

行政院環境保護署

105 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工作

以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染 之土壤

期末報告(定稿本)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系
專案主持人：林啟燦 教授
專案執行期間：104 年 11 月 17 日起至
105 年 11 月 16 日止

中華民國 105 年 12 月 印製

「105 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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
政策性審查意見		計畫單位回覆		
1. 請依專案計畫書標準格式撰寫，勿刪除表單及格式，各項次說明或表格勿跨頁。		感謝 貴署提醒，遵照辦理。		
2. 研究經費之專任助理勞保費編列有誤，請依附表 2-2 規定更正編列經費。		已修正，如第八章研究經費編列所示。		
3. 「貴重儀器使用費」之欄位(二)、(三)，請填妥單位、數量及公告收費標準。		已修正，如第八章研究經費編列所示。		
4. 其他研究相關費用之差旅費(大眾交通工具/雜費)，請於備註欄補充說明人數及天數。		已修正，如第八章研究經費編列所示。		
5. 雜項費用，於項目名稱內拆項(如：報告印刷、資料檢索費、碳粉匣、紙張、文具用品…等)，並於說明欄內說明其用途。		已修正，如第八章研究經費編列所示。		
6. 「雜項費用」之碳粉匣，請依計畫使用覆實編列。		已修正，如第八章研究經費編列所示。		
7. 差旅費請依據行政院 103 年 7 月 7 日公告之「國內出差旅費報支要點」編列。		感謝 貴署提醒，遵照辦理。		
8. 如編列參加成果發表會之相關費用，單據日期需於計畫執行期程內，始得核銷。		感謝 貴署提醒，遵照辦理。		
9. 本計畫經費編列如有浮編不實之虞，期末檢具核銷審查未通過，將扣除該編列款項，不予以補助(或追繳)。		感謝 貴署提醒，遵照辦理。		
技術性審查意見		計畫單位回覆		
委員 1				
1. 計畫內容有些部分較過簡略，未見說明。例如：厭氧有機液肥如何製作？何謂健綠洗劑？土壤清		1. 厭氧有機液肥製作程序及最佳化之土壤清洗程序將於期中報告詳細說明。		

「105 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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
洗之程序？廚餘醱酵之處理程序？這些材料以及程序是否具有再現性？因其可能均會影響處理戴奧辛之效果。		2. 健綠洗劑：本計畫所使用之健綠洗劑製作過程為低耗能，對於空氣污染/二次污染較低，廢水部分將回收再利用、降低水資源使用量，材料部分為廢棄物再利用，故本計畫將此洗劑稱為健綠洗劑。 3. 實驗設計及過程會充分掌握相關材料之物理組成及或化學特性，以確保處理程序之可再現性。		
2. 戴奧辛污染土壤之性質以及戴奧辛濃度均會影響到處理效果，均應納入考量。		感謝委員的指導，本計畫將建立土壤粒徑重量百分濃度圖。		
委員 2				
1. 本計畫開發厭氧液肥水洗、好氧或兼氧廚餘醱酵、真菌分解之複合式生物降解程序處理戴奧辛污染土壤的技術，以此技術完成污染土壤處理目標。處理技術規劃方式為先透過厭氧液態有機肥料所富含之生物界面活性劑與添加健綠萃取劑進行濕洗處理，將戴奧辛自污土中溶出；清洗後之液體進行水處理；而液洗後所產出的低濃度土壤則接續以好氧廚餘醱酵及真菌分解方式進行生物處理，將污染降低至法規標準以下。		感謝委員的肯定。		
2. 主持人曾參與相關戴奧辛處理計畫，其經驗可勝任本計畫之執行。本計畫可發展本土之戴奧辛處理技術，對未來含戴奧辛污染物場址之整治應有貢獻，研究方法及步驟具可行性。		感謝委員的支持，本團隊會盡力執行本計畫，未來成果冀能提供國內含戴奧辛污染物場址整治之範例。		

「105 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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
3. 本計畫在學術或技術上具創新性，並具實場應用性。		感謝委員的肯定。	
委員 3			
1. 創新研究整治技術，但非本年度補助之優先項目。		感謝委員給予機會，團隊成員會更努力執行本計畫。	
2. 廚餘發酵液微生物菌種變化大，控制不易在應用於整治上如何能夠有效系統性應用與評估管理。		感謝委員指教，本計畫所使用的液肥主要影響處理物質為界面活性劑/共溶劑。	
3. 經濟效益？		本計畫所使用之廚餘堆肥是收集各鄉鎮之廚餘。廚餘本身為廢棄物，本團隊將廢棄物再利用，且在製作過程中低能耗、對於空氣污染/二次污染較低、廢水部分將回收再利用，降低水資源使用量，最後冀能提升土地價值及豐富周遭環境生態。	
委員 4			
1. 有機液肥及加入之萃取劑要能分解戴奧辛之真正關鍵因子為何？後續的「好氧廚餘發酵」與真菌等進行分解之菌種為何？其存在現場於環境特性為何？非僅憑文獻回顧。主持人能否可能找到這些結果並加以應用。		1. 加入有機液肥及加入萃取劑主要目的為將戴奧辛從固相轉移至液相，以減少污染土壤之量及濃度，以利後續生物降解。目前掌握液肥之共溶劑，包含有醇類、酯類、酮類、有機酸類等。 2. 好氧廚餘發酵及/或真菌降解戴奧辛之菌種及環境特性文獻回顧已清楚交代，能否成功應用為本計畫之研究目的。	
2. 如何有效在一年內降至<1000 ng (I-TEQ) /kg？		優先選擇中低濃度污染土壤，依據文獻回顧：Kao (2001)研究團隊在 TCDD 與 PCP 污染場地中，取含水層之沈積物作為活性污泥之原生菌來源，在試驗過程中添加醋酸及糖	

「105 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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
		蜜作為主要基質(碳源)，進行共代謝和還原脫氯。試驗結果得知，經 90 天培養厭氧活性污泥作為微生物菌劑和污泥餅的主要基質當中，TCDD 去除率高達 86%。本計畫將持續蒐集相關文獻並參考應用。	
3. 有機液肥及廚餘醱酵等如何使其可分解戴奧辛。		1. 有機液肥主要目的為將戴奧辛從固相轉移至液相，以減少污染土壤之量及濃度，以利後續生物降解。 2. 廚餘醱酵得掌控含水率、pH、溫度、碳氮比、供氣量等參數，以確保生物活性不被戴奧辛毒性抑制。	
4. 酌刪人事費（專任助理）38 萬元及部份反應器 20 萬元。		1. 感謝委員指教，人事經費已修正，如第八章研究經費編列所示。 2. 因本計畫處理污染物為世紀之毒-戴奧辛，戴奧辛藉由揮發、長程傳輸、乾/濕沉降、光解、生物累積及放大、生物降解等不同的自然作用散佈於不同的環境介質或生物體內，其中乾/濕沉降是戴奧辛被帶至地表水體或土壤的最主要機制。本團隊為了確保人體健康及避免污染環境及生態，故須使用反應器，降低危害之風險。	
委員 5			
1. 已執行經濟部類似計畫，建議彙整相關成果與經驗（本計畫與經濟部的計畫只是污染物不同）。		感謝委員提醒，會將科專計劃處理油污染之技術經驗典範移植至戴奧辛處理之挑戰。	
2. 水洗（或是濕處理的前處理）技術的成效請參考中石化的經驗。		感謝委員指教，本團隊將請教中石化對於水洗之相關經驗。另外，本團隊會持續蒐集國	

「105 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」

☒修正計畫書
 ☐期中報告
 ☐期末報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
		內外相關專利及期刊。		
3. 本技術若是擬處理 0.076 mm 以上的砂質為主的土壤部分，與中石化的經驗並不一致，中石化的經驗顯示 Dioxin 主要與 0.076 mm 以下的顆粒結合，砂質土中 Dioxin 相對含量較低。		因 0.076 mm 以下為細顆粒砂土或粉粘土，洗滌效率較差，本計畫為生物處理並考慮未來實用性，故選用 0.076 mm 以上的砂質土，且將會進行土壤特性分析，了解其土壤所含之有機質及其他相關性分析。		
4. 生物分解所能有效分解的分佈為何（以毒性當量而言）？建議評估經分解前後的分子量分布。		感謝委員提醒。本計畫優先考慮去除效率，若去除效率佳，再行評估戴奧辛處理前後的分子量分布變異。		
5. 添加物的比例為何？添加物的比例的合理性建議評估。		本計畫經過嚴謹文獻蒐集分析（期刊、專利），因戴奧辛總毒性當量高，故擬調配之堆肥比例也相對高；本計畫添加比例擬於 1：1~1：4 之間作調配。		
6. 處理成效是以毒性當量為單位化以單一的 Dioxin 的削減為單位？建議評估。		感謝委員指教，本案將採以總毒性當量 (I-TEQ)，搭配某單一戴奧辛物質來作衡量指標。		
7. 已執行經濟部類似計畫。		因具有相關經驗，有利於挑戰更難處理之污染物，且可直接進行更深入之研究及應用。		
8. 聘請專任助理較不具培育學生參與土水計畫的意義。		為能確保本案之進度與品質，仍規劃以具有專業背景之專任助理，輔以學生兼任助理之培育。		
綜合性審查意見		計畫單位回覆		
原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。		遵照辦理。		

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 已完成預定之工作項目和目標。		感謝委員肯定，期中報告後將繼續努力。	
2. 含戴奧辛厭氧液肥與水產生漿廢液，其中戴奧辛如何處理將是本研發技術可行性之重要關鍵，應納為本計畫之研究重點。		感謝委員建議，本計畫之研究重點須先證實厭氧液肥及/或水產生漿可萃取污土中戴奧辛，經證實若可行後，下一階段的確必須探討如何淨化厭氧液肥及/或水產生漿廢液中之戴奧辛，才能避免戴奧辛只是自固相轉移至液相，而成為二次污染之盲點。基於綠色且經濟可持續性整治（green sustainable remediation）之 GSR 概念，目前構想擬以厭氧條件探討廢液中戴奧辛是否具有還原脫氯降解現象，但受限於部分研究項目尚未完成，且戴奧辛檢測費用高昂所費不貲，故擬列為後續計畫重點。	
3. 厭氧液肥與水產生漿廢液能濕洗戴奧辛污染土壤之機制，建議也能加以探討。		感謝委員建議，本研究檢測化驗厭氧液肥，發現含醇、酯、醛、酮、胺、酸等類成分，具有界面活性劑功能，能將戴奧辛溶於液體中。而水產生漿之成分含有脂肪、胺基酸、碳氮磷等有機碳水化合物，亦具可將戴奧辛共溶於組織液潛力，後續將會蒐集其他資料再加佐證。	
委員 2			

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
1.	本研究採取以濕處理液洗及堆肥之非熱處理整治技術，處理受戴奧辛污土，期能將土壤戴奧辛濃度處理至符合法規標準1000 ng TEQ/Kg以下。目前結果顯示汙染土之處理成效尚未達預期。	感謝委員指導。 本專案利用濕處理液洗，已將富含戴奧辛之中高濃度污土搓洗至濃度低於 5000 ng TEQ/Kg 以下，但的確仍未符合 1000 ng TEQ/Kg 以下法規標準。後續，擬依計畫規劃，接續採用廚餘生物堆肥，再研究是否可將污土之戴奧辛濃度處理至符合法規標準。當然，繼續增加搓洗次數以達法規標準，也是選項之一；但預期增加之廢水量大，是否符合經濟效益仍持續評估中。	
2.	建議針對操作成本進行評估，並和目前中石化公司之使用方法比較。	感謝委員指教，在後續研究中，若能更完整地蒐集相關資訊，當即進行成本評估比較。	
3.	建議針對說明使用之限制及使用條件進行說明。	感謝委員指教，使用限制可能包含污土之戴奧辛濃度高低、土液比及反應溫度、搓洗物理設備性能如何提升及縮短時間、是否掌握廢液之淨化技術與成本，將依委員建議增修於期中或/及期末報告。	
4.	目前初步結果顯示處理成效尚無法達到預期目標。因此後續須評估此技術在實場應用之可行性。	感謝委員建議，本專案試驗利用濕處理液洗將含戴奧辛中高濃度之土壤洗至濃度 5000 ng TEQ/Kg 以下，接著利用堆肥處將污染濃度達至法標準。而本團隊將在後續進行操作條件及使用限制的評估和修正，以提升去除效率，並遵照委員意見對此技術進行實場應用之可行性。	
5.	可說明本方法之QA/QC程序。	感謝委員建議，將再加強修訂 QA/QC。本研	

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
		究之採樣分析基本上是遵循環檢所公告之標準方法：戴奧辛及呋喃檢測方法—同位素標幟稀釋氣相層析／高解析質譜法 (NIEA M801.13B)，唯考量中石化土壤樣品濃度較高，故沒有採用 HRGC/MS；但有規劃當樣品處理至接近管制標準時，則採取平行樣品送至 HRGC/MS 實驗室進行再確認分析。	
6. 後續可提出專利之規劃。		感謝委員建議。本團隊會將委員建議列入規劃考量。	
7. 後續可補充成果是否具延伸性，如是否可處理其他類似性質汙染。		遵照委員意見對此技術進行延伸性評估。若能成功將高端較難處理的戴奧辛處理至達標，相信對於多氯聯苯等其他類似性污染物質之處理成效將有很大的信心及成效。	
委員 3			
1. 請加強相關文獻探討。		感謝委員建議，遵照辦理。	
2. 廚餘發酵菌種成分複雜，如何有效控制菌種作為戴奧辛分解的復育技術，仍待進一步規劃與實驗可操作可預期的方法，如何使研究為可應用的成熟技術。		感謝委員建議，將擬加強微生物研究探討。	
1. QA/QC ?		感謝委員建議，將再加強修訂 QA/QC。本研究之採樣分析基本上是遵循環檢所公告之標準方法：戴奧辛及呋喃檢測方法—同位素標幟稀釋氣相層析／高解析質譜法 (NIEA M801.13B)，唯考量中石化土壤樣品濃度較高，故沒有採用 HRGC/MS；但有規劃當樣	

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
		品處理至接近管制標準時，則採取平行樣品送至 HRGC/MS 實驗室進行再確認分析。	
委員 4			
1. 已依計畫進度及項目執行。		感謝委員指教。	
2. 已完成初步結論、成果自評及建議。		感謝委員指教。	
3. 請補充計畫審查意見之回覆對照表及補充後續工作說明。		感謝委員指教，遵照辦理。	
委員 5			
1. 執行現況、流程及方法已說明。		感謝委員指教。	
2. 計畫後續執行工作項目已說明。		感謝委員指教。	
3. 計畫執行進度與預定進度相符，本計畫至期中報告時執行進度並無落後。		感謝委員指教。	
4. 已有初步成果，初步成果與原計畫目標符合。		感謝委員指教。	
5. 至期中報告時，整體研究成果符合預期。		感謝委員指教。	
6. 已有初步研究成果，且已有初步討論。但對於成果的實務應用與潛在應用性仍待於期末報告時有更進一步的討論。		感謝委員建議，本專案試驗利用濕處理液洗將含戴奧辛中高濃度之土壤洗至濃度 5000 ng TEQ/Kg 以下，接著利用堆肥處將污染濃度達至法標準。而本團隊將在後續進行操作條件及使用限制的評估和修正，以提升去除效率，並遵照委員意見對此技術進行實場應用之可行性評估，同時考量技術可行性及經濟可行性。	

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
7. 研究內容與計畫目的相符，但研究成果的實務應用性仍待期末時具體討論。	遵照委員意見，將於期末成果中對此進行實務應用性評估及討論，同時考量技術可行性及經濟可行性。		
8. 相關機制宜說明（是酸洗？是有機質吸附？或是降解轉化？或是...）。	液洗實驗的機制為以溶劑的界面活性劑功能與油溶性質，將戴奧辛帶離土壤，並溶出於液體中。對於戴奧辛而言，液洗機制無作化學變化只有相轉移。 而生物堆肥實驗的機制為藉由堆肥中菌種之代謝或活性作用，將低濃度的戴奧辛降解。在高溫期中，嗜熱及溫微生物會活躍，將大量的有機物(含戴奧辛)分解或降解。		
9. 操作條件（例如劑量之間的關係...等等）建議說明。	感謝委員建議，液洗實驗的操作條件如下： 1. 土液比：1：2.5(土壤約 200 公克，萃取液約 500 公克) 2. 溫度：攝氏 30 度 3. 搓洗次數及時間：每次搓洗一小時，每批次重複搓洗五至六次，計五或六小時。 4. 其他條件：40kHz 的超音波震盪器，結合上下兩對雙螺槳攪拌搓洗。 5. 洗液配方為厭氧液肥及水產生漿。		
10. 污染物的最終宿命建議說明。	將加強相關資訊蒐集，希望最終宿命可以降解為水、二氧化碳和含氯酸等物質。		
11. 操作方式建議說明（是泥漿法？生物堆肥法？或是...？）	生物堆肥實驗屬於生物堆法，利用空壓機將空氣打入肥堆，使得肥堆中的微生物(菌種)作用將有機物轉化為堆肥材料，且提供這些		

「105 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」

☐修正計畫書 ☒期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756
		微生物適當的生存環境，促使其能夠迅速及有效地活動。	
12. 操作環境因子建議說明（是厭氧？或是好氧？或是...？）		生物堆肥實驗為使用好氧作用，提供肥堆適量的通氣量，為常溫均勻曝氣，空氣壓力為 1.01~1.02 atm，空氣量為每分鐘肥堆體積的 0.1~0.15 倍，因天氣、基質等等影響，而做適當調整。	
本署審查意見		計畫單位回覆	
1. 請檢附審查意見回覆對照表。		遵照辦理。	
2. 專案基本資料表請補蓋專案主持人印章。		遵照辦理。	
3. 專案成果績效自評表請更正查核點。		遵照辦理。	
4. 請增加後續工作說明。		遵照辦理。	

「105 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」

□修正計畫書 □期中報告

■期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	■ 研究專案 □ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	■ 整治 □ 評估 □ 預防 □ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
委員審查意見		計畫單位回覆		
委員 1				
1. 建議於結果與討論中放入每日發酵條件控制數據(溫度、含水率、好氧、pH值、C/N Ratio)，及完成後之堆肥腐熟度與肥效成分是否符合CNS等規定。		1. 已將每日監控條件(溫度、含水率、好氧以及pH值)修正至第67~71頁。 2. 堆肥腐熟度之判定有許多種簡易的方法，例如：觀察有機質肥料外觀顏色與味道、種子發芽測定法、還原糖含量、蚯蚓法、C/N比、EC值(導電度)、pH等。本計畫是觀察有機質肥料外觀顏色來判定此堆肥之腐熟度，腐熟的堆肥，外觀顏色為深黑色或黑褐色，具膨鬆感覺。 3. 本計畫未做肥效成份分析。其它類似計畫有執行，均能符合雜項堆肥規定。		
委員 2				
1. 本研究係導入綠色及可持續性整治，採取以濕處理液洗及堆肥之非熱處理整治技術，處理受戴奧辛污土，並減少空污、水污、廢棄物等二次污染環境足跡，且更經濟低廉以使整治得以持續順利進行。將土壤戴奧辛濃度處理至符合法規標準 1000 ng I-TEQ/Kg 以下，洗土成本低於每公噸污土 6000 元。		感謝委員的肯定。		
2. 請進行成本分析，比較本技術和其他技術是否具成本上的優勢。		下表為美國聯邦部會 FRTR 土壤整治技術與平均單價表。近年美國等環保先進國家與我國環保署，皆大力倡導綠色及可持續性整		

「105 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」

□修正計畫書 □期中報告
■期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	■ 研究專案 □ 模場試驗																																									
計畫主持人	林啟燦	研究類別	■ 整治 □ 評估 □ 預防 □ 自訂																																									
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤																																											
專案連絡人	陳葦亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756																																									
		治 (Green Sustainable Remediation, GSR) 觀念，故本計畫採取以濕處理液洗及堆肥之非熱處理整治技術，處理戴奧辛污土，使用濕處理及廚餘淨化之原物料為廢棄物資源回收再利用，更符合環境友善綠色整治，並減少空污、水污、廢棄物等二次污染環境足跡。另外，本技術還能提升污土之肥力，產出物經安全評估後，亦可作為土壤改良劑，提升經濟及後續自然整治效益。本計畫研發之水產生漿因原料較貴，成本 25,000 元/噸；液肥成本僅 2,500 元/噸，較具競爭力。 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">技術名稱</th> <th colspan="2">單價 (新台幣，元/每立方公尺)</th> </tr> <tr> <th>英文</th> <th>中文</th> <th>平均低價</th> <th>平均高價</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Soil Washing</td> <td>洗土</td> <td>2100</td> <td>5610</td> </tr> <tr> <td>Thermal Desorption</td> <td>熱脫附</td> <td>1320</td> <td>7560</td> </tr> <tr> <td>Biopile</td> <td>生物堆</td> <td>3900</td> <td>7800</td> </tr> <tr> <td>Landfarming</td> <td>土耕法</td> <td>3000</td> <td>7800</td> </tr> <tr> <td>Slurry Phase</td> <td>土漿相</td> <td>3900</td> <td>6000</td> </tr> <tr> <td>Chemical Extraction</td> <td>化學萃取</td> <td>10740</td> <td>51510</td> </tr> <tr> <td>Chemical Reduction /Oxidation</td> <td>氧化還原</td> <td>5700</td> <td>19800</td> </tr> <tr> <td>Dehalogenation</td> <td>脫鹵</td> <td>6600</td> <td>7500</td> </tr> </tbody> </table>			技術名稱		單價 (新台幣，元/每立方公尺)		英文	中文	平均低價	平均高價	Soil Washing	洗土	2100	5610	Thermal Desorption	熱脫附	1320	7560	Biopile	生物堆	3900	7800	Landfarming	土耕法	3000	7800	Slurry Phase	土漿相	3900	6000	Chemical Extraction	化學萃取	10740	51510	Chemical Reduction /Oxidation	氧化還原	5700	19800	Dehalogenation	脫鹵	6600	7500
技術名稱		單價 (新台幣，元/每立方公尺)																																										
英文	中文	平均低價	平均高價																																									
Soil Washing	洗土	2100	5610																																									
Thermal Desorption	熱脫附	1320	7560																																									
Biopile	生物堆	3900	7800																																									
Landfarming	土耕法	3000	7800																																									
Slurry Phase	土漿相	3900	6000																																									
Chemical Extraction	化學萃取	10740	51510																																									
Chemical Reduction /Oxidation	氧化還原	5700	19800																																									
Dehalogenation	脫鹵	6600	7500																																									
3. 請說明本技術用於實場可能在環境上受到的干擾問題。		本技術用於實場可能會受到土壤粒徑分佈、土壤有機物含量等干擾，而影響本技術之效率。																																										
4. 說明本技術在應用時，如何進行QA/QC		1. 濕洗部份，要控制濕處理洗劑之成分穩																																										

「105 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」

☐修正計畫書 ☐期中報告

☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
的控制以及準確度的提升。		定、固液比例、溫度、攪拌轉速及時間等參數。 2. 廚餘生物堆之部分，參考日本專利，僅控制堆肥通氣率、含水份、監控堆肥溫度及 pH 變化即可。		
5. 請說明如何利用本研究的成果進行土壤的管理以及政策的擬定。		1. 含砂量大於 50% 之案場。 2. 適用於離地之現場或離場整治。 3. 除了廢水處理之外，亦注意廢水的回收循環再利用及空氣與廢棄物的二次污染防治。		
6. 請說明本研究成果的主要貢獻以及成果的外溢性和應用性。		1. 創新性、可行性、商轉性以及加值性。 2. 此方法亦可處理油品污染或其他含氯有機物之污染案場。 3. 亦可應用於資源化處理化工有機污泥或生活污水處理廠之產出污泥。		
委員 3				
1. 英文摘要部分語句及文法不通順，請加強修正與校對之工作。另部分表次項目有錯別字。		感謝委員的指教，已修正完畢。		
2. 本計畫所研提之技術是否具有戴奧辛去除效果？若以濕處理為例，洗土後之試驗，未針對廢水(液相)進行分析，如何確認整體戴奧辛之破壞去除效率？建議計畫應有完整程序之質量平衡分析，並確認戴奧辛之破壞去除率；另中間生成物		1. 濕處理是以移除效率 (R.E%) 來評估；廚餘淨化生物堆法則可以破壞去除率 (DRE%) 評估。 2. DRE% 是以堆肥混合物之初始及最終濃度計算；未對不均質之洗後廢液進行分析；亦未針對降解機制探討。 3. 本計畫已達到證明技術可行之目的，後續		

「105 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」

□修正計畫書 □期中報告
■期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	■ 研究專案 □ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	■ 整治 □ 評估 □ 預防 □ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
宜需予以測定為佳。		針對質量平衡及降解機制之學理探討，擬提科技部計畫，繼續研發。		
3. 部分試驗結果可知，經10次洗土後，戴奧辛濃度仍高於相關管制濃度；建議本項技術應有相關破壞分解或轉化機制之探討。		本計畫初衷是整治列車之構想，先利用濕洗降低污土濃度；再接續生物堆處理，以降低成本。		
委員 4				
1. 研究內容與計畫目的相符，請補充說明發表論文之相關進度。		感謝委員的肯定。發表期刊論文已於 12 月 06 日投稿至 ESPR (IF=2.76) 國際期刊審查中。		
2. 洗劑的應用與最終處置？整體可實務操作性評估？經濟效益評估。		1. 因使用的洗劑（液肥、水產生漿以及甘蔗酒）具有豐富的營養物質，本團隊藉此使用監測式自然降解（MNA）來處理洗後之洗劑廢液。 2. 未來技術持續改進之重點移放在提高液洗效率、降低液洗次數、減少洗液廢水產出及洗液之循環再利用。若能完成前項所述，則整體可實務操作。 3. 監測式自然降解將廢液放置厭氧環境，並固定時間採樣監測此廢液中戴奧辛濃度是否下降，故操作成本僅在於監測分析以及少量之人事成本，總體經濟誘因較高。		
委員 5				
1. 執行現況、流程及方法說明具體		感謝委員指教。		
2. 計畫後續執行工作項目及內容已說明		感謝委員指教。		
3. 計畫執行進度與預定進度相符		感謝委員指教。		
4. 整體研究成果符合預期		感謝委員指教。		

「105 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」

☐修正計畫書 ☐期中報告

☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
5. 根據研究內容所提出之討論與建議合理		感謝委員肯定。		
6. 研究內容與計畫目的相符		感謝委員肯定。		
7. 研究成果具體:尚未具體說明		本計畫證實，以濕處理及生物堆肥處理受戴奧辛污染土壤之整治技術為可行。利用整治列車之概念，將受戴奧辛污染之土壤先經過濕處理，再利用廚餘堆肥將戴奧辛污染之土壤降至法規標準。		
8. 研究成果的說明建議以實務的觀點說明討論		試驗初步證實，以濕處理結合生物堆肥處理受戴奧辛污染土壤之整治技術為可行。若用於實務上可結合通氣式堆肥反應器及機械式堆肥反應器，不僅可縮短整治時間與減少人員操作負荷，亦可減少空氣、水體、廢棄物等環境足跡，同時有助於復育土壤肥力及加速自然整治，或強化式植生復育，亦具成本經濟以及環境友善之潛在優勢。		
9. 本技術的應用限制條件或是適用條件(例如:不同的洗劑間的關係與其效應機制...等)(為何水產生漿較佳? 其關鍵因子為何? 是改變環境因子或是其他的機制?) (Dioxin一般認為以厭氧處理較佳，本研究認為好氧較佳，其間的異同與機制為何?) 建議說明討論		1. 因戴奧辛為油溶性，而水產生漿油脂類含量較高，故去除效果最佳，且懸浮之水產生漿粒亦具有吸附之功能。 2. 本計畫先使用好氧降解處理含戴奧辛污土，其於高溫發酵期可將戴奧辛濃度下降 50%左右，且不受戴奧辛毒性抑制；接著利用兼氧或厭氧還原脫氯進行監測式自然降解，可降低整治成本。 3. 好氧會有開環之破壞去除機制，具總體降低毒性（TEQ）之優勢；若採行厭氧，則要承受		

「105 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」

☐修正計畫書 ☐期中報告

☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林啟燦	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤			
專案連絡人	陳華亭	連絡專線	0955-835-297 (07)3617141#3756	
		OCDD/F 脫氯轉換成 TCDD 之 TEQ 提高風險。		

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 評估 ☐ 自訂					
申請機構系所		國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系					
機構地址		高雄市楠梓區海專路142號					
計畫主持人		林啟燦		職等/職稱		教授	
協同主持人				職等/職稱			
專案 名稱	中文	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤					
	英文	Clean up dioxins form contaminated soil by wet treatment and fermentation of food waste					
	關鍵字	濕處理、廚餘、戴奧辛、污染土壤、整治技術					
執行期程		☒ 1年期 ☐ 2年期(第____年) ☐ 3年期(第____年) 自民國 104 年 11 月 17 日起 至民國 104 年 11 月 16 日止					
計畫主持人		姓名：林啟燦		Email：ctlin@webmail.nkmu.edu.tw		專線：07-361-7141#3756 手機：0939-904-043	
專任助理		姓名：陳華亭		Email：weiting40@yahoo.com.tw		專線：07-361-7141#3756 手機：0955-835-297	
經費 分 析 總 表	專 案 預 估 經 費		金 額		編 列 說 明		
	1.	人事費用		245,172	(1~5項相加之50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費		243,750	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用		217,000	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用		11,840	(差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用		9,510	(1~6項相加之5%為限)		
	6.	行政管理費		72,727	(1~5項相加之10%為限)		
			專案計畫申請總金額		799,999	(多年期計畫請列全程經費)	

專案主持人(簽名及蓋章):

日期: 105. 12. 14.

