



行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別： 訓練)

土壤污染整治及復育訓練計畫 出國報告書

服務機關：吳文娟、姜祖農、賴九世、余素雯、
出國人 職 稱：蔡萬寶、顏己曉、鄭玲惠、曾伯昌、
姓 名：徐文宏、余建志、王立宏、蔡清旭、
劉彩玉

出國地點：荷蘭
出國期間：民國九十三年四月十二日至四月二十四日
報告日期：民國九十三年七月

行政院研考會編號欄

IS / 09302671

系統識別編號：C09302671

行政院環境保護署環境保護人員訓練所出國報告提要

報告名稱：土壤污染整治及復育訓練計畫

頁數_____頁函附件：否

主辦機關/聯絡人/電話：環保署訓練所/劉彩玉/03-4020768

出國人員/服務機關/職稱：環保署土壤及地下水污染整治基金

管理委員會副執行秘書吳文娟等十

三人，詳如內文名冊

出國類別：訓練

出國地點：荷蘭

出國期間：九十三年四月十二日至四月二十四日

報告日期：九十三年七月

分類號/目：I5 化學與環境科學

內容摘要：

本次訓練由環保署訓練所透過荷蘭貿易暨投資辦事處 (NTIO) 及荷蘭應用科學研究院 (TNO) 協助，針對荷蘭土壤及地下水污染整治技術及現況，規劃辦理是項訓練。成員包含環保署土污基管會、環境督察總隊及地方環保局相關業務承辦單位等一行 13 人，於四月十二日至四月二十四日赴荷蘭阿不丹 (Apeldoorn) 之 TNO 針對土壤及地下水污染風險評估、受污

染場址整治、復育技術、受污染土地再利用評估及政策、土壤及地下水污染相關管理組織架構與法令、整治中場址與復育後再利用場址現場觀摩等課程，透過中央與地方環保機關共同參與，除加強各權責單位間之溝通聯繫機制，並有助於提昇國內土壤及地下水污染整治技術與管制能力。

目 錄

壹、前言	1
貳、九十三年度「土壤污染整治及復育訓練班」參訓人員名單..	2
參、訓練課程表	3
肆、專題內容紀要	7
專題一、開訓典禮及訓練機構介紹.....	7
專題二、荷蘭土壤污染整治政策、法規與策略目標.....	12
專題三、荷蘭土壤污染整治復育之角色扮演.....	24
專題四、荷蘭土壤整治之技術發展與論述.....	33
專題五、荷蘭土壤污染風險評估之方法與應用.....	66
專題六、觀摩 DAF 生物整治場址.....	85
專題七、觀摩 Heijmans 污染土壤處理再利用場.....	90
專題八、歐洲案例介紹及台灣案例研討.....	91
伍、結論與建議	97

壹、前言

近年土壤與地下水污染已成為世界各先進國家關注的環保問題，鑑於我國自八十九年發布實施土壤及地下水污染整治法及陸續完成相關法規、標準建制後，藉由擷取先進國家土壤及地下水污染整治相關政策，法令、技術與經驗供國內執行業務之參考，以提昇我國土壤及地下水污染整治工作之成效。本次訓練由環保署訓練所透過荷蘭貿易暨投資辦事處（NTIO）及荷蘭應用科學研究院（TNO）協助，針對荷蘭土壤及地下水污染整治技術及現況，於今年四月十二日至四月二十四日共同規劃辦理是項訓練。參訓學員包含環保署土污基管會、環境督察總隊及地方環保局等相關業務主管及承辦人，訓練重點包括土壤及地下水污染風險評估、受污染場址整治、復育技術、受污染土地再利用評估及政策、土壤及地下水污染相關管理組織架構與法令、整治中場址與復育後再利用場址現場觀摩等課程，透過中央與地方環保機關共同參與，除加強各權責單位間之溝通聯繫機制，並有助於提昇國內土壤及地下水污染整治技術與管制能力。

貳、 環保署九十三年度土壤污染整治及復育訓練（荷蘭）班

參訓人員名單

編號	單位	職稱	職等	姓名
一	本署土污基管會	副執行秘書	十一	吳文娟
二	本署環境督察總隊	副大隊長	十	姜祖農
三	彰化縣環保局	技正	九	賴九世
四	台南縣環保局	技佐	六	余素雯
五	新竹市環保局	課長	八	蔡萬寶
六	桃園縣環保局	課長	七	顏己曉
七	台中縣環保局	技佐	五	鄭玲惠
八	宜蘭縣環保局	稽查員	六	曾伯昌
九	苗栗縣環保局	稽查員	六	徐文宏
十	南投縣環保局	技士	三	余建志
十一	台中市環保局	技士	七	王立宏
十二	雲林縣環保局	技士	五	蔡清旭
十三	本署環訓所	薦任組員	七	劉彩玉

參、環保署九十三年度土壤污染整治及復育訓練（荷蘭）課程表

日程	星期	日期	時間		課程內容
1	二	四月十三日			Arrive, transport to Apeldoorn - Briefing and orientation 抵達 Apeldoorn
2	三	四月十四日	9.00	9.15	Opening by the Director of TNO Environment, Energy and Process Innovation 開訓典禮
			9.15	10.00	Course introduction 課程介紹
			10.00	11.00	Overview of Soil and Groundwater Remediation Philosophy and Logic in the Netherlands. 荷蘭土壤及地下水整治及復育原理概論
			11.00	12.00	Soil and Groundwater Knowledge Infrastructure 土壤及地下水知識架構
			12.00	13.00	Lunch, walk
			14.00	16.00	Policy Regulation and Standards implemented on Soil and Groundwater Remediation by the Dutch Government; 荷蘭土壤及地下水整治法規及標準
			16.00	16.30	Lessons learnt, recap and feedback 復習
			16.30	17.30	Informal Drinks / Reception / Poster Session
3	四	四月十五日	7.30	9.00	leaving for RIVM 前往荷蘭政府環保部門
			9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	10.30	The regulator's role in supporting contaminated land remediation and restoration 立法者在土壤污染整治及復育中之角色
			10.30	11.30	The industries' role in supporting contaminated land remediation and restoration 產業在土壤污染整治及復育中之角色
			11.30	12.30	The consultant/contractors role in supporting contaminated land remediation and restoration 顧問公司/承包商在土壤污染整治及復育中之角色
			12.30	13.30	Lunch, walk
			13.30	14.30	The government's role in supporting contaminated land remediation and restoration 政府在土壤污染整治及復育中之角色

			14.30	15.30	The role of national and international networking 國內及國際網路之角色
			15.30	16.30	Workshop: Helping hand: The Netherlands - Taiwan 台灣案例研討
			16.30	17.00	Lessons learnt, recap and feedback 復習
4	五	四月 十六日	9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	11.30	Remediation Technology Overview 1 (hydrocarbons: oil, PAH, BTEX etc) 整治技術概論 1 (碳氫化合物: 油, PAH, BTEX 及其他)
			11.30	17.00	Site visit and Case presentation: NAM/Shell site: bioventing and anaerobic bioremediation (take away lunch) NAM/Shell 現場訪問及案例展示
			17.00	17.30	Lessons learnt, recap and feedback 復習
5	六	四月 十七日	10.00		Social Programme in the Netherlands - AMSTERDAM 社交活動
6	日	四月 十八日			Social Programme in the Netherlands - KEUKENHOF 社交活動
7	一	四月 十九日	9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	11.00	Monitoring Diffuse Contamination (heavy metals): determination of risk and measures 污染擴散之監測 (重金屬): 風險評估及對策
			11.00	12.00	Monitoring and Remediation of Dump Sites and Landfills in the Netherlands 1 荷蘭曠野傾倒及掩埋 場之監測及整治 1
			12.00	13.00	Lunch, walk
			13.00	14.00	Monitoring and Remediation of Dump Sites and Landfills in the Netherlands 2 荷蘭曠野傾倒及掩埋場之監測及整治 2
			14.00	16.00	Monitoring Diffuse Contamination (pesticides): determination of risk and measures 污染擴散之監測 (農藥): 風險評估及對策
			16.00	17.00	leaving for site visit 前往現場訪問
			17.00	18.00	Restoration of Pesticide Contaminated Soil and Groundwater,

					Case: Akzo Nobel 農藥污染之土壤及地下水之復育
			18.00	18.30	walking around the site 現場走訪
			18.30	19.00	Lessons learnt, recap and feedback 復習
			19.00	20.00	leaving for the hotel 前往旅館
8	二	四月 二十日	9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	11.30	Site Investigation and Natural Attenuation System: how to determine and use Natural Attenuation best 現場調查及天然稀釋系統
			11.30	12.30	Lunch, walk
			12.30	14.30	Natural Attenuation Cases in Europe incl. regulatory constraints 歐洲天然稀釋系統及法規限制
			14.30	17.00	Workshop: working on 2 Cases from Taiwan 台灣二個案例研討
			17.00	17.30	Lessons learnt, recap and feedback 復習
9	三	四月 二十一日	9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	11.30	Remediation Technology Overview 2 (chlorinated compounds) 復育技術概論 2 (氯化物)
			11.30	17.00	Site visit and Case presentation: DAF Truck site: anaerobic bioremediation (take away lunch) DAF Truck 現場訪問及案例展示:厭氧生物復育
			17.00	17.30	Lessons learnt, recap and feedback 復習
10	四	四月 二十二日	9.00	9.30	Day introduction 日程介紹
			9.30	11.30	Risk-based approach to remediation and the application of risk tools in The Netherlands 以風險為基礎之整治方法及荷蘭之風險工具之應用
			11.30	12.30	Assessment of Benefit and Costs (ABC-tool) introduction

					成本效益評估介紹(ABC 工具)
			12.30	13.30	Lunch, walk
			13.30	15.30	Cases in Europe 歐洲案例
			15.30	17.00	Workshop: working on 2 Cases from Taiwan 台灣二個案例研討
			17.00	17.30	Lessons learnt, recap and feedback 復習
			17.30	18.30	Review on the COURSE and Certification and Evaluation 課程復習及評量
			18.30	19.30	Informal Drinks / Reception
11	五	四月 二十三日			Depart and leave for Taiwan 返回台灣

肆、 專題內容紀要

專題一、開訓典禮及訓練機構介紹

一、開訓典禮

行政院環境保護署環訓所主辦九十三年度土壤污染整治及復育訓練班，奉 署長核定本署土污基管會副執行秘書吳文娟等十三位學員，並由吳副執行秘書擔任本訓練班之領隊，其他成員包括本署環境督察總隊中區環境督察大隊副大隊長姜祖農、彰化縣環保局技正賴九世、台南縣環保局技佐余素雯、新竹市環保局課長蔡萬寶、桃園縣政府環保局課長顏己曉、台中縣環保局技佐鄭玲惠、宜蘭縣政府環保局稽查員曾伯昌、苗栗縣環保局稽查員徐文宏、南投縣政府環保局技士余建志、台中市環保局技士王立宏、雲林縣環保局技士蔡清旭及本署環訓所薦任組員劉彩玉。

我國土壤及地下水污染整治法自民國八十九年二月二日頒布施行至今已逾四年，亦已參照美國超級基金及其他歐美之環保經驗，成立土污基管會，陸續推動我國土壤及地下水相關保護、整治及管理工作，汲取先進國家之土污防治經驗更可強化充實理念與政策規劃能力。荷蘭於歐洲各國之中，無論在重視土污整治及投注人力物力與財力上均居領先地位，特組此訓

練班以學習荷蘭經驗。

訓練機構 TNO-MEP 之所長 Dr. Wilfried Notten 首先代表該機構竭誠歡迎遠道自台灣來的訓練班，並慰問長途跋涉舟車勞頓之辛勞，同時預祝本次訓練圓滿順利成功。

本訓練班領隊吳文娟副執秘則代表全體團員及環保署感謝 TNO 提供完善親切的訓練學習環境，並表示將努力學習荷蘭數十年來在土壤及地下水污染整治復育之經驗，並相互討論，俾使貴我兩國能在此專業領域上持續交流。

Dr. Wilfried Notten 摘要介紹荷蘭應用科學研究院 TNO 總共有 300 位員工，其中環境能源及程序創新所 (MEP) 有 30 位員工，應用地質科學所有 35 位員工，土壤及地下水管理與整治研究中心有 30 位員工 (其中包括 20 位博士及超博士)，平均每年收入 1,000~1,500 萬歐元 (與新台幣之幣值比約為 40:1)。荷蘭現階段面臨之污染場址主要為含氯溶劑 PCE 及 TCE，其來自該國內乾洗業、金屬工業及化工業。本次所規劃提供之訓練課程包括：

- (一) 土壤及地下水之內部知識架構。
- (二) 荷蘭政府之土水政策與法規。
- (三) 土壤整治技術。

(四) 土壤整治之風險評估。

(五) 污染擴散之監測 (尤其在重金屬及殺蟲劑方面)。

(六) 棄置場及掩埋場之監測與整治。

荷蘭自 1976 年開始重視土壤污染問題以來，逐年均有不斷累積之整治復育經驗，尤其在 1987 年土壤保護法 (Soil Protection Act) 頒布施行以後，更是挹注大量人力與經費，相信會有相當豐富之經驗與本訓練班分享學習交流。

二、訓練機構介紹

Mr. Sjef Staps 是 TNO-MEP 的高級計畫經理，自 1999 年以來領導其工作團隊從事各種大型的生物整治計畫。同時他亦曾服務於荷蘭國家公共健康與環境所 (RIVM)，累積極豐富之土壤及地下水污染整治之實務經驗，由他來介紹 TNO 更具意義。而 Dr. Alette Langenhoff 則為一位服務於 TNO-MEP 之環境生物技術處之女性高級主管人員，其博士研究領域為利用厭氧性微生物分解環狀芳香族化合物，從事以微生物分解程序處理土壤及地下水污染物之工作長達 13 年，目前正參與荷蘭國家級之科技計畫「苯之厭氧分解計畫」，為一充滿活力、專業與親和力的女性科學家。

