

行政院所屬各機關報告書
(出國類別：考察)

德國土壤及地下水污染整治技術與環保法規制度 心得報告

服務機關：中國石油股份有限公司

出國人職稱：工業安全衛生師

姓名：蕭文河

出國地區：德國科隆

出國期間：2001.07.06~12

報告日期：2001.08.28

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：德國土壤及地下水污染整治技術與環保法規制度

頁數 41 含附件： 是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

蕭文河/中國石油公司油品行銷事業部台中營業處/工業安全衛生師/04-22920130

出國類別： 1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：2001.07.06~12

出國地區：德國科隆

報告日期：2001.08.28

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

國內土壤及地下水污染整治法於民國八十九年公告實施，其施行細則及相關標準迄今尚未公佈；本事業部所屬油庫及加油站，部份因長期操作疑有污染之虞，為妥善處理地下環境之污染整治，達到符合相關環保法令規定，已積極進行土壤及地下水污染調查與整治，在各相關部門努力配合下，已獲得整治成效，土壤與地下水之油氣濃度已明顯降低；然因地下環境複雜多變且受限條件較多，某些場址雖已投入相當多之人力及物力，處理成效尚需較長時間追蹤觀察，故有參考先進國家土壤及地下水污染整治技術及經驗之必要。

德國在土壤及地下水之整治經驗，係由各聯邦州先推動，累積相當成熟技術與經驗後，再由聯邦政府彙整訂定出適用於全國之土壤保護法，此與國內法令之訂定有所不同；且因標準的訂定係由整治經驗而得，顯然較為務實。由德國 ANNA 污染場址整治經驗，重度受污染土壤採用熱處理方式，中度受污染土壤採用固化方式，且處理後之土壤處置管制皆較嚴格，可作為借鏡；而且開挖時為防止 VOC 逸散，採用密閉式開挖，與國內土壤整治時常導致空氣污染問題有很大差異，亦為國內處理土壤中揮發性有機污染物所需學習之處。

行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：德國土壤及地下水污染整治技術與環保法規制度													
出國計畫主辦機關名稱：中國石油股份有限公司													
出國人姓名/職稱/服務單位（若二人或以上，則列 等 人） 蕭文河/工業安全衛生師/中國石油公司油品行銷事業部台中營業處													
出國計畫 主辦機關 審核意見	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依限繳交出國報告 2. 格式完整 3. 內容充實完備 4. 建議具參考價值 5. 送本機關參考或研辦 6. 送上級機關參考 7. 退回補正，原因：（1）不符原核定出國計畫 （2）以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 （3）內容空洞簡略 （4）未依行政院所屬各機關出國報告規格辦理 （5）未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 8. 其他處理意見： 												
層轉機關 審核意見	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 40%;">同意主辦機關審核意見</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">全部</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">部分</td> <td style="width: 30%; text-align: right;">（寫審核意見編號）</td> </tr> <tr> <td>退回補正、原因：</td> <td colspan="3" style="text-align: right;">（填寫審核意見編號）</td> </tr> <tr> <td>其他處理意見：</td> <td colspan="3"></td> </tr> </table>	同意主辦機關審核意見	全部	部分	（寫審核意見編號）	退回補正、原因：	（填寫審核意見編號）			其他處理意見：			
同意主辦機關審核意見	全部	部分	（寫審核意見編號）										
退回補正、原因：	（填寫審核意見編號）												
其他處理意見：													

說明：

- 一：出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二：各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三：審核作業應於出國報告提出後二個月內完成。

目錄

壹、目的	1
貳、過程	2
參、心得	3
一、德國在土壤及地下水污染整治方面之相關 制度及標準	4
二、德國地下環境污染整治實例	11
三、油庫與加油站土壤及地下水污染整治方法 與適用性探討	22
四、結語	26
肆、建議	27
附件一、Action、trigger and precautionary values	28
附件二、Requirements concerning remediation investigation and remediation plan	35
附件三、requirements concerning the investigation and evaluation of areas where there is suspicion of the existence of an adverse soil alteration resulting from soil erosion by water	38
附件四、德國 Anna 污染場址土壤整治圖片	39

壹、目的

國內土壤及地下水污染整治法於民國八十九年初公告實施，其施行細則及相關標準迄今尚未公佈，本事業部所屬油庫及加油站，部份因長期操作疑有污染之虞，對於未來之永續經營將產生重大影響。為妥善處理地下環境之污染整治，以符合日益嚴格的環保法令標準，宜透過了解先進國家在此一方面之經驗與技術，評估與引進適當可行方法，應用於本公司污染場址，縮短整治時間與節省整治成本。

德國在環境保護與污染防治方面績效卓著，德國萊因公司(TUV)在此一領域經驗豐富，其業務並擴展至全球各地，透過至德國萊茵公司學習其地下環境之污染整治方法與經驗，除了增加自己在此一方面之知識技能外，並提出建議，作為公司污染場址整治之參考。

貳、過程

本次考察自民國九十年七月六日至十二日共七天，過程如下：

七月六、七日：啟程前往德國法蘭克福

七月八 十日：至科隆拜訪德國萊茵公司(TUV)，了解其環保法令相關規定並學習其土壤及地下水污染整治方法與技術，並至污染場址 ANNA 學習了解整治實務。

七月十一、十二日：返程

參、心得

本次考察針對德國土壤及地下水污染整治之方法及相關標準規定，研究其適用於國內地下環境之污染整治方法與相關遵循依據；國內土壤及地下水污染整治法雖已於民國八十九年初公告，然因施行細則及相關標準迄今尚未公佈，導致於規劃地下污染整治之相關措施時難以遵循，且常因附近居民不理性要求與學者理論性嚴苛標準，必須採取比較嚴苛不合理之整治標準，不只浪費資源且延宕整治時間，對於事業之永續經營將產生重大影響。為妥善處理地下環境之污染整治，透過了解德國萊因公司(TUV)在此一方面之經驗與技術，評估與引進適當可行方法，應用於本公司污染場址，縮短整治時間與節省整治成本。