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

105 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：105 年 10 月 05 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂		
申請機構系所	國立高雄海洋科技大學	計畫主持人	林啟燦
專案名稱	以濕處理及廚餘淨化受戴奧辛污染之土壤		
專案執行期程	☒ 1 年期 ☐ 2 年期 ☐ 3 年期	查核點	☐ 申請 ☐ 期中 ☒ 期末

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「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

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 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	0	1		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1		
		(2)研討會論文	1	0	2		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告	2	0	2		
	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	0	2		
		(2)博士	1	0	1		
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	0	1		
		(2)跨機構團隊					
		(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 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	0	0	2		
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明	0	0	1		
			新型/設計	1	0	0		
			合計	1	0	0		
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)品種/系(件數)								
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數		1	0	1		
		金額(仟元)		100	0	4350		
	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	5	0	10		
		收入(仟元)	0	0	0		
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、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限)

國內預估至少 100 萬噸之戴奧辛污染土壤。傳統較可確信之戴奧辛污染土壤處理技術為焚化處理技術，但其處理成本高居不下(大於 20000 元/噸)，同時又耗能排碳；一般工程上只定位於處理高濃度且量小之污染土壤。因此，餘留之中低濃度，量體大之污染土壤，則迫切需求一經濟有效之整治技術。

本團隊發出厭氧液肥水洗、好氧廚餘醱酵化之複合式生物降解程序處理戴奧辛污染土壤的技術，本構想之技術及經濟可行性有近百篇 SCI 文獻和專利及技術報告支持。且本計畫已產出 1 篇 SCI/EI 等級論文期刊、提出 1 篇國內發明專利申請。

本複合處理技術已開發成功，此技術、經濟及社會面向效益包含如下：

- 1、戴奧辛污土處理成本可降至 4000 元/噸以下。是為業界所能承擔之合理成本。
- 2、本技術建議以濕處理及好氧廚餘醱酵方式，符合節能減碳之綠色整治國際潮流，具國際性之創新價值。
- 3、本健綠處理技術，較容易為社會民眾所接受，得以減少整治過程，非技術性之環保抗爭。
- 4、於學術層面，本技術可將傳統常溫生物整治技術提升至高溫醱酵生物處理，具有技術創新之意義及貢獻。

中文摘要

本研究係導入綠色及可持續性整治(Green and Sustainable Remediation, GSR)，採取以濕處理液洗及堆肥之非熱處理整治技術，處理受戴奧辛污土，更符合環境友善綠色整治，並減少空污、水污、廢棄物等二次污染環境足跡，且更經濟低廉以使整治得以持續順利進行。期能將土壤戴奧辛濃度處理至符合法規標準 1000 ng I-TEQ/Kg 以下，洗土成本低於每公噸污土 6000 元。

本研究之污染土壤，濕篩採取粒徑 0.105~0.250 公厘之砂質土壤，使用厭氧液肥、水產生漿、及甘蔗酒三種配方，進行洗土試驗，以評估清洗戴奧辛污土潛勢，另外利用好氧堆肥試驗將含戴奧辛污土降至法規標準。

洗土試驗為戴奧辛污土與上述三類洗土配方皆以 1：2.5 之重量比（土壤約 200 公克，萃取液約 500 公克）混合，攝氏 30 度，40kHz 超音波震盪器。本研究洗土結果顯示，水產物生漿其戴奧辛濃度由未萃取前 22,080 ng-TEQ/Kg，水洗後結果為 1,298 ng-TEQ/Kg，去除效率為 94.1%，接近法規標準 1,000 ng-TEQ/Kg；厭氧液肥水洗後其濃度為 2,961 ng-TEQ/Kg，去除率為 87%；最後甘蔗酒水洗後其去除率為 80%。此外，本團隊藉由上述之結果，選擇兩種去除效率較佳之溶劑(厭氧液肥及水產物生漿)，亦試驗高濃度之土壤，其戴奧辛濃度介於 110,000 至 130,000 ng-TEQ/Kg。其中，厭氧液肥洗土後，其濃度由 113,565 ng-TEQ/Kg 降至殘餘為 4,841 ng-TEQ/Kg，去除率為 95.74%；水產物生漿洗土後其濃度由 134,709 ng-TEQ/Kg 降至 6,237 ng-TEQ/Kg，去除率為 95.37%。

本團隊之好氧堆肥實驗，以負壓箱作為反應器進行好氧堆肥實驗，將戴奧辛污土與廚餘以濕重比為 1：3，經充分混拌後，總重 5.6 公斤。該混合物之戴奧辛初始濃度為 2,491 ng-TEQ/kg，歷時 63 天反應後，其殘留濃度為 751 ng-TEQ/kg，去除率為 69.9%，且達到土壤污染管制標準 1,000 ng-TEQ/kg 以下。因此，本團隊藉由上述之結果，嘗試對於只經濕式篩分但未經厭氧液肥

或水產物生漿或甘蔗酒等搓洗過後之土壤，進行兩批次好氧堆肥反應器實驗，充分混拌戴奧辛污土與廚餘（濕重比 3：7，廚餘成分以生魚肉為主），單組總重 80 公斤，該堆肥混合物戴奧辛初始濃度各別為 7,462 及 6,048 ng-TEQ/kg，經 42 與 47 天反應後，其殘留濃度各為 1,916 及 1,604 ng-TEQ/kg，去除率為 74.3%及 73.5%，最終殘餘濃度亦近於土壤污染管制標準值。

由此三批次之好氧堆肥實驗結果顯示出對於戴奧辛降解均為有效，且負壓箱與反應器之戴奧辛降解趨勢為吻合。本計畫提出含有戴奧辛污染土壤解除法規管制標準之最佳路徑，為將污土先經由洗劑搓洗將戴奧辛濃度降至 5,000 至 7,000 ng-TEQ/Kg 後，再由好氧堆肥處理，亦將殘留餘土壤中戴奧辛濃度降解至本計畫之目標值。

英文摘要

Green and sustainable remediation (GSR) is commonly recognized in the recent years. Going for GSR, air, water, waste, energy and ecological impacts are emphasized to reduce secondary pollutions and to minimize environmental footprints. In this research, we are aiming to explore both technical and economic feasibility of soil washing and composting to treat Dioxin contaminated soils in order to compensate current thermal desorption and thermal destruction treatment in the aspect of reducing energy consumption and CO₂ emission. Moreover, the treated soil must comply with the 1000 ng I-TEQ/Kg control criteria. Competitive and affordable treatment cost is expected for less than NTD\$6000/ton.

A pretreatment, namely soil screening/sieving, is conducted for obtaining a glance at particle distribution of the soil. The result shows that fine sand is the major component of the soil, accounting for more than 60% of the total mass. Both fish broth and anaerobic compost tea were chosen as probe of greener washing fluids. A combined treatment of ultrasonification and mechanical double-blade agitation is employed, which proves to be considerably efficient, achieving more than 85% (6 washing cycles) and 95% (10 washing cycles) of total removal efficiencies for medium and highly contaminated soils respectively under ambient temperature, soil/liquid ratio 1:2.5, 700 ppm and relatively short duration. As that for the fish broth, 94% and 96% removal were achieved in a parallel experiments. Though fish broth has achieve higher efficiency, anaerobic compost tea is chosen for the cost consideration. Those high efficiencies of anaerobic compost tea washing can be explained by the collision and penetration effects brought about by an innovatively designed combination of mechanical agitation and ultrasonic power; therefore, the partitioning between the particles and anaerobic compost tea rises benefiting the treatment. It is the first time a natural solvent is used for dioxin contaminated soil washing. Anaerobic compost tea, which is rich of bio-surfactants, e.g. alcohols, humic acids, etc., provides no harm to the environment during the treatment and also possesses the ability to

improve bioavailability and bioactivity of the soil so that further bio-attenuation and full recuperation may take place in a faster manner.

The feasibility of degrading highly dioxin contaminated field soil by the aerobic co-composting process with food waste. The initial toxic equivalent quantities (TEQ) of the soil was 16,004 ng-TEQ/kg dry weight, which then decreased to 7,642 after mixing with the bulking agents. The final TEQ value after 42 day incubation was 1,916 ng-TEQ/kg dry weight (approximately 74.3 % degradation) which is still higher than the standard limit (1,000 ng-TEQ/kg dry weight). Profiles of temperature, moisture, pH and ammonia presented favorable conditions for aerobic organisms. In another attempt, a washing soil with initial dioxin concentrations at 2,491 ng-TEQ/kg after mixing with foodwaste at 1:3 ratio has demonstrated 69.9% of removal in 63 days, and the residual concentration was 751 ng-TEQ/kg that is lower than the 1,000 ng-TEQ/kg regulatory limit.

Above findings have demonstrated the feasibility in combining anaerobic compost tea washing and the aerobic organic waste composting techniques to remediate dioxin contaminated field soils. The proposed technologies serve as alternatives in choosing greener technology for remediation other than traditional thermal treatment approach. In order to meet the regulatory control limit, a treatment train consists of anaerobic compost tea washing, followed by organic waste composting is proposed.

目次

一、前言	1
二、研究目的	3
三、文獻探討	4
3.1 戴奧辛之特性	4
3.2 戴奧辛的物化整治技術	5
3.3 濕處理技術及設備	6
3.3.1 日本清水建設污染土壤清洗廠	7
3.3.2 三菱重工業株式會社土壤萃取	7
3.4 土壤水洗/萃取	8
3.5 洗土條件	9
3.5.1 水洗溶劑	9
3.5.1.1 含醇類配方	9
3.5.1.2 液肥配方	13
3.5.1.3 水產萃取液	14
3.5.2 洗劑與土壤之比例	17
3.6 濕處理技術可行性分析	17
3.7 戴奧辛的生物整治技術	20
3.8 廚餘醱酵技術可行性分析	34
四、研究方法與過程	42
4.1 執行流程	42
4.2 執行方法	43
4.2.1 檢測項目及方法	43

4.2.2 研究步驟.....	44
4.2.2.1 水洗溶液及廚餘原料	45
4.2.2.2 前處理：土壤濕式篩分(Soil wet-screening)	47
4.2.2.3 土壤監測項目	48
4.2.2.4 洗土流程及步驟.....	48
4.2.2.5 好氧堆肥實驗流程及步驟.....	49
4.3 工作進度甘特圖	53
五、結果與討論	54
5.1 結果與討論	54
5.1.1 戴奧辛污染土壤濃度粒徑分布圖	54
5.1.2 土壤之化學特性表.....	55
5.1.3 水洗溶液分析	56
5.1.4 洗土結果.....	59
5.1.5.1 中濃度洗土結果及去除效率	59
5.1.5.2 高濃度洗土結果及去除效率	63
5.1.5 好氧堆肥結果	66
5.1.5.1 負壓箱好氧堆肥實驗	66
5.1.5.2 好氧堆肥反應器實驗	67
5.2 結論與建議	72
5.2.1 結論	72
5.2.2 建議.....	73
六、參考文獻	74

圖次

圖 3.1-1 戴奧辛類化合物構式.....	4
圖 3.3-1 水洗設備.....	6
圖 3.3.1-1 日本清水建設土壤清洗廠清洗流程圖.....	7
圖 3.3.2-1 三菱重工業株式會社土壤處理設置流程圖.....	8
圖 3.7.1-1 近 10 年相關戴奧辛堆肥研究的數量.....	23
圖 3.8-1 堆肥技術降解戴奧辛濃度趨勢圖.....	35
圖 3.8-2 環狀碳氫化合物雙氧原子酵素氧化戴奧辛途徑.....	38
圖 3.8-3 好氧菌針對之降解途徑.....	38
圖 4.1-1 研究流程圖.....	42
圖 4.2.2-1 研究步驟流程摘要圖.....	44
圖 4.2.2.4-1 洗土流程.....	48
圖 5.1-1 含戴奧辛污染土壤粒徑圖.....	54
圖 5.1-2 粒徑濃度特徵圖.....	54
圖 5.1.2-1 戴奧辛與總有機碳之相關圖.....	55
圖 5.1.4.1-1 魚漿配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖.....	59
圖 5.1.4.1-2 液肥配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖.....	60
圖 5.1.4.1-3 醇類配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖.....	61
圖 5.1.4.1-4 3 種洗土配方對於中濃度之去除效果比較.....	63
圖 5.1.4.2-1 厭氧液肥配方之土壤高戴奧辛濃度與洗土次數圖.....	64
圖 5.1.4.2-2 水產生漿配方之土壤高戴奧辛濃度與洗土次數圖.....	65
圖 5.1.4.2-3 厭氧液肥及水產生漿洗土配方之去除效果比較.....	66
圖 5.1.5.1-1 好氧堆肥通氣靜置試驗之溫度逐日變化趨勢.....	67
圖 5.1.5.1-2 好氧堆肥通氣靜置試驗之戴奧辛濃度變化趨勢.....	67

圖 5.1.5.2-1	第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之溫度與含水率逐日變化.....	68
圖 5.1.5.2-2	第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之逐日酸鹼值變化.....	69
圖 5.1.5.2-3	第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之戴奧辛濃度變化趨勢.....	69
圖 5.1.5.2-4	第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之溫度與含水率逐日變化.....	70
圖 5.1.5.2-5	第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之逐日酸鹼值變化.....	71
圖 5.1.5.2-6	第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之戴奧辛濃度變化趨勢.....	71

表次

表 3.5.1.1-1 含醇類配方洗土戴奧辛污染土壤之彙整.....	11
表 3.5.1.2-1 液肥水洗戴奧辛污染土壤之彙整.....	14
表 3.5.1.3-1 水產萃取液戴奧辛污染土壤之彙整.....	16
表 3.7.2-1 還原脫氯乙烯類細菌之多樣性.....	26
表 3.7.2-2 生物處理人工污染土壤與氯化戴奧辛和生物增廣細菌菌株.....	27
表 3.7.2.1-1 好氧性細菌多應用於降解低氯戴奧辛.....	29
表 3.7.2.1-2 可分解戴奧辛之好氧菌種.....	30
表 3.7.2-1 厭氧條件下各類細菌對戴奧辛降解率彙整表.....	32
表 4.2.2.3-1 土壤化學特性之檢測方法.....	48
表 5.1.2-1 土壤之化學特性表.....	55
表 5.3-1 厭氧液肥之成分表.....	56
表 5.3-2 水產生漿之成分表.....	57
表 5.3-3 醇類配方之成分表.....	58
表 5.1.4.1-1 洗土次數及其去除效率.....	62
表 5.1.4.2-1 厭氧液肥配方經 10 次洗土之去除效率.....	64
表 5.1.4.2-2 水產生漿配方經 10 次洗土之去除效率.....	65

一、前言

在國內外經濟發展起飛之時，透過蓬勃發展後所帶來的工業污染不只是造成人體傷害，更為這片土地留下難以移除的污染，尤其又以土壤污染整治最為困難，包含落差大之濃度，不均勻之污染、複合式之混和污染等，甚至國內還擁有國際知名之綜合高濃度污染案場。為此如能解決案場之問題，對於地狹人稠之臺灣能夠將土壤活化，更加造福居住在這片土地上的居民。

臺灣自早期的米糠油事件、臺南縣中石化安順廠的污染事件，彰化線西的毒鴨事件、毒蚊香，到最近的戴奧辛毒鴨，戴奧辛污染事件總是不定時的爆發，而污染源大多來自高溫燃燒，如煉鋼後的爐渣污染河川、土壤，進而造成一些農牧產品受污染。目前，戴奧辛污染案場是國際上相當受關注的場址，其整治工作是國際上污染土地整治復育歷史上非常重要的里程碑，毫無疑問是環保專業人員面臨前所未有的挑戰。

目前國內整治戴奧辛之技術大多以水洗濕處理技術以及熱處理、熱脫附為主。雖然這些處理技術經驗上較為成熟有效率，然而完全使用熱處理(熱脫附)方式進行，需要花費非常龐大的整治經費；且由於全程使用熱處理整治技術必須進行大規模開挖，造成揚塵以及熱處理過程產生二次污染的防治，均會增加整治成本、健康風險及可能遭受居民抗議等後續問題。因此，若要降低整治經費、減少二次污染以及達到節能減碳之目標，須以其他有效、成本可負擔且環境友善的技術處理污染土壤，此技術研發有其需求性與急迫性。

戴奧辛是一種不易分解的物質，它會持續累積並存在於自然界與生物體內，並對整個環境形成一嚴重的潛在危害。特別是由於戴奧辛在一般狀態下，甚至在熱、酸或鹼的環境中都非常穩定，當其被微量釋出到環境中並進入食物鏈後，會隨著食物鏈的累積而使濃度愈來愈高。戴奧辛的化學結構與人體賀爾蒙的結構相似(E.L. Gregoraszczuk, 2002)，因此，當經由食物鏈進入人體後，一方面會形成「假性賀爾蒙」而產生類似賀爾蒙的作用，另一方面亦會影響身體內的賀爾蒙含量，這二者皆會干擾人體原有的內分泌機制，並嚴重影響人體的新陳代謝與干擾賀爾蒙的平衡，導致身體機能受損。此外，戴奧辛亦被證實是強力的促癌劑(tumor promoter)，會引起動物致癌性，包括增加大白鼠肝癌、肺部腫瘤以及皮膚腫瘤的發生率。美國環保署(US-EPA)以及世界衛生組織(WHO)已將戴奧辛歸類為可能之人類致癌物，而國際癌症

中心(International Agency for Research on Cancer, IARC)在 1997 年已將毒性最強的 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD)，歸類為“一級人類確定致癌物”(D.B. McGregor et al., 1998)。因此，若未妥善處理這類化合物，將會對環境造成嚴重影響。世界各國為了有效地處理環境戴奧辛污染物，避免環境以及生態繼續遭到嚴重的破壞，紛紛投入大量人力與財力來尋求解決的方法。

在國際間綠色整治地蓬勃發展之下，國內也逐漸重視，而生物整治被認為最具有整治潛力且可行之技術，微生物是大自然中的分解者，具有分解各種物質的酵素，造成土壤污染之主要組成成分可被生物分解去除，生物分解作用是污染場址中造成污染物降解之最主要機制，因此在戴奧辛污染的分解上扮演了極為重要的角色。現今環境污染物的處理方法當中，生物復育法因為具有成本低廉、節能減碳、對生態破壞小，在降解環境污染物的過程中不會產生有毒的副產物而造成二次污染，以及可以在原地(in situ)進行操作等優點，所以被廣泛地應用於受污染場址的整治且因其綠色整治形象，最易為大眾所接受，在國際間已成為最新且最具發展潛力之污染復育技術。

所以，經過 1082 篇 SCI 文獻回顧，694 篇各國專利判讀，及 151 份技術報告的技術及經濟可行性評估過後(詳述於文獻回顧章節)，我們決定使用富含生物界面活性劑之液肥加入環境友善之健綠萃取劑濕洗污土，先將高濃度之戴奧辛污土減輕污染濃度及減少體積後，再用好氧廚餘醱酵法使低濃度污土淨化，希望能降至法規管制標準以下。

二、 研究目的

國內約有 100 萬噸戴奧辛污土、廢棄物，其市場需求急迫。目前處理戴奧辛技術大多為焚化法處理，此整治技術可有效處理戴奧辛，但其成本高昂且耗能排碳，每噸成本約為 12,000 元至 20,000 元間，本計畫冀能開發其低成本、高效率之創新處理技術，協助業界將污染場址整治成本，控制在合理可接受範圍之內。因此欲以濕處理及廚餘醱酵法處理污土，其成本可控制在每噸處理成本小於 4000 元，節能、無二次污染並且環境友善。本計畫之研究目的及目標如下列：

- 1、 資料蒐集以及分析彙整
- 2、 厭氧有機液態肥料製作
- 3、 試驗及評估使用液肥添加健綠洗劑萃取戴奧辛污土的移除及降解效率
- 4、 試驗及評估利用廚餘醱酵分解戴奧辛之可行性
- 5、 進行總體經濟及技術廠化運用可行性分析

三、 文獻探討

3.1 戴奧辛之特性

戴奧辛屬於 halogenated aromatic hydrocarbons (HAHs)的其中一類，其化學結構為氧原子連結一對苯環類化合物，約為 210 種不同的化合物之總稱，包括 75 種多氯二聯苯戴奧辛 (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)及 135 種多氯二聯苯呋喃(Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)，如圖 3.1-1 所示。但只有 17 種具有 2,3,7,8 取代位置之戴奧辛被認為具有毒性；相同的亦只有 17 種具有 2,3,7,8 取代位置之 PCDD/Fs 被認為具有毒性，其中依據國際癌症研究中心(International Agency for Research on Cancer, IARC) 表示出 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin(TCDD)之毒性最強。

TCDD 最初被發現為製造殺蟲劑過程中的副產品，後來發現在含有氯分子垃圾的焚化過程中，亦會釋出大量的戴奧辛。由於戴奧辛是非常穩定的化合物，具有結構穩定，不易分解之特性(土壤表層的戴奧辛，半衰期約為 9 至 15 年；較深層土壤中的戴奧辛，半衰期則可長達 25 至 100 年)，因而一旦發生戴奧辛污染，就會長期存在環境中(Jacob, J., 1996；Hutzinger et al.,1985; Alcock and Jones,1996；Jim A. Field et al.,2008)。並且由於戴奧辛具有高度脂溶性之特性，故容易將環境中存在之戴奧辛藉由食物鏈途徑而轉移至動物體內，再因為生物累積作用的影響，導致人體內戴奧辛之曝露來源中，食物攝入佔了全部曝露量之 99% 以上。

而戴奧辛另一個特點，是它的化學結構與人體賀爾蒙的結構相似 (Gregoraszcuk EL., 2002)，會對人體新陳代謝及賀爾蒙平衡造成不良影響，此外，而美國環保署(US Environmental Protection Agency, USEPA)及世界衛生組織(World Health Organization, WHO)也將戴奧辛歸類為可能人類致癌物質。

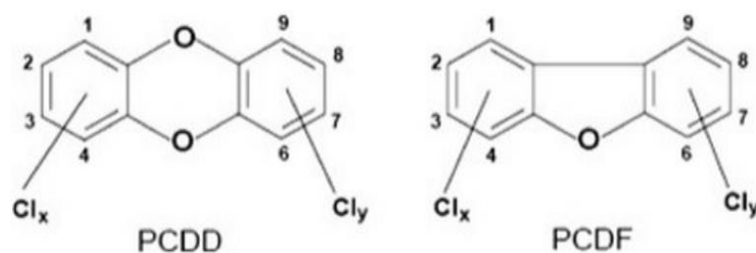


圖 3.1-1 戴奧辛類化合物構式 (潘錦橐，2005)

3.2 戴奧辛的物化整治技術

戴奧辛污染土壤之整治技術可分為物理處理法(physical treatment methods)、化學處理法(chemical treatment methods)、植生復育法(photoremediation treatment methods)、生物整治法(biological treatment methods)及熱處理法(thermal treatment methods)；然而戴奧辛之整治技術大多使用高溫熱處理，當處理溫度達到 1000°C，戴奧辛去除率可達至 99.9%，但缺點係需要大量能源、初設成本高(Tripathi et al., 2015)。

根據美國聯邦整治技術圓桌論壇 (Federal Remediation Technologies Roundtable, 簡稱 FRTR) 之案例統整發現，土壤清洗是一經濟及技術可行性之選項，土壤清洗技術(Soil Washing)常用之清洗液有螯合劑、共溶劑(co-solvent)或是界面活性劑(surfactant)等，其中又以界面活性劑最常被使用(Cao et al., 2015; Im et al., 2015; Tsang & Hartley, 2014)。

界面活性劑是一具有兩性 (Amphiphilic) 構造之聚合物，同時具有親水基 (Hydrophilic Group) 及疏水基 (Hydrophobic Group) 兩種相反性質官能基的特殊化合物，因可吸附於表面或界面上，使其表面張力減低或界面張力產生活性 (Zhaohui, 2004; Park et al., 2005)。界面活性劑移除地下環境之疏水性有機污染物之主要機制主要有增溶作用 (Winsor Type I Dissolution) 及移動作用 (Winsor Type III middle phase micro-emulsion) (Sabatini et al., 2000; Childs et al., 2004)。(一) 增溶作用 (Solubility Enhancement)：指加入界面活性劑使其濃度大於臨界微胞濃度 (Critical Micelle Concentration, CMC) 後，微胞的疏水基聚成一有機相，可增加有機污染物之溶解度。(二) 移動作用：是降低 DNAPL 與水間之表面張力，增加 DNAPL 之移動性，使 DNAPL 隨地下水抽水而移除。同時可加入共溶劑 (Cosolvent，主要為水溶性之醇類或鹽類)，使其表面張力降至更低，以增高 DNAPL 之移動性，惟此方式需謹慎配合進行水力控制 (Hydraulic Control)，以免造成 DNAPL 向下移動，導致污染範圍擴大，故目前國外場址多不傾向運用此機制。

然而，傳統之濕洗法多依賴化學界面活性劑，殘留之化學界面活性劑濃度，對於生物分解效能有很大的影響力，當其濃度高到對生物有害，甚至達到致死濃度時，則生物將會死亡或無法接續分解；因此，在達成沖排目的後，將需針對殘留的界面活性劑進行生物分解或以水溶液沖排，盡可能去除仍附著在土壤顆粒上之界面活性劑。但不論是何種性質的界面活性

劑，只要在環境中不易或無法被分解者，甚至會產生毒害，均不是很適用；為避免地下環境造成二次污染，建議使用生物可分解性或是食品級的界面活性劑是較為可行的，雖然清潔效果不是極強，但易於沖洗，殘留性低，對生物與環境的傷害亦低 (Fox, 1993; Mulligan, 2005)。且生物可分解之界面活性劑不僅能提升碳氫化合物在土壤中的去除率，具有低毒性、自然生物降解性、對環境安全性及特殊生理活性等優點 (Lee et al., 2004; Cheung et al., 2005; Mulligan, 2005)。

3.3 濕處理技術及設備

預期透過使用醇質類溶液為基底之萃取溶劑進行土壤洗滌。將已篩後之污染土壤，使用沖洗方式透過萃取溶劑與共溶劑等特性吸附與沖刷污染物質，將部分污染帶離土壤，進而將中高濃度之污染物降至低濃度。圖 3.3-1 為國外洗土(Soil Washing)設備系統，供本案濕處理系統之核心設備單元參考。



圖 3.3-1 水洗設備

資料來源：荷蘭 Pancon 公司水洗設備

此外，日本之模廠濕處理相關資訊，如下：

3.3.1 日本清水建設污染土壤清洗廠

自日本國家的『土壤污染對策法』2002 年公告後，清水建設正式啟用位於川崎市的土壤清洗廠，主要處理重金屬污染土壤，隨著土壤清洗市場的逐步提昇，也建造了移動式的土壤清洗設備，使土壤清洗技術被廣泛的應用在污染土壤的現地與離地處理，目前該公司共有六套以上土壤清洗設備運作於國內各地。

