

行政院環境保護署

103 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

封隔型雙負壓浮油回收系統於油品洩漏場址的運用

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：102年11月25日起至

103年11月24日

中 華 民 國 103 年 11 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

計畫成果自評表(期末報告)

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：

依據計畫期程，實際計畫執行進度符合原先規劃進度。

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 1 篇； ☒未發表之文稿 1 篇； ☒撰寫中 1 篇； ☐無

專利：☐已獲得 件； ☒申請中 2 件； ☐無

技轉：☐已技轉； ☐洽談中； ☐無

其他：「浮油回收裝置及浮油回收設備」專利產品榮獲「2014 年台北國際發明暨技術交易展」-發明競賽銀牌獎

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

此次模場試驗結果呈現出新開發的封隔雙真空式浮油回收系統，無論在操作效能與使用成果效益上均優於傳統浮油回收系統，預期未來實場運用上應能增進受油品類污染場址的改善成效，與提升系統應用效能，並進一步降低後續或相關場址的改善作業花費。

行政院環境保護署計畫成果中英文摘要

〔期末報告修正稿〕

- 一、中文計畫名稱：封隔型雙負壓浮油回收系統於油品洩漏場址的運用
- 二、英文計畫名稱：The application of dual-vacuum packer-type free product recovery system at a site contaminated with oil leakage
- 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102 年11 月25 日
- 七、執行結束時間：民國103 年11 月24 日
- 八、報告完成時間：民國103 年10 月23 日
- 九、報告總頁數：88 頁(本文)
- 十、使用語文：中文
- 十一、報告電子檔名稱：封隔型雙負壓浮油回收系統的運用
- 十二、報告電子檔格式：WORD
- 十三、中文摘要關鍵詞：石油化學、洩漏、浮油、回收
- 十四、英文摘要關鍵詞：petrochemical, leakage, free product, recovery
- 十五、中文摘要：

環保署目前已完成七期全國加油站及大型儲槽之土壤及地下水污染調查工作，陸續發現石油化學產品造成地表下環境的污染現象。石化產品為疏水性(hydrophobic)物質，密度小於水的疏水性物質一般稱為輕質非水相液體(Light Non Aqueous Phase Liquid, LNAPL)，當 LNAPLs 因洩漏進入土壤介質，由於土壤的吸附作用會將油品吸附於介質中，部分揮發性成分會透過揮發作用在土壤空隙中傳輸移動，若 LNAPLs 入滲量超過土壤之吸附容量時，這些 LNAPLs 會在地下水液面形成所謂的浮油(free product)相。在油品污染類型場址整治作業中最優先採行緊急應變與污染調查作業，而須先執行污染源阻斷與瞭解污染分布情況，否則貿然進行整治作業可能增加整治費用甚或徒然無功，最嚴重是不當整治工法可能擴大污染範圍造成更大的潛在危害與損失。

本研究計畫主要是針對發生油品洩漏的污染場址，在進行整治作業前的緊急應變與前置調查作業，應用雷射激發螢光(LIF)系統先行於洩漏場址中

進行地表下油相(NAPL)污染團分布調查與浮油相(Free product)移動路徑確認，接續於浮油相移動路徑上設置攔截點進行浮油相回收作業，防止浮油相污染團的擴大，最後再以 LIF 系統偵測浮油相污染團的分布以驗證執行成效。為瞭解設置之浮油回收系統效能、操作條件限制及整治方法之執行時機，本計畫導入由研究團隊開發之新型式井中浮油回收系統(Free product recovery system)：封隔型雙負壓浮油相回收系統(dual-vacuum packer type recovery system)，系統主要功能特點為以定置空間(Fixed Space)概念進行抽汲系統設置，使系統作功集中於目標污染物回收，減少不必要的虛功浪費以節省操作成本，另一方面藉由親油性填充管提高油水分離效能，降低伴隨之地下水抽取量，減少因浮油回收作業所產生之廢水處理量，以符合現行推行節能環保與效能提高目標需求，提供相關污染場址進行浮油回收應變作業的另一種選擇。

封隔型雙負壓浮油相回收系統安裝於現場經約 5 個多月的模場試驗測試，在系統作功效能提升、浮油蒐集效能、廢水減量效能與操作成本效能之比較上，相關監測數據呈現本研究新開發的封隔雙真空式浮油回收系統皆優於傳統舊式的其他真空式浮油回收系統。

十六、英文摘要：

Taiwan EPA has implemented soil and groundwater investigation at gas stations and underground storage tanks for 7 terms. The leakage of petrochemical products was found liable to contaminate subsurface environments. Petrochemical products are generally hydrophobic and lighter than water, and they are named as light non aqueous phase liquids (LNAPLs). When the leakage of LNAPLs occurred, some of them might be sorbed to soil medium or volatilize into the vadose zone. If the quantity of NAPL leakages exceeded the adsorption capacity of soil media, the residual NAPLs would reach groundwater table and form a layer of free products. For the sites contaminated with petrochemical products, the first priority works are to take emergency actions to cut off leaking sources and to investigate the spreading of contamination areas. The planning of remediation works might be in vane or greatly swell the expenses without the understandings of contamination details. The improper remediation work is liable to cause plume spreading and to increase potential health risk.

In this study, one site contaminated with petrochemical products was selected for test. Laser induced fluorescence (LIF) system was employed to detect the transport paths of free products and to investigate the distribution of contaminant plume. In order

to implement emergency action, the recovery system was established on the transport paths of free products for the control of plume spreading. Finally, LIF system was employed again to delineate the distribution of contaminant plume after operating the free-product recovery system for several months. The introduced free-product recovery system was developed by the research team, which is called dual-vacuum packer-type recovery (DVPTR) system. This novel DVPTR system is established at fixed space in the well to allow the maximum recovery of free products and minimum suction of water, which contain a lipophilic packer to increase the efficiency of oil and water separation. This novel DVPTR system was operated in such a way that the waste of energy use and the treatment of wastewater were minimalized due to the reduction of water suction. This showcase is expected to fulfill the objectives of energy saving and remediation efficiency improvement, and this novel DVPTR system is definitively an alternative of free-product recovery during implementing emergency action.

The DVPTR system was installed in field to conduct a pilot test of fuel recovery for more than 5 months. The monitoring results showed that the developed novel DVPTR system is superior to other traditional vacuum-type fuel recovery system on energy efficiency, fuel recovery, wastewater reduction, operation expense.

第一章 前言

環保署目前已完成七期全國加油站及大型儲槽之土壤及地下水污染調查工作，陸續發現石油化學產品造成地表下環境的污染現象。石化工業在台灣工業之中佔有相當重要的比例，而石化工業通常是指「石油化學工業」的簡稱，一般又分為「煉油工業」與「石油化學工業」。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, 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類屬，而煉油工業則是經由一系列化工製程(分餾、裂解、重組等過程)如將原油分離製成油氣、液化石油氣、汽油、輕油(石油腦)、煤油、柴油、燃料油、潤滑油及蒸餘油等各種不同沸點的碳氫化合物油品等。在整個的工業活動之中可能於運送、貯存、煉製過程中產生洩漏或不當排放與一些意外事件而造成環境污染狀況，由於石油化學之相關製品與原物料對於人體有著相當高的潛在危害性，因此當發現有洩漏狀況時便需進行相關的應變控制作為，若情況嚴重者則必須進行場址整治作業以降低環境與人體健康的危害風險。

1.1 計畫由來

土壤及地下水污染問題為近年來環境保護方面的新興議題，由於工業的發展在製造生產過程中原料的不當儲存、製程異常、操作不當、運送意外，以及廢棄物的不當處理處置致使污染地表下土壤層，甚至進入地下含水層而間接或直接影響到環境生物與危害人體健康。隨著經濟的發展腳步，人類對於能源的需求也不斷增加擴大，而石油製品是目前發展中最重要能源來源，另外石油化學產品應用涵蓋了人類的食衣住行各方面的需求，依現階段來說石化能源(Fossil Energy)與石油化學(petrochemistry)相關製成品可以說已跟現代人生活密不可分，然而高度仰賴石化能源所帶來便利的同時，也帶來了各種不同的潛在隱憂。石化污染(petrochemical pollution)對環境之影響除常見的空氣污染、地表水汙染及固體廢棄物污染外，近來在各種工業化與社會化活動中亦陸續被發現對於地表下環境造成相當的環境污染現象。

石油是十分複雜的碳氫化合物的混合物，石油與其所衍生的化合物稱為「石油碳氫化合物」簡稱「烴」，一般組成依其分子結構的不同可分為石蠟烴(paraffin)、烯屬烴(Olefin)、環烷烴(naphthenes)、芳香烴(aromatics)等四類，從地底開採出來的石油須經過數次以上的操作步驟才能成為產品或是原料。這些原料經過幾次加工處理後，會變成成千上萬種附加價值極高的石化產品。原油通常會先在煉油廠內蒸餾、提煉，分成各種油品，部分中間油品會再加以裂解精煉，產生乙烯、丙烯、丁二烯等石油化學基本原料，進而衍生出各種石油化學製品。原油煉製(petroleum refining)主要是先經由蒸餾工場提煉、蒸餾，把原油分離成揮發性不同的成分，原油中的各種烴類具有不同的沸點，利用加熱蒸發和冷凝，把原油分離成沸點在不同範圍內的各種成分所組成的混合物，蒸餾後再以其物理方法進一步分離這些混合物，如汽提、精餾、萃取及吸附等，部分產品則用化學反應方法，如觸媒裂解法或觸媒重組法加以處理。通常原油在經分餾後可得到燃料氣、粗液化石油氣、戊烷、輕石油腦、重石油腦、汽油、煤油、柴油和殘渣油等產品。

石化污染成分通常為揮發性有機物(volatile organic compounds, VOC)，如甲苯、二甲苯、苯等有機溶劑與半揮發性有機物(semi-volatile organic compounds, SVOC)，如部分的多環芳香族碳氫化合物 alkylated naphthalene、phenanthrene、dibenzothiophene、fluorene 及 chrysene，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。於眾多研究中發現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。

石油化學產品一般為疏水性(hydrophobic)物質，當這些疏水性的石油化學產品因洩漏(Leakage)狀況進入到地表下的土壤與地下水環境中成為污染物質，一般稱此物質為非水相液體(Non Aqueous Phase Liquid, NAPL)，依照和水密度的關係可分為兩種類：較水輕者稱為輕質非水相液體(Light Non Aqueous Phase Liquid, LNAPL)，較水重者稱為重質非水相液體(Dense Non Aqueous Phase Liquid, DNAPL)。較常見 LNAPL 多為油品類，諸如汽

油、柴油、燃料油、各類機油，而常見 DNAPL 多為鹵化有機物質，其造成污染者有許多屬於氯化烴類的有機溶劑，包括三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯(Tetrachloroethylene, PCE)等。由於 DNAPL 特性為比水重易隨著重力下沉移動，故往往污染深度較深並具較不易清除狀況。當 NAPLs 因洩漏進入土壤介質中由於吸附作用會將油品吸附於土壤中，部分含揮發性氣體成分會在土壤中的空隙傳播移動，而後續由於重力作用一直滲入致超過土壤之吸附能力時，這些 NAPLs 會持續移動到地下水表面形成浮油，然而在地層中的移動路徑往往受到本身物理性質及區域地質水文條件所控制，由於在自然環境中地層條件常受沈積環境及其組成材料的影響，在空間分佈上形成具有異質性(Heterogeneous)的特性，因此使得監控污染物在地層中的分佈及移動方式產生了一定的困難性。就輕質非水相液體(LNAPL)在地表下移動特性來看，除順著孔隙率較大與孔隙壓較小之地層中向下移動外，當到達地質分布較均質的含水層附近時，由於密度比水輕的特性慢慢地橫向移動會大於縱向移動向量，但由於重力壓力關係部分 LNAPL 物質亦會分布於含水層下方(如圖 1.1)。LNAPL 在井中厚度與地層中自由相深度分布狀況基本上是不相同的情形，由於壓力與密度變化狀況井中浮油液位會低於實際地層中自由相分布區間，另井中浮油厚度亦會造成井內地下水位低於地層中地下水位位置，所以在有存在浮油相的地下水井中量測所得之油水位資料，需經過差異轉換才能推估出地層中實際的自由相與地下水的分布區間。

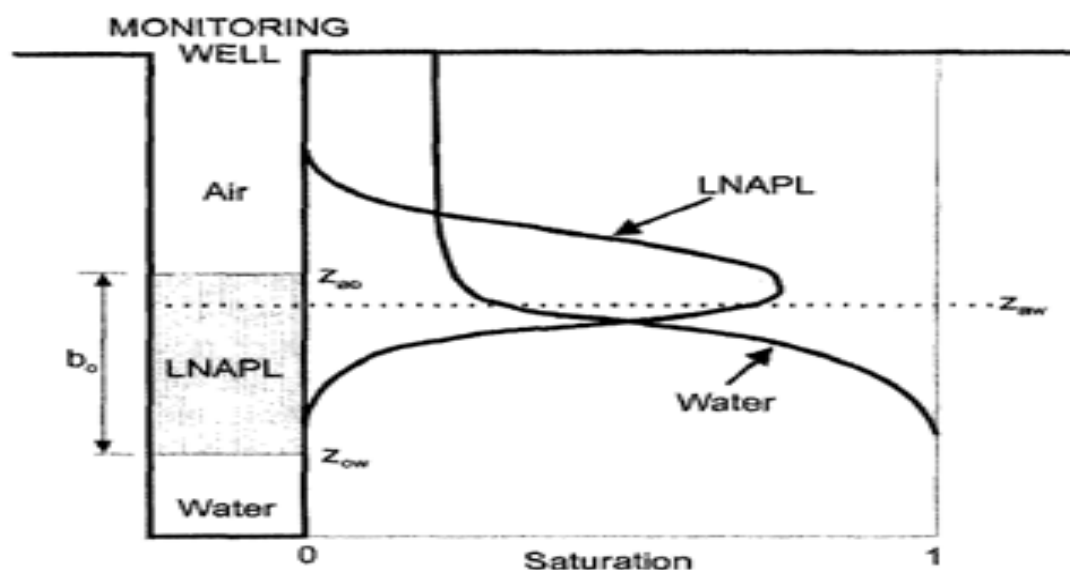


圖 1.1 LNAPL 物質於含水層介面分布曲線與井中油水位變化

油品類污染場址整治技術一般分為現地與離地，常用的整治方法大致有土壤氣體抽除法 (Soil Vapor Extraction)、生物通氣法 (Bioventing)、生物堆法 (Biopiles)、土耕法 (Landfarming)、低溫加熱脫附法 (Low-temperature Thermal Desorption)、空氣注入法 (Air Sparging)、生物曝氣法 (Biosparging)、監控(測)式自然衰減法 (Monitored Natural Attenuation)、現地地下水生物整治法 (In-situ Groundwater Bioremediation)、雙相抽除法 (Dual-phase Extraction)、抽出處理法 (Pump and Treat)、井內氣提法 (In-well Air Stripping)、現地化學氧化法 (In-situ Chemical Oxidation)、界面活性劑沖排法 (Surfactant Flushing)、開挖處理法 (Excavation)、加強好氧生物整治法 (Enhanced Aerobic Bioremediation)、滲透性反應阻牆法 (Permeable Reactive Barrier)、電動力法 (Electrokinetic Remediation)、植物復育法 (Phytoremediation)……等等，但無論選用何種整治方法，污染場址整治作業中整治方法施用並非第一優先選項，而是須先執行整治作業前的前置應變與污染調查作業，否則貿然進行整治作業，可能增加整治費用甚或徒然無功，最嚴重是擴大污染範圍造成更大的潛在危害與損失。

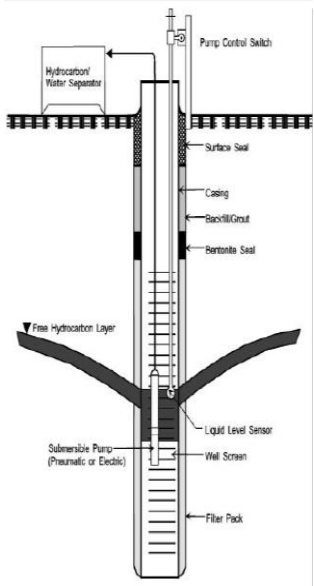
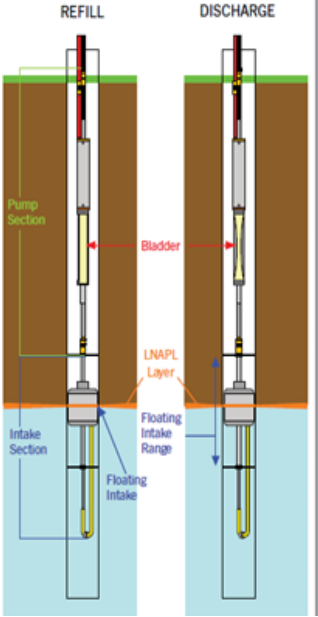
在石化工業類發生洩漏場址中通常於選用與進行整治工作之前應先確認發生油品洩漏之來源是否已阻斷，其次就是防止污染範圍的擴大，然後進行場址基本條件、污染狀況與污染分布調查，再來才是選用適合場址特性的整治方法進行污染改善作業並同時規劃整治成效驗證方法，以便適時了解改善情形便於後續的整治規劃方案調整，方能達成最初設定的整治目標。

本研究計畫主要是針對發生油品洩漏的污染場址，在進行整治作業前的緊急應變與前置調查作業，應用專門針對油品物質之偵測系統先行於洩漏場址中進行地表下非水溶性油相 (NAPL) 污染團分布調查與浮油相 (Free product) 移動路徑確認，接續於浮油相移動路徑上設置攔截點進行浮油相回收作業防止污染團的擴大，最後再以專門針對油品污染物質之偵測系統執行成效驗證，以了解設置之系統所能發揮之效能與相關條件限制及後續執行選擇整治方法時機，計畫中主要導入由團隊所開發之新型式井中浮油回收系統 (Free product recovery system): 封隔型雙負壓浮油相回收系統 (Packer type dual-vacuum recovery system)，此系統主要功能特點為以定置空間 (Fixed Space) 概念進行抽汲系統設置，使系統作功集中於目標污染物回

收，並減少不必要的虛功浪費以節省操作成本，另一方面藉由親油性填充管提高油水分離效能降低伴隨之地下水抽取量，並減少因浮油回收作業所產生之廢水處理量，以符合現行推行節能環保與效能提高目標需求，提供相關污染場址進行場址改善與應變作業的另一種選擇。

目前浮油回收方式大致包含有，以開挖方式加大滲流面積並設置相關地下蒐集設施進行滲出油水蒐集與設置回收井方式再運用不同的方法與設備進行浮油相抽取的方式。其使用之方法大致有自然壓力差重力滲流、井中水位洩降法強化壓力差重力滲流、推拉引力式流場控制法、主動真空抽汲(slurp)式負壓吸引法或其他物理化學方法(如界面活性劑沖排法、氣體沖排法、熱蒸氣沖排法)等，常見浮油回收設備有真空式刮油器(vacuum skimmer)、氣動式刮油器(Pneumatic Skimmer)、被動式浮油蒐集器(Passive Skimmers)、氣動式雙隔膜抽汲泵(Pneumatic diaphragm pump)、離心式單泵(single centrifugal pump)、離心式雙泵(dual centrifugal pump)、高真空液封式泵(high vacuum liquid ring pump)等，常見使用之浮油回收設備如表 1.1 所示。

表 1.1 一般常用於井中浮油回收的設備型式

典型單泵浮油抽取設備	典型被動式浮油蒐集器設備	典型氣動式刮油器設備	典型真空式刮油器設備
			

一般被動式自然滲流法回收浮油往往於浮油厚度較大之情形下使用，在初期回收效能尚佳，但當浮油厚度降低時回收效率便慢慢變差，使得回收作業時程變的非常攏長，所以通常在場址浮油厚度減低致使回滲率下降時便會採取主動式方法來提高浮油的滲流率。採用主動式洩降錐方法稱為雙相抽除法 (Dual-phase Extraction) 雖可加大重力壓差使浮油相更易進入井內進行回收(如圖 1.2)，但由於需抽取大量的地下水，所以必須設置較大處理能量的污水處理系統，因此採用此法作業時同時可進行溶解相的地下水整治作業稱為抽出處理法(Pump and Treat)，此法不只是針對浮油回收作業而是需同時進行整治作業，因此就必須於初期投入較多的成本花費。油品類污染物特性為較難溶於水之物質(Non Aqueous Phase Liquid)，但其中部分成分具有略高之水溶性現象而造成地下水的污染狀況，除了難溶於水與略溶於水的成分外部分油品亦存在有揮發性物質(volatile organic compounds, VOC)特性，針對這些特性在整治方法中發展出一種以真空抽汲方式的整治方法稱為生物漱洗法(BioSluping)(如圖 1.3)，此法為土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction) 的功能改變型式，為抽出處理法(Pump and Treat)中演化的另一種作業型態，可同時針對油品中揮發性成分、溶解性成分與難溶解成分進行抽出處理，又被稱為多相抽除法(Multi-phase Extraction)，此法需搭配處理能量較大的廢氣處理系統與處理能量但不需太大的廢水處理系統，應用於浮油回收作業相較於主動式洩降錐方法有較低之二次污染處理費用，缺點為地下水位太深之浮油除效率會降低若低於真空抽汲壓力便無法使用。不過每種方法使用皆有利弊之處，在浮油回收作業的應用方面，除看場址潛在的風險危害外主要是視場址地下環境特性與浮油厚度的變化進行施用工法改變與調整，才能達到最佳回收效率與較低成本花費的平衡點。

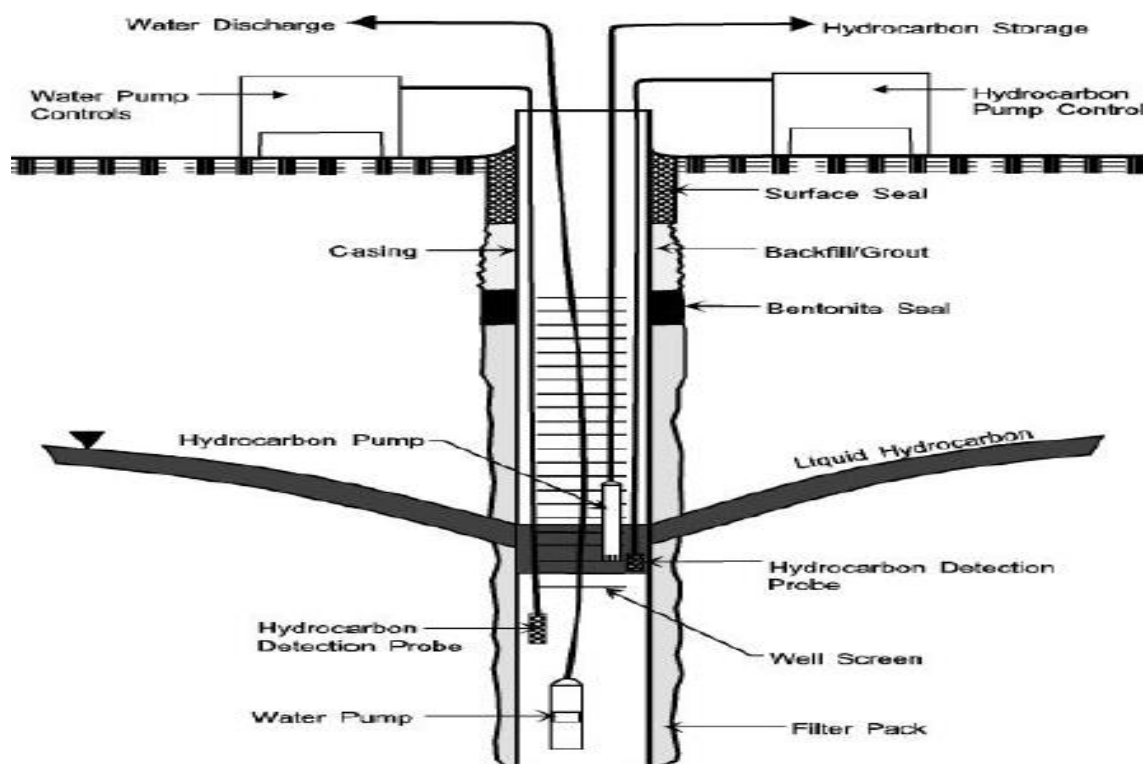


圖 1.2 典型雙相抽除法 (Dual-phase Extraction) 之雙泵抽除系統示意圖 (USEPA)

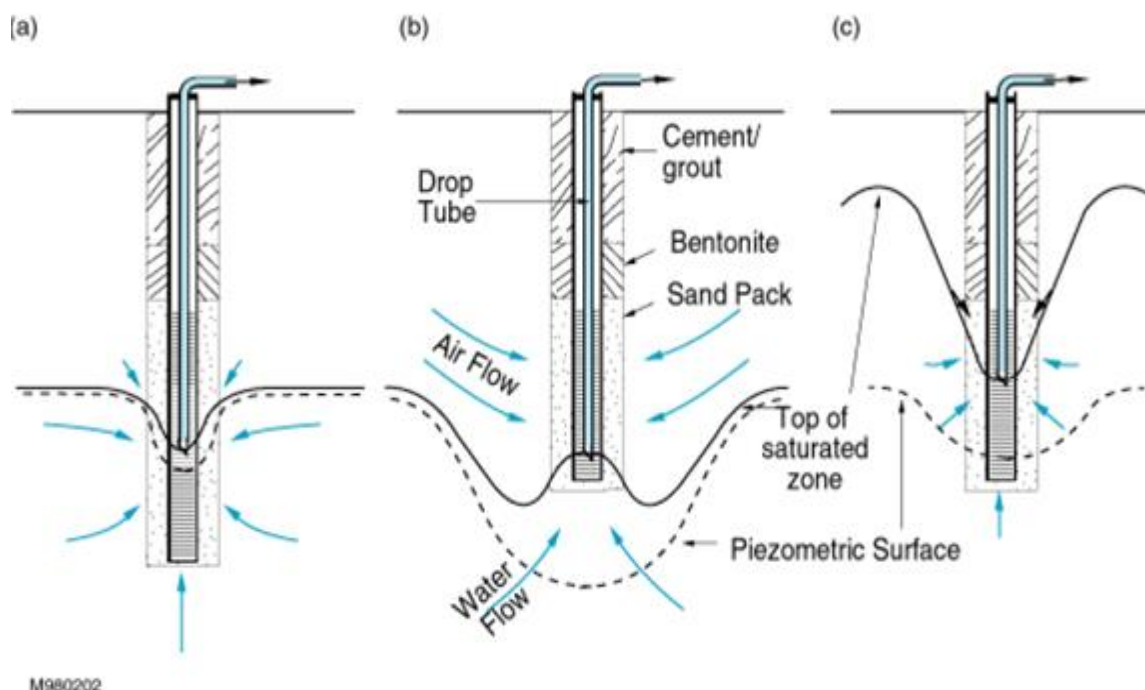


圖 1.3 多相抽除系統(Multi-Phase Extraction)抽除應用方式示意圖 (USEPA)

1.2 計畫概說

隨著經濟的發展腳步，人類對於石油化學產品的應用可以說是相當的密切，然而高度仰賴石化產品所帶來便利的同時，也帶來了各種不同的潛在隱憂，石化污染(petrochemical pollution)對環境之影響除常見的空氣污染、河川水源污染、海洋污染外及固體廢棄物污染外，近年來在各種工業化與社會化活動中亦陸續被發現對於地表下環境造成相當程度的環境污染現象，地表下環境屬非可視化與直接感官化的污染狀況，當地下環境遭受污染時往往不易察覺，一旦發覺時污染狀況常常已經相當嚴重，由於地質條件具不均質性與異向性加上石化產品本身特性因素，往往造成污染調查與後續改善作業具相當的困難度，也因此調查方法與後續污染改善的方法選擇與應用就顯得相當的重要。在採用環境介質取樣分析方式方面，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。因此為了增加調查資料的數據量與降低場址環境存在的潛在變異性不會影響調查結果並能使後續改善作業產生實際功效，本計畫擬於改善設施施作前導入專門針對油品類洩漏場址使用的現地快速檢測之雷射誘發螢光系統工具，進行現地檢測與配合少量環境介質採樣分析查核以確認污染程度，建構出試驗模場的污染概念模型。並以此污染概念模型為基準於改善設施施作與運轉完成後，再進行試驗模場的重複查核調查作業與前置的污染概念模型結果進行資料比對，藉以了解試驗方法應用對於場址污染改善成效的成果。

模場試驗研究大致分成 5 個主要步驟進行(如圖 1.4)，於現地調查作業執行之前，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」等方法原則進行試驗廠區相關運作與場址歷史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。在一階環境場址評估完成後接續進行試驗場址現地調查作業，現地調查方法則參考場址環境二階評估程序標準指引(E1903 Standard Guide for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process, ESA Phase I) 中應用現地即時快速工具進行整個試驗

場址範圍的污染源與污染團分布情形調查，當整個試驗場址初步的污染範圍界定完成後，依據高污染濃度反應區於試驗場址中的位置選定試驗模場設置範圍，當試驗模場位置區域確認後便接續再次使用現地即時快速工具更詳細的界定出模場中的污染物分布情形，並配合環境介質採樣進行樣品濃度分析作業已確認污染濃度值。在場址與試驗模場等污染狀況背景調查完成後即進行浮油回收井與相關回收設備的設置安裝作業，系統安裝完成後再正式運轉前期先執行試運轉作業以發現系統可能存在之缺陷與隱藏的問題，並加以修正使後續常態操作時能避免掉不需要的干擾狀況。當整個浮油回收系統設施持續操作一段時間後，由日常的監控作業如發現井中浮油回滲效率開始降低時，將視計畫期程與實際運轉成效決定後續的成效驗證時程。成效驗證方式亦再次導入模場試驗開始前的即時快速工具調查與環境介質採樣分析，以現地重複性調查作業將前期所得背景資料與後期執行改善後成果資料進行比對，來了解研究計畫設定之目標值是否有達成預估之成效與差異性分析。

