



環境部環境管理署

112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

大型石化污染場址污染土壤熱處理技術 及效能評析(第二年)

期末報告(定稿本)

主辦單位：  環境部環境管理署
專案執行單位： 國立高雄師範大學/生物科技系(所)
專案主持人： 陳士賢 教授
專案執行期間： 112年12月18日起至
113年11月29日止

中 華 民 國 113 年 12 月 印 製





環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書
 ☐申請計畫書
 ☐期中報告
 ☐修正計畫書
 ☒期末報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	112年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他		主持人：陳士賢 NO：E7
計畫名稱	大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評估(第二年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 本計畫對於不同試驗期間之熱脫附 TPH 去除效率差異，宜有進一步檢討與評析，尤其是對於熱處理系統之操作穩定性，以及操作運轉條件之建立等資料，此將有助於後續技術應用之選擇參考。		1. 大型石化場址由於同時在數個區域進行大規模污染土壤開挖、現地及離地整治，場址內污染土壤量體大，且污染物種類歧異，多種工法同時施用以加速整治進度，各整治團隊所使用熱處理系統亦不同，試車期間及調校最佳參數亦歷經不同之時間期程，面對多元化之污染型態，不同設備之熱脫附 TPH 去除效率差異，必須視不同系統處理之污染土壤濃度、含水率、土壤質地、風化程度，進行場置性調整系統之升溫條件、土壤滯留時間等，所進行即時調整要點均敘述於第四章。	
2. 有關熱脫附效率(TPH 去除率)是否須訂定下限值，換言之當系統未達 TPH 去除率之下限規範，則表示該系統之操作運轉未達預期成效，以作為自主管理之規範要求。		2. 大型石化場址在土壤熱處理工法連續性操作條件下，對於土壤處理後係以土壤污染法規為標準，即各種處理工法後土壤 TPH 需小於1000 mg/kg 為規範，以便回填，操作單位每日固定會進行多次不同時段之抽樣原始土壤及處理後之土壤，不合格土壤再進行重工或以其他處理方式。監造單位(市政府)會針對處理完之土壤進行抽樣檢驗及計價，場址半導體建廠單位亦委託第三方進行合格土壤之抽檢。因此整治單位自主管理之規範一般以 TPH 濃度800 mg/kg 為保守性基本操作閾值。	
3. 熱處理技術應用於 TPH 污染土壤，除著重於 TPH 之去除率外，對於衍生空氣污染物之排放，以及處理後之污染土壤特性分析等，均是極為重要的關鍵議題；之前期中書審時，曾建議應建立相關之質量與能量平衡資料，然期末報告似仍未進行討論。為使技術能廣泛應用與推		3. 熱處理設施於場址設置時，均依固定污染源設置環保法規規範，及經連續試車取得空氣污染物排放許可，針對空氣污染物排放管制，每日於周界空氣針對 VOCs 進行監測以預防二次公害，但整體質量平衡在大型石化場址無法進行，係以 TPH 濃度代表土壤中所有主要污染物，事實上總石油碳氫化合物為數百種有機化合物所組成，	



廣，宜思考建立質能平衡資料之重要性。	源自自然界生成貢獻及人為活動產生碳氫化合物，包括揮發性有機物、半揮發性有機物、高碳數不揮發有機化合物等，當土壤及地下水整治進行時由於涉及各種工法，包括水洗、熱處理、生物復育、化學整治，但因污染量體大，核定之整治計畫書估計場址污染土壤為3,943,990 m³，因此無法精密估算每天處理土壤之TPH中各組成化合物經逸散、溶解、揮發、吸附、及被工法移除裂解各自所占百分比，簡單言之場址中TPH中各類型化合物在各工法使用前後，缺乏單一化合物(污染物)在各環境介質之基線資料及宿命及傳輸變化，因此每日處理污染土壤並非源自單一污染物，當涉及混合污染物且組成不相同，其宿命及傳輸不同，無法精準推估污染土壤中各化合物濃度變化，僅能觀察TPH處理前後濃度之變化，無法進行傳統環境工程思維下之質量平衡。
委員二 1. 多螺管式熱脫附效果似乎較差，脫附溫度是否符合高碳數TPH?宜明確說明後續可如何改善。 2. 第二年TPH移除率介於30-99.5%之間，建議針對系統尚未穩定前之數據可另外說明，避免誤解為整體去除效果不理想。 3. 針對兩種不同處理方式，建議應計算出處理成本。 4. 建議建立不同濃度TPH範圍之最佳處理方式。	1. 依兩年半操作經驗顯示，多螺管式熱脫附處理高碳數TPH污染土壤必須採在其中不同階層進行升溫，以增加高碳數TPH脫附效果。 2. 感謝建議，已將熱處理系統試車期間尚未穩定期間TPH移除率較低，及原始污染土壤低TPH濃度造成之低移除率之各批次排除於TPH移除率討論範疇，並於內文單獨敘明。 3. 熱處理成本依不同整治區廠商所提供資料約為4000-4800元/公噸。 4. 大型石化場址針對低碳數分佈污染土壤，如溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤、及煤油污染土壤，其TPH_g濃度小於3,000 mg/kg時，規劃以生物復育、水洗、或熱增強型土壤氣體抽除法進行復育。針對中、高碳數分佈污染土壤如柴油污染土壤、燃料油污染土壤、重油污染土壤等進行現場土壤污染濃度分析、風化程度判定及污染樣態快速篩分，針對污染土壤其



	TPH _d 濃度大於3,000 mg/kg，規劃以熱脫附處理法進行污染土壤復育。
委員三 1. 報告書中已說明計畫執行狀況、研究流程。 2. 計畫後續執行工作項已於 P. 157 (5.2 節) 中簡要說明。 3. 計畫執行進度與預定進度相符。 4. 報告書中所述的研究內容與原計畫目的相符。 5. 根據研究內容所提出之討論與建議應以實務的觀點討論，並建議討論(或研議)工程實務的可行性與可能的施作程序。 6. 本計畫的整體研究成果符合預期，但基金會的模場試驗專案的研究性質以實務應用為導向，建議多討論實務可行性。 7. 本計畫的成果偏重模場研究，已有研討會論文。也有多位研究生參與，達人才培育的目的。 8. 本計畫的研究成果並未申請專利，本計畫部分成果已有技術轉移的規劃。	1. 敬悉。 2. 敬悉。 3. 敬悉。 4. 感謝肯定。 5. 本計畫對於大型場址各種熱處理系統之原件、原理及操作方式，所面對問題及 TPH 移除方式，均透過兩年半期間完整蒐集及彙整，具體呈現於結論與建議中，此項工作為國內唯一，可供國內所有整治業者參考，未來在國內外類似污染樣態場址應用上，可以此大數據基線參考，作為擬訂規劃熱處理工法之依據及最適化之設計。面對多元化之污染型態，不同設備之熱脫附 TPH 去除效率差異，無法使用同一操作參數，必須視污染土壤濃度、含水率、土壤質地、風化程度進行場置性調整系統之升溫條件、土壤滯留時間等，均建議於第五章。 6. 本計畫為整治工作第一線，並非小規模試驗計畫，而是伴隨大型石化場址整治進度之同步工作，國內除台南中石化戴奧辛熱處理設施及燁民土壤離廠熱處理廠不在計畫範疇內，所有國內大型石化污染場址之各種熱處理系統之原理及操作方式、設置條件、規範均為本計畫蒐集，此大數據基線資料可供國內所有土壤及地下水從業人員，整治規劃者擬訂規劃熱處理工法之依據及最適化之設計參考。 7. 感謝肯定。 8. 各種熱處理系統之設計、原理及操作方式均屬整治國家隊各公司智慧財產，申請專利並非本計畫訴求，而是以加速整治及解



9. 本計畫的研究成果對國內土壤地下水污染領域有貢獻(“…發掘土壤熱處理設施各單元流程可能問題，提升石油碳氫化合物污染土壤熱處理技術之適用性，並獲得最佳化操作參數…”)，與環境政策的關係尚待討論。 10. 本報告主要是現場操作的描述，對原計畫目標(參數與效能評析，或是最佳化)的討論較有限。	決熱處理操作技術問題。所面對各類型問題及 TPH 移除方式均透過兩年半期間完整蒐集及彙整討論，具體呈現於結論與建議中。未來在國內外類似大型石化污染場址技術輸出上，可以參考此大數據基線，作為整治產業擬訂規劃熱處理工法之依據及最適化之設計。 9. 為因應高雄市政府建立科技廊帶群聚，活化土地，必須縮短整治時程，挑選已發展成熟之整治技術及足夠之技術能力，作為主要整治策略，以便在三年整治期程內完成，研究團隊一路參與環境政策之擬定及推動。此大型石化工業污染場址規劃及執行快速整治之實績，為國內甚至國際間絕無僅有，因此配合環境政策劃分不同整治分區同步分區施作，依照整治成效適時進行施作層面優化。本場址的整治計畫變更係配合高雄市政府後續土地利用藍圖規劃，將廠內各場址整治作業回歸單一計畫書進行執行面控管，希望透過整體性的規劃，通盤研擬適切之整治策略，最大化資源投入效益，並即早完成場址污染改善工作。 10. 由於此項大型石化場址整治工作為國內唯一僅見，國外近年亦未有此規模整治，報告將大型場址內不同區域，各整治公司使用不同熱處理系統之原件、原理及操作方式均詳細說明於3.2節「熱處理設備設置及操作」，至於影響熱處理的參數敘述於3.4節「評估離地熱處理技術的影響參數」，並於4.2 節「熱脫附法效能分析」完整陳述及討論歷經兩年半期間所面對各類型問題、TPH 移除方式、操作參數與效能評析，各工項均透過兩年半期間進行完整蒐集及彙整評析，具體呈現於報告「結論與建議」中，因此對熱處理工法之最佳化建議陳述於第五章。
委員四 1. 以台灣最大的石化污染場址為樣本，評析熱處理技術效能，產出結果應對於技術及管理有貢獻。	1. 感謝肯定。



2. 熱處理技術具高耗能高排碳的技術，用於高濃度不易揮發之土壤基質是合適的，但由第四章表格數據看來，許多污染土壤濃度低於1000mg/kg 也被送進熱處理設備，這是不合理也不環保的。是否有另外原因？要對本研究應給予綠色整治合理建議。 3. 同樣數據亦有許多筆處理完土壤 >1000mg/kg，在如此高耗能高強度工法下，這些土壤還要二次處理也是不合適。是否 TPHd 高或水分高所造成的，原因探討也是避免失誤的必要手段，若真如上述原因，條留時間是否要在處理上予以調控。	2. 為加速大型石化場址整治進度，整治工法採用開挖、水洗、熱處理、生物復育、化學整治、離場外運等各種工法同時進行，配合第三階段整治工程，多套新設熱處理裝置在2024年2月及3月進行試運轉，因此採用低污染濃度土壤進行試運轉，以調整操作參數，因此造成部分數據為低污染土進行熱處理之情事。誠然部分整治工法如熱處理符合綠色整治之要項並不多，因此在整治期間仍透過擷取符合綠色整治的作法及工項，如現地快速分析方法減少土壤樣品外運分析及溶劑使用之碳足跡，廢水回收再利用及回注，現場整治取代離場外運，以天然氣取代燃油，減少離場外運土方...，在3年整治期間仍於大型石化場址整治期間，積極推動綠色及永續之整治作為。 3. 大型石化場址在第三階段啟動整治後，整治區有多套新設熱處理裝置在2024年2月及3月進行試運轉，因此在試運轉期間之部分批次污染土壤在處理後未能符合標準，經過操作參數調整後此現象在2024年4月後即未出現，本計畫旨在建立基線資料，因此在兩年半期間完整忠實呈現熱處理原始數據，因此試車階段數據亦納入。
委員五 1. 各工項執行成果原則與預期進度相符，但關於熱處理技術及設備輸出可行性評析部分，建議增加相關說明與建議，俾以作為未來主管機關應用或推廣相關技術或設備之參照。	1. 感謝肯定。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書
 ☐申請計畫書
 ☒期中報告
 ☐修正計畫書
 ☐成果報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	112年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：陳士賢 NO：E7	
計畫名稱	大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評估(第二年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本計畫採用熱脫附處理技術，去除土壤之 TPH，其中以熱增強型土壤氣體抽除 (TEVET) 技術，TPH 之去除效果似不甚理想(均介於7%~57%之間)；第二年是否有研提改善或精進之建議？ 2. 第二年計畫改採多螺管式熱脫附系統，TPH 之去除效果，未達法規標準之樣品數，亦達20%以上，綜合第一年之執行成果而言，熱脫附處理技術未來應用於 TPH 之去除有何須考量之重點或修正之方向？		1. 熱增強型土壤氣體抽除技術(TEVET)於大型場址整治初期時(2021年底-2022年10月)，使用於幾個區塊的汽油及溶劑污染土壤，後續整治工作在各整治工區多屬高度風化汽油污染土壤、柴油污染土壤、及高碳數油品污染土壤，不適用 TEVET 技術，因此第二年並未使用 TEVET 於後續大型場址之整治工作。 2. 大型石化場址的土壤熱處理工法包括低溫熱處理及高溫熱處理系統，由於大型石化場址同時在數個區域進行大規模污染土壤開挖、現地及離地整治，場址內污染土壤量體甚大，且污染物種類歧異，由於系統操作均為連續式進樣，針對污染異質性很大之各類型質地土壤，無法每批次土壤均符合處理標準，對於無法達到法規標準之批次土壤，採重工或其他處理工法。配合大型場址整治進度所執行 TPH 污染土壤整治工作，本計畫第一年期間調查及彙整熱增強型土壤氣體抽除法及隸屬三個不同整治團隊之熱脫附設施，評估熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法對污染土壤移除效能，蒐集操作參數及最適操作條件，其中熱增強型土壤氣體抽除法處理3,000公噸，而高溫熱處理系統包括：(1)多螺管式熱脫附系統在三個整治區域共處理污染土壤23,548公噸，(2)離地高溫熱脫附系統，整治期間在3-1區處理進行污染土壤數量為14,731 B.M³(自然方)，約為23,570公噸，(3)整治區4-3及4-4區採旋轉窯熱脫附法處理含高濃度 TPH 之粉黏土質土壤(為水洗工法衍生之濃縮污泥)，累計處理	



3. 本計畫對於熱處理過程，衍生之空氣污染物排放以及處理後之污染土壤性質之分析，宜與熱處理程序一併評析；若能進一步建立質量與能量平衡資料，將更能彰顯技術應用之可行性。	20,200公噸。因此多螺管式熱脫附系統並非單一處理方式。第二年場址熱脫附法之效能分析，配合本大型場址啟動第三階段整治工程，自2023年11月至2024年4月期間，各區熱處理操作情形為：(1)1-2區及2-2區域污染土壤，熱處理以多螺管式熱脫附系統設備進行，已處理約14419公噸之污染土壤，(2)北二區旋轉窯熱處理截至2024年4月30日止，操作天數100天，累計處理量已達90,882公噸。由於各整治區域使用不同熱脫附設備，面對多元化之污染型態，無法使用同一操作參數，必須視污染土壤濃度、質地、風化程度進行必要之調整，因此將持續蒐集各系統操作參數及處理成效。 3. 感謝建議，熱處理過程衍生之空氣污染物排放，熱處理單元程序修正及調校，以及處理後之污染土壤性質分析，均依各區實際操作情形進行評析，同時監督及驗證單位針對污染處理量之記錄及質量平衡資料，均摘錄於報告中，並將於期末報告綜合評估不同技術應用性及限制性。
委員二 1. 整體研究成果優，值得肯定。 2. 表4.7整體去除率差異大，更有低至33.2%(7008->4683mg/kg)唯同批有去除率高達97.4%，宜請再解析。 3. P.107表10部分去除率為0或負值，除了解是否符合法規外，宜請再解析原因並探討。	1. 感謝肯定。 2. 由於西區污染土壤來自過去油槽區，多個油槽儲存物質種類多元，加上過去數十年來，並未針對油槽基座進行土壤污染調查及污染種類及樣態了解，因此石化污染物碳數分布範圍歧異度較大。固定之操作模式對於不同碳數分布之污染物，由於沸點、物化性質歧異度甚大，在熱處理連續操作條件下，採24小時連續操作，每套設備每日處理量為200噸，每日總處理量約為400噸，無法用實驗室微觀角度隨時更改參數以配合每批次處理效能，而且處理後效能之闕河必須等土壤冷卻、送驗、計量，因此移除效能有顯著差異無法及時修正，但對於未符合法規及整治需求之批次土壤，整治單位分別以重工方式或其他工法進行處理，以符合法規要求。 3. 熱處理去除率過低之土壤多源自為處理低TPH污染土壤，由於無論原始污染土壤或處理後土壤其顯示TPH濃度均為抽樣分



4. 碳排放估算中，請彙整成表格並呈現其他方法與本方法之排碳情形並比較討論之。	析，污染之不均質性是造成去除率為0或負值之原因，其最終目標以符合法規為原則(1000 mg/kg)，否則未能通過驗證將進行重工。 4. 第一年熱脫附設施溫室氣體排放推估綜合彙整於表4-15，第二年之結果將持續蒐集及估算整理列於表格，以提供國內土壤熱處理設施溫室氣體排放推估。
委員三 1. 期中報告已說明本計畫(大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評析)的執行現況、流程與試驗方法。 2. 原計畫的審查建議已回覆說明。 3. 本計畫後續的執行工作項目已於報告P.129(第五章)中說明。 4. 計畫執行進度與原規劃預定進度相符，本計畫的進度正常。 5. 依期中報告所述，本計畫的研究內容與原計畫目的相符。 6. 本計畫為延續性計畫。前一期的成果與建議的延續或應用，建議說明。 7. 期中報告中說明一部分的工作項目已完成，也依據目前的研究內容提出適當的討論(能耗(或轉化成 CO₂e):建議討論)(大型石化污染場址污染土壤熱處理技術適用的情境(或條件)建議討論)(石化污染物土壤熱處理技術已是極為成熟的技術，國內此處大型石化污染場址污染土壤採熱處理技術後所獲得的效益(技術提升、工程管理、能耗評估、參數掌控…等)建議討論。 8. 整體研究成果符合預期。	1. 感謝肯定。 2. 敬悉。 3. 敬悉。 4. 感謝肯定。 5. 敬悉。 6. 第一期的成果與建議的延續或應用說明於5.1節。 7. 國內除台南中石化安順場址及高雄燕巢燐民處理廠外，甚少操作土壤熱處理經驗及參數，因此透過大型石化污染場址整治，污染土壤採熱處理技術後所獲得的效益如技術提升、工程管理、能耗評估、參數掌控、處理效益評估...等將討論於期末報告，同時由於國內缺少土壤熱處理設施溫室氣體排放基線資料，期望透過本計畫協助相關基線資料之建立。 8. 感謝肯定。
委員四 1. 本計畫為配合中油高廠整治案執行之計畫，數據整理中若能將每批土壤的異質性分析納入效能評析價值會更高。	1. 場址進行大規模開挖後，先經過分選適合進行熱處理之 TPH 污染土壤，而為減少土壤異質性，污染土壤透過滾筒篩及震動篩方式進行物理分選，由於污染土壤熱處理操作條件係採用24小時連續操作，而非批次操作，以整治區西區為例，共兩套設備，每套熱處理設備每日污染土壤處理量為200噸，每日總處理量約為400噸，大規



2. 高廠執行期間，是以快速解列為目標，綠色整治並非重點，倘於事後評析中能有具體建議，日後該項整治技術在低碳世代會更具亮點。	模土方，無法用實驗室微觀角度，檢視每批次土壤的異質性。 2. 為加速大型石化場址整治進度，採用開挖、水洗、熱處理、生物復育、化學整治、離場外運等各種工法，誠然部分工法符合綠色整治之要項並不多，仍可透過擷取符合綠色整治的作法及工項，如現地快速分析方法減少樣品外運分析之碳足跡，廢水回收再利用或回注，現場整治取代離場外運，以天然氣取代燃油，減少離場外運土方...，有許多作為可彙整進行事後評析。
委員五 1. 計畫綜整高煉廠目前採用之四種熱脫附技術，並均予以分析目前整治成效，同時針對各項工法提出操作參數調整建議，符合目前期中報告預計進度。 2. 後續工作重點提及 TEVET 技術在本案場址適用成效相對較低一節，能否透過本計畫提供操作參數調整建議，進一步提升操作成效。	1. 感謝肯定。 2. 熱增強型土壤氣體抽除技術(TEVET)於大型場址整治初期時，即2021年底至2022年10月，使用於台積電目前建廠之區塊的汽油及溶劑污染土壤，由於後續整治工作在各整治工區多屬高度風化汽油染土壤、柴油污染土壤、及高碳數油品污染土壤，不適用 TEVET 技術，因此第二年並未使用 TEVET 於後續大型場址之整治工作。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	112年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：陳士賢 NO：E7	
計畫名稱	大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評析(第二年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. P.7 第一年計畫中，增強型土壤氣體抽除法 (TEVET) 設備 移 除 TPH _d (C ₁₀ -C ₄₀) 介 於 7%~57%，其差異範圍甚大，後續應可配合今年度優化各項操作參數後得到改善，建議後續可於報告中，彙整呈現各參數優化後之效益；另外，建議可同步蒐集其他常見整治方法碳排放資訊做比較，據以作為操作參數最佳化之參考依據之一。		1. (1) 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)係針對汽油類總石油碳氫化合物 TPH _g (C ₆ -C ₉)為主要移除標的污染物，因此以揮發性有機物及碳數較低之半揮發性有機物為移除對象。第一年執行期間針對大型石化場址污染土壤其 TPH _g 濃度小於3,000 mg/kg，以熱增強型土壤氣體抽除法進行復育，分項檢視三批次污染土堆，其汽油類總石油碳氫化合物 TPH _g 濃度範圍介於2.35 mg/kg 至182 mg/kg，三批次污染土壤處理後 TPH _g 濃度為低於偵測極限至12.5 mg/kg，汽油類總石油碳氫化合物 TPH _g 之移除率介於90-92%，由於本場址污染多年，汽油及航空燃油組成分中高揮發性化合物歷經風化作用而減少，三批次污染土壤雖然 TPH _g 濃度相對低，但仍可觀察出熱增強型土壤氣體抽除技術對於汽油類總石油碳氫化合物 TPH _g 之移除有顯著之成效。但 TPH _d 屬半揮發性或非揮發性化合物，非 TEVET 主要移除污染物對象，故成效有限。(2) 未來配合本場址整治工作，由於熱增強型土壤氣體抽除法受限於只能處理 TPH _g 及低碳數污染土壤，因此第二年工作配合各整治團隊，污染土壤將以高溫熱脫附處理為主，熱脫附法設施將持續運作，因此高溫熱處理系統優化工作持續進行中，本計畫將蒐集系統各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，提供國內土壤及地下水整治業界基線參考重要資訊及評估熱處理設備及技術輸出之可行性。	



- | | |
|---|--|
| <p>2. P.13、P.14列有熱增強型土壤氣體抽除法 (TEVET)之各項優點，建議可一併列出目前之使用限制，以利綜合考量。</p> <p>3. 本案將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理石化污染土壤，並與兩家國內大型環境工程顧問公司合作，若能取得相關整治工法與本計畫進行經濟及效益比較分析，將為極具說服力之實場寶貴資訊。</p> <p>4. 本研究計畫書撰寫具體，且文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域的現況了解。</p> | <p>2. TEVET 之主要限制因子為場址污染物物理及化學特性，若其沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低，則移除成效受限制，此觀察詳細論述於第一年期末報告4.1節及本計畫書「八、研究預期效益、績效指標及成本效益分析」之<u>第一年執行成果之貢獻及成果效益</u>該段落中。</p> <p>3. 本計畫第一年以建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，評估污染土壤處理效能分析為主，著重設施操作參數蒐集及調整。有關本計畫第二年工作重點，除配合大型場址持續整治，將持續蒐集熱脫附處理設備數據，同時進行節能減廢措施評估及熱處理極佳化測試。高溫熱脫附處理其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及進行再利用。透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，是第二年預期獲致效益重點，尤其多螺管式熱脫附系統在三個區域污染土壤共處理23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物 TPH 濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，TPH 移除率介於84.1%至99.9%，經過152批次處理污染土壤，結果顯示多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求，污染物富集土壤熱處理系統處理20,200公噸，污染土壤濃度介於5,870–36,800 mg/kg，TPH 去除率達99.5 %以上。未來配合本場址持續進行之整治工作，多螺管系統及高濃度污染物富集土壤系統將持續運作，系統優化持續進行中，將蒐集此兩系統各種參數於第二年執行成果中，並歸納其<u>操作及維護成本</u>、<u>更新碳排放資訊</u>，提供國內土壤及地下水整治業界基線參考重要資訊及評估熱處理設備輸出之可行性。</p> <p>4. 感謝指正及肯定。</p> |
|---|--|



委員二

1. 建議綜整各土質、油品、粒徑、碳排、成本等因素後，提出合宜的污土熱處理工法與參數的選擇路徑，以供實場應用的寶貴參考。另 P.45提及高溫與低溫熱脫附，但無相關參數說明。

1. (1) 有關本計畫後續第二年工作重點，配合大型場址持續整治，將持續蒐集熱脫附處理設備數據，同時進行節能減廢措施評估及熱處理極佳化測試。由於熱增強型土壤氣體抽除法受限於只能處理 TPH_g 及低碳數污染土壤，因此第二年土壤熱處理工作配合各整治團隊需求，將以高溫熱脫附處理為主，其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及再利用。透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、螺管升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，尤其多螺管式熱脫附系統在經過152批次處理污染土壤，結果顯示多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求，未來配合本場址持續整治，系統優化正持續進行中，並將蒐集各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。(2) 熱增強型土壤氣體抽除法設置及操作參數詳見於計畫書 P.35-38內文及圖9及10表示。熱脫附處理法設置及操作由於在不同整治區使用不同系統，其中多螺管式熱脫附系統設置及操作參數詳見於計畫書 P.39-41內文及圖11至13表示，高濃度污染物富集土壤熱脫處理系統設置及操作參數詳見於計畫書 P.41-44內文及圖14至15及表3。

2. 土地使用同意書甲方資料空缺，宜補正。

2. 土地使用同意書甲方為高雄市政府工務局，並具關防用印，甲方代表人、地址及電話詳列於高雄市政府工務局函文中。

3. “張傑”同時聘在第一年的兼任及專任人員，請確認資料的正確性。

3. 張傑為碩士班研究生，在第一年計畫執行初期2022年9月至2023年1月為兼任，2023年1月畢業後改聘為專任助理，第二年計畫並無參與。

委員三

1. 本計畫第一年建置熱增強型土壤氣體抽除法及多螺管式熱脫附系統設施，前者已處理處理三批次共3,000公噸污染土壤，

1. 熱增強型土壤氣體抽除法受限於只能處理 TPH_g 及低碳數污染土壤，因此第二年工作配合各整治團隊，將以高溫熱脫



後者在三個污染區域共處理23,548公噸污染土壤總石油碳氫，TPH濃度處理效能多能超過84.1%，後者處理效能符合場址整治需求。

附處理為主，其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及再利用。透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、螺管升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，尤其多螺管式熱脫附系統在三個區域污染土壤共處理152批次污染土壤23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物 TPH 濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，整體處理效能顯示除3-2區單一批次 TPH 移除率為73.7%外，TPH 移除率介於84.1%至99.9%。由於不同整治區域其土壤質地不同、受污染時間年代不一，污染物種類及污染程度不同，有些批次污染土壤係經過生物復育工法或水洗工法施作後，無法達到污染物移除，而改以熱處理方式，因此土壤異質性甚高，所以會造成在連續操作下，熱處理出土之 TPH 濃度差異，但整體而言，熱處理後之土壤均符合操作單位及驗證單位(高雄市工務局)認定合格土壤之基本法規需求 (TPH 濃度需小於1000 mg/kg)，綜整一年來之操作經驗，多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求，未來配合本場址持續整治，系統優化正持續進行中，並將蒐集各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。

2. 研究所得參數，對於技術具應用及推廣可具參考性。
3. 有關於兩個熱處理技術的比較，包括目標污染物、適合土壤、能耗、碳排放量等，建議能夠說明。

2. 感謝指正及肯定。
3. 由於熱增強型土壤氣體抽除法受限於只能處理 TPH_g 及低碳數污染土壤，因此計畫第二年工作配合各整治團隊及工區調整，將以高溫熱脫附處理技術為主，高溫熱脫附處理其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及再利用。各工區熱處理設施及操作參數不同，透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，來達到系統優化，並將蒐集各種參數於第二



4. 建議能夠納入文獻類似熱技術、以及物化技術，其處理效能、成本及能耗之數據，以便後續技術推廣及應用參考。	年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。 4. 感謝建議，第二年工作將持續蒐集國內外相關文獻，以便後續技術推廣及應用參考。
委員四 1. 針對前期計畫整治之污染物處理移除率因土壤經風化程度、土壤質地及結塊等情形影響，建議本年度計畫可納入污染土壤前處理於最佳化程序因子，如均質化或經採樣將土壤依污染程度分級等，可有效達降低能耗及碳排等成效。 2. P.8、P.50，本計畫書內摘要部分載明已完成七分區整治，與後續第一年執行成果效益內容之五分區有所出入，建議應確認並修正之。 3. P.50，本計畫參考及彙整國外研究四個熱脫附案例，其已瞭解設備之溫室氣體排放量，並與本研究設計之設備相比較，然各地區依污染物質及程度之異同而對碳排將有直接影響，建議宜說明本研究之設計與國際間技術碳排效益之評析。	1. 感謝建議，各工區透過土壤前處理、各單元階段溫度監控、土壤停留時間、升溫條件、系統熱傳導均勻性、操作時間，配合不同系統的優化正持續進行中，並將蒐集各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。 2. 截至目前為止，大型石化場址已完成第三區(3-1、3-2、3-3)及第四區(4-1、4-2、4-3、4-4)共七個分區整治工作，其中有五個分區(3-1、3-2、3-3、4-3、4-4)污染土壤有使用熱處理，未免混淆，已修正 P.8 及 P.50 相關文字說明內容。 3. 由於基線參數匱乏，本計畫採用熱脫附的平均溫室氣體排放為 $0.07 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$，其來源係 Amponsah 等人(2018)彙整自四個熱脫附案例，包括以熱脫附處理一般性污染物污染土壤，其溫室氣體排放為 $0.212 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Beames et al., 2015)。針對汞污染土壤進行熱脫附處理，其溫室氣體排放為 $0.0357 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Hou et al., 2016)。Inoue 及 Katayama (2011)針對持久性污染物污染土壤，進行熱脫附處理，其建議之溫室氣體排放為 $0.0178 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$，另外對不同污染物污染土壤進行熱脫附處理，其溫室氣體排放為 $0.000942 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Vignes, 2011)，在最壞情形推估下熱脫附溫室氣體排放最高值為 $0.2 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Amponsah et al., 2018)。各工區熱處理系統之設計與國際間技術碳排效益，將於第二年計畫執行中嘗試蒐集資訊，並進行計算及評析。



4. 有關本設備之碳排放計算，因處理之污染物 TPH 經燃燒後將產出二氧化碳與污染物濃度成正相關，為接軌國際趨勢，建議可將其處理產出之碳排與能源利用等分別計算，以利瞭解本技術之完整碳排架構。	4. 本計畫根據前人研究綜整出之上述參數 ($0.07 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ 及 $0.2 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$) 作為計算各區不同單元熱脫附設施其溫室氣體排放推估之上下限值，配合本場址整治工作持續推動，高溫熱處理系統將持續運作，系統優化亦持續進行中，同時不同整治區亦將有新設之熱處理設施，因此本計畫將持續蒐集各工區熱處理系統各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、處理產出之碳排與能源利用將研究分別計算以更新碳排放資訊。																
5. 本計畫目前已完成20,000餘公噸之受污染土壤處理，其執行成果具實場應用性並已有實際成效，未來可持續作為我國處理相關土壤污染場址整治應用之技術使用。	5. 高溫熱處理系統在第一年共蒐集三種不同熱處理系統的操作成果，包括多螺管式熱脫附系統、離地高溫熱脫附系統、高濃度污染物富集土壤處理系統，三種高溫熱處理系統在大型石化場址共處理47118公噸污染土壤及20200公噸富集污染土壤及濃縮污泥，共計67318公噸。如下表所示 <table border="1" data-bbox="879 1021 1422 1491"> <tr> <td>多螺管式熱脫附系統</td><td>污染土壤重量(t)</td></tr> <tr> <td>3-1區</td><td>8394</td></tr> <tr> <td>3-2區</td><td>10388</td></tr> <tr> <td>3-3區</td><td>4766</td></tr> <tr> <td>離地高溫熱脫附系統</td><td>污染土壤重量(t)</td></tr> <tr> <td>3-1區</td><td>23570</td></tr> <tr> <td>熱脫附法處理高污染富集土壤</td><td>污染土壤重量(t)</td></tr> <tr> <td>4-3區及4-4區</td><td>20200</td></tr> </table> 藉此大型石化場址之實作經驗，研究團隊將可累積不同系統之操作參數，並進行整治、設施操作、碳排放及維護成本計算，建制二次公害預防措施，建立場址整治策略研判及決策機制流程，作為未來國內大型石化場址整治使用熱處理工法之借鏡，同時培育土壤及地下水整治產業將整治技術及設備輸出之量能。	多螺管式熱脫附系統	污染土壤重量(t)	3-1區	8394	3-2區	10388	3-3區	4766	離地高溫熱脫附系統	污染土壤重量(t)	3-1區	23570	熱脫附法處理高污染富集土壤	污染土壤重量(t)	4-3區及4-4區	20200
多螺管式熱脫附系統	污染土壤重量(t)																
3-1區	8394																
3-2區	10388																
3-3區	4766																
離地高溫熱脫附系統	污染土壤重量(t)																
3-1區	23570																
熱脫附法處理高污染富集土壤	污染土壤重量(t)																
4-3區及4-4區	20200																



委員五 1. 研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題實際、技術具未來應用性且整體研究架構明確方法可行。	1. 感謝肯定。
委員六 1. 除期刊論文與研究報告外，是否可以有“技術手冊(本土化)”的產出。 2. 如何將柴油、燃料油及混合油品污染土壤進行參數調整及處理效能蒐集，現場土壤能有效區隔受污染類型，請說明。 3. 耗材與主要費用包含採樣器具、設備建置應再詳列說明。	1. 由於不同整治區由不同整治團隊規劃並搭配不同整治工法(如生物復育、土壤水洗、熱處理、離場處理)，造成所選擇之熱處理設備之製造商差異極大，因此熱處理設施在硬體設備、設置空間、操作流程、土壤處理量能、二次公害設施，均有極大差異，對於技術手冊之產出可能不容易適用所有熱處理使用者及規劃者。 2. 如計畫書圖8研究架構所示，土壤開挖後首先進行現場土壤污染濃度分析，進行快速篩分判定風化程度及污染樣態，使用不同快篩工具，如開發之氣相層析快速分析法，了解污染物碳數範圍及 TPH_g、TPH_d 比例及 TPH 濃度，針對低碳數油品可搭配 GC/PID 及 GC/FID 執行土壤氣體篩測，使用 TPH test kit 或 RemScan 偵測 TPH_d 濃度。當污染土壤為溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤、及煤油污染土壤，其 TPH_g 濃度若小於3,000 mg/kg，各工區整治團隊多規劃以熱增強型土壤氣體抽除法或生物復育法，進行復育。針對中、高碳數分佈污染土壤，如柴油污染土壤、燃料油污染土壤、重油污染土壤其 TPH_d 濃度若小於3,000 mg/kg 多規劃使用水洗工法，若污染土壤其 TPH_d 濃度大於3,000 mg/kg，或水洗成效不彰之污染土壤，規劃以熱脫附處理法進行污染土壤復育。 3. 採樣器具包括熱處理前與後之土壤採樣工具，採樣瓶，土壤分析所需萃取溶劑及分析儀器相關耗材。



委員七 1. 第二年試驗運用第一年成果持續優化現場高溫熱脫附及 TEVET 系統，第二年度計畫書中進行優化之測試規劃可再詳細陳述。	由於熱增強型土壤氣體抽除法受限於只能處理 TPH_g 及低碳數污染土壤，因此計畫第二年工作配合各整治團隊及工區調整，開挖污染土壤以低揮發度且高碳數之柴油、燃料油、重油為主，熱處理將以高溫熱脫附處理技術為主，整治各工區(計畫書圖 6 之第 2、5、6 區)透過熱處理設施之土壤前處理、各單元階段溫度監控、土壤停留時間、升溫條件、系統熱傳導均勻性、操作時間，配合不同系統的優化正持續進行中，並將蒐集各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、更新碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。
委員八 1. 主持人已有相關研究經驗與績效，對土水污染整治技術發展能力佳，足以勝任本專案計畫。 2. 本專案計畫著重於:以石化廠土壤污染的實際案場為對象評估 TEVET 成效與效益分析。本計畫的執行對國內未來土壤整治工作推動有貢獻。 3. 計畫書撰寫具體，所提出的研究方法可行。 4. 本計畫以實際案場為對象，研究結果具有潛在的實務應用潛力。 5. 主持人已有相關研究經驗，本計畫書中對文獻的蒐集整理頗完整。計畫書中對國內外本研究領域現況有所了解。 6. 本計畫屬於延續性的第二年度計畫，計畫執行期限的規劃合理。	1. 感謝肯定。 2. 感謝指正。 3. 感謝肯定。 4. 感謝肯定，藉此大型石化場址之實作經驗，研究團隊將可累積不同系統之操作參數，並進行整治、設施操作、碳排放及維護成本計算，建制二次公害預防措施，建立場址整治策略研判及決策機制流程，作為未來國內大型石化場址整治使用熱處理工法之借鏡，同時培育土壤及地下水整治產業將整治技術及設備輸出之量能。 5. 感謝肯定。 6. 敬悉。



7. 專案經費建議略減(因為是第二年計畫，部分耗材已購置)(本年度增加人事費)。 8. TEVET: in situ 的延伸應用，建議略加討論。	7. 計畫第二年工作配合各整治團隊及五個不同工區(計畫書之圖6之第2、5、6區)整治同步進行，熱處理設施均為重新設置，污染土壤除現地整治外，開挖高碳數高濃度之污染土壤將以高溫熱脫附處理技術為主。由於整治各工區由不同整治團隊規劃，並使用不同整治工法，造成所選擇之熱處理設備之製造商差異極大，因此熱處理設施在硬體設備、設置空間、操作流程、土壤處理量能、二次公害設施，均有極大差異，熱處理設施增加，資料蒐集、樣品採樣及樣品分析工作增加，因此耗材及設備費用增加。人事費用編列為減少，第一年人事費為510,952元，第二年人事費編列較少為377,520元。 8. TEVET 所處理之污染土壤主要配置以針對 TPH_g 污染型態為主、碳數$10(\text{C}_{10})$以下揮發程度較高之污染土壤，以降低各批次間之處理成效差異，對於未達處理成效及法規標準具殘留態污染物之土壤，可搭配生物復育以提高成效熱增強型土壤氣體抽除技術對於總石油碳氫化合物 $\text{TPH}_d(\text{C}_{10}-\text{C}_{40})$之移除率受到污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響。該技術在國內僅使用於少數私人場址整治，未來可持續推廣於汽油污染土壤及含氯有機溶劑污染土壤之離地整治。
--	---



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人： 陳士賢 NO：A10	
計畫名稱	大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評析(第1年)		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 有關成果績效自評表，表內提出學術面須投稿國外期刊論文、研究報告及人才培育，以及產業面可移轉產業技術2件，但未標示各項目標達成情形及未達成原因，建議宜修正之。 2. 本計畫透過處理場址內量體甚大且污染物種類歧異之受溶劑、汽油、航空燃油、柴油或燃料油污染土壤，評估熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法對污染土壤移除效能，蒐集操作參數及最適操作條件，使用熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，針對不同油品污染、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下，各類型污染土壤之目標污染物移除效能，尚缺具體說明之研究流程及方法。		1. 感謝指正，本計畫為兩年期執行期程，今年為第一年執行期，績效自評項目除「國外期刊投稿」將待完整累積蒐集熱處理操作參數、多批次污染土壤移除及熱處理效能綜合評析成果，預擬規劃於計畫第二年執行中進行投稿外，成果績效自評表中所列之「學術產出及活動」(如研究報告)、「人才培育」(訓練碩士生兩位)、「跨機構團隊」(與整治團隊中兩家工程顧問公司技術合作)、「研發技術轉移」(包括評析熱增強型土壤氣體抽除技術、多螺管式熱脫附系統)等各項目，期中達成數及期末達成數均已修正補充於自評表，預期目標均已達成。 2. 研究流程及方法詳如第三章各節完整敘述。因為大型場址涉及各不同整治區域，由不同執行團隊進行，且污染樣態及整治規劃略有不同，但整體而言有關土壤挖掘分選、土壤預處理、開挖土壤污染濃度快速分析及研判之原則詳述於3.1節。對於低碳數且高揮發性之污染物，在不同工區，各整治團隊分別採用熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)、或水洗工法、生物復育，其中 TEVET 工法為收集對象，但對於半揮發性或非揮發性、高度風化及高碳數化合物之污染土壤，其 TPH_d 初始濃度若大於3,000 mg/kg，規劃以熱脫附處理法進行處理。不同之熱處理設備設施及操作、處理效能之量化查核指標詳述於3.2節。實驗品保/品管詳述於3.3節。評估離地熱處理技術的影響參數其作法詳述於3.4節。如何評估離地熱處理技術的經濟	



3. 本計畫無執行進度落後，然而在執行時程規劃查核點未有節能減廢措施評估及熱處理極佳化測試、熱處理操作參數調整及評估離地熱處理技術的影響參數，建議納入查核點說明。 4. 綜上所述，整體研究成果尚符合預期成果，然建議補充說明計畫技術轉移的情形、未來經濟效益及碳排放的部分。 5. 有關結論及建議，建議將結論及建議分別說明，另針對第二年計畫說明短、中長期規劃。 6. 本計畫欲建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，評估熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法對污染土壤移除效能，並蒐集操作參數及操作條件，針對不同條件下，瞭解各類型污染土壤之目標污染物移除效能，後續須考慮操作參數最佳化、操作及維護成本計算，並分析熱處理技術之適用性及限制性。	及碳排放參數其作法詳述於3.5節，各項工項均有完整之說明。 3. 感謝指正，有關熱處理設施操作參數調整、熱處理極佳化測試、節能減廢措施評估均已納入3.6節查核點說明，並修正表3-3 研究進度及預期完成之工作項目。 4. 本計畫整治技術發展之目標，第一年以建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，評估污染土壤處理效能分析為主，著重設施操作參數蒐集及調整，熱增強型土壤氣體抽除技術操作3000公噸污染土壤整治，對於總石油碳氫化合物汽油類 $\text{TPH}_g(\text{C}_6\text{-C}_9)$ 之移除率具一定成效，但對於總石油碳氫化合物柴油類 $\text{TPH}_d(\text{C}_{10}\text{-C}_{40})$ 之移除率受到污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，效果受到限制，該技術在國內僅使用於少數私人場址整治，未來可持續推廣於汽油污染土壤及含氯有機溶劑污染土壤之離地整治。多螺管式熱脫附系統在三個區域污染土壤共處理23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物 TPH 濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，整體處理效能顯示除3-2區單一批次 TPH 移除率為73.7%外，TPH 移除率介於84.1%至99.9%，截至目前操作情形顯示，多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求，由於大型場址仍持續整治中，熱處理經濟效益將在第二年執行時累積更多操作實績，進行綜合性評估。 5. 依照委員建議，結論及建議分別說明於第五章，並針對第二年計畫說明短、中長期規劃說明於第五章。 6. 配合大型場址整治進度及後續共五區整治工程進行之規劃，高溫熱處理設施之操作參數蒐集及調校，將持續於第二年計畫執行中進行，並分析熱處理技術之適用性及限制性，並綜整操作及維護成本計算，碳排放資訊蒐集，提供國內土壤及地下水整治產業界及環境管理者重要基線參考資訊及技術未來輸出至國外之參考。
---	--