開挖離地清洗則朝開發處理具毒性之危害物，以提昇土壤清洗業務的價值，如 2007 年規劃建置戴奧辛污染土壤清洗廠，2010 年取得處理許可，是日本唯一被認可的戴奧辛污染土壤處理廠。戴奧辛土壤處理廠的收費平均每噸 6~21 萬日幣(楊佑群，2007)，約為處理傳統重金屬與油品污染土壤之 5 倍，大力提昇了清洗技術的價值。

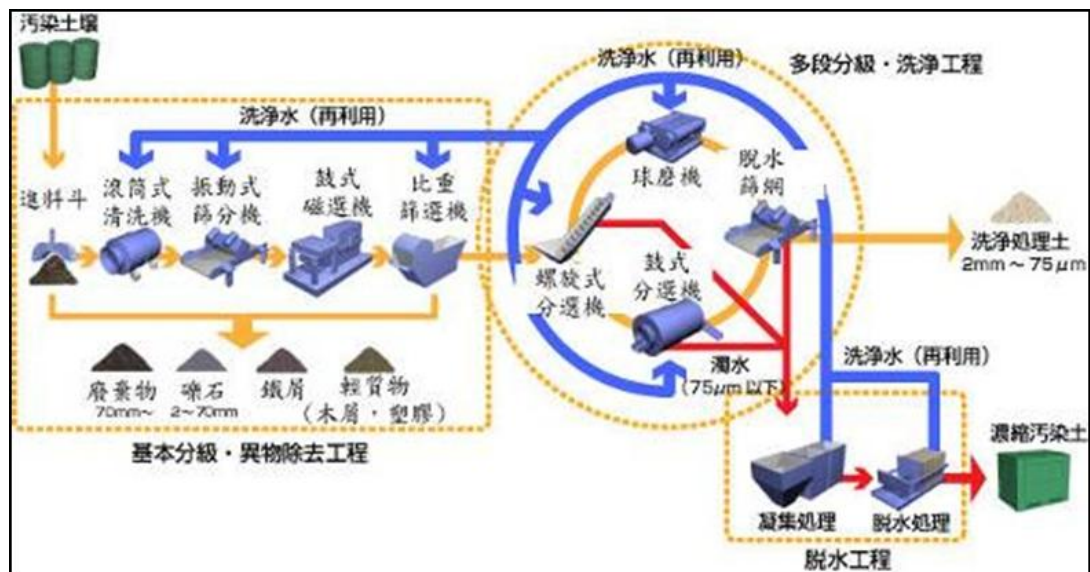


圖 3.3.1-1 日本清水建設土壤清洗廠清洗流程圖

3.3.2 三菱重工業株式會社土壤萃取

場址污染深度為地表下 1 至 2 公尺，污染土壤量約 1,000 m³，戴奧辛濃度約 36~16,000 pg-TEQ/g，超標日本法規標準值 16 倍，推測是化學工廠拆遷洩漏含 PCB 之廢油導致。

場址污土之處理技術：

(a) 使用溶劑(酮類)將土壤中之 PCB 溶出

- (b) 進行污染物與溶劑之分離
- (c) 溶劑精製後可回收再使用
- (d) 處理後之土壤經檢驗確認，作為回填土
- (e) 2006 年 6 月公告解列，前後共花費約 6 年

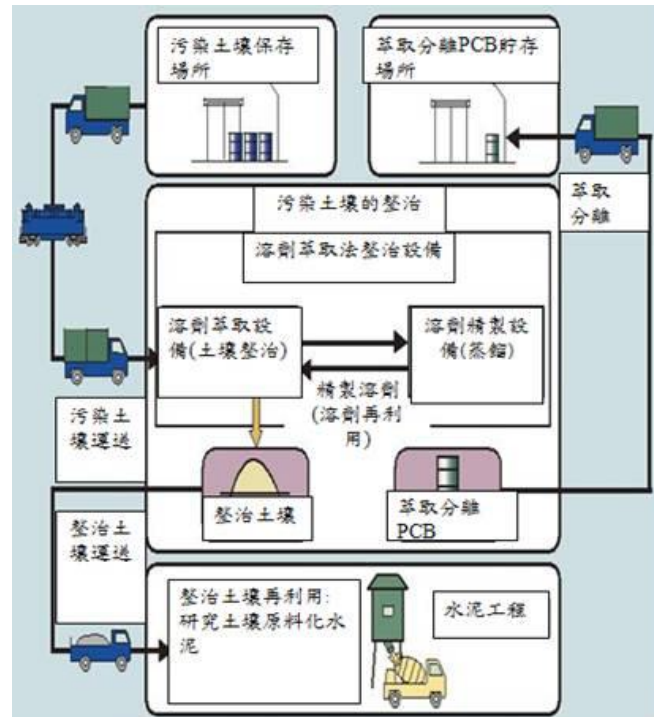


圖 3.3.2-1 三菱重工業株式會社土壤處理設置流程圖

3.4 土壤水洗/萃取

土壤淋洗是使用水基溶劑去除無機污染物的“萃取技術”。土壤淋洗粗顆粒是一種相對便宜的方法，但不適用於淤泥、粘土和/或有機物含量高之土壤 (Mulligan et al, 2001)。

利用界面活性劑去除地下水污染物及土壤洗滌為新興技術，增強土壤中有機污染物去除效果(Deshpande et al., 1998)。成本方面，相對於土地耕作和現地生物處理技術，溶劑洗土可能較昂貴，若要縮短整治時間，且土壤淋洗後溶劑可進行回收以符合成本效益，此方法為一個理想的替代方案。

另外，易地土壤溶劑清洗的成功取決於溶劑萃取過程的有效性，其重要因素包括溶劑類型、提取時間、土壤及溶劑之間的接觸模式(Khodadoust et al, 1999)。整治過程中常見之方法為酸萃取、生物處理和熱脫附。

然而，這些方法僅成功於去除從土壤污染物的特定群體：金屬、揮發性有機化合物、殺蟲劑以及除草劑，並不能有效用除去其污染物結合的污染物(Semer and Reddy, 1996)。水洗土壤是正在推行的污染土壤處理方式。水洗似乎費用少，顯示相當高的處理效率，並且不需要昂貴的處理設施(Lee et al., 2007)。溶劑應該是相對便宜的，易回收，能溶解目標污染物和對人類健康和環境在可接受影響。

3.5 洗土條件

3.5.1 水洗溶劑

3.5.1.1 含醇類配方

比較各溶劑特性得知，Nakamiya 等人(2003)研究乙醇搓洗處理戴奧辛污染土壤，其去除率為 76%，並且指出乙醇沸點（78.3℃）可易於回收再利用以及對於環境友善的溶劑之一。

李細見進行幾種土壤溶劑的提取能力比較(Lee et al., 2001)發現乙醇是可以提升去除效率，且最適合的洗土溶劑。(Nakamiya et al., 2000)研究乙醇洗土 PCDD / F 污染土壤，處理戴奧辛除去 76%，指出乙醇沸點（78.3℃）。乙醇相對於其他溶劑相比，較為環境友善之溶劑，能夠溶解戴奧辛與呋喃，以及多氯聯苯異構物(Mitoma et al, 2015)。文獻中使用乙醇洗土戴奧辛污染土壤之彙整於表 3.5.1.1-1 所示。

表 3.5.1.1-1 含醇類配方洗土戴奧辛污染土壤之彙整

No	污 染 物	土 液 比	溶 劑	去 除 率 (%)	操 作 時 間 (hrs)	規 模	來 源
含醇類洗劑							
1	Dioxins	N/A	乙 醇	99.8	16	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al., 2005
2	B(a)P	N/A	乙 醇	99.8	N/A	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al., 2001
3	Benzo(a)pyrene	N/A	乙 醇	99.8	N/A	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al.,
4	PAH	1 : 2	100%乙醇	73.3–99.0	24	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al., 2000
5	Dioxins	1 : 1.6	二甲醚	82.6-98.9	N/A	Lab-scale	Sahle-Demessie et al.
6	OCP	1 : 10	Organic solvents, 乙醇, 1-丙醇, 以及石油醚 (petroleum ether)	80–98	3	Lab-scale	JIANG Xin et al, 2012
7	heavy crude oil (重油)	1 : 6	正己烷加丙酮(25 vol %)	97	0.67 (20 min)	Lab-scale	X. Li et al., 2012
8	PCP	1 : 100	50%乙醇	95	12	Lab-scale	A.P.Khodadoust et al., 1999
9	B(a)P	1 : 3	乙 醇	92	N/A	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al., 2001
10	PCDD/DFs	1 : 4	100 %乙醇	90	0.5	Lab-scale	Byung-Dae Lee et al., 2007
11	PCP	1 : 8	50%乙醇	90	N/A	Lab-scale	A. P. Khodadoust et al.,
12	PAHs	1 : 4	5%戊醇、10%水、85%乙醇的混和溶液	65-90	12-24	Lab-scale	A.P. Khodadoust et al., 2000

13	PCP	1 : 100	50%乙醇	86	N/A	Lab-scale	Makram T. Suidan et al., 1999
14	C ₂ H ₃ Cl, C ₂ Cl ₄	1 : 5	硫酸及異丙醇(4:9 混和溶液)	81.3-86.0	20	Lab-scale	R. Semer, X R. Reddy, 1996
15	PCDDs, PCDFs	1 : 3	75%乙醇	81-85	5	Lab-scale	S. Jonsson et al., 2010
16	PCP	1 : 20	75%乙醇	81.20	N/A	Lab-scale	A.P.Khodadoust et al., 1995
18	Dioxins	1 : 10	80%乙醇	76	0.67 (20 min)	Lab-scale	K.Nakamiya et al., 2003
20	HCB	1 : 50	Methyl-β-Cyclodextrins 加 30%乙醇	72	N/A	Lab-scale	J. Wan et al., 2009
21	Dioxins	N/A	20%橄欖油	59	N/A	Lab-scale	Pirjo Isosaari et al.,

3.5.1.2 液肥配方

一些研究報告顯示，在實驗使用液肥水洗受戴奧辛和其他類戴奧辛化合物污染土壤如表 3.5.1.2-1。例如，Pellegrino et al. (2014)研究藉由腐植酸洗土多環芳香烴 (PAHs)，結果顯示於 24 小時 22 分鐘的去除率達到 65%。此外，腐植酸溶液可以洗土受人工合成界面活性劑污染的土壤，具有同樣的效率。

Yongiming et al. (2006) 研究腐殖酸 (HA) 處理受 PHE 污染土壤，在 pH(3.0 和 6.0)及溫度 (15 和 25°C) 條件下洗土 11 天 22 分鐘。此外，PHE 通常在低 pH 值和溫度低的條件下較易吸附。

Jing - Jingahan et al., (2007) 研究腐殖酸 (HA) 水洗受 PHE 污染土壤，操作時間為 7 天 20 分鐘的去除率 30-85%。除了芳族或脂族碳含量，也應該考慮 PHE 的吸附能力和非線性影響。

W. Chu et al. (2005)研究腐殖酸 (HA) 水洗受農藥污染土壤，25 小時的去除率達到 56.98%。此外，在低 HA 濃度，HA 受到光解產生自由基，光子衰變速率提高，導致 Atrazine (ATZ) 光解的破壞衰變率提高。然而，在高 HA 濃度，HA 可能會清除自由基和停止 Atrazine(ATZ)激發態。

Jo-Shu Chang et al. (2009)研究生物界面活性劑水洗受總石油碳氫化合物 (TPH) 污染土壤，去除效率達 63%。此外，提高生物界面活性劑濃度 (質量從 0 至 0.2%)，去除效率增加，但在 1~7 天時沒有顯著變化。

總結上述之文獻，使用腐植酸吸附含戴奧辛污染土壤影響之因素為 pH 值與溫度。例如，(Luo et al., 2006)研究腐殖酸 (HAS)，在 pH (3.0 和 6.0) 及溫度 (15 和 25°C) 下水洗受 phenanthrene (PHE) 污染土壤。phenanthrene (PHE) 通常在較低 pH 值或較低溫度條件下之吸附能力較強。因此，外來性腐殖物質可以在適當條件下，來控制土壤中多環芳香烴的流動性，以減少多環芳香烴污染。

從報告、專業期刊及網站，綜述報告之摘要列入文獻資料進行研究和調查。使用液肥土壤水洗沒有太多的研究。然而，過去也是以腐殖酸和生物界面活性劑作為液肥。

然而，我們使用天然界面活性劑作為液肥，像是腐植酸溶液，進行水洗受戴奧辛和其它戴奧辛類化合物污染土壤，去除效率約為 63%。洗劑為

腐殖酸溶液與土壤混合比為 100 毫升：10 克（洗劑：土壤），操作時間為 24 小時 22 分，使用超聲波萃取，對於處理土壤污染是一種符合環保及具有成本效益的好方法。

表 3.5.1.2-1 液肥水洗戴奧辛污染土壤之彙整

Target Compound	Mixture Ratio (solvent: soil)	Solvent Main	Co-	Removal Efficiency	Washing Action	Duration time	Research scales	Reference
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	100 mL : 10 g	Humic acid	-	65%	Ultrasonic extraction	24 hours 22 mins (Shaken 24 hours) (Centrifuged 10 mins) (Sonicated 12 mins)	Lab-scale	Pellegrino Conte et al., 2004
Phenanthrene (PHE)	20 mL : 20 g	Exogenous humic acids (HAs)	-	NA	Centrifuge	11 days 25mins (Mix soil and solvent) (Air-dry 10days) (Pass through 1-mm sieve) (Centrifuge 15 mins) (Oscillating shaker 24 hours) (Centrifuge 10 mins)	Lab-scale	Yongming Luo et al., 2006
Phenanthrene (PHE)	NA	Humic acids (HA)	-	30 - 85%	Batch technique	7 days 20 mins (Shaking 7 days) (Centrifuge 20 mins)	Lab-scale	Jing - Jinghan et al., 2007
Pesticide atrazine	15 mL : 1 g	Humic acid	-	56.98%	Rotary shaker	25 hours (Shaking 24 hours) (Centrifuge 1 hour)	Lab-scale	Ladislau Martin Neto et al., 2006
Total petroleum hydrocarbon (TPH)	100 mL : 50 g	Biosurfactant	-	63%	Batch experiment	168 hours (Shaker at 25 C) (Fixed agitation 24 h or 168 h)	Lab-scale	Jo-Shu Chang et al., 2009

3.5.1.3 水產萃取液

一些研究提到持久性有機污染物（POPs）摻雜植物油和魚油，如表 3.5.1.3-1 所示。顯然，植物油和魚油可能是一個巨大的溶劑。此外，已經證明植物油可以作為有效的溶劑從土壤中萃取有機污染物的方法(Isosaari et al., 2001; Bragato and El Seoud, 2003; Pannu et al., 2004). (Pannu et al. 2003)，也建議植物油可以刺激多環芳烴生物降解土壤泥漿體系。因此，這些土壤水洗過程戴奧辛污染土壤具有潛在利用性。

從文獻得知，使用含油性之溶劑進行土壤水洗，可藉由油性溶劑將土壤中的污染物溶出。所以，本團隊將找出油性且對於環境有善之溶劑配方，冀能利用本配方達到本計畫之目標。

植物油和魚油可去除持久性有機污染物，如多環芳烴化合物 (polycyclic aromatic compounds, PAHs)，多氯聯苯並戴奧辛，多氯二苯並呋喃 (polychlorinated dibenzofurans, PCDFs)、土壤多氯聯苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs)。為生物降解的一種。此優點如下：

- a. 降低二次污染疑慮
- b. 具環保型溶劑
- c. 降低成本
- d. 殘留於土壤中，也提供養分給土壤中的生物，並可促進生物降解

因此，我們建議使用魚油土壤水洗受戴奧辛類污染土壤。由於累積在魚油的目標化合物與戴奧辛類基密切相關。此外，如果考慮去除戴奧辛類污染的去除效率 70% 以上。同時，植物油也有很好的去除效率。

表 3.5.1.3-1 水產萃取液戴奧辛污染土壤之彙整

No	污染物	土液比	油種	去除率 (%)	操作時間 (hrs)	規模	來源
生物性洗劑							
1	PAHs	1 : 10	Humic acid	65	24 hours 22mins	Lab-scale	Pellegrino Conte et al., 2004
2	TPH	1 : 2	Biosurfactant	63	168 hours	Lab-scale	Jo-Shu Chang et al.,2009
3	Pesticide atrazine	1 : 15	Humic acids (HA)	56.98	25 hours	Lab-scale	W. Chu et al.,2005
4	PHE	N/A	Humic acids (HA)	30-85	7 days 20mins	Lab-scale	JING-JING ZHAN G et al.,2007
5	PHE	1 : 1	Exogenous humic acids (HAs)	N/A	11 days 25mins	Lab-scale	Yongming Luo et al.,2006
含油性洗劑							
6	PCDD/Fs DL-PCBs	NA	魚油	>70	NA	Lab-scale	Ayato Kawashima et al., 2009
7	PAHs	01:04	葵花油	>90	4 day	Lab-scale	B.-M. Wilke et al., 2005
8	PAHs	NA	花生油	90	NA	Lab-scale	Owen P. Ward et al., 2003
9	PCDD/Fs	NA	橄欖油	84	NA	Lab-scale	Pirjo Isosaari et al., 2001
10	PAHs	NA	豆油	72	24h	Lab-scale	Fung-Hwa Chi et al., 2010

3.5.2 洗劑與土壤之比例

除了配方種類會影響去除效果外，污染物特徵、土液比例以及時間，也是影響去除效率的重要因素。由前述之表 3.4.1-1 得知，評估洗劑與土壤比例（重量比）可控制於 1：2 至 1：10 之間。

文獻中，K. Nakamiya（2003）設定土壤和洗劑比例為 1：10，戴奧辛在洗劑中的溶解度，去除戴奧辛約 76%；Sahle-Demessie 等人(2007)、Byung-Dae Lee 等人（2007）及 S. Jonsson 等人（2010）使用之比例 1：2、1：4 及 1：3，去除效率 81 %至 98.9 %，其使用較少溶劑且減少廢液產生。

下列為本團隊整理出影響洗劑與土壤比例之因素：

1. 土壤種類及有機質(如：砂質、粘土、粉黏土等)
2. 污染物特性(戴奧辛、多氯聯苯、三氯乙烯、重金屬等)
3. 洗劑濃度
4. 添加其它溶劑、界面活性劑或化學藥劑(如：芬頓、丙酮等)
5. 操作時間
6. 外加裝置(如：攪拌器、超音波等)

3.6 濕處理技術可行性分析

早期土壤清洗技術被定位為污染土壤的最終處理技術，著重於單一技術完成土壤污染的整治工作，在處理成本上較高（如清洗劑使用量大）。近年的發展，逐漸由最終處理技術的角色轉變成扮演污染土壤減容的前處理角色，亦即採用類似於整治序列（Treatment Train）的概念，不完全以單一技術畢其功於一役為整治手段。必要時可先將污染土壤處理至適合採用處理技術（如生物法）之最適污染濃度範圍，再以該類技術進行最終處理。這種應用概念上的改變，使得土壤清洗與其他技術的組合成為經濟的整治方案，因此大幅提昇其工程應用的競爭力。

雖然土壤清洗技術在國外已經發展得相當成熟，但國內的應用仍多限於重金屬污染土壤，並以酸洗為主，至於有機污染土壤（如石油碳氫化合物）

的清洗，因涉及清洗液配方（如界面活性劑）開發之技術門檻，因此目前國內實場規模應用較少。此外，國內土壤與地下水整治技術的應用發展，於過去十年主要著重於現地處理技術，較少直接採用離地處理，其中主要原因之一是主管機關對於將污染土壤外運再進行處理的接受度不高，進而影響土壤清洗技術之發展。惟近年國外已有移動式的土壤清洗廠，可以將開挖後的污染土壤，於場址內進行處理，降低外運的需求，甚至完全不需要外運處置，此類技術的日趨成熟，將有助於國內的應用與發展。

土壤清洗的基本概念是使用特定的液體或清洗劑（如：清水、界面活性劑或酸液等），將土壤中的污染物轉移至液相之中，再透過適當的後端處理或處置，將污染物加以分解或處置，達到淨化污染土壤的目的。所以土壤清洗的基本程序單元包括：

- （1）將污染土壤與清洗劑混合後，進行土壤洗淨的清洗單元
- （2）將土壤與清洗廢水分離的程序
- （3）廢棄土壤與廢水的後段處理單元。

土壤清洗程序能處理相當多元的污染物，包括有機污染物、重金屬污染物，乃至於放射性核種污染物，因此在污染土壤的處理上，有相當廣泛的應用，而其成功的關鍵主要在於清洗劑的選擇與程序單元的控制。例如針對有機污染物多採用界面活性劑作為清洗劑，針對重金屬污染物則多採用酸液或螯合劑作為清洗劑，甚至選擇適切的清洗劑（如螯合性界面活性劑）可以在單一程序中，同時處理有機與重金屬污染物（Huang, 1997；黃等，2002），進一步提昇土壤清洗的應用價值。由於在清洗過程當中，除了面對污染物的多樣性以外，同時要面對土壤質地的不均質性、污染物轉移至水相後與土壤分離的效能以及清洗劑的回收使用等挑戰，因此在程序單元功能區隔差異不大的狀況下，程序單元的控制也是工程應用成功的關鍵。例如土壤中戴奧辛的清洗方式，主要是利用特殊的單元設計，使污染土壤能藉由螺旋式分選機、球磨機、脫水篩分及鼓式分選機等設備組合而成之多段分級洗淨程序，達到適切的處理效果（清水建設，2009）。

土壤清洗程序主要的功能是在於將土壤中的污染物轉移至水相中，一旦污染物進入水相中，後端的處理即可依循一般廢水處理程序加以處理。清洗過後的土壤經過固液分離後，基本上會產生乾淨的土壤與含有污染物的廢

水。乾淨土壤經過脫水後通常可以與前處理程序所得的大粒徑土壤混合回填至原場址使用。廢水的部分，則通常含有高濃度的污染物，所以必須進一步處理，包括傳統的混凝沉降或高級氧化程序（Advanced Oxidation Process, AOP）都可用於後端的處理。

清洗劑的選擇主要是以標的污染物為依據，例如對於有機污染物的移除而言，可採用水洗、界面活性劑或溶劑，而對於重金屬類的污染物，則可採用酸洗或螯合劑等。然而，由於土壤中的 污染物通常相當複雜，包括重金屬、揮發性有機物、非揮發性有機物或半揮發性有機物都可能共同存在，面對土壤中不均質的污染組成，採用單一配方而要有效的移除土壤中多元的污染物具有 相當程度的困難度，而能針對不同污染物與介質特性提供適當之清洗劑配方，乃至於清洗程序之設計，已成為各廠商在土壤清洗技術優勢上形成 差異的重點。

濕處理的優點，在理想的條件下進行時，可導致體積減少 90%最初污染土壤(Sharma and Reddy 2004)。且可以在同一個處理系統中處理有機及無機污染物，由於濕處理現場進行的，大體積的土壤是洗滌後不被污染，可重新用作回填在站點。

濕處理的缺點，需要大的面積，以便設置系統。濕處理主要適用有效的土壤是非常粗糙，在粗粒徑的土壤清洗也比較成功且在補救受污染場地的百分比越高。這意味著，在粉質粘土處理不會有很好的效果，因它不會迅速減少污染土壤的量，所以土壤須通過其他更昂貴的整治方法處理，在這種情況下使用濕處理可能無法節省時間或金錢。在一般情況下，含多於 30~50% 粉砂，粘土或有機質土壤的濕處理是無效的(Sharma and Reddy 2004, US EPA 1993)。

另一個缺點是，所使用的廢水，通常含有化學添加劑，可能需要專門的處理通常是很難做到的，且價格昂貴。從清洗設備處理中排放的空氣為另一個因素增加操作成本，同時降低了其吸引力的原因(Sharma and Reddy 2004)。

至於單元程序的選擇，主要取決於標的污染物與操作成本。近年為能更貼近永續性環境技術的發展趨勢，土壤清洗技術應用上，對於後端處理的廢水，逐步朝向循環回用於前端土壤清洗程序發展。至於所產生之污泥（如來自於混凝沉降或其它固液分離程序）則在確認其污染物濃度後，以廢棄物的處理原則加以處置。基本上後段的處理設計上與傳統的廢水與廢棄物處

理相當類似，技術應用上相對也較成熟。

3.7 戴奧辛的生物整治技術

微生物是大自然中的分解者，具有分解各種物質的酵素，造成土壤污染之主要組成成分可被生物分解去除，生物分解作用是污染場址中造成污染物降解之最主要機制，因此在戴奧辛污染的分解上扮演了極為重要的角色。現今環境污染物的處理方法當中，生物整治法因為具有成本低廉、在降解環境污染物的過程中不會產生有毒的副產物而造成二次污染，以及可以在原地(in situ)進行操作等優點，所以被廣泛地應用於受污染場址的整治。生物復育法中，又以微生物復育技術最具發展性和前瞻性之處理方法，其具有花費少，省能源，對生態破壞小，且不造成二次污染，最終產物通常已不再危害環境，在時間成本、珍惜資源、操作複雜度等方面更有其獨特優點，最易為大眾所接受，在國際間已成為最新且最具發展潛力之污染復育技術。

戴奧辛降解菌在不同環境下主要可經由 3 種途徑針對戴奧辛或相似結構之有機化合物進行降解。分別為在好氧環境(aerobic condition)下進行共代謝(cometabolism)及氧化破環(oxidation ring cleavage)以及在厭氧環境(anaerobic condition)下進行還原性脫氯(reductive dechlorination)。而具有分解木質素能力之白腐真菌(white-rot fungi)同時亦能藉由 lignin peroxidase (LiP) 及 manganese peroxidase (MnP) 氧化分解含氯戴奧辛(Chen et al., 2013; Fennell et al., 2011; Hanano et al., 2014; Roubalová et al., 2014)。

3.7.1 生物堆肥處理技術於各(複合)污染物之應用趨勢

生物整治(Bioremediations)，為利用微生物群組多種菌體的作用，以降解環境污染物(B. Zhao et al., 2008)。近年來亦增加了許多相關研究，並被實際廣泛應用。

生物整治的終產物為二氧化碳、水及對於環境影響較小之化合物(Baker DB et al., 1994)。使用生物整治之土壤或任何案場，可透過添加營養物(如碳、氮和磷)，和/或加入微生物族群，來增強對污染物的分解或降解。使用有機廢棄物做為原料/配方，利用微生物分解有機化合物結構的能力 (A. Dadrasnia et al., 2010)，以達降解的目的，亦為新穎性的綠色整治技術方案。

從文獻得知，相對於生物整治，使用物理和化學整治成本較高(如表

3.7.1-1)。表 3.7.1-1 比較了各種整治技術及對於污染物之影響(分為物理、化學及生物法) (Azni Idris et al., 2016)。

目前，對於處理土壤及水域的污染不少均採用微生物整治法。相較於其他類生物，微生物擁有獨特物理化學和生化分解能力，可與人造和天然存在之兩類多樣化合物反應，發生結構改變，或使某些特定的分子完全降解/分解(之能力)(Head et al., 1998)。

表 3.7.1-1 比較各種整治技術對於土壤化學、物理與生物的影響(HEAD ET AL., 1998)

Effects of remediation methods on soil characteristics and the estimated costs of treatment (adapted from Houghton, 1996)^a

Treatment	Effects on soil chemistry	Effects on physical structure	Effects on microorganisms	Approximate remediation cost (£/tonne)
Removal to landfill	?	?	?	Up to 100
<i>Solidification</i>				
Cement and Pozzolan based	N	N	N	25-175
Lime based	N	N	N	25-50
Vitrification	N	N	N	50-525
<i>Physical processes</i>				
Soil washing	Y	N	N	25-150
Physico-chemical washing	Y	N	N	50-175
Vapour extraction	Y	Y	Y	75
<i>Chemical processes</i>				
Solvent extraction	Y	N	?	50-600
Chemical dehalogenation	Y	N	?	175-450
In situ flushing	Y	Y	?	25-80
Surface amendments	Y	Y	Y	10-25
<i>Thermal treatment</i>				
Thermal desorption	Y	N	N	25-225
Incineration	N	N	N	50-1200
<i>Biological treatments</i>				
Windrow turning	Y	N	Y	10-50
Land farming	Y	N	Y	10-90
Bioventing	Y	Y	Y	15-75
Bioslurry	Y	N	Y	50-85
Biopiles	Y	N	Y	15-35
In situ bioremediation	Y	Y	Y	175

^a N indicates that the above factors will not generally survive in a particular treatment method and Y indicates that they will generally survive. ? indicates that the effects are unclear.