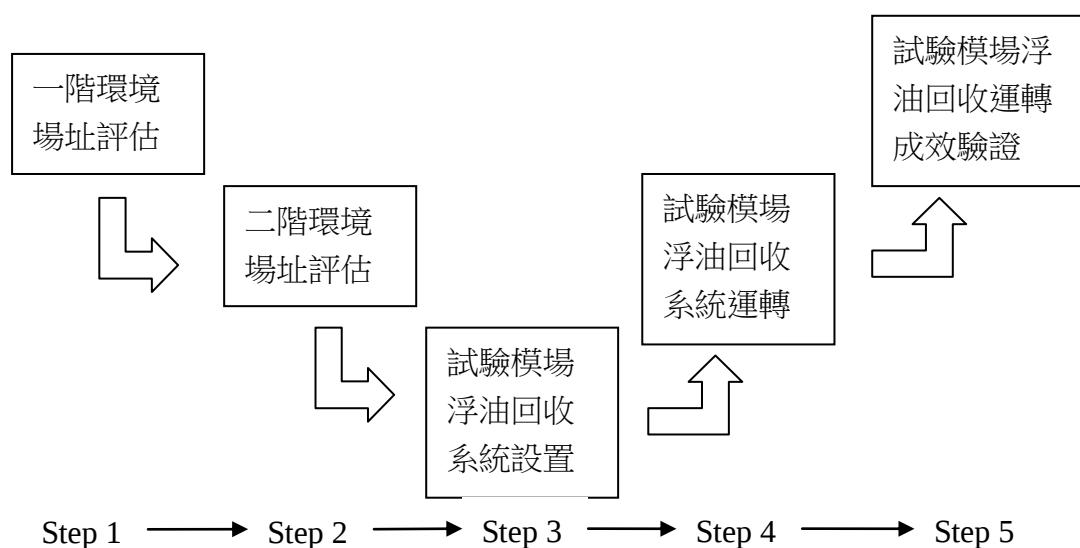


圖 1.4 模場試驗研究主要步驟

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，檢測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，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)少量特定深度取樣比對，並以氣相

層析儀之火焰離子分析法(GC-FID)分析與污染物相關之總石油碳氫化合物(TPH)成分，最後綜合調查資料進行相關解析，如地質水文相關性比對、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。

第二章 研究目的

2.1 目的說明

由於天然資源的限制條件造成能源與資源使用成本不斷的增高，過度的開發與使用亦造成自然環境相當大的負荷，提供開發節能產品與作業環境操作環節節能已成為當今潮流的共識，土壤與地下水環境的污染因為具有不易被察覺的特性，一旦發現地下環境遭受污染其污染嚴重度往往超出一般的想像，加上地質本身之不均質性與異相性以及污染物質本身的物理與化學性質產生污染整治作業的複雜特性，假使再遇到地上或地下人工建構物影響而使得的污染物在地下環境中的移動與分布更加難以掌控與預測，因此一個場址的污染整治作業花費往往所費不貲且曠日費時，所以如何降低場址整治花費與時程乃當今大家所思考的重要方向與目標。近年來國內也開始推動所謂綠色整治(Green Remediation)的觀念，主要目的亦為為降低整治過程中對環境所造成負擔及耗費之能源，如何考量場址整治所產生的各種作業環境效益，並納入各項可用選項，使整治作業產生的淨環境效益能達到最大化是一個重點的課題。

在許多不同的污染場址整治作業中，常需要思考二個主要的問題：(1)找尋合適的處理技術選項；(2)在特定場址環境條件下，評估與選擇各種不同技術的應用原則。針對油品洩漏污染場址，通常整治作業的導入時機並非為第一步驟選項，首要步驟應先進行場址環境調查初步找出可能的洩漏來源再進一步確認洩漏源並加以阻斷洩漏狀況，其次進行現地場址環境調查已了解場址的地質水文條件與在此環境中洩漏物質因本身特性在此場址特地的下環境特徵中呈現之空間污染分布情形與未來可能的傳輸擴散評估存在的風險程度，以採取緊急應變措施或採程序性的改善控制流程。不管是採用緊急應變措施或改善控制流程在油品洩漏污染場址中都應先了解是否有浮油相存在，如有則應先執行浮油回收程序除可防止污染的擴大，減少後續整治費用的投入進一步亦可能回收再利用降低因洩漏所產生的損失，但如何進行有效的回收作業則需透過詳細的現地調查去發現高污染團位置，一般高污染團的產生不外乎為洩漏來源或因場址與地質條件下傳輸所產生的蓄積現象，而地下環境往往因不均質性與異向性及不明地下建構物而產生複雜的傳輸結果，也因此如不透過較細膩的現地調查就無法設置有效的攔截系統與設

置適當的回收設備以進行最佳的場址改善作業。

本模場研究計畫主要為建置一油品洩漏污染場址於整治作業導入前利用專門針對油相成分偵測之檢測工具進行空間污染分布概念模型建立，依結果推估出浮油洩漏傳輸路徑並配合新開發之浮油回收設備於洩漏傳輸路徑上進行浮油相的回收作業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). 建立初期場址空間油品污染分布概念模式與後期改善作業空間污染衰減程度效能比對

一般場址發生非水相液體(Non Aqueous Phase Liquid, NAPL) 物質洩漏污染事件後，污染物質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)，若污染物因吸附飽和而持續移動至地下水位面附近，如該污染物質為輕質非水相液體(Light Non Aqueous Phase Liquid, LNAPL)，污染物便會浮在水位面附近形成移動自由相(free product)，若為重質非水相液體(Dense Non Aqueous Phase Liquid, DNAPL)則在進入含水層後仍會繼續往下移動直到遇到低滲透層地質便會形成油池(pool)的狀況。大部分的油品皆屬輕質非水相液體，所以絕大多數的油品洩漏場址都會存在有浮油相的問題，但由於場址地質本身的不均質性與異相性，在調查方面如未使用較多數據量的細膩調查方式，而使用少量數據進行污染分布推估只能得到較大致的污染分布情形，對於實際污染團的狀況根本無從得知，對於後續改善系統的設計與設置所能提供的訊息並不多，由於資料的不確定性較大可能導致系統設置不當而無法發揮改善成效，於後續成效驗證查核便會因為污染分布不均質性致使調查結果數據呈現差異過大的忽高忽低不規則變化而無法準確判定整體改善效能，因此本試驗除於初期採用多數據量的現地油品檢測設備建置場址污染概念模式(如圖 2.1)，並於改善後期亦使用相同方法進行重複查核調查，以相同多數據量比對方式減低數據變化的不確定性，提高整體空間污染衰減變化的可靠性(如圖 2.2)，以證實污染改善設施於場址中應用的實際成效。本次現地檢測設備將應用雷射激發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)調查技術，主要以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)進行場址探測孔的連續偵測，測定模場中輕質非屬溶解相(LNAPL)空間分布情形，並搭配少量土壤介質取樣分析以查核比對污染程度推估的可靠性。

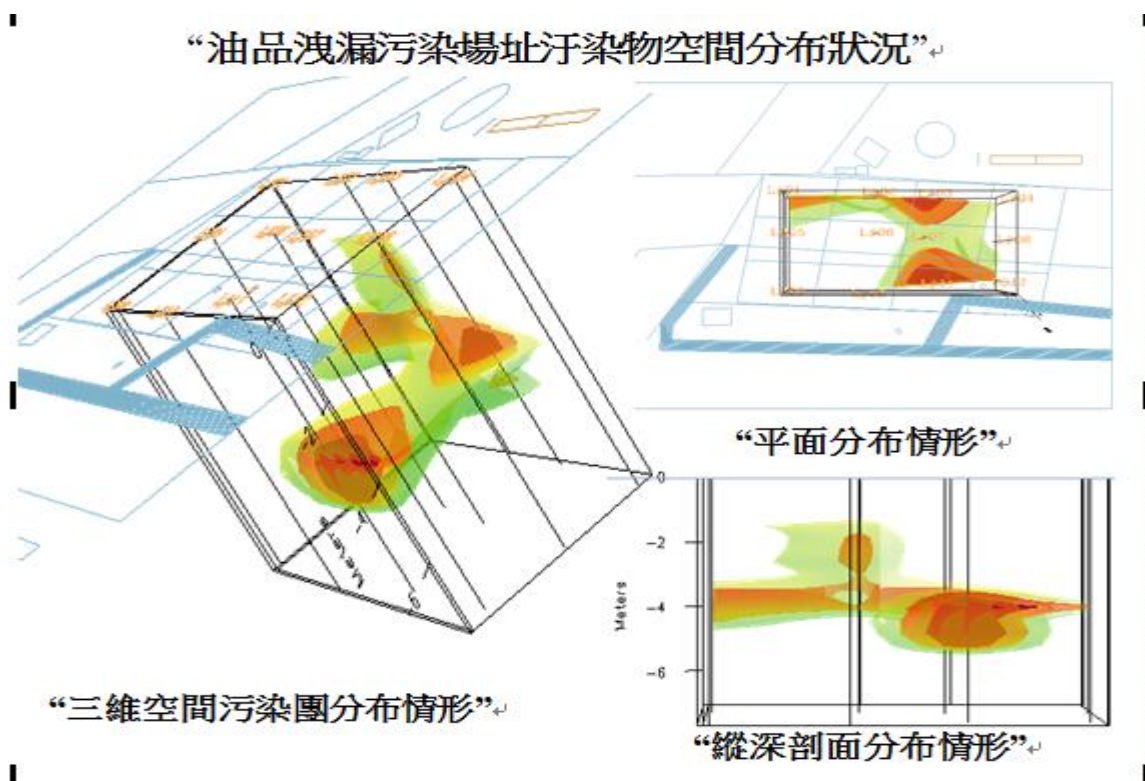
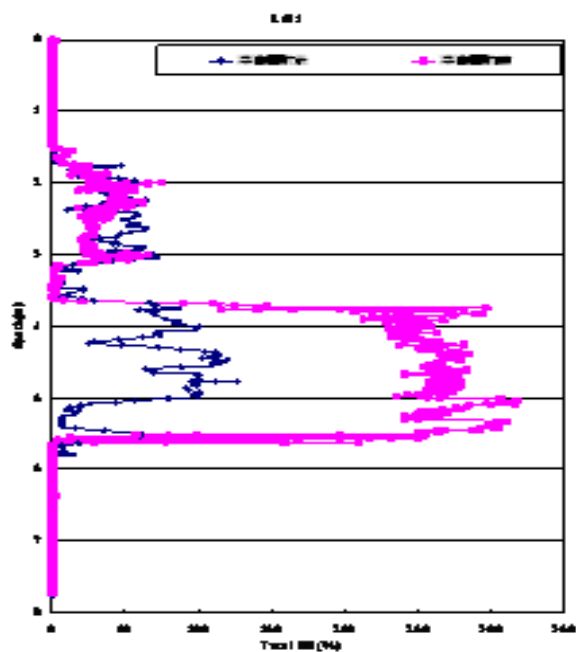


圖 2.2 連續性場址油品污染分布檢測建構三維污染團分布概念模型



(浮油回收前粉紅色曲線；浮油回收後藍色曲線)

圖 2.3 場址浮油回收作業執行前與執行後連續調查資料比對成效驗證

(2)導入新開發的浮油回收設備與方法提供後續相關場址於改善作業節能減廢方向的新技術應用選項

現行的油品洩漏場址所應用的浮油回收方法與設備，通常分為被動式回收法與主動式回收法兩類，主動式回收法是運用沉水泵的作功來抽取浮油，一般又分成兩種方式一為單泵操作(Single-Pump)，另一為雙泵操作(Dual-Pump)，其分別在於單泵抽取位置位於油水介面處附近而雙泵則一個位於水位下方處另一個至於浮油層中，目前常用的泵類型主要有離心泵與氣動泵兩種。另外主動式回收法後續發展出以真空動能為基礎的浮油回收設備，常見到的為現今整治方法之一的多相抽除法(Multi-phase Extraction)，一般這些方法與設備在洩漏場址浮油厚度高時，使用這些設備進行浮油回收其回收效能都很高，主要是因為浮油滲流率大，這時之差異點主要為人時的應用效能不同而已，但當浮油厚度降低至一定程度時，由於地質條件特性與油品本身特性會造成浮油滲流率開始降低，此時方法與設備應用調整就顯得非常重要，否則除浪費能源、增加二次污染處理費外較嚴重為改善時程會變得攏長，也因此會增加更多場址改善的花費與潛在風險的提高，本計畫所導入新開發的浮油回收設備是以真空動能為基礎的浮油回收設備(如圖 2.3)，目標為提高單元真空動能的效能與減少虛功的量費，針對特定目標提升設備使用於改善作業中的環境效能。

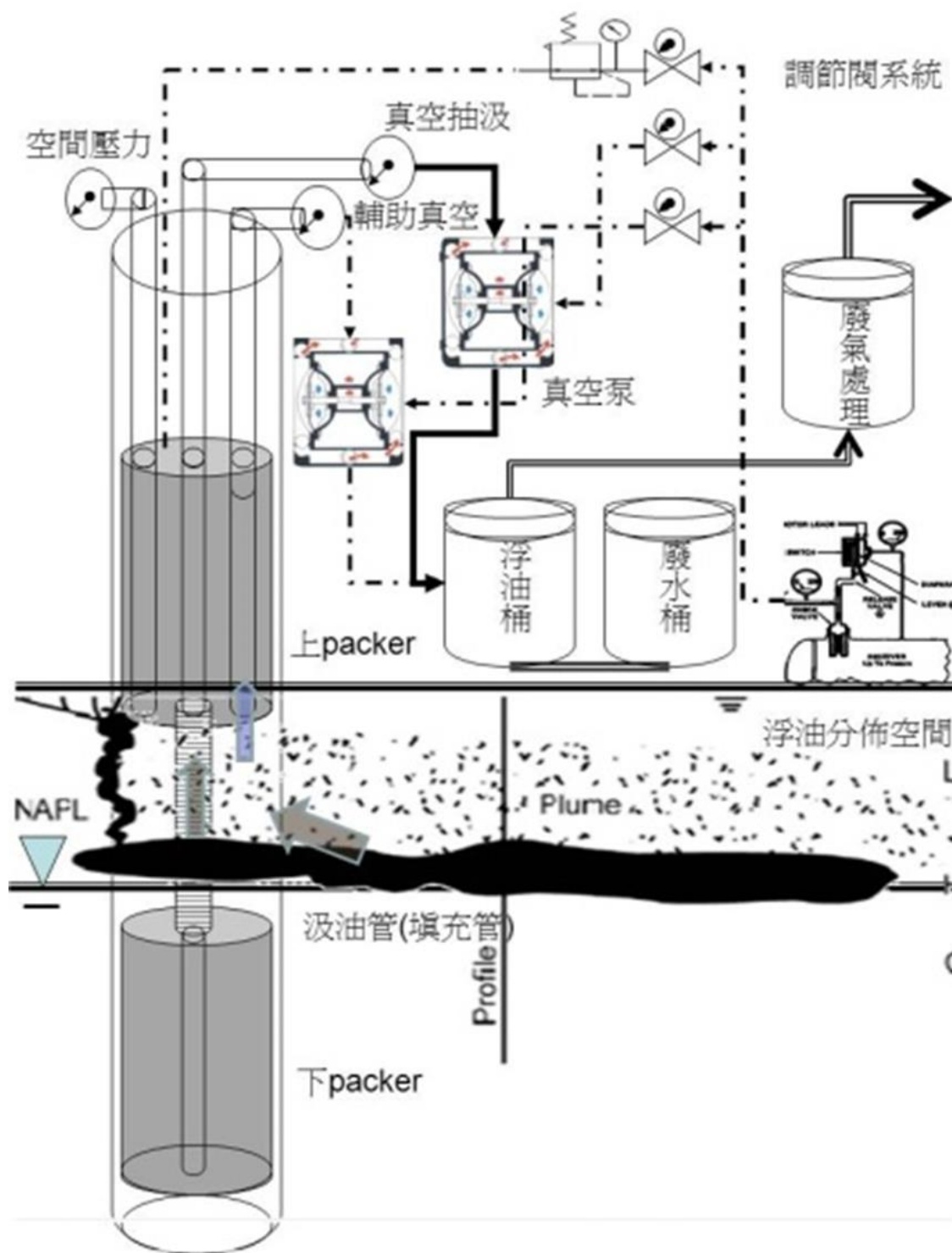


圖 2.5 封隔式雙真空(輔助真空)型浮油回收系統定深空間應用示意圖

2.2 預期目標

一般浮油回收方法分為被動式與主動式兩大類，被動式回收設備主要是利用自然的重力滲流，當油品由地層孔隙流至收集設施或井中時，在使用泵或集油器來蒐集浮油的應用下，如果地層浮油厚度較厚則滲流率快，反之如浮油厚度較薄則滲流率變慢而且會越來越慢，造成回收作業需要拖時長久；在主動式方面則是應用泵的作功直接於油水位介面處或下方以造成水位洩降錐的方式增加重力位能加速浮油的滲流率。另外主動式方法後續又發展出以真空動能為基礎的多相回收技術，主要運用壓力差異來促進油品的滲流動能。就三種方式來比較滲流速度大致以洩降錐法>真空動能>自然重力滲流（但在地層中浮油量或厚度較少時真空動能法可能會優於洩降錐法）；在二次污染產廢處理成本方面為洩降錐法>真空動能>自然重力滲流。在本計畫中所導入之新開發浮油回收系統為以真空動能法為基礎，但有別於現行之多相回收技術之處乃增添井中封隔設施將單元真空動能集中於浮油所位於之地層空間位置提高單元真空動能所產生的應用效率減少不必要的虛功浪費，尤其當浮油量與厚度減少時加上孔隙阻力與油品黏滯力都會將低浮油滲流率，若施加過大的功只會浪費不必要的能源與產生過多的二次污染處理成本。故如何藉由適當的單元功率使用在處理標的物乃本計畫之設計目標，希望藉由實場測試成果提供未來相關場址進行場址改善作業時增加新的選項與參考。

除希望研究成果未來可提供國內油品洩漏類污染場址（包含石油化學品製造廠、石油化學煉製廠、加油站、油品儲槽區）在有發生洩漏事件時，提供一新污染改善方法選擇與相關緊急應變時之需求使用外。另針對目前相關性污染改善應用之方法有偏向耗時與耗費較多經費之趨勢，希望本方法之導入應用預期可減低相關場址污染改善之花費與執行時程。

第三章 文獻探討

由於現代工業與人為活動的盛行下大量使用了石油化學的相關製品，在這些種種行為活動過程中由於某些特定因素或意外事件而造成了自然環境的污染現象，其中亦包含了土壤與地下水環境的污染狀況，一般來說對於地下環境的污染問題大致可分為可溶性（dissolvable）與不溶性（Insoluble）兩大類型，就石油化學產品而言其污染物型態大致類屬於微溶於水性至不溶於水性之特性，通常稱這種幾乎不溶解於水之污染物為 NAPL（Non Aqueous Phase Liquid，非水相液體）物質，NAPL 類污染物質在與水接觸後會形成與水壁壘分明的獨立體，當 NAPL 自污染來源釋出並滲入地下後需先穿過所謂之通氣層土壤（vadoze zone），在通氣層土壤移動時一部份會揮發成氣相，一部份微溶於水中，其餘的則受重力影響持續向下移動，當碰到地下水位面後若其比重比水輕稱為 LNAPL（Light NAPL）則會聚集於地下水位面之上形成所謂的浮油（free-product），而後逐漸沿著地下水位面作橫向性的擴散產生浮油團。

一般受污染的環境場址調查通常需要一個較具完整性的場址調查評估作業，以期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，就受石化產品污染的場址調查來說，通常應用土壤與地下水等地下介質採樣後再將樣品送進實驗室以相關儀器（如 GC-FID、GC-MS.....等）進行檢測分析，這種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，有時礙於經費的限制只能採取少量性樣品進行分析而產生後續對於場址污染分布情形的推估不確定性缺憾，但後期由於相關調查工具與方法技術的發展，在現地快速偵測工具應用下產生所謂的快速場址評估（Expedited Site Assessment）作業方法模式，這種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。在此次計劃中使用雷射誘發螢光（Laser Induced Fluorescence）檢測系統屬於針對油品類污染物質快速場址評估的一種作業方式，針對受石油化學物質污染場址地下環境中非屬溶解相的「自由相態」進行偵測的技術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，來建立較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布組成特徵，以提供後續場址污染改善

規劃、設置與執行的參考依據。

土壤與地下水污染整治(Remediation)作業通常分兩大類處理方式一為離地(Ex-situ)處理方式；另一為現地(In-situ)處理方式，採用離地處理法時主要是將污染物質從土壤或地下水層中，移出至設置於地面之處理設備或是將污染物移運至場址外的其他地方處理，而應用現地處理法則不將污染物從土壤或地下水層中移出至地面，而直接將設備置於地下污染區或將處理藥劑推送至污染區範圍進行整治作業，一般受石油化學產品污染的場址整治方法除常用的一些物理、化學或植(生)物的整治方法應用外，通常在整治方法執行前會先施行前期污染控制作業，亦即漏源阻斷與浮油回收之程序以避免污染範圍的擴大風險，與後續之整治範圍變大而增加不必要的整治成本。

因此如何了解一受污染場址的基本地質與水文條件、場址洩漏來源與狀況、洩漏污染物的物理化學性質、場址污染流佈範圍情形及選用適當的控制改善設施與適切的設置方式等，便成為後續改善作業是否能有所成效而不可或缺的一些基本條件因素。

3.1 環境場址評估方法應用

通常對於場址調查的起始程序往往是從環境場址評估(Environmental Site Assessment, 簡稱 ESA)的方法應用開始，現今較普遍被參考與應用之規範標準乃為美國材料試驗學會(American Society for Testing and Materials, 簡稱 ASTM)所撰寫之執程序，基本上針對場址進行環境場調查作業可分為兩個主要作業階段，其一為一階環境場址評估程序(Phase I Environmental Site Assessment Process)與另一個為二階環境場址評估程序(Phase II Environmental Site Assessment Process)，一般來說環境場址評估(EAS)執行作業係先透過第一階段(Phase I) 環境場址評估程序以具系統性的資料蒐集方式並透過現場勘查程序及與可能之相關人員會晤訪談，事先對場址背景作一較詳實的審視、評估與發現，而後再依第一階段評估結果與資料缺少部份和需要再確認部分決定是否需進一步執行第二階段(Phase II) 環境場址評估程序之調查作業。

第一階環境場址評估作業最基本的步驟就是資料蒐集與審閱，藉由盡可能蒐集到的各種相關場址歷史資料進行比對研析，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、地下水水位變化與地下水流向及潛在污染物可能移動之距離與影響範圍、目標場址環境應用資料(ex.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,場址被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)、場址營運過程中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,一般搜尋的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,資料蒐集方面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應於報告書中適切地索引並註明出處來源。

進行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,應儘可能勘查調查場址的內部環境及外部環境,並應包括任何座落於其中的相關結構物,同時勘查是否有敏感之環境受體存在。如有必要則需於報告中說明勘查時所受到的限制,另外勘查時部分需特別注意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、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、曾經於場址居住、管理、使用的相關人士或場址周遭可能知曉場址相關情形的人員進行訪談,一般訪談會晤方式可採親自訪談、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訪談問卷,便於進行詢問時需要蒐集資訊的方向與重點紀錄。(ASTM E1527-05)

在環境場址評估第一階段評估完成後進行資料彙整解析與判斷所得結果,於所蒐集資料缺少部份和資料中有疑問需要再確認部分,可藉由執行第二階段(Phase II) 環境場址評估程序之調查作業進行相關資料的補充與確認。環境場址評估第二階段的執行主要為建立工作範圍 (Development of the Scope of Work), 工作範圍主要包括評估工作項目 (Assessment Activities)與現地篩選和分析技術 (Field Screening & Field Analytical Techniques)兩大

項，於建立工作範疇後後續即進行環境介質採樣 (Environmental Media Sampling) 並搭配合適之現地篩選技術與環境樣品處理 (Environmental Sample Handling) 及適當的分析技術方法，等相關資料產出後進行資料評估與解析 (Evaluation and Interpretation of Data) 更進一步與先前假設條件證明比對 (Verification of Data)，於調查報告中闡明此次的調查結果並盡可能的說明解除的"已確認的環境狀況" (Elimination of RECs) 與"已確認的環境狀況" 的確認 (Confirmation of RECs)。(ASTM E1527-05)

3.2 油品類污染場址快速評估應用

於進行場址評估作業階段其整個評估結果倘若能更接近實際場址條件狀況與完整性便能夠提供參與者與相關人員有關場址地下環境中污染發生大致情形、污染物存在情形的證據及可能之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污染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，通常所有檢測數據皆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都是離場完成，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。

目前應用於油品類污染場址快速調查技術工具大致有光纖化學偵測器(fiber optic chemical sensors ,FOCS)、免疫分析法和酵素測定法(Immunoassay and Enzymatic Assays)、紅外線 (IR) 光譜(Infrared (IR) spectroscopy)偵測器、檢測試劑盒(Test kits)、揮發性有機化合物直推式分析系統(volatile organic compounds (VOC) Direct-push analytical systems)、直推式雷射誘發螢光分析系統(Direct-push Laser-induced fluorescence (LIF) analytical systems)、土壤氣體取樣分析(Soil-Gas Sampling analytical)等，常見的光纖化學偵測器有雷射誘發螢光系統(laser induced fluorescence (LIF) system)、雷射誘發崩解光譜法(laser-induced breakdown spectroscopy system (LIBS))、拉曼光譜儀系統(Raman spectroscopy system)；在免疫分析法和酵素測定法方面與油品類污染檢測有關的方法主要為土壤中篩選石油烴化合物免疫分析法(Soil Screening for Petroleum Hydrocarbon by Immunoassay)屬於 USEPA 所公告的 EPA SW-846 中 4030 分析方法；在紅外線 (IR) 光譜偵測器方面應用現場便攜式紅外儀常使用在測量開放路徑的空氣污染物、在水中揮發性有機化合物與在土壤和水中總石油烴含量量測；檢測試劑盒的使用相關於油品類污染檢為 EPA SW-846 方法中 9074 的土壤中總可萃取回收碳氫化合物濁度篩選程序(Turbidimetric Screening Procedure for Total Recoverable Hydrocarbons in Soil)；在揮發性有機化合物直推式分析系統方面主要代表性工具為薄膜界面探測器系統(Membrane Interface Probe ,MIP)，是一種半定量的現場篩測設備，可以檢測存在土壤和底泥中的揮發性有機化合物 (VOCs)；土壤氣體取樣分析的應用則是搭配一些便攜式氣體偵測器進行土壤中的揮發性有機化合物 (VOCs) 成分進行偵測；在直推式雷射誘發螢光分析系統應用方面主要是偵測地表下不飽和層、毛細帶、飽和層界面或地下水位下等土壤中的 NAPL 純相或殘留相物質，目前較常見使用的雷射誘發螢光分析系統有 Rapid Optical Screening Tool (ROST™) System、Site Characterization and Analysis Penetrometer System (SCAPS) LIF Sensor and Support System、Tar-Specific Green Optical Screening Tool (TarGOST™)、Ultraviolet Light Emitting Diode (UV LED)、UltraViolet Optical Screening Tool (UVOST®) 等五套系統工具，其主要偵測與使用特性如表 3.1 所示。(CLU-IN ,Laser-Induced Fluorescence,2013)

表 3.1 常見使用的雷射誘發螢光分析系統主要特性比較表

	ROST	SCAPS	TARGOST	UV LED	UVOST
Driving Platform	CPT only	CPT only	The system can be used with a variety of direct push equipment.	The system can be used with a variety of direct push equipment	The system can be used with a variety of direct push equipment.
Spatial Resolution	The vertical spatial resolution is about 2.0 cm.	The vertical spatial resolution is about 2.0 cm.	The vertical spatial resolution is about 2.5 to 3.0 cm.	Continuous.	The vertical spatial resolution is about 2.5 to 3.0 cm.
Type of NAPL	The system readily detects most light to medium fuels and oils and can generally identify product type.	The system readily detects most light to medium fuels and oils and can generally identify product type.	The system readily detects most light to medium fuels and oils and can generally identify product type.	The system detects light to medium fuels and oils and monoaromatics and may be able to identify product type.	The system readily detects most light to medium fuels and oils and can generally identify product type.

