洗法被認為較一般方法快速且經濟，不僅可以在短時間內完成污染場址的土壤整治，而且整治費用相對低廉，因此當污染場址的土壤受到高濃度污染且急需完成整治時，土壤清洗法即為值得加以評估考量的整治技術。

土壤清洗法的操作源自於採礦與選礦原理，以「洗滌」(scrub)的方式，清除土壤中污染較嚴重之部分。使用土壤清洗法後還需要進一步清理，單獨使用土壤清洗法並無法完全清除土壤污染，故通常需搭配其他處理方法將土壤污染完整清除。土壤清洗法與土壤淋洗法(Soil Flushing)技術不同，前者以水為主要溶劑，需要機具拌合，分離出顆粒較大、不易吸附污染物的土壤後，將污染土壤濃縮至較小的體積再予以處理；後者亦以水為主要溶劑，將大量的水直接噴灑、澆灌在地面或注入地下水中，使土壤中的污染物被淋洗至地下水中，再將地下水抽取至地面處理。表 4.1.1-1 為土壤清洗法與土壤淋洗法之比較。

由於化學物質通常傾向黏著或附著於顆粒較細的土壤，例如泥砂或黏土，而較不易黏著或附著於粗顆粒的土壤，如砂礫土壤。因此，土壤清洗法的基本概念，就是移除細顆粒土壤，將受污染的土壤與乾淨的土壤分離。通常土壤清洗法在含有較多粗顆粒土壤的條件下，有較佳的去除效率，可應用於受油品、重金屬及農藥等污染的土壤整治。

在進行土壤清洗之前，需先將待處理的污染土壤進行分類，移除石塊、岩塊及雜物，以免損害清洗設備，再將受污染土壤放置於洗滌塔(scrubbing unit)中，加入水(water)與洗滌劑(detergent)，經過攪拌與篩選方式，將泥沙或黏土等細顆粒土壤分離出來。由於少部份的污染物會溶解於水與洗滌劑中，因此需將水與洗滌劑經過污水處理系統，再回收利用或依規定排放。

表 4.1.1-1 土壤清洗法與土壤淋洗法比較表

比較項目	土壤清洗法 (Soil Washing)	土壤淋洗法 (Soil Flushing)
可處理的污染物	重金屬、汽油、燃料油、農藥	重金屬、汽油、燃料油、含氯碳氫化合物、苯環類碳氫化合物、多氯聯苯
技術分類	離地(Ex-situ)，係將受污染土壤挖出，於現場或運送至他處，利用水(或萃取劑)混合攪拌後進行固液分離，一般常在現場進行	現地(In-situ)，係利用水(或萃取劑)將土壤中的污染物淋洗至地下水，再於下游處或適當地點抽取含有污染物的地下水至地面處理
萃取劑種類	水、水與界面活性劑、酸液(例如鹽酸、硝酸、檸檬酸)、螯合劑、氧化(或還原)劑、溶劑、超臨界萃取液(水或二氧化碳)	水、水與添加劑(弱酸或強鹼)、水與界面活性劑
需要二次處理的物質	分離出來的細顆粒土壤，以及清洗液	抽取至地面的地下水
優點	成本低、縮減後續處理污染土壤的體積、可在現場進行而免除運送的費用與風險	不需開挖污染土壤、可併同進行地下水整治
使用限制	不適用於細顆粒土壤比例過高的土壤 選用酸液會使土壤喪失地力，後續需要進行土壤復育 可能要額外處理分離出來的細顆粒土壤中之萃取劑	不適用於低透水性或非均質性的土壤 若污染物與土壤緊密吸附，將降低其處理效率 淋洗液與土壤反應後，會降低污染物的移動性 僅適用於淋洗液與淋洗出的污染物，可以被局限且捕捉

被分離出來的細顆粒泥沙或黏土，需要經過第二次處理，通常採取再次清洗，或是配合生物處理、熱脫附處理等方法，亦可直接採取掩埋方式處理。被分離出來的粗顆粒土壤，若經檢測確認污染已被去除，則可直接回填原場址中；若污染尚未被完全清除，則需經再次清洗或搭配其他方法處理。圖 4.1.1-1 為土壤清洗法技術的示意圖。

洗滌塔的洗滌劑可使用各種萃取劑，例如鹽酸、硫酸、磷酸、檸檬酸、乙二胺四乙酸(EDTA)等。若以稀酸溶液作為萃取劑，則此土壤清洗法一般稱為土壤酸洗法(Soil Acid Washing)，其對土壤重金屬的移除效果較僅使用以水為佳，惟酸洗後的土壤 pH 過低(大多介於 2~3 之間)，須再進行完善的地力回復措施，以恢復土壤的基本功能。在酸液回收再利用方面，則須維持酸液的 pH 小於 2~3，才具有一定的酸洗效果。