委員二

1. 表4-2~4-4共進行152批次高溫熱脫附效率檢測，都可將污染土中 TPH 明顯降低至低於管制標準，但有些批次可降至10 mg/kg 以下，有些稍高，達500 mg/kg，建議評析，以用於優化系統操作。

2. TEVET 系統測試因為土壤 TPH 分布不均，所以造成處理後採樣分析數值較採樣前高，後續如何調整以於第二年能更明確了解系統去除效率及於優化系統操作？

3. 建議詳述及剖析本項技術成果，深入比較三套系統去除效率及運作條件，以得出最適處理條件並減低碳排放量。

1. 在大型污染場址中，三個整治區域包括 3-1 區、3-2 區及 3-3 區之污染土壤分別以位在不同區域之多螺管式熱脫附系統設備進行處理，除試車階段略而不計，三個區域污染土壤共處理 23548 公噸。由於不同整治區域其土壤質地不同、受污染時間年代不一，污染物種類及污染程度不同，有些批次污染土壤係經過生物復育工法或水洗工法施作後，無法達到污染物移除，而改以熱處理方式。因此土壤異質性甚高，所以會造成在連續操作下，熱處理出土之 TPH 濃度差異，但整體而言，熱處理後之土壤均符合操作單位及驗證單位(高雄市工務局)認定合格土壤之基本法規需求(TPH 濃度需小於 1000 mg/kg)。高溫熱脫附處理其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及再利用。透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、螺管升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，在經過 152 批次處理污染土壤，多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求，未來配合本場址持續整治，系統優化正持續進行中，並將蒐集各種參數於第二年執行成果中，並歸納其操作及維護成本、碳排放資訊，供國內土壤及地下水整治業界參考。

2. 因應大型場址整治進度及後續共五區工程進行之規劃，因應這些區域多屬探數較高之混合油品污染型態，目前整治團隊尚無規劃 TEVET 系統於後續之各工區使用，若有整治團隊採行 TEVET 系統，將持續蒐集相關參數。

3. 感謝委員建議，三套系統去除效率及運作條件彙整於 4.2 節，各種熱處理系統碳排放資訊彙整於 4.3 節。高溫熱處理設施之操作參數蒐集及調校將持續於第二年計畫執行中進行，並分析熱處理技術之適用性及限制性，並綜整操作及維護成本計算，碳排放資訊蒐集，提供國內土壤及地下水整治產業界及環境管理者重要



	基線資訊及技術未來輸出至國外之參考。
委員三 1. 自評表中未說明期中及期末之達成數量。 2. 未見土壤基本性質之分析結果，包含有機質及質地等。 3. TEVET 中，1000公噸取6點位進行分析，由於相同點位處理前後的土樣並非是相同的土樣，為何不考慮將六個數據取平均及標準差，以進行比較及統計分析？	1. 成果績效自評表中所列之學術產出及活動(研究報告)、人才培育(碩士生兩位)、跨機構團隊(包括整治團隊中兩家工程顧問公司)、研發技術轉移(包括熱增強型土壤氣體抽除技術、多螺管式熱脫附系統)等各項目，期中達成數及期末達成數均已補充於成果績效自評表。 2. 本大型場址約176公頃，依據場址歷次鑽探資料顯示第一層為 1-4公尺厚的沉泥質砂土層與黏土質砂土層，往廠區南側逐漸成沉泥質黏土層，第二層為6-12公尺厚的細砂到中砂的砂質土壤組成，約含有5-12%的沉泥，第三層為7-12公尺厚的細砂層，包括30%的沉泥，而在此層中夾雜黏土層，第四層為地表下約10-40公尺的黏土質沉泥、砂質沉泥層與沉泥質砂層所組成的互層，第五層則是0-6公尺厚度的石灰層的存在，土層夾雜珊瑚碎片。在廠區的中南部位，此層是相當於第四層的深度。場址東側地區之鑽探粒徑分析資料顯示地下4-10公尺之坩土含量約10%-20%；10-20公尺之坩土含量約15%-40%；20-30公尺之坩土含量約20%-60%；30-45公尺之坩土含量約40%-90%。有機碳含量在地下3至30公尺由三個不同測點分別顯示為1.51-3.61%、2.13-3.8%、2.24-4.16%。 3. TEVET 施作中由於每批次污染土壤量體大，考量污染分佈之不均質性甚高，為求全面瞭解其成效，因此整治團隊本身委託兩個不同採樣及分析團隊，就不同點位進行採樣及分析，本計畫團隊另行單獨採樣及分析，由於 TEVET 自行成效評估及驗證單位係進行土壤多點位採樣，所有樣點之 TPH 濃度均需低於1000mg/kg方認可為合格，否則須局部區塊持續改善，因此在操作上，樣品濃度表示未取平均值。



4. 多螺管式的土壤 TPH，為何不加入 C₁₀以下及 C₁₀以上，而僅以 TPH 來表示？ 5. TEVET 結果中，處理後之濃度增加了，為何其 Conc Decrease 仍為正值？ 6. 未見經濟與碳排放之結果。	4. 大型場址土壤整治，無論採行何種工法須進行現場土壤污染濃度分析及篩分，針對低碳數分佈污染土壤如溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤、及煤油污染土壤，當其 TPH_g 濃度小於3,000 mg/kg，規劃以熱增強型土壤氣體抽除法或生物堆進行復育。因此 TPH_g 污染土壤在整治分工上，多不會直接進入熱脫附系統處理。針對中、高碳數分佈污染土壤如柴油污染土壤、燃料油污染土壤、重油污染土壤其 TPH_d 濃度大於3,000 mg/kg，因屬較難整治，以多螺管式熱脫附系統使用熱脫附處理法進行污染土壤復育。因此多螺管式熱脫附系統之污染物移除以總石油碳氫化合物 TPH 為指標。 5. 感謝指正，數據誤植的部分已修正於表4-1。 6. 由於大型場址仍持續整治中，熱處理經濟效益將在第二年執行時累積更多操作實績，進行綜合性評估。碳排放估算已加列於4.4.節熱處理設施碳排放估算，請參閱。
委員四 1. 本計畫熱增強型土壤氣體抽除技術結果顯示有初步的成果。建議延續本項實驗的執行。 2. 熱增強型土壤氣體抽除法效能顯示部份污染土壤樣品於處理前後，於總石油碳氫化合物 TPH_d(C₁₀-C₄₀)分析數據有提升之現象，建議後續改善措施。	1. 因應大型場址整治進度及後續共五區工程進行之規劃，目前五區整治團隊尚無規劃應用熱增強型土壤氣體抽除技術 (TEVET)系統於後續之各工區使用，若有整治團隊採行 TEVET 系統，將於第二年持續蒐集相關參數。該技術在國內目前僅使用於少數私人場址整治，未來可持續推廣於汽油污染土壤及含氯有機溶劑污染土壤之離地整治應用上。 2. 熱增強型土壤氣體抽除技術適用於低碳數分佈污染土壤如溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤及煤油污染土壤，對於柴油類總石油碳氫化合物 TPH_d(C₁₀-C₄₀)之移除率，受限污染物其沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，部份污染土壤樣品於處理前後，由於批次處理土壤中污染分布之不均質性及多點採樣點不同，對於移除成效較差或污染分布其歧異大區



3. 建議補充評估本案所採用系統的節能減廢措施。 4. 在不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下對污染土壤之總石油碳氫化合物移除效能不同。本處理系統(熱增強型土壤氣體抽除技	塊，會造成分析數據有提升之現象，整體而言 TEVET 對於總石油碳氫化合物 TPH_d 移除效果不佳。 3. 節能減廢措施分別敘述於3.2節各小節，在 TEVET 系統中，含揮發物的土壤氣體經真空鼓風機泵送至燃燒室高達980°C的氣體加熱系統，由於氣體在燃燒室滯留約0.5秒，因此土壤氣體中所含揮發性有機污染物將被去除，經燃燒室去除揮發性有機污染物的高溫空氣，重新再注入土堆中。三種熱處理系統均採用 LNG 天然瓦斯為燃料，減少空氣污染物排放，設施均進行周界空氣監測以避免二次污染。3-1區熱脫附爐其二次高溫爐為以高溫燃燒含總碳氫化合物之含油性氣體，以600-800°C 高溫滯留時間2秒以上將其分子結構破壞，廢氣經由污染防治設備處理。3-2區多螺管式熱脫附系統二次污染防治系統之運作方式為脫附後之油氣，由空氣抽引器抽出至二次燃燒室，二次燃燒室中溫度為860°C，二次燃燒室之廢氣經由架高之裸鋼管，進行冷卻後進入高溫觸媒陶瓷集塵器中，在進入集塵器前進行脫硝除硫之工作，廢氣進入高溫陶瓷集塵器後設於內之濾管去除空氣中之土粉及脫硫反應後形成之硫酸鈣，同時附於濾管表面之二氧化鈦觸媒亦進行脫硝反應以降低排氣中之污染物。4-3及4-4區高濃度富集土壤熱脫附處理系統設置二次燃燒室，使氣化油品於高溫及富氧環境下進行熱氧化，達到有機氣體完全分解成安定無害之二氧化碳及水，在高溫(850~1,100°C)完全熱氧化 VOCs 及 SVOCs 及其他氣體，採密閉蓄熱結構，節能及低熱損。空污防制次流程為經熱氧化處理後之排氣中，因仍含有少量衍生之硫氧化物(SO_x)及氮氧化物(NO_x)與粒狀污染物，因此須再進行後續之脫硫、脫硝及除塵等空污防制，方可將潔淨氣體排放至大氣。 4. 為提升熱增強型土壤氣體抽除設備處理之污染物移除率，在大型場址及大量污染土壤情境下，前端之土壤篩分工作，特別是對污染土壤碳數分布範圍之了
--	--



術)有其適用的條件除了 TPH_g 濃度小於 3,000mg/kg 外，建議評估其他條件的限制(例如土壤質地、風化程度)的影響。 5. 建議考量鼓風機通氣時，熱空氣與有機污染土壤的接觸問題。	解，可能有其必要性，操作時儘可能配置 TPH_g 污染為主(C₁₀以下)、揮發程度較高之污染土壤，以降低批次間之處理成效差異，對於未達處理成效及法規標準具殘留態污染物之土壤，可搭配生物復育以提高成效。截至目前觀察本場址污染土壤均為多年風化，風化程度對 TEVET 處理成效並未造成影響，土壤質地因須重新堆疊並未造成影響。 5. TEVET 作業時，系統的鼓風機將343°C 的熱空氣以每分鐘2,500 ft³/min (70.9 m³/min)注氣量注入土堆，造成土堆土壤溫度從室溫升高到65°C 至232°C 間，若處理受汽油污染的土壤約升高至80°C 至120°C 即可。
委員五 1. 期中報告審查意見均妥善回應。 2. 期末報告主要增加了熱脫附法效能分析的研究結果，除了期中報告所提出的「多螺管式熱脫附系統效能評析」，並增加「離地高溫熱脫附系統效能評析」及「熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤效能評析」，整體處理效能符合預期。 3. 4-3及4-4區採熱脫附法處理含高濃度 TPH 之粉黏土質土壤，此類型土壤特性為進料時非常溼黏不易輸送，出料時過於乾燥易引起大量揚塵，是否粉質壤土或其他質地土壤可避開此困擾，請討論。	1. 感謝指正。 2. 感謝肯定。 3. 由於場址4-3及4-4區採用土壤水洗為主要整理工法，油品污染土壤經過土壤清洗步驟，以水清洗的情形下，一些污染油品可能會溶於水中或上浮到水面，然後清洗過之砂、細砂和砂礫可以在洗滌單元中排出，土壤水洗裝置使用粒徑分離方式，從較大顆粒的土壤中分離出洗滌土中的極細砂、粉土和黏土，因此在水洗過程中細粒徑之粉土和黏土易懸浮，最後貢獻為含高濃度 TPH 水洗後之粉、黏土質土壤(污泥)，而4-3及4-4區採熱脫附法處理之對象是污染土壤經清洗後產出的污染物富集土壤，土壤水洗過程中不可避免所產生之細粒徑殘留物，因此在熱處理過程中易產生揚塵。



土污基管會

1. 本計畫熱脫附及 TEVET 2種設備，針對各批次土壤處理之相關可控制操作參數為何，請補充說明。

2. 各項污染土壤處理成效中，其中3-2區土壤處理移除率73.7%–99.9%，請說明差異26%可能原因為何。

3. 請補充說明 TEVET 設備如何進行參數調整及極佳化測試，其中參數調整是否包含油品污染土壤種類及濃度。

1. 土壤處理之相關可控制操作參數為數眾多，詳述於報告3.2節各小節。重要參數摘要如下：

(1) 以 TEVET 系統而言，系統的鼓風機將120°C 的熱空氣以每分鐘70.9 m³/min 注氣量注入1000公噸汽油污染土堆，操作期程為7天，土壤氣體燃燒過程中約需每分鐘約需7.1立方公尺的新鮮空氣以提供燃燒所需之氧氣，因此每分鐘亦約有7.1立方公尺經氣體加熱系統處理的高溫空氣需被排放至大氣中。

(2) 多螺管式熱脫附系統溫度大於450°C，土壤每小時處理量10公噸，土壤含水率20%時則每小時可處理5噸之污染土壤，二次爐溫度860°C。

(3) 離地高溫熱脫附系統以350°C 循環熱風加熱，二次高溫爐800°C 高溫，以高溫燃燒自熱脫附爐所引誘之含油性氣體。

(4) 熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤，現場設置兩套土壤熱脫附系統，每套設計處理量為12噸/小時，第一段窯係乾燥段(120°C)，第二段窯係脫附段(450°C)，二次燃燒室在高溫850~1,100°C)完全熱氧化 VOCs 及 SVOCs 及其他氣體。

2. 3-2區進行熱處理10388公噸污染土壤，除單一批次TPH移除率為73.7%外，TPH移除率介於85.9%至99.9%，本大型場址污染土壤均為污染多年及歷經不同風化程度，土壤質地及結塊形成土壤團粒情形不一，加上污染物種類繁多，且分布歧異，因此形成移除率較低之單一批次，但熱處理後之土壤其 TPH 濃度(963 mg/kg)仍符合法規要求。

3. 為提升熱增強型土壤氣體抽除設備處理之污染物移除率及應用性，在大型場址面對大量污染土壤情況下，前端之土壤篩分工作，特別是對污染土壤碳數分布範圍之了解，可能有其必要性，操作時儘可能配置 TPH_g 污染為主(C₁₀以下)、揮發



	程度較高之污染土壤，以降低批次間之處理成效差異，對於未達處理成效及法規標準具殘留態污染物之土壤，可搭配生物復育或水洗工法以提高成效。
--	--





112年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號： (由本署填寫)

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案技術編碼	LAB-S-R-C2-P		
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型	研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 政策類或其他		
申請機構系所	國立高雄師範大學生物科技系(所)				
機構地址	高雄市燕巢區深中路62號				
專案主持人	陳士賢	職等/職稱	教授		
協同主持人	劉原宏	職等/職稱	董事長		
專案名稱	中文	大型石化污染場址污染土壤熱處理技術及效能評析(第二年)			
	英文	Evaluation of technology and performance of thermal treatment for petroleum contaminated soils in a large contaminated site			
	關鍵字	熱增強型土壤氣體抽除技術、高溫熱脫附法、石油碳氫化合物污染場址			
執行期程	自民國112年12月18日起至民國113年11月29日止				
專案主持人	姓名：陳士賢	E-mail：cschen@nkn.edu.tw	專線：(07)7172930 ext 7312 手機：0935236622		
專/兼任人員	姓名：蘇憶玲	E-mail：bisiy3357@gmail.com	專線：(07)7172930 ext 7328 手機：0976351488		
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估 總經費		第一年 申請經費	第二年 申請經費	編列說明
	1.	人事費用	510,952	320,487	(1~5項相加之50%為限)
	2.	設備使用含維護費	244,372	195,276	(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	866,727	1,038,857	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	23,345	45,840	(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	194,604	239,540	(1~5項相加之15%為限)
	6.	自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1~5項)		1,840,000	1,840,000	總金額：3,680,000
	計畫總經費(1~6項)		1,840,000	1,840,000	總金額：3,680,000

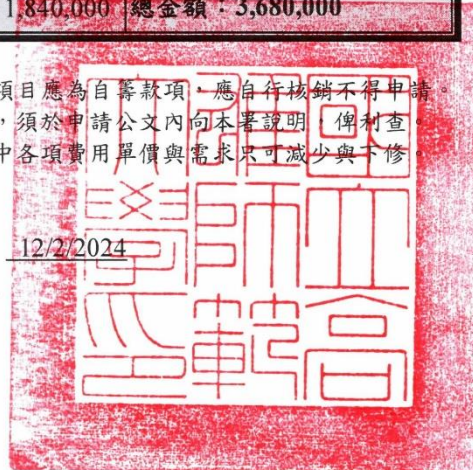
說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利查核。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人： _____

日期： 12/2/2024

計畫人陳士賢
主持人





土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

112年度專案成果績效自評表

二、成果績效自評:「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一)學術面

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目							
A 學術 產出 及 活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文					
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1		1		
		(2)國際研討會 論文發表					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告	1		1		
	4.專著(本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人才 培育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2				
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊	1		1		
		(3)形成研究中 心					
		(4)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



(二) 產業面

項目				目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明						
			新型/設計						
			合計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍 生 利 益 金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍 生 利 益 金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		2		2			
		(2)品種/系(件數)							
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
		業界投資金額(仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)							



(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數或人才培育碩博士生說明)

1. 研究結果產出已投稿國際期刊，分享台灣大型石化污染場址整治工法之成效及精進措施。
2. 訓練碩士級研究生2名熟悉大型石化污染場址多種整治工法及工項，包括樣品取樣、現場快速分析方法及實驗室分析方法、土壤復育決策判定、低溫及高溫熱處理設施操作原理及操作參數收集、污染土壤復育成效確核、及污染場址工地安全衛生管理。

產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

1. 與國內兩家大型環境工程顧問公司合作，均為大型石化污染場址之整治國家隊成員，協助土壤及地下水整治人才訓練及養成，精進石油碳氫化合物污染土壤之低溫及高溫熱處理技術及最佳化操作。
2. 由大型場址大規模污染土壤批次處理，發掘土壤熱處理設施各單元流程可能問題，提升石油碳氫化合物污染土壤熱處理技術之適用性，並獲得最佳化操作參數，完備發展技術之適用性並探討其限制性，提供給國內整治業者，並估算熱脫附的平均溫室氣體排放，強化節能減廢措施，提昇綠色及永續整治工法。
3. 為國內建立土壤熱處理最佳化技術管理模式，提供基線參考資料。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升或提供政府作為監測/管制標準、污染址管理等政策及法規研訂之參考)

1. 提升國內土壤及地下水整治產業的土壤熱處理技術應用及整治效益，因國內在大型場址之現場土壤熱處理技術之發展、普及性及技術成熟度相對較缺乏，藉此建立熱處理爐設置，操作參數設定、污染物處理效能，及二次公害預防實作經驗。
2. 廣泛建立熱處理操作參數及經驗，對於國內未來大型石化污染場址整治及土壤及地下水整治技術輸出至海外，可提供重要參考實績。



四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任助理」及「兼任助理」等類別之順序分別填寫。

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每週平均投入工作時數
專案主持人	陳士賢	國立高雄師範大學生物科技系(所)	教授	規劃研究計劃方向及模場實驗設計與進度查核	20%
協同主持人	劉原宏	裕山環境工程股份有限公司	董事長	規劃模場計劃方向及現場工程設計，現場工作重點與進度查核計畫協調	10%
兼任助理	蘇憶玲	國立高雄師範大學生物科技系(所)	碩士班研究生	執行場址實場工作與實驗室分析試驗	100%
兼任助理	曾雅玲	國立高雄師範大學生物科技系(所)	碩士班研究生	執行場址實場工作與數據分析	100%

※註：每週平均投入工作時數比率係填寫每人每週平均投入本專案工作時數佔其每週全部工作時間之比率，以百分比表示（例如：50%即表示該研究人員每週投入本專案研究工作之時數佔其每週全部工時之百分五十）。



中文摘要

熱脫附(thermal desorption)處理技術為土壤整治技術之一種，係利用加熱之方式將受有機物污染土壤加熱至有機物沸點以上，使吸附於土壤中之有機物揮發成氣態後再分離處理，此方式為物理分離程序，熱脫附處理技術已經驗證可應用於處理污染土壤、底泥、污泥及濾餅等。本計畫目的為配合國內大型石化場址整治，將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理石化污染土壤，評析熱增強型土壤氣體抽除技術(thermally-enhanced vapor extraction technology, TEVET)及熱脫附法(thermal desorption)，在不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下對污染土壤之總石油碳氫化合物(Total petroleum hydrocarbon, TPH)移除效能。

第一年以建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，以配合大型場址在第三區及第四區之快速整治進度，結果顯示由於 TEVET 操作處理三批次污染土壤之 TPH_g 均相對低，不易彰顯其成效，柴油類總石油碳氫化合物 TPH_d 之移除率成效不佳，因污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響所致。多螺旋式熱脫附系統在第一年執行期間，在三個整治區域共處理污染土壤23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，TPH 移除率介於84.1%至99.9%，第二年配合大型場址啟動第三階段整治工程，自2023年11月至2024年9月執行期間，多螺旋式熱脫附系統共處理約33096公噸之污染土壤，污染土壤總石油碳氫化合物濃度範圍為529 mg/kg 至9407 mg/kg，TPH 移除率介於64.5%至99.5%，低移除率均屬原始污染土壤濃度值在1400 mg/kg 及以下之批次，整體而言熱處理後之土壤，均符合操作單位及驗證單位(高雄市工務局)認定合格土壤之基本法規需求，即土壤 TPH 濃度需小於1000 mg/kg 方能回填及再利用，多螺旋式熱脫附系統設備經長時間操作，符合大型石化場址之污染土壤挖掘、不同工法離地復育、回填或再利用之快速整治方式。

檢核3-1區離地高溫熱脫附系統，污染土壤進料 TPH 濃度最高為9892 mg/kg，出料濃度介於113至197 mg/kg，平均每日操作量達115 B.M³(自然方)(約195公噸)，整治期間以熱處理進行污染改善土壤數量為14,731 B.M³(自然方)，約為18413.75 L.M³之鬆方(Loose cubic meter, L.M³)，約為27620公噸，整體處理效能符合預期。4-3及4-4區採熱脫附法處理之對象是污染土壤經清洗後產出的污染物富集土壤，土壤水洗過程中不可避免所產生之細粒徑殘留物，此類型土壤特性為進料時非常溼黏不易輸送，出料時則非常乾燥易引起大量揚塵，技術難度甚高，設備安裝及試車整改共歷時9個月，受限於專



案完工期限，實際運作時間僅約70工作日(2022年12月至2023年2月)。全案累計處理20,200公噸濃縮污泥，每套平均處理量為10.5公噸/小時，略低於原設計之12公噸/小時。系統整體運作順暢，故障皆可在當日排除，開機率(有效運作)可達82.0%。進料濃度介於5,870–36,800 mg/kg，平均值為14,700 mg/kg，典型的進料碳數分布以 C_{12} – C_{22} 為主，屬柴油範圍。出料土壤每小時分堆檢測，出料濃度則介於24–310 mg/kg，平均為82 mg/kg，TPH 去除率達99.5 %以上。北二區(5-1區、5-2區、部分6-2區)污染土壤以旋轉窯熱處理方式進行，於2024年1月19日起開始雙線運轉，截至2024年5月28日設備結束操作止，總操作天數121天，累計處理量達114010公噸。共4套熱脫附爐進行土壤復育，其開機率(有效工時)可達90%，單日處理量平均可達975公噸，實際單爐產量為10公噸/小時/爐，高於原先規畫之設計量8公噸/小時/爐，實際處理量可高於設計處理量之原因，主要是進料污染土壤含水量比預期低。污染土進料濃度介於1719–10500 mg/kg，平均值為3409 mg/kg，出料濃度則介於61–328 mg/kg，平均為145 mg/kg，TPH 去除率達96%，本熱脫附系統之所以能有高去除率，主要因加熱方式採直接加熱，窯內土壤受熱面積大，加上窯體轉動，土壤在窯內均勻混合，故脫附效果極佳，合格品佔比可達100%，能穩定產出高品質產品。

大型場址第一年共完成七個分區整治，其中有五個分區(3-1區、3-2區、3-3區、4-3區、及4-4區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估平均值為3072.8 t CO₂-eq，熱處理設施溫室氣體總排放最高推估值為9049.3 t CO₂-eq。第二年有二個分區(西區、北-2區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估為6865 t CO₂-eq，熱處理設施溫室氣體總排放推估最高值為19614.1 t CO₂-eq。綜合大型石化場址整治期間，所有個整治區其熱處理設施溫室氣體總排放之平均值推估為9937.7 t CO₂-eq，推估熱處理設施溫室氣體總排放最高上限值為28393.4 t CO₂-eq，此參數可供國內制定綠色及永續整治工法及擬定或盤查各整治工法碳足跡之參考。

高溫熱脫附處理其目的為移除污染物而盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及再利用。透過熱處理設施各單元階段溫度監控、土壤停留時間、螺管升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，尤其多螺管式熱脫附系統及旋轉窯系統在經過兩年以上多批次處理污染土壤，結果顯示符合大型場址整治需求，這些操作及維護經驗參數及碳排放資訊，可供場址熱處理法適用時機判斷依據，國內土壤及地下水整治界熱處理設施整廠輸出國外及系統操作維護及優化參考。



英文摘要

Thermal desorption is suitable for the treatment of most volatile and semi-volatile organic pollutants in the soil, such as total petroleum hydrocarbon (TPH), chlorinated solvents, polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyl (PCB), dioxins, pentachlorophenol, and mercury. In addition to the application of various types of contaminants, thermal desorption has the advantages of short treatment cycle, high efficiency in removing contaminants, high safety, low cost, reusable soil and strong pollutant recovery capabilities. The method exhibits several advantages, such as short treatment period, high efficiency, high safety, lack of secondary pollution, and recycling of impacted matrices and contaminants. The basic process includes the heating (direct or indirect) of the contaminated environmental matrix at an appropriate temperature under vacuum or into carrier gas to separate target volatile/semivolatile contaminants from the media. During ex-situ thermal desorption, after the vaporization or sublimation processes, desorbed contaminants are condensed and consequently disposed in more concentrated volumes, activated carbon or thermal oxidizers are often used for off-gas treatment. Based on the boiling point of the target contaminants, thermal desorption can be classified as low temperature thermal desorption at the temperature range of 90-320°C for volatile organic compounds (VOCs), or high temperature thermal desorption for semivolatile organic contaminants and metals at the temperature range of 320-540°C.

The objective of this study is to employ thermally-enhanced vapor extraction technology (TEVET) and thermal desorption to remediate the petroleum hydrocarbon contaminated soils in a 162-hectare contaminated site. TPH is a key evaluation indicator to establish target cleanup levels for petrochemical contaminated soil. Incorporating the remediation task of the mega size petroleum hydrocarbon contaminated site, the excavated soil will be rapidly screened to determine which method will be used for further treatment. If the concentration of TPH in soil is less than 3000 mg/kg with mainly gasoline range organics, TEVET will be used. If concentration of TPH is higher than 3000 mg/kg, thermal desorption will be used. If concentration of TPH is less than 3000 mg/kg but in diesel range organics, soil will be distributed to soil washing or bioremediation. If concentration of TPH is higher than 3000 mg/kg composing of diesel range organics, thermal desorption will be adopted.

For the first-year study, TEVET was employed for three batches of 1000 tons soil treatment. The results indicated that gasoline range total petroleum hydrocarbon (TPH_g) decreased ranging from 2.35 mg/kg to 182 mg/kg to below detection limit to 12.5 mg/kg. TPH_g



removal ranged from 90-92%. No apparent removal of TPH_g was observed in weathered soils with apparent loss of VOCs. However, removal of diesel range total petroleum hydrocarbon (TPH_d) in contaminated soil was between 7% to 57% due to contaminants were composed of compounds with higher carbon number and lower vapor pressure.

Thermal desorption technology was performed in five remediated regions of the contaminated site by three types of thermal desorption systems in the first year. For System A, 23548 tons of TPH-contaminated soils were treated in operation of 152 batches in total. Concentrations of TPH contaminated soils ranged from 2089 mg/kg to 6820 mg/kg. Besides one set of treatment was below 80% TPH removal, the TPH removal ranged from 84.1% to 99.9%. For the second-year study, 33096 tons of TPH-contaminated soils were treated in operation of 1231 batches by System A. For System B, 23570 tons of TPH-contaminated soils were treated with average daily capacity of 190 tons. The highest concentration is 9892 mg/kg. Concentrations of treated soils ranged from 113 to 197 mg/kg. Overall the treated soils met the environmental regulation criteria with residual TPH concentration below 1000 mg/kg.

Rotary kiln system was designed to treat 20,200 tons of TPH-concentrated sludge produced from soil washing facilities in System C in the first-year study. Only seventy days were operated in System C due to dust issue caused by dry-out of smaller size of concentrated sludges. The TPH concentrations of sludge ranged from 5870 to 36800 mg/kg due to the concentrated effect of soil washing. Concentration of treated sludge ranged from 24 mg/kg to 310 mg/kg. The average treatment capacity is 10.5 tons/hr. Rotary kiln system was adopted to treat 114010 tons of contaminated soils in the second-year study. The TPH concentrations of contaminated soils ranged from 1719 to 10500 mg/kg with average of 3409 mg/kg. Concentration of treated soil ranged from 61 mg/kg to 328 mg/kg. Total run time is 121 days.

Total greenhouse gas (GHG) emissions from five different thermal desorption facilities was estimated to be 3072.8 to 9049.3 tons CO₂-eq using average GHG of 0.07 ton CO₂-eq/m³ associated with thermal desorption from previous study in the first year. GHG emissions was estimated to be 6869 to 19614 tons CO₂-eq in the second year. Relevant information and obtained results in the mega contaminated site practice can be used as a basis line information for future scaling-up practice of hydrocarbon-contaminated soils remediated by ex-situ thermal desorption in Taiwan or remediation technology transfer to southeast Asia countries.



目錄

第一章、研究背景與目的-----1

1.1 研究背景-----1

1.2 研究目的-----4

第二章、原理與設計-----5

2.1 土壤熱處理技術-----5

2.1.1 熱增強型土壤氣體抽除技術-----5

2.1.2 熱脫附技術-----6

2.2 模場試驗場址環境特性-----10

2.2.1 場址現況與特性-----10

2.2.2 污染物種類-----10

2.2.3 地質條件-----11

2.2.4 水文條件-----11

2.3 污染場址整治架構-----14

2.4 模場計畫重要性、技術可行性、新穎性及未來性-----19

第三章、研究方法-----21

3.1 研究架構-----21

3.1.1 土壤挖掘分選-----22

3.1.2 土壤預處理-----22

3.1.3 開挖土壤污染濃度快速分析及研判-----22

3.2 熱處理設備設置及操作-----27

3.2.1 熱增強型土壤氣體抽除法設置及操作-----27

3.2.2 熱脫附處理法設置及操作-----30

3.2.3 多螺旋式熱脫附系統設置規劃(統包案)-----31

3.2.4 離地高溫熱脫附系統設置規劃(3-1區)-----36

3.2.5 熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤(4-3區及4-4區)-----38

3.2.6 西區熱脫附系統(1-2區及2-2部分)-----47

3.2.7 北二區熱脫附系統(第二年)-----51

3.2.8 處理效能之量化查核指標-----58

3.3 實驗品保/品管-----59

3.4 評估離地熱處理技術的影響參數-----60

3.5 評估離地熱處理技術的經濟及碳排放參數-----61



3.6 進度及預期完成之工作項目-----	62
第四章、結果與討論-----	65
4.1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET) 效能評析-----	65
4.2 熱脫附法效能分析-----	68
4.2.1 多螺旋式熱脫附系統效能評析-----	68
4.2.2 離地高溫熱脫附系統效能評析(3-1區) -----	75
4.2.3 熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤(4-3區及4-4區)效能評析-----	76
4.2.4 多螺旋式熱脫附系統處理西區污染土壤效能評析(第二年)-----	81
4.2.5 北二區熱處理實廠處理效能(第二年) -----	135
4.2.6 土壤熱處理綜合彙整-----	140
4.3 周界空氣監測-----	142
4.3.1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)周界空氣監測-----	142
4.3.2 熱脫附設施周界空氣監測-----	144
4.4 熱處理設施碳排放估算-----	147
第五章、結論與建議-----	149
5.1 結論-----	149
5.2 建議-----	151
第六章、參考文獻-----	153



圖目錄

圖2-1 熱脫附處理流程圖-----7

圖2-2 熱脫附設備示意圖-----7

圖2-3 石化污染場址廠區配置圖-----10

圖2-4 場址水力傳導係數-----12

圖2-5 場址地下水流速-----13

圖2-6 石化污染場址整治分區-----14

圖2-7 石化污染場址第三階段整治分區-----15

圖2-8 場址整治架構圖-----16

圖3-1 研究架構-----21

圖3-2 TEVET 土壤復育作業各項步驟-----28

圖3-3 TEVET 系統熱空氣導入技術處理示意圖-----29

圖3-4 多螺旋式熱脫附爐溫度場域分布圖-----31

圖3-5 熱脫附系統流程及說明-----32

圖3-6 熱脫附流程圖-----33

圖3-7 3-1區離地高溫熱脫附流程圖-----37

圖3-8 主爐體示意圖-----37

圖3-9 熱脫附整體系統流程-----38

圖3-10 高濃度富集土壤熱脫附處理系統概念流程圖-----30

圖3-11 富集土壤熱脫附系統流程圖-----40

圖3-12 土壤熱脫附系統平面配置圖-----42

圖3-13 熱脫附設備立面圖-----43

圖3-14 空氣污染防制設備立面圖-----43

圖3-15 現場設備現況-----46

圖3-16 西區熱脫附處理流程圖-----48

圖3-17 西區1-2熱脫附作業操作照片 -----49

圖3-18 西區2-2熱脫附作業設備建置照片 -----50

圖3-19 土壤熱脫附系統流程圖 -----54

圖3-20 空氣污染防制設備-----55

圖3-21 現場熱脫附設備實體照片 -----55

圖3-22 熱脫附出料單元 -----56



圖4-1 熱脫附前污泥餅照片	76
圖4-2 熱脫附後乾燥土壤照片	76
圖4-3 熱脫附後土壤加水保溼照片	77
圖4-4 熱脫附處理量累計圖	77
圖4-5 熱脫附處理 TPH 濃度變化圖	78
圖4-6 熱脫附污泥餅(進料)TPH 圖譜	79
圖4-7 熱脫附污泥餅(出料)TPH 圖譜	80
圖4-8 熱脫附單日產量	135
圖4-9 熱脫附進料汚土含水量	136
圖4-10 熱脫附處理量累計圖	136
圖4-11 土壤經熱脫附處理變化	137
圖4-12 熱脫附進料汚染土壤 TPH 圖譜	138
圖4-13 熱脫附出料成品砂 TPH 圖譜	139
圖4-14 熱脫附處理產出成品砂	139
圖4-15 熱脫附處理品質監控圖	142
圖4-16 熱增強型土壤氣體抽除設備周界空氣採樣點	142
圖4-17 現場設備運作時空氣樣品採集	143



表目錄

表1-1 我國石化污染場址整治技術使用統計-----	2
表2-1 熱脫附法優缺點比較-----	9
表3-1 熱脫附窯體操作參數表(4-3區及4-4區)-----	40
表3-2 熱脫附設備規格及動力表(4-3區及4-4區)-----	44
表3-3 熱脫附窯體操作參數表(北2區)-----	52
表3-4 熱脫附設備規格及動力表(北2區)-----	57
表3-5 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）-----	63
表4-1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)TPH 移除率-----	66
表4-2 場址3-1區污染土壤熱處理批次處理結果-----	69
表4-3 場址3-2區污染土壤熱處理批次處理結果-----	71
表4-4 場址3-3區污染土壤熱處理批次處理結果-----	73
表4-5 場址3-1區污染土壤熱處理批次處理結果(位於6-2區熱脫附設備處理)-----	75
表4-6 2023年11月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	82
表4-7 2023年12月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	85
表4-8 2024年1月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	90
表4-9 2024年2月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	97
表4-10 2024年3月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	103
表4-11 2024年4月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	109
表4-12 2024年5月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	112
表4-13 2024年6月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	117
表4-14 2024年7月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	122
表4-15 2024年8月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	126
表4-16 2024年9月西區熱脫附處理量及篩測紀錄-----	131
表4-17 西區熱脫附處理量-----	134
表4-18 污染土壤處理量彙整-----	141
表4-19 熱增強型土壤氣體抽除法設施周界空氣檢測數據-----	143
表4-20 熱脫附設施周界空氣品質監測結果-----	144
表4-21 熱脫附設施溫室氣體排放推估-----	148





第一章、研究背景與目的

1.1 研究背景

國內在面對層出不窮因石油碳氫化合物造成的土壤及地下水污染場址時，在油品現地整治技術(in-situ remediation)選擇上，針對汽油或航空燃油污染，由於其目標污染物具備較高揮發程度及水溶解度，大多會選用物理性方法，如土壤氣體抽除法(soil vapor extraction, SVE)、雙相抽除法(dual phase extraction, DPE)，搭配空氣注入法(air sparging, AS)、蒸氣注入法(steam injection)等，化學性方法則以界面活性劑或共同溶劑沖洗法。針對汽油及航空燃油經風化後油品碳數較高殘留於土壤部分或是柴油及燃料油污染場址，則以化學性處理方法如化學氧化法、界面活性劑或共同溶劑沖洗法，或加強式生物復育方法來進行整治工作，我國石化污染場址選擇的整治工法如表1-1彙整所示。

在石油碳氫化合物污染場址的整治工法決策中，由於需面對各種不同之油品、溶劑，土壤質地、不同的土壤及地下水污染範圍及深度，若採用土壤現地整治技術，針對揮發性有機物，其中較常採用土壤氣體抽除法(SVE)，傳統土壤氣體抽除法係利用真空抽氣，使存在於土壤不飽和層中之污染物產生揮發作用，並由固相或液相轉換為氣相，使污染物往抽氣井方向移動而可被抽除，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放，此方法可有效移除土壤中之揮發性有機物，然而針對較不易揮發的高碳數或風化過後之油品類污染物，傳統土壤氣體抽除法在執行成效上可能相對會受到一定的限制，且土壤的異質性會影響土壤氣體抽除系統的成效，亦不適合用於處理水分含量高或黏土質地之土壤及透氣性低的土壤環境中(Feeney et al., 1998; USEPA, 2004; Zhao et al., 2019)。

因此在選擇污染場址整治技術的考量上，當有整治時間急迫性，或受限於現地整治成效不佳及不易施作時，除以整治列車的概念搭配數種整治方式以求得較好整治成效外，亦可採用土壤整治離地處理技術(ex-situ remediation)，可在較短時間期程，將受污染土壤以開挖的方式自污染源移除，一般污染土壤離地處理可採用之技術如熱脫附(thermal desorption)、土壤清洗(soil washing)、土耕法(land farming)、生物堆(biopile)、以及離場處理配合再利用等方式。其中土壤清洗、土耕法及生物堆法等工法在高雄市中油公司苓雅儲運所大型場址整治有良好之操作績效。



表1-1 我國石化污染場址整治技術使用統計

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

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



國內在石油碳氫化合物污染場址之整治上，許多物理、化學及生物工法之使用均有相當經驗且嫻熟，但土壤熱處理則相對較少，石油碳氫化合物污染土壤離場熱處理廠有一座位於高雄市燕巢區，台南中石化安順廠目前用熱處理法復育戴奧辛及汞污染土壤及底泥，台電公司曾用熱處理整治因多氯聯苯污染土壤，因此國內對熱處理技術之應用面、限制性、操作成本也較缺少資訊，在國內土壤及地下水歷經二十年之實務操作及經驗累積下，有必要補強此技術之缺口。



1.2 研究目的

熱處理在國際間是屬於相對成熟的技術，但國內場址在過去二十年間相對應用案例較少，是國內土壤處理技術上的缺口之一，為彌補國內外的技術應用所存在之落差，本計畫目的為配合國內大型石化場址整治，將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理石化污染土壤，評析熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，在不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下對污染土壤之總石油碳氫化合物(Total petroleum hydrocarbon, TPH)移除效能。

本計畫進行模場計畫之大型石化場址刻正在不同區域進行污染土壤開挖、現地、及離地整治，場址的整治計畫目標污染物包含溶劑、汽油、航空燃油、柴油、潤滑油及燃料油等油品之烷類(alkanes)、烯類(alkenes)及環烷類(cycloalkanes)及芳香族(aromatics)組成之總石油碳氫化合物等，透過處理場址內量體甚大且污染物種類歧異之受溶劑、汽油、航空燃油、柴油、或燃料油污染土壤，評估熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法對污染土壤移除效能，蒐集操作參數及最適操作條件，使用熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，針對不同油品污染、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下，各類型污染土壤之目標污染物移除效能。

本整治技術發展之目標，第一年以建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，評估污染土壤處理效能分析為主，著重設施操作參數蒐集及調整，第二年將操作參數最佳化、操作及維護成本計算，並進行熱處理技術之適用性及限制性綜合評析。藉此大型石化場址之實作經驗，以求得操作參數最佳化，並進行設施整治、操作及維護成本計算，作為未來國內大型石化場址整治之技術參考及國內土壤及地下水產業技術輸出國外之參考。



第二章、原理與設計

2.1 土壤熱處理技術

2.1.1 熱增強型土壤氣體抽除技術

熱增強型土壤氣體抽除技術(thermally-enhanced vapor extraction technology, TEVET)是結合土壤氣體抽除技術及熱處理的污染土壤脫附技術，為優化土壤氣體抽除法的整治技術，TEVET 在真空條件下或通入載氣，通過直接或間接熱交換使有機污染物從污染介質上得以揮發或分離，再進入氣體處理系統，其原理主要透過熱空氣導入、電阻或射頻加熱等方式，分布於不飽和層之污染物蒸氣壓，而促進原先吸附於土壤固相之高碳數或風化過後之油品類污染物，轉化為氣相之效率，再搭配土壤氣體抽除將污染物移除，加以改善傳統土壤氣體抽除針對較不易揮發之污染物整治成效(Poppendieck et al., 1999a; 1999b; USEPA, 2004; Zhao et al., 2019)。

熱增強型土壤氣體抽除法發展已有二十多年，為相對成熟之整治工法，於國外實場整治應用亦具有一定之執行實績，例如在美國已有多個超級基金(Superfund)場址或資源保育回收法(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)廢棄物場址，應用熱增強型土壤氣體抽除技術來脫附不同土壤特性(如黏土、粉土及砂土)中的不同污染物(如揮發性有機物、多環芳香烴或總石油碳氫化合物)，以達污染物移除目的(USEPA, 2004; Zhao et al., 2019)。