生物堆肥發酵過程前期，因微生物群組活動旺盛，其代謝所產生的熱量會蓄積於堆肥中而使溫度升高，此為堆肥化之特徵(Williams et al., 1992)。其中，Fogarty and Tuovinen (1991)研究指出，堆肥化過程中分為四個時期：嗜溫期 (mesophilic)、嗜熱期 (thermophilic)、回溫期 (cooling) 和腐熟期 (maturation)。這四個時期主要發生溫度的變化，及微生物群組結構的改變。在第一至第二期，因呼吸運動的增加(即氧氣量需求增加)；隨之嗜溫微生物

活性降低，嗜熱微生物接著快速成長，使得堆肥進入較高溫的階段(45~65℃)，在此時期有較高的微生物群組降解作用(Fogarty and Tuovinen, 1991)；在第三期，因為大多數可利用之有機碳漸被消耗完畢，導致嗜熱微生物活性下降且溫度降低，此階段為回溫期(Fogarty and Tuovinen, 1991)；後再進入常溫階段的腐熟期。

生物堆肥整治方法為污染土壤加廚餘混合堆肥，利用堆肥化過程微生物降解或分解污染物(Azni Idris et al., 2016)。生物堆肥是一個較新的整治技術，正因如此相關研究報告的數量較少。但是仍有相關報告已經進行了處理污染物的基礎研究結果(Azni Idris et al., 2016)。

堆肥化是生物整治中較為可行的方法之一，堆肥中含有豐富微生物菌群，藉由調控水分、營養源(廚餘)、空氣量及副資材(如：稻草、木屑、迴流等)，提供微生物菌群活性的動力。充分提升微生物降解戴奧辛脫氯、破環改變結構氧化分解的能力(Freeman and Harris, 1995)。

近年來，相關含氯有機化合物污染環境之議題越來越被重視(Hagblom et al., 1992)。在農業、工業和公共健康等被廣泛使用之環境污染物產品，其成分大多含有氯酚、戴奧辛及多氯聯苯(Apajalahti and Salkinoja-Salonen, 1986)。如圖 3.7.1-1 為戴奧辛堆肥研究的數量近十年中有逐漸增長，亦成為目前全球關注和更多的研究。同時，關於使用堆肥法整治戴奧辛之研究也有所增加。Laine and Jurgensen et al., 1997 由試驗規模做出研究，其採用不同的種類堆肥成分淨化受氯酚污染之土壤，包含：蘑菇秸稈堆肥、污染土壤以及土壤微生物群。實驗 30 天後，在堆肥系統中約有 50~60% 的五氯酚被礦化分解。其五氯酚污染土壤之初始濃度約為 44 mg/kg；經過 2 個月的堆肥作用後，五氯酚之去除率為 80%，且達到可接受之最終濃度為小於 10 mg/kg。

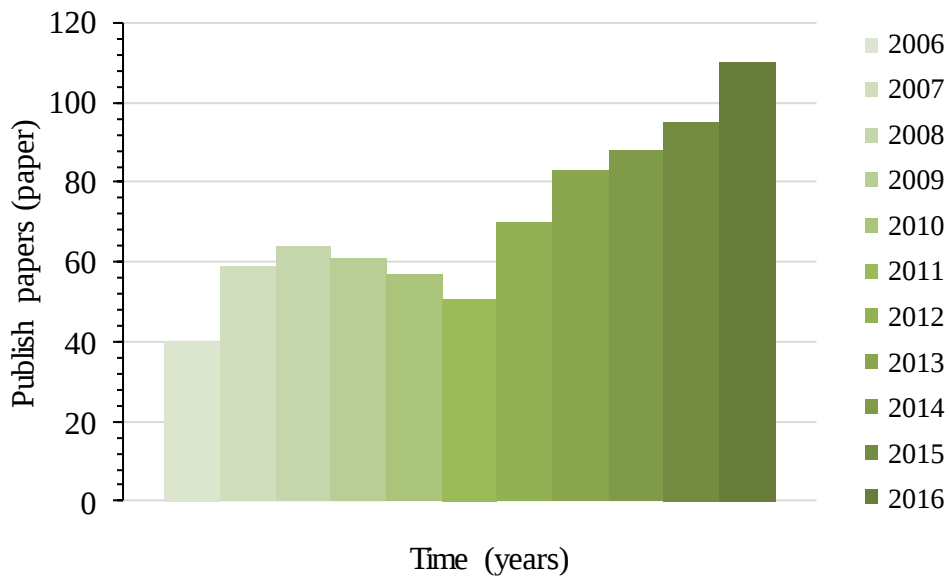


圖 3.7.1-1 近 10 年相關戴奧辛堆肥研究的數量

3.7.1.1 相關因素和優化維護

1. 溫度

堆肥是透過微生物於升高的溫度及有氧條件之環境下，將有機物質分解。典型之堆肥溫度範圍為 54~65°C，其增加的溫度由微生物分解有機物質所產生熱量造成的現象(CPEC, 1998)。此外，溫度為堆肥操作是否成功之關鍵因素。堆肥熱量為微生物分解有機物質所產生之副產物，且熱量多寡主要取決於堆肥的大小、含水率及含氧量(Nancy Trautmann, 1996). Chitsan Lin et al, (2011)。研究使用廚餘堆肥以嗜熱生物降解柴油之實驗，結果顯示監測溫度、pH 和含水量為確保堆肥處理符合正常之指標。

2. 含水率

部分研究指出，一般認知最佳堆肥之含水率為 50~60%。若含水率過低(< 30%)則會抑制微生物的活性；若含水率太高(> 65%)則會導致微生物分解有機物質過於緩慢，進而產生厭氧期之臭味，且養分亦流失(Nancy Trautmann, 1996)。Yu-Yang Long et al, (2013)研究關於使用豬糞作為厭氧堆肥之原料，以處理受多氯聯苯污染之土壤，其結果顯示，在含水率 60%時，PCB 脫氯效果為最佳。

3. 好氧

在好氧微生物進行代謝和呼吸作用時，氧氣是不可或缺的原料。在微生物氧化活性開始時，在孔隙中的氧氣濃度為約 15~20%(似於空氣的正常組成)。此外，作用期間氧氣的濃度會下降，而二氧化碳濃度則會上升。如果在堆肥中的平均氧氣濃度低於約 5%，則會使堆肥呈現厭氧。要維持有氧之環境條件，包含鑽井氣孔、插入曝氣管、強制空氣流動，及機械混合等。機械混合和翻動有助於使堆肥變得鬆散，因此能提高堆肥間的孔隙率以增加曝氣量(Nancy Trautmann et al., 1996)。

此外，需要有多少氧氣去維持需氧的環境條件？雖然大氣中有 21%的氧氣，但好氧微生物可在氧氣濃度最低 5%中存活。一般研究指出，氧氣濃度大於 10%為最佳，以維持好氧堆肥系統運作。部分堆肥系統能夠透過自然的擴散和對流，維持所需之氧氣量。另一些堆肥系統則需經由鼓風機或翻動/混合進行曝氣，才能維持所需氧量(Nancy M. Trautmann et al., 1996)。

4. pH 值

堆肥微生物作用之最佳 pH 值為 5.5~8.5。堆肥會有酸化現象為細菌和真菌在消化有機物質時會釋放出有機酸。在堆肥的初期階段，這些有機酸物質會累積聚集。酸性條件下有助於真菌的生長，及分解木質素和纖維素。一般而言，有機酸物質會在堆肥過程中進一步被分解。如果堆肥系統變成厭氧環境時，因為酸性物質的積累，可能使 pH 值降低至 4.5，會限制了微生物活性，而在這情況下，曝氣可以使堆肥之 pH 回到可接受的範圍中(Tom Richard et al., 1996)。Nancy M. Trautmann et al., 1996 研究指出，微生物之分解，碳和氮所需要的元素是最重要的因素。

5. 碳氮比(C/N Ratio)

碳可提供一個能量來源，和提供建造約 50%微生物之基質。氮是微生物進行生長和產生功能輔酶的一個關鍵組成部分，如蛋白質、核酸、氨基酸及酶等等。在一般情況下，含氮較高之物質大部分為綠色或濕潤材料，包含：剪草、植物扦插、水果及蔬菜等等；而含碳較高之物質為棕色/褐色或乾燥木質材料，如紅葉、木屑及碎紙等等。

然而，固體廢棄物包含一般廚餘、禽畜糞便、農業廢棄物，及城市污水/污泥等等，堆肥整治技術已被廣泛應用於此。此外，以堆肥處理受有機污染物污染土壤之方法為一種新興生物整治技術，且已引起越來越多的關注。好氧堆肥已經在土壤中的有機物污染被使用。此外，一般廚餘是可以作為含高效碳和氮源有機廢物之堆肥材料。

因此，本研究主旨在探討處理受戴奧辛污染的土壤與廚餘，經由好氧堆肥反應器作用之可行性。對有助於戴奧辛降解的影響因素和影響戴奧辛的好氧堆肥系統進行了研究，並尋找綠色整治方法/技術。

3.7.2 好氧及厭氧細菌降解戴奧辛污染之回顧

戴奧辛/呋喃和多氯聯苯降解機制分為兩個部分：生物轉化由微生物活性和物理化學轉化。第一組包括厭氧、好氧和厭氧順序與有氧轉化。後者可分為光化學和熱降解。

微生物轉化使有毒化合物產生的酶處理至毒性較低的形式，使用有機化合物作為碳源降解可進行礦化或作為共代謝，其中微生物需要碳源能源，污染物的發生是由於並發進程改造其他來源的來源。該方法的產品可進一步礦化，否則不完全發生降解，導致更多的毒性代謝物形成和累積。細菌的總結資料庫菌株氯化乙烯類和氯化戴奧辛的生物降解呈現在表 3.7.2-1 及表 3.7.2-2。

表 3.7.2-1 還原脫氯乙烯類細菌之多樣性

No.	Bacteria name	Target compounds (for dechlorination)	Dechlorination Efficiency (%)	Final products of dechlorination	Duration time	Research scales	Reference
1	<i>Dehalobacter restrictus</i>	PCE	-	cis-DCE	-	-	Holliger et al., 1993
2	<i>Dehalospirillum multivorans</i> (<i>Sulfospirillum</i>)	PCE	-	cis-DCE	-	-	Scholz-Muramatsu et al., 1995
3	<i>Desulfotobacterium</i> strain PCE1	PCE	-	TCE	-	-	Gerritse et al., 1996
4	<i>Desulfuromonas chloroethenica</i>	PCE	-	cis-DCE	-	-	Krumholz et al., 1996
5	Strain MS-1	PCE	-	cis-DCE	-	-	Sharma and McCarty, 1996
6	Strain TEA	PCE	-	cis-DCE	-	-	Wild et al., 1996
7	<i>Desulfotobacterium</i> sp. strain PCE-S	PCE	-	cis-DCE	-	-	Miller et al., 1997
8	<i>Dehalococcoides ethenogenese</i> strain 19	PCE	-	Ethylene	-	-	Maymo-Gatell et al., 1997
9	<i>Desulfotobacterium frappieri</i> TCE1	PCE	-	cis-DCE	-	-	Gerritse et al., 1999
10	<i>Clostridium bifermentans</i> strain DPH-1	PCE	-	cis-DCE	-	-	Chang et al., 2000
11	<i>Dehalococcoides</i> sp. strain CBDB1 (<i>Dehalococcoides ethenogenese</i> type)	PCE	-	trans-DCE	-	-	Adrian et al., 2000
12	<i>Desulfotobacterium</i> sp. strain Y51	PCE	-	cis-DCE	-	-	Suyama et al., 2002
13	<i>Desulfotobacterium metallireducens</i>	PCE	-	cis-DCE	-	-	Finneran et al., 2003
14	<i>Desulfuromonas michiganensis</i>	PCE	-	cis-DCE	-	-	Sung et al., 2003
15	<i>Dehalococcoides</i> sp. strain BAV1 (<i>Dehalococcoides ethenogenese</i> type)	cis-DCE	-	Ethylene	-	-	He et al., 2003a,b

表 3.7.2-2 生物處理人工污染土壤與氯化戴奧辛和生物增廣細菌菌株

No.	Bacteria name	Target compounds (for dechlorination)	Removal Efficiency (%)	Final products of dechlorination	Duration time (Incubation)	Research scales	Reference
Bioremediation in soils artificially contaminated with chlorinated dioxins							
1	<i>Pseudomonas resinovorans</i> CA10	23-DCDD (1000 ug/L)	100.0%	.	14 days	Lab scale	Widada et al., 2002
2	<i>Terrabacter</i> sp. DBF63	28-DCDF (1000 ug/L)	90.0%	.	7 days	Lab scale	Habe et al., 2002b
		2-CDF (1000 ug/L)	89.0%	.	5 days		Habe et al., 2002b
		2-CDD (1000 ug/L)	65.0%	.	5 days		Habe et al., 2002b
		28-DCDF (1000 ug/L)	78.0%	.	5 days		Habe et al., 2002b
		23-DCDF (1000 ug/L)	32.0%	.	5 days		Habe et al., 2002b
3	<i>Sphingomonas</i> sp. KA1	2-CDD (1000 ug/L)	96.0%	.	7 days	Lab scale	Habe et al., 2002a
		23-DCDD (1000 ug/L)	70.0%	.	7 days		Habe et al., 2002a
4	<i>Pseudomonas</i> sp. CA10	2-CDD (1000 ug/L)	97.0%	.	5 days	Lab scale	Habe et al., 2001b
		23-DCDD (1000 ug/L)	89.0%	.	5 days		Habe et al., 2001b
		123-TCDD (1000 ug/L)	52.0%	.	5 days		Habe et al., 2001b
5	<i>Pseudomonas</i> sp. CA10	2-CDD (10000 ug/L)	98.5%	.	7 days	Lab scale	Halden et al., 1999

降解速率的有效性變化取決於環境中的條件，並且包括：(1) 污染物進入，(2) 物理參數（含氧量、溫度、光強度、pH 值、電傳導性）和 (3) 生物參數（微生物能降解特定污染物和碳和/或其他能源）可用性。所有上述變量的確定分析的化合物的生物和物理轉化的速率。廣泛地用於生物處理，三種處理條件簡要解釋如下：

3.7.2.1 好氧條件

有氧轉化發生在含氧的環境中，並利用微生物的分子，如單 - 和二氯化戴奧辛/呋喃和多氯聯苯，作為碳和能量的來源。應當指出在大約 90% 的情況下，發生該過程作為共代謝，這意味著該微生物除了戴奧辛/呋喃或多氯聯苯的額外來源需要碳。從文獻資料證實，好氧生物降解可使低氯戴奧辛/呋喃和 PCB 化合物達到脫氯之效果(Parsons and Stroms, 1989; Wilkes et al., 1996; Schreiner et al., 1997; Keim et al., 1999)。而含有五個或更多的氯原子的分子較不容易受到好氧微生物降解之效果。

好氧性細菌多應用於降解低氯戴奧辛(如表 3.7.2.1-1)，對於低氯戴奧辛具有較高去除率，較高含氯數戴奧辛其降解能力反而減低。表 3.7.2.1-2 綜合彙整好氧性細菌以 Alphaproteobacteria、Betaproteobacteria、Gammaproteobacteria、Actinobacteria 及 Phylum Firmicutes 等 5 類具較佳分解能力。

表 3.7.2.1-1 好氧性細菌多應用於降解低氯戴奧辛

Sphingomonas sp. RW1	23-DCDF	59	0.7	84.8	45DCSA	Wilkes et al. (1996)
Alcaligenes sp. JBI	27-DCDD	0.3	2.8	33.3		Parsons and Storms (1989)
Rhodococcus opacus SAO101	28-DCDD	1	7	16	3456TeCC	Kimura and Urushigawa (2001)
Sphingomonas sp. RW1	27-DCDF	NS	NS	NS	6C2MCh, 7C2MCh	Keim et al. (1999)
Sphingomonas sp. RW1	4-CDF	1013			3`CTHBP, 3CSA, (2HPA)	Arfmann et al. (1997)
Coculture ^c		1013			Chloride	Arfmann et al. (1997)
Coculture (S. RW16 + P.RW10)	3-CDF	1013	25	96	Chloride, protoanemonin	Wittich et al. (1999)
Sphingomonas sp. HL7	2-CDD	8.7	0.3	100	CHPMA	Fukuda et al. (2002)
Sphingomonas wittichii RW1		8.7	0.3	100		Fukuda et al. (2002)
Alcaligenes sp. JBI		0.3	2	97.7	HCDD, DHCDD	Parsons and Storms (1989)
Burkholderia sp. JB1		0.1	1	95	4CC, CTHDE	Parsons et al. (1998)
Pseudomonas veronii PH-03		219	2.5	90	4CC	Hong et al. (2004)
Terrabacter sp. DBF63		10	0.8	75	4CC	Habe et al. (2001a)
Pseudomonas sp. EE41		2.5	63	63.7		Du et al. (2001)
Klebsiella sp. HL1		8.7	0.3	45		Fukuda et al. (2002)
Sphingomonas sp. RW1		55	0.7	44.8	4CC, C, CTHDE, 2CMA	Wilkes et al. (1996)
Pseudomonas sp. CA10		10	0.8	32.5	4CC	Habe et al. (2001a)
Beijerinckia sp. B8/36	2-CDD	500	NS	NS	CDD-dihydrodiols	Klecka and Gibson (1980)
Klebsiella sp. HL1	2-CDF	8.1	0.3	82.5		Fukuda et al. (2002)
Sphingomonas sp. HL7		8.1	0.3	100		Fukuda et al. (2002)
Pseudomonas sp. CA10		10	0.8	100	5CSA	Habe et al. (2001a)
Coculture ^b		1013	25	NS ^a	Chloride,	Wittich et al. (1999)
Terrabacter sp. DBF63		10	0.8	NS	5CSA	Habe et al. (2001a)
Alcaligenes sp. JBI		NS	NS	NS	CSA	Parsons et al. (1990)
Sphingomonas sp. RW1		55	0.7	60.8	3CC, C, CTHDE, 2CMA	Wilkes et al. (1996)
Rhodococcus opacus	1-CDD	1	7	92		Kimura and Urushigawa.(2001)
Pseudomonas veronii PH-03		219	2.5	84	3CC	Hong et al. (2004)
Bacillus megaterium AL4V		2.2	0.003	40	DH1CDD	Sulistyaningdyah et al. (2004)
SAO101 Beijerinckia sp. B8/36		500	NS	NS	CDD-dihydrodiols	Klecka and Gibson (1980)

表 3.7.2.1-2 可分解戴奧辛之好氧菌種

系統發育群/物種/ straina	基底降解	Mode of dioxygenation
Class Alphaproteobacteria α -變形菌		
<i>Novosphingobium aromaticivorans</i> IFO 15084T	DF	Lateral
<i>Novosphingobium stygium</i> . IFO 16085T	DF	Lateral
<i>Novosphingobium subterraneum</i> . IFO 16086T	DF	Lateral
<i>Porphyrobacter sanguineus</i> IAM 12620T	DF	Lateral
<i>Sphingobium yanoikuyae</i> B1 (=DSM 6900)	DD, DF, MCDD/Fs	Lateral
<i>Sphingomonas</i> sp. HH19k	DF	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. HH69 (=DSM 7135)	DD, DF, MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/Fs, TCDD/Fs	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. HL7	DF	NAb
<i>Sphingomonas</i> sp. KA1	MCDD, DCDD, CAR	NA
<i>Sphingomonas</i> sp. RW16 (=DSM 12667)	DF	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS3 (=DSM 6432)	DE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS31	MethylDE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS33	DCDE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. CDH-7	CAR	Angular
<i>Sphingomonas wittichii</i> RW1T (=DSM 6014)	DD, DF, 9-FN, MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/Fs, TCDD	Angular
Class Betaproteobacteria β -變形菌		
<i>Burkholderia cepacia</i> F297	DF, DBT, FN	Lateral
<i>Burkholderia cepacia</i> ET4	DE	Lateral
<i>Burkholderia</i> sp. JB1	MCDD/F	Angular
<i>Burkholderia</i> sp. LB400	DD, DF	Angular
<i>Ralstonia (Wautersia) eutropha</i> DSM 5536	MCDD/F, DCDD/F, TrCDD/F	NA
<i>Ralstonia (Wautersia)</i> sp. DSM 6708	MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/Fs, TCDD/Fs	NA
<i>Ralstonia (Wautersia)</i> sp. RJGII.123	CAR	Angular
<i>Ralstonia (Wautersia)</i> sp. SBUG290	DF, BP	Lateral
Class Gammaproteobacteria γ -變形菌		
<i>Erwinia</i> sp. CU3614	DE, MCDD, DCDD	NA
<i>Klebsiella</i> sp. HL1	DF	NA

系統發育群/物種/ straina	基底降解	Mode of dioxygenation
<i>Pseudomonas cruciviae</i> S93B1	DE	NA
<i>Pseudomonas fluorescens</i> BS243	DF	Lateral
<i>Pseudomonas fluorescens</i> TTC1(=NCIMB 40605)	DF, DBT	Lateral
<i>Pseudomonas mendocina</i> MC2	9-Fluorenone	NA
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> POB310	Carboxy DE	NA
<i>Pseudomonas putida</i> BS291	DF	Lateral
<i>Pseudomonas putida</i> G7 (=NCIB 9816)	DF, FN, DBT	Lateral
<i>Pseudomonas putida</i> PH-01	DF	Angular
<i>Pseudomonas resinovorans</i> CA10	CAR, DD, DF	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. CA06	CAR	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. F274	DF, FN	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. HL7b	FN	Lateral
<i>Pseudomonas</i> sp. LD2	CAR	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. NSS2	Carboxy DE	Angular
<i>Pseudomonas stutzeri</i> ATCC 31258	CAR	Angular
<i>Pseudomonas stutzeri</i> OM1	CAR	Angular
Phylum (class) Actinobacteria 放線菌門		
<i>Arthrobacter</i> sp. DBTS2	DBT, 9-fluorenone	Angular
<i>Arthrobacter</i> sp. F101	FN	Lateral
<i>Brevibacterium</i> sp. DO	DBT, FN	Angular
<i>Brevibacterium</i> sp. DPO220	DF, FN	Angular
<i>Microbacterium</i> sp. YK18	DF	NA
<i>Nocardioide</i> sp. NSA1-2	DF	Lateral
<i>Rhodococcus erythropolis</i> SBUG 271	DF, BP	Lateral
<i>Rhodococcus opacus</i> SAO101	DF, DD, MCDD, DCDD	NA
<i>Rhodococcus</i> sp. TUT581	DF	Lateral
<i>Rhodococcus</i> sp. YK2	DF	NA
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DPO1361	DF	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DPO360	DF	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DBF63	DF, DD, FN	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. YK3	DF	Angular
Phylum Firmicutes 厚壁菌門		
<i>Bacillus megaterium</i> ATCC 13368	2,3,7,8-TCDD	NA

(Hiraishi, 2003)

3.7.2.2 厭氧條件

厭氧微生物由於氧的擴散限制較適於與高碳濃度污染物反應。戴奧辛/呋喃和多氯聯苯厭氧轉化包括使用戴奧辛/呋喃和多氯聯苯作為電子受體還原脫鹵。在此過程中氯原子被替換為氫原子。發生在土壤和底泥等沉積物，其中不同的微生物具有脫氯、脫鹵、脫鹵酶速率(Urbaniak, 2014)。脫氯的路線都依賴於環境因素，如碳可用性，電子供體，比戴奧辛/呋喃和多氯聯苯，溫度和 pH 等電子受體存在下進行。這些因素影響微生物的群落和其活性組合物。

在厭氧條件時，有機污染物最終可被代謝為甲烷、二氧化碳及微量的氫氣(弓愛君等人，2013)。依去除效果而論，厭氧菌具還原脫氯機制，能降解較多高中氯戴奧辛(如表 3.7.2-1)。惟於厭氧脫氯過程中，戴奧辛亦可能僅脫氯未破環而降解為毒性更強的中間產物，故其整治績效必須更為謹慎評估。

表 3.7.2-1 厭氧條件下各類細菌對戴奧辛降解率彙整表

微生物培養	化合物	濃度 (ppm)	時間 (d)	去除率 (%)	產品 ID	Growth EA ^a	電子供體	出處
Dehalococcoides sp.CBDB1	12378-Pe CDD	1.1	104	2.8	2378-Te CDD, DCDD, 237-TCDD		H ₂ , Acetate	Bunge et al. (2003)
Anaerobic (sediment)	1234-TeCDD	16.1	244	89.7	124-TCDD, 13-DCDD, 23-DCDD		Org. acid mixture	Bunge et al.(2001)
Anaerobic enrichment		10	225	85	124-TCDD, 13-DCDD	PCE	Butyrate +YE	Fennell et al. (2004)
Methanogenic enrichment		0.6	515	76.6	124-TCDD, 13-DCDD	BrP	NS	Vargas et al. (2001)
Anaerobic enrichment		0.2	18	42.3	13-DCDD, 23-DCDD, D,	HCB	Lactate	Beurskens et al. (1995)

					124-TCDD, 123-TCDD			
D.ethenogenes 195 ^d		10	250	40	124-TCDD, 13-DCDD ^c	PCE	H ₂	Fennell et al. (2004)
Anaerobic (sediment)		16.1	396	30	13-DCDD		Org. acid mixture	Ballerstedt et al. (1997)
Methanogenic (sediment)		0.6	944	26.9	124-TCDD,13-DCDD		NS ^b	Vargas et al. (2001)
Dehalococcoides sp. BDB1		14.8	84	22	2-CDD, 23-DCDD		H ₂ , Acetate	Bunge et al. (2003)
Sulfate reducing (sediment)		0.6	944	3.7			NS	Vargas et al. (2001)
Anaerobic enrichment		10	91		13-DCDD, 2CDD	1234-TeCB	Lactate/ propionate	Ahn et al. (2005)
Anaerobic enrichment	1234-TeCDF	13.4	91		TCDF, DCDF	1234-TeCB	Lactate/ propionate	Ahn et al. (2005)
Anaerobic enrichment		7.2	55	91.9	13-DCDD	1234-TeCDD	Org. acid mixture	Bunge et al. (2001)
Anaerobic enrichment	124-TCDD	2.9	148	86.6	13-DCDD		Org. acid mixture	Ballerstedt et al.(1997)
Dehalococcoides sp.CBDB1		17.3	84	55	2-CDD, 13-DCDD		H ₂ , Acetate	Bunge et al. (2003)

Anaerobic enrichment	123-TCDD	2.9	148	61.9	23-DCDD, 13-DCDD, 2CDD		Org. acid mixture	Ballerstedt et al.(1997)
Dehalococcoides sp. CBDB1		7.2	84	59	2-CDD, 23-DCDD, 13-DCDD ^d		H ₂ , Acetate	Bunge et al.(2003)
Anaerobic enrichment		7.2	55	95.8	13-DCDD		Org. acid mixture	Bunge et al. (2001)
Dehalococcoides sp. CBDB1	23-DCDD	2.5	84	53	2-CDD		H ₂ , Acetate	Bunge et al. (2003)

a EA = electron acceptor used for growth during enrichment; BrP = bromophenols; HCB = hexachlorobenzene; TeCB = 1234-TeCB; PCE = perchloroethene.

b NS = Not stated.

c Trace.

d Dehalococcoides ethenogenes 195.

