

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」

污染土壤再利用管理系統之建置

期末報告

- 主辦單位： 行政院環境保護署
- 計畫執行單位：國立台灣大學嚴慶齡工業發展基金會
會合設工業研究中心
- 計畫主持人：林正芳教授
- 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

計畫成果中文摘要

建立污染土壤再生後之品質控管制度，不僅可落實污染土壤整治之執行，亦能有效管理污染物流向，藉由完整的污染土壤再利用管理系統，能確保污染土壤再利用之環境安全，故本計畫執行第一階段收集國內污染土壤物化特性，比較國內外污染特性，亦收集業界及國外污染再利用方式及管理制度，針對國內外事業廢棄物及污染土壤管理方式行分析探討，並彙整國內可行之污染土壤再生處理技術。

相較於國外如荷蘭、美國、日本及英國等，已明定污染土壤再利用管理規範，依據再利用土壤中成分含量及環境污染規範值作為分類基準，分別判定其可再利用之用途，台灣地區相關再利用規範中僅將事業產生之污泥納入再利用範圍，尚缺乏完整的管制系統。建構健全的污染再利用管理系統執行組織架構，由政府、專業環境顧問、專業檢驗實驗室、土壤回收業、土木承包商與相關企業合作，擔任監督與技術提升之諮詢團隊，為落實與促進污染土壤再利用技術發展之首要工作，藉由團隊經驗交流與合作分工，建立污染土壤再利用管理辦法，規劃適當用量之成本效益分析評估，並結合交通部、營建署及其他再利用主管機關政策與規範研擬及執行，由第三方驗證機構定期執行審核，由專責之測試人員定期查核確保產品品質，將能有效降低天然資源使用量與促進再生資源永續利用。

計畫成果英文摘要

Quality control system of the regeneration of contaminated soil not only implements the implementation of the remediation of contaminated soil practically, but also controls the management of pollutant flow effectively. Integral contaminated soil management system would ensure the safety of reuse of contaminated soil environment. Therefore this project is working to collect and compare physical and chemical properties of contaminated soil. The methods of reuse and management system of contaminated soil and regeneration processing technology are also collected.

Compare to foreign countries such as Netherlands, the United States, Japan and the United Kingdom, which have stipulated the standards for management of reused contaminated soil. The standards are according to the ingredients in the soil and environmental pollution specification as a benchmark classification and then the reuse purposes are determined respectively. The main categories of soil pollution in Taiwan include heavy metals, organic pollutants and unknown waste. In recent years, off-site treatment of contaminated soil was adopted to achieve sustainable use of harmless. However, the transport management and contaminated soil re-use patterns is still a lack of clear and complete control system.

The contaminated soil reuse management system of contaminated soil is to establish a quality control system in the contaminated soil regeneration. Government, professional environmental consultants, professional testing laboratory, soil recycling industry, civil engineering contractors in cooperation with the relevant enterprises construct sound pollution reuse organizational structure of the implementation of the management system, as a monitoring and upgrade their technology consulting team.

The implementation and promotion of contaminated soil recycling technology development is the primary work. By the team experience exchanges and cooperation between the division of labor, the contaminated soil reuse management could be established. Planning for appropriate cost-benefit analysis assessment and implementation of policies and regulations of the competent authority combined with the Ministry of Transportation, Construction and Planning Agency, and other re-use of the formulation and implementation of policies and regulations of the competent authority is necessary. Perform the audit on a regular basis by a third-party certification bodies by dedicated testers regular checks to ensure product quality, will be able to reduce the use of natural resources and the promotion of renewable resources and sustainable utilization.

計畫成果摘要

建立污染土壤再生後之品質控管制度，不僅可落實污染土壤整治之執行，亦能有效管理污染物流向，藉由完整的污染土壤再利用管理系統，能確保污染土壤再利用之環境安全，故本計畫執行第一階段收集國內污染土壤物化特性，比較國內外污染特性，亦收集業界及國外污染再利用方式及管理制度，針對國內外事業廢棄物及污染土壤管理方式行分析探討，並彙整國內可行之污染土壤再生處理技術。

參考荷蘭政府「建築材料法」(Building Materials Decree)，明定污染土壤可再利用之條件，依據再利用土壤中成分含量及環境污染規範值作為分類基準，分別判定其可再利用之用途；美國各州有不同的污染土壤再利用管理方式，主要管理項目包含毒性特性溶出管制、人體健康風險管制及底泥污染特性評估等，並依據不同的再利用用途分別訂定管制濃度閾值；日本則依據處理方式分別規範各類污染土壤最終處置、淨化處理、再利用作為水泥原料及土壤調理等後續處理方式之認定機制；英國認定污染土地場址由主管機關以危害評估調查污染源，並評估其傳播途徑及可能受影響區域後，由政府公告之。相較之下台灣地區相關再利用規範中僅將事業產生之污泥納入再利用範圍，尚缺乏完整的管制系統，因此本計畫探討並研擬事業廢棄物再利用管理方式及國外污染土壤再利用管制方式，建立污染土壤再利用分級制度，分別建立不同污染土壤再生技術之再利用認定標準，如：污染土壤壓密處理及污染土壤燒結再生處理，經前處理去除可能污染物（如重金屬萃取）或改變再利用材料之特性或結構（如玻璃化）或高溫燒結等方式，降低或減少對環境污染之可能性再進行利用。

此外，經處理之污染土壤再利用成品，需依用途進行物理性測試及溶出試驗符合後始得使用，即污染土壤再利用的目標及方向，考量整治行為對環境的衝擊，運用須減少能源、水的消耗以及降低廢棄物產生的方式，及善用再生資源之特性，降低環境污染並促進資源有效利用。

針對現有重金屬污染場址一處進行取樣，並進行再利用評估程序，即應用動態溶出試驗評估污染土壤重金屬於再利用處理後之溶出量，分析溶出水體之溶解性金屬、pH 值、導電度及氯鹽含量之差異。分析結果顯示熱處理前後污染土壤中重金屬含量略為降低，但仍有部份重金屬如銅、鋅總兩仍高於土壤污染標準限值，動態溶出試驗結果則顯示熱處理前後溶出之重金屬濃度反而升高，溶出液之 pH 值亦升高，此結果顯示熱處理技術確實改變土壤特性，但對於重金屬污染之控制程度有限，建議後續針對土壤特性與再利用處理技術及應用宜深化研究與發展。

第一章 計畫緣起與目的

1.1 計畫緣起

環保署目前土壤污染及地下水整治列管廠址共有 2,374 處，總公告管制面積達 14,260,816 平方公尺。台灣地區土壤污染種類以重金屬、加油站有機污染物及不明廢棄物為主，近年污染場址整治方式主要為挖除至場外處理，污染土壤處理的目標為無害化及永續利用。然而污染土壤之再利用方式仍缺乏明確且完整的管制系統，因此本計畫主要目的在於依據污染土壤之處理方式及再利用可行方式，建立管理認證系統，包含土壤再利用之管理規範，及再利用前之品質管制確認程序，包含土壤再利用前處理方式分類、成品環境品質檢驗及再利用用途分類，藉以建立一套完整的污染土壤再利用管理認證系統，確保再利用之環境安全，落實污染整治管理與發展永續環境資源。

