



# 土壤及地下水污染調查作業參考指引 (113年修正版)

出版年份：民國 113 年 5 月  
出版單位：環境部環境管理署  
EPA-25-III-05B-2015-001

## 版本修正對照表

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
一	行政院環境保護署(以下簡稱環保署)「土壤與地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)於民國 89 年 2 月 2 日公告，.....	行政院環境保護署(現已改制環境部)「土壤與地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)於民國 89 年 2 月 2 日公告，.....	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字及照片修正。	1-1
	三、任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照環保署最新公告之標準作業規範。	三、任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照環境部環境管理署(以下簡稱本署)最新公告之標準作業規範。		1-2
	七、本指引並不代表環保署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。	七、本指引並不代表本署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。		1-2
	我國環保署自土污法公告以來，從參考美國 ASTM 之環境場址評估流程(E1527 and E1903)，到歷經十多年的污染調查.....	我國環管署自土污法公告以來，從參考美國 ASTM 之環境場址評估流程(E1527 and E1903)，到歷經十多年的污染調查.....		2-1
	確定污染整治目標後必須研擬污染改善工作，本指引彙整目前環保署發表之相關.....	確定污染整治目標後必須研擬污染改善工作，本指引彙整目前本署發表之相關.....		2-2
	調查人員之訪談內容可參考環保署之「以土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法，附件一場址環境.....	調查人員之訪談內容可參考本署之「以土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法，附件一場址環境.....		3-6
	行政院環保署，居家生活環境資訊網， <a href="http://living.epa.gov.tw/">http://living.epa.gov.tw/</a>	行政院環保署，居家生活環境資訊網， <a href="http://living.epa.gov.tw/">http://living.epa.gov.tw/</a> ( <u>原網站已移除</u> )		4-2

項次	第一版 (104 年)	第二版 (113 年修正版)	說明	頁碼
	經濟部中央地質調查所，地質資料整合查詢系統， <a href="http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm">http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm</a>	經濟部地質調查及礦業管理中心，地質資料整合查詢系統， <a href="https://geomap.gsmma.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8a/t3/index1.cfm">https://geomap.gsmma.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8a/t3/index1.cfm</a>		4-2
	經濟部水利署，地理資訊倉儲中心， <a href="http://gic.wra.gov.tw/gic/GIS/JS/MainJs.aspx">http://gic.wra.gov.tw/gic/GIS/JS/MainJs.aspx</a>	經濟部水利署，水利空間資訊服務平台， <a href="https://gic.wra.gov.tw/Gis/Map">https://gic.wra.gov.tw/Gis/Map</a>		4-2
	行政院環保署，全國環境水質監測資訊網， <a href="http://wq.epa.gov.tw/Code/?Languages=">http://wq.epa.gov.tw/Code/?Languages=</a>	環境部，全國環境水質監測資訊網， <a href="https://wq.moenv.gov.tw/EWQP_GIS/">https://wq.moenv.gov.tw/EWQP_GIS/</a>		4-2
	行政院環保署，土壤及地下水資訊管理系統， <a href="http://sgw.epa.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx">http://sgw.epa.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx</a>	環境部環境管理署，土壤及地下水資訊管理系統， <a href="https://sgw.moenv.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx">https://sgw.moenv.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx</a>	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字及照片修正。	4-2
一	交通部中央氣象局網站氣象資料， <a href="http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm">http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm</a>	交通部中央氣象署網站氣象資料， <a href="https://www.cwa.gov.tw/V8/C/">https://www.cwa.gov.tw/V8/C/</a>		4-2
	為利於事業辨別用地之所屬分區，可參考行政院環保署公告之「土壤污染評估.....	為利於事業辨別用地之所屬分區，可參考本署公告之「土壤污染評估.....		4-13
	建議可參閱環保署環檢所 94 年度「地下水污染擴散模式建立之研究」委辦計畫之研究成果(報告全文可於環保署環境資料庫網站下載，網址： <a href="http://edb.epa.gov.tw/">http://edb.epa.gov.tw/</a> )。	建議可參閱環保署環檢所(現已改制為環境部國家環境研究院) 94 年度「地下水污染擴散模式建立之研究」委辦計畫之研究成果(報告全文可於環境部環保專案成果報告查詢系統下載，網址： <a href="https://epq.moenv.gov.tw/">https://epq.moenv.gov.tw/</a> )。		5-7

項次	第一版 (104年)	第二版 (113年修正版)	說明	頁碼
一	則應根據行政院環保署公告之「土壤地下水污染場址環境影響與健康風險評估辦法」.....	則應根據本署公告之「土壤地下水污染場址環境影響與健康風險評估辦法」.....	因應環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱與相關網站網址調整，進行相關內文文字及照片修正。	5-15
	在健康風險評估過程中，行政院環保署為提供土壤及地下水污染調查健康風險評估規範與工具.....	在健康風險評估過程中，本署為提供土壤及地下水污染調查健康風險評估規範與工具.....		5-15
	依據 <u>環保署</u> 規定，進行土壤樣品分裝及保存作業	依據 <u>本署</u> 規定，進行土壤樣品分裝及保存作業		6-3
	將採集的待測樣品分裝於事前準備好的樣品容器中，並依 <u>環保署</u> 公告的土壤各分析項目.....	將採集的待測樣品分裝於事前準備好的樣品容器中，並依 <u>本署</u> 公告的土壤各分析項目.....		6-4
	將採集的樣品分裝於事前準備好的樣品瓶組，依 <u>環保署</u> 公告各類水質檢測項目樣品保存方法.....	將採集的樣品分裝於事前準備好的樣品瓶組，依 <u>本署</u> 公告各類水質檢測項目樣品保存方法.....		6-8
	在環保署毒災管理資訊系統教育宣導說明( <a href="http://toxiceric.epa.gov.tw">http://toxiceric.epa.gov.tw</a> )，將進行毒性化學物質災害處理.....	在 <u>環境部</u> 毒災管理資訊系統教育宣導說明( <a href="https://toxicdms.moenv.gov.tw/">https://toxicdms.moenv.gov.tw/</a> )，將進行毒性化學物質災害處理.....		6-10
	<u>環保署</u> 環境檢驗所已公告「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式X-射線螢光光譜儀分析法」.....	<u>環境部</u> 國家環境研究院已公告「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法」.....		附-114
二	土壤採樣調查佈點規劃，可參考 <u>行政院</u> 環保署公告之「土壤採樣方法(NIEA S102.63B)」所述內容.....	土壤採樣調查佈點規劃，可參考 <u>本署</u> 公告之「土壤採樣方法(NIEA S102.64B)」所述內容.....	因應「環保署升格為環境部，轄下各分署單位名稱」及「土壤採樣方法於111年更新，原採樣方法於111年公告廢止」，進行相關內文文字修正。	4-12

項次	第一版 (104年)	第二版 (113年修正版)	說明	頁碼
二	土壤採樣方法主要依 <u>環保署</u> 公告之「 <u>土壤採樣方法(NIEAS102.63B)</u> 」相關規範執行。	土壤採樣方法主要依 <u>本署</u> 公告之「 <u>土壤採樣方法(NIEAS102.64B)</u> 」相關規範執行。	因應「 <u>環保署</u> 升格為 <u>環境部</u> ，轄下各分署單位名稱」及「 <u>土壤採樣方法</u> 於111年更新，原採樣方法於111年公告廢止」，進行相關內文文字修正。	4-17
	土壤採樣作業主要依據 <u>環保署</u> 公告「 <u>土壤採樣方法(NIEA S102.63B)</u> 」與「 <u>土壤檢測方法總則(NIEA S103.61C)</u> 」的相關.....	土壤採樣作業主要依據 <u>本署</u> 公告「 <u>土壤採樣方法(NIEA S102.64B)</u> 」與「 <u>土壤檢測方法總則(NIEA S103.61C)</u> 」的相關.....		6-3
	由於油品類污染有可能產生VOC(如BTEX等)及SVOC，根據我國土壤採樣方法( <u>NIEA S102.61B</u> )規範.....	由於油品類污染有可能產生VOC(如BTEX等)及SVOC，根據我國土壤採樣方法( <u>NIEA S102.64B</u> )規範.....		附-50
	表 1.2.4-1 土壤採樣方法適用之地質特性	表 1.2.4-1 土壤採樣方法適用之地質特性(表格內容修正)		附-51
	2.參考資料:我國 <u>環保署</u> 土壤採樣方法。(NIEA S102.61B)	2.參考資料:我國 <u>環管署</u> 土壤採樣方法。(NIEA S102.64B)		附-51
三	我國 <u>環保署</u> 已公告標準作業方法，對於使用限制及耗材設備，均有詳細之規範，可參考 <u>環保署</u> 環境檢驗所公告之土壤採樣方法(NIEA S102.63B)。另外，由油品類污染物如LNAPL、BTEX等屬於有機類之污染，樣品採集之後相關保存方法詳土壤檢測方法總則(NIEA S103.60C)。	我國 <u>本署</u> 已公告標準作業方法，對於使用限制及耗材設備，均有詳細之規範，可參考 <u>本署</u> 環境檢驗所公告之土壤採樣方法(NIEA S102.64B)。另外，由油品類污染物如LNAPL、BTEX等屬於有機類之污染，樣品採集之後相關保存方法詳土壤檢測方法總則(NIEA S103.61C)。	因應「 <u>環保署</u> 升格為 <u>環境部</u> ，轄下各分署單位名稱」及「 <u>土壤採樣方法</u> 於111年更新，原採樣方法於111年公告廢止」、「 <u>土壤檢測方法總則</u> 於98年更新，原採樣方法於98公告廢止」，進行相關內文文字修正。	附-49

項次	第一版 (104年)	第二版 (113年修正版)	說明	頁碼
四	地下水採樣方法主要依 <u>環保署</u> 所公告之「 <u>監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)</u> 」之相關規範執行。	地下水採樣方法須依照 <u>本署</u> 公告之「 <u>監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)</u> 」之相關規範執行。	因應「 <u>環保署</u> 升格為 <u>環境部</u> ，轄下各分署單位名稱」及「 <u>監測井地下水採樣方法</u> 於110年更新，原採樣方法於107年公告廢止」，進行相關內文文字修正。	4-18
	地下水採樣作業程序係依據 <u>環保署</u> 公告的「 <u>監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)</u> 」執行地下水採樣工作。	地下水採樣作業程序係依據 <u>本署</u> 公告的「 <u>監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)</u> 」執行地下水採樣工作。		6-4

# 目錄

	<u>頁碼</u>
<b>第一章 前言</b> .....	<b>1-1</b>
1.1 目的.....	1-1
1.2 適用範圍與限制.....	1-1
1.3 手冊內容概述.....	1-2
1.4 中英文專有名詞對照.....	1-3
<b>第二章 污染調查流程概述</b> .....	<b>2-1</b>
<b>第三章 場址環境評估</b> .....	<b>3-1</b>
3.1 背景資料蒐集.....	3-1
3.2 現場勘查.....	3-4
3.3 人員訪談紀錄.....	3-6
3.4 污染評估結果.....	3-12
<b>第四章 污染調查規劃</b> .....	<b>4-1</b>
4.1 場址調查策略.....	4-1
4.2 場址污染調查規劃.....	4-12
4.2.1 調查位置.....	4-12
4.2.2 調查深度.....	4-16
4.2.3 調查方法.....	4-17
4.3 場址概念模型建立.....	4-18
4.3.1 水文地質特性調查.....	4-20
4.3.2 污染物特性調查.....	4-23
<b>第五章 調查結果評估</b> .....	<b>5-1</b>
5.1 污染調查評估報告.....	5-1
5.2 污染事實確認後續管理.....	5-2
5.3 污染範圍及體積推估.....	5-4
5.3.1 土壤.....	5-4

5.3.2	地下水.....	5-6
5.4	健康風險評估.....	5-15
<b>第六章 品保品管及工業安全衛生.....</b>		<b>6-1</b>
6.1	品保品管.....	6-1
6.1.1	現場採樣工作.....	6-1
6.1.2	實驗室分析.....	6-8
6.2	工作安全衛生管理.....	6-9
6.2.1	現場工作組織.....	6-9
6.2.2	現場作業安全及衛生管理.....	6-10
6.2.3	緊急應變措施.....	6-12
<b>附件一 現場快速調查技術.....</b>		<b>附件一-1</b>
1.1	地球物理.....	附件一-1
1.2	直接貫入.....	附件一-34
1.3	土壤氣體.....	附件一-61
1.4	現場有機物分析.....	附件一-66
1.5	現場快速篩選試劑.....	附件一-96
1.6	浮油厚度量測.....	附件一-108
1.7	攜帶式 X 射線螢光分析儀(XRF).....	附件一-110
1.8	發展中現場篩選技術.....	附件一-117

# 圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.1-1	場址污染調查作業流程..... 2-3
圖 4.1-1	三合系統工作架構圖..... 4-3
圖 4.3-1	地下水場址概念模型修正重點示意圖(範例)..... 4-19
圖 5.1-1	污染調查結果各類情境示意圖..... 5-3
圖 5.3.1-1	利用 Surfer 推估達管制標準..... 5-5
圖 5.3.1-2	土壤氣體濃度及污染範圍推估圖(範例)..... 5-5
圖 6.1.1-1	土壤採樣作業流程圖..... 6-3
圖 6.1.1-2	監測井地下水採樣作業流程..... 6-5

# 表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.4-1	中英文專有名詞對照..... 1-3
表 3.1-1	污染評估調查作業-背景資料蒐集項目彙整表..... 3-2
表 3.3-1	訪談問卷參考範例..... 3-8
表 4-1	環境背景資料蒐集參考網頁..... 4-2
表 4.1-1	現場快速調查技術適用條件-地球物理..... 4-8
表 4.1-2	現場快速調查技術適用條件-直接貫入..... 4-9
表 4.1-3	現場快速調查技術適用條件-現場分析技術..... 4-9
表 4.1-4	傳統與三合系統場址調查之比較..... 4-10
表 4.1-5	用於不同污染物之現場快速調查技術(USEPA)..... 4-11
表 4.3-1	場址概念模型於各階段之功能..... 4-19
表 5.3.2-1	常用地下水模式及適用範圍介紹..... 5-9
表 5.3.2-2	地下水污染物傳輸模式所需參數及資料來源..... 5-10
表 5.3.2-3	不同型態土壤之水力傳導係數與有效孔隙率..... 5-11
表 5.3.2-4	各有機污染物之有機碳分配係數..... 5-13
表 5.3.2-5	沉積物土壤有機碳含量比例( $f_{oc}$ )資料彙整表..... 5-13

# 第一章 前言

## 1.1 撰寫目的

行政院環境保護署(現已改制環境部)「土壤與地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)於民國 89 年 2 月 2 日公告，並經 92 年 1 月 8 日與 99 年 2 月 3 日兩次增修，積極對全國農地、加油站、儲槽、工廠及非法棄置場址等各大類型污染場址，進行全面性調查。

為了提昇土壤及地下水污染調查的成效，自民國 95 年起著手編撰油品類調查手冊，包含「油品類儲槽系統污染調查及查證參考手冊」、「油品類儲槽系統污染範圍調查作業手冊」、「油品類儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊」、「油品類儲槽系統污染改善完成驗證作業手冊」。並接續於民國 97 年出版比水重非水相液體(DNAPL)的「土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之初步篩試調查、查證及驗證作業技術參考手冊」，與民國 100 年的「土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之初步篩試調查、查證及驗證等之作業參考手冊」。

上述各類型技術手冊距今最久的，已將近十年，隨著土污法於民國 99 年的修訂後，部份內容已不敷使用。此外，國內調查工作已累積十多年的經驗，不論何種污染物或場址類型，皆已發展出一套完整的本土化調查流程。故將上述各類型污染調查手冊之執行調查工作原則內容，彙整成「場址土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」(以下簡稱本指引)，供環保機關或民間機構辦理土壤及地下水污染調查相關業務時之參考。

## 1.2 適用範圍與限制

- 一、 本指引設定之使用對象為環保主管機關、目的事業機關、技術顧問機構，以及污染行為人、污染土的關係人等，在土壤及地下水受污染場址之污染調查作業參考。
- 二、 本指引並未提供有關土壤及地下水之基礎理論，如有該方面的基礎知識，可參考本指引參考文獻。

- 三、 任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照環境部環境管理署（以下簡稱本署）最新公告之標準作業規範。
- 四、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，並著重於如何與實務結合進行場址調查與評估工作。亦不提供各項技術與相關設備儀器之詳細操作步驟。
- 五、 本指引所列舉之各項快速調查技術，現階段仍僅作為協助污染潛勢研判或篩試之工具。
- 六、 本指引各種調查技術之成本與期程僅提供參考，可能隨監測及管制標準修正而有所差異。
- 七、 本指引並不代表本署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。

### 1.3 指引內容概述

本指引主要乃論述完整之場址潛勢評估、污染調查及污染範圍調查程序，說明執行內容於各階段之主要目的與原則，並提供可選擇之工具及方法作為執行污染調查技術指引，而本指引中所提及之各項技術並不會相互比較或評斷其優劣，而是著重於技術之可行性與適用性討論，本指引主要包含六個主要章節及附件，其內容茲概述如后。

#### 第一章 前言

本章將說明本指引之定位與撰寫目的與適用範圍，以利使用者於參考本指引時，可快速了解各項陳述與說明之出發點，並同時知悉本指引之各項規範與限制。

#### 第二章 污染調查流程概述

本章主要針對使用者於各階段之污染調查執行時，評估場址現階段執行流程及後續作為之說明。

#### 第三章 場址環境評估

本章主要說明如何以資料審閱、現勘、訪談等方式針對目標場址之「背景資料蒐集」、「現場勘查」及「人員訪談紀錄」等 3 項評估重

點執行污染潛勢評估。

#### 第四章 污染調查規劃

本章乃依循前一章節執行成果，針對場址高污染潛勢區域，提供各種快速調查技術及採樣佈點參考原則，並依據調查結果評估場址後續作為。

#### 第五章 污染調查結果評估

本章主要針對污染調查後，根據不同污染情況研擬之不同場址後續管理情境的說明。

#### 第六章 品保品管及工業安全衛生

本章節主要闡述污染調查工作於現場工作及檢測工作執行時，品保品管及人員之分工原則與主要安全衛生計畫需注意事項，以利使用者能夠完善場址污染調查工作之整體執行架構並確實遵守現場安全衛生規範。

### 1.4 中英文專有名詞對照

本節彙整所有與土壤及地下水污染物調查相關之中英文專有名詞，彙整於表 1.4-1，提供參考。

表 1.4-1 中英文專有名詞對照

英文	中文
Accuracy	準確度
Adaptive cluster sampling	應變叢集採樣
Bottle rack grid method	瓶架網格法
Bulk density	土壤容積比重
Calorimetric Test	比色法
Combustible gas indicator (CGI)	測爆器
Composite sampling	混合採樣
Confined aquifer	受壓含水層
Consistency	一致性
Constant head test	定水頭試驗

英文	中文
Constant rate test	定抽水率試驗
Data Quality Level (DQL)	數據品質等級
Decision maker	決策者
Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL)	比水重非水相液體
Distribution coefficient	分配係數
Dynamic work plan	動態工作計畫策略
Electromagnetic Method, EM	電磁波探測法
environmental condition	環境條件
Environmental Site Assessment (ESA)	場址環境評估
Flame Ionization Detector (FID)	火焰離子偵測器
Fluorescent Immunoassay (FIA)	螢光免疫分析法
FLUTe	充脹式襯管地下污染偵測技術
Gas Chromatograph/Mass Selective Detector (GC/MSD)	氣相層析質譜儀
Ground penetrating radar method, GPR	透地雷達探測
HaloProbe	鹵化物感測器
Hand-Held Gas Chromatography (HHGC)	手握式氣相層析儀
High density polyethylene (HDPE)	高密度聚乙烯
Hot spots	熱點或高污染潛勢區
Judgmental sampling	主觀判斷採樣
Laser Induced Fluorescence (LIF)	雷射引發螢光
Lower Explosive Level (LEL)	爆炸下限(濃度)
Material safety data sheet (MSDS)	物質安全資料表
Membrane Interface Probe (MIP)	薄膜界面鑽桿(管)
Modular Three-Dimensional Transport Model (MT3D)	模組化三維傳輸模式
On site measurement technology	現場快速調查技術
Parallel grid method	平行網格法
PhotoIonization Detector (PID)	光離子偵測器
Piezometer	水壓計
Precision	精確度
Real-time measurement technology	即時檢測技術
Rectangular grid method	矩形網格法
Resistivity Image Profiling Method, RIP	地電阻法
Retardation factor	遲滯係數
Riser	延伸井管
Simple random sampling	簡單隨機採樣
Site Conceptual Model (SCM)	場址概念模型
Skin effect	集膚效應
Slug test	微水試驗
Soil gas sampling	土壤氣體採樣

英文	中文
Soil sampling	土壤採樣
Source zone	污染源區
Static water level	地下水靜水位
Stratified sampling	分區採樣
Systematic and grid sampling	系統及網格採樣
Systematic project planning	系統性專案規劃
Systematic sampling	系統化佈點
Total petroleum hydrocarbons (TPH)	總石油碳氫化合物
Triad system	三合系統
Uncertainty management	不確定性管理
Unconfined aquifer	非受壓含水層
Variance	變異度
Volatile Organic Compound (VOC)	揮發性有機物
Wellbore storage effect	井儲蓄效應
X-ray fluorescence (XRF)	攜帶式 X 射線螢光分析儀

## 第二章 污染調查流程概述

污染場址的發現通常是由民眾或環保機關稽查所得，無論是何種情形下得知，各級環保主管機關具應以土壤及地下水污染整治法第七條之規定，各級主管機關得派員攜帶證明文件，進入公私場所進行調查工作，並得命場所使用人、管理人或所有人提供有關資料，以蒐集及保全污染行為證據，作為日後污染場址列管及責任追究之參考。

我國環管署自土污法公告以來，從參考美國 ASTM 之環境場址評估流程 (E1527 and E1903)，到歷經十多年的污染調查經驗累積，已經發展出一套本土化污染調查工作執行流程與原則，執行的流程如圖 2.1-1。本指引以污染潛勢評估、調查規劃及結果評估為主軸，僅說明圖中之場址污染評估、污染調查規劃與評估、調查結果評估階段內容。場址後續處理方式，請使用者參照圖中說明之相關整治述指引內容。本指引彙整調查工作執行流程時，以調查目的為導向，說明各種不同調查目的下，應執行的工作項目說明。可將目的分為四個階段，個別工作說明如下：

### 一、 場址環境評估

當存在污染之虞啟動場址污染調查作業時，首先進入場址污染評估調查階段，該階段重點工作項目為進行資料蒐集與審閱、現場勘查及人員訪談作業。各工作項目之重點內容將於第三章詳述，須注意現勘範圍必須包括場址內部運作與周界環境調查，著重於潛在污染源之情境描述，並配合資料審閱與人員訪談過程，綜合評估場址是否存在污染潛勢，可作為下一階段場址污染潛勢區調查執行參考依據。

### 二、 污染調查規劃

經初步評估後有污染之虞者，應進一步確認場址是否遭受污染，此內容詳見第四章，該階段可利用現場採樣及實驗室分析工作加以確認。原則上現場採樣工作根據是否需送入實驗室分析，可分為初步篩試/快速調查及現場採樣調查兩類。利用快速調查技術研判污染潛在區域，於現場採樣工作時隨時調整原規劃內容。待得知初步判定潛在污染區域後，進一步規劃採樣工作，將所有樣品送至實驗室分析，進一

步了解場址污染情況。所有的採樣及分析結果應彙整如文件，作為場址是否存在污染及規劃後續污染範圍調查之依據。

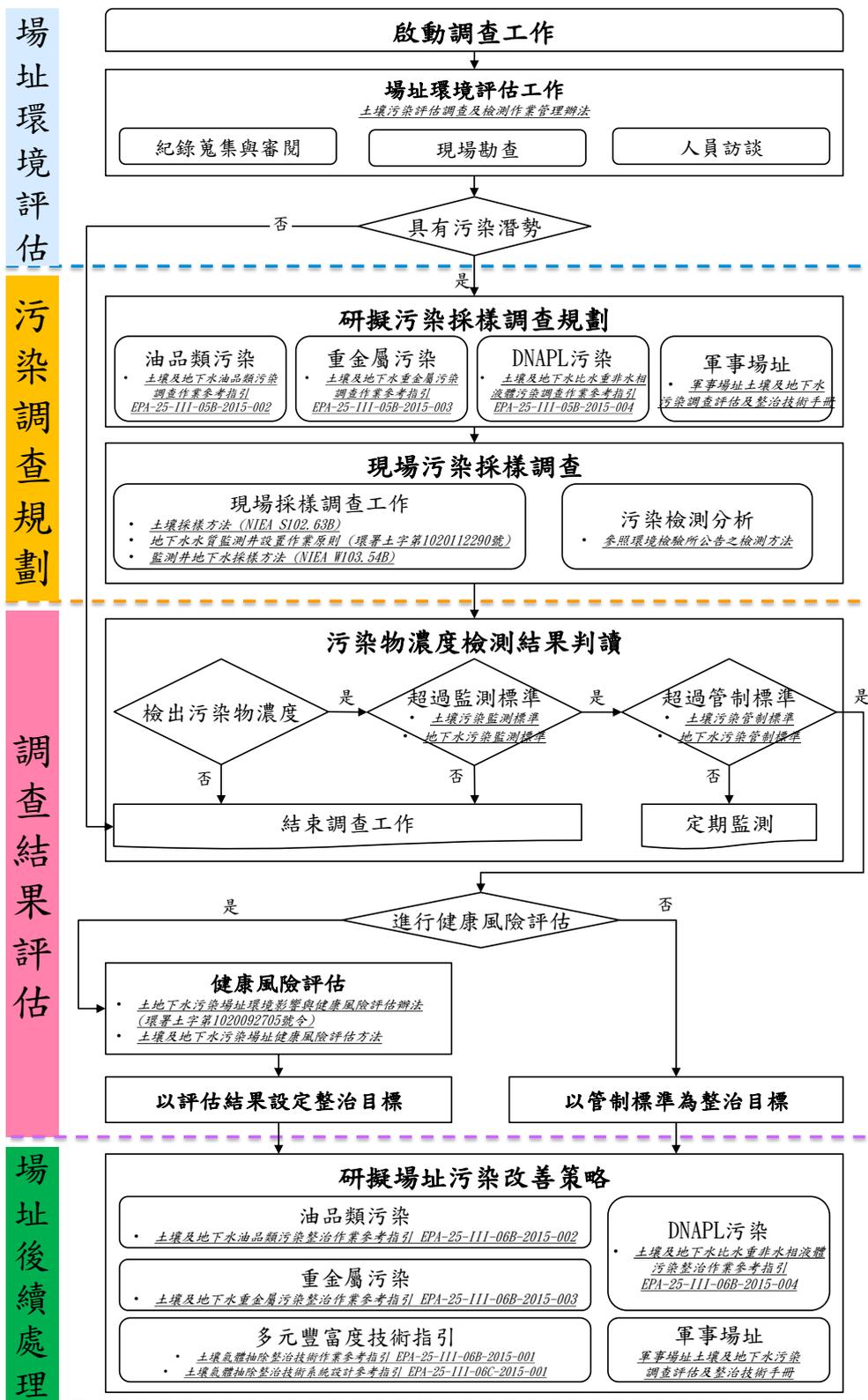
### 三、 調查結果評估

當污染調查工作結束後，應利用其污染物檢出濃度結果判定調查結果評估。本指引將調查結果分為四種情境，包含未檢出污染物濃度、檢出污染物濃度但未超過監測標準、超過監測標準但未超過管制標準，及超過管制標準，詳如第五章說明。

當確認污染物超過管制標準後，必須進行污染改善相關工作研擬。根據土壤及地下水污染整治法(以下簡稱土污法)第二十四條規定，若因地質條件、污染物特性或污染整治等因素，無法整治至污染物濃度低於土壤、地下水污染管制標準者，依環境影響與健康風險評估結果，提出土壤及地下水污染整治目標。本指引彙整相關管理辦法及評估方法於圖 2.1-1，詳如第五章說明。

### 四、 污染後續處理評估

確定污染整治目標後必須研擬污染改善工作，本指引彙整目前本署發表之相關技術指引，提供予使用者參考。此部份內容請參照各相關技術指引，本指引並不對此部份內容另行說明。



註：本指引僅說明場址環境評估、污染調查規劃、調查結果評估階段，場址後續處理請參照所列相關指引如有相關法令規範，敬請參考土壤及地下水污染整治法或相關規定

圖 2.1-1 場址污染調查作業流程

## 第三章 場址環境評估

場址環境評估的目的，是為了解該區域之作業環境或使用現況，並進一步是否存在土壤及地下水污染的潛勢。我國污染評估調查的執行過程，茲參照美國 ASTM E1527 場址環境評估 Phase I (Environmental Site Assessment, ESA)的精神，研擬之國內執行工作流程。透過污染評估調查的執行，除可對目標場址有更深一步的瞭解，亦有助於後續現場採樣調查之工作執行，其蒐集資訊亦可作為污染行為人認定證據之參考依據。茲就背景資料蒐集與審閱、現場勘查及人員訪談，三大重點工作執行重點說明於后。最後，將場址環境評估結果繪製場址概念模型，以作為後續場址污染調查作業之參考。

### 3.1 背景資料蒐集

背景資料的蒐集是場址評估為最基本的步驟，在進場執行污染調查工作前主要是藉由各類背景調查、資料蒐集與研析，初步判定場址具污染潛勢之區域，提昇後續現場勘查執行效率。資料蒐集範圍應根據污染物特性、實際場址周圍情況調整，可參考美國 ASTM 方法建議，界定為 0.8~1.6 公里之間。以下茲就蒐集資料項目與進行資料蒐集與審閱時注意事項兩大部份進行說明。

#### 一、蒐集資料項目

含場址環境資料及場址使用歷史資料，建議項目彙整如表 3.1-1。

##### (一)場址環境資料：

包括是否曾屬於主管機關公告之土壤、地下水污染控制或整治場址，是否位於公告之土壤、地下水污染管制區，是否曾違反相關環保法規之紀錄，場址所在地理位置圖、平面配置圖及其他相關地理、水文、地質資料，其他有助於評估土壤潛在污染之環境資料等。

此外，可審閱由政府機關所建置保存的環境資料，以補足場址環境資料之不足。場址相關資料可包括地籍登記資料、不動產

使用狀況、周遭區域的不動產使用狀況、建管紀錄、環保工安相關許可、列管紀錄或報告、場址水文地質特徵資料、航照圖或先前的調查評估報告等。然而，本指引所提供項目僅供參考，使用者應根據場址實際情況調整。

## (二)場址使用歷史

場址及鄰近區域環境、表面土地利用變化，若於廠區則蒐集製程改變情況，廠房或地面物之使用變化，相關資料可包括歷年航照圖，土地使用分區資料，廠區更新製程設施或設備之紀錄，並盡可能取得生產或製造產品的運作情況，或其他有助於評估場址土壤潛在污染之歷史資料。

**表 3.1-1 污染評估調查作業-背景資料蒐集項目彙整表**

場址環境資料	場址使用歷史
1. 場址公告或列管紀錄	1. 場址及鄰近區域之表面土地利用歷史與現況
2. 場址所在地理位置	2. 場址所有權及歷史用地
3. 平面配置圖	
4. 水文地質條件	
5. 政府機關環境資料庫	
6. 環保法規違反紀錄	
7. 航照圖	
8. 先前調查評估報告	
9. 自然災害	
10. 環境敏感區	

## 二、資料蒐集與審閱注意事項

蒐集項目須涵蓋現況與歷史層面，避免不正確或已過時之資料欠缺，取得之資料應以眾所皆知且可供公眾利用之資料，且在合理的時間及成本可取得之前提下獲得。在彙整及評估場址資料時，應依評估人員之專業知識、經驗及其他顯著的資訊，判斷其中錯誤或不完整處，彙整出最客觀之場址評估結果，並於報告中註明其資料獲得來源。蒐集與彙整場址相關資料時之注意事項說明如下。

### (一)資料搜尋範圍

為有助於評估目標場址之潛在污染，場址評估人員或顧問機

構，應審閱目標場址及鄰近區域之相關紀錄資料。評估內容必須考量目標場址所在地與其周界之概況，如人口密度、環境敏感受體等、當地地質及水文地質特性、地下水位與地下水流向及潛在污染物可能移動之距離、與其他合理的因素。

## (二) 回溯期間

針對目標場址的使用歷史，應儘可能的回溯其使用年代，應注意資料更新情形，以避免取得不正確或過時的資料。描述所有可確認及無法確認使用情形之原因，並對於研判目標場址是否有污染可能之影響。

## (三) 確認場址使用的一般情形

審閱場址使用歷史時，需確認其使用之用途(如：辦公室、廠房或儲槽等)。若其使用的基本類型為事業之製程設施或設備時，應儘可能詳細的說明生產或製造的產品及其運作情形。

## (四) 合理取得資料

在進行資料審閱時，應針對可合理取得的資料進行審閱，包括眾所皆知且可供公眾利用之資料、以合理的時間及成本可取得的資料，並且注意其資料或紀錄必須是實際上可以審閱的，即不需經由繁複之分析，即可得知與目標場址有關資訊的資料。

## (五) 其他替代性資料

若應蒐集之資料或其他替代性資料皆無法合理取得時，資料審閱者應嘗試，儘可能尋求其他方法取得所需之資料。倘若所欠缺之資料足以影響研判目標場址是否遭受污染，或具潛在污染危害之情形時，應描述該筆欠缺資料對於執行場址評估或污染調查規劃之影響。

## (六) 資料文件之查核

場址評估人員或顧問機構進行資料文件審閱時，應依其專業知識、經驗及其他顯著的資訊，合理比對其中錯誤或不完整之處。報告書中應說明其所使用的每筆資料。引述之資料應該包括名

稱及其最後更新的日期，且任何引用之相關文件均應於報告書中適切地索引並註明出處來源。

## 3.2 現場勘查

現場勘查時應盡可能包含場址內部及外部，除非受環境或障礙物所阻礙，任何場址內的結構物皆應納入勘查動線，針對敏感之環境受體區域應特別留意。所有勘查過程應詳細記錄並拍照存證，於勘查紀錄中說明現場環境概況，如場址目前使用狀況、場址過去使用情形、毗鄰場址使用現況、建築物之座落位置、現場水體分布，勘查時天候狀況等。現勘工作可分為兩大部份，包含場址背景資料書面審閱與實地勘查，個別工作內容說明如下：

### 一、場址背景資料書面審閱

首次進場污染調查時，可能限於人力及經費限制，無法即時進行採樣分析工作，但為爭取足夠時間以判定污染潛勢，可與污染場址所有人、管理人或使用人進行進場前之背景資料蒐集正確性核對，並要求提供以下場址資料，進行實地勘查前資料核對：

- (一) 經營許可執照
- (二) 工廠平面配置圖
- (三) 儲槽管線位置圖
- (四) 工廠製程說明
- (五) 核定之事業廢棄物清理計畫書
- (六) 核定許可之水污染防治措施計畫
- (七) 按期申報之廢棄物之產出、貯存、清除、處理、再利用、輸出及輸入情形
- (八) 按期申報之製程設施、用水來源及原廢(污)水資料申報表
- (九) 土地所有權狀、地籍圖、租賃契約
- (十) 土地使用、轉移資料

### (十一) 其他有助於判定污染潛勢的相關資料

## 二、實地勘查

實地勘查時，場址評估人員或顧問機構，應依其專業判斷並紀錄任何涉及可能造成土壤、地下水污染之物質其運作現況，即便為無人居住或使用的空間也應予以紀錄。實地勘查時除了核對書面資料是否吻合外，必須針對現場實際情況進行拍照與紀錄，各項勘查重點項目說明如下：

### (一) 目標場址使用現況

關於目標場址過去使用情形之任何跡象及可能造成土壤、地下水污染之物質其運作情形，應加以紀錄。現場勘察重點應著重於有害物質之使用、處理、貯存、處置或生產情形，貯槽與管線分配與是否有洩漏情況，現場惡臭源，各種容器存放堆至情況，加熱或冷卻裝置，使否有污漬或腐蝕情況，現場排水管與污水坑，坑洞、水槽、池沼或其他地表水，土壤或人工鋪面情況，植被分布，廢棄物堆置情況，任何形式之抽水井或監測井，化糞池及污水系統，飲用水供應，道路及停車設施，以及其他可供評估場址狀態之標的等。

### (二) 毗鄰目標場址的使用現況

關於毗鄰目標場址的使用現況及可能存在之污染物質，應儘可能予以紀錄。

### (三) 毗鄰目標場址過去的使用情形

關於毗鄰目標場址過去使用情形之跡象或任何造成土壤、地下水污染之可能性，皆應儘可能加以描述。

### (四) 周遭區域的使用現況與過去使用情形

對於周遭區域目前或過去使用之類型，如住宅、商店、工廠等，應儘可能加以紀錄。

### (五) 地質、水文地質、水文以及地形的描述

目標場址及其周遭區域的地質、水文地質、水文與地形方面

的資料應併同分析，以協助研判可能之土壤污染物是否會對目標場址造成環境上之影響。

#### (六) 關於結構物、設施或設備的概括描述

應概略目標場址內的結構物、設施或設備，如：建築物的棟數、每一棟的樓層數、概略的屋齡、儲槽的數量與槽齡、管線位置，以及其他附屬結構物等。

### 3.3 人員訪談紀錄

場址人員訪談是執行場址污染調查前評估污染潛勢區之重要工作之一，雖然場址人員對於問題可能採取閃躲或迴避之態度，但是經由對場址所有權人、使用人、工作人員之交叉訪談中，往往會由不一致或矛盾之回答中獲得寶貴資料。訪談各細節要求與說明如下：

#### 一、訪談內容

應有助於取得目標場址之使用情形以及評估所需之相關資訊。在訪問過程中，現場勘查後依現場情況及適當時機提出合適的問題。雖然訪談對象對於問題可能採取閃躲或迴避之態度，但是經由對場址土地所有人、場址管理人、場址使用人、場址所在地村、里長或熟悉當地事物人事之交叉訪談中，往往可從回答中獲得相關資料。訪談過程應盡可能詳實記錄受訪者之基本資料，包括其姓名、職稱、與場址之關係，使用場址期間或於場址附近居住期間等資料。

調查人員之訪談內容可參考本署之「以土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法，附件一場址環境評估法」、美國環境場址評估 (Environmental Site Assessment, ESA) 之方式進行，參考訪談問卷如表 3.3-1，實際執行訪談時應依不同之場址特性擬定適當之問卷。

#### 二、訪談方式

訪談可採親自訪談、電話訪談，或書面資料訪談等方式進行。

#### 三、訪談時機

訪談執行者可依其判斷，於進行場址勘查前後搭配不同的時機提出合適的問題。

#### 四、受訪者

場址土地所有人、場址管理人、場址使用人、場址所在地村、里長或熟悉當地事物人士。

#### 五、對受訪者的要求

應告知接受訪談者具體合理地回答問題；並且誠實地就其所知的範圍內回答問題。

#### 六、受訪者基本資料

訪談紀錄中應儘可能詳實紀錄受訪者之基本資料，包括其姓名、職稱、與場址之關係、使用場址期間或於場址附近居住之期間等資料。

#### 七、訪談完成

訪談於所有問題得到完整回答時完成。若經過合理的嘗試卻未得到回答，或是僅得到部份的回答，則訪談程序得視為已完成。

#### 八、相關文件

進行場址勘查前，應該儘可能詢問目標場址土地所有人、管理人以及使用人是否知悉任何下列文件。並且是否能在合理的時間及成本下，提供該等文件之複本。若可取得該等文件，執行場址勘查的人員應當在進行場址勘查前，先行審閱下列文件。

- (一)目標場址環境調查、檢測、評估等相關報告。
- (二)相關許可證明文件或書表（例如廢/污水排放許可、事業廢棄物清理計畫書、毒性化學物質運作許可等）。
- (三)物質安全資料表。
- (四)關於目標場址或其周遭區域之水文地質調查或研究報告。
- (五)政府機關對目標場址過去或目前違反環境法令之公告。
- (六)其他與目標場址相關之研究或報告。

#### 九、涉及目標場址之訴訟或公告

在進行場址勘查之前，應該儘可能詢問目標場址土地所有人、主

要管理人以及使用人是否知悉：

(一)任何與存在於目標場址中之土壤污染物，或與該目標場址產生的土壤污染物有關之民事、刑事或行政訴訟（包括尚未判決、已判決或可能發生者）。

(二)任何涉及目標場址曾經違反環境法令，經主管機關處分之紀錄。

表 3.3-1 訪談問卷參考範例

場址名稱： \_\_\_\_\_ 調查人員： \_\_\_\_\_  
 場址地址： \_\_\_\_\_  
 土地使用人或管理人： \_\_\_\_\_ 受訪員工： \_\_\_\_\_

問題		土地使用人或管理人	員工	現場勘查
1.1	此場址是否為工業用？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
1.2	場址毗鄰地區是否為工業使用？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
2.1	是否有任何證據顯示此場址先前曾做為工業使用？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
2.2	是否有任何證據顯示此場址毗鄰地區為工業使用？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
3.1	此場址是否作為加油站、汽車修護廠、商業印刷廠、乾洗廠、照相沖印廠、廢棄物堆積場、掩埋場、廢棄物處理、儲存、置放、回收處理廠？（如果有，請說明之）	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
3.2	此場址毗鄰地區是否作為加油站、汽車修護廠、商業印刷廠、乾洗廠、照相沖印廠、廢棄物堆積場、掩埋場、廢棄物處理、儲存、置放、回收處理廠？（如果有，請說明之）	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
4.1	是否有任何證據顯示此場址曾經作為加油站、汽車修護廠、商業印刷廠、乾洗廠、照相沖印廠、廢棄物堆積場、掩埋場、廢棄物處理、儲存、置放、回收處理廠？（如果有，請說明之）	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否

問題		土地使用人或管理人	員工	現場勘查
4.2	是否有任何證據顯示此場址毗鄰地區曾經作為加油站、汽車修護廠、商業印刷廠、乾洗廠、照相沖印廠、廢棄物堆積場、掩埋場、廢棄物處理、儲存、置放、回收處理廠？（如果有，請說明之）	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
5.1	是否現有任何車用或工業用廢電池，存放於5加侖或50加侖桶內之農藥、油漆或其他化學物質，因儲存、置放或使用造成危害或洩漏？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
5.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有車用或工業用廢電池，存放於5加侖或50加侖桶內之農藥、油漆或其他化學物質，因儲存、置放或使用造成危害或洩漏？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
6.1	是否現有任何工業用桶槽、太空包放置於場址內？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
6.2	是否有任何證據顯示此場址曾有工業用桶槽、太空包放置於場址內？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
7.1	是否有任何證據顯示此場址曾經有來自污染場址的回填土？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
7.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有不知來源的回填土？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
8.1	是否有任何作為廢棄物處理、處置的坑孔、水塘或污水塘？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
8.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有作為廢棄物處理、處置的坑孔、水塘或污水塘？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
9.1	場址內是否有可疑的受污染土壤？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
9.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有可疑的受污染土壤？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
10.1	此場址內是否有任何已申報或未申報之地上或地下儲槽？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
10.2	是否有任何證據顯示此場址內曾經有任何已申報或未申報之地上或地下儲槽？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
11.1	場址內是否有任何排氣管、排放管或其他通路由地下突出？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
11.2	是否有任何證據顯示此場址內有任何排氣管、排放管或其他	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否

	問題	土地使用人或管理人	員工	現場勘查
	通路由地下突出？			
12.1	場址內是否有任何雨水溝渠、廢水排放溝渠或井，遭受物質污染或有異味？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
12.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有任何雨水溝渠、廢水排放溝渠或井，遭受物質污染或有異味？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
13.1	如果場址內使用私設井或非公共給水系統，是否有任何證據顯示，此場址用水水質曾經超出用水標準？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
13.2	如果場址內使用私設井或非公共給水系統，是否有任何證據顯示，此場址之用水被政府機關認定遭受污染？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
14	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址內曾經被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	
15.1	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內過去曾經存在有害物質或石油製品？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	
15.2	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內最近存在有害物質或石油製品？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	
15.3	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內曾經被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	
15.4	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內最近被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	
11.1	場址內是否有任何排氣管、排放管或其他通路由地下突出？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
11.2	是否有任何證據顯示此場址內有任何排氣管、排放管或其他通路由地下突出？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
12.1	場址內是否有任何雨水溝渠、廢水排放溝渠或井，遭受物質污染或有異味？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
12.2	是否有任何證據顯示此場址曾經有任何雨水溝渠、廢水排放溝渠或井，遭受物質污染或有	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否

	問題	土地使用人或管理人	員工	現場勘查
	異味？			
13.1	如果場址內使用私設井或非公共給水系統，是否有任何證據顯示，此場址用水水質曾經超出用水標準？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
13.2	如果場址內使用私設井或非公共給水系統，是否有任何證據顯示，此場址之用水被政府機關認定遭受污染？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
14	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址內曾經被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
15.1	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內過去曾經存在有害物質或石油製品？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
15.2	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內最近存在有害物質或石油製品？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
15.3	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內曾經被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
15.4	土地所有人、使用人或管理人是否被告知場址內最近被環保主管機關稽查且違反環保法規之情形？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
16	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址內之環境調查評估過程中，曾經顯示有害物質或石油製品存在造成污染或需進一步調查評估？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
17	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址過去的土地關係人曾經因洩漏或疑似洩漏有害物質或石油製品而遭處分或管制	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
18.1	場址內或鄰近場址地區是否排放廢水至雨水下水道中？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
18.2	場址內或鄰近場址地區是否排放廢水至污水下水道中？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
19	是否有任何證據顯示，場址內曾經有土壤污染物被棄置、掩埋或焚燒？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否

	問題	土地使用人或管理人	員工	現場勘查
20	是否有任何變壓器、電容器、水利設施包含PCBs？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
16	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址內之環境調查評估過程中，曾經顯示有害物質或石油製品存在造成污染或需進一步調查評估？	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否
17	土地所有人、使用人或管理人是否知悉場址過去的土地關係人曾經因洩漏或疑似洩漏有害物質或石油製品而遭處分或管制	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 不知道	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否

### 3.4 污染評估結果

將蒐集背景資料、現場勘查與人員訪談結果，經由評估人員專業判斷，以文件化紀錄調查結果，判定場址是否存在污染潛勢。在污染評估結果文件中，必須詳實紀錄在場址環境評估過程中，所有蒐集到的資訊及觀察到的環境條件 (environmental conditions)。接下來，必須由專業評估人員針對上述相關資料進行合理性評估，並將現場勘查或人員訪談過程中所觀察到的環境條件彙整分析，以利作為後續進一步的污染調查工作執行參考。

## 第四章污染調查規劃

本章提供一套污染調查作業準則，場址調查評估人員可根據污染調查目的不同，分為污染事實的確認及污染範圍的評估。在進行高污染潛勢區調查的執行過程，場址評估人員或顧問機構應依場址環境評估執行之結果為基礎，針對評估後判釋為高污染潛勢之區域，進行土壤及地下水污染調查規劃工作，研擬高污染潛勢區採樣調查之執行方式，擬定後續土壤及地下水採樣工作。必要時應委託環檢所認證核可之檢測機構執行必要之採樣佈點規劃，與樣品分析作業，確認場址之土地是否有遭受污染。當進行污染範圍確認時，則應根據污染事實確認工作評估結果，修正場址概念模型後，進一步評估可能污染範圍分佈，再擬定污染調查規劃工作。

污染調查規劃需考慮到場址限制，事先判斷會妨礙或限制勘查、分析或採樣的障礙，例如低矮的天花板、狹窄的通道、鬆軟的土質、險峻的斜坡和已知的地下結構物如管線或建物、設施之基礎等，以上限制皆可於現場勘查獲得充分的資訊。檢視現有資訊，以確認場址特性及鄰近地區狀況，進而決定採樣佈點及採樣方式。本章將依序針對場址污染調查規劃、污染調查規劃可考慮採用策略，最後說明進行場址概念模型修正所需調查之水文地質及污染物相關資料。各種環境背景資料蒐集，可參考表 4-1 彙整之網頁。

### 4.1 場址調查策略

為了提昇調查的品質，本節將介紹目前可用於現場進行快速調查的技術，並提出場址調查系統整合方式。有鑑於此，美國於 2013 年為降低調查成本而建立三合系統之調查策略，以整合調查工作為目標，具有相當程度的參考價值但非調查共同原則。本節列出該系統之調查精神，以提供國內進行污染調查工作之參考。此外，另說明現場快速調查技術之基本原理及適用條件等，常見之技術原理及應用之詳細說明如本指引附件。

表 4-1 環境背景資料蒐集參考網頁

項次	資料庫名稱	資料庫網站畫面	資料用途
1	行政院環保署，居家生活環境資訊網， <a href="http://living.epa.gov.tw/">http://living.epa.gov.tw/</a> (原網站已移除)		經由系統之查詢，可判別場址是否在環境敏感區或特定目的區位內，評估場址調查之優先順序或可能造成之環境影響，並掌握場址附近可能之污染受體
2	經濟部地質調查及礦業管理中心，地質資料整合查詢系統， <a href="https://geomap.gsmma.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8a/t3/index1.cfm">https://geomap.gsmma.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8a/t3/index1.cfm</a>		掌握區域性地質資料，並可輔助地下水井設置規劃與設井工具選用之參考。
3	經濟部水利署，水利空間資訊服務平台， <a href="https://gic.wra.gov.tw/Gis/Map">https://gic.wra.gov.tw/Gis/Map</a>		1.判定場址所屬地下水分區與對應之區域性地下水流向與各項水文參數 2.掌握場址附近可能污染源、敏感區位與污染受體 3.掌握區域性土壤性質。 4.瞭解附近水井分布情形
4	環境部，全國環境水質監測資訊網， <a href="https://wq.moenv.gov.tw/EWQP_GIS/">https://wq.moenv.gov.tw/EWQP_GIS/</a>		1.可研判場址附近有無地下水監測井，並掌握區域性地下水水質背景值。 2.地下水水質監測資料可供水質指標分析研判。
5	環境部環境管理署，土壤及地下水資訊管理系統， <a href="https://sgw.moenv.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx">https://sgw.moenv.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx</a>		經由系統之查詢，可瞭解場址及鄰近地區以往是否曾接受過調查及相關資料，並可取得場址之航照圖，亦可與相關區域性或場置性之監測井資料進行連結
6	交通部中央氣象署網站氣象資料， <a href="https://www.cwa.gov.tw/V8/C/">https://www.cwa.gov.tw/V8/C/</a>		掌握區域性氣象資料(如年、月之平均降雨量)，可作為豐枯水期研判之參考。

國內污染調查工作執行，須遵照標準之採樣及分析方法，以建立具代表性及可信賴之數據供決策者判斷，並符合法規要求。然而，在污染調查工作執行過程仍有許多可提昇執行效率方法，以美國環保署於 1990 年代開始逐步推動之三合系統為例，該策略可增進場址污染調查及整治效率之工作規範，並且於 2003 年彙整完成所謂三合系統(Triad System)之污染場址管理策略(ITRC, 2003a)，系統所強調的是根據調查的目的與場址本身狀況的不同，每一個場址有其專一性的調查策略，並非如傳統方法般，要求使用同樣的作業程序與標準，因此，確認資料品質與事前的規劃也顯得格外重要。以只動員一次為目標，在最短的時間內，以最經濟的方式，得到符合品質要求的資料。以單次的三合系統的場址調查來看，也許不見得比單次的傳統場址調查來的經濟，但以獲取相同品質的資料為基礎來看，三合系統可節省一筆可觀的經費與時間，因此，可以作為環境整治效益決策系統參考。

因污染場址之水文地質條件、污染物分布、傳輸機制等皆充滿不確定性，三合系統運作即是透過此種場址不確定性管理(Uncertainty Management)方式，進行系統性專案規劃、動態工作計畫策略、現場快速調查技術應用，提升場址調查之效率及降低不確定性，相互關係如圖 4.1-1 所示，各面向執行工作說明如下。

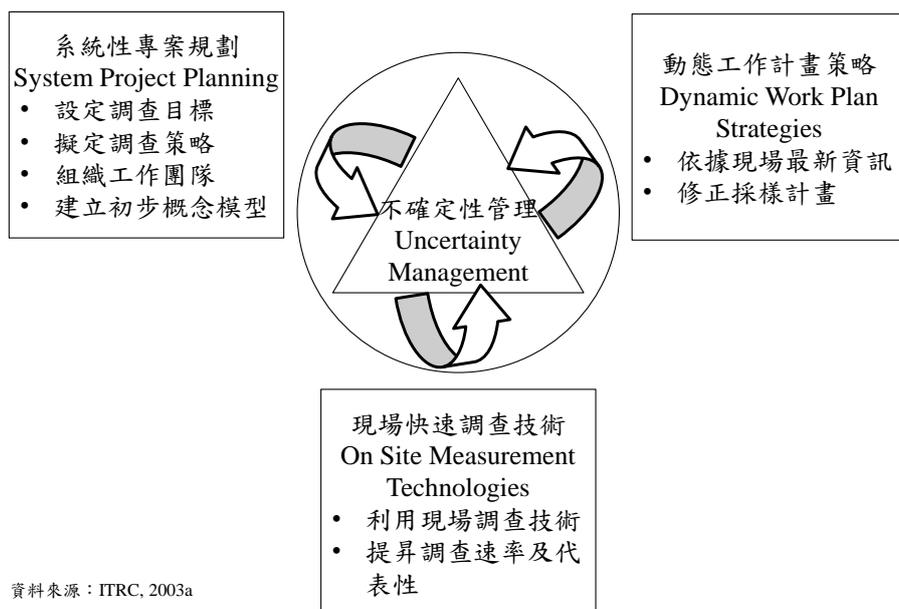


圖 4.1-1 三合系統工作架構圖

## 一、系統性專案規劃

於開始規劃採樣行程前，針對不同的要求及情況，設定調查目標、擬定調查策略與準則，並組織合乎目標與策略設定的工作團隊，共同管理後續採樣行程事宜。為達到以科學法則為基礎，並以專業知識與漸進的方式，確保計畫完善與工作比重適宜性。可透過設定調查目標、擬定調查策略、組織工作團隊，及建立初步場址概念模型方式，並同時達成計畫目標所需之數據品質，主要工作內容說明如下：

### (一) 設定調查目標

在工作初始階段，以污染場址調查工作而言，應設定調查工作所需達成之目標，例如場址查證工作，其計畫目標可能為高污染區之土壤及地下水污染濃度調查，並作為場址列管之依據。計畫目標應明確可行，後續工作才可順利進行。

### (二) 擬定調查策略

為達成上述計畫目標，擬定所需之調查方法，包括可行之現場快速調查技術、標準採樣作業等。調查策略應制訂各調查方法之應用時機、工作流程、調查結果之品質管制、安全衛生計畫等。由於調查方法不完全是法規制訂之標準方法，有時調查數據之品質管制較不嚴謹，因此應用時需對其誤差有正確之認知，以免反被誤差數據所誤導。

### (三) 組織工作團隊

由團隊決策者(decision maker)依據所需施行之調查技術，組織調查工作團隊。團隊成員包括將進行調查技術之專家，現場需要有資深的專案經理負責現場決策工作。