4.1.2 適用條件

在執行土壤清洗整治技術前，應先針對場址污染特性進行瞭解，例如重金屬種類與濃度、重金屬在土壤中分佈範圍與深度、重金屬在土壤中的

型態分佈(speciation)、土壤本身特性(pH、粒徑分佈、陽離子交換容量)，以及特定重金屬化合物之含量等。其中，使土壤清洗整治技術成功的最重要資訊為土壤粒徑分佈與重金屬濃度間的關係。

為發揮最佳整治效果，土壤清洗技術所適用的土壤條件為粗質地土壤，其黏粒與粉粒總含量宜低於 20~30%，其次是低陽離子交換容量，此 CEC 值宜低於 5~10 cmol(+)/kg (USEPA, 1991)。

土壤清洗法可廣泛應用於受重金屬、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，在國內已成功用於整治一些重金屬、無機物及有機物同時污染的土壤等，目前國內之應用主要針對重金屬污染部分。重金屬的萃取劑主要採用酸與螯合劑，由於大部分的酸均具危害性，因此使用稀酸或弱酸。常用的酸性萃取劑，包括鹽酸、硫酸、硝酸、葡萄糖(gluconate)、草酸、醋酸及磷酸等；常見的螯合劑，則包括 EDTA、二乙烯三胺五乙酸(Diethylenetriamine pentaacetic acid, DTPA)、三甘胺酸(Nitrilotriacetic acid, NTA)及檸檬酸(Citric acid)等。

若採用酸性萃取液，需注意加入的酸性化學物質會造成土壤 pH 值下降、微生物生態或其他土壤性質的改變，降低土壤品質，對土壤的破壞性高。因此，土壤酸洗後添加石灰物質、有機質及肥料等，增加土壤肥力。

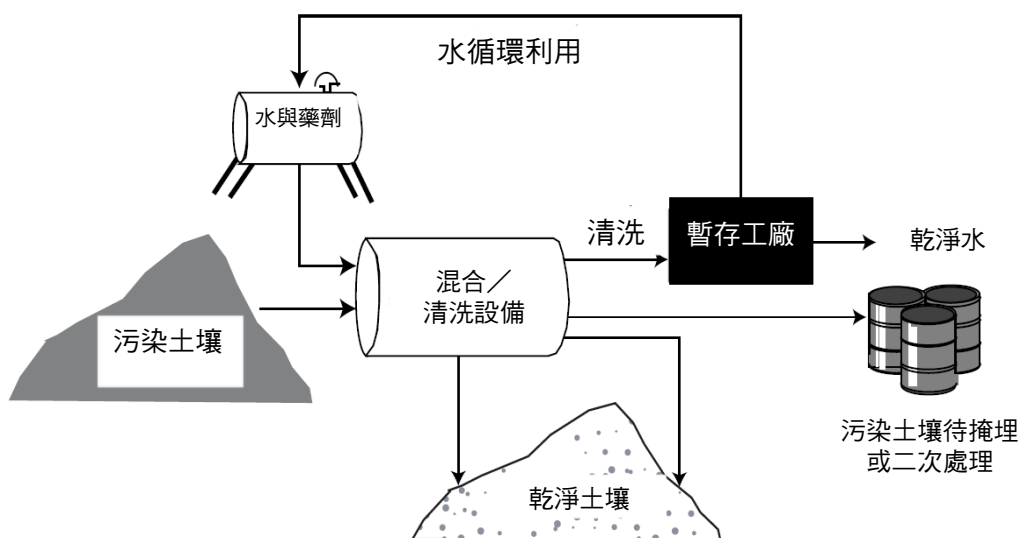


圖 4.1.1-1 現地土壤清洗技術示意圖

4.2 整治系統操作與設計

由於土壤本身相當複雜，例如土壤 pH、氧化還原電位、黏粒含量、有機物含量等，皆會影響重金屬的有效性，又重金屬在土壤中可能以不同的化合物或物種(species)出現，其危害風險並不相同。此外，各地的水文地質條件亦不盡相同，因此，以單一管制標準(即土壤全量重金屬濃度)作為污染場址的認定依據或整治目標，並無法完善考量重金屬污染土壤所造成的危害風險，因而可能產生過多不具立即危害風險的公告控制場址，但是為了達到整治目標可能須要極高的整治費用，往往導致污染問題擱置，或者污染行為人因對龐大整治費用難以承擔，乾脆宣告破產或潛逃(在美國則活絡了有利可圖的辯護產業，有時訴訟費累積起來都比整治費高)，往往無法真正解決土壤污染問題，造成立意良善(控管嚴格)卻推行成效不彰之窘境，而形成雙輸的局面(蘇紹璋、陳尊賢，2008)。有鑒於此，大多先進國家近年來轉而依據土地利用方式與污染危害風險之評估，建立彈性化的污染土壤管制標準與整治目標，相關詳細資訊可參考 <http://www.clarinet.at/policy>。