(一) TNO 為荷蘭文之「荷蘭應用科學研究院」之縮寫，成立

之宗旨在於強化企業與政府間創新作為之能力。

- (二) TNO 之決策高層下設管理部門除管理 15 個研究機構 (MEP 為其中之一)、6 個企業中心及 32 個科技中心外，亦組成有國防研究委員會及技術合作夥伴群組。
- (三) TNO 之研發能力包括基礎科學、科技發展、應用科學及研發技術。
- (四) TNO 為一獨立運作之研發團隊，提供政府部門與企業界之服務及扮演學術研究與實務應用之媒介與橋樑角色。
- (五) TNO 位於阿不丹 (Apeldoorn) 商業園區，擁有超過 5,500 位專業技術人員，總收入已達 4 億 5 千萬歐元，相當於 180 億新台幣。其中在土壤及地下水部分，擁有 100 位專業人員，收入達 1,000~1,500 萬歐元 (相當於 4~6 億新台幣)。
- (六) TNO 之服務項目包括：
 1. 技術及軟體開發及升級。
 2. 樣品分析及分解試驗 (擁有極先進之實驗室)。
 3. 專案計畫之管理。
 4. 提供政府及企業主技術複核之專業意見。

5. 組成土壤處理業務之組織群組。

三、結論：

TNO 頗為類似我國之工業技術研究院，惟所獲得之獨立授權與公信力，及扮演政府與企業界之協調性橋樑及管道尤超過工研院。舉凡提供荷蘭政府部門之專業建議，分析試驗之結果與報告，均具某種程度不受質疑之專業公信力，甚至提供政策、法規制定之複核意見（或稱第二意見，Second Opinion），其專業能力倍受荷蘭各界之高度肯定。

本次專業訓練涵蓋荷蘭之國家政策、法規、技術、管理、場址參觀實作及案例討論與經驗分享交流，課程十分緊湊與充實，希望全體學員認真參訓，勇於發問並充分學習交流，以達國外受訓之專業目的。

專題二、荷蘭土壤污染整治政策、法規與策略目標

一、荷蘭土壤污染整治立法政策進程

(一)前言

荷蘭土地係低於海平面以下，故有「低國度」之稱，土壤及地下水均為其重要的環境資源，由於隱藏於地下，當發生污染時，往往不易察覺，而任由污染持續與惡化，終將達到危害人類環境與破壞生態的程度。荷蘭人口約一千六百萬，土地面積約為台灣的 1.1 倍，人口密度不若台灣稠密，然其各型產業發達，如工業、農業等，造成土壤及地下水污染的問題亦相當多，有些甚至相當嚴重。荷蘭地下水水位高，地下水資源豐富，為其全國賴以維生的重要水源，然一旦土壤遭受污染，連帶地下水亦將遭受污染，故相當仰賴土壤與地下水品質，亦特別重視地下水與土壤污染整治立法及研擬政策，確保其土地及地下水資源的有效使用。

(二)內容

1. 荷蘭於 1975 年開始發現土壤及地下水污染問題嚴重，而造成之污染源多為傳統之產業，如乾洗業使用之溶劑、煤業、石油業等，而這些產業均為已存在之事實，在當今是無法有

所改變的。

2. 在 1980 年發生一件重大的污染環境事件，對社會造成很大的衝擊，一批住宅區新建的房子蓋在廢棄物堆置區上，該堆置區之前掩埋有化學物質、建築廢棄物、有機溶劑、甚至是有害廢棄物，居民在其花園中找到曝露之化學廢棄物，擔心影響健康，尤其是對孩童之威脅。
3. 荷蘭政府有鑑於陸續發現全國各地土壤及地下水污染事件，故於 1983 年訂定土壤保護法律，這是荷蘭將土壤及地下水保護立法的起步。
4. 在 2004 年荷蘭要製作標示全國各地有土壤污染的分布地點之地圖，以不同顏色區分其污染程度。荷蘭總計有 60 萬個地點有土壤污染情形，而經過勘測，非常嚴重的個案有 6 萬處需要優先整治。
5. 根據統計，整治受污染土壤之處理費用約需一億五千萬歐元，且需費時 30 年才能整治完成。在整治費用中，政府可補助 40% 經費，目前已有 25% 土壤污染個案已動工或完成較大面積的個案。而完工後的個案，須維護保養，並不斷予以檢測及監控，以掌握其復育狀況。而一些較小面積的個案，在整治優先順序中，除污染程度嚴重緊急者外，均於以

後再行整治復育。

6. 每一產業、行業均有其不同的整治標準，如火車站、煤業、加油站、乾洗業、碼頭等，如火車站土壤污染整治，係由獨立團體負責，政府可補助三分之一的經費；一般之污染整治責任為污染者負責整治經費，而開發商亦需負擔經費，政府亦可補助 30% 之整治經費。
7. 荷蘭以前之整治土壤污染策略為全部清除乾淨，但因整治經費龐大，財政負擔沉重，而且整治時間長，不符經濟效益，執行困難；現在係以土地使用功能、目的訂定整治標準，不需百分之百全部清除乾淨，這樣經費將可減少，整治時間亦可縮短，方為可行的策略。對於污染嚴重、情況緊急者，則優先整治，一般污染案則以後再行整治。
8. 荷蘭土壤保護法律與歐盟之土壤保護法規均為明訂「行使權」於法規內，以利執行。
9. 政府無法補助 100% 整治經費，但卻是土壤污染整治的重要推動力量。

(三) 結論

1. 荷蘭目前有約有六萬個污染情形非常嚴重的場址，急需優先

詳細評估整治。

2. 「行使權」必須明訂於法律中，使其具備適法性與強制性，以利執行。
3. 較多污染項目或特別污染項目，由特別團體負責整治；污染者與開發者要負擔整治經費，但政府的補助是必要的（30%）。
4. 最主要的宗旨是「不要污染到下一代」。

二、荷蘭土壤整治政策的發展

（一）前言

荷蘭土壤污染的主要來源有四種：

1. 油品洩漏。
2. 儲槽洩漏。
3. 乾洗業使用之含氯溶劑。
4. 毒性廢棄物處置過程中所產生。

針對土壤污染整治，荷蘭政策發展過程，亦經過幾次的變革，以下將針對荷蘭土壤整治政策發展進行說明。

（二）內容

荷蘭土壤污染整治政策，共有以下幾個歷程：

1. 1980~1983 年 Lekkerkerk 事件：荷蘭於 1980~1983 年因於 Lekkerkerk 發生居民因居住於堆填區上，而產生許多疾病，引起民眾對土壤污染的重視，導致「ABC 條例」的產生，此為荷蘭土壤污染整治政策的開端。
2. 1987 年土壤保護法制定。
3. 1994 年土壤清理法：土壤清理法以 target 值及 intervention 值取代了 ABC 值。
4. 1997~2003 年 BEVER 法規：BEVER 法規為荷蘭政府現行之土壤整治政策，其相關說明如下：
 - (1) 制定源起：之前荷蘭法規開始時皆太過於激進且規模太過於宏大，但執行的速度太慢，於是修正以往的政策而制定 BEVER。
 - (2) BEVER 的特點：
 - A. 以各方討論方式決定整治情況，針對表土之非移動性污染物，以土地用途或土壤適用性決定整治結果，針對地下水中移動性污染物，則以風險評估之成本效益分析決定，無論何種情況皆以成本有效利用為一個重要的考量點。
 - B. 移動性污染物以「穩定現有狀況」(Stable end

situation) 為主，而所謂「穩定現有狀況」即：

- (A) 針對人類及環境沒有危害風險。
- (B) 污染地區可能會增加，但必須於 30 年內完成改善。
- (C) 針對敏感地區無影響，如飲用水區域。
- (D) 透過預期的改善對未來不會造成不安。

但往往「穩定現有狀況」並不可能達成或並非成本最有效利用的方式。

C. 以風險原則及完整的改善表土及深層土壤都與未來發展相關。

5. 2003 年 12 月中荷蘭環境部門之土壤政策文件提及以下幾點：

- (1) 將不再採用明確的 Urgency 值和 Severity 值。
- (2) 深層土壤可依土地使用狀況整治。
- (3) 以風險作為邊界狀況。
- (4) 土壤使用決定策略及優先權。

針對很嚴重 (Severe) 和很緊急 (Urgent) 的土壤污染事件，必須於 2018 年以前開始整治。

(三) 結論

針對如何選擇整治策略，如何達到穩定及無害化等許多問題 VROM 定出了指引為 ROSA' S 指引，透過各種團體的討論及成本效益、風險比較、給整治者及管理者提供一個指引，選擇土壤整治的目標及策略。

三、荷蘭土壤整治的監控及政策目標之檢視

(一) 前言

荷蘭估計投入三十五億歐元才能進行所有污染現址之整治工作，所花費用居歐盟國家之冠，且愈來愈多經確認具污染潛勢的場址陸續發現。從 1982 年 2000 個場址至 2004 年已增加至 350,000 個場址，預計其中約 60,000 至 80,000 個場址須進行整治。

(二) 內容

1. 荷蘭土壤整治政策的主要時程：

- (1) 1987 年以後造成的污染場址須馬上進行整治。
- (2) 所有的土壤污染分析報告須於 2004 年完成。
- (3) 所有 1987 年以前嚴重污染的場址須被控制，而緊急

污染的場址須於 2023 年前整治完成。

2. 操作計畫及控管：

- (1) 從 2004 年所有污染場址的土壤報告推估所有的工作量。
- (2) 針對 2023 年的整治目標作更清楚的描述。
- (3) 發展情節說明書 (Scenarios) 及成本模式，以使預算推估更有效。
- (4) 以監控系統紀錄改進整治方案。
- (5) 作預算控制。

3. 土壤整治的監控系統：

- (1) 由監控工作小組明確定義政策基本目標。
- (2) 由地方政府將調查數據送至 RIVM (中央環境部門)。
- (3) 由 RIVM 確定數據的完整性並作成國家圖形。
- (4) 由工作小組書寫報告。
- (5) 在每年五月由中央之環境空間規劃部門將報告送交議會。其中報告中須載明疑似污染場址數量、污染程度、預估清理費用、場址調查程序、調查數量、步驟、整治優先順序、場址整治程序、整治場址數量、面積或體積、須全部整治或部份整治、整治成效、土壤表

面實際整治目標，並以每年花費、每場址平均花費、合作資金等作評估指導。

(三) 結論

荷蘭至 2001 年完成整治之場址約 8,000 多個，其中私人整治部分占 7,000 多個、政府整治部份僅占 1,000 多個，每年約 1,000 個場址被整治，報告每年增加 1,500 個，且其中大約有 850 個為緊急須整治場址。

一半的場址仍以須完全清理為目標，若以現在場址增加的數量，比較完成清理場址的數量，明顯無法達到平衡。荷蘭政府究竟有無可能於 2023 年達到所有場址整治完成的目標呢？可能很難，除非政府每年須增加 135% 的預算，但是 BEVER 政策的進行，或許可更加速整治速度的推行。

四、土壤及地下水知識架構

(一) 前言

面對複雜的土壤及地下水問題，首先必先建立正確的知識架構，以較科學的觀點而言，面對土壤及地下水其基本上係包涵政治及管理兩大課題，而探討此項問題必須不斷的發展作為政策的依據，同時尋求問題解決最有效的方法、工具，並提高

公眾共同的意識，進而建立社會共識。

Mr. Vermeulen 亦曾擔任荷蘭生物技術就地土壤整治研究計畫（NOBIS）專案經理。本次訓練課程將荷蘭土壤整治之技術發展作一概要性的傳授，使學員均能了解整治技術之發展進程。

（二）內容

1. 荷蘭研究機構沿革：

- （1）SPBO 期間自 1986～1994 年，由政府每年編列 1,000 萬元預算基金，此階段研究課題以污染物及治理技術基礎研究為重點。
- （2）PGBO 期間自 1995～1998 年，由政府每年編列 200 萬元預算基金，此階段研究課題以建立科學論壇架構，強化諮詢功能為重點。
- （3）NOBIS 期間自 1994～1998 年，由政府及民間成立每年 1,700 萬元預算基金，此階段研究課題以就地生物整治，包括自然衰減之應用研究為重點。
- （4）SKB 期間自 1998～2004 年，由政府及民間成立每年 2,000 萬元預算基金，此階段研究課題以提供技術與政

策之關係，並進行土壤生態與土壤性質之研究為重點。

- (5) SKB-2 預定自 2005 年開始，由政府及民間成立每年 300 萬預算基金，將來研究課題以地表下之基礎研究及實務研究為重點。

2. 荷蘭研究之成果：

- (1) 在荷蘭目前有 5 所大學有土壤科系，4 所土壤研究所、大約 10 大顧問諮詢公司、15 大承包商，並有超過 1,000 名的土壤整治相關從業人員。
- (2) 在荷蘭土壤整治處理費用從 1990 年的 100 歐元／公噸至 2000 年降為 10 歐元／公噸，同時整治技術已進步為現地整治。
- (3) 在荷蘭土壤污染是無法接受的觀念，仍普遍存在公眾的感覺上，而新的複雜政策仍是需要進一步的知識建構。
- (4) 在荷蘭土壤污染研究相關費用佔其國民生產毛額 2.02%，已達到歐盟要求的 1.94%，並且高於英國、義大利、西班牙等國。
- (5) 在荷蘭對於土壤污染問題之探討已建制 Network 的國與國之間歐洲共同論壇諮詢平台，分享研究成果，避

免重蹈他國已發生整治失敗歷史。

(三)結論

1. 土壤對我們的環境關係就如空氣及水存在的重要，我們必須重視它的問題。
2. 土壤特性的複雜性是需要進一步正確的了解。
3. 對於地面上利用機制與地面下運用的功能是不同的，必須有正確的知識研究作基礎。
4. 對於土壤利用運作，人類是最終的決策者，不可不慎重。

