



土壤及地下水油品類污染
整治作業參考指引
(113年修正版)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-002

版本修正對照表

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	行政院環境保護署(以下簡稱環保署)陸繼針對.....	行政院環境保護署(現已改制環境部)陸繼針對.....	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字修正。	1-1
	環保署為協助各級環保人員增加油品類污染場址之整治技術知識，.....	環境部環境管理署(以下簡稱本署)為協助各級環保人員增加油品類污染場址之整治技術知識，.....		1-1
	但環保署仍會保留對於補救措施的許可，確保環境保護主管機關的責任。	但本署仍會保留對於補救措施的許可，確保環境保護主管機關的責任。		2-1
	表 2.1-1 國內外土壤及地下水污染場址整治管理比較表：我國—環保署	表 2.1-1 國內外土壤及地下水污染場址整治管理比較表：我國—環管署		2-8
	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.....	本節參考本署曾於民國 92 年 8 月環保署環署土字第 0920057616 號函.....		2-19
	(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」.....	(一)若處理製程(或設備)符合本署公告之「第一批至第七批公私場所」		2-19
	(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.....	(二)當土壤開挖、暫存之行為符合環署空字第 940073671 號函之解釋：「...本署公告第五批各行業.....		2-19
	(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.....	(二)若污染場址控制或整治計畫之土石堆置，符合本署民國 97 年 5 月 23 日公告.....		2-20
	委託處理之再利用機構應依「行政院環保署事業廢棄物再利用管理辦法」規定，向環保署申請取得污染土壤類代碼之再利用許可.....	委託處理之再利用機構應依「行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法」規定，向環境部申請取得污染土壤類代碼之再利用許可.....		2-21

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	除了 <u>環保署</u> 公告之採樣及分析方法之外，請參照「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。	除了 <u>本署</u> 公告之採樣及分析方法之外，請參照「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字修正。	3-4
	污染調查所使用之工具，除了 <u>環保署</u> 公告之採樣及分析方法之外，亦可參考「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。	污染調查所使用之工具，除了 <u>本署</u> 公告之採樣及分析方法之外，亦可參考「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。		3-5
	6.整治成效驗證調查：確認關切物質於整治期間濃度下降變化。而污染調查所使用之工具，除可參考 <u>環保署</u> 公告之採樣及.....	6.整治成效驗證調查：確認關切物質於整治期間濃度下降變化。而污染調查所使用之工具，除可參考 <u>本署</u> 公告之採樣及.....		3-12
	<u>環保署</u> 於民國92年「全國十年以上加油站及大型儲槽潛在污染源調查計畫」查證確認土壤中苯、甲苯.....	<u>本署</u> 於民國 92 年「全國十年以上加油站及大型儲槽潛在污染源調查計畫」查證確認土壤中苯、甲苯.....		3-25
	生物通氣系統從1994年至1998年持續4年後評估，經過土壤採樣驗證，發現包括苯、甲苯、二甲苯、萘、三氯乙烯、1,2-二氯乙烯及TPH等均被 <u>環保署</u> 驗證整治有效.....	生物通氣系統從 1994 年至1998 年持續 4 年後評估，經過土壤採樣驗證，發現包括苯、甲苯、二甲苯、萘、三氯乙烯、1,2-二氯乙烯及 TPH 等均被 <u>本署</u> 驗證整治有效.....		3-29
	以國內為例，SVE排放限制主要受到 <u>環保署</u> 空氣污染相關法規之要求。	以國內為例，SVE 排放限制主要受到 <u>本署</u> 空氣污染相關法規之要求。		附件 一-9
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件 一-16

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字修正。	附件一-27
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件一-37
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件一-44
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件一-54
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件一-84
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件二-10
	依 <u>環保署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....	依 <u>本署</u> 「空氣污染防制法」第23條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物.....		附件二-22

目錄

頁碼

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	1-4
1.4 專有名詞中英文對照表	1-6
第二章 整治技術應用現況與相關法令	2-1
2.1 整治技術發展應用現況	2-1
2.2 國內污染場址整治期間相關環保法令	2-19
第三章 整治技術選取策略	3-1
壹、技術選取策略	3-1
貳、案例解析	3-25
第四章 工業安全衛生與緊急應變	4-1
4.1 工業安全衛生	4-1
4.2 緊急應變	4-2
參考文獻	參-1
附件一 現地整治技術	附件一-1
一、土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction)	附件一-1
二、生物通氣法(Bioventing)	附件一-19
三、生物堆法(Biopiles)	附件一-29
四、空氣注入法(Air Sparging)	附件一-39
五、生物曝氣法(Biosparging)	附件一-47
六、現地地下水生物整治法(In-Situ Groundwater Bioremediation)	附件一-56
七、雙相抽除法(Dual-phase Extraction)	附件一-71
八、井內氣提法(In-Well Air Stripping)	附件一-87

九、現地化學氧化法(In-Situ Chemical Oxidation).....	附件一-95
十、界面活性劑沖排法(Surfactant Flushing).....	附件一-110
十一、加強好氧生物整治法(Enhanced Aerobic Bioremediation)	附件一-119
十二、滲透性反應阻牆法(Permeable Reactive Barrier)	附件一-128
十三、動力法(Electronics Remediation)	附件一-140
十四、植物整治法(Phytoremediation)	附件一-148
十五、監控(測)式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation)	附件一-155
十六、抽出處理法(Pump and Treat)	附件一-165
附件二 離地整治技術	附件二-1
一、土耕法(Land farming)	附件二-1
二、低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption)	附件二-12
三、開挖處理法(Excavation)	附件二-25

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.1-1 美國超級基金場址管理流程.....	2-2
圖 2.1-2 日本污染場址管理流程.....	2-7
圖 3.1-1 整治技術選取重點評估面向.....	3-1
圖 3.1-2 美國環保署油品類污染整治技術快速選取流程.....	3-7
圖 3.1-3 美國石油協會油品類污染整治技術篩選矩陣.....	3-8
圖 3.1-4 土壤油品類污染物分階段整治技術選用案例.....	3-15
圖 3.1-5 地下水油品類污染物分階段整治技術選用案例.....	3-16
圖 3.1-6 浮油傳輸宿命示意圖.....	3-18
圖 3.2-1 台灣南部某加油站場址-不同污染情形之整治分區圖.....	3-27

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.2-1	本指引 19 項整治技術之適用範圍..... 1-3
表 1.4-1	專有名詞中英文對照表..... 1-6
表 2.1-1	國內外土壤及地下水污染場址整治管理比較表..... 2-8
表 2.1-2	美國超級基金場址土壤污染整治技術應用..... 2-10
表 2.1-3	美國超級基金場址地下水污染整治技術應用..... 2-11
表 2.1-4	美國油品類污染場址整治技術統計..... 2-12
表 2.1-5	我國加油站油品污染整治技術統計..... 2-17
表 3.2-1	台灣南部某加油站場址資訊..... 3-26
表 3.2-2	緬因州的 LORING 空軍基地場址資訊..... 3-29
表 3.2-3	美國 LORING 空軍基地整治場址分區整治說明..... 3-29
表 4.1-1	污染場址整治之一般安全措施..... 4-1

第一章 前言

1.1 撰寫目的

自民國 89 年 2 月「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)公佈施行以來，行政院環境保護署(現已改制環境部)陸續針對全國各加油站、軍事單位油槽設施等油品類儲槽場址進行土壤及地下水污染調查工作，並對超出土壤或地下水污染管制標準之場址，依法公告為控制場址或整治場址，要求污染行為人進行污染改善、控制及整治工作。有鑑於油品類儲槽污染場址之數量有逐年增加之趨勢，且其整治工作有時必須採用「多種整治技術同時施工」，或需以「分時程、分階段增加整治單元」之方式進行，並隨個案場址狀況不同而異，故有關油品類儲槽污染場址之污染整治技術，近年來已逐漸為各界所重視。

由國外先進國家之經驗顯示，「整治技術之選擇」已逐漸與「風險評估之觀念」互相結合，也就是說整治技術需依污染場址所在區域(例如工業區、住宅區、水源水質保護區等)之特性及環境受體之不同，而考量整治之急迫性與整治目標之需求，以決定如何進行及採用何種整治技術控制或整治污染場址，並非每個污染場址都須投入大量經費，或是使用最複雜的整治技術來進行污染改善。

以環保主管機關所擔任之監督污染改善、控制或整治工作之角色而言，除需依現行土污法進行相關管制工作外，對於實際整治技術之基本知識，例如相關之整治技術原理、整治技術選取、系統設計要點與注意事項等，也需進一步瞭解。環境部環境管理署(以下簡稱本署)為協助各級環保人員增加油品類污染場址之整治技術知識，於民國 95 年編訂「油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊」，俾利於各級環保主管機關人員於審查相關之污染改善計畫、控制或整治計畫，或於監督整治施工時，知道如何掌握重點，並提供作為執行整治相關工作之參考。

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「土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引」(以下簡稱本指引)。在手冊內容重新調整為統一架構，並更新相關法令規範，以提昇使用者之閱讀便利性。

本指引彙整目前國內外使用於油品類污染場址整治工程上較為成熟之 19 項技術，並針對各項技術之原理、適用環境及其可行性與適用性予以說明。19 項整治技術包括：土壤氣體抽除法(soil vapor extraction, 簡稱 SVE)、生物通氣法(bioventing)、生物堆法(biopiles)、土耕法(landfarming)、低溫加熱脫附法(low-temperature thermal desorption)、空氣注入法(air sparging)、生物曝氣法(biosparging)、監控(測)式自然衰減法(monitored natural attenuation, 簡稱 MNA)、現地地下水生物整治法(in-situ groundwater bioremediation)、雙相抽除法、(dual-phase extraction)、抽出處理法(pump and treat)、井內氣提法(in-well air stripping)、現地化學氧化法(in-situ chemical oxidation, 簡稱 ISCO)、界面活性劑沖排法(surfactant flushing)、開挖處理法(excavation)、加強好氧生物整治法(enhanced aerobic bioremediation)、滲透性反應阻牆法(permeable reactive barrier)、電動力法(electrokinetic remediation)、植物復育法(phytoremediation)等。

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，在土壤及地下水受油品污染場址，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，應參照本署最新公告之標準作業規範。
- 四、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，並著重於如何與實務結合進行場址污染改善工作。亦不提供各項技術與相關設備儀器之詳細操作步驟。
- 五、 使用者於執行污染整治各階段工作時，所採取之執行方式、佈點位

置、數量及分析項目等，仍應視各場址實際狀況及使用者之專業判斷加以決定，本指引中並無強制規範。

- 六、 本指引主要是完整的彙整論述各項整治技術程序，共 19 項整治技術如表 1.2-1。包含各項技術選擇之方法、適用環境等，本指引中的各項技術並不會相互比較或評斷其優劣，而專注於技術之可行性與適用性討論。
- 七、 本指引各種整治技術之成本與期程僅提供參考，可能隨監測及管制標準修正而有所差異。
- 八、 本指引並不代表本署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。
- 九、 整治技術之選用，因涉及有效與否之主觀認定，以及技術廠商之專利或專業行為，非環保機關之強制性要求或規定之範圍。

表 1.2-1 本指引 19 項整治技術之適用範圍

序號	整治技術名稱	適用環境介質		應用領域			適用污染物特徵			施工方式 註 1	
		土壤	地下水	生物	物理	化學	氣相	浮油相	溶解相	現地處理	離地處理
1	土壤氣體抽除法	✓			✓		✓			✓	
2	生物通氣法	✓		✓	✓		✓			✓	
3	生物堆法	✓		✓			✓		✓	✓	
4	空氣注入法	✓	✓		✓		✓		✓	✓	
5	生物曝氣法	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	
6	現地地下水生物整治法		✓	✓					✓	✓	
7	雙相抽除法	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
8	井內氣堤法		✓		✓				✓	✓	
9	現地化學氧化法	✓	✓			✓			✓	✓	
10	界面活性劑沖排法	✓	✓			✓			✓	✓	
11	加強好氧生物整治法	✓	✓	✓					✓	✓	

序號	整治技術名稱	適用環境介質		應用領域			適用污染物特徵			施工方式 註 1	
		土壤	地下水	生物	物理	化學	氣相	浮油相	溶解相	現地處理	離地處理
12	滲透性反應阻牆法		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
13	電動力法	✓	✓		✓	✓			✓	✓	
14	植物整治法	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
15	監控(測)式自然衰減法	✓	✓	✓	✓				✓	註 2	
16	抽出處理法		✓		✓			✓	✓	✓	
17	土耕法	✓		✓			✓		✓		✓
18	低溫加熱脫附法	✓			✓		✓				✓
19	開挖處理法	✓	✓		✓			✓	✓		✓

註 1：離地(Ex-situ)處理係指污染物質必須從土壤或地下水層中，移出至設置於地面之處理設備，或是場址外的其他地方處理；而現地(In-situ)處理則不將污染物從土壤或地下水層中移出至地面，而直接將處理藥劑或設備置於地下污染區進行整治。

註 2：監控(測)式自然衰減法無工程施工型態，但其是否是一種合適的整治方式，必須由環保主管機關認可

1.3 指引內容摘要

第一章 前言

闡述本指引之定位與撰寫之目的與適用範圍，以利使用者在參考本技術指引時，能了解各項陳述與說明的出發點。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，可減少技術內容誤用。

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，資料部分主要描述美國、日本、歐盟等國家之制度差異性，以及獨特之處，特別是對於美國環保署整治場址之管理工作流程的介紹，期為使用者勾勒出整治管理程序的概念與程序的輪廓，並了解各國在推動整治技術上的異同。例如美國：Superfund、資源保育及回收法(RCRA)、

全面環境應變補償及責任法(CERCLA)、超級基金修正及再授權法(SARA)等相關法令之分析。日本：環境省土壤污染對策法、水質污濁防止法等相關法令蒐集彙整分析。歐盟：根據「Sixth Environment Action Programme」預定 2010 年達成之土壤環境管理目標說明管理制度。其次介紹國外整治技術發展現況，主要彙整美國 Superfund 統計資料，日本方面則彙整環境省對於國內技術廠商所建立之資料庫，另彙整歐洲部分國家對於場址資訊之統計資料，說明常用之整治技術建議順位。

然而，各種技術均有其限制與適用範圍，對於特定油品污染場址，不同類別之技術的可行性與適用性亦有差異。因此在使用者熟悉各種可應用之技術，並考量目前國內污染場址整治期間相關環保法令規範，於本章中建構選取適當技術之準則，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

彙整油品類污染場址於現地進行污染改善之整治技術，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、成本及期程評估等內容。

附件二 離地整治技術

彙整油品類污染場址於離地進行污染改善之整治技術，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、成本及期程評估等內容。

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
Acid-Base	酸鹼法
Aerobic	好氧
Air sparging (AS)	空氣注入法
Anaerobic	厭氧
Anisotropy	不等向性
Belt skimmer	帶式油水分離
Biopiles	生物堆法
Bioslurping	生物漱洗法；生物啜洗法
Biosparging	生物曝氣法
Bioventing	生物通氣法
Capillary fringe	毛細現象帶
Co-oxidation	生物共氧化
Critical hydrocarbon thickness	臨界碳氫化合物厚度
Diffusion	擴散
Dilution	稀釋
Dispersion	延散
Dual-phase extraction (DPE)	雙相抽除法
Electrokinetic remediation	電動力法
Enhanced aerobic bioremediation	加強好氧生物整治法
Excavation	開挖處理法
Ex-situ	離地
Five-year review process	5 年回顧複審程序
Floatation	浮除
Free product	浮油
Granular Activated Carbon(GAC)	顆粒活性炭、粒狀活性炭
Hydrolysis	水解法
Immobilized	固定的
In-situ	現地

英文	中文
In-situ Chemical oxidation(ISCO)	現地化學氧化法
In-situ chemical reduction (ISCR)	現地化學還原法
In-situ groundwater bioremediation	現地地下水生物整治法
In-well air stripping	井內氣提法
Isotropic	等向性
Landfarming	土耕法
Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL	輕質非水相液體
Low-temperature thermal desorption	低溫加熱脫附法
Mobility	移動性
Monitored Natural Attenuation(MNA)	監控(測)式自然衰減法
National priorities list, NPL	國家優先場址清單
Non-viscous fluid	非黏滯流體
Open channel flow	明渠流
Overall risk	整體風險
Permeability	透水性
Permeable reactive barrier (PRB)	滲透性反應阻牆法
Phytoremediation	植物(生)整治法
Pilot test	模場試驗
Plume	污染團
Pneumatic pump	氣囊式泵浦
Precipitation	沈澱
Primary porosity	主要孔隙
Pump and treat (P&T)	地下水抽出處理法
Pumping rate	抽水速率
Records of Decision(ROD)	決策紀錄
Remedial Investigation/Feasibility Study(RI/FS)	整治調查與可行性研究
Removal system	抽除系統
Saturation	飽和度
Secondary porosity	次要孔隙
Skimming system	油水分離系統
Soil vapor extraction (SVE)	土壤氣體抽除法
Sorption	吸持(附)
Suction	吸啜
Sump	集水(油)槽
Surfactant flushing	界面活性劑沖排法
Tension	張力
Treatment train	處理技術序列
Volatile Organic Compound(VOC)	揮發性有機污染物
Volatilization	揮發作用

英文	中文
Water table depression	地下水位洩降
Wetability	可潤濕度

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(包含美國、日本及德國)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。

一、 環保先進國家污染場址管理制度資料彙整

(一)美國

美國環保署「超級基金」(Superfund)從發現污染場址至刪除列管名單，已設計一套完整之因應作業流程(如圖 2.1-1)，藉由各階段工作資訊之累積與流通，促成整治作業之順利進行。

在污染場址整治程序方面，首先辦理整治調查與可行性研究(RI/FS)，並由聯邦政府提出計畫書經由民眾參與討論與建議後，選擇整治方法，再由聯邦政府或州政府提出整治決策紀錄報告書。整治決策紀錄報告書明定整治方法及目標，作為下階段整治設計與整治行動之依據，並且規劃整治期間相關操作與維護事項。

另美國環保署針對超級基金中之整治場址，設計了「5 年回顧複審程序」(Five-year review process)，該程序係為符合「全面環境應變補償及責任法」(CERCLA)Section121 以及 1986 年通過之「超級基金修正與再授權法案」(SARA)規範，對於整治過程中仍存在於場址中高於標準的有害污染物質，進行每 5 年 1 次的整治成效審視、風險評估等措施，必要時甚至頻率可以縮短。

5 年回顧複審程序可以提供一個機會，以評估補救的措施和成效，確定是否它依然在保護人類健康和環境的觀點上執行整治或管理措施，或是已經達到更完善目標，可以從事更高價值的土地利用開發。通常，回顧場址過去 5 年來執行整治行動及未來用途限制，依然是以基於風險管理所設定之土地使用性質，作為評估之依據。但環保署仍會保留對於補救措施的許可，確保環境保護主管機關的責任。

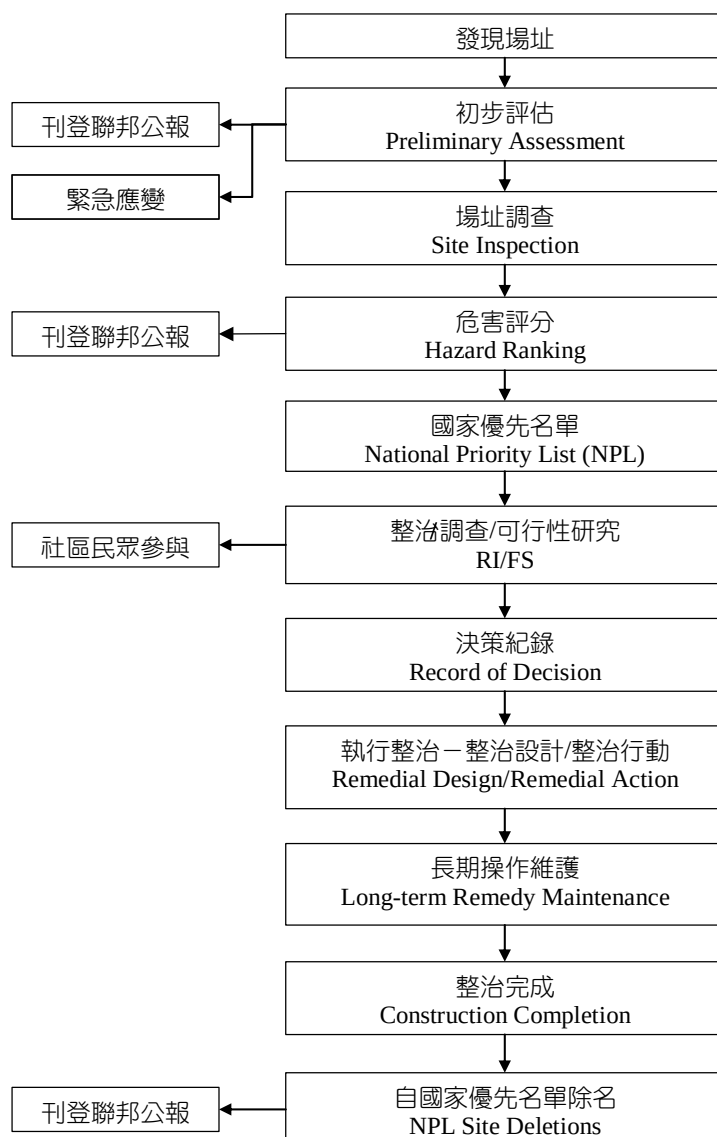


圖 2.1-1 美國超級基金場址管理流程

美國國家油品及危害物質污染應變計畫(National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan, NCP)定義污染場址整治行為的存在，是不允許場址未受限制的使用(unlimited use)，以及場址內暴露行為未受嚴密的控制(unrestricted exposure)，整治期間，環保署及其他相關主管機關為了達到整治期間相關控管之要求措施，以符合上述法令對於整治過程監控規範，相關措施彙整以「5 年回顧復審綜合指引」(Comprehensive Five-year Review Guidance, EPA 540-R-01-007, OSWER No.9355.7-03B-P)的方式來辦理，該指引相關重點引述說明如下：

1. 引用執行時機

在美國，場址整治目標的設定，通常根據後續土地利用型態而定，根據整治期間或整治最終成果之場址濃度，以風險評估結果，評定後續土地利用的限制，而如前段所述，為防止污染場址遭到未受限制的使用(unlimited use)，以及場址內暴露行為未受嚴密的控制(unrestricted exposure)，一般而言，不管是否進行整治工程，包括對於民眾使用土地、地下水、地表水的所有限制措施，或是採取其他物理性、阻絕性工程的設置等，均必須遵行 5 年回顧復審程序。

5 年回顧復審程序主要為了符合「全面環境應變補償及責任法」(CERCLA)以及「超級基金修正與再授權法案」(SARA)之要求，完成降低危害性物質、污染物存留於場址之行動及責任，也就是國家境內所有場址都應該有避免民眾接觸污染所產生之風險，但畢竟場址大小、型態、污染程度不一，而且數量眾多，有的甚至被允許不整治而逕行再開發利用，因此，針對美國「國家優先場址清單(National Priorities List ,NPL)」中的列管場址，進行場址整治中使用限制及暴露行為的控管；而針對其他非屬美國國家優先場址清單中的場址，其中若有可能需要超過 5 年完成整治，或是其他管理上需求者，同樣也可以 5 年回顧復審程序辦理。一旦場址整治行動開始，5 年回顧復審機制即開始，進行第一次的初始審查，當初始審查完成並簽明具結之日期，即為後續定期復審之計算之開始，其頻率為 5 年一次，或是其他特殊規定之定期頻率等。

2. 主管機關

大部分主要污染場址的主管機關為環保署，負責 5 年回顧復審程序等所需之相關資訊及資料文件。不過環保署非必然為所有污染場址的主管機關，州政府、部落自治區，或是由關切人士組成的法人基金會，均可能主導管理的污染場址，成為該場址的主管機關，但環保署也會提供 5 年回顧復審程序之相關協助。

3. 5 年回顧復審程序之內容組成

(1) 公眾參與及通知(Community Involvement and Notification)

每5年回顧復審的作業開始階段，必須召集所有公開的或潛在的關切團體組織並加以通知，如州政府(或部落自治區)、地方政府、適當的社區代表、聯邦政府或州政府的委託代表等。

(2) 文件回顧(Document Review)

每5年回顧復審的作業中，文件回顧為基本的作業內容，由主管機關負責檢視所有必要之相關文件，包括整治決策文件(如環保署 Records of Decision, ROD 紀錄文件等)、強制令(如法院裁決令、主管機關之行政命令等)、場址調查報告、整治規畫設計以及整治成效等報告或文件。

(3) 資料回顧及分析(Data Review and Analysis)

主辦管理機關審視之數據資料部分則包括採樣及監測計畫執行結果，監測作業內容、操作維護報告，或其他有關整治期間整治成效之驗證文件，其中也應包括先前之5年回顧復審之報告。資料數據主要彙整成技術分析內容及後續的決策依據。而依據數據形式(type)以及品質(quality)，可以對於所有於場址中的重大發現，以及其他結論等產生重要的影響。

除了由整治單位依據主管機關相關要求提出之文件數據之外，在部分案例中，主管機關也主導補充調查採樣，或其他資料數據之收集工作。

(4) 場址審視(Site Inspections)

可由環保署或其他主管機關主導辦理場址現場審視之工作，藉以獲得場址或場址附近的現況資訊，現場審視工作最好於5年回顧復審作業被簽署具結前之9個月內。

(5) 訪談(Interviews)

對於場址管理人、員工、聯邦政府、州政府、部落自治機關以及其他場址附近居民等，進行觀點、想法的訪談。

4. 評估整治措施的成效

美國環保署基於保護民眾及環境的立場，對於技術性的評估，

由下列 3 個問題來達成：

(1) 是否整治功能一如預期規劃？

對於本項問題的確認，主要針對技術性整治成效，進行單一操作單元以及全廠整治成果確認，確保未來能夠達到預期目標，不至於遙遙無期；若有充分理由，顯示目前的整治作為，無法展現預期的整治成效可以被實現的話，可能必須要求污染行為人進行其他的改善措施。此外，也要能確保整治過程，危害人體健康的曝露途徑，均成功的被阻隔，因此，監測數據、系統成效、操作維護紀錄等，即會佔一個相當重要的角色。

(2) 是否暴露假設、毒性資料、整治目標、整治行動仍合理有效？

對於整治目標計算之所有風險參數，每 5 年必須檢討 1 次，審視現況是否和 5 年前一樣。

(3) 是否有其他明朗化資訊？

對於場址其他相關資訊，有助於場址整治工作者，可以新增列入評估，美國環保署可能希望關切之其他資訊，例如生態風險、土地利用改變等。

5. 環保署結論

回顧復審程序於 5 年內完成後，其中環保署會完成審查結論後簽具，其結論內容應包括確認識題(Identification of issues)、後續工作的建議(Recommendation of follow-up actions)、判定整治措施是否能夠保護國民健康及環境(A determination of whether the remedy is, or is expected to be, protective of human, and the environment)。

透過上述文件回顧、資料蒐集、訪談以及場址審視等工作來綜合提出技術性的評估，此外，整治場址報告之提出單位必須確認鑑別場址是否由不確定性的制度控管，或因場址特性的改變，造成整治目標無法達成。

(二)日本

日本環境省藉由「土壤污染對策法」等相關法令，管制遭受污染之場址。當場址經確認超過土壤或地下水污染基準後，環保機關即會劃定污染區域為指定公告區域，並考量風險之概念，要求污染土地行為人或關係人進行覆土、封存、整治、地下水監測等改善措施；當污染場址經改善後，其地下環境污染物濃度低於相關基準後，即可解除列管。流程如圖 2.1-2。而在污染場址改善期間，則要求業者定期提出監測報告，並對於業者所提出之改善措施加以監督，並針對維護附近居民健康之緊急措施上給予建議。

(三)歐洲

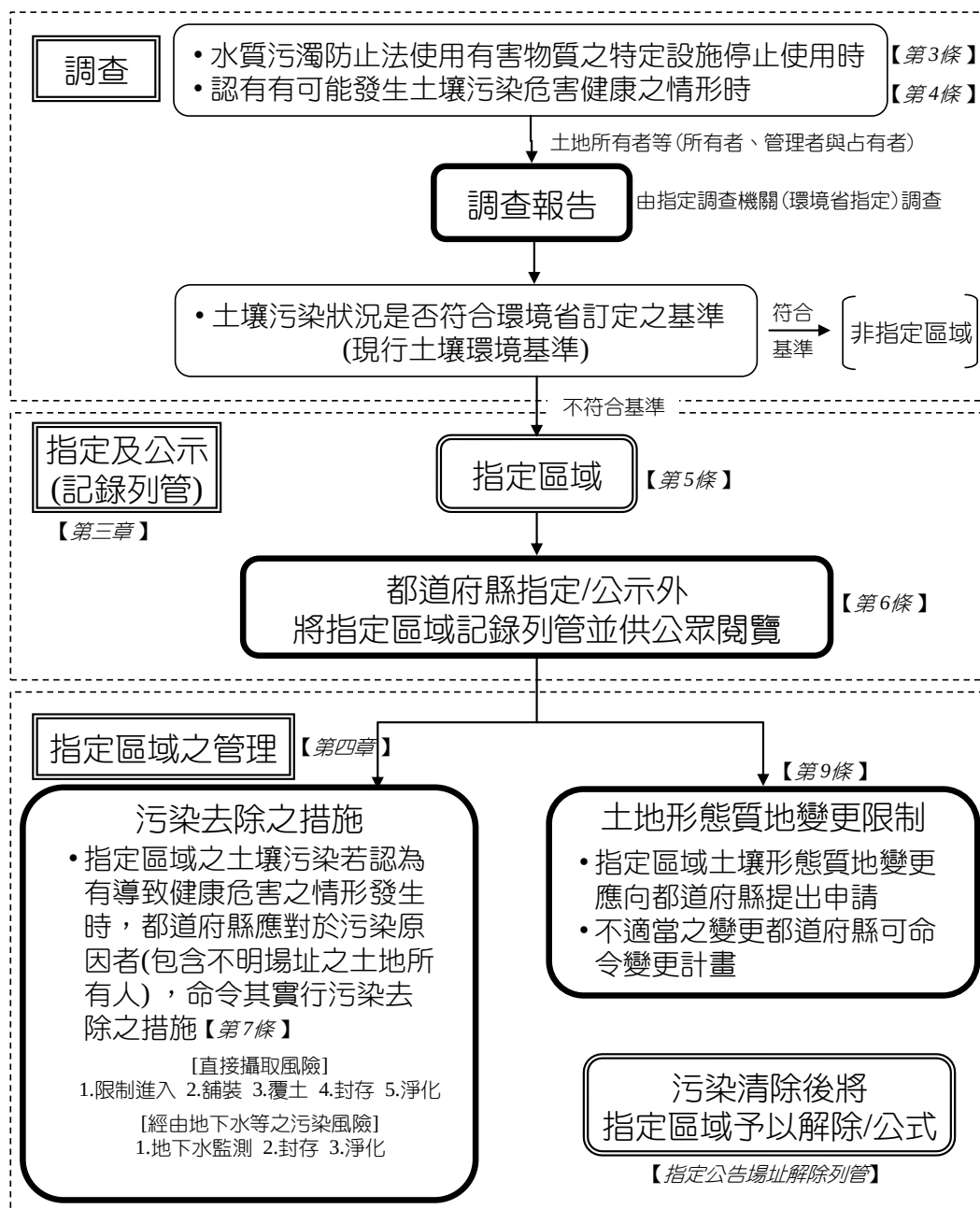
歐盟國家根據歐洲議會第 1210/90 規章，成立了歐洲環境署 (EEA)，並於 1996 年 9 月成立歐洲土壤主題中心(The European Topic Centre on Soil, ETCS)，管理各會員國土壤資訊以及發展相關技術文件，促進各國污染場址問題解決的經驗交流。但是各國對於土壤地下水污染場址管理制度仍基於各國制度法令而有所不同，以德國為例，該國於 1998 年公布聯邦土壤保護法(Federal Soil Conservation Act)，對於棄置場址以及工業污染場址進行規範管理，後續並制定污染場址土壤保護條例(Ordinance on Soil Conservation and Exiting Contaminated Sites)，規範場址評估、調查及整治相關工作。

德國聯邦環保署被賦予制定相關管制法令的責任，在管制標準訂定方面，除了一般管制標準外，特別包括為了處理緊急污染事件之緊急應變標準。應變標準係為了確保場址附近民眾之健康，無須進一步的場址調查工作確認。

其次，德國對於污染場址土地管理較特別之處，還包括依據其所在土地的利益價值將其分為一般污染場址(Contaminated Sites)及潛在污染場址(Potentially Contaminated Sites)來管理土地。潛在污染場址的定義為：

1. 已經關閉或其他已經處理完畢的廢棄物棄置場址。

2. 已經關閉的工業污染場址，或其他已經處理完畢、危害物質已經控制的工業污染場址。
3. 有具體原因，或被懷疑對個體、公眾有害的土壤污染場址。



【括弧】內文字為對應日本「土壤污染對策法」之章節條文

圖 2.1-2 日本污染場址管理流程

本指引茲將美國、日本、歐洲(德國)與國內對於污染場址整治措施之管理制度初步比較如表 2.1-1 所示。

表 2.1-1 國內外土壤及地下水污染場址整治管理比較表

項目	美國	日本	德國	我國
法規	- 資源保育及回收法(RCRA) - 全面環境應變補償及責任法(CERCLA) - 超級基金修正及再授權法(SARA)	- 土壤污染對策法 - 農用地土壤污染防止法 - 水質污濁防止法等	- 聯邦土壤保護法 - 污染場址土壤保護條例	- 土壤及地下水污染整治法(土污法) - 土污法施行細則及相關法規命令、行政規則
主管機關	- 環保署 - 州政府	- 環境省 - 各地方政府(包括都、道、府、縣行政區)	- 聯邦環保署 - 聯邦州政府	- 環管署 - 環保局
污染場址判定標準	- 場址危害性分級 - 各州自行訂定標準	- 土壤溶出量基準 - 土壤含有量基準 - 地下水基準	- 緊急應變標準 - 土壤管制標準	- 土壤污染監測標準 - 土壤污染管制標準 - 地下水污染監測標準 - 地下水污染管制標準
污染場址類別	- 場址危害性分級 - NPL	污染場址指定區域	- 潛在污染場址 - 污染場址	- 控制場址 - 整治場址
整治經費來源	- 由 CERCLA 及 SARA 授權徵收整治基金 - 自 1996 年 1 月起停止徵收	污染場址整治責任及經費來源，基本上係以污染者付費為原則	對於發現的污染場址聯邦環保署有責任進行場址管制、調查、風險評估、整治等工作，但仍以污染者付費為原則，進行後續經費歸償	- 由土污法授權，對指定公告之化學物質，依其產生量及輸入量，向製造者及輸入者徵收土壤及地下水污染整治費，並成立整治基金 - 基本上係以污染者付費為原則

二、 環保先進國家整治技術應用發展現況

(一)美國

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。

1. 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 2.1-2。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。

2. 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 2.1-3。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 2.1-2 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 2.1-3 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

另據美國環保署統計資料顯示(表 2.1-4)，油品類污染場址運用整治技術以土壤氣體抽除法最高，空氣注入法次之。美國環保署亦有相當多的整治技術公開予各界使用，針對油品類儲槽系統整治技術方面，已出版“*How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites—A Guide for Corrective Action Plan Reviewers*”指引，可供執行人員選取整治技術參考。相關整治技術文件與網站資訊可參酌：

1. 美國環保署地下儲槽辦公室(OUST)網站：
<http://www.epa.gov/oust>
2. 美國環保署創新整治技術與特性(Clu-in)：<https://clu-in.org/>
3. 美國聯邦整治技術圓桌論壇(FRTR)：<http://www.frtr.gov>

表 2.1-4 美國油品類污染場址整治技術統計

技術名稱		計畫數量	計畫規模			計畫階段		有具體資料之計畫	有成本資料之計畫
			實驗	模廠	全場	完成	進行中		
土壤氣體抽除法	Soil Vapor Extraction	138	0	1	137	19	119	129	24
空氣注入法	Air Sparging	123	1	2	120	19	104	113	39
抽出處理法	Pump-and-treat	100	0	16	84	22	78	76	43
生物復育法	Bioremediation	73	7	13	53	35	38	68	28
現地化學氧化法	In-situ Chemical Oxidation	21	0	4	17	8	13	20	2
多相抽除法	Multi-Phase Extraction	13	0	4	9	4	9	10	2
植物復育法	Phytoremediation	8	3	4	1	5	3	1	0
滲透性反應阻牆法	Permeable Reactive Barrier	6	0	2	4	4	2	4	0
熱處理	Thermal Treatment	1	0	0	1	1	0	1	0

註：美國環保署自 323 個油品類污染(與 MTBE 或其他燃料添加劑有關者)相關整治計畫進行統計，每一個計畫可能包含一個或多個整治技術。

參考文獻：USEPA, “Technologies for Treating MTBE and Other Fuel Oxygenates”, 2004 年 5 月。

(二)日本

為了達到確保污染地下水達成經濟、有效的整治技術，以及良善管理地下水的水質，並宣導相關法令措施，自 1999 年起，環境省水環境部彙編了地下水保護整治技術資料指引，並不定期更新編彙，除提供一般民眾及事業主有關於地下水保護常識、法令關係等之外，更將所有國內可執行相關整治技術之廠商、單位等，建立資料庫，包括廠商資料、整治技術內容等各項欄位，提供各界參考。其特點如下：

1. 廠商資料庫是由環境省定期維護的。
2. 清楚的瞭解國內具有實場經驗的廠商專長總覽。
3. 技術資訊是被環境省實證過的(檢附驗證結果說明)。
4. 可以提供整治需求單位，具有統一標準的整治技術選擇資料庫，減少評估篩選整治技術廠商的時間。
5. 技術交流。

在日本整治技術商資料庫中，經歷年新增管理，被分為「泛用技術」以及「新穎技術」2 類，現共有 32 個技術供應商已經環境省實證，其中可以處理油品類污染的整治技術主要包括下列幾種類型(依通用原理分類類型)：

(1)抽出處理

較傳統的、早期的處理技術，係將受污染的地下水抽出處理，分解方式包括曝氣揮發後，有機物成分再由活性炭吸附，屬於原位置現地處理的方式。其次，地上處理設備亦可以適用於各種有機物污水處理程序，包括紫外光氧化法、生物處理法、觸媒氧化法等。

雖然地面上的處理反應氣能有效的處理、分離地下水中污染物，但因為地質等環境因素限制，是否能由地下水層有效的抽出大部分的浮油，或是低溶解性的有機性溶劑物質等，反而是其整體效能的限制因素。

(2)土壤注氣抽氣法

類似土壤氣體抽除法，為現地的整治方式，但其和土

壤氣體抽除法不同的是，除了在污染區域廣泛的場址中，設置密度較高的土壤不飽和層抽氣井之外，還設置了土壤層空氣注入井，注入空氣，其目的係希望藉由注氣的作用增加土壤層中吸附污染物之脫附作用，提昇土壤污染層中氣體抽除的效率。

(3) 現地注氣法

類似於土壤注氣法，但反應系統是在於地下水位以下，其建置方式是於污染區上方設置整治井，於井中除向地下水層注氣之外，並於井內設置抽水/注水泵，藉以在整治井內產生循環性水流，降低整治井的水力梯度，促使受污染之地下水持續流入整治井內，再藉由注氣之氣提作用，移除地下水中揮發性物質。吹出之揮發性污染物再以吸附塔系統加以移除。現地注氣法可搭配地面上的土壤抽氣裝置，以主動的強化方式，增加污染氣體移除效率。

(4) 二重吸引法

即一般所謂的雙向回收法，屬現地處理方式。在受垂直污染之土壤以及地下水場址中設置垂直整治井，並視場址的實際污染情形，於土壤層、浮油層或地下水含水層中設置回收井及泵，可利用同一系統回收溶解於不同相(如氣、液、油)的污染物，而且其佔用地面空間較小，因此其應用廣泛。惟部分技術廠商技術實證結果顯示，於地下水位較淺的情形下較適用，回收率較高。

(5) 水平井法

由於許多的污染場址污染範圍擴及人口密集的住宅區，或是地面上建物密集的工業區內，若污染團位於建物正下方，無法設置垂直的整治作業井，因此，可以於污染區外空地地表上設置處理設備，再將抽水井以水平方式穿透建物下方之飽和層或不飽和層中，由水平井抽取後，至地面上的處理設備。

(6) 地下水循環生物法

於污染區之地下水上游設置注入井，下游設置抽出井

，抽出之地下水經地表之生物處理系統處理，於注入井回注地下水。亦有只於地面反應器中混入營養劑後，再回注者，其生物處理機制發生於地下水含水層中之現地微生物，惟其方法尚未經環境省所實證。

上述經環境省實證方法中，油品類污染地下水部分仍以抽出處理者較多，土壤污染部分則以土壤氣體抽除者較普遍。這些方法雖然已經實證，但是可能因污染場址環境條件不同而有所限制，在選用上仍必須加以注意。

(三)歐洲

在歐盟整合成立之後，逐漸對於環境議題中土壤及地下水污染的管理進行整合，透過各項政策性的規範條文，進行管理以及交流各國的整治技術經驗。根據歐盟報告(Annual expenditures for contaminated sites remediation in selected countries)指出，1999 年至 2000 年各國對於污染場址整治工程投注之經費，若以每人每年單位平均而言，以荷蘭最多，約達 3,500 歐元，約合 140,000 元新台幣；較少的如西班牙，約 50 歐元，約合 2,000 元新台幣，各國投注經費差異頗大。

至於整治技術發展部分，歐洲目前逐漸將整治工程技術概念，與場址評估、風險評估等結合。例如，目前各國常用的整治技術，係於污染源進行現地或是離地的處理，而侷限於場址地質特性，往往必須耗費大量的成本；可是若以風險管理而言，若能避免地下水下游民眾接觸到污染物質，即可不必大量投注整治經費。因此，以阻絕地下水污染擴散的阻絕整治技術，例如，抽水系統之水力阻牆，或是填充反應物質之地下阻牆等，為整治技術的發展趨勢，亦有節省大量整治經費的優點，有利於污染者積極參與整治工程的動機。

以英國為例，地下水管制以風險評估結果為整治目標，反應式阻牆為整治技術的發展重點，其概念為在污染區域地下水下游某處設置類似地下水的擋水牆，阻隔隨地下水擴散的污染物，但避免污染物仍繞流至下游，因此，阻牆採可透水性之設計，一方

面避免地下水流場改變，一方面可於阻牆內設置反應物質，進行反應處理，反應式阻牆依據填充物質內容可分為：

1. 物理性程序

- (1) 稀釋(Dilution)、延散(Dispersion)、擴散(Diffusion)等
- (2) 揮發作用(Volatilization)；
- (3) 吸附(Sorption)

2. 生物性降解

- (1) 好氧式(Aerobic)；
- (2) 厭氧式(Anaerobic)；
- (3) 生物共氧化(Co-oxidation)；

3. 化學反應

- (1) 吸持法(Sorption)；
- (2) 沉澱法(Precipitation)；
- (3) 酸鹼法(Acid-Base)；
- (4) 水解法(Hydrolysis)；

三、我國整治技術應用發展現況

國內之油品類污染場址統計如表 2.1-5 所示。當僅有土壤污染時，主要以開挖處理搭配排客土工法為主(54.3%)，次之為土壤氣體抽除法搭配空氣注入法(24.9%)。存在地下水污染時，以現地化學氧化法為主要使用工法(52.2%)，接著為土壤氣體抽除法搭配空氣注入法組合(40.4%)。當污染情況更嚴重或存在浮油時，則應搭配浮油回收技術及抽出處理法。

(一)土壤污染整治技術應用

1. 土壤氣體抽除法

土壤氣體抽除法為傳統土壤污染整治技術，在國內應用案例上，包括大部分之加油站污染場址、輸油管線洩漏、工廠污染場址等。

2. 土耕法

本項技術為國內油品類污染場址常用之類型，尤其以加油站儲槽洩漏、輸油管漏油等場址的污染土壤處理。例如，位於台南

縣的嘉 X 加油站，係將受污染土壤挖除送往土壤復育場(依據美國 Battelle 之技術規範建造)進行土耕法之整治復育工作。另同樣位於台南縣的新 X 加油站，也同樣採用土耕法技術進行整治。

此外，嘉義縣國道 274.5K 污染案亦將高污染濃度區土壤挖除後，以土耕法等方式進行離地的整治工作。然而，同一場址有時並不會只用一種整治方法進行整治，因此這些場址除了土壤挖除進行離地土耕法處理之外，部分未移除土壤之污染區域，則有另外以土壤氣體抽除法等其他現地整治方式進行整治。

表 2.1-5 我國加油站油品污染整治技術統計

整治技術		使用場址		
土壤污染整治				
主要	搭配使用	數量	百分比	
開挖處理	排客土	94	54.3%	69.9%
	生物復育	18	10.4%	
	化學氧化	6	3.5%	
	土壤清洗	5	1.2%	
	熱脫附	5	1.2%	
	生物堆法	1	0.36%	
土壤氣體抽除法	-	38	22%	51.4%
	空氣注入法	43	24.9%	
	生物曝氣法	8	4.6%	
現地化學氧化法		48	27.7%	
雙相抽除法	-	27	15.6%	16.8%
	空氣注入法	2	1.2%	
加強好氧生物整治法		26	15%	
介面活性劑沖排法	-	4	2.3%	4.6%
	抽出處理法	2	1.2%	
	雙相抽除法	2	1.2%	
生物曝氣法		1	0.6%	
現地電熱法	雙相抽除法	1	0.6%	
地下水污染整治				
現地化學氧化法		60	52.2%	
空氣注入法	-	10	8.8%	49.1%
	土壤氣體抽除法	46	40.4%	
抽出處理法		39	34.2%	
雙相抽除法		29	25.4%	
加強好氧生物整治法		26	22.8%	
現地地下水生物整治		6	5.3%	
生物曝氣法	-	1	0.9%	5.3%
	土壤氣體抽除法	5	4.4%	
介面活性劑沖排法		5	4.4%	
現地電熱法	雙相抽除法	1	0.9%	

參考文獻：全國土壤及地下水污染整治策略旗艦領航計畫(行政院環保署，2014)

3. 熱脫附法

例如台南縣國道 322.5K 污染案為油品類污染場址，總石油碳氫化合物(TPH)超出土壤污染管制標準，其中部分區域採取挖除土壤後，再以熱脫附法技術進行土壤整治工作。

(二)地下水污染整治技術應用

1. 空氣注入法

主要應用在加油站與輸油管線漏油場址，地下水污染物為苯與甲苯。一般污染場址在土壤及地下水均受污染之情形下，會考量將空氣注入法結合土壤氣體抽除法(AS/SVE)，以加速污染場址之整治。例如桃園縣士 X 加油站、全 X 加油站、苗栗縣雙龍橋地區輸油管線漏油場址、嘉義縣國道 274.5K 輸油管線漏油場址、台南縣嘉 X 加油站與高雄市中國石油公司苓 X 寮儲運所等，均採此一整治模式。

2. 地下水抽除處理法

主要應用在加油站場址與大型儲槽場址，例如 X 喬高雄廠。

3. 加強式生物復育

例如台南縣 X 南加油站、國道 322.5K 輸油管線漏油場址、高雄縣大旗 X 加油站及金門縣塔后地區柴油污染場址等，其主要地下水污染物為苯。置放釋氧劑之目的在處理含水層中所殘留污染物，避免因殘留污染物溶解於地下水中，再度污染地下水體。台南縣 X 南加油站與高雄縣大旗 X 加油站在整治告一段落後，分別於監測井與空氣注入井中置入釋氧劑；台南縣國道 322.5K 輸油管線漏油場址則於地下 2~3 米處以 6~8 吋之水平管填充釋氧劑，於場址地下水下游處形成一可滲透反應牆；金門縣塔后地區柴油污染場址，整治單位於場址原截流溝中置入釋氧物質，形成類似生物反應牆效果。

4. 生物漱洗法

生物漱洗法是介於傳統與新穎技術間之地下水整治技術，包括台南縣國道 322.5K 輸油管線漏油場址與高雄縣中油林園廠採此一整治技術，其地下水污染物為苯。

5. 抽出處理法

幫浦浮油回收法屬傳統地下水整治技術，例如台南縣永 X 加油站採用幫浦抽除浮油與地下水，廢水經油水分離槽處理後，回收浮油。

2.2 國內污染場址整治期間其他相關環保法令

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

一、空氣污染防制

(一)若處理製程(或設備)符合本署公告之「第一批至第七批公私場所應申請設置變更及操作許可」或「第八批公私場所應申請設置、變更及操作許可之固定污染源者」，則應依「空氣污染防制法」(以下簡稱空污法)第 24 條規定，以及「固定污染源設置與操作許可證管理辦法」，檢具相關證明文件，向當地環保主管機關申請核發固定污染源設置及操作許可證。

(二)當土壤開挖、暫存之行為符合環署空字第 940073671 號函之解釋：「…本署公告第五批各行業/堆置場係指同一公私場所，其地平面土粉粒狀物堆置場(如礦物、土石等)之總設計或實際堆置體積在 3,000 千立方公尺以上或堆置量在 6 萬公噸/年以上者，但屬室內儲放場所或位於營建工地內者不在此限」，應檢具相關證明文件，向當地環保主管機關申請核發固定污染源設置及操作許可證。

(三)依空污法第 31 條規定，在各級空氣污染防制區內不得有造成逸散空氣污染物之行為，有關場址控制計畫或整治計畫開挖之土方堆置等行為，應設置相關之污染防制措施，以避免產生逸散污染。

(四)若污染場址之土壤開挖作業，經環保機關認定屬空污法第 16 條所指之「營建工程」時，即屬建築法規規定之開挖整地之行為，應依空污法第 16 條規定繳交固定污染防制費「空氣污染防制費」。

二、水污染防治

(一)污染場址若屬水污染防治法(以下簡稱水污法)列管事業定義者，其於廠區內進行土壤及地下水污染場址控制計畫或整治計畫，並將所產生之廢(污)水納入該事業原有之廢(污)處理設施時，應依該法相關規定辦理。如於水污染防治措施變更前，應先檢具水污染防治措施計畫，經直轄市或縣市主管機關審查核准；排放廢污水於地面水體者，應向直轄市或縣市主管機關申請，經審查登記，發給排放許可證後，始得排放廢污水並應符合放流水標準等規定。

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

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

一、民國 103 年 1 月 29 日之「指定廢棄物清理法第二條第一項第二款之事業」修正公告後，自 103 年 7 月 1 日起新增實施第三十四項「採土壤離場處理之土壤或地下水污染場址」為指定事業，並於同年 4 月 11 日依環署廢字第 1030029853 號函修正污染土壤清運之相關廢棄物代碼。

二、於公告緩衝期間(民國 103 年 7 月 1 日至民國 104 年 7 月 1 日止)，離場之廢棄物運送至不同機構處理方式說明如下。

(一)離場至公民營處理機構者

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

(二)離場至再利用機構

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

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

第三章 整治技術選取策略

3.1 技術選取策略

在進行油品类儲槽系統整治技術選取之前，須了解並無一種整治技術可適用於所有場址，並保證其整治成效。一個成功的整治場址，往往具有許多客觀的條件來達成，且大部分可以在整治之前作進一步釐清，以節省整治所需之時間及金錢。為使本指引之使用者易於掌握油品类儲槽系統整治技術之選取，將優先說明技術選取之重點評估面向，接續描述技術選取流程。

一、技術選取重點評估面向

遂摘述美國環保署編製之超級基金場址整治措施選擇原則(Rule of Thumb for Superfund Remedy Selection)之提示文件，供國內環保人員參考。該文件所提示之主要工作包括風險管理、成效評估、防止污染擴散監測計畫，如圖 3.1-1 所示，個別內容說明如下：

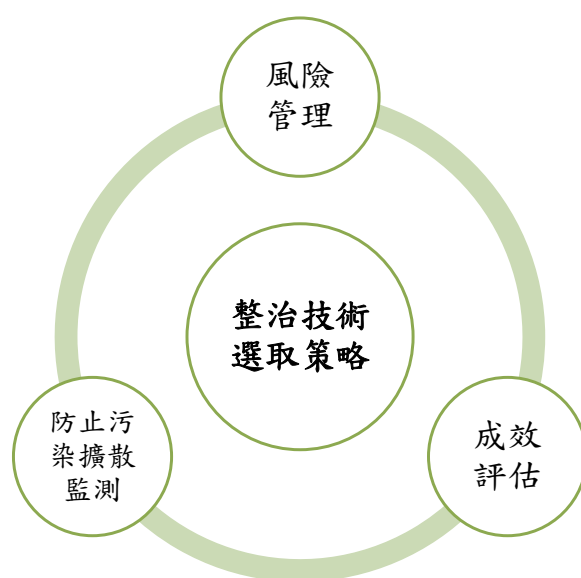


圖 3.1-1 整治技術選取重點評估面向

(一)環境與健康風險管理

整治工作的目標在於確認場址的管理能達到保護民眾健康及環境

之功效，整治技術的選擇與風險評估所得之結果息息相關。整治技術的選擇，必須能夠在預計之期限內達成整治目標的前提下進行，而不是僅以整治技術成本或施工便利程度來加以選擇。

(二) 整治方案成效評估

美國環保署建議之場址整治技術選擇審查重點如下：

1. 多項整治方法之組合：建議整治者提出及採用包括多項整治技術、工程控制、制度管理控制的整合方案。
2. 處理主要污染物：所選擇之整治技術應該要在實際可行的條件下，能處理場址污染狀況對環境所造成之主要威脅。
3. 污染物之關切原則：特殊情形下，如果有下列情形發生，須研判為整治技術不實用/不可行，在適當的情形下要求改善：
 - (1) 預定期限內，污染物未呈現明顯下降之趨勢。
 - (2) 特別大的污染區域或待處理體積，或是特別複雜的場址，可能造成部分整治技術無效。
 - (3) 整治技術反而造成整體風險(overall risk)提升，例如增加工作人員接觸污染物機會，擴散鄰近社區造成衝擊等。
 - (4) 整治技術造成多項其他環境介質的影響，例如空氣、河川表水等。
4. NAPL 特性之關切：要求將浮油(Free product)先行移除，以增加後續整治技術成功之可能性。
5. 制度管理之關切事項：當主要處理技術有不當、無效之處理情形時，適當的行政管制措施，例如土地使用限制等，可以加以執行。

(三) 防止污染擴散監測計畫

對於場址整治技術選擇之審查，美國環保署提出以下的參考重點：

1. 確定整治目標。
2. 依據場址資訊(經場址調查、風險評估等所獲得之資訊)來進行整治行動方案(整治技術)之選擇，並釐清整治承諾事項，即除了整治標準、整治目標之外，在部分特殊之地質區域，經評估

後，如提出現行整治技術無法整治、不整治之污染團永不會移動、或是整治將造成更大風險時，則排除部分區域在整治承諾範圍。

3. 評估合理整治期程。
4. 環境監測/成效監視計畫。

上述內容主要為提供環保人員對相關文件審視重點，並提供自我檢視查核之功能，但並非一個絕對的選取流程，應鼓勵與檢視發展中新穎技術之可行性。

二、技術選取流程

基於上述簡要之技術選取應留意面向，以下將進一步說明技術選取個別項目應行作為如下。

(一)描述場址污染現況

使用者是否能成功運用相關整治技術，除了本指引中所提供之基本資訊外，更重要的是「如何正確選擇一個整治技術」的觀念之建立，但閱讀參考本指引之相關人員，更應該在參與任何場址整治技術之選取評估作業之前，要求污染整治技術廠商，優先確認下列問題，全盤描述及了解一個完整的場址特徵，後續整治技術的選取才有意義：

1. 確認污染洩漏來源是否已經移除

在選用與進行整治工作之前，油品類儲槽系統業者應先確認發生油品洩漏之來源是否為本身儲槽系統所造成，可採取更換儲槽、管線或設備等改善措施，以避免油品繼續洩漏；若為外來污染，則建議應考量污染來源與範圍，並應與外來污染源一併規劃整治，以免使單方面之整治工作徒勞無功。

2. 確認詳細污染範圍調查是否已進行

進行改善前，應先針對可能污染範圍進行詳細之調查，以確認污染物實際之空間分布情形，以利整治技術之規劃與設計，並可避免因規劃設置位置不當，導致污染物移動與擴散，或因系統設置處理能量不夠，導致改善成效不佳等不良後果。

3. 確認地下水文地質資料是否已完全掌握

下水文地質狀況與整治技術能否發揮正常處理效能息息相關，故於整治技術規劃設計前，應先掌握場址與週遭地下環境之水文地質狀況與參數，必要時應進行相關探測作業或模場試驗，以確保規劃設計之整治技術，能於實場運作時，發揮應有處理功能。

4. 沒有最有效的整治技術，只有最適合的整治技術

整治技術必須依場址特性來加以選用，亦即沒有一個整治技術能適用於所有之污染場址，需考量重點包括：

- (1) 污染物之特性、分布範圍與濃度
- (2) 水文地質資料
- (3) 整治期程
- (4) 整治經費與預算
- (5) 模場試驗(pilot test)
- (6) 整治技術於污染場址之適用性

(二) 確認目標污染整治範圍

整治範圍的確定，為整治工作開始前場址特徵建立之重要工作之一，針對土污法有關「控制場址之可能污染範圍」、「整治場址之污染範圍」及「污染管制區」等劃定及作業流程建議，可使用之工具，除了本署公告之採樣及分析方法之外，請參照「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。

(三) 建立污染整治目標

整治目標之決定攸關整治技術與整治經費之多寡，而以目前國內現行法規制度而言，整治目標乃相當明確，即為須達到污染管制標準以下，方能合乎標準。

觀看歐美先進國家作法，其整治目標之訂定莫不以場址用地未來用途以及納入風險之概念進行規劃，根據各場址之特性與後續用途，評估後續造成人體或環境危害之風險程度，以訂定不同之整治目標，並採用不同之整治方法來完成。而國內目前已將風險概念納入土污法修正整體規劃中，未來整治目標之訂定，亦可能考量風險之概念，以使有限之整治經費能使用在具高風險之污染場址或區域上。

(四)推估污染總量

污染場址除了污染濃度之外，還必須推估存在環境中之污染物總量，才得以在後續整治中推算整治成效，預估整治目標可能達成時間，整治污染數量之評估可由下列程序方式建立達成：

1. 建立污染濃度分布圖
2. 以數學模式推估污染擴散速率及空間分佈量

污染調查所使用之工具，除了本署公告之採樣及分析方法之外，亦可參考「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」。

(五)評估多元技術之可行性

油品類污染的整治技術的初步篩選，可依據場址條件與污染狀況，鑑別出可用的技術，美國環保署(圖 3.1-2)與美國石油協會 API(圖 3.1-3)均有相關的篩選矩陣。篩選矩陣通常各有其共同點與特色，其中共同點的部分包括：

1. 篩選之初應取得相當程度的場址污染資訊
2. 必須先釐清浮油存在與否，必要時應先行移除浮油
3. 技術選擇基礎以飽和層/不飽和層污染為起點

這些共同點也呼應前述有關適當之場址資訊的取得與釐清的需求。在取得較完整之污染場址資料之後，務必確認是否存在浮油，因為浮油回收技術選取，與殘留相整治技術的選取截然不同，此步驟將會直接影響後續整治序列的規劃與整治技術的選擇。有關浮油回收技術，將會於最後一個步驟進一步的說明。

至於不同技術篩選方式的差異主要在於篩選因子的複雜程度。例如美國環保署的篩選矩陣，明顯較美國石油協會者簡單，主要僅依據介質中的總石油碳氫化合物濃度作為篩選基準(TPH=50,000 mg/kg)，篩選之基礎較薄弱，但也同時提供更多元化的選擇，給予工程設計方面更多的專業判斷與組合的空間。

相對的，美國石油協會所研擬之技術篩選矩陣，則具備更多層級的篩選條件，並且不僅考量技術面的需求外，亦包括利害關係人、法規、商業考量等，是屬於較全面的篩選矩陣。其次對於技術選擇的第一步，則以地下環境油品污染團的移動性(mobility)

做為基準，亦即考量污染物於地下環境之殘留相或移動相。定義上，殘留相與移動相之間的關係，可依飽和度區隔。當 LNAPL 因土壤的毛細力而附著或侷限於孔隙之間，而相對的不具移動性者即為殘留相，當 LNAPL 持續增加而超過殘留相飽和度時，即產生一連續的移動相。因此美國石油協會即從污染團移動性差異的角度，將可用之整治技術區分為二大矩陣。於各矩陣中則以類似的邏輯發展，其篩選條件除確認污染層的部份(飽和層/不飽和層)外，並加入透水係數、地下水位與污染物揮發性做為條件，篩選的基礎較為精細，但所採用的技術組成則較缺乏化學性的處理技術或較積極的處理方式。由此可見不同之篩選矩陣的切入角度不同，所得到的可用技術組合亦有所差異，必要時可採用不同之篩選矩陣的交集做為選擇的參考。

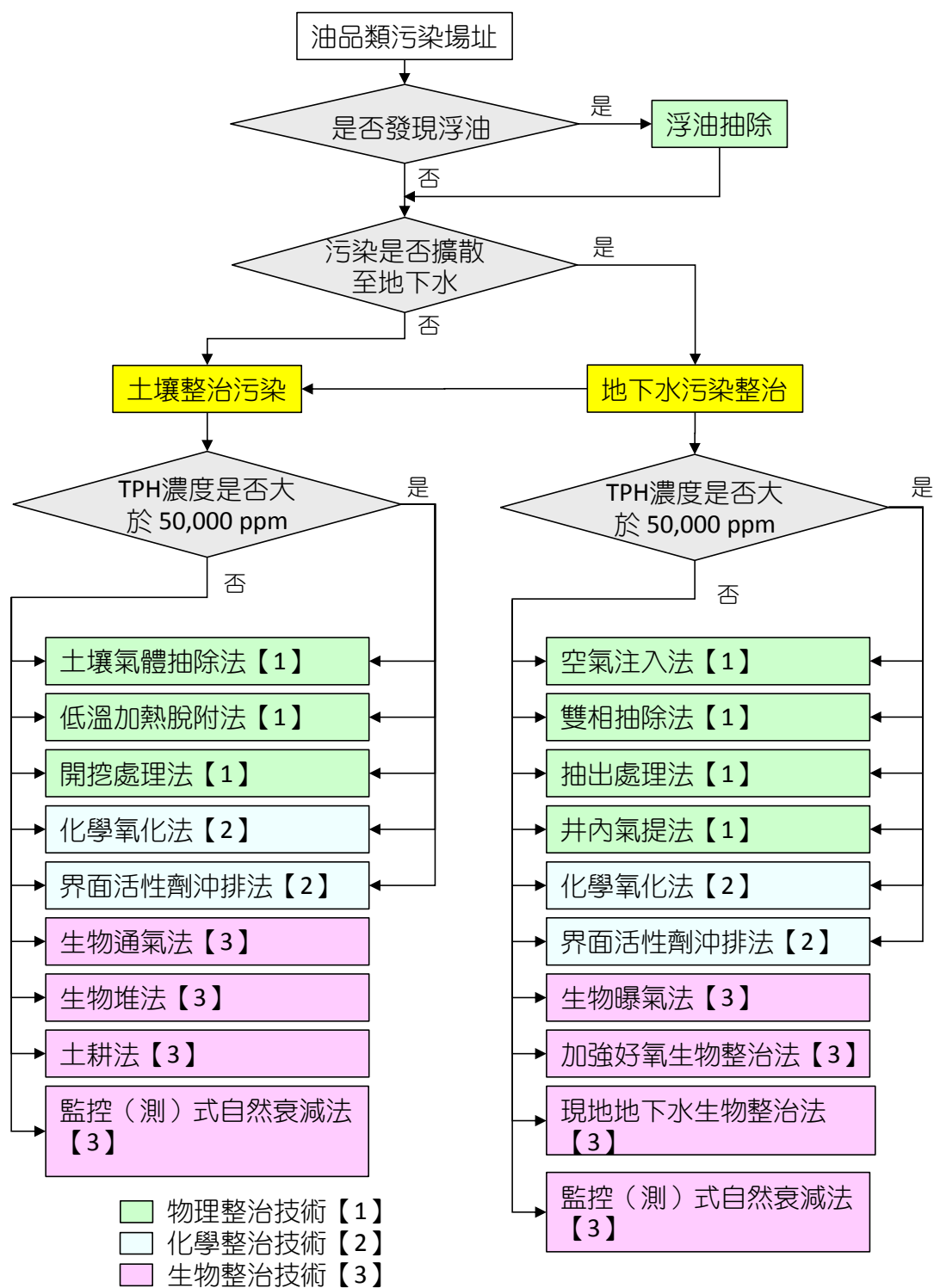


圖 3.1-2 美國環保署油品類污染整治技術快速選取流程

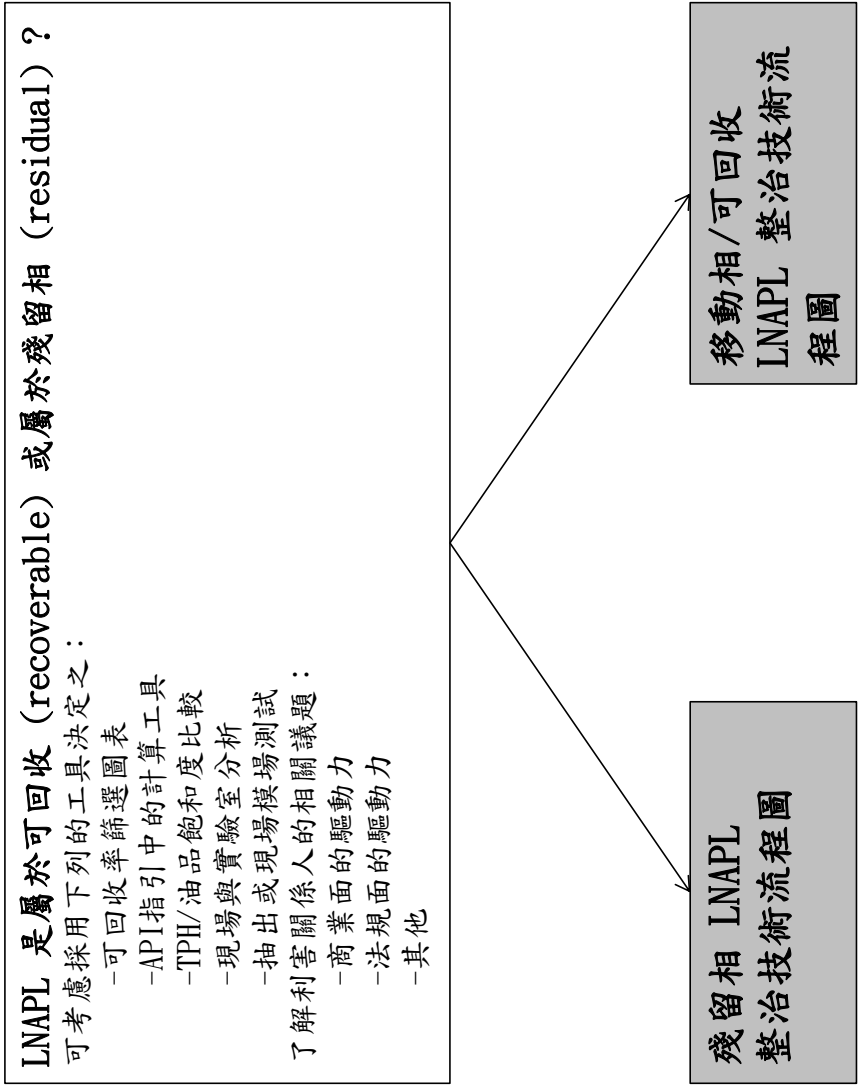


圖 3.1-3 美國石油協會油品類污染整治技術篩選矩陣

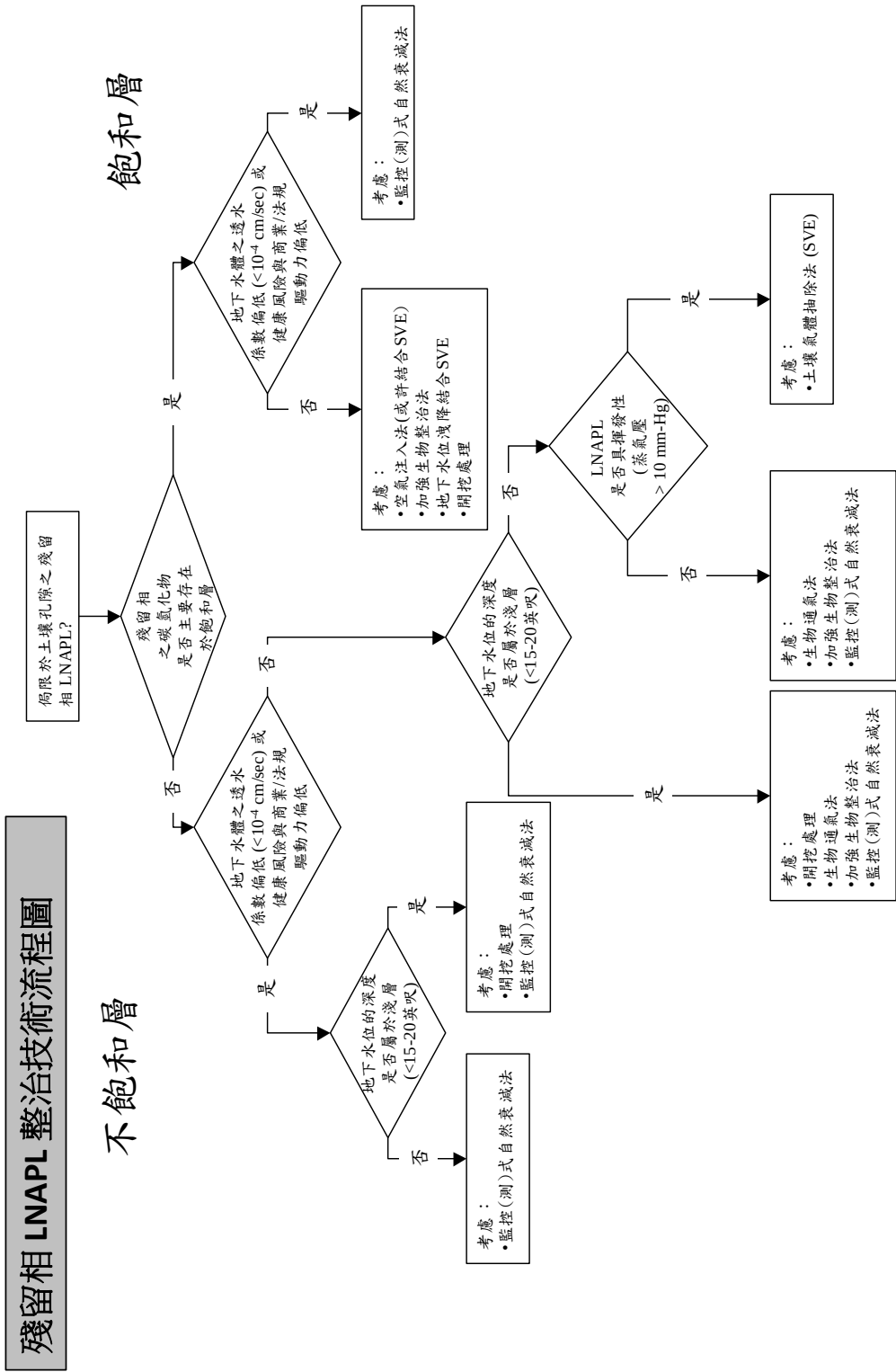
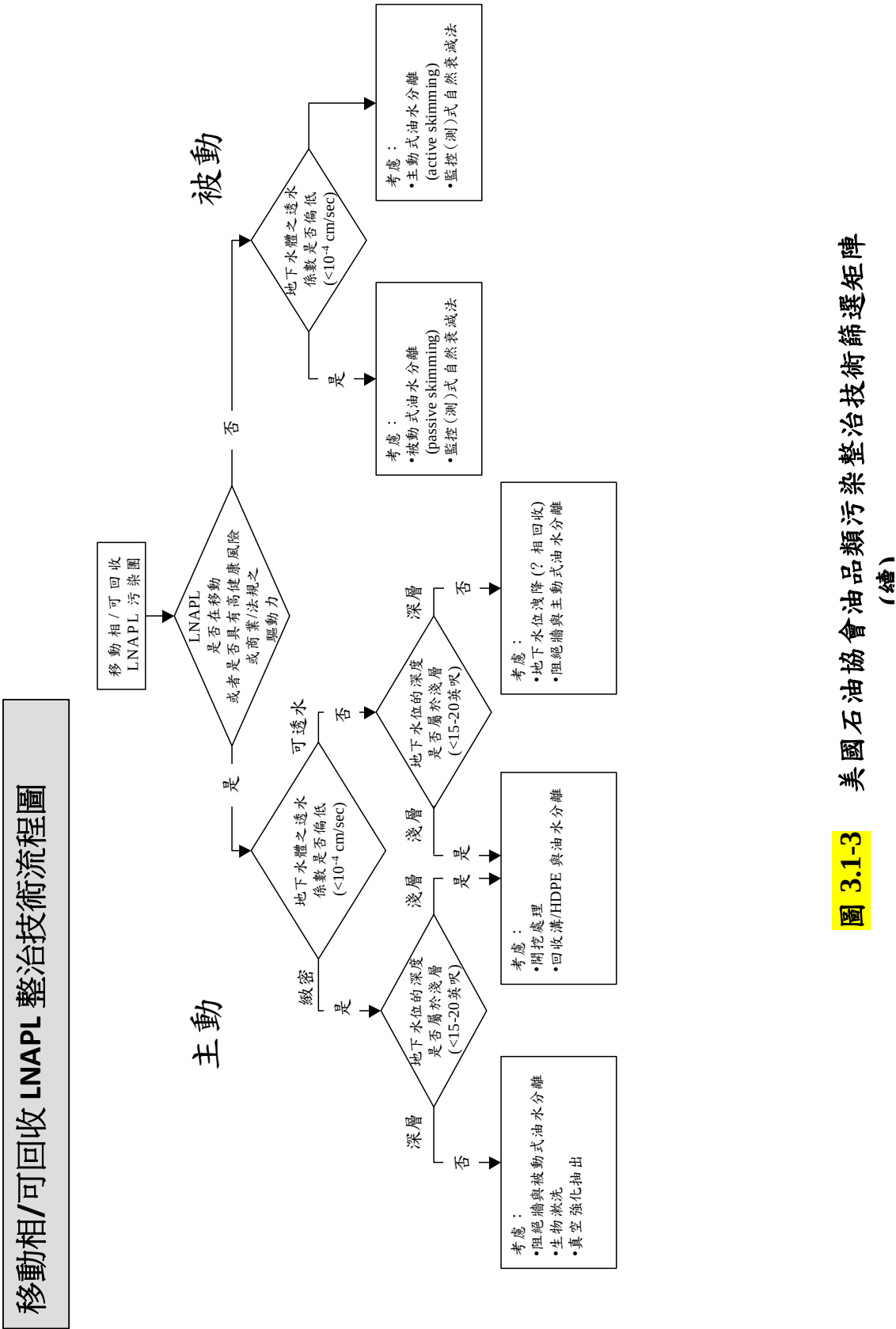


