

# 行政院環境保護署

## 「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

### 屏東縣九如鄉九清段1340地號生物整治現地試驗

#### 期末報告

主 辦 單 位：  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位： 國立高雄師範大學／生物科技系所

計 畫 主 持 人： 陳士賢教授

計 畫 執 行 期 間： 100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中 華 民 國 101年10 月 印製

## 計畫摘要

本計畫場址位於屏東縣九如鄉大坵村，地號為九清段 1340 地號，總面積 27,550 平方公尺，公告整治場址範圍為 1,800 平方公尺。污染行為人於該場址從事廢機油提煉與回收處理作業，作業場所露天堆置數十個 50 加侖的鐵桶，且因無污染防護措施，以致廢原料油或提煉製程之廢液因溢漏、漫流或任意倒置而殘留於場址土地上，檢測結果顯示，銅、鉻、鋅、鎳及總石油碳氫化合物（TPH）超過土壤污染管制標準，環保局於 98 年 6 月 1 日公告屏東縣九如鄉九清段 1340 地號為土壤污染控制場址，場址面積為 27,550 平方公尺，綜上所述，本計畫之試驗土地為公告之土壤污染整治場址，土壤已受鉻、鋅及總石油碳氫化合物之污染。

本計畫之主要目的與重要性為：

- 1、整治污染場址：期盼以現地試驗改善並整治重金屬及石油碳氫化合物污染，未來再循法律或其他途徑向污染行為人追索所發生之費用。
- 2、作為公有地整治表率：本計畫之執行將有政府整治污染場址(公有地)之表率與宣示效果。
- 3、避免持續污染地下水：本計畫之執行將可避免TPH之持續傳輸而進一步污染屏東九如地區地下水。
- 4、現地生物復育（Bioremediation）試驗之應用，應用蚯蚓及微生物分解石化污染物。
- 5、植生復育（Phytoremediation）之現場應用：除生物復育外，亦將搭配植生復育法，其結果將可做為此工法現地應用之參考，使我國之土壤與地下水污染整治技術增加另一選項。

本計畫之試驗內容包括範圍界定與圈界、現場清理、土壤污染範圍及理化性質調查、整地及土壤理化性質調整、生物復育試驗施作、植生復育試驗施作等，高污染潛勢區樣品分析結果顯示，表層土壤重金屬鋅、鉻、鎳、銅及 TPH（C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>）濃度超過土壤污染管制標準，受污染土壤深度約達地表下 1 公尺。其中重金屬污染以鋅最嚴重達 52,167 mg/kg，石油碳氫化合物污染亦非常嚴重，TPH 高達 136,753 mg/kg，顯示過去操作廢油回收及提煉造成表層土壤之嚴重污染，由土壤樣品不同深度之層析圖譜研判，污染場址土壤樣品之層析圖譜顯示石化產品典型之直鏈烷及支鏈烷模式，與環保局所提供之背景資料相符。在清理完成後，進行整地與土壤理化性質調整。其方法係以挖土機進行翻土、破碎與整平，耕犁深度約為 60 cm。

本計畫以公告污染場址為範圍，依據歷次調查結果及本計畫執行初期整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，規劃六個試驗區，其中 CK 代表無污染之對照區(Control)，其餘五區為處理區，其中 BP1、BP2 及 BP3 代表同時進行生物與植生復育之試驗區(Bio-phytoremediation)，而 PR1 與 PR2 則為進行植生復育(Phytoremediation)之試驗區，有關本計畫之具體成果為下列各項：

#### 一、生物復育試驗施作

進行蚯蚓分解污染土壤研究，採用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)復育土壤石化污染物，依據污染物範圍及濃度，在污染場址劃分不同區塊(BP1、BP2、BP3)，每一區塊施放約 5.4 公斤蚯蚓，於 5 月 15 日及 9 月 7 日施放兩次，石化分解菌在實驗室大量培養後，配合實驗施作的區隔於 8 月 13 日施灑，施灑菌種為 *Pseudomonas* sp. NKNU01。

規劃定期土壤採樣及分析，偵側土壤之 TPH 濃度之採樣天數分別為第 7、15、30、60、90、及 150 天，以評估生物復育成效。三個生物復育樣區(BP1、BP2、BP3)之 TPH 濃度隨著時間變化，在歷經五個月後均呈現降低趨勢，於監測結果發現 BP1 及 BP2 樣區，不同深度 TPH 有明顯移除效果，TPH 減量可達 41%至大於 99%，BP2 樣區中移除效果明顯，不同深度土壤多數已低於土壤污染管制標準。在 BP3 高污染樣區，TPH 減量為 29%至 96%，整體而言 TPH 下降百分比比較 BP1 及 BP2 樣區為低，可能原因為高污染區不利於生物生長，甚至由於油污染氣味造成蚯蚓竄逃，導致生物量減少影響移除效果。

#### 二、植生復育試驗施作

本計畫依白楊樹生長所需之伸展空間及現場機具作業之需求，以間距 2.5 m 於場地內栽種白楊樹，總計 350 顆。而場內各試驗區之植株數量分別為 CK 25 棵，BP1 及 BP2 各 12 棵，BP3 為 10 棵，PR1 為 9 棵，PR2 為 18 棵。此外，太陽麻栽植係於六個試驗區內進行。由於種子撒播後之萌芽率不一，故單位面積之植株數亦不盡相同，惟平均數約為每平方公尺 150 棵。完成白楊樹與太陽麻之栽植後定期土壤及植體採樣及分析，評估對重金屬減量之成效。白楊樹由栽植日起至第四次調查日（十月中旬）共約四個月，其成長率達 55~213%，但在高污染區 BP-3 白楊樹成長率較低，整體而言在本試驗中白楊樹為生長快速之植物，加以其對污染物之吸收累積效果，未來將可藉由定期修剪與移除植體而達到改善污染之目的。

植生復育各區太陽麻栽植狀況，無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而在五個處理區中，重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其測值呈現較低之現象，與白楊樹之趨勢相

同，可見污染物對兩種植物之發育皆有抑制之可能，值得持續觀察。

在栽種初期各區之重金屬含量差異不大，而第二次分析值則發現，污染量最高之鋅，在各試驗區植體中有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。至於太陽麻根之含量大於地上部，而且與白楊樹之結果相似，鋅在地上部之吸收累積量最大，鎳次之。本場址之主要污染物為 Zn、Cu、Cr、Ni，而植株之分析結果顯示，白楊樹與太陽麻之重金屬含量依序為  $Zn > Cu > Ni > Cr$ 。

總結言之，雖然各區白楊樹與太陽麻之發育略有差異，但兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善效果試驗。

由本計畫之推動除整治污染場址，逐步降低重金屬與石化污染物含量，為解除管制奠基，同時藉公有地之整治行動，發揮政府整治污染場址之表率與宣示效果。就污染場址整治技術而言，將蚯蚓與分解菌之生物復育試驗成果應用於現場，可檢視兩者間之異同。藉由生理調查及植體分析，可比較試驗樹種之除污功能，做為其他污染場址引用植生復育之參考。同時將生物復育與植生復育結合，發揮相輔相成功效，未來可提供一個高效率之複合整治技術。評估生物復育與植生復育試驗成果，提供我國土壤與地下水污染整治技術一個價廉、經濟、實用與有效的方法。

## 英文摘要

Assessing soil and groundwater contamination and developing appropriate cleanup goals is a complex task. In particular, handling both petroleum hydrocarbons and metal contamination in the subsurface environment is very challenging. The contaminated site proposed in this study is located in Pingtung County with the area of 1,800 m<sup>2</sup>. The site was originally used for waste oil recycling practice. During the long-term operation of waste oil refine and recycle, the site was contaminated by spilled waste oil. The major contaminants were in soil found to be chromium, zinc and total petroleum hydrocarbon (TPH) by previous investigation. Groundwater did not illustrate high level of contaminants.

Given the liability of county government to deal with this public owned land, remediation action is required to prevent potential groundwater contamination. The objective of this research project is to conduct remediation in the contaminated site. Specifically, the objectives are to: (1) conduct remediation of metal and TPH-contaminated soil, (2) to establish the pattern of site remediation administrated by local government agency, (3) to prevent potential groundwater contamination, and (4) conduct in-situ bioremediation and phytoremediation.

Land cleaning was performed prior to any remediation task. Several barrels of waste oil were found on site. Characterization of chemical and physical properties of soil was performed. Analysis of soil core samples down to 1 m revealed that concentration of zinc was 52167 mg/kg and TPH was 136,753 mg/kg. Severe contamination of surface soil was found, which was consistent with the initial finding three years ago.

Six experiment zones were designated. Three treatment cells (6×6m) were designed in the contaminated site in the highly contaminated area for bio-phytoremediation (i.e., BP1, BP2, and BP3). Two cells were designed for phytoremediation practice (PR1 and PR2). One control cell was used to compare the results with different remediation treatment. About 5.4 kg of earthworm was employed in BP1, BP2, and BP3 for three month interval. In the next phase, petroleum-degrading bacteria (*Pseudomonas* sp. NKNU01) was applied in the same cells for enhanced bioremediation. Monitoring of TPH and metals was conducted by scheduled soil sampling to evaluate removal efficiency of TPH and metals.

The apparent decrease of TPH was observed in the BP1 and BP2 zones. The removal of TPH ranged from 41% to 99% after five month bioremediation practice. In particular removal of TPH in BP2 is significant that most of the samples revealed that TPH is below regulation criteria. However, removal efficiency of TPH in BP3 is less due to highly contaminated nature of the cell. The removal efficiency varied from 29 to 96% at different depth. The highly contaminated area may affect the population of earthworm or biomass.

Poplars (*Populus bonatii* Levl. ) and Sun Hemp (*Crotalaria juncea* L.) were utilized in the phytoremediation practice. Three hundred fifty poplars were planted in the site including six experimental cells. Metals in plant tissue and soil were analyzed to evaluate removal efficiency of contaminants. After four months, the growth rate of poplar ranged from 55 to 213%. It was observed that growth rate was lower in the highly contaminated area such as BP3. Certain inhibition was noticed. The heavy metal analysis of tissues revealed that  $Zn > Cu > Ni > Cr$ . Both species are suitable for phytoremediation. The results generated in this study will serve as a case study of green remediation and environmental decision purpose.

## 第一章、計畫緣起與目的

### 1.1 計畫緣起

本計畫之試驗土地為屏東縣公告之土壤污染整治場址，土壤受重金屬鉻、鋅及總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon, TPH)之污染。2008 年污染行為人於場址內搭設簡陋工寮從事廢機油提煉與回收處理作業，作業場所露天堆置數拾個 50 加侖的鐵桶，因無污染防護措施，以致廢原料油或提煉製程之廢液因溢漏、漫流或任意倒置而殘留於場址土地上，造成土壤與地下水污染。

#### 一、計畫場址地理位置

本計畫場址位於屏東縣九如鄉大坵村，地號為九清段 1340 地號，總面積 27,550 平方公尺，公告整治場址範圍為 1,800 平方公尺，乃屏東縣政府民政處所屬之殯葬用地（圖 1-1）。

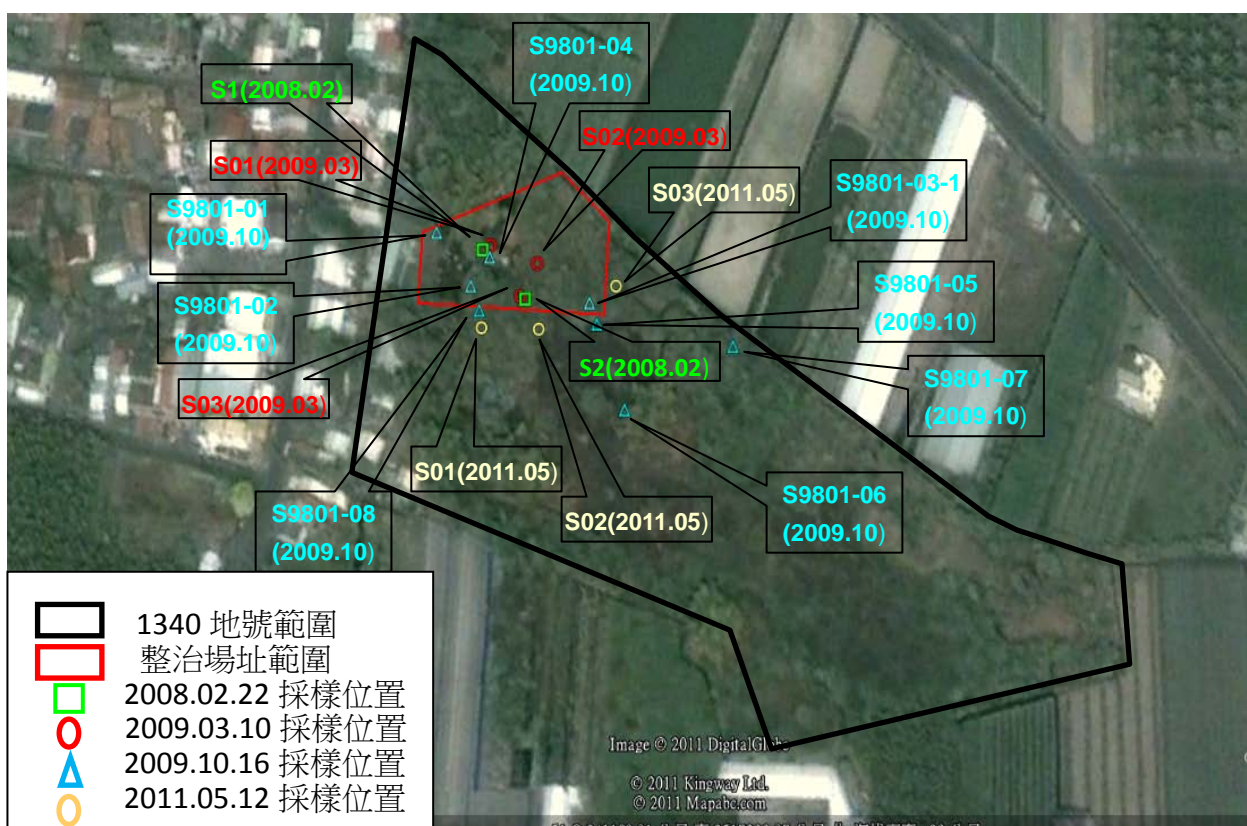


圖 1-1 計畫場址地理位置、範圍及歷次土壤採樣點分佈圖

## 二、計畫場址污染稽查與查證歷程

2008 年 1 月屏東縣政府環保局接獲民眾之污染陳情，遂於當月 21 日會同相關單位赴該場址稽查，發現污染行為人陳福長於場址內搭設簡陋工寮從事廢機油提煉與回收處理作業，作業場所不但露天堆置數十個 50 加侖的鐵桶，且因無污染防治措施，以致廢原料油或提煉製程之廢液因溢漏、漫流或任意倒置而殘留於場址土地上，有污染土壤與地下水之虞（圖 1-2）。

稽查人員除依法禁止其污染行為並採取必要應變措施外，水污科並於 22 日會同污染行為人及相關單位進場於廢油桶堆置區（S1，0-15 cm）及鄰近之草叢廢液傾倒區（S2，0-5 cm、5-20 cm、20-40 cm）採集 4 個土壤樣品，分析重金屬（鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎳）及揮發性有機物(VOCs)，採樣點分佈如圖 1-1，檢測結果則列於表 1-1。由表中數據顯示，銅、鉻、鋅、鎳及總石油碳氫化合物（TPH）超過土壤污染管制標準。環保局遂於 2008 年 4 月 2 日行文給陳福長先生，告知依據土壤及地下水污染整治法第十一條規定該地號為土壤污染場址，要求其提出改善措施，以減輕污染影響或避免污染擴大。



圖 1-2 污染行為人作業現場及污染概況圖

表 1-1 稽查採樣檢測結果 (2.22.2008)

採樣點	深度 (cm)	鉛	銅	鉻	鋅	□	鎘	TPH <sub>g</sub>	TPH <sub>d</sub>	TPH
		mg/kg								
S1	0-15	295	<b><u>586</u></b>	<b><u>711</u></b>	<b><u>51800</u></b>	<b><u>555</u></b>	2.78	100	110000	<b><u>110000</u></b>
S2	0-5	41.0	88.0	129	<b><u>44200</u></b>	105	0.58	958	68100	<b><u>69100</u></b>
	5-20	41.4	42.7	47.6	1180	56.0	ND	43.0	27600	<b><u>27600</u></b>
	20-40	36.6	33.9	38.6	624	51.3	0.58	46.7	24400	<b><u>24400</u></b>
土壤□染管制標準		2000	400	250	2000	200	20			1000

註：超過管制標準者以**粗體底線**表示。

### 三、改善計畫書提報、改善歷程及驗證結果

污染行為人於 2008 年 6 月 30 日提出自行改善計畫書，同年 7 月 7 日審查經環保局通過，整治方法為移除與翻轉稀釋，期限為 2008 年 7 月 1 日至 2009 年 3 月 1 日。環保局於 2009 年 3 月 10 日針對場址改善成果進行驗證，現場採集 3 個樣點（圖 1-1），檢測結果（表 1-2 及 1-3）發現重金屬（鉻、鋅）及 TPH 仍超過管制標準，因此即依法規進行後續公告程序。

表 1-2 改善驗證土壤重金屬檢測結果(3.10.2009)

採樣點	深度 (cm)	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
		mg/kg					
S01	0-45	0.15	<b><u>282</u></b>	152	131	49.7	<b><u>8300</u></b>
S02	30-60	ND	78.8	47.6	77.6	26.8	<b><u>2750</u></b>
S03	30-60	ND	75.1	70.7	55.1	33.3	<b><u>2350</u></b>
土壤污染管制標準		20	250	400	200	2000	2000

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。

表 1-3 改善驗證土壤總石油碳氫化合物檢測結果(3.10.2009)

點位編號	採樣深度(cm)	檢測項目	檢測值(mg/kg)
S01	20-45	TPH <sub>g</sub>	805
		TPH <sub>d</sub>	<b><u>123000</u></b>
S02	30-50	TPH <sub>g</sub>	173
		TPH <sub>d</sub>	<b><u>59900</u></b>
	110-130	TPH <sub>g</sub>	<10
		TPH <sub>d</sub>	<b><u>1530</u></b>
S03	30-50	TPH <sub>g</sub>	<10
		TPH <sub>d</sub>	<50
土壤污染管制標準			1000

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。

#### 四、土壤污染控制場址及管制區公告歷程

由於驗證結果顯示自行改善未達預定目標，故環保局基於權責依法於 2009 年 6 月 1 日公告屏東縣九如鄉九清段 1340 地號為土壤污染控制場址，場址面積為 27,550 平方公尺，污染物為土壤中之重金屬鉻、鋅及總石油碳氫化合物。其後並於 2009 年 6 月 25 日公告為土壤污染管制區，依土壤及地下水污染管制區管制辦法予管制或限制管制區內之土壤使用或人為活動。

#### 五、整治場址公告歷程

由於公告之土壤污染控制場址面積達 27,550 平方公尺，環保署為釐清明確之污染範圍，經環保局請求協助後，乃於 2009 年 10 月 16 日以緊急應變方式進行補充調查。於場址內共採集 9 組土壤樣品（圖 1-1，編號 S9801-01~S9801-08）；並於高污染潛勢區設置 3 口簡易井（圖 1-2，編號 TW-9801-1~TW-9801-3），採集地下水樣品，另於場址西側下游採集 3 組民井地下水樣品。

土壤檢測結果如表 1-4 與表 1-5 所示，其中採樣點編號 S9801-02、S9801-03-1 及 S9801-04 之鋅濃度，編號 S9801-04 之鉻及鎳濃度皆超過管制標準。編號 S9801-02、S9801-03-1 及 S9801-04 之總石油碳氫化合物濃度也都超過污染管制標準。研判污染範圍為 1,800 平方公尺。至於地下水調查結果（表 1-6 與表 1-7）則皆未達第二類地下水管制標準，可見此區地下水尚未嚴重污染。依據此結果，環保署於 2010 年 5 月 4 日開會議決公告本場址為土壤污染整治場址，面積為 1800 平方公尺。

表 1-4 環保署補充調查土壤重金屬檢測結果(10.16.2009)