專題三、荷蘭土壤污染整治復育之角色扮演

一、政府在土壤污染整治及復育中之角色

(一)前言

Mr. Brett Bannink 服務於荷蘭烏特列支省 (Province of Utrecht) 土壤污染處之國家公務員，主要工作為推動及建議國營機構及國防部之有關場址整治計畫，及核准工業土地污染場址整治計畫之補助申請。以其從事於省政府業務部門之公務員身分，講解荷蘭政府針對土壤污染整治議題之組織架構與權責分工，對於同樣來自中華民國環保公務員的學員而言，應是受益匪淺。

(二)內容

1. 省政府土污部門之主要工作項目包括許可核准、調查及整治、區域管理及政策發展。
2. 國家最高之環保主管機關為「住宅、空間規劃及環境部」(簡稱 VROM)，有關污染場址之整治均以五年計畫為提報與核定之基礎。
3. 荷蘭環保事務之主管機關分三個層級：中央 (VROM)、省政府 (全國有 11 個省) 及市政府 (地方政府)。

4. VROM 訂定土壤保護政策法規，並依據 1987 年頒布施行之土壤保護法 (Soil Protection Act) 訂定一般行政命令以進一步規範土壤品質目標、風險評估程序、土污防治等相關事項。
5. 荷蘭另有「國家公共健康及環境保護機構」(簡稱 RIVM)，則負責提供土壤品質目標及風險評估之量化數值與科技支援。
6. 市政府向所在地省政府提報擬整治場址之歷史調查基本資料、場址現況調查及整治工作執行計畫，經所轄省政府彙整後，以未來五年計畫方式向 VROM 提報污染場址調查及整治規劃，該規劃內容應包括擬整治場址之列管名單及優先順序、整治工作內容細項，俟 VROM 核准後核撥經費據以實施。以烏特列支省為例，已獲得中央五年 2000 萬歐元之補助進行污染土壤之整治復育工作。
7. 嚴重污染及緊急狀態之判定：
 - (1) 嚴重污染之判定基準：
 - A. 達國家公告之土壤管制值。
 - B. 受污染土壤體積達 25 立方公尺。
 - C. 受污染地下水體積達 1,000 立方公尺。

(2) 風險評估之緊急狀態判定基準：

- A. 對人體產生立即危害程度。
- B. 對生態產生危害程度。
- C. 地下水之污染擴散程度達危害程度。

8. 決策管理

(1) 功能導向－視土地利用用途別決定整治程度。

(2) 成本效益評估

A. 正面評估－土壤及地下水整治完成後，保護人民及環境之程度。

B. 負面評估－人力、物力及財力因整治而消耗之程度。

(3) 應以最少之後續照護 (aftercare) 為主。

(4) 評估程序之建立。

(5) 成本降低應達 35~50%。

9. 計畫及評估考量項目

(1) 整治目標。

(2) 技術需求。

(3) 成本及規劃。

(4) 整治成果。

(5) 技術變異程度。

(6) 後續照護及監督。

(7) 核發許可文件 (最終報告)。

(三) 結論

1. 應充分交換整治經驗以免重複執行相同程序及重蹈錯誤之過程。
2. 一個清晰透明的整治過程如同其整治計畫內容一樣重要。
3. 土壤及地下水污染整治與國土規劃之整合乃徹底解決問題之重要關鍵。

二、 產業在土壤污染整治及復育中之角色

(一) 前言

土壤污染一旦發生，探討污染整治及復育中，將涉及土地所有者或開發者，如何在政府所定的法令規範進行污染整治及復育。其中在複雜的土壤特性及法令要求下，工程技術顧問在此復育環節中是一提供技術研究成果及立法當局訂定法令規範之重要參考知識角色。

(二) 內容

1. 介紹荷蘭二大 Kruisweg Consultancy 及 Akzo Nobel 顧問公

司成立宗旨及營業方針，其環保政策為責任、健康、安全、避免環境敏感衝擊及生產管理系統。

2. 基本上而言，多數顧問技術公司是被動配合，在設計上雖是以土壤及地下水防治為基本主題，惟考慮土地設廠之環境負荷，仍對環保問題欠缺週詳。
3. 顧問公司在土壤及地下水防治上分兩方面進行，主動與各基金機構、大學參與計畫研究，並與當地環保政府機構結合，另一方面被動配合土地開發者設廠要求。
4. 在合作議題上，顧問公司及業者在荷蘭與政府部門合作協議是公開化，並參與規範研究，以契約替代法規，結合協議同意機能，但在歐洲其他國家推行就有困難。
5. 顧問公司在荷蘭與政府合作機制在 1970~1975 期間，最初是提供土地基本數據及有效防治技術而已，但今日進行各項風險評估、管理、控制及土壤自然衰減等公開討論研究議題。但顧問公司的角色在歐洲其他國家就不同，例如比利時就不同意顧問公司參與地下水研究。
6. 顧問公司在此項工作上困難有：1. 執法者對於污染未被完全清理的案件害怕有責任；2. 在觀念上污染問題是相當敏感的政策課題。

7. 產業、土地開發商在財產移轉上有以下執行上的限制條件：

(1) 對於原有土地需不斷的現況調查，掌握投資風險；(2) 必須取得銀行的土地開發保證；(3) 對於未確定的狀況解決是一項昂貴的開支。

8. 產業投資設廠在歐洲各國其投資者交涉的對象大多是地方政府，因地方政府已充分被授權，但在中國大陸交涉對象是中央政府，其各部會工作特點是相當獨立自主的。

(三) 結論

1. 產業結構在土污法規上，目前中國大陸與美國或歐洲基本上法規標準大致相同。

2. 對於各項工業設廠標準，中國大陸對於新的工業設廠要求是相當嚴格法規標準。

3. 對於業者設廠土地開發，在中國大陸執行各項背景環境調查計畫，最終評量檢測，對業者投資而言是一項相當困難及嚴格的考驗。

4. 業者與政府的交涉過程雖是一項雜碎煩瑣的歷程，但一切的流程最好是公開交涉，避免其他支節。

三、 承包商在土壤污染整治及復育中之角色

(一)前言

探討土壤污染整治及復育工作，承包商扮演現場處理執行者角色，在政府、業者之間為實際執行者，其在政府法令規範下，透過業者、顧問技術公司之技術與經費之考量，如何有效執行整治及復育工作，為承包商重要議題。

(二)內容

1. 簡介：荷蘭 A & G 公司成立於 1984 年，每年大約有 30 個計畫在執行，其技術來源與 TNO 研究部門結合，其年處理土壤污染量為 24 公噸／年，其質量流程控制能使客戶滿意，主要係充分公開與客戶溝通研商，並在技術上透過技術合作及參與論壇研究來提昇品質。
2. 沿革：(1) 在荷蘭第一個土壤污染事件發生在 1982 年的 Lekkerkerk 土地開發案件，之後在 1986 年統計在 10 年之內必須清除整治的地點大約有 10,000 處，至 1995 年統計大約有 100,000 處地點需要整治復育，至 2002 年有 600,000 個監測場址，其污染需 50~100 年之間清除，到了 2004 年統計有 200,000 處急需某方面之復育，而這些復育期限為

2030年，目前評估可能無法如期完成。(2) 在1982年代土壤污染整治僅是採移除清運到處理場處理的低層技術，至1985年才有清洗、焚化及生物處理，之後在1990土壤污染整治才為普通的業務，在1995年土污整治技術已發展為現場整治技術。

3. 目標：土壤污染整治有效清除目的必須透過現場勘測、有效週詳的計畫、澈底的清理及減少經費，執行上需考量不同的土壤特性、不同的污染物、地上建物之分布及地下水，承包商需建制標準的清理流程。而整治復育的執行方案在計畫→執行→監控→法規→計畫的循環流程上，透過顧問技術單位、政府部門、承包商、研究機構公開討論的經驗分享、傳承，才能不斷發展有效的整治技術。
4. 整治技術：關於整治方法不只是探討挖除、清除污染物單方面的思考，新的現場復育技術不斷的提出，而綜觀有效的復育方法不外乎生物衰減處理、物理減降、污染物移除、污染抑制等；而污染現場整治方式亦區分好氧性生物處理及厭氧性生物處理兩大生物衰減處理。

(三) 結論

1. 為有效進行土壤污染整治復育工作，對於承包商品質要求必須有標準的合約範本以約束承包商控制品質及經費。如能以統包方式將可解決此項問題。
2. 產業、承包廠商、政府部門三方面，可經由不斷公開討論以提昇技術，減少經費、可解決不可預期土污案件。
3. 土污整治復育工作是項結合各項科學與經驗所累積的，在研擬整治方法及現場執行方案的過程，是需要透明公開的討論，而承包商執行者的角色才能順利扮演。

專題四、荷蘭土壤整治之技術發展與論述

一、技術發展－荷蘭土壤整治之發展

(一)前言

Mr. Harry Vermeulen 是荷蘭土壤品質研究及發展基金會 (SKB) 的主管，該基金會扮演土壤整治及土壤品質管理之研究及技術移轉角色，在過去四年已執行超過 100 個研究計畫。

Mr. Vermeulen 亦曾擔任荷蘭生物技術就地土壤整治研究計畫 (NOBIS) 專案經理。本次訓練課程將荷蘭土壤整治之技術發展作一概要性的傳授，使學員均能了解整治技術之發展進程。

(二)內容

荷蘭土壤污染整治之政策及技術發展可分為以下四個階段：

1. 允許濃度階段。
2. 生物性就地整治階段。
3. 以風險考量整治階段。
4. 土壤品質管理階段。

其中在第一階段採用之整治政策係以允許濃度標準來管

制，將受污染土壤挖掘後進行離場（ex-situ）處理，但是在污染現場加強抽出處理（pump and treat）、土壤氣提法（soil air extraction）及生物通氣（bioventing）與生物注氣（biosparging）之技術。

然而經過了二十餘年的整治所累積的經驗及技術，演變成第四階段（現階段）的以土地品質管理為政策主軸，包括：

1. 回歸土地管理之基本面的，即非以降低污染物濃度限值，而係以降低風險為管理策略。
2. 以利用自然衰減法等自然程序技術進行污染土壤或地下水之整治。
3. 加速並縮短土壤及地下水之整治時程。
4. 必要時應用強化生物整治技術（intensive bioremediation）。
5. 應用其他技術處理無法化學降解之污染物質（non-degradable components），以減少污染量。

其中強化整治技術方面係採用自然衰減（natural attenuation）、加強自然衰減（enhanced natural attenuation）、生物篩（biological screens）及土地耕種（land farming）等方式。

6. 風險評估技術 REC 之介紹

REC 乃取風險降低 (risk reduction)、環境優先 (environmental merit) 及成本 (costs) 之第一個英文字母合成，並將土壤污染整治以「多功能整治 (multi-functional)」、「封閉 (isolation)」及「就地整治 (in-situ)」三項評估因子分別評估，再綜合決定優選方案之技術。

其中多功能整治 (MF) 係將受污染土壤處理至完全乾淨土壤之整治技術，其降低風險程度最高及對環境有利程度最高，但卻耗費鉅資及時間；封閉污染物 (ICM) 雖花費最低，但風險高及對環境不利；就地整治 (in-situ) 則均居中，但可達原土地利用之用途別，屬功能性整治 (functional remediation)。

7. 荷蘭針對受污染土壤之整治政策亦因表層、裏層土壤而不同：

(1) 表層土壤 (5m 以上) 係依功能性整治，整治至符合原土地用途，風險評估係以對人體健康及生態危害為主，對於特定污染場址則由中央或省以專案處理，而責任部分則由土地所有人或污染行為人負完全責任及負擔整治經費。

(2) 裏層土壤 (5m 以下) 則視整治價值來決定整治方案，風險評估以潛在風險為主，污染場址由地方政府提出地方解決方案 (regional solution)，而由公眾 (包括政府、企業、學術研究機構及社區民眾，乃至於民意機關) 共同協議負責完成。

8. 荷蘭土壤污染的專業整治機關包括鐵路單位、事業單位 (例如金屬工業、乾洗業、以前的汽油或天然氣開發單位及廢棄物處理場) 及地區相關單位 (如港口及工業區)。

9. 三維的空間規劃 (three dimensional spatial planning) 應考慮以下三點：

(1) 未來土地利用之需求及潛能。

(2) 有步驟、有系統的思維。

(3) 長期發展之不確定性及彈性作為。

(三) 結論

荷蘭的土壤污染整治技術隨著時間與思維之演變，逐漸由整體全面澈底之整治策略與技術，調整為目前之符合土地利用用途別之目標，以有限的預算及經費，進行具實用性及結合成本效益分析之實務整治作業，不但風險評估技術隨之調整，連

整治政策、策略、措施與具體作為亦隨之配合修正，同時藉由中央、省及地方政府的垂直分工、充分授權，以及公眾參與協議之橫向聯繫整合而形成共識之積極推動整治實務能力，均使這國土面積與台灣相近，人口約 1,600 萬，全國有三分之一低於海平面之鬱金香故鄉的荷蘭，擁有傲人的全民環保意識、協商機制與執行能力，深值我國借鏡。

二、荷蘭土壤污染整治技術概論

(一)前言

1. 一旦土壤及地下水遭受污染，必須先經過調查及危害性評估確認污染程度及影響範圍，用以來決定是否進行整治。整治工作的進行須考慮許多因素，其中整治技術運用適當與否是決定一個污染場址的命運，所以了解各污染物的特性及整治技術的運用範圍，將有助於決定污染場址所須使用的整治技術，避免選錯方式白白浪費時間及金錢。
2. 一般而言，針對 BTEX 國內皆採用好氧處理方式，但是氧氣須要利用幫浦來打氣，所須費用不低，案例介紹的場址，研究的目的是在於利用厭氧環境來分解 BTEX，原因是由於地下一般為厭氧狀態，而採用其他電子接受者研究是否能取代