相較於其它土壤復育方法，TEVET 具有下列幾項優點：

- A. 衍生自土壤氣體抽除技術，是安全可靠且有實證的復育方法。
- B. 在復育遭有害物質(如含氯有機物)污染的土壤時，較傳統的復育方法，TEVET 具有較低的成本費用。
- C. TEVET 是一個完備且快速的復育技術——每週約可處理一批次約1,000公噸遭揮發性有機物/半揮發性有機物/總石油碳氫化合物污染的土壤。
- D. 無須將污染土壤運離場址，可免除辦理污染土壤離場申報作業或發生違法清運的情形，且可消除離場復育衍生的相關法律責任。
- E. 復育完成的土壤可直接回填在場址開挖區域，因而節省購買客土的費用。
- F. 土壤中污染物的種類與濃度將影響復育作業所需花費的時間；每批次污染土壤通常僅需5至7天即可完成修復作業。



G. 黏土、粉土、砂土、岩石、礫石等各種特性的污染土壤均可處理。

H. 復育作業前無須進行土壤礫石的篩分作業。

2.1.2 熱脫附技術

熱脫附技術設計是在真空條件下，通過直接或間接熱交換方式，將土壤中的有機污染物通過控制熱脫附系統的溫度和污染土壤停留時間，使目標污染物揮發成氣態以達分離，依據污染土壤的不同污染性質的氣化溫度不同而提供對應且穩定的熱源，並藉由攪拌器提供動力輸送及翻轉，使得污染土壤能在輸送管體內均勻受熱，並且以相同處理時間進行，對於油品污染土壤而言是最快速的處置方案，此方法可將油品污染土壤快速、確實地完成整治(Tatano et al., 2013; Lee et al., 2020; Li et al., 2020)。

熱脫附處理技術為土壤整治技術之一種，係利用加熱之方式將受有機物污染土壤加熱至有機物沸點以上，使吸附於土壤中之有機物揮發成氣態後再分離處理，此方式為物理分離程序，有機物於加熱脫附過程中並非將有機物加熱氧化，已經驗證可應用於處理污染土壤、底泥、污泥及濾餅（filter cake）等。此技術基本上包含二個處理程序，第一為加熱單元，用以加熱待處理之物質，將物質中有機污染物揮發成氣態後分離，在加熱處理物質的過程當中，亦會將土壤中的水分含量一起蒸發，故第一階段之加熱單元又稱為旋轉窯(rotary dryer)，另一單元為氣狀污染物處理單元，處理單元需能將含有污染物之氣體處理至法規標準後排放至大氣，氣態污染物之處理方式，可依有機物之濃度及經濟性選擇以冷凝、吸附或燃燒之方式處理(Stegemeier and Vinegar, 2001; Khan et al., 2004; Sato et al., 2010)。

熱脫附依處理溫度可分為低溫熱脫附(low-temperature thermal desorption, LTTD)與高溫熱脫附(high-temperature thermal desorption, HTTD)兩種。一般低溫熱脫附係指處理溫度介於90°C~320°C 而言；另一種為高溫熱脫附，一般係指處理溫度高於320°C(介於300-350°C)以上，甚至到達650°C。處理溫度之選擇須視有機污染物之物理特性，一般石油碳氫化合物如汽油、柴油或煤油污染等，因其具有低沸點及高揮發等特性，故以LTTD法即可；如污染物為持久性有機污染物(persistent organic pollutants, POPs)，如戴奧辛、多氯聯苯、殺蟲劑等，因其沸點高、揮發性低，故處理溫度須提高才能將吸附態之污染物轉變成氣態後收集處理，熱脫附處理流程及設備示意圖分別如圖2-1及圖2-2所示。

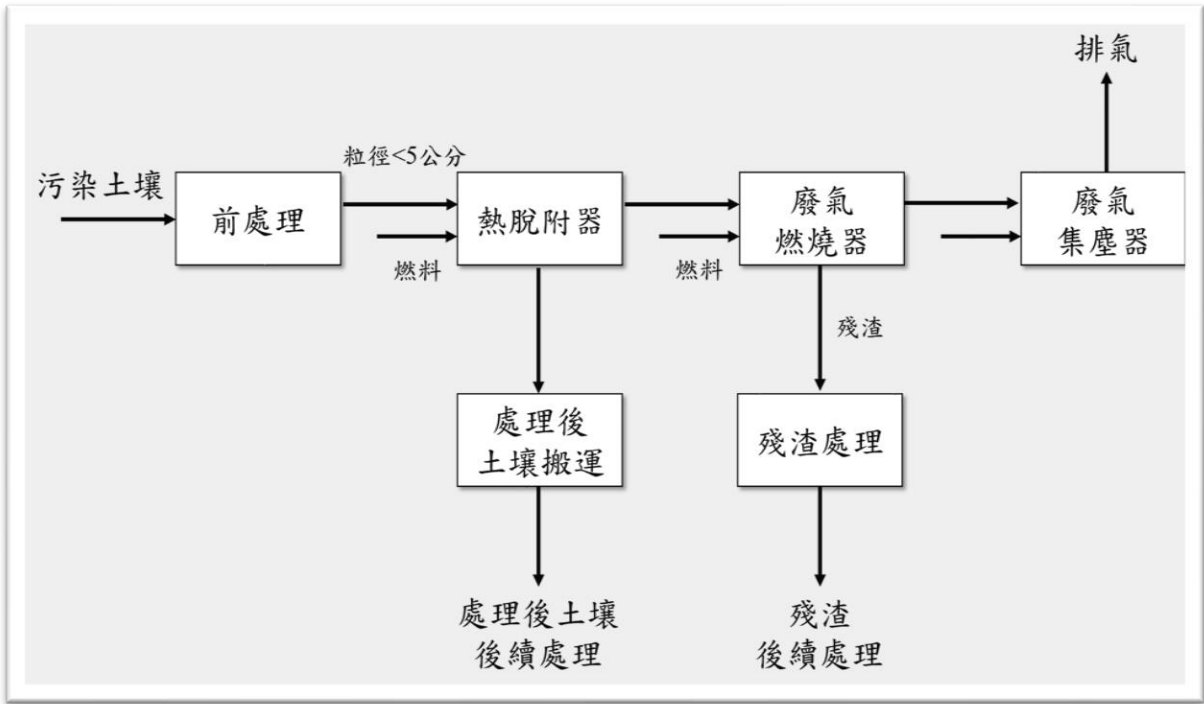


圖2-1 熱脫附處理流程圖

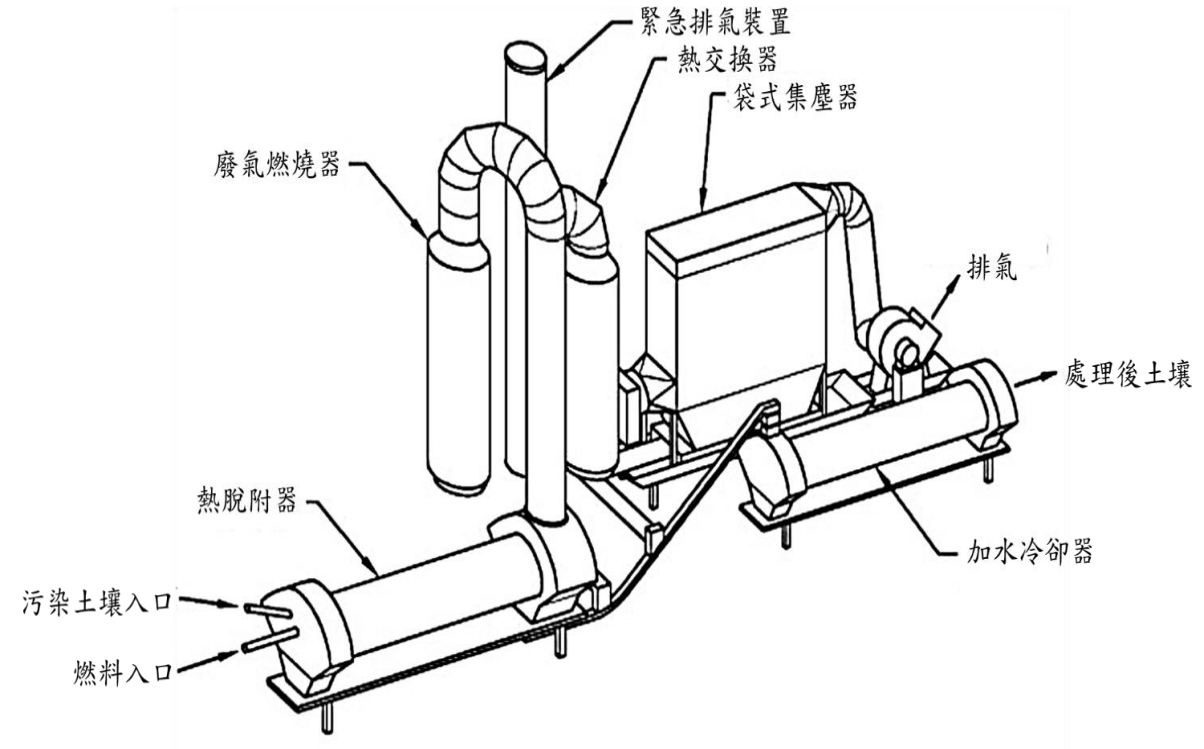


圖2-2 熱脫附設備示意圖



熱脫附技術可針對不同性質的污染物土壤進行熱處理，透過溫度控制及污染土壤停留時間來達到土壤熱脫附的效果，燃燒室設置於中空爐體的下方，且中空爐體位於燃燒器的上方，用以提供中空爐體的熱源，同時均勻加熱並隔絕燃燒室之火源直接對輸送管體直接加熱，減少輸送管體在熱源加熱下熱脹冷縮差異過大膨脹不均而造成損壞。藉由攪拌器提供動力輸送及翻轉，使得污染土壤能在輸送管體內均勻受熱，以進行熱脫附(Falciglia et al., 2011; 2020)。

熱脫附泛指利用溫度產生之熱能將土壤中吸附相污染物脫附出，熱脫附處理法依處理場地區分，可區分為離地(ex-situ)處理及離場(off-site)處理兩種，處理方式之選擇須視污染範圍及深度決定，亦即污染體積決定了挖除及載運費用，污染體積小適合以現地處理，反之，污染體積大則適合離場處理，常見之工法包含下列各項：

A. 旋轉窯熱脫附法

將土壤通過經加熱之旋轉窯，再以旋風集塵器或其他空氣污染控制設備，將被脫附之有害氣體及無害粉塵分離，有害氣體以二次燃燒爐燒淨處理，確認無害後排至大氣，收集之粉塵及經旋轉窯完成污染熱脫附之土壤，可做為開挖回填之填料，目前台南市安順中石化場址採用此方法，進行污染土壤及底泥中戴奧辛、五氯酚及汞的移除。

B. 現地熱脫附法

現地熱脫附技術(In-Situ Thermal Desorption)是揮發性及半揮發性有機物類污染土壤現地復育技術中一項重要手段，主要用於處理一些比較難進行離地或離場環境復育的區域，例如，深層土壤以及建築物下面的污染復育。現地熱脫附技術是將污染土壤加熱至目標污染物的沸點以上，通過控制系統溫度和物料停留時間有選擇地促使污染物氣化揮發，使目標污染物與土壤顆粒分離、去除。熱脫附過程可以使土壤中的有機化合物揮發和裂解等物理化學變化。當污染物轉化為氣態之後，其流動性將大大提高，揮發出來的氣態產物通過收集和捕獲後進行淨化處理(Troxler et al., 1993; Tatano et al., 2013)。

常見之現地熱脫附法包括電阻加熱法(electrical resistance heating, ERH)、蒸氣加強抽除法(steam enhanced extraction, SEE)與熱傳導加熱法(thermal conduction heating, TCH)，電阻加熱法亦稱為電熱法，是設置電極裝置於污染土壤現地或堆置區域，提供電流傳導於電極間，電流傳導因土壤造成電阻而發熱，使得土壤中孔隙水及地下水轉換成蒸氣及汽化污染物(Troxler et al., 1993; Falciglia et al., 2011; 2020; Li et al., 2020)。



蒸氣加強抽除法是將蒸氣導入地下土壤及地下水中，加熱、移動及汽化污染物，藉由真空抽除方式，抽取汽化或液態污染物。熱傳導加熱法是將加熱器埋設至地下不鏽鋼井管中，傳導加熱並提升溫度至可破壞污染化學物質程度；此方法於高雄市的污染場址有實際完成改善之案例。

C. 離地熱脫附法

離地熱脫附技術(Ex-Situ Thermal Desorption)則用來處理一些適於開展離地環境復育的區域，將污染土壤提取出來，通過直接或間接加熱，將污染土壤中的目標污染物加熱至其沸點以上，通過控制系統溫度和物料停留時間有選擇地促使污染物氣化揮發，使目標污染物與土壤顆粒分離、去除。離地熱處理法常見離地低溫/高溫熱脫附、熱裂解，國內此類技術目前已有相對成熟的發展，例如旋轉窯，及應用於加油站場址之熱增強型氣體抽除技術等。

相較於國外，我國熱脫附復育污染土壤研究處於逐步推廣應用階段，綜合以上之敘述，熱脫附法之優缺點彙整列於表2-1。

表2-1 熱脫附法優缺點比較

優點	缺點
1. 處理大量土壤時具競爭優勢，每噸土壤處理費用約3000~5000元 2. 可快速處理主污染區的高濃度油品污染 3. 經處理之土壤可回填至原場址 4. 可持續降低總石油碳氫化合物至10 mg/kg 以下，苯、甲苯、乙苯及二甲苯(BTEX)至0.1 mg/kg 以下，甚至更低	1. 必須挖除土壤，但一般限制在地表以下深度7.6 m 以內 2. 欲處理地下水面以下之含水土壤，必須以抽水等方式先降低地下水位



2.2 模場試驗場址環境特性

2.2.1 場址現況與特性

本計畫進行模場試驗之大型石化場址，其相關製程區域經多次擴建與新建，廠區面積約252公頃，製程區面積約177公頃，目前被公告列管面積約176.7公頃，在全盛時期共有46處主要製程工廠營運。

2.2.2 污染物種類

大型石化廠進口原油進行提煉，主要由外海設置浮筒及海底輸油管送至岸上大型儲存油槽，再以管線輸送至工廠煉製。工廠主要製程為石油煉製與石油化學品煉製，原油經不同的煉製過程，可以生產燃料氣、液化石油氣、汽油、噴射機油、柴油、燃料油、潤滑油、柏油、石油焦、硫磺等產品；另有輕油裂解、芳香烴萃取與殘渣油氣化等石化工廠，生產乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯、合成氣與一氧化碳等石油原料，供應下游工廠生產各類石油化學產品。提煉後之油品主要以環島油輪或管線輸送，少量或特殊合成油料以油罐汽車運送，潤滑油或溶劑等則利用大桶包裝出售，如圖2-3所示。



圖2-3 石化污染場址廠區配置圖



2.2.3 地質條件

歸納大型石化場址地質鑽探與土壤試驗結果顯示：(1)地面下0.3至1.5 m 為回填層，主要為混凝土鋪面及回填粉質砂夾磚塊、混凝土塊或礫石等；(2)回填層以下至6.5 m，為疏鬆至中等緊實，土層為棕褐色粉質中細砂，偶夾砂質粉土及少量礫石；(3)6.5至14.5 m 為疏鬆至中等緊密，土層為灰色粉質中細砂，偶夾粉質粘土薄層含貝層；(4)14.5至29.8 m 為中等緊密至緊密，土層為灰色粉質細砂，偶夾質粘土薄層；於深度16.0 m 處存在一厚度約1~2 m 之粉質粘土夾層；(5)29.8至43.8 m 為堅實至極堅實稠度之灰色粉質粘土，或粘土與粉質細砂互層含貝層；(6)43.8至49.3 m 為極緊密之灰色粉質細砂層；(7)49.3 m 以下為灰色泥岩。

區域地下含水層之土壤組成係以細砂至粗砂、粉土及黏土為主，整體趨勢大致由上往下逐漸細緻。區域土壤顆粒由西南往東北漸減，並隨深度加深而遞減，北側含水層地質為滲透性良好之細至粗砂夾粉土，增加北側周界受污染機會。東側因屬地下水下游處，為周界內污染區與周界外潛在受體之間的敏感邊界區域，導致東側周界及外圍易遭受污染。

2.2.4 水文條件

場址內滲透性為東北側淺層(地表下10 m)及東南側深層(地表下10~20 m)較佳，而東側淺層(地表下10 m)滲透性大致愈往周界愈佳。北側周界滲透性由西往東漸增，滲透性大致隨深度遞減；而中間道路沿線滲透性由西往東漸增，滲透性大致隨深度遞增；東北側沿下游滲透性普遍良好，但東北角附近存在局部低滲透性層。

整體而言，場址區域地下水流向為由西向東流動趨勢，廠區中央處分別有向東北及向東方向流動之趨勢。北側地下水流向大致由西南往東北，以及高廠南側地下水流向大致由西往東，季地下水力梯度約0.26~0.28%。本區域每季之地下水流向與地下水力梯度之差異不顯著。該場址原生土壤地質環境以砂質為主，地質分層在地表下約4~6 m 為砂質粉土，其下有約1~2 m 的細砂層；再向下則以中砂為主，第一含水層約為地表下20~22 m，地下水自西南向東北流，本區域地下水位約為4~5 m，枯豐水期變化可達1.5公尺。根據計算結果，顯示 K 值最大為監測井 SA-02，K 值最小為監測井 NW-08，全廠區 K 值分布範圍為 $1.42 \times 10^{-3} \sim 4.86 \times 10^{-6}$ m/s，如圖2-4所示。

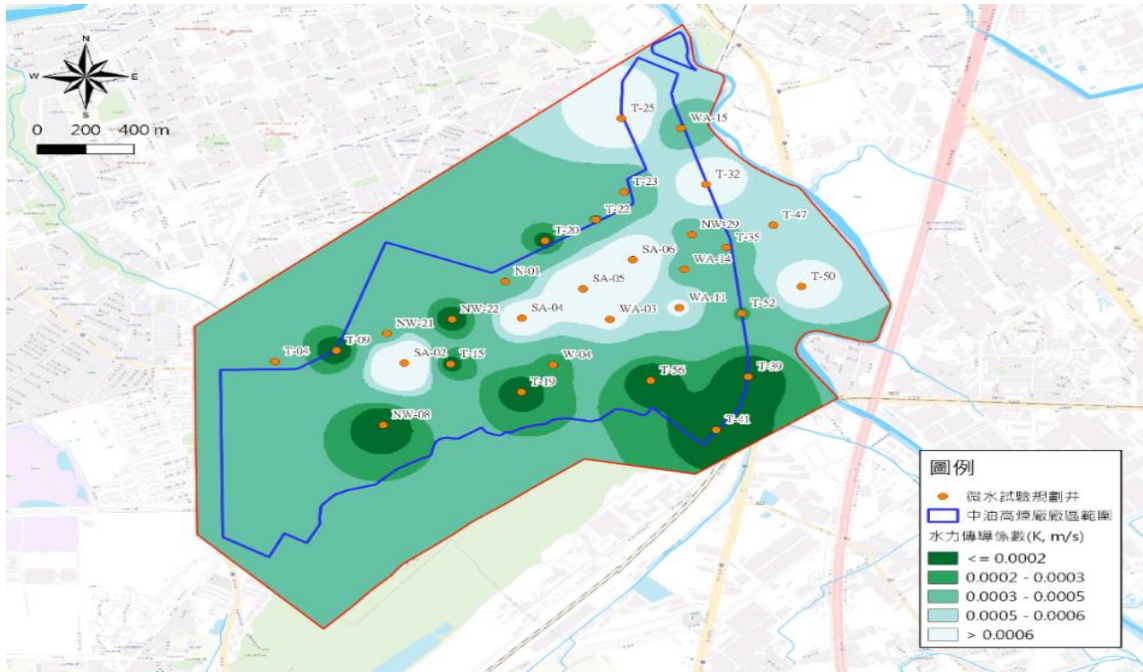


圖2-4 場址水力傳導係數

地下含水層大致上可區分深、淺二層含水層，淺層含水層即為場址內地質第一層粉土質細砂，分布於地表下約20公尺以內，深層含水層大部份在地表下35~50公尺左右，兩含水層之間存在一厚度不一之黏土層。依據設置深、淺水位井位之觀測資料顯示，當黏土層較厚時，深淺含水層之水位相差較大，最大可達1.2公尺，當黏土層較薄時，此時黏土層便無法發揮其阻隔作用，即深、淺層水位無明顯之差異，可視為同一含水層。

根據歷年廠內與附近地區所進行的鑽探、設井及地下水監測等資料，場址與其附近地區的自然地下水位在枯水期時約在地表下3~7公尺左右，豐水期地下水位會達到地表下2~5公尺左右，即地下水位變化由廠區西側之高程13.5公尺逐漸向東側下降至8公尺。就紀錄資料來看，豐枯水期之地下水位變化於一般情況下為1~2公尺。單井流速流向調查結果，顯示地下水平均流速為3.25~8.63 m/d；廠內地下水流向受地形影響，山麓區域地下水流向為向北；東側較平緩區域地下水則流向東，如圖2-5所示。

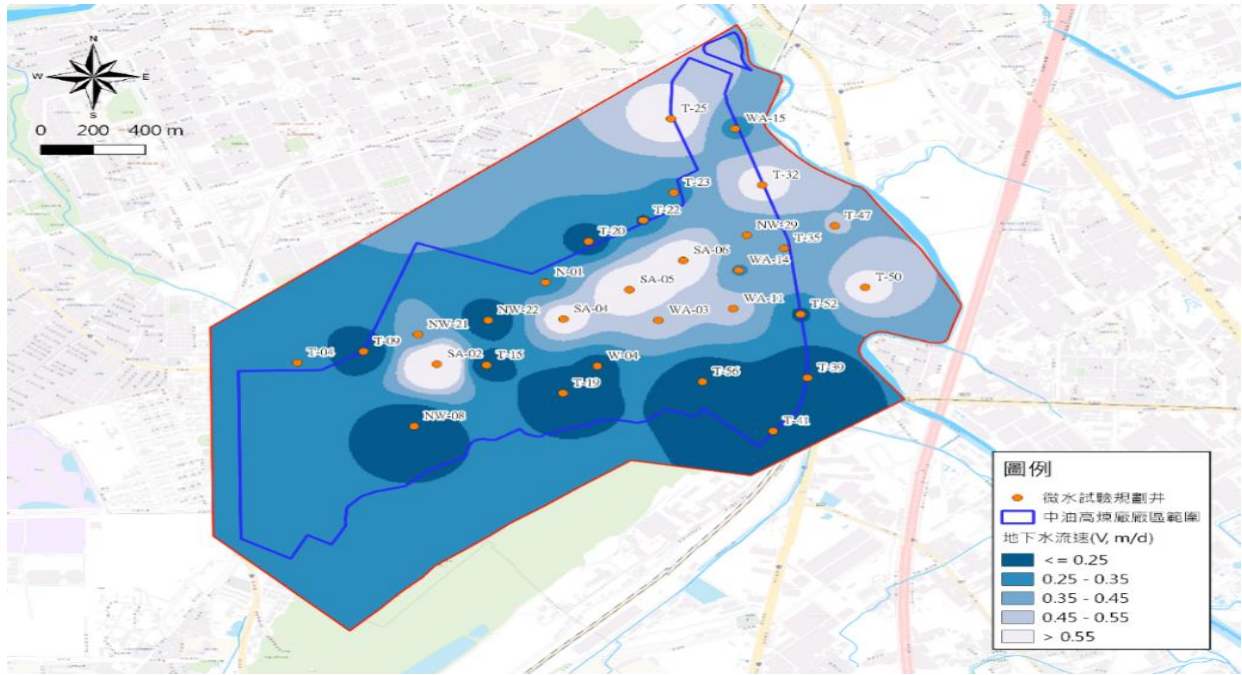


圖2-5 場址地下水流速



2.3 污染場址整治架構

本場址為國內之大型石化工業污染場址，為因應高雄市政府建立科技廊帶群聚，必須縮短整治時程，挑選發展成熟之整治技術作為主要整治策略，以便在兩年多整治期程內完成，因此劃分不同整治分區同步分區施作(如圖2-6)，依照整治成效適時進行施作層面優化。本場址的整治計畫變更係配合高雄市政府後續土地利用藍圖規劃，將廠內各場址整治作業回歸單一計畫書進行執行面控管，希望透過整體性的規劃，通盤研擬適切之整治策略，最大化資源投入效益，並即早完成場址污染改善工作。



圖2-6 石化污染場址整治分區

在整治架構規劃上，土壤整治工作將透過現場開挖篩分，視各分區污染情況及土壤質地，分別採熱脫附、土壤清洗及土壤離場或其他可行之新穎工法進行整治工作；其餘無法進行開挖之區域則改採現地工法執行，而地下水整治工作則初步擬定包含現地化學氧化、加強式生物復育、界面活性劑沖排、雙向抽除、透水性反應牆或其他可行之新穎工法作為整治策略；而於整治工程執行過程中，為了有效防堵污染團的遷移，場址既有之SVE/AS及注氣幕簾設備等污染物攔截系統，擬在不影響後續開挖整治工作執行前提下，維持既有操作量能，持續進行廠內污染團圍堵作業，避免不慎發生污染團擴散至場外的情事。



為配合第三階段整治工作推動，第1、2、5、6區的整治工作於2023年5月1日公告，6月1日評選，並於2023年9月1日開工，離地整治將預定於2024年8月30日結束，現地整治預期2025年8月30日結束，因此圖2-6原有不同整治分區進行重新劃分，如圖2-7所示，有關場址污染整治架構請參考圖2-8。

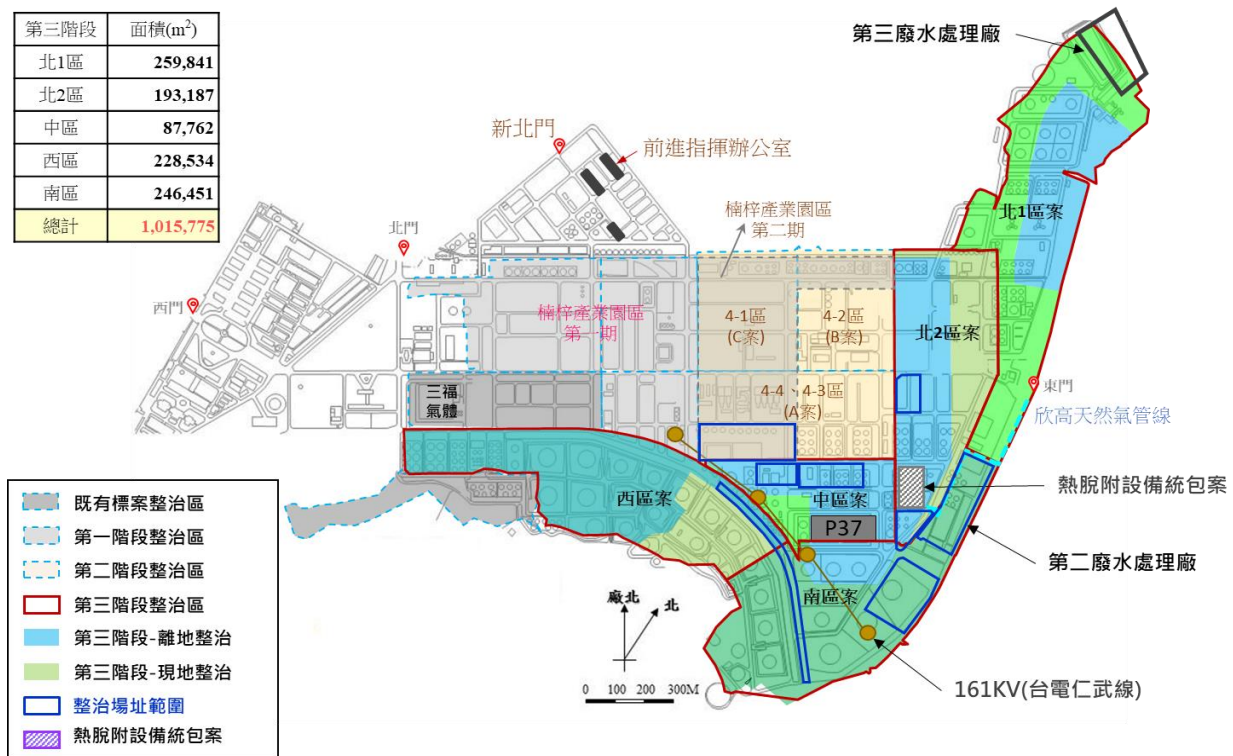
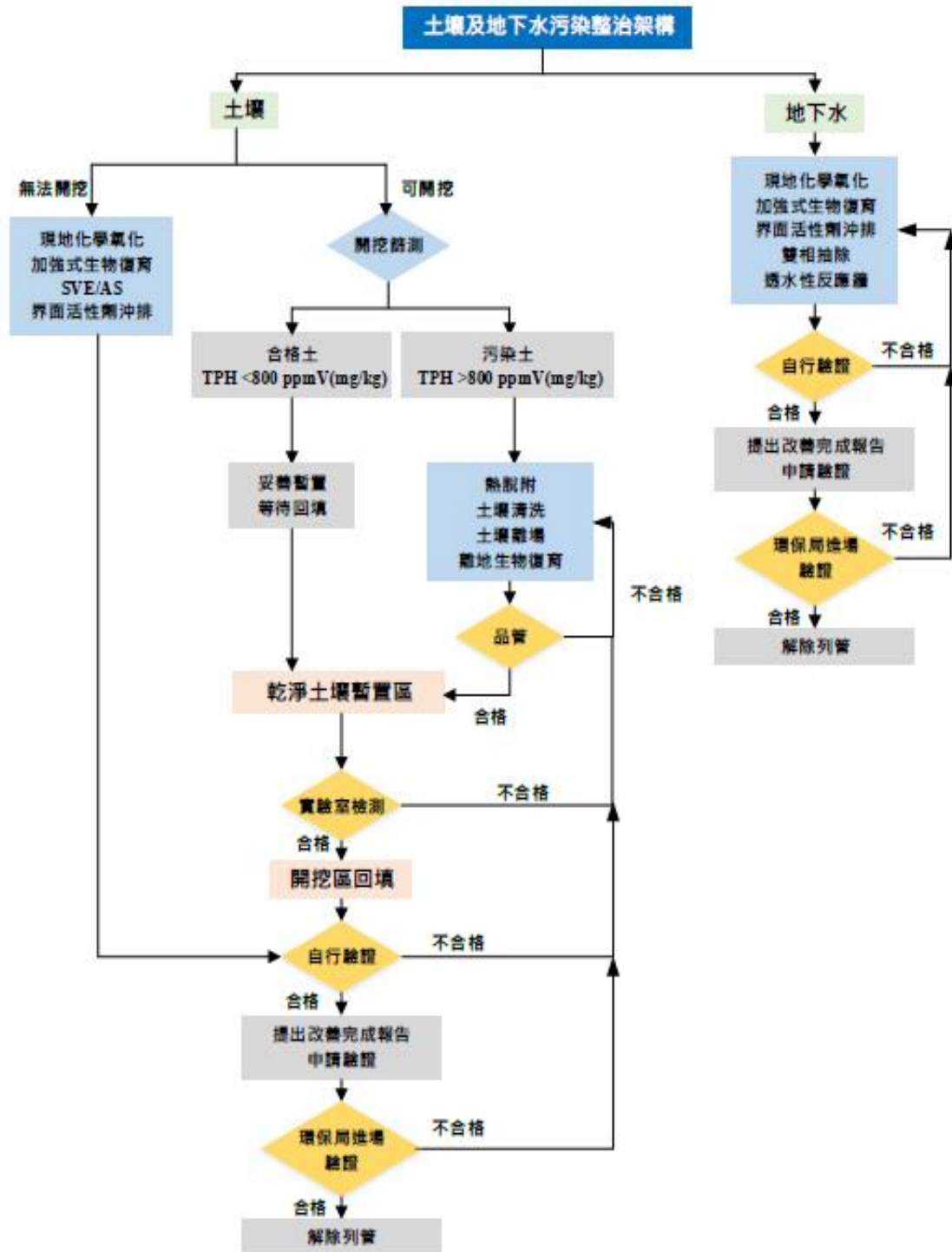


圖2-7 石化污染場址第三階段整治分區

依照整治成效適時進行施作層面優化，針對適合場址污染物特性之規劃工法說明如下：

- (1) 場址整治從地下水上游處規劃整治至下方處，亦即由西向東，除拆除設備及大規模開挖外，由於場址地下環境多屬通氣性良好之粉砂質細砂土壤，對於具揮發性之土壤及地下水污染控制將以現地土壤氣體抽除(SVE)為主，並配合現地空氣曝氣法(AS)以增加氣體交換效率，SVE及AS可因應污染面積或控制目的以點狀(單井)、或面狀方式配置。
- (2) 使用土壤清洗，以土壤篩分設備先行分離不同粒徑範圍的土壤，再使用水洗將土壤中的污染物移除或轉移至液相中，透過適當處理將污染物加以分解、移除或固定化。
- (3) 針對含砂量低之高污染濃度土壤採取熱脫附方法，可將總石油碳氫化合物污染濃度大幅降低。



註：1.若整治過程中發現浮油，則優先進行浮油回收工作。
 2.既有污染圍欄系統在不影響開挖整治工作的前提下將持續操作。
 3.若需使用客土，則其回填前品質送至合格實驗室分析VOCs、八項重金屬、TPH，低於土壤管制標準始可回填。
 4.後續整治目標若因政策需求或其他因素無法將污染物濃度改善至預定目標，則評估採風險評估概念進行污染物圍堵及監測式自然衰減等作為。

圖2-8 場址整治架構圖



(4) 執行過程中發現浮油將優先去除，另下游處地下水污染攔截方式，則採曝氣幕簾或透水性反應牆進行，另針對局部高濃度區域可採現地化學氧化法及部分離場再利用進行相關整治。

在各分區土壤污染整治規劃上，將於開挖後視**污染物**濃度篩分結果、質地分布及污染物特性、時程考量等因子，綜合評估並確認改善方式，原則上將以熱脫附、土壤清洗及土壤離場作為主要整治策略，另一方面，若後續**整治**廠商具有新穎整治技術之使用實績，亦可同步納入整治策略規劃中使用，此外，若分區**污染物**種分布多以**低碳數**油品為主，且在時程安排或土方暫置空間具可行性下，亦不排除可針對局部污染土進行離地生物復育。

彙整過往調查結果，本場址土壤**污染物**深度約分布在地表下2.5~6公尺，初步將開挖深度定於地表下6.5公尺，惟因各分區**污染物**於地下環境中之分布情況皆有所差異，後續將依各區現場篩測結果決定實際開挖深度，現場分區開挖將搭配PID/FID、TPH test kit或其他適合之快篩儀器篩測，原則上以每100至200 m³進行一次篩測為基礎，篩測濃度高於800 ppmV者（若使用TPH test kit則為800 mg/kg）視為污染土進行相關之整治作業，因後續各分區陸續發包後預期會有不同廠商進駐，為保留整治工程施作上的彈性，確切整治工法將由後續得標廠商依污染分區現況決定，使用之工法原則將於熱脫附、土壤清洗及土壤離場等計畫書核定可使用之工法中進行選擇，而篩測濃度低於800 ppmV者則視為合格土，將於場邊暫置等待後續回填，於開挖完成後亦規劃針對開挖面底部使用進行篩測，若發現篩測濃度仍高於800 ppmV，將依循上述開挖篩分流程，持續向下開挖至無污染深度為止。

基於工安考量，開挖範圍將打設深度9或13公尺之鋼板樁以進行擋土支撐作業，並於施工區四周設置安全圍籬、加裝警示燈及相關安全維護措施，且於鄰近路口豎立告示牌提醒用路人前方有施工區，注意安全等相關警示設施。

在各分區之地下水污染整治規劃上，初步擬定工法包含現地化學氧化、加強式生物復育、界面活性劑沖排、雙相抽除、透水性反應牆或其他可行之新穎工法，因整治時程考量原則上將以現地化學氧化為主要方式，初步規劃以過氧化氫或過硫酸鹽為主要添加之藥劑，後續亦將視各分區污染分布狀況適時搭配上適合工法進行整治，並由承攬商就現地條件滾動調整相關操作面之細部規劃，以期達到最大整治效益；而注藥井設置則以能涵蓋高濃度污染團位置及深度為基礎，並依循地下水上下游關係做相關之井場配置規劃。



對避免對場址周界外下游地區構成影響，故先於周界或道路旁設置SVE/AS 設備，針對污染團進行局部改善作業，另於東側周界設置注氣幕簾攔截系統（air sparging curtains, AS curtains），透過多排注氣井構成之注氣幕簾作為污染團反應攔截區，除了可將地下水中之污染物氣提外，注氣過程也可增加地下水溶氧量，兼具生物復育的功效，此外，也將視現場狀況評估進行加強式生物復育，期在攔截污染物往下游移動時，能夠同時在過程達到持續局部降解污染物之目的。

而在各分區整治執行開挖過程中，為持續攔截污染團流佈，若不影響開挖工作執行，將持續操作既有之污染團攔截系統，而後若因開挖施作動線設計需求等其他因素考量，則將暫停或遷移部分無法操作之設備，並依當時整治工作現況進行適度調配。本場址在後續整治工作執行上，若發現有浮油情況，將優先辦理浮油回收工作，其中在開挖區部分，規劃將浮油引至收集坑抽除，並視情況評估是否需額外鋪設吸油棉，而非開挖區部分，則初步規劃透過既有井進行浮油抽除，若回收狀況不佳，亦將考量新設浮油回收井輔以進行回收作業。



2.4 模場計畫重要性、技術可行性、新穎性及未來性

配合大型石化場址正在不同區域進行污染土壤開挖及離地整治，此場址規模及整治期程短在國際間均屬少見，而場址土壤及地下水整治計畫之目標污染物包含溶劑、汽油、航空燃油、柴油、潤滑油及燃料油等油品之烷類、烯類及環烷類及芳香族組成之總石油碳氫化合物等。本計畫擬應用熱增強型土壤氣體抽除設備及多螺管式熱脫附技術於大型石化場址污染土壤改善，規劃直接於場址周邊空地設置熱脫附設備，整治受 TPH 污染土壤。

由於熱處理在國際間是屬於相對成熟的技術，但設備投資成本高、設備適用性不強、操作費用昂貴等問題，國內場址在過去二十年間相對應用案例較少，為彌補國內的技術應用所存在之落差，透過處理大型石化場址內量體甚大且污染物種類歧異之污染土壤，評估熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法對污染土壤移除效能，蒐集設備操作參數最適操作條件及二次公害預防措施，以評析面對不同種類油品(單一或混合型)、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下，對污染土壤之總石油碳氫化合物移除效能。

藉此大型石化場址之實作經驗，研究團隊將可求得最佳操作參數，並進行整治、設施操作及維護成本計算，建制二次公害預防措施，建立場址整治策略研判及決策機制流程，作為未來國內大型石化場址整治之借鏡，同時累積土壤及地下水整治產業各整治團隊未來將土壤及地下水整治技術及設備輸出至東南亞國家及中國之量能。





第三章、研究方法

3.1 研究架構

本計畫應用數種熱處理技術於大型石化場址污染土壤改善，規劃直接於場址空地設置熱脫附設備，包括熱增強型土壤氣體抽除設備及多螺旋式熱脫附技術，整治 TPH 污染土壤，研究架構如圖3-1所示，由於生物復育法及土壤清洗法非本計畫重點，故以虛線表示。

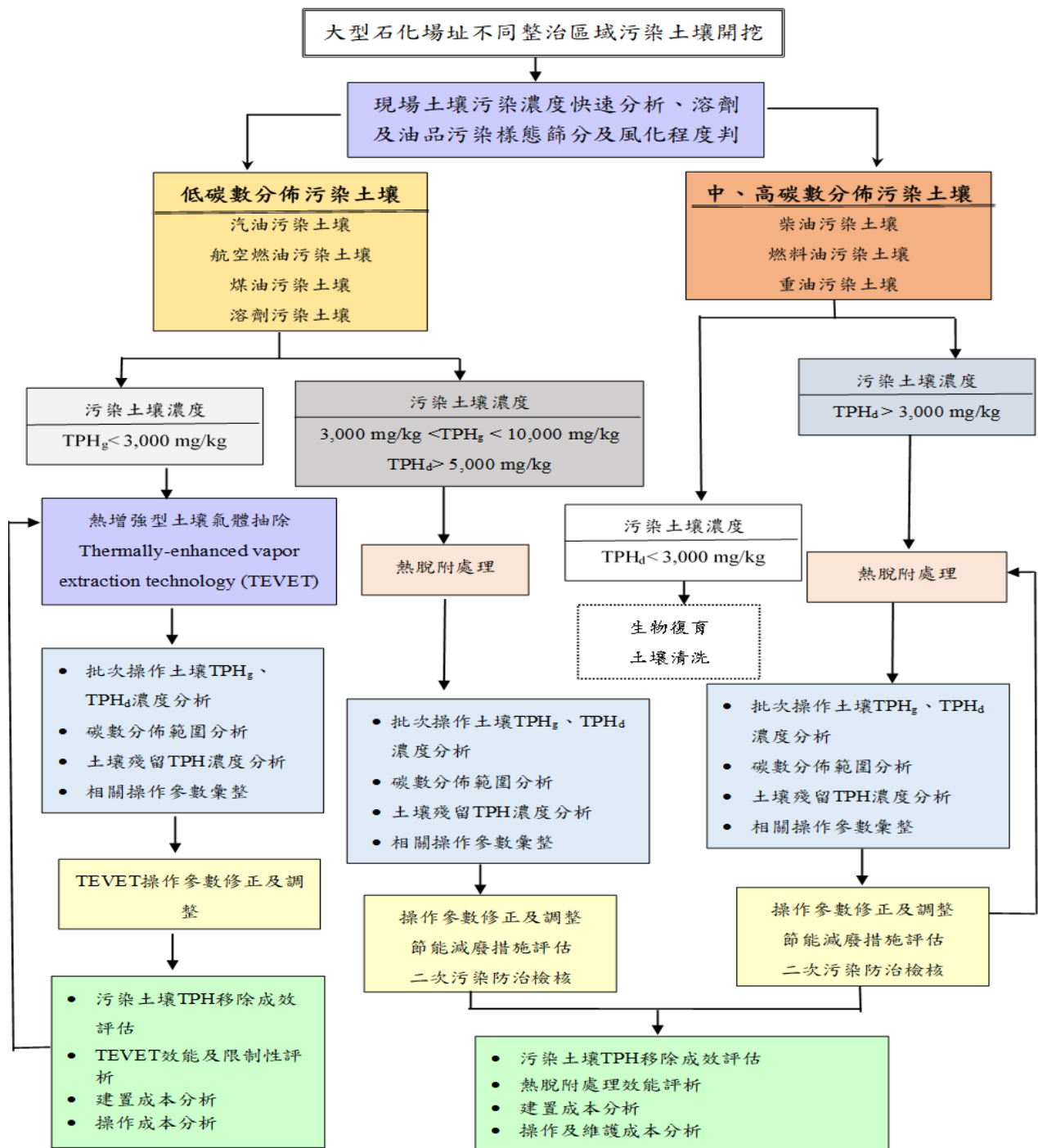


圖3-1 研究架構



3.1.1 土壤挖掘分選

對地下水位較高的場地，挖掘時會進行排水，使土壤含水率降至符合處理要求。

3.1.2 土壤預處理

對挖掘分選後的土壤進行適當的預處理，例如篩分、調節土壤含水率、磁選等。

3.1.3 開挖土壤污染濃度快速分析及研判

首先進行現場土壤污染濃度分析，判定風化程度及污染樣態快速篩分，針對低碳數分佈污染土壤如溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤、及煤油污染土壤，其 TPH_g 濃度小於 $3,000 \text{ mg/kg}$ ，規劃以熱增強型土壤氣體抽除法進行復育。針對中、高碳數分佈污染土壤如柴油污染土壤、燃料油污染土壤、重油污染土壤進行現場土壤污染濃度分析、風化程度判定及污染樣態快速篩分，針對污染土壤其 TPH_d 濃度大於 $3,000 \text{ mg/kg}$ ，規劃以熱脫附處理法進行污染土壤復育。