心得內容如下：

- 一、 德國在土壤及地下水污染整治方面之相關制度及標準。
- 二、 德國地下環境污染整治實例。
- 三、 油庫與加油站土壤及地下水污染整治方法與適用性探討。
- 四、 結語。

一、德國在土壤及地下水污染整治方面之相關制度及標準

德國是一個聯邦制國家，其法令之制定，常由各聯邦州先自訂法令，最後再由聯邦政府制定聯邦法規統一推行於全國實施，土壤保護相關法令亦是如是；1960年在聯邦水資源法及其後續之聯邦州自治法規中已定義了對地下水之保護，於1972年制定聯邦廢棄物管理法及其後續之聯邦州自治法規，1980年代有些聯邦州已經在其廢棄物管理自治法中規範了土壤保護，1991年第一個聯邦州土壤保護自治法規公告實施；而於1999年，由各聯邦州彙整過去二十年之整治經驗，制定了德國聯邦土壤保護法公告實施於全國，該法因係由下往上之制定方式，且是依據實務經驗而得，與國內89年頒布之「土壤與地下水污染整治法」比較起來，顯然較務實。

德國對於土壤及地下水之調查工作規定，係採用階段性作法，每一階段分為三個步驟(計畫、執行及成果評估)，每一階段之成果即為下一階段工作之依據。

1. 場址歷史紀錄調查

經有系統的清查找出可疑場址後，針對個別場址進行詳細的檔案資料調查及現場勘查，包括場址過去發展歷史及環境相關事件資料記錄、場內所有原物料，特別是有害物質之紀錄、建築物之安全性及過去調查之相關資料等等。本階段之目的即在收集完整之場址資料以判定是否需進行下一階段之調查。

2. 初步調查

根據既有的調查資料判定此一階段調查的必要與否，土壤及土壤氣體通常採用格狀的採樣模式，將樣品自場址內取出，於現場直接化驗或

送至實驗室檢驗分析。如有其他資料，特定區域的採樣也可同時進行，樣品除了標準的檢測項目外，也應對歷史調查中之特定物質進行檢測。確認且推估不同的污染物及其濃度是相當重要的，本階段之目的及在確認場址是否遭受到污染，而檢測結果隻判斷應詳細考量不同場址之狀況後，依「觸發值」(trigger value)進行評估。

3. 詳細調查

存在特定的證據顯示場址內存在或可能存在高於「觸發值」(trigger value)之污染物濃度，在詳細調查過程中，應確認場址內特定污染物之存量是否帶來風險，並應界定每一污染區域並製作污染物之濃度線圖，因此樣品之分析項目將包含基本項目及「歷史調查」所得結果及初步調查所新發現之項目，在詳細考量不同場址之狀況後，分析結果應依「行動值」(action value)進行評估，以確定何種整治，保護或限制措施應被採行，確認結果後，本場址及被視為遭受污染場址。