### (四) 建立初步概念模型

雖然在執行調查工作前，對於場址特性掌握可能不甚明確，但可依據場址初步蒐集及勘查所得資料，大略描繪場址初步概念模型，包括大區域水文地質條件、潛在污染區域之研判、可能污染型態等。場址初步概念模型將隨現場調查工作成果，而進行

動態修正成為較完整之場址概念模型。

## 二、動態工作計畫策略

動態工作計畫策略與傳統之調查工作計畫不同，在於動態工作計畫策略，強調現場工作時調查計畫之可調整性，使調查工作項目及內容，可隨最新獲得之調查數據及資料進行更正。團隊工作成員並不要全部在調查現場執行工作，但需可隨時藉由網路、行動電話等掌握調查工作最新進度，並提供專業意見供現場作業判斷。因此，動態工作計畫是一個由系統性規劃制定邏輯，而非硬性的採樣計畫。這種工作方法，有賴具專業判斷能力的工作人員與現場檢測技術的配合。

動態工作計畫策略之優勢在於調查計畫可在現場即時進行調整。由現場人員依照取得之即時資訊，決定下一步的計畫執行方向。過去傳統作法，第一階段調查工作完成後需等待實驗室分析結果，得到分析結果後再據以規劃下一階段工作內容，所需時間冗長，且浪費許多人員機具之動員費用。隨著已開發之現場即時調查工具，且網路及行動通訊上日趨普及，也促使動態工作計畫策略得以實施。

執行動態工作計畫策略時，所獲得之即時資料應隨時與初步場址概念模型比對。當與概念模型有所出入時，應先討論現場快速調查技術是否符合系統性專案規劃所訂定之工作步驟，若排除資料之誤差後，仍與概念模型有出入，即代表初步概念模型不正確，應立即進行修正。現場經理應依據修正後之概念模型，機動調整調查計畫，並在現場即時執行調整後之計畫，以符合調查計畫目標。

## 三、現場快速調查技術

現場快速調查技術是提升現場調查效率的一種工具，亦可稱為即時檢測技術(Real time Measurement Technologies)。目前現場採樣技術是以縮小分析儀器，簡化操作方法並同時提昇資料品質為目標，目前常見技術簡介詳如本指引附件。使用現場快速調查技術所面臨之最大課題是如何進行工作品質管制，這些技術通常無法使用重複分析、查核分析等實驗室品保品管方法予以管制，因此其調查成果之正確性較受爭議。欲減少這些品質管制問題之道，可採行下列方式：

- (一) 進行調查前，需依照製造廠商所定之儀器校正程序確實執行之。
- (二) 儀器、機具之操作需由技術熟練之人員執行，並依照標準作業程序進行施作。
- (三) 調查成果應由經驗豐富之工程師進行判讀，並與現有之場址概念模型比對。
- (四) 使用不同類型之調查技術進行比對，確保調查結果正確性。

本指引所敘述之快速調查技術，基本上為一項快速界定土壤及地下水之場址狀況與特性之工作架構，並可做為污染改善或整治工程決策的輸入條件，其發展的目的都是要「降低場址調查與評估的費用並提高其效益與效能」。快速調查技術的工作方法與傳統的場址調查評估的不同，在於以下幾項特性，藉此將其與傳統的方法與以區隔：

- (一) 快速場址評估的工作是規劃後在單一次的行動中(可能數小時至數日)，完成所有的調查工作，降低調查工作經費負擔
- (二) 所有檢測數據均於現場執行與取得，並且可於現場進行解讀，可即時判斷場址狀況調整調查策略
- (三) 採樣與檢測方法具備彈性，可於現場進行必要的變動
- (四) 現場工程師具有於現場更改採樣與分析檢測方式的權力

近年在快速調查技術的發展，因土壤、土壤氣體與地下水之快速採樣與現場分析方法技術的進步，而有顯著的改善。必要時也可將傳統的採樣與分析方法整合至快速場址評估計畫中。最明顯的例子就是選擇性的以傳統方法分析少數的樣品做為驗證之用。本指引彙整目前國內常用快速調查技術選項，可協助污染調查人員進行以下特性的判定。

#### (一) 地質狀況

確認地層狀況以決定採樣或偵測方法的適用性。例如，調查結果顯示該場址為複雜且具有礫石層的地質條件下，則可協助污染調查人員判定，採用直接貫入的方式可能會遭遇較大的阻礙，應選擇鑽堡進行監測井設置。

## (二) 監測井中是否有浮油或自由相

污染的場址地下水中是否具有浮油相，將會影響調查檢測技術的選擇，浮油量或地下水中溶解相的狀況亦會直接影響評估技術的選擇。此時，可透過現場快速調查技術，於進行採樣前事先了解目前場址地下水特性，並選用適當的調查技術。

## (三) 標的污染物的種類

對於較常見的有機及無機污染物可採用之技術較為廣泛，包括有機污染物可選擇土壤氣體分析、PID/FID 與氣相層析儀均可使用，而無機重金屬污染物可以 XRF 作為快速調查工具。但較特殊之條件下則可使用比色管(Detector Tube)等。透過初步調查評估後，可協助判斷後續採樣技術的選取。

## (四) 計畫資料數據目標

在調查計畫規劃階段將會以計畫需求訂定數據品質層級 (dataquality level, DQL)，這將會涉及所用偵測技術的精確度 (precision)、準確度 (accuracy)、變異度 (variance) 以及一致性 (consistency)，這些也直接影響到數據對於最終決策的效用。

## (五) 污染物的生物特性

針對有機污染物的生物特性經常因地而異，相較於物化特性，其變異性較大，即使是同一種污染物，在不同場址均可能有不同之生物降解特質，而這個部分對於數據與資料解讀有相當程度的影響。

快速調查技術所使用的現場分析方法的選擇取決於許多因素，包括污染物種類、數據資料需求、使用的方便性、設備取得的難易度、費用以及取的分析結果的速度。一般而言，此過程會使用不同精密程度的分析方法取得大量樣品數據，以提高污染團界定的解析度。本指引將現場快速調查技術，分為地球物理、直接貫入式、現場分析技術之快速調查技術，並綜合性彙整各種技術之應用條件，詳細應用原理及詳細執行方式說明，可參閱本指引附件。

## (一) 地球物理

此技術主要乃以非破壞性方式，探測地下物如管線、油槽、鋼筋之分布，並可概略性瞭解場址地質特性，初步確認可能之污染團分布，可分為五種，適用條件與限制條件說明如表 4.1-1。

## (二) 直接貫入

直接貫入乃以破壞性方式，於現場獲取場址各種相關資訊，包含地質條件、土壤及地下水樣品、有機污染團分布情形等，並可搭配現場分析技術，快速瞭解場址概略性污染分布狀況，適用條件與限制條件說明如表 4.1-2 所示。

## (三) 現場分析技術

下列技術之使用，主要目的在於協助判定以少量傳統實驗室分析方法所需選取之目標樣品，或是依據現場分析結果，回饋上述土壤採樣、監測井設置及地下水採樣，作為規劃補充調查或現場調查方式調整之重要依據，適用條件與限制條件如表 4.1-3。

表 4.1-1 現場快速調查技術適用條件-地球物理

調查技術	適用基質		適用條件	限制條件
	土壤	地下水		
地電阻	○	○	瞭解場址地質剖面電阻率分布情形，評估地質分布、地下水位、有機污染物分布等。	應先將污染源及污染場址標準地層之電阻率確定，當污染源與原地層電阻率差異不大時，應輔以其他探勘方法。
透地雷達	○	○*	瞭解地下物分布情形，確認地下管線、槽體、鋼筋結構等，並推測目標物形貌。	當污染源與原地層介電常數差異不大情況下，應輔以其他探勘方法。
電磁波探測	○	○*	依據地層導電程度差異，區分地層當中不同區域土壤鹽含量、含水量及質地等，進而推估有機污染物分布區域。	當污染源與原地層導電度差異不大情況下，應輔以其他探勘方法。
震測探測	○	○	利用波在地層的速度，區分地層及地下構造，可作為確認地下地質及水位面狀況之參考。	若因地表覆蓋無法埋入受波器時，則該技術無法使用。
井內探測		○	為地球物理探測法在井孔內的延伸，可應用於污染團的調查、監控及整治成效評估等。	未設有井的場址，無法使用該快速調查技術。

註\*：一般國內較少用於地下水污染調查，多使用於未飽和層之管線探測為主。

表 4.1-2 現場快速調查技術適用條件-直接貫入

調查技術	適用基質			適用條件	限制條件
	土壤	土壤氣體	地下水		
地質鑽探	○		○	確認場址地質剖面條件。	貫入力量可能導致土壤緊實或水力傳導係數降低，應依現場環境條件特性，降低可能危害。
土壤氣體採樣		○		針對不飽和層之土壤間隙氣體進行採樣，適用於高蒸氣壓、低水溶解度、低分子量之有機污染物。	土壤氣體採集過程。可能具有高濃度污染物，採樣人員需避免吸入性危害。
土壤採樣	○			以劈管採樣器、活塞式採樣器、薄管採樣器進行土壤採樣。	採集土壤皆需帶走，並進行棄土處理。
地下水採樣			○	以簡易井快速進行場址地下水採樣工作。	採樣方法多元，需藉專業人員判斷採樣方法。
地電阻直感鑽頭	○		○	可快速測試場址土壤之分層特性，並直接量測地層或地下環境土壤電導度或電阻。	地電阻的量測分析數據解讀，需由豐富經驗之專業人員判讀。
薄膜界面鑽桿	○		○	對特定深度之油品碳氫化合物篩選等級之分析數據。	當場址存在浮油層，可能造成浮油附著於鑽桿上，造成即時分析誤差。

表 4.1-3 現場快速調查技術適用條件-現場分析技術

調查技術	適用基質			適用條件	限制條件
	土壤	土壤氣體	地下水		
測爆器	○	○		可用於加油站土壤不飽和層之有機污染物氣體檢測。	無法區分烓烓類或芳香族之有機化合物
PID/FID	○	○	○	快速篩測目標基質中總有機氣體，如 VOCs 及 SVOCs。	僅能測出是否存在污染物，無法得知污染物組成。
現場氣相層析儀	○	○	○	可針對目標基質中特定成分之有機污染物進行現場定性分析。	為確保現場數據精確度，需由專業人員執行品保查核與應變。
雷射引發螢光	○		○	用於石油碳氫化合物之偵測，並藉此作為土壤採樣及設井位置之參考。	現場螢光反應對於土壤變異性相當敏感，易受土壤顆粒大小、水分影響。
比色法	○		○	用於固體或液體樣品之碳氫化合物濃度，特別是芳香族碳氫化合物。	待測物的濃度較低或組成較複雜時，顏色判定困難。
免疫測試	○		○	用於測定微量土壤或地下水樣品，針對短鏈碳氫化物、PAH 或 TPH	交叉反應可能造成正偏差的錯誤。
濁度法	○	○	○	針對現場採集土壤樣品，初步檢測土壤 TPH 濃度，作為送實驗室分析樣品挑選依據。	富含有機質、高濕度土壤樣品，可能造成偏差。
XRF	○			針對採集土壤樣品快速完成重金屬篩測，作為送實驗室分析樣品挑選依據。	偵測極限受重金屬種類、機型等影響。

傳統調查程序與使用三合系統調查程序之異同，詳如表 4.1-4。三合系統於工作程序上的最大優勢為現場工作的彈性及單次動員的效率，故能節省多次動員所需花費的成本與時間。再輔以現場採樣分析技術，短時間取得分析結果，更進一步縮短等待離場或傳統實驗室分析結果的時間。以下，將列舉兩個國外案例探討三合系統，分別在不確定性管理、樣品分析數量與經費使用上可帶來之優勢。

不論是快速場址評估或是三合系統都必須仰賴現場快速調查技術的支援，這也是整個快速場址評估之核心技術所在。表 4.1-5 彙整部分污染物可使用之現場快速分析方法，該表主要係依照美國環保署的污染物分類與資料歸納整理，常見現場快速調查技術詳見本指引附件。污染物的分類主要是以污染類型為主，所以各分類中或有重複的化學物質，例如二甲苯(xylene)既屬於石油污染中的 BTEX 之一，也屬於常用的有機溶劑。若以偵測技術而言，透地雷達、土壤氣體分析與氣相層析儀均已達到實場應用的階段，而分析偵測器(亦即如 PID/FID 之類)則多處於發展階段，主要的限制在於其定量上的解讀較為困難，較適合做為定性指標。

**表 4.1-4 傳統與三合系統場址調查之比較**

比較項目	傳統場址調查	三合系統場址調查
調查階段動員次數	多次	單次
現地人員管理	管理者不隨行	管理者隨行
採樣點位置及數量	固定不變	以行前規劃加上採樣現場的即時資訊，在現地判斷出最有意義的採樣點，採樣方式則選擇最經濟但又能鑑定出污染物的方法為主。
工作計畫	固定不變	彈性
資料分析	樣品分析所須費時數週	通常為現地採樣分析，輔以少數樣品送交實驗室以標準法分析，大部分的數據可以在數小時或數日內獲得。
使用技術	公告標準方法	配合採樣策略選擇最適分析方法

表 4.1-5 用於不同污染物之現場快速調查技術(USEPA)

化學物質種類	化學物質名稱	現地分析技術	發展階段		應用項目								
			實驗室研發	先驅試驗階段	費場應用	樣品採樣	場址範圍界定	定量分析	洩漏偵測	環安與工安監控	地質化定性		
VOCs	BTEX	透地雷達			✓								
		免疫分析			✓								
		偵測器(Stand Alone only)											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)		✓									
		層析法											
	土壤氣體分析系統												
	揮發性非鹵化物	偵測器(Stand Alone only)		✓									
		免疫分析											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
SVOCs	揮發性鹵化物(如: TCE、氯仿)	土壤氣體分析系統											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
	氫氫苯與相關衍生物	層析法											
	推進劑和炸藥(如: 1,3,5-三甲基苯、2,4,6-三硝基甲苯)	透地雷達											
		免疫分析											
		層析法											
	多環芳烴(PAH)	土壤氣體分析系統		✓									
其他有機化合物	半揮發性非鹵化物	偵測器(Stand Alone only)											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		透地雷達											
		免疫分析											
	有機鹼鹵或除草劑(如: 毒殺芬)	免疫分析											
		層析法											
		土壤氣體分析系統											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		層析法											
無機物	半揮發性鹵化物(如: DDT、PCB)	偵測器(Stand Alone only)											
		免疫分析											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		透地雷達											
	溶劑(Solvent)	免疫分析											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		土壤氣體分析系統											
		層析法											
其他有機化合物	有機鹼鹵(如: 甲苯、二甲苯)	免疫分析											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		土壤氣體分析系統											
		層析法											
	無機鹵化物	免疫分析											
		層析法											
		以化學反應為基礎的指標(如比色法)											
		透地雷達											
		免疫分析											
非金屬毒性元素	免疫分析												
	層析法												
	以化學反應為基礎的指標(如比色法)												
	透地雷達												
	免疫分析												
重金屬(如: 石棉、氟化物)	免疫分析												
	層析法												
	以化學反應為基礎的指標(如比色法)												
	透地雷達												
	免疫分析												

## 4.2 場址污染調查規劃

調查評估人員應根據場址環境評估結果，進行場址污染調查規劃。規劃方式根據污染分佈空間分佈的不同，可分為調查位置及深度佈點，根據調查介質的不同則分為土壤及地下水的調查。然而，根據調查目的不同，可分為污染事實的確認及污染範圍評估。以下茲以調查空間分佈的不同，進行調查位置、深度及各種方法進行說明。

### 4.2.1 調查位置

調查位置的規劃可分為土壤及地下水，並根據調查目的不同，進一步分為污染事實的確認及污染範圍評估，詳細說明如下。

#### 一、土壤

土壤採樣調查佈點規劃，可參考本署公告之「土壤採樣方法(NIEA S102.64B)」所述內容為原則，並視情況進行採樣的分區，以取得具有代表性樣品、減低成本及提高調查品質為主要考量。並應審慎檢查每一鑽孔的位置，避開地下管線、儲槽或其他非天然障礙物。此外，污染調查時需先釐清非污染區、疑似污染區及已知污染區，可由定期監測、背景調查結果及土地使用沿革得知概略情況，再經更詳細的土壤採樣分析結果判定污染區。針對疑似污染區及已知污染區採樣時，不可混入非污染區土樣。

常用的污染調查採樣規劃可分為主觀判斷或系統規劃方式，個別說明如下：

#### (一) 主觀判斷採樣(Judgmental sampling)：

當確知或可目視污染源所在位置時，根據專業判斷直接於定點採樣。可節省採樣及分析成本，但其結果不適合作統計分析。

#### (二) 系統化佈點 (Systemati sampling)

為有效取得準確調查結果，採樣數的決定相當重要，調查人員應依採樣計畫的數據品質、濃度變異性、可容忍之採樣誤差等，選用不同的統計方式。系統化佈點的採樣位置決定與空間維度的關係，可參考「土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法」。

(三) 簡單隨機採樣(Simple random sampling)：

將調查區劃分成許多小單位，配合亂數表對各小單位採樣。適用於調查區域內的污染分佈相當均質時，亦即非針對高濃度的污染源調查時。其結果具統計意義，容易計算平均值、濃度分佈與變異。

(四) 分區採樣(Stratified sampling)：

當調查區內影響污染物分佈特性(如土壤質地、風向、地下水流等)的異質性較高時，可將較為均質範圍劃為一分區，以各分區的面積權重分配採樣數，再對各小分區進行(如隨機)採樣。其結果可更精確獲知污染分佈。

(五) 系統及網格採樣(Systematic and grid sampling)：

利用虛擬網格方法，在網格內或交叉處採樣，當污染趨勢或分佈範圍過大且不明確時，可依此結果找尋高污染區。在常用的網格定點方法中，若無特殊考量，以瓶架網格法(Bottle rack grid method)、平行網格法(Parallel grid method)及矩形網格法(Rectangular grid method)採得高濃度點的機率較高。一般而言，農地重金屬主要即以系統及網格採樣方法，或簡單隨機採樣方法為主要的採樣規劃。為利於事業辨別用地之所屬分區，可參考本署公告之「土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法附件二-網格法」。進行不同污染潛勢區佈點規劃。本指引提供表 4.2.1-1 案例說明土壤污染範圍調查之系統化佈點方式。

(六) 應變叢集採樣(Adaptive cluster sampling)：

利用初步大範圍的系統調查結果，再逐步趨向高污染區作較細密的採樣，適用於界定污染範圍。

(七) 混合採樣(Composite sampling)：

當受限於樣品分析經費或時間，可將採得的土樣等量均勻混合，以減少分析樣品數。其結果會損失濃度分佈的資訊。

表 4.2.1-1 土壤污染範圍調查及劃定方式

步驟	圖示	說明
1	<p>● 第一階段採樣調查 超過管制標準之採樣點</p> <p>① 濃度高於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p> <p>① 濃度低於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p>	於可能受污染區域及鄰近區域，以相等間距劃定網格，網格必須涵蓋所有可能受污染之土地區域，再於該網格上取樣，如左圖第一階段採樣（圖例①）。網格大小可參考附表以預估土壤污染範圍決定。
2	<p>● 第一階段採樣調查 超過管制標準之採樣點</p> <p>① 濃度高於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p> <p>① 濃度低於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p>	網格點採樣結果顯示已受污染（例如高於管制值），則於該格點向 X 及 Y 軸方向延伸，以相同之間距選取新的採樣點，如左圖第二、三階段採樣（圖例②、③）。重複上一步驟直到最外圍網格點所採樣品皆低於管制值。
3	<p>● 第一階段採樣調查 超過管制標準之採樣點</p> <p>① 濃度高於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p> <p>① 濃度低於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p>	再於所有最外圍之網格中心採樣，如左圖第四階段採樣（圖例④）。
4	<p>● 第一階段採樣調查 超過管制標準之採樣點</p> <p>① 濃度高於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p> <p>① 濃度低於法規值之採樣點 (數字表示採樣階段)</p> <p>可能污染範圍劃定</p>	如果外圍網格中心點之採樣結果高於管制值，則重複步驟 2 至邊界採樣點之土樣檢測均低於管制值為止，如左圖第五階段採樣（圖例⑤）。在所有向外調查之採樣點均低於管制標準後，利用 Surfer 繪製等濃度圖，以達管制標準區域為污染範圍。

土壤污染範圍與網格間距關係附表

項目	單位	小範圍場址				大範圍場址	
		<5	5-25	25-100	100-150	500-1000	1000-5000
預估污染範圍	平方公尺						
網格間距	公尺	2.5	2.5	5	7.5	10	15

土壤採樣佈點根據調查目的不同，可再細分為污染事實的確認及污染範圍判定，分別說明如下。

### (一) 污染事實確認

可一次採樣作評估，亦可能需要以多階段執行，第一次可作較大範圍、較大間距的均勻佈點，第二次及後續階段則應儘量集中於高污染區內及邊界附近，即調查由開始至結束階段，佈點重心也由場址的全面性趨於污染源或高污染潛勢區(Source or hot spot)。

### (二) 污染範圍評估

一般而言，土壤污染範圍調查之採樣位置除高污染區域外，亦需針對低污染區進行確認，而高低污染區之採樣密度可隨之調整，考量因素除污染範圍確認外，主要為後續整治之污染總量推估計算。因此，污染範圍界定常需要進行多次的佈點與採樣，第一次作較均勻的採樣間距佈點，得到初步土壤污染物濃度分佈，再對於土壤污染物濃度較高處、濃度異常變化處等進行較細密的採樣佈點與採樣。

界定土壤污染範圍時，包括污染土地的面積、深度及污染物種類及濃度分佈，通常採網格方式作採樣佈點。網格之製作可於調查面積內，以每隔 5 至 50 公尺間距進行虛擬網格作業，網格可為正方形、長方形、三角形、菱形或平行四邊形等形狀，於網格節點處即為採樣點。實際上可依現場面積大小、污染分佈與污染物傳輸速度、污染程度、土壤質地、污染物質之物理化學性質、場址地表情況而變動。

## 二、 地下水

地下水採樣佈點時，除以高污染潛勢區為主要規劃地區外，另應考量區域的地下水流向，於高污染區附近或下游地區佈點；在場址內進行至少三口以上簡易井之地下水採樣，此簡易井之分布以三角形為原則，並量測鑽孔內水位之相對高程，作為研判場址內之地下水流向之初步參考資料，並調整初步概念模型。

根據調查目的的不同，以下個別說明於進行污染事實確認及污染範圍調查評估原則。

### (一) 污染事實確認

在場址初步採樣調查評估階段時，地下水調查可採用簡易井。簡易井以 1 吋井徑為主，採用同一種濾料(石英砂)回填，可無需進行完井，其設置成本低、施工期程短，故可用較少的資源掌握場址特性，符合篩選調查的目的地。若受限於資源或場址特性而無法設置足夠的簡易井，可採用單井流速流向觀測儀協助地下水流向與流速的研判。單井流速流向觀測儀為一方便、經濟的地下水流速流向量測方法，但需注意井中與地層中的地下水流況具有差異性。

然而，簡易井因不符合監測井設置規範的規定，不僅井結構亦遭破壞，同時地下水水質易受干擾而不能完全代表含水層的水質特性，爰此，若評估調查場址極具遭受地下水污染之可能時，需考量設置標準監測井作為地下水污染調查方式。

基於確認場址是否存在污染之目的，不論簡易井或監測井設置位置應以高污染潛勢區為主，包括儲槽區、管線區、廢棄物儲存、處理區、污水處理區、製程設備或設施區、毒性化學物質運作場所、排水管與污水坑、坑洞、水槽、池沼或其他地表水等。

### (二) 污染範圍評估

對於地下水污染範圍調查而言，在未能完全初步掌握地下水污染範圍前，可先於場址內進行監測井設置佈點，並且設置位置需參考水文地質條件，於污染區之上下游位置進行佈點，若執行完污染範圍調查後仍無法完全劃定地下水污染邊界，則需考量場址外之地下水監測井設置佈點及調查採樣分析。

## 4.2.2 調查深度

### 一、土壤

壤採樣可分為特定深度採樣及連續深度採樣，若可搭配 4.1 節所述

快速調查技術，可選用連續深度採樣方式，藉由現場快速調查篩選污染程度最具疑慮之某特定深度土壤樣品進行實驗室檢測分析。若於此調查階段可較明確瞭解場址受到污染之途徑及污染物種類，可選擇特定深度進行土壤採樣，並直接檢送實驗室進行檢測分析。

目標深度可依據現勘、訪談及地球物理探測結果，於污染潛勢區存在地下管線、槽體等可疑洩漏源之情況下，規劃其地下物深度作為預定採樣深度。

## 二、地下水

為確認場址地下水是否遭受污染，可依現勘、訪談及地球物理探測結果，根據可疑之污染物種類、場址水文地質特性及污染潛勢區域遭受污染之途徑，進行標準監測井或簡易井之設置深度規劃。

然而，監測井設置之開篩深度主要係依據場址污染物種類及水文地質條件，選擇污染物殘留可能性最高之深度進行開篩，亦可利用 MIP 作為有機污染物調查時，地下水監測井設置之前端調查作業，掌握較高濃度之深度位置後規劃開篩深度。由於標準監測井設置費用較高，故一般進行調查時往往會先以全開篩之簡易井或以直接貫入採樣法取得地下水樣品，然以簡易井或直接貫入採樣法取得之水樣為混合數個不同深度地下水之樣品，後續若要釐清實際污染物位置，仍建議設置標準監測井以獲得具代表性之數據。

場址地下水的判定可利用調查區域附近現有地下水既有井或監測井，獲得地下水位深度資料，做為地下水採樣深度的參考依據。若如果無當地地下水之相關資料，可在附近進行土壤採樣時，以採取的土壤樣品含水量作為地下水水位採樣深度的參考依據，並蒐集附近是否有土地開挖或地質鑽探資料，作為地下水位參考依據。

### 4.2.3 調查方法

以下就污染調查之土壤採樣方法、地下水監測井設置以及地下水採樣方法說明於後。

#### 一、土壤採樣

土壤採樣方法主要依本署公告之「土壤採樣方法(NIEA

S102.64B)」相關規範執行。須依據土壤採樣目的，和土壤、污染物質及現場周圍環境等特性，選取合乎場址特性需求的採樣設備、材料、方式、品質管制與安全措施等。

## 二、地下水監測井設置

高污染潛勢區地下水調查主要以標準地下水監測井為主，地下水水質監測井的設置作業，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。

## 三、地下水採樣

地下水採樣方法主要依本署所公告之「監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)」之相關規範執行。

### 4.3 場址概念模型建立

根據場址環境評估結果，可作為場址背景資料、潛在污染物、污染來源及途徑等，預估可能對受體造成的影響。然而，隨著污染事實及污染物類別的確認後，應進行相關水文地質資料及污染物特性資料的蒐集，進行場址概念模型(Site conceptual model, SCM)的建立。場址概念模型在不同階段，可提供不同訊息予調查評估人員，作為後續場址管理之參考，表 4.3-1 為各階段可提供之訊息彙整。為了建立完整之場址概念模型，應蒐集資料及重點彙整如圖 4.3-1，說明如下。

#### 一、背景資料

- (一) 污染團位置
- (二) 供水井位置
- (三) 地下水分類或用途
- (四) 鄰近之水源保護區/含水量
- (五) 環境中潛在性受體之位置

表 4.3-1 場址概念模型於各階段之功能

場址管理階段	功能
場址環境評估	<ul style="list-style-type: none"> <li>協助建立場址內蒐集有關污染來源、傳輸途徑及受體間的關聯性</li> <li>透過潛在影響關聯性評估，避免不必要得調查工作</li> <li>作為後續調查工作之基礎架構，規範出後續調查工作之項目及範圍</li> </ul>
污染調查規劃	<ul style="list-style-type: none"> <li>將場址內之物理、化學、生物特性進行特徵化描述</li> <li>描述污染物洩漏、移動及曝露途徑</li> <li>與場址污染無關的訊息文件化(歷史資料、自然環境背景、人為的污染來源)</li> </ul>
整治方案選取	<ul style="list-style-type: none"> <li>找出潛在曝露途徑，並定義對人體健康及環境的潛在風險</li> <li>評估可能整治方案</li> <li>協助進行整治方案選取，並盡可能避免對受體產生不可接受的曝露風險，以確保人體健康及環境的保護</li> <li>去除空白數據的不確定性，進行明確整治方案選取規劃</li> <li>彙整所有蒐集的資訊、評估結果及可行性測試結果，進行整治方案的選取</li> <li>選取積極的整治方法進行場址污染改善</li> <li>討論已選定之整治方案，應如何進行人體健康及環境的保護</li> </ul>
污染改善作業後期	<ul style="list-style-type: none"> <li>將整治成效文件化，並說明過程中如何減緩對人體健康及環境的衝擊</li> <li>將充足的調查資料繪製成圖，強化持選定之整治方案的可靠性，並作為工程及體制監控的依據</li> <li>可作為緊急應變作為的參考</li> <li>證實所有污染調查及整治階段的工作，皆符合相關法令或手冊</li> <li>作為污染改善完成後的監測計畫參考</li> </ul>

參考文獻：Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, 2011

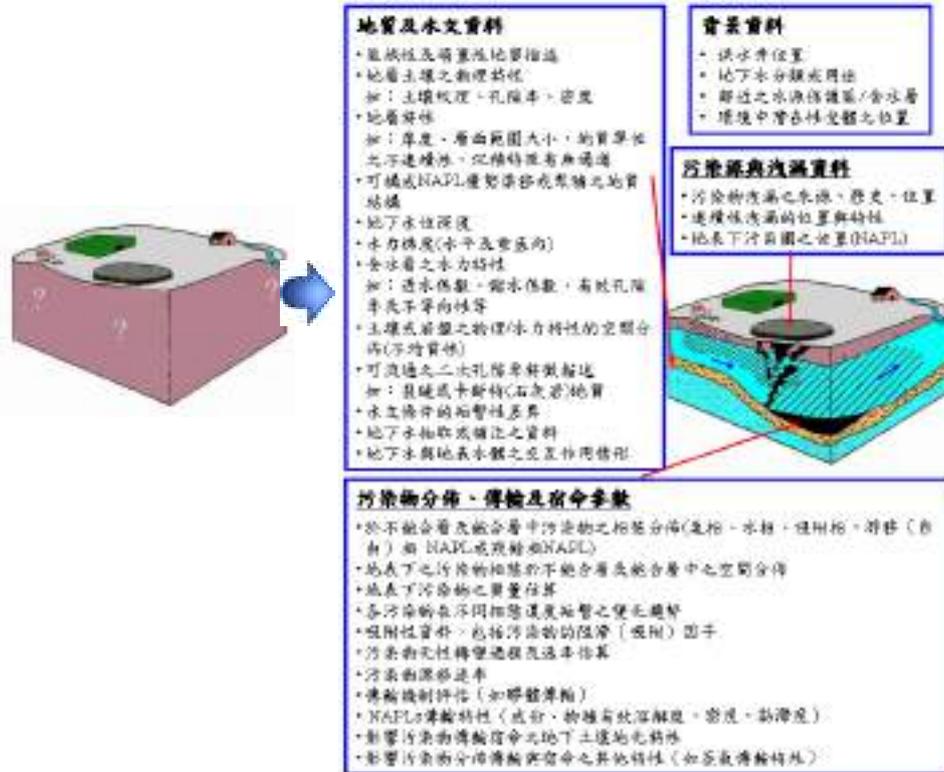


圖 4.3-1 地下水場址概念模型建立重點示意圖(範例)

## 二、污染源於洩漏資料

- (一) 污染物洩漏之來源、歷史、位置
- (二) 連續性洩漏的位置與特性
- (三) 地表下污染團之位置

## 三、地質及水文地質資料

- (一) 區域性及場置性地質描述
- (二) 地層土壤之物理特性，如土壤紋理、孔隙率、密度
- (三) 地層特性，如厚度、層面範圍大小、地質單位之不連續性、沉積特徵有無通道
- (四) 可構成 NAPL 優勢漂移或聚積之地質結構
- (五) 地下水位深度
- (六) 水力梯度，包含水平及垂直向
- (七) 含水層之水力特性，如水力傳導係數、儲水係數、有效孔隙率及不等向性
- (八) 土壤或岩盤之物理/水力特性的空間分佈
- (九) 可流通之二次孔隙率特徵描述，如裂縫或石灰岩地質
- (十) 水文條件的短暫性差異
- (十一) 地下水抽取或補助的資料
- (十二) 地下水與地表水體之交互作用情形
- (十三) 地層剖面資料，如含水層數目、阻水層之連續性及厚度、水層剖面資料、水文地質邊界

### 4.3.1 水文地質特性調查

水文地質調查的目的在於瞭解含水層之「水文地質特徵」與「地下水流場變化」，前者是掌握水文地質的變化，量化的參數包括有導水係數、儲水係數等；後者則是含水層中地下水流速、流量、流向的空間分佈及時

間變化。

水文地質調查是場址污染調查、監測、整治不可或缺的前置作業，若輕忽此一步驟而欲求省錢、快速、有效的污染整治，無異於捨近求遠，反而造成事倍功半，甚至愈加嚴重的反效果。

然而，水文地質特性之調查，需檢視目標場址之類型、污染物種類及污染途徑，進而考量是否具有執行場址水文地質特性調查之必要性，若此類相關資訊與污染範圍調查工作、污染範圍與體積推估、污染傳輸流布途徑以及未來整治工法選擇或地下水污染等較無相關影響，可評估選擇針對場址之土壤背景調查、既有地質相關資料彙整、場址周遭水文地質特性調查資料蒐集等，作為此部分之主要執行內容。

#### 一、含水層調查

含水層為透水及儲水性能佳的地層，從水資源的觀點而言，含水層可以長時間、穩定地提供人類所需的用水，然而，一旦含水層遭受污染，則污染物亦因此特性而影響含水層的水質。水文地質項目需說明場址含水層系統中有多少含水層及含水層類別、阻水層之水平及垂直延伸範圍，及阻水層水平連續性是否完全涵蓋含水層面積等，並附水文地質剖面圖。這些地層的特性與分布，必須經由調查才能瞭解，此部分之調查可依據本總則 4.2.2 之調查方法，依據場址特性及調查目地選用以下各種破壞性或非破壞性調查方式。

(一)地質鑽探

(二)透地雷達

(三)電磁波

(四)井內探測

#### 二、水位調查

地下水位是能量的表現，此能量是高度能、壓力能及速度能的總和，其中，壓力能可利用水壓計(piezometer)量測。由於地下水流動速度緩慢，速度能因此可被忽略，因此，地下水位為高度能與壓力能的總和，代表了地下水體的總能量或趨動力。含水層系統可分為自由含水層(unconfined aquifer)與受壓含水層(confined aquifer)兩類，前者為通

氣層，其壓力能等於大氣壓力加上靜水壓力，故井篩若設於自由含水層中的監測井，則監測井中的液面即反映飽和層的介面；後者為受壓層，其壓力能與不透水層的分布有關，因此井篩若設於受壓含水層中的監測井，則監測井中的液面有可能高於上方自由含水層的飽和層介面。

在環境問題中，一般是經由監測井量測「地下水靜水位(static water level)」，將監測井的井頂高程減去此靜水位，可得到水頭或地下水位。地下水靜水位的定義，是從監測井的井頂端到井中靜止之水面，而量測方式主要分為以下兩種：

(一)手動式地下水位量測

(二)自記式地下水位量測

### 三、含水層參數調查

傳統的含水層參數調查方法分析這些水力試驗結果，與時間尺度(例如穩態、暫態)、地層特性(例如自由含水層、受壓含水層、滲漏含水層)、含水層特性(例如均質/非均質、等向/非等向)、井篩特性(例如完全貫穿、部份貫穿)等有關，同時亦須考慮井集膚效應(Skin effect)、井儲蓄效應(Wellbore storage effect)之影響，目前商業用之含水層參數分析軟體，已收納許多分析方法，使用者可以依據現地地層與試驗方法選用，而傳統之含水層參數調查方法主要為以下幾種。

(一)定抽水率試驗(Constant rate test)

(二)微水試驗(Slug test)

(三)定水頭試驗(Constant head test)

### 四、邊界條件調查

如果場址地下水流與污染物傳輸，會使用數值模式進行評估、模擬，則場址概念模型成為現地實況與數值模式之間的橋樑，此時邊界條件是不可或缺的資料，這是因為給定邊界條件方能得到一個適定解(Well-posed solution)。數值模式的邊界條件，可分為固定水位邊界(Dirichlet 或第一類邊界)、固定流量邊界(Neumann 或第二類邊界)及混合邊界(Cauchy 或第三類邊界)。

一般而言，數值模式的邊界條件中，至少要包括水位邊界，可確保數值模式的唯一性，海洋、湖泊、河川等天然水體常被設定為水位邊界。其次，由於地表下的流量不易估算，或估算的誤差通常很大，因此，流量邊界盡可能取零流通量，例如分水嶺或難透水邊界。至於混合邊界，因為包括水位與流量兩個變數，不易準確的估算，一般較少使用。

如果場址概念模型沒有天然水體的水位邊界，可以在邊界範圍設置觀測井，利用自記式水位計長期觀測水位的變化，根據水位的變動情形，適當地給定水位邊界。如果分水嶺或難透水邊界距離場址很遠，是否要將此天然邊界納入數值模式中，需綜合考量計畫的目標、時程、經費，以及場址的水文地質特性。另一個邊界條件的替代方案，是在數值模式中虛擬一個位於適當遠處的水位邊界，並假設其水位變化為零。

含水層中地下水之流向、流速、流量可透過前述水文地質調查所得之參數進行推估。一般而言大尺度地下水流向可由區域性地下水水井之水位高程描繪地下水位等水位線圖加以判定，小尺度則可應用單井流速流向測定來獲得較符合微尺度場址異質性的資訊；地下水流速除可使用前述單井流速流向測定之外，亦可應用滲透係數與水力坡降計算，或使用追蹤劑判定；地下水之流量則可透過 Dupuit 方程式或達西定律計算。

### 4.3.2 污染物特性調查

場址污染物分布、傳輸、存在型態及毒性等，受到污染物之物化特性極大之影響，爰此，於完成場址污染採樣調查並確認污染物種類後，需詳加蒐集彙整該污染物之物理化學相關特性，作為後續規劃污染範圍調查及整治工法選擇之重要依據。

一般而言，污染物種類可先概略分為無機污染物(如重金屬)及有機污染物，如揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)、總石油碳氫化合物(Total petroleum hydrocarbon, TPH)，並可參考我國勞動部勞動及職業安全衛生研究所物質安全資料表(Material safety data sheet, MSDS)、勞委會

危害物質危害數據資料、美國環保署毒理研究資料(toxicology review)、有毒物質及疾病登記署(ATSDR)網站或國內外相關學術論文研究資料等。

主要蒐集之相關資訊需考量是否與場址後續之範圍調查、傳輸流布、整治工法選擇有相關，例如污染物之主要存在型態、比重、溶解度、有機碳分佈係數、亨利常數、擴散係數等，調查評估人員應依場址實際污染情況、污染物種類進行相關特性資料蒐集，本指引僅提供參考。

## 第五章 調查結果評估

為了解目標調查區域內之土壤及地下水是否存在污染事實，並根據調查結果進行污染嚴重程度的描述，本章將說明在不同調查目的為前提下，各種調查結果評估方式。基本上可將調查結果評估分為兩大部份，一為污染事實的判定並訂定後續管理作為，另則是在確認污染事實進一步評估污染嚴重的程度，進行污染體積及範圍推估。

### 5.1 污染調查評估報告

為了將污染調查結果彙整，以作為後續場址管理工作判定的依據，建議在報告書及相關檢附文件，應包含以下項目。

#### 一、 報告書內容至少需包括：

- (一)摘要及簡介
- (二)場址狀況描述
- (三)資料審閱
- (四)場址勘查
- (五)訪談
- (六)採樣計畫
- (七)檢測分析結果
- (八)結論
- (九)建議
- (十)參考文獻
- (十一) 執行者簽章及相關證明文件
- (十二) 附錄

#### 二、 檢附文件

報告書中的結果，皆應有相關資料予以支持。若場址評估人員或

顧問機構於報告書中排除採用執行過程中所取得之特定資料，則應於報告書中說明排除之理由。報告書應檢附文件包括

- (一)現場照片
- (二)現場會勘、採樣紀錄，以及相關簽到文件
- (三)員工或居民訪談紀錄
- (四)場址營運相關資料
- (五)工業局、建設局、環保局所提供相關資料
- (六)航照圖、地形圖、場址配置圖等相關圖資
- (七)檢測機構之土壤及地下水採樣紀錄
- (八)檢測機構之分析結果及品保品管分析

## 5.2 污染事實確認後續管理

根據污染調查規劃完成場址污染採樣調查後，需根據場址污染物種類(重金屬、有機化合物、農藥、火炸藥類等)選定合適檢驗分析方式，並比對分析數據與現行土壤及地下水法規之監測/管制標準。比對結果可能存在情境如圖 5.2-1，各種情境應進行之後續管理作為茲分述如下。

### 一、情境一

當污染調查結果中，各項檢測分析之污染物種類均未檢出，或扣除原環境背景值後污染物種類濃度遠低於監測標準，應再根據污染物類別進行污染情況的判定。如土壤重金屬濃度未被檢出，表示污染調查之區域均未受污染，原評估之高污染潛勢區域不存在可能之污染途徑。然而，若為比水重非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL)濃度未被檢出，結果僅能判定該場址高污染潛勢區域未受污染，不可斷定該場址全區域無污染，應再評估調查作業規劃是否完整。

爰此，於此情境之下若具有完整之污染潛勢評估工作及結果，較能判定此場址之土壤及地下水未受污染，否則，需考量場址其他區域是否仍具有可能之污染潛勢，並考慮進行其他區域補充調查。

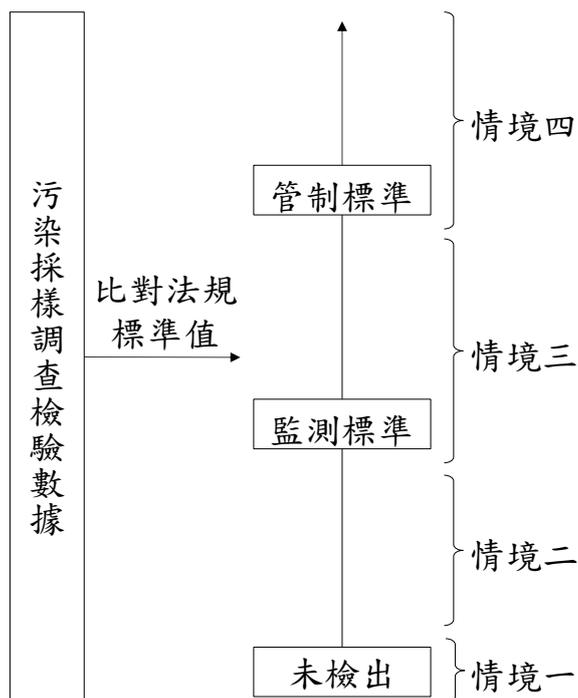


圖 5.2-1 污染調查結果各類情境示意圖

## 二、情境二

若檢驗分析污染物有檢出情形，但均低於監測標準，顯示該區域內確實有污染物的存在，應再比對原環境背景值，評估是否為原環境即存在之污染物。若則顯示場址確實有發生污染可能性，僅污染狀況較輕微或污染發生時間較短。於此，後續作為應著重在追查並斷絕污染源之工作，確保場址之土壤及地下水不再持續受到污染之可能，並可依據自身成本、場址後續土地利用等，評估規劃是否需進行定期調查監測之工作。

## 三、情境三

當污染調查之檢驗數據有檢出並介於監測標準及管制標準之間時，表示此場址已存在遭受污染之虞，在此情境之下應再比對背景濃度，確認是否為原環境即存在之污染物，若否則應立即追查並斷絕污染源，亦需完整規畫場址定期調查監測工作，必要時需更進一步規劃後續擴大調查工作，確認其他區域是否亦遭受污染之情事。

## 四、情境四

此情境乃最為嚴重之情況，當調查檢測數據超過管制標準，顯示此場址確實遭受污染且可能為長期污染事件，除立即追查並斷絕污染源外，需啟動緊急應變機制以控制污染擴散，確保污染範圍不再擴大或加劇，並且需依據此次污染調查結果，進一步規劃詳細之污染範圍調查工作，以確認場址污染範圍、深度、種類、程度等。

爰此，在此情境下需針對污染成果調查報告之各項相關內容詳細說明，擬定後續污染範圍調查工作規劃，並如第二章所述，環保行政機關得依相關法令命其利害關係人進行緊急應變作為，或公告為控制場址或整治場址。

### 5.3 污染範圍及體積推估

經過污染調查結果評估後，若判定場址土壤或地下水已遭受污染，為詳加瞭解場址土壤及下水污染範圍，俾利後續污染場址改善作業規劃與評估，需依據污染調查結果進行場址污染範圍及濃度分布評析，茲就土壤及地下水污染範圍及體積推估說明如后。

#### 5.3.1 土壤

而執行土壤污染範圍調查時，除藉由實驗室檢測分析結果瞭解污染物污染分布深度外，亦可利用現場快速調查技術於場址不同深度之執行結果，進行實驗室檢測分析結果比對及迴歸，利用大量場址快速調查數據換算真實污染濃度，評估土壤污染水平與垂直分布情形。

一般而言，進行土壤污染範圍細密調查之採樣點數通常較多，所顯示之污染物濃度分佈亦較具代表性。除藉由實驗室檢測分析結果瞭解污染物污染分佈深度外，油品污染場址亦常利用土壤氣體檢測，調查土壤污染水平與垂直分佈情形。

所得檢驗結果或檢測數據，可輔以適當電腦軟體，可以二維方式呈土壤調查結果，若擬界定土壤污染體積，只需計算其所涵蓋之空間分布，即可推算污染物之體積，將有助於瞭解污染物於地表下之分布狀況。一般而言，進行土壤污染範圍調查之採樣點數通常較多，所顯示之污染物濃度分布亦較具代表性，故可依檢測分析結果，利用 Surfer 繪製等濃度圖(圖

5.3.1-1)，已達管制標準區域則可視為污染範圍。以下為某場土壤污染體積推估方式說明。

某場址地面下3公尺及5公尺處剖面之土壤氣體等濃度，如圖 5.3.1-2(a) 所示，假設該區域之土壤污染深度達地面下 5 公尺。欲保守推估土壤污染體積，則可以污染範圍較廣之地面下 5 米剖面之等濃度圖進行水平面污染面積推估，進而推估土壤污染體積(圖 5.3.1-2(b))，推估過程如式 5-1 及式 5-2。

$$\text{水平面污染面積} = [(20 \times 20) - (8 \times 2)] = 384 \text{ m}^2 \quad \text{式 5-1}$$

$$\text{土壤污染體積} = 384 \text{ m}^2 \times 5 \text{ m} = 1,920 \text{ m}^3 \quad \text{式 5-2}$$

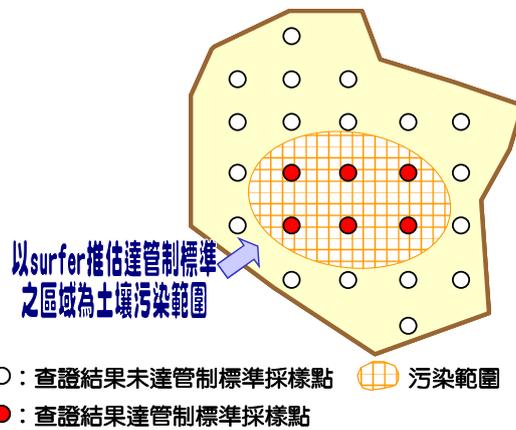


圖 5.3.1-1 利用 Surfer 推估達管制標準

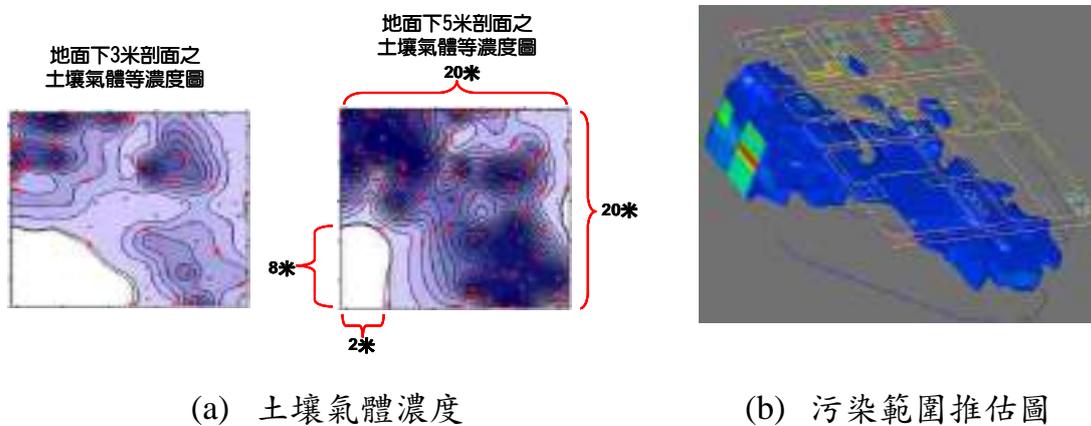


圖 5.3.1-2 土壤氣體濃度及污染範圍推估圖(範例)

### 5.3.2 地下水

在地下水方面，污染範圍推估受到場址水文地質特性及污染物種類影響極大，因此以下就地下水污染範圍推估時應考量因素、推估方法、可用模擬軟體進行說明。

#### 一、 考量因素

若需進行場址地下水污染範圍推估，需先確認場址水文地質特性，並區分污染物種類。

##### (一) 水文地質特性

場址地下水污染範圍分布，會受到水文地質條件之不同，可能有不同地下水層之分布差異，應預先建立此場址之地質剖面分布圖，並針對該場址之特性進行監測井設置佈點規劃，除設置不同深度監測井外，亦可利用微洗井方式在不同深度之井篩區段採樣分析，藉以了解不同深度之污染物分布情形。

##### (二) 污染物種類

而污染物種類部分，需於第四章執行成果中確認場址污染物後，依據該場址之污染物種類，判斷此污染物進入地下水後之可能傳輸方式，其中可大致區分為無機污染物與有機污染物，有機污染物又可再大致分類為比水輕與比水重二類。

#### 二、 推估方法

一般而言，會先以地下水污染範圍的調查結果，經現場地下水監測井設置及地下水採樣，以及實驗室的分析結果，彙整污染物位置、深度及濃度等資料，繪出污染物的三維分布圖，推算地下水污物之體積，而概略評估劃定地下水污染範圍之各階段內容如以下所列。

(一) 以既有、實測之場址水文地質資料，選用適當之地下水污染物傳輸模式進行模擬，推估污染團位置、範圍、移動方向、速度等，並依歷次污染範圍調查過程所取得之水文地質及污染物濃度資料，逐次修正模式模擬結果，並配合於所推估之污染範圍邊界進行採樣確認。

- (二) 在地下水污染物傳輸模式方面，由於污染物於地下水系統中隨地下水流動而有傳輸作用，其傳輸與擴散行為屬於三維度。為瞭解污染物於場址隨地下水之傳輸與擴散，可根據現場地質鑽探、水文地質分析及地下水檢測結果，並選擇適用之電腦模式，模擬評估污染物於地下水系統中之可能傳輸情形及未來可能分布狀況，據以評估場址污染之危害性及因應之整治方案。
- (三) 由於地下水污染傳輸模式種類繁多，建議應依場址特性，選用適當之地下水污染物傳輸模式進行地下水污染範圍之模擬作業。而 MODFLOW 搭配 MT3D 為目前一般常用之地下水污染物傳輸模式，其可適用於大部分場址狀況，此外，若對於地下水污染擴散模式有進一步之興趣，建議可參閱環保署環檢所(現已改制為環境部國家環境研究院) 94 年度「地下水污染擴散模式建立之研究」委辦計畫之研究成果(報告全文可於環境部環保專案成果報告查詢系統下載，網址：<https://epq.moenv.gov.tw/>)。
- (四) 場址污染情形一旦擴及地下水，可能污染深度得以第一含水層涵蓋深度，作最保守之估計，並藉此推估地下水污染量，瞭解第一含水層下方不透水層(阻水層)之位置，以進一步推估第一含水層深度。

### 三、 可用模擬軟體

現有地下水污染物傳輸模式眾多，初步篩選於地下水可能污染範圍或地下水污染範圍之模式，其適用及限制條件亦有所差異，詳表 5.3.2-1 所示。環保機關於選用模式時，應注意場址及污染物特性是否屬模式之適用範圍，且必須掌握模式模擬所需參數，以免模擬結果之精準度無法達到預期。

由於污染物於地下水系統中隨地下水流動而有傳輸作用，其傳輸與擴散行為屬於三維度。為瞭解污染物於場址隨地下水之傳輸與擴散，可根據現場地質鑽探、水文地質分析及地下水檢測結果，並選擇適用之電腦模式，模擬評估污染物於地下水系統中之可能傳輸情形及未來可能分布狀況，據以評估場址污染之危害性及因應之整治方案。

此外，除表 5.3.2-1 所列之模式之外，環保機關應依污染場址污染物及水文地質特性，選用其他適合之地下水污染物傳輸模式，進行控

制場址可能污染範圍及整治場址污染範圍之模擬、劃定作業。本指引以 MODFLOW 及 MT3D 模式為例，說明如下。

Processing MODFLOW for Windows(簡稱 PMWIN)為商用軟體，涵蓋 MODFLOW、MOC3D、MODPATH、MT3D、MT3DMS 等功能，可模擬場址地下水流狀態與污染物傳輸現象，另有 PEST 與 UCODE 可供參數校正與驗證。主要之功能可分為三類，包括：水流傳輸模式(MODFLOW、MODPATH)、溶質傳輸模式(MOC3D、MT3D、MT3DMS)、反轉模式(PEST、UCODE)，並加入了前置處理器與後置處理器，讓此模式更加人性化、更容易執行，是目前模擬地下水污染物傳輸之軟體之一。此軟體為 1989 年德國處理北方沿海地區垃圾傾卸區之整治計畫時，整合既有模式所研發。

MT3D 為 Modular Three-Dimensional Transport Model(模組化三維傳輸模式)之縮寫，原為一獨立的污染物傳輸模式架構，後來與美國地質調查局結合有限差分地下水模式 MODFLOW，使之能夠支持 MODFLOW 的水文地質特徵。此模式可求解溶質傳流、延散及化學反應(advection, dispersion and chemical reactions)，並建立於濃度場改變對流域場改變不明顯的狀況下。配合世界上被廣泛使用之地下水模式 MODFLOW 模擬流場之後，將其水位結果直接套用在 MT3D 上或是將之前的流場稍作修改，再將溶質傳輸特性輸入，進行場址溶解相污染物之傳輸模擬。

對於溶解相污染物之演變及傳輸模擬，可應用 MODFLOW 結合 MT3D 進行，是商業應用相當普遍之傳輸模式。MODFLOW 可以應用於一維、二維及大部分的三維地下水流問題，對於不論是穩態(steady)抑或是非穩態(unsteady)、受壓含水層(confined aquifer)或是非受壓含水層(unconfined aquifer)。除了地下水系統本身之外，外來的擾動(包括抽水井抽水、區域補注、蒸發散、河床水位變動及區域排水等)也可以模擬。

若可掌握地下水污染物傳輸模式所需參數時，可選用適當模式推估污染物達管制標準範圍，劃定為地下水可能污染範圍。例如一般常用之 MODFLOW 搭配 MT3D 模式即可適用大部分場址狀況。惟為避免掌握不足或錯誤之資訊，進而誤判地下水污染物擴散之趨勢，表

5.3.2-2 所列敏感參數建議應有實測資料，方能增加模擬結果正確性。

**表 5.3.2-1 常用地下水模式及適用範圍介紹**

模式名稱	模式類型	適用條件	限制條件	輸出結果
AT123D	3-D混合數值分析模式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬質量傳輸、均質穩態流、3D延散、一階衰減、吸附/延滯作用、生物衰減/轉換及延滯等情形</li> <li>2. 可推估污染物組成濃度</li> <li>3. 適用於單一地下水流向</li> </ol>	不適用複雜之地下水流向	污染物組成濃度的分佈
BIOSCREEN	模擬2-D延散、延滯及生物降解之情形	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬吸附/延滯作用、生物衰減/轉換及延散情形</li> <li>2. 可模擬污染物濃度隨時間變化之情形及可能發生之污染物濃度</li> <li>3. 適用於均值/等向水層</li> <li>4. 適用於油品污染</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 不適用於非均質或非等向水層</li> <li>2. 需要地下水平面區域範圍</li> <li>3. 無法模擬3D地下水流場</li> </ol>	污染物組成於地下水中降解之情形
MODFLOW搭配MT3D	3-D數值模式(有限差分法)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模擬對象包括井、地下水補注、河流、溝渠、蒸發及一般性邊界</li> <li>2. 適用於穩定流或紊流之單一飽和層或多個飽和層</li> <li>3. 適用於油品污染</li> <li>4. 可模擬穩拘限含水層、非拘限含水層、飽和層質量傳輸情形、多水層、穩定流或紊流、生物衰減/轉換及延散情形</li> </ol>	不適用於未飽和層	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水頭、流速</li> <li>2. 污染物濃度變化</li> </ol>
FEMWATER搭配FEMWASTE	3-D數值模式(有限元素法)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬飽和或不飽和土層中之地下水流傳輸、不定邊界條件、污染物傳輸及海水入侵等問題</li> <li>2. 可模擬吸附/延滯作用及延散情形</li> <li>3. 適用於拘限含水層或是非拘限含水層、拘限含水層與非拘限含水層混合之多層地下系統亦可模擬</li> </ol>	不適用於油品污染、熱傳及非水液相	溶質濃度於空間上與時間上之分佈
IGW	2-D數值模式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 適用於穩定流或紊流之單一飽和層或多個飽和層</li> <li>2. 適用於拘限含水層或非拘限含水層</li> <li>3. 適用於油品污染</li> <li>4. 可模擬吸附/延滯作用、生物衰減/轉換及延散情形</li> </ol>	無法模擬3D地下水流場	溶質濃度於空間上與時間上之分佈

表 5.3.2-2 地下水污染物傳輸模式所需參數及資料來源

主要參數名稱	註解	建議資料來源	敏感參數
污染源區域濃度	各場址變異性大	採樣分析	✓
有機碳含量( $f_{oc}$ )	高變異度，各場址變異性大	採樣分析或現地量測	✓
有機碳分配係數( $K_{oc}$ )	化學變異性	參考文獻	✓
土壤-水之吸附係數( $K_d$ )	$f_{oc} \times K_{oc}$	由前二項求得	✓
敏感受體之距離	高變異度，各場址變異性大	圖面或現地量測	✓
飽和層水力傳導係數	高變異度，各場址變異性大	現地量測	✓
水力坡降	高變異度，各場址變異性大	現地量測	✓
平均線性流速	$v = Ks \times i / \theta T$ ，各場址變異性大	現地量測	✓
土壤有效孔隙率	影響流速及遲滯係數	採樣分析	✓
污染源區域寬度 (平行於地下水流向)	高變異度，各場址變異性大	圖面或現地量測	
土壤總體密度	各土壤間變異度不大	採樣分析或現地量測	
飽和層厚度	各場址變異性大	圖面或現地量測	
儲水係數	依拘限/非拘限含水層而有所不同	參考文獻或現地量測	
補注量(入滲量)	高變異度，各場址變異性大	現地量測	
縱向延散	一般土壤種類間變異度不大	參考文獻	
橫向延散	一般土壤種類間變異度不大	參考文獻	
垂直延散	一般土壤種類間變異度不大	參考文獻	
降解速率	依化學特性及場址特性而不同	參考文獻或採樣分析	
污染源釋放時間	高變異度，各場址變異性大	採樣分析或現地量測	

#### 四、 污染物可能移動距離推估方式

有關地下水污染物可能移動距離之推估方式，除運用電腦模式模擬外，亦可運用理論公式推估計算，在查證資料有限且不確定性偏高之情形下，在實務上亦不失為一權宜之計，茲說明如下。

##### (一) 以地下水流速作為污染物傳輸速度之推估方式

一般而言，環保機關在無法獲取場址充足之資訊時，可以達西公式保守推估地下水可能移動距離：

$$L = v \times t \quad \text{式 5-3}$$

$$v = \frac{K \times i}{n} \quad \text{式 5-4}$$

其中

$L$ ：污染物可能移動距離(m)

$v$ ：地下水流速(m/day)

$t$ ：推估場址污染源洩漏之時間(day)

$K$ ：水力傳導係數(m/day)

$i$ ：水力坡降

$n$ ：有效孔隙率

達西公式中之水力傳導係數  $K$  建議以實作微水試驗(Slug Test)方式求得。惟如於調查過程中未進行水文地質參數試驗，則上述  $K$  值、 $n$  值等參數可參考文獻值之方式(表 5.3.2-3)進行推估， $i$  值亦可參考文獻值或利用地形坡度進行初步概估。此外，場址污染源洩漏時間若無法確知時，可以發生洩漏設備或設施之設置期間、工廠營運期間等推估。

表 5.3.2-3 不同型態土壤之水力傳導係數與有效孔隙率

介質	水力傳導係數K (m/sec)	有效孔隙率 n
水平方向		
黏土(表層)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	0.01 ~ 0.2
黏土(深層)	$10^{-8} \sim 10^{-2}$	0.01 ~ 0.2
砂土	$10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.01 ~ 0.3
砂土(細質地)	$10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.1 ~ 0.3
砂土(普通質地)	$5 \times 10^{-5} \sim 10^{-4}$	-
砂土(粗質地)	$2 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$	0.15 ~ 0.3
礫石	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	0.2 ~ 0.35
有機砂土	$\sim 10^{-10}$	0.1 ~ 0.35
砂岩層	$10^{-8} \sim 10^{-5}$	-
石灰岩層	$10^{-7} \sim 10^{-5}$	0.1 ~ 0.4
有裂縫或已風化之岩層	$10^{-8} \sim 10^{-4}$	0.01 ~ 0.24
垂直		
地下水位下方1.0至1.5公尺之黏土層	$1.3 \times 10^{-5}$	0.01 ~ 0.2
地下水位下方2.0至2.5公尺之黏土層	$4.2 \times 10^{-6}$	0.01 ~ 0.2
地下水位下方4.0至4.5公尺之黏土層	$2.5 \times 10^{-7}$	0.01 ~ 0.2

資料來源：Danish Environmental Protection Agency, "Guidelines on Remediation of Contaminated Sites", Environmental Guidelines No. 7, 2002.