1.2 研究目的

本計畫主要目的在於建立污染土壤離場(off-site)處理後做為再利用資材之管理驗證體系，提升資源再利用之環境安全及效益。政府近年來大力推動綠營建、綠建築及資源再生技術，目前已有許多再生材料提供應用，經適當處理之污染土壤因仍保有本身之物理特性，適於應用於不同需求之營建用途，建立污染土壤再生後之品質控管制度，不僅可落實污染土壤整治之執行，亦能有效管理污染物流向，藉由完整的污染土壤再利用管理系統，能確保污染土壤再利用之環境安全，亦具有提升廢棄物管理資訊整合之效益，同時達到資源永續利用之政策目標。

故本計畫預定完成之工作項目如下：

- 一、國內外污染土壤特性比較分析
- 二、國內外事業廢棄物及污染土壤管理方式分析探討
- 三、國內污染土壤可行之再利用處理技術探討
- 四、研議污染土壤再利用技術測試及檢驗方案

五、研議污染土壤再利用技術之產品特性檢驗方案

六、研議再利用分類項目及用途

七、研議污染土壤再利用環境品質認定檢驗方案

預期本計畫後續執行成果可達成之效益如下：

一、量化效益

- 提升污染土壤整治改善率
- 提高資源再利用率

二、非量化效益

- 落實綠色整治技術
- 強化污染土壤再利用管理體系

第二章 執行方法及工作內容

2.1 研究流程

本計畫執行第一階段收集國內污染土壤物化特性，比較國內外污染特性，亦收集業界及國外污壤再利用方式及管理制，針對國內外事業廢棄物及污染土壤管理方式行分析探討，並彙整國內可行之污染土壤再生處理技術，第二階段將依據再生技術之產品特性，訂定再利用分類項目及用途，及污染土壤再利用環境品質認定檢驗程序。