4. 整治調查及整治計劃

因污染物之種類、分布或數量對個人或公眾造成影響，污染關係人必須進行整治調查並提出整治計劃，整治調查對決定整治技術及程度非常重要，復育計劃應包含：

- 風險評估之摘要及整治調查
- 污染場址過去、現在及未來之使用狀況
- 整治目標之敘述；應採取除污、穩定、保護、限制及自我監測措施及其實施時機。

除污措施若是符合技術上及經濟上可行且能確保其處理後殘留之污染物對個人或公眾不再具有影響，則該除污措施即適合使用。

實務的做法：

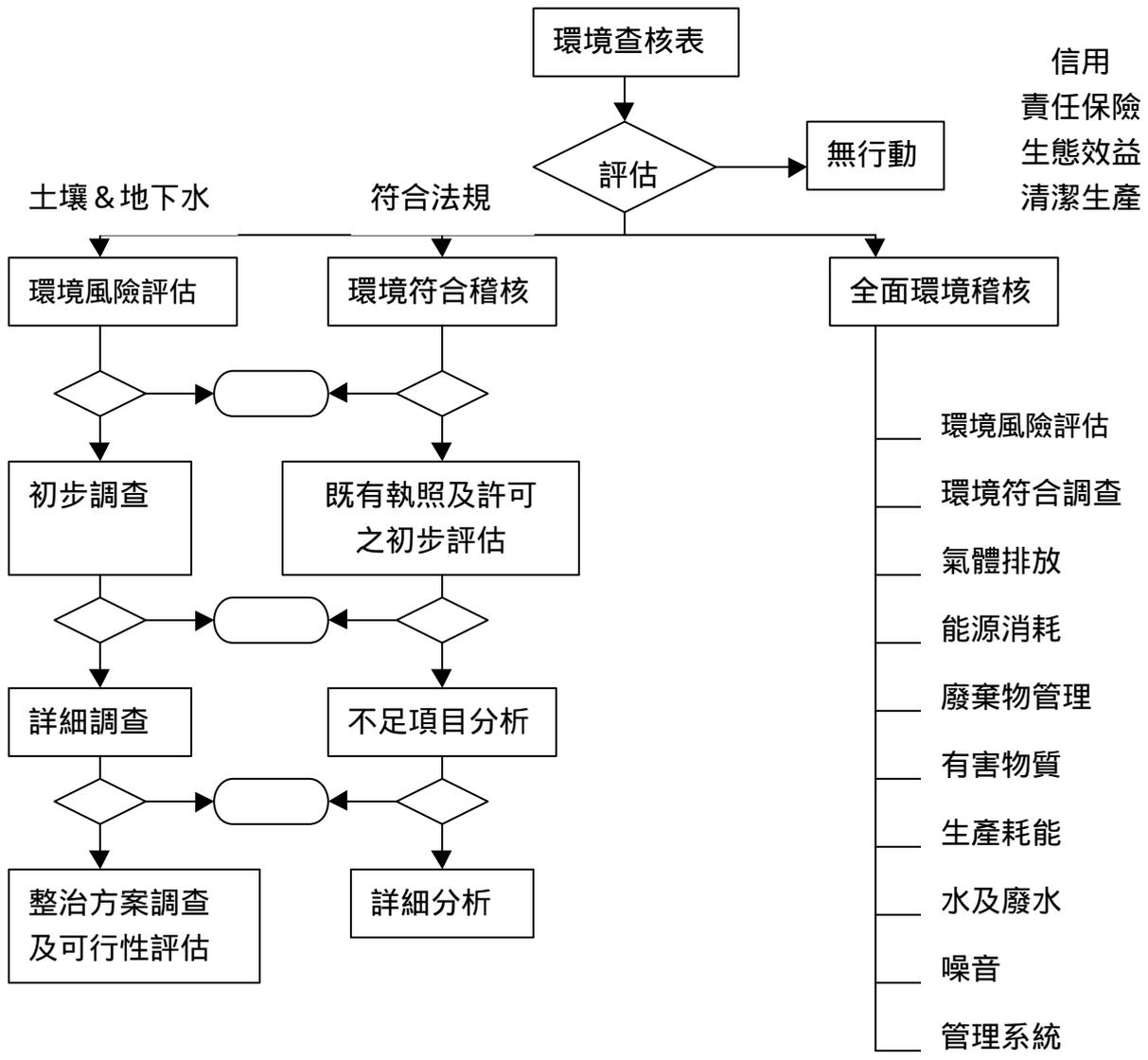
這種系統性的階段作法應該也能適用於國內，當然必須將當地的狀況列入整體考量，以下幾點即為應特別主注意之事項：

- 場址狀況之調查
- 潛在風險之調查
- 目標之確認
- 調查計劃

場址狀況調查包含意外事件、抵押貸款、產權轉移（包含合併及併購）是否為「指定公告事業」及其預防措施。潛在風險可經由環境風險評估（EDDA）來確認，或由一全面環境稽核（EEA）或經由初步的環境查核表。環境風險評估包含多次的場址勘查，官方及私人檔案之查閱，並據以判斷可能之污染物及其分布位置（土壤、土壤氣、地下水及建築物）。若有污然存在之可能，場址「採樣及分析計劃」將會被提出進行「初步調查」。

全面環境稽核（EEA）指對場址之所有環保項目進行全面評估，項目包括廢棄物、廢水、氣體排放、有害物質、土壤、地下水及各項操作許可，環保相關操作許可評估將由環保符合稽核（ECA）及其相關檢核。由德國得利銀行及德國萊因共同發展的「環境查核表」（詳如下頁），可用於對場址進行初步的評估及建議。

所有調查之前應先確立調查之目標，而後實際的調查才能依據現場狀況、潛在風險及調查目標詳加規劃。



德國萊因公司環境查核表

因此，依德國之經驗建議以下之階段作法：

1. 環境查核表

- 提供基本資料
- 潛在風險之專業評估
- 後續措施之建議

第一階段之資料是所有後續階段之基礎也將影響調查之結果。

2. 環境風險評估

- 場址調查
- 檔案資料之查閱
- 有害物質之確認，數量及種類
- 土壤、土壤氣、地下水之風險評估
- 若有污染存在之可能，初步調查之「採樣及分析計劃」將被提出。

3. 場址初步調查

- 執行採樣及分析計劃，針對土壤、土壤氣及地下水進行一般項目分析及前階段所發現之特定項目分析。
- 確認污染物存在與否
- 確認污染物之種類及其濃度
- 界定污染區域及其變化
- 風險評估
- 若有污染之存在，下階段詳細調查之「採樣及分析計劃將被提出」將被提出。

4. 場址詳細調查

- 執行採樣及分析計劃
- 確定污染物之空間分布

- 界定未受污染之區域
- 傳播途徑之風險評估
- 確定應採取之整治、保護及限制措施
- 可行對策初步評估

5. 整治調查及整治計劃

- 整治技術之經濟性及技術性評估
- 替代方案之成本效益分析
- 進行整治調查以提供決策所需資料
- 全面復育計劃之規劃
 - * 整治目標
 - * 整治技術
 - * 整治範圍
 - * 進度
 - * 執行整治工作之預算

對於突發性之污染事件必須採取立即之緊急處置，則不適用本作法，這種多階段的因應措施應依場址狀況不同而彈性使用，對於較小的場址可考慮整合至 2 到 3 階段即可，但是上述之要素均應包含在內以獲得足夠的必要資訊以達成整治目標。

