

行政院環境保護署

102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與 組成特徵辨識 期末報告

主 辦 單 位： 行政院環境保護署

計畫執行單位：崑山科技大學／環境工程系所

計畫主持人：吳庭年 教授

計畫執行期間：101年12月10日起至

102年12月09日

中 華 民 國 102 年 12 月 印製

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案 成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

- ☒ 達成目標
- ☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）
- ☐ 實驗失敗
- ☐ 因故實驗中斷
- ☐ 其他原因

說明：

本研究計畫主要為規劃於已發生洩漏狀況之場址進行地表下連續性雷射螢光偵測，以瞭解地下環境中自由相態污染物的分布情形，並配合地質水文調查來找出優勢路徑回推可能之洩漏來源。藉由初期一階環境場址評估(ESA Phase I)瞭解試驗場址大致可能受污染特性後，運用 UVOST-LIF 及 MIP 兩種現地快速檢測分析系統，與搭配少量的地下介質樣品取樣分析，試驗結果呈現出 3 個可能污染來源區，包含廠區內 Sulfolane 洩漏之事件、試驗場址內油水分離設施、第二分離工場不明洩漏來源，其餘 2 個污染特徵屬性為相關污染事件(含油槽區洩漏事件)造成之污染物混合區。與計畫初期推測屬多種洩漏來源預期相符，在後續訪談過程中也間接證實了調查結果的可信度，整個計畫執行結果與進度已達成原先預期的設定目標，本次模場試驗綜合成果與測試方法運用應具實際現場的應用價值。

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

- 論文：☐已發表 ☐未發表之文稿 ☒撰寫中 ☐無
- 專利：☐已獲得 ☐申請中 ☒無
- 技轉：☐已技轉 ☐洽談中 ☒無
- 其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以500字為限）

石油化學工業一般類屬於環境高污染行業，由於使用原料與製程特性，在石油化學之相關製品、原物料與人體致癌發生率具有強烈之相關性，其污染發生的原因大致為意外事件、運送、貯存及煉製過程中可能產生洩漏或不當排放所造成。由於石油化學工廠廠區內建物特性，往往比一般工業複雜許多，且部分地下設施眾多亦造成地下環境變得較不單純，當場址疑似或確實發生洩漏狀況時，常常因地下環境變數較大而造成調查結果呈現高度的不確定性。某些案例指出以傳統的採樣分析作業調查，在有限的資訊下進行場址洩漏推估，時常產生無法找到洩漏源的情況，甚至於往後的整治改善作業，在花費相當多的經費後才發現改善成效不彰，或者污染狀況變得更加嚴重。若要以一般傳統採樣分析作業進行詳細的場址調查作業，必須花費相當龐大經費，通常在實際狀況中只能以有限的經費進行調查作業，因此以傳統採樣分析方式做調查就只能取得有限的數據進行結果判斷與推估。本次模場試驗選擇之場址為較複雜的具多種洩漏來源的狀況，主要藉由 UVOST-LIF 調查分析系統所提供螢光光譜法的污染成分之光學指紋特性，可初步推測出場址的污染物種類，結合地質水文相關性比對、快速檢測污染濃度空間分布差異分析，推論出可疑的污染來源，並藉由少量的地下介質取樣分析比對，證實大致污染物質成分與濃度，也直接證實現地調查結果成效的相關性。綜合試驗成果呈現各方法之間呈正相關的趨勢，在各方法缺點上彼此間的優點也能補足相對之間的資料缺口，由此可看出在場址現地複雜條件與干擾下，只要瞭解場址受污染特性，與選擇適當的調查方法組合應用，便可降低場址調查結果的不確定性，提高數據結果的可信賴度，與降低後續改善作業的失敗率。因此本模場試驗成果對於後續場址調查應用，應具備實際的參考價值與可推廣性。

行政院環境保護署計畫成果中英文摘要(簡要版)

〔 期末報告修正稿 〕

一、中文計畫名稱：運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

二、英文計畫名稱：Source tracking and characteristic recognition of field leakage using ultra-violet optical laser induced fluorescence system at the petrochemical industrial site

三、計畫編號：

四、執行單位：崑山科技大學/環境工程系

五、計畫主持人(包括共同主持人)：吳庭年

六、執行開始時間：民國101 年12 月10 日

七、執行結束時間：民國102 年12 月09 日

八、報告完成時間：民國102 年11 月01 日

九、報告總頁數：96 頁(本文)+ 14頁(附件)

十、使用語文：中文

十一、報告電子檔名稱：誘發螢光系統石化場址進行漏源追溯

十二、報告電子檔格式：WORD

十三、中文摘要關鍵詞：雷射誘發螢光、石油化學、漏源追溯、洩漏

十四、英文摘要關鍵詞：laser-induced fluorescence (LIF), petrochemical, source tracking, leakage

十五、中文摘要(簡易版)：

石油化學工業一般類屬於環境高污染行業，由於使用原料與製程特性，污染成分通常為揮發性有機物(volatile organic compounds, VOC)如苯、甲苯、二甲苯等有機溶劑，與半揮發性有機物(semi-volatile organic compounds, SVOC) 如 naphthalene、phenanthrene、dibenzothiophene、fluorene、chrysene 及部分多環芳香族碳氫化合物。污染發生的原因大致為意外事件、運送、貯存及煉製過程中可能產生洩漏或不當排放造成，於環境調查監測主要指標性的污染成分為多環芳香族碳氫化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)、酚類與石油碳氫化合物(TPH) 為最普遍。

紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra-Violet Optical laser induced fluorescence system, UVOST-LIF)為一種光學檢測技術，在環境污染物檢測之應用原理，主要針對部分環境污染物成分具有光激發螢光反應之特性，於使用高功率密度(power density) 之雷射光源可得到較高強度之螢光反應，因而增加檢測的靈敏度。運用於石化類污染物之檢測，主要針對化合物分子中具不飽和之 π (雙鍵)成分，因能量之激發而產生螢光之特性進行檢測分析。紫外光學雷射誘發螢光技術

的應用對象係針對「自由相態」(free phase)的石化污染物，有別於針對「溶解相態」有機污染物的薄膜介面探測系統(MIP)調查技術。雷射激發螢光系統為一新穎的即時場址調查技術，國外已有些調查作業場址的成功應用案例。

本研究計畫於已發生洩漏狀況之場址進行地表下連續性雷射螢光檢測，以瞭解地下環境中自由相態污染物的分布情形，並配合地質水文調查期能找出優勢路徑回推可能之洩漏來源。利用現場雷射螢光特徵圖譜測定結果，選取少量高濃度土壤樣品進行 GC-FID 或 GC-MS 分析，以鑑定洩漏源之污染物種類，並辨識污染物之空間分布。同步結合薄膜界面探測推估污染團分布，比對雷射激發螢光探測之自由相污染物分布，藉由污染成份空間分布之相互關聯性，使得原先污染洩漏的情境得以重建，針對洩漏源是否仍持續存在或僅為偶發事件之殘留物亦可獲得確認。本模場試驗可以呈現雷射誘發螢光探測之優點，搭配其他即時現場探測方法之整合運用，可提供相關場址建置污染場址概念模型(Site Conceptual Model, SCM) 與溯源追漏之案例參考。從本研究調查案例經驗得知，藉由洩漏污染物質之雷射誘發螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況，來推估場址的污染來源是可行方式。尤其在多重洩漏源情形下，運用 UVOST-LIF 調查可以快速釐清場址污染分布特徵，但現場存在許多不明的干擾因素，若能結合其他調查方法可降低本系統對輕質油品類物質的誤判風險，並減少調查結果的不確定性，以獲致快速又準確的場址污染調查成果。

十六、英文摘要：

Petrochemical industry is commonly listed as one of highly contaminated industries to the environment. According to the characteristics of raw materials and manufacturing processes, the expected contaminants are volatile organic compounds (such as benzene, toluene, xylene and other solvents) and semi-volatile organic compounds (such as naphthalene, phenanthrene, dibenzothiophene, fluorene, chrysene and other polycyclic aromatic hydrocarbons) at a petrochemical industrial site. The occurrence of soil and groundwater contamination is mainly caused by accidental events, unintentional leakage or unacceptable release during transportation, storage and refinery processes. In general, the target compounds of environmental monitoring and site investigation are polycyclic aromatic hydrocarbons, phenols and total petroleum hydrocarbons (TPH).

Ultra-violet optical laser induced fluorescence (UVOST-LIF) system belongs to optical measurement technology. In order to enhance measurement sensitivity, the LIF system utilizes a laser beam with high power density to detect certain photo-induced fluorescence reactive contaminants. For the cases of petroleum contaminant detection, certain compound molecules possess π double bonding capable of being initiated with

energy and releasing fluorescence, which can be further in-situ detected by the LIF system. The LIF detection is aimed at finding free-phase petroleum pollutants that are quite different from the membrane interface probe (MIP) detection. The LIF system is developed for on-site real-time site investigation, and it has been successfully tested at several foreign site investigation cases.

This study selected one soil and groundwater remediation site with potential leakage sources for the testing of in-situ continuous LIF detection. The distribution of free-phase petroleum contaminants obtained from the LIF detection was integrated with the results of hydrogeological survey to trace the possible transport pathway of leakage sources. Based on LIF specific waveform profile, several soil samples were subjected to GC-FID or GC-MS analysis for further identification of leakage contaminants. The MIP detection was synchronously applied to examine the distribution of dissolved contaminants, and the obtained results from the MIP detection were compared with those of the LIF detection as well. Thus, actual leaking scenario is expected to rebuild through the combination of LIF detection and MIP detection. The contaminant plume resulting from the continual sources or pulse leaking can be possibly confirmed as well. This field study is able to demonstrate the advantages of the LIF detection and to illustrate the establishment of site conceptual model and leakage source tracking through the associated application of on-site real-time site investigation tools. This study has demonstrated the feasibility of applying the LIF fluorescence characteristics of the leakages associated with spatial transport distribution of contaminant plumes to anatomize the possible contaminant sources in the field. The application of in-situ UVOST-LIF detection can rapidly outline the characteristics of contaminant distribution, and other investigation methods can be employed as well to reduce data gap and the uncertainty of site investigation. Accordingly, the mistake of site assessment regarding light fuel materials can be eliminated, and the accurate investigation results can be quickly obtained.

行政院環境保護署計畫成果中英文摘要(詳細版)

〔 期末報告修正稿 〕

一、中文計畫名稱：運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

二、英文計畫名稱：Source tracking and characteristic recognition of field leakage using ultra-violet optical laser induced fluorescence system at the petrochemical industrial site

三、計畫編號：

四、執行單位：崑山科技大學/環境工程系

五、計畫主持人(包括共同主持人)：吳庭年

六、執行開始時間：民國101 年12 月10 日

七、執行結束時間：民國102 年12 月09 日

八、報告完成時間：民國102 年12 月01 日

九、報告總頁數：96 頁(本文)+ 14頁(附件)

十、使用語文：中文

十一、報告電子檔名稱：誘發螢光系統石化場址進行漏源追溯

十二、報告電子檔格式：WORD

十三、中文摘要關鍵詞：雷射誘發螢光、石油化學、漏源追溯、洩漏

十四、英文摘要關鍵詞：laser-induced fluorescence (LIF), petrochemical, source tracking, leakage

十五、中文摘要(詳細版)：

石油化學工業一般類屬於環境高污染行業，由於使用原料與製程特性，污染成分通常為揮發性有機物(volatile organic compounds, VOC)如苯、甲苯、二甲苯等有機溶劑，與半揮發性有機物(semi-volatile organic compounds, SVOC) 如 naphthalene、phenanthrene、dibenzothiophene、fluorene、chrysene 及部分多環芳香族碳氫化合物。污染發生的原因大致為意外事件、運送、貯存及煉製過程中可能產生洩漏或不當排放造成，於環境調查監測主要指標性的污染成分為多環芳香族碳氫化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)、酚類與石油碳氫化合物(TPH) 為最普遍。

紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra-Violet Optical laser induced fluorescence system, UVOST-LIF)為一種光學檢測技術，在環境污染物檢測之應用原理，主要針對部分環境污染物成分具有光激發螢光反應之特性，於使用高功率密度(power density) 之雷射光源可得到較高強度之螢光反應，因而增加檢測的靈敏度。運用於石化類污染物之檢測，主要針對化合物分子中具不飽和之 π (雙鍵)成分，因能量之激發而產生螢光之特性進行檢測分析。紫外光學雷射誘發螢光技術

的應用對象係針對「自由相態」(free phase)的石化污染物，有別於針對「溶解相態」有機污染物的薄膜介面探測系統(MIP)調查技術。雷射激發螢光系統為一新穎的即時場址調查技術，國外已有些調查作業場址的成功應用案例。

本研究計畫於已發生洩漏狀況之場址進行地表下連續性雷射螢光檢測，以瞭解地下環境中自由相態污染物的分布情形，並配合地質水文調查期能找出優勢路徑回推可能之洩漏來源。利用現場雷射螢光特徵圖譜測定結果，選取少量高濃度土壤樣品進行 GC-FID 或 GC-MS 分析，以鑑定洩漏源之污染物種類，並辨識污染物之空間分布。同步結合薄膜界面探測推估污染團分布，比對雷射激發螢光探測之自由相污染物分布，藉由污染成份空間分布之相互關聯性，使得原先污染洩漏的情境得以重建，針對洩漏源是否仍持續存在或僅為偶發事件之殘留物亦可獲得確認。本模場試驗可以呈現雷射誘發螢光探測之優點，搭配其他即時現場探測方法之整合運用，可提供相關場址建置污染場址概念模型(Site Conceptual Model, SCM) 與溯源追漏之案例參考。

由紫外光學雷射誘發螢光系統現地檢測結果得知，測得污染物螢光特徵屬性經彙整歸類後大致可分為 5 個污染分布特徵群，進一步由環境場址評估作業 (Environmental Site Assessment, ESA)歸納出 3 個可能污染來源區（廠區內 Sulfolane 洩漏之事件、試驗場址內油水分離設施、第二分離工場不明洩漏來源）與其餘 2 個污染混合區。與土壤地下水取樣分析結果比對，由 TPH 之氣相層析圖譜間接證實 UVOST-LIF 所推斷的污染油品特徵屬性，並瞭解該場址屬多重洩漏污染的狀況。惟洩漏成分中包含易揮發的輕質油品類物質，其雷射誘發螢光特徵易受到其他重質油品特徵干擾；而此特性缺憾可導入現地 MIP 調查補充輕質油品的洩漏分布，藉此建立完整的空間污染場址概念模型，並降低調查結果資料的不確定性。從本研究調查案例經驗得知，藉由洩漏污染物質之雷射誘發螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況，來推估場址的污染來源是可行方式。尤其在多重洩漏源情形下，運用 UVOST-LIF 調查可以快速釐清場址污染分布特徵，但現場存在許多不明的干擾因素，若能結合其他調查方法可降低本系統對輕質油品類物質的誤判風險，並減少調查結果的不確定性，以獲致快速又準確的場址污染調查成果。

十六、英文摘要：

Petrochemical industry is commonly listed as one of highly contaminated industries to the environment. According to the characteristics of raw materials and manufacturing processes, the expected contaminants are volatile organic compounds (such as benzene, toluene, xylene and other solvents) and semi-volatile organic compounds (such as naphthalene, phenanthrene, dibenzothiophene, fluorene, chrysene and other polycyclic aromatic hydrocarbons) at a petrochemical industrial site. The

occurrence of soil and groundwater contamination is mainly caused by accidental events, unintentional leakage or unacceptable release during transportation, storage and refinery processes. In general, the target compounds of environmental monitoring and site investigation are polycyclic aromatic hydrocarbons, phenols and total petroleum hydrocarbons (TPH).

Ultra-violet optical laser induced fluorescence (UVOST-LIF) system belongs to optical measurement technology. In order to enhance measurement sensitivity, the LIF system utilizes a laser beam with high power density to detect certain photo-induced fluorescence reactive contaminants. For the cases of petroleum contaminant detection, certain compound molecules possess π double bonding capable of being initiated with energy and releasing fluorescence, which can be further in-situ detected by the LIF system. The LIF detection is aimed at finding free-phase petroleum pollutants that are quite different from the membrane interface probe (MIP) detection. The LIF system is developed for on-site real-time site investigation, and it has been successfully tested at several foreign site investigation cases.

This study selected one soil and groundwater remediation site with potential leakage sources for the testing of in-situ continuous LIF detection. The distribution of free-phase petroleum contaminants obtained from the LIF detection was integrated with the results of hydrogeological survey to trace the possible transport pathway of leakage sources. Based on LIF specific waveform profile, several soil samples were subjected to GC-FID or GC-MS analysis for further identification of leakage contaminants. The MIP detection was synchronously applied to examine the distribution of dissolved contaminants, and the obtained results from the MIP detection were compared with those of the LIF detection as well. Thus, actual leaking scenario is expected to rebuild through the combination of LIF detection and MIP detection. The contaminant plume resulting from the continual sources or pulse leaking can be possibly confirmed as well. This field study is able to demonstrate the advantages of the LIF detection and to illustrate the establishment of site conceptual model and leakage source tracking through the associated application of on-site real-time site investigation tools.

The results of in-situ UVOST-LIF detection illustrated that site contamination can be classified into 5 types of plume distributions based on their fluorescence characteristics. Integrating with the Environmental Site Assessment (Environmental Site Assessment, ESA) work, plume distributions were roughly recognized as 3

possible source leakages (at the previous sulfolane spill site, the oil-water separation facilities, and the second separation plant) and the other 2 mixing zones of contamination. Comparing with the analysis of soil and groundwater sampling, the identified contaminants according to LIF fluorescence characteristics were indirectly confirmed with TPH chromatograms by GC-FID analysis. The extent of contamination originating from multi-leakages can be figured out by in-situ UVOST-LIF detection. One drawback of LIF detection is that the fluorescence characteristics of light fuel components might be overlaid by heavy fuel components, and MIP detection can be employed to conquer this drawback and to assist the establishment of complete spatial sites conceptual model (SCM) of distributed contamination. The uncertainty of site investigation can be reduced through LIF detection associated with MIP detection, and this study has demonstrated the feasibility of applying the LIF fluorescence characteristics of the leakages associated with spatial transport distribution of contaminant plumes to anatomize the possible contaminant sources in the field. The application of in-situ UVOST-LIF detection can rapidly outline the characteristics of contaminant distribution, and other investigation methods can be employed as well to reduce data gap and the uncertainty of site investigation. Accordingly, the mistake of site assessment regarding light fuel materials can be eliminated, and the accurate investigation results can be quickly obtained.

報告大綱

本報告目前共分為五個章節，內容包含計畫緣起、文獻回顧、研究方法、結果與討論、結論與建議。在計畫緣起中包含計畫由來、研究目的、計畫構想、執行期程等事項說明；文獻回顧中包含應用技術說明與應用標的物介紹等兩大項目再細分幾小項目介紹；而研究方法主要針對模場調查規劃設計與執行方式並分成幾個主要執行項目進行內容說明；結果與討論則將研究所得綜合成果作整理並對於相關問題進行探討，最後於結論與建議中作出研究成果總結與相關應用建議事項說明。

第一章為「計畫緣起」

本章主要述明計畫由來、構想及目的、執行期程，各分成 4 個小章節加以說明計畫提出動機與執行計畫概念與執行期程的規劃及執行進程等。

第二章為「文獻回顧」

主要針對整體計畫之應用方法特性、技術運用之特性原理與所針對標的污染物特性等進行相關說明包含場址快速評估特性、環境場址評估特性、傳感偵測器特性與運用、雷射系統特性、螢光產生程序與偵測原理、NAPLs 物質在地下環境中的特性等項目說明。

第三章為「研究方法」

針對環境場址評估方法結合現地即時偵測技術之石油化學類非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPLs)物質偵測 UVOST-LIF 技術與針對溶解項與易揮發相(VOCs)之薄膜介面探測技術(Membrane Interface Probe, MIP)，並搭配直接貫入式(Direct Push)採樣方法與現地即時偵測技術，以快速場址評估觀念為基礎並納入少量傳統取樣分析方式輔助調查結果資料品管查核與資料缺口補充，來達到初步空間污染場址概念模型(Site Conceptual Model, SCM)快速建置，並延伸綜合調查資料解析與推估來達成追溯漏源的附加成效目的。

第四章為「結果與討論」

針對研究方法中主要作業方法與搭配執行作業項目等測試結果，包含環境場址評估、現地即時偵測技術、直接貫入式即時定深取樣、環境樣品樣品儀器分析檢測與現地地質&地質水文等調查資料結果進行資料解析與綜合性資料比對，解構場址地表下空間受污染情形與污染分布狀況，進一步建立調查模場現階段污染概念模型與可能污染來源推估等。

第五章為「結論與建議」

綜合本計畫之成果說明結論，並就使用場址快速檢測技術運用、雷射激發螢光法進行石油化學品污染樣品檢測與動態性場址調查方法應用的工作提出相關建議。

第一章 計畫緣起

石化工業在台灣工業之中有著重要比例，而石化工業一般是指「石油化學工業」的簡稱，通常又分為「煉油工業」及「石油化學工業」。煉油工業就是選購原油，依其碳氫化合物特性，經物理分離和化學變化等程序，將石油進行一系列的分餾、裂解、重組過程，各種不同沸點的碳氫化合物被分離製成油氣、液化石油氣、汽油、輕油(石油腦)、煤油、柴油、燃料油、潤滑油及蒸餘油等成份；而石油化學工業主要是以石油(Petroleum)或天然氣(Natural gas)為主要的原料，經化學反應、加工生產，以製造出各種化學產品的工業。一般是指烯烴(olefins，包括乙烯、丙烯、丁二烯)和芳香烴(aromatics，包括苯、甲苯、二甲苯)的上游工業，以及利用上游基本原料來生成中間原料的中游工業。一般石油化學工業類屬於環境高污染行業，由於使用原料與製程特性，污染成分通常為揮發性有機物(volatile organic compounds, VOCs)，如甲苯、二甲苯、苯等有機溶劑與半揮發性有機物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)，如部分的多環芳香族碳氫化合物 alkylated naphthalene、phenanthrene、dibenzothiophene、fluorene 及 chrysene，汙染發生的原因大致為意外事件、運送、貯存及煉製過程中可能產生洩漏或不當排放造成，於環境調查監測主要指標性的汙染成分為多環芳香族碳氫化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)、酚類與石油碳氫化合物(TPH)為最普遍。

石油化學之相關製品與原物料跟人體致癌發生具有強烈之相關性，在眾多研究論文中已成通識問題，國際癌症研究機構(IARC)將致癌物分為一級及二A級，其中苯、甲醛、環氧乙烷等為一級致癌物，丁二烯為可疑致癌物，其他如甲苯、乙苯、二甲苯、丙烯腈、乙腈、環己酮、甲醇、酚、乙烯、丙烯等或具有急毒性或慢毒性或具有爆炸性，此等皆是危險化學物品，長期接觸與暴露將產生病變或致癌死亡。在國內有許多流行病學與相關論文研究持續探討石化工業污染對人體健康可能造成的健康效應，如惡性腫瘤、循環系統之疾病、白血病、癌症等等都具有高潛在的發生機率。另外一些針對長期接觸石化污染區的健康風險評估計畫研究中之指出相關癌症與病變的發生具有顯著的相關性，因此如何管理與控制石化工業污染的發生與降低對環境影響與衝擊就顯的格外重要。

1.1 計畫由來

石油化學工廠類場址因為製程特性，廠區內建物特性往往比一般工業要來的複雜，且部分地下設施眾多亦造成地下環境變的較不單純，當場址疑似或確實發

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

生洩漏狀況時，常常因地下環境變數較大而造成調查結果呈現高度的不確定性，某些案例指出以以往傳統的採樣分析作業調查，在有限的資訊下進行場址洩漏推估，時常產生無法找到洩漏源的情況，甚至於往後的整治改善作業，在花費相當多的經費後才發現改善成效不彰或者污染狀況變的更加嚴重，但是若要以一般傳統採樣分析作業進行詳細的場址調查作業又必須花費相當龐大經費，通常在實際狀況中只能以有限的經費下進行調查作業，因此以傳統採樣分析方式做調查就只能取得有限的數據進行結果判斷與推估。

三要素組合法(the traid approach)是近幾年來新興的場址專案管理模式，強調的是根據調查的目的與場址本身狀況的不同，對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每一場址均使用同樣的作業程序與標準經由國內、外的經驗體認到傳統的場址調查技術費用偏高，此外，目前亦已發展出許多逐漸成熟的場址評估工具，因此所謂「快速場址評估」(Expedited Site Assessment)之作業程序漸漸受到推行與使用，快速場址評估作業主要為強化現場決策的規劃方法，目的在最短的時間內，利用最少的資源獲得最大效益之場址調查資訊。一般而言，快速場址評估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。目前針對污染場址之調查已發展出多種現地即時之調查或篩試方法，包含有地球物理、直接貫入法、土壤氣體、現場有機物/重金屬偵測技術、現場快速篩選試劑…等；而環保署亦於民國 95 年發行「油品類儲槽系統快速場址調查及評估技術」參考手冊。

本研究計畫主要是針對前述三要素組合法中現場測量技術之擴展與應用，發展有助於調查石化工業污染場址地下環境中非屬溶解相態的「自由相態」偵測技術—『雷射激發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)系統』，並結合目前廣泛應用於國內調查作業的薄膜介面探測(Membrane Interface Probe, MIP)系統調查技術其屬於現地探測「溶解相態」的有機污染物與配合使用不同精密程度的分析方法取得大量樣品數據，以建立更詳細的場址污染概念模型(site conceptual model, SCM)與不同空間污染物質分部組成特徵，並藉由污染物空間分布與組成特徵結合水文地質去推估洩漏發生處。

紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra-Violet Optical laser induced fluorescence system)為一種光學檢測技術，在環境污染物檢測之應用原理，主要針對部分環境污染物成分具有光激發螢光反應之特性，於使用高功率密度 (power density) 之雷射光源可得到較高強度之螢光反應，因而增加檢測的靈敏度。運用於石化類污染物之檢測主要針對化合物分子中具不飽和之 π (雙鍵) 鍵，因能量之激發而產生螢

光之特性進行檢測分析。紫外光學雷射誘發螢光技術的應用對象係針對非屬溶解相態(NAPL)「自由相態」(free product)或殘留相態的石化污染物成分，雷射誘發螢光技術(LIF)系統的發展最早是由美國陸軍、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，目前最新發展至 UVOST-LIF 系統。而 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；但 UVOST-LIF 系統則已商業化應用。

LIF 於國外的應用案例：

(1) 麥考密克和巴克斯特木餾油公司(Stockton, CA)

案例場址佔地約 32 畝，經營木材處理設備，從 1942 年直到 1991 年，場址操作歷史為處理各種不同木材防腐處理，包含木餾油、五氯酚、溶劑、石化基礎燃料和其他附加化學物質，場址調查與場址概念模式建立使用即時(real-time)調查方式，以場址特徵和分析貫入儀(SCAPS)的 CPT 與 LIF 系統進行場址調查，利用動態性工作策略以 SCAPS 系統調查結果決定土壤採樣深度，並以 LIF sensor 所提供的螢光資料概估非屬水溶相(NAPL)的濃度與辨識其組成種類，案例指出 LIF 系統可有效協助後續土壤與地下水抓樣作業。

(2) 美國聖地牙哥海軍航空基地

案例場址位於美國加州聖地牙哥市的柯洛那多半島(Coronado Island)，整座基地為填海造地而成，其北邊的油料儲存場(North Island Fuel Farm)的地下水位約在地下 4.5 公尺。在初期的場址調查中已經發現石油碳氫化合物（包括飛機用油 JP-5 與船用柴油）污染存在於不飽和層與地下水中，並已有浮油與自由相。此案例中除了使用 LIF 貫入系統之外，亦採集土壤與地下水樣品以傳統方法分析，作為結果驗證的依據。所採集之土壤樣品均為砂質土壤。調查結果顯示不同雷射光源(氬氣雷射與 Nd:YAG)的 LIF 系統所測得之數據相當類似，均顯示污染團位於地下 3.6 至 4.2 公尺之處。污染的濃度由採樣點 1 至 6 逐漸降低，採樣點 2 與 5 由 LIF 測定為未受污染區域。另與利用傳統方法測定土壤的 TPH 濃度所得結果亦與 LIF 所量測之結果類似，但有二項重要的解讀數據上應注意的現象：(1)不同方法所顯示之污染範圍相近，但未顯示 LIF 測得濃度與傳統方法之比例或濃度差異與(2)於污染團的邊緣，當污染在垂直濃度變化相當大時，傳統方法之分析結果與 LIF 之結果落差較大，但在未受污染區域即使土壤採樣點與 LIF 貫入點有差異，其結果之相關性仍很好。此案例也驗證了 LIF 系統的適用性與準確性。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

(3) 美國加州 Port Hueneme 場址

Port Hueneme 為美國海軍設施用地，本場址為該設施用地內之一大型地上儲槽場址區，由於管線洩漏造成土壤受到船舶用柴油污染，傳統調查結果在地表下 20 英尺處之 TPH 濃度達 70,000 mg/kg，本場址以 LIF 系統進行 15 處之調查，貫入深度約 16 至 20 英尺，並於相同位置採集土壤樣品分析其總石油碳氫化合物 (TPH)，本場址螢光反應之閾值為柴油濃度 109 mg/kg。LIF 結果與傳統實驗室分析 TPH 方法比較，針對兩種方法是否偵測到污染物之存在之定性描述進行統計分析，結果具一致性(Agreement)比例為 89.2%，呈現假陰性(false negative)及假陽性(false positive)之比例均為 5.4%。顯示在定性分析方面 LIF 技術與傳統調查方法具有高度之一致性。

LIF 於國內的應用案例：

(1) 雲林縣某加油站

案例場址位於雲林縣某加油站，該場址同時以 MIP 和 LIF 系統進行探測比較，圖 1-1 可明顯看出兩種系統調查結果的差異性，自由相和溶解相的 hot spot 落於不同區塊。MIP 出現反應濃度區間介於地表下 2 至 6 公尺，污染範圍於泵島區至站屋之間，以溶解相為主；而 LIF 系統則明顯出現高反應濃度區間於地表下 2 至 3.3 公尺，位於場址地下水位豐枯水季的範圍，以自由相或殘留相為主；並可透過俯視圖追蹤浮油團自第二泵島的加油機處為起始點，併往西北方向移動擴散。透過兩系統的應用比較，可有效提供場址更精準、正確之污染分佈現況，協助該場址先進行目標區域範圍內浮油的回收處理，再針對已溶解至地下水位面下的溶解相污染物質規劃整治方案。

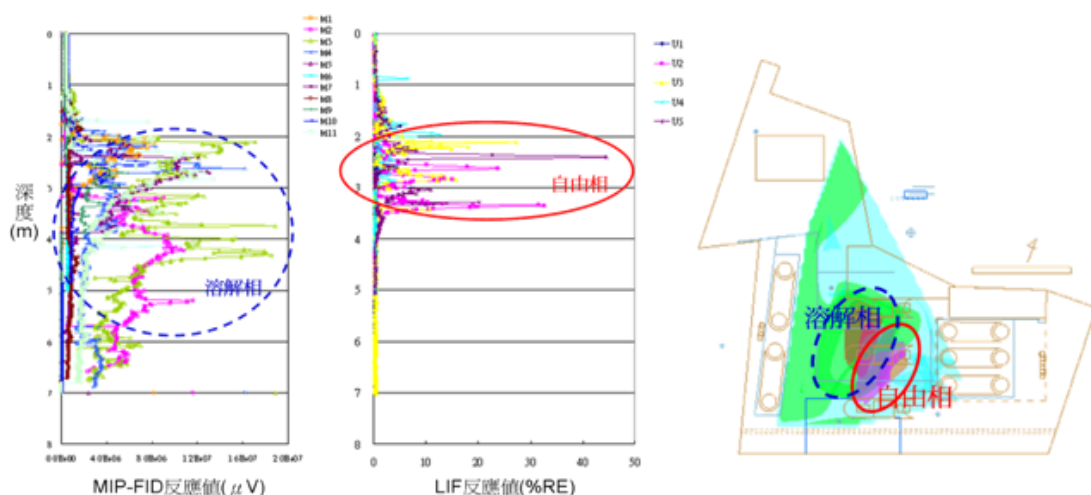


圖 1-1 加油站洩漏調查以 LIF 與 MIP 雙系統調查後洩漏成分地表下分布之情形

1.2 研究目的

土壤及地下水污染有不易察覺及複雜之特性，尤其地質本身之不均質性與異相性，加上污染物質本身的物理與化學性質如質浮於水上（輕質）、溶於水中（溶質）、沉於水下（重質）、帶電荷性、黏滯性、電位特性等等，使得的汙染物在地下環境中的移動與分布更加難以掌控與預測，在石油化學工業類場址又再加上人工建構物等因素，使得場址環境調查顯得更加劇挑戰性，應用一般傳統思維模式已無法負荷相關的問題解決。

在近年來快速場址評估發展與推行下，直接貫入式雷射誘發螢光系統(DPT-LIF)也漸漸的被推行於實際場址調查的使用，LIF 對一般含不飽和雙鍵類(π 鍵)之化學物質會產生螢光反應，尤以多環芳香烴(PAH)螢光反應較強烈，於檢驗測定時有著其特定光譜強度特徵，應用於石油化學工業場址調查更有其相當的適用性，主要因為石油化學原料與製品中含有不飽和雙鍵類物質與芳香烴物質等成分。有鑑於國內場址調查方法的運用尚未發展成熟應用本項先進技術，並於所接觸到的石油化學工業場址中曾遭遇到漏源不明之問題及由於經費限制而無法建立較詳實的汙染場址概念模型，以致後續改善作業之成效不彰與不當花費，本模場研究計畫主要為建置一複合式調查方法之運用模式與建立實際運用經驗，以提供未來相關需求場址選擇參考，另外研究中可提供之相關成效應用如下說明：

1. 提供現地檢測即時辨識工具

近年來主要漏油鑑定的分析方法大致可分為兩大類，非特異性方法(Non-specific methods)與特異性方法(Specific methods)。前者包括一般的 GC-FID、GC-PID、TLC 和 HPLC 等等的分析技術。後者則包括具特異性、選擇性與高感度的 GC-FID、GC/MS 和其它技術。其中以 GC-FID 和 GC/MS 最為被廣泛使用，可作詳細組成成份分析，且其化學指紋可使用來鑑定油污染物的類型、來源確認等。本研究計畫則應用雷射激發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)調查技術，其為一即時現地之含不飽和鍵成分與芳香烴碳氫化合物調查篩試技術，可提供地下非屬溶解相汙染狀況高解析度之定性至半定量之訊息，如圖 1-2 所示。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

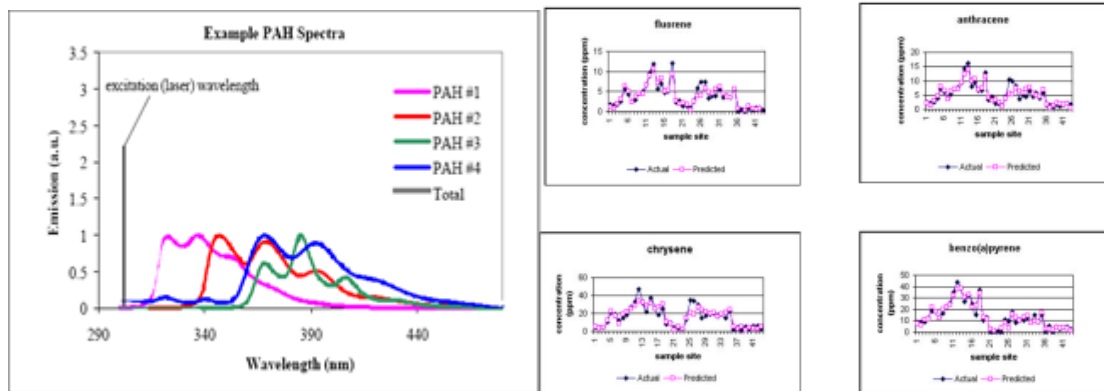
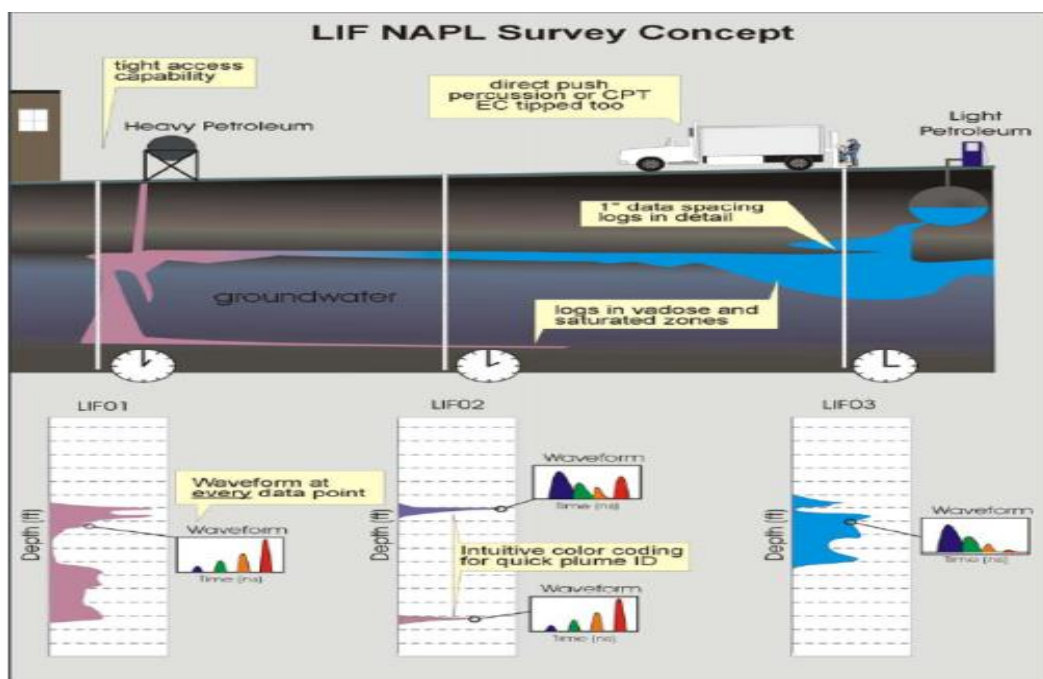


圖 1-2 不同多環芳香烴成分受能量激發後發散出不同波段螢光反應與強度

2. 確認地表下非屬溶解相連續分布與成分組成特徵

一般在非屬溶解相(NAPL)類污染物洩漏事件發生後，因重力作用而沿著土壤間孔隙向下移動，污染物會殘留在土壤孔隙形成殘留量(residual)，若油品類污染物移動至地下水位面附近，由於油的比重比水輕之特性，油污便會浮在水位線附近形成自由移動相(free product)，由連續的偵測方式便可以了解 NAPL 存在的狀況，另外由於各污染成分其組成各異因此在 LIF 系統檢測下便會產生不同的螢光特徵圖譜情形，藉由圖譜差異性便可進一步可了解不同深度位置之污染物組成，如圖 1-3 所示。



資料來源:Dakota technology

圖 1-3 不同種類 NAPL 洩漏污染成分於 LIF 系統偵測後地下分布位置情形示意圖

3. 建立場址空間污染概念模式:

主要以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)進行場址探測孔的連續偵測，偵測模場中地表下非屬溶解相(NAPL)空間分布情形，並結合搭配薄膜界面探測器系統(MIP)進行溶解相與揮發相的偵測，以了解污染團的溶解與擴散(水溶解相與氣態揮發相)分布情形，搭配少量地下介質(土壤與地下水)取樣分析以建構出場址空間污染概念模式，如圖 1-4 所示。

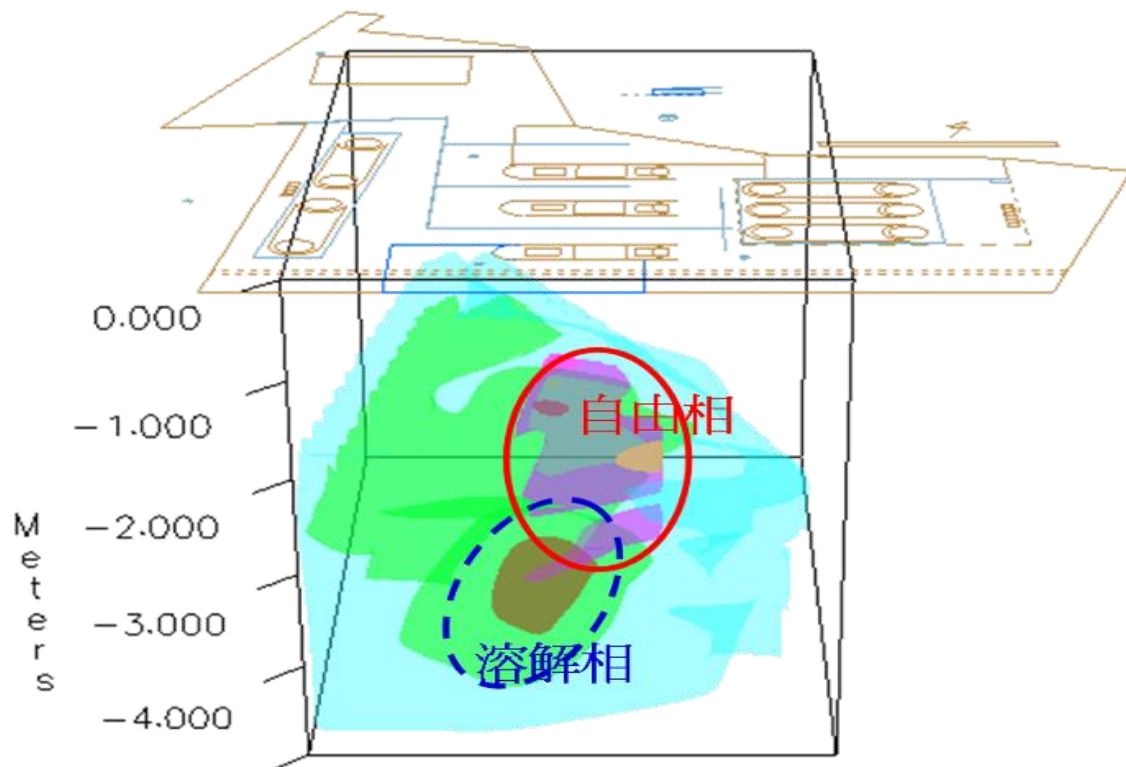


圖 1-4 以現地快速偵測設備建構場址地表下污染物質空間分布概念模型

4. 場址內洩漏源追溯:

藉由多種類型調查方式與各方式所得到之不同特性資料，如地質水文相關性比對、水溶相污染空間分布、揮發相污染空間分布與非水溶污染相空間分布比對、快速檢測成分組成分布與儀器分析成分組成結果比對、快速檢測濃度空間分布與儀器分析濃度值差異比對、快速檢測污染濃度與成份空間分布差異分析、污染濃度空間分布與地質分布特性&水文條件空間變化分析比對等等，再由彙整分析結果推估並追溯到洩漏發生源頭，如圖 1-5 所示。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