有關開挖土壤之分析工作如下：

(1) 土壤質地分析

土壤固態物質依據組成成分分為有機物質與無機礦物兩部分；根據粒徑大小可分為石塊(stone)、石礫(gravel)、砂粒(sand)、粉粒(silt)及黏粒(clay)等。土壤質地之測定方法以比重計法進行，操作步驟簡述如下：

- A. 取 50 g 之烘乾土，加入蒸餾水 100 mL 及 5% 偏磷酸鈉 40 mL ，攪拌後靜置 24 小時。
- B. 將攪拌後之懸浮液洗入量筒並加水至 1000 mL ，接著以封口膜封緘其口或手掌緊壓量筒口，上下翻轉使懸浮液均勻混合，翻轉時若有土粒黏於底部，則用力震動使之鬆動落下，但需注意溶液不可逸出，混勻後迅速將量筒至於桌面並開始計時。
- C. 靜置 30 秒後，輕輕插入比重計不使其上下晃動，至 40 秒鐘時紀錄比重計與液面接觸處之數值。重複(2)及(3)之步驟，將兩次讀值之差控制於讀值 0.5 內方可繼續下一步驟，計算此二讀值之平均值。此數值即可計算黏粒與粉粒之含量。
- D. 繼續靜置並讀取 4 分鐘與 2 小時之讀值。每次皆於預定時間前約 10 秒鐘緩慢插入比重計，並紀錄比重計與液面接觸處之讀值，此數值可做為計算黏粒含量之用。



E. 每次測定時應同時量測土壤溶液之溫度，若高於67°F (19.4°C)時每增高1°F讀值應增加0.2，反之則降低1°F減少0.2。經上述實驗求得之砂粒、粉粒與黏粒百分比，再依USDA土壤質地三角表求得土壤質地種類。

所依據之美國分級系統如下：

$$\text{砂粒}\% = 100 - \left[\left(\frac{PS_{US}}{W} \right) \times 100 \right]$$

$$\text{黏粒}\% = \left[\left(\frac{PC}{W} \right) \times 100 \right]$$

$$\text{粉粒}\% = 100 - \text{砂粒}\% - \text{黏粒}\%$$

W：烘乾供試土之重量。

PS_{US}：靜置40秒鐘後之比重計讀值且經空白與溫度校正者。

PC：靜置2小時後之比重計讀值且經空白與溫度校正者。

(2) 粒徑分析

污染場址所取出各種油品污染土壤，將使用乾篩分析，先以烘箱烘乾土壤樣品，溫度設定為 110±5°C，取烘乾樣品 500 g，以#4 號篩(4.76 mm)至#200(0.074 mm)號篩過篩率計算方法，依序扣除留置在特定篩號(粒徑)的土壤重量百分比。粒徑分析組裝#4、#20、#40、#60、#100、#200 及底盤共 6 組篩網，將烘乾的土樣置入篩網內，放在搖篩機上，計算留篩百分率。

(3) 含水率測定

依據環保署「土壤及底泥水分含量測定方法－重量法(NIEA S280.62C)」來進行，取乾淨稱量瓶及瓶蓋置於烘箱內，以 105 ± 5°C 乾燥 1 小時，然後蓋上蓋子移至乾燥器內冷卻至少 45 分鐘，測定加蓋稱量瓶的重量(m₀)，精稱至 10 mg。稱取 30 至 40 g 土壤置入稱量瓶中，精稱內含土壤之加蓋稱量瓶重量(m₁)，精稱至 10 mg。將土壤、稱量瓶及瓶蓋放入烘箱中，以 105 ± 5°C 乾燥至恆重。將稱量瓶加蓋後移至乾燥器中冷卻至少 45 分鐘，取出稱量瓶，旋即精稱內含乾燥後土壤之加蓋稱量瓶重量(m₂)，精稱至 10 mg。以下式乾重為基礎計算水分含量，以重量百分比表示，精確至 0.1%(m/m)：

$$\text{水份含量 } w_{H_2O}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100$$

m₀：含蓋稱量瓶空重 (g)

m₁：含蓋稱量瓶及風乾樣品或田間含水土壤重 (g)

m₂：含蓋稱量瓶及烘乾樣品重 (g)



(4) 有機碳含量

利用重鉻酸鉀與濃硫酸之共同作用將有機質中之碳氧化，由氧化劑之耗用量計算其有機碳含量。首先秤取 1 g 土壤樣品，置於 500 mL 三角錐形瓶中，使用定量吸管加入過量之 $K_2Cr_2O_7$ 溶液再加入濃硫酸 10 mL，輕晃 1 分鐘使其充分反應後，放至冷卻後加 100 mL H_2O 、5 mL H_3PO_4 、5 滴 Diphenylamine 指示劑，以 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液滴定之，直至其顏色由灰藍色變成綠色為止，記錄 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液所消耗的體積。將無土壤樣品之空白組(Fe_{blank})依上述相同步驟進行，所得結果為空白實驗所消耗的 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液體積。

$$\text{有機碳(\%)} = \frac{(Fe_{blank} - Fe_{soil}) \times N \times 3 \times f \times 10}{\text{土壤重量}}$$

N： $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 之當量濃度

3：C 之當量或毫當量

f： $K_2Cr_2O_7$ 氧化有機碳之比例

上述之有機碳檢測法乃美國土壤學者 Walkley 與 Black 兩人所發展，此法雖簡易可行，惟滴定終點不易辨認是其缺點。後來 Smith 與 Weldon 發展出間接滴定法後，此缺點才獲改善。此改良法之實驗步驟如下：

秤取 1 g 之土壤於 500 mL 三角錐形瓶中，加入過量 $K_2Cr_2O_7$ 及 H_2SO_4 ，待其充分反應後，加入過量之 $FeSO_4$ 或 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ，並加入 100 mL 蒸餾水，再以已知濃度之 $KMnO_4$ (約 0.3 N) 滴定剩餘之 $FeSO_4$ 或 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ，滴定終點為紫色之 $KMnO_4$ 不消失為止，即溶液成淡紫色。此法需進行空白試驗，實驗過程與上述內容完全相同，僅未置入土壤樣本。

將實驗結果所得之二數據依下列公式計算土壤中之有機碳含量：

$$\text{有機碳(\%)} = \frac{(\text{土壤耗用 } MnO_4 \text{ 之 m.e. 數} - \text{空白試驗耗用 } KMnO_4 \text{ 之 m.e. 數}) \times 3 \times f \times 100}{\text{土壤重量(mg)}}$$

(5) 污染土壤 TPH 分析方法

土壤汽油類總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon as gasoline, TPH_g) 分析：土壤樣品先以適當溶劑(如二氯甲烷、丙酮或正戊烷等)萃取，經氣相層析儀/火焰離子化偵測器(gas chromatograph/flame ionization detector, GC/FID)篩選分析，初步判別高低碳數範圍後，如分析樣品低碳數(如汽油類)之石油系污染，即汽油類總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon as gasoline, TPH_g)時，可採用環檢所公告之「密閉式吹氣捕



捉法(NIEA M155)」或「平衡狀態頂空處理法(NIEA M157)」等方法處理並導入氣相層析質譜儀(GC/MS)中分析其含量。本計畫將先以平衡狀態頂空處理設備進行前處理，GC/MS 使用分離管柱為毛細管柱 (DB-624, Agilent J&W, USA)，長60公尺，管柱內徑 0.25 mm，薄膜厚度1.4 μ m。設定起始溫度40°C 維持1分鐘以每分鐘上升5°C 到達220°C，並維持16分鐘。

柴油類總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon as diesel, TPH_d)分析: 分析高碳數(如柴油類或柴油以上)之石油系污染樣品時，即柴油類總石油碳氫化合物(TPH_d)時，可先採用有機溶劑 (二氯甲烷、丙酮、正己烷或其混合溶劑等)經微波萃取前處理，分析方法將以微波萃取土壤中的總石油碳氫化合物，首先秤取5g 土壤樣本，將秤好之土樣置入75 mL 鐵氟龍(Teflon)萃接管內。配製1：1比例的二氯甲烷與甲醇萃取溶劑40 mL，將此萃液緩緩地加入含土壤之萃接管中，使萃液與土壤混合均勻，避免土樣殘留於管壁。將微波管外壁擦拭去除溶劑殘留後放入微波萃取機(CEM，型號: MARS，機型：MJ-3476)中，以800W 進行微波萃取，使其在15分鐘內升溫至150°C，於150°C 持續15分鐘的程序萃取。

萃取後待樣品溫度降至室溫，取澄清液置於 10 mL 的玻璃注射針筒中，針筒前端需加裝孔徑0.22 μ m 的過濾盤(材質為 PTFE, Millipore)，過濾後收集萃取液以2 mL 棕色瓶保存於-20°C 冰箱待分析。以耐350°C 以上高溫之層析管柱(DB-1MS，60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)經 GC/MS 分析其含量。分析 TPH 之 GC/MS 儀器設定為使用不分流進樣(splitless injection)，管柱流速為1 mL/min，注射口310°C，掃描範圍50-650 amu，倍增器電壓1565 eV。起始的溫度為40°C 維持5分鐘，接著每分鐘上升4°C 到達300°C，於該溫度維持30分鐘，依此升溫模式，樣品分析共需100分鐘。分析後的圖譜再分別以建立好的 TPH 檢量線進行濃度回推。

(6) 各種污染土壤碳數範圍測定

利用不同的碳氫化合物會因沸點不同會有不同的滯留時間，並且可依照化合物波峰出現的先後次序來判斷其為何種化合物。將 GC/MS 樣品圖譜與直鏈烷的 C₆-C₄₀ 之圖譜作比較，利用相同的滯留時間比對出相對的化合物碳數，以積分面積得出化合物所佔的面積百分比，經由烷類通式 C_nH_{2n+2}與化合物所佔面積比例相乘後所得出的分子量，則可推估出各油品的平均分子量，其實驗步驟如下：

製作稀釋五倍之各油品樣品，實驗流程為先取 20 mL 油品，倒入 100 mL 定量瓶中，再以二氯甲烷加至定量完成稀釋，稀釋後取出適量樣品至 2 毫升樣品瓶中，



加蓋後以 GC/MS 進行分析，若未能立即分析，則存放於 4°C 的冰箱中保存。

以 GC/MS 進行 C₆-C₄₀ 標準品分析，得出 C₆-C₄₀ 各化合物滯留時間，其 GC/MS 設定為：儀器升溫程式設定皆相同，起始溫度設為 40°C，維持 5 分鐘後，再以每分鐘 4°C 升溫至 300°C，並於 300°C 維持 30 分鐘。進樣方式採不分流方式進行。

載氣與流速使用 1 mL/min 的氮氣。

由步驟(B)所得出之 C₆-C₄₀ 標準品層析圖譜與稀釋五倍之各油品層析圖譜作一比對，並個別算出碳數範圍 C₇-C₈，C₈-C₁₀，C₁₀-C₁₂，C₁₂-C₁₄，C₁₄-C₁₆，C₁₆-C₁₈，C₁₈-C₂₀，C₂₀-C₂₂，C₂₂-C₂₄，C₂₄-C₂₆，C₂₆-C₂₈，C₂₈-C₂₉間所佔油品成分的波峰面積，求出各種污染土壤碳數範圍比例。



3.2 熱處理設備設置及操作

3.2.1 熱增強型土壤氣體抽除法設置及操作(第一年)

由於大型石化場址在不同整治區域進行污染土壤開挖，在本場址主要使用熱脫附、土壤清洗、生物復育、以及離場處理，對於適合熱處理土壤將先進行必要之篩分，針對低碳數分佈污染土壤如溶劑污染土壤(甲苯、乙苯等)、汽油污染土壤、航空燃油污染土壤、煤油污染土壤進行現場土壤污染濃度分析、風化程度判定及污染樣態快速篩分，針對污染土壤其 TPHg 濃度小於3,000 mg/kg，以熱增強型土壤氣體抽除法(thermally-enhanced vapor extraction technology, TEVET)進行復育，其相關步驟如下。

(1) TEVET 系統設置規劃

TEVET 主要系統包含蒸氣收集及空氣過濾設備、鼓風機機組、熱交換器及熱增強機組，設備將安裝於貨車或貨櫃中，處理區地表會覆蓋防滲襯墊，將現場開挖移除污染土壤堆置於熱脫附區後，以熱氣配送管線均勻埋設於土堆中，最後於土堆上方覆蓋防滲襯墊後再進行熱處理，圖3-2顯示為 TEVET 整治作業之序列步驟。

標準熱增強型土壤氣體抽除系統主要組成設備包含下列部分：

- A. 蒸汽收集及空氣過濾設備：利用冷凝槽、冷凝水篩檢程式及熱交換器將土壤蒸汽中所含水分去除。
- B. 鼓風機機組：應用空氣回收鼓風機抽除土壤孔隙中氣體使孔隙呈真空狀態，抽除的土壤氣體經蒸汽收集設備後泵送至熱交換器組。
- C. 熱交換器組：熱交換器組為氣體加熱設備，設備包括以丙烷或液化石油氣(LPG)作為燃料的氣體加熱系統，氣體加熱系統在加熱過程中並可同時去除土壤氣體中的關切物質。
- D. 熱增強機組：加熱後的土壤氣體以配備隔熱罩及隔振器的高壓鼓風機重新注入污染土堆中。

(2) TEVET 系統處理流程

TEVET 作業每批次污染土壤處理量可為500公噸至1000公噸，若以1000公噸污染土壤為一批次，則土壤將堆置成約25公尺長×12公尺寬×高約2公尺高的土堆，堆置過程中同時將熱氣注入管線配置於土堆內，土堆頂部則配置土壤氣體抽除管線，再以防滲襯墊披覆於堆置完成後的土堆表層以避免處理過程中揮發性有機物逸散至大氣中。熱氣注入管線與土壤氣體抽除管線則與 TEVET 系統進行銜接。



步驟 1 鋪設底層防滲襯墊	步驟 2 堆置污染土壤及埋設注氣管線
步驟 3 外層包覆防滲襯墊進行復育作業	步驟 4 完成復育作業移除土壤

圖3-2 TEVET 土壤復育作業各項步驟

開挖移除後污染土壤堆置成土堆，堆置過程中同時將熱氣注入管線配置於土堆內，土堆頂部則配置土壤氣體抽除管線，再以防滲襯布披覆於堆置完成後的土堆表層以避免處理過程中揮發性有機物逸散至大氣中。

熱氣注入管線與土壤氣體抽除管線則與 TEVET 系統進行銜接。系統注熱氣使土壤溫度升高後，揮發性有機物將自污染土壤中揮發混入土壤氣體中，混合有機物的土壤氣體經土壤氣體抽除管線以真空鼓風機抽除至系統，土壤的孔隙因土壤氣體抽除呈真空狀態，進而加速污染物揮發的速率。含揮發物的土壤氣體經真空鼓風機泵送至燃燒室氣體加熱系統，由於氣體在燃燒室滯留約0.5秒，因此土壤氣體中所含揮發性有機污染物將被去除。土壤將持續維持此作業條件至土壤中污染物濃度低於土壤污染管制標



準，TEVET 系統設備維持24小時持續運轉。系統元件包含燃燒器、鼓風機、耐熱風管、SVE 系統等，其裝置如圖3-3所示。

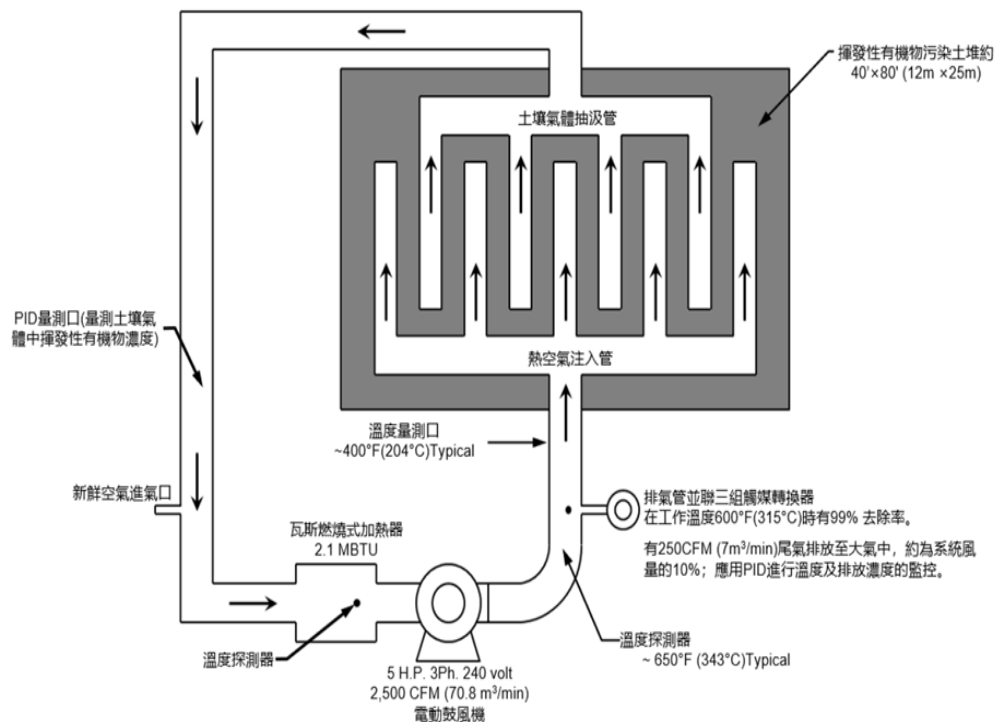


圖3-3 TEVET 熱空氣導入技術處理示意圖

TEVET 作業時，系統的鼓風機將 343°C 的熱空氣以每分鐘 $2,500\text{ ft}^3/\text{min}$ ($70.9\text{ m}^3/\text{min}$) 注氣量注入土堆，造成土堆土壤溫度從室溫升高到 65°C 至 232°C 間，土壤污染物的特性將影響土堆所需升高的溫度，若處理受汽油或柴油污染的土壤約升高至 80°C 至 120°C 即可；土壤溫度升高後，揮發性有機物、多環芳烴或總石油碳氫化合物將自污染土壤中揮發混入土壤氣體中，混合有機物的土壤氣體經土壤氣體抽除管線以真空鼓風機抽除至系統，土壤的孔隙因土壤氣體抽除呈真空狀態，進而加速污染物揮發的速率。含揮發物的土壤氣體經真空鼓風機泵送至燃燒室高達 980°C 的氣體加熱系統，由於氣體在燃燒室滯留約0.5秒，因此土壤氣體中所含揮發性有機污染物將被去除，經燃燒室去除揮發性有機污染物的高溫空氣重新再注入土堆中。土壤將持續維持此作業條件至土壤中污染物濃度低於土壤整治目標值。

估計整治作業若在春季至秋季期間之氣候狀態進行，通常可在5至7天達成土壤整治目標，處理作業時間變化的因素分別為土壤污染物濃度高低及土壤含水量高低之影



響；而整治作業若改在冬季期間進行，則將延長至14天方可達成土壤污染整治目標。

TEVET 整治作業期間系統設備將24小時持續運轉，直至土壤達成整治目標。

土壤氣體燃燒過程中約需每分鐘約需7.1立方公尺(約占土壤氣體抽除量的10%)的新鮮空氣以提供燃燒所需之氧氣，因此每分鐘亦約有7.1立方公尺經氣體加熱系統處理的高溫空氣需被排放至大氣中。高溫空氣排放前將先流經觸媒氧化器(或其它適當的空氣洗滌設備)以防止污染物或微粒排入大氣，若作業需要並可在觸媒氧化器後端以活性炭吸附再排入大氣中，排放的高溫空氣在未經觸媒氧化器處理前，排放氣體以符合 USEPA AP-42尾氣為排放標準。

若土壤污染物為含氯揮發性有機物時，混合含氯有機物的土壤氣體經土壤氣體抽除管線以真空鼓風機抽除至系統後，則不再泵送至燃燒室進行燃燒，而先經熱交換器降溫去除土壤氣體中水份，再以活性炭去除土壤氣體中含氯揮發性有機物，最後通過含觸媒轉換器的尾氣排放設備後再排放至大氣中，每分鐘約有70.8立方公尺的經活性炭吸附處理後之氣體排入大氣中。

TEVET 復育土壤作業過程中，將持續抽除之土壤氣體進行連續性監測，當土壤氣體監測顯示氣體中揮發性有機物濃度較初始取樣濃度減少95%時，這表示土壤復育目標已經達成，即進行土壤採樣檢測作業，以確認土壤的目標污染物是否已低於整治目標值。土壤氣體連續性監測除可確認土壤復育是否已達整治目標，並可確保排放尾氣污染物濃度不超過排放標準。土壤採樣將在 TEVET 開始進行後5至14天執行。

3.2.2 熱脫附處理法設置及操作(第一年)

建置熱脫附系統將根據目標污染物的特性，調節適合的操作參數(脫附溫度、停留時間等)，使污染物與土壤分離，進行尾氣處理，收集熱脫附過程產生的氣體，通過尾氣處理系統對氣體進行處理，檢測達標後排放。

熱脫附系統由進料系統、脫附系統和尾氣處理系統組成，進料系統包括篩分機、破碎機、振動篩、鏈板輸送機、傳送帶、除鐵器等；脫附系統包括迴轉乾燥設備或熱螺旋推進設備，燃燒器產生的火焰均勻加熱轉窯外部，污染土壤被間接加熱至污染物的沸點後，污染物與土壤分離廢氣經燃燒直排。尾氣處理系統富集氯化污染物的尾氣通過過濾器、冷凝器、超濾設備等環節去除尾氣中的污染物，氣體通過冷凝器後可進行油水分離，濃縮、回收有機污染物包括旋風除塵器、二燃室、冷卻塔、冷凝器、布



袋除塵器、淋洗塔、超濾設備等。本場址由於面積遼闊，由不同整治團隊設計規畫不同熱處理單元，詳細系統設置規劃如下所述。

3.2.3 統包案多螺管式熱脫附系統設置規劃

場址統包案依合約要求建置多螺管式熱脫附系統，依據現場土壤污染濃度分析、風化程度判定、及污染樣態快速篩分，針對中、高碳數分佈污染土壤，如柴油污染土壤、燃料油污染土壤、重油污染土壤進行篩分，污染土壤其 TPH_d 濃度大於3,000 mg/kg，以多螺管式熱脫附系統法進行污染土壤復育。

本技術可針對不同性質的污染物土壤進行熱處理，熱脫附爐溫度場分布如圖3-4所示，透過溫度控制及污染土壤停留時間來達到土壤熱脫附的效果，燃燒室設置於中空爐體的下方，且中空爐體位於燃燒器的上方，用以提供中空爐體的熱源，同時均勻加熱並隔絕燃燒室之火源直接對輸送管體直接加熱，減少輸送管體在熱源加熱下熱脹冷縮差異過大膨脹不均而造成損壞。藉由攪拌器提供動力輸送及翻轉，使得污染土壤能在輸送管體內均勻受熱，進行熱脫附，圖3-5為熱脫附系統流程及說明。

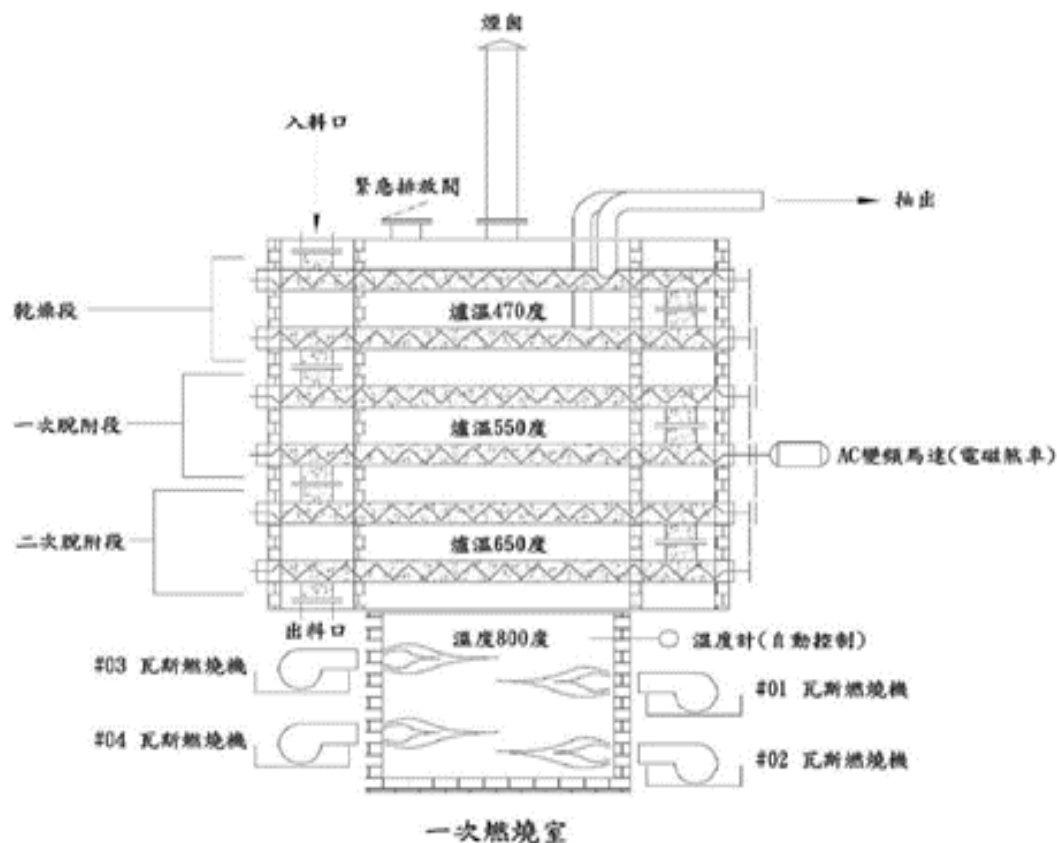


圖3-4 多螺管式熱脫附爐溫度場域分布圖

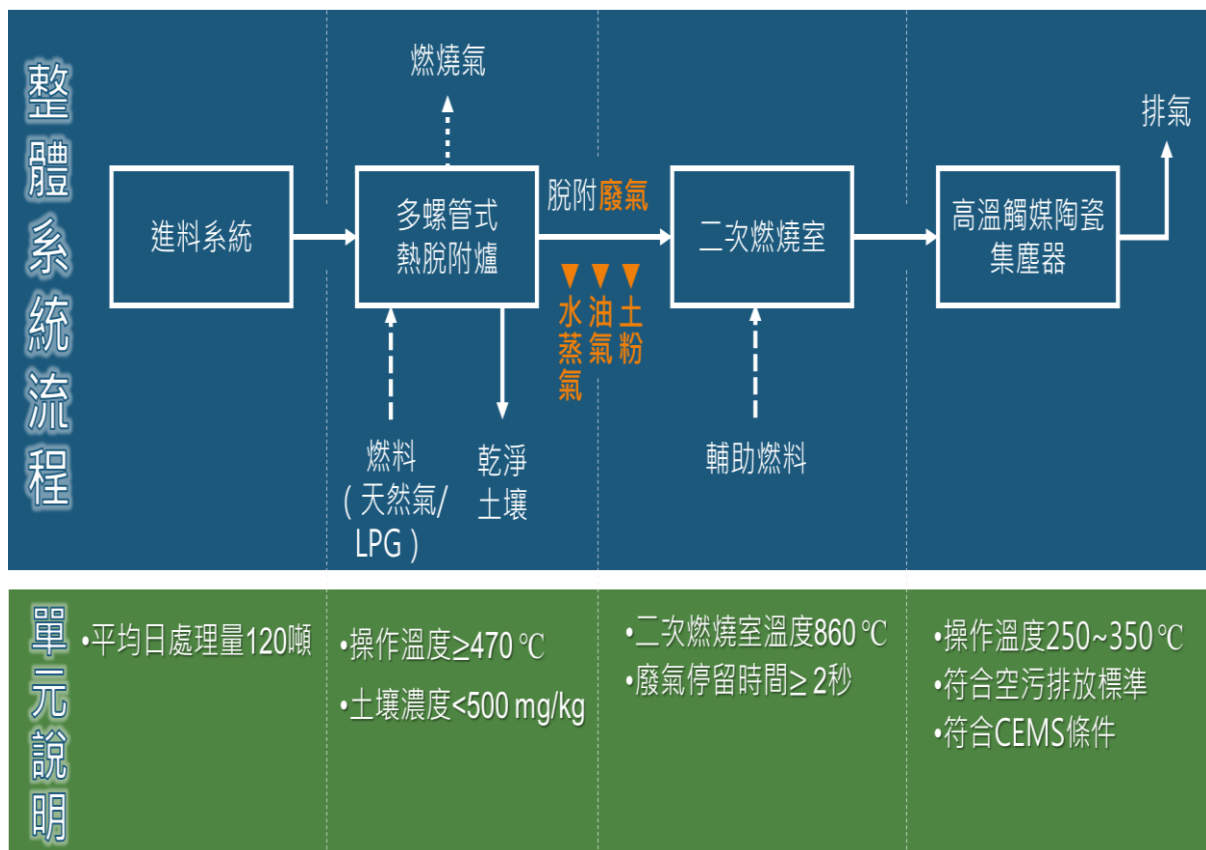


圖3-5 熱脫附系統流程及說明

1. 多螺管式熱脫附系統處理流程

熱脫附整體流程圖如圖3-6所示，熱脫附爐底部燃燒室設有燃燒機，主爐膛內之溫度計及壓力計會即時將數值傳送至中央控制盤，當測得主爐膛溫度低於設定值時，便會啟動燃燒機，同時依據不同之溫度調整火力大小，空氣上升後加熱爐膛中之螺管，當溫度上升至設定值時，便會停止瓦斯燃燒機之作動。多螺管熱脫附爐內含之油氣，經加熱後成為氣狀污染物，空氣抽引器由空氣壓縮機將空氣加壓，並將高壓空氣注入空氣抽引器中，空氣抽引器因空氣的注入所成負壓而將螺管內之空氣抽出，含油氣之廢氣進而流入二次燃燒室中，當設於二次燃燒室之溫度計低於設定溫度時，啟動燃燒機將爐內溫度提高，便於燃燒油氣及其他有機物，並依據溫度高低自動調整燃燒機之火力大小。經二次燃燒室處理後之廢氣由經誘引式抽風機之吸力，進入高溫觸媒陶瓷集塵器中，由於濾管的過濾作用，將空氣中之微粒排出。

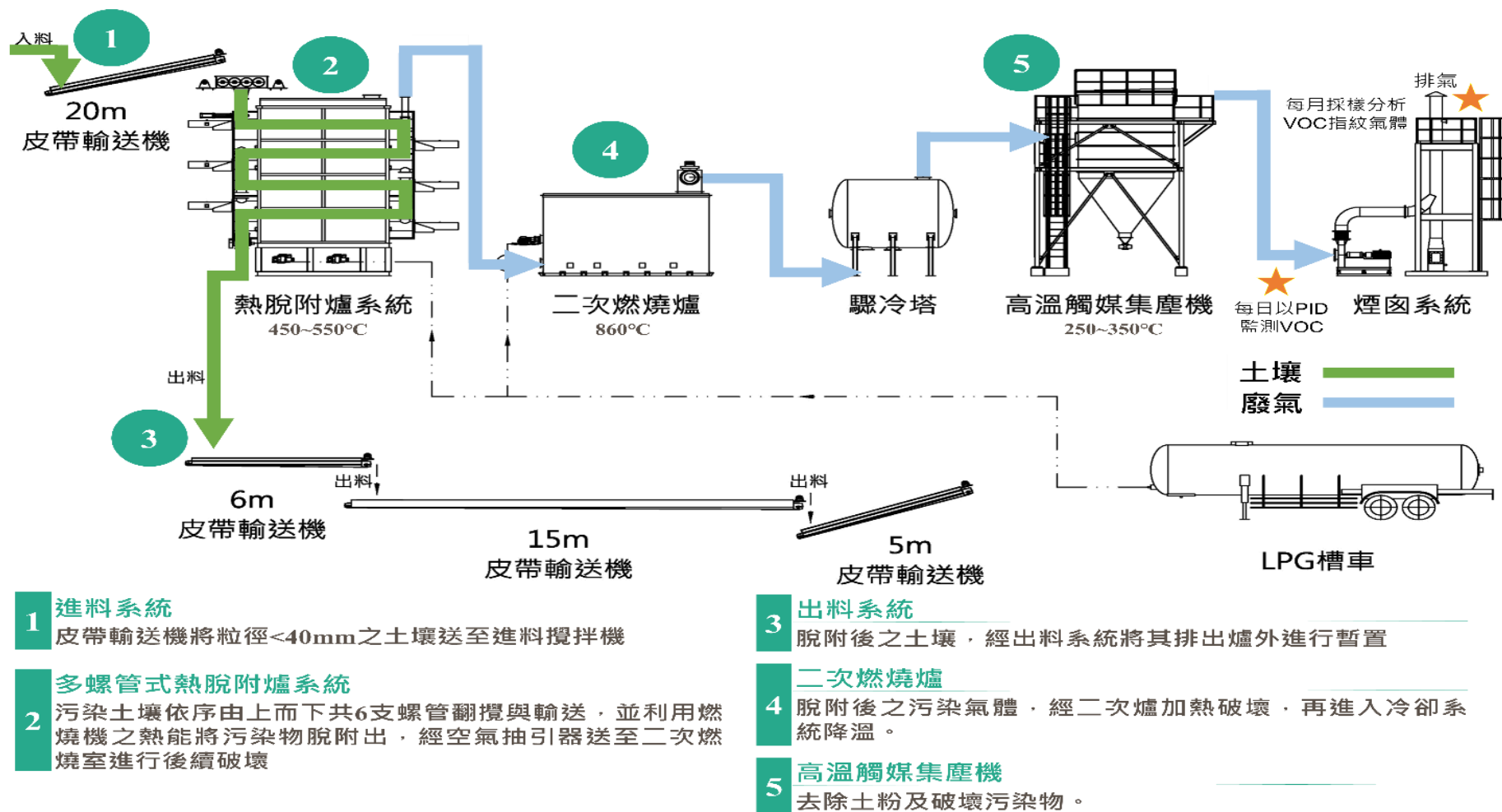


圖3-6 多螺旋式熱脫附流程圖



2. 多螺管式熱脫附系統各單元設計容量及運作

前處理設施之設計容量以污染土壤10噸/小時之處理量進行設計，其運行方式為受污染土壤由搬運車輛運送至處理場中，由小型挖土機將受污土壤移入篩分機中，篩分機篩網孔徑為40 mm，由兩組振動馬達帶動振動篩產生振動，使小於40 mm 直徑之土壤過篩進入皮帶輸送機，粒徑大於40 mm的土壤脫離篩分機後重新破碎，小於40 mm 粒徑的土壤經由皮帶輸送機輸送經磁選機，由磁選機將土壤中之鐵塊分離，經篩分及磁選的土壤進入堆置區。

- (1) 進料系統由進料抓斗機、進料攪拌機及進料旋轉閥構成，其本系統運作方式為過篩後之土壤置於堆置區中，由進料抓斗機將欲處理之土壤挖取，再由電動吊車將土壤運送至進料攪拌機中，由擬啟動之多螺管熱脫附爐，將土壤放置至進料攪拌機，攪拌均勻後進入進料旋轉閥。
- (2) 多螺管式熱脫附爐設計處理量於含水率20%時，每小時可處理5噸之污染土壤，當含水率小於10%時，每小時可處理10噸。其運作方式為設置兩套多螺管熱脫附爐兩套互為備用，每套設有12支螺管，再分為兩排每排6支螺管，欲處理之土壤由旋轉下料閥將土壤送入螺管中，螺管裡設有螺桿由旋轉螺桿之葉片將土壤輸送及翻攪，由上至下將土壤輸送至下方螺管。爐內設有4組瓦斯燃燒機，每組每小時提供600,000 Kcal 熱量，將爐中之空氣加熱，並間接的使螺管內之土壤中水份及TPH受熱而脫附，脫附之油氣經螺管上緣由空氣抽引器抽離以達成TPH之熱脫附的需求，脫附氣體則抽送至二次燃燒室進行處理。
- (3) 出料系統之運作方式為經熱脫附後之土壤由出料旋轉閥將處理好之土壤排出螺管掉入螺旋輸送機上，由螺旋輸送機將處理土壤輸送至皮帶輸送機，由濕潤水加壓泵將工業水輸送至噴嘴上，由噴嘴將工業水噴灑於處理土壤上，以冷卻溫度並加濕處理土壤以防止粉塵飛散，加濕後之處理土再經由皮帶輸送機輸送至成品堆置區待驗。
- (4) 二次污染防治系統之運作方式為脫附後之油氣，由空氣抽引器抽出至二次燃燒室，空氣抽引器由空氣壓縮機提供高壓空氣，經冷凍乾燥機將高壓空氣中之水份去除，進入空氣抽引器中之噴嘴噴入，再由於高壓空氣產生之高速差形成負壓將油氣吸出，同時達成混入新鮮空氣，經由管線進入二次燃燒室中，二次燃燒室中設有溫度計及瓦斯燃燒機，當二次爐出口溫度小於860°C 時啟動瓦斯燃燒機將二次燃燒室出口溫度提升至860°C，以確認脫附之爐氣可完全燃燒分解，



二次燃燒室之廢氣經由架高之裸鋼管，進行冷卻後進入高溫觸媒陶瓷集塵器中，在進入集塵器前設置於排氣管道上之自動連續監測設備（Continuous Emission Monitoring Systems, CEMS）將排氣中之硫氧化物及氮氧化物之濃度進行偵測，如其濃度高於設定值時，啟動尿素水加壓泵或消石灰抽引器將尿素或消石灰排入煙道中，進行脫硝除硫之工作，廢氣進入高溫陶瓷集塵器後設於內之濾管去除空氣中之土粉及脫硫反應後形成之硫酸鈣，同時附於濾管表面之二氧化鈦觸媒亦進行脫硝反應以降低排氣中之污染物。由於濾管上截留之土粉增厚濾管中壓損增加，此時誘引式抽風機增加轉速以提供更大之吸引力將廢氣排出，當集塵器之背壓高於600 mmAq 時，由空氣壓縮機提供高壓空氣經由內建脈衝閥向濾管提供脈衝壓力，以使附著於濾管上的粉塵掉落，掉落之土粉由消石灰下料閥排出集塵器外，經螺旋輸送機併同合格之處理土壤運返回填。



3.2.4 離地高溫熱脫附系統設置規劃(3-1區)(第一年)

場址3-1區整治規劃為污染土壤採用水洗、生物復育、熱處理及離場處理等方式，由台境企業公司負責，採用之高溫熱脫附系統，脫附爐設備包含自動進料輸送系統及自動出料系統，主爐設計採用上下兩層式，全程操作距離全長24 m，直徑2.3 m，採用螺旋推進式，加熱方式為內外兩層夾套式，以350°C 循環熱風加熱。二次高溫爐其功能為以高溫燃燒含總碳氫化合物之含油性氣體，以600-800°C 高溫滯留時間2 秒以上將其分子結構破壞，廢氣經由污染防治設備處理。

考量本場址污染濃度、含水率及土壤不均質性等變異性，另搭配計算軟體，隨時針對場址污染土不同變數，如含水率、污染土壤濃度或進料量等，計算燃料需求進行調整，設備概述如下：

1. 高溫熱脫附設備規劃設計

- (1) 熱風爐功能用於進料土水份去除。
- (2) 熱脫附爐設備包含自動進料輸送系統及自動出料系統，主爐設計採用上下兩層式，全程操作距離全長24 m，直徑2.3 m，採用螺旋推進式，加熱方式為內外兩層夾套式，以350°C 循環熱風加熱。
- (3) 材料及規格如下：外爐尺寸直徑2300 mm，材質 S40 鋼板 x12t 耐火層可耐熱 1,200°C、內爐材質直徑1,200 mm，全長12,000 mm，材質 SUS304x8t
- (4) 本設備即分上下兩爐：長度與直徑尺寸皆相同，進料系統其方式為帶式輸送機。
- (5) 二次高溫爐其功能為以高溫燃燒自熱脫附爐所引誘之含油性氣體(含總碳氫化合物)，並以600-800°C 高溫且滯留時間2 秒以上，將其分子結構破壞。
- (6) 加熱爐其功能提供400°C 熱風給予乾燥爐做熱脫附用，最高設計溫度1,350°C。
- (7) 氣冷式熱交換器其功能將二次高溫爐排除之高溫廢氣降至300°C 以下，此為第一道降溫程序。
- (8) 旋風集塵機其功能為收集粒徑 30 μ m 以上的粉塵，以自然螺旋沉降方式收集。
- (9) 半乾塔：其功能將廢氣溫度降至 150°C 以便進入帶式集塵機，同時噴灑45% Naoh，除硫除酸及兼具調解 pH 之功能。
- (10) 袋濾式集塵機功能為過濾 30 μ m 以下之微細粉塵、效率 99.9%以上。
- (11) 洗滌塔：濕式洗滌去除廢氣中的粗塵微粒。
- (12) 誘引抽風機：透浦蝸流式。
- (13) 排氣煙囪。

2. 製程流程

- (1) 高溫熱脫附設備流程圖(Process Flow Diagram，簡稱為 PFD)，如圖3-7所示，爐體示意詳如圖3-8。燃燒能源使用 LNG 天然瓦斯。
- (2) 設備操作人力配置為系統以24小時持續操作運行，現場人力配置採輪班制，每天三班，每班兩位工作人員為一組。