3.3 紫外光學雷射誘發螢光系統油品檢測應用

紫外光學雷射誘發螢光系統(Ultra-Violet Optical laser induced fluorescence system, UVO-LIF) 檢測技術在環境污染物檢測之應用原理，主要針對洩漏油品中具有光激發螢光反應之成分特性進行光激螢光檢測，應用高功率密度 (power density) 之雷射光源激發待測物而得到較高強度之螢光反應，因此可增加檢測的靈敏度。直壓貫入式雷射誘發螢光系統(Direct Push Laser Induced Fluorescence, DP-LIF) 的特性乃應用於地表下非屬溶解相液體(NAPL)的「自由相態」(Free Phase)與「殘留相態」(Residual Phase)石化污染物進行連續性的偵測而進一步可得到污染物質於地表下分布的情形，回溯雷射誘發螢光系統的發展最早是由美國陸軍、海軍及空軍在應用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。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；UVOST-LIF 系統則已商業化應用。

通常一個場址若發生非屬溶解相液體(NAPL)類污染物洩漏事件後，該洩漏物質會因重力作用而入滲於土壤之中並沿著土壤間孔隙向下移動，在入滲移動過程中污染物會被吸附殘留在土壤孔隙形成殘留相(Residual Phase)，若過飽和油品類污染物繼續移動至地下水水位面附近，由於油品的比重比水輕之特性，滲流油品便會浮在地下水水位界面處形成自由移動相的浮油(Free Product)，藉由連續性的偵測方式便可以了解 NAPL 存在於地表下分布的狀況，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，經由圖譜差異比較便進一步可了解不同深度位置之污染物組成，如圖 3.1 所示。進一步藉由檢測結果與標準品的檢量線配製測試亦可提供地表下洩漏的 NAPL 污染狀況較高解析度之定性至半定量之訊息(圖 3.2)，

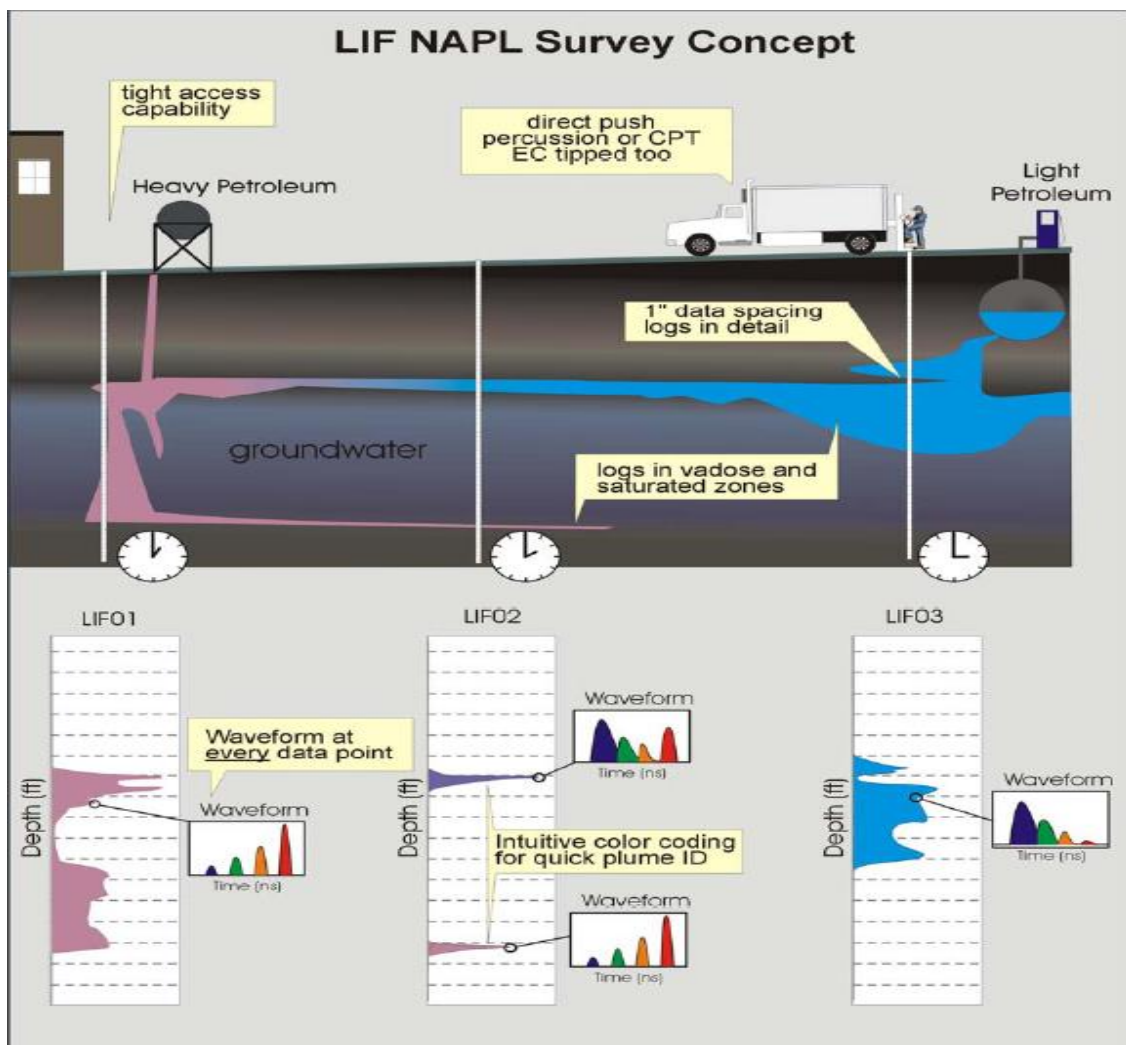


圖 3.1 紫外光學雷射誘發螢光系統於地表下連續性油品污染成分檢測
(資料:Dakota)

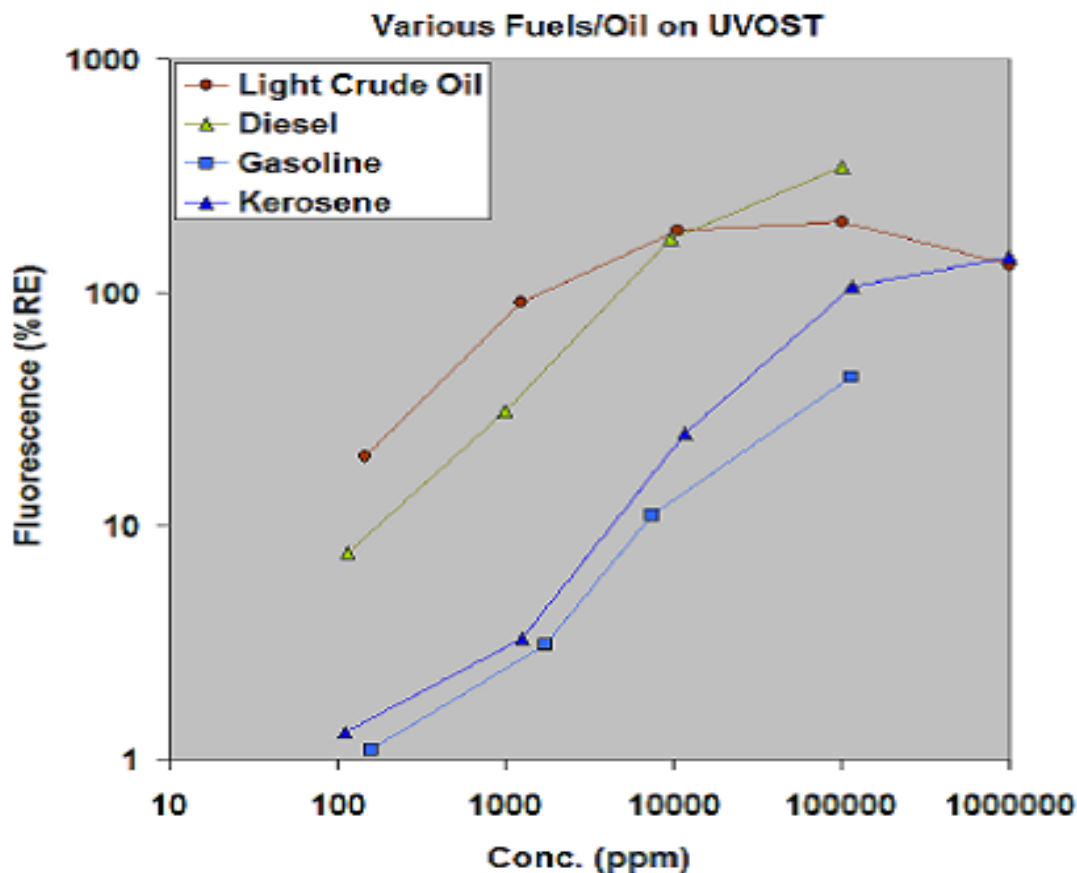


圖 3.2 LIF 系統檢測對一般石化油品典型的半定量結果

3.4 LNAPL 於地下環境的特性

當非水相液體(NAPL)洩漏於污染場址時，因為本身物理與化學特性的關係，成份中蒸氣壓較大的有機物會揮發至未飽和層，其中較不易揮發的成份則因土壤吸附作用而將油品吸附於土壤中，後續會因為洩漏壓力或者重力影響作用下一旦超過土壤之吸附能力時便迫使油品一直往地表下更深層的土壤滲入，當這些入滲油品慢慢的往下移動到地下水位表面位置時，屬於比水輕的油品(LNAPL)則會減緩往下入滲的速度，並隨著地下水位的變化變成水平擴散現象，當浮在地下水水位面上的洩漏油品慢慢因蓄積作用便會形成所謂的浮油(free-product)現象，其中部分微溶解於水的有機物成分則因擴散作用與地下水的移動而大了污染團範圍(如圖 3.3 所示)。

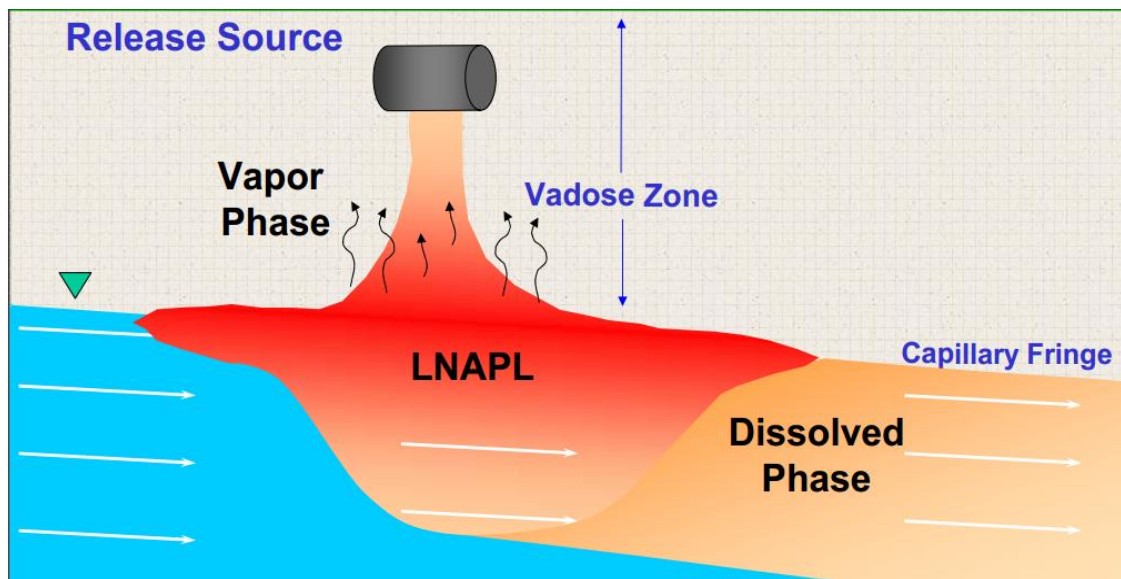


圖 3.3 簡易 LNAPL 洩漏於地表下污染型態概念模型

(Modified from Huntley and Beckett, 2002)

通常油品於洩漏後存在於地表下地層中時，會以幾種型態存在於地層土壤之中，一般包括：存在未飽和層土壤顆粒與孔隙間、溶解於未飽和層土壤顆粒表層水膜、黏著於未飽和層土壤顆粒周圍、存在於飽和層土壤顆粒與孔隙地下水間、溶解於飽和層地下水中、吸附在未飽和層或飽和層土壤膠體顆粒表面中等。(如圖 3.4 所示)

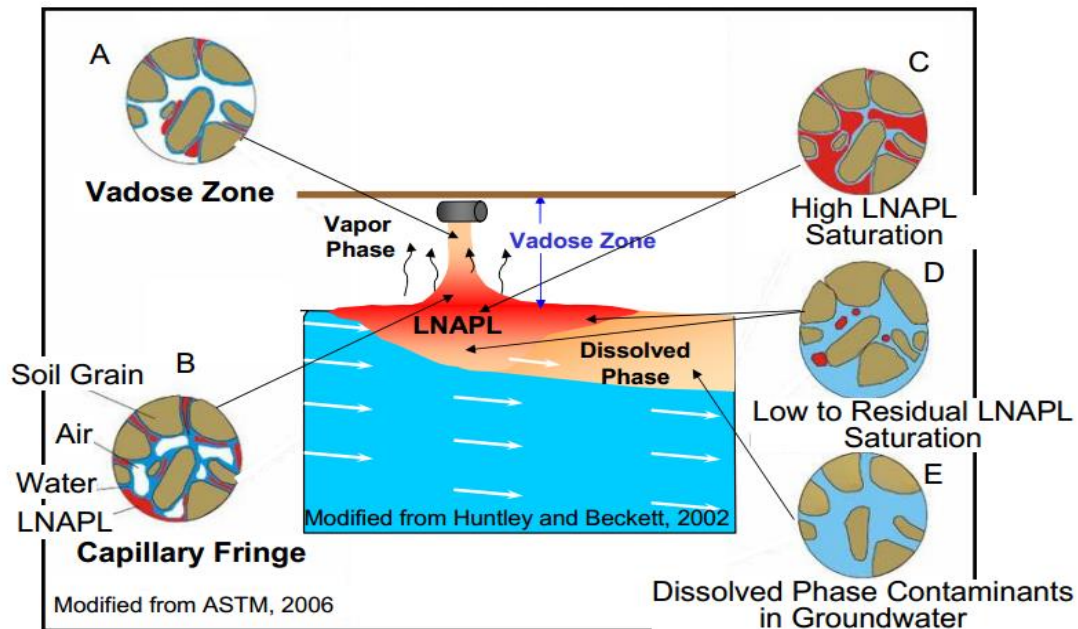


圖 3.4 LNAPL 於土壤顆粒孔隙中的不同分布型態

(Modified from ASTM, 2006)

在土壤系統中有土顆粒骨架的固相和空氣、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復雜的過程，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。在 NAPLs 移運過程中，幾種存在形態將相互轉化，如圖 3.5 所示。

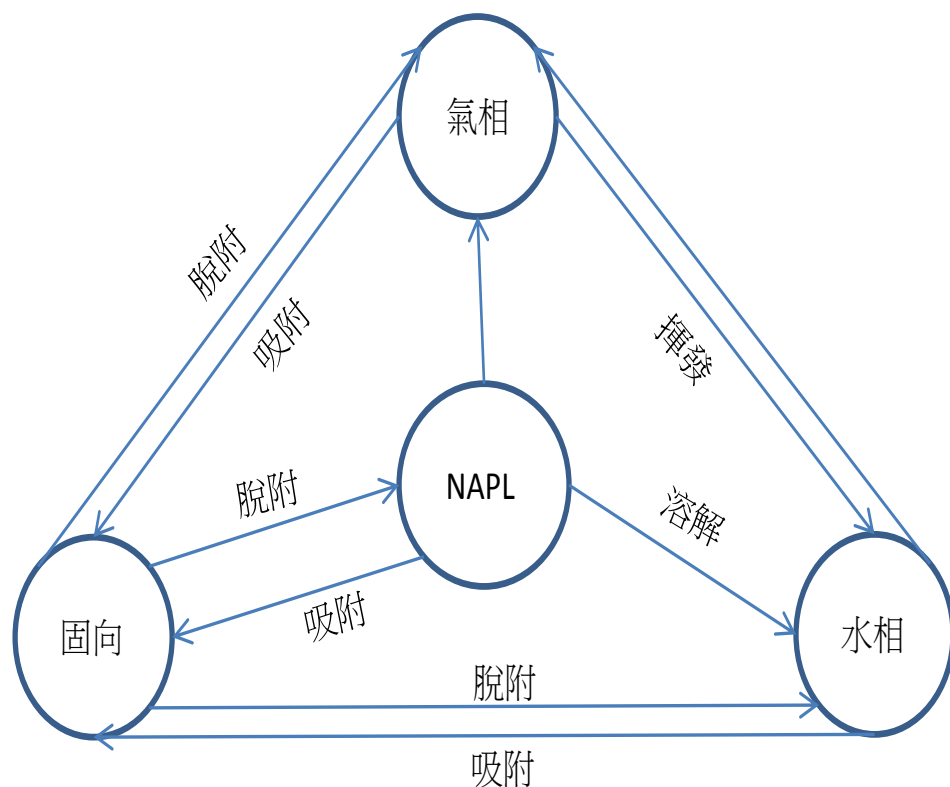


圖 3.5 NAPLs 在土壤系統中各存在形態的相互轉化

一般當洩漏油品移動至地下水水位界面而形成浮油狀態時並非為一個均勻的分布型態，從一個縱深剖面的角度來看油品的累積型態會從殘留態慢慢形成過飽和態型式，然後由於油相與水相在土壤孔隙中的分配比例變化關係會再由過飽和型態轉變回不飽和的殘留態型式而形成一個所謂的”shark fin”剖面飽和度變化分布情形，由圖 3.6 中以 X 軸來表示 LNAPL 在土壤孔隙中的飽和度(% of soil pore space filled with LNAPL)變化，Y 軸則表示井中的 LNAPL 厚度，在含水層中 LNAPL 的飽和度變化範圍大致介於 5% to 50% 之間，這樣的特性使得 LNAPL 在地表下的實際體積估算存在著相當的難度，因此對於預測 LNAPL 存在的可回收液體量也有著相當的困難度(ICRT, 2009)。所以浮油回收的初步目標主要是針對飽和態會遷移的浮油相以防止其繼續遷移而造成污染範圍的擴大，至於殘留飽和態的浮油相則需應用其他強化型主動式法進行第二階段浮油回收方式才能移除地層中更多的浮油相物質。

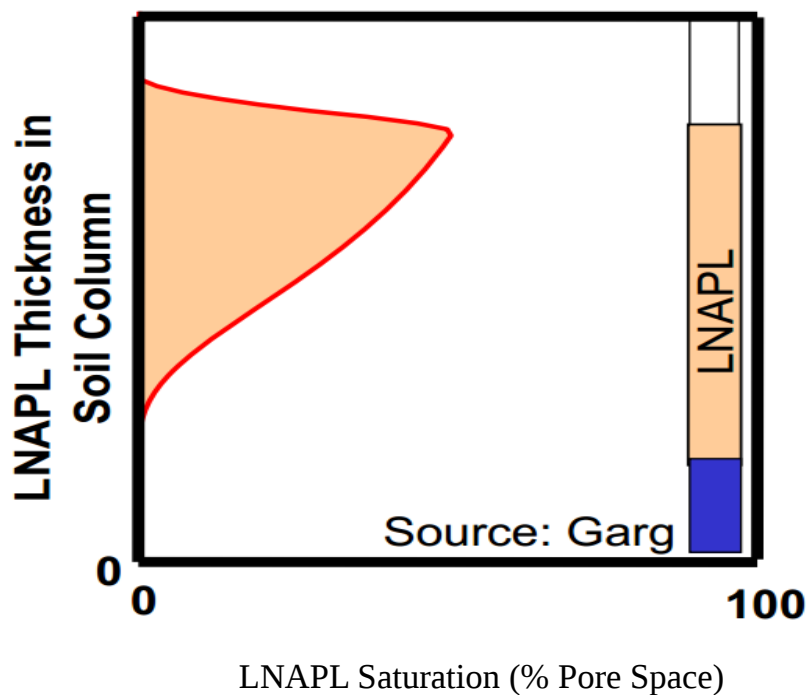


圖 3.6 地層中潛在的浮油飽和度分布與井中浮油厚度比較狀況

在土壤飽和層中，孔隙中包括了水、NAPL 及土壤介質（固相）形成三相系統。水、NAPL 的體積總和應等於該介質之孔隙體積。在飽和層中，水、NAPL 及土壤顆粒表面有一接觸角（Contact Angle），接觸角可以用來表示該固體介質之濕潤特性，在飽和層中，水通常為濕潤相，而 NAPL 為非濕

潤相。其他影響因子如重力、浮力與毛隙壓力為控制 NAPL 在土壤中傳輸的重要因素，當油槽或輸送管線洩漏時，受到重力影響向下滲漏。控制 NAPL 是否繼續向下滲漏的因素為洩漏源的持續性，孔隙中的 NAPL 欲繼續向下滲漏，其在孔隙中的重力或是洩漏壓力必須大於毛隙壓力，一旦洩漏停止，一部分 NAPL 會繼續因重力向下滲漏，直到重力小於毛隙壓力或到達地下水面為止，此時孔隙中會形成不連續的 NAPL，稱之為殘留非水相液體(residual Non-Aqueous Phase Liquids)，以飽和度觀念求得殘留飽和度，公式如下：

$$\text{殘留含油飽和度} = \frac{\text{殘留於孔隙中之 NAPL 體積}}{\text{多孔隙介質孔隙體積}}$$

地底下浮油的移動通常取決於一些因素條件，主要包含流體和地質媒介兩種主要的功能屬性，這些條件因子主要是毛細壓力、相對滲透率、潤濕性、飽和度和殘餘飽和度，雖然這些條件因子彼此間式互相關聯的但其中較重要因子乃毛細壓力和相對滲透率，表 3.2 整理了關於這些特性因子和其所代表的意義 (USEPA,1996)。

表 3.2 流體和地質媒介之間的功能特徵屬性表

性質	代表意義
毛細壓力	毛細因子限制了浮油的移動性，浮油的移動路徑往往發生於毛細壓力較小的通道上，例如較粗顆粒的地質。
相對滲透率	相對滲透率除了是飽和度的函數外並控制液體在多孔隙媒介中的流動性，相對滲透率和飽和度具有直接的比例關係。
潤濕性	大部分地質媒介材料其潤濕性相對於油品是以水為優先的對象，這意味著在地層中水比油品的移動性更佳。
飽和度	飽和度控制液體通過多孔性介質的流動性，針對液體的移動液相必須是連續狀態且部分介質必須是飽合的狀態。
殘留飽和度	液體從多孔性媒介排出直到一定的最低飽和度到達並且停止流動的狀態。

一般油料污染場址浮油回收物理整治方法初期當浮油厚度大時，整治效率顯著，不過隨著浮油厚度的減少，會因為土壤中的毛細現象使得油料殘留，漸漸地浮油回收效率也隨之降低。

3.5 浮油回收系統應用

地表下浮油的移動一般是順著地下水流方向在行進，但這樣的移動方式又強烈地受到地質的異質性和異向性所影響，因此一個場址的浮油回收系統其設計和操作效能往往須視場址的地質水文條件實際特性而定，另外要知道的是在監測井中所量測到的油位與水位高程並代表該位置的地下水位高程，通常需藉由所量測到的浮油厚度與密度來修正地下水位高程，其他考量的關鍵因素是油品洩漏到地下水位處的總體積量，如果洩漏的體積量是小到無法累積到地下水位處那麼進行浮油回收作業便顯得不切實際，一些對於浮油回收作業較重要的影響因子如表 3.3 所示，通常浮油回收作業是在一個典型的整治作業步驟中的一個優先施行步驟，但就整體的整治作業而言浮油回收作業並無法將實際洩漏的總量進行一個完整的回收，因此對於殘留量浮油需進一步搭配其他的整治技術結合運用才有可達成較完整的去除效果。

表 3.3 一些影響浮油回收較重要的因素說明

(USEPA)

因素	意義說明
土壤異質性和異向性	控制浮油遷移和地下水流動的方向
產品粘度	影響流動性、可回收性的難易、殘餘飽和度的程度
土壤滲透性	控制浮油遷移和地下水流動的速率
到地下水位深度	結合洩漏體積可決定使用何種整治技術能達到最好效率
洩漏體積量	再加上到地下水位的深度可決定是否必要執行浮油回收

一般浮油回收系統方法的應用大致可分為被動式、主動式與強化型主動式浮油回收方式，被動式有挖掘方法(Excavation)、物理性遏制法(Physical containment)；主動式方法有浮油刮油器(LNAPL skimming)、雙泵式液體抽除法(Dual pump liquid extraction)、雙泵式多相抽除法(Multi-phase extraction, dual pump)、單泵式多相抽除法(Multi-phase extraction, single pump)、吸啜式抽除法(Bioslurping extraction)等；強化型主動式抽除法有水或熱水式沖洗法(Water/hot water flooding)、界面活性劑沖排法(Surfactant flushing)、共溶劑沖排法(Cosolvent flushing)、蒸氣或熱空氣注入法(Steam/hot-air injection)、微波加熱法(Radio frequency heating)、三相或六相電阻加熱法(Three and six-phase electrical resistance heating)等，通常主動式回收法主要針對過飽和的可移動性的浮油相進行回收應用，而強化型主動式法則針對飽和非移動性的殘留相進行回收應用提高土壤中浮油的回收率。

浮油回收系統的選擇主要是能滿足整治目標去控制浮油的遷移與達到最大的浮油回收效能並且能夠兼顧浮油相和揮發相同時蒐集的功能，通常來說場址條件影響了浮油回收的體積量，基本上包含了區域範圍、經調查定位出的深度、滲透性和地下水流向等地質水文參數等這些條件直接影響了浮油回收系統的選擇和處理程序的設計。現今常用的浮油回收技術或方法(表 3.4 說明了這些方法技術的相關應用性)大致有(圖 3.7): (USEPA, 1996)

■ 浮油抽除結合刮油器油水分離系統 (Free product removal/skimming systems)(1)

■ 水位洩降法回收浮油系統(Free product recovery with water table depression)(2)

■ 結合揮發相/地下水抽出系統 (vapor/groundwater extraction) (3)

■ 雙相 (液相與氣相) 回收系統(Dual phase (liquid and vapor) recovery) (4)

表 3.4 浮油回收方法技術的相關應用性說明

浮油回收方法	描述	適用性
浮油抽除結合刮油器油水分離系統	直接從井中或截流溝中汲取浮油但不包括地下水	較少量的浮油回收方式，通常是在開挖或截流工法使用受限制的區域，為緊急或短期整治作為使用。
利用水位洩降法回收浮油系統	從井中或截流溝中抽取浮油並伴隨地下水抽取，利用地下水抽取方式造成地下水位洩降產生洩降錐以擴大影響範圍。	需要設置於地表下適當滲透性較佳的地層材料中，可使用於較深地下水位的場所，屬於長期性整治作業，但所產生的地下水處理費是較昂貴的。
結合揮發相/地下水抽出系統	將真空應用到井中地下水位上方處，去回收揮發相並保持地下水位高度，浮油和地下水同時藉由泵進行回收。	適用於低至中等滲透性的地質媒介中，可提高易揮發成分的回收。
雙相回收系統	液體相的浮油和地下水與揮發性成分於相同的井中一起回收，地下水的抽取量相對的較小，並且地下水位可以維持於穩定狀態。	通常可設置於低滲透性的地層材料中，需要地層表面的密封性，以防止真空的短流狀況產生。

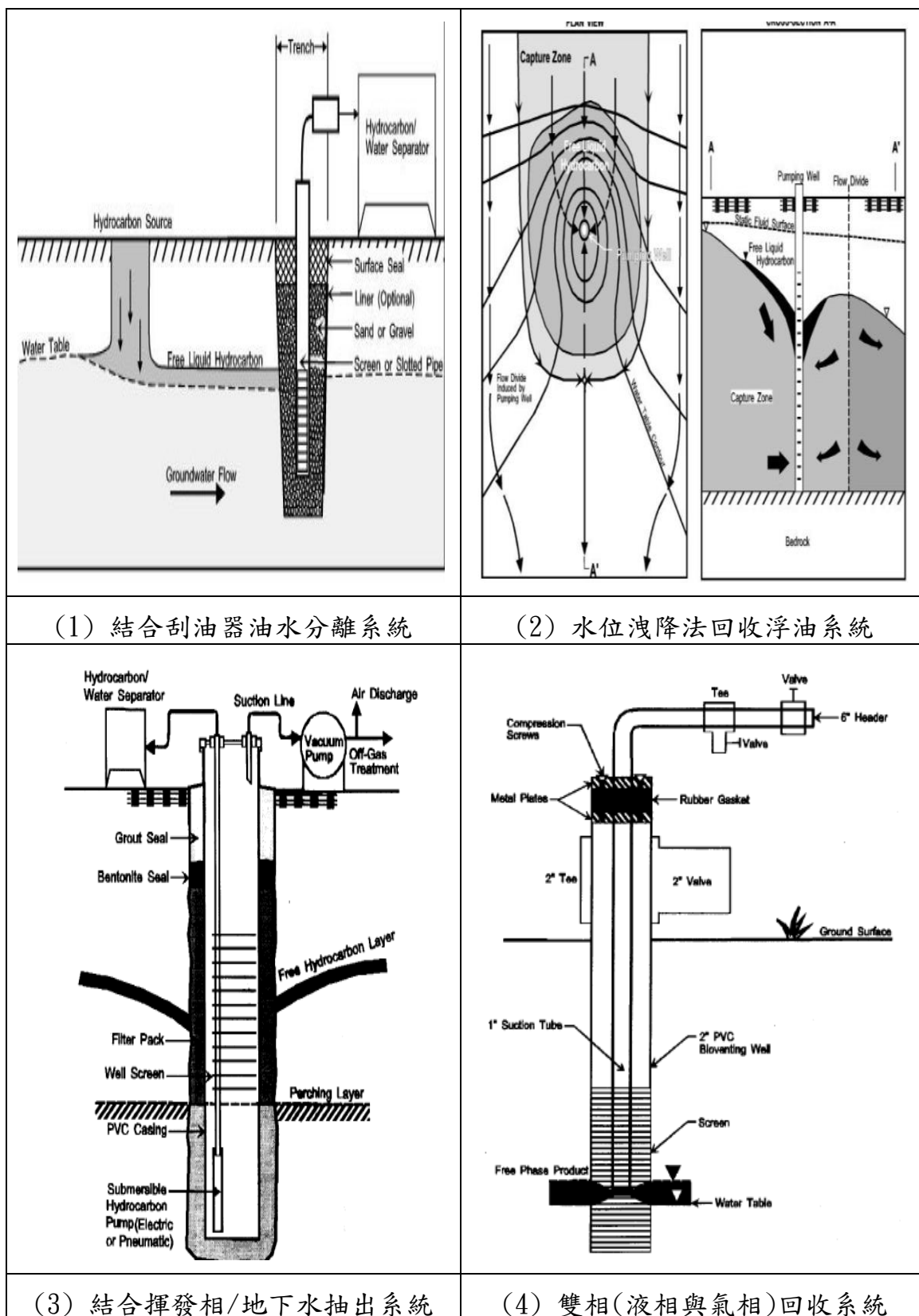


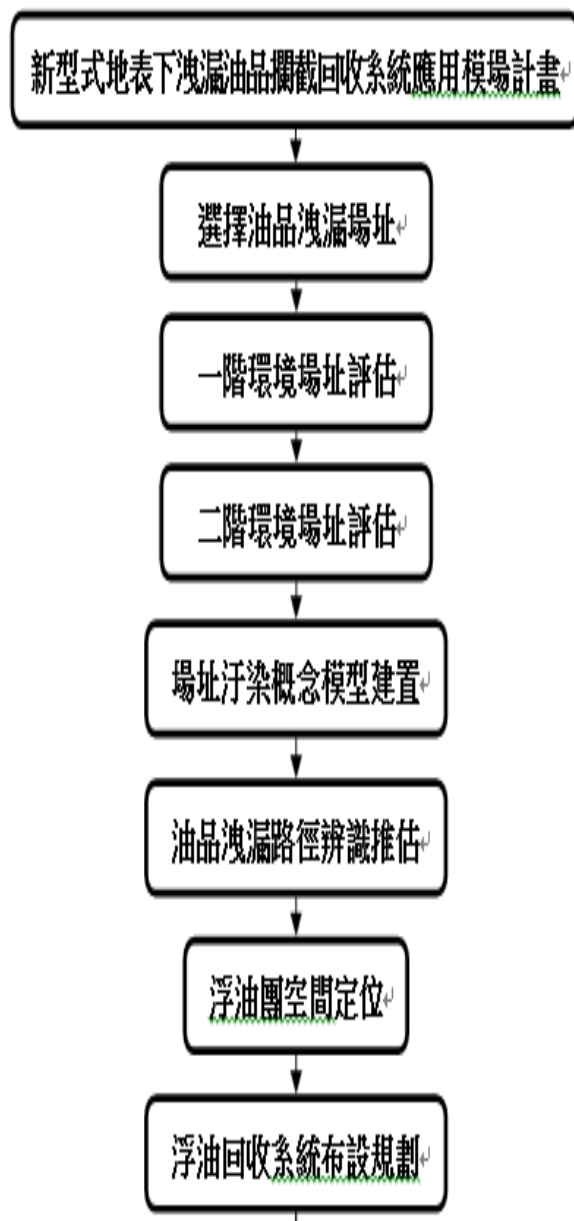
圖 3.7 常用的浮油回收技術圖示說明

第四章 研究方法與過程

4.1 模場試驗內容規劃

本研究模場試驗作業流程如圖 4.1 所示，初步先找尋已發生油品洩漏污染的場址且該場址目前有在進行浮油回收相關作業或者初步發現油品洩漏狀況但尚未進入相關改善程序為目標選擇場址，當確認目標場址後於執行現地試驗前參考美國材料及試驗協會（American Society for Test and material, ASTM）一階環境場址評估作業準則（E1527 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」進行場址歷史與廠區相關運作資料蒐集以協助後續調查作業執行，依據一階環境場址評估結果參考場址環境二階評估程序標準指引(E1903 Standard Guide for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process, ESA Phase I) 與油品类儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊(環保署)執行試驗模場現地的調查與查驗作業，進行假設條件證明 (Verification of Data)與確認已確認的環境狀況 (Confirmation of RECs)及資料評估 (Evaluation Data)等。