圖 3.1-3 美國石油協會油品類污染整治技術篩選矩陣 (續)



在評估與選擇可能之整治技術時，原則性的篩選步驟茲概要說明如下：

1. 確認場址是否有浮油存在

若有浮油存在時，則應先將浮油抽除處理後，再選擇其他適當之整治繼續進行後續污染改善。

2. 確認場址污染物之分佈範圍，是僅存於土壤之中，或是已擴散至地下水

污染物在還未擴散至地下水前，其整治上較為容易，因污染物仍侷限在土壤中，可採用之整治方法包括土壤氣體抽除法、開挖法、生物復育法等。當污染物一旦進入到地下水當中，其擴散較土壤中為快，且擴散之方向難以掌握，所需耗費之調查與整治成本亦增加，其適用之地下水整治技術則包括空氣注入法、抽出處理法、化學氧化法等。若污染同時存在於土壤與地下水中，則可能須使搭配使用不同之整治方法，以同時改善土壤與地下水中之污染狀況。

3. 考量污染物濃度高低，選擇合適之整治技術

一般而言，以物理或化學之處理方式較適合於高濃度污染之場址(整治初期)，且整治期程通常較快速；而生物處理方式則適合於低濃度污染之場址(整治後期)，整治期程通常較久。

依前述步驟可篩選出一整治技術群組，作為整治技術選擇之母體，為後續仍須再針對成本、整治目標、整治期程、整治技術限制等因素進行考量，將已選擇出來之整治技術進行細部之篩選、排列或調整，以選擇或搭配出真正符合場址特性與業者需求之整治技術，進行後續之改善作業。

(六) 預估整治成效、經費及期程

整治技術必須依場址特性來加以選用，亦即沒有一個整治技術能適用於所有之污染場址，此外，亦需依污染場址所在區域(例如工業區、住宅區、水源水質保護區等)之特性及環境受體之不同，而考量整治之急迫性與整治技術是否可達到整治目標之需求。

因此，於進行場址整治技術選取時，需檢視該整治技術之有效性、可行性及所需經費，亦需考量其時效性及民眾接受度，以評估決定所選取之整治技術是否適用於污染場址本身，以免花費時間與金錢後又達不到預期之整治成效。

本指引共彙整 19 項油品類污染場址之整治技術，分別詳述於附件一至附件二。各項整治技術均說明其原理、適用條件、優缺點、系統設計操作要點、環保工安注意要點、監測設備、成本及期程評估，與案例分析等，本指引之使用者，可參考本指引附件中之各項整治技術內容，以快速閱讀及查閱所需之相關資料。

(七) 蒐集整治設計所需相關資料

每一項整治技術均有其特定之參數需求，主要可分為下列各項：

1. 初步環境資訊：污染場址發生後，由主管機關確認之污染項目、污染區域、地號及污染範圍等基本場址資訊。
2. 整治技術評估資訊：每項整治技術都有其各自特殊的地質、水文等參數之特殊需求，有些參數並不會在初步調查時進行，因此，初步選定欲採用整治技術之後，應依據所選擇的技術需求參數，進行實際補充調查確認後評估，至於各技術所需之參數條件，請參酌本指引附件中各技術適用性評估說明。
3. 細部調查資訊：整治細部範圍確認之採樣計畫、建立補充調查數據。
4. 監控計畫資訊：監控整治期間，整治機具之效能。
5. 監測計畫資訊：進行土壤、地下水及其他環境介質之污染物分布情形。
6. 整治成效驗證調查：確認關切物質於整治期間濃度下降變化。而污染調查所使用之工具，除可參考本署公告之採樣及分析方法之外，亦可參考「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」，選擇性挑選快速調查技術，以增加研判數據、降低調查成本。

有關本節所述之整治技術之特定參數需求，本指引之使用者

，可參考本指引附件中之各項整治技術內容，以快速閱讀及查閱所需之相關資料。

(八)評估技術合併之可行性

因個別整治技術均有其限制以及處理極限，而各場址特性、污染狀況與類型又不相同，故沒有一種整治技術可適用於各類型污染狀況，而「整治列車」(treatment train)係同時或分階段結合兩種或兩種以上之整治技術，以符合場址特性，並期降低整治費用及縮短整治期限，使整治工作整體成效更好。在技術序列組合運用方面，可分為下列 2 種情形：

1. 同時應用 2 種以上整治技術

例如在油品類儲槽系統污染場址進行土壤氣體抽除(SVE)過程中，原不飽和層中土壤之孔隙會逐漸變得密實，使得土壤氣體抽除效益漸差，同時亦可能影響土壤中好氧性微生物之分解速率，如於場址高污染區同時設置空氣注入井，藉由注入空氣在地下水中產生氣泡，以氣提方式將地下水中的污染物帶離至不飽和層，再由土壤氣體抽除系統抽出處理，可提高整治處理之效率。

2. 分階段應用 2 種以上整治技術

例如在地下油槽污染場址中，可先將污染源高污染濃度區，以雙相抽除法、生物漱洗法或陰離子介面活性劑淋洗等，迅速將浮油予以回收。但這些整治技術僅能將土壤或地下水污染濃度降低至一定程度，部分油品仍會殘留在土壤及地下水中，因此，必須藉由其他污染整治技術，如土壤氣體抽除法、生物通氣法、生物分解法、空氣注入法或抽出處理法、化學氧化法等，進一步將土壤中殘留污染物及低污染濃度地下水有效地降解或破壞，以達到土壤及地下水污染管制標準或整治目標。

參考上述技術評估選用原則，茲舉下列兩項技術組合範例供使用者參考：

1. 土壤油品污染分階段整治案例

該案例為分階段同時應用 2 種以上之整治技術，選用整治技術示意圖如圖 3.1-4。

(1) 第一階段(整治初期)：使用土壤氣體抽除法

整治初期土壤中揮發性氣體濃度高，藉由土壤氣體之抽除，可有效降低土壤中之污染物濃度。惟當土壤中污染物濃度降至一定濃度後，剩下之污染物均緊緊被吸附於土壤顆粒孔隙中，土壤氣體抽除效果將不顯著。土壤氣體抽除法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。

(2) 第二階段(整治中、後期)：

該階段以生物通氣法與加強好氧生物整治法配合使用。生物通氣法應配合土壤氣體抽除法之進行，再於土壤中添加營養鹽，增加微生物對於污染物之分解作用，以強化污染物之處理成效。生物通氣法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。當土壤中污染物降至一定濃度以下，如採用土壤氣體抽除法、生物通氣法漸失處理成效，可考量採用加強好氧生物整治法，利用微生物對附著於土壤顆粒之污染物加以分解。加強好氧生物整治法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。

2. 地下水油品污染分階段整治案例

該案例為分階段應用 2 種以上整治技術，選用之整治技術示意圖如圖 3.1-5。

(1) 第 1 階段(整治初期)：空氣注入法或抽出處理法

整治初期地下水中污染物濃度較高，藉由空氣注入法或抽出處理法，可初步將地下水中污染物大量移除至一定程度以下。空氣注入法或抽出處理法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。

(2) 第 2 階段(整治中、後期)：生物曝氣法或現地化學氧化法

當污染物降至一定濃度以下，空氣注入法或抽出處理法之處理成效即不顯著，可考量配合空氣注入法之進行，再於土壤中添加營養鹽，以增加微生物對於污染物之分解

作用，提升整體處理效果。生物曝氣法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。

然而，我國目前之地下水污染管制標準較土壤污染管制標準為嚴格，若欲達到整治目標，必須在藉助化學方法之配合，而化學氧化法即為可達到此目的之整治技術之一。現地化學氧化法之原理、適用時機及環境介質、規劃設計要點及注意事項等，請參考本指引附件一。

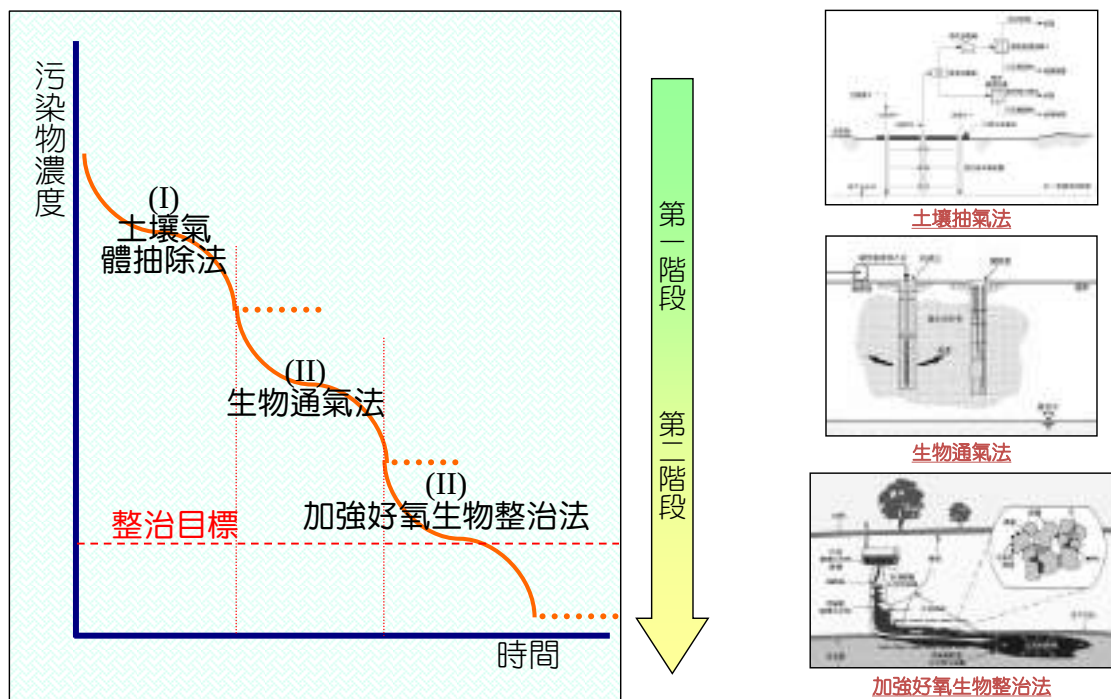


圖 3.1-4 土壤油品類污染物分階段整治技術選用案例

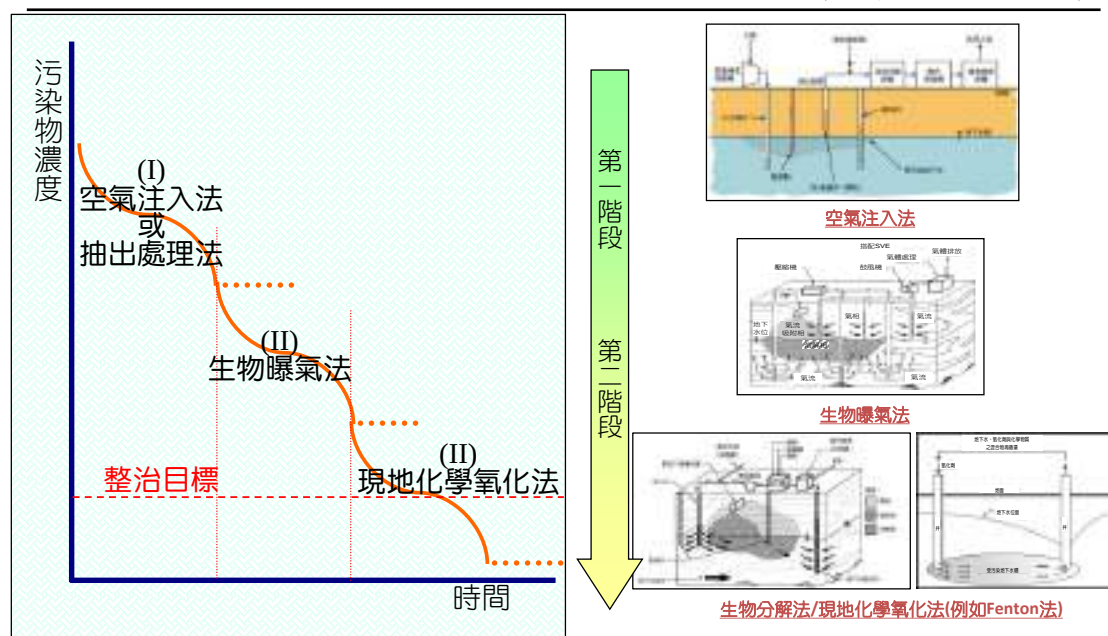


圖 3.1-5 地下水油品類污染物分階段整治技術選用案例

(九) 浮油回收技術

確認浮油存在與否以及進行回收，是進行油品污染場址整治前的必要步驟，但其相關技術是不同於整治技術。雖然有關浮油回收技術不在本指引主要探討的範圍內，為維持技術內容的完整性，茲將有關浮油回收技術之相關說明，於本小節中陳述。

1. 浮油的傳輸宿命

浮油在地下環境中的宿命與傳輸主要取決於油品的物化特性與地質的特徵。比較重要的油品特性包括密度、黏度與表面張力；在地質或土壤特性方面則包括孔隙度與透水性(permeability)，另外還有與土壤及油相都有關的毛細壓力、相對透水性、可潤濕度(wettability)、飽和度(saturation)等(USEPA, 1996)；場址特定的物理特性(如：地下水深、洩漏體積量、地下水流方向)對於洩漏油品的移動與擴散也有相當的影響。

當油品洩漏至地下環境中時，液相碳氫化合物在重力與毛細現象的影響下，傾向於向下移動。重力的影響對於密度越高的液體有越明顯的影響，毛細現象的影響則類似於水被乾海棉吸入的效應。當污染源持續洩漏，底下的土壤逐漸接近飽和，油相的前緣向更深處移動，而殘留相則吸附固定於土壤中。當洩漏量相對

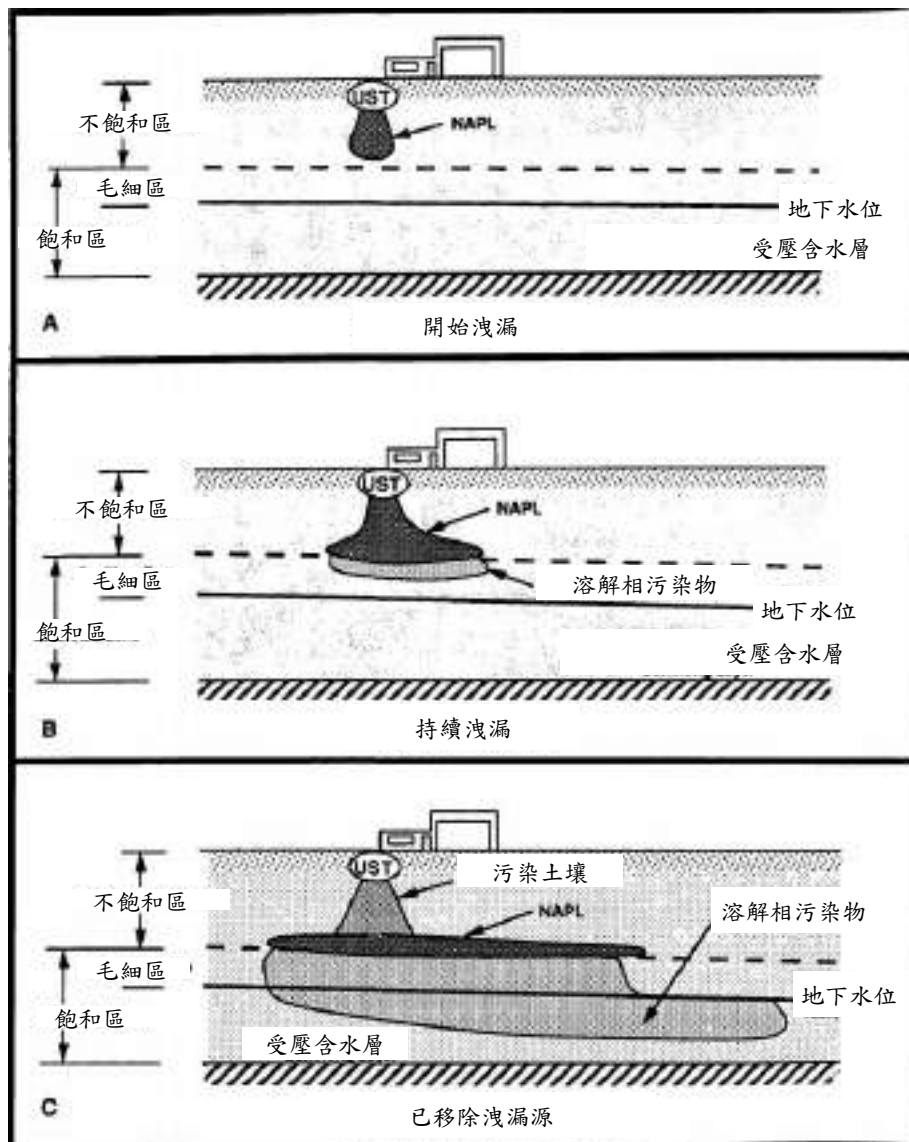
於土壤可吸附油相之量並不大時，油相會多吸附於土壤中，而幾乎完全為土壤「固定」(immobilized)。要於地下水面形成自由相，洩漏量必須足夠滿足土壤吸附或固定的量，如果沒有足夠的自由相，並沒有必要採用回收系統。不論如何，仍然必須有適切的整治行動以使殘留(吸附)相不會繼續成為一持續污染源，圖 3.1-6 所顯示的即是典型地下儲槽洩漏至地下環境中的進程(USEPA, 1990)。圖 3.1-6-A 顯示洩漏物尚未到達毛細區，如果這時候可停止洩漏，自由相的問題應該不會產生。圖 3.1-6-B 表示洩漏已持續一段時間，洩漏量足以在地下水形成自由相並取代毛細邊緣的孔隙水分或空氣。在洩漏源移除或停止的狀況下(圖 3.1-6-C)，殘留相持續存在於土壤中，自由相則向側面擴散，溶解相的碳氫化合物也向下移動，表示地下環境已形成具自由相的油品污染狀況。

2. 影響浮油回收之重要因素

(1) 孔隙度

孔隙度 (或有效孔隙度) 在評估浮油回收系統時，是一項相當重要的土壤特性，在計算自由相與吸附相時均需要有效孔隙度。基本上，孔隙度定義了地下介質的儲存量，所有的岩石與非膠結介質均有孔隙，而孔隙體積相對於總體積之百分比即為孔隙度。一般孔隙度又區分為主要孔隙 (primary porosity) 與次要孔隙 (secondary porosity)。主要孔隙是沉積或結晶石生成時所產生，當顆粒之大小幾乎一致與且為非球形時，主要孔隙是最大的；非膠結介質的主要孔隙則較低，因為其粒徑所涵蓋的範圍較廣 (即粒徑較不一致)，而小粒徑的土壤會填補於較大粒徑的土壤之間的空隙，所以其孔隙度也比較低。次要孔隙則是在沉積或岩石形成後才產生的孔隙，例如岩縫 (fracture) 與節理 (joint) 等，而要去了解地下水與浮油流經這些裂縫與節理的特性可能會特別麻煩。例如監測井安置於這些特別的孔隙的下面，在地下水流的方向與流速判斷上有可能錯誤，因為流經這種孔隙時不論是地下水或浮油速度都比較快，甚是有時接近明渠流 (open channel flow)，浮油的移動可

能在數月間移動近數公里遠。



資料來源：USEPA (1990)

圖 3.1-6 浮油傳輸宿命示意圖

(2) 透水性

透水性是設計浮油回收系統時必須考量的最重要土壤特性之一。地下水流動與浮油移動的速率都直接與透水性有關，雖然浮油的移動與其他介質特性也有關係，但透水性的變動範圍是最大（一般的土壤介質可能有 5 到 6 個幕次的變動範圍）。當地質具高透水性與高水力傳導度時，可以輕易的傳輸非黏滯流體 (non-viscous fluid)，包括地下

水或浮油。許多地質的水力傳導性多在可預測的範圍，所以在應用時通常可以依據質地，假設所謂的「典型」水力傳導性。如果所量測水力傳導在各方向均相同則稱之為等向性 (isotropic)。但在實際的狀況下，透水性會隨著量測的方向而有所改變，也就是不等向性 (anisotropy)，使得地下水或浮油的流動不見得會與(主要)水力梯度的方向一致，由於不等向性的存在，像抽水井所造成的洩降錐就不一定是對稱的，亦即不一定是圓形。

(3) 流體密度

一般在油品污染場址所見的油品密度多在 0.75 g/cm^3 到 0.99 g/cm^3 的範圍，其變動與數個環境因子有關，其中較重要的是溫度，但在地下環境中，溫度的變動不會太大，所以地下流體的密度大致上是較固定 (USEPA, 1996)。確實了解油品密度的重點是於場址量測監測井中的水位時，是在油水混合的狀況下，在水位的確認上必須將油品的密度一併考慮並針對密度差異與浮油厚度進行修正。簡單的修正公式如下式 (Wilson and Brown, 1989)：

$$h_c = h_m + H_o \times \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad \text{式 1}$$

其中

h_c ：修正後之水頭 (m)

h_m ：監測井中油水界面的高程 (m)

H_o ：浮油厚度 (m)

ρ_o ：油品的密度 (g/cm^3)

ρ_w ：水的密度 (mg/cm^3)

(4) 流體黏度

在大部分的實際應用上，黏度可以被視為對流體一種比較定性的描述，像「黏度越大流動的阻力越大」，所以黏度小的流體，其在地下流動的速度通常較快。因此在浮油回收方面，越「稀」的油品（如：汽油）比越「濃」的油品（如燃料油）容易回收。

在影響因素方面，黏度的大小是與溫度成反比，溫度越高黏度越小，回收效率會提高。所以在部分較寒冷的區域，浮油回收的效率在冬天會比夏天差。另外在時間方面，因為在地下環境時間越長，分子量較小或較容易揮發的部分揮發消失，所以一般而言黏度會隨在地下環境之時間的增加而上升。

(5) 表面張力

表面張力是控制可潤溼度的主要因子，當表面張力越大時，不相溶的兩種液體間的界面越穩定。如果完全相溶，則表面張力為 0 達因/公分 (dyne/cm)，水的表面張力 (25°C 時) 為 72 dyne/cm，至於一般油品與水的混合系統中，都在這兩個極端之間。

表面張力會隨溫度的增加而降低，同時也會受 pH 值、界面活性劑與水中氣體的影響。某些用於估計地下浮油體積與多相流體的理論模式均會需要表面張力作為輸入資料。但必須注意的是，雖然油品的表面張力多有文獻值可用，這些值通常是指純質，並不一定可以代表地下環境中的浮油團。

(6) 毛細壓力

毛細壓力是在同一孔隙空間中，兩相之間（如：碳氫有機液體和水）的壓力差。由於表面張力的差異造成不互溶相之間的界面呈現曲度，毛細壓力即為穿過此界面的壓力差。在不飽和層毛細壓力是負值（即小於大氣壓力），通常又稱之為吸啜 (suction) 或張力 (tension)。在土壤顆粒大小方面，毛細壓力在小粒徑的介質（如粉土與黏土）會大於在大粒徑的介質（如礫石），如地下水位上的毛細現象帶 (capillary fringe) 就是毛細壓力所造成，又由於毛細反壓力與孔隙大小成反比，所以毛細邊緣的高度在較細的介質中較高。浮油在地下的分布與累積主要是由毛細壓力控制，而浮油於不飽和層的穿透則是與土壤的水含量、粒徑大小與孔隙的方向有關。當浮油到達毛細邊緣時，向下穿

透的阻力會變大 (因土壤的水分)，所以開始往橫向擴散並於飽和層上開始累積，若漏油持續油品將開始取代水相。

浮油到達飽和層後，如同不飽和層的現象，碳氫化合物在小孔隙的毛細阻力影響下，傾向於往橫向擴散，然後儘可能朝較粗介質移動。浮油厚度的產生，需要有足夠的碳氫化合物的量，產生超過毛細阻力的壓力頭，這個壓力又稱之為臨界碳氫化合物厚度 (critical hydrocarbon thickness) (Schwille, 1988)。同樣地，在不均質的飽和層介質中，浮油傾向往毛細現象較弱的地方移動 (如砂岩、礫石)。

(7) 相對透水性

浮油回收系統的效能取決於浮油流過地層介質的移動力，而這種移動力是掌控於浮油與水之間的相對透水性，也就是取決於飽和度。當一種以上流體存在於孔隙介質時，流體會互相競爭所存在的孔隙空間，進而降低介質的相對透水性與流體的移動性。這種變化可以定量為介質實際透水性與相對透水性的乘積。

3. 技術選項

美國環保署所提出常用的浮油回收技術(USEPA, 1996)：

- (1) 浮油抽除與油水分離 (removal/skimming system)
- (2) 利用水位洩降回收浮油
- (3) 氣相抽出/地下水抽出
- (4) 雙相 (液相與氣相) 回收

另一方面，美國石油協會(API, 2004) 所建議之常用浮油回收技術則包括：

- (1) 阻絕牆 (barrier)
- (2) 生物漱洗 (bioslurping)
- (3) 主動/被動式油水分離 (skimming)
- (4) 地下水位洩降 (water table depression)
- (5) 回收溝系統 (trench and drain system)
- (6) 真空強化回收 (vacuum enhanced recovery)

一般而言，常用的浮油回收技術多為以物理性機制為主的程序（如抽出），雖美國環保署與美國石油協會的分類稍有不同，但其技術內容多相同。此外，部分的回收技術實際上亦是整治技術透過不同設計與建置方式，做為浮油回收之用，例如生物漱洗、地下水位洩降即屬於雙相抽除法（詳本指引附件一）的不同應用。近來逐漸受到重視的界面活性劑沖排（surfactant flushing），是結合化學性與物理性原理的回收技術，由於其回收效能高於物理性程序與且時程需求較短，在技術應用上是一項優勢。以下即就常用之浮油回收技術的應用加以說明：

4. 技術之應用

(1) 油水分離

基本上，油水分離系統的目標是要在不回收地下水（或非常少量）的條件下回收浮油。一般而言，這種方法涉及在開挖處、回收溝或回收井使用油水分離設備移除浮於地下水位上的浮油，通常用於臨時性或短期的處置。

如前面所述，油水分離設備較適用於不需要長期對污染團進行水力控制的情況，最常被應用的狀況是當浮油進入某一缺口時，作為臨時回收浮油的方法，而且一般用於浮油量小的狀況。在採用油水分離技術時，水力傳導至少要大於 10^{-4} cm/sec，以確保有足夠的浮油流入油水分離設備中。油水分離技術也可以與其他的浮油回收方法同時運作，例如安裝於監測或回收井進行水位洩降回收。

基本上有二種油水分離的回收方式：主動式與被動式。主動式回收的設備是以機械運轉的方式，主動的由回收溝或回收點將浮油抽除，所採用的機械包括浮除（floatation）、氣囊式泵浦（pneumatic pump）以及帶式油水分離（belt skimmer）。大型浮除式回收設備通常可以用很快速率的回收浮油（5 加侖/分鐘），每個油水分離設備均有只讓油類通過之疏水性井篩，所以只有浮油可以進入抽除點。大型的浮除設備一般只用於較淺的深度（< 6 公尺）而且回收井必須大於 24 英吋；小型浮除設備的深度限制則在

9 公尺左右，回收井需求為不小於 4 英吋。

帶式油水分離設備使用可吸附油之材質製成的帶狀物，以緩慢循環方式，移動經過地下水層將浮油攜帶出。這種分離方式可以很容易的安裝於不小於 4 英吋的回收井中，但一般比較適合安裝於集水(油)槽 (sump)。

(2) 水位洩降回收

水位洩降回收主要是利用抽水的方式讓井中地下水位產生洩降錐，使得污染團的浮油直接流向回收井進行回收。這種方式在運作過程中會同時回收地下水與浮油，所以後段亦需要適當的油水分離槽。在系統設計上則必須盡量減少地下水洩降的程度又能回收浮油，因為減少洩降程度可以減少同時回收的地下水量以及洩降錐產生時所造成的土壤污染區域。

利用水位洩降方式的回收系統通常適用於必須使用水力控制的場址或污染團，這些系統受到透水性與地質的限制較少。不過由於與處理後段的油水分離與水中之碳氫化合物相關的費用並不低，所以應用上還是以較高透水性的地質為主 ($> 10^{-4}$ cm/s)，而其操作期間多以長期 (1 年以上) 為設計目標 (USEPA, 1996)。此浮油回收系統的成功仰賴於回收井的數量、設置地點以及抽水(油) 速率，以使浮油回收可以更多更快。

要決定流經浮油區之浮油量還需要場址的特性參數，包括污染團範圍、水力傳導係數、水體飽和層厚度、水力梯度等，地下水流速則可用達西定律 (Darcy's Law) 估算。考量場址的各種不確定，通常會高估地下水流速，以提供設計上適當的安全係數，避免實際地下水流速高過估算值的狀況發生，而設計時所採用的總抽水速率 (pumping rate) 通常是地下水流速估算值的 1.5 到 2 倍之間。在決定了地下水流速之後，下一個考量因素就是減少洩降，因為浮油區過大的洩降會導致浮油位下降並與可吸附物 (如土壤) 接觸，反而造成浮油無法回收，根據所需之洩降與地下水

流速可以計算所需井的數量。在回收井的設置位置方面，一般而言，回收井最好放置於接近浮油團的下游，比較能達到水力控制的效果，同時也要考量出入上的方便性等。

(3) 雙相回收

雙相回收是利用真空強化抽出的方式同時抽取浮油、土壤氣與地下水。雙相系統可以在單一井點不僅完成除水的動作，同時加速不飽和層的整治 (Baker and Bierschenk, 1995)。這種方法比其他的回收技術優越的部分有：

- 在空氣/油界面或空氣/水界面不會有洩降錐的產生
- 浮油區的擴散減至最低
- 即使有洩降錐產生，回收井附近的地下水體穿透性因界面真空度的關係，仍得以維持
- 氣相（油氣）與液相（浮油）可以同時被回收

雙相回收技術有二種配置的概念，主要的差異僅在於抽接管在井中之垂直位置的不同。一般的真空/抽水系統是直接將抽出管出口置於地下水中，採用單一泵浦同時抽取水與浮油，由於回收井為氣密設計，所以回收井上部產生真空而有回收油氣之效果。另外一種系統則是設計同時用單一泵浦同時抽取浮油、空氣與水，所以將抽出管或抽氣管的出口置於空氣/浮油的界面，這種設置即為一般所稱的生物啜吸。有時雙相回收系統可以藉由地下水抽取量與回收井的數量與位置的設計，達到利用水力控制限制浮油團的擴散。雙相回收系統的適用條件包括：

- 中等透水性地質 ($<10^{-3}$ cm/s) 或較薄的浮油厚度 (<15 cm)
- 地下水位界於 1.5 到 6 公尺
- 傳統的抽出法或回收溝技術不適用
- 浮油團位於鋪面或不透氣表面之下

當雙相回收系統之浮油回收體積不夠多的時候，就該考慮停止操作，所以訂定停止運作之標準也是系統建置時

必須審慎考慮的條件。停止運作的標準可能包括總浮油回收率與回收/監測井中浮油厚度。浮油厚度應按季或按月進行監測，以確保回收/監測井中的厚度在規定時間內（如 2 年）沒有超過閾值（如 3 公分），這個閾值也同時可以作為重新啟動回收設備的參考。

3.2 案例解析

一、國內成功整治

台灣南部某加油站資訊如表 3.2-1。該場址於民國 78 年起營運至民國 95 年終止營運，設有 6 座油槽，各油槽容量皆為 50 公秉。本署於民國 92 年「全國十年以上加油站及大型儲槽潛在污染源調查計畫」查證確認土壤中苯、甲苯、二甲苯及 TPH，地下水中苯、甲苯超過管制標準，依土污法第七條第五項命其採取應變必要措施。然而，於民國 95 年再次查證未通過，即公告為土壤及地下水控制場址，同年公告為土壤及地下水整治場址。該場址之整治計畫茲根據污染程度，研擬不同的整治措施。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

該場址鄰近區域多為民宅與商業建物，四周緊鄰住宅皆無使用地下水情況，僅部份洗車廠設有抽水井供用水不足時備用。

2. 土壤特性

該場址土壤地質調查係透過地質鑽探、土壤孔隙水導電度探測、透地雷達探測及微水試驗，確認該場址土壤以砂質土為主且地質特性均一。

3. 地下水特性

透過單井流向儀與模擬軟體，研判該場址內地下水流向由東向西流動。

表 3.2-1 台灣南部某加油站場址資訊

項目	說明
場址名稱	台灣南部某加油站場址
關切污染物	土壤：苯、甲苯、二甲苯及 TPH 地下水：苯、甲苯
整治工法	開挖處理、化學氧化法、雙相抽汲法
整治期程	民國 96 年至民國 98 年

4. 污染範圍

(1) 土壤

在深度較淺區域(1.5m~4m)內土壤污染較為顯著，有較多苯、甲苯、二甲苯及 TPH 超過管制標準 20 倍點位，污染深度較深(2.5m~4.5m)之超標點位相對較少。

(2) 地下水

地下水中超過管制標準項目為苯、甲苯、1,2-二氯乙烷、總酚及萘。根據定深度即時採樣檢測結果顯示，污染深度可能抵達 10 公尺，但情形較不嚴重。由 MIP 調查結果顯示，最大地下水污染深度介於 2~5 公尺間，地電阻探測結果顯示地表下 3~5 公尺具有高電阻反應，推測為石油污染團所造成，因此地下水高污染潛勢區研判為地表下 2~5 公尺間。

(二) 整治方法

根據土壤與地下水污染情況不同所區分之高污染區及低污染區示意圖如圖 3.2-1。各區域內之整治方法說明如下：

1. 場址外監測範圍

於上游高污染區尚未整治前，並於下游進行周界污染注藥及抽水控制防止污染擴大，屬於化學氧化處理整治工法之應用。

2. 高污染區

該區域內存在土壤之 TPH 濃度大於 10000ppm 之採樣點，由於污染情況較為嚴重，採用兩階段分別開挖 5 公尺與 5~7 公尺之污染土方，其挖出土方將運至場外處理。開挖後區域，以現地裸孔化學氧化注藥方式，整治地表下 7~10 公尺地下水污染，待確

認污染物濃度無回升情況後，回填乾淨土方。高污染區域占總公告區域 75%。

3. 低污染區

屬於污染物濃度較低區域，未以開挖方式進行改善，而以現地化學氧化搭配雙相抽汲法進行處理。

(三) 整治成果

自民國 95 年公告為土壤及地下水污染整治場址後，於民國 96 年提出土壤及地下水污染整治計畫書，並於民國 98 年提出土壤及地下水污染改善完成報告書，共歷時 2 年時間進行整治，已將土壤中苯、甲苯、乙苯、二甲苯、TPH，地下水中苯、甲苯、1,2-二氯乙烷、總酚及萘之濃度降至管制標準以下。

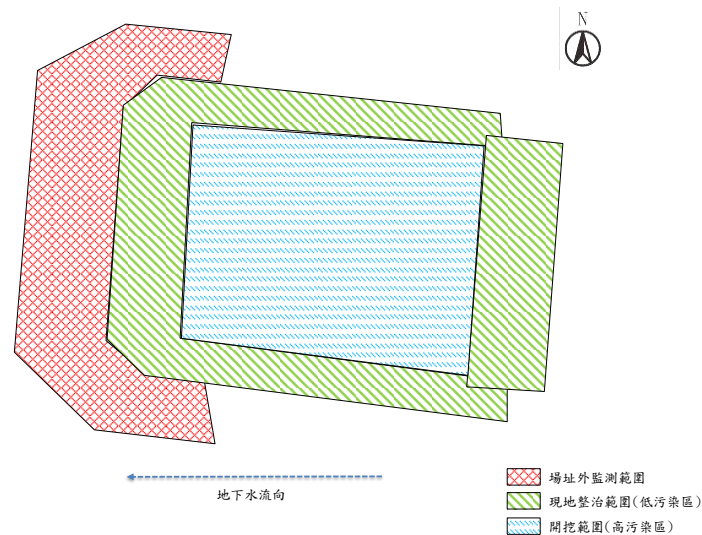


圖 3.2-1 台灣南部某加油站場址-不同污染情形之整治分區圖

二、 國外成功整治案例

(一)場址污染歷史描述

緬因州的 LORING 空軍基地(LORING AIR FORCE)資訊如表 3.2-2。美國環保署 Superfund 場址編號為 ME9570024522；該基地自 1940 年起由美國空軍管理使用，基地設施包括停機坪、維修廠、彈藥庫等，廠區內許多地方曾經運作、儲存、棄置或處理一些有害廢棄物以及油品類產品，造成儲槽、管線洩漏等。自 1994 年起，基地關閉並執行整治工作。

(二)整治區劃分

本場址根據美國 CERCLA 法令，首先提出整治工程評估(Evaluation)以及經濟分析(Cost analysis)報告，並提出污染源控制以及處理方案，全場址可分為「土壤污染整治區」、「地下水污染整治區」以及「地面水體整治區」。本案例探討「土壤整治區」的整治技術，其整治區採用了數種方案，執行期間逐年評估執行成效，其中包括了生物通氣法的整治技術。

本案例整治概念值得注意的是，本場址「土壤整治區」(執行單元, Operable Units)依據區內土壤污染程度不同，再細分各整治場址，而每場址均採用不同的整治方案，包括：

1. 無行動
2. 浮油回收
3. 現地土壤抽氣法
4. 生物通氣法

本案例土壤整治區的各場址整治方案詳如表 3.2-3 說明。另外，就本案例之整治技術而言，是「分區」、「不分階段」執行，也就是較高階之整治技術如生物通氣法等，並不是等土壤抽氣法無法達到成效才執行，而是一開始即評估其污染程度，以及場址適用性，確定後即執行土壤通氣法。

表 3.2-2 緬因州的 LORING 空軍基地場址資訊

項目	說明
場址名稱	緬因州的 LORING 空軍基地場址
關切污染物	土壤：VOC(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)、SVOC(萘、2-甲基萘) 地下水：無
整治工法	生物通氣法

(三) 整治成效評估

在 OU5 區域「FJETC」場址(約 1.2 英畝)中，使用了生物通氣法整治，其場址中包括了柴油類、航空用油的土壤污染，相關的污染物還包括 VOC(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)以及 SVOC(萘、2-甲基萘)等，1995 年場址開始整治起，即評估採用生物通氣法，這符合了土壤氣體抽除法可能還不足以對較汽油類揮發性低之柴油類達成整治成效的預期，加強了生物通氣作用，可以加速污染物分解，才再容易被抽除。更值得注意的是，於執行期間，土壤層中存在少量較低濃度之含氯有機污染物，也因生物通氣作用而有降解、被抽除的情形。

生物通氣系統從 1994 年至 1998 年持續 4 年後評估，經過土壤採樣驗證，發現包括苯、甲苯、二甲苯、萘、三氯乙烯、1,2-二氯乙烯及 TPH 等均被本署驗證整治有效，但尚未達到以風險考量為主的整治目標。

表 3.2-3 美國 LORING 空軍基地整治場址分區整治說明

區域	場址代號	整治方案	污染物及環境介質
OU5	NDA	無行動方案	油品類污染地下土壤層
	FJETC	生物通氣法	油品類及溶劑污染土壤
	SSA	無行動方案	表土及地下土壤層污染
OU8	FTA	浮油回收	油品類浮油
		無行動方案	表土及地下土壤層污染
	UTS	無行動方案	表土及地下土壤層污染
OU9	AHS	生物通氣法	油品類污染地下土壤層
OU10	ES	現地土壤氣體抽除	溶劑污染地下土壤層
		無行動方案	油品類污染地下土壤層
	JEBS	現地土壤氣體抽除	溶劑污染地下土壤層
OU11	BL	現地土壤氣體抽除	溶劑污染地下土壤層

參考資料：EPA Superfund record of decision：Site within operable units (OUs) 5, 8, 9, 10, and 11 record of decision . USEPA, EPA /ROD/R01-99/119, 1999.

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。

表 4.1-1 污染場址整治之一般安全措施

類別	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

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，請詳本指引附件整治技術內容。

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。

参考文献

1. API (2004) API Interactive LNAPL Guide, version 2.0.4, American Petroleum Institute, Washington DC, U.S.A.
2. Baker, R.S., and J. Bierschenk (1995) Vacuum-enhanced recovery of water and NAPL: Concept and field test, Journal of Soil Contamination, 4(1), pp. 57-76.
3. EEA (2002) Annual Expenditures for Contaminated Sites Remediation in Selected Countries (EUR per capital and year), Partly Estimations, European Environment Agency, February.
4. Schwille, F. (1988) Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media, Lewis Publishers, Chelsea, MI.
5. USACE (2003) Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies, EM 1110-1-4007, 15 August 2003
6. USEPA (1990) Assessing UST Corrective Action Technologies: Early Screening of Cleanup Technologies for the Saturated Zone, EPA/600/2-90/027, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH.
7. USEPA (1996) How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites - A Guide for State Regulator, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA-510-R-96-001, Washington, D.C., USA.
8. USEPA (1997) Rule of Thumb for Superfund Remedy Selection, EPA 540-R-97-013, USEPA, Washington DC, U.S.A.
9. USEPA (1999) EPA Superfund Record of Decision : Site within Operable Units (OUs) 5,8,9,10,and 11 Record of Decision ” , EPA /ROD/R01-99/119, USEPA, Washington DC, U.S.A.

10. 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
11. USEPA (2001) Comprehensive Five-year Review Guidance, EPA 540-R-01-007, OSWER No.9355.7-03B-P, USEPA, Washington DC, U.S.A.
12. USEPA (2004) How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-R-04-002, USEPA, Washington DC, U.S.A.
13. USEPA (2004) Technologies for Treating MTBE and Other Fuel Oxygenates, USEPA, Washington DC, U.S.A.
14. USEPA (2013) Superfund Remedy Report: Annual Status Report (14th Edition) ,EPA 542-R-13-016, 2013
15. USEPA, Clu-in, <https://clu-in.org/>
16. USEPA, Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), <http://www.frtr.gov>
17. USEPA, Office of Underground Storage Tanks (PUST),<http://www.epa.gov/OUST>
18. Wilson, S. and R. Brown (1989) In-situ bioreclamation: A Cost-Effective Technology to Remediate Subsurface Organic Contamination, Ground Water Monitoring Review, 9:1, pp. 173-179.
19. 行政院環保署，全國土壤及地下水污染整治策略旗艦領航計畫，2014
20. 行政院環保署，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. 行政院環保署，油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊，2006
22. 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
23. 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
24. 行政院環境保護署，土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引，EPA-25-III-05B-2015-002，2015
25. 行政院環境保護署，公民營廢棄物清除處理機構許可管理辦法，中華民國 101 年 12 月 5 日行政院環境保護署環署廢字第 1010109839 號令，2015
26. 行政院環境保護署，水污染防治法，中華民國 104 年 2 月 4 日總統華總一義字第 10400014261 號令，2015
27. 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
28. 行政院環境保護署，環境檢驗所，<http://www.niea.gov.tw/>
29. 行政院環境保護署，行政院環境保護署事業廢棄物再利用管理辦法，中華民國 101 年 1 月 19 日環署廢字第 1010006041 號令，2012
30. 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

土壤及地下水油品類污染
整治作業參考指引
(附件一)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-002

附件一 目錄

	頁碼
一、 土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction)	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	附件一-5
1.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-5
1.2.2 整治系統單元	附件一-14
1.2.3 整治系統監測	附件一-14
1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-16
1.3 成本及期程評估	附件一-16
二、 生物通氣法(Bioventing).....	附件一-19
2.1 整治技術簡介	附件一-19
2.1.1 原理	附件一-19
2.1.2 適用條件	附件一-20
2.2 整治系統操作與設計	附件一-23
2.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-23
2.2.2 整治系統單元	附件一-25
2.2.3 整治系統監測	附件一-26
2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-27
2.3 成本及期程評估	附件一-28
三、 生物堆法(Biopiles).....	附件一-29
3.1 整治技術簡介	附件一-29
3.1.1 原理	附件一-29
3.1.2 適用條件	附件一-30
3.2 整治系統操作與設計	附件一-34

3.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-34
3.2.2	整治系統單元.....	附件一-36
3.2.3	整治系統監測.....	附件一-36
3.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-37
3.3	成本及期程評估.....	附件一-38
四、	空氣注入法(Air Sparging).....	附件一-39
4.1	整治技術簡介.....	附件一-39
4.1.1	原理.....	附件一-39
4.1.2	適用條件.....	附件一-40
4.2	整治系統操作與設計.....	附件一-43
4.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-43
4.2.2	整治系統單元.....	附件一-43
4.2.3	整治系統監測.....	附件一-44
4.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-44
4.3	成本及期程評估.....	附件一-45
五、	生物曝氣法(Biosparging)	附件一-47
5.1	整治技術簡介.....	附件一-47
5.1.1	原理.....	附件一-47
5.1.2	適用條件.....	附件一-47
5.2	整治系統操作與設計.....	附件一-52
5.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-52
5.2.2	整治系統單元.....	附件一-52
5.2.3	整治系統監測.....	附件一-53
5.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-54
5.3	成本及期程評估.....	附件一-55
六、	現地地下水生物整治法(In-Situ Groundwater Bioremediation).....	附件一-56
6.1	整治技術簡介.....	附件一-56
6.1.1	原理.....	附件一-56

6.1.2	適用條件	附件一-58
6.2	整治系統操作與設計	附件一-63
6.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-63
6.2.2	整治系統單元	附件一-67
6.2.3	整治系統監測	附件一-68
6.2.4	二次污染防治與安全衛生	附件一-69
6.3	成本及期程評估	附件一-69
七、	雙相抽除法(Dual-phase Extraction).....	附件一-71
7.1	整治技術簡介	附件一-71
7.1.1	原理	附件一-71
7.1.2	適用條件	附件一-75
7.2	整治系統操作與設計	附件一-80
7.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-80
7.2.2	整治系統單元	附件一-81
7.2.3	監測設備	附件一-83
7.2.4	環保工安注意要點	附件一-84
7.3	成本及期程評估	附件一-85
八、	井內氣提法(In-Well Air Stripping).....	附件一-87
8.1	整治技術簡介	附件一-87
8.1.1	原理	附件一-87
8.1.2	適用條件	附件一-88
8.2	整治系統操作與設計	附件一-89
8.2.1	整治系統設計與操作要點	附件一-89
8.2.2	整治系統單元	附件一-90
8.2.3	整治系統監測	附件一-90
8.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件一-90
8.3	成本及期程評估	附件一-94
九、	現地化學氧化法(In-Situ Chemical Oxidation).....	附件一-95

9.1	整治技術簡介.....	附件一-95
9.1.1	原理.....	附件一-95
9.1.2	適用條件.....	附件一-97
9.2	整治系統操作與設計.....	附件一-101
9.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-101
9.2.2	整治系統單元.....	附件一-104
9.2.3	整治系統監測.....	附件一-105
9.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-106
9.3	成本及期程評估.....	附件一-108
十、	界面活性劑沖排法(Surfactant Flushing).....	附件一-110
10.1	整治技術簡介.....	附件一-110
10.1.1	原理.....	附件一-110
10.1.2	適用條件.....	附件一-113
10.2	整治系統操作與設計.....	附件一-115
10.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-115
10.2.2	整治系統單元.....	附件一-116
10.2.3	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-117
10.2.4	整治系統監測.....	附件一-117
10.3	成本及期程評估.....	附件一-117
十一、	加強好氧生物整治法(Enhanced Aerobic Bioremediation)	附件一-119
11.1	整治技術簡介.....	附件一-119
11.1.1	原理.....	附件一-119
11.1.2	適用條件.....	附件一-121
11.2	整治系統操作與設計.....	附件一-124
11.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-124
11.2.2	整治系統單元.....	附件一-124
11.2.3	整治系統監測.....	附件一-126
11.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-126

11.3 成本及期程評估	附件一-127
十二、 滲透性反應阻牆法(Permeable Reactive Barrier)	附件一-128
12.1 整治技術簡介	附件一-128
12.1.1 原理	附件一-128
12.1.2 適用條件	附件一-130
12.2 整治系統操作與設計	附件一-132
12.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-132
12.2.2 整治系統單元	附件一-137
12.2.3 整治系統監測	附件一-137
12.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-137
12.3 成本及期程評估	附件一-138
十三 電動力法(Electronics Remediation)	附件一-140
13.1 整治技術簡介	附件一-140
13.1.1 原理	附件一-140
13.1.2 適用條件	附件一-142
13.2 整治系統操作與設計	附件一-144
13.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-144
13.2.2 整治系統單元	附件一-145
13.2.3 整治監測	附件一-146
13.2.4 二次污染防治與安全衛生管理	附件一-146
13.3 成本及期程評估	附件一-147
十四、 植物復育法(Phytoremediation).....	附件一-148
14.1 整治技術簡介	附件一-148
14.1.1 原理	附件一-148
14.1.2 適用條件	附件一-150
14.2 整治系統操作與設計	附件一-151
14.2.1 整治系統設計與操作要點	附件一-151
14.2.2 整治系統單元	附件一-152

14.2.3	整治系統監測.....	附件一-153
14.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-153
14.3	成本及期程評估.....	附件一-153
十五	監控(測)式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation).....	附件一-155
15.1	整治技術簡介.....	附件一-155
15.1.1	原理.....	附件一-155
15.1.2	適用條件.....	附件一-157
15.2	整治系統操作與設計.....	附件一-161
15.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-161
15.2.2	整治系統單元.....	附件一-162
15.2.3	整治系統監測.....	附件一-163
15.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-163
15.3	成本及期程評估.....	附件一-164
十六、	抽出處理法(Pump and Treat)	附件一-165
16.1	整治技術簡介.....	附件一-165
16.1.1	原理.....	附件一-165
16.1.2	適用條件.....	附件一-165
16.2	整治系統操作與設計.....	附件一-167
16.2.1	整治系統設計與操作要點.....	附件一-167
16.2.2	整治系統單元.....	附件一-168
16.2.3	整治系統監測.....	附件一-168
16.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件一-169
16.3	成本及期程評估.....	附件一-169

圖目錄

	頁碼
圖 1.1.1-1 土壤氣體抽除法單元流程.....	附件一-1
圖 1.1.2-1 土壤氣體抽除法技術評估程序.....	附件一-3
圖 1.2.1-2 SVE 垂直抽氣井構造	附件一-11
圖 1.2.1-3 SVE 水平抽氣井構造	附件一-12
圖 1.2.1-4 鼓風機型式與適用範圍.....	附件一-13
圖 1.3-1 污染物濃度削減與質量移除之關係.....	附件一-17
圖 2.1.1-1 生物通氣法處理系統.....	附件一-20
圖 2.1.2-1 生物通氣法簡易評估流程.....	附件一-21
圖 3.1.1-1 生物堆法處理系統.....	附件一-30
圖 3.1.2-1 生物堆法簡易評估流程.....	附件一-31
圖 4.1.1-1 空氣注入法搭配氣體抽出法處理系統.....	附件一-39
圖 4.1.2-1 空氣注入法評估流程.....	附件一-40
圖 5.1.2-1 生物曝氣法評估流程.....	附件一-48
圖 5.2.2-1 生物曝氣法處理系統.....	附件一-52
圖 6.1.1-1 現地地下水生物整治法處理系統-類型一.....	附件一-57
圖 6.1.1-2 現地地下水生物整治法處理系統-類型二.....	附件一-58
圖 6.1.2-1 現地地下水生物整治法評估流程.....	附件一-60
圖 7.1.1-1 單泵回收井設備示意圖.....	附件一-72
圖 7.1.1-2 雙泵回收井設備示意圖.....	附件一-73
圖 7.1.1-3 單管雙相回收系統示意圖.....	附件一-74
圖 7.1.1-4 生物漱洗井結構示意圖.....	附件一-74
圖 7.1.2-1 雙相抽除法簡易評估流程.....	附件一-76
圖 8.1.1-1 井內氣提法之結構與運作原理示意圖.....	附件一-87
圖 8.2.1-1 NoVOCs 系統設計圖.....	附件一-91
圖 8.2.1-2 UVB 系統設計圖	附件一-92
圖 8.2.1-3 DDC 系統設計圖	附件一-93
圖 9.1.2-1 現地化學氧化法簡易評估流程.....	附件一-99
圖 9.2.1-1 MnO ₄ -殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表	附件一-104

圖 9.2.1-1	S2O8 ²⁻ -殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表	附件一-104
圖 10.1.1-1	界面活性劑沖排移除 NAPL 機制	附件一-110
圖 10.1.1-2	界面活性劑的基本結構特性	附件一-112
圖 10.1.1-3	界面活性劑(含共溶劑)沖排法的基本架構	附件一-113
圖 10.1.2-1	界面活性劑(含共溶劑)沖排法評估流程	附件一-114
圖 11.1.1-1	釋氧化合物供給法處理系統	附件一-120
圖 11.1.1-2	純氧注入法處理系統	附件一-120
圖 11.1.1-3	過氧化氫滲濾法處理系統	附件一-121
圖 11.1.2-1	加強好氧生物法評估流程	附件一-122
圖 12.1.1-1	滲透性反應阻牆示意圖	附件一-128
圖 12.2.1	透水性反應式阻牆之工法	附件一-133
圖 12.2.1-2	依結構深度分類之 PRB 工法	附件一-136
圖 13.1.1-1	電滲透流示意圖	附件一-141
圖 13.1.1-2	電動力法土壤污染現地處理概念	附件一-141
圖 14.1.1-1	植物整治法土壤污染處理概念	附件一-149
圖 15.1.1-1	監控(測)式自然衰減法生物作用差異性示意圖	附件一-157
圖 15.1.2-1	監控(測)式自然衰減法評估查核流程	附件一-158

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.1.2-1 土壤氣體抽除技術查核表	附件一-4
表 1.1.2-2 土壤氣體抽除技術優缺點	附件一-4
表 1.2.1-1 土壤滲透性及 SVE 效率對照表	附件一-5
表 1.2.1-2 地下水高度及 SVE 效率	附件一-5
表 1.2.1-3 常見油品類污染物及蒸氣壓	附件一-6
表 1.2.1-4 油品類污染物及沸點範圍	附件一-6
表 1.2.1-5 油品類污染物及沸點範圍	附件一-7
表 1.2.1-6 SVE 抽氣井類型與適用場址情況	附件一-9
表 1.2.3-1 SVE 系統監控設備需求	附件一-15
表 2.1.2-1 生物通氣法技術選用查核表	附件一-22
表 2.1.2-1 生物通氣法優缺點比較表	附件一-23
表 2.2.4-1 氣體抽除系統監控設備需求	附件一-27
表 3.1.2-1 生物堆法技術選用查核表	附件一-33
表 3.1.2-2 生物堆法優缺點比較表	附件一-34
表 3.2.3-1 生物堆法建議監測計畫內容	附件一-38
表 4.1.2-1 空氣注入法技術選用查核表	附件一-42
表 4.1.2-2 空氣注入法優缺點比較表	附件一-42
表 5.1.2-1 生物曝氣法技術選用查核表	附件一-51
表 5.1.2-2 生物曝氣法優缺點比較表	附件一-51
表 5.2.3-1 氣體抽除系統監控設備需求	附件一-54
表 6.1.2-2 現地地下水生物整治法優缺點比較表	附件一-59
表 6.1.2-1 現地地下水生物整治法技術選用查核表	附件一-62
表 6.2.3-1 現地地下水生物整治法建議監測計畫內容	附件一-68
表 7.1.2-1 雙相抽除法技術選用查核表	附件一-78
表 7.1.2-2 單泵雙相抽除法優缺點比較表	附件一-79
表 7.1.2-3 雙泵雙相抽除法優缺點比較表	附件一-79
表 7.2.3-1 雙相抽除法系統效能評估監測計畫	附件一-84
表 8.1.2-1 井內氣提技術優缺點比較表	附件一-89

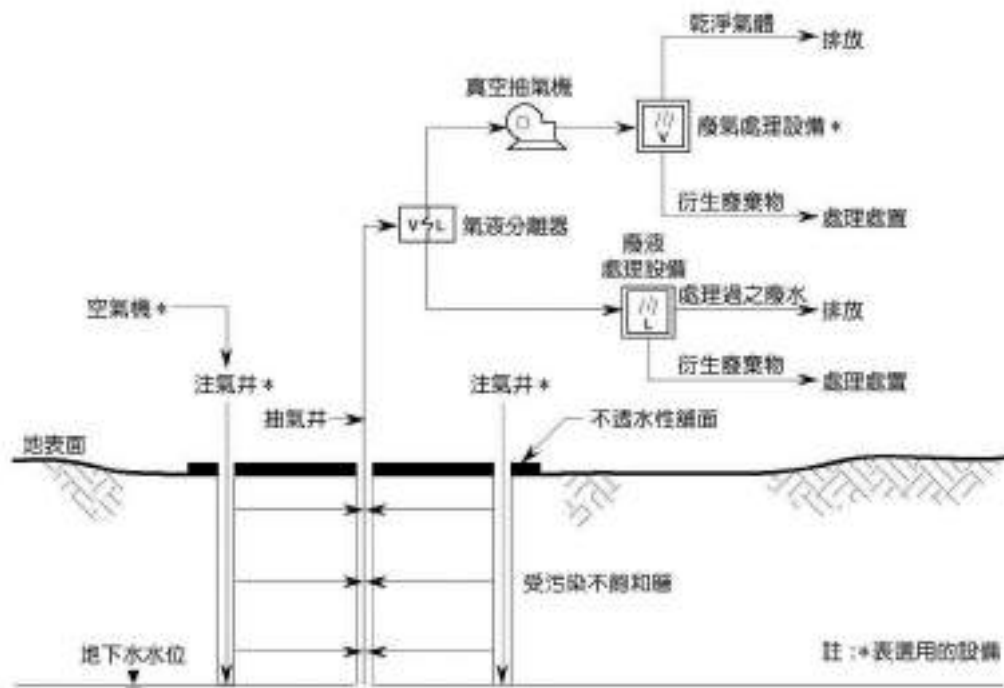
表 8.3-1	井內氣提系統建置平均成本.....	附件一-94
表 9.1.1-1	現地化學氧化法氧化劑適用性評估表.....	附件一-96
表 9.1.2-1	現地化學氧化法技術選用查核表.....	附件一-98
表 9.1.2-2	現地化學氧化法優缺點比較表.....	附件一-101
表 9.2.1-1	現地化學氧化法基本設計因子.....	附件一-102
表 9.2.2-1	現地化學氧化法之系統設備組成.....	附件一-105
表 9.2.3-1	現地化學氧化法建議監測計畫內容.....	附件一-106
表 9.3-1	美國以臭氧氧化技術整治案例之成本推估表.....	附件一-108
表 10.1.2-1	界面活性劑(含共溶劑)沖排法優缺點比較表.....	附件一-113
表 10.2.4-1	界面活性劑(含共溶劑)沖排法系統之監測參數.....	附件一-118
表 11.1.2-1	加強好氧生物整治法優缺點比較表.....	附件一-124
表 11.2.1-1	加強好氧生物整治法比較表.....	附件一-125
表 11.2.3-1	加強好氧生物整治法建議建議監測計畫內容.....	附件一-126
表 12.1.2-1	可利用零價鐵處理的有機污染物.....	附件一-131
表 12.1.2-2	常用之反應介質及其機制分類.....	附件一-132
表 12.1.2-3	滲透性反應阻牆法優缺點比較表.....	附件一-132
表 13.1.2-1	電動力法優缺點比較表.....	附件一-143
表 14.1.2-1	處理油品相關污染物之植物.....	附件一-151
表 14.1.2-2	植物整治法優缺點比較表.....	附件一-151
表 15.1.2-1	監控(測)式自然衰減法技術選用查核表.....	附件一-159
表 15.1.2-2	監控(測)式自然衰減法優缺點比較表.....	附件一-160
表 15.2.3-1	監控(測)式自然衰減法建議監測計畫內容.....	附件一-163
表 16.1.2-1	抽出處理法優缺點比較表.....	附件一-166
表 16.2.2-1	地下水抽出處理系統水處理設備.....	附件一-168

一、土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction, SVE)係針對不飽和層或通氣層(Vadose Zone)土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。本技術利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並因抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動，而被抽出，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放。本技術於操作時，常在地表上覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加抽氣井影響半徑及處理效率。土壤氣體抽除系統如圖 1.1.1-1 所示。