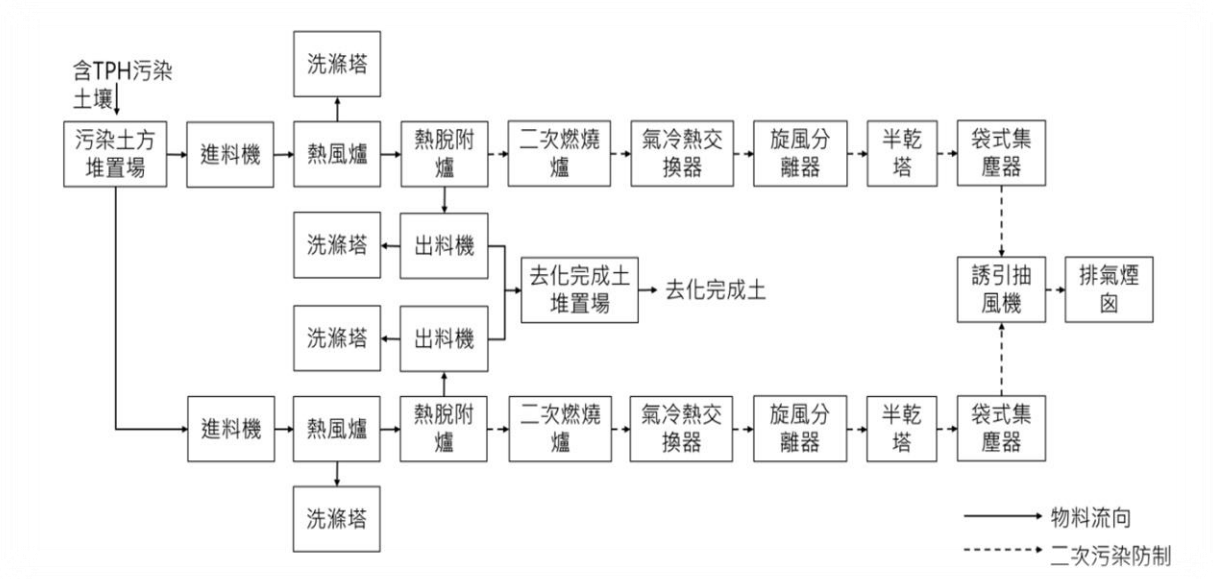


圖3-7 3-1區離地高溫熱脫附流程圖

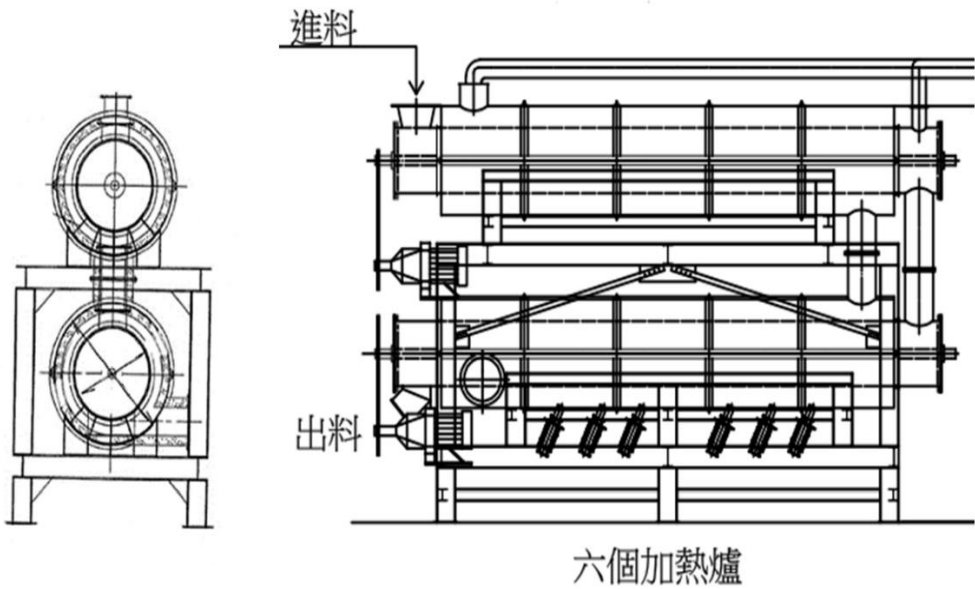


圖3-8 主爐體示意圖



有關3-1區之離地高溫熱脫附系統流程如圖3-9所示。設備具有模組套裝式、可現場快拆、維修簡便快速之特性。

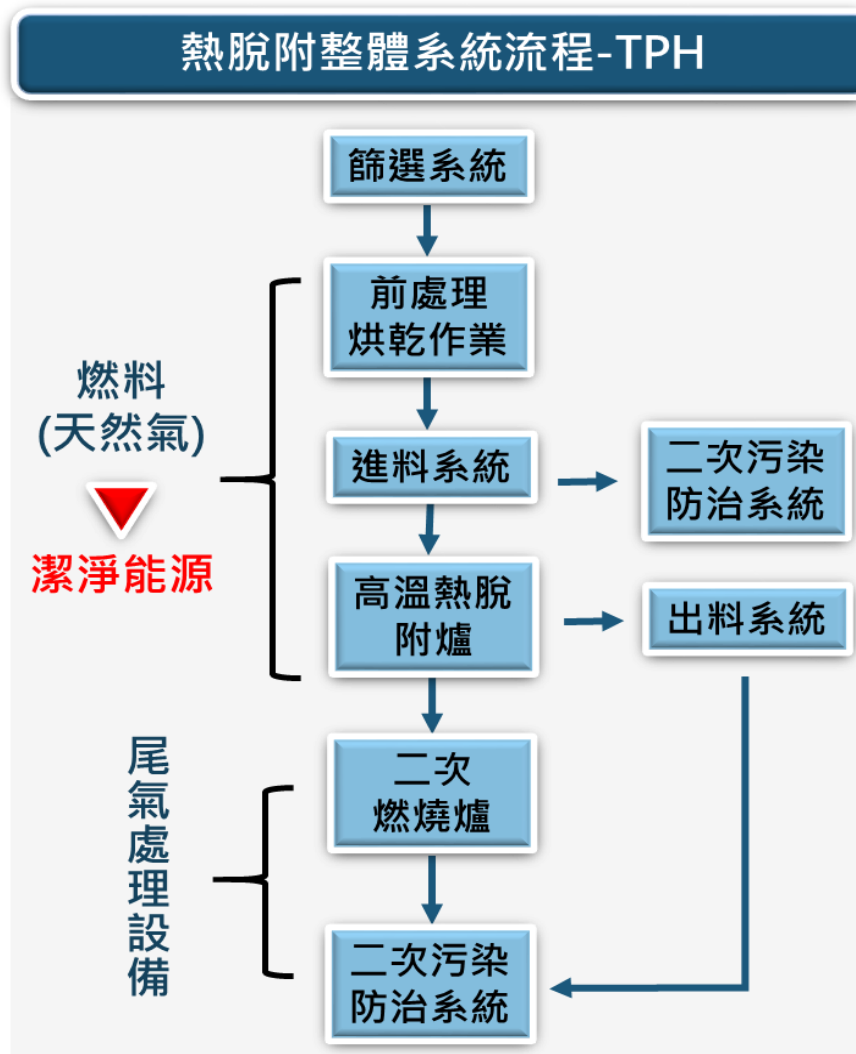


圖3-9 熱脫附整體系統流程

3.2.5 熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤(4-3區及4-4區)(第一年)

本場址4-3區及4-4區由可寧衛股份有限公司與森品環境科技股份有限公司合作，於現場設置熱處理廠，將污染土壤清洗後產出富集土壤中的 TPH 污染物，經由加熱氣化方式，使之脫離土壤，達到去除的目的。

熱脫附主要包含三個過程，一是通過調節加熱溫度和停留時間，將土壤中油品從液相轉化為氣相，過程中並不出現對油品的破壞作用，二是將含有氣相油品的尾氣予以焚燒，三是將焚燒衍生的氣體經處理達標後排放至大氣中，其概念如圖3-10所示。

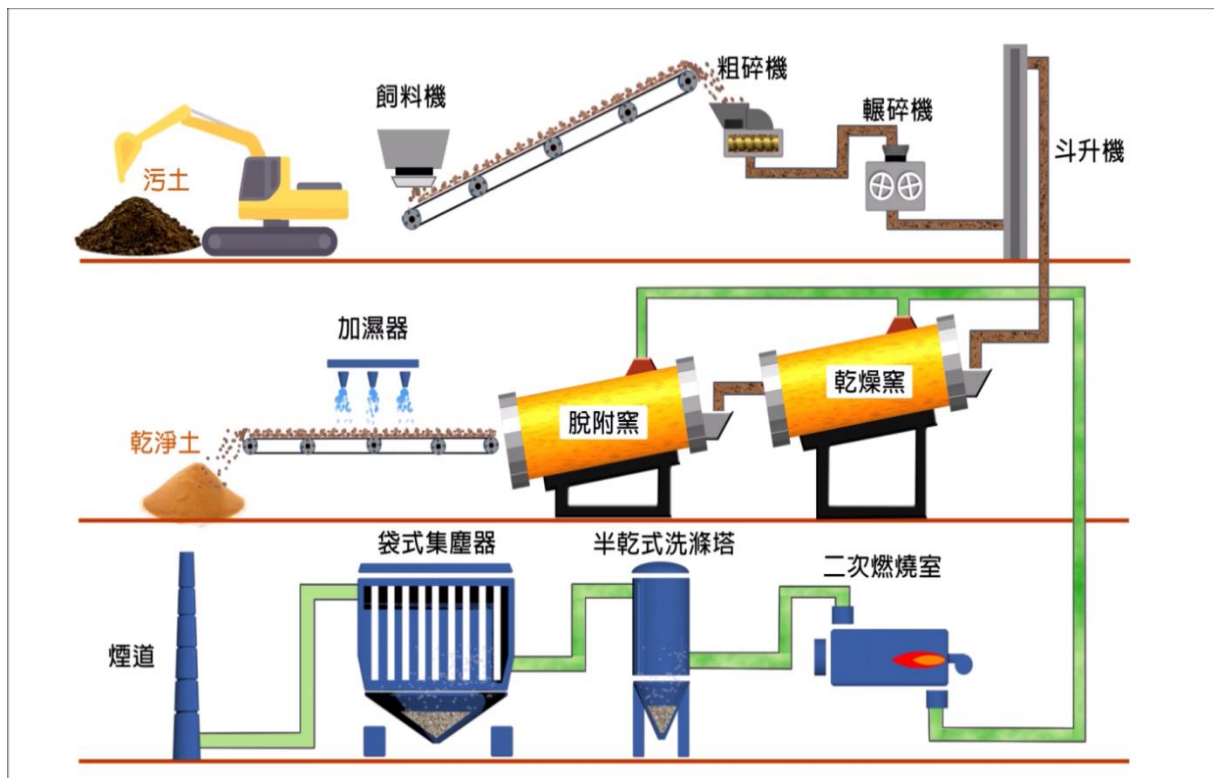


圖3-10 高濃度富集土壤熱脫附處理系統概念流程圖

1.處理標的與標準

本區主要整治工法以水洗、生物復育及熱處理為主，熱脫附處理之對象是污染土壤經清洗後產出的污染物富集土壤，其粒徑通常小於0.075 mm，多屬粉黏土質，此土壤係以污泥餅的方式呈現，污染物為 TPH 及 VOCs，其中 TPH 較 VOCs 不易揮發，易殘留於土壤中，是限制因子，故本案熱脫附標的污染物設定為 TPH。經檢測，送至熱脫附廠污泥餅中的 TPH 濃度介於5,870 ~36,800 mg/kg，處理後的土壤須符合 TPH<800 mg/kg 的標準，方能於現地回填。

2. 流程說明

現場設置兩套土壤熱脫附系統，每套設計處理量為12噸/小時，其系統流程如圖3-11所示，旋轉窯體主要操作參數詳如表3-1，系統簡述如下。

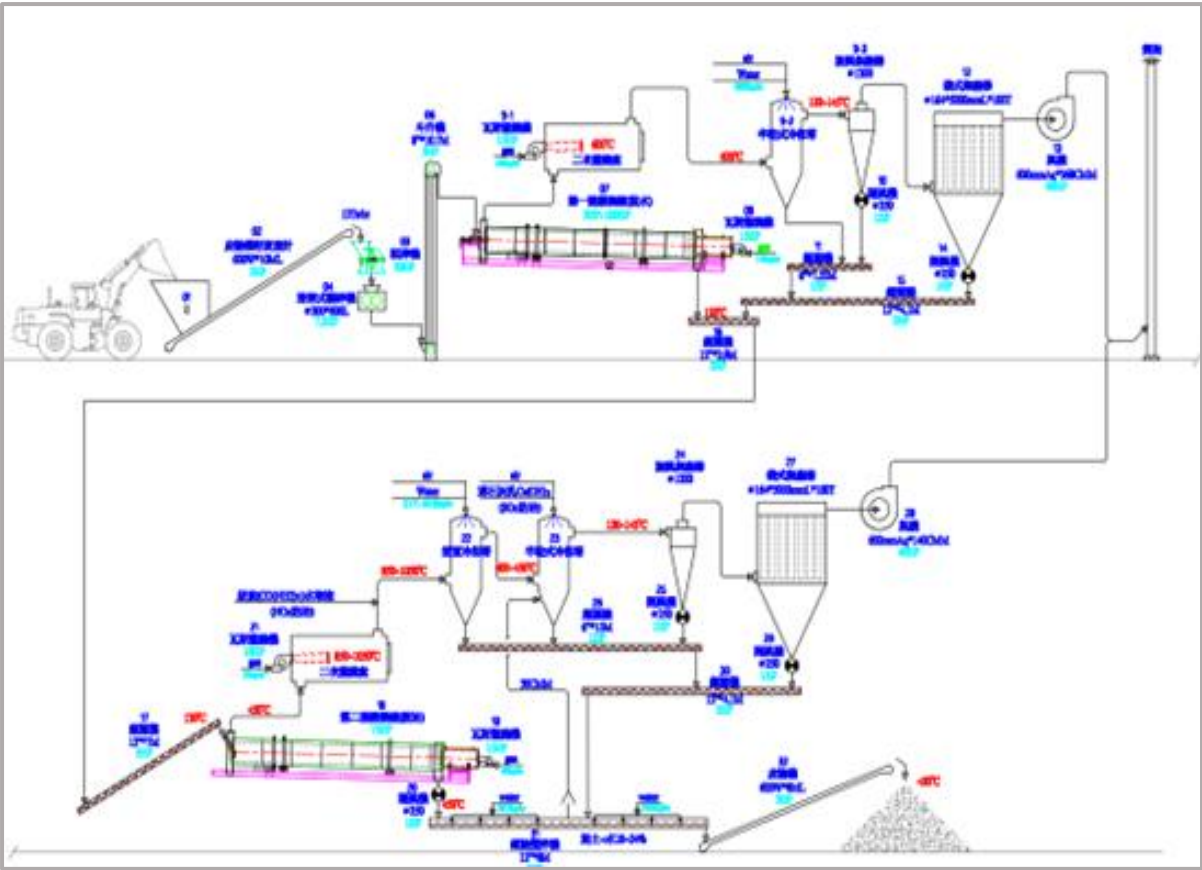


圖3-11 富集土壤熱脫附系統流程圖

表3-1 熱脫附窯體操作參數表 (4-3區及4-4區)

旋轉窯(乾燥段)	旋轉窯(脫附段)
長度 = 17.0 m	長度 = 17.0 m
外徑 = 1.93 m	外徑 = 1.93 m
內徑 = 1.89 m	內徑 = 1.78 m
斜度 = 0.026	斜度 = 0.030
轉速 = 12.9 rpm	轉速 = 10.6 rpm
風速 = 0.81 m/s	風速 = 0.35 m/s
出口溫度 = 120℃	出口溫度 = 450℃
停留時間 = 40 min	停留時間 = 45min



熱脫附主流程為採用旋轉窯(Rotary kiln)進行含 TPH 的污染土壤加熱，第一段窯係乾燥段(120°C)，第二段窯係脫附段(450°C)，以達到將污染土壤中的油品由液態強制揮發成氣態，達到與土壤介質分離之效果，功能如下：

- (1) 使用潔淨天然氣燃料提供熱源，減少二次污染。
- (2) 採用直接加熱，窯內土壤受熱面積大且均勻，脫附效果佳。
- (3) 操作溫度適中，降低能源損耗。
- (4) 兩套設備連續式處理，可單獨或同時運作，增加稼動率。
- (5) 操作彈性大，可調整轉速與停留時間，確保處理品質。

熱氧化次流程為設置二次燃燒室，使氣化油品於高溫及富氧環境下進行熱氧化，達到有機氣體完全分解成安定無害之二氧化碳及水，功能如下：

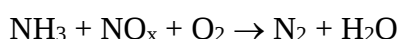
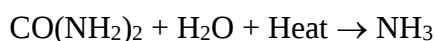
- (1) 使用潔淨天然氣燃料提供熱源，減少二次污染。
- (2) 高溫(850~1,100°C)完全熱氧化 VOCs 及 SVOCs 及其他氣體。
- (3) 足夠之停留時間使反應完全。
- (4) 採密閉蓄熱結構，節能及低熱損。

空污防制次流程為經熱氧化處理後之排氣中，因仍含有少量衍生之硫氧化物(SO_x)及氮氧化物(NO_x)與粒狀污染物，因此須再進行後續之脫硫、脫硝及除塵等空污防制，方可將潔淨氣體排放至大氣，相關功能如下：

- (1) 整體系統採負壓密閉收集，可達完全處理無逸散之虞。
- (2) 利用成熟之排煙脫硫技術(Flue Gas Desulfurization, FGD)進行脫硫(DeSO_x)處理。

硫氧化物的排煙脫硫(FGD)是指注入一種吸附劑，如消石灰 Ca(OH)₂乳液，以噴霧方式注入，使之與煙氣中的硫氧化物廣泛接觸並吸附之，以達到去除的目的。

- (3) 利用最佳可行之非觸媒脫硝技術(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)進行脫硝(DeNO_x)處理，氮氧化物的選擇性非觸媒還原是指無觸媒的作用下，注入一種含氨基的還原劑，如氨(NH₃)或尿素(CO(NH₂)₂)水溶液，在適合脫硝反應的溫度範圍內(760-1,090°C)，將煙氣中的氮氧化物還原為無害的 N₂及 H₂O，反應式如下：





(4) 利用最佳可行之除塵過濾脈動式袋濾機進行除塵處理。

(5) 排氣可符合現行法規標準無虞。

3. 設施特色

處理量能為使用兩套獨立設備，每套設計處理量為12公噸/小時，可全時段操作，兩套設備總處理量為576公噸/日，相關計算如下：

$$2\text{套} \times 12\text{公噸/小時/套} \times 24\text{小時/日} = 576\text{公噸/日}$$

本熱脫附系統空間配置為佔地80m × 40m，系統平面配置如圖3-12所示，熱脫附設備立面如圖3-13所示，空氣污染防治設備立面如圖3-13所示，所有設備及物料皆設置於棚架內，故可全天候(晴雨)暨全時段(日夜)操作。

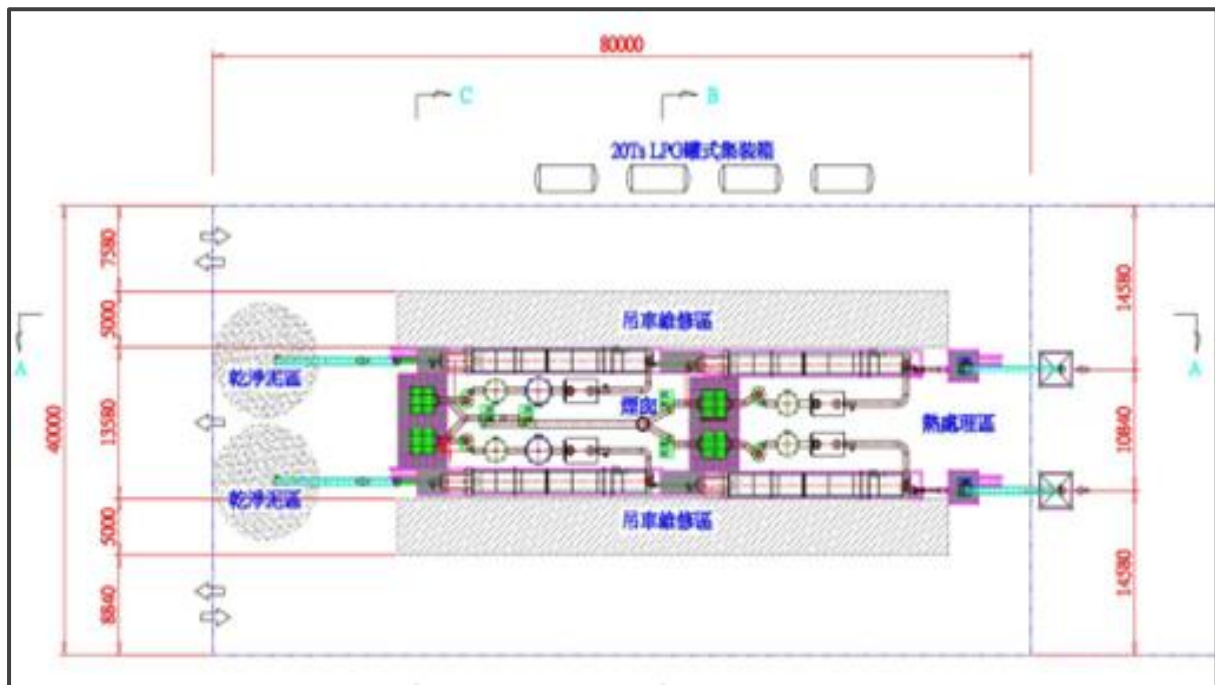


圖3-12 土壤熱脫附系統平面配置圖 (4-3區及4-4區)

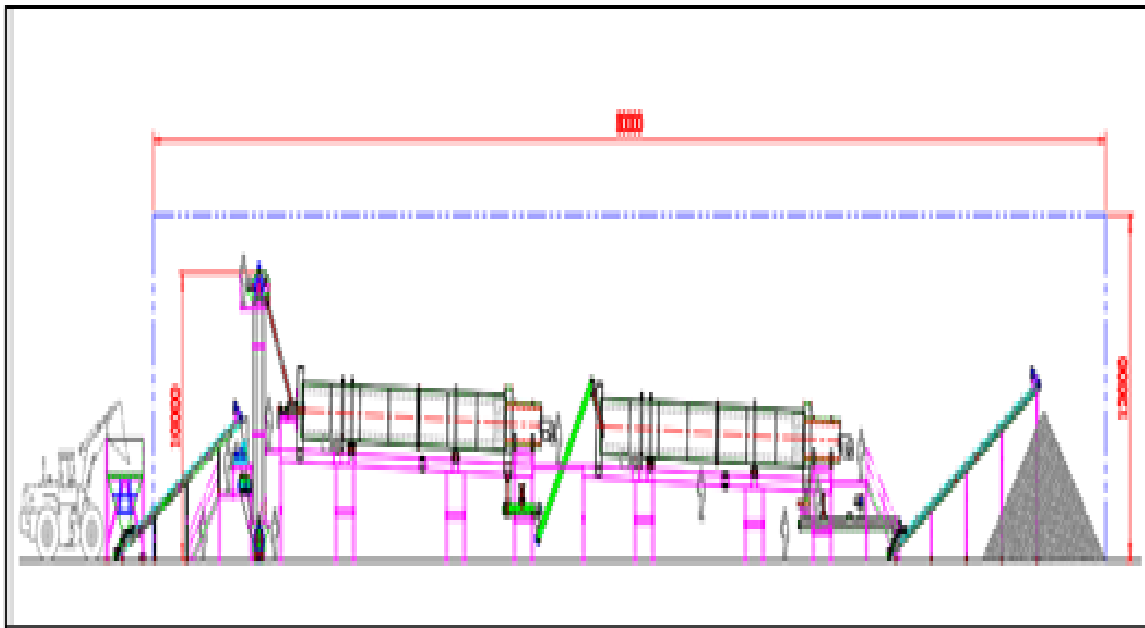


圖3-13 熱脫附設備立面圖 (4-3區及4-4區)

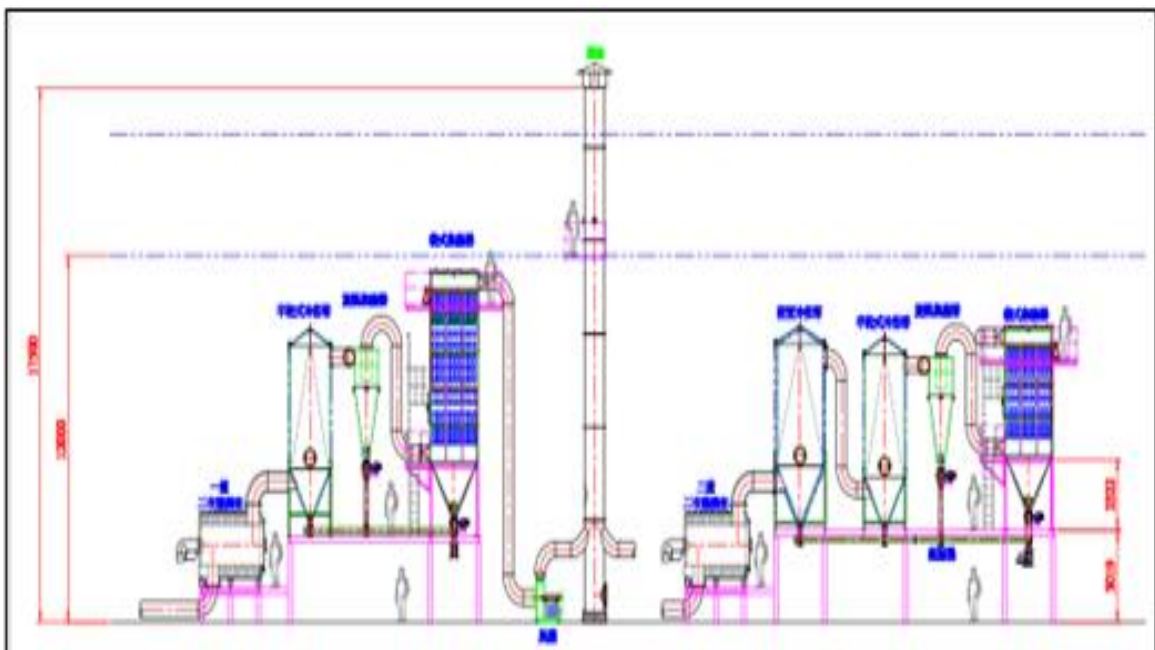


圖3-14 空氣污染防治設備立面圖 (4-3區及4-4區)

本熱脫附系統主要設備規格及所需動力詳表3-2，其中除尾氣排放管道為共用煙囪以外，其餘設備分為兩套且各自獨立，熱源係採用天然氣，天然氣容器及相關設備基於法令安全規定須置於棚架外側，於長時間高強度作業時，可全天候全時段運轉，現場設備現況如圖3-15所示。



表3-2 熱脫附設備規格及動力表 (4-3區及4-4區)

編號	設備名稱	規格	馬力(HP)	數量
01	入料斗	3M*3M		2
02	皮輸機附流量計	600W*10ML	2	2
03	粗碎機	500W	20	2
04	滑差式輾碎機	Φ200*600L	7.5	2
05	滑槽	SS400		2
06	斗升機	8"*10.7M	3	2
07	第一道鍛燒爐(脫水)	Φ1930*17ML	105	2
08	瓦斯燃燒機(附燃燒室)	RLG-360	15	2
09-1	瓦斯燃燒機(附二次燃燒室)	RLG-360	15	2
09-2	半乾式冷卻塔(附加水系統)	Φ1500	2	2
09-3	旋風集塵器	Φ1200		2
10	隔風機	Φ250	1	2
11	螺運機	6"*7.55M	3	2
12	袋式集塵器	Ø164*3000mmL*100T		2
13	風機	600mmAq268CMM	60	2
14	隔風機	Φ250	1	2
15	螺運機	12"*4.1M	2	2
16	螺運機	12"*2.9M	2	2
17	螺運機	12"*7M	5	2
18	第二道鍛燒爐(脫油)	Φ1930*17ML	75	2
19	瓦斯燃燒機	RLG-360	15	2
20	隔風機	Φ250	1	2
21	瓦斯燃燒機(附二次燃燒室)	RLG-300	10	2
22	前置冷卻塔(附加水系統)	Φ2400	3	2
23	半乾式冷卻塔(附加藥系統)	Φ1500	2	2
24	旋風集塵器	Φ1200		2
25	隔風機	Φ250	1	2



表3-2 (續)

編號	設備名稱	規格	馬力(HP)	數量
26	螺運機	6"*13M	1	2
27	袋式集塵器	∅164*3000mmL*100T		2
28	風機	600mmAq140CMM	40	2
29	隔風機	Φ250	1	2
30	螺運機	12"*4.1M	2	2
31	螺旋攪拌機(附噴嘴)	12"*8M	5	2
32	皮輸機	600W*8ML	3	2
33	出料加水系統	附流量控制	5	2
34	空氣壓縮機	附冷凍乾燥機	50	2
合計馬力			915 HP	

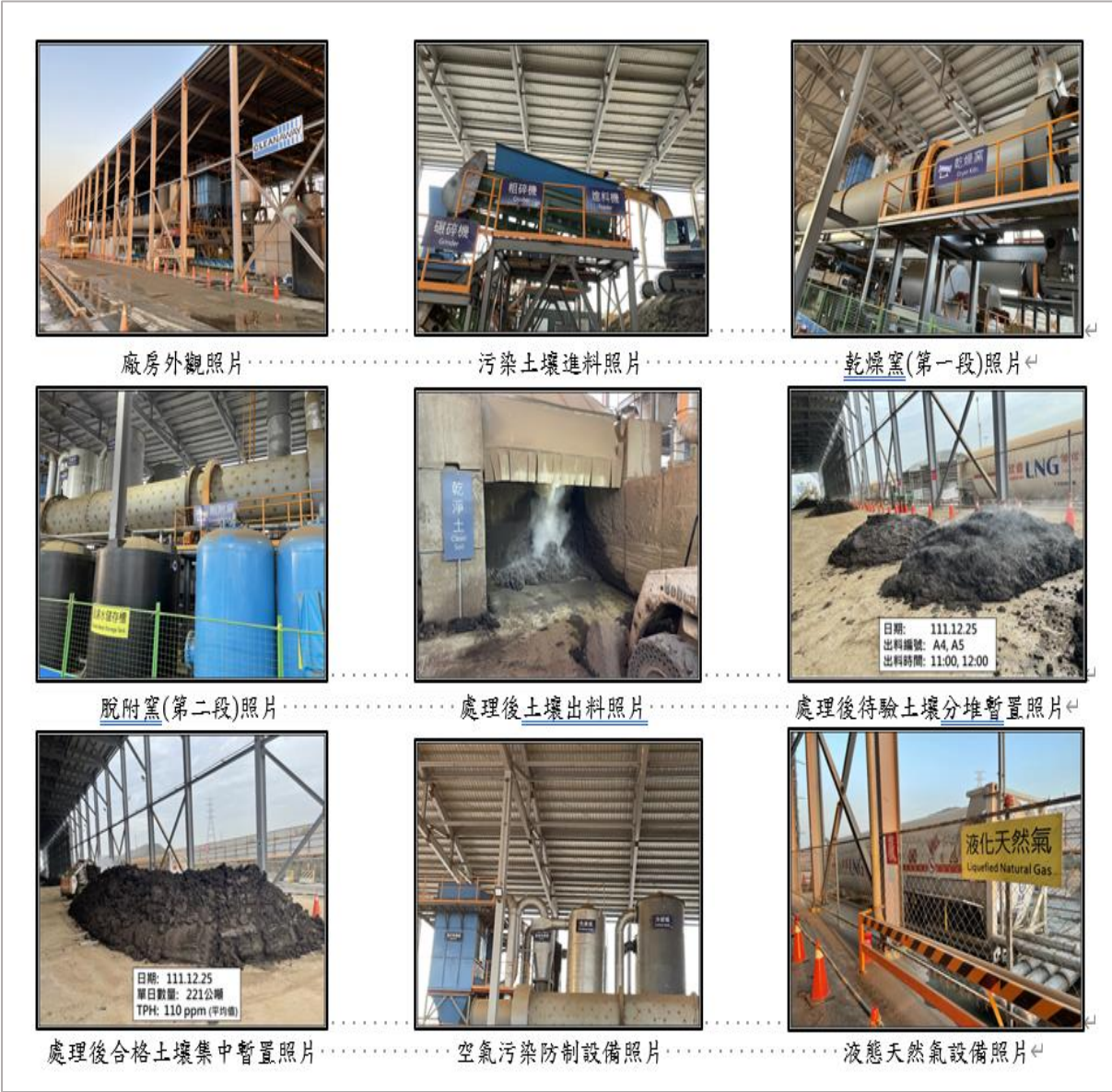


圖3-15 現場設備現況



3.2.6. 西區熱脫附系統(1-2區及2-2部分)(第二年)

本大型場址在2023年9月開始執行第三階段整治工作，將石化污染場址原有整治的分區(如圖2-6所示)之1-2區及2-2(部分)區重新劃分為西區(如圖2-7所示)，由裕山環境工程公司負責，西區污染土壤的熱處理係使用多螺旋式熱脫附系統，為間接加熱之型式，設計理念為燃燒氣體不與脫附之油氣及水氣接觸混合，降低二次燃燒室欲破壞處理之廢氣量及過剩空氣之空污防制氣體量。

該熱脫附裝置係利用熱能將受污染土壤中之油氣脫附成氣態，將脫附而出之氣體(油氣)送至二次燃燒室，分解為二氧化碳及水，再將分解所生成之氣體送至高溫觸媒陶瓷集塵器處理，使排放氣體濃度符合法規標準。可有效處理污染物為半揮發性有機物(SVOCs)、多氯聯苯或總石油碳氫化合物等環境部公告之土壤污染管制標準中「有機化合物」所列21項管制物質之污染土壤。

本區使用2套熱處理設備，其設計原理類似3.2.2節及3.2.3節所述，配合大型場址整治進度採24小時連續操作，每套設備每日處理量為200噸，每日總處理量約為400噸(實際操作依現場狀況而定)。熱脫附設備主要單元分為多螺旋式熱脫附爐、二次燃燒室、高溫觸媒陶瓷集塵器等，其處理流程如圖3-16所示。

1-2區熱脫附設備目前已建置完成，開始進行單機測試以求最佳操作參數，經試燒許可函文核定，正式執行入料作業如圖3-17所示；另2-2熱脫附設備目前建置中，如圖3-18所呈現。

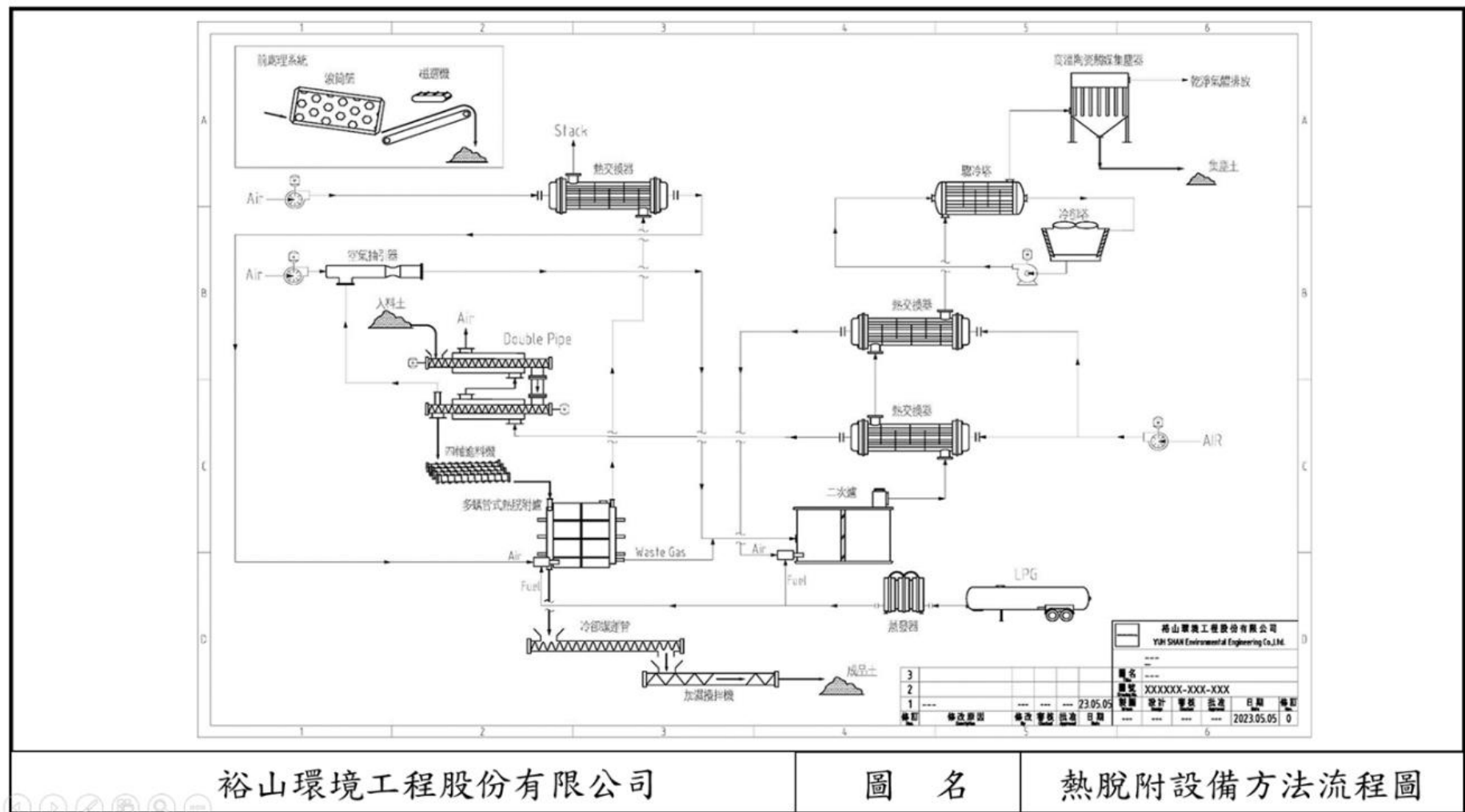


圖3-16 西區熱脫附處理流程圖



	
熱脫附現場概況	熱脫附槽車進場
	
污染土進場	污染土進場
	
熱脫附出料防塵區設置	熱脫附出料防塵區設置
	
熱脫附前處理設備測試完成	熱脫附前處理設備測試完成

圖3-17 西區1-2熱脫附作業操作照片



	
熱脫附現場建置概況	熱脫附現場建置概況
	
熱脫附主爐、二次爐及驟冷塔	熱脫附主爐、二次爐及驟冷塔
	
熱脫附主爐全貌	熱脫附主爐全貌

圖3-18 西區2-2熱脫附作業設備建置照片



3.2.7 北二區熱脫附系統(第二年)

本大型場址在執行第三階段整治工作上，將石化污染場址原有整治的分區(如圖2-6所示)之5-1區、5-2區及6-2(部分)區重新劃分為北二區(如圖2-7所示)，由可寧衛股份有限公司與森品環境科技股份有限公司合作，於現場設置熱處理廠，採用熱脫附法處理受油品污染土壤。本熱脫附處理系統係由兩家公司共同研究開發，採用國內自製的設備，可應用於含有揮發性污染物的土壤。

1. 處理標的與標準

本案熱脫附的對象是污染土壤，土壤污染物主要為 TPH 及苯、甲苯、乙苯、二甲苯(BTEX)，其中 TPH_d 較 BTEX 不易揮發，易殘留於土壤中，是限制因子，故本案熱脫附標的污染物設定為 TPH。經檢測本案送至熱脫附廠污染土壤中的 TPH 濃度介於 1,865-10,500 mg/kg (平均值為 3,632 mg/kg)，處理後的土壤須符合 TPH<800 mg/kg 的標準，方能於現地回填。

2. 流程說明

應本案需求，現場設置雙線(A線及B線)4套土壤熱脫附系統，每套設計處理量為 8 噸/小時，合計兩線4套處理量為 32 噸/小時，每線2套脫附爐共用1套進料系統及1套空氣污染防制設備；兩線共用1套水浴脫水出料系統(撈砂水車+脫水篩)，最後兩線由單一煙囪排放氣體。窯體主要操作參數詳表3-3，系統簡述如下：

(1) 熱脫附主流程

本系統採用旋轉窯(Rotary kiln)進行含 TPH 的污染土壤加熱，脫附爐設計溫度 650–1,050°C，出口溫度為 450°C，以達到將污染土壤中的油品由液態強制揮發成氣態，達到與土壤介質分離之效果，功能如下：

- A. 使用潔淨天然氣燃料提供熱源，減少二次污染。
- B. 採直接加熱，窯內土壤受熱面積大且均勻，脫附效果佳。
- C. 操作溫度適中，降低能源損耗。
- D. 雙線4爐連續式處理，可單獨或同時運作，增加稼動率。
- E. 操作彈性大，可調整轉速與停留時間，確保處理品質。

(2) 熱氧化次流程

本系統設置二次燃燒室，使氣化之油品於高溫及富氧環境下進行熱氧化，達到有機氣體完全分解成安定無害之二氧化碳及水，功能如下：



- A. 使用潔淨天然氣燃料提供熱源，減少二次污染。
- B. 高溫(850~1,100℃)完全熱氧化 VOCs 及 SVOCs 及其他氣體。
- C. 足夠之停留時間使反應完全。
- D. 採密閉蓄熱結構，節能及低熱損。

表3-3. 熱脫附窯體操作參數表(北二區)

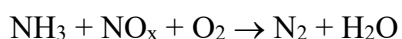
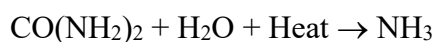
旋轉窯 (4套)
長度 = 17.0 m
外徑 = 1.93 m
內徑 = 1.78 m
斜度 = 0.030
轉速 = 10.6 rpm
風速 = 0.35 m/s
出口溫度 = 450 °C
停留時間 = 45min

(3) 空污防制次流程

經熱氧化處理後之排氣中，因仍含有少量衍生之硫氧化物(SO_x)及氮氧化物(NO_x)與粒狀污染物，因此須再進行後續之脫硫、脫硝及除塵等空污防制，方可將潔淨氣體排放至大氣，整體系統採負壓密閉收集，可達完全處理無逸散之虞。

利用成熟之排煙脫硫技術(Flue Gas Desulfurization, FGD)進行脫硫(DeSO_x)處理。硫氧化物的排煙脫硫(FGD)是指注入一種吸附劑，如消石灰 Ca(OH)₂乳液，以噴霧方式注入，使之與煙氣中的硫氧化物廣泛接觸並吸附之，以達到去除的目的。

利用最佳可行之非觸媒脫硝技術(SNCR)進行脫硝(DeNO_x)處理。氮氧化物的選擇性非觸媒還原(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)是指無觸媒的作用下，注入一種含氨基的還原劑，如氨(NH₃)或尿素(CO(NH₂)₂)水溶液，在適合脫硝反應的溫度範圍內(760~1,090℃)，將煙氣中的氮氧化物還原為無害的 N₂及 H₂O，反應式如下：





利用最佳可行之除塵過濾脈動式袋濾機進行除塵處理。排氣可符合現行法規標準無虞。

(4) 防止出料粉塵增設加濕系統

土壤出料溫度約200°C，直接出料若無妥善加濕處理，將會有明顯粉塵逸散問題，本案採用水浴加濕，再搭配水車撈砂及脫水篩脫水，可改善粉塵逸散問題，且出料成品易於後續搬運堆置。

3. 處理量能

本系統含雙線4套獨立熱脫附爐，每套熱脫附爐設計處理量為8公噸/小時，採全時段24小時連續操作，4套設備總處理量為768公噸/日，相關計算如下：

$$4\text{套} \times 8\text{公噸/小時/套} \times 24\text{小時/日} = 768\text{公噸/日}$$

4. 空間配置

本熱脫附系統佔地80m × 40m，空間配置主要有土壤熱脫附系統(流程如圖3-19所示)及空氣污染防治設備(如圖3-20)，所有設備及物料皆設置於棚架內，故可全天候(晴雨)暨全時段(日夜)操作，現場熱脫附設備整體實體如圖3-21，熱脫附出料單元如圖3-22。

5. 設備規格

本熱脫附系統主要設備規格及所需動力詳表3-4，其中除出料裝置(撈砂水車+脫水篩)及尾氣排放管道為共用煙囪以外，其餘設備分為雙線，每線配有1套進料系統、2套熱脫附爐及1套空氣污染防治設備，熱源係採用天然氣，天然氣容器及相關設備基於法令安全規定須置於棚架外側，於長時間高強度作業時，可全天候全時段運轉。