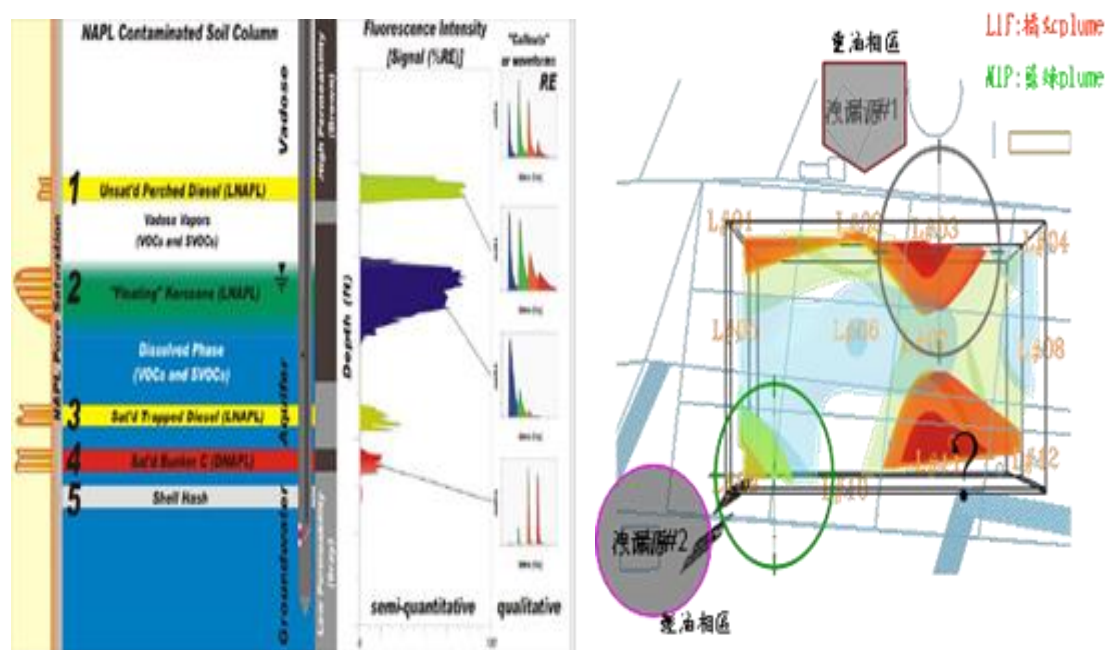


圖 1-5 運用空間分布、場址背景與不同調查資料結果比對追溯可能之污染洩漏源

1.3 計畫構想

石油化學污染場址因為製程特性，除存放與生產物質種類繁多外，地下環境也因建物、設備構築與物料傳輸作業等而形成較複雜之情形，造成場址調查評估作業有較多的挑戰性與困難度，以往常用的環境介質取樣分析方式，往往只對分析樣品結果保證而無法反映場址實際狀況，且由於成本效益與經費限制以至於調查數據量偏低，造成場址調查結果存在著較多不確定性，為降低場址環境存在的潛在變異性影響調查結果判識，擬規劃以複合式調查方法並導入較新穎的場址專案管理方法三合法(traid approach)的精神進行本研究模場執行作業，期能使作業流程能更加流暢化，另為使研究成果於未來實場運用時不至於有太多差異性，故規劃一場址選擇原則以挑選試驗用模場，以下就本研究執行規劃進行各項說明。

1.3.1 雷射誘發螢光系統試驗模場選擇:

基於雷射誘發螢光系統檢測特性，選定具相關指標性特徵的產業類別進行挑選，基本上以(1)含芳香烴類或不飽和烴類化學物質生產製造場址、(2)已知場址中發生洩漏狀況並疑似影響至地下環境(3)場址中發現非屬溶解相(NAPL)存在於環境介質中、(4)場址發生洩漏物質具備多種影響環境標的物質、(5)於環境監測中發

現指標性污染物存在於地下介質中但不清楚洩漏源、(6)曾經尋找洩漏源但一直無法發現、(7)洩漏狀況經初步調查後發現非屬單純洩漏較難釐清實際狀況(8)場址污染空間分佈概念模式不明確等，茲將以上 8 點要項定為本次試驗模場的選擇指標，場址選定之要件至少須具備(1)、(2)、(3)等 3 個條件，依序依其他具備的條

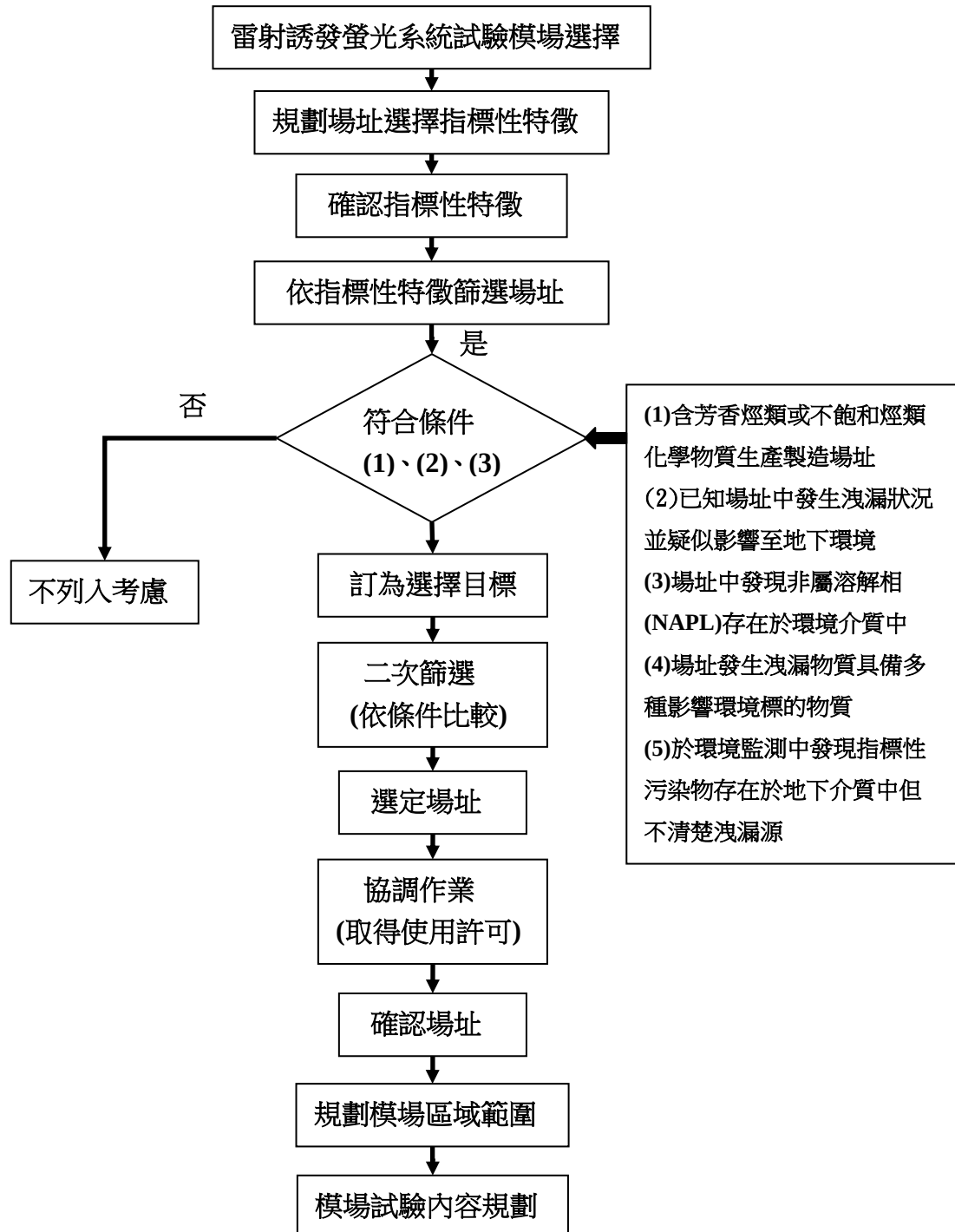


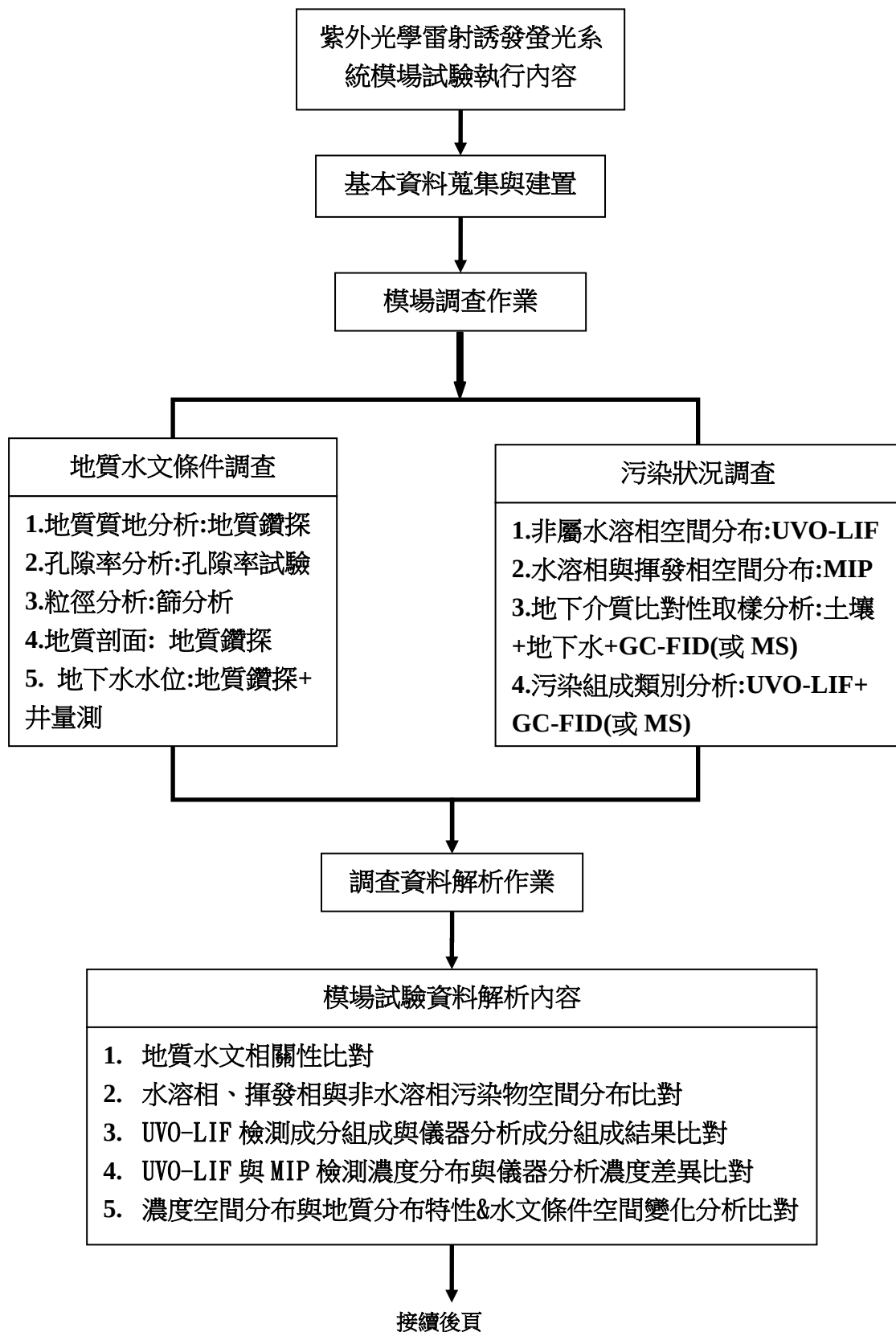
圖 1-6 模場試驗場址選擇流程圖

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

件多寡進行場址的篩選，最後選定至少 2 個候選場址進行場址使用協調作業，取得場址使用許可後確認最終進行模場試驗場址，開始著手場址模場試驗規劃並初步劃定模場使用區域，後續即進行模場試驗內容規劃。場址選擇流程如圖 1-6 所示：

1.3.2 研究模場試驗內容規劃：

本研究模場試驗於現地執行之前將先參考行政院環境保護署「以環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」及美國材料及試驗協會（American Society for Test and material, ASTM）ESA Phase I 準則（E1527-05 Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process）進行場址歷史與廠區相關運作資料蒐集以協助後續實場調查作業與結果研判之參考，後續實場調查主要分成 3 大部分，主要為(1)場址地質條件(2)場址水文條件(3)場址污染狀況等，在場址地質條件方面主要為了解模場的地質特性、物理特性(如孔隙率)與地質分布情形(地質剖面)，在場址水文條件方面主要為知道地下水位變化、地下水位流向及地層中下水的滲透性(K 值)，為協助進一步了解空間滲透性的異質變化，特採用了可進行不同深度微水試驗工具(氣動式微水試驗組，PST)進行多深度的滲透性調查，最後為本研究計畫的主要重點即場址污染狀況調查，主要以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)進行場址探測孔的連續偵測，測定模場中非屬溶解相(NAPL)空間分布情形，並藉由系統所產出的特徵圖譜初步研判可能的污染物成分組成，結合後續依據雷射誘發螢光系統調查出之 NAPL 空間分布情形進行地下環境介質(土壤&地下水)少量特定深度取樣比對，並以氣相層析儀(GC-FID)或氣相質譜儀(GC-MS)分析與污染物相關之揮發性有機化合物(VOCs)或半揮發性有機化合物(SVOCs)，如總石油碳氫化合物(TPH)、多環芳香烴(PAH)或與製程相關的物質等，另外搭配薄膜界面探測器系統(MIP)進行溶解相與揮發相的偵測，以了解污染團的擴散分布情形，綜合上述調查資料進行相關解析，如地質水文相關性比對、水溶相、揮發相與非水溶相空間分布比對、快速檢測成分組成與儀器分析成分組成結果比對、快速檢測濃度分布與儀器分析濃度差異比對、快速檢測污染濃度空間分布差異分析、濃度空間分布與地質分布特性&水文條件空間變化分析比對，藉由多重分析結果期能推估並追溯到洩漏發生源頭，並加以證實此一複合式調查工法的實用性，另外更進一步了解紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra-Violet Optical laser induced fluorescence system)在石油化學污染場址使用效益與可行性。模場試驗內容規劃流程如圖 1-7 所示。



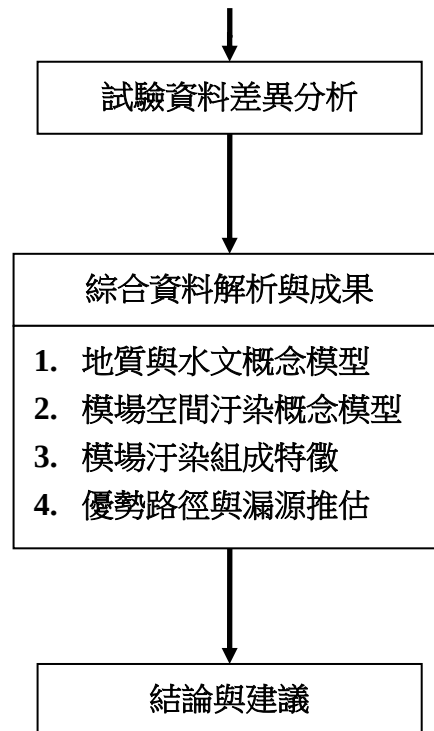


圖 1-7 研究模場試驗內容規劃流程

1.4 執行期程

依據合約規定本計畫執行期間自 2012 年 12 月 10 日起至 2013 年 12 月 09 日止完成計劃，共計 365 日曆天，工作進度預定排程詳見表 1-1。本計畫自計劃核定通過後開始執行日起至第 5 個月份需提交期中報告，預定繳交日期為 2013 年 5 月 09 日，於第 11 個月份須提交期末報告初稿，預定繳交日期為 2013 年 11 月 09 日，於計劃期間預定 4 個查核點為執行期程之第 4 個月份、期中、第 9 個月份與期末等，有關預定工作執行排程(表 1-1)與各項工作執行期程如黑實線所示。計畫執行工作包括如下：

表 1-1 本計畫預定工作進度及查核點

工作項目	年月												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
試驗模場協調作業	▬		※		※				※		※		
場址一階環境場址評估		▬											
模場試驗前置作業		▬											
UVO-LIF 系統檢測			▬										
MIP 系統檢測				▬									
調查資料解析				▬									
地下水即時取樣							▬						
土壤取樣作業							▬						
地質鑽探作業							▬						
水文調查作業							▬						
樣品儀器分析作業							▬						
綜合資料解析									▬				
報告撰寫						▬					▬		
以下空白													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8%	24%	32%	39%	49%	55%	66%	75%	81%	86%	93%	100%	
預定查核點	期中：		第 3 個月完成一階環境場址評估，第 5 個月完成現地 UVO-LIF 與 MIP 調查作業。第 6 個月提出期中報告										
	期末：		第 9 個月完成現地介質比對取樣與地質&水文條件調查，第 11 個月完成樣品分析與綜合資料解析。第 12 個月提出期末報告。										
說明： ▬ 預定進度 ▬ 實際執行													
1、 工作項目請視專業性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。													
2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。													
3、 「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													

第二章 文獻回顧

一個具完整性的場址調查能提供較具體化的污染分布情形與反應實際地下環境條件，呈現的資料訊息能讓參與決策者做出正確的應變策略與因應方案，提升後續改善作業成效與經濟效益。傳統的場址調查方法大部分的檢測工作與數據解讀均是離場完成，而且是在採樣後的數週後甚至數個月後才能產生初步的結果。而快速場址評估工作方法的特色相較於傳統的場址調查方法則有不同處，快速場址評估具有現場即時取得檢測數據之優勢，通常所有檢測數據均於現場執行與產生並且於現場進行解讀，也因此可提供即時判斷場址狀況並適時進行調整調查策略的運用。本計劃所使用之雷射誘發螢光(Laser Induced Fluorescence)檢測系統屬於快速場址評估(Expedited Site Assessment)的一種作業方式，此次乃針對現場測量技術之擴展與應用，發展有助於調查石化工業污染場址地下環境中非屬溶解相態的「自由相態」偵測技術，並結合其他現地探測「溶解相態」的有機污染物偵測設備與配合使用不同精密程度的分析方法取得大量檢測數據與少量查核比對數據，以建立更詳細的場址污染概念模型(site conceptual model, SCM)與不同空間污染物質分部組成特徵，另外亦藉由污染物空間分布與組成特徵結合水文地質去推估可能之洩漏發生來源。以下就相關方法、技術運用之特性原理與標的污染物特性別進行說明。

2.1 場址快速評估特性

場址評估作業若能接近實際場址狀況完整性便能夠提供參與者有關地下環境中污染物存在情形的證據及其實際污染分布的狀況，對於後續決策整治規劃的技術可提升其應用效能與經濟上的效益，但如果調查評估工作缺乏完整性與產出資料不完整，所提供的資料可能是不正確性或具誤導性的訊息，便可能使得整治規劃失當導致效能不彰而徒增整治經費或擴大污染範圍，如何執行才能具備場址調查的完整性基本上較難以定義，但藉由多樣的調查技術比對、成果資料成效驗證與減少需求資訊落差或者藉由後續改善成效成果便可進一步了解是否具備調查的完整性。

由國內、外的實際應用經驗體認到傳統的場址調查執行方式除費用偏高外，在有限經費的限制下往往無法使場址調查具備完整性，而增加了調查結果的不確定性，對於後續整治成效變化亦多以推測方式來進行資料解釋，針對這些缺點逐漸發展出許多成熟的場址評估工具，因此所謂「快速場址評估」(Expedited Site

Assessment)之作業程序儼然成形，較完整的方法為由美國環保署所推動的「三合系統」(Triad System)，其功能在於利用最少的資源獲得最大效益之場址調查資訊。快速場址評估工作方法的特色相較於傳統的場址調查方法不同處，通常所有檢測數據均於現場執行與產生並且於現場進行解讀，相較於傳統的場址調查方法，大部分的檢測工作與數據解讀均是離場完成，而且是在採樣後的數週後甚至數個月後才能產生初步的結果。在採樣與檢測方法方面具備彈性，可於現場進行必要的變動，但傳統調查方法經常導致整個調查工作必須分成數個階段完成，甚至必須重新採樣分析，造成調查計畫額外的負擔。所以快速場址評估具有現場即時取得檢測數據之優勢，可即時判斷場址狀況調整調查策略。快速場址評估方法與傳統的場址調查方法執行流程之差異比較如圖 2-1 所示。

在快速場址評估的工作方法應用上，也因土壤、土壤氣體與地下水之快速採樣與現場分析方法的進步，而有顯著的改善。在必要時也將傳統的採樣與分析方法整合至快速場址評估計畫中，以提升調查資料品質與資料可靠度，基本上就是選擇性的以傳統方法分析少數的樣品做為驗證之用。在快速場址評估過程中，特別強調適當的利用技術將完成場址調查所需的時間最小化，並且將執行後續改善或整治規畫決策時可用之數據資訊最大化。由於傳統場址調查評估的採樣與分析部分通常是相當剛性的定義採樣位置與數量，而且大部分的資料分析與解釋都要花上數週或數月的解讀。最後的結果通常著重於描繪出地下水的污染團，而不是著重於污染源或是污染最嚴重的區域的定位，而且污染團的三維分布(即相對於縱深度方面的分布)也通常被忽略。因此傳統的調查方法一般都較耗費時間且總經費也較高，對於場址調查最後結果也不見得完整和正確。快速場址評估具直接進行評估的特色，並有利於現場依狀況進行調查計畫之調整，以使獲得的數據能對計畫發揮最大的效用。然而不論是傳統或是快速場址評估方法，都必須要建構相關場址概念模型(Site Conceptual Model, SCM)以進行採樣的規劃，而快速場址評估的採樣與分析計畫是動態的而非固定的。一但在現場有新的檢測數據出現時，就可直接用於評估中，並更新與調整相關場址概念模型(SCM)，所以資料上的缺陷可以隨時補上，不合理的數據資料也可以當場審視，除直接減少重新採樣的可能性，亦提高數據資料之可用性。

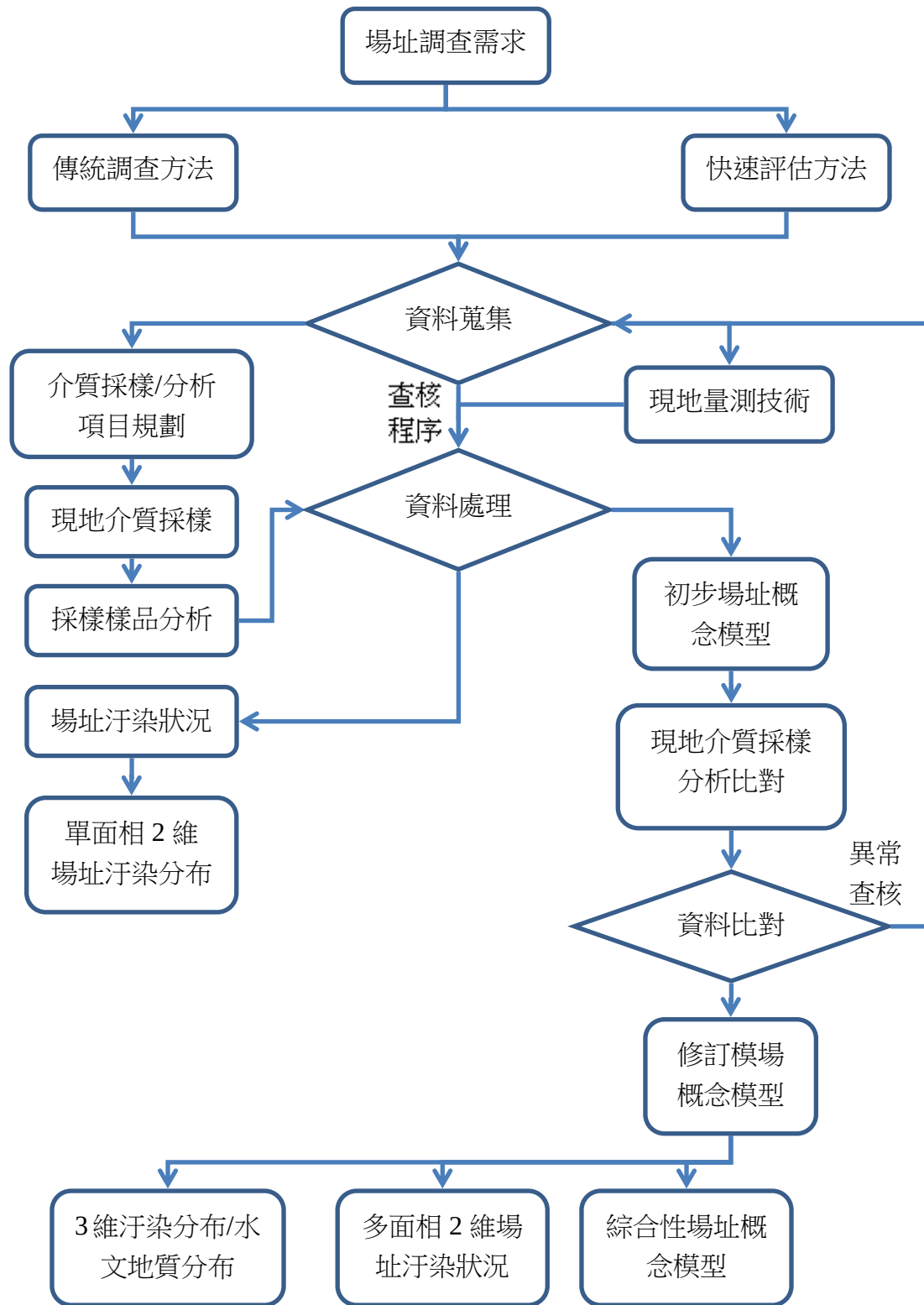


圖 2-1 快速場址評估方法與傳統的場址調查方法執行流程之差異比較

2.2 環境場址評估特性

環境場址評估(Environmental Site Assessment, 簡稱 ESA) 主要應用於標的場址中土壤及地下水之潛在污染調查，一般環境場址評估方法可分成兩個階段(當今普遍被參考之規範標準，乃為美國材料試驗學會(American Society for Testing and Materials, 簡稱 ASTM))，一階環境場址評估程序(Phase I Environmental Site Assessment Process)與二階環境場址評估程序(Phase II Environmental Site Assessment Process)但通常環境場址評估(EAS)執行作法係先透過第一階段(Phase I)評估以有系統性的資料蒐集方式並透過現勘程序及相關人員訪談，事先對場址背景作一覺詳實的審視、評估與發現，然後再依評估結果資料缺少部份與需確認部分決定是否需進一步執行第二階段(Phase II)之調查作業。

資料蒐集與審閱是一階環境場址評估最基本的步驟，藉由盡可能蒐集到的各項歷史資料之進行研析，例如目標場址所在地與其周界概況、考量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、目標場址環境資料(場址所在地理位置圖、平面配置圖)、確認場址使用的一般情形(確認其使用之用途，如：辦公室、廠房或儲槽等，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。)、是否曾違反相關環保法規之紀錄、使用歷史等背景資料(回溯期間)等，藉以研判目標場址潛在污染之可能位置與疑似造成污染條件的污染源，搜尋範圍係依照場址特性、適用目的與相關規條之差異，而有不同的搜尋距離，資料蒐集應以合理取得；並可供實際審閱研析之資料為限，蒐集時應注意資料更新情形及有效性，以避免取得不正確或過時的資料。進行資料文件審閱時，應依專業知識、相關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。

場址勘查目的是為確認場址內可接受與應排除的可鑑識環境條(Recognized Environmental Conditions, RECs)項目，一般而言於進行場目標場址勘查時，除非受環境或障礙物所阻礙，應儘可能勘查場址的內部及外部，並包含任何座落其中的結構物，同時勘查是否有敏感之環境受體存在。如有必要需於報告中說明勘查時所受到的限制，另外勘查重點需特別注意並之重點包含有害物質與石油製品之使用、處理、儲存、處置或生產情形、廠房內外製程設施或設備附近區域、地上與地下儲槽管線設施、惡臭發生源、各種承裝容器(原料或廢棄)、污漬或腐蝕痕跡、

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

廢污水收集處理設施與放流口、排水口、溝渠、植物生長異常、可視之回填或遭廢棄物傾倒區域、原物料、產品卸裝區等。

在訪談方面主要是針對相關對場址歷史沿革、運作特性及環境背景資料熟悉之場址土地所有人、管理人、使用人或周遭可能知曉場址相關情形的人員進行訪談，一般訪談方式可採親自訪談、電話訪談，或書面資料訪談等方式進行。可依不同之場址特性擬定適當之問卷，便於詢問方向與重點紀錄。

2.3 傳感偵測器特性與運用

傳感偵測器(sensor)是一種可對外界刺激的反應產生識別的一種裝置，常見的一些傳感偵測器如:溫度感應器、光電反應感應器、壓力感應傳送器、煙霧偵測器、藉由對刺激反應產生標準化電子訊號的電子傳感器等等，通常這些設備具有可顯示讀取數值與數值輸出界面的裝置或較大型的設備亦提供了感應數值輸入至邏輯決策系統進行數據解讀與判斷，例如常被使用在儲槽內部的傳感偵測器，提供了液位的訊息到系統控制器上再經轉換此訊息決定啟動或關閉泵浦，去補充或洩放掉儲槽內的液體。傳感偵測器也可運用至環境調查或整治作業的一些活動中，如場址特徵調查、監控作業或自動化作業，運用的當的話對於整治專案便可提供長遠的效益，如節省人力需求、節省分析費用或產生促進優化流程資訊等。

一般環境整治作業包含了許多的行為活動，如污染濃度檢測與監測參數的需求、介質的特徵、系統操作參數等，近幾年來已相繼陸續有一些型式的傳感偵測器技術應用於場址環境整治作業期間，這些技術通常包含了即時(real-time)偵測的執行、連續性的量測作業、遙測監控、遙測操作與系統自動等作業。

針對應用在系統自動化、特徵描繪和環境監控的傳感偵測器系統通常是由數種不同機構所組成，包含機械性傳感器組成機構、電子傳感器機構、分析(化學)傳感器機構、控制系統機構、遙測系統機構和相關軟體等，通常測些機構可能可單獨分開使用或者是整合在一起使用，使用操做過程可能相對的簡易或具高度的複雜性。機械性傳感器的定義包含運動部件，例如渦輪流量計包含當水流通過管子時推動渦輪轉動部分，藉由每分鐘轉數進行計數測量流率，當結合電子訊號轉換器時流量計便可從傳感器系統將量測的數據傳訊至控制器單元或顯示器單元。電子傳感器機構是種電學機制並可量測多種類的參數，如壓力、比重、液體存在情形(液位計或界面探針)、酸鹼度、溫度和導電度等。分析傳感器典型的作用是去量測化學性質參數如污染成分濃度，一些常用的分析傳感器如 PH 探針、比色法用的光學傳感器。控制系統通常是與傳感器共同使用的設備，包含可程式化的邏輯

系統(programmable logic controllers , PLC)與微處理器的電子設備(electronic microprocessor devices, EMD)，控制系統通常可以去接收感應器訊號輸入、處理訊號與觸發特定的動作。遙測系統主要是便於系統的控制或者是從遙測地點進行資料擷取，基本上可以透過無線系統或有線電訊系統進行。

2.4 雷射系統特性

「雷射」是由英文 laser 音譯而來，而這英文名詞則是由 light amplification bystimulated emission of radiation 的字首所組成，當光與物質發生交互作用時，原子內部的電子就從某一能階狀態躍遷到另一能階狀態，而躍遷過程會伴隨著光的吸收和輻射。雷射系統組成的要件通常包括活性介質(Active Medium)、激發源(source)及光共振腔(resonator)，活性介質必須具有「居量反轉」的特性，才能形成激發放射的雷射光，居量反轉(Population inversion)是產生雷射光的重要條件，就是上能階的電子密度必須高於下能階的電子密度。一種物質可能只有少數幾組能階可因某些激發方式呈現居量反轉，所以能發出的光波波長就有所限制，另外藉由共振腔使光強度放大並反覆進行，大幅增加放大效果，而共振腔的反射鏡是選擇性地只對少數波長的光具有高的反射率，甚至還常用稜鏡或光柵對光波長做進一步篩選。因此，雷射光就只能具有很窄的波長範圍，也就是雷射光具有單色性，單色光是指幾乎是單一頻率的光與自然光不同的是自然光不具單色性而是具有各種顏色或頻率的光，另一方面，激發放射使光波（光子）的步伐整齊（相位一致），所以雷射光束的相干性很高，雷射源產生運作的過程，大致可分為五個步驟：（1）未激發的原子；（2）藉由外界照光，原子吸收光波而躍遷到激發態並開始自發發射；（3）自發發射頻譜經過共振腔篩選，只剩下幾個特定頻率共振，這時，原子數目已達居量反轉分布，受激發射開始；（4）受激發射，經過共振腔多次往返，增益漸增，光沿著光軸方向逐漸加強強度；（5）因受激發射而繼續放大，達到臨界值而輸出雷射。

當激發光打入共振腔時，雷射光子會快速累積，光強度與增益常數成反比，當光強度增加到飽和強度時；共振腔內會形成穩態，最後由輸出端之反射率決定輸出比例。下列式子表示雷射輸出強度關係式：

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{\delta - \ln R} - 1 \right) \quad \text{其中 } g_0 = \frac{\sigma_f \eta P_{in}}{h\nu V}$$

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

其中 A 與 L 為增益介質的截面積與長度、 I_s 為增益飽和、 R 是輸出端之反射率、 g_0 為小訊號增益常數、 δ 共振腔損耗、 V 為增益介質體積、 η 為總轉換效率、 Γ 螢光生命週期、 ν 為雷射頻率。

雷射系統的類型就活性介質類別的不同而有所區別，如活性介質為氣體，稱為氣體雷射，例如：氦氖氣體雷射或二氧化碳雷射、當活性介質為固體，稱為固體雷射，例如：紅寶石固體雷射、當活性介質為半導體，稱為半導體雷射，活性介質不一樣，所發出的波長也不一樣，例如氦氖雷射波長 $632.8 \text{ nm} = 0.6328 \text{ } \mu\text{m}$ ，加工用的二氧化碳雷射波長是 $10.4 \text{ } \mu\text{m}$ 。一般常見雷射系統種類與特徵如表 2-1 所示：

表 2-1 常見雷射系統之種類與特徵

雷射型態	活性物質/型態	激發型式	放波型式	震盪波長 nm	特性/特徵
He-Ne 雷射	Ne/氣體	放電	連續波	632.8	功率雖小但可作同調性佳的穩定輸出、操縱簡單
氬氣雷射	Ar/氣體	放電	連續波	488 514.5	功率大且可作同調性佳的定輸出
二氧化碳雷射	CO ₂ /氣體	放電	連續波	10.6	高輸出、高效率紅外線
氦氣雷射	N ₂ /氣體	放電	脈衝波	337.1	短脈衝 近紫外線
準分子雷射	ArF、KrF、XeCl、XeF/氣體	放電	脈衝波	193、248、308、351	高輸出 紫外線
金屬蒸汽雷射	Cu、Au/氣體	放電	脈衝波	511、578 628	高速度往復 平均輸出大
染料雷射	Rhodamine6G coumarin 其它/液體	光學	脈衝波 連續波	320~1000 220~500、 190~310	振盪波長寬 波長可變
紅寶石雷射	Cr/晶體	光學	脈衝波	694.3	高能量脈衝 高功率輸出
YAG 雷射	Nd/晶體	光學	連續波 脈衝波	1064、532、 355	高能量脈衝、高輸出、高速往復
二極體雷射	GaAlAs/GaAs InGaAsP/InP	電子	連續波 脈衝波	330~400、 380~485、	袖珍、可直接調整脈衝

	(PbSn)SnTe/ 半導體			450~530、 630~700、 740~870、 900~1060、 1180~1580、 630~1580	
--	--------------------	--	--	---	--

2.4.1 雷射系統操作安全衛生

(1) 雷射光的危險性

雷射光的高強度，使它與生體組織產生極劇烈的光化學、光熱、光動力、光游離、光波電磁場等交互作用，而造成傷害。人眼的角膜與結膜沒有受到如一般皮膚角質層的保護，最容易受到光束及其他環境因素的侵襲。雷射光的強度很高，以致眼瞼的反射動作產生保護作用之前，就造成傷害了。

雷射光的能量必須能穿透前方組織，而為某處組織吸收時，才會對該組織造成破壞。因此，眼睛所受的傷害與波長有關(可見光與 IR-A 影響視網膜，UV-B、UV-C、IR-B、IR-C 影響角膜)；可見光和短波紅外線(near infrared；IR-A)會穿過清澈的眼中物質，而被視網膜吸收，所以若光束太強，就會傷害視網膜。雷射光的高準直性，使光線能會聚於一個很小的點，在視網膜上約為 10 至 20 μm (小於頭髮的直徑)。因此，400nm 到 1400nm 之間的雷射，對視網膜具有特別高的危險性，這個波段稱為視網膜危險區(retinal hazard region)。由於熱流和震波的影響，環繞成像區的組織也可能受損，而對視覺功能造成更嚴重的後果。因為視網膜神經組織的修復能力甚低，這種傷害一般而言都是永久性的。視網膜危險區之外的電磁波，包括紫外線和長波紅外線(far infrared)，則可能使眼睛的前方部分受傷。有些波段會傷害晶狀體(lens)，295nm 至 320nm 以及 1 μm 至 2 μm 的輻射尤其嚴重。波段相當廣的紫外線，以及波長大於 1400nm 的紅外線，可能傷害角膜。只傷及角膜表皮時，一兩天內就能修復，而使視力完全恢復。如果角膜的較深層部位發生顯著傷害，會造成角膜癍痕，而導致永久失明。紅外線的組織穿透深度(penetration depth)方面，1.44 μm (如某些半導體雷射)、1.54 μm (如鉕—玻璃雷射)、2.1 μm (如鈦—雅克雷射)大於 10.6 μm (二氧化碳雷射)，所以前三者造成永久性傷害的危險性比較高。308nm 的 XeCl 雷射光束，會使晶狀體立即產生白內障，所以還具有額外的危險性。

(2) 附加輻射的危險性

雷射發生源常常是整套儀器系統的一部份，為了將光照射在特定部位，雷射光常經由光纖引導出來，而在雷射的激發裝置部分所產生未經放大的電磁輻射，會由雷射裝置的雷射光出口(aperture；孔徑)或機殼的縫隙逸出。由於其中可能有游離輻射，如紫外線或 X 射線，所以可能引起傷害，尤其是長期曝照之後的危險性更高。注意機殼的緊密程度，避免長期靠近可能有附加輻射之處，可以大幅減少發生這類危險的機會。

(3) 相關的危險性及防範

相關的危險是雷射或週邊物件，可能因不當操作或故障、損壞而引起的危險，也包括正常操作時因為相關物質發生變化，而造成的危險。一般危害如，(A)高壓電擊：由於漏電或誤觸電路引起。若有良好接地，電線沒有破損，非維修人員不碰觸雷射電路，則可避免、(B)電路失火：因為電線短路、超載，或是電路旁之器材不耐高溫及撞擊電路部分所造成。注意檢查電線，適量分散插座及開關之負荷，適當安置周圍器材可以預防這種危險、(C)電路元件爆裂：雷射中的電容器、變壓器最有可能爆裂，並因而造成擊傷、失火、短路等。除了請維修人員定期檢查這些器件的狀況，並作必要之更新以外，避免過度使用，提防散熱不良，可防止這類危險、(D) 其他物件爆裂：激發雷射用的強閃光燈，充有主動介質的氣體管或離子體管(plasma tube)可能因為不小心碰撞而爆裂。這些器件應該有堅固的護罩防止受撞擊，並應防止摔落、(E) 壓縮氣體的危險性：雷射壓縮氣體，可能因容器(如鋼瓶)不安全或放置不當，而造成危險。防止這種危險的方法是：使用通過安全檢查的容器，並依安全規定穩固地放置這些物品、(F) 有毒氣體或粉塵：光化學反應、光熱效應(燒出來或蒸發出來)、光動力效應(撞或鑽所造成)、準分子雷射的鹵素氣體外溢等，都會發生這類的危險。良好的護具，功能完善的局部抽氣排煙設備，是不可或缺的安全設施。煙氣排出之前，務必要妥善過濾。

(4) 雷射光危險性的分級

雷射的主要危險性在於其光束本身。根據雷射光的危險程度加以分級，可以分別採取恰當的安全措施：

(A)第 1 級 (Class 1) 雷射：輸出功率極低的雷射，它的光束是可以安全地目視的，不會對眼睛、皮膚造成傷害。例如不超過 $0.39 \mu W$ 的可見光雷射；釹雅克雷射(Nd:YAG)基頻(1064nm)光束功率不超過 $0.6mW$ ，二倍頻(532nm)不超過 $0.39 \mu W$ ，四倍頻(266nm)不超過 $0.8nW$ ，都屬於第 1 級。

(B)第 2 級(Class 2)雷射：第 2 級雷射的光束久看有害，連續波可見光雷射光

束功率高於第 1 級的上限，而低於 1 mW 時。這一級雷射，也就是低危險雷射。其危險性可視為與凝視太陽、鎢絲鹵素(tungsten-halogen)聚光燈(spotlight)、或其他能導致視網膜中央傷害(photoc maculopathy; central retinal injury)的強光燈相當。只有在故意反抗自然厭光反應(aversion response)，持續凝視時，第 2 級雷射才會造成眼部傷害。

(C)第 3 級(Class 3)雷射: 總功率高於 1.0mW 的瞄準光束(aiming beam)或對光雷射(alignment laser)，具有第 3 級危險性。即使只在完成厭光反應之前的短暫期間內，有第 3 級雷射光進入眼睛，就會有傷害。第 3 級又分為 3a、3b 兩個副級。第 3a 級雷射是光束功率為 1 至 5mW，強度不超過 25W/m² 的可見光雷射。如果它的光束大部分都進入眼中，會引起中度的眼睛傷害。輻射率（註 1）較低時，久看有害；輻射率較高時，眼睛受短期照射，即造成傷害；用儀器觀看亦立即造成傷害。非可見光雷射也沒有屬於 3a 級雷射者。第 3b 級雷射的光束直接照射眼睛與皮膚，立即造成傷害。它包含一些脈衝雷射，以及輸出功率介於 5mW 與 500mW 之間的連續波雷射。

(D)第 4 級(Class 4)雷射:輸出功率高於 0.5W(500mW)的連續波雷射，屬於第 4 級。如果使用不當，以致眼睛和皮膚受到直接光束或散射光束照射時，都會傷害眼睛與皮膚，及導致火災。

