

土壤及地下水污染調查與整治技術參考手冊

現地化學氧化法整治技術參考指引

出版日期：民國 108 年 1 月
出版單位：行政院環境保護署

目錄

	頁碼
第一章 前言.....	1-1
1.1 目的.....	1-1
1.2 適用範圍與限制.....	1-2
1.3 內容概述.....	1-3
1.4 中英文專有名詞對照表.....	1-6
第二章 技術原理介紹.....	2-1
2.1 污染物傳輸與去除機制.....	2-1
2.1.1 污染物傳輸.....	2-2
2.1.2 現地化學氧化藥劑傳輸.....	2-4
2.1.3 污染物去除機制.....	2-8
2.2 氧化劑種類.....	2-11
2.2.1 過氧化氫系統.....	2-12
2.2.2 高錳酸鹽氧化系統.....	2-17
2.2.3 過硫酸鹽氧化系統.....	2-22
2.2.4 臭氧氧化系統.....	2-28
2.3 ISCO 技術適用範圍.....	2-32
2.4 ISCO 與其他技術的整合.....	2-39
第三章 場址特性調查和概念模式.....	3-1
3.1 地質與化學特性參數.....	3-4
3.1.1 水力傳導係數.....	3-4
3.1.2 滲透率.....	3-5
3.1.3 土壤質地與孔隙率.....	3-5
3.1.4 水力梯度與地下水流速.....	3-7
3.1.5 臺灣重金屬背景.....	3-7
3.2 污染物之物化特性.....	3-8

3.2.1	污染物濃度	3-10
3.2.2	溶解度	3-10
3.2.3	土壤分布係數	3-10
3.3	場址調查方法	3-13
3.4	場址概念模型建置方法	3-14
第四章	系統設計基本資料需求	4-1
4.1	執执行程序	4-1
4.2	實驗室試驗	4-3
4.3	模場試驗	4-9
4.4	試驗效能與數據分析	4-12
4.5	試驗報告建議內容	4-13
第五章	系統設計原則	5-1
5.1	氧化劑濃度和體積計算	5-2
5.2	氧化劑輸送方法	5-8
5.3	系統設備	5-22
5.4	系統性能設備維護	5-25
5.5	二次污染防治設備	5-25
第六章	設備試運轉測試	6-1
6.1	概述	6-1
6.2	蒐集基準點資料	6-2
6.3	設備運轉與測試	6-2
6.3.1	設備安裝狀態確認	6-3
6.3.2	個別設備功能檢查	6-5
6.3.3	系統功能整合性檢查	6-5
6.4	系統啟動	6-5
6.5	資料評估與啟動報告	6-7
第七章	系統操作與維護	7-1
7.1	系統操作功能維護	7-2

7.1.1	操作策略.....	7-2
7.1.2	設備功能維護.....	7-4
7.1.3	工業安全衛生管理計畫.....	7-8
7.2	系統操作功能監測.....	7-13
7.3	系統修正與優化.....	7-19
7.4	O&M 撰寫指引.....	7-20
第八章	整治效能評估.....	8-1
8.1	評估策略.....	8-1
8.2	評估方式.....	8-2
8.2.1	監測位置選定.....	8-2
8.2.2	監測項目與頻率.....	8-2
8.2.3	採樣方法.....	8-4
8.2.4	監測頻率與時間.....	8-4
8.3	評估結果分析.....	8-7
8.3.1	含水層平衡評估.....	8-7
8.3.2	污染物濃度反彈與再污染.....	8-7
8.3.3	場址條件變化.....	8-8
8.3.4	統計方法.....	8-9
8.4	系統關閉.....	8-10
第九章	綠色及永續導向型評估.....	9-1
9.1	方案決策支援系統.....	9-4
9.2	環境面評估.....	9-8
9.3	經濟面評估.....	9-11
9.4	社會面評估.....	9-15
9.5	ISCO 之 GSR 計算邏輯.....	9-17
9.6	GSR 評估結果產出.....	9-25
9.7	最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs).....	9-26
9.8	現地化學氧化主要環境足跡來源與最佳管理措施建議.....	9-30

第十章 整治成本估算	10-1
10.1 類別估算.....	10-1
10.2 成本估算範例.....	10-2
第十一章 案例解析	11-1
11.1 國內案例.....	11-1
11.2 國外案例.....	11-8
11.2.1 印地安納州紐卡斯爾之停業加油站（[13]ITRC, 2005）.....	11-8
11.2.2 加州洛杉磯皮爾斯加油站（ITRC, 2005）.....	11-10
第十二章 技術常見問題與說明	12-1
12.1 設備問題.....	12-2
12.2 操作期間問題.....	12-3
12.3 環境問題.....	12-4
參考文獻	參-1

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.1-1	DNAPL 污染傳輸概念模型..... 2-3
圖 2.1-2	常見的現地化學氧化藥劑注入方法..... 2-4
圖 2.1-3	污染物分布與現地化學氧化藥劑傳輸..... 2-5
圖 2.1-4	現地化學氧化藥劑分散與污染物濃度變化關係示意圖..... 2-6
圖 2.1-5	密度造成現地化學氧化藥劑流動的影響..... 2-6
圖 2.1-6	氣體在含水層中移動示意圖..... 2-7
圖 2.2-1	以溶解性亞鐵離子催化過氧化氫化學反應關係圖..... 2-14
圖 2.2-2	高錳酸鹽氧化烯烴類化合物的反應機制圖..... 2-19
圖 2.2-3	臭氧現地化學氧化系統示意圖..... 2-28
圖 2.2-4	HSB model..... 2-30
圖 3.1.3-1	各種土壤之土壤滲透率..... 3-7
圖 3.2-1	污染物各種相態間關聯圖..... 3-9
圖 4.1-1	現地化學氧化法評估、設計流程圖..... 4-2
圖 4.2-1	NOD 計算結果範例..... 4-7
圖 4.2-2	反應速率計算結果範例..... 4-7
圖 4.2-3	管柱試驗結果範例..... 4-9
圖 4.3-1	注藥井與監測井分布與開篩位置案例示意圖..... 4-10
圖 4.4-1	污染物濃度反彈現象範例..... 4-12
圖 5.1-1	水力半徑的影響..... 5-3
圖 5.1-2	Theis 曲線擬合法示意圖 (範例)..... 5-4
圖 5.2.2-1	滲透性的影響..... 5-12
圖 5.2.2-2	由底部向上注入..... 5-12
圖 5.2.2-3	上下游循環法..... 5-13
圖 5.2.2-4	Geoprobe 直接貫入法注藥照片..... 5-13
圖 5.2.2-5	直接貫入法網格法注藥與藥劑流動情況..... 5-14
圖 5.2.3-1	批次添加與再循環法..... 5-18
圖 5.2.3-2	利用螺旋鑽混合土壤..... 5-18
圖 6.5-1	污染物濃度變化 (範例)..... 6-7

圖 7-1	系統操作與維護組織架構圖.....	7-1
圖 8.2.4-1	三氯乙烯於整治前、整治中、整治後之濃度變化.....	8-5
圖 9-1	綠色及永續導向型整治架構圖.....	9-1
圖 9-2	綠色及永續導向行整治推廣平台.....	9-4
圖 9.1-1	新增污染場址.....	9-6
圖 9.1-2	方案決策建立.....	9-7
圖 9.1-3	權重設定.....	9-7
圖 9.2-1	環境足跡分析結果(範例).....	9-9
圖 9.2-2	環境面評估頁面.....	9-10
圖 9.2-3	環境面評估成果呈現.....	9-11
圖 9.3-1	GSR 架構下之經濟面向衡量指標.....	9-12
圖 9.3-2	經濟面層級一評估.....	9-14
圖 9.3-3	經濟面層級二評估.....	9-14
圖 9.4-1	社會面評估頁面.....	9-16
圖 9.5-1	現地化學氧化法示意圖(Engineering Issue, US EPA).....	9-18
圖 9.5-2	現地化學氧化法環境足跡模組系統邊界示意圖.....	9-18
圖 9.5-3	現地化學氧化法污染區示意.....	9-19
圖 9.5-4	總管線長度示意圖.....	9-20
圖 9.5-5	原物料與機械載運作業模組化流程.....	9-23
圖 9.6-1	環境、經濟、社會面向評分結果.....	9-25
圖 9.6-2	方案評估總表.....	9-25
圖 9.7-1	BMPs 最佳管理措施篩選原則.....	9-28
圖 10.1-1	ISCO 工程成本估算精準範圍圖.....	10-1
圖 11.1-1	場址設施配置及基本地下水文圖.....	11-2
圖 11.1-2	歷年土壤調查超過管制標準點位及濃度.....	11-4
圖 11.1-3	歷年土壤調查超過管制標準點位及濃度.....	11-4
圖 11.1-4	第二次驗證採樣位置示意圖.....	11-5
圖 11.2-1	監測井 AW-7 及 AW-8 之苯濃度變化圖.....	11-10
圖 11.2-2	苯之等濃度圖(2003 年 5 月).....	11-11
圖 11.2-3	苯之等濃度圖(2004 年 1 月, Fenton's 試劑加入 6 個月).....	11-12
圖 11.2-4	監測井 MW9、MW10 及 MW18~MW21 之 TPHg 濃度變	

	化圖.....	11-14
圖 11.2-5	監測井 MW9、MW10 及 MW18~MW21 之苯濃度變化圖	
	11-14

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.4-1	中英文專有名詞對照表..... 1-6
表 1.4-1	中英文專有名詞對照表（續）..... 1-7
表 2.1.3-1	氧化劑強度..... 2-9
表 2.2-1	常見的現地化學氧化系統比較..... 2-11
表 2.2-2	Fenton' s CHPs..... 2-13
表 2.2-3	Fenton' s reaction of organics 2-13
表 2.2-4	不同過氧化物的 ISCO 系統比較..... 2-16
表 2.2-5	常用的高錳酸鹽物理化學特性..... 2-17
表 2.2-6	高錳酸鹽完全礦化的化學劑量要求*..... 2-21
表 2.2-7	過硫酸鹽溶解度..... 2-22
表 2.2-8	過硫酸鈉特性..... 2-22
表 2.2-9	過硫酸鹽的 pH 反應..... 2-23
表 2.2-10	過硫酸鹽活化方法與 pH 關係..... 2-24
表 2.3-1	四種常見氧化劑之比較..... 2-34
表 2.3-2	不同介質型態（滲透率）適用之氧化劑類型..... 2-34
表 2.3-3	四種常見氧化劑之催化與反應影響因子..... 2-35
表 2.3-4	ISCO 法適用之污染物通用原則..... 2-36
表 2.3-5	含氯有機溶劑的離子化潛力(data from Montgomery,1996)..... 2-38
表 2.3-6	四種常見氧化劑之適用污染種類..... 2-38
表 2.4-1	ISCO 與其他技術的整合..... 2-39
表 3-1	ISCO 場址概念模型所需重要內容與說明..... 3-2
表 3-1	ISCO 場址概念模型所需重要內容與說明(續)..... 3-3
表 3-2	對現地化學氧化藥劑分布影響的重要環境參數..... 3-3
表 3-2	對現地化學氧化藥劑分布影響的重要環境參數(續)..... 3-4
表 4.2-1	各種常見現地化學氧化藥劑分析方法..... 4-5
表 5-1	現地化學氧化法基本因子..... 5-1
表 5.1-1	應用 ISCO 試劑之考慮因子..... 5-6
表 5.2.1-1	注入策略注意事項..... 5-10

表 5.2.2-1	氧化劑垂直注入法設計經驗參數.....	5-12
表 5.2.2-2	直接貫注法常見經驗參數與建議安全因子.....	5-16
表 5.2.2-2	直接貫注法常見經驗參數與建議安全因子(續).....	5-17
表 5.3-1	常用系統設備清單.....	5-22
表 5.3-2	現地化學氧化法設備表.....	5-24
表 6.2-1	系統試運轉前基線資料蒐集確核表(範例).....	6-2
表 6.3.1-1	設備符合安裝完成確核表(範例).....	6-3
表 6.3.1-1	設備符合安裝完成確核表(範例)(續).....	6-4
表 6.4-1	現地化學氧化正式啟動檢查表(範例).....	6-6
表 7.1.1-1	ISCO 系統的操作問題與因應對策.....	7-3
表 7.1.2-1	ISCO 設備基本功能維護項目.....	7-4
表 7.1.3-1	工業安全衛生管理工作重點.....	7-8
表 7.1.3-2	氧化劑危害資料參考表.....	7-9
表 7.1.3-3	潛在之危害與保護措施.....	7-10
表 7.1.3-4	個人安全防護裝備等級分類.....	7-12
表 7.2-1	ISCO 操作紀錄表 (範例).....	7-15
表 7.2-2	ISCO 巡察紀錄表 (範例).....	7-16
表 7.2-3	工安巡察紀錄表 (範例).....	7-17
表 7.2-3	工安巡察紀錄表 (範例)(續).....	7-18
表 7.2-4	ISCO 系統功能監測表.....	7-19
表 8.2.2-1	ISCO 整治效能評估檢測項目與建議頻率.....	8-3
表 8.2.4-1	改善過程各階段監測頻率說明.....	8-6
表 9-1	GSR 評估核心元素與原則.....	9-3
表 9.1-1	GSR 污染改善方案決策支援系統評估指標.....	9-5
表 9.2-1	環境面評估指標與評分方式.....	9-8
表 9.3-1	經濟面評估指標與評分方式.....	9-13
表 9.4-1	社會面評估指標與評分方式.....	9-15
表 9.4-2	整治人員意外風險值.....	9-16
表 9.5-1	土壤類型及其特性.....	9-20
表 9.5-2	氧化劑與催化劑建議濃度.....	9-22
表 9.5-3	鑽井機具參數表.....	9-23

表 9.7-1	BMPs 實施紀錄表（範例）	9-29
表 9.8-1	現地化學氧化對環境、社會與經濟之影響	9-30
表 10.2-1	假設場址的概況範例	10-3
表 10.2-2	概念設計和假設概述範例	10-3
表 10.2-2	概念設計和假設概述範例(續)	10-4
表 10.2-2	概念設計和假設概述範例(續)	10-5
表 10.2-2	概念設計和假設概述範例(續)	10-6
表 10.2-3	詳細成本明細-資本成本範例	10-6
表 10.2-3	詳細成本明細-資本成本範例(續)	10-7
表 10.2-4	詳細成本明細-第一年實施和監測成本範例	10-8
表 10.2-4	詳細成本明細-第一年實施和監測成本範例(續)	10-9
表 10.2-5	詳細成本明細-第二年與第三年實施和監測成本範例	10-9
表 10.2-5	詳細成本明細-第二年與第三年實施和監測成本範例(續)	10-10
表 10.2-6	詳細成本明細-系統關閉後成本範例	10-10
表 10.2-6	詳細成本明細-系統關閉後成本範例(續)	10-11
表 10.2-7	總成本範例	10-12
表 11.1-1	第二次土壤驗證彙整表	11-6
表 11.1-2	第二次地下水驗證結果彙整表	11-6
表 11.2-1	注入井內 BTEX 和 MTBE 整治成效檢測報告表	11-9
表 11.2-2	監測井內 TPHg 和苯整治成效檢測報告表	11-13
表 12-1	ISCO 常見問題與解決方法	12-1

第一章 前言

1.1 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(以下簡稱環保署)即陸續進行全國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。統計至民國 106 年為止,所有公告解除控制或整治場址之總數量近 3400 筆,在整治技術應用方面已有一定程度的經驗。

在環保署推動及民間單位共同推廣下,無論是調查或整治技術均有長足的進步。環保署彙整歷年所執行之農地、加油站、工廠、工業區調查及健康風險評估方法等計畫經驗,亦發表各類型土壤及地下水污染預防、調查或整治技術手冊。期望透過技術手冊發表與使用,促使污染行為人及顧問公司,在場址中應用正確的調查整治觀念及方法。然而,雖然發表許多污染物類型或不同場址類型的整治技術篩選與評估的手冊,目前並無特別發表任何整治技術之設計參考指引。

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。環保署為協助各級政府機關人員及審查委員對於整治技術的瞭解,遂編訂「現地化學氧化法整治技術參考指引」(以下簡稱本指引),俾利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,亦提供為污染行為人參考,透過對於整治技術執行方法的進一步了解,共同監督污染改善作為的進行。

1.2 適用對象與限制

- 一、 本指引設定之使用對象為政府機關人員、審查委員、污染改善行動利害關係人等，在土壤及地下水污染場址採用現地化學氧化時，進行技術規劃與評估參考，但場址整治工作仍需由專業人員進行研析、判斷、規劃設計與執行。
- 二、 本指引內容不代表環保署任何政策或法規的制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證用，手冊提及之各類技術應用，應以中華民國法規規範優先。
- 三、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，著重進行場址整治執行實務經驗描述與探討，文件中所提及的技術內容可能因技術進步與更新而演進，有興趣之讀者應針對文件所述內容尋找相關文獻深入研究。現場土壤及地下水採樣、監測井設置、或實驗室檢測分析皆應依環檢所公告或經科學驗證之方法執行，本手冊不提供各項方法之技術說明，以及相關儀器之操作步驟。
- 四、 本指引僅建議通論性之規劃、程序、步驟、方法及數量等，各場址應依現場實際狀況彈性調整，並依執行單位之專業判斷評估規劃，以符合場址執行需求。
- 五、 本指引中所述之商標、化學藥劑、產品或藥劑品牌內容，僅為文獻資料之引述，不代表任何傾向或推薦，各場址應依據執行單位之專業判斷與規劃選定合適藥劑。
- 六、 指引中所述各項施工安全規範與建議，並非一體適用於所有的場址，仍應現場實際狀況規劃適合之風險管理內容，並由專業人員執行，以符合場址執行需求。

1.3 內容概述

本指引主要有十三個章節，茲將各章節內容概述如下。

第一章 前言

本章說明本指引之撰寫目的、適用範圍及限制、指引內容概述，並提供專有名詞中英文對照表。提供初次使用本指引讀者可快速了解本指引之目的與使用方法。

第二章 技術原理介紹

本章簡要說明利用地下環境污染物轉移與去除機制、常見氧化劑的應用種類、技術適用範圍以及與其他技術的整合等。讓讀者可藉由對於該整治技術的污染移除機制有初步了解，以評估是否使用該整治技術進行場址的污染改善，亦可選用合適之輔助整治技術。

第三章 場址特徵和概念模式

本章簡要說明現地化學氧化技術應用過程中所需考量之環境條件因子，包含水文地質特性參數、污染物物化特性參數，以及如何選用適當之場址調查方法與場址概念模型建置方法等，協助讀者可評估如何獲得必要資訊以使用該整治技術。

第四章 實驗室試驗及模場試驗規劃

除了上述提供之場址調查與評估資訊外，本章將提供實驗室規模或模場為主設計試驗的方法建議，說明模場試驗與實驗室規模之整治方法的設計重點與實驗架構，並以模場試驗與實驗室試驗之結果如何進行解讀，運用於後續整治規劃中。另提供試驗結束後的報告所需內容，與試驗結果是否符合需求之評估之相關依據，以及相關前導試驗結果是否適用於現場情形的判斷準則。

第五章 系統設計

羅列進行系統設計所需資料，包含氧化劑濃度和體積設計、氧化劑注入方法、設備選用與細部設計、系統性能維護設備等設備規範與設置建議，另為避免二次污染的產生，亦提供二次污染防治設備原則。以協助政府機關人員、審查委員、污染改善行動利害關係人，檢視污染改善單位是否確實進行整治系統設計。

第六章 系統試運轉

為確保整個場址的污染改善效果，建議應先以小規模測試系統操作成效，再將規模放大至全場址，本章將提供系統試運轉啟動前之必要資訊，包含場址基本資料、設備安裝與功能的檢查與安全防護措施等，確認啟動後操作可行性。

第七章 系統操作與維護

當整治系統正式開始操作期間，應進行定期監測與操作維護，避免因使用不當導致設備毀損，或影響污染改善進度事宜。

第八章 整治效能評估

本參考指引宗旨為提供使用者檢視污染改善是否如預期進行，因此，本章彙整污染改善評估方式，並說明污染改善期間或改善完成後應進行之污染物濃度持續監測方式。

第九章 綠色及永續型整治評估

綠色及永續評估可協助執行者判定與調整整治技術設計與操作之最適化，評估面向含括環境面、經濟面與社會面，依據上述層面評估，選出最佳管理措施，以供規劃設計綠色及永續型整治方案。

第十章 整治成本估算

提供國外假設案例之成本預估說明。

第十一章 案例解析

提供案例介紹，從以案例場址背景作介紹，使用的氧化劑種類、系統設計及現場作業、整治成果等，作為範例說明整體評估的邏輯。

第十二章 技術常見問題與說明

提供整治失敗案例與整治期間常遭遇之問題，並進行問題解析與說明整治注意事項。

第十三章 參考文獻

1.4 中英文專有名詞對照表

本指引將內容中所使用之專有名詞中英文對照彙整如表 1.4-1，提供各位讀者參考。

表 1.4-1 中英文專有名詞對照表

英文	中文
Air permeability	透氣性
Air Sparging, AS	空氣注入法
Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene, BTEX	苯、甲苯、乙苯、二甲苯
Best Management Practices, BMPs	最佳管理措施
Bioremediation	生物整治法
Catalyzed H ₂ O ₂ propagations, CHP	催化過氧化氫衍生反應物
Chlorinated Benzenes, CBs	氯苯類
Chlorinated Ethanes	氯乙烷類
Citrate	檸檬酸根
Contaminants of Concern, COC	關切污染物
Core zone of the plume	污染團中心區
Dichloroethene, DCE	二氯乙烯
Distal zone of the plume	污染團邊緣區
Dual-Phase Extraction, DPE	雙相抽除處理法
Fenton	芬頓
Green and Sustainable Remediation, GSR	綠色及永續型整治
Hydraulic conductivity	水力傳導係數
Hydrogen Peroxide, H ₂ O ₂	過氧化氫
In-Situ Chemical Oxidation, ISCO	現地化學氧化法
Intrinsic permeability	滲透率
Laminar flow	平流
Malate	蘋果酸根
Methyl Tert-Butyl Ether, MTBE	甲基第三丁基醚
Monitored Natural Attenuation, MNA	監測式自然衰減法
Natural organic matter, NOM	天然有機質
Nonpolar organic compound	非極性有機化合物
Octanol-water partition coefficient	辛醇-水分配係數
Operation Maintenance and Monitoring, OM&M	操作維護與監測

表 1.4-1 中英文專有名詞對照表（續）

英文	中文
Organic carbon, OC	有機碳
Oxidizable Matter, OM	可氧化物質
Ozone, O ₃	臭氧
Permanganate, MnO ₄ ⁻	高錳酸根
Permeability	滲透性
Persulfate, S ₂ O ₈ ²⁻	過硫酸根
Phytate	植酸鹽
Piping and Instrumentation, P&I	管線和儀表配置
Porosity	孔隙率
Reactive barrier	反應牆
Remediation process optimization, RPO	整治過程優化
Screened point	分級點
Solubility	溶解度
Soil bulk density	土壤總體密度
Soil Oxidant Demand, SOD	土壤氧化劑需求量
Soil particle density	土壤顆粒密度
Soil partition coefficient	土壤分配係數
Soil Vapor Extraction, SVE	土壤氣體抽除法
Source Zone	污染源區
Tert-butyl Alcohol, TBA	第三丁醇
Tetrachloroethylene, PCE	四氯乙烯
Total Petroleum Hydrocarbon, TPH	總石油碳氫化合物
Trichloroethylene, TCE	三氯乙烯
Venturi	文氏管
Vinyl Chloride, VC	氯乙烯

第二章 技術原理介紹

2.1 污染物傳輸與去除機制

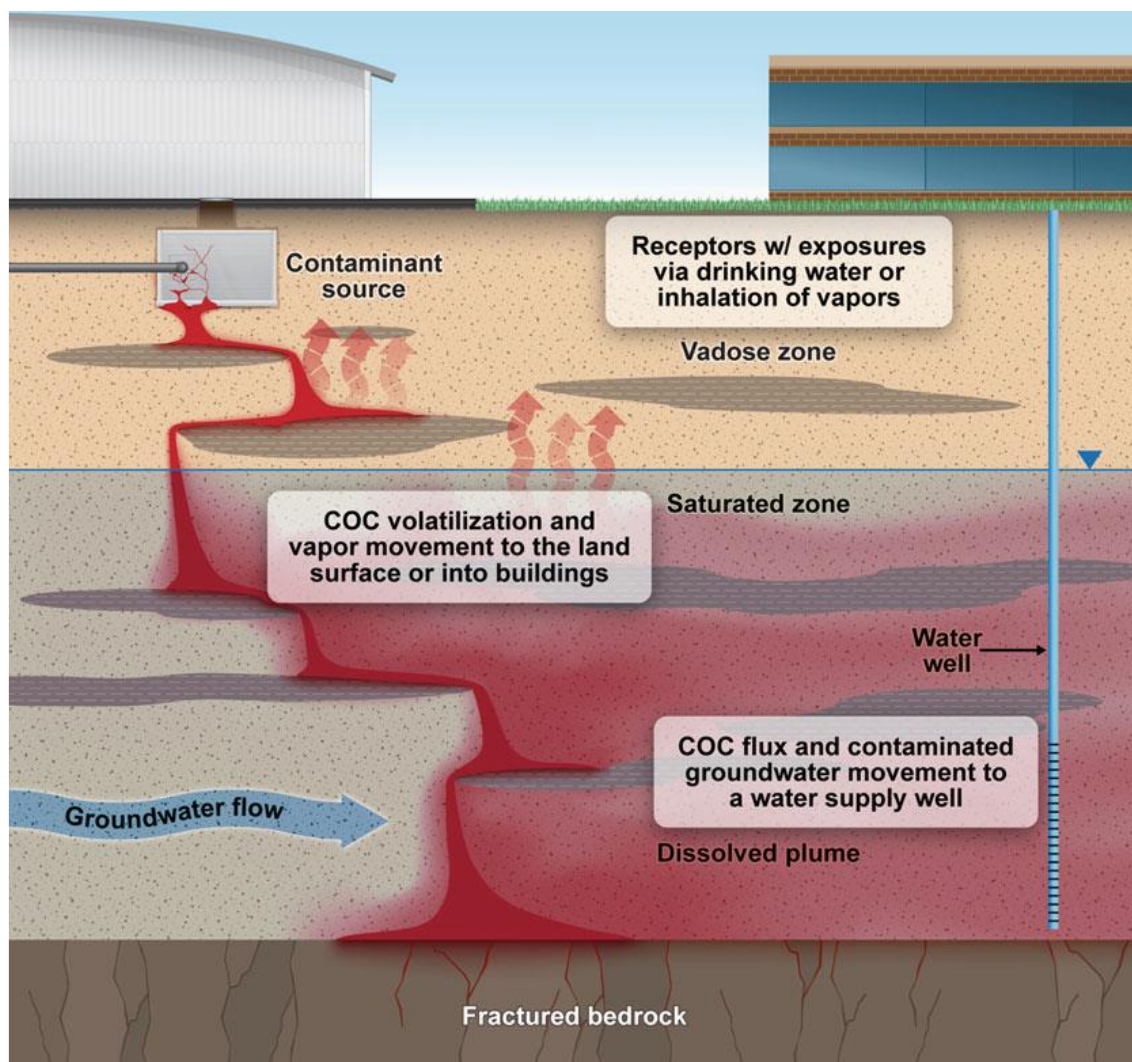
現地化學氧化技術 (in-situ chemical oxidation, ISCO) 係指將氧化劑注入地下環境中，分解關切污染物 (contaminants of concern, COC)，並降低其質量、移動性及/或毒性的方法。該整治技術適用於土壤與地下水之揮發性和半揮發性有機污染物整治，如 BTEX、總石油碳氫化合物 (total petroleum hydrocarbon, TPH) 等。ISCO 適用範圍相當廣，對於污染源區 (source zone)、污染團中心區 (core zone of the plume) 與污染團邊緣區 (distal zone of the plume) 等不同污染物強度之整治皆具適用性，此整治技術已於國內外廣泛應用於土壤及地下水污染整治中，為一種成熟的整治技術。需要特別注意的是，雖然現地化學氧化是利用氧化劑將污染物分解，但由於氧化劑對於不同的污染物有不同的反應能力，因此在應用時仍須綜合考量污染物特性、場址水文地質特性等不同因素進行選擇與設計，不可將現地化學氧化作為污染整治唯一的手段。

ISCO 整治技術主要以氧化劑做為分解地下污染物之關鍵藥劑，常見氧化劑包含有過氧化氫 (hydrogen peroxide, H_2O_2)、高錳酸鹽 (permanganate, MnO_4^-)、過硫酸鹽 (persulfate, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) 與臭氧 (ozone, O_3) 等，本技術指引將於本章節分項進行其原理介紹。此外，由於 ISCO 整治技術除可以單獨使用，亦可與其他物理、化學、生物處理方法合併使用，本章將列舉說明常見之搭配整治技術與搭配應用應注意事項。

ISCO 的處理速率，往往受到氧化劑與污染物的接觸性與其反應所產生之氧化還原電位等因素的作用，對於不同場址條件有顯著不同。評估場址是否適用之場址特性與污染物特性資料詳如第三章，對於各類氧化劑之整治系統設計、技術應用與設備需求則詳如第五章與第六章介紹。

2.1.1 污染物傳輸

圖 2.1-1 為常見之 NAPL(non-aqueous phase liquid, NAPL)污染物於地下環境中傳輸的概念模式 [以 DNAPL(dence non-aqueous phase liquid, DNAPL)為例]]，通常污染物洩漏發生之後，污染物會因為重力而向地下深處移動，這些高濃度的 DNAPL 會隨著緻密的地層傾斜方向而造成移動方向改變，並且可能蓄積在某些緻密地層的上方而形成污染池(pool)。對 LNAPL(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)而言，則會因為密度比水小而停留在水位面上，隨著地下水位的變動而移動。



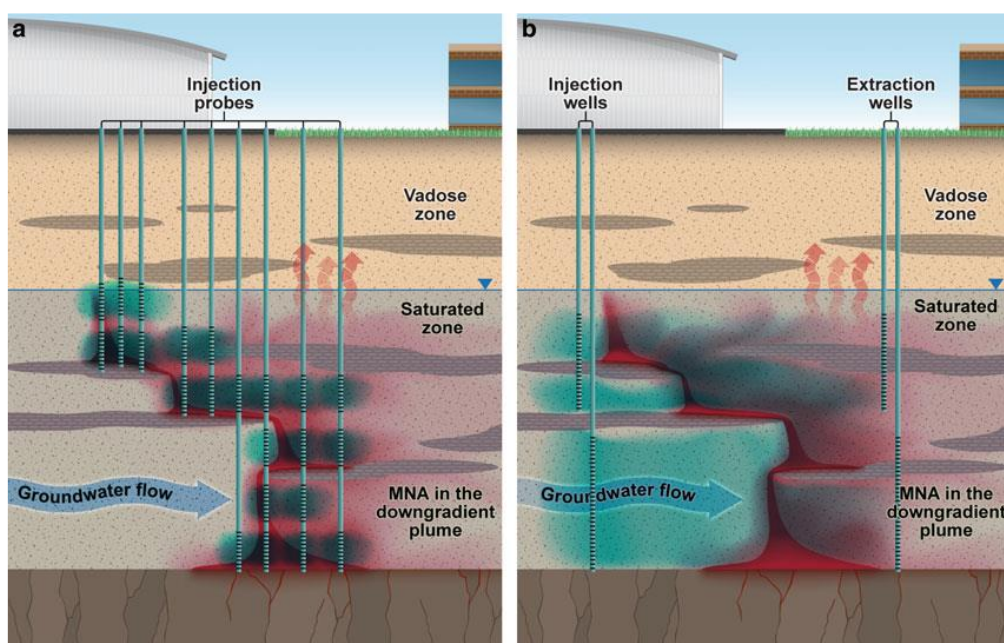
參考文獻：Siegrist et. al, 2011. * COC為關切污染物(Contaminants of Concern, COC)

圖 2.1-1 DNAPL 污染傳輸概念模型

污染物在地下環境中，會有吸附、脫附、溶解與揮發的作用同時發生，並且在氣相、溶解相與液相之間轉移，在通氣層或溶解於地下水中的污染物會揮發而進入土壤孔隙中，進而傳輸至地表或進入建物當中，這樣的情形被稱為土壤氣體入侵，而在含水層中的污染物，則是會有吸脫附、溶解的情形發生。溶解態的污染物則隨著地下水流動方向移動，而有延散與擴散的情況一直到無污染濃度。

2.1.2 現地化學氧化藥劑傳輸

現地化學氧化法主要是將不同濃度或質量負荷(mass loading)的氧化劑以液體、氣體或固體的方式與地表下的介質混合，使得氧化劑與污染物接觸而氧化或分解這些污染物。圖 2.1-2 為現地化學氧化法常見的液態藥劑注入與分散模式，原則是將藥劑注入地下環境中，利用溶解態的氧化劑進行污染物的氧化，而成為最終產物。藥劑可以直接注入處理區(如圖 2.1-2a)，並隨著地下水流移動，或以水力控制方式來強化氧化劑的移動(如圖 2.1-2b)。對於固態或部份液態的氧化劑，也可以使用土壤混合(soil mixing)或水力破裂(hydraulic fracturing)等方法將藥劑注入或分散至特定的土壤層中。

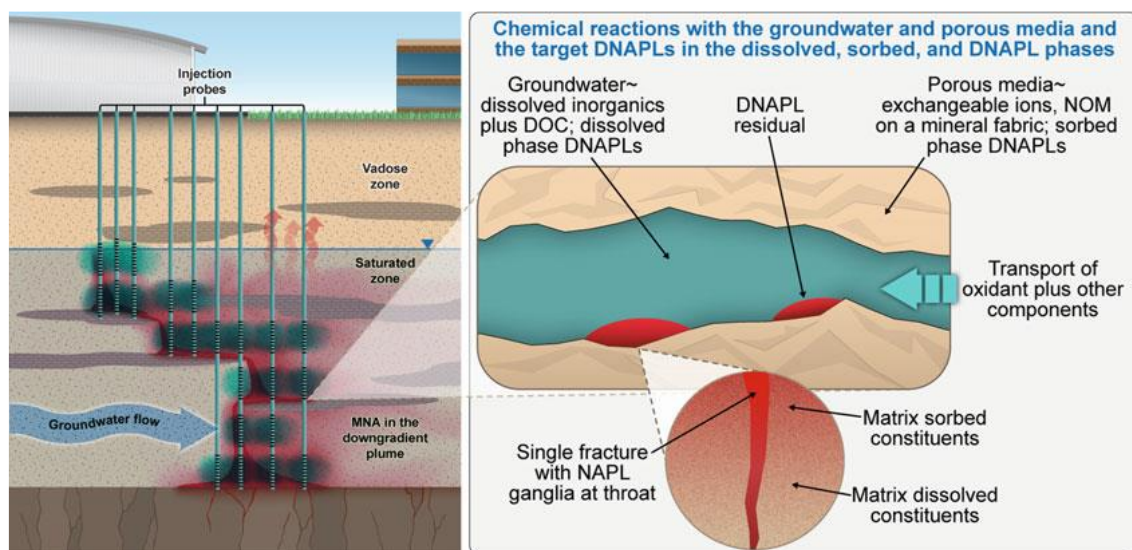


參考文獻：Siegrist et. al, 2011. *MNA為監測式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation, MNA)

圖 2.1-2 常見的現地化學氧化藥劑注入方法(a)直接注入特定位置，(b)利用水力控制輔助藥劑傳輸。

圖 2.1-3 則進一步說明污染物於孔隙中的分布情形，污染物在土壤孔隙中存在有溶解相、吸附相或殘留相，土壤中則另外存在有天然有機物(natural organic matter, NOM，或稱 soil organic matter, SOM)，地下水中則存在有溶解性的有機碳(dissolved organic carbon, DOC)，當氧化劑注入地下含水層中，藥劑會隨著地下水在土壤的孔隙間移動，並且與地下水中溶解態的污染物、

DOC 或 SOM 發生反應。



參考文獻：Siegrist et. al, 2011.

圖 2.1-3 污染物分布與現地化學氧化藥劑傳輸

溶解態的氧化劑注入地下環境中，在一般的情況下，可視為溶解態的傳輸，因此會有平流(advection)、延散(dispersion)、擴散(diffusion)及吸附(sorption)的情況，但需要特別注意以下兩種情況：

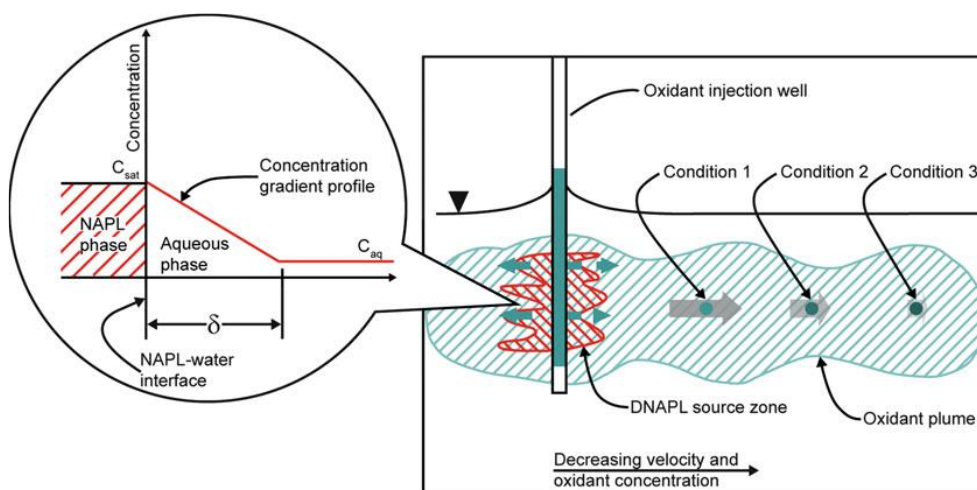
一、藥劑注入的局部影響

當藥劑注入地下環境後，則會對地下水流場造成局部的影響，而間接的對於地下水流速、氧化劑濃度以及 NAPL 污染濃度變化造成影響，如圖 2.1-4 所示，當 NAPL 存在時，地下水中的濃度會與 NAPL 的距離有關，當氧化劑注入時，會局部的造成地下水流速增加(圖 2.1-4 condition 1)，此時的氧化劑濃度也會最高，而隨著與注入點距離增加，則地下水流速以及氧化劑濃度會逐漸減少(condition 2)，一直到地下水流速與一般地下水流速相當，此時氧化劑濃度則幾乎為 0 (condition 3)。

二、密度造成的藥劑流動

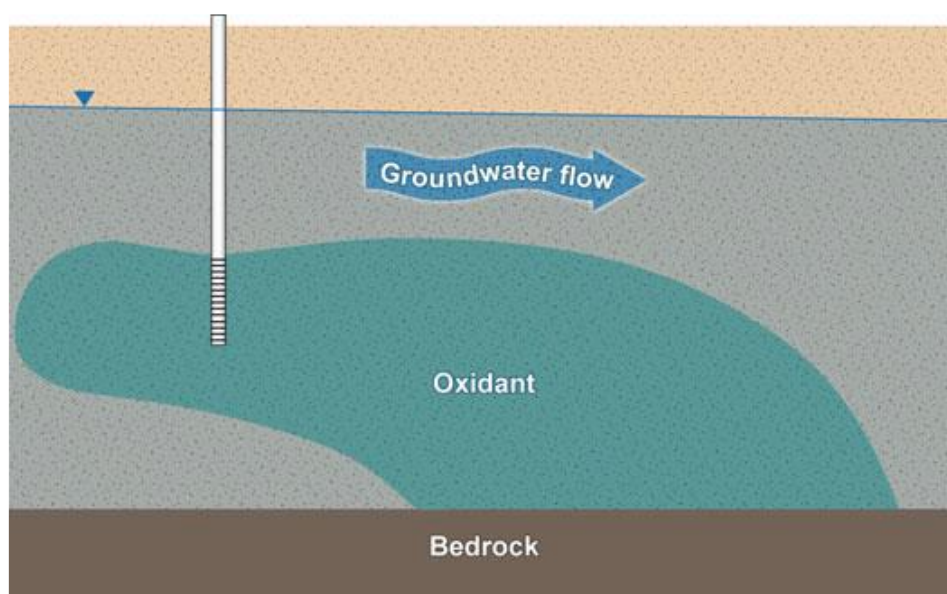
當液態的氧化劑注入地下環境時，因為密度的差異，會讓地下水體抬升及藥劑向深處移動(如圖 2.1-5)，Schincariol and Schwartz (1990) 的

研究顯示當密度差異達到 0.0008 g/mL ，便會造成流體的不穩定性，而使得平流與延散所使用的模式需要進行修正。



參考文獻：Siegrist et. al, 2011.

圖 2.1-4 現地化學氧化藥劑分散與污染物濃度變化關係示意圖



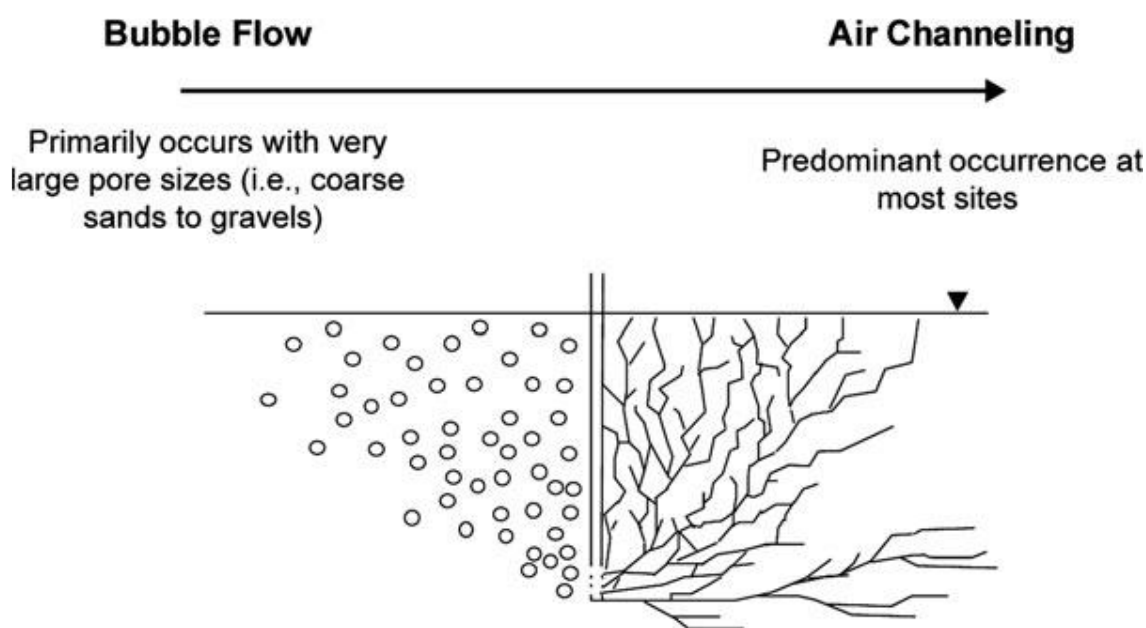
參考文獻：Heiderscheidt et al., 2011.

圖 2.1-5 密度造成現地化學氧化藥劑流動的影響

臭氧的注入與分散則與溶解態的氧化劑不同，其作用機制是氣態的傳輸，與曝氣法(air sparging)或生物通氣法(bioventing)較為相似。在通氣層，臭氧的流動與氧氣在土壤間隙中的流動完全相同，臭氧在通氣層的傳輸距離或作用範圍，與臭氧對於氣相與水相污染物的反應速率以及在相(phase)之間的質傳

有關。

在含水層中，臭氧的傳輸原則上也是依循氣體在含水層中傳輸的概念，而臭氧的現地化學氧化成功與否，則取決於臭氧的傳輸上。通常，氣體在含水層中的傳輸都是屬於不均質性的，受到地質異質性、毛細層水力特性、顆粒大小與孔隙大小以及孔隙結構的影響。使用 AS 法進行曝氣時，氣體的移動會依循以下的程序：氣體在部份飽和的孔隙材料中流動、氣流造成部份飽和的空氣通道(air channels)，以及氣泡的產生。圖 2.1-6 為氣體在含水層中的流動的示意圖，通常較粗的顆粒比較容易產生氣泡，當土壤較為緻密時，氣泡產生情況較少，而容易產生空氣通道。理想上曝氣所產生的氣體流動應為 V 型的分布，但實際上會有許多優勢的空氣通道產生，而使得氣體通道的分布不容易被預測。



參考文獻：Clayton et al., 2011.

圖 2.1-6 氣體在在含水層中移動示意圖

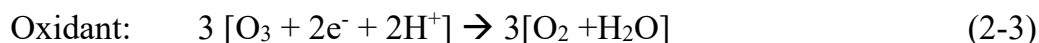
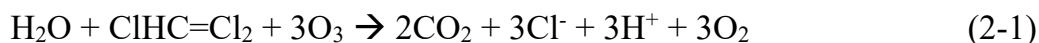
由於氧化反應不具選擇性與專一性，一般來說，對於地下環境中之所有有機物皆具有攻擊效應，包含有機污染物與土壤中的有機質等，而影響 ISCO 之適用性與成效的兩個主要因素為：(1) 反應是否發生，以及 (2) 自由基是否能接觸到污染物。前者受到氧化劑之氧化還原電位以及污染物產生反應之

氧化還原電位的影響，後者則受競爭反應、注入方法以及水文地質條件之影響，並以後者為 ISCO 現地整治成效最重要的影響關鍵，許多現場應用的案例經驗已證實，如何達到良好的藥劑傳輸使其與目標污染物接觸並啟動化學反應，為現場整治效能的關鍵條件，考量重點包含整治前的場址環境情況，(如地下水流動方向、流速、電導度、氧化態、pH、溫度、DOC 等水文地質因子、污染物的分布情形、氧化劑的傳輸距離等)。

污染物分布情況為影響氧化劑選擇的要素之一，在小範圍之污染源區中，一般氧化劑原則上均可以適用，若污染團範圍很大，則以高錳酸鹽以及過硫酸鹽（非硫酸根自由基形式）等兩種較穩定的氧化劑效果較佳。除污染範圍外，污染物所在場址之地質條件也是影響氧化劑選擇的因素，透水性佳之區域，氧化劑傳輸以層流 (laminar flow) 機制為主，原則上常用之氧化劑均適用，但是在透水性差之區域，氧化劑傳輸以擴散為主，則以高錳酸鹽以及過硫酸鹽（非硫酸根自由基形式）適用性較高。若層流與擴散兩種機制同等重要，氧化劑需要傳輸的時間較久時，亦以高錳酸鹽與過硫酸鹽（非硫酸根自由基形式）較佳。

2.1.3 污染物降解機制

化學氧化，顧名思義便是利用特定化學物質的氧化能力，通過氧化過程，直接氧化有害污染物轉化成無害或毒性較低的化合物，使其更穩定、移動性更小。氧化反應中電子是由基質(污染物)傳遞給氧化劑(oxidants)。基質會失去電子而被氧化，而氧化劑則會得到電子而還原。以 TCE 被臭氧氧化的機制為例：



氧化技術的應用，需要了解化合物是否能被氧化或還原，現地化學氧化是利用一些強氧化劑為基礎進行氧化的化學反應程序，目前最常使用的化學氧化劑包括過氧化物（如過氧化氫、過硫酸鹽）、高錳酸鹽（如高錳酸鉀）與

臭氧等。這些氧化劑能受到催化或氧化產生反應性物質(reactive species)或強氧化劑，能夠引起許多有機化合物的快速與完全性的化學破壞，抑或使有機物部分降解，作為後續生物復育的輔助技術。一般而言，氧化劑能夠以非常快的反應速率（在 90 分鐘內破壞）達到對不飽和脂肪族，如三氯乙烯和芳香族化合物的高處理效率。

由於過氧化氫、過硫酸鹽及臭氧均能受催化後而產生自由基，因此氧化能力均比高錳酸鹽等非自由基氧化劑之氧化反應快速；高錳酸鹽容易與具 π 鍵結構之有機物質反應，因此在處理如氯烯類污染場址時，為較適用之氧化劑。氧化劑的能力可以利用氧化電位為參考的比較標準，通常與氯做比較，評估所有氧化劑的相對氧化能力，如表 2.3-1 列出了常見的氧化劑的相對強度。

表 2.1.3-1 氧化劑強度

氧化劑種類	標準氧化電位 (volts)	相對於氯的氧化 能力(氯=1)
氫氧自由基(OH^\bullet)*	2.8	2.0
硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\bullet-}$)	2.5	1.8
臭氧	2.1	1.5
過硫酸鈉	2.0	1.5
過氧化氫	1.8	1.3
高錳酸鹽(Na/K)	1.7	1.2
氯	1.4	1.0
氧	1.2	0.9
超氧離子(Superoxide ion, $\text{O}_2^{\bullet-}$)*	-2.4	-1.8

*自由基是由臭氧和 H_2O_2 分解所形成

參考文獻： Siegrist et al., 2001.