採樣點	深度 (cm)	砷	汞	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
		mg/kg							
S9801-01	100-130	6.81	0.04	ND	29.0	19.7	29.4	20.4	228
S9801-02	150-180	16.4	0.099	0.30	60.9	204	52.7	45.1	<b><u>4600</u></b>
	200-230	5.13	ND	ND	20.6	17.9	28.8	23.	257
S9801-03-01	100-130	13.5	0.114	0.41	232	195	179	47.3	<b><u>9250</u></b>
S9801-04	0-15	23.5	0.106	0.69	<b><u>566</u></b>	361	<b><u>288</u></b>	76.7	<b><u>18100</u></b>
S9801-05	50-80	7.85	0.064	ND	23.5	20.6	29.9	22.7	122
S9801-06	50-80	7.86	0.079	ND	23.3	19.8	28.1	26.4	112
S9801-07	0-15	9.85	0.052	ND	27.6	28.9	33.4	31.0	122
S9801-08	0-30	8.40	0.054	ND	2.03	25.5	30.5	26.6	119
土壤污染管制標準		60	20	20	250	400	200	2000	2000

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。

表 1-5 環保署補充調查土壤 TPH 檢測結果(10.16.2009)

點位編號	採樣深度(cm)	TPH <sub>g</sub>	TPH <sub>d</sub>	TPH
		mg/kg		
S9801-01	130-150	<10	<50	--
S9801-02	180-200	<10	<b><u>25700</u></b>	<b><u>25700</u></b>
	230-250	<10	144	144
S9801-03-01	130-150	350	<b><u>48200</u></b>	<b><u>48550</u></b>
S9801-04	80-100	112	<b><u>16500</u></b>	<b><u>16612</u></b>
S9801-05	80-100	<10	<50	--
S9801-06	0-15	<10	<50	--
S9801-07	0-15	<10	<50	--
S9801-08	30-50	<10	<50	--

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。



圖 1-3 環保署補充調查簡易井位置示意圖

表 1-6 環保署補充調查地下水重金屬檢測結果

項目	方法偵測極限	簡易井			民井			管制標準
		TW-9801-01	TW-9801-02	TW-9801-03	01	02	03	—
		mg/L						
砷	0.0005	ND	0.0013	0.0010	0.0011	ND	0.0011	0.5
鎘	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
鉻	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
銅	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10
汞	0.0003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
鎳	0.004	<0.020 (0.004)	<0.020 (0.010)	<0.020 (0.005)	ND	ND	ND	1.0
鉛	0.005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
鋅	0.007	0.032	0.164	0.030	ND	<0.020 (0.018)	0.021	50

註：第二類地下水污染管制標準。

表 1-7 環保局補充調查地下水 TPH 檢測結果

分析項目	監測井名稱	九如鄉九清段 1340 地號			第二類地下水標準	
	監測井編號	TW9801-01	TW9801-02	TW9801-03	管制標準 監測基準	
	監測井座標	X：196610 Y：2515830	X：196624 Y：2515799	X：196661 Y：2515799		
	單位	99/5/10	99/5/10	99/5/10		
水溫	℃	31	29.7	29.4	—	
pH 值	-	6.96	7.00	6.80	—	
導電度	μS/cm	725	753	769	—	
溶氧量	mg/L	3.07	0.95	0.67	—	
氧化還原電位	mV	151	109	96	—	
TPH-d	mg/L	0.693	6.17	1.85	10	—

## 六、調整公告範圍歷程

由於整治場址與控制場址範圍落差較大，因此屏東縣政府環保局依環保署補充調查成果修正控制場址範圍，調整如環保署公告之整治場址範圍，因此於 2011 年 5 月 12 日再次於整治場址公告範圍周邊進行補充調查。調查方法係以主觀判斷法於整治場址周邊佈設 3 個採樣點（圖 1-1）。此外為確認地下水品質，同時針對場址內所設之三口簡易井進行採樣與總石油碳氫化合物(TPH)分析。檢測結果(表 1-8)顯示，土壤重金屬及 TPH 皆未超過法規標準，而地下水濃度亦低於第二類地下水污染管制標準。基於此，環保局遂於 2011 年 6 月 27 日調整公告本土壤污染控制場址及管制區範圍為 1800 平方公尺，污染物為重金屬鉻(Cr)、鋅(Zn)及 TPH。

表 1-8 環保局補充調查土壤檢測結果(05.12.2011)

採樣編號	S01	S02	S03	監測 標準	管制 標準
採樣深度(cm)	30-60	0-30	0-30		
mg/kg					
鎘	0.71	0.68	0.69	10	20
鉻	18.9	19.2	19.8	175	250
銅	26.8	20.1	20.2	220	400
鎳	23.7	25.0	27.0	130	200
鉛	23.6	23.0	19.9	1000	2000
鋅	126	98.1	162	1000	2000
TPH <sub>g</sub>	ND<1.73	ND<1.73	ND<1.73	-	1000
TPH <sub>d</sub>	13.5	14.0	658		

## 1.2 計畫目的

綜上所述，本計畫之試驗土地為公告之土壤污染整治場址，土壤已受鉻、鋅及總石油碳氫化合物之污染，故本計畫之主要目的與重要性為：

1. 整治污染土壤：依據土水法之規定，污染場址之污染行為人或土地相關人員有責任改善污染情況，使污染物濃度降至法規標準或預定之目標值以下，以減輕並解除污染之影響，且避免污染範圍擴大。由於本場址之污染行為人陳福長先生經濟情況不佳，事後已走避而難於短期內進行整治。加以本場址土地屬於屏東縣政府，因此期盼以本模場試驗改善並整治污染，未來再循法律或其他途徑向陳福長先生追索所發生之費用。
2. 公有地整治表率：如上所述，污染行為人陳福長先生已無法於短期內進行本場址之整治，而本場址土地又屬於屏東縣政府公有地，在政府要求私有污染土地進行改善之同時，本計畫之執行將有政府整治污染場址之表率與宣示效果。
3. 避免持續污染地下水：由上述本場址歷次採樣與檢測資料得知，目前污染僅限於土壤，而地下水中之重金屬與總石油碳氫化合物則符合法規標準，尤其環保署補充調查測結果（表 6）顯示，地下水中之重金屬含量甚微，然而，表 7 之數據亦同時指出，簡易井 TW-9801-02 之 TPH 含量已達 6.17 mg/L，顯見 TPH 有向下移動之現象，本計畫之執行將可避免 TPH 之持續傳輸而進一步污染地下水。
4. 生物復育（bioremediation）試驗之現場應用：計畫主持人曾於 2008-2009 年間執行土污基管會委託之「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術」計畫。結果發現，土壤若受柴油污染，其所吸附之多環芳香族碳氫化合物（polynuclear aromatic hydrocarbons, PAHs）濃度可隨時間而自然衰減，惟其衰減程度受場址物化條件及是否有 PAHs 分解菌等條件之影響，不過若於污染土壤中引進蚯蚓，則蚯蚓的存在與運動行為，有助於減低污染土壤之 PAHs 濃度，因此可提高 PAHs 之生物降解。以該計畫實驗設計之柴油高污染土壤為例，蚯蚓可在 TPH 濃度數萬至 10 萬 mg/kg 之環境下協助 PAHs 減量。因此在蚯蚓可耐受的污染物濃度範圍內，若提供適合蚯蚓生存的因子（如濕度、堆肥），則添加蚯蚓將有助於提高復育之能力，並加速去除土壤中之污染物質。該計畫除評

估適合 PAHs 分解潛勢之蚯蚓外，亦篩選出五種分解菌，這些成果將應用於本場址之整治，其結果將可提升該室內生物試驗之現場應用性。

5. 植生復育（phytoremediation）之現場應用：植生復育法因可利用植株之攝取（uptake）與代謝（metabolism）等生理作用，植株分泌酵素（enzyme）之作用，土壤微生物（soil microbial）之分解作用，以及植株與根圈微生物（rhizosphere microbial）之交互作用，對土壤污染物進行植生除污（phytodecontamination）、植生穩定（phytostabilisation）、植生萃取（phytoextraction）與植生分解（phytodegradation）之功能。因此，近年來已被公認為去除或降解各種有機或無機污染物最為價廉、經濟、實用與有效的方法之一。由於過去我國植生復育之相關研究皆以篩選高清除效率植生種類為主，現場植生整治之案例甚少，本計畫除生物復育外，亦將搭配植生復育法，其結果將可做為此工法現地應用之參考，使我國之土壤與地下水污染整治技術增加另一選項。
6. 生物復育與植生復育結合試驗：由於生物復育法之效果與其生存環境條件關係密切，一般而言較易提供表層土壤適合之氧氣、溫度、溼度、營養鹽等條件，深層土壤則反之。由本場址之調查資料顯示，目前污染物之分佈深度可達 2 公尺，故本計畫擬同時進行植株栽種，除可彌補生物復育法之不足外，植株之栽種亦可因其遮蔭、保水、增進有機質含量與根系活動而提供生物適合之生存條件，發揮相輔相成之功效。此兩種復育法之結合試驗，亦為本計畫之特色，其結果可提供未來土壤與地下水污染另一複合整治技術。

### 1.3 工作項目

本計畫之工作項目包括下列各項：

- 1、 範圍界定與圈界：明確界定污染場址界線與範圍並以警示帶區隔，除供試驗用外並可防止民眾誤入。
- 2、 現場清理：清除遺留空桶、雜物與雜草，恢復地貌。
- 3、 土壤污染範圍及理化性質調查：釐清污染物分布範圍，界定高低污染區，且掌握土壤之理化性質。
- 4、 整地及土壤理化性質調整：增進土壤之通氣性與導水度，且有適合之pH、濕度與養分。
- 5、 生物復育試驗施作：完成蚯蚓與分解菌之植入與繁殖，使發揮污染整治效用。
- 6、 植生復育試驗施作：完成白楊樹、繖楊與太陽麻之栽植，使發揮污染整治效用。

## 1.4 執行進度

研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

工作項目	年月	2011	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	備
		12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	註
範圍界定與圈界														
確立試驗範圍														
現場清理														
執行團隊現勘														
土壤污染範圍及理化性質調查														
土壤污染範圍調查														
土壤理化性質調查														
整地及土壤理化性質調整														
生物復育試驗施作														
選擇蚯蚓物種														
蚯蚓分類與培育														
試驗用土壤區塊界定														
蚯蚓分解污染土壤研究														
植生復育試驗施作														
選擇植生復育樹種														
栽植規劃														
試驗規劃														
第一次工作進度報告					◎									
期中報告							◎							
第二次期中報告								◎						
期末報告													◎	
工作進度估計百分比 （累積數）		10 %	15 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	100 %	
預 定 查 核 點		第 1 季:		完成範圍界定與圈界、土壤污染範圍及理化性質調查、完成工作進度報告										
		期中:		生物復育試驗施作、完成期中報告										
		第 3 季:		完成第二次進度報告										
		期末:		完成植生復育實驗施作、完成期末報告										
說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：（1）工作天數，（2）經費之分配，（3）工作量之比重，（4）擬達成目標之具體數字。 3.「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														

## 第二章、計畫背景

污染土壤之整治工法甚多，包括各種物理、化學、生物與工程法，目前我國常見之工法為移除處理、翻轉或客土稀釋、酸洗、抽除處理與生物分解等，前三者主要應用於重金屬等無機污染場址，後兩者則多見於有機污染場址。本計畫場址之污染物為重金屬鉻(Cr)、鋅(Zn)及總石油碳氫化合物(TPH)，預定使用之生物復育法，利用蚯蚓及過去研究來自石化污染場址中所分離的菌種，進行 TPH 生物降解，蚯蚓對 TPH 會有較快速與明顯之降解效果，國內外已多有研究與現場成功案例可資佐證，至於植生整治法係藉由植物與土壤微生物之交互作用，使污染物穩定化，再經萃取、降解、揮散而去除，近年來已被公認為去除或降解各種有機或無機污染物最為價廉、經濟、實用與有效的非入侵性污染防治替代方法，亦有許多室內研究與現場整治之成功案例可資參考。以下將針對本計畫使用之生物復育法與植生整治法作一簡述。

### 2.1 石油碳氫化合物之生物復育

生物復育技術的定義是利用微生物或微生物程序，轉換及分解污染場址的污染物，以達到整治之目標。採用生物技術的優點包括可現址處理、處理費用較低、生態相容、確實分解破壞污染物等，但也有其缺點如技術選擇困難、處理時間較長、可能產生副產品等，目前已發展之處理技術大致可分為下列幾項：

第一類是採用生物促進法(Biostimulation)活化場址內既有的微生物族群，如添加可生物分解之介面活性劑或營養鹽。

第二類為生物添加法(Bioaugmentation)，直接添加對污染場址污染物有去除分解能力的微生物，此部份可利用基因工程技術，發展具特定污染物分解能力之基因重組微生物，但由於基因重組微生物添加至自然生態環境中，必需考量其毒性及對生態系之影響，因此必須經過嚴密而謹慎的審查後才可實施。

第三類為污染物生物處理法，將污染物經通氣或土壤洗滌後送至特殊生物反應器或是生物濾床、生物洗滌塔去除污染物，或是採用農地施用、堆肥處理。目前有關地下水生物復育技術及土壤污染物生物吸附分解也被積極研究中。

石油碳氫化合物污染概括來說分為(1)總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbons, TPH)、(2)芳香族碳氫化合物(aromatics)包括揮發性組成物(volatile organic components)及半揮發性組成物、及(3)油品添加劑等三大類的污染形式。總石油碳氫化合物包括直鏈烷、支鏈烷、環烷類、及烯類等，芳香族碳氫化合物包括油品揮發性組成物如 benzene、toluene、ethylbenzene 及 xylenes (合稱 BTEX)、其他單苯環芳香族及多苯環芳香族碳氫化合物，油品添加劑則是具有毒性的物質，主要分為 MTBE (methyl tertiary-butyl ether)或醇類，會對各類生物造成嚴重的傷害。

由於石油降解微生物種類是非常廣泛地，因此根據降解石油碳氫化合物的不同，則可以大致略分為三種類群。第一類為降解總碳氫化合物 TPH 物質的細菌，稱為 hydrocarbon degrading bacteria;第二類為降解 MTBE 物質，稱為 MTBE-degrading bacteria;第三種為降解 BTEX 物質，稱為 BTEX-degrading bacteria。

關於 hydrocarbon degrading bacteria 方面，前人研究中發現可能有下列幾屬：*Candida*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*，這些菌屬可能對較長碳氫鏈會進行分解(Cavalca et al., 2000; Cassidy et al., 2001)。而就 MTBE-degrading bacteria 方面而言，可能有下列幾屬：*Rubrivivax*, *Mesophilicum*, *Rhodococcus*, *Graphium*, *Alcaligenes*, *Xanthobacter*, *Xanothomas*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Hydrogenophaga*, *Methylobacterium*, *Austroafricanum*，這些菌屬的微生物是可以將 MTBE 完全代謝分解或是轉換成無毒物質(Deeb et al., 2000; Prince et al., 2000; Fiorenza et al., 2003)。

在 BTEX-degrading bacteria 方面就較前面兩類複雜許多，根據此四類物質的不同，降解的細菌就也有所不同。可以降解苯的細菌有：*Pseudomonas*, *acinetobacter*, *Methylosinus*, *Nocardia*, *Methanogens* 等幾屬。降解甲苯 (toluene) 的細菌有：*Methylosinus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Cunninghamella*, *Achromobacter*, *Methanogens* 幾屬，而降解乙苯 (ethylbenzene) 的細菌只有 *Pseudomonas* 這一屬。至於降解二甲苯(xylene)的細菌有 *Pseudomonas*, *Methanogens* 兩屬(Wiedemeier et al., 1999)。此外還有 *Microbacterium*, *Azoarcus*, *Mycobacterium* 與 *Bradyrhizobium* 這四屬細菌

也可以分解 BTEX (Cavalca t al., 2004)，但對於是分解 BTEX 中的那類化合物目前還是未知的。

這些菌屬的細菌在代謝總碳氫化合物與各種油品添加劑時，其分解此一些石油碳氫化合物的能力是受到各種環境因子的影響。舉例來說：石油碳氫化合物的有氧降解 (aerobic degradation) 效率遠高於厭氧降解 (anoxic degradation)，因此在利用這些優勢菌種進行環境中石油碳氫化合物污染整治時，必須配合一些針對這些優勢菌種生長條件作最佳的調控，加強生物整治的效果。

研究團隊於 2008 至 2009 年執行環保署土污基管會委託研究計畫「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術研究」，從汽油洩漏污染場址中分離出五株菌株 (*Pseudomonas* sp. NKNU01、*Bacillus* sp. NKNU01、*Klebsiella* sp. NKNU01、*Enterobacter* sp. NKNU01 與 *Enterobacter* sp. NKNU02)，2010 至 2011 年執行環保署土污基管會土壤及地下水污染研究計畫「應用生物反應槽進行石化污染物之生物復育研究」，針對主要汽油添加物-甲基第三丁基醚 (methyl tert butyl ether, MTBE) 進行生物分解試驗，依先前研究的微生物族群結構，設計不同顆數的純菌株，植入生物反應器中，進行生物復育成效的探討，藉以評估石化污染場址中菌種對污染物分解能力，同時尋找具有最佳 MTBE 分解能力菌種，進行在各種條件下污染物分解能力之評估探討，與推估微生物之分解 MTBE 途徑。

在該計畫中分別利用批次試驗求得單一菌種及混合菌種將 MTBE 當作碳源之降解能力、共代謝物質對微生物降解 MTBE 情形的影響。使用生物反應槽利用批次試驗所得實驗條件進行提高 MTBE 濃度降解試驗。分解途徑以蛋白質體技術進行鑑定，針對二維電泳蛋白質表現量差異兩倍以上蛋白質點，再利用基質輔助雷射脫附-飛行時間質譜法 (MALDI-TOF MS) 分析與 PMFs (peptide mass fingerprints) 資料庫比對鑑定。

在批次實驗中，混合菌加入共代謝物質降解效果為最佳，可降解 MTBE 約達 64%，在單一菌種則是 *Bacillus* sp. NKNU01 為最佳，可降解 MTBE 約 21%；共代謝物質挑選，屬正戊烷 (Pentane) 具有最佳效果。另外，不添加共代謝物質試驗中，

發現 *Enterobacter sp.* NKNU02 降解 MTBE 效率約達 29%較添加共代謝物質時效率佳，且屬單一菌種試驗中具有最佳降解 MTBE 潛力菌種。

生物反應槽試驗結果顯示 *Enterobacter sp.* NKNU02 可於不添加共代謝物質之實驗分解 MTBE 約達 56%；另一方面加入共代謝物試驗中，*Bacillus sp.* NKNU01 與 *Klebsiella sp.* NKNU01 降解 MTBE 皆約達 22%，與批次實驗相較之下皆有顯著差異，故推測利用生物反應槽可促進生物降解效率提升。由該研究結果顯示 *Enterobacter sp.* NKNU02 為具有最佳分解 MTBE 潛力菌種，蛋白質鑑定其代謝蛋白包含 alcohol dehydrogenase、phospho- glyceromutase、transaldolase 與 isocitrate dehydrogenase；另外利用 GC/MS 進行定性分析，推估出具可能性之代謝產物，如 acetic acid、2-propenoic acid 與 2-propanol。實驗發現 *Enterobacter sp.* NKNU02 進行 MTBE 分解時，不經過第三丁醛(*tert*-butyl formate, TBF)轉化，而直接氧化生成第三丁醇(*tert*-butyl alcohol, TBA)進而生成 2-Propanol 與 Lactate 再進入 TCA cycle，完成 MTBE 代謝作用。

降解實驗添加 BTEX 以模擬汽油發生洩漏，結果發現 *Enterobacter sp.* NKNU02 分解 MTBE 會受 BTEX 所抑制，使降解率約減為 16%。然而，BTEX 亦會被 *Enterobacter sp.* NKNU02 分解，甲苯被分解效果為最佳約有 36%，苯約有 32%，故此菌種對其他汽油污染物亦具有降解效用。本計畫將應用這些菌株研究作為提升九如污染場址之生物復育效能。

## 2.2 蚯蚓復育污染土壤

蚯蚓對於土壤來說扮演了重要的角色，它們利用混合土壤使其肥沃，利用鑽洞讓土壤翻覆使其有持續地保持肥沃與結構，增進通風與排水能力，也是在土壤中佔最大與最簡單量的生物。蚯蚓占有土壤中 60-80% 的生物量，所以蚯蚓對於土壤中化學物質的測試是個非常合適的指標性物種 (M. Saint-Denis et al., 1999)。