結論：

這種階段性的因應措施係由所有參與之單位共同配合發展而成，包括主管機關、污染關係人、工程公司及獨立之公正顧問機構，根據他們的經驗，多階段性的作法可確保有效率的調查及整治作業，而這種作法也被德國聯邦土壤保護法所要求。此種方式也能適用於國內，各級主管機關的態度是決定性因素。目前最重要的工作就是儘速

著手解決現有的土壤地下水污染問題，同時要有系統的去發現及改正過去在處理有害物質（包含廢棄物及廢水）之缺失，並應持續執行管理上及技術上之預防措施。

污染已知，技術存在，具經驗的專業機構國內也存在多家，只需再建立可信賴的法規及透明的決策，公平而適切之執法程度，同時主管機關及管理階層應更加強決策過程且避免短視的作法。

土壤及地下水相關標準

德國聯邦政府於 1999 年頒布了土壤保護法(Federal Soil Protection Act)，依據 Article 8 (Values and Requirements)訂定 trigger values(觸發值)、 action values(行動值)、 precautionary values(附件一)及 requirements for remediation(附件二)、 requirements for investigation and evaluation(附件三)。各項標準並非單一值，而是依據土壤使用目的之不同，而有不同之標準，由地下水(groundwater pathway)之 petroleum hydrocarbons(trigger value) 僅 200 ug/l (ppb)、 BTEX 僅 20 ug/l (ppb)，而 Benzene 低至 1 ug/l (ppb)，可見其管制相當嚴格；但並未管制 MTBE，與國內有所不同。

二、德國地下環境污染整治實例

場址概要：

在德國 Alsdorf 附近之小鎮的市中心，一座佔地 53 公畝的煤礦、焦煤廠 Anna，在經過 140 年的營運後關廠，而且將在原場址興建一座包含住宅區、商業區、及公園休閒設施的開發計劃。在地下礦區週遭約有 130 棟建築物及其他設施。需要破壞之設施包括：發電廠、苯類製造工廠、倉庫、辦公室及輸送管路等。具有污染性之建築廢棄物包括：焦油、多環芳香族及 BETX。就現地而言，土壤亦被氰化物及砷所污染。部分建築物含有石綿且被水銀所污染。此區域存在之地下水文狀況也很複雜。三部分之工作將會被區別開，且將在此大範圍內之不同區域進行工作，建築物之破壞工作及場址的復育工作已於 1993 至 1997 年間執行，而地下水之監測工作將持續至 2003 年。基於監測結果，再決定如何進行地下水之復育工作。此廠區的所有者是由之前煤礦業之 EBV 轉換至開發公司 LEG，與德國萊因簽約執行以下工作：

1. 廠房設施之拆除

1. 對拆除後之材料準備及執行廢棄物管理計劃
2. 提出並監督拆除期間之勞工安全衛生計劃
3. 對拆除工作之監督。

2. 土壤復育

1. 調查地下污染
2. 準備復育計劃
3. 準備並執行開挖期間之廢棄物管理計劃
4. 提出並監督拆除期間之勞工安全衛生計劃
5. 對開挖工作之監督

3. 地下水監測

1. 設置監測井
2. 採樣、分析及評估地下水污染情形

工作概述：

1. 在建築物之檢查期間，針對建築物中之有害物質，如石綿等進行全面清查及登記，並進行採樣及分析，在考量經濟因素之前提下擬定拆除材料之分類回收及棄置計劃，廢料依其污染性質及濃度被送往不同之回收或處理廠，分離已受污染及未受污染的材料的工作，將依照事前的分析及外觀檢查加以建立。而勞工安全計劃亦須同時考量有害物質之風險，及結構安全問題。在嚴密監控下拆除工作產生 160,000 M³ 的建築廢料，在現場，這些材料被粉碎且被分為 160 堆，每堆材料均須依據事前決定之標準進行採樣、分析及分類，以決定要回收或棄置。在焦炭廠之耐火磚中的可溶性之硫酸鹽及重金屬均以石灰固化。固化後之物體可再回收，回收的材料（混凝土、磚塊）

將用於地下室之回填工作，金屬廢棄物則可轉賣回收廠，材料之回收及棄置須詳細記錄及監控，勞工安全衛生計劃也被嚴格監視。

2. 土壤之採樣分析經由 600 多次深達 8 公尺之劈管採樣，土壤氣體將在適當的地點加以採樣分析。這些地點將依照歷史調查所顯示之前的使用情況加以選擇。先前之使用情形及地下的污染情況相當吻合：

- a. 苯類製造場中存在多環芳香族及揮發性芳香族碳氫化合物
- b. 位在焦油塔區域存在多環芳香族
- c. 在氣體淨化設施區域存在多環芳香族及氰化物
- d. 開放性冷卻塔區域內存在焦油

在建築物之檢查期間，針對建築物中之有害物質，如石綿等進行全面清查及登記，並進行採樣及分析，在考量經濟因素之前提下擬定拆除材料之分類回收及棄置計劃，廢料依其污染性質及濃度被送往不同之回收或處理廠，分離已受污染及未受污染的材料的工作，將依照事前的分析及外觀檢查加以建立。而勞工安全計劃亦須同時考量有害物質之風險，及土木安全問題。特別是之前為苯環類工廠地點之開挖方式，是在一密閉帳篷空間內進行，以避免氣體外溢。在開挖過程中已受污染及未受污染之土壤均被分離及避免二次污染之工作均嚴格的執行，以維棄置費用之降低。在開挖過程中，除外