2.5 螢光產生程序與偵測原理

光是一種能量，由不同能能量形式產生的光可區分為熱光 (Incandescence)與冷光(Luminescence)，熱光是從熱能所產生的量轉換成光形式，冷光則是物質於光能照下即會發射出輻射能量而以光的形式呈現，通常冷光可分為螢光(Fluorescence)及磷光 (Phosphorescence)兩類，螢光為單重激發態(singlet state)形式生命期約 10-9 到 10-12sec，磷光則為三重激發態(triplet state)形式生命期較長約 10-3 到 10¹sec，當分子受到激發之後它會很快的鬆弛到最低能級電子激發態(excited state)的最低振動態，並且該最低能級之激發態與一開始激發之電子態具有相同的自旋多重性 (spin multiplicity) 這個過程是由於物質中其他分子頻繁碰撞所引發的。這個快速鬆弛的過程稱做內部轉換(internal conversion)，物質於吸收特定波長激發光之能量後，電子由基態 S₀ 激發到高能階的震動能階，先藉由震動鬆弛(vibrational relaxation) 回到 S₁、S₂ 的最低能階，再回到基態 S₀ 過程便會產生螢光波長電磁波，如果是經由內部系統轉換(Intersystem Crossing) 初始在最低自旋單態激發態的分子進一步轉換到了自旋三態的激發態 T₀ 能階，再由 T₀ 能階回到基態 S₀ 過程則

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

放出之電磁輻射能量為磷光，如 2-2 圖所示。

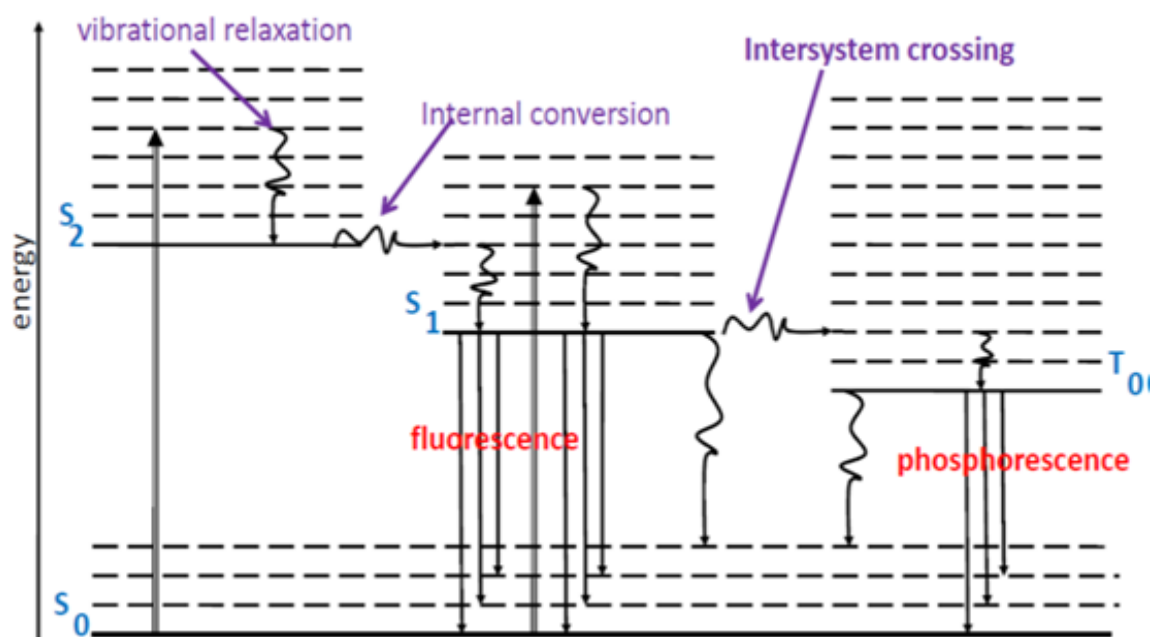


圖 2-2 冷光產生過程電子躍遷圖

冷光(Luminescence)現象是物理系統由於過度熱輻射或白熱化後產生電磁輻射放射的一種現象，當入射光子的能量等於或是超過能隙時，會激發價帶電子跨過能隙到達導帶，然後當物質由激發狀態回復到基態時便會產生輻射放射。一般光激發螢光原理，牽涉到一個由電磁(Electro-Magnetic) 輻射激發的系統，在分類上是屬於光學發光的技術，當入射光(電磁輻射) 照射在物質上時，導致電子被升高至激發態，典型的能帶躍遷過程可從汞燈光源或雷射光束來提供足夠的功率激發。入射如來自於雷射光源(能量 $h\nu_{\text{laser}}$)，當激態電子返回初始能態時，它會產生一個光子(能量 $h\nu_{\text{PL}}$)，也可能產生許多的聲子(能量 $h\nu_{\text{phono}}$)。由能量守恆，可將其表示為 $h\nu_{\text{laser}} = h\nu_{\text{pl}} + h\nu_{\text{phono}}$ 之方程式，一般激發光與放射光之能量差變化稱之為史托克位移(Stokes Shift)。

螢光(Fluorescence)是一種光放射現象，當一個適當波長的光照射具有螢光性質的分子，分子會吸收光的能量而被激發至高能量狀態，並在極短時間內，分子即回復低能量狀態，同時以放光的形式將多餘能量釋出，此即為螢光。一般而言，可放出螢光的分子其結構具備以下特點：共軛系統(conjugated system)、剛硬(rigid)及平面結構。在分子軌域中，電子產生 $\pi \rightarrow \pi^*$ 轉移而產生螢光，或者在 $n \rightarrow \pi^*$ 的轉移也會有微弱的螢光發生，強弱主要由量子產率 Φ_f (quantum yield)判定，即發光分子數目與被激發分子數目的比率，和螢光放光強度有正比的關係。影響放光強度因素分為內在因子(結構本身)及外在因子(周圍環境)。

光激發螢光(Photoluminescence)所使用的激發光源可區分為傳統光源激發螢光及雷射激發螢光兩種。常用的傳統光源有汞、氙等電弧燈，首先以濾光片自發射光帶中分離出所需的波長，再經過聚焦來激發分子，產生螢光，由於傳統光源皆為連續波長發射的光源，故必需利用濾光片或單光器來分離特定的波長，大幅降低激發光的入射光強度而同時也就限制偵測的靈敏度偵測極限一般在 10^{-5} - 10^{-8} mol 左右。與傳統光源比較，以雷射為激發光源的靈敏度較高，因為雷射具有高強度，帶寬窄及同調性的特點，所以容易以透鏡聚焦，其單位面積上的強大能量，能有效提高靈敏度，這種偵測方式稱為雷射激發螢光，文獻上曾報導目前雷射激發螢光的最低偵測極限可達 10^{-21} mol。

螢光激發光譜是針對光激發螢光(Photoluminescence)的某一特定譜線能量作偵測，這個方法是偵測特定的放射光能量，藉由分析光激發螢光資料，可以由放射光譜中的特徵得知物質的類屬組成種類，量測螢光生命期的方法有很多，通常都須使用脈衝式雷射激發樣品，而其對時間的解析度基本上是受限於雷射脈衝波的寬度。基本原理為當短脈衝雷射光源激發樣品時，其所造成激發態之起始時間便可曉得。每次脈衝只紀錄特定波長的光子，使螢光進入一個單光子光偵測器，將單個螢光光子出現時間與激發光脈衝到達之延遲時間間距準確的偵測出來，經過多次計數，測得螢光光子出現的機率分佈，。藉由快速反應的單光子光偵測器及精密的電子線路，這些到達時間量測的精準度可達到約 20ps。將所得到的螢光衰變時間分佈藉著儀器反應函數(instrument response function) 可得到更短時間的激發態生成時間與快速衰變反應，一般稱為時間解析光譜測量(Time-resolved photoluminescence)。這項利用到單光子光偵測能力，因此具有高動態比例範圍(high dynamic range)，相當高的靈敏度，可以比較不同的螢光效率之樣品等狀況，此外，這技術可對於空間分佈不均勻之樣品，可了解其空間分佈狀況與提供樣品相關重要的資訊。

在螢光光譜方面整個螢光過程是一種週期性程序，除非螢光條件處於激發態時是一種無法破壞的不可逆現象，所以相同的螢光程序是可反覆地被激發和偵測，由圖 中 $h\nu_{EX}$ 與 $h\nu_{EM}$ 分別代表一個較廣泛的能量光譜稱為螢光激發光譜與螢光放射光譜，針對應用於同時偵測兩個或兩個以上不同的螢光光譜，這些光譜的帶寬(bandwidths)是特別重要的參數，除了少數例外，在一些單螢光種類成份中一般螢光激發光譜是相對應於吸收光譜，且相同條件下，螢光發射光譜的激發波長是獨立的，由圖 2-3 中可看出在受激發後生命期中激發能量的分布情形，在一個激發波長中發射光的強度與螢光激發光譜的振幅成比例關係。通常一個螢光檢測

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

系統可分成 4 個基本要素部分，(1)激發源部分、(2)激發波與螢光波傳遞部分、(3)隔絕激發光子與發射光子的濾鏡濾波器部分、(4)發射光子的計數器或光譜影像器部分等。

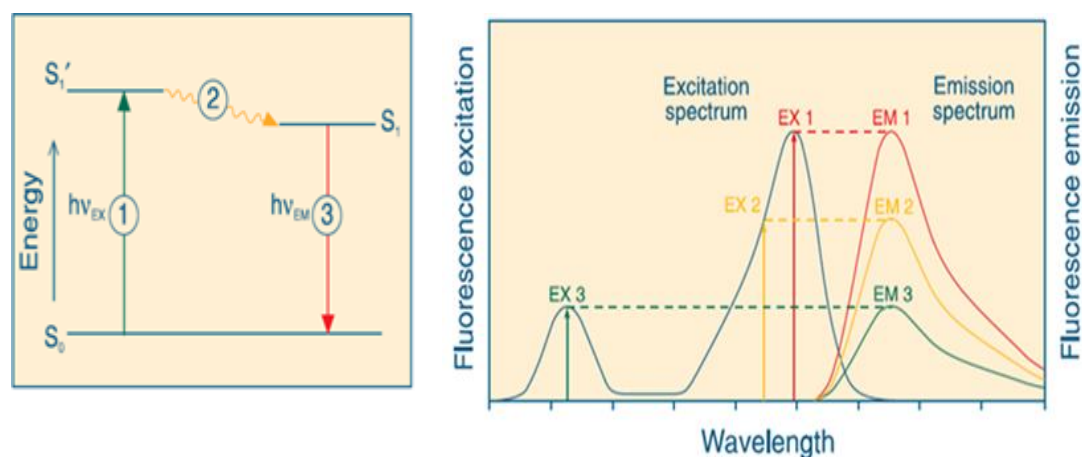


圖 2-3 螢光激發與發射光譜反應分布與強度變化示意圖

2.6 NAPLs 物質在地下環境中的特性

石化污染是環境污染問題的一個重要課題，在石化原料的開採、煉制、貯運及使用過程中，石化原料和各種石化類產製成品進入環境中而造成污染狀況，石化產品主要是由烷烴、環烷烴和芳香烴等基本組成的物質或混合物，具有致癌、致畸和致突變的潛在威脅，對人類和環境有相當大危害性。

石化類污染物在水中的溶解度一般很小，進入地下環境後通常以非水相液體 (Non-Aqueous Phase Liquid, NAPLs) 的形式存在。根據密度，NAPLs 可劃分為兩種：比水輕的稱為輕質非水相液體 (Less Dense Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPLs)，比水重的稱為重質非水相液體 (Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPLs)，地下環境中的土壤介質是一種典型的多孔介質。在土壤系統中有土顆粒骨架固相和空氣、水等二種不同的流體相存在。滲透性是多孔介質的重要特性之一，在受污染土體中一般存在著空氣、水和 NAPLs 等流體的多相流動。NAPLs 在土壤系統中的遷移是一個非常複雜的過程，從微觀角度來看，NAPLs 自由相在足夠大的壓力和重力作用下克服土體細小孔隙中的毛細壓力與物質界面間黏滯、磨差等相關阻力，穿過孔洞並且驅進替換孔隙中水相或者氣相滲流傳輸移動，同時受到土壤中有機和無機膠體和微生物的作用，通過物理、化學和生物變化不斷被吸附、分解和轉化；部分可溶性和揮發性組分通過溶解和揮發過程進入地下水

和孔隙空氣，受對流、延散等作用繼續傳輸移動。

NAPLs 在土壤系統中一般有以下幾種存在形態：自由流動的液相、吸附在土顆粒表面的吸附相、溶解於水中的溶解相和揮發於空氣中的揮發相。在 NAPLs 運移過程中，幾種存在形態將相互轉化，如圖 2-4 所示。

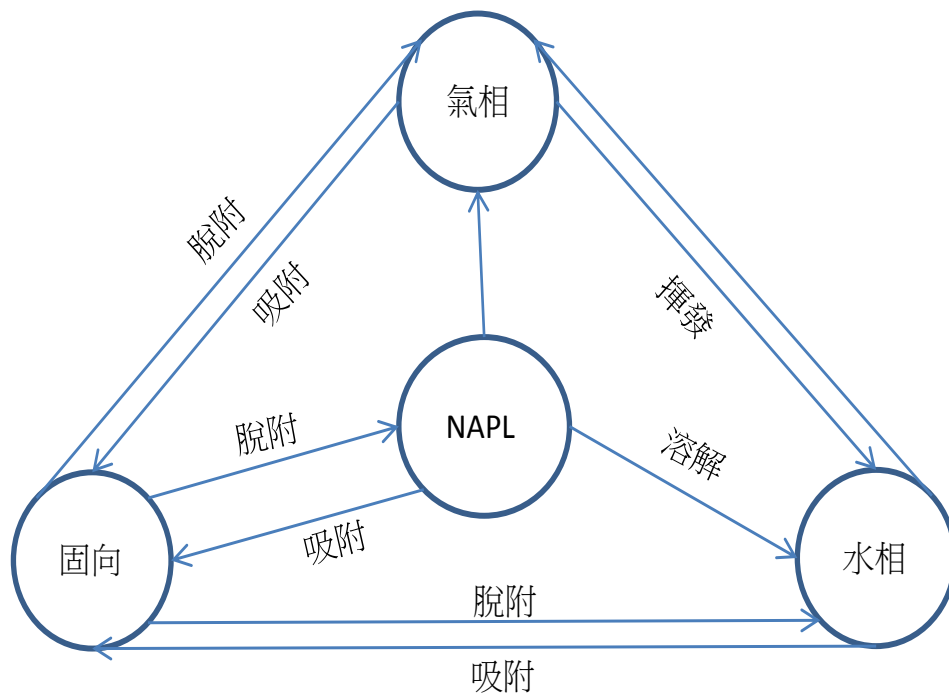


圖 2-4 NAPLs 在土壤系統中各存在形態的相互轉化

通常 NAPL 物質於洩漏後，在非飽和帶一般行進的傳輸是垂直向為主的人滲過程，進入地下水飽和帶後，水平方向上的擴散開始變得非常顯著，特別是對於 LNAPL 和非均質性強的含水層型態，以垂滲入深度而言通常取決於污染物洩漏量、洩漏強度、入滲時間、污染物的遷移性及場地介質條件等，在水平遷移距離方面取決於污染物組成成分的物性遷移性和地下水的水力條件狀況，如果污染物的洩漏量足夠多，入滲時間足夠長，最後污染物會進入到地下水。NAPL 在孔隙介質中如果含量足以形成連續相容易因水力梯度作用而移動稱為自由相(free-phase)或移動相(mobile phase);自由相的 NAPL 在移動過程中，也會部分殘留在小孔隙中其特點為非連續且不易移動，一般稱為殘留相(residual-phase)或稱為油滴(blobs)如圖 2-5 所示。

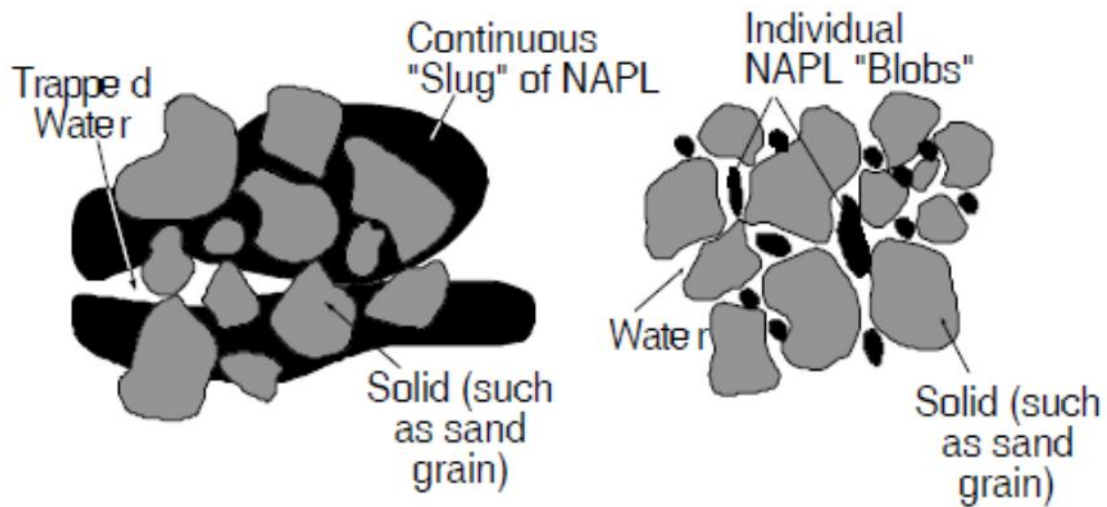


圖 2-5 NAPLs 在土壤孔隙中形成自由相與殘留相情形

另外 NAPL 在地下介質孔隙移動過程大致可分成兩種不同的遷移狀況，一般分為透過主要孔隙與次要孔隙的遷移，在主要孔隙遷移呈現較均勻之分布而於次要孔隙的遷移呈現支脈狀裂隙分布特徵，如圖 2-6 所示，對於密度小於 1 的 NAPL 一般稱之為 LNAPL(Less Dense Non-Aqueous Phase Liquid)當其向下移動到地下水位面附近時，會暫時停滯浮在地下水位面上，蓄積形成輕油透鏡體(LNAPL-lenses); 若密度大於 1 則稱為 DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid),DNAPL 通常會穿透地下水位面繼續向下移動，直到遇到阻礙層(一般為低滲透層) 停止,蓄積形成重油聚集池(DNAPL-pool)如圖 2-7 所示。

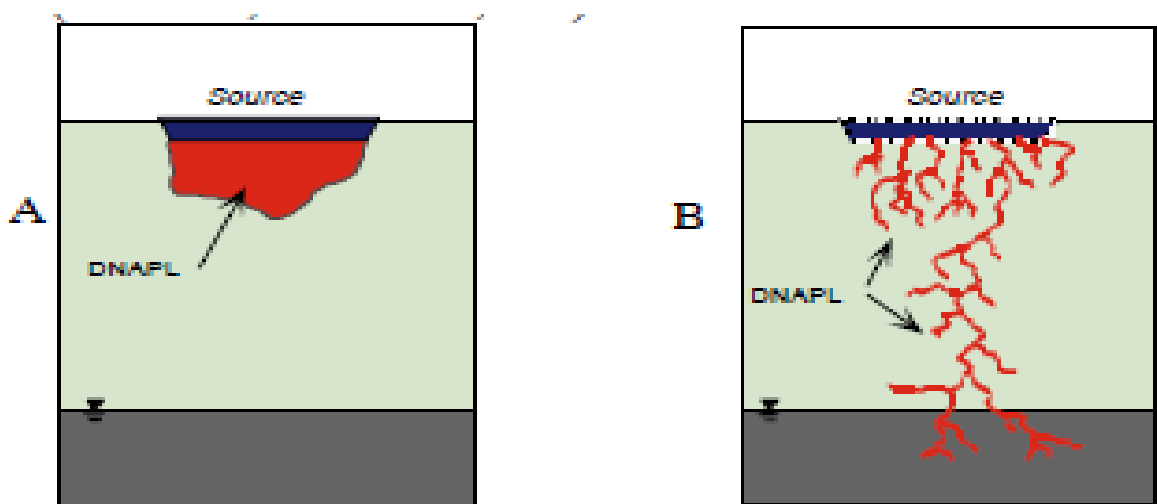


圖 2-6 NAPLs 透過不同孔隙型態遷移呈現之分布特徵

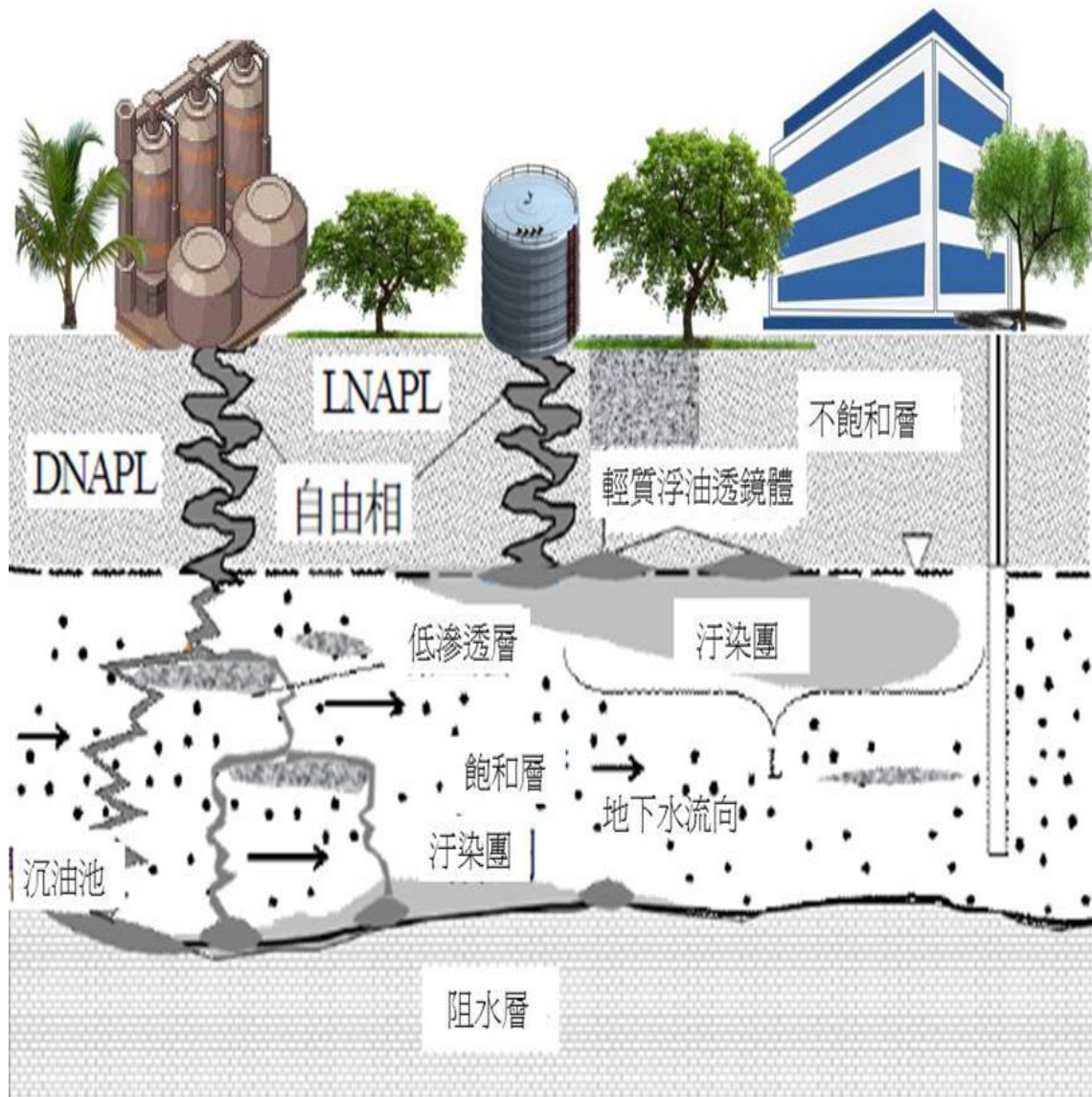


圖 2-7 非水相流體(NAPLs) 洩漏場址地下污染傳輸概念示意圖

第三章 研究方法

本次模場試驗研究於現地調查作業執行之前，將參考美國材料及試驗協會（American Society for Test and material, ASTM）一階環境場址評估準則（E1527-05 Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process, ESA Phase I）與行政院環境保護署「以環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」等方法原則進行場址歷史與廠區相關運作資料蒐集以協助後續進行實場調查作業與資料結果研判之參考。

試驗模場場址調查部分主要分成 3 個方向進行，工作項目分別為(1)場址地質條件(2)場址水文條件(3)場址污染狀況與分布調查等，在場址地質條件方面進行地質鑽探作業與土壤樣品篩分析試驗以了解模場的地質特性、物理特性(如孔隙率)與地質分布情形(地質剖面)；在場址地質水文條件方面使用氣動式微水試驗組(Pneumatic Slug Test Kit ,PST) 進行多深度的微水試驗測試以了解模場地層中不同深度的滲透性(K 值)條件，另外亦使用地下水即時取樣工具(GW 1600,USA Geoprobe)進行小區域模場流向測定；在場址污染狀況調查方面主要以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)進行場址探測孔的連續偵測，測定模場中非屬水溶解相液體(NAPL)空間分布情形，藉由系統所產出的特徵圖譜初步研判可能的污染物成分組成，並搭配薄膜界面探測器系統(Membrane Interface Probe ,MIP)進行溶解相與揮發相的偵測，以了解污染團的擴散分布情形，將現地即時調查工具所得到的污染熱區與污染團分布資料，以 DPT(direct push Tech.)採樣器，進行地下環境介質(土壤&地下水)少量特定深度取樣比對，並以氣相層析儀(GC-FID)或氣相質譜儀(GC-MS)分析與污染物相關之揮發性有機化合物(VOCs)、半揮發性有機化合物(SVOCs)、總石油碳氫化合物(TPH) 或與製程相關的物質等，最後綜合調查資料進行相關解析，如地質水文相關性比對、水溶相、揮發相與非水溶相空間分布比對、快速檢測成分組成與儀器分析成分組成結果比對、快速檢測濃度分布與儀器分析濃度差異比對、快速檢測污染濃度空間分布差異分析、濃度空間分布與地質分布特性&水文條件空間變化分析比對等。

3.1 一階環境場址評估作業

場址資料蒐集包含各項相關歷史資料、場址環境資料(地理位置圖、平面配置圖)、周界概況資料、區域水文地質特性、場址使用用途資料、基本設施、設施製程、原物料與製成品特性、有關場址相關報告回顧。

人員訪談則找尋場址管理人員與熟悉場址歷史沿革、運作特性及環境背景資料的人員，以現場親自訪談與電話訪談方式進行相關重點詢問與問題點求證。

場址勘查則針對場址使用、廢棄物處理、物料儲存、製程相關處置或生產情形、廠房內外製程設施或設備附近區域、地上與地下儲槽管線設施、惡臭發生源、各種承裝容器(原料或廢棄)、污漬或腐蝕痕跡、廢污水收集處理設施與放流口、排水口、溝渠、植物生長異常、可視之回填或遭廢棄物傾倒區域、原物料、產品卸裝區等進行重點式勘查。

模場試驗規劃：

- 1.模場尺寸規模:預定於試驗場址中選取 48x100 m² 區域作為本次研究之測試模場。
- 2.調查規劃方式:使用系統性網格規劃((Systematic and grid) 方式，利用虛擬網格方法繪製瓶架網格，將試驗場址區分為 24 個網格 cell，每個 cell 區域面積約 12x16.6m*2 並以等腰三角形進行瓶架調查點設置，預計共有 16(新增至 18 點)個調查測點數，試驗模場網格規劃方式如圖 3-1 所示。

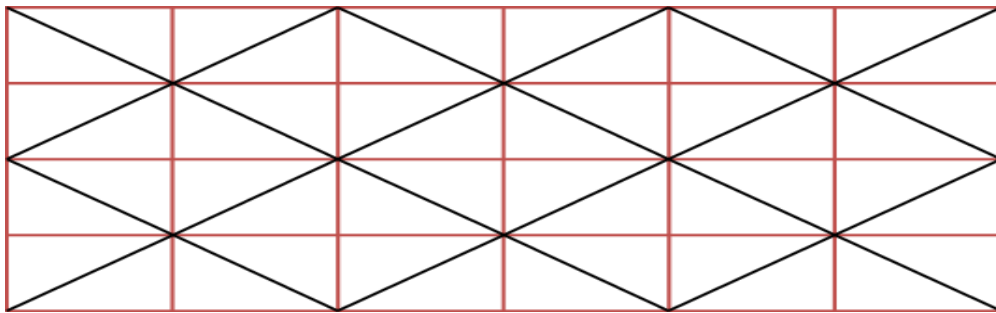


圖 3-1 試驗模場調查點網格規劃方式示意圖

- 3.紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)施作:預計施作測點 16 點(新增至 18 點)，每個測點施作深度 5m，施作總尺寸=16x5m=80m。
- 4.薄膜介面探測器系統(MIP)施作: 預計施作測點數 16 點(新增至 18 點)，每個測點施作深度 3.2m，施作總尺寸=16x3.2m=51m。
- 5.土壤鑽探作業:單孔測點連續取樣 0~5m 深度，並進行地質判視與資料製作，施作 6 個測點，總取樣深度=6x5m=30m。
- 6.模場地下水文施作:以 GW1600 地下水即時取樣工具佈設 6 個測點進行地下 水位量測，配合固定高程點進行相對水位高程測量，進行水位流向繪測。
- 7.土壤分析取樣作業:取樣測點 6 點，參考紫外光學雷射誘發螢光系(UVO-LIF)施作結果進行定深取樣作業，每個測點取 3 個樣品(以高、中、低濃度強度反應為依

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

據)，總樣品數=6×3=18 個。

8.地下水分析取樣作業：取樣測點 6 點，參考薄膜介面探測器(MIP) 施作結果進行定深取樣作業，每個測點取 3 個樣品(以高、中、低濃度強度反應為依據)，總樣品數=6×3=18 個。

9.樣品分析作業：預計以火焰離子氣相層析儀(GC-FID)與氣相分析質譜儀(GC-MS) 進行分析作業，分析項目為：總石油碳氫化合物、揮發性有機化合物(VOCs)、半揮發有機化合物(SVOCs)、BTEX 等項目，總分析樣品數=土壤樣品+地下水樣品=18+18=36 個分析樣品。

3.2 紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)裝置

雷射誘發螢光 (Laser Induced Fluorescence, LIF) 分析光學檢測技術在環境污染物檢測之應用原理，主要針對部分環境污染物成分具有光激發螢光反應之特性，於使用高功率密度 (power density) 之雷射光源可得到較高強度之螢光反應，因而增加檢測的靈敏度。本次實驗系統(如 圖 3-2 與表 3-1 所示)雷射源系統主要為準分子雷射(excimer laser)系統，其特性為擁有較大能量輸出功率，準分子雷射名稱的由來是由'excited' + 'dimer'兩個字而來，意即受激發的兩個離子結合成準分子狀態，當不穩定的分子解離後釋放出的能量便是雷射光。用來激發產生雷射的介質通常是兩種氣體，一為稀有氣體(rare gas)，一為鹵素氣體(halide gas)，因此只要不同的氣體組合，便可得到不同的雷射光波長輸出，並且以脈衝(pulse)的方式釋放出來。雷射光源與光輻射訊號傳遞則是採用光導纖維，光纖是一種達致光在玻璃或塑料製成的纖維中的全反射原理傳輸的光傳導工具。微細的光纖封裝在塑料護套中，使得它能夠彎曲而不至於斷裂。光纖的一端的發射裝置使用雷射束將光脈衝傳送至光纖，光纖的另一端的接收裝置使用光敏元件檢測脈衝。

本裝置係利用特定波長 308 nm 之氯化氙(Xenon Chloride, XeCl)準分子雷射，為惰性氣體原子和鹵素氣體原子結合成的準分子，運用紫外波段的短波長脈衝雷射，將高分子材料內部電子激發，造成瞬間的離子化；紫外光雷射光源激發待測物內層的電子至外圍，為保持能量平衡，分子外圍電子將補入內層電子外移的空缺。因外圍電子能量較高，當電子進入內層軌域時，將放出特定的螢光能量，透過分析螢光之強度，可得到待測物質之相對濃度。藉由捕捉四個主要獨特的光譜特徵波段(350±20 nm、400±20 nm、450±20 nm、500±20 nm)，來描述螢光激發的完整性，並以 wavelength-time matrix (WTM)作為其紀錄形式。

表 3-1 UVOST 雷射激發螢光系統裝置單元

1. Control computer 控制電腦	7. Fiber I/O 光纖進出口
2. Oscilloscope 示波器	8. Launch Assembly 發射組合
3. Laser 雷射	9. Fiber-based Trigger 光纖基礎觸發器
4. Remote Display 移動式顯示器	10. E-Deck 電子傳輸機構
5. Emission/detection module 放射物偵測模組	11. Probe 探測桿

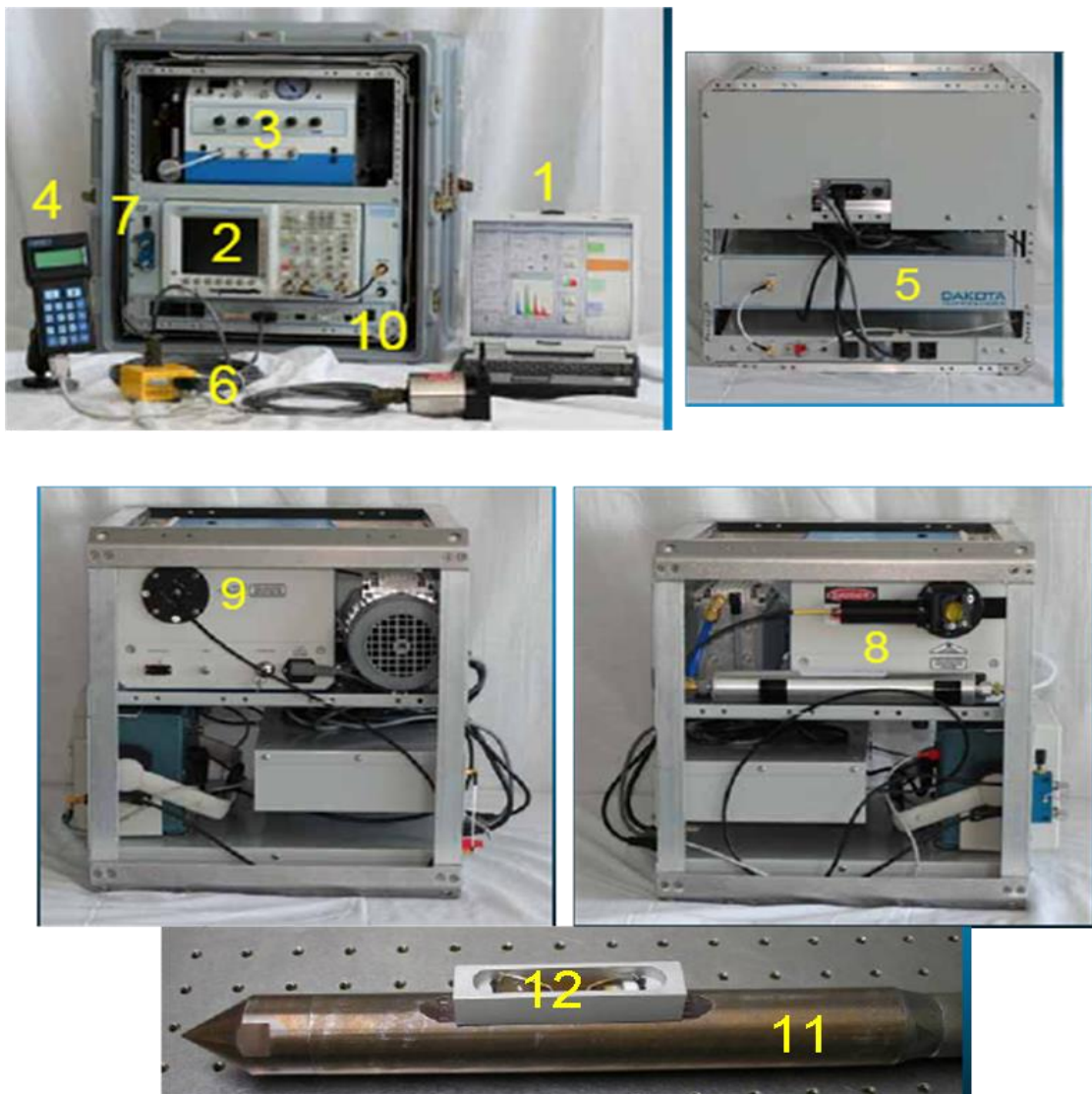


圖 3-2 本研究所使用之 UVOST 雷射激發螢光系統

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

UVOST 為一種 logging 工具，可利用於土壤中含 NAPLs 類有機化合物污染物之連續觀測。位於探針外的 NAPLs 類化合物經由光纖傳導雷射光激發作用產生螢光反應進入光學視窗後經由折射及光纖輸出至地面上的光學偵測器。偵測器將會記錄探測針深度及偵測到污染物的深度。每一筆 UVOST 偵測開始的事件記錄(logging event)前應優先執行校正作業，放置 RE 固定器到偵測視窗上，使用 Acq RE 指令獲取 RE 值，從示波器螢幕上比較參考波形與 RE 測試時之波形看起來應該是要符合才能進行檢測作業，在每一測點執行前先獲取適當的 RE 與背景值，輸入相關的測點訊息紀錄，將 PROBE 定位後啟動 RECORD 指令，開始測定並且持續的紀錄，此時探針會持續在土壤或地下水中前進直到計畫的預定深度。

3.3 薄膜介面探測器系統(MIP)裝置

薄膜介面探測系統(Membrane Interface Probe ,MIP)乃利用掛載之可透氣及難滲水功能之薄膜與雙極式導電度感測器，現地即時偵測地下環境中非飽和層及飽和含水層中之揮發性有機化合物(VOCs)與半揮發有機化合物(SVOCs)及導電度。將 MIP 探測針直接以垂擊或下壓貫入方式驅入至地表下，並藉由 MIP 溫控系統加熱控制加熱片溫度於攝氏 100 至 120 度間，使探針薄膜片週圍之土壤中揮發性（或半揮發性）有機化合物受熱脫附後氣體揮發滲透而進入薄膜內。利用循環攜行之高純度氮氣載氣，以每分鐘 35 至 45 毫升之流量傳輸至偵測器進行揮發性有機化合物總量分析。直徑 6.35 毫米可透氣及難滲水之高分子鐵氟龍（Teflon）薄膜以及加熱器部分稱之為採樣模組。後段地面上偵測部分則稱為分析模組，如火焰離子偵測器（Flame Ionization Detector）或光離子偵測器（Photoionization Detector）可偵測油品類污染物，如苯、甲苯、乙苯、二甲苯等輕質難溶於水相之液體。而搭配電子捕集偵測器(electron capture detector, ECD)可偵測含鹵素的有機化合物，如多氯聯苯、殺蟲劑等環境污染物。系統組成如圖 3-3 所示。

薄膜介面探測系統(MIP)系統執行前需進行反應測試(Response Test)，此測試程序是非常重要的品管測試，它確認了系統紀錄的完善及真實性。若是沒有反應測試結果，操作人員將不知系統偵測結果是否正確或者系統是否處於正常運作狀態。此程序主要因為它可反映出系統運作(載氣傳輸與流量)與偵測器(參考反應物質反應強度值是否正確)是否正常以及可讓操作者測量出反應滯留時間(Retention time)。這個反應時間是污染物由探針經由氣體傳輸管到達偵測器的時間。反應時間需於正式操作前鍵入 MIP 軟體程式中，以利後續數值記錄時進行真實存在深度的計算。

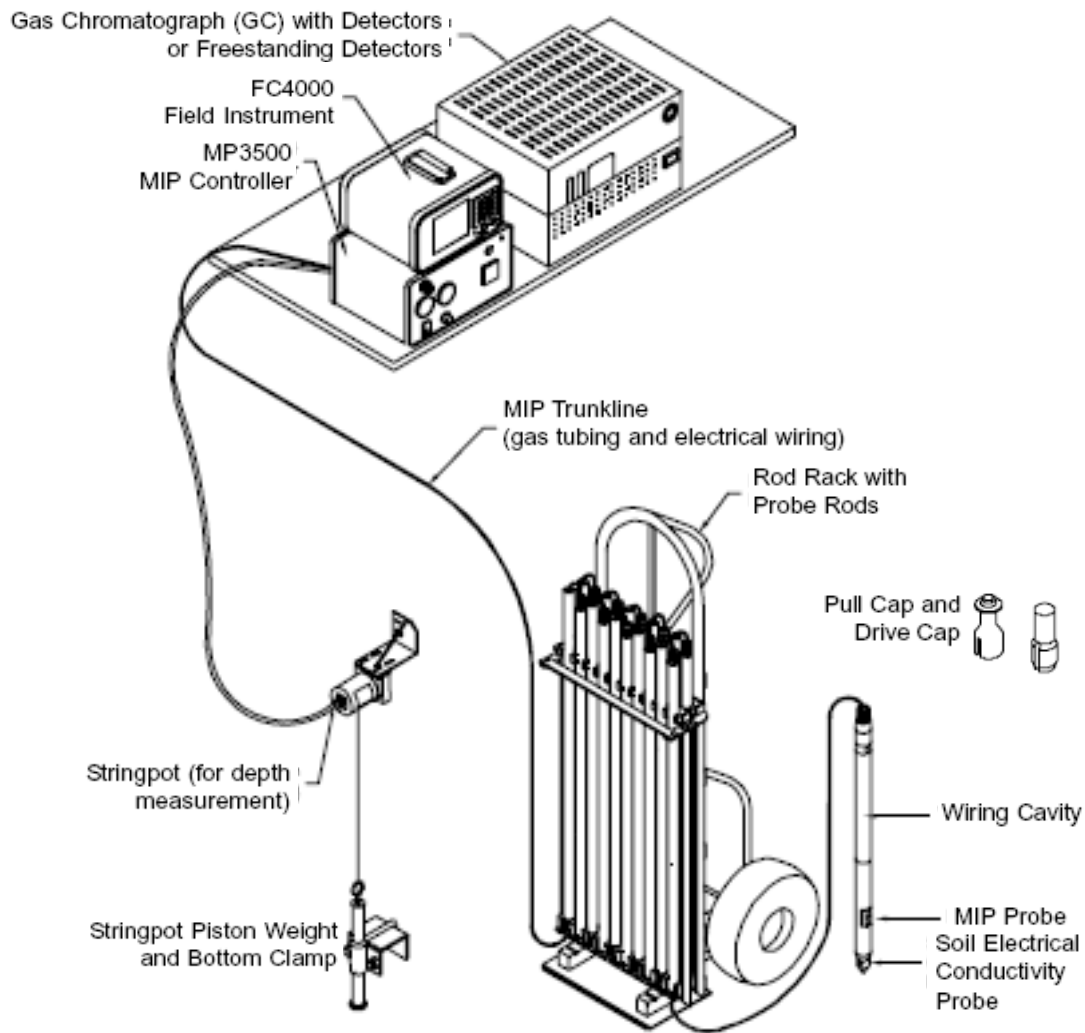


圖 3-3 薄膜介面探測系統設備配件組成圖

測點執行前應先開啟 MIP 系統所需使用之氣體氣閥(例如：攜帶氣體，氮氣；FID 之氫氣等等)。並確認及控制其流量與壓力，與之前作業時的值作比較，同時開啟偵測器電源並熱機。進入 MIP 操作畫面，設定反應時間及探桿長度，並紀錄檔案名稱及基本操作參數，鑽探前先行以 PreProbe 進行試鑽以確認地表下無阻礙物，探測時將探針插至地表使半透膜位置位於地表處進行歸零設定，再次確認系統及配線皆正常狀態(溫度、氣體壓力、深度線)，紀錄條件參數及檔案名稱和測定點號，啟動”紀錄”開關開始偵測，以直壓式機械開始進行下壓或以敲擊方式前進進入地下進行探測，過程中需隨時注意設備之變化條件，及反應濃度是否超出偵測範圍，如有則需馬上調整偵測範圍，探針行進到事先已預定的深度之速度為保持均速狀態或直到目標深度已達到。