以獨自運作或與其他生物聯手之方式，蚯蚓對土壤中有機物分解、營養再生及結構維持均有關鍵之重要性，牠也具有提供其他生物食物及食用其他生物等功能，若土壤中有污染物存在，造成蚯蚓群聚之迴避、數量降低或大量死亡，則前述之生態功能均未能完全展現，對土壤生態系統之維持與運作，有存續維繫之重要意義(Lukkari et al., 2005)。

蚯蚓藉由溶於水中的部份污染物經由體表的被動吸收，還有攝取土壤時經由腸道的吸收作用，從土壤環境周圍吸收累積了許多親脂性的微量有機污染物。當蚯蚓攝取土壤的量增加，體內累積的微量有機污染物隨之增加 (Contreras-Ramos et al., 2005)。蚯蚓的攝食土壤行為對有機污染物例如 phthalate、phenanthrene 及 fluoranthene 的降解有利，前人研究指出蚯蚓與微生物的互相影響有助於 PAHs 的降解，吸附在土壤上的疏水性有機化合物會經由擴散作用從蚯蚓的外膜，或者藉由通過消化道中的土壤被吸收到蚯蚓體內，在不同種蚯蚓及不同化合物中這兩個路徑的相對重要性並未完全被了解。

有些報告指出像水生多毛綱(polychaetes)這種蚯蚓之外的環節動物，可以代謝 benzo(a)pyrene，因為他們可利用細胞色素 P450 來降解這種化合物。已在陸生蚯蚓 *Eisenia fetida* 體內發現中類似水生多毛綱利用細胞色素 P450 來降解污染物的酵素活動，土壤中原來的微生物可降解碳氫化合物，但是若蚯蚓添加入土壤中，蚯蚓的翻土行為可促進土壤的通風進而氧氣增加，可刺激微生物的活動及增加生物降解。

蚯蚓亦是石化污染物毒性測試的良好模式生物，隨著石化污染物增加，蚯蚓之反應也隨之呈現轉劇之現象。在封閉系統內，韓國研究者發現 *Perionyx excavatus* 和 *Eisenia andsei* 等兩種蚯蚓對於 MTBE 之死亡及體型異常反應測試，可在 72 小時內表現非常靈敏且明顯的反應 (An, 2005)。德國利用 *Eisenia fetida* 之致死測試、

生殖檢驗、及迴避檢測評估原油污染之土壤毒性，也同意蚯蚓對石化污染物測試具有敏感及明確之反應 (Schaeges, 2001)，但是，這些研究也警告不同物種之反應應該分別予以評估，特別是應考慮生態棲位之差異。

OECD (經濟合作與發展組織) 的標準測試方法 207 號指出，蚯蚓可用來做為大範圍的化學物質測試，由於測試時允許通氣，因此僅適用於非揮發性化合物，通常用來測試 PAHs、explosives、殺蟲劑、chlorophenols、重金屬、鉛、鉻與鎳。(OECD, 2004, NO. 207)。被推薦的實驗蚯蚓種類是 *Eisenia fetida* (Michaelsen)，它出現在富含有機物土壤，雖然這種蚯蚓不是一個典型的土壤物種。但它對化學藥品的敏感度相似於真正居住在土壤內的種類。它的生命週期不長，從卵繭孵化只需約 3 個到 4 個星期，到達成熟要在 20°C 下的環境渡過約 7 到 8 個星期。*Eisenia fetida* 是非常多產的，各隻成蟲生產二個到五個卵繭，每星期由每個卵繭孵化出幾隻幼蟲。此種蚯蚓可養殖在大範圍有機廢料材料中 (OECD, 2004, NO. 207)。

對於多環芳香族碳氫化合物，蚯蚓也具有生物累積與敏感反應毒性之能力。Parrish et al. (2006)發現 *Eisenia fetida* 和 *Lumbricus terrestris* 均有自土壤累積 PAHs 至其體內之現象，而累積濃度會隨著蚯蚓物種與土壤 PAHs 衍生物組成而有變化。Jager et al. (2003)利用 *Eisenia andrei* 探討 PAHs 在土壤之生物可利用性 (bioavailability)也獲致相似結論。瑞典學者 Eijsackers et al. (2001)指出因蚯蚓存在與運動，將有助於減低污染土壤之 PAHs 濃度，因此可提高 PAHs 之生物降解。

這些研究的結論指出，蚯蚓具有累積與降解土壤中 PAHs 之能力。但是，這種能力也受到蚯蚓物種、土壤環境變化和 PAHs 存在衍生物之操控，對其影響機制與方式，目前仍未明瞭，需要深入探討。此外，在不同蚯蚓以生理、生化及代謝等生物反應降解土壤 PAHs 之過程及運作，亦應予以瞭解，這些訊息之釐清，對於土壤石化物污染之移除及復育，有重要之商業發展潛力與意義。

台灣地區蚯蚓研究沉寂多年，近年來持續有新的成果發表(Tsai et al., 1999; Chuang and Chen 2002; Shen et al., 2002)，物種數量已快速累積超過 50 種，估計總種類數應有百種以上，顯見台灣蚯蚓的豐富度，目前相關研究多集中於北部與中部，南部地區尚未對該生物進行有系統的調查。而利用該生物進行土壤毒理與復育等研究方向，在台灣則剛起步，具有寬廣之發展空間。

近年來，美國與歐洲均投入大量研究資源以使用蚯蚓發展毒理測試、土壤復育和瞭解生態系衝擊等相關研究。發現外來種蚯蚓入侵會使土壤內碳循環、磷循環、元素比例(如 C:N)、植物根系分布、微生物組成及本土蚯蚓群聚結構等發生改變，在未來數十年可能改變全球土壤特質。此外，蚯蚓在不同農業型態之物種分布(Whalen, 2004)與土壤中農藥吸附作用(Gevao et al., 2001)、有機物累積(Jager et al., 2005)及吸附途徑(Jager et al., 2003)、重金屬之移除如鋅(Socctt-Fordsmand et al., 2004)、鎘(Sturzenbaum et al., 2004, Burgos et al., 2005)與銅(Burgos et al., 2005)等層面之探討，亦有明顯進展。

計畫主持人於 2008 至 2009 年執行環保署土污基管會委辦「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術」研究計畫，嘗試以蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術，經耐受實驗結果選定 *Eisenia fetida* (紅蚯蚓)和 *Perionyx excavatu* (掘穴環爪蚓)此兩種蚯蚓作為復育多環狀芳香族碳氫化合物(polybuclear aromatic hydrocarbons, PAHs)實驗物種(圖 2-1)。



*Eisenia fetida* 成體



*Perionyx excavatu* 外觀

圖 2-1 2008 年計畫使用之兩種蚯蚓外表形態

在該研究中比較兩種蚯蚓復育 PAHs 成效並無明顯差異，該實驗結果顯示柴油污染土壤的最佳復育天數為 60 天，可減少 PAHs 濃度為 100 mg/kg 的柴油污染土壤中 90% 以上 PAHs，比較 120 日復育期程後，掘穴環爪蚓在低及中柴油污染土壤中存活率較紅蚯蚓為高，但紅蚯蚓在高柴油污染土壤有較高存活率，顯示其繁殖後代使存活率回升。結果發現土壤若受柴油污染後，土壤所吸附之 PAHs 濃度將

隨時間自然衰減，其衰減程度將視場址物化條件及是否有 PAHs 分解菌等條件影響，但蚯蚓存在與運動行為，將有助於減低污染土壤之 PAHs 濃度，因此可提高 PAHs 之生物降解。

以該計畫實驗設計柴油高污染土壤為例，蚯蚓可在高 TPH 濃度環境下協助 PAHs 減量，此點可作為設計蚯蚓對石化污染場址整治時決策判定的參考依據。因此若於柴油污染土壤，在蚯蚓可耐受的污染物濃度範圍，提供適合蚯蚓生存的因素(如濕度、堆肥)，添加蚯蚓有助提高復育之能力，並加速去除土壤中之污染物質 PAHs。考量本場址為潤滑油及機油污染，因此在本計畫構思使用蚯蚓復育並考慮搭配其他生物復育方法，作為九如污染場址進行現地及離地生物整治之規畫。

## 2.3 植生復育

植生復育法（Phytoremediation）是一種利用植物來清理環境中污染的方法，植生復育係利用現地植物(in-situ)，以移除、分解或稀釋方式，減少土壤、淤泥、沉積物或地下水中之污染物。植物能幫助清理包括重金屬、殺蟲劑、爆裂物(explosives)及油品等多種類型之污染，同時植物也能幫助避免污染藉由風、雨及地下水，自場址被帶到其他地區。

植生復育法最適用於處理低至中污染量的場址。當植物的根部自污染的土壤、河流及地下水中吸取水分及養分時，它進行移除地面中的有害化學物質。植物清除污染物質倚賴根系深度，木本植物的根系比較草本植物的根系生長較深，因此它們被用來接觸土地中較深處的污染。污染物質一旦進入植物體內，期可能產生之變化為：

- (一) 被貯存在根部、莖部，或葉部。
- (二) 在植物體內被轉化為比較無害的化學物質。
- (三) 在植物進行蒸發（呼吸）時，被轉化成氣體釋放至空氣中。

即使污染物質未被植物的根吸取到它的體內，植生復育法也能夠發生作用。例如當污染物質黏附或吸附在植物的根部，或是它們被生長在植物根部附近的動物或微生物轉化成比較無害的化學物質。

植物被種植及用來吸取污染物質，然後再收割及銷毀它們，或如果貯存在植物體中的重金屬能被再利用時，也可進行回收再使用。通常木本植物會被留下，不會被砍伐。植生復育法所種植的植物，它也能幫助使有害化學物質不能自污染場址移動到其他地區。植物能限制藉由風或雨水將滲入土壤或流出場外之有害化學物質帶走的數量。

當然在植生復育法進行之前，必須了解所種植用以清除污染的植物是否會對人類有害。一般而言，只要不食入這些種植的植物，它們就不會對人類有害，但部分種類昆蟲及動物可能食入植生復育法所種植的植物，必須瞭解所種植的植物是否會傷害它們，及是否會透過食物鏈食性關係，對食入這些動物的更大型動物，造成傷害。

使用植生復育法清除場址所需要的時間，決定在幾項因素上：

- (一) 使用植物的種類及數量。
- (二) 既有有害化學物質的種類及數量。
- (三) 污染面積的大小及深度。
- (四) 土壤的種類及場址現況條件。

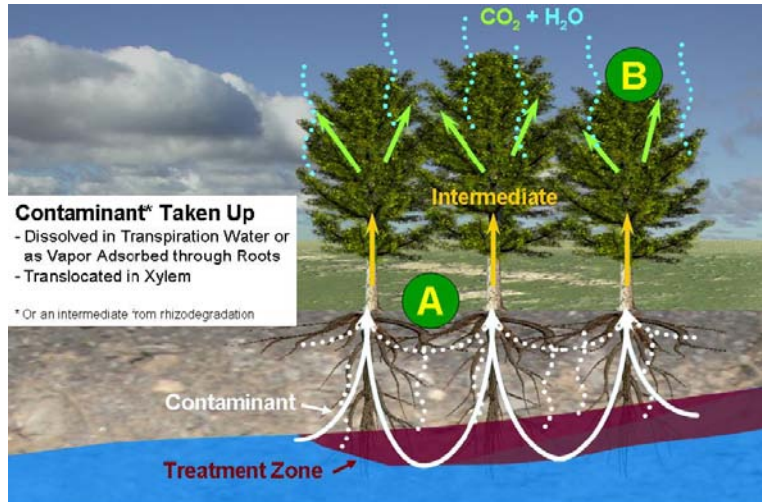
這些因素隨場址之不同而異。如果植物被惡劣的氣候或動物所摧毀，則它們可能必須重新植種，這種情形會增加清除所需的時間。通常需要許多年來清除一個使用植生復育法的場址。

植生復育法藉由自然種植之過程來獲得效益，比較其他方法，因植物本身完成大部分的工作，它幾乎不需要設備及工作人員。同時樹木及植物使場址顯得綠意，更具吸引力。場址能夠不須移除污染土壤及抽取污染地下水而清除。這種方法避免工作人員與有害化學物質接觸。植生復育結合陽光、植物及微生物特性，其成本低廉，可使自然景觀與污染整治兼顧並存，具綠色整治概念之污染整治技術。因此綜合植生復育特性包括以下：

1. 植株的根部在土壤中，根毛之有機質可促成微生物之增生，種類 增加，數量增加；可以增加土壤微生物及其活力，促進土壤微生物之分解作用。
2. 植生整治所需之能源，來自於植株光合作用(太陽能)，為地球上 最價廉、最豐富、最有效率之能源。
3. 土壤及地下水污染場址容易形成一片蕭條，但種植物後，綠意盎然具有優美高雅之感觀。
4. 植物能把污染物抽取聚集，並可形成阻隔帶，防止污染物擴散蔓延。
5. 植株可以釋放光合作用所產生的氧氣，植株收成時，亦可有效利用或妥善處理。
6. 植株的根部把氧注入根系區域，可促進土壤微生物生長以及污染物之分解。
7. 檢測分析植物之成份，可以推估污染物分解的結果，可以作為整治進程之指標。

一般而言植生復育包括以下各項作用機制:

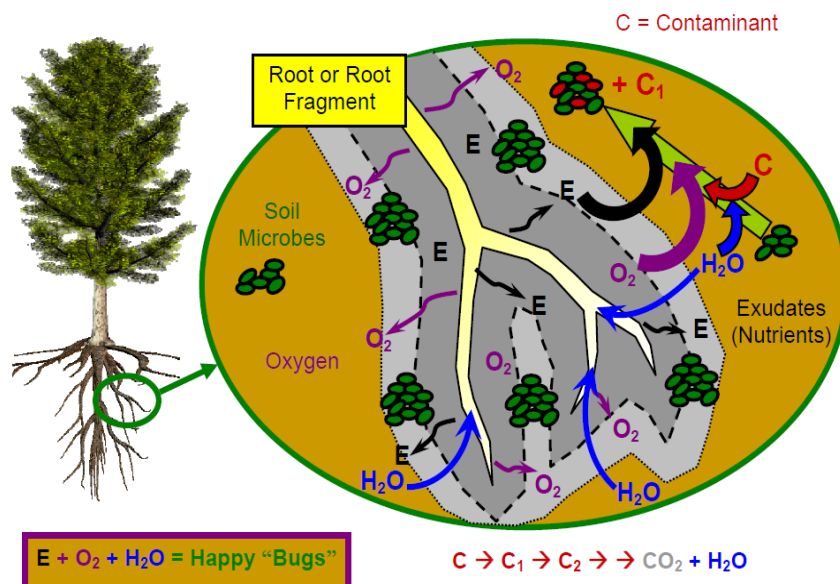
1. 植物分解作用(Phytodegradation): 污染物吸收至植物體組織內，藉由植物光合作用配合植物自身之酵素將污染物分解或改變污染物化學組成(圖2-2)。



參考資料： ITRC(2009).

圖2-2 植物分解作用-A為植物酵素作用，B為光合作用

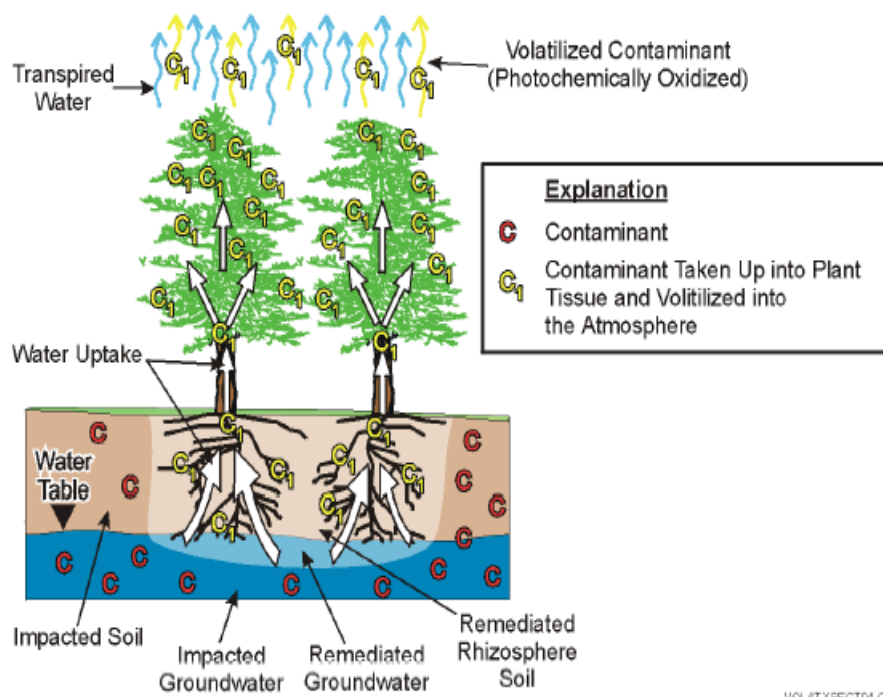
2. 根系土壤分解(Rhizodegradation): 於根際藉由植株根系部位，與微生物相互作用，分解土壤中污染物，如圖2-3所示。



參考資料： ITRC(2009).

圖2-3 根系土壤分解

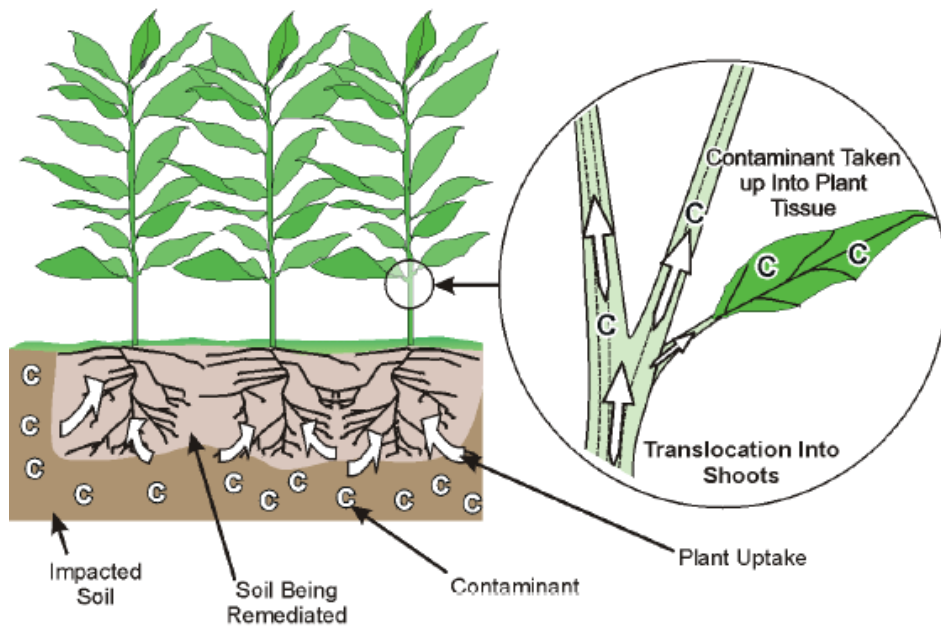
3. 植物揮發作用(Phytovolatilization): 污染物被植物自土壤中吸收進入植物體後，隨植物呼吸作用，經由葉片排入大氣之中(圖2-4)。



參考資料：ITRC(2001).