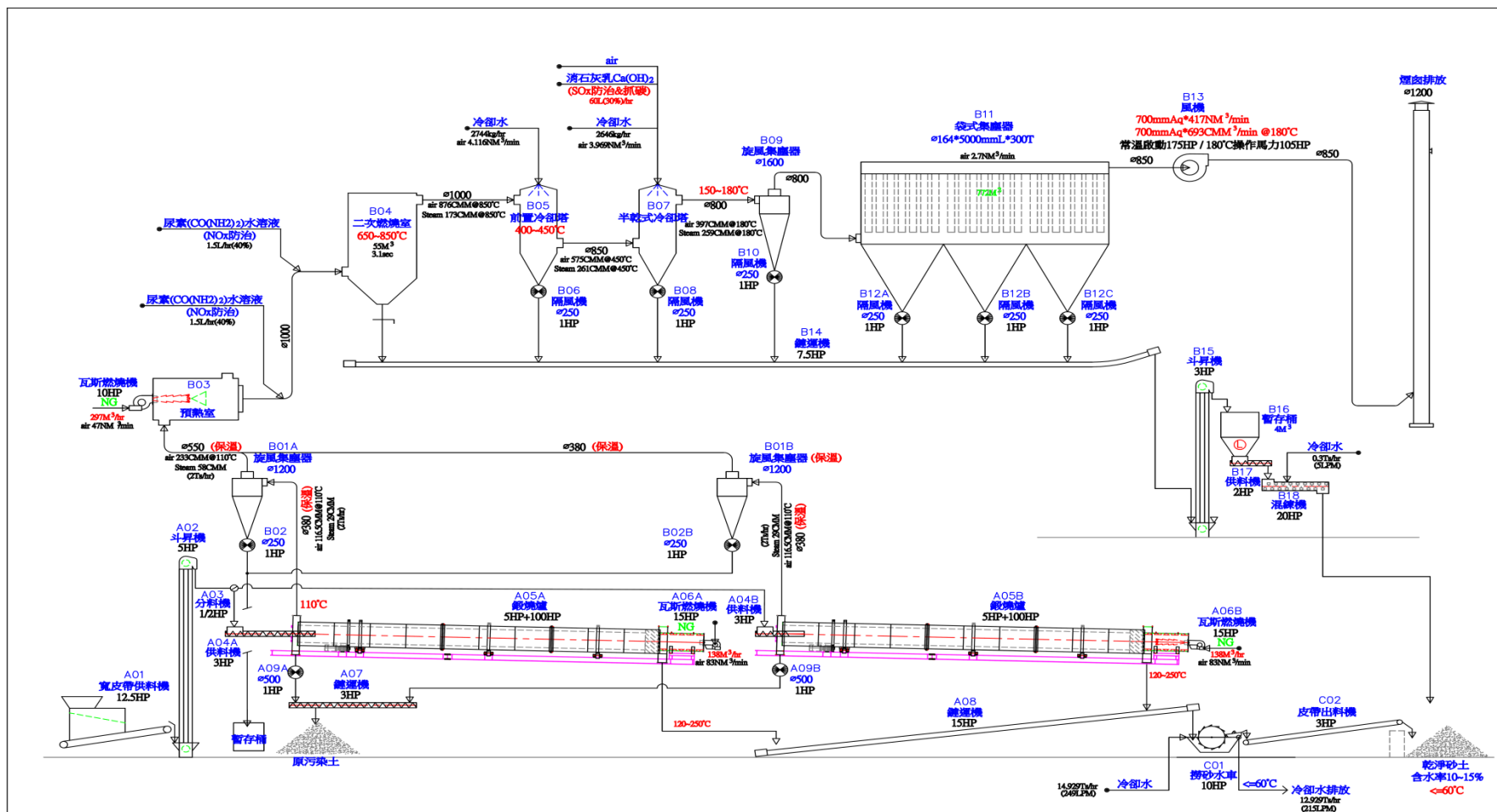


圖3-19. 土壤熱脫附系統流程圖(北二區)



圖3-20. 空氣污染防治設備照片



圖3-21. 現場熱脫附設備實體照片



圖3-22. 熱脫附出料單元



表3-4. 熱脫附設備規格及動力表(北二區)

編號	設備名稱	規格	馬力(HP)	數量	Total
A01	進料斗	1000W	12.5	2	25.0
A02	斗昇機	DD2519	5	2	10.0
A03	供料機	12"	2	4	8.0
A04	脫附爐	Φ1930*25ML	90	4	360.0
A05	瓦斯燃燒機(附燃燒室)	RLG-200	5	4	20.0
A06	隔風機	Φ250	1	4	4.0
A07	螺運機	12"	2	2	4.0
B03	瓦斯燃燒機(附預熱室)	RLG-360	15	2	30.0
B04	二次燃燒室	54M3	5	2	10.0
B04'	二次燃燒室		5	2	10.0
B05	前置冷卻塔(附加水系統)	Φ2400	2	2	4.0
B06	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B07	半乾式冷卻塔(附加藥系統)	Φ2400	2	2	4.0
B08	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B09	旋風集塵器	Φ1600	1	2	2.0
B10	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B11	袋式集塵器	Ø164*5000mmL*200T	1	6	6.0
B12A	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B12B	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B12C	隔風機	Φ250	1	2	2.0
B13	風機	700mmAq*417NM3 /min	175	2	350.0
B14	鏈運機	FK320	7.5	2	15.0
B15	混練機	單軸式	20	2	40.0
C01	水車撈砂機		10	1	10.0
C02	脫水篩		10	1	10.0
C03	空氣壓縮機	附冷凍乾燥機	110	2	220.0
C04	脫水篩輸送帶		3	1	3.0
C05	出料輸送帶		5	1	5.0
C06	B 線抽砂機		60	1	60.0
C07	排水泵浦		15	1	15.0
C08	進水泵浦		15	1	15.0
合計馬力 HP：					1,252.0



3.2.8 處理效能之量化查核指標

本大型場址在整治架構規劃上，將土壤整治工作透過現場開挖篩分，視各分區污染情況及土壤質地，分別採熱脫附、土壤清洗及土壤離場或其他可行之新穎工法進行整治工作；其餘無法進行開挖之區域則改採現地工法執行，對於採用熱脫附法之土壤，處理效能之量化查核指標，第一階段整治時(3-1區、3-2區、3-3區)針對污染土壤其高溫熱脫附處理預估月處理量 6600 m^3 ，進行污染土壤其低溫熱脫附月處理量 $7,200\text{ m}^3$ ，處理效能以處理後土壤現場批次驗證達到 TPH 低於 1000 mg/kg 為原則。未符合標準將進行重工或使用替代整治工法。



3.3 實驗品保/品管

(1) TPH 檢量線製備

TPH 標準混合液(C₈~C₄₀) 1 mL (Supelco, USA) 中每種化合物之濃度皆為500 mg/L。將500 mg/L 之標準液以二氯甲烷稀釋成2.5 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、25 mg/L、50 mg/L 及100 mg/L 七種濃度，儲存於4 °C 的冰箱中，待測時自冰箱中取出，以 GC/MS 進行定性及定量分析。將 GC-MS 分析所得 TPH 在各濃度之波峰豐度(abundance)與其對應濃度建立標準檢量線，所得之決定係數(coefficient of determination) R²值需要大於0.995。

(2) 方法偵測極限

首先以實驗室標準品製作標準濃度檢量線，之後配置七個標準品，經過完整分析步驟，將此分析值經過運算，可得到標準偏差(standard deviation, SD)，3.14倍標準差即為此研究之初步方法偵測極限。確認 MDL 之計算為將各個最低濃度之標準品進行第二次分析，計算其變異度(S²)，與前次分析之 S²值比較，將較大值記為 S_A²為分子，較小值為 S_B²，若 S_A²/S_B² < 3.05，則利用下述公式(1)計算共同標準偏差(Pooled standard deviation, Spooled)。最後以公式(2)將 Spooled 之值代入，即可求出 MDL。

$$S_{pooled} = \left[\frac{6S_A^2 + 6S_B^2}{12} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$MDL = 2.681 \times S_{pooled} \quad (2)$$

(3) 精密度(Precision)

精密度為一批次重複分析所得測量值之間的差異性，一般而言會重複分析相同濃度的標準溶液七次，計算所得結果的平均值與標準偏差，再將標準偏差值除以平均值，所得之值稱為相對標準偏差(RSD)，以此表示分析系統的精密度，其值必須低於25%。

$$\text{相對標準偏差(RSD, \%)} = (\text{標準偏差}/\text{平均值}) \times 100\%$$

本研究分析校正曲線最低濃度七次，將所得結果依照上式計算本方法之精密度。

(4) 準確度(Accuracy)

為一批次所得之分析平均值與真值的差異程度，以百分比表示，需低於30%，計算公式如下：

$$\text{準確度(Accuracy)} = | \text{分析平均濃度} - \text{配製理論濃度} | / \text{配製理論濃度} \times 100\%$$

本研究取校正曲線的最低濃度並分析七次，並將所得結果依照上式計算之。



3.4 評估離地熱處理技術的影響參數

本計畫目的為配合國內大型石化場址整治進行，將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理石化污染土壤，評析熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，在不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下對污染土壤之總石油碳氫化合物(Total petroleum hydrocarbon, TPH)移除效能。

有機污染物在土壤中的去除過程主要是物理蒸發，脫附分為兩個階段，首先是土壤顆粒表面的快速蒸發，第二階段蒸發受到顆粒內部擴散的限制，因此本計畫執行中需評估下列各項影響因子以進行必要之操作參數調整。影響因子須列入考量包括以下各項：

- (1) 評估土壤性質：砂土土質疏鬆，對液體物質(NAPL)的吸附力及保水能力弱，受熱易均勻，故易於熱脫附。粘土：顆粒細，性質與砂土正好相反，不易熱脫附。
- (2) 土壤含水率：水分受熱揮發會消耗大量的熱量，土壤含水率將直接影響到處理運行成本，高粘土含量或濕度會增加處理費用，因此對污染土壤的含水率有著嚴格的要求，國外相關工程統計數據顯示，土壤含水率在5-35%間，所需熱量約在117-286 kcal/kg，為保證熱脫附的效能，進料土壤的含水率宜低於20%。
- (3) 粒徑分布：如果超過50%的土壤粒徑小於200目(0.0750mm 以下)，細顆粒土壤可能會隨氣流排出，導致氣體處理系統超載，因此最大土壤粒徑不應超過5cm。
- (4) 污染物濃度：土壤中有機污染物混合物蒸發速率比純物質的蒸發速率小(如在同等條件下混合物中 pyrene 的蒸發速率比純 pyrene 的蒸發速率小5倍)，有機污染物濃度高會增加土壤熱值，可能會導致高溫，損害熱脫附設備，甚至發生燃燒、爆炸，因此尾氣中有機物濃度要低於爆炸下限25%，有機物含量高於1%-3% 的土壤不適用於直接熱脫附系統，可採用間接熱脫附處理。
- (5) 沸點：一般情況下直接熱脫附處理土壤的溫度範圍為150-650°C，間接熱脫附處理土壤溫度為120-530°C。
- (6) 二次公害預防措施：針對土壤整治工程的噪音和揚塵、粉塵污染等新污染源控制方案。



3.5 評估離地熱處理技術的經濟及碳排放參數

本計畫目的為配合國內大型石化場址整治，將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理石化污染土壤，評析熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，在不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下對污染土壤之總石油碳氫化合物(TPH)移除效能，除技術效能外亦須評估下列各項以極佳化技術：

(1) 經濟參數

- A. 去化污染土壤的體積，對應設施建置及操作成本。
- B. 大型場址中多元化污染土壤及污染物特性與熱脫附技術的相宜性。
- C. 熱脫附設備的設計處理能力。

(2) 操作及維護費用

- A. 整個熱處理工程的設計處理能力。
- B. 預處理後污染土壤的含水率。
- C. 燃料類型、土壤性質、污染物濃度等。

(3) 碳排放資訊: 針對本計畫選擇之兩種熱處理設施，熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，將伴隨操作時程，蒐集碳排放資訊，以供國內持續推動綠色及永續整治之參考。



3.6 進度及預期完成之工作項目

本計畫研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)如表3-1所示，第一年完成熱增強型土壤氣體抽除技術評析，在執行期間共進行三批次污染土壤處理，每次約1000公噸，除進行 TPH 移除效能分析，並於操作期間進行環境監測預防二次公害。同時完成不同整治區熱脫附設備建置，進行熱處理操作參數調整，熱處理極佳化測試，評估離地熱處理技術的影響參數，針對各整治區不同熱脫附設備之污染土壤處理前後污染物移除評析，並進行熱處理設施溫室氣體排放計算。

截至第二年期中期報告提送為止，完成第三階段整治工區，包括西區、北一區及北二區使用熱處理之資料，針對各整治區不同熱脫附設備之污染土壤處理前後污染物移除效能進行評析。



表3-5 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目 \ 月	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	備註
第1年模場試驗													
設備建置													
汽油污染土壤採樣分析													
航空燃油污染土壤採樣分析													
柴油污染土壤採樣分析													
熱處理操作參數調整													
熱處理極佳化測試													
熱處理效能分析													
節能減廢措施評估													
第2年模場試驗													
柴油污染土壤採樣分析													
柴油污染土壤熱處理效能評析													
燃料油及重油污染土壤採樣分析													
燃料油及重油污染土壤熱處理效能評析													
混合型污染土壤熱處理效能評析													
節能減廢及碳排放計算													
熱處理設施經濟參數、適用性及限制性綜合評析													
成果報告			◎			◎			◎			◎	
工作進度估計百分比 (累積數)	5%	10%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%	
預定查核點	第一 年期 中	(1) 完成熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)設備建置 (2) 溶劑、汽油污染土壤處理效能分析 (3) 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)操作參數調整及極佳化測試											
	第一 年期 末	(1) 熱處理設備建置 (2) 柴油污染土壤熱處理效能分析。 (3) 熱處理操作參數調整 (4) 節能減廢措施評估及熱處理極佳化測試 (5) 評估離地熱處理技術的影響參數											



	第 二 年 期 中	(1) 柴油污染土壤熱處理。 (2) 燃料油污染土壤熱處理。 (3) 混合油品污染土壤熱處理。 (4) 調整操作參數。
	第 二 年 期 末	(1) 節能減廢及碳排放評估 (2) 評估離地熱處理技術的經濟參數 (3) 熱處理技術之最佳化及綜合評析 (4) 完備發展技術之適用性及限制性 (5) 熱處理技術及設備輸出可行性評析
說明： 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。 4、以12個月作規劃，其中期中報告書提送要件需達計畫執行進度50%以上，期末報告書需於計畫結束前1.5個月提送。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。		



第四章、結果與討論

本計畫研究目的為將國內較少使用之熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法應用於離地處理大型石化污染場址土壤，經由採用離地之熱增強型土壤氣體抽除技術及熱脫附法，對不同油品、不同土壤質地、不同污染程度、及不同風化程度條件下，對污染土壤之總石油碳氫化合物(TPH)移除效能評析。

目前已完成二年期工作，包括熱增強型土壤氣體抽除設備及熱脫附設備建置，並收集熱增強型土壤氣體抽除設備處理污染土壤批次結果及成效評析，同時針對位於各整治區之不同熱脫附設備之污染土壤處理前後污染物移除進行整治成效評析，熱處理設施的溫室氣體排放計算，各項工作執行之成果如下各節詳述。

4.1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)效能評析(第一年)

第一年熱增強型土壤氣體抽除技術在執行期間，共進行三批次污染土壤處理，分別為 A、B 及 C 共三堆污染土壤，每次約1000公噸，以氣相層析儀/火焰離子化偵測器(gas chromatograph/flame ionization detector, GC/FID)進行 TPH 移除效能分析，單一批次污染土壤共採樣6個點位，三批次共計18組污染土壤樣品，進行污染物移除成效分析。

由表4-1結果可以觀察出，熱增強型土壤氣體抽除設備處理前之三批次污染土堆汽油類總石油碳氫化合物 TPH_g ($\text{C}_6\text{-C}_9$)濃度範圍介於2.35 mg/kg 至182 mg/kg，三批次污染土壤處理後 TPH_g 濃度為低於偵測極限(N.D.)至12.5 mg/kg，汽油類總石油碳氫化合物 TPH_g ($\text{C}_6\text{-C}_9$)之移除率介於90-92%，由於本場址受污染多年，汽油及航空燃油其組成成分中高揮發性化合物可能經由多年風化作用而減少，三批次污染土壤雖然其起始 TPH_g 濃度相對低，但仍可觀察出熱增強型土壤氣體抽除技術對於汽油類總石油碳氫化合物 TPH_g ($\text{C}_6\text{-C}_9$)之移除有顯著之成效。

熱增強型土壤氣體抽除設備處理前之三批次污染土壤之柴油類總石油碳氫化合物 TPH_d ($\text{C}_{10}\text{-C}_{40}$)濃度範圍為275 mg/kg 至3370 mg/kg，TEVET 處理後 TPH_d 分析濃度為33.3 mg/kg 至4420 mg/kg， TPH_d 移除率介於7%至57%。

表4-1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)TPH 移除率

Soil PILE A		Pre-treatment							Post-treatment							Pre- and Post-Treatment Comparison
Sample		SA-01	SA-02	SA-03	SA-04	SA-05	SA-06	Average Concentration	PA-01	PA-02	PA-03	PA-04	PA-05	PA-06	Average Concentration	
檢測項目	單位															
C ₆ -C ₉	mg/kg(DW)	38.9	59.4	104	84.3	29.4	59.1	62.5	N.D.	6.07	6.89	7.13	4.71	N.D.	6.2	90%
C ₁₀ -C ₄₀	mg/kg(DW)	1,470	3,370	2,750	2,490	2,110	1,710	2,317	36.3	2,000	3,380	3,230	2,400	1,950	2,166	7%
Total TPH	mg/kg(DW)	1,510	3,420	2,850	2,570	2,140	1,770	2,377	38.5	2,010	3,390	3,230	2,400	1,950	2,170	9%
Soil PILE B		Pre-treatment							Post-treatment							Pre- and Post-Treatment Comparison
Sample		SB-01	SB-02	SB-03	SB-04	SB-05	SB-06	Average Concentration	PB-01	PB-02	PB-03	PB-04	PB-05	PB-06	Average Concentration	
檢測項目	單位															
C ₆ -C ₉	mg/kg(DW)	144	91.3	34.9	182	82.6	91.4	104.4	ND	12.50	9.63	8.11	ND	4.24	8.6	92%
C ₁₀ -C ₄₀	mg/kg(DW)	3,340	3,370	3,470	2,870	3,140	2,930	3,187	33.3	4,420	1,410	1,120	442	878	1,384	57%
Total TPH	mg/kg(DW)	3,480	3,460	3,510	3,050	3,220	3,020	3,290	35.5	4,430	1,620	1,130	444	882	1,424	57%
SOIL PILE C		Pre-treatment							Post-treatment							Pre- and Post-Treatment Comparison
Sample		SC-01	SC-02	SC-03	SC-04	SC-05	SC-06	Average Concentration	PC-01	PC-02	PC-03	PC-04	PC-05	PC-06	Average Concentration	
檢測項目	單位															
C ₆ -C ₉	mg/kg(DW)	146	5.78	4.58	2.35	5.79	6.06	28.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<2.2	92%
C ₁₀ -C ₄₀	mg/kg(DW)	2,410	565	275	375	463	388	746	715	1,380	1,010	270	743	709	805	Not Available
Total TPH	mg/kg(DW)	2,560	571	279	378	468	382	773	717	1,380	1,020	272	745	711	808	Not Available

DW: dry weight basis

MDL: For C₆-C₉: 2.22 mg/kg; For C₁₀-C₄₀: 8.52 mg/kg



由三批次污染土壤分析中可觀察出，熱增強型土壤氣體抽除技術由於其升溫條件，對於總石油碳氫化合物 TPH_d ($\text{C}_{10}\text{-C}_{40}$)之移除率有限，系統升溫之溫度未能氣化高碳數污染物，此受到污染物其沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，其中部份污染土壤樣品於處理前後，對於總石油碳氫化合物 TPH_d ($\text{C}_{10}\text{-C}_{40}$)分析數據反而沒有濃度降低之現象，TEVET 使用受限於場址污染物其沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，部份污染土壤樣品於處理前後，由於批次處理土壤中污染分布之不均質性及多點採樣點不同，對於移除成效較差或污染分布其歧異大區塊，會造成分析數據有提升之現象，整體而言 TEVET 對於總石油碳氫化合物 TPH_d 移除效果不佳。可能為土壤中污染分布不均質造成採樣誤差，且殘留污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低所致。

為提升熱增強型土壤氣體抽除設備處理之污染物移除率，在大型石化場址處理大量污染土壤情境下，由於污染物樣態多，且污染濃度分佈差異大，因此前端之土壤篩分工作格外重要，特別是在特定區塊中，對污染土壤係源自何種油品污染，其可能濃度範圍、碳數分布範圍，均須要有基本之了解，所處理之污染土壤儘可能配置以 TPH_g 污染型態為主，以 C_{10} 以下揮發程度較高之污染土壤為處理對象，以降低批次間之處理成效差異，對於未達處理成效及法規標準具殘留態 TPH 污染物之批次土壤，可再搭配生物復育以提高成效。



4.2 熱脫附法效能分析

4.2.1 多螺管式熱脫附系統效能評析(第一年)

有關場址熱脫附法效能分析，收集各整治區域不同熱處理系統所處理污染土壤數據，其中3-1區、3-2區及3-3區三個區域污染土壤，由座落在不同工區之多螺管式熱脫附系統設備進行處理。其中3-1區污染土壤主要由位於6-2區離地高溫熱脫附系統熱脫處理(屬不同熱處理系統，結果顯示於4.2.2節)，3-1區部分污染土壤由6-2區多螺管式熱脫附系統設備進行處理，3-2區污染土壤移至位於1-2區之多螺管式熱脫附設備處理，3-3區污染土壤移至位於5-2區之多螺管式熱脫附設備處理，針對已處理約23548公噸之污染土壤，以氣相層析儀/火焰離子化偵測器 (gas chromatograph/flame ionization detector, GC/FID) 進行數據分析共152組，以下針對各別區域說明。

場址3-1區域污染土壤約8394公噸由位於6-2區之多螺管式熱脫附系統處理，共計65批次，分析樣品編號為1至65，由表4-2中可觀察出熱脫附設備處理前總石油碳氫化合物(TPH)濃度範圍為2089 mg/kg 至5783 mg/kg，處理後 TPH 濃度範圍介於83 mg/kg 至438 mg/kg，TPH 移除率為84.1% 至98.6%，針對65批次8394公噸污染土壤，其處理效能符合法規及整治需求。



表4-2 場址3-1區污染土壤熱處理批次處理結果

3-1 區污染土壤 (位於 6-2 區之多螺旋式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soil (mg/kg)	Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
1	37	3,826	438	88.6
2	88	4,575	396	91.3
3	125	4,268	245	94.3
4	74	4,753	378	92.0
5	61	5,637	275	95.1
6	77	5,637	276	95.1
7	94	5,209	392	92.5
8	60	5,096	286	94.4
9	111	5,384	356	93.4
10	103	4,715	227	95.2
11	107	5,096	272	94.7
12	117	4,654	332	92.9
13	110	4,201	202	95.2
14	128	4,668	323	93.1
15	148	4,918	291	94.1
16	130	4,664	261	94.4
17	142	4,958	387	92.2
18	151	4,362	213	95.1
19	143	3,816	204	94.6
20	106	4,019	367	90.9
21	132	3,506	253	92.8
22	133	4,231	372	91.2
23	147	5,351	270	94.9
24	123	5,783	83	98.6
25	147	3,172	366	88.5
26	153	4,721	275	94.2
27	150	5,012	292	94.2
28	160	3,763	328	91.3
29	139	3,026	177	94.2
30	178	4,837	289	94.0
31	130	5,438	240	95.6
32	174	3,057	273	91.1



表4-2 (續)

3-1 區污染土壤 (位於 6-2 區之多螺管式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soils (mg/kg)	Treated soils (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
33	188	5,022	309	93.9
34	201	4,524	303	93.3
35	175	3,458	235	93.2
36	207	5,163	317	93.9
37	209	4,006	313	92.2
38	220	3,219	358	88.9
39	199	4,991	302	93.9
40	201	5,022	277	94.5
41	88	2,968	256	91.4
42	201	3,788	293	92.3
43	132	4,961	167	96.6
44	190	2,731	216	92.1
45	222	4,564	254	94.4
46	210	3,011	226	92.5
47	122	3,133	255	91.9
48	208	4,524	341	92.5
49	79	3,458	361	89.6
50	112	5,163	361	93.0
51	165	4,006	363	90.9
52	111	3,219	355	89.0
53	159	2,938	243	91.7
54	179	4,405	174	96.0
55	174	2,437	275	88.7
56	92	3,571	274	92.3
57	92	4,364	295	93.2
58	76	2,732	285	89.6
59	84	3,916	279	92.9
60	32	5,033	298	94.1
61	61	2,734	214	92.2
62	69	3,591	296	91.8
63	18	4,752	211	95.6
64	33	3,645	243	93.3
65	8	2,089	331	84.1



3-2區場址污染土壤約10388公噸，由位於1-2區之熱脫附設備處理，共計54批次，分析樣品編號為66至119。由表4-3中可觀察出熱脫附設備處理前總石油碳氫化合物TPH濃度範圍為3661 mg/kg 至6284 mg/kg，處理後總石油碳氫化合物(TPH)濃度範圍為3 mg/kg 至963 mg/kg，總石油碳氫化合物(TPH)移除率為73.7 % 至99.9 %。針對54批次10388公噸污染土壤其處理效能符合法規及整治需求。

表4-3 場址3-2區污染土壤熱處理批次處理結果

3-2 區污染土壤 (位於 1-2 區之多螺管式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soils (mg/kg)	Treated soils (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
66	77	4,550	376	91.7
67	106	4,652	599	87.1
68	117	3,705	382	89.7
69	101	4,509	377	91.6
70	105	5,522	730	86.8
71	111	3,661	963	73.7
72	205	4,626	185	96.0
73	59	4,763	180	96.2
74	88	5,562	60	98.9
75	62	4,920	9	99.8
76	60	4,513	181	96.0
77	140	4,551	7	99.8
78	158	4,697	42	99.1
79	221	5,895	123	97.9
80	214	5,894	27	99.5
81	188	5,010	40	99.2
82	166	4,859	392	91.9
83	51	5,001	3	99.9
84	118	5,703	58	99.0
85	113	5,667	16	99.7
86	91	5,712	10	99.8
87	26	5,007	25	99.5
88	83	5,118	10	99.8
89	289	5,603	246	95.6
90	182	5,034	259	94.9
91	272	4,982	258	94.8
92	317	5,621	233	95.9



表4-3 (續)

3-2 區污染土壤 (位於 1-2 區之多螺管式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soils (mg/kg)	Treated soils (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
93	289	5,852	524	91.0
94	227	5,082	405	92.0
95	212	5,425	196	96.4
96	240	5,931	280	95.3
97	284	5,164	515	90.0
98	284	5,060	575	88.6
99	300	5,245	432	91.8
100	284	5,210	316	93.9
101	241	5,100	294	94.2
102	294	6,284	561	91.1
103	259	5,801	722	87.6
104	248	5,815	821	85.9
105	230	5,110	68	98.7
106	192	5,694	34	99.4
107	197	5,893	19	99.7
108	68	5,065	55	98.9
109	236	6,006	79	98.7
110	243	5,709	226	96.0
111	305	5,928	290	95.1
112	326	5,796	161	97.2
113	317	5,566	266	95.2
114	236	5,553	268	95.2
115	310	4,638	283	93.9
116	315	4,673	449	90.4
117	313	5,419	584	89.2
118	197	5,340	441	91.7
119	23	4,471	247	94.5



場址3-3區域污染土壤約4766公噸，由位於5-2區熱脫附設備處理，共計33批次，分析樣品編號為120至152。由表4-4中可觀察出熱脫附設備處理前，污染土壤總石油碳氫化合物 TPH 濃度範圍為3410 mg/kg 至6820 mg/kg，處理後總石油碳氫化合物(TPH)濃度範圍為40 mg/kg 至695 mg/kg，總石油碳氫化合物(TPH)移除率為88.6 % 至99.4 %。

表4-4 場址3-3區污染土壤熱處理批次處理結果(位於5-2區熱脫附設備處理)

3-3 區污染土壤 (位於 5-2 區之多螺管式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soils (mg/kg)	Treated soils (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
120	90	4,030	430	89.3
121	141	5,230	260	95.0
122	202	4,870	555	88.6
123	162	6,310	695	89.0
124	72	6,820	397	94.2
125	93	5,770	309	94.7
126	102	4,790	169	96.5
127	165	3,550	223	93.7
128	186	3,650	338	90.8
129	91	4,130	168	95.9
130	120	5,550	267	95.2
131	93	3,890	275	92.9
132	120	6,770	214	96.8
133	113	5,100	286	94.4
134	114	3,410	355	89.6
135	108	5,180	195	96.2
136	60	3,570	175	95.1
137	105	5,610	270	95.2
138	130	5,300	214	96.0
139	186	4,230	345	91.8
140	173	4,640	86	98.2
141	194	6,510	40	99.4
142	198	5,650	201	96.5
143	205	6,050	247	95.9
144	204	3,770	137	96.4
145	206	5,020	129	97.4



表4-4 (續)

3-3 區污染土壤 (位於 5-2 區之多螺管式熱脫附設備處理)				
Sample	Processing volume (tonne)	Contaminated soils (mg/kg)	Treated soils (mg/kg)	TPH Removal (%)
		GC/FID	GC/FID	
146	125	6,070	240	96.1
147	113	6,300	243	96.2
148	206	5,400	100	98.2
149	194	4,850	118	97.6
150	200	4,730	107	97.7
151	202	5,950	78	98.7
152	94	4,630	119	97.4

綜合三個區域污染土壤，在三套位於不同區域之多螺管式熱脫附爐共處理23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物 TPH 濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，整體處理效能顯示除3-2區單一批次 TPH 移除率為73.7%外，TPH 移除率介於84.1%至99.9%，由於不同整治區域其土壤質地不同，土壤受污染時間年代及次數不一，污染物種類及污染程度不同，有些批次污染土壤係經過生物復育工法或水洗工法施作後，無法達到污染物移除，而改以熱處理方式進行最終處理，因此污染土壤異質性甚高，所以會造成在連續操作下，熱處理出土之 TPH 濃度差異，但整體而言，熱處理後之土壤均符合操作單位(整治團隊)及驗證單位(高雄市工務局)認定合格土壤之基本法規需求(TPH 濃度需小於1000 mg/kg)，多螺管式熱脫附系統設備符合大型場址整治需求。



4.2.2 3-1區離地高溫熱脫附系統效能評析(第一年)

有關3-1區污染土壤熱處理改善期間為2022年3月至2022年9月，由位於6-2區之離地高溫熱脫附系統進行污染土壤處理，污染土壤進料 TPH 濃度最高為 9,892 mg/kg，出料濃度介於113至197 mg/kg，平均每日操作量達115(B.M³)，整治期間以熱處理進行污染改善土壤數量為14,731 B.M³(自然方)，約為18413.75 L.M³之鬆方(Loose cubic meter, L.M³)，場址3-1區污染土壤熱處理批次處理結果如表4-5所示，整體處理效能符合預期。

表4-5 場址3-1區污染土壤熱處理批次處理結果(位於6-2區之熱脫附設備處理)

日期	進料濃度 (mg/kg)	出料濃度 (mg/kg)	改善數量 自然方(B.M ³)	燃料使用量 (度)
2022年3月	2,688-6,640	87-382	388	23,597
2022年4月	2,354-4,576	24-487	2,337	92,163
2022年5月	1,688-6,440	8-473	3,712	158,352
2022年6月	1,970-9,892	21-384	3,289	125,937
2022年7月	2,352-5,696	24-411	4,145	189,465
2022年8月	1,866-5,250	18-387	810	35,465
2022年9月	1,574	135	50	3,201
合計			14,731	628,179

註: 1. 普通土1m³自然方(Bank cubic meter, B.M³)經開挖後後約為1.25 m³之鬆方(Loose cubic meter, L.M³)運輸量，經滾壓壓實後約為 0.9 m³實方(Compact cubic meter, C.M³)。

2. 鬆方密度為1.51 ton/m³。



4.2.3 4-3區及4-4區熱脫附法處理高濃度污染物富集土壤效能評析(第一年)

4-3區及4-4區污染土壤經水洗處理過程後所衍生之污泥採用熱處理進行處理，濃縮污泥進料前外觀如圖4-1所示，原呈厚片狀，含水率介於19.1-22.2%，一旦經搬運擠壓後則呈團塊狀。此污泥經熱脫附處理後含水率降為0%，外觀如圖4-2所示，此乃因熱脫附屬高溫富氧環境，污泥呈紅棕色(三氧化二鐵)的散狀顆粒及粉末，出料時易揚起大量粉塵(來自屬細顆粒之粉黏土)，故操作時須加水保溼，以利環境控制及後續搬運。

加水保溼後之成品土壤，經檢測含水率介於17.4-21.8%，接近處理前的數值，其外觀如圖4-3所示，復呈團塊狀，惟顏色較深，此土壤經檢測確認合格後，運送至本案原開挖區回填。

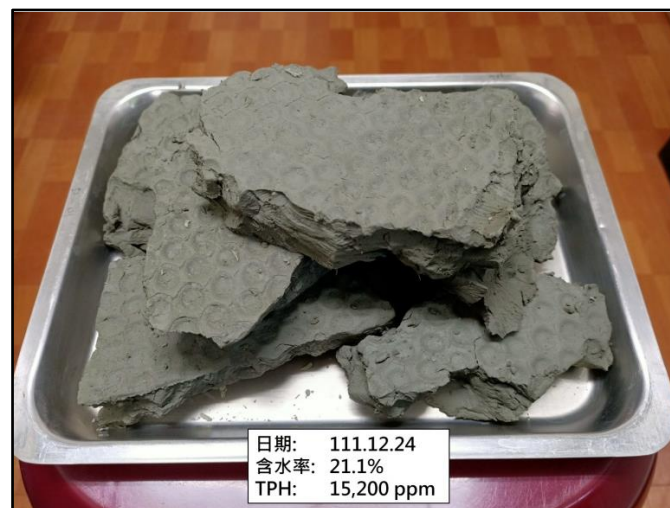


圖4-1. 熱脫附前污泥餅照片



圖4-2. 熱脫附後乾燥土壤照片



圖4-3. 熱脫附後土壤加水保溼照片

4-3及4-4區採水洗法處理含中低濃度TPH之粉黏土質土壤，水洗後之濃縮污泥其粒徑分布屬細粒徑，此類型濃縮污泥特性為進料時非常溼黏不易輸送，出料時則非常乾燥易引起大量揚塵，技術難度甚高，設備安裝及試車整改共歷時9個月，受限於專案完工期限，實際運作時間僅約70工作日(2022年12月至2023年2月)。

最初20日以單套運作，中間25日以雙套運作，最後25日仍以單套運作，處理量累計如圖4-4所示，全案累計處理濃縮污泥20,200公噸，每套平均處理量為10.5公噸/小時，略低於原設計之12公噸/小時。系統整體運作順暢，故障皆可在當日排除，開機率(有效運作)可達82.0%。

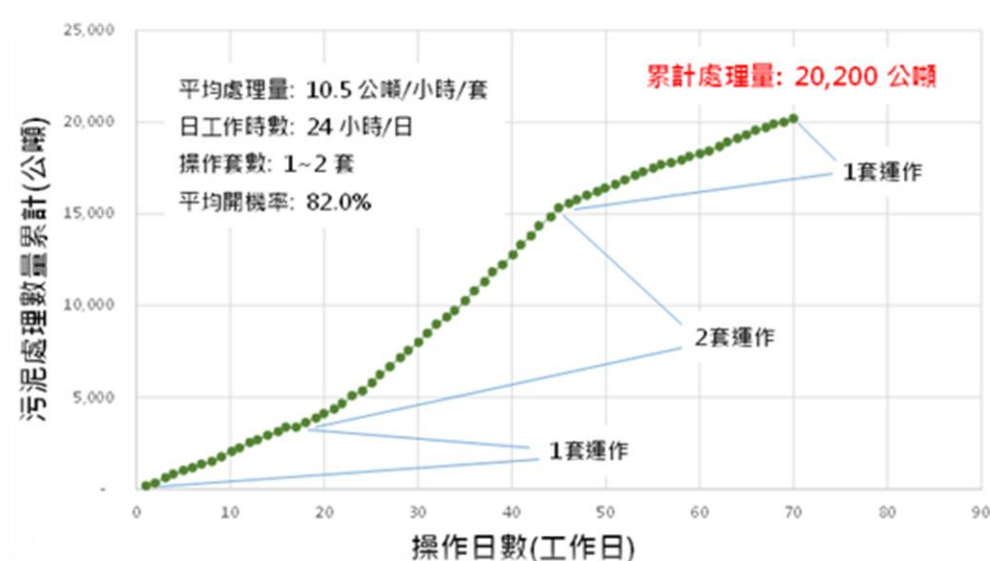


圖4-4. 熱脫附處理量累計圖



所處理污泥的進料及出料 TPH 濃度，每日皆有持續且系統性的檢測，操作期間各日平均值如圖4-5所示。進料濃度介於5,870 mg/kg 至36,800 mg/kg，平均值為14,700 mg/kg，典型的進料土壤其碳數分布如圖4-6所示，以 C_{12} – C_{22} 為主，屬柴油範圍油品。出料土壤每小時分堆檢測，合格者集中暫置，待次日過磅回填。

出料濃度則介於24–310 mg/kg，平均為82 mg/kg，典型的出料碳數分布如圖4-7所示，依此計算出 TPH 去除率達99.5 %以上。

本熱脫附系統之所以能有高去除率，主要因加熱方式採直接加熱，窯內土壤受熱面積大，加上窯體轉動，土壤在窯內均勻混合，故脫附效果極佳。運作初期(前5日)合格品(TPH<800 mg/kg)佔比僅約80%，經調整操作參數(溫度/轉速/抽氣量等)後，合格品佔比可達100%，能穩定產出高品質產品。

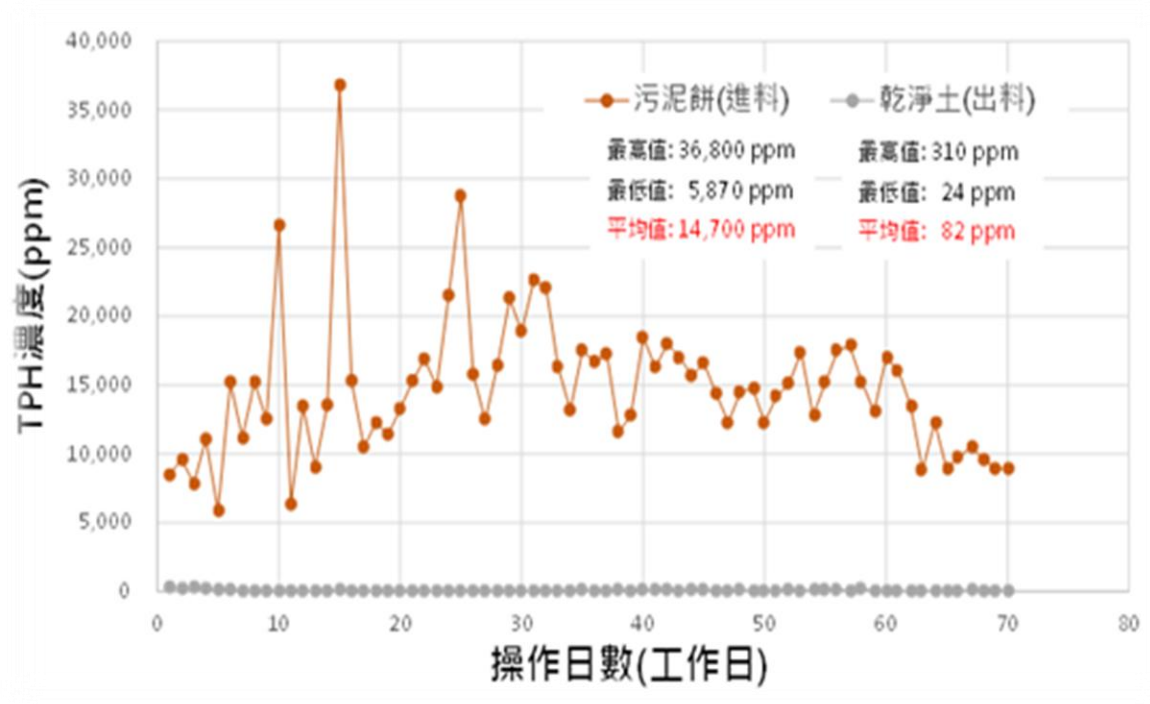


圖4-5. 熱脫附處理 TPH 濃度變化圖

Page 1 of 1

79

Page 1 of 1

80



4.2.4 多螺管式熱脫附系統處理西區污染土壤效能評析(第二年)

有關第二年場址熱脫附法之效能分析，配合大型場址啟動第三階段整治工程，本計畫自2023年11月至2024年9月執行期間，蒐集1-2區及2-2區域中(簡稱為西區)污染土壤熱處理各批次結果，西區污染土壤熱處理以多螺管式熱脫附系統設備進行，共處理約33096公噸之污染土壤，由於採24小時連續操作，每日操作會於污染土壤進樣及處理完成在不同時段採樣，以氣相層析儀/火焰離子化偵測器(GC/FID)進行分析，以下將針對熱處理效能1231批次數據進行逐月分析及說明。

2023年11月西區場址污染土壤約961公噸由多螺管式熱脫附系統處理，共計操作44批次，由表4-6中可觀察出熱脫附設備處理前污染土壤之 TPH 濃度範圍為4419 mg/kg 至 8328 mg/kg，處理後 TPH 濃度範圍介於149 mg/kg 至1628 mg/kg，總石油碳氫化合物 (TPH)移除率為87.5%至98.5%(最高及最低移除率以底線表示)，處理後 TPH 濃度不合格者移除率不納入採計，針對所有44批次961公噸污染土壤，有8批次處理後之土壤超過法規標準1000 mg/kg，未符合標準約占總處理數之18%，在表4-6中以陰影表示。處理後土壤 TPH 濃度最高可達1628 mg/kg，由於熱處理設施完成試車及符合排放許可後初始運行，在污染物移除效能上較未能符合預期，對於未符合法規及整治需求之批次土壤，分別以重工或其他工法進行後續處理。



表4-6 2023年11月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/11/21	64	5298	1502	71.65
2023/11/22	81	6644	152.5	97.70
		8328	149.3	98.21
2023/11/23	71	7285	1502	79.38
		6769	202.6	97.01
		6392	1163	81.81
2023/11/24	90	7222	187.9	97.40
		6078	211.7	96.52
		6543	188.1	97.13
2023/11/25	120	5877	209	96.44
		7222	725.3	89.96
		6380	1030	83.84
2023/11/26	113	7096	637.3	91.02
			577	91.87
			769.3	89.16
			715.3	89.92
			150.3	97.88
2023/11/27	128	7423	154	97.93
			150.5	97.97
			140.4	98.11
			150.7	97.97
		6895	101.9	98.52
			162.4	97.64
			722.8	89.52
			384.7	94.42
		6681	156	97.67
			171.7	97.43