3.7.2.3 兼氧條件

實驗顯示，較低的氯化戴奧辛/呋喃和多氯聯苯的微生物降解發生比在高氯戴奧辛/呋喃和多氯聯苯更快。然後厭氧脫氯中產生的氯化戴奧辛/呋喃和多氯聯苯同源可以用於氧化破壞好氧微生物，這導致生產氯苯甲酸，容易被細菌降解。上述研究結果顯示，可透過連續暴在厭氧和好氧生物完全降解戴奧辛/呋喃和多氯聯苯降解。高氯化同族元素可以在厭氧條件下還原脫氯轉化為較低的氯化化合物。同類氯化物，在厭氧脫氯產生，可能再成為氧化破壞通過好氧微生物，其可以導致生產氯苯甲酸的，其進一步容易被細菌降解 (Novakova et al., 2002; Bunge and Lechner, 2009)。

3.8 廚餘醱酵技術可行性分析

生物堆肥整治技術，係利用添加材料（如廚餘、稻草或木屑等）與污染土壤混合，監控通氣率、含水率、酸鹼值和營養源等參數，使微生物群利用豐富營養源提高其活性，進而醱酵升溫，提升降解污染物之速率(Freeman and Harris, 1995)。相較於熱處理或物化濕處理，此類技術需要較長反應時間，

以分解或降解污染物，尤其結構穩定或者較難分解等特性之關切物質尤甚。然而，生物整治被視為對環境較為友善之綠色整治技術，具有較低能耗、對空氣水體與廢棄物較少影響環境足跡特性。此類技術有下列幾項優勢：(1) 偏屬自然過程；(2) 通常可在現場或現地進行；(3) 有益破壞各種有機污染物；(4) 節省運輸成本及時間；(5) 成本較經濟(Head et al., 1998)，而且較節能、減碳、節水與減壓並促進資源化再利用。Chitsan Lin 等人(2011)研究結果顯示，高溫堆肥過程可發展為具高效率與成本經濟的新穎綠色整治技術，且成功證實堆肥可淨化受高濃度柴油污染土壤。

在 Basic Principles of Composting 一書亦提及，堆肥實驗中需監控及記錄之參數，其最佳條件範圍為：(1)溫度：45~65 °C。其中，定義中溫期(mesophilic)為 80~120 °F(即 26~48 °C)；高溫期(thermophilic)為 105~150 °F(即 40~65 °C)。(2)含水率(moisture)：40~60%，若含水率在 60%以上，水分會阻塞堆肥裡的孔隙，而使空氣不易流動，導致內部缺氧形成厭氧環境；若含水率過低，亦會使生物活性下降或停止。(3)酸鹼值：6.5~8。

2005 年二瓶裕之等人研究指出，若堆肥、木屑及含戴奧辛/呔喃的污染土壤以重量比 1：1：3 均勻混合，並控制在最佳參數範圍，包含：含水率 40~50%、溫度為 20~40°C、酸鹼值為 6~8.5 及菌數 10¹⁰~10¹² CFU/mL (colony-forming units/milliliter)，其結果顯示：污染土壤的初始濃度為 1,000 與 3,000 奈克 - 毒性當量 / 公斤 (nanogram-Toxicity Equivalency Quantity/kilogram, 以下簡稱 ng-TEQ/kg)，經過數個月至一年，可降至 250 ng-TEQ/kg 以下，如圖 3.8-1 所示。

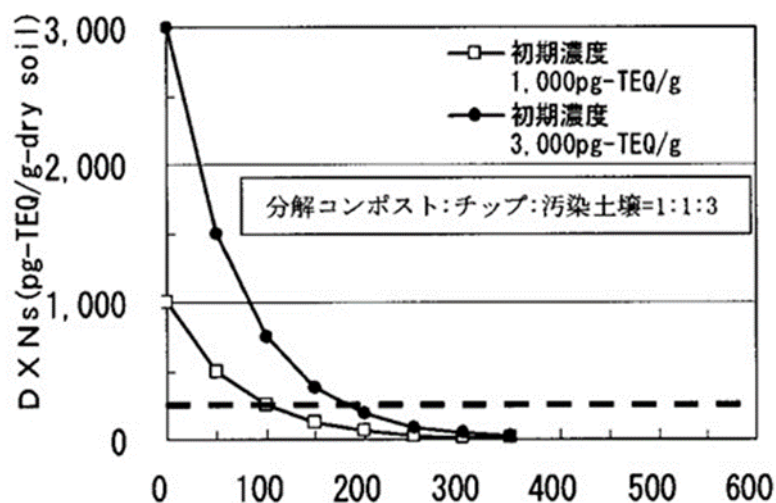


圖 3.8-1 堆肥技術降解戴奧辛濃度趨勢圖(二瓶裕之等人，2005)

根據 Takashi Narihiro 和 Akira Hiraishi 在 2004 年提出的研究中，指出堆肥係適用於戴奧辛污染土壤之生物修復技術，他們研究兩類堆肥反應器，皆具降解戴奧辛能力。而其中一種 flowerpot-using solid biowaste composting (FUSBIC) 反應器與本研究相似，在 FUSBIC 反應器內的固體廢棄物堆肥混合物(solid waste-compost mixture，簡稱 SCM)，它具有多樣且數量龐大的微生物，其中也包含可降解戴奧辛的微生物，厭氧菌可供脫氯及好氧菌可供破壞，且可共存將戴奧辛和呋喃降解/分解。而 Wei-Yu Chen 等人(2016)研究發現，在厭氧堆肥中培養 α -變形菌及放線菌等菌種，結合牛糞可降解污土中戴奧辛，證實簡便、有效、節能且易執行。

好氧菌分解戴奧辛之研究中，最多學者研究的是其分解程序之第一步，即好氧菌以環狀碳氫化合物雙氧原子酵素氧化戴奧辛(圖 3.8-2)。其中又可分為 2 種主要途徑，如圖 3.8-3 所示。途徑 A 主要為經由側邊 1,2 的位置氧化，此一途徑與已知之萘(naphthalene)與聯苯(biphenyl)等環狀化合物之降解機制相似；途徑 B 主要為經由中間 4,4a 的位置氧化分解。戴奧辛經 2 種途徑氧化後均進入三羧酸(TCA)循環代謝。表 3.8-1 為各文獻中具有戴奧辛好氧分解能力之菌株，可大致分為 Alphaproteobacteria、Betaproteobacteria、Gammaproteobacteria、Actinobacteria 及 Phylum Firmicutes 等 4 類。

Kao (2001)實驗室批次實驗，取五種氧化還原反應試驗，包含：(1)好氧生物降解(2)好氧共代謝(3)甲烷(4)還原鐵(5)還原脫氯做試驗。研究團隊在 TCDD 與 PCP 污染場地中，取含水層之沉積物作為活性污泥之原生菌來源，在試驗過程中添加醋酸及糖蜜作為主要基質(碳源)，進行共代謝和還原脫氯。試驗結果得知，經 90 天培養厭氧活性污泥作為微生物菌劑和污泥餅的主要基質當中，TCDD 去除率高達 86% (初始濃度為 96 $\mu\text{g/kg}$ 土壤)，另在其他好氧條件下觀察 TCDD 並沒有明顯的去除率，由此得知好氧性微生物降解受 TCDD 污染之土壤之效果不明顯。Field and Sierra-Alvarez (2008)亦指出少氯數之戴奧辛物種可利用好氧菌處理，如 *Sphingomonas*, *Pseudomonas* 及 *Burkholderia*。此外 *Pseudomonas veronii* 可直接利用一氯聯苯戴奧辛(monochlorinated dibenzop dioxins)，作為供給微生物所需的碳源，可與污染物進行共代謝作用(Field and Sierra-Alvarez, 2008)，由此可知依戴奧辛的種類與氯數不同，可利用不同好氧菌株處理之，下圖是以好氧性菌降解 2-CDD 及 2-CDF 之反應途徑。

好氧菌降解 2-CDD 過程 6 階段程序，分別為：

1. 2-chlorodibenzo-p-dioxin ;
2. 8-chloro-cis-1, 10a-dihydroxy-1-hydro-dibenzo-p-dioxin ;
3. 4'-chloro-2,2',3-trihydroxydiphenylether ;
4. 2-hydroxy-6-oxo-6-(4-chloro-2-hydroxyphenoxy)-2,4-hexadienoic acid ;
5. 4-chlorocatechol ;
6. 4-chloroguaiacol

好氧菌降解 2-CDF 過程 7 階段程序，分別為：

1. 2-chlorodibenzofuran ;
2. 8-chloro-cis-4,4a-dihydroxy-4-hydro-dibenzofuran ;
3. 5'-chloro-2,2',trihydroxybiphenyl ;
4. 2-hydroxy-6-oxo-6-(5-chloro-2-hydroxyphenyl)-2,4-hexadienoic acid ;
5. 6-chloro-2-methyl -4H-chroman-4-one ;
6. 5-chlorosalicylic acid ;
7. 2-hydroxypenta-2,4-dienoate

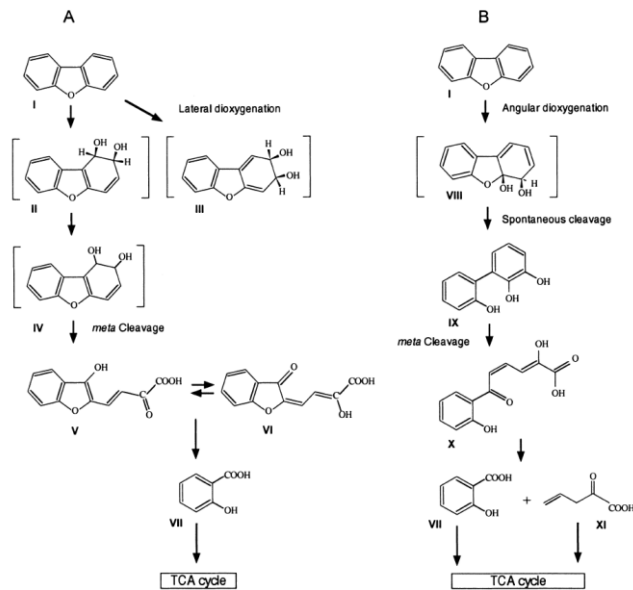


圖 3.8-2 環狀碳氫化合物雙氧原子酵素氧化戴奧辛途徑

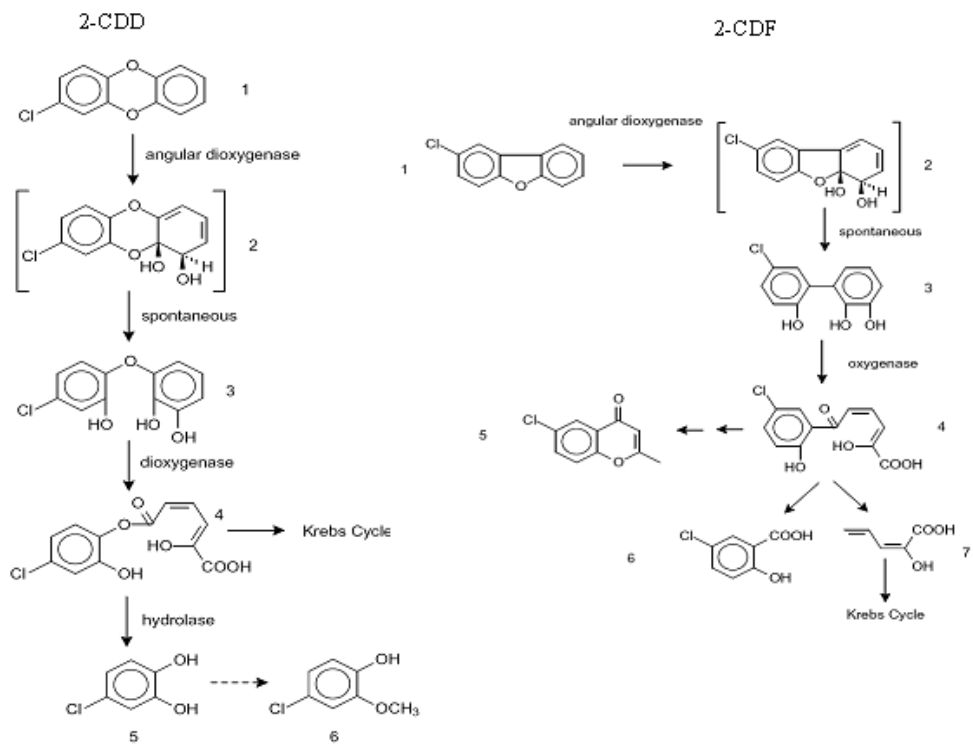


圖 3.8-3 好氧菌針對 2-CDD (2-chlorodibenzo-p-dioxin)及 2-CDF (2-chlorodibenzofuran)之降解途徑

表 3.8-1 具有戴奧辛好氧分解能力之菌株 (61 株)

Phylogenetic group/species/straina	Substrate degraded	Mode of dioxygenation
Class <i>Alphaproteobacteria</i>		
<i>Novosphingobium aromaticivorans</i> IFO 15084T	DF	Lateral
<i>Novosphingobium stygium</i> . IFO 16085T	DF	Lateral
<i>Novosphingobium subterraneum</i> . IFO 16086T	DF	Lateral
<i>Porphyrobacter sanguineus</i> IAM 12620T	DF	Lateral
<i>Sphingobium yanoikuyae</i> B1 (=DSM 6900)	DD, DF, MCDD/Fs	Lateral
<i>Sphingomonas</i> sp. HH19k	DF	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. HH69 (=DSM 7135)	DD, DF, MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/Fs, TCDD/Fs	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. HL7	DF	NAb
<i>Sphingomonas</i> sp. KA1	MCDD, DCDD, CAR	NA
<i>Sphingomonas</i> sp. RW16 (=DSM 12667)	DF	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS3 (=DSM 6432)	DE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS31	MethylDE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. SS33	DCDE	Angular
<i>Sphingomonas</i> sp. CDH-7	CAR	Angular
<i>Sphingomonas wittichii</i> RW1T (=DSM 6014)	DD, DF, 9-FN, MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/ Fs, TCDD	Angular
Class <i>Betaproteobacteria</i>		
<i>Burkholderia cepacia</i> F297	DF, DBT, FN	Lateral
<i>Burkholderia cepacia</i> ET4	DE	Lateral

Phylogenetic group/species/strains	Substrate degraded	Mode of dioxygenation
<i>Burkholderia</i> sp. JB1	MCDD/F	Angular
<i>Burkholderia</i> sp. LB400	DD, DF	Angular
<i>Ralstonia</i> (<i>Wautersia</i>) <i>eutropha</i> DSM 5536	MCDD/F, DCDD/F, TrCDD/F	NA
<i>Ralstonia</i> (<i>Wautersia</i>) sp. DSM 6708	MCDD/Fs, DCDD/Fs, TrCDD/Fs, TCDD/Fs	NA
<i>Ralstonia</i> (<i>Wautersia</i>) sp. RJGII.123	CAR	Angular
<i>Ralstonia</i> (<i>Wautersia</i>) sp. SBUG290	DF, BP	Lateral
Class Gammaproteobacteria		
<i>Erwinia</i> sp. CU3614	DE, MCDD, DCDD	NA
<i>Klebsiella</i> sp. HL1	DF	NA
<i>Pseudomonas cruciviae</i> S93B1	DE	NA
<i>Pseudomonas fluorescens</i> BS243	DF	Lateral
<i>Pseudomonas fluorescens</i> TTC1(=NCIMB 40605)	DF, DBT	Lateral
<i>Pseudomonas mendocina</i> MC2	9-Fluorenone	NA
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> POB310	Carboxy DE	NA
<i>Pseudomonas putida</i> BS291	DF	Lateral
<i>Pseudomonas putida</i> G7 (=NCIB 9816)	DF, FN, DBT	Lateral
<i>Pseudomonas putida</i> PH-01	DF	Angular
<i>Pseudomonas resinovorans</i> CA10	CAR, DD, DF	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. CA06	CAR	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. F274	DF, FN	Angular

Phylogenetic group/species/strains	Substrate degraded	Mode of dioxygenation
<i>Pseudomonas</i> sp. HL7b	FN	Lateral
<i>Pseudomonas</i> sp. LD2	CAR	Angular
<i>Pseudomonas</i> sp. NSS2	Carboxy DE	Angular
<i>Pseudomonas stutzeri</i> ATCC 31258	CAR	Angular
<i>Pseudomonas stutzeri</i> OM1	CAR	Angular
Phylum (class) <i>Actinobacteria</i>		
<i>Arthrobacter</i> sp. DBTS2	DBT, 9-fluorenone	Angular
<i>Arthrobacter</i> sp. F101	FN	Lateral
<i>Brevibacterium</i> sp. DO	DBT, FN	Angular
<i>Brevibacterium</i> sp. DPO220	DF, FN	Angular
<i>Microbacterium</i> sp. YK18	DF	NA
<i>Nocardioides</i> sp. NSA1-2	DF	Lateral
<i>Rhodococcus erythropolis</i> SBUG 271	DF, BP	Lateral
<i>Rhodococcus opacus</i> SAO101	DF, DD, MCDD, DCDD	NA
<i>Rhodococcus</i> sp. TUT581	DF	Lateral
<i>Rhodococcus</i> sp. YK2	DF	NA
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DPO1361	DF	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DPO360	DF	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. DBF63	DF, DD, FN	Angular
<i>Terrabacter (Janibacter)</i> sp. YK3	DF	Angular
Phylum <i>Firmicutes</i>		
<i>Bacillus megaterium</i> ATCC 13368	2,3,7,8-TCDD	NA

四、 研究方法與過程

4.1 執行流程

本計畫之技術研究流程如圖 4.1-1 所示。於計畫研提之前，已經過 3 個月之密集文獻收集階段，以提高本研提構想之可行性及研發成功機率。計畫開始執行時，首先要對戴奧辛污染土壤進行濕式篩分(Wet screening)，以確保代表性污染土壤之取得；隨後，於反應槽中試運轉，完成後，即可進行液肥淨化濕洗程序，先將高濃度戴奧辛污土濕洗淨化成中低濃度且低含氯戴奧辛污土；緊接著，再進行好氧廚餘發酵程序，將污土進一步淨化至管制標準以下。

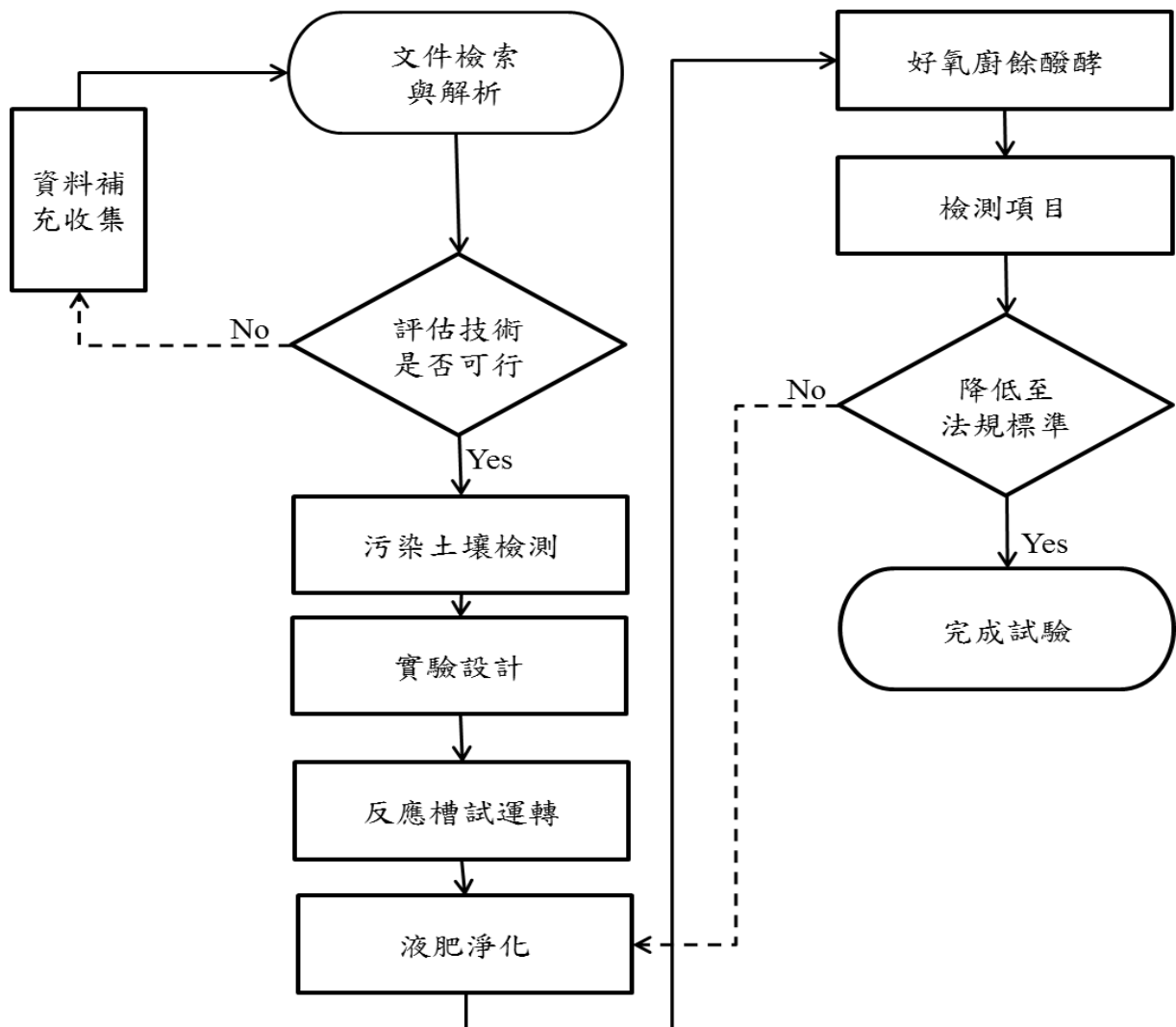


圖 4.1-1 研究流程圖

4.2 執行方法

4.2.1 檢測項目及方法

本計畫處理成效之追蹤，主要是污土中的戴奧辛濃度之分析，而好氧發酵醱法之監控主要參數則為溫度、酸鹼值及含水率，必要時，再輔以菌種種類及活性之監測，分別說明如下：

(1)溫度

本試驗使用 TES 1310 TYPE K 型數位式溫度計及電耦式溫度探針測量溫度，溫度探針材質為不鏽鋼，長度為 1.2 公尺，測量範圍為-50℃～130℃，靈敏度為±0.1℃。

(2)酸鹼值

根據環保署標準方法土壤中酸鹼值測定方法（NIEA R208.03C）進行測定。使用 Mettler Toledo MP 125 pH Meter，秤取樣品 5.0 ± 0.5 g (n=3) 於燒杯中，加入 25 mL 之去離子水 (1:5)，利用水域震盪器震盪後靜約 30 分鐘，過濾所得之濾液，進行測定再將其數值平均後求得。

(3)含水率

含水率的測定方法是由環保署所研訂之土壤及底泥水分含量測定方法—重量法（NIEA S280.62C），分析步驟為取乾淨之坩鍋置於烘箱內，以 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 乾燥，乾燥後移至乾燥器內冷卻至室溫，測定坩鍋之重量 (W0)。秤取樣品約 10 g 置入坩鍋中，加蓋精秤坩鍋及樣品重 (W1)。將樣品、坩鍋及瓶蓋放入 105°C 烘箱中，直至恆重。之後坩鍋加蓋於乾燥器中冷卻至室溫。取出加蓋坩鍋，精秤乾燥後樣品及坩鍋重量 (W2)。以下式乾重量為基礎計算水分含量百分比。

$$\text{水分含量 WH}_2\text{O} (\%) = (W1 - W2) / (W1 - W0) \times 100$$

W0：含蓋坩鍋空重 (g)

W1：含蓋坩鍋及樣品樣品重 (g)

W2：含蓋坩鍋及烘乾樣品重（g）

(4)戴奧辛濃度(受戴奧辛之污染土壤)

可使用環署 NIEA M801.13B 戴奧辛及呋喃檢測方法，並使用氣相層析儀/質譜儀(GC/MS)分析樣品。分析前每件樣品加入 20 μ L 單位問題之回收標準溶液。抽取 1~2 μ L 之濃縮萃取液注入氣相層析儀進行分析，測定 PCDDs 及 PCDFs 之四至八氯異構物含量。

4.2.2 研究步驟

實驗場域主要是在國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系固體廢棄物實驗室及廚餘堆肥廠進行。如前節研究流程所述，將本計畫之主要研究步驟摘要如圖 4.2.2-1 所示。經過步驟 1、2 及 3 之單元程序(詳細說明如後)，祈能將戴奧辛污土淨化至管制標準以下。

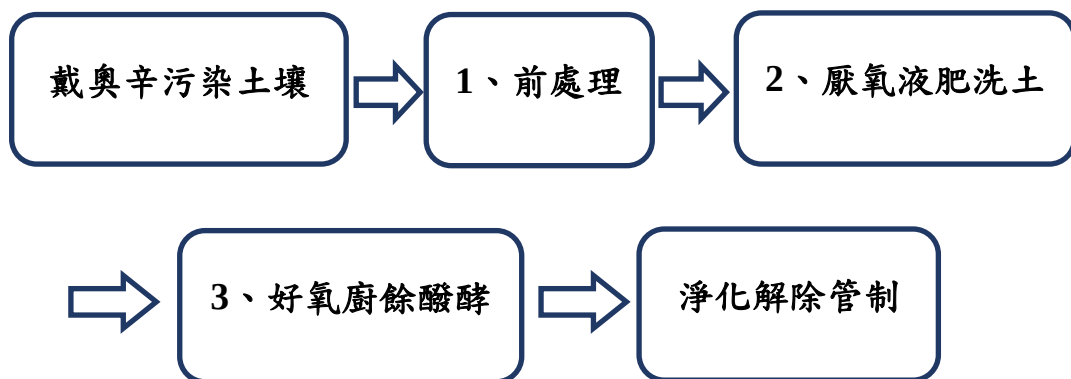


圖 4.2.2-1 研究步驟流程摘要圖

步驟 1、濕篩前處理以取得代表性之污染土壤

一般常識均知戴奧辛污染濃度與土壤粒徑分布息息相關。不論是吸附於土壤中的有機質（有機物 吸附機制）或與土壤表面官能基錯合（重金屬吸附 機制），污染物主要都附著或吸附於粒徑較小的土壤中，而粒徑較大土壤所含污染物比例則相對較低。基於如此的土壤污染物分布現象，為提昇土壤清洗的效能，試驗之前需將污土進行篩分取得適合濕處理之砂質土，其粒徑多介於 2~ 0.076 mm 之間(其污染物濃度較高)，適合利用特定的清洗液進行清洗。小粒徑的部分，則是小

於 0.076 mm 的粉黏土，除了污染物濃度高以外，亦不易用清洗的方式或是清洗成本效益偏低，因此必須採用其他的方式加以處理（如固化或焚化）加以處置。

濕篩之執行是參考 ASTM E276-13、D422-63 方法，可以用手工進行，或使用一機械震動篩。

步驟 2、有機液態肥料加入萃取劑液洗含戴奧辛污土

預計使用液態肥料洗滌土壤，將濕篩後具代表性之污染土壤使用搓洗方式，透過厭氧液肥與添加健綠萃取劑之特性進行洗滌、萃取，溶出污染物質，將污染物帶離土壤，經多次萃取後，將液態肥料分離做廢液處理。每次萃取後，取其溶液做戴奧辛濃度檢測，以追蹤液洗成效。初步規劃是採五階段逆向萃取程序。萃取時之固液比例控制在 1:2 至 1:10 之間，進行技術及經濟可行之最佳化。

步驟 3、廚餘醱酵及真菌降解淨化土壤

將已降至中低濃度土壤混合漿狀廚餘 100 公斤以 1:1 及 1:9 的比例一同進入反應器，並加入副資材，進行好氧廚餘醱酵及真菌降解反應，希望能將戴奧辛濃度降低至法規標準值以下。並在實驗過程中追蹤戴奧辛濃度隨時間之變化及瞭解戴奧辛降解速率。

好氧廚餘醱酵淨化土壤技術，本計畫主持人林啟燦教授，曾有「利用廚餘堆肥醱酵處理油污染土壤」之經濟部科專計畫執行經驗，於本計畫執行時，擬藉由科專計畫之經驗，將堆肥技術反應器化，以在可控反應器中，安全的執行毒化物戴奧辛之好氧廚餘醱酵化分解。廚餘成分之選擇與配比，則是依據文獻回顧結果，進行最有利化之試驗。