本計畫研究流程如圖 2.1 所示：

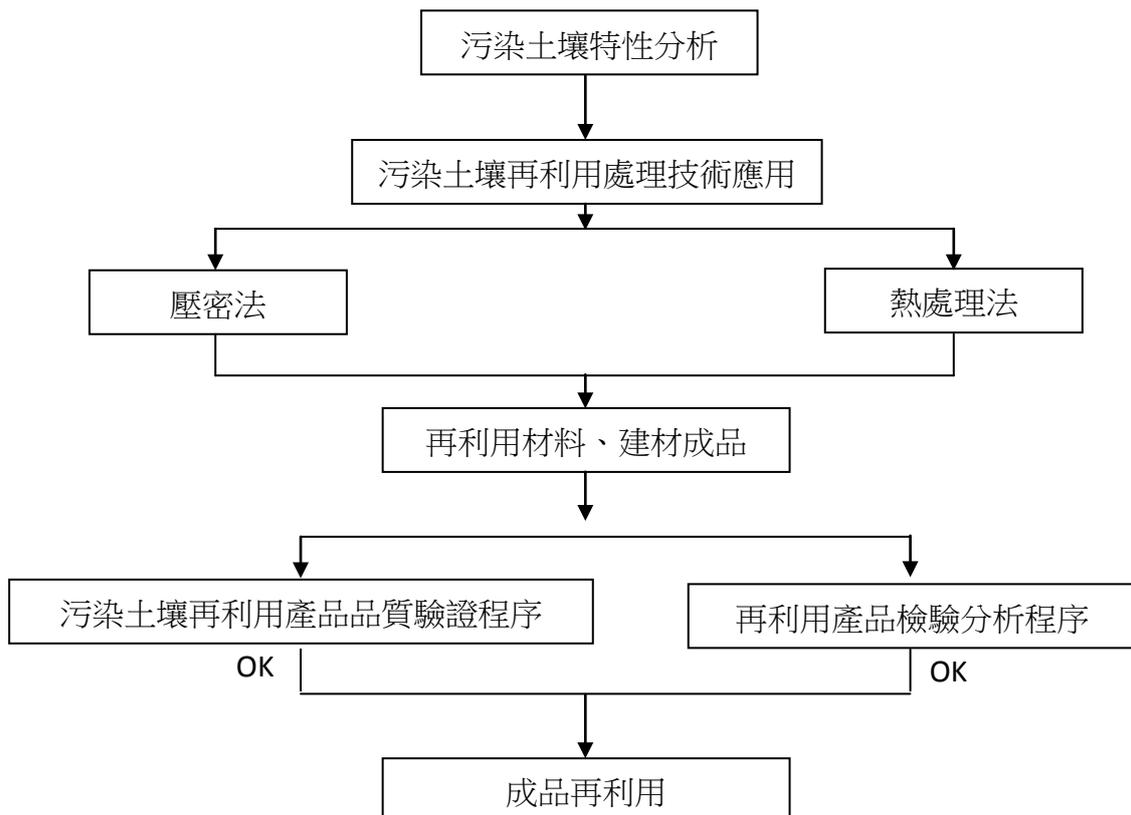


圖 2.1 計畫執行流程圖

2.2 污染土壤再利用材料檢驗分析

一、壓密處理材料檢驗分析

壓密處理之污染土壤再利用成品，需依用途進行物理性測試符合後始得使用。壓密處理完成之隔熱地磚試驗項目如表 2.1 所示。

二、熱處理材料檢驗分析

熱處理之污染土壤再利用成品，需依用途進行物理性測試符合後始得使用。熱處理完成之燒結體物理特性分析流程如圖 2.2 所示。

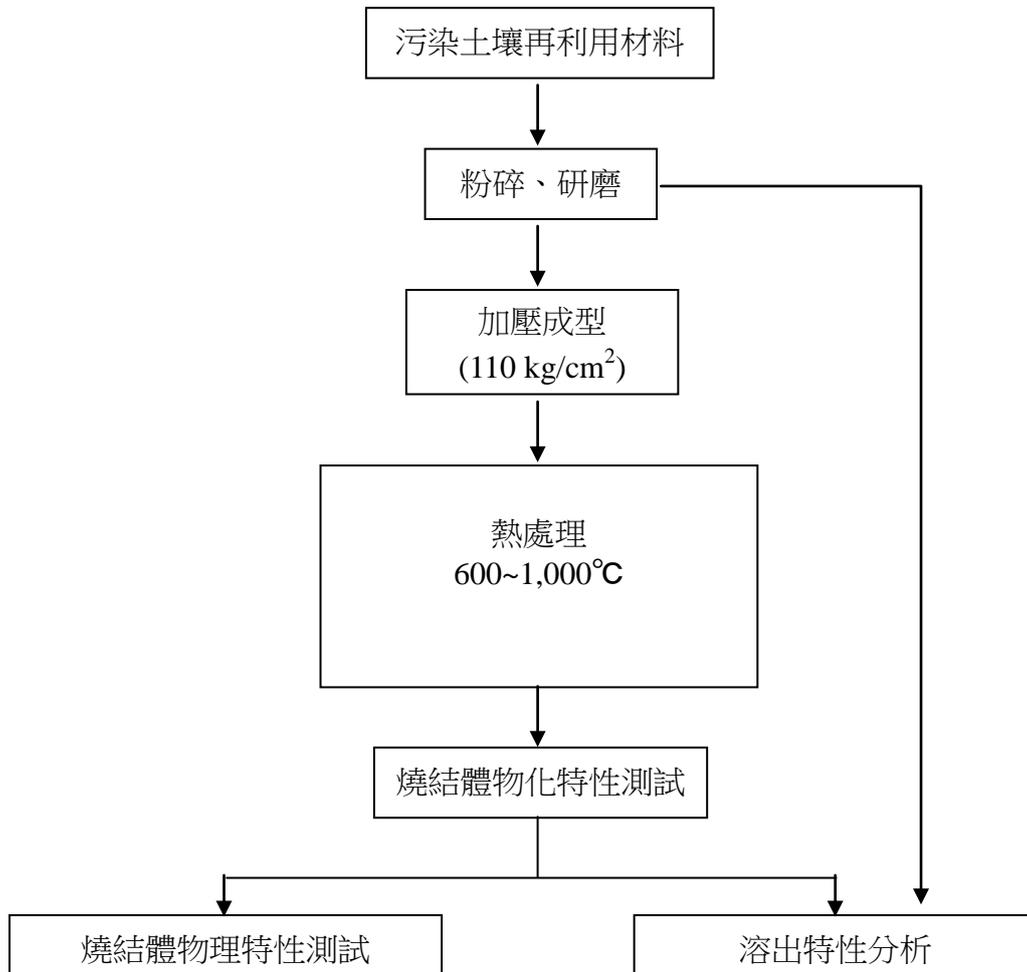


圖 2.2 燒結體物理及溶出特性分析流程

2.3 溶出特性分析

污染土壤再利用材料溶出特性分析，係以動態管柱實驗(Column test)即管柱溶出試驗將待評估樣品填充於管柱中，由萃取液以連續通量流入貫穿之方式，連續與樣品接觸，而收集濾液分析，模擬再利用材料經酸雨長期淋洗後，評估後續重金屬溶出之長期潛勢。再利用材料樣品置於管柱中，以蠕動泵打入萃取液，即以柱塞式向上流之方式連續打入模擬酸雨之萃取液，以萃取液淋洗灰渣後，採取出流水樣分析其重金屬溶出濃度。

動態管柱實驗設備及方法如下：

- 一、管柱試驗裝置：管柱材質為玻璃燒製，直徑 5 cm (± 0.5 cm)，高度 40 cm，進出水相距高度 30 cm，管柱上下端置放一多孔狀散水盤以使進出水流均勻分散，灰渣填充量 350 公克，加入適量水（約 100 至 130 mL），使土樣浸泡於水中，蠕動幫浦以上流式打入淋洗液，以減少短流現象之發生。
 - 二、淋洗液：濃度 10^{-5} M 之 HNO_3 溶液，pH 值維持在 5 (± 0.5)。
 - 三、每支管柱使用定量幫浦以 800 mL/day 的流量，將淋洗液自管柱上方加入。管柱與滲出液之瓶子，均用鋁箔紙密封開口，以避免灰塵的干擾。
 - 四、取樣頻率：第一天第 4、8、24 小時，第二天後每 24 小時取樣。紀錄滲出液的體積、pH 值、導電度，並分析氯鹽、TOC 及重金屬濃度。
- 動態管柱實驗配置圖如圖 2.3 所示：



圖 2.3 動態管柱實驗配置圖

第三章 執行成果

3.1 國內污染土壤特性

土壤含有之自淨能力可分為物理性或化學性的吸附能力、化學氧化還原作用及土壤微生物的分解作用，可減輕污染物所造成的危害，降低污染物進入自然生態循環系統的風險，土壤污染即指污染超過土壤自淨作用的負荷，目前「土壤及地下水污染整治法」中對「土壤污染」所下之定義為：指土壤因物質、生物或能量之介入，致變更品質，有影響其正常用途或危害國民健康及生活環境之虞。

台灣地區土壤污染主要物質為重金屬及有機物，其中有機污染物區分為非含氯有機物及含氯有機物，依據 99 年度土壤及地下水污染整治年報，台灣地區土壤污染物種類以重金屬污染場址比例所占比例最高，占總比例之 89.2%；其次為有機物，含苯、甲苯、乙苯、二甲苯及總石油碳氫化合物，占總比例 10.0%；含氯有機物則占 0.77%，其相關土壤污染物種類比例如圖 3.1 所示。

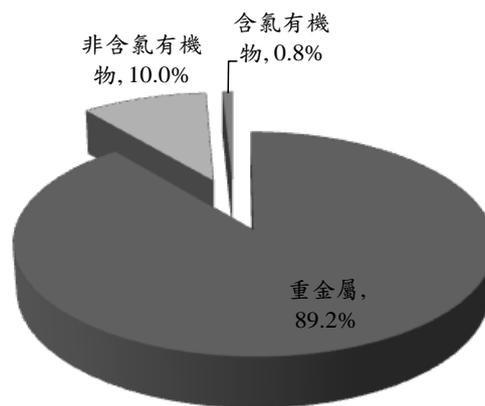


圖 3.1 土壤污染物種類比例圖

3.1.1 重金屬污染

近年因工業及科技業的高度發展，重金屬廣泛的應用於各式產業上，但因未經妥善處理，常經由排放水、滲漏及飛灰等途徑進入環境中，台灣地區早期因土地規劃不良，工廠常位於農地旁，加上灌溉水道與工廠排放水灌排不分，造成工廠排放水常隨農田灌溉水進入土壤中，土壤重金屬來源除從礦物等自然來源，最主要來源為人為活動，主要可分為：

- 一、 交通工具排放廢氣：交通工具使用之含鉛汽油，導致鉛散佈於空氣中後，經沉降及雨水淋洗進入土壤。
- 二、 石化燃料燃燒：石化燃料所含之重金屬，在燃燒過程中隨煙塵釋放到環境中。
- 三、 農業施肥及施藥：因長期或大量使用使得農藥或肥料中之重金屬累積於土壤中。
- 四、 牲畜廢棄物：牲畜的排泄物中常含大量的銅和鋅。
- 五、 都市及工業廢水不當排放：未妥善處理之廢水排入河流或灌溉渠道。
- 六、 冶金工業及礦場：在冶煉或採礦過程中，含重金屬之粉塵飄浮於大氣中，經沉降作用進入土壤中，工廠排放或堆積之廢棄物，因淋洗作用使重金屬溶出進入土壤。

台灣地區重金屬污染主要來源如表 3.1，其中以電鍍業所使用之重金屬種類最為廣泛，因電鍍業電鍍方式通常使用高濃度之重金屬溶液，而包含鎳、鉻、銅、鎳、鉛與鋅等各種重金屬被大量的使用，導致高濃度重金屬廢水與廢水污泥產生，若處理不當，極易造成河川、土壤及地下水之污染，農田若引入此類水源做為灌溉之用，必定會使得大量含重金屬廢水進入土壤造成污染。