3.4 直接貫入式(DPT)土壤採樣工具

活塞式土壤採樣工具(PMC)裝置為一種組合式金屬套桶，使用直壓式機械來驅入地表下固定深度再某一固定深度下採集土壤樣品，標準採樣器尺寸為 52in(1321mm)長、外徑 22inch 套桶組成，採集量約 1300ml 套桶內置的襯管中取得，內襯管為一可抽換式薄壁管置放於採樣器內提供土壤樣品存放，規格為 1.75in×46in 長(44mm×1168mm)，一般材質包括不鏽鋼、Teflon、PETG、PVC 等。系統組成如圖 3-4 所示。

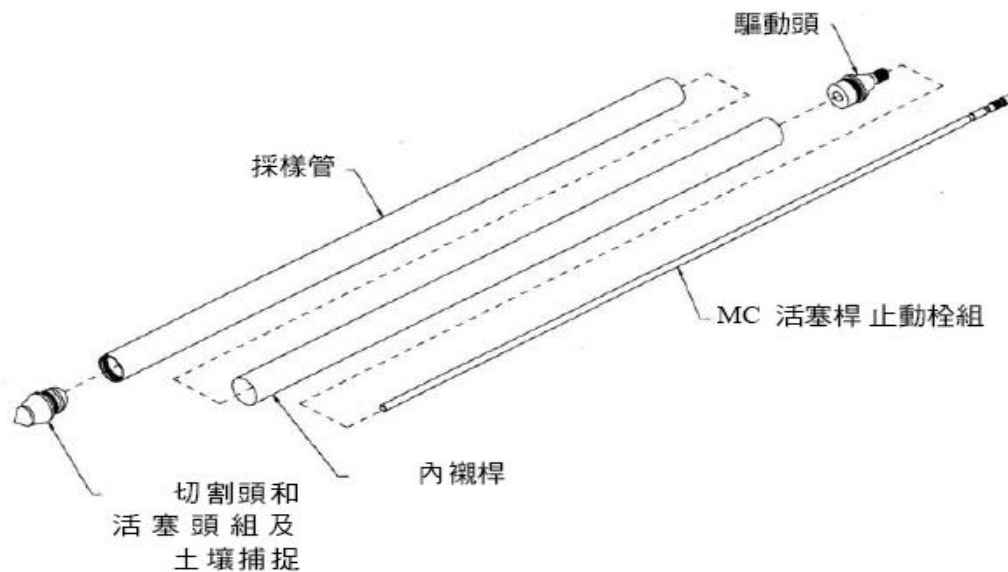


圖 3-4 活塞式土壤採樣工具構件圖

3.5 地下水即時取樣工具(SP16)裝置

為一種直接貫入式工具包含 PVC 或不銹鋼篩管，在驅動置入地下含水層時保持著密封狀態，至預定取樣區間位置時解開密閉狀態並將篩管暴露於地層中，以抓取特定區間之地下水樣品，採樣器組合約 51.5in(1308mm)長、外徑為 1.625in(41mm)、內置篩管 41in(1041mm)長，一般執行方式乃將內部已置放濾管之採樣器套管，貫入預先設定之地層採樣區間，然後使濾管裸露於地下水層中，此時未受擾動之地下水便經由濾管進入採樣器內，可直接採集當時新鮮之地下水樣品。此採樣方式亦可進行不同深度區間之地下水樣品採集，對於疑似或已受污染之採樣區間，於採集完樣品後，可直接封閉採樣孔，避免污染擴散之情況產生。由於未經洗井之擾動，亦可減少污染物於地下水層中之移動，造成不必要之污染擴散現象。系統組成如圖 3-5 所示。

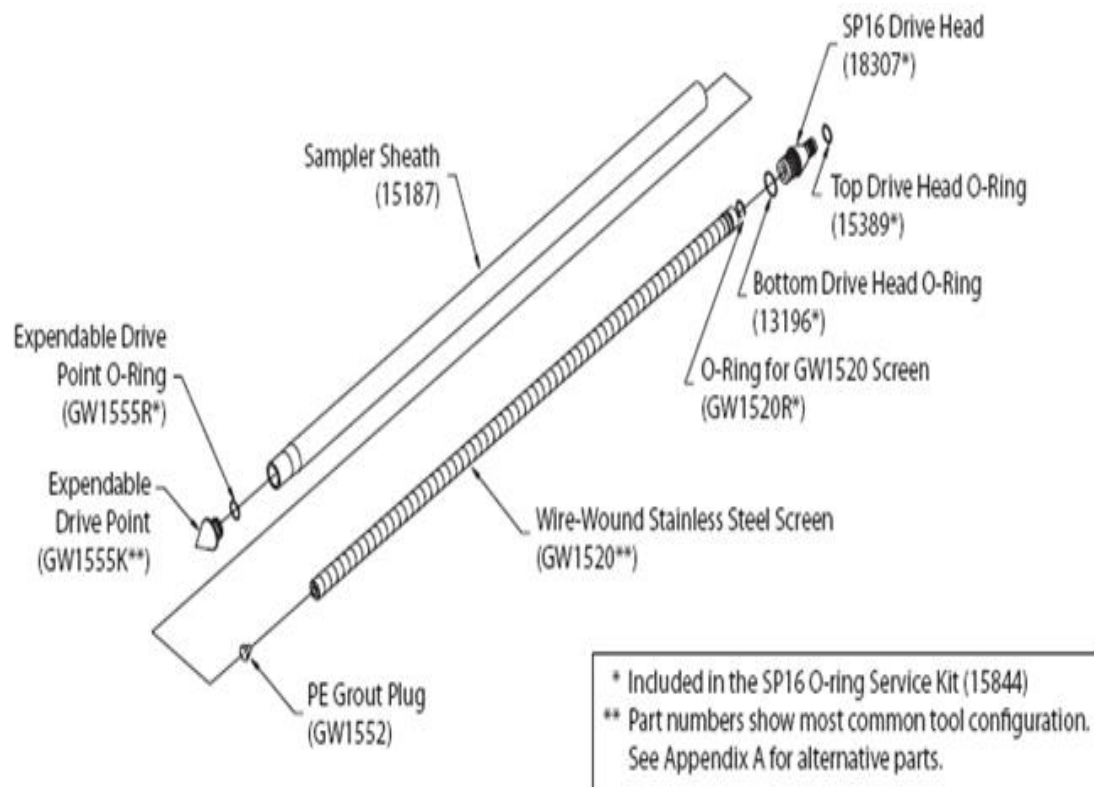


圖 3-5 地下水即時取樣工具(Screen Point,SP16)構件圖

3.6 氣動式微水試驗裝置

氣動式微水試驗設備(Pneumatic Slug Test kit,PST) 是一種使用於連接在直接貫入式(direct push,DP)地下水採樣工具(如 SP16)或監測井上進行微水試驗的一套工具如圖 3-6 所示，作業方式於測試前先進行組裝 PST 內透水井篩段與前端拋棄式鑽頭，決定試驗深度後計算所需要的連接鑽桿數量之後安裝於 DP 鑽機機組上，鑽桿連接處需纏上止洩帶並加裝橡皮墊圈以避免漏氣狀況產生，持續鑽進與連接鑽桿至預定作業深度，到達深度後將延伸桿放入至鑽桿之中，直到碰觸鑽桿底部拋棄式鑽頭並固定，將鑽桿回抽約 0.5~1 公尺，使拋棄式鑽頭脫落，露出井篩段使地下水可以通過篩網自由出入連接的鑽桿，井篩段露出後可灌入或抽取數公升的水進行洗井，移除井篩段周圍可能阻塞之細顆粒材料，後續組裝氣壓啟動控制器於鑽桿上方，置入壓力傳感器於鑽桿內水位下方 1~1.5m 處於開始紀錄後注氣，水位面下降約 30~40 公分時固定注氣壓使水位面穩定。此穩定水位面下降深度即為 PST 初始壓差，讓初始壓差穩定數秒後並且開啟洩氣閥讓水位面回升，紀錄水位面回升資料，待恢復原有水位時，試驗完成停止紀錄。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

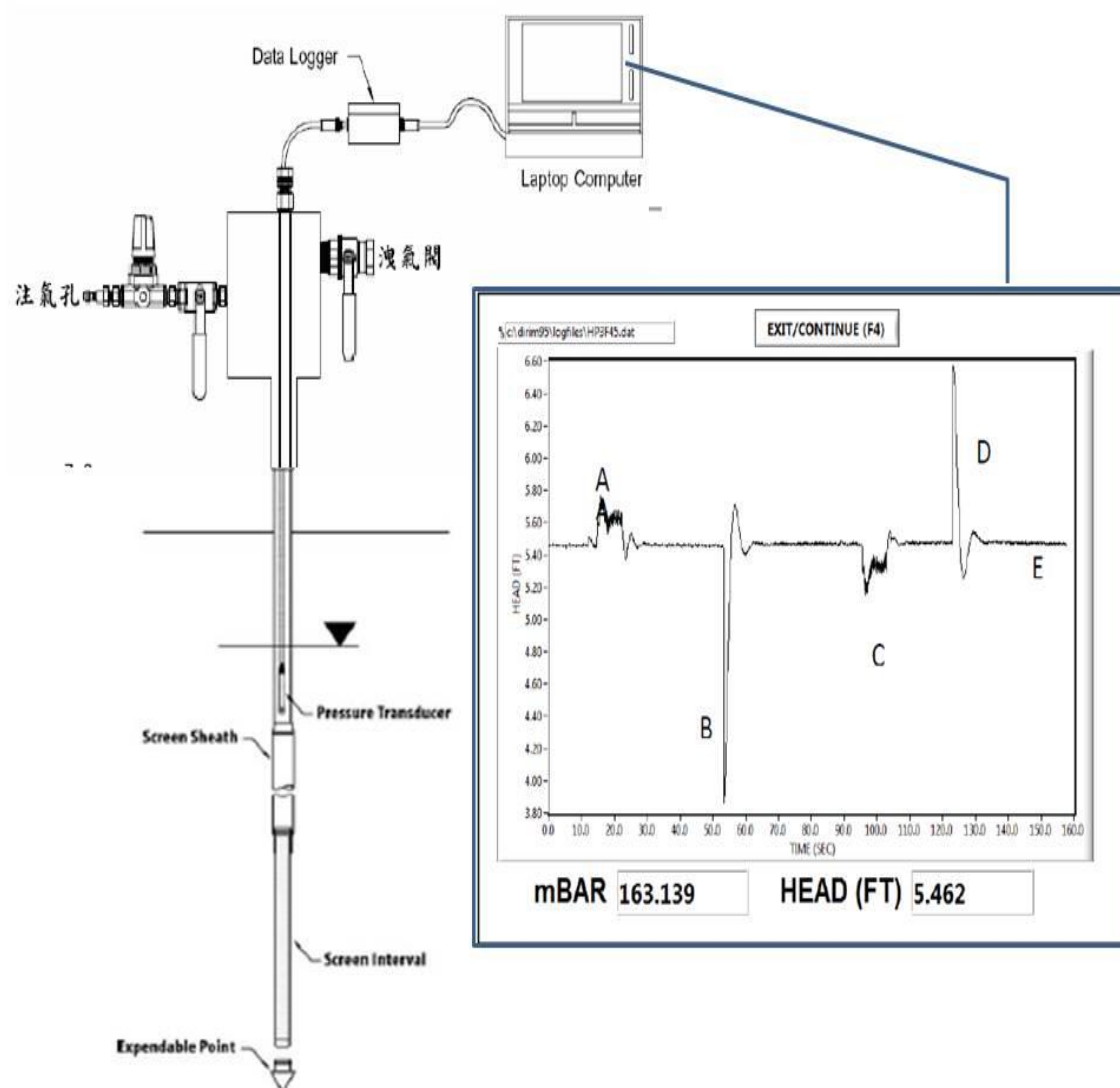


圖 3-6 氣動式微水試驗設備構件圖

3.7 其他檢測方法比對

氣相層析儀/火焰離子化偵測器法

執行方式：

取樣與前處理萃取：(此部分實驗之操作流程參考國內環檢所公告標準方法：超音波萃取法 NIEA M167.00C)

1. 將大約 2 g (記錄樣品之淨重準確至 0.1 g) 的樣品放入 15 mL 錐形離心管內。用紙巾將瓶口處沾著的樣品拭去，秤量並記錄樣品之淨重，蓋上瓶蓋後，再進行下一個樣品的盛裝，以免交互污染。

2. 加入 2 g 無水硫酸鈉於秤好之樣品中，充份混合之。
3. 加入適量體積之溶劑，使各個樣品之最終體積皆為 10.0 mL，將瓶蓋旋緊後，放入超音波振盪水槽中，連續振盪至少 5 分鐘。本試驗所適用萃取溶劑為正己烷。
4. 於可丟棄式之巴斯德移液管內，填充 2 至 3 公分高之玻璃綿，將萃液移入其中過濾之，收集濾液於適當容器中。
5. 為便於濃縮後之體積計算，建議收集定量濾液，如 10 mL 萃液通常收集 5.0 mL 的濾液被濃縮成 1.0 mL 或更少。
6. 氮氣吹除濃縮技術：將濾液至濃縮試管後，置於一穩定加熱裝置中 (約 35 °C)，使用乾淨且乾燥之氮氣以和緩流量吹除溶劑，使溶劑蒸發至所需的體積。操作過程中，濃縮試管內壁必須以適當溶劑淋洗數次。在正常操作條件下，樣品萃取液不應完全被蒸乾。
7. 完成上述步驟之定容萃取液，則移至自動進樣儀用之樣品小瓶中，以微量注射針吸取、注入氣象層析儀管柱中，並以火焰離子化偵測器分析樣品中待測油品之濃度含量。
8. 若萃取液不馬上進行分析，則將濃縮管加蓋並冷藏。若須冷藏萃取液超過 2 天，則須將其轉至附有鐵氟龍襯底之小瓶中，並適當標記。

氣象層析條件設置：

(此部分分析之條件設定參考國環檢所公告標準方法：土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣象層析儀/火焰離子化偵測器法 NIEA S703.61B)

載流氣體 (He) 流速：3 mL / min

注射埠溫度：350 °C

偵測器溫度：350 °C

起始溫度：50 °C，持續 5 分鐘

升溫速度：50 °C 以每分鐘 10 °C 升溫至 350 °C

最終溫度：350 °C，持續 10 分鐘

氮氣流速：30 mL / min

空氣流速：300 mL / min

注射方式：split (2:1)

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

檢量線建立與查核：

(此部分檢量線之配製與確認參考國內環檢所公告標準方法：環境檢測檢量線製備及查核指引 NIEA-PA103)

本試驗檢測分別配製至少五種濃度之檢量線標準溶液建立起始檢量線，最低一點濃度宜與方法定量極限之濃度相當，其餘的濃度須涵蓋實際樣品的預測濃度，或在偵測器之工作範圍內。採用與注入真實樣品之相同方式，將配製好檢量線標準溶液注入氣相層析儀，並依標準溶液待測物的濃度對應測得的尖峰面積，製成檢量線。

檢量線製作方式，是從該油品層析圖中對應碳數起始至結束的滯留時窗內，基線以上之所有尖峰面積與待測物標準溶液的濃度，作線性回歸圖，並計算校正因子。

$$\text{校正因子 (CF)} = \frac{\text{尖峰面積總和}}{\text{所注入之總量 (ng)}}$$

$$\text{平均校正因子 (CF}_{\text{avg}}\text{)} = \frac{\sum \text{CF}}{n}$$

若校正因子在檢量範圍內之相對標準偏差 (RSD) 小於或等於 20%，則可假設檢量線為通過原點之直線，以平均校正因子進行定量分析。若相對標準偏差 (RSD) 大於 20%，則必須矯正系統或重新製作新檢量線。檢量線製作之同時，須配製第二來源之檢量線中間濃度標準品，進行檢量線分析確認，若計算待測物濃度之相對誤差在 $\pm 15\%$ 以內，則此檢量線有效，若相對誤差大於 $\pm 15\%$ 時，則必須矯正系統或重新製作新檢量線。

檢量線查核：

在進行樣品分析時，須配製檢量線中間濃度的標準品，來做檢量線之查核。分析過程中，每 12 小時亦須作一次檢量線查核。若在檢量線查核時計算待測物濃度之相對誤差在 $\pm 15\%$ 以內，則此檢量線有效，若相對誤差大於 $\pm 15\%$ 時，則必須矯正系統或重新製作新檢量線。

含水率測定：

取適當樣品量，依循我國環檢所公告標準方法：土壤水分含量測定方法—重

量法 (NIEA S208) 測定乾重量為基礎水分含量百分比 (WH₂O (m / m, %))。

外標準品校正法：

樣品中待測物之濃度，可依據上述檢量線建立之平均校正因子及待測物之尖峰面積總合計算之。計算方式如下：

$$\text{土壤樣品濃度 (mg / kg)} = (A_x \times V_t \times D) / (C_{Favg} \times V_i \times W_{dry})$$

$$W_{dry} = W_{wet} \times (100 / (100 + WH_2O))$$

A_x ：樣品中待測物之尖峰面積總合。

V_t ：樣品之總體積 (mL)。

D ：樣品之稀釋倍數 (樣品萃液在分析前之稀釋倍數)。

C_{Favg} ：待測物之平均校正因子 (面積 / ng)。

V_i ：樣品注入量 (μ L)。

W_{dry} ：樣品乾基重量 (g，秤至小數點第三位 (含) 以下)。

W_{wet} ：樣品濕基重量 (g，秤至小數點第三位 (含) 以下)。

WH₂O：乾重量為基礎之水分含量百分比 (m / m, %)。

(4) 品保品管：

此部分結果之品質管制依循國內公告標準方法：土壤檢測方法總則 (NIEA S103.61C) 規定，每批樣品或同批中每隔 20 個樣品，至少要做 1 組空白樣品分析、重複樣品分析、添加樣品分析、查核樣品分析。空白樣品分析值應小於方法偵測極限值之二倍。

第四章 結果與討論

4.1 一階環境場址評估作業結果

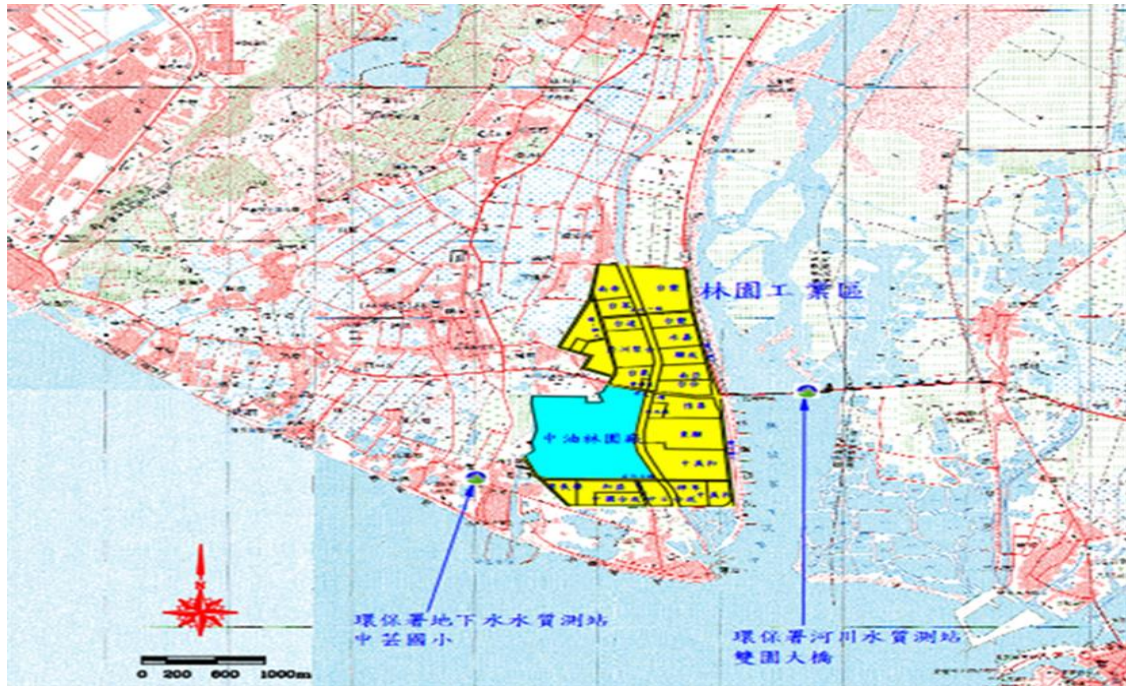
4.1.1 場址歷史資料

本次試驗施作模場場址名稱訂為第四芳香烴工場 T4002 油槽綠帶區，隸屬台灣中油股份有限公司石化事業部，模場場所位於高雄縣林園鄉林園工業區之中油公司林園石化廠內，環保署於 90 年 11 日委外調查林園廠，發現廠區內 No.200 油槽區附近三口監測井之苯含量超過地下水污染管制標準民國 91 年 4 月經高雄縣政府公告為地下水污染控制場址，91 年 6 月林園廠方面辦理補充採樣調查作業，確認地下水污染範圍在芳一組、芳二組、No. 200 油槽區北側等三個區域，污染物主要為苯，經查證資料顯示此為三個獨立的污染團，其污染來源應屬不同因素造成。98 年於高雄縣土壤及地下水污染調查暨農地控制場址改善工作計畫調查作業中，芳一組第四香烴場、增產油槽區東北角 No.200 油槽區南側檢測到土壤污染濃度超過管制標準，100 年 7 月高雄市土壤及地下水污染調查及查證工作計畫作業中，經調查結果顯示地下水中苯濃度超過地下水管制標準，土壤二甲苯濃度超過污染管制標準，100 年 12 月高雄市政府環保局進廠進行土壤及地下水採樣調查，調查結果顯是廠內土壤中苯及總石油碳氫化合物超過土壤管制標準地下水中苯、甲苯、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯乙烯、1 氯甲烷、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯及三氯乙烯等污染物超過地下水管制標準，於 101 年 9 月配合環保局要求月執行土壤定期監測，並分析土壤污染管制標準中之有機化合物，檢測結果顯示土壤中檢測出乙苯及二甲苯污染濃度超過土壤污染管制標準，後經歷年來的污染源移除與污染控制改善工作之執行，土壤與地下水污染濃度與範圍已逐漸縮減中。

4.1.2 場址地理位置

試驗場址位於高雄縣林園鄉林園石油化學工業區內（簡稱林園工業區），林園鄉位於高雄縣最南端，林園鄉東隔高屏溪與屏東縣新園鄉和東港鎮相望，西以駱駝山與高雄市小港區為界，南臨臺灣海峽與屏東縣琉球鄉對視，北毗大寮鄉昭明、義仁兩村；相對經緯度位於東經 120.50 度，北緯 22.40 度，面積 32.2860 平方公里，包括林內、中厝、潭頭、溪州、五福、東林、文賢、林園、仁愛、王公、廣應、林家、龔厝、北汕、東汕、中汕、西汕、鳳芸、中芸、西溪、頂厝、港嘴、港埔、中門等 24 個村，如圖 4-2 所示。林園工業區東鄰高屏溪與屏東縣接鄰，西接高雄市小港區與臨海工業區，南臨台灣海峽，工業區開發總面積約 403.6 公頃，設廠用地 315.8 公頃、公共設施用地 81.1 公頃、社區用地 6.7 公頃，中油公司林園

石化廠位於工業區之西南側，地理位置如圖 4-1 所示佔地 98 公頃，試驗模場場址位於林園石化廠區西北側位置，施作面積約 4000m²。林園廠廠區距高雄市區約 17 公里，北側、東側及南側分別以沿海公路、林園排水溝及石化三路與工業區內其它工廠相鄰，廠區西北側為農業用地，西側緊鄰中芸排水溝與農地、魚塭相鄰，廠址附近有汕尾三村、中芸及鳳芸等村落，居民多以養殖或近海漁業為主。



資料來源：台灣中油股份有限公司石化事業部林園石化場

圖 4-1 試驗模場場址所屬地理位置圖



資料來源：內政部高雄縣林園鄉行政區域圖改繪

圖 4-2 林園鄉行政區域圖

4.1.3 驗場址工場區製程特性

試驗場址所位於之工場主要以生產烯烴類與芳香烴類兩大石化原料為主，煉製所使用之原料主要來源包括輕石油腦、重石油腦、製氣油、及媒組油等，主要產製成品包括乙炔、乙烯、丙烯、丁二烯、苯、對二甲苯、鄰二甲苯、碳煙進料油、丁二烯萃餘油。中間產物有重組油、甲苯、混合二甲苯等，製程簡單方塊流程如圖 4-3 所示，生產製程特性說明如下。

- (1) 烯烴類產品: 建有兩座輕油裂解工場，分別為第三輕油裂解工場與第四輕油裂解工場，第三輕油裂解工場主要為史東韋伯斯特製程，以石油腦（Naphtha）為原料，經高溫裂解及低溫精餾和溶劑萃取等流程，生產高純度的乙烯、丙烯、丁二烯等主要產品。第四輕油裂解工場為隆馬斯製程，以石油腦及製氣油（Gas Oil）為原料，除生產乙烯、丙烯、丁二烯等輕油裂解共同之品外，並生產乙炔，不飽合九碳烴等產品。
- (2) 芳香烴類產品: 主要由八座工場進行產製，分別為第四媒組工場、第三、第四、第六芳香烴工場、兩座二甲苯分離工場、第五/六加氫脫硫工場，第四媒組工場為美國環球公司（UOP）製程，以輕石油腦為原料，利用白金觸媒，將油料中的直鏈分子或環狀分子重新組合，變成含高價值芳香烴的重組油，提高汽油的辛烷值，並作為芳香烴萃取工場之進料油，以產製芳香烴類產品。第三、第四、第六等三座芳香烴工場。利用溶劑萃取的原理，以特殊的溶劑，將重組油或輕油裂解工場來的裂解汽油提煉芳香烴類，再經過精密分餾，分離出苯產品、甲苯及混合二甲苯等中間產品。甲苯及混合二甲苯再送至二甲苯分離工場繼續產製高純度之鄰/對二甲苯等產品。兩座二甲苯分離工場包括轉烷化、異構化及吸附分離等三製程，主要將芳香烴萃取工場產出之混二甲苯及甲苯作為進料，產製高純度之鄰二甲苯及對二甲苯。第五/六加氫脫硫工場則是將第四輕油裂解工場進料油製氣油做前處理，除去製氣油中的硫份，以符合輕油裂解進料規範。

4.1.4 可能污染物及其特性

林園廠的煉製製程主要以生產石化上游原料為主，主要產品苯、甲苯、二甲苯等，是目前廠內主要的污染物，亦是目前土壤或地下水的污染管制項目。由於

廠內製程進料包括製氣油、石油腦、裂解汽油、煤組油等混合化學物，其成分亦包含這些芳香烴類物質，因此，這些製程原料都可能是污染來源之一。

茲說明林園廠主要污染物之特性如下：

(1)芳香烴

芳香烴簡稱芳烴(aromatic hydrocarbons)，為苯及其衍生物的總稱，是指分子結構中含有一個或者多個苯環的烴類化合物。其中最簡單和最重要的芳香烴是苯及其同系物甲苯、二甲苯、乙苯等。在芳香族中，一些芳香環中並不完全是苯的結構，而是其中的碳原子，會被氮、氧、硫等元素取代，一般稱之為雜環，具有鏈狀的芳香烴一般稱之為脂芳烴(arenes)，帶有兩個或以上苯環的化合物稱之為多環芳香烴(PAHs) 純多環芳香烴一般是親脂性白色或淺黃色的固體，它們在水的溶解度會隨著分子質量增大而降低。不少多環芳香烴已被界定為致癌物。報告指出若長期接觸高濃度多環芳香烴的混合物，會引起皮膚癌、肺癌、胃癌及肝癌等疾病。

(2)苯

外觀為透明無色液體，具芳香味，比重 0.877，蒸氣壓在 25℃時為 95mmHg，蒸氣密度 3.19（空氣=1），25℃之水中溶解度為 1,750 mg/L，爆炸界限為 2.3 ~ 7.1 %。長期暴露會抑制中樞神經系統，導致困倦、頭暈、頭痛、噁心、喪失協調功能，經皮膚微量吸收為慢性作用，會刺激皮膚。長期毒性會造成白、紅血球及血小板的形成受損，引起白血球癌症。LD50 為 930 mg/kg（大鼠、吞食），八小時日時量平均容許濃度為 5 ppm。

(3)甲苯

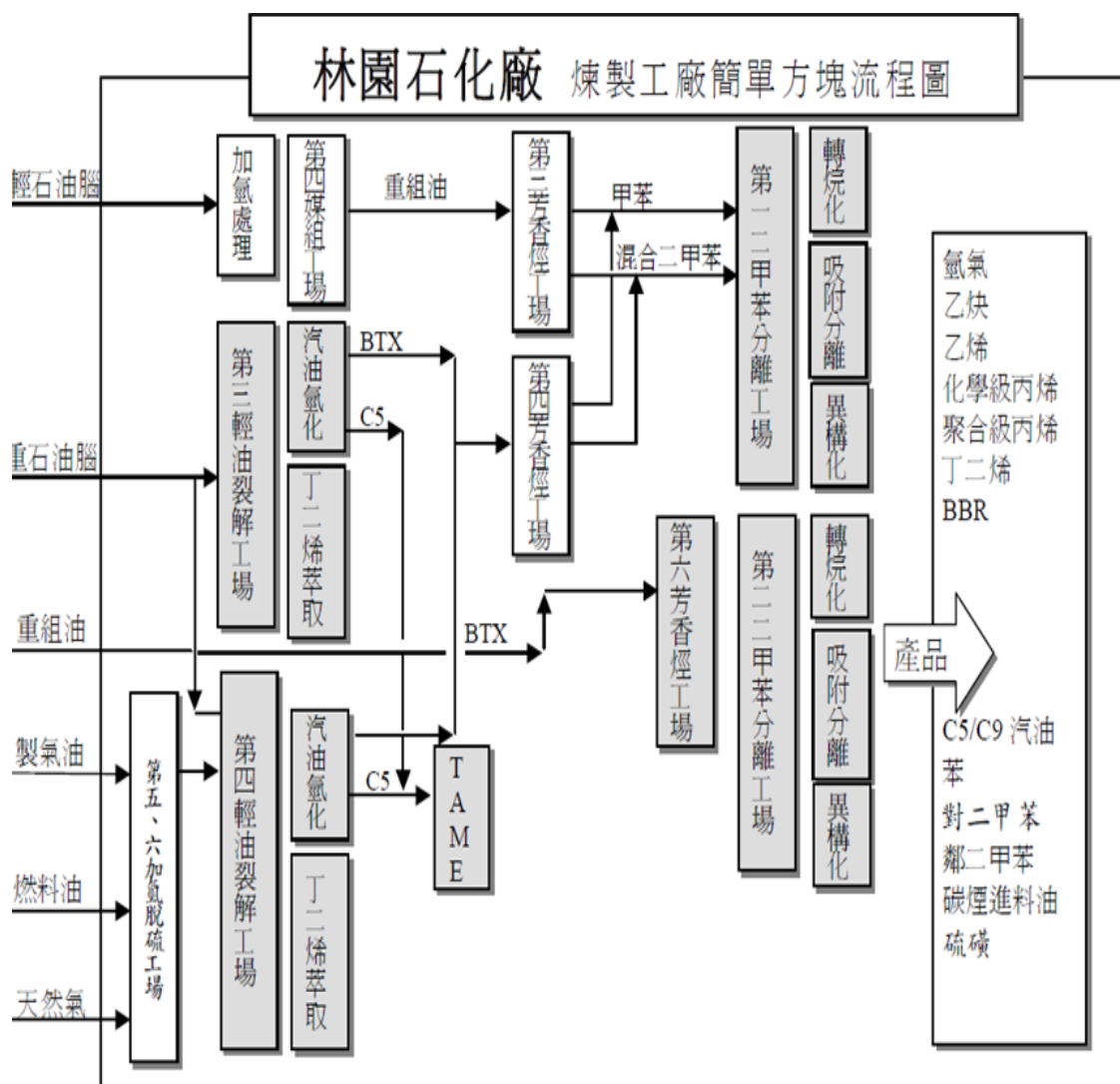
為無色澄清液體，具芳香味，比重 0.86，蒸氣壓在 25℃時為 28 mmHg，蒸氣密度 3.1（空氣=1），25℃之水中溶解度為 524 mg/L，爆炸界限為 2.2 ~ 7.1 %。吸入蒸氣會引起輕微嗜睡、頭痛、刺激呼吸系統，嚴重時意志中樞神經系統，導致無意識和死亡，皮膚長期接觸可能導致皮膚炎，眼睛暴露會引起輕微刺激。LD50 小於 870 mg/kg（大鼠、吞食），八小時日時量平均容許濃度為 100 ppm。

(4)乙苯

為無色具芳香味液體，比重 0.86，蒸氣壓在 25℃時為 10 mmHg，蒸氣密度 4.34（空氣=1），25℃之水中溶解度為 187 mg/L，爆炸界限為 1.0 ~ 6.7%。蒸氣會刺激鼻子與喉嚨，吸入可能引起噁心、頭痛、嘔吐、暈眩，皮膚接觸會輕微刺激皮膚，眼睛暴露會引起刺激和流淚。長期暴露可能使腎臟、血液和睪丸受影響，皮膚長

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

期接觸可能引起皮膚炎、皮膚龜裂、毛髮掉落。LD50 為 3,500 mg/kg(大鼠、吞食)，八小時日時量平均容許濃度為 100 ppm。



資料來源：中國石油股份有限公司「林園廠技術手冊」

圖 4-3 林園石化廠煉製工廠簡單方塊流程圖

(5)二甲苯

為透明無色具芳香味液體，比重 0.86，蒸氣壓在 25℃時為 6.6 mmHg，蒸氣密度 4.34（空氣=1），25℃之水中溶解度為 175 mg/L，爆炸界限為 1.0 ~7.0 %。吸入會刺激鼻子與喉嚨，引起噁心、嘔吐，濃度高（10,000 ppm）時則會有動作不協調、失去意識、呼吸衰竭甚至死亡的情形。皮膚接觸蒸氣會產生刺激，引起皮膚炎，眼睛暴露會引起刺激。反覆或長期暴露會造成肝臟和腎臟損害。LD50 為 5,251 mg/kg（大鼠、吞食），八小時日時量平均容許濃度為 100 ppm。

(6)石油腦

石油腦(Naphtha)又稱輕油是石油成份中 5 個碳至 7 個碳之碳氫化合物,如戊烷,己烷和庚烷等,沸點高於汽油而低於煤油的分餾混合物,石油腦可分為輕石油腦及重石油腦兩種,石油腦經去醇酸處理後,可作為汽油及航空燃料油使用;輕石油腦也可經煤組反應後產生高辛烷質的汽油或石油化學原料,為苯、甲苯、二甲苯的主要來源;還可以經裂解反應產生乙烯、丙烯、丁烯、戊烷、芳香烴及碳煙;或經過加氫裂解反應,生產汽油及液化石油氣。外觀為淡紅棕色液體,具微芳香味,比重 0.74,蒸氣壓在 20℃時小於 5mmHg,蒸氣密度 3.4(空氣=1),水中溶解度為 400 mg/L 對人體造成的急性影響為頭昏眼花、使人昏昏欲睡、對眼睛、鼻子、皮膚及喉嚨會有輕微的刺激,長期暴露會使皮膚乾燥及破裂,損害神經系統。LD50 大於 5,000 mg/kg(大鼠、吞食),八小時日時量平均容許濃度為 100 ppm。

(7)煤組油

煤組油製成主要是利用觸媒將低價值輕質輕油(light naphtha)轉換成高品質苯、甲苯及二甲苯混合物作為芳香烴萃取工場進料。

(8)重組油

重組油(reformate)製成主要是將重質輕油(heavy naphtha)經煤組反應製成重組油作為芳香烴萃取工場進料。

4.1.5 試驗場址所處場區地質特徵

在地質地層方面本區域在地質分區上屬於台灣西部麓山帶地質區,出露之地層主要包括第四紀全新世之沖積層、更新世晚期之臺地堆積層、以及大社層之鳳山石灰岩,。其中,沖積層由砂、礫石、泥組成,於中油林園石化廠之地質鑽探調查報告(1991),本區域地表下 56 公尺(最大鑽孔深度)範圍內大致可以區分為以下 10 個主要地層:

- (1) 粉質粗中細砂層(SM1):本層主要由灰色粉質粗中細砂偶夾粘土夾層所組成,分佈於地表下 0.0~15.3 公尺,平均厚度約 11.8 公尺。標準貫入試驗 N 值為 2~19,平均約為 9,極疏鬆至中等緊密程度。
- (2) 粉質粘土層(CL1):本層主要由灰色低至高塑性粉質有機質粘土所組成,分佈於地表下 8.7~18.1 公尺,平均厚度約 4.0 公尺。標準貫入試驗 N 值為 2~10,平均約為 6,軟弱至堅實稠度。
- (3) 粉質細砂層(SM2):本層主要由灰色粉質細砂偶夾砂質粉土或粘土夾層所組

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

成，分佈於地表下 14.4~22.0 公尺，平均厚度約 3.6 公尺。標準貫入試驗 N 值為 8~20，平均約為 14，疏鬆至中等緊密程度。

(4) 粉質粘土層 (CL2)：本層主要由灰色粉質粘土含粉土、有機質，偶含貝殼或腐木所組成，分佈於地表下 18.2~26.2 公尺，平均厚度約 5.5 公尺。標準貫入試驗 N 值為 4~13，平均約為 8，中等堅實至堅實稠度。

(5) 粉質細砂層 (SM3)：本層主要由灰色粉質細砂含粉土、貝殼或有機質所組成，分佈於地表下 24.2~28.7 公尺，平均厚度約 2.3 公尺。標準貫入試驗 N 值為 9~24，平均約為 16，疏鬆至中等緊密程度。

(6) 粉質粘土層 (CL3)：本層主要由灰色粉質粘土含粉土、有機質所組成，偶夾粉質砂土夾層，分佈於地表下 26.2~37.1 公尺，平均厚度約 6.6 公尺。標準貫入試驗 N 值為 4~20，平均約為 10，中等堅實至極堅實稠度。

(7) 粉質細砂層 (SM4)：本層主要由灰色粉質細砂含粉土及粉質粘土夾層所組成，分佈於地表下 31.2~49.2 公尺，平均厚度約 11.4 公尺。標準貫入試驗 N 值為 15~34，平均約為 24，中等緊密至緊密程度。

(8) 粉質粘土層 (CL4)：本層主要由灰色粉質粘土含粉土及貝殼所組成，偶夾粉質砂土夾層，分佈於地表下 44.6~50.9 公尺，平均厚度約 4.8 公尺。標準貫入試驗 N 值為 8~22，平均約為 15，堅實至極堅實稠度。

(9) 粉質細砂層 (SM5)：本層主要由灰色粉質細砂所組成，分佈於地表下 50.9~53.4 公尺，平均厚度約 2.5 公尺。標準貫入試驗 N 值為 21，中等緊密程度。

(10) 粉質粘土層 (CL5)：本層主要由灰色粉質粘土所組成，分佈於地表下 53.4 公尺至本次鑽探最大深度。標準貫入試驗 N 值為 21~26，平均約為 24，極堅實稠度。

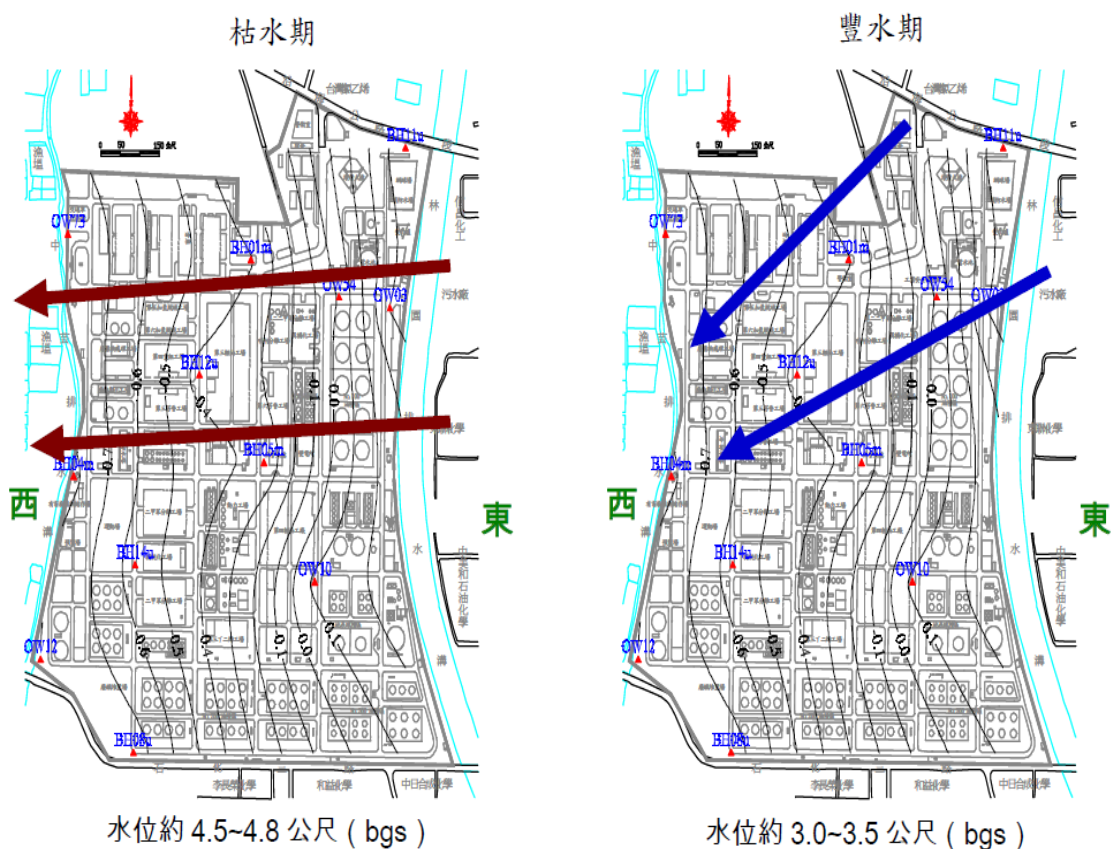
4.1.6 試驗場址所處場區水文特徵

本區地面水水文係位於高屏溪流域之下游，高屏溪自旗山流至林園工業區而出海，亦是高雄縣與屏東縣之分界，本區距高屏溪約有 2 公里以上。高屏溪上游之主要支流荖濃溪，發源於玉山東山東坡與秀姑山南坡，行西南至大津與濁口溪會合後，遂進入平原區，河流分歧成辮狀；再往西南流至磚仔地與隘寮溪會合，西行約 8 公里至旗山鎮嶺口，與旗山溪（楠梓仙溪）相匯即成為高屏溪；至此河床漸寬，且流路時常變遷，南行至屏東縣新園鄉出海，沿線流經高、屏二縣共 24 個鄉鎮。高屏溪全長 170.90 公里，流域面積廣達 3,256.85 平方公里，為台灣流域面