4.2.2.1 水洗溶液及廚餘原料

本計畫之洗土試驗使用 3 種溶液，分別如下。

(1) 厭氧液肥

係採用過期食品罐頭與家庭廚餘以厭氧且密封不攪動節能條件下，醱酵而成之液肥，取得容易且費用低廉，若測試成效顯著日

後亦較易大量生產且為各利害關係人所接受。

選用原因：

- A. 本團隊具有 12 年以上技術和經驗及相關專利，可輔助實驗過程。
- B. 原料(即廚餘或過期之食品)取得容易且費用低廉，若測試成效顯著日後亦較易大量生產且為各利害關係人所接受，亦能將廚餘資源循環再利用。

(2) 水產生漿

係採用未蒸煮之水產品絞碎漿液，係富含脂肪、DHA、碳氮磷等有機碳水化合物。

選用原因：

- A. 可將所有含戴奧辛之魚獲，免於需送焚化處理，因為其成本很高。反之，若能將其資源化，且就地循環再利用來整治污染土地，亦將是綠色環保之功效。
- B. 以合理價格向魚民採購含污染物之漁獲，且聘請當地居民協助處理生漿製作，因此提供當地就業機會。
- C. 由於生漿的營養成份高，因此經過液洗後的土壤不僅無害，且又有利於後續生物處理或自然整治。

(3) 醇類配方

原料盛產於南台灣，除容易取得，且易於自行大量製造，其具高糖份特性，易經由厭氧發酵成為高醇類之複合成分配方。

選用原因：

- A. 具高糖份特性易經由厭氧發酵成為高醇類之複合成分配方。
- B. GC-MS 檢測出多元官能基之生物界面活性劑，包含醇、酸、

胺、醛、酮、酯類 等。

C. 這些環境友善之生物界面活性劑可支持並增加洗滌效率。

而好氧堆肥實驗之使用材料，堆肥原料為係由環保局收集的家庭或店家廚餘，包含海鮮魚體類 90%、蔬果殘渣 5%、冷飲茶葉殘渣 5%等等。其他原料為木屑、迴流等耗材，其中，負壓箱好氧堆肥實驗之廚餘、木屑與迴流濕重比約為 4：1：2，而好氧堆肥反應器則為 5：1：1。

4.2.2.2 前處理：土壤濕式篩分(Soil wet-screening)

將污土先經由濕式土壤篩分前處理(Soil wet-screening)，且將土壤篩分成 6 種土壤粒徑。依據土壤吸附特性，戴奧辛濃度會隨土壤粒徑分布而有所不同。粒度分佈分析是一種必要的分類試驗土壤，尤其粗粒土，因為它呈現顆粒不同大小的相對部分。土壤包括主要礫石、粗砂、中砂、細砂、粉土和黏土，直到篩網範圍的限制，而這些粒徑範圍可能會影響污土和濃度分布。因此，粒徑分離是一個重要的過程，以進行分類，並篩選出主要實驗之粒徑。

1. 濕篩標準方法

本團隊使用中華民國國家標準 Central Nervous System -土壤粒徑分析試驗法 (CNS 11776 A3251)及美國材料和試驗協會 American Society for Testing and Materials -粒徑或篩分分析在第 4 號篩 (4.75mm) 和較細的金屬軸承礫石及相關材料的標準測試方法(ASTM E276 - 13)，這兩種濕式篩分方法。

2. 濕式篩分設備及材料

(一)個人防護裝備：防護帽、防護衣、口罩、手套、安全鞋套。

(二)美國標準篩，符合規範的編織網試驗篩：第 10 號 (2.00 mm)，第 18 號 (1.00 mm)，第 35 號 (500 μ m)，第 60 號 (250 μ m)，第 140 (106 μ m) 和第 270 號 (53 μ m)。

a. 機械篩分儀。

b. 台秤。

c. 清洗銅及纖維毛刷、篩網。

d. 水或其他液體。

4.2.2.3 土壤監測項目

1. 分析方法

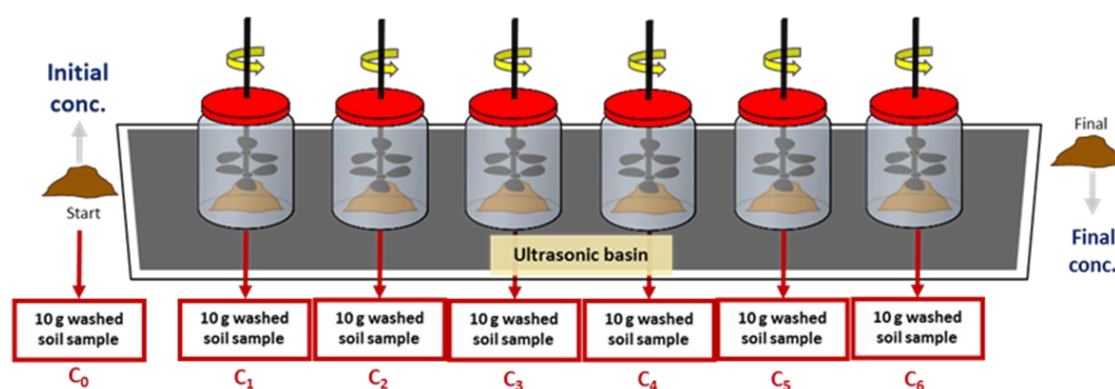
表 4.2.2.3-1 土壤化學特性之檢測方法

Analysis 分析項目	Adopted method 檢測方法
pH 酸鹼度	NIEA S410.62C
Cation Exchange Capacity (CEC)陽離子交換能力	NIEA S201.61C
Soil Electrical Conductivity(EC)土壤電導度	TARI S101.1B
Organic Matter (OM) 有機物質	NIEA W530.51C
Total Nitrogen (TN) 總氮	NIEA W439.50C

4.2.2.4 洗土流程及步驟

為本團隊規劃出洗土實驗流程如下圖所示。

圖 4.2.2.4-1 洗土流程



所有在粒度範圍土壤 0.25 - 0.105 公厘，來自 4 個土箱混合均勻，後在 20 克土壤樣品，在-50 度下用冷凍乾燥機 乾燥所收集。水分含量計算測量乾燥的樣品後，再次檢查水分均勻混合的土壤總百分比。此外，這種乾燥的土壤樣品萃取初始濃度進行分析。最後，均勻混合土壤將收集由任一 3 種類型的液體洗淨。操作步驟為土清洗的包括：

1. 秤重約 200 克均勻混合的土壤，並將其置放在 600 毫升玻璃瓶中(含蓋，即為密閉系統)，再加入備妥的 500 克洗劑（土壤：洗劑重量比例為 1：2.5），將土液均勻攪拌，並進行第一次搓洗。
2. 在抽風櫥內進行實驗，且條件制定於攝氏 30 度，超音波震盪功率 40kHz 中，結合上下不銹鋼雙螺槳攪拌搓洗，以促進搓洗功效。
3. 實驗設置為每一次搓洗一小時，因此每一批實驗將花費五小時。
4. 搓洗後，利用真空泵過濾機將土壤及洗劑作分離。並收集洗劑儲存於玻璃瓶中，自土壤中取樣 10 克作為搓洗後戴奧辛待測濃度樣品。
5. 剩餘土壤仍以同一土液比例（1：2.5）外加入相同的新洗劑，均勻攪拌後，則進行第二次搓洗。
6. 後續步驟為重複步驟 1 至 5，將污染土壤經過五次搓洗，並完成第一批次洗劑搓洗。
7. 完成一批次後，將實驗所使用之器皿作清洗及乾燥，並整齊排放清點用具。

進行第二批洗劑搓洗，則以上述相同步驟執行。

4.2.2.5 好氧堆肥實驗流程及步驟

廚餘堆肥化之作法及流程(如圖 4.2.2.5-1)，先製備所需之材料：回流、木屑及多魚肉之廚餘，將廚餘經由破碎後，至攪拌機充分攪拌後，將其安裝至反應器中，並且記錄每日監測其酸鹼度、含水率及溫度。



1. 準備堆肥之材料



2. 廚餘破碎廚餘且秤重



3. 將廚餘與其他材料均勻攪拌



圖 4.2.2.5-1 廚餘堆肥化之作法及流程

負壓箱好氧堆肥實驗所使用的設備組，如圖 6 所示。因戴奧辛具毒性，且對人體健康及生態環境有極高之負面影響，故使用容積各 600 mL 的空寶特瓶共 14 瓶，製成樣品瓶，區隔開含戴奧辛污染土壤以及箱內其他未受戴奧辛污染之廚餘，並在瓶身預留孔洞以利通氣（如圖 4.2.2.5-2 左側）。試驗中，每排放置 7 瓶樣品瓶(共 2 排)，並將樣品瓶排列於下方具抽氣系統槽內，下方抽氣形成微負壓狀態，在開放式環境下，營造好氧通氣環境。

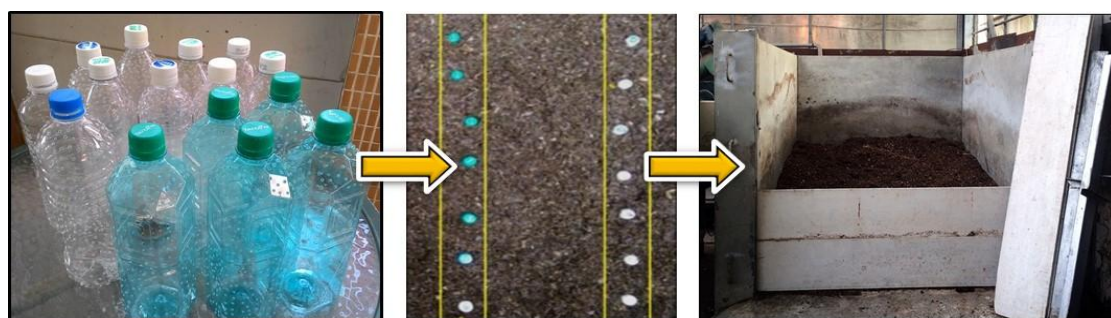


圖 4.2.2.5-2 負壓箱好氧堆肥實驗反應器組

（左：樣品瓶，中：樣品瓶試驗排列上視圖，右：具下方抽氣系統的負壓箱）

而好氧堆肥反應器實驗之反應器如圖 4.2.2.5-3 所示。操作容量為 80

kg，上下方各具注氣及排氣口，可交替變換進氣方向，使內部形成好氧環境，可依需求將內容物順/逆時針旋轉翻動。桶槽底部具有濾滲液兼曝氣盤，可將滲水排出，且回收滲出水再利用。上方兩側具有氣液流體的取樣或偵測口，以進行每日監測。



圖 4.2.2.5-3 好氧堆肥反應器

堆肥實驗之每日監控及記錄之參數，包含：(1)溫度：在高溫期時溫度可達 45°C 以上，且約可維持近 20 天的高溫環境，可使微生物的活性增加及有效地分解有機物質。(2)含水率：水分含量在堆肥試驗中是關係微生物活動，因微生物透過水分進行代謝、分解或降解等作用，而本試驗對於微生物群活動的最佳含水率 30~40%。(3)酸鹼值：因堆肥化過程前期處於發酵過程，故酸鹼值偏酸性，在中後期，堆肥內部作用趨於穩定，酸鹼值漸成中性或弱鹼性。因此檢測酸鹼值可瞭解堆肥試驗進展，掌握堆肥降解戴奧辛最佳作用時期。(4)曝氣量：供給充足空氣量，可增強菌群活性，尤其是在高溫期維持微生物效能的作用。而通氣翻動堆肥試驗在常溫時通氣量約為 $8.48 \text{ L air/kg dry solid} \cdot \text{min}$ ，其空氣壓力為 1.01~1.02 大氣壓(atmosphere, atm)。

4.3 工作進度甘特圖

工作項目	年 月												備 註	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
A.文獻蒐集及分析彙整														
B.實驗規劃與材料準備														
C.厭氧有機液態肥製作														
D.液態肥料及健綠洗劑之濕洗試驗														
E.廚餘醱酵化及真菌降解處理實驗														
F.總體技術及經濟可行性分析														
G.期末報告														
工作進度估計百分比 (累積數)	15%	25%	35%	40%	45%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	100%		
預定查核點	期中		完成濕處理液洗污土實驗											
	期末		完成廚餘醱酵實驗、技術及經濟可行性分析											
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、 多年期計畫應分年說明各年度工作項目及期程規劃。														

五、 結果與討論

5.1 結果與討論

5.1.1 戴奧辛污染土壤濃度粒徑分布圖

圖 5.1-1 為戴奧辛污土其粒徑與重量百分比關係圖；圖 5.1-2 為粒徑與戴奧辛濃度之關係。

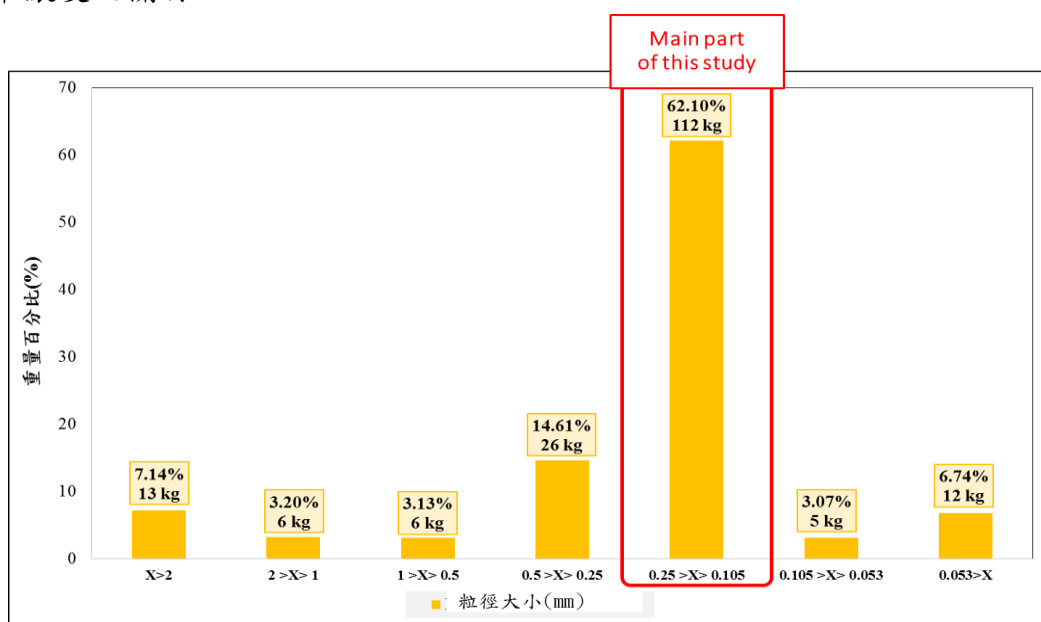


圖 5.1-1 含戴奧辛污染土壤粒徑圖

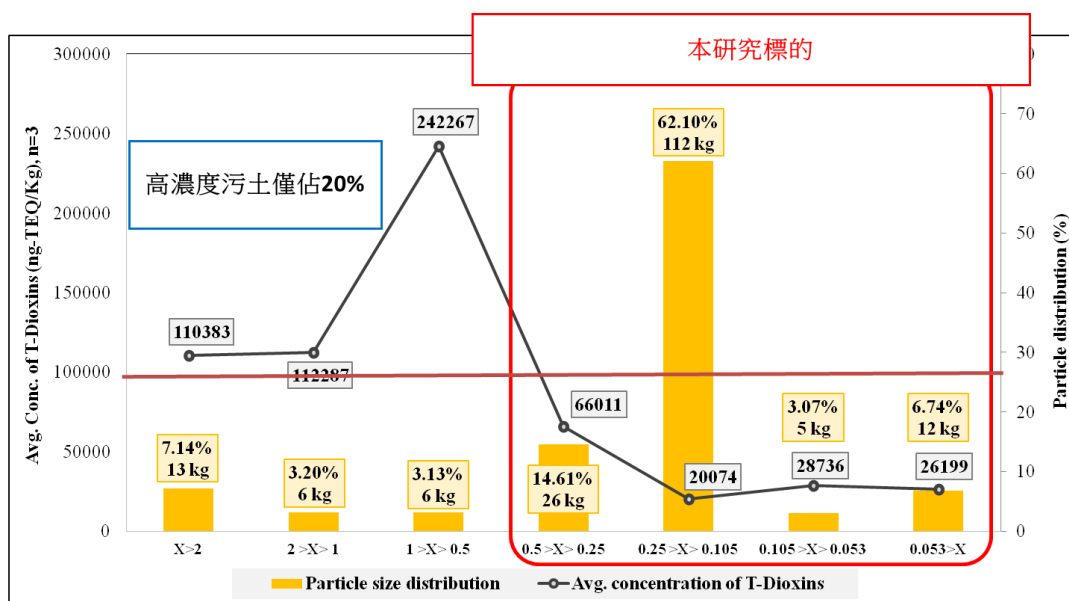


圖 5.1-2 粒徑濃度特徵圖

5.1.2 土壤之化學特性表

經由檢測所得土壤的化學特性，如下表 5.1.2-1 所示：

表 5.1.2-1 土壤之化學特性表

粒徑範圍(mm)	百分比 (%)	戴奧辛 (ng-TEQ/Kg)	酸鹼值	總有機碳 (mL/g)	總氮 (mg/Kg)	電導度 (S/cm)
原土壤	100	-	7.32	-	-	-
>2	7.1	110383	-	0.65	699.04	0.49
2 >X> 1	3.2	112287	-	0.86	1351.76	0.41
1 >X>0.5	3.1	242267	-	1.79	1358	0.29
0.5 >X> 0.25	14.6	66011	-	0.65	445.34	0.19
0.25 >X> 0.105	62.1	20074	8.9	0.04	279.91	0.16
0.105 >X> 0.053	3.1	28736	-	0.07	232.95	0.19
X<0.053	6.7	26199	-	-	-	-

另外，由土壤化學分析表(表 5.1.2-1)中發現，土壤中的總有機碳分佈曲線與戴奧辛濃度分佈曲線有相同的趨勢，如下圖 5.1.2-1 所示。

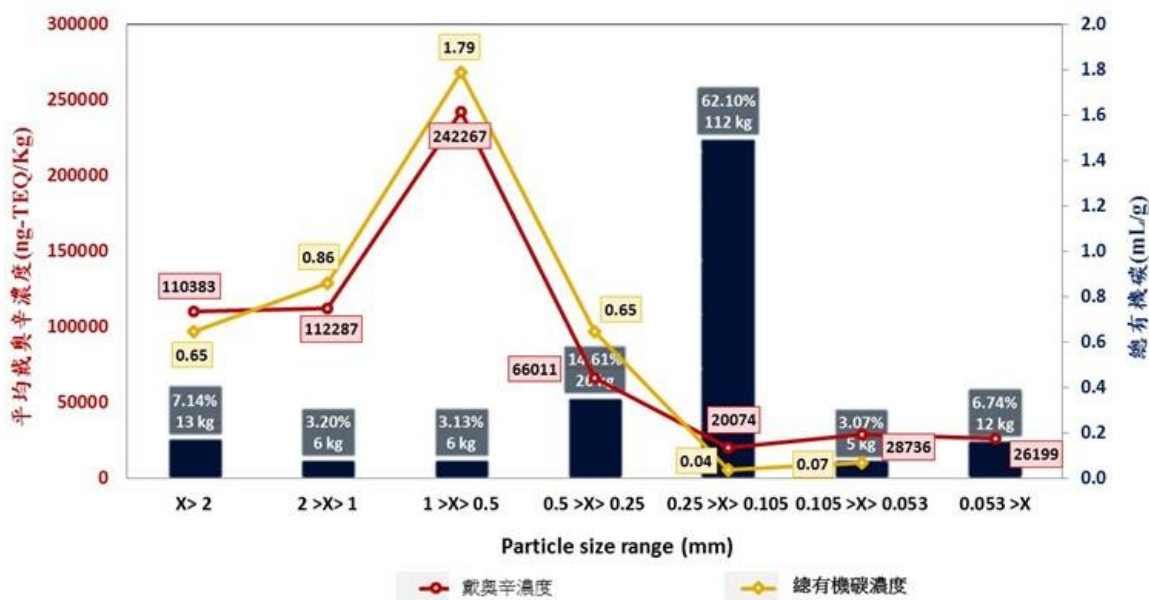


圖 5.1.2-1 戴奧辛與總有機碳之相關圖

5.1.3 水洗溶液分析

1. 厭氧液肥成分：

厭氧液肥成分如表 5.3-1：

表 5.3-1 厭氧液肥之成分表

General category	Compound name	Chemical formular	Concentration (mg/L)
Alcohol group	Ethanol	C_2H_6O	893.00
	7-Oxabicyclo[4.1.0] heptane	$C_7H_{10}O$	101.38
	1-Formyl-2,2,6-trimethyl-3-(3-methyl)	$C_{15}H_{24}O$	245.90
	2-Furanmethanol	$C_5H_6O_2$	239.42
Acid group	Benzenesulfonic acid	$C_6H_5SO_3Na$	128.12
	2-Pyridinecarboxylic acid	$C_5H_4N_2O_2$	179.90
	Carbamic acid	$C_2H_5NO_2$	179.90
	Benzoic acid, 4- (methylthio)	$C_8H_7NO_2S$	183.34
	Carbonofluoridic acid	$C_2F_4O_2$	154.00
Acidamide group	4-Aminobutyamide	$C_4H_9N_2O_3$	175.60
Aldehydes	Acetaldehyde	C_2H_4O	175.60
	Benzaldehyde, 3-nitro-	$C_7H_5NO_3$	219.10
Ketones	Solavetivone	$C_{15}H_{22}O$	203.20
	Bicyclo[2.2.1] heptan-2-ol	$C_7H_{12}O$	210.09
Ester	Phenyl ester	$C_7H_7NO_2$	179.90
	Diphenyl phosphate	$C_{12}H_{11}O_4P$	236.00

2. 水產生漿成分：

水產生漿成分如下圖 5.3-2。

表 5.3-2 水產生漿之成分表

Compound name	Chemical formular	Concentration (ug/mL)
Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	32.56
Pentadecanoic acid, 14-methyl-	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	13.06
n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	61.99
Benzeneethanamine	C ₉ H ₁₂ FNO ₃	13.73
1,4,8-Dodecatriene	C ₁₂ H ₁₈	14.88
9, 12-Octadecadienoic acid(Z,Z)-, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	21.34
9-Octadecadienoic acid(Z)-	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	19.35
2(3H)-Furanone	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	15.30
Octadecadienoic acid	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	29.65
9-Octadecadienoic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	434.51
14-Pentadenoic acid	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	350.86
Pentadenoic acid	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	119.12
Docosane	C ₂₂ H ₄₆	106.63
Oxacyclotetradecan-2-one	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	89.93
Dodeca-1, 8-dien-4-yne	C ₁₂ H ₁₈	17.90
1,3-Propanediol	C ₅ H ₁₂ O ₆ S ₂	19.12
1-Methylbocyclo[3.2.1]octane	C ₉ H ₁₆	12.39
5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid	C ₂₁ H ₃₄ O ₂	12.88
Butanedinitrile	C ₄ H ₄ N ₂	18.57
7,10,13-Eicosatetraenoic acid	C ₂₁ H ₃₆ O ₂	76.62
Tricosane	C ₂₃ H ₄₈	13.78
9-Octadecenoic acid(Z), methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	11.29
2(3H)-Furanone, dihydro-5-propyl-	C ₇ H ₁₂ O ₂	17.54
Cycloheptanone, 2-methyl-	C ₈ H ₁₄ O	13.20
Benzenemethanamine	C ₁₆ H ₁₇ NO ₂	14.59
Styrene	C ₁₅ H ₁₃ NO ₃	35.83
Benzoic acid	C ₃₁ H ₃₃ NO ₂	20.96
3,4-Dihydrocoumarin	C ₁₁ H ₁₃ NO ₂	61.22
Benzenamine, 2,3,5,6-tetrachloro-	C ₆ H ₃ Cl ₄ N	48.44
Phenol, bis(1-methylpropyl)-	C ₁₄ H ₂₂ O	35.45
Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	C ₁₄ H ₂₂ O	177.57
1,2-Benzenedicarboxylic acid	C ₁₄ H ₁₈ O ₄	66.82
1,3-Benzodioxole	C ₂₁ H ₂₂ O ₆	52.17
Tricyclo[4.3.1.13,8]undecane	C ₁₁ H ₁₇ Br	46.21
Benzene, 1,2,4,5-tetrakis(1-methyl)-	C ₁₈ H ₃₀	40.00

3. 醇類配方成分：

醇類配方成分如下表 5.3-3。

表 5.3-3 醇類配方之成分表

General category	Compound name	Chemical formular	Concentration (mg/L)
Alcohol group	Ethanol	C_2H_6O	3,071.00
	1-Propanethiol	C_3H_8S	719.41
	2-(2-Hydroxyphenoxy)-1-phenylethanol	$C_{14}H_{14}O_3$	498.60
Acid group	2-Hexynoic acid	$C_6H_8O_2$	435.20
	Boric acid	BH_3O_3	449.40
	Ethanedioic acid	$C_6H_{10}O_4$	94.90
	2-norbornanecarboxylic acid	$C_8H_{11}ClO_2$	125.90
	Formic acid	CH_2O_2	72.50
	Propanoic acid	$C_3H_6O_2$	103.90
	Carbamic acid, tricyclo[	$C_{10}H_{15}NO_2$	89.28
Acidamide group	Formamide	CH_3NO	72.50
Aldehydes	Acetaldehyde	C_2H_4O	182.90
Ketones	Cyclohexanone, (2-nitrophenyl)	$C_{12}H_{15}N_3O_2$	103.90
	2-Butanone, (2,4-dinitrophenyl)	$C_{10}H_{12}N_4O_4$	79.40
Ester	Diethyl ester	$C_6H_{10}O_4$	94.90

5.1.4 洗土結果

5.1.5.1 中濃度洗土結果及去除效率

1. 水產生漿之洗土結果

圖 5.1.4.1-1 為魚漿配方於開放系統中經過 5 次洗土後，其結果為戴奧辛濃度由 22,080 ng-TEQ/Kg 去除至 1,298 ng-TEQ/Kg 且達到最佳之去除效率 94.1%，為此次洗土結果之最佳配方。

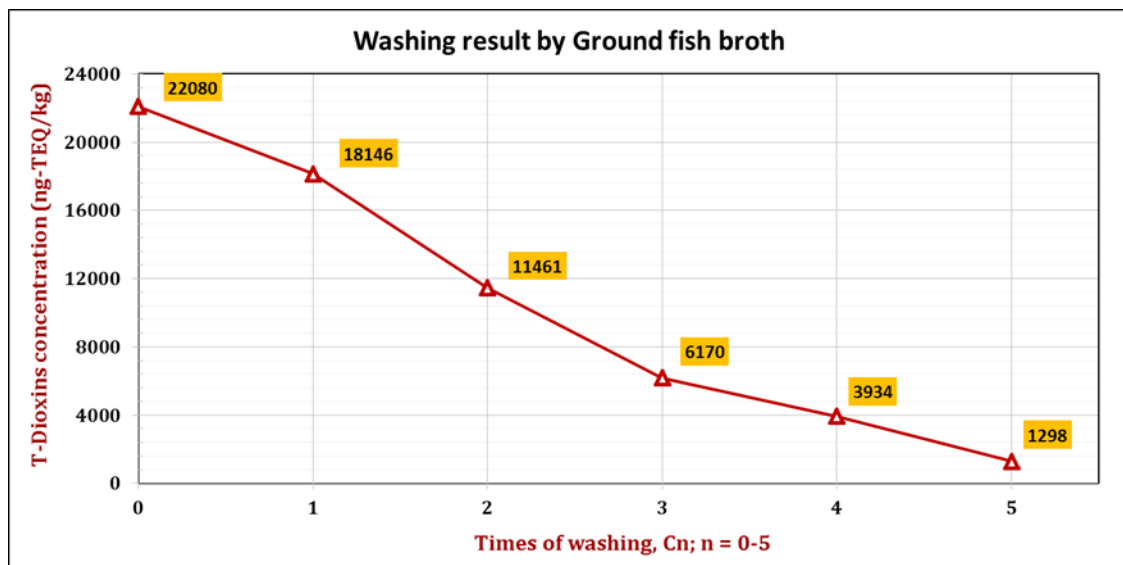


圖 5.1.4.1-1 魚漿配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖

2. 厭氧液肥之洗土結果

厭氧液肥配方於密閉系統中經過 6 次洗土後，其結果為戴奧辛濃度由 22,080 ng-TEQ/Kg 去除至 2,961 ng-TEQ/Kg 且達到去除效率為 86.6%，此液肥為第二佳之洗土配方，成果如圖 5.1.4.1-2。