觀觀察外，約挖出 80,000 噸的土壤且依事前調查之不同污染情形加以分離，約 10,000 噸之高污染性土壤（多環芳香族、BTEX 及/或氰化物），需加以熱處理，大約 70,000 噸重的中度污染土壤在以水泥固化後再回填至原開挖地點。在計劃之公園區內，大約有 50000 平方公尺之污染土壤，其表面利用滲透率低（ $K_f \sim 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ）之黏土層覆蓋其上加以阻隔。所有程序均詳細記載，勞工安全衛生計劃也被嚴格監視。

3. 在復育場址內之土壤滲透性變化非常大，此結構造成一種複雜之地下水流動形式，地下水層約位於地表下 27 公尺，為更加了解複雜的水文情形，在現有的 12 個監測井外，又多設置了 18 個監視井，這些井之深度約從 40 到 70 公尺深，而直徑約 125 公厘，固定每 3 個月，全部的水井會進行一次採樣及對地下水之分析，四個重疊之污染區已被偵測出，在苯製造廠之地下水位上方形成了 BTEX 之污染層。

在此計劃執行過程中，數個整治程序必須加以驗證：

- a. 移除全部被污染之建築材料
- b. 耐火磚在石灰固化後原地回填
- c. 低污染及可回收之建築材料原地回填
- d. 受污染土壤完全移除

e. 中度污染土壤之固化及回填

f. 公園內受污染土壤之表面密封包覆

e. 建築材料及土壤之離場處理

每一個整治程序均須有不同之驗證步驟，移除受污染之建築材料、開挖受污染土壤及回填輕度污染之建築材料，均被有系統之監督。針對不同之整治階段，虛擬定不同之分析採樣方法，以驗證整治工作之成效。表面的包覆包括了基礎層、土工織物、黏土層、滲水層再覆以壤土之復育層，表面包覆的完全須包含以下步驟：

a. 材料的適用性

b. 正確的鋪設各層

c. 完整之包覆

例如，黏土層必須經由供應商提供的測試報告加以確認，驗證測試須依照 DIN 規定，除在現場測試外，亦須在實驗室對樣品進行測試，已確定其物理特性，如：密度、粒徑分布、水分含量及黏土之滲透係數。在現場，黏土層之密度，一致性，平滑度、坡度及厚度均須依照規範處理，其他層亦須依照辦理。現場包覆層之設置工作必須於監督下進行，可用性將利用地下水採樣及分析程序加以確認。由於固化之物體要回填（並非在掩埋場），因此必須能滿足高品質標準，固化之材料必須能滿足長短期之要求，因此，相關的測試須於固化後 28 及 56 天

進行，要點包括：

化學穩定性

1. 於 28 及 56 天後進行評估，且應持續此工作
2. 依照相關之污染物進行分析（多環芳香族、重金屬、硫酸鹽）

物理穩定性

1. 28 天後之滲透性
2. 28 天後之抗壓及抗拉試驗
3. 超過 28 天後之完整性測試
4. 回填時期之工地密度試驗

每 2,000 噸之固化回填物需進行一組採樣及測試，除必要的的工作日誌外，另一額外之操作日誌亦須同時記載，以維長時期之安全確認。

在操作日誌中，下列之項目須加以註記：

- a. 日期
- b. 被固化之總材料量
- c. 材料之原始位置
- d. 固化物之回填位置
- e. 添加物之數量及種類
- f. 採集測試樣品
- g. 承包商之測試結果（要黏貼上）

h.工作人員

i.附註

j.功能性控制

k.維護與維修

工作日誌每天均須由承商負責人填寫及簽名，針對部分固化物，第三公正者的確認之要點包括：

- a. 每日在現場針對固化之進行、回填及採樣之監測工作
- b. 對材料外觀檢查其一致性
- c. 每日檢查工作日誌及簽名〔視需要，得加註意見〕
- d. 定期轉送工作日誌至主管機關
- e. 依合約規範檢查測試報告
- d. 隨機採樣及測試進行交叉分析

Anna

Coal mining and coking plant

煤礦礦場及煉焦場

Operation since 1848

自1848年開始

Closure 1982 to 1992

自1982年到1992年陸續關閉

Some 130 buildings and facilities

共有約130座工廠及建築物

53 ha

約53公頃

Main contaminants (soil concentrations)

主要污染物

- PAH up to >60,000 mg/kg TS
- BTEX up to >1,600 mg/kg TS
- Phenols up to >200 mg/kg TS
- Cyanides up to >2,200 mg/kg TS
- Arsenic up to >500 mg/kg TS