圖2-4 植物揮發作用

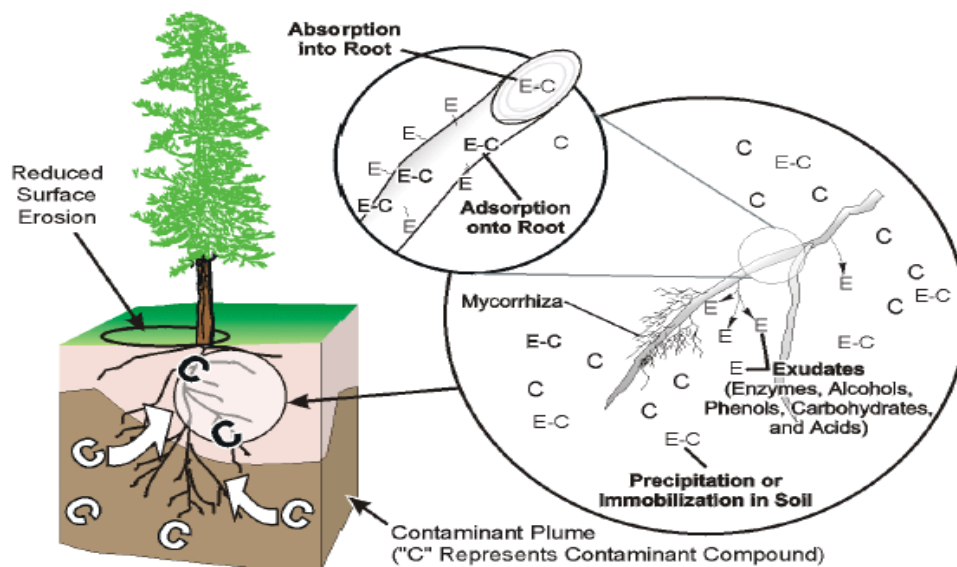
4. 植生萃取作用(Phytoextraction): 植物可自土壤中將金屬成分吸收並傳送、儲存於植物之各部分組織。利用部分植物具重金屬超量累積特性，將重金屬由土壤傳輸和濃縮至植物根部以及地上生長部分。重金屬超量累積植物是具有可在植物葉片上將Ni、Co、Cu、Cr、濃縮至0.1%乾重和Zn、Mn濃縮至1%乾重的植物，植物萃取作用適用特定重金屬如Ni、Ag及Se，化學藥劑使重金屬的移動性、植物有效性及累積濃度增加，縮短植生萃取所需之時間，但卻會增加成本及地下水受污染之風險 (Lai and Chen, 2006)。



參考資料：ITRC(2001).

圖2-5 植生萃取作用

5. 植物穩定化作用(Phytostabilization):藉由根系吸收與沉澱作用，達到穩定污染物的目標，利用植物限制土壤中重金屬的移動性和生物可利用性。作為植物穩定化作用之植物須能容忍高濃度重金屬，並利用吸附、沉澱、複合或還原方式穩定重金屬，穩定土壤結構降低沉積物腐蝕和移動性。



參考資料：ITRC(2001).

圖2-6 植物穩定化作用

有關植生復育，國內已有諸多研究，例如「重金屬污染土壤之植生復育技術與案例分析」(賴鴻裕，陳尊賢，2003)、「台灣利用花卉植物移除土壤重金屬相關研究之回顧」(賴鴻裕，陳尊賢，2005)等。我國目前已有相關列管場址使用植生復育法，如「新屋鄉台15線53.5K土壤及地下水污染改善計畫」、「花蓮供油服務中心北埔庫區」、「屏東縣萬丹鄉新安段1438及1439地號(大鼎飼料廠)」等，對於未具高潛在健康風險之場址，未來可持續推動植生復育技術，運用在更多污染類型之場址中。

## 第三章、研究方法與過程

本計畫之試驗內容包括場址範圍界定與調查、生物復育試驗施作及植生復育試驗施作等，研究方法及步驟如下各節所述。

### 3.1 場址範圍界定與調查

#### 一、範圍界定與圈界

本計畫之試驗範圍為中央與地方公告之整治或控制場址範圍 1,800 平方公尺。計劃執行初期測量場址界線、釘樁並圍以警示帶，除可明確界定場址範圍外，並可兼顧安全性。

#### 二、現場清理

本計畫執行團隊現勘時發現，現地除仍遺留少數空桶外，並且雜草叢生（圖 3-1），故而必須移除空桶且清除雜草，方可進行後續之試驗。



圖 3-1 試驗現場遺留之空桶（左）及叢生雜草（右）

#### 三、土壤污染範圍及理化性質調查

由圖 1-1 之歷次土壤採樣點分佈圖可知，本場址雖歷經中央與地方環保單位多次之調查，但採樣點仍未涵蓋試驗地所有區域，故有必要進行補充調查。此外，為了解土壤性質並進行必要之調整或改良，以提供生物與植物良好之生存環境，亦須採樣分析其理化性質，供後續整治工法施作之參考。其採樣點與分析項目規劃如下：

## 1. 土壤污染深度調查

由歷次之調查資料顯示，樣點 S9801-02 於 180 cm 處之鋅，200 cm 處之 TPH 仍超過污染管制標準（表 1-4），下層土壤則無此現象，故進行補充調查之採樣深度預定為 200 cm。而採樣點規劃將以過去未採集區域為主，採樣點規劃示意圖如圖 3-2。分析項目為重金屬（鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎳）及 TPH，分析方法依環保署公告標準方法為之。其中重金屬分析者，每點分別採集 0~30、30~60、60~100 cm、100~150 cm 及 150~200 cm 五個土層。供 TPH 分析者則採集全層未擾動土深壤。

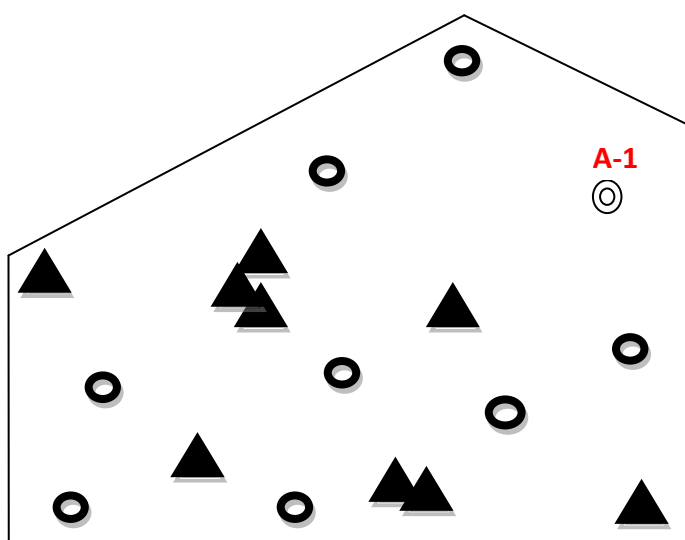


圖 3-2 土壤污染補充調查採樣點分佈圖

▲表歷次採樣點；○表本計畫預定各實驗區採樣點；◎補充調查採樣點(A-1)

## 2. 土壤理化性質調查

由於本場址之地勢平坦，土地利用亦無差異，故理化性質調查之採樣規劃，針對高污染潛勢區進行採樣，採樣深度為 240cm，每層分別採集 0-60、60-120、120-180 及 180-240 cm 四個土層。分析項目分別為 pH、有機碳含量、及含水率等(如表 4-2)。分析方法參照李芳胤與陳士賢合著之「土壤分析實驗手冊」與美國土壤學會之土壤分析方法（Methods of Soil Analysis）。

#### 四、整地及土壤理化性質調整

在清理完成後，將進行整地與土壤理化性質調整。其方法係以曳引機(圖 3-3)及迴轉犁(圖 3-4)進行翻土、破碎與整平，耕犁深度約為 60 cm。此舉將可使土壤疏鬆，增進空氣交換與水分傳輸，有益於後續之生物活動與植物生長。此外依據土壤理化性質調查結果，將其調整至適合植物與土壤生物生長之條件，其所需添加之物質將於整地時混入並予調勻。而預定調整之項目與目標值分別為 pH 6.0~7.5、含水量(田間容水量)及營養鹽(大量要素 100 mg/kg，微量元素 1 mg/kg)。



圖 3-3 曳引機(左)及深耕犁耙(右)

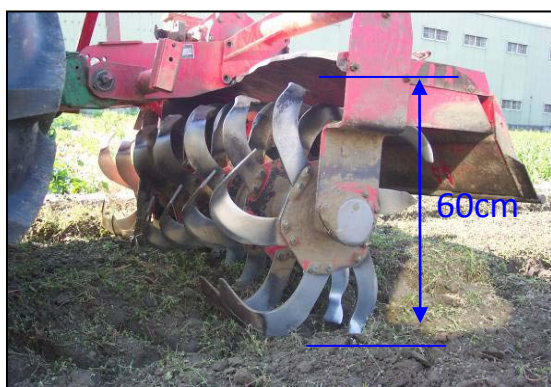


圖 3-4 深耕迴轉犁(右)及刀具(左)

## 3.2 生物復育試驗施作

### 一、試驗區規劃

本計畫係以公告污染場址為範圍，依據歷次調查結果及本計畫執行初期整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，規劃六個試驗區，其分佈如圖 3-5 所示。其中 CK 代表無污染之對照區(Control)，其餘五區為處理區，其中 BP1、BP2 及 BP3 代表同時進行生物與植生復育之試驗區(Bio-phytoremediation)，而 PR1 與 PR2 則為進行植生復育(Phytoremediation)之試驗區。

### 二、選擇蚯蚓物種

研究不同物種對污染物之反應應該考慮生態棲位之差異，本研究採用 *Eisenia fetida* 作為復育土壤石化污染物，*Eisenia fetida* 為歐洲常用進行土壤污染物檢測之蚯蚓物種。前人研究顯示其具有累積及降解石化污染物之能力(Parrish et al. 2005)，*E. fetida* 也是國際土壤標準毒理測試使用之物種(ISO, 1993, 1998；OECD, 2004)，喜愛生存於堆肥和糞肥中等富含有機質的環境，並非存在於一般土壤的品種(Bouché, 1972)。該物種目前也被引入台灣，用途則多作為魚餌之用，釣具店稱之為「紅蚯蚓」，在台灣一般土壤中未曾被採集過，需用室內培養的方式養殖(Blakemore et al., 2006)。

先前進行之「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術研究」發現，土壤若受柴油污染，其所吸附之 PAHs 濃度可隨時間而自然衰減，惟其衰減程度受場址物化條件及是否有 PAH 分解菌等條件之影響，不過若於污染土壤中引進蚯蚓，則蚯蚓的存在與運動行為，有助於減低污染土壤之 PAH 濃度，因此可提高 PAHs 之生物降解。以該計畫實驗設計之柴油高污染土壤為例，蚯蚓可在 TPH 濃度數萬至 10 萬 mg/kg 之環境下協助 PAHs 減量。因此在蚯蚓可耐受的污染物濃度範圍內，若提供適合蚯蚓生存的因子(如濕度、堆肥)，則添加蚯蚓將有助於提高復育之能力，並加速去除土壤中之污染物質，因此本計畫將透過污染場址之實作予以評估蚯蚓分解石化污染物之能力。

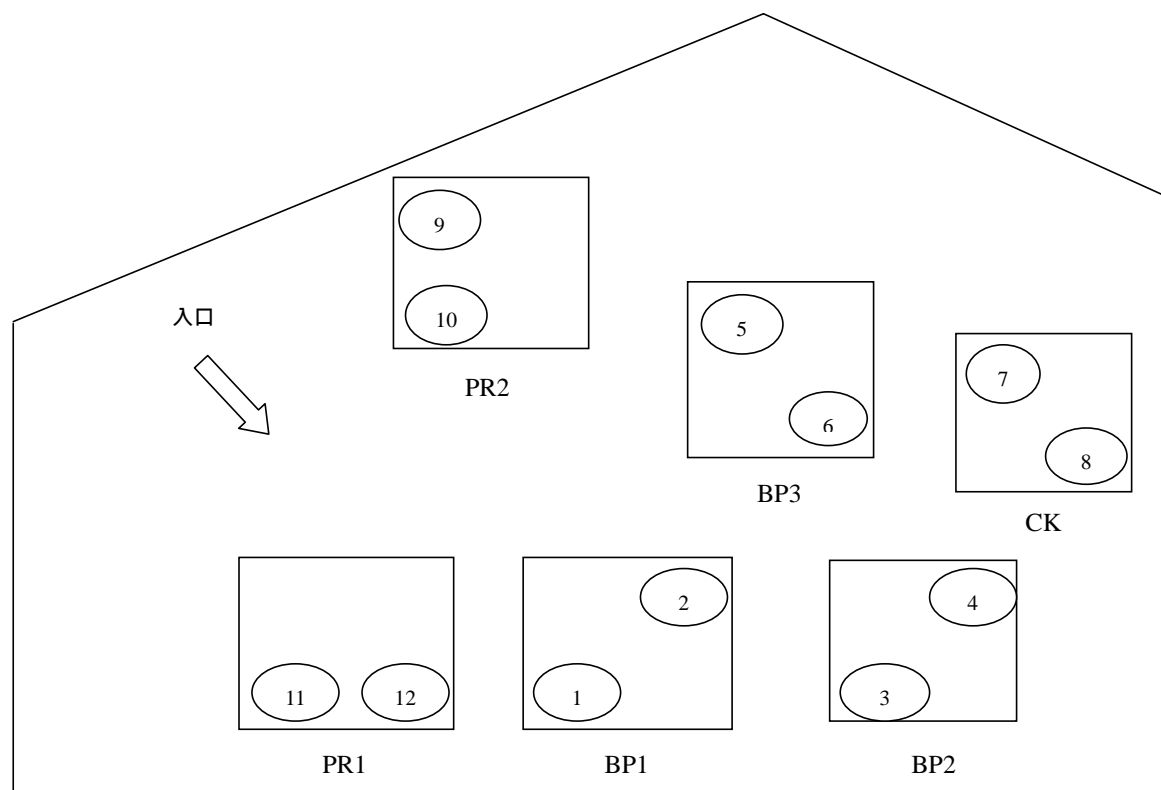


圖 3-5 本場址生物與植生復育之試驗區配置圖

### 三、蚯蚓分類與培育

*Eisenia fetida* 此蚯蚓物種在一般釣具行均可能購得，以紅蚯蚓稱之，購買時以單盒 10 條或秤斤販賣，來源如自野外挖掘其中可能混雜數種不同物種，在物種分類之基礎要求，毫無把關可言，若研究人員無蚯蚓之分類訓練與能力，將會影響後續之研究結果，因此本計畫蚯蚓統一購自單一飼養者，以確保來源品質。

*Eisenia fetida* 體長約 3-5 cm，寬度約 1-3 mm，具 32-37 環節，卵巢一對出現於 13 體節，10-11 體節具兩對睪丸與兩對受精囊（spermathecae），雄生殖孔則位於第 15 體節。對於本計畫所需使用個體，於引入後在實驗室持續培育該種蚯蚓 1 週，以馴化及穩定試驗個體之品質與來源。

### 四、蚯蚓分解污染土壤研究

蚯蚓之吃土、鑽土行為會促進土壤通風，讓氧氣進入土壤縫隙中，可促進土壤中微生物的活動，進而增進土壤中 TPH 的降解機會，本實驗將分析蚯蚓對土壤中 TPH 之移除效率。

本實驗為了解蚯蚓對於石化污染之土壤之復育能力，將進行現地實驗，以了解蚯蚓對於石化污染物之移除能力。現地試驗之規劃，係依據先前調查污染物範圍及濃度，在污染場址劃分不同區塊(BP1、BP2 及 BP3)，引入蚯蚓，並以米糠拌入土壤，提供蚯蚓較佳生長環境，實驗條件為探討當土壤中存在微生物以及 *Eisenia fetida* 品種之蚯蚓時，土壤中的 TPH 移除效率及藉由分析污染土壤石化污染物組成變化探討其生物利用性。

蚯蚓分解污染土壤實驗進行 3 組區塊，施放時間分別為 5 月 15 日及 9 月 7 日，偵測土壤之 TPH 濃度之採樣天數分別為第 7、15、30、60、90、及 150 天，採樣期程分別為 5 月 15 日、5 月 22 日、5 月 30 日、6 月 14 日、7 月 13 日、8 月 13 日、9 月 12 日及 10 月 12 日，自樣區取出土壤樣品，經萃取後分析 TPH 濃度。

## 五、石化分解菌施用

### 1. 菌種來源

菌種來自高雄市橋頭油庫，其儲存油品包括汽油、噴射燃料油、柴油、煤油及各種潤滑油，石化產品包括乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、丁烷、丁烯、苯、甲苯、及二甲苯等。而在土壤中分離出具有 MTBE 分解潛力菌種，已公開寄存於新竹食品工業發展研究所之生物資源保存及研究中心

### 2. 菌種培養

(1) 大量培養:利用 Nutrient Broth (NB)大量培養株菌

(2). 更換培養液，用微生物緩衝液清洗:

- NB 培養 50ml 離心 10min 4400rpm, 倒去上清液
- 1ml PBS(phosphate buffer solution) 回溶洗菌塊放於 2c.c. 離心管，再離心 10 分鐘 4400rpm
- 重複上述過程 3 次
- 用 1 c.c. 培養液回溶菌塊

(3). 用分光光度計測菌量：利用 OD<sub>600</sub> 測出菌種的吸光值(稀釋方式:取 980μl 的 MSM 當 blank, 利用 20μl 的菌液測出原液濃度)

(4). 利用原菌液直接將所需體積加入培養液

(5). 再以生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)大量培養(條件為 37°C、150 rpm)

### 3. 實驗設備

攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)為總容積 5L 的玻璃槽體(圖 3-6)，容許運載量最高為 4L，藉由槽外底部之加熱板及槽內冷卻管調控槽體溫度，有一通氣管外接氣體流量計藉以監控槽體通氣量，兩個攪拌葉片藉著轉動軸的轉動而帶動槽內培養液的流動混合。

### 4. 施灑菌種

石化分解菌在實驗室大量培養後，配合生物復育實驗施作的區隔施灑，施灑菌種為 *Pseudomonas* sp. NKNU01，此菌株為兼具分解 MTBE 潛力之菌種，於 8 月 13 日運送至現場，施灑區塊為圖 3-7 中 BP1、BP2 及 BP3。每一區塊以約 20L(桶裝約 19-20L 的菌量)培養之菌量，分別由各區塊採樣點(採樣點 1、採樣點 2、採樣

點 3、採樣點 4、採樣點 5 及採樣點 6)向外延伸施灑，並於施用後定期灑水及提供營養鹽使微生物有較佳生長環境。

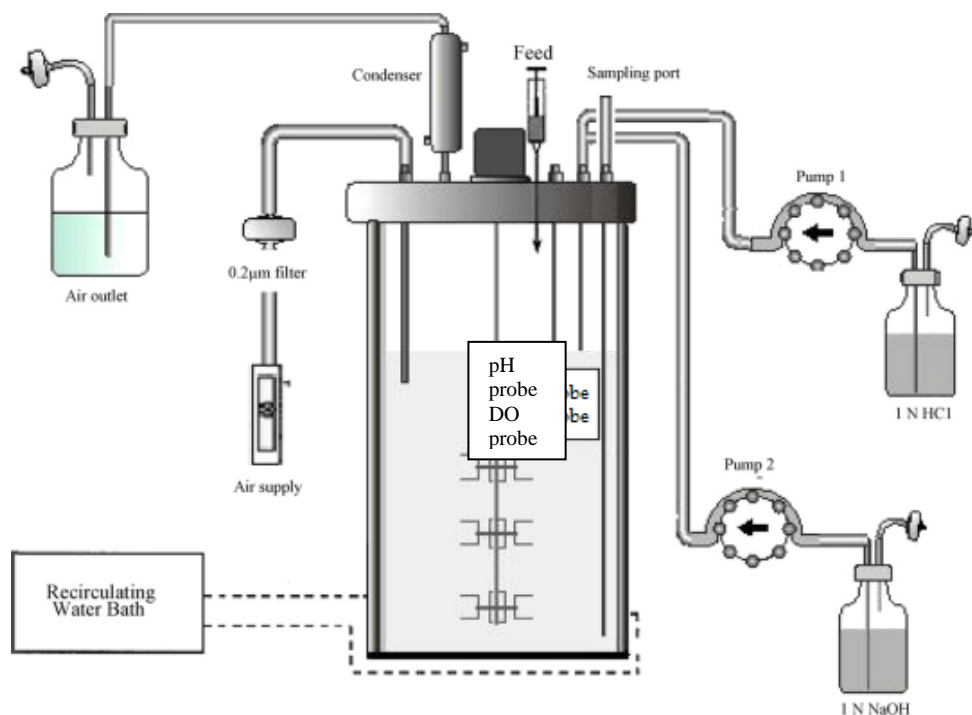
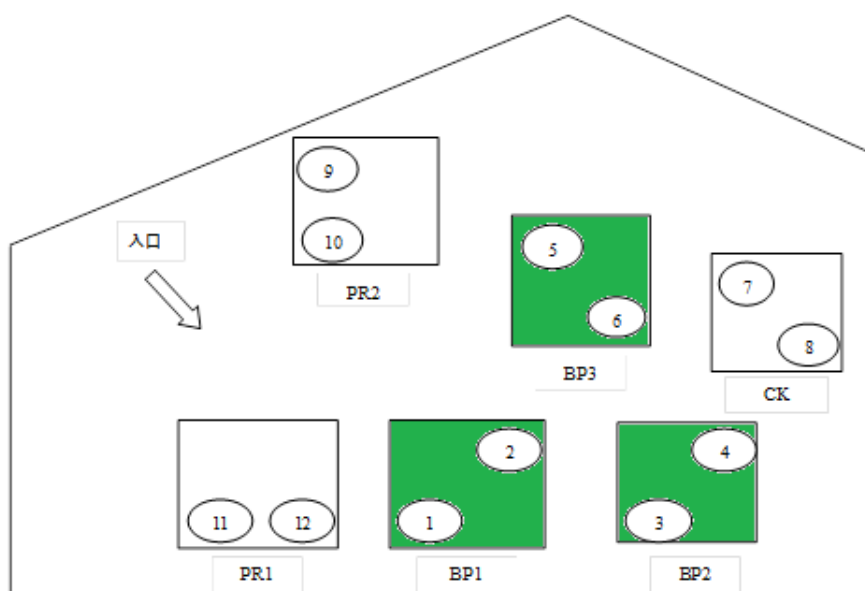