## (二) 考量污染物傳輸特性之推估方式

污染物於含水層之傳輸，因與土壤介質之吸附、吸收或離子交換等機制影響，其傳輸速度通常小於地下水流速，此現象稱為遲滯(retardation)效應。若環保機關能獲取場址充足之資訊時，可以下列方式推估地下水可能污染移動距離。

$$L = v \times t \quad \text{式 5-3}$$

$$v = \frac{K \times i}{n} \times \frac{1}{R} \quad \text{式 5-5}$$

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} \times K_d \quad \text{式 5-6}$$

$$K_d = \frac{S}{C} \quad \text{式 5-7}$$

其中， $L$ ：污染物可能移動距離(m)

$V$ ：污染物傳輸速度(m/day)

$t$ ：推估場址污染源洩漏之時間(day)

$K$ ：水力傳導係數(m/day)

$i$ ：水力坡降

$n$ ：有效孔隙率

$R$ ：遲滯係數(retardation factor)

$\rho_b$ ：土壤容積比重(bulk density) (g/mL)

$K_d$ ：分配係數(distribution coefficient) (mL/g)

$S$ ：污染物在土壤中之濃度(mg/kg)

$C$ ：污染物在地下水中之濃度(mg/L)

對於有機污染物而言，分配係數亦可以下列公式推估：

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc} \quad \text{式 5-9}$$

其中

$K_{oc}$ ：污染物之有機碳分配係數(mL/g)

$f_{oc}$ ：土壤有機碳含量比例

針對地下水污染管制標準項目中，部分較常見之有機污染物之有機碳分配係數如表 5.3.2-4 所示；土壤有機碳含量比例則需進行現場實測。有關土壤有機碳含量比例  $f_{oc}$  之文獻資料不多，且數值分佈呈現非常大的差異，如表 5.3.2-5 所示。

表 5.3.2-4 各有機污染物之有機碳分配係數

項 目	有機碳分配係數 $K_{oc}$ (mL/g)
苯(Benzene)	$8.30 \times 10^1$
甲苯(Toluene)	$3.00 \times 10^2$
乙苯(Ethylbenzene)	$1.10 \times 10^3$
二甲苯(Xylenes)	$2.40 \times 10^2$
四氯化碳(Carbon tetrachloride)	$1.10 \times 10^2$
氯苯(Chlorobenzene)	$3.30 \times 10^2$
氯仿(Chloroform)	$3.10 \times 10^1$
1,4-二氯苯(1,4-Dichlorobenzene)	$1.70 \times 10^3$
1,1-二氯乙烷(1,1-Dichloroethane)	$3.00 \times 10^1$
1,2-二氯乙烷(1,2-Dichloroethane)	$1.40 \times 10^1$
1,1-二氯乙烯(1,1-Dichloroethylene)	$6.50 \times 10^1$
順-1,2-二氯乙烯(cis-1,2-Dichloroethylene)	$4.90 \times 10^1$
反-1,2-二氯乙烯(trans-1,2-Dichloroethylene)	$5.90 \times 10^1$
總酚(phenols)	$1.46 \times 10^1$
四氯乙烯(Tetrachloroethylene)	$3.64 \times 10^2$
三氯乙烯(Trichloroethylene)	$1.26 \times 10^2$
氯乙烯(Vinyl chloride)	$5.70 \times 10^1$

資料來源：Michael D. LaGrega Phillip L. Buckingham Jeffrey C. Evans and The Environmental Resources Management Group, "Hazardous Waste Management", International Editions 1994.

表 5.3.2-5 沉積物土壤有機碳含量比例( $f_{oc}$ )資料彙整表

場址名稱	質地(texture)	土壤有機碳含量比例( $f_{oc}$ )
Borden, Ontario	細—中砂	0.0002
Gloucester, Ontario	砂及礫石	0.0006
North bay, Ontario	中砂	0.00017
Chalk River, Ontario	細—中砂	0.00023
Woolwich, Ontario	細砂	0.00026
Cambridge, Ontario	中砂	0.00065
Rodney, Ontario	細砂	0.00102
Wildwood, Ontario	粉土	0.00108
Palo Alto, Baylands	砂、礫石	0.01
River Glatt, Switzerland	砂	<0.000-0.01
Oconee River, Georgia	砂	0.0057
	粗粉土	0.029
	中粉土	0.02
	細粉土	0.0226

資料來源：摘錄自 Domenico and Scheartz, Physical and Chemical Hydrogeology, 2<sup>nd</sup> ed., wiley, New York, p.506, 1998

針對上述 2 種地下水污染物可能移動距離之推估方式，不論採用何種方式推估所得之污染物傳輸距離或範圍，仍存在相當多的假設條件與不確定性，包括污染量、污染源是否持續洩漏、吸附、生物降解作用、水文地質變異性等，因此推估結果可能會與實際狀況有所差距，提醒環保機關在應用上宜特別注意，必要時建議輔以現場實測數據或參採國內外針對污染物污染傳輸距離之相關文獻綜合研析。

以下為地下水可能污染範圍推估範例說明。

- (一)根據本場址設置 3 口標準式監測井所測量之地下水絕對高程水位，推估地下水流向大體為北往南(或偏東南)流動。
- (二)該監測井設置時曾施作微水試驗，所求得之水力傳導係數 K 分別為  $5.5 \times 10^{-4}$  m/sec、 $3.9 \times 10^{-4}$  m/sec、 $2.4 \times 10^{-4}$  m/sec。
- (三)經查閱監測井設置時之土壤鑽探資料，發現該場址含水層主要粗、中砂所組成，經查文獻參考表(如表 3.3-2)得知有效孔隙率 n 介於 0.15~0.3 間，而其所顯示之水力傳導係數 K 範圍亦與實測值亦大致相符。
- (四)利用美國環保署”EPA On-line Tools for Site Assessment Calculation”之網站中所提供之計算工具，輸入監測井座標與水位高程可得到地下水水力坡降約為 0.0014。
- (五)地下水流速計算

為了保守起見，本場址水力傳導係數(K)取  $5.5 \times 10^{-4}$  m/sec，有效孔隙率(n)取 0.15，水力坡降取 0.0014 代入式 5-4，可求得地下水流速為 161.8m/year。

- (六)污染物移動距離推估

本場址設立約三年，故污染物可能移動距離以保守起見推估約 485.4 公尺。

## 5.4 健康風險評估

當使用者完成污染事實確認或污染範圍劃定後，擬採行場址健康風險評估。則應根據本署公告之「土壤地下水污染場址環境影響與健康風險評估辦法（環署土字第 1020092705 號令）」，進行相關評估方法使用與行政工作。進行健康風險評估之法令規範、相關評估方法與審查作業辦理有關的規範。

在健康風險評估過程中，本署為提供土壤及地下水污染調查健康風險評估規範與工具，於民國 103 年 7 月發表「土壤及地下水污染場址健康風險評估方法」。在該方法中說明應如何進行污染危害鑑定、劑量反應評估、曝露評估及風險特徵描述四大步驟評估方法，並且根據受體、曝露途徑及參數取得方式，分為三大層次評估資料蒐集與計算內容。

除提供污染評估人員參考操作方法外，亦公告針對內容的審查相關作業要點，如「環境影響與健康風險評估小組設置要點（環署土字第 1030043165 號）」，說明健康風險評估小組之組成與委員任務。此外，公告「土壤及地下水污染場址改善審查及監督作業要點（環署土字第 1030097321 號令）」，說明各相關單位應盡職責。

## 第六章 品保品管及工業安全衛生

### 6.1 品保品管

執行污染調查工作時，可分為現場採樣工作及實驗室分析。然而，為了確認各項工作的執行皆可達到污染評估的成效，應符合我國現行公告之相關作業辦法，以提昇調查工作成果的可靠度。本節茲就現場採樣工作及實驗室分析部份分別說明如下。

#### 6.1.1 現場採樣工作

土壤及地下水樣品的檢測除了應重視實驗分析過程的品保品管工作外，對樣品採集、運送及保存過程之品保工作亦不可忽略。由於樣品的基質、來源不盡相同，為採得具代表性的樣品，於採樣工作進行前應有周詳之規劃作業。

##### 一、採樣前置作業

採樣前置作業包括：採樣計畫書的擬定、樣品容器分類統計、樣品標籤製作、採樣器材洗滌與防污、樣品容器洗滌、採樣品管樣準備、採樣器材設備清點檢查等事項，其內容分別說明如下。

##### (一)採樣計畫書的擬定

採樣前需針對擬調查的場址依其調查目的擬定其採樣計畫書，計畫書內容需包括：調查目的、場址背景(如場址地址、場址地圖、場址範圍)、規劃採樣點數及佈點、採樣深度、採樣方式(工具)、採樣人員、樣品容器與保存運送，以及待檢測項目等。

##### (二)樣品容器分類統計

依據各類檢測的各種項目保存方法、保存期限、樣品體積與樣品容器種類予以統計後，建立樣品容器分類統計表。此作業方式將有助於採樣人員在外部作業時，不會因人為疏失造成瓶組不夠或樣品量不足，同時依類別分類保存減少保存不當等作業疏失。

### (三) 樣品標籤製作

樣品標籤製作主要目的為減少採樣人員於現場填寫樣品標籤的工作，以避免現場作業疏失。基本上，可由電腦統一作業，可於計畫執行前，先查核校對所有樣品標籤內容，以確保採樣分裝保存的品質。樣品標籤上應事先印製，並包含以下項目：

1. 專案名稱
2. 專案編號
3. 採樣日期
4. 場址名稱
5. 測站編號
6. 樣品編號
7. 容器代號
8. 分析項目
9. 保存方法
10. 採樣人員

### (四) 採樣器材洗滌與防污

採樣器材於採樣出發前，先以自來水清洗後，以無磷清潔劑清洗，再的去離子水或蒸餾水洗淨後晾乾備用。

### (五) 樣品容器洗滌

應依各類污染物所需之各種容器洗滌規定，進行樣品容器的清洗，以確保容器的清潔。

### (六) 採樣品管樣準備

為確保樣品之品質，土壤與地下水採樣時，應配合採取現場重複、野外空白樣品、設備空白樣品、運送空白樣品。上述各種樣品定義及採集方式，詳如環境檢驗品質管制手冊通則(NIEZ PA101)。

### (七) 採樣器材設備清點檢查

此外亦須做好採樣前準備及清點作業，在樣品容器準備作業

時，需由專人依據樣品容器分類統計表，將印好之樣品標籤貼於乾淨樣品容器上，並將各測站所需的樣品容器全部裝於一塑膠袋內。至於採樣前清點檢查作業，則由採樣作業人員於採樣出發前，依據採樣作業器材與設備清點檢查表進行採樣前的器材與設備檢查清點作業，以利爾後現場採樣作業的執行。

## 二、 現場採樣工作

由於土壤及地下水採樣作業方式不甚相同，然而無論是何種採集方式皆應依環境樣品採集及保存作業手冊(NIEA-PA102)公告之方式，進行採集後樣品的保存。

### (一) 土壤採樣

土壤採樣作業主要依據本署公告「土壤採樣方法(NIEA S102.64B)」與「土壤檢測方法總則(NIEA S103.61C)」的相關規定執行現場土壤採樣作業，有關土壤現場採樣作業程序的流程如圖 6.1.1-1 所示。現就土壤現場採樣之作業程序說明如下。

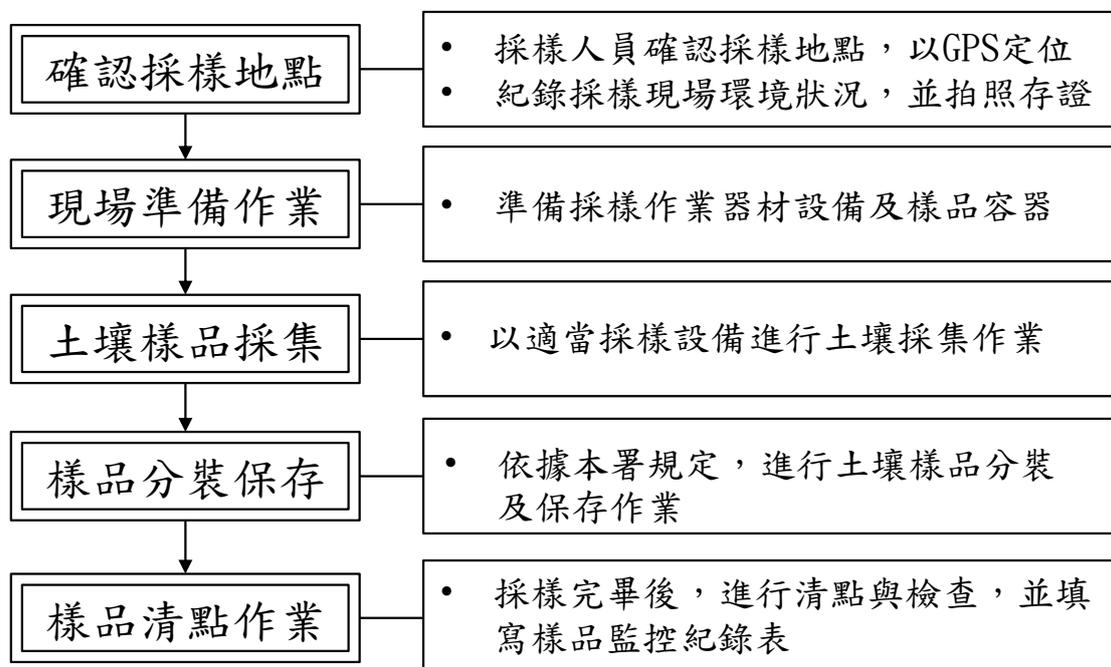


圖 6.1.1-1 土壤採樣作業流程圖

#### 1. 確認採樣地點

採樣人員到達採樣地點後，預先確認採樣點位置以 GPS 或精度較高 DGPS 定位採樣點，並進行拍照存證。

## 2. 現場準備工作

由採樣負責人執行各項現場工作的分工分派，記錄採樣地點的現場環境狀況於土壤採樣地點環境狀況表中，並準備該採樣點所需的採樣設備、器材及樣品容器。

## 3. 土壤樣品採集

詳細記錄土壤採樣點深度，若現場有快速篩測調查工具，則應依快速篩測結果選出具代表性樣品。土壤採集樣品應依土壤樣品深度分層包裝，並詳細記錄編號、深度及土質狀況。選用適當採樣器具與設備進行該採樣點的土壤樣品採集工作，並記錄相關採樣資料於土壤採樣紀錄表中。

## 4. 樣品分裝保存

將採集的待測樣品分裝於事前準備好的樣品容器中，並依本署公告的土壤各分析項目樣品保存方法進行樣品保存，將樣品置於樣品暫存櫃中。

## 5. 樣品清點作業

於該採樣點採樣完畢後，清點採集的樣品數量，並填寫樣品監控紀錄表。

# (二)地下水採樣

地下水採樣作業程序係依據本署公告的「監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)」執行地下水採樣工作。監測井地下水採樣作業程序如圖 6.1.1-2 所示，地下水採樣作業程序說明如下。

## 1. 確認採樣地點

記錄採樣現場狀況於地下水採樣地點環境狀況表中，並進行現場狀況記錄與拍照存證。

## 2. 現場準備工作

進行採樣設備與容器準備作業，量測監測井的水位與水深，計算所需洗井水量。

## 3. 現場測量儀器校正

各測量儀器現場校正作業，並記錄校正結果於測量儀器校正紀錄表中。

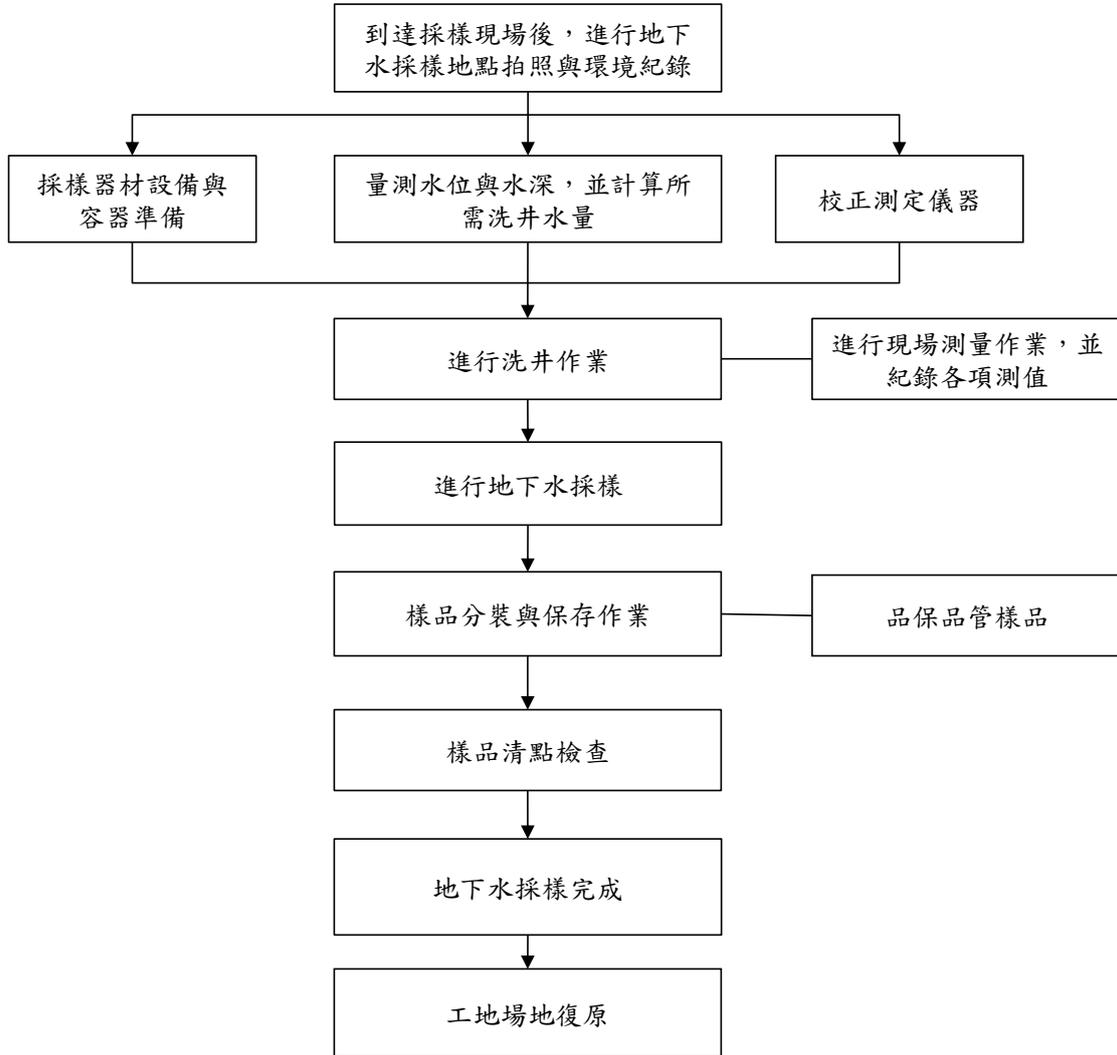


圖 6.1.1-2 監測井地下水採樣作業流程

4. 洗井作業

裝設抽水洗井設備，進行監測井洗井作業，並填寫監測井地下水採樣紀錄表，內容包括：

(1) 監測井基本資料

- 場址名稱、測站編號。
- 測井編號、樣品編號。
- 環境描述：包括監測井鎖扣是否完整、附近環境描述。
- 井深計之重錘是否含泥沙。

- 量測記錄：記錄資料包含井篩深度(井篩頂至井口深度)、井篩深度(井篩頂至井口深度)、井水深度(井深－水位)、井管內徑、井水體積、三倍井水體積等。

#### (2) 洗井紀錄

- 洗井方式：以貝勒管或採樣泵進行洗井。
- 各階段洗井作業之現場各項測量紀錄(抽水速率、水位、放置深度、汲出水體積、水溫、導電度、pH、溶氧、氧化還原電位、濁度、水質顏色、水質氣味等)。
- 汲出水總體積。

#### (3) 採樣紀錄

- 採樣器材、採樣器放置深度。
- 採樣開始時間與結束時間，採樣結束後之水位。
- 採集樣品測量紀錄：各項水質測量結果(水溫、pH、導電度、溶氧、氧化還原電位、濁度、水質顏色等)。

#### (4) 現場異常狀況情形描述

執行洗井作業時，應對補注速率較佳之監測井，其汲水速率應小於補水速率，即避免洗井時，水位有明顯洩降。此外，針對不同洗井方式，亦應注意幾點不同的原則。

- (1) 井柱水體積置換法：洗井時可採用抽水泵或貝勒管進行，洗井汲水速率宜小於 2.5 L/min，以適當流速抽除 3 至 5 倍的井柱水體積，以取得代表性水樣。
- (2) 若以抽水泵洗井時，汲水位置為井篩中間部位(當水位高於井篩頂部時)、井內水位之中點(當水位低於井篩頂部時)、或改採用貝勒管(當井內水位較低，為避免汲入井底之泥沙時)，原則上於洗井過程中儘量避免大幅降低井內水位。(無論是以貝勒管或採樣泵洗井，若因地質特性造成井內之出水量很小，補水速率很慢，則建議先將井內積水抽乾，待新鮮地下水回補)。

- (3) 若以貝勒管洗井時，汲水位置為井管底部。
- (4) 開始洗井時，以小流量抽水，記錄抽水開始時間，同時量測並記錄汲出水的 pH 值、導電度及現場量測時間。採集揮發性有機物樣品增加執行溶氧、氧化還原電位之量測。同時觀察汲出水有無顏色、異樣氣味及雜質等，並作記錄。洗井過程中需繼續量測汲出水的水質參數，同時觀察汲出井水之顏色、異樣氣味，及有無雜質存在，並於洗井期間現場量測至少五次以上，直到最後連續三次符合各項參數之穩定標準( $\text{pH} \leq \pm 0.2$ 、導電度  $\leq \pm 3\%$ 、溶氧  $\leq 10\%$ 、氧化還原電位  $\leq 20 \text{ mV}$ )。
- (5) 現場儀器量測頻率(井柱水體積置換之洗井方式)：汲出水約 1 至 1.5 倍井柱水體積之水時，量測第一次水質參數，然後每汲出 0.5 倍井柱水體積之水時再量測乙次。
- (6) 洗井時若使用水流元量測水質參數，當水質達到穩定後，進行採樣時預將水流元拆離或繞流。
- (7) 洗井時，若以 0.1~0.5 L/min 速率汲水，水位洩降超過 1/8 倍井篩長，則應由設井時之岩心取樣(Core sampling)紀錄判斷該含水層是否屬低滲透性地層。若屬低滲透性含水層，則將汲水泵置於井管底部附近以較大之汲水速率將井內積水抽除，待水位回升後採集新鮮水樣。若非屬低滲透性含水層，則可能井篩產生阻塞，進行完井作業後再重新採樣。
- (8) 以貝勒管洗井時，因溶氧與氧化還原電位不易達到穩定標準，需抽除至少三倍井柱水體積之水量，才可以停止洗井。
- (9) 洗井完成時，量測此時地下水位面至井口的高度並記錄。

#### 5. 進行樣品採集

採樣時應注意以下幾個事項，以免採集不具代表性之樣品。

- (1) 樣應在洗井後兩小時內進行為宜，若監測井位於低滲透性地層，洗井後，待新鮮水回補，應儘快於井底採樣，較具代表性。
- (2) 如以貝勒管採樣，原則上將貝勒管放置於井篩中間附近取得水樣。另若考量污染物在地表下之流布特性、相關之現

場篩測結果及採樣目的等因素，將貝勒管放置於井篩中適當位置進行取樣。

(3) 如以原來洗井的抽水泵採樣，則俟洗井完成或水質參數穩定後，在不對井內作任何擾動或改變位置的情形下，維持原來洗井之低流速，直接以樣品瓶接取水樣。

(4) 開始採樣時，記錄採樣開始時間。並以清洗過之抽水泵或貝勒管及其採樣管線，取足量體積的水樣，裝於樣品瓶內。並填好樣品標籤，貼在樣品瓶上。

(1) 以貝勒管進行樣品採集，若有其他檢測項目，地下水樣品的裝瓶順序為揮發性有機物、總有機鹵素→溶解性氣體及總有機碳→半揮發性有機物→金屬及氰化物→主要水質項目之陽離子及陰離子。

#### 6. 樣品分裝與保存

地下水樣品若有懸浮固體，應視待檢測項目之方法規定，決定是否進行現場過濾。若未於現場進行過濾，地下水樣品可能因化學作用（如氧化沉澱）而增加水中膠體或細微顆粒後，此時再予過濾之水樣將不具代表性。進行現場過濾時，採樣設備如為抽水泵，建議於線上直接過濾；採樣設備如為貝勒管，則可於貝勒管底部裝上一過濾裝置直接加壓過濾。

將採集的樣品分裝於事前準備好的樣品瓶組，依本署公告各類水質檢測項目樣品保存方法進行樣品加藥保存，並將保存後的樣品放置於冷藏櫃中(4°C)。

#### 7. 樣品清點檢查

於該測點採樣完畢後，清點檢查所採集樣品數量，存放品於冷藏櫃，並填寫樣品監控紀錄表。

#### 8. 採樣完成

地下水採樣完成，並作工作場地之復原

### 6.1.2 實驗室分析

採樣工作本節內容茲就採樣工作及檢測工作應注意並遵循之品保品管作業說明。依土污染第十條規定，進行土壤、底泥及地下水污染調查、整

治及提供、檢具土壤及地下水污染檢測資料時，其土壤、底泥及地下水污染物檢驗測定，除經中央主管機關核准者外，應委託經中央主管機關許可之檢測機構辦理。依第一項規定進行土壤、底泥及地下水污染物檢驗測定時，其方法及品質管制之準則，由中央主管機關定之。

檢測實驗室土壤及地下水污染物檢測方法，依各實驗室構買檢測儀器設備及檢測方法之不同，以環檢所認證核可之檢測方法為主，檢測結果始具法律效力。然而，無論何種檢測方式皆應進行空白樣品分析、重複樣品分析、查核樣品分析、添加樣品分析等，詳細說明可參考「環境檢驗品管分析執行手冊(NIEA-PA104)」。另，亦須進行檢量線製備及檢量線查核，可參考「環境檢驗檢量線製備及查核手冊(NIEA-PA103)」，確認樣品分析時品保品管作業。

上述之檢測方法及品質規範，皆應參照環檢所公告之標準方法為主。在選擇相關檢測方法時，可於環檢所網站(<http://www.niea.gov.tw/>)下載最新的檢測方法，以免誤用。

## 6.2 工作安全衛生管理

### 6.2.1 現場工作組織

執行場址現場污染調查相關作業時，需針對場址特性及現場各項執行內容進行分組分工，其分工方式說明如后。

#### 一、場址特性評估

欲執行調查之場址需依其現況，評估是否存在影響現場採樣調查工作進行之因素，例如運作中工廠、機具常態搬運、車輛運輸、配水配電、工廠設備管線等，可藉由污染潛勢評估成果，配置現場協調溝通人員，在採樣調查執行前、中、後各階段，進行現場人員調配、車輛交通指揮、調查進度掌控、人力及設備資源溝通協調等相關工作，妥善利用現場資源，以利現場調查工作之進行。

#### 二、執行內容分工

依據規劃之採樣調查內容及方法，如土壤採樣、地下水採樣、監

測井設置、現場快速篩測等，進行各工項分組，各組組長需充分了解調查工作流程及遭遇突發狀況之應變方式，隨時協助規劃者快速掌握現場執行進度，以利調整現場採樣調查方式及內容，使污染採樣調查工作達到最高之效益。

## 6.2.2 現場作業安全及衛生管理

於採樣調查作業階段，須嚴格管制現場施工作業安全，避免因操作疏忽，釀成工安意外，現場採樣作業執行之工安管理，至少包括現場作業區域劃分、工業人員安全防護設備、現場作業工安管理及二次污染防制準則、危害預防，分別說明如下。

### 一、 現場作業區域劃分

視現場調查作業進度及現場狀況，圍設工作區及非工作區等二種作業區域。

### 二、 人員安全防護裝備

在環境部毒災管理資訊系統教育宣導說明 (<http://toxiceric.moev.gov.tw>)，將進行毒性化學物質災害處理的時候，根據毒性化學物質特性，配置不同化學防護衣，可分為 A、B、C、D 四等級套裝，包含呼吸系統防護及皮膚防護，單一套件無法發揮出最高的效用。在土壤及地下水污染調查階段，工作人員裝備須符合 D 級，即基本工作服，在功能上無法提供呼吸的保護，僅有些許的皮膚保護功能，不應在有危害呼吸或皮膚的情況下使用。裝備組成包含：

- (一)一般的工作服，所有專案職員須穿著適合於營造施工之服裝，且必須隨時穿著襯衫、長褲和適當的鞋子。
- (二)手套，如棉質工作手套。
- (三)足尖和小腿處堅硬處理的抗化靴，如橡膠雨鞋或工作安全鞋。
- (四)安全眼鏡，或必要時採用護目鏡、有效的耳塞等隔音防護。
- (五)堅硬的帽子，如安全帽。

### 三、 現場作業工安管理及二次污染防制準則

### (一)個人防污

1. 避免用手觸摸污染物
2. 確實遵行著裝規定
3. 現場作業完畢後，應清洗雙手
4. 絕對禁止在工作區內飲食及抽煙
5. 休息時應補充足夠水分
6. 其他可能導致個人健康風險行為

### (二)工地防污

1. 區分工作範圍及非污染區域並豎立標示，讓其他員工有所警覺
2. 用過的受污染設備，要集中放入預備之容器中，等待連同一般廢棄物一併處理
3. 其他可能影響污染採樣調查結果事項

### (三)工安管理

4. 應設置勞工安全衛生告示牌
5. 作業區應以警示錐及黃色警示帶隔離，並設告示牌

### (四)勞工安全及衛生守則

1. 計畫執行單位所有工程師等人員均戴安全帽、安全鞋、手套等個人防護器具方可進行施工。
2. 現場施工須設置勞工安全衛生告示牌，詳細內容同法規規定。
3. 施工區成需固有施工警告帶，或警示柱等警示物。
4. 施工期間，計畫執行單位應確實遵守空氣污染防治法、水污染防治法、廢棄物清理法、噪音管制法及其他相關環保法令。
5. 計畫執行單位應遵守勞工安全衛生法相關規定，落實各項施工安全管理。
7. 計畫執行單位應依勞工安全衛生法採取必要之防護措施，提供所屬人員必要之防護設備及器材，以維護人員之施工安全。
8. 計畫執行單位應要求所屬施工人員嚴格遵行安全作業規定，如因預防措施不足或所屬施工人員失誤，所引起之一切損失、人員傷害及觸犯法令之刑責問題等，概由計畫執行單位負其完全

責任。

#### 9. 其他根據現場執行狀況守則

#### 四、 危害預防

執行現場工作時，須對「職業安全衛生法」第六條列舉之潛在工業安全危害，如機械設備、爆炸性、墜落等引發之危害，須提出符合規定之必要安全衛生設備及措施。各類型之設備操作，可參考勞動部勞動及職業安全衛生研究-安全資料表資料庫(參考資料：<http://www.iosh.gov.tw>)，研擬危害預防之必要措施。

### 6.2.3 緊急應變措施

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

#### 一、 緊急應變運作流程與組織

(一) 應變組織架構與權責

(二) 緊急應變控制中心位置與設施

(三) 緊急應變運作流程與說明

#### 二、 緊急應變設備之置備與外援單位之聯繫

#### 三、 緊急應變演練計畫與演練記錄(演練模擬一般及最嚴重危害之狀況)

#### 四、 緊急應變計畫之修正。

## 參考文獻

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, <http://www.atsdr.cdc.gov/>
2. ASTM E1527-00 Standard Practice for Environmental Site Assessments : Phase I Environmental Site Assessment Process ◦
3. ASTM E1903-97 Standard Guide for Environmental Site Assessments : Phase II Environmental Site Assessment Process ◦
4. ASTM, E1689-95 Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites, 2003
5. Danish Environmental Protection Agency, “Guidelines on Remediation of Contaminated Sites”, Environmental Guidelines No. 7.2002.
6. Domenico and Scheartz (1998) Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd ed., Wiley, New York, p.506, 1998
7. EUGRIS, 2010. Site Investigation: Conceptual Site Model, <http://www.eugris.info/index.asp>.
8. ITRC, Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management, 2003a
9. Michael D. LaGrega Phillip L. Buckingham Jeffrey C. Evans and The Environmental Resources Management Group, “Hazardous Waste Management”, International Editions 1994.
10. New Jersey Department of Environmental Protection (2011) Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model
11. The Network for Industrially Contaminated Land in Europe (NICOLE), Report of the NICOLE Workshops: Data Acquisition for a Good Conceptual Site Model, May 2006
12. USEPA, Innovations in Site Characterization Case Study: The Role of a

- Conceptual Site Model for Expedited Site Characterization Using the Triad Approach at the Poudre River Site, Fort Collins, Colorado, EPA 542-R-06-007, 2006a
13. 交通部中央氣象局網站氣象資料，<http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>
  14. 行政院環保署，土壤及地下水資訊管理系統，  
<http://sgw.epa.gov.tw/SGM/Anonymous/SgmLogin.aspx>
  15. 行政院環保署，全國環境水質監測資訊網，  
<http://wq.epa.gov.tw/Code/?Languages=>
  16. 行政院環保署，居家生活環境資訊網，<http://living.epa.gov.tw/>
  17. 行政院環境保護署，土壤及地下水比水重非水相液體污染調查作業參考指引，EPA-25-III-05B-2015-004，2015
  18. 行政院環境保護署，土壤及地下水比水重非水相液體污染整治作業參考指引，EPA-25-III-06B-2015-004，2015
  19. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染場址改善審查及監督作業要點，環署土字第 1030097321 號令，2014
  20. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染場址健康風險評估方法，2014
  21. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染場址環境影響與健康風險評估小組設置要點，中華民國 103 年 5 月 26 日環署土字第 1030043165 號，2014
  22. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法，中華民國 99 年 2 月 3 日總統華總一義字第 09900024211 號，2010
  23. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治場址環境影響與健康風險評估辦法，中華民國 102 年 10 月 31 日行政院環境保護署環署土字第 1020092705 號令，2013
  24. 行政院環境保護署，土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之初步篩試調查、查證及驗證作業技術參考手冊，2008
  25. 行政院環境保護署，土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引，EPA-25-III-05B-2015-002，2015

26. 行政院環境保護署，土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引，EPA-25-III-06B-2015-002，2015
27. 行政院環境保護署，土壤及地下水重金屬污染調查作業參考指引，EPA-25-III-05B-2015-003，015
28. 行政院環境保護署，土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引，EPA-25-III-06B-2015-003，015
29. 行政院環境保護署，土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之初步篩試調查、查證及驗證等之作業參考手冊，2009
30. 行政院環境保護署，土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法
31. 行政院環境保護署，土壤污染監測標準，中華民國 100 年 1 月 31 日行政院環境保護署環署土字第 1000008485 號令，2011
32. 行政院環境保護署，土壤污染管制標準，中華民國 100 年 1 月 31 日行政院環境保護署環署土字第 1000008495 號令，2011
33. 行政院環境保護署，地下水水質監測井設置作業原則，中華民國 102 年 12 月 25 日環署土字第 1020112290 號令，2013
34. 行政院環境保護署，地下水污染監測標準，中華民國 102 年 12 月 18 日行政院環境保護署環署土字第 1020109443 號令，2013
35. 行政院環境保護署，地下水污染管制標準，中華民國 102 年 12 月 18 日行政院環境保護署環署土字第 1020109478 號令，2013
36. 行政院環境保護署，油品類儲槽系統污染範圍調查作業指引，2006
37. 行政院環境保護署，油品類儲槽系統污染調查及查證參考作業手冊，2006
38. 行政院環境保護署，油品類儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊，2006
39. 行政院環境保護署，軍事場址土壤及地下水污染調查評估及整治技術手冊
40. 行政院環境保護署，環境資料庫網站，<http://edb.epa.gov.tw/>

41. 行政院環境保護署，環境檢驗所，<http://www.niea.gov.tw/>
42. 行政院環境保護署，環境檢驗所，土壤採樣方法，NIEA S102.63B(中華民國 104 年 2 月 2 日環署檢字第 1040009426 號)，2015。
43. 行政院環境保護署，環境檢驗所，土壤檢測方法總則，NIEA S103.61C (中華民國 98 年 10 月 12 日環署檢字第 0980092514B 號)
44. 行政院環境保護署，環境檢驗所，監測井地下水採樣方法，NIEA W103.54B(中華民國 99 年 5 月 14 日環署檢字第 0990041320 號)，2010。
45. 行政院環境保護署，環境檢驗所，環境樣品採集及保存作業指引，NIEZ PA102(環署檢字第 0930087470 號函)
46. 行政院環境保護署，環境檢驗所，環境檢驗品管分析執行指引，NIEA-PA104 (環署檢字第 0930087470 號)
47. 行政院環境保護署，環境檢驗所，環境檢驗品質管制手冊通則，NIEZ PA101 (環署檢字第 0930087470 號)
48. 行政院環境保護署，環境檢驗所，環境檢驗檢量線製備及查核指引，NIEA-PA103(環署檢字第 0930087470 號)
49. 行政院環境保護署毒管處，毒理資料庫，[http://flora2.epa.gov.tw/\\_ToxicWeb/ToxicUC4/database.aspx](http://flora2.epa.gov.tw/_ToxicWeb/ToxicUC4/database.aspx)
50. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所物質安全資料表，<http://ghs.osha.gov.tw/CHT/intro/search.aspx>
51. 經濟部中央地質調查所，地質資料整合查詢系統，<http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm>
52. 經濟部水利署，地理資訊倉儲中心，<http://gic.wra.gov.tw/gic/GIS/JS/MainJs.aspx>

土壤及地下水污染調查作業  
參考指引總則  
(附件)

出版年份：民國 113 年 5 月  
出版單位：環境部環境管理署  
EPA-25-III-05B-2015-001

# 附件目錄

	<u>頁碼</u>
<b>1.1 地球物理.....</b>	<b>附-1</b>
1.1.1 地電阻.....	附-1
1.1.2 透地雷達.....	附-7
1.1.3 電磁波探測.....	附-18
1.1.4 震測探測.....	附-22
1.1.5 井內探測.....	附-25
<b>1.2 直接貫入.....</b>	<b>附-34</b>
1.2.1 貫入系統.....	附-36
1.2.2 土壤氣體採樣.....	附-42
1.2.3 地下水採樣.....	附-44
1.2.4 土壤採樣.....	附-49
1.2.5 地電阻直感鑽頭.....	附-53
1.2.6 薄膜界面鑽桿.....	附-58
<b>1.3 土壤氣體.....</b>	<b>附-61</b>
<b>1.4 現場有機物分析.....</b>	<b>附-66</b>
1.4.1 測爆器.....	附-66
1.4.2 火焰離子與光離子偵測器.....	附-69
1.4.3 現場氣相層析儀.....	附-74
1.4.4 雷射引發螢光.....	附-81
1.4.5 鹵化物感測器.....	附-86
1.4.6 充脹式襯管地下污染偵測技術.....	附-91
<b>1.5 現場快速篩選試劑.....</b>	<b>附-96</b>
1.5.1 比色法.....	附-96
1.5.2 免疫學測試法.....	附-100
1.5.3 濁度法.....	附-106

1.6	浮油厚度量測.....	附-108
1.7	攜帶式 X 射線螢光分析儀.....	附-110
1.8	發展中現場篩選技術.....	附-117
1.8.1	手握型現場氣相層析儀.....	附-117
1.8.2	地層透水係數垂直分布測試.....	附-121

# 圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 1.1.1-1	地電阻法測勘..... 附-1
圖 1.1.1-2	雙極電極排列法測勘示意圖..... 附-3
圖 1.1.1-3	以雙極排列之二維電阻率影像法野外施測過程圖..... 附-4
圖 1.1.1-4	溫奈電極排列法測勘示意圖..... 附-5
圖 1.1.1-5	施蘭柏吉排列法測勘示意圖..... 附-6
圖 1.1.1-6	偶極偶極排列法測勘示意圖..... 附-6
圖 1.1.2-1	頻率與電流密度關係圖..... 附-9
圖 1.1.2-2	電磁波速度與頻率關係圖(摘自 Davis & Annan, 1989)..... 附-10
圖 1.1.2-3	天線頻率與解析能力關係圖..... 附-11
圖 1.1.2-4	電磁波頻率與解析能力、穿透深度關係圖..... 附-11
圖 1.1.2-5	透地雷達系統示意圖..... 附-14
圖 1.1.2-6	透地雷達野外施測天線排列示意圖..... 附-16
圖 1.1.3-1	EM 測勘示意圖..... 附-19
圖 1.1.3-2	EM 野外測勘示意圖..... 附-20
圖 1.1.4-1	折射震測法野外施測示意圖..... 附-23
圖 1.1.5-1	雷達井測儀器組合圖..... 附-29
圖 1.1.5-2	單孔反射法施測示意圖..... 附-30
圖 1.1.5-3	單孔垂直雷達剖面法施測示意圖..... 附-30
圖 1.1.5-4	跨孔零支距剖面法施測示意圖..... 附-31
圖 1.1.5-5	跨孔多重支距剖面法施測示意圖..... 附-31
圖 1.2.1-1	各式直接貫入推進系統載具..... 附-36
圖 1.2.1-2	單套管系統與雙套管系統示意圖..... 附-38
圖 1.2.1-3	單套管系統之典型元件構造..... 附-41
圖 1.2.2-1	PRT、雙套管即時土壤氣體採樣與永久土壤氣體井圖..... 附-43
圖 1.2.3-1	封閉式篩孔之地下水即時採樣示意圖..... 附-46
圖 1.2.3-2	簡易監測井結構示意圖..... 附-47
圖 1.2.4-1	活塞式土壤採樣鑽頭示意圖..... 附-50
圖 1.2.5-1	電子錐貫入試驗鑽頭示意圖..... 附-54

圖 1.2.5-2	無線傳輸電子錐貫入鑽頭.....	附-54
圖 1.2.5-3	地電阻量測鑽頭.....	附-55
圖 1.2.5-4	典型的圓錐貫入試驗資料紀錄.....	附-57
圖 1.2.5-5	典型的 EC 資料紀錄.....	附-57
圖 1.2.6-1	MIP 與 LIF 直感鑽頭結構.....	附-58
圖 1.3-1	土壤氣體間接採樣箱之組合.....	附-64
圖 1.4.1-1	典型的測爆器.....	附-68
圖 1.4.2-1	典型的 FID/PID 偵測器.....	附-71
圖 1.4.3-1	典型的攜帶型氣相層析儀的層析圖譜.....	附-75
圖 1.4.3-2	典型的可攜式氣相層析儀.....	附-76
圖 1.4.4-1	LIF 鑽頭的結構示意圖.....	附-83
圖 1.4.4-2	典型的 LIF 偵測圖譜.....	附-84
圖 1.4.5-1	HaloProbe 之反應訊號圖.....	附-88
圖 1.4.5-2	HaloProbe 之訊號剖面圖.....	附-88
圖 1.4.6-1	充脹式襯管染色效果圖.....	附-92
圖 1.4.6-2	充脹式襯管設置示意圖.....	附-93
圖 1.4.6-3	充脹式襯管設置流程圖.....	附-95
圖 1.4.6-4	充脹式襯管設置現場照片圖.....	附-95
圖 1.5.1-1	Friedel-Crafts alkylation 反應機制.....	附-96
圖 1.7-1	原子能階與 X-ray 射線產生.....	附-111
圖 1.7-2	土壤樣品之能量光譜.....	附-112
圖 1.7-3	XRF 探測原理.....	附-112
圖 1.7-4	各型攜帶式 X 射線螢光偵測器.....	附-113
圖 1.7-5	XRF 應用案例現場工作圖.....	附-116
圖 1.7-6	XRF 應用案例檢測分析圖.....	附-117
圖 1.8.1-1	手握式氣相層析儀.....	附-118
圖 1.8.1-2	手握式氣相層析儀基本結構.....	附-119
圖 1.8.1-3	樣品濃縮系統結構圖.....	附-120
圖 1.8.1-4	微型管柱結構與填充狀況.....	附-120
圖 1.8.2-1	DPP 鑽頭構造示意圖.....	附-123
圖 1.8.2-2	DPIL 比與 DPST 所測得之 K 值轉換迴歸線.....	附-125

# 表目錄

		<u>頁碼</u>
表 1.1.2-1	常見介質的電性參數.....	附-12
表 1.1.5-1	常見的地球物理井測法分類表.....	附-26
表 1.1.5-2	透地雷達井測依天線頻率對應使用之時間取樣間隔.....	附-32
表 1.1.5-3	不同天線頻率之最大天線移動間距.....	附-32
表 1.2.1-1	各種直接貫入機具的差異比較.....	附-40
表 1.2.4-1	土壤採樣方法適用之地質特性.....	附-51
表 1.3-1	土壤氣體的適用原則.....	附-62
表 1.3-2	油品單一成分物化特性.....	附-62
表 1.3-3	國內油品蒸氣壓.....	附-62
表 1.4.2-1	FID/PID 不同工作方法之特性比較.....	附-73
表 1.4.3-1	現場氣相層析儀的長期成本分析.....	附-79
表 1.4.3-2	現場氣相層析儀法的特色.....	附-81
表 1.6-1	浮油厚度量測方法比較.....	附-109
表 1.7-1	XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測與管制標準.....	附-115

## 附件 現場快速調查技術

### 1.1 地球物理

#### 1.1.1 地電阻

地電阻法(Resistivity Image Profiling Method, RIP)主要依據地層的電阻率來區分地層，根據組成的礦物、顆粒大小、位態、含水量以及含鹽度不同來區分地層及地下構造。其主要應用於 LNAPL 污染團調查、地質描繪、地下水探勘、斷層調查、海水入侵、地下空洞調查等等。

##### 一、原理

地電阻法乃是利用直流或低頻交替直流電經由一對電極(電流極 1 C 與 2 C)通入地層中建立人為電場。藉由地表上另一對電極(電位極 1 P 與 2 P)量測其間的電位差(圖 1.1.1-1)。

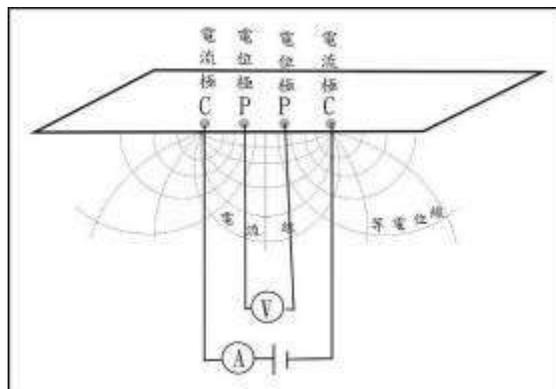


圖 1.1.1-1 地電阻法測勘

地電阻法在野外施測時，電極排列有許多種方式，常用者有施蘭柏吉法(Schlumberger array)、溫奈排列法(Wenner array)、雙極法(Pole-pole array)、偶極偶極法(Dipole-Dipole array)、偶極電極法(Dipole-pole array)等不同之電極排列方式。電極排列方式、展距及測線配置，需依據現場之地形、地物與探測目標而定。

##### 二、適用時機與選用原則

地電阻法適用於各種污染之調查，亦可獲得十分豐富之成果。進行污染區調查時，應先將污染源電阻率確定，可利用儀器量測污染源之電阻率，其後應進行污染場址標準地層電阻率確立，選定離污染區最近，未受污染地區建立標準電性地層剖面圖。國內發生漏油污染大都位於石化廠內或加油站，其管線大部分為鐵管，反應為低電阻率。一般而言，探測時若污染源為新鮮油品(高電阻)，污染場址地層及管線皆為低電阻，很可輕易將污染範圍確立，但若 LNAPL 污染源與原本之電性地層差異不大情況下，應輔以其他地球物理探勘方法測勘。一般而言，因地球物理方法有等效性的問題，建議以兩種以上方法確立為佳。