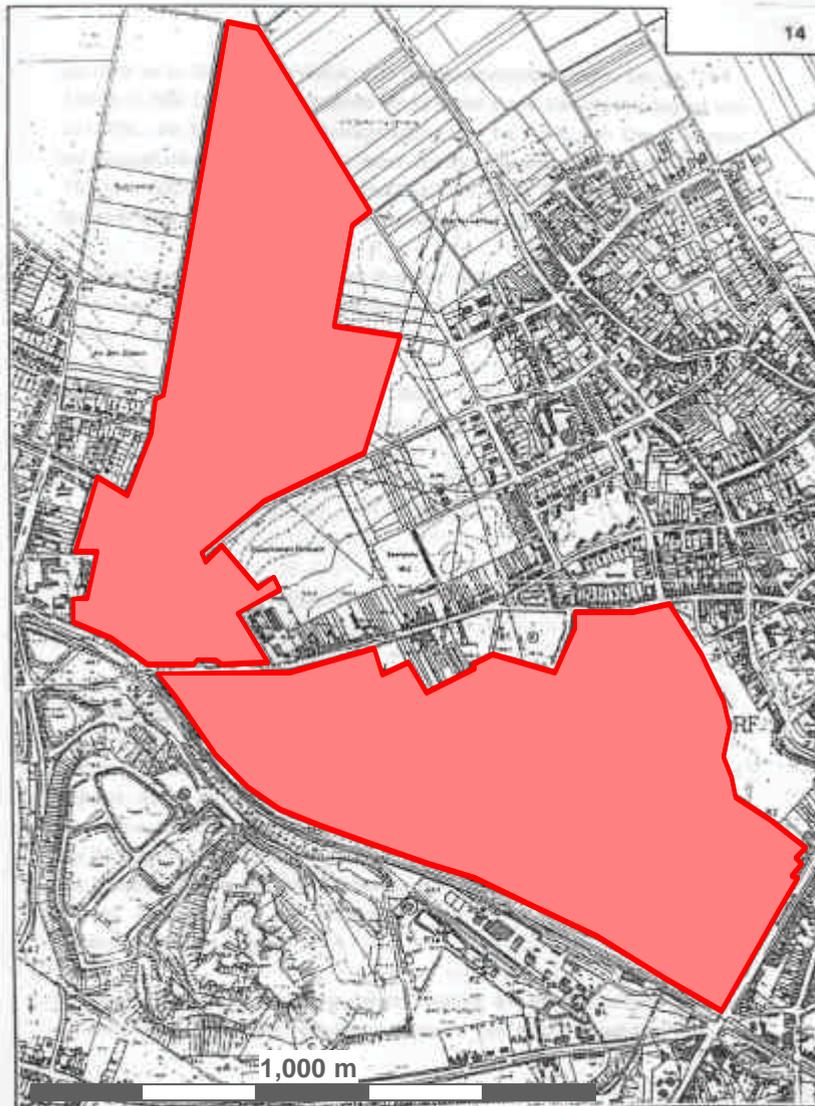
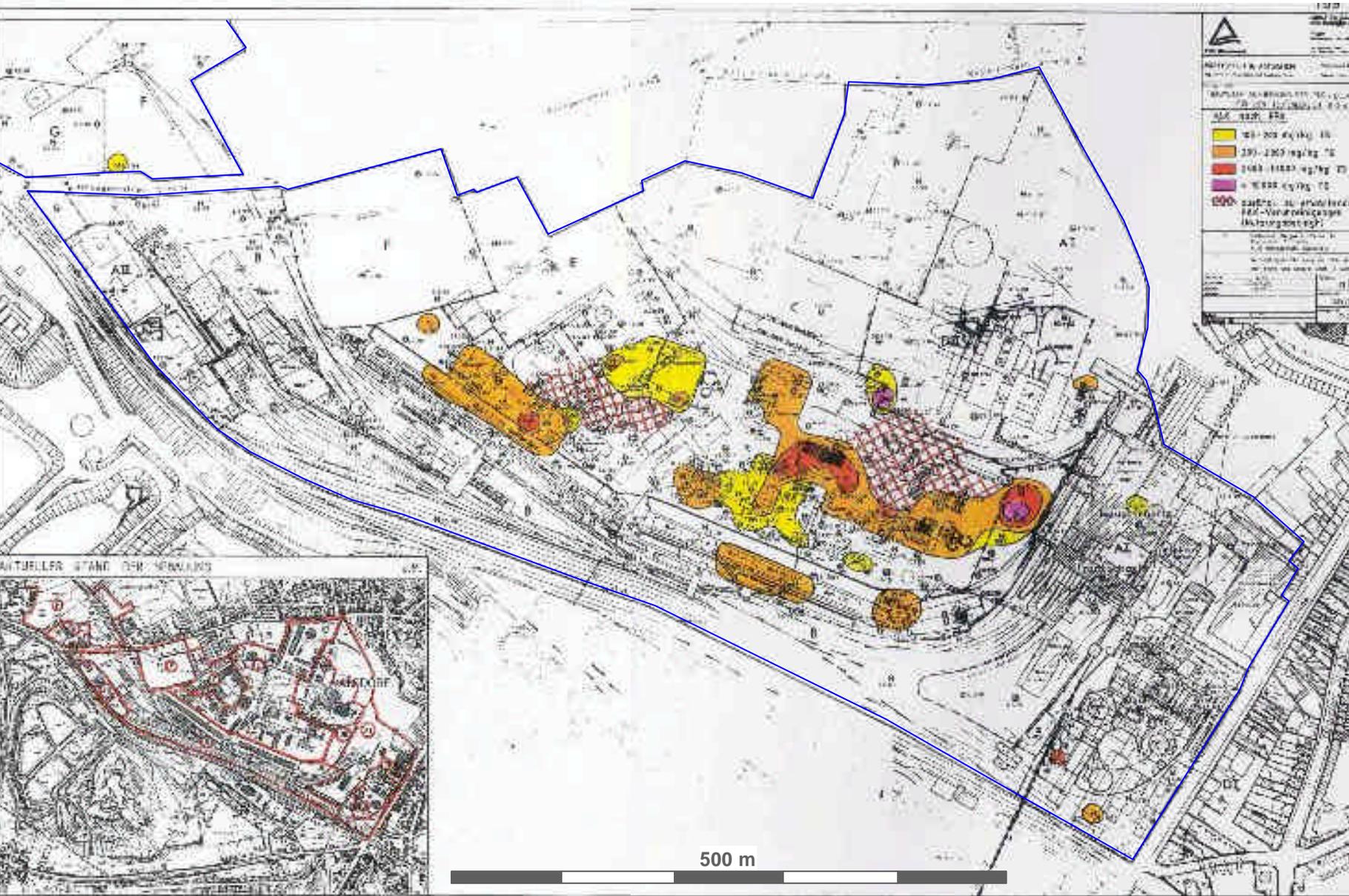