積第一大河川。

而在本區附近之地面水體主要有林園大排及中芸排水，大致呈由北往南方向出海。中油林園廠西側以中芸排水為界，其起源自林園潭頭村一帶，南下至中芸漁港出海；中油林園廠東側之林園大排，其主流自大發工業區北端開始，流經大寮鄉及林園鄉，直至港嘴堤防東側之東汕漁港，主流全長約 15 公里。另一方面沿海一帶由於超抽地下水，使得當地的地下水水位下降、海水入侵，因而造成近海地區之地面水體及地下水體水質皆有鹽化的現象。

在地下水文方面廠區地下水水位在乾季與濕季約有 30 公分至 1 公尺不等的差異變化，地下水流向之變化則是受枯豐水期而有不同如圖 4-4 所示，影響的原因包括有降雨、林園大排水溝或高屏溪的補注、周圍地下水的抽用及潮汐作用等。一般而言，在乾季時期的地下水主要補注來源為林園排水溝或高屏溪，地下水流向大致由東側的林園大排水溝流向西側的中芸排水溝，而在濕季時期的地下水主要補注來源為降雨，地下水流向大致由地勢較高的廠區東北側向外圍流動。



資料來源: 台灣中油石油股份有限公司石化事業部林園石化廠

圖 4-4 林園廠區豐枯水期地下水位變化

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

含水層特性方面，本區域性水文地質係以現代沖積層為主，該地層廣泛覆蓋在西部海岸平原上，主要的組成岩性包括黏土、沉泥質砂、砂及礫石等，其透水性略差於以粗砂礫為主之屏東平原上、中游沖積層。計畫區之基層岩盤頗深，仍具有良好的透水性質，其淺層（第一）含水層主要為灰色的細至中砂夾雜粗砂、小礫石所組成，含水層之地下水位約在平均海平面 0.1～－0.6 公尺之間，即約為地表下 3.5～4.5 公尺之間。參考中油林園廠之歷次含水層試驗結果，如表 4-1 所示，其導水係數介於 478～5,908 平方公尺/日，水力傳導係數（K 值）介於 10^{-4} ～ 10^{-3} 公尺/秒，儲水係數則介於 10^{-3} ～ 10^{-1} （無因次），比出水係數為 0.18（無因次）；此外，依文獻顯示當地地下水之水力坡降約為 1/1,000，將上述水力傳導係數及水力坡降等參數輸入達西定律，可進一步推估本區附近之地下水流速，即約略為每年 3～30 公尺，惟因各地土質成分、特性及其他地下環境狀況之差異等，其地下水流速或有些許的差異

表 4-1 模場廠區歷次含水層試驗結果一覽表

試驗時間	試驗方法	導水係數 (平方公尺/日)	水力傳導係數 (公尺/秒)	儲水係數 (無因次)	比出水係數 (無因次)
82 年 06 月	抽水試驗	987~5,908	—	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-1}$	—
85 年 10 月	微水試驗	—	$4.1 \times 10^{-4} \sim 5.3 \times 10^{-4}$	—	—
89 年 06 月	抽水試驗	478~1,394	$3.7 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	—	—
91 年 07 月	抽水試驗	4,349	2.9×10^{-3}	—	0.18

資料來源：中國石油公司，林園石化廠土壤及地下水污染控制計畫書，91 年 11 月。註：「—」表示該次試驗未分析。

4.1.7 試驗場址所處場區受汙染特徵

本次計畫選定之模場試驗場址主要位於林園廠區內芳一組第四芳香烴工場的區域，該區域在 91 年 6 月由林園廠委託地下水採樣調查作業結果，顯示附近地下水汙染濃度較高之測值為位於芳一組第四芳香烴工場的 OW-91 井地下水苯濃度 32.1 mg/L 與位於芳二組第二分離工場的 OW-93 井地下水苯濃度為 13.5 mg/L，汙染範圍推估如圖 4-5 所示。廠區自 91 年 4 月由高雄縣政府公告前，已著手實施各項緊急應變工作，到 95 年 12 月為止業已執行兩階段的汙染控制計畫。第一階段控制計畫係由民國 92 年 3 月到民國 93 年 6 月，由監測結果顯示在控制計畫實施期間，地下水中苯的汙染團有逐漸削減之趨勢。於第二階段為控制變更計畫實施期間，自民國 93 年 7 月至民國 95 年 12 月，在此期間廠內地下水中苯的汙染團中

心點仍位在芳一組之第四芳工場 OW-91 監測井附近，自民國 96 年 3 月至今，於第四芳工場西南側增設一組 SVE/AS 機組，且於第四芳工場製程區範圍內啟用 4 口抽水井進行水力控制，避免較高濃度污染物向下游移動。



資料來源:中國石油股份有限公司石化事業部林園石化廠專題報告計畫繪製 91 年 6 月地下水污染等濃度圖

圖 4-5 試驗場址所處場區地下水苯污染濃度分布範圍推估示意圖

4.1.8 試驗場址所處場區污染改善作為與設施

本次試驗場址所處場區進行過之污染改善作為，於 92 年 4 月完成四芳工場分餾區地下管線更新工作，93 年 1 月~94 年 1 月完成廠區廠 CPI 之防漏披覆之 FRP Coating 與芳二組第二吸附分離污油水管線方井洩漏及全油回收系統檢修工作，96 年 9 月至 97 年 2 月，控制整治井功能提升與控制設備相關紀錄器檢修及進行污染源圍堵與移除。97 年 11 月進行芳二組北側、芳二組南側等相關地下管線更換，並規劃設置污染土壤控制處理場與暫存場，土方暫存場於 99 年 7 月設置完成。芳一組執行查漏作業期間，將污染土壤開挖後移至土壤控制處理場進行處理。相關污染改善作為現場情形如圖 4-6 所示。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

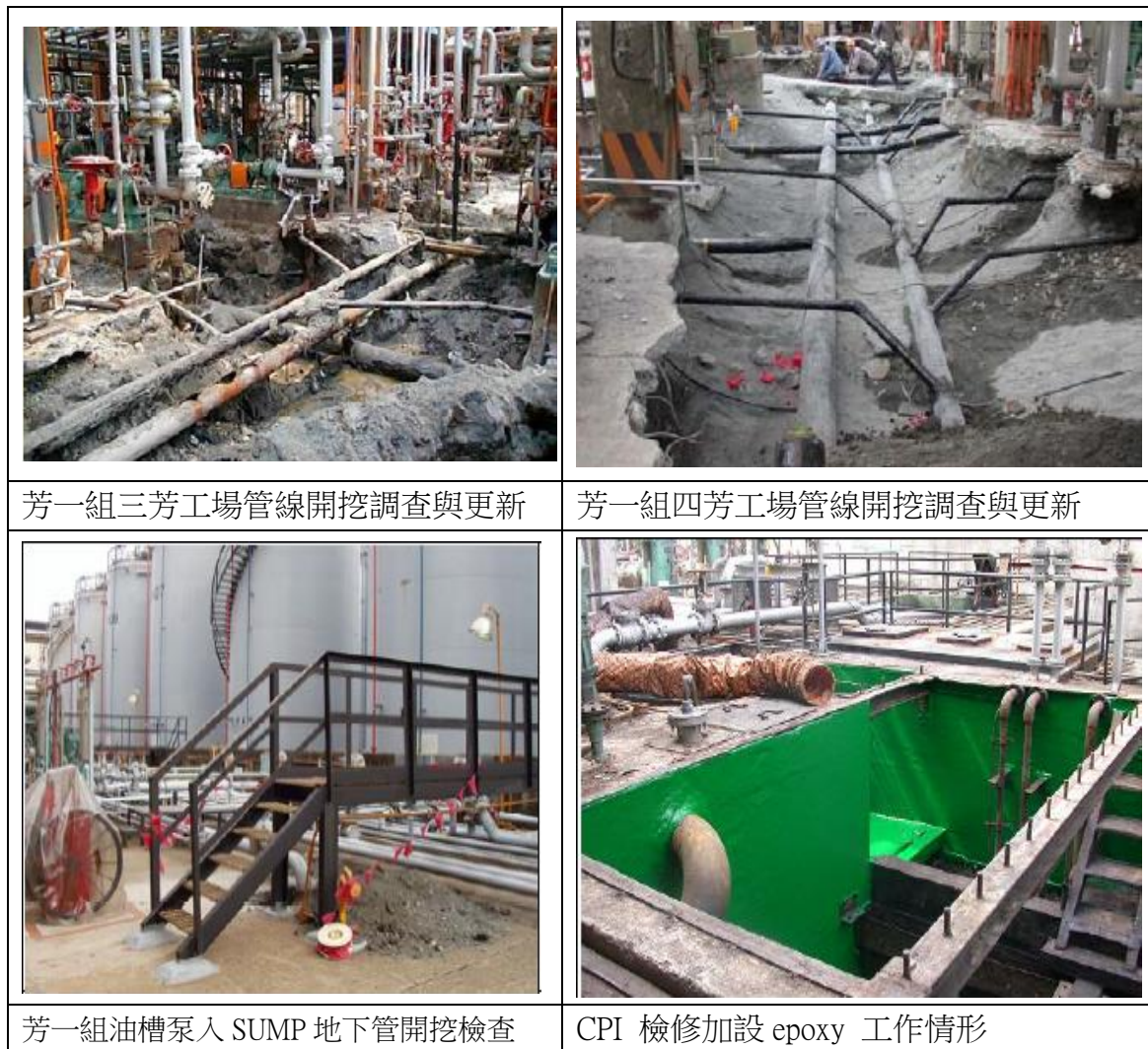


圖 4-6 試驗場址所處場區相關污染改善作業

自 91 年辦理控制改善工程至現階段，除對污染源與潛在污染源加以阻斷外，所使用的污染改善方法包括浮油抽除回收、生物漱洗、水力控制、SVE/AS、釋氧物質投注或化學氧化等方式，以移除與降解地下水中污染物的濃度。在芳一、二組主要污染團區域，污染控制方法乃於 95 年 11 月在第三芳香工場西側增設 1 組 SVE/AS，並為提升位於第四芳香工場南側之 SVE/AS 試驗模廠之效能，以降低此區污染團範圍，於原場址設涵蓋範圍較大之 SVE/AS 機組，並於 96 年 7 月開始操作。SVE/AS 機組每一組系統分別由 2~3 台 10~15HP 鼓風機及 1 台 30HP 空壓機所組成，各配置 24 口曝氣井及 16~20 口抽氣井。每台鼓風機真空度在 100mm Hg 時，抽氣量約為 3,680 L/min，操作方式為 24hr 連續運轉。曝氣系統於 0.8 kg/cm²

操作壓力時之總注氣量約為 3,300 L/min，分為兩大組之輪流作動方式，24hr 連續運轉。相關污染改善設施如圖 4-7 所示。



圖 4-7 試驗場址所處場區相關污染改善設施

4.1.9 後續試驗場址所選定位置與規劃

依據歷史資料與相關調查及所提送相關計畫，經進一步與相關單位協商討論後，選定本次試驗模場位置於芳一、芳二組交界的芳一組第四芳香烴工場周圍附近，該區域為相關資料中指出之廠區高污染團位置之一，主要地下水中污染物質為苯，於 96/09~97/08 年期間從周圍的監測井 OW90、OW91、OW131、BH-12 等井位地下水中檢出苯的濃度約 0.2~0.3 mg/L。土壤方面較缺少相關檢測資料，地下水雖已有明顯之改善但仍持續存在污染濃度，此次調查目的將針對設定之調查區塊進行連續性偵測作業，以了解土壤中是否存在飽和態或殘留相的污染物質成分，並由二維與三維污染位置與污染團分布型態推測區域內之污染來源是否為區域外之設施之影響所造成。初步規劃模場面積約 48x100 m² 並將其區分為 24 個網格細胞，每個 cell 區域面積約 12x16.6m² 並以等腰三角形進行瓶架調查點設置，預計共有 18 個調查側點數測點編號為 LF1~LF18，試驗模場規劃方式如圖 4-8 所示。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

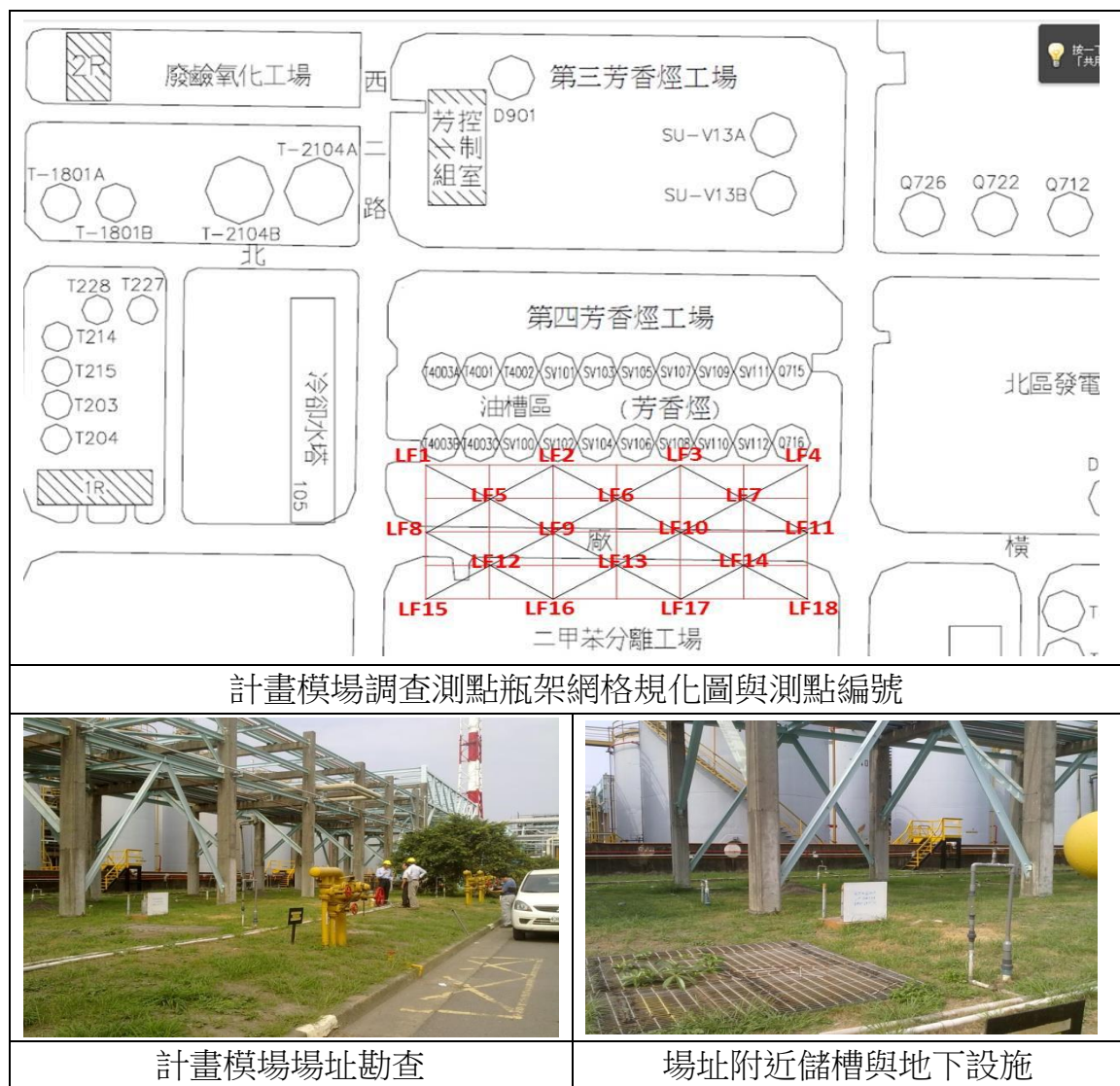


圖 4-8 計畫模場場址調查規劃與場址勘查照片

4.2 紫外光學雷射誘發螢光系統結果

此次場址紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra Violet Optical Screen Tool-Laser Induced Fluorescence ,UVOST-LIF)調查作業，共計執行 18 個調查測點平均深度約 6~7m 左右(視實際污染物分布深度進行調整)，測點編號為 LF1~LF18，測點位置如 4.1.9 章節中圖 4-8 所示，實際執行測試時由於現地地底設施之阻礙現象故部分測點進行微調位置，基本上離原先規劃設計之位置偏差不大，測試結果各測點呈現螢光反應深度分布彙整如圖 4-9 所示，由地表下螢光反應變化情形初步可了解測試場址地層中含非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid , NAPLs)區域，約從地表下 4.2~6.8m 區間上下不等分布，其中螢光反應強度(RE%)較大之測點為 LF12、LF15、LF16 與 LF17；LF8 與 LF18 測得知螢光訊號為微量反應；LF2 與 LF11 未測得螢光

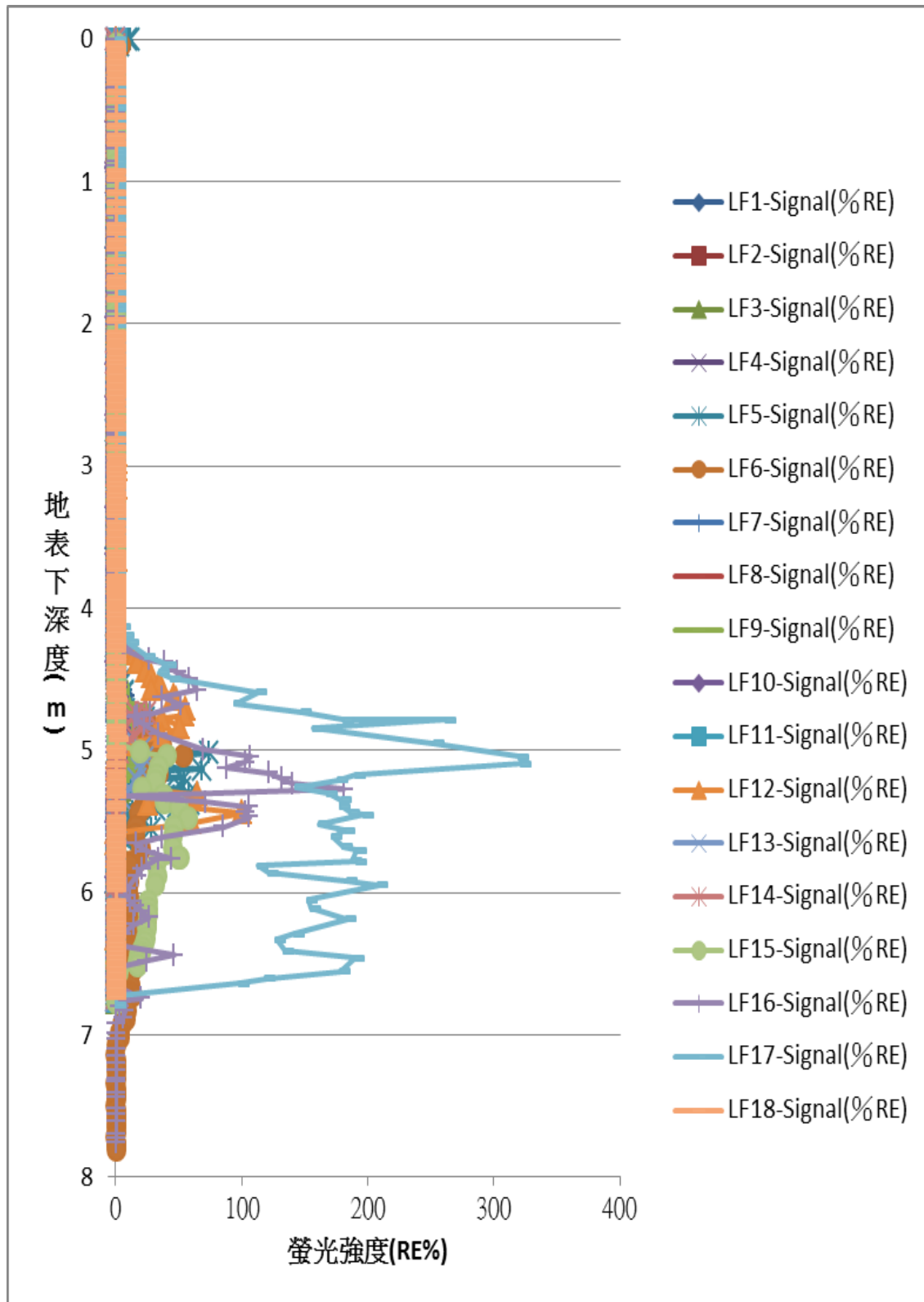


圖 4-9 試驗模場 UVOST 雷射螢光檢測測點螢光反應深度分布彙整圖

反應外，其餘測點之螢光反應強度則為輕至中等之程度。由表 4-2 中各個測點的雷射螢光反應變化比較下，從螢光色階的呈現大約可看出此次調查點中呈現了 3 種不同情況的色階變化，包含黃綠、橘黃與水藍等 3 種色階樣式，除有單點單種純相分布情形外，亦有上下分布與漸層混合變化之情形，測點 LF4、LF5、LF6、LF7、LF10、LF16、LF17 等測點屬較單種純相物質分布情形；測點 LF3、LF9、LF13、LF14、LF15 屬漸層混合變化的情形；另測點 LF1、LF12 則屬於上下互層的分布情形，由此現象初步可推估此次調查模場中可能含有 3 種不同組成成分的非水相液體 (NAPLs) 種類存在於模場內。

進一步藉由雷射螢光特徵圖譜進行洩漏物質組成成分區別辨識由表 4-3 中可明顯看出 3 種不同類型螢光特徵組成比例，此 3 種類型為測點中分布於地層內呈現單種純相螢光色階反應之位置，至於其他屬漸層混合與上下互層之測點螢光特徵圖譜則呈現微量特徵比例變異情形，如圖 4-10 所示。綜合前述資料進行初步歸納分析，由各不同雷射螢光特徵非水相液體(NAPLs)於模場地層中分布情形，可區分出 3 個主要的污染分區如圖 4-11 所示。應用 3 維解析軟體進行資料解析後，由圖 4-12 可以明顯看出 3 個高污染區與污染團流佈的情形與相對應場址可能之污染來源的設施(如油槽區、油水分離池、第二分離工場)對應，在圖 4-13 空間污染分布圖則呈現出試驗場址北側之污染深度屬較淺層分布而南側方位污染深度分布則相對較深。

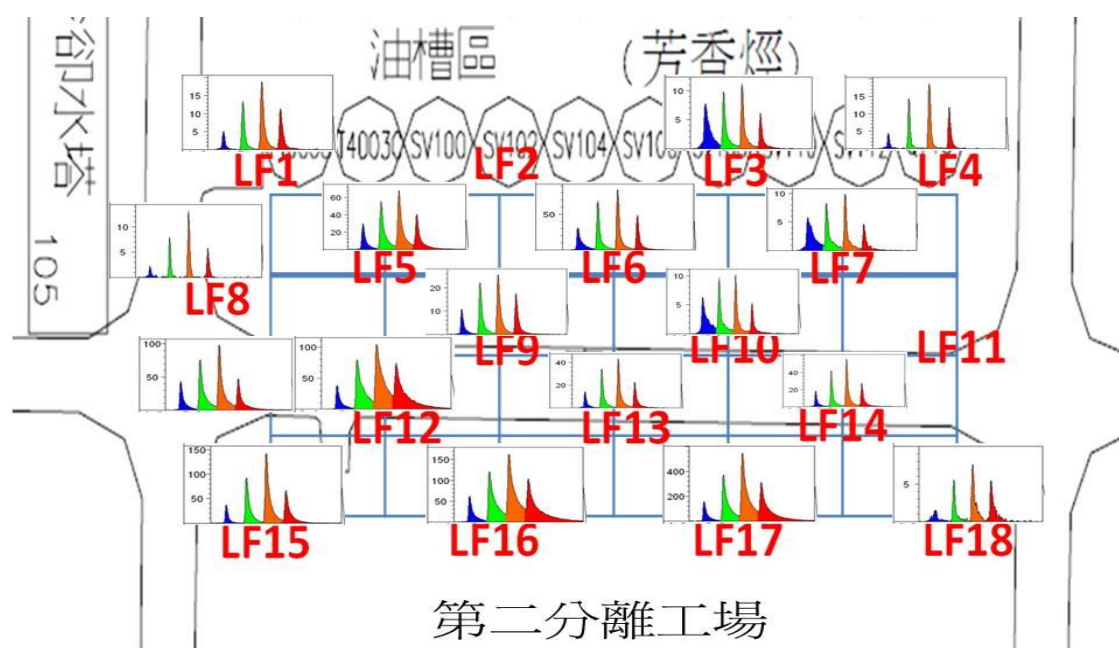
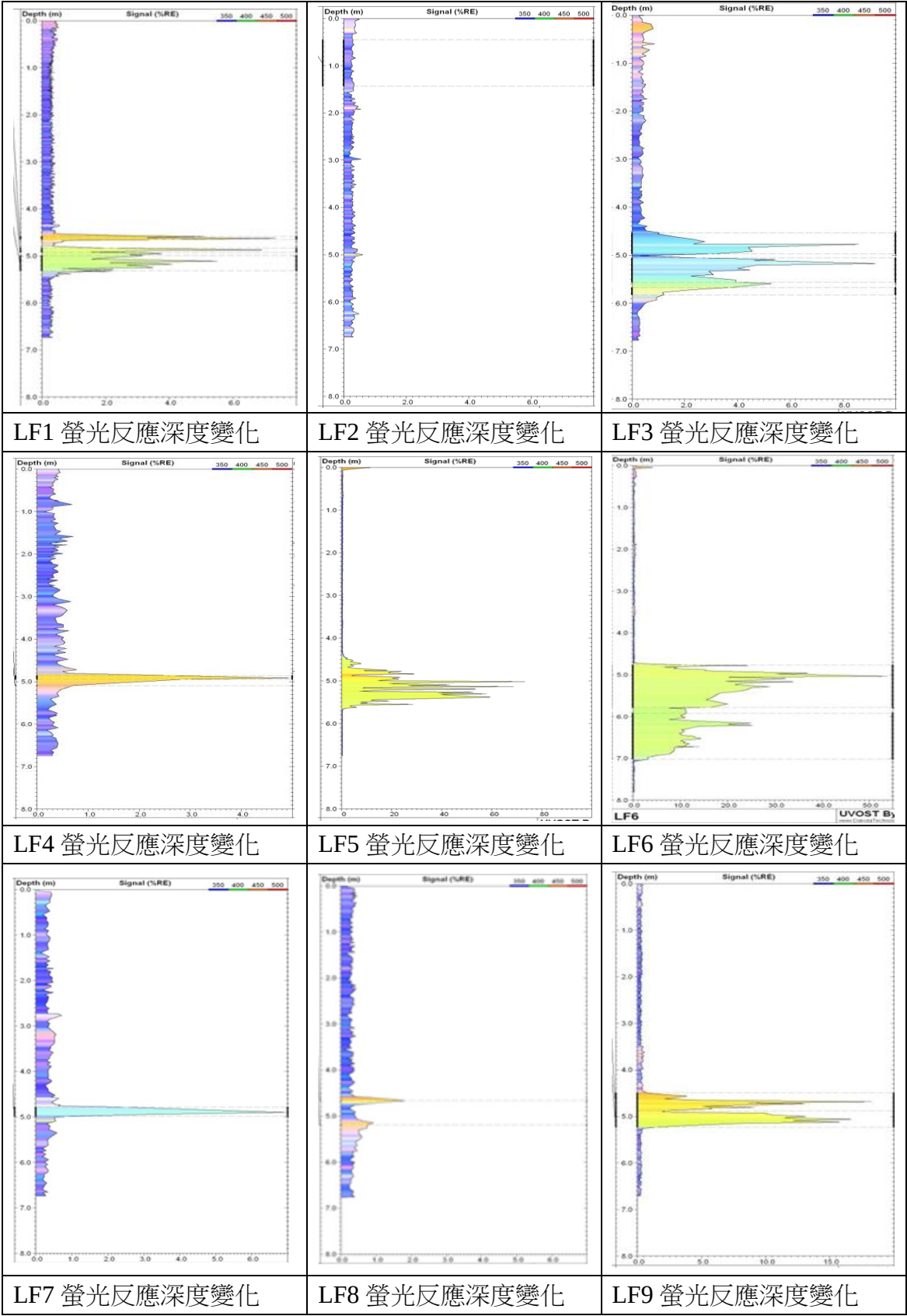


圖 4-10 調查模場各測點螢光特徵圖譜分布比對圖

表 4-2 測試場址各測點不同深度螢光反應變化比對表(1/2)



運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

表 4-2 測試場址各測點不同深度螢光反應變化比對表(2/2)

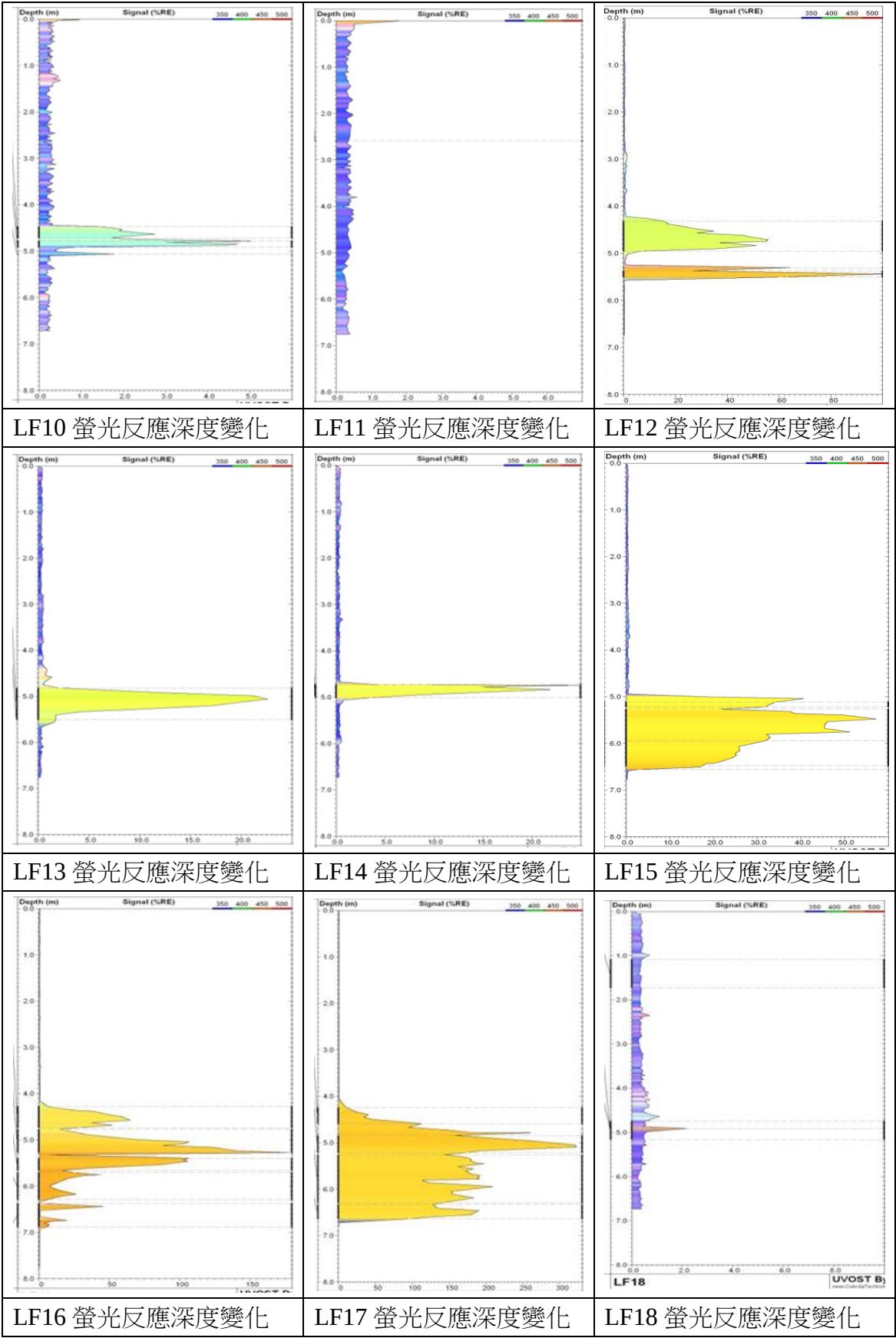
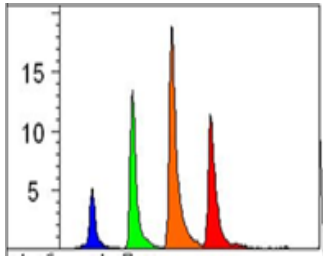
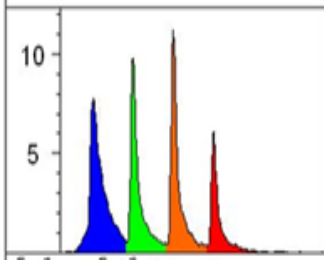
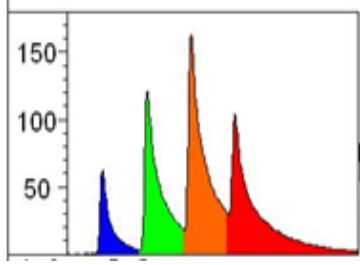
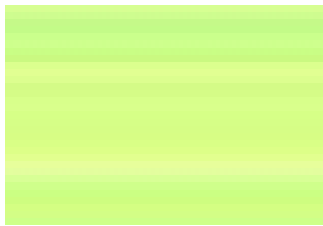


表 4-3 測試場址主要存在非水相液體(NAPLs)雷射螢光特徵類型

類型	類型 I	類型 II	類型 III
螢光特徵圖			
螢光色階圖			

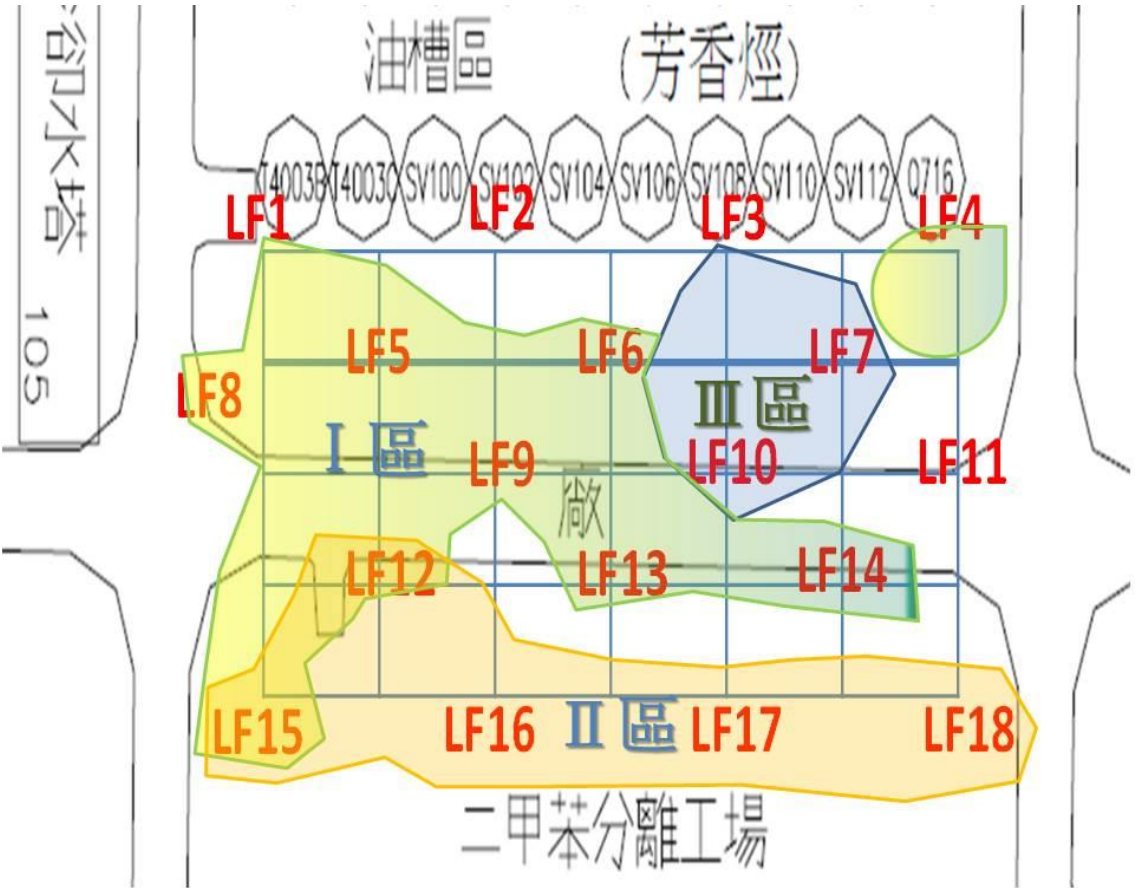


圖 4-11 調查模場不同非水相液體(NAPLs)物質分布區域分區示意圖

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

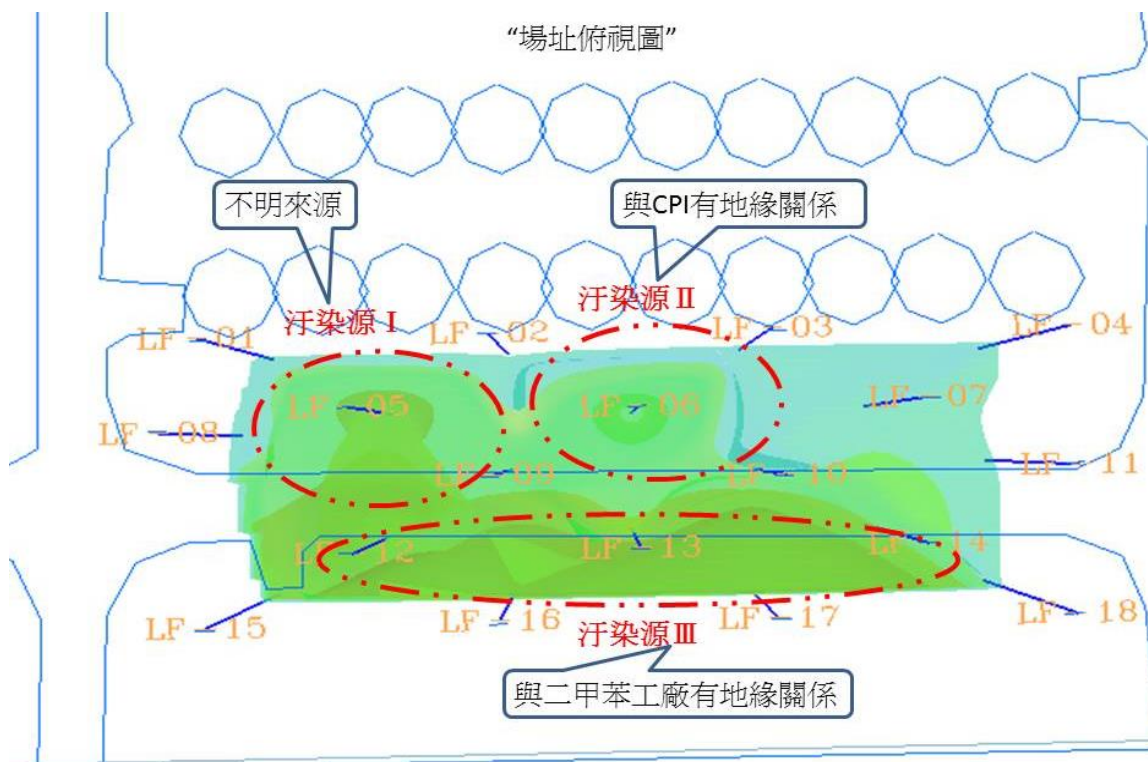


圖 4-12 試驗模場 LIF 偵測螢光訊號數值 3D 資料解析非水相液體(NAPLs)物質污染團區域分布圖

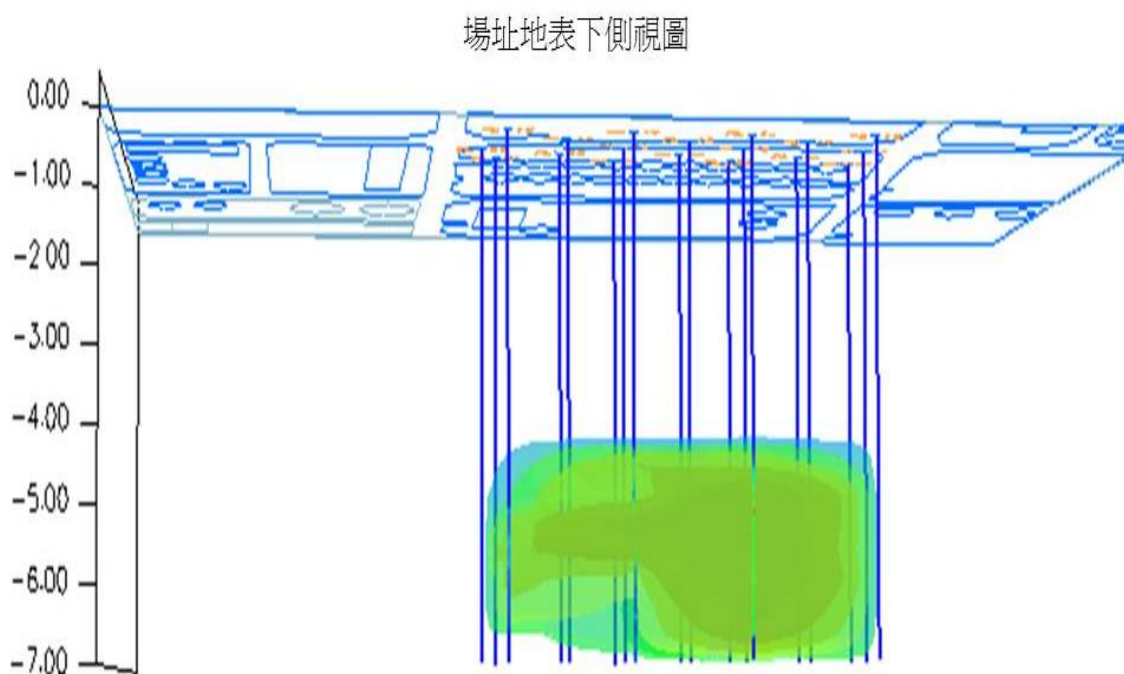


圖 4-13 調查模場 LIF 偵測螢光訊號數值 3D 資料解析非水相液體(NAPLs)物質地表下污染團深度範圍分布圖

4.3 薄膜介面探測器系統調查結果

此次場址薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe ,MIP)調查作業，係依據先前紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra Violet Optical Screen Tool-Laser Induced Fluorescence ,UVOST-LIF)調查之佈點位置 LF1~LF18 測點旁進行重複測點探測(約 5cm 半徑距離內)，共計執行 18 個調查測點平均深度約 6~7m 左右(視實際污染物分布深度進行調整)，測點編號為 MP1~MP18，主要檢測目的為比較兩個不同系統針對目標場址污染調查結果可能呈現之差異性與同質性比對，本次 MIP 偵測系統掛載之偵測器分別為火焰離子偵測器(flame ionization detector, FID)、光離子偵測器(Photoionization Detector, PID)與電導度(Electrical Conductivity, EC)等 3 項，測試結果各測點呈現濃度反應電壓值深度分布彙整如圖 4-16(FID 偵測器反應電壓值)與圖 4-17 (PID 偵測器反應電壓值)所示，由地表下濃度反應電壓值反應變化情形，初步可看出污染反應縱深分布區域大致分為較淺層的通氣帶與較深層之地下水面下之區域，較淺層之污染反應區域測點主要有 MP3、MP7、MP10、MP12 與 MP13 等約從 1.8m 深度就有污染成分反應，其餘測點污染濃度反應則為約從 4m 至 6.8m 等不等深度。