表 2.1.3-1 中所示的氧化劑具有足夠的氧化能力來處理大部分有機污染物。標準氧化電位是一個有用的氧化劑強度參考，顯示其氧化能力，但這些數值並不能說明在現地環境的表現，在微觀上，動力學或熱力學的反應速率可能是最重要的，但在現場條件下卻有些不切實際。因為在現地，氧化反應速率取決於許多必須同時考慮的變數，包括溫度、pH、反應物濃度、催化劑、

反應副產物和系統雜質[例如:天然有機物(NOM 或 SOM)、氧化劑消耗者(oxidant scavengers)等]。

除此之外氧化劑的傳輸以及氧化劑是否與污染物接觸也是極為重要的因子，為了有效地降解污染物，氧化劑必須與污染物分子接觸，理想情況下，輸送技術將確保氧化劑均勻分散在待處理區域，一些更穩定的污染形式只能用較強的氧化劑氧化，而較強的氧化劑也會在地下迅速消耗，限制了氧化劑可以傳輸的距離。活性較低的氧化劑更穩定，可以在地下傳輸更長的距離，因此，處理含水層體積是選擇氧化劑時要考慮的重要變量，氧化劑在水中的溶解度(通常注入流體)也是重要的，因為它限制了每體積注入流體可以注入的氧化劑質量。

所有 ISCO 設計的一個重要考量，尤其是在污染源區，由於注入飽和區的體積會在交界處發生混合並排出相同體積的地下水，在地下水污染嚴重升高的污染源區，應盡可能控制這個區域，使其與氧化劑充分接觸，污染物和注入氧化劑的空間分佈也受到異質性的地下地質和地下水流速/方向很大的影響。

2.2 氧化劑種類

目前最常被應用於土壤與地下水污染整治之化學氧化系統有四種，包含(1)過氧化氫系統(hydrogen peroxide system)、(2)高錳酸鹽系統(permanganate system)、(3)過硫酸鹽系統(persulfate system)及(4)臭氧系統(ozone system)，表 2.2-1 為不同的氧化系統的重要參數比較，其中污染物可以特定氧化劑的化學當量比例計算，是用氧化劑的當量重(equivalent weight)除以溶劑的當量重。如此便可與整治目標進行計算，評估需要處理多少量體。

表 2.2-1 常見的現地化學氧化系統比較

氧化劑 (oxidant)	化學式 (formula)	分子量 (molecular weight)	電子轉移 數量 (number of electron transferred)	當量重 (equivalent weight)	氧化潛力 (oxidation potential)
活化的過硫酸鈉 Activated Sodium Persulfate	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$	238	2	119	2.6
過氧化氫，芬頓法 Hydrogen Peroxide, Fenton's	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$	34	1	34	2.59
臭氧 Ozone	O_3	48	2	24	2.07
過硫酸鈉 Sodium Persulfate	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$	238	2	119	2.01
過氧化氫 Hydrogen Peroxide	H_2O_2	34	2	17	1.77
過錳酸鉀 Potassium Permanganate	KMnO_4	158.04	3	52.7	1.7
過錳酸鈉 Sodium Permanganate	NaMnO_4	141.9	3	47.3	1.7
過氧化鎂 Magnesium Peroxide	MgO_2	56	2	28	0.9*
過氧化鈣 Calcium Peroxide	CaO_2	72	2	36	0.9*
過碳酸鈉 Sodium Percarbonate	$2\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-}3\text{H}_2\text{O}_2$	314	6	52	0.9*

* Alkaline pH

2.2.1 過氧化氫系統

過氧化氫為一個氧化能力極高且用途廣泛的化學氧化劑，被廣泛的應用在工業或水處理程序上。過氧化氫是一個在結構上很簡單的化學物質，但在水中被催化會產生大量的自由基(free radicals)等反應性物質。通常市售的過氧化氫為 20%-70%的溶液，在使用前稀釋成需要的濃度，並且透過催化劑(catalyst)或是活化劑(activator)的添加，產生催化過氧化氫衍生反應(catalyzed hydrogen peroxide propagations, CHPs)相關的反應性物種(reactive species)，而被應用於過氧化氫的化學氧化系統中。這些 CHPs 所產生的反應性物種包含了氧化劑及還原劑，在環境工程的應用上，可以來降解有機污染物或減低有機污染物的毒性。

芬頓於 1894 年發現在中性偏酸(pH 3-5)的環境下，亞鐵離子 (Fe^{2+}) 可以催化稀釋的過氧化氫，將其分解產生氫氧自由基 ($\text{OH}\cdot$)，氫氧自由基的還原電位為各類氧化劑中最高，約為 $E_0 = 2.8$ ，這個反應被稱為 Fenton's reagent 或 Fenton's process，其反應式如下：



1990 年起，Fenton 法開始被應用在土壤及地下水污染的處理，然而隨著 ISCO 的應用與研究的發展，發現 Fenton's reagent 在現地化學氧化過程中，並非只產生氫氧自由基，也包含了許多強氧化物如表 2.2-2 所示，這些具有反應性的含氧物質包含了氧化劑與還原劑，由於是兩者同時存在，因此可能同時有氧化與還原的反應發生。此外，也有越來越多的過氧化物與不同的催化劑與催化方式產生，而衍生出 Fenton-like 法或 modified Fenton's reagent 等其他的過氧化氫的化學氧化系統。

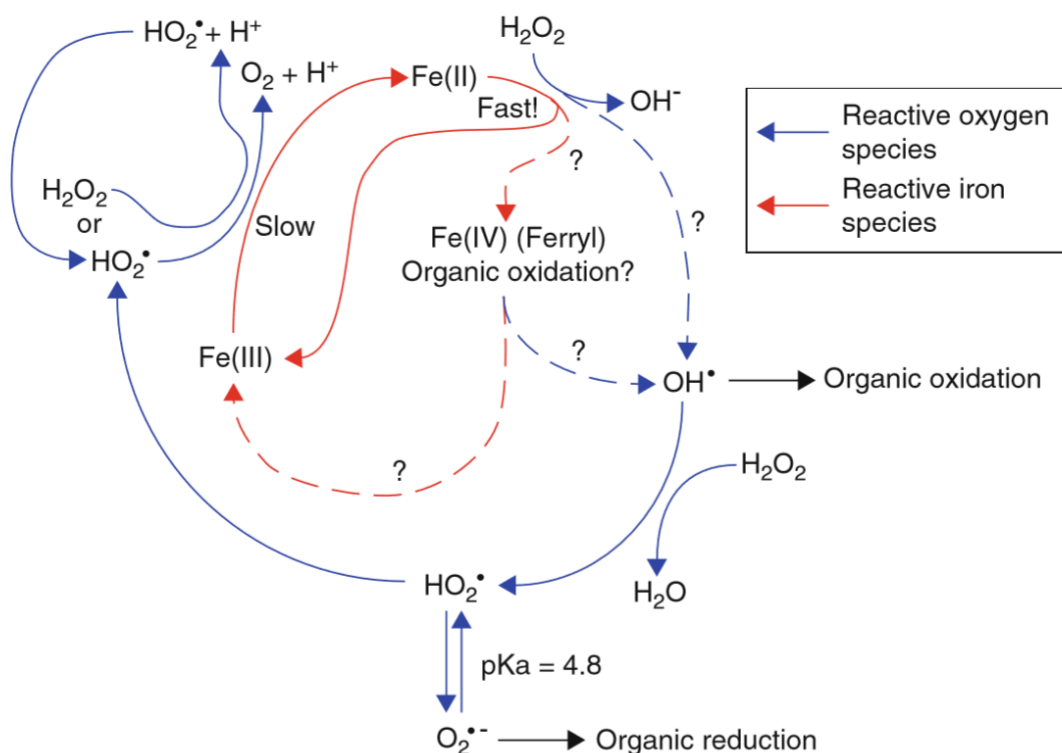
Fenton 試劑之優點在於亞鐵與過氧化氫均便宜且毒性低，氧化反應迅速，一般而言，ISCO 最常應用的過氧化氫濃度約為 2%~12% (0.6-3.6M) 範圍內，Fenton 試劑氧化反應需在 pH 3.5 至 5 之酸性 pH 條件下才具有明顯效果，也因為酸性條件有助於維持溶液中的可溶性鐵離子存在，較有利於氫氧自由基的形成，可有效達到催化功能，過氧化氫催化反應與有機污染反應公式表 2.2-3 所示，Fenton 試劑產生的 CHPs 反應如圖 2.2-1 所示。

表 2.2-2 Fenton's 催化過氧化氫衍生反應物

物種	化學式	標準還原電位 (V)	出現的 pH 值	反應中的角色
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	1.766	pH<11.6	強氧化劑，弱還原劑
Hydroxyl radical	OH•	2.59	pH<11.9	強氧化劑
Superoxide anion	O ₂ • ⁻	-0.33	pH>4.8	弱還原劑
Perhydroxyl radical	HO ₂ •	1.495	pH<4.8	強氧化劑
Hydroperoxide anion	HO ₂ ⁻	0.878	pH>11.6	弱氧化劑，強還原劑
Ferryl ion [Fe(IV)]	FeO ₂ ⁺	未知	未知	強氧化劑
Solvated electrons	e ⁻ _(aq)	-2.77	pH>7.85	強還原劑
Singlet oxygen	¹ O ₂	Not applicable	未知	參與 Diels-Alder and Ene 反應
Atmospheric (triplet) oxygen	O ₂	1.23	任何	弱氧化劑

表 2.2-3 Fenton's reaction of organics

反應式	動力學/熱力學參數	編號
$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{OH}^- + \text{Fe}^{3+}$	$k = 6.3 \times 10^1 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	(2-5)
$\text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2\cdot + \text{H}_2\text{O}$	$k = 3.3 \times 10^7 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	(2-6)
$\text{HO}_2\cdot + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{OH}\cdot$	-	(2-7)
$\text{Fe}^{2+} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$k = 3.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	(2-8)
$\text{HO}_2\cdot \rightleftharpoons \text{O}_2\cdot + \text{H}^+$	$\text{pK}_a = 4.8$	(2-9)
$\text{HO}_2\cdot + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+$	$k = < 2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{S}^{-1}$	(2-10)
$\text{HO}_2^- + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HO}_2\cdot$	$k = 2.7 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$	(2-11)
$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{HO}_2)^{2+} + \text{H}^+$	$k_e = 3.1 \times 10^{-3}$ (無因次)	(2-12)
$\text{Fe}(\text{HO}_2)^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \text{HO}_2\cdot$	$k = 2.7 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$	(2-13)
$\text{RH} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{R}\cdot$	-	(2-14)
$\text{R}\cdot + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Products}$	-	(2-15)
$\text{R}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{ROH}$	-	(2-16)
$\text{R}\cdot + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{ROH} + \text{OH}\cdot$	-	(2-17)



參考文獻： Petri et al., 2011

圖 2.2-1 以溶解性亞鐵離子催化過氧化氫化學反應關係圖

需要注意的是，過氧化氫分解的反應是會自我加速的，這主要是因為當分解反應發生時，溫度會上升，此時會有更多的過氧化物被分解，而加速溫度上升與分解反應速率。因此過氧化氫在應用時，為有效控制分解反應，建議應該要將過氧化氫的濃度控制在 10% 以下，同時配合土壤氣體抽除法來抽除 ISCO 過程產生的氧氣。

由於 Fenton 法反應快速，在現地中不容易被有效控制，因此衍生出 Fenton-like 氧化法，利用穩定劑、螯合劑或是地下環境中的天然鐵氧化物來催化 Fenton 反應發生。穩定劑(stabilizer)是用來延長過氧化物在土壤中的壽命。主要是著重於去活性金屬催化劑的研究。有兩種穩定劑被認為是有效果的，包含無機磷酸鹽(inorganic phosphate)以及螯合劑(chelating compounds)。無機磷酸鹽的功能是形成不溶性的磷酸鐵(ferric phosphate)為主。另外，Bacocchi (2003)等學者的研究顯示，在一個 30 公分長的 TCE 污染土壤管柱試驗中，以 KH_2PO_4 處理過的土壤可有效的延長過氧化物的穩定性及延長對

TCE 的氧化。

螯合劑的功能也是與鐵形成錯合物。Watts (2007)的報告中指出一個添加了 hematite (Fe_2O_3)的土壤，利用 3 種不同的螯合劑處理，包含檸檬酸根(citrate)、蘋果酸(malonate)及植酸(phytate)，可以發現這三種螯合劑都可以有效的促進過氧化物的穩定性，且所有的穩定劑都不會減少氫氧自由基與超氧化物(superoxide)的產生。此外，不論是利用穩定劑先處理土壤後，加入不穩定的過氧化氫或是事先將穩定劑與過氧化物混和後，再添加到土壤中，都會有相同的效果。

Fenton 法或 Fenton-like 法最普遍的方法是使用液體，用水稀釋後，添加酸或鐵催化劑。也可以添加固體物，使之水解然後釋出過氧化氫。一般市售的液態過氧化氫的濃度範圍大多介於 20%-70%，因為濃度高、反應性強，在使用上容易發生工安危害，因此發展出利用固態過氧化物來產生過氧化氫，常見的固態的產品包含：

Calcium peroxide ($\text{CaO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}_2$)

Magnesium peroxide ($\text{MgO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}_2$)

Sodium percarbonate (sodium carbonate peroxide) ($2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{Na}^+ + 2\text{CO}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}^2$)

這些固態的產品會產生高 pH 的過氧化氫溶液，這些固態氧化物可能產生的反應性物種包含 hydroperoxide anion 及 superoxide

使用液態的過氧化氫系統一般是用金屬(鐵)催化，可以區分為兩個類別，酸性配方 (acidic formulations) 及中性配方 (circumnetural formulations)，酸性配方系統大多是使用無機鐵鹽及酸。而中性系統則是使用螯合的鐵及穩定的過氧化物，而被稱為修正的芬頓反應劑(modified fenton's reagent)。這兩種系統都一般都會產生氫氧自由基，但實際上，亦會產生反應性含氧物質的混合物。表 2.2-4 為不同的過氧化氫氧化系統的比較。

表 2.2-4 不同過氧化物的 ISCO 系統比較

化合物	優點	缺點
傳統的芬頓法 (conventional Fenton's)		
<ul style="list-style-type: none"> • 酸(硫酸) • 硫酸亞鐵溶液 • 過氧化氫溶液 5-25% 	<ul style="list-style-type: none"> • 低成本化學物質 • Coincidental stripping • 高反應速率 	<ul style="list-style-type: none"> • 低 pH 可能會使重金屬移動 • 過氧化物的穩定性差 • 與土壤中的有機物反應 • 常會污染反彈 • 會使 VOCs 揮發 • 複合性的應用 • 多個應用程序
修正的芬頓法(Modified Fenton's)		
<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化氫溶液 5-20% • 螯合的鐵溶液 • 穩定劑(proprietary) 	<ul style="list-style-type: none"> • 不用調整 pH • 加強過氧化物的穩定性 • 廣泛的反應性 • 不會與土壤的有機物反應 	<ul style="list-style-type: none"> • 在某些礦物質土壤的壽命受限(或減少) • 螯合劑與穩定劑的花費 • 需要多個應用程序來處理吸附相
穩定化的 CHPs [Stabilized Catalyzed H ₂ O ₂ Propagations]		
<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化氫溶液 1-10% • 穩定劑(citrate, malonate, phytate) 	<ul style="list-style-type: none"> • 不用調整 pH • 加強過氧化物的穩定性 • 廣泛的反應性 • 不會與土壤的有機物反應 	<ul style="list-style-type: none"> • 在某些礦物質土壤的壽命受限(或減少) • 穩定劑的花費 • 需要多個應用程序來處理吸附相
過氧化鈣 (Calcium Peroxide)		
<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化鈣泥漿 	<ul style="list-style-type: none"> • 緩釋型的過氧化物 • 較長的壽命 • 鹼性的過氧化物溶液 	<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化鈣是不可溶的 • 注入泥漿 • 藥劑的分散受限制
過氧化鎂 (Magnesium Peroxide)		
<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化鎂泥漿 	<ul style="list-style-type: none"> • 緩釋型的過氧化物 • 較長的壽命 • 鹼性的過氧化物溶液 	<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化鎂是不可溶的 • 注入泥漿 • 藥劑的分散受限制
過碳酸鈉 (Sodium Percarbonate)		
<ul style="list-style-type: none"> • 過碳酸鈉溶液 • 螯合鐵的催化劑有時需要使用 	<ul style="list-style-type: none"> • 鹼性過氧化物溶液 • 過碳酸鈉溶解度中等 • 廣泛的反應性 	<ul style="list-style-type: none"> • 過氧化物的壽命有限 • 碳酸鹽會消耗氫氧自由基

2.2.2 高錳酸鹽系統

高錳酸鹽因具有極高的還原潛勢、可預期的化學反應及非毒性的副產品而使得這個化學物質常被用來處理有機物、三鹵甲烷或其他的水處理程序中，因此早在 1990 年左右便被認為可以用來進行現地化學氧化。

在天然系統中高錳酸鹽通常以液態或固態 KMnO_4 存在，過錳酸根亦可結合 Na^+ 、 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 等離子形成高錳酸鹽，以高錳酸鉀 (KMnO_4) 和高錳酸鈉 (NaMnO_4) 為兩種最常見高錳酸鹽氧化劑，其化學特性如表 2.2-5 所示。

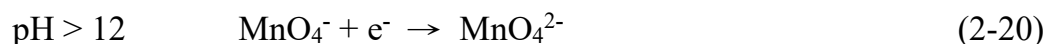
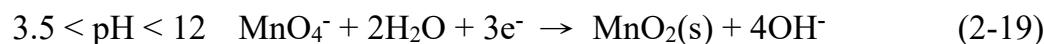
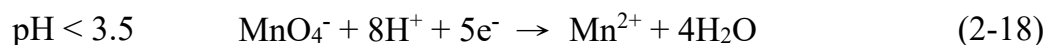
KMnO_4 是一種結晶固體，可以使用地表水或自來水在現場製備所需濃度(一般為 4%)的水溶液，因為它是固體，可使運送危害最小化。 NaMnO_4 通常以濃縮液體(40%)供應，需在現場稀釋並以較低的濃度使用。高濃度的高錳酸鈉可能會使得注入體積有更靈活的設計，並且由於其為液體形式，不會有粉塵危害，但是 NaMnO_4 具有更高反應性的風險，如果用濃縮的還原劑中和，可能會釋放熱能。

表 2.2-5 常用的高錳酸鹽物理化學特性

化學特性	高錳酸鉀 (KMnO_4)	高錳酸鈉 (NaMnO_4)
分子量	158.03	141.93
最常見的型態	固態	液態
溶解度(g/L)	65g/L (20°C) 27.8 g/L (0°C)	幾乎完全溶於水 (~900 g/L)
溶解態的比重	1.039 (6% wt %溶液)	1.36 – 1.39 (40 wt. % 溶液)
化學上不可競爭性	強酸、有機過氧化物、濃過氧化氫、有機物、還原劑與重金屬粉末	

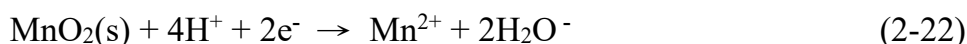
兩種形式的高錳酸鹽都是強氧化劑，對氧化碳-碳雙鍵(carbon-carbon double bonds)、醛基(aldehyde groups)或羥基(hydroxyl groups)的有機化合物具有獨特的親和力。高錳酸鹽氧化在污染場址的化學劑量和動力學可能相當複雜，因為有許多反應，錳可以參與由於其多種價態和礦物形式。方程式 2-18 ~ 2-20 說明了高錳酸鹽在不同 pH 下主要氧化還原反應，這些半反應可與污染物進行化學劑量學的計算，評估添加的藥劑量，亦可用於檢視現地化學氧

化反應過程潛在的化合物。



在酸性條件下，高錳酸鹽的半反應如式 2-18，會有 5 個電子轉移，產生 Mn^{2+} ，pH 在 3.5~12 的範圍內，則僅有 3 個電子轉移，同時 MnO_2 (固體)為主要產物，當 $\text{pH} > 12$ 時，僅有 1 個電子的轉移發生，在不同的酸鹼條件下， Mn^{+7} 還原成 Mn^{+2} (式 2-18)、 Mn^{+4} (式 2-19)或 Mn^{+6} (式 2-20)。需特別注意的是，在一般的操作條件下，容易產生二氧化錳的沉澱物，使在高錳酸鹽系統的現地化學氧化過程中，造成地下環境的流動路徑阻塞，而影響藥劑傳輸效果。

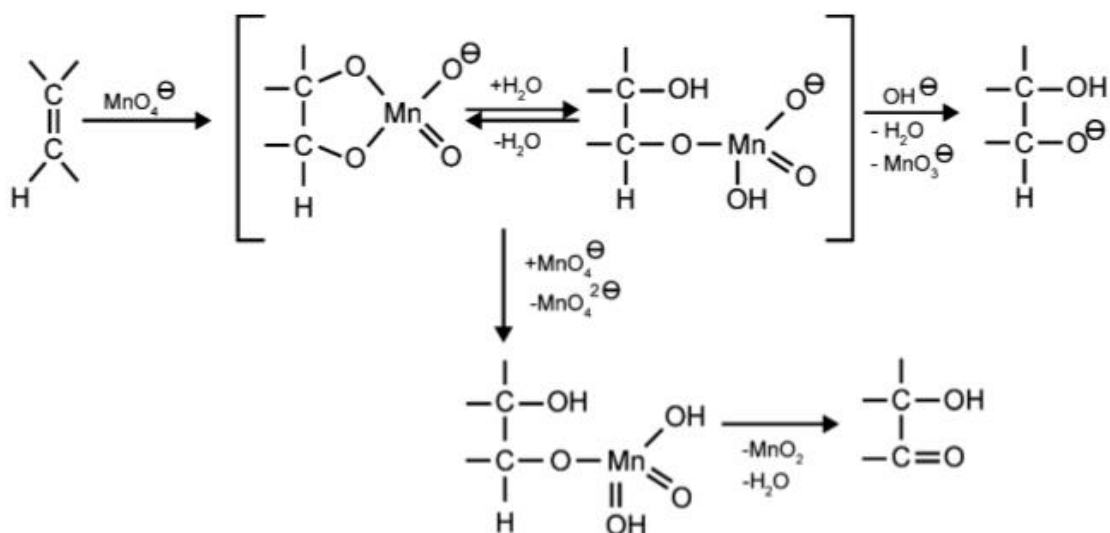
在酸性 pH 條件($\text{pH} < 3.5$)下形成的 Mn^{2+} 離子會被過量的(未反應的)過錳酸根離子氧化並形成沉澱，然而 MnO_2 也自然緩慢地降低以產生 Mn^{2+} ，如式 2-21 和 2-22 所示。換言之，偏酸性的條件可能會導致水中的 Mn^{2+} 濃度長期上升，因此初始地下 pH 值、操作過程 pH、高錳酸鹽添加量和地下環境的緩衝能力將影響發生總體操作的效果。



高錳酸鹽也可以與水反應，但速度非常慢，導致非高錳酸鹽消耗和進一步生成二氧化錳固體，當還原物質(污染物或天然物質)不再與高錳酸鹽反應時，這種緩慢的分解過程最終導致過量高錳酸鹽的消耗，在處理後可能殘留在地下。此外，高錳酸鉀具有顏色，可增加氧化劑傳輸之辨識度，但容易造成金屬離子的溶出與移動，例如六價鉻及汞均曾發現因整治而造成濃度增加。

相較於其他氧化劑，高錳酸鉀的氧化過程是以電子直接轉移的方式，而

非產生自由基去除污染物，所以必須藉由與目標污染物產生碰撞才能發生氧化反應。對飽和脂肪族的化合物，高錳酸鹽會與化合物的碳鍵結，像是在飽和脂肪鏈上增加一個官能基，因此高錳酸鹽對於脂肪族類的有機物處理效果較差。高錳酸鹽則對於烯烴類的碳碳雙鍵有很好的反應效果，反應如圖 2.2-2 所示，高錳酸鹽會打開碳-碳雙鍵而形成環酯(cyclic ester)，接著可能會使得所有的碳-碳鏈間斷開或再添加羥基 (C-OH) 或羰基 (C=O) 而破壞烯烴類化合物。不幸的是，芳香族化合物雙鍵的電子更為緊密共享，因此比脂肪族化合物更穩定，使得高錳酸鹽不能氧化大多數芳香族化合物。當與取代的碳原子結合時，構成芳香族化合物和脂肪族化合物雙鍵的可用電子對更具反應性(即氯或有機基團如 CH₃)，這是由於較長的、不太穩定的鍵結所造成。



參考文獻：Petri et al. 2011

圖 2.2-2 高錳酸鹽氧化烯烴類化合物的反應機制圖

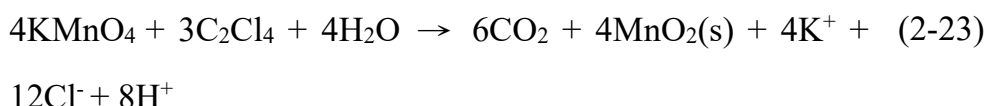
在沒有大量 NOM 或其他還原劑的情況下，高錳酸鹽的有機物降解速率取決於污染物和高錳酸鹽的濃度，大部分可以用二階動力式來描述。很重要的一點是污染物降解速率很容易受到競爭物種的存在影響，如天然的有機物質或減少的礦物物質，反應速度與溫度有關。

除此之外，高錳酸鹽的反應均是發生在溶液態中，且高錳酸鹽與所有的

氧化劑一樣，是沒有選擇性的，所以也會氧化土壤中存在的 NOM 而增加高錳酸鹽的注藥量。但由於有機污染物會吸附或分配於土壤中的 NOM 上，一旦 NOM 被高錳酸鹽氧化後，有機污染物也會再被釋放出來，當目標有機物的水相濃度耗盡時，也會引起的平衡分配的變化，而持續增加脫附速率，這也同樣會造成藥劑需求量的增加。

大部分高錳酸鹽會應用在多氯乙烯類的現地化學氧化中，但較少應用於氯烷類的處理，KMnO₄ 與各種氯乙烯的化學劑量反應式如下，通常具有較高氯取代度的氯烯類消耗較少的氧化劑並產生較少的二氧化錳沉澱，如 3 莫耳的 PCE 需要 4 莫耳 MnO₄ 來氧化並產生 4 莫耳的 MnO_{2(s)}，但 3 莫耳的 VC 氧化則需要 10 莫耳的 MnO₄ 並產生 10 莫耳的 MnO_{2(s)}。

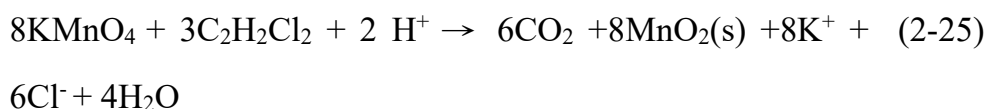
四氯乙烯(*Perchloroethene*, PCE)



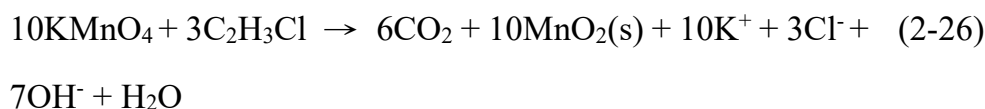
三氯乙烯(*Trichloroethene*, TCE)



二氯乙烯(*Dichloroethene*, DCE)



氯乙烯(*Vinyl chloride*, VC)



高錳酸鹽用於廢水處理過程中的可用來氧化酚類化合物，但苯酚的礦化消耗相對多的高錳酸鹽(每克苯酚15.7克過錳酸鉀)，萘(naphthalene)、菲(phenanthrene)、芘(pyrene)等多環芳香烴也可被高錳酸鹽氧化，使其中一個環發生斷鏈而分解。由於這些化合物經常與油品污染整治有關，但許多與燃

料有關的污染物無法被氧化，因此在油品污染整治上，高錳酸鹽不是優先選的氧化劑。少數的PCBs研究表明，高錳酸鹽不是PCB降解的有效氧化劑，但是高錳酸鹽氧化火藥成分(例如HMX、RDX、TNT等)則非常成功(IT Corporation 2000)。應用高錳酸鹽應根據具體情況確定，並取決於污染的範圍、污染物的氧化劑需求量、是否存在互相競爭的自然降解材料以及處理目標，表2.2-6提供了幾種有機化合物與高錳酸鹽礦化的化學劑量要求比較。

表2.2-6 高錳酸鹽完全礦化的化學劑量要求*

目標化合物	化合物的分子量 (g/mol)	氧化劑需求 (g MnO_4^- /g of target)	MnO_2 產物 (g MnO_2 /g target)
四氯乙烯	165.6	0.96	0.70
三氯乙烯	131.2	1.81	1.32
二氯乙烯	96.8	3.28	2.39
氯乙烯	62.4	6.35	4.64
苯酚	94.1	11.8	8.62
萘	128.2	14.8	10.8
菲	178.2	14.7	10.7
芘	202.3	14.5	10.6

*Molecular weight: MnO_4^- (118.9 g/mol), KMnO_4 (158 g/mol), NaMnO_4 (141.9 g/mol).

在評估、設計和實施高錳酸鹽氧化過程中無論採用何種輸送系統，皆必須考慮以下問題：

- 高錳酸鹽在氧化苯、氯化苯、MTBE、四氯化碳或氯化乙烷(1,1,1-TCA等)方面無效。
- 與所有氧化劑一樣，在注入前應確定最佳的氧化劑負荷，包括目標化合物與非目標化合物。
- 土壤中的 MnO_2 沉澱物會降低地下滲透率。
- 與所有的氧化劑一樣，由於氧化態和/或pH值的變化，可能造成重金屬溶出而在處理區內流動。

- 處理高錳酸鉀時要考慮防塵措施。
- 當高錳酸鈉濃度超過10%與不相容材料(還原劑溶液、過氧化氫、石油化合物、乙二醇等)混合時，可能發生強烈反應。

2.2.3 過硫酸鹽系統

過硫酸鹽的研究熱潮大約是從 2000–2002 年開始的，發展的時間較短，對於其氧化特性的了解並不像其他化學氧化系統完整，過硫酸鹽會在水中解離成過硫酸根離子($S_2O_8^{2-}$)，儘管它們是強氧化劑，但是在對於有機污染物分解速率相對緩慢，表 2.2-7 說明不同的市售過硫酸鹽溶液的溶解度，在 ISCO 應用上，過硫酸鉀的溶解度較低，而過硫酸銨的注入可能會導致產生氮，這對地下水質會造成影響，因此最常用的是過硫酸鈉，過硫酸鈉溶液的化學特性如表 2.2-8 所示。

表2.2-7 過硫酸鹽溶解度

鹽類	溶解度(at 25°C)
過硫酸銨	46%
過硫酸鈉	42%
過硫酸鉀	6%

表 2.2-8 過硫酸鈉特性

特性描述	參數
物理型態	白色結晶固體
分子式	$Na_2 S_2O_8$
分子量	238.1 g/mol
溶解度 0 °C	37 wt. %
25 °C	42 wt. %
50 °C	46 wt. %
溶液密度 10%	1.067 g/mL
20%	1.146 g/mL
30%	1.237 g/mL
40%	1.340 g/mL

過硫酸鹽的化學反應極為複雜，在過硫酸鹽與有機物反應的過程中，有

三種主要反應會同時存在，即過硫酸鹽的自解反應、過硫酸鹽因氧化有機物而被消耗的分解反應，以及有機物被氧化後生成二氧化碳的反應。在自解反應中，過硫酸鹽可以直接接受 2 個電子形成硫酸根離子(SO_4^{2-})，具有極高的還原電位($E^0=2.01\text{V}$)，是一個強氧化劑。而更重要的反應是接受 1 個電子的情況下，則進一步可以產生硫酸根離子與硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\bullet-}$)，這些自由基則進一步發生反應產生更多的反應性物種。通常過硫酸鹽產生反應性物種需要經過「活化」，因此相較於其他的現地化學氧化系統，需要更長的時間，也具有較長的持久性。目前已知有多種活化方式，包含熱活化、鹼活化、鐵活化或螯合鐵活化、過氧化氫活化等四種，可針對不同的關切污染物與場址條件來選擇使用的活化方式。主要產生的反應性物種則包含了硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\bullet-}$)以及氫氧自由基 (OH^{\bullet})。

過硫酸鹽的化學分解反應會隨著過硫酸鹽濃度、pH 和氧而變化，並且產生過氧化氫或過硫酸鹽，在弱酸條件下，過硫酸根離子的水解產生硫酸氫根離子和過氧化氫，表 2.2-9 說明過硫酸鹽分解反應如何隨 pH 變化。過硫酸鹽活化反應也與 pH 有關，其相關性說明如表 2.2-10。以下茲就不同的活化方法進行說明：

一、熱活化

過硫酸鹽在加熱的情況下，反應如方程式 2-27，會產生 2 個硫酸根自由基。溫度越高，活化的效果越明顯，通常加熱的溫度的範圍為 30-60 $^{\circ}\text{C}$ 。熱活化後會形成極為氧化的情況，不但活化速度增加，其他的化學反應也會同時加速。



表2.2-9 過硫酸鹽的pH反應

溶液pH	反應
中性	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HSO}_4^- + \frac{1}{2}\text{O}_2$
弱酸(pH 3-7)	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{HSO}_4^- + \text{H}_2\text{O}_2$ (注意過氧化物的生成)
強酸	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HSO}_4^- + \text{HSO}_5^-$
鹼性(pH >13)	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + \text{OH}^- \rightarrow \text{HSO}_4^- + \text{SO}_4^{2-} + \frac{1}{2}\text{O}_2$

表 2.2-10 過硫酸鹽活化方法與 pH 關係

活化方法	說明
熱活化 (Heat activation)	影響尚不清楚
鐵活化 (Iron activation)	因為在中性的pH下，鐵會沉澱，因而中止反應，因此鐵活化需要將pH降低至3，來強化鐵參與反應而不會被螯合。(Block et al., 2004)
螯合鐵活化 (Chelated-iron activation)	被螯合劑螯合的鐵可以使鐵在中性的情況下不沉澱而使得活化反應持續進行。(Liang et al., 2004b)
過氧化氫活化 (Hydrogen peroxide activation)	pH對於過硫酸鹽-過氧化氫的活化方法研究較少，但過氧化氫的分解在中性與鹼性的條件下反應較快，因此預期自由基的產生也會比較快。
鹼活化 (Alkaline activation)	鹼活化過程是將pH提升至11，在pH為11時，過硫酸鹽的衍生反應(propagation reactions)比較傾向產生氫氧自由基 (Liang et al., 2007b)，但產生的酸可能會造成pH下降而停止活化反應 (Waisner et al., 2008)。
無活化 Unactivated persulfate	pH對於過硫酸鹽反應的影響研究仍少，但Block et al. (2004) 建議在酸性pH下有較佳的效果。

二、鐵活化

利用鐵或過度族金屬來進行活化為過氧化氫活化最常見的一種方式，利用鐵或過度族金屬活化，可以在室溫及中性的 pH 下加速過硫酸鹽的化學反應，這顯示在現地化學氧化過程不需要額外的對地下環境加熱。有許多不同的過度族金屬離子可以用來活化過硫酸鹽，但考量其穩定性與毒性，Fe(II)及 Fe(III)仍是最常使用的活化劑。

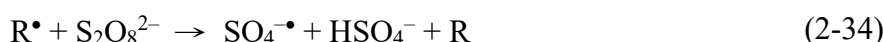
加熱或亞鐵鹽可顯著增加過硫酸鹽的氧化強度，這種增加是由於硫酸根自由基(SO₄•)的產生。自由基是具有不成對的分子片段，導致它們具有高度的反應性和短暫的壽命，硫酸根自由基是一種非常有效的氧化劑，大致等於使用臭氧或過氧化物產生的羥基自由基，涉及自由基的反應可以是鏈增長反應或鏈終止反應。

鏈增長反應會產生另一個自由基，而鏈終止反應不產生，任何一種類型的反應都可能涉及或可能不涉及與目標化合物的反應(即存在污染物)，涉及過硫酸鹽的自由基反應例子如下(Kislenko et al., 1995)。

鏈引發反應(Chain-Initiating Reactions)



鏈增長反應(Chain-Propagating Reactions)



鏈終止反應(Chain-Terminating Reactions)



要注意的是鐵也會參與終止反應，所以亞鐵離子濃度對於控制傳播與終止反應速率是重要的，在升高的溫度條件下(~40°C)，硫酸鹽自由基的半衰期約為 4 秒(Banerjee and Konar, 1984)，可以預期羥基自由基具有更短的半衰期，因為它們在動力學上更快，亞鐵離子需要高度還原的條件，如地下環境需維持在酸性 pH 值。

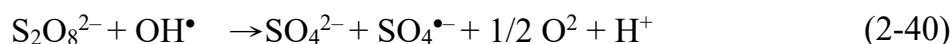
過硫酸鹽在現場應用中，活化劑必須與過硫酸鹽一起分配和運輸，而 Fe(II)的問題之一是他們容易被氧化成 Fe(III)，在土壤具有 pH 緩衝能力的土壤環境中，形成的 Fe(III)沉澱在土壤上，因此，鐵活化的有效性隨時間和距離而降低。

三、螯合鐵活化反應

由於亞鐵離子一方面會造成鏈終止反應，且在環境中容易發生沉澱或轉為三價鐵，因此便利用螯合劑來延長亞鐵離子的壽命。使用無機酸(草酸、檸檬酸)的羧基可輕易地完成螯合，EDTA(乙二胺四乙酸)，或是NTA[次氨基三乙酸]、STPP[三聚磷酸鈉]、HEDPA[氫氧化乙烯雙磷酸])通常用於改良的芬頓(Fenton's)體系中，並且可以應用於過硫酸鹽體系(Liang et al., 2003)。

四、過氧化氫活化

將過氧化氫與過硫酸鹽同時應用發生反應，可以活化過氧化氫與過硫酸鹽，而不需要添加過渡族金屬活化劑。其背後的機制仍然不是非常的清楚，無法確定到底是哪一個化合物對於過硫酸鹽產生活化。而許多的土壤礦物，特別是鐵或錳，會使得過硫酸鹽的反應傾向產生過氧化氫，因此可預期的在天然土壤中，仍然存在許多催化劑可以催化反應的發生。過氧化氫活化的反應可能是從產生自由基開始的，如氫氧自由基或超氧自由基，接著與過硫酸鹽發生反應，產生硫酸根自由基



五、鹼活化

另一種活化過硫酸鹽的方法是升高的 pH 值，通常會添加氫氧化鈉或氫氧化鉀，理論上當 pH 提升為鹼性時(pH 11-12)氫氧根會增加，氫氧根與硫酸根自由基發生反應，產生硫酸根與氫氧自由基，接著便發生延長反應。有研究可添加石灰產生過量的氫氧根離子，然後過硫酸鹽被活化形成硫酸根自由基(來自石灰水合的熱量)，作為 PCB 脫氯的一種手段，最近的研究也指出在鹼性條件下超過 pH 10.5 的過硫酸鹽可以分解氯化乙烷，還可以分解氯化甲烷，如四氯化碳和氯仿。硫酸根自由基反應過程遵循更複雜的途徑，並涉及方程式 2-28~2-39 中所述的引發、增長和終止步驟，不僅形成了硫酸根($\text{SO}_4^{\bullet-}$)，其動力學比過硫酸根陰離子快，而且可能形成氫氧自由基(OH^\bullet)和有機自由基，多個自由基的反應過程提供了一個非常有效的反應來摧毀難分解的化合物，理論上，如果鏈

終止過程對於鏈傳播路徑是慢的，則相對少量的硫酸根自由基可以產生顯著的污染物分解效果，而會小於直接氧化的所需要的化學計量，由於過硫酸根陰離子的氧化動力學緩慢，與 NOM 的相互作用有限，並且比過氧化物或高錳酸鹽的相互作用要低得多，最近的研究也表明，土壤氧化劑對硫酸根自由基的需求遠低於高錳酸鹽和羥基自由基，然而混雜的影響是氯離子以及碳酸鹽和碳酸鹽離子可以做為硫酸鹽自由基的自由基掃除劑，如果這些掃除劑以高濃度存在，則會降低氧化劑的有效性。

用過硫酸鹽氧化地下水中的 VOC 也有可能降低地下水中的 pH 值，因為在水中沒有土壤可以來緩衝 pH 值，根據所使用的過硫酸鹽的量，pH 值通常下降到 1.5-2.5 的範圍，這種情況的變化可以使土壤中天然存在的或人為污染的重金屬產生移動，然而在土壤環境中，由於許多土壤具有 pH 緩衝能力並且可以減輕硫酸的形成，所以 pH 下降可能不如水中觀察到的劇烈，從理論上說，使用過硫酸鹽氧化土壤和地下水中的揮發性有機化合物時應該注意幾個問題：

- Fe(II)似乎不能用氯化乙烷(1,1,1-TCA 等)和氯化甲烷(氯仿等)有效活化過硫酸鹽，然而最近在鹼性條件下使用過硫酸鹽的工作證明了對這些污染物的有效性。
- 鐵的催化作用似乎隨著時間和距離的減少而衰減，這種下降可能是由於溶解的 Fe(II)在土壤環境中的傳輸不良或者因為它激活過硫酸鹽而導致鐵的消耗，螯合鐵則有效地提高 Fe(II)在地下水中的鐵溶解度和壽命。
- 過硫酸鹽分解可能會產生低 pH 條件，這會導致地下水中溶解的金屬濃度增加，天然的土壤緩衝能力可以幫助緩解這種現象。
- 過硫酸鹽可能會降解銅或黃銅等軟金屬，施工材料應長期與過硫酸鹽相容，適當的材料包括不鏽鋼、高密度聚乙烯和聚氯乙烯(PVC)。
- 與所有氧化劑一樣，注入前應確定最佳的氧化劑負荷，包括目標化合物與非目標化合物。
- 與所有氧化劑一樣，由於氧化態和/或 pH 值的變化，使得重金屬可以在處理區內流動。

2.2.4 臭氧系統

臭氧的現地化學氧化與前述3種系統都不一樣，最主要是因為臭氧是以氣態的方式注入地下環境中，因此涉及應用氣體(臭氧)的設計和操作問題，與應用過氧化物，過硫酸鹽和高錳酸鹽液體系統截然不同。

臭氧是ISCO最強氧化劑之一，他是氧氣的同素異形體，其氧化還原電位約為 $E_o = 2.1\text{ V}$ ，只要一接觸有機物即會產生氧化作用，以非常快的、假一次動力反應進行，可直接氧化污染物或通過形成氫氧自由基的方式氧化。臭氧的反應性強、半衰期僅有數個小時到數天，極為不穩定，因此在現地化學氧化的應用上受到很大的限制。通常臭氧的現地化學氧化會搭配曝氣法與土壤氣體抽除，臭氧由臭氧產生器在現場生成，使用空氣或氧氣的商業化臭氧產生機通常產生2-10重量百分比範圍內的臭氧，利用垂直井或水平井將產生的臭氧注入地下環境中，圖2.2-3為臭氧現地化學氧化系統的示意圖。

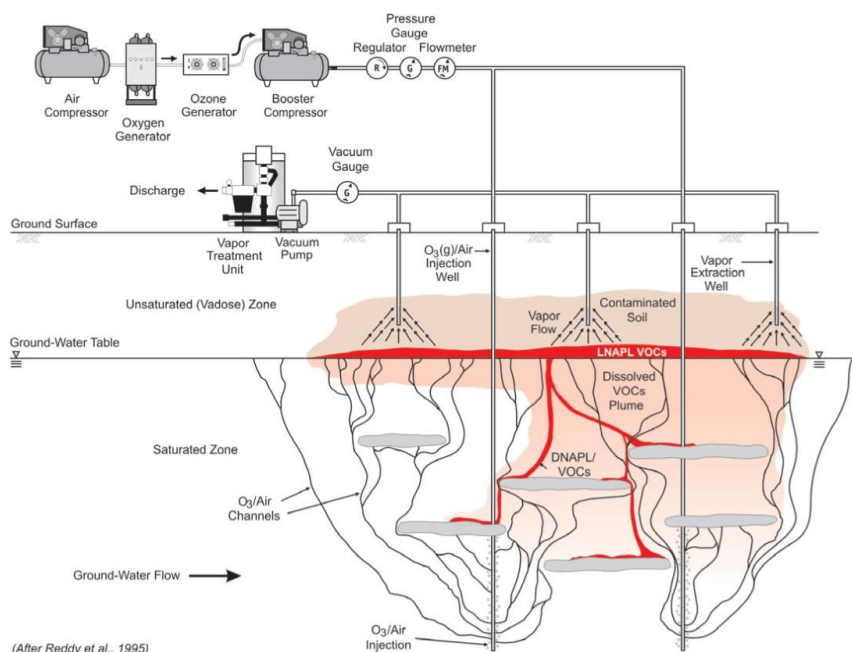


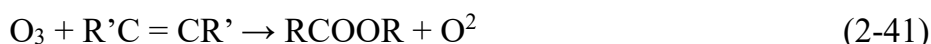
圖 2.2-3 臭氧現地化學氧化系統示意圖

當通過氣相引入臭氧時，應用考慮氣相和液相之間平衡控制，典型的臭

氧化進料氣體進入乾淨的水中進行灌注時，水平衡臭氧濃度通常在5-30mg/L(Langlais et al., 1991)。

有兩種不同形式的現地臭氧應用：臭氧氣體的滲流注入和地下水位以下的臭氧噴射，由於在這些不同的應用中，存在地下水流物理和化學傳輸的差異，這些方法的操作和處理考慮與其他氧化劑的操作和處理考慮大不相同，對於臭氧的系統，最經常要考慮單獨應用臭氧和過氧化氫(應用臭氧與過氧化氫)，現地注入臭氧也可以用來調整高pH條件，這種方法是增加羥基自由基產生的策略，其導致一些污染物(例如酚類)的降解速率增加。

臭氧可以直接與有機污染物反應，去除污染物，其反應式如下。

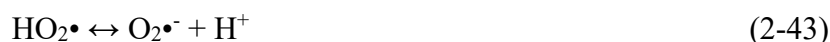


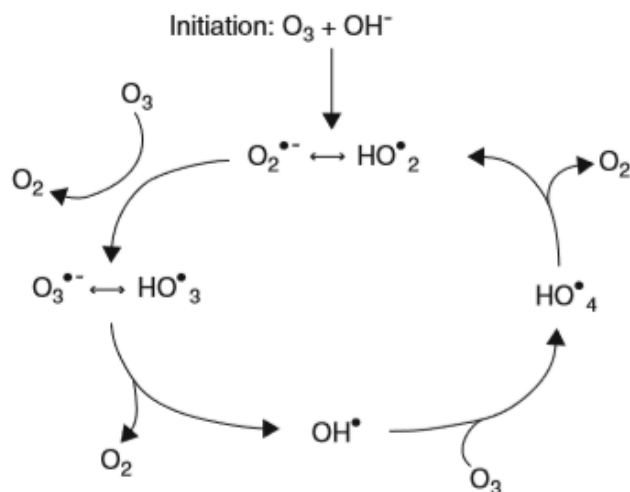
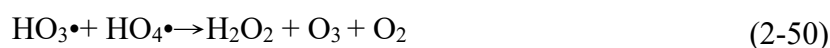
臭氧亦可藉由提高pH或利用UV光照射，產生氫氧自由基來間接氧化污染物，目前對於臭氧產生自由基的機制仍有爭論，但大致可從方程式2-41開始，並區分為2種模式：



一、Hoigne, Staehelin and Bader Model, HSB model

HSB model 認為臭氧的反應會是一個循環的反應鏈，並包含了反應性物種的延長反應，依據這個概念，式 2-41 所產生的反應性物種為 $\text{O}_2^{\bullet-}$ 以及 HO_2^{\bullet} ，其自由基的反應如圖 2.2-4，相關反應式如後所示：



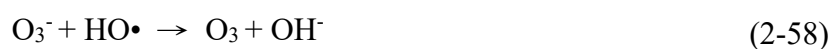
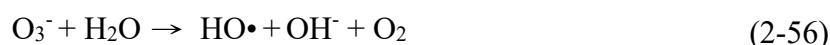


參考文獻：Clayton et al., 2011.

圖 2.2-4 HSB model

二、Tomiyasu, Fukutomi and Gordon Model, TFG model

TFG model 則認為臭氧的反應性物質的分解反應是線性的，且不會有 $\text{HO}_3\bullet$ 以及 $\text{HO}_4\bullet$ 產生，並且提出 1 個電子轉移的程序(因此會產生 OH^\bullet 及 O_3^-)及 2 個電子轉移的程序(因此會產生 HO_2^- 及 O_2)，延續的反應則經過 O_3 產生氫氧自由基，其反應如下：



前述的反應會受到pH的影響，除此之外臭氧的現地化學氧化最主要的問題仍是臭氧於地下環境中的傳輸，在污染物的部分，已經有許多的污染物被證實可被臭氧所分解，包含氯有機溶劑(e.g., PCE, TCE, 1,1,1-TCA)、1,4-Dioxane、含氯芳香族(e.g., chlorobenzene, dichlorobenzene, chlorophenol)、油品碳氫化合物(e.g., BTEX, TPH, MTBE)、多環芳香族 (e.g., benz[a]anthracene, benzo[a] pyrene, pyrene, anthracene)、火炸藥類(e.g., hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine [RDX], nitrotoluene, 2,4,6-trinitrotoluene (TNT), nitrobenzene)。

2.3 ISCO 技術適用範圍

不同氧化劑都有其優點和侷限性，雖可適用於土壤污染和某些污染源區，但仍以地下水整治應用為主。各種不同氧化劑在應用上亦有其缺點需要克服，如高錳酸鉀之產物二氧化錳，容易於注入井周圍形成沉澱，造成井口阻塞；而臭氧由於需利用高壓電連續產生，在處理上，能源成本較高。有關 ISCO 技術應用之影響因子與適用範圍可歸納如以下各點，表 2.3-1 為針對上述四類常見氧化劑所進行之優缺比較。

一、地下環境之滲透性與傳輸性

由於氧化劑與污染物的接觸與反應為整治成效的關鍵，故對於滲透性低的地下環境，氧化劑輸送的均勻性差且有局部不均勻性問題，其土壤中的污染物不容易完全被化學氧化劑接觸而破壞。為能有效地降解污染物，氧化劑必須與污染物分子有效接觸，理想情況下，可透過氧化劑的輸送技術均勻分散的注入待處理區域，不同介質型態（滲透率）適用之氧化劑類型詳表 2.3-2 所列。此外，地下環境的滲透性也可能受到氧化反應過程中的副產物影響，如高錳酸鹽反應後會生成二氧化錳沉澱物，以及催化過氧化氫的二價鐵離子亦會轉化為三價鐵離子沉澱，阻塞土壤孔隙而降低局部滲透率。

不同的氧化劑種類，其反應半衰期亦有所差異，通常來說氧化還原電位較強的氧化劑消耗迅速，而限制了氧化劑傳輸距離與反應半徑，活性較低的氧化劑更穩定，可以在地下運輸更長的距離，以過氧化氫與過硫酸鹽為例，過硫酸鹽氧化劑典型的半衰期為 10 至 20 天，為過氧化氫半衰期之 10 倍，因此過硫酸鹽於地表下之應用可呈現較大範圍的影響半徑且具持久性，原則上，高錳酸鹽與未催化之過硫酸鹽較適合低滲透性與擴散型地下水污染，而 CHP 與經催化過硫酸鹽則較適合高滲透性地下環境與污染源區、污染團中心區。

氧化劑反應的持久性亦影響整治範圍，過硫酸鹽與高錳酸鹽因於地下環境中具有較長的活性，較可有助於直接擴散到低滲透性的土壤中並破壞污染物，而臭氧在土壤下反應速率快，從注入點向周圍傳送的距離

不足，常常無法涵蓋整個待處理污染區域。

二、催化與反應條件

ISCO 技術的應用除考量氧化劑是否會與現場標的污染物發生反應外，在微觀上，動力學或反應速率可能是最重要的考量要素，氧化反應速率須同時取決多項考量因子，包括溫度、pH 值、反應物濃度、催化劑、反應副產物與其他反應物（如天然有機物）等。

依據第 2.2 節中各類型氧化劑之反應式來看，過氧化氫與過硫酸鹽皆須透過如鐵離子等催化劑的啟動，以加速生成自由基破壞污染物。氧化劑的啟動環境條件亦有所差異，高錳酸鹽與過硫酸鹽可適用之 pH 範圍廣，pH 3~11 皆可反應；而由過氧化氫與鐵離子組成之 Fenton 試劑除非經改良，否則僅適用於 pH 3.5~5 之酸性條件。

除上述提及之氧化劑所產生之二氧化錳副產物與催化鐵離子之沉澱影響外，反應過程中亦可能產生其他潛在影響，如過氧化氫與臭氧在氧化反應後所造成的大量產氣問題，可能引發注藥井壓力過大，且催化過氧化氫反應過程也將伴隨大量產熱反應，故須注意現場操作之公安危害；另氧化反應過程中亦可能造成原本吸附態之金屬離子被溶解釋出至地下水，衍生其他污染問題。

另外，由於氧化劑不具選擇性，因此若欲使目標污染物達到良好的降解效率，必須考量目標污染物所需之氧化劑劑量、氧化劑本身自我降解量，以及與土壤中其他可氧化物質(oxidizable matter, OM)反應之消耗量，而用以克服土壤中非目標 OM 之氧化劑量稱為土壤氧化劑需求量(soil oxidant demand, SOD)，其中以高錳酸鹽所需之 SOD 劑量最高，而過硫酸鹽則有低 SOD 需求量之優勢。此外，SOD 隨著氧化劑濃度的增加而提升，尤其在低滲透地質環境中 SOD 之效耗量越大，約高達 90% 的氧化劑量可能因擴散限制系統中的 SOD 所消耗。有關上述所提各類氧化劑之催化與反應影響因子詳表 2.3-3 所示。

表 2.3-1 四種常見氧化劑之比較

類型	優點	缺點
臭氧	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高處理效率且反應時間短 ■ 不具選擇性 ■ 增加溶氧，可提升生物好氧整治之功效 ■ 可利用自動系統操作 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 半衰期短 ■ 增加氣體短暫揮發進入鄰近建築結構或公共設施的風險 ■ 傳輸距離短，低滲透性的土壤較不適用 ■ 需要臭氧產生機及傳輸設備
過氧化氫/ 鐵	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高處理效率且反應時間快 ■ 不具選擇性 ■ 增加溶氧，可提升生物好氧整治之功效 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 反應產生大量熱與氣體 ■ 半衰期短 ■ pH適用範圍小 ■ 傳輸距離短，低滲透性的土壤較不適用
過錳酸鉀	<ul style="list-style-type: none"> ■ 反應過程較安全，不產生熱及氣體 ■ 氧化處理期程較長，可增加與污染物接觸的機會 ■ pH適用範圍廣 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 易產生沉澱固體顆粒，造成含水層土壤孔隙阻塞 ■ 傳輸距離短，低滲透性的土壤較不適用 ■ 高SOD ■ 處理石油類的污染場址效能較差
過硫酸鹽/ 催化	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高處理效率 ■ 具有低SOD ■ 氧化處理期程較長，可增加與污染物接觸的機會 ■ pH適用範圍廣 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 需要催化劑 ■ 反應後pH變動性大。

表 2.3-2 不同介質型態（滲透率）適用之氧化劑類型

介質型態（滲透率）	氧化劑類型
砂質土（不適合岩石材料）	皆適用
黏土質	高錳酸鹽、過硫酸鹽
裂隙地質	高錳酸鹽、過硫酸鹽

表 2.3-3 四種常見氧化劑之催化與反應影響因子

類型	潛在危害影響	pH/鹼度	穩定度	氧化劑需求量	土壤滲透性與異質性
臭氧	產氣、副產物、金屬離子溶出	受鹼度影響，可適用 pH 範圍廣泛	穩定度不佳，易自解	土壤氧化劑需求量隨土壤類型而異；污染物氧化劑需求量需考量污染物總質量，含吸附相、溶解相與純相	滲透性與非均質性之地下環境影響氧化劑的傳輸與反應效能
過氧化氫/鐵	產熱、產氣、副產物、金屬離子溶出	受碳酸鹼度影響，可適用 pH 範圍廣泛，未經調控下以 pH 3.5~5 最佳	穩定度不佳，易自解		
過錳酸鉀	副產物、金屬離子溶出	受碳酸鹼度影響，可適用 pH 範圍廣泛，約 pH 3~12	穩定度高		
過硫酸鹽	副產物、金屬離子溶出	受鹼度影響，可適用 pH 範圍廣泛，約 pH 2.5~11	穩定度高		

三、適用之污染種類與劑量範圍

現地化學氧化需要考量土壤及地下水的水文、地質、地球化學特性以及污染物的特性來選擇，依據經驗，大概可以污染物來區分 ISCO 的適用性，依據污染物區分為 3 類進行快速的判定，如表 2.3-4 所示：

表 2.3-4 ISCO 法適用之污染物通用原則

實場案例適用	實場應用待確認	不建議實場使用
Chloroethenes BTEX TPH PAHs Chlorobenzenes Phenols (e.g., chlorophenols) Fuel oxygenates (MTBE, TAME) Alcohols 1,4-Dioxane	Chloroethanes Chlorinated/brominated methanes Explosives (RDX, TNT, etc.) Organic herbicides or pesticides NDMA Ketones PCBs Dioxins/furans	Heavy metals Radionuclides Inorganic salts Perchlorate Nutrients (nitrate, ammonia, phosphate)

(一) 實場案例適用 – 通常可利用 ISCO 氧化劑快速氧化之有機污染物

指大部份的 ISCO 方法可以處理的污染物，且文獻中大部分的實際應用經驗大多為這些污染物，因此具有許多實際案例。

(二) 實場應用待確認 – 可以被 ISCO 藥劑氧化，但與場址特性或程序有關

這一類污染物通常較不易被氧化或還原，或是這些氧化劑對污染物的分解效率或分解能力仍存在不確定性，通常採用 ISCO 處理這些污染物也比較不具有經濟效益，此外，由於第二類污染物進行 ISCO 的研究及實場經驗較少，因此如果場址的關切污染物屬於第二類，則在 ISCO 的應用上需要更多的評估。

(三) 不建議實場使用 – 不用考慮採行 ISCO 的污染物

被分類為第三類的污染物，原則上不建議採用 ISCO 進行污染改善，如果採用 ISCO 方法進行改善，甚至可能會改變污染物在地下環境中的行為。如對於氧化還原環境改變較為敏感的重金屬，可

能會因為 ISCO 而溶出。當第三類的污染物與第一類或第二類污染物同時存在時，採行 ISCO 會有一定的風險，造成第三類污染物的移動或二次污染。

基本上氧化劑之氧化能力越強，其能氧化的物種越多。由於過氧化氫、臭氧以及過硫酸鹽等三種氧化劑，均可以產生自由基，因此氧化能力均比不會產生自由基之高錳酸鹽高，對於化學結構較穩定的污染物，需應用活性較高（氧化還原電位較高）的氧化劑氧化進行破壞。

高錳酸鉀氧化劑雖無法有效氧化部份揮發性有機物，但在柴油、汽油、或 BTEX 等，尤其是氧化甲基第三丁基醚 (Methyl Tert-Butyl Ether, MTBE) 部分，高錳酸鉀氧化速率遠較其他 ISCO 常見之氧化劑低，而過硫酸鹽對 MTBE 的氧化處理效果則優於其他三類氧化劑。但相較可產生氫氧自由基者，因高錳酸鹽容易與雙鍵、醛基或羥基等具 π 鍵結構之有機物質反應，因此在處理氯乙烯類污染場址時為較適用之氧化劑。含氯乙烷類 (chlorinated ethanes, 如 TCA)、第三丁醇 (Tert-butyl Alcohol, TBA) 與氯苯類 (Chlorinated Benzenes, CBs) 以過氧化氫與過硫酸鹽的處理較佳。

對於含氯溶劑的氧化處理，有 2 個基本的原則，(1)雙鍵會增加電子密度(Pi cloud)，使得含氯有機溶劑比較容易被氧化；(2)氯原子會降低電子密度，使得有機溶劑比較容易被還原，因此在含氯溶劑的 ISCO 上，需要去關注雙鍵與氯原子的關係 - 離子化潛力 (ionization potential, IP)，如表 2.3-5 所示。

通常四氯乙烯 (Tetrachloroethylene, PCE)、三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE)、二氯乙烯(Dichloroethene, DCE) 與氯乙烯(Vinyl Chloride, VC)等含氯乙烯類則四類氧化劑皆適用，而四氯化碳(Carbon Tetrachloride, CCL₄)、三氯甲烷 (Chloroform, CHCl₃) 多氯聯苯 (Polychlorinated Biphenyl, PCBs)、二氯甲烷(Methylene Chloride, DCM)、殺蟲劑等則屬於非常頑抗的污染物，四類氧化劑對其處理效能較為有限。各項氧化劑之適用污染種類詳表 2.3-6 所列。

表 2.3-5 含氯有機溶劑的離子化潛力

Saturated compound	IP	Unsaturated compound	IP
氯乙烷 Chloroethane	10.98	氯乙烯 Vinyl chloride	10.0
1,2-二氯乙烷 1,2-Dichloroethane	11.12	Cis-1,2-二氯乙烯 Cis-1,2-Dichloroethene	9.65
氯丙烷 Chloropane	10.78	氯丙烯 Chloropropene	10.04
二氯丙烷 Dichloropane	10.87	二氯丙烯 Dichloropropene	9.82
氯甲烷 Dichloromethane	11.28		
二氯甲烷 Dichloromethane	11.35		
氯仿 Chloroform	11.37		
四氯化碳 Carbon Tetrachloride	11.47		

參考文獻：Montgomery, 1996.