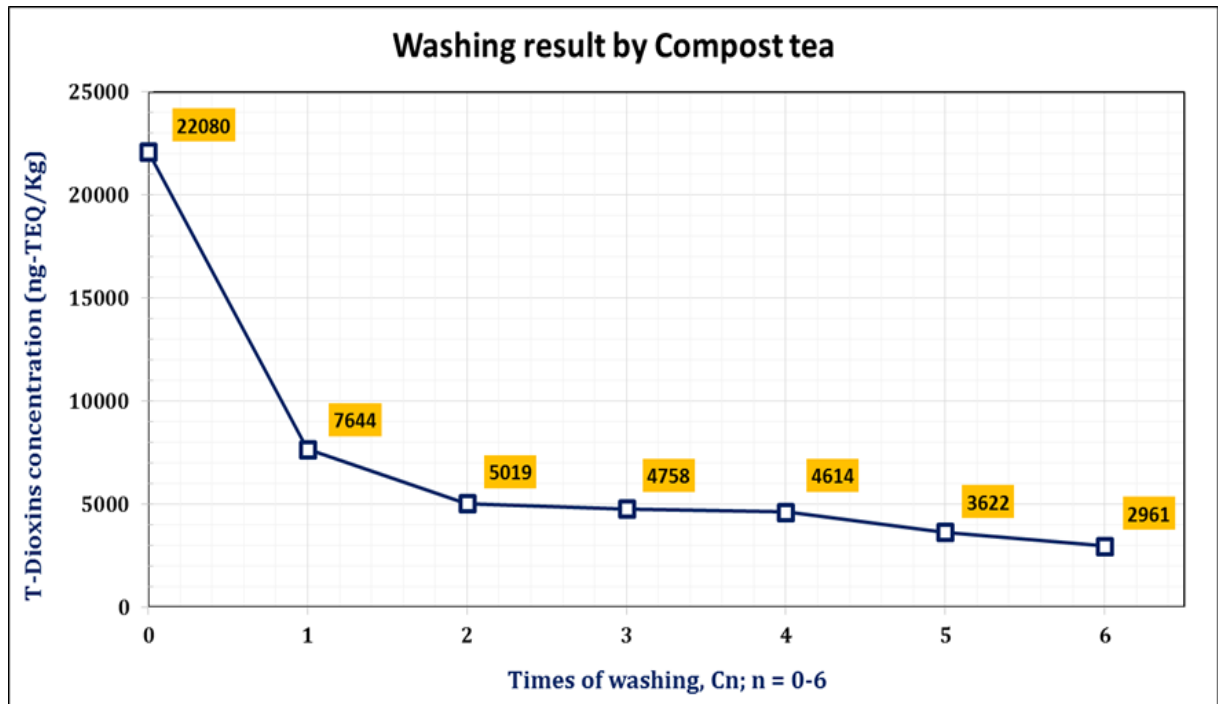


圖 5.1.4.1-2 液肥配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖

3. 醇類配方之洗土結果

醇類配方於密閉系統中經過 6 次洗土後，其結果為戴奧辛濃度由 22,080 ng-TEQ/Kg 去除至 6,524 ng-TEQ/Kg 且達到去除效率為 70.5%，成果如圖 5.1.4.1-3。

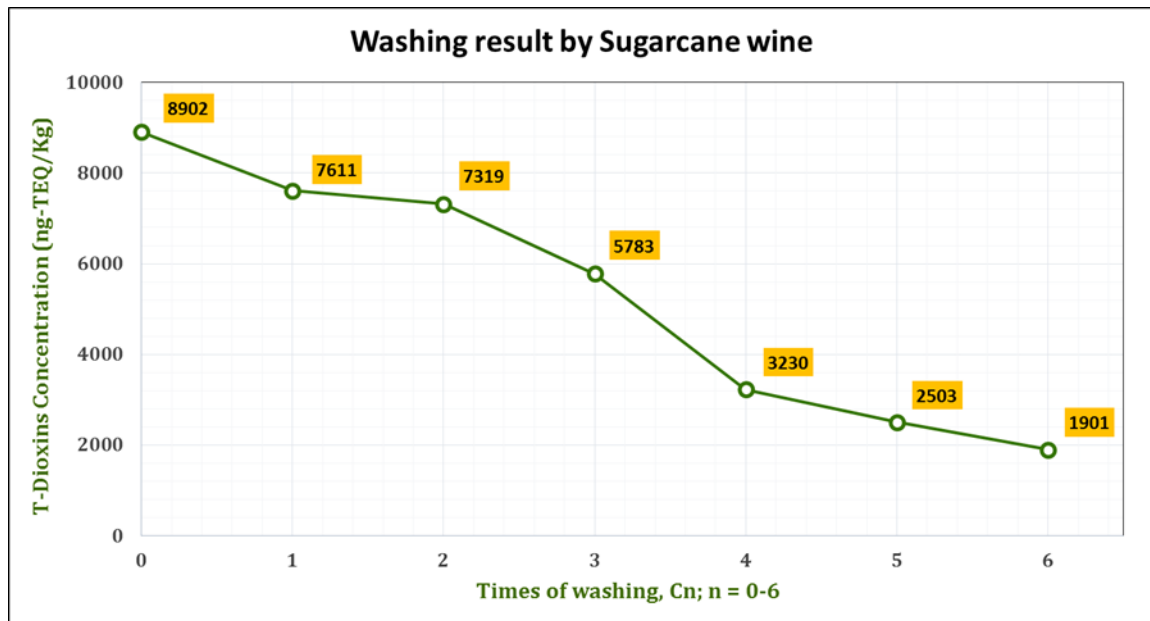


圖 5.1.4.1-3 醇類配方之土壤戴奧辛濃度與洗土次數圖

依表 5.1.4.1-1 及圖 5.1.4.1-4 所示，可發現去除效果最佳之洗土配方為水產生漿。而在開放系統中洗土至第 5 次時，其土壤殘留濃度 (1,298 ng-TEQ/Kg) 幾近至達標濃度，且去除效率為 94.1% (土：液=1：2.5)。而第二佳之配方為厭氧液肥，其在第 6 次洗土時，其土壤殘留濃度 (2961 ng-TEQ/Kg) 去除效率達到 86.6% (土：液=1：6.4)。

表 5.1.4.1-1 洗土次數及其去除效率

	初始濃度	殘留濃度(ng-TEQ/Kg) (ng-TEQ/Kg)					
Washing liquid	T-Dioxins (ng-TEQ/Kg)	1st washing	2nd washing	3rd washing	4th washing	5th washing	6th washing
洗土配方	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
厭氧液肥	22,080	7,644	5,019	4,758	4,614	3,622	2,961
混合比率 (1 : n)		2.9	3.1	3.6	4.1	5.7	6.4
去除效率 (%)		65.4	77.3	78.5	79.1	83.6	86.6
水產生漿	22,080	18146	11461	6170	3934	1298	-
混合比率 (1 : n)		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	-
去除效率 (%)		17.8	48.1	72.1	82.2	94.1	-
醇類配方	8,902	7,611	7,319	5,783	3,230	2,503	1,901
混合比率 (1 : n)		2.6	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4
去除效率 (%)		14.5	17.8	35	63.7	71.9	78.6

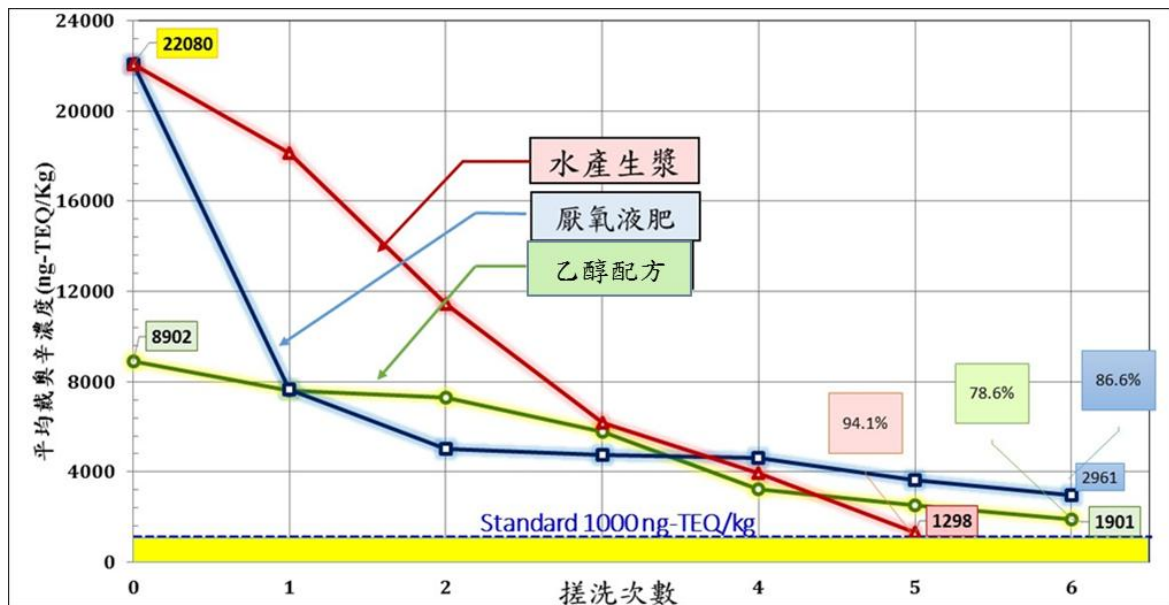


圖 5.1.4.1-4 3 種洗土配方對於中濃度之去除效果比較

5.1.5.2 高濃度洗土結果及去除效率

本團隊選用中濃度試驗去除效率最佳之 2 種溶劑，做了一組高濃度約 110,000 至 130,000 ng-TEQ/Kg，成果如下：

1. 厭氧液肥水洗結果

如表 5.1.4.2-1 及圖 5.1.4.2-1 為厭氧液肥結果。厭氧液肥配方於密閉系統中經過 10 次洗土後，其結果為戴奧辛濃度由 113,565 ng-TEQ/Kg 去除至 4,841 ng-TEQ/Kg 且達到去除效率為 95.74%。

表 5.1.4.2-1 厭氧液肥配方經 10 次洗土之去除效率

Compound Name	Avg-C ₀ (ng-TEQ/kg)	Compost tea (1) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (2) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (3) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (5) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (7) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (9) (ng-TEQ/kg)	Compost tea (10) (ng-TEQ/kg)	I-TEF	IDL (ug/L)
2,3,7,8-TeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	1.74
2,3,7,8-TeCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1	2.24
1,2,3,7,8-PeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.05	3.47
2,3,4,7,8-PeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5	3.27
1,2,3,7,8-PeCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5	9.30
1,2,3,4,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	8.56
1,2,3,6,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	3.49
2,3,4,6,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	5.43
1,2,3,4,7,8-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	15.90
1,2,3,6,7,8-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	9.88
1,2,3,7,8,9-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	8.34
1,2,3,7,8,9-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	7.15
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	52000	49889	17890	14103	10409	4483	3749	2959	0.01	84.19
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	17699	18169	7216	6291	4889	1457	884	N.D.	0.01	14.86
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	54.40
OCDF	12064	10908	4139	3018	2425	1196	849	760	0.001	119.48
OCDD	31802	28575	10051	7335	5986	1927	1383	1123	0.001	94.27
Total (ng-TEQ/kg)	113565	107542	39296	30747	23709	9062	6865	4841		
R.E.%		5.30	65.40	72.93	79.12	92.02	93.95	95.74		

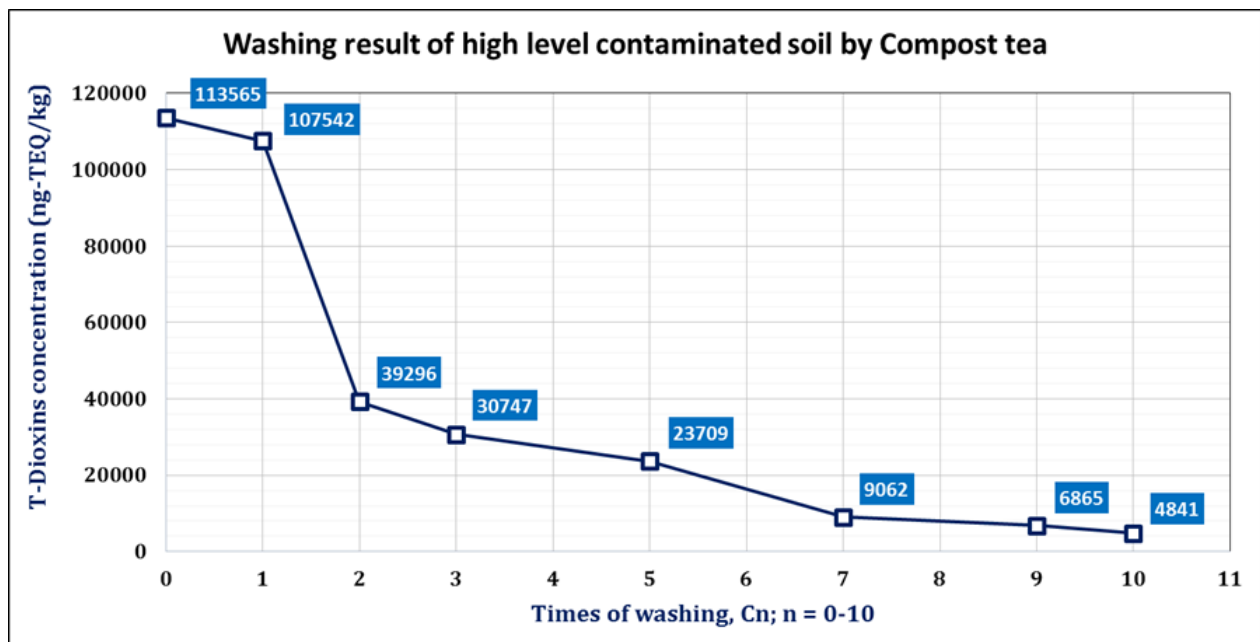


圖 5.1.4.2-1 厭氧液肥配方之土壤高戴奧辛濃度與洗土次數圖

2. 水產生漿水洗結果

如表 5.1.4.2-2 及圖 5.1.4.2-2 為水產生漿結果。水產生漿於密閉系統中經過 10 次洗土後，其結果為戴奧辛濃度由 134,709 ng-TEQ/Kg 去除至 6,237 ng-TEQ/Kg 且達到去除效率為 95.37%。

表 5.1.4.2-2 水產生漿配方經 10 次洗土之去除效率

Compound Name	Avg-C ₀ (ng-TEQ/Kg)	C1-Fish broth (ng-TEQ/Kg)	C3-Fish broth (ng-TEQ/Kg)	C5-Fish broth (ng-TEQ/Kg)	C7-Fish broth (ng-TEQ/Kg)	C10-Fish broth (ng-TEQ/Kg)	I-TEF	IDL (ug/L)
2,3,7,8-TeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	1.74
2,3,7,8-TeCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1	2.24
1,2,3,7,8-PeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.05	3.47
2,3,4,7,8-PeCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5	3.27
1,2,3,7,8-PeCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5	9.30
1,2,3,4,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	8.56
1,2,3,6,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	3.49
2,3,4,6,7,8-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	5.43
1,2,3,4,7,8-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	15.90
1,2,3,6,7,8-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	9.88
1,2,3,7,8,9-HxCDD	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	8.34
1,2,3,7,8,9-HxCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	7.15
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	73082	21844	20961	12020	10621	4158	0.01	84.19
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	20475	6954	4255	2781	3321	N.D.	0.01	14.86
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	54.40
OCDF	12488	3434	2823	1648	1801	923	0.001	119.48
OCDD	28664	8399	5703	3326	2526	1155	0.001	94.27
Total	134709	40631	33742	19775	18269	6237		
R.E.%		69.84	74.95	85.32	86.44	95.37		

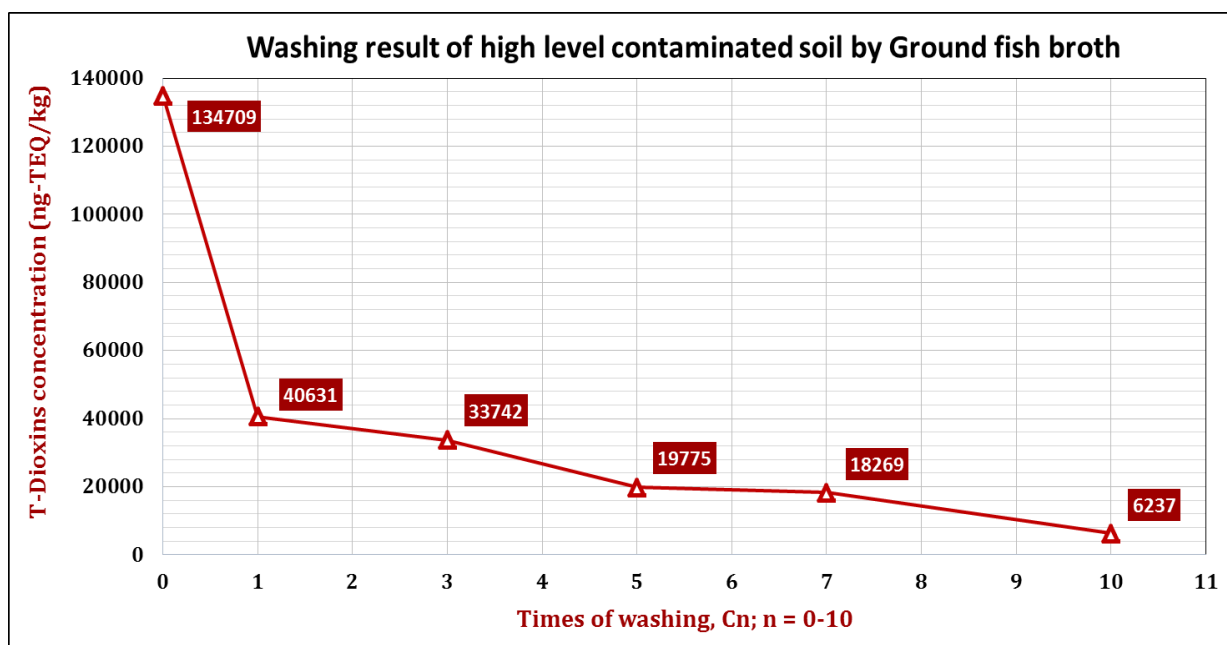


圖 5.1.4.2-2 水產生漿配方之土壤高戴奧辛濃度與洗土次數圖

圖 5.1.4.2-3 為厭氧液肥及水產生漿洗土配方之去除效果比較，厭氧液肥經過 10 次洗土後，達到 95.74% 之去除效率，其濃度由 113,565 ng-TEQ/Kg 降至殘餘為 4,841 ng-TEQ/Kg。而另一配方水產生漿經過 10 次洗土後，達到最佳之去除效率 95.37%，其戴奧辛濃度由 134,709 ng-TEQ/Kg 降至 6,237 ng-TEQ/Kg。

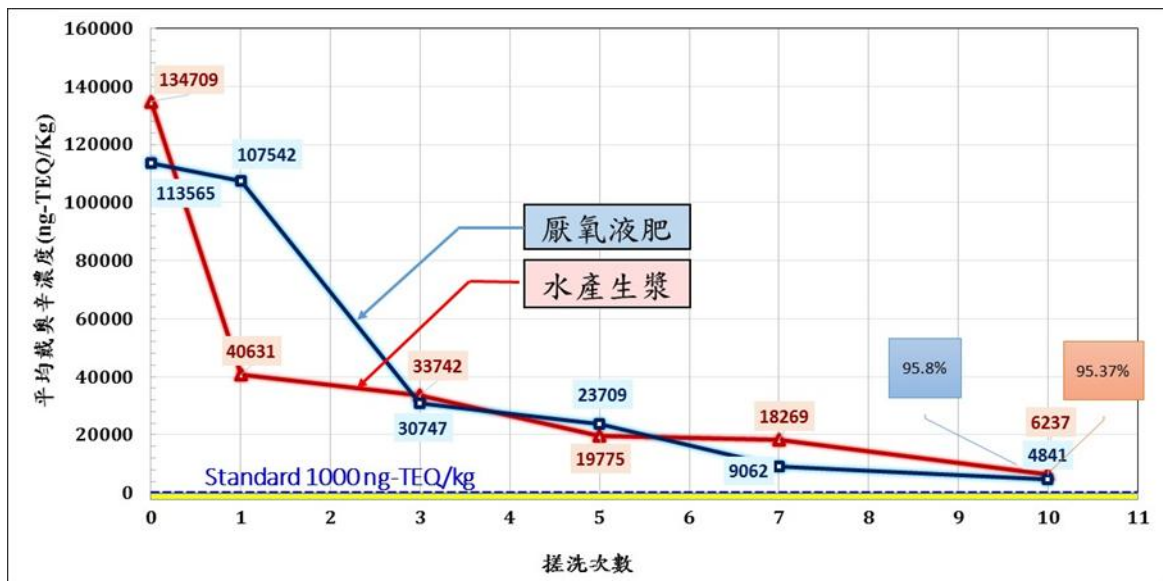


圖 5.1.4.2-3 厭氧液肥及水產生漿洗土配方之去除效果比較

5.1.5 好氧堆肥結果

5.1.5.1 負壓箱好氧堆肥實驗

負壓箱好氧堆肥實驗，廚餘與戴奧辛污土之濕重比為 3:1 均勻混合後，裝入樣品瓶中並於負壓箱中進行試驗，單瓶裝重 0.4 公斤，瓶裝反應器共 14 支，總重 5.6 公斤，其戴奧辛初始濃度為 2,491 ng-TEQ/kg，結果說明如下：

(1) 溫度變化

溫度變化（如圖 5.1.5.1-1）：高溫期維持 16 天，因為在通氣靜置反應器組之好氧環境下，樣品瓶中堆肥因僅通氣而未翻動，故溫度下降較為平緩，而最終至常溫 25 °C 左右。

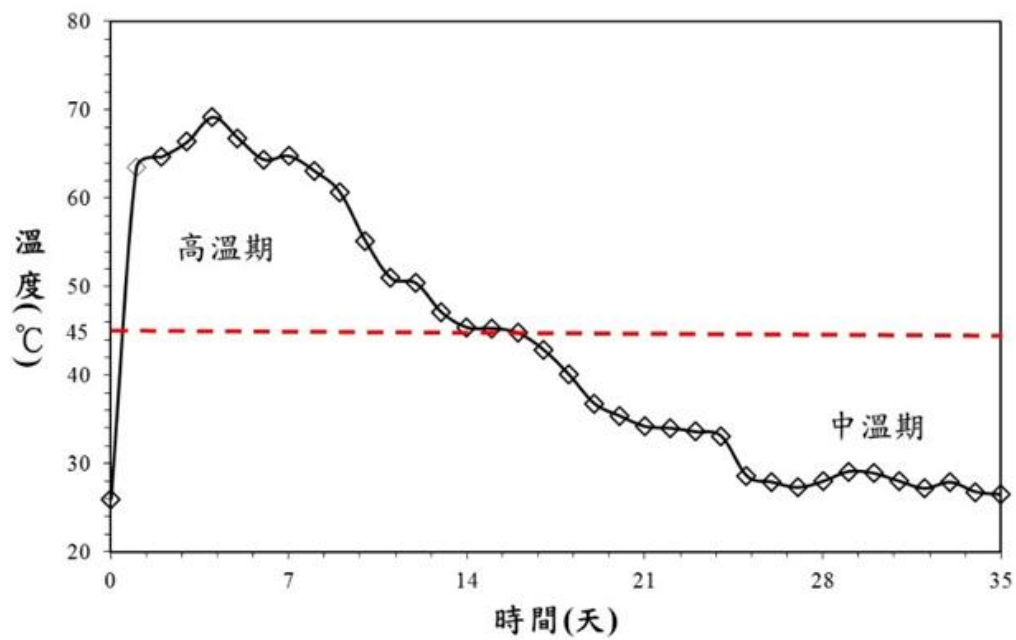


圖 5.1.5.1-1 好氧堆肥通氣靜置試驗之溫度逐日變化趨勢

(2) 戴奧辛濃度

作用 63 天後，戴奧辛濃度由 2,491 ng-TEQ/kg 降至 751 ng-TEQ/kg，去除率為 69.9%，且最終濃度低於土壤污染管制標準（如圖 5.1.5.1-2）。

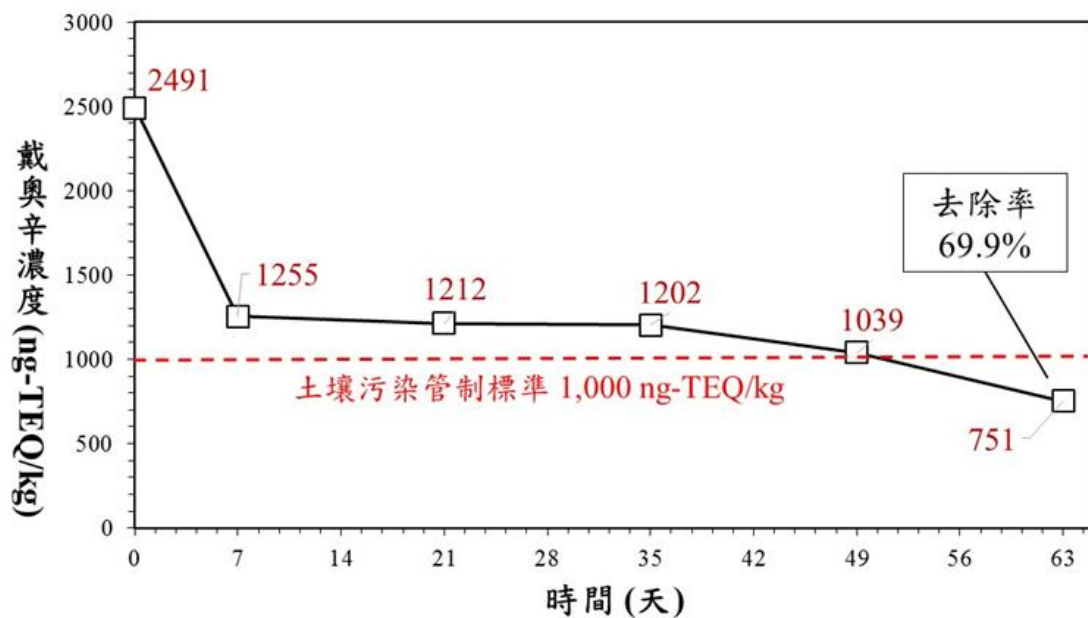


圖 5.1.5.1-2 好氧堆肥通氣靜置試驗之戴奧辛濃度變化趨勢

5.1.5.2 好氧堆肥反應器實驗

1. 第一批次好氧堆肥反應器

第一批次好氧堆肥反應器，廚餘與戴奧辛污土之濕重比為 7：3，其總重為 80 公斤，混合均勻後，置於反應器中進行 42 天的反應，每日監測項目之結果以及戴奧辛濃度之變化說明如下：

(1) 每日監測參數

- a. 溫度與含水率變化（如圖 5.1.5.2-1）：高溫期維持近 20 天，爾後 20 天至試驗結束的溫度則驟降至常溫。而初始水分為廚餘本身水分，而在操作期間含水率則控制在 30~40%，以維持微生物活動所需。