### 三、設備要求

地電阻測勘儀器設備可分為：

- (一) 電阻探測儀(控制、展示與儲存地電阻訊號)
- (二) 自動切換電纜線組
- (三) 電極棒
- (四) 電池、充電器
- (五) 配合用之軟體
- (六) 運送箱(裝儀器)
- (七) 皮尺、噴漆
- (八) 附件(記錄紙、鐵鎚、鏟刀、水壺、傾斜儀、太陽傘等等)
- (九) 衛星定位系統或測量儀器(配合大區域測量或需精密定位時用)

### 四、施測方式

施測方式依據場址現場地形、地物與待測目標而定，目前國內較常用的為雙極法(Pole-pole array)、溫奈排列法(Wenner array)、施蘭柏吉法(Schlumberger array)等排列法，茲將排列法簡介如下：

- (一) 雙極法(Pole-pole array)

雙極排列法是將四極中之一電流極 2C 及電位極 2P 固定置於

無窮遠處(一般大於測深十倍即可)(如圖 1.1.1-2)，稱之為遠電極 (Remote electrodes)。當進行電阻率影像剖面法施測時，在欲探測剖面以等間距佈置多支電極。施測開始時，以第 1 支做 1C 電流極，第 2 支，第 3 支…，第 N+1 支逐次切換做 1P 電位極(N 為設定之目標測深參數)，就可測得第 1 支 1C 電流極，由淺至深地層訊號；接著，以第 2 支做 1C 電流極，第 3 支，第 4 支…，第 N+2 支逐次切換做 1P 電位極(N 為設定之目標測深參數)，就可測得第 2 支 1C 電流極，由淺至深地層訊號，如此下去，即可獲得由淺至深二維地層剖面資料，如圖 1.1.1-3。相對於其他方法，此方法受地形限制較小，探測深度較深，品質亦穩定可靠，施測時因將電極棒事先佈好，故十分節省測勘時間。

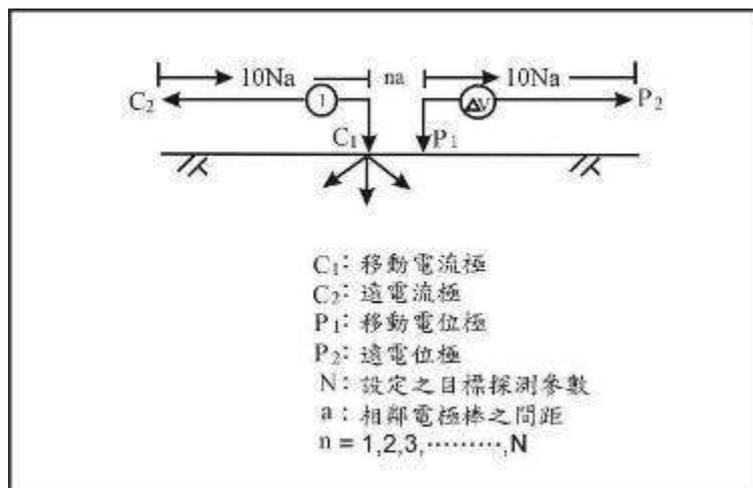


圖 1.1.1-2 雙極電極排列法測勘示意圖

(二) 溫奈排列法(Wenner array)

溫奈排列法是以一對電流極 1C 及 2C，另一對電位極 1P 及 2P，在一直線上均以中心點 O 為對稱點，1C2C 的距離為 1P2P 的三倍，且保持  $1C1P=1P2P=2P2C$ (圖 1.1.1-4)。探測的深度約小於 1P2P 的間距，當加大 1C2C 及 1P2P 間距時，可逐次得到地層由淺至深的導電性訊息。

此法受地形限制較大，且愈深層的資料所含的雜訊亦較高，在施測上相當耗時，其優點是在於訊號較穩定及資料處理容易，

露頭的電阻率測量多採用此電極排列法。其二維施測時與雙極排列法施測相似，主要依加大電極間展距獲取較深層之電性地層資料。

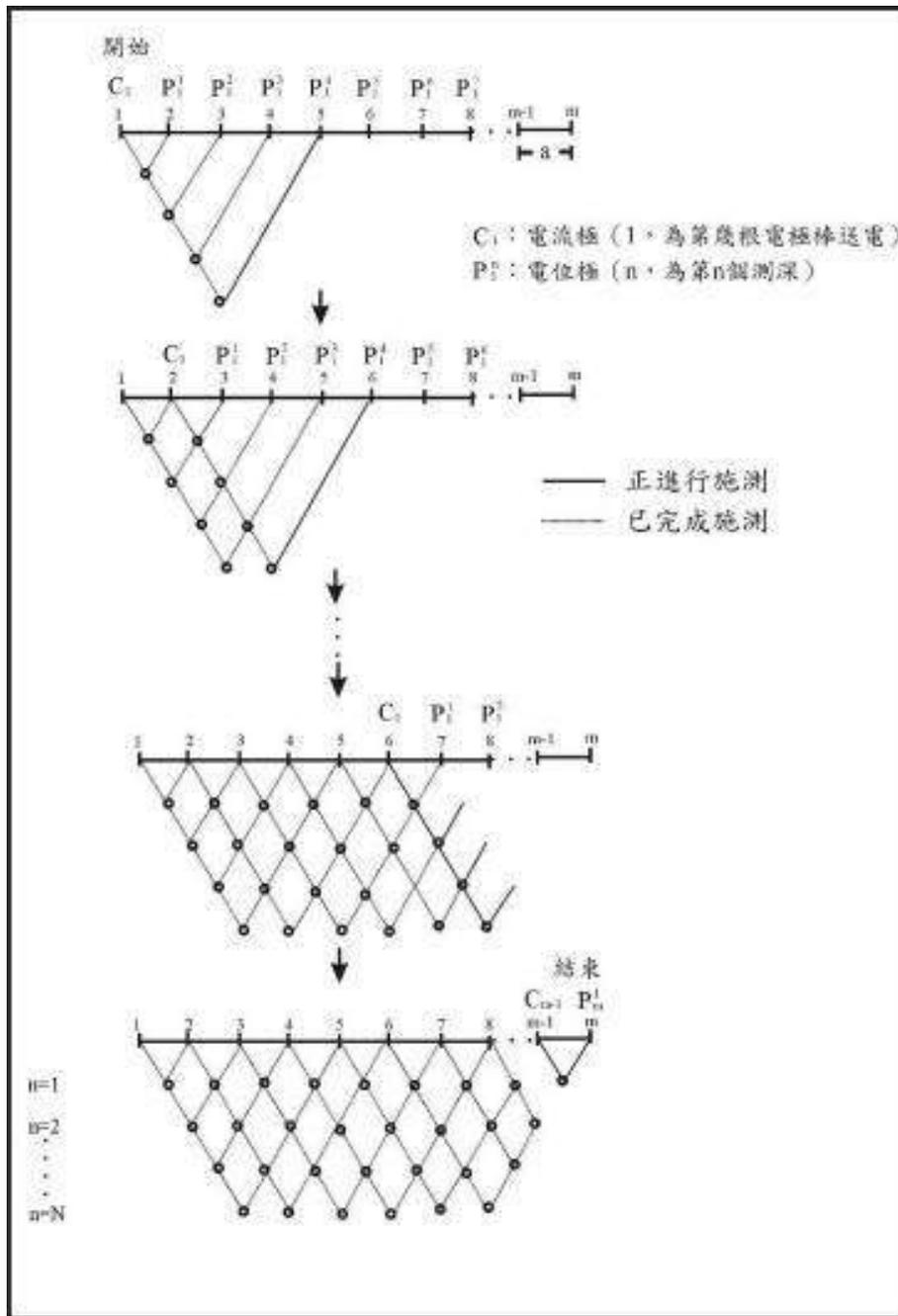


圖 1.1.1-3 以雙極排列之二維電阻率影像法野外施測過程圖

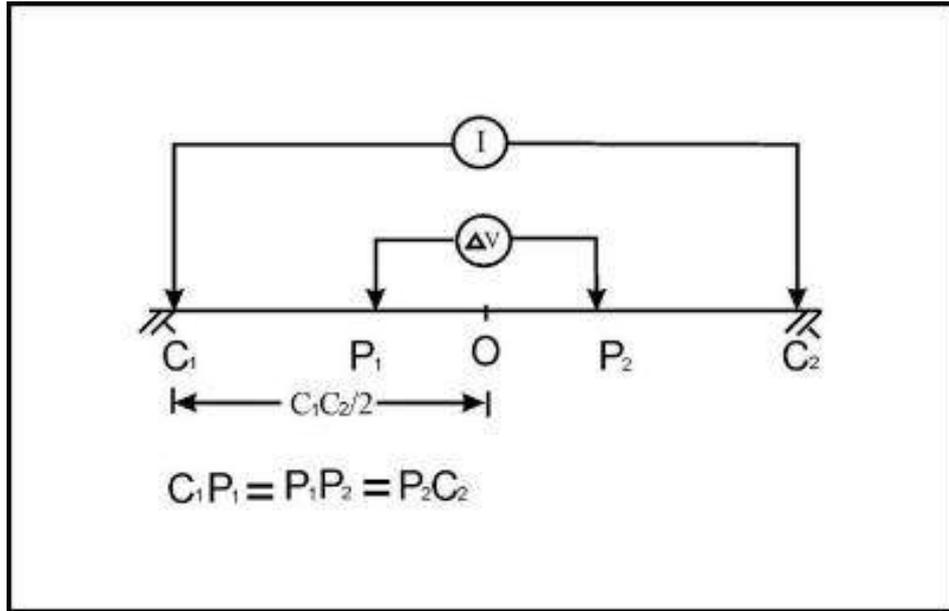


圖 1.1.1-4 溫奈電極排列法測勘示意圖

(三) 施蘭柏吉法(Schlumberger array)

施蘭柏吉法是以一對電流極 1C 及 2C，另一對電位極 1P 及 2P，在一直線上以中心點 O 為對稱點，1C2C 的距離遠大於 1P2P(圖 1.1.1-5)。探測的深度約小於 1C2C 的間距一半，當加大 1C2C 間距時，可逐次得到地層由淺至深的導電性訊息。此法受地形限制較大，且愈深層的資料所含的雜訊亦較高，在施測上相當耗時，其優點是在於訊號較穩定及資料處理容易。其二維施測時與雙極排列法施測相似，主要依加大電極間距獲取較深層之電性地層資料。

(四) 偶極偶極法(Dipole-dipole array)

偶極偶極法是以一對電流極 1C 及 2C，另一對電位極 1P 及 2P 作探測(圖 1.1.1-6)。探測的深度與 1C2C 與 1P2P 間距有關，當加大間距時，可逐次得到地層由淺至深的導電性訊息。此法較不受地形限制，且愈深層的資料所含的雜訊較高，在施測上相當耗時，其優點是在於施測容易。其二維施測時與雙極排列法施測相似，主要依加大間距獲取較深層之電性地層資料。

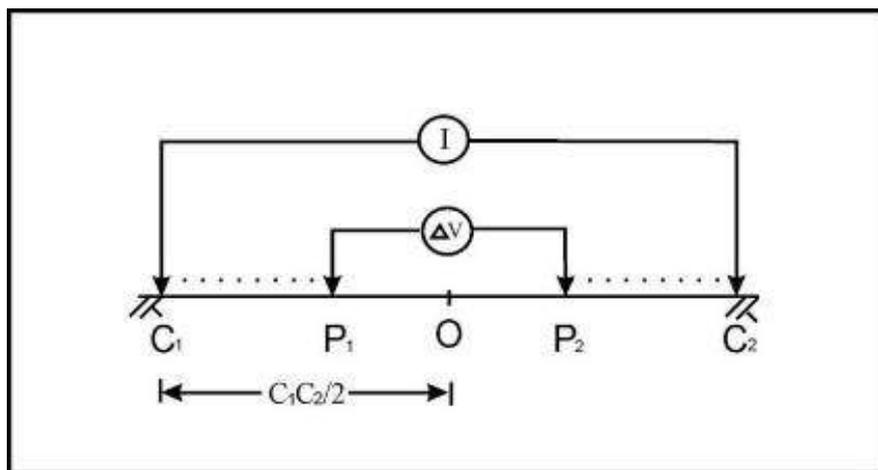


圖 1.1.1-5 施蘭柏吉排列法測勘示意圖

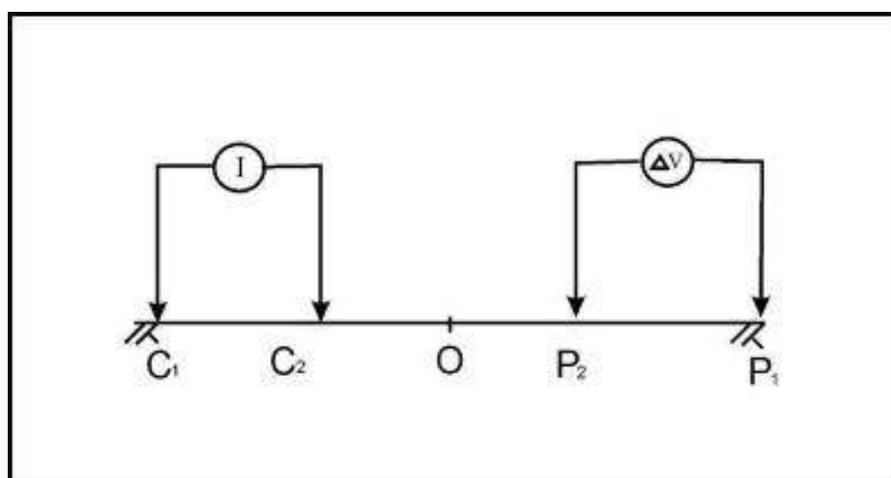


圖 1.1.1-6 偶極偶極排列法測勘示意圖

### 五、作業程序

地電阻法野外作業情形如下：

- (一) 測區基本資料蒐集及研判。
- (二) 依據測量目的配置適當測線，並決定電極排列與電極棒之間距。
- (三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當之描繪。
- (四) 控制點測量。
- (五) 導線測量，測線不長時以皮尺控制測點間距，山區及起伏地區需以測量儀器定測點位置。

- (六) 量電極棒之接地電阻，以確保電流通入地下，必要時在電極棒接地處灌入鹽水或以數根電極並聯取代原電極棒。
- (七) 以自動切換電纜線之各接頭依序連接各電極棒。
- (八) 自動切換電纜線與地電儀相關接頭連接。
- (九) 連結電池與地電儀相關接頭。
- (十) 通電流分別量測不同電流極間距(對應不同深度)時之電阻反應。
- (十一) 施測時操作員必須注意螢幕上各電極間通電之反應，必要時調整施測參數或重新施測。

## 六、成本分析

目前二維地電阻影像剖面探測成本約 300~1,000 元(新台幣)/每公尺，依照現場地形地物之不同而成本不同，若有特殊情況則依業主與執行單位約定而定。三維地電阻影像剖面法與二維地電阻影像剖面成本相似，依測線佈置而定。

### 1.1.2 透地雷達

透地雷達法(Ground-penetrating radar method)簡稱 GPR，其探測方法與反射震測法之地球物理探測技術頗為相似，係由電壓為數百伏特的發射線圈，產生頻率範圍自 10~3,000 MHz、歷時為幾十億分之一秒(ns)的脈波(雷達波)射入地下或建築結構體內，因不同地層或界面之介電常數變化而產生反射波，此一反射訊號經由地表接收天線接受訊號、放大、數位化後，由接收到訊號時間長短與波型的變化，記錄成原始資料，經資料處理後，研判地下構造、層面、地下異常物分佈狀況，並推測目標物之形貌。

透地雷達法因具高解析度且測勘迅速的優點，被廣泛應用於冰凍層研究、地下管線探測、地層描繪及污染調查等。透地雷達法測深取決於天線頻率與地質材料的導電性，其對淺地層之解析度高，尤其對於具強反射率之 LNAPL 有顯著的成效。

#### 一、原理

- (一) 電磁波特性及地層電性

透地雷達為極高頻電磁波，可由地層傳遞雷達波速度變化及能量衰減來描述地層內變異情況。影響地層傳遞雷達波之參數為介質的電容率和導電率。

## (二) 介質電性

一般來說，介質電性變化較磁性變化為大，故雷達波傳遞受電性影響較大。物質在電場作用下，產生兩種電流效應，分別為傳導電流(Conductivity current)及位移電流(Displacement current)。

### 1. 傳導電流

自由電子在電場作用下移動，將會產生傳導電流，其傳導電流密度“ $J_c$ ”，可以式 1.1.2-1 表示：

$$J_c = \sigma E \quad \text{式 1.1.2-1}$$

$\sigma$ ：導電率(Conductivity)

$E$ ：電場(Electric field intensity)

### 2. 位移電流

位移電流的產生，主要是發生於極性物質(如水等)受到時變電場的作用，其電通量密度(Electric flux density)  $D$ ，可以式 1.1.2-2 表示：

$$D = \epsilon E \quad \text{式 1.1.2-2}$$

其位移電流密度( $J_D$ )，可以式 1.1.2-3 表示：

$$J_D = dD / dt = \epsilon dE / dt \quad \text{式 1.1.2-3}$$

總電流密度( $J$ )總和為：

$$J = J_c + J_D = (\sigma + j\omega\epsilon)E \quad \text{式 1.1.2-4}$$

在頻率變動下，計算電流密度純量值可繪成圖 1.1.2-1，由圖可知傳導電流密度與頻率無關，位移電流密度卻隨著頻率增加而增加，可知頻率較高時位移電流密度扮演較重要的角色。

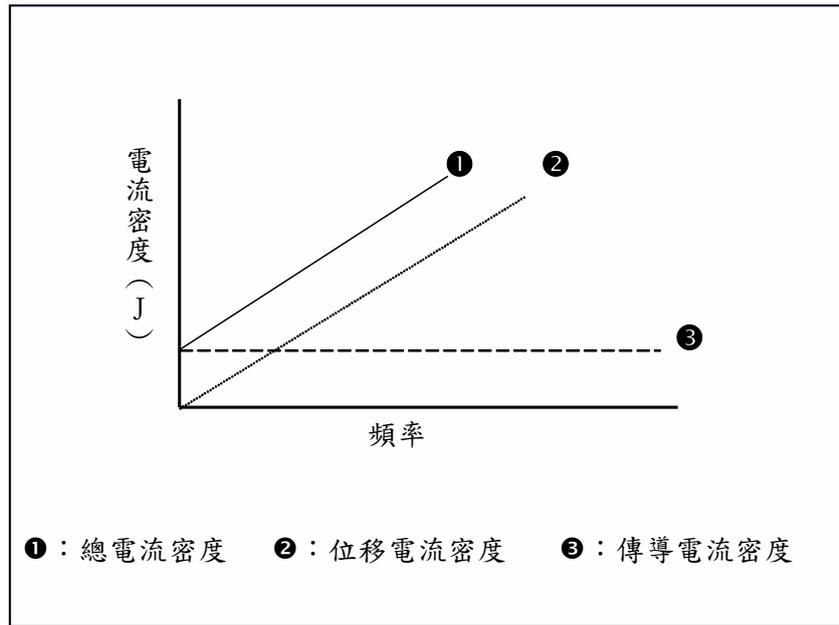


圖 1.1.2-1 頻率與電流密度關係圖

(三) 低損耗介質中之電磁波特性

透地雷達在低損耗介質中，能獲得較好的結果。茲將電磁波速度及衰減因子與頻率的關係敘述如下：

低損耗介質的數學定義：

$$\frac{|J_c|}{|J_d|} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1 \quad \text{式 1.1.2-5}$$

(四) 頻率與速度關係

電磁波的速度與頻率的關係如圖 4.1.2-2 所示，圖中顯示 10 至 3,000 MHz 頻率間，電磁波於低損耗介質中傳遞時，其速度為常數，可以式 1.1.2-6 來表示：

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad \text{式 1.1.2-6}$$

K：介電常數(Dielectric constant)

c：光速(Velocity of light)，又

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{式 1.1.2-7}$$

$\epsilon$ ：絕對介電係數

$\epsilon_0$ ：自由空間的電容率(介電係數)

在頻率 10-3,000 MHz 範圍內速度為一常數，不因電磁波頻率改變而有所變化，即無頻散效應，故目前商用透地雷達使用頻率多設定此範圍內。在高損耗介質(介電常數 K 較高，高導電度)，可使用之頻率範圍分佈極窄且侷限在高頻率區域，因此在選擇操作頻率時必須考慮介質是否為高損耗介質。

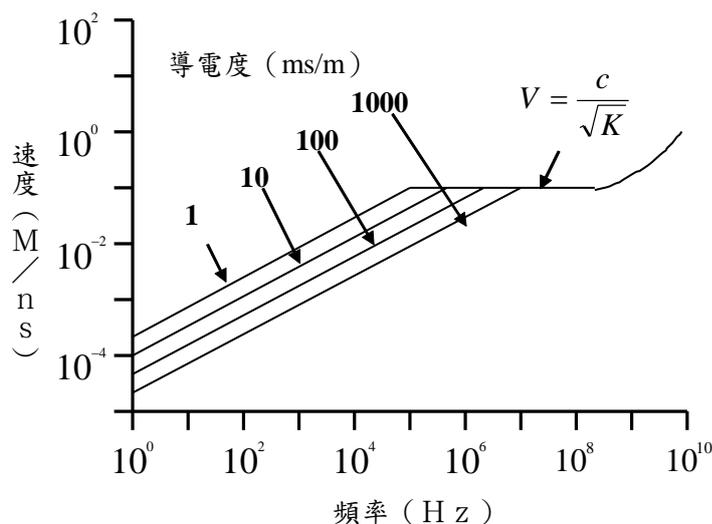


圖 1.1.2-2 電磁波速度與頻率關係圖(摘自 Davis & Annan, 1989)

#### (五) 電磁波的解析能力與穿透能力

解析度為分辨二緊連訊號的能力，震測資料處理通常定義四分之一波長為解析極限，在介質中波長與頻率為反比關係，因此入射波頻率愈高，其波長愈短，則解析度愈高；反之則相反。

入射電磁波在介質中傳播一段時間之後，高頻訊號容易衰減，因此收到的主要訊號其頻率將略小於中心頻率，故透地雷達大致以中心頻率的二分之一波長為解析極限。雖然高頻的使用可增加解析能力，但降低了穿透深度，因此解析能力和穿透深度的取捨將視測勘目標及解析度需求而定。

圖 1.1.2-3 表示不同的天線頻率在岩石、濕土、瀝青混凝土及水泥混凝土等介質的解析極限。圖 1.1.2-4 之三條剖面，為透地雷達沿同一測線，以不同天線頻率施測的結果。由圖可知電磁波頻率愈高，解析能力愈好，探測深度愈淺；反之，電磁波頻率愈低

，其解析能力愈差，但探測深度則愈深。一般而言，透地雷達探測深度淺可至幾公分以內，最深探測紀錄出現在格陵蘭冰原，曾有八十公尺的紀錄，就國內地層而言，因導電性較佳，探測最深僅達十幾公尺。

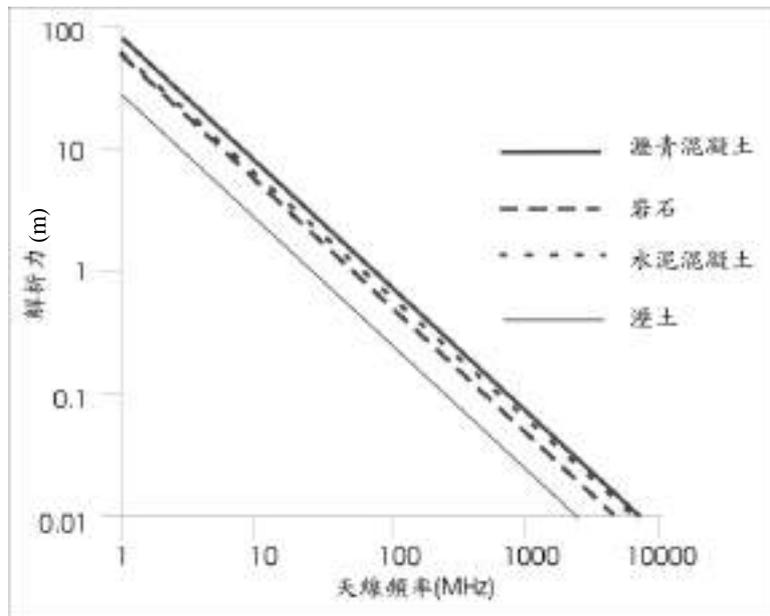
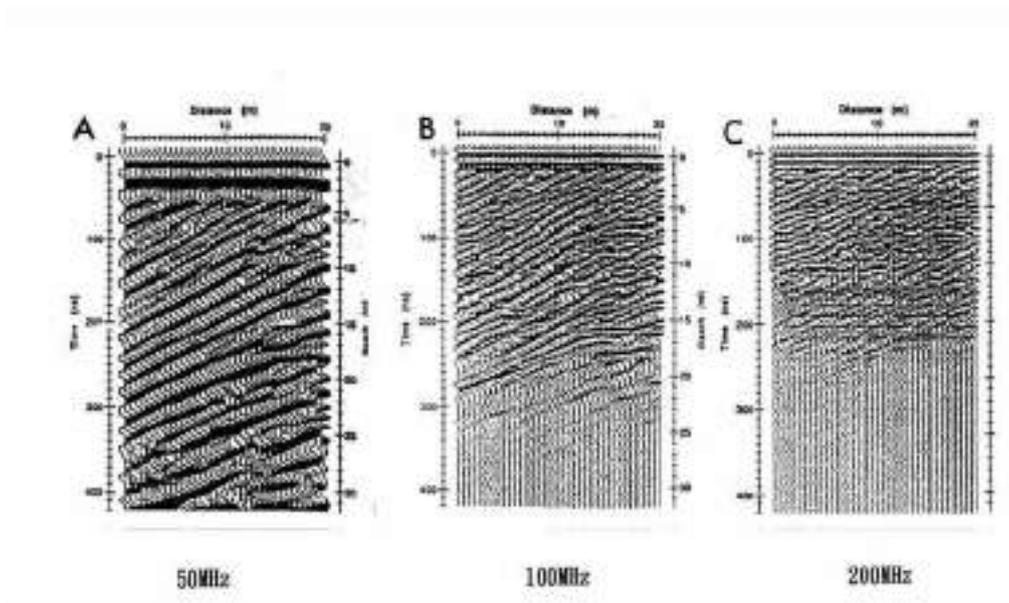


圖 1.1.2-3 天線頻率與解析能力關係圖



資料來源：摘自 Smith&Jol，1992

圖 1.1.2-4 電磁波頻率與解析能力、穿透深度關係圖

## (六) 反射係數

當電磁波自介質 A 向介質 B 入射，其反射係數(Reflection coefficient) “R”，定義如式 1.1.2-8 所示：

$$R = \frac{\sqrt{K_a} - \sqrt{K_b}}{\sqrt{K_a} + \sqrt{K_b}} \quad \text{式 1.1.2-8}$$

$K_a$ ：物質 A 的相對介電常數

$K_b$ ：物質 B 的相對介電常數

由(1.1.2-8)式可知電磁波在經過不同介質時，會把訊號反射至地表，顯示在雷達圖剖面中。表 1.1.2-1 為常見物質之電阻率、介電常數及速度等，可作為透地雷達施測事前評估及規劃測線等參考。

表 1.1.2-1 常見介質的電性參數

介質名稱	電阻率 $\rho$ (Ohm-m)	介電常數 K	速度 (m/ns)
乾沙	$10^3 \sim 10^7$	3~6	0.1~0.122
飽和含水沙	$10^2 \sim 10^4$	20~30	0.067~0.055
粉砂	$10^2 \sim 10^3$	5~30	0.134~0.055
頁岩	$10 \sim 10^3$	5~15	0.134~0.077
飽和含水黏土	1~10	5~40	0.134~0.047
溼土	50~100	30	0.055
墾殖土	200	15	0.077
岩質土	1000	7	0.113
乾砂質土	7100	3	0.173
濕砂質土	150	25	0.06
乾壤質土	9100	3	0.173
濕壤質土	500	19	0.069
乾黏土質土	3700	2	0.021
濕黏土質土	20	15	0.077
溼砂岩	25	6	0.122
乾石灰岩	$10^9$	7	0.113
濕石灰岩	40	4~8	0.15~0.106
濕玄武岩	100	8	0.106
花崗岩	$10^3 \sim 10^5$	4~6	0.15~0.122
淡水	$30 \sim 10^4$	81	0.033
冰凍層	$10^2 \sim 10^5$	4~8	0.15~0.106
乾雪	$10^5 \sim 10^6$	1	0.3
冰	$10^3 \sim 10^5$	3~4	0.173~0.15
水泥混凝土	0.1~1	6~11	0.09~0.12
空氣	無限大	1	0.3

(摘自楊等(1998)修改自 Davis and Annan, 1989, Ulriksen 1982)

## 二、適用時機與選用原則

一般而言，透地雷達探測法適用於各種污染之調查，若地質材料與污染所造成之介電常數差異性大，對於調查幫助愈大，但若污染源(LNAPL)與原本之電性地層介電常數差異不大情況下，應輔以其他地球物理探勘方法測勘。

## 三、設備要求

透地雷達測勘儀器設備可分為：

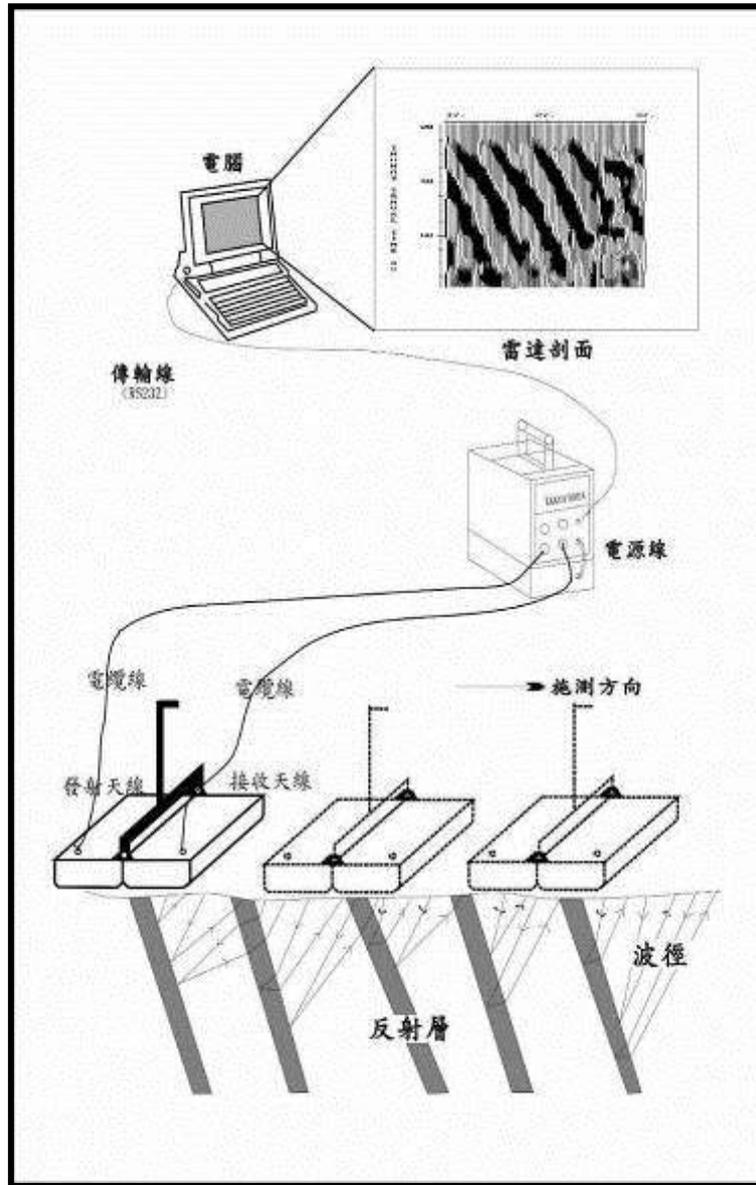
- (一) 透地雷達探測儀(控制、展示與儲存透地雷達訊號)
- (二) 透地雷達天線(依測勘目的準備天線)
- (三) 筆記型電腦
- (四) 電池、充電器
- (五) 配合用之軟體
- (六) 運送箱(裝儀器)
- (七) 皮尺、噴漆
- (八) 附件(記錄紙、鐵鎚、鏟刀、水壺、太陽傘等等)
- (九) 衛星定位系統或測量儀器(大區域測量或需精密定位時用)

## 四、施測方式

### (一) 儀器設備

透地雷達探測系統如圖 1.1.2-5，圖中實線表示正在施測之天線位置，虛線為天線移動方式，主要分成四大部份，分別為發射天線，接收天線，控制台與電腦等。施測時，天線以電纜線或光纖傳導與控制台連接，兩種傳輸方式各有優缺點，光纖傳輸品質較優良，但易因外力干擾使資料傳輸中斷，甚至造成光纖損毀；電纜線較耐壓，較不需擔心傳輸線的問題，但傳送的过程有脈衝電壓，易對收訊品質造成干擾。控制台再以傳輸線與電腦連接，施測參數由電腦中之軟體控制，當電腦下達指令於控制台要求動作時，控制台一方面使發射天線激發電磁波，另一方面要求

接收天線接收電磁波，並將接收之訊號數位化後傳回電腦儲存。



資料來源：本圖摘自洪翊翔，1995

圖 1.1.2-5 透地雷達系統示意圖

理論上，當發射電磁波的天線開始發射電磁波時，接受天線就應同步接受訊號，但由於透地雷達儀器相當敏感，所以系統溫度的微小變化均可使儀器記錄時間產生變化，所以在正式開始施測前須先熱機，使系統達至穩定後方可開始記錄訊號。此外，施測前還必須作時間歸零的修正(Time zero correction)，目的是為了使接收動作之時間早於發射動作之時間。為提高訊號與雜訊比

(Signal to Noise Ratio, S/N ratio)，每條描線(Trace)可由多次重覆發射時所接收之訊號重合後再平均組成，類似震測的同支距同炸點訊號重合法，通常疊加次數須設定為 16 次以上，但仍須視要求之資料品質及施測方式而定。此外為減少來自外界低頻雜訊的干擾，以便在施測同時即可辨識施測狀況，在訊號進入電腦紀錄同時，即先進行低頻濾波。

## (二) 野外探測

### 1. 施測方式

透地雷達法於野外施測較常使用的方法有兩種；一是水平剖面法，發射天線與接收天線以等間距移動施測，可直接反應地下形貌；二為同中點施測法，其目的為求得介質速度，以便將水平剖面法所測得之時間軸深度，換算成真實的深度之用。

#### (1) 水平剖面法(又稱為等間距施測法)

其特色為接收天線與發射天線之間距固定不變，整組天線沿著施測方向移動即可，所得到的剖面可直接反應探測體內部構造。施測時天線配置如圖 1.1.2-6。施測時所應設定的參數包括使用頻率、天線間距、天線組移動距離、天線排列方式、時間視窗及疊加次數等，可依野外施測實際狀況進行調整。

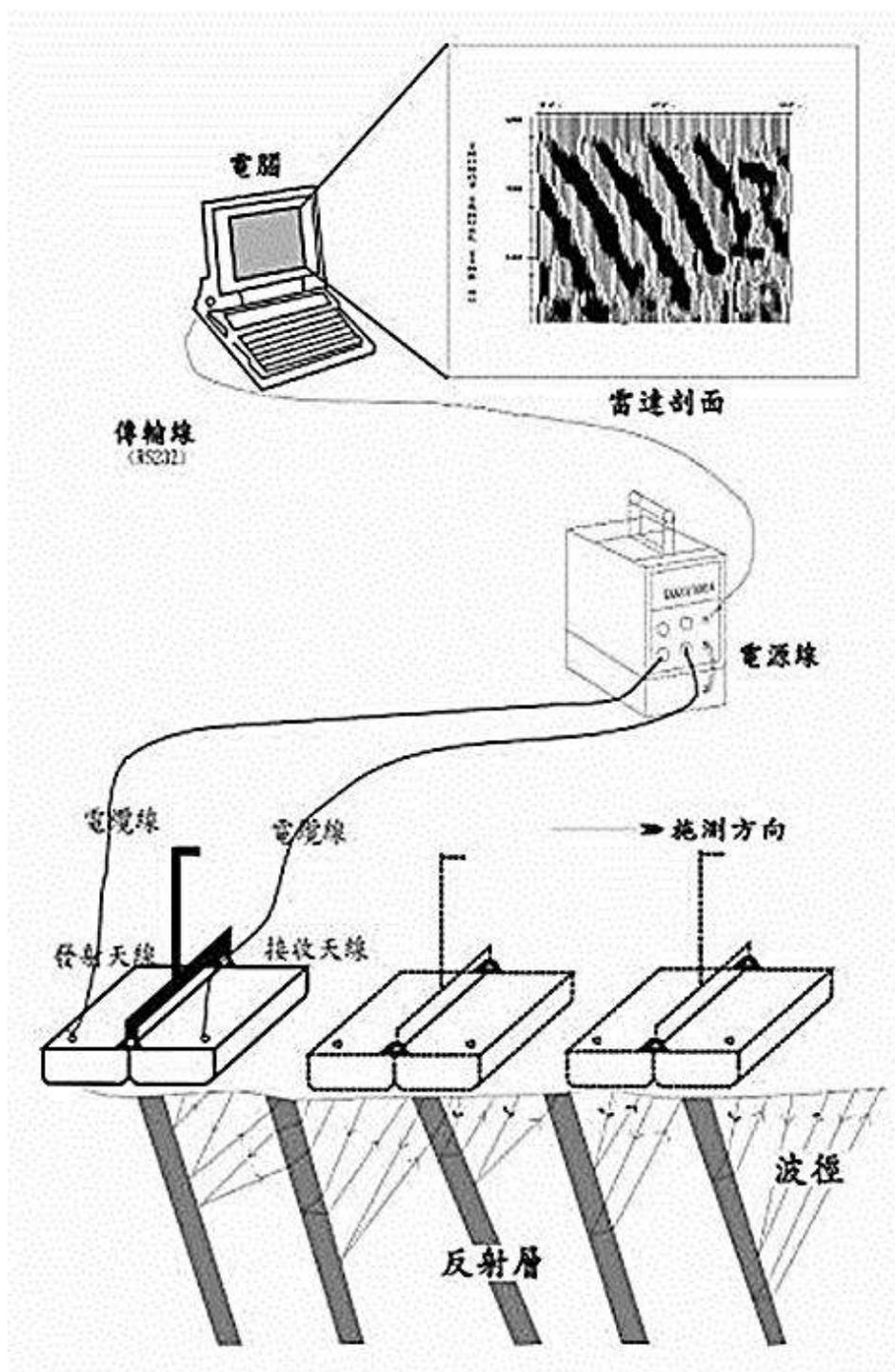
#### (2) 同中點施測法

其特色為發射天線與接收天線對同一對稱中點逐漸展開施測，可反應出發射與接收天線中點下介質速度訊息。因同中點施測剖面係反應地下同一位置之結果，故以不同速度作 NMO (Normal moveout)修正，當所用速度能將同中點施測法施測資料呈現之拋物線修正為水平，此時所用之速度即為雷達波在探測體內的傳遞速度，天線配置如圖 1.1.2-6。

### 2. 測線配置

當管線走向與測線走向小於  $45^{\circ}$  時，將無法檢測出管線，故在進行調查時，最好事先拿到測區的工程管線圖，以利測線的配

置及資料判讀，或是利用網格狀法將測線均勻分佈該區內。



資料來源：洪翊翔，透地雷達及地電法於淺層構造調查之研究 (1995)

註解：圖中實線表示正在施測之天線位置，虛線為天線移動方式

圖 1.1.2-6 透地雷達野外施測天線排列示意圖

### 3. 野外施測參數

野外施測時，為有效、快速偵測、縮短施測時間並提高施測品質，透地雷達探測系統提供許多施測參數，包括：天線頻率、時間取樣間隔、天線移動間距、激發電壓、天線間距、時間視窗及疊加次數等，供施測者選擇。而施測參數選擇之正確與否，將關係著施測結果的好壞。

## 五、作業程序

透地雷達法野外作業情形如下：

- (一) 測區基本資料蒐集及研判。
- (二) 依據測量目的作適當之測線配置，並決定天線排列與天線之頻率。
- (三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當之描繪。
- (四) 控制點測量。
- (五) 導線測量，測線不長時以皮尺控制測點間距，山區及起伏地區需以測量儀器定測點位置。
- (六) 依據探測目標選用適合之天線頻率。
- (七) 發射天線、接收天線、控制台及電腦連接。
- (八) 連結電池。
- (九) 抓取時間零點。
- (十) 熱機。
- (十一) 施測時操作員必須注意螢幕上發射及接收天線之反應，必要時調整施測參數或重新施測。

## 六、成本分析

目前透地雷達剖面探測成本每公尺約 150~500 元(新台幣)/每公尺，依照現場地形地物之不同而成本不同，若有特殊情況則依業主與執行單位約定而定，三維透地雷達剖面與三維地電阻影像剖面相似，依測

線佈置而定。

### 1.1.3 電磁波探測

電磁波法係依據地層導電程度之差異來區分地下地層，地層導電層度與組成的礦物、顆粒大小、位態、含水量以及含鹽度等有關。電磁波探測法已被廣泛應用 LNAPL 污染團調查、斷層調查、海水入侵調查等。

#### 一、原理

電磁波法(Electromagnetic Method)簡稱 EM 法，係應用電磁感應原理探測地層。測勘時在地表將送訊線圈(Transmitter Coil)通以可變頻率之交流電(通常為聲頻範圍)，產生隨時間而變動的原生磁場(Primary Magnetic field)，由於地層導電率的差異，依據冷次定律(Lenz's Law)，此原生磁場會在地層內產生時變的的渦電流(Eddy Current)，其電流密度的大小取決於各地層的電阻率。如果地下介質不均勻，則在覆蓋層、圍岩及局部的導體上產生感應的次生磁場(Secondary Magnetic field)。在地表以一受訊線圈(Receiver Coil)收錄次生磁場強度，可以藉此瞭解地下地層導電性分佈情形，進而推測地層的電性構造。

電磁波法依產生的原生電磁場及記錄次生電磁場的差異，可分為時間域電磁法(Time Domain Electromagnetic；TEM)與頻率域電磁法(Frequency Domain Electromagnetic；FEM)兩種。時間域電磁波法具有野外量測方便，但訊號／雜訊比(S/N Ratio)太低；頻率域電磁波法具有野外量測較複雜，但訊號／雜訊比較高，野外使用何種探測方法依量測者對當地地形、地物熟悉度及周遭訊號／雜訊比值而定。

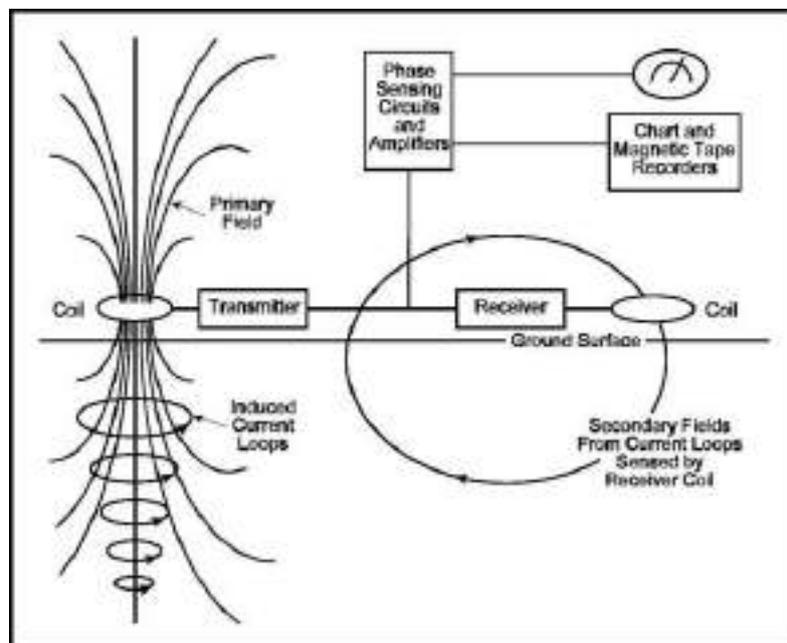
#### 二、適用時機與選用原則

為避免施測現場高壓線、鐵塔、管線及鐵絲圍籬等之影響及施測時之方便性，測線選定時需盡量避開電性干擾物，否則測值容易受到干擾。一般而言，電磁波法適用於各種污染之調查，或得成果也十分豐富，但若污染源(LNAPL)與原本之電性地層導電度差異不大情況下，應輔以其他地球物理探勘方法測勘。

#### 三、設備要求

電磁波儀器主要由四大部分構成(圖 1.1.3-1)：

- (一) 送訊線圈：主要功能為產生一個偶極磁場。
- (二) 受訊線圈：接收原生磁場及次生磁場。
- (三) 送訊線圈電源供應器：視線圈間距大小不同發射不同頻率電磁波。
- (四) 受訊線圈記錄器：接收原生電磁波及次生電磁波，直接以導電度顯示；並附有自動檢測線圈間距的裝置，免除量度線圈間距的繁雜工作，對於提高野外施測效率有很大的幫助。



資料來源：摘自 US EPA,1993a

圖 1.1.3-1 EM 測勘示意圖

電磁波測勘儀器設備可分為：

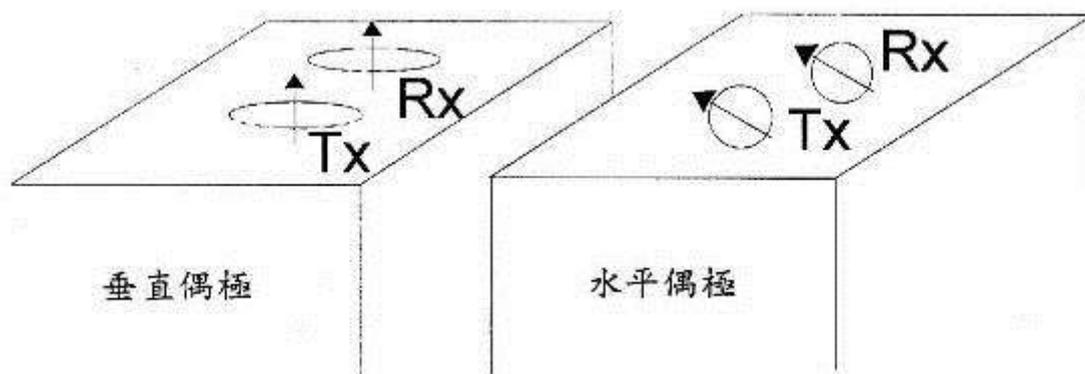
- (一) 電磁波探測儀(控制、展示與儲存訊號)
- (二) 發射主機
- (三) 接收主機
- (四) 電池、充電器

- (五) 配合用之軟體
- (六) 運送箱(裝儀器)
- (七) 皮尺、噴漆
- (八) 附件(記錄紙、鏟刀、水壺、傾斜儀、太陽傘等等)
- (九) 衛星定位系統或測量儀器(配合大區域測量或需精密定位時用)

#### 四、施測方式

施測方式依據野外現場地形、地物與待測目標而定，觀測過程中依量測過程不同可分為連續量測(Continuously Measurement)，即沿測線連續觀測儀器讀值與逐站量測(station by station Measurement)，即沿規劃之測站逐點觀測儀器讀值兩大類，無論如何，良好測線規劃影響施測成果的成敗。此外，探測範圍及測站間距亦是重要的測勘參數，過小的測勘範圍無法有效地量得地層之原始電性資料，造成對比困難；測站間距的設定須考慮探測目標的大小，應於正式作業進行前，沿測線方向連續觀察儀器讀值，以做為決定測站間距之依據。

此外，施測時依送訊線圈與受訊線圈圈面角度不同，可做兩種方式量測，即線圈面同時平行地表的垂直偶極(Vertical Dipole)展開與圈面沿測線方向且垂直地表的水平偶極(Horizontal Dipole)展開(圖 1.1.3-2)；垂直偶極的探測深度較深，容易獲得垂直方向的電性變化情形，水平偶極的探測深度較淺，容易獲得側向方向的電性變化情形。



資料來源：摘自蘇尚文，1998

圖 1.1.3-2 EM 野外測勘示意圖

## 五、作業程序

電磁波法野外作業情形如下：

- (一) 測區基本資料蒐集及研判。
- (二) 依據測量目的作適當之測線配置，並決定送訊線圈與收訊線圈的間距。
- (三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當之描繪。
- (四) 控制點測量。
- (五) 導線測量，測線不長時以皮尺控制測點間距，山區及起伏地區需以測量儀器定測點位置。
- (六) 連結電池與送訊線圈相關接頭。
- (七) 校正儀器。
- (八) 送不同頻率之電磁波分別量測地層對不同頻率(對應不同深度)之地層感應。
- (九) 施測時操作員必須注意螢幕上各參數之反應，必要時調整施測參數或重新施測。
- (十) 由野外所獲得之觀測值資料，依測點座標位置、地形標高等資料，繪製野外電導率剖面圖，可做地下污染團分佈及流向初步判定。電導率經由資料處理後，可換算成電性地層深度其對應之電導率圖，以作為推測污染團污染範圍及擴散方向。

## 六、成本分析

目前電磁波法探測成本，係依照現場地形地物之不同而有差異，因電磁波探測一般都以剖面為主，以長、寬各 100 公尺的測區而言，探測費用約在新台幣 25~35 萬上下，若有特殊情況則依業主與執行單位約定而定，三維電磁波法探測與二維電磁波探測非常相似，依測線

佈置而定。

### 1.1.4 震測探測

震測法主要依據波在地層的速度來區分地層及地下構造。其主要應用於地質描繪、地下水相關問題調查、斷層調查、污染團調查等。

#### 一、原理

震測 (Seismic Method)係使用人造波源產生地震波，向四周傳遞，由介質的物理性質差異，將震波折射或反射回至地表，並由在地表排列特定之受波器陣列收集震波資料。震測法依波於地下行進方式不同，基本上可以分為兩類，一類為折射震測，另一類為反射震測。不論何種震測，均依據地下地層之速度變化而取得資料，瞭解地下地質構造。

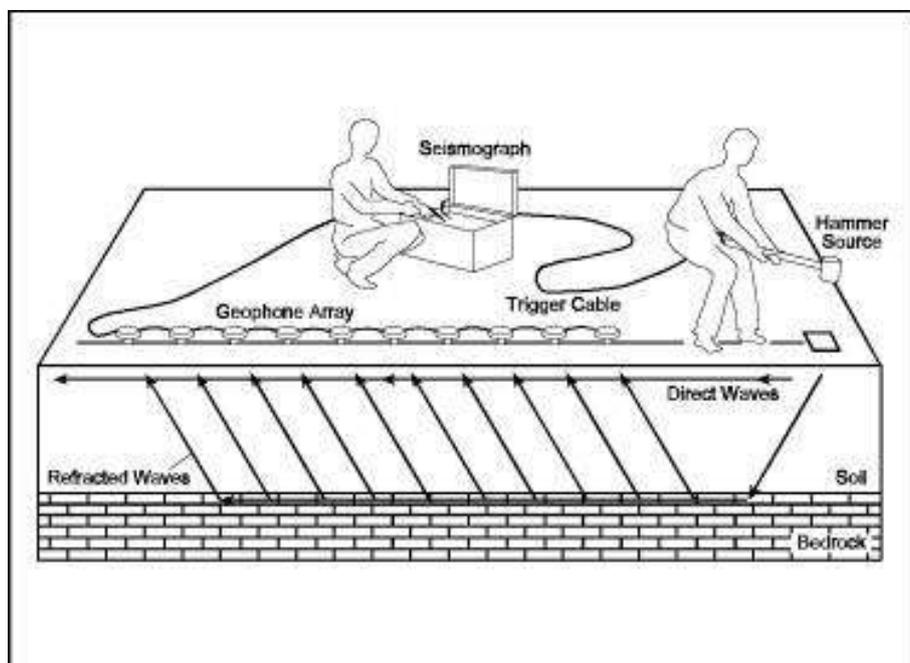
折射震測法是利用重錘擊地(或爆材)產生人造震波，震波在大地傳播時，因地下岩層彈性及密度的變化造成震波傳遞速度有快慢之別，震波於層面處產生折射現象，依 Snell 定律折射波傳回地表，為埋設於地表之受波器接收(圖 1.1.4-1)。利用觀測所得之震波到達時間(震波炸點傳播至各受波站之時間稱為走時)，將炸點至各受波站之距離及走時繪製成走時曲線圖，經由解析走時曲線可繪製速度分佈及剖面圖，藉此可以解釋地下地質結構。解析走時曲線可以採用 1980 年由 Palmer 所提出泛化互換法(Generalized Reciprocal Method, GRM)、正值-負值法(Plus-minus Method)或其他方法解決。

反射震測法亦是利用重錘擊地(或爆材)於地表下產生人造震波，震波在大地傳播時，因地下岩層彈性及密度的變化造成震波傳遞速度有快慢之別，震波於層面處產生反射現象，此反射波由埋設於地表之受波器接收。利用觀測所得之震波到達受波器之時間(震波炸點傳播至各受波站之時間稱為走時)，經過一連串修正後，藉此可以解釋地下地質或構造。

#### 二、適用時機與選用原則

一般而言，震測法適用於各種污染場址之地質調查，但目前國內應用震測法於 LNAPL 污染源調查，並無相關文獻產生。震測法應用於 DNAPL 污染調查通常為參考控制井之狀況下，利用二維或三維震測剖

面確定地下地質及水位面狀況，以提供後續整治之參考。



資料來源：Benson, 1984

圖 1.1.4-1 折射震測法野外施測示意圖

### 三、設備要求

震測測勘儀器設備可分為：

- (一) 震測探測儀(震波放大器、信號加強器、控制、展示與儲存震測訊號)
- (二) 震源產生器(鐵鎚或爆材)
- (三) 觸發器
- (四) 震波放大器
- (五) 自動切換電纜線組
- (六) 受波器
- (七) 電池、充電器
- (八) 配合用之軟體
- (九) 運送箱(裝儀器)

(十) 皮尺、噴漆

(十一) 附件(記錄紙、鐵鎚、鏟刀、水壺、傾斜儀、太陽傘等等)

(十二) 衛星定位系統或測量儀器(主要配合大區域測量或需精密定位時使用)

#### 四、施測方式

目前國內較常使用的震測法包含折射震測與反射震測兩種，施測方式依據野外現場地形、地物與待測目標決定何種方式施測。由野外所獲得之觀測資料。若為折射震測資料，經由高程及各項修正後，可獲得地層速度與厚度剖面圖；若為反射震測資料，經由高程、動態、靜態等修正後，可獲得地層速度與厚度剖面圖。不論何種方式施測，都可協助我們瞭解地下地質的風貌。