Abb. 1 : Übersichtskarte mit Lage des Untersuchungsgebietes und Lage der Teilflächen

PAH Contamination near Surface

靠近地表之多環芳香烴污染分佈





Anna-Park 公園

**Trade and Technology Industry
商業及科技工業區**

Remediation 整治專案

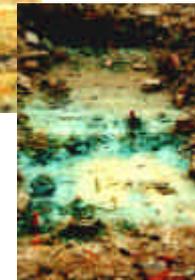
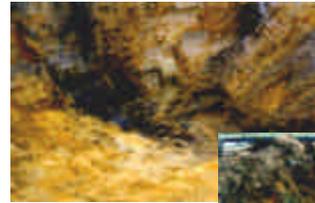
Demolition of Facilities 廠房建築拆除

- Structural Buildings
- Surface Structures
- Underground Facilities
- Basins
- Pipelines



Remediation of Soil 土壤污染整治

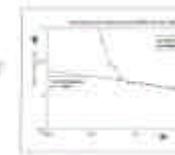
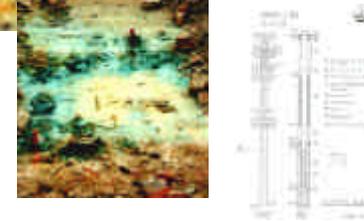
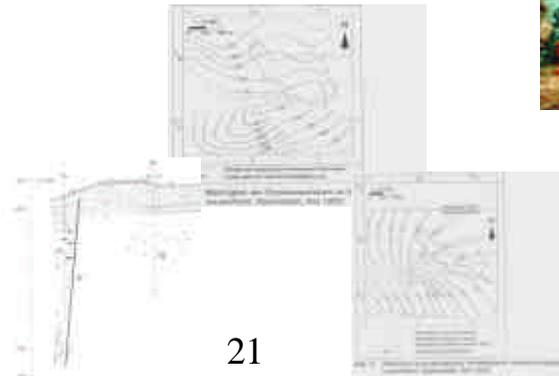
- PAH
- BTEX
- Phenols
- Cyanides
- Arsenic



Groundwater Monitoring 地下水水質監測

地下水水質監測

- Geology
- Hydrogeology
- Monitoring Wells
- Modeling



三、油庫與加油站土壤及地下水污染整治方法與適用性探討。

土壤污染復育方法和一般廢水、廢氣處理方法最大不同處在於場址之特異性。一般廢水、廢氣處理方法是依據污染物種類及數量即可設計處理程序，但土壤污染復育方法設計時則要考慮更多的場址環境參數，而這些參數卻往往因場址位置不同而有變異，因此增加了處理的困難度，也使得復育方法設計經驗值的判斷或分析歸納更為不易。當某個案例成功使用某種復育方法處理污染物時，下次同樣污染物出現在不同場址，卻不見得可以使用同一方法之設計來處理，必須考慮當地之土壤特性。土壤性質是篩選土壤復育方法的重要考慮因素，一般須包括下列要項：

- ◇ 土壤粒徑分布：是決定土壤物理性質之重要參數。
- ◇ 總體密度(bulk density)：土壤單位體積的重量，可依此數據換算污染物質體積與重量。
- ◇ 土壤比重
- ◇ 滲透性
- ◇ 孔隙率
- ◇ pH 值
- ◇ 氧化還原電位
- ◇ 分配係數：對於釐清有機污染物於土壤中之吸副作用有直接關係。
- ◇ 腐植物含量：和分配係數一樣，會影響有機污染物於土壤中之吸副作用。
- ◇ 總有機碳含量：用以作為土壤中有機質含量之指標之一，和生物

復育方法或有機吸附作用有關。

◇ 氧氣、二氧化碳濃度

土壤整治復育方法篩選之評估要點除了前述之污染物及土壤性質外，還包括有發展狀況、取得難易度、產生廢棄物、整組系統、系統可靠性、操作難易、清除時間、設置費用及維操成本。土壤及地下水之整治方法種類雖很多，因考量到實務性及針對油品污染場址之適用性，僅就目前較為成熟且適用之方法歸納如下：

(一)未飽和層土壤整治

1. 土壤氣提方法(soil vapor extraction；SVE)

土壤氣提方法的原理相當簡單，是屬於物理方法的一種，此類方法並不會破壞污染物之化學性質，而是在土壤的不飽和層中造成一壓力梯度，以形成一傳流(convection) 氣體來帶離土壤中之氣相污染物。並藉著引入的空氣，破壞土壤污染物原先與孔隙中土壤水分中溶解相所形成氣液相的平衡狀態，以增加存在於吸附或溶解相中有機污染物的揮發，再將土壤氣體抽出。本公司油庫及加油站之地下污染物屬於揮發性者較多，土壤氣體抽出方法為一可行方法，缺點為對低揮發性之油品效果較差。

2. 生物通氣法(bio-venting)