表 3.1 台灣地區重金屬污染來源

種類	來源	類別
Cd	工業	電鍍、油漆材料、電池、汽油、輪胎
	農業	磷肥中含鎘
Cr	工業	金屬鍍鉻、顏料、染料、油漆、墨水、玻璃、皮革
Cu	工業	電線、印刷電路板、金屬電鍍
	農業	殺蟲劑、硫酸銅、碳酸銅
Ni	工業	製造鋼鐵與合金、塗料、色素、化妝品、電池
Pb	工業、礦業	開採與冶鍊過程中產生
	交通	含鉛汽油燃燒產生之廢棄物
Zn	工業	電鍍、印刷

重金屬在土壤中會以各種的形式存在，如離子態的重金屬存在於水溶液中或吸附於土壤黏粒表面；部份重金屬則會與碳酸鹽、磷酸鹽、硫化物、鐵錳氧化物或其他鹽類形成複合物；土壤中的有機質、有機酸則能經由官能基或以鉗合的方式與重金屬鍵結；土壤礦物中也有重金屬存在於結構之中，依照 Tessier 等學者在 1979 年所發表之文章，土壤固相中重金屬可分為五個不同型態，吸附力由弱到強分別為：交換態、碳酸鹽結合態、鐵錳氧化物結合態、有機質結合態與殘留態，各型態之敘述如下：

- 一、 交換態：此型態之重金屬在土壤中主要是被粘粒、鐵錳氧化物、有機質等表面吸附，依土壤溶液組成的改變而產生吸附—脫附現象。
- 二、 碳酸鹽結合態：對於碳酸鹽類土壤或是沉積物，重金屬在碳酸鹽型態的分布佔重要的比例，此型態容易因為 pH 值改變而被溶出，因此也稱為酸溶解態。
- 三、 鐵錳氧化物結合態：此型態也可稱為還原態，土壤中通常含有大量的鐵錳氧化物以小顆粒、土壤顆粒間的結合物質或是包覆在土壤顆粒表面的方式

存在，此類氧化物對重金屬吸附的能力十分良好，而鐵與錳氧化物可因還原而被破壞，因此厭氧環境下較不穩定。

四、 有機質結合態：重金屬會與土壤中各種不同的有機質產生結合，包括：活的有機體、有機碎屑或包覆在土壤顆粒表面的有機質等，於氧化的情況下，有機質會因微生物分解而使可溶性的重金屬便被釋放出來，因此此型態也稱為可氧化態。

五、 殘留態：當前四個部份的型態被移除後，剩下的部份主要是原生與次生礦物，部分重金屬存在於礦物的結晶構造中，此種型態的重金屬在正常自然環境情況下，即使經過長時間風化作用也幾乎不會釋放到環境中。

重金屬如上述各型態，因與土壤中有機物、氧化物或黏土礦物等形成鍵結，降低其移動性或生物有效性，造成重金屬之累積現象顯著，為台灣地區主要之土壤污染物種類，土壤污染之污染物質如有機物、無機物及重金屬等，其中有機物質可被土壤中微生物分解利用，無機鹽類則可被植物吸收或溶解流失，重金屬因其累積現象顯著，不易被微生物或植物利用，長期殘留於土壤中，阻礙農作物之生長，且部分被作物吸收後，生產出影響健康之農作物，常見之重金屬污染主要有鎘、鉻、汞、鉛、鎳及砷等，主要影響如下：

- 一、 滲入地下含水層，污染地下水。
- 二、 降低土壤中微生物分解有機物之能力。
- 三、 直接對植物產生毒害，部分由植物吸收後，透過生物累積作用，最後經由食物鏈累積於人體內，造成人畜健康的危害。

3.1.2 非含氯有機物污染

非含氯有機物來源大多為油類產品，臺灣近幾十年來經濟快速成長，伴隨著開放油品進口及加油站民營化，與國內汽機車的使用大量成長，增加了對汽油、機油、潤滑油的需求，全國的加油站數於 85 年至 96 年間，由約 1,400 家增加至

約 2,635 家，儲油槽數量的增加及管線分布更密集，且加油站的高密集度，及設置地點因應需求均位於人口聚集或主要交通要道旁，因此油料洩漏等土壤污染問題逐漸受到重視，環保署為掌握全國加油站和大型儲槽的狀況，已進行許多年土壤及地下水的污染調查，包括委託台大農業工程研究所進行加油站基本資料之全面性普查建檔，並陸續以委託計畫方式進行全國加油站和大型儲槽污染源及潛在的污染源調查，如環保署於民國 91 年與 92 年進一步針對全國 800 座站齡達 10 年以上之加油站進行土壤及地下水污染潛勢調查，結果共發現 32 座加油站之土壤或地下水遭受污染，且更有因外洩油料污染鄰近的土壤及地下水，直接影響附近居民的用水品質事件發生，多年的調查結果，發現加油站污染土壤及地下水的情形相當嚴重。

油品化合物性質屬溶解度高且揮發性強，洩漏至週遭環境其擴散速度非常迅速而易於污染土壤，因此濃度很容易就超過土壤污染管制標準，彙整加油站油品洩漏至地下環境之主要原因有：

- 一、 地下油槽或管線腐蝕滲漏：地下油槽或管線因時間久遠超過使用壽命、雜散電流影響、陰極防蝕或其他防蝕設施功能下降或失去功能等。
- 二、 施工不當或施工品質不良：油槽包覆施工時不慎碰撞破損、油槽或加油機底部之連接管線因施工不良而滲漏等。
- 三、 營運操作管理不當：未落實每日營運設備自行安全檢查、每日填寫油品總量管制表、數字有異常時未注意、測漏工作未落實、洗車或清洗地板之含油污水排至土壤、及加油機過濾器保養更換時油品漏出等。
- 四、 濺漏及滿溢：洩油作業疏忽或加油時操作不當等。
- 五、 儲槽或管線受到外力壓迫。

其中地下油槽或管線腐蝕滲漏、施工不當或施工品質不良及營運操作管理不當此三項為油品污染至地下環境之主要原因。

污染土壤之油類非含氯有機物除一般使用之柴油及無鉛汽油外，主要有 TPH (Total Petroleum Hydrocarbons，總石油碳氫化合物)、BTEX (Benzene,

Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes, 苯、甲苯、乙苯、二甲苯)、PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 多環芳香族化合物)、MTBE (Methyl tert-Butyl Ether, 甲基第三丁基醚) 等, 其性質及影響如下述所介紹:

一、 柴油:

主要成份分佈以 $C_{10} \sim C_{26}$ 為主, 根據其成分中結構及特性則可大致將其分成 5 種物質: 正烷類、含支鏈及環烷類、異烷類、芳香族類及極性物質, 其中如異烷類具有相當不易被微生物分解特性, 及芳香族類具有相當易於鑑定且水溶性極高之特性, 對土壤污染影響較大。

二、 無鉛汽油:

主要成份為正烷類、芳香族類及甲基第三丁基醚等。

三、 總石油碳氫化合物 (TPH):

石油洩漏造成土壤污染時, 石油碳氫化合物污染物會先造成土壤層的污染, 之後逐漸滲透到不飽和水層, 最終污染將至含水層而污染地下水, 石油滲漏之量非常大時, 石油碳氫化合物污染物將會吸附在土壤中形成非水相溶液 (non-aqueous phase liquids, NAPLs), 並緩慢脫附而形成一長期之污染源, 對於地下水之水質造成長期之危害。

四、 苯、甲苯、乙苯及二甲苯:

此類污染物接觸人體會對皮膚產生刺激性、傷害神經系統, 且苯為一已知之人類致癌物, 此類污染物滲入土壤中後, 於表土的可經由揮發除去, 其餘的必須經由細菌分解才能消失, 滲入到地下水層, 必須透過特定的溫度、混合情況和微生物才能完全除去。

五、 多環芳香族化合物 (PAHs):

不少多環芳香烴已被界定為致癌物。臨床實驗報告指出: 若長期接觸高濃度多環芳香烴的混合物, 會引起皮膚癌、肺癌、胃癌及肝癌等疾病。

六、 甲基第三丁基醚 (MTBE):

相較於其他汽油之主要成分, 甲基第三丁基醚具有高水溶性, 主要點

污染源包括輸送管路之洩漏、貯存槽之洩漏之製造工廠排放之廢水等，在環境中之生物分解性較低，在厭氧的情況下，微生物幾乎很難分解，且不易被土壤所吸收。

3.1.3 含氯有機物污染

含氯碳氫化合物常在工業界使用如工業原料、農藥及中間原料與有機溶劑，此類工業用溶劑因廣泛使用而導致對環境具持續性之影響，在不當之使用，如貯存、使用及處理不當，導致含氯有機化合物洩露至土壤中而形成油層，進而污染地下水層，污染物隨地下水流佈，致使污染範圍擴大，常見之含氯有機污染物如 1,2-二氯苯，當氯和苯在適當的溫度及氯化作用所需催化劑存在之下，二氯苯之異構物都會逐漸地形成，過去在表面水體、地下水體與生物組織中皆曾被檢測出二氯苯，同時 1,2-二氯苯亦被美國環保署公告為優先整治對象。

3.2 國內外污染土壤管理方式分析探討

3.2.1 荷蘭土壤保護法

荷蘭因土地狹小、人口密集、高度使用地下水，加上密集的農業活動及過度的工業開發，導致許多污染場址的問題產生，隨著民眾環保意識的提升，荷蘭政府於 1976 年決定將土壤保護納入國家環境政策。

土壤保護法為土壤及地下水保護的基本政策及主要架構，其內容主要包括土壤保護技術委員會設置及任務，一般土壤保護條款、土壤污染處理一般條款、除外條款、調查、財務等相關規定，本法並授權針對可能影響土壤品質的活動，制定相關的一般行政命令以執行環境保護政策，並依據此法，在法案公布後所造成污染場址，其無論其造成之風險為何均必須進行整治，而針對本法案公布前之舊

污染場址，則須對其污染狀況進行管理，經過評估後判斷屬嚴重污染者則必須進行整治工作，本法規範土壤污染保護主要包括下列方面：

- 一、 肥料的使用。
- 二、 固體及液體廢棄物之運輸、處置。
- 三、 地下儲槽中石油化學品儲存。
- 四、 地表水滲流。
- 五、 整治後土壤再利用作為建築材料。
- 六、 土壤整治中心(Soil Clean-up Centre, SCG)任務及角色定位。

荷蘭政府並於「建築材料法」(Building Materials Decree)中，明定污染土壤可再利用之條件，依據再利用土壤中成分含量及環境污染規範值作為分類基準，分別判定其可再利用之用途，即污染土於再利用之分類乃依據污染土壤之管制目標值和介入值為其評量之標準，依土壤中污染物之濃度區分為：乾淨土壤(即土壤中污染物濃度低於目標值)、受輕微污染土壤(即土壤中污染物濃度介於目標值和介入值)，及受嚴重污染土壤(即土壤中污染物濃度高於介入值)三大類。當土壤屬乾淨土壤或屬受輕微污染土壤且符合建築材料法(BMD)規範時，即可作為建築材料使用，表 3.2 所示為自污染場址挖除之污染土壤可再利用之品質要求與用途。

表 3.2 荷蘭污染土壤再利用品質要求與用途分類

再利用之用途	挖出土壤品質		
	乾淨(Clean)	輕微污染(Lightly Contaminated)	嚴重污染(Seriously Contaminated)
土壤	√	△ ¹	× ⁵
建材	√	△ ²	×
掩埋場址應用	× ⁶	× ⁷	△ ³
掩埋場堆置	× ⁸	× ⁸	△ ⁴

說明：“√”表示符合；“×”表示不符合；“△”表示有條件符合。

註：1.僅限於下列情形：(1)具土壤管理計畫；(2)具土壤品質圖；(3)品質維持原則；(4)土壤功能不具風險；(5)經申報及註冊。

2.需符合 BMD 中有關環境釋入量與成分含量之規範。

- 3.無法整治之污染土壤為佳。
- 4.僅限於無法整治之污染土壤。
- 5.除非已證實污染完全去除。
- 6.除非嚴重污染土壤及輕微污染土壤不足。
- 7.除非嚴重污染土壤不足。
- 8.完全禁止。

該法案中規範之再利用材料包含土砂（係指取自土壤之材料）及建築材料（building materials）兩大類，其採用「環境釋入量」（immission）與「成分含量」（composition）之管制概念，而非「溶出量」之管制方式，並制定土砂及建築材料的成分含量與環境釋入量標準，作為土砂及建築材料使用限制之判定依據，其分為第一類、第二類以及特殊類別：

- 一、 第一類：材料中所含之各種污染物，其成分含量及環境釋入量均未超過 BMD 之規範值者。
- 二、 第二類：材料中所含之各種污染物，其成分含量未超過 BMD 之規範值，但其環境釋入量在未特別隔離之情況下，高於 BMD 之規範值者。
- 三、 特殊類別：材料為焚化灰渣與含有焦油類瀝青的骨材。

此外，BMD 特別針對土砂制定一標準值，低於該標準值則可認定為「乾淨土砂」。由於土砂和一般建築材料不同，若和土壤混合後不易分辨與分離，因此對於土砂再利用於建築材料時有移除責任之規定，其原則如下：

- 一、 不可與現地土壤或水中沉澱物混合；
- 二、 必須可隨時移除；
- 三、 在工程結束後剩餘土砂需能完全清除。
- 四、 針對做為建築材料之土砂需符合「最小體積」規定，即工程應用之土砂單位體積不可小於 50 立方公尺，需離最高地下水位 (mean highest groundwater level) 0.5 公尺以上。