另外，不同氧化劑在使用上亦有其濃度限制，過氧化氫溶液可配置濃度範圍最廣，可達 5~50 wt.%，過硫酸鹽溶液以 0.5~5 wt.% 為建議值，高錳酸鉀溶液則以 0.02~4.0 wt.% 為佳，而臭氧無限定值。

表 2.3-6 四種常見氧化劑之適用污染種類

氧化劑	可分解	難分解	無法分解
臭氧	PCE、TCE、DCE、VC、BTEX、CB、酚、MTBE、TBA、爆炸性物質	DCA、DCM、PAHs	CHCl ₃ 、殺蟲劑、TCA、PCBs、CCL ₄
過氧化氫/鐵	TCA、PCE、TCE、DCE、VC、BTEX、CB、酚、MTBE、TBA、爆炸性物質、1,4-Dioxane	DCA、DCM、PAHs、PCBs、CCL ₄	CHCl ₃ 、殺蟲劑
過錳酸鉀	PCE、TCE、DCE、VC、BTEX、PAHs、酚、爆炸性物質	苯、殺蟲劑	CHCl ₃ 、TCA、PCBs、四氯化碳
過硫酸鹽	PCE、TCE、DCE、VC、BTEX、CB、酚、BTEX、TBA、1,4-Dioxane	PAHs、殺蟲劑、爆炸性物質	PCBs

2.4 ISCO 與其他技術的整合

由於地下污染之複雜性高，在面對複合性污染物質或濃度差異極大的污染場址，往往無法僅以單一種整治計畫達到最佳之整治成效，因此，整治列車的概念即被提出，利用多項整治技術的整合以達到最具經濟性與高效率之工法設計。

依據 ISCO Technology Practice Manual 所提出之案例介紹，有高達 74 % 的研究場址採行整治列車的整合性工法，促使這些場址之污染濃度之降解率達 90 %。針對 ISCO 技術與其他物理、化學與生物整治技術之整合性詳表 2.4-1 所列，以下提供可能性的技術整合說明：

一、ISCO 技術與物理性整治技術搭配

面對具有高濃度有機物之污染場址時，建議可先搭配空氣注入法、雙相抽除處理法處理，同時具非飽和層與飽和層污染者則可搭配土壤氣體抽除處理法 (Soil Vapor Extraction System, SVE) 工法處理，該作法皆以降低污染物質為目標，防止污染物不斷釋出至含水層，造成 ISCO 處理地下水污染過程中的濃度反升現象。另，在進行現地熱處理後，可搭配應用過硫酸鹽氧化技術，利用其餘熱進行過硫酸鹽活化，以降低處理成本。

二、ISCO 技術與化學性整治技術搭配

ISCO 搭配如界面活性劑等化學處理方法，可以增加吸附性污染物的溶解度，以利氧化劑有效接觸地下水中之污染物。

三、ISCO 技術與生物性整治技術搭配

於 ISCO 技術後串聯生物整治技術 (bioremediation) 可有助於降低整體整治藥劑的花費成本。對於 ISCO 技術來說，因採行過氧化氫或臭氧等氧化劑反應過程中，其主要副產物為氧氣，具有促進現地好氧微生物分解污染物之可行性；過硫酸鹽亦具有其優勢，因其最終產物硫酸根 (SO_4^{2-}) 不具環境毒性，且一般土壤與地下水環境中，多以厭氧與兼性微生物為主，硫酸根則是此類微生物分解碳氫化合物時重要的電子接受者

。此外，國內外研究許多顯示 ISCO 對天然含水層微生物的抑制作用為暫時性的，以熱催化過硫酸鹽對原生土壤微生物的影響研究案例來看，微生物數量在氧化劑濃度達 10 g/L 前並不受影響與抑制，且在高濃度 (30g /L)過硫酸鹽氧化雜酚類污染物後，管柱內之微生物仍可恢復並進行生物降解反應。國內「應用整合型復育技術處理受燃料油污染之土壤及地下水」研究工作中曾提出，利用界面活性劑、Fenton-Like 與生物復育技術串聯的整治序列，其結果顯示 Fenton-Like 反應後，土壤總生菌數仍可維持在 10^6 至 10^7 CFU/g-soil 之間，氧化過程並不會對微生物造成過大傷害，且殘留之 TPH 將可由第三階段之自然生物降解或自然衰減之機制去除，使受燃料油污染之介質達到整治之目標，並恢復土壤原貌，證實化學氧化法與生物復育搭配之可行性。

表 2.4-1 ISCO 與其他技術的整合

整合技術名稱	優點	缺點
開挖	<ul style="list-style-type: none"> 快速可行 可以將氧化劑快速的與滲透表面土壤混合 土壤混合法更容易施行 	<ul style="list-style-type: none"> 污染熱區依然維持 回填可能產生優勢流路徑 回填高有機物濃度的土壤可能會有額外的氧化劑消耗 回填或混合的乾淨土壤會使得氧化劑處理效率降低
加強式的污染物回收(如多相抽除法等)	<ul style="list-style-type: none"> 可大量減少污染物質質量進而減低氧化劑需求量 移除 NAPL pool 或是飽和的區域可以幫助氧化劑在平流方向的傳輸 	<ul style="list-style-type: none"> Smear Zone 厚度可能會增加 殘留相的 NAPL 仍然會殘留

表 2.4-1 ISCO 與其他技術的整合(續 1)

整合技術名稱	優點	缺點
界面活性劑沖排	<ul style="list-style-type: none"> 可大量減少污染物質質量進而減低氧化劑需求量 界面活性劑可以促進特定氧化劑的反應能力 可增加污染物的溶解與脫附而促進溶解相的氧化作用 	<ul style="list-style-type: none"> 未結合的界面活性劑可能會造成氧化劑的分解 氣體的產生可能會造成氣泡而改變滲透性 有一些 NAPL 可能會在界面活性劑沖排後殘留
土壤氣體抽除/曝氣	<ul style="list-style-type: none"> 可大量減少污染物質質量進而減低氧化劑需求量 曝氣法的設備可以搭配現地臭氧氧化 可以配合抽除可能產生的揮發性污染物與產生的氣體 可能可以氧化某些還原的物質而減低地下環境中的 SOD 	-
熱處理整治	<ul style="list-style-type: none"> 可大量減少污染物質質量進而減低氧化劑需求量 溫度提升可以提升某些氧化劑的效率 對某些氧化劑與持久性污染物而言，分解的動力學速率會因為溫度上升而上升 	<ul style="list-style-type: none"> 溫度上升可能會強化氧化劑與污染度放熱反應而有健康與安全的問題 坩土或黏土可能會因為溫度上升而發生固化而造成後續氧化劑分散的問題 當溫度的提升會促進氧化劑分解時，則可能會造成後續藥劑注入的問題與使用量的增加

表 2.4-1 ISCO 與其他技術的整合(續 2)

整合技術名稱	優點	缺點
生物整治或加強式生物整治	<ul style="list-style-type: none"> 如果現地化學氧化後，地下環境條件可以恢復到原來的狀態，則 ISCO 可能為一個清洗或菌種選擇的步驟 	<ul style="list-style-type: none"> 如果是接續厭氧還原後進行 ISCO，則需要更多的藥劑。 生物整治產生的微生物或有機基質，可能會額外對氧化劑產生消耗
電動力法	<ul style="list-style-type: none"> 可適用於水力傳導性較低及黏土含量較高的土壤 具驅動力作用，將氧化劑引導至污染熱源區 電動力法可改變土壤中原有成份的 pH，使金屬離子活化，土壤本身的結構不會遭到破壞，且過程中不會受到土壤滲透性影響 	<ul style="list-style-type: none"> 是否成功會受到氧化劑溶解性和污染物於土壤膠體表面之脫附性能影響 金屬電極可能會於電解過程中溶解，並產生腐蝕性物質

第三章 場址特性調查和概念模式

整治技術的應用與設計端賴適切的場址調查以及對於場址特性的了解，ISCO 技術的應用亦不例外。事實上，完整的場址調查是掌握整治成效的最關鍵因素之一，而所謂適切的場址調查不僅止於污染物濃度的檢測，同時需要了解污染物的存在於地下環境的特性與質量（例如吸附相、溶解相以及自由相）與地下環境的地質條件（如關切污染物的主要傳輸途徑以及地下水流方向/梯度）。

此外，應結合所有場址調查資料建立場址概念模型（Conceptual Site Model, CSM），而 CSM 是需要持續持續地更新以確保整治工作的成效。原則上，CSM 的基本元素除了前述的污染物特性與地下環境特性外，亦包括場址地形、水文地球化學特性、地下結構物存在與否、地表水的特性與使用狀況以及周邊潛在之受體等。於建構 CSM 的過程中，所有的既有或歷史資料來源均須加以了解與審閱，以確核資料的可用性與正確性。在進行場址特性調查時，應基於特定的資料品質目標，建立完整的採樣與分析計畫以及品保品管規劃書。

NAFVAC 2015 年所發表現地化學氧化技術文件，彙整了現地化學氧化 CSM 中所需要特別注意的參數(如表 3-1 所示)。其中某些參數會顯著的影響到 ISCO 的設計以及是否能有效地將 ISCO 藥劑注入地表下(表 3-2)。本章節將進一步說明各項重要參數的內容。

表 3-1 ISCO 場址概念模型所需重要內容與說明

CSM 元素	說明
污染物的天然特性與污染程度	<p>許多因素會決定注入的氧化劑垂直與水平位置：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 關切污染物的來源與污染時間 • 關切污染物的物理與化學特性(如 K_{oc}，溶解度) • 關切污染物的污染量 • 關切污染物水平與垂直的分布以及關切污染物分布的異質性 • NAPLs 的出現與否與如何分布(如在 smear zone 或是黏土層)
人類與生態健康風險	<ul style="list-style-type: none"> • 關切污染物的風險 • 氧化劑注入與持久性的風險（特別是在處理程序的最後或是有許多不同整治工法要應用時）
關切污染物的傳輸與宿命	決定藥劑注入的藥劑對注入點的位置的影響、氧化劑的濃度、流率以及注入含水層的方法
場址上的基礎結構物與其特性	<p>有許多因子會影響注入位置及總體注入策略：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 都市環境或鄉村環境的考量 • 建物設施是否存在 • 與鄰近受體的距離 • 近期與未來土地利用
水文特性	<p>有許多因子會決定如何將氧化劑注入到地下環境中</p> <ul style="list-style-type: none"> • 岩性（岩性單元，非均質性，顆粒大小，滲透率，母岩的存在等） • 水文地質特性（水力梯度，侷限含水層或非侷限含水層、飽和含水層厚度、電導度、通量、達西速率、地下水流速、異向性等。） • 礦物學特性（如可能會造成重金屬成分暫時的移動性）

表 3-1 ISCO 場址概念模型所需重要內容與說明(續)

CSM 元素	說明
水文地質化學	<ul style="list-style-type: none"> 溶氧、氧化還原電位、pH、緩衝能力 量測土壤有機物來預測有機物比例(f_{oc})及分配係數(distribution coefficients, K_d) 未污染區與污染區地質化學特性

表 3-2 對現地化學氧化藥劑分布影響的重要環境參數

CSM 參數	設計影響
水力傳導係數與含水層的異向性	地下水及氧化劑的流動會順著抵抗力最小的路徑流動，低傳導係數的區域並不見得能夠被適當的處理，因此對於此類區域需要額外或針對性的注藥。
地質特性	<p>水力破裂(fracturing)及其他強化方法必須被應用在低滲透性的含水層中，才能促進氧化劑的傳輸。</p> <p>異質性會影響到藥劑流動的路徑以及與關切污染物的接觸</p>
NAPLs 是否出現、在水位變動層或吸附的污染物	<p>影響氧化劑需求量</p> <p>當溶解相均被處理後，可能會產生污染濃度反彈</p> <p>可能造成反向擴散(back diffusion)，特別是低滲透性含水層</p> <p>移動性可能會影響到處理程度與種類</p>
污染物的水平延伸	會影響處理的程度，可能只涵蓋污染源區、部分或全部的污染團，或是兩者都包含
地下設施或管線	<p>地下環境中的優勢通道可能會使得藥劑移動至非預定的區域(如雨水管線、污水管線)而無法與關切污染物接觸。</p> <p>對於地下中的管線與通道必須要小心地排查</p> <p>產生的揮發性氣體(無論是分解的副產物或放熱反應的副產物)</p>

表 3-2 對現地化學氧化藥劑分布影響的重要環境參數(續)

CSM 參數	設計影響
地上物	對於產生的氣體、蒸氣或是熱都需要做蒸氣回收以減低風險 地上物可能對現地化學氧化的注入造成問題

3.1 地質與化學特性參數

場址特定的地球化學參數應於整治、決定氧化劑種類與劑量以及評估 ISCO 的成效前，透過調查工作建立基線資料。主要的基線資料包括整治前之關切污染物初始濃度以及現場水質參數。ISCO 技術主要應用於含水層之污染物處理，並受到氧化劑於地下環境之傳輸性影響，因此前述的基線資料需要在進入整治系統設計前，即有充分的了解。以下各小節將依 ISCO 技術應用之設計過程，所需特性參數加以說明，以作為技術適用性評估之參考。

對於場址地下環境之土壤特徵的描繪是發展 CSM 的第一步，這個過程包括收集場址之地質鑽探的岩心資料以及確認水文地質數資料(水力傳導係數、土壤粒徑分布、土壤孔隙度以及地下水流方向與梯度等)，極為重要的是藉此描繪土壤的不均質性與決定短流路徑的存在，進而確認注入地下環境之氧化劑的傳輸宿命。

3.1.1 水力傳導係數

水力傳導係數 (hydraulic conductivity, K) 是量測地下水於飽和含水層移動的難易度，此項資料可協助設計者了解溶解相污染物與氧化劑移動的速度與難易。典型的量測方法是現場採用微水試驗 (slug test) 或實驗室中的定水頭量測方法，可進一步參考 ASTM Method D5084 了解其詳細內容。由於現場地下環境的不均質性甚高且取得未受擾動之代表性土壤樣品相對困難，因此多採用現地的水體試驗較能評估場址特定的狀況。水力傳導係數對於估算影響區域、決定井與井之間距以使注入之藥劑適當的分布以及注藥期間減少污染的強迫性移動 (污染地下水的非自然擴散) 相當重要。

水力傳導係數是用以判斷多孔介質傳遞特定流體難易程度，通常是為水的傳輸。水力傳導係數是多孔介質與流體的函數，其因次為 $[L T^{-1}]$ 。當水力傳導係數係由地下水飽和條件決定時，稱為飽和導水率係數(K_s)。內在滲透率(k)與飽和水力傳導係數(K_s)的關係如下式所列：

$$k = \frac{K_s \mu_w}{\rho_w g}$$

其中

μ_w ：水動力黏滯係數 (dynamic viscosity) $[M L^{-1} T^{-1}]$

ρ_w ：水密度 $[M L^{-3}]$

g ：重力加速度

$k = 10^{-7} \text{ m-sec} \times K_s$ 或 $k = 10^{-5} \text{ cm-sec} \times K_s$ (水溫為 293K)

K_s ： m sec^{-1} (水溫為 293K)

3.1.2 滲透率

土壤的滲透度 (soil permeability) 是類似於水力傳導係數的參數，滲透率是量測任何流體流經地表下介質的難易度，是土壤基質專屬的特性且未考量任何流體的特性。飽和層或不飽和層均可量測其滲透率，量測之方法可參考美國石油協會 (America Petroleum Institute, API) 出版的 API Method RP40。飽和層的透水性對於了解潛在自由相以及溶解相的傳輸路徑以及決定可使氧化劑均勻分布的體積或壓力有助益，不飽和層(空氣)通透性則有助於決定臭氧在不飽和層的流動型態。

滲透率或稱為內在滲透率 (intrinsic permeability, k)，可用以判斷多孔介質傳輸空氣、水或其它流體難易程度。內在滲透率僅為多孔介質的函數，其因次為長度的平方 $[L^2]$ 。表示滲透率時也可以達西 (Darcy) 為單位， 1 cm^2 約等於 10^8 達西。若以介質可展現的最大滲透率值，或以特定流體表示滲透率時，則以相對滲透率(kr)之無因次參數方式表現。

3.1.3 土壤質地與孔隙率

孔隙率與滲透率的不同，在於孔隙率為表示多孔介質中，不同相態可流

通的體積，而滲透率為表現多孔介質中，不同相態在其可流通體積傳輸之難易程度表現。多孔介質之總體積(V_t)，由固相(V_s)、氣相(V_g)、液相(V_l)所組成。孔隙由多孔介質總體積中的氣相及液相組成，如蒸氣、水或 NAPL。孔隙率(porosity, n)為一無因次數值，為孔隙體積(V_p ，即 $V_g + V_l$)對多孔介質總體積(V_t)的比值，通常以小數或百分比表示。孔隙率可由土壤總體密度(soil bulk density, ρ_b)，與土壤顆粒密度(soil particle density, ρ_s)算出，如下式所列。

$$n = 1 - (\rho_b / \rho_s)$$

其中

n ：孔隙率

ρ_b ：每單位體積(土壤顆粒與孔隙的總體積)的土壤乾重，又稱乾密度

ρ_s ：土壤中之固體體積密度

粒徑分布可以藉由地工實驗室測試獲得 (如 ASTM Method D4464M)，是屬於土壤粒徑的定量參數，包括土壤樣品之礫石、砂、粉土與黏土的比例。鑽探紀錄可以針對土壤類別的變異性與不均質性予以定性描述，但土壤仍應該進行粒徑分析以確認或支持土壤分類的判讀。土壤分類與不均質性對於氧化劑的分散程度有相當程度的影響。在建構場址概念模型時，所量測的土壤粒徑分布狀況可以與前述的水力傳導係數及透水性加以比對。

土壤質地與孔隙率的大小將影響地下水流之速度與藥劑的滲透範圍，粗粒土壤通常會呈現較大的孔隙率，可形成較均勻的地下水流場而有利於藥劑均勻分布；相較於粗粒土壤來說，細粒土壤的特性就是其本身的滲透率偏低，在進行藥劑注入時可能造成短流，分析土壤顆粒尺寸，能提供土壤中顆粒粒徑分佈(distribution of particle sizes in soil)的資訊。典型砂粒與碎石的孔隙率為 25%至 40%。細粒土壤的孔隙率較高，例如泥砂通常介於 35%至 50%，而黏土則是 40%至 70%。各種土壤質地之滲透率表現如圖 3.1.3-1。

原生滲透性(k , cm^2)

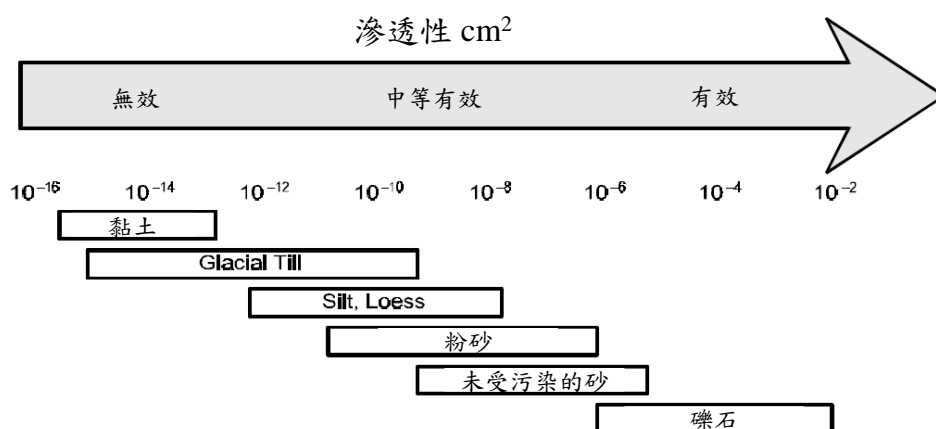


圖 3.1.3-1 各種土壤之土壤滲透率

3.1.4 水力梯度與地下水流速

水力梯度是藉由收集地下水位量測資料（通常是監測井或水壓計）加以推估。水力梯度是計算地下水流向與速度的必要參數，適切的評估水文地質資料，可以對於場址的物理特性有更完整的了解。必須注意的是地下環境是否有透水性不佳的地質（即粉土與黏土）與人造結構物（如污水管線、雨水排管線、電力線或未適當廢井的監測井）可能造成污染移動的路徑，此等因素均應在建置 ISCO 整治計畫前詳加評估。前述的污染移動路徑有可能成為氧化劑與/或反應產物的傳輸路徑，揮發性有機物（氣相）會移動到管線、設施填充物，造成氣爆的潛勢。同樣的，整治過程應將管線加以定位與監控此類的結構物，使之維持在非爆炸性程度。

3.1.5 重金屬背景濃度

土壤的生成主要受到氣候、生物、母質、地形與時間等因子影響，我國位於溫暖多雨的環境下，風化作用強盛，且地形變化劇烈，地表侵蝕作用亦強，在上述環境中造成多數地區土層較薄或土壤生成化育時間較短，使得土壤中重金屬等微量元素深受母岩性質所影響，這些地區相較於其他地區重金屬元素含量背景濃度值較高，地質學上稱為地球化學異常現象(geochemical anomaly)。台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界帶，隨著板塊活動所造成

的火山噴發，使得台灣有著許多火成岩為主體之地質構造，受不同地質條件因素影響，火成岩中可能含有較高的重金屬元素，在高壓高溫環境下亦是如此，當熱水礦液(受熱地下水)湧上地表後緩慢冷卻，過飽和之金屬離子會形成礦體，例如臺灣金瓜石地區之金、銅礦床，而在礦體周邊風化土壤中可發現砷、銅、鉛、汞等其他伴生元素含量偏高之情形(余炳盛，1999)。玄武岩或蛇紋岩等中常富有自然礦物如橄欖石、輝石等鐵鎂礦物，且這些礦物之鉻、鎳、鈷含量較高，臺灣東部蛇紋岩分布所採集的土壤中發現鉻、鎳等重金屬含量偏高現象(劉滄琴等人，2007；許正一，2011)。

重金屬污染後會透過各種途徑來影響人體健康，而重金屬的移動與釋出與其環境 pH 值變化有著密切關係，但不僅酸雨會影響土壤環境 pH 值，在施肥或是進行土壤地下水整治時所採用的現地化學氧化法也會改變土壤 pH 值，進而造成重金屬釋放於地下水環境中，因此在進行現地化學氧化法時，應先做好背景調查，確保此區域重金屬濃度是否會對人體造成危害，也應於施作現地化學氧化法時定期監測土壤及地下水中重金屬濃度。

3.2 污染物之物化特性

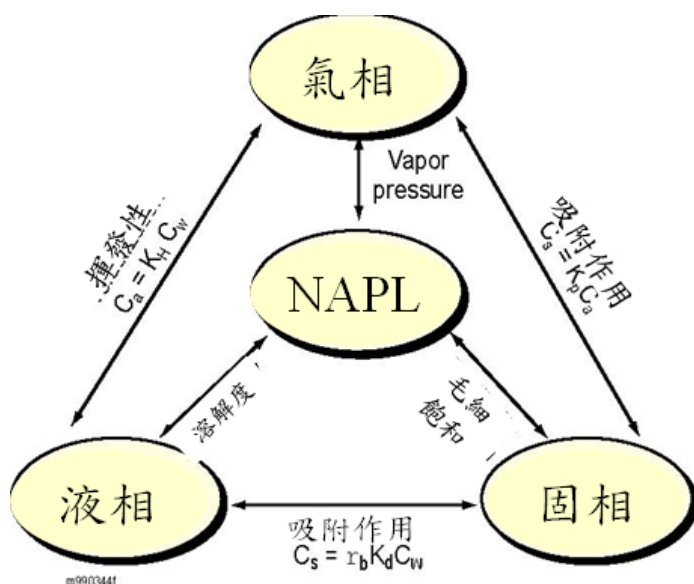
最常採用 ISCO 技術的污染物包括總石油碳氫化合物 (Total Petroleum Hydrocarbons, TPH)、有機氯農藥、揮發性有機物 (Volatile Organic Compounds, VOC)、半揮發性有機物 (Semi-Volatile Organic Compounds, SVOC)、多環芳香烴 (Poly Aromatic Hydrocarbons, PAH) 及多氯聯苯等。在場址調查階段，上述所有可能的污染物建議至少要有一組的完整分析資料，以確認是否有非標的關切污染物需要被納入處理的項目。由於 ISCO 為非選擇性的處理技術，因此確認存在於地下環境所有的有機污染物是相當重要的工作。

目標移除污染物的物理/化學特性，對污染物在地下環境的宿命(fate)與傳輸(transport)有顯著的影響。這些特性影響污染物在土壤以四種相態存在時的分佈狀況，分別為蒸氣(氣相)、溶解於孔隙水(水相)、吸附於粒子表面(固相)及 NAPL，各相態之間的關聯性如圖 3.2-1 所示。

對於現實存在於環境中的混合性污染物(如石油)，不同相態的分布，會

隨著釋放至環境一段時間後，經風化作用而有所變化。風化初期較輕、較不穩定且可溶解的相態，較容易去除而消失。較重、較不易溶解且不易揮發的部分，則長期存在於土壤基質中。

為更加了解實際環境污染物組成是否可達成預期目標移除效率，須蒐集各種係數，並了解該係數如何傳達場址內污染物與地下環境作用的情況。例如，在平衡狀態下，化合物的氣相化程度，可用化合物的蒸氣壓力、亨利定律常數和沸點來表示；化合物溶解於水的程度，可以化合物的溶解度來表示；吸附於土壤的程度，則以土壤吸附係數(soil adsorption coefficient)表示。以下將針對影響 ISCO 設計與污染移除相關的、應蒐集的污染物特性資料說明。



VOC 的分配，其中：
 C_a 、 C_w 與 C_s = VOC 成分在氣、液、固相的濃度；
 K_H = 亨利常數；
 K_p = 分配係數；
 K_d = 分佈係數；
 及 r_b = 土壤容積密度 (USACE, 1995)。

圖 3.2-1 污染物各種相態間關聯圖

3.2.1 污染物濃度

藉由量測之污染物濃度可以計算污染物的質量，而污染物的總質量應包括飽和層的水平與垂直方向（含自由相）以及毛細區（smear zone），質量溶解相與吸附相的污染等，特別是針對飽和層中土壤吸附污染物質量的確認，以有效綜合評估反應區內真實之有機污染物質量。在確認地下環境中所存在之有機污染總質量後，才能進一步評估適用之氧化劑類型，以及注藥井之分布範圍與藥劑注入量。

此外，調查過程中亦建議針對地下環境中存在之金屬離子進行分析，如鐵、砷、鎘、鉻、銅、鉛、硒等，主要因氧化反應過程中，金屬離子的氧化過程可能消耗注入之氧化劑量，而增加氧化劑的需求量。

3.2.2 溶解度

污染物溶解於地下水與未飽和帶孔隙水的程度，稱之為溶解度(solubility)。高溶解度的化合物，通常較容易在滲透雨水帶與地下水帶移動。因此，為了解污染物在地下環境可能的分布情情，亦可透過污染物溶解度的參數蒐集，進行模擬與推估。

3.2.3 土壤分布係數

土壤分配係數代表化合物吸附至土壤或有機質顆粒表面的能力。因此在平衡狀態下，非極性有機化合物(nonpolar organic compund)的分布，為溶解濃度(C_w)與吸附濃度(C_s)之間比率的函數，如下式所列。

$$K_d = \frac{C_s}{C_w}$$

其中

K_d ：分配係數

C_w ：溶解濃度

C_s ：吸附濃度

然而，在已知的有機化合物中， K_d 並非常數，隨著土壤中的有機碳 (organic carbon, OC) 與黏土含量百分比的上升，數值呈現線性增加的趨勢。其斜率表示為單位碳含量為基礎的吸收量，如下式所列。

$$K_{oc} = \frac{K_d}{f_{oc}}$$

其中

K_{oc} ：可視為標準化有機碳含量的污染物吸附係數

K_d ：土壤分配係數

f_{oc} ：土壤有機碳含量

K_{oc} 值並不易求得，然而，辛醇-水分配係數 (octanol-water partition coefficients, K_{ow}) 與 K_{oc} 值關係極為密切，通常作為吸附趨勢的指標。 K_{oc} 可表示為 n -辛醇污染物濃度，對蒸餾水中污染物濃度的平衡比。若已知某關切成分的 K_{ow} ，即可利用 Dragun (1988) 開發 K_{ow} 與 K_{oc} 之間的關聯，計算 K_{oc} ，接著以下式推估土壤吸附係數(K_d)。

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc}$$

其中

K_d ：土壤分配係數

K_{oc} ：標準化有機碳含量的污染物吸附係數

f_{oc} ：土壤有機碳含量

土壤內的有機碳比例 (f_{oc}) 會影響特定化合物分配為氣相或液相的能力。若土壤有機碳比例偏高，污染物由土壤顆粒分布至周圍孔隙空間的量較低；比例偏低時，則污染物移至周圍孔隙空間的量會提昇。

雖然土壤吸附係數意味著平衡和可逆的吸附作用 (equilibrium and reversible sorption)，土壤/ 液體/ 蒸氣的分配過程卻往往不平衡亦不可逆，因

此無法以土壤吸附係數準確推估。

然而，為了有效推估污染物的吸收情況，可用雙室吸附模型 (two-compartment sorption models) 解釋。吸附化合物經過一段時間後，在較難進入的吸附位置，或防水性較佳的土壤顆粒中可能產生接合，無法如預期釋出。化合物自端點 (dead-end) 的微孔釋出時，同樣也僅有受限的擴散作用(Scow et al., 1986；Pignatello, 1989)。當化合物宿命無脫附作用機制時，化合物可能不容易揮發、溶出，可能導致化合物在整治期間比原本預期更難分解。

3.3 場址調查方法

ISCO 技術的應用最主要為處理地下水中之標的污染物，因此，為確認注藥後之氧化劑反應區和污染範圍，在進行污染調查調查時，除污染物種類外，即應鎖定污染深度與的地下水流向為主要關切項目。原則上污染範圍調查可分為實測界定及模式推估兩種。實測方式係透過採樣分析環境介質（土壤及地下水），確認低於污染管制標準之採樣點位置以界定污染範圍。而模式推估則是將既有調查資料輸入模式中，透過模式模擬推估可能之污染範圍。一般來說，實測界定較為可信，但在採樣點數量足夠的前提下，模式推估亦會有類似之成果。但若部份區域無法採樣或污染範圍較大之情形下，模式模擬另可就污染位置及污染傳輸方向，進行客觀模式推估修正，亦獲得可信之污染範圍推估量，故本參考指引污染範圍補充調查將採模式推估方式進行，地下水採樣點規劃原則如下，細部採樣作業規範詳第八章介紹：

- 一、 利用環保機關既有調查資料，研判可能之污染區域。
- 二、 於污染監測井四周增設簡易井或監測井，並依現場現況、可能污染源位置、污染物特性、土壤地質及場址水文特徵（地下水水位及流向）等研判最適井位。
- 三、 污染範圍評估工作可利用各點之分析結果，透過軟體（如 surfer）分析模擬，並考量場址之污染源及地下水流向等影響因素，彙整研判場址之污染範圍。

3.4 場址概念模型建置方法

氧化劑的輸送對於 ISCO 的成功與成本效益至關重要，為決定氧化劑與污染物的接觸與提高有效反應之關鍵，因此，正確的場址概念模型建置將有助於評估者掌握地下污染狀況，以決定氧化劑的類型、配比與注藥方式等，相關數據將透過事先的場址調查來取得。本節則將提供建置範例說明如何建立適用之場址概念模型。

依據美國國防部環境安全技術認證計畫 (Environmental Security Technology Certification Program, ESTCP) 於 2010 年所發布之地下水現地化學整治技術指引內容，建議於啟動整治前應先建構完整之場址概念模型，以釐清污染範圍、確認關切污染物質分布，確保整治成效。對於場址概念模型之建置，至少應取得場址（運作）歷史資料、污染時間、污染類型與位置、現場地質水文資訊、曾經或預計執行之整治工法、未來的管理策略等。相關判定準則如下：

一、場址運作紀錄與污染物洩漏情形

蒐集場址過去與現況之運作紀錄，可協助評估者了解可能之污染物質類型與洩漏來源與污染年代，相關設備製程是否已停止運作或已拆除；如設備仍在運作，應進行洩漏檢測以證明是否有持續洩漏現象，洩漏源是否有阻絕機制避免滲入地下環境。

二、確認關切污染物質

確認調查數據是否足以反應所有可能之關切污染物及其濃度，以及各類污染物存在之環境介質，如地下水、土壤、地表水與底泥等。分析現場環境是否因生物作用產生代謝產物，如 TCE 污染經微生物作用後產生 DCE、VC 等污染物。

三、關切污染物型態

可藉由污染物濃度值、監測井中樣品的觀察，搭配不同污染物之溶解性與濃度分布結果，判定污染型態屬自由相或溶解相，一般而言，當濃度值大於 1% 時，即可能存在自由相污染團。

四、污染分布

污染物的分布需搭配地質資訊與地下水流速、方向等資訊分析結果（詳第 3.1 節），研判污染物之傳輸距離與垂直污染深度，以確認污染範圍與深度，地質資訊亦可協助釐清此是否有岩盤裂隙，造成 NAPL 污染累積形成多個污染團。

五、地下水與地表水的交互影響

透過濃度分析結果評估地下水與地表水間之交互作用。

六、暴露途徑評估

依據污染調查結果評析可能造成之環境風險，考慮所有現有之暴露途徑，包括皮膚接觸、誤食攝入、空氣吸入與室內空氣侵入等，設定可接受之風險等級與污染濃度，包含人類受體與生態受體等，據以作為後續整治作業與管理策略之參考。

在完成上述關鍵資訊的蒐集與調查後，即可以此建構場址概念模型，其表現方式可以簡單的圖示與文字說明，如描繪地質剖面與污染物垂直分布之概念圖像，污染物受水文影響所呈現之橫向擴散範圍，以及污染隨不同介質傳輸可能造成之人體/生物受體風險暴露途徑等。

第四章 實驗室試驗及模場試驗規劃

應於系統設計及操作前，執行前導試驗。根據試驗規模的大小，可再細分實驗室及模場試驗。為了對應不同規模的試驗應執行的時機，本章提供 ISCO 方法執行評估，判斷此方法是否適用，再對實驗室試驗、模場試驗的執行方法及結果評估撰寫，提供給使用者參考。

4.1 執行情序

在進行前導試驗時，應依照場址情況來決定試驗內容。當污染事件發生時，優先採取緊急應變措施盡可能的緩和污染洩漏產生污染，污染持續洩漏時，則應盡早移除污染來源或關閉洩漏源。然而，若為污染種類較複雜的場址，最佳做法則應優先採取試驗工作，以完成全面性的評估作業。測試規模的評估取決於整治技術的不確定性，依照場址的狀況決定是否需要做實驗室試驗，本節彙整選用 ISCO 方法之實驗室試驗或模場試驗之篩選流程如圖 4.1-1。

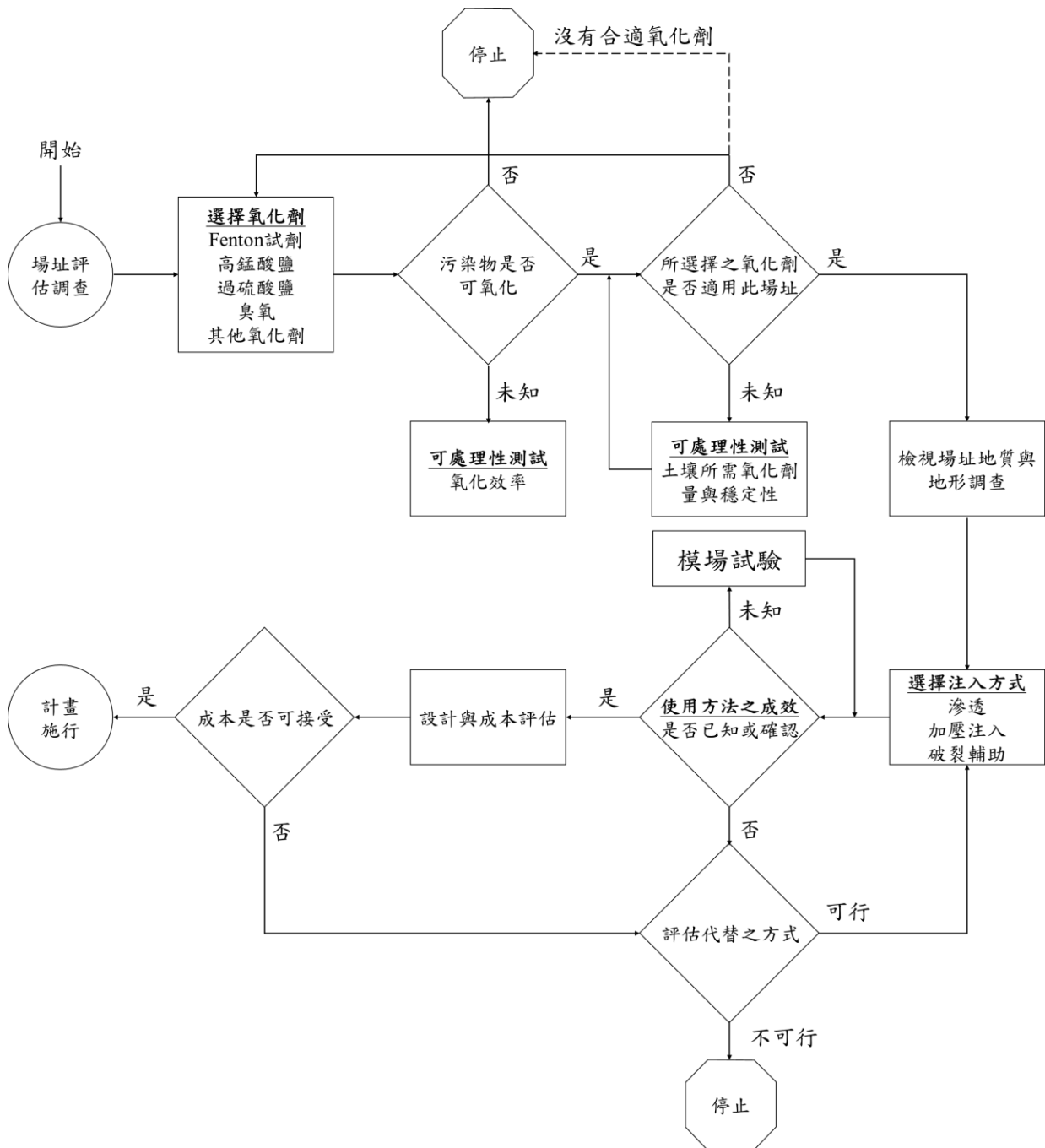
一、 小型試驗

小型試驗相較於模場試驗來說規模較小，主要是實驗室試驗，目的是利用小規模條件，證明目標污染物可以經過氧化處理進行轉化，可以藉由實驗室試驗來測量氧化劑的需求量，實驗資料可用於證明 ISCO 的可行性，並可用於推估模場試驗或實場整治的氧化劑注入量，早期文獻指出，氧化還原效應可能導致環境中易受 pH 值影響的金屬遷移，這也是實驗室試驗研究的一個重要的試驗目標。也可從實驗室試驗測試氧化還原反應是否可能產生妨礙試驗進行之反應副產物，利用進行小型試驗可以降低成本，並評估 ISCO 的可行性。

二、 模場試驗

利用實驗室試驗求得與預估污染改善成效後，可進行污染改善系統的設計，再將此設計結果放大至實場進行操作。於模場試驗中，應隨時觀察污染物移除率、含水層透水性、水飽和度等參數的監測，未

來應用至實場整治時，是否能達成預期成效。



參考文獻: Dijkshoorn P, 2003.

圖 4.1-1 現地化學氧化法評估、設計流程圖

4.2 實驗室試驗

大多數 ISCO 系統應用程序會先從實驗室規模的測試開始，目的是為了確保大尺度試驗時能成功地應用，實驗室規模試驗之目的在於測試飽和土壤中特定污染物的化學氧化劑處理效率，還可以用來評估由於土壤自然有機質引起的氧化劑需求，以及測試土壤存在高濃度金屬的情況下可能產生的金屬溶出與移動的情形。

使用實驗室規模測試 ISCO 技術的結果可以直接應用於模場試驗的研究設計中，但仍有其限制。在實場應用上，有時仍可能無法有效的呈現相同的效果，主要的原因包含：(1)實驗室規模試驗的結果通常是在土壤和地下水相對均質的情況下進行測試，而不能完全重現現地觀察到的物理特性及流動特性，例如一般經常使用的管柱試驗和沙箱實驗，可作為模擬三維環境的簡易方法，但在實驗室測試中無法考慮某些現實的影響(例如薄壁效應)。(2)實驗室試驗的環境是相對均質的，而現場土壤分布異質性很大。地下環境的高度的異質性與未知的氧化劑需求量，會造成氧化劑估計量的高估或低估。以高錳酸鹽作為氧化劑的情況為例，此類氧化劑反應速率較慢，可能導致會高估實際氧化劑需求，因為在實驗室研究中有較完整的混合條件使得氧化劑反應較全面，但現地沒有這種條件。但儘管有以上的差異出現，實驗室規模的試驗對於估算現地特定氧化劑的需求量還是有著重要的貢獻。

通常實驗室試驗規模試驗的設計乃依據場址現況與設計參數所需來決定，主要可以獲得以下資訊：藥劑是否可與污染物發生反應、藥劑的持久性、藥劑化學反應最佳化(最佳添加量預估)等。以下就實驗室規模試驗及其評估與計算方式逐一進行說明：

一、試驗樣品蒐集與規劃建議

由於現地化學氧化是將藥劑注入地下環境中，通常在設計上需要考慮其影響半徑(radius of influence, ROI)內氧化劑受到的影響與反應，此外，也需要考慮場址異質性狀況，因此建議實驗室試驗階段，需要取得廠址無污染之土壤與地下水做為 SOD 評估試驗樣品，另外，也需要取得 ROI 內不同深度、位置或組成的土壤與地下水進行試驗與分析，以確認在不同孔隙、不同介質下的情形。

二、分析方法確認與選擇

由於不同的氧化劑的反應，可以利用不同的化學方法進行分析，因此需要依據化學反應來選取合適的分析方法與計算方法，各種氧化劑的分析方法列表如表 4.2-1。除了氧化劑濃度外，亦需要針對各污染物濃度變化或土壤或地下水中的總有機物濃度變化進行分析，這些分析方法可參考環檢所公告之各類分析方法執行，讀者可依據實驗需求選定不同的分析方法與條件，惟需要在實驗前完整了解各分析方法的極限與其所代表意義。

三、實驗室試驗

(一) 批次試驗 – 最佳氧化劑濃度計算

試驗作法應將場址現地之土水樣品置入已知濃度之氧化劑試瓶中，觀察污染物隨時間衰減狀況，了解氧化劑對特定污染物濃度值之消耗能力，以評估未來所需濃度，以下說明實驗室試驗執行步驟流程：

1. 準備污染場址深層土壤及淺層土壤，並將其乾燥、過篩與秤重(M)
2. 準備體積為 V 不同起始濃度之氧化劑溶液
3. 量測起始氧化劑濃度 C_i
4. 量測適當重量之土壤樣品與不同濃度之氧化劑溶液混合，均勻搖晃，實驗時間需要依據氧化劑特性調整，過氧化氫系的氧化劑，反應時間短，因此後續採樣分析的間隔短。
5. 每一段時間量測氧化劑濃度，可以獲得氧化劑濃度隨時間變化，當氧化劑濃度不再變化的最後最終氧化劑殘留的濃度為 C_{eq}
6. 根據試驗結果得知土樣受氧化劑後各種機制之消耗量數值，計算公式為：

$$Q = (C_i - C_{eq}) \frac{V}{M} \quad (4-1)$$

其中 Q 表示每克土樣中氧化劑受各種機制(諸如化學/物理吸附、自身分解、氧化土壤中氧化劑及有機質之損失等等)之消耗量。

表 4.2-1 各種常見現地化學氧化藥劑分析方法

文獻來源	設備	快篩	藥劑	技術概述	干擾	預估每個樣品的分析時間
Kolthoff and Sandell, 1969	僅需玻璃器皿	有	Potassium iodide; Sodium thiosulfate; Ammonium molybdate; Sulfuric acid; Starch (indicator)	碘滴定法，利用後滴定法滴定至澱粉的滴定終點	其他氧化劑	~ 5 分鐘準備時間 5 分鐘反應時間
高錳酸鉀						
Eaton et al., 2005 所列標準方法	有適當濾鏡的分光光度計	無	無	直接在 525nm 波長量測高錳酸鉀濃度	二氧化錳沉澱產生的濁度干擾	~ 2 分鐘樣品準備時間
過硫酸鹽						
Kolthoff and Carr, 1953	僅需玻璃器皿	無	Potassium iodide; Sodium bicarbonate; Sodium thiosulfate; Starch (indicator)	碘滴定法，利用後滴定法滴定至澱粉的滴定終點	其他氧化劑	~ 5 分鐘準備時間 15 分鐘反應時間
Liang et al., 2008	分光光度計 玻璃器皿	無	Potassium iodide; sodium bicarbonate; sodium thiosulfate	碘滴定並在 352nm 量測吸光度	其他氧化劑	~ 5 分鐘準備時間 15 分鐘反應時間
Huang et al., 2002	分光光度計 玻璃器皿	無	Sulfuric acid; Ferrous ammonium sulfate; Ammonium thiocyanate	在酸性環境下過硫酸鹽會與鐵離子反應，加入 thiocyanate 並在 450 nm 量測其吸光度	其他可能的氧化劑，特別是在 450nm 下可量測的有機物	~ 5 分鐘準備時間 40 分鐘反應時間
臭氧						
Eaton et al., 2005 所列標準方法	分光光度計 玻璃器皿	有	Phosphoric acid; Monobasic sodium phosphate; Indigo (potassium indigo trisulfonate)	靛藍比色法。臭氧在酸性條件下會使得靛藍溶液脫色，在 600nm 波長或與色卡相比	錳或其他氧化劑	~ 5 分鐘準備時間

參考文獻：Siegrist et. al, 2011

(二) 批次試驗 – SOD 計算

氧化劑在土壤中的消耗速率，會與 SOD 有關，因此分析氧化劑濃度隨時間的變化，便可以推算 SOD 的影響、藥劑的持久性及相關之反應動力參數。

1. 以場址預定注藥之影響半徑計算處理之孔隙體積

$$V_{oxidant} = ROI^2 \times \pi \times \theta \times h \quad (4-2)$$

此處，

$V_{oxidant}$ = 氧化劑的體積[L³]

ROI = 影響半徑[L]

θ = 孔隙率[-]

h = 垂直注入區間長度[L]

2. 計算預定添加藥劑量

換算成單位重量土壤所需要添加的藥劑量，因此需要知道土壤的乾密度(dry bulk density)，通常是 1.6- 2.0 g/L，氧化劑處理 1PV (pore volume)所需要的藥劑量，接著可以依據試驗的溶液體積與試驗土壤重量，換算添加

$$D_0 = V_t \times C_{max} / M_{media}$$

D_0 = mg-氧化劑/kg-土壤 (dry wt.)

V_t = 1PV 藥劑所需體積(m³)

C_{max} = 藥劑濃度 (mg-氧化劑/L-溶液)，可由前一試驗獲得

M_{media} = kg 土壤(dry wt.)

3. 選擇另外 2 個藥劑量進行試驗，通常是 0.5 D_0 與 0.1 D_0

4. 在不同時間下，分析試驗瓶中的藥劑濃度與污染物濃度

5. 試驗結果範例如圖 4.2-1 所示，可以計算 SOD 濃度：

(1) 最終 SOD (SOD_{ult})指整個實驗的 SOD (mg-oxidant/kg-media (dry wt.))