圖 3-6 生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)



註:綠色區塊(BP1、BP2 及 BP3)為菌種施灑區塊

圖 3-7 菌種施灑區塊

### 3.3 植生復育試驗施作

本計畫之污染物深度雖達 200 cm，但濃度較高且分佈較廣土層仍以 0~60 cm 為主，此範圍之污染將以草本植物配合生物加以整治。由於深層土壤之環境較不易控制且生物活動亦較受限制，故針對深層土壤之整治法將以木本植物復育法為主，生物復育法為輔。試驗初期，無論草本或木本植物之根系多於淺層土壤發展，故與生物整治發揮相乘效果，對高污染之表層土將可收明顯效果，俟木本植物根系向深層土壤伸展後，植生亦可發揮相輔功效。茲將試驗內容概述如下：

#### 一、樹種選擇

選擇植生復育樹種所需考慮之主要條件包括：

##### 1. 環境適應力強、生長迅速且清除效果高

多數污染場址之土壤環境條件較差，除污染物之毒性外，常伴隨 pH 異常或土壤貧瘠等不利因素，而其中又以污染物之植物生理毒性為最大限制因子。因此，復育樹種之首要條件為具有惡劣生長環境之適應力與污染物耐受力，此外還需有旺盛之生命力，快速生長並且吸收、分解與穩定污染物，以發揮清除與降解污染物之功效。

##### 2. 根系發達並涵蓋污染土層

復育樹種對污染物若欲發揮除污、穩定、萃取與降解的功能，其基本要件乃根系必須發展而接觸污染物方可竟其功。因此，優良樹種的根系必須密度大，且深度與廣度需涵蓋污染土層。

由於國內對重金屬與 TPH 污染場址之植生復育實場經驗甚少，因此本計畫依據國外之研究與現場實作所得結果，選取木本植物白楊樹 (*Poplars; Populus bonatii Levl.*) 與草本植物太陽麻 (*Sun Hemp; Crotalaria juncea L.*) (圖 3-8)。其主要理由乃此樹種皆具有上述特色與功能，亦即可耐受油污與重金屬，並有高降解效果；光合作用及蒸散作用旺盛，生長快速，枝葉茂盛，根系發達且為深根性。此外，樹種取得容易、維護管理方便。



圖 3-8 白楊樹(左)及太陽麻(右)

## 二、栽植規劃

如上所述，國內植生復育之實場經驗較為欠缺，而本場址又兼具重金屬與 TPH 兩種污染物，雖然國外資料顯示，白楊樹與繖楊皆為優良之復育樹種，但在國內仍無應用前例。本計畫除期望藉由栽植而達到整治污染之目的外，並且希望藉由生理調查及植體分析，比較兩者之功能，做為其他污染場址引用之參考。因此，將以間作方式栽植兩樹種，栽植方式為行距 2 公尺，株距 3 公尺。同時，並於行間栽植草本植物太陽麻(Sun Hemp；*Crotalaria juncea* L.)，其作用為(1)可於淺層土壤發揮吸收與降解污染物功能；(2)根系可與微生物交互作用而促進生物復育功能；(3)良好的土地覆蓋可提供蚯蚓與分解微生物適當之溫度、濕度與有機質等有益生存環境；(4)可提供氮肥，有利土壤微生物之生存與活動。

## 三、試驗規劃

為了解植生樹種在污染環境中之生長情形與對污染土壤之淨化效果，本計畫於執行期間將進行下列試驗：

### 1. 白楊樹與太陽麻栽植

本計畫依白楊樹生長所需之伸展空間及現場機具作業之需求，以間距 2.5 m 於場地內栽種白楊樹，總計 350 顆。而場內各試驗區之植株數量分別為 CK 25 棵，BP1 及 BP2 各 12 棵，BP3 為 10 棵，PR1 為 9 棵，PR2 為 18 棵。此外，太陽麻栽

植係於六個試驗區內進行。由於種子撒播後之萌芽率不一，故單位面積之植株數亦不盡相同，惟平均數約為每平方公尺 150 棵。

## 2. 土壤之採集與分析

本計畫係於六個試驗區內採集土壤進行重金屬(Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni)分析。每一區內有兩個採樣點，其編號分別於試驗區代碼後以-1 及-2(如 CK-1，CK-2 等)標示之。每採樣點採集 0~30、30~60 及 60~100 公分之土樣，其編號方式係於採樣點後分別以-30，-60 及-100(如 CK-1-30，CK-1-60 及 CK-1-100)表示之，總共採集 34 土樣(因為 PR1 60 公分以下為水泥層，無法以人工採樣。)。其分析係依照環保署公告之標準方法(NIEA S361.63B)進行，亦即以王水消化經前處理（風乾、研磨與過篩）之土樣，再以原子吸收光譜儀(AA)測定消化液中之重金屬含量。

## 3. 植體採集與分析

白楊樹係於栽種初期及三個月後採集最底層之成熟葉片，每棵採集 1~3 片，各試驗區混合為一樣品，亦即每次採集 6 個樣品，計畫執行期間共有 12 個樣品。而太陽麻則於收成後，於每試驗區隨機選取 10 棵，將每區 10 棵植株之根與地上部分開，各區之根與地上分別混合為一個樣品，總計 12 個樣品。各類植體樣品於烘乾、破碎後，以二酸消化法(濃硝酸：濃過氯酸=5：1)消化分解之，再以 AA 測定消化液中之重金屬含量，其重金屬種類則與土壤相同。

## 4. 白楊樹及太陽麻生育調查

為了解植物發育情形及污染物對其發育之影響，本計畫定期(約一個月)量測白楊樹地上部之高度，其方式係測量地面至最高枝幹之生長點距離。總計於執行期間進行四次。至於太陽麻，因屬草本之短期植物，故於播種約 10 週後採收，並於每試驗區隨機選取 10 棵量測地上部之長度並秤其濕重與乾重。

## 5. 白楊樹光合潛力及綠素螢光暗適應測定

眾所皆知，光合作用乃植物之重要生理作用，其效率足以代表植物生理狀況。本計畫於白楊樹栽種四個月後測定其光合作用率。測定對象為栽植於六個試驗區

的植株，每區分別隨機選取 4 株，每株測定 2 片葉。測定時間為上午 7:30 至 10:30，使用之儀器為可控制環境條件的攜帶式光合作用測定系統(LI-6400, LI-COR, USA)，每個葉片測定的微環境為光量  $1500 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，葉箱內  $\text{CO}_2$  濃度控制在  $400 \mu\text{l L}^{-1}$ ，相對濕度 60~80%，葉溫控制在  $28^\circ\text{C}$ 。在此等固定條件下所得到的光合潛力數據，可比較白楊樹栽植在不同處理區的生理狀態。

其次，由於葉綠素為光合作用之胞器，故測定植株在暗適應後的最大光化學效益(maximal photochemical yield,  $F_v/F_m$ )可了解植物之健康狀況。本計畫係以攜帶式葉綠素螢光儀(Mini-PAM, Walz, Germany)測定之。暗適應處理過程係於測定前先使用暗適應葉夾(dark leaf clip, DLC-8)將葉片遮蓋，進行暗適應 30 分鐘後，再以 Mini-PAM 測定葉片的最低螢光值( $F_o$ )及最大螢光值( $F_m$ )，由此可計算該葉片暗適應後之  $F_v/F_m$  值(其中  $F_v = F_m - F_o$ )。在植物生理學上， $F_v/F_m$  代表光合系統 II 之最大光化學潛能，可用來當作植物是否遭受逆境之指標，供評估其健康狀態。

### 3.4 污染防治及場址安全措施

針對整治施作時危害的預防，本計畫在現場工作執行前，擬定安全衛生管理計畫，並進行相關教育訓練與宣導，以減少危害發生的機率；並針對可能發生的危害狀況，制訂緊急應變計畫，配合教育訓練與宣導，執行人員於危害發生時，可依循應變計畫進行相關處置，以維護人員安全並減少損失；相關措施分述如下：

#### 一、安全衛生管理計畫

安全衛生管理計畫主要依據勞工安全衛生法令之相關規定，主要部分包括確認安全基本事項、擬定安全衛生管理架構、制訂工作守則、實施安全衛生會議與教育訓練、實施與回報作業，以達到預防危害之目的。

##### 1. 確認安全基本事項

除了基本的安全事項宣導外，由於不同類型的調查場址，可能存在的污染物種類均不相同，以本場址為例，可能的主要污染物包括有殘留態揮發性有機物(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、其他有機溶劑)、總石油碳氫化合物及重金屬等。在進場調查前，須使調查人員了解該場址可能存在的污染物種類、相關法規規定如土壤、地下水管制標準、勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準...等基本特性，並依規定建立目標污染物之安全物質資料表。

##### 2. 擬定安全衛生管理架構

現場調查時，參與的人員眾多，且調查作業牽涉之工項複雜，將明確劃分作業人員的職掌與權責，使安全衛生工作落實執行，管理架構的原則主要採分層負責，逐級回報方式進行。一般而言，工地負責人為現場安全衛生工作的總管理者，負責工程進度、工作安排、各單位協調等。會另行指派一位安衛負責人專責安全衛生管理工作，協助制訂安全衛生計畫書、主導工地安全衛生計畫執行、研擬訂定安全防護等級、安全防護設備檢查...等，並隨時將安全衛生執行情形向工地負責人報告。此外針對儀器設備維護、作業環境管理、場址管制記錄...等工作，將指派專人執行，並明確告知其負責項目與內容，並將執行結果向安衛負責人回報。

### 3. 制訂工作守則

工安負責人協助工地負責人制訂工作守則，內容將包括：安全觀念宣導、各項工作安全須知、設備安全檢查、防護器具配戴、警示裝置、急救設備檢查、罰則...等。

### 4. 安全衛生會議與教育訓練

於現場工作開始前，召集工作人員針對安全衛生管理計畫之內容進行說明，並實施教育訓練，確保工作人員均了解各項規定與權責，同時應製作紀錄，並由工作人員簽名後存檔。另每日工作開始前或必要時，由安衛負責人針對工作環境進行安全衛生等危害告知。

### 5. 實施與回報作業

安全衛生管理計畫最重要的環節，即在於確實實施與檢查，唯有真正落實計畫內容，現場工作之安全才有保障，才不致淪為空談。無論是施工前的安全衛生會議與教育訓練、危害認識；進場前的設備檢查、防護器具檢查；施工中的重點巡查、記錄與改善，均須徹底執行，如遇有突發狀況，應即時回報予上層管理人員，進行應變處置以降低危害之風險。

## 二、緊急應變計畫

緊急應變計畫其目的乃在建立一套因天然災害或施工過程，因操作疏失或意外所引起的緊急事故之應變能力適當的程序，使得危害發生時能採取適當的辦法，藉由各項事故發生的原因和機率的瞭解，進一步積極地預防緊急事故的發生，以降低災變對人員、設備和環境的危害。

為確定緊急事故發生時，能迅速進行處理，避免災害擴大，調查人員應於工作進行前規劃緊急應變小組，並訓練人員熟悉各項流程，各類人員執掌如下：

- 負責人：負責緊急應變計畫執行與緊急應變小組人員分配及訓練，現場緊急事故判定與管理，立即於緊急事故發生時及時通報工地負責人或安衛負責人(緊急事故之通報應於 2 小時內完成)。
- 急救人員：負責急救設備之準備、保管與定位，同時負責緊急事故發生後對

人員必要的急救措施。

- 現場控制人員：負責緊急事故發生後，現場工作人員集合與清點，並對現場實施管制，必要時疏散附近居民。
- 連絡人員：負責聯絡警察局、醫院、消防隊等相關單位，同時協調救護、滅火、醫療等事項。
- 運送人員：負責運送人員與購買所需物品之一切交通運輸工作。
- 支援人員：現場待命，由負責人統一指揮調度。

本計畫將訓練工作人員於發生緊急事故之應變程序，以利各項救援進行，並事先建立鄰近之警察局、醫療院所與消防隊之聯絡電話，與各緊急應變通報單位之相對位置與運輸路線，且本項資料將置於工地內明顯處所。

### 三、二次污染防治計畫

污染復育工作進行時，若不當處理時，將可能造成二次污染之產生。本計畫提出之二次污染防治計畫，對於清理期間可能發生之污染問題有效防治，避免二次污染之發生。

#### 1. 空氣污染防治

由於本場址污染物並非來自揮發性有機物，施工期間對於鄰近地區空氣品質之影響主要來自土壤開挖工程，土壤開挖時會造成之粒狀污染物飛揚情形，若不配合防治措施，則最大著地濃度皆超過環境空氣品質標準總懸浮微粒(TSP):250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且對於周遭環境污染影響很大，若氣候潮濕，配合如灑水及工程車行駛速度控制之污染防治措施，粒狀污染物排放可降低 50~60%，此時可合乎環境空氣品質標準

#### 2. 噪音污染防治

清理期間及植生復育施作之噪音依其來源可區分為兩大類:(1) 載運清理開挖之土壤之運輸車輛所產生之噪音。(2) 土壤開挖及基礎打樁等各類型施工機具，包括推土機、挖土機、空氣壓縮機及打樁機等所產生之噪音。開挖期間之噪音量大小乃依據機具設備、數量、型式、運轉時間、地點及離受音者之距離而定。清理開挖時產生噪音之施工機具有打樁機、卡車、挖土機、推土機及空氣壓縮機等，

其中打樁機產生之噪音為最高。若以均能噪音量( $L_{eq}$ )降至一般地區第二類日間噪音量管制標準 60 dB(A)，則所需之直線距離至少為 240 公尺以上。假如噪音接受者(receiver)距離較近，無地形之屏障時，應考慮使用較低噪音型之施工機具，或者對固定高噪音機具(如空氣壓縮機)，則採用包覆隔離方式，將可降低噪音量 5~15 分貝，使噪音之影響減輕至中度或輕微程度。

### 3. 振動污染防治

施工時，因使用不同之施工機具，會產生不同之振動量。日本環境廳曾對一般施工機具做不同距離振動量之量測。若以整地施工而言，採用振動式打樁機，其位距 5 公尺及 10 公尺之振動位準分別為 90 dB 及 82 dB。若假設距離最近之住戶為 60 公尺，經距離之衰減，其振動值約介於 66.4~68.4 dB 之間，雖可符合東京都振動規定，但超過日本東京都第一種區域公害振動標準 65 dB(日間)，惟因施工活動係一暫時性現象，一般人可承受之振動量較高。

### 4. 水污染防治

為避免造成污染團位移，本計畫進行期間將避免於場址內抽取地下水，開挖作業及植生復育所需使用的地下水，將協調鄰近民井，計畫進行中將持續進行地下水監測。

### 5. 固體廢棄物清理

整治期間所產生之固體廢棄物及工程人員之一般性生活垃圾兩大類。依照廢棄物清除處理法中相關規定，進行廢棄物之清除，故應無污染環境之虞。

## 第四章、結果與討論

本計畫之先期工作項目包括範圍界定與圈界、現場清理、土壤污染範圍及理化性質調查、整地及土壤理化性質調整。而污染場址復育工作包括生物復育試驗施作及植生復育試驗施作，各項工作執行成果如下詳述。

### 一、範圍界定與圈界

試驗範圍為中央與地方公告之整治或控制場址範圍 1,800 平方公尺，故計劃初始階段，先進行整地工作，測量場址界線、釘樁並圍以警示帶，並設置告示牌，除可明確界定場址範圍外，並可兼顧安全性，污染場址經界定場址範圍後如圖 4-1 所示。



圖 4-1 計畫場址範圍界定

## 二、現場清理

計畫執行團隊現勘時發現，現地除仍遺留少數空桶外，並且雜草叢生因此必須移除空桶且清除雜草，方可進行後續之試驗（圖 4-2）。第一階段現場清理工作將空桶及雜草清除(圖 4-3)。為規畫生物復育與植生復育施作，本計畫雇用怪手進行現場清理、鬆土及標記場址警戒線範圍，但在整地階段意外發現部分原為水泥鋪面處下方有廢油污染，深達半公尺至一公尺，同時現場仍有油桶殘留，相關位置如圖 4-4 標示，其污染情況及嚴重程度與當年屏東縣環保局調查之污染現況有很大差異，經徵詢土污基管會並會同現勘後，將該高污染區塊隔離，由屏東縣環保局另案處理(圖 4-5 及 4-6)，場址其他部分仍照本計畫規劃，採行植生復育與生物復育試驗工作。



圖 4-2 現場清理前現場叢生雜草（上）及遺留之空桶（下）



圖 4-3 場址叢生雜草完成清除



圖 4-4 計畫場址範圍、歷次土壤採樣點分佈圖及新發現油污染區域



圖 4-5 場址中新發現嚴重油污染區域



圖 4-6 嚴重油污染區域深達 0.5 至 1 公尺

### 三、土壤污染範圍及理化性質調查

為了解土壤性質並進行必要之調整或改良，以提供生物與植物良好之生存環境，進行採樣分析其理化性質，供後續整治工法施作之參考。本次採樣與分析項目如下：

#### 1. 土壤污染深度範圍調查

本場址雖歷經中央與地方環保單位多次之調查，但採樣點仍未涵蓋試驗地所有區域，故以高污染潛勢區進行補充調查。土壤採樣作業依據「土壤採樣方法」（NIEAS102.61B）辦理。本工作以土鑽採樣組（Auger）採集土壤樣品。於該點位周圍以土鑽採樣組試挖淺層土壤樣品輔助確認污染範圍，本次補充調查之採樣深度為 240cm。而採樣點規劃以過去未採集區域為主，採樣點規劃示意圖如圖 4-7。

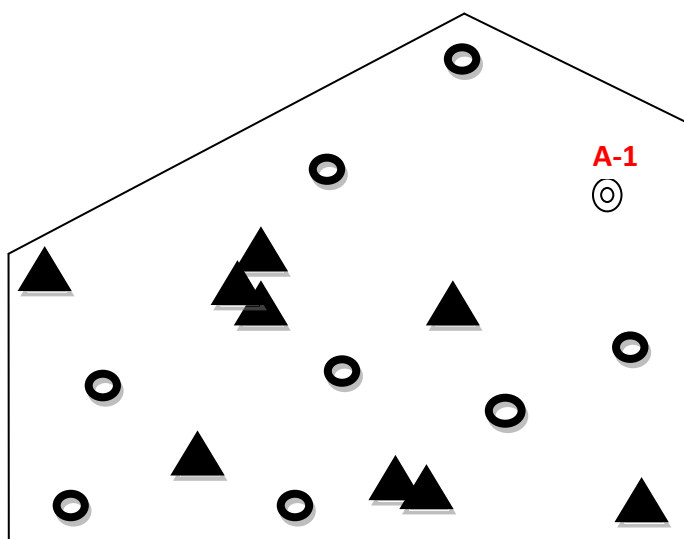


圖 4-7 土壤污染補充調查採樣點分佈圖

（▲表歷次採樣點；○表本計畫預定各實驗區採樣點；◎補充調查採樣點(A-1)）

土壤分析項目為重金屬（鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎳）及 TPH，分析方法依環保署公告標準方法為之。採樣時依據與管理單位討論之結果，將原訂之採樣規劃佈點做以下調整：總計四個土層，每點分別採集表土、60-120 公分、120-180 公分及 180-240 公分，供 TPH 分析者則採集全層未擾動土壤。各採樣點之污染外觀初判描述分別為(如圖 4-8)：