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

圖 1.1.1-1 土壤氣體抽除法單元流程

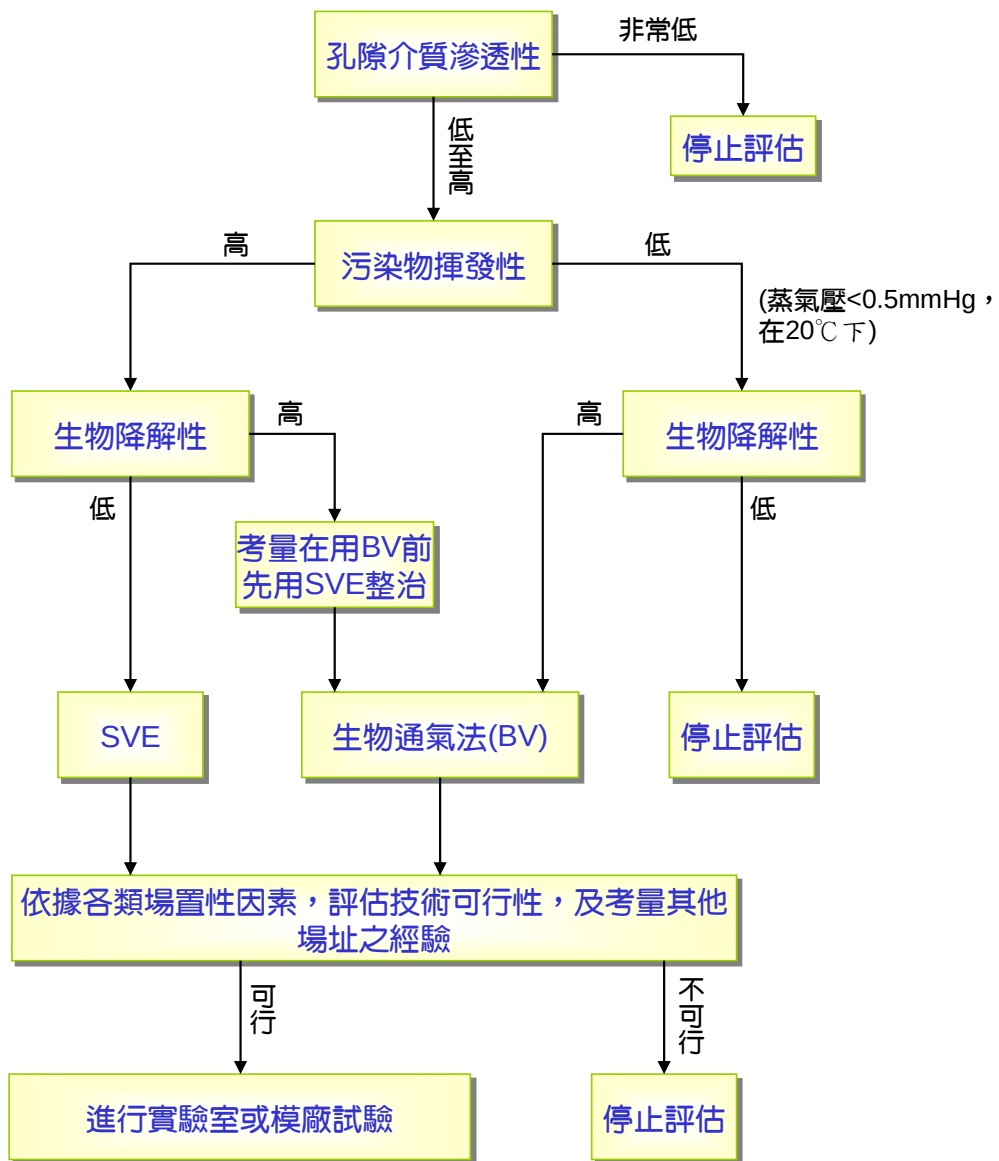
1.1.2 適用條件

土壤氣體抽除法可成功地運用在處理位於中透氣性及高透氣性土壤中含有揮發性污染物成分，以油品污染場而言，SVE 在抽除的過程中亦可回收少數的浮油(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)並被大量運用在含氣溶劑污染的場址中。其限制說明如下：

- 一、 僅適用於土壤污染，不可單獨作為地下水污染改善技術(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)
- 二、 不適用於低揮發性或低亨利常數之污染物，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境中。雖可以運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治之經費。
- 三、 土壤對揮發性有機物之吸附力，會降低土壤氣體抽除系統對揮發性有機物之萃取率，亦即將揮發性有機物轉化為氣體之效率，土壤對污染物吸附力的影響，在整治階段後期最為明顯，土壤氣體抽除法將需要更長的操作時間，以處理最後殘留於土壤的揮發性有機物。
- 四、 粒徑較小的土壤濕度高，會減少土壤中之孔隙，阻礙 SVE 成效。且不連接的孔隙(dead end pore)亦有可能殘留污染物(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)
- 五、 土壤的異質性亦將影響土壤氣體抽除系統的成效，氣體易在大粒徑土壤中流動，但不易在粒徑小的黏土中流動，且在一般情形下，揮發性有機物亦累積在黏土表面，因此，相對地流過高污染土壤的氣流量將極為有限。另外，破碎的岩層帶因其空氣流動通道不規則，亦不適合採用 SVE(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)。

土壤氣體抽除法屬於土壤整治技術，擬採用土壤氣體抽除法時，可參考美國工兵署之技術評估程序(如圖 1.1.2-1)，以及參考美國環保署之查核表(如表 1.1.2-1)，整治技術評估或遴選單位可以藉回答表中之相關問題，以決定土壤氣體抽除法是否適用於個別場址，回答「否」的問題宜應進一步蒐集相關的資訊，以決定土壤氣體抽除法是否可以達到場址整治目標。

土壤氣體抽除法(SVE)優缺點彙整如表 1.1.2-2 所示。



資料來源：譯自USACE, Soil Vapor Extraction and Boilventing (EM 1110-1-4001), 2002

圖 1.1.2-1 土壤氣體抽除法技術評估程序

表 1.1.2-1 土壤氣體抽除技術查核表

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

表 1.1.2-2 土壤氣體抽除技術優缺點

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

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

土壤氣體抽除系統最基本的配置是利用傳統的鑽井方式，設置一個或多個垂直井，場址如未設置鋪面(如混凝土或瀝青鋪面)，一般井篩頂部設置在地面 1 公尺以下，以避免產生空氣短流的現象。而在土壤氣體抽除系統規劃設計上，通常需注意下列事項：

一、環境參數方面

(一)場址土壤滲透係數

土壤滲透係數影響 SVE 之操作效率最大。表 1.2.1-1 為土壤滲透係數與 SVE 效率之對照表，可藉由土壤滲透性研判 SVE 之效率。

表 1.2.1-1 土壤滲透性及 SVE 效率對照表

土壤滲透性	SVE 效率
$k \geq 10^{-8} \text{ cm}^2$	通常有效。
$10^{-8} \text{ cm}^2 \geq k \geq 10^{-10} \text{ cm}^2$	可能有效需再評估。
$k \leq 10^{-10} \text{ cm}^2$	可能無法發揮功能。

(二)地下水高度

考量地下水高度，主要為過高之地下水會阻礙土壤污染物在 SVE 抽氣時之移動性，部分情況可以其他控制設施如水平井以及水井降低水位等措施進行改善，表 1.2.1-2 為地下水高度與 SVE 效率之對照表。

表 1.2.1-2 地下水高度及 SVE 效率

地下水高度	SVE 效率
地表 3 公尺以下	通常有效。
地表下 1 公尺至 3 公尺	需增加其他控制設施，如水平井或抽水井。
地表 1 公尺以上	可能無法發揮功能

(三) 污染物蒸氣壓

對 SVE 而言，污染物蒸氣壓需大於 0.5 mm-Hg 方能發揮功能，而油品类儲槽系統污染場址主要污染物蒸氣壓如表 1.2.1-3 所示，除四乙基鉛外，大部分可以運用 SVE 進行整治。國內加油站多數亦採用 SVE 整治技術，此為主要原因。

表 1.2.1-3 常見油品类污染物及蒸氣壓

污染物	蒸氣壓(mm-Hg at 20°C)
甲基第三丁基醚(MTBE)	245
苯	79
甲苯	22
乙苯	7
二甲苯	6
萘	0.5
四乙基鉛	0.2

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

(四) 污染物沸點

一般而言，SVE 針對沸點在 250°C~300°C 以下之污染物效率均不錯，表 1.2.1-4 為油品类污染物及其沸點範圍，其中汽油污染適合以 SVE 整治，柴油污染則需視實際情況，對於碳數較高之污染物 SVE 可能較不適合。

表 1.2.1-4 油品类污染物及沸點範圍

污染物	沸點範圍(°C)
汽油	40~225
柴油	200~338
潤滑油	不揮發

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

(五) 污染物亨利常數

針對 SVE 而言，污染物亨利常數需大於 100 atm 方能發揮功能，而油品类儲槽系統污染場址主要污染物亨利常數如表 1.2.1-5

所示，除萘及 MTBE 外，大部分可以 SVE 整治，國內加油站多數採用 SVE 整治技術，此亦為原因之一。

表 1.2.1-5 油品類污染物及沸點範圍

污染物	亨利常數(atm)
甲基第三丁基醚(MTBE)	27
苯	230
甲苯	217
乙苯	359
二甲苯	266
萘	72
四乙基鉛	4,700

資料來源：“How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

二、系統設計基礎資料需求(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)

- (一)場址地質資料
- (二)地下水位深度與變動情形
- (三)釐清污染物特性、污染範圍與污染量
- (四)土壤氣體濃度
- (五)土壤濕度
- (六)土壤有機碳含量
- (七)土壤氧氣含量
- (八)場址地上、地下設施與地勢

三、系統參數方面

(一)影響半徑(ROI)

影響半徑之量測係以抽氣井為原點，觀察能造成水柱下降至少 0.1 英吋(0.25 公分)之最大距離，即為該抽氣井之影響半徑。影響半徑受到土壤橫向與縱向滲透性、地下水位、注氣井之使用等因素影響。一般而言，影響半徑之設計範圍自 5 英呎(1.52 公尺)(細質地土壤)至 100 英呎(30.48 公尺)(粗質地土壤)，並可藉由模廠試驗或經驗公式進行估算。

(二)井頂真空度

抽氣井頂約維持在 3 至 100 英吋(7.62 至 254 公分)水柱之真空度，滲透性低之土壤需要較高之真空度以維持一定影響半徑。

(三)氣體抽出流量

一般抽出流量約維持在每分鐘 10 至 100 立方英呎(0.28 至 2.83 立方公尺)之範圍，而氣體抽出流量與抽氣井影響半徑與井頂真空度均相互影響。

(四)最初污染物氣體濃度

可藉由模廠試驗、現場土壤氣體或土壤採樣得到，可用於估算污染物移除之效率與 SVE 所需之操作時間，並可評估是否需設置尾氣處理設備。

(五)欲達到之最終污染物濃度

以國內而言，係以污染管制標準為最終整治目標。此項目可評估所需整治之範圍以及 SVE 系統何時可停止運轉。

(六)整治期程

與系統設計有關，設計者可藉由增加抽氣井之設置密度以縮短整治所需耗費之時間。

(七)處理之土壤體積

依場址特性使用整治目標或風險評估方式評估。

(八)孔隙體積計算

與氣體抽出流量可計算孔隙體積交換率(pore volume exchange rate)，建議每天抽氣體積至少應與土壤氣體孔隙體積相同或更大。而抽換相同土壤氣體孔隙體積所需花費之時間，可藉由下列公式進行估算：

$$E = \frac{\varepsilon V}{Q} \quad \text{式-1}$$

其中

E 為孔隙體積交換時間(hr)

ε 為土壤孔隙率(m^3 氣體/ m^3 土壤)

V 為已處理之土壤體積(m^3 土壤)

Q 為總氣體抽出流量(m^3 氣體/hr)

(九)排放限制或監測需求

以國內為例，SVE 排放限制主要受到本署空氣污染相關法規之要求。設計時須確認 SVE 系統設計有監測口，以利系統運轉時進行監測(國內大部份 SVE 系統無此設計)。

(十)場址構造限制

如建築物位置、設備、埋藏物體、住宅區或其他於設計時須考量之因素。

四、前導試驗(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)

進行全場整治系統設計前，宜進行前導試驗以確認 SVE 成效。前導試驗之主要目標包含確認可能之污染移除速率、空氣流通路徑、場址透氣性、預估長期殘留濃度(achievable residual concentrations)與必要的空氣量(necessary air throughput)。在前導試驗中，可設置一抽氣井以 step test 確認場址之透氣性，另外亦可以 PID/FID 測試抽氣井所抽出之蒸氣濃度。

五、系統規劃設計方面

(一)抽氣井

1. 類型

SVE 系統可運用垂直或是水平抽氣井，其類型可視場址特性與需要進行調整，如表 1.2.1-6 所示。

表 1.2.1-6 SVE 抽氣井類型與適用場址情況

抽氣井類型	適用場址情況
垂直井	適用淺層至深層之污染場址(距地表深度 5 至 100 英呎(1.5 至 30 公尺)。地下水位距地表 10 英呎(3 公尺)以上。
水平井	適用淺層污染(距地表 25 英呎(7.6 公尺)以內)；距地表 10 英呎(3 公尺)以內較垂直井有較佳之處理效果；距地表 25 英呎(7.6 公尺)以上則較難進行設置。 污染區域被侷限成層狀時。

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

2. 位置與數量

抽氣井之定義與數量可使用下列方法：

(1) 利用抽氣井之影響面積估算

$$\text{單一抽氣井之影響面積} = \pi(\text{ROI})^2 \quad \text{式-2}$$

$$\text{所需抽氣井數量} = \frac{\text{處理面積} \quad (\text{m}^2)}{\text{單一抽氣井之影響面積} \quad (\text{m}^2/\text{well})} \quad \text{式-3}$$

(2) 利用孔隙體積交換時間進行估算

$$\text{所需抽氣井數量} = \frac{\varepsilon V / t}{q} \quad \text{式-4}$$

其中

ε 為土壤孔隙率(m^3 氣體/ m^3 土壤)

V 為處理區之土壤體積(m^3 土壤)

q 為單一抽氣井抽氣量(m^3 氣體/hr)

t 為孔隙體積交換時間(hr)

而在抽氣井之位置規劃上需考量下列因素：

- 於高污染濃度區布設抽氣井較密以增加污染物移除效率
- 若地面有覆蓋密封時，因空氣係由橫向補充而非直接來自地表，故抽氣井間距可稍加放寬。惟規劃上亦須注意是否有增加設置空氣注氣井之必要。
- 若場址內為分層型態之土壤時，於滲透性高之土壤布井間距可較寬，於滲透性低之土壤布井間距可較密。
- 可以模式評估抽氣之死角帶(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)

3. 抽氣井構造

一般垂直抽氣井與水平抽氣井之構造如圖 1.2.1-2 與圖 1.2.1-3

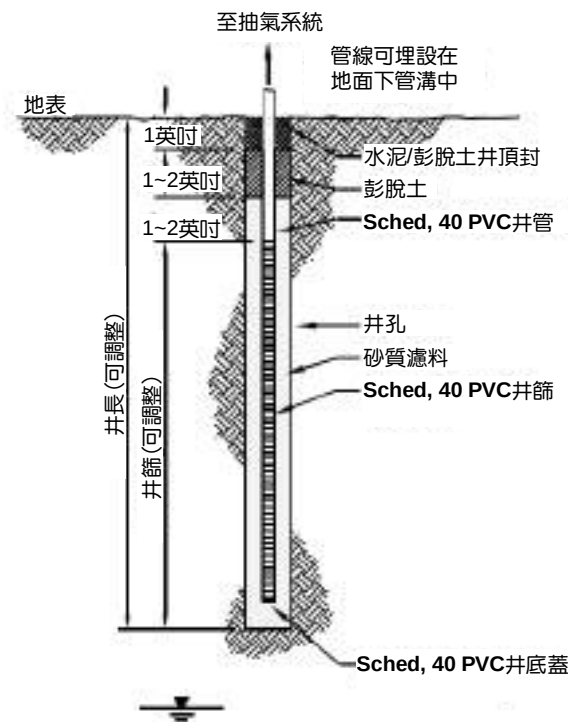
所示。垂直抽氣井之設置與地下水監測井設置方法相同，水平抽氣井則通常需透過開挖方式進行設置。抽氣井井管通常使用 PVC 材質，口徑範圍介於 2 至 12 英吋；建議使用 4 吋井因其較 2 吋井能運用更大之抽氣量並產生較小之壓損。

(二) 管線系統

管線系統主要在連接注氣井與鼓風機，可設置於地面上或地下管溝中。管線之設計需考慮壓損(Soil vapor extraction, 2009 台美講習會)，管線設計上可向注氣井傾斜，如此凝結或不慎抽出之地下水可回流至注氣井中。

(三) 氣體前處理設計

抽出之氣體中可能含有大量的水氣、地下水或顆粒，可能會對鼓風機造成損害，並降低整體系統之處理效率。故通常會在氣體進入鼓風機前設置氣液分離裝置與過濾裝置，以避免發生前述情形。



資料來源：“How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

圖 1.2.1-2 SVE 垂直抽氣井構造

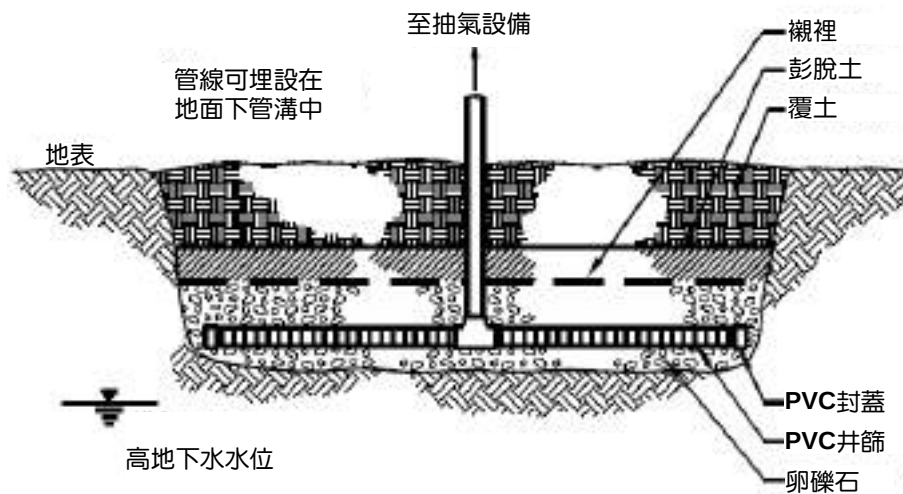


圖 1.2.1-3 SVE 水平抽氣井構造

(四) 鼓風機(blower)選擇

鼓風機大小與型式之選擇主要取決於所需形成之井頂真空度與總抽氣流量。由於實際應用上可能有爆炸之危險，故應選擇具有防爆功能之鼓風機為宜，下列三種為常應用於 SVE 系統之鼓風機型式，個別之抽氣量與真空度範圍如圖 1.2.1-4 所示：

1. 離心式鼓風機(centrifugal blowers)

適用於高流量(可達 280 scfm(7.93CMM))與低真空度(低於 30 英吋(0.76 公尺)水柱)之情況。

2. 再生式與渦輪鼓風機(regenerative and turbine blowers)

適用於高真空度(高於 80 英吋(2.03 公尺)水柱)之情況。

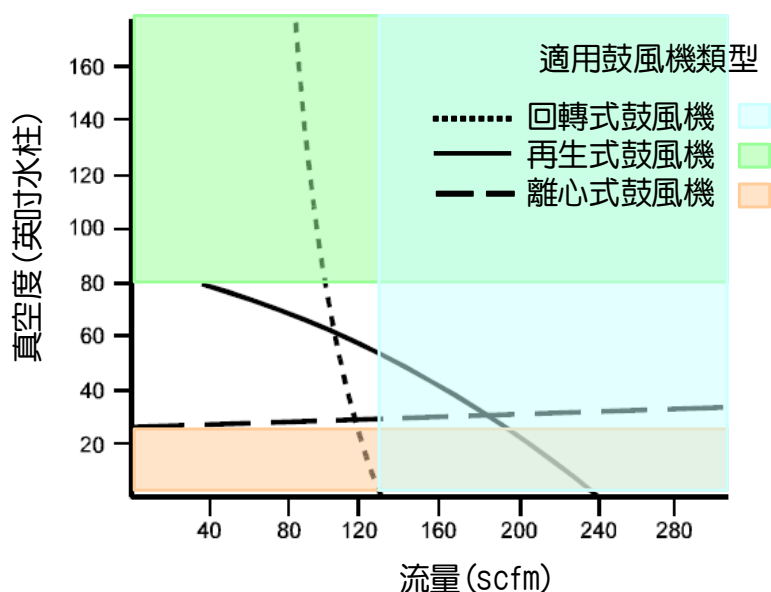
3. 回轉葉(rotary lobe)式鼓風機

當需要非常大之抽氣流量時。

(五) 儀控設計

通常需監控之參數包括下列四項：

1. 壓力(或真空度)
2. 抽氣或排氣量
3. 污染物移除效率
4. 排氣溫度



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

圖 1.2.1-4 鼓風機型式與適用範圍

(六) 選擇性設備

1. 注氣井

當整治區域較深(大於 25 英尺(7.6 公尺))或週遭為低滲透性土壤時，規劃使用注氣井可調整氣流流向分布與加強抽氣效率，並可預防短流情形發生。規劃時亦須注意應避免造成污染物移動至整治區域外。

2. 地表覆蓋

地表覆蓋之設計可預防地表水入滲、污染物氣體之逸散、氣體之短流、增加抽氣井之影響半徑等。但其亦增加地下環境空氣補助所需之距離，因此抽氣井需要更大之真空度。地表覆蓋通常可使用高密度聚乙烯(HDPE)襯裡、黏土或膨脹土(搭配植被或其它保護)，或是混凝土鋪面等。

3. 地下水抽水泵浦

當地下水位離地表很近時可規劃設置，可降低地下水位面以減少地下水被抽氣井抽出，並利於 SVE 系統處理較大之土壤體積。然而抽出之地下水可能含有浮油或溶解相之污染物，必須進行

處理。

4. 氣體處理系統

假使 SVE 尾氣排放濃度過高有可能導致環境周界之空氣污染物超過標準時，即應設置處理設備。較適合之處理設備包括顆粒活性炭(GAC)、觸媒氧化或熱氧化等。國內有設置處理設備之加油站大多採用活性碳設備處理尾氣，因其設置與操作成本相對上較為經濟。

1.2.2 整治系統單元

一個完整之 SVE 系統，通常包括下列設備或設施：

- 一、 抽氣井
- 二、 管線系統
- 三、 鼓風機(Blower)
- 四、 儀控設備
- 五、 選擇性設備：

- (一)注氣井
- (二)(地)表面覆蓋(Surface seals)
- (三)地下水抽水泵浦
- (四)尾氣處理設備

1.2.3 整治系統監測

為能監控 SVE 系統之處理成效，應針對 SVE 系統進行監測，而其監控設備需求如表 1.2.3-1 所示，且 SVE 系統運轉與監測時，應注意下列重點：

一、 初期運轉

SVE 系統初期運轉之 7 至 10 天內應進行系統功能之調整，以使污染物之抽除效率達到最佳化。流量量測、真空度記錄、氣體濃度檢測等監測項目須每日進行紀錄。

二、長期運轉

長期監測則包括流量平衡、流量與壓力之量測、氣體濃度檢測等，監測頻率可兩週或每月量測 1 次。

經由 SVE 系統處理土壤中污染物之減少亦為監測之重點項目之一，而長期運轉所移除之污染物質量可藉由抽氣量與氣體中污染物濃度進行估算，計算公式如下：

$$M = C \cdot Q \cdot t$$

式-5

其中

M 為污染物累計移除量(kg)

C 為抽出氣體中之污染物濃度(kg/m³)

Q 為抽出氣體流量(m³/hr)

t 為運轉時間(hr)

表 1.2.3-1 SVE 系統監控設備需求

監測設備	監測位置	設備範例
流量計	每個井頂 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	皮托管 浮子流量計 孔口板 文氏管或流量管
壓力(真空)錶	每個井頂或管線分歧點 鼓風機上游之過濾設備前後端 氣體處理前後端	壓力計 壓力讀數錶 真空錶
氣體溫度感測器	管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口(氣體處理前)	雙金屬指針式溫度計
採樣口	每個井頂或管線分歧點 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	軟管接頭 塞墊
氣體採樣收集設備 (透過採樣口)	每個井頂或管線分歧點 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	氣體採樣袋(Tedlar bags) 吸附管 吸附罐 GC 直接注射用之聚丙烯(PP) 材質管
控制設備		
流量控制閥	每個井頂或管線分歧點 於至鼓風機前之管線設置稀釋閥	球閥 閘/球型閥 蝶型閥

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

1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

土壤氣體抽除法對環境造成之影響，主要在於其抽出之氣體是否有效的被處理，如無設置適當之尾氣處理設備，可能會造成空氣污染。此外，系統運作中亦有可能抽出含污染物之地下水，亦須妥善加以處理。

依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

而美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供尾氣處理設備選擇時之參考：

- 一、 VOC 濃度大於 2,000 ppmv：建議使用熱氧化法。
- 二、 VOC 濃度介於 100 至 2,000 ppmv：建議使用觸媒氧化法。
- 三、 VOC 濃度介於 35 至 100 ppmv：建議使用顆粒活性碳(GAC)吸附。
- 四、 VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備，處理 SVE 系統排放之污染物，定期更換設備耗材(如活性碳或觸媒)以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

1.3 成本及期程評估

現地土壤氣體抽除法之成本主要與場址大小、污染物特徵與數量、水文地質條件等因子有關。前述因子會影響設井數量、鼓風機抽氣量與整治所需之時間，而尾氣之處理成本亦須考量在內。在理想情況下，運用土壤氣體抽除法之整治期程約需 6 個月至 2 年，其成本處理每公噸污染土壤約 10 至 50 美元(約新台幣 350 至 1,750 元)。而模廠試驗通常需花費 10,000 至 40,000 美元(約新台幣 350,000 至 1,440,000 元)。

污染物移除量以及抽出氣體中之污染物濃度與運轉時間之關係通常如圖 1.3-1 所示。營運期間應定期檢視抽出氣體與土壤中之成份進行分析比較，以確認污染物是否已轉換為以非揮發性之污染為主。當「漸近行為(asymptotic behavior)」開始發生時，整治者即需思考與評估是否應開始採取因應措施，如採脈動式(pulsing)之系統操作或是增加注氣井與抽氣井之數量，以提升污染物之去除效率。

當漸近行為持續超過 6 個月以上，且系統關閉時，污染物之回復濃度可低於法規標準時，系統即可停止運轉；反之，若污染物濃度仍高於整治目標，整治者即需考量採取其他如生物注氣法之整治技術，進入下一階段之整治。

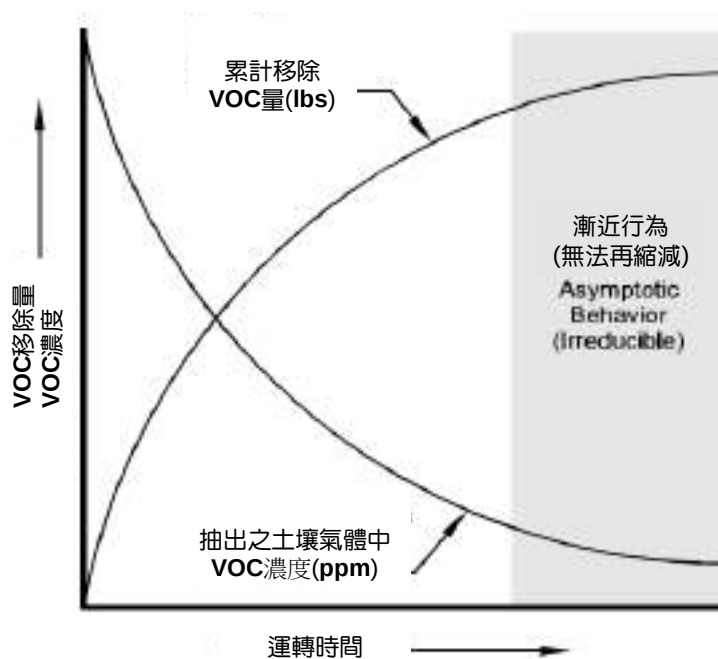


圖 1.3-1 污染物濃度削減與質量移除之關係

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”,

USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

2. “Soil Vapor Extraction and Boilventing(EM 1110-1-4001)”, USACE, 2002.
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. Soil vapor extraction, 2009 台美講習會

二、生物通氣法(Bioventing)

2.1 整治技術簡介

2.1.1 原理

生物通氣法(Bioventing)是一種常用的現地(in-situ)的處理技術，其主體設備仍為土壤氣體抽除設備，藉以抽除土壤層中的揮發性有機污染物，但其中比較特別的是多加了一個整治程序單元，於土壤層中添加了營養鹽(Nutrient)的成份，其目的係為增加土壤的生物分解作用，以加速土壤層中污染物質降解速率，使得部分分子量較大、揮發性較低，或是吸附於土壤顆粒微細間隙、吸附引力較強、不易抽離的污染物，可以藉由生物降解作用，將污染物水解或分解成小分子中間產物，而得以再繼續藉由抽氣引力，離開土壤微細間隙，或是較容易抽離土壤層。

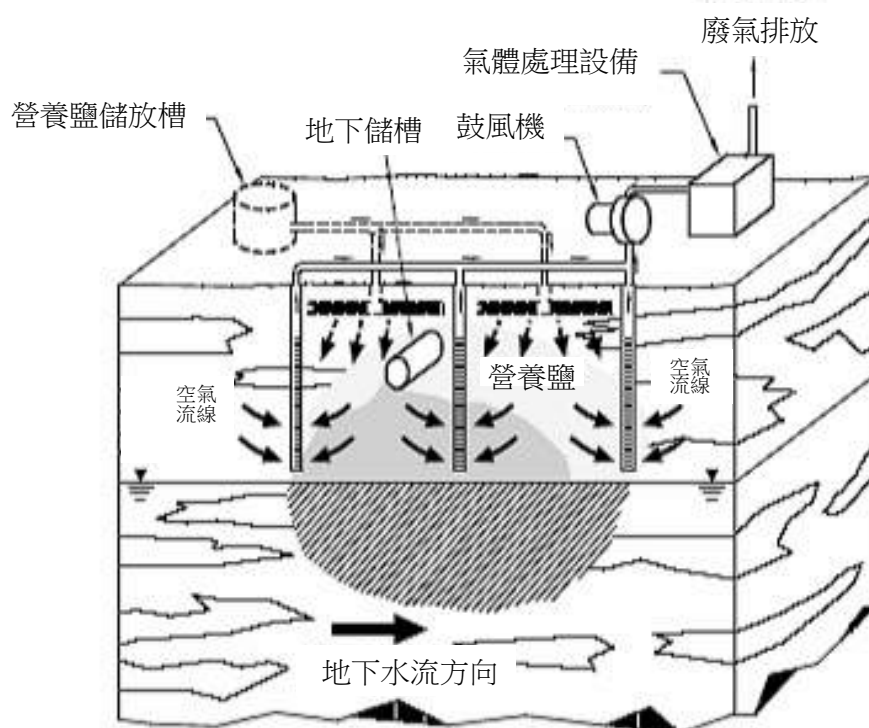
土壤層中原本即可能存在有一些現地微生物，部分微生物本身可能可以利用有機污染物做為生長基質，而產生代謝污染物的作用，進而分解污染物質，達到總污染量下降的目的。但生物分解作用有其必要、合適的環境限制條件，例如溫度、濕度、氧氣、污染物與生物接觸途徑等，若沒有適當的環境，微生物可能無法直接利用，或是大量利用有機污染物做為分解基質，其中一項重要的影響因子就是營養鹽。因為微生物生長所必須之碳源，可以由有機污染物提供，但是其他生長代謝所需的物質，例如氮、磷、微量元素等，就必須從外面提供足夠的量，否則土壤層環境中並不會存在足量的這些物質。

生物通氣法現地馴養微生物的目標種類，主要為好氧性微生物，也就是生物分解的代謝過程中，微生物必須利用氧氣做為電子接受者，而以污染物做為電子提供者，完成完整的降解程序。自然土壤層中的原始氧濃度可能不足以達到促進生物大量分解污染物的需求，因此，土壤層中的氧濃度也成為一項相當重要的因子，而生物通氣法的土壤層通氣作用，正好提供了一個良好的通氣環境。

生物通氣法之設備單元如圖 2.1.1-1 所示，在污染場址的現場，可以於

地面上設置一個營養鹽配製儲放槽，然後經由管線加壓淋灑，使營養鹽能分布於土壤層中。

生物通氣法適用於油品類污染，例如汽油、柴油、航空燃油等，但在處理柴油、航空燃油等污染時更具成效，因為汽油污染往往使用 SVE 即可得達到良好的成效(揮發性相對高)，但柴油、航空燃油等污染，SVE 所能達成的成效就有限，利用生物通氣法的生物降解輔助作用，可加強其功效。

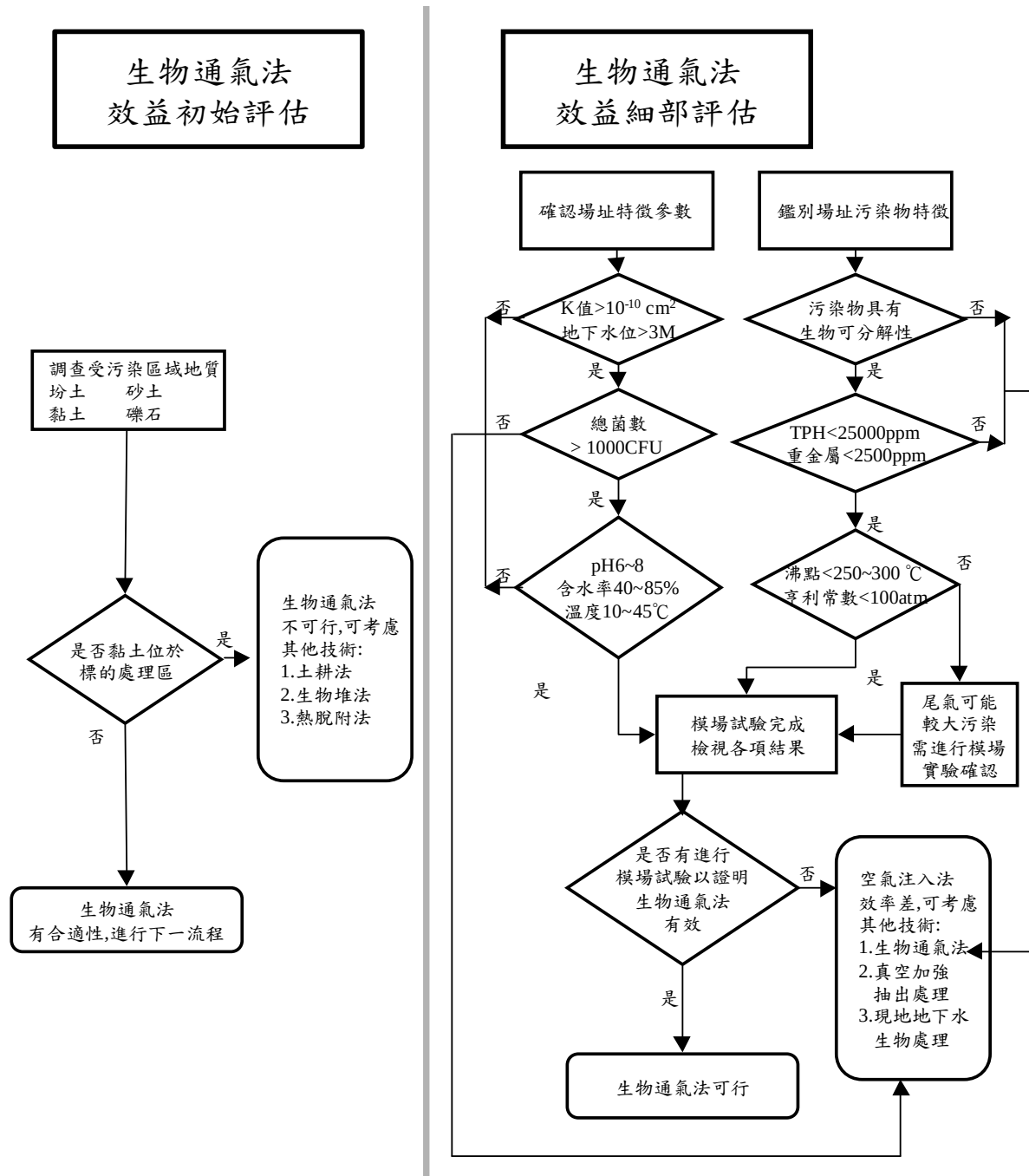


參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 2.1.1-1 生物通氣法處理系統

2.1.2 適用條件

關於使用生物通氣法適用性的評估流程可詳圖 2.1.2-1，其查核項目如表 2.1.2-1。而關於污染物濃度，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於 25,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers” , USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 2.1.2-1 生物通氣法簡易評估流程

表 2.1.2-1 生物通氣法技術選用查核表

1.0 場址特性：	是	否
1.1 土壤滲透性是否大於 10^{-10} cm^2 ？		
1.2 是否無不透氣層或其他可能阻斷氣流之地質狀況？		
1.3 異營性細菌數是否 $>1,000 \text{ CFU/克-土壤}$ ？		
1.4 土壤 pH 值是否介於 6-8？		
1.5 污染範圍內之土壤水分飽和度是否介於 40%-85% 間？		
1.6 碳：氮：磷之比是否介於 100:10:5 與 100:1:0.5 間？		
1.7 地下水位是否低於 0.9 公尺(3 呎)？		
2.0 污染物特性：		
2.1 所有的污染物是否可被有效生物降解？		
2.2 污染物蒸氣壓是否大於 0.5mm Hg，污染物沸點是否高於 300°C，污染物亨利定律常數是否大於 0.01？		
3.0 生物通氣法設計之評估：		
3.1 引進氣流流速是否能符合原整治設定值？		
3.2 抽氣井有效半徑是否介於 1.5 至 30 公尺(5 呎至 100 呎)？		
3.3 測量流速，確認各抽氣井流速是否分別符合原整治設計值？		
3.4 井的型式(垂直井或水平井)是否切合場址狀況？		
3.5 井的密度是否適當，井之有效半徑是否涵蓋整個污染範圍？		
3.6 井開篩位置是否符合場址之污染狀況？		
3.7 是否設置注氣井？		
3.8 注氣井設計是否適用於污染場址？		
3.9 選用之抽氣設備(Blower)是否可達到預定真空狀況？		
4.0 選用設備之評估：		
4.1 如需設置營養鹽注入系統，整治系統是否已設計？		
4.2 是否設置鋪面？		
4.3 鋪面材質是否適用於場址？		
4.4 是否需要降低地下水位？		
4.5 如需降低地下水位，地下水抽水井之設置位置是否正確？		
4.6 是否需要廢氣處理系統？		
4.7 如需廢氣處理系統，所採用廢氣處理系統是否適合處理場址所產生之廢氣濃度？		

資料來源：譯自 USEPA, "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers", USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

有關生物通氣法使用之優缺點整理如表 2.1.2-1。其中地質條件必須加以注意，因本項技術較適用於土質間隙較鬆的土壤層，才能夠有利於土壤氣體的抽除，若是整治廠商對於場址內地層調查較粗糙的話，有可能因為忽略了地質限制而造成整治期程的延期，或是效果受到限制。

其次，在美國某些州規定，為了防止地下環境改變，禁止從外界注入太多的不名化學物質或是其他物質，因此，注入井的設置遭受管制，必須提出申請。這一點雖然國內可能目前尚未有完整的規範，但取其精神，主要希望能夠管制灌注行為，防止外來添加物反而成為場址內的二次污染。

表 2.1.2-1 生物通氣法優缺點比較表

優點	缺點
- 簡單可得之工具器材，容易設置。 - 操作的空間較小。 - 較短的處理時間，在已調整為最適的操作狀況之下，平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。 - 每噸土壤處理費用約 45~140 美元，較其他地面處理程序便宜。 - 可以和簡單地和其他類型的整治技術結合，例如整治地下水的空氣注入法(air sparging)、抽出處理法(groundwater extraction)等。 - 可能不需要昂貴的尾氣處理費用。	- 濃度太高的成份，可能對於微生物造成毒性。 - 在低透水性、黏土質高的土壤層，可能不適用，或是地質條件未調查明確的情況下，可能效能有減低的現象。 - 土壤若有分層，恐造成效能降低。 - 無法達到太低的污染物濃度處理目標。 - 營養鹽注入井(nutrient injection wells)的設置，在美國某些州需要提出申請。 - 若場址土壤太乾燥可能需要額外控制濕度[*]

參考資料：

"How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers", USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

*：Bioventing, 2009 台美講習會

2.2 整治系統操作與設計

生物通氣法之選用，因涉及微生物生長之相關限制因子，地質狀況為最主要考量因子，並不是所有條件地質下情形均適用，最好能在土壤間隙較大的地質條件下進行。一般而言，以砂質、粉土等透水係數高的場址以及汽油、柴油等沸點較低之污染物效果較佳。

2.2.1 整治系統設計與操作要點

生物通氣法設計前了解污染物與浮油的種類、污染量與三維分佈情形以決定設置注氣井、抽除井與整治井的位置；此外亦需釐清污染物的生物降解情形於其他非生物移除機制(如稀釋、延散或揮發)，為了解上述內容，生物通氣設計所需資訊包含土壤氧氣與二氧化碳、場址地質資訊、濕度、營養可及性、場址地上與地下設施、透氣性、地下水位與其變動、浮油存在情形等。而在進行全場設計前，宜先進行土壤透氣性與呼吸試驗等前導測試，以確認生物通氣成效(Bioventing, 2009 台美講習會)。

對於污染場址是否適用生物通氣法，必須進行完整的場址特性(Site Characteristics)調查，主要包括下列項目：

一、 滲透性

土壤滲透性係數(Intrinsic permeability) k 值決定空氣(氧氣)能被傳

輸到地下土層之速率，一般土壤的範圍 k 值大於 10^{-10} cm^2 有較大處理效率， $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ cm}^2$ 最適用本項技術，但有可能必須再詳細調查評估。有關土壤 k 值的範圍，可在實驗室或現地試驗取得。

二、 土壤結構及分層狀況

若簡單地以平均土壤地質情形來看，粗顆粒(coarse-grained)土壤例如砂質土壤區域，會比細顆粒(fine-grained)土壤如黏土、粉土土壤區域較適用。

土壤層中若不是存在單一種地質，而是有不同的地質分層的組成情形，必須評估其分層情形是否有利於土壤氣體的抽除。例如，氣體抽除時的氣流方向，可能會在通氣性低的地方遇到阻礙，而流向旁邊通氣性高的地方，其空氣流向動線的阻礙或方向變異，必須藉由詳細的地質調查評估，是否有利於氣體抽除時的收集。

三、 微生物數量

生物通氣法因為必須藉由微生物作用，因此必須調查污染場址是否有足量的現地微生物，能夠提昇後續現地生物處理的潛能。一般而言，每克乾重土壤中若含有 1,000 CFU(colonyforming units)以上的異營性總菌數，將有利於本項技術的執行；若小於 1,000 CFU，可能仍有效，但需要更進一步的評估現場狀況，包括現場存在之土壤環境是否已造成生物毒性。

四、 土壤 pH 值

一般而言，大多數的土壤環境微生物最適生長之 pH 值為 7 左右，pH 約 6 至 8 左右微生物能夠適合生長。若超出範圍，必須進行土壤 pH 值改良。

五、 土壤含水率

微生物生長需要適當的土壤水份，乾燥的土壤並不可行，但過量水份也有可能抑制微生物的生長。若有需要的話必須以抽水機抽水，降低地下水位，以有利不飽和層微生物的降解作用。

六、 土壤溫度

一般而言，10°C 至 45°C 的土壤溫度適合微生物生長。

七、 營養鹽濃度

微生物生長需要無機類的氮、磷以及其他營養鹽，一般污染場址並不存在足量的營養鹽，因此，本項技術在整治期間，必須持續的提供足量的營養鹽，大致的需求量可以下列反應式求得：

碳源(C-source) + 氮源(N-source) + 氧氣(O₂) + 礦物質(Minerals) + 營養鹽(Nutrients) → 細胞質(Cell mass) + 二氧化碳(CO₂) + 水(H₂O) + 產物(products)

其中 Cell mass 可以最被廣泛接受的 C₅H₇O₂N 及 C₆₀H₈₇O₃₂N₁₂P 來表示計算，當污染量之碳源已知後，即可再推算需求之營養鹽供給量，碳：氮：磷之比例約在 100：10：1 至 100：1：0.5 之範圍。

八、 地下水深度

因為生物通氣法係屬於處理地下水層上方之不飽和層土壤污染，因此，含水量過高，將降低土壤孔隙間的通氣效果。一般而言，地下水位大於 10 英呎(約 3 公尺)以上，將有利於本項技術執行；地下水位於 3 英呎(約 1 公尺)以內者，將不適用本項方法；介於 1 公尺至 3 公尺間之地下水位者，本項方法雖然可行，但必須借助其他方式加以控制，例如前述之以抽水泵抽水降低地下水位。

2.2.2 整治系統單元

一個完整之生物通氣系統，包括下列設備或設施：

- 一、 垂直式/水平式抽氣井。
- 二、 管線系統。
- 三、 土壤氣體前處理設備(選用)。
- 四、 鼓風機。
- 五、 氣體流量計。
- 六、 儀控設備。
- 七、 尾氣處理設備。

2.2.3 整治系統監測

生物通氣法必須注意的監測事項，是與土壤氣體抽除法一樣的氣體抽除設備，亦即 SVE 系統。為能監控 SVE 系統之處理成效，應針對 SVE 系統進行監測，其監控設備需求如表 2.2.3-1 所示，SVE 系統運轉與監測時，應注意下列重點：

一、 初期運轉

SVE 系統初期運轉之 7 至 10 天內應進行系統功能之調整，以使污染物之抽除效率達到最佳化。流量量測、真空度記錄、氣體濃度檢測等監測項目須每日進行記錄。

二、 長期運轉

長期監測則包括流量平衡、流量與壓力之量測、氣體濃度檢測、呼吸試驗(Bioventing, 2009 台美講習會)等，監測頻率可兩週或每月量測 1 次。經由 SVE 系統處理土壤中污染物之減少亦為監測之重點項目之一，而長期運轉所移除之污染物質質量可藉由抽氣量與氣體中污染物濃度進行估算，計算公式如下：

$$M = C \cdot Q \cdot t \quad \text{式-1}$$

其中

M 為污染物累計移除量(kg)

C 為抽出氣體中之污染物濃度(kg/m³)

Q 為抽出氣體流量(m³/hr)

t 為運轉時間(hr)

表 2.2.4-1 氣體抽除系統監控設備需求

監測設備	監測位置	設備範例
流量計	• 每個井頂 • 管線系統至鼓風機 • 鼓風機排氣口	• 皮托管 • 浮子流量計 • 孔口板 • 文氏管或流量管
壓力(真空)錶	• 每個井頂或管線分歧點 • 鼓風機上游之過濾設備前後端 • 氣體處理前後端	• 壓力計 • 壓力讀數錶 • 真空錶
氣體溫度感測器	• 管線系統至鼓風機 • 鼓風機排氣口(氣體處理前)	• 雙金屬指針式溫度計
採樣口	• 每個井頂或管線分歧點 • 管線系統至鼓風機 • 鼓風機排氣口	• 軟管接頭 • 塞墊
氣體採樣收集設備 (透過採樣口)	• 每個井頂或管線分歧點 • 管線系統至鼓風機 • 鼓風機排氣口	• 氣體採樣袋(Tedlar bags) • 吸附管 • 吸附罐 • GC 直接注射用之聚丙烯(PP)材質管
控制設備		
流量控制閥	• 每個井頂或管線分歧點 • 於至鼓風機前之管線設置稀釋閥	• 球閥 • 閘/球型閥 • 蝶型閥

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

2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助進行污染物分解，因此須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數。至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防治法令。依本署「空氣污染防治法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防治設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之

空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

- 一、 VOC 濃度大於 2,000 ppmv：建議使用熱氧化法。
- 二、 VOC 濃度介於 100 至 2,000 ppmv：建議使用觸媒氧化法。
- 三、 VOC 濃度介於 35 至 100 ppmv：建議使用顆粒活性碳(GAC)吸附。
- 四、 VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備，以處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性碳以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

2.3 成本及期程評估

一般而言，每噸土壤處理費用約 45 至 140 美元(約新台幣 1,575 至 4,900 元)，較其他地面處理程序便宜。在理想情況下，運用土壤氣體抽除法之整治期程約需 6 個月至 2 年。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. “Soil Vapor Extraction and Boilventing(EM 1110-1-4001)”, USACE, 2002.
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

三、生物堆法(Biopiles)

3.1 整治技術簡介

3.1.1 原理

生物堆法(Biopiles)也是一種常用的、簡單的現地(in-situ)的處理技術，也有稱之為生物箱法(biocells)、生物堆疊法(bioheaps)、生物土堤法(biomounds)、堆肥法(compost piles)等。主要係針對受到油品類污染之土壤，利用生物處理方式，降解受污染之土壤。對於地下含水層污染而言，本項方法並不適用。

生物堆法主要程序，係在場址原處或選擇其他空地之地面處，先鋪上一層不透水層或是其他阻隔材料，圍起一個整治區，再將受污染的土壤挖起放置於整治區的上部，堆成一個土堆，之後再將空氣(氧氣)、營養鹽、微量元素、水份(氣)等，利用管線系統輸送至土堆之內部，以馴養好氧性的微生物，微生物則利用油品類污染物質做為代謝生長的基質，將其轉化成代謝產物 CO_2 及 H_2O 。

生物堆法和土耕法(landfarms)有些類似(土耕法詳附件四)，都是利用地面上的系統化、工程化的人工處理系統，提供生物處理程序，降解有機污染物。兩者不同的是在供氧的方式，土耕法係利用耕土、翻土等動作，造成大氣交換，提供氧氣；而生物堆法則是利用機械動力(鼓風機)，進行土堆內氣體的進氣(injection)及抽氣(extraction)等氣流交換作用提供氧氣。

根據經驗，生物堆法在許多油品類地下儲油槽污染的場址，都呈現良好的效果。在揮發性較高的汽油類部分，傾向由進氣/抽氣作用時所移除；其他揮發性較低的部分如柴油等，則可以由生物處理輔助降解；而較重的潤滑油等，則僅能靠生物處理降解。必須注意的是，整治過程中產生的 VOCs 逸散問題，可能會較嚴重，因其不像土壤氣體抽除法有一個集中的氣體處理設備，而其是採取開放式空間處理，因此，VOCs 逸散量必須符合空氣污染防制法之相關法令。但為減少逸散量，也可以加強採用密閉系統之氣體蒐集方式，使得氣體完全在控制系統之下，這點相較於土耕法而

言，則有較大的好處。

生物堆法之設備單元如圖 3.1.1-1，在污染場址的現場，除了供氧、營養鹽系統等，較重要的是防止二次污染的監測設施，包括 VOCs 氣體監測管、滲出液收集(leachate collection)及處理系統等。

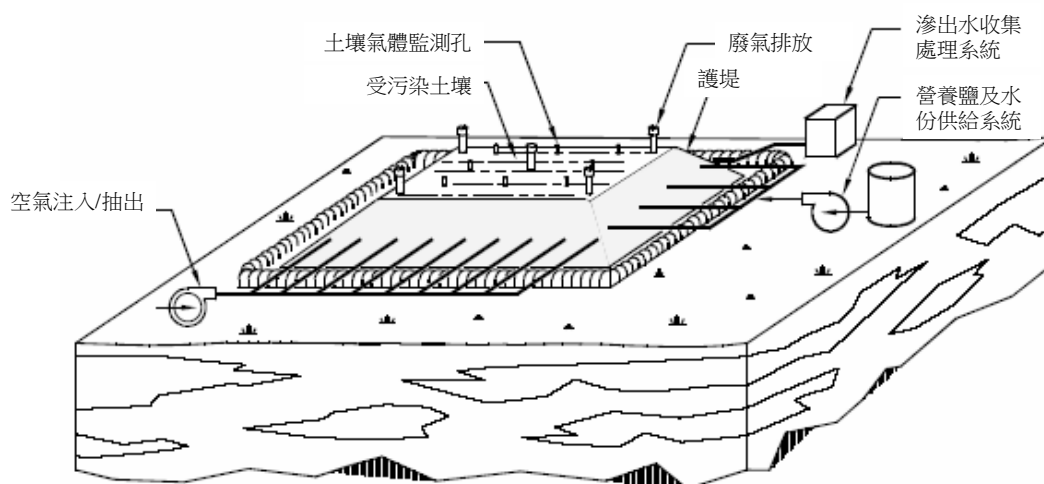
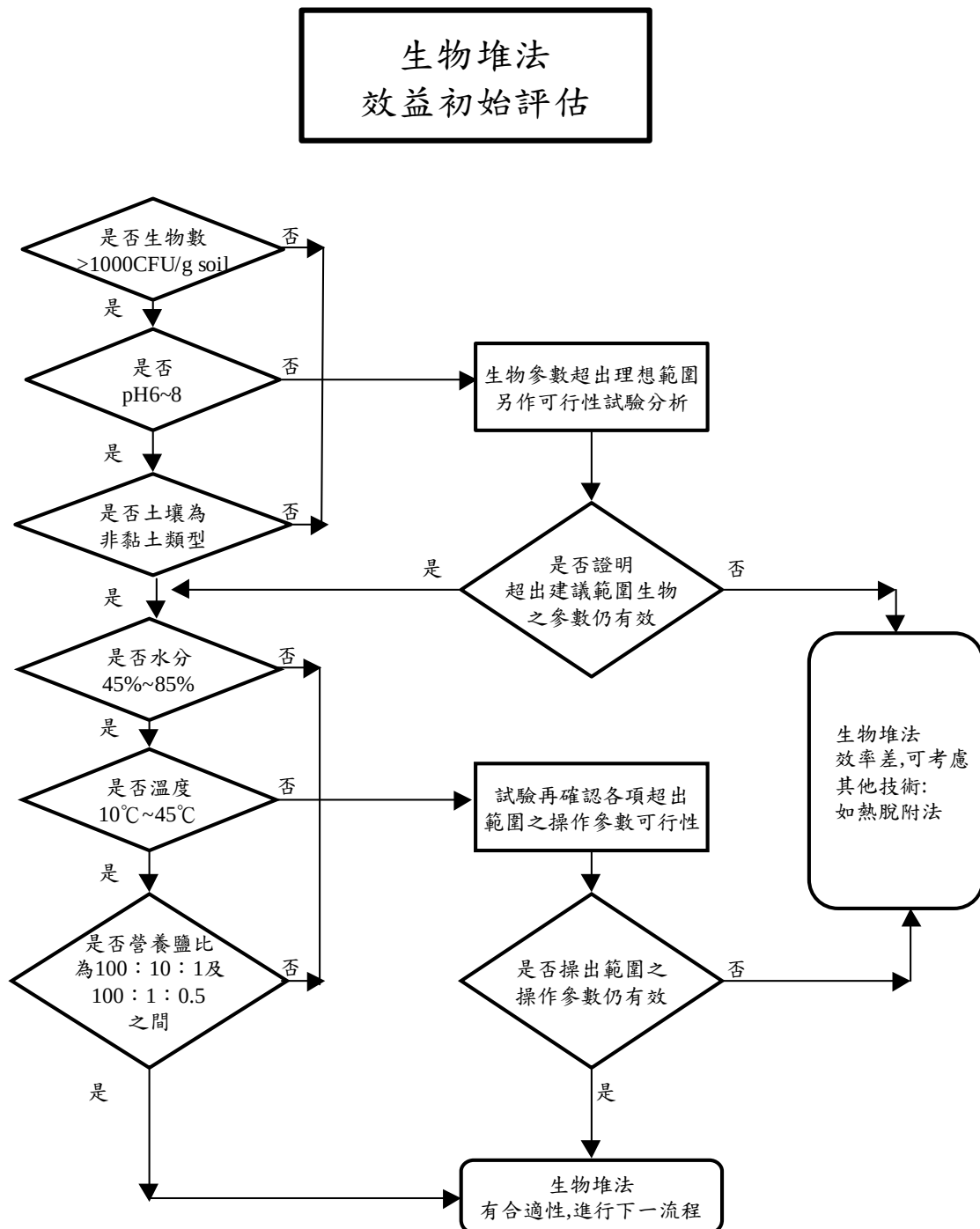


圖 3.1.1-1 生物堆法處理系統

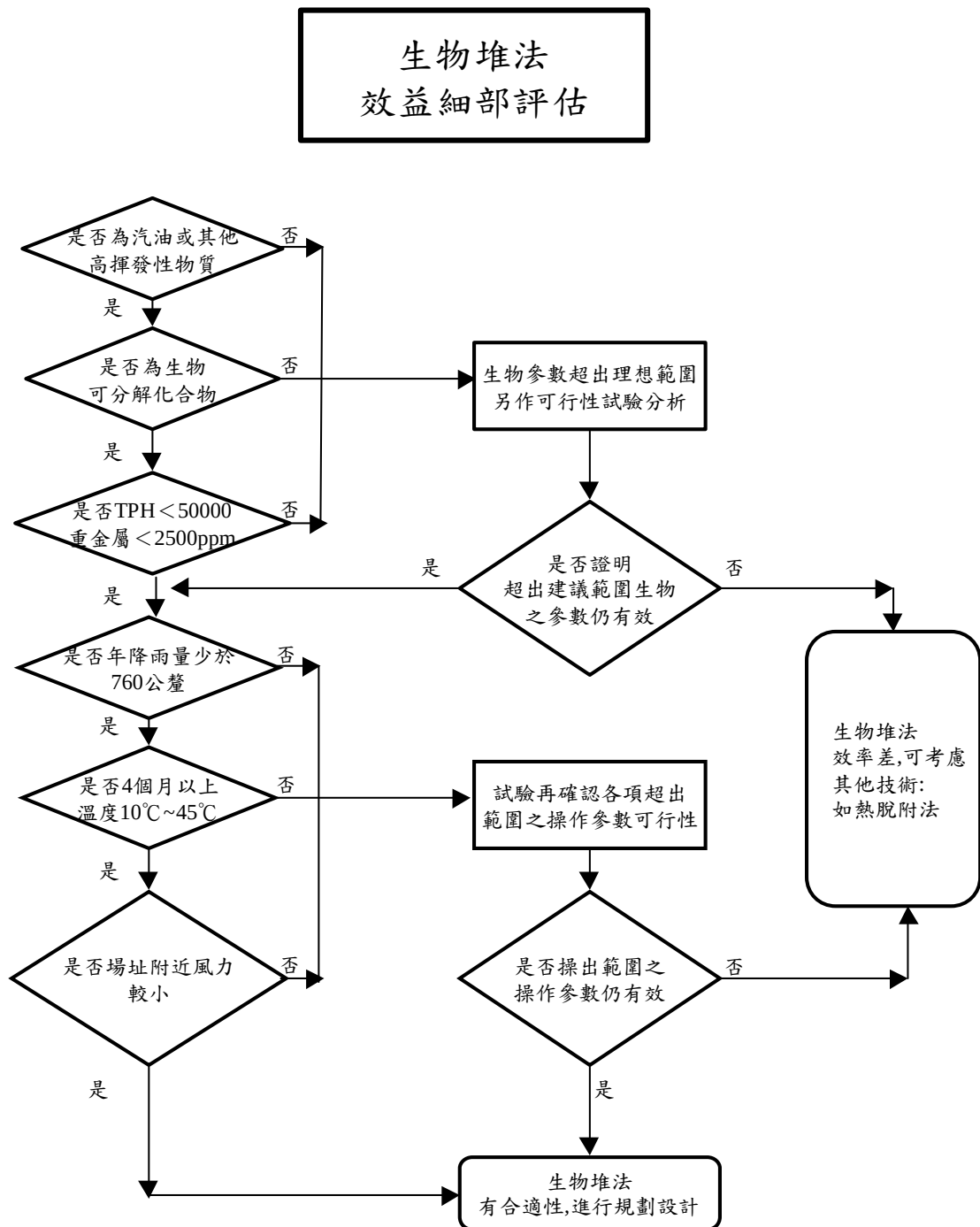
3.1.2 適用條件

有關使用生物堆法適用性的評估流程，詳圖 3.1.2-1；另有關評估本技術適用性的查核項目如表 3.1.2-1。本技術適用處理受污染之土壤，但不適用於地下含水層污染。而在污染物濃度方面，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於 50,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 3.1.2-1 生物堆法簡易評估流程



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 3.1.2-1 生物堆法簡易評估流程(續)

表 3.1.2-1 生物堆法技術選用查核表

1.0 確認適用生物堆法之場址特性：	是	否
1.1 異營性細菌數是否>1,000 CFU/克-土壤？		
1.2 土壤 pH 值是否介於 6-8？		
1.3 污染範圍內之土壤水分飽和度是否介於 40%-85%間？		
1.4 土壤溫度是否介於 10°C~45°C？		
1.5 碳：氮：磷之比是否介於 100:10:5 與 100:1:0.5 間？		
1.6 土壤是否易被分開或不易凝結成塊？		
2.0 污染物特性：		
2.1 待處理污染土壤是否屬於煤油或非汽油之重質油品，或空氣逸散現象是否被監測或控制？		
2.2 所有的污染物是否可被有效生物降解？		
2.3 總石油碳氫化合物濃度是否≤50,000 ppm 與重金屬總濃度是否≤2,500 ppm？		
3.0 確認適用生物堆法之氣候狀況：		
3.1 在進行生物堆法之季節裏，總降雨量是否小於 760 公釐(30 吋)？		
3.2 是否不太可能發生強風現象？		
3.3 是否曾進行生物處理研究？		
3.4 生物處理研究是否提供營養鹽添加量及配方之資料，是否確認可能產生毒害之狀況？		
4.0 生物堆技術設計之評估：		
4.1 考量生物堆高度、操作與出入空間，是否有足夠的土地面積？		
4.2 是否控制地表逕流？		
4.3 是否說明控制水土流失之特別措施？		
4.4 是否說明營養鹽添加配方、頻率，以及調整 pH 值之物質？		
4.5 是否需要補充水分？		
4.6 是否將場址不利的自然狀況，如低溫、豐沛雨量、質地不良的土壤等因素，納入設計中？		
4.7 場址是否進行妥善的管理？		
4.8 是否評估氣體逸散狀況，是否進行土壤氣體監測？		
4.9 如場址需要氣體逸散控制設備，設計是否符合需求？		

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004

有關生物堆法之優缺點詳述整理於表 3.1.2-2。綜合其優缺點可發現，對於設置而言，其方法較為簡單，又因位於地表上，因此維護也較容易。許多污染場址之管理者也喜歡選用本項技術，可是在環保主管機關的立場上，必須要求整治者防止場址的二次污染，包括防止 VOCs 逸散措施、滲水收集處理設施等。

表 3.1.2-2 生物堆法優缺點比較表

優點	缺點
• 相對於其他整治技術而言，較簡單，且容易設置。 • 較短的處理時間，在已調整為最適的操作狀況之下，平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。 • 每噸土壤處理費用約 30~90 美元，較其他地面處理程序便宜。 • 比土耕法需要較少的土地面積。 • 對於有機化合物具有生物降解之輔助作用。 • 相對於土耕法而言，可以設計密閉式的逸散氣體收集系統。 • 能有效處理複雜的油品類土壤污染場址。	• 濃度去除率 > 95%，殘餘濃度 0.1 ppm 的情形是比較難以達到的。 • > 50,000 ppm 高濃度污染土壤可能效率較差。 • > 2,500 ppm 高濃度重金屬土壤可能會抑制微生物作用。 • 揮發性高的物質可能較易被抽氣系統移除，而不是被生物分解成無害物質。 • 需要較大的土地面積空間(雖然仍比土耕法需要較少)。 • 抽出之氣體必需處理，不能直接與大氣交換。 • 需要設置底部阻絕設施。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

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

生物堆法之選用，涉及微生物生長之相關限制因子，但因挖至地面處理，對於地質狀況為次要之考量因子。污染場址是否適用生物堆法，必須由下列參數配合，主要包括下列項目：

一、 土壤特性

首先為微生物量評估，生物堆法因為必須藉由微生物作用，故污染土壤須鑑定是否有足量的微生物，以提昇處理的潛能。一般而言，每克乾重土壤中若含有 1,000 CFU(colony-forming unit)以上的異營性總菌數，將有利於本項技術的執行；若小於 1,000 CFU，可能仍有效，但需要更進一步的評估現場狀況，包括現場是否存在生物毒性。

其次為土壤 pH 評估，大多數的土壤環境微生物最適生長之 pH 值在 7 左右，pH6 至 8 左右適合微生物生長，若超出此範圍，則必須進行土壤 pH 值改良。

微生物生長需要適當的土壤含水率，乾燥的土壤並不可行，但過量水份也有可能抑制微生物的生長，一般建議含水率約為 40%至 85%，超出本項範圍則必須添加適當的水分或設置蒐集多餘水分之設施。

在土壤溫度部分，一般而言保持 10°C 至 45°C 的土壤溫度適合微生物生長。

在營養鹽部分，一般以典型之碳：氮：磷比為 100：10：1 至 100：1：0.5 之間為佳。土壤中若有氮、磷不足的部分，應適當的加以添加，但過量也不好，必須小心加以控制。

最後必須評估生物堆的布置，不得太緊密，有礙於透氣及水分之保持，以及空氣注入之傳輸途徑。

二、 污染物特性

首先必須加以注意的是污染物之揮發性，有機污染物因空氣注氣作用被驅散出土壤堆，這是不願意被見到的，因為本項方法乃期望生物作用能為主要之降解污染物方式，否則必須再進行逸散氣體的防制工作。因此，在提供曝氣作用時，必須控制曝氣強度。一般而言，汽油、柴油在微曝氣情形下並不會大量逸散出土壤堆，但 VOC 的揮發性較高，必須加以控制。

其次視污染物的化合物結構特性是否符合生物作用需求，一般而言，汽油、柴油等油品類，較具生物分解性；但若是潤滑油、機油、熱燃油(heating oil)等，則具較低之生物分解性。

關於污染物濃度部分，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於 50,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。

三、 天氣條件

生物堆法易受天候的影響，首先是氣溫，因為氣溫會間接影響土壤溫度，如果氣溫超出前述土壤溫度合適範圍，就必須採取補助升溫或降溫之措施。

其次，降雨也會直接影響土壤整治之效果，因為一般生物堆法並未設計加蓋措施，降雨會破壞土堆結構，或是提高土壤含水量。因此，一般而言，常年降雨量超過 30 英吋(762 公釐)的地區，可能不考慮採用此項方法，或是須設計加蓋、雨水收集溝渠等輔助結構設備，底部也應設計滲水收集設施。

風力部分也是一項考量因子，風蝕作用(erosion)可能會造成土堆表層的封閉性結構產生，導致土壤層的通氣效果下降。

3.2.2 整治系統單元

一個完整之生物堆系統，設置相關設施時必須注意下列事項：

一、 土地需求

土地需求面積決定於待處理的土壤總量，傳統的生物堆設計高度建議約為 3 到 10 英呎(約 0.9 至 3 公尺)，土壤總體積除以設計高度，即可得土地面積需求，但另外需準備其他額外空間來製造土堆側邊的斜坡。至於土堆之長寬比方面，若是以機械式空氣注入，並無特別的規定；但若是以人工翻土方式提供曝氣者，土堆寬度最好不要超過 6 至 8 英呎(約 1.8 至 2.4 公尺)。

二、 布置方式

場區設計決定於生物堆的布置方式，生物堆系統可以是單一生物堆，也可以是多個生物堆。

三、 生物堆結構

包括準備區、路肩、底部不透水布，覆蓋物(視需要)、空氣注氣設備、集/散氣管線、營養鹽注入管線、滲水收集設施及處理系統、土壤前處理設施(如 pH 調理、加藥等)、逸散氣體處理設施(視需要)以及其他耗材零件等。

鼓風機等注氣設備必須提供足夠之動力，使得空氣能夠均勻的散注於生物堆之中，避免散氣不均勻之情形。

四、 其他注意事項

場址必須做好妥善的安全管理，防止民眾故意或無意的接觸場址內的污染土壤，危害健康。

3.2.3 整治系統監測

生物堆法運轉過程中，與其他現地整治方法不同的是，本項方法是將

污染土壤挖除後，在侷限的區域以及控制條件下進行整治工程，而不是將藥劑、空氣等注入地層之中，較不會有污染區因整治工程造成擾動的風險。但是，因為整治區的開發空間型態，必須做好揮發性污染物逸散防治、水污染防治等二次公害防治工作。操作注意事項則包括操作計畫、運轉過程監測等兩大項，必須盡量完善做到這兩項內容之規範，才能避免二次污染發生，茲詳述兩項規範內容如下：

一、 操作計畫

包括三大操作計畫：「注氣」、「營養鹽添加」、「水分添加」等施作頻率計畫，各計畫可以根據實際現場情形調整，包括季節性、雨量、大氣條件、氣溫等。而如果生物堆有加覆蓋，如塑膠布、不織布、尼龍布等，必須隨時注意是否有破洞、撕裂等。

二、 監測計畫

即使在良好的操作情況之下，也難免會有意外的情形發生。為了確保二次污染不會發生，或是發生時也能立即得知並進行改善的動作，因此必須進行監測。茲彙整生物堆法建議監測計畫項目如表 3.2.3-1。

3.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

VOCs氣體逸散濃度必須符合國內相關空氣污染防制法令。依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

而滲出水部分，若污染區位於工廠內，一般建議可納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，應符合我國污染防治相關法令，在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