(2) 瞬時 SOD (SOD_{if})指一開始快速被反應之氧化劑，通常是土壤中會被立即氧化的部分，通常會在實驗開始的 8-12 小時內發生

(3) 利用 $\ln C/C_0$ 及時間，可以計算氧化劑在此試驗土壤的反應速率(如圖 4.2-2 所示)

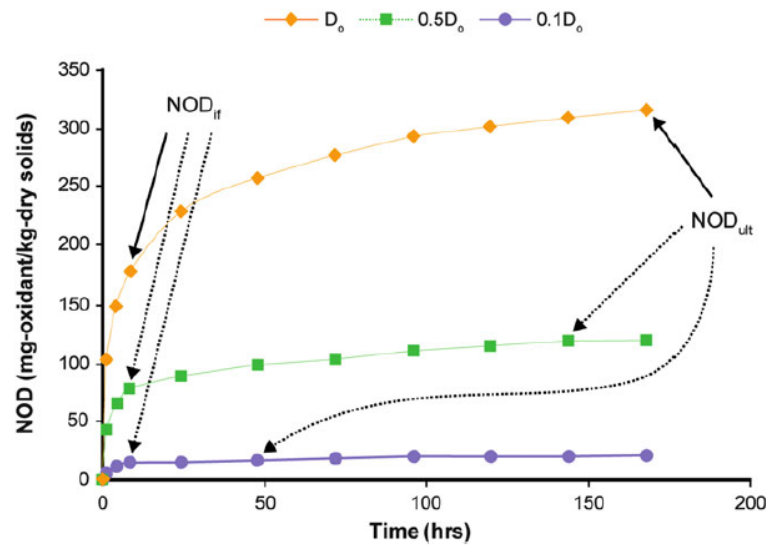


圖 4.2-1 SOD 計算結果範例

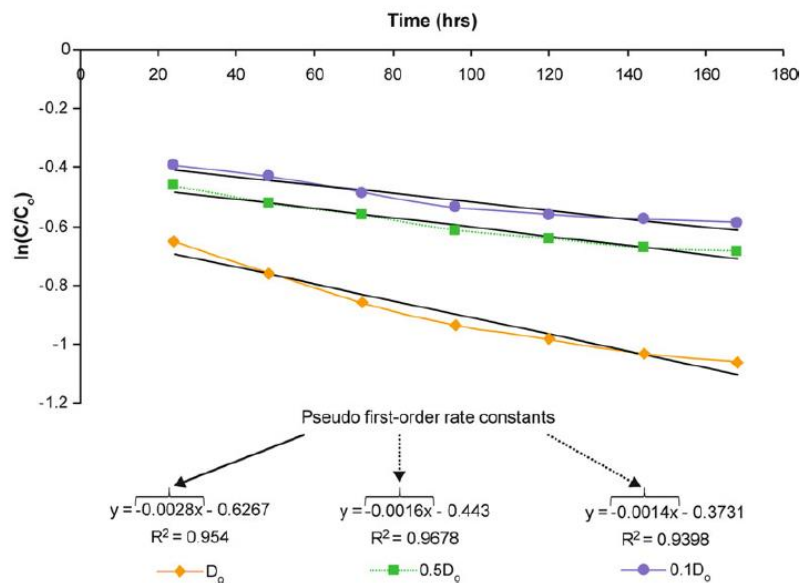


圖 4.2-2 反應速率計算結果範例

(三) 管柱試驗

一般而言，上述批次式的實驗可較快速的提供氧化劑效能評估，但管柱實驗所得結果則較能切合現地工程設計的狀況與需求。管柱試驗提供了實場整治設計之重要參數，包含氧化劑整治效率及氧

化劑用量等。另一方面也可設定進流流速，使其較接近實場的地下水流速，因而可預測未來現地氧化劑的影響。其他由管柱實驗所得之資料數據，也可以用於了解氧化劑與污染物反應之後，可能產生之沉澱以及可能造成之阻塞或水力傳導係數下降之可能性。以下簡介其實驗過程：

1. 實驗設備

管柱實驗所採用之管柱兩端有進流口與出流口，並有鐵氟龍篩網之可調式活塞，使得管柱之長短可依實際需求調整。在管柱中間則設有取樣口，取樣口是以取得管柱中心點之樣品為主。進流水樣流速模擬現地之地下水流速進流，並在適合時間取樣，一直到達成穩定狀態（即污染物濃度於某一時間後即達到近乎固定的狀態）。

2. 實驗流程

- (1) 依據場址地下水濃度配置進流水，並以地下水流速為進流濃度，在合適的時間取樣(通常是出流每個孔隙體積的水做一次取樣)，直到進流與出流濃度相當
- (2) 當出流濃度與進流濃度相同時，自管柱下方注藥口加入特定PV的氧化劑，氧化劑濃度由批次試驗結果推算
- (3) 持續注入進流，監測出流水污染物濃度，觀察污染物濃度變化，以確認氧化劑的效果(如圖 4.2-3)、停留時間等參數

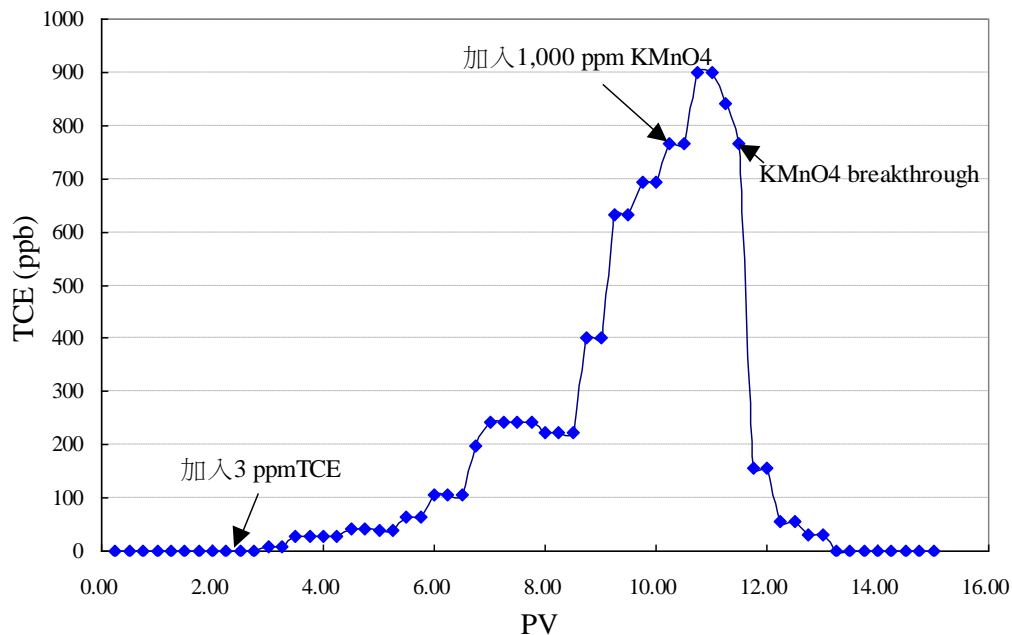


圖 4.2-3 管柱試驗結果範例

4.3 模場試驗

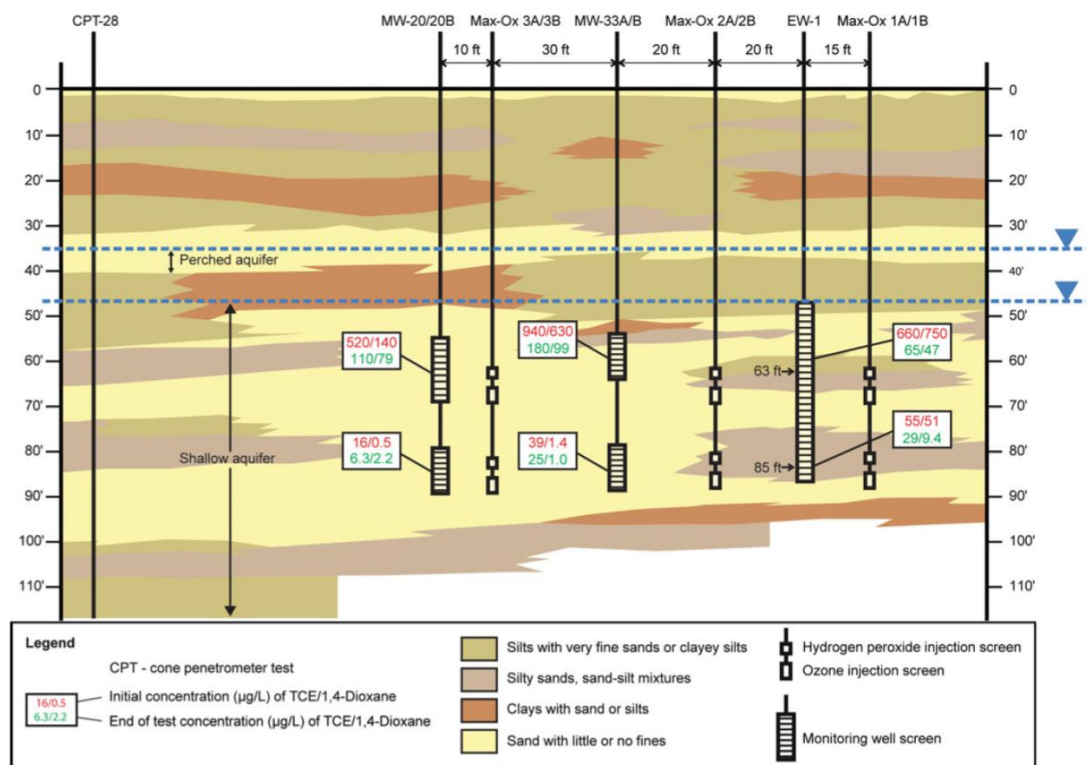
模場試驗可以提供進行大尺度規模試驗設計前必要的資訊，包括適當的注入井間距，以及液體和氣體輸送的適當注入流量，並比較各種氧化方法，也可以用來評估大尺度規模整治成本所需的注入參數，這些參數包括氧化劑濃度、注入流速、溫度、壓力、影響半徑和注入量。模場試驗也可以用來判斷複雜的地下地層，並確定目標污染物的整治成效。

在規劃 ISCO 技術的模場試驗時應考慮的技術問題如下：

- 一、應優先選擇現場最具代表性的地點進行現場模場試驗，該地點最具代表整個場址的一小區域，且可以連續性操作並不被中斷，如果在試驗中未涵蓋整個污染團，應先選擇污染團的兩側部分，以確保整治區域不會重新污染，並能觀察到未受污染的下游區域狀況。
- 二、使用現有監測井、新的注藥井、直接灌入注入點或以上組合來設計氧化劑注藥程序，選擇適當的注入點距離和排列很重要，為了確保整個污染區的氧化劑能均勻分布，所有注入點的影響範圍應相互重疊，氧化劑的

輸送量應通過分析污染物質量和土壤有機質消耗的氧化劑需求量來決定。

三、設計一個地下水井監測網，監測井必須位於每個注入點的附近或下游，且與注入點保持一定的距離，以便追蹤氧化劑的分佈與分散，並收集適當的監測數據，因此可能需要額外設置臨時的簡易井，至少必須監測污染團周邊的擴散情形，以確保氧化劑和污染物沒有再遷移。通常監測井最少需有三口，且與注藥井有不同的距離，可以用來觀察氧化劑與污染物的傳輸，監測井可以設計在不同的深度有不同開篩位置(如圖 4.3-1 所示)，以監測氧化劑在不同深度傳輸的情況。另外，由於在試驗過程中，如 H_2O_2 等氧化劑的反應過程會產生大量氣體，為避免大量氣體產生而造成短流，可以選擇在注藥井適當的距離設置通氣井做為排氣之用。



參考文獻：Siegrist et. al, 2011

圖 4.3-1 注藥井與監測井分布與開篩位置案例示意圖

四、建立一個現場監測和採樣程序，以充分監測氧化劑的分散和處理的效能

，通常氧化劑分布情形的量測頻率會高於目標污染物的分析頻率。

- 五、使用臭氧時，模場試驗可藉由注入點周圍的氣相影響區域，通過評估壓力影響、溶氧增加、氮氣追蹤、地下水位變化和注入氣體濃度，以確認氣體注入系統之有效影響範圍。
- 六、現地化學氧化的影響範圍，通常需要考量氧化劑於地下環境的傳輸、天然、污染物濃度等影響，因此可以藉由模場試驗的方式或模擬的方式來判定。可藉由溶液在地下水中的分配情形，通過評估壓力影響、溶氧增加、地下水位變化或注入藥劑的濃度，以確認注入系統在不同溶液注入速率的有效影響範圍，並藉由這個影響範圍的變化，來調整接續的整治井場規劃、藥劑注入量與頻率。需特別注意的是，以高錳酸鉀做為氧化劑注入時，可以利用土壤顏色或地下水顏色的變化來判斷藥劑是否確實達到的位置。

實驗室試驗和模場試驗都是用來確定整治場址所需氧化劑注藥量的重要工具，在大多數情況下，土壤中含有其他有機質會消耗掉大量的氧化劑，因而要注入更多的氧化劑量來滿足目標污染物的氧化需求，因此，在設計過程中必須將土壤有機質的消耗納入考慮。

為獲得實際執行改善工作時之設計參數，了解實場地下水流狀況及注入氧化劑後土壤消耗之狀況，計畫於場址內施作示蹤劑試驗；做法為使用惰性物質作為示蹤劑，配合改善工程所使用之氧化劑進行注入運轉，並持續數周監測井進行惰性物質及氧化劑濃度之即時監測，以確認改善區域之地下水流狀況以及土壤消耗氧化劑之能力。

模場試驗試運轉、操作及維護、監測、效能評估等可以參照本指引第五章至第八章，作為模場試驗選用氧化劑與運輸、貯存藥劑、設計以及工業安全衛生上的參考依據。

4.4 試驗效能與數據分析

試驗效能與數據分析是為了確認 ISCO 整治成效的數據。從試驗的結果中可以得到氧化劑與污染物的反應狀況，用以判斷該氧化劑是否合適使用於此場址，或催化劑、螯合劑是否適用，若不適用應予以更換。

從試驗結果數據分析中應注意污染物是否有反彈現象發生，如圖 4.4-1，圖中於加藥後污染物濃度先是下降一段時間後，污染物濃度開始回升，則需進行第二次，待污染物濃度降低後，應長時間進行場址成效監測，以避免污染物反彈現象發生，並評估含水層與水相污染物是否已達到所規劃的氧化量與吸收量。

在模場試驗中可先行針對數據結果建立污染改善成效監測指引，可依試驗結果或過去曾於此場址執行之改善作業所獲得的相關參數做為參考，建立相關數學模式後進行內容的撰寫。

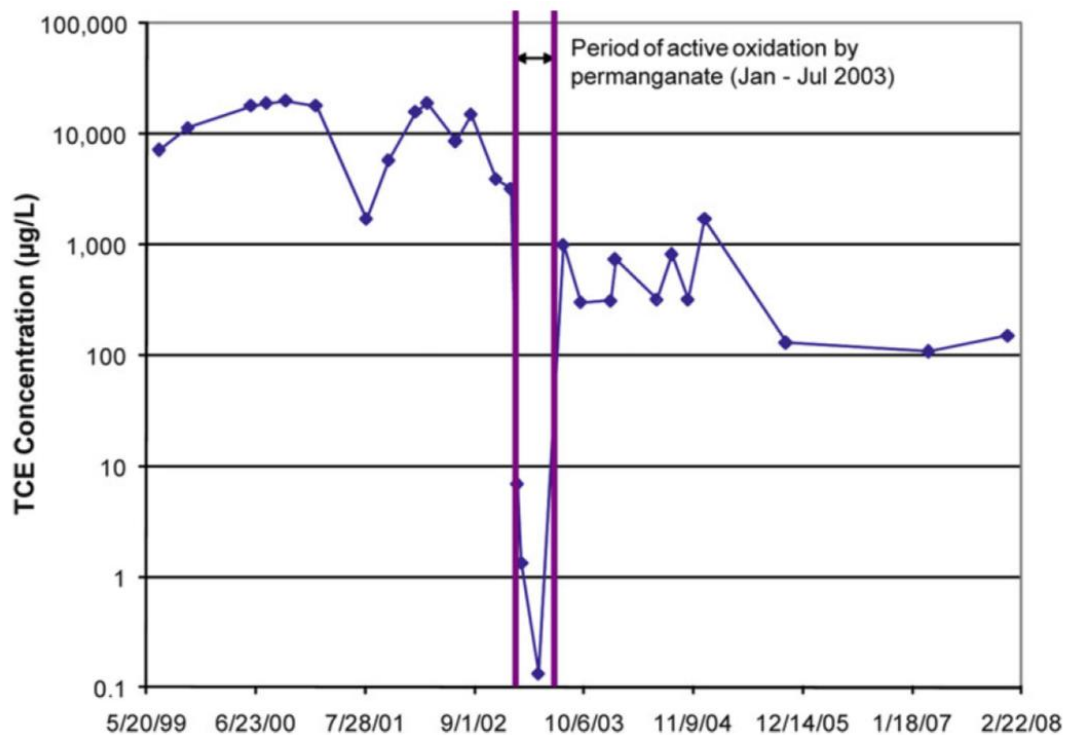


圖 4.4-1 污染物濃度反彈現象範例

4.5 試驗報告建議內容

本節說明發展模場試驗或實驗室試驗的一般性內容。以下列舉模場是驗報告所要求的最少資訊。以星號(*)標記的項目不適用於實驗室試驗。

一、簡介

(一) 背景介紹

(二) 目的

二、執行期程規劃

三、設備

(一) 井與管路*

1. 注藥井

2. 監測井

3. 抽取井

(二) 氧化劑注入系統

1. 注入設備

2. 氧化劑儲存槽

四、監測與數據蒐集

(一) 化學藥劑濃度

(二) 污染物濃度值

(三) 執行時間

(四) 溫度

(五) pH

(六) 壓力/真空

(七) 流量

(八) 違反工作計畫/工作計畫的例外情形

四、結果與討論

(一) 物理參數

1. 通透性

2. 流速修正

(二) 化學參數

1. 氧化劑 pH

2. 污染物濃度

3. 回收的反應氣體

4. 化學數據品質

(三) 效能指標評估

五、結果與建議

(一) 技術的整體效率

(二) 後續研究的需要

(三) 完整系統的最終概念設計

附錄

(一) 實驗室分析報告

(二) 品保報告

(三) 系統參數監測表

(四) 井的裝設與鑽孔紀錄

第五章 系統設計原則

ISCO 的成功條件為足夠的氧化劑與目標污染物接觸並在充足的時間內與污染物持續且有效的反應，因此需要蒐集完整的場址和污染物特性資訊，如場址的滲透性、土壤有機質多寡、目標污染物的基本物理化學特性等。現地化學氧化法的設計各項基本因子整理如表 5-1，可從表中得知許多的環境因素均會對現地化學氧化法移除污染物的成效造成影響，而在進行正式的系統設計之前，應先以實驗室試驗或模場試驗瞭解現地化學氧化法的可行性。

表 5-1 現地化學氧化法基本因子

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、有效孔隙率、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。
油品类污染物特性： ■ 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。

參考文獻：USEPA, 2004.

5.1 氧化劑濃度和體積計算

氧化劑注藥量與目標整治區域的地下孔隙體積比例有關，必須確保污染物不會因為注藥時發生的反應而移動到整治區外，氧化劑注入的濃度和體積需考慮下列因素來決定：

- 注入氧化劑之總劑量應能破壞或分解吸附相、溶解相與自由相之污染物，且注入量必須大於天然還原劑與氧化劑競爭者(如有機碳、還原礦物質、碳酸鹽)所需消耗之氧化劑量。
- 氧化劑反應速率與在地下環境之持久性。
- 預期的影響半徑。

要達到目標影響半徑所需的氧化劑體積與土壤的孔隙空間有密切關係，假設注入孔隙中的氧化劑會置換孔隙中原來的流體，所以將氧化劑注入飽和含水層時，會排出相同體積的孔隙水。如圖 5.1-1 所示，左圖為污染團與欲注入的目標影響半徑（虛線），此影響半徑對應到右圖是一圓柱體狀，有了圓柱體的半徑與高度可以計算出圓柱體的體積，並乘上孔隙率即為可以被排出的孔隙體積，可作為注藥量體積設計的參考依據，但實際情況還是得依現場狀況來估算注藥量體積，一口注藥井的氧化劑注入體積之計算方法如第四章中（式 4-1）。

$$V_{oxidant} = ROI^2 \times \pi \times \theta \times h \quad (4-1)$$

此處，

$V_{oxidant}$ = 氧化劑的體積[L³]

ROI = 影響半徑[L]

θ = 孔隙率[-]

h = 垂直注入區間長度[L]

因為地下環境是異質性、異向性、裂隙還有人為管道等等，而且地下孔隙介質中可能有許多孔隙是沒有相互連接的，流體會滯留於這些無效孔隙中，隨著注入的氧化劑來置換這些孔隙中的流體時，可能也會發生擴散現象。另

外，雖然一般認為垂直方向的傳輸較不明顯，仍須注意注入的要劑會往更深處傳輸而低估要劑用量，在設計時必須考慮這些因素。

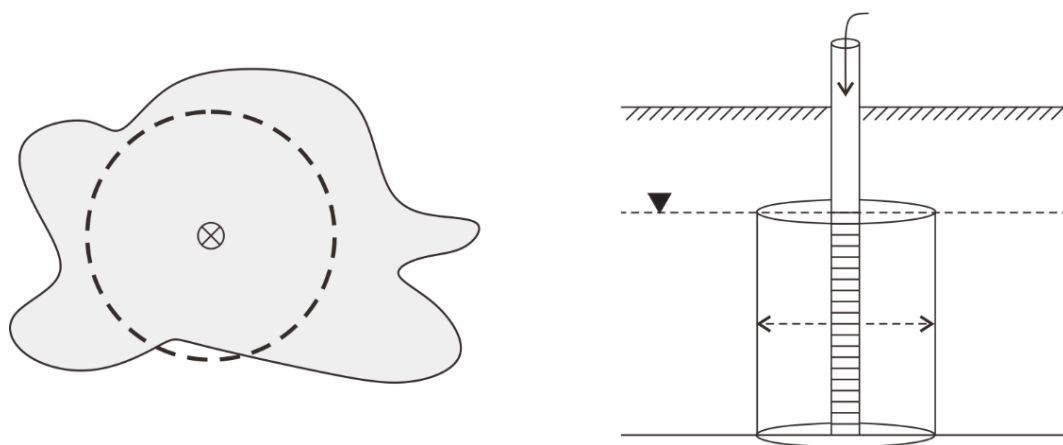


圖 5.1-1 水力半徑的影響

影響半徑(ROI)的決定則可透過現地抽水試驗或示蹤劑試驗來測得，由一口抽水井搭配數口觀測井，以評估水文地質邊界與水力梯度分佈及地質空間變化對含水層的影響。執行抽水試驗時需準備以下設備：(1)抽水機；(2)水位計及自記式水位計；(3)筆記型電腦及分析軟體；(4)發電機(選用配備)；(5)水量測定設備(流量計、大型量筒及碼錶)。執行抽水試驗之步驟如下：

- (1) 分級試水：目的是求得抽水井安全抽水量。由小而大的方式連續抽水，各級抽水時間為 60 分鐘。每級水量需穩定，2~3 分鐘內變化小於可接受值即可。
- (2) 定量試水：根據分級試水結果，擇一適當抽水量，做連續長時間抽水(原則為三天)，抽水量保持固定，並觀測水位洩降變化情形。抽水試驗剛開始時，水位洩降快，量測時間需較密集，隨著抽水時間增加量測時間間格可加大。
- (3) 回升試水：定量試水結束時，觀測紀錄水位回升情形，紀錄應採自記式水位計連續監測值，水位回升至原始穩定靜水位時，始可停止測定。

以抽水試驗進行時，可利用洩降-時間曲線求得通透係數(T)、水力傳導係數(K)以及儲水係數(S)，可採用 Theis 曲線擬合法(Theis, 1985)求得水文地質參數。Theis 曲線擬合法其相關公式如下：

$$s(t) = h_0 - h(t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (5-1)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

其中

$s(t)$ ：水位洩降[L]

h_0 ：抽水前初始水頭[L]

$h(t)$ ：觀測井在時間 t 之水頭[L]

Q ：抽水流量[L³T⁻¹]

T ：含水層之通透係數[L²T⁻¹]

$W(u)$ ：水井函數

r ：抽水井影響半徑(觀測井距抽水井之徑向距離)[L]

S ：含水層儲水係數[-]

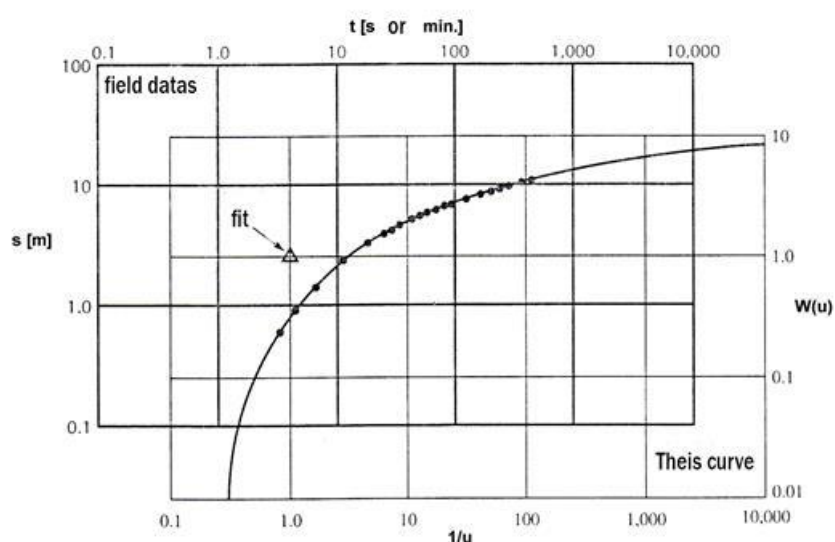


圖 5.1-2 Theis 曲線擬合法示意圖 (範例)

由於 Q 、 T 、 S 為常數，因此 Theis 建議將 $W(u)$ 與 u 關係圖繪製於半對數圖上，比較兩張圖的曲線最相似的部分進行擬和比對，然後於圖上任一點即可求得相對應的參數，再帶入式(5-1)中即可求得影響半徑(r)，目前坊間已有多種商業化軟體可進行估算。

示蹤劑試驗則是使用惰性物質作為示蹤劑，將示蹤劑注入場址的地下環境，並持續對鄰近監測井中惰性物質濃度之進行即時監測，便可以確認地下水流狀況、可能影響範圍，常見的示蹤劑如溴鹽(NaBr)，溴鹽為惰性物質，以其無毒性、易偵測及不易吸附於土壤，且已有商業化手持電極設備可即時分析。高錳酸鉀亦可做為一種示蹤劑，因為高錳酸鉀水溶液為紫紅色，因此可以利用攜帶式色度計或分光光度計進行量測，唯高錳酸鉀同時也是氧化劑，因此可配合其他示蹤劑的使用，以評估在地下環境中的傳輸、流動與氧化的情況。

通常示蹤劑試驗或抽水試驗需要有一個注入井/抽水井，並且於注入井附近不同距離設置觀測井，觀測井數目、距離則視場址於調查階段的所獲得的水文地質資訊有關。

注入的氧化劑濃度與目標污染物有關，所需的氧化劑質量是根據實驗室試驗以及模場試驗和現場污染物來估算的，每種氧化劑所需的注入體積也不同，需要計算出充分分布所需的體積來決定氧化劑的濃度。以下討論每種氧化劑以及應用這些氧化劑的注意事項，並整理相關氧化劑的考慮因子如表 5.1-1 所示，分述如下。

5.1.1 Fenton 試劑

過氧化氫的注藥濃度通常介於 1-5%，可以在低壓或高壓下使用，傳統 Fenton 法的要使注藥井的 pH 值保持在酸性(3.5-5 之間)以維持三價鐵(或二價鐵)催化劑的溶解度，此方法對環境衝擊較大。因此較常用的 Fenton-like 法為改良式的 Fenton 法，不拘限於在酸性環境下操作，利用有機酸或挑選出一種酸，這種酸可以與污染物相容，且不會產生不良反應或對環境造成不良影響，或利用螯合劑來保持三價鐵的溶解度，此時就可以在中性的 pH 環境下

使用，對環境的衝擊性也比較小，要特別注意的是在含有大量碳酸鹽的含水層中是不能添加酸的。

過氧化氫的穩定性具有高度不確定性，會影響有效處理半徑，一般注藥井的配置間隔會較過錳酸鹽來的小，由於反應會產生氧氣，可能降低透氣性導致試劑傳輸受限、污染物可能隨著氣體傳輸遠離注藥井、地下壓力的增加導致地表鋪面損壞等問題，反應產生的熱可能會損壞管線並增加污染物的移動力。

表 5.1-1 應用 ISCO 試劑之考慮因子

氧化劑	注入/分布設計考慮因子及挑戰
Fenton 試劑	<ul style="list-style-type: none"> ■ 氧化反應會放熱，並產生氣體 ■ 由於有機物和目標污染物反應過程中產生的熱量和蒸汽，蒸汽可能侵入附近的建築物，目標污染物可能會揮發和遷移 ■ 會形成大量的氣體 ■ 試劑壽命短，其限制了試劑擴散分布的能力。有時添加穩定劑如磷酸鹽和檸檬酸鹽，以提供更穩定的反應 ■ 可能需要注入和分配額外催化劑來穩定(鐵和酸或螯合劑)並分布在含水層 ■ 天然的碳酸鹽或碳酸氫鹽會降低氧化速率影響試劑分布 ■ 注入井和監測井材料必須要耐熱避免井管融化
過硫酸鈉	<ul style="list-style-type: none"> ■ 應考慮注藥設備與過硫酸鹽的兼容性 ■ 可能需要注入額外的催化劑(強鹼，鐵催化劑，螯合劑，氫或過氧化鈣) ■ 當給水量大於需求量，則在含水層中較持久，隨著水流和擴散均能良好分布 ■ 可作為反應牆與污染團相交，防止污染向下游遷移
高錳酸鹽	<ul style="list-style-type: none"> ■ 在含水層中持久性較好，隨著水流和擴散均能良好分布 ■ 可作為反應牆(reactive barrier)與污染團相交，防止污染向下游遷移 ■ 具深紫色，在高錳酸鹽分布沒有得到充分控制的情況下，可以在附近的地表水體和地下水井中觀察到 ■ 其副產物為二氧化錳，是一種會降低含水層滲透性的沉澱物 ■ 與過氧化物和過硫酸鹽相比氧化電位較低，因此不適用於某些目標污染物 ■ 如果某個區域過量使用高錳酸鹽，可能會使高錳酸鹽長期持續存在(可能長達數年)

參考文獻：NAVFAC, 2015.

5.1.2 高錳酸鹽

地下環境會影響高錳酸鹽的氧化能力，地下的自然有機物和礦物質的會大量的消耗掉高錳酸鹽，導致常常需要添加過多的高錳酸鹽氧化劑來處理非目標污染物的消耗，而這些非目標污染物的反應速度很快，使其經常與目標污染物搶奪添加的氧化劑，進而造成整治效果不佳。

要注意現場的 pH、Eh、離子強度以及 MnO_2 固體的產生，這些條件變化會影響金屬形態和流動性，也會影響含水層滲透率與水力傳導係數等，如在緩衝能力較有限的地方進行整治可能會使得 pH 值降低，而在低 pH 的條件下金屬會較容易溶解，會使許多金屬被活化；在注入大量高錳酸鹽的情況時，產生的 MnO_2 有可能會顯著降低土壤的滲透性。然而美國能源部的 DNAPL 聯盟機構(Interagency DNAPL Consortium, IDC)在佛羅里達州的卡納維爾角做了一項實驗，將 150,000 磅的 KMnO_4 注入 50x75x45 立方英尺的體積中，實驗結果顯示並不會有降低土壤滲透性的情況發生(Crimi and Siegrist, 2003)。

ISCO 系統的使用之高錳酸鉀和高錳酸鈉，其溶液濃度介於 1%-40%，用來處理受污染的地下水，使用垂直井和水平井來作為批次注入井或注入/回收/再循環井；將高錳酸鹽以固體或液體的形式藉由噴槍與土壤混合或水力破裂技術輸送至地下。挑選高錳酸鉀或高錳酸鈉作為氧化劑主要是基於經濟考量，固體的高錳酸鉀較高錳酸鈉的成本來的低，可是使用大量的高錳酸鉀需要較複雜的儲存、輸送和混合設備，才能將結晶粉末製成濃縮的氧化劑溶液，在設備與後處理的成本上會較高；而高錳酸鈉使用上較為簡單，只須稀釋至注入濃度即可，應綜合考慮設計濃度、體積和流速來判斷現場適合使用哪一種氧化劑。

5.1.3 過硫酸鹽

過硫酸鹽相較於芬頓法是較新的現地化學氧化技術，尚有許多理論待釐清與確認，但有一些研究已經確定螯合的三價鐵化合物可以做為過硫酸鹽氧化 VOC 的有效活化劑。過硫酸鹽與 Fenton 試劑類似，均以自由基氧化方式

為反應作用機制，皆可以二價鐵予以活化產生自由基，過硫酸鹽氧化劑的最佳鐵催化劑載量為 100-200 mg/L。

可以從過去文獻研究中發現將碳酸鈉添加到過硫酸鹽混合物中即可有效地緩衝 pH，雖然碳酸鹽會減緩過硫酸鹽的氧化反應，但是並不會抑制 VOC 氧化，最佳的碳酸鹽載量約為過硫酸鹽的 20% (以 mole 計)，在這個比例下，使 pH 保持在 4-5 以上，碳酸鹽可以提高過硫酸鹽的穩定性，可以從過硫酸鹽的濃度來觀察氧化反應影響，過硫酸鹽濃度越高，氧化 VOCs 時會顯得更快速有效，且過硫酸鹽還不會與自然有機質反應。

5.2 氧化劑輸送方法

一般來說越多的注入點/注入井來添加氧化劑，可以越有效的達到整治效果，最好的是水平或垂直方向均能使氧化劑與目標污染物接觸的有效區能有足夠的重疊，在某些情況下，當污染物吸附到土壤上或作為殘留相的 DNAPL 時，則需要多次注入氧化劑或加大整治有效區域。

氧化劑傳輸會因反應受限，因為氧化劑在通過地下時也一邊在消耗，因此，若反應速率較快的氧化劑，即會導致更有限的傳輸距離，在設計上可與其他工法搭配，如土壤氣提抽除法(SVE)、抽出處理法，並設置臨時井用於注入氧化劑或監測，如果監測井未用於注入作業時，應監測地下環境是否受到污染。在某些情況下可能需要使用專門設計的注入設備會較合適，例如高濃度臭氧輸送可能就需要不鏽鋼注入設備，對於半衰期較長的氧化劑，如高錳酸鹽和過硫酸鹽，可以使用地下水循環來輸送。所謂的地下水再循環輸送即是在目標處理區的上游注入氧化劑並在目標處理區的下游抽水，並添加額外的氧化劑再次注入以達一個循環的方法，但是再循環系統需要較複雜且成本較高的地面設備來執行，此方法對於高度污染的地點比較具成本效益。

氧化劑注入的壓力和流動條件與氧化劑輸送狀況有密切的關係，如果注入時的壓力過大或速度過快，會導致水力破裂或土壤噴出，雖然加壓注入可以使橫向的輸送較快，但是若超過了土壤破裂壓力，那就要謹慎的控制裂縫幾何形狀，使裂縫不會向上移動或是移動到非目標區域，甚至導致地表被破

壤。若氧化目標污染物是 DNAPL 時，在執行之前還必須考慮加壓注入可能會使 DNAPL 移動的問題。

直接貫入式技術是在注入氧化劑是較常見的一種方法，可以讓氧化劑有良好的垂直和水平分布於目標處理區，若在建築物或街道下時，可以採用水平井來達到整治的目的，但在使用水平井時，需要確保氧化劑是沿著整個水平井且均勻分布，在注藥井設置過程中，需要滿足產品的質量保證/質量控制計畫，確保每個注藥井的規格都是一樣的，在設置注藥井時需以 3-6 m 的距離設井，以確保氧化劑均勻分布在目標處理區。直接貫入式方法一般適用於在污染深度 <30 m 並且沒有任何地質材料的阻礙的地方來注入氧化劑，其優點在於可以很容易的移動注入位置來針對特定的熱點，在公共街道或建築物地面需要注入氧化劑的地方，直接貫入式方法可以減少日常操作的干擾，在設計注入系統時，應先了解與各種氧化劑材料的兼容性。在設計氧化劑輸送時應注意以下幾點(NAVFAC, 2015)：

- 一、氧化劑注入量和持久性。包括預期的注入次數，所需的氧化劑濃度和體積及氧化劑壽命。
- 二、注入方法。基於岩性和其他場址特定考慮因素來選擇再循環、直接貫入法、推拉法、土壤混合法。
- 三、注入井/點類型、間距、佈點和設計規格，包括目標處理間隔和安裝方法(鑽井技術和建築材料)；確保井/點設置位置妥當，以達整治目標；設置之前應透過模場試驗來確定注藥影響半徑，並考量每個注入井/點的注藥體積。
- 四、應用工具和技術。目前已開發了許多專用的注入工具和應用方法，設計時需紀錄這些工具應該達到的具體參數。
- 五、泵、貯槽和輔助設備的規格。在注藥過程中使用的泵、貯槽和輔助設備的規格。
- 六、操作程序。用於將氧化劑注入含水層的方法描述和操作方法，包括預計注入天數、運行小時數、注入量、預估的注入流量、同時注入的井/點數、注入孔隙體積的數量(PV)，以及預期的影響半徑。

七、建立輸送網。適當的分配氧化劑輸送至整治目標區。

5.2.1 注入方法概述

ISCO 設計必須考慮將氧化劑引入含水層中的方法，有四種主要的注入方法。表 5.2.1-1 中比較了每種注入方法相關的考慮因素。

一、直接貫入法：將試劑從外部來源注入，取代與注入體積相同的體積的地下水，可用於批次添加，一次注入多口注藥井中。

二、上下游循環：由一個或多個抽水井抽出後，混合氧化劑處理後再注入地下水，以達到一個循環整治的方式。

三、單井循環：單井抽取一定體積的地下水，在地上與氧化劑混合，然後注入同一個井中，這個方法可以批量處理場址一口或多口井。

四、土壤混合法：土壤混合需使用大型螺旋鑽引入氧化劑，在低滲透的土壤介質中(如黏土)能發揮相當大的作用。

表 5.2.1-1 注入策略注意事項

考慮因素	直接貫入法	上下游循環	單井循環	土壤混合
液壓控制 流體能力	與再循環和推拉法相比，更能從目標處理區移除溶解污染物	可以比直接貫入法和推拉法能保持更好的流體液壓控制	比直接貫入法好，但比再循環差	良好
水源	需要	不需要	不需要	若使用固體試劑則不需要
應用速度 與難易度	相對快速	設備密集程度高，通常需要較長時間	單一位置非常快，若需調動到多個點會花費較多時間	應用較快，但設備密集，因使用螺旋鑽使其具有挑戰性
地層滲透性限制	黏土層難以施工，高壓注入可能會有問題，且可能會發生流體冒出地表	水力傳導係數大於 10^{-4}cm/s 時效果更好	黏土層難以施工，高壓注入可能會有問題，且可能會發生流體冒出地表	在低滲透性的土壤中非常有效
地面處理	與其他方法相比地上設備較少	大型貯槽和混合設備	大型貯槽和混合設備	大型地上混合設備
與污染物接觸	難以確保與污染物充分接觸	容易	容易	非常好

參考文獻：NAVFAC, 2015.

5.2.2 液態氧化劑注入方法及影響半徑

液態氧化劑灌注的方法大致包含注入井灌注與直接注入法(direct-push technology, DPT)等 2 類，通常氧化劑以注入井灌注時，其影響範圍受到污染物濃度、土壤質地、氧化劑性質、注入方法和壓力而變化，注入的氧化劑會根據反應速率而影響其在地下傳輸的距離，反應較快的氧化劑會高估實際氧化劑的分散度，因為地下環境很少是具有均質且等向性的，在設計注入時也必須考慮到。圖 5.2.2-1 說明了一個系統，其中注入區有兩層不同的滲透率，上部區域的滲透率較差(例如粉質黏土)，而下部區域具有高滲透性(例如沙)，由於氧化劑較容易進入沙質介質，且沙質介質的水力影響半徑較大，所以若需要使氧化劑在粉質黏土中分布，則需要注意注入區域不能與沙子相交，否則在粉質黏土中效果會不明顯。

圖 5.2.2-2 是說明影響半徑的另一個例子，許多的 ISCO 注藥都是用地下注入方法進行的，將注藥口推入所需深度並且採用由底下向上以區間的方式注入氧化劑，隨著注藥口注入，使得注入區的厚度增加，影響半徑也跟著增大。影響半徑的變化是進行模場試驗的重要因子，有效的模場試驗數據能使設計時能夠確保注藥系統的合理設計。

依據國外的經驗，不同種類藥劑進行垂直注入時，會有不同的影響半徑、藥劑量、需要注入的孔隙體積數(pore volume)、注入次數與頻率等經驗參數，如表 5.2.2-1 所示，這些參數可應用於快速評估場址可能需要的注藥井數、藥劑量與注藥頻率等，但讀者仍然需要依據藥劑種類、場址地質情況、實驗室試驗、模場試驗結果等，做為實際進行整治時的操作參數。

當採行注入井灌注時的井場的設計上，要視場址地質情況、場址地上物與地下物結構等進行考量，如採用全開篩則需要考慮圖 5.2.2-1 及圖 5.2.2-2 的情況，亦可依據地質構造，於合適的位置開篩，並分層注藥，以達到分散藥劑的目的。

為了使藥劑可以有效的分散，有時也會採用水力控制的方式，使氧化劑得以有效的分散在預定的區域，如圖 5.2.2-3 所示，於污染團的上游進行藥劑灌注，並於下游處抽出，使藥劑可與污染物充分接觸而氧化。

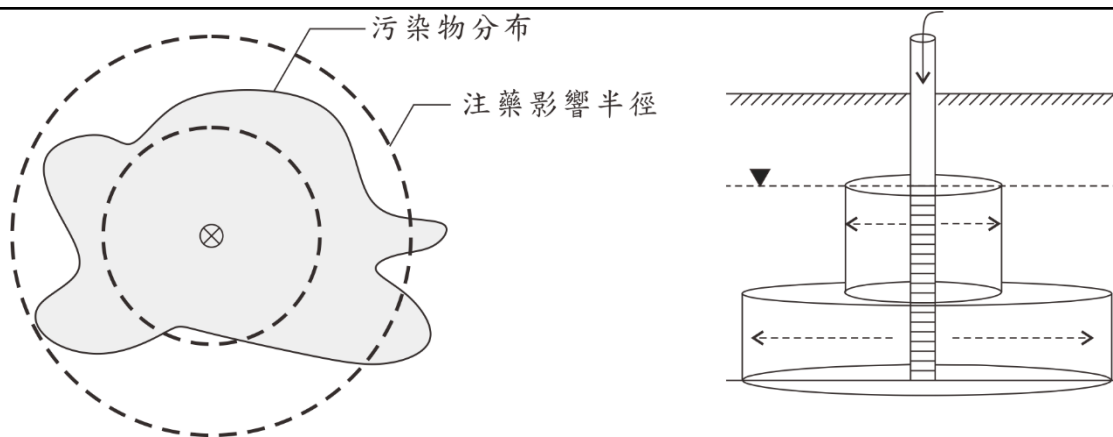


圖 5.2.2-1 滲透性的影響

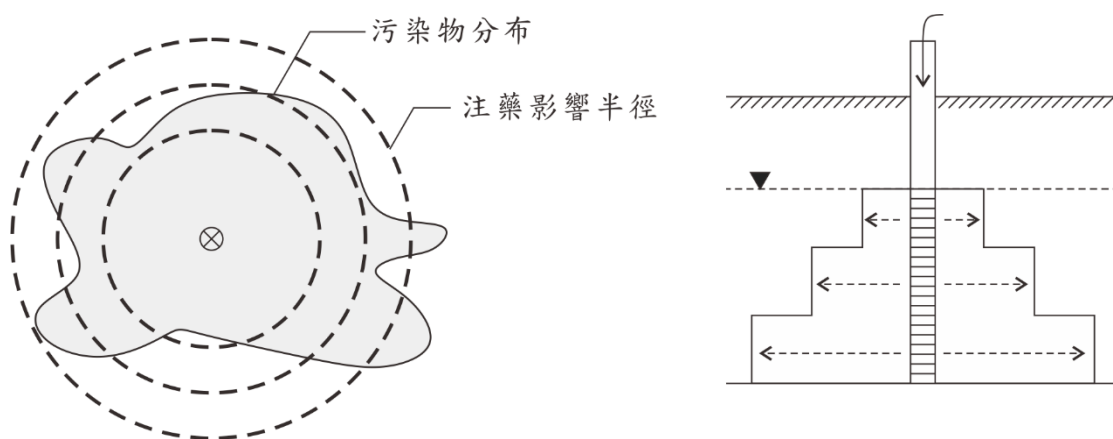


圖 5.2.2-2 由底部向上注入

表 5.2.2-1 氧化劑垂直注入法設計經驗參數

參數種類	高錳酸鉀	芬頓法	過硫酸鹽	臭氧
設計 ROI 中位數(m)	4.3 (n=29)	4.6 (n=30)	4.0 (n=6)	7.6 (n=5)
實際 ROI 中位數(m)	7.6 (n=11)	4.6 (n=6)	6.1 (n=3)	無資料
氧化劑劑量中位數(g/kg)	0.4 (n=36)	1.2 (n=19)	5.1 (n=6)	0.1 (n=4)
注入 PV 中位數	0.16 (n=32)	0.073 (n=26)	0.57 (n=6)	無資料
每批次注藥次數中位數	2 (n=65)	2 (n=57)	1 (n=10)	1 (n=15)
注藥天數中位數	4 (n=45)	6 (n=42)	4 (n=7)	210 (n=15)

註：n 係指文獻中分析之場址數量

參考文獻：Simpkin et. al., 2011

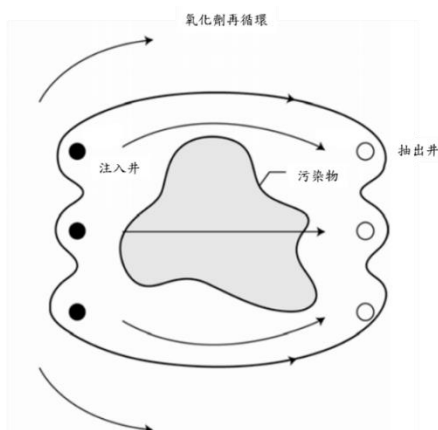
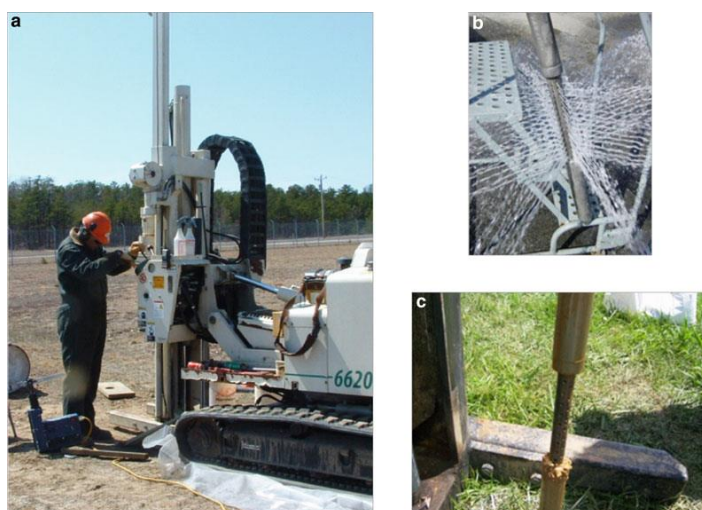


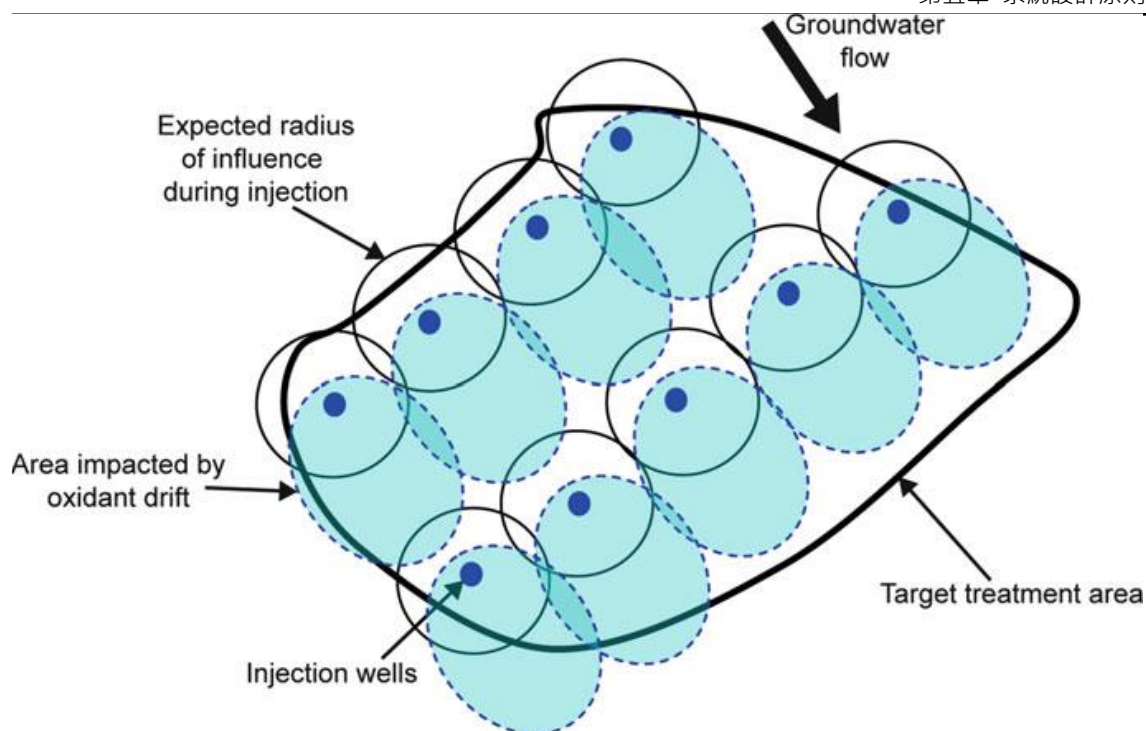
圖 5.2.2-3 上下游循環法

直接貫注法則是利用鑽機，在適當的壓力下將藥劑注入特定深度的地下環境中，其優點是可以依據污染物的垂直與水平的分布情況，將藥劑於特定的位置中釋放，使氧化劑與污染物具有更佳的接觸機會，圖 5.2.2-4 為 Geoprobe®進行直接貫注的照片，通常是利用直接貫入的方式，將鑽頭壓入特定深度後，回拔外套管將注藥口露出，並以特定壓力將藥劑從不同的方向注入地下環境當中，圖 5.2.2-5 為常見的網格法布點方式及藥劑傳輸示意圖，通常藥劑注入後，會因為地下水流向或地質狀況而有向下游傳輸或不均勻的情況，因此通常需要針對質地較為緻密的區域進行藥劑補充，以盡可能涵蓋污染物可能存在的範圍。



參考文獻：Simpkin et. al., 2011

圖 5.2.2-4 Geoprobe 直接貫入法注藥照片



參考文獻：Simpkin et. al., 2011

圖 5.2.2-5 直接貫入法網格法注藥與藥劑流動情況

有時污染分布於黏土層或岩盤時，可以利用破裂的方式，將緻密的地層結構破壞、產生裂隙，再注入氧化劑，以增加藥劑的影響半徑或提升注藥速率。

破裂法，最初在石油和天然氣開採所開發的破裂技術已被用於環境改善，已加強各種的整治技術，包括抽出處理法、生物整治、空氣注入法、SVE 和 ISCO，破裂主要用於低滲透性的土壤(如黏土)和岩盤，以提高地層的滲透能力或水力傳導能力。水力傳導係數(K)的增加範圍是原先的 1.5-175 倍，水力傳導係數增加會使的整治井的有效影響半徑增加，因此可以透過破裂技術來減少井數且達到相同的整治效果，有的裂隙可能是沒有相通的無效孔隙，會縮短擴散途徑。

在 ISCO 的應用中，在注入氧化劑之前先進行破裂以產生多處裂隙，這些裂隙可以增加氧化劑注入時的影響半徑和提升注入速率，破裂技術一般可以分為水力破裂和氣動破裂兩大類。水力破裂主要用於低滲透區域形成砂岩裂縫，在高壓下將水、沙和厚凝膠組成的泥漿注入地下產生徑向裂隙，殘留的凝膠會被生物所降解，並留下一個裂隙。

在岩盤和沉積物中使用氣動破裂，在注入高壓空氣後短時間內會爆裂，形成徑向破裂區，氣動破裂和水力破裂的不同之處在於，氣動破裂之後不需要填入支撐劑（例如沙子）還能保持裂隙開口，因此，含水層材料越堅固越能保證裂隙是保持開放狀態，膨脹黏土和其他低強度材料不適合使用氣動破裂。水力破裂和氣動破裂一般藉由雙封塞套管鑽孔進行，透過封隔器、地面套管或其他方式密封所需破裂區的上方和下方，流體在高壓下注入可以擴大鑽孔壁並打開相鄰的裂縫，一旦壓力超過臨界值，裂隙會越來越長且越來越大，直到裂隙與地表或地下障礙相交，壓力通過裂隙至障礙物或地表時會消散便停止注入，產生的裂隙通常是水平或者垂直傾斜的。裂隙可以自然保持開放或者需藉由支撐劑保持開放。

在最好的情況下，可以利用現有的模式來預測裂隙的類型，裂隙的半徑和傾角仍是取得困難的資訊，基於這個原因，在有地下結構、建物、公共設施或其他敏感區域附近的破裂作業要非常小心，除了在破裂過程中地下所經歷的高壓之外，在破裂過程中通常會造成地表變形(如地面抬升)，這些地表變形會隨著時間而逐漸減小，但是可能會有永久變形發生，像是加入支撐劑的水力破裂應用。

事實上，藉由破裂過程和破裂後的地表變形測量是用來估計地下裂隙形成和形狀的方法之一，諸如傾斜儀之類的電阻率設備也經常用來量測破裂後產生的地面坡度，石墨或其他導電材料注入到裂隙中可以使用導電度來追蹤裂隙。

表 5.2.2-2 則是常見的氧化劑注入之經驗參數與建議安全標準，同樣的也需要依據場址之特性進行調整，這些參數可應用於快速評估場址可能需要的注藥井數、藥劑量與注藥頻率等，但讀者仍然需要依據藥劑種類、場址地質情況、實驗室試驗、模場試驗結果等，做為實際進行整治時的操作參數。

表 5.2.2-2 直接貫注法常見經驗參數與建議安全因子

參數	岩性 範圍	深度	反應性藥劑	非反應性藥劑	
				液態	非液態
注入參數					
場址最大孔隙體 積百分比	礫石-粗砂	-	<33%	<33%	<10%
	粗砂-粉砂	-	<10%	<33%	<10%
	粉土-黏土	-	<5%	<33%	<10%
ROI	礫石-粗砂	-	< 9.14 m	< 9.14 m	< 4.572 m
	粗砂-粉砂	-	< 4.572 m	< 4.572 m	< 1.5 m
	粉土-黏土	-	< 1.5 m	< 1.5 m	< 1.5 m
流速	礫石-粗砂	0.3 - 1.5 m bgs	< 3.785 LPM (不建議使用 >5%過氧化 氫)	重力流	< 11.355 LPM
		1.5 -3.0 m bgs	< 11.355 LPM	< 18.925 LPM	< 18.925 LPM
		3.0 – 9.14 m bgs	<55.775 LPM	<55.775 LPM	<37.85 LPM
		>9.14 m bgs	<94.625 LPM	<94.625 LPM	(> 7.62m bgs) < 55.775 LPM
	粗砂-粉砂	0.3 - 1.5 m bgs	< 3.785 LPM (不建議使用 >5%過氧化 氫)	重力流	< 11.355 LPM
		1.5 -3.0 m bgs	< 11.355 LPM	< 18.925 LPM	< 11.355 LPM
		3.0 – 9.14 m bgs	<55.775 LPM	<55.775 LPM	<37.85 LPM
		>9.14 m bgs	<94.625 LPM	<55.775 LPM	<37.85 LPM
	粉土-黏土	0.3 - 1.5 m bgs	不建議使用	重力流	< 18.925 LPM
		1.5 -3.0 m bgs	< 11.355 LPM	< 18.925 LPM	<55.775 LPM
		3.0 – 9.14 m bgs	< 11.355 LPM	<55.775 LPM	<55.775 LPM
		>9.14 m bgs	< 11.355 LPM	<55.775 LPM	< 18.925 LPM

註：修正自 Simpkin et. al., 2011

表 5.2.2-2 直接貫注法常見經驗參數與建議安全因子(續)

參數	岩性 範圍	深度	反應性藥劑	非反應性藥劑	
				液態	非液態
注入監測					
壓力(psi)	壓力需要持續的監測，除非要進行水力破裂或氣動破裂，否則壓力不應該太高				
溫度	溫度通常要低於攝氏 66 度，以避免其他影響。此外，也要搭配氣體控制系統，以排除產生的氣體。				
流速	流速要盡可能維持在表格中所建議的流速				
蒸氣濃度 (ppm)	當注入可能存在揮發性有機物的污染區時，所有潛在的氣體傳輸路徑均應監測，以避免蒸氣入侵問題。				
材料特性	會接觸到氧化劑的材料，都必須要是低反應性的，包含儲存桶、泵浦、注入設備、注入井等。通常是不銹鋼或是聚氯乙烯材質較佳。				

5.2.3 高錳酸鹽的注入

有兩種常見的方法可將高錳酸鹽溶液輸送至地下，如圖 5.2.3-1 所示分為批次添加和再循環兩種主要方法，高錳酸鹽可以透過泥漿用水力破裂法整治低滲透性的黏土層，若在地下水中會比過氧化氫或臭氧來的更持久，有研究指出高滲透性的飽和土壤中使用高錳酸鹽影響半徑可達 10 m 以上。

在污染面積或量非常大的情況下，常常會選擇再循環方法較符合成本，注入井與抽出井需選擇合適的地點，在做設計時應該考慮到抽出的污染物與地面上的高錳酸鹽產生二氧化錳沉澱物的可能性。高錳酸鹽也可以以固體結晶形式注入作為反應牆(reactive barrier)，使用螺旋鑽注入固體高錳酸鹽並與土壤攪拌，使固體高錳酸鹽與土壤均勻分布，此方法較適合在通氣層內的淺層污染使用，土壤混合如圖 5.2.5-2 所示。