表4-6 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/11/28	72	4419	128.3	97.10
			1077	75.62
			554.4	87.45
			1036	76.56
			433.7	90.19
2023/11/29	101	6568	237.7	96.38
			628.5	90.43
			1187	81.93
			1047	84.06
			716.5	89.09
		5952	208	96.50
2023/11/30	103	5286	1628	69.20
			378.4	92.84
			256.3	95.15
		7046	163.2	97.68
			149.1	97.88
			160	97.73



2023年12月場址西區域污染土壤約2472公噸，共計118批次，由表4-7中可觀察出熱脫附設備處理前污染土壤之總石油碳氫化合物濃度範圍為1527 mg/kg 至8341 mg/kg，處理後 TPH 濃度範圍介於125 mg/kg 至5425 mg/kg，其中12月11日該批次土壤，由於機械問題，完全未展現處理效能，12月13日有一批次土壤處理效能不佳，僅達33.2%TPH 移除率。

檢視12月操作成效，TPH 移除率為71.0%至98.9%，移除率最低批次其原始濃度為1527 mg/kg，移除率係採六次採樣移除率平均。針對118批次2472公噸污染土壤，有30批次處理後之土壤仍超過法規標準，在表4-7中以陰影表示，未符合標準批次約占總處理批次數之27%，處理後土壤 TPH 濃度最高達1628 mg/kg，西區污染土壤來自油槽區，由於油槽儲存油品、溶劑及原料油種類多元，加上過去數十年來並未針對油槽基座進行土壤調查及污染樣態了解，因此污染物其碳數分布範圍歧異度較大，對於未符合法規及整治需求之批次土壤，整治單位分別以重工方式或其他工法進行處理，以符合法規要求。



表4-7 2023年12月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/12/01	101	5424	180.4	96.67
			157.4	97.10
			155.6	97.13
		5449	176	96.75
			125.3	97.70
			135.6	97.51
			199.4	96.34
			525.4	90.36
2023/12/02	113	5550	152.4	97.25
			247.3	95.54
		5286	203.9	96.14
2023/12/03	116	5562	935.2	83.19
			744.2	86.62
			286.6	94.85
			446.3	91.98
			138.4	97.51
			63.22	98.86
2023/12/04	98	5009	152.4	96.96
			158.0	96.85
			192.3	96.16
2023/12/05	100	1527	526.7	65.51
			882.4	42.22
			659.9	56.79
			151.4	90.09
			288.4	81.12
			144.9	90.51
2023/12/06	131	8127	466.4	94.26
			478.9	94.11
			127.2	98.43
			197.1	97.57



表4-7 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/12/06	131	5122	544.3	89.37
			432.4	91.56
			184.3	96.40
2023/12/07	155	5110	161.77	96.83
			75.29	98.53
			241.7	95.27
			380.9	92.55
			417.3	91.83
		7511	837.2	88.85
			683.8	90.90
2023/12/08	85	5914	234.6	96.03
			150	97.46
			160.9	97.28
			282.6	95.22
2023/12/11	41	5399	5424	Not available
			336.9	93.76
2023/12/12	149	5110	172	96.63
			188.9	96.30
			129.3	97.47
			297.9	94.17
			251.7	95.08
		6128	325.6	94.69
			1527	75.08
			2759	54.97
2023/12/13	156	5977	1214	79.68
			1111	81.41
			1027	82.82
			1992	66.67
			917.6	84.65
		7008	4683	33.18
			2634	62.42
			182.9	97.39



表4-7 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/12/14	191	8341	962.9	88.46
			2093	74.91
			1892	77.32
			709	91.50
		5801	2370	59.16
			3262	43.77
			2646	54.39
			721.5	87.56
2023/12/15	145	5449	3073	43.60
			2219	59.28
			1175	78.43
			510.4	90.63
		5864	2646	54.88
			724.1	87.65
			1012	82.74
			197.5	96.63
2023/12/16	129	6556	1967	69.99
			841	87.17
			2294	65.00
		4934	1089	77.94
			881.2	82.14
			404.8	91.80
			490.2	90.06
2023/12/17	133	4846	874.9	81.95
			1666	65.63
			1389	71.34
			985.5	79.66
		5298	326.8	93.83
			380.9	92.81
			281.6	94.69
			202.4	96.18



表4-7 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2023/12/18	97	5110	368.3	92.79
			666.2	86.96
			1206	76.41
			319.3	93.75
		5122	272.8	94.68
			453.8	91.14
			844.7	83.51
2023/12/19	99	5298	1053	80.12
			394.7	92.55
			1140	78.48
			236.3	95.54
		6995	176.1	97.48
			156.2	97.77
			134.1	98.08
			343.2	95.09
2023/12/20	126	7750	1267	83.65
			1691	78.18
			1040	86.59
			252.9	96.74
		6857	208.5	96.96
			2093	69.48
			978	85.74
			484	92.94



2024年1月西區場址污染土壤約3204公噸由多螺旋式熱脫附系統處理，共計進行185批次，由表4-8中可觀察出污染土壤之總石油碳氫化合物濃度範圍為529 mg/kg 至9409 mg/kg，處理後土壤 TPH 濃度範圍介於44 mg/kg 至1515 mg/kg，其中1月2日批次土壤由於原始污染濃度相對低，熱處理前為529 mg/kg，熱處理後為479 mg/kg，因此其移除率僅9.45%，該批次土壤為在場址開挖篩測時，判定為大於1000 mg/kg，因此決定進入熱處理程序，但由於土壤中污染分布之不均質性，同時熱處理前污染土壤 TPH 測定並非即時反應，因此當瞭解到原始污染土壤(熱處理前)檢測顯示 TPH 濃度為529 mg/kg，事實上時間軸已經是在該批次土壤完成熱處理之後數天(因正常 TPH 分析期約需4至7天)，類似此情況在大型場址整治期間，由於土方量過大，經常發生，為確保整治成效污染土壤，多會採行主動工法而不會直接回填。

若不予採計1月2日批次土壤該批次土壤，2024年1月總石油碳氫化合物移除率為72.7%至99.5%，低移除率多屬 TPH 原始濃度低之土壤($\text{TPH} < 600 \text{ mg/kg}$ ，如1月2日兩批次土壤移除率為52.4%及62.0%)。針對2024年1月之185批次污染土壤，有37批次熱處理後之土壤仍超過法規標準，未符合標準約占總處理數之20%，在表4-8中以陰影表示，處理後土壤 TPH 濃度最高達1515 mg/kg，對於未符合法規及整治需求之批次土壤分別以重工或其他工法進行處理。



表4-8 2024年01月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil(mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/01	114	5914	254	95.71
			890	84.95
			1136	80.79
			213	96.40
		6455	216	96.65
			183	97.16
			527	91.84
			1146	82.25
2024/01/02	110	6455	758	88.26
			1041	83.87
			818	87.33
			44	99.32
		529	201	62.00
			252	52.36
2024/01/03	101	4745	479	9.45
			806	83.01
			1156	75.64
		9409	959	79.79
			1021	89.15
2024/01/04	87	8454	160	98.30
			1277	84.89
			1243	85.30
			402	95.24
		5009	44	99.48
			383	92.35
			1299	74.07
			595	88.12
2024/01/05	73	5449	208	95.85
			748	86.27
			1490	72.66



表4-8 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/05	73	5449	308	94.35
		5487	137	97.50
			1055	80.77
			98	98.21
2024/01/06	84	7272	131	98.20
			194	97.33
			177	97.57
			217	97.02
		6882	406	94.10
			617	91.03
			416	93.96
			72	98.95
2024/01/07	120	7901	189	97.61
			327	95.86
			244	96.91
			373	95.28
		6581	270	95.90
			1427	78.32
			1162	82.34
			265	95.97
2024/01/08	113	5940	75	98.74
			221	96.28
			1326	77.68
			346	94.18
		6983	493	92.94
			388	94.44
			161	97.69
			342	95.10
2024/01/09	104	5864	300	94.88
			402	93.14
			297	94.94



表4-8 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/09	104	8604	709	91.76
			522	93.93
			1280	85.12
2024/01/10	120	7121	1301	81.73
			1178	83.46
			278	96.10
			44	99.38
		5902	1515	74.33
			154	97.39
2024/01/11	106	5902	977	83.45
			757	87.17
			761	87.11
		6933	328	95.27
			430	93.80
			493	92.89
			806	88.37
2024/01/12	108	6543	713	89.10
			473	92.77
			312	95.23
			564	91.38
		7901	202	97.44
			475	93.99
			136	98.28
2024/01/13	130	7611	312	95.90
			470	93.82
			365	95.20
			351	95.39
		4419	293	93.37
			456	89.68
			590	86.65



表4-8 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/14	121	5148	297	94.23
			483	90.62
			300	94.17
			304	94.09
		6216	214	96.56
			176	97.17
			145	97.67
			310	95.01
2024/01/15	104	5902	357	93.95
		6782	914	86.52
			169	97.51
			237	96.51
			167	97.54
2024/01/16	133	6757	574	91.51
			378	94.41
			192	97.16
			367	94.57
			393	94.18
2024/01/17	120	5449	812	85.10
			1314	75.89
			1174	78.45
			862	84.18
		5173	179	96.54
			1125	78.25
			1009	80.49
			302	94.16
			714	86.20
			710	86.27
2024/01/19	94	4946	553	88.82
			212	95.71
		6882	267	96.12
			247	96.41



表4-8 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/20	133	5474	468	91.45
			783	85.70
			577	89.46
			230	95.80
		5349	784	85.34
			986	81.57
			1065	80.09
			401	92.50
2024/01/21	99	6907	294	95.74
			517	92.51
			416	93.98
			341	95.06
		5512	326	94.09
			527	90.44
			657	88.08
			332	93.98
2024/01/22	125	5512	525	90.48
			735	86.67
			426	92.27
			1214	77.98
		5776	867	84.99
			803	86.10
			1125	80.52
			390	93.25
2024/01/23	116	5374	581	89.19
			1238	76.96
			1066	80.16
			539	89.97
		7310	1006	86.24
			1376	81.18
			1427	80.48
			392	94.64



表4-8 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/01/24	142	7385	458	93.80
			279	96.22
			318	95.69
			437	94.08
		5223	1339	74.36
			405	92.25
			346	93.38
2024/01/25	135	6078	841	86.16
			1222	79.89
			783	87.12
			1155	81.00
			1198	80.29
2024/01/26	48	5449	1192	78.12
			930	82.93
			655	87.98
2024/01/28	34	5236	507	90.32
			249	95.24
2024/01/29	113	4959	1062	78.58
			899	81.87
		6342	974	84.64
			244	96.15
			758	88.05
			670	89.44
2024/01/30	143	6694	414	93.82
			1221	81.76
			1314	80.37
			402	93.99
		5034	282	94.40
			500	90.07



2024年2月西區場址污染土壤約2918公噸以熱處理進行土壤復育，共計150批次操作，由表4-9中可觀察污染土壤之總石油碳氫化合物濃度範圍介於673 mg/kg 至7322 mg/kg，經熱處理後土壤 TPH 濃度範圍介於95 mg/kg 至1290 mg/kg，檢視2月份處理效能，其中2月6日兩批次土壤，由於原始污染濃度相對低(濃度為812 mg/kg)，而部分出料土濃度較原始濃度高，分別為1037 mg/kg 及1114 mg/kg，造成 TPH 移除率之計算無法顯示實質意義。在2月21日(833 mg/kg → 1050 mg/kg)、2月22日(768 mg/kg → 900 mg/kg)、2月24日(965 mg/kg → 991 mg/kg)、2月27日(673 mg/kg → 783 mg/kg)及2月29日(759 mg/kg → 792 mg/kg)等部分批次土壤，由於原始污染濃度相對低，亦有類似現象發生。這些批次土壤在場址開挖時，經現場快篩判定為 TPH 大於1000 mg/kg，為確保污染土壤整治成效，整治單位多會採行主動整治工法，透過生物復育、水洗、或熱處理方式處理，而不會直接回填。

因此污染土壤決定進入熱處理，但由於土壤中污染分布之不均質性，同時熱處理前 TPH 測定並非即時性，分析有時間差，因此當瞭解到原始污染土壤(熱處理前)檢測顯示 TPH 濃度小於1000 mg/kg，事實上在時間軸已經是在該批次土壤完成熱處理之後數天，類似此現象在大型場址整治期間，由於土方量過大，污染型態種類多且混合性污染物多，為加速整治進度及確保整治成效，污染土壤多會採行主動工法而不會直接回填，故會造成此現象。

由於原始污染土壤濃度較低，甚至低於管制標準，造成移除率較低，如2月6日其中一批次移除率為5.67%，一批次移除率為30.9%，2月18日其中一批次移除率為30.5%，一批次移除率為27.3%，2月20日其中一批次移除率為31.6%，2月24日兩批次移除率分別為7.7%及16.4%，若不予採計這些原始污染土壤濃度較低批次土壤移除率，2024年2月總石油碳氫化合物移除率為69.2%至97.0%。

針對2024年2月的150批次污染土壤，有8批次處理後之土壤仍超過法規標準，未符合標準約占總處理數之5%，在表4-9中以陰影表示，處理後土壤 TPH 濃度最高達1290 mg/kg，對於未符合法規及整治需求之批次土壤，分別以重工或其他工法進行處理。



表4-9 2024年02月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/02/01	113	4381	1195	72.72
			1251	71.44
			973	77.79
		6455	553	91.43
			478	92.59
			739	88.55
			283	95.62
2024/02/02	97	5751	1188	79.34
			1042	81.88
			592	89.71
			275	95.22
		7322	514	92.98
			464	93.66
			564	92.30
2024/02/03	41	4683	218	97.02
			185	96.05
			371	92.08
2024/02/04	84	4657	334	92.87
			338	92.74
		5148	284	93.90
			280	94.56
			354	93.12
			270	94.76
			207	95.98
2024/02/05	104	5148	227	95.59
			381	92.60
			202	96.08
			170	96.70
		5826	337	94.22
			221	96.21
			232	96.02



表4-9 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/02/05	104	5826	198	96.60
2024/02/06	135.6	3689	198	94.63
			280	92.41
			218	94.09
			261	92.92
		812	112	86.21
			561	30.91
			766	5.67
			1037	Not available
			302	62.81
			1114	Not available
2024/02/07	135.7	3136	617	80.33
			1290	58.86
			965	<u>69.23</u>
			522	83.35
			823	73.76
2024/02/15	98.1	1173	252	78.52
			686	41.52
			445	62.06
			268	77.15
2024/02/16	149.1	876	146	83.33
			299	65.87
			268	69.41
			284	67.58
		1097	226	79.40
			404	63.17
			440	59.89
			181	83.50
2024/02/17	141.3	923	371	59.80
			293	68.26
			537	41.82



表4-9 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/02/17	141.3	904	358	60.40
			339	62.50
			119	86.84
2024/02/18	147.8	722	264	63.43
			254	64.82
			502	30.47
			174	75.90
		1007	134	86.69
			133	86.79
			231	77.06
			732	27.31
2024/02/19	158.4	1452	881	39.33
			95	93.46
			205	85.88
		1192	247	79.28
			415	65.18
			319	73.24
			326	72.65
2024/02/20	129	1192	409	65.69
			313	73.74
			815	31.63
		811	461	43.16
			360	55.61
			333	58.94
2024/02/21	176.3	2068	353	82.93
			759	63.30
			490	76.31
			360	82.59
		833	1050	Not available
			851	Not available
			471	43.46



表4-9 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/02/21	176.3	833	183	78.03
2024/02/22	160.5	771	481	37.61
			288	62.65
			339	56.03
			191	75.23
		768	446	41.93
			900	Not available
			491	36.07
			391	49.09
2024/02/23	93	867	188	78.32
			468	46.02
			534	38.41
			535	38.29
2024/02/24	102.3	965	891	7.67
			371	61.55
			807	16.37
			991	Not available
		999	608	39.14
			704	29.53
			605	39.44
			375	62.46
2024/02/25	152.3	1021	299	70.71
			618	39.47
			322	68.46
			321	68.56
		921	437	52.55
			448	51.36
			371	59.72
			241	73.83
2024/02/26	175.4	742	349	52.96
			262	64.69



表4-9 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/02/26	175.4	742	244	67.12
		1402	404	71.18
			289	79.39
			463	66.98
			475	66.12
			622	55.63
			705	49.71
2024/02/27	174.6	1339	772	42.35
			825	38.39
			704	47.42
		673	783	Not available
			44	93.46
			44	93.46
			273	59.44
2024/02/28	174.9	1427	602	57.81
			615	56.90
			610	57.25
			318	77.72
		975	793	18.67
			688	29.44
			362	62.87
2024/02/29	174.5	759	566	25.43
			693	8.70
			792	Not available
			339	55.34
			719	5.27
			743	2.11
			468	38.34



2024年3月西區場址污染土壤約3969公噸，共計182批次熱脫附系統處理，由表4-10中可觀察出污染土壤之總石油碳氫化合物濃度範圍為337 mg/kg 至2483 mg/kg，處理後 TPH 濃度範圍介於34 mg/kg 至1001 mg/kg，由於本月處理之原始污染土壤 TPH 濃度相對較低，多數批次甚至低於管制標準，因此造成移除率較低。此現象發生在如3月3日其中一批次，幾乎未顯示處理效能(854 mg/kg → 845 mg/kg)，3月5日其中一批次移除率為20.5%，3月21日其中一批次顯示處理效能低(1164 mg/kg → 1001 mg/kg)，而3月23日其中一批次是幾乎未顯示處理效能(337 mg/kg → 337 mg/kg)、3月24日其中二批次亦是幾乎未顯示處理效能(634 mg/kg → 571 mg/kg; 782 mg/kg → 777 mg/kg)、3月29日其中兩批次(684 mg/kg → 664 mg/kg; 684 mg/kg → 661 mg/kg)亦有類似現象發生。

原始污染土壤濃度較熱處理後土壤 TPH 低，而導致無法計算土壤移除率，包括3月6日其中一批次(626 mg/kg → 727 mg/kg)、3月9日兩批次(547 mg/kg → 567 mg/kg; 547 mg/kg → 983 mg/kg)、3月13日兩批次(641 mg/kg → 645 mg/kg; 641 mg/kg → 666 mg/kg)、3月15日多批次、3月16日其中一批次(554 mg/kg → 557 mg/kg)、3月19日其中一批次(507 mg/kg → 522 mg/kg)、3月22日其中三批次(541 mg/kg → 669 mg/kg; 541 mg/kg → 846 mg/kg; 797 mg/kg → 864 mg/kg)、3月24日三批次(634 mg/kg → 693 mg/kg; 634 mg/kg → 811 mg/kg; 782 mg/kg → 934 mg/kg)、3月27日一批次(469 mg/kg → 667 mg/kg)，若不予採計這些原始污染土壤濃度較低導致無法計算土壤移除率，檢視原始污染土壤濃度大於1400 mg/kg 之批次，2024年3月總石油碳氫化合物移除率為65.6%至87.3%。

針對182批次污染土壤，有1批次處理後之土壤仍超過法規標準，未符合標準約占總處理數之0.5%，在表4-10中以陰影表示，處理後土壤 TPH 濃度最高達1001 mg/kg，對於未符合法規及整治需求之批次土壤分別以重工或其他工法進行處理。



表4-10 2024年03月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/01	159	1452	830	42.84
			317	78.17
			984	32.23
			801	44.83
			930	35.95
			497	65.77
2024/03/02	102.9	910	412	54.73
			463	49.12
			581	36.15
			285	68.68
		1076	370	65.61
2024/03/03	63	854	762	10.77
			845	1.05
			366	57.14
			326	61.83
		1076	676	37.17
			463	56.97
			592	44.98
			654	39.22
			326	69.70
2024/03/04	52.95	1068	308	71.16
			308	71.16
			468	56.18
			499	53.28
		1552	430	72.29
2024/03/05	122.4	1123	497	55.74
			432	61.53
			510	54.59
			343	69.46
		1238	984	20.52
			519	58.08



表4-10 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/05	122.4	1238	801	35.30
			523	57.75
			930	24.88
			497	59.85
			631	49.03
2024/03/06	165.3	626	289	53.83
			727	Not available
			568	9.27
			304	51.44
		1037	489	52.84
			307	70.40
			283	72.71
			309	70.20
2024/03/07	166.2	949	387	59.22
			233	75.45
			481	49.32
			382	59.75
		1502	491	67.31
			657	56.26
			559	62.78
			357	76.23
2024/03/08	176.1	962	371	61.43
			695	27.75
			666	30.77
			655	31.91
		962	484	49.69
			266	72.35
2024/03/09	108.5	547	567	Not available
			983	Not available
			439	19.74
			381	30.35



表4-10 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/10	164.7	567	421	25.75
			440	22.40
			527	7.05
			282	50.26
			454	19.93
			414	26.98
			362	36.16
2024/03/11	177.8	602	396	34.22
			255	57.64
			343	43.02
			284	52.82
		533	432	18.95
			454	14.82
			329	38.27
2024/03/12	172.7	632	303	52.06
			434	31.33
			410	35.13
			290	54.11
		773	430	44.37
			348	54.98
			410	46.96
			147	80.98
2024/03/13	155.9	652	287	55.98
			378	42.02
			435	33.28
			318	51.23
		641	351	45.24
			645	Not available
			666	Not available
2024/03/14	206.1	836	659	21.17
			588	29.67



表4-10 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/14	206.1	836	597	28.59
			312	62.68
		749	410	45.26
			651	13.08
			264	64.75
			711	5.07
2024/03/15	177.5	509	534	Not available
			957	Not available
			649	Not available
			909	Not available
			631	Not available
			416	18.27
			34	93.32
			299	41.26
2024/03/16	186	509	476	6.48
			401	21.22
			397	22.00
			44	91.36
		554	377	31.95
			557	Not available
			378	31.77
			226	59.21
2024/03/17	177.3	725	398	45.10
			475	34.48
			279	61.52
			348	52.00
		666	50	92.49
			450	32.43
			498	25.23
			421	36.79
2024/03/18	120	632	397	37.18



表4-10 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/18	120	632	470	25.63
			376	40.51
		747	588	21.29
			217	70.95
2024/03/19	160.5	732	316	56.83
			382	47.81
			304	58.47
			459	37.30
		507	522	Not available
			386	23.87
2024/03/20	191.9	761	349	31.16
			290	61.89
			573	24.70
			577	24.18
		787	361	52.56
			547	30.50
			519	34.05
			710	9.78
2024/03/21	181.7	729	490	37.74
			578	20.71
			548	24.83
			532	27.02
		1164	444	39.09
			830	28.69
			1001	14.00
			463	60.22
2024/03/22	141.8	541	651	44.07
			669	Not available
		797	846	Not available
			864	Not available
2024/03/23	93	773	326	59.10
			505	34.67



表4-10 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/03/23	93	773	336	56.53
		337	337	0.00
2024/03/24	156	634	334	47.32
			693	Not available
			811	Not available
			406	35.96
			571	9.94
		782	777	0.64
			934	Not available
			448	42.71
			486	37.85
2024/03/25	156.5	843	373	55.75
		1154	696	39.69
			808	29.98
			471	59.19
			280	75.74
			422	63.43
2024/03/26	52.2	2483	316	<u>87.27</u>
2024/03/27	10	469	667	Not available
2024/03/28	52.05	1009	600	40.54
			577	42.81
			378	62.54
2024/03/29	129.9	684	280	59.06
			387	43.42
			664	2.92
			661	3.36
		1031	316	69.35



2024年4月西區場址污染土壤約1816公噸由多螺管式熱脫附系統處理，共計52批次，由表4-11中可觀察污染土壤之 TPH 濃度範圍為651 mg/kg 至2128 mg/kg，4月1日至4月3日為零件更換後試車，部分批次移除率較不穩定，系統正常運作後，4月17日至4月30日期間，污染土壤處理後 TPH 濃度範圍介於238 mg/kg 至865 mg/kg，污染土壤 TPH 濃度低之批次(接近1000 mg/kg)，其移除率相對低，不易作一綜合性比較，必須排除，檢視原始污染土壤濃度大於1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物(TPH)移除率為64.5% 至87.6%，針對52批次1816公噸污染土壤，處理後之土壤均符合法規標準。

表4-11 2024年4月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/04/01	151.7	651	377	42.09
			587	9.83
			238	63.44
			603	7.37
		1041	865	16.91
			576	44.67
2024/04/02	154.5	1031	485	52.96
			434	57.90
			445	56.84
		2128	755	<u>64.52</u>
			737	65.37
2024/04/03	119.4	1999	539	73.04
2024/04/17	134	1527	245	83.96
			294	80.75
		1271	321	74.74
			295	76.79
2024/04/18	139	1207	266	77.96
			245	79.70
		1286	280	78.23
			316	75.43



表 4-11 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/04/19	115	1314	186	85.84
			266	79.76
		1099	228	79.25
			304	72.34
2024/04/20	128	1326	286	78.43
			302	77.22
		1464	386	73.63
			182	87.57
2024/04/22	97	1074	256	76.16
			238	77.84
		1150	191	83.39
			328	71.48
2024/04/23	109	1241	321	74.13
			343	72.36
		1229	274	77.71
			469	61.84
2024/04/24	94	1402	371	73.54
			362	74.18
		1439	317	77.97
			261	81.86
2024/04/25	98	1004	229	77.19
			299	70.22
		1167	434	62.81
2024/04/26	130	1615	486	69.91
			469	70.96
		1540	478	68.96
			429	72.14
2024/04/27	125	1402	401	71.40
			445	68.26
2024/04/29	123	1376	488	64.53
2024/04/30	98	1246	371	70.22
			372	70.14



2024 年 5 月西區場址污染土壤由多螺旋式熱脫附系統處理約 3879 公噸，共計 120 批次，表 4-12 中顯示污染土壤之 TPH 濃度範圍為 1053 mg/kg 至 2407 mg/kg，污染土壤處理後，TPH 濃度範圍介於 133 mg/kg 至 510 mg/kg，檢視原始污染土壤濃度大於 1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物移除率為 70.7% 至 89.6%，針對 120 批次 3879 公噸污染土壤，各批次處理後之土壤均符合法規標準，並無需要重工或採用其他復育方式之污染土壤批次。



表 4-12 2024 年 5 月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/05/01	122	1301	413	68.26
			459	64.72
		1242	363	70.77
			237	80.92
2024/05/02	120	1142	200	82.49
			186	83.71
		1053	279	73.50
		1118	326	70.84
2024/05/03	120	1351	370	72.61
			429	68.25
		1402	410	70.76
			449	67.97
2024/05/04	142	1829	459	74.90
			484	73.54
		1854	397	78.59
2024/05/05	119	1301	345	73.48
			303	76.71
		1326	312	76.47
			264	80.09
2024/05/06	122	1292	234	81.89
			307	76.24
		1238	235	81.02
			492	60.26
2024/05/07	107	1879	438	76.69
			480	74.45
		1791	497	72.25
			428	76.10
2024/05/08	121	1703	447	73.75
			477	71.99
		1728	412	76.16
			265	84.66



表4-12 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/05/09	122	1195	248	79.25
			213	82.18
		1234	278	77.47
			161	86.95
2024/05/10	117	1207	212	82.44
			172	85.75
		1234	239	80.63
			229	81.44
2024/05/11	131	1213	342	71.81
			324	73.29
		1184	378	68.07
			456	61.49
2024/05/12	118	1716	446	74.01
			414	75.87
		1791	200	88.83
			493	72.47
2024/05/13	120	1829	470	74.30
			509	72.17
		1942	436	77.55
			202	89.60
2024/05/14	114	1174	214	81.77
		1102	287	73.96
		1134	254	77.60
			268	76.37
2024/05/15	126	1055	175	83.41
			242	77.06
			133	87.39
2024/05/16	134	1218	298	75.53
			201	83.50
		1187	250	78.94
			188	84.16



表 4-12 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/05/17	132	1244	177	85.77
			220	82.32
		1268	205	83.83
2024/05/18	123	1288	258	79.97
			260	79.81
		1228	300	75.57
			483	60.67
2024/05/19	112	1653	471	71.51
			484	70.72
		1540	450	70.78
			481	68.77
2024/05/20	131	1842	507	72.48
			458	75.14
		1955	486	75.14
			445	77.24
2024/05/21	128	1917	497	74.07
			481	74.91
		1892	495	73.84
			425	77.54
2024/05/22	135	1804	448	75.17
			481	73.34
		1980	502	74.65
			415	79.04
2024/05/23	138	1829	407	77.75
			481	73.70
		1854	454	75.51
			226	87.81
2024/05/24	138	1192	274	77.01
			253	78.78
		1314	297	77.40
			391	70.24



表 4-12 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/05/25	134	1653	449	72.84
			484	70.72
		1691	495	70.73
			489	71.08
2024/05/26	112	1992	510	74.40
			504	74.70
		1980	480	75.76
			305	84.60
2024/05/27	131	1326	327	75.34
			294	77.83
		1288	300	76.71
			193	85.02
2024/05/28	132	1150	224	80.52
			152	86.78
		1144	256	77.62
			483	57.78
2024/05/29	134	1942	507	73.89
			497	74.41
		1904	445	76.63
			292	84.66
2024/05/30		1252	250	80.03
			281	77.56
		1209	288	76.18
			497	58.89
2024/05/31		1515	465	69.31
			507	66.53
		2407	453	81.18



2024 年 6 月西區場址污染土壤由多螺旋式熱脫附系統處理約 4225 公噸，共計 113 批次，由表 4-13 中顯示污染土壤之 TPH 濃度範圍為 1028 mg/kg 至 5726 mg/kg，污染土壤處理後 TPH 濃度範圍介於 153 mg/kg 至 543 mg/kg，檢視原始污染土壤濃度大於 1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物移除率為 64.4%至 95.5%，檢視低移除率之批次，其污染土壤之 TPH 濃度均為較低如 1028 mg/kg、1184 mg/kg，處理後污染土壤之 TPH 濃度為 505 mg/kg、499 mg/kg，針對 113 批次 4225 公噸污染土壤，處理後之土壤均符合法規標準。



表4-13 2024年6月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/06/01	150	1527	543	<u>64.44</u>
			304	80.09
		1578	347	78.01
			288	81.75
2024/06/02	141	1288	295	77.10
			328	74.53
		1301	346	73.41
			407	68.72
2024/06/03	150	1829	427	76.65
			469	74.36
		1904	509	73.27
			435	77.15
2024/06/04	142	1980	393	80.15
			411	79.24
		1930	459	76.22
			326	83.11
2024/06/05	149	1262	294	76.70
			299	76.31
		1247	318	74.50
			280	77.55
2024/06/06	147	1207	244	79.78
			277	77.05
		1218	184	84.89
2024/06/07	123	1182	250	78.85
			230	80.54
		1188	295	75.17
			342	71.21
2024/06/08	140	1314	298	77.32
			219	83.33
		1351	268	80.16
			396	70.69



表 4-13 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/06/09	148	1184	334	71.79
			499	57.85
		2319	376	83.79
			509	78.05
2024/06/10	155	2458	481	80.43
			322	86.90
		1364	283	79.25
			409	70.01
2024/06/11	134	2571	444	82.73
			285	88.91
		1135	250	77.97
			388	65.81
2024/06/12	140	1490	419	71.88
			532	64.30
		2458	343	86.05
2024/06/13	159	1791	401	77.61
			473	73.59
		1892	449	76.27
			471	75.11
2024/06/14	143	1791	415	76.83
			385	78.50
		2533	425	83.22
			419	83.46
2024/06/15	151	2495	439	82.40
		1967	322	83.63
			342	82.61
2024/06/16	123	1603	279	82.60
			249	84.47
		1402	288	79.46
			318	77.32



表4-13 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/06/17	141	1300	235	80.15
			258	90.22
		1892	185	86.39
2024/06/18	145	1227	167	60.39
			486	73.00
		1615	436	75.67
			393	91.20
2024/06/19	134	5726	504	95.39
			264	84.47
		1854	288	80.15
			368	78.82
2024/06/20	137	1615	342	81.80
			294	82.26
		1691	300	81.29
2024/06/21	137	1716	321	90.50
			163	85.12
		1028	153	50.88
			505	87.58
2024/06/22	131	3727	463	88.19
			440	91.00
		4657	419	91.30
			405	72.93
2024/06/23	143	1603	434	66.13
			543	88.40
		4507	523	<u>95.45</u>
			205	84.97
2024/06/24	120	1716	258	82.52
			300	83.19
		2118	356	77.81
			470	80.15



表4-13 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/06/25	133	1917	440	77.05
			382	80.07
		1791	393	78.06
			334	81.35
2024/06/26	150	1615	256	84.15
			258	84.02
		1056	305	71.12
			376	64.39
2024/06/27	144	1728	362	79.05
			396	77.08
		1691	407	75.93
			260	84.62
2024/06/28	141	1741	436	74.96
		1653	436	73.62
			446	73.02
2024/06/29	137	1211	321	73.49
			274	77.37
		1339	343	74.38
			261	80.51
2024/06/30	141	1376	299	78.27
		1351	229	83.05
			475	64.84



2024年7月西區場址污染土壤由多螺管式熱脫附系統處理約2687公噸，共計67批次，由表4-14中顯示污染土壤之 TPH 濃度範圍為1063 mg/kg 至4192 mg/kg，污染土壤處理後 TPH 濃度範圍介於118 mg/kg 至551 mg/kg，檢視原始污染土壤濃度大於1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物(TPH)移除率為73.5%至91.9%。檢視移除率較低之批次，其趨勢為污染土壤之 TPH 濃度均為較低，分別為1212 mg/kg 及1301 mg/kg，處理後污染土壤之 TPH 濃度分別為484 mg/kg、454及465 mg/kg，高濃度之污染土壤其移除率較佳，針對67批次2687公噸污染土壤，處理後之土壤均符合法規標準。



表4-14 2024年7月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/07/01	92	2219	475	78.59
			500	77.47
		4167	498	88.05
			448	89.25
2024/07/02	94	2382	460	80.69
			497	79.14
		4142	504	87.83
2024/07/03	104	2960	489	83.48
			551	81.39
		3928	319	<u>91.88</u>
2024/07/04	107		427	89.13
		4192	494	88.22
			488	88.36
		3828	381	90.05
2024/07/05	117	1477	338	77.12
			392	<u>73.46</u>
2024/07/06	141	1515	319	78.94
			378	75.05
		2546	353	86.14
			406	84.05
2024/07/07	159	1892	195	89.69
		1578	211	86.63
			246	84.41
2024/07/08	141	1879	396	78.92
			331	82.38
		1301	454	65.10
			465	64.26
2024/07/09	143	1854	480	74.11
			396	78.64
		1791	304	83.03
			441	75.38



表 4-14 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/07/10	132	2244	548	75.58
			397	82.31
		1212	266	78.05
			484	60.07
2024/07/11	307	2520	431	82.90
			391	84.48
		2156	434	79.87
			257	88.08
2024/07/12	156	1063	118	88.90
		2546	507	80.09
			363	85.74
2024/07/13	143	2332	346	85.16
			346	85.16
			498	78.64
		2357	474	79.89
			321	86.38
2024/07/14	141	1917	361	81.17
			344	82.06
		2055	285	86.13
			204	90.07
2024/07/15	138	2445	401	83.60
			401	83.60
		1904	207	89.13
			232	87.82
2024/07/16	146	1258	285	77.34
2024/07/29	146	1233	149	87.92
			197	84.02
			192	84.43



表 4-14 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/07/30	143	1164	173	85.14
			242	79.21
		1261	203	83.90
			233	81.52
2024/07/31	141	1216	280	76.97
			304	75.00
		1241	201	83.80
			364	70.67



2024年8月西區場址污染土壤由多螺旋式熱脫附系統處理約4158公噸，共計116批次，由表4-15中歸納污染土壤之 TPH 濃度範圍為1014 mg/kg 至3237 mg/kg，污染土壤處理後 TPH 濃度範圍介於220 mg/kg 至577 mg/kg，檢視原始污染土壤濃度大於1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物移除率為71.2%至90.1%。檢視移除率較低之批次，其趨勢均為污染土壤之 TPH 濃度較低，針對116批次4158公噸污染土壤，處理後之土壤均符合法規標準。



表4-15 2024年8月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/08/01	145	1791	309	82.75
			467	73.93
		2030	426	79.01
			418	79.41
2024/08/02	144	1754	424	75.83
			453	74.17
		2181	493	77.40
			331	84.82
2024/08/03	137	1741	356	79.55
			501	<u>71.22</u>
		2131	509	76.11
			307	85.59
2024/08/04	141	1666	309	81.45
			577	65.37
2024/08/05	144	2256	498	77.93
			440	80.50
2024/08/06	141	1804	485	73.12
			434	75.94
		1955	414	78.82
			397	79.69
2024/08/07	150	1879	406	78.39
			377	79.94
		1326	420	68.33
			245	81.52
2024/08/08	142	1992	302	84.84
			534	73.19
		2143	514	76.01
			484	77.41
2024/08/09	130	2043	473	76.85
			387	81.06
		2722	378	86.11
			370	86.41



表 4-15 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/08/10	134	2231	435	80.50
			449	79.87
		1247	474	61.99
			356	71.45
2024/08/11	145	1464	376	74.32
			405	72.34
		1130	495	56.19
			382	66.19
2024/08/12	143	1249	409	67.25
			498	60.13
		2332	425	81.78
			476	79.59
2024/08/13	136	1955	375	80.82
		2307	366	84.14
			474	79.45
2024/08/14	148	1155	382	66.93
			411	64.42
		1791	382	78.67
			518	71.08
2024/08/15	140	3237	481	85.14
			430	86.72
		1741	427	75.47
			352	79.78
2024/08/16	132	1917	469	75.53
			469	75.53
		1402	490	65.05
			407	70.97
2024/08/17	143	1754	365	79.19
			415	76.34
		1339	451	66.32
			309	76.92



表 4-15 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/08/18	155	1414	353	75.04
			442	68.74
		1154	465	59.71
			395	65.77
2024/08/19	158	1666	415	75.09
			446	73.23
		2269	425	81.27
			363	84.00
2024/08/20	156	1741	220	87.36
			454	73.92
		1615	263	83.72
			476	70.53
2024/08/21	156	1490	304	79.60
			331	77.79
		2282	393	82.78
			227	<u>90.05</u>
2024/08/22	149	1236	271	78.07
			324	73.79
		2080	505	75.72
			237	88.61
2024/08/23	127	2206	276	87.49
			277	87.44
		2168	309	85.75
			265	87.78
2024/08/24	96	1967	240	87.80
			466	76.31
		2093	437	79.12
			253	87.91
2024/08/25	135	2143	298	86.09
			465	78.30
		2168	473	78.18
			258	88.10



表 4-15 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/08/26	132	1154	440	61.87
			478	58.58
		1014	456	55.03
			298	70.61
2024/08/27	136	1041	328	68.49
			449	56.87
		1980	460	76.77
			498	74.85
2024/08/28	114	1389	381	72.57
			463	66.67
		1364	476	65.10
			459	66.35
2024/08/29	137	1515	380	74.92
			392	74.13
		1741	383	78.00
			328	81.16
2024/08/30	146	1314	357	72.83
			378	71.23
		1578	400	74.65
2024/08/31	117	1590	445	72.01
			388	75.60



2024 年 9 月西區場址污染土壤由多螺旋式熱脫附系統處理約 2807 公噸，共計 84 批次，由表 4-16 中顯示污染土壤之 TPH 濃度範圍為 1077 mg/kg 至 3262 mg/kg，污染土壤經熱脫附處理後 TPH 濃度範圍介於 91 mg/kg 至 815 mg/kg，檢視原始污染土壤濃度大於 1400 mg/kg 之批次，總石油碳氫化合物移除率為 65.0%至 96.6%。

檢視長期操作之結果，移除率較低之批次，多發生在污染土壤之 TPH 濃度較低，高濃度之污染土壤(如 TPH 濃度範圍為 3262 mg/kg 之批次)其 TPH 移除率較佳，針對 84 批次 2807 公噸污染土壤，處理後之土壤均符合法規標準。



表 4-16 2024 年 9 月西區熱脫附處理量及篩測紀錄

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/09/01	147	1477	484	67.23
			466	68.45
		1502	414	72.44
			397	73.57
2024/09/02	132	1175	207	82.38
			191	83.74
2024/09/03	146	1079	464	57.00
			468	56.63
2024/09/04	141	1578	429	72.81
			413	73.83
		2872	405	85.90
			99	<u>96.55</u>
2024/09/05	142	1917	815	57.49
			212	88.94
		1703	222	86.96
			244	85.67
2024/09/06	145	1842	257	86.05
			261	85.83
		1791	371	79.29
			411	77.05
2024/09/07	152	2219	370	83.33
2024/09/08	146	1678	402	76.04
			266	84.15
2024/09/09	146	2181	226	89.64
			283	87.02
		1867	305	83.66
			224	88.00
2024/09/10	152	1904	290	84.77
			339	82.20
		1854	308	83.39
			249	86.57



表 4-16 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/09/11	150	1930	277	85.65
			368	80.93
		1666	326	80.43
			238	85.71
2024/09/12	153	1816	91	94.99
			169	90.69
2024/09/13	198	1703	151	91.13
			327	80.80
		1992	166	91.67
			163	91.82
2024/09/14	144	1578	144	90.87
			171	89.16
		1980	324	83.64
			502	74.65
2024/09/15	150	2219	530	76.12
			416	81.25
		1779	128	92.80
			104	94.15
2024/09/16	145	1716	295	82.81
			140	91.84
		1192	262	78.02
			189	84.14
2024/09/17	149	1241	130	89.52
			590	52.46
		1224	269	78.02
			158	87.09
2024/09/18	153	1716	415	75.82
			141	91.78
		1414	131	90.74
			478	66.20



表 4-16 (續)

Date	Processing volume (tonne)	TPH in Contaminated soil (mg/kg)	TPH in Treated soil (mg/kg)	TPH Removal (%)
2024/09/20	150	1351	204	84.90
			383	71.65
			329	75.65
2024/09/21	146	3262	421	87.09
			229	92.98
		1077	230	78.64
2024/09/22	125	1590	218	86.29
			313	80.31
		1842	189	89.74
			384	79.15
2024/09/23	135	2307	316	86.30
			500	78.33
		2294	442	80.73
			440	80.82
2024/09/24	144	1540	459	70.19
			419	72.79
		1464	415	71.65
			512	<u>65.03</u>
2024/09/25	138	3061	419	86.31
			485	84.16
		1754	499	71.55
			470	73.20
2024/09/26	132	2106	514	75.59



綜合本計畫第二年執行期間，西區自2023年11月至2024年9月熱處理操作期間，污染土壤處理量如表4-17所示，由於熱處理設施完成試車及符合排放許可後初始運行，在操作初期前三個月較常出現污染物移除效能未能符合預期，對於未符合法規及整治需求之批次土壤，分別以重工或其他工法進行後續處理，當系統操作趨於穩定正常，處理後之土壤均符合法規標準，重工情形顯著降低。

表4-17. 西區熱脫附處理量(2023/11-2024/9)

年/月	早班 (公噸)	晚班 (公噸)	月處理量 (公噸)
2023/11	406	555	961
2023/12	1229	1243	2472
2024/1	1599	1604	3203
2024/2	1320	1598	2918
2024/3	2091	1878	3,969
2024/4	877	939	1816
2024/5	1954	1925	3879
2024/6	2109	2116	4225
2024/7	1244	1444	2687
2024/8	2039	2119	4158
2024/9	1422	1385	2807
總計	16290	16806	33096



4.2.5 北二區熱處理實廠處理效能(第二年)