進一步應用三維數值解析方法彙整 MIP 調查點污染物反應數值可視化後如圖 4-19 與圖 4-20 所示場址高污染區和污染團分布結果與紫外光學雷射誘發螢光系統調查結果類似，主要差異之處為紫外光學雷射誘發螢光系統呈現之高污染區分布狀況較為明確而薄膜介面探測器系統呈現之高污染區則為延伸分布混合狀況型態且區域範圍較大，但在縱深污染物測值反應方面薄膜介面探測器系統呈現之檢測深度污染反應與紫外光學雷射誘發螢光系統呈現之檢測深度污染則出現明顯的差異，主要是在場址中地表下 4m 以上的空間深度區域薄膜介面探測器系統偵測出二個較高的污染反應區而紫外光學雷射誘發螢光系統則未有明顯的污染反應測值，初步推估此兩個位置的較高濃度反應其污染物質應屬於較輕質與較易揮發的油品类物質，且其在土壤中的濃度含量並不高以致於紫外光學雷射誘發螢光系統感應靈敏度較差而出現場址內兩系統偵測結果污染團分布出現部分差異的現象，在土壤電導度(EC)方面從電導度(EC)的縱深分布(如圖 4-18)與三維數值解析圖(如圖 4-14 與圖 4-15 所示)來看場址主要質地為砂質壤土質地(尤其在含水層以下)，其次為粉土夾砂質地大部分位於含水層以上，另在 MP2 測點附近則存在粉土至黏土之地質條件。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

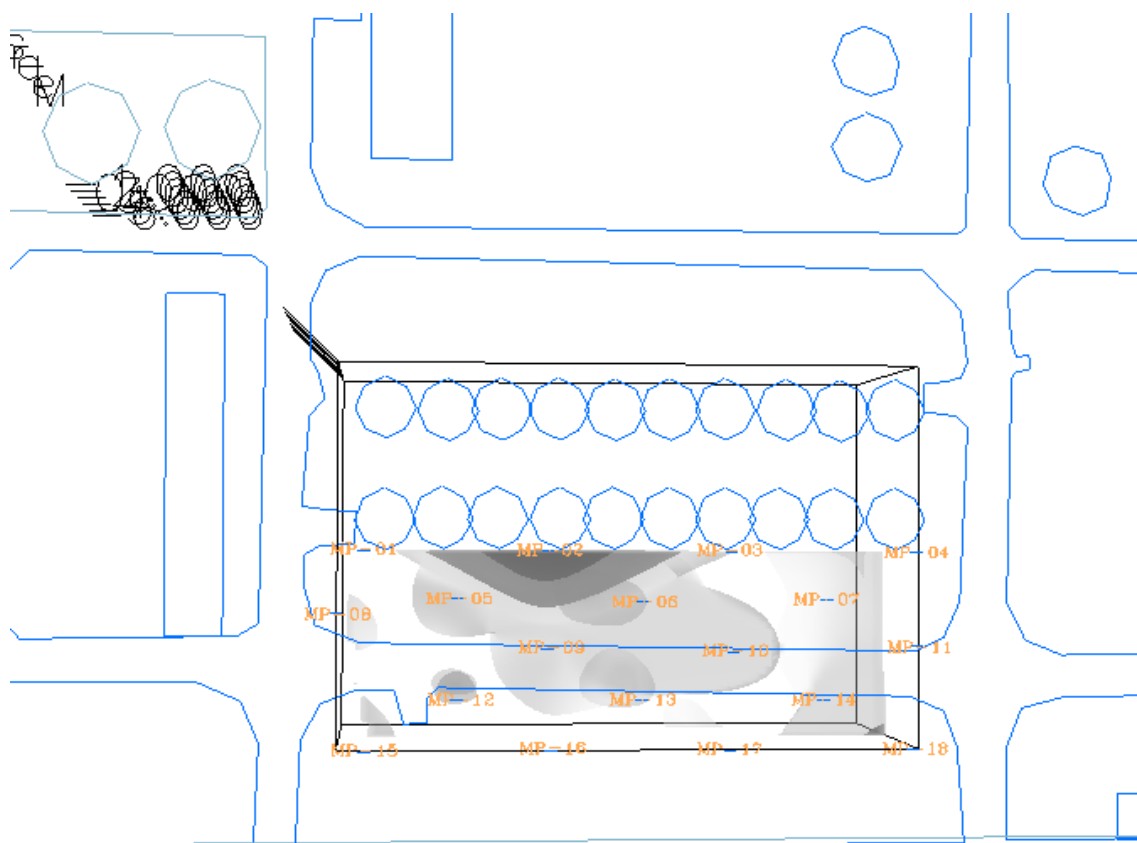


圖 4-14 調查模場 EC 數值 3D 資料解析地質條件區域分布圖

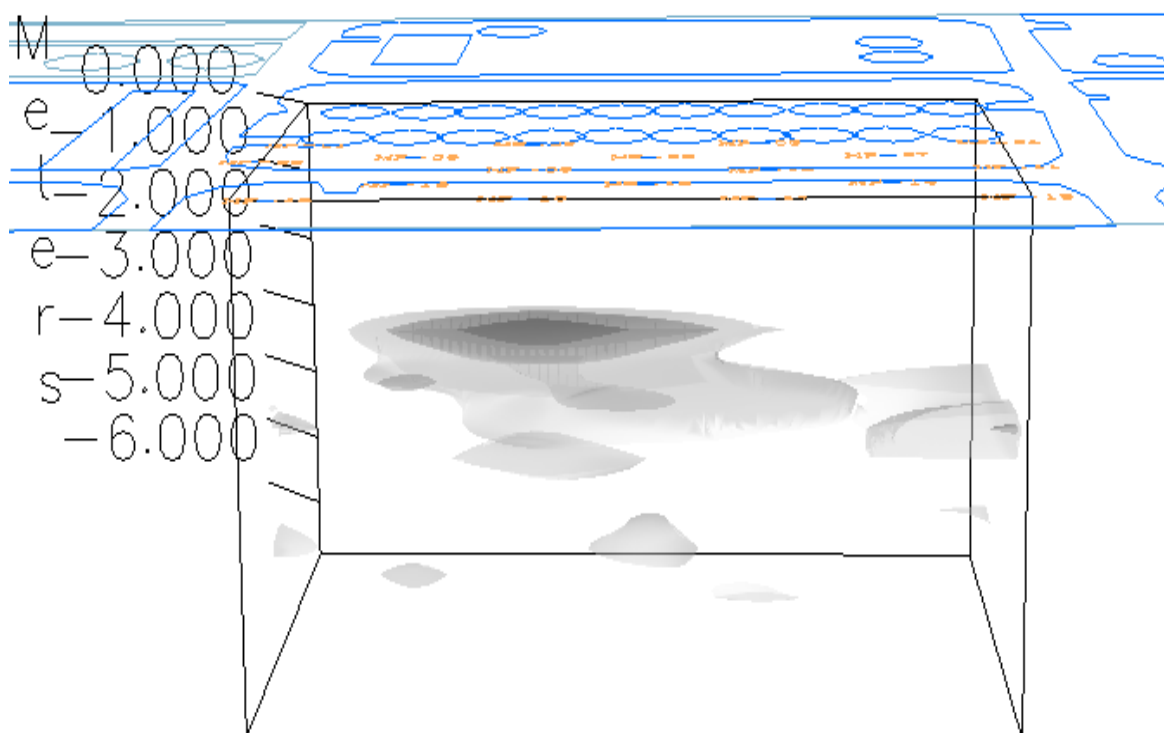


圖 4-15 調查模場 EC 數值 3D 資料解析地質條件深度範圍分布圖

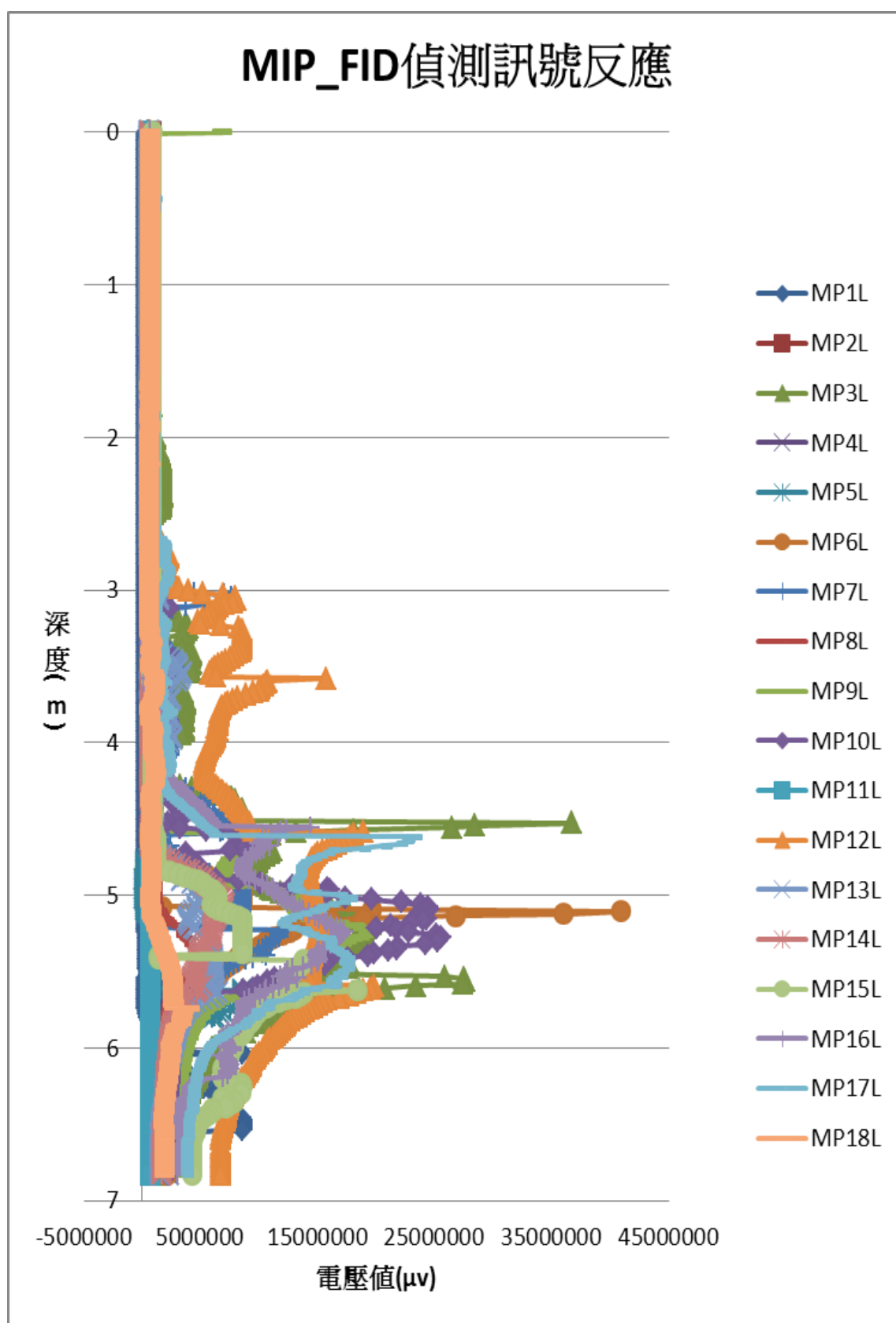


圖 4-16 試驗模場 MIP_FID 檢測測點偵測反應深度分布彙整圖

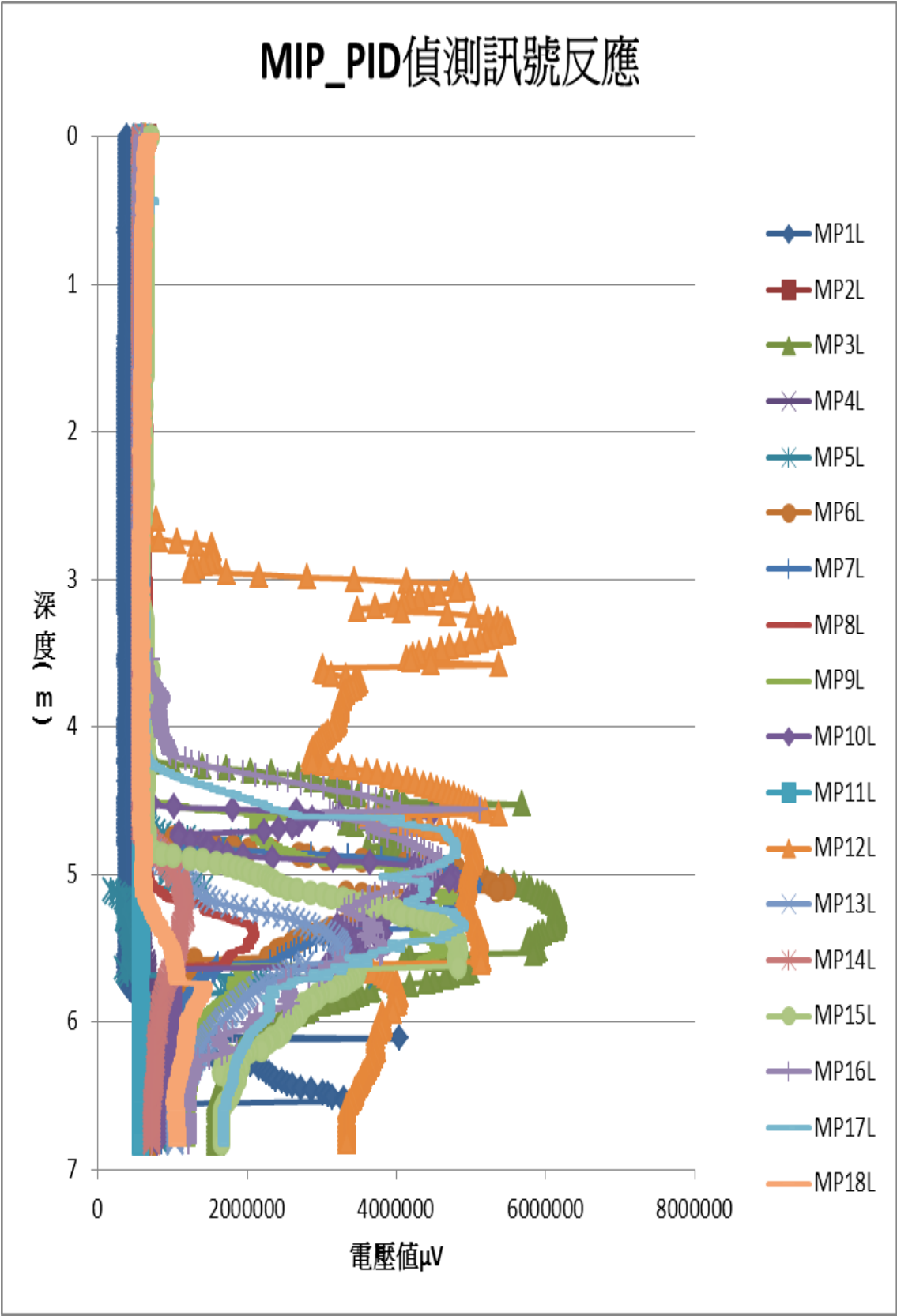


圖 4-17 試驗模場 MIP_PID 檢測測點偵測反應深度分布彙整圖

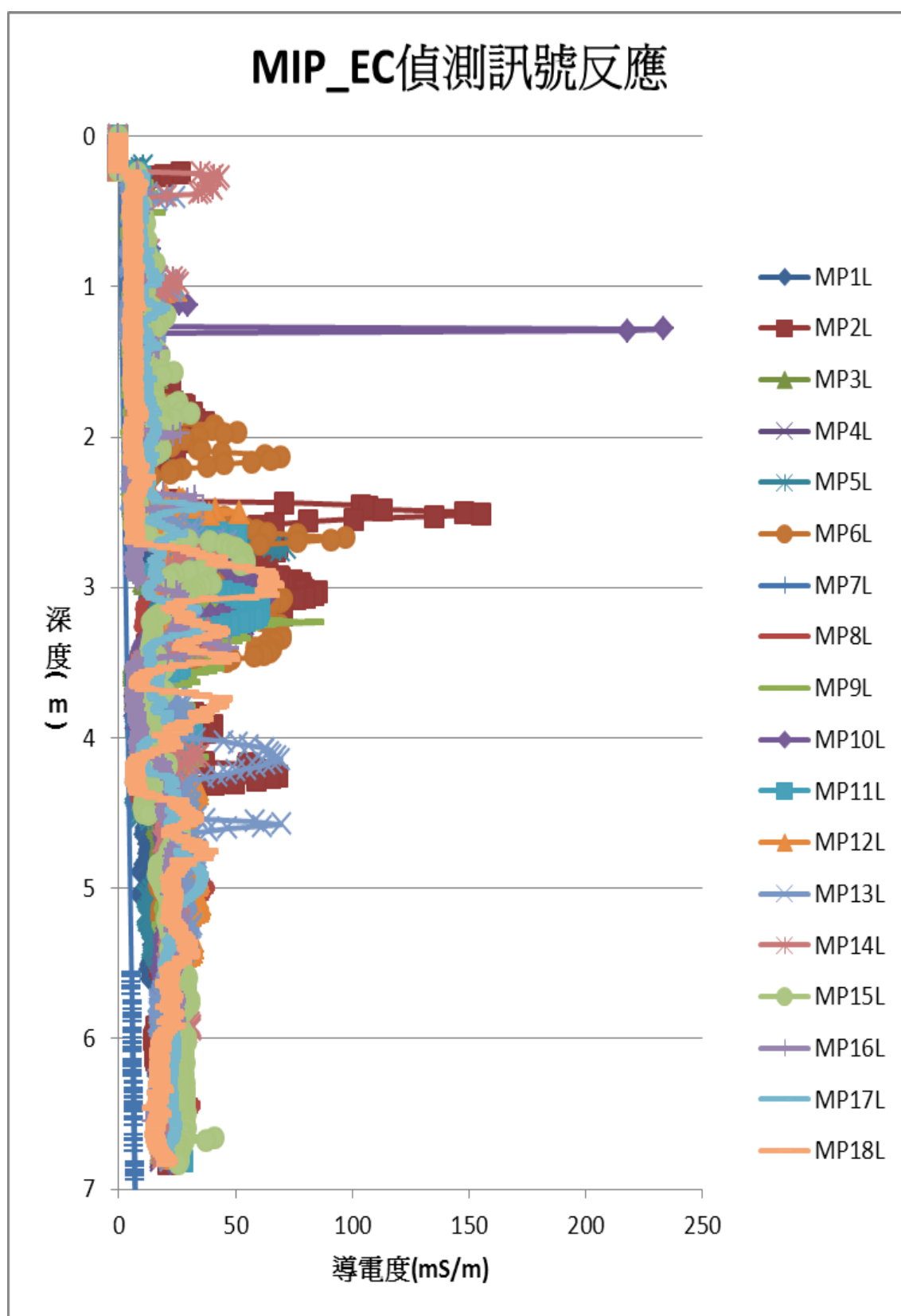


圖 4-18 試驗模場 MIP_EC 檢測測點偵測反應深度分布彙整圖

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

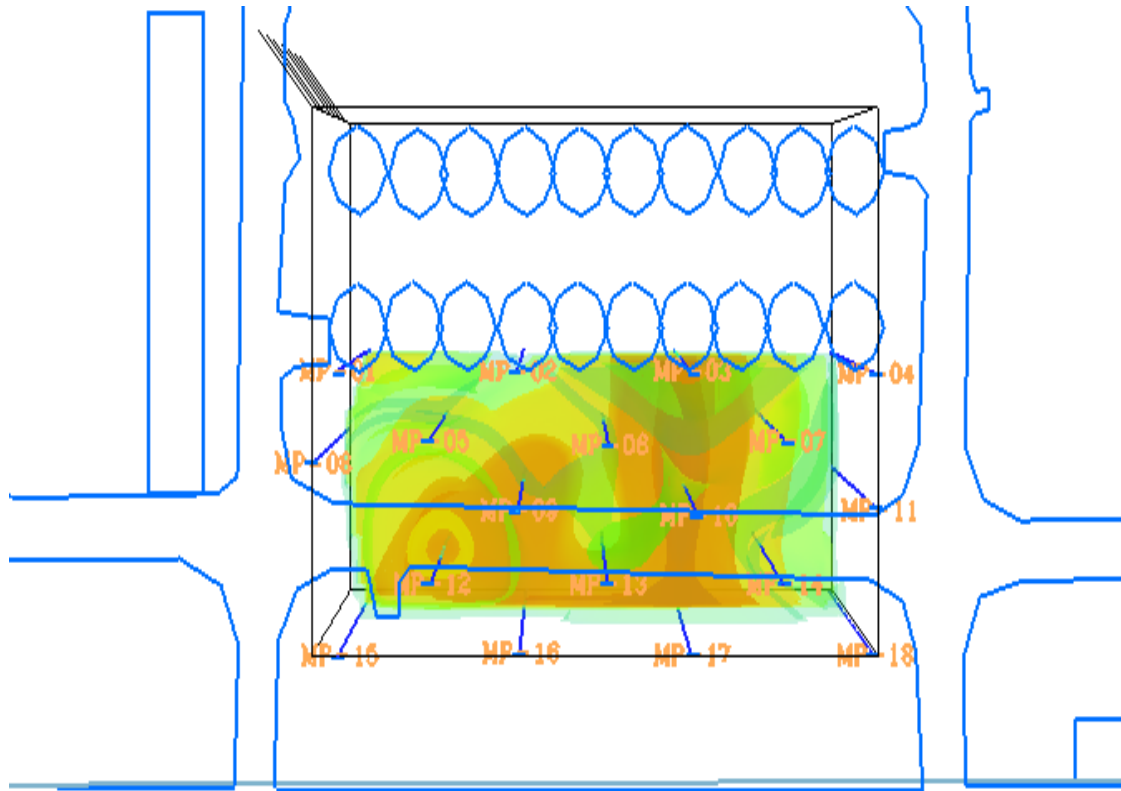


圖 4-19 調查模場 MIP 數值 3D 資料解析溶解相與揮發相物質污染團區域分布圖

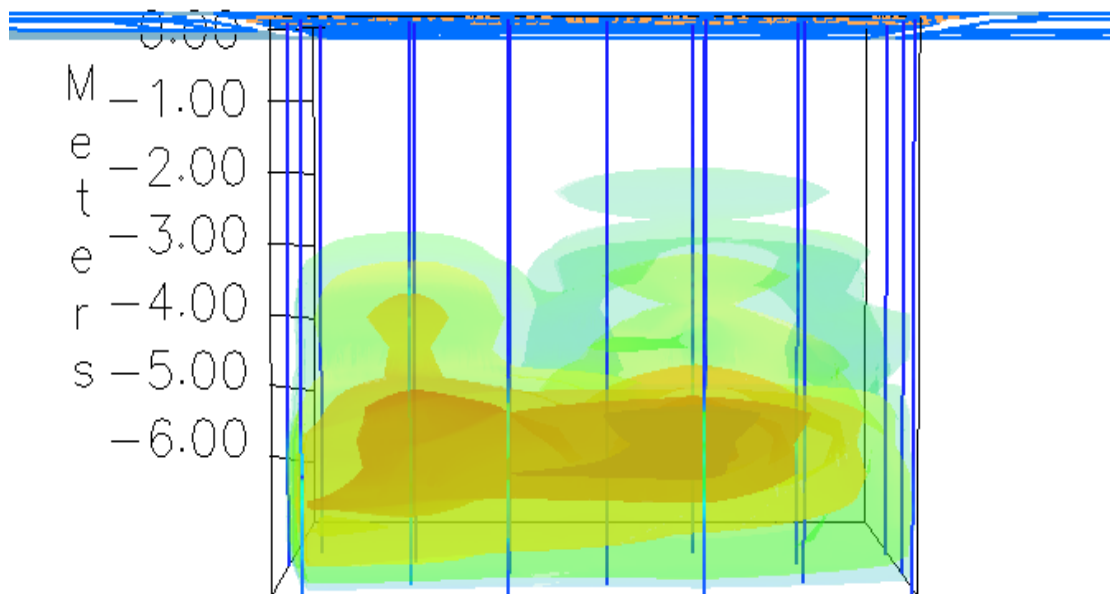


圖 4-20 調查模場 MIP 數值 3D 資料解析非水相液體(NAPLs)物質地表下污染團深度範圍分布圖

4.4 地質水文調查結果

在模場地質調查方面本次針對調查場址中所選定之土壤採樣測點 LF5S、LF12S、LF9S、LF6S、LF3S、LF17S 等六個測點，進行地表下 6m 深度之全尺寸鑽探作業，取得地土壤岩心樣品經人工進行地質條件分布之辨識，辨識結果將壤心代表符號進行彙整後各相關測點由 LF5S 為起點依序串接各測點至 LF17S 為終點(圖 4-21)，結合成為代表調查場址地質分布的剖面線，試驗場址鑽探調查結果地質屬性條件呈現為細至中砂夾雜礫石、細至中砂、中至粗砂、粗砂夾礫石等級配砂質等為場址主要質地特徵，部分深度為摻雜粉土夾砂質地或細砂質粉土特徵，另外部分測點表層則有砂土夾磚石之回填土特徵(圖 4-22)。

將含水層中個不同深度的土壤進行土壤篩分析試驗，測試結果(圖 4-25、4-26、4-27)各不同深度地層之地質特性其有效粒徑(Effictive Size) D10 與 D60 及均勻係數(Coeffiction of Uniformity) Cu 分別為 3~4m 之 D10=0.08mm、D60=0.54、Cu=6.75；4~5m 之 D10=0.15、D60=0.6、Cu=4；5~6m 之 D10=0.15、D60=1.5、Cu=10，另外試驗測得之平均孔隙率約 34.5%。

場址含水層水力傳導係數(Hydraulic conductivity (k))量測作業原選定以 LF6 測點為代表，預計規劃測試 3.5~4.5m、4.5~5.5m、5.5~6.5m 等 3 個深度，但由於試驗執行階段當時地下水位低於原規劃之水位深度(約 4.9m 左右)，故地表下 3.5~4.5m 區間之測試便無法執行試驗，此次水力傳導係施作方式主要以 U.S.A Geoprobe 公司生產之 GW1600 氣動式微水測試系統套件(Pneumatic Slug Test, PST)結合 SP16(Screen Point)地下水即時採樣器進行氣動式微水試驗，於每個深度區間預計重複施作 6 次之測試執行(圖 4-23)。由於試驗場址含水層特性屬非受壓之含水層所以數值分析方法採樣用 Bouwer and Rice 數值分析方法進行數據解析(如圖 4-24 與圖 4-24-1)。數值分析結果進一步求得(表 4-4)地表下 4.5~5.5m 區間的水力傳導係數平均值為 $1.62\text{E-}3(\text{cm/s})$ ；地表下 5.5~6.5m 區間的水力傳導係數平均值為 $3.64\text{E-}3(\text{cm/s})$ ，場址水力傳導係數數值變化有由上往下遞增之趨勢。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

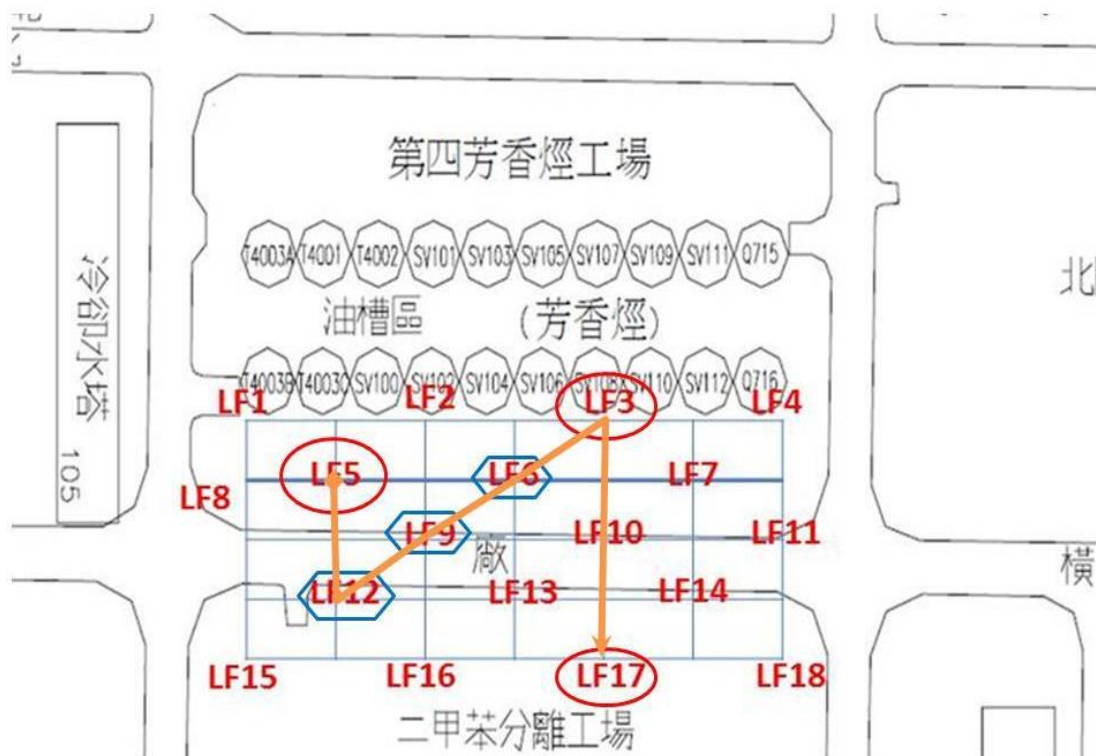


圖 4-21 調查場址鑽探測點地質剖面線串接連線示意圖

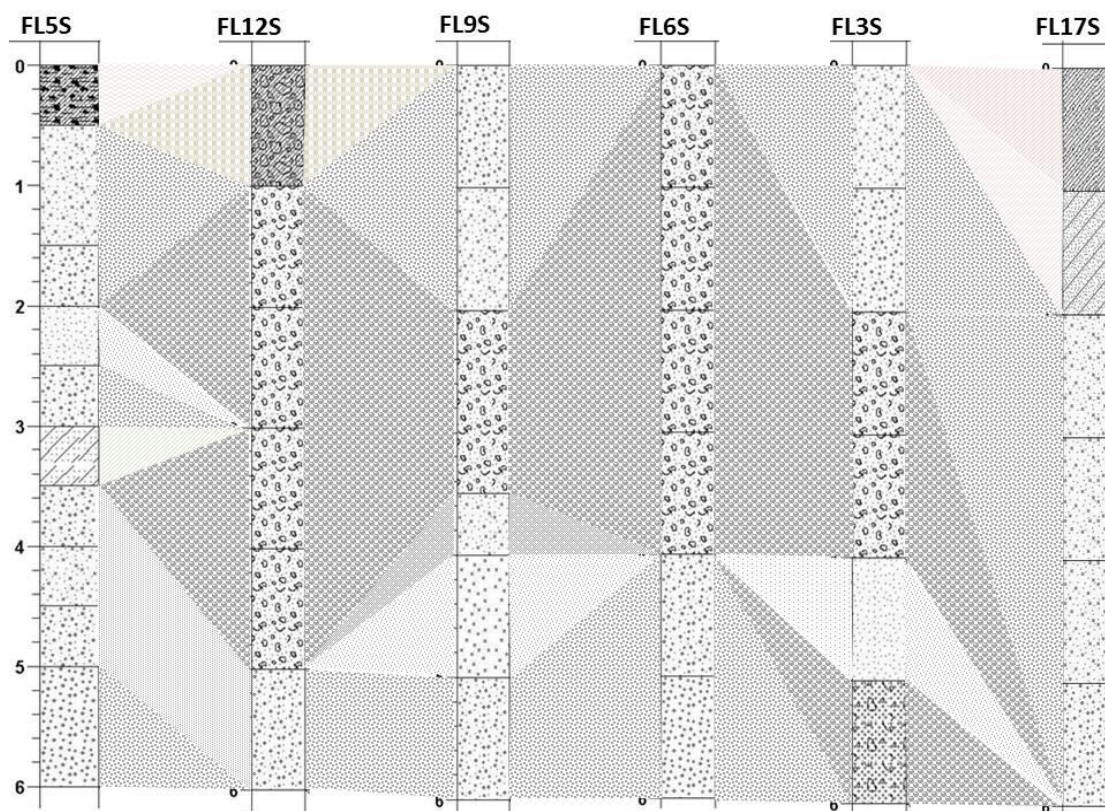


圖 4-22 調查場址鑽探地質判識結果地質分布特徵剖面示意圖

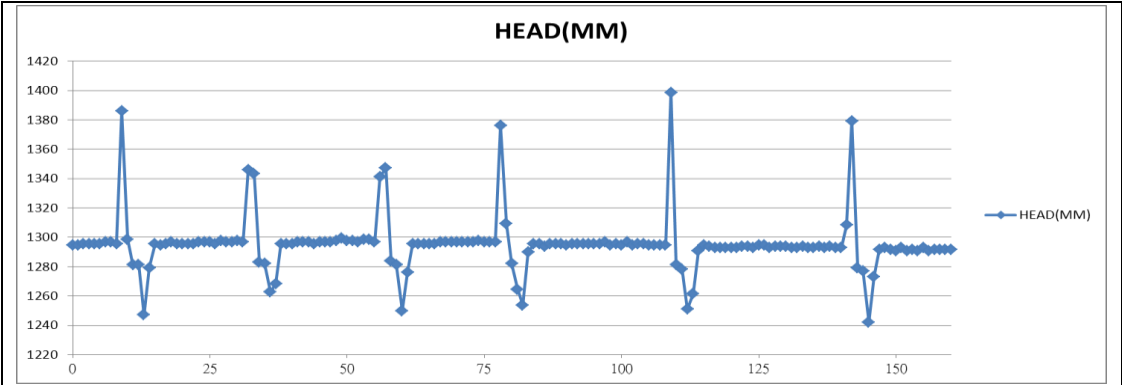


圖 4-23 地表下 5.5~6.5m 井開篩區間之氣動式微水試驗測試數據

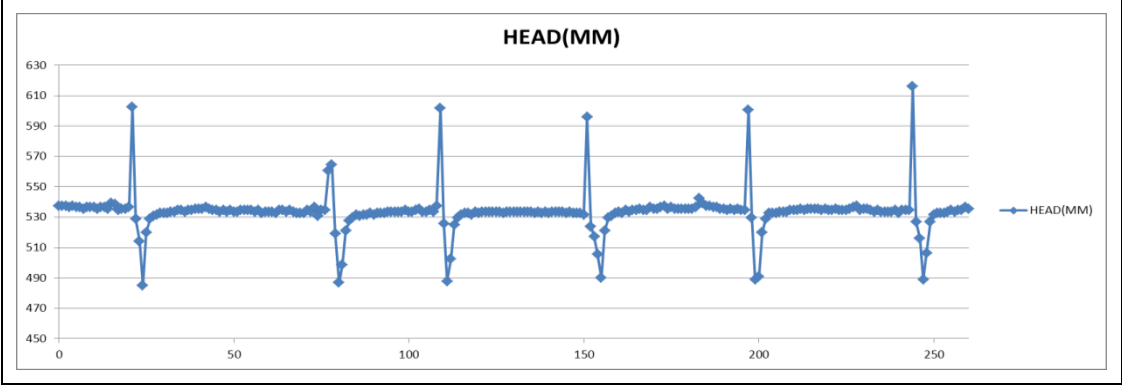


圖 4-23-1 地表下 4.5~5.5m 井開篩區間之氣動式微水試驗測試數據

圖 4-23 直接貫入式地下水取樣器地表下不同開篩區間之氣動式微水試驗測試數據

表 4-4 LF6 測點不同深度氣動式微水試驗測試結果代表性 K 質

測試區間	1 st K 值 (cm/s)	2 st K 值 (cm/s)	3 st K 值 (cm/s)	4 st K 值 (cm/s)	5 st K 值 (cm/s)	6 st K 值 (cm/s)	平均值 (cm/s)
4.5~5.5m	1.09E-3	1.74E-3	1.81E-3	1.13E-3	2.21E-3	1.74E-3	1.62E-3
5.5~6.5m	3.71E-3	4.78E-3	4.17E-3	4.42E-3	3.01E-3	1.75E-3	3.64E-3