氧，以降低整治經費。本實驗採用了硝酸鹽進行，因為其還原電位比其他電子接受者高，反應易進行且價格比氧便宜。

3. Kempen Region 位於荷蘭的南部，與比利時交界處盛產 Cd 礦與 Zn 礦，依其特性及可能涉及的污染連續關係，如地勢高低、森林、農業用藥、上下土層滲透等均會造成地下水污染，而 1970 年代發現該場址下方有地下水遭受重金屬 (Cd、Zn) 嚴重污染，但該場址目前已停止生產，污染減弱中。
4. 荷蘭於 1980 年前即設有 3,800 個垃圾堆置場，其堆置場垃圾大致可分為家庭有機物、建築物廢棄土、化學垃圾等，而這些垃圾堆置場於設置前是沒有妥善規劃環保問題，目前已停止使用。而 1980 年以後所設置堆置場，已於使用前於底層覆蓋一層不透水布，第二層加黏土層，以防止污染物滲透污染地下水，如該堆置場不再使用，立即覆蓋上一層不透水布，並加一層約 1 米高的新土覆蓋後，再進行復育及監測工作，並且對這 3,800 個堆置場依滲透範圍水的流速等利用測量器、電解值、磁場等方式，採集正常乾淨的土樣與堆置場內的土樣進行比對，超過 10 倍，則發現有 85 個堆置場遭受污染，其中地下水中發現含有 BTEX 等化合物有 15 處。在 10 年前針對污染場址進行風險評估，其整治經費太龐大，

現在嘗試用自然衰減法，而不抽取地下水處理其污染物之方式來得划算，安全性也大。

5. 由於農業作物如需運用大量農藥幫助農作物能豐收，過去使用不易分解長效性的有機氯殺蟲劑，如 γ -HCH、DDT、endosulfan 等，可在北極熊體內找到這些長效性農藥遺留物。在 1995 年 Barrt 等人的研究估計每年荷蘭大氣中有 Atrazine、Dichlorvos、Fentin、PCP、Trifluralin 分別有 1.1、0.04、0.6、1.4、0.2 噸沉澱荷蘭土地，有 0.65、0.02、0.9、1.4、0.06 噸流到荷蘭水體、河流、湖面中，究竟有多少殺蟲劑真正污染荷蘭土地及水體，這些大量殺蟲劑究竟從何而來，誰又該為這些殺蟲劑的流布負責。
6. Akzo Nobel 是一個全球化大廠，全球約有 68,000 名員工、分布 80 個國家、有 350 生產據點、1,000 座工廠，2001 年產值有 141 億歐元，主要生產藥品 coatings、化學產品，位於荷蘭基地主要產鹽包括食用鹽及工業鹽，年產量 200 萬噸，其中有一部份用來製氯氣、氫氧化鈉等副產品，其中有一廠區過去是生產目前禁用的含氯類農藥，嚴重污染該廠區土壤及地下水，從 1990 年開始試圖整治土壤及地下水，尋找可行最佳方案，如何清潔淨化土壤，或另尋生產基地，

規劃利用熱分解污染土壤中的氯，但需花費昂貴費用約 800 萬歐元，於 2000 年時，利用細菌就地分解並在污染場址上同時加蓋運輸碼頭，將污染物限制於控制場址中不會擴散，成本只花費 30 萬歐元，是一個結合整治及土地利用的環保與經濟並重最佳實例。

(二)內容

1. 降解作用：一般微生物為了獲得能源進行生物合成作用，產生較大的細胞分子或新的細胞及利用能源來移動，必須利用分解作用來分解食物產生能源以利用，而食物經分解後變成分解作用後的產品（或廢物）。而生物降解的原理，即是將污染物當作微生物的食物來源，利用其分解作用將污染物分解，形成較無害的產品（或廢物）。
2. 氧化還原：依其氧化還原狀態可區分為兩種狀態，有氧存在時稱為好氧狀態，而無氧存在時稱為厭氧狀態，而厭氧狀態又可分為硝酸鹽還原態、鐵還原態、硫酸鹽還原態及甲烷化狀態，而在 pH=7，依各狀態還原半反應來看，其作為電子接受者的趨勢為 $O_2 > NO_3^- > Fe^{3+} > SO_4^{2-} > CO_2$ ，換言之即污染物如需以氧化反應加以去除，在好氧環境當然以 O_2 為電

子接受者，但在厭氧環境就以 NO_3^- 為優先選擇。

3. 污染物種類：

(1) 不含氯化合物包括：(I) 芳香族化合物如：苯、甲苯、乙苯、二甲苯 (BTEX)、酚、多環芳香烴 (PAH) 等。(II) 脂肪族化合物：如礦物油等。(III) MTBE 等。

(2) 含氯化合物依其鍵結狀態也可分為：(I) 脂肪族化合物：如四氯乙烯 (PCE)、三氯乙烯 (TCE)。(II) 芳香族化合物：如農藥 (HCH) 靈丹、多氯聯苯 (PCB)、戴奧辛 (Dioxins)。

(3) 先就不含氯化合物部份加以討論：

苯、甲苯、乙苯、二甲苯 (BTEX) 的好氧降解：
污染物本身是電子提供者，所以利用 O_2 作為電子接受者，而氧分子直接被苯環所鍵結，經此反應進而打破苯環的穩定結構，利於後續氧化作用的進行。

而 BTEX 的厭氧降解：由於利用其他來源做為電子接受者，相對反應能量就比好氧降解低，所以其反應速率比好氧降解緩慢，而之間的反應速率又以甲苯最快，其次為乙苯、二甲苯、苯，其中苯因為

其鍵結構的原因，在厭氧狀態雖有可能分解，但速率是最慢的。

綜合言之，BTEX 的分解最後產生 CO_2 和 H_2O ，沒有中間產物的問題，好氧降解 BTEX 是最快的方式，但是現場並不是一定可行的，因為現場可能是任何一種氧化還原狀態，而在厭氧狀態之下，苯是最難分解。

多環芳香烴 (PAH) 的降解：依據其分子量的大小，溶解度及環狀結構的數目而有所改變，一般而言，分子量愈大，溶解度愈小，且環狀結構的數目愈多，是相對愈難降解。

油的降解：油是碳氫化合物的混合體，其降解程度視其內部組成而定，而歸納三點原則：(1) 短鏈的化合物是最易分解的。(2) 支鏈會降低降解的速率。(3) 芳香族化合物的數目愈多也會降低降解的速率。

MTBE：做為石油添加劑取代鉛的功用，本身性質具溶解性易流動，不論好氧或厭氧反應都是緩慢的。

4. 實驗目的：證明厭氧環境仍可降解 BTEX：

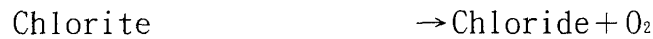
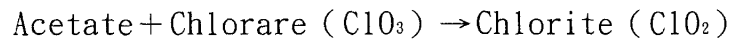
步驟：先於 Flebo, Hooge Zand 進行小規模現場實驗，利用 6 口入滲井，1 口抽出及監測井監測苯及硝酸鹽的濃度變化，經過 400 天長期監測。經論：硝酸鹽有利於苯的厭氧分解，而且不會影響地下水水質。

經過初期實驗，應用本實驗結果於位於 Slochteren 的 NAM 公司，該公司生產石油氣，場址附近已有污染，故利用 HAM 公司場址進行 Field Study，此次實驗只利用一個入滲井及數個監測井，入滲井可進行滲入及抽出的功能，實驗共分為五個試程：試程 1，只打入苯經過 2 天的打入，又放置 6 又 1/2 週的時間，在抽出 4 天的打入量，證明苯在自然的厭氧環境下是難以分解的；試程 2，只打入硝酸鹽，發現打入的 10 天內，地下水中硝酸鹽的濃度已趨近於零，說明硝酸鹽，確實在地下水中不會造成殘留及污染；試程 3，同時打入苯及試程 2 兩倍的硝酸鹽，並透過同位素分析排除、稀釋、吸附及傳輸作用是造成苯濃度降低的原因，發現硝酸鹽確實有助於苯在地下環境中的分解；而試程 4 為了加強及證實在 Flebo 實驗所培養的細菌是否有助於苯的降解，實驗步驟同上各試程，實驗方法同

時加入苯、硝酸鹽及細菌，結果顯示苯的濃度是有降解而降低，而且加入細菌的幫助是很輕微的。

經過上述實驗試程，硝酸鹽對苯的降解是有所幫助，但是仍比不上好氧降解，是否有其他替代物可以取代氧的功能。

試程 5，利用醋酸鹽加上氯酸鹽在現場反應產生 O_2 ，用以進行反應，其方程式如下：



上述反應可利用氯還原菌先將 Chlorate (ClO_3) 反應產生 O_2 ，以利氧化菌及氧化反應的進行，將苯進行好氧降解。實驗結果顯示有助於苯的降解。

5. 重金屬微粒釋放到大氣中，可經沉降落到土壤中，進一步滲透污染地下水，為了解污染情形，利用不同模型預測未飽和水位及飽和水位中受污染情形，首先利用 HYDRUS-ID 模型預測有多少鋅、鎘，滲透到未飽和地下水域中。在 HYDRUS-ID 模型中需先假設三組參數分別為地下水位、土壤地質（如：土壤主要成份沙地、黏土、化學物）、灰的掩

埋（如：鋅、鎘、冶鍊剩下的灰、含有高濃度重金屬，做為路基掩埋的量為多少鋅、鎘量透污染土壤及地下水），再者利用 MODFLOW/MT3D 模型預測飽含水域中受污染情形，利用三組參數、水文地理、地下水化學（如鹽類、pH 值等）污染物特性，進行飽含水域污染情形，最後得到水流結果（如地下水位、水流出量、水流向）及污染物傳送結果（如濃度地點、重金屬污染河流情形，均用曲線表示）。

HYDRUS 1D 模型是一組平面地點推測地圖中各區可能有某種污染物濃度，在模式中加入各項參數數據、水、化合物進入量及傳遞係數、地下水位、土壤性質（如 pH、有機物總含量、黏土總含量）、鎘、鋅傳遞係數等，即可推估有多少鎘溶解於土壤中，全部有多重重金屬污染分布圖。

從 1,600 個監測數據，其中取一項數據討論也發現鎘每年有 85 克／公頃沉降，並且滲透到土壤中，1950 年沉降的鎘已滲透到地下水位下 110 公分，先有鋅循環回到地表蒸發，直到 1990 年才發現有鎘循環回到地表。

地下水流模型 (Groundwater flow models) 分成三組：ABDK1、ABDK2、ABDK3，針對不同土壤成分、深度、土質情形的 PHT3D 模型及微觀土壤吸收殺蟲劑整體傳遞活動情

形，充分結合水文化學及地理化學，呈現各項殺蟲劑顆粒在水裡溶解形態和土壤吸附情形，在水文化學中分淺水位（0~6 公尺深）、略深水位（6~15 公尺深）、深水位（大於 15 公尺），輸入、自然滲入、自然滲入及滲出、農業滲入、農業滲入及滲出、滲出等數據，於地理化學輸入黏土含量、土壤性質、氧化鐵等參數據數，探討殺蟲劑，在不同土壤吸附情形。

6. 自然衰減方法係指透過物理、化學及生物反應過程，使污染物的量、濃度、流量或毒性減少之技術，而此法必須建立在持續的監測，並建立最基本之管理策略去發現其變化狀態，而生物處理技術是建立在生物衰減傳遞、累積及污染物的滲透性等，而其基本的原理就是維持現地原有菌種的生存而給予適當的水、空氣及食物等以增其反應及分解，降低污染物傳遞。

7. 有四大類污染物

(1) 碳氫化合物。

(2) 有機物。

(3) BTEX Benzene PAH。

(4) 重金屬、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 等。

依其污染物之特性、BTEX 和礦物油可用厭氧處理，再以生物降解，氯化物不能用生物降解，而環氮化合物很容易被生物分解，而重金屬則固化或沉澱；如生物分解很活躍時，細菌可同時產生，則其污染物總量減少，範圍也不致於再度擴散。

8. 依生化轉化過程當中，作一個基因分析，依 DND 來分析生物轉化觀察污染物的傳遞，並用實驗室作的基因，到現場作基因比較，其堆置場區內有很多菌種活躍在不同區域，其細菌之菌種很多，變化很大，以掩埋場水文地質狀況而言，DNA 並非是有效的判定生物轉變的工具。
9. 另把堆置區垃圾拿回實驗室發酵，以了解 25 年後垃圾其發酵過程是否已停止，如有發酵其程度是多少？實驗推測超過 50 年的堆置場其污染物穩定性高，發酵過程會愈來愈慢，所以不必擔心重金屬沉積會愈來愈多。
10. H_2 檢查是目前有名的研究。
11. 農作物使用農藥僅有一部分農藥真正發揮效果，殺蟲劑經由人類活動及自然擴散飄散到大氣之中，部分經由乾沉降到土壤中，有些經由雨水濕沉降到水體（如河流及湖泊），有些殺蟲劑在大氣層高處飄向其他地方或國家，運用

測量儀器或模式模擬，雖然能夠正確估計殺蟲劑流量，但需花費昂貴費用，並且無法預估結果，若使用模式模擬需花費較多時間，但是不用花費太多費用，且能預測結果，目前有“Blame matrix”模式發展成熟可運用在模擬殺蟲劑的流向。

這個研究團隊在荷蘭建構 18 個監測大氣及雨水中殺蟲劑濃度，主要監測 Atrazine、Lindane Chlorpropham Propachlor Trifluralin、Bentazon、Diuron、2,4-D、Mecoprop (MCCP)、Simazine、Trifluralin 等幾項主要殺蟲劑，由這 18 個監測站構成的監測網，建立殺蟲劑擴散資料庫數據，藉由這些數據建立“Blame matrix”模式，由監測所得數據對照模式模擬，結果發現兩者農藥流向趨勢吻合，表示模式模擬荷蘭境內農藥分布流向是一種經濟可行方案。