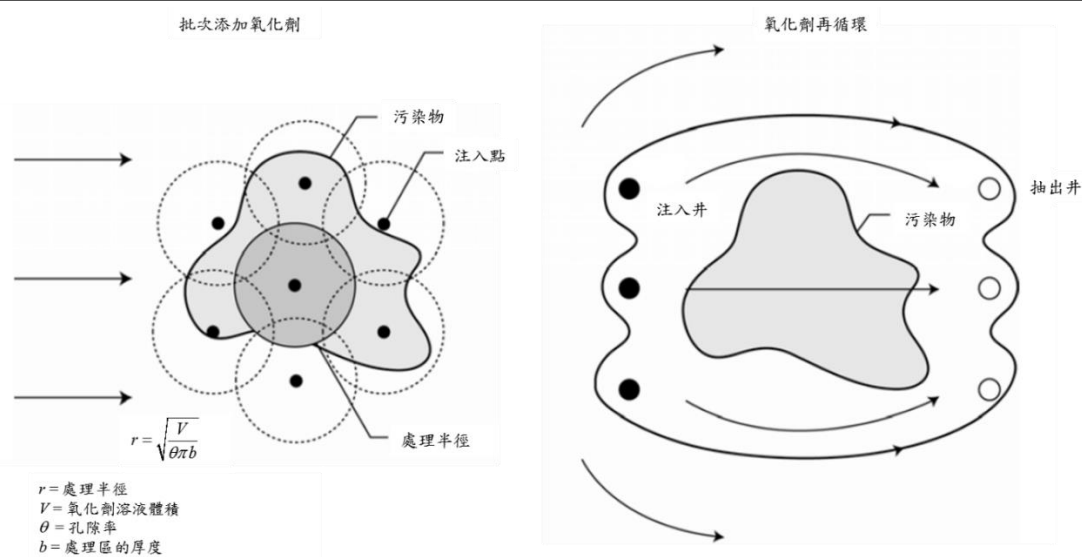


圖 5.2.3-1 批次添加與再循環法

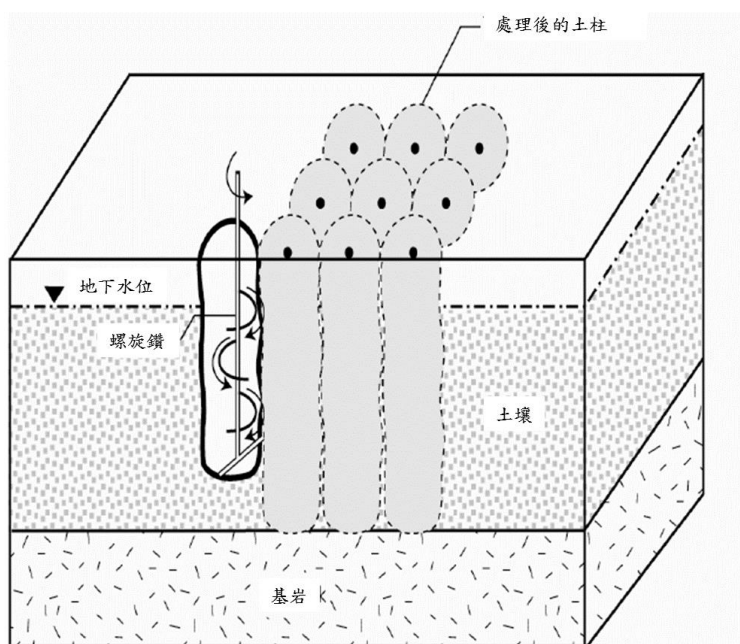


圖 5.2.3-2 利用螺旋鑽混合土壤

5.2.4 過硫酸鹽的注入

過硫酸鹽的輸送方式基本上與高錳酸鹽相同，使用批次添加或再循環法，且過硫酸鹽也是比過氧化氫和臭氧於地下環境更持久，所以高滲透性

的土壤中影響半徑會較大，污染面積或量非常大的情況下，應選擇再循環方法來進行整治，且注入井和抽出井的位置也要做適當的規劃。

5.2.5 Fenton 試劑的注入

應用 Fenton 試劑有幾種方法，最常見的如下：

- 注入過氧化氫後再注入亞鐵離子可確保試劑在反應前分布於污染區。
- 過氧化氫與亞鐵離子同時注入，此方法使試劑在分布時同時進行反應。

如果需使用注入井來調整 pH 值的話，則需要用不鏽鋼井來注入酸，避免腐蝕注入井管壁，Fenton 試劑可以在低壓(<25psi)或高壓下注入，高壓用來回收 DNAPL 和 LNAPL 或於低滲透區可以有較明顯的效果。由於鐵催化劑會引發劇烈反應，所以鐵和過氧化物在注入前不能在儲存罐中進行混合；反應會產生熱量，可以用來促進污染物的揮發和熱氧化，但亦須注意激烈反應所帶來的熱與壓力變化而產生土壤及地下水或氧化劑噴出的問題。某些場址可以發現地表下有存在明顯污染時，會採用由上而下的注入方式，通過這種方式，將試劑從較淺的深度輸送至地下水中時，可以產生覆蓋層(blanket)，以利用因放熱反應產生的熱量揮發而消耗掉有機物。在水位接近地表的地區，放熱反應需要加以注意，因為產生的熱量會引起水膨脹，並可能導致地上淹水的情況發生，在這種情況下應盡量減少熱量產生。

在進行過氧化物的應用時，先行做實驗室試驗與模場試驗是為了能確保在現地整治時能成功應用，實驗室試驗可以用來量化飽和土壤與溶解相中污染物的處理效率，也可以確認是否有影響土壤或地下水反應效率的任何不良反應或沉澱物，模場試驗可以用來確定注入參數，如反應速率、溫度、壓力、影響半徑以及注藥量和注入速率。

5.2.6 臭氧之介紹與輸送方法

由氧氣產生臭氧時，臭氧濃度於 5%-10%，利用空氣產生臭氧時，濃度約在 1% 以內，而臭氧的活性非常強、對物質也有較強的腐蝕性，因此要應用臭氧時必須在現場製造。在現場使用臭氧製造設備連續產生臭氧流體，相較於高錳酸鹽、過硫酸鹽與 Fenton 試劑的批次注入方法，臭氧是可以連續注入的現地化學氧化法。

臭氧產生設備的容量取決於所需的總氧化劑負載量和地下可接受的氣體流速和總處理時間，舉例來說，若要在一年內完成 7000 磅臭氧來滿足地下自然有機質和現場目標污染物的需求，那麼臭氧產生設備需要 7000 磅/365 天 20 磅/天，大約一天要注入 20 磅左右的臭氧。由於許多的臭氧產生設備的流量能力是有受限的，因此選擇能夠注入適當體積和流量的臭氧產生設備是非常重要的，有些臭氧產生設備注入量低於 1.695 m³/hr，這會導致每個注藥井的影響半徑非常有限(<1.5 m)。

臭氧是一種活性強但存在時間短暫的氧化劑，需要有良好的輸送方法，由於臭氧不太穩定，所以在臭氧產生設備產生臭氧時須立即注入地下，可以通過添加活化劑或地下固體的催化作用來氧化污染物，也可以轉化或礦化各種有機污染物，包括許多難以處理的化合物，由於臭氧是氣態氧化劑，可以用來處理通氣層或飽和含水層污染，另外臭氧會降解成氧氣，有助於現地有氧生物降解。

注氣系統應進行可行性測試以證實注藥井的設計流量和壓力，可行性測試期間輸送的氣體通常是臭氧或空氣，可以使用空氣來代替臭氧來確定流量/壓力與影響區域數據，在實際的氧化過程中甚至可以使用空氣來幫助分配氧化物或增加臭氧流量。

可行性測試類似於空氣注入法(air sparging)，其中被注入的氣體以不同的注入壓力和流速輸送至飽和土壤中的分級點(screened point)，在每個注入步驟中應增加壓力和流速，以便收集影響區域的資料，要收集的影響區域資料包括監測井地下水位變化、觀測井周圍的壓力影響（注入氣體會導致影響範圍內通氣層的壓力改變）、觀測井的 DO 變化或增加注入氣體的頂部空間

和溶解濃度，也可以注入示蹤劑氣體（如氦氣），在觀測井處可以較容易檢測到。

臭氧注入系統最常見的問題是臭氧系統的流量設計，由於臭氧產生器的流量限制，許多小型的臭氧產生器不能提供有效的影響範圍，這類問題通常發生在沒有設計基礎的情況下進行模場試驗和挑選的臭氧設備，在系統設計之前應該進行模場試驗，以了解每個注入點所需的適當流量，以達到有效的影響區域與適當的井距。

市面上最常見到的臭氧產生設備是電暈放電產生器，幾乎可完全用於ISCO 的應用上，該產生器通過兩個帶有相反電荷的同心環形金屬管電極之間傳遞乾燥空氣或氧氣而產生臭氧，約產生 2%-5%和 4%-10%的臭氧。ISCO 應用的關鍵因素是現場需要乾燥空氣、氧氣濃縮器或氧氣源、發電機的冷卻水和具有比臭氧產生器使用的壓力更高的發電壓縮機。

由於臭氧包含在空氣中(空氣或氧氣中的臭氧含量<10%)，因此需要將臭氧從氣相轉到水相中，常見的方式是使用類似於生物曝氣法，或是通過儲存罐注氣將臭氧化水注入含水層，或使用文氏管(venturi)將臭氧引入氣體注射器。

根據污染物的特性大多數應用的注入速率範圍約 0.25–2 scfm，但如果污染物揮發性很低時，根據現場條件，可以使用更高的注入速率。文獻指出空氣反應中苯和三氯乙烯的降解速率非常快。臭氧與污染物發生反應後會使得揮發性有機物從地表逸散，若臭氧沒有接觸污染物也可能會從地表逸散。

5.3 系統設備

在介紹了氧化劑的體積與輸送之後，接著討論各種化學氧化系統應注意的原則，表 5.3-1 列舉常用系統設備之簡易清單，如下所示。

表 5.3-1 常用系統設備清單

設備	功能
原液貯槽	提供氧化劑原液儲存、放置之設備
輸送泵浦	將氧化劑原液、催化劑、螯合劑或自來水輸送至配送區
配送泵浦	將調配過後之氧化劑注入目標改善區
流量計及管線系統	控管輸送氧化劑流量
儀控電力系統	系統化控制氧化劑輸送與各貯槽自動配送
抽出系統	設置抽出井以利注藥循環，或氣體抽除設備
相關控制閥件與井頭設施	控制藥劑配送管線與注入開關

較詳細設備內容如表 5.3-2，總結了各種現地化學氧化法所需之設備與設施，過硫酸鹽與高錳酸鹽傳輸技術類似，可參考高錳酸鹽之設備與設施。另外在選擇設備時應考慮以下因素(NAVFAC, 2015)。

- 一、設備的所有與氧化劑接觸的部件都需要與任何氧化劑與活化劑兼容
- 二、泵的尺寸要正確，用以處理預計的壓力和流量
- 三、貯槽和混合系統的大小確保足夠的試劑混合和儲存能力
- 四、所有的液體處理設備和貯槽都需要有二次污染防治措施
- 五、根據現場存在的氧化劑和活化劑提供適當的安全設備，如洗眼器、安全淋浴、滅火器等等
- 六、如果可行，將 GSR 納入設計中

注入、抽出和再滲透井的三個重要考慮因素是井的方向、井的位置、井的數量和井的設置。水平井和垂直井都可用於處理各種化學氧化系統，然而 Fenton 試劑最常被使用在垂直注入井。井的位置和數量，在設計過程中確定井的數量和位置，以達到以下基本目標：

- 優化可靠的氧化劑和催化劑輸送到污染區域。

■ 提供測量化學氧化系統性能的管道。

對於高錳酸鹽再循環系統，意味著將再注入井置於污染源區，同時從下游抽取地下水，這種方法同時提供較強的水力梯度，使得氧化劑更快速的在影響區域傳輸。抽出井的數量、位置和設計主要是取決於水文地質條件，還有污染區域的深度和厚度以及現場試驗的結果。要特別注意的是隨著整治作業的進行，井位可能需要更改，因為隨著作業時間的進展，井通常會產生優勢路徑，進而影響整治成效。

臭氧注入井的數量和井之間的距離可以透過模場試驗來決定，但有一些要注意的事項：

- 在污染物濃度較高的區域，應該把井設置的密集一點，以增強污染物接觸氧化劑，而這個區域的氧化劑需求量會較多。
- 利用密集的井距，將氧化劑輸送到污染區中，可以比透過水流與擴散的方式輸送氧化劑還來的快速許多，可以有效地氧化劑傳輸的節省時間。
- 若地質滲透率較差的地方，通常需要較密集的井來達到目標影響半徑，滲透率較高的地方井距可以較疏散一些。

關於井的設置，化學氧化系統所設置的井由直徑 1-6 英吋的 PVC 井管、鍍鋅鋼管或不鏽鋼管構成，在低 pH 條件下應使用不鏽鋼管來避免 PVC 井管受到酸而損壞。臭氧注入井的開篩間格通常為 30-90 公分長，位於污染區內，當水平注入氧化劑時，必須適當灌漿以防止氧化劑直接從井環向上至非飽和區。再滲透井具有從井底延伸到不飽和區的開篩長度，理想情況下，地下水採樣應於含有最大碳氫化合物的飽和層進行，現地試驗研究和數據分析、水力模擬可以極大地幫助確定地下水採樣和注入井的配置和施工設計。對於 GSR 計算詳第九章。

表 5.3-2 現地化學氧化法設備表

設備	功能	不同氧化劑之需求設備			
		過氧化氫/Fenton 試劑	過錳酸鹽	過硫酸鹽	臭氧
抽氣井/抽水井	主要收集因氧化反應使地表下產生之 VOC 蒸氣、氧氣及水，井之尺寸約 1~6 吋不等，依各場址需求不同選定之，井材料一般以 PVC、表層鍍鋅的鋼或不鏽鋼之管線，若是在酸性環境下建議採不鏽鋼管。	✓	✓	✓	
注入井	主要將氧化劑注入至需處理之污染層，井材及尺寸同抽氣井。井的設置方式可採水平或垂直向，若使用過氧化氫/Fenton 試劑建議使用水平置入方式。	✓	✓	✓	
抽氣/注入泵	用以將氣體抽出及將氧化劑注入地表下之動力設備。設備易因過氧物質造成損壞，操作期間應常保養更換。	✓	✓	✓	✓
地下水及氣體處理設備	經抽氣井抽出之地下水及氣體，以粒狀活性碳吸附、生物濾床或其他處理技術將油品污染物移除。	✓	✓	✓	✓
儀控設備	藉由儀錶訊息可精確掌握處理成效。	✓	✓	✓	✓
監測井	採樣分析以評估污染控制成效。	✓	✓	✓	✓
Lanch Injection points	呈現泥漿狀的過錳酸鹽需以 push-point 技術置入地表下。		✓		
大尺寸的土鑽設備	攪拌以充分混合土壤或地下水中之過錳酸鹽。		✓		
空壓機	提供足夠的氧量以產製臭氧，並供給足夠壓力以將臭氧送入地下水中。				✓
臭氧製造機	現場產製臭氧用，一般使用濃度為 5%。				✓

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.

5.4 系統性能設備維護

為了維持與監控 ISCO 系統操作的狀態，應使用系統性能維護設備進行監控。透過良好的儀器配置與控制系統的設計，可確保個別組件皆可有效的運作，因此可利用系統儀表板的使用，盡可能完整監控系統操作概況。以下為儀表板設計時至少滿足的項目。

- 一、 管線與儀器配置圖
- 二、 電力配置圖
- 三、 各項設備組件說明
- 四、 系統操作及控制流程說明
- 五、 操作狀態燈號顯示

經由各操作狀態燈號警示或巡查人員的紀錄，應即時更換或維修有狀況之設備，使設備維持在優良運轉的環境中。某些設備有連動設計，若發現某個部分設備無運作時，應檢查是否連動系統出問題，並聯絡廠商進行設備維修。

5.5 二次污染防治設備

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

在抽除廢水時，應考量產生廢氣排放與廢水處理之問題，並考量周圍居民對於空氣品質與用水安全之觀感，以避免不必要非理性抗爭，造成執行之延宕。此外為了避免二次污染的產生，應加裝廢液處理設備，並經適當處理並檢測合格後始得排放。

第六章 設備試運轉測試

6.1 概述

化學氧化劑本身對人體有造成傷害之疑慮，故應於場址改善過程中做好工業安全衛生計畫與監測工作。由於氧化劑有腐蝕輸送管線的可能，應定期檢查管線狀況，若氧化劑濃度較高，則縮短管線檢查週期，以防管線受腐蝕而使氧化劑逸散於環境中造成工業安全危害。此外，為了避免改善工作造成二次污染的行為發生，在操作過程中產生的廢氣與廢水皆須取得排放許可證，並妥善處理後始得排放。

於系統試運轉過程應遵循之操作策略，包含系統試運轉之基線資料蒐集、設備試運轉與測試、系統啟動、資料評估與啟動報告，如圖 6.1-1 所示，各個階段執行方法個別說明於後。使用者應注意每個場址的場址與污染物特性有所差異，因此在準備系統試運轉時，應考量系統設計目標與複雜性。



圖 6.1-1 系統試運轉執行流程

6.2 蒐集基準點資料

在系統試運轉期間為評估執行成效，應將試運轉期間與原始的場址環境地下變化做比較，觀察目標整治區域內的污染狀況因系統操作所產生的變化。場址之基本資料應於模場試驗前蒐集完成，並於模場試驗時蒐集場址特性資料、污染物濃度與分布狀況等等，然而，於模場試驗所蒐集的資訊可能無法涵蓋全場址，因此試運轉初期應檢視現有資料，並盡可能蒐集任何其他所需資訊。

為了蒐集試運轉前基準點資料，本節彙整常見的應蒐集與分析資料如表 6.2-1，而此表僅供參考，使用者應視場址實際狀況進行調整，修改基準點資料蒐集項目。任何採樣與分析方法皆應參考行政院環保署檢測機構公告之最新方法為之。

表 6.2-1 系統試運轉前基線資料蒐集確核表(範例)

檢查項目	填表人	檢核日期	補充說明
土壤自然有機質(OM)耗氧量			
土壤採樣結果：污染物種類和濃度			
土壤中是否含重金屬			
ISCO 注入井/點之土壤孔隙率			
地下水位及流向			
地下管線調查			
數據蒐集頻率及數量，應隨該筆數據何時取得並用於場址調查、場址大小、預算、整治目標使用			

註：不同數據應各有其蒐集頻率及數量，可取決於該筆數據何時取得、場址大小、場址調查目的、預算、整治目標的設定

6.3 設備運轉與測試

操作試運轉之前應確實檢查設備是否完成安裝，以及對個別設備功能及整合性系統功能檢查，以確保試運轉時能正確安全無疑的運作，個別設備工作說明如下：

6.3.1 設備安裝狀態確認

設備安裝狀態包含各個設備是否已確實完成所有安裝工作、完成安全防護措施並完成最終確核，以下個別說明確認方式。

一、安裝完成

安裝完成確認的目的在於確認所有系統設備皆已適當安裝完畢，本指引列出常見應檢查確核表如表 6.3.1-1。系統試運轉時應遵照設備規範操作，並符合污染改善工作規劃，若有未如預期改善成效時應予以修正並重新測試。

表 6.3.1-1 設備符合安裝完成確核表(範例)

檢查表項目		是/否 完成	是/否符合 需求	檢核 日期	說明
井	井規格(深度、大小、材質....等)				
	注藥井或抽水井(監測井)皆已加蓋				
	井及監測點位周圍巡視檢查				
管路系統 設置	管線及相關配件設置				
	管路系統沖洗工作				
	過濾器或濾芯的安裝與清潔				
	閥件設置且可正常操作				
	絕熱帶配置				
	井或管線上配置熱感應器、配置採樣口、監測口、真空表安裝				
	壓力、真空度及液體測漏測試				
泵	安裝隔振裝置				
	外殼與消音器完整度檢查				
	檢查潤滑液是否填充，確保操作運轉的可行性				
	若為皮帶驅動，應有適當的皮帶張力				
	旋轉設備上的保護蓋已就定位				
	確認泵轉動功能是否正常				
	已安裝壓力/溫度表				
	已安裝消音器與隔音設備				
	已安裝/測試管連接				
	已安裝壓力/溫度表				
電氣	泵與密封墊圈完好(無洩漏)				
	進行連續性檢查以確認配線迴路				
	所有保護蓋皆已就位				
	緊急斷電裝置可正常使用				
	斷電器與控制的單機距離在視線範圍之內				
	接地裝置檢查				
	照明功能正常				
	組件與電源供應器的配線無損壞/劣化				

表 6.3.1-1 設備符合安裝完成確核表(範例) (續)

檢查表項目		是/否 完成	是/否符合 需求	檢核 日期	說明
儀 表 與 控 制	控制系統與竣工圖規劃相符				
	已適當標示面板組件				
	控制組件已接管或接線至各個已標示的終端條				
	於終端、接點標示控制配線與配管				
	電子感應器已使用保護套				
	電力已連接至儀表版				
	個別的控制器、警報器、連鎖裝置功能正常				
	儀表與控制系統可正常運作				
	遠程監控系統/ 數據機可正常運作				
貯 槽 與 混 合 系 統	貯槽規格(尺寸、材質…等)				
	貯槽的壓力與流量控制				
	確認混合系統是否正常運作				
	確認貯槽與混合系統是否有二次污染防治措施				
	貯槽閥是否正常				
	貯槽密封是否完好(無洩漏)				
	自來水貯槽自動補水功能是否正常				
輔 助 設 備	現場監測儀器已校正				
	控制面板沖洗系統正常運作 (如有使用)				
	液環流體系統功能正常 (如有需要)				

參考文獻：修改自 USACE 2002

二、安全防護

應檢查所有設備皆已正確放置、密封，盡可能避免於污染改善工作執行期間受損。檢查氧化劑輸送管線是否有洩漏之情形發生，皆應小心做好設備安全防護措施。

三、最終確核

可利用系統的管線和儀表配置圖(piping and instrumentation, P&I)，來檢查所有設備與管線是否依設計安裝，且於完工後繪製竣工圖。設備的保護蓋應放好、所有應上鎖設備是否妥善處理、安全閥及或其他壓力釋放裝置完畢，以及其他場址安全裝置等。

6.3.2 個別設備功能檢查

確認設備安裝完成後，應逐一檢查各項設備的功能是否完好。一般來說，在測試設備估能時應採用製造商的建議程序來檢查，若製造商並未提供程序，則有必要制定出效能測試方法，來滿足設備功能檢查之要求。設備的功能測試並不一定要在場址內完成，當設備因安裝技術限制需在場址外完成組裝後，運到場內者則可於組裝地點進行測試。

6.3.3 系統功能整合性檢查

確認設備安裝以及個別設備功能檢查後，下一步應進行全系統測試，以便測試實際運作前的系統完整性。在整合性系統檢查時，首先開啟供電系統，檢查各配電設備是否正常運轉。應將緊急斷電系統也一併檢查，確保系統功能正常運作，包含手動開關是否正確傳遞訊號、測試控制系統迴路、系統反應邏輯是否正常等。

使用者應根據現場設備配置情況進行檢查，觀察系統安裝期間是否有異常的狀況發生，進行必要的系統修正，所有系統設備的功能檢查，應盡可能避免產生之後啟動的意外發生。

6.4 系統啟動

在系統啟動之前，應確認前述之所有基準點資料蒐集、設備運轉與測試皆已完成。於系統試運轉之啟動目的在於蒐集並評估系統操作的成效，以及確認各項系統設備操作之可行性。以下分別對系統啟動操作之事前工作準備、工作小組任務、疑難排除策略內容。

一、試運轉前準備

首先應確認與檢討所有有關健康安全與緊急應變的程序及問題，避免啟動時的人員安全疑慮。系統啟動前應決定本次測試的設備及參數、各項設備測試時間多長，並事先了解各項設備的使用/測試方法，以確保系統試運轉之結果為可信的。本指引彙整各種系統正式啟動前之相關項

目如表 6.4-1，提供各位使用者參考。

表 6.4-1 現地化學氧化正式啟動檢查表(範例)

檢查項目		是/否 完成	是/否符合 需求	檢核 日期	說明
地下系統	注藥井/點的注入流量量測				
	抽水/氣井的抽水/氣量量測(如有設置)				
	於操作期間地下水溫度量測				
	於操作期間地下水 pH 量測				
	於操作期間地下水水位量測				
	於操作期間地下水污染物濃度量測				
	於操作期間揮發性有機物量測				
	於操作期間氧化劑濃度量測				
	於操作期間氧化副產物量測				
	重金屬濃度量測				
	評估範圍內的監測點污染物含量				
	井場管路系統、閥件與儀器配置正確				
	排水系統是否正常				
泵	自控制機制啟動至停止運作是否正常				
	轉速符合製造商規格				
	測量噪音位準，並注意任何異常震動或噪音				
	確認臭氣產生器是否正常運作				
貯槽與混合系統	確認貯槽有無洩漏				
	確認連接管線有無腐蝕				
	確認氧化劑調配是否正常				
	測量貯槽氧化劑 pH 值				
系統控制	以溫度計、差壓表或其他裝置手動測量受控變數，確認控制器維持在設定點				
	依據規格以及其他系統控制器確認連鎖裝置功能				
	確認控制系統符合操作順序的規定				

參考文獻：修改自 USACE 2002.

二、工作小組任務

系統試運轉的工作小組成員，應根據表 6.4-1 檢查表確認系統可正式啟動，並評估各系統是否符合預期要求。當系統存在未符合需求項目時，應決定由什麼單位負責採取何種行動，並評估需花費多久時間。待確認工作完成後，應再次由工作小組成員進行確核並簽署。

三、疑難排除策略

即便系統已完成模場試驗，在進行系統試運轉的過程中，仍難免出現未如預期的狀況發生。例如，在系統試運轉範圍內的土壤異質性較高，導致測試區域內的氧化劑分布不均，影響半徑未達預期，因土壤特性因素而無法達到原先規劃的效果。在這些情況下，必須再次確認注藥井的規劃，以便佈滿實際目標污染區域。

6.5 資料評估與啟動報告

雖然模場試驗、數值模型模擬等可協助判定污染改善成效，然而仍難以預測實際的氧化作用情況，特別是地下特性分析不足時。因此，透過本章所述之系統試運轉，可進一步瞭解實場整治時，污染物的移除率與所需處理時間及尾氣處理等資訊。為了有效評估系統試運轉的結果，建議繪製污染物濃度（個別井或系統總污染物）與時間的關係（詳圖 6.5-1），藉此可初步評估可能完成污染改善的成效。資訊的參考價值取決於啟動的時間長度與所蒐集的污染物濃度資料多寡而定。

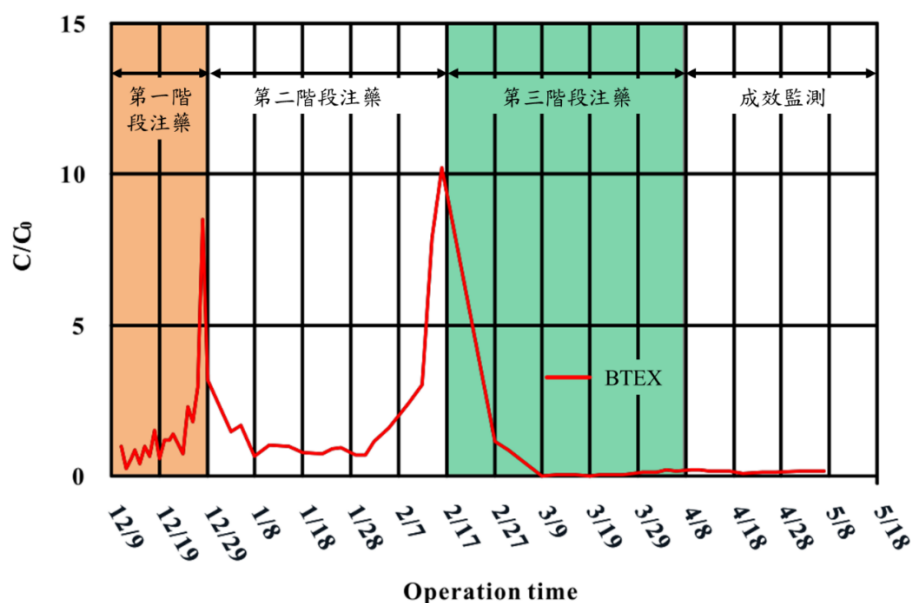


圖 6.5-1 污染物濃度變化 (範例)

第七章 系統操作與維護

在系統操作與維護階段主要分為三大工作項目，本章闡述典型的操作、維護與監測策略(Operation Maintainance and Monitoring, OM&M)，第一項為系統操作功能維護，包含常見的操作問題與因應對策，說明系統操作策略，並說明各項設備的功能維護；第二項為系統操作設備運轉監測，說明在污染改善過程中，監測系統操作相關設備的運作情況，最後是系統修正與優化，欲提升整治成效時，可進行之工作項目，其組織架構圖如圖 7-1 所示，各系統的操作與維護內容應視不同廠商設備調整，並訂定相應之操作手冊。

此外，為了避免因改善作業執行時，而造成人員安全與衛生的危害，將提出工業安全衛生管理計畫。將美國兵工部建議之系統操作與維護的撰寫指引納入本章最後一節，提供給使用者參考。

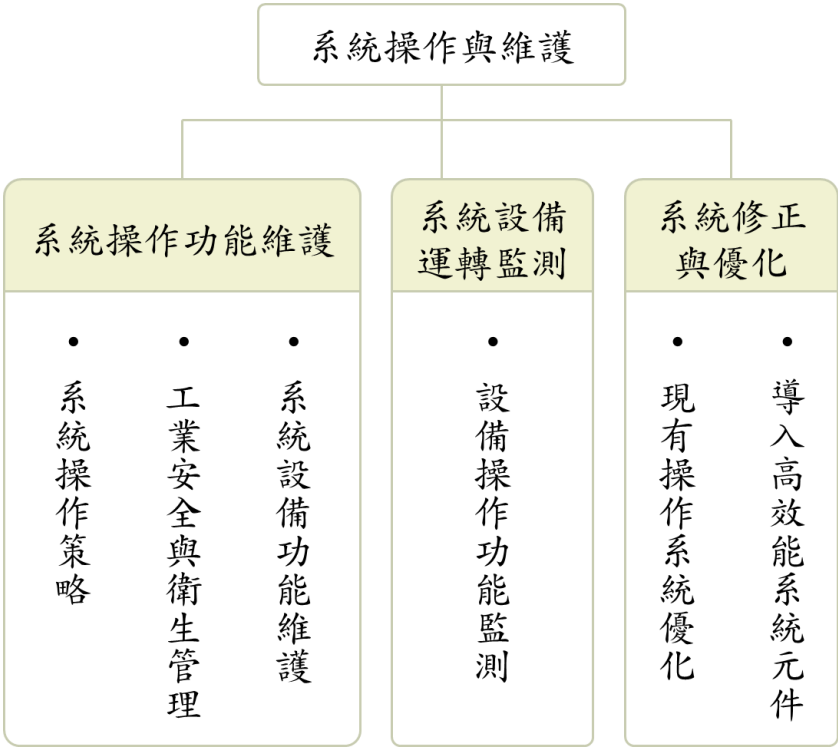


圖 7-1 系統操作與維護組織架構圖

7.1 系統操作功能維護

系統試運轉後污染改善過程中，為了確保污染改善成效，須依原先設計之規劃來進行操作。本節將說明在系統操作時常見的問題與因應對策以及應注意的事項。在污染改善作業時，系統設備有機會毀損或停機的可能性，因此定期維護與保養便是一個重要的工作，跟著改善作業的不同階段，亦會有所調整。為確保系統操作時工作人員的安全，在本節的最後將研擬在場址污染改善作業中，建議之工業安全衛生管理計畫。

7.1.1 操作策略

欲達有效管理的目標，須制定良好的操作策略，以達到預期的污染改善成效的方法，因此將操作人員的管理及資料紀錄與分析管理列為系統操作管理策略的兩大重要部分，以下個別說明兩者的規劃。

一、操作人員管理

操作人員管理須從操作策略開始著手，由於操作策略往往受到專案需求、場址特異性與系統設計三大面向的影響，所以必須考量許多初始設計的原則與假設。為了達到預期改善成效、有效做出系統調整的因應策略及檢查系統故障排除，盡可能操作人員須由原系統設計者參與操作，有效執行系統操作，確保污染改善成效。

二、資料紀錄與分析管理

資料紀錄是用來了解目前系統污染物改善成效的一個重要方法，操作人員必須確實記錄，並藉由資料紀錄進行後續污染改善作為的調整與規劃。資料紀錄的內容可分為：

1. 現場操作資料的紀錄，如壓力、pH、流速、溫度，及其它操作參數的紀錄。
2. 現場採樣資料的紀錄，必須追蹤樣本位置、收集日期與時間、實驗室、試驗方法、分析結果、偵測極限、與相關品管樣本的相關資訊。

若為改善範圍較大的 ISCO 系統，建議採用電腦化資料管理系統，

有效紀錄與了解污染改善情況。在有效系統操作人員與資料紀錄的管理之下，仍可能產生部份因場址特性或地下環境複雜程度差異等原因，衍生操作的困難。因此，本技術指引彙整操作 ISCO 系統的常見問題、原因與因應對策於表 7.1.1-1。

表 7.1.1-1 ISCO 系統的操作問題與因應對策

操作問題	成因	因應對策與建議
僅有部分操作井的污染物濃度下降	<ul style="list-style-type: none"> ■ 土壤滲透性較差 ■ 氧化劑消耗過快 ■ 氧化劑未適當的分散 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 進一步的地下環境調查與分析 ■ 調整氧化劑注入流率 ■ 新增井的數量 ■ 檢查井是否出現阻塞 ■ 更換催化劑/螯合劑 ■ 使用水力破裂法或氣動破裂法
注入井周圍地表冒出氧化劑	<ul style="list-style-type: none"> ■ 井內壓力迅速累積 ■ 土壤滲透性較差 ■ 出現優勢路徑，造成短流現象 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 重新調整氧化劑注入流率 ■ 檢查井是否出現阻塞 ■ 調整氧化劑濃度 ■ 暫時關閉注入作業
操作期間污染物濃度偏低，但關閉系統時，濃度又會升高。	<ul style="list-style-type: none"> ■ 優先流造成氧化劑分布不均、氣流短路循環 ■ 氧化劑注入量不足。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 使用間歇性操作，觀察污染反彈現象，適時搭配使用其他污染改善工法，如 SVE、雙相萃取、脈衝式通氣、現地熱處理 ■ 開挖高濃度污染區域土壤，進行離場處理
達到或接近爆炸水準的非預期性高蒸氣濃度	<ul style="list-style-type: none"> ■ 可能有自由相產物：甲烷或其它揮發性有機物的聚集 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 稀釋進氣流降低氣體濃度 ■ 裝設高階防爆系統，加強工業安全管理，然而，這無法保證 100%安全，只是可以降低危險，使用者應該先移除高濃度自由相、高濃度氣體或稀釋高濃度氣體，而非用防爆裝置來防範爆炸的危害。 ■ 檢查是否有不明的污染來源

7.1.2 設備功能維護

設備於正式啟動後可能會有一些突發狀況或故障發生，所以定期的設備功能保養與維護是使設備使用壽命延長不可少的一部分，為了有效維護設備基本功能，以下將對 ISCO 主要注藥井、抽除系統單元、輸送管線系統、儲槽設備之維護策略進行說明，維護項目彙整如表 7.1.2-1。

表 7.1.2-1 ISCO 設備基本功能維護項目

維護項目	維護策略
注藥井/抽水井	完井作業維護注藥基本功能
抽氣井(若有需要，如 Fenton 試劑)	完井作業維護抽氣基本功能
貯槽(氧化劑、催化劑、混合、配送、自來水、迴流)	定期清洗及檢修，檢查連接之管線配送功能，檢查是否洩漏、腐蝕
抽除系統單元(如有需要)	定期更換、清洗與例行性維修
輸送管線設備	定期監測，特別於管線接合處、墊片、水氣淤積問題
泵浦	定期檢測與例行性維護
維護項目	維護策略
流量計	定期檢查流量計是否故障，流量是否維持設定
液位計	定期檢查液位計，確保液位到達一定值時能正常顯示
儀控設備	定期巡檢各訊號源是否正常

註：使用者應據實際操作情況進行功能維護項目調整

一、注藥井/抽水井

在操作 ISCO 時，可能會因氧化劑與污染物的氧化作用產生沉澱副產物，進而造成注藥井/抽水井井篩阻塞的狀況發生，影響注藥及抽水能力。應定期視情況辦理再次完井工作，並於再次完井後確認注藥井操作成效，及注藥量是否能維持定量注入，提升注藥效率以評估井場操作狀況。

完井的方法可透過以下三種來實施，視現場情況、井篩阻塞與井底淤積行為而定。本指引參考目前常見之再次完井方法說明於後(環保署，

2015)。

(一) 井刷式完井

井刷式完井可用以移除井管及井篩上附著之積垢或生物膜，剝落的積垢或生物膜隨後以氣提或超量抽水方式自井內移除。當抽氣井口徑夠大，可考慮採用支架及起重機，將井刷緩緩垂入井內，自井底向上反覆刷洗數次，直到井篩及井管已刷洗乾淨。實施井刷前應先確認井內無異物阻塞及嚴重淤泥。井內如有異物應先嘗試將其取出，如井底淤積情形嚴重，應先實施氣提。

(二) 氣提式完井

氣提式完井兼具抽水及移除井底淤泥之功效，且注入空氣時也會造成濾料層擾動，有助於移除濾料層中淤積泥砂。將排水與空氣管固定後置入井內，利用空氣壓縮機將空氣注入井中。此時，井底將產生劇烈擾動，挾帶泥砂之污濁井水將自排水管流出。此步驟應重複沖洗至出水無泥砂。

(三) 噴射沖洗完井

噴射沖洗主要利用機械方法對井篩產生反向沖洗水流，擾動濾料層與井周圍含水層後，將淤積泥砂帶回井內並由井頂湧出；噴射沖洗可用於移除因濾料層或井周圍含水層阻塞所造成的正薄壁，以改善井回水能力。

二、抽氣井

抽氣井操作過程，可能會因地下水位抬升，一併抽除地下水的情況發生，此過程可能因生物膜與雜質累積造成抽氣井篩阻塞，影響抽氣效率，因此也需要辦理抽氣井完井工作，其完井方式與前者注藥井之方式相同。

三、貯槽

所有貯槽包含氧化劑貯槽、催化劑貯槽、混合槽、配送槽、自來水貯槽、現場迴流槽等，均需要定期清洗維護，避免管線、槽體破損而洩

漏或是阻塞的現象，應檢查是否有受氧化劑腐蝕管線的現象發生，以防管線破裂，造成人員安全之危害。確認操作過程中運轉情況是否異常，連接處是否完全密封或阻塞等現象，應定期清洗排空。

四、抽除系統單元

土壤氣體抽除系統在使用會造成大量氣體的氧化劑時應予以加裝(如使用 Fenton 試劑時)抽除系統單元。以下說明運作行為，首先鼓風機因抽氣作用產生真空度，再將井場中部飽和層之揮發性污染物抽入井中。經由氣體入口端進入氣液分離桶內，在此處會將抽入的氣體與液體還有少量泥沙進行分離，而分離液會暫存於氣液分離桶內，須加裝液位控制器進行液位監測，當分離液體達一定高度後，則暫停此系統並開始輸送廢水，利用廢水輸送泵將廢水送至廢水處理設施(廢水處理廠、廢水貯槽)。經過氣液分離桶的氣體會隨著管線流經過濾芯，由於濾心將進氣中較大顆粒的粉塵去除，避免了鼓風機的損壞。進入鼓風機後氣體將被推送至氣體出口端，此出口端連結著尾氣處理設備。若有較大的噪音產生，可以加裝消音器來避免影響到周圍民眾生活，抽除系統單元詳細操作維護可參考環保署手冊「土壤氣體抽除整治技術系統設計參考指引」(環保署，2015)。

五、輸送管線設備

井場管線應維持在穩定正壓作為操作現況評估的重要指標，確保管線無洩漏，為現場操作人員巡查之重點工作，一般井場管線系統巡查維護要點如下(環保署，2015)：

(一) 管線接合處

操作人員應定期巡查氣體輸送主管線與分支管系統以及氧化劑配送管線，確認各段管線之氣密性是否良好，並注意法蘭接點、閥件、管線焊道與轉折處，是否有管線破損、氧化劑洩漏或氣體洩漏之情形產生。流量計進出口管線銜接處、密閉式操作井頭接縫處、壓力表與控制閥門裝設處皆是常見之洩漏位置，應加強該處區域管件巡查。

液態的氧化劑洩漏較容易被發現，而檢測氣體洩漏的部分需定期以 Toxic Vapor Analyzer,(TVA)離子偵測器或可燃性氣體偵測器測定管線接點或管件、法蘭銜接處，是否有氣體外洩與異常狀況，避免揮發性有機氣體洩漏及預防工安事件的發生。

(二) 金屬管線接合墊片

金屬管線法蘭墊片或 HDPE 管件接頭 O 型環，可能因長時間使用造成破損或龜裂而導致漏氣，應定期檢修更換相關元件。

(三) 水氣淤積問題

管線末端與相對低點處容易造成水氣淤積之情形，影響氣體輸送與負壓建立，於管線系統設置過程應規劃於管線末端與相對低點處設置排水閥，並定期於巡檢過程排除管線積水，避免影響氣體流量與傳輸效能。

六、泵浦

泵浦為整個輸送作業的核心設備，應定期巡檢確認泵浦狀況是否正常，設備配件有無腐蝕或洩漏，避免造成人員危害。

七、流量計

氧化劑的配送主要是藉由流量計控制，藉由處理目標範圍而調整每口井應注藥的流量，最佳化井場氧化劑有效半徑之設計。應定期巡檢流量計是否符合所設定之流量，確保注藥流量達目標設計量。

八、液位計

當配送槽內之調配氧化劑不足時，液位計會即時反應，而補充道一定液位時，會有提示或藉由電子系統自動關閉補充藥劑，因此，若液位計故障時，可能會造成改善期間內氧化劑並未注入所設計的量，或是滿溢出來造成可能的人員危害。

九、儀控設備

井場較大時通常需要電子化的控制系統，藉由儀器控制氧化劑之配送與調配藥劑以及關閉注藥閥等等之工作，以利工作時程能進行，應定

期巡檢儀控設備，避免自動化設備失效，延宕工作期程或造成現場公安疑慮。

7.1.3 工業安全衛生管理計畫

由於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，並重是在處理設計與操作監測過程可能產生的熱、高溫、大量廢氧氣量、大量可燃性有機污染物蒸氣(In-situ chemical oxidation, 2005 台美講習會)。

本節針對現場作業的應注意事項，彙整各項工作計畫重點，以確保操作人員的作業安全，其中包含液體洩漏偵測、配戴工業安全防護具、進行安全教育訓練等等，各項工作計畫如表 7.1.3-1。由於氧化劑本身具有危害性，本節整理出常見氧化劑對人體或環境造成之危害影響表，如表 7.1.3-2 所示，並彙整出 ISCO 有關勞工安全衛生之潛在危害與應對保護措施，如表 7.1.3-3。本節也設計一工安巡查表單，以確保操作人員安全，範例如表 7.2-3。

表 7.1.3-1 工業安全衛生管理工作重點

管理行動	目的
液體洩漏偵測	避免系統內的氧化劑從裂縫或未確實密閉接合處滲漏進入環境中，應觀察系統內壓力變化。當壓力變化有異常時，應立即巡檢是否有洩漏氧化劑的可能，並停止輸送氧化劑。
設備防爆需求	儀器操作溫度過高，造成現場工作安全疑慮。
工業安全防護設施配戴	利用個人防護器具，過濾或隔絕潛在著化學性、生理性或火災爆炸等傷害。
安全教育訓練	協助場址作業員以安全與有效的方式，操作和保養設備，並提供作業員基本現場工作突發事件緊急應變能力。

註：使用者應據實際操作情況進行功能維護項目及頻率的調整

表 7.1.3-2 氧化劑危害資料參考表

氧化劑	CAS No.	健康危害	環境影響	主要症狀
過氧化氫	7722-84-0	吸入會刺激呼吸道引起皮膚炎鼻喉嚴重刺激及肺水腫，高濃度蒸氣或霧滴會使眼睛發紅、流淚、發炎甚至致盲，做過動物實驗有致癌及引發突變的試驗報告	不具有生物累積性	刺激感、皮膚刺痛及暫時性變白，紅腫，起泡，胃出血，眼疾
過硫酸鈉	7775-27-1	高溫度粉塵及霧滴會刺激鼻、喉及呼吸道，喉嚨緊縮及呼吸吃力。長期暴露會導致嚴重過敏，氣喘、呼吸困難及胸膛緊實	對水中生物具高度毒性	咳嗽、呼吸短促、呼吸困難、皮膚和眼睛刺激性、嘔吐
高錳酸鉀	7722-64-7	高溫度粉塵及霧滴會刺激鼻、喉及呼吸道。甚至可致肺炎或肺積水而致命。稀溶液會刺激眼睛及皮膚，濃溶液具有強烈的腐蝕性。長期暴露會影響中樞神經系統	對水中生物具高度毒性	刺激感、喉頭炎、咳嗽、呼吸急促及困難、浮腫、出血、走路困難、腿部虛弱或抽痙、記憶及判斷會有困難、情緒不穩、說話困難、手臂及腳戰慄、呼吸聲大、脈搏慢、麻痺、血壓低
臭氧	10028-15-6	劇毒，吸入可能致命。可能引起肺部傷害，其影響可能延遲	對水中生物具高度毒性	咳嗽、呼吸短促、胸口緊、呼吸困難、喉嚨乾燥、哮喘、頭痛、噁心、急度疲勞、頭暈、無法入睡、精神不集中、皮膚泛青、支氣管炎、肺炎、嚴重呼吸道刺激、無意識

參考文獻：(1)工研院環安中心-MSDS (2)勞動部化學品全球調和制度 GHS 介紹網站 (3)CHEMINFO 資料庫，CCINFO 光碟，2000-3 (4)RTECS 資料庫，TOMES PLUS 光碟，Vol.45，2000 (5)CHEMINFO 資料庫，CCINFO 光碟，99-2 (6)RTECS 資料庫，TOMES PLUS 光碟，Vol.41，1999 (6)HSDB 資料庫，TOMES PLUS 光碟，Vol.41，1999

表 7.1.3-3 潛在之危害與保護措施

潛在風險	可能遭遇時機	可能暴露風險	保護措施及個人防護設備
物理性風險	某些反應性氧化劑與污染物不相容可能會造成火災、系統過度加壓、環境排放或爆炸	氧化劑與污染物之不相容性	<ul style="list-style-type: none"> • 加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力 • 使用適當的液體輸送設備 • 使用自動警報系統 • 執行適當的化學品貯存與運作程序 • 提供貯存有害化學品的桶槽適當的圍堵設施
	不適當的運作化學品可能會導致系統產生高熱或高壓，並造成不可控制的化學反應、火災或爆炸	化學反應	<ul style="list-style-type: none"> • 加強人員貯存與運作化學品程序訓練與緊急應變能力 • 監測氧化劑注入過程與特定時間點的系統溫度 • 提供緊急沖眼/安全淋浴器
	當操作人員或設備破壞電線或潮濕的區域接觸電力設備可能會造成感電	感電	<ul style="list-style-type: none"> • 加強人員貯存與運作化學品程序訓練與緊急應變能力 • 使用加裝防止感電設備的電力系統 • 相關電器工作應由合格之電器技師負責執行
	當液位計失效時，可能會造成氧化劑滿溢漏出	化學危害	<ul style="list-style-type: none"> • 加入自動控制系統安全設計，如加藥逾時連鎖控制等
化學性風險	<ul style="list-style-type: none"> • 工作人員可能接觸到反應性的化學氧化劑 • 不適當的貯存方式可能會產生衍生危險的化學反應或於貯存區域產生高熱/高壓甚至火災、爆炸 • 工作人員之皮膚與呼吸系統可能與化學氧化劑或其副產品直接接觸 	化學氧化劑之使用、貯存、接觸與相容性	<ul style="list-style-type: none"> • 提供化學品儲槽與管線適當的標示、分隔與防溢裝置 • 建立伙伴制度(buddy system) • 確保工作人員配戴適當的個人防護具 • 加強人員有關運作特定化學品的訓練與緊急應變的能力 • 預先參考物質安全資料表(MSDS)並確認氧化劑的相容性 • 使系統有足夠的通風

參考文獻：USACE, 2003

註：使用者應據實際操作情況進行功能維護項目及頻率的調整

一、液體洩漏偵測

氧化劑運送過程中，可能會因氧化劑腐蝕管線或遭天災、環境造成管線有破損而有洩漏發生。當壓力變化太大時或無法滿足注入設計注藥量時，可能是有洩漏的現象發生，為了避免造成操作人員之安全危害，應停止輸送氧化劑作業，並立即檢查洩漏處予以維修或更換。

主要輸送氧化劑的管線應具有抗氧化性，以防止管線被腐蝕，宜採用不鏽鋼管線作為氧化劑輸送管線的基礎。貯槽區也需定期檢查閥、氧化劑輸入/輸出口與管線連接處是否密合，以及維護槽體基本貯存功能。

二、工業安全防護設施配戴

抽除作業期間，如表 7.1.3-3 所示，可能存在潛在著物理、化學等各種危害或生理性及火災爆炸等傷害。以化學性或生理性傷害，一般透過呼吸、皮膚接觸或其他傳播途徑為例，應可利用個人防護器具加以過濾或隔絕。個人安全防護裝備詳列如表 7.1.3-4；而易燃爆性物質之危害必須藉助防火安全設備如外洩偵測及控制設施、滅火器材、防火(爆)供電系統及絕緣器具等以控制災害之擴大或二次發生。

三、安全教育訓練

應安排正式的操作訓練課程給所有的操作人員，以熟悉各個設備之使用方式與注意事項，除了上述各項設備操作、安全防護措施使用的注意事項外，協助場址作業員以安全與有效的方式，操作和保養設備，並提供作業員基本現場工作突發事件緊急應變能力。訓練應包含室內課程訓練與實際系統操作訓練。

表 7.1.3-4 個人安全防護裝備等級分類

保護等級	個人安全防護裝備	使用時機
A	<ol style="list-style-type: none"> 1. 面罩及自供空氣式人工呼吸器 2. 正壓全密封式化學防護衣及可棄式鞋套 3. 化學防護手套 4. 工作服 5. 具化學防護之長(半)統安全鞋 6. 安全帽 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用於現場有極大可能會遭遇高毒性物質時 2. 對人體呼吸、皮膚與眼睛需作最高程度的防護 3. 需使用完全密閉之化學防護衣(其材質必須與場址內化學物質相容)
B	<ol style="list-style-type: none"> 1. 面罩及自供空氣式人工呼吸器 2. 頭套連身式化學防護衣及可棄式鞋套 3. 化學防護手套 4. 工作服 5. 具化學防護之長(半)統安全鞋 6. 安全帽 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 當高濃度污染物或噴濺物質不影響皮膚時 2. 個人防護裝備對人體呼吸作最高程度的防護，對皮膚作次高級防護 3. 選用於現場空氣含高度蒸氣、氣體或懸浮微粒，但對皮膚不致有害或現場氧氣含量低於 19.5%
C	<ol style="list-style-type: none"> 1. 面式或半面式面罩之空氣濾淨呼吸器 2. 頭套連身式化學防護衣及可棄式鞋套 3. 化學防護手套 4. 工作服 5. 具化學防護之長(半)統安全鞋 6. 安全帽 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 當污染物對皮膚噴濺時接觸時不致產生傷害 2. 濾毒罐已可過濾確定濃度及型態之廢水 3. 污染物濃度未超過立即影響生命之濃度 4. 氧氣含量大於 19.5%
D	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工作服 2. 手套 3. 安全鞋 4. 安全眼鏡或護目鏡 5. 安全帽 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 污染物無危害性 2. 工作處不會噴濺或吸入有害物 3. 不可跨區工作 4. 氧氣含量大於 19.5%

參考文獻：

1. 行政院環境保護署毒災防救管理資訊系統：<http://toxiceric.epa.gov.tw/PublicTell/Default.aspx?p=2>
2. 環檢所毒性化學物質中有機化合物檢測分法-樣品製備法

7.2 系統操作功能監測

在進行實場操作時應進行系統功能的監測，用來檢核操作效率並根據監測結果進行調整，進而改善操作效率與縮短整治期程。應定時現場巡檢並詳實紀錄，本節設計一個現場記錄表單與工安巡查表單範例可參照表 7.2-1 至表 7.2-3。

系統操作過程中各項設備之功能性表現，皆可能會影響整治成效，將常見之監測項目彙整於表 7.2-4，並個別說明如下。

一、氧化劑流量

氧化劑流量數值攸關氧化劑注入量之多寡，應按照原先規劃的氧化劑劑量批次或連續注入，使地下環境污染物能與氧化劑有充分的接觸、混合，進而達成整治成效。在正常未洩漏的環境中，輸送總流量應等同於各別注入井的流量總和。

二、氧化劑 pH 值

pH 值會影響地下環境的金屬，金屬於酸性環境中容易被活化，有遷移的可能性發生，在注入酸的同時也要監測地下環境之 pH 值，避免金屬受到酸的影響而溶出，並影響地下水造成二次污染。部分氧化劑藉由酸當作穩定劑(如鹽酸、硫酸、檸檬酸或磷酸)來保持三價鐵活化劑的溶解度，使得氧化劑可以在地下環境中存在的較持久，與污染物的氧化反應也較好。

需要特別注意的是若含水層中有大量碳酸鹽的情況下，則應該避免添加酸，以免產生大量放熱的行為。

三、土壤溫度

氧化反應時往往會有放熱的情況發生，溫度測量可使用溫度探針或溫度計，或將數值輸出至紀錄儀，以準確判定蒸氣控制系統的操作成效。氧化作用造成持續放熱的區域會使得操作人員暴露於潛在危險之中，應隨時注意土壤溫度，確保人員公共安全。

四、水位

抽水井運作時，應定期監控抽水區域水位，若水位有無法回升情況應降低抽水流率或停止運作，避免地下水抽乾，另外降雨也會對抽水井水位造成影響，應列為考慮因子。

五、氣液分離桶控制器

定期監控氣液分離桶並紀錄蒸氣流所排出的水分體積，利用控制器開關控制液位高度，當液位過高或水量大時可以人工或自動抽水方式排水，並紀錄排出的水量。

六、系統控制盤

控制盤顯示器應能有效顯示氧化劑注入流率、設備操作溫度、操作時數、電壓與電流等資訊，作為操作人員調整與掌控設備狀態之參考，並定期檢查儀表顯示器與作業功能是否正常。

七、廢水排放濃度檢測

氣液分離桶內之廢液或抽水井之抽取液體，須定期採樣分析，若檢測為無污染濃度才可進行排放；若有污染濃度則應先經由廢水處理系統處理，安全無虞之後才能進行排放。

表 7.2-1ISCO 操作紀錄表 (範例)