- (1) 表土層：顯著油污染土，略具油氣味；
- (2) 60-120 cm：略顯著油污染土壤，略具油氣味；
- (3) 120~180 cm：無顯著油污染土壤，無顯著油氣味；
- (4) 180~240 cm：無顯著油污染土壤，無顯著油氣味；



圖4-8 採樣樣品各深度土層外觀

土壤污染補充調查(A-1)樣品分析結果顯示，表層土壤重金屬鋅、鉻、鎳、銅及 TPH (C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>) 濃度超過土壤污染管制標準，受污染土壤深度約達地表下 60 公分(表 4-1)。其中重金屬污染以鋅最嚴重濃度達 52167 mg/kg，石油碳氫化合物污染亦非常嚴重，TPH 高達 136,753 mg/kg，顯示過去操作廢油回收及提煉造成表層土壤之嚴重污染，由土壤樣品不同深度之層析圖譜研判，污染場址土壤樣品之層析圖譜顯示石化產品典型之直鏈烷及支鏈烷模式，與環保局所提供之背景資料相符(圖 4-9 及 4-10)。

表4-1 補充調查樣點A-1土壤重金屬及TPH檢測結果

採樣深度 (cm)	污染 物	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	TPH
	分析 方法	NIEA S361.63B						NIEA S703.61B
0-60		1.678	<b>2765</b>	<b>1204</b>	<b>1268</b>	57.83	<b>52167</b>	<b>136752</b>
60-120		0.572	8.378	14.74	27.54	7.178	103.3	804.4
120-180		0.750	9.339	12.33	28.45	7.178	92.39	-
180-240		0.256	10.06	12.23	27.62	6.667	94.39	-
土壤污染管制標準		20	250	400	200	2000	2000	1000

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。

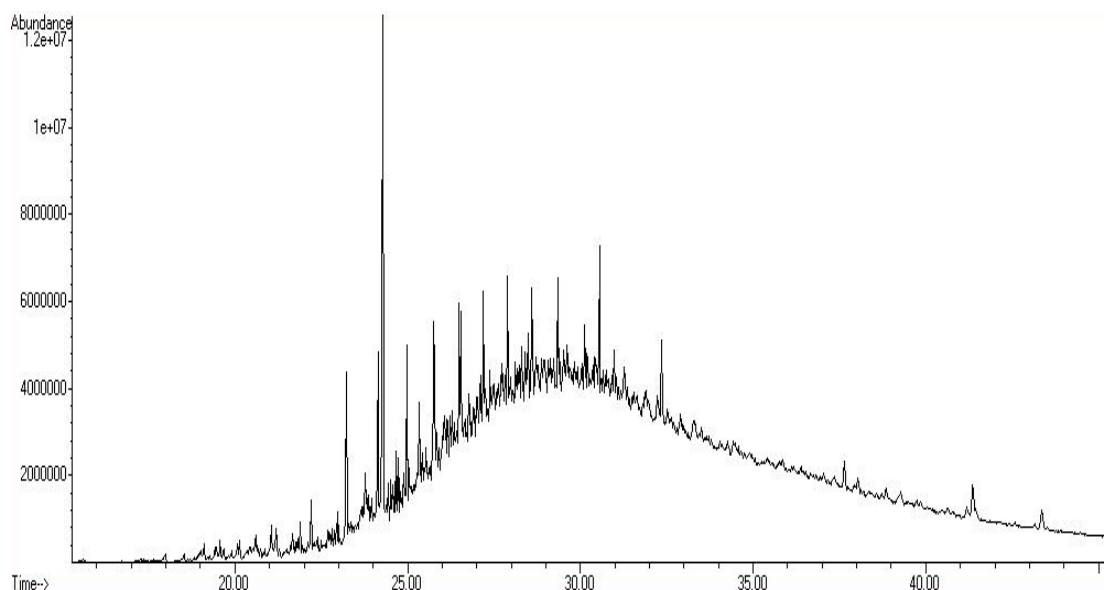


圖 4-9 污染補充調查土壤樣品(0-60 公分)之 TPH 層析圖譜(C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>)

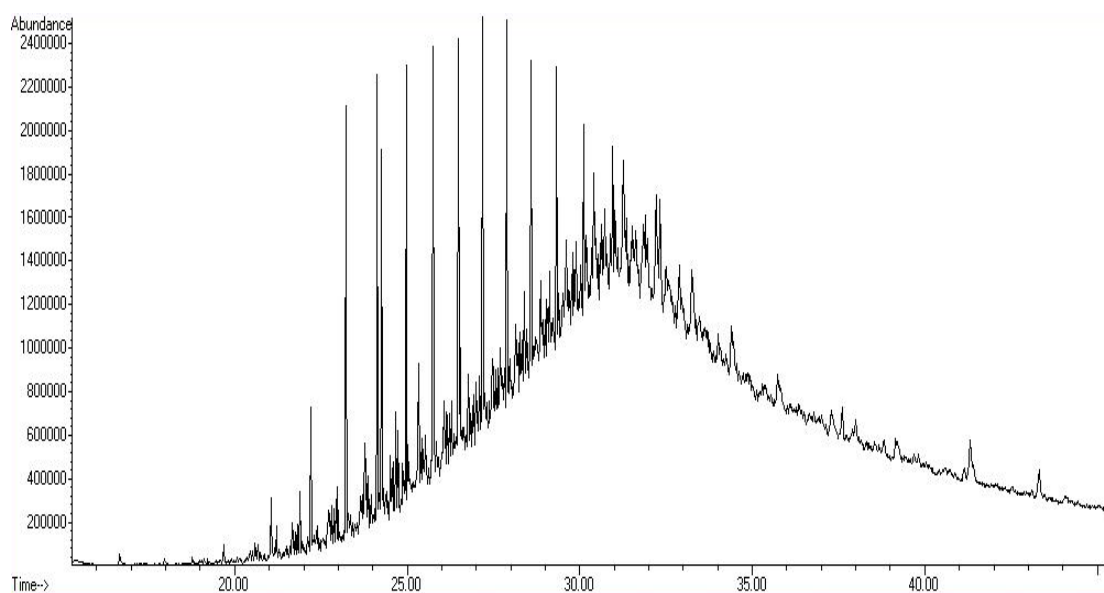


圖 4-10 污染補充調查土壤樣品(60-120 公分)之 TPH 層析圖譜(C<sub>10</sub>~C<sub>40</sub>)

## 2. 土壤理化性質調查

由於本場址之地勢平坦，土地利用亦無差異，故理化性質調查之採樣規劃，針對高污染潛勢區進行採樣，採樣深度為 240cm，每層分別採集 0-60、60-120、120-180 及 180-240 cm 四個土層。分析項目分別為 pH、有機碳含量及含水率等(如表 4-2)。分析結果顯示表層土壤有機碳含量高達 22.8%，顯現廢油洩漏之影響，土壤 pH 值為中性偏弱鹼。

表 4-2 土壤含水率、有機碳含量及 pH 檢測結果

深度(cm)	含水率(%)	有機碳含量(%)	pH
0-60	22.8	22.8	7.67
60-120	9.83	3.09	7.80
120-180	6.64	2.00	7.95
180-240	7.98	1.94	8.02

#### 四、生物復育施作圈界

場址在清理完成後進行整地，其方法係以挖土機進行翻土、破碎與整平，耕犁深度約為 60 cm。此舉使土壤疏鬆，增進空氣交換與水分傳輸，有益於後續之生物活動與植物生長(圖 4-11)。由於本計畫係以公告污染場址為範圍，依據歷次調查結果及本計畫執行初期整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，規劃六個試驗區，其中 CK 代表無污染之對照區(Control)，其餘五區為處理區，其中 BP1~BP3 代表同時進行生物與植生復育之試驗區(Bio-phytoremediation)，而 PR1 與 PR2 則為進行植生復育(Phytoremediation)之試驗區。

生物復育施作首先進行木板圈界，係為施放蚯蚓以進行生物復育之用，在整地期間發現地面下仍有廢棄油桶，此部分不在預定木板圈界範圍裡。在本場址規劃分為三個生物復育施作實驗樣區，分別為 BP1、BP2、及 BP3，此三區亦同時為進行植生復育之試驗區，將此三實驗樣區以衛星定位如表 4-3 所示，生物復育每一樣區為 6×6 公尺之方型樣區，深度為 1.9 公尺(如圖 4-12)。



圖 4-11 場址整地後現況

表 4-3 樣區圈界進行衛星定位

樣區編號	座標(TWD97, m)	
	橫坐標(X)	縱坐標(Y)
BP1	196642	2515810
BP2	196638.44	2515798.42
BP3	196571	2515801



BP1



BP2



BP3

圖 4-12 生物及植生復育樣區建置--BP1（上左）、BP2（上右）及 BP3（下）

## 五、生物復育試驗施作

### 1. 選擇蚯蚓物種

研究不同物種對污染物之反應應該考慮生態棲位之差異，本次研究採用 *Eisenia fetida* 此種蚯蚓作為復育土壤石化污染物。*Eisenia fetida* 為歐洲常用進行土壤污染物檢測之物種，文獻回顧顯示其具有累積及降解石化污染物之能力(Parrish et al. 2005)。*E. fetida* 也是國際土壤標準毒理測試使用之物種(ISO, 1993, 1998；OECD, 2004)，喜愛生存於堆肥和糞肥中等富含有機質的環境，並非存在於一般土壤的品種(Bouché, 1972)。該物種目前也被引入台灣，用途則多作為魚餌之用，釣具店稱之為「紅蚯蚓」(如圖 4-13)。



圖 4-13 生物復育所使用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)

### 2. 蚯蚓培育

*Eisenia fetida* 蚯蚓物種在一般釣具行購得，僅以紅蚯蚓稱之，購買時以單盒秤斤販賣。*Eisenia fetida* 體長約 3-5 cm，寬度約 1-3 mm，具 32-37 環節，卵巢一對出現於 13 體節，10-11 體節具兩對睪丸與兩對受精囊 (spermathecae)，雄生殖孔則位於第 15 體節。對於本計畫所需使用個體，在購入蚯蚓後，於實驗室持續培育該種蚯蚓至少 1 週，以馴化及穩定試驗個體之品質與來源。

### 3. 蚯蚓分解污染土壤研究

本實驗為了解蚯蚓對於石化污染之土壤之復育能力，進行現地實驗，以了解蚯蚓對於石化污染物之移除能力。就現地試驗之規劃，依據污染物範圍及濃度在污染場址劃分不同區塊(BP1、BP2、BP3)，5月15日及9月7日分別植入蚯蚓，每一區塊施放約 5.4 公斤，並以米糠拌入土壤，提供蚯蚓較佳生長環境(如圖 4-14)，施用後並定時澆水，提供蚯蚓潮濕生長的土壤環境。

實驗初始階段分別自各樣區取樣表土樣品三個，經萃取後分析 TPH 濃度，各區 TPH 濃度範圍分別為 BP1 區-45076-71978 mg/kg、BP2 區-3887-9670 mg/kg 及 BP3 區-5881-166708 mg/kg，BP3 區顯示最高 TPH 濃度且濃度變異最大，BP2 相對於其他各區 TPH 濃度較低。

施放蚯蚓後進行定期的土壤採樣(如圖 4-15)。由於蚯蚓具備吃土、鑽土行為會增進土壤通風，讓氧氣進入土壤縫隙中，可促進土壤中微生物的活動，進而增進土壤中 TPH 的降解機會。



圖 4-14 生物復育樣區--BP1、BP2 及 BP3 樣區植入蚯蚓及施灑米糠



圖 4-15 生物復育樣區--BP1、BP2 及 BP3 樣區採樣

#### 4. 石化分解菌施用

先期實驗以搖瓶試驗評估各石化分解菌對污染物的分解能力，發現石化分解菌(*Pseudomonas sp.* NKNU01)具降解 TPH 潛勢，因此在實驗室大量培養後，配合蚯蚓實驗施作的區隔，於 8 月 13 日運送至現場施用於 BP1、BP2 及 BP3 區塊，並於施用後定期灑水及提供營養鹽，使微生物有較適生長環境(圖 4-16)。



圖 4-16 生物復育樣區---BP1、BP2 及 BP3 樣區施用石化分解菌

### 5. 土壤總石油碳氫化合物分析結果

土壤總石油碳氫化合物分析結果列於表 4-4 及 4-5，表 4-4 測值為未執行復育前，三樣區表層土所測出總石油碳氫化合物濃度，在實驗初始階段分別自各樣區取樣表土土壤樣品三個，經萃取後分析 TPH 濃度，以了解各區 TPH 濃度範圍，分別為 BP1 區 45076-71978 mg/kg、BP2 區 3887-9670 mg/kg 及 BP3 區 5581-166708 mg/kg，BP3 區顯示最高 TPH 濃度，較接近新發現嚴重油污染區域，且濃度變異最大，BP2 相對於其他各區 TPH 濃度較低。在實驗初始階段三樣區皆超過土壤污染管制標準。

表 4-5 測值為執行生物復育後，施用蚯蚓後定期採樣三樣區(分別為蚯蚓施放後 7 日、90 日(3 個月)、及 150 日(5 個月))在 30、60、及 100 公分深度土壤所測出總石油碳氫化合物濃度。由結果可發現各樣區污染物不僅累積於表層土，其深度皆可達 100 公分。就同一深度而言，三個生物復育樣區 TPH 濃度隨著時間變化，在歷經五個月後呈現降低趨勢，於監測結果發現 BP1 及 BP2 樣區，TPH 有明顯移除效果(圖 4-17 及圖 4-18)，TPH 減量可達 41%(BP1-1-100)至大於 99%(BP2-1-30、BP2-1-100，BP2-2-30)，BP2 樣區中移除效果明顯，不同深度土壤多數已低於土壤污染管制標準。TPH 減量可達 90%，在歷經五個月以上生物復育期間，BP2 樣區中不同深度土壤多數已低於土壤污染管制標準。

BP3 為高污染樣區，其中 BP3-1 樣點中土壤在 60 cm 及 100 cm 深度在歷經五個月後濃度仍分別高達 18365 及 63267mg/kg，整體而言 TPH 下降百分比較 BP1 及 BP2 樣區為低(圖 4-19)，在 BP3 高污染樣區，TPH 減量為 29%(BP3-2-60)至 96%(BP3-2-30)，可能原因為高污染區不利於生物生長，甚至由於油污染氣味造成蚯蚓竄逃，導致生物量減少影響移除效果。

植生復育實驗區中僅執行植生復育的樣區(如 PR1、PR2)，由於須俟植栽生長至一段期間方進行土壤採樣，因此於實驗後期始進行 TPH 分析(表 4-5)，結果顯示除 CK 樣區之外，其他樣區濃度皆超過土壤污染管制標準。

表 4-6 為各樣區土壤含水率、有機碳含量檢測結果，在高污染樣區 BP3 中有機碳含量高達 27.8%，顯現廢油洩漏之影響。

表4-4 實驗初期各樣區表層土中總石油碳氫化合物檢測

樣區	編號	1	2	3
	分析方法	NIEA S703.61B		
	濃度單位	mg/Kg		
BP1		<b><u>71977.7</u></b>	<b><u>48863.0</u></b>	<b><u>45075.5</u></b>
BP2		<b><u>9670.48</u></b>	<b><u>3887.12</u></b>	<b><u>4285.87</u></b>
BP3		<b><u>5581.28</u></b>	<b><u>110157</u></b>	<b><u>166708</u></b>
偵測極限(MDL)		15		
土壤污染管制標準		1000		

註:測值為粗黑字體且下標線者乃超過土壤污染管制標準

表 4-5 各採樣點土壤總石油碳氫化合物監測結果

採樣點- 深度(cm)	監測時間 (蚯蚓施放後)	7 天	3 個月	5 個月
	分析方法	NIEA S703.61B		
	濃度單位	mg/Kg		
BP1-1-30		<b><u>69074.0</u></b>	<b><u>36640.6</u></b>	<b><u>4050.85</u></b>
BP1-1-60		<b><u>60939.3</u></b>	<b><u>59276.9</u></b>	<b><u>2073.61</u></b>
BP1-1-100		<b><u>42008.6</u></b>	<b><u>94231.7</u></b>	<b><u>24731.3</u></b>
BP1-2-30		<b><u>46026.1</u></b>	<b><u>37585.8</u></b>	<b><u>2594.29</u></b>
BP1-2-60		<b><u>23951.7</u></b>	<b><u>2961.84</u></b>	<b><u>3401.92</u></b>
BP1-2-100		<b><u>51152.8</u></b>	<b><u>5357.88</u></b>	<b><u>10046.3</u></b>
BP2-1-30		<b><u>10672.9</u></b>	<b><u>5110.30</u></b>	N.D.
BP2-1-60		<b><u>3511.37</u></b>	737.925	180.239
BP2-1-100		<15	113.786	N.D.
BP2-2-30		<b><u>10380.5</u></b>	<b><u>2576.38</u></b>	122.857
BP2-2-60		764.138	195.567	693.001
BP2-2-100		<b><u>14877.8</u></b>	<b><u>1249.26</u></b>	<b><u>1050.38</u></b>
BP3-1-30		<b><u>76524.4</u></b>	<b><u>55768.2</u></b>	<b><u>11653.9</u></b>
BP3-1-60		<b><u>151021</u></b>	<b><u>105722</u></b>	<b><u>18365.3</u></b>
BP3-1-100		<b><u>169375</u></b>	<b><u>71907.2</u></b>	<b><u>63266.6</u></b>
BP3-2-30		<b><u>16779.2</u></b>	<b><u>11481.3</u></b>	706.210
BP3-2-60		<b><u>11193.4</u></b>	<b><u>2547.92</u></b>	<b><u>8000.57</u></b>
BP3-2-100		<b><u>7420.68</u></b>	<b><u>4411.22</u></b>	<b><u>2374.86</u></b>
偵測極限(MDL)		15		
土壤污染管制標準		1000		

註:測值為粗黑字體且下標線者乃超過土壤污染管制標準

表 4-5(續)

採樣點-深度(cm)	監測時間 (蚯蚓施放後)	7 天	3 個月	5 個月
	分析方法	NIEA S703.61B		
	濃度單位	mg/Kg		
PR1-1-30	-	-	<b><u>28259.5</u></b>	<b><u>3224.45</u></b>
PR1-1-60	-	-	<b><u>9756.31</u></b>	<b><u>2944.80</u></b>
PR1-2-30	-	-	<b><u>17290.5</u></b>	201.064
PR1-2-60	-	-	<b><u>51720.5</u></b>	42.6733
PR2-1-30	-	-	<b><u>42519.6</u></b>	468.780
PR2-1-60	-	-	<b><u>73660.8</u></b>	<b><u>1300.91</u></b>
PR2-1-100	-	-	<b><u>34554.7</u></b>	436.234
PR2-2-30	-	-	<b><u>65827.3</u></b>	<b><u>5601.67</u></b>
PR2-2-60	-	-	<b><u>23475.9</u></b>	<b><u>17753.8</u></b>
PR2-2-100	-	-	<b><u>73660.8</u></b>	<b><u>1051.05</u></b>
CK-1-30	-	-	N.D.	N.D.
CK-1-60	-	-	N.D.	N.D.
CK-1-100	-	-	N.D.	N.D.
CK-2-30	-	-	N.D.	N.D.
CK-2-60	-	-	N.D.	N.D.
CK-2-100	-	-	N.D.	N.D.
偵測極限(MDL)		15		
土壤污染管制標準		1000		