12. 六氯環己烷 (Hexachlorocyclohexane, HCH) 是一種頑固化合物，平時以晶狀方式呈現，不易溶於水及不易受到生物分解，在 1996 到 1998 年 ES & T 的 Middeldorp 及 Van Eekert 兩人發現六氯環己烷在厭氧狀態下提供碳源，可催化細菌將六氯環己烷分解成苯 (Benzene) 及一氯苯

(monochloro- benzene)，分別再經厭氧及耗氧狀態下完全分解成水、二氧化碳、甲烷、氫離子及氯離子等，利用這個結果運用在 Akzo Nobel 在荷蘭的污染場址，評估利用現有細菌分解六氯環己烷可行性。

該廠區污染區域呈現羽毛狀超過 250 公尺，深 18 公尺，且位於運河旁，隨時可能污染運河，在場址中可偵測到 HCH、CP、BENZENE (B)，首先由實驗室實驗如何活化細菌有效利用厭氧分解 HCH，以及藉由厭氧及耗氧狀態下將 MCB 及 B 分解成 CO_2 、 HCl 、 H_2O ，結果發現甲醇 (CH_3OH) 可活化細菌在厭氧狀態下分解 HCH 成 MCB 和苯，其中 MCB 在厭氧狀態下，又可完全分解苯在耗氧狀態下可完全分解成 CO_2 ，於是將實驗結果帶到污染場址實際復育。

在復育同時向政府申請碼頭興建，並將污染物控制在不會擴散區中，使土壤污染復育及碼頭興建同時並行，前六個月為設計、興建碼頭及復育設施，同時並進行復育前土壤污染背景資料測量，在六個月後完成所有設施後開始每隔三個月加入固定量的甲醇，第四次加入甲醇後中止一年後再加甲醇，並在每個月在每個監測點採樣監測污染擴散及復育情形。

結果發現污染場址實際復育情形與實驗結果吻合，在第一次加入甲醇後，HCH 的監測值急速下降，而 MCB 及苯濃度則逐漸升高，而中止加入甲醇後一年之中 MCB 及苯濃度亦逐漸下降，當再一次加入甲醇後 MCB 及苯濃度再次升高，代表加入甲醇能活化細菌分解 HCH 的生化能力，當細菌將土壤中的 HCH 生化方式分解成 MCB 及苯時，在地下水位下游將地下水抽出利用厭氧環境及耗氧環境將 MCB 及苯完全分解，符合荷蘭放流水排放標準後排放，完成整個土壤復育程序。

(三)結論

1. 以降解反應的趨勢而言，苯、甲苯、乙苯、二甲苯 (BTEX) 類芳香族化合物、礦物油及多環芳香烴 (PAH) 均是愈朝向好氧環境的狀態下反應愈快。而如何加速降解反應的進行，就視其狀態，如為好氧降解，就是增加 O_2 ，而如為厭氧降解，可以考慮增加電子接受者如 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 或電子提供者，一般而言，不論好氧或厭氧反應，增加適合的營養及細菌皆可加速反應。
2. 硝酸鹽確實有潛力幫助及加速自然衰減，但細菌培養在本實例中並不成功，有可能的方式應儘可能利用當地的菌種

加以繁殖，避免因各地條件不同造成失敗的案例，另一方面 Chlorate（氯酸鹽）是可行氧的替代方案。

3. 從模式模擬可得土壤吸收速度遠高於地下水吸收鎘的速度，在 2020 年土壤吸收鎘的總量及濃度將達到最高點。
4. 年代比較久的堆置場其本身即是非常好的環境，其有機物數量龐大是一個提供好的營養鹽場所，導致一連串的生物氧化還原反應存在，污染物濃度降低後，即表示其污染物已達到穩定狀態，故不須急著用大筆經費做整治工作，反觀場區外，其化學污染以後是一個大問題，因為現在堆置場垃圾堆置約 100 米高，證明滲透範圍也是很廣，雖新設置堆置場底層都有防護措施，萬一遭受污染物滲透污染地下水，其嚴重性可想而知。而舊的堆置場其硫化物亦造成堆置區及羽毛區之重金屬濃度降低，相較之下比區外安全穩定。
5. 荷蘭境內殺蟲劑由實驗實測及模擬模擬得到結果，主要來源是雨水中沒有殺蟲劑，由大氣傳送從他國（如：法國、比利時）境外移入到荷蘭，另外有一部分的殺蟲劑（如：endrin、endosulphan、DDT 等），過去荷蘭曾經使用，目前不用的殺蟲劑，依舊可以偵測到這些禁用的殺蟲劑存

在，預測這類殺蟲劑是由非洲目前尚在使用經由境外移入到荷蘭，而在荷蘭境內若無境外移入殺蟲劑，估計水體中含有殺蟲劑的量，不會超過荷蘭國家標準。

在 Ijsselmeer 湖測量結果，已經禁用的 Atrazin、Lindane、Trifluralin 三種禁藥，分別測得每年 10~15、10~30、40~60 公斤，證實殺蟲劑境外移入確實存在，而在雨水中許多殺蟲劑的濃度超過荷蘭政府規定存在水體標準，而在種植農作物為求豐收不得不使用大量殺蟲劑，而好多荷蘭目前已經停用較毒的殺蟲劑，不斷免費從外國（如法國、比利時、非洲等）境外移入飄向荷蘭。

在荷蘭農業發展研究如何提高殺蟲劑效用，能用最少殺蟲劑生產最大量農作物，減少荷蘭土地負擔，結果也顯示荷蘭每年使用大量農藥，在農藥使用上單位成本最高，但是每 1000ECU 產量農藥使用量卻是最低，可見荷蘭成功做到減輕土地負擔。

6. 案例證實 HCH 可藉由活化細菌生化分解能力完全分解，同時也是第一個將實驗室結果成功移植到土壤污染場址，讓環境保護與經濟發展兼籌並顧，期望將生化處理的厭氧處理及耗氧處理特性，運用到相關類似污染場址，成功結合

生物處理與污染場址再開發。

三、自然衰減法(Natural Attenuation)

(一) 前言

在許多國家自然衰減法為一污染場址進行整治時之選擇，但可信的風險評估結果為是否選定此方法的必要條件，且風險評估中即須證實使用此法為整治方案時，對人類或動物及其他自然的生態系統無不良影響，另一重要的條件為在評估此法（自然衰減法）時應依土地使用的功能及其目的為導向，確實評估實施，允許些許污染物殘留於地下水中，並允許有較長的整治時間將污染物完全分解。

(二) 內容

1. 自然衰減法之定義

(1) 美國、英國

自然衰減法被著眼於污染物藉吸收、稀釋、揮發、穩定、化學性及生物性的降解反應使得污染物降低濃度及數量。

(2) 荷蘭（德國、法國、比利時）

在荷蘭自然衰減法的定義則有較多的限制，必須係由細菌、真菌及其他有機體的降解。

2. 自然衰減法之指引

- (1) 自然衰減過程應量化。
- (2) 概念模式應包含以下幾點：
 - A. 污染源：何時、何地發生，發生的範圍及其擴散的規模 (plume)。
 - B. 土壤的特性：土層為砂層、岩石層、黏土層…等。
 - C. 水文的特性：如地下水位、流速及其波動…等。
- (3) 依土地使用功能及目的進行風險評估。
- (4) 其他相關聯性的事項：地下水井、地表水及揮發情況等事項。
- (5) 自然衰減過程最被重視的為其降解，最重要的項目即需考慮氧化還原反應 (Redox)。

自然生物處理氧化還原反應 (Redox) 包含了好氧及厭氧的分解程序。在好氧分解的條件下，微生物將氧氣當作最終電子接受者來進行生物分解的氧化還原反應。厭氧分解過程中則分別利用硝酸鹽、三價鐵、錳、硫酸鹽及二氧化碳當做最終電子接受者來進行氧化還原反應。而場址之條件及微生物間之競爭將決定何種反應為主要的分解過程，因此藉由監測上述物質可較易得知土壤及地下水為好氧或厭氧環境是否適用自然衰減法作為整治法的選擇。

一般來說，在一個高濃度的污染場址，可利用的氧氣將很快被消耗殆盡，緊接著進行的反應是脫硝作用、鐵還原、硫酸鹽還原，以及最終的甲烷化反應。在土壤及地下水生物復育的過程中，亦有因為生物特異性的原因導致失敗或執行效果不佳的情形。例如在某些情況下，現地的細菌可能不具有可分解污染物之酵素而須另行添加微生物或馴養。此外，若場址中並未發現有具活性的現地微生物叢生的情形，則場址中可能存在抑制或毒性條件。

自然生物衰減反應進行時，可監測一些可顯示或影響微生物活性的重要指標，這些指標參數包括溶氧、氧化還原電位、二氧化碳、甲烷、硝酸鹽、亞硝酸鹽、硫酸鹽、亞硫酸鹽、鐵及錳等，並藉由這些指標判定自然生物處理是否可繼續進行。茲將這些指標參數所代表的意義簡述如下。

- (1) 溶氧：污染區的溶氧若低於背景值，則可證實微生物具好氧降解之能力。
- (2) 氧化還原電位 (Eh)：氧化還原電位是測量環境是屬於氧化態或還原態之方法，若 Eh 大於零則屬於氧化態之環境；若 Eh 小於零則屬還原態環境。在

低溶氧或厭氧狀態下，由於溶氧並無法顯示場址狀態，此時氧化還原電位即為一重要指標。例如含高度污染物的場址偏向於厭氧狀況，在復育程序中的電子接受者多具有較高的氧化還原電位。惟需注意的是 Eh 僅能提供某項氧化還原反應(如微生物的呼吸反應潛能)之參考，而無法分出各種有機物或無機物的反應作用，在應用時仍需參酌其他指標。

- (3) 電子接受者：在好氧環境中，氧是最終的電子接受者；當氧缺乏時，只要微生物具有適當酵素系統，硝酸根、鐵(Fe^{3+})、錳(Mn^{4+})及硫酸根等物質，都可當成電子接受者。當氧氣消耗時，系統中的微生物族群亦可能隨之改變。兼氣菌可利用硝酸根或氧當作電子接受者。當氧缺乏時，兼氣菌與厭氧菌就成為優勢菌種。藉由電子接受者濃度的測定，可瞭解場址是否有足夠之條件提供微生物進行生物分解。
- (4) 中間產物及最終產物：中間產物(如污染物之降解副產物、亞硝酸鹽、亞硫酸鹽、二價錳、二價鐵)及最終產物(如二氧化碳、甲烷)的測量，可瞭解微生物

降解反應是否進行及得知是否有毒性中間產物的產生，更可進一步證實微生物的活性。

荷蘭一新方法及技術為同位素分析方法，同位素的分析發現一些較輕同位素的物質對生物降解及蒸發反應有加速反應的助益（例如碳 12 比碳 13 有助於反應進行），但此法對稀釋、吸收、傳導作用則無助益。

而另一新技術為針對微生物提出 DNA 圖譜比對，該項研究至 2003 年已發現好氧微生物對 PCE、PCB 可進行降解反應，厭氧微生物則對苯（benzene）、臭樟腦（naphthalene）、石油碳氫化合物（petroleum HC）可反應，含氯（chlorate）環境微生物則對苯（benzene）具反應效果、厭氧條件下對 Monochlorobenzene 則不反應。

由上可知自然衰減法應用於受污染土壤及地下水的處理已有許多案例，尤其對化合物較小、單鏈化合物較易分解處理，化合物大支鏈多或環狀化合物則較難分解處理，已應用於石油碳氫化合物（BTEX）、含氯溶劑、含氯芳香族化合物（PAH）、多氯聯苯(PCB)、殺蟲劑及除草劑的處理上。

3. 監測性自然衰減法（Monitored Natural Attenuation）SINAS

—荷蘭決策支援系統 (Dutch decision support system)

由荷蘭目前自行發展的 SINAS (Site Investigation and Natural Attenuation System) 系統，係以類似交通紅綠燈系統的方式提供污染場址是否可得選監測性自然衰減法 (Monitored Natural Attenuation) 或急需尋找另外整治方法的決策支援系統。

此系統雖非官方規定的強制性運用系統，但仍是被建議使用的決策支援系統及使用工具，以四階段類似交通紅綠燈系統的步驟執行：

- (1) 快速搜尋廠址的歷史資料庫
- (2) 監測 plume 的發展過程
- (3) 與資金贊助者討論
- (4) 提出監測計畫

於第一步驟 (快速搜尋廠址的歷史資料庫) 中提供了統一的評估方法、結合 (GIS) 地理資訊系統，更易於簡單判斷並評估針對含氯有機碳 (chloro hydro carbons)、氯乙烯 (chloroethenes)、BTEX、Monochlorobenzene 及 MtBEu 依污染物類型及型式給予配分，得分總和大於等於 8 則為綠燈、小於等於 4 則給紅燈，其餘為黃燈，以判斷是否可

進行下一步驟或須另覓整治方案行。

第二步驟（監測 plume 的發展過程）則依污染標的項目輸入大概污染物的濃度、發生的時間、污染物總質量的大小判斷 plume 的大小及擴散的情形。若 plume 縮小且 plume 中污染物總質量降低則給予綠燈、若 plume 縮小或 plume 中污染物總質量降低則給予黃燈可繼續進行下一步驟，若 plume 擴散變大且 plume 中污染物總質量增加則給予紅燈，並應尋求緊急應變方案。

第三步驟（與資金贊助者討論）則針對整治所需時間、污染整治範圍、污染代謝的形式及附加的方向（如整治發展計畫、公眾的意見...等）做討論。

第四步驟（提出監測計畫）對於整治所需時間、長時間的監測等作一具體的規範，若整治期間監測後判斷為紅燈則須另提緊急應變計畫將污染物取出整治或另提替代整治方案，並應配合限制土地使用直至土壤及地下水整治完成。