待完成場址調查評估作業並建構模場污染概念模型(Conceptual Models)後，接續進行現地污染浮油團空間定位與開始浮油回收系統佈設規劃，規劃重點主要為確認洩漏浮油可能之移動路徑並決定設置攔截點位置、浮油回收井的規劃設計考量新設井或改良現有之井功能、浮油回收設備與搭配系統的操作能量，完成規劃後著手進行模場現地工程設置作業，設置作業完成後即進行試運轉程序並調整系統與操作參數，確認系統運作正常後開始浮油回收模場試驗進行定期監控作業，直至達預估運轉時程結束後進行油品空間污染分布查核確效以了解系統操作對於模場污染改善的效果評估，並檢討相關可能存在的缺失作為後續應用的改善與改進建議。



接續後頁

接續前頁

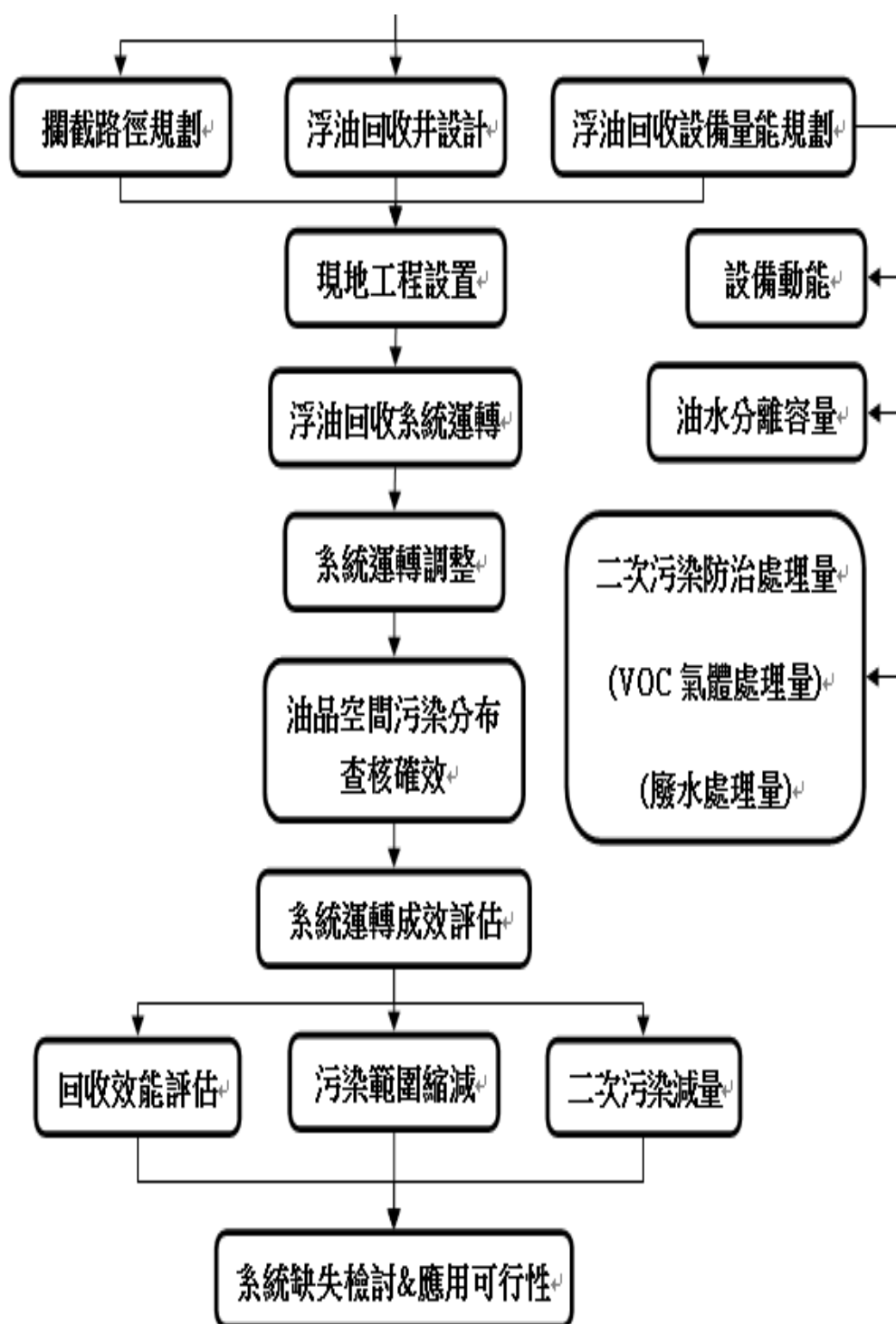


圖 4.1 計畫研究模場試驗作業流程

4.2 環境場址評估作業

一階環境場址評估作業主要執行內容為場址基本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。

在相關人員訪談方面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，並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。

場址勘查則針對試驗模場選定之目標場址使用、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。

二階環境場址評估作業主要主要以紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)現地即時快速調查系統進行場址探測孔的連續偵測，進行試驗場址與試驗模場污染狀況調查，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，以了解污染團的遷移擴散分布情形，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，搭配 DPT(direct push Tech.)採樣器，進行少量地下環境介質(土壤樣品)特定深度取樣比對，並以氣相層析儀(GC-FID)分析污染物相關之總石油碳氫化合物(TPH)成分定量推估出試驗場址受污染的風險程度。

此次研究計畫模場試驗之試驗場址歸屬於台灣中油股份有限公司煉製事業部大林煉油廠，廠區位於高雄臨海工業區內座落於高雄市小港區沿海四路區域範圍(如圖 4.2)，大林煉油廠總面積約 300 公頃主要從事石油相關製品的製造，計畫執行區域規劃預定選擇之試驗場址位於大林廠區之 F 區中的第六媒組工場(地號為中林子段 1025-6 號)，場址相對位置座落圖如圖 所示，場址現況仍為運作中工場，F 區第六媒組工場的二階環境場址評估作業預計佈設 14 個 LIF 調查點(如圖 4.3 所示)來進行場址受污染範圍調查以確認場址受污染的主要區域，在了解場址受污染特徵後才依據現場實際狀況與受限制條件來決定試驗模場的設置規劃。

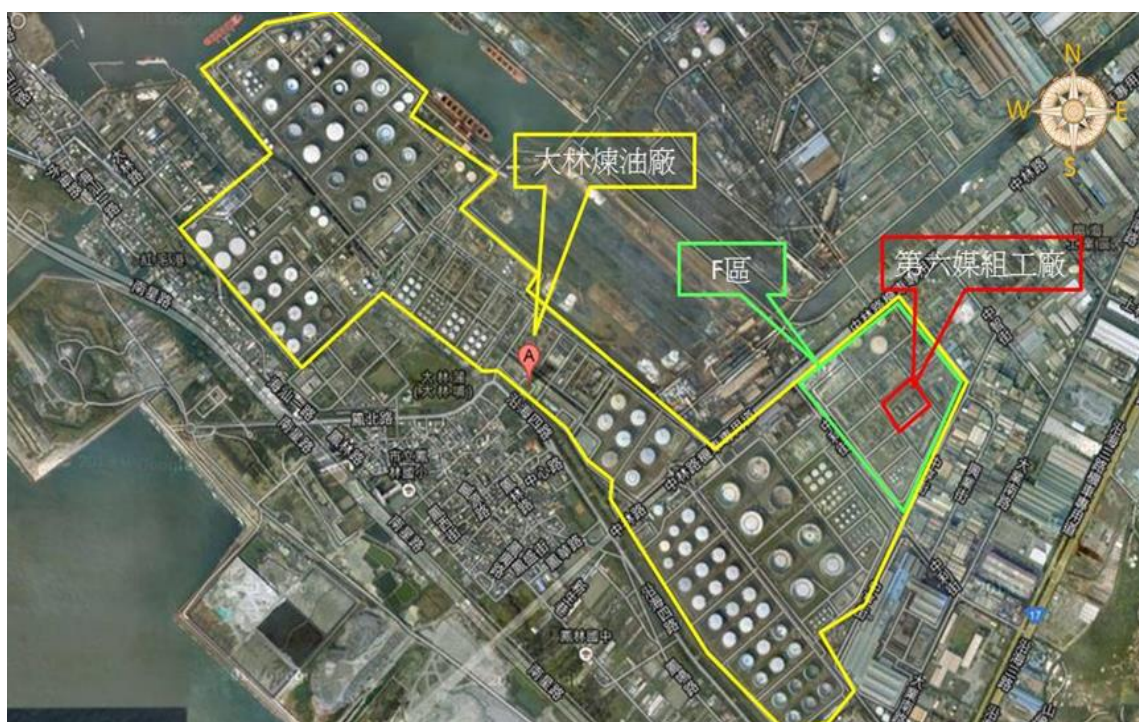


圖 4.2 計畫選擇試驗場址相對位置座落圖

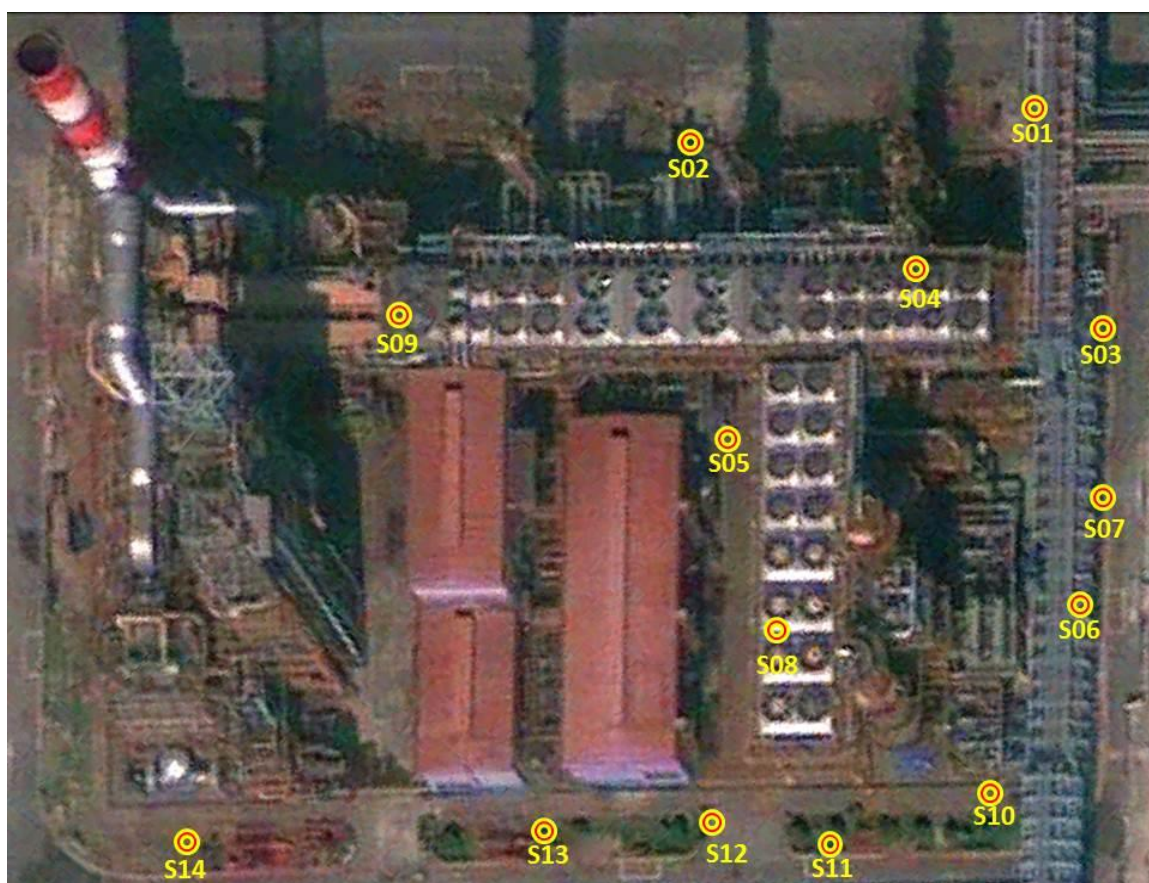


圖 4.3 試驗場址二階環境場址評估 LIF 調查點規劃

4.3 模場試驗規劃

模場試驗項目說明:(原計畫規劃方式因現場場地限制條件與計畫經費等因素而略作修訂)

模場尺寸規模:預定於試驗場址中選取 3 個至少 5x5m² 區域作為研究之浮油回收測試模場。

調查規劃方式:預定使用系統性網格規劃(Systematic and grid)與應變叢集規劃(Adaptive cluster)方式,利用虛擬網格方法進行有限度隨機網格(試驗場址)與三角瓶架(浮油回收模場)網格的方式布設調查點(如圖 4.4 所示),調查測點數量(包含試驗場址污染背景與試驗模場污染背景)至少不少於 21 個測點數。

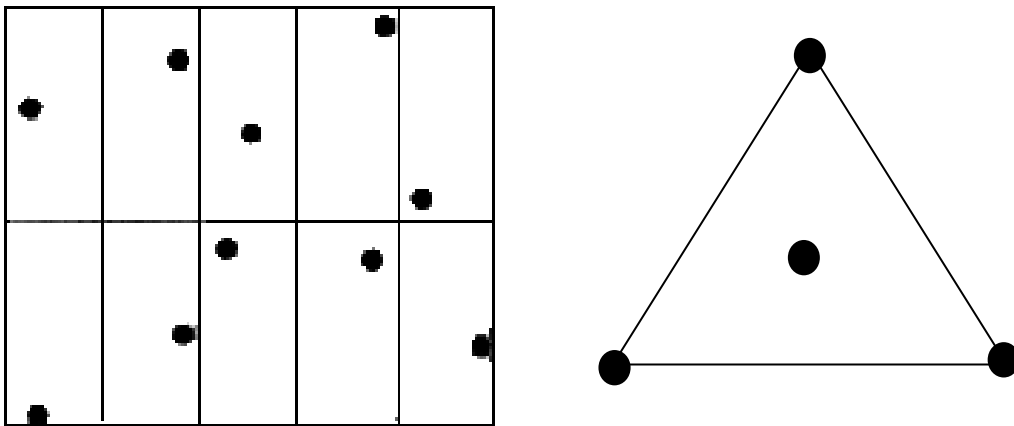


圖 4.4 試驗場址與試驗模場 2 種調查佈點規畫方式概念圖

浮油回收井設置:預計選擇 3 口試驗井進行場址浮油回收作業,井深預估為至少 5m 深度左右(視場址地下水位變化進行調整),3 口浮油回收井的型式分別為新開發封隔型雙負壓浮油回收系統、BIOSLUP 多相回收型浮油回收系統、自然重力滲流人工抽取型系統,井的布設原則為設置於試驗場址調查範圍內調查結果呈現高污染反應的範圍區域,作業井間距至少距離 5m 以上,

各井周圍至少需要有 3 點以上的調查點分布且調查點最好不要有重疊狀況。

紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)施作:預計施作總測點數 14 點，每個測點施作深度於地表下約 4m 左右，包含場址前置調查作業與後期查核驗證作業共 2 次施作，施作總尺寸 $= (14 \times 4\text{m}) = 56\text{m}$

土壤分析取樣作業:預計每次取樣測點 6 點(每個浮油回收井模場個兩個測點，包含回收井與 1 個周界監測點)，參考紫外光學雷射誘發螢光系統(UVO-LIF)施作結果進行定深取樣作業，每個測點取 1 個樣品(以高濃度強度反應為依據)，包含場址前置調查作業與後期查核驗證作業共 2 次施作，總樣品數 $= (6 \times 1) \times 2 = 12$ 個。

樣品分析作業:預計以火焰離子氣相層析儀(GC-FID)進行分析作業，分析項目為:總石油碳氫化合物(TPH-G & TPH-D)，總分析樣品數=12 個分析樣品(包含前期背景調查 6 個與後期驗證調查 6 個)。

模場試驗使用設備說明:本研究計畫所採用的現地調查系統(UVOST-LIF)與土壤取樣等設備將以租借或外包方式進行，另現地浮油回收系統現地工程設置亦以外包方式進行，而新開發樣式的浮油回收系統將依現場需求進行製作。

模場試驗浮油回收系統:試驗模場的浮油回收系統主要設施包含浮油回收井、吸啜管、隔膜式氣動泵、空氣動力源、壓力控制閥、調壓閥、節流閥、壓力表、真空表、流量開關、管閥接件、管件、流量表、計量器、油水分離器、液體儲槽、廢氣處理槽、封塞器、連接桿等等組合成整個試驗用回收系統，相關組件組配串接設計如圖 4.5 所示。

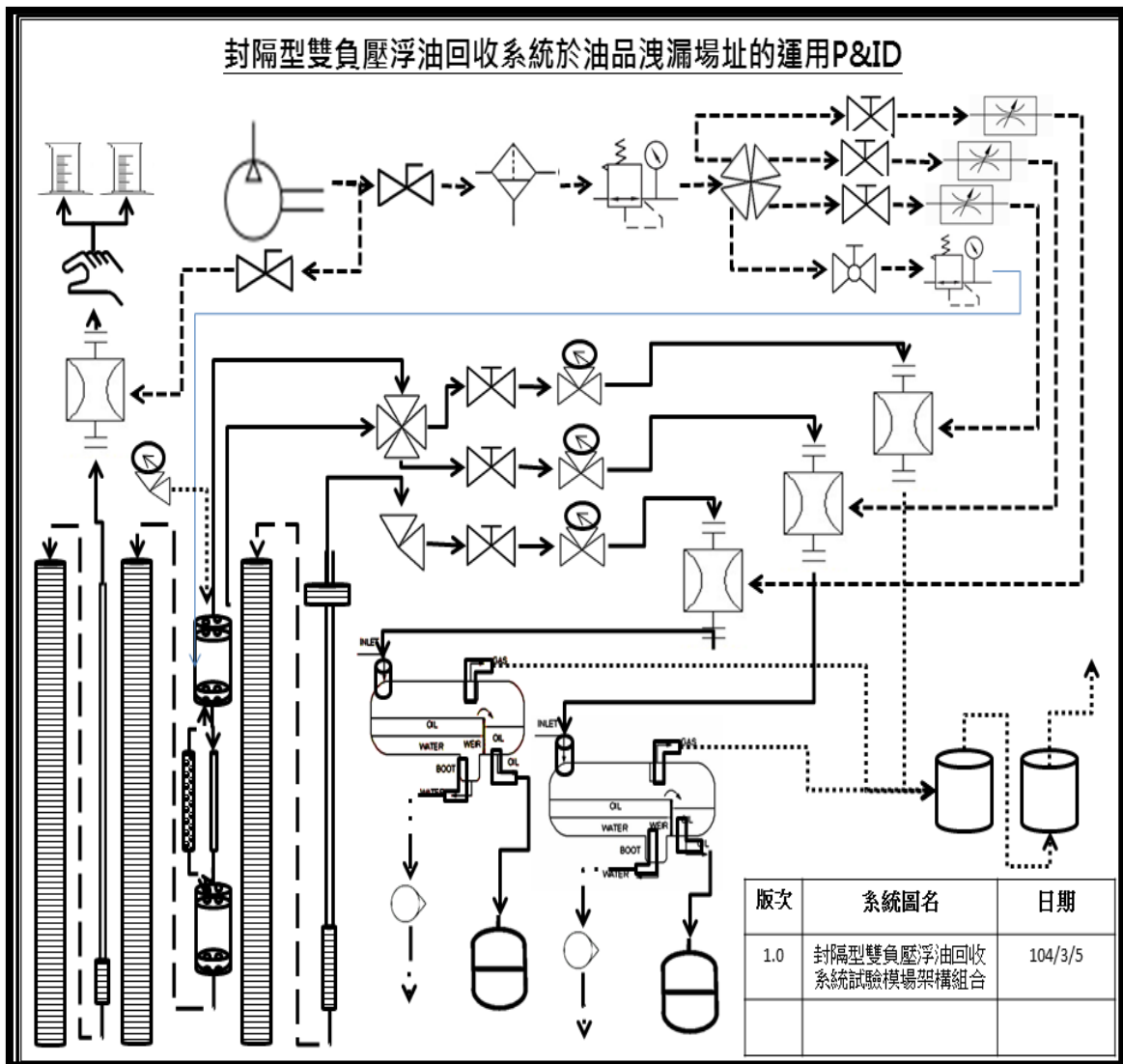


圖 4.5 試驗模場整體浮油回收系統設計 P&ID 圖

4.4 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 4.6 與表 4.1 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。藉由補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 4.1 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

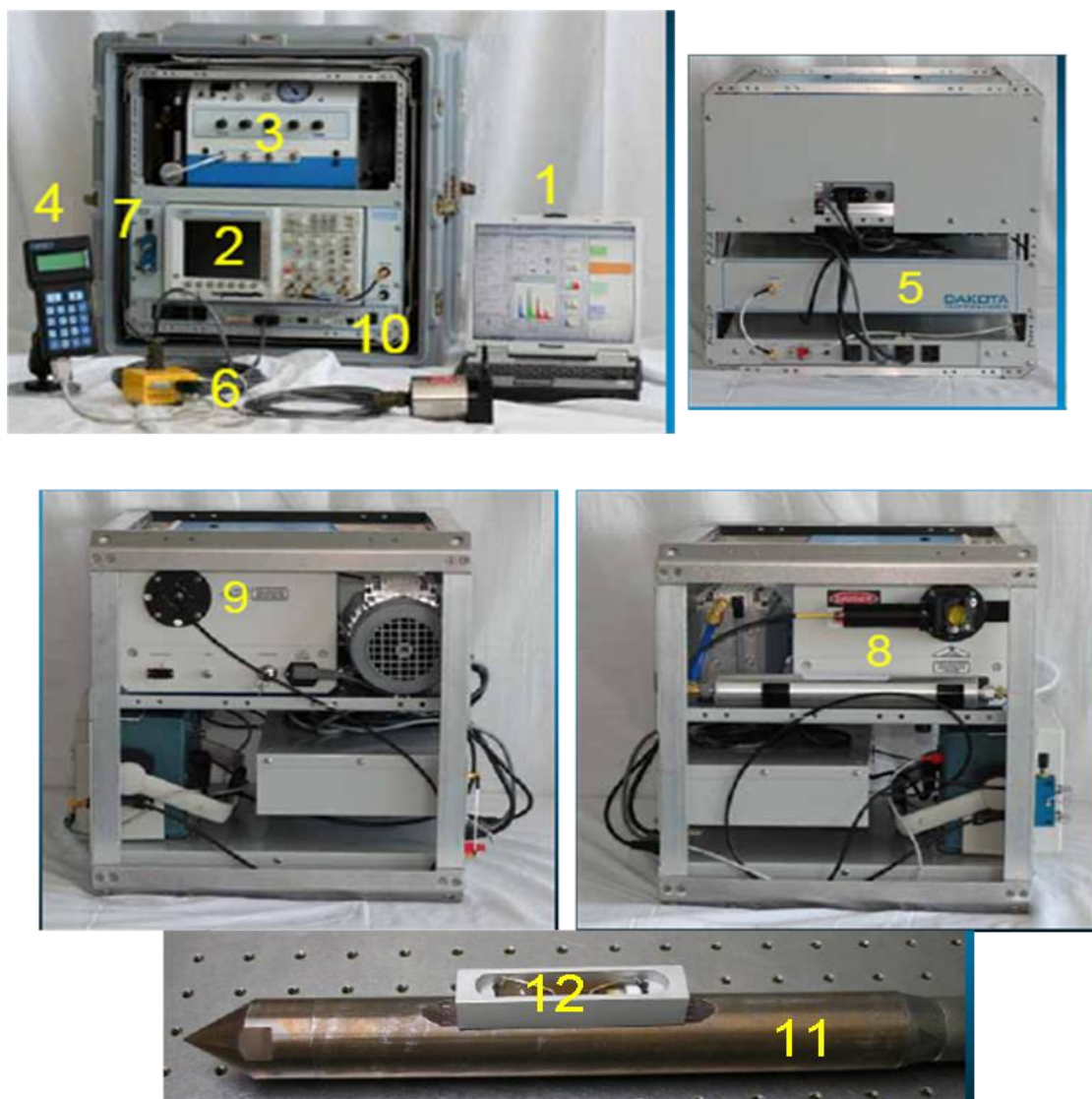


圖 4.6 本研究所使用之 UVOST 雷射激發螢光系統

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。

4.5 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 從內置的襯管中取得，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×46ih 長(44mm×1168mm)，一般材質包括不鏽鋼、Teflon、PETG、PVC 等。系統組成如圖 4.7 所示。

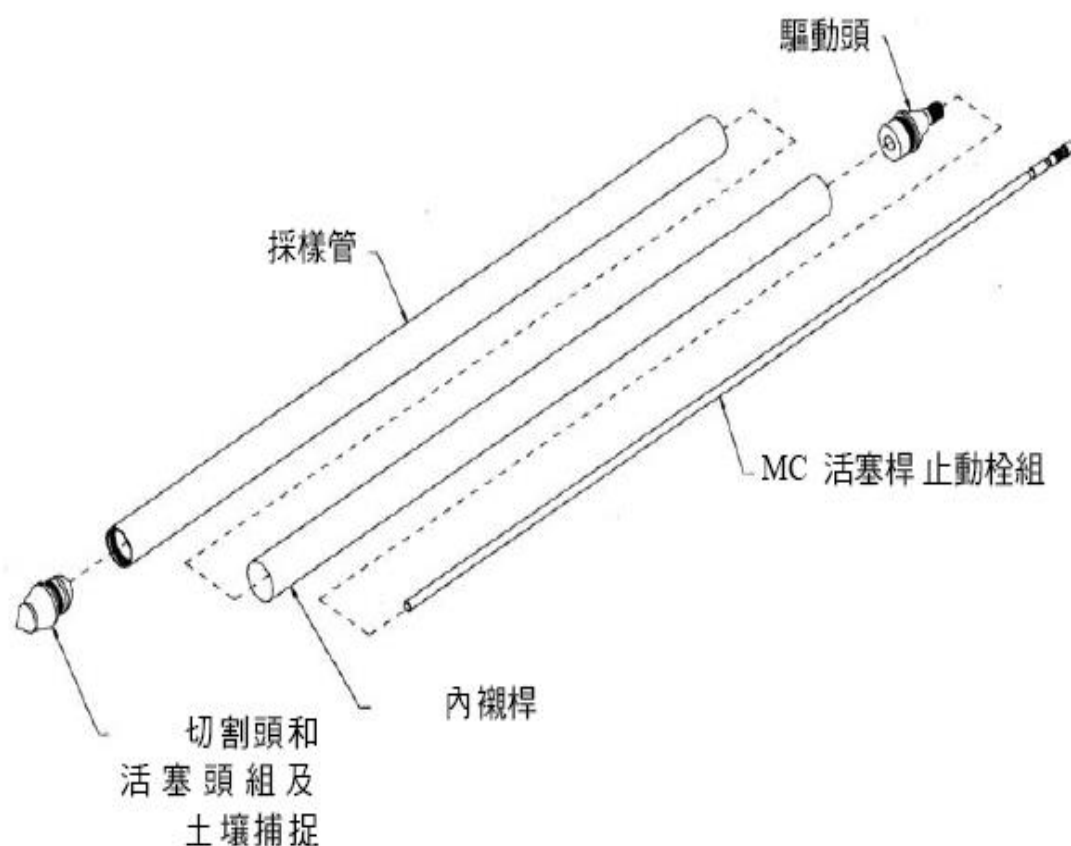


圖 4.7 活塞式土壤採樣工具構件圖

4.6 雙封隔式浮油回收裝置

雙封隔式浮油回收裝置(圖 4.8)為一種新開發型的浮油回收系統，主要基本套件包含 2 個多通道型充氣式封隔器、親油型填充吸啜管、封隔器連接桿、充氣管、壓力調節控制器模組、流量調節控制模組與真空/流量調節控制模組，一般組裝操作模式為設置前先量測浮油回收井內之地下水位與浮油液位，依據浮油厚度裝設需封隔的區間，然後依封隔區間使用連接桿串接兩個封隔器後連接適當長度的填充吸啜管，並連接汲油管路、抽氣管路、真空監控管路後再使用連接桿將組裝完成的裝置推送至原先預定的封隔位置，裝置就定位後即以充氣原件進行封隔器的充壓動作使預設之汲油空間產生密閉功能，封隔完成後即可操作真空產生器(真空泵)進行真空抽吸動作來執行浮油回收作業，通常會視地層浮油的滲入率進行腔體真空調節與抽汲浮油管路流量調節來達到一較穩態的浮油回收控制。