ISCO 處理工作操作紀錄表							
日期：____年____月____日							
氣候狀況：早班____；中班____；晚班____							
操作紀錄							
	運轉 時數 (hr)	氧化劑 注藥量 (L)	催化劑 注藥量 (L)	自來水 配送量 (L)	混合槽 氧化劑 pH	電壓(V)	電流(A)
早班							
中班							
晚班							
	氧化劑 貯槽水 位(cm)	催化劑 貯槽水 位(cm)	自來水 貯槽水 位(cm)	放流槽 水位 (cm)	液位計 是否正 常	泵浦油 料補充	警示燈 是否正 常運作
早班							
中班							
晚班							
尾氣監測紀錄(ppm)							
	入口端			出口端			
	PID	FID		PID	FID		
中班							
其他紀錄							
交班注意事項							

早班人員：_____ 中班人員：_____ 晚班人員：_____

工 程 師：_____ 計畫主管：_____

表 7.2-2ISCO 巡察紀錄表 (範例)

ISCO 井場巡察紀錄表							
日期：____年____月____日							
氣候狀況：早班____；中班____；晚班____							
操作紀錄							
	流量 (L/hr)	壓力 (psi)	水位 (m)	電導度	pH	溫度 (°C)	溶氧 (mg/L)
早班							
中班							
晚班							
尾氣監測紀錄(ppm)							
	入口端			出口端			
	PID	FID		PID	FID		
中班							
其他紀錄							
交班注意事項							

早班人員：_____ 中班人員：_____ 晚班人員：_____

工 程 師：_____ 計畫主管：_____

表 7.2-3 工安巡察紀錄表 (範例)

工程名稱					
檢查日期		年 月 日至 月 日		檢查人	
工項	檢查項目				檢查結果
一般狀況	注意、警告等安全標誌之設置(含夜間警示燈)是否良好				
	安全圍籬設置(含臨時警示帶、或三角紅旗繩)及維護狀況是否良好				
	安全帽、安全帶等個人防護具佩戴及使用情形(含電桿作業、戴手套、護目鏡、口罩、耳塞等等)				
	作業勞工身心狀況(含精神、體力、平衡感、無喝酒、熬夜、賭博、打鬥、童工、非法外勞等)良好				
電氣設備	電氣設備容量及安全防护(總開關箱管制上鎖)是否良好				
	高壓電危險標示、防護套管及隔絕圍籬防護設施是否良好				
	漏電斷路器、保險絲及自動斷電裝置或自動電擊防止裝置是否良好				
	電動手工具之使用無漏電或電線破損等不良狀況				
料物運儲	物料堆置整齊，合格品、不合格品清楚標示				
	乙炔鋼瓶或危險物、有害物儲存管制(存放於陰涼適當地點)是否良好				
火災防止	防颱措施是否良好(門窗緊閉、圍籬、施工架、模板、物料堆置固定、清除水溝淤泥)				
	易引起火災或爆炸危險之物品及場所嚴禁使用明火或吸煙				
	滅火器有效期限及設置位置、數量(含明顯標示)是否良好				
	電氣火災的預防(含靜電)				
工作場所	行走通道或工作地面是否良好(無障礙物、滑溜、積水、潮溼)				
	地下室、樓電梯等等空間之採光照明設備是否良好				
	通風設備及數量充足，換氣良好				
	定期清除雜物及做必要之消毒，無蟲蟻、蝨蚤、鼠疫等等傳染疾病				
說明		經檢查合格者打「○」，當日無此項目者打「／」，不合規定者在檢查結果欄內劃「×」並在安衛環保日誌中詳註及擬具改善建議呈核。			
勞安衛管理人員		工地負責人(工地主任)		計畫主管	

表 7.2-3 工安巡察紀錄表 (範例)(續)

工程名稱					
檢查日期		年 月 日至 月 日		檢查人	
工項	檢查項目				檢查結果
開挖及建築物拆除	露天開挖之安全設施(圍籬、警告標誌、防護欄杆等等)是否良好				
	水平支撐、擋土設施及預防坍塌設施是否良好				
	鄰近建築物或公共設施設備(含地下地上管線、瓦斯、自來水、電力、電信等等)是否良好				
	積水狀況之檢查處理				
	施工機械陷落、翻倒之預防是否良好				
	樓梯、階梯等上下設備之設置與檢查是否良好				
	人行步道安全走廊等防止飛落設施是否良好				
	警告標示之設置是否良好				
衛生設施	廁所、飲水、盥洗設備是否定時清洗，保持潔淨				
	垃圾分類是否良好，有效實施資源回收，減少垃圾量				
	作業環境之有害氣體濃度測定是否合格				
	環境整潔(含施工所、道路、大門、走道、材料堆置及垃圾場管理等等)工作是否良好				
污染防制	施工機械設備是否上潤滑油及隔消音設備以減低噪音，不致影響附近鄰居安寧				
	施工過程所產生之振動不致造成鄰房損傷、不適及災害				
	廢棄土(物)之運棄是否良好(防飛散、灰塵設施、合格棄置場及合法廠家)				
	施工廢水經過有效沉澱設備，不置污染環境水質(水溝蓋加裝麵粉帶等濾淨設施)				
	杜絕塵土飛揚、清洗道路及進出車輛輪胎、空氣污染				
	車輛進出工地有專人進行交通指揮，進行疏通管制、維護行人安全				
說明		經檢查合格者打「○」. 當日無此項目者打「／」. 不合規定者在檢查結果欄內劃「×」並在安衛環保日誌中詳註及擬具改善建議呈核。			
勞安衛管理人員		工地負責人(工地主任)		計畫主管	

表 7.2-4ISCO 系統功能監測表

項次	監測項目	監測目的
1	氧化劑流量	確保預設體積之氧化劑輸送至待整治區
2	氧化劑 pH 值	氧化劑 pH 會影響氧化時的反應速率
3	土壤溫度	降低相對濕度變化，而影響活性碳移除效率
4	水位	避免抽除過多地下水
5	氣液分離桶液位(如有需要)	紀錄液位變化，確認桶內淤積狀況
6	系統控制盤	隨時掌握系統設備狀態
7	廢水排放濃度	避免二次污染

註：使用者應據實際所需進行監測項目調整

7.3 系統修正與優化

系統修正與優化主要目的是為了使改善作業更符合經濟效益、降低成本，因此完成系統操作後可以斟酌是否進行修正與優化作業。美國空軍工程與環境中心 (Air Force Center for Engineering and the Environment, AFCEE) 建議每年至少執行一次的整治過程優化 (Remediation process optimization, RPO)，評估可達成的優化程度。根據整治系統的複雜度，評估/優化小組應包含水文地質學家、工程師、化學專家、風險評估者與監管專家以完成評估。除了增加整治速率外，優化亦可節省成本，建議可從現有操作系統優化，及導入高效能系統元件，個別說明如下。

一、現有操作系統優化

優化應以不變原訂系統設備設計的條件下，進行整體操作的優化，透過優化過程，提升污染物的移除率，並使操作成本降到最低，也縮短改善作業的時間。以下列舉現有操作系統的評估方式與優化對策說明。

(一)定義操作成本熱點

不論使用何種整治技術，皆須符合土壤或地下水的管制標準始得解除列管。基於該條件下，評估並檢討達到欲達到該標準所需之整治期程，再推估所耗費的成本。

一般而言，現有整治系統耗費最多成本的其中一項就是監測工

作。應評估監測計畫是否可能降低監測成本，或以相同成本取得更好的數據。重點在於應強調取得系統效能數據，例如能以相對低廉的價格從個別井內獲得流速與濃度，而且非常有助於維繫系統的優化(環保署，2015)。

(二) 評估氧化劑的需求

在處理污染物時，應定期採樣分析污染物濃度，若污染物濃度低於一定值時，此時可以考慮停止注入氧化劑，並配合其他整治方法，將少數的污染物去除，較常配合的方法如生物整治法與土壤氣體抽除法，當污染物濃度不高時注入大量的氧化劑，反而會耗費龐大的整治成本。

二、導入高效能系統元件

在評估現有系統運作狀況後，應重新研擬系統設計，藉由導入高效能系統原件來提升整治成效或降低成本為目標。在評估系統元件後，研擬是否有提高效能之可能，例如改變或新增系統元件或引進新穎技術。在評估系統時也應一併注意污染物情況，且蒐集當污染情況不同時對當前整治期間影響的資訊，導入高效能系統元件如下所示：

(一) 增添或更換更合適之螯合劑或催化劑

(二) 使用電子化系統控制整個氧化劑調配、輸送與注藥作業

7.4 O&M 撰寫指引

操作與維護報告說明應針對 ISCO 系統中可能進行的每一項工作詳細說明並製作書面，協助不熟悉場址的技術人員遵循指示。其內容應涵蓋系統安裝、試運轉、與啟動時經常需要調整與維護的設備。因此，以下修改自美國工兵部建議之系統操作與維護報告撰寫指引。

一、 簡介

(一) 撰寫目的

(二) 整治目標

(三) 設施說明

(四) 專案組織

(五) 紀錄

二、系統元件的說明 (包含竣工圖)

(一) 井場配置與施工細節

(二) 系統管線和儀表安裝

(三) 氧化劑輸送、配置系統

(四) 蒸氣、水處理系統

(五) 輔助設備

(六) 控制元件

三、系統 O&M

(一) 啟動

(二) 例行性操作程序

(三) 設備保養與維修

(四) 設備使用調整建議

四、應變計畫

(一) 機械風險

(二) 系統設計調整

(三) 啟動矯正措施的標準

五、系統保養

(一) 週/月/季檢查 (包含紀錄表)

(二) 例行保養程序 (包含紀錄表)

(三) 耗材與備品庫存

六、 監測、取樣、分析與報表文件

(一) 整治目的

(二) 排放限制

(三) 取樣與分析時程

(四) 報表

(五) 品保/品管

附錄 A—衛生與安全計畫

附錄 B—標準作業程序(空氣抽樣、水抽樣、水位測量)

第八章 整治效能評估

現地化學氧化法之目標在於將環境中污染物濃度降至一定濃度以下，其整治效能可由監測不同數據進行評估，包含監測的背景值、氧化劑輸送效率、污染物濃度等，本章節將說明如何進行此類參數的監測，以評估整治效能，並說明在污染改善後，如何持續執行監測作業避免污染物反彈效應產生所造成的問題。

8.1 評估策略

整治效能評估執行前，需先確立整治目標，常見的整治目標如下：

- 一、將污染物濃度降至管制標準以下。
- 二、將污染物濃度減少一定的百分比。
- 三、將污染物濃度降至可以監測式自然衰解的範圍。

為確認場址污染物濃度的變化以評估整治是否有成效，必須持續執行相關參數之監測工作，以評估整治效能與污染改善情形，再進行指標項目監測與採樣分析過程中，須注意以下事項：

一、全程監測與紀錄

整治效能評估應隨系統執行過程中不間斷地維持例行性監測並詳實記錄各項參數，不可於整治工作後期才開始執行監測工作。每次取樣結果與分析的數據結果皆需蒐集彙整並建立場址操作資料庫，以利定期監測並確保系統維持正常之預期方式進行污染改善。

二、符合品保品管標準

現場採樣工作、實驗室分析工作等皆應參考環檢所網頁上公告之標準方法，確保其作業符合品保品管標準流程，項目如器具清洗、空白樣本製作、儀器校正、標準品配置等。避免因為取樣或分析過程的缺失，產生不可靠的整治效能評估結果。

8.2 評估方式

評估整治成效前，須制訂一個評估成效的監測計畫，此監測計畫須依據整治執行前的調查結果進行調整，並隨著整治工作與監測的執行過程，持續蒐集數據的同時，滾動式修正監測計畫。因此必須適當的調整監測參數、位置、頻率與監測時間等，以獲得所需數據。由於 ISCO 於地下的反應速度快且持續時間短，因此靈活的修正監測計畫可有效的評估 ISCO 的處理效率。

8.2.1 監測位置選定

評估整治成效的採樣目標包含針對 ISCO 整治區域的地下水，若污染區域存在純相的污染物時，也須採集含有純相污染物的土壤進行分析。採樣點位的數量與設置位置取決於所制定的整治目標以及監管需求所制定，且須設定一套監測系統，以確實執行整治性能監測以及運行監測等工作，如在目標整治區域內及其周圍設置足夠數量的監測井，以確認氧化劑注入位置與預測氧化劑的最大影響半徑周邊的污染處理效率。

一般而言，氧化劑注入點不適合用於監測 ISCO 的處理性能，原因為高濃度的氧化劑注入時目標污染物的濃度會低於其他位置，並非代表實際濃度，因此僅能用於例行性的監測(如確認氧化劑的持久性與降解效率)。但於整治後期停止注入氧化劑，水文地質條件重新平衡後，則可採用氧化劑注入井的地下水數據。

8.2.2 監測項目與頻率

整治效能評估的監測參數選擇取則於 ISCO 所使用的氧化劑或所建立的整治目標來決定，表 8.2.2-1 說明了使用過氧化氫、過錳酸鉀或過錳酸鈉、過硫酸鈉與臭氧等氧化劑執行 ISCO 整治後效能評估所需的檢測項目與建議頻率，其間測頻率皆為建議值，實際監測頻率需依照場址特性、整治目標等進行調整。

表 8.2.2-1 ISCO 整治效能評估檢測項目與建議頻率

檢測項目	過氧化氫	過錳酸鉀或過錳酸鈉	過硫酸鈉	臭氧	建議監測頻率 ^a
地下水位	FI	FI	FI	FI	定期監測
溫度	FI	FI	FI	FI	定期監測
水色	V	V, DPT	-	-	定期監測
pH 值	FI, FK	FI, FK	FI, FK	FI, FK	每周至每月一次
溶氧	FI, FK	-	-	FI, FK	每周至每月一次
氧化還原電位	FI	FI	FI	FI	每周至每月一次
導電度	-	DPT, FI	DPT, FI	-	每周至每月一次
鹼度	L, FK	-	-	L, FK	每周至每月一次
氧化劑	FK	FS, V, FK	FK	FI, FK	每周至每月一次
硫酸鹽	-	-	L, FK	-	每周至每月一次
錳	-	L, FK	-	-	第一季每月一次
氯化物	L, FI, FK	L, FI, FK	L, FI, FK	L, FI, FK	每月及(或)整治後成效監測
目標污染物(地下水)	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	每月及(或)整治後成效監測
目標污染物(含水層土壤，及滲流區氣體)	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	DPT, L, FI, FK	ISCO 執行後，氧化劑消耗後的任何時間
場址內特定的氧化還原敏感金屬	L, FK	L, FK	L, FK	L, FK	整治效能監測完成後
自然衰解的地球化學指標(如硝酸鹽、CO ₂) ^b	L, FK	L, FK	L, FK	L, FK	整治效能監測完成後
生物指標(如生物質、DNA) ^b	L	L	L	L	整治效能監測完成後

附註：

DPT：直接貫入式感測器(如 MIP)

FI：現場儀器(如儀表、溫度計)

FK：現場快篩 kit (如呈色劑、濁度劑、檢知管等)

FS：現場分光光度計

L：實驗室分析

V：目測

^a 實際監測頻率應根據執行地點與氧化劑具體情況確定，或是可作為監管要求的一部分(如延長監測時間以判斷整治後地下水平衡情況)。

^b 適用於利用生物降解的場址

參考文獻：Siegrist et al., 2011

8.2.3 採樣方法

整治成效評估的驗證項目，可以現場篩測或實驗室分析方式執行，於表 8.2.2-1 已大致呈現各項參數的監測方式，本小節將說明整治目標區域的地下水採樣方法及策略。

地下水採樣佈點時，除了以整治目標的高污染潛勢區為主要規畫地點外，另外也需考慮地下水流向，於整治區域下游區域佈點；在廠址內進行至少三口以上簡易井之地下水採樣，此簡易井之分布以整治井為中心呈三角形為原則。監測井設置可以標準監測井為主，考量成本因素可輔以簡易井。地下水監測井設置作業，須依據「地下水水質監測井設置作業原則(環署水字第 1020112290 號令)」相關規定執行；地下水採樣方法須依照環保署公告之「監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)」之相關規範執行。

8.2.4 監測頻率與時間

處理效能的監測頻率取決於氧化劑的作用時間與地下水重新平衡的時間、水文地質特性與 ISCO 產生的副產物(如氧化還原敏感金屬)。由於 ISCO 的反應速率快且積極，只需要有足夠的時間能使地下水條件達到再平衡，ISCO 的影響大多時候可透過對於監測地點的單次取樣分析即可完成。然而，若需評估整治後污染物濃度的趨勢或整治長期的影響，如濃度反彈、二次污染、水文地質影響、或 ISCO 後的環境微生物活性等，長期監測是有其效用的。

在停止注入氧化劑不久後，須持續量測現場參數(包含 pH 值、導電度、溶氧、氧化還原電位等)，以及氧化劑的濃度，以確認含水層中氧化劑的遷移以及地球化學的變化。然而，對於污染物濃度變化的監測，最好在氧化劑已完全消耗後，且地下水已重新達到平衡後進行監測。

評估整治效果監測時間的方式為進行監測，直到測得參數穩定於基線監測基線呈現的可變性範圍內，圖 8.2.4-1 即顯示上述監測方法於監測現場地下水中三氯乙烯的變化的應用，此場址於執行整治前三氯乙烯濃度基線範圍約為 1,700 至 20,000 $\mu\text{g/L}$ ，在利用過錳酸鹽執行 ISCO 整治時，氧化劑作用的情形下，三氯乙烯濃度低於 10 $\mu\text{g/L}$ ，當過錳酸鹽反應完成後，三氯乙烯

濃度在 16 個月內回升至 300 至 1,700 $\mu\text{g/L}$ ，此期間顯示污染濃度的變化情形與整治前的觀察類似，因此，ISCO 整治後 16 個月的持續監測已經足以證明地下水三氯乙烯已達到再平衡並且已能夠停止效能監測。

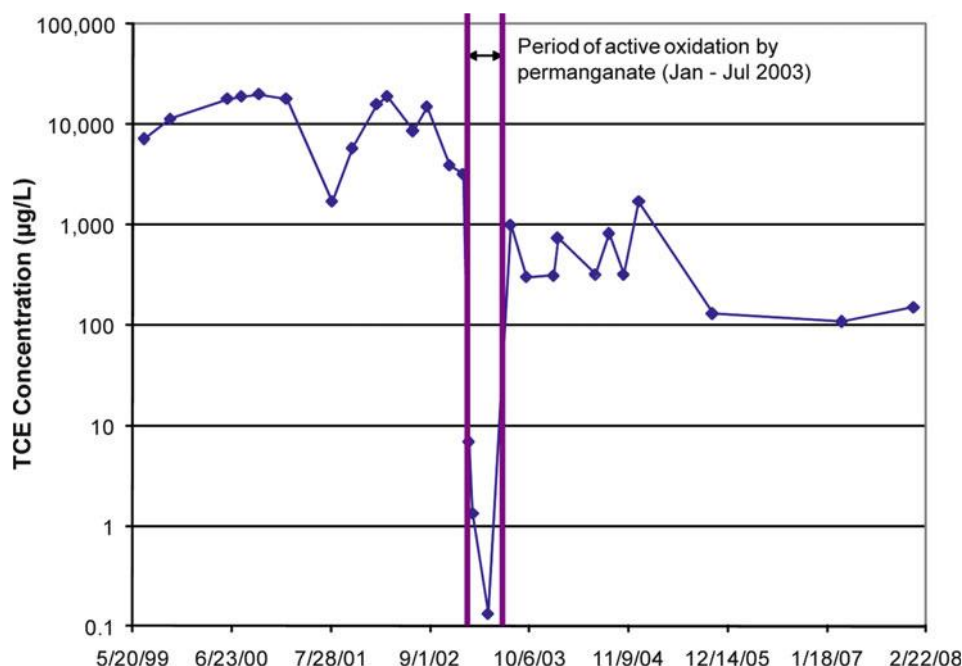


圖 8.2.4-1 三氯乙烯於整治前、整治中、整治後之濃度變化

上述方法中，不同場址的整治效能監測時間因地點而異，建議可針對不同場址建立整治成效監測指引，此類指引的內容可依據模場試驗、或是過去曾於相同場址中執行的整治工作所獲得的相關參數為依據，建立相關數學模式後進行內容的撰寫。

但考慮實際的情況，對於某些 ISCO 整治計畫，須建立一個 ISCO 處理後進行成效監測的固定時間，原因為在某些地點的地下水所需的平衡時間過長所造成，建議各階段皆擬訂監測頻率，有效掌握藥劑的影響情形，如 8.2.4-1 之改善過程各階段監測頻率規劃。

表 8.2.4-1 改善過程各階段監測頻率說明

No.	改善階段	監測目的	監測頻率建議
1	注藥後	監測藥劑影響範圍與程 效	建議投藥後針對鄰近監測 井，投藥後每隔 1 周進行以 次監測，掌握污染濃度變動
2	濃度回升階 段	監測污染濃度回升狀況 與掌握濃度回升之高值	自注藥後監測濃度下降後， 啟動回升階段監測工作，建 議 1-2 周執行乙次，至少執 行至濃度趨於平穩
3	改善完成監 測	透過密集監測掌握污染 改善成效，確認污染濃度 下降的狀況	執行至少 6-8 個月，1-2 月執 行一次
4	解列監測	掌握場址改善後污染物 濃度是否殘留，是否因長 時間而有濃度回升問題	執行至少 1-2 年，每季執行 一次

參考文獻：統整國內外場址常見污染監測規劃

大部分的國家法規皆有規定在整治系統關閉前須進行整治後監測的最短時間，可用於協助選擇 ISCO 整治後的監測時間。美國州際技術與管理委員會(Interstate Technology & Regulatory Council, ITRC)規定於現地處理完成後須至少監測 1 年，以確保污染物濃度無反彈現象，確認污染整治的效能，並評估含水層與水相的污染物是否已達到所規劃的氧化量與吸收量。

ISCO 處理效能監測計畫的設計應包含現場可能遭遇的潛在動態條件，最常見的例子為地下水流速。在地下水重新平衡後，上游的地下水會快速回到目標整治區域中，若上游地下水中污染物濃度相對較低，則可能不影響性能評估的結果，但上游地下水中若含有高濃度目標污染物，目標整治區域內的含水層土壤及地下水就可能有二次污染的風險。在這種情況下，必須先確認進入目標整治區域的地下水流量與水質，並建立一個時間限制，若超過這個時間限制，則目標整治區域的監測數據可能會因為污染物的進入而產生誤差。

8.3 評估結果分析

整治效果監測的最終目標為蒐集確認 ISCO 整治成效的數據，本小節將說明為達到此目標所需執行的各項工作與需考慮的重點。

8.3.1 含水層平衡評估

大多數的 ISCO 的注入方法會透過物理與化學反應影響地下水含水層的條件，如鑿井、地下水採樣、注入藥劑以及氧化後殘留的層積物(如氧化錳)皆有可能造成物理性的干擾；而化學干擾主要由氧化反應、氧化劑影響 pH 值、添加介面活性劑或氧化還原反應所造成。初步的數據評估，應確認地下水平衡的情形(如地下水位回升)，在地下水達到平衡後，再考慮化學平衡的情況。一般而言，化學穩定的過程是由含水層土壤中的地下水通量與緩慢的化學分配所造成，因此化學平衡所耗費的時間較地下水平衡更長。

藉由監測水位、水質參數(如 pH 值、DO、ORP 與溫度)以及示蹤劑可用於理解地下水置換與稀釋的影響，可添加於氧化劑溶劑中的示蹤劑包含鈉/鉀或其他的添加劑(如溴化物)，可用於評估稀釋效應與地下水平衡。所監測的數據應與背景值進行比較，以確認氧化反應後的再平衡，當目標整治區域內測量值與背景監測的數值相似時，可說明地下水環境已達到重新平衡，因為在一般情況下，目標整治區域的地球化學數值最終會回復至背景值。而在其他的區域，ISCO 的影響可能需要更長的時間來達到平衡，在這些反應較慢的地點中，ISCO 的影響可能是永久性的，因此須規劃其他確認平衡終點的替代方案。

8.3.2 污染物濃度反彈與再污染

整治效能評估的一個常見的問題是在目標整治區域中，溶解的污染物濃度有反彈的可能性，原因在於殘留的純相污染物溶解或來自低滲透層中未與氧化劑接觸的污染物的反向擴散所導致。依據過去經驗，ISCO 的整治幾乎皆會有污染濃度反彈的情形，因此在制定整治成效監測計畫時就需考慮污染物濃度反彈的可能性。

一般而言，在 ISCO 的整治過程中，會使目標整治區域內的污染物質大

量的減少，此變化應為永久性的，因為此類化學反應為不可逆的。然而，過去的經驗表明，水中的污染物濃度在執行 ISCO 後會快速地顯著下降，但會隨著時間濃度再次上升，而此現象即被稱為反彈(Rebound)。其發生原因主要可分為以下二種：

- 一、當來自目標整治區域內部的污染物重新分配至未處理的地下水中，即會產生反彈現象。
- 二、由於氧化劑分布不均或是氧化劑添加量不足，氧化劑無法完全與污染物進行反應，因此造成反彈。

再污染則是指目標整治區域外的污染物向內遷移，重新污染已整治完成之區域。雖然反彈與再污染所造成的結果相同，但兩者的成因並不同。再污染的發生，可能說明 ISCO 的目標整治區域位於污染羽中，或是在目標整治區域周邊有未發現的污染團。

無論如何，反彈的評估程序皆在 ISCO 執行後進行評估，並確認含水層是否已達到平衡狀態。地下水的再平衡狀態可由模式模擬的方式來進行評估，但此類方法目前尚處於研究階段，並未完全試用於實際場址的情況。目前常用的方式為收集多次整治後的地下水數據進行評估，依據過去經驗，在三次的採樣中，現場水質參數與目標污染物的變化若小於 10%，則可說明地下水已達到再平衡(USEPA, 1996)。此外，在某些場址，也可量測場址水質參數，當測得的水質參數位於背景值的 95%信賴區間內時，也可將其定義為再平衡。

8.3.3 場址條件變化

在 ISCO 執行的過程中或監測及間若地下環境發生變化，則數據評估則會變得複雜。可能導致地下環境發生變化的活動如降雨、抽水、水管洩漏或建設的設置或拆除工作等，此類事件均會導致目標整治區域內的環境產生巨大的影響。因此，若場址條件發生重大變化，則可能需要蒐集額外的相關數據，或重新評估相關數據建立新的基準。

8.3.4 統計方法

多種統計方法可用於數據評估，通常運用於下列具有數據解釋相關需求的場址中：

- 一、於大型、多層的場址，以及目標整治區域複雜的場址大型數據收集。
- 二、地下環境內所產生的平均化學濃度與信賴界線。
- 三、測試目標污染物濃度變化的統計顯著性。
- 四、進行時間序列濃度測量的趨勢分析，以評估再平衡與處理效率。
- 五、估計污染物質量與質量流的減少。

地理空間技術如克利金法為一個可用於估算整治前與整治後目標污染物的濃度、地下水質量通量等複雜數值。地理空間模型設置必須能夠代表目標整治區域的特性，且必須設置適合的邊界條件以限制統計分析，對於水文地質較複雜的區域而言，這可能是項複雜的工作。如有必要，必須建立多個模型以保持現場條件，模型建立的各項參數也需仔細審視，以確保其適用性。

需指出的是，在選擇與應用統計方法前，決策者之間的共識需慎重考慮，因為在 ISCO 的整治目標，在目標整治區域內的每個點地下水監測濃度皆達到整治目標濃度，在這種情況下，監測結果與整治目標需進行比較，以確認整治成效。在其他情況下，現地整治工作通常無法在整個目標整治區域具有相同效果，因此利用統計方法可將整治成效與整治目標進行比較。但需要注意的是，必須使用統計上有效的數據進行分析，這說明監測計畫需考慮後續統計數據的評估方法，樣本必須在足夠的時間蒐集足夠數量的樣本以進行後續評估工作。但這件事對於成本有限的場址而言，通常較為困難，因此可考慮一些替代方案，如分析含水層固體樣本的費用，可改為分析地下水樣本，以減少採樣與分析成本。

8.4 系統關閉

經整治效能評估後，確認場址內之污染移除已完成，可低於地下水管制標準，或是以達到預期目標，即可進行系統關閉作業。然而，為了避免有殘餘污染再釋出，應研擬長期監測計畫，並隨時注意是否有反彈效應發生，導致污染物濃度回升現象。為避免污染物反彈效應產生，應針對目標移除污染物濃度持續監測，且須留意採樣與分析的方式，皆需符合品保品管規範。

第九章 綠色及永續導向型評估

綠色及永續導向型整治 (Green and sustainable remediation, GSR) 為「於污染場址整治工作任一階段，採行兼顧環境、社會公義與經濟效益的技術、工法、策略或管理方式，達到減少整體環境足跡與環境衝擊、符合社會共同利益、降低經濟負面衝擊的目標，來確保土壤及地下水資源永續性利用」。

綠色及永續導向型整治須系統性檢視污染場址管理的所有階段，圖 9-1 為我國執行 GSR 之架構圖。若以污染場址的生命週期檢視之，一個場址的管理可分為場址調查、污染改善方案技術選取與規劃設計、污染改善系統設備建置、污染改善系統操作及維護、定期監測至最終解除列管，恢復土地可利用性等階段。綠色及永續導向型整治概念的應用並不限於特定場址生命週期階段、特定一種整治技術或特定污染類型場址，然在不同時間點應用 GSR 概念可達成的目標則有所不同。

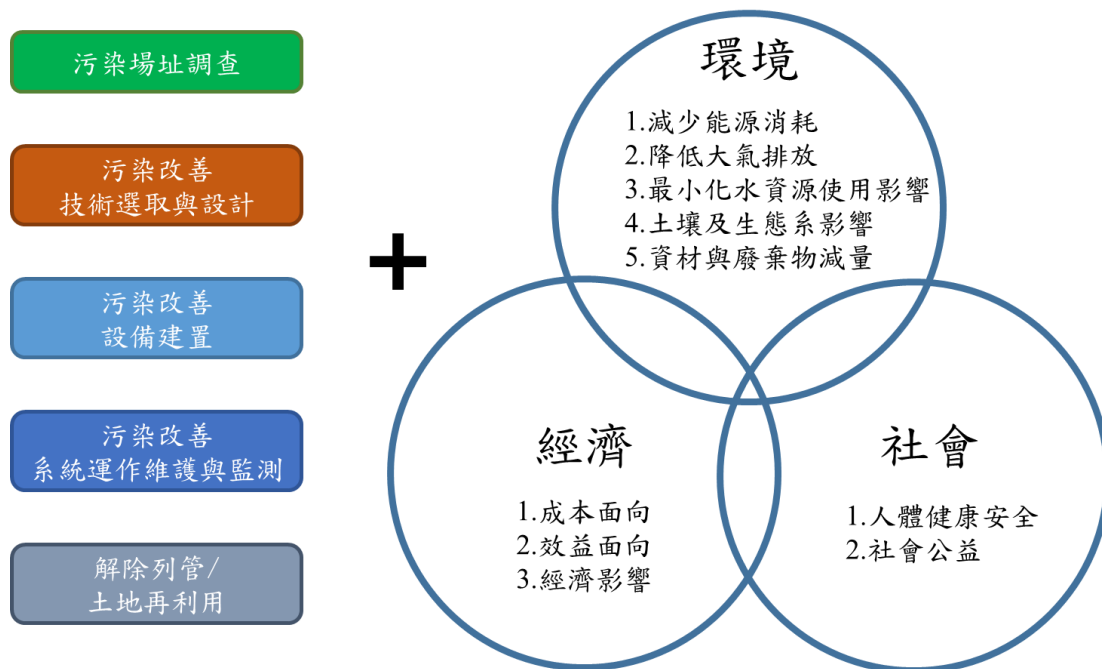


圖 9-1 綠色及永續導向型整治架構圖

在污染改善計畫書核定前，GSR 評估目標為考量技術可行性、整治目標、期程、成本與未來土地利用規劃等因子進行方案初步篩選後，再比較可行方案之環境、經濟與社會面影響，透過污染改善方案決策支援系統，藉由不同利害關係人的參與，選擇各利害相關人皆可接受之方案，後對於選定之整治技術，再行擬定可行之最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs) 於後續污染改善工作執行時施做。

由於 GSR 所評估之面向甚廣，故將需考量的因子依環境面、經濟面與社會面訂定核心元素，我國 GSR 以環境面而言，包含「減少能源消耗」、「降低大氣排放」、「最小化水資源使用影響」、「資材與廢棄物減量」、「土壤及生態系影響」等五大核心元素；在社會面則為「人體健康與安全」及「社會公義」兩大核心元素，在經濟面則包含「成本效益項目」與「經濟影響」。每項核心元素下又可細分為數個原則。以環境面「減少能源消耗」核心元素為例，其原則之下又包含「採行節能措施」、「使用再生能源」與「提高能源使用效率」等三項原則。我國土壤及地下水整治活動應考量之核心元素與原則，整理如表 9-1，所有場址的評估內容與評估指標都包含於表 9-1 中的核心元素與原則之下。

行政院環境保護署於民國 105 年建立「綠色及永續導向型整治推廣平台」(網址：<http://sgw.epa.gov.tw/GreenRemediation/>)，介面如圖 9-2 所示，即為一本土化之 GSR 評估工具，內容包含環境足跡計算工具、最佳管理措施查核列表、經濟影響分析工具、居民風險評估工具等。此工具可分析整治活動在環境面、經濟面與社會面三個不同面向，本章節將說明使用此系統進行整治工法 GSR 評估的方法。

表 9-1 GSR 評估核心元素與原則

面向	核心元素	原則
環境面	減少能源消耗	採行節能措施
		使用再生能源
		提高能源使用效率
	降低大氣排放	減少空氣污染物排放(NO _x 、SO _x 、PM ₁₀)
		降低溫室氣體排放
		防止關切污染物大氣排放或逸散
	最小化水資源使用 影響	減少水資源消耗與廢水產生
		廢水回收再利用
		防止對地表及地下水體造成衝擊
	資材與廢棄物減量	減少資材或原料消耗
減少廢棄物產生		
盡可能廢棄物回收再利用		
土壤及生態系影響	減低對土壤及生態環境衝擊，減少生態風險	
	保存生物多樣性	
社會面	人體健康及安全	整治前後人體健康風險
		整治過程中人體健康風險(包含整治工程人員與大眾)
		整治施工過程勞工意外風險
		避免產生二次污染
		阻絕曝露途徑，避免居民與整治人員接觸
	社會公義	利害關係人參與
		資訊公開
		考慮整治活動對附近居民影響
		保護並保留文化資產
經濟面	成本效益項目	提升專案財務成本投入效率
		增加整治行動對土地價值回復之正面效果
	經濟影響	極大化專案誘發之總體工作機會增加
		極大化專案誘發之總體產業產出增加效果
		極大化專案誘發之附加價值增加效果



圖 9-2 綠色及永續導向行整治推廣平台

9.1 方案決策支援系統

GSR 方案決策系統可分為(1)決定方案比較時應考量的評估準則、(2)給定評估準則權重、(3)針對不同方案各面向評分及(4)評分結果與標準化四個步驟。第一為訂定評估指標，根據環境、經濟、社會三面向中之評估原則，研擬可區別不同方案間永續性之指標，如表 9.1-1。第二為定義評估指標權重，針對該決策系統中的指標進行重要程度評分，建立各評估指標 1~5 分之重要程度評分表。需要給定指標權重乃因不同利害關係人對於指標之重要程度看法不同，例如溫室氣體排放量與水資源使用量的重要程度對於不同利害關係人而言可能不同。第三為判定評估指標得分，在確認所有指標之相對重要程度後，則需建構一污染改善方案評分系統，提供專家對各項評估指標在不同方案間之永續性表現進行評分。

表 9.1-1 GSR 污染改善方案決策支援系統評估指標

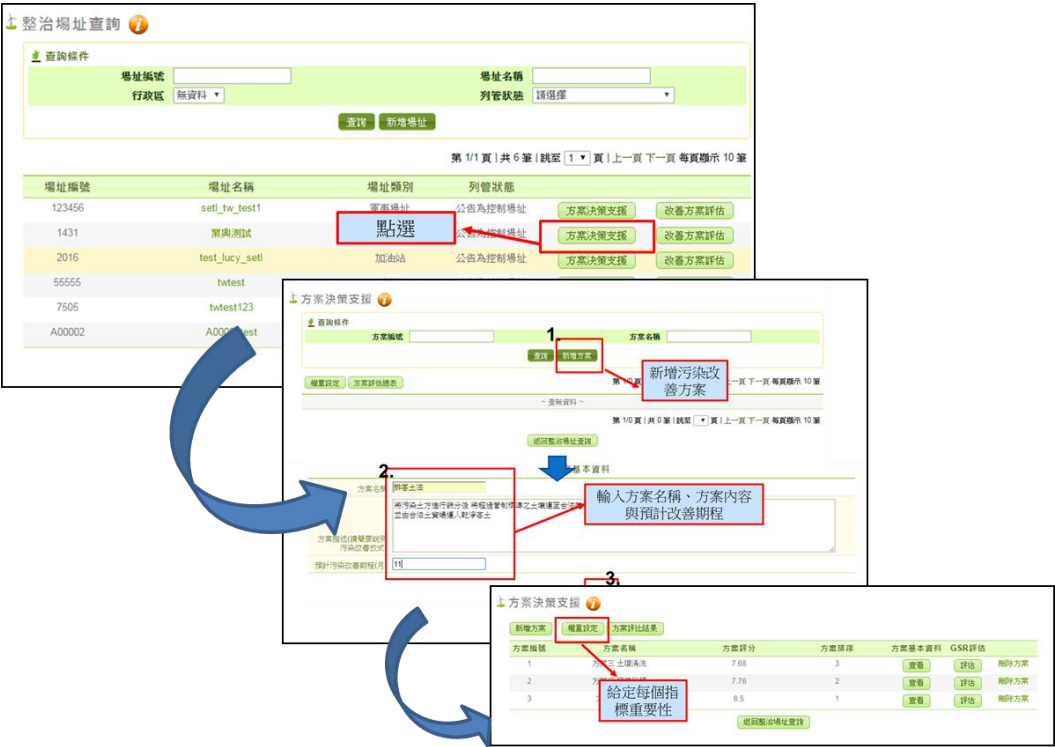
面向	核心項目	原則	評估指標	定量/定性
環境面	減少能源消耗	採行節能措施	能源使用量	定量 (環境足跡工具)
	降低大氣排放	減少空氣污染物排放	SO _x	
			NO _x	
			PM ₁₀	
	最小化水資源使用影響	減少水資源消耗與廢水產生	CO ₂ -e	
			水資源用量	
			廢水產生量	
	資材與廢棄物減量	減少資材或原物料消耗	原物料使用量(Refined & unrefined)	定性 (專家判定)
		減少廢棄物產生	廢棄物產生量(有害&一般)	
經濟面	對土壤及生態系影響	選擇對土壤及生態環境衝擊較小之工法	對土壤肥力造成影響	定量 (經濟評估工具)
		保存生物多樣性(依據環境影響評估法，若位於環境敏感區考慮)	外來物種的引進	
			對棲息地影響	
	成本效益項目	提升專案財務成本投入效率	期初投入成本(\$)	定量 (經濟評估工具)
			運轉維護成本(\$)	
			間歇性成本(\$)	
	經濟影響	增加整治行動對土地價值回復之正面效果	土地價值改變(只針對污染場址本身)(\$)	定量 (經濟評估工具)
		極大化專案誘發之總體工作機會增加	因專案所直接、間接誘發增加之雇用人次(人)	
		極大化專案誘發之總體產業產出增加效果	因專案所直接、間接誘發增加之產出效果增加效果(\$)	
社會面	人體健康安全	整治前後與整治過程人體健康風險	因專案所直接、間接誘發之附加價值增加效果(\$)	定量
			整治工程人員施工意外風險	
			整治工程人員健康風險	
	社會公義	考慮整治工法對附近居民生活影響	居民健康風險	定性 (專家判定)
			噪音	
			揚塵	
			異味	

使用方案決策系統第一步驟為新增場址，進入評估工具系統後，點選新增場址，進入新增場址頁面後，輸入場址基本資料，包含場址編號、場址名稱、廠址類別、場址座標、列管狀態等，輸入完成後按儲存鍵即完成場址建立，操作介面如圖 9.1-1 所示。

圖 9.1-1 顯示了系統中的「新增場址」操作介面。介面頂部有查詢條件欄，包含場址編號、場址名稱及行政區等輸入框。下方為場址列表，其中「新增場址」按鈕被紅色方框標出。點擊該按鈕後，進入新增場址的詳細資料輸入頁面。該頁面包含多個輸入欄位，如場址編號、場址名稱、場址座標（TW97 X/Y 座標）、場址類別、列管狀態等。頁面底部有「儲存」按鈕，該按鈕被紅色方框標出。此外，頁面中還有「方案決策支援」和「改善方案評估」等按鈕。一個大的藍色弧形箭頭指示了從查詢頁面到新增場址頁面的流程。

圖 9.1-1 新增污染場址

場址建立完成後，可開始進行方案決策之評估，點選場址「方案決策支援」鍵，進入後須先建立整治方案，需填入方案名稱、整治內容概述、以及預計整治期程，如圖 9.1-2。輸入完成後，則可進入權重設計頁面，如圖 9.1-3，可設計各項評估指標的重要程度，並可依據不同利害關係人建立多種權重分配，如依據地方環保局、整治顧問公司、附近居民或污染行為人等，根據不同利害關係人所關切的目標不同，可設計不同的評分方式。



9.2 環境面評估

環境足跡分析乃以 ISO14044 生命週期計算的四大架構進行，包含目標與範疇界定、生命週期盤查分析、生命週期衝擊評估及生命週期闡釋。環境足跡分析之目的為了解進行污染改善工作投入之能資源可能衍生的環境影響。以污染場址而言，其生命週期分為場址調查、污染改善系統設置、污染改善系統操作與定期監測與採樣等階段，本所提供的環境足跡評估即蒐集污染場址調查整治的原物料、運輸、機具操作、廢棄物處理等活動的資料，計算 GHGs、空氣污染物排放(SO_x、NO_x、PM₁₀)、能資源消耗等，環境面評估指標與計分方式如圖 9.2-1 所示。

表 9.2-1 環境面評估指標與評分方式

評估面向	評估指標	評分依據	永續程度評分標準及對應之計算方式 (S, 較差=1, 較佳=5) min, MAX, d = 得分最小值, 最大值, 評分級距				
			1	2	3	4	5
環境面	SO _x	定量 環境足跡工具計算結果	$\leq \text{MAX}$ 及 $>(\text{min}+4d)$	$\leq (\text{min}+4d)$ 及 $>(\text{min}+3d)$	$\leq (\text{min}+3d)$ 及 $>(\text{min}+2d)$	$\leq (\text{min}+2d)$ 及 $>(\text{min}+d)$	$\leq (\text{min}+d)$ 或 $\geq \text{min}$
	NO _x						
	PM ₁₀						
	CO _{2e}						
	水資源用量						
	廢水產生量						
	原物料使用量 (Refined & unrefined)						
	廢棄物產生量 (有害&一般)						
	是否會對土壤肥力造成影響	定性 專家判定	影響非常嚴重	影響嚴重	-	影響輕微	不會造成影響
	避免引入外來物種		外來種且極易擴散成為優勢種	外來種但不容易擴散	-	原生種但極易擴散成為優勢種	原生種且不影響當地生態
	棲息地影響		改變場址原本地貌超過 50%	改變場址原本地貌超過 30%	改變場址原本地貌超過 20%	改變場址原本地貌超過 10%	不影響地貌

資料經過環境足跡評析工具計算後即可得到各環境之衝擊結果。由評估結果可清楚瞭解污染改善工作調查、操作、施工與監測等不同階段之環境足跡排放量，除此之外，；也可再更細部分析各階段中，原物料使用、機具設備操作、運輸、廢棄物/廢水處理、水資源使用等個別活動所產生的環境足跡量，如圖 9.2-1 所示。

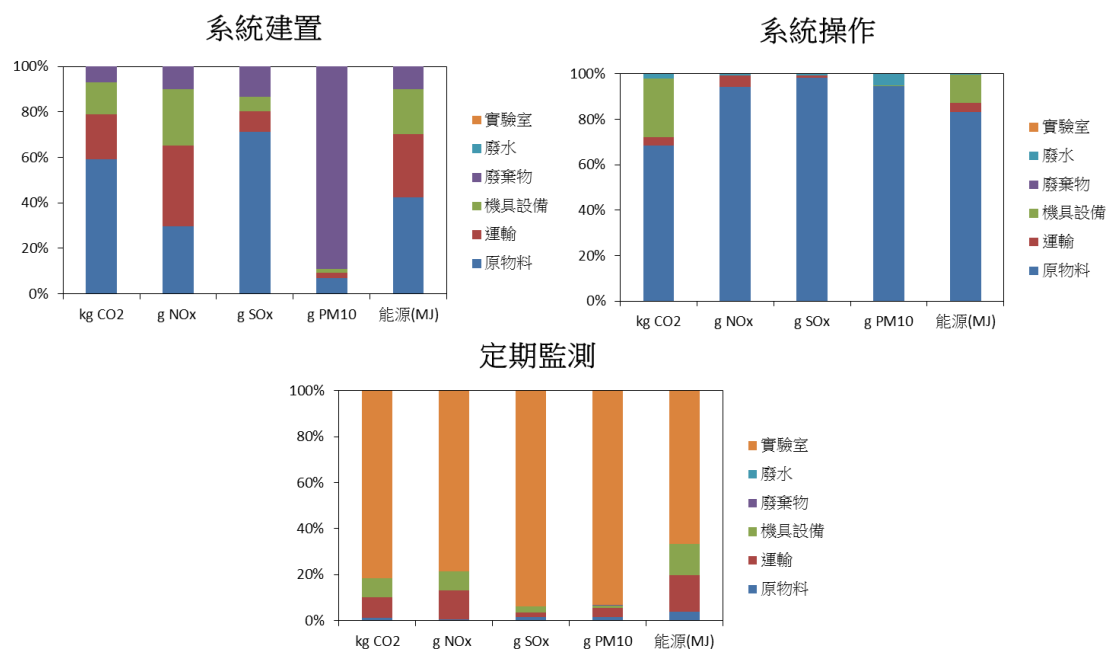


圖 9.2-1 環境足跡分析結果(範例)

環境面評估頁面由 GSR 評估頁面點選環境面圖示進入，頁面如圖 9.2-2 所示。整治工作的計算包含四個不同階段，分別為調查、設置、操作與定期檢測監測階段，可分別評估不同階段中所產生的環境足跡。每項階段內均有四個項目的評估，包含：

一、原物料

原物料包含在監測井設置、地下水採樣、土壤採樣等過程中使用的原物料所可能產生的環境足跡，透過分析各項工作所使用的器具與其材質，進行環境足跡的計算。

二、運輸

運輸指工作人員、原物料、設備、廢棄物等在運輸過程中所可能產生的環境足跡。

三、機具設備

機具設備指在整治過程中，所使用設備裝置所產生的環境足跡，由

設備所需的燃料與功率進行計算，主要可分為使用燃料與電力兩種。

四、水資源使用、廢棄物與實驗室分析

只在整治過程中所使用的水資源、產出的廢棄物、以及實驗室分析成本所計算的環境足跡。

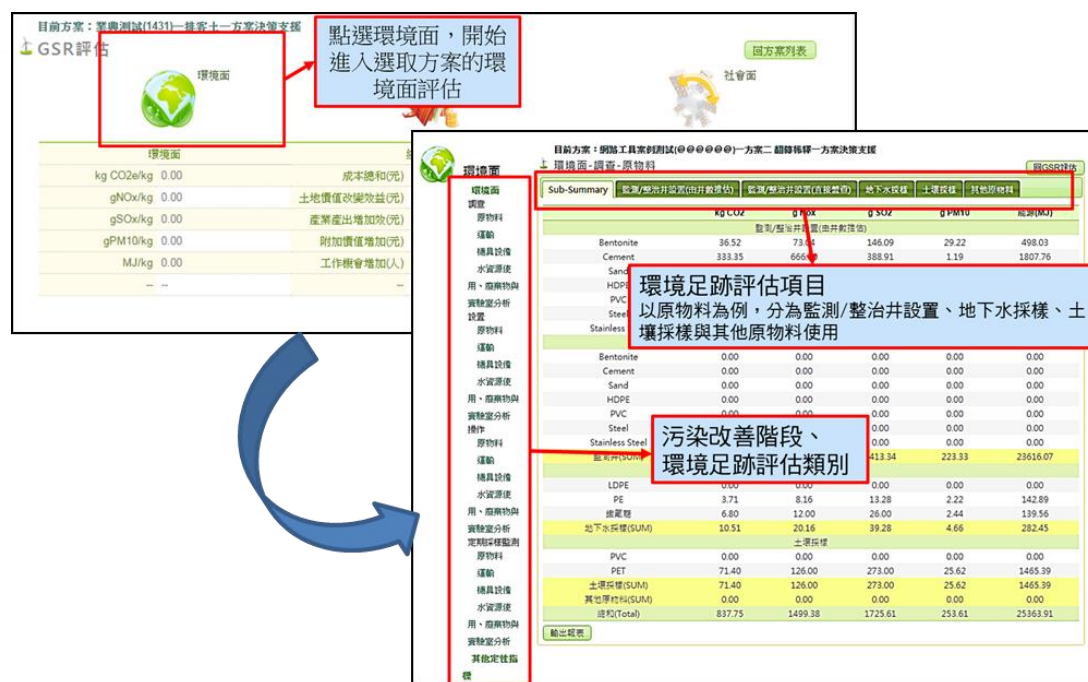


圖 9.2-2 環境面評估頁面

各階段環境足跡評估項目皆填入相對應之數值後，即可計算各階段活動所產生之環境足跡，如圖 9.2-3 所示，可選擇將評估成果以不同的方式呈現，也可下載 excel 報表。



圖 9.2-3 環境面評估成果呈現

9.3 經濟面評估

在工法選擇過程中，不同整治工法所需支出的成本不盡相同。而在選定特定工法進行整治時，過程中會因整治工程之執行，透過產業之間的互動關係，對整體經濟帶來如「附加價值」、「產值」、「工作機會」等經濟影響 (economic impacts)。最後在完成整治工程後，環境目標之達成將帶來環境改善效果，而這些改善效果又可進一步貨幣化成為效益項目 (economic benefits)。換言之，這些經濟評估指標可呈現綠色整治工法在不同階段於經濟面向所造成之效果，圖 9.3-1 為經濟面所考量之指標。

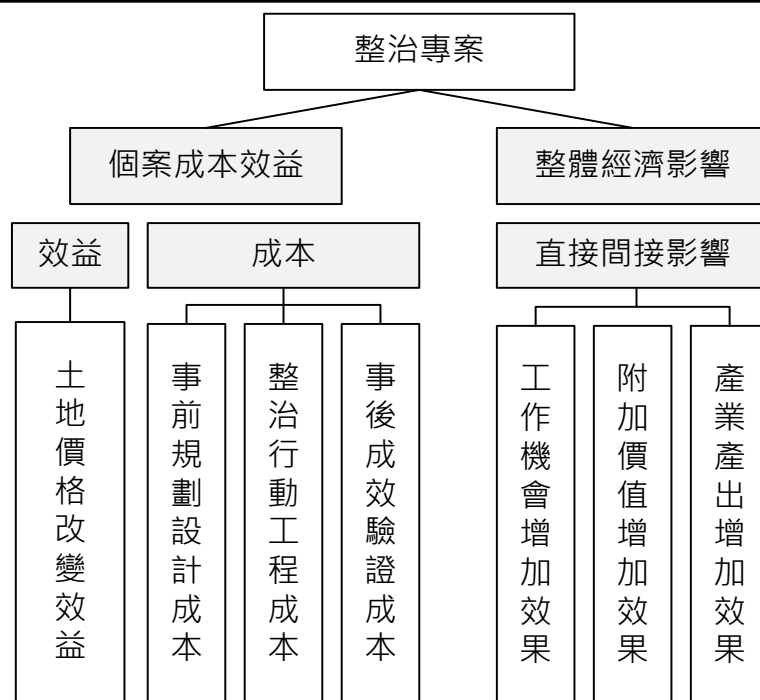


圖 9.3-1 GSR 架構下之經濟面向衡量指標

經濟面評估主要分為成本、效益與整體經濟影響三部分，評估指標如表 9.3-1 所示。其中效益指污染土地整治後恢復土地價值所得之效益，計算方式為：

$$\text{未受污染土地價值} - \text{受污染土地價值} = \text{整治成本} + \text{污名值損} + \text{土地使用價值}$$

整體整治經濟影響則包含產業產出增加效果、附加價值增加效果、及工作機會增加效果共三項指標。其中土地單價可以內政部地政司網站 (<https://www.land.moi.gov.tw/chhtml/landvalue.asp?cid=100>) 查詢公告土地現值及公告地價。

表 9.3-1 經濟面評估指標與評分方式

評估面相	評估指標	評分依據	永續程度評分標準及對應之計算方式 (S, 較差=1, 較佳=5) min, MAX, d = 得分最小值, 最大值, 評分級距				
			1	2	3	4	5
經濟面	期初投入成本(\$)	定量 經濟面 評估工具	$\leq \text{MAX}$ 及 $>(\text{min}+4d)$	$\leq (\text{min}+4d)$ 及 $>(\text{min}+3d)$	$\leq (\text{min}+3d)$ 及 $>(\text{min}+2d)$	$\leq (\text{min}+2d)$ 及 $>(\text{min}+d)$	$\leq (\text{min}+d)$ 或 $\geq \text{min}$
	運轉維護成本(\$)						
	間歇性成本(\$)						
	土地價值改變(只針對污染場址本身)(\$)		$\leq (\text{min}+d)$ 或 $\geq \text{min}$	$\leq (\text{min}+2d)$ 及 $>(\text{min}+d)$	$\leq (\text{min}+3d)$ 及 $>(\text{min}+2d)$	$\leq (\text{min}+4d)$ 及 $>(\text{min}+3d)$	$\leq \text{MAX}$ 及 $>(\text{min}+4d)$
	因專案所直接、間接誘發增加之雇用人數(人)						
	因專案所直接、間接誘發增加之產出效果增加效果(\$)						
	因專案所直接、間接誘發之附加價值增加效果(\$)						