監測性自然衰減法 MNA 執行期間仍可依監測頻率定期將數據放入系統中評估，若監測結果污染物減少或範圍縮小則可減少監測頻率，反之，應檢查運用條件具以核實

或改寫整治模式並執行緊急應變計畫。

4. 監測性自然衰減法 (Monitored Natural Attenuation) 之歐洲規範 (European dimension)

在荷蘭土壤及地下水污染整治，業界亦自行組成一個組織 Nicole (Network Of Industrially Contaminated Land)，組織中的成員包含跨國的工業企業(如：Ford motors，DOW chemicals，ICI，Shell，BP，Exxon Mobile，Powergen，Solvay，ENI group，Corus，Philips 等知名公司)、顧問公司、工程服務公司、大學、研究所、學術單位等等。組織設主席，而組織的秘書則由本次的訓練機構荷蘭 TNO 擔任。

該組織於 1997 年開始即推動監測性自然衰減法 MNA 專案，其創立的宗旨為針對污染場址尋求有關環境方面的探查及較具成本效益的整治解決方案，提供監測性自然衰減法 MNA 風險評估的技術面，目前該組織已選定 11 個示範場作為進行推動的場址，包含污染源為有機碳的場址 6 個，含氯有機碳的場址 2 個，酚污染場址 1 個，混合性污染場址 2 個。

Nicole 利用交通紅綠燈判定系統證明污染場址的歷史

資料對於整治場址污染量及其濃度的降低具有其正面的意義，地質化學（geochemical）及水文地質學（hydrogeological）的資料庫有助於自然衰減法 NA 了解污染形式及整治速率，而由實驗室對人類影響的研究也證明微生物學資料對自然衰減法 NA 確有幫助，以上三項的證明皆獲得美國 EPA、英國 Ea 及荷蘭本國現行方針所採用。

Nicole 也針對監測性自然衰減法 MNA 專案建立一些可依循的策略，包括以下幾項：

- （1）規定所有污染場址的共同調查資料。
- （2）每個會員皆投入至少 100000 歐元。
- （3）整治工作交由專業顧問公司執行。
- （4）分享各場址的整治經驗和知識。
- （5）統一共同輸出資料項目的格式。
- （6）交由第三者組成的委員會審查。
- （7）統合完成最後的專案報告（本專案由 TNO 完成）。

完成後的報告針對每個污染場址皆具統一格式標準的 10-12 頁摘要，然後交由政府機關、科學家們審視報告包括專案的介紹及其結果、監測模型的設計及控制參數，評估的標準，最後依政府機關、科學家們審查意見完成總結

報告，而後於 2005 年 Nicole 研討會中發表並刊登發佈於定期相關期刊，為一產、官、學界皆接受的最終完成報告。

(三) 結論

事實上監測性自然衰減法 (MNA) 在荷蘭運用在整治時並非是一個不行動 (no action) 之方案。而是以一專案研究的方式處理，並依土地使用的功能及其目的為導向，確實評估實施，有別於目前本國傳統整治技術在一些案例中，整治的方式只是將主要污染源 (如洩漏的地下貯槽) 移除淋洗 (淋洗後土壤中微生物相即死亡消失) 後回填而已，是以顧及自然復育的角度著眼，於污染來源移除後，便以自然生物處理完成清除工作，以利後續復育工作之執行。

四、含氯化合物之土污整治技術

(一) 前言

本課程討論含氯化合物，脂肪族化合物 (如四氯乙烯 (PCE)、三氯乙烯 (TCE))、芳香族化合物 (丹寧 (HCH)、PCB、戴奧辛 (dioxins)) 等污染物特性及整治技術。

(二) 內容

含氯化合物為強毒、複雜、難分解特性，可能具致癌生物

累積的危險，須善加處理。討論其降解特性，高氯乙烯須使用厭氧降解去氯，低氯乙烯可使用好氧及厭氧兩方式，惟厭氧方式降解污染物，須提供電子供應者，方使反應順利。

四氯乙烯為常見含氯化合物污染之一，生活中大量使用於汽車冷媒、噴霧添加等，其降解可能程序 $PCE \rightarrow TCE \rightarrow cDCE \rightarrow VC \rightarrow ethene$ ，如能有效控制環境因子，PCE 等含氯化合物能形成乙烯，可再借由 O_2 （氧氣）反應形成 CO_2 、 H_2O 。

去氯反應比率（percentage dechlorination）可依照 PCE 形成各種生成物計算而得，公式為：

$$\frac{(\frac{1}{4}[TCE] + \frac{1}{2}[DCEs] + \frac{3}{4}[VC] + [Ethene] + [Ethane])}{([PCE] + [TCE] + [DCEs] + [VC] + [ethene] + [ethane])} \times 100\% = \text{去氯百分比}$$

有機氯化合物降解趨勢，與氫（ H_2 ）濃度及氧化還原電位（Redox）有關連性，高氯化合物適於厭氧狀態下分解，故其分解速率正比於 H_2 （氫）濃度。低氯化合物則相反。BTEX 芳香族化合物適合好氧狀態，故其分解速率與 H_2 （氫）呈現曲線正比。其餘礦物油（mineral oil）及 PAHs（戴奧辛）之分解趨勢亦與 BTEX 相同。

進行場址調查土壤、地下水污染狀況時，首先進行田野調查，瞭解該場址特性，包括污染物種類、中間生成物、氧化還原電位（Redox）；硝酸鹽、鐵（III）、硫酸鹽、甲烷濃度、氫

濃度測量、溶解性有機化合物種類和濃度、營養物（碳、氮、磷營養鹽）及細菌種類調查（可使用 DNA 鑑定）。

污染物污染團（plume）自然衰減，可分成三區討論，最內圈污染物濃度高，呈現厭氧狀態，第二圈屬兼氣狀態，可使用鐵（III）、硫酸鹽（ SO_4^- ）、硝酸鹽（Nitrate）等，作為電子接受者。最外圍為好氧反應，細菌利用 O_2 （氧氣）分解污染物。

土壤及地下水污染，依其 H_2 （氫）濃度不同，可瞭解目前進行氧化還原反應種類為何，甲烷生成、硫酸鹽還原、DCE/VC（三氯乙烯／揮發性有機碳）還原、四氯乙烯／三氯乙烯（PCE/TCE）還原，鐵（III）還原、硝酸鹽還原皆有其適宜濃度。

進行污染物批次試驗時，須瞭解其確切位置為何？降解反應可否進行？生物降解速率為何？並進行刺激污染物降解試驗。

刺激降解反應進行時，好氧分解狀態下，可添加 O_2 （氧氣）測試，也可測試添加電子接受者（如 NO_3^- 、 SO_4^- ）和電子給予者（electron donor），也可進行營養物質（nutrients）或細菌（bacteria）調整。

(三) 結論

含氯化合物於工業製程中大量使用，極可能因廠商故意或不慎使用而污染環境，其毒性較強，易於影響動植物、人類及生態環境，發生此種污染須善加調查、整治，以維生命安全。

專題五、荷蘭土壤污染風險評估之方法與應用

一、荷蘭之土壤風險評估

(一) 前言

荷蘭政府為了預防及整治土壤及地下水污染，確保土地及地下水資源永續利用，改善生活環境，增進其國民健康，於1983年制訂其土壤保護之法規，用以規範土壤及地下水污染整治措施，並促使污染土壤及地下水之人，正視土壤與地下水污染預防與管制之重要性，積極從事減輕污染與控制污染源工作。人類活動所產生之各種污染物，當進入土壤中，致使土壤之物理、化學、生物等性質或功能劣化，而影響土壤的用途或造成環境及健康的危害，故需對污染土壤之危害，作一風險之評估。

不論是土壤有機物污染或無機物污染，都可能對作物的生育、人類或動物健康，以及土壤生物造成危害，此外，也對地表水質、地下水質及土壤性質造成影響，而危害與影響的程度，則視土壤污染物在土壤環境中的動態與殘留時間而定，故荷蘭政府與環境研究單位關係相當密切，且建立相當週密之土壤污染風險評估系統與機制，可提供整治及復育工作之重要參考依據。

(二) 內容

1. 荷蘭建立土壤污染風險評估機制，主要目的在於土壤之保護與對各種生物、生態系統之影響，以及對人體健康之危害程度。
2. 建立土壤污染風險評估，首先要了解調查污染場址的歷史使用背景，再進行工作架構建立，並監測其濃度值，區分其優先整治之場址，評估緊急整治之條件。
3. 荷蘭於 1975~1980 年發生二個嚴重的土壤污染案例，在 1987 年對於土壤污染嚴重問題之場址，進行各項整治復育與保護工作，經過評估結果，污染整治等處理費用要考慮其經濟性及財源從那裏籌措。
4. 1994~1998 年土壤保護及風險評估雖已建立機制，也產生新哲學理論，整治復育要快速進行，並且需導向市場。
5. 到了 2003 年政府修正思考方向，採取新的政策與污染整治概念，強調並加入地方保護意識。
6. 對於工作架構，乃建立基準濃度線，並區分以下三級：
 - (1) 乾淨土壤。
 - (2) 輕度污染。
 - (3) 嚴重污染。

並且建立緊急整治基準，對於緊急者優先進行整治，並以土地使用權及視土地使用目的決定整治基準值，無需百分之百完全清除乾淨，這是新的整治觀念之一。

7. 濃度值則需考慮生態系統風險前例，而修正值則考慮人體最大忍受值，而生態系統則有 50% 之空間。至於生態毒物修正值則考慮生物多樣性、生物支持方式，而生態判定標準較人類判定標準高。
8. 人體對毒物修正值則考慮孩童每週出去三次，成人每天出去一次及蔬菜 10% 吸收毒物量所造成之影響。
9. 對人體健康風險評估模型設計，主要在於毒物在人體器官循環所造成的影響，以及吸收途徑之分析研究，均為評估之一環。
10. 經評估結果有兩種整治情況：
 - (1) 非常嚴重者要在這一代整治，其又區分如下：
 - A. 非常緊急：從現在到 4 年內整治完成。
 - B. 次緊急：由 4~20 年內整治完成。
 - (2) 低嚴重者則留至下一代整治。
11. 著重於理論與實務平衡，以風險評估指標程序進行整治，並以電腦程式測定緊急程度。

12. 風險評估之程序不同，有三種基準點測定方式：

(1) 人類健康。

(2) 生態系統。

(3) 地下水。

13. 特殊利用的整治案例則有表層土的利用及六種土壤性質的運用。而對人類健康、生態系統、地下水之風險測定在於光學毒物、滲透情形、農藥污染、人類其他活動污染。

(三) 結論

歐盟是否適用同一風險評估標準？答案是否定的；歐盟雖還有很多議題合作，可有同樣的方針、標準、程序，但對於風險評估指標基準雖可有統一測定工具，惟各國仍制定適合其國內之測定風險評估之工具，而不會使用荷蘭所制定的土壤風險評估制度。

二、荷蘭土壤干預值之評定技術

(一) 前言

1994 年荷蘭政府制定之環境保護法 (Soil Protection Act) 中針對情況緊急的污染而定出干預值 (Intervention value)。以對人類及環境之風險潛勢以及進行深入研究調查，

評定土壤整治中之干預值。

(二) 內容

1. 土壤干預值評定起始點：

(1) 人體風險評估：

- A. 保護標準：最大允許風險 (MPR)。
- B. 曝露狀況：無背景曝露情況。
- C. 曝露模式：皆以理想參數。

(2) 環境風險評估：

- A. 保護標準：危害濃度 HC_{50} 。
- B. 生態系曝露途徑：只有直接曝露。

2. 土壤干預值評定程序：

(1) 以 HC_{50} 推估出土壤及地下水中之 SRC_{eco} 。

(2) MRR_{human} 透過 CSOIL 模式求出人體曝露量，進而求出土壤及地下水中之 SRC_{human} 。

(3) 再由 1.、2. 中之 SRC_{eco} 及 SRC_{human} 交互比對求出土壤及地下水中之 SRO。

3. 最大允許風險 (Maximal Permissible Risk, MPR)

考慮參數有：

- (1) 非致癌性：每天長時間曝露無致癌風險 (non-carcinogens)。
- (2) 致癌性：長時間曝露有 10^{-4} 致癌風險。
- (3) 攝入性 (Oral)：TDI→每日可忍受攝入量 ($\mu\text{g}/\text{kg}_{\text{bw}}/\text{day}$) CR_{oral} →攝入性致癌風險。
- (4) 吸入性 (Inhalative)：TCA→大氣中可忍受濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) CR_{inhal} →吸入性致癌風險。
- (5) 修正情況：
 - A. 高毒性數值。
 - B. 較好的吸入機制。

4. 植物吸收狀況評定：

- (1) 重金屬的吸收以經驗值推估。
- (2) 有機化合物的吸收須考慮化合物之揮發性 (K_{oa})，在高 K_{ow} 的情況下，根部吸收狀況及雨水由土壤濺起之水花透過葉片的吸收等。

(三) 結論

土壤干預值的評定須考慮人體曝露情況及許多曝露參數，含物理、化學各方面，及評估對環境的危害，並透過於實

驗室中條件可控制之情況下進行各種模擬，並於實際情況中，各種條件不確定下作一系列模擬比對，而由實驗數據及現場分析，並運用統計分析去評定土壤於各種情況之干預值 (intervention value)。

三、土壤調查與復育之實施步驟

(一) 前言

授課教師從事土壤污染及整治工作多年，目前為 TNO-EP 環境生物科技中生物程序土壤整治之計畫主持人。因本班同仁曾表達對於土壤調查之興趣，TNO 特別增加課程。

(二) 內容

Nanne 由 2004/4/19 荷蘭電子媒體報導有關荷蘭土壤污染報導切入，最新估算，在荷蘭有 600,000 處地點土壤受污染，由政府及歷史資料為根據，其中 60,000 處地點須要整治，但是如何確認整治場址須進一步復育？且其地點為何呢？