表 3.2.3-1 生物堆法建議監測計畫內容

監測介質	監測目的	取樣頻率	監測參數
生物堆裏的土壤	分析生物堆裡生物降解效果	操作期間每月或每季一次	微生物量、污染物濃度、pH、氮、磷、水分及其他生物生長限制因子
生物堆內的氣體	分析生物堆裡生物降解效果	操作前三個月每週一次，其後每月或每季一次	CO ₂ 、O ₂ 、CH ₄ 、H ₂ S、VOCs
大氣	分析場址操作人員及附近民眾之健康危害性	操作前二週每週二次，此後每季一次，或依據空氣污染防治法規定辦理	揮發性有機污染物、粒狀污染物
滲出水	分析溶解性或懸浮性污染物	依據水污染防治法規定，或是環保機關更嚴格的審查要求	依據水污染防治法規定，或是環保機關更嚴格的審查要求，其中必須包括危害性有機物
生物堆下方土壤	監測污染物的移動。	一季一次或半年一次	危害性有機物
生物堆下游地下水	監測溶解性污染物的移動。	一年一次	溶解性的危害性有機物

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

3.3 成本及期程評估

本項技術若操作得當，工程經費預估值較能掌握，因為其係在良好的控制單元之下進行。一般而言，每噸土壤處理費用約 30~90 美元(約新台幣 1,050 至 3,150 元)，較其他地面處理程序便宜；平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。

參考文獻

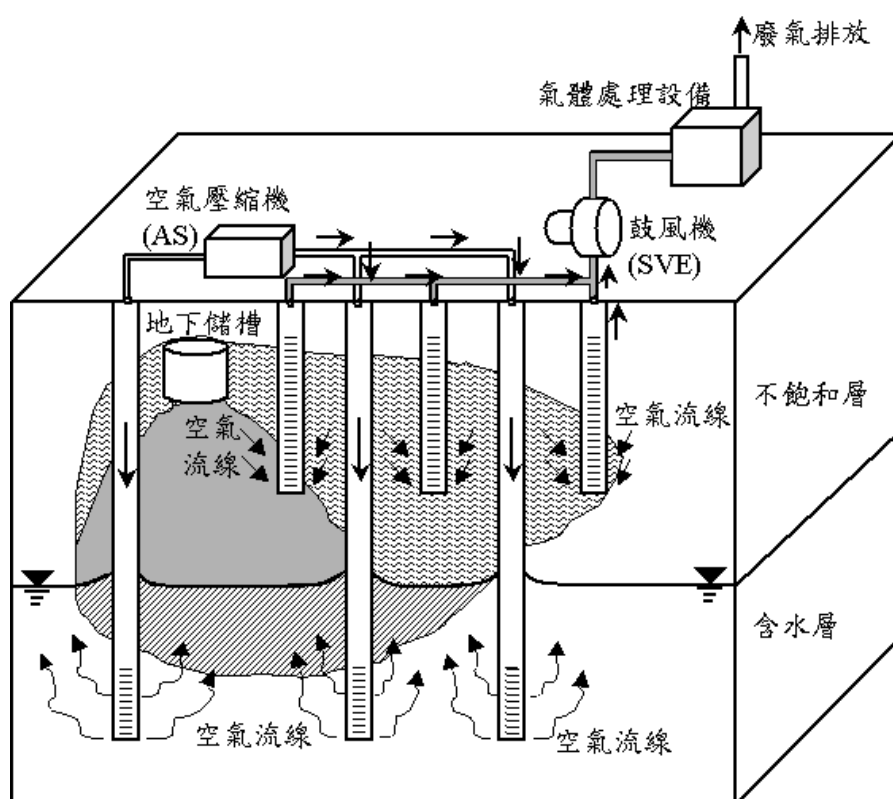
1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. “Soil Vapor Extraction and Boilventing(EM 1110-1-4001)”, USACE, 2002.
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

四、空氣注入法(Air Sparging)

4.1 整治技術簡介

4.1.1 原理

空氣注入法(Air Sparging)被視為最常用的現地(in-situ)的處理技術，主要針對吸附於土壤或溶解於地下水中的揮發性或半揮發性有機物質進行處理，將未受污染的乾淨空氣注入地下水污染區(通入含水層)中，藉由水中曝氣作用，使得有機物質從溶解的液相中吹出移除，當其到達不飽和層之土壤層中，可藉由土壤氣體抽除設備如 SVE(Soil Vapor Extraction)等抽除。其經評估對於遭受油品污染的地下水，有相當良好的效果。空氣注入法之設備單元如圖 4.1.1-1 所示。

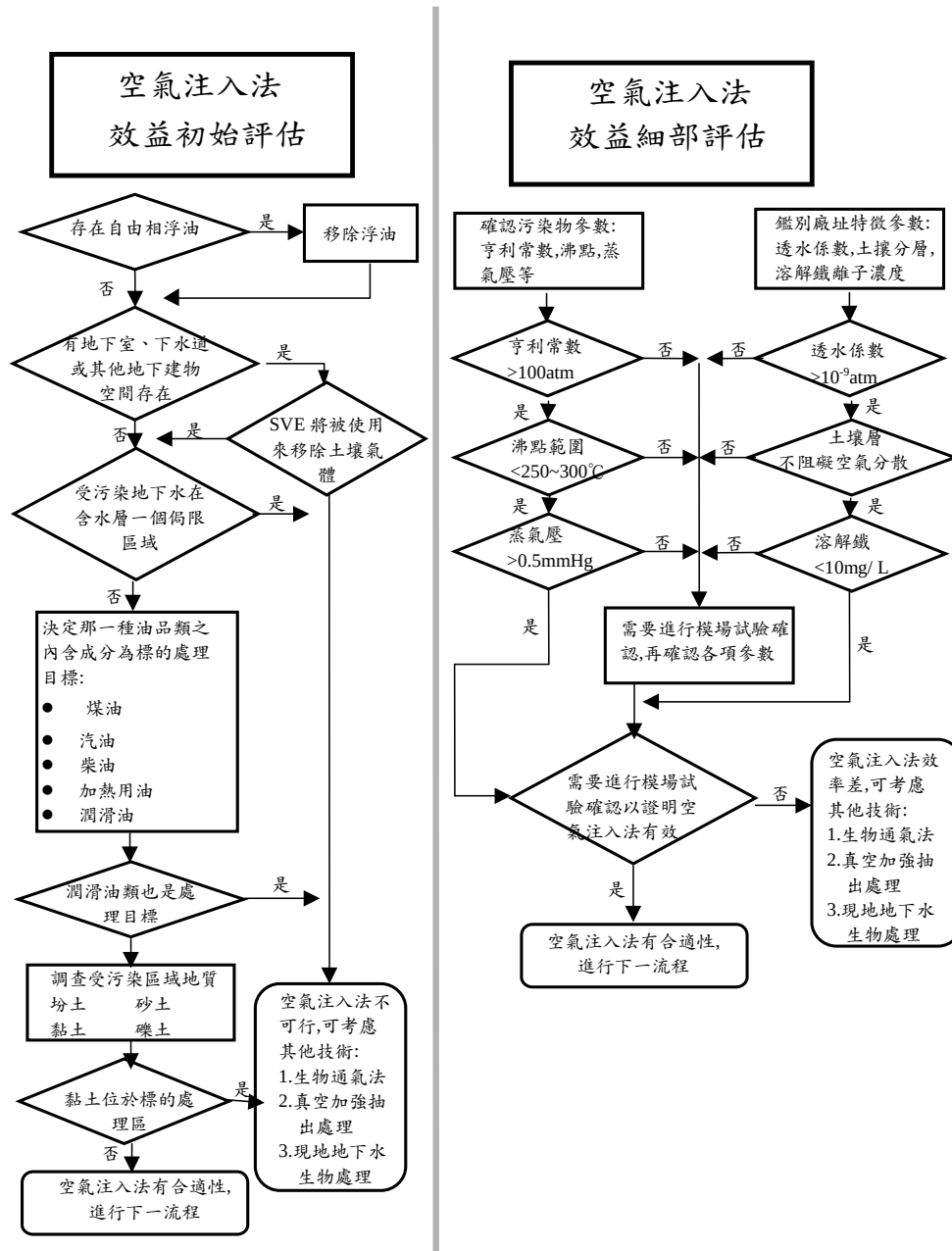


參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 4.1.1-1 空氣注入法搭配氣體抽出法處理系統

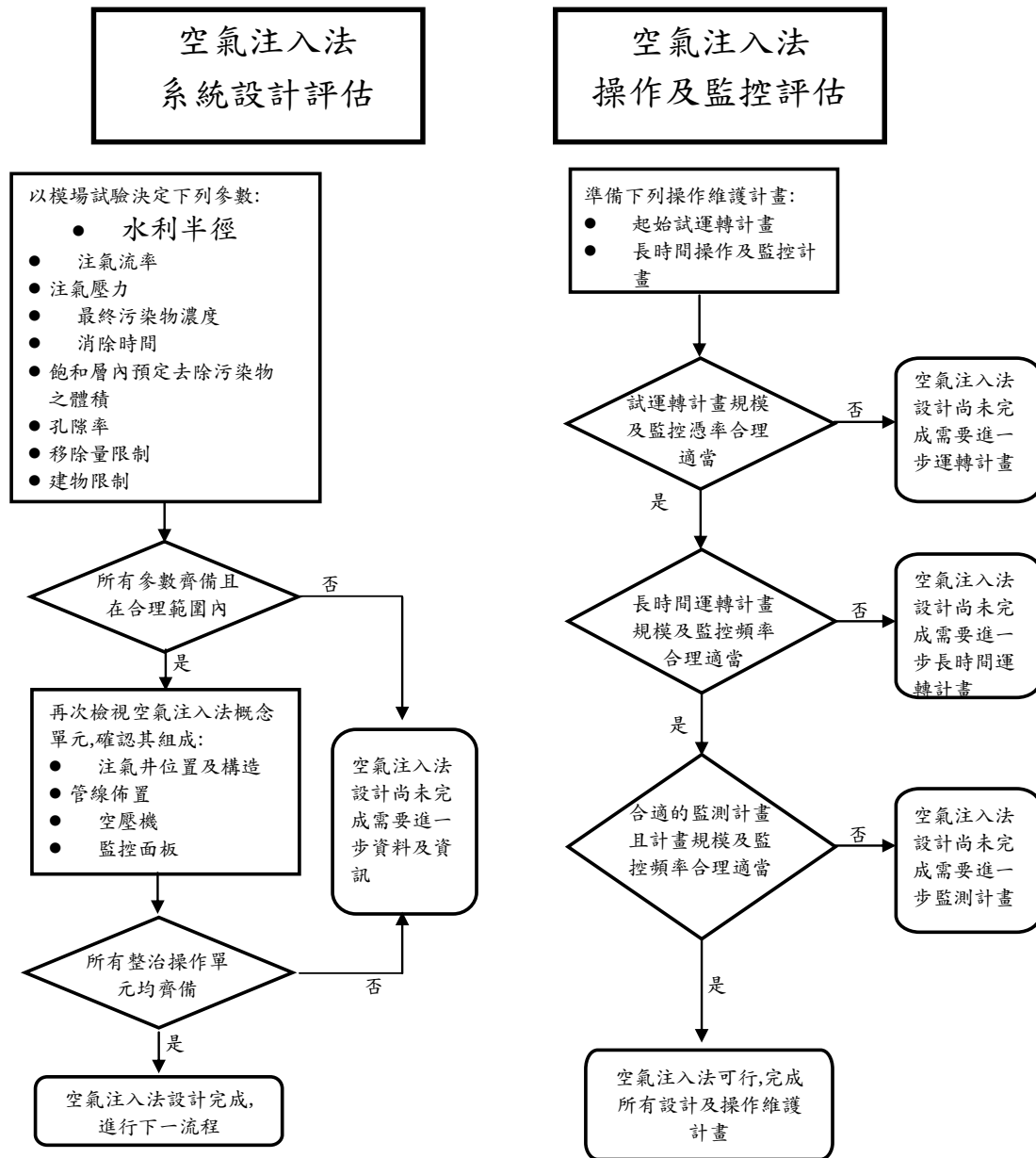
4.1.2 適用條件

有關使用空氣注入法的適用性，可採用圖 4.1.2-1 所示的初步篩選、細部評估、系統設計、操作及監控計畫等四個流程來評估。另評估本技術適用性之查核表則如表 4.1.2-1 所示。有關空氣注入法使用之優缺點整理如表 4.1.2-2 所示。



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 4.1.2-1 空氣注入法評估流程



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 4.1.2-1 空氣注入法評估流程(續)

表 4.1.2-1 空氣注入法技術選用查核表

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

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

表 4.1.2-2 空氣注入法優缺點比較表

優點	缺點
- 簡單可得之工具器材，容易設置。 - 操作空間較小。 - 較短的處理時間，在特定條件操作下，整治期程小於 1 至 3 年。 - 每噸土壤處理費用約 20~50 美元，較其他地面處理程序便宜。 - 不須移除、處理、儲存、處置遭受污染的地下水 - 可以 SVE 加強處理效能。	- 若有自由相浮油存在，不能同時處理，必須先移除浮油。 - 不能處理遭特殊地質局限之污染團。 - 土壤若有分層，恐造成效能降低。 - 一些化學性、物理性、生物性的交互作用尚不清楚。 - 缺乏實場及實驗室數據支持設計考量因子，場址差異性影響參數，不能通用。 - 會造成組成物的移動 - 須細部設計模場試驗，確認氣體揮發之控制。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

4.2 整治系統操作與設計

4.2.1 整治系統設計與操作要點

空氣注入法之選用，適用之地質狀況為最主要考量因子，並不是所有地質條件均適用，最好能於土壤間隙較大的地質條件下進行。一般而言，以砂質、粉土等透水係數高的場址以及汽油、柴油等沸點較低之污染物效果較佳。空氣注入法系統設計基礎資料需求如下(In-situ air sparging, 2009 台美講習會)：

- 一、地下水位深度與變動、高程
- 二、場址地質資料
- 三、污染物分佈與特形如溶解度、蒸汽壓、可生物降解性、
- 四、土壤透氣性與注入空氣壓力
- 五、地下水地質化學資料
- 六、地下微生物生長情形

4.2.2 整治系統單元

一個完整空氣注入系統若搭配抽氣系統，包括下列設備或設施：

- 一、垂直式/水平式注氣井。
- 二、土壤氣體抽氣井。
- 三、管線系統。
- 四、鼓風機。
- 五、氣體流量計。
- 六、儀控設備。
- 七、地下水抽水泵浦。
- 八、尾氣處理設備。

4.2.3 整治系統監測

空氣注入法的監測注意事項為土壤氣體抽除法(SVE)系統。為能監控 SVE 系統之處理成效，應針對 SVE 系統進行監測，而其監控設備需求如表 4.2.3-1 所示。SVE 系統運轉與監測時，應注意下列重點：

一、 初期運轉

SVE 系統初期運轉之 7 至 10 天內應進行系統功能之調整，以使污染物之抽除效率達到最佳化。流量量測、真空度記錄、氣體濃度檢測等監測項目須每日進行記錄。

二、 長期運轉

長期監測則包括流量平衡、流量與壓力之量測、氣體濃度檢測等，監測頻率可兩週或每月量測一次。

經由 SVE 系統處理土壤中污染物之減少亦為監測之重點項目之一，而長期運轉所移除之污染物質質量可藉由抽氣量與氣體中污染物濃度進行估算，計算公式如下：

$$M = C \cdot Q \cdot t \quad \text{式-1}$$

其中

M 為污染物累計移除量(kg)

C 為抽出氣體中之污染物濃度(kg/m³)

Q 為抽出氣體流量(m³/hr)

t 為運轉時間(hr)

4.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助污染物分解，但必須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數。

至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防制法令。依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染

整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

- 一、 VOC 濃度大於 2,000ppmv：建議使用熱氧化法。
- 二、 VOC 濃度介於 100 至 2,000ppmv：建議使用觸媒氧化法。
- 三、 VOC 濃度介於 35 至 100ppmv：建議使用顆粒活性炭(GAC)吸附。
- 四、 VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備，以處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性炭等耗材以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

4.3 成本及期程評估

依美國環保署資料顯示，以空氣注入法進行整治，平均每噸土壤處理費用約為 20~50 美元(約新台幣 700 至 1,750 元)。空氣注入法具較短的處理時間，在特定條件操作下，整治期程小於 1 至 3 年。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. EPA Superfund record of decision：record of decision for Operable Unit 5 Fort Wainwright Fairbanks, Alaska. USEPA,EPA /ROD/R10-99/036, 2004.
3. “Soil Vapor Extraction and Boiventing(EM 1110-1-4001)”, USACE, 2002.
4. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>

5. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
6. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>
7. In-situ air sparging, 2009 台美講習會

五、生物曝氣法(Biosparging)

5.1 整治技術簡介

5.1.1 原理

生物曝氣法(Biosparging)是一種常用的現地(in-situ)的處理技術，係針對受污染的土壤及地下水介質進行同步處理的整治工作，藉培養現地微生物(indigenous microorganisms)，進行飽和含水層的曝氣及生物馴養，達到生物降解污染有機物的目標。

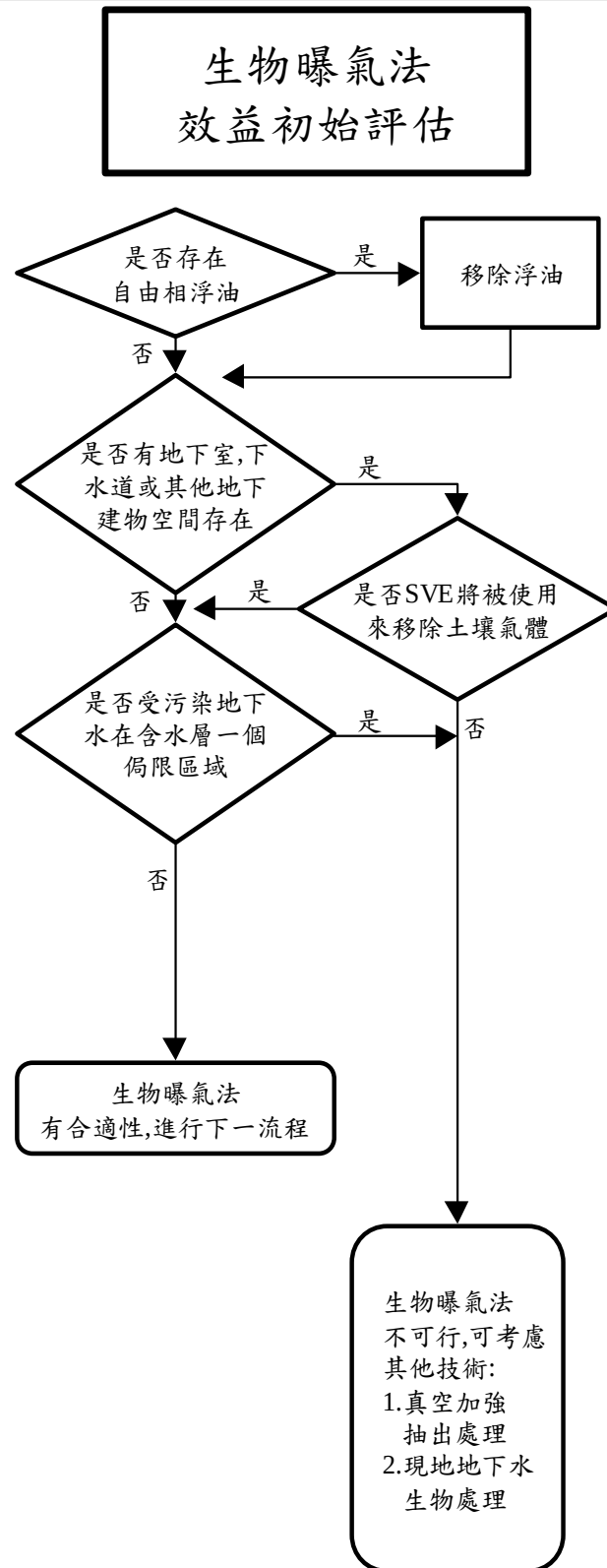
生物曝氣法類似空氣注入法，均在含水層中進行曝氣，但其差異是，空氣注入法主要靠注氣促進污染物的揮發作用；生物曝氣法則是另外還注入了生物生長所需之營養鹽等，強化了微生物族群分解污染物的作用。另外，生物曝氣法的曝氣速率必須較空氣注入法為低，以避免地下環境中的生物/污染物/地質型態造成太大的擾動變化。

本項技術針對在不飽和層的土壤污染，雖然同時可以進行土壤氣體抽除整治，但是若針對只有不飽和層土壤污染，而沒有地下水污染團的場址而言，其整治成效可能會不如生物通氣法(bioventing)。

5.1.2 適用條件

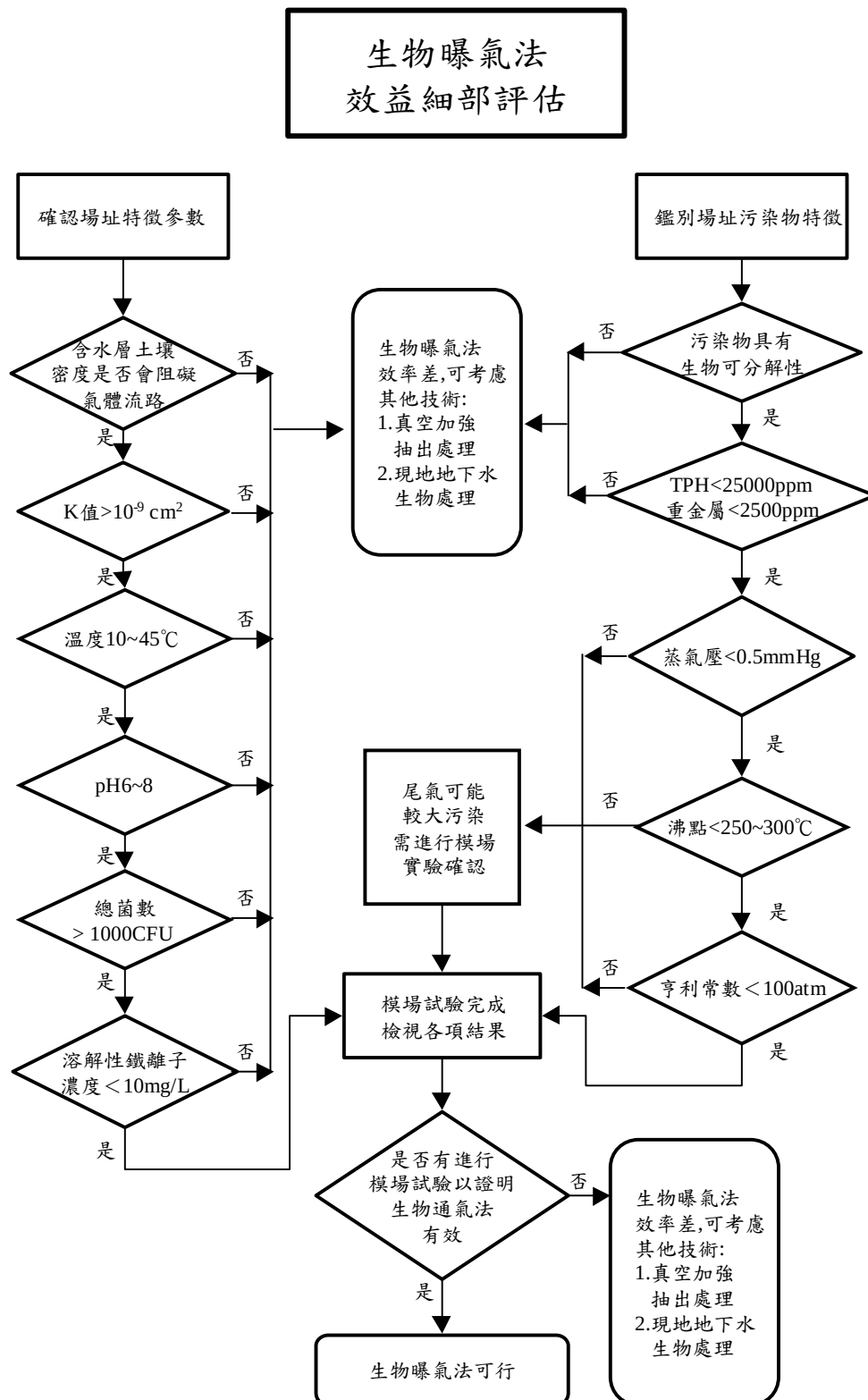
有關生物曝氣法的適用性評估詳圖 5.1.2-1 及表 5.1.2-1 所示。生物曝氣法成功及失敗案例均有，端視場址細部調查評估詳盡與否、操作管理經驗良窳等而定。在美國超級場址，本項技術相對於其他技術而言較為新穎，目前尚有許多場址仍在操作中，雖然其原理概念簡單，但實際操作成效仍有賴更多數據驗證。欲採用本技術前，建議宜先建立模場試驗，在獲得較多數據之後再行評估。

有關生物曝氣法使用之優缺點整理如表 5.1.2-1。



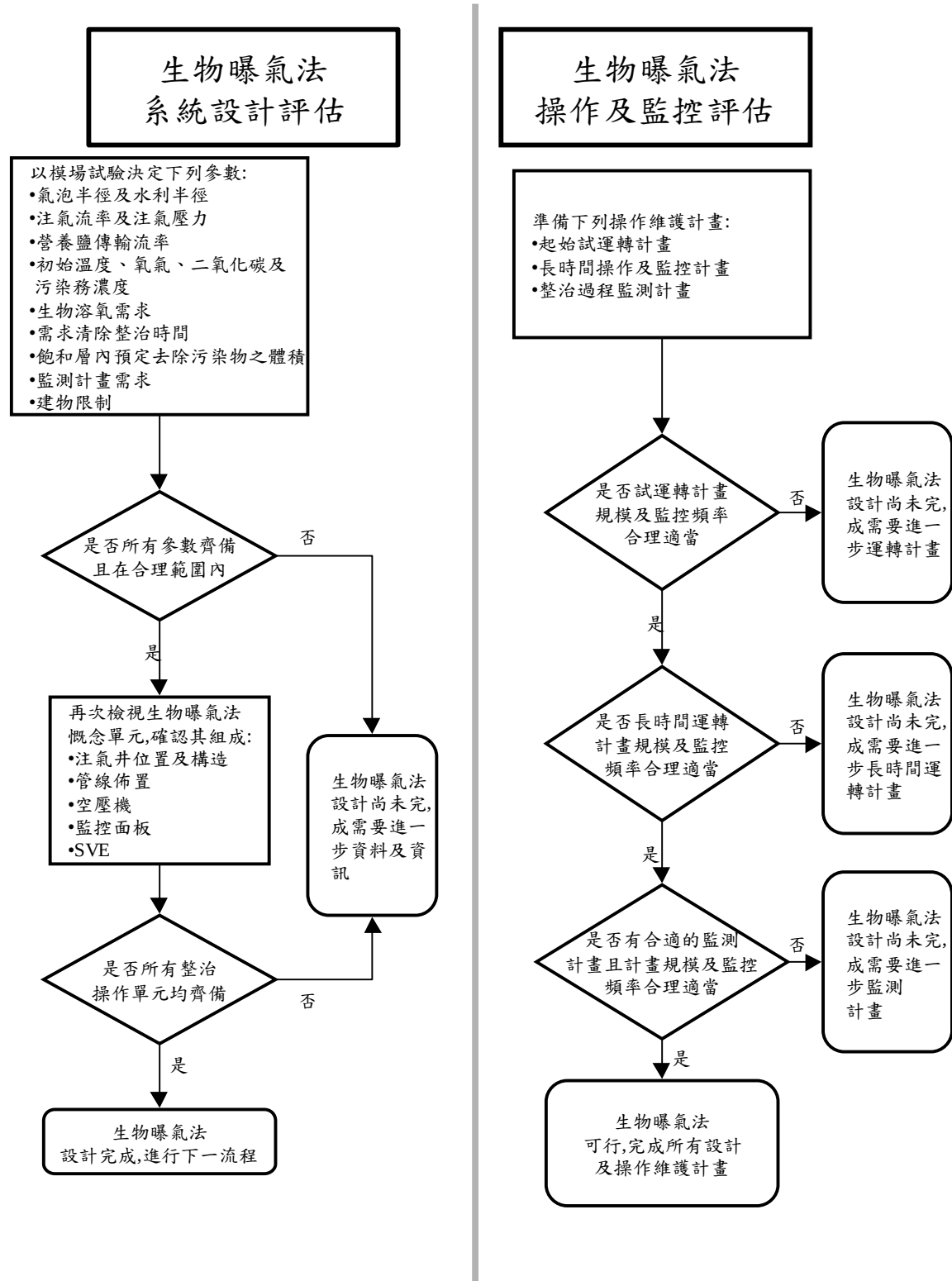
參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers” , USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 5.1.2-1 生物曝氣法評估流程



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 5.1.2-1 生物曝氣法評估流程(續)



參考資料: "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers", USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 5.1.2-1 生物曝氣法評估流程(續)

表 5.1.2-1 生物曝氣法技術選用查核表

1.0 場址特性：	是	否
1.1 地下含水層有浮油？		
1.2 土壤透氣性大於 10^{-9}cm^2 ？		
1.3 無不透氣層或其他可能阻斷氣流之地質狀況？		
1.4 地下水 pH 值介於 6~8？		
1.5 異營性細菌數 $>1,000 \text{ CFU/克-土壤}$ ？		
1.6 碳：氮：磷之比介於 100:10:5 與 100:1:0.5 間？		
1.7 場址溶解性鐵離子濃度小於 10mg/L ？		
1.8 含有污染物的氣體移動被有效控制？		
2.0 污染物特性：		
2.1 所有的污染物可被有效生物降解？		
2.2 總石油碳氫化合物濃度 $\leq 50,000 \text{ ppm}$ 且重金屬總濃度 $\leq 2,500 \text{ ppm}$ ？		
2.3 污染物蒸氣壓是否小於 0.5mmHg ？		
2.5 污染物的亨利常數是否小於 100atm ？		
3.0 生物曝氣系統設計之評估：		
3.1 確認注入空氣壓力。建議注氣壓力可克服水頭及毛細力？		
3.2 確認注氣井分布之適宜性。注氣井之影響半徑可涵蓋所有污染面積？		
3.3 注氣井的配置型式適合場址條件？		
3.4 鼓風機或空壓機之型式可以達到設計的注氣壓力？		
3.5 若需添加營養鹽，則營養鹽之化學成分及傳輸速率適合場址條件？		
3.6 場址氧氣與二氧化碳之背景濃度已納入考量？		

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

表 5.1.2-2 生物曝氣法優缺點比較表

優點	缺點
- 簡單可得之工具器材，容易設置。 - 操作空間較小。 - 較短的處理時間。一般如果場址調查、模場試驗資料詳盡，在操作良好的情形之下，6 個月至 2 年之期間可得到預期成效。 - 在處理污染地下水方面，成本具有競爭性優勢。 - 相較於空氣注入法而言，能夠處理之油品污染種類範圍及項目更為廣泛。 - 不須抽除、離地處理、儲存、廢棄受污染之地下水，現地處理可避免造成廢污水處理的問題。 - 相較於空氣注入法而言，低速率之曝氣作用，減低地面上如 SVE 等的處理負荷。	- 若有自由相浮油存在，不能同時處理，必須先移除浮油。對於不飽和層土壤之處理亦無法單獨處理。 - 一些化學性、物理性、生物性的交互作用上仍不清楚。 - 缺乏實場及實驗室數據支持設計考量因子，場址差異性影響參數，不能通用。 - 會造成污染物組成物的移動。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

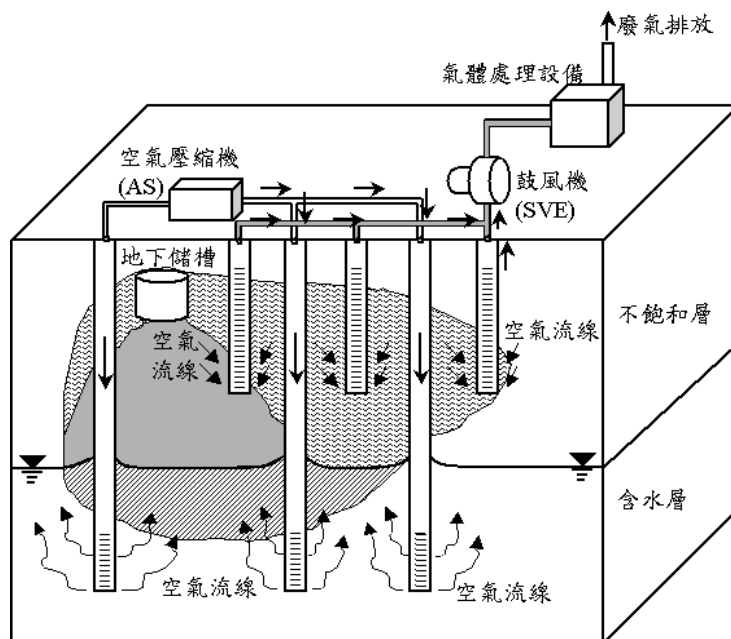
5.2 整治系統操作與設計

5.2.1 整治系統設計與操作要點

生物曝氣法之選用，適用之地質狀況為最主要考量因子，並不是所有地質條件均適用，最好能於土壤間隙較大的地質條件下進行。一般而言，以砂質、粉土等透水係數高的場址以及汽油、柴油等沸點較低之污染物效果較佳。

5.2.2 整治系統單元

一個完整之生物曝氣法系統若搭配抽氣系統，包括下列設備或設施，如圖 5.2.2-1 所示：



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 5.2.2-1 生物曝氣法處理系統

垂直式/水平式注氣井。

- 一、 土壤氣體抽氣井。
- 二、 管線系統。
- 三、 鼓風機。

- 四、氣體流量計。
- 五、儀控設備。
- 六、地下水抽水泵。
- 七、尾氣處理設備。
- 八、營養鹽儲槽、注入井(視需求)。

5.2.3 整治系統監測

生物曝氣法必須監測氣體抽除設備，亦即 SVE 系統之尾氣排放。為能監控 SVE 系統之處理成效，應針對 SVE 系統進行監測，其監控設備需求如表 5.2.3-1 所示。SVE 系統運轉與監測時，應注意下列重點：

一、初期運轉

SVE 系統初期運轉之 7 至 10 天內應進行系統功能之調整，以使污染物之抽除效率達到最佳化。流量量測、真空度記錄、氣體濃度檢測等監測項目須每日進行記錄。

二、長期運轉

長期監測則包括流量平衡、流量與壓力之量測、氣體濃度檢測等，監測頻率可兩週或每月量測一次。

經由 SVE 系統處理土壤中污染物之減少亦為監測之重點項目之一，而長期運轉所移除之污染物質質量可藉由抽氣量與氣體中污染物濃度進行估算，計算公式如下：

$$M = C \cdot Q \cdot t \quad \text{式-1}$$

其中 M 為污染物累計移除量(kg)

C 為抽出氣體中之污染物濃度(kg/m³)

Q 為抽出氣體流量(m³/hr)

t 為運轉時間(hr)

表 5.2.3-1 氣體抽除系統監控設備需求

監測設備	監測位置	設備範例
流量計	每個井頂 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	皮托管 浮子流量計 孔口板 文氏管或流量管
壓力(真空)錶	每個井頂或管線分歧點 鼓風機上游之過濾設備前後端 氣體處理前後端	壓力計 壓力讀數錶 真空錶
氣體溫度感測器	管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口(氣體處理前)	雙金屬指針式溫度計
採樣口	每個井頂或管線分歧點 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	軟管接頭 塞墊
氣體採樣收集設備 (透過採樣口)	每個井頂或管線分歧點 管線系統至鼓風機 鼓風機排氣口	氣體採樣袋(Tedlar bags) 吸附管 吸附罐 GC 直接注射用之聚丙烯(PP)材質管
控制設備		
流量控制閥	每個井頂或管線分歧點 於至鼓風機前之管線設置稀釋閥	球閥 閘/球型閥 蝶型閥

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

5.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。此外，整治過程中有可能產生好氧微生物協助污染物分解，但必須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數。

至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，必須符合國內相關空氣污染防制法令。依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

- 一、 VOC 濃度大於 2,000 ppmv：建議使用熱氧化法
- 二、 VOC 濃度介於 100 至 2,000 ppmv：建議使用觸媒氧化法
- 三、 VOC 濃度介於 35 至 100 ppmv：建議使用顆粒活性碳(GAC)吸附
- 四、 VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防治設備，以處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性碳等處理耗材以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

5.3 成本及期程評估

在操作良好的情形下，6 個月至 2 年期間可以獲得預期成效。本項技術容易受到場址差異性影響，造成整治期程、整治成效之不同。在整治經費方面，相較其他侷限性整治方法(如生物通氣法、生物堆法)而言，也比較難估計，建議應先進行模場評估試算來獲得更詳盡的工程經費資料。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers” , USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
3. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
4. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

六、現地地下水生物整治法(In-Situ Groundwater Bioremediation)

6.1 整治技術簡介

6.1.1 原理

現地地下水生物整治法(In-situ Groundwater Bioremediation)簡單來說就是促進(encourage)飽和含水層之現地微生物之生長，強化生物分解作用。本技術能夠有效處理溶解於地下水中的有機類物質，例如油品类污染物等。

為了加強生物分解的作用，通常必須將微生物加以馴養，馴養的機制包括提供足量的電子接受者(如氧氣、硝酸鹽)、營養鹽類(如氮、磷等)以及能量來源(碳源)。一般而言，污染場址中存在碳源，也就是有機性的污染物，而電子接受者與營養鹽類就成為生物降解作用最重要的兩個限制性因子。

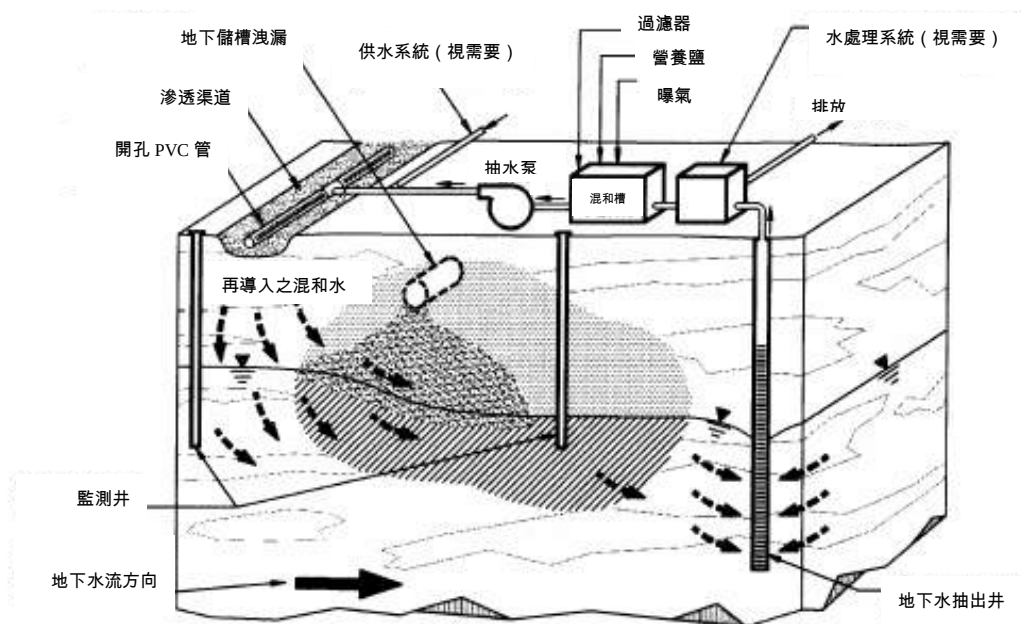
現地地下水生物整治法主要概念，係在地下水主污染區之地下水下游方向，適當距離位置處，設置一口或多口抽水井，將地下水抽出至地面後，進行曝氣以及混合營養鹽等物質後，回注設置於主污染區地下水上游方向之一口或多口注入井，形成地下水循環區間。

現地地下水生物整治法之設備單元如圖 6.1.1-1 所示。在污染場址的現場，地下水環境形成一個密閉循環區(closed-loop)，可以於地面上設置一個營養鹽混合及曝氣槽，然後經由橫向管線加壓淋灑，使營養鹽能分布於土壤層中，並向下滲漏至地下水含水層。另一種混合液回注的方式，如圖 6.1.1-2 所示，混合液係透過垂直式的地下水井直接回注於地下水中，土壤層中存在之污染區域，並不會接觸到回注之混合液。

基本上理想的抽出注入方式，係形成一個持續性的循環，直到地下水被處理到整治目標之下，而所有處理動作都在現地完成，抽出的地下水完全回注回去。但必須注意的是，抽出的地下水若要回注的話，必須取得環

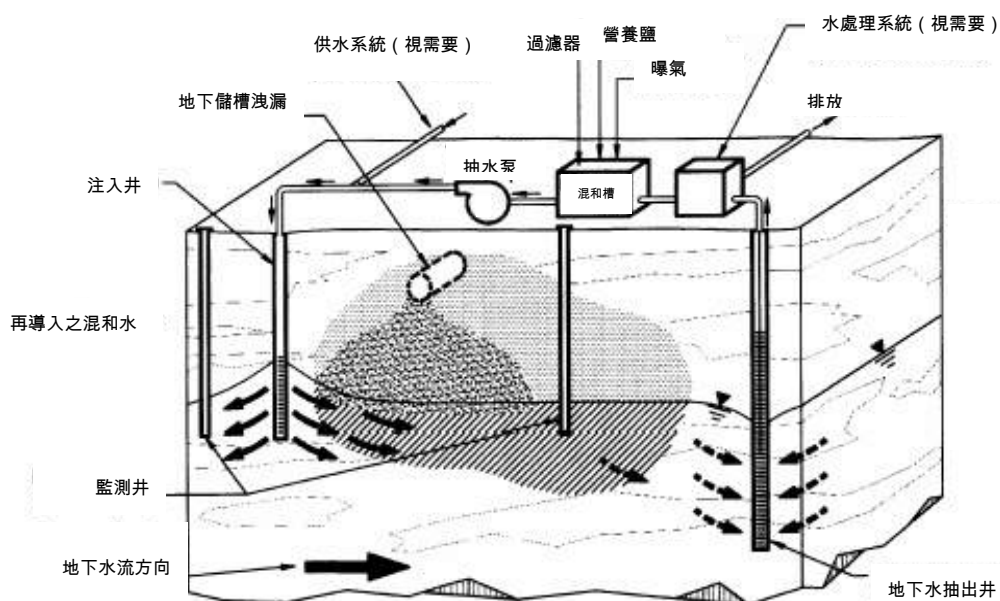
保主管機關同意。在美國部分州政府並不允許抽出之地下水回注，不過另外有彈性的做法，那就是用乾淨的自來水代替，但注入量必須和抽出量相當；惟如此一來，抽出地下水必須另外處理。

現地地下水生物整治法可以多種型態方式進行，例如好氧作用(aerobic)、無氧作用(anaerobic)、厭氧作用(anaerobes)以及共代謝作用(co-metabolic)等，端視添加回注液中的物質而定。好氧作用係於回注水中曝氣，增加水中溶氧；而好氧作用已被證實對於降低脂肪族化合物(例如正己烷)、芳香族化合物(例如苯、萘)等常見於石油類之污染物，其效果特別顯著。至於好氧曝氣方式除了將抽出之地下水於地面上進行曝氣外，亦有直接在注入井中曝氣，或是將過氧化物投入注入井或地面抽出水中者，皆可達到提昇水中溶氧的作用。至於無氧、厭氧以及共代謝作用等較常見於處理其他化合物，例如含氯有機溶劑等，通常降解的速率會比好氧處理石油類製品污染物的速率為低。



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 6.1.1-1 現地地下水生物整治法處理系統-類型一



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 6.1.1-2 現地地下水生物整治法處理系統-類型二

6.1.2 適用條件

有關本技術之適用性評估詳如圖 6.1.2-1 及表 6.1.2-1 所示。而在使用工法上，本技術並非針對不飽和土壤層的污染所規劃的處理方式，而是對地下水污染加以處理，因此，土壤層污染部分必須搭配其他方式，例如土壤氣體抽除法、生物通氣法等來併同處理。

此外，在使用本技術進行整治之前，必須先將浮油層移除，且雖然對於不同分子量範圍之石油類化合物，本技術均有其適用性，但是對於溶解性高、低分子量、短鏈鍵結之化合物仍有較高去除的效率。

有關本技術之優缺點整理於表 6.1.2-2 所示。由於本技術為能夠直接針對主要污染區進行整治，加上使用生物方法，因此成本較低，且可因減少化學藥劑的添加，降低對於地下水環境的影響或是其他風險問題，故本技術在主動式處理的技術當中，常被選擇使用。不過由於場址地質狀況，以及污染物分布的差異性，並不是每一個場址都能成功的或是如期的完成整治工作。因此，調查工作仍應盡量完整，確實掌握污染源位置，使污染團能夠真正被涵蓋於密閉式之抽出、注入循環系統內，在整治過程中也可能

須依照實際狀況，調整抽出、注入井位置，以獲得較佳的處理結果。

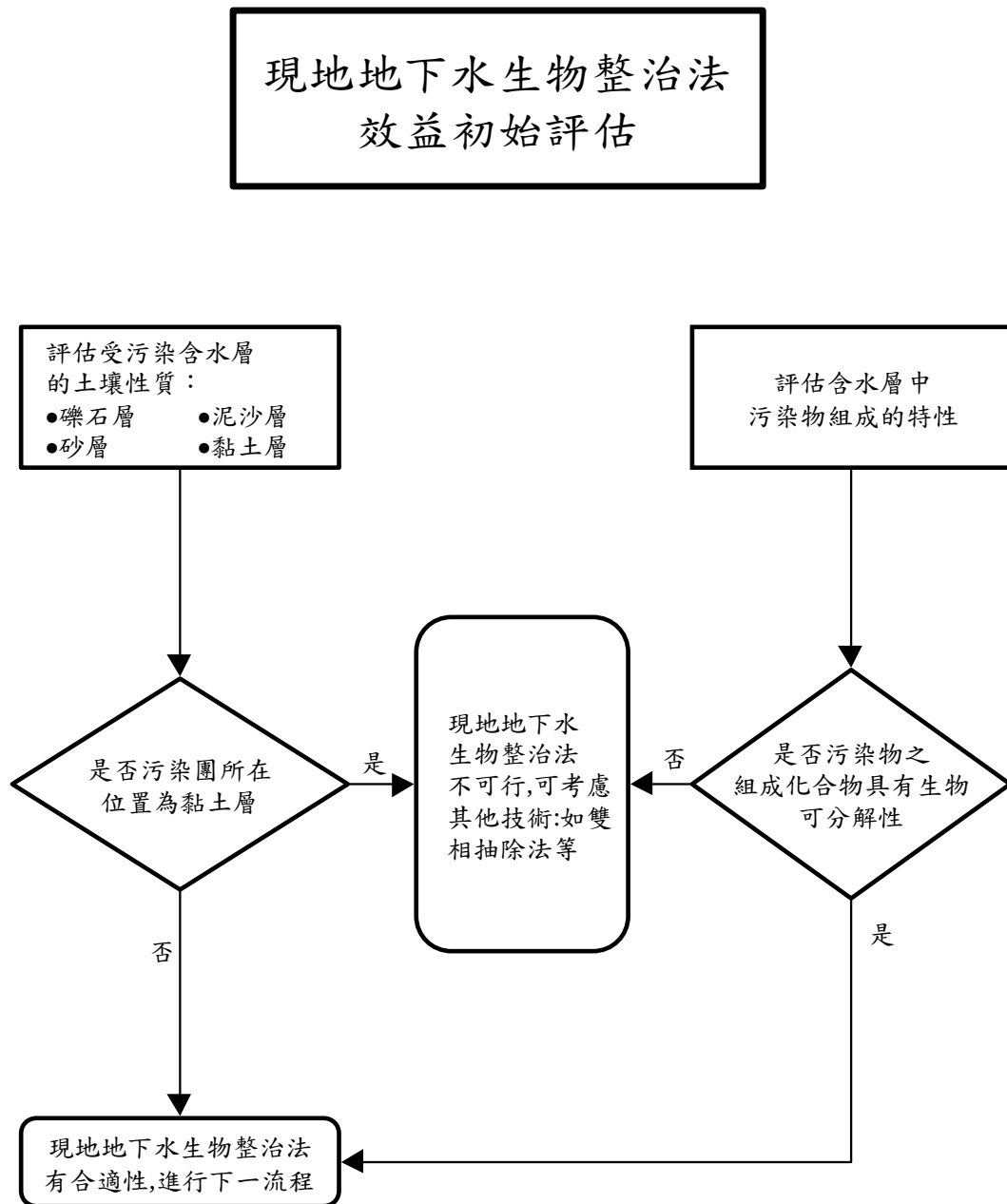
此外，本技術最常見的操作問題在於氧化作用造成地下水井的阻塞，包括生物性阻塞物(生物膜)，以及物理化學性的阻塞物(如鐵氧化物以及其他氧化物沉澱)等。一旦阻塞物形成，勢必改變注入或是抽出地下水的速率，除了整治效果會打折扣之外，更有可能造成上游遭污染的地下水，未被下游之抽取動作阻絕，而造成穿透(breakthrough)的情形。因此，在設計上除了可以採取分區、階段性設置地下水抽水區外，亦可採用高壓沖洗等方式進行洗井的動作。

本技術之所以發展快速、應用廣泛，是因為它可以應用於不同的地下水有機污染物標的。在美國許多油品類污染的場址，例如軍用運輸工具維修場等，因有機溶劑的使用，經常併同其他類型有機污染物，例如氯化有機物、苯、甲苯等，在同一種整治工法下，可以搭配不同的電子接受者的氧化機制，而同時將不同類型有機污染物併同去除。

表 6.1.2-2 現地地下水生物整治法優缺點比較表

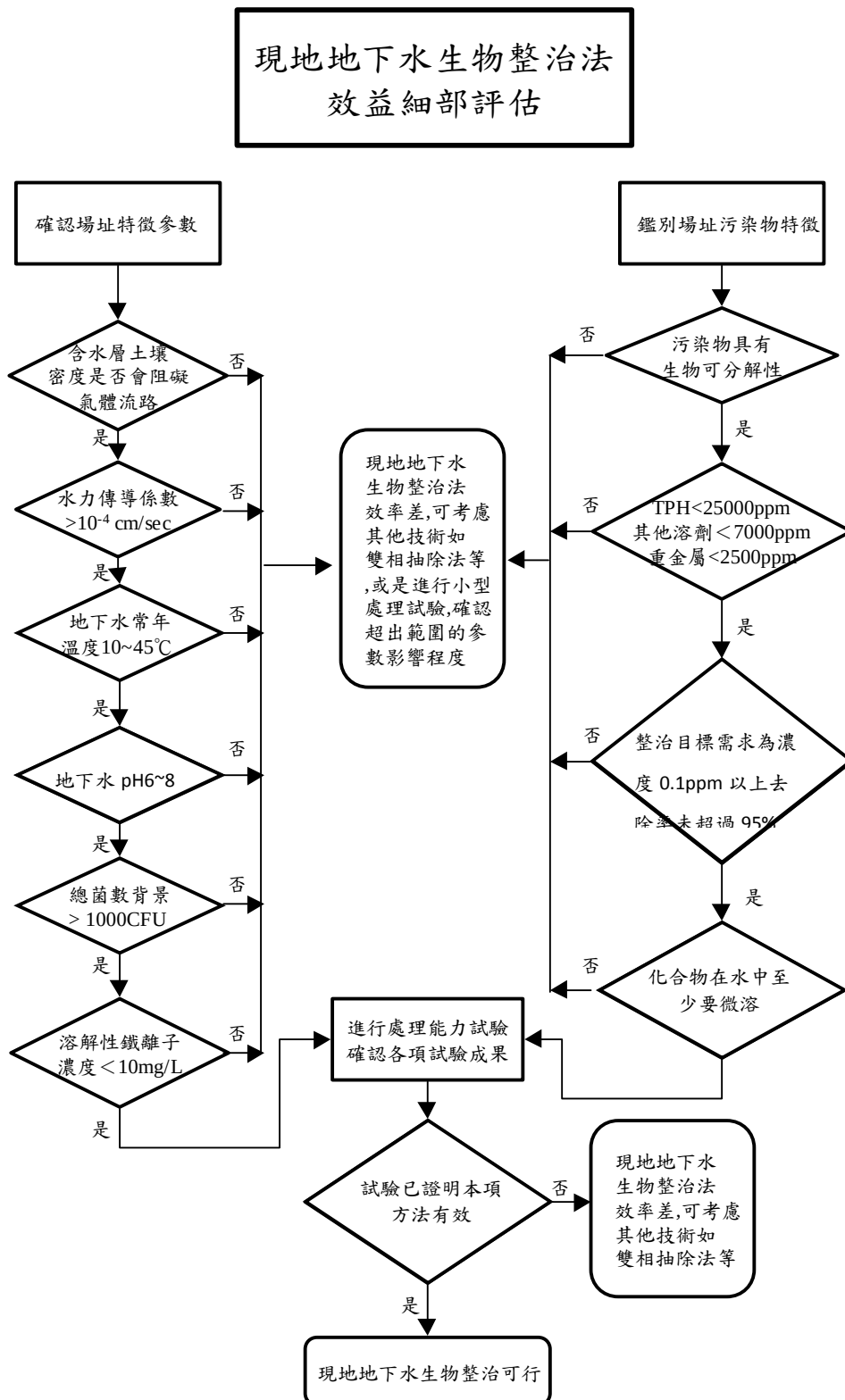
優點	缺點
除了溶解於地下水中的污染物之外，對於吸附於土壤顆粒間隙的污染物分子，或是因地質因素侷限於地層中特定位置之污染團，均能去除降解。 簡單可得之工具器材，容易設置。 整治過程對於現場運作中之其他製程、工作等所造成的影響最小， 對地下環境整治所需之時間相對於其他方法，例如抽出處理，期程較短。 一般而言，比其他類似方法，如抽出處理等較便宜。 能夠簡單的和其他技術結合應用。 許多例子顯示，本技術並不會產生廢棄物。	注入井可能會被微生物生長的生物膜或是礦化沉澱物質所阻塞。 高濃度(TPH>50,000ppm)、低溶解度物質可能會造成生物毒性，或是無法被生物利用。 在低透水性之含水層($<10^{-4}$ cm/sec)較難達到處理效果。 注入井設置、曝氣管的埋設須取得環保主管機關的同意。 需要連續的監測及操作維護。 降解作用很可能僅侷限於污染區內透水性較高之區域。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 6.1.2-1 現地地下水生物整治法評估流程



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers” , USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 6.1.2-1 現地地下水生物整治法評估流程(續)

表 6.1.2-1 現地地下水生物整治法技術選用查核表

1.0 場址特性：	是	否
1.1 地下水傳導係數大於 10^{-4} cm/sec？		
1.2 無不透氣層或其他可能阻斷氣流之地質狀況？		
1.3 已檢測地下水礦物質含量並將其納入考量？		
1.4 地下水鐵離子濃度小於 10 mg/L？		
1.5 土壤 pH 值介於 6~8？		
1.6 地下水溫度介於 10°C~45°C 間？		
1.7 異營性細菌數 > 1,000 CFU/克-土壤？		
1.8 碳：氮：磷之比介於 100:10:5 與 100:1:0.5 間？		
2.0 污染物特性：		
2.1 已全部確認出可能的污染物？		
2.2 所有的污染物可被有效生物降解？		
2.3 總石油碳氫化合物濃度是否 ≤ 50,000 ppm 與重金屬總濃度 ≤ 2,500 ppm？		
2.4 有機溶劑濃度是否 ≤ 50,000 ppm？		
2.5 整治目標之濃度 > 0.1 ppm 且碳氫化合物去除效率 < 95%？		
2.6 污染物可溶於地下水？		
3.0 現地地下水生物整治設計之評估：		
3.1 已進行生物處理試驗？		
3.2 已運用地下水模式計算含水層污染物濃度的演變情形？		
3.3 如否，是否已運用其他方法計算整治所需之時間？		
3.4 生物降解速率符合整治計畫所定之整治期程？		
3.5 整治計畫中訂定生物降解速率？		
3.6 已計算注入井或回收井之有效影響半徑？		
3.7 井的配置適當，注入井或回收井井之有效半徑涵蓋整個污染範圍？		
3.8 已經估算待處理污染物的量？		
3.9 已經估算整治所需之電子接受者的量與種類？		
3.10 如須設置電子接受者系統，是否已設計此系統？		
3.11 是否須於地面設置廢水處理系統？		
3.12 已經估算整治所需注入營養鹽的量？		
3.13 如須設置營養鹽注入系統，是否設計此系統？		
3.14 生物補強(Bioaugmentation)是否需要，如是，是否已設計此系統？		
3.15 已估算抽水速率？		
3.16 設計控制與警報系統？		
3.17 須設計自由相浮油回收系統？		

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

6.2 整治系統操作與設計

6.2.1 整治系統設計與操作要點

現地地下水整治法之選用，因涉及微生物生長之相關限制因子，地質狀況為最主要考量因子，並不是所有地質條件下均適用，最好能在土壤間隙較大的地質條件下進行。一般而言，以砂質、粉土等透水係數高的場址以及汽油、柴油、煤油等沸點較低之污染物效果較佳。

對於污染場址是否適用現地地下水整治法，必須進行完整的場址特性(Site Characteristics)調查及污染物特性(Constituent Characteristics)等兩項主要工作，包括以下內容：

一、 水力傳導係數

水力傳導係數(Hydraulic conductivity, K 值)主要判定地下水在含水層中的移動能力，是研判現地地下水生物整治法相當重要的指標，控制電子接受者(如溶氧)以及營養鹽類物質於地下水中，傳輸供給至微生物族群的速率。K 值可藉由微水試驗(slug test)以及抽水試驗(pumping test)決定之。若是 K 值太小，則有可能地質條件較差，顆粒間隙較小，土壤密度緊緻，不利於地下水傳輸流動。一般而言，K 值大於 10^{-4} cm/sec 的情形下，對於本項技術相當有利； 10^{-4} ~ 10^{-6} cm/sec 可能可以執行，但必須以模場試驗設計控制；K 值小於 10^{-6} cm/sec 的情形下，則其地質條件可能不適合本技術。

二、 土壤結構及分層狀況

若簡單地以平均土壤地質情形來看，粗顆粒(coarse-grained)土壤例如砂質、礫石土壤區域，會比細顆粒(fine-grained)土壤如黏土、粉土土壤區域適用。這是因為在結構上土壤間隙較寬，較具有良好的地下水流動傳輸能力，在地下水被抽出以及注入時，有較低的傳輸阻力。

土壤層中若不是存在單一種地質，而是有不同的地質分層的組成情形，必須評估其分層是否有利於地下水的整治。例如，地下水抽水井或注入井附近可能會在透水性低的地方遇到阻礙而流向旁邊，產生

所謂側流/層流(lateral flow)的現象。此種不均勻的水流情形有可能造成整治時間延長，或是降低整治成效，因此，若要在這種地質特性的場址採用本技術，必須另外增加改善措施，例如增加局部性區域的注入井等。

三、 地下水礦物成份

場址地下水中一般存在的鈣、鎂、錳及鐵等元素，可能會和人工添加營養鹽中的磷等物質(一般以三聚磷酸鹽形式添加)，或是過氧化物產生反應，而發生沉澱現象。沉澱除會阻塞各式水井之外，也有造成機器、管路等物件的損害。再者，若是磷酸鹽產生沉澱作用，那麼預期被微生物利用的營養鹽添加量將不足，可利用過量添加的方式來預防，採取莫耳分率比，三聚磷酸鹽：總礦物質(鈣、鎂) $>1:1$ 的比例下添加，藉三聚磷酸鹽成為分離劑(sequestering agent)之螯合功能，讓鈣、鎂保持在水溶液型態，防止沉澱。

其次，水溶液中鐵離子濃度也相當重要，地下水中二價鐵會消耗水中溶氧，而形成氧化鐵之沉澱物。一般當地下水二價鐵濃度小於 10 mg/L 時，沉澱現象不致於造成太大影響；但當二價鐵濃度為 10~20 mg/L 時，則必須於注入井進行沉澱實驗，或是必須於整治執行期間，進行定期清除沉澱物的工作；若是二價鐵濃度大於 20 mg/L 時，不建議採用本項方法。

四、 地下水 pH

一般而言，大多數的土壤環境微生物最適生長之 pH 值為 7 左右，而 pH 約 6 至 8 左右微生物能夠適合生長。若接近極端範圍，例如小於 5 或是大於 10 以上，通常不適合微生物生長，必須加以調理。但在某些場址，現地微生物已經適應了當地環境，甚至在 pH 小於 5 的情形下，仍可以發現現地微生物，進行 pH 調理反而會對於生物作用不利。因此，建議在採取本技術前，進行現地微生物之 pH 反應小型試驗，在杯瓶試驗中，比較微生物在調理成不同 pH 值的地下水基質中，降解污染物的反應速率，評估現場工作中進行 pH 調理工作的必要性。

五、 地下水溫度

一般而言，10°C~45°C 的土壤及地下水溫度適合微生物生長。在台灣的气候條件下，冬夏溫差變化不像歐美等部分地區有極大的差異性，地下水溫度變化也不若氣溫變化顯著，因此，一般應不需進行溫度控制。

六、 微生物量

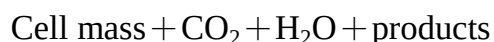
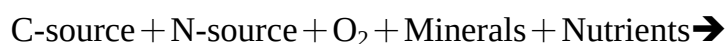
本技術因為必須藉由微生物作用，故須鑑定污染場址地下環境中是否有足量的現地微生物。一般而言，含水層每克(乾重)土壤中若含有 1000 CFU 以上的異營性總菌數，將有利於本技術的執行；若小於 1000 CFU 大於 100 CFU，可能仍有效，但需要更進一步的評估現場狀況，包括是否現場存在之地下水環境已造成生物毒性。至於現地低於 100CFU 之微生物總量情況下，通常不建議採用本技術。

七、 電子接受者

微生物生物代謝過程中，需要溶氧、硝酸態氮等電子接受者，期望能夠在有機物代謝過程中獲得能量。整治過程若環境中溶氧、硝酸態氮等量不足，則必須外加持續提供。本技術之供氧方式係抽出地下水後，於混和槽中曝氣或是添加硝酸態氮溶液，最後出流水再回注地下水層中，供給現地微生物之代謝所需。

八、 營養鹽濃度

微生物生長需要無機類的氮、磷以及其他營養鹽，一般污染場址並不存在足量的營養鹽，因此，本技術在整治期間，必須持續的提供足量的營養鹽，大致的需求量可以下列公式求得：



其中 Cell mass(生物質量)可以最被廣泛接受的 $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ 或 $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{O}_{32}\text{N}_{12}\text{P}$ 來表示，當污染量 C-source 已知後，即可再推算需求之營養鹽供給量。一般建議生物生長需求為碳：氮：磷比為 100：10：1~100：1：0.5。營養溶液與供氧方式相同，於地面上之混和槽中混和添加。

九、 污染物結構特性

低分子量(低於 9 個碳以下)、高揮發性、高溶解度之物質較容易被生物利用分解，例如，脂肪族、單環芳香烴等；多環芳香烴、長鏈脂肪族等較不易被生物利用分解。而在相同分子量下，長鏈型結構會比具有支鏈型結構的化合物來的容易分解。

油品類物質的污染場址中，以汽油、柴油、煤油、加熱用油、潤滑油等主要添加物區分，包括汽油中的丁烷、戊烷、苯、甲苯、二甲苯以及柴油中的壬烷等，均容易被生物利用分解；但是，如甲基第三丁基醚(即 MTBE)等支鏈結構較多者，則較難以被生物利用。考量現地實際環境問題，往往現地地下水的整治方案必須搭配其他物理化學之整治方式，方能確保水中難分解物質完全去除，因此，在選用本技術之前，建議進行生物分解試驗，觀察殘餘物質濃度，決定哪種化學組成份最難分解，那麼後續的規劃設計、操作計畫、監測計畫等，均可以此化合物為處理重點。

十、 污染物濃度及毒性

太高濃度的 TPH 及重金屬濃度，生物不但無法分解，還可能造成毒性，抑制生物增長。反之，太低濃度的 TPH 及重金屬濃度，則無法增加生物活性。一般而言，TPH 小於 50,000ppm，其他化學溶劑化學物總濃度小於 7,000ppm，重金屬濃度小於 2,500ppm 等的情形下，生物分解具有可行性。若各項濃度均大於上述值，則可造成生物抑制性，應用時可先進行生物毒性試驗評估，但整治期間可能延長。

雖然生物整治可被預期有效的達到處理目標，但根據美國實場經驗顯示，整治技術本身仍有方法極限。因為當污染物組成分解至最後時，都是剩下一些無法再被生物利用的最終殘餘物質。一般而言，當整治目標需求為各項化合物濃度均低於 0.1ppm，或 TPH 去除率須大於 95%的時候，就必須考慮進行模場實驗評估可行性；若無法以單一技術達成目標，則可能須搭配其他整治程序共同來達成整治目標。

十一、 溶解度

污染物組成之各項化合物溶解度越高，越容易被生物分解利用。

6.2.2 整治系統單元

一個完整的現地地下水生物整治系統，必須考量下列設備或設施及其設置原則：

- 一、 地下水抽出井(包括井體位置、方向、井深、井體結構等)。
- 二、 地下水注入井(包括井體位置、方向、井深、井體結構等)。
- 三、 過濾系統：移除生物性顆粒、地下水中的一般粒狀物等，避免造注入井、橫向管線加壓淋灑管線，抽出井等篩孔位置，形成膠凝沉澱現象。
- 四、 抽出地下水的處理系統：視需要可以設計生物處理、化學處理、粒狀活性碳吸附等地面設置之水處理設備，將抽出的地下水進行初步的處理，處理後的地下水除部分排放之外，大都於後續添加營養鹽及曝氣後回注至含水層。
- 五、 營養鹽溶液之準備單元及儲存槽。
- 六、 微生物注入系統：一般場址都具有現地微生物，可以加以馴養後，增強其降解地下水污染物之效能。但若污染場址歷史較短，現地尚未初步自然增長出足量的微生物，或是馴養過程中期望的微生物族群未出現、或是生質量不足者，可嘗試注入特定的微生物族群。但必須強調的是，外來菌種添加方式在許多國家都是嚴格管制的，此舉必須詳細評估，並獲得環保主管機關審查同意。若生物系統無法有效地在現地執行，此時就必須考慮放棄生物處理方式，改採如化學氧化等其他物理化學整治方法。
- 七、 電子接受者系統：包括曝氣槽、過氧化氫混和槽等型式。
- 八、 監測井。
- 九、 儀控系統以及警示系統。

6.2.3 整治系統監測

有關本技術整治期間之監測需求如表 6.2.3-1 所示。而在系統運轉與監測時，應注意之重點包括：整治作業前詳細的評估，以及良好的規劃設計，加上操作人員的經驗，使儀器設備操作都在預定情況下進行，都可以降低環境遭遇緊急狀況二次污染的可能。有關防止污染擴大之方法包括適當之操作及監測，茲分述如下：

一、啟動運轉操作

系統啟動運轉約 1 至 3 天內，應進行系統功能之調整，以使地下水之抽除/注入效率達到最佳化；之後進行營養鹽溶液及曝氣(或其他硝酸態氮等的電子接受者)等操作，約 2 至 3 天之後，量測溶氧(電子接受者)、氮、磷等濃度。一般啟動運轉操作約須持續 1 至 2 週，溶氧(電子接受者)等的濃度必須每天監測，地下水位建議每 2 至 3 天量測記錄一次。在啟動運轉操作結束之前，應採取地下水或土壤樣品，分析受關切污染物質的濃度。

表 6.2.3-1 現地地下水生物整治法建議監測計畫內容

監測介質	監測頻率	監測內容	監測位置
試運轉期間	至少每天 1 次	抽水體積	抽水井
		注水體積	注水井
		電子接受者濃度	監測井
整治期間	每 2 至 3 天	地下水水位	監測井
		地下水水位	監測井
		抽水及注水速率	地下水抽出、注入井口位置
	每週一次	電子接收者、氮、磷、總磷、硝酸鹽氮濃度以及 pH、導電度等	監測井
		每月一次	土壤或地下水中，受關切的化合物
			抽出、注入井及監測井污染區土壤取樣

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

二、長期運轉操作

建議每週確認檢查下列事項：

(一)檢視抽水幫浦、注水幫浦、空壓機、混和槽等的操作機器之是否

正常運轉。

(二)量測及記錄地下水水位。

(三)量測及記錄地下水抽出及注入流率，確認正常操作。

(四)取樣分析地下水中電子接受者(如溶氧)之濃度。

(五)取樣分析地下水中營養鹽之濃度。

(六)取樣分析地下水中 pH、導電度及其他數據。

6.2.4 二次污染防治與安全衛生

在地下水含水層中進行抽水、注水等操作，可能造成地下水擾動，以及局部性的水位變化。因此在規劃地下水密閉式循環系統之抽出井、注入井位置時，除了必須符合污染整治效率需求外，亦需仔細評估是否會因抽水、注水作用，影響到地下水污染管制區外的地下水文流向、流速以及水質等，必要時應規劃足夠的水文緩衝區。一般建議可進行小規模之抽水及注水試驗等，求得影響半徑，藉此再掌握大規模整治工程之可能影響範圍，選擇合適之幫浦設備。

除此之外，本技術可能會產生好氧微生物，協助進行污染物分解。但必須注意的是，地下水下游地區是否有過量之生菌數，及民眾有無取用這些生菌數過高之地下水之可能。

部分場址可視需要設計生物處理、化學處理、粒狀活性碳吸附等水處理設備，將抽出的地下水進行初步的處理，處理後的地下水除主要提供後續添加營養鹽及曝氣後回注至含水層之用外，部分可能進行排放。若場址位於工廠廠區內，一般建議可納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

6.3 成本及期程評估

以本技術而言，地下水中污染之移除單價較難估計，因涉及地質環境適合度、地下水污染範圍大小、機具操作情形等，所以模場試驗階段，可根據可能發生降解的效率及結果，評估工程經費。但一般除了初設費用估

計可較為準確外，其餘每年運轉費用必須根據實際污染削減量調整預算。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
3. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
4. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

七、雙相抽除法 (Dual-phase Extraction)

7.1 整治技術簡介

7.1.1 原理

雙相抽除法亦稱為多相抽除法(multi-phase extraction)、真空抽除法(vacuum-enhanced extraction)以及生物漱洗法(bioslurping)，屬於現地處理方式之一。主要於污染區土壤上方，挖設一個回收整治井，井中設置泵，由泵抽離、移除土壤及地下水中以不同型態存在的污染物質，其中包括液態之地下水自由相(free product)、溶解相，以及不飽和土壤層中以氣相存在之揮發性有機物等物質，屬於油、水、氣可同時抽除處理之整治技術。抽除之各種型態之污染物，經處理之後排放或廢棄、回收。

雙相抽除法在不飽和土壤層中，由於土壤氣體遭不斷的抽除，造成不飽和層趨向真空的狀態，而也因回收井附近之抽氣作用，使得污染區以外之遠方乾淨土壤氣體引入，造成通氣氣流之現象，持續補助整治區之土壤層供氣供氧，產生類似生物通氣法之作用，如此可以加強不飽和層土壤層之生物降解作用。

雙相抽除法特別適用於油品類污染之場址，尤其是在自由相之浮油尚未移除之前，並不適合直接利用生物或化學方法進行整治的場址。因此，在污染場址採取多重處理方法併用原則下，針對有浮油層的場址，雙相抽除法往往優先於其他整治程序，被選擇來處理地下環境中之污染物。

在系統的設計上，大致可分為單泵與雙泵兩種，其示意圖分別如圖 7.1.1-1 與圖 7.1.1-2 所示。單泵與雙泵的差異在於前者採用單一泵同時從回收井中回收浮油與地下水，後者則是一組泵抽取浮油及一組泵抽取地下水同時提供必要的水位洩降。

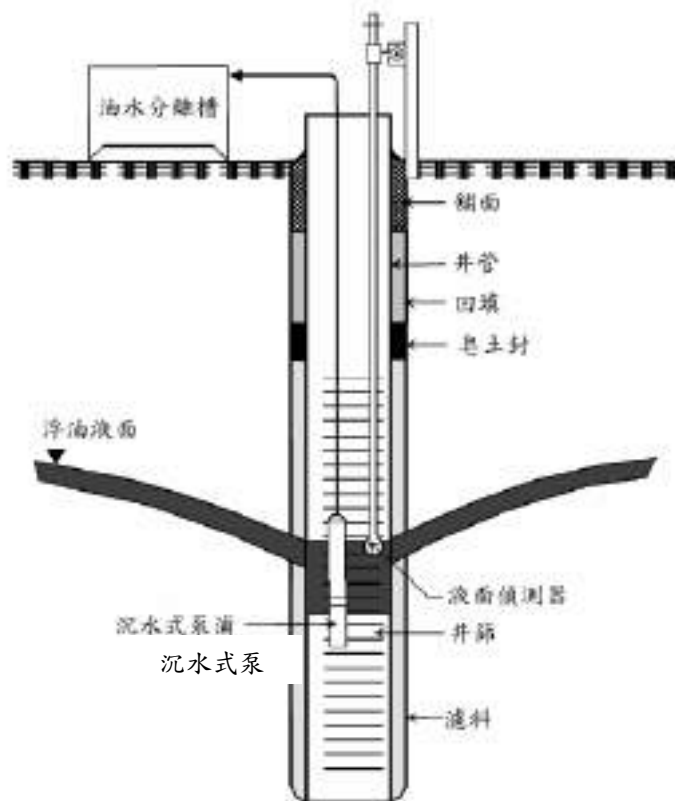
一、單泵系統

適用於具有低到中等程度透水性的地質，其設置成本低也較容易，

其抽取量一般藉於 5 gpm 到 20gpm 之間，抽取方式則是藉液位偵知器做間歇性的抽取。由於任何的泵型式，在抽取過程中均會造成乳化現象(emulsification)，致使溶解相之濃度升高，所以地表上都必須設置油水分離與水處理設備。

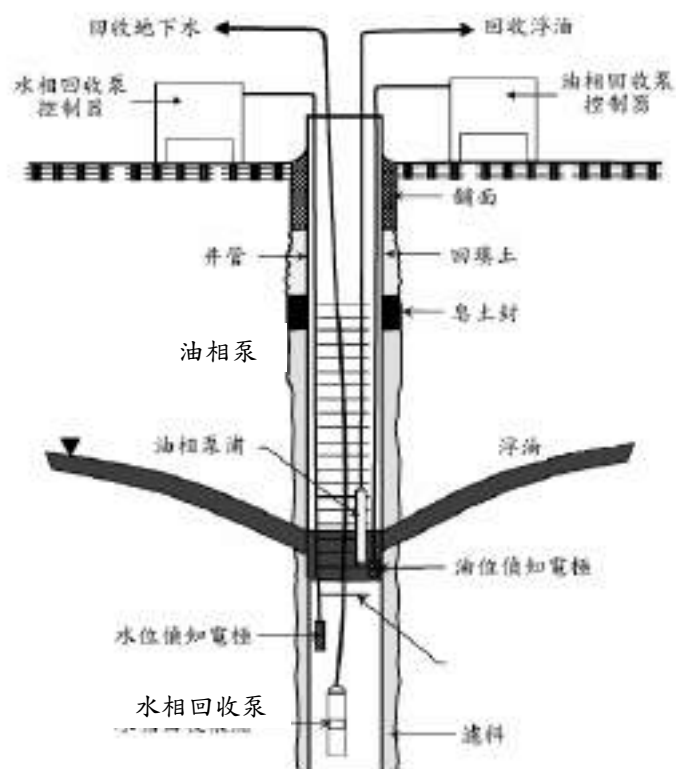
二、雙泵系統

主要目的是最佳化洩降錐的程度以達到最高的浮油回收效能，同時讓油水混合的狀況減至最低，因此這種系統採用一組泵只抽取地下水以製造所需之洩降錐，第二組泵則只抽取浮油。抽取地下水的抽取量需經過適當的調整以控制洩降之深度，抽除浮油的部分則採用油類偵知器作為啟動與關閉泵的機制。因為個別抽除管線配置，有利於回收污染物，但需要較大的井亦須做大量地下水處理(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。藉由平衡地下水與浮油之抽取量，即可以將乳化現象減至最低，甚至可以達到不需要油水分離設備的程度。



參考資料：API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.