經濟面評估系統分為層級一與層級二評估，兩者主要差別為，層級一的成本計算是利用模組化評估，而層級二則須輸入實際數值，使用者可依照自身需求選擇層級一或層級二表單進行分析。如圖 9.3-2 與 9.3-3 所示。層級一評估可以選單選擇污染改善工法，並填入處理污染土方量與地下水面積，以及土地面積、單價等，輸入完成後點選計算整體經濟影響，即可得到經濟面評估成果。層級二概念大致上與層級一相同，兩者差異在於執行成本需自行輸入，並填寫個產業類別之成本，輸入完成後點選計算整體經濟影響，即可得到經濟面評估成果。

經濟面

說明 層級一 層級二

1. 輸入土地單價、土地面積與整治期程等，土地單價可使用以下系統查詢土地公告現值 <http://www.land.moi.gov.tw/chhtml/landvalue.asp?cid=100>

2. 效益

3. 計算整體經濟影響

4. 點選列入紀錄後儲存

以下下拉選單選擇污染改善工法，並填入處理污染土方量與地下水面積

輸入完成後點選計算整體經濟影響

點選列入紀錄後儲存

項目	數值
1. 土壤污染整治工法	工研-重金屬-脫洗及固化(3m內)
2. 土壤污染處理體積(立方公尺)	500
3. 地下水污染整治工法	曝氣
4. 原地上游年淨利(元)	50000
5. 總和(元)	\$14400000

項目	數值
1. 未污染時土地單價(平方公尺)	12000
2. 污染土地面積(平方公尺)	1000
3. 污名價值比率	0.3
4. 地下水污染處理面積(平方公尺)	
5. 整治計畫進行年數	3
6. 土地價值改變效益(元)	\$18000000

二、整體經濟影響

2. 附加價值增加效果(元) \$18,000,000

3. 工作機會增加效果(人)

直接間接影響

圖 9.3-2 經濟面層級一評估

說明 層級一 層級二

1. 輸入土地單價、土地面積與整治期程等，土地單價可使用以下系統查詢土地公告現值 <http://www.land.moi.gov.tw/chhtml/landvalue.asp?cid=100>

2. 效益

3. 填寫每個產業類別的成本

4. 點選列入紀錄後儲存

輸入完成後點選計算整體經濟影響

自行輸入各成本

填寫每個產業類別的成本

點選列入紀錄後儲存

項目	數值
1. 期初投入成本(元)	200000
2. 運轉維護成本(元)	200000
3. 間歇性成本(元)	200000
4. 其他成本(元)	
5. 總和(元)	\$600000

項目	數值
1. 未污染時土地單價(平方公尺)	12500
2. 污染公告面積(平方公尺)	2000
3. 污名價值比率	0.3
4. 原地上游年淨利(元)	600000
5. 整治計畫進行年數	2
6. 土地價值改變效益(元)	\$9300000

三、整體經濟影響

1. 產業產出增加效果(元) \$995,535

2. 附加價值增加效果(元) \$600,000

3. 工作機會增加效果(人) 1

直接間接影響

圖 9.3-3 經濟面層級二評估

9.4 社會面評估

社會影響面向包含二個核心元素，分別是「人體健康及安全」與「社會公義」。在「人體健康及安全」面向中所強調的是，應考量場址污染現況對附近居民與整治工程進行時對居民與整治工程人員的健康風險。此面向須涵蓋 5 個原則：(1)整治前後人體健康風險、(2)整治過程中人體健康風險(居民與整治工程人員)、(3) 整治施工過程勞工意外風險、(4)二次污染風險及(5)阻絕曝露途徑以避免污染向外擴散。在「社會公義」項目中，主要涵蓋四個衡量原則，分別是：(1)利害關係人決策參與、(2)資訊公開、(3)文化遺產的保留，以及(4)整治工法對附近居民之影響。社會面評估指標與評分方式如表 9.4-1 所示。

表 9.4-1 社會面評估指標與評分方式

評估面相	評估指標	評分依據	永續程度評分標準及對應之計算方式 (S, 較差=1, 較佳=5)				
			1	2	3	4	5
社會面	整治工程人員施工意外風險	定量	$\leq \text{MAX}$ 及 $>(\text{min}+4d)$	$\leq (\text{min}+4d)$ 及 $>(\text{min}+3d)$	$\leq (\text{min}+3d)$ 及 $>(\text{min}+2d)$	$\leq (\text{min}+2d)$ 及 $>(\text{min}+d)$	$\leq (\text{min}+d)$ 或 $\geq \text{min}$
	整治工程人員健康風險	定量	風險不可接受	-	-	-	風險可接受
	居民健康風險	風險評估結果					
	揚塵	定性 專家判定	整治工法會產生且持續時間超過總整治期程 2/3 或產生次數大於 20 次	整治工法會產生且持續時間超過總整治期程 1/3 或產生次數小於 15 次	整治工法會產生但持續時間小於 1 個月 或產生次數小於 10 次	整治工法會產生但持續時間小於 1 周 或產生次數小於 3 次	整治工法不會產生
	噪音						
	異味						

社會面評估頁面主要需輸入六項參數，分別為整治工程人員意外風險、整治工程人員健康風險、居民健康風險、噪音、揚塵與異味等，介面如圖 9.4-1 所示。

目前方案：業典測試(1431)－排客土一方案決策支援

社會面 回GSR評估

~ 查無資料 ~

整治工程人員施工意外風險	整治工程人員健康風險	居民健康風險	噪音	揚塵	異味
<input type="text"/>	請選擇 ▼	請選擇 ▼	1 ▼	1 ▼	1 ▼

列入紀錄
清空

針對揚塵、噪音、異味說明：
 1=整治工法會產生且持續時間超過總整治期程2/3或產生次數大於20次
 2=整治工法會產生且持續時間超過總整治期程1/3或產生次數小於15次
 3=整治工法會產生但持續時間小於1個月
 4=整治工法會產生但持續時間小於1周
 5=整治工法不會產生

圖 9.4-1 社會面評估頁面

整治人員意外風險為施工意外風險與交通意外風險總和，相關公式如下：

- 整治人員意外風險=施工意外風險+交通意外風險
- 施工意外風險=總工作時數×每小時受傷/致死意外
- 交通意外風險=總工作人數×交通距離×延人公里受傷/致死意外

上述公式中施工意外與交通意外之機率如表 9.4-2 所示。

表 9.4-2 整治人員意外風險值

項目	施工意外 (每小時)		交通意外 (延人公里)	
	受傷	致死	受傷	致死
營建工人	9.15 E-08	2.3 E-05	---	---
操作工人	5.35 E-08	2.3 E-05	---	---
廢棄物管理	5.95 E-08	2.7 E-05	---	---
科學與技術服務	4.5 E-09	5.5 E-06	---	---
公路運輸	---	---	7.8 E-09	6.28 E-07
公路運輸(設備)	---	---	7.8 E-09	6.28 E-07
航空運輸	---	---	1.00 E-10	2.67 E-11
鐵路運輸	---	---	4.00 E-10	5.16E-08

資料來源：Table 2h, SiteWise™ Version 3 User Guide (UG-NAVFAC-EXWC-ENV-1302), 2013

整治人員與居民健康風險部分，可以環保署土壤及蒂亞水污染場址健康

風險評估系統進行計算(<http://sgw.epa.gov.tw/Risksystem/Default.aspx>)，根據計算結果，選擇整治工程人員與居民之健康風險為可接受或不可接受，其中致癌風險若 $<10^{-6}$ ，且非致癌風險 <1 ，則為可接受風險。

噪音、揚塵與異味三項指標為定性專家評估之指標，可由問卷訪談的方式，或是參考網頁說明的方式進行評估：

1=整治工法會產生且持續時間超過總整治期程 2/3 或產生次數大於 20 次

2=整治工法會產生且持續時間超過總整治期程 1/3 或產生次數小於 15 次

3=整治工法會產生但持續時間小於 1 個月

4=整治工法會產生但持續時間小於 1 周

5=整治工法不會產生

9.5 ISCO 之 GSR 計算邏輯

現地化學氧化法(In-Situ Chemical Oxidation, ISCO)是由廢水處理的化學氧化法啟發，已發展成為地下水污染整治主要解決方案之一，近年來廣泛應用於石油碳氫化合物與含氯有機溶劑之污染場址。其原理是將氧化劑注入地下環境中，於現地氧化地下水與土壤中的污染物，使其降解、破壞為較不具危險的二氧化碳、水及無機鹽類，除轉換目標污染物，也降低其質量、移動性及毒性，目前較常用的氧化劑有 Fenton 試劑、過硫酸鹽、高錳酸鉀與臭氧。現地化學氧化法適用的處理污染物類型廣泛，且相較其他技術，可在短時間削減與降解污染物，但氧化的時間與效果受地質條件及氧化劑特性影響。

此工法的示意圖如圖 9.5-1，主要的設備有注入井、泵、儲槽及管線、儀控設備，因儀控設備耗電量所佔整體耗電量低，因此並未包含在環境足跡計算中。ISCO 模組計算範疇如圖 9.5-2 模組系統邊界示意圖，包含原物料、水資源、運輸、機械設備等的投入與產出。工具設計的輸入基本資料分為主要污染區(Z1)與次要污染區(Z2)，此一設定乃考量污染場址往往可能有主要污染源頭區或高濃度區，並隨著時間或地下水的流向擴散，導致濃度較低，與主要污染區濃度差別極大的周邊範圍產生，視為次要污染區，示意如圖 9.5-

3。輸入值包含污染寬度與長度、地下水水位、井深、土壤類型及氧化劑類型。此外，尚有注入井與地面管線、運輸與機具設備的其他設計參數輸入，詳細內容說明於後。

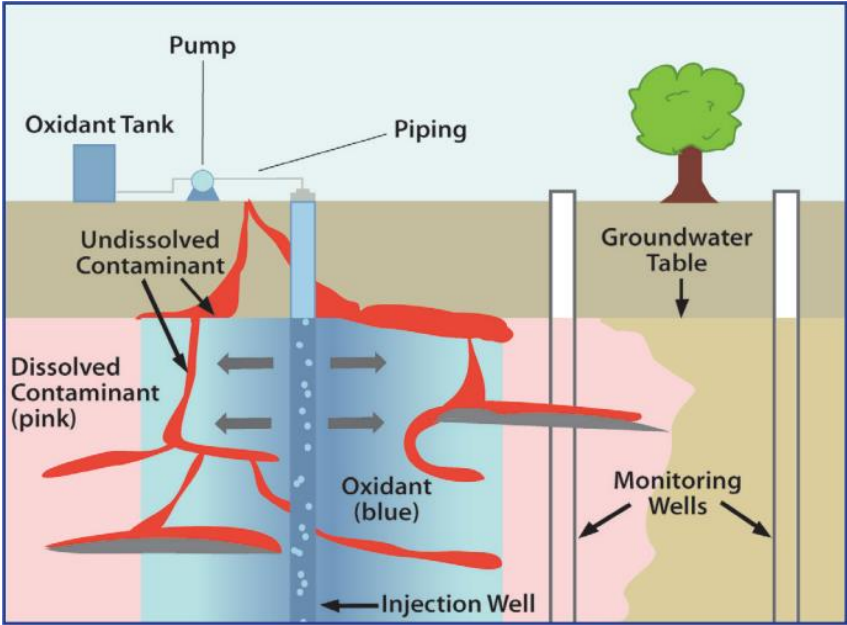


圖 9.5-1 現地化學氧化法示意圖(Engineering Issue, US EPA)

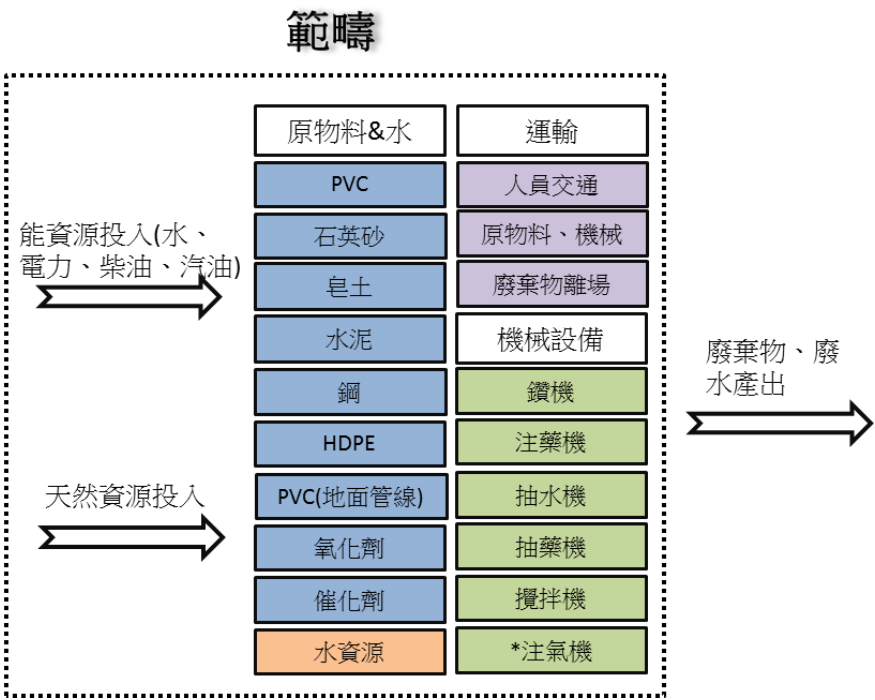


圖 9.5-2 現地化學氧化法環境足跡模組系統邊界示意圖

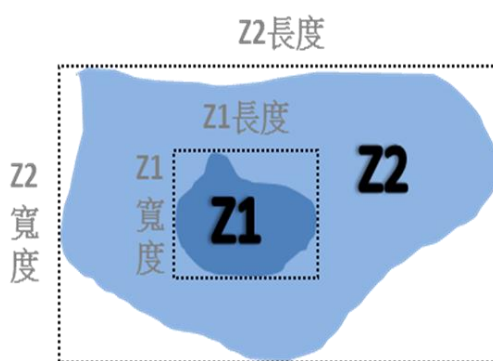


圖 9.5-3 現地化學氧化法污染區示意

一、原物料_注入井設置

ISCO 需設置注入井，用途雖然不同，構造組成卻與監測井相似，因此設置單一注入井所需要的原物料計算，乃引用環境足跡評估工具已建立的監測井設置計算表單，惟因應注入井的特性，並兼顧設計者使用彈性與簡化複雜性，特別調整其中計算方法或參數設定，例如：取消原水泥平台、不銹鋼保護套管、警示柱、次要濾料層的計算；防水人孔頂蓋設定為隱藏式、水泥封層固定 0.2 公尺；皂土層厚度提供使用者輸入，但限制可輸入的最大值；鑽井直徑亦提供使用者輸入，但需大於井管直徑；濾料層厚度由已定之井深、皂土層、水泥封層、底層厚度最後決定。經過此計算表單取得設置單一注入井需要的原物料量，包含 PVC、石英砂、皂土、水泥、鋼、HDPE。

模組化工具井深預設為污染下方距地表深度，但考量實務上可能稍作調整，因此保留使用者輸入的彈性。注入井數目是利用影響面積估算，採無條件進位，如下式：

- $$\text{注入井數目} = \frac{\text{污染寬度} \times \text{污染長度}}{(\pi \times \text{ROI}^2)}$$

式中，ROI 是影響半徑，係以注入井為原點，觀察能造成水柱下降至少 0.25 公分之最大距離，受到許多因素影響，模組工具參考 SRT 系統，依據不同土壤類型定義的影響半徑(參考表 9.5-1)。

表 9.5-1 土壤類型及其特性

土壤類型	膨脹係數	平均總體密度(kg/m ³)	孔隙率	ROI
Sandy gravel	1.15	1633.9	0.35	5.33
Sand (well graded)	1.15	1601.8	0.25	5.33
Sand (poorly graded)	1.15	1601.8	0.35	5.33
Silt	1.3	1521.8	0.4	3.35
Clay	1.3	1441.7	0.45	NA

參考文獻：SRT 2.3 APPENDIX B

二、原物料_地面管線

連接抽氣井與抽氣機及後續處理設備的地面管材估算方法可參考圖 9.5-4，首先由使用者選擇管線型式、管徑，透過內部自動參照相對應之單位長度管線重量(kg/m)，再與管線總長度相乘取得地面管線 PVC 用量。總長度隨不同場址差異頗大，然而模組工具目的在於設計階段評估，因此，假設如圖 9.5-4 的理想情況一場址方正，處理機房位於正中央，抽氣井均勻分布，管線總長度的計算式為：

- 管線總長度(m)=ROI*2*(抽氣井數目-1)

雖然無法完全代表各場址管線規劃，但是此公式隱含了隨抽氣井數目越多，管線長度越長的性質。

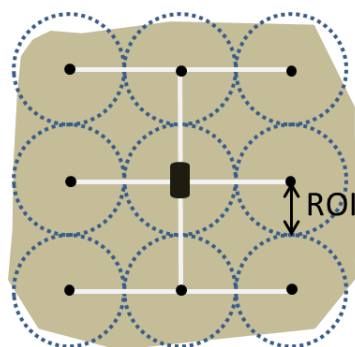


圖 9.5-4 總管線長度示意圖

三、原物料_氧化劑、催化劑、水資源

現地化學氧化法模組化工具可供選擇的氧化劑類型包含 Fenton 試劑(雙氧水+鐵粉/亞鐵離子)、過硫酸鹽及過錳酸鉀，以上三者均屬於液態

氧化劑，在國內相當常見、市售可取得、且已普及使用。

氧化劑劑量的推估，原假設以完全氧化分解有機污染物為二氧化碳，除須計算污染物降解所需的理論化學需氧量，尚須考量土壤中有機質所消耗氧化劑的自然需氧量(Natural/Soil Oxidant Demand, NOD/SOD)。根據本計畫模擬合理的污染場址情況實際執行測試，同時參考 SRT 提供之低中高自然需氧量分別為 0.5、2.0、及 20.0 g/kg，推算求得之氧化劑劑量遠受自然需氧量影響，理論化學需氧量之氧化劑劑量所佔比重極低，除與污染物濃度無關外，推算劑量亦遠遠超越實際執行經驗，此舉將過度高估環境衝擊，而導引設計規劃者捨棄以現地化學氧化之最適工法進行改善作業。

因此，氧化劑劑量的推估，修正為實際操作面可執行作規劃，以污染土壤孔隙體積(Pore Volume, PV)，作為可填充稀釋後的氧化劑溶液容量，配合孔隙體積填充倍數與溶液稀釋比例，回推市售量販最高濃度氧化劑所需的劑量。計算公式示意如下。

- 稀釋後氧化劑溶液體積(m^3)=污染土壤體積(m^3)*土壤孔隙率*填充孔隙體積倍數
- 氧化劑劑量(kg)= 稀釋後氧化劑溶液體積/氧化劑稀釋倍數*氧化劑密度(kg/m^3)

其中氧化劑密度預設為 1,000，孔隙體積填充倍數預設為 1，設計規劃者可視場址特性或作業需求調整。另氧化劑稀釋倍數的選定與催化劑使用量，參考美國州際技術與管理協調會的現地化學氧化技術小組出版的「污染土壤及地下水現地化學氧化法技術與管理指引」，與 USP H_2O_2 氧化法領先技術顧問公司公開的「Fenton 試劑一般化學需量」，彙整如表 9.5-2 與下列公式。

- 催化劑劑量(kg)=稀釋後氧化劑溶液體積(m^3)*催化劑建議濃度($mg \text{ as Fe/L}$)* $10^{-6}(kg/mg)$ * $10^3(L/m^3)$
- 稀釋水體積(m^3)=稀釋後氧化劑溶液體積(m^3)-氧化劑劑量(m^3)

表 9.5-2 氧化劑與催化劑建議濃度

氧化劑	氧化劑市售濃度	氧化劑建議注入濃度	氧化劑稀釋倍數	催化劑	催化劑建議濃度(mg as Fe/L)
Fenton 試劑	30%	3%	10	鐵粉/亞鐵離子	15
過硫酸鹽	95%	3%	32		150
過錳酸鉀	99%	20%	5	NA	NA

四、運輸_人員

人員交通是針對規律來往於場址的工作人員，排除單趟或非常態的旅程，因模組工具目的乃是設計階段之估算，為簡化使用複雜性，由使用者輸入單趟平均距離、作業期間趟數、燃料類型，計算人員交通油耗，即可以下式獲得。

- $\text{油耗(L)} = \text{單趟平均距離(km)} * \text{作業期間前往場址趟數} * 2 / \text{燃料效率(km/L)}$

因為交通工具類型設定為自用車，燃料效率可以由燃料類型參照而得，上式乘以 2 是納入來回交通的考量。

五、運輸_原物料與機械、運輸_廢棄物離場

原物料與機械定義廣泛，包含各式施工過程帶往場址的工具、材料、機械、設備等及其他雜項，因此種貨物項目繁雜，重量不易估算。SEFA 介紹的油耗計算分為兩類，一為棄土與回填土載運的計算方式，主要影響因子為載重，公式如下：

- $\text{油耗(L)} = \text{車次} * \text{單趟距離(km)} * \text{載重(ton)} * \text{燃料效率(Lptkm)}$

另一為原物料與機械運輸的計算方法，亦為本單元採用方式：

- $\text{油耗(L)} = \text{車次} * \text{單趟距離(km)} * 2 / \text{燃料效率(kpl)}$

式中乘以 2，表示來回車程；車次預設為 1，但是供使用者彈性調整。模組工具僅需輸入單趟距離、燃料類型，即自動對應燃料效率，進而計算油耗量，此流程可見於圖 9.5-5。

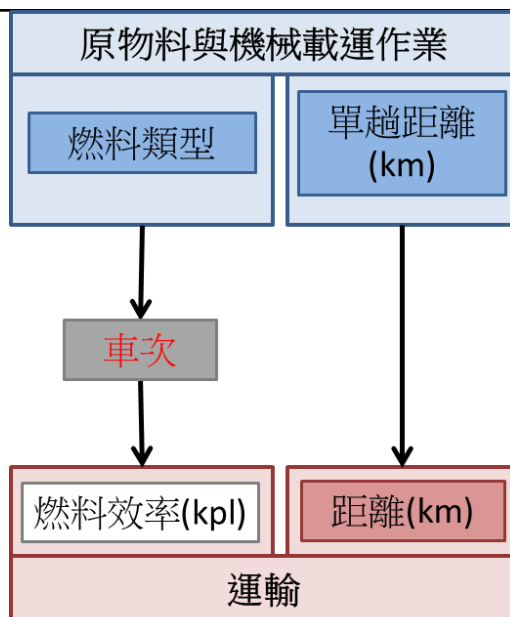


圖 9.5-5 原物料與機械載運作業模組化流程

六、重型機具設備_鑽井

鑽井設備參考 SEFA 重型機具設備參數表 9.5-3，使用者可以選擇「中空螺旋鑽」或「氣旋鑽」的鑽井工法，取得對應設井速率、馬力、燃料類型，操作時間則透過井數、井深與設井速率決定，如下。

- 操作時間(hr)=抽氣井數目*井深(m)/設井速率(m/hr)

表 9.5-3 鑽井機具參數表

鑽井工法	設井速率(m/hr)	馬力(hp)	燃料類型
中空螺旋鑽	3.81	150	柴油
氣旋鑽	7.62	500	柴油

七、機具設備(使用電力)_注藥機、抽水機、抽藥機、攪拌機

氧化劑與稀釋水分別經抽藥機與抽水機抽汲出，利用攪拌機均勻混合後，再以注藥機將稀釋後氧化劑溶液，注入至土壤及地下水污染範圍中，完成改善作業。上述機具均以電力驅動，故沿用原評估工具電力之機具設備計算，用電量計算方法為：

- 用電量(kwh)=馬力(hp)*操作時間(hr)*L/η*數量

式中， L 是機械滿載百分率， η 是機械效率，SEFA 建議值各為 80% 與 0.7。

參考環保署計畫所評估與常見且實務上採用的馬力數，使用者需選取設計馬力值，模組工具將自動計算抽汲速率(m^3/hr)，或依場址地質特性輸入灌注速率(m^3/hr)，模組工具將以抽汲或灌注速率與稀釋後氧化劑溶液體積，自動產生操作時間(hr)，連結上式獲得各式機具耗電量，計算公式示意如下。

- 抽汲速率(m^3/hr)= $\text{馬力}(\text{hp}) \times 3600 (\text{s/hr}) \times 746 (\text{W/hp}) \times \eta / 9800 (\text{N/m}^3) / \text{揚程高度}(\text{m})$

式中， 10 m^3 桶槽高度約 3 公尺，故假設揚程高度為 3 公尺， η 是泵的効率值，根據 SEFA 建議若缺乏資料可以假設為 0.7。

- 操作時間(hr)= $\text{稀釋後氧化劑溶液體積}(\text{m}^3) / \text{抽汲速率}(\text{m}^3/\text{hr}) / \text{數量}$

9.6 GSR 評估結果產出

在 GSR 參數皆輸入完成後，返回 GSR 評估頁面，即可獲得各項參數的列表，如圖 9.6-1 所示。若於方案建立時建立多個方案，則可進行不同方案的 GSR 評估分數比較，透過不同方案的得分可選取較符合 GSR 精神之整治方案，如圖 9.6-2 所示。



圖 9.6-1 環境、經濟、社會面向評分結果

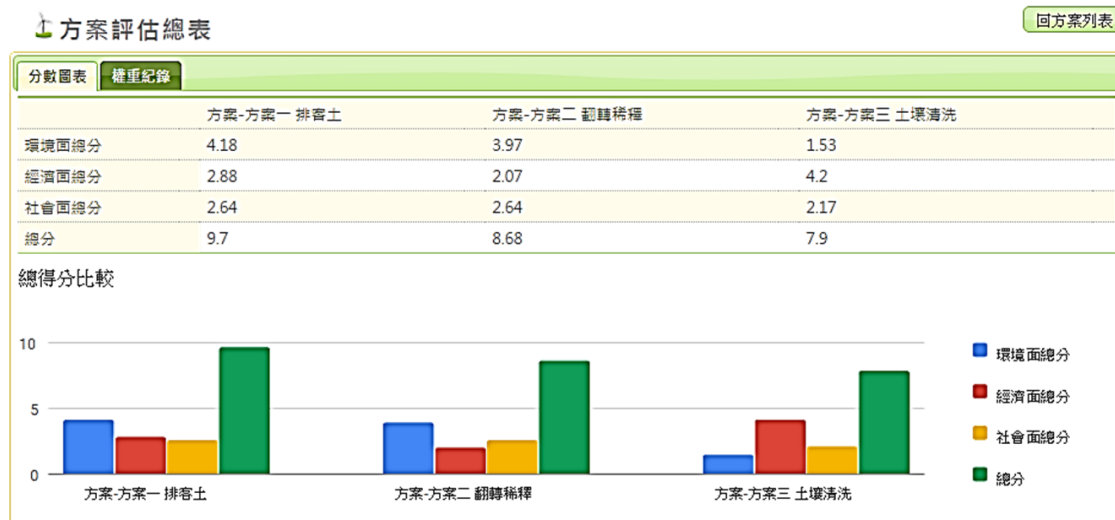


圖 9.6-2 方案評估總表

9.7 最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs)

根據美國材料和試驗協會 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 對於 BMPs 的定義，GSR 的 BMPs 係指「任何在特定場址，多數情形下可以增進環境、社會或經濟表現的行動方案」，亦即任何在綠色及永續導向型整治評估核心元素與原則下，執行後可達到一個或多個 GSR 核心原則的作為。此種作為可能包含整治工法操作時間的最佳化，如在不影響整治目標前提下改變操作頻率，可減少能源使用；或提升場址管理效果，如進行居民健康風險評估並根據評估結果進行風險溝通。BMPs 可在整治計畫的任一階段使用。整治單位應就其污染場址調查、工法規劃設計與選擇、執行與操作等不同階段，擬定該場址可採行之 BMPs。需注意的是，綠色及永續導向型整治雖有基本的核心元素及原則，然而，每一場址都有其獨特性，因此規劃採行之 BMPs 時，應依場址特性採取適當的措施。環保署目前所提供的 GSR 平台，可讓使用者依污染改善階段、污染改善工法、污染改善工作活動類別等不同篩選條件選取適合特定場址使用的最佳管理措施，選定 BMPs 後可使用表 9.7-1 格式彙整以追蹤紀錄實際執行情形。

根據環保署系統「綠色及永續導向型整治推廣平台」中最佳管理措施建議方案內容，可以分為以下幾個步驟快速篩選出合適的 BMPs，首先選擇適用時機，適用時機說明如下：

- 調查：自調查場址是否受到污染開始，至確認污染情形並擬定污染改善工作前。
- 選取設計：在調查階段結束，確認污染情況後，至擬定污染改善方案，與污染改善計畫書審查通過前之所有工作。
- 建置：自污染改善計畫書審核通過後，至污染改善設備啟動與操作前，所有污染改善設備建置階段。
- 操作維護與監測：完成設備建置後，整治系統運作至污染改善完成與後續監測期間，所有工作皆屬於該階段。

第二階段為專案類別篩選階段，使用者應選擇自己較在意的項目，專案類別說明如下：

- 原物料：在調查、整治階段中，所有消耗性產品的投入。如化學藥劑、監測/注入井設置用料(水泥、皂土、石英砂等)、裝樣容器等。
- 電力與燃料：在調查、整治階段中，所有使用的電力或燃料。如使用空壓機耗油量。
- 專案管理、專案規劃與管理：在調查、整治所有階段中，環境、社會、經濟面之活動管理規劃。
- 固體與液體廢棄物：在調查、整治階段中，所有產生之固體及液體廢棄物。如鑽井產生之廢棄土方、活性碳廢棄物等。
- 採樣與分析：在調查、整治階段中，所有土壤、地下水與底泥採集與分析。如現場快速篩測土壤採樣、被動式採樣方法等。
- 場址整理與復原：完成污染改善後，所有將場址恢復原貌的活動。如土方回填、植被種植等。
- 地表水與雨水：在調查、整治所有階段，所使用之自來水、河川、水庫、雨水，任何可能被使用之水資源。
- 車輛與設備：在調查、整治所有階段中，所有車輛與耗電/耗油設備的使用。如電動車、馬達。
- 廢水：在調查、整治階段中，所產生之廢水、土壤清洗廢水。

第三階段為需求效益篩選，依使用者需求選擇社會面、環境面或經濟面之考量，之後系統會統整使用者依照三個階段選擇的項目快速列出適合之 BMPs 措施，以便使用者查看，如圖 9.7-1 所示。

↑BMPs最佳管理措施篩選原則

匯出到Excel

類別	BMPs措施	資料來源	
原物料	使用回收材料(如由金屬回收製成之鋼鐵、回收之水泥或瀝青、回收塑膠、回收材質製成之防水布等)	ASTM 2013b	
原物料	使用生物基質(biobased)的產品(如使用農藥副產品為侵蝕控制構造物)	ASTM 2013b	
原物料	使用蒸氣、無磷清潔劑或生物可分解的清潔用品取代有機溶劑或酸性液體清潔採樣器材	ASTM 2013a,ASTM 2013b	
原物料	<div>需求效益內容</div> <div>使用回收材料(如由金屬回收製成之鋼鐵、回收之水泥或瀝青、回收塑膠、回收材質製成之防水布等)</div>	ASTM 2013b	
原物料	<div>環境面</div> <div>GSR評估核心元素與原則 效益</div> <div>資材與廢棄物減量 減少資材或原料消耗</div> <div>廢棄物回收再利用</div>	ASTM 2013b	
原物料	<div>經濟面</div> <div>GSR評估核心元素與原則 效益</div> <div>直接經濟影響 專案財務成本</div>	2013b	
原物料		2013b	

點選放大鏡

圖 9.7-1 BMPs 最佳管理措施篩選原則

表 9.7-1 BMPs 實施紀錄表（範例）

類別	BMPs	面向	GSR 原則	實施階段				紀錄文件
				調查	方案 選取 與設 計	設置 設備	整治 系統 操作 與監 測	
調查與 分析	與有綠色政策或綠色化學分析的實驗室簽約	環境	全	✓			✓	契約影本，綠色政策或綠色化學證明文件
	使用被動式或不洗井的採樣方法	環境	最小化水資源使用影響	✓			✓	採樣紀錄 與傳統調查方法 比較廢水產生量
專案 管理	在承包商招標文件或契約上擬訂 GSR 要求	環境	全	✓		✓	✓	契約文件 GSR 內容影本
	召開調查成果說明會，說明污染情形	社會	資訊公開	✓				會議紀錄、會議照片
	進行場區人員與污染改善人員健康風險評估	社會	考量整治前與整治中人體健康風險		✓	✓	✓	健康風險評估報告
	僱用當地勞工或採用當地原物料	環境、 社會	減少溫室氣體排放、減少空氣污染物排放、極大化專案誘發之總體工作機會增加			✓	✓	勞雇證明
原物料	當同一場址要進行多輪採樣時，避免使用即丟式採樣器具	環境	減少資材與廢棄物產生	✓			✓	說明所採取之非即丟式採樣工具
電力與 燃料	當進入漸進狀態 (asymptotic condition) 時，使用間歇性取代連續性注藥或抽氣	環境	採行節能措施、降低空氣污染物、降低溫室氣體排放				✓	操作時間調整、電力減少量
液/固 體廢棄 物	使用脫水設備以減少固體廢棄物，減少離場運輸	環境	降低空氣污染物、降低溫室氣體排放		✓	✓	✓	脫水設備說明、因減少離場運輸的溫室氣體減量計算紀錄
場址整 理與復 原	最小化調查與整治過程中樹木的移除	環境	減少土壤與生態系衝擊	✓		✓		說明整治前後場址內的植物保留情形

9.8 現地化學氧化主要環境足跡來源與最佳管理措施建議

土壤及地下水污染整治工作其目的是期望可以將地下環境介質中的污染物分解或轉換為無毒的型態，進而恢復其品質，避免健康危害。而 GSR 則是進一步的期望透過評估程序，考量環境、社會與經濟的影響，使污染改善工作在這三個面向上的衝擊或影響最小化，淨效益最大化。目前污染整治工作的發展，在 GSR 上，主要朝向 2 個方向發展：(1)針對既有技術進行最佳化、(2)開發低衝擊的新技術。現地化學氧化技術對於環境、社會與經濟的影響已被歸納如表 9.8-1 所示。現地化學氧化或其他既有的整治工法對於三個面向的影響已被大量討論與研究，這些正面或負面的效益或影響與場址本身有及大的關聯，因此在評估時，仍然需要針對每個場址作計算、評估與討論。

以溫室氣體(green house gases, GHGs)排放為例，不同氧化劑與不同的製造方式，其 GHGs 排放有及大的差異。例如過錳酸鉀的 GHGs 排放量約為 4 ton CO₂/ton KMnO₄，但過硫酸鈉為 1.25 ton/ton、H₂O₂ 則為 1.2 ton/ton，而更早期的製程排放量會更高，同時這也取決於化學藥劑製造過程所使用的能源種類。因此在使用這些參數時，需要特別注意其參數來源的評估邊界(T.J. Simpkin et al, 2012)。

表 9.8-1 現地化學氧化對環境、社會與經濟之影響

正面影響	負面影響
減低地下環境中污染物的質量，可減低對人體與環境的風險	在整治過程中產生的 GHGs 排放(如氧化劑的生產、運送、設井或注藥)
可以使受損的資源回復期期原本的用途(如土地利用、再開發或生態利用)	在整治過程中產生的空氣污染物(如氧化劑的生產、運送、設井或注藥)
從整治工作或未來土地再利用創造工作機會與價值	在整治過程中非再生能源的消耗(如氧化劑的生產、運送、設井或注藥)
-	在注藥過程中消耗的水資源
-	在整治過程或藥劑運送過程中產生的交通意外

參考文獻：整理自 T.J. Simpkin et al, 2012

由於現地化學氧化是一項現地工法，總體來說，注藥設施的設置或系統操作產生的環境足跡相較於化學藥劑的使用與運送來的低(但仍需要考慮計

劃期程、場址規模等差異)，因此藥劑使用量的最佳化是減低環境足跡最需要注意的事情。

以下就 ISCO 最常見的幾項最佳管理措施進行說明：

- 一、減少氧化劑使用量，或是在許可下採用整治列車方式，至整治後期改用監測式自然衰減或加強式生物復育(因為商品化的乳化油 GHGs 排放量約為 0.43ton/ton)
- 二、採用或開發使用長效型的氧化劑
- 三、採用可更「精準」與目標污染物反應的氧化劑或方法，避免傳統氧化方法的不專一性而造成藥劑的浪費。例如針對性的小區域注藥等。
- 四、直接從來源取得氧化劑，如此可以減少更少的能耗、減低 GHGs 產生
- 五、使用當地或鄰近地區生產製造的氧化劑，如此可以減低交通運輸產生的 GHGs 與交通風險
- 六、使用再生能源(如太陽能板)或其它方法注藥(如重力流)，來減低泵浦的能耗。
- 七、可考慮採用被動式採樣方法

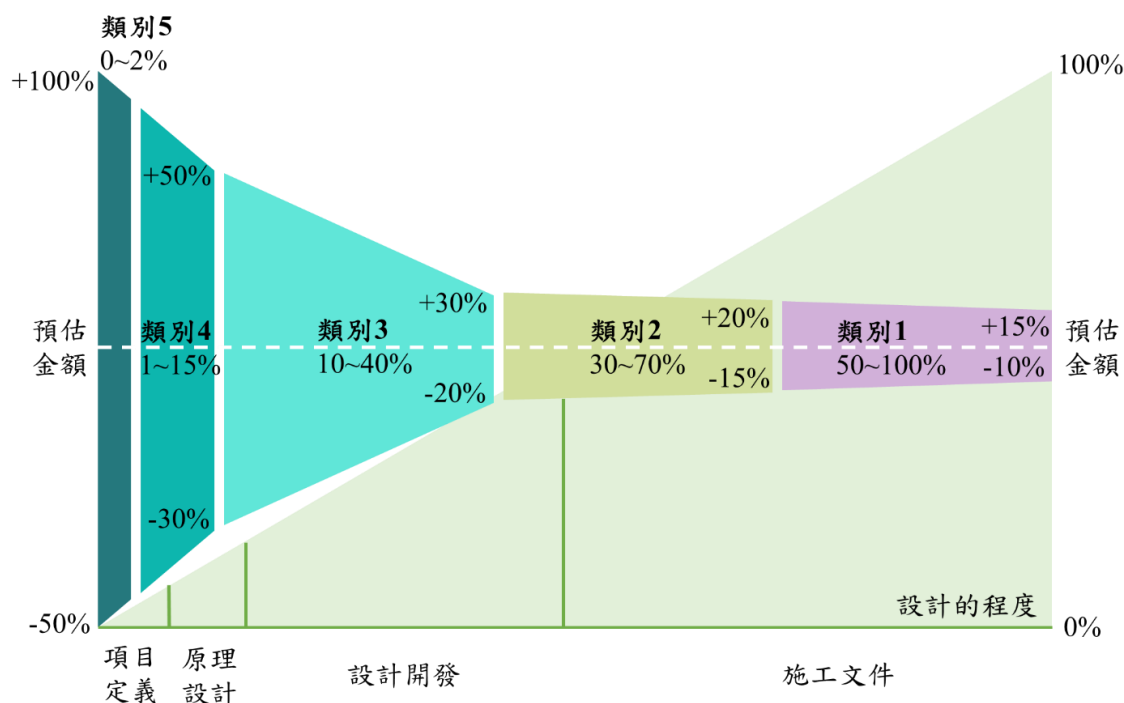
第十章 整治成本估算

在整個改善污染過程中，整治成本的估算是不可或缺的重要一環，在有限的經費下，應對整治成本進行完善的估算，用來確認污染改善工作所需成本，及達到污染改善初期預估成本後續分配以降低總成本之目的。

因整治成本的估算受到許多現場作業設計的影響，故本章僅說明進行成本估算時應評估面向，提供污染改善相關單位進行該項工作之參考，並提及一些國外場址所列出的整治成本。

10.1 類別估算

成本估算可以通過多種方式和不同層級的細節來準備，本節概述成本估算的類別並討論分類方法，美國成本工程國際推進協會(American Association of the Advancement of Cost Engineering International, AACEI)對於成本估算定義了五種類別，這些類別因開發估算所用的方法而異，如圖 10.1-1。



參考文獻：修改自 Siegrist, 2011

圖 10.1-1 ISCO 工程成本估算精準範圍圖

在圖 10.1-1 中最左側的類別 5 一般是概念、篩選或可行性成本的估算，通常用於改善作業的替代方案時，用有限的資訊來做初步的成本估算。類別 5 的誤差範圍則較大一些大約是+100~-50%，由於資訊較少能做的估算也有很大的浮動。

在改善工程工作中，類別 4 或類別 3 則較常見，類別 4 是預先或概念設計的可行性研究估算，為可行性研究準備的估算，而誤差範圍大約落在+50~-30%。類別 3 為較詳細的設計開發或系統設計時的預估成本，通常受限於設備供應商或供應商的報價，但不包括詳細的設備安裝與拆除成本，成本估算精準值大約+30~-20%。

類別 2 至類別 3 為工程設計時的成本估算，從類別 2 開始就比較細部工作、設備選用、氧化劑選擇、注藥量計算及執行時間與人力成本等。而類別 1 的成本估算是基於設備供應商提供的細節(如管線數量與長度的測量、管線材料、貯槽大小與材質等)和供應商所提供的詳細單價，通常類別 1 的成本估算精準值約在+15~-10%。

美國環保局在可行性研究期間制定和記錄成本估算指南(USEPA, 2000)，可以於實施成本估算之前參考此指引。

10.2 成本估算範例

基於上一節 5 個類別的分級，一般在設計成本估算表格是用於第 5、4、3 類別居多，由於高於類別 3 的估算較詳細，應使用供應商或承包商的報價會較妥當。對於類別 5 或 4 可以使用較制式的表來協助成本估算，本節採用國外文獻所提供的成本估算表作為使用者在成本估算時的一個參考依據。

為說明 ISCO 應用的成本估算，採用國外文獻假設的污染場址，表 10.2-1 敘述了這個場址的污染狀況、地質條件等，表 10.2-2 描述此場址的概念設計和假設，而表 10.2-3~10.2-6 則提供詳細的成本明細，表 10.2-7 則為總成本估算。以下簡單闡述此假設場址之現況。這個場址於 2009 年在污染源區設計 25 個注入井，使用的氧化劑為過硫酸鹽，假設第一年進行第一次注藥作業，第二年執行第二次注藥，成本包括 3 年的運作和監測等工作。

表 10.2-1 假設場址的概況範例

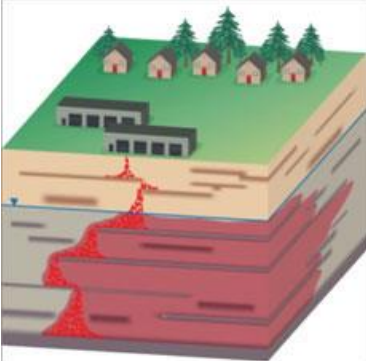
X 場址		污染物
<ul style="list-style-type: none"> • X 場址含有氯苯，其中地下水的總氯化揮發性有機化合物 (CVOC) 濃度高達 30500mg/L，以多達 40000mg/kg 的濃度存在於孔隙介質中。 • 通過現場調查已經確定在 100x100 英尺的範圍內，污染物深度在地下 10 至 30 英尺之間。 • 此場址是可滲透和異質性高的冰川沉積物，平均水力傳導係數為 50 英尺/天。 • 現場的整治目標是減少污染物質量。 		<ul style="list-style-type: none"> • 氯苯 • 總 CVOCs 濃度高達 30500mg/L • 在某些區域疑似有 DNAPL • 影響深度為 10-30 英尺
示意圖		地質條件
		<ul style="list-style-type: none"> • 冰川沉積物 • 可滲透且異質性高 • 水力傳導係數 50 英尺/天 • 目標：減少 CVOC 的質量

表 10.2-2 概念設計和假設概述範例

成本估算假設-直接注入井				
場址：X 場址		編寫者：P. Eng		
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89		
說明：活化過硫酸鹽注入井				
	值	單位	值	單位
1.場址背景資料				
改善區				
目標地下水污染區域長度	100	ft		
目標地下水污染區域寬度	100	ft		
受污染地下水區域面積	10,000	sf		
注藥頂部間隔	10	ft bgs		
注藥底部間隔	30	ft bgs		
飽和層厚度	20	ft		
總孔隙率	0.4			
受污染的地下水體積	598,440	gal		
總固體密度	110	lb/cu ft		
污染土壤的體積	7407	cy		
污染土壤的質量	22,000,000	lb		

表 10.2-2 概念設計和假設概述範例(續)

成本估算假設-直接注入井				
場址：X 場址		編寫者：P. Eng		
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89		
說明：活化過硫酸鹽注入井				
	值	單位	值	單位
2.氧化劑輸送				
優選的氧化劑	過硫酸鹽			
改善所需的注藥孔隙體積	1			
目標注藥體積	598,440	gal		
目標注藥體積(來自供應商或其他)	-	Gal		
使用者選擇注藥量	598,440	gal		
注入率	10	gpm		
同時注入井數	8			
注藥時間(小時/天)	8	hours		
注藥總時間	16	days		
氧化劑劑量	4	g/kg soil		
氧化劑質量	88,000	lb	17,632	mg/L
所需的活化劑總量(類型和重量單位)	使用者輸入	→	44,000	lb
酸的總質量(類型和單位)	N/A	→		lb
3.注入系統設計				
注入井設計				
井間距	20			
井在假定網格中的位置	5	by	5	
井數	25			
注入井深	30			
總注入井長(所有注入井深加總)	750			
井口完井方法	嵌入式			
井口完井數量	25			
廢棄物產生量				
鑽孔方法	中空螺旋鑽			
鑽孔直徑	8	in		
廢土量	9.69	cy		
廢棄物容器化要求	36	55-gal drums		

表 10.2-2 概念設計和假設概述範例(續)

成本估算假設-直接注入井				
場址：X 場址		編寫者：P. Eng		
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89		
說明：活化過硫酸鹽注入井				
	值	單位	值	單位
現場管線設計(如果適用歧管或再循環設計)				
挖溝的長度	0	ft		
管道尺寸		in		
管道長度		lf		
管道基底數量		cy		
回填量		cy		
挖掘廢棄物數量		cy		
4.監控系統設計				
新設監測井數量	3			
新設監測井深	30			
新設井總長(所有監測井深加總)	90			
井口完井方法	嵌入式			
井口完井數量	3			
廢棄物產生量				
鑽孔方法	中空螺旋鑽			
鑽孔直徑	8	in		
廢土量	1.16	cy		
廢棄物容器化要求	5	55-gal drums		
須採樣的監測井總數	4			
每年進行幾次抽樣	4			
每年採樣總井數	16			
估計每次每口井總樣本數	1			
估計每年樣本總數	24			
5.施工時間				
鑽孔的總直線長	840			
鑽機速率(含完井)	100	ft/day		
鑽機現場的天數	8	days		
現場設備製造的天數(如適用)	0	days		
挖溝的總直線長	0			
挖溝速率(包括管材和回填)	200	ft/day		
挖溝天數	0	days		

表 10.2-2 概念設計和假設概述範例(續)

成本估算假設-直接注入井				
場址：X 場址		編寫者：P. Eng		
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89		
說明：活化過硫酸鹽注入井				
	值	單位	值	單位
設備運作天數	2	days		
施工總天數	10	days		
6.注藥時間				
運作和現場設置的總天數	2	days		
注藥時間	16	days		
設備設置時間	50	hours(假設：每口井 1 小時設置，1 小時故障)		
注藥總天數	18	days		
7.整治後系統關閉				
廢棄井	28	wells		
系統完全關閉的天數	9	days		
設備移除的總天數	1	day		
場址恢復天數	10	days		

注：bgs-地面下，cu ft-立方英尺，cy-立方碼，ft-英尺，gal-加侖，gpm-加侖每分鐘，in-英寸，lb-磅，lf-直線英尺，sf-平方英尺

文獻：Siegrist, 2011；備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

表 10.2-3 詳細成本明細-資本成本範例

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價	價格	建議和參考
資本成本					
施工					
模場試驗					
污 染源區模場試驗	0	ea	\$50,000.00	\$0	確定最佳氧化劑與 注藥劑量
設井與挖溝承包商					
設井工程	1	ea	\$2,500.00	\$2,500	中空螺旋鑽
注藥井安裝	750	lf	\$50.00	\$37,500	Sch40 PVC
注藥井口完井	25	ea	\$400.00	\$10,000	嵌入式

表 10.2-3 詳細成本明細-資本成本範例(續)

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
監測井安裝	90	lf	\$40.00	\$3,600	中空螺旋鑽
設井設備	1	LS	\$2000.00	\$2,000	包括水質儀、泵、發電機、油管
監測井口完井	3	ea	\$400.00	\$1,200	嵌入式
設井許可證	28	ea	\$30.00	\$840	假設每口井 1 個
IDW 土壤處理	41	drum	\$350.00	\$14,350	假設特性、管理、儲存、運送
鑽井承包商津貼費用(以日計)	10	days	\$624.00	\$6,240	假設所有支出(膳食、住宿等)
監工					
施工/安裝監工	125	h	\$70.00	\$8,736	假設一天 12 小時
設井操作人員	56	h	\$70.00	\$3,920	假設每口井 2 小時
系統啟動監工	0	h	\$90.00	\$0	
成本小計				\$90,886	
現場工作津貼	0%	of	\$90,886.00	\$0	
機械津貼	0%	of	\$90,886.00	\$0	
儀表和控制津貼	0%	of	\$90,886.00	\$0	
電費津貼	10%	of	\$90,886.00	\$9,089	
其他設備津貼	0%	of	\$90,886.00	\$0	
成本小計				\$99,975	
計畫管理	8%	of	\$99,974.60	\$7,998	
設計	15%	of	\$99,974.60	\$14,996	
施工管理	5%	of	\$99,974.60	\$4,999	
成本小計				\$127,967	
G&A	5%	of	\$127,967.49	\$6,398	
現場開銷	5%	of	\$127,967.49	\$6,398	
稅				\$0	
應急費用	15%	of	\$127,967.49	\$19,195	
成本小計				\$159,959	
合約保險	2%	of	\$159,959.36	\$3,199	
費用	8%	of	\$159,959.36	\$12,797	
總成本				\$175,955	

注：ea-每個，G&A-一般和行政，h-小時，IDW-調查衍伸廢棄物，lf-直線英尺，LS-總額，Sch40 PVC-40 號 PVC 管

文獻：Siegrist, 2011；備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

表 10.2-4 詳細成本明細-第一年實施和監測成本範例

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
第一年實施和監測					
地下水採樣					
人員操作費用	96	h	\$55.00	\$5,280	2 名人員，3h/井
地下水樣品分析	24	樣品	\$450.00	\$10,800	VOC/MNA/ 重金屬分析，包含 QA/QC 樣品和數據驗證
採樣用品	4	round	\$500.00	\$2000.00	包含消耗品，運費
地下水採樣設備租借	4	round	\$1,300.00	\$5,200	包含水位計、水質儀、泵、發電機
總地下水採樣費用				\$23,280	
注藥					
承包商人事費和津貼(以日計)	2	days	\$900.00	\$1,800	包含所有設備支援、氧化劑運輸和實施費用
氧化劑供應	88,000	lb	\$1.75	\$154,000	包含運送和操作
活化劑供應	44,000	lb	\$0.39	\$17,160	25%NaOH 溶液
酸調理劑供應	0	lb	\$1.30	\$0	
注藥和混合設備租借	16	days	\$100.00	\$1,600	
注藥承包商費用	16	days	\$6,000.00	\$96,000	
工程師/水文地質專家費用	160	h	\$90.00	\$14,400	
總系統啟動費用(一次注入作業)				\$284,960	
注藥次數(第一年)	1	次			
總注藥費用				\$284,960	
報告					
工程師/水文地質專家費用	160	h	\$90.00	\$14,400	
編輯費用	20	h	\$65.00	\$1,300	
CAD 技術人員費用	8	h	\$75.00	\$600	
總報告費				\$16,300	
注藥實施和監測小計				\$324,540	
計畫管理	8%	of	\$324,540.00	\$25,963	
技術支援	5%	of	\$324,540.00	\$16,227	
施工管理	0%	of	\$324,540.00	\$0	
第一年運作和監測小計				\$366,730	

表 10.2-4 詳細成本明細-第一年實施和監測成本範例(續)

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
G&A	5%	of	\$366,730.20	\$18,337	
現場開銷	5%	of	\$366,730.20	\$18,337	
稅				\$0	
應急費用	15%	of	\$366,730.20	\$55,010	
第一年運作和監測小計				\$458,413	
合約保險	0%	of	\$458,412.75	\$0	合約只適用資本成本
費用	8%	of	\$458,412.75	\$36,673	
第一年運作和監測總成本				\$495,086	

注：CAD-電腦輔助設計，G&A-一般和行政，h-小時，lb-磅，MNA-監測式自然衰減，NaOH-氫氧化鈉，QA/QC-品保品管，VOC-揮發性有機化合物

文獻：Siegrist, 2011；備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

表 10.2-5 詳細成本明細-第二年與第三年實施和監測成本範例

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
第二年實施和監測					
地下水採樣(第一年成本的%)	50%	of	\$23,280.00	\$11,640	
注藥(第一年成本的%)	75%	of	\$284,960.00	\$213,720	
報告(第一年成本的%)	50%	of	\$16,300.00	\$8,150	
專業服務(第一年成本的%)	50%	of	\$42,190.20	\$21,095	
第二年運作與管理小計				\$254,605	
G&A	5%	of	\$254,605.10	\$12,730	
現場開銷	5%	of	\$254,605.10	\$12,730	
稅		of		\$0	
應急費用	15%	of	\$254,605.10	\$38,191	
第二年運作與管理小計				\$318,256	
合約保險	0%	of	\$318,256.38	\$0	合約只適用資本成本
費用	8%	of	\$318,256.38	\$25,461	
第二年實施和監測總成本				\$343,717	

表 10.2-5 詳細成本明細-第二年與第三年實施和監測成本範例(續)