#### 五、作業程序

震測法野外作業情形如下：

(一) 測區基本資料蒐集及研判。

(二) 依據測量目的作適當之測線配置，並決定受波器排列與受波器之間距。

(三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當之描繪。

(四) 控制點測量。

(五) 導線測量，測線不長時以皮尺控制測點間距，山區及起伏地區需以測量儀器定測點位置。

(六) 將受波器埋入土中。

(七) 以自動切換電纜線之各接頭依序連接各受波器。

(八) 自動切換電纜線與震測儀相關接頭連接。

(九) 連結電池與震測儀相關接頭。

(十) 進行測區背景訊號測試以決定施測參數。

(十一) 施測時操作員必須注意螢幕之反應，必要時調整施測參數或重新施測。

## 六、成本分析

目前震測剖面探測成本每公尺約 300~1,000 元(新台幣)/每公尺 300~1,000 元，依照現場地形地物之不同而有差異，若有特殊情況則依業主與執行單位約定而定，三維震測剖面法與二維震測剖面相似，係依測線佈置而定，但資料處理較複雜。

### 1.1.5 井內探測

井內地球物理探測為地表地球物理探測法在井孔內的延伸，一般而言，地表上所能進行的各種地球物理探測技術都能在井孔內施行。在無法佈測長距離地表地物探測測線之場址，此時井內地球物理探測便能發揮其效用，藉由鑽鑿井孔，將探測儀器置入井孔內進行施測。孔內地球物理探測又可分為單孔井測與跨孔井測，常見的地球物理井測如表 1.1.5-1。

過去傳統的井測(電阻井測、自然電位井測、自然伽瑪井測、聲波井測、放射性井測、溫度井測、超音波井測等等)應用在地質調查方面已有許多重大的成就，目前由於環保意識的抬頭，井測法逐漸被應用於污染團的調查，協助監控污染團的範圍、傳輸方向及整治的成效評估等，例如：應用跨孔電阻率井測法於 DNAPLs 控制場址進行研究，以描繪污染的殘留相。

隨著時代的進步，較精密探測的透地雷達亦被應用於孔內探測，其成果也相當的豐碩。例如：應用透地雷達井測法輔助描繪地質構造；本節將簡介透地雷達井測及一般傳統井測法的應用。

#### 一、原理

透地雷達井測法施測原理相同於地表雷達探測，乃利用地層中介電常數及地層速度的差異，藉以描繪地層構造，原理詳見 4.1.2 節。

傳統井測法係藉電纜將探測器下降至井孔中，在地面控制、記錄發射及接收訊號，將井孔及其周圍地層之各種物理現象加以測定、分析、評估的一種科技。井測大約分為電氣、聲波及放射線三類。

表 1.1.5-1 常見的地球物理井測法分類表

單孔井測	跨孔井測
雷達井測 電阻井測 自然電位井測 自然伽瑪井測 聲波井測 放射性井測 溫度井測 超音波井測 傾角井測 感應極化井測 流速井測 孔內攝影	雷達跨孔井測 地電阻跨孔井測 震波跨孔井測 電磁波跨孔井測

電氣類井測原理為在均勻等向性電阻率為  $\rho$  之介質通入電流  $I$ ，距離  $r$  之電位  $V$  可寫為

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r}$$

上式可改寫為

$$\rho = 4\pi r \frac{V}{I}$$

若已知  $r$  與  $I$ ，則可求出  $\rho$ ，原理與一般直流電阻法十分相似，常用的方式包含：

- (一) 普通電測：包含電阻率及自然電位兩大類。電阻率井測係由一組電極通電，一組量電位差，其原理類似直流電阻法。自然電位係藉由一組電位極量測岩層電位差，藉以推測地層。
- (二) 焦點式井測：係由多極電流通入地層中，而後量測電位，換算精確的地層電阻率。
- (三) 感應式電測：係藉由一定強度之高週波交流電送進發射線圈，使地層產生同軸之次生渦電流，其渦電流又產生次生磁場經由感應線圈接收，經由換算後，可得地層電導率。

聲波類井測原理為測量震波所發出之壓縮波(Compression waves)或剪力波(Shear waves)，利用不同之地層，聲波傳遞速度不一樣來區分地層，包含：

- (一) 聲波電測：係利用一發射器與接收器量測聲波走時資料，換算地層狀況。
- (二) 振幅井測：係利用一發射器與接收器量測聲波振幅資料，換算地層狀況。
- (三) 井孔電視：係類似聲納原理，掃描井孔，由反射訊號及發射位置的相對位置，換算地下地層情況。

放射線類井測原理係利用在自然界中有一些原子核會放出射線，有一些則可利用撞擊的方式產生。常用的方式包含：

- (一) 伽瑪電測：自然界中地層之放射物含量因地層岩性不同，故可利用檢測地層中之伽瑪含量，換算井內地層之情況。
- (二) 伽瑪能譜電井測：係由量測地層中伽瑪能譜，換算井內地層之情況。
- (三) 地層密度電測：係藉由發射伽瑪線，使地層產生康普敦效應，換算地層密度。

施測地點所得的資料，經資料處理後，即可獲得測勘成果。一般來說，施測成果的好壞，與施測地點的地形地物有很大的關係，若施測地點障礙物很多，則訊號常會夾雜許多雜訊，使得訊號較雜訊為小，必須靠資料處理的技術將訊號與雜訊比提高，使得真正訊號顯現出來。

## 二、適用時機與選用原則

地表透地雷達應用於污染探測上具有許多豐富的成效，但有時仍受限於現場環境的影響無法施作，如地表面有人造建物含有鋼筋，地表透地雷達則會受到干擾及產生電磁波被吸收的問題，此時雷達井測即可發揮其功效；此外，如欲探測地表面下數十公尺之地層狀況，或地表建物基礎下方的地下狀況，地表透地雷達探測亦會受到測深或儀器探測方式受限而無法施作，此時亦可選用透地雷達井測，以達到探測之目的。

傳統井測為量測正確的地層電阻率與放射性反應，通常必須在裸

孔的方式下進行，而裸孔必定充滿泥漿，量測時必須將泥漿污染影響去除，測得該地層真正的物理參數，例如：電阻率、孔隙率、滲透率等等。

### 三、設備要求

透地雷達井測儀器設備可分為：

- (一) 透地雷達井測探測儀(控制、展示與儲存透地雷達訊號)
- (二) 透地雷達井測天線(依測勘目的準備天線)
- (三) 傳輸電纜線兩條
- (四) 筆記型電腦
- (五) 電池、充電器
- (六) 配合用之軟體
- (七) 運送箱(裝儀器)
- (八) 皮尺、噴漆
- (九) 附件(記錄紙、鐵鎚、鏟刀、水壺、太陽傘等等)
- (十) 衛星定位系統或測量儀器(大區域測量或需精密定位時用)

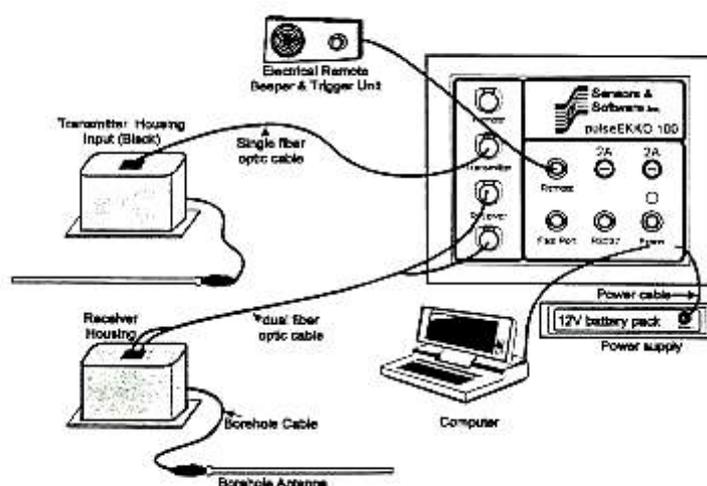
傳統井測儀器設備則可分為：

- (一) 井測探測儀主機(控制、展示與儲存訊號)
- (二) 井測探棒
- (三) 傳輸電纜線
- (四) 筆記型電腦
- (五) 電池、充電器
- (六) 配合用之軟體
- (七) 運送箱(裝儀器)
- (八) 皮尺、噴漆
- (九) 附件(記錄紙、鐵鎚、鏟刀、水壺、太陽傘等等)

## (十) 衛星定位系統或測量儀器(大區域測量或需精密定位時用)

## 四、施測方式

在透地雷達井測的部分，以 Sensor & Software 廠牌所製造 EKKO 透地雷達井內探測系統為例，主機為 PulseEKKO 100 型儀器，其中井測透地雷達擁有的頻率為 50MHz，100MHz，及 200MHz，施測儀器包含主機一部，傳輸光纖二條，發射器與接收器，發射天線與接收天線各一組，蜂鳴器，電腦，電池。全部組合如圖 1.1.5-1：



資料來源：SENSORS & SOFTWARE 使用手冊

圖 1.1.5-1 雷達井測儀器組合圖

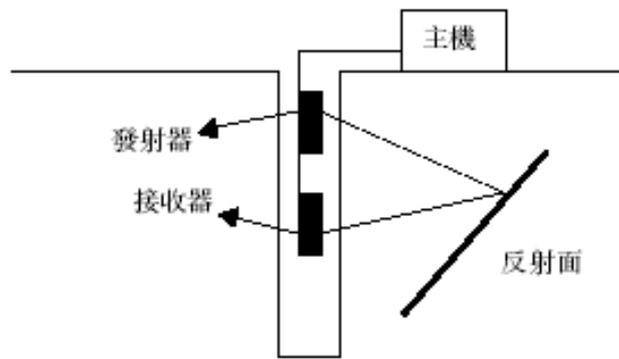
雷達井測與地表雷達探測最大的不同在於施測方式，施測方式可分為單孔反射法(Single Hole)、單孔垂直雷達剖面法(VRP, Vertical Radar Profile)、跨孔零支距剖面法(ZOP, Zero offset Profile)、跨孔多重支距剖面法(MOG, Multiple Offset Gather)，分別介紹如下：

(一) 單孔反射法(Single Hole): 單孔井測是將發射器和接收器放至同一口井中，其施測原理與反射式透雷達相同，都是透過介質介電常數與反射係數的不同，由反射波得到地層或目標物的影像，其施測方式如圖 1.1.5-2。

(二) 單孔垂直雷達剖面法，VRP(Vertical Radar Profile)：當現場只有一

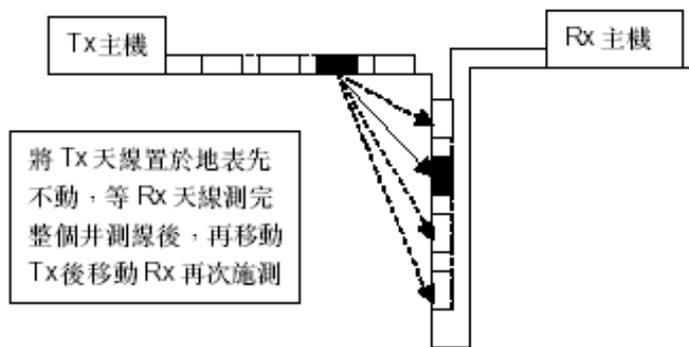
口井可資利用時，或為了得到兩口井間與地表之間的射線資料，增加雷達波入射的路徑和角度變化，以便獲得更多資訊時，可使用 VRP 施測，此時可將發射天線放置地表固定位置，移動在井中的接收天線，由井口至井底，接著再移動地表發射天線至另一位置，重複進行到施測結束，其施測方式如圖 1.1.5-3。

(三) 跨孔零支距剖面法，ZOP (Zero offset Profile)：這是最快速的施測方式，就是透地雷達的發射天線(Tx)和接收天線(Rx)分別在不同的井中同時做等間距的移動(如圖 1.1.5-4)，藉著所收集到雷達波資料走時和振幅的變化，能夠指出兩井間地層的變化。



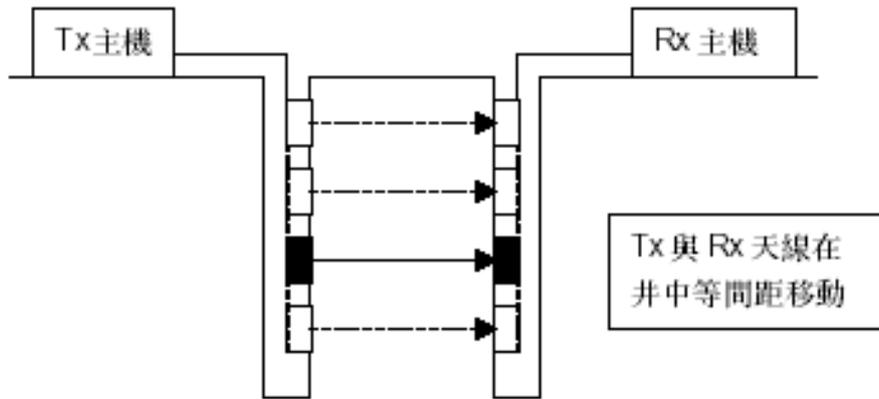
資料來源：高千平, 2001

圖 1.1.5-2 單孔反射法施測示意圖



資料來源：高千平, 2001

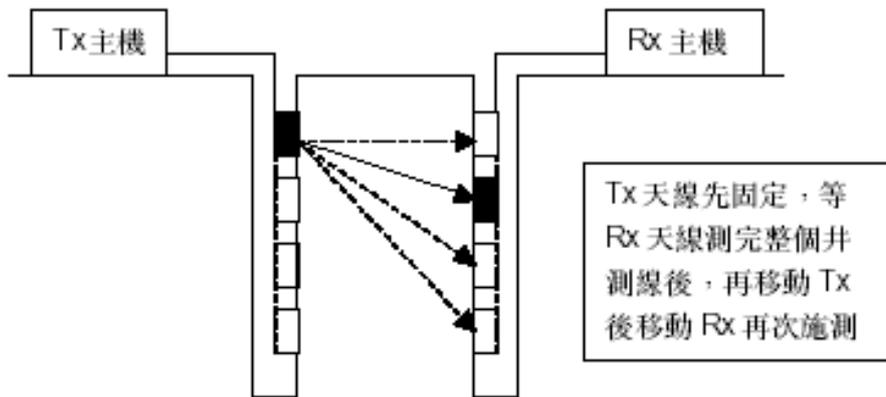
圖 1.1.5-3 單孔垂直雷達剖面法施測示意圖



資料來源：高千平, 2001

**圖 1.1.5-4 跨孔零支距剖面法施測示意圖**

(四) 跨孔多重支距剖面法，MOG (Multiple Offset Gather)：此法可獲得更詳細的地層資料，利用雷達波不同的路徑和入射角度來獲取兩井間地層更多的資訊。當施測時，固定發射天線的深度位置，改變接收天線的位置，由井的頂部移動至底部，再將發射天線移至另一深度，再次移動接收天線由井口至井底，重複施測，直至發射天線移至井的底部，施測方式如圖 1.1.5-5。



資料來源：高千平, 2001

**圖 1.1.5-5 跨孔多重支距剖面法施測示意圖**

如同地表透地雷達施測，雷達井測施測時亦需設定最佳參數，方能得到最佳的探測效果，相關雷達井測參數說明如下：

## (一) 天線頻率(Antenna frequency)

由於天線頻率決定其探測深度與解析能力，頻率較高，具有較佳解析度，但其探測較淺；反之，解析度較差，但其探測深度較深。因此，進行施測前，為減少野外工作時數，最好事先得知探測目標之大略深度，以決定使用之頻率。

## (二) 時間取樣間隔(Sampling interval)

雷達井測依天線頻率建議所使用的時間取樣間隔，如表 4.1.5-2。

**表 1.1.5-2 透地雷達井測依天線頻率對應使用之時間取樣間隔**

天線頻率(MHz)	時間取樣間隔(10-12 sec)
50	1600
100	800
200	400

## (三) 天線移動間距(Antenna step size)

雷達井測依不同的天線頻率建議所使用的最大天線移動間距，如表 1.1.5-3。

**表 1.1.5-3 不同天線頻率之最大天線移動間距**

天線頻率(MHz)	最大天線移動間距(m)
50	2.0
100	1.0
200	0.5

## (四) 時間視窗(Time window)

時間視窗為透地雷達接收天線接收訊號的時間範圍，其時間零點以接收天線開始接收電磁波算起；若時間視窗開得愈大，而接收天線接收訊號的時間愈長，所得之訊號包括探測體較深的部份；反之，時間視窗開得愈小，接收天線接收訊號的時間愈短，所得之訊號僅包括探測體較淺的部份。

時間視窗開得大小與天線頻率及待測體之電性有極大的關係。若使用天線頻率愈高或探測體的導電度愈大，電磁波的衰減係數較大，透地雷達探測深度就較淺，時間視窗就不適合開得太大；反之，若使用天線頻率愈低或被探測體的導電度較小，此時因電磁波的衰減係數較小，時間視窗就要開大一點。有時因地層材質本身的導電度在事前難以得知正確值，則使用現地電磁波穿透深度測試，以決定該組天線是否足以匹配所待測目標的位置深度。

#### (五) 疊加次數(Stack number)

疊加次數為發射天線在同一測點發射訊號的次數，亦為接收天線在同一測點接收訊號的次數，用以加強訊號雜訊比。

傳統井測法的執行通常以單孔井測為主，調查井孔附近地層之物理參數，但也可實施單孔垂直剖面法(VRP, Vertical Radar Profile)、跨孔零支距剖面法(ZOP, Zero offset Profile)、跨孔多重支距剖面法(MOG, Multiple Offset Gather)，其實施方式則由施測現地地形、地物及現場需求而定。

### 五、作業程序

透地雷達法野外作業情形如下：

- (一) 測區基本資料蒐集及研判。
- (二) 依據測量目的及現場可施作之井孔數量及井孔間距選擇施測方式。
- (三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當之描繪。
- (四) 控制點測量。
- (五) 依據探測目標選用適合之天線頻率。
- (六) 發射天線、接收天線、控制台及電腦連接。
- (七) 連結電池。
- (八) 熱機。

- (九) 抓取時間零點。
- (十) 施測時操作員必須注意螢幕上發射及接收天線之反應，必要時調整施測參數或重新施測。

傳統井測現場作業情形說明如下：

- (一) 測區基本資料蒐集及研判。
- (二) 依據測量目的及現場可施作井孔數量及井孔間距選擇施測方式。
- (三) 記錄工作日期及氣候等，並對測線附近地形及地物作適當描繪。
- (四) 控制點測量。
- (五) 依據探測目的選用適合之井測方式。
- (六) 探測棒(發射器、接收器)、控制台、電纜線及電腦連接。
- (七) 連結電池。
- (八) 施測時操作員必須注意螢幕上發射及接收器之反應，必要時重新施測。

## 六、成本分析

目前井測計價方式是以孔數量計價，每孔約新台幣 50,000~100,000 元(井深 30 公尺至 50 公尺之間)，若井孔更深，所花費的成本也就越大，成本依照現場地形及井深之不同而成本不同，若有特殊情況係依業主與執行單位約定而定。

## 1.2 直接貫入

直接貫入(Direct-Push, DP)技術泛指利用直接動力驅動與直推/震動的方式，將小口徑之空心鑽管貫入地下進行地下環境調查之工具。藉由在套管末端安裝不同功能之採樣與分析工具，直接貫入系統可用於採集土壤、地下水與土壤氣體。此外，亦可安裝多種現場量測地下環境特性之工具，以進行現場連續量測，例如地電阻、污染物濃度、水力傳導係數等。至於鑽頭的推進方式，從使用人力貫入的人工鑽槌(如 sliding hammer)到重達 60 噸的卡車均有(圖 1.2.1-1)，可依場址需求選擇較適宜的方式。

直接貫入方法為因應更完整且快速進行污染場址評估之需求而在近年所發展之技術。傳統場址評估方式通常仰仗傳統的鑽探方法，如小型旋鑽機、衝擊鑽(cable tool)、鑽堡(air rotary)等鑽具，進行土壤與地下水的採樣以及永久性監測井的設置。傳統之方式不僅程序冗長，且為能保持其經濟性，通常所取得之地下水樣數目有限。同時多以階段性且彈性較低的工作方式執行。此外，樣品多採用離場分析(如送至場址所在以外之認證實驗室)，於速度上又成為另一項限制。運用直接貫入技術，設置標準監測井才能採集地下水的必要性已經消失，而且土壤、土壤氣體與地下水樣品均可迅速的採集，讓高品質的分析方法可以於現場使用，也因此直接貫入技術成為快速場址評估調查之發展的重要角色。

直接貫入技術相較於傳統採樣方法的另外一項優勢，是產生之廢棄物量較為有限，例如套管系統從地下所採得或移除的土壤樣品量並不多。雖然亦有因貫入之力量造成土壤緊實與水力傳導係數降低等疑慮，但都有方法可以減低這些問題的影響。相反地，雖然其他的鑽探方法將土壤完全由地下移除，使得土壤緊實的問題不明顯，但所產生的廢土量則遠多於直接貫入之方法，且容易造成黏土與粉土混合於透水性較佳之土層，導致誤判其真實的地層條件。甚至有可能在土中殘留相與浮油被取出時，造成污染物的重新分布。

然而在為特定場址選擇適當的直接貫入方法時，必須相當了解直接貫入方法的原理以及調查的目標，因為許多工具是「只」為特定用途而設計。此外，直接貫入技術的核心就是連結貫入機具與套管系統而能於地下環境採集樣品的採樣工具或特殊功能鑽頭。由於近年直接貫入技術日受重視，其技術發展的腳步亦日新月異，要完全涵括所有的工具(包括實驗性質與商業化)實屬不易，因此，後續章節中將針對可用於直接貫入技術的「採樣工具」與「現場篩選工具」之各項功能性鑽頭，並以適用於油品污染之土壤與地下水之調查為主要考量。內容的安排則將先就基本的貫入系統做說明，接著再針對不同之應用所需之鑽頭與工具加以介紹。相關說明將涵蓋工作原理、適用時機與介質，設備需求、作業程序說明以及相關之品保品管與作業安全事項，以期協助了解直接貫入系統與工具的技術。

### 1.2.1 貫入系統

#### 一、原理

直接貫入的套管推進方式，可以小至手動鎚擊器(manual hammer)，也可以大至在 20 噸重的卡車上安裝推進機具(圖 1.2.1-1)，使用的選擇取決於場址特性與調查目的以及可用性。目前在進行場址調查時，多是有小型電動鎚擊器與中大型車載推進機具。

基本上貫入系統之推進方式可以分為重力式與動力式，手動鎚擊器即屬於重力式貫入，單純利用鎚擊器的重量以鎚擊或滑動的方式，將直接貫入套管貫入。動力式則可以機械動力提供高頻率的撞擊，達到快速貫入的目的，不論是貫入速度或深度均較手動鎚擊器佳(如手握式電動鎚擊器)。安裝於中小型載具的鎚擊器是最常被用於直接貫入的貫入系統，載具包括履帶車、中型貨車與客貨兩用車等。

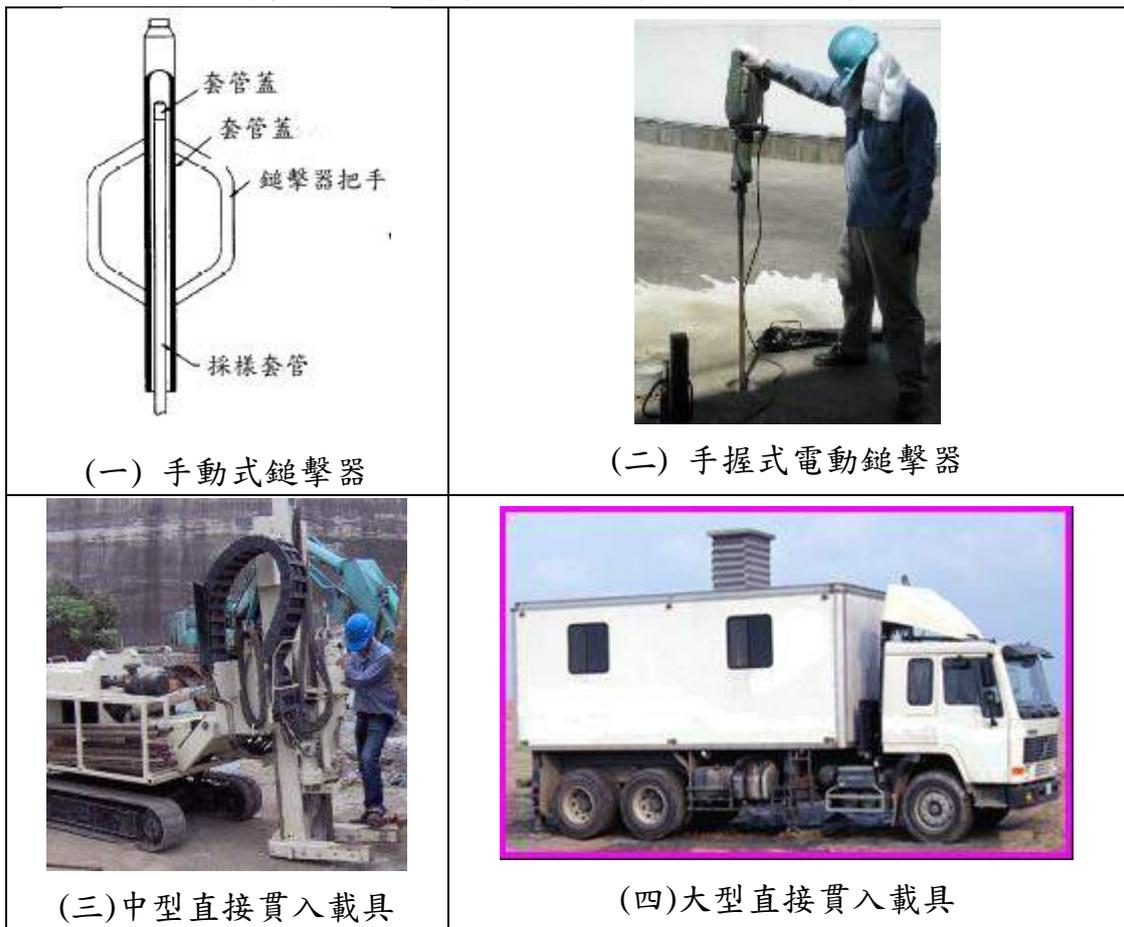


圖 1.2.1-1 各式直接貫入推進系統載具

安裝於載具之鏈擊器利用液壓活塞將套管壓入地下，必要時則施以衝擊力。衝擊/撞擊的力量通常是採用液壓式或氣壓式驅動，少數的衝擊系統是利用高速震動的方式，這種方式同時利用震動的形式降低套管邊壁的摩擦力，讓穿透速度加快與貫入深度更深。安裝於大型載具(卡車)的液壓貫入系統多用於圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)，其主要的套管推進力量包括大型載具本身的重量與液壓式驅動，可貫入之最大深度亦取決於載具重量。

貫入系統的另一項元件是套管系統(rod system)，為採用中空套管做為推進探測鑽頭或採樣工具的連接系統。套管多為 1 公尺長，一端為公螺牙，另一端為母螺牙，當直接貫入套管推進、敲擊或震動貫入土層中，另一段套管即隨之連接後，再持續推進直到標的深度或貫入機具無法再推進套管。套管類型的大致可分為單套管與雙套管二種，二者均可用於採集土壤、土壤氣體與地下樣品，圖 1.2.1-2 即為此二種套管之示意圖。

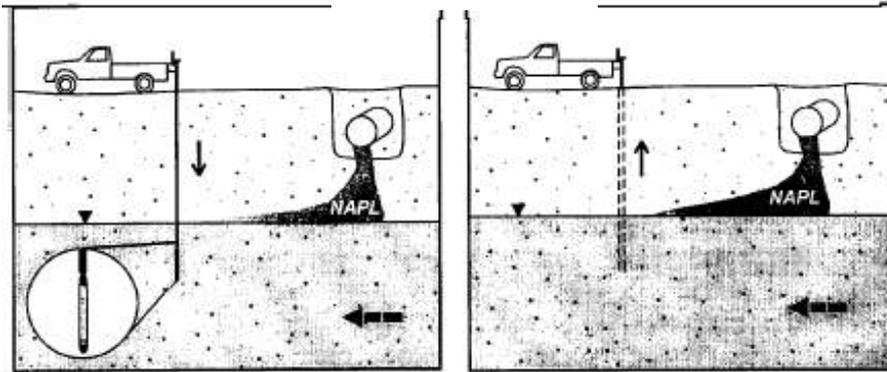
單套管是最常用於直接貫入系統的套管，此種套管採用單一序列連結之套管連接鑽頭或採樣工具與推進機具。一旦樣品採集後，整套連結之套管必須完全由採樣孔拔出，而採集更深層之樣品時，則需要重新將採樣工具聯結，再貫入原採樣孔，重複以上的步驟。套管的直徑一般是 1 英吋，但也有 0.5 到 2.125 英吋的規格。

雙套管系統(dual tube 或 cased system) 是推進外套管與內部採樣管的方式進行。外套管可以與內管同時貫入或在內套管貫入後隨即貫入。樣品可以在不拔除整組內套管的情形下取得，並且可以避免採樣時崩孔的風險。由於同時使用兩種套管，所以外套管直徑相對較大，通常是 2.4 英吋，但實際則可介於 1.25 至 4.2 英吋之間。

## 二、適用時機與環境介質

一般手動鏈擊器適用於淺層之採樣(地下 1 公尺至 3 公尺)，在地質條件狀況較好的條件下，也有貫入至地下 7.5 公尺的可能。基於此種淺層貫入的特性，故較適合做為土壤氣體的採集工具。電動鏈擊器其適用之功能較多元，包括淺層土壤採樣、土壤氣體採樣與地下水採樣均可。一般可達到的深度約在 2 公尺至 5 公尺，最深可達 10 公尺以上。

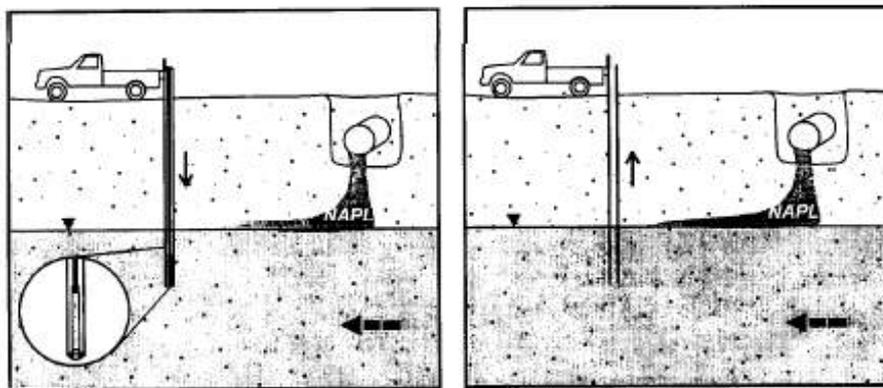
單套管系統



(1) DP 採樣工具聯結於一組單套管的末端推進

(2) 一旦採樣完成後，採樣工具與套管由地下拔出，要收集另一個樣品時，採樣工具需重新插入並推進到另一個深度

雙套管系統



(1) DP 採樣工具與內套管聯結並同時與外套管推進

(2) 採集樣品時，僅拔出採樣工具與內套管。外套管仍留在地下避免崩孔。要採集更深層的樣品時，採樣工具與內套管重新連結放至原採樣孔底部，並與外套管一起推進。外套管則於所有採樣完成後再移除。

資料來源：USEPA (1997a)

圖 1.2.1-2 單套管系統與雙套管系統示意圖

中小型載具的貫入系統一般可以達到地下 6 公尺到 15 公尺的深度，最深曾有達到 45 公尺的紀錄。由於安裝於載具或小型車輛上，所以在移動性相當好，當然這也取決於載具車輛的種類與現場的狀況。

大型載具之貫入深度在 9 公尺到 30 公尺之間，最深可達 90 公尺。以圓錐貫入試驗而言，其鑽頭為精密設備，所以安裝於大型載具上的

貫入系統，通常沒有衝擊或撞擊的設備，但仍然可以使用一般的直接貫入套管，進行各種的採樣與量測工作。

傳統的鑽具(如前述之小型旋鑽機、衝擊鑽、鑽堡等)也可被做為土壤、土壤氣體與地下水採樣工具，事實上類似的作法在地質鑽探已行之有年，而在 ASTM D1586 方法中亦有相關的說明。傳統鑽具的衝擊重量約在 2,270 公斤至 9,080 公斤之間，一般可到達深度在 6 公尺到 24 公尺之間，最深則可達 60 公尺。但受限於其結構通常較大，在場址的移動性較差。不同的貫入機具間主要的差異在於其推進各式套管所能到達的深度以及移動性與方便性，茲將其差異列舉於表 1.2.1-1。

貫入深度是取決於設備的反應重量，當然尚有多種次要因素，如錘擊器的種類等，均會對可達深度有所影響。至於地質與土壤類型對於所有的貫入機具均有類似的影響。對所有的機具而言，理想的地質是未固結的沉積黏土、粉土與砂質土，而礫石可能會對直接貫入方法造成困擾，半固結與固結沉積層一般都會對直接貫入方法造成限制或阻礙。

至於在套管系統的部分，單套管與雙套管系統的應用範圍重疊性很高，二者均可用於許多相同的環境條件。不過，單套管系統顯然較雙套管系統容易運作，且採集單一樣品的速度較快。在土壤分層較均質或地層分布描繪程度佳的場址特別適用。

雙套管系統的主要優點在於外套管可以避免採樣孔崩孔，採集連續土壤樣品時，不會有崩落的土壤混雜，避免分層樣品受到污染。雙套管系統在進行 3 公尺以下的連續土壤採樣工作上，比單套管系統快，而土壤連續採樣工作對於地質不均質性高的場址尤其重要。此外，在採集地下水樣時，雙套管系統可以在確定在到達飽和層後，再開始採樣，同時可以先行知道透水性再選擇於透水性較佳的深度採樣。單套管系統的主要缺點在於當採集連續土壤樣品時，速度可能較慢，而且對於較鬆弛的砂層，會有崩孔的風險。

表 1.2.1-1 各種直接貫入機具的差異比較

貫入機具	反應重量(磅)	一般可達深度 (公尺)	最大深度 (公尺)	可攜性
手動式錘擊器	30 至 60	1.5 至 3	7.5	優
手握式電動錘擊器	30 至 90	2 至 5	12	優
中型貫入載具	5,000 至 17,000	6 至 15	45	佳
傳統鑽具	5,000 至 20,000	6 至 24	60	差
大型貫入載具	30,000 至 120,000	9 至 30	90	差

資料來源：USEPA (1997a)

### 三、設備需求

完整的貫入系統設備包括前述的貫入設備與套管系統，依據場址特性與調查目的，可選擇不同的貫入設備與套管系統之組合，而其相關之設備需求亦會依不同組合而有所差異，同時與工作原理有相當的關連性。以下將貫入系統之設備分為貫入設備與套管系統二部分加以說明，並請同時參閱前「原理」一節有關系統的描述：

#### (一) 貫入設備

1. 重力式貫入設備：手動錘擊器
2. 手握或可攜動力式貫入設備：手握式電動錘擊器
3. 中小型載具貫入設備：貫入系統安裝於履帶車、中型貨車與客貨兩用車等。
4. 大型載具貫入系統：多用於圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)，貫入設備的有效力量包括大型載具本身的重量與液壓系統之驅動。

#### (二) 套管設備

1. 單套管系統：套管系統至少包括錘擊帽(drive cap)、鑽尖(drive point)、回拔器(pull cap)、切割環(cutting shoe)與套管(rod)，其典型的構造如圖 1.2.1-3 所示。
2. 雙套管系統：除單套管系統之元件外，尚包括外套管(outer rod)



參考資料：Kejr. Inc. Geoprobe System (<http://www.geoprobe.com>)

圖 1.2.1-3 單套管系統之典型元件構造

#### 四、作業程序

- (一) 進行場址現勘，確認計畫需求之作業點，勘查作業動線。若作業點附近無法作業，包括機具無法進入，或是作業區地面不平等可能造成作業人員危害者，應與計畫負責人聯繫協調。
- (二) 根據現勘、地質水文、地下管線資料等擬定作業計畫。
- (三) 工作執行之前應以無磷清潔劑及 RO 水清洗所有現場採樣工具，視計畫需求，採取設備空白、野外空白等樣品。
- (四) 如地表是水泥表面或柏油，則需先用水泥破碎機或氣錘機之螺旋鑽頭打通水泥層或柏油，若無地下管之虞，應可直接以人工錘、電動錘或液壓錘鑽孔。
- (五) 依據作業內容，組合不同之套管，以貫入機具反覆向下敲擊，開始鑽進。
- (六) 直至預定採樣深度停止後開鎖繼續敲進、採樣或回拔。
- (七) 將套管拔出，並以皂土填入鑽孔，視需要加入適量的 RO 水，最後配置水泥塗平遭破孔之地面，恢復採樣現場原狀。
- (八) 將收集的土壤、土壤氣體、地下水等樣本保存送至實驗室進行分析或是以現場分析儀器進行分析。

(九) 完成定位、照相及作業紀錄表單填寫等之作業紀錄等。

## 五、工作注意事項

- (一) 雖然採用直接貫入技術所產生之廢棄土壤量並不多，但若是真的  
有廢棄土壤或廢棄物產生的話，工作執行單位仍必須妥善處理，  
尤其在主要污染區所進行之採樣工作，其廢棄土壤或廢棄物都具有  
高濃度的污染物，必須加以妥善處理。
- (二) 直接貫入法有因貫入的力量造成土壤緊實與水力傳導係數降低  
等疑慮，但仍可依據現場環境條件特性，弱化這些問題的影響，  
例如操作貫入機具時，以間斷性輕敲擊，避免重力強壓錘擊等方  
式。
- (三) 直接貫入系統的貫入深度與載具之呆重有直接的相關性，而中小  
型載具會採用衝擊的方式彌補其呆重較輕與貫入深度之限制，但  
也因此必須於貫入過程中特別注意套管的傾斜度，以避免在貫入  
深度較深時，套管的彎曲甚至斷裂。

### 1.2.2 土壤氣體採樣

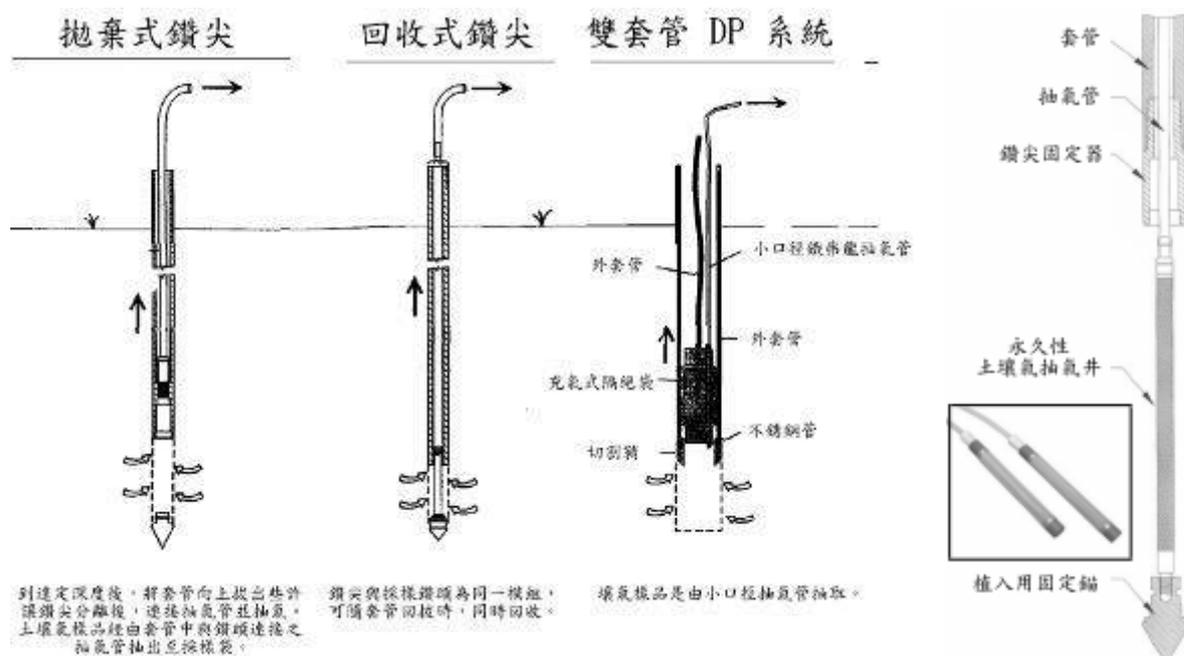
#### 一、原理

土壤氣體經常被應用於初步的場址調查，特別是在受揮發性有機物污染的場址，本指引第 4.3 節將針對「土壤氣體」調查目的、原理與方法專節說明，故於本節僅就直接貫入技術與其相關之土壤氣體採樣 (Soil gas sampling) 設備加以說明，對於「土壤氣體」較不熟悉的讀者，建議先參閱「土壤氣體」一節。直接貫入式的土壤氣體採樣形式，依照其採樣頻率的需要，可分為即時採樣與設置永久性土壤氣體採樣井二種方式，即時採樣的鑽頭是所謂的「後接管系統」(Post-Run Tubing, PRT)，其不同的結構如圖 1.2.2-1 所示，其中以單套管之拋棄式鑽頭者最常被使用。永久性土壤氣體採樣井通常是以不銹鋼材質製成，適用於有長期監控需求之場址，其結構亦如圖 1.2.2-1 所示。利用相同的套管系統，即可進行植入的工作，採樣井直接於尾端連接抽氣管(類似於 PRT)，鑽尖則直接用於貫入過程，當到達預定深度後，將採樣井推出

固定器，並壓入土壤中固定，再將套管拔出即可。永久式的土壤氣體採樣井尚可做為曝氣井與地下水採樣井。

## 二 適用時機與環境介質

通常土壤氣體之採樣深度需求多為淺層(地下1公尺至3公尺)的初步調查篩選工作，在淺層地下管線、儲槽下方，或是地下水位以上的不飽和層採樣機會較大，在地質條件允許下，手動鎚擊器即可適用做為土壤氣體的採集工具。但若是遇到礫石、黏土等地質條件較為堅硬的情形，手動鎚擊器較為費時，則可採用動力式貫入設備。在場址內無特殊阻礙且貫入載具可移動方便，亦可以採用中小型貫入系統載具進行淺層的土壤氣體採樣工作。



參考資料：Kejr. Inc. Geoprobe System (<http://www.geoprobe.com>)

圖 1.2.2-1 PRT、雙套管即時土壤氣體採樣與永久土壤氣體井示意圖

## 三、設備需求

在貫入設備部分可利用各種貫入設備，包括各種重力及動力式設備等。至於在套管部分，則以單套管為主，而圖 1.2.2-1 所示之各類型鑽頭均可搭配使用。除非遇到非常特殊的地質情況，一般而言，以拋棄式鑽尖的使用性較高，其一方面可以減少因鑽尖重複使用而必須進

行除污的程序，提高作業的效率，另一方面，可降低交叉污染的可能性。

#### 四、工作程序

首先選擇適當之土壤氣體採樣鑽頭，連接於套管末端，並以推進系統將採樣鑽頭貫入地表下，持續連接套管直到採樣鑽頭到達預定之深度。到達預定深度後，將適當長度之採樣管與連接器伸入套管中，直到接觸到採樣鑽頭後端之連接處，並藉由採樣管的轉動將連接器與採樣鑽頭連結。接著將套管回拔些許以使鑽尖脫落(拋棄式)或與套管分離(回收式)，並利用抽氣泵浦將土壤氣體抽出至採樣袋中。採樣完成後，將採樣管以同樣旋轉的方式，使其與採樣鑽頭分離後，將套管陸續拔出。

#### 五、成本分析

土壤氣體的採樣多為淺層，成本上較經濟，若以單一土壤氣體採樣而言，成本約在新台幣 2,000 元上下。雖然土壤氣體樣品的採集過程，貫入機具非必要性設備，但若需使用貫入機具，則仍需加上移機或設備運送的費用。

#### 六、工作注意事項

除一般貫入系統的注意事項外，當在主要污染區進行土壤氣體採樣工作時，其土壤中可能具有高濃度的污染物，必須加以注意妥善處理。同時，不論以正壓式或是負壓式採集土壤氣體樣品，雖然採樣人員直接接觸或吸入高濃度污染氣體樣品之可能機會較小，仍建議採樣人員均必須注意有接觸到高濃度土壤氣體的機會。必要時，在高污染區進行採樣作業時，應戴上防護面具，避免吸入性傷害。

### 1.2.3 地下水採樣

#### 一、原理

用於直接貫入之地下水採樣用的鑽具相當多元，簡單的依照可使用時間加以區隔，有下列 3 種：

(一) 可以用於單次採樣，樣品採集後隨即封孔的即時採樣

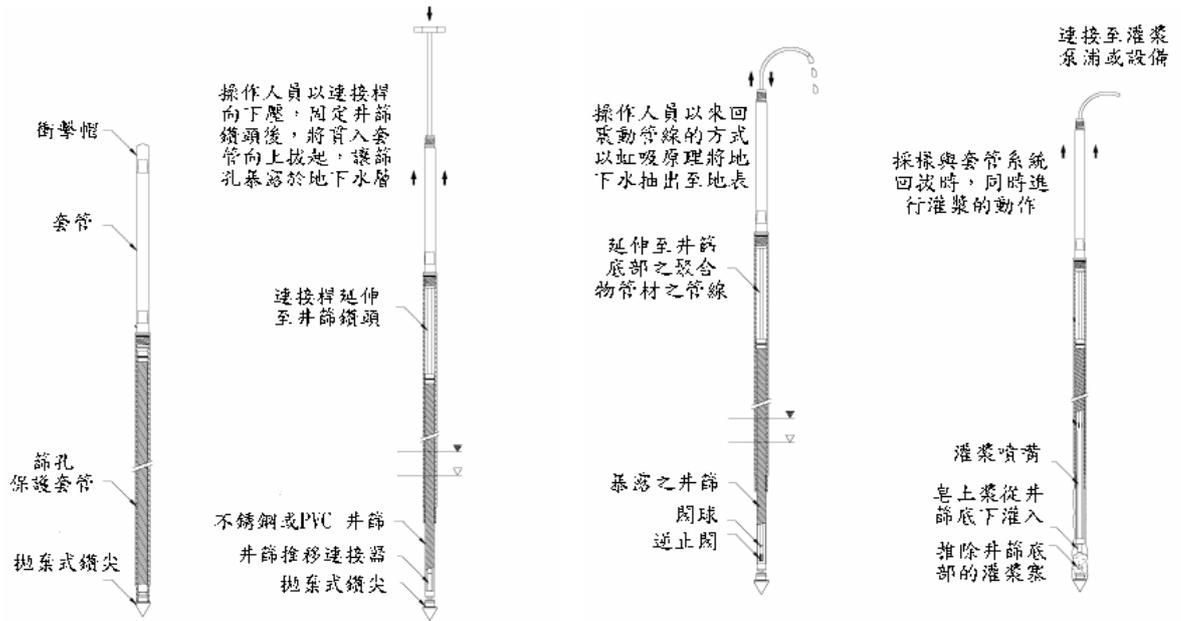
(二) 可將採樣工具留置於地下數日，並採集數次樣品

(三) 設置簡易監測井，允許採樣工作可延續數月或數年

即時採樣之工具多為有開篩的不銹鋼鑽頭，依據 ASTM 的分類 (ASTM, 1996)，直接貫入的地下水即時採樣工具亦可分為開放式篩孔與封閉式篩孔採樣器。前者在貫入過程中，具備井篩功能之鑽頭直接與土壤接觸，並未有套管保護，到達指定深度後即可利用抽水泵浦或貝勒管進行採樣，是一項操作簡單並適用於採集抓樣 (grab sample) 的工具。由於貫入過程中篩孔是暴露於外，所以有造成篩孔堵塞與交叉污染的可能性，特別是穿過不同污染地層的時候。

此外，如果是用於既有鑽孔之採樣，鑽頭與延伸井管 (riser) 均可能會充滿原鑽孔中之地下水，因此採樣前應該先以高壓灌水或其他方式清洗井篩。後者則在貫入過程中將具篩孔之鑽頭密封保護於套管中，在到達預定深度後，將套管向上拉起，再讓篩孔暴露於地下水層，然後以抽水泵浦或貝勒管進行採樣，可彌補開放式篩孔的部分缺點。完成採樣後可再以灌漿設備直接在套管拔出過程中，完成封孔的動作，完整的工作方法如圖 1.2.3-1 所示。

安裝簡易監測井採集地下水樣品的方法，可採用單套管與雙套管系統，其基本的結構如圖 1.2.3-2 所示。簡易井的安裝提供一個可以進行較長期或多次採樣的獨立採樣區域，但受限於其直徑，採樣時多採用具逆止閥之虹吸管、小型貝勒管或蠕動泵浦，而無法以標準地下水採樣方法進行。

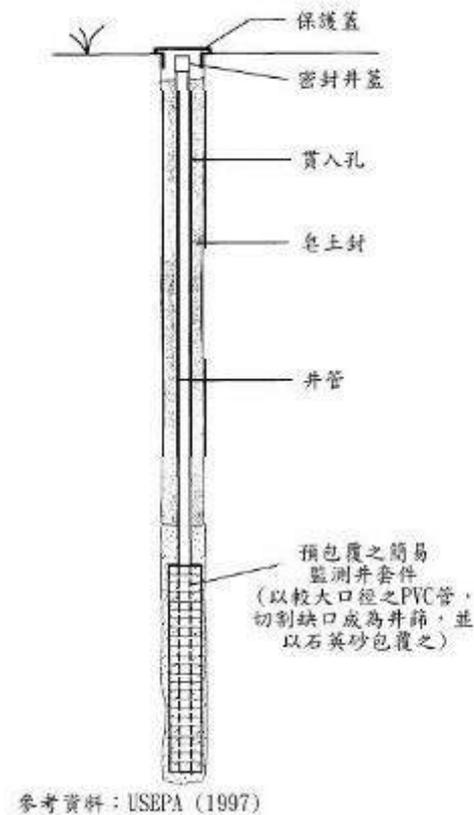


資料來源：Geoprobe System-SP15&SP16 Groundwater Sampler

圖 1.2.3-1 封閉式篩孔之地下水即時採樣示意圖

二、適用時機與環境介質

各式鑽頭的適用時機，是依照採樣需求而有所不同。以即時採樣為目的可選擇開放式或封閉式井篩的地下水採樣鑽頭，若是涉及較長時間之採樣需求(如中長期監測)則可選擇安裝簡易監測井。由於地下水即時採樣必須將套管設備貫入至地下水位以下(飽和層)，因此一般手動鏈擊器較不適合做為貫入工具，貫入工具的限制(如地質、深度)可參考貫入系統一節。



資料來源：USEPA (1997)

圖 1.2.3-2 簡易監測井結構示意圖

### 三、設備需求

在貫入設備部分可利用各種貫入設備，包括各種重力及動力式類型設備等。至於在套管部分，如圖 1.2.3-1 所示之各類型設備均可使用，除非遇到非常特殊的地質情況，一般以拋棄式鑽尖的利用性較高，一方面可以減少因鑽尖重複使用而必須加以清洗、確認空白後才能再使用所造成的不便，一方面可以增加作業的效率，並確保避免鑽尖於重覆使用時造成交叉污染的可能性。而另一方面，雖然封閉式篩孔地下水即時採樣於場址調查時常被利用，但是在場址模場試驗、整治期間，有時候為了能使監測井能夠重覆採樣使用，簡易監測井之設置往往成為較好的選擇。

#### 四、作業程序

地下水即時採樣的作業程序大致分為貫入、配置、採樣與封孔等四項主要步驟，並依此說明如下，同時請參考圖 1.2.3-1 做為輔助。首先藉由貫入設備將之鑽頭貫入至適當之深度。將鑽頭中的井篩壓住固定，同時將套管回拔，由於井篩本身被固定於特定深度，將套管回拔後，即將鑽頭中的井篩暴露於地下水層。第三步驟即進行採樣的工作，最簡單的方法是採用逆止閥搭配虹吸管採樣的方式(如圖 1.2.3-1)，但要採集較完整的樣品仍以使用氣囊式或蠕動式泵浦以及迷你貝勒管較佳。採樣完成後，即進行最後的封孔工作，此步驟首先將井篩管底部的灌漿塞使用連接桿推除後，採用灌漿噴嘴伸入底部，接著在套管拔出的同時，以高壓灌漿設備，將皂土漿打入，並隨著套管的拔出持續灌漿，待套管完全拔出後即完成封孔的工作。

若是採用預包覆之監測井，首先將監測井置於鑽頭套管內，並在貫入過程中，每增加一段套管的同時，即於套管內增加一段井管(riser)，直到貫入至預定之深度。配置階段則是先壓住井管以固定底部預包覆監測井的位置，將套管回拔至監測井井篩頂部的同時，逐步由套管與井管之間隙倒入濾料(20/40 細砂)，填充井篩與土壤之間的空隙，當濾料填充至井篩頂部上方約 60 公分處，逐步由套管與井管之間隙倒入皂土，以於井管週邊形成皂土封(厚度應大於 60 公分)，最後將套管完全拔出即完成設置工作，其完成之結構請參考圖 1.2.3-2。其採樣的方法則同樣可以採用逆止閥搭配虹吸管採樣、使用氣囊式或蠕動式泵浦或迷你貝勒管。另詳細之設置規範亦可參考 ASTM Method D 6725。

#### 五、成本分析

目前國內多傾向設置簡易監測井做為直接貫入的地下水採樣方法，主要是單一採樣成本較低，特別是在需要較長期採樣的場址。簡易監測井(1 英吋)淺層設置費用在新台幣 15,000 至 20,000 元之間，較深層之成本將會依據深度而有所差異，包括井管、皂土封等的耗材費用亦會使費用隨深度變動。至於採樣方法上多以小型貝勒管或蠕動式泵浦為工具，成本上較一般標準採樣方法低。

## 六、工作注意事項

(一) 即時地下水採樣中的開放式篩孔採樣鑽頭，有一些在採樣時必須認知與注意的事項，包括：

1. 可能造成浮油層的洩降而污染土壤與井篩中的地下水；
2. 雖然可以用在地下水多層(multi-level sampling)採樣，但有可能造成不同層之地下水樣品交叉污染。
3. 貫入過程經過土壤時井篩被阻塞；
4. 由於洩降與阻塞的考量導致需較長時間的洗井動作；
5. 井篩段因開孔的關係結構上較為脆弱。

(二) 即時地下水採樣中的封閉式篩孔採樣鑽頭，有一些在採樣時必須認知與注意的事項，包括：

1. 較適合一次單一深度的地下水樣品之抓樣工作，尤其適合包括粗砂等含水層地質，地下水傳導速率較高，流動速率較快，可以快速補集到地下水樣品。
2. 若是以封閉式篩孔採樣器進行多層(multi-level sampling)採樣時，必須須搭配採用單套管系統，但因單套管在取樣後必須抽回，這個動作有可能造成交叉污染，因為土壤中地洞仍存在，可能造成土壤層污染物的向下移動，而導致污染地下水。