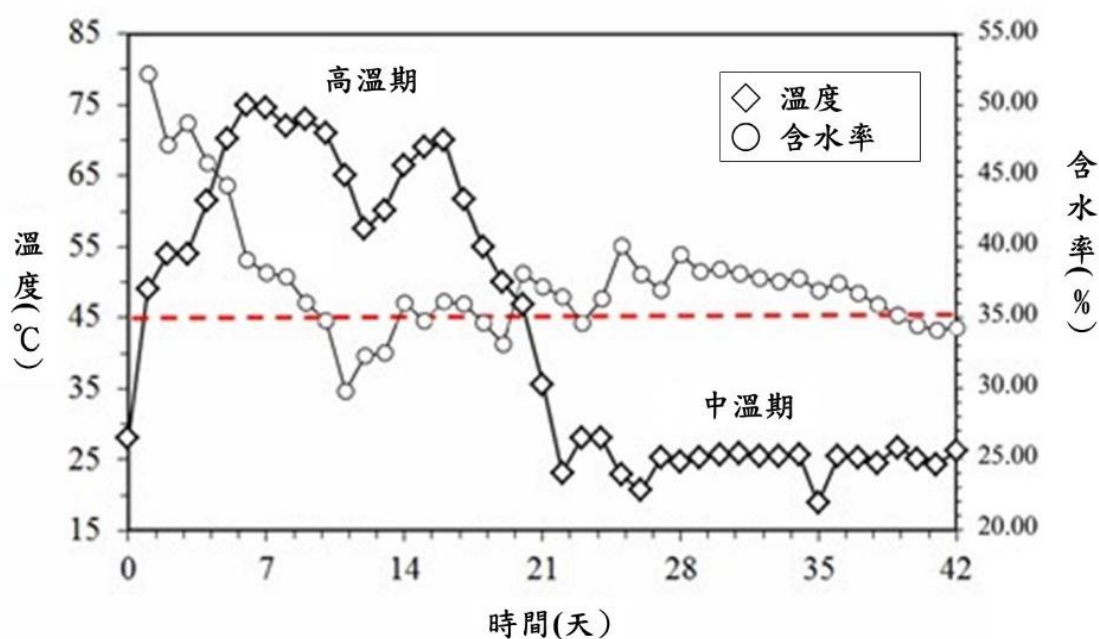


圖 5.1.5.2-1 第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之溫度與含水率逐日變化

- b. 酸鹼值變化（如圖 5.1.5.2-2）：在試驗前期之酸鹼值均為酸性，而到後期趨於中性及弱鹼性，且維持直至試驗結束。

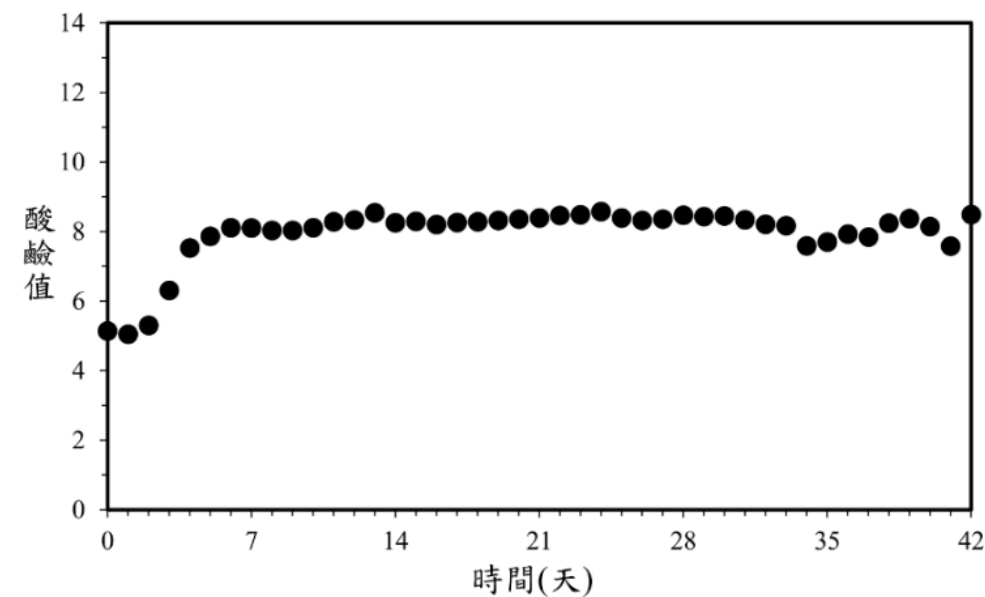


圖 5.1.5.2-2 第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之逐日酸鹼值變化

(2) 戴奧辛濃度

本試驗戴奧辛原土濃度為 16,004 ng-TEQ/kg，加入 68% 廚餘（濕重），濃度降至 7,462 ng-TEQ/kg（如圖 5.1.5.2-3），至第 14 天戴奧辛濃度已去除 50.7%，之後降解雖較緩慢，但仍有 20% 以上的去除效率。至第 42 天，其濃度降至 1,916 ng-TEQ/kg，已趨近於我國土壤污染管制標準 1,000 ng-TEQ/kg。

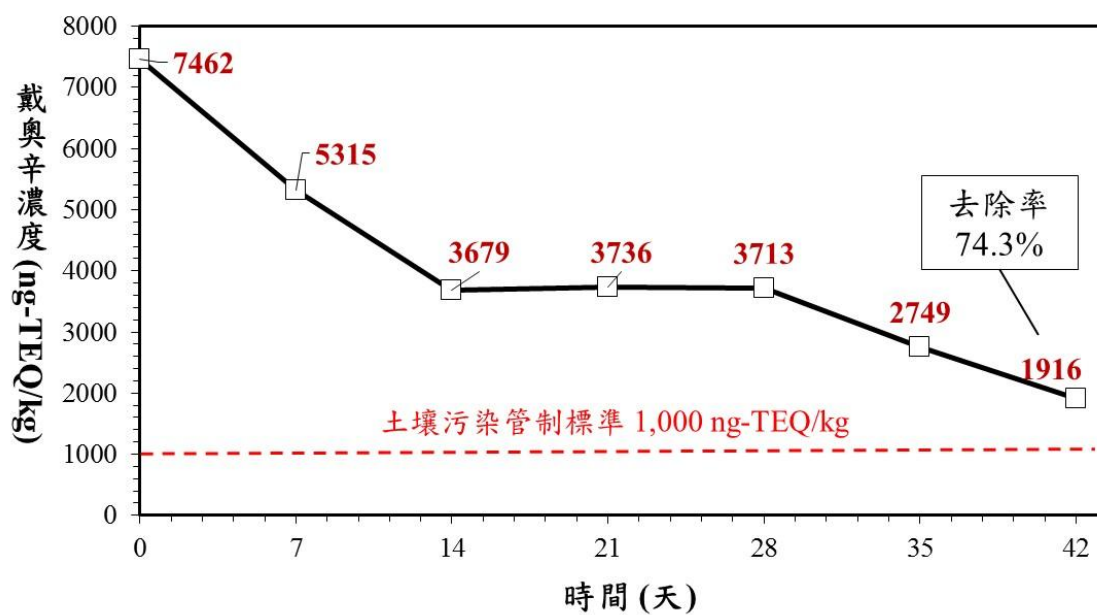


圖 5.1.5.2-3 第一批次好氧堆肥通氣翻動試驗之戴奧辛濃度變化趨勢

2. 第二批次通氣翻動堆肥試驗

第二批次反應器試驗的廚餘堆肥與污土混合比如同第一批次。而第一批試驗之經驗，於高溫過程降解戴奧辛濃度其速率較快，故此階段於堆肥試驗過程中再加入營養源，冀使微生物能再次在高溫期繼續作用，能供給菌群養分以提高戴奧辛去除效率。

(1) 每日監測參數

- a. 溫度與含水率變化如圖 5.1.5.2-4 所示：高溫期維持 20 天，且因再添加營養源，使得微生物共維持三次高溫期作用。而為維持環境條件，故將含水率控制在 35~45%之間。其酸鹼值變化，近似於第一批次試驗，但因再添加營養源，所以發生三次由酸至中性及弱鹼性的變化過程。

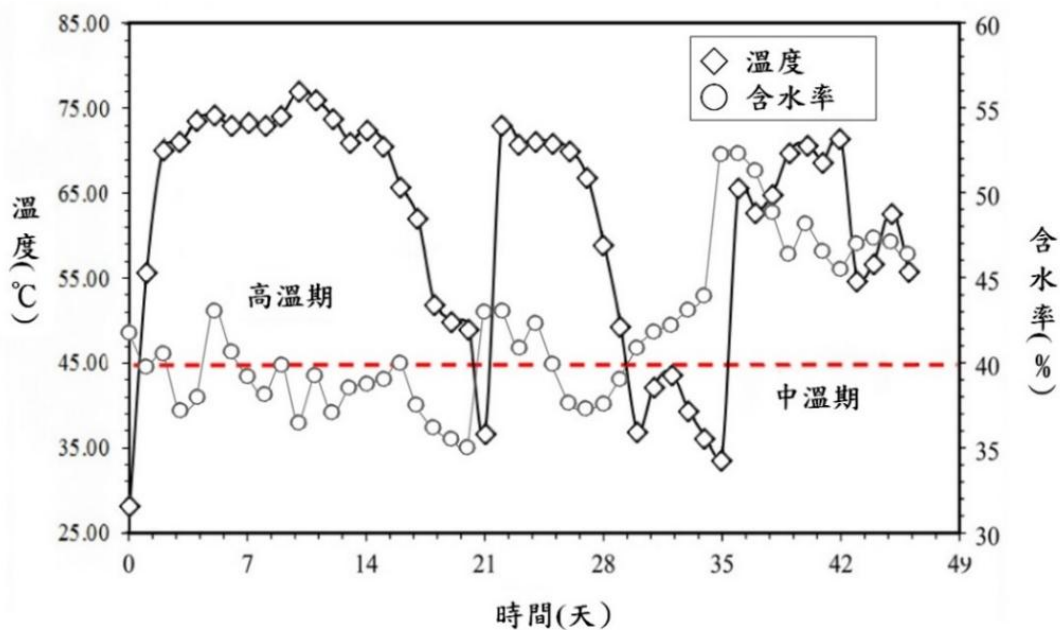


圖 5.1.5.2-4 第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之溫度與含水率逐日變化

- b. 酸鹼值變化（如圖 5.1.5.2-5）：在試驗前期之酸鹼值均為酸性，而到後期趨於中性及弱鹼性，且維持直至試驗結束。

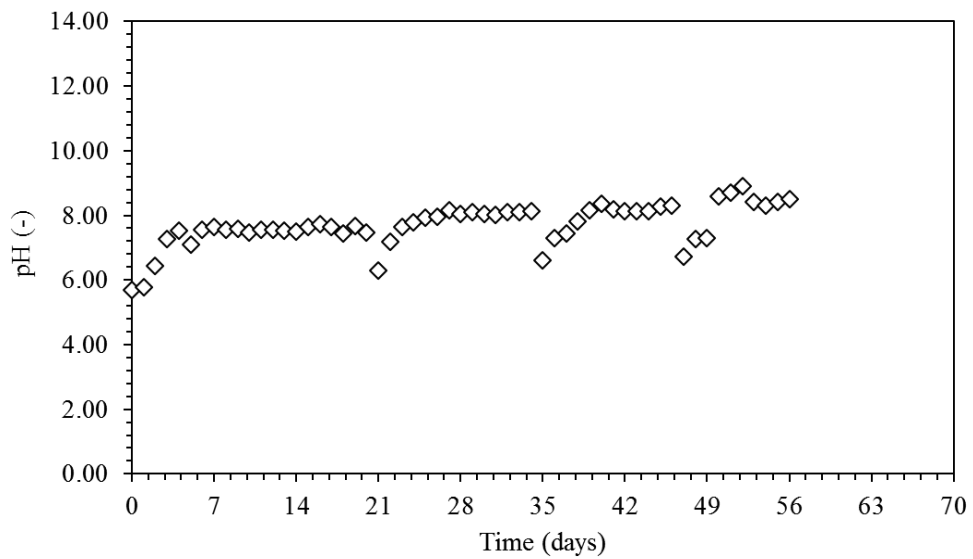


圖 5.1.5.2-5 第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之逐日酸鹼值變化

(2) 戴奧辛濃度

本試驗原土濃度為 15,496 ng-TEQ/kg，加入 69%廚餘（濕重），濃度降至 6,048 ng-TEQ/kg（如圖 5.1.5.2-6 可知），此次試驗在過程中添加營養鹽，希望可提升效果加速降解速率。而在高溫發酵過程中戴奧辛濃度降至 3,227 ng-TEQ/kg，分別於第 21 天及第 35 天加入營養源，最後戴奧辛濃度降至 1,604 ng-TEQ/kg。

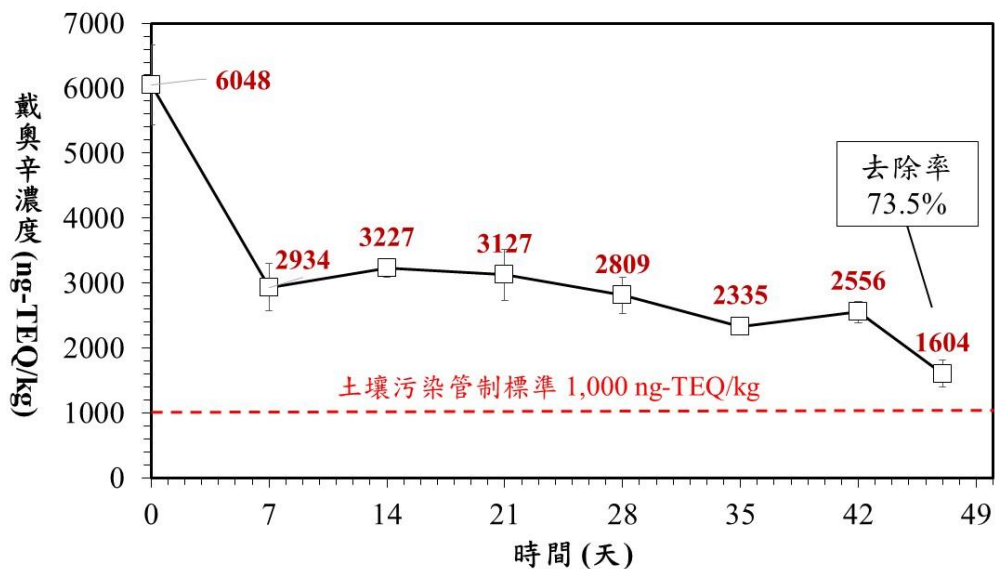


圖 5.1.5.2-6 第二批次好氧堆肥通氣翻動試驗之戴奧辛濃度變化趨勢

5.2 結論與建議

5.2.1 結論

本研究利用三種洗劑搓洗及廚餘堆肥淨化受戴奧辛污染土壤，綜合本研究結果得到以下結論：

1. 在攝氏 30 度下，經過五次搓洗後，得到最佳洗劑為厭氧液肥，其去除效率為 94.1%。
2. 水產物生漿其戴奧辛濃度由未萃取前 22,080 ng-TEQ/Kg，水洗後結果為 1,298 ng-TEQ/Kg，去除效率為 94.1%，接近法規標準 1,000 ng-TEQ/Kg；次之，厭氧液肥水洗後其濃度為 2,961 ng-TEQ/Kg，去除率為 87%；最後甘蔗酒水洗後其去除率為 80%。
3. 高濃度之土壤，其戴奧辛濃度介於 110,000 至 130,000 ng-TEQ/Kg。其中，厭氧液肥洗土後，其濃度由 113,565 ng-TEQ/Kg 降至殘餘為 4,841 ng-TEQ/Kg，去除率為 95.74%；水產物生漿洗土後其濃度由 134,709 ng-TEQ/Kg 降至 6,237 ng-TEQ/Kg，去除率為 95.37%。
4. 本研究證實濕處理搓洗戴奧辛污土可行，使用之洗劑為廢棄物回收再利用，具生物可分解特性，且對環境較友善，環境足跡相對較少。
5. 本研究三批次之好氧堆肥試驗（污土與廚餘之混合物其初始濃度分別為 7,462、6,048、2,491 ng-TEQ/kg），對於污土中之戴奧辛降解顯示有效；二批次好氧堆肥反應器實驗與負壓箱好氧堆肥實驗之戴奧辛降解趨勢近似。
6. 好氧堆肥反應器實驗中，戴奧辛濃度由 2,491 ng-TEQ/kg 耗時 63 日降至 751 ng-TEQ/kg，最終濃度已符合並低於我國土壤污染管制標準(1,000 ng-TEQ/kg)。

7. 堆肥發酵過程中，高溫期約 20 日，顯示廚餘與戴奧辛污土之堆肥混合物，其中微生物生長及活性並不會受到戴奧辛毒性抑制，且堆肥高溫發酵期亦能使戴奧辛污土濃度下降 50% 左右。
8. 本研究試驗過程，廚餘係一般廢棄物資源化再利用之試驗資材，且僅初期 20 天每日間歇地實施兩次少量通氣與翻動，廚餘滲出水亦迴流用於堆肥試驗保濕，也未使用任何加熱或連續電力輸出設施，故在節能、減碳、節水、減廢、促進資源化再利用等方面，相較於其他技術可能更有顯著效益。
9. 本研究證實，以生物堆肥處理受戴奧辛污染土壤之整治技術初步可行，若在微生物菌種與基因方面之機制能更深入的研究，因堆肥相關設備較為簡易且成本經濟，故可搭配於實際案場放大測試。結合通氣翻動之機械式堆肥反應器，不僅可縮短整治時間與減少人員操作負荷，亦可減少空氣、水體、廢棄物等環境足跡，同時有助於復育土壤肥力，亦具成本經濟以及環境友善之潛在優勢，故後續實有更深入研究開發之潛力。

5.2.2 建議

1. 熱處理為耗能排碳、高環境足跡之傳統技術，本計畫成果冀能開發出較低能耗與較低環境足跡之綠色及可持續性整治 (Green and Sustainable Remediation, GSR) 技術~以濕處理結合生物堆肥。
2. 本研究證實濕處理搓洗戴奧辛污土可行；然而，搓洗後之土壤尚未達到法規標準，本研究將接續進行廚餘生物堆肥，冀能達至法規標準。
3. 本團隊目前使用之洗劑為廢棄物回收再利用，具生物可分解特性，且對環境較友善，環境足跡相對較少，則更具實際應用價值，對於非熱處理之較低能耗與排碳之整治工法將提供對環境更友善的對策，亦將為後續研究之目標。

六、 参考文献

弓爱君，邱丽娜，要如磊，张玮玮，朱 琳，二恶英降解菌及其降解机理的研究进展，沧州师范学院学报，第 29 卷第 2 期，2013。

Ahn, Y.B., Haggblom, M.M., Fennell, D.E., Co-amendment with halogenated compounds enhances anaerobic microbial dechlorination of 1,2,3,4-tetrachlorodibenzo-p-dioxin and 1,2,3,4-tetrachlorodibenzofuran in estuarine sediments. *Environ. Toxicol. Chem.* 24, 2775–2784, 2005.

Alcock, R.E., Jones, K.C., Dioxins in the environment: a review of trend data. *Environ. Sci. Technol.* 30, 3133 – 3143, 1996.

Arfmann, H.A., Timmis, K.N., Wittich, R.M., Mineralization of 4-chlorodibenzofuran by a consortium consisting of *Sphingomonas* sp. strain RW1 and *Burkholderia* sp. strain JWS. *Appl. Environ. Microbiol.* 63, 3458-3462, 1997.

Billy J. Cochran, William A. Carney, H. Rouse Caffey, and Jack L. Bagent “Basic Principles of Composting”, LSU Ag. Center, Pub. 2622.

Ballerstedt, H., Kraus, A., Lechner, U., Reductive dechlorination of 1,2,3,4-tetrachlorodibenzo-p-dioxin and its products by anaerobic mixed cultures from Saale river sediment. *Environ. Sci. Technol.* 31, 1749-1753, 1997.

Beurskens, J.E.M., Toussaint, M., Dewolf, J., Vandersteen, J.M.D., Slot, P.C., Commandeur, L.C.M., Parsons, J.R., Dehalogenation of chlorinated dioxins by an anaerobic microbial consortium from sediment. *Environ. Toxicol. Chem.* 14, 939 – 943, 1995.

Bunge, M., Adrian, L., Kraus, A., Opel, M., Lorenz, W.G., Andreesen, J.R., Gorisch, H., Lechner, U., Reductive dehalogenation of chlorinated dioxins by an anaerobic bacterium. *Nature* 421, 357-360, 2003.

Bunge, M., Ballerstedt, H., Lechner, U., Regiospecific dechlorination of spiked tetra- and trichlorodibenzo-p-dioxins by anaerobic bacteria from PCDD/F-contaminated Spittelwasser sediments. *Chemosphere* 43,

675-681 , 2001.

Chen, W.Y., Wu, J.-H., Lin, Y.Y., Huang, H.J., & Chang, J.E., Bioremediation potential of soil contaminated with highly substituted polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans: Microcosm study and microbial community analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 261(0), 351-361, 2013.

Chitsan Lin, Ta-Chen Lin, Wen-Ming Mao, Chun-Lan Huang, Der-Shyan Sheu., Jimmy C. M. Kao, “Application of Food Waste Composting Process for the Treatment of Diesel Contaminated Soil”, Paper Presented at The 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, IPCBEE vol.6, Singapore (2011).)

Du, X.Y., Zhu, N.K., Xia, X.J., Bao, Z.C., Xu, X.B., Enhancement of biodegradability of polychlorinated dibenzo-p-dioxins. *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 36, 1589-1595, 2001.

Ernest Marco-Urrea and C. A. Reddy, Degradation of Chloro-organic Pollutants by White Rot Fungi. Shree Nath Singh Editor *Microbial Degradation of Xenobiotics* , 31-66, 2012.

Fennell, D. E., Du, S., Liu, F., Liu, H., & Häggblom, M. M., Dehalogenation of Polychlorinated Dibenzop-Dioxins and Dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Brominated Flame Retardants, and Potential as a Bioremediation Strategy. In M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)* , 135 - 149. Burlington: Academic Press , 2011.

Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.

Fukuda, K., Nagata, S., Taniguchi, H., Isolation and characterization of dibenzofuran-degrading bacteria. *FEMS Microbiol. Lett.* 208,179 – 185, 2002.

Freeman H.M. & Harris E.F. (eds.). “Hazardous Waste Remediation,

Innovative Treatment Technologies”, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster (PA), USA, (1995).

Gregoraszczuk EL., Dioxin exposure and porcine reproductive hormonal activity. *Cad Saude Publica*, 18(2), 53-62, Mar-Apr 2002.

Habe, H., Chung, J.S., Lee, J.H., Kasuga, K., Yoshida, T., Nojiri, H., Omori, T., Degradation of chlorinated dibenzofurans and dibenzo-p-dioxins by two types of bacteria having angular dioxygenases with different features. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 3610-617, 2001a.

Hiraishi A, Biodiversity of Dioxin-Degrading Microorganisms and Potential Utilization in Bioremediation. *Microbes Environ*, 18(3) : 105-125, 2003.

Head E, Callahan H, Muggenburg BA, Cotman CW, Milgram NW., “Visual discrimination learning ability and β -amyloid accumulation in the dog”, *Neurobiol Aging*, 19, pp. 415-525 (1998)

Hutzinger, O., Blumich, M.J., Vanderberg, M., Olie, K., Sources and fate of PCDDs and PCDFs – An overview. *Chemosphere* 14, 581-600, 1985.

Hong, H.B., Nam, I.H., Murugesan, K., Kim, Y.M., Chang, Y.S., Biodegradation of dibenzo-p-dioxin, dibenzofuran, and chloro-dibenzo-p-dioxins by *Pseudomonas veronii* PH-03. *Biodegradation* 15, 303-313, 2004.

Jacob J, The significance of polycyclic aromatic hydrocarbons as environmental carcinogens. *Pure Appl. Chem.* 68, 301-308, 1996.

Jim A. Field , Reyes Sierra-Alvarez, 2008. Microbial degradation of chlorinated dioxins. *Chemosphere* 71, 1005-1018, 2008.

Kao CM, Wu MJ. (2000) Enhanced TCDD degradation by Fenton’s reagent preoxidation. *Journal of Hazardous Materials.* 74(3), 197-211.

Keim, T., Francke, W., Schmidt, S., Fortnagel, P., Catabolism of 2,7-dichloro- and 2,4,8-trichlorodibenzofuran by *Sphingomonas* sp. strain RW1. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 23, 359-363, 1999.

Kimura, N., Urushigawa, Y., Metabolism of dibenzo-p-dioxin and chlorinated dibenzo-p-dioxin by a gram-positive bacterium, *Rhodococcus opacus* SAO 101. *J. Biosci. Bioeng.* 92, 138-143, 2001.

Klecka, G.M., Gibson, D.T., Metabolism of dibenzo-para-dioxin and chlorinated dibenzo-para-dioxins by a *Beijerinckia* species. *Appl. Environ. Microbiol.* 39, 288-296, 1980.

Matsumura, F., Benezet, H.J., Studies on the bioaccumulation and microbial degradation of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. *Environ. Health Persp.* 5, 253-258, 1973.

Manji, S. and Ishihara, A., Screening of tetrachloro dibenzo-p-dioxin-degrading fungi capable of producing extracellular peroxidases under various conditions, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 63 : 438-444, 2004.

McKay G., Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review. *Chemical engineering journal.* 86(3), 343 – 368, 2002.

Nam, I.H., Kim, Y.M., Schmidt, S., Chang, Y.S., Biotransformation of 1,2,3-tri- and 1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzo-p-dioxin by *Sphingomonas wittichii* strain RW1. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 112-116, 2006.

Nojiri, H., Omori, T., Molecular bases of aerobic bacterial degradation of dioxins: involvement of angular dioxygenation. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 66, 2001-2016, 2002.

Parsons, J.R., Storms, M.C.M., Biodegradation of chlorinated dibenzo-para-dioxins in batch and continuous cultures of strain JB1. *Chemosphere* 19, 1297-1308, 1989.

Parsons, J.R., Ratsak, C., Siekerman, C., Biodegradation of chlorinated dibenzofurans by an *Alcaligenes* strain. In: Hutzinger, O., Fiedler, H. (Eds.), *Dioxin' 90. Organohalogen Compounds 1. EPRI-Seminar. Eco-Informa Press, Bayreuth, Germany*, pp. 377-380, 1990.

Philippi, M., Schmid, J., Wipf, H.K., Hutter, R., A microbial metabolite of TCDD. *Experientia* 38, 659-661, 1982.

Quensen III, J.F., Matsumura, F., Oxidative degradation of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin by microorganisms. *Environ. Toxicol. Chem.* 2, 261-268, 1983.

Suhara, H., Daikoku, C., Takata, H., Suzuki, S., Matsufuji, Y., Sakai, K. and Kondo, R., Monitoring of white-rot fungus during bioremediation of polychlorinated dioxin-contaminated fly ash, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 62 : 601-607, 2003.

Sulistyaningdyah, W.T., Ogawa, J., Li, Q.S., Shinkyo, R., Sakaki, T., Inouye, K., Schmid, R.D., Shimizu, S., Metabolism of polychlorinated dibenzo-p-dioxins by cytochrome P450BM-3 and its mutant. *Biotechnol. Lett.* 26, 1857-1860, 2004.

Takashi Narihiro and Akira Hiraishi, "Bioremediation of dioxin polluted soil in solid-phase bioreactors", Department of Eco-logical Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Japan (2004)

van Leeuwen, F.X.R., Derivation of toxic equivalency factors (TEFs) for dioxin-like 12 compounds in humans and wildlife. *Organohalogen Compunds* 34:237, 1997.

Vikas, & Chayawan., Single-descriptor based quantum-chemical QSPRs for physico-chemical properties of polychlorinated-dibenzo-p-dioxins and -dibenzo-furans (PCDD/Fs): Exploring the role of electron-correlation. *Chemosphere*, 118(0), 239-245, 2015.

Vargas, C., Fennell, D.E., Haggblom, M.M., Anaerobic reductive dechlorination of chlorinated dioxins in estuarine sediments. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57, 786-790, 2001.

Wilkes, H., Wittich, R.M., Timmis, K.N., Fortnagel, P., Francke, W., Degradation of chlorinated dibenzofurans and dibenzo-p-dioxins by *Sphingomonas* sp. strain RW1. *Appl. Environ. Microbiol.* 62, 367-371,

1996.

Wittich, R.M., Degradation of dioxin-like compounds by microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 49, 489-499, 1998.

Zeng, X.-L., Zhang, X.-L., & Wang, Y., QSPR modeling of n-octanol/air partition coefficients and liquid vapor pressures of polychlorinated dibenzo-p-dioxins. *Chemosphere*, 91(2), 229-232, 2013.

二瓶裕之、高岡一栄、中谷龍男，“コンポスト処理法を用いたダイオキシン類 汚染土壌浄化システムの開発”，環境リサイクル小特集，三井造船技報，第 185 期(2005)