3.2.2 美國各州

美國紐約州依據「石油污染土壤指引政策」(Petroleum-Contaminated Soil Guidance Policy) 進行污染土壤再利用之管理，管理項目包含毒性特性溶出管制、人體健康風險管制及底泥污染特性評估等，並依據不同的再利用用途分別訂定管制濃度閾值；俄亥俄州亦訂定污染土壤再利用之污染項目基準值(Re-Use Action Level)；科羅拉多州則明文規定石油污染土壤須由再利用者依再利用場址特性進行風險評估後取得許可始得再利用；麻州則依據污染土壤中重金屬、有機污染物及有害廢棄物溶出特性之限制標準，評估污染土壤作為掩埋場覆土或整地材料之再利用管制方式。澳洲採污染土壤分級管理方式，分別由污染土壤之污染特性、最大總濃度及最大溶出濃度，判別污染土壤可再利用之分級及用途，並規範相關之清運及處理機構許可制度，表 3.3 所示為美國各州污染土壤處置及再利用標準比較，表 3.4 所示為美國環保署及紐約州、麻州污染土壤管理制度彙整比較。

表 3.3 美國各州污染土壤處置及再利用標準比較

州別標準	目的	適用範圍	處置或再利用途徑
美國 LDR 之選擇性之土壤處理標準	污染土壤進入掩埋場處置之處理標準，並決定適用之掩埋場類型	污染土壤	掩埋場處置，包括一般事業廢棄物掩埋場及有害事業廢棄物掩埋場
美國麻州污染土壤再利用污染物限值	作為污染土壤於掩埋場內再利用之標準	油品類污染土壤	1. 掩埋場覆土再利用 2. 掩埋場處置
美國紐約州污染土壤指引值	作為污染土壤再利用之標準	油品類污染土壤	1. 瀝青及混凝土製造 2. 冷混瀝青 3. 建築材料 4. 回填至原開挖處 5. 回填至原場址內其他地方 6. 經核可之場址外利用
美國俄亥俄州土壤再利用行動基準值	作為污染土壤再利用之標準	油品類污染土壤	相關法令許可之用途

資料來源：白慧芬，國內污染土壤離場處理管理策略之研析，2011。

表 3.4 美國環保署及紐約州、麻州污染土壤管理制度彙整比較表

管理制度內容	美國環保署	美國紐約州	美國麻州
法令依據	1. 包含污染物管制政策 (Contained-In Policy) 2. 掩埋及土地處置限制(Land Disposal Restriction, LDR)	油污土壤指引政策 (Petroleum-Contaminated Soil Guidance Policy)	污染土壤於掩埋場再利用與處置政策 (Reuse and Disposal of Contaminated Soil at Massachusetts Landfills, Policy # COMM-97-001)
污染土壤認定	土壤為環境介質，包含或為 RCRA 列管之有害廢棄物污染時，或符合有害廢棄物認定標準時，必須依照 RCRA 有害廢棄物方式管理或處理。	污染土壤一經挖出後即視為工業廢棄物。	先進行污染土壤是否屬有害廢棄物之認定，非屬有害者始可進行再利用或掩埋處置。
處理或再利用方式	僅針對進行掩埋處置應達到之相關標準進行規範。	可作為瀝青混合物、建築材料、掩埋場覆土等使用。	掩埋處置或作為掩埋場每日覆土、中間覆土、整地材料使用。
處理或再利用標準	需符合 RCRA 有關事業廢棄物管制之相關規定。	視為工業廢棄物，必須依據 6NYCRR Part 360 進行管理，並依據 6NYCRR Part 364 進行運送。	清運作業必須依據固體廢棄物管理法規中有關清運之相關規定或該政策中之物質運送紀錄 (Material Shipping Record, MSR)所規範之程序進行。

資料來源：白慧芬，國內污染土壤離場處理管理策略之研析，2011。

3.2.3 日本

日本於污染土壤整治技術上的發展以離地技術(土壤清洗)為優先處理方式，而現地整治技術為輔，土壤清洗技術於日本已發展成熟，並廣泛應用於受戴奧辛污染之土壤整治，其污染土壤政策主要依據「土壤污染對策法」及「搬出污染土壤處理方式」辦理。

並於土壤污染對策法賦予土壤污染整治之義務，其可分為兩類：土壤污染調查義務及污染整治義務，調查義務的主體為土地所有人、管理人及占有人，若是未能立即找到前述適當之有調查義務之對象，因土壤污染危害之急迫性，地方自治團體之都道府縣知事亦可自行進行調查義務；整治義務的主體亦為所有人等，但在非實際造成污染、明確可知實際污染原因人且所有人等亦同意由污染原因人進行整理之情形下，則由污染原因人負整治之責任，調查義務發動的時期有二，其一為工廠廢止時，其二為都道府縣知事認定土壤污染有危害人體健康之虞時，可命調查義務的主體進行調查並報告結果，依據前述調查結果，如果土壤污染的狀態已經超過了環境標準時，都道府縣知事則須指定土壤污染場址，並為公告，令其登錄於土壤污染土地清冊上，提供閱覽，直到整治完成後才得解除指定，並將其從污染土地清冊上刪除。

伴隨對策法的強制規範，土壤污染整治事業的規模預估有 13 至 43 兆日圓的規模，因此日本的環境相關事業相繼投入土壤污染整治技術的開發，由於對策法以防止危害健康為旨，調查對象以使用「水質污濁防止法」所規定有害物質之設施，並以設施廢止時為調查時點，另一項調查命令發動理由則為都道府縣知事依據環境標準，考量有無危害人體健康之情形，兩項發動調查命令之理由或對象皆相當有限，而整治命令的發動，也以防止危害健康為旨，多數要求封鎖現址或覆蓋，污染土的除去或原場址整治的情形則屬於例外。

而依據處理方式分別規範各類污染土壤最終處置、淨化處理、再利用作為水

泥原料及土壤調理等後續處理方式之認定機制，其中作為水泥原料之污染土壤，需符合特定有害物質如重金屬、揮發性有機化合物及農藥之溶出管制基準濃度。

污染土壤處理方式分類如下：

- 一、 第一類：進入依海洋污染防治法設置之掩埋場所，或依廢棄物處理法設置之最終處分場(掩埋場)。
- 二、 第二類：進入經核可認定之污染土壤淨化設施進行處理。
- 三、 第三類：進入經核可認定之水泥製造設施作為原料利用。
- 四、 第四類：進入經核可認定之分選處理設施後，經調整污染土壤之含水率與去除雜物程序後，再運送至相關處理設施處理。

此外，污染土壤處理亦搭配「搬出污染土壤管理票」制度，藉以管控污染土壤之去向，作為場址污染土壤流向管制與整治執行方式之依據。「搬出污染土壤管理票」係針對指定公告管制區域開挖之污染土壤，進行流向管制，針對指定公告區域內開挖之污染土壤，搬出者(或稱交付責任者)應提出「污染土壤管理票」，交由委託處理者(最終處理場、回填地、污染土壤處理設施、水泥工廠等)，於運送及處理完成後均需加以確認，例如運至鄰近土地、暫時保管、有害物質去除、原址回填等情況皆須確保其責任者以確實完成其責任工作，此管制方式類似我國有害事業廢棄物處理聯單制度。