依照先後順序，荷蘭土壤調查和復育程序如下：

1. 先期調查，瞭解該場址是否污染，其背景值 (S-value) < 標準值表示土壤未受污染；如監測值大於背景值及干預值的一半 ($1/2 (S+I)$) 則進行下一步調查。

2. 調查污染的尺度和種類，以及其危害性為何？假如 25 立方公尺土壤或 100m³ 地下水之污染物濃度高於土壤干預值 (I)，則表示土壤受嚴重污染。
3. 接著評估其對人類、生態及傳送的風險。
4. 接著撰擬整治計畫，比較可能方案，選擇最佳方案。
5. 依整治計畫為藍圖，據以執行。

如何進行整治場址歷史資料追蹤呢？由公司資料、政府許可文件、先前真實從事活動地點及形式，使用何種化學品及當地地理水文資料做分析。如發現該地屬均勻污染情形 (homogeneous contamination)，如何決定調查及採樣方式呢？如場址面積為 P 公頃，採樣點 30P，土壤採樣數 30P，應分析之樣品數 10P，採樣地下水井 10P，應分析地下水樣品數為 10P。如發現該場址屬異相污染情形 (heterogeneous contamination) 如何決定調查及採樣方式呢？即可依照其長寬比，選擇對照表比對土壤及地下水採樣相關數據。

(三) 結論

TNO 同仁相當用心準備資料，適時提供資料，給予參訓同仁，詳加閱讀，以充實知能。往後轄內可依照授課內容，作為

土壤及地下水調查參考。

四、荷蘭土壤整治風險評估之方法與應用

(一) 前言

Mr. Meer 是位地質化學家，曾有六年 TNO-MEP 計畫經理之經驗，亦曾負責主持數個涵蓋自然衰減、風險評估、場址調查及監測清理策略之大型計畫，最近從事巨大場址對於鹿特丹港之風險評估工作，針對土壤及地下水整治計畫之風險評估實務經驗及理論科學有豐富心得，對於本訓練班全體學員受益良多。本課程包括立法架構、風險評估方法、模式工具及實務應用等內容，從荷蘭的新整治政策，歐盟的立法架構，風險評估的原理、方法與步驟，到風險評估的模式推估與應用，將風險評估應用於土壤及地下水整治工作進行有系統的整理傳授及心得交流。

(二) 內容

1. 立法架構（土壤保護法案）

- (1) 確認污染之嚴重性：對於有污染之虞之土地，進行污染調查，並將土壤之污染值與背景值作比較後可得到三種情況，分成小於目標值（對人體及環境之影響是可以忽略）、小於干預值（土地功能性質部已

受影響，但仍在風險容許範圍或生物 50%致死率內)
及大於干預值（土地功能已受影響且大於風險容許
或生物 50%致死率之範圍）。

- (2) 如屬大於干預值之情況，則須執行緊急整治確認：
進行風險評估，包含人體曝露風險、生物風險及擴
散風險，並決定整治時間及整治目標。

2. 荷蘭在土壤及地下水整治之新政策（走向）

- (1) 由於先前進行之整治，係將土壤中之污染物全清除
（不能有任何污染），不僅所需經費高且時間長，非
常沒有效率，因此逐漸改為優先考量土地使用目的
進行不同清理程度之整治及風險評估之方法。
- (2) 針對非移動性之污染源，則採避免直接接觸（如在
表層填土 2 公尺）及清理至可作功能性使用為止（依
使用目的清理）。
- (3) 在地下水之移動性污染範圍，則考量其穩定最終狀
態（30 年內污染範圍會縮小，則不作任何整治）、
處理費用低且有效率、自然衰減及監測。
- (4) 對於特別的場址，則需從大範圍考量（不能僅著限
於場址周邊而已）。

3. 歐盟之法令（一般水體及地下水）

- (1) 一般水體及地下水法令是互補的。
- (2) 一般水體法令已建構完整而地下水保護法令仍在發展中。
- (3) 目標：以整合性方法保護全部水系統。
- (4) 在 2015 年前達到一個好的化學狀態。
- (5) 由歐盟每個成員都可以有自己的規定。
- (6) 建立風險管理區域（RMZ）及保護區域之差異性。
- (7) 避免污染之轉移超越風險管理區域。

4. 風險評估方法：

包括完整的**污染源** → **途徑** → **受體**程序。

5. 人體風險評估步驟(I)

(1) 建立曝露模式

- A. 確定土地用途(包含現在及未來)：住宅用、工業用、娛樂用或農業用。
- B. 確定與土地使用相關之污染接受體（換言之瞭解誰被曝露於污染中，老人、小孩或工人…）。
- C. 確定污染傳輸路徑（污染源至受體）。
- D. 載明污染受體曝露路徑。

(A)直接的：吸入空氣、皮膚接觸、吃下等。

(B)非直接的：使用被污染的水或食物等。

(2) 污染傳輸量化

A. 由污染之土壤或地下水所至曝露地點，例如室內空氣或飲用水之污染濃度。

B. 考量污染物自然衰減情形。

C. 以分區方式逐步計算傳輸情形，或採非飽和區模式（經常被含於風險模式內）。

6. 人體風險評估步驟(II)

(1) 計算曝露風險。

A. 以污染濃度、曝露頻率、曝露週期、體重及吸入或吃到污染物之百分比等為計算基礎。

B. 對於特別場址資訊，需要多種之選擇。

C. 對於敏感性及不確性之因素進行分析。

D. 使用各種模式計算後，加以比較。

(2) 與最低風險作比較

A. 非致癌物質風險值：TDI(每天人體每公斤重多少毫克計算)。

B. 致癌物質：增加致癌可能性之風險(在荷蘭一般致

癌率為 10 萬分之一)。

7. 曝露量計算公式

$$\text{Intake(mg/kgbw/D)} = (\text{CA} \times \text{IR} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT})$$

CA：空氣中之污染物濃度(mg/m³)

IR：吸入率(m³/h)

ET：曝露時間(h/day)

EF：曝露頻率(days/year)

ED：曝露週期(years)

BW：體重(在美國一般定為 70kg)

AT：平均時間(days，一般為 30~70 年，致癌物質為 30 年，

非致癌物質為 70 年)

8. 世界各國使用之風險評估模式如下圖。

Country	Model used for soil and groundwater quality standards	Model used for other purposes	Biodegradation module
Australia	Noname	none	no
Austria	none	none	no
Belgium	Vlier-soil	yes	no
Denmark	none	none	no
Finland	none	CalTOX, RISC-Human	no
France	none	none	no
Germany	UMS	yes	no
Greece	none	none	no
Ireland	none	EUSES, POEM	no
Italy	ROME	ASTM RBCA	no
The Netherlands	CSOIL, SEDISOIL	USES, RISC-Human, HESP	no
Norway	Noname	yes	no
Portugal	none	none	no
Bask Provinces	LUR	none	no
Sweden	Naturvardverket	yes	no
Switzerland	none	none	no
United Kingdom	CLEA	yes	yes
USA	CalTOX	yes	yes

9. 在荷蘭常用的風險評估模式

- (1) CSOIC、SUS、VOLASOIC Risk human 及 J&E 等，須視實際的情形選擇合適的方法。
- (2) 例如，Risk human 評估軟體，只要輸入污染場址狀況(土地用途、曝露路徑等等)、場址參數(地下水深度、土壤含水率等等)、受體相關數據(大人、小孩、蔬菜攝取量、洗澡的時間等等)、時間劃分(不同季節的曝露時間等)及各污染物的量測值，就可得到各污染物的風險值(曝露量)及國家法規容許值比較表。

10. 風險評估結果之觀察分析

- (1) 不同的評估模式其評估結果有很大的差異。
- (2) 一般而言風險評估結果太過於保守(風險值偏高)

三、結論

- (一) 污染場址土地用途調查，必須包含目前及未來之土地用途。
- (二) 要充分了解自然衰減(NA)的過程，並將其納入評估。
- (三) 對於敏感性及不確定性因素要加以分析。
- (四) 透過實際量測數據驗證評估結果。

(五) 使用不同的評估模式，加以評估比較是較合適的。

五、成本效益評估之介紹

(一) 前言

Ms. Maring 是 TNO-MEP 之環境生物技術處的研究員，是一位熟稔地理資訊系統 (GIS)、決策支援系統 (DSS)、土地評估及土壤利用與管理的土壤科學家。現正參與一項歐洲的 PURE 計畫 (即工業污染場址之地下水資源保護計畫) 及數個荷蘭土地利用規劃計畫，同時也負責荷蘭場址調查及自然衰減系統 (Site Investigation and Natural Attenuation System, SINAS) 及自然衰減之決策支援系統之技術執行。針對荷蘭如何應用 ABC 工具 (即 Assessment of Benefit and Costs, ABC-tool) 來進行土壤及地下水污染場址之成本與效益分析，以做為土壤及地下水污染整治之決策參據。課程內容包括歐盟的地下水資源保護計畫 PURE，成本效益分析的各項目標、架構及方法，並例舉歐洲實例來進行實務應用與探討，對本訓練班成員可充分了解荷蘭及歐盟體之策略工具與實務經驗。

(二) 內容

1. 第五屆歐盟架構協議 (EU 5th framework program)

其中一項名為 PURE 計畫—工業區污染場址之地下水

資源保護計畫(共有六個國家十四個機構共同參與),其主要目的為有三:

- (1) 對於防止工業區地下水被污染的問題,提供新式的且有效益的、可廣泛應用於各種工業區之方法。
- (2) 將污染問題製造者、提供服務單位、土地使用者及研發人員等加以整合在一起。
- (3) 這新的方法或技術將降低污染場址調查費用 20%,降低污染場址整治費用 20~40%。

2. PURE 組織架構

分成二大部分,第一部分為場址污染調查和整治模式(含效益評估和場址調查、就地處理技術發展、場址調查及模式化),第二部分為嚴重的土壤及地下水污染整治技術(有含氯化合物之分解及重金屬的穩定化、電子-生物整治、混合污染物的結合分解、飽和區及未飽和區的同時整治、甲烷、丁烷及氧化物的共同新陳代謝)。

3. PURE 計畫的目標

- (1) 研發對各種不同場址整治方式之效益評估決策工具。
- (2) 發展對於場址調查之新式的且具高效益的方法。

- (3) 對於複雜的污染場址，發展和測試新的技術。
- (4) 提供相關人員有效的溝通工具，以達成使用最佳的方法保護地下水資源。
- (5) 使研發之學術及經驗可有效的運用於實際個案。

4. 創新

- (1) 參與 PURE 計畫之 TNO 研發出一名為「ABC 工具」的軟體，A 代表評估(Assessment)，B 代表效益(Benefits)，C 代表費用(Costs)為該軟體主要的三個模組。
- (2) 「ABC-tool」使用數種決定支持法確保選擇正確的整治技術。
- (3) ABC-tool 具下列功能及特性：
 - A. 週期分析。
 - B. 經費效益分析。
 - C. 多重標準分析或多重特質分析。
 - D. 容易使用。
 - E. 沒有全部的(輸入)資料，亦可以得到結果(惟其輸出之結果會較模糊)。
 - F. 屬於開放性結構(全部輸入資料均可修正)。

- G. 可以快速得到結果且自動將結果以數字和圖表之形式輸出(顯示)報告。
 - H. 專家資料庫可不斷更新。
- (4) ABC-tool 可提供地主很多重要的訊息，如環境的負荷、土壤的清理情形、整治時間、空間發展過程、整治費用等。
- (5) ABC-tool 軟體組成元件。
- A. 可行性及不可行性技術庫。
 - B. 可用的專家資料庫。
 - C. 效益資料庫(整治技術對環境的益處)。
 - D. 費用資料庫(就不同技術及不同國家分別計算)。
 - E. A、B、C 模組。
 - F. 場址資料(須輸入)。
 - G. 專家之聯繫資料庫(提供專家之聯繫電話號碼等資料)。
 - H. 報告輸出(使用 Excel，包含可行性技術、效益分析、費用估算三大部分)。
- (6) ABC-tool 是一個具技術性的、溝通性的、學習性的及經濟性的等功能之工具。

(三) 結論

1. 對於污染情況複雜之工業區場址之估算，ABC-tool 是很有幫助的。
2. ABC-tool 可以作為溝通工具，增進與政府機構或資金擁有者間良好互動。
3. ABC-tool 是提供各種可能性、介紹新的技術，但並不能取代專家或顧問。
4. 使用者最好具有污染整治經驗或相關專業知識，以便對於整治技術做正確的決定。
5. 透過 ABC-tool 協助，使用者可以做出使環境安全及花費更有效的決定，甚至將他們的策略向關心之政黨遊說。
6. 透過 ABC-tool 之協助，使用者可以對污染物受體做風險評估。
7. ABC-tool 為一開放性架構，可以容易擴充(或修改)專家及可行性技術資料庫。
8. ABC-tool 是使用於污染場址調查後，污染整治前，之應用工具。
9. ABC-tool 適用範圍廣泛，非常具有彈性。
10. ABC-tool 可以將新發明的技術轉成標準化技術。

專題六、觀摩 DAF 生物整治場址—氯乙炔及氯乙炔生物整治個案 研究 (DAF)

一、前言：

上午課程已先研習有關含氯化合物污染土壤和地下水狀況，配合課程內容個案研究 DAF 的土壤污染整治情形。並於下午前往該廠實地參觀，接著參觀 Heijmans 土壤處理工廠，了解污染土壤處理流程。

二、內容：

DAF 工廠位於 Apeldoorn 南方約 100 公里處，從事汽車及卡車製造，鋼材去油過程，產生有機氯化合物污染，大部分為 TEC (三氯乙炔)，也含 TCA 和 BTEX (苯環化合物)。地下水流影響運河 (canal) 水質。土壤質地不均，含砂質、細砂、泥炭土和黏土。主要污染地點位於生產工廠下方，現地檢測發現分解後產物 cDEC、VC 和乙炔。