### 1.2.4 土壤採樣

#### 一、原理

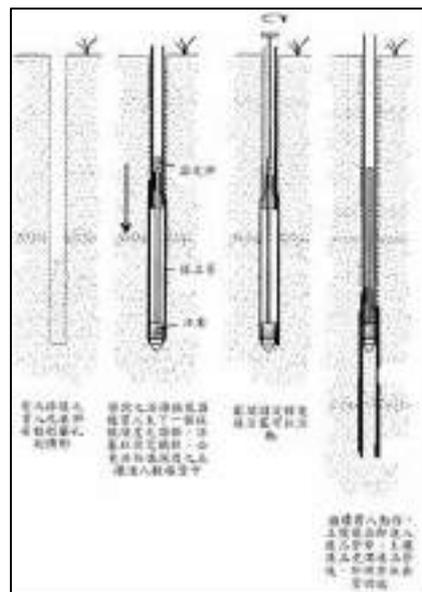
直接貫入技術的土壤採樣方法包括劈管採樣器(Split - barrel sampler)、活塞式採樣器(Piston rod soil sampler)與薄管採樣器(Thin-Wall Tube Samplers)，其中又以活塞式採樣器的應用較為廣泛，其示意圖如圖 1.2.4-1 所示。活塞式採樣器的結構允許將土壤樣品封存於樣品管中，可用於採集不受擾動與連續深度的土壤樣品。現今的活塞式採樣器中多已使用內襯管，而內襯管的材質包括塑膠管、鐵氟龍管與金屬管(銅管或不鏽鋼管)，有關不同材質於採樣時機的適用性，以及土壤採樣之方法，我國本署已公告標準作業方法，對於使用限制

及耗材設備，均有詳細之規範，可參考本署環境檢驗所公告之土壤採樣方法(NIEA S102.64B)。另外，由油品類污染物如 LNAPL、BTEX等屬於有機類之污染，樣品採集之後相關保存方法詳土壤檢測方法總則(NIEA S103.61C)。

二、適用時機與限制

由於油品類污染有可能產生 VOC(如 BTEX 等)及 SVOC，根據我國土壤採樣方法(NIEA S102.64B)規範，對於 VOC 污染物，包括劈管採樣法、活塞式採樣法、雙套管採樣法、薄管採樣法等均適用，SVOC 污染物則除了上述 VOC 適用之方法外，還可以適用手動採樣方法。而各種地質條件適用之採樣方法詳表 1.2.4-1 所示。

較常被採用的活塞式採樣的優點是，這種推進方法，可提高土壤樣品之回收率，亦即土壤樣品充滿樣品管或內襯管的量多於劈管式與薄管式。另外，隨著應用需求之不同亦有不同的結構，例如採集特定深度之抓樣(grab sample)時，可採用直徑較小與樣品管較短之組合，如果是採集連續土層樣品，則傾向於使用直徑較大與樣品管較長之組合。若採集於內襯管之土壤樣品涉及揮發性有機物的分析(如油品類)，則於襯管取出後立刻將襯管二端以襯管蓋密封，可降低分析物揮發損失。



資料來源：USEPA (1997a)

圖 1.2.4-1 活塞式土壤採樣鑽頭示意圖

表 1.2.4-1 土壤採樣方法適用之地質特性

地質特性 採樣器具	黏土層	粉土層	砂土層	湧砂含水層	礫石層	一般土壤特性
劈管採樣器	√	√	√	X	○	√
活塞式採樣器	√	√	√	√	√	√
雙套管採樣器	√	√	√	○	○	√
薄管採樣器	√	○	○	X	X	○
採樣鏟或手動式土鑽採樣組	X	√	√	X	○	√

註：1.依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：√ 屬「推薦使用」，○ 屬「適用」，X 屬「不適用」。  
2.參考資料：我國環管署土壤採樣方法(NIEA S102.64B)。

### 三、設備需求

直接貫入之土壤採樣相關設備主要包括樣品管、可回收鑽尖(請參考圖 1.2.1-3)以及固定桿。依據採樣需求與土壤特性，在樣品管中亦可置入 PE/PP 薄管或銅管做為內襯管以利樣品的收集。

此外現場應具備適當的除污設備(如高壓沖洗機或設置除污專區)，以利設備之除污需求。

### 四、作業程序

直接貫入的土壤採樣方法主要是以內襯管搭配活塞式採樣鑽頭為主，以下之說明請同時參考圖 1.2.4-1 的說明。首先組合採樣鑽頭，將鑽尖放入樣品管中，然後將適當材質之內襯管置入鑽頭樣品管內，接著置入固定桿，鎖定後即組合完成。利用貫入系統將採樣鑽頭貫入至欲採樣深度的頂部，接著以連接桿伸入套管內將固定桿鬆開，然後持續貫入之動作。

此時活塞(鑽尖)不再處於固定狀態，所以貫入時隨著採樣鑽頭前進的動作，土壤樣品進入樣品管或內襯管中，並將鑽尖向後推移，直到土壤樣品充滿採樣管為止。依據樣品管的長度，將採樣鑽頭貫入至適當深度後，開始回拔的動作，最後取出內襯管進行樣品保存的動作，包括封管、切管與分樣等。

### 五、成本分析

一般直接貫入的土壤採樣費用是依照貫入深度為基準，另因場址規模、地質狀況與採樣數量的多寡亦會影響單位成本。一般而言，單

一樣品深度在 5 公尺以內費用約 2,000 元(新台幣)/每公尺，5 公尺以上的費用則略高 3 至 4 成。此項費用不包括設備搬運與鑽機移機費用、特殊耗材或特殊地質條件等，以上各項成本會依據場址的特殊條件而變動。

## 六、工作注意事項

直接貫入方式進行土壤採樣注意重點事項如下：

- (一) 為確保採樣樣品之品質應採取適當之品管樣品，依各採樣計畫之需要應有品管樣品併行，品管樣品因目的不同分述如下：野外重覆樣品(Field duplicates)、野外空白(Field blank)、設備空白(Equipment blank)、運送空白(Trip blank)。
- (二) 採樣完畢後，若現場挖出之棄土無污染採樣孔或採樣坑之虞(例如含污染物的棄土不能回填至未污染層)，應將現場挖出之棄土回填並夯實；若棄土無污染之虞但未能完全回填，或挖出之棄土有污染之虞，則應以細砂或細砂及皂土交替灌滿所有鑽孔，並保持工地之清潔及整齊，後者之棄土應與受污染土壤一併處理。採樣人員應依據工作計畫，於施工後將工作場所修補或復原。
- (三) 若以採樣襯管裝待測揮發性有機化合物樣品時，襯管需儘量充滿樣品，不作其他會擾動樣品的處理，並套上鐵氟龍封帽或內置鐵氟龍膜的塑膠封帽，於封帽邊緣包裹鐵氟龍止洩帶及如石蠟(paraffin)封口膜之密封物，以確保密封。分析時保留部分土壤樣品以供水份含量測定用。
- (四) 除污是為減少土壤樣品間的接觸與相互污染的可能，在採樣前、後徹底清洗採樣系統各部零件。與樣品接觸的土鑽採樣元件、銅管或不鏽鋼襯管等於使用後須更換或清理乾淨，方能重複使用。清洗方法為先用毛刷或鋼刷將附著的土壤刷除(以目視判定)(若採集待分析有機成份土樣時，尚需以無磷清潔劑、或有機溶劑(丙酮及正己烷)、或熱水清洗)，最後以去離子水或不含待測物的試劑水潤洗之，風乾後以塑膠袋、鋁箔或 PVC 膜包裹備用，襯管兩端則需套上封帽。

## 1.2.5 地電阻直感鑽頭

### 一、原理

直接貫入法亦可搭配多種特殊鑽頭進行現場篩選分析的工作，此類鑽頭的發展相當快速，許多目前仍在試驗階段。本指引將以較成熟且常用於現場調查之現場鑽頭為主。

電子錐貫入試驗(Cone Penetration Test)是利用測試土壤對於貫入力量的回應來測定地下土壤分層特性的一種方法。在大地工程之地質調查中，為一種簡單、快速、可靠及經濟的調查方法，其結果可求得垂直連續地層剖面，有助於深入瞭解地層結構的特性，對於新生地特有的軟弱夾層可完整記錄，是探查新生地土層性質最理想的方法。其應用深度多在 15 至 30 公尺之間，特殊情況下(軟質未固結沉基層)則可達 90 公尺。一般而言，包含除污與封孔的動作，每日可執行的工作量在 30 至 90 公尺，如果沒有除污(仍須封孔)的動作則工作量可達 2 倍左右。當然，如果場址本身地形造成進出受限或是同時進行各種採樣工作，則工作完成量會降低。

傳統上，電子錐貫入試驗的載具都較笨重，但隨著技術的發展，也可採用直接貫入所使用的中小型載具，不僅在活動力上增加，同時成本效益也更高。電子錐貫入試驗的是將壓力感知器等裝置於鑽尖或直接貫入套管中(圖 1.2.5-1)，以量測貫入過程中的土壤阻力或其他性質，常用的感知器包括壓力感知器(piezocone)、摩擦套管(friction sleeve)與核子紀錄器(nuclear logging tool)以及 pH 量測器(pH indicator)。對於地下環境中石油碳氫化合物的種類與位置的量測，近來也有相當多的創新技術，包括雷射引發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)與油品螢光偵測器(Fuel Fluorescence Detector)。感知器的電子訊號則由連接於鑽頭的訊號線(圖 1.2.5-1)經套管系統傳至地面上的紀錄器或電腦。此外，也有利用聲波傳遞訊號者而成為無線傳輸的圓錐貫入試驗鑽頭(圖 1.2.5-2)。



資料來源：USEPA (1997a)

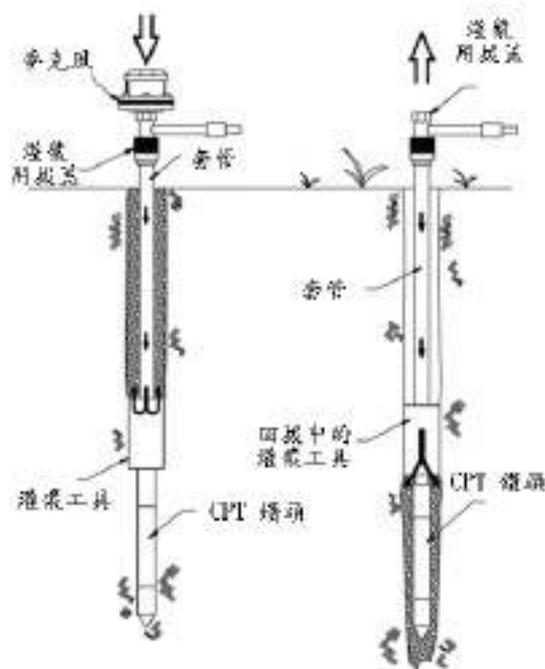
(a)



資料來源：Mayne, P.W. (2005)

(b)

圖 1.2.5-1 電子錐貫入試驗鑽頭示意圖



資料來源：Geoprobe System (2005)

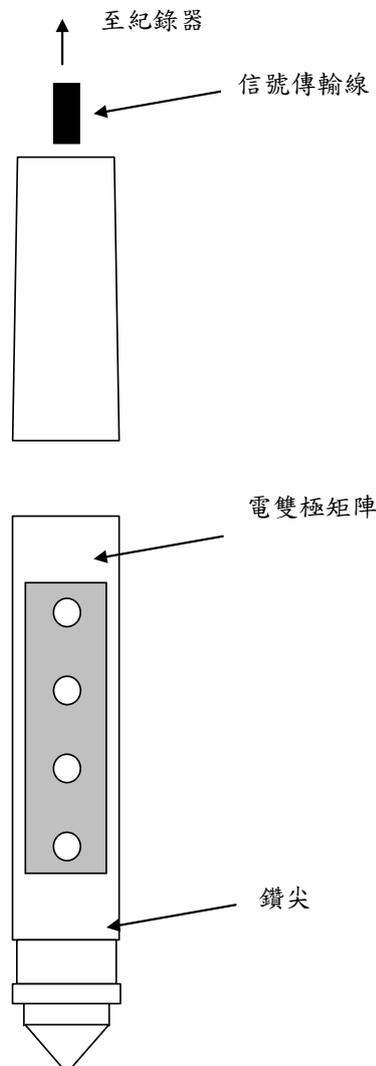
圖 1.2.5-2 無線傳輸電子錐貫入鑽頭

地導電度或地電阻(Electrical Conductivity, EC)鑽頭可以直接量測地層或地下環境土壤的電導度或電阻，其構成如圖 1.2.5-3 所示。這種量測早已被用於土壤分類上，其主要原理是當地質屬於較細顆粒的未固結沉積物(如粉土、黏土)時，由於黏土通常具有較高的正電荷，就會產生較高的電導度，而砂質土與礫石則相對具有較低之導電度。

本方法最好可以進一步以採集土壤岩心的方式(連續或分段)加以

確認，因為導電度亦可能是由其他條件所造成(例如水分、土壤密度、礦物質與污染物)。

此外，由於地下水會提高電導度，因此當到達飽和層時，於已知導電度之地質區域，地下水位通常可以由明顯的導電度增加且對比強烈的趨勢區分出來。類似於前述的情形，導電度量測偶爾也可以顯示碳氫化合物的污染，特別是在有大量的殘留相(residual phase)或浮油(free product)存在於高導電度地層(如黏土層)時，因為碳氫化合物是屬於導電度較差者。



重繪自 Kejr. Inc. Geoprobe System (<http://www.geoprobe.com>)

圖 1.2.5-3 地電阻量測鑽頭

## 二、適用時機與限制

當污染場址地質、水文環境、污染分布等情形不明確，或是場址初步調查初期的情形之下，適合利用本項技術進行場址地下環境分布之確認工作，惟對於地電阻之量測分析數據解讀等，必須由有經驗的專業人員以及輔助以其他數據研判。

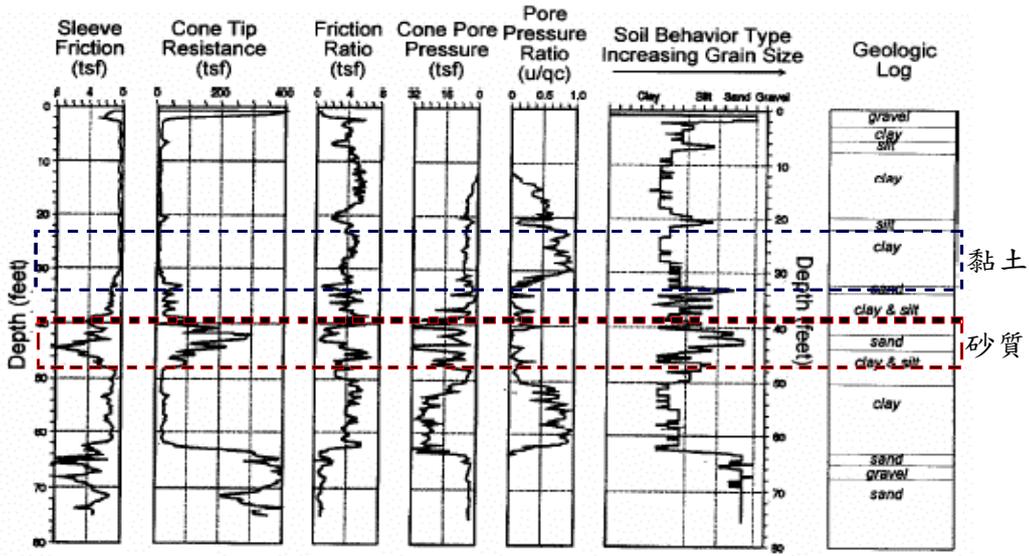
## 三、設備需求

有關貫入設備部分與第 1.2.1 節所述之設備內容相同，但有關鑽頭部分最常用的電子錐是三通道電子錐(three-channel cone)，可以同時量測鑽尖阻力、套管摩擦力與電子錐於地下的傾斜度。

## 四、作業程序

三通道電子錐(three-channel cone)可以同時量測鑽尖阻力、套管摩擦力及電子錐於地下的傾斜度。不論是電子錐或後續將會提到的各種特殊直感式鑽頭，其貫入過程並未有前述各種採樣方法的繁複步驟，最重要的是過程中記錄器所收集之資料的解讀，因此在工作方法的部份，將會以數據解讀為重點。

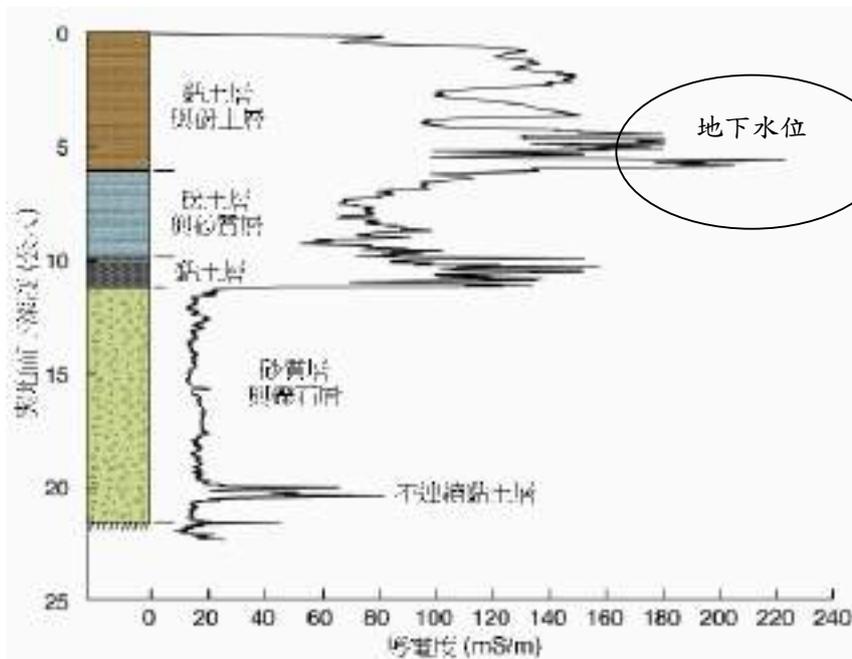
三通道電子錐會同時紀錄鑽尖阻力(tip resistance)、套管摩擦力(sleeve friction)與電子錐於地下的傾斜度(inclination)，其紀錄資料如圖 1.2.5-4 所示。套管摩擦力對鑽尖阻力的比值稱為摩擦比(friction ratio)，可用於解讀貫入過程中所遇到的土壤特性。一般而言，砂質土壤具有較高的鑽尖阻力與較低之摩擦比，而粘土質土壤則具低鑽尖阻力與高摩擦比(見圖 1.2.5-4)。依此特徵可用於估計地層的水力傳導係數(hydraulic conductivity)，且利用圓錐貫入試驗所獲得的地質分層解析度可達 10 公分以內，足以提供相當完整地質狀況的資訊。



資料來源：USEPA (1997a)

圖 1.2.5-4 典型的圓錐貫入試驗資料紀錄

量測地下環境之地導電度可用於初步判斷地下環境的岩層結構，其典型的資料紀錄如圖 1.2.5-5 所示。該圖中可以明顯的看出其區別，另外在黏土層接近砂土/砂質層之間，有一明顯的高導電度訊號，則應是地下水位所在。



資料來源：Butler et al. (2000)

圖 1.2.5-5 典型的 EC 資料紀錄

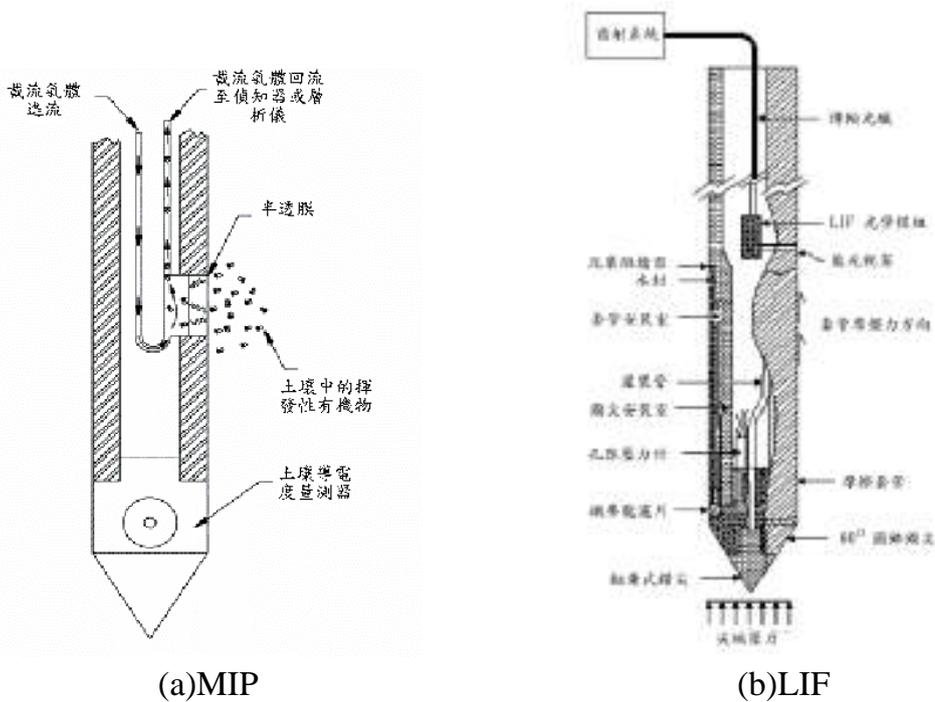
五、工作注意事項

地導電度的量測結果應再搭配其他資訊(如歷史地質資料、土壤採樣)確認岩層結構較為恰當。

1.2.6 薄膜界面鑽桿

一、原理

化學性的直感式工具可以提供對特定深度的油品碳氫化合物篩選等級之分析數據，而且可直接貫入量測，不需進行土壤或地下水採樣。在較廣大的範圍中密集使用此類的篩選工具，可以快速的描繪出場址地下環境或污染源區域之三維特性。具化學性的感知器的鑽頭種類相當多種，而且隨著直接貫入技術的開發腳步，功能性鑽頭也不斷的推陳出新，目前較常用的包括薄膜界面鑽管 (Membrane Interface Probe, MIP)以及雷射引發螢光偵測器(Laser Induce Fluorescence, LIF)，其構成如圖 1.2.6-1 所示，以下就薄膜界面鑽管作詳細說明。



資料來源：USDOE (1996)

圖 1.2.6-1 MIP 與 LIF 直感鑽頭結構

薄膜界面鑽管設備的主要組成包括載流氣體管線、密閉室、加熱系統以及半透膜，而載流氣體管線的末端則可連接至一般的 ECD、PID、FID 偵測器或氣相層析儀。半透膜本身則嵌入不鏽鋼鑽頭表面，並通常會加熱至 100 至 120°C，土壤(或地下水)中的揮發性有機污染物經過半透膜進入密閉室，並由載流氣體將污染物帶至地表的偵測器進行分析定量。此種鑽頭得以提供場址調查取得與深度對比的有機污染物相對濃度，且是連續性的紀錄，也因此藉由適當的網格規劃，可以清楚描繪出場址之三維污染濃度分布。目前亦有將 EC 整合在一起的特殊鑽頭，可以進一步提供同時評估土壤物理特性的資訊。

## 二、適用時機與環境介質

在較廣大的範圍中密集使用此類的篩選工具，可以快速的描繪出場址地下環境或污染源區域之三維特性。當污染場址污染分布情形不明確，或是在場址初步調查初期的情形之下，適合利用本項技術進行場址地下環境分布之確認工作。本技術適用於具有揮發性的污染物質的分析，對於非揮發性有機污染物或低揮發性有機污染物之鑑定作用可能較差，而且若地下環境中存在有浮油層，亦有可能造成浮油附著於鑽桿上，而造成即時分析上的誤差。

## 三、設備需求

有關貫入設備部分與第 1.2.1 節所述之設備內容相同。MIP 連接之分析設備包括 ECD、PID、FID 偵測器或氣相層析儀，分析儀器為配合現場作業之移動性，大部分設計成可以裝設於移動式的車輛中。

## 四、作業程序

MIP 系統之操作步驟如右圖所示，其執行重點包括：

- (一) 貫入 MIP 鑽頭前，應確認鑽機腳架是否固定，以確保垂直貫入。
- (二) 貫入 MIP 鑽頭前需先進行半透性薄膜之透氣性測試，並於加熱至 121°C 後方可貫入。
- (三) 貫入施作過程中注意維持等速及等溫，貫入速度不宜過快，搭配 EC 者另應注意土壤孔隙導電度變化，如遇導電度突然升高現象

應注意是否遭遇黏土層，避免貫穿造成污染擴散。

(四) 現場工程師必須依分析顯示污染物濃度調整 MIP 驅動軟體之顯示範圍。

(五) 透過所製作之檢量線，可將 MIP 所得電壓訊號轉換為污染物濃度

## 六、成本分析

國內採用 MIP 進行調查的費用大致 3,000 至 5,000 元(新台幣)/每公尺之間，但亦會隨所調查的深度與後端所使用的分析儀器而有所差別。部分廠商之調查費用則會以單孔的計算，則每公尺的平均費用會較低，這些費用未包含貫入機具的移機與設備搬運費與特殊耗材等的變動成本。

## 六、工作注意事項

(一) MIP 調查技術適用於具有揮發性的污染物質的分析，對於非揮發性有機污染物或低揮發性有機污染物之鑑定作用可能較差。

(二) MIP 僅為快速初篩之調查工具，建議仍應透過適當之佈點規劃，搭配必要之傳統採樣分析方式，方能準確掌握污染物濃度。

(三) MIP 鑽頭用於存有浮油相的地下環境時，必須注意鑽頭貫入速度與數據的解讀，因為在鑽頭經過浮油層時，往往會有浮油附著於管壁甚至半透膜上，且加熱溫度會在進入地下水層時下降許多，導致附著之浮油持續擴散通過半透膜，形成「拖尾」的現象，而造成誤判(高估)浮油厚度或地下水中污染物濃度分布的情形。

(四) 存有浮油場址亦常發現污染物殘留於載流管造成連續檢測時的交叉污染，欲於現場鑑別此現象是否發生，可在每一次量測之前，進行一次的系統空白量測。或延長 MIP 鑽頭於特定深度的停留時間，再以地面上的偵測器確認濃度達到平衡之後，再向下一個深度貫入，以避免資料誤判。此外載流管線的部分亦可考慮以 PEEK 聚合物取代鐵氟龍材質的管線。

(五) MIP 之貫入進尺方式建議以直壓方式進行，過度採鉗擊方式進行將影響鑽頭之使用壽命。

## 1.3 土壤氣體

### 一、原理

土壤氣體分析系統是一套整合性設計，用來分析土壤間隙氣體中所含之污染物質，並且是以不飽和層為主。土壤氣體篩選技術對找尋高蒸氣壓、低水溶解度、低分子量有機污染物(如氯化有機物及石油碳氫化合物)最有效。其應用時機與採樣方式必須對污染物在不飽和層的移動原理有所了解，其移動方式則通常應考量污染物的物化特性、地質狀況、生物降解性等。一般土壤氣體採樣分析之適用條件如表 1.3-1 所示。

以污染物之物化特性而言，應用時要考量污染物的蒸氣壓與亨利常數。蒸氣壓是指污染物揮發的難易度，蒸氣壓越高表示越容易揮發，越適合採用土壤氣體量測。一般而言，要使用主動式(active)土壤氣體採樣分析，原則上污染物的蒸氣壓必須高於 0.5 mm-Hg，有時候也可以偵測到具有較低蒸氣壓之污染物，惟其他條件需同時配合(如土壤中污染物濃度高或地質透氣性佳)。表 1.3-2 列舉與油品相關之單一成分物化特性。

由於油品為一種混合物，雖然可以藉由簡單平均(simple averaging)、成分基準平均(composition-based averaging)以及相對沸點指標相關性(correlation to relative boiling point index)等方法估計(Gustafson et al., 1997)，一般油品的蒸氣壓多以區間表示，表 1.3-3 中即為國內油品供應商之油品蒸氣壓化學特性。如果水中有溶解相之污染物則需考量污染物之亨利常數。亨利常數是代表污染物在空氣中與水中濃度分配的狀況，雖然亨利常數依單位有不同的表示方法，最常用的是無因次的亨利常數(氣相中之污染物濃度除以水相中之污染物濃度)。當此常數大於 1 時，表示污染物比較傾向於存在於氣相，反之(即小於 1)則比較傾向於存在於水相中。一般而言，亨利常數大於 0.1 的污染物即可用主動式土壤氣體採樣分析偵測。至於其工作方法則以利用直接貫入工具的最為普遍。

表 1.3-1 土壤氣體的適用原則

條件特性	適用條件
污染物蒸氣壓	> 0.5 mm Hg
污染物之亨利常數值	> 0.1
土壤水分或飽和度	< 80%
取樣點之條件	沒有黏土

表 1.3-2 油品單一成分物化特性

組成化合物	對等正烷類碳數(1)	原子量	水中溶解度 (mg/L)	蒸氣壓 (atm)	亨利常數 (atm·m <sup>3</sup> /mole 或 cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	log K <sub>ow</sub> (2)
Benzene	6.50	78.11	1780	1.25x10 <sup>-1</sup>	2.25x10 <sup>-1</sup>	2.13
Toluene	7.58	92.13	515	3.75x10 <sup>-2</sup>	2.74x10 <sup>-1</sup>	2.69
Ethylbenzene	8.50	106.2	152	1.25x10 <sup>-2</sup>	3.58x10 <sup>-1</sup>	3.13
m-Xylene	8.60	106.2	160	1.09x10 <sup>-2</sup>	2.95x10 <sup>-1</sup>	3.20
p-Xylene	8.61	106.2	215	1.15x10 <sup>-2</sup>	2.33x10 <sup>-1</sup>	3.18
o-Xylene	8.81	106.2	220	1.15x10 <sup>-2</sup>	2.28x10 <sup>-1</sup>	3.15
Styrene	8.83	104.14	300	7.90x10 <sup>-3</sup>	1.23x10 <sup>-1</sup>	3.05
Isopropylbenzene	9.13	120.2	50	3.75x10 <sup>-2</sup>	5.92x10 <sup>-1</sup>	3.63
n-Propylbenzene	9.47	120.2	52	4.44x10 <sup>-3</sup>	4.20x10 <sup>-1</sup>	3.69
1-Methyl-3-ethylbenzene	9.55	120.2		3.86x10 <sup>-3</sup>		3.63
1-Methyl-4-ethylbenzene	9.57	120.2	95	3.90x10 <sup>-3</sup>	2.02x10 <sup>-1</sup>	3.63
1,3,5-Trimethylbenzene	9.62	120.2	50	3.21x10 <sup>-3</sup>	3.15x10 <sup>-1</sup>	3.58
1-Methyl-2-ethylbenzene	9.71	120.2	75	3.26x10 <sup>-3</sup>	2.14x10 <sup>-1</sup>	3.63
1,3,4-Trimethylbenzene	9.84	120.2	57	2.66x10 <sup>-3</sup>	2.30x10 <sup>-1</sup>	3.60
t-Butylbenzene	9.84	134.22	30	2.82x10 <sup>-3</sup>	5.17x10 <sup>-1</sup>	4.11
Isobutylbenzene	9.96	134.22	10.1	2.47x10 <sup>-3</sup>	1.34	4.01
sec-Butylbenzene	9.98	134.22	17	2.37x10 <sup>-3</sup>	7.63x10 <sup>-1</sup>	4.10
1,2,3-Trimethylbenzene	10.06	120.2	70	1.97x10 <sup>-3</sup>	1.38x10 <sup>-1</sup>	3.55
1-Methyl-3-isopropylbenzene	10.09					4.10
1-Methyl-4-isopropylbenzene	10.13	134.22	34	2.01x10 <sup>-3</sup>	3.25x10 <sup>-1</sup>	4.10
1,3-Diethylbenzene	10.40					4.10
1,4-Diethylbenzene	10.46					4.10

註：1.相對於同碳數之正烷類的沸點比 2.K<sub>ow</sub>：正辛醇-水中分配係數

表 1.3-3 國內油品蒸氣壓

油品名	蒸氣壓
92 無鉛汽油	258 – 774 mm-Hg
95 無鉛汽油	
98 無鉛汽油	
高級柴油	2 mm-Hg @ 20°C
超級柴油	
燃料油	0.2 mm-Hg @ 20°C

對於揮發性低的污染物而言，可採用被動式的土壤氣採樣工具，該工具主要是將可吸附有機物之材質填充於小型吸附管中，再將該吸附管安置於淺層土壤中一段時間後(數日至數週)，取出至實驗室以加熱的方式使吸附之有機物自吸附管脫附，再送入適當之儀器(如氣相層析儀)進行定量。由於被動式的土壤氣體採樣法所需時間較長，並不符合所謂的快速場址調查技術之要求，惟考量各項技術之完整性描述，故仍納入本指引加以說明。

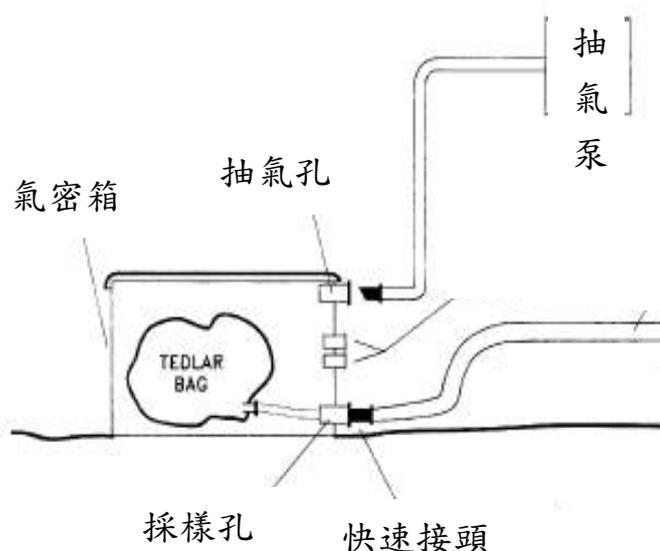
土壤氣體的量測結果屬於較定性的描述，其精細度隨末端所搭配的分析設備而有所差異。例如採用 PID 或 FID 可獲取綜合性的總石油碳氫化合物(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)的濃度，而採用氣相層析儀則可分析部分揮發性有機物之濃度(如 BTEX 與 MTBE)。

## 二、適用時機與限制

### (一) 主動式土壤氣體採樣法

主動土壤氣體採樣法的採樣系統主要是由中空套管與抽氣泵浦所組成，採用正壓抽氣的方式或以間接採樣箱(圖 1.3-1)的方式將土壤氣體抽至採樣袋(Tedlar bag)中。間接採樣箱的組成是採用抽氣的方式形成氣密箱的真空，當快速接頭連結採樣管時，以負壓的方式將土壤氣吸入採樣袋中，此種間接抽氣採樣的方法可以減少直接抽氣所可能造成的交叉污染或管線吸附損失。另外亦可使用不銹鋼筒，先行抽成真空，再將其與採樣套管連結或直接插入土壤中，以直接負壓的方式，將土壤氣體吸入鋼筒中。

土壤氣體分析儀則包括可攜帶式光離子偵測器(Photoionization Detector, PID)、火燄離子偵測器(Flame Ionization Detector, FID)、紅外線偵測器(Infrared Detector, IR)、呈色管(Colorimetric Tube, CT)、氣相層析儀(Gas Chromatography, GC)。其中光離子偵測器、火燄離子偵測器可以用來檢測揮發性有機化合物；紅外線偵測器可以檢測甲烷、一氧化碳、二氧化碳、石油碳氫化合物、二氧化碳和氧氣，也可以使用在地熱的研究上；比色管可以檢測甲醇；氣相層析儀則視所安裝的偵測器而有不同的適用範圍。



資料來源：USEPA (1996)

圖 1.3-1 土壤氣體間接採樣箱之組合

在資料儲存部分，分析儀器通常具備儲存數據之功能，再利用資料傳輸功能下載至電腦進行分析。若使用氣相層析儀通常則可搭配個人電腦直接進行資料之儲存與分析。

一般而言，主動式土壤氣體採樣較適用於污染濃度較明顯之區域以及揮發性較高之污染物。

## (二) 被動式土壤氣體採樣法

被動式土壤氣體採樣法是讓土壤氣體在自然壓力下，吸附於疏水性材質上。在分析儀的部分與資料儲存系統部分則與主動式類似。惟在將樣品導入分析儀時必須採用適當的方法(如加熱)讓污染物由吸附材質上脫附。由於材質是疏水性的，可以防止水氣的干擾，且可利用控制吸附時間之長短，強化半揮發性有機化合物及化合物濃度很低時的檢測。

土壤氣體分析系統的一個主要限制是不能提供地表下污染物質的濃度，主動土壤氣體採樣系統也只能夠提供某一定點土壤氣體樣品的濃度。因為影響污染土壤氣體高低的因素很多，例如，自由流動的污染物、被土壤吸附的污染物、地下水或深層化石

燃料，因毛細現象而揮發的蒸氣等，要直接由土壤氣體關聯至土壤中甚或地下水中的污染物濃度是相當困難。

### 三、設備需求

土壤氣體分析系統主要是由土壤氣體採樣系統、土壤氣體分析儀、資料儲存系統所組成。主動式土壤氣體採樣系統包括貫入設備、套管以及集氣設備所構成，在貫入設備部分可利用第 1.2.1 節所述之各種貫入設備，包括各種重力及動力式類型設備等。至於在套管部分，如圖 1.2.2-1 所示之各類型設備均可使用。集氣設備如前述雖有採樣袋以及不鏽鋼桶等方式，但仍以採樣袋為最常見以及常用，除了取樣較快速方便之外，其可以搭配直接貫入法採取不同深度之土壤氣體，較以不鏽鋼桶插入土壤之方式，可以取得更多的場址資訊。

### 四、作業程序

#### (一) 主動土壤氣體採樣法

以鑽探設備鑽入或手動採集工具鑽出一適當孔穴(以 1~2 吋為宜)。將鐵氟龍管(外徑 1/8 吋)與具有開孔的鑽頭連接，置入鋼管(內徑 1/2 吋)中，以鑽探設備鑽至欲採樣深度後，以挖出之土屑覆蓋地表鑽孔，再將鋼管往上拉約 2 公分(或 10 公分)；或直接置入鋼管(外徑 1/2 吋以下)。再以適用之氣體抽吸設備，自動式或手動式真空馬達(Hand Pressure Pump)，抽取土壤間隙氣體，所抽之氣體可直接以攜帶式偵測器，於現場立即量測污染物的濃度數據，或是將氣體收集在 Tedlar Bag 採氣袋中再進行檢測。

#### (二) 被動式土壤氣體採樣法

同樣以鑽探設備鑽入或手動採集工具鑽出一適當孔穴，將吸附管置入孔穴中，依需求將吸附管置於孔穴中一段時間後，以吸附管取出器材將吸附管取出，再以熱脫附的方式將吸附於疏水性材質污染物釋放導入量測設備。

### 五、工作注意事項

(一) 進行應避免使用旋鑽式器具，以防止土壤團粒因旋轉而受到擾動

重組，其內含之土壤氣體逸散。

- (二) 土壤氣體較適用於砂質地層，應避免將抽氣口置於黏土層的位置造成抽氣困難的問題。
- (三) 採樣時，應注意現場環境之干擾及採集工具之交互污染。土壤氣體採樣設備：包括鑽頭、鑽桿、鐵氟龍管、及電鑽或撞擊鎚等，其他設備包括抽氣馬達或真空採樣箱、採樣袋、採樣鋼筒。
- (四) 在採樣前後，依照所適用的標準程序，進行採樣器具之除污作業。除污是為減少土壤樣品間的接觸與相互污染的可能，徹底清洗採樣系統各部份零件。與樣品接觸的土鑽採樣元件、銅管或不鏽鋼襯管等，於使用後須更換，或是清理乾淨，方能重複使用。
- (五) 土壤中的水分對於土壤氣體的抽取或吸附材質的吸附效能有相當程度的影響，因此一般在下雨或剛下過雨土壤潮濕的條件下，避免進行土壤氣體的採樣分析。
- (六) 由於水分對於土壤氣體的抽取與濃度有相當程度的影響，因此採樣深度應與地下水位保持適當的距離，亦可避免將水分抽入分析儀器，造成量測儀器的損害。
- (七) 電動衝擊機如果會漏電，工作人員會有觸電的危險，使用時應裝置漏電斷路器、使用絕緣手套、工作人員應戴安全帽及穿安全鞋。實施土壤氣體鑽探時，若電動衝擊機衝擊不下時，要立刻停止操作，重新管線探測確認。若有感電傷人時，立即關閉發電機，將傷者送醫。

## 1.4 現場有機物分析

### 1.4.1 測爆器

環境中受關切的氣體特性大致可分為二類：毒性與可燃性，其濃度的偵測對於場址或人員的安全均有相當的重要性。可燃性氣體一般以可燃或爆炸限值定義、爆炸下限(Lower Explosive Level, LEL)與爆炸上限(Upper Explosive Level, UEL)定義之。UEL 與 LEL 係以空氣中爆炸性氣體(或其他

氧化劑)的體積百分比表示，當濃度介於此上下限，才具備可燃性。當濃度低於 LEL 時，物質本身過淡而不可燃，當高於 UEL 則物質本身過濃而不可燃。一般測爆器(Combustible gas indicator, C.G.I.)量測範圍為 0~100% LEL，而不同物質則有定義的 LEL 值，例如正己烷為 1.1% 而氫氣為 4%。

### 一、原理

測爆器通常只是利用不同的感知器偵測空氣中特定的氣體濃度，而非一種氣相分析儀，最常用的感知器包括：

- (1) 固態感知器(solid-state sensor)：開發於 1970 年代，其出現亦代表空氣監測技術的一大突破。其特色在於可以同時偵測濃度為數 ppm 至 100% LEL 以上的可燃性與毒性氣體。現代的固態感知器已可偵測 150 種以上的氣體物質。其優勢在於感知器的使用生命週期可長達 10 年以上。
- (2) 觸媒顆粒感知器(catalytic bead sensor)：僅能用於可燃性氣體的偵測，僅當濃度在 1,000 ppmV 至 % LEL 的程度。此類的感知器不具特定性，會對相當廣泛的氣體種類發生反應。其原理是於內部之白金線圈塗覆觸媒，當空氣中有可燃氣體時，會與觸媒反應釋出能量，而使得白金線圈溫度升高，電阻隨之升高，再藉由量出感測元件與溫度補償元件之間的溫度差異而得知氣體濃度。觸媒感知器為測爆器較常用之偵測方式。過去這種感知器容易受到硫化氫、矽與其他物質的毒化，最近的技術發展已大大提高其毒性抵抗力，並有較高之穩定性與較長之使用年限。
- (3) 電化學感知器 (electrochemical sensor)：早於 1950 年代即用於氧氣濃度的監測，現在的感知器則以可偵測 10 數種以上的氣體。具有對特定氣體有相當高的敏感度且耗電力低，但當暴露於高濃度的氣體過久，會明顯縮短期使用年限。

### 二、適用時機與限制

測爆器並非氣體分析儀，所測得之數據為一綜合性指標，所以一般多用於場址調查階段之工作安全監控指標，並不屬於定量甚至定性級的數據提供技術。由於其反應標的物依設備與感知原理之差異，在

使用時應確認所感應之氣體適合用於油品洩漏場址。

### 三、設備需求

測爆器為工業安全及衛生之重要監測儀器，而國內有相當多的儀器設備商自行開發製造或是由國外代理進口，目前測爆器可以偵測氣體內容大致可分為：

- (一) 可燃式氣體偵測。
- (二) 毒性氣體偵測。
- (三) 二氧化碳濃度偵測。
- (四) 特定微量氣體偵測。

而對於以機型使用目的，則可以分做下列幾項型態(圖 1.4.1-1)：

- (一) 現場攜帶型。
- (二) 實驗室桌上型。
- (三) 現場固定式。



現場攜帶式



現場攜帶式



固定式

資料來源：Rae Systems (<http://www.raesystems.com>)

圖 1.4.1-1 典型的測爆器

#### 四、作業程序

測爆器之測值無法絕對反應土壤中之實際氣體濃度，其僅能成為加油站、油品儲槽污染等初步調查之工安篩檢、環境檢視預測的工具，後續必須再輔以其他分析設備，進行土壤氣體污染濃度研判工作。

集樣器中之氣體插入測爆器之氣體吸入口直接進行分析。土壤氣體採樣雖然可以採用被動式採樣方式，但因為測爆器為場址篩選的使用目的，若集樣器集氣速率太慢，將喪失其快速篩選之目的，因此，建議搭配主動式採樣的採樣方法。

#### 五、成本分析

因測爆器產品種類規格較多，價格也會所不同，但以污染場址快速篩選之需求而言，簡易攜帶型之測爆器應能符合需求，國內廠商報價每台約新台幣 10 萬上下，因此，折舊納入其他土壤氣體採樣等成本之後，每單點之土壤氣體測爆器分析成本應不至於太高。

#### 六、工作注意事項

- (一) 測爆器對於有機氣體並不具有選擇性，因此，無法區分烷烴類或芳香族之有機化合物。
- (二) 對於非屬加油站測漏管類型之土壤氣體採樣，若要搭配測爆器分析，建議採用主動式土壤氣體採樣方式。

#### 七、與調查結果相關性探討

由土壤氣體驗證結果顯示，就油品類污染場址由測漏管所採取之土壤氣體分析結果來篩選污染場址，需要在測漏管功能良好之情況下進行檢測才具可信度，且僅能代表鄰近測漏管附近之土壤污染狀況。

### 1.4.2 火焰離子與光離子偵測器

#### 一、原理

總有機氣體(Total Organic Vapor, TOV)的分析方法可以偵測樣品中的總有機揮發性化合物。雖然可以提供相對的污染程度，但無法分別定量特定的化合物。一般所使用的偵測器有兩種：火焰離子偵測器

(Flame Ionization Detector, FID) 與光離子偵測器 (PhotoIonization Detector, PID)。

火焰離子偵測器是採用氫火燄將有機氣體離子化，藉由自由離子所造成的電流(稱為儀器反應或 instrument response)與樣品中的揮發性化合物濃度成正比的相對關係加以量測。火焰離子偵測器對大多數的有機蒸氣均能產生明顯的反應，且對於脂肪族(或直鏈)碳氫化合物特別敏感，因為這些化合物比芳香族(或環狀)碳氫化合物的燃燒效率高。火焰離子偵測器一般是利用甲烷進行校正。

光離子偵測器則是使用紫外光燈的能量來離子化有機氣體。如同 FID 一般，儀器的反應是與被離子化之化合物所產生之電流相關。光離子偵測器的工作原理則是利用每一種化合物都具有特定的游離能和游離效率，偵測化合物游離後所產生的電流大小來進行定量。紫外光源提供的能量範圍為 8.4 至 11.7 電子伏特(eV)之間，可以將游離能低於紫外光能量的有機分子加以游離化，藉著內部的抽氣馬達不斷將空氣抽入儀器內，有機物暴露在發射特定能量光子的紫外線光源之下，游離產生之離子及自由電子，被吸引至一對賦予固定電壓的電極而產生電流，以電流計量測電流的大小，輸出電壓與游離化有機化合物分子濃度是呈正相關性。

## 二、適用時機與限制

手提式 PID/FID 可以檢測土壤、地下水、土壤氣體甚至空氣中 VOCs 及 SVOCs 污染化合物，檢測費用低廉，又可以立即獲得檢測結果，執行現場篩選，可有效協助採樣佈點。亦可以應用於緊急洩漏檢測、有毒廢物現場檢測、地下儲槽洩漏檢測、石化煉油安全衛生檢測、微量有機有毒氣體污染檢測、健康安全檢測、室內空氣質量監測等。

偵測限制上，以 FID 而言，較適用於脂肪族的有機污染物。光離子偵測器則對芳香族有機化合物反應較靈敏，對油品類碳氫化合物，感應值隨不飽和度增加而增加，對甲烷、乙烷、無機氣體和水蒸氣較不敏感，也偵測不到輕質烷類。高離子化電位(如脂肪族)的化合物需要較高的能量才能離子化，因此這種儀器對於芳香族碳氫化物(如 BTEX)最敏感，但部分的脂肪族也可以利用能量較高紫外光燈予以離子化並

偵測。

### 三、設備需求

常見之 PID/FID 設備如圖 1.4.2-1 所示，而完整的 FID/PID 設備則至少包括：

- (一) 檢測器
- (二) 電力供應系統(可充電式電池)
- (三) 採樣幫浦(自動泵浦吸引式，可配外接採樣袋)。
- (四) 警示設置
- (五) 顯示系統(數位液晶顯示、發光二極體)。
- (六) 數據儲存系統



資料來源：Thermo Electron Corporation, Photovac, Inc. 與 PID Analyzer, LLC

圖 1.4.2-1 典型的 FID/PID 偵測器

### 四、作業程序

採用不同的工作方法，FID 與 PID 均可用於土壤氣體、土壤與地下水之總石油碳氫化合物濃度的量測。而工作方法大致可分成三類：

- (一) 直接量測是直接於土壤或地下水樣品的上方，讀取 FID 或 PID 的偵測值。通常做為一種篩選方法以決定土壤或地下水樣品是否需要進一步用可以提供較高數據品質等級的方法進行分析。同時可以協助決定後續採樣的位置。
- (二) 頂空篩選是將土壤或地下樣品置於氣密容器中(如玻璃罐或聚乙

烯袋)，並保留 1/2 至 1/1 的空間，該容器則搖晃、加熱或靜置一段時間，讓碳氫化合物擴散至頂空，再用 FID 或 PID 量測頂空。使用聚乙烯袋允許樣品以穩定的流量進入儀器中，但因氣密袋本身可能產生碳氫化合物，進而影響分析。所以應該測試空白樣品(空的氣密袋)，並將結果考慮於最終分析結果。因為此方法有進一步的控制樣品的分析，所以比直接量測更能提供一致性的讀值與相對濃度。但是這種方法的分析讀值仍是變異性大，因為污染物的揮發仍受到土壤種類、水分、空氣的稀釋作用、溫度以及準備分析樣品的時間等多項因素的影響。

(三) 頂空分析與頂空篩選的方法類似，但過程有更進一步的控制，所以結果較為準確。首先將已知量的土壤或地下水放在聚乙烯袋中，若是土壤則同時加入特定體積的去離子水，以提升有機蒸氣分配至頂空的一致性。接著將袋子充氣並搖晃樣品。於特定的時間，採用 FID 或 PID 量測頂空濃度。其中的品管步驟包括使用現場標準品建立檢量線，這些標準品有助於儀器反應的解讀並提供樣品與已知濃度的比較。

## 五、成本分析

使用 FID/PID 的費用隨所採用之方法而有所差異，在初設成本或固定成本的部份，其費用範圍在美金 4,000 至 8,000 元之間。加上操作成本後，直接量測、頂空篩選以及頂空分析之每個樣品的單位成本平均分別在美金 1 元以下、1 至 10 元以及 10 元左右。

## 六、工作注意事項

土壤樣品中黏土含量或有機質含量偏高，其檢測結果不一致性將隨之增加。又汽油本身洩漏時間不長或老化程度不高，所量測之結果方較有用。

水氣亦會明顯壓抑 PID 對有機化合物之蒸氣的感應值，曾有研究顯示在百分之百相對溼度下，PID 訊號會衰減 60%。如果樣品溼度和周圍空氣溼度一致，則可達到修正濕氣影響的目的，氣體樣品可以使用連續稀釋的方法，避免濕氣訊號凍結問題(Humidity Quenching)。

暴露於大量汽油下，PID 訊號會受到壓抑，丁烷會壓抑訊號強度，如果有甲烷存在，也會造成訊號凍結問題。PID 訊號也會受到高濃度二氧化碳壓抑，在油品洩漏的場址，由於燃油生化分解，土壤氣體及水樣中可能存在高濃度二氧化碳。

PID 樣品流量約在每分鐘 0.1 至 0.5 公升範圍，訊號讀值為流量之函數，因此，以 PID 量測時，須注意勿發生儀器流量削減，另外，電源線、變壓器、高壓儀器、或電磁波發射器也會影響光游離偵測器感應值。

各類訊號凍結現象具有加成性，如果能以一貫之程序來操作，仍然可以得到相當可靠之讀值，將蒸氣系統化的稀釋，可以減少訊號凍結的影響，改善 PID 在燃油污染現場篩檢的可靠性。

其它有關不同工作方法之間的差異，彙整如表 1.4.2-1 所列。

**表 1.4.2-1 FID/PID 不同工作方法之特性比較**

項目	直接量測	頂空篩選	頂空分析
可偵測化合物	FID: 直鏈脂肪族為主，對芳香族(如 BTEX)較不敏感 PID: 芳香族為主以及部分脂肪族		
偵測極限			
水中的汽油	>100 ppmV	數 10 至數 100 ppmV	0.1 至 1 ppmV
土壤中的汽油	>100 ppmV	數 10 至數 100 ppmV	1 至 10 ppmV
土壤中的柴油	>100 ppmV	數 100 ppmV	數 10 至數 100 ppmV
限制條件	如果土壤樣品的黏土含量或有機質含量偏高其結果不一致性隨之增加汽油本身應該洩漏時間不長或老化程度不高，所量測之結果方較有用。		
分析時間	2 分鐘	10 至 30 分鐘	10 至 30 分鐘
工作程序困難度	低	低	中
數據品質等級	DQL 1A	DQL 1A	DQL 1B

資料來源：USEPA (1997a)

## 七、調查結果相關性

(一) 直接量測是屬於 DQL 1A 的分析方法，因為這些測值的變異度相當高且量測時幾乎沒有品保品管的措施。較低的偵測極限約在 100 ppmV 左右，但在理想條件下(無風、濕度低等)，偵測極限可能更低。頂空篩選的量測方式亦屬於 DQL 1A 的範圍僅能提供較定性的數據，但其偵測極限一般介於 10 至 100 ppmV。頂空分析

是屬於 DQL 1B 半定量的方法，因為可提供污染程度的冪次範圍，但無法提供特定污染物成分的濃度。頂空分析的偵測極限最低可達水中汽油 0.1ppmV 的程度，一般則為 1 ppmV 以上。

(二) 以儀器而言，PID 最低偵測極限可達 ppb 等級，偵測範圍最大為 1 ppb~10,000 ppmV，一般對汽油蒸氣的偵測範圍在 100~1,000 ppmV 之間，對柴油蒸氣的感應值低，尤其是陳化燃油更低。至於更進一步的數據品質控制可參考攜帶型氣相層析儀的部份，包括精密度測定標準與準確度測定標準。