4.2.1 整治系統設計與操作要點

進行土壤清洗作業前，應掌握土壤重金屬濃度分佈，並進行適當的土壤前處理，以降低處理之土方量。此外，應先行模場試驗，以獲得最佳之操作條件，作為系統設計的依據。圖 4.2.1-1 為一般土壤清洗操作之系統設計，污染場址之實際清洗操作方式，會因執行單位所具有之清洗設備不同而有所差異。

表 4.2.1-1 為歐州某一公司土壤清洗設備之規格，該設備每小時處理污染土壤的最大量為 25 公噸，每日連續操作的工作量為 600 公噸。清洗設備所需的工作空間約寬度 30 公尺、長度 40 公尺、高度 15~18 公尺。這套土壤清洗設備可安裝於廠房內，設備包括篩分離單元、水力分離單元、磁力分離單元、重力分離單元、浮除單元、污泥脫水單元、廢水處理單元等部份。

表 4.2.1-1 土壤清洗設備規格一覽表

項目	功能	說明
處理量	—	25 T/hr(average)
平面需求	—	30 x 40 m ²
高度需求	—	15~18 m
清洗單元	水洗	Type 402050 / 6000 / 2 double-sword, turning counter clock-wise; capacity 35-45 t/h, 2 motors 15 kW
脫水篩選	脫水	Type MCDM 01818-1
進料台	自動進料裝置	Type TC, variable motor; capacity 30 t/h maximum
單線檯篩選	大顆粒篩分	length 4800 mm; width 1200 mm
尾部幫浦	水循環	Type VASA G120 335-4", various impellor types and motors (20 kW , 40 kW)
三組漩流分離 砂土	砂土篩分	Set of 2 x 10" type C670 Set of 2 x 10" type C670 Set of 5 x 5" type C570
部份磁選	分離重金屬(污染物)	Type WS 912 DMHG Metso; drum diameter 900 mm, length 1200 mm
重螺旋分離	粉土分離	Model 6 LM5/2, 6 x duplex LM 5 turn spiral (12 starters) from South West Metallurgical Services
調節劑	浮除單元之濃稠集中效果	3 x Model 21 VPT5 Prochem
浮除單位	有機物(如戴奧辛)分離	Sala International AB: 3 banks of 3 cells Type AS 1.4-2
底泥集中機	集中底泥	2 sets of Type LT100-F3, volume 1.4 m ³ each, total weight 7800 kg, Lamella
底泥輸送帶	集中底泥	Phoenix, Model CH-2.0 m
藥劑存放箱	藥劑存放	from Prominent
乾式進料機	乾式進料	Ultramat AT-2000 RC, 0-18.13 kg/h
脫水機	底泥脫水機(脫水效果:含水率 20%)再進行熱脫附	Heated-oil circuit through drying chamber (sort of kiln).

4.2.2 整治系統單元

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

土壤清洗法一般於場址內進行，主要是為了避免運輸過程所造成的二次污染風險。在挖除受污染土壤時，須以空氣污染防制設備，控制揚塵的污染或其他潛在之空氣污染風險。一般而言，污染物不易由洗滌塔逸散至空氣中，然而環保主管機關仍須針對場址空氣進行監測，以確保污染物沒有向外逸散。其次，開挖區域必須執行水污染防治，避免地表水將污染物帶離場址或向下滲漏而污染地下水。

二、成效監測及監測設備

成效監測及監測設備詳細內容，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。

表 4.2.3-1 土壤清洗法整治系統成效監測表

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

4.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

一、對環境之影響

本法於污染土壤挖掘與清洗過程中，可能對環境中空氣造成影響；其沖洗重金屬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

土壤清洗法潛在可能之風險，約略分成兩類，分別是物理性及化學性風險，詳細內容如表 4.2.4-1。

表 4.2.4-1 土壤清洗法潛在之危險

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
	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，工作人員可能會曝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

4.3 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／公噸，約新台幣 1,000- 2,250。

整個處理程序通常需要幾個星期至幾個月的時間，視場址特性而不同。使用土壤清洗法進行整治所需要的時間，一般決定於下列因素：

- 一、 泥砂、黏土及岩石碎片的比例與數量
- 二、 土壤中污染物種類及其濃度
- 三、 洗滌塔的大小