Pelican密封箱內容物:

- (1)4inch packerx2
- (2)供氣控制模組*1
- (3)抽氣控制模組*1
- (4)填充管0.5m*1
- (5)連接桿:
 - 1mx2
 - 0.5mx2
 - 0.25mx2

封隔型雙負壓浮油回收系統套件

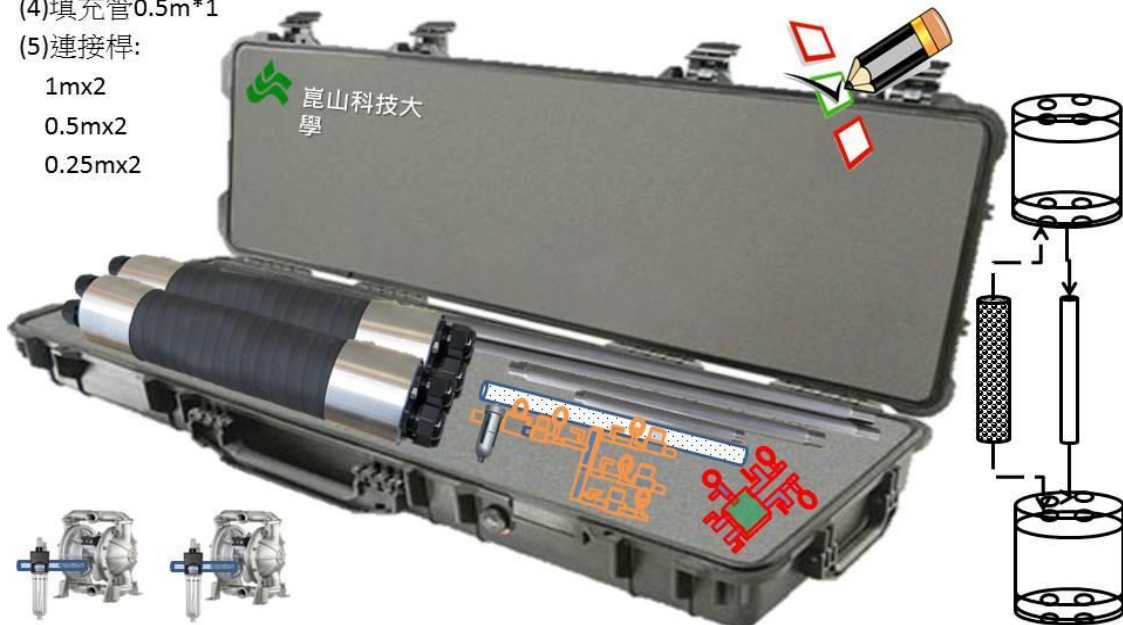


圖 4.8 雙封隔式浮油回收裝置基本套件組

4.7 其他搭配的檢測方法

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

氫氣流速：30 mL / min

空氣流速：300 mL / min

注射方式：split (2:1)

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。

4.8 執行期程

依據合約規定本計畫執行期間自 2013 年 11 月 25 日起至 2014 年 11 月 24 日止完成計畫，共計 365 日曆天，工作進度預定排程詳見表 4.2。本計畫自計劃核定通過後開始執行日起至第 6 個月份需提交期中報告，預定繳交日期為 2014 年 5 月 25 日，於第 11 個月份須提交期末報告初稿，預定繳交日期為 2014 年 10 月 10 日，於計劃期間預定 4 個查核點為執行期程之第 3.5 個月份、期中、第 10 個月份與期末等，有關預定工作執行排程(表 4.2)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 4.2 本計畫預定工作進度及查核點

年月 工作項目	年月												備 註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
一階環境場址評估		■	■										
二階環境場址評估			■	■									
井場設置與浮油回收系統設置			■	■	■								
前置試驗與系統調整					■	■							
期中報告撰寫					■	■							
系統操作與監控作業					■	■	■	■	■	■			
執行成效查核驗證											■	■	
資料總整理、解析與成果比較											■	■	
期末報告											■	■	
以下空白													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8%	16%	27%	33%	41%	50%	58%	66%	75%	83%	91%	100%	
預定查核點	期中		第 3 個月完成一階與二階環境場址評估，第 4.5 個月完成現地工程置與試驗及系統調整作業。第 6 個月提出期中報告										
	期末		第 10 個月完成現地浮油回收操作程序，第 11 個月完成執行成效查核驗證。第 12 個月提出期末報告。										

說明： ■ 預定進度 ■ 實際執行

1、 工作項目請視專案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。

第五章 結果與討論

5.1 一階環境場址評估作業結果

5.1.1 場址歷史資料

本次試驗施作之模場位於中油大林廠 F 區第六媒組工場區內，場址隸屬台灣中油股份有限公司煉製事業部大林煉油廠，中油大林廠位於高雄市小港區沿海四路 50 號。中油大林廠第六媒組工場(高雄市小港區中林子段 1025-6 地號)於 100 年 8 月由環保單位入廠進行土壤及地下水污染採樣調查稽核時，調查發現廠內 F 區第六媒組工場內用地被稽核出土壤樣品中濃度苯 40.7ppm、二甲苯 685ppm，超過「土壤污染管制標準」(標準值：苯為 5 mg/kg、二甲苯為 500 mg/kg)，另地下水中濃度總酚 0.562 mg/L、苯 105 mg/L、甲苯 115 mg/L、TPHd 882 mg/L，也超過「地下水污染管制標準」(標準值：總酚為 0.14 mg/L、苯為 0.05 mg/L、甲苯為 10 mg/L、TPH 為 10 mg/L)，100 年 10~12 月大修期間進行於第六媒組工場進行污染源查漏及阻漏措施作業，101 年 2 月在 F 區第六媒組工場區與周界範圍定期監測地下水質，在十一口水質監測中有六口檢出水中苯濃度含量超過「地下水污染管制標準」，在土壤檢測分析結果方面 8 個調查點中有三個土壤採樣測點超出「土壤污染管制標準」。環保單位後續要求中油大林廠需於 101 年 4 月 20 日前提報相關污染改善應變必要措施計畫，目前依據所提污染改善應變必要措施計畫相關內容進行場址污染改善作業中。

5.1.2 場址地理位置

中油大林煉油廠地處高雄小港區鳳森里，小港區是台灣高雄市的一個市轄區，位於市區南端，北臨鳳山區，東鄰大寮區且有鳳山丘陵為屏障，西北連前鎮區，西南濱台灣海峽，南接林園區，總面積 41.2061 平方公里，現轄 38 里鄰，為高雄國際航空站的所在地(如圖 5.1)。

試驗場址位於中油大林煉油廠工場區中，中油大林廠地處高雄市小港區高雄第二港口南端，臨海工業區西南側。北側臨海汕小港，東側隔第二港口彼岸為臨海工業區中船及中鋼公司，西側及緊鄰大林浦聚落更遠處為南星計畫區。東南方約 4 公里處為駱駝山，東北至東南方約 5~6 公里處為鳳山丘陵，地理位置如圖 5.2 所示。



圖 5.1 高雄小港區行政區域圖

資料來源：高雄市政府民政局

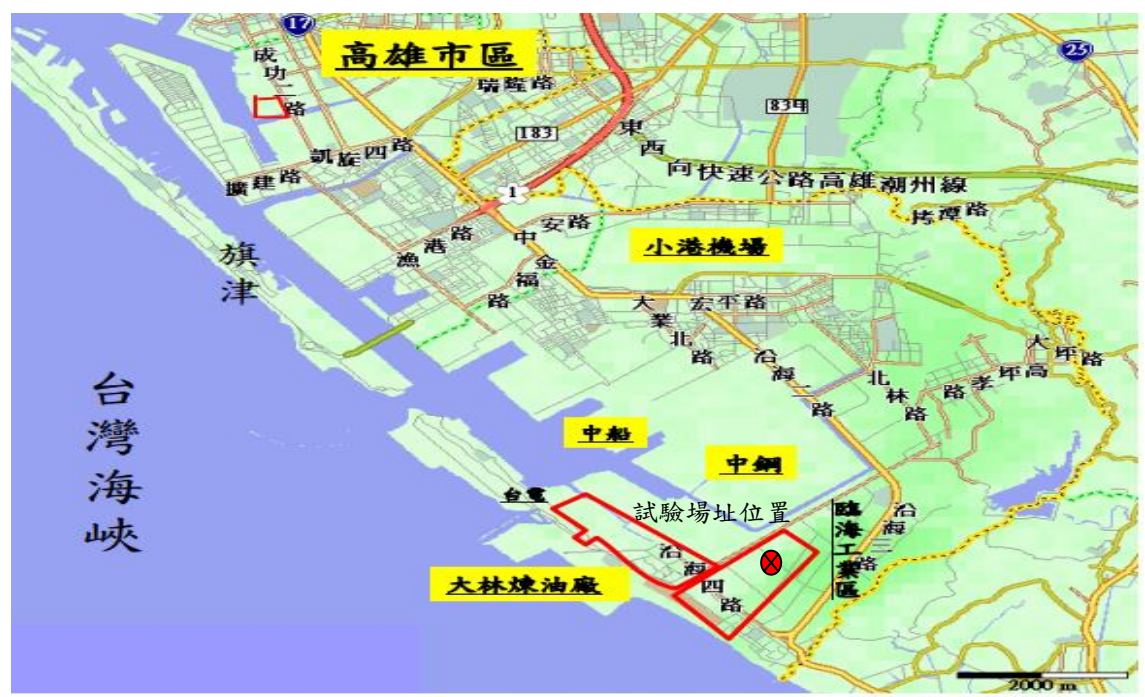


圖 5.2 試驗模場所處場址廠區地理位置圖

資料來源：中油大林煉油廠

5.1.3 驗場址工廠區製程特性

試驗場址所位於之工廠主要以生產石油及煤製品，包括液化石油氣、車用汽油、航空燃油、柴油、燃料油、丙烯、氫氣、硫磺等，大林廠區煉製製程流程如圖 5.3 所示其生產製程特性說明如下。

- (1) 蒸餾工場三座，每座日煉原油十萬桶，主要生產液化石油氣、石油腦、煤油、柴油、重油等產品。
- (2) 芳重油脫硫工場二座，每座每日煉製三萬桶，生產低硫份燃料油，其含硫量可低於百分之零點五以下。
- (3) 硫磺工場二座，每座可日產硫磺兩百噸，將重油中所含硫份轉變為高純度液態硫磺，作為化學品的原料。
- (4) 氫氣工場一座，可日產高純度氫氣三千五百萬立方英尺，供應低硫燃料油工場及石化下游工廠使用。
- (5) 重油轉化工場一座，其進料為脫硫之重油，每日煉二萬五千桶，生產汽油、丙烯等產品。
- (6) 汽油摻配工場二座，可摻配九二、九五無鉛汽油。烯烴轉化工場一座，進料為丁烷、丁烯可聚合為汽油、提高辛烷質，日煉四千七百桶。
- (7) 異構化工場一座，其進料為戊烷、己烷，可轉化正烷烴為異烷烴，提高油品之辛烷質，日煉一萬桶。
- (8) 煤組工場兩座，其進料為輕石油腦，每座每日煉量三萬桶，生產煤組油，可供摻配成高級無鉛汽油，及供應作為芳香烴石油化學品之原料。
- (9) 油氣純化工場一座，可日煉七千兩百萬英尺之高純度氫氣以及日煉凝結油七萬五千桶，生產液化石油氣、塔底油及石油腦。

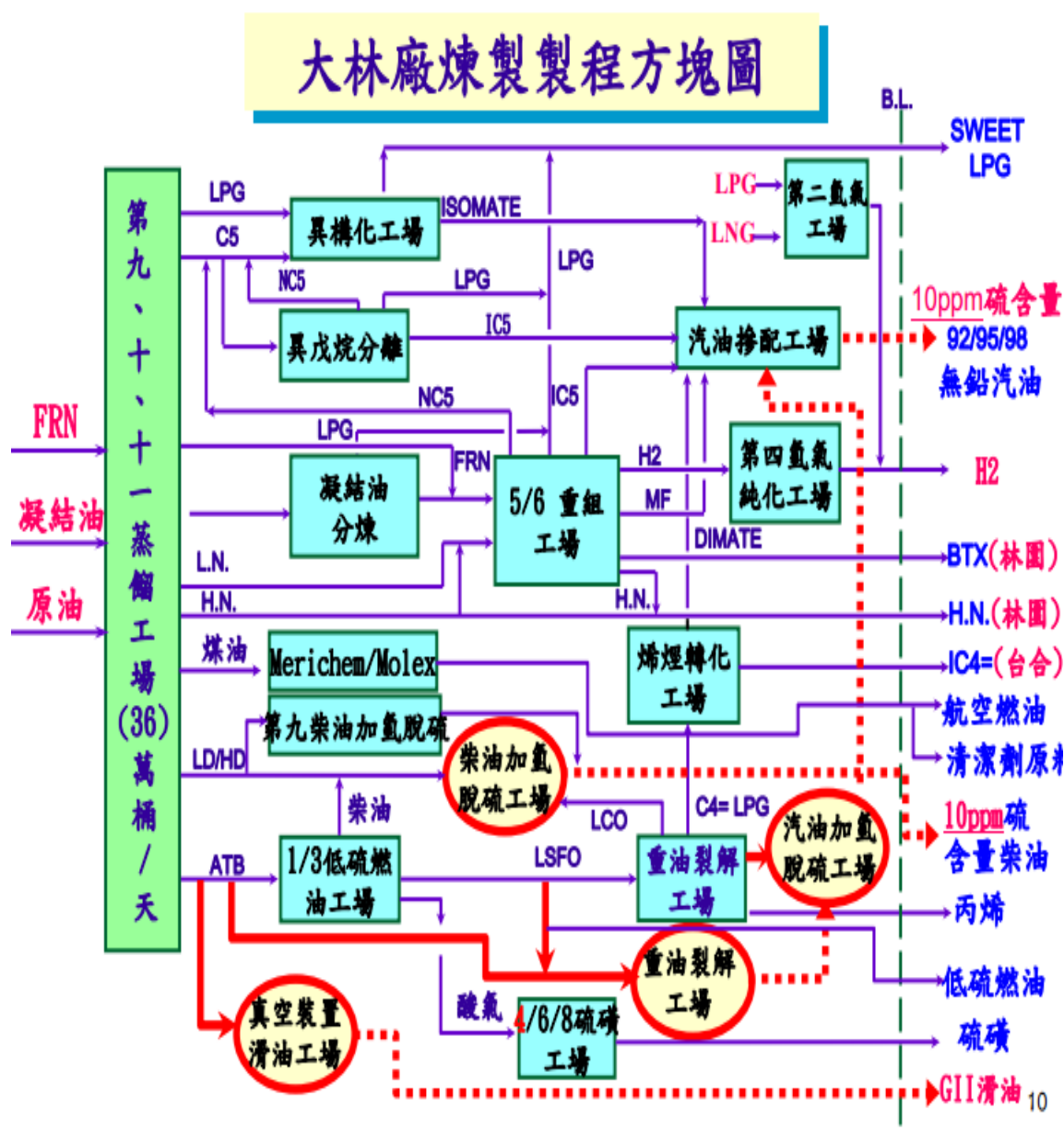


圖 5.3 中油大林廠區煉製製程流

資料來源：中油大林廠

5.1.4 可能污染物及其特性

大林廠的煉製製程主要以生產石油及煤製品，包括液化石油氣、車用汽油、航空燃油、柴油、燃料油、丙烯、氫氣、硫磺等。其中成分主要為總石油碳氫化合物外亦包含相關芳香烴類物質，使用與生產相關的原料與製程物亦是目前土壤或地下水的污染管制項目因此，這些製程原料都可能是污染來源之一。

茲說明大林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) 二甲苯

二甲苯外觀為無色透明液體，具有芳香氣味，比重為 0.861，蒸氣壓在 25℃時為 6.5 mmHg，蒸氣密度為 3.7，水中溶解度在 25℃時為 130 mg/L，爆炸界限為 1.0～7.0%。二甲苯對眼睛、皮膚及黏膜具有刺激性，暴露於二甲苯可能會造成呼吸困難、食慾減少、噁心、嘔吐、皮膚炎、疲倦、頭痛、頭暈、失去協調性、易怒、反應時間改變、麻醉、部分手足麻痺與貧血，在

嚴重的病例中，會導致意識喪失與死亡。

(5) 總石油碳氫化合物

總石油碳氫化合物含蓋範圍為含碳數 C6~C40 等之石油碳氫化合物，其中汽油類主要組成為 C6~C9 的直鏈烷類及其異構物，並含有較高量之 BTEX 等揮發性芳香烴、及如 MTBE 等添加劑，高碳數如柴油及重油主要組成為 C10~C40 的直鏈烷類及其異構物、含支鏈烷類、環烷類，是故 C6~C9 為總石油碳氫化合物-汽油(TPH-g)，而多碳數 C10~C40 為總石油碳氫化合物-柴油(TPH-d)。汽、柴油為淡黃色液體，為原油蒸餾出之混合物，比重約 0.82。由於汽、柴油屬混合物，並無物質安全資料(MSDS)與毒性資料(如 LD50 等)、風險暴露參數等。

(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。

5.1.5 試驗模場所處場區地質特徵

在地質地層方面本區域在地表出露之地層以更新世至全新世地層為主，由老而新包括大社層（含鳳山石灰岩）、台地堆積層及現代沖積層（地調所，2001），其中大社層及台地堆積層分布於鳳山丘陵地區，至於現代沖積層則分布於仁愛—前鎮河平原區，各地層特性分述如下。

大社層 (Ts)

本層主要分佈於高雄縣柑宅巷以南之大社—大樹地區及鳳山地區，再往北則漸減而無本層的分佈。本層岩性以厚層泥岩為主，間夾有 50 公分至 3 公尺厚的細粒至粗粒的砂岩、10 公分至 1 公尺厚的礫岩層與砂、頁岩互層，部份砂岩內可見化石碎屑。礫石一般礫徑以 3 至 5 公分者最多，少數可發現有超過 10 公分者；其成分以砂岩、變質砂岩及石英岩最佔優勢，形狀以圓形至次圓形為主；頁岩及板岩則較小（1 至 3 公分），形狀較扁，偶而亦可見到風化的玄武岩。本層於鳳山地區南側在其上部並夾有鳳山石灰岩透鏡體。

鳳山石灰岩 (Tsf)

本層出露之標準地點為高雄縣鳳山，分佈於鳳山水庫以南至鳳鼻頭之間，屬大社層之透鏡體構造。岩性以生物泥粒岩或粒泥岩及生物泥礫岩或礫泥岩為主，主要由泥晶及生物化石碎屑組成，化石碎屑包括大型有孔蟲、鈣質紅藻、珊瑚及貝類等。本層厚度最厚可達約 50 公尺，一般厚度約 30 公尺左右。

台地堆積層 (t)

台地堆積層分佈於鳳山丘陵南緣大坪頂台地局部區域，主要由礫石、砂及粘土所組成，為更新世晚期之後的產物，礫石粒徑可達 30 公分，厚度可達 10 公尺以上，為陸相沉積物，不整合覆蓋於大社層及鳳山石灰岩之上。

現代沖積層 (a)

本層係區內沖積平原主要材料，係由砂、泥及礫石組成。現代沖積層不整合覆蓋於以泥岩為主之基礎岩盤之上，依據本區附近其他鑽孔資料顯示，本層於計畫區附近厚度大部分應超過 40 公尺。

大林煉油廠附近地表下 60 公尺內現代沖積層之分布，依先前歷史各階段既有鑽孔資料整理，大致可分為兩層（表層人工回填層不計），由上而下分別為：

厚層粉土質砂夾泥質或黏土質地層，偶夾砂質礫本層厚度約在 35~40 公尺間，研判應為河相—河口灣（溢浪沖積扇或障蔽島）—濱面之砂質沉積物，其 SPT-N 值（標準貫入試驗）大約分布於 5~30 之間，並呈現由上而下漸增之趨勢；地下水位約分布於地下 2 公尺左右粉土質黏土或砂質粉土偶夾

粉土質砂

本層厚度應在 30 公尺以上，研判應為內遠濱環境下之泥質沉積物，其 SPT-N 值大約分布於 15~40 之間，並呈現由上而下漸增之趨勢，局部砂質含量高的地層，其 SPT-N 值可大於 40。

此外，靠近 F 區區域之地層，依附近其他計畫鑽孔資料顯示大致為：

粉土質黏土或砂質黏土本層厚度約在 6~11 公尺間，研判應為河相（曲流）之泥質沉積物，SPT-N 值多在 2~10 之間，顯示其膠結疏鬆軟弱；地下水位約分布於地下 10 公尺內。

5.1.6 試驗模場所處場區水文特徵

依據高雄市政府環保局網站之地下水環境相關資料顯示，大林煉油廠所在之小港區，由於西側臨海域，故整體地下水流向亦由東向西，豐水期間為西南向，枯水期間則以西向為主，大林煉油廠一帶則為西北向。而由於本區鄰近海岸，地下水位也較淺，無論是豐枯水季，地下水位均在地表下 1~3 公尺左右，而往大林煉油廠 F 區方向沿線向東至大坪頂地區，由於地勢較高地下水位大約地表下 5~8 公尺。本次試驗模場所處之 F 區第六媒組工場共設置有數十口地下水質監測井，依據大林煉油廠土壤及地下水污染改善應變必要措施計畫書(101 年 09 月)中所提該區域之地下水位流向亦呈現向西北方向流動之趨勢。(如圖 5.4)



圖 5.4 大林煉油廠 F 區第六媒組工廠區地下水流向示意圖

5.1.7 試驗模場所處場區受污染特性

本次計畫選定之模場試驗場地主要位於大林煉油廠 F 區內第六媒組工場的區域範圍內，該區域在 101 年 3 月至 6 月期間所執行的土壤與地下水定期監測中，於 101 年 3 月 8 日所採樣之 8 點土壤樣品標準方法分析結果，其中有 3 點(S01、S02、S04)超過土壤污染管制標準，其餘皆低於土壤污染管制標準，由調查結果可初步呈現污染範圍集中於第六媒組工場東北側(如圖 5.5)。地下水監測方面依據 F 區之地下水監測井樣品標準方法分析結果與第六媒組工場監測井分析結果數據合併進行場區污染範圍分析推估，由地下水中所分析之苯濃度項目進行數據解析繪出苯污染等濃度分布推估圖，其地下水水質受污染影響範圍狀況如圖 5.6 所示，場區地下水苯污染等濃度分布推估結果顯示高污染濃度區域位於第六媒組工場區東北側位置，由此次 F 區的土壤與地下水樣品監測分析結果來看，本次模場試驗場地所處之第六媒組工場區其受污染位置大致靠近工場區北方偏東之方位。

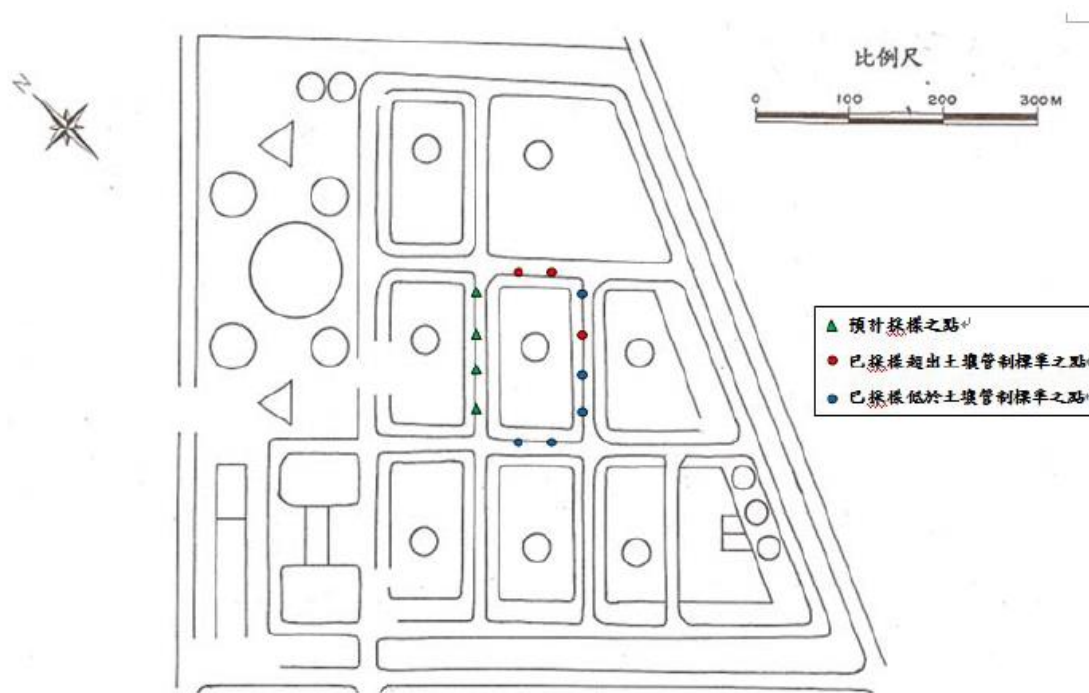


圖 5.5 F 區內第六媒組工場 101 年 3 月 8 日土壤採樣調查測點

資料來源：大林煉油廠土壤及地下水污染改善應變必要措施計畫書(101.09)

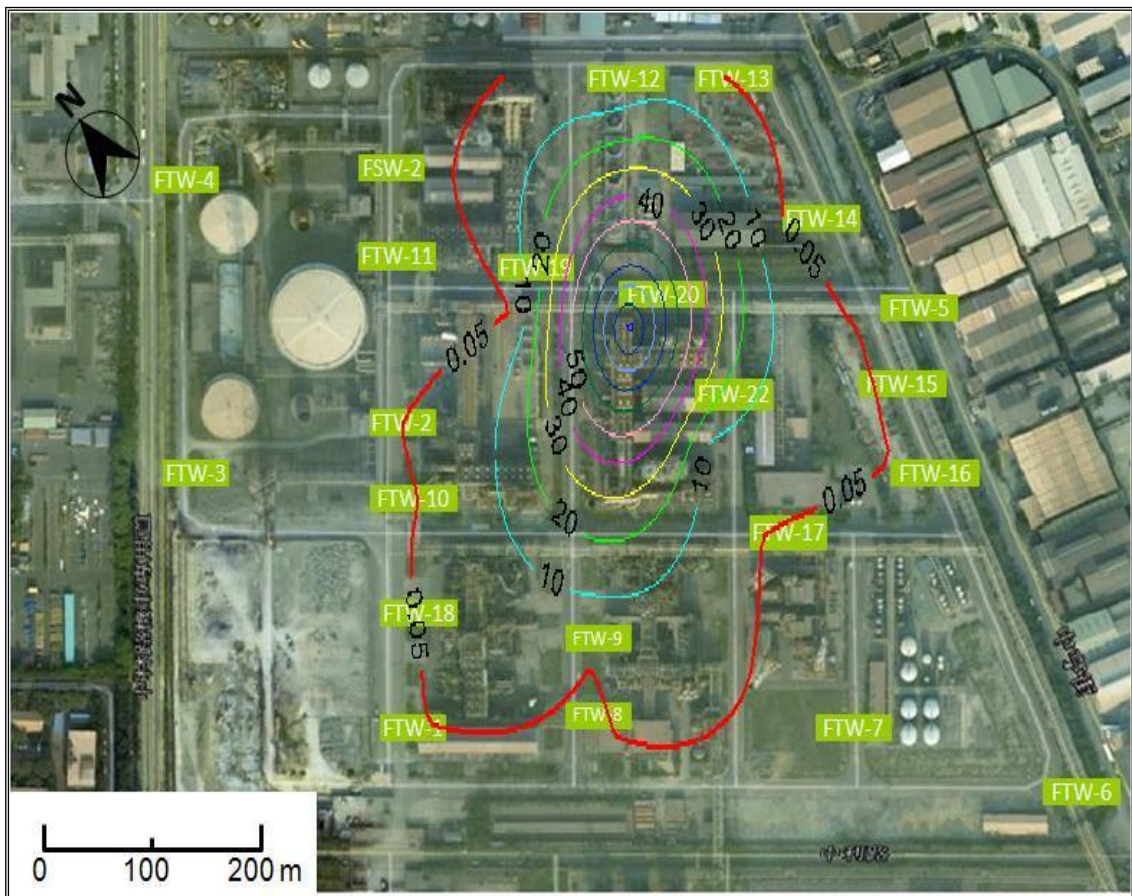


圖 5.6 試驗模場所處 F 區 101 年 4~6 月地下水苯污染濃度範圍推估示意圖

資料來源：大林煉油廠土壤及地下水污染改善應變必要措施計畫書(101.09)

5.1.8 試驗模場所處場區污染改善作為與設施

本次試驗場址所處場區(F 區之第六媒組工場)進行過之污染改善作為，主要於 100 年 10~12 月在工場停爐大修期間進行污染源查漏工作及進行阻漏防治等(如圖 5.7)，相關作業說明如下：

1. 發現 CPI 油水分離池一處破損洩漏，經機修課檢修妥，油坑及水坑重新鋪設防蝕。
2. 所有排放至 COD 之管線均加盲板，COD 已正式停用(之前僅靠關閉 Valve 隔離)。
3. 8 吋地下油管主管線開挖檢查，並無洩漏處。
4. 埋設 CPI 旁回收井時發現地下油管管線進入 CPI 處 4 吋沖洗管線

焊道未焊，經修護焊盲板封死。

5. 未來各地下油管主管線將設置管溝。
6. 大修末期在地下水、中、下游已增設 4 座浮油回收箱；另外，上游端亦增設 5 口監測井。
7. 歲修後已自浮油回收箱抽取浮油 126 公升。
8. 第六煤組工場裝設 6 台氣動泵，歲修後恢復啟動。另外，浮油回收箱後續亦儘速配管抽取油水，定期量測污染應變化情況。