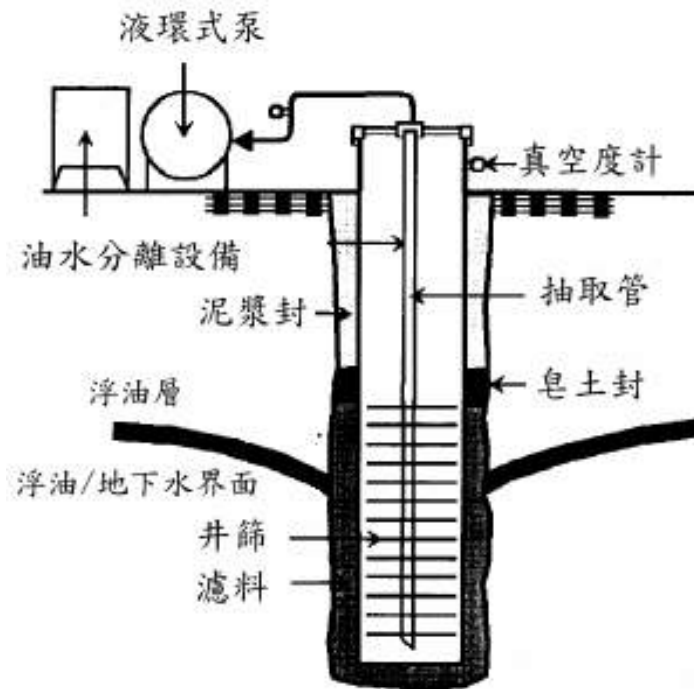
圖 7.1.1-1 單泵回收井設備示意圖



參考資料：API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.

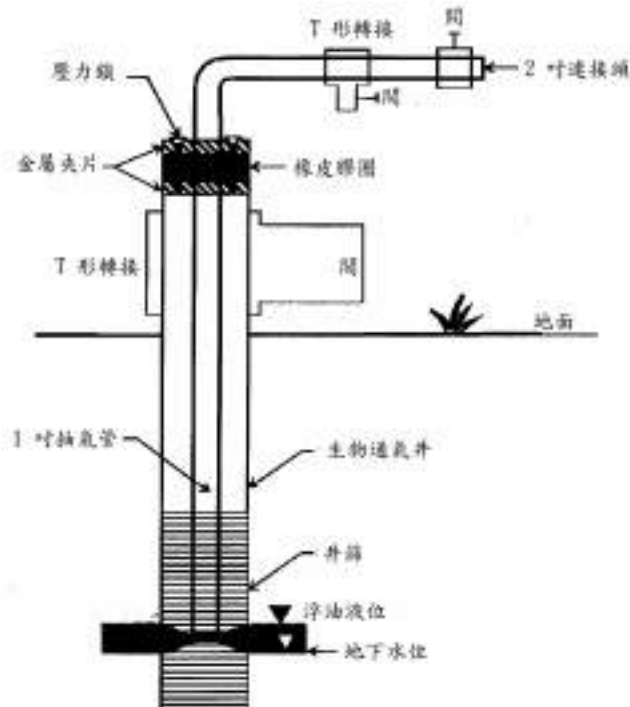
圖 7.1.1-2 雙泵回收井設備示意圖

雙相抽除法在實際整治設計上已發展出多種形式，但主要有二種配置的概念，其差異僅在於抽取管在井中之垂直位置的不同。一般的真空/抽水系統如圖 7.1.1-3 所示，直接將抽出管出口置於地下水中，採用單一泵同時抽取水與浮油，由於回收井為氣密設計，所以回收井上部產生真空而有回收油氣之效果。另外一種系統則是設計同時用單一泵同時抽取浮油、空氣與水，所以將抽出管或抽氣管的出口置於空氣/浮油的界面(圖 7.1.1-4)，這種設置即為一般所稱的生物漱洗(bioslurping)。有時雙相回收系統可以藉由地下水抽取量與回收井的數量與位置的設計，達到利用水力控制限制浮油團的擴散。



參考資料：API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.

圖 7.1.1-3 單管雙相回收系統示意圖



參考資料：API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.

圖 7.1.1-4 生物漱洗井結構示意圖

7.1.2 適用條件

如存在以下情況可考慮使用雙相抽除法，欲提昇 SVE 或生物通氣方式進行場址內土壤氣體抽除作業、提高 NAPL 污染物的回收或提高較低含水量含水層的地下水抽出量等(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。然而，以上所述並非為選定雙相抽除法之絕對因素，應進行進一步的適用性評估，如圖 7.1.2-1 所示。雙相回收抽除系統適用於土壤、地下水污染併同處理，甚至包括浮油之回收，具有氣、液、油共同處理之適用優勢，適用情境的篩選如表 7.1.2-1。

雙相回收抽除系統的適用條件包括：

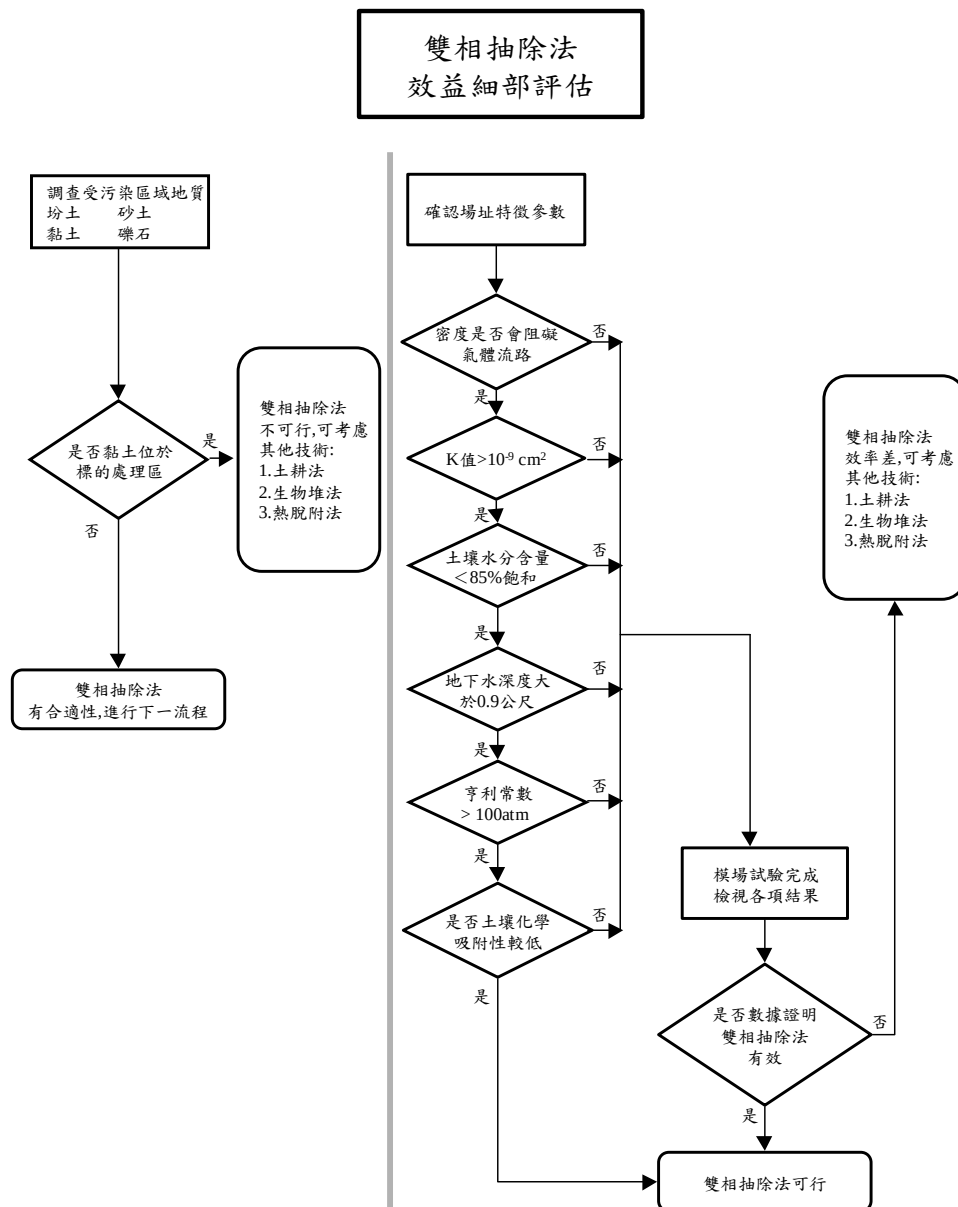
- 一、 低到中等的透水性地質(<10⁻³ cm/s)或較薄的浮油厚度(<15cm)
- 二、 地下水位介於 1.5 到 6 公尺。
- 三、 傳統的抽出法或回收溝技術不適用。
- 四、 浮油位於鋪面或不透氣表面之下。
- 五、 場址內存在可回收的 NAPL 污染物 (MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)
- 六、 每口井出水量小於 20L/h (MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)

當雙相回收系統之浮油回收體積不夠多的時候，就該考慮停止操作，所以訂定停止運作之標準也是系統建置時必須審慎考慮的條件。停止運作的標準可能包括總浮油回收率(例如：每個月少於 2 加侖或者浮油回收體積對地下水抽出速率的比例小於 0.1%)與回收/監測井中浮油厚度(例如：小於 3 公分)。浮油厚度應按季或按月進行監測，以確保回收/監測井中的浮油厚度在規定時間內(如 2 年)沒有超過閾值(如 3 公分)，此閾值也可同時作為重新啟動回收設備的參考。

有關使用單泵雙相抽除法之優缺點整理於表 7.1.2-2，使用雙泵雙相抽除法之優缺點整理於表 7.1.2-3。因本項技術為能夠直接針對主要污染區進行整治，加上生物通氣效用，最重要能同時回收浮油，相當合適用於油品類儲槽系統之土壤地下水污染整治工作。茲將雙相抽除法或生物漱洗法回

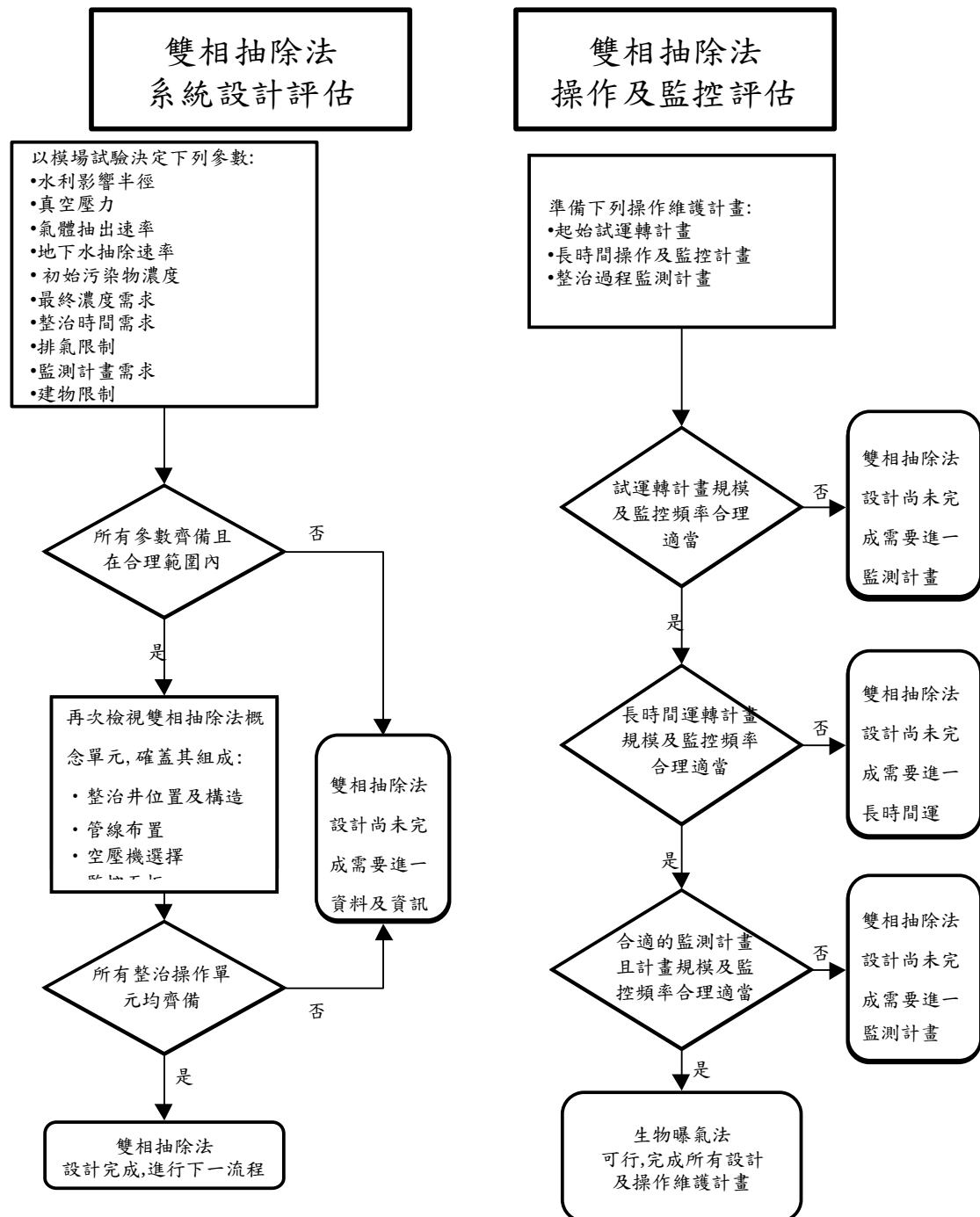
收浮油的優點歸納如下：

- 一、相較於其他 LNAPL 的浮油回收技術，雙相抽除法或生物漱洗法降低抽出地下水體積對浮油回收量的比例，所以可以減少儲存、處理、處理與最終處置的需求，進而降低計畫費用。
- 二、將土壤氣的抽取量減至最低，可以維持抽出之氣體的濃度在法規值以下，進而減少尾氣處理的需求。



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 7.1.2-1 雙相抽除法簡易評估流程



參考資料: "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers", USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 7.1.2-1 雙相抽除法簡易評估流程(續)

表 7.1.2-1 雙相抽除法技術選用查核表

1.0 場址特性：	是	否
1.1 土壤滲透性大於 10^{-12}cm^2 ？		
1.2 無不透氣層或其他可能阻斷氣流之地質狀況？		
1.3 土壤水分飽和度小於或等於 85%？		
1.4 地下水位低於 0.9 公尺(3 呎)？		
2.0 污染物特性：		
2.1 污染物蒸氣壓大於 0.05mm Hg、沸點低於 300°C、亨利定律常數大於 0.01？		
2.2 污染物之化學吸附能力(Chemical Sorptive Capacity)夠低？		
3.0 多相抽除技術之設計評估：		
3.1 抽水井有效半徑介於 1.5 至 30 公尺(5 呎至 100 呎)？		
3.2 有效半徑依據場址各類土壤之特性加以計算？		
3.3 對於需設置不同開篩深度或較多抽水井之較複雜場址，利用地下氣流模式(Subsurface Airflow Modeling)進行模擬，以決定井的布置位置？		
3.4 依現場先導試驗結果，確認水源處之真空度介於 80-250 mm(3-100 吋)水柱間？		
3.5 每一口井之氣體抽除流速介於(2-50 ft^3/min 或 0.057~ 1.416 m^3/min)間？		
3.6 抽水速率足以捕捉超出整治目標濃度以上之污染地下水？		
3.7 是否訂有特別的整治期限？		
3.8 已估算受污染土壤面積？		
3.9 已訂有廢水或廢氣排放標準？		
3.10 井的數量與位置適當，所有井之有效半徑涵蓋整個污染整治區域？		
3.11 已提出廢氣處理方法？		
3.12 真空抽氣機之型式可以達到設計的真空度？		
3.13 已設置妥善的系統控制設備，包括監測真空度、氣體及液體流速、抽水速度、廢氣污染濃度、溫度等之方法？		

參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004

三、 由於一般氣相的 LNAPL 濃度高於水中之 LNAPL 濃度，所以所抽取的地下水有可能也可以符合放流水水質標準，進一步省去水處理設備的需求。

四、 因地下水位變動(洩降錐的形成)不大，所以相關之污染擴散情形減低。

五、 不飽和層的殘留相可以藉由回收井內之真空度，在回收方面獲得改善。

六、 雙相抽除法或生物漱洗技術可以被設計作為水力控制之用途，同時也可以輕易的被改裝作為生物通氣井。

七、 大部分所需元件都可設在地下，所以場址利用上更具彈性。

但雙相抽除法或生物漱洗法回收浮油技術也有其限制，至少包括下列三點：

- 一、 所使用之液環式泵以及其他的高速抽氣泵較容易產生乳化的情形，特別是回收柴油時
- 二、 由於有強化好氧生物活動的效果，所以有可能在井篩產生生物性積垢物(biofouling)
- 三、 不能處理飽和層中受污染的土壤。

表 7.1.2-2 單泵雙相抽除法優缺點比較表

優點	缺點
- 在低滲透性地質特性場址中，整治較有效。 - 操作空間較小。 - 較短之處理時間(一般在最適條件下操作約為至6個月至2年)。 - 增加污染地下水之抽除速率。 - 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、生物整治法等。 - 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。	- 在高滲透性地質特性場址中，要達到整治目標所需之經費較高。 - 在地下水水位變動較大之區域難以處理 - 處理抽除之土壤氣體或是分離油、水兩相之經費可能較高。 - 在地面上，必須設置能夠處理大量地下水的設備。 - 須有特殊的機器設備以及有經驗的操作及試驗技術。 - 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004

表 7.1.2-3 雙泵雙相抽除法優缺點比較表

優點	缺點
- 廣泛適用於各種條件之地質狀況，機具設備較容易獲得。 - 處理設施運作之空間需求較小。 - 較短之處理時間(一般在最適條件下操作約為6個月至2年)。 - 對於地下水位變化較大的區域有較大的彈性運用空間。 - 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、生物整治法等。 - 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。	- 對於地下環境之資訊不完整之場址有使用上的限制，可能較無效。 - 氣體處理需要較多的經費。 - 分離油、水兩相，經費可能較高。 - 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

7.2 整治系統操作與設計

7.2.1 整治系統設計與操作要點

污染場址是否適用雙相抽除法，必須進行完整的場址特性(Site Characteristics)調查及污染物特性(Chemical properties)等兩項主要項目工作，包括以下內容：

一、 原滲透度

原滲透度(Intrinsic permeability)主要判定地下水在含水層中的移動能力，是研判雙相抽除法相當重要的指標，控制不飽和層中氣體傳輸供給微生物之速率，以及飽和層地下水被抽除的速率。

一般而言，單泵雙相抽除法適合原滲透度 10^{-9} ~ 10^{-11} cm² 的情形下，對於本項技術相當有利；而 10^{-9} cm² 下較不建議執行。對於雙泵雙相抽除法而言，原滲透度適用範圍較廣，限制性較小。

二、 土壤結構及分層狀況

土壤層中若不是單一種地質，而是有不同的地質分層的組成情形，必須評估其分層情形是否有礙於地下水的整治；例如，地下水抽水井附近可能會在透水性低的地方遇到阻礙而流向旁邊，產生所謂側流/層流(lateral flow)的現象。這樣不均勻的水流有可能造成整治時間延長，或是降低整治成效的情形，因此，若要在這種地質特性的場址上執行本項整治工法，必須另外增加改善措施；例如增加局部性區域的注入井等。

三、 不飽和層的含水量

不飽和層中若濕氣較高，會降低土壤氣體的滲透性，並降低土壤氣體之抽除效率。一般而言，水分含量若大於 85% 的土地涵容量，氣流將被鎖置(blocked)，降低不飽和層內的抽氣速度。

四、 地下水特性資料

一般而言，地下水位離地表 3 英呎(約 90 公分)以內者，不飽和層之氣體流路太短，不利於形成真空狀態及併同抽除油、氣、水之期望。

對於單泵雙相抽除法而言，在地下水水位變動較大之區域難以處理，故不建議採用本項方法，或改採用雙泵雙相抽除法代替。另外亦須調查水力傳道係數及地下水的水文地質特性資料(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。

五、 污染物揮發性

可由化合物蒸氣壓、沸點以及亨利常數等進行揮發性的研判，一般以蒸氣壓大小為簡易研判之基準，大於 0.5mmHg 者，容易於抽氣井中被抽氣泵抽除；但若是化合物之蒸氣壓小於 0.5 mmHg 者，則必須藉由通氣作用，由土壤層中的微生物進行分解。

六、 污染物吸附特性

吸附容量(sorptive capacity)決定污染物會不會被吸附於土壤顆粒間隙中，一般由土/水分配係數 K_d 值表示，若是吸附容量越大，則表示污染物越容易存於土壤層內，不易被雙相抽除法系統的泵所抽除。

七、 模場試驗結果

模場試驗主要是為了解是否可使不相容(immiscible)污染物的回收成效提昇、可用於地下水位變動區間的通氣層污染移除、求得適當真空度、取得飽和層的水力資料等。因此，為了有效取得上述資訊，於測試過程中應確實監測地表真空度及流量、VOC 移除率、LNAPL 回收率、未飽和層受真空度影響、湧升流現象(upwelling)等(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。根據模場試驗之結果，可決定本技術是否能有效回收浮油。

7.2.2 整治系統單元

本節將針對雙相抽除法之生物漱洗法在設計、應用與運作方面做較詳細的說明。

生物漱洗法是由建築工程常用的真空除水技術(vacuum dewatering)衍生而來，現在常被用於現地(in-situ)的 LNAPL 的污染整治。生物漱洗法同時採用真空強化抽出/回收機制，自地下水或毛細作用層(capillary fringe)中移除自由相的 LNAPL，並以生物通氣(bioventing)機制激發不飽和層與毛細

作用層所含之碳氫化合物的生物降解。因為可以同時解決浮油回收與殘留相整治，所以相較於其他的回收技術，具有高效能與低成本的優點。

設計用來在同一流管中抽取地下水、浮油以及土壤氣的生物漱洗設備之主要元件如下 (圖 7.1.1-4)，設計時應將水及污染物的回收量一併納入考量(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。

- 一、 裝有漱洗管(抽氣管)之回收井
- 二、 可以抽取液體與氣體的抽氣泵(一般使用液環式泵)
- 三、 氣/液與油/水分離設備
- 四、 水與尾氣處理單元

漱洗管是一置於回收井井篩開篩區間且可調整長度並延伸至 LNAPL 層的抽氣管，地下水、浮油以及土壤氣則用抽氣泵由此抽氣管抽出。因為抽氣在回收井中產生負壓梯度(真空度)，所以可以加強地下水中浮油及不飽和層中殘留相之移除。生物漱洗系統利用漱洗管在移除液相與移除氣相之間循環運作，並在處理期間維持相對穩定的地下水位。同時由漱洗管抽除氣體提昇了不飽和層的通氣量，增加該層的氧氣濃度，進而增加好氧生物降解機制。如果生物漱洗設備運作條件得宜，有時候處理回收的地下水與氣體的地上設備亦可以免除。當浮油回收工作完成後，回收井可以輕易的改裝成生物通氣(bioventing)井繼續後續的生物處理工作。

當漱洗井開始抽氣時，應先抽除浮油與少部分的地下水，如果浮油流進井中的速率夠快，且地下水位在地表下 7.5 公尺以內，回收過程中浮油一般是可以充滿整支漱洗管；但如果條件不足(例如：浮油回流速度不夠快)，則回收的浮油會是斷斷續續，在漱洗管中形成一段一段的油水混合型態，亦所謂之「漱洗」。回收的液體被導入油水分離裝置，浮油可以回收再利用，而所收集的地下水經處理後再放流。當地下水回流速度不夠快時，回收井無法提供漱洗管所需之液體量(液面低於漱洗管)，於是漱洗管開始抽取井篩週邊的土壤氣，形成低到中等的真空度(3 到 20 in-Hg)，所抽取的氣體則收集於氣/液分離設備，再由尾氣處理設備處理後排出。此時漱洗管不斷抽出不飽和層的土壤氣，使得週邊的空氣不斷的補充進入回收井中，增加不飽和層的氧氣流通量，進而提高了好氧之生物降解效能。於抽除氣體

一段時間後，因為回收井上方之真空度所造成的壓力梯度，液面逐漸回升，在液面回到漱洗管的抽氣口位置，漱洗程序回到抽除液相的階段。生物漱洗回收浮油技術的運作就是在地下水/浮油抽除以及土壤氣抽除兩者間循環。至於運作時抽除地下水的體積則可以藉由調整漱洗管的深度控制，而土壤氣的抽除體積可以藉由調整抽氣泵的抽氣量與所得抽除速率控制。

7.2.3 監測設備

監測行動根據目的的不同，可分為系統操作性能評估及污染物移除成效評估，分別說明如下。

一、系統操作性能評估監測

本技術整治期間之監測需求如表 7.2.3-1 所示，系統運轉與監測時，應注意下列重點：整治作業前詳細的評估、良好的規劃設計，加上操作人員的經驗，使儀器設備操作都在預定情況下進行，都可以降低環境遭遇緊急狀況二次污染的可能。有關防止污染擴大之方法包括適當之操作及監測，茲分述如下：

(一) 啟動運轉操作

單泵雙相抽除法系統啟動運轉約 7 至 10 天內，應進行系統功能調整，以使真空泵以及抽氣管深度設置定位，效率達到最佳化。多泵雙相抽除法系統則另外測試氣、油、水等的多相分離成效。通常每天記錄調整流率、真空泵壓力、碳氧化物之濃度、氧濃度及 VOC 濃度等。

(二) 長期運轉操作

長期運轉工作內容包括流量校正、壓力記錄、各相濃度及回收率記錄等。記錄頻率可每週或是兩週一次。運轉過程中若有使用碳吸附材應定期量測濕度及進出口污染濃度，以確保吸附材仍具原設計效能(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)。

二、污染物移除成效評估監測(MPE and product recovery, 2009 年台美講習會)

污染物移除成效評估可透過污染物於地下水及排放水之濃度監測，

即比較鼓風機前後污染物濃度，並監測各抽除井的污染物濃度以評估通氣層的污染現況。此外，亦可利用 NAPL 層的組成及厚度變化評估污染移除成效。評估場址污染改善作業是否完成時，可利用土壤採樣、土壤氣體採樣或反彈試驗(rebound test)進行評估。

表 7.2.3-1 雙相抽除法系統效能評估監測計畫

監測介質	監測頻率	監測內容	監測位置
試運轉期間(7-10 天)	至少每天 1 次	流量	抽水井出氣孔
		真空壓力讀值	多頭管
		氣體濃度	氣體排放口
		二氧化碳	
		氧氣	
整治期間	每週或雙週一次	流量、流量平衡	抽水井出氣孔
		真空壓力讀值	多頭管
		氣體濃度	氣體排放口
		二氧化碳	
		氧氣	

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

7.2.4 環保工安注意要點

抽取地下水可能造成地下水擾動，以及局部性的水位變化。地下水抽出井位置除了需要符合污染整治效率需求之外，也必須仔細評估是否會影響到地下水污染管制區外的地下水文流向、流速及水質，必要時應規劃足夠的水文緩衝區。一般建議進行小規模抽水試驗，並求得影響半徑，藉此再推估大規模整治工程之可能影響範圍，再選擇合適之設備。抽水量必遵照規劃設計操作參數操作。

抽出的地下水進行油水分離的處理，油的部分可回收或送交處理業者進行有害廢棄物處理。地下水後續處理可能進行排放，若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，處理後之放流水須符合「放流水標準」。

至於抽除之土壤氣體經處理後排放的尾氣，必須符合國內相關空氣污染防治法令。依本署「空氣污染防治法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防治設施或監測設施之正常運

作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯及二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 及 2 ppm，且排放之氣體若有臭味(或厭惡性異味)，亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。

美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

- 一、 VOC 濃度大於 2,000 ppmv：建議使用熱氧化法。
- 二、 VOC 濃度介於 100 至 2,000 ppmv：建議使用觸媒氧化法。
- 三、 VOC 濃度介於 35 至 100 ppmv：建議使用顆粒活性碳(GAC)吸附
- 四、 VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備來處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性碳等處理耗材以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

7.3 成本及期程評估

以本技術而言，土壤及地下水中污染之移除單價較難以估計。因其涉及地質環境適合度、土壤及地下水污染範圍大小、機具操作情形等，所以模場試驗階段，可以根據可能發生降解的效率及結果，評估工程經費，但一般除了初設費用估計較為準確之外，其餘每年運轉費用必須根據實際污染削減量調整預算。一般在最適條件下操作約為至 6 個月至 2 年。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.

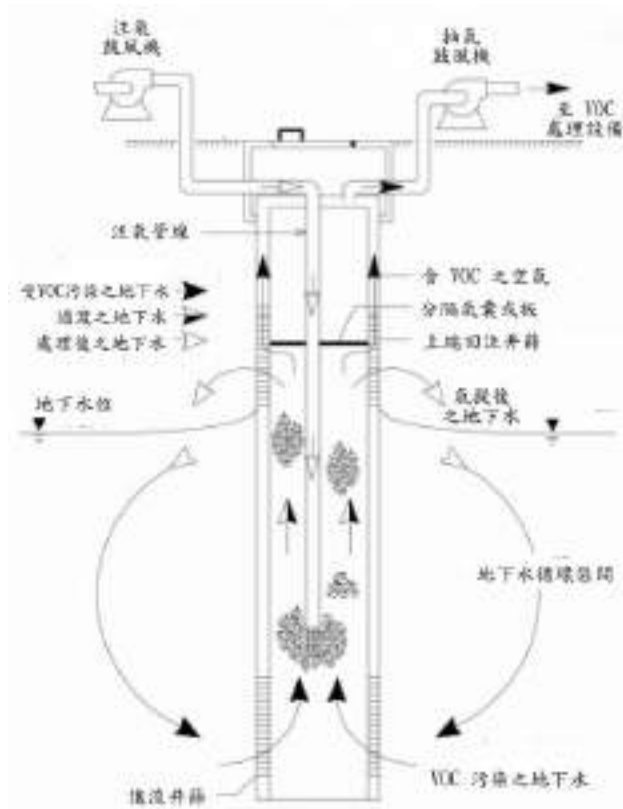
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>
6. MPE and product recovery, 2009 年台美講習會

八、井內氣提法(In-Well Air Stripping)

8.1 整治技術簡介

8.1.1 原理

井內氣提法 (in-well air stripping) 是地下水循環井 (Groundwater Circulation Well, GCW) 的一種應用，其原理是利用將地下水抽入井內後，再經過井管，將井內之地下水在不抽出地下的條件下，重新打入地下水層，在地下水層形成循環。此項技術又稱為現地氣提 (in-situ vapor stripping/in-situ air stripping)、真空氣體萃取 (vacuum vapor extraction) 等，相關基本結構與運作如圖 8.1.1-1 所示。



參考資料：“Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Ground-Water Circulation Wells”, USEPA, EPA-542-R-98-009, October 1998.

圖 8.1.1-1 井內氣提法之結構與運作原理示意圖

井體本身為雙套管式並於井內有分隔的上層與下層井篩設置於地下水體之飽和層範圍內。技術的應用亦可利用添加臭氧、活性碳吸附或生物處理技術進一步增強其效能。井的影響半徑的強化，則可以利用添加化學物質，現地安定化地下水中溶解性金屬。至於其結構的選擇多取決於場址條件與製造商。

系統可以採用向上井內流(upward in-well flow)或向下井內流(downward in-well flow)。最常用的方式是將空氣注入內井管，降低地下水的密度並允許其上升，成為一種氣提式抽水(air-lift pumping)的機制，藉此地下水中之揮發性污染物即藉由上升的氣泡，由溶解相轉移至氣相。受污染之氣體接著被抽至地上處理程序加以處理，或重新由上層井管注入不飽和層中，利用現地生物整治的方式降解之。

至於氣提後之地下水則在內井管中繼續向上流動，最後由外套管流出，經上層井篩回注至不飽和層。一但回到地下水層，地下水流再一次由下層井篩循環至下層井篩，置換因密度差異而上升的地下水。這樣的循環機制在井的周邊形成一循環模式，允許地下水於現地連續的循環與氣提，而地下水則持續循環直到污染物移除率達到預期的效果。

8.1.2 適用條件

井內氣提法是針對移除地下水與飽和層中的污染物所設計之技術，井內氣提法適用於移除地下水與飽和層土壤中之污染物，其應用範圍包括氯化有機溶劑、碳氫化合物以及可被氣提之污染物。其設計比其他常用之注氣法或抽出處理都要簡單，且僅需日常維護即可連續運轉，也沒有安裝於地下的活動零件，所以維護上相當容易。

目前現地的應用主要是針對鹵化揮發性有機物(如三氯乙烯)以及油品类污染物(如 BTEX)。部分系統經過適當的修改後，可應用於半揮發性有機物與殺蟲劑污染物的移除。至於地質條件部分，其應用範圍之土壤特性涵蓋粉土質黏土至砂質礫石，亦是相當廣泛。有關井內氣提技術的優缺點，彙整如表 8.1.2-1 所示。

表 8.1.2-1 井內氣提技術優缺點比較表

優點	缺點
- 為現地處理技術，不需要將地下水抽出地表或設置地上處理系統(如氣提塔與儲存槽)，減少地上設施所需空間。 - 採用垂直向沖提，有助於垂直分層間透水係數較低之地層中污染物的移除，也可能強化污染源區域的污染物的釋出，加速整治效率。 - 沒有回注之需求。 - 無回注時的法規限制。 - 由於其運作為垂直向的循環，對地下水位之衝擊小，特別適用於對地下水位變化敏感之區域(溼地)。 - 井內氣提是直接將地下水中的 VOC 在井中吹除，因此地上處理設施需求較低。若要處理井內吹出之 VOC，則可考慮是使用活性炭吸附。 - 井內氣提除了降低地下水中之 VOC 濃度進而降低對生物的毒性，也因為氣提過程的曝氣可使地下水中的溶氧高於週遭的溶氧，所以可以強化生物降解。 - 與其他整治技術結合，可以成為其他整治技術的平台，如氧化劑、界面活性劑與觸媒等的傳送，也可以藉以送入營養鹽與電子接受者，以強化生物整治。	- 對地質水文條件相當敏感，當地下環境之不等向性高時，可能明顯影響循環效能與影響半徑。 - 如果井未能適當設計，可能容易造成未處理完全之污染物擴散移動。 - 處理效能受到污染物揮發性與設計的限制，如果僅以氣提為機制，可能無法達到預期處理效果。 - 氣提效應可能造成地下水中，碳酸鹽濃度的變動，進而影響到地下水的緩衝能力改變，導致 pH 值提高，產生鐵與鈣的沉澱，造成井的堵塞。 - 井的設計與設置困難度較高，在設置過程必須確實避免上下井篩之間有短流，同時其間之井封也必須確實，以免同樣造成短流。 - 井內氣提並不適用於地下水層厚度太薄的區域。 - 無法處理半揮發性有機污染物，因為其原理與一般之氣提塔相同，所以與污染物之揮發性有很大的關係。

參考資料：“Groundwater Circulation Well Technology Assessment”, Naval Research Laboratory, NRL/PU/6115-99-384, May 1999.

8.2 整治系統操作與設計

8.2.1 整治系統設計與操作要點

井內氣提技術的設計，依據設計之差異可分為三大類：

一、NoVOCsTM

由史丹佛大學開發成功，其結構(圖 8.2.1-1)與通用型的結構(圖 8.1.1-1)類似。此系統採用空壓機將空氣送入受污染之地下水中，有氣泡的混合水上升至發生最佳揮發的高度後，碰到反射板，此時氣泡開始結合，而地下水由上層井篩流出井外，氣泡則由真空抽氣帶至地上 VOC 處理設施。適當的化學物質(造成沉澱或吸附)則放置於 NoVOCs 的周邊隨水流釋放，使得地下水得以與之接觸。

二、UVB 系統

此系統(圖 8.2.1-2)採用沉水式泵保持標準水流量。此外使用氣提反應器，於地下水回到水體之前，加速揮發性污染物的揮發。位於散氣盤下方的管路則可增加接觸時間，藉以提高揮發效能。

三、DDC 系統

此系統(圖 8.2.1-3)強調生物整治效能的強化與將抽出之氣體導入不飽和層，以藉由生物作用自然降解。營養鹽或是氧氣均可加入 DDC 井中，同時提供予飽和層與不飽和層，提升自然好氧程序。

8.2.2 整治系統單元

建置井內氣提系統之必要設備，會隨著不同類型的系統而有所差異，以下所列項目則以共通性之設備需求為主，包括：

- 一、 雙套管與雙井篩之氣提井
- 二、 注氣泵與抽氣泵
- 三、 注氣與抽氣管線
- 四、 分隔氣囊或分隔板
- 五、 抽出氣體之 VOC 處理設施
- 六、 其他設備(散氣盤、反應器、化學物質輸送系統與沉水式泵等)

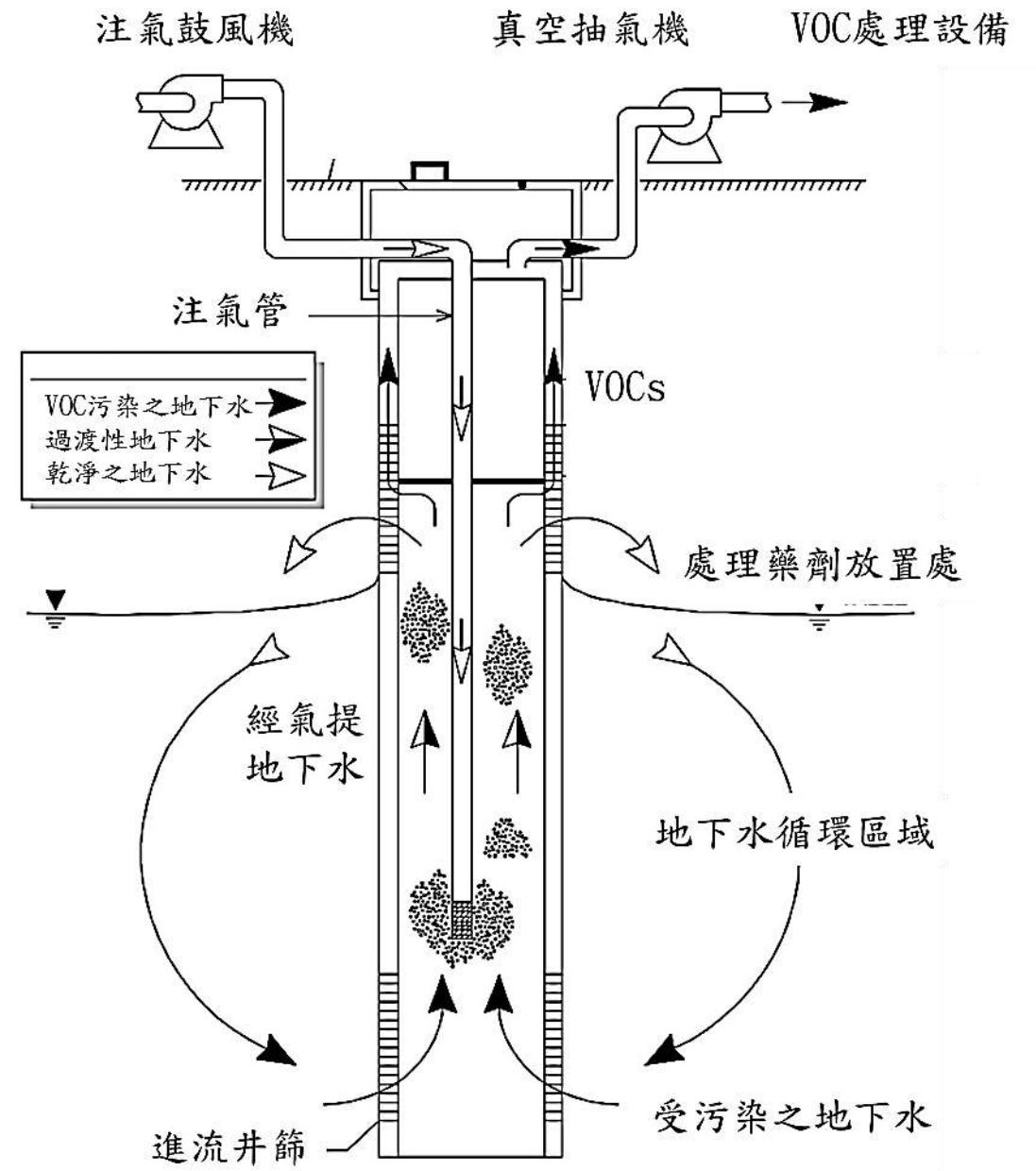
8.2.3 整治系統監測

本系統並未將地下水抽出，所以在污染物擴散方面較易控制，其潛在污染擴散之途徑以地下水為主。因此監測設備可在污染團移動路徑上進行地下水監測。

8.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

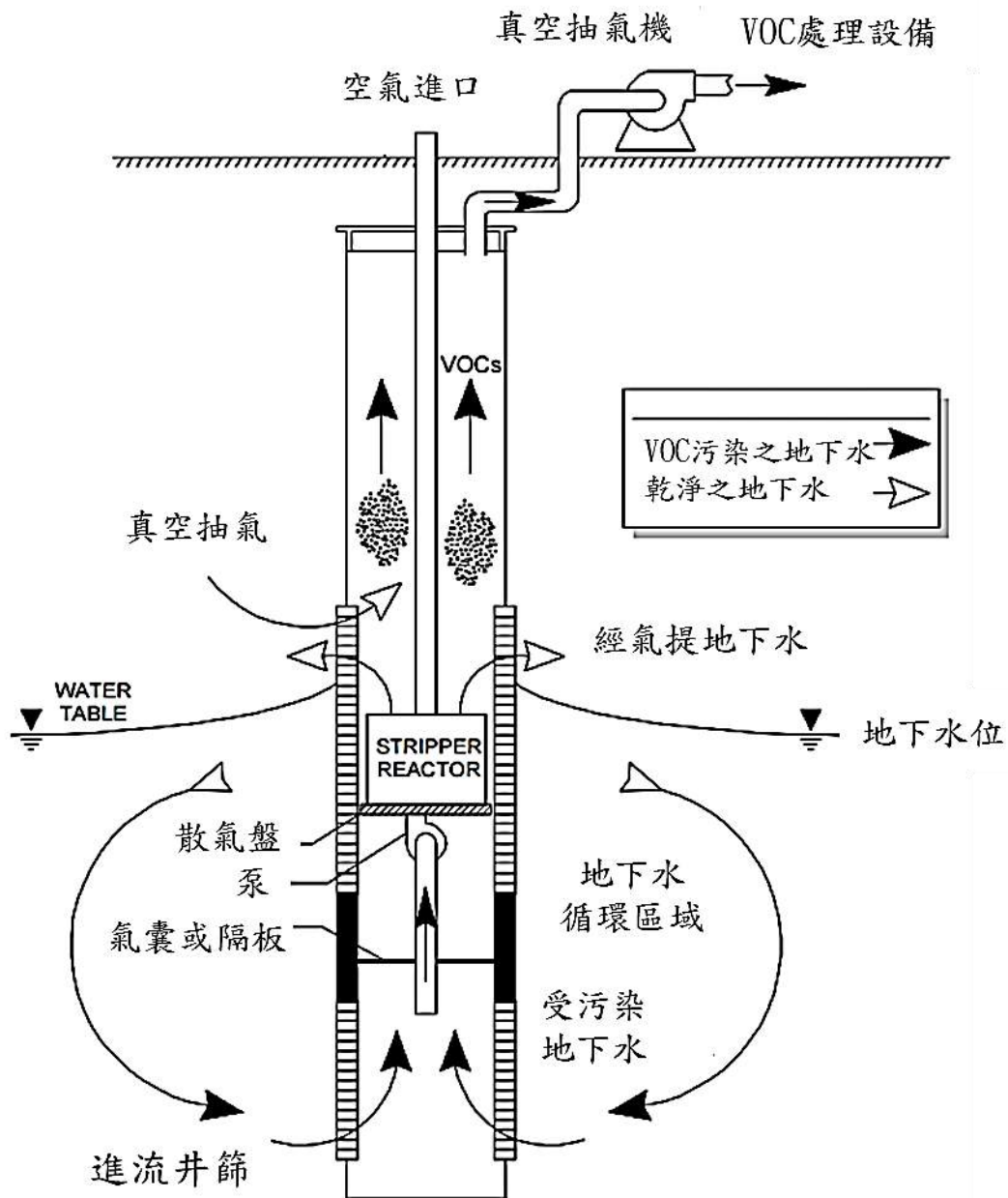
由於直接於地下水中進行氣提，對於地下環境之化學特性有一定的影響，包括地下水的碳酸鹽平衡、pH 值、氧化還原態以及溶氧等，其可直接造成地下水中沉澱物的增加、溶氧的提升以及地下水緩衝能力的改變，因此在設計過程中應對這些環境衝擊予以考量與說明。

此外，在井內氣提的過程中，是否有逸散至地表的情形，如果有類似的情形發生，則應確認逸散濃度對環境不會造成風險。



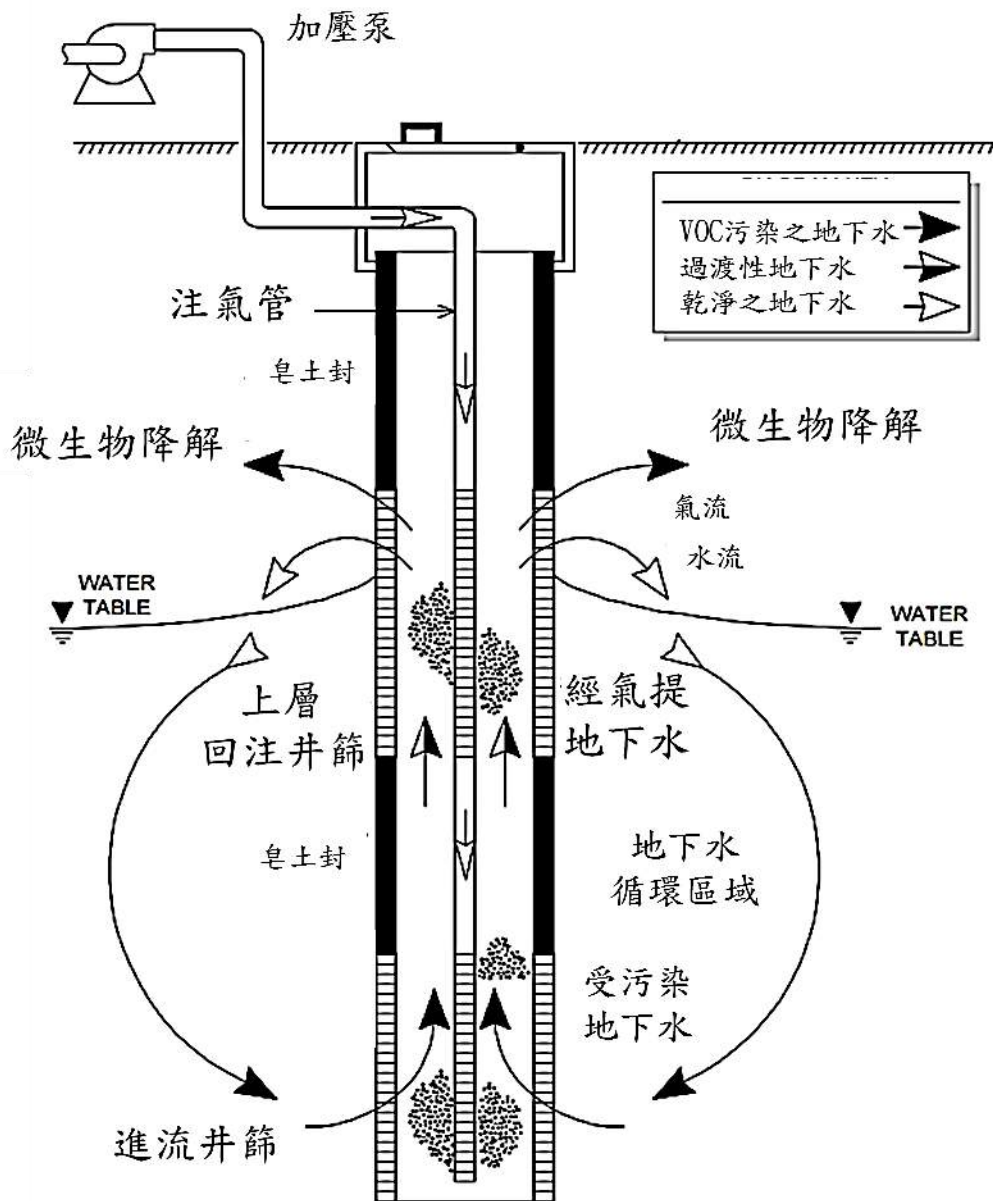
參考資料：“In-Well Vapor Stripping”，Technology Review Report，TO-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, February 1997

圖 8.2.1-1 NoVOCs 系統設計圖



參考資料：“In-Well Vapor Stripping”, Technology Review Report , TO-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, February 1997

圖 8.2.1-2 UVB 系統設計圖



參考資料：“In-Well Vapor Stripping”, Technology Review Report , TO-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, February 1997

圖 8.2.1-3 DDC 系統設計圖

除前述各種系統在設計上的差異外，於進行設計時應注意下列重點：

- 一、氣囊與井的結構應以 VOC 的最大揮發量且與適切的將地下水導入不飽和層為設計重點。
- 二、須注意系統使用所造成之地下水與土壤的化學變化(如沉澱或氧化)。

8.3 成本及期程評估

根據美國環保署的統計，在全球採用井內氣提進行整治的案例中，有 58% 達到整治目標並完成關閉場址的目標，是相當高的成功率。而達成場址關閉的平均操作時間為 21 個月(範圍 2 至 71 個月)，平均使用井數為 6 口，平均處理水體厚度 8.7 公尺，未達整治標準的場址，平均已操作時間達 37 個月，由此可見此項技術的效能與場址特性有相當大的關係。

以操作成本而言，使用井內氣提系統之平均費用彙整如表 8.3-1。依此成本預估，可計算出 1、3、5 與 10 年操作費用分別為美金 260,000、340,000、440,000 與 710,000 元(約新台幣 9,100,000、11,900,000、15,400,000、24,850,000 元)，若以每年處理 1,000 加侖的地下水為基準，不同操作年限之平均每加侖污染物的整治費用分別為美金 260、110、88 與 71 元(約新台幣 9,100、3,850、3,080、24,850 元)。

表 8.3-1 井內氣提系統建置平均成本

類別	費用(美金)	費用(新台幣)	備註
系統初設成本	180,000	6,300,000	以 UVB 系統估計
第一年操作與維護費用	72,000	25,200,000	
後續每年之操作與維護費用	42,000	14,700,000	

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

參考文獻

1. “Groundwater Circulation Well Technology Assessment”, Naval Research Laboratory, NRL/PU/6115-99-384, May 1999.
2. “Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Ground-Water Circulation Wells”, USEPA, EPA-542-R-98-009, October 1998.
3. “In-Well Vapor Stripping”, Technology Review Report , TO-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, F

九、現地化學氧化法(In-Situ Chemical Oxidation)

9.1 整治技術簡介

9.1.1 原理

現地化學氧化法，顧名思義係利用各種化學氧化劑，注入土壤或地下水污染層中，氧化油品污染所造成環境中存在之各項化合物，使其成為二氧化碳及水。本指引將介紹各種現地常用之化學氧化劑，這些氧化劑曾被廣泛應用於廢水處理程序，現逐漸被利用於土壤及地下水污染之現地處理。

現地化學氧化法之特點為處理時間較快，相對於生物整治法而言，需要的反應時間較短。然而，因為地質條件限制，以及各種氧化劑的特性，都會限制氧化的時間以及效果，可以根據需求來加以選擇。例如，有的氧化劑雖然反應較慢，但可以緩慢持續與污染物接觸反應，提供較長的接觸時間，在氧化劑的選擇上須加以評估。

現地化學氧化法最主要的考量因子是土壤與氧化劑的反應性，如果土壤中含有大量的其他有機質，那麼有可能會消耗大量的化學藥劑，造成成本的浪費。又例如 Fenton 氧化劑(過氧化氫)可能不適用於含有大量碳酸鹽的地下水，因為過氧化氫的氫氧自由基，在尚未與地下水中油品反應之前，即與碳酸鹽離子進行反應耗盡，造成浪費耗損與效率降低。相反地，含有大量碳酸鹽的地下水，則有助於高錳酸鹽類氧化物對於油品的氧化作用。

本指引主要介紹三種常用化學氧化劑，分別是過氧化氫、高錳酸鹽以及臭氧。三種常用氧化劑對於油品污染之適用性比較如表 9.1.1-1 所示，使用者可依據本表對照場址特性，選擇合適的化學藥劑為主要的添加物質。

表 9.1.1-1 現地化學氧化法氧化劑適用性評估表

藥劑	過氧化氫	高錳酸鹽	臭氧
優點			
具有短時間之內完成整治的潛力	✓		
具有氧化 MTBE 及苯等能力	✓		✓
在化學反應過程中的產熱，不會產生危害性的 VOC	✓ (<10%)	✓	
延長氧化的時間，增加氧化劑與污染物接觸之可能機會		✓	
可以順便增加水中溶氧，加強好氧生物作用的分解	✓		✓
施作期間降低健康風險以及操作措施較為安全		✓	
可以用自動化系統控制			✓
缺點			
對於苯及 MTBE 的處理效能較差		✓	✓
可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE 等	✓		✓
增加污染團結構改變的風險	✓		✓
氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層，氧化污染	✓	✓	✓
需要現地儲槽	✓	✓	✓
需要現地氣體產生機			✓
目前為止較少完成案例		✓	
可能產生不被預期產生的有害副產物	✓	✓	✓
有可能造成沉澱性固體，阻塞土壤層中的顆粒間隙	✓	✓	

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

9.1.2 適用條件

現地化學氧化法適用於低滲透性或高度分層(highly stratified soil)土壤、低揮發性污染物、現地降解動力常數低(in-situ degradation kinetic constants) 污染物及 DNAPL 污染物(In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會)，適用性評估詳圖 9.1.2-1 所示。現地化學氧化法適用於土壤、地下水污染併同處理，快速且有效率。但可能因化學藥劑較貴，考量經濟因素下，往往優先應用於小污染區域場址，或是為了縮小污染區範圍之目的而使用，選用現地化學氧化法的選用查核表如表 9.1.2-1。

在使用現地化學氧化法前，必須先進行自由相(free product)之回收，在確定場址內沒有浮油層之後，才會使用現地化學氧化法，其理由有兩點：

- 一、 避免發生浮油與氧化劑產生劇烈的氧化作用而發生危險。
- 二、 避免浪費太多化學藥劑，造成成本浪費。

基於安全的理由，現地化學氧化法常常搭配其他整治技術，例如土壤氣體抽除法(SVE)一併施行，以幫助緩和和安全問題，控制可能因各種化學氧化劑添加所產生的氧化作用，所引起含有揮發性有機物(VOCs)、氧氣和其它反應副產物的尾氣。

在多重整治方法併同處理的整治趨勢下，現地化學氧化法在應用時機上，往往扮演一個先趨的角色，亦即在整治初期，先以現地化學氧化法控制污染擴大趨勢，爭取整治時間，後續再以生物整治方式，將剩餘之污染量移除，因為氧化劑於地下水殘餘的結果，會持續形成高溶氧狀態，提供微生物分解代謝過程中所需之電子接受者。

現場的化學處理必須考慮化學物質的宿命(fate)，也就是該物質於土壤中的傳輸、擴散及反應等。於應用化學處理時，必須特別注意所加的化學藥劑可能含有害性化學物質，而且所添加的量也可能很大，這些都是現場處理前必須考慮的環境影響因素。就 Fenton 氧化法而言，因為過氧化氫於處理過程中用量較大，但是在自然環境中會被分解為氧氣及水，其所添加的 Fe^{2+} 催化劑是自然界含量頗高的化學物質，因此相較於高錳酸鉀及臭氧而言，其對環境的衝擊較小。所以如用過氧化氫加鐵催化的 Fenton-like 法

處理受有機污染之土壤及地下水之改善方式，亦成為後續現地化學氧化法發展的核心。

本技術之優缺點整理於表 9.1.2-2，選擇最適合的處理技術有賴正確的場址特性調查及詳細的現場篩選分析，通常需要實驗室的可行性評估及現場的模場試驗。此外，本技術的成功關鍵在於：

- 一、 所用的化學物質之加藥量與污染物的比值必須合理。
- 二、 能有效地將添加的化學物質傳送到受污染的區域。

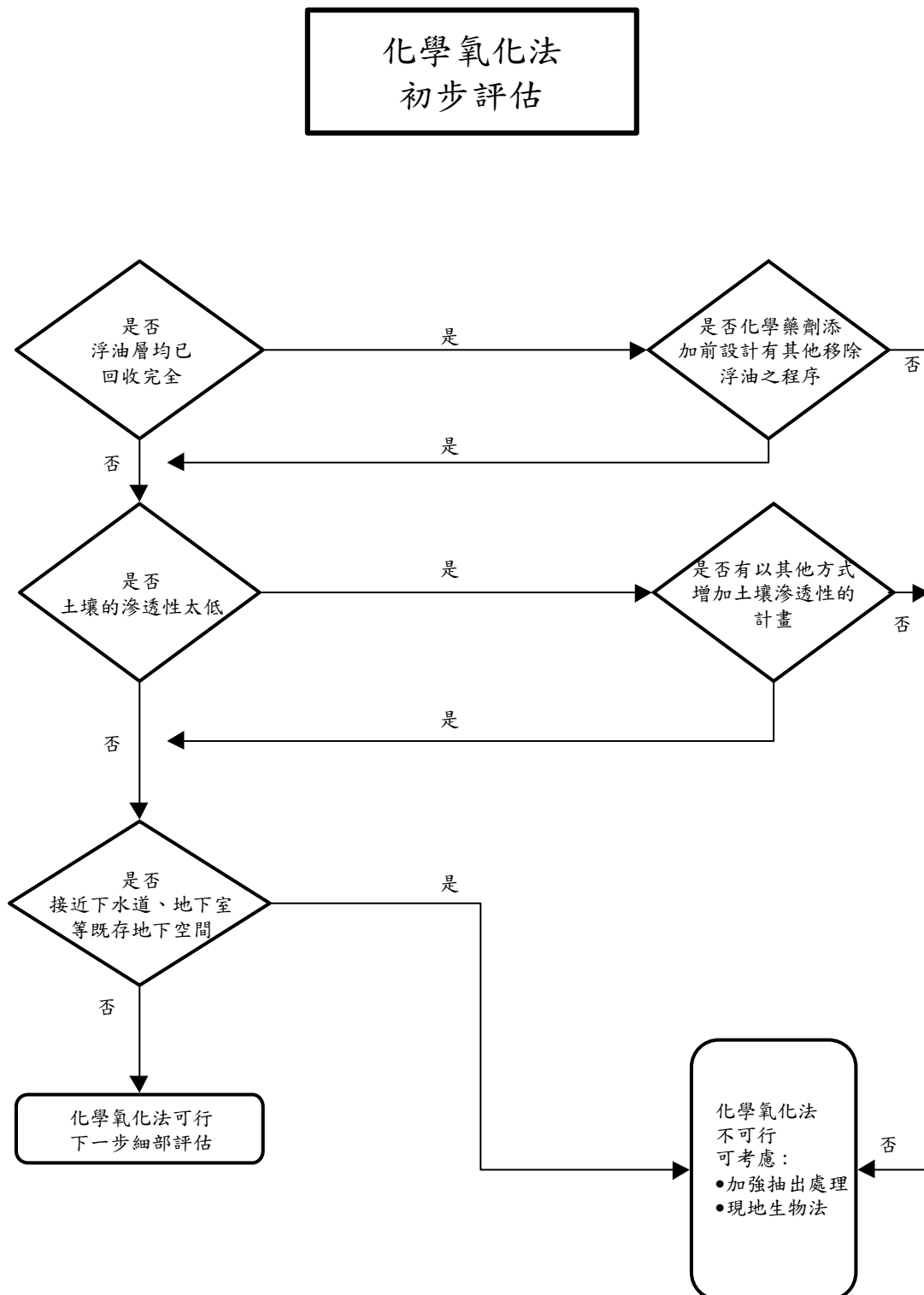
化學氧化整治發展至今仍有許多挑戰，詳細說明如下(In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會)：