註:測值為粗黑字體且下標線者乃超過土壤污染管制標準

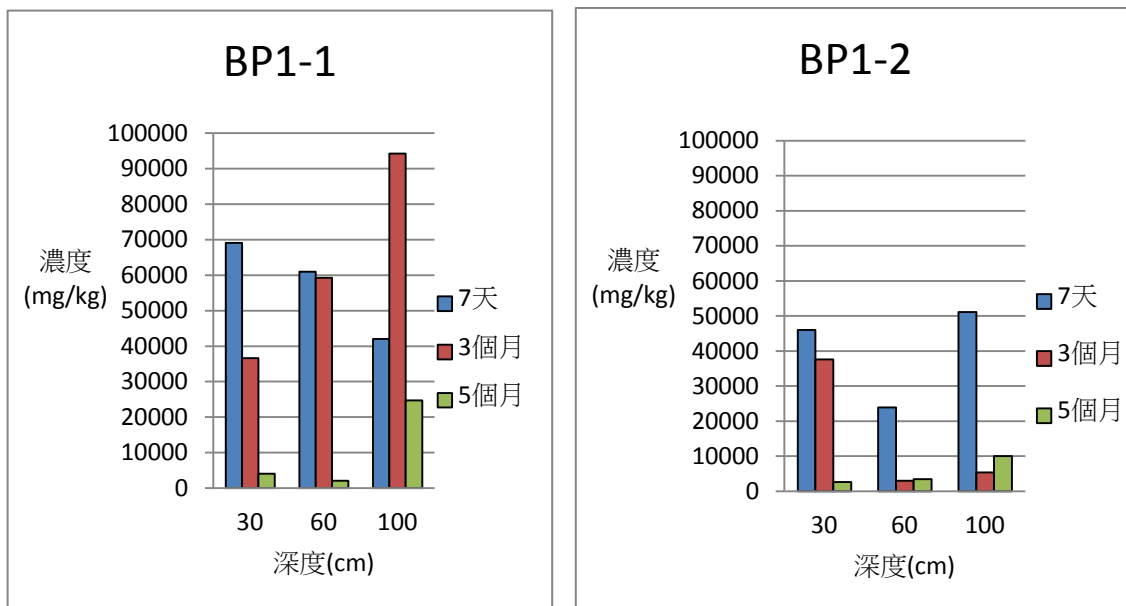


圖 4-17 生物復育樣區---BP1 樣區 TPH 濃度變化

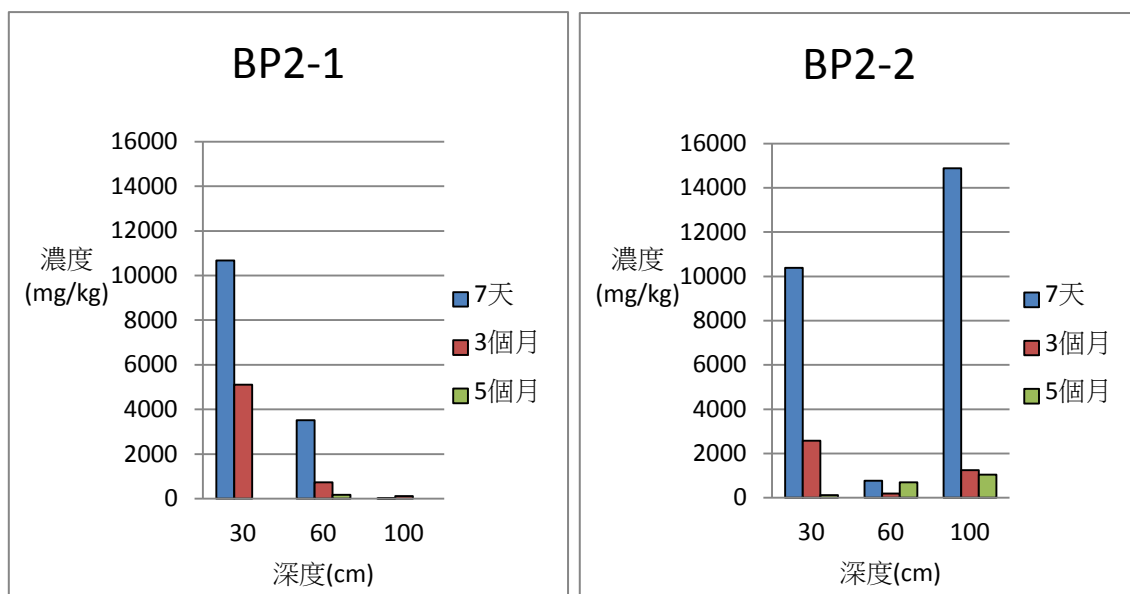


圖 4-18 生物復育樣區---BP2 樣區 TPH 濃度變化

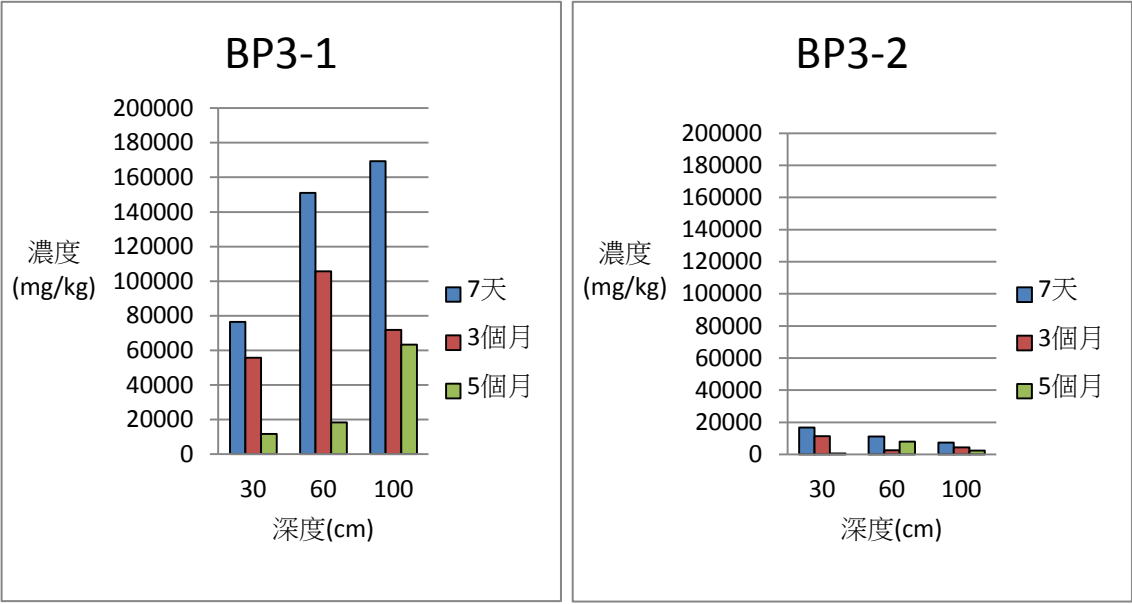


圖 4-19 生物復育樣區---BP3 樣區 TPH 濃度變化

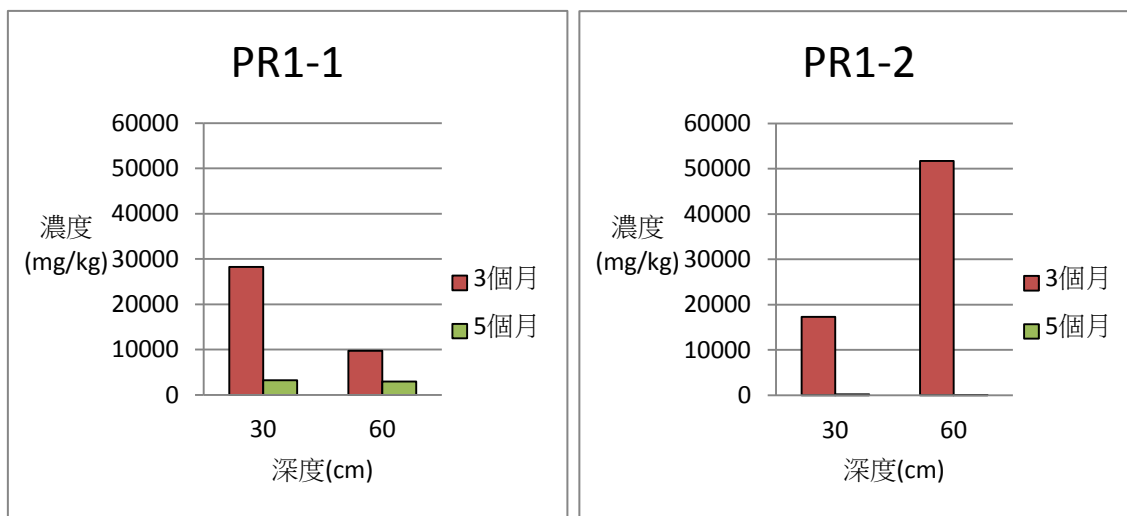


圖 4-20 植生復育樣區---PR1 樣區 TPH 濃度變化

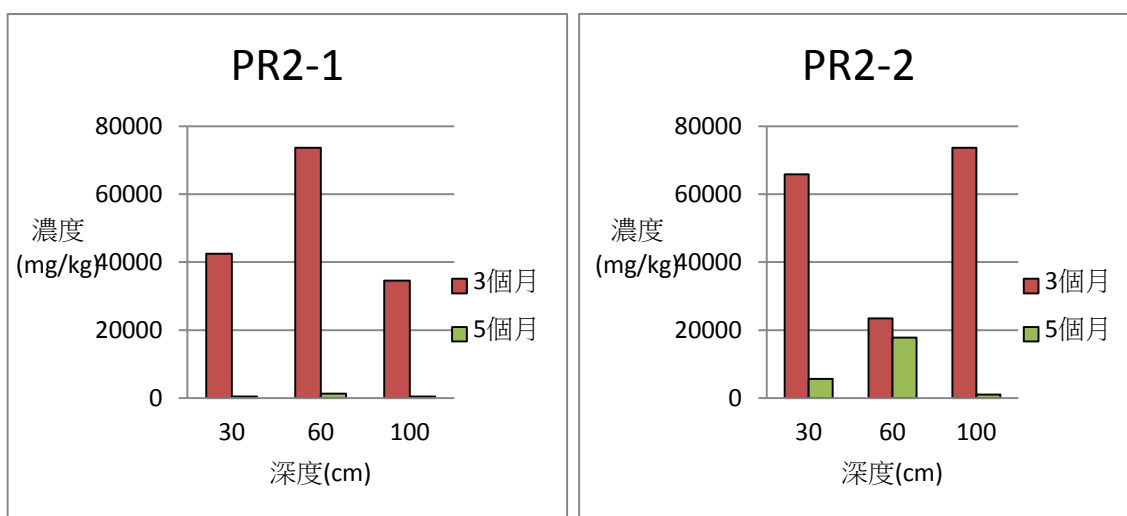


圖 4-21 植生復育樣區---PR2 樣區 TPH 濃度變化

表 4-6 土壤含水率、有機碳含量檢測結果

採樣點-深度(cm)	含水率(%)			有機碳含量(%)		
監測時間 (蚯蚓施放後)	7 天	3 個月	5 個月	7 天	3 個月	5 個月
BP1-1-30	15.3	17.2	24.3	12.0	7.97	14.7
BP1-1-60	20.0	19.6	25.4	10.4	12.0	14.6
BP1-1-100	25.9	27.0	25.8	9.71	21.4	12.4
BP1-2-30	15.4	18.9	15.8	9.05	8.92	8.07
BP1-2-60	15.6	17.0	19.3	7.75	5.60	9.78
BP1-2-100	22.3	24.4	18.6	11.5	6.35	12.1
BP2-1-30	15.8	21.3	14.4	6.55	5.97	4.79
BP2-1-60	17.8	18.2	15.4	5.85	4.66	6.31
BP2-1-100	17.2	17.5	14.1	4.35	4.27	3.95
BP2-2-30	13.4	19.0	14.1	6.15	5.67	4.95
BP2-2-60	15.4	18.9	12.5	4.90	4.69	6.19
BP2-2-100	22.2	23.0	21.8	7.42	5.35	13.2
BP3-1-30	18.6	20.8	19.4	13.3	14.2	16.7
BP3-1-60	18.6	28.1	17.2	27.0	12.4	12.2
BP3-1-100	21.2	21.5	18.5	27.8	14.1	19.1
BP3-2-30	13.4	20.2	14.3	8.17	6.65	5.94
BP3-2-60	17.1	19.5	18.5	7.99	5.37	7.96
BP3-2-100	14.8	14.7	14.4	5.29	3.93	4.57
PR1-1-30	-	30.8	29.4	-	16.6	18.6
PR1-1-60	-	24.7	29.8	-	18.8	18.2
PR1-2-30	-	21.9	18.2	-	12.5	8.93
PR1-2-60	-	16.3	16.1	-	7.85	6.14
PR2-1-30	-	22.7	29.9	-	11.2	8.40
PR2-1-60	-	19.5	21.0	-	7.16	7.54
PR2-1-100	-	18.6	9.7	-	5.95	5.90
PR2-2-30	-	20.5	19.9	-	9.37	10.7
PR2-2-60	-	21.4	34.6	-	8.63	26.3
PR2-2-100	-	20.7	18.2	-	19.9	5.29
CK-1-30	-	19.3	17.7	-	4.51	4.13
CK-1-60	-	19.0	16.9	-	4.34	3.87
CK-1-100	-	16.9	15.2	-	3.88	3.71
CK-2-30	-	18.2	18.2	-	4.31	4.41
CK-2-60	-	18.6	16.4	-	3.91	3.73
CK-2-100	-	15.8	11.9	-	3.32	3.03

## 六、植生復育試驗施作

### 1. 土壤重金屬分析結果

本場址五個處理區土壤重金屬分析結果列於表 4-7。由各元素之測值可知，本場址五個處理區之主要污染物為 Zn、Cr、Cu、Ni，其中以 Zn 之濃度最高。四種重金屬含量超過土壤污染管制標準者甚多，且污染物不僅累積於表層土壤，其深度皆可達 100 公分。至於對照區之測值則皆遠低於土壤污染管制標準，屬一般正常土壤之含量。此結果與各環保單位之歷次調查結果相符。

### 2. 白楊樹與太陽麻生育調查成果

本場址各試驗區白楊樹之生育調查數據列於表 4-8 至表 4-11；而全區生長狀況如圖 4-22 所示，各試驗區生長狀況則如圖 4-23 所示。由表中資料可知，第一次調查時之高度介於 62~75 公分，各區差異不大，而對照區之平均高度為各區量測值之中數。第二次調查時，對照區之高度明顯高於其他各區，顯然對照區以外各區之白楊樹仍在適應土壤中之污染物，故發育略為遲緩。第三次及第四次之結果則顯示，BP1 及 BP2 兩區之高度已大於 CK，顯然已逐漸適應污染物。而重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其初始株高與 BP1 及 BP2 相當，但後續之生長卻較緩慢，是否受較高污染物含量之影響，有待後續觀察。

表 4-12 為白楊樹四次生育調查平均值之彙整表，由栽植日起至第四次調查日（十月中旬）共約四個月，其成長率達 55~213%，但在高污染區 BP-3 白楊樹成長率較低，整體而言在本試驗中白楊樹為生長快速之植物，加以其對污染物之吸收累積效果，未來將可藉由定期修剪與移除植體而達到改善污染之目的。

表 4-7 土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/Kg)					
BP1-1-30	223	<b><u>29062</u></b>	N.D.	<b><u>330</u></b>	<b><u>478</u></b>	<b><u>476</u></b>
BP1-1-60	138	<b><u>36232</u></b>	N.D.	<b><u>476</u></b>	<b><u>780</u></b>	<b><u>1030</u></b>
BP1-1-100	139	<b><u>41195</u></b>	N.D.	<b><u>535</u></b>	<b><u>953</u></b>	<b><u>1293</u></b>
BP1-2-30	76.6	<b><u>16977</u></b>	N.D.	<b><u>283</u></b>	<b><u>612</u></b>	<b><u>406</u></b>
BP1-2-60	93.3	<b><u>45856</u></b>	N.D.	<b><u>576</u></b>	<b><u>990</u></b>	<b><u>1133</u></b>
BP1-2-100	87.9	<b><u>44893</u></b>	N.D.	<b><u>506</u></b>	<b><u>943</u></b>	<b><u>940</u></b>
BP2-1-30	45.2	<b><u>5666</u></b>	N.D.	105	158	175
BP2-1-60	72.7	<b><u>6146</u></b>	N.D.	103	151	225
BP2-1-100	65.0	<b><u>6812</u></b>	N.D.	114	173	209
BP2-2-30	47.1	<b><u>8813</u></b>	N.D.	153	<b><u>301</u></b>	175
BP2-2-60	127	<b><u>35625</u></b>	N.D.	<b><u>396</u></b>	<b><u>714</u></b>	<b><u>538</u></b>
BP2-2-100	137	<b><u>39161</u></b>	N.D.	<b><u>462</u></b>	<b><u>788</u></b>	<b><u>604</u></b>
BP3-1-30	78.1	<b><u>30090</u></b>	N.D.	<b><u>433</u></b>	<b><u>1016</u></b>	<b><u>582</u></b>
BP3-1-60	92.0	<b><u>29303</u></b>	N.D.	<b><u>426</u></b>	<b><u>1076</u></b>	<b><u>546</u></b>
BP3-1-100	94.1	<b><u>31165</u></b>	N.D.	<b><u>477</u></b>	<b><u>1206</u></b>	<b><u>580</u></b>
BP3-2-30	52.0	<b><u>8100</u></b>	N.D.	<b><u>367</u></b>	<b><u>528</u></b>	233
BP3-2-60	55.6	<b><u>9784</u></b>	N.D.	<b><u>311</u></b>	<b><u>674</u></b>	257
BP3-2-100	23.8	645	N.D.	34.0	59.2	35.4
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	0.033	0.033	0.033	0.023	0.100	0.433

註:測值為粗黑字體且下標線者乃超過土壤污染管制標準

表 4-7 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/Kg)					
PR1-1-30	169	<b><u>55985</u></b>	N.D.	<b><u>1206</u></b>	<b><u>4361</u></b>	<b><u>1236</u></b>
PR1-1-60	86.9	<b><u>46597</u></b>	N.D.	<b><u>947</u></b>	<b><u>3928</u></b>	<b><u>1120</u></b>
PR1-1-100	59.2	<b><u>13054</u></b>	N.D.	<b><u>209</u></b>	<b><u>550</u></b>	380
PR1-2-30	42.1	<b><u>7255</u></b>	N.D.	130	246	238
PR2-1-30	51.8	<b><u>11265</u></b>	N.D.	195	<b><u>655</u></b>	234
PR2-1-60	49.6	<b><u>9097</u></b>	N.D.	141	<b><u>306</u></b>	186
PR2-1-100	28.4	1347	N.D.	117	56.2	44.5
PR2-2-30	90.9	<b><u>42261</u></b>	1.50	<b><u>528</u></b>	<b><u>853</u></b>	<b><u>1393</u></b>
PR2-2-60	53.5	<b><u>17617</u></b>	0.367	<b><u>206</u></b>	<b><u>423</u></b>	<b><u>616</u></b>
PR2-2-100	39.6	<b><u>3896</u></b>	0.133	81.0	185	128
CK-1-30	27.4	165	N.D.	22.4	23.2	31.5
CK-1-60	28.0	154	N.D.	22.7	24.6	32.4
CK-1-100	26.5	144	N.D.	22.3	22.2	30.6
CK-2-30	25.2	88	N.D.	19.9	18.2	23.2
CK-2-60	25.8	86	N.D.	23.3	20.2	25.4
CK-2-100	24.8	83	N.D.	20.6	19.4	23.5
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	0.033	0.033	0.033	0.023	0.100	0.433

註:測值為粗黑字體且下標線者乃超過土壤污染管制標準

表 4-8 白楊樹第一次生育調查結果

試驗區	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
植株序號	(unit: cm)					
1	53	85	108	54	56	80
2	68	66	95.5	60	65	63
3	59	61	59	34	84	66
4	79	73	53	92	74	62
5	85	70	75	61	79	75
6	67	70	92	73	66	79
7	71	72	60	52	67	70
8	57	60	46.5	65	83	110
9	97	83	105	60	80	51
10	70	83	87.5	66		85
11	63	62	51			49
12	66	54	71			62
13	62.5					72
14	49					98
15	70					68
16	60					60
17	52					57
18	65					58
19	54					
20	80					
21	77					
22	63					
23	69					
24	73					
25	71					
平均	67	70	75	62	73	70

表 4-9 白楊樹第二次生育調查結果

試驗區	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
植株序號	(unit: cm)					
1	80	148	77	55.5	73	85.5
2	135	136	128.5	61.5	74	60
3	129	82.5	122	64	154	80
4	143	74.5	116	96	70	65
5	132	104	130	60.5	128.5	79.5
6	127	138	137.5	97	101	72
7	149	95	125.5	104.5	66	66
8	127	112.5	129	62.5	93.5	110
9	140.5	127	132	68	101	76
10	100	136	174	91		84.5
11	106	88	144			75.5
12	112.5	125	112			57.5
13	113					65
14	101					71
15	158					86
16	90.5					102
17	94					71
18	118					55
19	113					
20	145					
21	119					
22	106					
23	144					
24	123					
25	160					
平均	124	114	127	76	96	76