北二區(原5-1區、5-2區及部分6-2區)熱脫附法處理TPH污染土壤，於2024年1月19日起開始雙線運轉，共4套熱脫附爐進行土壤復育，其開機率(有效工時)可達90%，單日處理量平均可達975公噸(詳圖4-8)，實際單爐產量為10公噸/小時/爐，高於原設計量8公噸/小時/爐，實際處理量可高於設計處理量之原因，主要是進料污染土壤含水量比預期低，原預期污土含水量約為10%，實際進料污土含水量較低，平均值為6.6% (詳圖4-9)，係因運轉作業期間，天候晴朗乾燥日多，進料污土含水量比預期低，加快污土加熱脫附效率，在維持高品質產品之前提下，可增大進料處理量能；如圖4-10顯示。

北二區截至2024年5月28日設備結束操作止，總操作天數121天，污染土壤熱脫附法處理其累計處理量已達114,010公噸。

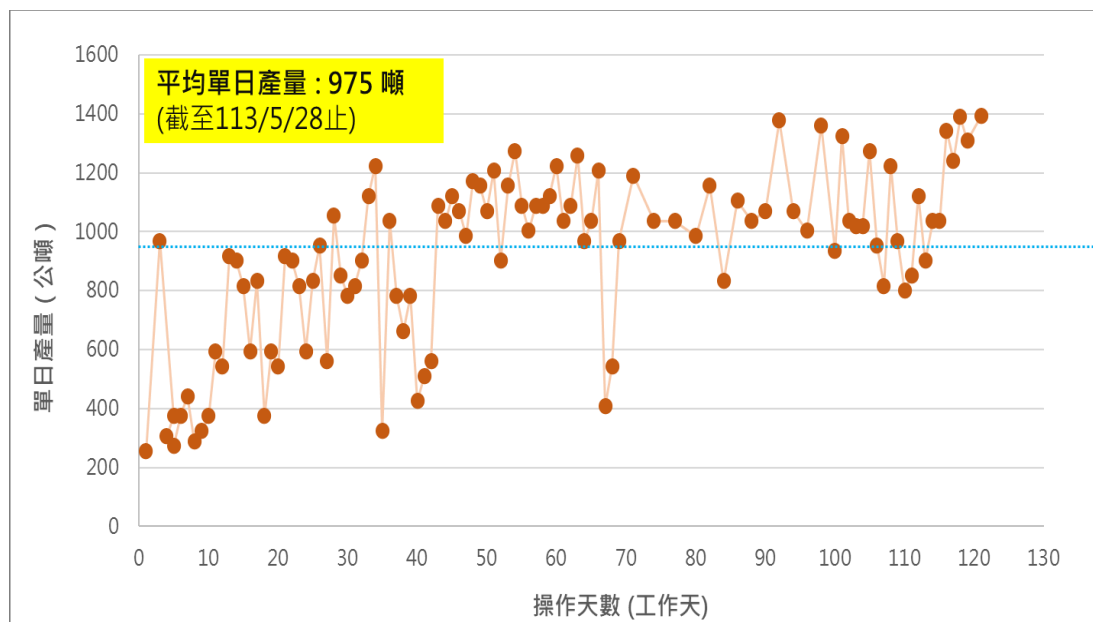


圖4-8. 熱脫附單日產量

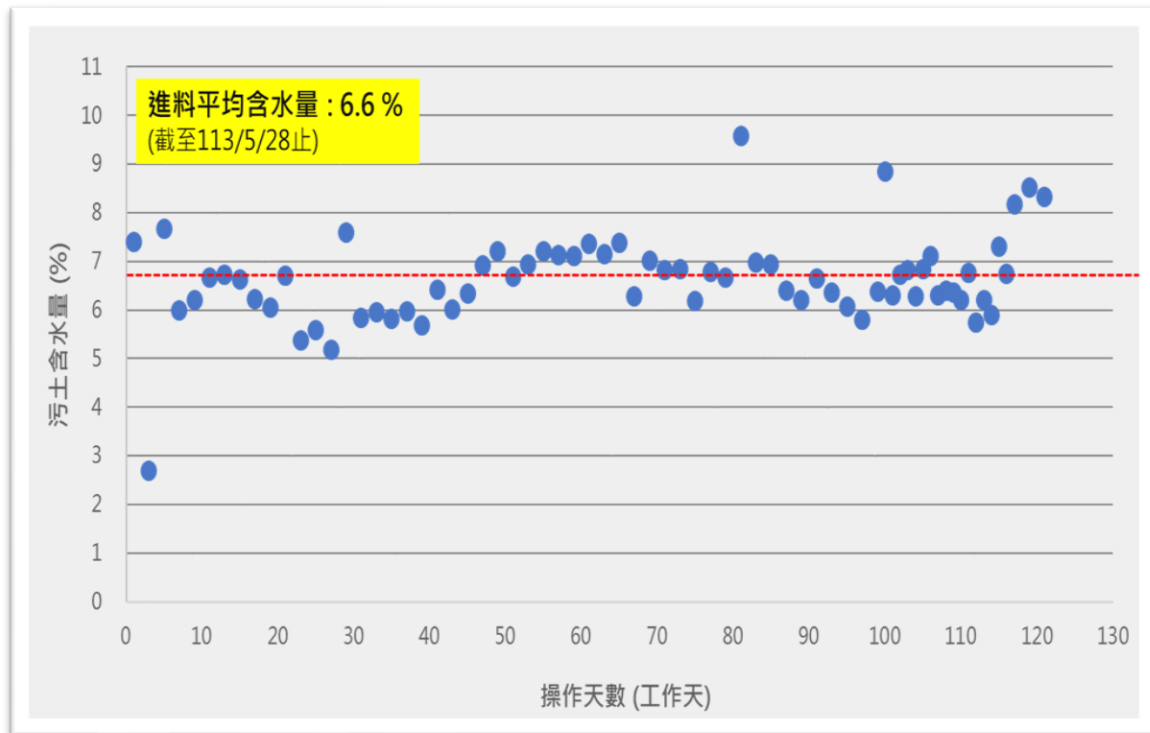


圖4-9 熱脫附進料污泥含水量

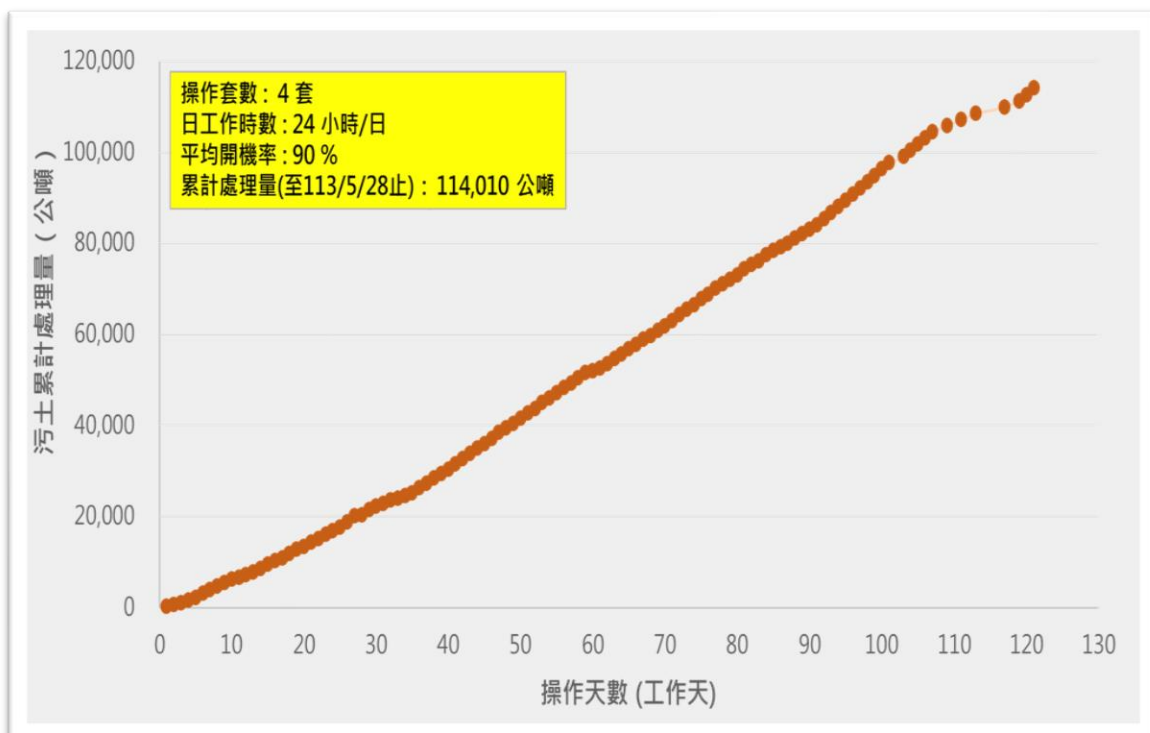


圖4-10. 熱脫附處理量累計圖



針對操作期間北二區所處理污染土壤的進料及出料 TPH 濃度，每日皆有持續且系統性的檢測。污染土進料濃度介於1719–10500 mg/kg，平均值為3409 mg/kg，土壤 TPH 經熱脫附處理變化如圖4-11。

典型的污染土壤碳數分布如圖4-12所示，以 C_{12} – C_{22} 為主，屬航空燃油及柴油範圍。出料成品土壤每小時分堆檢測，合格者集中暫置，待次日過磅回填，出料濃度則介於61–328 mg/kg，平均為145 mg/kg，典型的出料土壤其碳數分布如圖4-13所示，成品土壤如圖4-14。

依此計算出 TPH 去除率達96%，本熱脫附系統之所以能有高去除率，主要因加熱方式採直接加熱，窯內土壤受熱面積大，加上窯體轉動，土壤在窯內均勻混合，故脫附效果極佳，合格品佔比可達100%，能穩定產出高品質產品。

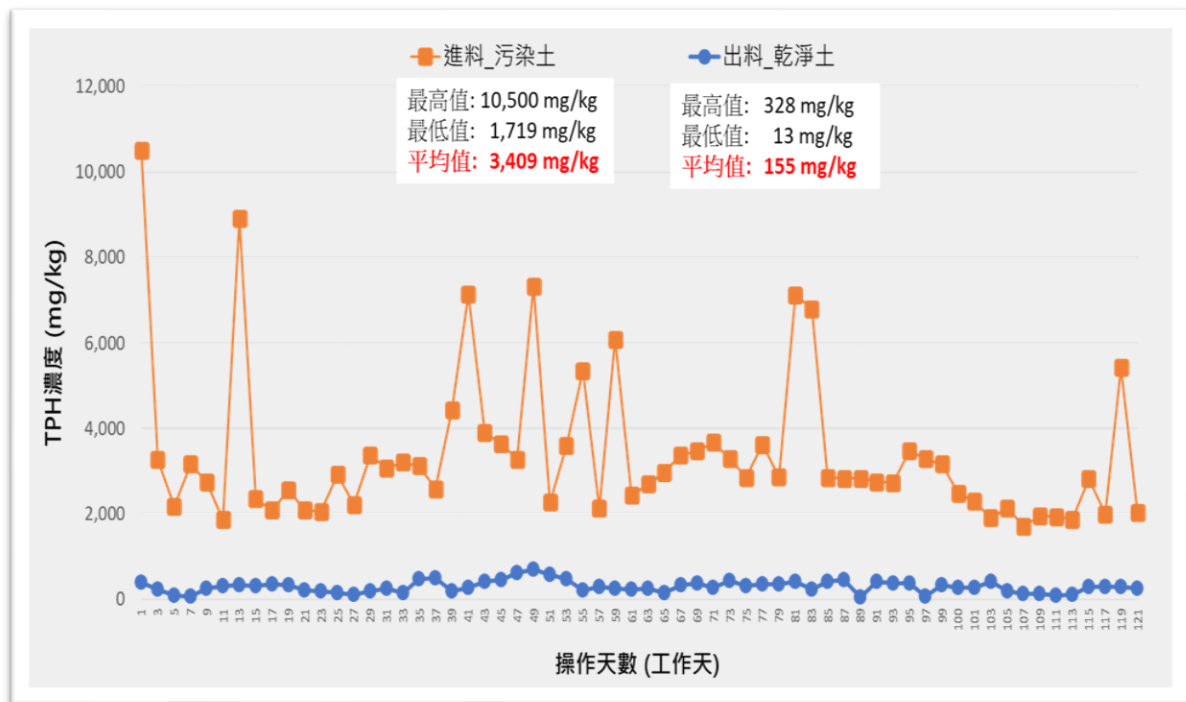


圖4-11. 土壤 TPH 經熱脫附處理變化

```
Sorted By      :      Signal
Multiplier    :      1.0000
Dilution      :      1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
```

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	15.208	BBA+	4.0523	6009.15674	24.71478	1.000e2

TPH-D 112/12/07 1121206-D-01 10500 mg/kg 稀釋 20 倍

138

*** End of Report ***

TPH-D 113/4/16 1130412-D-09C 77.4 mg/kg

圖4-13. 熱脫附出料成品土壤 TPH 圖譜 (TPH 濃度 77.4 mg/kg)



圖4-14. 熱脫附處理產出成品土壤



4.2.6 土壤熱處理綜合彙整

藉由本計畫調查及彙整熱增強型土壤氣體抽除法及三套熱脫附法設施，配合大型場址整治進度，所執行 TPH 污染土壤整治工作，其結果經彙整如表4-20所示。第一年熱增強型土壤氣體抽除法處理3000公噸，多螺旋式熱脫附系統在三個區域污染土壤共處理23548公噸，3-1區離地高溫熱脫附系統，整治期間以熱處理進行污染改善土壤數量為14,731 B.M³(自然方)，約為23570公噸。4-3及4-4區採熱脫附法處理含高濃度 TPH 之粉黏土質土壤(水洗工法衍生之濃縮污泥)，累計處理20200公噸。

第二年場址熱脫附法之效能分析，配合本大型場址啟動第三階段整治工程，自2023年11月至2024年9月期間，蒐集西區(1-2區及2-2區域)污染土壤熱處理部分，熱處理以多螺旋式熱脫附系統設備進行，已處理約33096公噸之污染土壤。北二區(5-1區、5-2區、部分6-2區)污染土壤以旋轉窯熱處理，截至2024年5月28日設備結束操作止，總操作天數121天，累計處理量已達114010公噸。



表4-18 污染土壤熱處理量彙整

第一年	
熱增強型土壤氣體抽除系統 (TEVET)	污染土壤重量(t)
3-2區	3000
熱脫附系統	污染土壤重量(t)
多螺旋式熱脫附系統	
3-1區	8394
3-2區	10388
3-3區	4766
離地高溫熱脫附系統	
3-1區	23570
旋轉窯熱脫附法處理高濃度富集土壤	
4-3區及4-4區	20200
總計	67318
第二年	
熱脫附系統	污染土壤重量(t)
多螺旋式熱脫附系統	
西區	33096
旋轉窯熱脫附法	
北二區	114010



4.3 周界空氣監測

4.3.1 熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)周界空氣監測

本場址使用光離子化偵測器(Photo ionization detector, PID)進行周界空氣監測，光離子化偵測器如圖4-15，PID 用於量測熱增強型土壤氣體抽除設備中各土壤鼓風機組，與土壤蒸氣回收處之油氣濃度，藉以判斷是否發生氣體滲漏，並於處理土方之前、中、後段(5-171、5-189及5-209)與土壤蒸氣回收處(5-167)進行氣體監測，如圖4-16所示。



圖4-15 現場周界空氣檢測

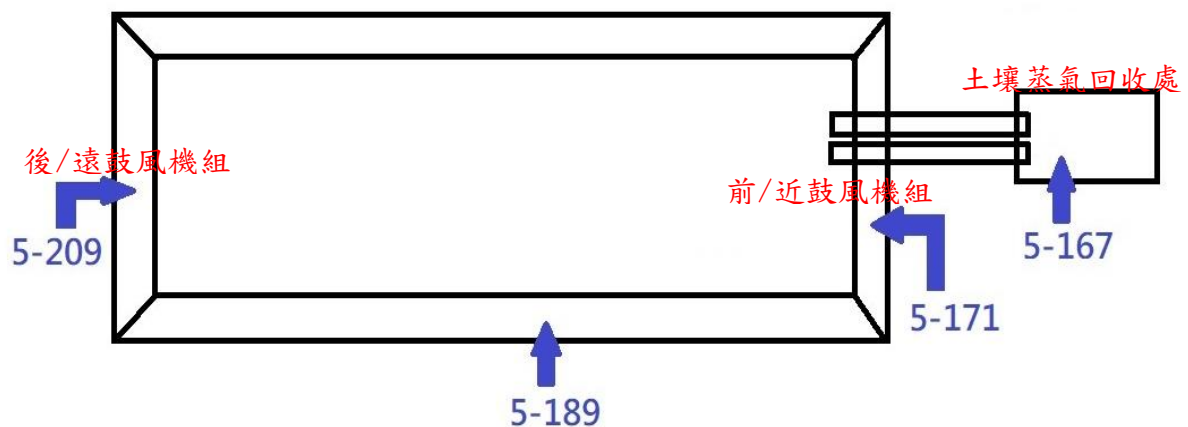


圖4.16 熱增強型土壤氣體抽除設備周界空氣採樣點



由表4-19結果顯示，熱增強型土壤氣體抽除法(TEVET)周界空氣監測濃度為1.4 ppm，土壤蒸氣回收處(5-167)濃度為14 ppm，前/近鼓風機組(5-171)濃度為24 ppm，中間採樣點(5-189)濃度為26.4 ppm，後/遠鼓風機組(5-209)濃度為22.4 ppm，將各採樣點空氣採樣樣品送至認證實驗室分析(圖4-17)，其濃度分別為土壤蒸氣回收處(5-167)分析濃度為0.009 ppm，前/近鼓風機組(5-171)分析濃度為0.110 ppm，中間採樣點(5-189)分析濃度為0.149 ppm，後/遠鼓風機組(5-209)分析濃度為0.164 ppm，由現場 PID 分析數據與認證實驗室分析數據確認，熱增強型土壤氣體抽除法設備於運作時並不會有污染物藉由設備孔隙間排出至大氣中，此整治方法並不會對於環境造成二次傷害。

表4-19 熱增強型土壤氣體抽除法設施周界空氣檢測數據

現場 PID 監測數據			認證實驗室 分析數據
Sample	採樣點	濃度	
	周界空氣	1.4 ppm	Not available
5-167	土壤蒸氣回收處	14 ppm	0.009 ppm
5-171	前/近鼓風機組	24 ppm	0.110 ppm
5-189	中	26.4 ppm	0.149 ppm
5-209	後/遠鼓風機組	22.4 ppm	0.164 ppm



圖4-17 現場設備運作時空氣樣品採集



4.3.2 熱脫附設施周界空氣監測

各熱脫附設施周界需定期進行空氣品質監測，其結果如表4-20所示，操作期間環保單位亦維持定期監測，以確保場址周界空氣品質。

表4-20 熱脫附設施周界空氣品質監測結果

檢測日期	監測位置	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	濕度 (%)	風速 (M/S)	風向
111/08/24~25	3-1整治區 6-2堆置區	226	29.9	72.6	0.7	東
檢測項目	單位	檢測結果		管制值	MDL	檢測方法
		3-1整治區	6-2堆置區			
二氯二氟甲烷	ppb	ND	ND	18500	0.270	NIEA A715.16B
氯甲烷	ppb	ND	ND	923	0.275	NIEA A715.16B
二氯二氟乙烷(1,2-二氯-1,1,2,2-四氟乙烷)	ppb	ND	ND	18400	0.277	NIEA A715.16B
氯乙烯	ppb	ND	ND	93.9	0.249	NIEA A715.16B
1,3-丁二烯	ppb	ND	ND	183	0.279	NIEA A715.16B
溴甲烷	ppb	ND	ND	90.6	0.242	NIEA A715.16B
氯乙烷	ppb	ND	ND	18500	0.239	NIEA A715.16B
氯三氟甲烷(三氯一氟甲烷)	ppb	ND	ND	18500	0.257	NIEA A715.16B
1,1-二氯乙烯	ppb	ND	ND	-	0.217	NIEA A715.16B
二氯甲烷	ppb	ND	ND	928	0.243	NIEA A715.16B
1,1,2-三氯-1,2,2-三氟乙烷	ppb	ND	ND	18500	0.252	NIEA A715.16B
反-1,2-二氯乙烯	ppb	ND	ND	3700	0.226	NIEA A715.16B
順-1,2-二氯乙烯	ppb	ND	ND	3700	0.284	NIEA A715.16B
1,1-二氯乙烷	ppb	ND	ND	1850	0.226	NIEA A715.16B
丁酮(2-丁酮)	ppb	ND	ND	3670	0.245	NIEA A715.16B
正己烷	ppb	ND	ND	917	0.214	NIEA A715.16B
三氯甲烷(氯仿)	ppb	ND	ND	186	0.222	NIEA A715.16B
1,2-二氯乙烷	ppb	ND	ND	183	0.241	NIEA A715.16B
1,1,1-三氯乙烷	ppb	ND	ND	6480	0.237	NIEA A715.16B
苯	ppb	ND	ND	500	0.219	NIEA A715.16B
四氯化碳(四氯甲烷)	ppb	ND	ND	38.3	0.240	NIEA A715.16B
環己烷	ppb	ND	ND	5490	0.271	NIEA A715.16B
1,2-二氯丙烷	ppb	ND	ND	1390	0.331	NIEA A715.16B
甲基丙烯酸甲酯	ppb	ND	ND	1840	0.240	NIEA A715.16B



表4-20 (續)

檢測項目	單位	檢測結果		管制值	MDL	檢測方法
		3-1 整治區	6-2 堆置區			
一溴二氯甲烷	ppb	ND	ND	-	0.240	NIEA A715.16B
三氯乙烯	ppb	ND	ND	927	0.366	NIEA A715.16B
正庚烷(庚烷)	ppb	ND	ND	7350	0.213	NIEA A715.16B
甲基異丁酮 (4-甲基-2-戊酮)	ppb	ND	ND	918	0.235	NIEA A715.16B
順-1,3-二氯丙烯	ppb	ND	ND	18.3	0.251	NIEA A715.16B
反-1,3-二氯丙烯	ppb	ND	ND	18.3	0.243	NIEA A715.16B
1,1,2-三氯乙烷	ppb	ND	ND	187	0.250	NIEA A715.16B
甲苯	ppb	ND	ND	2000	0.239	NIEA A715.16B
二溴氯甲烷	ppb	ND	ND	-	0.253	NIEA A715.16B
二溴乙烷 (1,2-二溴乙烷)	ppb	ND	ND	371	0.254	NIEA A715.16B
四氯乙烯	ppb	ND	ND	926	0.305	NIEA A715.16B
氯苯	ppb	ND	ND	1380	0.258	NIEA A715.16B
苯乙烷(乙苯)	ppb	ND	ND	2000	0.197	NIEA A715.16B
中間,對-二甲苯	ppb	ND	ND	2000	0.396	NIEA A715.16B
苯乙烯	ppb	ND	ND	918	0.213	NIEA A715.16B
1,1,2,2-四氯乙烷	ppb	ND	ND	18.6	0.238	NIEA A715.16B
鄰-二甲苯	ppb	ND	ND	2000	0.229	NIEA A715.16B
對-乙基甲苯	ppb	ND	ND	-	0.189	NIEA A715.16B
1,3,5-三甲基苯	ppb	ND	ND	459	0.206	NIEA A715.16B
1,2,4-三甲基苯	ppb	ND	ND	459	0.197	NIEA A715.16B
氯甲苯 (氯化甲基苯)	ppb	ND	ND	-	0.268	NIEA A715.16B
間-二氯苯(1,3-二氯苯)	ppb	ND	ND	-	0.283	NIEA A715.16B
對-二氯苯(1,4-二氯苯)	ppb	ND	ND	1380	0.273	NIEA A715.16B
鄰-二氯苯(1,2-二氯苯)	ppb	ND	ND	924	0.319	NIEA A715.16B
1,2,4-三氯苯	ppb	ND	ND	92.1	0.301	NIEA A715.16B
六氯丁二烯	ppb	ND	ND	0.365	0.281	NIEA A715.16B



表4-20 (續)

檢測項目	單位	檢測結果		管制值	MDL	檢測方法
		3-1 整治區	6-2 堆置區			
丙烯	ppb	ND	ND	—	0.306	NIEA A715.16B
乙醇	ppb	ND	<2.0(0.63)	18300	0.542	NIEA A715.16B
丙烯醛	ppb	ND	ND	1.84	0.471	NIEA A715.16B
丙酮	ppb	ND	<2.0(0.57)	13700	0.392	NIEA A715.16B
異丙醇	ppb	ND	ND	60	0.248	NIEA A715.16B
二硫化碳	ppb	ND	ND	183	0.230	NIEA A715.16B
甲基第三丁基醚	ppb	ND	ND	733	0.221	NIEA A715.16B
醋酸乙烯酯	ppb	ND	ND	182	0.353	NIEA A715.16B
乙酸乙酯	ppb	ND	ND	7330	0.248	NIEA A715.16B
四氫呋喃	ppb	ND	ND	3670	0.200	NIEA A715.16B
1,4-二氧陸園	ppb	ND	ND	458	0.303	NIEA A715.16B
2-己酮	ppb	ND	ND	—	0.238	NIEA A715.16B
溴仿	ppb	ND	ND	9.21	0.261	NIEA A715.16B
苯	ppb	ND	ND	182	0.353	NIEA A715.16B
	ppb					NIEA A715.16B
	ppb					NIEA A715.16B
	ppb					NIEA A715.16B



4.4. 熱處理設施碳排放估算

針對本場址之各種熱處理設施包括熱增強型土壤氣體抽除及各區熱脫附設施，伴隨大型場址整治操作期程，本計畫蒐集熱處理碳排放資訊，以供國內持續推動綠色及永續整治之參考，在離場及離地之場址整治中，從生命週期研究(life cycle assessment, LCA)發現，污染土壤體積及運輸距離是污染土壤熱處理的環境衝擊最重要之因子(Liang et al., 2023)。

前人針對6種離地土壤處理技術，包括開挖及處置、離地熱處理、離地土壤蒸氣處理、離地生物復育、焚化、離地土壤清洗之生命週期進行研究，彙整63案例進行各種離地土壤處理技術其溫室氣體排放(greenhouse gas (GHG) emission ($\text{CO}_2\text{-eq}$))比較，顯示6種離地土壤處理技術溫室氣體排放變異極大，為 $3.1 \times 10^{-7} \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ 至 $8.2 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ ，其中焚化處理的平均溫室氣體排放為 $0.7 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ 。

熱脫附的平均溫室氣體排放為 $0.07 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ ，其來源係彙整自四個熱脫附案例(Amponsah et al., 2018)，包括以熱脫附處理一般性污染物，其溫室氣體排放為 $0.212 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Beames et al., 2015);針對汞進行熱脫附處理，其溫室氣體排放 $0.0357 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Hou et al., 2016);Inoue 及 Katayama (2011)針對持久性污染物，進行熱脫附處理，其溫室氣體排放為 $0.0178 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ ，針對不同污染物進行熱脫附處理，其溫室氣體排放為 $0.000942 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Vignes, 2011)，研究指出在最壞情形推估下熱脫附溫室氣體排放最高值為 $0.2 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ (Amponsah et al., 2018)。

本計畫據此參數($0.07 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$ 及 $0.2 \text{ t CO}_2\text{-eq/m}^3$)作為計算各區不同單元熱脫附設施其溫室氣體排放推估之上下限值，如表4-21所示。大型場址第一年共完成七個分區整治，其中有五個分區(3-1區、3-2區、3-3區、4-3區、及4-4區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估平均值為 $3072.8 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ，熱處理設施溫室氣體總排放推估最高值為 $9049.3 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。第二年有二個分區(西區、北-2區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估為 $6865 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。熱處理設施溫室氣體總排放推估最高為 $19614.1 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。

綜合大型石化場址整治期間，所有個整治區其熱處理設施溫室氣體總排放之平均值推估為 $9937.7 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ，推估熱處理設施溫室氣體總排放最高上限值為 $28393.4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ，此參數可供國內制定綠色及永續整治工法及擬定或盤查各整治工法碳足跡之參考。



表4-21 熱脫附設施溫室氣體排放推估

多螺旋式熱脫附系統	污染土壤重量 (t)	污染土壤體積 (m ³)	GHC (t CO ₂ -eq/site) 平均	GHC (t CO ₂ -eq/site) 最高
3-1區	8394	5596	391.72	1119.2
3-2區	10388	6925	484.77	1385.1
3-3區	4766	3177	222.41	635.47
西區	33096	22054	1544.48	4412.8
離地高溫熱脫附系統	污染土壤重量 (t)	污染土壤體積 (m ³)	GHC (t CO ₂ -eq/site) 最低	GHC (t CO ₂ -eq/site) 最高
3-1區	23570	14731	1031.2	2946.2
熱脫附法處理高污染富集土壤	污染土壤重量 (t)	污染土壤體積 (m ³)	GHC (t CO ₂ -eq/site) 最低	GHC (t CO ₂ -eq/site) 最高
4-3區及4-4區	20200	13467	942.67	2693.3
北二區	114010	76007	5320.47	15201.3
第一年 (3-1區、3-2區、3-3區、4-3區及4-4區)	65844.5	43896.33	3072.74	8779.27
第二年 (西區、北二區)	147106	98070.67	6864.95	19614.1
合計	212950.5	141967	9937.69	28393.4



第五章、結論與建議

5.1 結論

針對大型石化場址不同整治區所使用之不同熱處理系統，熱處理成本依不同整治區廠商所提供資料約為4000-4800元/公噸。各種熱處理設備執行成果重點將綜合呈現於以下各項。

1. 熱增強型土壤氣體抽除設備

本計畫整治技術發展之目標，第一年以建置及完備熱增強型土壤氣體抽除法及熱脫附法設施，以配合大型場址在第三區及第四區之快速整治進度，因此計畫工作項目以評估不同熱處理系統對污染土壤處理效能之分析為主，著重設施操作參數蒐集及調整。第一年結果顯示，由於 TEVET 操作處理三批次污染土壤之 TPH_g 均相對低，不易彰顯其成效，柴油類總石油碳氫化合物 $\text{TPH}_d(\text{C}_{10}\text{-C}_{40})$ 濃度範圍為275 mg/kg 至3370 mg/kg，TEVET 處理後分析濃度為33.3 mg/kg 至4420 mg/kg， TPH_d 移除介於7%至57%，由三批次污染土壤分析中可觀察出熱增強型土壤氣體抽除技術對於總石油碳氫化合物 $\text{TPH}_d(\text{C}_{10}\text{-C}_{40})$ 之移除率受到污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，其中部份污染土壤樣品於處理前後，對於總石油碳氫化合物 $\text{TPH}_d(\text{C}_{10}\text{-C}_{40})$ 分析數據有提升之現象，可能為土壤中污染分布不均質且污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低所致。

2. 多螺管式熱脫附系統

多螺管式熱脫附系統在第一年執行期間，在三個整治區域共處理污染土壤23548公噸，污染土壤總石油碳氫化合物濃度範圍為2089 mg/kg 至6820 mg/kg，整體處理效能顯示除3-2區單一批次 TPH 移除率為73.7%外， TPH 移除率介於84.1%至99.9%。第二年配合大型場址啟動第三階段整治工程，自2023年11月至2024年9月執行期間，共處理約33096公噸之污染土壤，污染土壤總石油碳氫化合物濃度範圍為529 mg/kg 至9407 mg/kg， TPH 移除率介於64.5%至99.5%，由於不同整治區域其土壤質地不同、受污染次數及時間年代不一、污染物種類、及污染程度不同，有些批次污染土壤係經過生物復育工法或水洗工法施作後，無法達到污染物移除，而改以熱處理方式，因此土壤異質性甚高，所以會造成在連續操作下，熱處理出土之 TPH 濃度差異，但整體而言，熱處理後之土壤均符合操作單位及驗證單位(高雄市工務局)認定合格土壤之基本法規需求，即土壤 TPH 濃度需小於1000 mg/kg 方能回填及再利用，多螺管式熱脫附系統設備經長時間操



作，符合大型石化場址之污染土壤挖掘、不同工法離地復育、回填或再利用之快速整治方式。

3. 離地高溫熱脫附系統

檢核3-1區離地高溫熱脫附系統，污染土壤進料 TPH 濃度最高為9892 mg/kg，出料濃度介於113至197 mg/kg，平均每日操作量達115 B.M³(自然方)(約195公噸)，整治期間以熱處理進行污染改善土壤數量為14,731 B.M³(自然方)，約為18413.75 L.M³之鬆方(Loose cubic meter, L.M³)，約為27620公噸，整體處理效能符合預期。

4. 旋轉窯熱處理

場址4-3及4-4區採用土壤水洗為主要整治工法，油品污染土壤經過土壤清洗步驟，在以水清洗的情形下，一些污染油品可能會溶於水中或上浮到水面，然後清洗過之砂、細砂和砂礫可以在洗滌單元中排出，土壤水洗裝置使用粒徑分離方式，從較大顆粒的土壤中分離出洗滌土中的極細砂、粉土和黏土，因此在水洗過程中細粒徑之粉土和黏土易懸浮，最後貢獻為含高濃度 TPH 水洗後之粉、黏土質土壤(污泥)，而4-3及4-4區採熱脫附法處理之對象是污染土壤經清洗後產出的污染物富集土壤，土壤水洗過程中不可避免所產生之細粒徑殘留物，此類型土壤特性為進料時非常溼黏不易輸送，出料時則非常乾燥易引起大量揚塵，技術難度甚高，設備安裝及試車整改共歷時9個月，受限於專案完工期限，實際運作時間僅約70工作日(2022年12月至2023年2月)。全案累計處理20,200公噸濃縮污泥，每套平均處理量為10.5公噸/小時，略低於原設計之12公噸/小時。系統整體運作順暢，故障皆可在當日排除，開機率(有效運作)可達82.0%。進料濃度介於5,870–36,800 mg/kg，平均值為14,700 mg/kg，典型的進料碳數分布以 C₁₂–C₂₂為主，屬柴油範圍。出料土壤每小時分堆檢測，出料濃度則介於24–310 mg/kg，平均為82 mg/kg，TPH 去除率達99.5 %以上。

北二區(5-1區、5-2區、部分6-2區)污染土壤以旋轉窯熱處理方式進行，於2024年1月19日起開始雙線運轉，截至2024年5月28日設備結束操作止，總操作天數121天，累計處理量達114010公噸。共4套熱脫附爐進行土壤復育，其開機率(有效工時)可達90%，單日處理量平均可達975公噸，實際單爐產量為10公噸/小時/爐，高於原先規畫之設計量8公噸/小時/爐，實際處理量可高於設計處理量之原因，主要是進料污染土壤含水量比預期低。污染土進料濃度介於1719–10500 mg/kg，平均值為3409 mg/kg，出料濃度則介於61–328 mg/kg，平均為145 mg/kg，TPH 去除率達96%，本熱脫附系統之所以能有



高去除率，主要因加熱方式採直接加熱，窯內土壤受熱面積大，加上窯體轉動，土壤在窯內均勻混合，故脫附效果極佳，合格品佔比可達100%，能穩定產出高品質產品。

5. 碳足跡

大型場址第一年共完成七個分區整治，其中有五個分區(3-1區、3-2區、3-3區、4-3區、及4-4區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估平均值為3072.8 t CO₂-eq，熱處理設施溫室氣體總排放最高推估值為9049.3 t CO₂-eq。第二年有二個分區(西區、北-2區)污染土壤部分使用熱處理，熱處理設施溫室氣體總排放推估為6865 t CO₂-eq。熱處理設施溫室氣體總排放推估最高值為19614.1 t CO₂-eq。綜合大型石化場址整治期間，整合所有各整治區其熱處理設施溫室氣體總排放之平均值推估為9937.7 t CO₂-eq，推估熱處理設施溫室氣體總排放最高上限值為28393.4 t CO₂-eq，此參數可供國內制定綠色及永續整治工法及擬定或盤查各整治工法碳足跡之參考。

5.2 建議

有關本計畫工作重點係配合大型場址持續整治，蒐集熱脫附處理設備基線數據，同時進行節能減廢措施評估及熱處理極佳化測試。TEVET 在過去使用案例上，對於總石油碳氫化合物汽油類 TPH_g(C₆-C₉)之移除率具一定成效，但在本計畫三批次操作，由於污染土壤其 TPH_g 均相對低，不易比較 TPH_g 移除成效，但對於總石油碳氫化合物柴油類 TPH_d(C₁₀-C₄₀)之移除率受到污染物沸點較高、蒸氣壓較低、揮發性較低之影響，效果受到限制，該技術在國內僅使用於少數私人場址整治，未來可持續推廣應用於汽油污染土壤及含氯有機溶劑污染土壤之離地整治。

高溫熱脫附處理其目的為移除污染物，且盡可能保留原來土壤之物理性質及樣態，以便復育土壤可以回填場址及進行再利用。面對大型場址中多元化之污染型態(包括各類型有機化合物、重金屬)，不同設備之污染土壤目標污染物熱脫附去除效率差異，必須視不同系統處理之污染土壤濃度、土壤含水率、土壤質地、污染物風化程度，進行場置性調整系統之升溫條件、土壤滯留時間及必要之輔助工具等，進行即時調整包括熱處理設施的各單元階段溫度監控、土壤停留時間、螺管升溫條件、系統熱傳導均勻性、評估修正操作時間，尤其多螺管式熱脫附系統及旋轉窯系統在經過兩年以上多批次處理污染土壤，結果顯示符合大型場址整治需求，這些操作及維護經驗參數及碳排



放資訊，可供場址熱處理法適用時機判斷依據，並作為國內土壤及地下水整治界熱處理設施整廠輸出國外及系統操作維護及優化參考。



第六章、參考文獻

- 台灣中油股份有限公司 (2020) 高廠及其它區域地下環境污染改善工作總顧問技術服務
高廠整體規劃與改善成果第一階段完成報告，環境保護及生態保育處，高雄。
- 台灣中油股份有限公司 (2021) 煉製事業部高雄煉油廠工廠區土壤及地下水污染控制場
址控制計畫暨2處土壤污染整治場址整治計畫(修訂一版)，高雄。
- 台灣中油股份有限公司 (2024) 煉製事業部高雄煉油廠工廠區土壤及地下水污染控制場
址控制計畫(第六次變更)暨2處土壤污染整治場址「高雄市楠梓區油廠段41地號等
9筆地號及後勁段月眉小段837地號(油廠段44地號)整治計畫(合併變更) (第三次變
更)(修訂一版)，高雄。
- 美商科進栢誠工程顧問有限公司 (2021) 熱增強型土壤氣體抽除修復方法，台北。
- Amponsah, N.Y., Wang, J., Zhao, L. (2018) A review of life cycle greenhouse gas (GHG)
emissions of commonly used ex-situ soil treatment technologies, *Journal of Cleaner
Production*, 186, 514-525.
- Beames, A., et al., (2015) Accounting for land-use efficiency and temporal variations between
brownfield remediation alternatives in life-cycle assessment. *Journal of Cleaner
Production*, 101, 109-117.
- Falciglia, P.P., Giustra, M.G., Vagliasindi, F.G.A. (2011) Low-temperature thermal desorption
of diesel polluted soil: Influence of temperature and soil texture on contaminant removal
kinetics, *Journal of Hazardous Materials*, 185, 392-400.
- Falciglia, P.P., De Guidi, G., Catalfo, A., Vagliasindi, F.G.A. (2016) Remediation of
soils contaminated with PAHs and nitro-PAHs using microwave irradiation, *Chemical
Engineering Journal*, 296, 162-172.
- Falciglia, P.P., Lumia, L., Giustra, M.G., Gagliano, E., Roccaro, P., Vagliasindi, F.G.A., Bella,
G.D. (2020) Remediation of petrol hydrocarbon-contaminated marine sediments by
thermal desorption, *Chemosphere*, 260, 127565.
- Feeney, R.J., Nicotri, P.J., Janke, D.S., (1998) *Overview of Thermal Desorption Technology*,
Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California.
- Gao, Y.F., Yang, H., Zhan, X.H. Zhou, L.X. (2013) Scavenging of BHCs and DDTs from soil
by thermal desorption and solvent washing, *Environmental Science Pollution Research*, 20,
1482-1492.



- Hou, D., Gu, Q., Ma, F., O'Connell, S., (2016) Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land, *Journal of Cleaner Production*, 139, 949-956.
- Inoue, Y., Katayama, A., (2011) Two-scale evaluation of remediation technologies for a contaminated site by applying economic input-output life cycle assessment: risk-cost, risk-energy consumption and risk-CO₂ emission, *Journal of Hazardous Materials*, 192 (3), 1234-1242.
- Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R. (2004) An overview and analysis of site remediation technologies, *Journal of Environmental Management*, 71, 95-122.
- Lee, S.H., Lee, J.H., Jung, W.C., Park, M., Kim, M.S., Lee, S.J., Park, H. (2020) Changes in soil health with remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils using two different remediation technologies, *Sustainability*, 12, 1-10.
- Li, F., Zhang, Y., Wang, S., Li, G., Yue, X., Zhong, D., Chen, C., Shen, K. (2020) Insight into ex-situ thermal desorption of soils contaminated with petroleum via carbon number-based fraction approach, *Chemical Engineering Journal*, 385, 123946.
- Liang, T., Huo, M., Yu, L., Wang, P., Zheng, J., Zhang, C., Wang, D., Ding, A., Fasheng Li, F. (2023) Life cycle assessment-based decision-making for thermal remediation of contaminated soil in a regional perspective, *Journal of Cleaner Production*, 392, 136260.
- Liu, H., Li, J.B., Zhao, M., Li, Y.B., Chen, Y.M. (2019) Remediation of oil-based drill cuttings using low-temperature thermal desorption: Performance and kinetics modeling, *Chemosphere*, 235, 1081-1088.
- Percin, P.R.D., 1995. Application of thermal desorption technologies to hazardous waste sites. *Journal of Hazardous Materials*, 40 (2), 203-209.
- Poppendieck, D.G., Loehr, R.C., Webster, M.T. (1999a) Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 1. Laboratory studies, *Journal of Hazardous Materials*, 69(1), 81-93.
- Poppendieck, D.G., Loehr, R.C., Webster, M.T. (1999b) Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 2. Field study, *Journal of Hazardous Materials*, 69(1), 95-109.
- Sato, T., Todoroki, T., Shimoda, K., Terada, A., Hosomi, M. (2010) Behavior of PCDDs/PCDFs in remediation of PCBs-contaminated sediments by thermal desorption, *Chemosphere*, 80 184-189.



- Stegemeier, G.L., Vinegar, H.J. (2001) Thermal Conduction Heating for In-Situ Thermal Desorption of Soils (Chapter) *In Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook*, Oh, C.H. Ed, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Tatano, F., Felici, F., Mangani, F. (2013) Lab-scale treatability tests for the thermal desorption of hydrocarbon-contaminated soils, *Soil & Sediment Contamination*. 22, 433-456.
- Troxler, W.L., Cudahy, J.J., Zink, R.P., Yezzi, J.J., Rosenthal, S.I. (1993) Treatment of Nonhazardous Petroleum-Contaminated Soils by Thermal Desorption Technologies, *Air & Waste*, 43(11), 1512-1525.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2004) *Remediation technology cost compendium-year 2000*, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA-542-R-01-009, Washington, DC.
- Vignes, R.P. (2001) *Use Limited Life-cycle Analysis for Environmental Decisionmaking*, p. 15. North Carolina.
- Zhao, C., Dong, Y., Feng, Y., Li, Y., Dong, Y. (2019) Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review, *Chemosphere*, 221, 841-855.