	
4 吋沖洗管線焊道未焊	地下油管管切斷盲封
	
裝設浮油回收井	浮油回收井施工完成
	
地下油管主管線開挖檢查	地下油管主管線防腐蝕處理

圖 5.7 試驗場址所處場區相關污染改善作業

9. 第六媒組工場區範圍內所裝設之浮油井與浮油回收設施與場區配置情形如圖 5.8 所示。

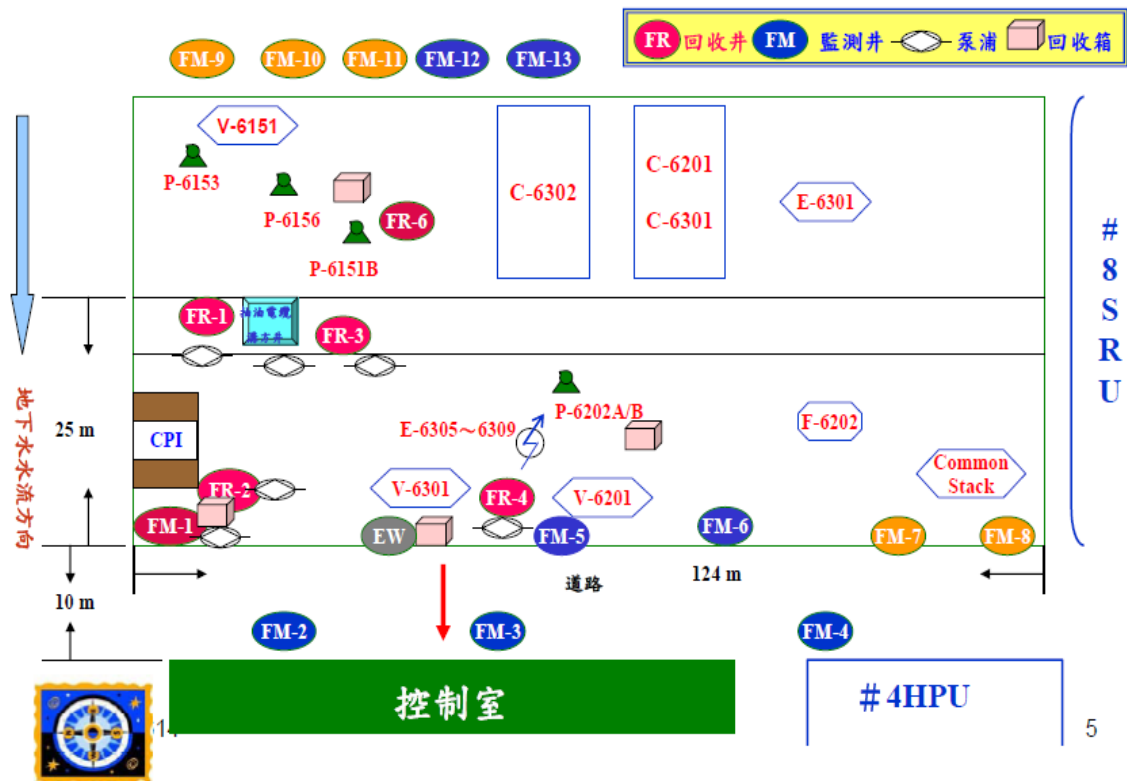


圖 5.8 第六媒組工場裝設浮油回收箱及監測井相關位置示意圖

10. 導入現地污染阻截式整治技術，應用空氣注入(air sparging)法將空氣注入到地下水中產生氣泡，而將水中污染物氣提趕出到不飽和層中，再配合空氣抽取設備(SVE)將氣體抽至地面處理(如圖 5.9)。



圖 5.9 F 區第六媒組工場周界污染局限工法 SVE/AS 系統設置

5.2 二階段環境場址評估作業調查結果

在二階段環境場址評估作業(Phase II Environmental Site Assessment Process)方面主要使用可針對非屬溶解相液體(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPLs)直接進行偵測的紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)快速調查工具執行調查作業，在計畫目標場址污染分布調查方面共規劃計執行 14 個調查測點平均深度約 10m 左右，測點編號為 S01~S14 配置位置如 4.2 章節中圖 4.3 所示，而測點實際現場位置如表 5.1 中各照片所示，在 14 個調查點中由表 5.2 中 UVOST-LIF 深度變化螢光強度反應圖來看除 S11、S14 兩個測點無明顯之螢光反應外，其餘測點如 S10、S12、S13 呈現微量螢光強度反應(RE%)；測點 S05、S06、S07、S09 呈現略強的螢光反應(RE%)；而以測點 S01、S02、S03、S04、S08 等四個測點為此次螢光強度反應(RE%)較強之調查測點，其中以 S01 與 S04 測點反應最強烈(圖 5.10)。在整體不同深度變化具螢光強度反應(RE%)方面由圖 中所彙整 14 個測點統計後，可明顯看出最淺約從地表下 1.5m 深度開始有螢光強度反應(RE%)現象，部分測點最深可達地表下 7~8 米深度左右，但主要較顯著的螢光強度反應(RE%)則為地表下 2~5m 的範圍區間。

另外由紫外光學雷射誘發螢光系統(UVOST-LIF)調查結果所提供之螢光色階圖與螢光特徵圖來看，調查場址中存在之油品類的 NAPLs 大概有 3 種類型如表 5.3 中所呈現之特徵，將 14 個調查點藉由 NAPL 螢光特徵加以層別與歸類大致可分成，測點 S01 部分淺層、S02、S08、S09 淺層等其油品 NAPL 螢光特徵是相同屬性；測點 S01 部分淺層、S04、S03 部分淺層具相同屬性而深層部分也有相同屬性的反應；測點 S10、S12、S13 等淺層微量反應屬性相同；測點 S05 深層部分與 S01、S04、S03 等深層部分螢光特徵反應屬性相同，除測點 S02、S04、S05、S08 其油品 NAPL 污染特徵較明確具體外，測點 S01 與 S03 則呈現多種類油品 NAPLs 混雜分布的型態，另外在螢光強度反應(RE%)較微弱的測點 S10、S12、S13 與 S09 深層部分則呈現油品風化較嚴重的螢光特徵反應狀態。

綜合 14 個 LIF 測點進行試驗場址污染分布數值圖形化資料解析，結果如圖 5.11 中所呈現高污染濃度區分成兩個區域，由場址俯視圖來看，一個區域為測點 S04 位置；另一個區域位於測點 S08，另由相關場址側視圖查看，於測點 S04 的高濃度污染團呈現淺層污染分布情形，而測點 S08 的高濃度污

染團則呈現相對較深之污染分布情形。經由二階段環境場址評估作業結果依據紫外光學雷射誘發螢光系統所測得之場址 NAPLs 分布的高濃度範圍區域，後續將於此兩高濃度區域範圍內再進行進一步的 LIF 測點測試以建立浮油回收模場的污染狀況背景資料。

表 5.1 計畫目標場址污染分布調查 UVOST-LIF 各測點位置現場照片彙整表

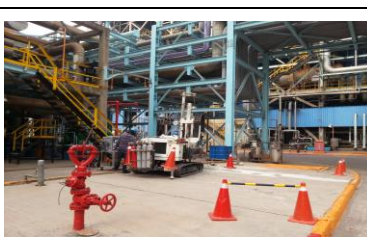
		
S01	S02	S03
		
S04	S05	S06
		
S07	S08	S09
		
S10	S11	S12
		
S13	S14	空白

表 5.2 計畫目標場址污染分布調查 UVOST-LIF 各測點剖面深度 NAPL 螢光反應變化圖彙整表

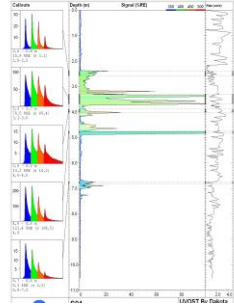
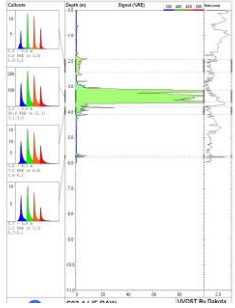
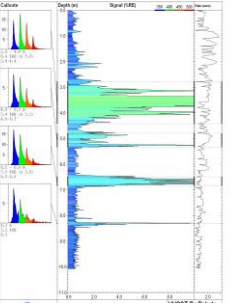
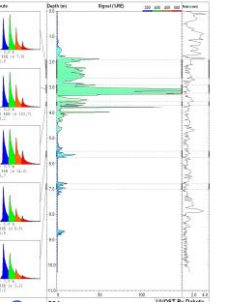
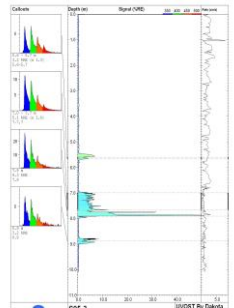
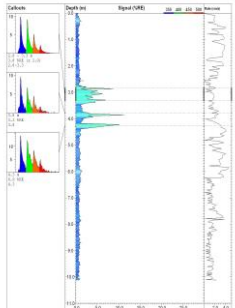
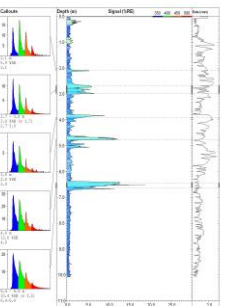
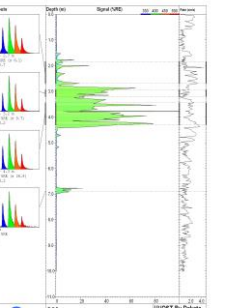
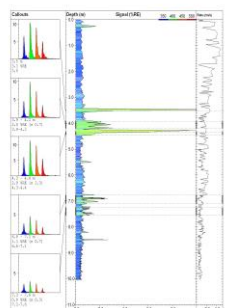
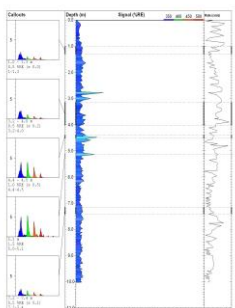
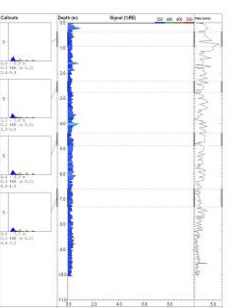
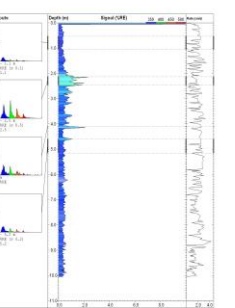
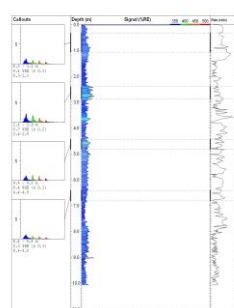
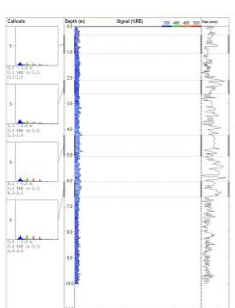
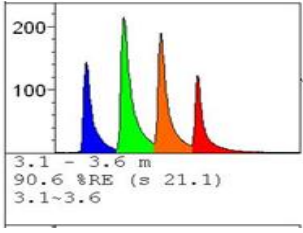
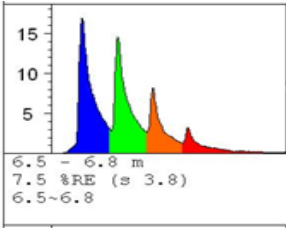
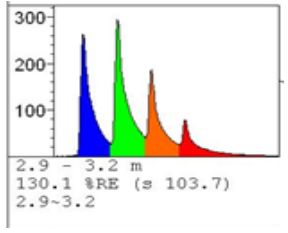
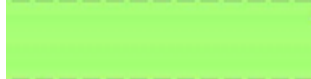
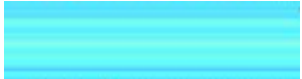
			
S01	S02	S03	S04
			
S05	S06	S07	S08
			
S09	S10	S11	S12
			
S13	S14	空白	空白

表 5.3 此次場址 UVOST-LIF 調查結果呈現主要油品 NAPL 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			

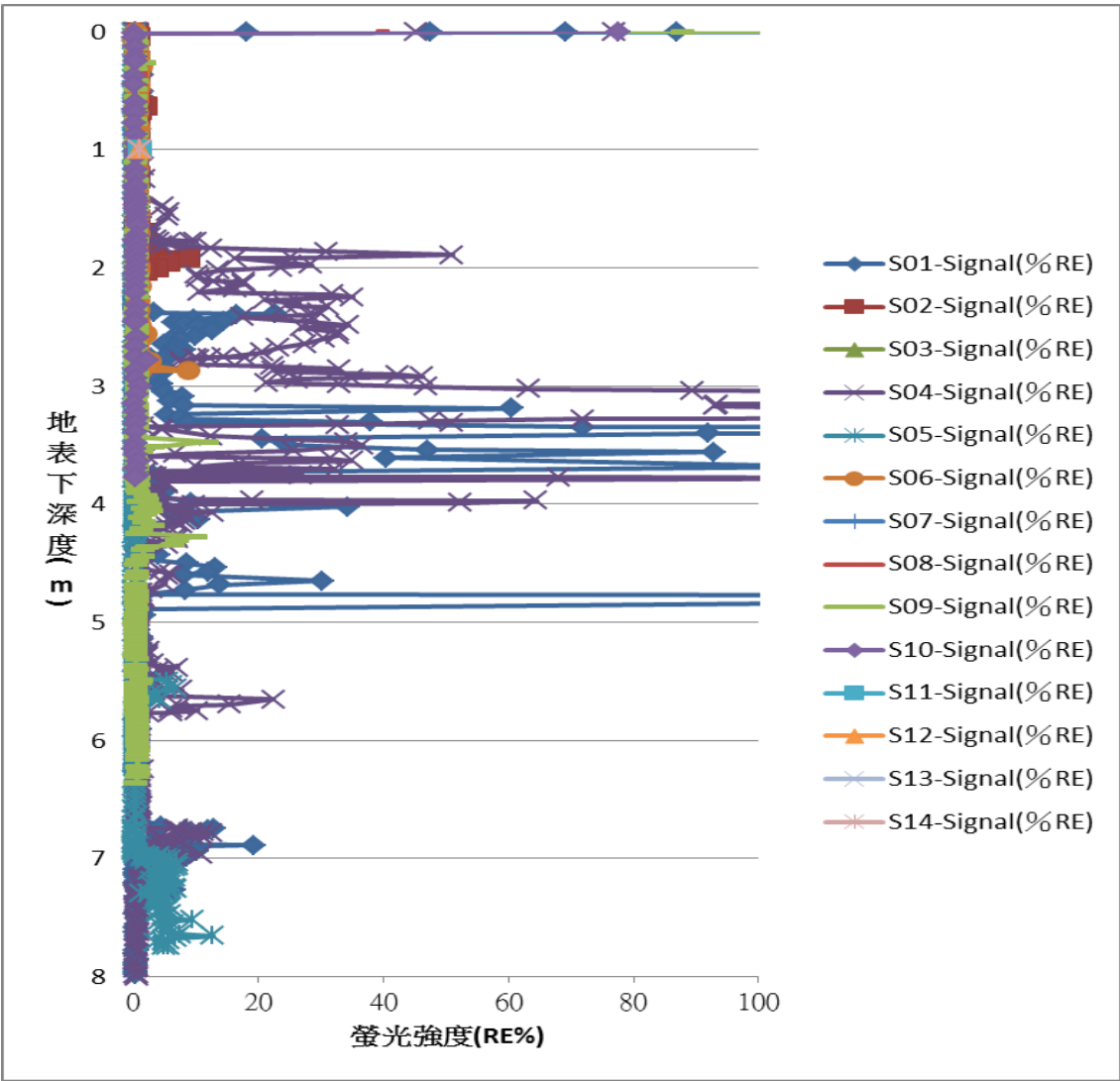


圖 5.10 試驗模場 UVOST 雷射螢光檢測各測點螢光反應深度分布彙整圖

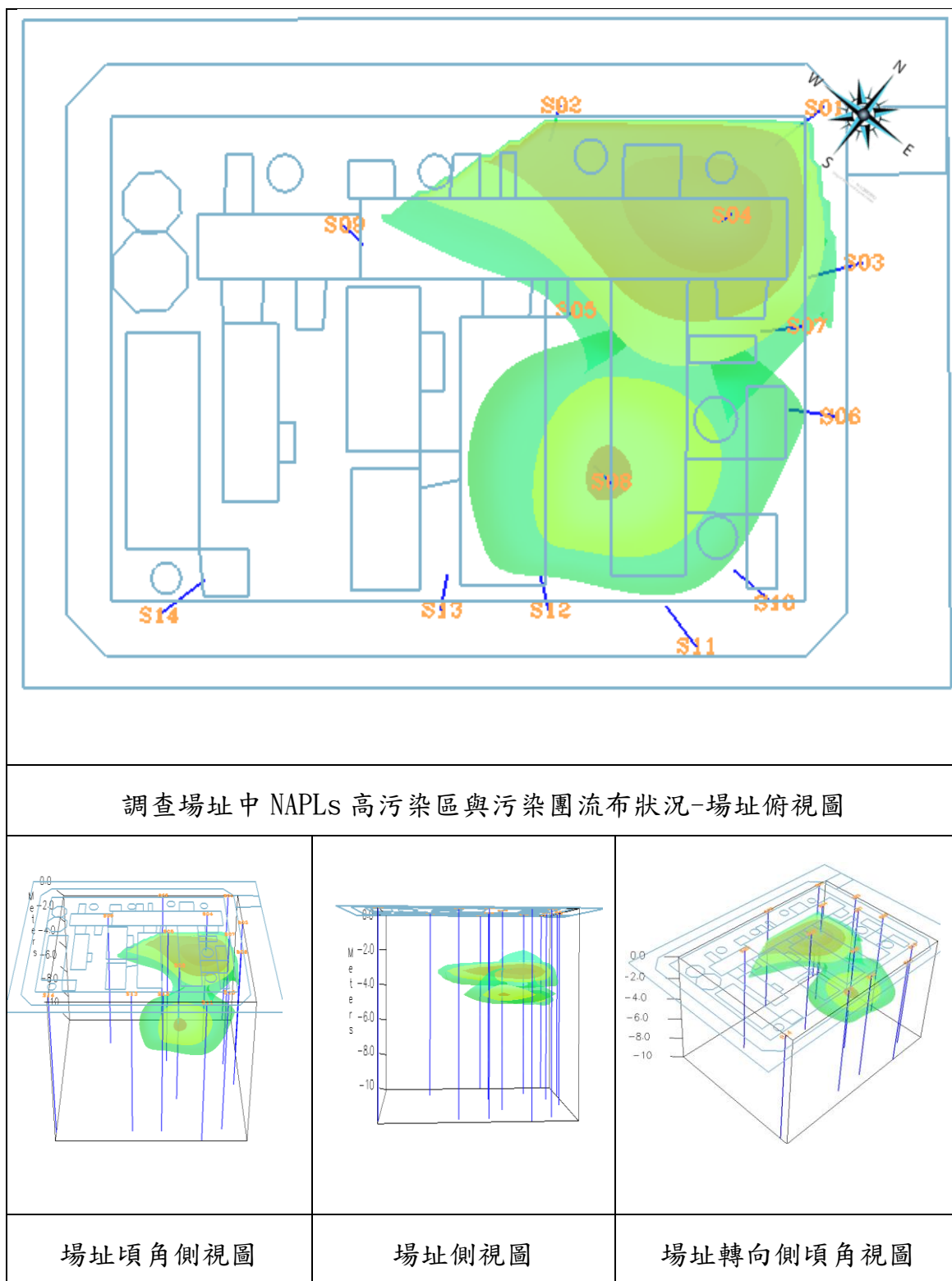


圖 5.11 調查場址 LIF 數值 3D 解析非水相液體(NAPLs)物質污染團分布圖

5.3 浮油回收模場建置

此次浮油回收試驗模場的設置因礙於第六煤組工場目前屬於運作中工場的關係，基於相關運作設備與地下管線位置的限制與場區作業工安規定與要求下，故無法將計畫預定之設計讓 3 口浮油回收井井場設置於相近之污染團區域範圍內，因此依據此次二階段環境場址評估作業所得之第六煤組工場區 NAPLs 污染分布結果，並參考場區現行之浮油回收設施的操作紀錄，綜合比較下將計畫中規畫之三種型態的浮油回收設施分別設置於不同的場址區域中如圖 5.12 中所示，三種不同操作型態之浮油回收設施分別設置於 FR-4、FR-6 與 FTW-20 等三口浮油回收井中，其中 FR-4、FTW-20 回收井場位於此次 LIF 調查測點 S04 之高污染濃度區範圍內；FR-6 回收井場則設置於 LIF 調查測點 S08 之高污染濃度區範圍內，另外大林廠環保組因新購置了一套國外產製之 AUTO SKIMMER 回收設備裝置於 FM-6 回收井中，所以本次於浮油回收模場污染背景調查時順便建置了該井場 NAPLs 污染分布的背景資料。

試驗模場中各浮油回收井井場污染背景資料建置，仍然以 UVOST-LIF 系統針對回收井與周界測點進行井場 NAPLs 污染分布的調查，規劃中除每個回收井本身外周界範圍各布設 3 個調查點，調查深度約地表下 5~6m 區間，每個回收井井場各計有 4 個測點形成一個背景調查範圍，各回收井與測點編號關係如圖 5.12 所示，初次 UVOST-LIF 系統檢測之結果各井場之 NAPLs 污染深度分布特徵如表 5.4 所示，另各井場測點螢光強度與污染深度變化比較之背景值統計如表 5.5 中所示。



圖 5.12 模場試驗於第六煤組工場區設置浮油回收試驗模場配置圖

表 5.4 浮油回收井場 LIF 背景調查各井場區測點螢光強度特徵圖彙整表

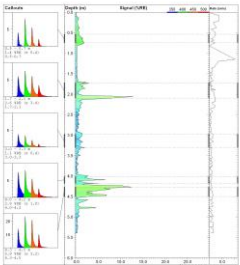
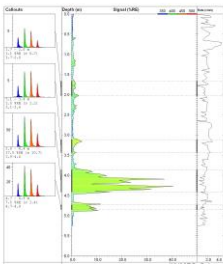
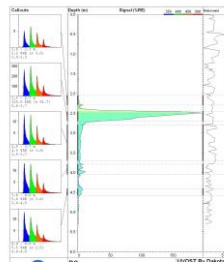
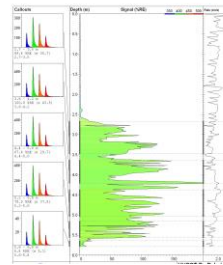
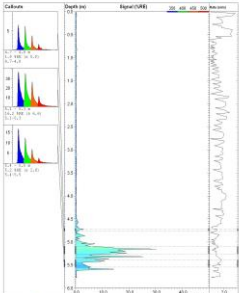
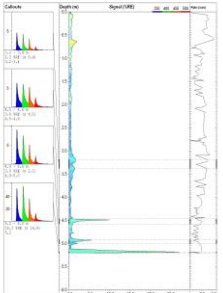
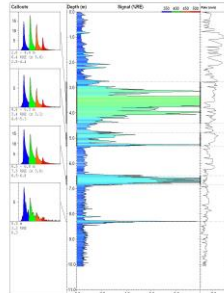
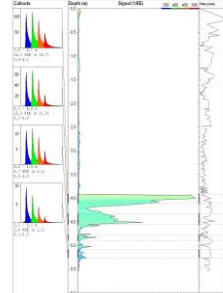
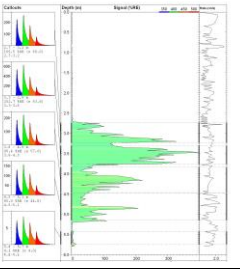
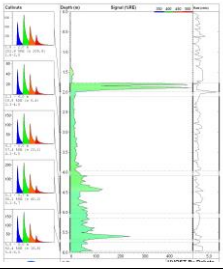
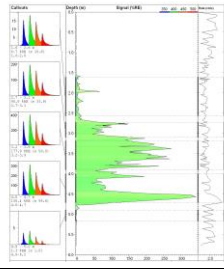
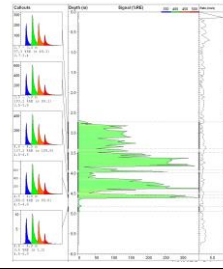
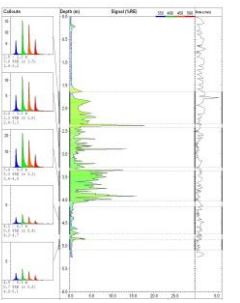
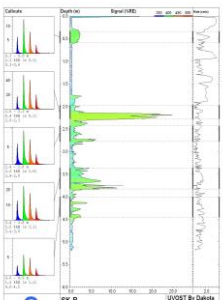
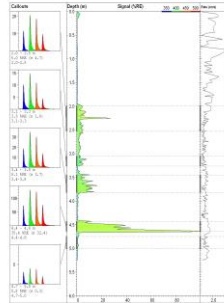
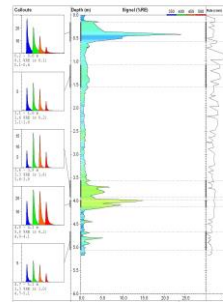
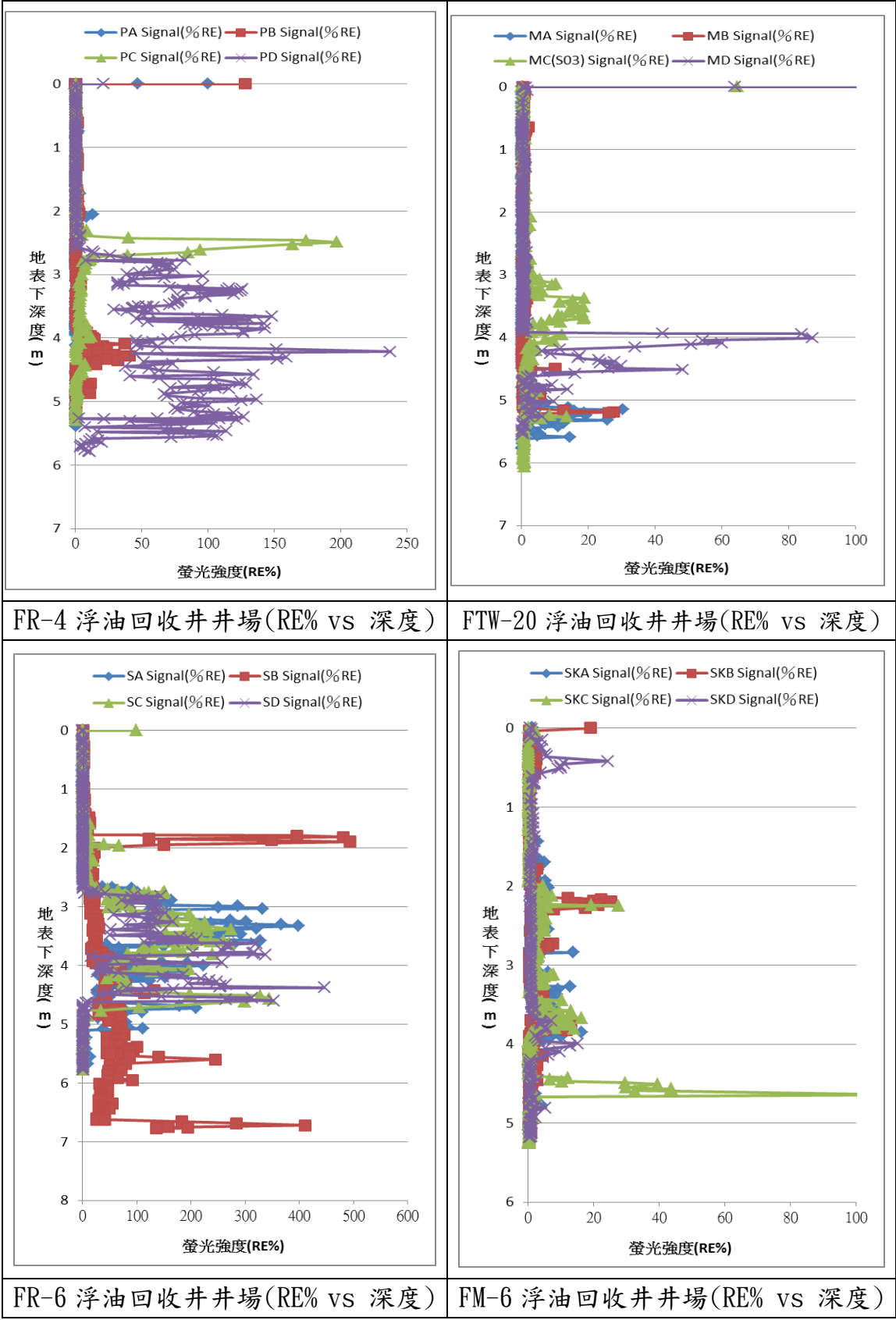
FR-4 浮油回收井井場 LIF 調查點			
			
PA 測點	PB 測點	PC 測點	PD 測點
FTW-20 浮油回收井井場 LIF 調查點			
			
MA 測點	MB 測點	MC 測點	MD 測點
FR-6 浮油回收井井場 LIF 調查點			
			
SA 測點	SB 測點	SC 測點	SD 測點
FM-6 浮油回收井井場 LIF 調查點			
			
SKA 測點	SKB 測點	SKC 測點	SKD 測點

表 5.5 各浮油回收井場調查點 LIF 檢測螢光強度與深度對比統計圖彙整表



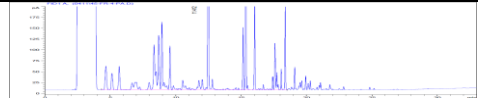
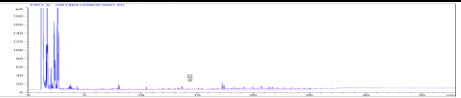
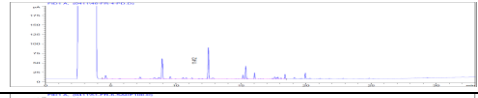
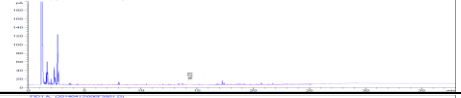
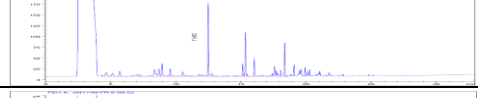
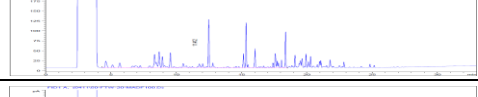
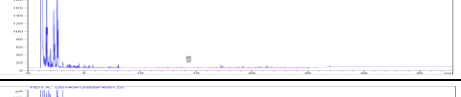
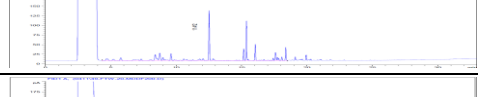
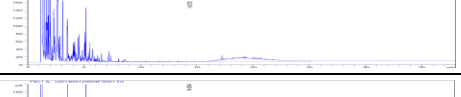
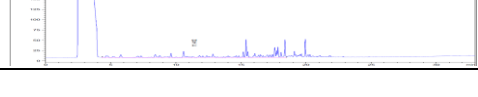
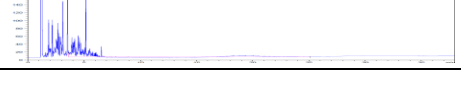
5.4 土壤採樣分析結果