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
第三年實施和監測					
地下水採樣(第一年成本的%)	25%	of	\$23,280.00	\$5,820	
注藥(第一年成本的%)	75%	of	\$284,960.00	\$0	
報告(第一年成本的%)	25%	of	\$16,300.00	\$4,075	
專業服務(第一年成本的%)	25%	of	\$42,190.20	\$10,548	
第三年運作與管理小計				\$20,443	
G&A	5%	of	\$20,442.55	\$1,022	
現場開銷	5%	of	\$20,442.55	\$1,022	
稅		of		\$0	
應急費用	15%	of	\$20,442.55	\$3,066	
第三年運作與管理小計				\$25,553	
合約保險	0%	of	\$25,553.19	\$0	合約只適用資本成本
費用	8%	of	\$25,553.19	\$2,044	
第三年實施和監測總成本				\$27,597	
第二年與第三年總實施和監測成本				\$371,314	

文獻：Siegrist, 2011

備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

表 10.2-6 詳細成本明細-系統關閉後成本範例

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
關閉後成本					
關閉報告					
工程師/水文地質專家費用	80	h	\$90.00	\$7,200	
編輯費用	16	h	\$65.00	\$1,040	
CAD 技術人員費用	8	h	\$75.00	\$600	
總關閉報告成本				\$8,840	

表 10.2-6 詳細成本明細-系統關閉後成本範例(續)

成本估算假設-直接注入井					
場址：X 場址		編寫者：P. Eng			
替代方案：污染源整治		項目編號：012345.67.89			
說明：活化過硫酸鹽注入井					
項目/工作	數量	單位	單價(美元)	價格(美元)	建議和參考
廢井與設備復原					
廢井	28	well	\$300.00	\$8,400	假設注藥井和新設監測井的廢棄
廢井許可證	28	well	\$30.00	\$840	假設設備回收與運費
設備復原	1	dat	\$500.00	\$500	PID
設備租借	1	week	\$200.00	\$200	
廢井與設備復原小計				\$9,940	
現場工作津貼	10%	of	\$9,940.00	\$994	
機械津貼	10%	of	\$9,940.00	\$994	
儀表和控制津貼	0%	of	\$9,940.00	\$0	
電費津貼	0%	of	\$9,940.00	\$0	
其他設備津貼	0%	of	\$9,940.00	\$0	
總廢井與設備復原成本				\$11,928	
關閉後成本小計				\$20,768	
計畫管理	8%	of	\$20,768.00	\$1,661	
技術支援	15%	of	\$20,768.00	\$3,115	
施工管理	15%	of	\$20,768.00	\$3,115	
關閉後成本小計				\$28,660	
G&A	5%	of	\$28,659.84	\$1,433	
現場開銷	5%	of	\$28,659.84	\$1,433	
稅				\$0	
應急費用	20%	of	\$28,659.84	\$5,732	
關閉後成本小計				\$37,258	
合約保險	2%	of	\$25,553.19	\$745	
費用	8%	of	\$25,553.19	\$2,981	
關閉後總成本				\$40,984	

注：CAD-電腦輔助設計，h-小時，PID-光離子化檢測器

備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

參考文獻：Siegrist, 2011

表 10.2-7 總成本範例

場址：X 場址	編寫者：P. Eng	
替代方案：污染源整治	項目編號：012345.67.89	
資本成本總額百分比		% of total
施工(設井)	\$99,975	
項目管理	\$7,998	
設計	\$14,996	
施工管理	\$4,999	
開銷、稅、合約、保險	\$15,996	
費用	\$12,797	
應急	\$19,195	
總資本成本	\$175,955	16%
年度運營和監測		
地下水採樣	\$23,280	3%
注藥	\$284,960	36%
報告	\$16,300	2%
專業服務	\$42,190	5%
開銷、稅、合約、保險	\$36,673	
費用	\$36,673	
應急	\$55,010	
第一年運營和監測	\$495,086	
剩餘年度運營和監測		
第二年注藥監測和報告	\$288,522	27%
第三年監測和報告	\$55,195	5%
第三年	\$27,597	3%
剩餘年度運營和監測總計	\$371,314	
關閉後成本		
關閉報告	\$8,840	
廢井和設備復原	\$11,928	
專業服務	\$7,892	
開銷、稅、合約、保險	\$3,611	
費用	\$2,981	
應急	\$5,732	
關閉後成本	\$40,984	4%
關閉成本	\$1,083,339	100%
	\$111	每立方公尺
總成本	\$1,047,220	

備註：各項計算為民國 98 年當時執行費用

上述範例的例子以國外文獻來看，大約是排在類別 4 的級別，誤差範圍落在+50%~-30%中，會有較大的成本誤差主要原因是具體設計的細節只有在該項目實際執行之後才會知道。可能影響成本的因素包括現場條件、整治範圍與整治時間、設計的細節、投標時的狀況和其他可能的市場競爭條件，施工和運作期間的變化、生產率、利率、操作人員人數、設備租借費用，還有稅或其他行政上的變數。因此實際成本可能會與這些估算上有所出入。

由於不同氧化劑所使用的設備與運輸方法有些不同，加上場址大小、污染深度、自然有機物的消耗、低水力傳導係數、異質性的程度、整治目標、污染物種類與可能遇到的風險等等因素，因此，很難去比較 ISCO 與其他整治技術的成本。本節提供範例僅供使用者參考作為初步的成本估算，詳細的成本應依照承包商或廠商提供的單價作為估算成本的基礎。

第十一章 案例解析

國內使用 ISCO 方法進行的場址不算少，大多污染類型為油品污染場址(包含加油站、油庫與儲槽類)，且主要是 ISCO 搭配 SVE 的方法進行污染改善，本章說明分別以國內外 ISCO 案例經驗分析之內容進行闡述，以利使用者對於此方法之實例應用有一定的了解。

11.1 國內案例

一、案例場址背景

場址為國內一處污染加油站場址，場址內包含營業站屋、油槽、加油泵島、洗車區及泵島停用改建之保修倉庫。場址於民國 78 年建造並於 95 年終止營業。有 6 座油槽、7 座泵島，西側 3 座已於 83 年間停用，現為保修場倉庫，終止營業前僅使用東側 4 座。根據歷年檢測結果初步評估主要的土壤污染 Hot Spot 區域為油槽區周圍及加油泵島區之間，於 95 年 5 月終止後應無污染源持續洩漏問題。根據標準監測井施測絕對高程後之水為量測及校正結果並以 SURFER 軟體推估本場址地下水可能流向為油東向西(局部偏西南或西偏北)流動。根據場址中心位置所進行之地質鑽探分析結果顯示，自地表下 1~7.5 公尺之土壤性質以細砂及粉土質細砂為主；粉土之比例不超過 25%，自 7.5 公尺以下粉土所佔比例逐漸增加，自 10~15 公尺以細砂質粉土為主，並夾雜 12~19% 比例之黏土。經微水試驗調查結果顯示 K 值介於 $1.54\sim4.33\times10^{-4}\text{cm/sec}$ 之間，符合本場址砂質土壤特性。

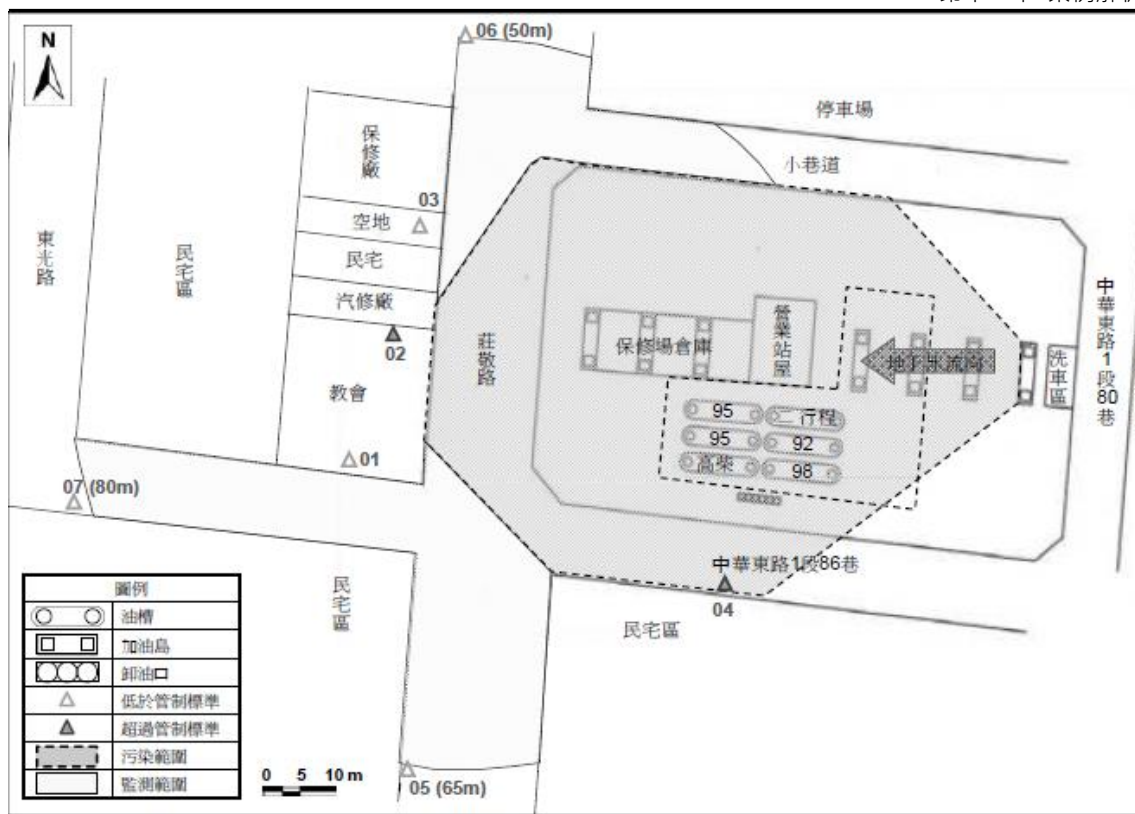


圖 11.1-1 場址設施配置及基本地下水文圖

二、污染說明

場址於民國 95 年經環保署公告為土壤及地下水污染整治場址，土壤污染物為：苯、乙苯、甲苯、二甲苯、總石油碳氫化合物。地下水中污染物為：苯、甲苯、萘、1,2-二氯乙烷、總酚。

經歸納歷年土壤採樣位置及檢測結果，評估主要的土壤污染 Hot Spot 區域為油槽區周圍及加油泵島區之間，地下水污染方面，苯的濃度達管制標準的次數較多，為主要關切之地下水污染物。地下水污染 Hot Spot 區域與土壤相若，位於油槽區及加油泵島之間，污染深度由 95 年所作之 32 點次 MIP 調查中發現 Hot Spot 區域之污染濃度主要分布於地底下 3~5 公尺處，部分深及 6 公尺。

三、系統設計及現場作業

(一) 規劃主軸

整治工作分成兩階段執行，第一階段整治工作將場址分為四個

不同區域(第 I 區、第 II 區、第 III 區以及局部污染控制/改善區域)，依照污染程度不同而進行不同的整治策略。

第 I 區為開挖移除區域，根據歷年土壤、地下水採樣檢測、MIP 等相關調查後劃定之高污染區，第 II 區、第 III 區為現地化學氧化模場實施區域，此區域地下水污染濃度為場址內除第 I 區範圍外次高者，因此擇下、下游 2 處做為可行性評估及模場實施區域，作為後續全場整治方案之參考。局部污染控制/改善區域為除第 I、II、III 區外場址內調查結果顯示受污染區域，因場址地下水污染情形已達地下水流向下游周界，因此需持續進行周界之污染控制及改善措施，避免污染持續擴散，將採取監測式自然衰減(MNA)方式持續監測土壤、地下水品質，若監測期間發現污染物濃度突然上升，則以局部加藥方式因應。

(二) 現場作業

考量第 I 區之污染程度甚為嚴重，為免土壤中殘留相一再隨著地下水為升降污染地下水，增加後續地下水污染整治之困難度，也因場址已歇業，未來亦不再作加油站使用，地下油槽設施無使用必要，決定採開挖方式移除高污染區土壤及地下油槽。現場作業包含打設鋼板樁、土壤離場、淋灑化學藥劑、開挖區回填、拔除鋼板樁、污染物濃度監測評估以及整治井群。

第 II 及第 III 區為現地化學模場試驗區域，規劃為於第 II 區設置 3 口注藥井，另設置 6 口簡易監測井組成一小單元(初設井群間距以 3~5 公尺暫估)，進行 1 批次為期 4~6 週之注藥測試及成效評估。上述小單元實施完畢後，再決定是否重複批次或逐漸擴大設置注藥、監測井群進行較大範圍單元之注藥監測與成效評估。順序上先將第 II 區模場成效評估完成後再進行條件較複雜之第 III 區模場試驗。此外，當第 II 區全區之化學氧化法成效評估完成，以小單元逐漸放大之設置方式，配置相關之 SVE 及 AS 井群進行模場試驗，增加其他整治方式之可行性評估。

污染控制/改善區域污染程度相對輕微，因此採取小範圍之批

次注藥方式，控制污染情形，對於場外污染問題之處理對策將採取監測式自然衰減方式，以每 3 個月 1 次的頻率持續監測土壤、地下水品質，並於實施 1 年後評估後續處理方式，若發現監測位置濃度突然上升即採局部加藥方式因應。

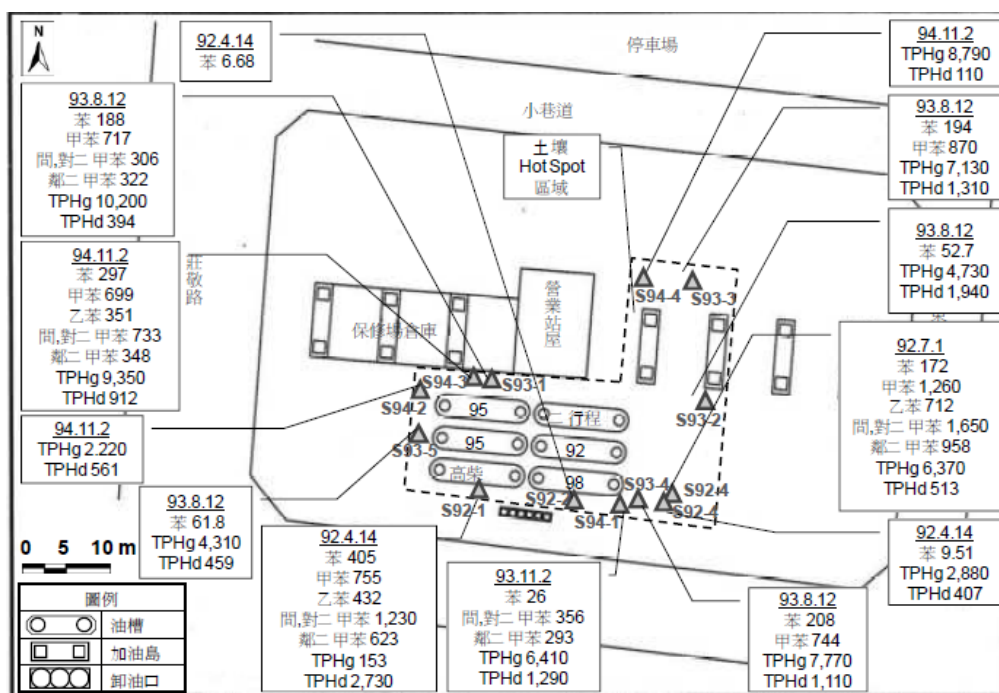


圖 11.1-2 歷年土壤調查超過管制標準點位及濃度

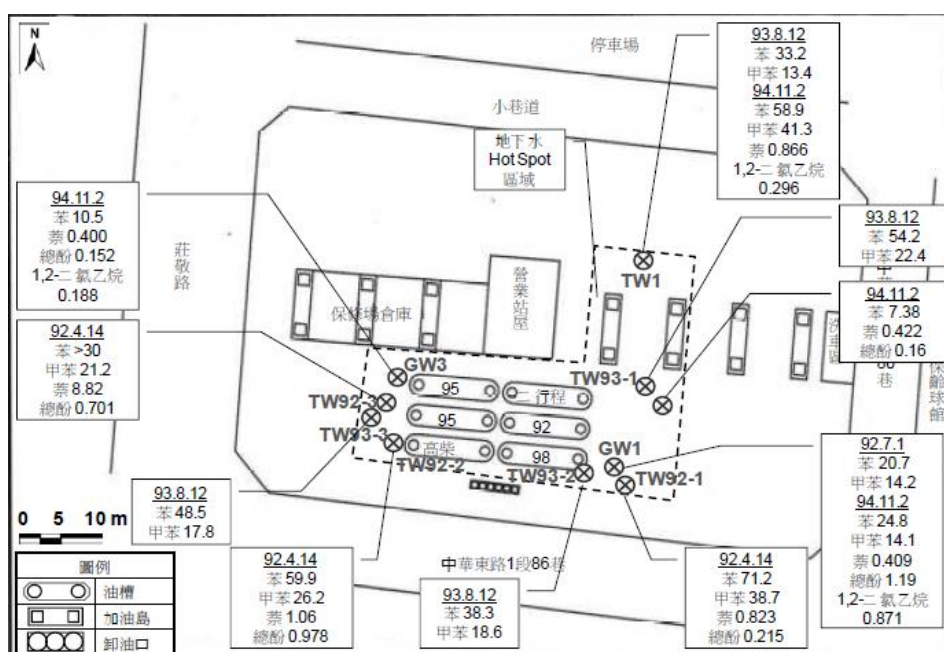


圖 11.1-3 歷年地下水調查超過管制標準點位及濃度

四、整治成果

共執行兩次土壤驗證，第一次為 99 年 4 月進場驗證；但仍有乙處土壤有機物項目超過管制標準，於同年 8 月辦理第二次驗證工作，結果均符合法規標準。

第一次地下水驗證分析結果，僅少數監測井之第下氮氮、鐵、錳超過地下水監測基準，僅 GW-01 及 GW-09 之溶氧超過 4 mg/L，較常態地下水溶氧高。土壤驗證分析結果，於 S05 採樣深度 360~420 cm 處，測得二甲苯(間- & 對-二甲苯及鄰-二甲苯)測值為 742 mg/kg，超過土壤管制標準約 1.5 倍，同深度土樣之 TPH 測值為 5,470 mg/kg，亦超過土壤污染管制標準。

第二次驗證於場址局部污染改善區(前次採樣超標位置)，位置為局部開挖區中心點及局部開挖區外之相對地下水下游處，土壤檢測結果有機物檢測值均為 N.D.；場址內地下水監測井 GW1 及 GW9 地下水溶氧值亦在合理範圍內(均 ≤ 1.0 mg/L)，且有機物檢測項目多數為 N.D.值並無超標情形，於 99 年 10 月解除列管。

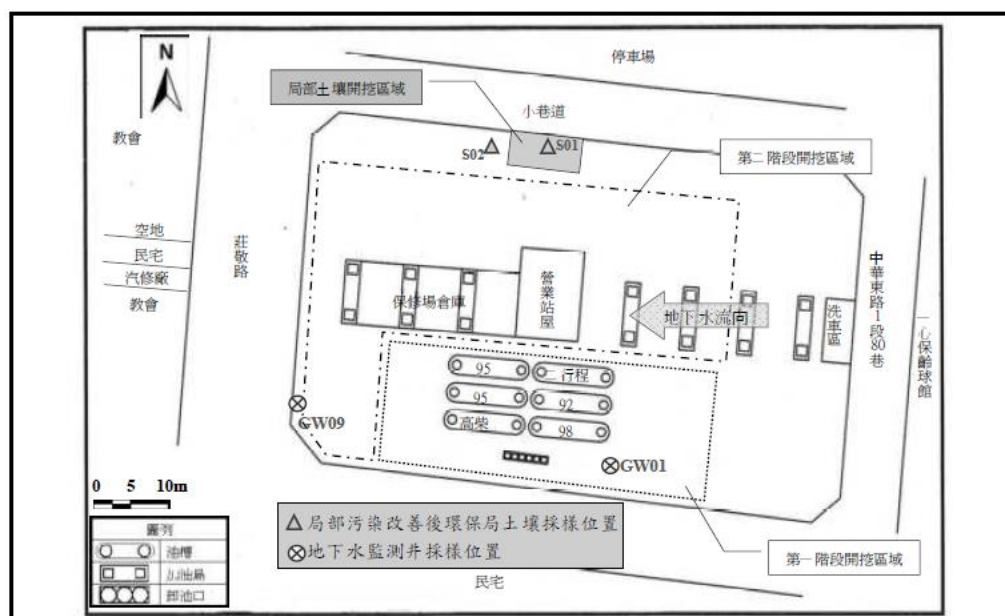


表 11.1-1 第二次土壤驗證彙整表

檢測項目	MDL	採樣點位置/深度(cm)		單位	管制標準
		S01	S02		
		210~240	360~420		
pH	—	8.2	7.0	—	—
氯乙烷	0.198	ND	ND	mg/kg	10
反-1,2-二氯乙烷	0.038	ND	ND	mg/kg	50
順-1,2-二氯乙烷	0.040	ND	ND	mg/kg	7
氯仿	0.247	ND	ND	mg/kg	100
四氯化碳	0.241	ND	ND	mg/kg	5
苯	0.040	ND	ND	mg/kg	5
1,2-二氯乙烷	0.043	ND	ND	mg/kg	8
三氯乙烷	0.035	ND	ND	mg/kg	60
1,2-二氯丙烷	0.040	ND	ND	mg/kg	0.5
甲苯	0.260	ND	ND	mg/kg	500
四氯乙烷	0.038	ND	ND	mg/kg	10
乙苯	0.241	ND	ND	mg/kg	250
間-與對-二甲苯	0.461	ND	ND	mg/kg	500
鄰-二甲苯	0.220	ND	ND	mg/kg	
1,3-二氯苯	0.276	ND	ND	mg/kg	100
1,2-二氯苯	0.241	ND	ND	mg/kg	100
2,4,6-三氯酚	0.055	ND	ND	mg/kg	40
2,4,5-三氯酚	0.067	ND	ND	mg/kg	350
六氯苯	0.068	ND	ND	mg/kg	500
五氯酚	0.070	ND	ND	mg/kg	200
3,3'-二氯聯苯胺	0.061	ND	ND	mg/kg	2
TPH-G	4.21	ND	ND	mg/kg	1000
TPH-D	23.2	ND	ND	mg/kg	
TPH	23.2	ND	ND	mg/kg	1000

註：1. 'ND'表示低於方法偵測極限；'MDL'表方法偵測極限。

2. 採樣日期：99.8.23

表 11.1-2 第二次地下水驗證結果彙整表

檢測項目	MDL	井號		單位	管制標準
		GW01	GW09		
pH 值	—	7.6	7.6	—	—
導電度	—	281	285	μmho/cm	—
溶氧	—	0.7	1.0	mg/L	—
氧化還原電位	—	183.0	171.5	mv	—
水溫	—	29.7	30.3	—	—
水位	—	2.11	1.13	m	—
總酚	0.0027	0.0412	0.0212	mg/L	0.140
氯甲烷	0.00058	ND	ND	mg/L	0.30
氯乙烷	0.00043	ND	ND	mg/L	0.020
1,1-二氯乙烷	0.00057	ND	ND	mg/L	0.070
二氯甲烷	0.00027	<QDL(0.001)	ND	mg/L	0.050
甲基第三丁基醚	0.00043	ND	ND	mg/L	—
反 1,2-二氯乙烷	0.00074	ND	ND	mg/L	1.0
1,1-二氯乙烷	0.00052	ND	ND	mg/L	8.50
順 1,2-二氯乙烷	0.00041	ND	ND	mg/L	0.70
氯仿	0.00063	0.0410	0.0840	mg/L	1.0
四氯化碳	0.00050	ND	ND	mg/L	0.050
苯	0.00046	ND	ND	mg/L	0.050
1,2-二氯乙烷	0.00068	ND	ND	mg/L	0.050
三氯乙烷	0.00042	ND	ND	mg/L	0.050
甲苯	0.00057	ND	ND	mg/L	10
1,1,2-三氯乙烷	0.00042	ND	ND	mg/L	0.050
四氯乙烷	0.00037	ND	ND	mg/L	0.050
氯苯	0.00041	ND	ND	mg/L	1.0
乙苯	0.00021	ND	ND	mg/L	7.0
間,對-二甲苯	0.00046	ND	ND	mg/L	100
鄰-二甲苯	0.00022	ND	ND	mg/L	
1,4-二氯苯	0.00048	ND	ND	mg/L	0.750
苯	0.00091	ND	ND	mg/L	0.40
TPH-G	—	<QDL(0.2)	<QDL(0.2)	mg/L	—
TPH-D	0.0171	ND	ND	mg/L	10

註 1. 'ND'表示低於方法偵測極限；'MDL'表方法偵測極限；'QDL'表可定量極限值；濃度高於 MDL 但小於 QDL，以 '<QDL'表示，並註明 QDL 值；—表無相關數值。

2. 採樣日期：99.8.23

11.2 國外案例

11.2.1 印地安納州紐卡斯爾之停業加油站 (ITRC, 2005)

一、案例場址背景

場址是在 New Castle, IN，前為販售汽油之加油站。汽油因地下儲油槽洩漏污染土壤地下水。低孔隙率(0.2)，估計地下水流速為 0.009m/d。場址地下水深度範圍為 2.4~4.6 公尺。非拘限水層因地下水季節性波動存在 1.2 公尺污染區域，現場原有之洩漏儲油槽及可辨別污染土壤幾已全部挖除。

二、污染說明

污染物是易揮發的有機化合物，特別是 BTEX 和 MTBE，現場監測井也發現浮油(LNAPL)，場址大約 237 平方公尺，污染物厚度大約 2.1 公尺(地表面下 2.4~4.6 公尺)，處理體積估計約為 504.6 立方公尺。

三、系統設計及現場作業

應用鐵催化過氧化氫(Fenton's)產生化學氧化劑自由基均勻散佈在緊密的土壤後，隨後注入過硫酸鈉。此預處理步驟係透過定製的直接推進水平噴射工具，在每間隔 0.6 公尺之垂直鑽孔區域連續注入過硫酸鈉溶液。

以這種方法，相對短效性氧化處理(Fenton's)被相對長效性氧化劑過硫酸鈉增大。影響半徑估計為 3 公尺。放熱的氧化過程的溫度持續監測和控制。溫度的提升不僅促進污染物從緊密土壤基體脫附且活化先前土壤基體裡之過硫酸鈉。現場人員在臨近監測井連續監控評估氧化劑成效且謹慎控制技術性能。地下水質量參數監測項目有溶氧、pH 值、比導電度，溫度，氧化/還原電位和地下水位。整治目標為印地安納州環境管理風險綜合系統工業區地下水污染物關場標準。

四、整治成果

最初在 2003 年 12 月使用芬頓(Fenton's)處理兩周的時間，使用 8 口穩定的注射井。此創新技術之成果非常有希望整治以前現地無法整治之

緊密土壤。整治目標容易達成如表 11.2-1 及圖 11.2-2，污染物持續減少的現象超過兩個月。

表 11.2-1 注入井內 BTEX 和 MTBE 整治成效檢測報告表

井編號	樣品日期	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	MTBE
工業區地下水 RISC 關場標準	單位 $\mu\text{g/L}$ 、ppb	99	20,000	10,000	180,000	720
AW-1	12/01/03	< 5	< 5	5.8	20	< 5
	12/23/03	26	19	< 5	210	< 5
	02/20/04	1.4	< 5	< 5	16	< 5
AW-2	12/01/03	12	< 5	6.4	17	< 5
	12/23/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
	02/20/04	< 1	< 5	< 5	< 10	< 4
AW-3	12/01/03	5.4	16	66	76	< 5
	12/23/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
	02/20/04	< 1	< 5	< 5	< 10	< 4
AW-4	12/01/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
	12/23/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
AW-5	12/01/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
	12/23/03	< 5	< 5	< 5	< 10	< 5
AW-6	12/01/03	67	290	33	220	< 5
	12/23/03	12	40	< 5	30	< 5
	02/20/04	< 1	< 5	< 5	< 10	< 4
AW-7	12/01/03	640	1,200	130	1,200	< 5
	12/23/03	16	< 5	< 5	< 10	< 5
	02/20/04	5	< 5	< 5	< 10	< 4
AW-8	12/01/03	700	6	< 5	16	< 5
	12/23/03	220	42	81	100	< 5
	02/20/04	40	< 5	< 5	15	< 4

註：樣品使用 USEPA SW-846 8260 方法分析

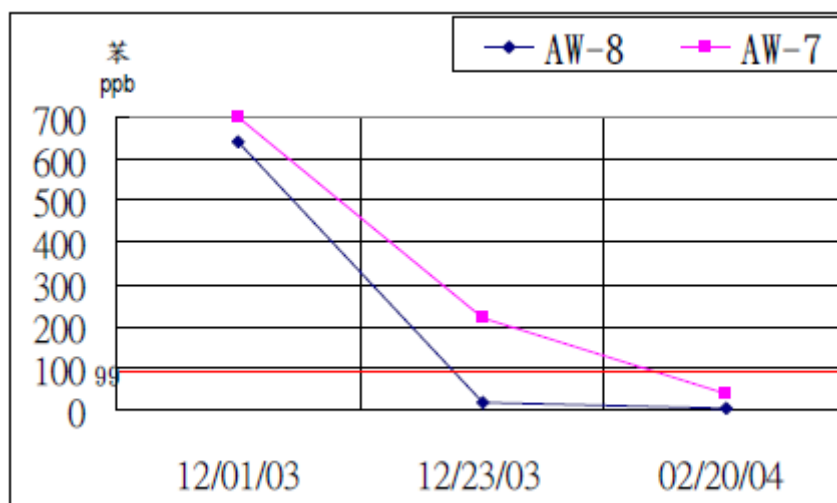


圖 11.2-1 監測井 AW-7 及 AW-8 之苯濃度變化圖

11.2.2 加州洛杉磯皮爾斯加油站 (ITRC, 2005)

一、案例場址背景

污染團約距加油站的西南方 150 英尺處，穿過兩條交通流量高的街道。地下水向西南方流動，水力梯度為 0.008 m/m，地下水流速估計為 0.012 m/d。洛杉磯地區水質管理局(LARWQCB)認為該區域淺層的地下水為飲用水源，且有一所高中(敏感區)位於場址下游，地下水含鐵量基線範圍為 6~338 mg/L 和總有機碳 17~35mg/L。地下水層沈積物為粘沙土，淤沙在地下水層的上層，低滲透性的黏土淤泥在下層。

二、污染說明

在這場址之污染物包括 BTEX 和 TPH 汽油(TPHg)，沒有 MTBE 污染物。污染團被拘限在淺層沖積層上，深度為地表面下 9.1~13.7 公尺。污染範圍約 656 平方公尺，地下水體積估計為 3,976 立方公尺。整治前苯最高濃度為 2,000 $\mu\text{g/L}$ ，TPHg 最高濃度為在 65,000 $\mu\text{g/L}$ 。

三、系統設計及現場作業

以場址之地球化學和水力參數應用專利模式評估場址設計注入參數

，和確定合適的氧化劑需要量。這個模式沒評估自然氧化需求（NOD）、土壤氧化需求（SOD）或自然有機物質（NOM），但可間接用模式計算氧化劑需要量。場址共設置 21 口注射井(篩孔在地表面下 9.4~14 公尺)且在大規模使用芬頓氧化劑整治技術。以早先低滲透性的土壤的經驗為依據，注射井之有效半徑估計約有 4.6 公尺，有效半徑係在場址內測量地下水水質參數的變化確認。井隔距約 7.6 公尺且重疊處理範圍涵蓋流離場址的污染團。地下水每口井先注入小量(189 公升)由硫酸亞鐵和鹽酸組成的催化劑溶液調和，然後過氧化氫(17.5%的溶液)以重力方式(不使用幫浦抽或加壓)注入地表面下。注入期間監控井內溫度，過氧化物注入速率要控制地下水溫度沒超過 180°F。經過操作 4 周，共 32,554 公升過氧化氫溶液(5,696Kg 過氧化氫)注入地下水裡，平均每口井注入量為 1,628 公升。

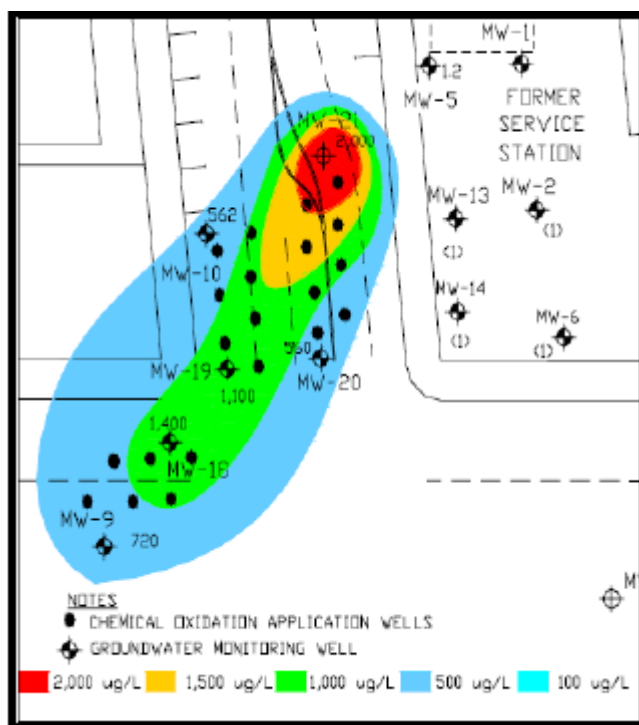


圖 11.2-2 苯之等濃度圖(2003 年 5 月)

四、整治成果

在這個場址使用芬頓氧化劑整治技術非常得成功。大多數污染區監測井地下水之苯濃度從 2,000 降到 240 $\mu\text{g/L}$ (88%削減率)，且 TPHg 濃度從 62,000 降到 4,300 $\mu\text{g/L}$ (93%削減率)。表 11.2-2 顯示場址之 6 口監測井苯的平均削減率為 96%，和 TPHg 平均削減率為 93%。

污染源區之幾口監測井初期 3 個月持續監測(2003 年 8 月)顯示污染濃度未低或輕微增加。但在 4 到 6 個月持續監測地下水後(2004 年 1 月)，全部監測井苯濃度顯著降低(平均 78%削減率)，Fenton's 試劑加入 6 個月後，苯之等濃度變化情況如圖 11.2-3(2004 年 1 月)。在持續整治一年後，苯濃度平均降低 96%。延遲的整治效應相信是因為強力地芬頓反應後污染物之吸附與溶解相之緩慢地再平衡。另也可能是因過氧化氫釋放的溶氧增加，生物激化效應出現。場址內生物激化效應可能持續發生幾個月，且苯濃度可能將繼續下降，這個場址未評估室內的空氣品質。最近的沒有現場具體情況清除目標已經被為這個網站建立。考慮污染源區域面積縮小和長期的生物激化效應與自然衰減對剩下低濃度苯的影響，這場址有關閉的資格，然而是否關閉仍需洛杉磯地區水質管理局(LARWQCB)作最後的確認。

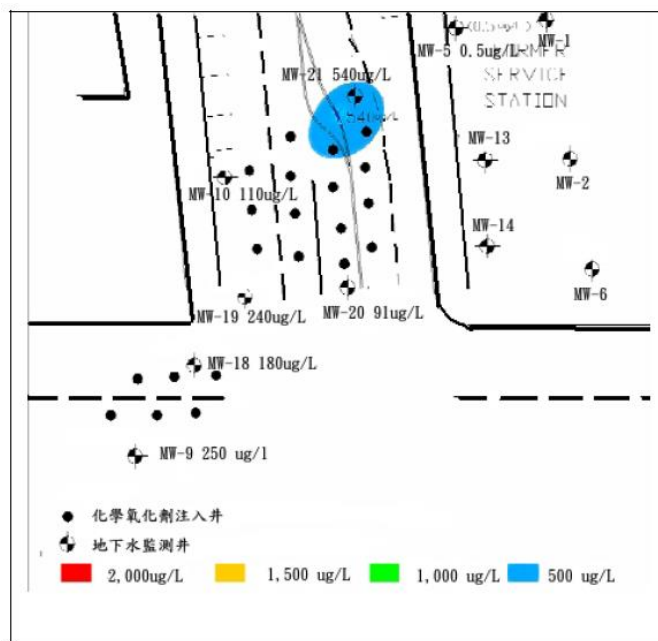


圖 11.2-3 苯之等濃度圖(2004 年 1 月，Fenton's 試劑加入 6 個月)

表 11.2-2 監測井內 TPHg 和 苯 整治成效檢測報告表

井號	樣品日期	TPHg (μ g/L)	削減率(%)	苯 (μ g/L)	削減率(%)
MW-9	5/21/2003	2,600		720	
	8/1/2003	990	62	150	79
	1/9/2004	520	80	250	65
	6/25/2004	180	93	3.3	100
MW-10	5/21/2003	17,000		562	
	8/1/2003	2,800	84	77	86
	1/9/2004	3,100	82	110	80
	6/25/2004	1,600	91	21	96
MW-18	5/21/2003	55,000		1,400	
	8/1/2003	61,000	-11	1,300	7
	1/9/2004	16,000	71	180	87
	6/25/2004	4,000	93	25	98
MW-19	5/21/2003	66,000		1,100	
	8/1/2003	15,000	77	660	40
	1/9/2004	7,800	88	240	78
	6/25/2004	4,100	94	17	98
MW-20	5/21/2003	38,000		560	
	8/1/2003	7,700	80	490	13
	1/9/2004	7,200	81	91	84
	6/25/2004	2,100	94	37	93
MW-21	5/21/2003	62,000		2,000	
	8/1/2003	29,000	53	1,700	15
	1/9/2004	10,000	84	540	73
	6/25/2004	4,300	93	240	88

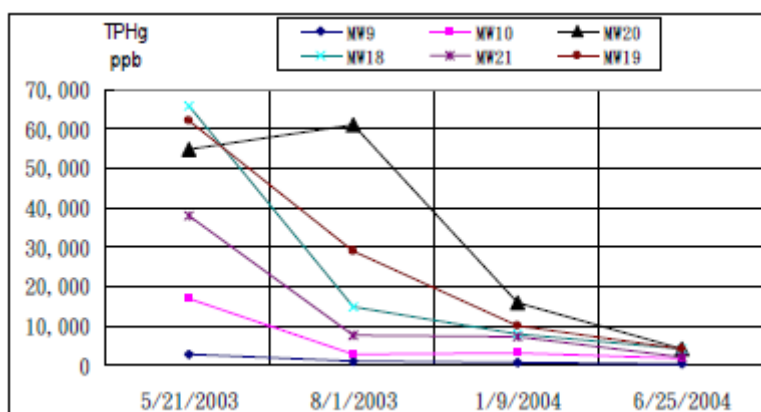


圖 11.2-4 監測井 MW9、MW10 及 MW18~MW21 之 TPHg 濃度變化圖

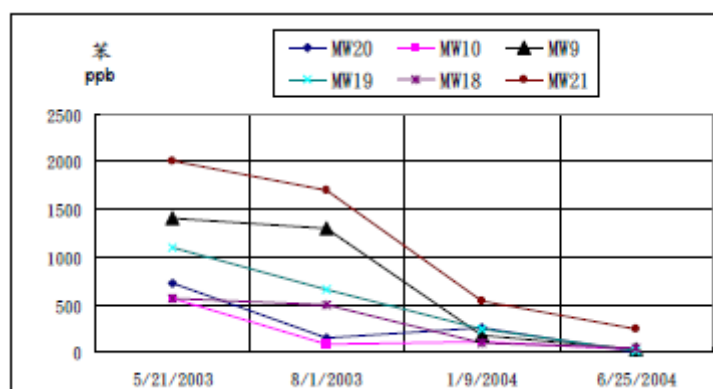


圖 11.2-5 監測井 MW9、MW10 及 MW18~MW21 之苯濃度變化圖

第十二章 技術常見問題與說明

執行 ISCO 技術時難免會有問題與狀況發生，本章列舉幾個在實際操作時，較常見的技術問題依照發生的事件分類後，提出可能原因以及解決方法，並給予一些建議，在發生問題前提早預防避免相關問題產生。將相關問題彙整如表 12-1，詳細個別說明於後。

表 12-1 ISCO 常見問題與解決方法

事件類型	常見問題	可能原因	解決方法
設備問題	氧化劑滿溢	■ 鐵催化劑形成固體，浮球式液位計堵塞，無法正常偵測，造成藥劑不斷補充而滿溢	■ 換成雷達式液位計
	輸送泵洩漏	■ 設備配件可能為塑膠材質易遭腐蝕，漏洞造成氧化劑洩漏	■ 選用耐酸鹼、耐腐蝕配件的設備
操作期間問題	冒藥	■ 氧化反應劇烈，產生短流 ■ 地下壓力太大，氧化劑往地表冒出	■ 降低流率 ■ 挖掉、重新回填 ■ 井頭加裝洩壓閥
	Fenton 試劑自解	■ 產生大量的氧氣造成過高的壓力使得密封儲存槽因壓力而破裂 ■ 因自解濃度降低，改善成效不佳	■ 儲存時間不宜過久，需要注藥時才備料，避免試劑自解
	污染改善不均勻	■ 地下有優勢路徑，影響半徑無法均勻涵蓋	■ 設置抽水井，造成強制梯度，將氧化劑引導至目標影響半徑內 ■ 模擬注、抽水情況，計算有效影響半徑
環境問題	微生物指標	■ 微生物因氧化劑殺菌而降低豐富度	■ 停止注入後，半年至一年內會慢慢恢復，優勢菌群會較早出現，一年後漸漸回復為場址原本狀態

12.1 設備問題

在系統啟動後，可能因設備的選用不當，或一些未注意到的細節而產生操作故障或人員安全疑慮，以下列出較常見之問題以及解決對策。

一、氧化劑滿溢

在自動化配送系統中，儲存、配送、混合槽會設置液位計，判斷配送槽是否需要補充新的藥劑。常見的浮球式液位計是靠槽內液體高、低接觸頂、底部訊號發射器而發出訊號給系統，進而控制補充氧化劑。使用鐵催化劑時，會產生一些固體，這些固體會使得液位計產生系統故障的情況，造成頂、底部訊號發射器被這些固體物阻塞，浮球就無法觸及訊號發射器而產生故障。若氧化劑開始補充時，使得槽內液位上升，但是浮球無法觸及訊號發射器，系統無法判斷是否足夠而繼續補充，會有氧化劑滿溢的危險發生。由於氧化劑槽內的濃度若未稀釋的情況下是具有高度腐蝕性的，會對現場操作人員身處危險當中，有非常嚴重的工安疑慮。

常見的解決方式是選用或更換為雷達式的液位計，由於雷達式的有保護外殼，較不會受到氧化劑或催化劑的影響，除了使設備壽命延長外，也確保了操作人員的安全。

二、輸送泵洩漏

在選用設備時，應該慎重考慮設備材質，由於輸送泵除了連接的管線以外，設備本身的配件材質也很重要，若是一般的 PVC 材質，容易因長時間輸送高腐蝕或酸性較高的氧化劑，造成配件受腐蝕而洩漏，當洩漏狀況發生時，並不易察覺，巡查、操作人員可能會誤認為是滴水，實際上是氧化劑洩漏，隨著操作時間增加，破洞會越來越大，最終可能有氧化劑噴灑的情況發生，造成操作人員的安全疑慮。應慎選耐腐蝕與耐酸鹼的設備配件以確保安全。

12.2 操作期間問題

一、冒藥

在注藥作業時，往往會因注入氧化劑的濃度不確定，而造成注入濃度過高的氧化劑造成反應劇烈，產生大量氣體與熱源，持續注入氧化劑會造成地下氣體累積過多而壓力逐漸增加，當壓力過大時，容易從監測井邊緣的皂土裂隙而冒出，造成地表冒泡現象。

除了井邊緣冒泡以外，也可能地表鋪面有裂隙或無鋪面之處，因產生的氣體過多，也有地表冒泡的情形發生，有時會夾雜地下砂土帶出地面。地表鋪面回填處或邊緣的排水溝，排水管在鋪設時無法確保排水管與回填鋪面有完全無縫隙在，而有縫隙之處往往會有藥劑冒出的情況發生。

為解決此問題，通常會降低氧化劑注入流率，再持續觀察是否持續有地表冒藥的情形發生。然而，壓力過大造成的短流一但產生便無法回復，氧化劑會藉由優勢路徑遷移，常常降低了氧化劑流率，冒藥問題還是無法解決的情況，而改善的做法是將冒藥井的皂土挖除，再重新回填新皂土，此時降低注藥流率，避免冒藥情況再次發生。

預防方法是於井頭加裝洩壓閥與壓力計，設定一個壓力，當壓力大於設定值時，洩壓閥會自動開啟，而氧化劑會回流於洩壓閥之管線中，避免壓力過大造成土壤孔隙破裂或回填物破裂情況發生。

二、Fenton 試劑自解

在市面上最常使用的四種常見氧化劑中，Fenton 是最為大宗使用的一種氧化劑，其成分過氧化氫若放置過久，會自解成氧氣與二氧化碳，若儲槽上蓋密封會造成儲槽內因產生大量的氧氣而使壓力過大，槽內壓力承受不住時，會使得儲槽爆炸，氧化劑四散且受壓力而彈飛的儲槽多為金屬製品，會有重傷操作人員或造成其他設備損壞的可能，最好選用加蓋但不會密封或有設置排氣孔的儲槽。

過氧化氫的自解反應會使得氧化劑濃度降低，若未經測試就將氧化劑注入可能會得不到想要的效果，造成整治成效較差或沒有明顯的差別。應於試驗注藥前，以快篩或滴定方式大致上的測量試劑的濃度範圍，

再由測試結果進行氧化劑濃度的調整，以確保整治成效。

三、污染改善不均勻

在較大的整治場址注藥時可能會發現有些地方是藥劑無法送達之處，常常會有一樣的距離不同位置監測到的藥劑濃度或是污染降低濃度不同的情況，可能原因是用重力流的方式注藥，藥劑隨著地下水移動，與預期的情況較不同，此時可考慮設置幾口抽水井，因抽水井可使地下環境造成強制梯度，藥劑會被引導至抽水井的地方，藉由設置抽水井與注藥井的位置可以使得注藥有效半徑較均勻的覆蓋於場址中，進而達到整治成效。

設計抽水井與注藥井時，可以藉由模式進行模擬，計算出有效半徑後再進行井場的設計，注入流量、抽出流率的計算等等，可較有效的發揮氧化作用。

12.3 環境問題

現地化學氧化對於地下環境中的氧化是沒有區別性，因此現地化學氧化的藥劑添加後，會對土壤顆粒結構、土壤中的有機物含量、pH 與微生物有明顯的影響，由林與梁(2015)的研究指出過硫酸鹽的使用會使土壤 pH 下降，得 pH 會下降至約介於 2~4 之間，然而當氧化劑消耗後 pH 則會逐漸回升。高錳酸鹽與土壤反應後會提升 pH 值，可能是因高錳酸鹽之反應會消耗 H^+ 及產生 OH^- 所致(梁與林，2015)。

過硫酸鹽對土壤中的有機質氧化作用為一緩慢、溫和之反應；過氧化氫無論在何種條件下皆會完全降解，因而當使用過氧化氫作為 ISCO 氧化劑時，不宜以 SOD 做為估算用量之指標，而其對土壤有機物地之降解反應具有高度不確定性，由於過氧化氫當接觸土壤後將會迅速降解，因此對土壤 pH 之影響不明顯；高錳酸鹽對土壤造成有機物降解量可達原始有機物濃度的 70%，遠高於其他兩種氧化劑(梁與林，2015)。

過氧化氫、高錳酸鹽及鐵活化過氧化氫處理後之土壤其礦物結構形狀變得較為尖銳、破碎，尤以高錳酸鹽處理之土樣更為明顯，此破碎結構可

能有部份來自錳氧化物之微粒；於序列萃取結果可知，Fe 之型態絕大部分為殘留態，屬於礦物晶格中之金屬型態，氧化劑無法破壞礦物晶格，故 Fe 之型態無明顯變化，而以高錳酸鹽處理之土壤其鐵錳態之 Mn 會增加，在低 pH 下，碳酸鹽呈溶解態，無法與 Cu 結合，故碳酸態之 Cu 會減少，在高錳酸鹽處理之土壤土中，有機態之 Cu 減少，此乃由於大部份有機物被高錳酸鹽降解所致(梁與林，2015)。

在環境方面最先著重的點在於微生物指標，用來判斷使用 ISCO 方法對於原先地下環境的微生物影響。一般來說氧化劑具有殺菌作用，尤其以過氧化氫最為明顯，當注入的氧化劑對地下環境造成改變時，應慎選氧化劑種類。根據多數文獻顯示，使用 ISCO 方法改善整治目標區時，的確會大量的降低微生物豐富度與數量，但在試驗結束後半年至一年內優勢菌群會出現，且開始慢慢恢復為生物多樣性，一年後微生物的回復狀況會與試驗開始前接近吻合。

參考文獻

- | | |
|---------------------------|---|
| Clayton et al. 2011 | Clayton W. S., Petri B. G., Huling S. G., 2011. Fundamentals of ISCO Using Ozone. SERDP/ESTCP Environmental Remediation Technology book series (SERDP/ESTCP, volume 3) |
| Crimi and Siegrist 2003 | Crimi, M. L., and Siegrist R. L., 2003. "Geochemical Effects on Metals Following Permanganate Oxidation of DNAPLs," Ground Water 41(4): 458–69. |
| Dijkshoorn 2003 | Dijkshoorn P., 2003. In-situ chemical oxidation of chlorinated solvents with potassium permanganate on a site in Belgium. Proceedings of ConSoil. 2003-8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, 1686-1691, May 12-16, Gent, Belgium |
| DTU Environment 2008 | DTU Environment, 2008. In Situ Chemical Oxidation - State of The Art |
| Eaton et al. 2005 | Eaton A. D, Clesceri L. S, Rice E. W, Greenberg A. S., 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC, USA. 1365 p. |
| ESTCP 2010 | ESTCP, 2010. In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation |
| ESTCP 2014 | ESTCP, 2014. Field Demonstration, Optimization, and Rigorous Validation of Peroxygen-Based ISCO for the Remediation of Contaminated Groundwater - CHP Stabilization Protocol |
| Heiderscheidt et al. 2011 | Heiderscheidt J. L., Tissa H., Illangasekare Robert C., Thomson B. R., 2011. Principles of ISCO Related Subsurface Transport and Modeling. SERDP/ESTCP Environmental Remediation Technology book series (SERDP/ESTCP, volume 3) |
| Huang et al. 2002 | Huang K. C., Couttenye R. A., Hoag G. E., 2002. Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl-tert-butyl ether (MTBE). Chemosphere 49:413–420. |

- hr/>
- | | |
|---------------------------|---|
| Huling et al. 2016 | Huling S. G., Pivetz B. E., Jewell K., Ko S., 2016. Pilot-Scale Demonstration of In Situ Chemical Oxidation Involving Chlorinated Volatile Organic Compounds Design and Deployment Guidelines. EPA 600/R-16/383. |
| ITRC 2005 | ITRC, 2005. Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Second edition. |
| Kolthoff and Carr 1953 | Kolthoff I. M., and Carr E. M., 1953. Volumetric determination of persulfate in the presence of organic solutes. Anal Chem 25:298–301. |
| Kolthoff and Sandell 1969 | Kolthoff I. M., and Sandell E. B., 1969. Quantitative Chemical Analysis. Macmillan, New York, NY, USA. 1199 p. |
| Liang et al. 2008 | Liang C., Huang C. F., Mohanty N., Kurakalva R. M., 2008. A rapid spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO. Chemosphere 73:1540–1543. |
| NAVFAC 2013 | NAVFAC, 2013. SiteWise™ Version 3 User Guide (UG-NAVFAC-EXWC-ENV-1302), Table 2h. |
| NAVFAC 2015 | NAVFAC, 2015. DESIGN CONSIDERATIONS FOR IN SITU CHEMICAL OXIDATION. NAVFAC EXWC under Contract No. N62583-11-D-0515. |
| Petri et al. 2011 | Petri, B. G., Watts R. J., Tsitonaki A., Crimi M., Thompson N., and Teel A.L., 2011. Fundamentals of ISCO Using Persulfate in: In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation, R.L. Siegrist et.al.eds. Springer Press. |
| Siegrist et al. 2011 | Siegrist R. L., Crimi M., Simpkin T. J., 2011. In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation. SERDP ESTCP Environmental Remediation Technology. DOI 10.1007/978-1-4419-7826-4. |
| USACE 2002 | USACE, 2002. Engineering and design for soil vapor extraction and bioventing. |
-

- hr/>
- | | |
|-------------------|--|
| USEPA 2004 | USEPA, 2004. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA,EPA 510-R-04-002. |
| USEPA 2006 | USEPA, Huling S.G. and Pivetz B.E. 2006. In Situ Chemical Oxidation. Engineering Issue Paper: EPA 600-R-06-072. |
| USEPA 2017 | USEPA, 2017. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”. Land and emergency management 5401R. EPA 510-B-17-003. |
| Watts et al. 2007 | Watts R. J., Finn D. D., Cutler L. M., Schmidt J. T., Teel A. L., 2007. Enhanced stability of hydrogen peroxide in the presence of subsurface solids. J Contam Hydrol 91:312–326. |
| 台美講習會 2005 | 台美講習會，2005。In-situ chemical oxidation. |
| 環保署 2015 | 環保署，2015。土壤氣體抽除整治技術系統設計參考指引 (EPA-25-III-06C-2015-001) |
| 梁振儒、林毓玲 2015 | 梁振儒、林毓玲，2015。現地化學氧化法過氧化氫、過硫酸鈉及高錳酸鉀氧化劑對土壤衝擊影響之探討 |
| 余炳盛 2005 | 余炳盛，2005。陽明山國家公園土壤重金屬含量及地質特性對土壤性質影響 之研究，國家公園學報，第 15 卷第 2 期，65-87 頁。 |
| 許正一等人 2011 | 許正一、蔡衡，2011。蛇紋岩土壤之特性及其重金屬含量偏高問題，臺灣鑛業，第 63 卷第 1 期，12-26 頁 |
| 劉滄琴等人 2007 | 劉滄琴、郭鴻裕、朱戡良、連深，2007。臺灣東部蛇紋岩母質化育土壤地區 重金屬特性之初探，臺灣農業研究。第 56 卷，第 2 期，65-78 頁 |
| 蘇一哲 2006 | 蘇一哲，2006。現地化學氧化法整治受汽油污染之地下水案例經驗評析 |
-