3.2.4 英國

英國認定污染土地場址較特別之處，在於主管機關必須以危害評估的概念，調查出污染源的存在，且污染物其傳播途徑其可能使某區域受到影響，而在土地符合上述條件，政府才能公告其為污染土地。

依法英國地方主管機關有查證土地是否遭受污染的責任，截至 2002 年 3 月止，英國地方主管機關已經調查出 33 個污染土地場址，其中 11 個為污染場址包含已造成飲用水水源污染、石油煉製所造成的污染、生產爆炸性物質所造成的污

染，污染土地為國防部所轄及污染土地位於核能場址內等。

目前台灣地區相關再利用規範中僅將事業產生之污泥納入再利用範圍，污染土壤場址之污染來源多數由事業機構生產過程所致，實可納入事業廢棄物管制項目中，另污染土壤因來源不同而具有不同的物化特性，經適當處理後可做為可再利用資源，惟國內尚缺乏完整的管制系統，因此本計畫探討並研擬事業廢棄物再利用管理方式及國外污染土壤再利用管制方式，建立污染土壤再利用分級制度，分別建立不同污染土壤再生技術之再利用認定標準，如：污染土壤穩定化處理、污染土壤壓密處理、污染土壤燒結再生處理等，依據各處理技術產生之再利用材料品質建立品質認定、檢測方法及審核規範與再利用用途，並藉由事業廢棄物再利用申報管理制度，控管再利用量及廢棄物流向，以確保污染減量及環境安全，並達到資源永續利用之目標。

3.3 污染土壤再利用處理技術

由於「環境永續」議題已普遍受到國際社會的重視，再者自京都議定書於2005年2月生效以來，溫室氣體減量責任與減量政策已為我國帶來相當的衝擊。我國環保署針對此一問題相當重視，在土壤及地下水污染整治業務中，業已逐漸納入永續性的環保概念並積極拓展中。故推動「綠色整治」為污染土壤再利用的目標及方向，即考量整治行為對環境的衝擊，運用須減少能源、水的消耗以及降低廢棄物產生的方式，及善用再生資源之特性，降低環境污染並促進資源有效利用。

針對污染土壤進行不同之再利用前處理，比較三種不同處理方式對污染土壤特性影響及可行性探討，各種處理技術說明如後：

參酌廢棄物再利用方式，一般再利用材料之前處理之技術可依處理方式及應用目的分為低、中、高三個等級：低技術利用，係指再利用材料不需要或者需要

少許處理即可逕行作為填土、路基或覆土使用。中技術利用指再利用材料需經固封劑（如瀝青或石灰）結合或固封之後，方可進行資源再利用。高技術利用則指再利用材料需經前處理去除可能污染物（如重金屬萃取）或改變再利用材料之特性或結構（如玻璃化）或高溫燒結等方式，降低或減少對環境污染之可能性再進行利用。隨著技術需求之提昇，處理成本亦隨之增加，各層次技術之處理方法如表 3.5 所示。

表 3.5 再利用材料之技術需求分類

處理層次	利用方法或前處理技術
低技術	填充料 (fill material) 路基材料 (road base material) 掩埋覆土 (landfill cover) 污泥調理劑 (sludge conditioning)
中技術	熱瀝青利用 (hot bituminous application) 冷瀝青利用 (cold bituminous application) 與波特蘭充分混合 (Portland cement ready mix) 波特蘭石灰塊 (Portland cement block) 瀝青或波特蘭水泥混合之應用 (bituminous or Portland cement/limemixed-in-place application)
高技術	玻璃化 (vitrification) 重金屬萃取 (heavy metal extraction) 燒結 (high temperature sintering)

3.3.1 固化/穩定化法

固化/穩定化法(Solidification/Stabilization)係避免或減緩受污染土壤或廢尼中所含之有害物質釋放出來的整治技術，此整治技術通常不會破壞有害物質，而是避免有害物質釋放至環境中。固化係將受污染土壤(底泥)與水泥黏結成硬塊的處理程序；穩定化係改變有害物質之特性，使其較不具危害性或移動性。固化與

穩定性經常會一起使用，以阻礙有害物質暴露於人體或環境中。然固化法主要是添加水泥等固化劑，運用水泥含大量鹼度之特性，使重金屬離子形成不溶性、低活性之氫氧化物，此外水泥與水形成膠體矽酸鈣水合物，隨著水化作用形成網狀結構能將氫氧化鈣及水合結晶副產品固定，即形成堅固之固化體將重金屬氫氧化物包圍。惟其雖可達成穩定化效果，但其匣化及包覆固定後，反而減低其再利用之彈性，且使用水泥等固化劑藥品，亦造成其體積的增加，增加其運輸及廢棄成本，亦可能減少再利用之範圍，反而減少其穩定效益。

固化/穩定化的方法可利用穩定劑添加方式，作為污染土壤改良技術之一，常見之穩定劑如下：

一、 碳酸化穩定化

藉由污染土壤碳酸化過程，吸收 CO_2 及產生中和反應，並藉由氧化物水解及元素態金屬氧化形成氫氧合化合物之表面覆合物（oxyhydroxide surface coatings）等過程，使得重金屬物質不易再溶出。

二、 鐵氧磁體穩定化

鐵氧磁體之結晶結構與安定的天然尖石（ MgAl_2O_4 ）相同，二價鎂可由其他二價金屬離子取代，三價鋁亦可為其他三價金屬離子取代，形成類似尖晶石型構造物。一般能取代入鐵氧磁體之金屬離子包含銀、鎂、亞銅、亞鐵、三價鐵、三價鋁、三價鉻、六價鉻等，幾已涵蓋所有常用之金屬種類，以鐵氧磁體法穩定化污染土壤中之重金屬，可將重金屬鎘之鍵結種類及分配位改變，將重金屬化學鍵結種類由較易溶出之交換鍵結型轉換為與碳酸鹽鍵結型。此法除可將重金屬包封匣限外，並具有改變重金屬化學鍵結種類之效果。

三、 化學穩定法

依據化合物溶解度積 K_{sp} 之原理，當溶液中陰陽離子之溶解度乘積高於此化合物之 k_{sp} 時，會形成沉澱反應，因此，若金屬陽離子與某陰離子結合之化合物之 K_{sp} 甚低時，則此陰離子即易將此重金屬沉降下來，環境中陰離子如氫氧離子、硫離子、碳酸根離子、磷酸根離子等常與重金屬形成低

溶解度之化合物而減少其溶出，尤其硫化物之 K_{sp} 更低，一般常見重金屬化合物之 K_{sp} 如表 3.6 所示。

表 3.6 重金屬化合物之溶度積常數

氫氧化物	pK _{sp}	硫化物	pK _{sp}	碳酸化合物	pK _{sp}	磷酸鹽	pK _{sp}
Cd(OH) ₂	13.8	CdS	27.2	CdCO ₃	13.7	-	-
Pb(OH) ₂	19.8	PbS	28.2	PbCO ₃	12.8	Pb ₃ (PO ₄) ₂	44
Hg(OH) ₂	25.4	HgS	53	Hg ₂ CO ₃	16.1	Hg ₂ (HPO ₄) ₂	14