土壤取樣分析主要為建立浮油回收模場土壤中風險值較高的污染成分數值做為背景參考濃度，依據 UVOST-LIF 系統檢測所得到之浮油回收井場 NAPLs 污染物質分布情況，每個浮油回收井場選取兩個濃度值呈現較高值的土壤段取樣分析，包含浮油回收井旁的測點與井場周界一個測點，主要分析項目為總石油碳氫化合物(TPH,包含 C6~C9 與 C10~C40 範圍)，土壤檢測分析結果如表 5.6 與表 5.7 所示。

表 5.6 浮油回收井場土壤檢測結果 TPH 濃度值彙整表

測點編號	TPH(C6~C9) (mg/kg)	TPH(C10~C40) (mg/kg)	TPH(mg/kg)
FR-4-PA(3.5-4.5m)	536	31.8	568
FR-4-PD(3.5-4.5)	46.2	13.7	59.9
FR-6-SA(3.5-4.5m)	10200	837	11000
FR-6-SB(4.0-5.0m)	138	23.2	161
FTW-20-MA(4.5-5.5m)	7300	118	7420
FTW-20-MD(4.0-5.0m)	14300	3540	17800

表 5.7 浮油回收井場土壤檢測結果 TPH 項目 GC-FID 圖譜彙整表

樣品編號	TPH-(C ₆ ~C ₉)檢測項目	TPH-(C ₁₀ ~C ₄₀)檢測項目
FR-4-PA (3.5-4.5m)		
FR-4-PD (3.5-4.5)		
FR-6-SA (3.5-4.5m)		
FR-6-SB (4.0-5.0m)		
FTW-20-MA (4.5-5.5m)		
FTW-20-MD (4.0-5.0m)		

5.5 浮油回收設施安裝建置

此次試驗模場浮油回收系統設備與設施的建置的經與該工場區相關單位會商後，考量工安要求操作安全方面事宜與工場區動力來源(電源配置或壓縮空氣源)提供的便利性，經進一步討論後決定採用氣動式雙隔膜泵做為本次試驗驅動浮油回收設備元件的動力系統，在浮油回收井設施安裝方面原預定 FR-4 回收井安裝新開發的封隔型雙負壓回收設施、FR-6 回收井安裝 SLURP 吸啜管式多相回收式設施、FTW-20 回收井則安裝現行場址以手動式抽汲浮油的設施，設施的安裝方式與位置(如圖 5.13 所示)原則將於觀察各浮油回收井的油水位變化情形後，依據各回收井平均油水位變動情形的特性再決定井內設施的安裝深度，另地面上的回收浮油蒐集系統設施則視回收井位置周圍的環境特性安置於適當的位置。

各試驗用浮油回收井回收設施與設備安裝完成後，即接續進行設備的試運轉作業以測試系統安裝的完整性與實際回收井浮油的入滲條件變動來調控系統的操作條件，經初步測試後發現 FR-4 井回收井中有無法排除之小障礙物，操作過程並造成封隔器的損壞。基於此原因後續便將 FR-4 井回收設備與 FR-6 井設備進行交換，

故現行的回收井之設備 FR-4 井為安裝 SLURP 吸啜管式多相回收設施、FR-6 井安裝封隔型雙負壓回收設施而 FTW-20 井則不便仍維持原手動式抽汲浮油設施。

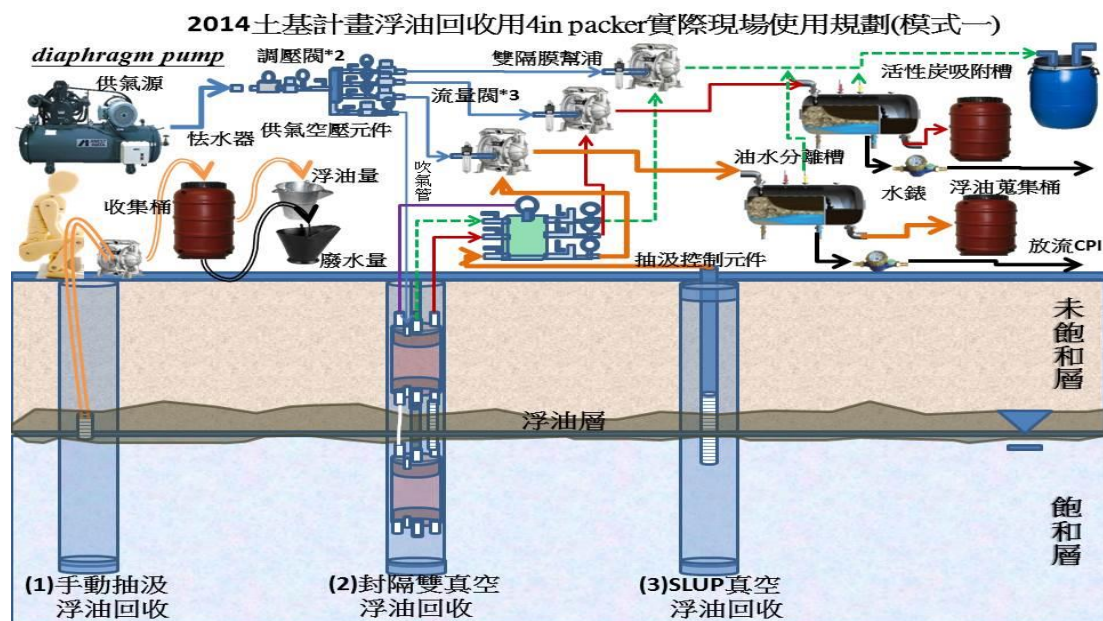


圖 5.13 試驗模場浮油回收系統井中與地上設備及設施安裝流程示意圖

5.6 試驗用浮油回收井背景狀況

本次浮油回收井設置乃依據 UVOST-LIF 系統檢測針對場址中土壤含油相分布調查結果(如圖 5.11)與考量場址現地可設置回收井區域的限制條件下，進行試驗用井的設置(相關位置如圖 5.12)，分別為 FTW-20、FR-04 與 FR-06，為便於後續浮油回收作業比較於操作前期一星期時程進行各井井中浮油入滲速率的追蹤調查，經試驗結果(如圖 5.14)FTW-20 浮油入滲速率變化約介於 0.7~1.1cm/hr 之間平均入滲率為 0.916cm/hr；FR-04 浮油入滲速率變化約介於 0.5~1.38 cm/hr 之間平均入滲率為 1.028 cm/hr；FR-06 浮油入滲速率變化約介於 0.2~2.14cm/hr 之間平均入滲率為 0.84 cm/hr，由此段監控時程追蹤成果發現，於井場設置初期各井浮油入滲量有些微之差異，但相差不大。在浮油液位與地下水位方面，試驗初期 FTW-20 井浮油液位約於地表下 3.2~4.0m 區間變動，相對地下水位則於地表下 3.5~4.4m 區間變動(如圖 5.15)；FR-04 井浮油液位約於地表下 3.7~4.3m 區間變動，相對地下水位則於地表下 3.9~4.6m 區間變動(如圖 5.16)；FR-06 井浮油液位約於地表下 4.0~4.7m 區間變動，相對地下水位則於地表下 4.4~5.6m 區間變動(如圖 5.17)。

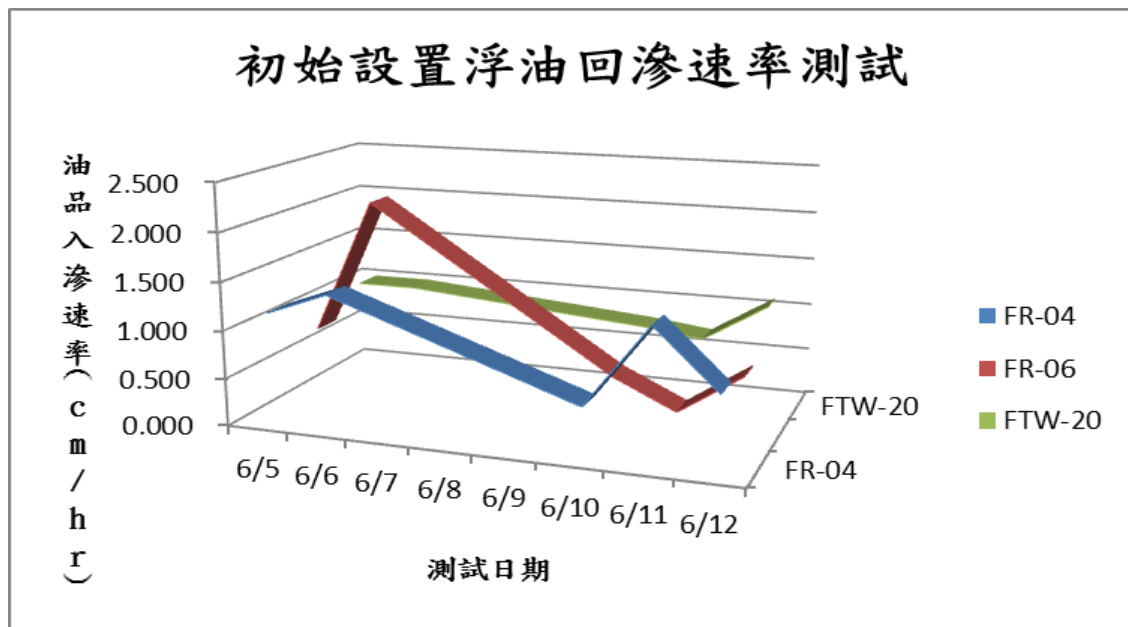


圖 5.14 試驗用井試驗前各井浮油入滲速率背景調查

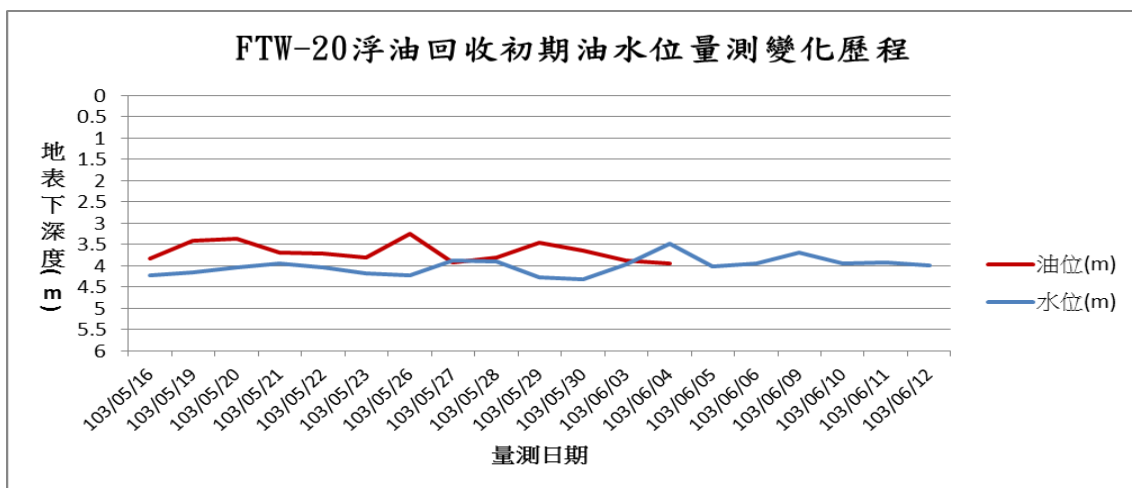


圖 5.15 FTW-20 試驗初期浮油與地下水位變化追蹤調查

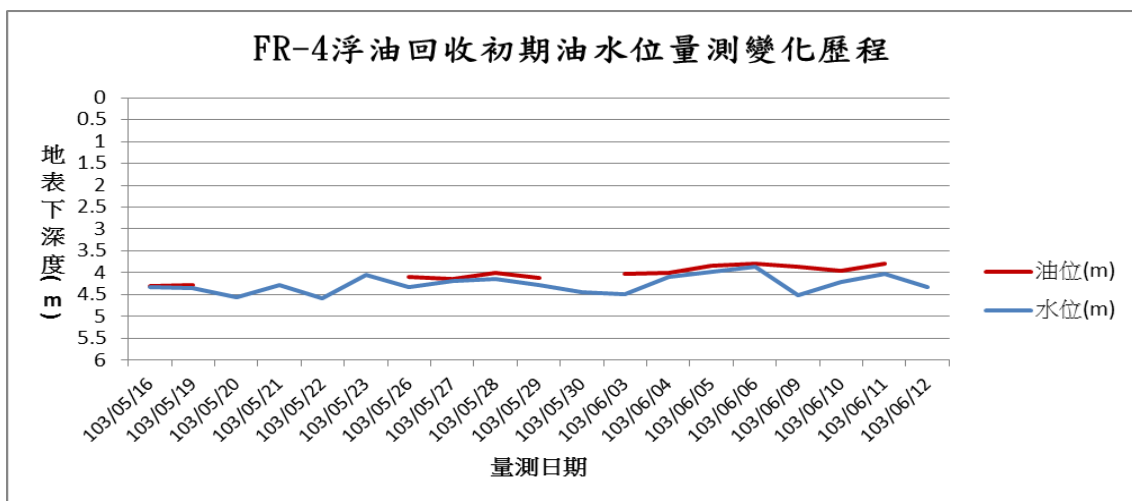


圖 5.16 FR-4 試驗初期浮油與地下水位變化追蹤調查

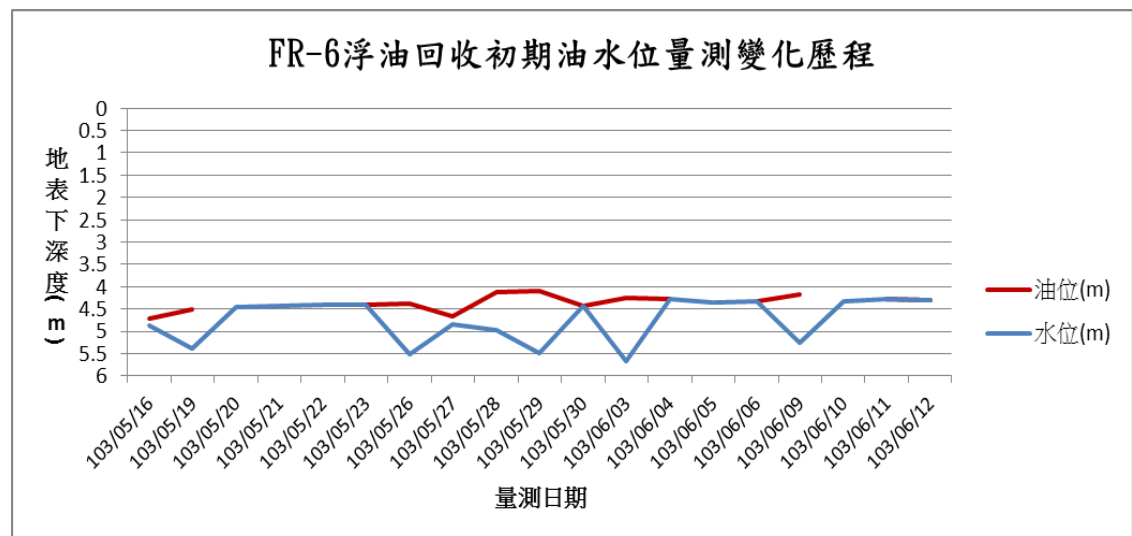


圖 5.17 FR-6 試驗初期浮油與地下水位變化追蹤調查

5.7 各浮油回收系統操作背景條件

試驗場址浮油回收系統雖然分成手動式浮油回收系統、封井吸啜管式浮油回收系統與封隔型雙負壓浮油回收系統，但為統一操作系統作功效能背景以作為相對性比對基準，所採用之真空泵皆為相同型式的雙隔膜泵作為操作時的真空動力來源，各浮油回收系統於實際操作時對於管道與井空間所產生之真空背景條件如圖 5.18 所示，基本上手動系統於開放空間下較難讀出系統之真空度，除非採用微壓計量測；在封井吸啜管式浮油回收系統方面由於井開篩空間較大因此除非採用較大抽氣量之泵，否則井空間也較難以讀出壓力變化條件，但依照液體抽取量的變化期吸啜管會保持在一定的真空變化範圍；而以封隔型雙負壓浮油回收系統而言由於封塞器作用將井空間縮小，相較於其他系統在相同泵作功下則呈現有較高之管道真空現象，尤其在抽油管道有填充物質相較下井空間更縮小所以更有較高的真空度狀態。就本次所架構之系統與模場現地地質條件下，各系統所產生之真空條件就封井吸啜管式浮油回收系統抽取管之內真空度範圍為 7~12cmHg；而封隔型雙負壓浮油回收系統輔助抽真空約為 14~25 cmHg，抽汲管真空則介於 25~30 cmHg 範圍內變動。

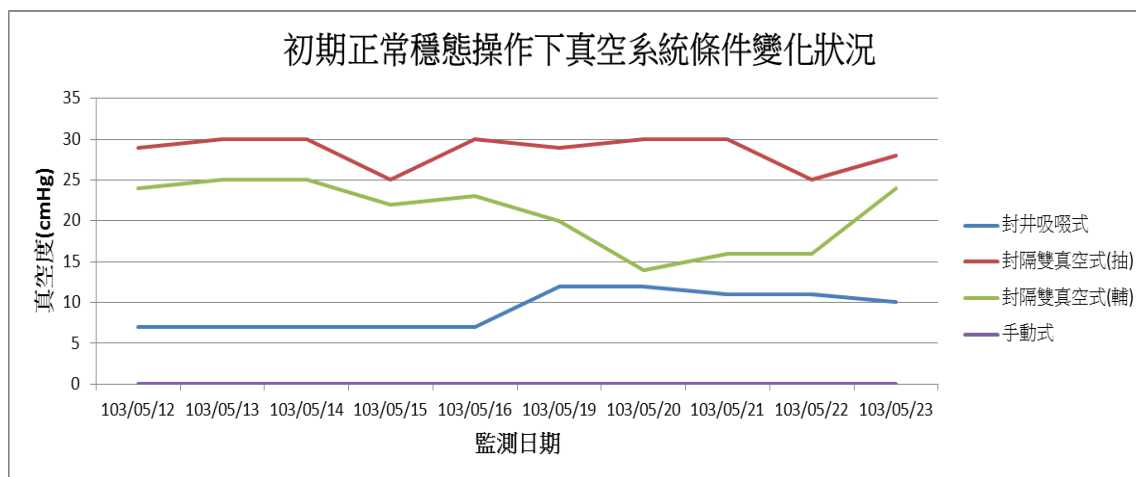


圖 5.18 各浮油回收系統於操作時雙隔膜泵對管道所形成之真空條件

5.8 浮油回收試驗結果

此次浮油回收試驗從 4 月底至 10 月初左右約執行 5 個半月左右，大致分成試車階段、試運轉階段、初步執行階段、第一期作業階段與第二期作業階段等，現場監控與浮油回收作業執行基本上以週為單位進行一個作業循環，每日浮油回收時程約 8 小時操作時間，停止後於次日操作前進行浮油厚

度與水位量測，每周操作時程則為星期一至五操作後停休二日，在停止後進行設備簡易維護與啟動前設備檢核，由週期性操作與監控程序呈現(圖 5.19)出每日浮油累積量以 FR-6 井最低，其次依序為 FTW-20 與 FR-4，間接可看出 FR-6 對於井附近回收效果有較佳之抽除效果，致使短時間的浮油回補速率較慢。另外在每週操作後停休二日時程浮油回滲的狀況由圖 15.15 呈現，除前期個井累積浮油厚度較相近外，後續變化初期則為 FR-6 井浮油累積厚度有逐漸升高之現象，其次為 FR-4 有略為增加之趨勢而 FTW-20 則保持較小的變動，至操作期中巧遇颱風來襲造成地下水位略升，造成各井浮油累積厚度受到影響，不過以 FTW-20 井呈現較小影響但後期累積浮油厚度有漸漸減少的趨勢，而 FR-4 於短期內累積浮油厚度減少後於後期操作呈現增加趨勢，而 FR-6 則在期中累積浮油厚度遞減後於後期操作期程一直未再有浮油累積的現象。

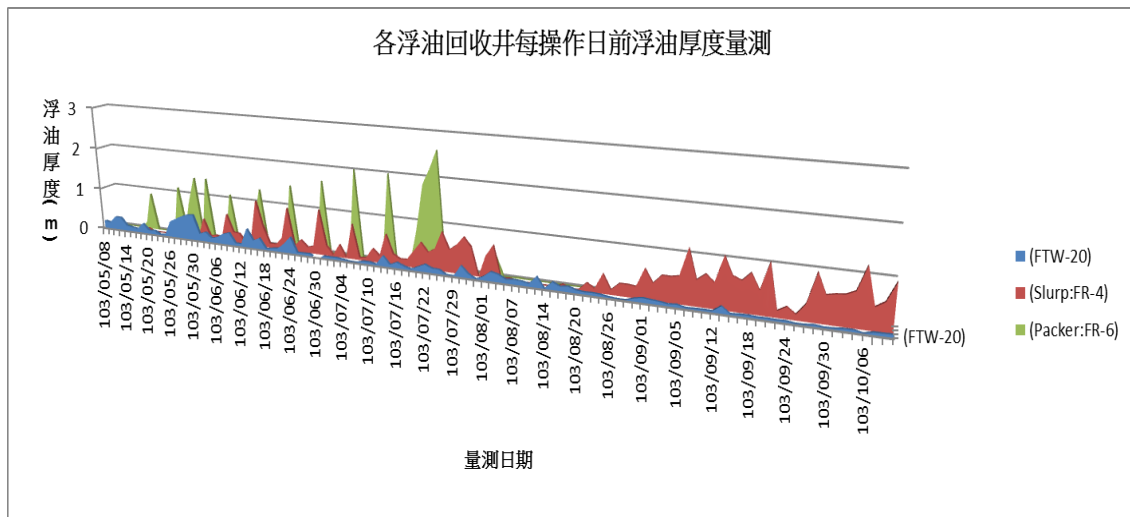


圖 5.19 試驗期間各浮油回收井每日操作前井內浮油厚度追蹤

進一步由操作期間針對各浮油回收井定期量測追蹤各井浮油入滲狀況來看，在 FTW-20 浮油回收井狀況來看，其浮油入滲速率變動基本保持在一定變化的範圍內，似乎受到颱風降雨導致水位略上升之影響不大，在 FR-4 浮油回收井方面來看，浮油入滲速率在操作期間初期原本呈現緩慢漸增之趨勢，但可能有受到颱風降雨導致水位上升影響，短期內浮油入滲量降低而後入滲量便恢復並保持持續漸增的趨勢，然而在 FR-6 浮油回收井狀況方面，在回收作業操作過程中初期過程階段呈現入滲速率有漸增至一高峰期現象，然後高峰期過後浮油入滲速率便呈逐漸遞減的趨勢，恰逢颱風降雨導致水位上升影響，以致期中浮油入滲速率降低較難以看出是何種變因產生之影

響較顯著，但後續 FR-6 井內於後期操作階段未再出現浮油狀況，推測除井周圍附近與上游位置之浮油量已遞減至一定程度。

就計畫執行於浮油回收系統操作期，大致可分成兩個操作階段，第一階段屬於較穩定期，在此操作期間設置的三大浮油回收系統較能呈現出各自系統的運作特性，而第二階段操作由於 FR-6 井所設置之封隔雙真空式浮油回收系統，因井中已無浮油可供抽除，所以只啟動輔助真空系統以增加井周圍浮油入滲的可能性，故在第二階段操作過程中只有 FTW-20 浮油回收井與 FR-4 浮油回收井持續有浮油回收效果呈現，所以各井浮油回收量大致分成兩個階段來統計，於第一階段浮油回收期從 103 年 5 月初至 103 年 7 月底約耗時 3 個月，此段期間各系統浮油回收量比較如圖 5.20，在手動式浮油回收系統 FTW-20 井方面浮油回收量為 56.79(L)；在封井吸啜式浮油回收系統 FR-4 井方面浮油回收量為 68.42(L)；在封隔雙真空式浮油回收系統 FR-6 井方面浮油回收量為 455.74(L)，由各井浮油回收量結果可看出封隔雙真空式浮油回收系統 FR-6 回收效能明顯高出其他兩套系統的運作成效(如圖 5.21)，系統浮油回收比例 FTW-20:FR-4:FR-6 約為 9.8:11.8:78.4(如圖 5.22)，若扣除各井本身基本的浮油入滲量倍數(如 5.6 章節)，以封隔雙真空式浮油回收系統 FR-6 井背景最高入滲量約其他兩口浮油回收井的兩倍，扣除倍數浮油回收量後仍明顯高於其他兩個系統的成果效能。在第二階段執行期間從 103 年 8 月初至 10 月初約歷時 2 個餘月，期間除試驗井場污染團可能有所改變造成浮油回收相關觀測數據變化外，加上期間遇到颱風帶來降雨因素的干擾以至於整個系統運作有些微變化干擾，而造成某些執行效果因外加變因而增加成效的不確定性，不過由於後續系統持續操作後所觀測到的參數變化又趨於穩定趨勢，因此後段數據的變動與追溯場址歷史資料，可增加第一階段蒐集的成果趨勢其可靠性相對增加，所以從第二階段成果呈現 FR-6 井周圍大致已無自由相浮油可回收，而 FTW-20 井周圍由於自然重力入滲關係呈現浮油入滲量緩慢遞減現象，然 FR-4 可能由於微真空吸引效應在前段穩定入滲變動後，於後段操作期慢慢有入滲速率增高的趨勢，而浮油回收量有比其他井較多的現象，但雖於後段有持續回收浮油期程多 FR-6 井 2 個月，但受限於入滲速率其回收量還是有限。總計於此次計畫浮油回收操作期程各回收井總浮油回收量分別為 FTW-20 井回收量約 85.38(L)；FR-4 井回收量約 235.81(L)；FR-6 井回收量約 478.86(L)。

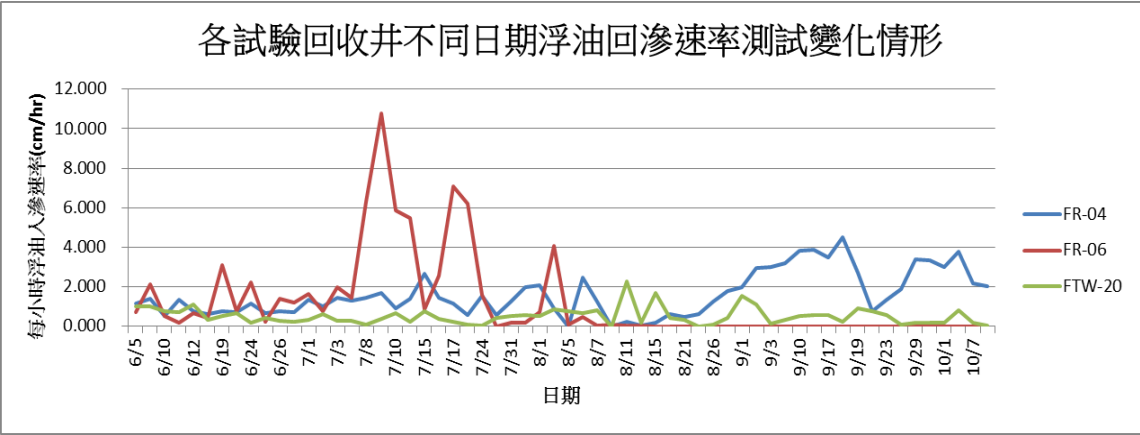


圖 5.20 各浮油回收井定期追蹤浮油回滲速率變化狀況

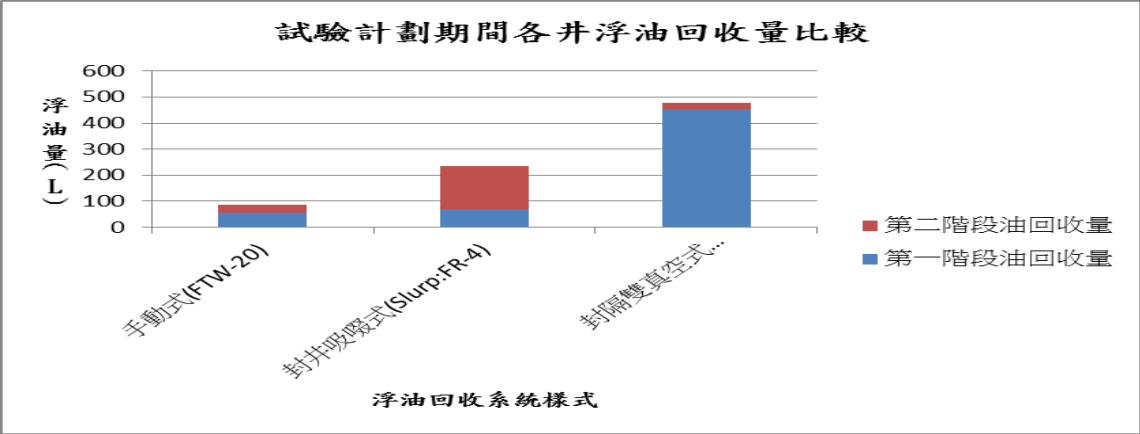


圖 5.21 計畫浮油回收階段各浮油回收系統浮油回收量比較

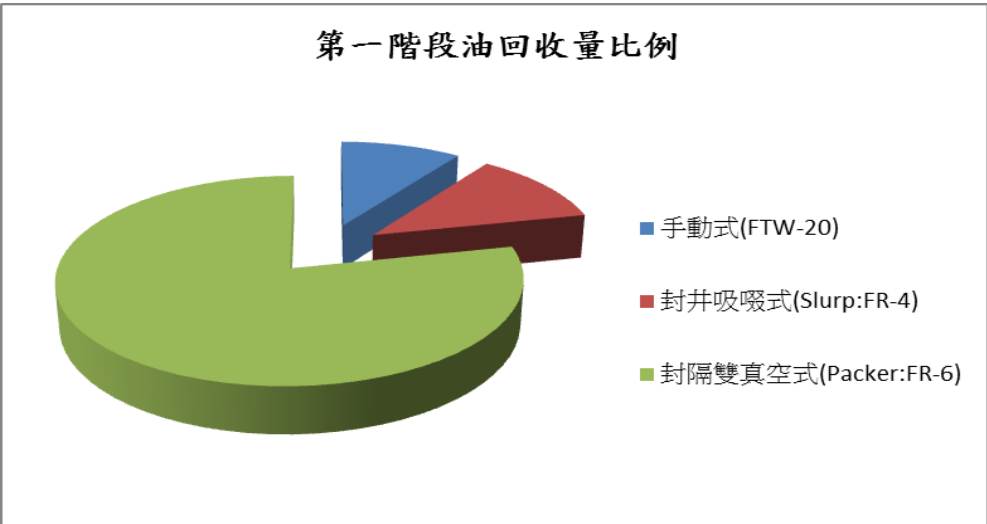


圖 5.22 各浮油回收系統於第一階段浮油回收期程回收浮油量比例

5.9 系統運轉成效評估

本次模場計畫執行之不同浮油回收系統執行成果成效評估比較將由下列幾個方向來進行各系統間的操作過程與所得結果比對系統間的差異性與探討，包括：輔助真空效能驗證、浮油回收量差異比對、油/水回收比差異比對、系統操作效益比較、模場改善成果比較等，雖然各浮油回收井的背景浮油含量可能有所差異，會造成部分項目因基準差異其所得結果在相對比對上有所偏差，在其他配合之查驗條件下結果應仍具討論空間，故本次之試驗成果僅針對此次現場條件與系統操作條件下所呈現之現象進行數據探討，而無法成為一般之通則，但此次試驗之成果經驗值應仍具參考之價值。