表 4-10 白楊樹第三次生育調查結果

試驗區	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
植株序號	(unit: cm)					
1	121.5	205.5	115	53	96	116.5
2	206	195	197	61	158	65
3	127	106.5	74	120.5	229	129.5
4	208	102	176	98	70	117
5	142	176	209	62	182	107
6	174	198.5	231	97	180	70
7	217	163	155	146.5	65.5	64
8	175	183	220	65	98.5	107.7
9	136	154	199	72	160.5	162.5
10	135	207	266	138.6		84
11	157	153	230			88
12	126	175	176			58.7
13	89					122
14	165					69.5
15	123					184.5
16	111					117.5
17	125					92
18	176					(補植)
19	109					
20	180					
21	127					
22	126					
23	150					
24	166.5					
25	168					
平均	150	168	187	91	138	103

表 4-11 白楊樹第四次生育調查結果

試驗區	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
植株序號	(unit: cm)					
1	121	204	119	55	96.5	126
2	219	190	240	60	201	91
3	127	108	70	142	287	174
4	250	103.5	195	98	72.5	165
5	146	200	37	61	171	125.5
6	203.5	237	240	100	226	50
7	225.5	202.5	158	146	72	62.5
8	178	215	265	65	101	105
9	137	202	223	73.5	195	199
10	153	238	298	158		82
11	158	176.5	280			93
12	128	193	202			31
13	(補植)					146
14	183					22
15	226					185.5
16	109.5					143
17	121.5					92.5
18	221					144
19	130					
20	183					
21	142					
22	126					
23	138.5					
24	162					
25	168					
平均	165	189	194	96	158	113

表 4-12 白楊樹四次生育調查平均值彙整表

試驗區		CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
第一次	(cm)	67	70	75	62	73	70
第二次		124	114	127	76	96	76
第三次		150	168	187	91	138	103
第四次		165	189	194	96	158	113
成長率	%	146	170	213	55	116	61

註：成長率=[（第四次測值－第一次測值）÷第一次測值]×100



圖 4-22 全區白楊樹生長狀況



圖 4-23 試驗區白楊樹生長狀況

(由上而下，由左而右分別為 BP1、BP2、BP3、PR1、PR2 及 CK)

各區太陽麻植栽狀況如圖 4-24 所示，收成後之植株照片如圖 4-25 所示，而其生育調查數據則列於表 4-13。表中數據指出，無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而在五個處理區中，重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其測值呈現較低之現象，與白楊樹之趨勢相同，可見污染物對兩種植物之發育皆有抑制之可能，值得持續觀察。

總結言之，雖然各區白楊樹與太陽麻之發育略有差異，但兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善效果試驗。



BP1



BP2



BP3

圖 4-24 生物復育樣區太陽麻植栽狀況--BP1（上左）、BP2（上右）及 BP3（下）



圖 4-25 試驗區太陽麻生長狀況

表 4-13 太陽麻生育調查結果

編號	株高 (cm)	濕重(g)	乾重(g)
		(g)	
CK	152	56	21
BP1	101	21	6
BP2	118	17	7
BP3	96	18	6
PR1	82	11	5
PR2	60	10	2

註：表中各植為 10 顆植株之平均值

### 3. 白楊樹光合潛力測定結果

表 4-14 乃白楊樹光合潛力之測定結果，表中測值指出，除 BP2 有兩棵之測值略低外，其餘各顆測值皆相當，而平均值亦然。由對照區與處理區植物相似之光合潛力觀之，白楊樹確實具有污染耐受能力。

表 4-15 為試驗區白楊葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益( $F_v/F_m$ )測定結果。在植物生理學上， $F_v/F_m$  代表光合系統 II 之最大光化學潛能，可用來當作植物是否遭受逆境之指標，供評估其健康狀態。

對健康的植株而言，此  $F_v/F_m$  數值幾乎是個常數 ( $0.832 \pm 0.004$ )，但遭到傷害的植物，此數值會降低，若低於 0.725 則屬顯著受害之情況(Criticchley 1998)。由表中數據可看出，各處理區之植株均屬健康範圍。由於光合作用為植物之重要生理作用，而葉綠素又為光合作用之生化工廠，由於光合潛力及  $F_v/F_m$  兩項測值都顯示白楊樹之生理作用正常，足證其對試驗場址之污染物確有良好之耐受力與適應力，為本場址合適之植生復育樹種。

表 4-14 試驗區白楊樹光合潛力測定結果

植株 序號	光合潛力( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
1	25.6	24.0	26.2	25.9	24.1	27.1
2	21.7	26.0	17.1	23.0	24.3	27.4
3	24.0	25.1	14.9	27.0	23.5	25.9
4	26.0	23.9	27.7	23.7	24.9	27.6
mean± SE	24.3±1.0	24.8±0.5	21.5±3.2	24.9±0.9	24.2±0.3	27.0±0.4

表 4-15 試驗區白楊葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益

植株 序號	最大光化學效益(Fv/Fm)					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
1	0.823	0.827	0.821	0.801	0.836	0.778
2	0.817	0.822	0.825	0.814	0.825	0.815
3	0.787	0.809	0.806	0.821	0.820	0.815
4	0.817	0.817	0.818	0.825	0.822	0.827
mean±	0.811±	0.818±	0.817±	0.815±	0.825±	0.809±
SE	0.008	0.004	0.004	0.005	0.004	0.011

#### 4. 植體重金屬分析結果

白楊樹之重金屬分析結果列於表 4-16，此結果指出，在栽種初期各區之重金屬含量差異不大，而第二次分析值則發現，污染量最高之鋅，在各試驗區植體中有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。至於太陽麻之分析值則列於表 4-17。由測值可知，根之含量大於地上部，而且與白楊樹之結果相似，鋅在地上部之吸收累積量最大，鎳次之。本場址之主要污染物為 Zn、Cu、Cr、Ni，而植株之分析結果顯示，白楊樹與太陽麻之重金屬含量依序為  $Zn > Cu > Ni > Cr$ ，此結果與與 Kabafa-pendias 及 Pendias 研究所得，微量元素被植物攝取之容易度依序為  $Cd > Zn > Hg > Cu > Pb > As > Ni > Cr$  一致。亦與 Dean(2006)所指，土壤金屬被植物攝取之轉換因子(Transfer factor)由大而小為  $Mn > Zn > Cd > Cu > Pb$  相符。而白楊樹對重金屬之良好植生復育效果亦與其他研究結果一致(Burken and Schnoor, 1998；Sebastiani et al., 2004)。

表 4-16 白楊樹葉部之重金屬含量

項目 標號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	(mg/kg)					
第一次樣品						
MDL	1.25	0.250	0.100	2.25	1.25	2.88
CK	8.54	64.2	0.371	4.58	7.30	1.48
BP1	10.7	77.7	0.494	4.45	7.41	2.35
BP2	13.6	112	0.623	7.97	23.7	3.86
BP3	10.3	107	0.498	6.23	6.85	1.87
PR1	7.12	64.0	0.250	4.00	6.49	0.624
PR2	10.6	111	0.249	4.36	4.98	1.37
第二次樣品						
CK	9.95	609	1.42	8.71	1.25	N.D.
BP1	11.2	2261	0.477	23.7	6.25	5.00
BP2	10.0	1200	0.636	15.0	3.75	N.D.
BP3	42.5	2036	0.714	15.0	6.25	N.D.
PR1	12.5	2361	0.477	22.5	1.25	N.D.
PR2	8.74	1748	0.635	16.2	1.25	N.D.

表 4-17 太陽麻植體之重金屬含量

項目 編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	(mg/kg)					
地上部						
MDL	1.25	0.250	0.100	2.25	1.25	2.88
CK	9.99	44	0.397	7.49	N.D.	N.D.
BP1	17.4	461	N.D.	15.0	6.23	N.D.
BP2	10.0	200	N.D.	7.50	1.25	N.D.
BP3	12.5	293	N.D.	12.5	1.25	N.D.
PR1	21.1	659	N.D.	27.7	19.8	N.D.
PR2	17.5	487	0.160	22.5	12.5	3.75
根						
CK	13.7	76	0.159	26.2	61.0	N.D.
BP1	30.6	885	0.206	25.7	38.6	N.D.
BP2	56.8	515	N.D.	23.1	30.2	28.4.
BP3	30.3	440	N.D.	23.8	32.5	6.50
PR1	54.1	1083	N.D.	32.0	19.7	N.D.
PR2	42.5	1836	N.D.	53.7	48.7	N.D.

#### 5. 試驗植物改善污染之可行性評估

由上述結果可知，本場址受油品及重金屬之污染，而白楊樹與太陽麻之生育調查、光合潛力及葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益測定結果都顯示，污染區植物生長狀況良好，且與對照區無明顯落差，顯然可以忍受並適應污染場址之生長條件。此外，兩種植體重金屬含量之測值都顯示，主要污染元素 Zn、Cu、Ni、Cr 在污染區植體中皆有大量之吸收累積，加以白楊樹生長快速，而太陽麻之生長 3~4 個月後即可採收，未來可藉由植體之修剪與移除而逐漸降低污染程度，達到改善污染之目的。

## 第五章、結論與建議

本計畫之先期工作項目包括範圍界定與圈界、現場清理、土壤污染範圍及理化性質調查、整地及土壤理化性質調整。而污染場址復育工作包括生物復育試驗施作及植生復育試驗施作。本計畫以公告污染場址為範圍，依據歷次調查結果及本計畫執行初期整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，規劃六個試驗區，其中 CK 代表無污染之對照區(Control)，其餘五區為處理區，其中 BP1、BP2 及 BP3 代表同時進行生物與植生復育之試驗區(Bio-phytoremediation)，而 PR1 與 PR2 則為進行植生復育(Phytoremediation)之試驗區，有關本計畫之具體成果為：

### 一、生物復育試驗施作

完成蚯蚓分解污染土壤研究，採用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)復育土壤石化污染物，依據污染物範圍及濃度，在污染場址劃分不同區塊(BP1、BP2、BP3)，每一區塊施放約 5.4 公斤蚯蚓，於 5 月 15 日及 9 月 7 日施放兩次，石化分解菌在實驗室大量培養後，配合生物復育實驗施作的區隔於 8 月 13 日施灑，施灑菌種為 *Pseudomonas* sp. NKNU01。

規劃定期土壤採樣及分析，偵測土壤之 TPH 濃度之採樣天數分別為第 7、15、30、60、90、及 150 天，評估生物復育成效，三個生物復育樣區 TPH 濃度隨著時間變化，在歷經五個月後均呈現降低趨勢，於監測結果發現 BP1 及 BP2 樣區，TPH 有明顯移除效果，TPH 減量可達 41%至大於 99%，在歷經五個月以上生物復育期間，BP2 樣區中不同深度土壤多數已低於土壤污染管制標準。BP3 為高污染樣區，TPH 減量為 29%至 96%，整體而言 TPH 下降百分比比較 BP1 及 BP2 樣區為低，可能原因為高污染區不利於生物生長，甚至由於油污染氣味造成蚯蚓竄逃，導致生物量減少影響移除效果。

### 二、植生復育試驗施作

本計畫依白楊樹生長所需之伸展空間及現場機具作業之需求，以間距 2.5 m 於場地內栽種白楊樹，總計 350 顆。而場內各試驗區之植株數量分別為 CK 25 棵，BP1 及 BP2 各 12 棵，BP3 為 10 棵，PR1 為 9 棵，PR2 為 18 棵。此外，太陽麻栽植係於六個試驗區內進行。由於種子撒播後之萌芽率不一，故單位面積之植株數亦不盡相同，惟平均數約為每平方公尺 150 棵。完成白楊樹與太陽麻

- Euliss, K., Ho, C.H., Schwab, A.P., Rock, S., Banks, M.K. 2008, Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone. *Bioresource Technology*. 99: 1961-1971.
- Gajalakshmi, S., Ramasamy, E.V., Abbasi, S.A. 2001. Potential of two epigeic and two anecic earthworm species in vermicomposting of water hyacinth. *Bioresource Technology*. 76: 177-181.
- Garg, V. K., Kaushik, P. 2005. Vermistabilization of textile mill sludge spiked with poultry droppings by an epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology*. 96: 1063-1071.
- Gevao, B., Mordaunt, C., Semple, K.T. Pearce, T.G., Jones, K.C. 2001. Bioavailability of nonextractable (bound) pesticide residues to earthworm. *Environmental Science & Technology*. 35: 501-507.
- Horn, M. A., Schramm, A., Drake, H.L. 2003. The earthworm gut: an ideal habitat for ingested N<sub>2</sub>O-producing microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*. 69: 1662-1669.
- Huang, X.D., El-Alawi, Y., Gurska, J., Glick, B.R., Greenberg, B.M. 2005. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils. *Microchemical Journal*. 81:139-147.
- Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), 2001. *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document*, Washington, D.C.
- Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), 2009. *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised*, Washington, D.C.
- ISO (International Standard Organization), 1993. Standard Number No.11268–1. Soil Quality – Effects of Pollutants on Earthworms (*Eisenia fetida*) – Part I: Determination of Acute Toxicity Using Artificial Soil Substrate. ISO, Geneva.
- ISO (International Standard Organization), 1998. Standard Number No.11268–2. Soil Quality – Effects of Pollutants on Earthworms (*Eisenia fetida*) –Part II: Method for the Determination of Effects on Reproduction. ISO, Geneva.
- Jager, T., Fleuren, R.H.E., Hogendoorn, A., Korte, G.D. 2003. Elucidating the routes of exposure for organic chemicals in the earthworm, *Eisenia andrei* (Oligochaeta). *Environmental Science & Technology*. 37: 3399-3404.
- Jager, T., Van Der Wal, L., Fleurgen, R.H.L.J., Barendregt, A., Hermens, J.L.M. 2005. Bioaccumulation of organic chemicals in contaminated soils: evaluation of bioassays with earthworms. *Environmental Science & Technology*. 39: 293-298.
- Jordahl, J.J., Foster, L., Schnoor, J.L., Alvarez, P. J. J. 1997. Effect of Hybrid Poplar Trees on Microbial Population Important to Hazardous Waste Bioremediation. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 16:1318–1321.

之栽植後定期土壤及植體採樣及分析，評估對重金屬減量之成效。白楊樹由栽植日起至第四次調查日（十月中旬）共約四個月，其成長率達 55~213%，但在高污染區 BP-3 白楊樹成長率較低，整體而言在本試驗中白楊樹為生長快速之植物，加以其對污染物之吸收累積效果，未來將可藉由定期修剪與移除植體而達到改善污染之目的。

各區太陽麻植栽狀況無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而在五個處理區中，重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其測值呈現較低之現象，與白楊樹之趨勢相同，可見污染物對兩種植物之發育皆有抑制之可能，值得持續觀察。

在栽種初期各區之重金屬含量差異不大，而第二次分析值則發現，污染量最高之鋅，在各試驗區植體中有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。至於太陽麻根之含量大於地上部，而且與白楊樹之結果相似，鋅在地上部之吸收累積量最大，鎳次之。本場址之主要污染物為 Zn、Cu、Cr、Ni，而植株之分析結果顯示，白楊樹與太陽麻之重金屬含量依序為  $Zn > Cu > Ni > Cr$ 。

總結言之，雖然各區白楊樹與太陽麻之發育略有差異，但兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善效果試驗。

本場址經現場清理、土壤污染範圍及理化性質調查、整地及生物及植生復育試驗，顯示對目標污染物具一定移除成效，未來若有延續性計畫或妥善環境管理措施，可繼續運用低耗能、低廢棄物產生之綠色整治概念於本場址之復育。

## 參考文獻

- 行政院環境保護署環境檢驗所，2007，持久性有機污染物之植生整治，環境檢驗電子報。
- 李芳胤、陳士賢，2007，土壤分析實驗手冊，新文京開發出版股份有限公司。
- 吳翊豪，2009，六種植物吸收重金屬之植生復育法研究，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
- 林浩潭、陳素文、沈季蓉、翁儵慎，2005，重金屬污染土壤以本土植物復育之探討，植物保護學會會刊，第 47 期，第 241-249 頁。
- 侯善麟，2003，結合太陽能植物及微生物的污染整治新技術-phytoremediation，三聯技術，第 49 期，第 12-18 頁。
- 賴鴻裕，盧至人，2007，植生復育重金屬污染土壤-國內研究之回顧及大豆生質能應用之探討，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊 第二十二期 第9-19頁
- An, Y-J. 2005. Assessing soil ecotoxicity of methyl tert-butyl ether using earthworm bioassay; closed soil microcosm test for volatile organic compounds. *Environmental Pollution*. 134: 181-186.
- Bohlen, P. J., Groffman, P.M., Fahey, T.J., Fisk, M.C., Suarez, E., Pelletier, D.M., Fahey, R.T. 2004. Ecosystem consequences of exotic earthworm invasion of north temperate forests. *Ecosystems*. 7: 1-12.
- Burken, J.G., Schnoor, J.L. 1998. Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees. *Environmental Science & Technology*. 32:3379-3385.
- Carman, E.P., Crossman, T.L., Gatliff, E.G. 1998. Phytoremediation of No. 2 fuel oil-contaminated soil. *Journal of Soil Contamination*. 7(4): 455-466.
- Chuang, S.C., Chen, J.H. 2002. A new record earthworm *Amyntus masatacae* (Beddard) (Megascolecidae: Oligochaeta) from Taiwan. *Acta Zoologica Taiwanica*. 13(2): 73-79.
- Collins, C. D. 2007. Implementing Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons. *Methods in Biotechnology*. 23(1): 99-108.
- Criticchley, C. 1998. Photoinhibition. In: *Photosynthesis*. A.S. Raghavendra (ed.) p.264-272. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dean, I. M, Jr. 2006. Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Additive Contaminants*. 23(1):36-48.

- Kabata-Pendias, Pendias, A. 1984. *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Florida.
- Lai, H.Y., Chen, Z.S. 2006. The influence of EDTA application on the interactions of cadmium, zinc, and lead and their uptake of rainbow pink (*Dianthus chinensis*). *Journal of Hazardous Materials*. 137: 1710-1718.
- Lukkari, T., M. Aatsinki, A. Vaisanen, J. Haimi. 2005. Toxicity of copper and zinc assessed with three different earthworm tests. *Applied Soil Ecology* 30: 133-146.
- OECD, 2004. Guideline for testing of chemical No. 222. Earthworm reproduction test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*). OECD Publications, Paris, France.
- Rentz J. A., Chapman, B., Alvarez, P.J.J., Schnoor, J.L. 2003. Stimulation of hybrid poplar Growth in petroleum contaminated soils through oxygen addition and soil nutrient amendments. *International Journal of Phytoremediation*. 5(1):57-72.
- Scott-Fordsmand, J. J., Stevens, D., McLaughlin, M. 2004. Do earthworm mobilize fixed Zinc from ingested soil? *Environmental Science & Technology*. 38: 3036-3039.
- Shen, H. P., Tsai, C.F., Tsai, S. C. 2002. Description of a new earthworm belonging to the genus *Amyntus* (Oligochaeta: Megascolecidae) from Taiwan and its infraspecific variation to elevation. *Bulletin of Zoology*. 50(1): 1-8.
- Sebastiani, L., Scebba, F., Tognetti, R. 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste. *Environmental and Experimental Botany* 52:79–88.
- Sturzenbaum, S.R., Georgiev, O., Morgan, A.J., Kille., P. 2004. Cadmium detoxification in earthworm: from genes to cells. *Environmental Science & Technology*. 38: 6283-6289.
- Sun W. H. , Lo, J.B., Robert, F.M., Ray, C., Tang, C.S. 2004. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons in tropical coastal soils I. selection of promising woody plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 11(4):260-266.
- Tang C.S. , Sun, W.H., Toma, M., Robert, F.M., Jones, R.K. 2004, Evaluation of Agriculture-Based Phytoremediation in Pacific Island Ecosystems Using Trisector Planters. *International Journal of Phytoremediation*. 6(1):17-33.
- Tsai, C.F., Shen, H.P., Tsai, S.C. 1999. On some new species of pheretimoid earthworm (Oligochaeta, Megascolecidae) from Taiwan. *Journal of National Taiwan Museum*. 52(2): 33-46.
- Whalen, J.K. 2004. Spatial and temporal distribution of earthworm patches in corn field, hayfield and forest systems of southwestern Quebec, Canada. *Applied Soil Ecology* 27: 143-151.