### 1.4.3 現場氣相層析儀

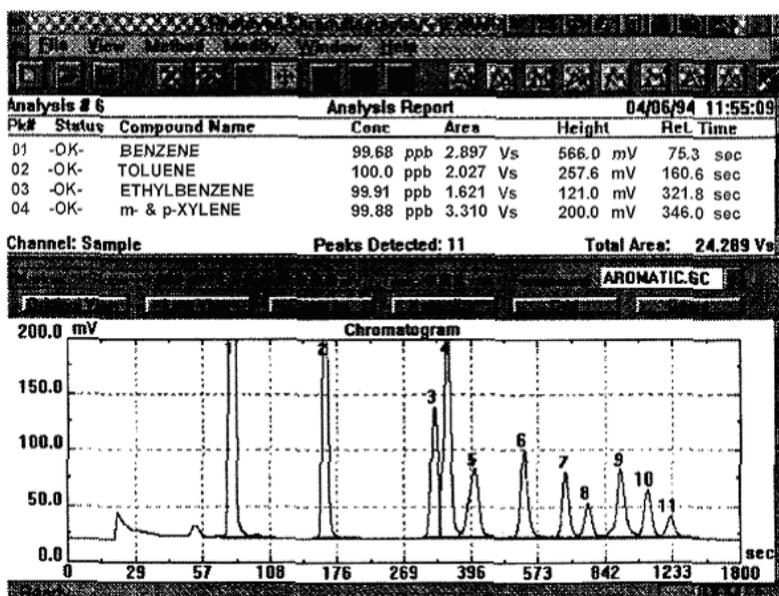
#### 一、原理

現場氣相層析儀主要使用於土壤、土壤氣體與水樣中特定成分的分析，此種現場分析方法是常用現場分析方法中，可以提供最高數據等級的方法。可攜式氣相層析儀與一般實驗室桌上型氣相層析儀操作原理類似，惟其體積較小、重量較輕，能夠讓一個人輕便的攜帶，前往補給地點，這補給地點能夠提供所需輔助氣體及其他不便攜帶的東西。

氣相層析儀是由二大部分所組成：包括分離各項組成化合物的分離管柱以及量測各項組成化合物訊號反應偵測器。管柱為一長薄且纏繞成線圈狀的管路，利用惰性氣體(如氦氣、氮氣或零級氧氣)做為載流氣體 (carrier gas)，將組成化合物傳輸經過管柱。由於低分子量與高揮發性的化合物在管柱內流動速度較高分子量與低揮發性的化合物快，樣品中各組成化合物即可在管柱中分離。但是分辨同時離開管柱的化合物(即共析出)通常較為困難，可利用增加管柱的長度，降低共析出的可能性。

偵測器位於管柱的末端，針對碳氫化合物的分析，最常用的偵測器是 PID 與 FID，這種 PID/FID 針對 GC 需求加以修改，具備有較佳的偵測極限。偵測器的反應是透過紀錄器或電腦予以顯示與紀錄，建構一組層析圖譜 (亦即偵測器反應對樣品的滯留時間)。圖譜中每一個反應波峯(response peak)的積分面積會與該化合物的濃度成正比，組成

的鑑別則是利用與標準品之滯留時間比對加以判斷，圖 1.4.3-1 即為攜帶型氣相層析儀的典型層析圖譜。



資料來源：USEPA (1997a)

圖 1.4.3-1 典型的攜帶型氣相層析儀的層析圖譜

## 二、適用時機與限制

目前常用於石油碳氫化合物分析的現場氣相層析儀包括可攜式氣相層析儀(portable GC)與可運送氣相層析儀(transportable GC)兩種。其運作原理幾乎相同，但由於形式的差異，在應用上的適用時機與範圍亦有差異。

可攜式氣相層析儀具耐用、體積小及重量輕等特色，具有內藏式電池與載流氣體供應系統，固其具有可攜帶性。惟該項特色亦造成電源與氣體供應上的限制，導致溫度上升條件設定上的限制，故可攜式氣相層析儀的管柱通常是恆溫(isothermal)。

可運送氣相層析儀則通常是安裝於移動式實驗室，其操作需要外部電源與氣體供應系統，故不具有可攜性。大部分的可運送氣相層析儀可以快速改變管柱溫度，因此可以做適當的溫度設定，而不會如可攜式氣相層析儀般受限於定溫條件下操作。由於可運送氣相層析儀的精度較高，用於現場時可以提供等同於認證實驗室 GC 分析數據等級。

可攜式氣相層析儀的主要優勢是其容易攜帶至現場且分析時間一般均較可運送式氣相層析儀短，可攜式氣相層析儀典型的分析時間多短於 10 分鐘，而可運送式氣相層析儀需要 10 至 40 分鐘甚至 60 分鐘。由於氣體供應的限制，常用於可攜式氣相層析儀的偵測器以 PID 為主，因為不需要氫氣，故許多脂肪族化合物無法使用可攜式氣相層析儀進行分析。

至於可運送式氣相層析儀相對的優勢，是可以提供較佳的化合物分離，以更正確的鑑別與定量成分。其較佳的分離效果是因為可運送式氣相層析儀所使用的管柱較長。此外，可以快速加溫與一致的溫度控制可提供更好的再現性。

### 三、設備需求

現場氣相層析儀至少含有注射系統、樣品分離系統(管柱)、偵測器，另外，還需要資料收集、儲存與數據分析系統，典型的現場氣相層析儀設備如圖 1.4.3-2 所示。



資料來源：Varian, Inc., Electron Sensor Technology, Photovac, Inc. 與 Inficon

圖 1.4.3-2 典型的可攜式氣相層析儀

#### (一) 注射系統

注射系統有兩種選擇，兩種系統都可能需要清洗以降低記憶效應：

1. 可以穿透墊片的氣密式注射針：此系統雖較不夠準確，但其注射範圍為 1 毫升到 10 公升，可以適當的濃縮樣品。

2. 可以清洗及充滿樣品的迴路：透過內建馬達及閥的切換來完成，閥的切換可以選擇手動或自動方式切換，此系統比較準確，但其注射量是固定的，要改變注射量就需要更換不同的進樣迴路。

## (二) 樣品分離系統(管柱)

樣品由載流氣體攜帶穿越層析管柱，許多可攜式氣相層析儀含有內建式、可重新補充的氣體鋼瓶，前往現場之前，要先灌滿氣體鋼瓶，也有一些可攜式氣相層析儀是外附氣體鋼瓶和調節器。要注意載流氣體鋼瓶使用說明書的指示以及運送過程對加壓氣體鋼瓶是否適當。

層析管柱分為兩種，包括填充層析管柱及毛細管層析管柱。填充層析管柱可以注射較大的樣品量，毛細管層析管柱則有較好的分離效果。待檢驗測定成分與液相間相互作用力愈強，在層析管柱中滯留愈久，其滯留時間則愈長。任何層析管柱的等溫狀態都需要建立其可用的滯留時窗，層析管柱每降低 30°C，滯留時間增加一倍。所以，需要針對待檢驗測定成分，選擇適當的層析管柱、尋找適當的層析管柱溫度及建立可用的滯留時窗。

## (三) 偵測器

現場氣相層析儀的偵測器一般有四種，根據其選擇性、靈敏度及線性範圍等特性，選擇合適的偵測器。

1. 火焰離子偵測器(FID)：為非選擇性，具中等靈敏度及大的線性範圍，一般用於檢測有機化合物，對 CS<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CCl<sub>4</sub> 的感度低，需要輔助氣體(空氣和氫氣)。
2. 光離子偵測器(PID)：使用不同能量的光源來增加選擇性，具高靈敏度及大的線性範圍，屬於非破壞性，一般用於檢測有機化合物及無機類氣體，對小分子如 CH<sub>3</sub>CN、CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>、CCl<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>OH 及低分子量碳氫化合物的感度低。
3. 電子捕捉偵測器(ECD)：高選擇性—對含有鹵素原子(F、Cl、Br、I)、氰基(CN<sup>-</sup>)、硝基(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)的分子有感度，對碳氫化合物、醇類化合物、酮類化合物感度極低，具高靈敏度及小的線性範

圍。

4. 熱傳導偵測器(Thermal Conductivity Detector, TCD)：對所有揮發性有機化合物及氨水、CO、SF<sub>6</sub>、NO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等無機化合物都不具有選擇性，具低靈敏度及好的線性範圍。

#### 四、作業程序

現場氣相層析儀可以執行土壤、土壤氣體與水樣的分析。其中土壤氣體的分析不需要樣品前處理，土壤與水樣則有二種樣品前處理方法的選擇。

##### (一) 土壤氣體分析

分析可以使用氣密式注射針或迴圈式注入器(loop injector)直接注入。

##### (二) 土壤與水樣的分析

有三種方法可適用於利用 GC 分析土壤與水樣中的石油碳氫化合物。最簡單的方法是使用靜態頂空(static headspace)的方式，這種方式適用於採用可運送式與可攜式氣相層析儀分析揮發性有機物。另外，溶劑萃取(solvent extraction)的則適用於採用可運送式與可攜式氣相層析儀分析半揮發性有機物。更複雜的方式是使用吹氣捕捉(purge and trap)的方式，但這種方法因為需要過多的能源，較不適用於可攜式氣相層析儀。

靜態頂空方法可參考美國環保署 SW-846 中的方法 5021，並已有專為可攜式氣相層析儀修改之版本。利用靜態頂空的方法分析水樣時，先將水樣置於有密封墊片的樣品瓶(土壤樣品則是將土壤置於同樣的樣品瓶內不含分析物的水中)，適度搖晃後將樣品置於固定溫度的水浴中。水樣中的揮發性碳氫化合物由樣品揮發至頂空最後達成平衡，此時頂空的揮發性碳氫化合物代表溶解相中的揮發性有機物。接著用氣密注射針由頂空抽出定量的氣體樣品注入 GC 中進行量測。

溶劑萃取方法對於半揮發性碳氫化合物可以有較高的回收率，特定質量的土壤置於有機溶劑中，使分析物溶出至溶劑中，

再將含有分析物之溶劑注入 GC 中分析。

吹氣捕捉可以提供比靜態頂空更好的回收率與更低的偵測極限，但於現場則僅適用於可運送氣相層析儀，因為其需要相當高的能源(電源)。吹氣捕捉法是先將樣品置於室溫的吹氣室中，以惰性氣體(通常為氮氣)吹氣，使得揮發性碳氫化合物由水中轉換至氣相，吹出之氣體經過可以捕捉選定之碳氫化合物成分的吸附劑，在將吸附劑加熱以釋出吸附之碳氫化合物，析出之樣品則直接輸送至管柱中進行分析。

現場氣相層析儀可以提供揮發性與半揮發性碳氫化合物特定組成分的定量分析，特別是用於決定評估風險與決定矯正行動之關鍵組成的分析。現場氣相層析儀分析土壤、土壤氣體與水樣之成分濃度可以至 ppb 的程度，最低甚至可達 1 到 10 ppb。樣品濃度低於 1,000 ppb 者，可以不經稀釋直接分析。GC 分析方法是用於描繪污染區時，決定未污染區域的主要方法。也可以用於鑑別油品污染物種類(汽油或柴油)，同時現場氣相層析儀之方法是唯一可用於檢測 MTBE 的現場分析方法。

## 五、成本分析

使用可攜式氣相層析儀分析單一樣品成本在美金 20 至 50 元之間，使用可運送氣相層析儀則在美金 50 至 70 元之間。此成本亦取決於分析基質、DQL 或品保品管需求以及樣品數量等因素。另根據 5 年長期操作的可攜式氣相層析儀的成本分析，則平均之單一樣品成本在美金 35 元左右，相關之成本分析如表 1.4.3-1 所示。

**表 1.4.3-1 現場氣相層析儀的長期成本分析**

分析設備	可攜式 GC/PID
初設成本	47,500
年操作成本	161,978
生命週期淨現值(4% 貼現率)	797,383
分析樣品總數	22,500
單一樣品成本	35

貨幣單位：美金

資料來源：USEPA (1996)

## 六、工作注意事項

使用現場氣相層析儀時應注意下列事項：

- (一) 環境溫度的變化必須盡量小，且週界空氣必須沒有被污染。
- (二) 分析的方法設定通常不會針對低揮發性與非揮發性碳氫化合物(如原油)。
- (三) 單一分析中通常不會檢測大範圍的碳氫化合物(如汽油到燃油)。
- (四) 高度污染的樣品必須經過稀釋，以避免超出檢量線範圍，甚至污染偵測器。
- (五) 非標的成份如果會共析出或具有與標的化合物相近的滯留時間，可能干擾波鋒的解析度。如果出現很多干擾波鋒，分離效果可能不好，則可以嘗試使用整個層析儀範圍積分來決定總揮發性有機物濃度。
- (六) 執行現場氣相層析儀分析時，應指派受過高度訓練的現場化學師操作。

## 七、調查結果相關性

現場分析數據之可信度，取決於現場分析之品保品管，依據美國國家職業安全衛生研究所(NIOSH)針對攜帶式氣相層析儀分析的品保品管內容，主要包括：

- (一) 在進行現場分析前，先使用攜帶式氣相層析儀在實驗室內建立分析物之檢量線、決定偵測器的平均飄移程度(以預期在現場操作時間)以及管柱分離分析物的能力
- (二) 於現場應建立日常檢量線，並應考量其他的標準樣品分析。

但要確保現場數據的精確度，仍必須由有經驗的人員(如現場化學師)執行與現場即時品保查核及應變，惟現場 GC 使用目的仍以快速篩選，而非完全取代公告之檢測方法。因此，建立及選擇合適的數據品質等級(DQL)是品保品管與任何結果調查的重要課題。一般而言，可攜式氣相層析儀足以提供 DQL 2 的資訊，而可運送氣相層析儀則可能可

以達到 DQL 3 的等級 (表 4.4.3-2)。

**表 1.4.3-2 現場氣相層析儀法的特色**

項目	水	土壤	土壤氣體
可分析化合物	特定成分之揮發性與半揮發性碳氫化合物		
偵測極限	1 至 10 ppb		
方法限制	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 無法於單一分析中檢測大範圍的碳氫化合物(如汽油到燃油)</li> <li>• 樣品濃度大於 1,000 ppb 者，可能需要稀釋以避免超出偵測器的偵測範圍</li> <li>• 非標的成份可能共析出並造成正偏差，導致解讀錯誤</li> <li>• 操作會受較嚴酷之溫度與受污染之工作環境的影響</li> <li>• 需要高度訓練之操作人員</li> </ul>		
分析時間	可攜式 10 分鐘以內，可運送式 10 至 30 分鐘		
操作困難度	中高	高	中
數據品質等級	可攜式 DQL 2，可運送式 DQL 3		

資料來源：USEPA (1997a)

## 1.4.4 雷射引發螢光

### 一、原理

雷射引發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)是利用衝擊紫外光之雷射光源激發化合物分子的電子至激態或較高能階。當電子回到較低的基態能階之過程中，會產生比紫外光激發波長還長的紫外光與可見光螢光電子，再藉由光學偵測器量測螢光的程度，進而決定待測物的濃度。

### 二、適用時機與限制

電子錐式的 LIF 系統最常用於現場快速篩選，作為判對地下環境是否存在石油碳氫化合物污染之依據，使場址調查可更謹慎的進一步利用有限數量採樣、鑽孔或監測井設置進行調查。此外，LIF 應用於整治階段時，因為可以立即得到檢測結果與污染物濃度資訊，整治的決策可以更加快速。

LIF 技術主要是做為安裝地下水監測井或土壤鑽探之前的現場篩選技術，但並非以此方法取代傳統的土壤鑽探與監測井的地位，而是一種能協助在場址調查過程中，將鑽探與監測井數量減少與使點位更正確的技術。LIF 技術的應用通常搭配直接貫入平台，提供即時現場篩選土壤物理特性與場址之石油碳氫化合物的化學特性。

使用 LIF 進行現場篩選的技術雖可廣泛的應用於地下環境之物化

特性的調查，但亦有多項限制因子，其中包括：

- (一) 採用直接貫入載具的大小會影響出入場址的靈活度與方便性。
- (二) LIF 貫入的過程中，遭遇砂層與粘土層膠結、掩埋之廢棄物、礫石層、大石塊或淺層岩盤等，均可能造成貫入的困難，因此在使用前，應詳細了解場址的地質狀況。
- (三) LIF 感知器對於不同的碳氫化合物有不同程度的反應，其差異甚至可能達到二個冪次之多，造成這些差異的原因主要是石油碳氫化合物中的多環芳香族化合物(PAH)的分布。
- (四) 現場螢光反應對於土壤的變異性亦相當敏感，包括土壤顆粒大小、水分與表面積等。
- (五) 雖然 LIF 的螢光是針對石油碳氫化物的偵測設計，但仍會對於其他天然物質產生反應。

### 三、設備需求

目前較常見的 LIF 系統主要有二種，包括由美國陸軍、海軍及空軍在貫入式場址調查及分析系統計畫(SCAPS Program)下合作發展之 SCAPS-LIF 系統，該系統僅由美國陸軍工兵署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)提供相關服務，另一個常見之 LIF 系統係由美國 Dakota 公司發展之 ROST™/LIF 系統。SCAPS-LIF 系統主要提供軍方、州及聯邦政府機構服務，並不提供給私人使用。本指引以 ROST™/LIF 系統而言，完整的 LIF 系統的設備，主要是由四大部分所組成，分別說明如下：

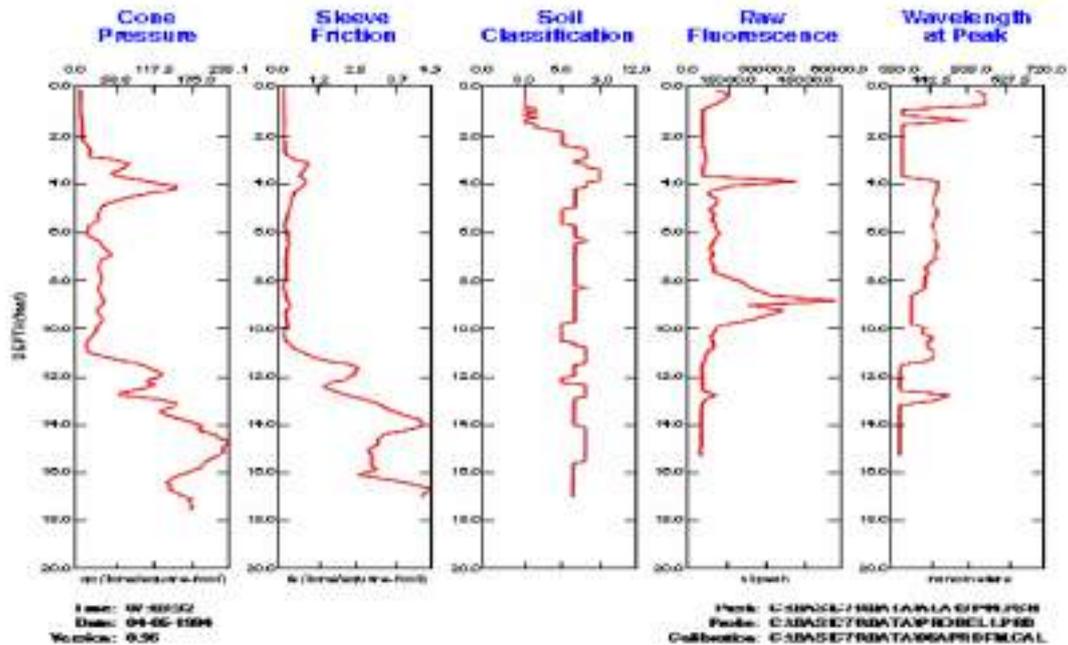
#### (一) 貫入平台

圓錐貫入試驗平台為最常被用於 LIF 系統的貫入方法，可同時使用一鑽頭，提供量測鑽尖壓力與套筒摩擦力的數據。此大型載具平台提供與其重量相關的靜態反應力(static reaction force)，在載具底部有貫入套管與鑽頭之除污設備，載具尾端則有獨立的數據收集實驗室，放置 LIF 的數據處理電腦。

#### (二) LIF 鑽頭



螢光由放射光纖收集後，送至 PDA 光譜儀偵測。在正常操作狀態下，套管以每分鐘 1 公尺的速度貫入，螢光訊號則每秒讀取一次數據，並由主控電腦收集資訊，同時即時產生以貫入深度為基準的圖譜，其典型的圖譜如圖 1.4.4-2 所示。



資料來源：USDOD (1997)

圖 1.4.4-2 典型的 LIF 偵測圖譜

#### 四、作業程序

利用 LIF 系統進行現場篩選的工作，依序大致分成下列幾個步驟：

- (一) 到達現場首先是系統的安裝與檢查，包括電子線路、光纖連結、以及其他相關設備是否穩固的固定在平台之上，以避免貫入過程的振動造成影響。
- (二) 連結相關之光纖至相關的設備，並與鑽頭及偵測設備相連。
- (三) 完成以上的設備實體安裝之後，進行系統校正與最佳化，首先是波長校正，完成波長校正後再安裝濾鏡，並以雷射光束確認其正確性。
- (四) 將鑽頭置於標準溶液中(硫化物)進行調校，直到訊號強度最高且

各訊號通道均取得可接受的訊號強度，即可準備進行現場量測。

- (五) 每一次貫入前均先以標準溶液(如溶於乙醇中的硫化金基鈉)進行量測，以確認其效能，並使其在貫入的數據解讀上有一基線可為依據，接著開始貫入。
- (六) 貫入之初期建議以低解析度的速度進行(每 15 至 30 公分量測)直到出現污染物的訊號，再增加解析度(每 4 至 7 公分)。另外一種操作模式是貫入時保持標準速度(每秒 2 公分)，並連續讀取資料，若發現有污染區域，在於拔出時於特定深度進行高解析度的量測，但這種方式有可能造成視窗為土壤顆粒遮蔽，導致拔出時的量測較不準確。
- (七) 當貫入過程發現污染區域時，亦可將 LIF 的操作轉為靜態模式(static mode)，於固定深度以不同波長掃描，以瞭解污染物之成份。

## 五、工作注意事項

使用 LIF 篩選石油碳氫化合物時，有多項的限制，隨之衍生之操作時的注意事項包括：

- (一) 在動員前應評估場址的配置與地質狀況，並據以規劃採樣點的位置，避免貫入過程遭遇不預期的地層，甚至造成設備之損害。
- (二) 雖然選擇 266 nm 波長的螢光對 BTEX 的敏感度高於 PAH，但經過長時間陳化的油品，BTEX 較易揮發與被降解，使得 PAH 訊號干擾加大，故在洩漏歷史較久之場址應特別注意數據之解讀，或以其他波長進行量測。
- (三) 人類活動所使用之可螢光物質亦可能進入地下環境，例如抗凍劑、解凍劑以及清潔劑等均會產生螢光。因此在量測過程與評估數據時必須考慮此可能性。如果無法分辨該因素的影響，可能導致碳氫化合物濃度的正偏差解讀結果，進而造成誤判。

## 六、成本分析

進行場址評估的成本取決於分析樣品的數量，就使用 LIF 技術性

質而言，即為所擷取之數據資料的數量，因收集數據的數量與貫入次數及深度相關，此部分為影響該技術使用成本之主要因子。

成本計算通常是以每日費用計算之，並依據場址針對假設的數據產生量，計算人力費用、規劃與數據報告產出、交通時間及載具設備費用等。此外，場址的其他因素也可能對成本造成影響，例如載具進出場址的難易、特殊地質狀況、存在污染物種類、污染物陳化時間以及基質效應等，凡可能衝擊 LIF 系統效能的因素都可能直接對成本產生影響。

## 七、調查結果相關性

一般 Nd:YAG LIF 偵測器的線性範圍取決於欲分析之特定碳氫化合物以及基質，以現場量測而言，經驗顯示線性範圍可達 3 個冪次，非線性範圍要在 10,000 mg/kg 才會出現。因為吸收作用或是飽和現象，通常發生非線性的濃度於砂質土比較低而於黏土質較高。此外，透過操作人員的調整，亦可增加線性範圍，例如增加光柵的寬度，但同時也會降低其敏感度。

由雜訊(noise)、背景(background)與敏感度(sensitivity) 可以決定螢光的閾值與偵測極限。雜訊、背景與敏感度則可由採用現場土壤所準備的校正樣品與標準分析技術得到。計算所得之雜訊、背景與敏感度則可用於計算螢光的閾值與偵測極限。

驗證 LIF 的結果，是以同時採集土壤樣品，並以傳統分析方法檢測數值加以比較。傳統分析項目可包括 TPH、BTEX 與 PAH。通常以可比較性加以解讀，因不同化合物對不同波長之螢光反應不同以及基質等影響，比較 LIF 數據與特定化合物濃度(BTEX)較為困難，典型的比較結果請參考下一節之案例說明。

### 1.4.5 鹵化物感測器

#### 一、原理

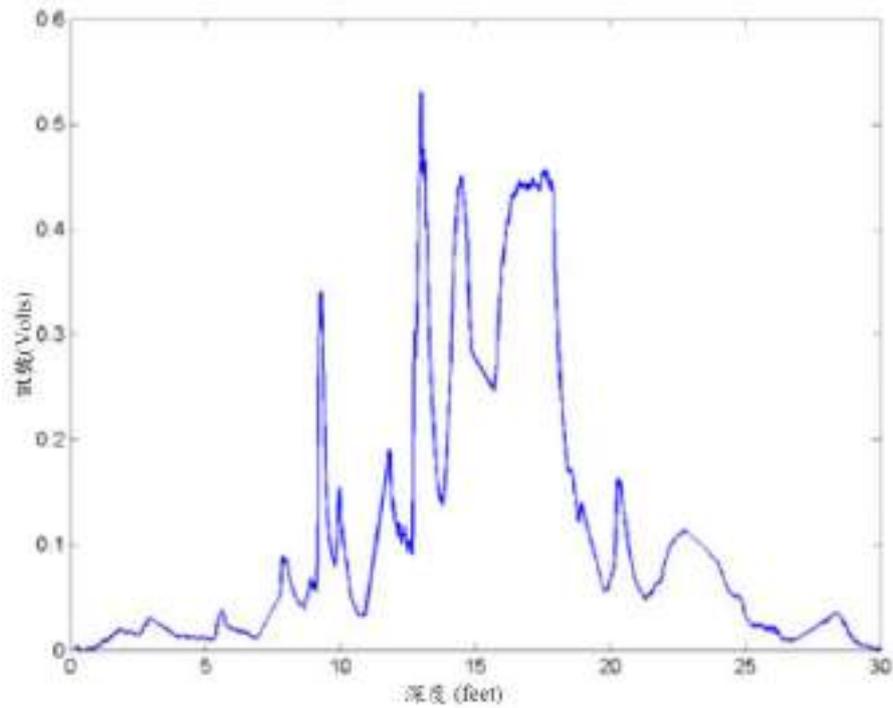
鹵化物感測器是美國 Dakota Technologies 公司目前研發狀態中之即時檢測技術，其商標名稱為 HaloProbe。其原理是利用 MIP 感測器再進行改裝，於 MIP 感測器上端安裝鹵化物層析感測器(Halogen Specific

GC Detector,XSD)，而成為 HaloProbe。此為目前相當創新之舉，將污染物感測器直接安裝於感測器內，隨感測器而深入地層中，因此屬於真正即時(real time)偵測之技術，而無污染物傳輸至地表所耗費之延時問題。且 XSD 為專門針對鹵化物之感測器，因此偵測極限低，可更為有效獲得含氯有機溶劑之濃度垂直分布資料。

鹵化物層析感測器 XSD 之原理，是在感測器反應室內進行有機物之氧化反應。由氣相層析管(GC column)而來之污染物，在感測器反應室內進行熱裂解反應(pyrolysis)，反應室內之溫度保持在 800°C~1100°C 之間，污染物分子內之鹵素被氧化並釋放出成為原子態或氧化態，隨後與陰極之活化鹼金屬作用產生熱離子，包括電子及鹵素離子，使陰極電流增加，從而轉換為電壓訊號被測得(OI Corporation, 2007)。

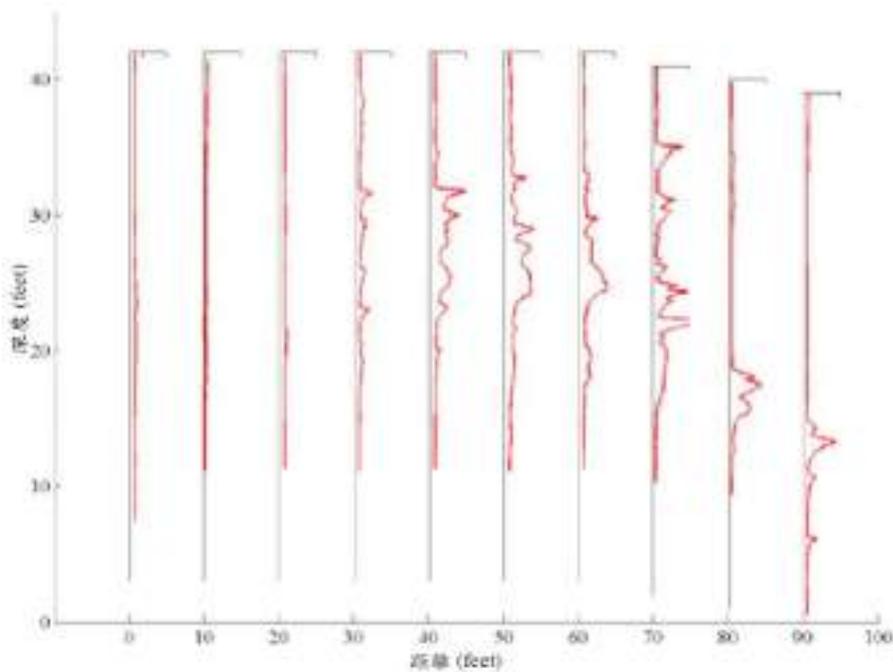
如同 MIP 感測器，當土層中污染物被 HaloProbe 感測器上之薄膜吸收後，將藉由擴散效應而穿過薄膜，進入 XSD 被偵測到。其對於鹵素有機物相當敏感，偵測極限比 MIP-FID 低許多，地下水中 DNAPL 濃度達 0.1 mg/L 即可被偵測出(Dakota Technologies, Inc., 2007)。但以 MIP-FID 而言，地下水濃度可能需 5 mg/L 才可被偵測到。

同時由於感測器直接安裝於感測器中，污染物不需經過傳輸管路至地面，而可在地層中直接被偵測，因此沒有延時問題，所得到之訊號數據均為即時之現地量測資料，如圖 1.4.5-1 所示，訊號讀值在 0.1 ~ 0.5 Volts 之間，而現場樣品之實驗室分析結果之濃度範圍在 85 ~ 2200 ppb 之 TCE。圖 1.4.5-2 則為在同一個場址，於上下游進行一連串感測，並繪製偵測訊號之剖面圖，染分布之特性。



資料來源：Dakota Technologies, Inc., 2007

圖 1.4.5-1 HaloProbe 之反應訊號圖



資料來源：Dakota Technologies, Inc., 2007

圖 1.4.5-2 HaloProbe 之訊號剖面圖

目前 Dakota 公司正研究如何將 XSD 所輸出之電壓訊號，與土壤或地下水污染濃度做比對，以利污染程度之判別，如同 FID 及 PID 一樣，可將感測器訊號轉換成 ppm。

Dakota 公司現正進行許多測試，在不同土層及污染物濃度下，與 XSD 所測得之訊號進行關係比對，未來 HaloProbe 產品之讀值將為總鹵素濃度(parts per million halogen equivalents, ppmh)，現場工程師將可立即研判地層中之污染程度及 DNAPL 所在深度位置。

## 二、適用時機

未來在環保單位進行調查階段時，使用 HaloProbe 技術進行土壤質地及污染程度量測之時機包括：

- (一) 場址污染程度不確定，需進行篩選測試，評估是否有污染狀況。
- (二) 調查經費有限，需以較節省之方式進行多量之檢測，並進行污染範圍評估。
- (三) 需進行定點定深度之污染程度研判，作為後續土壤或地下水採樣位置及深度之依據。
- (四) 需瞭解污染區之垂直污染分布，以研判是否有 DNAPL 存在及其可能深度位置。

## 三、限制

- (一) 由於 HaloProbe 技術仍須依賴直接貫入技術，因此僅適用於屬於砂土、砂土、黏土之地層。在含有卵礫石層中(如林口、桃竹苗台地、台中地區)，由於直接貫入鑽機無法鑽進，因此無法採用。
- (二) HaloProbe 技術目前仍屬於研發階段，對於偵測數據之品保品管尚未有相關作業手冊可參考，需有賴使用者自行建立相關品保品管數據。

## 四、作業程序

- (一) 架設地錨固定鑽機，確保 HaloProbe 感測器可垂直貫入地層。若地表有混凝土層，需先使用圓孔切割機將地表切割 4 英吋之圓孔。

- (二) 架設地錨的同時，開啟電腦軟體，設定點號、氣體傳輸時間、鑽桿深度等參數資料。
- (三) 開啟 HaloProbe 控制器之加熱開關，將探針上之薄膜加熱至 120 °C，使土壤或地下水中之揮發性有機污染物可進入 HaloProbe 感測器內。
- (四) 開始進行 HaloProbe 感測器之貫入，其鑽進速度應小於每分鐘 30cm。鑽機旁之定位弦(stringport)可即時量測感測器之貫入深度，並記錄貫入速度。
- (五) 在 HaloProbe 感測器貫入同時，地表下揮發性有機污染物進入 HaloProbe 內部，並經 XSD 感測器高溫加熱後，污染物分子內之鹵素被氧化並釋放出成為原子態或氧化態，使訊號增強，經由電腦軟體之數值轉換，即可在現場讀取偵測數據。

## 五、品保品管

現場分析數據之參考價值，主要決定於分析儀器之品保品管。由於各場址之土壤質地、土壤含水量、污染物特性各有不同，因此使用者應針對 HaloProbe 感測器進行品保品管作業，包括：

- (一) 在進行現場感測分析前，先於實驗室內建立分析物之檢量線，以校正 HaloProbe 感測器之訊號值與分析物濃度之關係式。
- (二) 於現場應建立日常檢量線，並經常與土壤及地下水樣品濃度進行比對。
- (三) 現場儀器之操作，需由有經驗之操作人員執行，於現場進行即時之品保查核及應變校正。HaloProbe 感測器之使用仍以快速篩試為目的，且仍在研發階段，因此使用者需特別予以注意。

## 六、成本分析

HaloProbe 感測器之研發廠商 Dakota Technologies 公司表示，目前該產品仍屬研發狀態，因此尚無報價資料或成本分析。

### 1.4.6 充脹式襯管地下污染偵測技術

充脹式襯管地下污染偵測技術 (Flexible Liner Underground Technologies, FLUTE) 是由美國 Flexible Liner Underground Technologies, Ltd. 公司於 1989 年所開始發展之地下污染物快速偵測技術，簡稱為 FLUTE，該公司並擁有 FLUTE 之商標著作權。其主要功能在於提供調查人員於現地快速偵測污染物，特別是屬於純相產物 (pure product) 之 NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) 地下深度位置。

#### 一、 原理

FLUTE 之組成為充脹式襯管及襯管上之染色劑及疏水性 (hydrophobic) 有機物，染色劑被吸收於疏水性有機物內，充脹式襯管的外側塗有黑、紅、藍等不同顏色的染色劑，如圖 1.4.6-1 之右下方所示。當地下污染物如 DNAPL、油品類之 LNAPL 及 DNAPL 接觸到襯管上之疏水性有機物，疏水性有機物將被這些 DNAPL 污染物所溶解，並隨之滲入充脹式襯管的內側，而染色劑也隨之帶入充脹式襯管的內側，因此在襯管內側產生程度不一的染色效果，但顏色較淺，調查人員可經由目視判別地層中是否存在 DNAPL 污染物。

如圖 1.4.6-1 之右上方所示，地層中之 TCE 液體將疏水性有機物及染色劑滲入充脹式襯管的內側，造成襯管內側也被染色，且由染色的形狀可約略判斷 DNAPL 之縱斷面，在本例中呈現圓狀，直徑約數公分，說明該場址 TCE 以滴狀存在於地層中。

圖 1.4.6-1 之左下方則為汽油污染所造成之襯管內側染色效果，由於汽油浮於地下水面上，且為連續之面狀，因此地下水位上下之染色劑皆被溶解而滲入襯管內側，並呈現連續式之條紋狀。

因此 FLUTE 之特色除了可以辨別 NAPL 物質是否存在，尚可研判其污染深度、污染形狀，若在場址鑽設多孔 FLUTE，則可研判 NAPL 分布之範圍。

FLUTE 之設置是使用直接貫入式 (Direct Push) 鑽機進行施工，FLUTE 被填裝於鑽機之鑽桿內，並隨鑽桿進入地層。當達到預定設置深度，將水注入並將鑽桿抽出，使 FLUTE 留置於鑽孔中，故 FLUTE 外側襯管即可接觸到裸露之地層，如圖 1.4.6-2 所示。

當 FLUTE 外側襯管接觸到地層中之 NAPL 污染物，便會將染色劑溶解並帶入襯管內側，使襯管內側染色，調查人員即可判別 NAPL 之存在。

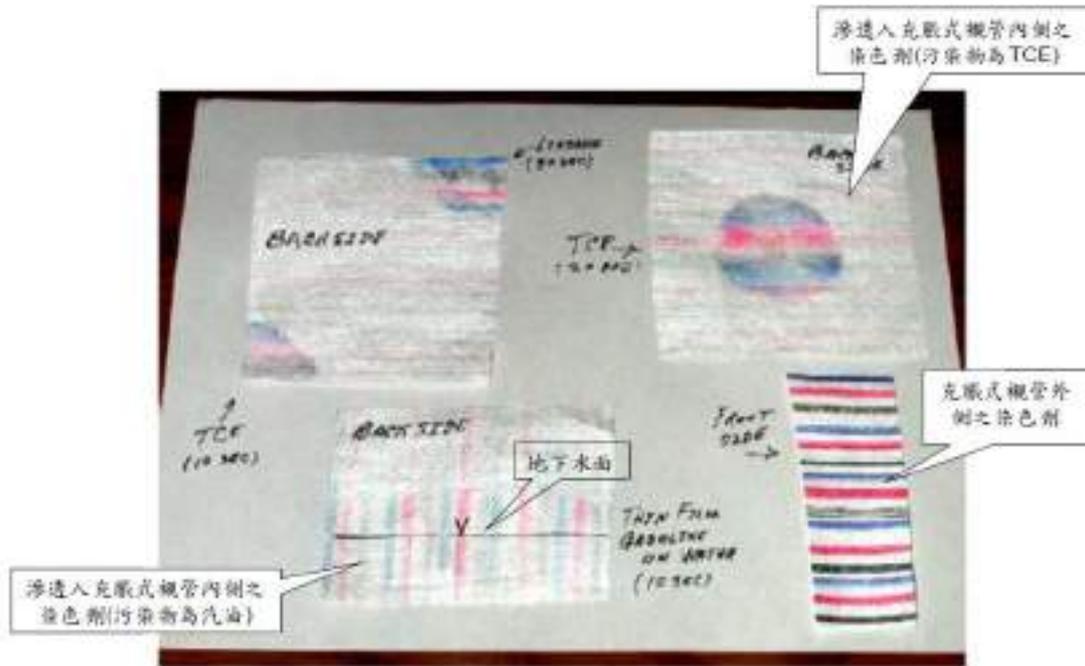


圖 1.4.6-1 充脹式襯管染色效果圖

## 二、適用時機及環境介質

- (一) 當經過初步現場調查，認為地層中可能存在 DNAPL 物質，但地下水樣品中無法找到 DNAPL，或高度懷疑存在 DNAPL 物質，但不確定其位置及深度時，即可採用 FLUTE 進行確認。
- (二) 由於 FLUTE 是在鑽孔中設置，因此進行土壤鑽探後亦可在原鑽孔使用 FLUTE 進一步辨別 DNAPL 之位置、深度、及可能分布範圍。
- (三) 本技術所適用之環境介質，包括：土壤質地屬於砂質、砂質或黏質土壤之未固結土壤通氣層、含水層等。但對於卵礫石層、固結岩層、破碎岩層等地質條件，則由於直接貫入鑽機無法鑽進，可能有所限制；若欲採用其他鑽進工法，則需注意避免造成 DNAPL 沿鑽孔上下交互之污染之可能性。

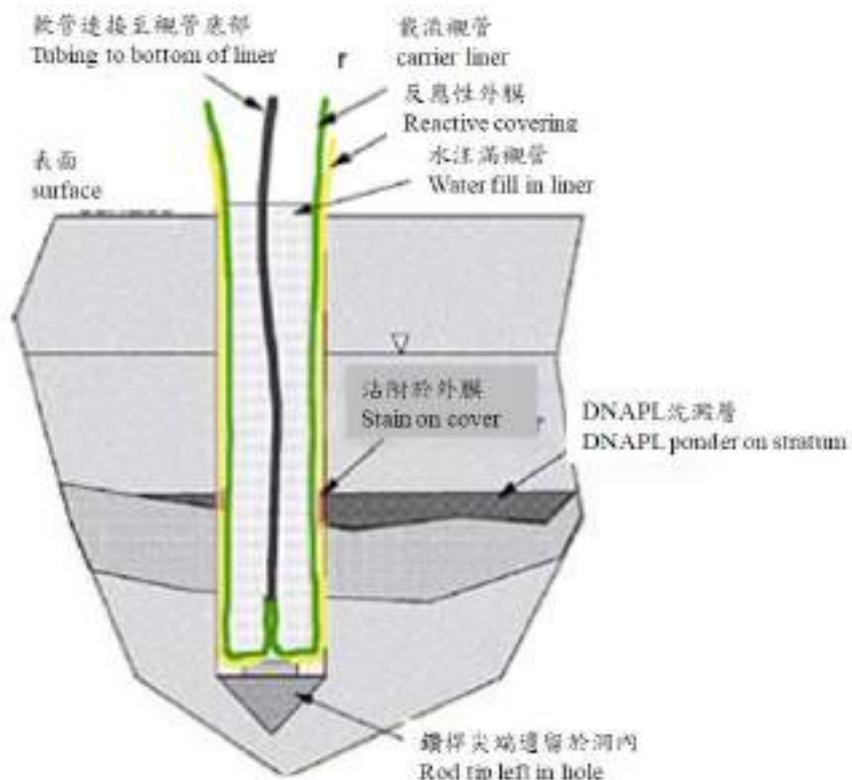


圖 1.4.6-2 充脹式襯管設置示意圖

### 三、設備要求

本技術需與直接貫入鑽機搭配，先進行調查點之鑽孔，才可設置 FLUTE，另需捲輪、水位計、量尺、皂土等現場工具。

### 四、限制

使用 FLUTE 技術，可能有下列限制因子：

- (一) 卵礫石層中(如林口、桃竹苗台地、台中地區)，由於直接貫入鑽機無法鑽進，因此無法採用 FLUTE 技術。若欲在裸孔內設置 FLUTE，則可能有坍塌之危機。
- (二) 在湧砂情形嚴重之地層中(如台南沿海)，可能也無法設置 FLUTE，因為在此類地層中，鑽桿一旦抽離，鑽孔很快會被湧砂填滿。
- (三) FLUTE 之染色效果隨污染物種類、污染物接觸時間而有相當大之差異性，目前無法藉由 FLUTE 之染色效果辨別污染物種類。
- (四) FLUTE 僅可供辨別 DNAPL 存在與否，但無法進行 DNAPL 之定

量分析。且除非 DNAPL 以連續之污染帶形式呈現，否則無法估算 DNAPL 之污染體積。

- (五) 在設置 FLUTE 過程中必須加水，是否會對地下水污染物分布造成影響，目前尚無定論。

## 五、作業程序

FLUTE 之設置作業程序如圖 1.4.6-3 所示，並說明如下：

- (一) 以直接貫入式鑽機將鑽桿壓入地層。
- (二) 將 FLUTE 置入鑽桿中。FLUTE 內側之底部有連接軟管連接至地面之捲輪，捲輪可逐漸將 FLUTE 深入地層中。
- (三) 將鑽桿拉起，為防止 FLUTE 同時被拉起，此時必須加入乾淨水於鑽孔中，此步驟也是最為關鍵之處。
- (四) 鑽桿全部拉出後，FLUTE 暴露於鑽孔中，FLUTE 內側則充滿先前加入之乾淨水，因此外側可緊貼著鑽孔壁。
- (五) FLUTE 於鑽孔中靜置約一小時，使 DNAPL 物質充分與 FLUTE 外側之疏水性有機物及染色劑接觸，並將染色劑滲入 FLUTE 內側。
- (六) 最後轉動地面之捲輪，將連接管拉起，順勢將 FLUTE 拉出。此時 FLUTE 之內側將被外翻，若內側有染色現象即表示該處深度有 DNAPL 存在。FLUTE 之設置作業現場照片如圖 1.4.6-4 所示。

## 六、成本分析

目前在美國設置 FLUTE 之成本為每設置 100 m 需 US.20,000(新台幣六十萬元)，其中 FLUTE 之材料費為每公尺 US.20(新台幣六百元)，其他則為人工設置費及設備租用。

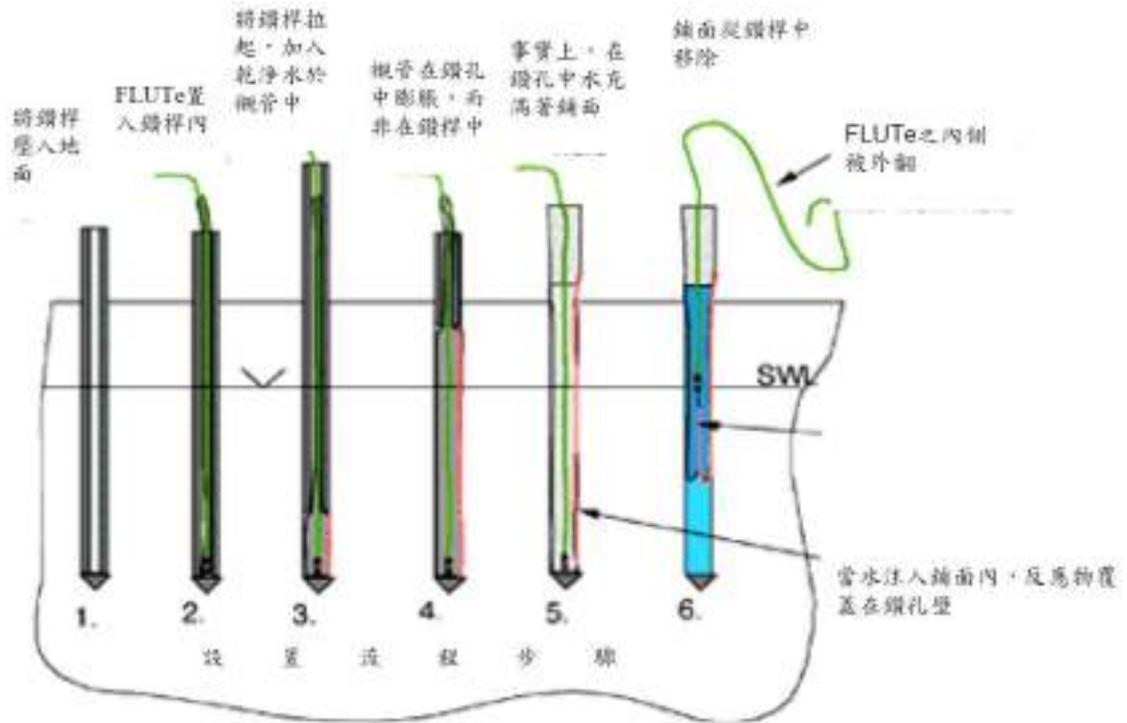


圖 1.4.6-3 充脹式視管設置流程圖



圖 1.4.6-4 充脹式視管設置現場照片圖

## 1.5 現場快速篩選試劑

### 1.5.1 比色法

#### 一、原理

比色法(Calorimetric Test)是利用會產生顏色的化學反應，來定性或定量化學污染物質。比色法的應用方式又可分為檢知管、比色試紙及測試套組，可以對有機和無機污染物提供半定量或定量檢測結果。

針對碳氫化合物分析所設計之比色法套件是藉由 Friedel-Crafts alkylation 反應(圖 1.5.1-1)，使芳香族化合物呈色，此項反應的發生是利用觸媒(如氯化鋁)攻擊芳香族碳氫化合物的烷基(alkyl group)。這些套件中，鹵化烷類(如四氯化碳)最常被用作為萃取劑及試劑，一但加入觸媒後，反應即開始進行並發色(如橘色、紫色)，藉此呈色結果分辨分析物的種類與組成，而由呈色的強度決定其濃度(在特定濃度區間，呈色強度與分析物濃度成比例關係)。

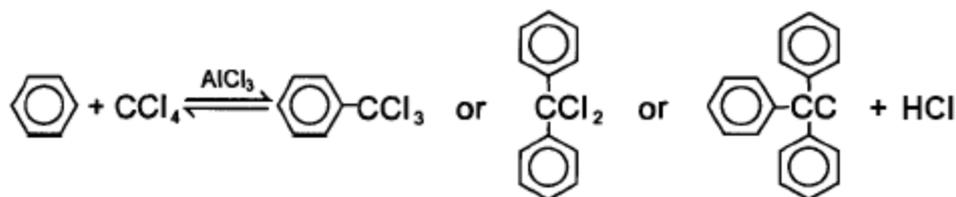


圖 1.5.1-1 Friedel-Crafts alkylation 反應機制

#### 二、適用時機與限制

比色法的應用非常廣泛，例如廢棄物、毒性化學物質水溶性及非水溶性之各類固態或液態樣品。在石油碳氫化合物的部份，比色法可用於分析土壤中與水中的芳香族碳氫化合物(特別是 PAH)。在土壤中其偵測極限大約在 1 至 10 ppm，對於水樣則是小於 1 ppm。

比色法對於汽油、柴油與其他燃油類污染物的分析效果均非常有效，其最大特色在於分析成效與分析物之揮發性無關，使得其在年代較久的洩漏或重油的偵測特別有用。而其最主要的限制之一為當待測

組成的濃度較低時，要由比色盤(圖)比較決定組成的濃度與顏色較為困難。此外，如果污染物是混合物時，呈現暗橘色的較輕之芳香族(如 BTEX)容易被呈現暗紫色的較重組成(如 PAH)所遮蔽，因此最好在分析前能預先知道樣品的組成。

### 三、設備需求

比色法的基本設備需求主要包括試劑膠囊(包括成色計與觸媒)、試劑瓶、標準樣品或校正用樣品以及比色盤或比色圖。

目前攜帶型分光光度計(可見光源/紫外光源或是只提供單一波長的發光二極體)已經逐漸取代比色盤，並可藉此克服前述在判讀呈色現象的限制。若使用的是可見光/紫外光燈源，還需要透過菱鏡或光柵的效應，產生特定波長範圍的光波，利用單一波長光線照射樣品，樣品吸收此特定波長後，隨即放射另一波長，藉由光偵測器(Photocell)量測樣品對光源的吸收度或穿透度，再經過光電倍增管提高靈敏度，光電倍增管將訊號增強並轉換成電流，產生毫伏特(mV)的電位訊號，微處理器將電位訊號儲存，並轉換成適當測量單位，以吸收度或穿透度的差異計算樣品濃度，最後透過顯示器輸出結果並加以記錄。

### 四、工作程序

比色法可用於土壤與水樣的分析，套件本身會提供萃取與比色分析芳香族碳氫化物所需之試劑與設備。比色盤(圖)則是利用已知濃度的多種組成所建立的色表，並藉由與之比較決定分析物的成分與大概濃度。工作程序依基質而有所差異，分別說明如下：

#### (一) 水樣分析

首先將水樣倒入分液漏斗中，然後加入溶劑/萃取劑，搖晃後萃取液分離於分液漏斗底部。將萃取液分離至試管中，再加入觸媒並強力搖晃，讓芳香族化合物與鹵化烷試劑反應進行。最後將試管中所呈現之顏色與標準比色盤(圖)比較，以決定組成與濃度。

#### (二) 土樣分析

土壤分析的方法與水樣的方法大致相同，但必須進行分析物

的萃取步驟。首先秤取適當重量的土壤樣品，將溶劑/萃取液加入土樣中，劇烈搖晃後等待溶劑/萃取液分離，接著將萃取液分離至試管中，再加入觸媒並搖晃。最後將試管中所呈現之顏色與標準比色盤(圖)比較，以決定組成與濃度。

## 五、品保與品管

土壤與水樣的檢測套件均屬於篩選等級的分析工具，由於土壤測試對芳香族碳氫化合物產生變動的反應、具有多項干擾因素以及使用上較為困難，所以其數據品質等級被歸於 DQL 1A 的分析方法。水樣的部份則較為準確，可提供冪次級的數據，所以被歸於 DQL 1B 的等級。在分析過程中仍應針對精密度與準確度進行必要的確認，其建議方式如下：

### (一) 精密度測定標準

為一組重複分析其各測定值間相符的程度。精密度可由各測定值間之相對標準偏差(Relative standard deviation, 簡稱 RSD, 重複次數大於 2 時)或相對差異百分比(Relative percent difference, 簡稱 RPD, 或稱 Relative range, 簡稱 RR, 重複次數等於 2 時)來表示。

### (二) 準確度測定標準

為分析檢測值與真值或可接受參考值間的符合程度。指一測定值或一組測定值之平均值與確認值或配製值接近的程度，準確度可由已知確認值或配製值之標準品來表示，由分析參考標準樣品或品管樣品的回收率%表示。

## 六、工作注意事項

- (一) 在使用比色法時，若有氯化有機物或溶劑存在，可能會造成錯誤的正偏差，因此解讀時必須注意現場存在此類有機污染物的可能性。
- (二) 黏土質的土壤可能造成橘色的顏色干擾，導致顏色解讀上的錯誤。同時黏土質也可能增加萃取的困難度。

(三) 反應產物對紫外光很敏感，隨時間增加可能導致高估污染物濃度的潛勢，因此呈色時間與光線的控制應注意。通常成分與濃度的判斷要在呈色的 30 分鐘之內完成。

(四) 當樣品濃度低於 1000 ppm 時，必須使用庚烷-四氯化碳溶劑進行萃取，以工安的角度而言，應注意後續廢棄物的處置，通常可以送回給製造商。當分析高濃度的土壤樣品時(> 1000 ppm)，可以使用庚烷而不需要四氯化碳進行萃取。

## 七、成本分析

成本分析的主要分項包括設備成本、耗材成本、支援設備成本、人員費用與廢棄物處置費用。另外還可能包括查核費用、差旅費用、採樣與運送費用等，均會隨場址而有相當大的差異。以一個實際案例之費用分析來看，使用比色法檢測(RemediAid Kit)與傳統方法檢測的調查費用分別為美金 8,510 元(200 個樣品)與 42,170 元(209 個樣品)，相差近五倍之多，但是二者在數據資料等級仍具有一定之差異。此外，透過成本分析顯示，比色法檢測的主要成本在於耗材(61%)與人員費用(23%)。

## 八、調查結果相關性

調查結果相關性的過程，其工作項目至少包括：

(一) 選擇驗證用參考方法：參考方法的選擇以公告方法為優先考量(例如以土壤中 TPH 而言，採用環檢所公告之 NIEA S703.60B 的方法)，若無適當之公告方法可以參考，則可選擇國外政府或公認之分析方法(例如 USEPA、ASTM、API 等)。

(二) 參考實驗室的選擇：首先應以認證實驗室為優先，並考慮執行檢測與建置分析方法開發經驗。此外，對於計畫所設定之標的亦需能提供適當的配合。

(三) 結果比較分析：上述以傳統試驗室所建立之數據等級為最高之 DQL 3，而現場篩選之方法則依各項方法的數據等級，應審慎解讀驗證之結果。數據等級為 DQL 3 之方法，可採取數據直接比對甚至以線性迴歸計算其之間的比例。隨數據等級下降，則可能應