5.9.1 輔助真空效能驗證

此次場址井中浮油回收模場試驗所使用之抽汲設備動力主要為應用真空動力系統，選用氣動式雙隔膜泵作為真空動力提供來源，選擇此設備主要原因為氣動控制於油料類型場址為一種安全性較高的作業設備，可符合運作中工廠的防爆安全需求，次要原因為脈衝式真空吸吸可適用於浮油量較少時之操作而不至於浪費太大的作功效應，針對此次 3 種類型的吸吸管式浮油回收系統，在主要吸吸管內部真空壓保持以封隔雙真空式浮油回收系統最大，其次為封井吸吸式浮油回收系統，最小則為手動式浮油回收系統，顯示封隔雙真空式浮油回收系統有較佳之抽汲能效如圖 5.23 所示。但封隔雙真空式浮油回收系統除有較佳之真空抽汲效能外，亦具備另一附加真空系統協助井體空間保持一定的真空吸引力好讓地層中的浮油更易進入到井體內部空間，為了解輔助真空系統是否如預測的能有效讓地層浮油更易進入井體內部，在不同的操作期程中進行幾次自然重力回滲與輔助真空回滲試驗，試驗結果呈現以輔助真空操作時確實能有效地增加地層中浮油進入到井體內，狀況好時回滲數率有倍數於自然重力回滲之效能(如圖 5.24)。

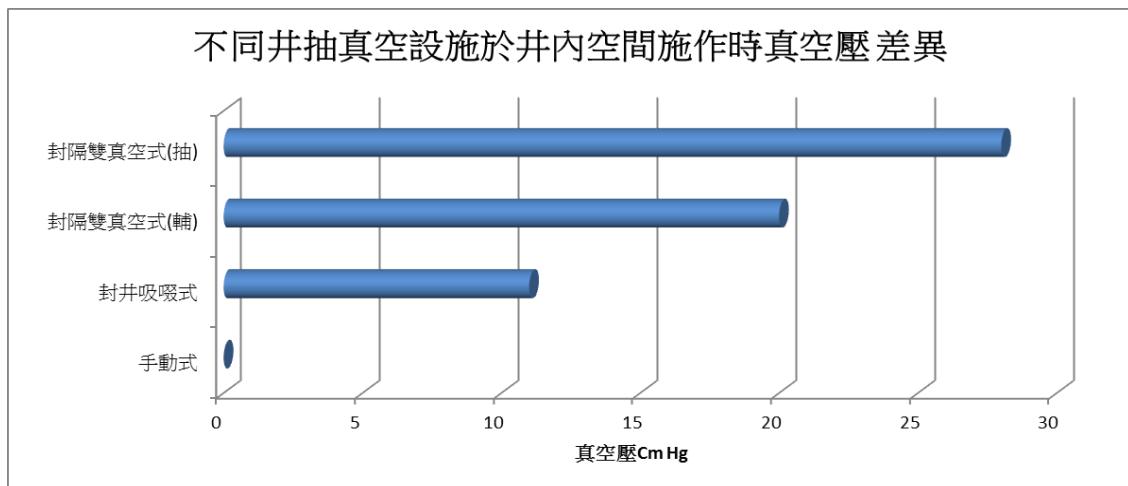


圖 5.23 各浮油回收系統於第一階段浮油回收期程回收浮油量比例

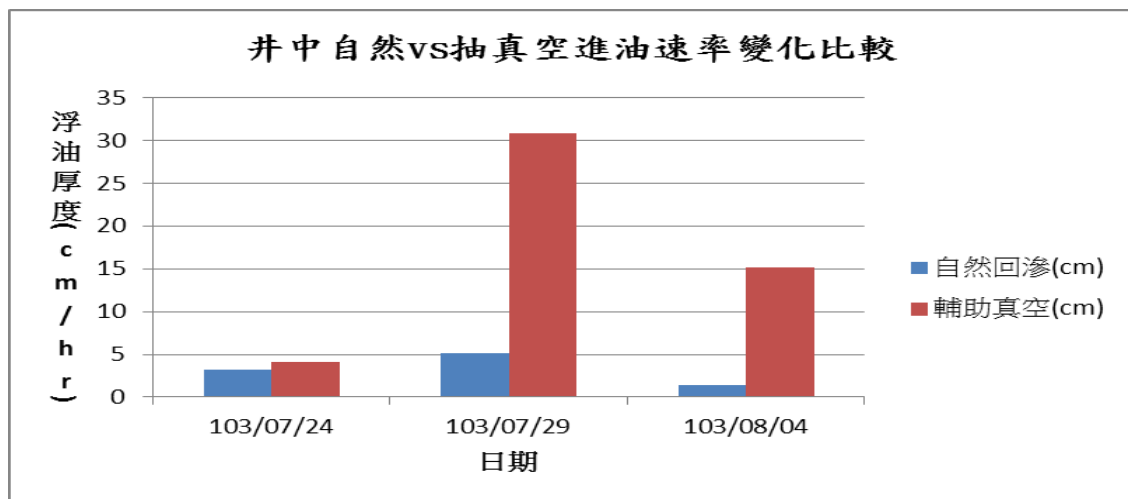


圖 5.24 各浮油回收系統於第一階段浮油回收期程回收浮油量比例

5.9.2 浮油回收量差異比對

關於浮油回收模場試驗浮油回收作業總時程約耗時 5 個多月，總期程大致分成 2 個作業階段，第一階段從 103 年 5 月初至 7 月底約 3 個月，第二階段從 103 年 103 年 8 月 1 日至 10 月 9 日約 2 個多月，分成二階段主要原因為裝設封隔雙真空式浮油回收系統之 FR-6 井於 7 月底 8 月初時井內已無浮油出現，此時判斷井體周圍附近應無自由相浮油存在以至於連輔助真空系統亦無法讓浮油進入井體內，但這段期間適逢颱風帶來雨量讓地下水位上升而有因地下水阻礙浮油移動路徑之疑慮，但經後續持續操作一段時間其他兩口 FTW-20 與 FR-4 已恢復常態來講，FR-6 仍持續無浮油出現，經追查 FR-6 先

前操作歷史也曾遇到相同狀況，但在短時間內就會回復浮油入滲狀況，基於此可間接證明封隔雙真空式浮油回收系統對於 FR-6 井區域具有一定的回收效能，且由輔助真空系統協助下期滲油速率較其他兩口浮油回收系統較佳亦屬正常，雖然在背景試驗時 FR-6 的浮油入滲率有比其他兩口好些，對於井設施回收成果效能應有加成效果的潛在干擾存在，但就 FTW-20 井的入滲率較差的情況下其表示井周圍的浮油量應相對較少，所以浮油回收系統如果效能佳的話，應於更短時程內將井周圍地層中浮油抽汲至井內無浮油出現之狀況才對，由此可推測手動浮油回收其效能比封隔雙真空式浮油回收系統效能較差，而封井吸嘍式浮油回收系統其油品入滲高峰期出現在第二階段時期(如圖 5.20)遠慢於封隔雙真空式浮油回收系統，顯示其井體內的真空引力確實比封隔雙真空式浮油回收系統的輔助系統差，對於井體較遠處的地層浮油吸引力差以至於第二階段末期仍有浮油持續入滲之現象。因此從此次試驗成果顯示(如圖 5.25)應用封隔雙真空式浮油回收系統的作業能於短時間抽取較多地層中浮油量，而其他浮油回收設施系統則須耗費較長的時程才能累積較多的浮油回收量。

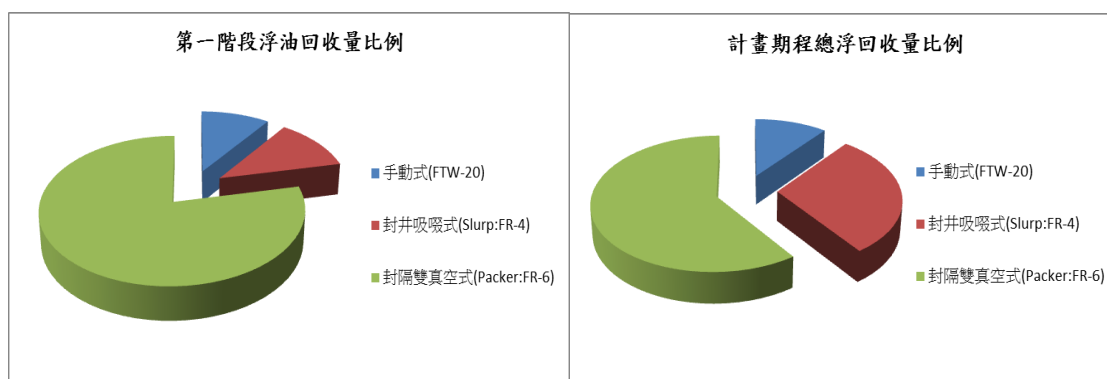


圖 5.25 各浮油回收系統於第一階段與計畫期末期程回收浮油量比例變化

5.9.3 油/水回收比差異比對

針對封隔雙真空式浮油回收系統應用除要強化回收泵的應用效能與提高地層浮油相入滲率外，其另一目的就是要將降低浮油回收作業時的地下水抽取量，以降低浮油回收作業時廢水處理負荷與成本效應，因此於模場試驗初期與操作一段時間後統計各系統抽出液的油/水回收比，以了解系統實際運作時的狀態，經統計後結果顯示在試驗執行初期手動式浮油回收系統與封井吸嘍式浮油回收系統和封隔雙真空式浮油回收系統的油/水回收比為 0.125:

0.028: 0.324；操作期間其比值為 0.124: 0.061: 0.374，兩次的結果皆呈現相同的趨勢(如圖 5.26)，顯示出封隔雙真空式浮油回收系統的操作確實能夠提高浮油的抽取量並減少抽出的含水量。

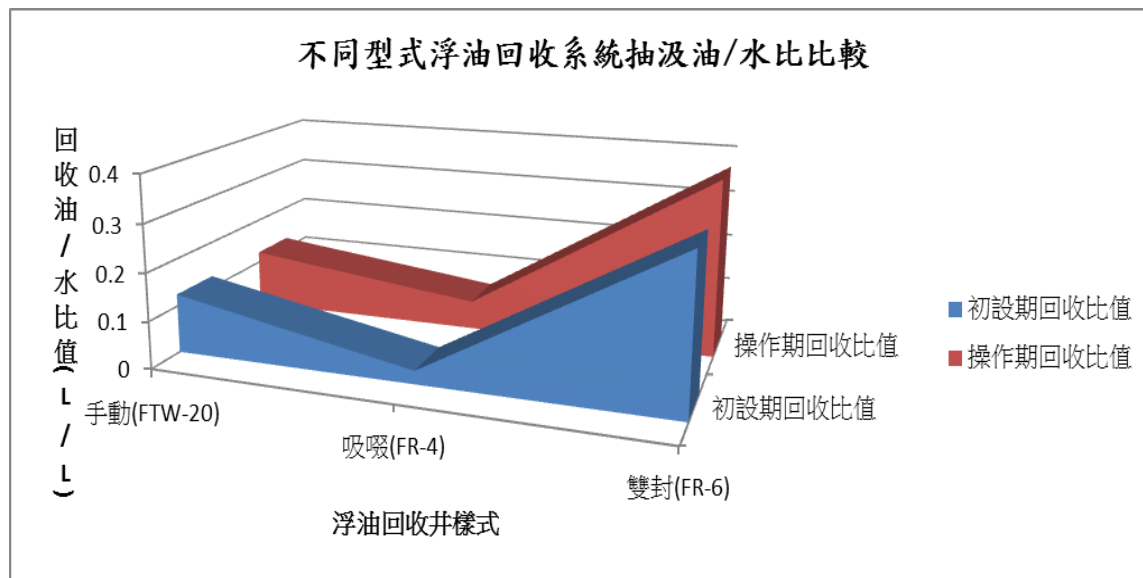


圖 5.26 各浮油回收系統於初始階段與操作期抽出液之油/水比例變化比較

5.9.4 系統操作效益比較

導入新開發的封隔雙真空式浮油回收系統除要改善一般傳統式浮油回收系統的缺失與相關操作效能外，其另一關鍵課題為操作成本是否能比舊式系統更具經濟效應，藉由各系統於浮油回收操作過程所設定之可能花費監控項目進行數據蒐集，包含耗用空氣量轉換的作功、系統運作需投入的人時、產生的廢水量處理成本與設備設置時的成本花費等，再與回收成果比對評估進一步推估出各系統單位回收量所需之成本效益，以了解各系統操作運用時的潛在應用成本花費與其應用效益的良黠。在壓縮系統空氣量成本單價方面乃參考壓縮空氣製造商所提出之單價成本分析為估算參考；在投入人時成本方面為參考行政院主計處公布之 2013 年國內平均之經常性薪資為單價成本估算參考；在廢水處理方面則參考石化業者對於廢水處理成本之經驗案例單價作為參考估算；系統設置成本費用則為接近實際設置時各項成本項目進行彙總估算(如表 5.8)。依據各系統實際操作數據蒐集與浮油回收總量進行估算，分成兩種估算成果，一為不包含設備設置費另一為包含設備設置費，不包含設備設置費估算的原因是因為系統的使用並非只用幾個月就丟棄不用，而是

可以使用一段時間以上，因此其設置成本可能會直接沖銷於運作成本中，經計算結果在不含設備設置費方面各項浮油回收系統操作成本(如圖 5.27)，在手動式浮油回收系統其操作單價成本為 790.8 NT-/L 浮油回收量；封井啜式浮油回收系統操作單價成本為 30.3NT-/L 浮油回收量；封隔雙真空式浮油回收系統操作單價成本為 8.6 NT-/L 浮油回收量，由此估算結果可看出封隔雙真空式浮油回收系統其操作成本較低，具實際應用潛力。在包含設備設置費方面各項浮油回收系統操作成本方面(如圖 5.28)，手動式浮油回收系統其操作單價成本為 1001.6 NT-/L 浮油回收量；封井啜式浮油回收系統操作單價成本為 144.8.3NT-/L 浮油回收量；封隔雙真空式浮油回收系統操作單價成本為 142.2 NT-/L 浮油回收量，估算結果呈現封井啜式浮油回收系統操作單價與封隔雙真空式浮油回收系統操作單價差異不大乃因於封隔雙真空式浮油回收系統操初期設置成本較高之因素，而在兩種估算成果顯示手動式浮油回收系統操作單價皆高於其他系統，主要原因不外乎人力成本一直是產業運作中的高單價項目，所以使用手動系統進行浮油回收作業其實是一種不具經濟價值的做法。

表 5.8 試驗模場各回收系統計畫執行期程相關耗費項目與成本推估表

浮油回收系統	Manual:FTW-20	Slurp:FR-4	Packer:FR-6	成本單價
耗用空氣量(m ³)	8.05	1053.76	1622.78	0.37(NT-./m ³)
投入人時(hr)	174	16	16	214.3(NT-./hr)
產生廢水量(L)	507.9	7015.3	4982.4	0.015(NT-./hr)
設備初設費用	18000-	27000-	64000-	系統(NT-./set)

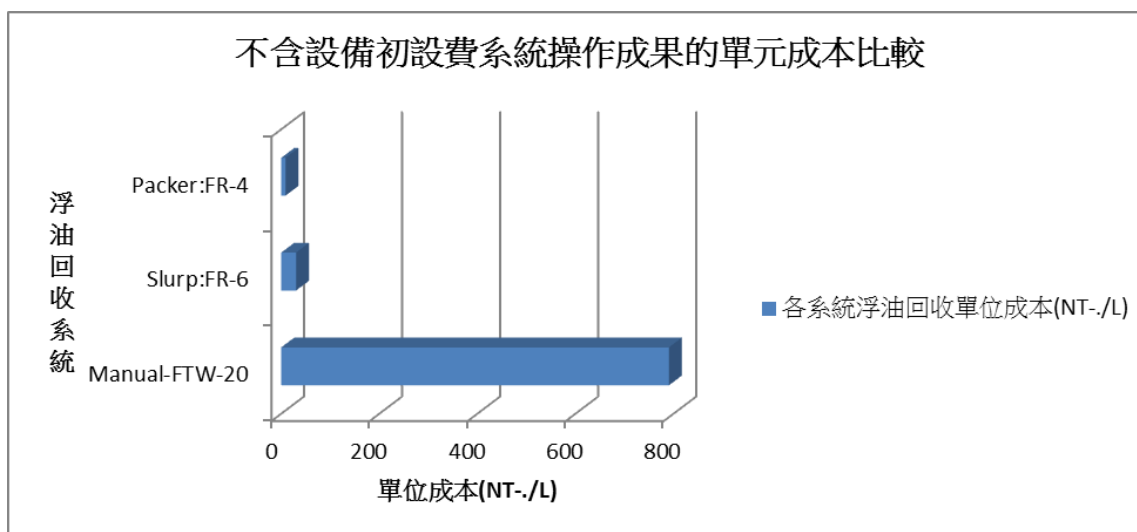


圖 5.27 此次模場試驗結果各浮油回收系統操作執行實際耗費單位成本比較

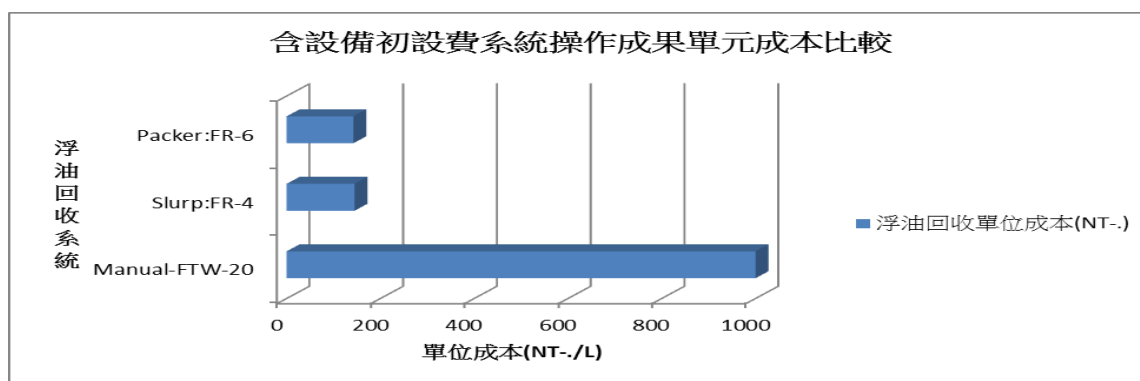


圖 5.28 含設備初設費用之全期各浮油回收系統操作執行耗費單位成本比較

5.9.5 模場改善成果比較

在歷時五個多月的浮油回收作業操作期程後，為了解各浮油回收井場對於試驗場址的改善成效，規劃於模場試驗前期藉由 UVOST-LIF 系統調查結果所建置的監測點與監測位置進行重複性的土壤取樣分析(如圖 5.29)，比對試驗前期與試驗後期相對位置的土壤中總石油碳氫化合物(TPH)成分含量(如表 5.9)，比對結果呈現部分浮油回收井監測點濃度降低而部分井監測點濃度升高狀況，在 FTW-20 部分井旁測點與井周圍測點濃度皆呈現下降趨勢，符合 FTW-20 井浮油回滲量降低現況；在 FR-4 測點測點井旁測點與井周圍測點皆呈現升高趨勢，亦符合 FR-4 井浮油回滲量漸漸升高之趨勢；然而在 FR-6 井部分在井旁測點呈現下濃度下降狀況，與井中無浮油之改善狀況有符合，但井周圍附近測點濃度異常升的太高，疑似 FR-6 測點附近仍存在有洩漏源補注浮油，而因該測點恰位於 FR-6 井的下游位置以至無法攔截該處地層之浮油，綜合結果來看試驗場址於 5 個餘月的操作期共約抽除 800 公升之地層浮油，由土壤檢測分析結果來看場址地層中局部仍存在相當量的浮油，並疑似有漏源位阻絕的狀況，因此 5 個多月的浮油回收對於試驗場址只能有局部改善情形，就整體場址來看仍存在較大的改善空間。

表 5.9 模場浮油回收井監測點前後期相對位置土壤檢測比對表

回收井設施	手動人工(FTW-20)		吸啜管式(FR-4)		雙封雙真空(FR-6)	
檢測點	MA(井)	MD(井旁)	PA(井)	PD(井旁)	SA(井)	SB(井旁)
取樣深度	(4.5-5.5m)	(4.0-5.0m)	(3.5-4.5m)	(3.5-4.5m)	(2.5-3.5m)	(4.0-5.0m)
2014/04/02	7420	17800	568	59.9	11000	138
2014/10/6	2680	3350	2430	3570	4660	25500

註:檢測項目:總石油碳氫化合物(TPH)，單位:ppm

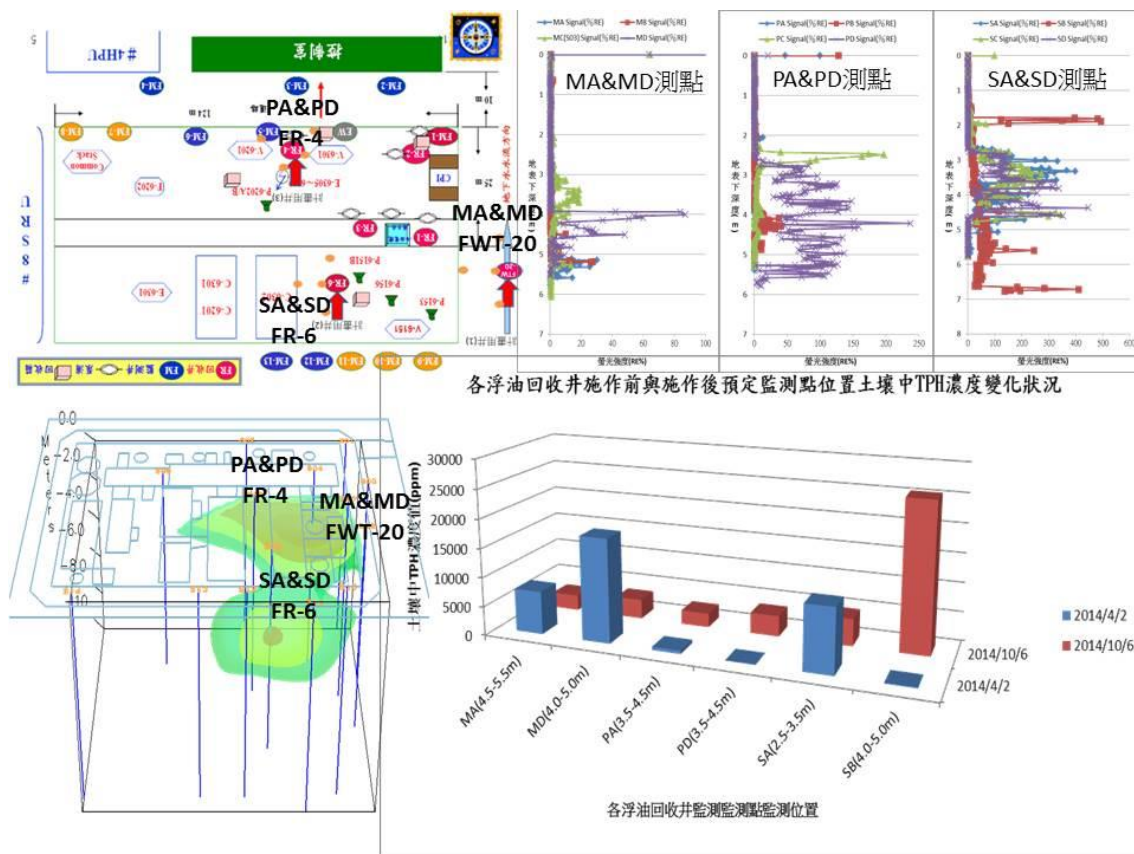


圖 5.29 試驗場址回收井井位與初始濃度分布及前後期土壤 TPH 濃度變化圖

5.10 結論

1. 由一階環境場址評估作業結果初步了解試驗模場所在之場址現階段環境條件，可知道該工場區目前受環保單位管制並進入改善應變計畫執行中，據廠方相關責任單位表示工場區漏源應該已經阻斷，現階段導入的污染改善方法大致有兩種，一種為 SVE/AS 工法但此工法應用之目的為進行場址周界阻截功能以防止場區內污染向外擴散；另一種則為浮油回收作業將洩漏於地表下之浮油進行回收。
2. 經 UVOST-LIF 系統調查後由調查結果顯示該工場目前高污染區有兩個區塊，一個位於工場區北方的角落另一個位於場址西南方位置，北方污染團塊經查與先前場址土壤與地下水調查所推估之結果相符，而場址西南方位置的污染團塊在廠方所提之改善應變計畫中則未發現，但在現場勘查作業中有發現該位置亦設有浮油回收井進行回收作業，推測為後續廠方發現的新污染位置。
3. 由 UVOST-LIF 系統調查結果呈現場址中 NAPLs 污染物質具有三種不同成分特徵，比對一階環境場址評估作業所蒐集之廠址歷史資料中曾經發現並改善的做為有 CPI 油水分離池破裂洩漏事件、CPI 處 4 吋沖洗管線

焊道未焊等問題、COD 管線問題。

4. 浮油回收試驗模場相關系統設置完成後總操作時程約歷經 5 個多月，執行期程中由相關數據蒐集整理比對後，呈現新開發樣式的封隔雙真空式浮油回收系統，在系統作功效能提升、浮油蒐集效能、廢水減量效能與操作成本效能等皆優於傳統舊式的其他真空式浮油回收系統。
5. 在試驗模場改善成效部分其改善成果並未顯著，可能原因為浮油回收井設置位置效能已接近極限或場址地層浮油量仍多而回收操作時程不夠長與工廠區地下干擾因素影響等，但最主要潛在的問題是由監測結果顯示場址目前還存在有漏源未阻斷之風險狀況。

5.11 建議事項

1. 此次模場試驗結果呈現出新開發的封隔雙真空式浮油回收系統，無論在操作效能與使用成果效益上均具有優於傳統系統的現象，唯在使用成果效益上由於比對基準存在差異性，所以試驗結果仍存在進一步的探討空間，建議後續應增加其他場址使用經驗，可進一步釐清相關疑問點與提高試驗結果的可靠度。
2. 此次模場試驗對於場址改善成效結果並不顯著，較可能因素為場址存在的潛在干擾因素較多，所以模場設置的區域選擇應盡量避免存在太多不確定干擾因素，而致使實際改善成果難以發揮。

第六章 參考文獻

台灣中油股份有限公司煉製事業部大林煉油廠土壤及地下水污染改善應變必要措施計畫書，101 年09 月

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，95 年9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

陳元章，郭明錦，油料污染場址浮油回收歷線特徵之研究，91年6月

葉慶得，運轉中之空壓系統節能改善技術

張士元，煉油廠廢水處理與回用，98年12月

ASTM, E1527-05 Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process

ASTM, E1903-97 Standard Guide for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process(2002)

ITRC, Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals (2009)

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

UAEPA, How To Effectively Recover Free Product At Leaking Underground Storage Tank Sites.(1996)

API, Evaluating Hydrocarbon Removal from Source Zones and its Effect on Dissolved Plume Longevity and Magnitude .(2002)

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

soils.

Randall J. Charboneau, Russell T. Johns, Larry W Lake and Michael J McAdams III, Free-Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon liquids(2000)

Ralph S. Baker and John Bierschenk, Vacuum-Enhanced Recovery of Water and LNAPL: Concept and Field Test (1995)

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

API, Models for Design of Free-Product Recovery Systems for Petroleum Hydrocarbon Liquids (2003)

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

Patrick E. Haas, TECHNOLOGY PROFILE: VACUUM-MEDIATED LNAPL FREE PRODUCT RECOVERY/BIOREMEDIATION.(1994)

USEPA, COST AND PERFORMANCE REPORT FOR CHARACTERIZATION AND REMEDIATION, Multi-Phase Extraction and Dual-Pump Recovery of LNAPL at the BP Former Amoco Refinery, Sugar Creek, MO.(2005)

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)

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

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

Modreck Gomo, Site Characterisation of LNAPL – Contaminated Fractured - Rock Aquifer.(2009)

ITRC,Evaluating Natural Source Zone Depletion at Sites with LNAPL.(2009)