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

表 9.1.2-1 現地化學氧化法技術選用查核表

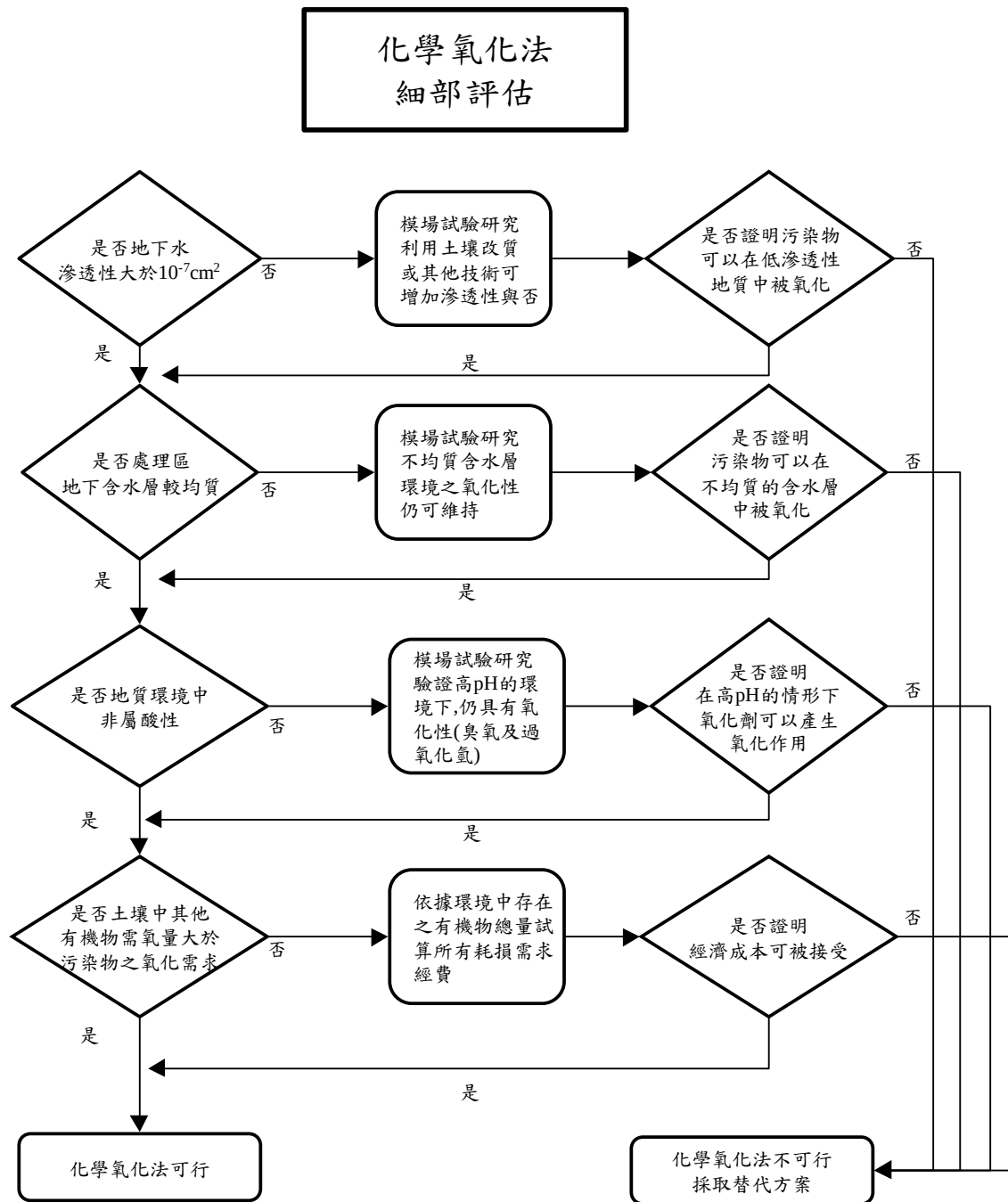
1.0 場址因素：	是	否
1.1 土壤滲透性大於 10^{-9}cm^2 ？		
1.2 無不透氣層或低透水性之地質狀況可能侷限相當的油品？		
1.3 由岩心鑽探資料顯示土壤不具有自然有機質？		
1.4 預期整治期間的土壤溫度比 10°C 高？		
1.5 場址的地下水 pH 值在 5-9 之間？		
1.6 場址的地下水中的溶解性鐵濃度小於 10mg/L ？		
1.7 有立即處理對人體健康有高度立即性風險的急迫性？		
1.8 需要特定的許可？		
2.0 化學氧化設計		
2.1 須採用生物處理之油品總質量有估計？		
2.2 生物降解油品污染物所需之溶氧量已經評估？		
2.3 建議之化學氧化技術足以提供在預期整治期間所需之溶氧量？		
2.4 化學處理系統具備產生與輸送達設計量之氧氣？		
2.5 在場址狀況下，氧氣的傳輸點足以將氧氣均勻的散佈至標的整治區域？		
3.0 操作許可		
3.1 是否有操作許可之問題？如有，如何因應？		
4.0 監測計畫		
4.1 在化學氧化處理前會先進行採樣分析以取得基準線？		
4.2 監測計畫特別排除輸送氧氣的井，以評估化學氧化之效能？		
4.3 監測井的位置適當的分布並足以評估化學氧化之成效？		
4.4 包括不定期的在氧氣輸送經之間的位置進行土壤採樣？		
4.5 土壤、土壤氣體與地下水樣品會針對建議之重要因子進行分析？		

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 9.1.2-1 現地化學氧化法簡易評估流程



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 9.1.2-1 現地化學氧化法簡易評估流程(續)

表 9.1.2-2 現地化學氧化法優缺點比較表

優點	缺點
• 污染物可以在現地被破壞移除 • 處理效率較為快速 • 處理過程中沒有廢棄物、廢水等產生，場址中加藥氧化過程產生的氣體也不多。 • 可以氧化 MTBE 等油品類較難分解污染物 • 減少操作及監測成本 • 殘餘的碳氫化合物可以持續由氧化劑產生的溶氧等，加強後續的生物分解作用 • 對於場址運作干擾最小 • 過氧化氫的反應熱可加速物質傳輸、反應速率與微生物活動* • 可能強化化學反應後之微生物活動強度與自然衰減速率* • 相較於其他候選整治技術可能具成本競爭優勢* • 現地化學氧化法可能可以降低其他整治技術(如抽水處理法與自然衰減法)帶來的整治成本*	• 初設成本及總成本可能較高 • 滲透性較差的地方，化學氧化劑可能無法到達以及氧化污染物 • 過氧化氫可能在現場產生危害性氣體，可能需要輔以其他設備抽除，避免危險 • 在處理數週至數月後，溶解性的水中污染物濃度可能回升 • 污染團結構及範圍可能在施作數週之後改變 • 化學藥劑之使用，有健康風險以及場址作業安全之考量 • 如果只用現地化學氧化法要將場址整治至非常低的濃度，可能是不經濟的甚至技術上很難達成的。 • 化學藥劑有可能浪費在與土壤層中其他物質作用而消耗。 • 有可能造成沉澱性固體，阻塞土壤層中的顆粒間隙 • 在某些土壤與含水層中，天然可氧化物質之氧化劑消耗量可能相對偏高* • 部分氧化劑因在地下環境反應速率快，持久性短* • 運作強氧化劑所衍生的工業安全衛生問題* • 造成污染物移動的潛在問題* • 降低滲透性(造成土壤孔隙阻塞)的潛在問題* • 可能不適用於嚴重污染場址* • 對混合污染物處理需採用整治技術組合(treatment train)*

參考資料：

"How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers", USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

*：ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會

9.2 整治系統操作與設計

9.2.1 整治系統設計與操作要點

化學氧化法的成功條件為足量的氧化劑與目標污染物接觸並在足夠的時間中與污染物持續、有效的反應(ISCO field scale implementation and engineering design considerations, 2007 台美講習會)。

化學氧化整治法的設計的各項基本設計因子整理如表 9.2.1-1，由表可知有許多環境因素會影響現地化學氧化法移除污染物的成效。而在進行全

場設計前，建議以模場試驗了解現地化學氧化法的可行性，宜蒐集場址地層組成以評估地質異質性影響、氧化劑傳輸方式與持久性、試劑注入所需速率與壓力、可能的中間產物、重金屬的移動性、氧氣需求量以及不同氧化劑對關切污染物的處理成效等資訊(ISCO bench and pilot-scale studies, 2007 台美講習會)。

表 9.2.1-1 現地化學氧化法基本設計因子

基本設計因子	設計資訊來源
- 處理目標： - 處理標準 - 處理期程 - 污染團範圍控制目標 - 其他	敏感受體檢視，曝露風險等的健康風險評估。
- 地質： - 均質性 - 地質分層 - 地質化學 - 岩盤位置 - 土壤滲透性	場址調查、土壤取樣、分析以及區域性參數資料研析。
- 水力： - 地下水位 - 地下水流速及流向 - 含水層特性 - 水力參數(導電度、有效孔隙度、導水係數、儲水係數等) - 地下水化性(硝酸鹽、硫酸鹽、鐵離子、溶氧等濃度)	場址調查、地質鑽探以及區域性參數資料研析。
- 油品類污染物特性： - 主要處理目標化合物濃度 - 其他耗氧化合物濃度 - 質量平衡計算(吸附、揮發、溶解) - 水平及垂直方向擴散情形 - 污染物傳輸特性 - 污染物組成之蒸氣壓及亨利常數 - 模擬(推估擴散及分布趨勢)	土壤地下水取樣分析、公開場址歷史資訊等。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

本節以 Fenton 氧化法為例說明整治系統設計與操作要點說明。

一、 pH 值

首先是 pH 值的影響，一般如以 Fenton 氧化法處理受污染的土壤之 pH 值介於 2 與 3 之間，實驗室規模之去除率可達 90% 以上。

二、 過氧化氫添加量

以 Fenton 氧化法處理的效能也取決於過氧化氫的添加量。一般而言，當過氧化氫的用量增加時，有機物的礦化百分比也會跟著增加。

但為了避免藥品的浪費，最好能進行實驗室及模場試驗，進行添加量之預估及成本估算，求取最佳用量及成本。

三、 土壤中的有機質

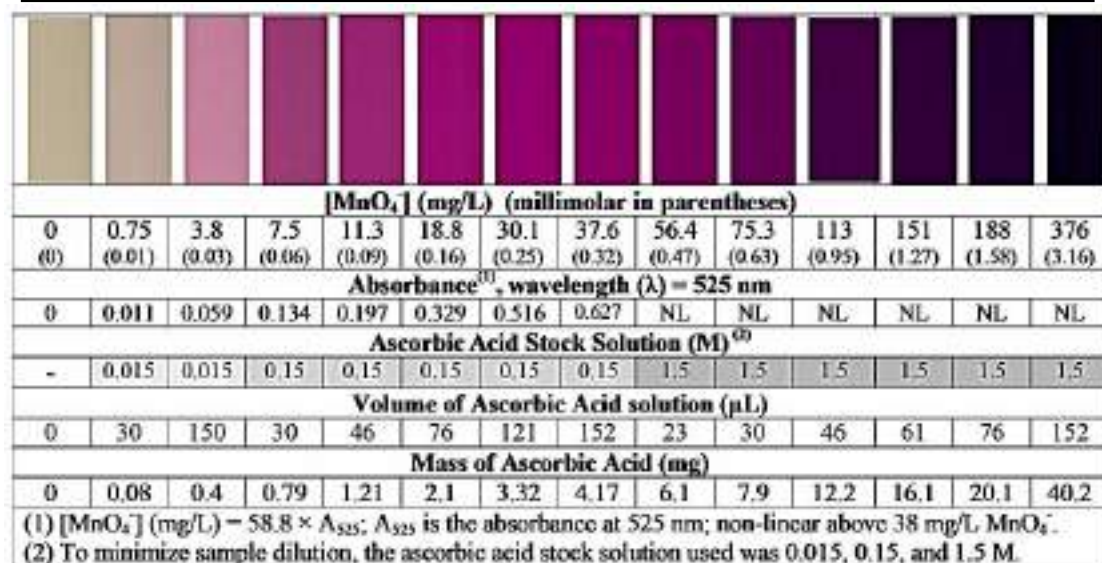
土壤中的有機質會影響氧化效果，土壤中的有機質會吸附污染物而使水溶液中的污染物濃度下降，因而不易受過氧化氫所氧化，而且過氧化氫也會被有機質所消耗，因此 Fenton 氧化法的處理效率與土壤或地下水中的有機質成反比例的關係。

四、 催化劑添加

添加二價鐵的催化反應可以使反應進行的更有效，但是在進行 Fenton 反應的過程中，有時無需添加鐵的催化劑，這是因為過氧化氫受了含於砂土中的鐵成分所催化而產生氫氧自由基的緣故，所以污染物才得以被分解。

五、 保存樣品藥劑的添加 (Groundwater sample preservation methods and guidelines, ISCO Sites, 2013 台美講習會)

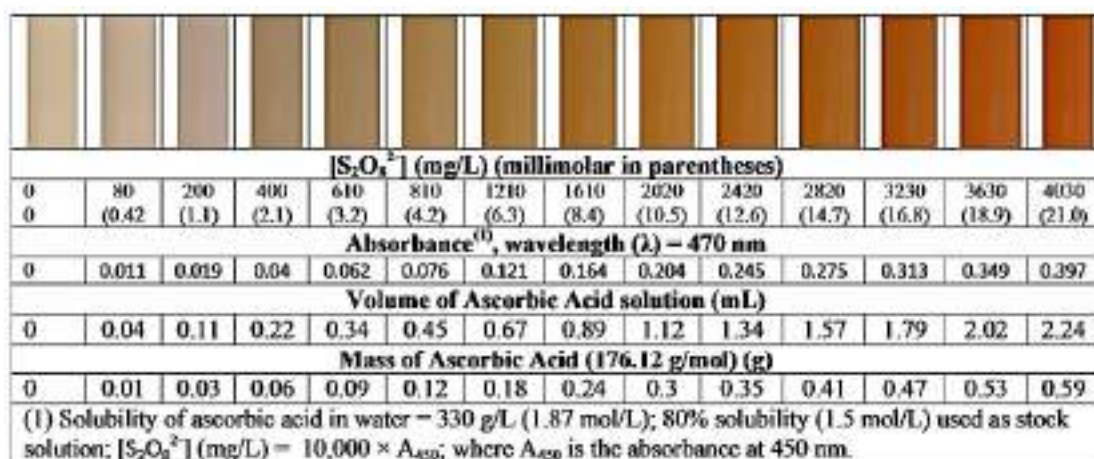
根據 2013 年台美講習會 Groundwater sample preservation methods and guidelines, ISCO Sites 演講中，Scott G. Huling 表示當地下水採樣中若發現 MnO_4^- 或 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 的藥劑殘留時，最好的作法為停留一段反應時間後，再次進行地下水採樣，確保化學氧化劑已與污染物完全反應，避免採樣結果失真。然而，若欲於藥劑殘留條件下進行採樣結果分析，必須確保在樣品運送過程中污染物不得再與化學氧化劑持續反應，而出現採樣結果誤差。故此時就需要添加樣品保存藥劑，抗壞血酸 (ascorbic acid)。本次演講重點為利用地下水採樣樣品呈色，進行樣品中化學氧化劑， MnO_4^- 或 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 的殘留濃度的預估，分別如圖 9.2.1-1 及圖 9.2.1-2。利用樣品色卡協助評估應加入多少抗壞血酸以保存樣品。以圖 9.2.1-1 為例，當 MnO_4^- 殘餘濃度為 113mg/L 時，建議使用 12.2mg 的抗壞血酸進行地下水樣品的保存。又如圖 9.2.1-2，當 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 殘餘濃度為 610mg/L 時，建議添加 0.09g 抗壞血酸保存樣品。



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

註：NL 表示在該 MnO₄⁻ 殘餘濃度後之添加藥劑比例未呈線性趨勢

圖 9.2.1-1 MnO₄⁻ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表



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

圖 9.2.1-1 S₂O₈²⁻ 殘餘濃度與使用抗壞血酸量對照表

9.2.2 整治系統單元

現地化學氧化法中，過氧化氫、高錳酸鹽、臭氧等三種處理方式之必要設備，彙整於表 9.2.2-1 中。

表 9.2.2-1 現地化學氧化法之系統設備組成

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

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

9.2.3 整治系統監測

本技術整治期間之監測需求如表 9.2.3-1 所示。而在系統運轉與監測時，應注意下列重點：整治作業前詳細的評估，以及良好的規劃設計，加上操作人員的經驗，使儀器設備操作都在預定情況下進行，都可以降低環境遭

遇緊急狀況二次污染的可能。而除整治期間需監測外，任何現地處理技術都需要考量濃度回升(contaminant rebound)之問題，在使用現地化學氧化法將污染物濃度降至管制標準後，污染物可能再經由低滲透性的地層中釋放，造成此濃度回升現象的因子多樣，不完全的氧化作用、原吸附於固體的污染物脫附、NAPLs 的溶解都可能導致污染物的濃度回升，因此需要進行持續的監測 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)。

表 9.2.3-1 現地化學氧化法建議監測計畫內容

監測參數	監測頻率		
	初設 7~10 天	長期運轉期間	
	每天	每週~每月	每季~每年
地下水			
溶氧 pH 值	✓	✓	
過氧化氫或臭氧	✓	✓	
污染物濃度			✓
生物分解中間產物			✓
水位	✓	✓	
土壤氣體			
二氧化碳	✓	✓	
氧	✓	✓	
揮發性有機物	✓	✓	
過氧化氫或臭氧氣體	✓	✓	
土壤			
污染物濃度			✓

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

9.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

使用化學藥劑應盡可能避免安全性的問題，應進行員工教育防護訓練課程，並重視在處理設計與操作監測過程可能產生的熱、高溫、大量廢氧氣量、大量可燃性有機污染物蒸氣(In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會)。

一、過氧化氫

(一) 可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE 等。

(二) 增加污染團結構改變的風險。

- (三) 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染。
- (四) 可能產生不被預期產生的有害副產物。
- (五) 需要現地儲槽。
- (六) 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。
- (七) 可能造成地下水酸化(ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)
- (八) 由於反應會產生氧氣，可能降低透氣性導致試劑傳輸受限、污染物可能隨氣體傳輸遠離試劑注入點、地下壓力增加導致地表鋪面損壞等問題(ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)
- (九) 反應造成之溫度上升可能損壞管線並增加污染物的移動力(ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)

二、高錳酸鹽

- (一) 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性土壤層氧化污染。
- (二) 可能產生不被預期產生的有害副產物。
- (三) 需要現地儲槽。
- (四) 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。
- (五) 某些過錳酸鉀含有微量鉻、砷的不純物，需注意使用時是否造成地下水的重金屬濃度上升 (ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會)

三、臭氧

- (一) 可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE 等。
- (二) 增加污染團結構改變的風險。
- (三) 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染。
- (四) 需要現地氣體產生機。

(五) 可能產生不被預期產生的有害副產物。

(六) 需要現地儲槽。

9.3 成本及期程評估

本技術之土壤污染整治成本大致上可分機械設備購置成本、開挖搬運成本、化學加藥成本、操作維護成本及採樣分析成本等。以臭氧處理為例，包含設井與 SVE 機械租賃等費用。至於過氧化氫處理，由於所加入的化學加藥成本與污染量有很密切的關係，操作時的變動成本也較大，因此過氧化氫處理主要應探討化學加藥的成本。

國外以臭氧處理的成本報告案例茲舉例如表 9.3-1，該案例顯示在以臭氧處理受乾洗業的廢溶劑污染的土壤時，以 AS/SVE 加臭氧處理時，其影響半徑可達 50 ft，而其污染團的深度可達地表下 75 ft。若土壤的密度為 1.5 公噸/m³，AS/SVE 加臭氧的處理範圍以圓錐形計算體積為 21,816 m³，換算其土壤重量為 32,725 公噸。該計畫的總處理成本為 US\$485,291，換算新台幣為 16,013,603 元，如此可得處理每公噸土壤需要新台幣 489 元。但需注意的是，經費會因場址差異產生極大不同，建議應進行模場試驗詳細估算可能整治經費，並逐年修正，使經費能夠控制在預期之規劃範圍。

表 9.3-1 美國以臭氧氧化技術整治案例之成本推估表

項目	內容	說明
場址整治		
1.場址描述	場址位置	Paul's Classic Drycleaners, WI
	地下水位	8.5-10.5 ft. bgs.
	地質狀況 ．地表回填 ．砂土 ．沖積土	2-10 ft. bgs 10-18 ft. bgs >18 ft. bgs
	污染物	PCE, TCE
	最高污染濃度	PCE=27ppm, TCE=2.3ppm, DCE=5.4ppm, VC=0.12ppm
	污染團範圍	長 100 ft 深 75 ft. bgs
2.處理技術	臭氧加強生物處理	模場試驗
	SVE/AS 加臭氧處理	模場試驗(影響半徑 50ft)
	多相抽除分離處理	地下水處理
處理成本		
1.場址評估	土壤	US\$16,507
	地下水	US\$66,029

項目	內容	說明
2.設計安裝	土壤 地下水	US\$2,373 US\$43,882
3.操作維護	操作 5 年，第 6 年以監控(測)式自然衰減法處理	US\$356,500
小計		US\$485,291 (NT\$16,013,603)
總計費用		
總計費用	16,013,603	元(新台幣)
土壤處理量	32,725	公噸
單位處理成本	489	元(新台幣)/公噸

資料來源：State Coalition for Remediation of Drycleaners 網站資料
<http://www.drycleancoalition.org/profiles/display.cfm?id=50>

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. API(1996)A Guide to the Assessment and Remediation of Underground Petroleum Releases, Third Edition, API Publication 1628, Washington, D.C.
3. 美國 State Coalition for Remediation of Drycleaners 網站，網址為 <http://www.drycleancoalition.org/profiles/display.cfm?id=50>
4. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
5. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
6. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>
7. In-situ chemical oxidation, 2005 年台美講習會
8. ISCO advantages/ disadvantages (limitations), 2007 台美講習會
9. ISCO bench and pilot-scale studies, 2007 台美講習會
10. ISCO field scale implementation and engineering design considerations, 2007 台美講習會

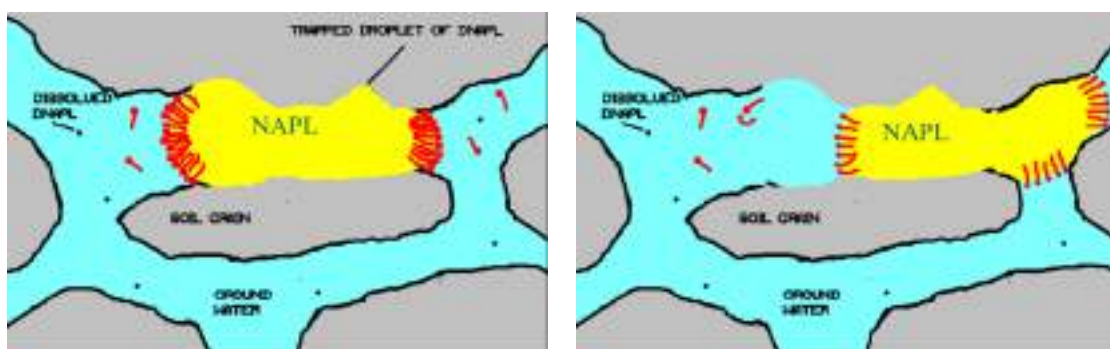
十、界面活性劑沖排法(Surfactant Flushing)

10.1 整治技術簡介

10.1.1 原理

界面活性劑加強含水層整治復育(Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation, SEAR)係利用界面活性劑進行土壤或地下水淋洗的工程應用，最早在 1970 年代即已開始受到重視，其主要的應用是在於有機污染物的移除，標的污染物包括非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPL)、油類、多氯聯苯與三氯甲烷等，且部分已完成模場或實場的示範或設置。界面活性劑沖排移除 NAPL 機制有以下二種 (Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會)：

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



(a) 增溶作用

(b) 提高流動性

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

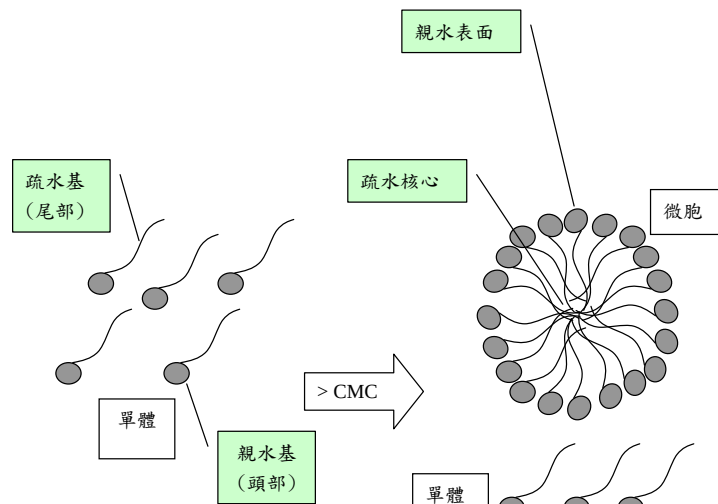
圖 10.1.1-1 界面活性劑沖排移除 NAPL 機制

過去利用地下水抽出處理(pump and treat)整治可溶性、可吸附或非水相液體(NAPL)污染物的經驗發現，直接抽出處理的效率不佳。而造成這些技術上缺陷的主要原因與污染物對水的親和度有關，因為污染物對有機物的親和力比對水的親和力高，因此污染物在地下水中的溶解、擴散以及脫附都相對的低。為了提高污染物的溶解度以解決上述的困難，於是添加界面活性劑(surfactant)以溶容(solubilize)有機污染物，並減少整治時所需要淋洗(flushing)的體積，縮短整治時間，使其成為一項重要的工程技術。

界面活性劑(surfactant)一詞來自於表面活性劑(surface active agent)的組合，其主要的分子結構特性，是同時具有疏水性及親水性的官能基。通常前者為一長碳鏈分子，因此對水的溶解性很差，而後者則通常為極性分子，對水有相當好的親和性，使得界面活性劑在水中成為一種相當特殊的介質。依照親水基(通常稱之為頭部)的電荷特性，界面活性劑被歸類成四大類，分別為陰離子性、陽離子性、非離子性及雙離子性界面活性劑。陰離子性者，即是該親水基為帶負電之陰離子(如： SO_3^-)；而陽離子性者為該親水基為帶正電之陽離子(如： $\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-$)；非離子性者，其親水基的部分則不帶電荷。

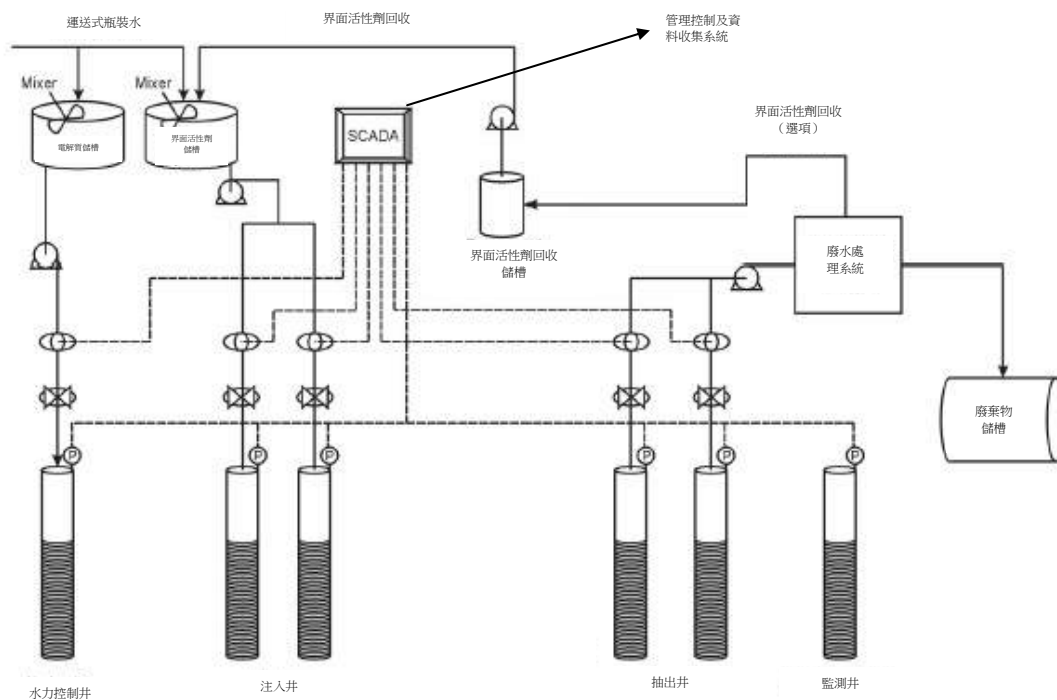
界面活性劑獨特的化學特性是，當在低濃度時界面活性劑以所謂單體(monomer)的形式存在；而當其濃度超過某一濃度時，界面活性劑開始形成結構迥異的微胞(micelle)，該特徵濃度稱為臨界微胞濃度(Critical Micelle Concentration, CMC)。在濃度高於CMC時，系統中是單體與微胞結構共存，其中單體會維持在相等於CMC的濃度，而多於CMC的部分，則因為疏水基互相吸引(或受水分子排擠)，而聚集成為一表面為親水性而內部為疏水性核心的微胞結構。微胞的典型基本結構如圖 10.1.1-2 所示。由於微胞的核心為疏水性，所以提供了一個可以容納低溶解度或疏水性有機物的空間，這種將有機物包容於微胞核心的機制稱為溶容(solubilization)。微胞的疏水核心相當於在系統中建立一個假相(pseudo phase)，促使疏水性有機物(Hydrophobic Organic Compound, HOC)在水溶液中可溶解於水中，同時可以「溶容」於微胞中，進而提高有機物在水中的整體溶解度(apparent solubility)。界面活性劑的這種特性，促成其在環境工程上的應用，於初始是以疏水性有機污染物為主要標的物。

除了界面活性劑之外，為了增加地下水有機污染物的溶解度，部分場址會另外添加共溶劑例如醇類等，其目的是使污染物從土壤顆粒中脫附，並使得污染物容易溶解分散於水中，而水中的溶解度增加之後，可以提昇界面活性劑的利用率。典型的界面活性劑沖排工程原理及架構詳圖 10.1.1-3。



參考資料：“利用陰離子界面活性劑移除土壤中重金屬期末報告”，黃智、林淑滿，財團法人中興工程顧問社，2003 年 4 月。

圖 10.1.1-2 界面活性劑的基本結構特性



參考資料：“Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation(SEAR)Implementation Manual”, Naval Facilities Engineering Command Technical Report ,Intera Inc.and Naval Facilities Engineering Service Center ,April 2003.

圖 10.1.1-3 界面活性劑(含共溶劑)沖排法的基本架構

10.1.2 適用條件

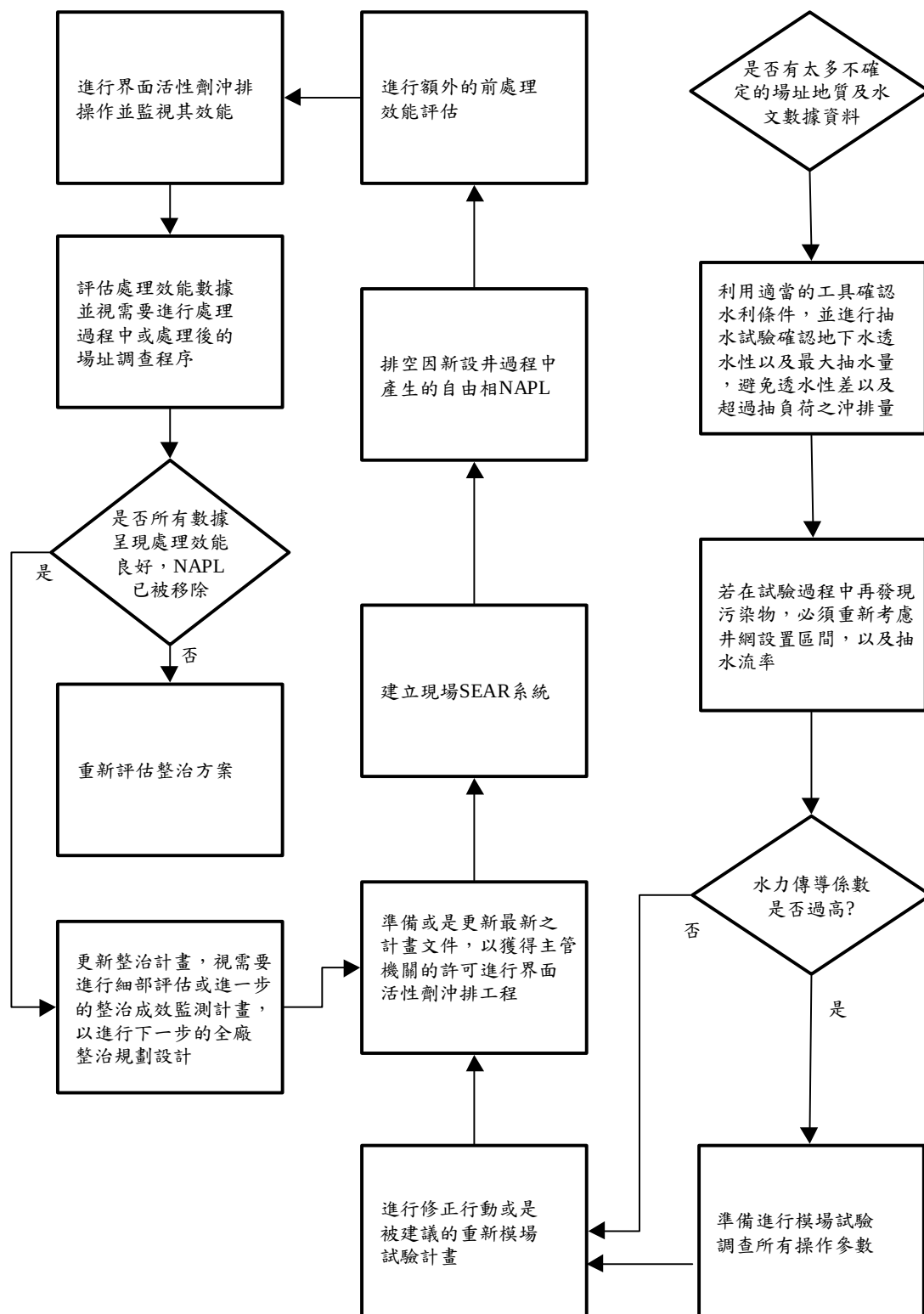
若欲使用界面活性劑及共溶劑淋洗法，進行土壤或地下水的整治工作，其適用性可以圖 10.1.2-1 進行評估及確認。

最早界面活性劑淋洗之整治技術開發，係利用於土壤中重金屬之移除；而針對不飽和土壤層之有機性污染物淋洗技術相關應用較少；但針對地下水含水層之界面活性劑沖排相關整治技術，應用於移除 NAPL 等非水相物質，例如油品溶解相、BETX 等有機污染，則有相當成效的案例成果。因此，界面活性劑及共溶劑淋洗法相當適用於地下水含水層介質中油品類污染之整治技術。惟必須注意的是，為減少成本，降低界面活性劑之無效使用量(被環境中其他物質作用，而非目標污染物)，一般仍應先將浮油層移除後，再進行界面活性劑淋洗沖排之工作。本技術之優缺點整理如表 10.1.2-1 所示。

表 10.1.2-1 界面活性劑(含共溶劑)沖排法優缺點比較表

優點	缺點
• 界面活性劑及共溶劑如醇類等，其密度比水輕之情形，有助於油品類污染物與其維持在地下水表層之作用，不致向下擴散。 • 可以結合不同之界面活性劑或是共溶劑，依據場址污染特性需求，製造不同成份組成之配方，以獲得最佳之處理效能。 • 界面活性劑或共溶劑在剛開始注入時，因濃度太高，並不會被微生物分解，可以保持有效作用濃度，確保其完全被污染物所作用。但當作用完畢時，剩下的低濃度界面活性劑或共溶劑可能會被微生物利用所分解，不致殘留於環境之中。	• 污染物質被溶解排出土壤顆粒之後，可能增加其移動性，若抽水井網規劃不完善，可能造成污染物流竄。 • 界面活性劑或是共溶劑配方之調配成本較高，而且隨著場址不同，或是整治期間濃度之變化，必須重新調配之可能性較高；而若不重新調配，也可能造成無效作用之藥品浪費。 • 生物不可分解或難分解之界面活性劑，可能殘存於地下環境之中，因此必須採用食品級藥品，以降低風險，如此將提高藥品成本。

參考資料：“Surfactant / Cosolvent Enhanced Recovery of NPAL”，美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/PRODUCT/AATDF/chap4.htm>。



參考資料：“Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation(SEAR)Implementation Manual”, Naval Facilities Engineering Command Technical Report ,Intera Inc.and Naval Facilities Engineering Service Center ,April 2003.

圖 10.1.2-1 界面活性劑(含共溶劑)沖排法評估流程

10.2 整治系統操作與設計

10.2.1 整治系統設計與操作要點

系統設計前應事先了解污染物的分佈、場址特性、模擬軟體使用、模場放大測試、界面活性劑化學特性等(Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會)。以下茲針對整治系統實際操作應注意要點說明。

一、工業安全

本技術若使用醇類物質作為共溶劑，應特別注意場址的安全性危害，因為醇類物質的沸點較低，在儲槽、管線等輸送操作的過程中，必須特別注意其工業安全事項。

二、注入化學品之規範

化學品注入井雖然非屬我國水利建造物相關辦法所轄之水利井，無須另外申請設置，但設置前仍應說明詳細設置規範，於整治計畫中提出予環保主管機關審查，確保其設置數量及注入量之規劃，能夠充分被環保主管機關掌握。

三、系統設置開始

當注入及抽出之操作開始階段，主要確認系統的穩定，確認事項包括：

- (一)確認測漏設備及流量校正設備，均顯示系統保持在正常的壓力之下操作，沒有洩漏之虞。
- (二)確認注入流率的水力控制數據，確保流量在設計參數之下運作。
- (三)確認廢水處理系統之運作及排放水符合管制標準。
- (四)確定自動化系統顯示之數據以及記錄資料的正確性。
- (五)測試警示系統及自動化設備的自動斷電及重開功能。

四、界面活性劑沖排之操作

為確保界面活性劑之品質，注入前之準備工作，必須依據下列順序辦理：

- (一)將批次混合槽填裝運送式瓶裝水。
- (二)加入電解質鹽類溶解。
- (三)添加界面活性劑攪拌完全。
- (四)裝入共溶劑(視需要)攪拌完全。
- (五)填裝運送式瓶裝水至混合槽全滿並攪拌完全。

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

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

10.2.2 整治系統單元

一個完整之界面活性劑及共溶劑淋洗法，包括下列設備或設施：

- 一、 界面活性劑溶液以及其他共溶劑等注入地下水之化學品的準備區及設備，例如現地藥品混合槽、藥品儲桶儲放區等。
- 二、 注入及抽出操作系統，包括抽出井、注入井、管線以及泵等。
- 三、 設置監測系統，包括存在於土壤、地下水環境中污染物、界面活性劑、共溶劑等化學藥劑取樣之監測井或一般工作井，自動化機械操作的壓力、流率等監控系統，以及地質水文監視項目如地下水位等。
- 四、 程序控制系統，包括數據資料蒐集、各項自動化監測設備之操作控制數據等。
- 五、 廢水處理系統，市售合用(針對揮發性有機物或半揮發性有機物)之廢水處理單元設備均可以選擇。

10.2.3 二次污染防治與安全衛生管理

本技術最主要的危害性產生於界面活性劑與共溶劑沖排所產生的大量注入及抽出行為，若未進行妥善的注意及規劃，即進行界面活性劑沖排的話，很有可能產生遭淋洗溶出的污染物朝向非預期的方向流竄，而產生其他民眾接觸的風險。

此外，所有淋洗沖排之管線、儲槽等，應避免洩漏所造成的污染。因為管線中除了界面活性劑之外，也還可能包括了自地下水中抽出回收之污染物質，若是於地面管線、回收儲槽等處產生洩漏，除了造成二次污染之外，場址相關人員也會有遭受接觸傷害之危險。因此，每天管線儲槽之操作維護應納入營運管理計畫中。

在氣態污染物方面，雖然本技術僅於地面設置廢水處理設備，並無氣體處理設備，因此並沒有固定污染源排放之問題。但是，由於場址中對於有機性污染物的抽出處理運作，對於場址的逸散氣體必須加以注意，應定期監測周界揮發性有機污染物的濃度。

廢水處理單元為界面活性劑回收前設置的唯一處理設施，若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，應符合我國污染防治相關法令。在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

10.2.4 整治系統監測

進行界面活性劑及共溶劑淋洗法，必須透過「操作監測」及「環境監測」來確保污染物於界面活性劑沖排之後，除了可以達到預期成效之外，也較不會造成污染範圍擴大影響環境。主要操作及環境監測內容詳可表 10.2.4-1 所示。

10.3 成本及期程評估

美國俄亥俄州 Chevron Cincinnati Facility 場址，採取界面活性劑淋洗法進行 LNAPL(包括自由相浮油)整治回收工作，在 8 年之整治期間，初設成本約 90,000,000 美金(約新台幣 3,150,000,000)，操作維護成本 16,000,000 美金(約新台幣 560,000,000)。然而為了防止污染區擴大，以及採取綜合的

整治方法，於後續整治期間，包括使用 SVE 及水力阻絕設施等技術，8 年間共計花費 42,000,000 美金(約新台幣 1,470,000,000)，若換算成單位成本，計算 8 年期間回收每加侖之浮油約為 0.67 美元(約新台幣 24)，但這個數字還需視後續之整治期程及經費而調整修正。

表 10.2.4-1 界面活性劑(含共溶劑)沖排法系統之監測參數

監測類型	監測參數	監測位置
化性分析	- 溫度 - pH - 電解質 - 共溶劑 - 界面活性劑	- 混合槽或是注入井前之管線 - 抽出井 - 監測井
	污染物(所有關切之化合物之單一濃度)	- 抽出井 - 監測井
流率性質	抽水流率	所有抽水、注水泵
	壓力	- 注入井 - 抽出井 - 廢水處理流路管線
含水層性質	水位	- 抽出井 - 注入井 - 監測井
	自由相 NAPL 的厚度	- 閘/球型閥 - 蝶型閥

資料來源：“Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation(SEAR)Implementation Manual”, Naval Facilities Engineering Command Technical Report ,Intera Inc.and Naval Facilities Engineering Service Center ,April 2003.

參考文獻

1. “ Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation(SEAR)Implementation Manual” , Naval Facilities Engineering Command Technical Report ,Intera Inc.and Naval Facilities Engineering Service Center ,April 2003.
2. 「利用陰離子界面活性劑移除土壤中重金屬期末報告」，黃智、林淑滿，財團法人中興工程顧問社，2003 年 4 月。
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>
6. Surfactant/ Cosolvent flushing, 2005 台美講習會

十一、加強好氧生物整治法(Enhanced Aerobic Bioremediation)

11.1 整治技術簡介

11.1.1 原理

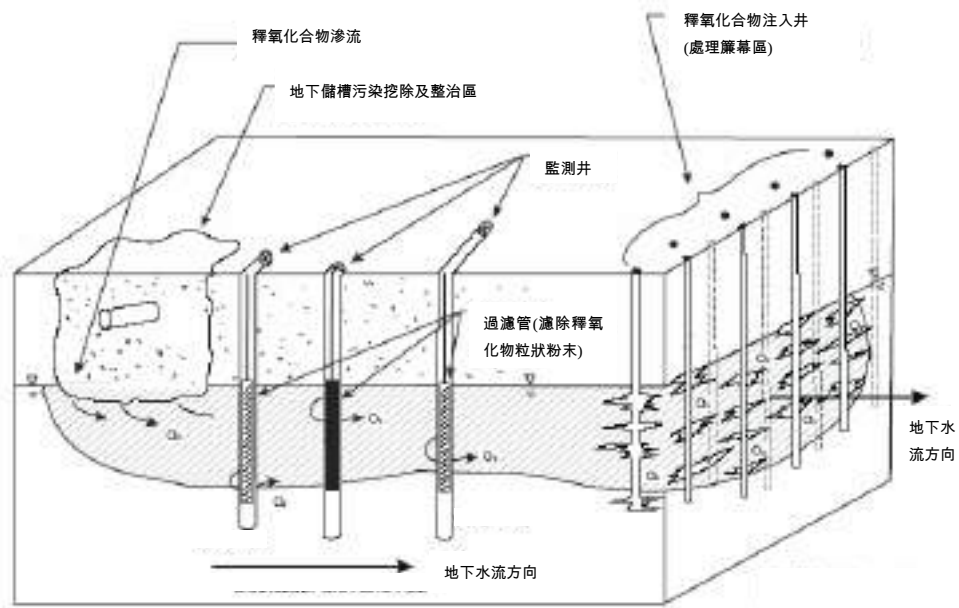
加強好氧生物整治法(Enhanced Aerobic Bioremediation)係加速污染場址中現地微生物(indigenous microorganisms)之生長，強化生物分解作用，能夠有效處理溶解於地下水中的有機類物質，例如油品類污染物，特別是汽油類中的釋氧劑 MTBE 等，適用於飽和層及不飽和層的污染。

加強好氧生物整治法依照供氧方式區分，包括生物曝氣法(biosparging)、生物通氣法(bioventing)、釋氧化合物供給法(use of oxygen releasing compounds)、純氧注入法(pure oxygen injection)、過氧化氫滲滲法(hydrogen peroxide infiltration)以及臭氧注入法(ozone injection)等。

1 莫耳的碳氫化合物，約需要消耗 3 莫耳的 O_2 ，可由上述不同的供氧方法提供及計算需求量，藉以估算整治需求之耗材藥劑費用。

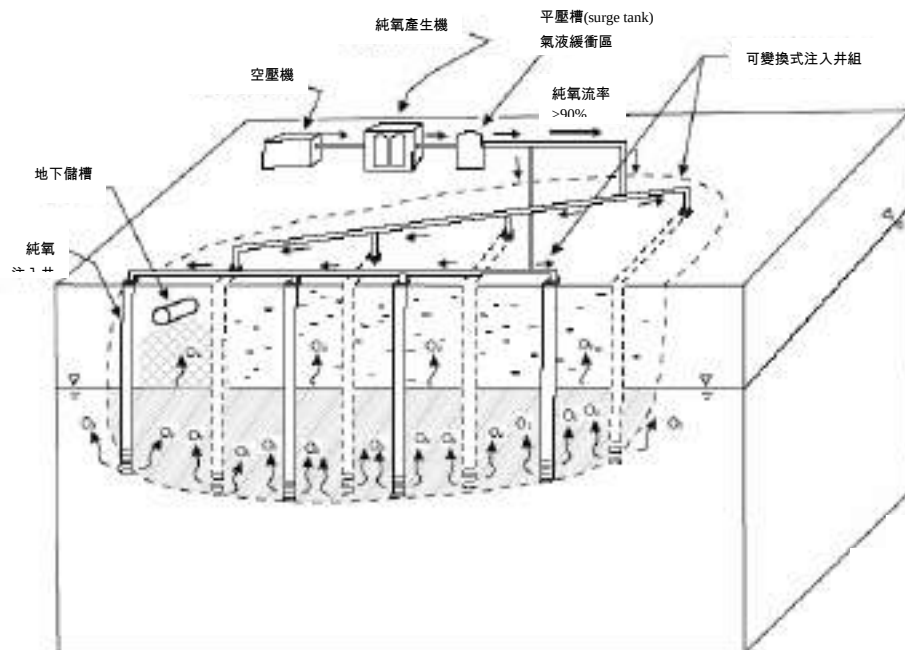
加強好氧生物整治法被設計應用於油品類物質中，分子量、揮發性排序中間的物質，例如柴油等。當然，低分子量、揮發性高的物質，如汽油等的處理效果也相當好，但如果場址只有單一物質的揮發性污染，一般會用生物曝氣、空氣注入、SVE 等方式處理較為經濟。若是潤滑油等污染物，加強好氧生物整治法雖然也有效，但加藥量、供氧量會較多，處理時間也會較長。

本篇主要介紹三種常用且經濟的加強供氧方式，分別是釋氧化合物供給法、純氧注入法、過氧化氫滲滲法。三種常用氧化劑對於油品污染之設備單元示意如圖 11.1.1-1 至圖 11.1.1-3 所示。其他氣體供氧方式概念如臭氧及純氧注入法等，目前實場經驗較少，現階段較屬模廠或是其他小規模之整治場址。



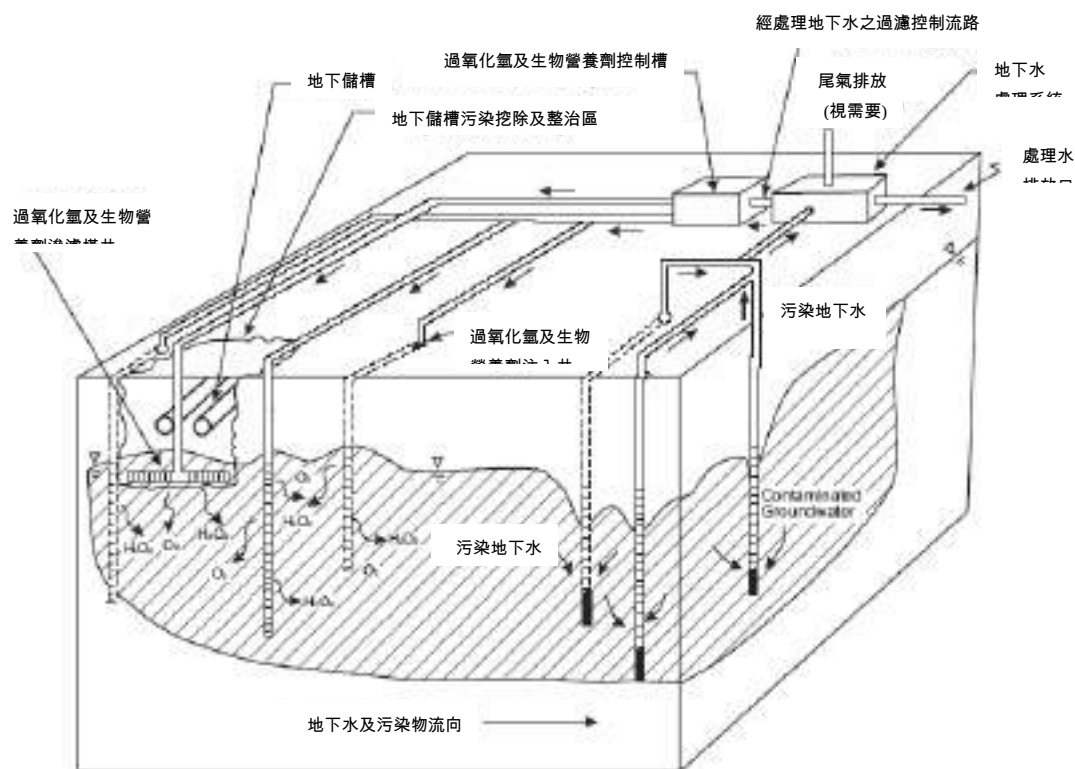
參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 11.1.1-1 釋氧化合物供給法處理系統



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 11.1.1-2 純氧注入法處理系統

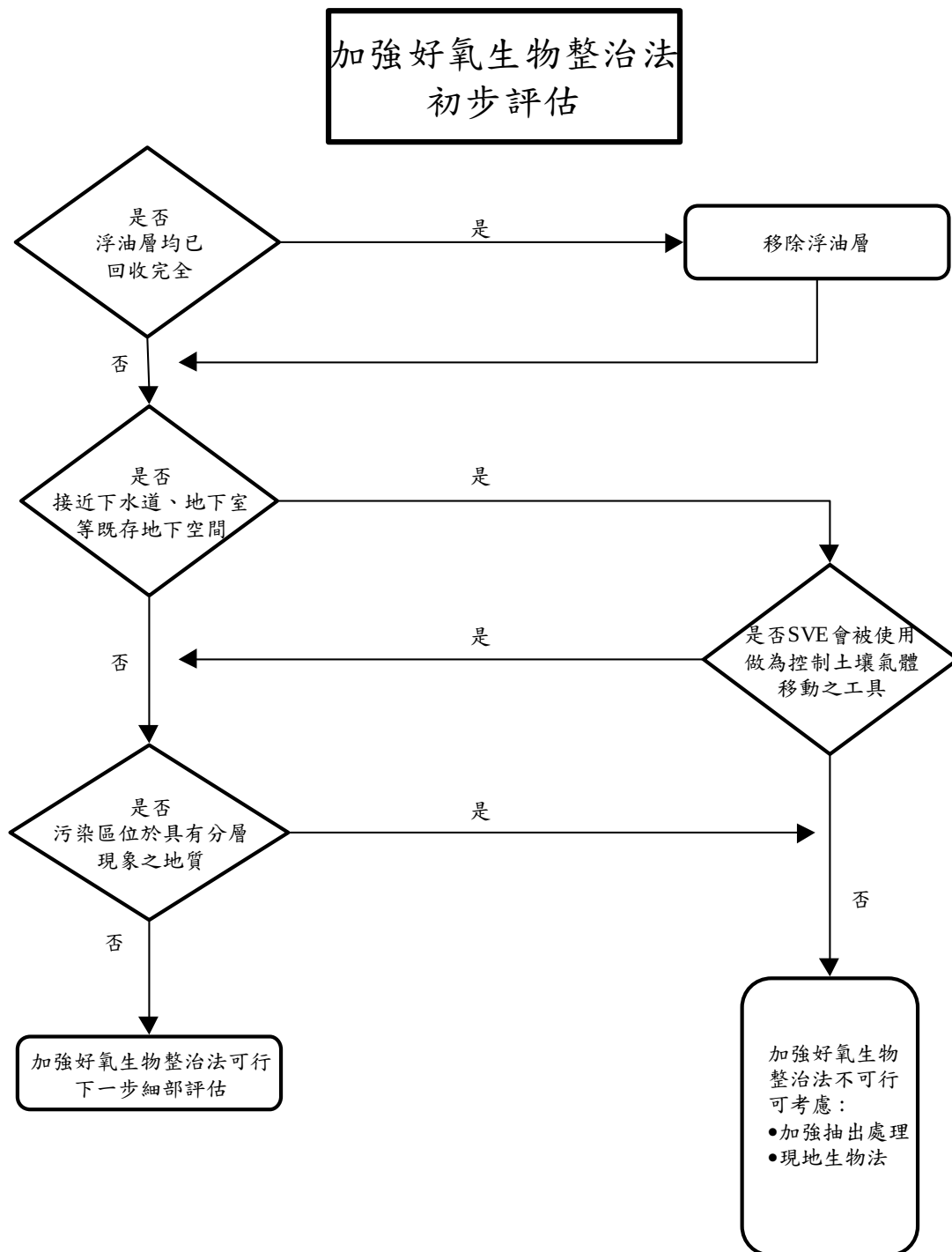


參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 11.1.1-3 過氧化氫滲濾法處理系統

11.1.2 適用條件

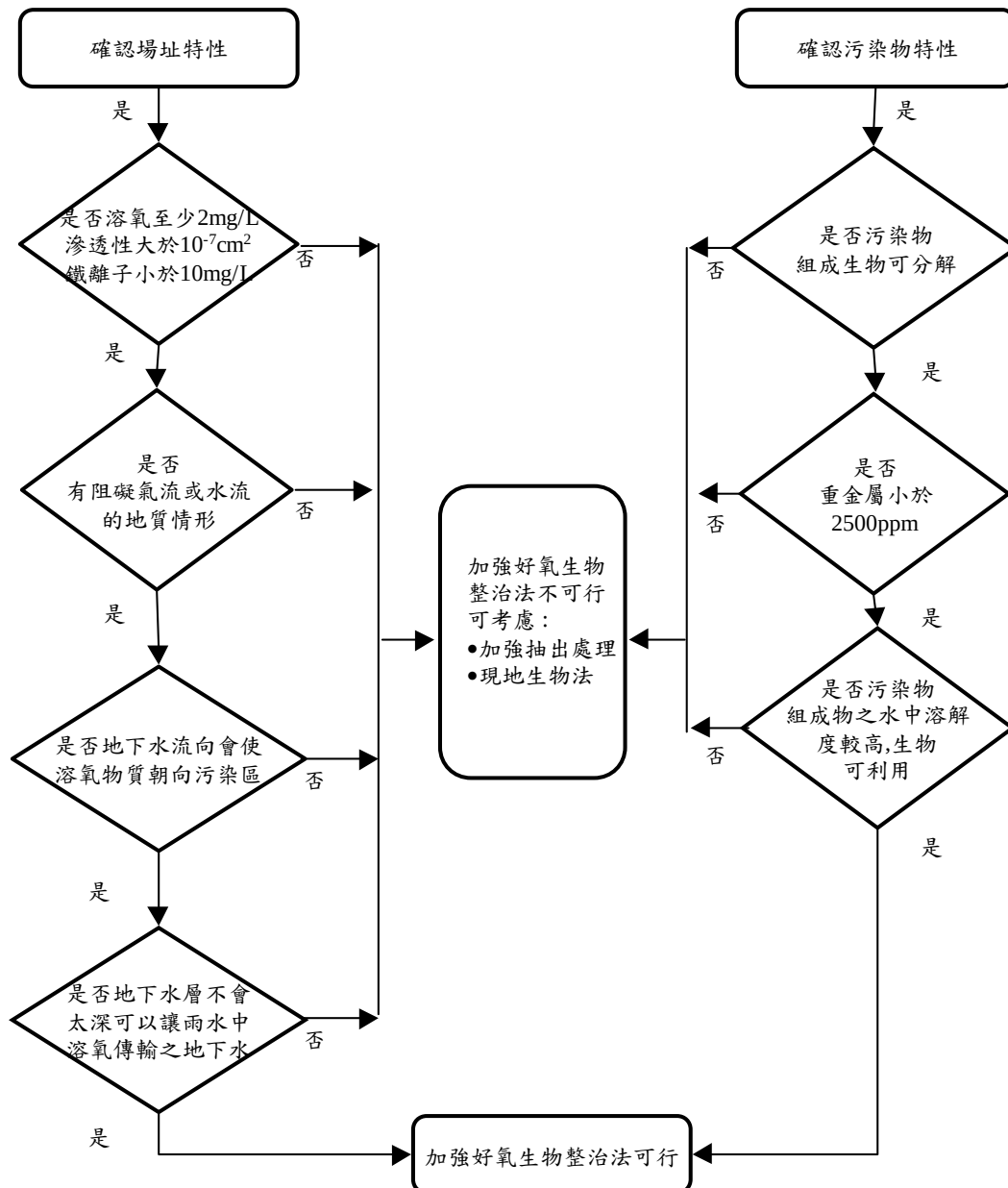
使用加強好氧生物整治法的適用性評估詳圖 11.1.2-1 所示。有關加強好氧生物整治法使用之優缺點詳述整理於表 11.1.2-1 所示。



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 11.1.2-1 加強好氧生物法評估流程

加強好氧生物整治法 細部評估



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 11.1.2-1 加強好氧生物法評估流程(續)

表 11.1.2-1 加強好氧生物整治法優缺點比較表

優點	缺點
- 對於已經在自然生物分解之場址相當有利。 - 適當的破壞油品類組成之污染物。 - 不產生廢棄物、廢氣，甚至廢水。 - 低動力耗能。 - 相對性便宜。 - 和積極性處理程序、被動式處理程序均可以整合。 - 需要場址的操作行為較少。 - 簡單的操作及監測需求。 - 比其他主動式處理如抽出注入法等，更加有整治程序的確定性。 - 可與其他整治技術結合，以前後搭配的方式處理殘餘之污染量，並達到節省整治經費之目的。	- 較其他積極性處理技術發時間。 - 可能無法完全達到背景值或非常低的整治目標。 - 需要長時間監測生物整治成效。 - 營養劑及氧氣等的注入行為，必須謹慎，並要取得環保機關許可。 - 可能並非對於所有油品類污染組成物都可以在預期之短期之內整治完成。 - 可能必須搭配其他技術，例如浮油回收等，以確認污染區能被掌握。 - 可能改變地質結構環境。 - 在某些不能完全掌握或是了解場址，可能因被錯用而失敗。 - 供氧的化學藥劑或是氣體，可能無法完全被生物利用，而是消耗在無用的地質環境中。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

11.2 整治系統操作與設計

11.2.1 整治系統設計與操作要點

有關釋氧化合物供給法、純氧注入法、過氧化物滲滲法等三種常用氧化劑對於油品污染之適用性比較如表 11.2.1-1 所示，可依據本表對照場址特性，選擇合適的化學藥劑為主要的添加物質。

11.2.2 整治系統單元

釋氧化合物供給法、純氧注入法、過氧化氫滲滲法，必須分別考量下列設備或設施以及其設置原則：

一、釋氧化合物供給法

- (一) 挖除區，讓釋氧化合物能夠緩慢的向下流動。
- (二) 處理井，用來使釋氧化合物(粉狀)能夠不沉澱，而懸浮揚起，提高接觸效率。
- (三) 監測井。

表 11.2.1-1 加強好氧生物整治法比較表

項目	釋氧化 合物法	過氧化 氫滲 法	純氧注 入法	臭氧注 入法	生物曝 氣法	生物通 氣法
優點						
不需要自動化作機具	✓					
最少的工程設計需求	✓					
較低的操作成本	✓					
可以處理不飽和層土壤	✓	✓	✓	✓	✓	✓
可以有效維持地下水週遭溶氧濃度在 8 mg/L 以上					✓	
可以有效維持不飽和層土壤週遭氧氣濃度在 21%以上						✓
相對而言較安全	✓					✓
不需要電力	✓	✓				
缺點						
對地下水對流、分散作用，和擴散的氧氣分佈，可能限制及延長整治時間。	✓	✓	✓			
場址的產氣有進入地上建物之風險			✓	✓	✓	
飽和層地下水無法處理						✓
需要現地的藥劑儲槽		✓				
需要現地產氣機具			✓	✓		
相對而言，比較少油品类儲槽污染場址使用或整治成功		✓	✓	✓		
可能需要注入井設置許可	✓	✓			✓	✓
藥劑或氣體影響範圍容易受到限制	✓					
傳輸效果較差	✓					

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

二、純氧注入法

- (一) 曝氣/注氣井。
- (二) 空壓機。
- (三) 氧氣產生機。
- (四) 自動控制機具。
- (五) 監測井。

三、過氧化氫滲滲法

- (一) 抽出井。
- (二) 注入井。
- (三) 抽出注入使用之泵、槽等。

(四) 地下水處理設備。

(五) 自動控制機具。

(六) 監測井。

11.2.3 整治系統監測

加強好氧生物整治法監測需求如表 11.2.3-1 所示，系統運轉與監測時，應注意下列重點：整治作業前詳細的評估，以及良好的規劃設計，加上操作人員的經驗，使儀器設備操作都在預定情況下進行。

表 11.2.3-1 加強好氧生物整治法建議建議監測計畫內容

監測參數	監測頻率		
	初設 7~10 天	長期運轉期間	
	每天	每週~每月	每季~每年
地下水			
溶氧	✓	✓	
氧化還原電位	✓	✓	
pH 值	✓	✓	
過氧化氫或臭氧	✓	✓	
營養鹽			✓
污染物濃度			✓
生物分解中間產物			✓
水位	✓	✓	
土壤氣體			
二氧化碳	✓	✓	
氧	✓	✓	
揮發性有機物	✓	✓	
過氧化氫或臭氧氣體	✓	✓	
土壤			
污染物濃度			✓

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

11.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

對於在地下水中的抽水、注水等作用，可能造成地下水擾動，以及局部性的水位變化。造成地下水抽出、注入之密閉式循環系統之抽出井、注入井位置可能除了需要符合污染整治效率需求之外，也必須仔細評估是否抽水、注水作用，會影響到附近地下水污染管制區外的地下水文流向、流速以及水質等，必要時應規劃足夠的水文緩衝區。一般建議小規模進行抽水試驗，以及注水試驗等，並求得影響半徑，藉此再求取大規模整治工程

之可能影響範圍，再選擇合適之幫浦設備。抽水量、注水量務必遵照規劃設計操作參數操作。

除此之外，有可能產生好氧微生物，協助進行污染物分解，但必須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數，以及確定民眾不會取用這些生菌數過高的地下水使用。

部分場址可視需要設計生物處理、化學處理、粒狀活性碳吸附等地面設置之水處理設備，以將抽出的地下水進行初步的處理，處理後的地下水除主要提供後續添加營養鹽及曝氣後回注至含水層之用外，部分可能需進行排放。若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，應符合我國污染防治相關法令，在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

11.3 成本及期程評估

以本技術而言，地下水污染物之移除單價較難以估計，因涉及地質環境適合度、地下水污染範圍大小、機具操作情形等，所以模場試驗階段，可根據可能發生降解的效率及結果，評估工程經費。但一般除了初設費用估計較為準確之外，其餘每年運轉費用必須根據實際污染削減量調整。

參考文獻

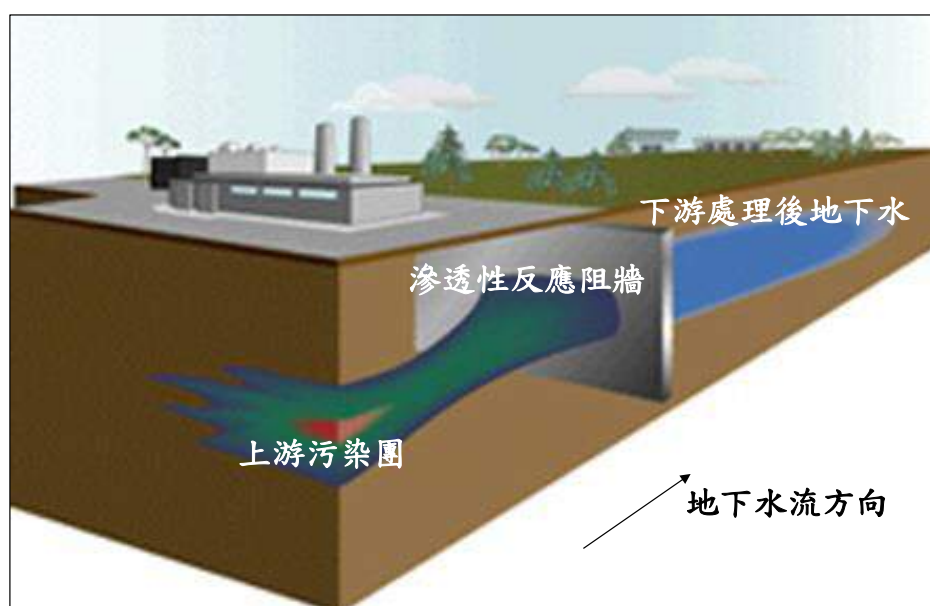
1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
3. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
4. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

十二、滲透性反應阻牆法(Permeable Reactive Barrier)

12.1 整治技術簡介

12.1.1 原理

有關滲透性反應阻牆(Permeable Reactive Barrier, PRB)的設置與功能，以簡單的示意圖(圖 12.1.1-1)加以說明。首先在發現污染源或污染團之後，在其地下水流向的下游適當位置的地底下，建構一道具有可滲透性的阻牆 (PRB)，PRB 類似一般土木建築工程施工時所挖掘設置的地下水止水牆，但不同之處在於其具有可滲透性，不會完全阻斷地下水使其水流繞道，因而改變地下水流向以及流速。這種具有滲透性的阻牆內，必須填充會降解污染物的材料或物質，流經 PRB 的地下水，經過所填充之反應物質後，污染物即被吸附、固定於阻牆內，或是經由化學性、生物性反應降解成無害物質，而處理過的地下水，則持續流往下游，但污染物濃度已降至不會危害人體健康之低風險濃度。本方法屬於一種被動式的處理方式。



資料來源：EnviroMetal Technologies Inc.網站(<http://www.eti.ca>)

圖 12.1.1-1 滲透性反應阻牆示意圖

關於 PRB 的定義，Powell 與 Powell(1998)的描述如下：「設置於地表下的反應性物質被設計做為攔截污染團、提供流經反應物的路徑以及將污染物轉變成能為環境所接受的型態，以達成阻牆下游所需之整治標的。」