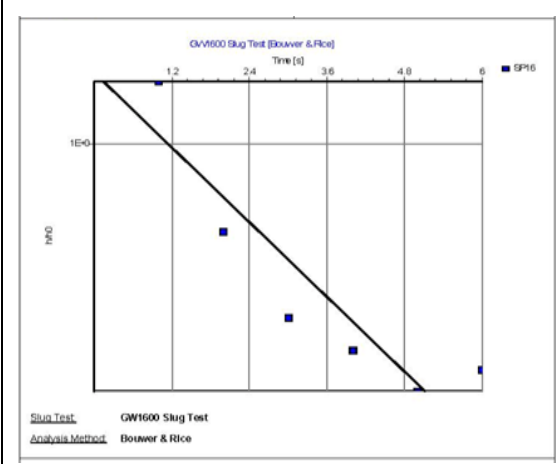


圖 24 4.5~5.5m Bouwer and Rice 解析圖

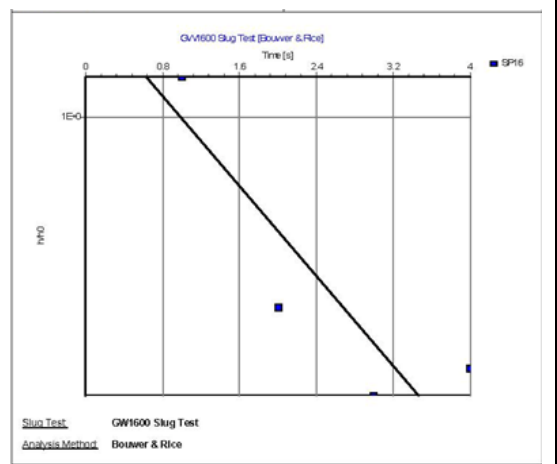


圖 24-1 5.5~6.5m Bouwer and Rice 解析圖

圖 4-24 不同深度氣動式微水試驗結果 Bouwer and Rice 方法數值解析結果

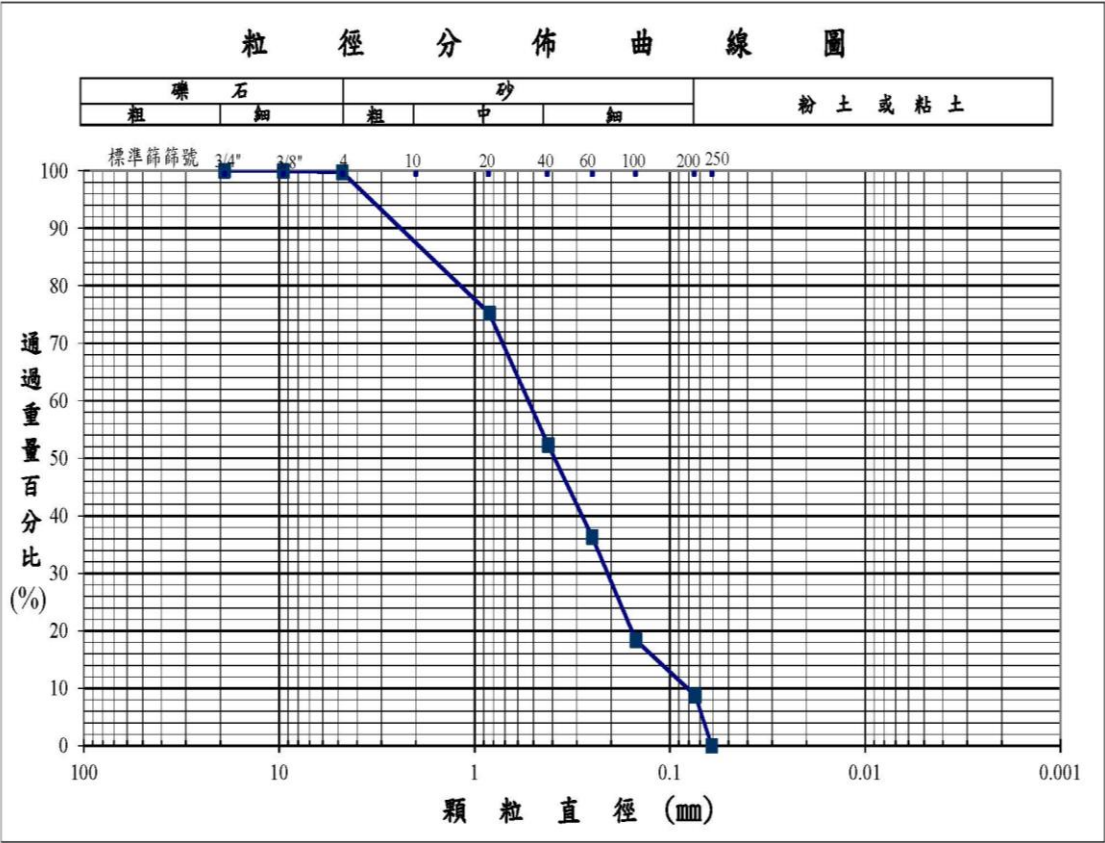


圖 4-25 試驗場址內代表性深度 3~4m 地質粒徑分布曲線圖

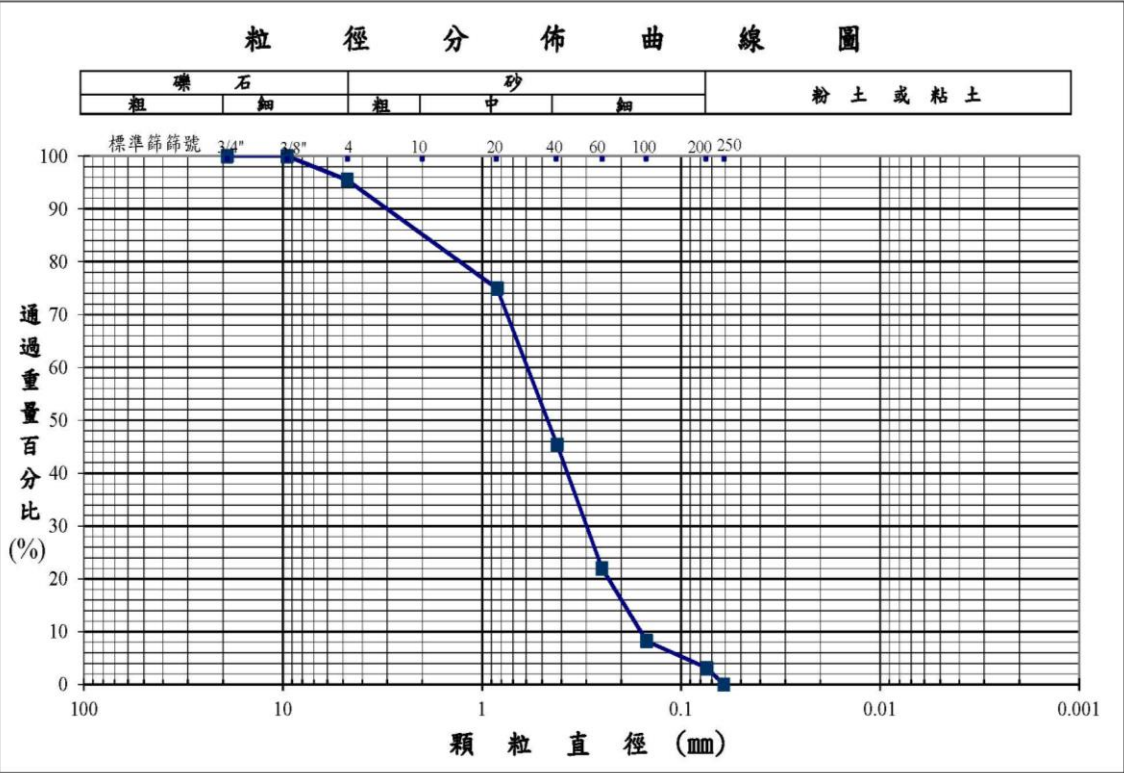


圖 4-26 試驗場址內代表性深度 4~5m 地質粒徑分布曲線圖

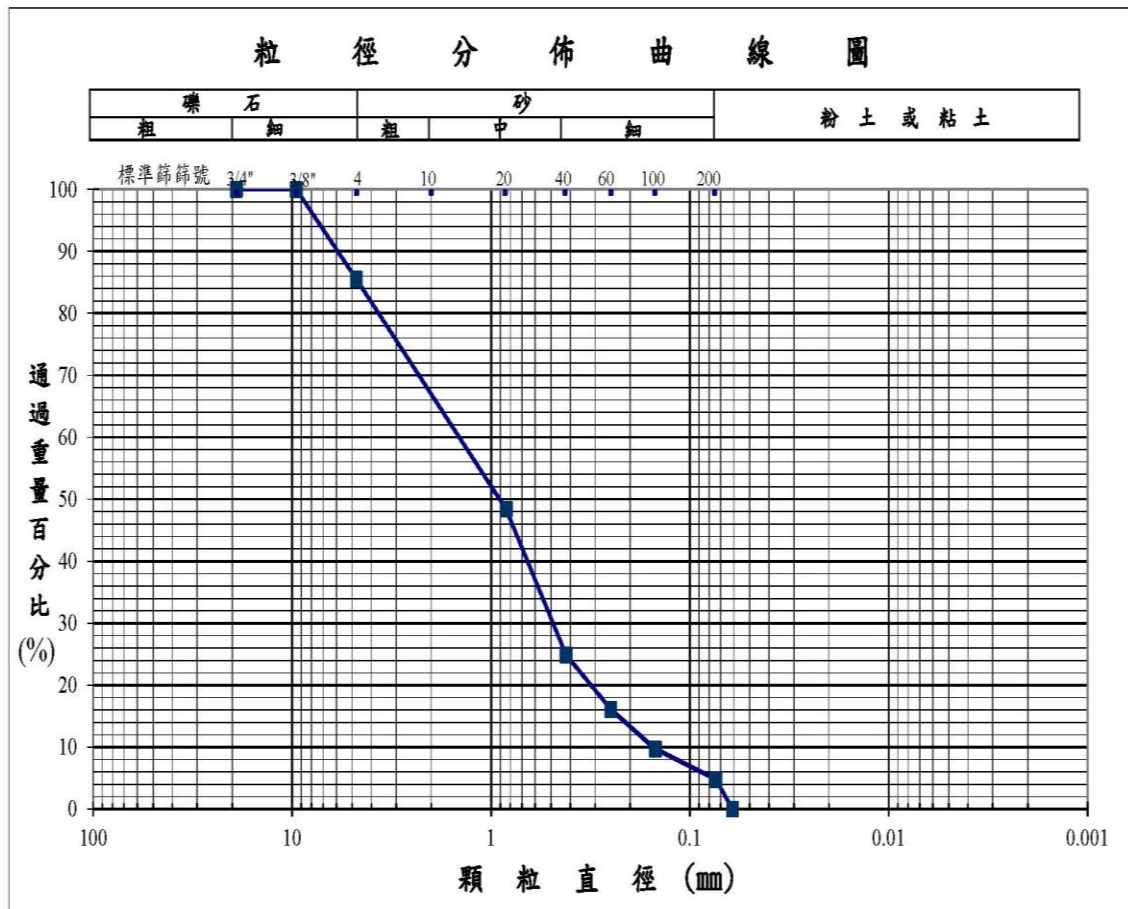


圖 4-27 試驗場址內代表性深度 5~6m 地質粒徑分布曲線圖

試驗模場場址地下水流向量測方式主要以使用地下水即時採樣器 SP16(Screen Point)進行臨時井的佈設,採直接貫入式工法將 SP16 採樣器直接鑽進至目標深度於井篩佈設完成並待水位平穩後,在地下水採樣作業開始前進行採樣器井口水位量測,並搭配規劃設置基準點之相對高程測量求得相對地表高程之採樣井地下水位資料(如表 4-5),量測所得資料彙整後以 SUFER 軟件進行地下水流向推估(圖 4-28),推估結果初步判定出現流向異常現象,試驗場址地下水位流向呈現突轉向 LF17 測點方向流動,推測 LF17 測點井水位可能受到地層中含浮油相影響(該測點 LIF 調查反應結果呈現 RE 高值)以致造成地下水位偏低狀況,故結果呈現與區域性流向及污染團流佈趨勢有所差異,經修正去除 LF17 測點數值後以其餘監測點數值重新解析後所求得之地下水流向(圖 4-28-1)則與廠區區域性地下水流向趨勢接近。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

表 4-5 SP16 即時採樣器井口水位相對高程測量

測點	相對井口高程	相對地表水位高程
LF5	5.430m	4.824m
LF9	5.415m	4.839m
LF6	5.180m	4.800m
LF3	5.090m	4.703m
LF17	5.460m	4.989m
LF12	5.230m	4.864m

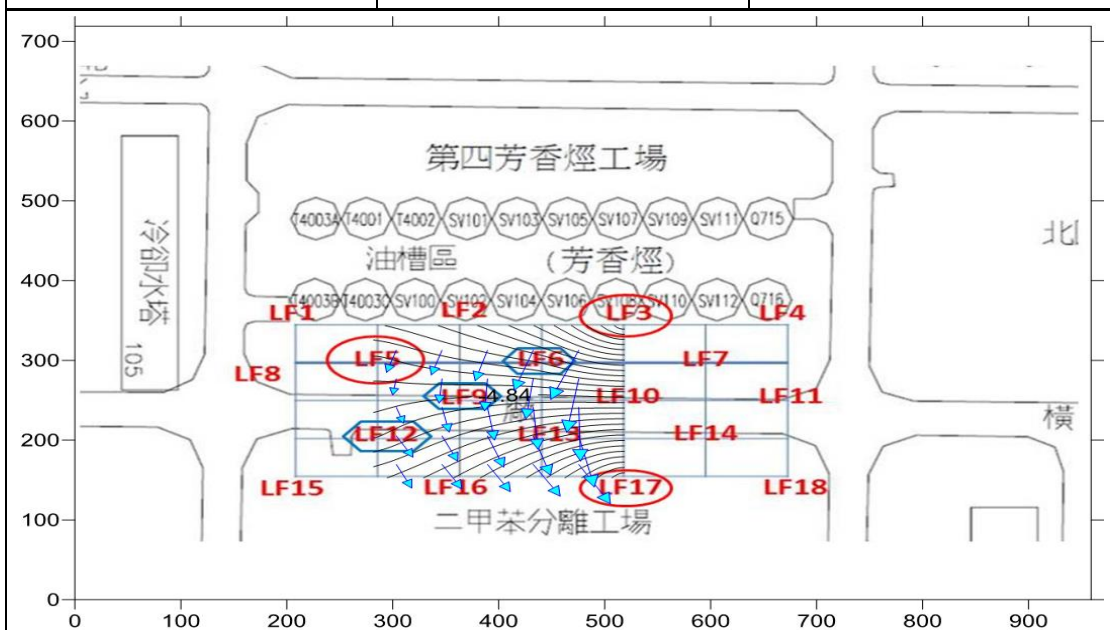


圖 4-28 六個地下水即時採樣測點推估後之試驗場址地下水流向

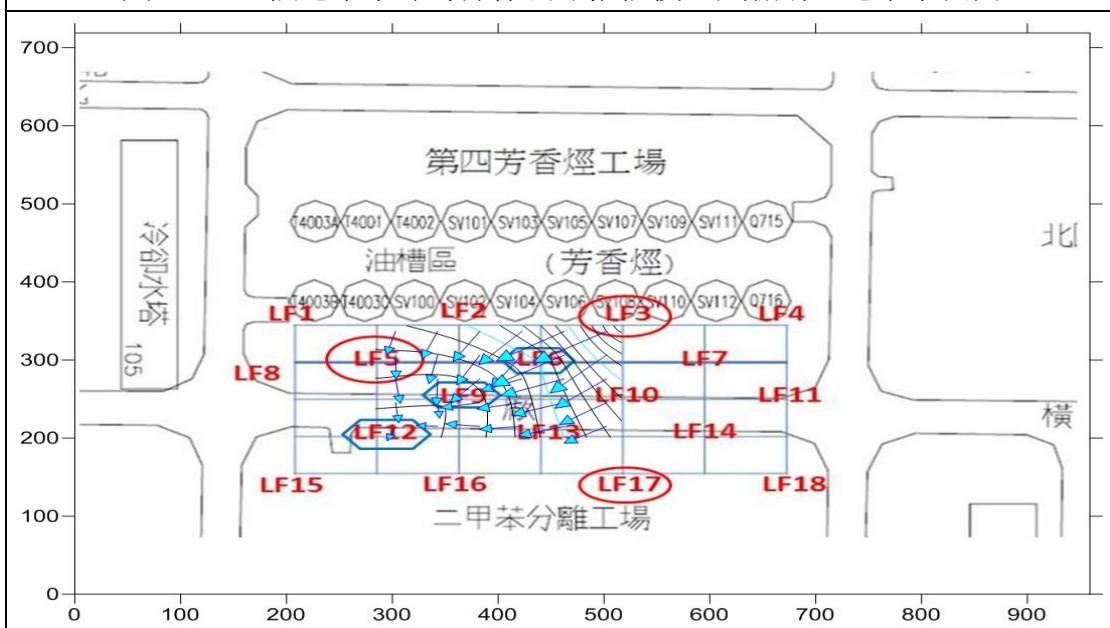


圖 4-28-1 去除 LF17 測點餘五個地下水即時採樣測點推估後之試驗場址地下水流向

圖 4-28 試驗場址地下水流向推估示意圖

4.5 地下介質取樣分析結果

土壤&地下水即時採樣作業規畫乃依據模場計畫中執行之 UVOST_LIF 與 MIP 兩系統調查結果所呈現之汙染團分布情形，針對可能之污染洩漏來源高濃度區與污染混合區進行採樣點布設(如圖 4-29)。採樣測點配置特性，主要分成 2 個特性區：

(1)漏源辨識特徵區：測點有原先之調查點 LF3(油水分離)、LF5(不明區)、LF17(二甲苯工廠區)等 3 個測點。

(2)洩漏混合區濃度分布比對：測點有原先之調查點 LF6、LF9、LF12 等 3 個測點。

分析項目方面主要規劃為揮發性有機化合物 VOCS 管制項、半揮發性有機化合物 SVOCS 管制項與總石油碳氫化合物 TPH(TPH-G&TPH-D)等 3 個分析項目。

樣品分析結果在土壤樣品方面(如表 4-6)在揮發性有機化合物 VOCS 管制項目測點 LF6S-2、LF3S-2、LF5S-2 呈現主要以甲苯的濃度較高，而苯、乙苯、二甲苯等成分相對較低；測點 LF12S-2 甲苯、乙苯、二甲苯成份數值則非常高為所有測點之最高值，苯項目相對較低；測點 LF17S-2 主要以甲苯成份為高值，苯、乙苯、二甲苯等成分相對較低，檢測濃度為本次的第二高值測點；LF9S-2 測點為此次濃度最低之測點，測得之主成份比例以二甲苯成份較高。在半揮發性有機化合物

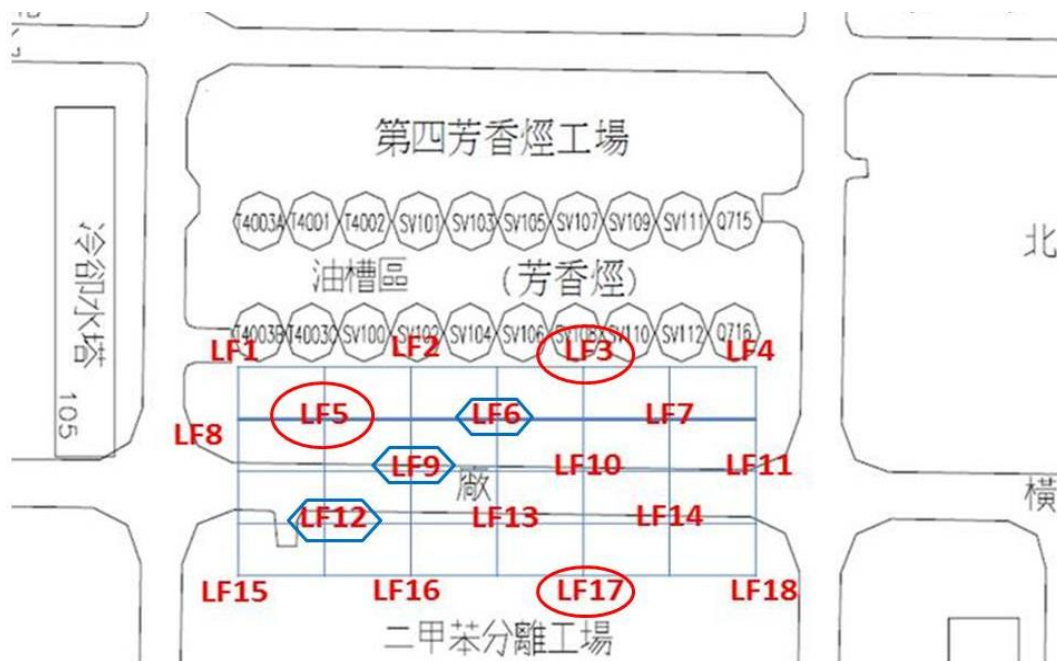


圖 4-29 計畫模場土壤採樣與地下水即時取樣位置規劃與測點編號

Ps.1.橢圓形符號代表漏源辨識特徵區

2.六角形符號符號代表洩漏混合區

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

SVOCS 管制項目方面則未檢出，總石油碳氫化合物 TPH(TPH-G&TPH-D)項目方面主要以測點 LF12S-2 為最高值成份比例以 TPH-G 測值遠高於 TPH-D 測值；測點 LF17S-2 檢出濃度為次要高之測點，TPH-G 測值與 TPH-D 測值比例則接近；其餘測點濃度偏低成份為 TPH-D。

表 4-6 土壤樣品分析各測點檢出成份彙整表

土壤樣品檢驗報告

樣品名 稱 檢驗項目	LF6S-2	LF3S-2	LF5S-2	LF9S-2	LF12S-2	LF17S-2	單位
苯	<0.01	0.18	1.61	-	20.30	5.04	mg/kg
甲苯	42.1	24.0	48.4	0.1	501.0	133.0	mg/kg
乙苯	0.11	1.84	0.56	0.21	812	3.06	mg/kg
二甲苯	0.39	6.07	4.53	1.59	5890	16.10	mg/kg
總石油碳氫化合物 (汽油類)	70	69	108	14	15300	374	mg/kg
總石油碳氫化合物 (柴油類或柴油以上)	<20	<20	-	-	463	122	mg/kg
總石油碳氫化合物	90	89	114	20	15800	496	mg/kg

在地下水樣品分析結果(如表 4-7)，揮發性有機化合物 VOCS 管制項目方面 LF6W-2 測點以甲苯最高其餘苯類項目偏低；測點 LF5W-2 最高為甲苯、次高為苯與二甲苯其餘項目偏低；測點 LF9W-2 亦以甲苯為較高值其餘相對較低，相對於於其他測點為濃度較低之測點；測點 LF3W-2 以甲苯濃度最高其餘相對較低；測點 LF12W-2 以苯、甲苯、二甲苯濃度為高值；測點 LF17W-2 則以甲苯、二甲苯為高值而苯次之。在半揮發性有機化合物 SVOCS 管制項目，部分測點驗出有酚、苯甲醇、2-甲基酚、3,4-甲基酚、2,4-二甲基酚、2-甲基萘、鄰苯二甲酸乙己酯等，但濃度不高。總石油碳氫化合物 TPH-D 以測點 LF5W-2 與 LF3W-2 較高，其次為測點 LF9W-2、LF12W-2、LF17W-2，濃度最低為測點 LF6W-2。

表 4-7 地下水樣品分析各測點檢出成份彙整表

地下水樣品檢驗報告

樣品名稱 檢驗項目	LF6W-2	LF5W-2	LF9W-2	LF3W-2	LF12W-2	LF17W-2	單位
柴油總碳氫化合物	0.558	5.24	2.15	3.87	1.80	1.77	mg/L
苯	1.07	21.1	1.73	1.23	33.5	44.4	mg/L
甲苯	136	198	22.4	178	27.2	91.3	mg/L
乙苯	0.614	2.14	0.412	3.42	4.54	8.00	mg/L
二甲苯	1.90	25.8	4.20	9.74	35.3	76.4	mg/L
萘	0.0620	-	<0.00100	1.34	<0.00100	0.554	mg/L
酚	-	0.0214	<0.00500	-	0.0522	0.0383	mg/L
苯甲醇	<0.00496	<0.00496	0.0146	<0.00496	<0.00496	0.00526	mg/L
2-甲基酚	0.00523	0.279	0.0667	<0.00502	0.00834	0.0193	mg/L
3,4-甲基酚	0.0141	0.0870	0.0160	<0.00993	0.0253	0.0303	mg/L
2,4-二甲基酚	-	0.228	0.0646	-	0.0265	<0.00502	mg/L
2-甲基萘	-	-	<0.00500	<0.00500	<0.00500	0.0113	mg/L
蒎烯	-	-	-	<0.00502	-	-	mg/L
鄰苯二甲酸二甲酯	-	-	<0.00502	-	<0.00502	<0.00502	mg/L
菲	-	-	-	-	-	<0.00500	mg/L
鄰苯二甲酸二丁酯	-	-	-	-	-	<0.00500	mg/L
鄰苯二甲酸乙己酯	0.00952	0.00931	0.00764	<0.00500	0.00501	0.00953	mg/L

4.6 環境場址評估作業補充調查

4.6.1 試驗場址附近存放之原物料雷射螢光特徵圖譜測試

經由紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)執行試驗場址調查作業，調查結果呈現出 3 種主要較明顯不同類型螢光特徵組成比例，進一步比較與整理各特徵在調查的 18 個測點中可發現除 3 種較顯著特徵外另衍生出 2 種較不明顯的混合特徵群現象，為了解試驗模場污染物呈現之雷射螢光特徵與周圍環境存放之背景原物料是否存在相關性，蒐集了試驗模場旁第四芳香烴工廠油槽區存放之苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、萃取用溶劑 Sulfolane(tetramethylene sulfone 環丁砜又名四氫噻吩-1,1-二氧化物)與芳二組二甲苯工廠之進料油品、成品油、PDEB(p-Diethylbenzene, 對二乙基苯)、CPI-05 中之油水分離物質等相關性原物料，進行雷射誘發螢光特徵圖譜建置，各相關性物質螢光圖譜特徵如表 4-8 中所示，提後續供與現地檢測資料進行查核比對。

表 4-8 試驗場址附近相關蒐集原物料雷射誘發螢光特徵圖譜建置彙整(1/2)

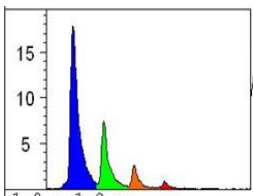
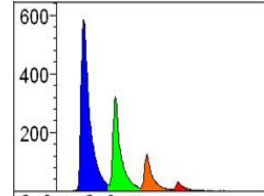
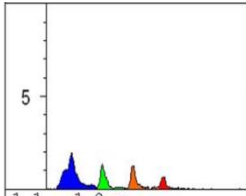
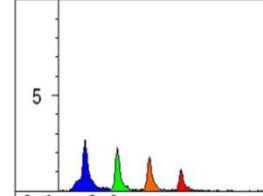
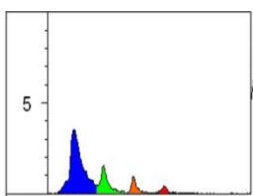
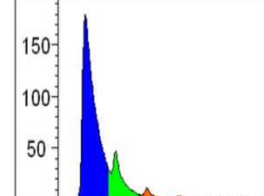
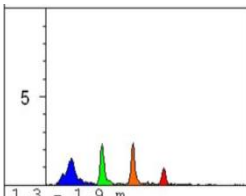
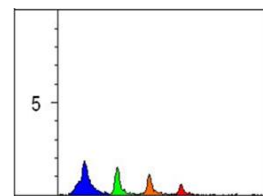
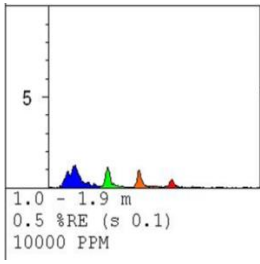
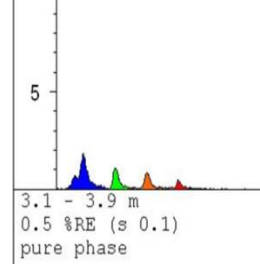
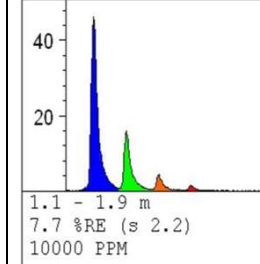
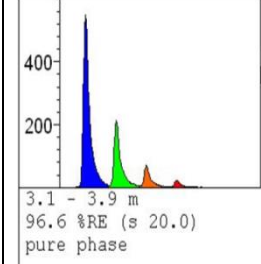
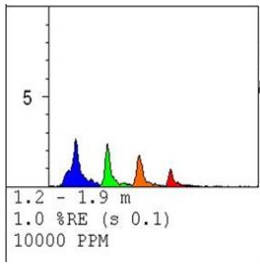
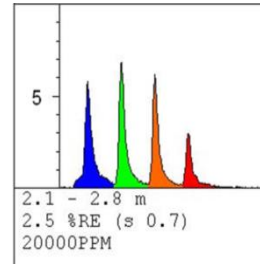
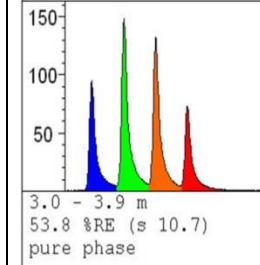
芳二組進料		芳二組製成品	
			
(1/2 飽和 sand)	(純相油品)	(1/2 飽和 sand)	(純相油品)
芳二組 PDEB		第四芳香烴工廠油槽區苯	
			
(1/2 飽和 sand)	(純相油品)	(1/2 飽和 sand)	(純相油品)

表 4-8 試驗場址附近相關蒐集原物料雷射誘發螢光特徵圖譜建置彙整(2/2)

第四芳香烴工廠油槽區甲苯		CPI-T05	
			
(1/2 飽和 sand)	(純相油品)	(1/2 飽和 sand)	(純相油品)
第四芳香烴工廠油槽區 SULFOLANE			
			
(1/2 飽和 sand)	(飽和 sand)	(純相油品)	

4.7 綜合資料比較

4.7.1 試驗模廠雙現地快速檢測系統成果差異比較

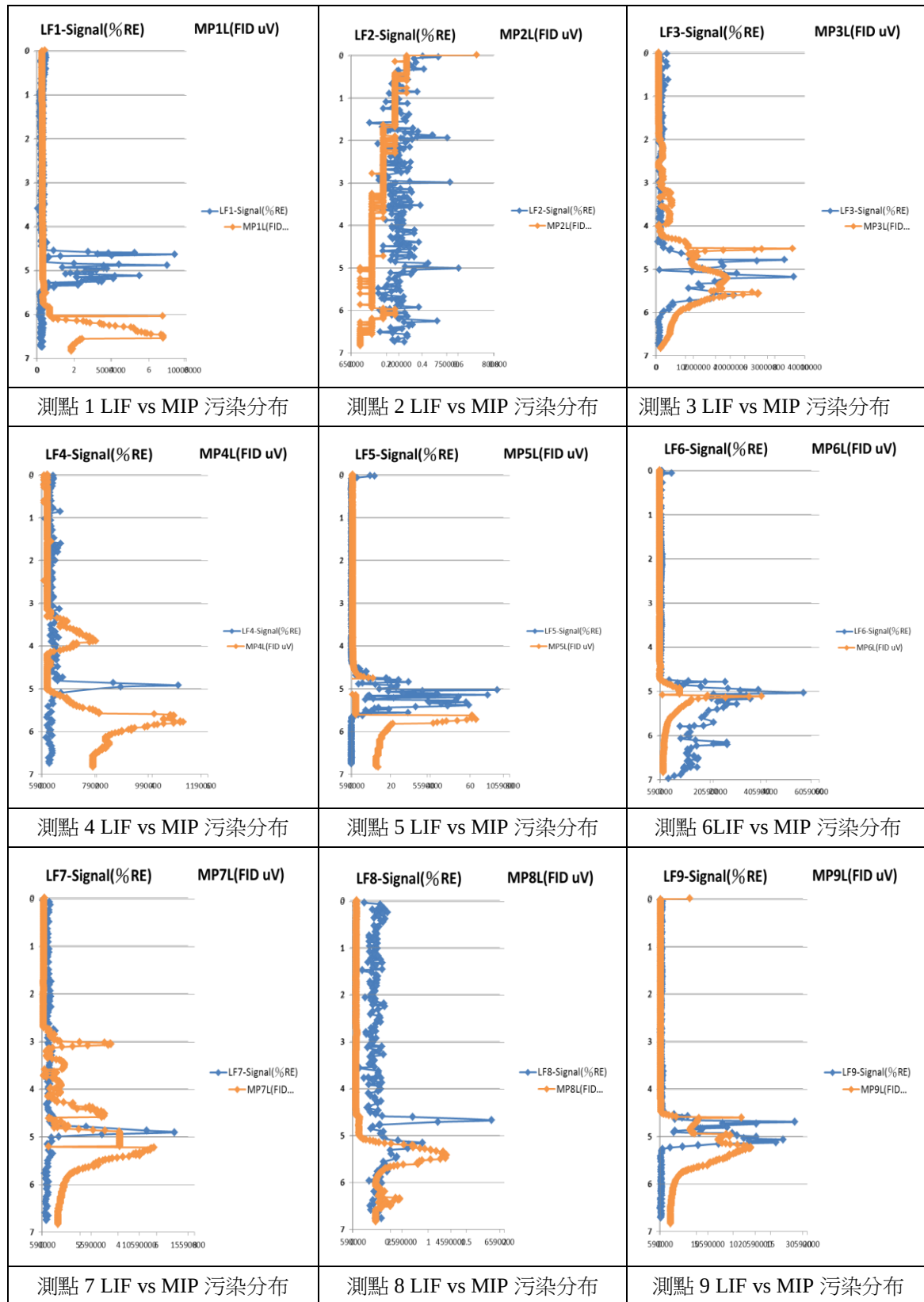
本次試驗使用兩種不同可針對石油化學類污染成分進行偵測之現地即時偵測系統，一為薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe, MIP)另一為紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra Violet Optical Screen Tool-Laser Induced Fluorescence, UVOST-LIF)，兩種系統各有其不同的偵測特性，薄膜介面探測器系統(MIP)主要應用熱揮發(Thermal evaporation)原理讓污染物成為氣狀成分透過半透膜傳遞在應用傳輸管路進行污染物偵測，所以當污染物揮發性較低時就會造成較難脫附污染成分與高濃度管路殘留檢測誤差現象，紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)則運用紫外波段雷射光源進行油品類污染物內特定成分進行激發螢光測定，唯對於輕質油品中某些特定成分其感度較低所以也會產生檢測誤差現象。此次模場現地偵測結果呈現兩系統對於污染物的分布位置，部分測點有相同趨勢部分測點則出現不同污染分不情形(如表 4-9)。如測點 LF2 與 LF11 兩個檢測系統皆未檢測出明顯之污染物，測點 LF3 與 LF15 污染分布有較相同的趨勢外其餘測點則呈現為污染範圍與位置不同之差異情形，進一步藉由三維資料解析場址污染團(Plume)分布情形

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

(如圖 4-30)，不同現地檢測系統呈現出不太相同的污染物流部狀態，以薄膜介面探測器系統(MIP)調查結果來看污染分布位於場址中北方較淺層(約 3m 左右)位置開始往南方擴散至東西方位分布與往深層移動的趨勢，而在紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF) 調查結果來看則與薄膜介面探測器系統(MIP)調查結果不相同，污染團則位於較深層之位置(約 4.5m 左右)並由場址中南方方位往北與西方向分布的趨勢，綜合兩種不同污染團分布的情形初步可看出試驗場址中至少存在兩種不同污染物質類型的洩漏來源存在。

從兩套不同的現地即時(Real Time)檢測分析設備其基本的檢測原理來看，薄膜介面探測器系統(MIP)主要是應用污染物質的揮發性物理現象如 VOCs(Volatile Organic Compounds)物質來蒐集污染成分易揮發的物質加以分析，但遇到較不易揮發之成分如 SVOCs(Semi-Volatile Organic Compounds)物質則應用強化熱脫附機制來達成檢測作用，可是由於受限於加熱能量方面的限制因此揮發性較高之物質便無法進行檢測，相較於紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)主要是應用光激發的原理進行污染成分的檢測分析原理所以就不受限於污染物質的熱力學(thermodynamics)性質所影響，但前提是污染物質必須含有可受光激發(Optical excitation)的成分存在，在兩種系統間存在的主要差異特性為薄膜介面探測器系統(MIP)無法進行污染成分的特徵辨識而紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)除可偵測污染成分濃度的變化外其最大特性是可針對污染成分的組成特徵作一個組成的特徵辨識作業，由於試驗場址是屬於多種油品洩漏之污染之場址油品中包含了非常多種混合物與多樣的化學物質成分，因此其中便存在著兩種檢測系統都可分析之物質與無法檢測之物質存在，所以模場試驗結果便呈現某些深度污染分布趨勢是相同現象與部分污染分布之趨勢出現差異之狀況。在計畫開始初期由一階環境場址評估作業(Phase I Environmental Site Assessment Process)階段對於試驗場址的基本特性已作初步的了解，所以才於計畫中導入雙偵測系統以補足單偵測系統可能產生之調查資料缺口(data gap)。

表 4-2 試驗場址各測點雙現地偵測系統 LIF vs MIP 調查結果污染分布表較(1/2)



運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

表 4-9 試驗場址各測點雙現地偵測系統 LIF vs MIP 調查結果污染分布表較(2/2)

測點 10 LIF vs MIP 污染分布	測點 11 LIF vs MIP 污染分布	測點 12 LIF vs MIP 污染分布
測點 13 LIF vs MIP 污染分布	測點 14 LIF vs MIP 污染分布	測點 15 LIF vs MIP 污染分布
測點 16 LIF vs MIP 污染分布	測點 17 LIF vs MIP 污染分布	測點 18 LIF vs MIP 污染分布

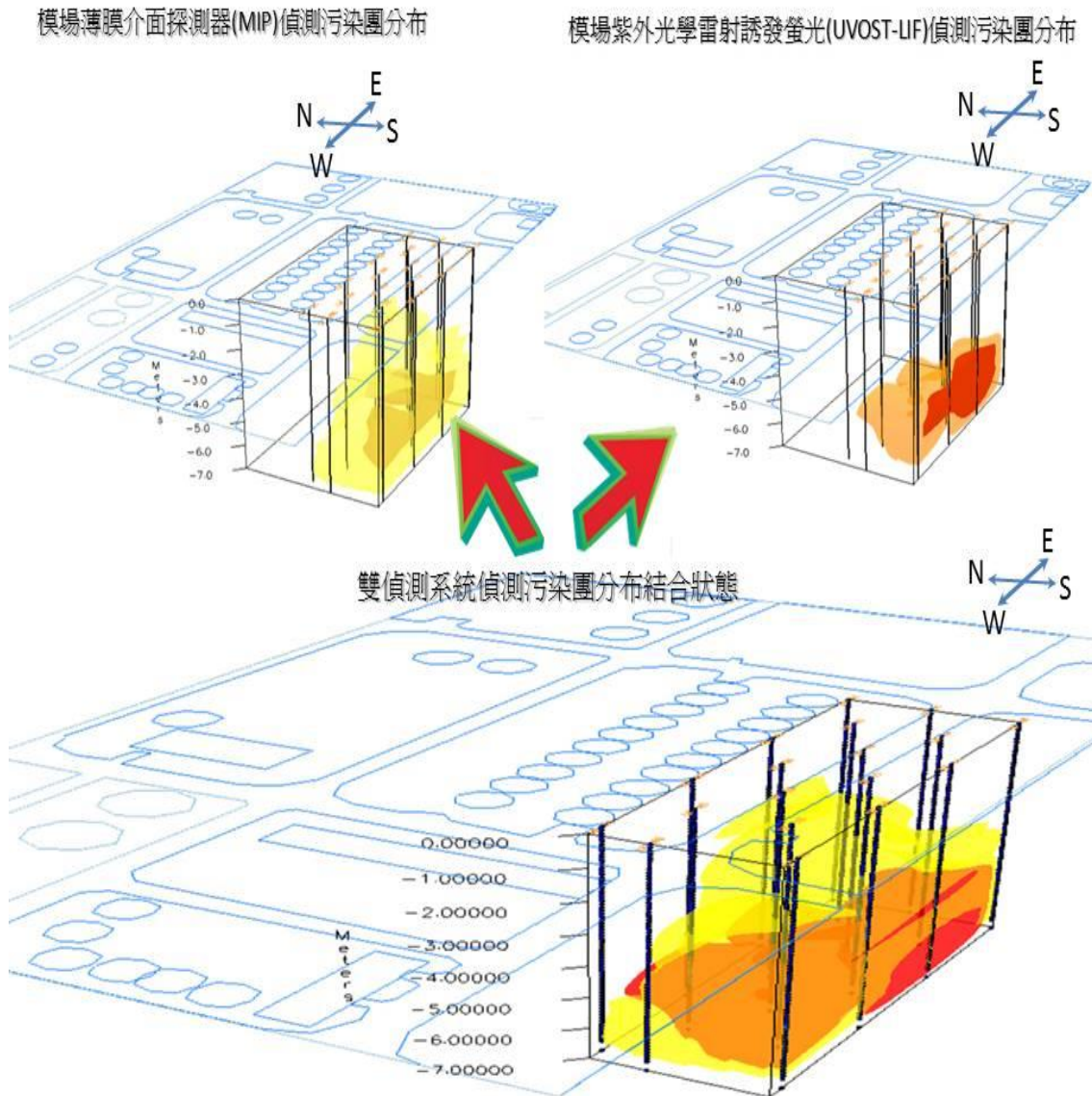


圖 4-30 試驗模場雙系統(MIP&LIF)檢測結果場址污染團分布差異情形

4.7.2 污染團與地質分布相關性比較

在此次模場地質調查方式主要由 MIP-EC 的土壤導電度偵測系統與地質鑽探人工辨識方式進行模場地質條件的確認，由調查結果呈現試驗場址主要地質條件為砂質地分布地層，次要為粉土質砂與偶夾粉黏土質地，在土壤導電度(EC)測質方面粉土質砂與偶夾粉黏土質地主要位於 2m~3.5m 區間，其他深度大部分為粗至細砂的級配壤土質地，在地質取樣人工辨識方面雖然呈現相同趨勢，但由於樣品回收率與人工判識精密度問題，所以地質條件在深度分布位置上略有出入之處。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

由三維資料解析進行地質分布與現地即時調查污染團相對位置比較結果，可明顯看出較重質浮油相物質目前大部分位於較深層的中粗砂地質中，而較輕質的污染成份位於淺、中深度區間中並分布於較不緻密的壤土質地內，形成一個明顯的滲流路徑現象(如圖 4-31)。

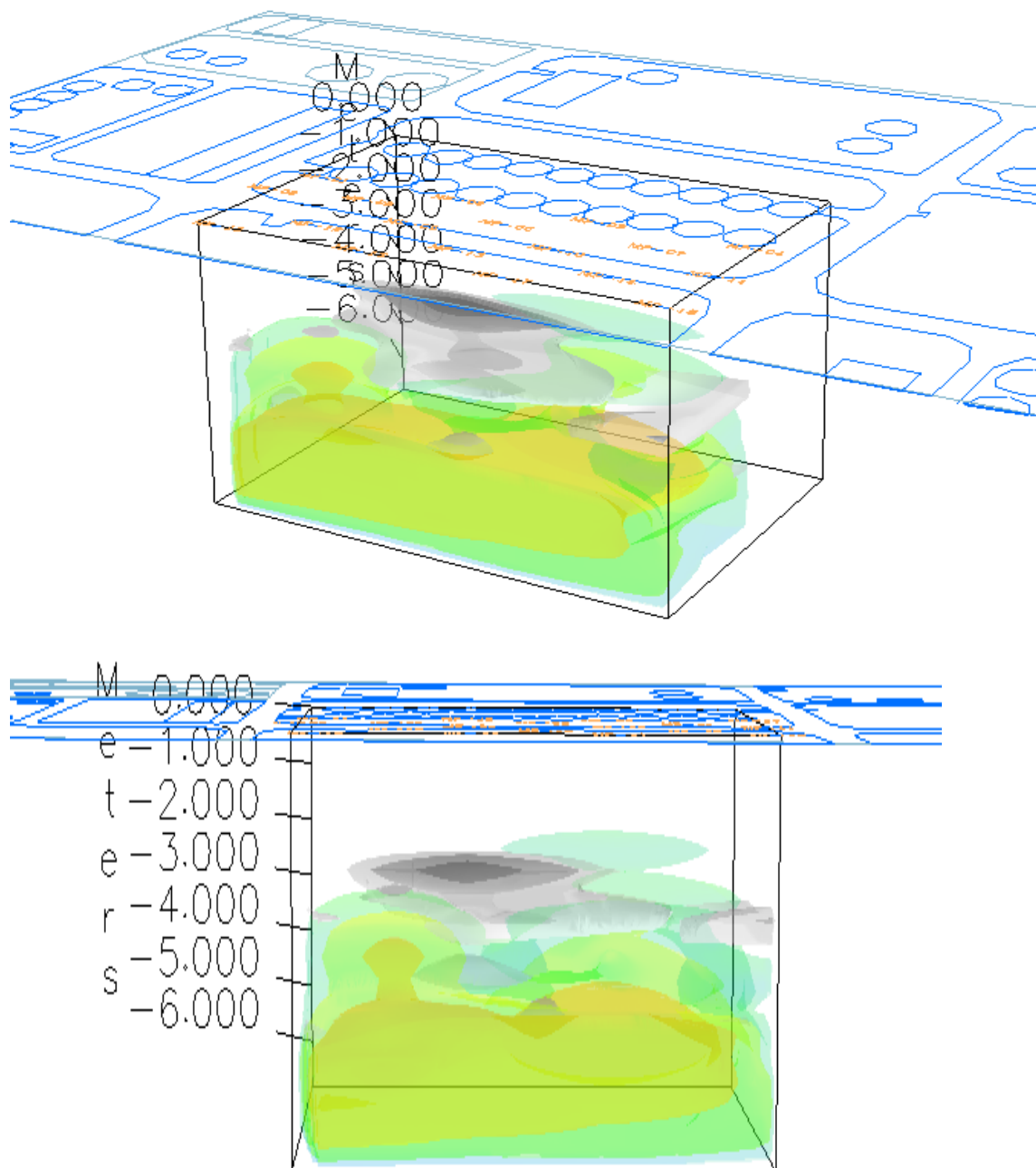


圖 4-31 試驗場址污染團與地質分布相關性比較

4.7.3 污染物質螢光特徵與污染分布比較

由於薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe, MIP)現地檢測結果只能提供污染物質分布位置與污染程度之高低情形，目前尚無法像雷射誘發螢光系統(Ultra Violet Optical Screen Tool-Laser Induced Fluorescence, UVOST-LIF)可藉由特殊之螢光波長比例變化形成特定比值之螢光特徵圖譜，因此對於提供現地即時污染種類辨識尚無法應用，在本模場試驗將應用紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)調查結果所提供之污染成分反映出的螢光特徵圖譜進行相關資料比對，在 18 個測試點中除原先所區分出 3 個明顯污染區螢光圖譜特徵外，另外的測點又可區分成 2 個混合狀態的特徵分區(如圖 4-32)，將 5 個特徵群與場址地理相關位置分布做進一步歸納(如圖 4-33)，亦呈現出與先前 4.2 章節中三維資料解析出之污染團分布之趨勢相同，唯藉由螢光特徵圖譜的特性解析下可更清晰比對出場址內不同污染來源區分(如測點群 LE1、LF5、LF6、LF9、LF10；測點群 LF12、LF16、LF17；測點群 LF3、LF7)與污染物混合型態區分(如測點群 LF13、LF18、LF14、LF15；測點群 LF4、LF8)在場址內分布位置的情形，由此區分特性將可進一步協助後續針對追蹤可疑之洩漏來源提供另一佐證參考資訊。