該以可比較性與趨勢相同等較半定性的方式加以比較。

## 1.5.2 免疫學測試法

### 一、工作原理

免疫分析法應用的範圍廣泛，橫跨醫療、藥理、保健、環境、農業與食品等領域，其特性是抗體與待測物具有高專一性、高特異性、與高親和性，可精確地連結在一起，像鎖與鑰匙一般地相互作用，並以酵素連結抗體為放大訊號的標示，因此，有相當高的靈敏度，藉著檢測顏色變化來定性和定量。抗體(Antibody)是一種免疫球蛋白(Immunoglobulin, Ig)，具有與侵入動物體之物質結合的能力，抗原(Antigen)是刺激動物產生抗體的物質。抗體和抗原的結合主要是藉著彼此之間立體空間相合而互相結合，抗原被抗體識別的位置稱為抗原決定基(Antigenic Determinant)，抗原決定基通常由4、5個胺基酸及4、5個單醣組成，抗原和抗體之間的結合力為庫倫靜電力、氫鍵、疏水性官能基間交互作用(hydrophobic-hydrophobic interaction)、凡得瓦爾力、及同性靜電排斥力組成的總結合力，由於彼此間非共價鍵結，當pH值、溫度、或離子強度改變時，都可能使抗原和抗體彼此分離。

抗體的製備是免疫分析關鍵步驟，抗體一般是由四股醣蛋白質組成，其中兩股是重鏈，兩股是輕鏈，由雙硫鍵連結這四股醣蛋白質，一般抗體有兩個口袋，就是與特定抗原鍵結的位置。

免疫分析法大致上可以分為酵素免疫分析法(Enzyme Immunoassay, EIA)、放射性同位素免疫分析法(Radio Immunoassay, RIA)、螢光免疫分析法(Fluorescent immunoassay, FIA)，分別說明如下：

- (一) 在場址評估方面主要是使用酵素連結免疫吸附分析法(Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)，ELISA的原理是利用抗原與抗體結合的專一性，加上酵素的呈色(或產生螢光)反應，來顯示特定污染化合物是否存在。在酵素連結免疫吸附分析法中，將酵素以化學鍵連結至抗原或抗體後，再用來測定免疫複合物(immune complexes)，而此免疫複合物是在一固相(solid phase)

中形成。實驗中將過多且未被結合到免疫複合物上的酵素連結抗體洗去，接著加入受質與酵素反應，會產生有顏色產物，經由光學密度(optical density)的測量，即得到半定量或定量結果。有些情況下，抗原和抗體結合後，酵素活性會降低，就不能分開結合的(bound)與游離的(free)抗原或抗體，而直接測定其光學密度。視有無需要分開結合的與游離的抗原或抗體，又分為同質與異質兩種。

### 1. 同質(Homogeneous)

由於立體障礙的緣故，酵素連結抗體活性受到抑制，所以不分開結合與游離的待分析物，直接測其反應變化量，又稱為酵素多重免疫分析(Enzyme Multiplied Immunoassay, EMIT)。

### 2. 異質(Heterogeneous)

酵素連結抗體活性不會受到抑制，所以，分開結合與游離的待分析物，才測其反應變化量，又分為競爭及非競爭兩種。

#### (1) 競爭

固定在試管上的抗原與樣品中抗原競爭固定量酵素連結抗體，或是樣品中抗原與固定量酵素連結抗原共同競爭固定在微量盤孔洞中的抗體，所測得訊號與樣品中抗原濃度成反比。

#### (2) 非競爭

過量酵素連結抗體與樣品中抗原反應，又稱為三明治免疫分析法，是把抗體(1)固定在固相上，若加入的樣本中含有抗原，則此抗原會被專一性地留在固相上，同時洗去其它雜質；然後加入第二抗體(2)，此抗體也會與該抗原有專一性結合；接著用對抗第二抗體(2)的二次抗體-酵素連結體(2nd Ab-Enz)與第二抗體(2)結合，則可測定樣本中抗原的含量。因為只有當樣本中含有抗原時，第二抗體與酵素的連結體才會留在固相上；因此，測定固相上所留的酵素量，即可得知樣品中的抗原量，所測得訊號與樣品中抗原濃度成正比。

三明治免疫分析法的專一性很高，因為樣品進行了兩次專一性辨認(抗體 1 與抗體 2)，因此背景值會很低。惟樣品的抗原必須是多價抗原，並可以誘生兩種以上的抗體；另外，抗體 1 與抗體 2 必須來自不同動物來源，以免後來的二次抗體-酵素連結體連接到抗體 1 上去。另外，亦可以直接在抗體 2 上面連接酵素，則不須二次抗體-酵素連結體，但是此種連結反應困難度比較高，比較難使用簡單的設備自行合成。

與目標分析物結合的酵素連結抗體被當作示蹤劑，此技術經不同變化的設計後，都可成為理想的免疫分析法。因此可為一個變通的、確實的、操作簡單的、使用經濟且穩定的試劑、及能經由一固相促使結合的免疫複合物與游離態的物質分開等性質。具有敏感度高、選擇性好、不含放射性物質、比放射免疫分析法安全，另外亦具有較長的保存時間、可以攜帶至採樣現場、使用容易(大部分應用)、快速(大部分應用)、檢測費用不昂貴、可檢測範圍廣、偵測極限低等優點。

- (二) 放射性同位素免疫分析法在環境分析上則比較不合適。一般放射免疫分析法是在醫院中固定的地點使用，不像其他免疫分析法可以攜帶前往現場進行檢測；此外，一般使用之放射性元素  $^{125}\text{I}$  的半衰期短， $^{125}\text{I}$  的半衰期為 60 天，經常來不及檢測，樣品就不見了，而且，需要檢附的相關文件也多，且放射性物質在操作上具有高危險性。
- (三) 螢光免疫分析法目前主要有二種方法。第一種為自動流動注射免疫分析(An automated flow injection immunoanalysis)，這方法被發展用來檢測水樣中農藥含量，將特殊抗體固定在薄膜上，反應物被推送穿越這薄膜，以時間來控制反應量，會產生螢光的受質與酵素反應後，使用螢光偵測器測量，這方法應用在農田、工廠排放水的檢測；第二種是使用塗覆抗體纖維質的螢光電極(A fluorescent probe with an antibody-coated fiber)，可檢測多氯聯苯的濃度，並能夠進一步區分多氯聯苯中，不同的阿洛可樂同源物

(Aroclors congeners)。上述免疫分析法的偵測極限都差不多，主要影響偵測極限的是待測物質和樣品基質。

酵素免疫分析儀(ELISA reader)與分光光度計原理雷同，皆是利用吸光度來定量樣品，吸光度與樣品中待測物質含量成正比。根據比爾(Beer)定律，光被吸收的量，正比於光程中產生光吸收的分子數目。此可用一數學式表示， $\log(I/I_0) = \varepsilon CL$ ，數學式中， $I_0$  和  $I$  分別為入射光及通過樣品後透射光強度， $\log(I/I_0)$  稱為吸光度(absorbance)或光密度(optical density)， $C$  為樣品濃度， $L$  為光程， $\varepsilon$  為光被吸收的比例係數，稱為摩爾吸收係數。

## 二、適用時機與限制

由於免疫學檢測法既簡單又靈敏，在簡單的實驗環境中，可被用來測定微量土壤和地下水樣品。免疫學檢測套件通常適用於量測化合物族群(如短鏈碳氫化物、TEX)或一個組成範圍的化合物(如 PAH、TPH)。雖然方法本身可以提供定量的篩選資訊，通常多用於決定樣品是否高於行動基準(action level)，亦即決定樣品有污染物存在。

## 三、設備需求

免疫學檢測法的基本設備需求主要包括

- (一) 抗體試劑瓶
- (二) 酵素
- (三) 標準樣品或校正用樣品
- (四) 比色計(differential photometer)
- (五) 樣品清洗套件。

依據製造商的不同，亦會提供選配套件，如單純為測試土壤樣品之特殊設備組合以及通用套件設備組合。

## 四、工作程序

免疫學檢測法之工作方法及程序隨不同製造商的套件而有所不同，但主要步驟仍是相近，而工作方法中又依基質不同分成水與土壤的工

作程序。以水樣而言，通常可以直接分析，但土壤樣品則必須經過一些萃取的步驟，因此為一種間接分析的方法。由於免疫學測試法是作為半定量的篩選，因此工作程序上包括設定行動濃度值以及觀察污染物濃度是否超出該濃度值。另亦可設定多層次的行動濃度值，而樣品濃度則是與不連續的濃度範圍比較(例如高於 100 ppm 但低於 500 ppm)。運用多點檢量線可用於進一步定義濃度，而標準品通常可由製造商取得。分析過程中每一批次均應分析標準品與空白樣品。以下即分別針對水樣與土壤樣品之測試方法加以說明：

#### (一) 水樣分析

將水樣置於含有適用於特定污染物之抗體的反應容器或試管中，接著加入酵素，在經過特定時間後，將樣品洗出，留下與抗體鍵結之分析物與酵素，最後測量污染物濃度。

#### (二) 土樣分析

土壤分析的方法與水樣的方法相同，只是增加分析物的萃取步驟。因此首先將醇類萃取液(通常為甲醇)加入土壤樣品中萃取污染物，接著搖晃後將萃取液取出。將萃取液置於含有適用於特定污染物之抗體的反應容器或試管中，接著加入酵素，在經過特定時間後，將樣品洗出，留下與抗體鍵結之分析物與酵素，最後測量污染物濃度。

### 五、品保與品管

免疫學測試套件可用於水中與土壤中短鏈碳氫化合物(TEX)、PAH 與總石油碳氫化合物(TPH)。此方法可提供 DQL 1B 等級的篩選，但在滿足測試套件的偵測極限下，則仍能以高度的確定性決定污染物濃度，因此也可以用於量測未受污染之樣品，而選擇適當之偵測極限的套件為品管的第一步，在過程中針對精密度與準確度進行必要的確認，其建議方式如下：

#### (一) 精密度測定標準

重複四次檢測同一個樣品，樣品包括盲測土壤樣品、環境土壤樣品及萃取樣品，並應分為戶外和室內兩種情況加以探討。

## (二) 準確度測定標準

比較盲測土壤樣品和萃取樣品的檢測值與配製值。

## (三) 儀器偵測極限

污染物	土壤中	水中
TPH	2 to 150 ppm	0.1 to 0.5 ppm
BTEX	1 to 5 ppm	10 to 500 ppb
PAHs	0.2 to 25 ppm	1 to 500 ppb
Pesticides	1 to 100 ppb	50 ppt to 10 ppb
PCBs	0.1 to 1.0 ppm	Less than 1.0 ppb
PCP	0.1 to 0.5 ppm	0.1 to 5 ppb
Explosives	0.2 to 1.0 ppm	0.5 to 5 ppb

註：目標分析物質的偵測極限因測試包之基質複雜性、干擾、製造商而有所改變

## 六、工作注意事項

- (一) 免疫學量測套件通常適用於分析短中長度的直鏈碳氫化合物(<7個碳的芳香族與<C11的脂肪族)，對於分析潤滑油或液壓油則效果不佳。
- (二) 免疫學量測的設計是針對特定分析物或特定範圍的分析物，這些套件無法量測所有的石油碳氫化合物。
- (三) 交叉反應可能發生且可能造成正偏差的錯誤，例如設計用於偵測TEX的試劑，在有高濃度的PAH存在時，可能得到正偏差的結果。這些交叉反應的資料，套件的製造商應該均會提供，而這類的資訊對於解讀測試結果更是重要。
- (四) 由於苯並不易偵測，BTEX的測試套件實際上是量測相當廣泛的短鏈碳氫化合物，這些套件提供汽油組成中的相關TEX濃度，而且特別針對二甲苯進行選擇性設計，對於其他芳香族化合物的靈敏度則變化較大。
- (五) 免疫學量測套件必須於製造商所建議之特定溫度區間使用，一般為4°C至32°C，同時必須保存於適當溫度之下。所有套件均有保存期限，因此使用前要注意藥品的有效期。
- (六) 土壤分析時必須注意有機物與粘土可能造成萃取效率的限制，因而比其他土壤樣品需要較長的萃取時間。此外，現場萃取PAH的效能可能比實驗室中所使用之萃取方法差，而且土壤中若有過多

的油料可能影響 PAH 的分析結果。

## 七、成本分析

成本分析的主要分項包括設備成本、耗材成本、支援設備成本、人員費用與廢棄物處置費用，另外還可能包括差旅費用、採樣與運送費用等，會隨場址而有相當大的差異。以一實際案例為例，使用免疫學檢測(EnSys Petro Test System)與傳統方法檢測的調查費用分別為美金 10,210 元與 41,290 元，相差四倍之多，但是二者在數據資料等級上具有一定之差異。透過成本分析顯示，免疫學檢測的主要成本在於耗材(75%)與人員費用(16%)。

## 八、調查結果相關性

調查結果相關性的過程，其工作項目至少包括：

- (一) 選擇驗證用參考方法：參考方法的選擇以公告方法為優先考量(例如以土壤中 TPH 而言，採用環檢所公告之 NIEA S703.60B 的方法)，若無適當之公告方法可以參考，則可選擇國外政府或公認之分析方法(例如 USEPA、ASTM、API 等)。
- (二) 參考實驗室的選擇：應以認證實驗室為優先，並考慮執行檢測與建置分析方法開發經驗。此外，對於計畫所設定之標的亦需能提供適當的配合。
- (三) 結果比較分析：上述以傳統試驗室所建立之數據等級為最高之 DQL 3，而現場篩選之方法則依各項方法的數據等級，應審慎解讀驗證之結果。數據等級為 DQL 3 之方法，可採取數據直接比對甚至以線性迴歸計算其之間的比例。隨數據等級下降，則應該以可比較性與趨勢相同等較半定性的方式加以比較。以免疫學測試的方法而言，多以濃度區間是否重疊為比較的基準。

### 1.5.3 濁度法

#### 一、原理

濁度法之原理是將土壤中的碳氫化合物萃取至溶液中，再利用濁度計量測懸浮於溶液中之萃取物所造成的濁度高低(亦即溶液的相對

混濁程度)。為維持懸浮狀態，懸浮溶液會造成所萃取的 TPH 與溶液分離(亦即沉澱)。因為土壤中的 TPH 直接與所量測到的濁度成正比，因此可建構檢量線概估 TPH 的濃度，而濁度計法所能提供的數據是在 ppm 濃度範圍。

## 二、適用時機與限制

濁度法主要是應用於篩選檢測土壤中總石油碳氫化合物的濃度，可用於鑑別不飽和層中污染源存在之區域。此類的測試適用於定性篩選土壤中所含中間碳數石油碳氫化合物(例如：柴油、燃料油與潤滑油)的量，對於高分子量的碳氫化合物較敏感，能夠偵測 C<sub>12</sub> 至 C<sub>30</sub> 之間的碳氫化合物，特別是對偵測範圍末端的碳氫化合物具備最高的敏感度。

## 三、設備需求

採用濁度法進行篩選時所使用的基本工具包括萃取液、發色試劑與可攜式濁度計。

## 四、作業程序

利用濁度法進行現場篩選的工作，主要分成下列三項步驟：

- (一) 萃取：使用甲醇做為萃取液自土壤樣品萃取出碳氫化合物。於加入萃取液後，加以攪拌，然後靜置沉澱。
- (二) 過濾：使用過濾器過濾土壤，並將濾液加入含發色液(developing solution)的樣品瓶。
- (三) 分析：待發色液(白色濁度)達成平衡，使用濁度計量測樣品濁度，濁度高低與石油碳氫化合物的濃度成正比。

## 五、工作注意事項

使用濁度法篩選石油碳氫化合物時，因方法之限制而衍生之操作注意事項歸納如下：

- (一) 油品組成應先加以初步鑑別以利自廠商所提供之對照表中選擇適當的感應因子(Response Factor, RF)。
- (二) 濁度計應於現場使用廠商提供之套件進行空白歸零與標準樣品

校正，一般每十個樣品即應分析一次空白樣品與標準樣品以確認儀器之穩定性。

- (三) 含豐富有機質的土壤可能會對萃取程序的效能造成限制或正偏差干擾。
- (四) 非污染區域的背景值可以做為結果的校正參考。
- (五) 濁度法的適用溫度在 4°C 致 40°C 之間。
- (六) 高濕度或含水量的土壤樣品可能造成萃取液中碳氫化物濃度的稀釋作用，造成負偏差的結果。

## 六、成本分析

一般濁度計法係採用套件的方式進行(如 DEXSIL 公司的 PetroFLAG)，單一樣品的成本隨分析樣品數量而有所差異。分析樣品在 30 個以內，每個樣品分析成本約為美金 28 元，超過此數量之分析成本則最低可降至美金 10 元左右。

## 1.6 浮油厚度量測

地下水體中浮油厚度之量測雖不屬於現地快速篩選分析的關鍵技術，但在進行油品儲槽相關之調查時，確是相當重要的工作之一，因為浮油的存在與否，會關係到許多現場快速篩選工作的進行與所得資料的解析(例如 MIP 的應用)。同時在後續對於場址況的評估(如浮油量)以及整治工作的進行亦有相當重大的影響。因此本節針對現場進行浮油厚度量測的常用方法加以說明。

### 一、工作原理

量測浮油厚度的方法相當多元，目前常用的包括油水位計、碳氫化物色帶以及貝勒管等。當然其相關原理與方法的優劣亦有所差異，分別說明如下：

- (一) 油水位計：目前最常用係採用光學與導電度電路的組合量測電極。紅外線光源與偵測線路適用於量測監測井中的液位，當電極接觸液相時，紅外光線因反射遠離偵測器，促使電路發出斷路訊號

。在液相中當導電度發生明顯差異時，導電度電路會發出訊號，以偵測油相(低電導度)與水相(高導電度)的界面。藉由此二種偵測方式的組合即可做為浮油厚度的工具。

(二) 碳氫化物色帶：此類的色帶通常是以親油性材質製成，當碰到油相時，會被色帶吸收造成變色，相對的水相則不會造成變色。

(三) 貝勒管：即用一般之貝勒管伸入浮油層以下，進行採樣，並在取出後量測其管內的浮油厚度。

## 二、適用時機與限制

前述各項方法之優劣之處。使用油水位計較無限制，但對於電極之現場除污工作較費時。碳氫化物色帶與貝勒管在量測深度上的限制較大，但有設備與使用成本的優勢。又碳氫化物色帶在浮油與比水重之有機污染物同時存在時，不易使用，且每次均需使用新的色帶，無法以同一部分進行重複量測。使用貝勒管時，必須確認貝勒管長度超過浮油厚度，且貝勒管的置放位置不易精確的置放於油水界面，量測亦不易。另外，當浮油的黏滯度較高時，浮油不易流入貝勒管的採樣口，導致所測得浮油厚度少於實際井中之浮油厚度。於表 1.6-1 中彙整比較三種方法的限制：

表 1.6-1 浮油厚度量測方法比較

量測方法	準確度	使用性	成本
油水位計	高	容易	普通
碳氫化物色帶	普通	普通	低
貝勒管	低	普通	低

## 三、設備需求

量測浮油厚度之相關設備較為簡單，以油水位計而言，除油水位計設備本身，應同時備有除污設備，如洗瓶、擦拭布等。碳氫化物色帶的部分，則應至少準備色帶與量尺。使用貝勒管量測浮油厚度時，如同色帶般應至少準備長度足夠之貝勒管與量尺。

## 四、工作程序

有關三種量測方法的相關之工作程序，分別說明如下：

- (一) 油水位計：將量測電極緩慢放入監測井中，當第一聲訊號響起時，紀錄深度，此為浮油液面。在持續將電極下降至第二聲訊號響起，此深度為油水界面。以上二深度之差即為浮油厚度。
- (二) 碳氫化物色帶：將已知長度的色帶放入監測井中，並將一端留置於井口固定，經過數秒後，將色帶完全拉出，以量尺量測基準點至變色段之開始與結束之長度，二者的差即為浮油厚度。
- (三) 貝勒管：將貝勒管緩緩放入監測井中，決定一放入深度使其底部進樣口至少比油水界面低 4 英吋(即在水中)。當採樣完成後，拉出貝勒管並量測管中浮油的厚度。

## 五、工作注意事項

除前述有關不同方法之限制以外，在量測浮油厚度時亦應注意以下事項：

- (一) 不同方法的選擇取決於監測或調查計畫的需求，包括對於成本與準確度的要求。
- (二) 當場址確定有浮油存在時，應注意現場人員相關之安全設備。
- (三) 採用油水位計時應注意井中之障礙物，避免在量測時，因障礙物之羈絆而導致設備損壞。

## 1.7 攜帶式 X 射線螢光分析儀

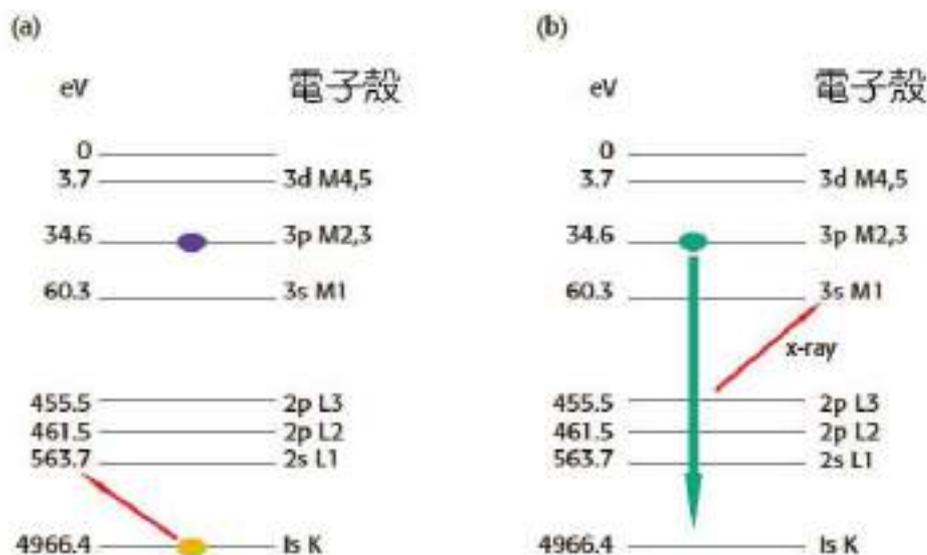
油品儲槽系統污染物亦可能有重金屬，例如含鉛汽油成分中之鉛，因此現場重金屬含量篩試亦可作為場址快速評估之參考，常用之重金屬篩試方法為 X 射線螢光光譜儀(X-ray fluorescence, XRF)，目前已發展攜帶式 X 光螢光光譜儀供現場使用，本項技術為非破壞性的元素定性和定量分析的技術，其原理是根據被入射 X 光提昇到激發態的樣品，在回復到基態時，所放射的 X 光螢光，具有因元素種類和含量不同而有不同的波長 X 光射線的特性與強度，故可進行定性、定量研究。

### 一、原理

X 射線螢光光譜儀之原理為利用 X-光束照射經前處理後之土壤，激

發土壤中重金屬原子，當原子自激發態回到基態時，偵測所釋放出來的螢光，經由分光儀分析其能量與強度後，可提供土壤中重金屬元素種類與含量，具有快速、非接觸、非破壞性及多元素分析等特點。

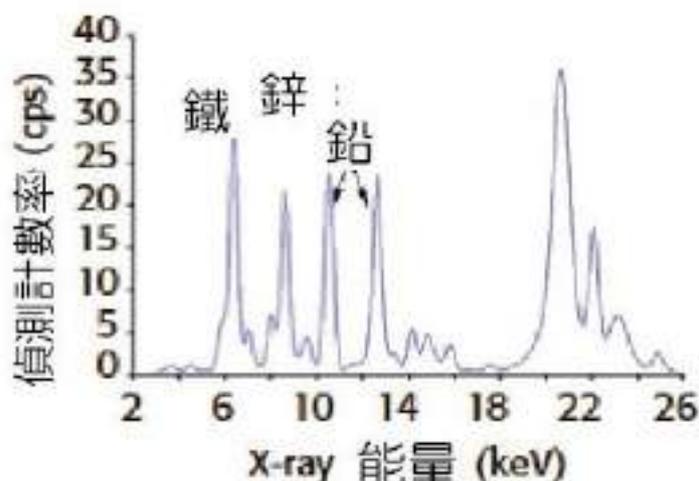
其工作理論可由圖 1.7-1 之電子軌域圖來做說明，主量子數  $n=1$  的軌域稱為 K 殼，即最內層電子軌域，此層軌域的電子稱 K 電子；主量子數  $n=2$  的軌域稱為 L 殼，此層軌域的電子稱 L 電子；主量子數  $n=3$  的軌域稱為 M 殼，此層軌域的電子稱為 M 電子。當一個高能的放射線進入原子的最內殼層，視能量的大小激出 K 電子或 L 電子，接著 L 電子或 M 電子則轉移填補被激出電子的空位並放出 K 螢光 X 射線或 L 螢光 X 射線。



資料來源：Volker Thomsen and Debbie Schatzlein, "Advances in Field-Portable XRF", *Spectroscopy*, 17(7), July 2002

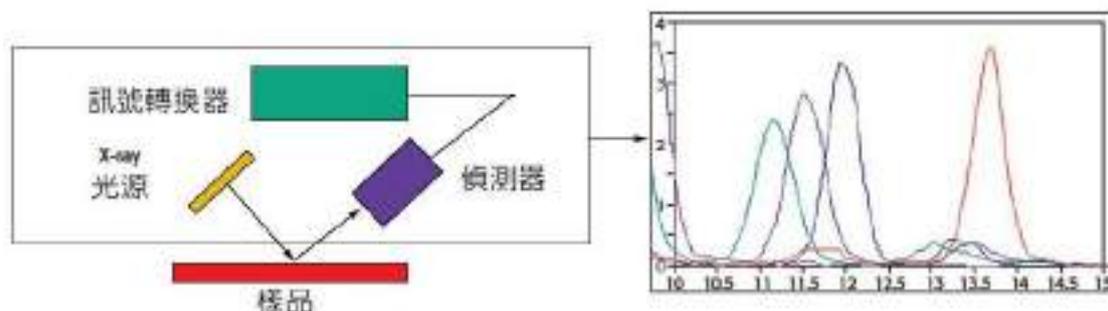
圖 1.7-1 原子能階與 X-ray 射線產生

土壤樣品經 X 射線照射後產生能量光譜，如圖 1.7-2 所示，能量光譜經 XRF 內部之偵測器接收後(如圖 1.7-3)，即依其能量大小判斷重金屬濃度高低，將轉換訊號值(濃度值)顯示於 XRF 儀表中。XRF 進行重金屬偵測值與實際值進行比對，於大部分重金屬偵測均能得到良好之線性關係。



資料來源：Volker Thomsen and Debbie Schatzlein, “Advances in Field-Portable XRF”, *Spectroscopy*, 17(7), July 2002

圖 1.7-2 土壤樣品之能量光譜



資料來源：Volker Thomsen and Debbie Schatzlein, “Advances in Field-Portable XRF”, *Spectroscopy*, 17(7), July 2002

圖 1.7-3 XRF 探測原理

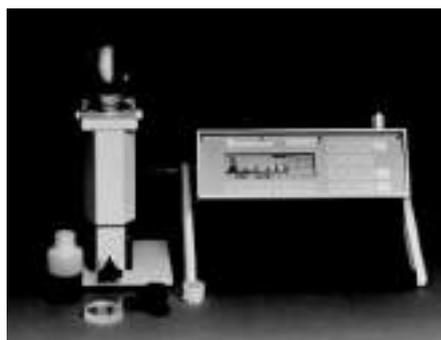
## 二、 設備需求

### (一) 攜帶式 X 光螢光光譜儀

以美國國內常用之設備為例，所使用之各式攜帶式 X 射線螢光偵測器如圖 1.7-4 所示，包括 TN Spectrace 9000、Metorex X-MET 2000、NITON XLi/XLt-700、Scitec MAP Spectrum Analyzer 等。該等 XRF 製造廠，原設計係為偵測油漆中的重金屬鉛，經研究改良後以偵測不同重金屬物質。XRF 通常會使用一種以上的放射源，例如 Fe-55、Cd-109、Am-241 或 Cm-244。其中，NITON 公司所生產之 XL 系列 XRF 為國內土壤污染調查作業中較常使用之機

型，以 NITON XL 700S 為例，其所使用的放射源為 Fe-55、Cd-109、Am-241。

- (二) 備用電池或充電器
- (三) 聚乙烯製樣品承裝器
- (四) X 射線端視窗上用之薄膜
- (五) 研鉢和碾槌
- (六) 樣品瓶
- (七) 篩網
- (八) 烘箱



(a) TN Spectrace 9000



(b) Metorex X-MET 2000



(c) NITON XLi/XLt-700



(d) Scitec MAP Spectrum Analyzer

圖 1.7-4 各型攜帶式 X 射線螢光偵測器

### 三、 作業程序

現地使用攜帶式 XRF(Field Portable X-ray Fluorescence, FP-XRF) 進行土壤樣品偵測時，土壤樣品通常需經過前處理，以降低對偵測之干擾。環境部國家環境研究院已公告「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法」(95 年 4 月 15 日, NIEA S322.60C)，相關之作業程序可參考該方法之相關規定。

### 四、 適用條件與限制

#### (一) 適用條件

XRF 可用於檢測原子量大於 16 元素，但不適用於鋰、鈹、鈉、鎂、鋁、矽或磷。美國環保署 Method 6200 指出攜帶式 XRF 適用之元素包含銻(Sb)、砷(As)、鋇(Ba)、鈣(Ca)、鉻(Cr)、鈷(Co)、銅(Cu)、鐵(Fe)、鉛(Pb)、錳(Mn)、汞(Hg)、鉬(Mo)、鎳(Ni)、鉀(K)、銣(Rb)、硒(Se)、銀(Ag)、鐳(Sr)、鉍(Tl)、釷(Th)、錫(Sn)、鈦(Ti)、釩(V)、鋅(Zn)及鋇(Zr) (2014 年台美講習會, Advanced design application and data analysis for FP-XRF in soil Matrices\_ Module 2 Basic XRF concepts)。

#### (二) 限制條件

針對我國土壤及地下水污染管制法所管制之重金屬項目，XRF 在無干擾物情形下，其偵測極限如表 1.7-1 所示；另依據上述 2004 年美國環保署土壤汞污染現地檢測技術驗證報告，其中，NITON XLt-700 型 XRF 偵測極限介於 13.9 至 69.8 mg/kg 間、NITON XLi-700 型 XRF 偵測極限為 32 mg/kg，Metorex X-MET 2000 型 XRF 偵測極限為 16.5 至 26.9 mg/kg，以上 XRF 偵測極限均以超出國內土壤污染監測基準及管制標準。

XRF 偵測極限受重金屬種類、偵測器型式、放射源種類及放射源強度、測量時間、基質(如土壤或沉積物)物化特性及原子間光譜等之影響，特別是基質樣品之同質性(homogeneity)對檢測數據的影響最為顯著。一般而言，經數值迴歸分析(regression analysis)後，重金屬 XRF 檢測數據與相關實驗室檢測數據之相關係數，砷

、銅、鉛、鋅為 0.90 以上，鉻為 0.70 以上，一般 XRF 之檢測數據會高估鉻濃度之情形。

除偵測極限外，操作技巧、檢測時間、污染物濃度、樣品製備、污染物間干擾及樣品顆粒大小等，皆會影響 XRF 檢測結果(2014 年台美講習會，Advanced design application and data analysis for FP-XRF in soil Matrices\_ Module 2 Basic XRF concepts)。

## 五、 成本分析

以 2004 年美國環保署土壤污染現地檢測技術驗證報告 NITON XLi/XLt-700 之 XRF 機型為例，由 2 位技術人員，依據美國環保署標準方法 Method 6200，檢測 197 組土壤及底泥樣品，平均檢測費用(含人事費)約 60 元美金／樣品(約新台幣 2,000 元／樣品)，可同時檢測 26 種重金屬(含我國法規規定之 8 種重金屬)濃度，相關於國內合格檢測機構之檢測我國土水法管制之 8 種重金屬所需之費用約新台幣 20,000 元，可節省大量檢測費用。此外，由於 XRF 檢測所需的時間短，依前例，NITON XLi/XLt-700 之平均檢測時間(含樣品準備時間)為 5.3 分鐘／樣品。

**表 1.7-1 XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測基準與管制標準**

重金屬項目	XRF 偵測極限* (mg/kg)	土壤污染監測基準(mg/kg)	土壤污染管制標準(mg/kg)
砷	40	30	60
鎘	100	10(食用作物農地之監測基準值為 2.5)	20(食用作物農地之監測基準值為 5)
鉻	150	175	250
銅	50	220(食用作物農地之監測基準值為 120)	400(食用作物農地之監測基準值為 200)
汞	30	10(食用作物農地之監測基準值為 2)	20(食用作物農地之監測基準值為 5)
鎳	50	130	200
鉛	20	1,000(食用作物農地之監測基準值為 300)	2,000(食用作物農地之監測基準值為 500)
鋅	50	1,000(食用作物農地之監測基準值為 260)	2,000(食用作物農地之監測基準值為 600)

## 六、 應用案例 (2014 年台美講習會, Advanced design application and data analysis for FP-XRF in soil Matrices\_ Module 4 Quality control)

污染調查評估小組於該場址，對地表、地質鑽探採樣及底泥採樣樣品進行 XRF 檢測分析，場址現場工作照片及檢測結果如圖 1.7-5。在場址內選取多處進行地質採樣，深度約 1 到 2 英尺(30 到 60 公分)，並將採集樣品放置於塑膠夾鍊袋中進行 XRF 檢測。本次試驗所用為攜帶式 XRF 儀器，樣品檢測如圖 1.7-5(d)所示。檢測結果將直接在現場透過資訊連線於電腦上顯示檢測結果，並且可儲存檢測資料以利後續分析用。本次檢測分析項目包含鉛、砷、鎂及鉻，檢測分析結果與認證數據之回歸圖如圖 1.7-6。本次檢測結果顯示，XRF 檢測數據皆與認證數據呈現相當好得相關性(接近於 1)。



(a) 場址照片



(b) 地質採樣



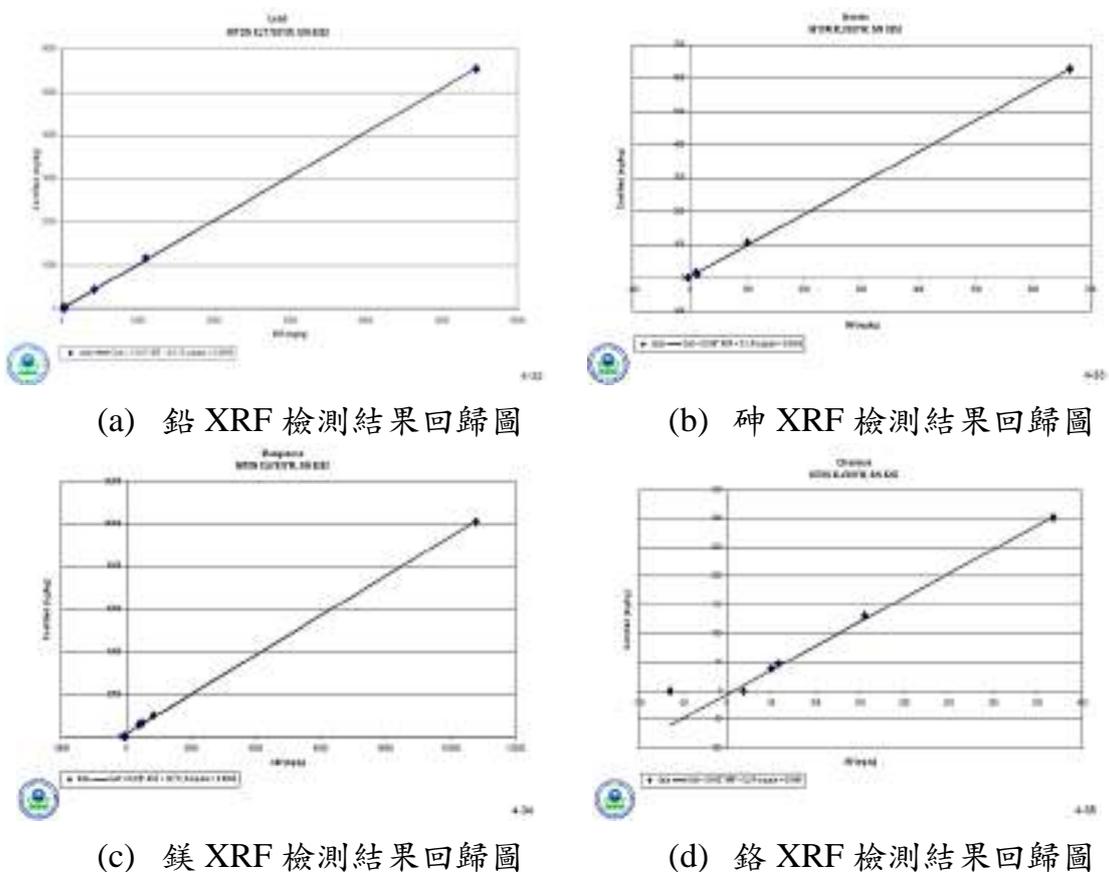
(c) 檢測設備



(d) XRF 樣品檢測

資料來源：Advanced design application and data analysis for FP-XRF in soil Matrices\_ Module 4 Quality control

**圖 1.7-5 XRF 應用案例現場工作圖**



資料來源：Advanced design application and data analysis for FP-XRF in soil Matrices\_ Module 4 Quality control

圖 1.7-6 XRF 應用案例檢測分析圖

## 1.8 發展中現場篩選技術

### 1.8.1 手握型現場氣相層析儀

#### 一、工作原理

美國山迪雅國家實驗室(Sandia National Laboratories)所開發的 ChemLab 為其代表之一，目前尚未商品化。此外，勞倫斯力物莫國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratories)亦開發出手握式氣相層析儀(Hand-Held Gas Chromatography, HHGC)原型機，兩者採用不同之偵測器，但體積較 ChemLab 大(圖 1.8.1-1)。手握式氣相層析儀之工作原理是將污染物濃縮於薄膜上，然後以快速加熱的方式，將污染物導入小型 GC 管柱分離後，以表面聲波感知器(Surface Acoustic Wave,

SAW), 進行污染物偵測。SAW 感知器利用輸入傳送器, 傳送聲波使儀器中的水晶產生振動, 而輸出傳送器則將振動轉換成為可量測的電子訊號。當污染物通過三個包覆不同濃縮薄膜的感知器與一個未包覆薄膜的感知器時, 因為不同污染物的存在, 導致各偵測器的振動頻率改變, 亦即電子訊號的改變, 而不同污染物的濃度則是藉由比較特定感知器與未覆蓋薄膜之偵測器的相差(phase shift)加以定量。

## 二、適用時機與限制

此項技術主要適用於氣相 VOC 的量測, 包括石油碳氫化合物的 BTEX 與氯化有機物的三氯乙烯等, VOC 的分析濃度可至 1 ppm 以下。目前尚無用於將水相中的 VOC 轉換至氣相中的機制與設備, 地下水濃度則仍需利用亨利常數轉換, 所以無法直接量測水中之 VOC。該項技術目前的發展僅止於原型機的製造。



(a)  $\mu$ ChemLab



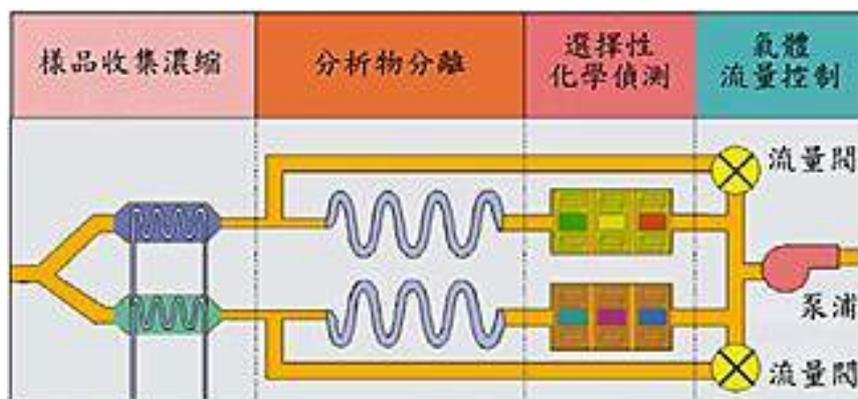
(b) HHGC

資料來源：USDOE (2004)

圖 1.8.1-1 手握式氣相層析儀

## 三、設備需求

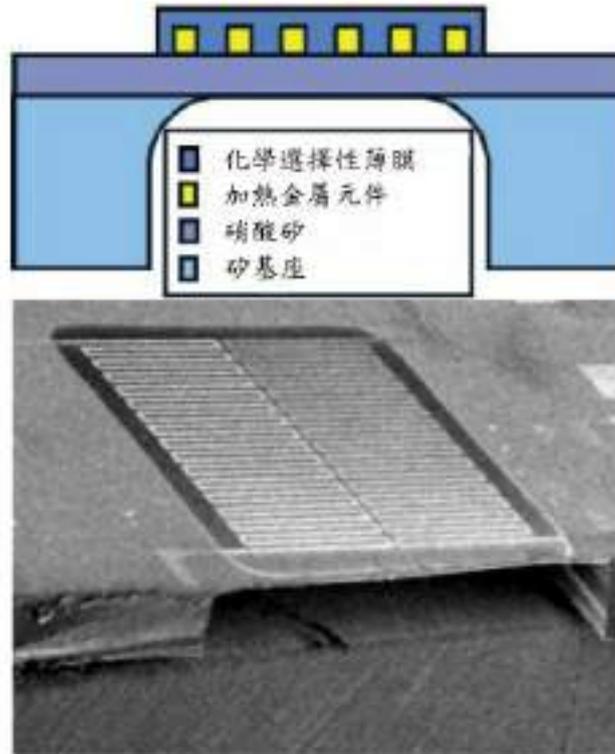
以 ChemLab 為例, 儀器基本設備依據功能可分成包括三部份(圖 1.8.1-2)：



資料來源：USDOE (2004)

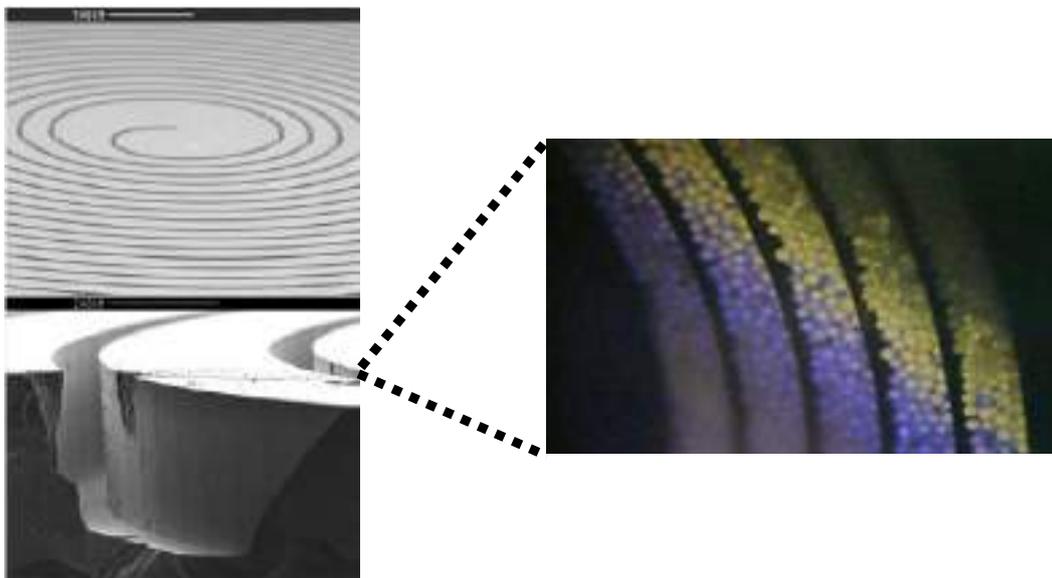
圖 1.8.1-2 手握式氣相層析儀基本結構

- (一) 樣品收集濃縮系統：在此部份的組成元件有硝酸矽(silicon nitride)薄膜支撐一組金屬加熱單元，其上再覆以選擇性吸附的薄膜(圖 1.8.1-3)。
- (二) 分析物分離：藉由深反應性離子蝕刻(deep reactive ion etching)於矽晶圓上製作 1 公分見方的捲式管柱，其切面約為 50 至 100 微米寬，400 微米深，通常管柱長度可達 1 公尺。一般是以空氣做為載流氣體(5 psi)，提供 30 至 60 秒的滯留或分離時間。所填充之固定相則可依據分析物填充極性(如 polyethylene glycol)或非極性(如 polydimethylsiloxane)，管柱結構與填充狀況如圖 1.8.1-4。
- (三) 選擇性化學偵測系統：目前是以表面聲波感知器(SAW)為主，一般是以覆蓋不同吸附薄膜的矩陣型感知器建構成為偵測系統，詳細原理請參考前節說明。另外亦有採用發光偵測器(glow discharge detector)與熱導度偵測器(thermal conductivity detector)，但儀器體積較大。單一樣品的分析時間大約二分鐘。



資料來源：USDOE (2004)

圖 1.8.1-3 樣品濃縮系統結構圖



資料來源：USDOE (2004)

圖 1.8.1-4 微型管柱結構與填充狀況

#### 四、工作程序

手握式氣相層析儀的工作程序與一般可攜式氣相層析儀工作程序

類似。首先以抽氣的方式，讓污染物氣體(如土壤氣體) 通過濃縮系統一段固定的時間，然後以快速加熱 (flash heating) 將污染物由薄膜釋出，經過分離管柱之後，由感知器分析定量。

## 五、品保與品管

本項技術偵測極限多在 1 ppm 以下，目前仍未有完整的數據足以提供其品管之需求。根據相關資料顯示，此項技術將足以提供低於或接近美國環保署所訂定之地下水 MCL(例如水中 5 g/L TCE 的濃度，以 20°C 亨利常數估算氣相之濃度在 270 ppb 左右)濃度之偵測。

## 六、成本分析

樣品分析之成本尚未有詳細的評估，且由於儀器本身目前仍在開發階段，成本估計亦較困難。但以儀器本身而言，在達到最適設計之狀況下，儀器本身的價格約在美金 2000 至 5000 元之間。

### 1.8.2 地層透水係數垂直分布測試

#### 一、工作原理

在地下水調查領域中，飽和層土壤透水係數傳統之調查方法多使用微水試驗(slug test)或抽水試驗(pumping test)，於現場取得地層的透水係數。這些測試方法侷限於所使用的試驗井的條件(如井篩的開篩位置)，通常所測的數值為局部的狀況，但經常被使用為全場的平均透水係數。在許多的研究中已經發現量測水力傳導係數於空間中的變異性對於地下水文調查事件為必須的資訊。

目前美國堪薩斯州地質調查所(Kansas Geological Survey)與德國圖秉根(University of Tubingen)正合作致力於開發新一代的直接貫入鑽頭，以在一次的貫入試驗中，取得垂直向的透水係數分布狀況，雖然目前仍在測試階段，但相關資料已顯示其具有可行性。

其所開發的鑽頭可進行包括直接貫入微水試驗(Direct Push Slug Test, DPST)、直接貫入注水紀錄器(Direct Push Injection Logger, DPIL)

以及直接貫入透水計(Direct Push Permeameter, DPP)等三種試驗方法，其工作原理雖然相近，但在鑽頭的型態上則有所差異。

DPST 與傳統的微水試驗原理相同，只是在貫入過程中，可於不同深度開啟鑽頭的井篩，並在小口徑的套管中進行微水試驗，完成一個深度之後，再向下貫入至另一個深度，重複同樣的微水試驗步驟，這種方法所面對的主要問題在於在小口徑套管中進行微水試驗的限制。

DPIL 的原理是在貫入過程中連續注入高流量的水(約每分鐘數公升)，以保持鑽頭井篩部分的通暢，在到達欲測定深度時，採用二種不同流量，以鑽頭的壓力計量測其水壓，再以所得壓力與流量的比例做為透水係數(K)的相對變異指標。採用兩種流量之目的係為評估量測結果與流量的相依性，以降低不確定性。

DPP 是為了改善前述二種方法的另一種配合直接貫量測垂直透水係數的方法。DPST 的主要限制在於洗井程序與所需時間較長，而 DPIL 雖然能快速的取得相對透水係數，但在對於井篩的堵塞與貫入過程地層的緊實度變化較為敏感，其使用限制甚至比 DPST 還多。DPP 則是融合速度與降低對井篩的堵塞與貫入過程地層的緊實度變化的一種方法。DPP 鑽頭的結構為一開放式井篩，其上方或下方裝置有壓力計(圖 1.8.2-1)，量測時以固定流量灌水(Q)，並透過壓力計監控井內壓力變化，一但二組壓力計之間的水頭( $\Delta h$ )達到平衡時，透水係數即可利用下列之圓管式達西定律(spherical form of Darcy's Law)計算式而得。

$$K = \frac{Q \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{4\pi(\Delta h)}$$

其中  $r_1$  與  $r_2$  是由井篩中央至近端與遠端壓力計的的距離。



資料來源：Butler and Dietrich (2004)

圖 1.8.2-1 DPP 鑽頭構造示意圖

## 二、適用時機與限制

上述三項技術以 DPST 較為成熟，可提供可信度高的透水係數值，主要適用的地質條件是以砂質與礫石層為主(透水係數  $6.0 \times 10^{-4}$  至  $0.3$  cm/s)，但必須注意其洗井的過程，洗井不完全可能造成所量測的是貫入過程套管周圍被壓實的土壤透水係數而不是地層的透水係數，而且其量測所需時間較長。

DPIL 是三種技術中量測速度最快的一種，適用於相當廣泛的地質條件，可以提供透水係數之相對變異性的資訊，但因為只能提供半定量的數據與相對變異性，所以必須藉由既有的透水係數值進行相關性分析，獲得實際透水係數。此外井篩的堵塞與貫入過程所造成之緊實度變化都會提高其不確定性。

DPP 的方法適用於粉土至粗砂之間之地層(透水係數  $1.0 \times 10^{-5}$  至  $0.1$  cm/s)的地質條件，雖然目前仍在開發階段，但初步的測試結果已顯示可快速取得可靠的透水係數量測值。由於壓力感知器直接設置於鑽頭，所以目前僅能以推貫(push-only)的方式而不能用鎚擊(hammer)的方式貫入，這也限制適用的地質條件與貫入載具。

### 三、設備需求

在使用直接貫入的地層透水係數垂直分布測試技術時，所需要的設備至少包括：

- (一) 直接貫入機具與套管系統
- (二) DPST、DPIL 或 DPP 鑽頭
- (三) 水位計
- (四) 抽水/注水泵浦
- (五) 壓力監控設備

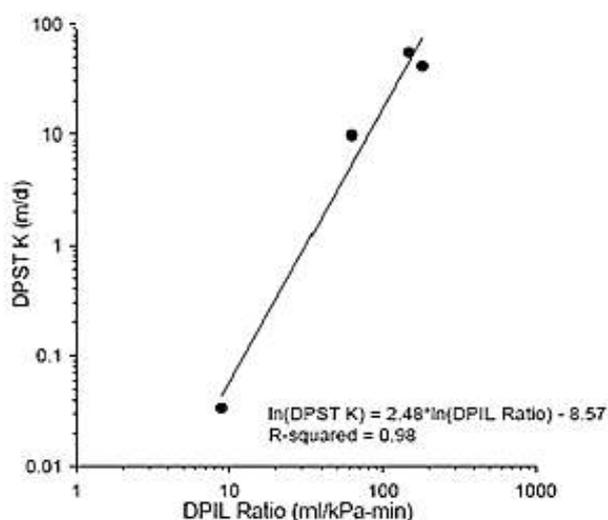
### 四、工作程序

DPST 的工作方法與傳統的微水試驗類似，亦即在直接貫入的套管內，製造瞬間的水頭變化，然後量測水頭的變化，藉由解讀水頭變化的資料，獲得透水係數值，與傳統微水試驗最大的不同在於 DPST 使用直接貫入套管取代監測井的功能，可連續貫入在不同深度進行微水試驗，進而獲得垂直向的透水係數資料。

DPIL 是使用末端具有開放式篩孔的鑽頭，在貫入過程中以大量的水注入，防止篩孔的堵塞。在到達預期深度後，使用地上泵浦控制注水流量，並以地上壓力計量測套管中壓力的變化，由所得之壓力與流量以下式計算 DPIL 比 (DPIL ratio)。

$$\text{DPIL Ratio} = \frac{Q}{\Delta p}$$

其中 Q 為流量，p 套管內壓力。再將 DPIL 比與 DPST 在相同深度所得之透水係數加以迴歸(圖 1.8.2-2)，所得之迴歸曲線即可用於將 DPIL 比轉換為透水係數的工具。



資料來源：Dietrich, P. et al. (2003)

### 圖 1.8.2-2 DPIL 比與 DPST 所測得之 K 值轉換迴歸線

DPP 採用開放式篩孔，所以在貫入過程中，亦須注水以保持篩孔的暢通(如同 DPST)，在到達欲測深度時，停止貫入與注水的動作，並靜待水頭回復至背景條件。接著在篩孔開口處以定流量注水，並監控二個不同位置之壓力變化，由所測得之水頭梯度與流量，利用圓管式達西定律(請見「原理」一節)計算透水係數。

#### 五、品保與品管

使用過程中若採用壓力計或內建於鑽頭上的壓力感知器，在進行測量前，必須進行壓力計的校正，鑽頭不同其校正方法亦有所差異，但在量測結果中應同時提供校正結果，以確認量測結果的正確性。一般而言，其校正後之誤差應在 10% 以內。

#### 六、工作注意事項

- (一) 貫入過程中因為套管的推擠與鈍擊，可能造成套管周邊土壤緊緻化，導致在量測過程中所得數據可能不是該深度地層的透水係數，而是套管周邊的土壤的透水係數，因此必須在量測前充分的洗井。
- (二) 若使用開放式井篩，貫入過程中的注水量或壓力必須充足，以避免篩孔的堵塞。

(三) 注水的必要性亦會發生在使用封閉式井篩鑽頭，主要是在套管的拔出過程。所以在使用過程中，必須了解注水的需要，會改變地下水的水質。

## 七、成本分析

相較於傳統的方法，最直接的成本效益在於免除永久性監測井的設置需求，由於監測井的設置費用取決於井的深度，而直接貫入的方式則與深度較無絕對的關係，故此部份的成本即有數萬元的差距。若有既設監測井，則必須考量井篩深度的適用性。若以所需時間而言，洗井時間與量測時間通常較傳統方法短，故以操作成本而言，直接貫入的方法亦較低。部分案例結果顯示，DPIL 可以在 10 分鐘內完成一次測試，DPST 取決於洗井時間的長短則可在 20 分鐘左右完成，DPP 可以於 10 分鐘內完成。

## 八、與調查結果相關性

量測結果的比對通常是與傳統的多深度微水試驗進行比較，而 DPIL 則需由一已知透水係數值加以轉換。在比對調查過程中，亦必須了解直接貫入的方法與傳統監測井測量透水係數的差異，例如後者會受限於井篩的位置與量測的深度與位置，所得到的透水係數本身即有因地質之不均質性所造成的誤差。

比對結果若有明顯差異，應取得其他地質的量測數據，以做為輔助判斷的資料，例如岩心鑽探資料、地導電度或地電阻資料等。換言之，做為比對基準的傳統微水試驗結果，應以更審慎的方式確認其量測資料的正確性。