早期阻牆的應用仍是以阻隔為重點，所以所建構的通常只是低透水度的泥漿阻牆(slurry wall)，這種方式是將污染物直接與外界隔絕，降低其風險性。接著阻牆技術由一種沒有「處理」的技術提升為有「處理」的技術，也就是目前所謂的反應式阻牆。常應用於阻牆的反應包括鐵粉還原、沸石吸附、活性炭吸附等。

PRB 所使用的填充物相當多元化，因應不同的目標污染物，會有不同的填充物以及反應降解機制產生，其中常用的物質包括活性炭、鐵粉、鋅粉、皂土、有機物、沸石等，其中又以鐵粉為大宗。研究層面及應用的案例較廣，其主要為阻絕處理地下水中較能由其他主動處理法所解決的 DNAPL 污染物(如三氯乙烯、四氯乙烯等)。根據美國環境保護署(USEPA)的調查，在目前北美以及歐洲的 47 個使用 PRB 的場址中，使用最多的填充介質仍是零價鐵(Zero Valent Iron, ZVI)或與之混合的反應介質(41 個場址)，其他的介質還有沸石、銅絨、鋼絨等(USEPA, 2002)。

一些研究或工程單位，也會想要改變填充物，來阻絕處理其他型態的污染物，例如屬於油品類的 LNAPL 污染物(如 BTEX)等場址。PRB 比較少見的是生物方面的處理技術應用在填充物降解的反應機制，雖然有少數的研究利用有機混合物與特定菌種結合做為填充物，以進行生物整治，但仍以脫氮或脫磷處理為主(Robertson et al., 2000)。

如前述，早期對環境工程而言，所謂的阻牆的功能單純是阻絕或限制污染團的移動或擴散，並避免污染物接觸環境敏感受體，所以填充物以高度不透水的填充物來達到其目的，例如薄泥漿(grout)、泥漿(slurry)或者直接採用連續壁在地表下形成一道「牆」。PRB 則將這個概念再向前推進，不以防堵為目的，而是要在不侷限地下水流的條件下，將污染物「固定化」或利用化學的方法將污染物轉換成無毒、更安全或更容易生物分解的物質。所以，PRB 要限制的是污染物的移動而不限制地下水的流動，這是與傳統的阻牆在概念上最大的差異。另外有類似的工法稱為反應區建置技術(Reactive Zone Formation, RZF)，概念與 PRB 很相近，惟工法上並不建構

阻牆，而是利用密集注入特定的物質，使得地下的特定區塊成為一個具有反應特性的「大型反應槽」，這也是一項類似於反應式阻牆的技術。

12.1.2 適用條件

本項技術係針對地下水污染而進行的工程設計，並非針對不飽和層土壤的污染所規劃處理。因此，若場址中若有土壤層污染的情形，必須先行以其他工程方法移除之。

由於 PRB 法並非在主要污染團內進行抽除、加藥等直接處理措施，而是以阻絕污染物朝地下水下游方向擴散的有效工程方法，其基本應建立於污染場址健康風險管理的基礎，亦即，因為適當的阻絕及處理，污染團下游民眾減少了接觸遭污染地下水的風險，達到與污染團主動式處理同樣的目的與功效。其好處則是不用昂貴的主動式處理技術，日常的機械維護操作成本也較低，因本項技術之選用，涉及非主動式處理之工程方式，其是否合宜，仍必須由環保主管機關審查，確認健康風險評估結果、場址土地利用價值以及分析技術可行性等。

此外，PRB 適用之處理污染物，目前也有其技術上的限制。最常用、技術也最成熟的 PRB 內填充物係為零價鐵，零價鐵可處理的污染物歸納如表 12.1.2-1。

依照透水性反應阻牆反應區的反應機制(如：降解、吸附與沉澱)，並針對不同的標的污染物與機制可採用多元的反應介質，其中常用的反應介質如表 12.1.2-2 所列(Vidic and Pohland, 1996)。

目前有關 PRB 實場應用案例，多為針對含氯有機化合物，技術成熟度較高，其使用零價鐵，乃是一種溫和的還原劑，因此其去鹵化(dehalogenation)的反應速率會因不同的鹵化有機污染物而改變。一些研究指出，決定降解速率的主要因素是阻牆介質的比表面積或鐵表面積/孔隙水體積(Matheson and Tratnyek, 1994)，同時降解速率通常是鹵化有機物的擬一次反應(pseudo-first-order)。但是漸漸的，針對其他類型污染物的發展也逐漸研究推展中，但其成熟度有待確認。若要將本技術應用於國內油品類污染場址者(例如針對 TPH 及 BTEX 污染物)，應由整治單位提出相關數據彙整完善

的整治計畫，由環保主管機關整體考量地理環境、人文社會因素，以及環境健康風險等，許可本項非主動處理技術的執行。

有關 PRB 使用之優缺點如表 12.1.2-3 所示。綜合其優點係此項技術不需長期使用能源，不論在成本與維修上都較傳統的處理方法(例如抽出處理法等)經濟。當然，PRB 也有其缺點；例如：污染團仍會長期性的存在；結構上阻牆必須建立在不透水層或岩盤之上，以防止污染團垂直方向的污染；在長期使用後，如何更換填充物質；更換後的填充物該如何處置等，這些都是必須注意且待研究突破的重點。但基本上，整治成本上的誘因，促使部分整治單位願意投注於本項技術之執行及研究；而 PRB 能夠降低、阻絕地下水污染下游民眾接受到污染物的風險，也是部分國家的法令規範或是環保主管機關能夠接受本項措施之主要原因。

此外，著眼於高密度開發國家對於有限土地資源的需求，PRB 節省了地上整治設備之操作空間，在阻絕整治處理的期間，只要做出適當的阻絕與民眾接觸的機會，土地可以有限度被規劃利用作為其他用途，例如公園、停車場、大型貨物儲置廠等，這些是除了工程技術之外，有效的場址管理誘因及優點。

表 12.1.2-1 可利用零價鐵處理的有機污染物

有機物類別	代表性污染物
芳香族	苯、甲苯、乙苯
甲烷類	四氯甲烷、三氯甲烷、二氯甲烷
乙烷類	六氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、二氯乙烷
乙烯類	四氯乙烯、三氯乙烯、反-1,2 二氯乙烯、正-1,2 二氯乙烯、1,1- 二氯乙烯、乙烯基氯
丙烷類	1,2,3- 三氯丙烷、1,2- 二氯丙烷
其他	六氯丁二烯、三氟三氯乙烷、二溴乙烷

表 12.1.2-2 常用之反應介質及其機制分類

標的污染物	反應機制類別	反應介質
有機	降解	零價鐵
		釋放氧化合物
		超微菌
		聯二亞硫酸鹽
		休眠態(resting-state)微生物
	吸附	沸石
		活性碳
		有機皂土
		界面活性劑改造矽酸鹽
無機	吸附	泥煤
		鐵氧化物
		皂土
		沸石

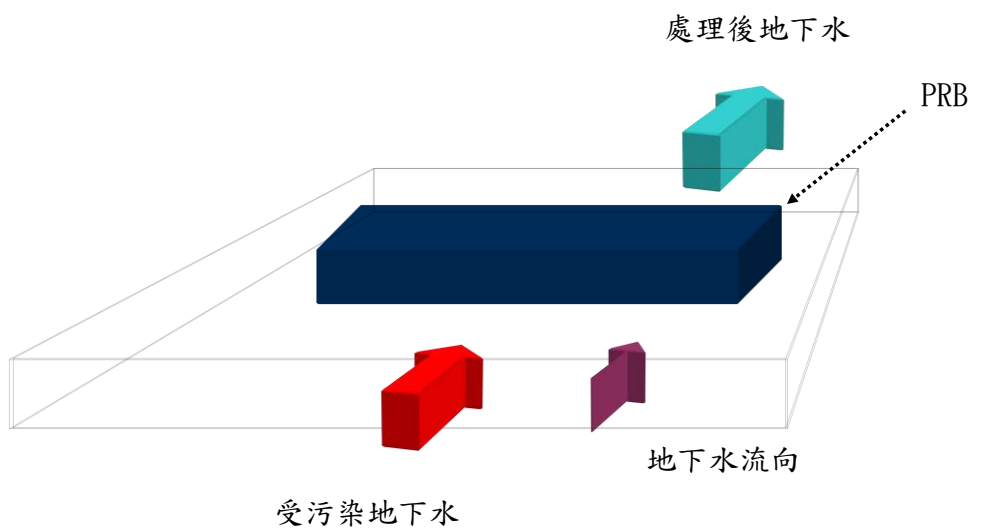
表 12.1.2-3 滲透性反應阻牆法優缺點比較表

優點	缺點
- 同時具有地下水污染的阻絕及整治等雙重功能。 - 因阻絕作用，降低了地下水污染下游民眾，接觸到高污染地下水的風險。 - PRB 內可以用不同的填充物質，以進行不同類型污染的阻絕整治，包括物理性、化學性、生物性整治等。 - 不於污染團直接處理，可以避免污染團遭到移動、擴散的風險。 - 操作維護成本較低，操作期間無需機械維護等人員操作。 - 地面上設置整治機具空間需求較小，土地能有效利用。 - 地上機具較少，民眾視覺觀感較佳。	- 污染團長期存在。 - 無法處理土壤污染。 - 當需要更換填沖濾材時，必須重新開挖組牆結構物，其工程規模可能較大。 - 初設成本相對而言較高。 - 施工方式與一般以設置地下水整治井(抽出或注入)之整治工程比較，其必須挖出設置阻牆之渠道，地面施工影響範圍較廣。

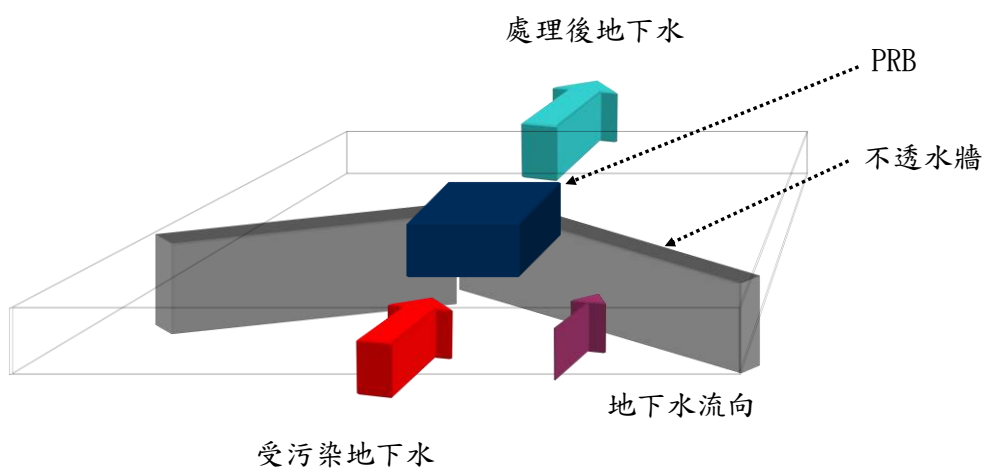
12.2 整治系統操作與設計

12.2.1 整治系統設計與操作要點

阻牆的設置工法會依實場需求而有所不同，基本上，PRB 的設置方法有二種：連續式阻牆(continuous PRB)與閘道式阻牆(funnel-and-gate PRB)。阻牆構造示意圖則如圖 12.2.1-1 所示。



(a)連續式阻牆



(b)閘道式阻牆

圖 12.2.1 透水性反應式阻牆之工法

連續式阻牆是直接在地點，直接開挖寬度足以攔截污染團的溝渠並放入反應性填充物質(如鐵屑、活性碳)形成阻牆。因為必須確實攔截流動的污染團，在理想狀態下，其深度須超過污染團的厚度，寬度也必須足以確保污染團不會由阻牆邊界以外流過。在結構上又可依照其構造的深度分為懸吊型(hanging)與錨定型(anchored)，二者主要的差異在於阻牆結構底部固定的位置。前者底部以能涵蓋污染團厚度為準，並不固定在不透水層，所以有污染團潛流(underflow)的可能，但在施工上較經濟；後者則是將結構體固定在不透水層，攔截整個含水層，所以可以避免污染團自阻牆底部「潛逃」，當然其施工的困難度與成本就相對提高。連續式阻牆在施工上還有一項挑戰，即在飽和層施工時，因為有地下水迅速入滲至溝渠以及溝渠崩塌的潛在危險，所以必須在溝渠挖掘時搭配迅速的反應物質或填充物料的回填，也增加了工程進行的困難度。此外，若污染團太寬，在建構技術與成本將更形複雜。

開道式阻牆採用不透水牆或結構，將地下水導流至透水性處理區域或開道，如圖 12.2.1-2 所示。導流的不透水牆(漏斗)一般是由連續壁(sheet piling)、泥漿牆或其他不透水性物質組成，並偏好植入不透水層(黏土層或岩盤)以避免污染物潛流。漏斗的安置主要目的是將受污染之地下水流加以包圍並導向具備反應物質的「開道」。由於是將大範圍的地下水導向較小的開道，地下水的流速會比自然狀態的流速高。在漏斗部分的設計必須完全包圍污染團的路徑，並且防止污染團由阻牆的邊緣流出。

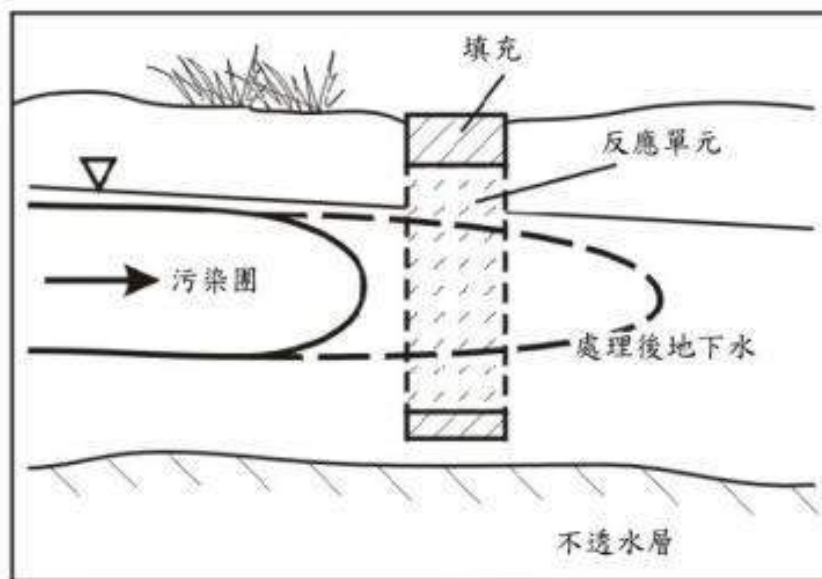
開道的部分，其設計形狀雖然沒有太多的限制，但通常是採用長方形的結構，近來也有一些不同的架構，其中包括回填沉箱、填充介質的中空震動鋼樑以及插入式反應器。典型的方正開道可以先暫時押入連續鋼板或建構可以移除的地下牆，然後將所圍成區塊挖空並抽乾其中的水，於其內部再填充反應物質。這樣的工法甚至允許結合更多的功能，例如額外的處理區或監測區。反應介質的透水性也是相當重要的特性，在填充於開道內的反應介質的透水性必須不小於週界的透水性，以減少流體的限制；同時，開道的長度必須考量地下水與反應介質有足夠的接觸與停留時間，這些均可藉由地下水數學模擬工具來決定。此外，「漏斗」與「開道」的連接處，在設計與建構二者的連接時，必須避免受污染之地下水經過不透水層與透

水層連接的空隙向下游流動。

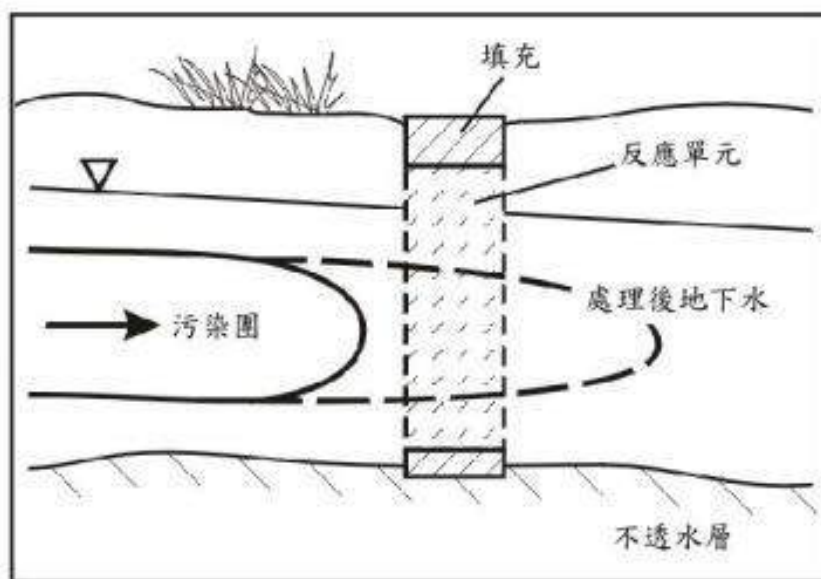
採用閘道型阻牆也有其需要注意的問題，首先在設計與安置前必須進行相當謹慎的場址污染調查工作。而在許多問題中，最重要的問題是地下水繞過閘道型阻牆系統的可能性。即使在閘道段的透水性相對於原水體已經相當的好，當閘道末端再一次接觸到下游的地下水體時，透水性會立即下降至原水體的透水性。因此，閘道區域與下游的閘道/地下水界面能夠提供等同於不透水導引牆(漏斗)所收集之地下水的通量是相當重要。然而要讓由攔截面積相當大的漏斗所收集的地下水量，完全通過閘道下游與原水體界面的小面積區塊，幾乎是不可能的事，因此在設計閘道型阻牆時要考慮在閘道區間所造成的水頭差異。曾經有研究指出這種水頭差異可以高達 7 至 10 英尺(Cushing et al., 1996)。

填充於滲透性反應阻牆的反應介質有一些基本的需求必須於使用前加以確認，包括：

- 一、 不會造成對環境有害的化學反應
- 二、 不會在與污染物反應的過程當中產生有害之副產物；
- 三、 介質本身不會成為污染源；
- 四、 材質或物質本身能長期存在且耐久耐用；
- 五、 粒徑均質以減少對水流造成太大的影響以及降低阻塞的可能性；
- 六、 介質本身不會危害人體以確保施工人員的安全。



(a)連續式阻牆



(b)開道式阻牆

圖 12.2.1-2 依結構深度分類之 PRB 工法

12.2.2 整治系統單元

一個完整 PRB 工程，最少應包括下列設備設施或組成單元：

- 一、 填充物質(例如零價鐵粉、活性碳等)。
- 二、 連續壁、泥漿牆等不透水牆(導流牆，視需要設置)。
- 三、 回填沉箱(開挖區不飽和層之回填，為避免遭受地面上重壓破壞，以特殊沉箱取代一般回填，視需要設置)。
- 四、 支撐架(避免結構強度不高之填充區崩陷，視需要設置)。
- 五、 下游及周界地區之地下水監測井。

12.2.3 整治系統監測

滲透性反應阻牆法，最重要的是以確保地下水污染團之擴散方向一如預期經由滲透性阻牆，且確實在下游方向被降解。定期或不定期監測污染區資訊，可預警及防止污染範圍擴散；若監測過程中發現異常，污染物(尤其是地下水污染部分)有擴散至預期阻絕區範圍外時，必須以緊急應變、阻絕系統進行處置，甚至必須採取積極性的整治措施。監測計畫應包括：

- 一、 主要污染項目。
- 二、 二次降解產生之化合物項目。
- 三、 監測範圍。
- 四、 監測頻率。

12.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

PRB 屬於現地處理方法，並無地面處理設備，地下水也未被抽出，類似非主動式污染團處理方式，執行過程中並不會於地面排放廢水、廢氣或廢棄物。但是對於地下水的主要污染區而言，若其污染物持續向下游方向擴散而未能通過阻牆，或是其他因素造成地下水流場的改變，都將可能造成污染團擴散未如預期。因此，場址內持續性的地下水監測必須確實執行。另外，若於執行期程中有更換阻牆填充物之行為者，廢棄之填充物若無法

回收再利用，則必須送交合格之清運及處理業者妥善清理。

12.3 成本及期程評估

目前以 PRB 進行油品類污染處理的實場規模並不多，因此以在一篇位於加州的含氯有機物實場處理技術示範的研究報告(USEPA, 1998)結果來說明 PRB 的經濟成本，該研究係利用抽出處理(操作時間九年)與 PRB 處理(操作時間二年)受三氯乙烯、二氯乙烯及二氯二氟代甲烷-113(Freon-113)污染的地下水，其處理地下水的成本均為 38 美元/1000 加侖，但抽出處理的年操作維修成本(113,200 美元，約新台幣 3,962,000)比 PRB 處理(83,500 美元，約新台幣 2,922,500)高出甚多，長期下來，PRB 處理技術的總成本將遠小於抽出處理。此外，PRB 設備安裝完成後，可立即降低阻牆下游的風險與危害，因此於風險控管方面亦是一項有力的工具。但由於必須考慮地下水流速、地質狀況、處理負荷、污染團大小等因素，故整治期程並無法確實估計。惟因採取本項處理技術之主要考量係非主動式處理方式，以阻絕降低達成污染物擴散風險之目的，因此，其阻絕期間往往較主動式處理為長。

參考文獻

1. Powell, R. M. and Powell, P. D.(1998)Iron Metal for Subsurface Remediation, The Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation(Robert A. Myers, ed.), 8, 4729-4761, John Wiley & Sons, Inc., New York.
2. Robertson, W.D., Blowes, D.W., Ptacek, C.J., and Cherry, J.A.(2000)Long-Term Performance of In Situ Reactive Barriers for Nitrate Remediation, Ground Water, 38:5, pp. 689-695.
3. USEPA(2002)Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
4. Matheson, L. and Tratnyek, P.(1994). Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal, Environmental Science and

-
- Technology, 28, 2045-2053.
5. Vidic, R. D., Pohland, F. G.(1996)Treatment Walls, Technology Evaluation Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA.
 - 6.Cushing, R., D. Graveling and P. B. McMahon.(1996)Overview of the Denver Federal Center, Remediation Technologies Development Forum, Permeable Barriers Action Team, Denver, Colorado.
 - 7.USEPA(1998)Cost and Performance Report-Pump and Treat and Permeable Reactive Barrier to Treat Contaminated Groundwater at the Former Intersil, Inc. Site Sunnyvale, California, September.
 - 8.「固定化微生物擔體於反應式阻牆技術之應用」，黃智、張欽裕、林淑滿，財團法人中興工程顧問社，2004 年 10 月。
 9. GERMAN PERMEABLE REACTIVE BARRIER NETWORK(2002)Rubin Project Case Study-Offenbach(<http://www.rubin-online.de/english/rubinprojects/offenbach>).
 10. Bowles, M.W.(1997)The Trench and Gate Groundwater Remediation System, Master Thesis, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
 11. RTDF(2000a)Permeable Reactive Barrier Installation Profile-Alamenda Point(<http://www.rtdf.org>)
 11. RTDF(2000b)Permeable Reactive Barrier Installation Profile-East Garrington Alberta Canada(<http://www.rtdf.org>)
-

十三、電動力法(Electronics Remediation)

13.1 整治技術簡介

13.1.1 原理

電動力法為一種利用電化學原理的土壤污染整治方式，常見於土壤重金屬污染的場址。然而近年來其技術發展快速，除了重金屬污染場址外，對於遭受油品污染之場址，國內外亦有相關的研究及實場經驗。

其原理簡而言之，就是於受油品污染的場址中，設置正負電極，電極藉由通電過程，可引起下列幾項作用：

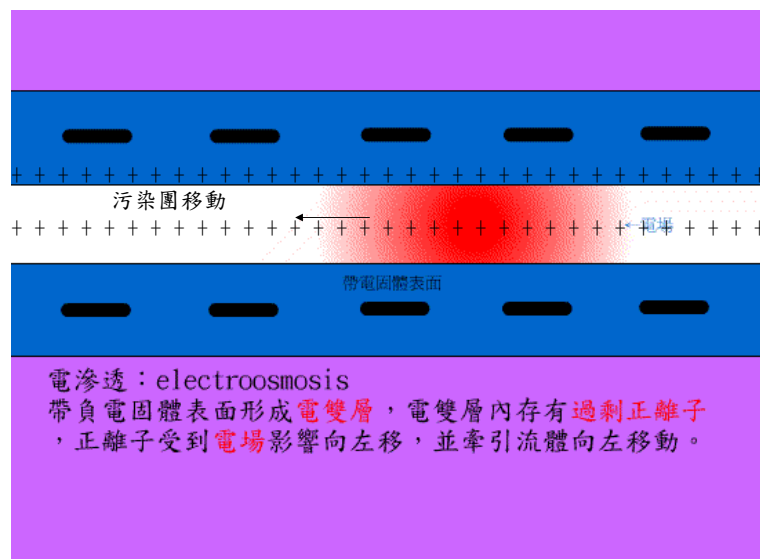
- 一、 電泳作用；
- 二、 電滲透作用；
- 三、 電解作用；
- 四、 電遷移作用。

此四種功能均有其獨特的作用，其中電遷移與電泳作用能促使土壤水分中之離子及帶電膠體因所施電場而移動，其方向視帶電極性而定。電解作用乃利用賈瓦尼效應於孔隙水受到電流通電量的影響所引起的化學反應，並且在正極釋出氧氣，在負極釋出氫氣。電滲透作用則為這四種電動力作用中，應用最廣泛的土壤污染整治技術。

電滲透流係在外加電場的情形下，電解質溶液相對於不動的帶電固體表面之運動現象(如圖 13.1.1-1 所示)，一般若含有帶負電的固體表面雙電層內之電解質溶液，存在有較多不穩定之正離子，這些正離子若受到外加電場的作用，會朝負極方向移動，這些因離子受到電場作用而移動之現象，稱之為電滲透流作用。

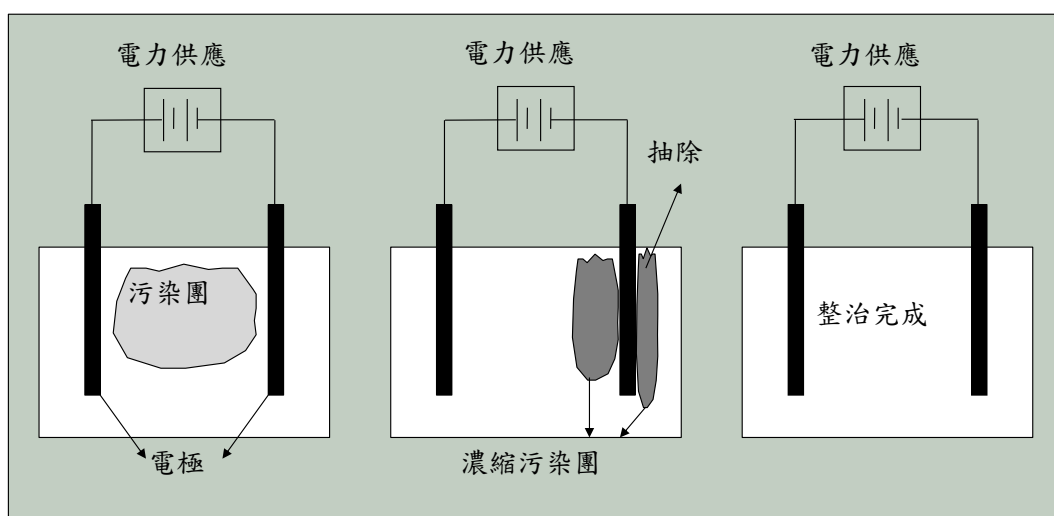
在實務上，電動力法的應用，係將正負電極棒插入遭受污染的土壤區域，在通以適當的電壓之後，兩個電極棒之間會產生電場，引導土壤中的

電解質溶液移動，因而去除土壤中的污染物(如圖 13.1.1-2 所示)。其類似電解反應。電動力法進行時，氧化狀態的陽極液體 pH 值會下降，而還原狀態之陰極槽液 pH 值則會上升，因此，陽極產生之氫離子，會隨著電滲透之流向，往陰極移動。而因為酸性水溶液之流動，會降低土壤之緩衝能力，而改變污染物在土壤中的分布關係，處理後之污染物將集中於電極端後藉由抽除方法移除之。



資料來源：<http://140.112.22.210/lab/colloidlab/images/electroosmosis.gif>

圖 13.1.1-1 電滲透流示意圖



資料來源：翁誌煌，受有機污染場址之物化整治技術研究，國科會

圖 13.1.1-2 電動力法土壤污染現地處理概念

13.1.2 適用條件

電動力法適用之條件說明如下：

一、土壤地下水條件

- (一) 一般而言，電動力法於土壤飽和層及地下水不飽和層皆可適用。
- (二) 其他整治技術較難應用之低滲透性污染場址，電動力法也可適用。因此不論滲透性高低，電動力法均可適用。
- (三) 土壤孔隙水界面之導電性必須考量。一般電滲透作用能促使土壤孔隙中性液體向負極傳送，同時孔隙液體之導電性亦是液體傳送的關鍵，若土壤層中孔隙液體之導電性不佳，宜選擇導電性良好之添加液，以增加系統之導電性。

二、污染物性質條件

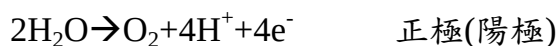
- (一) 水溶性愈高之物質愈適用，因為非水溶性物質無法在水溶液中形成離子態，因此無法於電極所造成之電滲透流中產生移動。
- (二) 分配係數低之物質較適用。
- (三) 污染物濃度愈高，會影響污染物之移動性及傳導性。
- (四) 污染物能以離子態呈現者，其移動性愈佳，愈能被集中後去除之

如同前述，電動力法以往係由土壤重金屬的整治及研究所開始起步。因此，相關土壤性質對於電動力法之影響的研究及討論相當純熟。但對於土壤性質的差異對於電動力法處理油品類污染場址，是否能如同對於重金屬影響一般，則結論仍較為不同。惟近來許多場址經驗證明，油品類污染場址在電動力法之應用方面亦相當適用的，在考量上述地質環境等情形之後，油品污染物之去除，同樣也能夠達到預期的效果。

使用電動力法做為土壤現地整治方法的優缺點整理如表 13.1.2-1 所示。其應用實係著眼於此項技術不需添加任何化學藥劑，因此不論在成本及操作維修上都較傳統的處理方法(例如抽出處理法等)經濟；亦由於不添加藥劑的關係，對於場址二次環境污染的影響可以降至最低。

至於本項技術的缺點，一般最常關切的是有關場址土壤系統酸化的問

題。由於電動力法操作時，涉及了水的電解反應，正極端會產生氧化反應而產生氫離子，而負極端則相反，由於還原作用而產生氫氧離子，其化學作用反應式如下：



由於離子的遷移及擴散作用，氫離子會由正極朝負極方向移動，而氫氧離子則移動方向相反。但由於在外加電場的作用之下，氫離子移動性會是氫氧離子的兩倍以上，因此兩根電極棒之間區域大部分會由氫離子所佔據。所以隨著整治時間越長，場址中土質呈現酸性的情形越趨嚴重，這是應用本技術時所應注意的事項。也因此許多專家目前也持續研究如何避免土壤酸化情形產生，同時確保整治效果。例如可添加系統操作液，這種系統操作液最常見的是緩衝溶液，可減緩場址酸化的速度。

表 13.1.2-1 電動力法優缺點比較表

優點	缺點
- 適用於各種性質的污染土壤，除了砂質土之外，尤其是淤泥、低滲透性的黏土性質之土壤等，效果較為顯著，已有許多經驗證實整治成功之可行性。 - 不需添加任何的化學藥品於土壤中。因此，較其他如化學處理方法而言，更具有減少二次公害發生情形之機率。 - 不需花費大量經費購買化學藥劑。因此，可降低整治期間的維護操作成本。 - 電動力法能夠處理之污染物種類較多，除了有機類油品污染等之外，對於重金屬污染、DNAPL、放射性物質等污染場址亦適用。因此，對於多重污染物類型之場址而言，可能較為適用。 - 在均質土壤中較傳統抽取處理方法有效，且於低滲透性土壤中，當採用抽取方式為困難且緩慢時，其可有效地驅動污染物遷移。 - 容易搭配其他類型的整治技術併同處理。 - 整治經費較傳統技術低，僅約 50~130 美元/噸。	- 場址運作時間越長，越有可能產生場址地下環境酸化的情形。 - 場址運作時間越長，須注意有可能造成電性逆轉之情形。 - 場址中可能產生沉澱的現象，尤其是在電極的附近。 - 隨著整治時間越久，土壤層中因沉澱或細小顆粒的移動，造成場址整體電阻增加，使得初設階段之固定電壓不足，降低污染物移動的效率，因此必須再投入其他設備或方法，使得整體電阻增加速率可以減緩。 - 搭配其他類型處理技術例如現地化學氧化法時，雖然效率較快，但須注意交互作用的影響，避免二次降解產物於地下環境中產生，故必須加以定期監測。

13.2 整治系統操作與設計

13.2.1 整治系統設計與操作要點

一般而言，影響電動力技術之污染物移除因子主要包括：

- 一、 鄰近電極之化學反應；
- 二、 土壤含水率或飽和度；
- 三、 土壤組成；
- 四、 地下水導電度 pH 等水質特性；
- 五、 土壤 pH 值及其梯度；
- 六、 污染物種類與濃度；
- 七、 施加之電流密度；
- 八、 電極的排列方式；
- 九、 電極的材質。

在進行整治工程之前，規劃設計階段必須考量上述因子，提出實驗室或是模場數據加以佐證，而主管機關也可以根據這些數據，確認整治成效是否能在預定之其成之內有效完成。而本技術在應用時主要之設計規劃要點包括：

一、地質型態

電動力法幾乎不受土壤孔隙分布與土壤粒子大小的限制，因此，在電場所形成的電位差下的電滲透流可以於微細顆粒土壤中，形成均勻有效的流體與質量傳送，而在低滲水性的土壤地下水污染場址中，更可以顯示其優越性，因此，土壤的型態幾乎可以不需要特別的限制。

二、污染物種類

一如前述，大部分電動力法的復育技術著重在重金屬的整治經驗，但近期對於汽油等油品類物質，以及揮發性有機物如苯、二甲苯等常見於油品污染場址的物質，也相當有效，因此，對於類似加油站、儲

油槽等油品類污染場址應該是可行的，但是必須注意的是，若污染場址中含有較重油類等水溶性較差的油品物質，可能必須再提出相關試驗數據驗證其單一場址的可行性，否則這些黏度較高，水溶性較差的物質可能無法達到良好的去除效率。

三、土壤含水量

一般而言，土壤含水率較高的情形下，污染物的去除率會較高，但是在某些場址中也發現不同的含水率並不會對於電滲透係數有太大的影響。

四、處理液的化學性質

在整個電動力處理過程中，電極槽液被視為一個清潔溶液，而去除污染物過程為土壤沖洗程序，其目的為控制系統的 pH 值，減少沉澱作用的發生，增加污染物移除的質傳效率，常見的有醋酸、檸檬酸、人工地下水及自來水等。

五、電極型態及位置

常見的電極型態及種類為石墨電極以及不鏽鋼電極，石墨電極具有惰性，不易在系統中釋放出離子而造成干擾，而不鏽鋼電極則較適用於場址的現地環境。電極放置方式則有水平放置以及垂直放置，隨著電極放置的方式所產生的電位坡降，會影響液體流動的狀況及移除效率。

六、電極間距

處理系統的電極間距，一般應用上常用的電壓坡降為 1V/cm，在適當的電力系統下，電極間距一般為 3 公尺左右，但仍必須依照現場狀況測試最大有效距離，一方面避免距離太遠，造成電解效率降低，一方面避免太近造成干擾及設置成本過高。

13.2.2 整治系統單元

一個電動力法整治工程，最少應包括下列設備設施或組成單元：

一、 整治井(為設置電極板之用途)；

- 二、 電極板；
- 三、 系統操作液(緩衝溶液，調節土壤 pH 值)；
- 四、 供電系統(一般為提供直流電壓之電源)；

隨著電動力法現場整治工作及研究經驗之發展，已有許多改良型之電動力法整治設備，例如：

- 一、 螯合劑添加系統：添加螯合劑使得土壤中集中於電極之離子能夠陸續被螯合，減少電阻增大、電壓不足，而造成電力系統的消耗。
- 二、 pH 控制系統：添加鹼液或緩衝液等物質，減緩土壤酸化情形速率。

13.2.3 整治監測

電動力法的監測系統，最重要的是防止整治過程中土壤酸化的情形，土壤酸化雖然不至於直接造成污染擴大或是人體危害的情形，但對於污染物的移動性卻有直接的影響，因此整治過程中對於土壤 pH 必須加以監測。此外包括土壤導電度、土壤含水量等，可以藉由這些參數變化確認是否場址在正常的操作下進行整治，若土壤性質變異性增大必須注意是否已發生不正常操作，可能間接造成污染物朝非預期之方向移動。本項技術建議之監測計畫內容應包括：

- 一、 主要污染項目。
- 二、 二次降解產生之化合物項目。
- 三、 監測範圍。
- 四、 監測頻率。

13.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

利用電動力法的基本前提，即考量在整治過程中，不灌注任何危害性的化學物質到地下環境之中，因此較不易造成二次污染危害。但須注意的是，在操作過程中必須移除負極端之高濃度污染物。若操作設備位於工廠內，產生之廢液一般建議可納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，則

應符合我國污染防治相關法令，設置必要之廢、污水處理設施；且集中移出之污染物質應委託合格之清除/處理機構妥善清理。

13.3 成本及期程評估

一般而言，每噸土壤處理費用約 50~130 美元(約新台幣 1,750~4,550)。在理想情況下，運用電動力法之整治期程約需數個月至 1 年，惟這些多為經驗值，必須視場址大小以及土壤粒徑、含水量、密度等個案而定。

參考文獻

1. 「土壤及地下水污染之電動力整治技術介紹」，楊金鐘，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，2004。
2. 「奈米鐵粉結合電動力法處理含硝酸鹽土壤之研究」，李曉嵐，國立中山大學碩士論文(指導教授楊金鐘)，2004 年 8 月。
3. 受有機污染場址之物化整治技術研究，翁誌煌，國科會，2000 年。
4. 「以電動力法處理受三氯乙烯及單氯酚污染粘質土壤之研究」，林裕雄，國立中興大學碩士論文(指導教授謝永旭)，2000 年 6 月。
5. 「循環改良式電動力系統之電化學反應」，廖盈智，朝陽科技大學碩士論文(指導教授章日行)，2003 年 6 月。
7. 國立台灣大學化學工程學系膠體懸浮液研究室網站，網址：<http://140.112.22.210/lab/colloidlab>。
8. 「電動力法於地下水污染場址之整治評估」，王奕森、鄭人豪、林文宏、洪宗憲、姚俊宇，第一屆海峽兩岸土壤與地下水污染整治研討會論文集，2002。
9. Yang, J.W., Lee, Y.L., Park, J. and Kim, S.J.(2005)Electrokinetic remediation-Research status and case study, in Proceedings of the 11th Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering 17-18 January 2005, pp. 37-41, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand.
10. EPI(2003)MTBE ElectroChemical Remediation Technology, Electro-Petroleum Inc. and ElectroChemical Process, LLC, 24 July

十四、植物整治法(Phytoremediation)

14.1 整治技術簡介

14.1.1 原理

植物整治法係將植物栽種於污染場址土壤上，利用植物降解、吸收、涵養、固定以及轉化分解土壤中的污染物，如圖 14.1.1-1。這是一個傳統的處理方法。雖然工程方法簡單，但是近年又逐漸受到整治單位的重視。在部分特殊條件下，許多場址開始進行實場的整治復育施作，也有相當良好的成效。最重要的是其生物復育的型態，除了不添加化學藥劑，對於場址環境的二次危害降至最低之外，整治場址的植物生態景觀，對於場址周圍民眾視覺觀感而言較為和緩，且接受度較高。

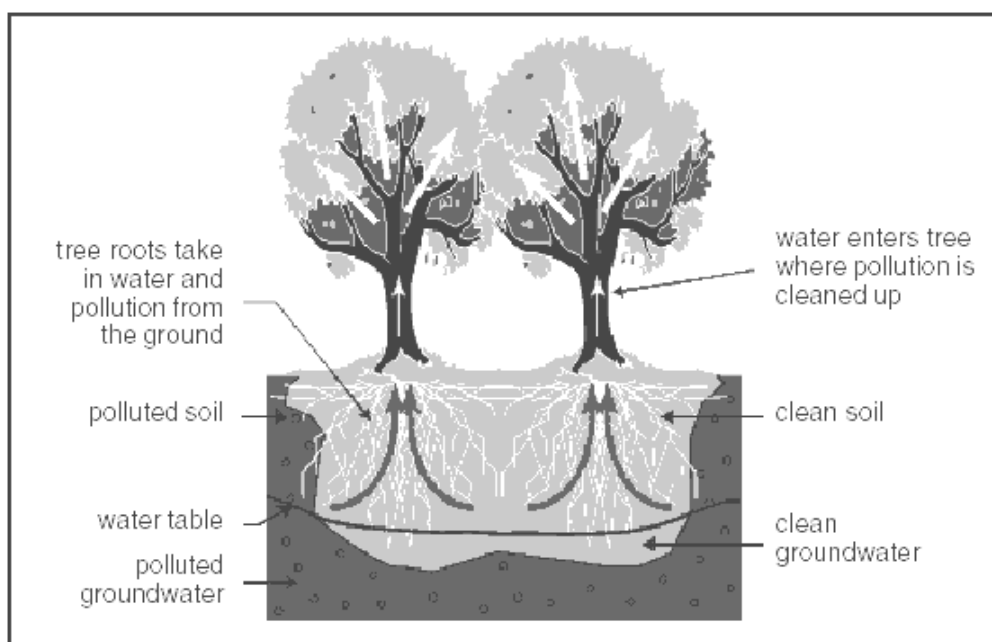
利用植物整治法一般可提供兩種功能：一為污染源控制，可避免污染物溶解於地下水中而流動到其他區域。二為污染團的捕捉，植物的根系可將污染團侷限於一定的範圍內，避免污染擴散而造成對受體的影響(New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL, 2005 台美講習會)。

植物整治法原理雖然簡單，但是針對不同類型污染物、土壤性質以及環境氣候等，都有其搭配上的適用性研究需求。例如，適用於重金屬類型污染場址的復育植物；對於有機污染物如油品類型之污染物場址就不一定適用。此外，本項方法主要針對植物根部生長範圍的淺層土壤效果最大，因此最常見於重金屬的污染場址，因重金屬污染場址之土壤污染深度往往僅侷限於土壤表層，剛好為植物根部生長所可達之區域。而對於油品類等有機性物質之污染場址而言，因污染物往往不僅侷限表層土壤，因此必須再加以搭配其他方式(如挖除離地處理)，搭配植物整治的整治方法施工。

此外，污染物濃度可能也是本項技術關鍵之一，因為濃度太高可能對植物造成毒害，因此，技術成熟度可能還須檢驗。一般建議在全面植栽之前，應先完成小區域規模的試作，檢驗其涵容能力限值。

植物整治法特別適合在污染程度尚未太嚴重之場址，植物根部才能在

吸收水分與土壤中營養成分之同時，將污染物一併攝入，最後達到去除污染物的目的。植物根部的深度決定可以去除污染物質的深度，一般而言，樹木的根部因為比一般小型花草類植物的根部更能夠深入土壤的深層，因此對於較深層的污染場址而言(包括欲以本方法處理地下水)，可能必須考慮用樹木類等大型植物進行整治。



資料來源：A Citizen's Guide to Phytoremediation, U.S.EPA。

圖 14.1.1-1 植物整治法土壤污染處理概念

植物整治法特別適合在污染程度尚未太嚴重之場址，植物根部才能在吸收水分與土壤中營養成分之同時，將污染物一併攝入，最後達到去除污染物的目的。植物根部的深度決定可以去除污染物質的深度，一般而言，樹木的根部因為比一般小型花草類植物的根部更能夠深入土壤的深層，因此對於較深層的污染場址而言(包括欲以本方法處理地下水)，可能必須考慮用樹木類等大型植物進行整治。

當然，場址若直接栽種植物，屬於現地整治方式。若因上述因素，深層土壤污染必須花費成本及時間栽種大型樹木的話，可能較不能夠符合實際場址之整治需求，因此，也有採用離地處理的方式，搭配如土壤挖除法等方式進行整治工作。例如，局部分批將場址內受污染土壤挖除後，移至一個以做好阻絕區域的平面土地，形成一個淺層的污染整治區，如此可以

植栽生長快速、成本較低之小型花草類植物，待完成整治後，再行下一局部區域的挖除及植栽整治。

植物整治法使用之植物在被植栽後，其污染物衰減之模式可分為下列數種途徑：

- 一、 污染物因儲留於根部、莖部或是葉子內，而被移除。
- 二、 污染物被植物吸收後，於植物體內轉化成為無害的物質。
- 三、 轉化成氣體，於植物進行蒸散或呼吸作用時，釋放至大氣之中。
- 四、 污染物未被植物攝入，但污染物質因吸附、吸持或黏附於植物體根部或其他地方。
- 五、 污染物在植物根部等地方，由微生物或是其他動物所代謝吸收而轉化成為無害的物質。

污染物被植物所吸收之後處理方式可分為下列幾種，各種方式均有其考量及作用，可以視土地用途做為參考：

- 一、 採收後銷毀。
- 二、 採收後萃取回收微量物質。
- 三、 保持原狀不採收，而成為設計景觀。

14.1.2 適用條件

植物整治法適用之條件說明如下：

一、 場址型態：

一般而言，植物整治法對於土壤飽和層及不飽和層皆可適用。但深入地下水含水層之整治，因樹木的根部比一般小型花草類植物的根部更能夠深入土壤的深層。因此，對於較深層的污染場址而言，樹木可能較花草類適合。

二、 植物種類與污染物型態：

根據美國經驗，目前已經於油品類污染整治場址現場施作之植物，彙整如表 14.1.2-1 所示。

表 14.1.2-1 處理油品相關污染物之植物

污染物類別	場址類型	污染介質	植物種類	位置(美國)
原油	油管洩漏	土壤	Sorghum,rye,cowpeas	Louisiana
石油	油管洩漏	土壤	Grasses,clover	Virginia
石油(1200 ppm)	儲槽加壓泵站	土壤	Poplar trees,Alfalfa	Utah

使用植物整治法做為土壤地下水整治方法的優缺點，整理如表 14.1.2-2 所示。綜合其優缺點說明可發現，其實係著眼於本項技術不需添加任何化學藥劑、成本經濟以及整治場址景觀上的考量，但技術上的不確定性仍須加以克服。

表 14.1.2-2 植物整治法優缺點比較表

優點	缺點
• 整治設備及人力需求相對較少。 • 不添加氧化劑等化學藥品於土壤中，因此較其他處理方法，具有減少二次公害發生之意義。 • 不需抽出地下水或挖除土壤，也可以直接進行整治，減少了人員接觸污染物質的風險，也可以避免因為整治行為，而改變了土壤及地下水的地質及水文型態。 • 對於整治場址附近民眾的觀感而言，由於沒有整治機具設備，以及抽水、人員操作等情形，加上整體綠意景觀宜人，因此民眾之接受度較高。 • 可以搭配其他類型的主動式整治技術，做為最後階段的復育方式，以增加土地其他的利用價值。 • 整治過程中不會產生其他廢水、廢氣、廢棄物等二次污染物質，且因為栽種之植物為有機生物型態，因此最終處置之問題性降低。 • 整治經費較傳統技術低。	• 整治期程可能較長。 • 對於地下水污染以本方法整治者，必須栽種大型樹木等根部較長者，因此，可能增加成本及困難度。 • 對於地下水污染採用本方法者，整治期間仍須關切掌握地下水污染的擴散趨勢，因植物對於地下水污染的吸收等作用，在速度上可能無法達到防止污染物擴散的目的。 • 因為植物的獨特性，相較於其他技術，更需有模場或溫室數據來佐證可以被預期的整治成效。 • 相對於其他技術而言，整治成效較無法有效的預期。

14.2 整治系統操作與設計

14.2.1 整治系統設計與操作要點

影響植物整治法污染物移除之因子相當多，包含項目個別說明如下。

- 一、栽種植物之種類，必須經實驗驗證過，其對於目標污染物具有降解能力之功能。

- 二、 土壤中土質狀況，包括是否具有植物生長所需之土壤肥力，以及其他營養物質或土壤微生物。
- 三、 土壤地下水之污染物項目及類型。
- 四、 土壤地下水之污染濃度範圍。不同的栽種植物，對於污染物的吸收度及生長毒性限值並不一致。因此，對於污染濃度過高之場址可能必須搭配進行一些其他的前置整治工程，以調整場址之濃度使適合微生物生長。
- 五、 土壤化性，包括土壤 pH 值及其他農業化學所關切之事項。
- 六、 土壤肥力，包括植物生長所需之氮肥、磷肥等。
- 七、 植物施作栽種範圍，包括有效植栽密度等的確認，可以最經濟的植栽密度達到最有效的數據範圍。
- 八、 天氣，包括當地氣候、溼度、溫度等，應適合於預定栽種之植物生長條件。

在進行整治工程之前，規劃設計階段必須考量上述因子，提出實驗室或是模場數據加以佐證，而主管機關也可以根據這些數據，確認整治成效是否能在預定之期程內有效完成。

14.2.2 整治系統單元

一個植物整治法整治工程，最少應包括下列設備設施或組成單元：

- 一、 其他輔助處理設備，包括在進行主體植栽工程前之輔助整治設備，例如抽水井、抽水機、挖土機等。
- 二、 整地工具，現地植栽者，包括翻土機具等，離地植栽整治，則包括挖土機、不透水布等設備。
- 三、 供水系統，包括灌溉、澆灌等各種植物生長需求之水渠、蓄水池、蓄水塔等。
- 四、 肥力、農藥等藥劑調配、儲放空間。
- 五、 必要時搭配防止土壤地下水污染範圍擴大之阻絕系統，例如抽水阻牆等。

六、 地下水監測井等其他環境監測設備。

14.2.3 整治系統監測

植物整治法的監測系統，最重要的是確保整治過程中，污染物不會持續擴大。建議監測計畫內容應包括：

- 一、 主要污染項目。
- 二、 二次降解產生之化合物項目。
- 三、 監測範圍。
- 四、 監測頻率。

14.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

利用本技術的基本前提為自然復育方法，以將整治過程對於環境之衝擊降至最低。植栽過程中除注意應避免交叉污染之外，對於農藥、肥料等添加，亦應在設計規範範圍；若有澆灌、灌溉等行為，雖然排水量不會太大，但排水系統之水質亦應定期檢測。若集中移出之污染物質欲視為廢棄物清理者，包括廢棄植物等，必須視其為害性委託合格之清除/處理機構妥善清理。

14.3 成本及期程評估

一般而言，植物整治法的處理成本，可較傳統物理及化學方法減少 50% 至 20% 之花費。至於整治期程，須視處理面積、污染深度及植物生長特性而定。在理想情況下，植物整治法之整治期程約需數個月至數年甚至拾數年。

參考文獻

1. USEPA(2001) A citizen's guide to phytoremediation. EPA 542-F-01-002, 2001 April.
2. USEPA Land Remediation & Pollution Control- Phytoremediation Research
網址：<http://www.epa.gov/ordntrnt/ORD/NRMRL/lrpcd/rr/phytores.htm>

-
3. Missouri Botanical Garden 網 站 :
<http://www.mobot.org/jwcross/phytoremediation>
 4. Wildlife Habitat Council 網址 : <http://www.wildlifehc.org/>
 5. RTDF(2000)Annual Report of the RTDF Phytoremediation Action Team - TPH Subgroup Cooperative Field Trials, March.
 6. Kulakow, P. and Feng, X.J.(2003) TPH Subgroup Phytoremediation Field Trials: Results and Preliminary Conclusions, in proceedings of International Applied Phytotechnologies Conference, March 5.
 7. DEPD(2001)Field and laboratory study of MTBE phytoremediation, Underground Tank Technology Update, November/December issue, University of Wisconsin-Madison, Department of Engineering Professional Development.
 - 8.New developments in monitoring, measurement and treatment of NAPL, 2005 台美講習會

十五、監控(測)式自然衰減法 (Monitored Natural Attenuation)

15.1 整治技術簡介

15.1.1 原理

監控(測)式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation, MNA)為一種消極的污染場址管理方式，亦即不對土壤或地下水污染區域進行通氣、抽水、開挖、加藥或其他主動的處理方式，僅定期性進行監測工作。但為避免污染行為人規避整治責任，採用本項方法之前，必須進行嚴密的規劃及研判，有關監控(測)式自然衰減法的應用，必須具備下列四項條件：

- 一、 確定所有的環境條件顯示，污染範圍沒有持續擴大的潛勢。
- 二、 未來沒有土地開發利用的需求。
- 三、 經健康風險評估計算，所有的暴露途徑下產生的風險(包括致癌及非致癌)，必須低於法令規定或環保主管機關之要求。
- 四、 設置嚴密的持續性監測計畫。

美國環保署不推薦污染場址採用監控(測)式自然衰減法為「唯一」的整治方法，而必須搭配其他主動式的整治技術，例如空氣注入法、生物曝氣法等，但也不視其為「零方案」(no action)，也就是說，其地位介於「主動式整治」與「不處理」之間。然而美國部分州政府法令訂定更為嚴格的規範，監控(測)式自然衰減法根本上不得作為整治方案。

監控(測)式自然衰減法使用上必須非常小心，並應考量實際國情。基本上我國環保主管機關基於保護環境及確保民眾健康之立場，對於污染場址單獨使用監控(測)式自然衰減法亦不鼓勵。惟本指引仍初步說明其相關技術規範，供主管機關參考。

監控(測)式自然衰減法的淨化機制，乃在自然環境中藉助自然的衰減作用，使有害污染物的質量、毒性等能夠衰減成無害物質，而移動性、分

佈體積等能夠被侷限甚至縮小。衰減作用包括自然的非破壞性(nondestructive)以及破壞性(destructive)作用。

非破壞性作用特徵如下：

- 一、 水力分散的動力稀釋作用。
- 二、 土壤顆粒間隙的吸附作用。
- 三、 污染物本身於地質環境中的自然揮發作用。

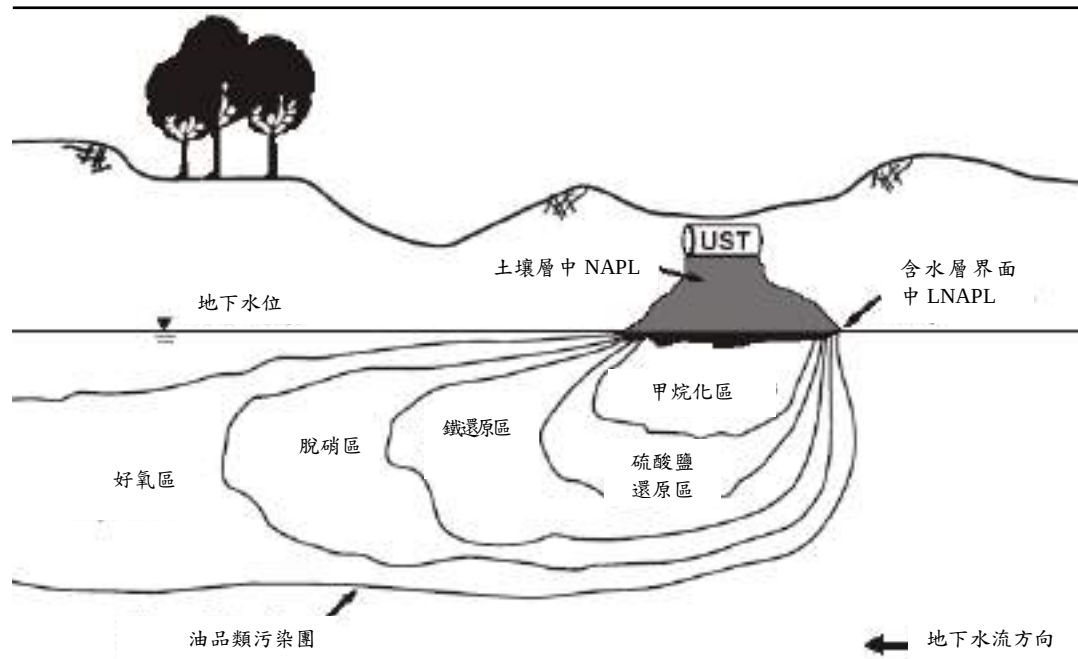
非破壞作用對於污染物本身並不會造成結構性的改變，也就是說污染物並不會降解氧化成無害的二氧化碳及水，而僅會因為上述的物理現象，造成污染團濃度的稀釋。

至於破壞性作用有可能包括下列幾種型態：

- 一、 生物降解作用。
- 二、 水解作用。

在地下自然環境之中，最重要、被預期的降解因子為生物降解作用。生物降解作用依據污染源位置與地下水流方向判定區域不同，可能有不同的機制存在。典型的油品類儲槽系統地下儲油槽洩漏污染的場址概念如圖 15.1.1-1 所示，在地下水下游方向，距洩漏污染源較遠處，因為污染物濃度較低，含水層中含氧量較高，因此土壤層中好氧性微生物可能會利用污染物做為生長代謝作用之基質，產生所謂的好氧分解作用；而在越靠近污染團的地方，因為污染物濃度過高，溶氧量不足，低氧化還原電位的情形之下，容易形成厭氧狀態，並產生脫硝、脫硫、發酵等作用。

在自然環境中自然衰減現象雖然可期待，但是決定生物降解現象的限制因子為自然環境中的電子接受者(electron acceptor)，例如好氧反應區的溶氧，以及厭(無)氧區的硫氧化物、氮氧化物等的存在與否，以及其濃度，若自然環境中這些電子接受者物質不存在、濃度太低或是量不足，可能無法達到預期的自然衰減效應。一般而言，自然環境中存在的電子接受者往往無法足量提供微生物降解反應之需求，反應速率也較緩慢，甚至部分場址地下環境中，根本不存在合適生物降解之環境條件，這也是環保主管機關不主張監控(測)式自然衰減法的主要原因之一。

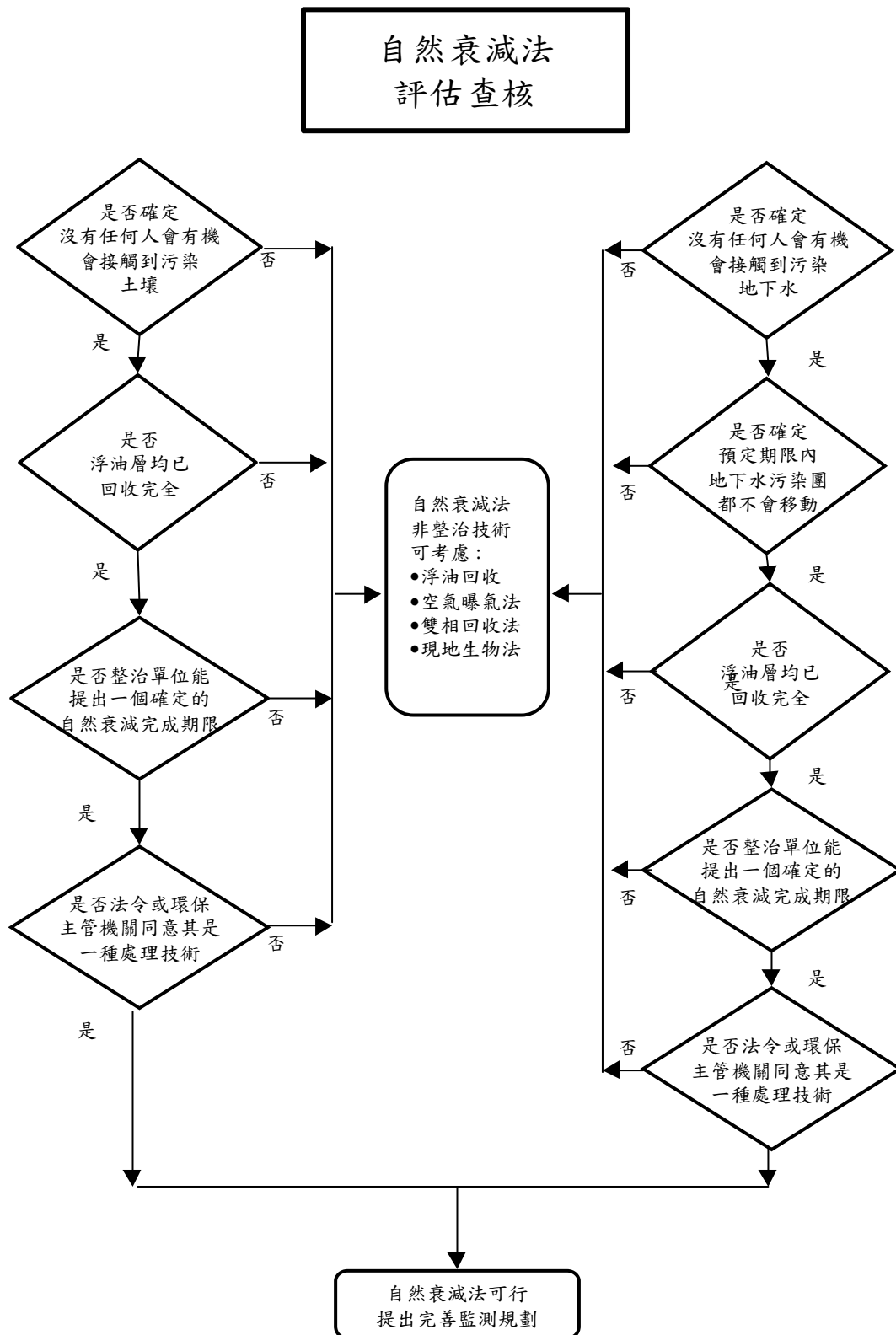


參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 15.1.1-1 監控(測)式自然衰減法生物作用差異性示意圖

15.1.2 適用條件

監控(測)式自然衰減法的適用性篩選，可以圖 15.1.2-1 說明，而該技術之選用查核項目則彙整如表 15.1.2-1。環保主管機關可從圖中的判定流程原則逐一進行審查，若整治單位提出監控(測)式自然衰減法，不打算積極處理者，可依本項流程單元逐一清查，若有不符合之情形發生，即有產生污染擴大的可能，必須要求整治單位配合其他整治方式處理。



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 15.1.2-1 監控(測)式自然衰減法評估查核流程

表 15.1.2-1 監控(測)式自然衰減法技術選用查核表

1.0 初步篩選土壤污染狀況：	是	否
1.1 污染源之質量已經估計？		
1.2 污染源的質量傾向侷限於土壤中？		
1.3 污染源存在時間長短有估計？		
1.4 預估達成整治目標所需之整治時間合理？		
1.5 沒有因接觸受污染土壤而健康受到威脅之受體？		
1.6 沒有因蒸氣的移動而健康受到威脅之受體？		
2.0 初步篩選地下水污染狀況：		
2.1 浮油 (如果存在)已經在技術可行範圍內，回收至其可回收之極限？		
2.2 污染源已經估計？		
2.3 污染團的生命期限已經估計？		
2.4 預估達成整治目標所需之整治時間合理？		
2.5 依據現場資料，污染團在縮小？		
2.6 所有的潛在受體均位於地下水需流動 2 年以上才能到達之距離？		
3.0 詳細評估土壤污染狀況：		
3.1 已建立三維的場址特徵？		
3.2 已經量測土壤之透水性？		
3.3 土壤的結構與分層有助於自然衰減？		
3.4 已經測定土壤的有機碳含量 (f_{oc})？		
3.5 所有關切污染物於土壤的飽和度限制都已計算？		
3.6 所有關切污染物於土壤的飽和度均低於預期對地下水會造成不可接受之衝擊的程度？		
3.7 土壤氣體樣品已經收集與分析完成？		
3.8 地質化學之特性因子已經測量並支持長期的生物降解？		
3.9 生物降解速率已經加以計算？		
3.10 預估達成整治目標所需之整治時間合理？		
3.11 不具有現存或未來會對潛在受體造成之威脅？		
4.0 詳細評估地下水污染狀況：		
4.1 已建立三維的場址特徵？		
4.2 已經量測透水性最好的傳輸區域之水利傳導性？		
4.3 污染物傳輸速度已經加以估計？		
4.4 污染團下沉之傾向有估計？		
4.5 關切污染物於所有的監測點的濃度均已量測？		
4.6 所有的監測點的地質化學特性均已量測？		
4.7 每一個變因的等值圖均已完成？		
4.8 生物降解速率或速率常數已經加以計算？		
4.9 預估達成整治目標所需之整治時間合理？		
4.10 不具有現存或未來會對潛在受體造成之威脅？		

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004

表 15.1.2-1 監控(測)式自然衰減法技術選用查核表(續)

5.0 處理土壤污染之長期效能監測：		
5.1 監測時間是否比預期達成整治目標之時間長 1-2 年？		
5.2 監測頻率是否維持至少每二年採樣一次？		
5.3 採樣點數是否足夠？		
5.4 樣品分析項目包括 BTEX、TPH 與其他關切物質？		
5.5 執行補充之土壤氣體採樣分析？		
6.0 處理地下水污染之長期效能監測：		
6.1 監測時間比預期達成整治目標之時間長 1-2 年？		
6.2 監測頻率在前二年維持至少每季採樣一次？		
6.3 前二年後的監測頻率保持每年一次？		
6.4 定時採樣至少包括 3 個污染團剖面、1 個上游剖面及 1 個下游剖面？		
6.5 所有的警戒（預警）井均包括於採樣計畫中？		
6.6 樣品分析項目包括 BTEX、TPH 與其他關切物質？		
6.7 所有樣品均有分析地質化學指標與降解產物？		

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004

表 15.1.2-2 監控(測)式自然衰減法優缺點比較表

優點	缺點
• 總處理成本相對較便宜。 • 最少的操作管理。 • 對於位於建物底下或其他不能挖除的區域可行。 • 沒有整治過程中產生的二次公害產物，但自然生物降解產生之甲烷仍有風險。 • 沒有因需要離場處理而造成污染物移入移出之運輸過程中，所產生的意外風險。 • 因不進行施工作業，降低人員接觸主污染區高濃度土壤地下水的風險。 • 有生物降解作用產生。	• 對於高濃度(大於 20,000mg/kg)TPH 污染土壤地下水而言，沒有處理成效，浮油層也無法處理。 • 當民眾對於污染土壤地下水有接觸途徑，例如抽取地下水井、住宅附近污染土壤蒸氣揮發等，產生健康風險時，本法不適用。 • 需要分長久的時間自然衰減，同時這個時間也無法預期。 • 經過一段長時間以後，仍無法達到整治標準之可能性相當高。 • 需要相當完整、詳細的場址調查工作，甚至有可能需要比其他整治技術更詳細之調查。 • 需要完善、詳細、制度化的控制及監測計畫，確保場址安全。 • 監測計畫的點次、頻率需要更高，監測距離範圍需要更廣。 • 需要更完善的緊急處理及應變計畫，如此一來反而可能更增加成本。 • 污染團有隨著地下水移動的可能。

參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

15.2 整治系統操作與設計

15.2.1 整治系統設計與操作要點

監控(測)式自然衰減法之選用，涉及微生物生長之相關限制因子，必須由各項合適之環境參數配合。茲將各項考量環境因子敘述如下：

一、土壤：

- (一) 透水性：大顆粒土壤提供好的排水和通風，但可能也促進污染物浸出和遷移。
- (二) 土壤結構：成層狀的土壤阻止污染物垂直的遷移和分散作用，但也可能會促進了側向傳輸。
- (三) 土壤吸附性：若土壤中含有較高有機碳，以及較小的顆粒，污染物在土壤中較容易被吸附，可以降低污染物在土壤中的遷移速度。
- (四) 土壤氣體的組成：氧氣為有氧生物降解的必要元素。其它項目，如氮氣、甲烷氣、二氧化碳等，則提供生物在降解過程中的整治效率或降解過程之資訊。
- (五) 土壤中水分：較好的濕氣環境是在重量比 12%至 30%之間，負荷比(field capacity)則在 75%至 90%之間為佳。
- (六) pH：一般而言，在自然環境中，生物生長限制因子為 pH 4~9，但最佳環境為 pH 6~8。
- (七) 溫度：本項限制因子之範圍較廣，為 0~45℃的情形下，均有可能產生降解反應。
- (八) 微生物族群：一般地表下自然環境中存在之微生物族群，均有機會降解污染土壤中之有機質。