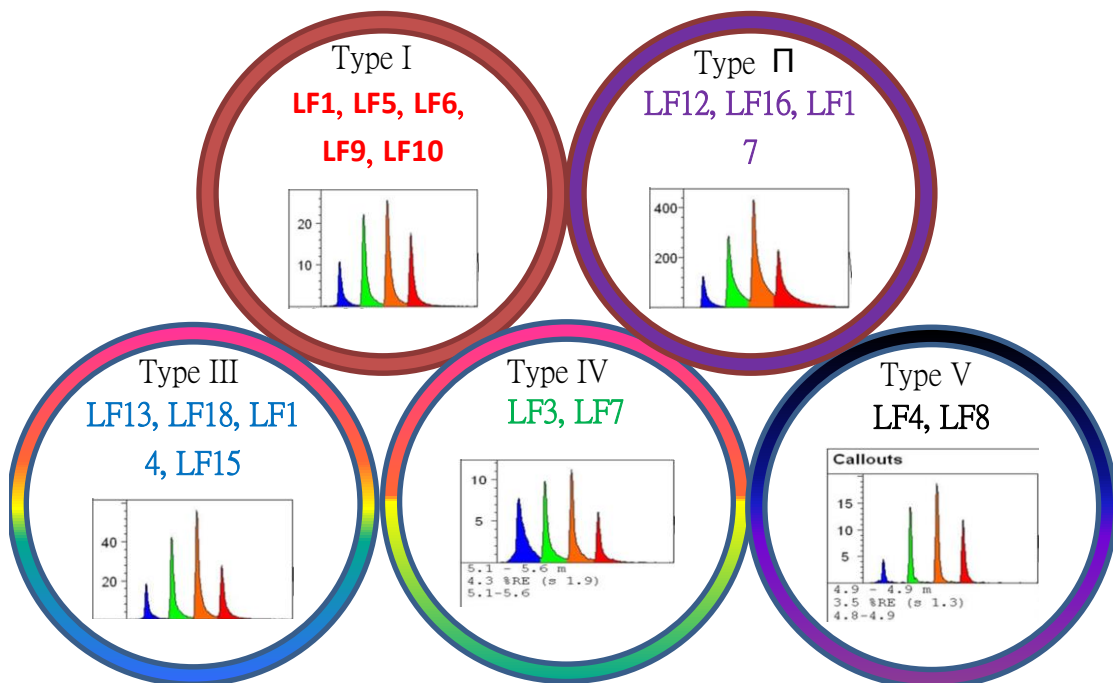


圖 4-32 試驗場址雷射誘發螢光系統調查結果測點特徵歸納

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

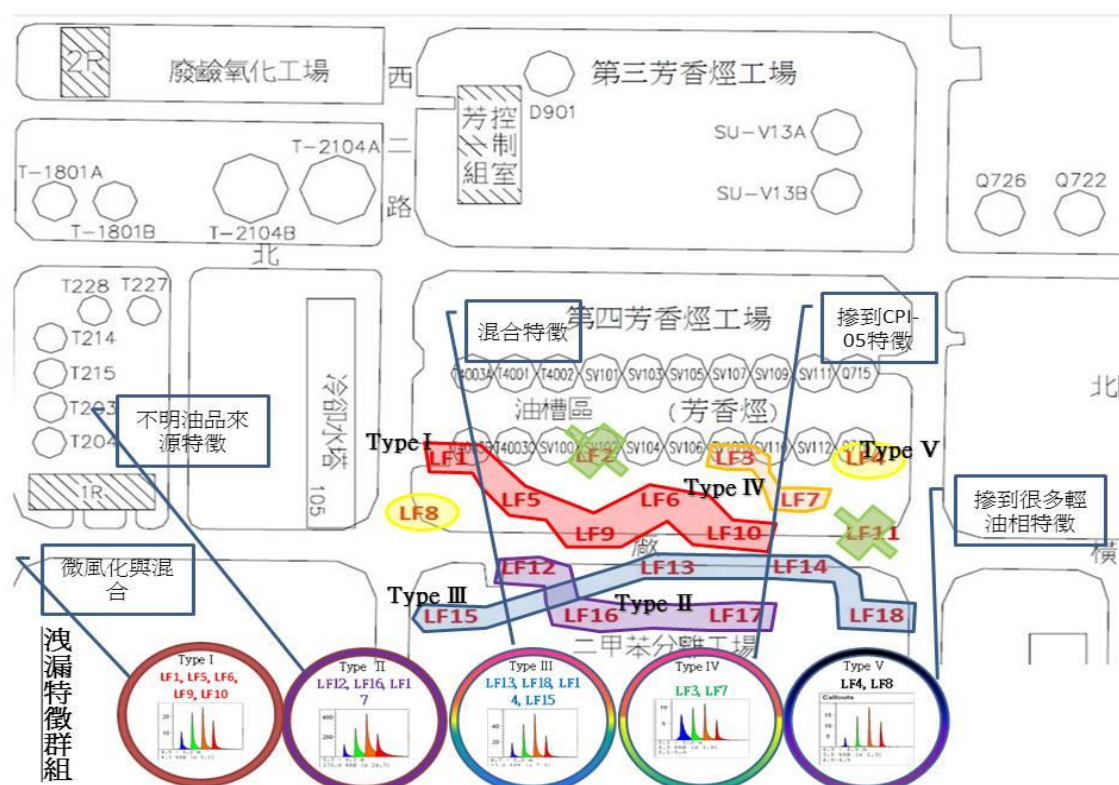


圖 4-33 試驗場址調查點螢光圖譜特徵與場址位置相關性特性分區

4.7.4 現地螢光特徵辨識與樣品分析結果比較

由紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)調查結果各測點的螢光特徵圖譜所呈現的污染物特徵，經比對歸納後可將試驗場址中現存之污染源區分成約 5 個污染特性區，其中包含 3 個疑似不同污染來源與 2 個混合區域特徵，後續針對這些污染特性區進行土壤與地下水環境介質取樣作業，取樣測點為 LF3、LF5、LF17、LF6、LF9、LF12 等 6 個，分析項目分別為揮發性有機化合物(VOCs)、半揮發性有機化合物(SVOCs)、總石油碳氫化合物(TPH)等相關性關切污染物成分，在樣品分析結果由於揮發性有機化合物(VOCs)與半揮發性有機化合物(SVOCs)中指標性成分通常只是油品類污染物中的部分成分而難以進行油品洩漏種類的比對辨識，因此其所得結果僅用來參考特定污染成分於環境中污染的風險嚴重程度，而在總石油碳氫化合物(TPH)的樣品分析結果方面則可由化合物質於分離管柱層析後所呈現之滯留時間(Retention time, RT)層析圖進一步了解污染油品的歸類屬性，市售油品在固定條件層析方法(GC-FID)的滯留時間(RT)如圖 4-34 中所示，一般輕質類油品(高揮發性)如汽油滯留時間較短其次為中質類油品(低度揮發性)屬性如柴油，而航空燃油類則介於兩者之間，在屬較重質類(不易揮發性)屬性油品方面如低硫燃

油、機油等後續則會依序出現，由油品分析 GC-FID 氣相層析圖的滯留時間(RT)可看出油品中部分成份的重疊性現象，因此現行以碳素(Cn)滯留時間(RT)分布範圍來辨識油品屬性在混合型油品污染樣品就常會出現誤判之情形發生，但若以層析後混合物主要峰值群出現的滯留時間(RT)範圍來辨識則初步可辨識出受何種類型油品污染的屬性。另外在紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)中主要針對油品中部份成分比例變化組成的檢測方式，則呈現出特有之螢光波長比例特徵圖來分辨油品屬性，在計畫中乃藉由兩種不同檢測分析結果進行比較來了解針對相同的檢測標的物是否具有相同之趨勢性情況以進一步釐清相關檢測數據的不確定性。

從各測點 LF3、LF5、LF17、LF6、LF9、LF12 等 6 個土壤樣品經 GC-FID 分析後所得之氣相層析圖譜(TPH-G(表 4-10)與 TPH-D(表 4-11))來看，測點 LF5、LF9 的總石油碳氫化合物(TPH)的分佈有較相同之屬性；測點 LF3、LF6 的總石油碳氫化合物(TPH)的分佈屬性接近；另外的 LF17、LF12 的總石油碳氫化合物(TPH)的分佈也有雷同之處，綜合這 6 個土壤樣品分析結果其總石油碳氫化合物(TPH)的圖譜滯留時間(RT)分佈特性比較 4.2 章節紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)之檢測結果，污染物組成都呈現 3 個特徵屬性群的趨勢，在不同的兩種檢測分析方法皆呈現輕質較多類屬油品污染(測點 LF5、LF9)、輕質混合中質類屬油品污染(測點 LF3、LF6)、與輕至中重質油品污染(測點 LF17、LF12)之現象，其中略有差異之處為測點 LF17、LF12 之分析結果，主要因為在紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)中較輕質類油品之螢光特徵會受到較重質油品螢光特徵的覆蓋變因，也因此其數值結果就較難以辨識出含輕質類屬之油品污染成份存在。

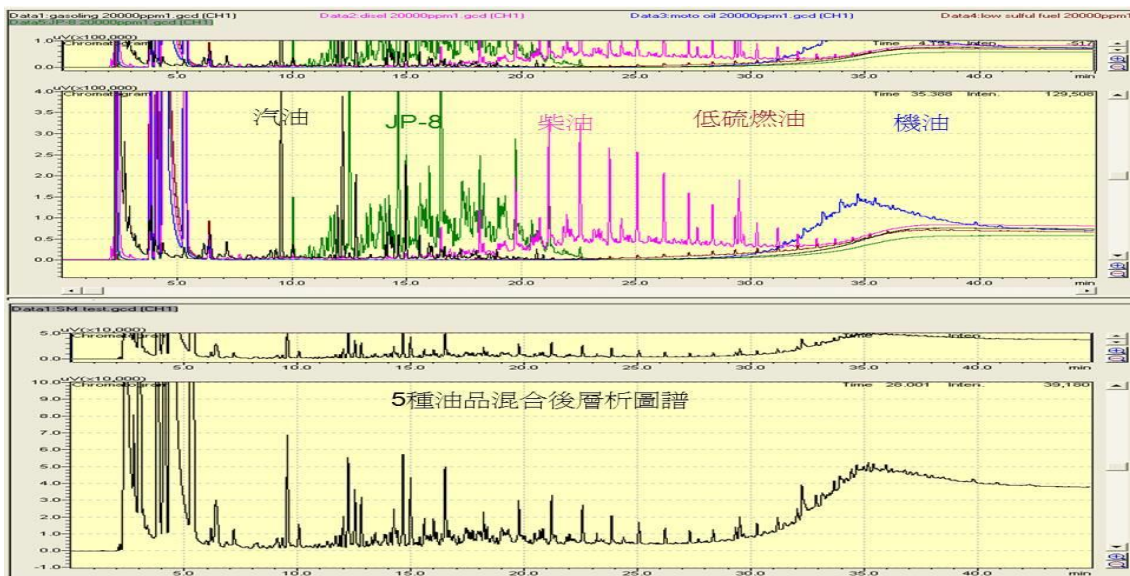


圖 4-34 測試配製不同類型油品混合與個別測試對比之 GC-FID 圖譜範例

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

表 4-3 試驗場址測試點取樣分析土壤中 TPH-G 分析圖譜

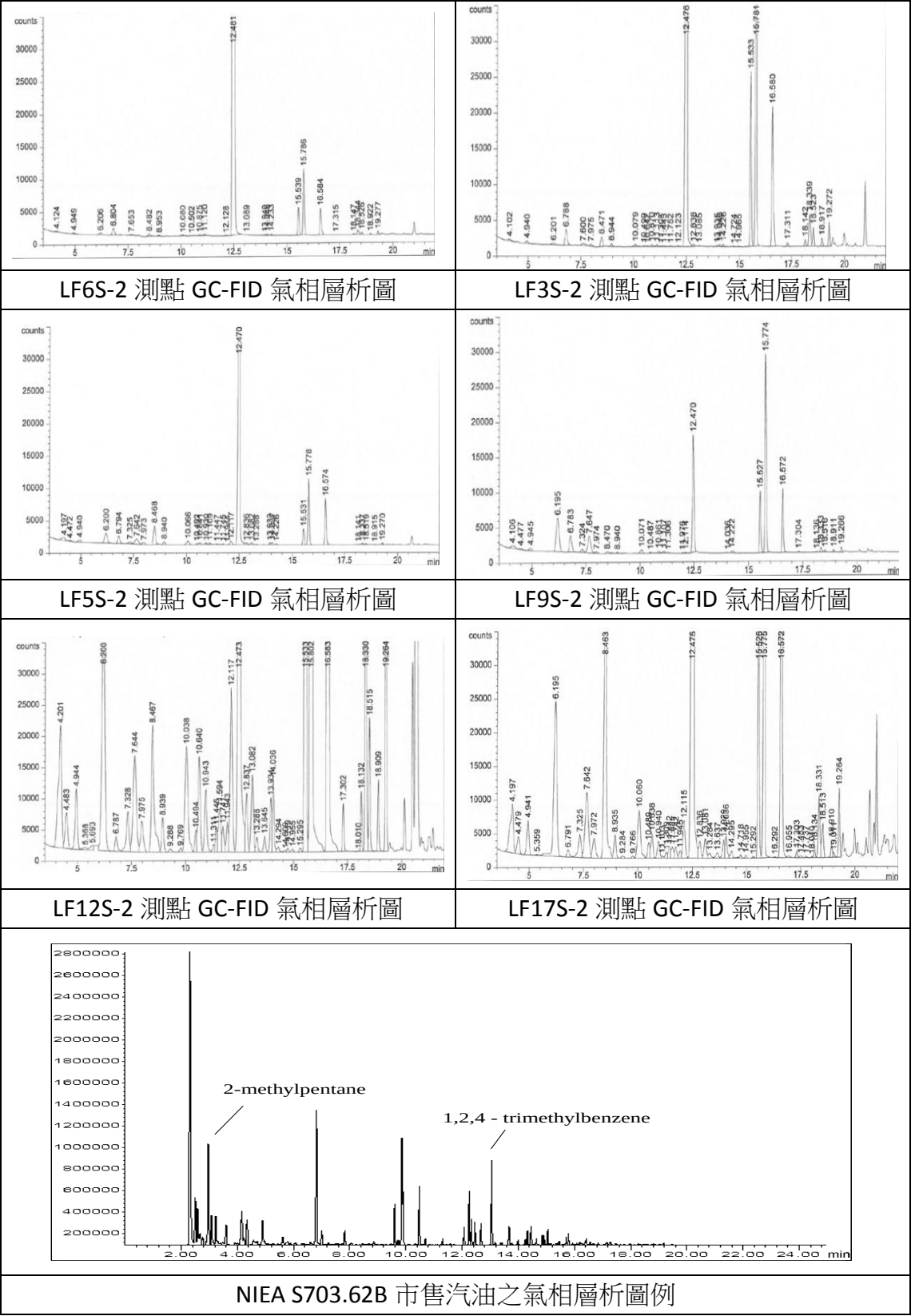
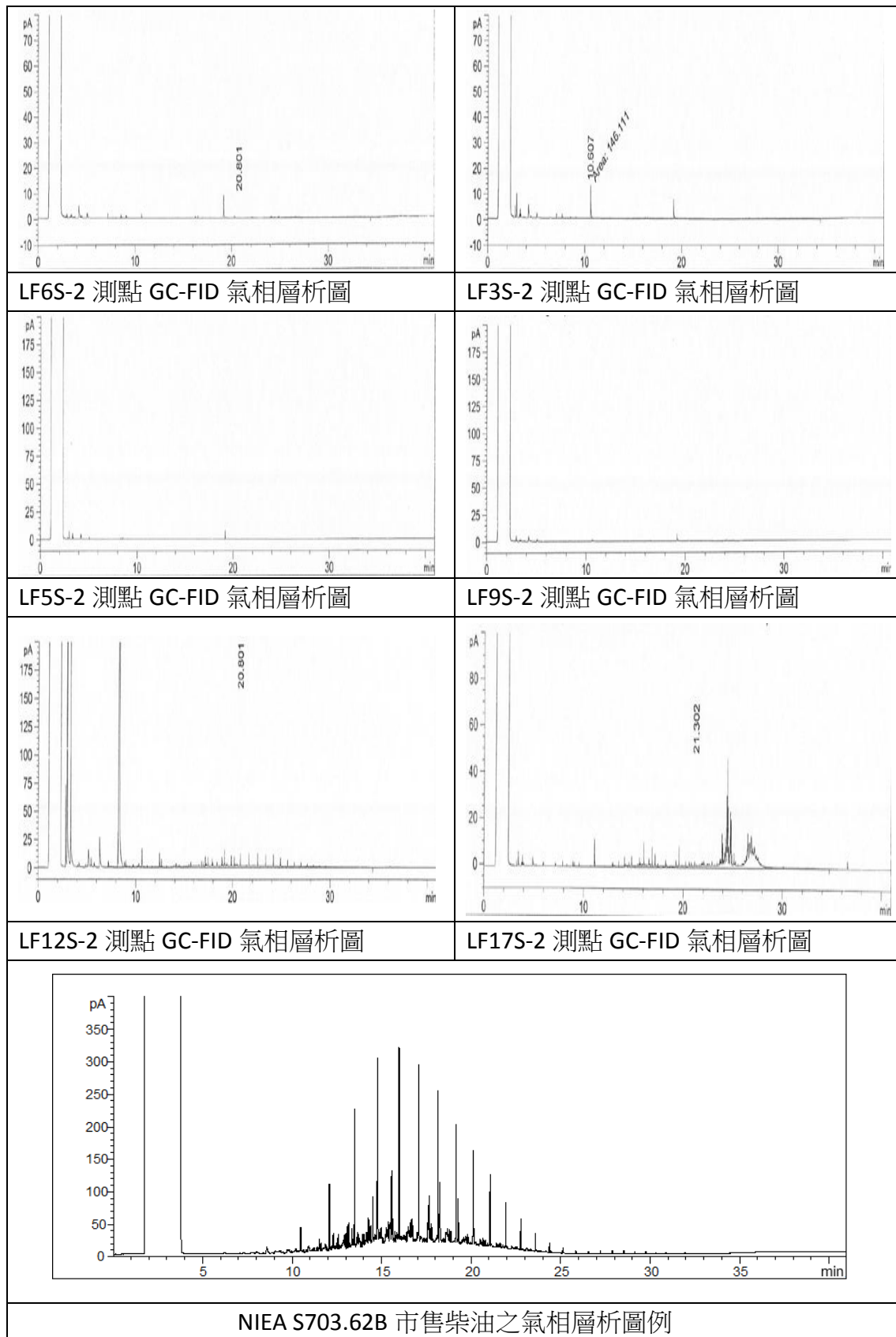


表 4-1 試驗場址測試點取樣分析土壤中 TPH-D 分析圖譜



4.7.5 試驗模場漏源追溯

藉由試驗場址運用紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF) 與薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe, MIP)雙系統現地檢測結果，再與一階環境場址評估作業結果進行相關資料交叉比對與查核，從計畫初始由紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)場址現地調查所得之結果由污染團高濃度分布情形與高濃度區呈現之螢光特徵圖譜類型(4.2 章節)，計畫之模場調查場址內污染來源初步推測應有三個來源，從試驗場址所在地理位置地緣關係(4.1.9 章節)來看可能來源推估有試驗場址旁油槽區、場址內的油水分離池(CPI-05)、試驗場址北方整治中場址與第二分離工場等四個可能來源，後續經薄膜介面探測器系統(MIP)調查結果其污染團的分布狀態呈現出試驗模場內油水分離池有洩漏擴散之情形(4.3 章節)；在蒐集試驗模場旁相關之背景物料進行雷射誘發螢光測試方面，測試結果如 4.6 章節各背景原物料雷射誘發螢光特徵圖譜，進一步比對結果呈現其中之 Sulfolane(tetramethylene sulfone 環丁砜又名四氫噻吩-1, 1-二氧化物)物料螢光圖譜特徵與模場現地部分區域(4.7.3 章節)測得之污染物螢光圖譜特徵近似，另一現地污染螢光圖譜特徵(測點 LF12、LF16、LF17)則無法在試驗場址周遭所蒐集到的背景物料中發現相關的關聯性。

後續由一階環境場址評估作業結果(4.1 章節)進行歷史資料與擴大試驗場址附近廠區內曾發生相關洩漏事件的資料彙整比對(如圖 4-35 所示)，在試驗模場北方的第三芳香烴工場區曾有發生輸送 Sulfolane 溶劑管線與三輕組 CPI 洩漏的事件，第四芳香烴工場管線也發生管線線漏事件而洩漏物質為苯、甲苯、二甲苯，第四芳香烴工場旁的油槽區的 SV102、SV108、SV104 與 SV106 也有發生疑似苯與甲苯物質地洩漏，距場址較遠的東方位置則有 LY-101、LY109 等油槽的洩漏事件洩漏物質為重石油腦與製汽油，場址東南方位也發生過油水分離設施 CPI-T09 與 CPI-T03 的洩漏事件。由廠區歷史地下水流向(ESA Phase I)調查與此次試驗模場場址地下水流向(4.4 章節)調查結果推斷與此次模場試驗場址較有相關影響性的洩漏事件，主要有第三芳香烴工場區、第四芳香烴工場區、第四芳香烴工場旁的油槽區、三輕組 CPI 等發生歷史洩漏之事件與現行調查結果所得的試驗模場中測得污染分布情形有著極高度的關聯性。

進一步配合由蒐集試驗場址周遭生產工場、輸儲設施、地下設施等存放之原物料，所進行紫外光學雷射誘發螢光系統特徵圖譜背景資料(4.6 章節)與試驗模場現地紫外光學雷射誘發螢光系統即時偵測所得洩漏污染物螢光特徵圖譜進行交叉比對(如圖 4-36 所示)，試驗場址之西北方向污染來源其特徵屬性接近第三芳香烴

工場區曾發生洩漏之 Sulfolane 溶劑特徵，在試驗場址東北方向偵測之污染物特徵雖接近 Sulfolane 溶劑特徵但又呈現參雜了 2A 進料與 CPI-05 之物料特徵屬性，再加上 MIP 結果之汙染流布情形，推斷該位置之洩漏特徵為 Sulfolane 溶劑特徵與 CPI-05 存放物質混合後所形成之污染物特徵，而在試驗場址中間部分由圖譜不同波段的變化比例來看雖保有 Sulfolane 溶劑部分特徵，但似乎參雜了其他物質成分而造成新的混合區污染特徵，另外在試驗場址南方方位靠近廠區第二分離工場邊界所偵測到的污染物質，直接與試驗場址周遭蒐集到的相關原物料建置的螢光特徵圖譜比對，發現該位置所測得之污染特徵呈現與試驗場址旁可能之潛在污染源及廠區之歷史洩漏事件無直接之相關關聯性，需進一步補充追查才可能釐清為何會存在此一污染特徵物質，由先前計畫針對國內油品運用紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)所建置之石化油品類雷射誘發螢光特徵圖譜進行比對，可初步辨識出不明污染物質油品屬性接近中質類油品的特質，後續從該區域土壤採樣分析結果在總石油碳氫化合物(TPH)的氣相層析圖譜(4.4.7 章節)可看出除輕質油類成分外，亦包含了中質類油品成分與中質偏重質之成分存在，此樣品分析呈現之結果與紫外光學雷射誘發螢光系統現地解析結果污染成分屬性特性趨勢接近。

擴大搜尋試驗場址所在之廠區中所有製程特性，由廠區製程流程圖中(圖 4-37 所示)顯示在廠區製程進料中存在有中質類石化油品屬性原料(目前廠區製程於 2013 年已更新)，從一階環境場址評估作業現地訪查中得知除製程中有使用到中質類屬性石化油品外，廠區內之前亦曾使用中質類屬性石化油品進行加熱燃燒的用途上，

由於在計畫前期與後期環境場址評估作業中並未蒐集到相關試驗場址所在之廠區中曾有過發生中質類屬性石化油品相關設施有發生洩漏狀況的事件，因此針對此一疑問點將交由提供試驗場址之廠方單位進行後續的調查作業。

綜合了整個模場試驗結果資料交叉比對與查核後，在此次試驗模場中所測得的污染物質其來源大致可分為 3 個，主要包含廠區內洩漏之 Sulfolane 污染物隨地下水流的傳輸擴散、試驗場址內地下油水分離設施(CPI-05)與第二分離工場附近的不明洩漏源(待進一步確認)，另油槽區發現之苯、甲苯、二甲苯洩漏事件，其洩漏徵照由於屬輕質油品特性加上現地 AS/SVE 的改善設施干擾下在本次調查以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)的結果並不明確(疑似)，但在薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe, MIP)中與結合少量土壤及地下水介質取樣分析結果則能補足針對此一試驗模場受污染特性調查結果缺失之處，建構出更完整之場址空間污染概念模型。

運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

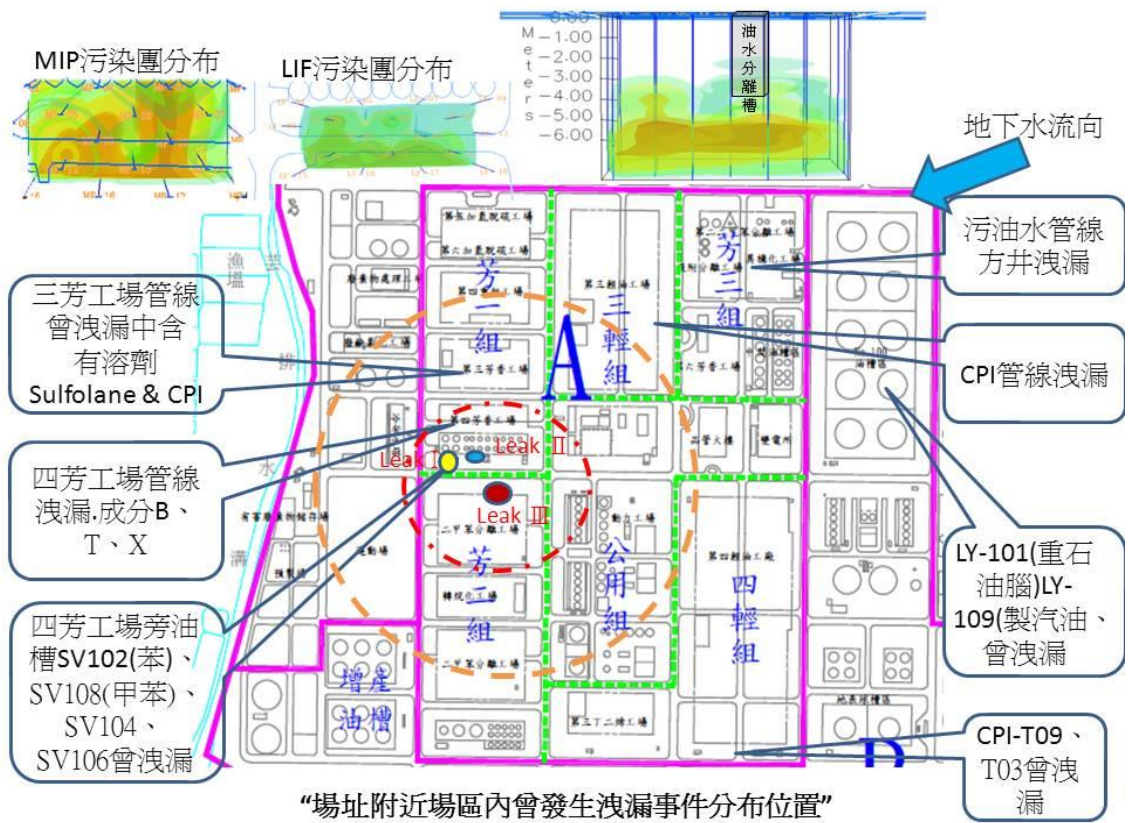
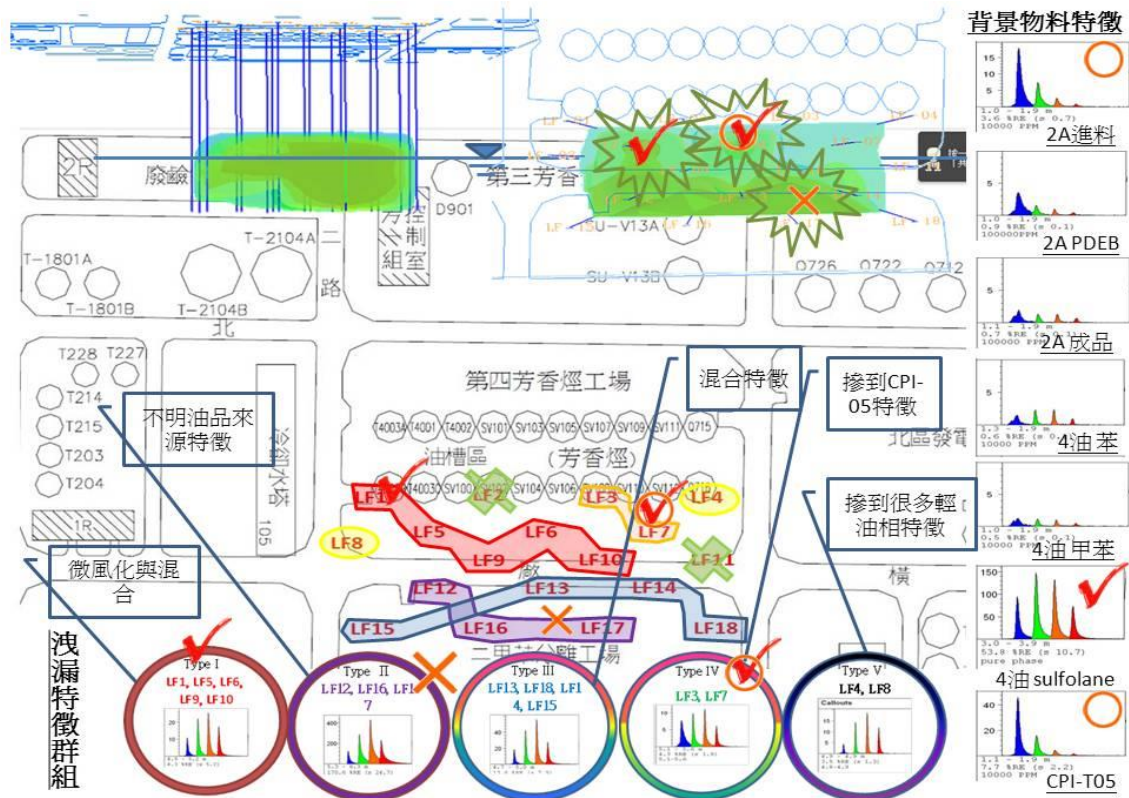


圖 4-35 試驗場址所在廠區附近曾發生洩漏污染事件位置示意圖



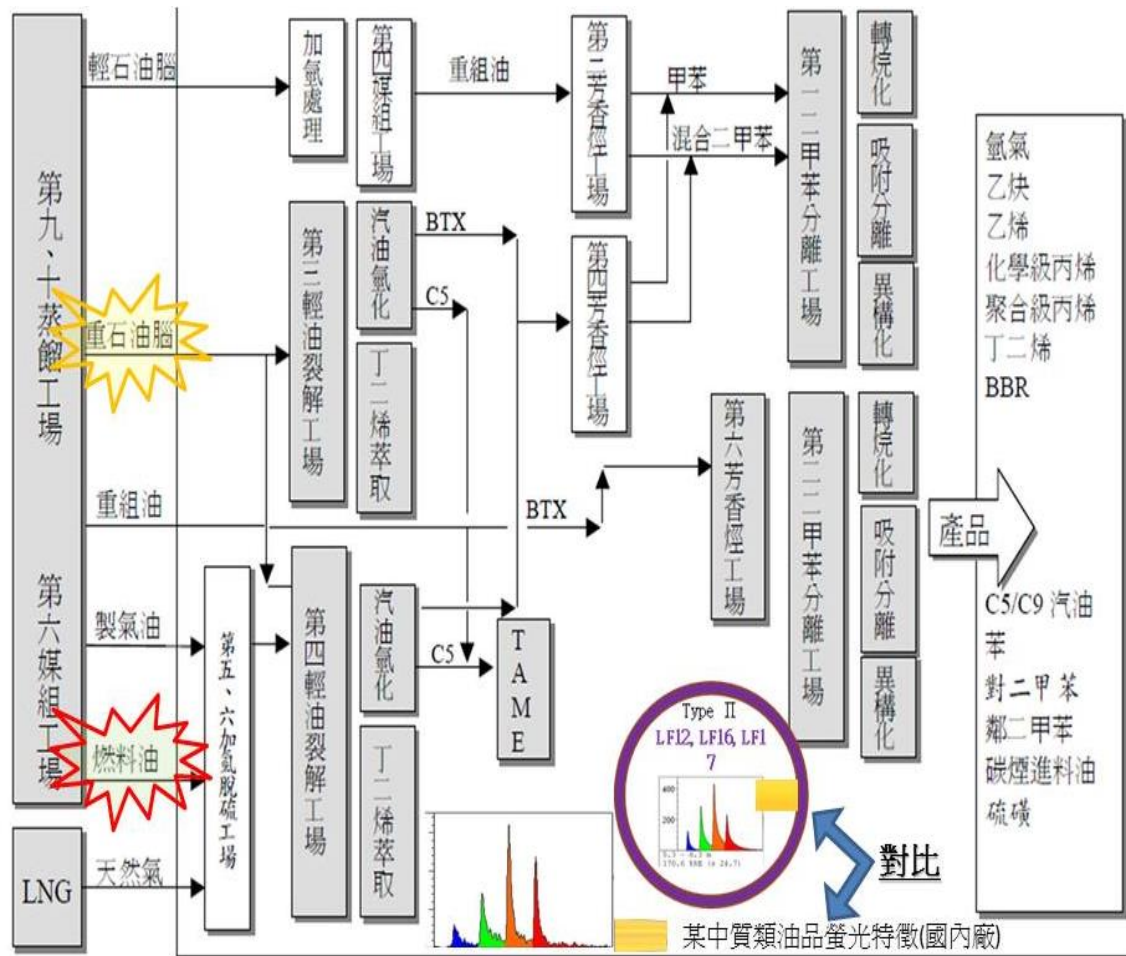


圖 4-37 試驗場址廠區製程流程圖(舊製程.2013 已更新)

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 針對石油化學洩漏污染之場址污染特徵調查與場址空間污染概念模型建構，就本試驗模場經驗而言，不同方法的組合運用相對重要，尤其在執行一階環境場址評估調查(ESA Phase I)時資訊完整度更顯重要性，可提供於二階環境場址評估(ESA Phase II)時的調查方法選擇參考依循，適時採用適當方法組合以減少場址調查資料缺口(data gap)，並強化空間污染概念模型(CSM)結果的可靠性，對於後續漏源追溯與改善作業將有非常大的助益。
2. 此次運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識方面，模場試驗在紫外光學雷射誘發螢光系統檢測成果，由測得之污染物螢光特徵屬性經彙整歸類後大致分為 5 個污染分布特徵群，並藉由環境場址評估作業((Environmental Site Assessment, ESA)歸納出 3 個可能污染來源區，包含廠區內 Sulfolane 洩漏之事件、試驗場址內油水分離設施、第二分離工場不明洩漏來源，其餘 2 個污染特徵屬性為相關污染事件(含油槽區洩漏事件)造成之污染物混合區。
3. 從運用紫外光學雷射誘發螢光系統進行受石化油品污染場址調查來看，藉由洩漏污染物質雷射誘發螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況推估場址受污染來源是可行的方式，尤其在多重洩漏源情形下可以快速釐清場址污染分布特徵，但在現場相關不明條件干擾下必須結合其他調查方法與系統優點，才能減少調查資料缺口(data gap)與所得結果的不確定性以得到快速又具準確性高的場址污染調查作業成果。

5.2 建議

1. 就本模場試驗計畫目標以提供現地檢測即時辨識與確認地表下非屬溶解相連續分布與成分組成特徵並進一步進行場址內洩漏源追溯是可行的。
2. 由於污染物類型會影響偵測系統的偵測結果，因為具選擇性問題所以對於場址檢測系統的選擇使用還是在於一階環境場址評估作業時需清楚場址背景特性，以考量該使用單系統還是複合式方式作為場址調查選擇。
3. 對於一般使用採樣分析結果應用於受污染場址的污染團分布與提供洩漏源追溯(特針對多洩漏來源狀況)提供之訊息是有限度的，所以針對場址污染特徵調查往往存在較大資料缺口(data gap)，但對於在協助場址空間污染特徵調查系統方面則有較佳之資料應用性，並可提升調查結果的靠性。

4. 計畫後續執行工作項目主要為調查結果中不明疑似洩漏來源部分，可建議廠商針對此部分由調查結果進一步探討出為何會有此不明來源物質存在於場址之中的原因，另針對已知洩漏來源部分可適時的調整現有的整治改善設施，並利用此次調查成果作為設施調整後改善成效的背景資料。

參考文獻

行政院環境保護署，油品类儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊，95年9月

台灣中油股份有限公司，三輕更新計畫環境影響說明書林園石化廠地下水專題報告，97年10月

NIEA W106.50C, 土壤及地下水直接貫入採樣及篩選測試方法，97年5月

T.G.M. Freegarde and G. Hancock , A Guide to Laser-Induced Fluorescence Diagnostics in Plasmas , (1997)

ULF ÖSTERBERG , Signal Processing in Optical Fibers , (2003)

Alan G. Ryder , Thomas J. Glynn , and Martin Feely , Influence of chemical composition on the fluorescence lifetimes of crude petroleum oils.

P. D. Meyer, G. W. Gee, Information on Hydrologic Conceptual Models, Parameters, Uncertainty Analysis, and Data Sources for Dose Assessments at Decommissioning Sites.(1999)

Dr. Hans-Wilhelm Trissl , University of Osnabrück , Theory of Fluorescence Induction

National Groundwater & Contaminated Land Centre report NC/99/38/2, Guide to Good Practice for the Development of Conceptual Models and the Selection and Application of Mathematical Models of Contaminant Transport Processes in the Subsurface.

R.H. Schultze, M. Lemke and H.-G. Löhmansröben , Laser-induced fluorescence (LIF) spectroscopy for the in situ analysis of petroleum product-contaminated soils.

James J. Butler, Jr., John M. Healey, G. Wesley McCall, Elizabeth J. Garnett, and Steven P. Loheide, II, Hydraulic Tests With Direct Push Equipment.

*Jonathan E. Kenny Tufts University, Chemistry Department Medford, MA, 02155 ,
LASER FLUORESCENCE EEM PROBE FOR CONE PENETROMETER POLLUTION
ANALYSIS*

Grace Bujewski Brian Rutherford , Sandia National Laboratories , The Rapid Optical Screening Tool (ROST)Laser-Induced Fluorescence (LIF) System for Screening of Petroleum Hydrocarbons in Subsurface Soils

L. V. MARKOVA, N.K.MYSHKIN, C.V. OSSIA, H. KONG , Fluorescence Sensor for Characterization of Hydraulic Oil Degradation , (2007)

Calvin D. Miller and Deanna S. Durnford , Considering Hysteresis in LNAPL Lens Geometry, Mobility, and Well Thicknesses.

Wisconsin Department of Natural Resources, Understanding Chlorinated Hydrocarbon Behavior in Groundwater: Investigation, Assessment and Limitations of Monitored Natural Attenuation.(2003)

*E. Hegazi *, A. Hamdan , Estimation of crude oil grade using time-resolved fluorescence spectra , (October 2001)*

Juliana Steffens & Eduardo Landulfo & Lilia Coronato Courrol & Roberto Guardani , Application of Fluorescence to the Study of Crude Petroleum , (December 2009)

Alan G. Ryder , Thomas J. Glynn a, and Martin Feely . Influence of chemical composition on the fluorescence lifetimes of crude petroleum oils.

Charles J. Newell,Steven D. Acree, Randall R. Ross, and Scott G. Huling, Light Nonaqueous Phase Liquids.

Tetra Tech EM Inc. , Chicago, Illinois , Field Measurement Technologies for Total Petroleum Hydrocarbons in Soil , (June 2000)

The Interstate Technology & Regulatory Council LNAPLs Team, Evaluating Natural Source Zone Depletion at Sites with LNAPL.(2009)

C.J. Newell and J.A. Connor, Groundwater Services, Inc. CHARACTERISTICS OF DISSOLVED PETROLEUM HYDROCARBON PLUMES.(1998)

W. Y. HUANG¹,C. M. KAO, W. C. CHO, Y.Y. Li, G. L. LIN, Using Triad Approach to

Manage Uncertain Decisions for a Chlorinated Ethene Contaminated Site in Taiwan.

USEPA, Sensor Technologies Used During Site Remediation Activities –Selected Experiences.(2005)

USEPA, Demonstrations of Method Applicability under a Triad Approach for Site Assessment and Cleanup — Technology Bulletin(2008)

USEPA, Groundwater Sampling and Monitoring with Direct Push Technologies(2005)

The Interstate Technology & Regulatory Council Sampling, Characterization and Monitoring Team, Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management.(2003)

New Jersey Department of Environmental Protection, Technical Guidance for Site Investigation of Soil, Remedial Investigation of Soil, and Remedial Action Verification Sampling for Soil.(2012)

Stephen A. Bartlett, Gary A. Robbins, PhD, J. Douglas Mandrick, Michael Barcelona, PhD, Wes McCall, Mark Kram, PhD, COMPARISON OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY DETERMINATIONS IN DIRECT PUSH AND CONVENTIONAL WELLS.(2004)

Kira P. Lynch, M.S. Evolving Conceptual Site Models (CSMs) in Real-time for Cost Effective Projects.(2004)

USEPA, Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model.(2011)

Christine Thomas and Trish Miller, Conceptual Site Models – Not Just a Pretty Picture.(2012)