污染場址地下水位淺，污染物以順時鐘方式擴散污染團 (plume)，由場址橫剖面圖可看出該場址有許多污染團污染，目前僅針對其中一污染較嚴重場址整治。

現地採用生物篩 (bioscreen) 整治，為什麼呢？因當地

為複雜、大面積污染，且土壤質地不均。污染源位於重要生產工廠下方，上方土壤地下水流速低，污染源整治朝向慢慢整治，故於污染源處，污染形狀就像漏斗狀，可於漏斗下方設置生物篩，污染物進入含水層前可接觸分解。預估以目前揮發性有機物模式評估，如使用生物篩降解污染，將有效減少污染。

經由微生態系統 (microcosm) 100 天測試結果，經由硫酸鹽還原可有效脫氯，但對於 NH_4Cl 少分解，1,1-DCA 無發生脫氯反應。

DAF 污染場址中，分成二個系統整治，抽出地下水，添加營養物，再注入地下，分別比較整治成效。開始於 2001 年 2 月，使用低劑量 Na-lactate 營養物，超過 20 次注入電子平衡物 (e-equivalent) 使硫酸鹽還原，但第一年無反應發生。

改變添加營養物，第一系統添加氮源及 ethyl-lactate，第二系統添加氮源及 potato-starch。接著，第一系統亦添加 potato-starch (蕃茄—澱粉)。

經由監測結果，於第一、第二系統皆發現 TCE (三氯乙烯) 有效轉換為 VC (揮發性有機物) 及乙烯，顯示污染有效轉化。

因污染團仍持續擴散，DAF 現址有多處監測井，每一監測井設置多重採樣器 (multi level sampler) 由 20~60 公尺深

設 16 層採樣，瞭解各深度污染情形。

有機氯化合物降解趨勢，與氫 (H_2) 濃度及氧化還原電位 (Redox) 有關連性，高氯化合物適於厭氧狀態下分解，故其分解速率正比於 H_2 (氫) 濃度。低氯化合物則相反。BTEX 芳香族化合物適合好氧狀態，故其分解速率與 H_2 (氫) 呈現曲線正比。其餘礦物油 (mineral oil) 及 PAHs (戴奧辛) 之分解趨勢亦與 BTEX 相同。

進行場址調查土壤、地下水污染狀況時，首先進行田野調查，瞭解該場址特性，包括污染物種類、中間生成物、氧化還原電位 (Redox)；硝酸鹽、鐵 (III)、硫酸鹽、甲烷濃度、氫濃度測量、溶解性有機化合物種類和濃度、營養物 (碳、氮、磷營養鹽) 及細菌種類調查 (可使用 DNA 鑑定)。

污染物污染團 (plume) 自然衰減，可分成三區討論，最內圈污染物濃度高，呈現厭氧狀態，第二圈屬兼氣狀態，可使用鐵 (III)、硫酸鹽 (SO_4^{2-})、硝酸鹽 (Nitrate) 等，作為電子接受者。最外圍為好氧反應，細菌利用 O_2 (氧氣) 分解污染物。

土壤及地下水污染，依其 H_2 (氫) 濃度不同，可瞭解目前進行氧化還原反應種類為何，甲烷生成、硫酸鹽還原、DCE/VC (三氯乙烯／揮發性有機碳) 還原、四氯乙烯／三氯乙烯

(PCE/TCE) 還原，鐵(III) 還原、硝酸鹽還原皆有其適宜濃度。

進行污染物批次試驗時，須瞭解其確切位置為何？降解反應可否進行？生物降解速率為何？並進行刺激污染物降解試驗。

刺激降解反應進行時，好氧分解狀態下，可添加 O_2 (氧氣) 測試，也可測試添加電子接受者 (如 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 和電子給予者 (electron donor)，也可進行營養物質 (nutrients) 或細菌 (bacteria) 調整。

三、實地參訪 (I) - DAF :

DAF 為汽車、卡車製造公司，場址有多處污染團，其中最大污染團面積寬廣，由鋼鐵去油程序洩出，深入地層 60m，由運河下方橫越道路至另一區土地。

首前往工廠外污染團區上方，觀看污染團跨越運河區後之監測井，說明各深度採樣點，該井共分 16 點採樣。

接著，進入工廠實地觀看污染場址之監測井，該地可分成 2 個系統，皆如課程內容進行整治。

四、結論：

本課程除進行原理介紹外，更實地參訪，瞭解含氯有機物污染場址整治現況。參訪後，發現荷蘭土壤整治時間長，整治場址乾淨，如未經課程介紹，經過該地也不知道該地正進行整治中，此種整治技術特殊適用於荷蘭，且易受該國人民所接受。

專題七、觀摩 Heijmans 污染土壤處理再利用場

該公司 Heijmans 位於荷蘭南部 Rosmalen 地方，該地點從事受污染土壤處理工作，包括拆除房屋後之營建廢棄物處理再利用、瀝青回收再利用、焚化後飛灰固化再利用及污泥處理等項目，每小時可處理 25 噸，2003 年共處理 50,000 噸受污染土壤。該公司在荷蘭 Moerdijk 地方也有一個類似的處理再利用場，每小時可處理 40 噸，2003 年共處理 50,000 噸受污染土壤。這些經酸洗處理後的乾淨土壤再以土方出售。

受污染土壤處理程序，先經篩選，分離顆粒大的礫石，接著進行洗砂工作，土壤經由洗淨程序，加水不斷磨擦，將表面污染物洗出。洗淨污染物沉降堆積可作為再生材料，作為建築使用。其餘輕質污染泥（sludge）及污染物則經由脫水過程，使污染物脫水堆積於廠內貯存區，再進入掩埋場（landfill）棄置。

荷蘭類似的土壤處理再利用場須先取得土壤清除處理許可證，才可執行本項業務，地方政府也會定期進行環境監測。

專題八、歐洲案例介紹及台灣案例研討

一、歐洲案例介紹

(一) 前言

Ms. Maring 延伸成本效益評估工具的介紹，與理論及決策基礎，藉由歐洲的案例來加深本訓練班學員的知能。以污染工業場址回復之場址特性化方法 (Site Characterization Approach for Recovery of contaminated industrial sites, SCAR) 為例，說明 ABC 工具如何在過程中應用，以協助尋求最佳解決方式。內容分階段性循序漸進逐步演繹，適時加入成本效益分析所需之各項參數，包括場址土地利用現況、地下水文學之水理數據及污染物之各項特性，快速而有效的做出決策建議，以提供決策者政策制定或策略運用之重要參據。

(二) 內容

由 ABC 技術應用於歐洲個案 (荷蘭)，是否可行應用於台灣，由模式操作，輸入各項條件，適用於歐盟(含土耳其)。

實際案例：

地點：比利時

特性：塑膠生產工廠

面積：50 公頃

並加入可行性及不可行選項。

現狀描述：1. 周圍無建築物（大量），故其利用率低，評估效率增高。

2. 水深 7~25m，由 7~25m 不同現況，使用不同工具。

3. 流速（地下水流道 0~40m/year）。

4. 污染類別：TCE（四氯乙烯）沉積於土壤。由各種技術測其不同土層 TCE 含量。

5. 土地性質：同類型砂質土壤。

6. 污染點：污染本源、羽毛區（污染地點）。

7. 污染深度 0~25m 飽和區水層。

8. 專業人員及技術人員選擇。

9. 輸入所有相對條件及數據，則由橫式計算出花費值。

由報告並顯出輸入數據，藉由土壤擴散性檢討原因（1）由運輸過程造成；（2）非危害性污染物；（3）技術層面對空間、時間之正負比值，決定其可行性。

(三) 結論

1. 藉由不同圖表比較歐洲國家易地處理現況。
2. 由發酵過程不同，其花費亦不相同。
3. 藉由圖表，經專家評估生物修復技術，並估算之。
4. 不同整治後土壤，藉由不同發酵過程其整治結果亦不相同。
5. 土地利用為決定 tool 之最大指標。
6. 歐盟數據之建立係由荷蘭國家先行研究得到數據，其他國家則藉由網路及合作關係得之，因各國有共同的問題例如乾洗業之含氯有機溶劑污染，才促成跨國性共同研究計畫，而研究成果及數據資料庫則使歐盟各國受惠。

二、台灣案例研討

(一) 前言

Ms. Linda 延伸歐洲案例，以 ABC 工具作成本效益評估工具的介紹，理論及應用於荷蘭案例，藉由台灣提供個案，套入模式中運用，以提供最佳服務方式、建議方案。

(二) 內容

1. 農地重金屬污染案

農地重金屬污染並不適用監測性自然衰減法 MNA 整治，但若有一灌溉溝渠上游有多家工業污染產生，至污染下游農業作物時，荷蘭訓練機構 TNO 建議：由政府於污染進入農田前劃定一污染責任區，並規定若農地遭受污染，可先由事業機構自行針對污染物及其工廠生產特性比對，以釐清污染責任；若數家事業機構皆具疑似污染特性生產而無法釐清責任時，則由政府估計整治費用，交由事業機構自行依其調查比對證明文件協調整治費用分配比例整治之。

2. 含氯有機物 (DNAPAL) 污染地下水案

在台灣許多污染場址若遭含氯有機物 (DNAPAL) 污染時，首先應查證其污染分布圖，可參考疑似污染事業機構生產資料，並須檢測土壤及地下水中乙烯、溶解性有機碳 (DOC) 含量及濃度、土壤及地下水氧化還原反應機制 (REDOX) 以了解土壤及地下水為厭氧及好氧環境以利選定整治方針。

由於台灣所提供之個案均屬典型農地污染，且無相關資料

可提供，如水文資料與 ABC 工具運用荷蘭模式（用於工業污染調查）亦不盡相容，不管是彰化或苗栗、中港溪個案，均無法應用於模式上，故只能作假設性操作及輸入，並由 Ms. Alette 講授中港溪四氯乙烯污染案，可能之污染源及羽毛區狀污染團（plume）。並由氧化還原條件測其自然衰減作用，由好氧厭氧處理，研究其衰減情況，考慮上述條件後，得知加入微生物於厭氧條件下有利 TCE 分解。

解決條件：1. 污染物之衰減條件。2. 加入物質之反應程度或效率。

隨後由 Mr. Sjef 依台灣情況及歐洲個案，講授歐洲處理土壤或地下水的原則：

1. 土壤污染去除：以排土客土法為主
2. 地下水污染去除：以幫浦法抽出處理後注入為主
3. 氯化物處理方法：
 - (1) 蒸發作用
 - (2) 萃取作用
 - (3) 注入空氣
 - (4) 純化操作
 - (5) 隔離法：利用水文地理及隔絕牆法阻截。

並考慮不同技術、污染物濃度、衰減、費用、時間效率，形成最佳操作方法。

(三) 結論

1. 考慮土地利用，則自然衰減為最佳方法。
2. 歐洲土壤及地下水污染處理成本概算為土壤排土客土費用在 200 歐元/ m^3 ，地下水則為 25~50,000 歐元，其中 25,000 歐元為前期費用，後期處理費則為 3~5 歐元/ m^3 ，監測費用為每年 10,000 歐元（含一般費用、前期設備及監測），土壤氣提法處理費為 1,000 歐元/月、注氣法處理費則為 500 歐元/月）。

伍、結論與建議

1. 本次訓練課程，充分傳達荷蘭政府、居民、產業界及承包商在土壤及地下水污染整治及復育中的高度共識；藉由拜會荷蘭政府環保部門及其技術機構，了解該國在污染整治政策的方向及各項技術概念，包含風險評估及其對策；參觀整治場址，也了解荷蘭政府現階段全面運用監測性自然衰減法（MNA）於土壤污染整治，在依不同土地分區使用條件下，不但節省整治經費，並可達到土壤整治復育再利用的目標。
2. 所謂「他山之石可以攻錯」，雖藉此次訓練的學習，可了解監測性自然衰減法（MNA）及其決策支援系統（SINAS）可以在有限的經費下更有效的達成土壤及地下水污染整治及復育的目標，惟荷蘭國情、全民共識與環境條件與本國之各項相對條件截然不同，其方法或可提供我國未來長期整治復育之理想目標，現階段首應解決國土規劃、土地分區使用管制之區隔與明確定位，以避免事業污染源散至各區位，造成污染之複雜性及後續整治復育之困難性，另應持續汲取其他先進國家更多更好的整治政策、技術及經驗，並與我國技術顧問工程業界經驗分享，以有限的經費達到真正潔淨的家園。
3. 荷蘭人開放、協商、妥協與合作的特質，充分顯示在該國土壤污

染整治復育之目標管理上，其對於場址污染並非僅是採取降低污染物濃度的方式為之，而是依各種土地之不同用途而訂定不同之整治標準，以達到降低風險及減少對環境與人體之污染影響為目的。先進國家對於場址之污染採以風險評估來確立整治方向，雖然是解決問題的務實作法，但要如何推動風險評估概念，確立風險管理措施，消除社會大眾疑慮，以順利獲致共識結論，確是需要經過不斷說服與折衝的漫長過程。

4. 荷蘭城鄉建設前均會進行三度空間之規劃與調查，以充分了解土壤環境之現況，進而設計一套符合該區域環境生態與人文活動的城鄉風貌與景觀，這種將環境保護與社區建設融合在一起的發展方向與做法，對於該國污染場址採取風險評估與風險管理的策略，自然有其正面的輔助效果。
5. 荷蘭政府致力於土壤污染整治與復育工作已有二、三十年之豐富經驗，在政策決策系統機制上納入專業部門(如 VRIM)及學術研究單位(如 TNO)之研發成果、專業意見與建議，作為政策法規之重要依據，並在污染區域上進行不同之整治復育研究，將研究成果有效運用到其他污染場址上，進而推廣技術至市場上，達到商業化目標，真正做到產官學研共同合作的理想目標，值得我國借鏡。