二、地下水：

- (一) 溶解度：污染物可溶性越大，越增加地下水中的分散作用。但是，污染物為混合物的情形下，各成分的可溶性可能會降低。

- (二) 亨利常數：污染物傾向分散在水相和氣相之間。越高的亨利常數，越傾向揮發成氣相狀態。
- (三) 地下水流速：越高的地下水速度增加被溶解污染物的遷移，但促進電子接受者如氧分子的再曝氣、再溶解作用。
- (四) 吸附、脫附作用：越高的有機碳濃度和較小的土壤顆粒，造成污染物容易被吸附，以致減緩污染物的移動。
- (五) 污染物傳輸速度：由於土壤吸著，因此污染物傳輸速度，比地下水滲流速度低。
- (六) 地質化學參數：提供含水層和生物降解過程的整治效率資訊。

15.2.2 整治系統單元

監控(測)式自然衰減法系統，若依 8.2 節之初步查核方法檢視，有設置相關措施之需求者，基於非主動式處理方法之特殊性，除了可能之環境監測設備(詳 8.7 節說明)外，整治機具部分並無需求，而後續主要關切的重點，在於場址內兩項污染降解作用：

一、生物作用

生物作用部分主要由微生物利用污染物為代謝基質，代謝過程中必須透過電子接受者獲得能量。於此，好氧性微生物之代謝分解作用會首先於場址之中產生，因為好氧性的生物分解作用，會讓微生物獲得最大的能量，反應速率也較為快速。在場址未持續提供氧氣的情形之下，後續由硝酸氮、硫酸鹽等提供做為電子接受者，由脫硝、脫硫等微生物族群繼續分解代謝有機污染物。而在水中結合氧型態之電子接受者完全被利用完畢之後，由鐵還原菌產生還原反應($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^0$)，利用污染物基質。最後一種生物反應程序為所有電子接受者均被利用完之後，地下環境(如地下含水層)中完全沒有電子接受者後，氧化還原電位 ORP 降至負值，呈現完全的還原態，此時，厭氧的水解、發酵作用可能產生，厭氧菌發酵基質降解成甲烷、二氧化碳等物質。

二、物理作用

物理作用包括揮發、分散稀釋、吸附等作用。吸附作用將污染物吸附於土壤顆粒間隙中，有助於後續生物利用。揮發作用係因地下環境中溫度等較高，低沸點之污染物組成份例如汽油、柴油等，會由地下水、土壤層中，轉化成氣相，揮發至大氣之中。以苯為例，一般而言，場址中會有自然移除量之 5%~10% 左右，係由揮發作用貢獻造成。至於分散稀釋作用之關鍵因子，係為地下水流速所造成的牽引動力，其使得從土壤層滲入地下水層之污染物，立即遭到橫向流速的分散稀釋，但是，一但地下水流速過低，本項作用的貢獻量將較小。

15.2.3 整治系統監測

監控(測)式自然衰減法最重要的設置前提即是完整的監測系統，定期或不定期監測污染區資訊，防止污染範圍擴散或是環境變化。若監測過程中發現異常，污染物(尤其是地下水污染部分)有擴散至預期污染區範圍以外時，必須以緊急應變、阻絕系統進行處置，甚至必須採取積極性的整治措施。監測計畫包括項目、內容、範圍、頻率等全面性考量。茲彙整監控(測)式自然衰減法建議監測項目如表 15.2.3-1 所示。

表 15.2.3-1 監控(測)式自然衰減法建議監測計畫內容

監測介質	監測頻率	監測項目	監測數量
土壤環境	至少半年一次	土壤 BTEX、TPH 以及其他受關切物質，以及土壤氣體中氧氣、二氧化碳、甲烷等。	必須進行具有統計上意義的採樣點數量，在縱深上則必須採取連續樣品，在主污染區及其他污染區，可以不同之密度設置採樣點。
地下水環境	前兩年每季一次，其後至少每年一次	土壤 BTEX、TPH 以及其他受關切物質，溶氧、 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CH_4 、 NO_3^- 、 Mn^{2+} 、pH 以及溶解性的無機碳	至少設置 3 組穿越主污染團之垂直監測井，地下水下游方向每一定距離內之降解區，至少設置 1 組垂直監測井，每組監測井均必須設置可採集不同深度樣品之監測井。

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

15.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

由於本項方法非採取主動式污染團處理方式，因此，預期在整治過程中，土壤及地下水等介質以外之污染，例如產生廢氣、廢水、廢棄物之可能性較小；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。

15.3 成本及期程評估

本項方法無工程費用，主要為環境監測(主要)及場址管理費用(次要)。國內環境監測之檢測機構業務技術成熟，市場需求固定，不需參考國外檢測單價。但環境監測總費用端視監測計畫的規模而定，會因場址大小、預定期程而有所不同，實際監測費用仍需分項計算後加總。惟根據國外經驗，若場址預估監測期程過長，監測計畫規模龐大，過程中無法避免採取應變措施，甚至因為監控(測)式自然衰減法失敗，造成污染物擴散，需重新採取積極性的整治措施等，種種因素均可能造成總整治經費不減反增。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
3. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
4. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

十六、抽出處理法(Pump and Treat)

16.1 整治技術簡介

16.1.1 原理

抽出處理法(pump & treat)顧名思義，包括了兩個主要程序，即將污染之地下水抽出至地表，以及處理這些被抽出之污染地下水。因本項技術簡單、處理成本較為經濟、技術門檻較低，在以往為最常被用於地下水的處理技術。惟近年來由於更有效、快速的地下水整治新穎技術不斷被開發，在許多使用過的場址經驗中，陸續發現其因場址特性，所造成的整治效能限制。但有時候在處理地下水污染場址緊急應變的措施上，抽出處理法有相當的意義及貢獻。在長期整治工作上，若是經過篩選，在合適的場址地質條件以及詳細完善之井點設置規劃之下，仍可以達到良好的整治成效。

抽出處理法主要能夠發揮下列兩種功能，一為利用抽水作用，降低地下水位，防止受污染的地下水向外擴散，或是隨地下水流向下游方向流去；其次為將抽出之地下水在現場即時加以處理。至於處理方式，則可視污染物性質，設置合適的處理單元。一般現場主要考量機動性較高的移動式設備，但若地下水抽除量較大，且污染區位於運作中的工廠，則可將工廠內的既存廢水處理設備納入考量，但應注意是否會超出原設計之處理負荷。

16.1.2 適用條件

本項技術係針對污染地下水的整治而言，因此，不飽和層的土壤污染區整治並不適用。

若抽取之地下水中所含的污染物質是屬於溶解性的，則一般的水井水力學原理，均適合於評估地下水污染物的抽除；但若是滲透性較低，或是地質結構較為複雜且非均質相時，則採取抽水方式處理較不適當。若場址滲透性較佳，除了抽水之外，甚至可以將抽除處理後之地下水進行補注，或是搭配其他整治方式加強處理，如此可更有效的將污染物從地下水中移除，這也是抽出處理法往往是整治技術組合序列的最初使用方法。

雖然地下水抽除處理的技術對於 LNAPL 等處理可行且有效，但是本技術在建立時，做了下列基本假設：

- 一、 含水層的傳導係數為單一常數。
- 二、 水井為完全貫穿的型態。
- 三、 沒有其他的地下水補助源。
- 四、 傳導係數屬於均向性。

基於上述條件，抽出處理技術雖然有效，卻不能應用於每一個場址。故在實場中上述條件均須滿足，否則採用本技術將可能導引出不正確的結果。

而在實場上，因為邊界條件的不同與場址特性的差異，最好能以數值模式的方法加以分析。這是本項技術的特色；亦即若要達到良好的預期抽水成效，應有完善的規劃及現地試驗。

有關本技術之優缺點整理如表 16.1.2-1 所示。

表 16.1.2-1 抽出處理法優缺點比較表

優點	缺點
• 設置簡單、快速，操作經驗需求較低。 • 設置及維護成本較低。 • 對於污染區域較小，或是污染濃度不高的場址，容易達成整治目標。 • 容易同時搭配其他土壤或地下水的整治方法，形成多重組合的整治序列，提高整治效能。	• 部分 NAPL 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的抽出。 • 污染物從水力傳導性(hydraulic conductivity)低的區域擴散到水力傳導性高的區域速率緩慢。 • 含水層中，已被土壤吸附污染物質的脫附速率較為緩慢，因此，可能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昇。 • 在死角區域(dead-end zone)的水動力會遭到隔絕(hydrodynamic isolation)。

參考資料：

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。

16.2 整治系統操作與設計

16.2.1 整治系統設計與操作要點

抽出處理法主要可考量的設計參數如下：

一、設計流率

地下水的抽出速率可以現地抽水試驗之數據資料決定，依據抽水試驗結果，分析地下水影響半徑、回水速率等，最後依據決定設置之抽水井口網、數量及位置，分析最佳之抽水速率。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。

此外，為了避免超出水力負荷，設計參數應乘上安全係數，避免全面性的抽水，致地下水抽出負荷過大，造成下陷坍塌之風險。

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以及規劃。

三、設計移除率

依據抽出速率以及抽出濃度，推算污染物之抽出移除量，除以預估存在於地下環境中的污染物總量，可預估總移除率及推估移除時間。

四、回收量

抽出之地下水，若包含了高濃度之浮油或 LNAPL 等，地面廢水處理程序之前，可以考慮進行回收設計，一方面降低處理濃度負荷，另一方面則可以回收有用物質。

16.2.2 整治系統單元

地下水抽出處理系統主要設備為下列 3 個部分：

- 一、 抽水井網及集水管線。
- 二、 抽水泵。
- 三、 地面廢水處理設備，處理設備如表 16.2.2-1 所列可供選用參考。

表 16.2.2-1 地下水抽出處理系統水處理設備

處理技術	特點
<u>移除 NAPL</u> - 雙相(水、油)分離 - 親油性過濾器 - 溶解性空氣氣體浮除	- 維護容易，對於已乳化之物質則不會移除。 - 可移除乳化物質，但對於大量體積物質，成本較高。 - 可移除中性的 NAPL，但操作成本較高。
<u>移除有機化合物</u> - 氣提法 - GAC 活性碳吸附 - 合成樹脂 - 生物處理 - UV 氧化	- 對於 VOCs 處理相當有效，操作需求較低。 - 對於多種有機化合物有效，操作需求較低。 - 對於高濃度廢水相當有效。 - 需要較多的操作維護 - 可以將大部分有機化合物處理，但能源動力較高。

資料來源：“New EPA Guidance on Cost-effective Design of Pump and Treat”, USEPA, Accelerating Site Closeout, Improving Performance, and Reducing Costs Through Optimization, Dallas, TX, June 15-17, 2004.

16.2.3 整治系統監測

在抽水井網的設計上，理論上有效捕捉區的範圍應比污染區範圍要大，而捕捉區必須依據抽水流率以及含水層的條件而定。為了涵蓋所欲清理的污染區域，抽水井的數目可以一直增加直到其整體的抽取能力足以提供一個有效的捕捉區。然而，當抽取井的數量增加，則有些污染物會在井與井之間流動，如此，則井與井之間的距離就像抽水率一樣，變成一個相當重要的設計因素：抽水率越高，則捕捉區範圍越大；而各井間的距離越接近，則污染圈中的污染物被捕捉的機率也就越高。

本技術須嚴防因為抽水井網的錯誤設計，導致抽水作用反將污染團導向不被預期的方向移動。因此，本技術雖然沒有太多機具設備，不至產生廢氣或廢棄物，然而，抽水作用造成污染團的移動遷移情形必須嚴密監控，避免污染區擴大，進而造成受污染區域居民之接觸風險。一般而言，整治過程中除了整治用之抽水井外，也應該在污染區周界附近設置監測井，同

步進行地下水質監測，若發現周界監測井中地下水污染物有升高的現象，則應立刻查核確認，檢討是否應停止整治井之抽水。

16.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

在地下水中的抽水可能造成地層擾動，因此務必在所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。至於抽出的地下水若有可回收價值，可先進行油水分離處理，或直接送交處理業者進行有害廢棄物處理。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污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，應符合我國污染防治相關法令，在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

16.3 成本及期程評估

雖然單獨使用抽出處理法無法有效處理 NAPL 等污染物質，但在搭配其他整治方法方面，本技術仍有其輔助之功能。在美國能源部試驗場址中，使用抽出處理、SVE 以及空氣注入法等方式併同處理有機污染物，在 139 天之試驗期間，推估未來 10 年整治期間所需之經費，推算結果每磅 VOC 之回收移除成本約為 15.59 元美金(約新台幣 545)。

參考文獻

1. 「地下水的污染整治」，盧至人譯，國立編譯館出版，1997。
2. “New EPA Guidance on Cost-effective Design of Pump and Treat”, USEPA, Accelerating Site Closeout, Improving Performance, and Reducing Costs Through Optimization, Dallas, TX, June 15-17, 2004.
3. 美國能源部 Innovative Technology Summary Reports 網站，網址為 <http://web.em.doe.gov/plumesfa/intech/>
4. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies

Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>

5. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
6. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

土壤及地下水油品類污染
整治作業參考指引
(附件二)

出版年份：民國 113 年 5 月
出版單位：環境部環境管理署
EPA-25-III-06B-2015-002

附件二目錄

一、	土耕法(Land farming)	附件二-1
1.1	整治技術簡介	附件二-1
1.1.1	原理	附件二-1
1.1.2	適用條件	附件二-2
1.2	整治系統操作與設計	附件二-6
1.2.1	整治系統設計與操作要點	附件二-6
1.2.2	整治系統單元	附件二-8
1.2.3	整治系統監測	附件二-9
1.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件二-10
1.3	成本及期程評估	附件二-10
二、	低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption)	附件二-12
2.1	整治技術簡介	附件二-12
2.1.1	原理	附件二-12
2.1.2	適用條件	附件二-14
2.2	整治系統操作與設計	附件二-18
2.2.1	整治系統設計與操作要點	附件二-18
2.2.2	整治系統單元	附件二-20
2.2.3	整治系統監測	附件二-21
2.2.4	二次污染防治與安全衛生管理	附件二-22
2.3	成本及期程評估	附件二-23
三、	開挖處理法(Excavation)	附件二-25
3.1	整治技術簡介	附件二-25
3.1.1	原理	附件二-25
3.1.2	適用條件	附件二-25
3.2	整治系統操作與設計	附件二-26
3.2.1	整治系統設計與操作要點	附件二-26

3.2.2	整治系統單元.....	附件二-26
3.2.3	整治系統監測.....	附件二-27
3.2.4	二次污染防治與安全衛生管理.....	附件二-27
3.3	成本及期程評估.....	附件二-27

圖目錄

圖 1.1.1-1	土耕法處理系統.....	附件二-2
圖 1.1.2-1	土耕法簡易評估流程.....	附件二-3
圖 2.1.1-1	低溫加熱脫附法處理系統.....	附件二-13
圖 2.1.2-1	低溫加熱脫附法簡易評估流程.....	附件二-15

表目錄

表 1.1.2-1	土耕法技術選用查核表	附件二-5
表 1.1.2-2	土耕法優缺點比較表	附件二-5
表 1.2.3-1	土耕法建議監測計畫內容	附件二-9
表 2.1.2-1	低溫加熱脫附技術選用查核表	附件二-17
表 2.1.2-2	低溫加熱脫附法優缺點比較表	附件二-18
表 2.2.3-1	低溫加熱脫附法操作監測項目	附件二-22

一、土耕法(Land farming)

1.1 整治技術簡介

1.1.1 原理

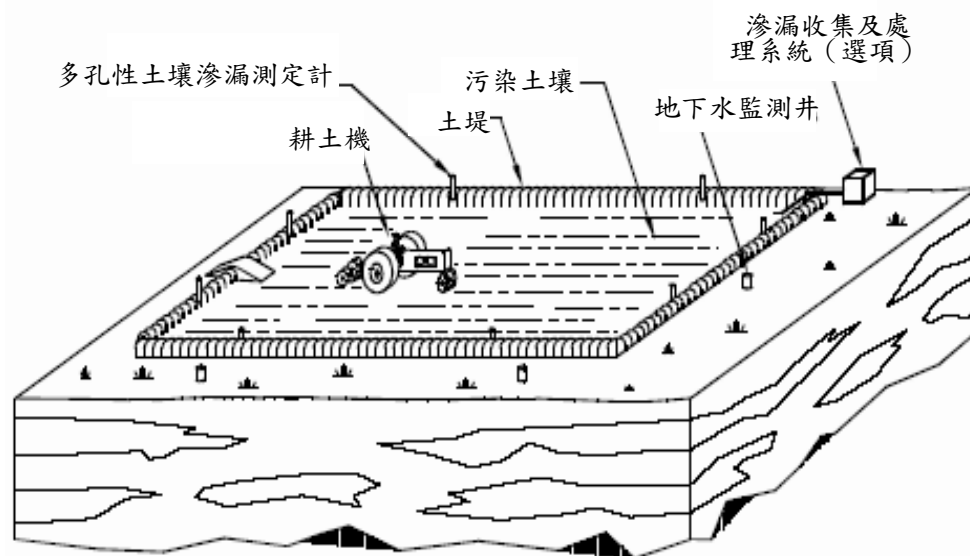
土耕法(landfarming)是一種簡單的地上(above-ground)型態的處理技術，針對受到油品类污染之土壤，利用生物處理方式，降解受污染之土壤。對於地下含水層污染而言，本項方法並不適用。

土耕法主要程序，係將污染的土壤挖除之後，分開散灑於地表上，以形成一個土壤薄層(thin-layer)，然後澆灑營養鹽、礦物質、水分等成分，並藉由翻土、犁耕等動作供給氧氣至土壤顆粒間隙內，藉此提供微生物良好的生長環境，加以馴養，使得微生物能大量利用土壤中有機物質進行代謝分解。

若受污染的土壤層較淺，低於3英尺(約90公分內)，可以不用將土壤挖起，而直接進行土耕整治。典型的土耕法操作如圖1.1.1-1所示。

在土耕作業過程中，較輕質、揮發性較高的物質如汽油等，會因翻耕作用而揮發。因此，對於揮發性有機污染物的逸散問題，其排放量必須符合環境法令，或是加以收集處理後排放；而中揮發性如柴油、煤油等，則可藉由生物分解來進行降解，但仍有可能部分逸散揮發，至於重油部分，如潤滑油等則完全不會被揮發，必須靠生物作用分解，但也比較花費時間。

土耕法是一種離地(ex-situ)處理程序，同樣需要較大的處理用地面積，而相較於生物堆法，每單位污染土壤，有可能需要更大的處理面積，因此，單一場址適用性，必須於整治初期加以評估。



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 1.1.1-1 土耕法處理系統

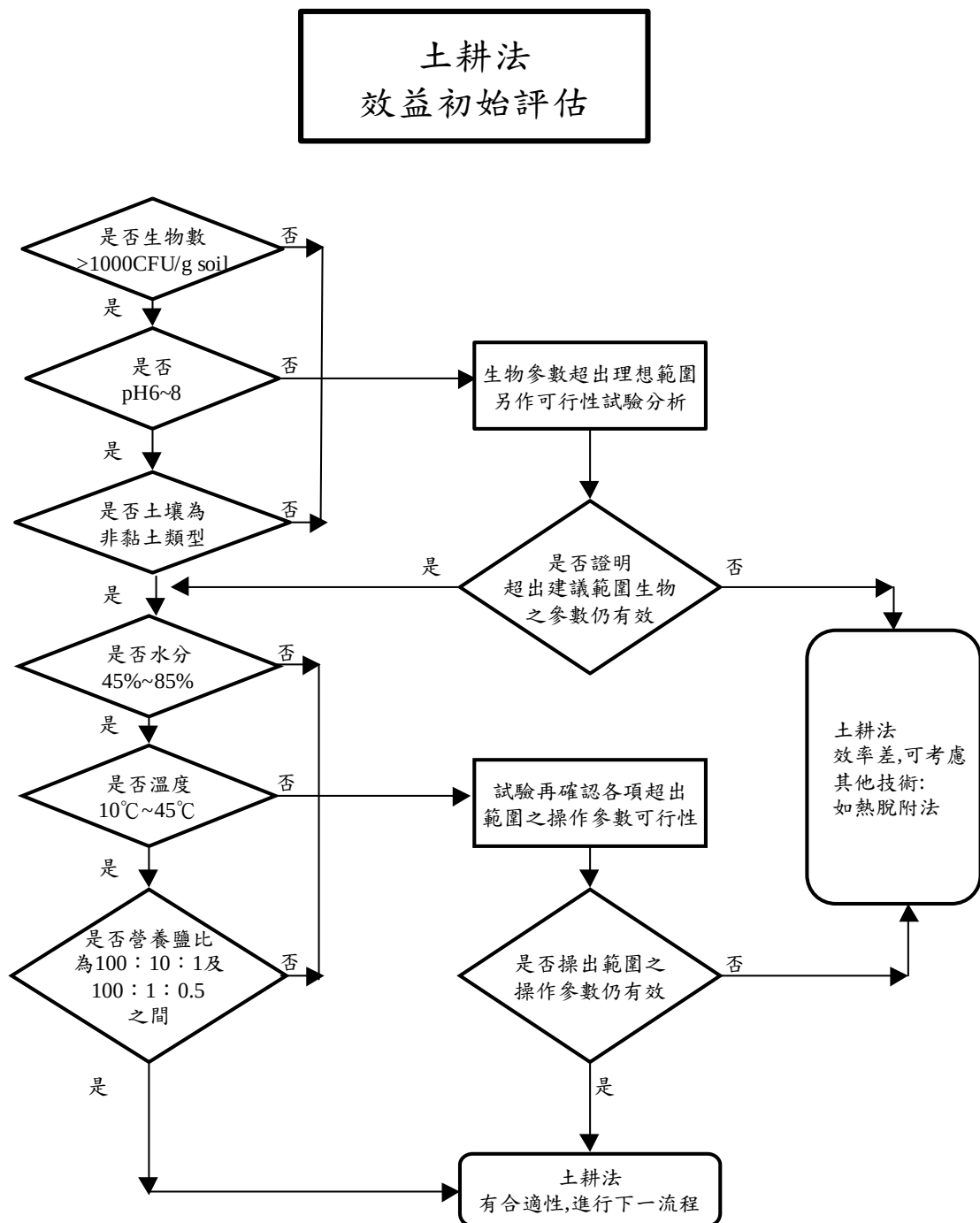
1.1.2 適用條件

土耕法並不適用地下含水層污染之整治。有關土耕法的適用性如圖 1.1.2-1；另評估本技術之適用性查核項目則如表 1.1.2-1 所示。

至於污染物濃度適用範圍，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於 50,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。

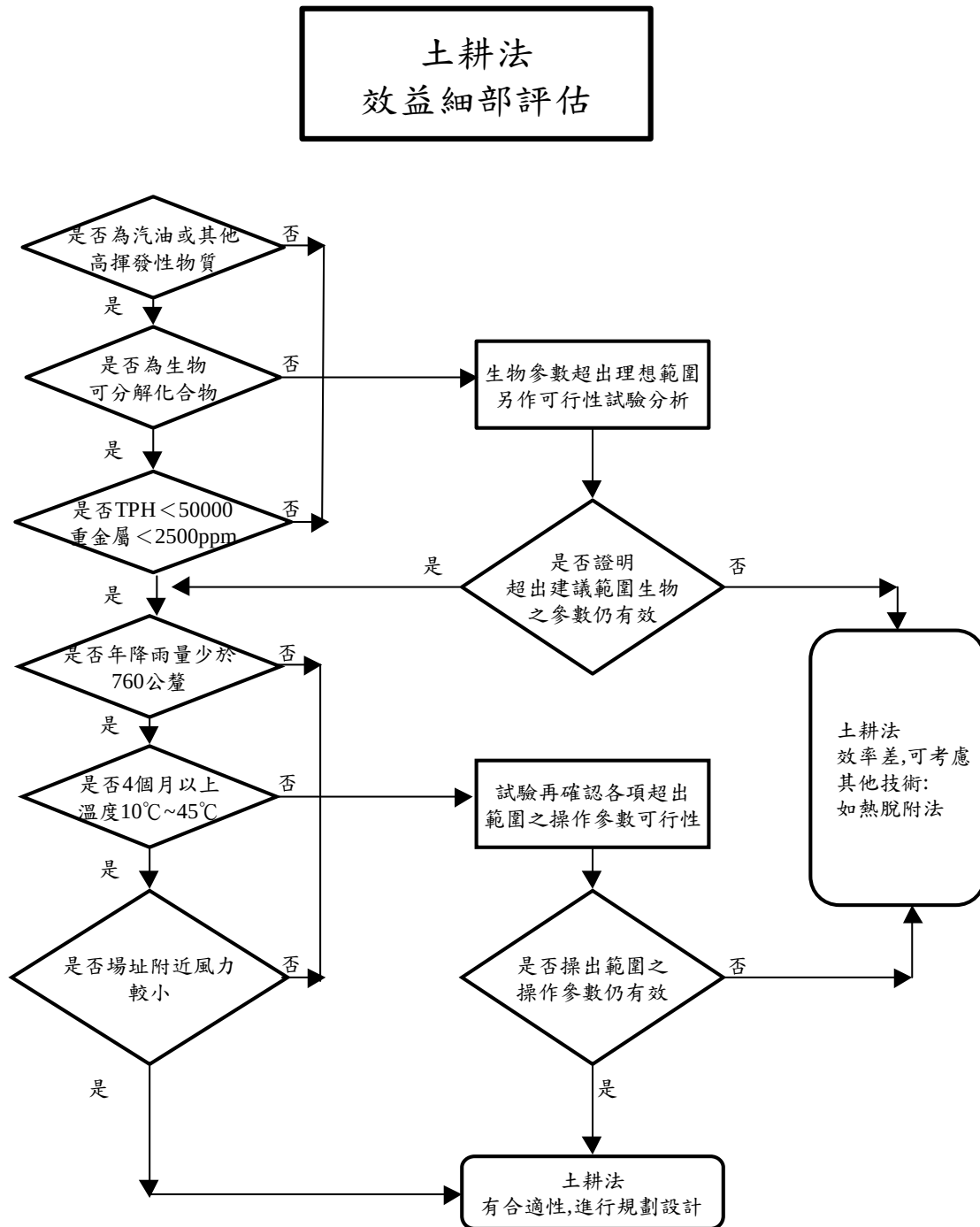
耕法使用之優缺點詳述整理於表 4.3-1 所示。綜合其優缺點說明可以發現，對於設置而言，其方法與生物堆法類似，但更為簡單，又其位於地表上，因此維護也較容易，但對於台灣土地利用密度較高的情形而言，大量的污染土壤，需要較廣大的處理土地面積，因此，污染行為人是否可找到足夠的土地用來處理污染土壤，可能有經濟上的考量。

然而在環保主管機關的立場上，若污染行為人選用本項方法，必須要求防止場址的二次污染，包括防止 VOCs 逸散措施、滲水收集處理設施等，並嚴密監測地下水，防止土壤污染物滲透至地下水層。



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 1.1.2-1 土耕法簡易評估流程



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 1.1.2-1 土耕法簡易評估流程(續)

表 1.1.2-1 土耕法技術選用查核表

1.0 確認適用生物堆法之場址特性：	是	否
1.1 異營性細菌數是否>1,000 CFU/克-土壤？		
1.2 土壤 pH 值是否介於 6~8？		
1.3 污染範圍內之土壤水分飽和度是否介於 40%~85%間？		
1.4 土壤溫度是否介於 10℃~45℃？		
1.5 碳：氮：磷之比是否介於 100:10:5 與 100:1:0.5 間？		
1.6 土壤是否易被分開或不易凝結成塊？		
2.0 污染物特性：		
2.1 待處理污染土壤是否屬於煤油或非汽油之重質油品，或空氣逸散現象是否被監測或控制？		
2.2 所有的污染物是否可被有效生物降解？		
2.3 總石油碳氫化合物濃度是否≤50,000 ppm 與重金屬總濃度是否≤2,500 ppm？		
3.0 確認適用生物堆法之氣候狀況：		
3.1 在進行生物堆法之季節裏，總降雨量是否小於 760 公釐(30 吋)？		
3.2 是否不太可能發生強風現象？		
3.3 是否曾進行生物處理研究？		
3.4 生物處理研究是否提供營養鹽添加量及配方之資料，是否確認可能產生毒害之狀況？		
4.0 生物堆技術設計之評估：		
4.1 考量土耕高度、操作與出入空間，是否有足夠的土地面積？		
4.2 是否控制地表逕流？		
4.3 是否說明控制水土流失之特別措施？		
4.4 是否說明營養鹽添加配方、頻率，以及調整 pH 值之物質？		
4.5 是否需要補充水分？		
4.6 是否將場址不利的自然因素，納入設計中？		
4.7 場址是否進行妥善的管理？		
4.8 是否評估氣體逸散狀況，是否將進行土壤氣體監測？		
4.9 如場址需要氣體逸散控制設備，設計是否符合需求？		

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

表 1.1.2-2 土耕法優缺點比較表

優點	缺點
- 相對於其他整治技術而言，較簡單，且容易設置。 - 較短的處理時間，在已調整為最適的操作狀況之下，平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。 - 每噸土壤處理費用約 30~60 美元，較其他地面處理程序便宜。 - 對於有機化合物具有緩慢的生物降解作用。	- 濃度去除率>95%，殘餘濃度 0.1 ppm 的情形是比較難以達到的。 >50,000 ppm 高濃度污染土壤可能效率較差。 >2,500 ppm 高濃度重金屬土壤可能會抑制微生物作用。 - 揮發性高的物質可能較會被逸散揮發，而不是被生物分解成無害物質。 - 需要較大的土地面積空間。 - 土耕過程中產生粒狀污染物，以及揮發性氣狀污染物，其濃度必須符合空氣污染防制相關法令。 - 需要的話，必須設置底部阻絕設施。

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

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

生物堆法之選用，涉及微生物生長之相關限制因子，但因挖至地面處理，所以地質狀況為較次要之考量因子。污染場址是否適用生物堆法，必須由下列參數配合，主要包括下列項目：

一、土壤特性：

首先為微生物量評估，土耕法因為必須仰賴微生物作用，因此污染土壤內必須有足量的微生物，才能夠提昇處理的潛能。一般而言，每克乾重土壤中若含有 1,000 CFU(colony-forming unit)以上的異營性總菌數，將有利於本項技術的執行，一般操作良好的場址內微生物約有 $10^4 \sim 10^7$ CFU/g-soil。若場址內微生物小於 1,000 CFU，可能仍有效，但需要更進一步的評估現場狀況，包括現場存在之土壤環境是否足已造成生物毒性。另外亦可考量散灑原場址以外含有分解性微生物之土壤進行混合，但這個措施必須審慎評估，並由環保機關審查同意。

其次為土壤 pH 評估，大多數的土壤環境微生物最適生長之 pH 值為 7 左右，pH 約 6 至 8 左右微生物能夠適合生長，若超出範圍，必須進行土壤 pH 值改良。

微生物生長需要適當的土壤含水份，乾燥的土壤並不可行，但過量含水份也有可能抑制微生物的生長。一般建議含水率約為 40%~85%，超出本項範圍則必須添加適當的水分或設置蒐集多餘水分之設施。

在土壤溫度部分，一般而言保持 $10^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ 的土壤溫度適合微生物生長。

在營養鹽部分，一般以典型之碳：氮：磷比為 100：10：1 至 100：1：0.5 之間為佳。土壤中若有氮、磷不足的部分，應適當的添加，但過量也不好，必須小心加以控制。

最後必須評估生物堆的布置，不得太緊密，有礙於透氣及水分之保持，以及空氣注入之傳輸途徑。

二、土壤質地

土壤質地與土壤滲透性、水分含量、土壤密度等有關，土壤質地不宜太過於緊緻，以免氧氣、營養鹽、水分等無法平均分散保存於土壤層之中。

三、污染物特性

首先是污染物之揮發性必須加以注意，土壤中有機污染物因土壤翻動而逸散出土壤堆，這是不願意被見到的，因為本項方法乃期望生物作用能為主要之降解污染物方式，否則必須再進行逸散氣體的防制工作。因此，在翻土時，必須控制其速度強度。一般而言，汽油、柴油在微曝氣情形下並不會大量逸散出土壤堆，但 VOC 的揮發性較高，必須加以控制。

其次視污染物的化合物結構特性是否符合生物作用需求，一般而言，汽油、柴油等油品類，較具生物分解性，但若是潤滑油、機油、熱燃油(heating oil)等，則具較低之生物分解性。

而關於污染物濃度範圍，建議總石油碳氫化合物(TPH)濃度不大於 50,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。而另一方面若 TPH 值高於 50,000 ppm，或是重金屬濃度高於 2,500 ppm 而欲以土耕法整治時，則可以考慮添加乾淨的土壤稀釋，不過這項措施必須審慎考慮經濟因素，以及置換土壤來源追蹤，避免造成廢棄土壤產生。

四、天氣條件

土耕法必須注意天氣的狀況，首先是氣溫，因為氣溫會間接影響土壤的溫度，如果氣溫超出前述土壤溫度合適範圍，就必須採取補助升溫或降溫之措施。

其次降雨也會直接影響土壤整治之效果，因為一般的土耕法並未設計加蓋的措施，降雨破壞土堆結構，或是提高土壤含水量。因此，一般而言，常年降雨量超過 30 英吋(762 公釐)的地區，可能不考慮此項方法，或是設計加蓋、雨水收集溝渠等輔助結構設備。而底部也應

設計滲水收集設施。

風力也是一項考量因子，風蝕作用(erosion)可能會造成土堆表層的封閉性結構產生，導致土壤層的通氣效果下降。

1.2.2 整治系統單元

一個完整之土耕系統，設置相關設施時必須注意下列事項：

一、土地需求

土地需求面積取決於待處理的土壤總量，以及耕土機可翻土之深度。一般土耕法設計翻土層高度建議約為 12 到 18 英吋(約 30 至 45 公分)，最深也有可翻至 24 英吋(約 60 公分)之強力耕土機。土壤總體積除以設計高度，即可得土地面積需求，但也可以將污染土壤分批次翻耕。一般另外需提供其他額外的空間來構築土堆側邊的斜坡。

二、布置方式

場區設計決定於翻土區的布置方式，土耕法系統可以是單一翻土區，也可以是多個翻土區。

三、土耕區結構

(一) 包括：準備區、路肩、底部不透水布(視需要)、滲水收集設施及處理系統、土壤前處理設施(如 pH 調理、加藥等)、逸散氣體處理設施(視需要)以及其他耗材零件等。

(二) 耕土機：使用一般農用耕土機即可，但可以再進一步使用有效的方法，例如將使用圓盤式轉動的設備，拖曳在耕土機之後，以避免供氣的土壤被耕土機的輪胎壓緊。

四、其他注意事項

(一) 場址必須做好妥善的安全管理，防止民眾故意或無意的接觸場址內的污染土壤，危害健康。

(二) 不定期灑適量的水，以防止因風力吹動而造成空氣中粒狀污染物濃度增加。

1.2.3 整治系統監測

土耕法運轉過程中，與其他現地整治方法不同的是，本項方法是在侷限的區域以及控制條件下進行整治工程，而不是將藥劑、空氣等注入地層之中，較不會有污染區因整治工程造成擾動的風險；但是，因為整治區的開發空間型態，必須做好揮發性污染物逸散防制、水污染防治等二次公害防治工作，操作注意事項則包括操作計畫、運轉過程監測等兩大項，必須盡量完善做到這兩項內容之規範，才能避免二次污染發生，茲詳述兩項規範內容如下：

一、操作計畫

包括三大操作計畫：「耕土/翻土」、「營養鹽添加」、「水分添加」等施作頻率計畫，各計畫可以根據實際現場情形調整，包括季節性、雨量、大氣條件、氣溫等。如果下雨天或平時有加覆蓋，如塑膠布、不織布、尼龍布等，必須隨時注意是否有破洞、撕裂等。

二、監測計畫

即使在良好的操作情況之下，也難免會有意外的情形發生。為了確保二次污染不會發生，或是發生時也能立即得知並進行改善的動作，因此必須進行監測。茲彙整土耕法建議監測計畫內容如表 1.2.3-1。

表 1.2.3-1 土耕法建議監測計畫內容

監測介質	監測目的	取樣頻率	監測參數
土耕區的土壤	分析土耕區生物降解效果	操作期間每月或每季一次	微生物量、污染物濃度、pH、氮、磷、水分及其他生物生長限制因子
大氣	分析場址操作人員及附近民眾之健康危害性	操作前二週每週二次，此後每季一次，或依據空氣污染防治法規定辦理	揮發性有機污染物、粒狀污染物
滲出水	分析溶解性或懸浮性污染物	依據水污染防治法規定，或是環保機關更嚴格的審查要求	依據水污染防治法規定，或是環保機關更嚴格的審查要求，其中必須包括危害性有機物
土耕區下方土壤	監測污染物的移動。	一季一次或半年一次	危害性有機物
土耕區下游地下水	監測溶解性污染物的移動。	一年一次	溶解性的危害性有機物

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

1.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

VOCs 氣體逸散濃度必須符合國內相關空氣污染防制法令。依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm，。

而滲出水部分，若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量，若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，應符合我國污染防治相關法令，在無法符合放流水質標準之情況下，必須設置廢、污水處理設施。

場址附近的地下水必須監測，其地下水濃度不得超出我國「地下水污染監測基準」以及「地下水污染管制標準」。

1.3 成本及期程評估

本項技術若操作得當，因為其係在良好的控制單元之下進行工程經費預估值較能掌握。一般而言，每噸土壤處理費用約 30~90 美元(約新台幣 1,050~3,150)，較其他地上處理程序便宜。在已調整為最適的操作狀況之下，平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. “Soil Vapor Extraction and Boilventing(EM 1110-1-4001)”, USACE, 2002.
3. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>

4. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>
5. 美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

二、低溫加熱脫附法 (Low-Temperature Thermal Desorption)

2.1 整治技術簡介

2.1.1 原理

低溫加熱脫附法 (Low-Temperature Thermal Desorption) 常以英文縮寫 LTTD 簡稱。低溫加熱脫附法被歸類為離地 (ex-situ) 型態的處理技術，針對受到油品類污染之土壤，利用「物理性」處理方式，移除受污染之土壤，主要係將受污染土壤挖除之後，送入加熱脫附機，使得污染物和土壤分離。低溫加熱脫附法之加熱脫附機內主要污染物去除機制可能由下列三項單元組成：

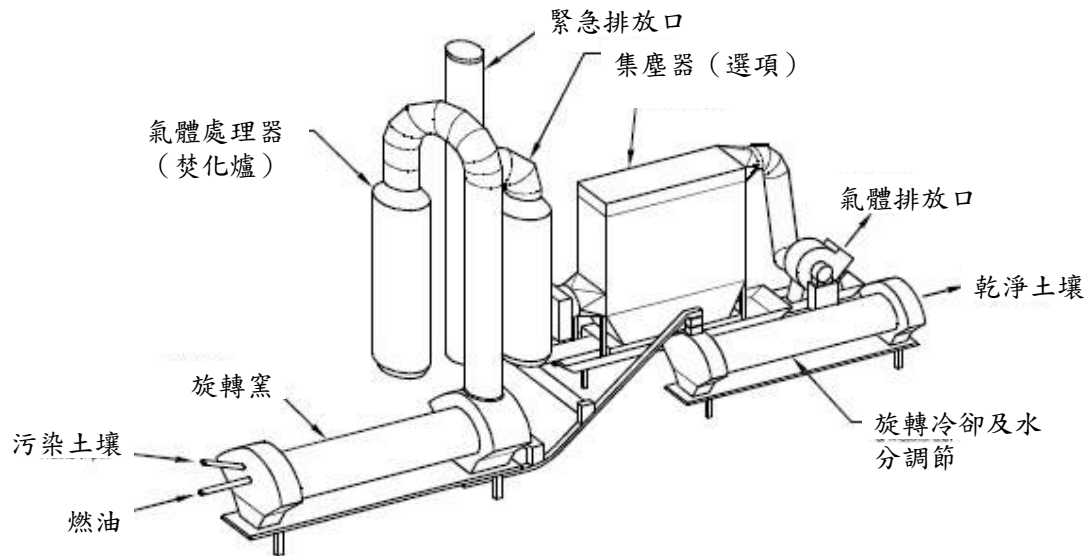
- 一、熱揮發 (thermal volatilization)
- 二、熱脫附 (thermal stripping)
- 三、熱烤 (soil roasting)

被移除之污染物因屬於有機氣體成分，因此需要利用後續「二次處理」 (secondary treatment) 設施進行處理，例如：

- 一、焚化：設置焚化器 (incinerator)，將污染物焚化成二氧化碳及水。
- 二、觸媒氧化：設置觸媒氧化器 (catalytic oxidation chamber)，同樣將污染物分解成無機性之二氧化碳及水。
- 三、冷凝：設置凝結器 (condenser) 等，將含污染物高溫氣體凝集之後收集，蒐集之液體再進行後續處理。
- 四、吸附：設置活性碳吸附設備 (carbon adsorption unit) 吸附氣體中之污染物，將其移除。

若用焚化法、觸媒氧化法可將有機物直接分解成無機性碳源後排放，但冷凝法及活性碳吸附法則必須再進行廢水、廢棄物等型態之處理。焚化產生之熱能，可以利用熱交換器回收，但焚化產生之粒狀污染物，必須加

以蒐集處理，例如設置集塵袋等。典型的低溫加熱脫附法系統設備示意如圖 2.1.1-1 所示。



多孔性土壤滲漏測定計

參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 2.1.1-1 低溫加熱脫附法處理系統

部分污染土壤必須進行初篩工作，以避免大型土壤顆粒或石塊進入低溫加熱脫附器之中，通常篩選器設定土壤粒徑應至少小於 2 英吋(約 5 公分)較佳。

低溫加熱脫附法處理完成之乾淨土壤，因已經熱交換，因此土壤溫度已降至一般環境溫度，惟其必須依政府規定或整治計畫書規劃，回填原址，或是送交其他合格處理單位辦理後續處置。若要回填至原址，則必須注意是否再視需要添加水分、營養份等，以增加土壤肥力，提昇再利用之價值。

低溫加熱脫附處理器可分為「移動型設備」及「非移動型設備」。移動型設備可以搬至污染場址內，現場直接處理挖除的土壤；而非移動型設備則因設置於場外，污染土壤可能會有運送行為產生，必須注意運送過程中，避免土壤二次污染產生，以及進行必要的運送管制作業。

低溫加熱脫附法對於處理油品類污染土壤相當有用，但對於地下含水

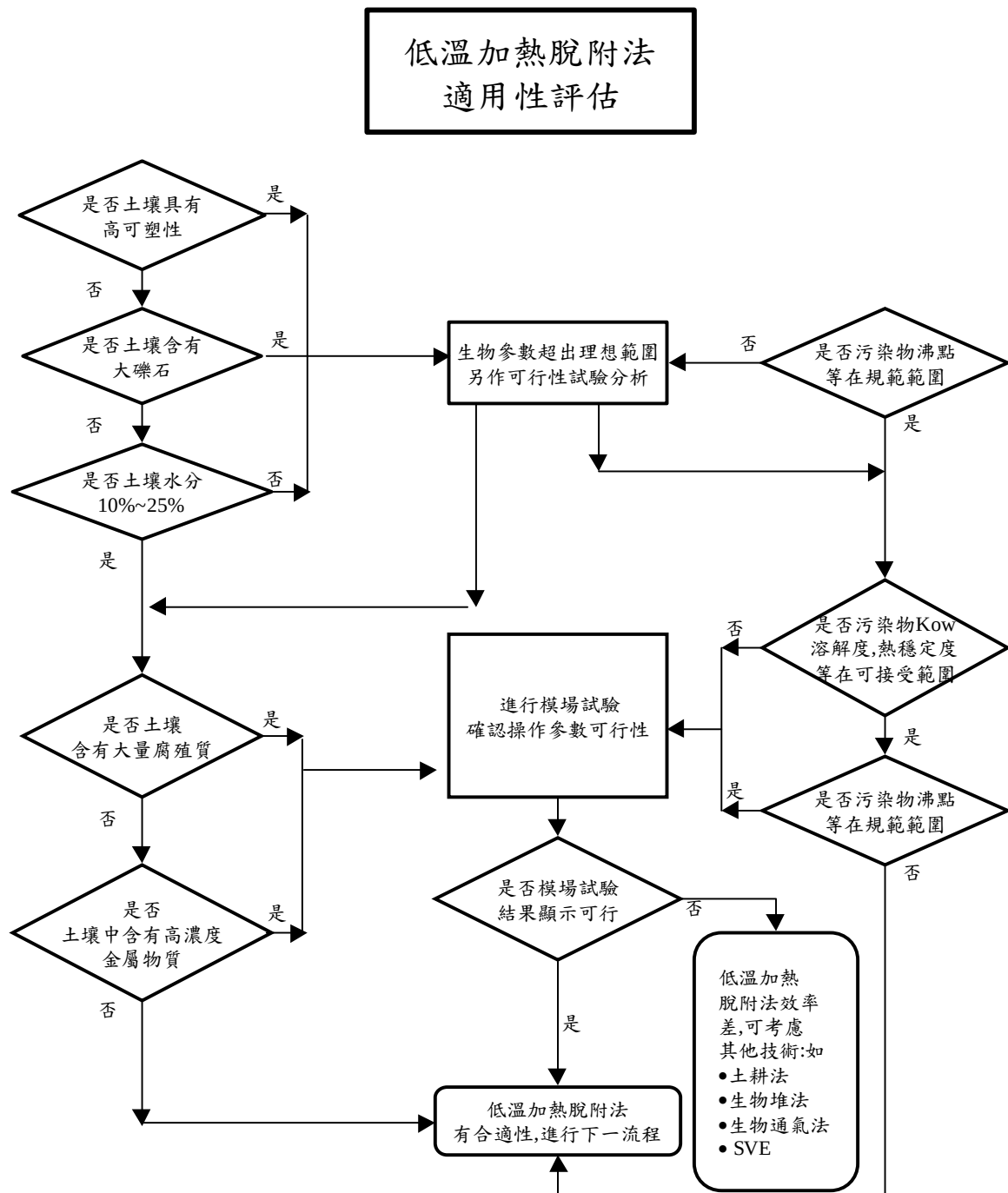
層污染而言，本項方法並不適用。至於加熱溫度一般經常控制於 150~540℃，最高不超過 650℃左右下操作。較低溫度下可以脫附油品類物質中汽油等成分，而不產生燃燒作用；柴油、煤油等則必須達到 370℃以上；至於不具揮發性的潤滑油、加熱用油等，則需要更高的加熱溫度才能脫附。

2.1.2 適用條件

關於使用低溫加熱脫附法的適用性評估詳圖 2.1.2-1，而適用性之查核項目則可參考表 2.1.2-1。低溫加熱脫附法僅適用於處理受污染之土壤，對於地下水含水層污染並不適用。

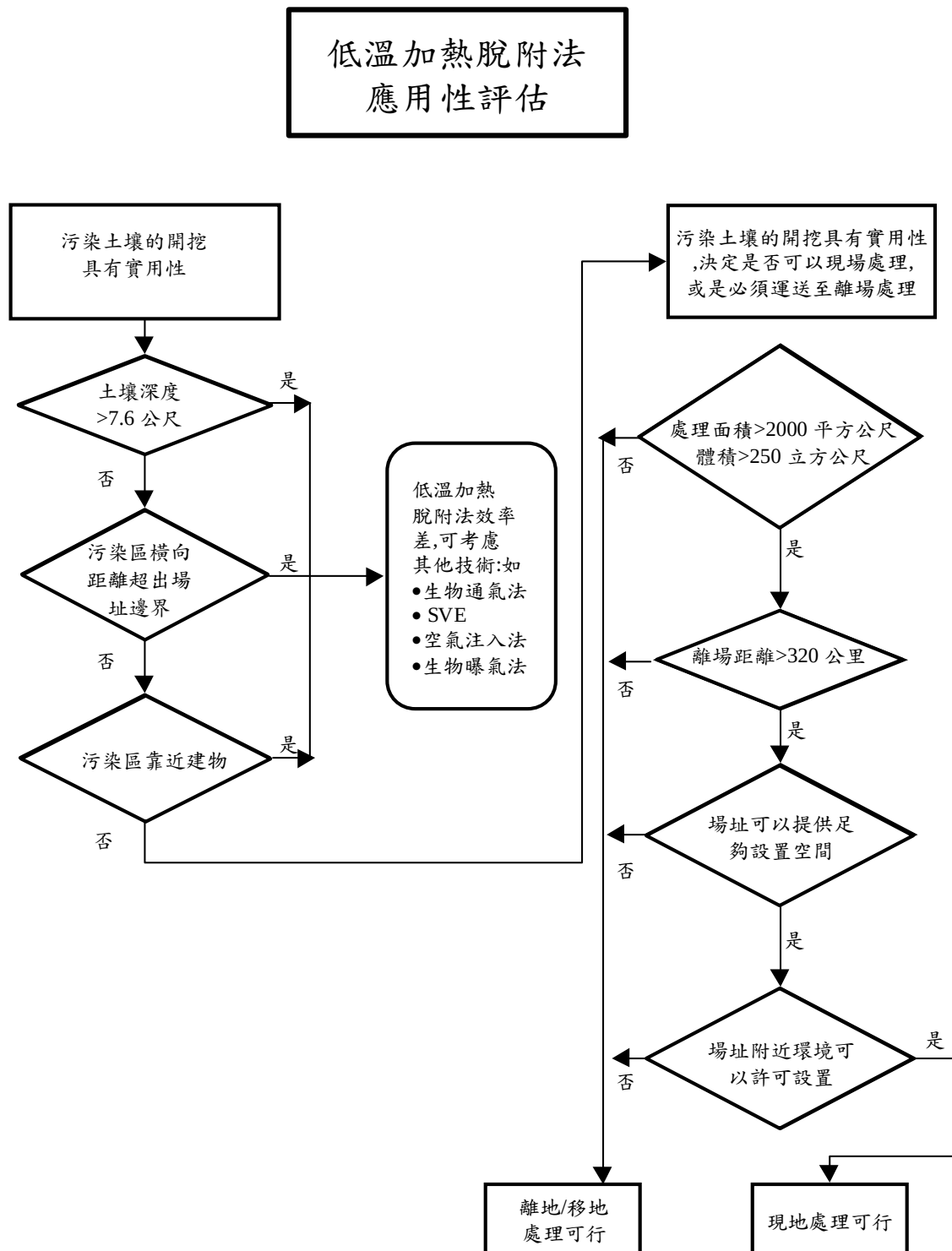
低溫加熱脫附法使用之優缺點詳述整理如表 2.1.2-2。綜合其優缺點說明可以發現，對於整治設備而言，係以成套設備來處理被挖除的土壤。而若將各項整治設備單元分開來看，無論加溫、氣體處理等設備單元，也都應該有較多的商品化成品可以詢得，再視需要，個別組合。因此，只要土壤進料控制得宜，均可以達到良好的處理效果，甚至能夠將濃度降至比生物堆法、生物通氣法等離地處理方式還要低。但操作上因涉及高溫尾氣處理，必須由具有良好經驗之人員操作辦理。

然而在環保主管機關的立場上，若污染行為人選用本項方法，必須全面防止場址的二次污染，包括防止燃燒不完全、注意尾氣中粒狀污染物、揮發性有機物之監測等。此外，若處理設備不打算設置於現場，則必須另外考量廠商是否提出完善之土壤運入、移出之管理制度，避免人為故意或疏忽所造成之違法行為，環保主管機關也須審慎考量是否同意其運送污染土壤離場處理行為。



參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

圖 2.1.2-1 低溫加熱脫附法簡易評估流程



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 2.1.2-1 低溫加熱脫附法簡易評估流程(續)

表 2.1.2-1 低溫加熱脫附技術選用查核表

1.0 評估低溫熱脫附之效能：	是	否
1.1 土壤是否具高可塑性(plasticity)？		
1.2 土壤含有石塊？		
1.3 土壤濕潤度是否高於 35%？		
1.4 TPH 濃度是否高於 2%？		
1.5 碳氫化合物是否為高揮發性？		
如果以上有任何答案為「是」，土壤必須進行前處理		
1.6 土壤是否含高濃度之腐植質？		
1.7 土壤是否含高濃度之重金屬？		
1.8 污染物之 K_{ow} 是否相對高值？		
1.9 土壤中是否有戴奧辛前驅物？		
如果以上有任何答案為「是」，必須進行模場測試		
1.10 模場測試結果是否顯示可應用低溫熱脫附？		
2.0 評估採用低溫熱脫附之實用性：		
2.1 受污染土壤深度是否不深於 25 英尺(7.6 公尺)？		
2.2 建築物下方或近建築物地基處沒有污染嗎？		
如果以上有任何答案為「否」，開挖不實際所以不適於採用低溫熱脫附		
2.3 現場是否有足夠的空間設置設備、操作與暫存污染與處理？		
2.4 離地處理設施是否離場址相當遠？		
2.5 周界土地利用狀況是否允許現場系統之操作？		
如果以上有任何答案為「否」，開挖之土壤必須送至離場處理設施		
3.0 評估採用低溫熱脫附之效益		
3.1 是否會採集適量之現場土壤樣品進行分析？		
3.2 是否會採集適量之處理後土壤樣品進行分析？		
3.3 建議之脫附單元是否曾經成功處理類似之污染程度的土壤？		
3.4 建議之最終處置措施是否可接受？		
如果以上有任何答案為「否」，必須取得更多的資訊進行評估		

參考資料：” How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

表 2.1.2-2 低溫加熱脫附法優缺點比較表

優點	缺點
- 現場(on-site)或離場(off-site)的技術及設備上取得容易，已經商業化(如美國)。 - 非常快速的處理時間，商業化系統每小時處理量可達 25 噸土壤。 - 處理大量土壤時(大於 765 立方公尺)，具有競爭優勢，每噸土壤處理費用約 30~70 美元，但不包括離場(off-site)處理方式的土壤運輸費用。 - 可以快速處理主污染區(hot spot)的高濃度油品污染。 - 可以簡單的和其他技術再進行結合處理，例如空氣注入法等。 - 經處理土壤可以回填原場址，或是做為原污染場址以外地方之其他填土用途(惟必須經環保機關同意)。 - 可持續降低 TPH 至 10 ppm 以下，以及 BTEX 至 100 ppb 以下，或甚至更低。	- 必須挖除土壤，但一般限制在地表以下深度 7.6 公尺以內。 - 現地處理必須有足夠的設備設置空間(大約大於 2,000 平方公尺) - 離場(off-site)處理方式的土壤運輸費用較高。 - 欲處理地下水面以下之含水層土壤者，必須以抽水等方式先降低地下水位。

參考資料：”How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002,May 2004.

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

低溫加熱脫附法之選用，主要考量下列兩大項目及其分項參數：

一、 土壤特性

首先為土壤塑性(soil plasticity)評估，主要是為了避免在高溫下成型，亦即土壤在處理程序過程中，能維持顆粒狀的型態，若加熱後會成型之土壤(可塑性較高)者，可能不適合加熱處理。若簡單的以土壤型態區分，砂質土以及黏土較容易在加熱過程中產生黏聚現象。而在實用性上，若無法仔細區分土壤性質，可加以前處理，例如進行篩選、破碎、混和等，以避免土壤分類技術上太過於繁雜。

其次是粒徑大小(particle size)的確認，其和上述土壤塑性參考之理由一樣，主要是避免過大的顆粒在加熱過程中產生黏聚、脫附效果不佳之情形，粒徑大小至少在 5 公分以下，且儘量分選土壤顆粒均一者，可以確保污染物之脫附效果。

土壤水分含量(moisture content)也相當重要，水分含量多寡決定土

壤於加熱反應器內之停留時間，水分太多，有可能造成停留時間必須延長，增加處理成本。一般土壤含水量在 10~25%之範圍內，較適合用本項整治技術方法執行。

熱容量(heat capacity)決定需要提供提昇溫度之能量多寡，但由於一般各種土壤之熱容量都不大，不會造成應用性的太大差異。

土壤中腐殖質(humic material)成分濃度太高會使得油品類物質容易吸附於腐殖質，造成脫附效果變差。

其次，重金屬濃度也是一項重要參考參數，雖然現在大多使用無鉛類油品，但過去許多油品內會添加含鉛的化合物，過去洩漏造成之土壤污染，可能會含有重金屬導致脫附效率變差，亦會造成空氣污染物排放濃度增加的可能。

最後考量整體密度(bulk density)，一般現地之土壤約為 1.3~1.9 公噸/立方公尺，經抽挖除後處理之土壤之合適處理整體密度約為現地土壤的 75~90%。

二、 污染物特性

因為本項整治技術係用加熱處理方式，因此下列有害毒性物質必須加以關切注意：

- (一) BTEX(Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes)。
- (二) 總有機鹵化物(Total organic halides, TOX)。
- (三) 揮發性有機物、半揮發性有機物以及重金屬之毒性溶出試驗(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)。
- (四) 總重金屬(Total metal)。
- (五) 多氯聯苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)。
- (六) 可燃性。
- (七) 腐蝕性。
- (八) 反應性。

油品污染物之濃度必須加以控制，一般建議進料土壤之 TPH 平均濃度為 1~3%，超過這個範圍可能造成脫附負荷過重，導致處理後之土

壤殘留濃度，必要時須再混合已經處理後乾淨的土壤，加以稀釋。惟濃度太低雖然仍可處理，但可能降低有效利用率，造成設備浪費。

其次考量沸點，汽油沸點在 40~225°C 之間，煤油在 180~300°C 之間，柴油在 200~338°C 之間，加熱用燃油大於 275°C，而潤滑油等則不具揮發性。一般低溫加熱脫附法之操作溫度約在 150~550°C 之間，旋轉乾燥器規格，應選擇使大部分之油品，能在操作溫度下脫附，而且不會直接燃燒。在蒸氣壓方面，大部分之油品均能在操作溫度下揮發。

另外，考量分散係數(octanol/water partition coefficient, K_{ow})，係以 $\log K_{ow}$ 為指標，決定土壤粒子間與油品吸附程度的容易與否，其值越高，油類分子傾向於吸附於土壤之中，比較不容易脫附。

設計參數上亦可以考量熱穩定度(thermal stability)，因為本項技術單元並不期望有加熱裂解或是焚燒的情形發生，因此，所以尾氣溫度必須低於油品類會被焚燒之溫度，也就是低於油品會產生自燃現象的溫度。

最後，因為本項技術處理過程中，包括了加熱程序，最重要的關切議題為戴奧辛的產生與否。若遭油品污染的土壤中，混合著 PCBs 或是其他含氯的化合物，即有可能在尾氣中發現戴奧辛。但因為一般油品類儲槽系統，並不會同時儲存包括如 PCBs 等的物質，因此洩漏污染場址中，若以本項整治技術並不會有產生戴奧辛的疑慮。唯一必須注意的是，若場址中包含了廢棄物，或是有含氯有機污染物存在者，處理後排放之尾氣即有產生戴奧辛的可能。不論如何，在採用本項技術之前，最好能分析污染土壤中是否存在 PCBs 或含氯有機物，以消除戴奧辛可能產生的疑慮。

2.2.2 整治系統單元

一個完整之低溫加熱脫附系統，包括下列相關設施：

一、旋轉乾燥窯

本項設備為程序核心，可以採用圓筒式金屬外殼不鏽鋼之旋轉窯，待處理污染土壤於本單元中加熱，揮發、脫附受污染的油品。旋轉窯為技術成熟之產品，可以選擇合適之容量及各種規格(例如可逆式及不

可逆式)，一般而言，最重要的是旋轉窯之溫度能夠保持在各項油品種類之沸點之上。

各種油品如汽油、柴油、煤油、航空用油等均有不同的合適處理溫度，可依據沸點而定；但若是處理綜合性油品污染之土壤，一般操作溫度常控制於 650°C 左右操作，可以脫附大部分油品類物質。

處理停留時間並無一定限制，必需視污染物濃度、種類、處理器規格型式等決定。在環保主管機關立場，可由整治單位自由選擇處理器廠牌形式，但廠商必須依據廠牌特性，試算合理的處理停留時間，確保尾氣、處理後土壤的去除率。

一般建議本整治技術必須進行模場試驗，主要本項技術涉及較精密之加熱脫附、尾氣處理等技術經驗，模場試驗可以確保污染物不會裂解成為其他毒性物質，尾氣也能適當處理。

二、熱交換系統：

處理後土壤及其排放尾氣均處於高溫狀態，土壤部分雖然可以直接排出自然冷卻，但會有產生粒狀污染物等疑慮；而尾氣部分，高溫下會對後續之氣體處理裝置如集塵袋等造成傷害，因此，在進入尾氣處理設備前，可以先用熱交換系統冷卻尾氣。

三、尾氣處理設備

土壤經加溫脫附所產生的尾氣，會產生包括下列三種類型之污染物：(一)粒狀污染物；(二)揮發性有機氣體；(三)其他碳氧化合物(如二氧化碳等)。粒狀物處理器可以用乾式(如集塵袋)及濕式(如文氏洗滌塔(venturi scrubbers))處理方式。至於揮發性有機氣體可以冷凝回收、後燃燒設備燃燒、活性碳吸附回收等方法處理。

2.2.3 整治系統監測

一、土壤運輸

現場處理並不會有土壤搬出、移入之情形。但如果採用移地離場處理，土壤搬出或移入時，必須規劃紀錄管制，其詳細管制計畫可由環保主管機關審查同意，避免污染土壤動向不明，或在運輸過程中產

生二次污染；另應詳細規劃緊急應變措施，確保運輸過程中之安全。
一般建議仍以現場處理方式為佳。

二、尾氣監測

若場址位置附近有敏感受體，例如學校、住宅等，包括揮發性有機氣體、二氧化碳、一氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、粒狀污染物等，建議能採用連續自動監測設施隨時監控為佳。但若考量場址非位於民眾活動之區域，而位於工業區等，亦可每月以人工採樣方式進行，惟其頻率可視需要由主管機關同意。

三、噪音振動監測

若場址位置附近有敏感受體，例如學校、住宅等，建議執行連續性噪音計設置量測，而振動量測每月一次。但若考量場址非位於民眾活動之區域，而位於工業區等，噪音及振動亦可進行，惟其頻率可視需要由主管機關同意。

四、操作監測

即使在良好的操作情況之下，也難免會有意外的情形發生，因此，為了確保二次污染不會發生，或是發生時也能立即得知並進行改善的動作，因此，必須進行操作監測，確保其在最佳運作狀態。茲彙整本項技術之操作監測項目如表 2.2.3-1 所示。

表 2.2.3-1 低溫加熱脫附法操作監測項目

內容	頻率	地點	項目
開挖	未限制	開挖邊	TPH
		開挖底部	其他關切項目
LTTD 處理	每 76.5 立方公尺的待處理/已處理土壤	待處理土壤	TPH
		已處理土壤	其他關切項目

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

2.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

VOCs 氣體逸散濃度必須符合國內相關空氣污染防制法令。依本署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為

公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm，且排放之氣體若有臭味(或厭惡性異味)，亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。

此外，以焚化方式處理尾氣者，另會產生粒狀污染物，粒狀污染物經集塵袋等處理之後，其排放濃度亦必須符合我國「固定污染源空氣污染物排放標準」規定，依據煙囪高度、管徑大小等，計算粒狀污染物之排放許可濃度。

若遭污染土壤中含有 PCBs 或是其他含氯化合物，即有可能在處理過程中產生戴奧辛，故應避免處理此類土壤，或須考量採取戴奧辛去除之措施。

2.3 成本及期程評估

本項技術若操作得當，因為其係在良好的控制單元之下進行，故工程經費較易預估掌握。一般而言，每噸土壤處理費用 30~70 美元(約新台幣 1,050~2,450)，但不包括離場(off-site)處理的土壤運輸費用。商業化系統每小時處理量可達 25 噸土壤，可以概估處理所需耗費之時間。

參考文獻

1. “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites — A Guide for Corrective Action Plan Reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.
2. 美國聯邦整治技術協調會 FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)網站，網址為 <http://www.frtr.gov/>
3. 美國環保署 Hazardous Waste Clean-up Information 網站，網址為 <http://clu-in.org/>

美國環保署 Reach It 網站，網址為 <http://www.epareachit.org/>

Stegemeir, G.L. and Vinegar, H.J.(2001)Thermal Conduction Heating for

In-Situ Thermal Desorption of Soils, in *Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook*(Editor: Chang, H.), Chapter 4.6-1, CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A.

TerraTherm(1998)Case Study: Commercial ISTD Project, Eugene, OR,(http://www.terratherm.com/casestudies/ws_eugene.pdf)

三、開挖處理法(Excavation)

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，而且被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。

3.1.2 適用條件

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，無法應用於處理地下水。

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，其與開挖面積及數量有關，而處理受污染土壤可能需要更長的時間。對於污染場址而言，如果僅考量開挖回填的時間，則開挖法比其他整治技術所需時間短，所以可以快速回應必要的緊急應變處置需求，此為其優勢之一。

如果將後續處理一併考慮，則整個開挖處理的時間就會拉長，而這將

取決於有害化學物質的種類與濃度、受污染區域的大小與深度、土壤種類以及土壤的水分含量。

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

開挖處理法通常可以非常安全的將受污染之土壤由場址移除，但對於部分有害物質必須特別注意工作安全之預防規劃。例如油品類污染物質極易揮發至空氣中，要避免這種狀況的影響，現場工作人員可考量以泡沫覆蓋地面或將揮發氣體導入集氣井中，避免開挖過程造成人員的傷害。如有酸與爆炸物的考量，則必須規劃讓工作人員穿著適當之安全防護衣與防護裝備，以降低其操作之危險性。

如果開挖處理被選擇做為處理受污染土壤之技術，當目視明顯可視土壤受到污染、利用 PID 量測總石油碳氫化合物濃度在 10 ppm 以上或含飽和油相土壤存在時，開挖深度至少須達 60 公分(包括裏土)。所挖出暫置之土壤應該要在送往處置或處理場之前進行土壤採樣。

開挖過程可採用適當的現地量測儀器篩選挖除之土壤，並以適當的量測頻率確認土壤移除之必要性(如每 10 立方公尺進行一次土壤氣體檢測)。

開挖完成後，應於開挖區域底部進行土壤採樣分析，所有的樣品應確實標示其基質、採樣點、採樣深度等，同時應提供相關之平面圖，以清楚顯示樣品與開挖區域的相對關係。

開挖處理法的整治效能取決於土壤受污染的程度，當土壤中有飽和油相存在且未在開挖過程中移除，則可能成為地下水的持續污染源，因此在規劃設計過程中應將浮油移除考慮在內。

開挖的速度取決於多項因素，包括車載數量與卡車的運作等。一般而言，18,200 公噸的污染土壤約需 2 個月的時間才能完成清運。

3.2.2 整治系統單元

一般而言，土壤開挖法所需的設備或設施至少包括下列項目：

- 一、 重型開挖機具設備(如挖土機、推土機)。
- 二、 土壤載運工具(如重型卡車)。
- 三、 測爆器。
- 四、 現場土壤氣或揮發性有機物偵測器(如 PID/FID)。
- 五、 防止揚塵之設施(灑水系統)。
- 六、 暫置場。
- 七、 後續處置設施(如合法廢棄物掩埋場)。

3.2.3 整治系統監測

開挖處理法可能造成污染擴大的途徑包括揚塵與逕流，因此於防止污染擴大之控制措施上，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，可於暫置場週界設置截流溝並設置遮蔽棚，並以暫存槽收集截流水，依其水中碳氫化合物之濃度高低再進行處理(如氣提設備)或逕行放流。

3.2.4 二次污染防治與安全衛生管理

開挖所產生的受污染廢土不論是在開挖過程或是在場址內暫置時，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(如下雨、揚塵)造成污染物逕流至地表水或其他周界之敏感環境受體，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。

此外，整治單位有時會被要求說明於土壤開挖過程中，氣體揮發對於建築物或週邊設施的環境影響風險，或者對於表面水/飲用水的衝擊。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說明這些風險的影響。

3.3 成本及期程評估

一般開挖處理法的開挖與處置成本約在每公噸美金 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、搬運與僅送至有害廢棄物最終處置場處置之費用。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。

參考文獻

1. “A Citizen’s Guide to Soil Excavation”, USEPA, EPA 542-F-01-023, December 2001.
2. “Excavation of Petroleum Contaminated Soil”, Guidance Document 3-01, Petroleum Remediation Program, Minnesota Pollution Control Agency, Minnesota, U.S.A., April 2005.
3. “Remediation Technologies Screen Matrix and Reference Guide”, Version 4, Federal Remediation Technology Roundtable, 2002.
4. “How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.