土壤氣提方法主要針對揮發性有機污染物，但對於低揮發性之油品，例如柴油，則一般多採用生物通氣法。生物通氣法是以生物處理方式搭配土壤抽氣的手段，改善土壤中之空氣滲透速率及氧化還原勢能等環境限制因子，促進土壤自淨能力，使現地天然的微生物將有機污染物分解成最終產物，通常對環境所造成之衝擊較其他的整治方法小且有效。

3. 焚化及熱處理方法

利用高溫（高熱）下，將介質中既存之污染物加以破壞、或令其離開介質，以利進一步之處理。破壞除去效率（Destruction and Removal Efficiency, DRE）常被用來評估焚化處理之效益。一般而言，針對含氯、非含氯、脂肪族、芳香族及多環芳香族化合物，其破壞除去效率可達 99.99% 以上。本公司高雄及大林煉油廠設有焚化爐，針對含有較粘稠油品之土壤可考慮採用此法，運輸距離為重要考量因素，且現場是否允許大規模開挖亦需考慮。

4. 共同溶劑沖洗法

共同溶劑沖洗技術原先使用於石化工業上，近十年來才應用於環境工程上從事地下水曾復育工程。此法乃針對受污染場址中土壤及地下水常見的有機污染物，利用數種不同的共同溶劑沖洗，將目標污染物移除，以達到土壤復育之目的。

共同溶劑係指甲醇(methanol)、乙醇(ethanol)、丙酮(acetone)等單一共同溶劑、混合共同溶劑和混合化學溶劑。因醇類對於水合有機物都屬互溶性的(immiscible)，依據醇的種類和有機污染物的種類，當醇類分布到有機污染物，會讓有機污染物體積範圍擴大，再降低有機污染物的密度。當使用混合醇類時，稱做共同溶劑。共同溶劑的沖洗是注入低濃度的醇類。本方法理論上可行，特別是針對受柴油污染的土壤，可將大部份污染物移除，但實務上因溶劑沖洗會導致污染物擴大，雖然低濃度的醇類在地下水中生物降解作用是快速的，要取得環保主管機關同意為癥結所在。

(二)地下水整治

國內最常採用的處理方式有 1.地下水抽出處理(pump and treat) 2.

現地生物復育(in-situ bioremediation) 3.地下水空氣曝氣法(in-situ air sparging) 以及目前美國流行的 4.天然衰減法(monitored natural attenuation ; MNA)。

1. 地下水抽出處理(pump and treat)

地下水抽出處理在過去是非常流行，但由國內外多年操作經驗顯示，此技術在處理到某個程度後之後，便無法有效降低地下水中之污染物濃度；國內桃園 RCA 廠案例即是如此。[本公司各油庫如場地允許，可考慮採用此法再搭配其他方法加速地下水中之污染物分解，對於加油站因場地受限較不適用。](#)

2. 現地生物復育法(in-situ bioremediation)

藉由微生物將有機污染物分解成無害的小分子如二氧化碳與水。本法可搭配其他方法使用以提高處理效率，降低處理時間。

3. 地下水空氣曝氣法 (in-situ air sparging)

此法主要是用來處理地下水中的揮發性有機物(VOCs)，將空氣注入受 VOCs 污染的地下水中，將污染物由水相移轉到氣象的氣泡中，通常搭配 SVE 收集以避免氣體亂竄造成二次污染。通常以亨利常數 (Henry's Law constant) 為 $10^{-5}\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 為判別標準，使兼具高揮發性與低溶解度的特性，對黏土地質亦不適用。[本省中部地區多為卵礫石地層，可考慮採用此法搭配 SVE 及生物復育法提昇處理效率。](#)

四、結語

從德國的土壤及地下水處理經驗，採用多階段性的作法可確保有效率的調查及整治作業，而這種作法也被德國聯邦土壤保護法所要求，此種方式也能適用於國內，主管機關的態度是決定性因素。目前最重要的工作就是儘速著手解決現有的土壤地下水污染問題，同時要有系統的去發現及改正過去在處理有害物質（包含廢棄物及廢水）之缺失，並應持續執行管理上及技術上之預防措施。

本公司各油庫及加油站，因長期操作難免滲漏，且加油站現有測漏管僅能測得油槽區之土壤油氣，對於泵島加油區之地下環境無法有效測得，為目前加油站最可能潛藏之問題所在，目前環保法令雖無規定，針對泵島加油區可能潛藏之問題，應及早規劃，以因應「土壤及地下水污染整治法」產生之衝擊。

肆、建議

自 89 年 2 月土壤及地下水污染整治法公佈後，油品行銷事業部即針對各油庫及加油站之地下環境不斷加強整治，在各相關單位努力配合下，已收到相當之整治成效，土壤與地下水之油氣濃度已明顯降低。

土污法相關細則與各項標準將於 90 年底前公佈，根據已公佈草案內容，某些項目甚為嚴格(如 MTBE)，將導致某些油品操作場所容易被列管，這是油庫及加油站必需注意加強管理之重點。雖然公司已投入相當多之人力及物力，但與廢水處理比較起來，因地下環境複雜且受限條件較多，部份場址處理成效尚需較長時間追蹤觀察。本次考察建議如下：

1. 於適當時機，建議環保署仿倣德國模式，建立公正第三者之機制，由顧問公司擔任業主與政府及附近居民之間的協調角色，避免目前專家學者採取理論性之高標準要求。
2. 針對加油站泵島加油區地下土壤油氣調查及早規劃。
3. 廠區內之油品管線除確實無法地上化外，應全面地上化。
4. 建議公司成立專責團隊，較能可累積技術與經驗，亦可對外服務。