四、 磷酸鹽穩定化

利用添加化學藥劑與灰渣中之重金屬螯合形成安定結構物，一般在飛灰穩定研究及實務上，常使用無機性磷酸鹽系及有機系硫磺鹼性藥劑。美國 Wheelabrator Environmental System Inc. 則以 WES-PHix 灰渣穩定過程申請專利 (Wiles, 1996)，本過程添加水溶性磷酸鹽和鹼，以形成穩定之磷酸鹽金屬化合物 (chloropyromorphite)，降低重金屬溶解度，致無法再滲出而達長期穩定化，經研究改善其反應時間及加強溶出成效，發展為一專利製程，已有商業應用。

3.3.2 壓密法

壓密法為目前市面上較新穎的環保技術，即將回收再利用的回收大理石、花崗石碎粒混合，加入水泥攪拌形成人造崗石表面，中層則使用高密度保麗龍做為隔熱材，第三層則使用免洗餐具或其混和材質，再加入回收大理石、花崗石及研磨產生之石粉，混和加入水泥攪拌製成輕質隔熱層。此產品具有易黏合不易脫

落，及產品成型後不需研磨處理，不會產生二次污染，且隔熱效果較傳統隔熱地磚佳，可作為地坪或步道之用，使用後老舊更新或變更改用途時，可將產品回收粉碎再利用。

3.3.3 分離/濃縮處理技術

分離/濃縮處理技術可作為污染土壤再利用時之前處理技術，其離地處理包括物理分離、高溫分離與溼式分離等，如熱脫附法、土壤淋洗、酸洗，利用液相或有機溶劑對土壤進行化學性萃取等，將所欲處理之重金屬洗出或溶出，並加以再生回收，現地處理方法則有電動力法，物理分離、土壤淋洗、酸洗及熱脫附法介紹如下。

一、 物理分離

物理分離技術是利用土壤物理性質(如粒徑、外觀、比重及磁性等)差異，而予以分離，污染場址中一般所採用之物理分離技術如下：

- (一) 粒徑分離：原理為利用不同直徑之開孔，使不同有效粒徑之顆粒通過，其優點為設備便宜且可大量、連續的分離處理，使用上的限制為篩網會被堵塞、細篩易損壞、乾篩易產生揚塵。
- (二) 水力分離：原理為利用顆粒密度、大小及外觀之不同而在水中具有不同的沉降速度進而分離，優點同粒徑分離，設備便宜且可大量、連續的分離處理，限制為當土壤中具有高含量之黏土、砂土及腐植質時不易使用。
- (三) 重力分離：原理為利用顆粒密度不同而分離之技術，同樣具有設備便宜且可大量、連續的分離處理的優點，其缺點同水力分離，不適用於土壤中含黏土、砂土及腐植質等物質。
- (四) 浮除：利用顆粒表面之特性而利用氣泡吸附，使其浮在水面後加以去除，此技術對細顆粒特別有效，但較適用於低濃度時。

(五) 磁力分離：原理為利用顆粒之磁性不同，可運用高磁力場梯度 (high gradient fields) 而廣泛回收不同的物質，其設置及操作成本較其它者高。

美國即有利用物理分離技術將污染土壤中之重金屬污染物濃縮後再送到重金屬回收處理之工廠進行回收之案例，此外，一般物理分離需結合其他處理方法如土壤淋洗法及回收處理等技術，方能達到土壤污染整治之目的。

經分離之大顆粒土壤、卵礫石上或其中之重金屬污染物去除之難易度，將會影響物理分離技術單價，如利用簡易水洗程序即可分離污染物，則可降低處理費用；如污染物非僅附於表面，則需進行破碎、研磨等程序，則處理費用將會提高

二、 土壤淋洗法

土壤淋洗法利用水溶液將附著在土壤顆粒上之污染物經由沖洗使其與土壤分開，過程中如泥土、泥沙粒子等附著力較弱者與沙子及砂礫土壤粒子分開，使污染物集中於較小體積的土壤上，而可更進一步處理及處置，此技術進行土壤污染整治所需之期程主要受如粉土、黏土及殘渣在污染土壤中之數量、土壤污染物之種類及數量及土壤污淨設備之處理容量。

土壤淋洗法已廣泛地應用於歐美，其做法常利用土壤淋洗技術先行移除或洗滌土壤中大部份污染物，以減少必須進一步處理污染土壤的量，因此土壤淋洗技術必須配合其他處理技術，以達土壤污染整治目標，經土壤淋洗技術處理後之土壤回填至污染場址中，衍生之污泥及廢棄物則送至中間處理場或最終處置場處理。

三、 酸洗法

由於如稀鹽酸、檸檬酸、磷酸、醋酸等稀酸溶液可作為重金屬之萃取劑，故可利用其淋洗污染土壤中，使其與土壤中之重金屬發生作用，並將重金屬於酸液中溶出。

酸洗法技術之處理流程，一般可分為前處理、萃取、淋洗分離、淋洗廢酸再生或處理、後處理等 5 個步驟，如下所示：

- (一) 前處理：土壤經風乾後，先行去除所含之大型顆粒如植物殘體及礫石等。
- (二) 萃取：針對欲萃取之重金屬，選擇適當之酸液及調配成為適當濃度之酸性萃取劑，利用酸性萃取劑萃取污染土壤中之重金屬，使土壤中之重金屬於酸液中溶出。
- (三) 淋洗分離：土壤與酸性萃取劑作用完成後，以水淋洗土壤，分離土壤與萃取劑。
- (四) 淋洗液再生或處理：土壤與酸性萃取劑作用完成後產生之淋洗液，經再生處理回收再利用，同時回收重金屬，或將淋洗液逕予處理，不回收酸液及重金屬，而將處理後產生之重金屬污泥，利用固化技術處理之。
- (五) 後處理：受重金屬污染之土壤經以酸淋洗處理後，需加入鹼劑(如碳酸鈣)以中和處理後土壤之酸性，使得進行後續回填處理。

四、熱脫附法

為利用加熱之方式將受污染之土壤加熱至污染物沸點以上，如將土壤加熱至有機物沸點以上，使吸附於土壤中之有機物揮發後分離處理，此處理方法已經驗證可應用於處理污染土壤、底泥、污泥及濾餅等，此技術除加熱程序外，尚須有氣狀污染物處理單元，能將揮發之有機污染物處理至標準後排放至大氣，避免造成空氣污染，一般氣態污染物之處理方式，可依濃度及經濟性選擇以冷凝、吸附或燃燒之方式處理。

影響熱脫附過程之應用性及有效性有下列幾項：

- (一) 特定的場址，特定大小的顆粒及材料的操作需求。
- (二) 為達土壤溼度的控制，可能需要先進行脫水。
- (三) 處理過的殘留土壤中，若含有重金屬物質則需再加以穩定化。
- (四) 土壤、淤泥、高腐植土壤與污染物質結合在一起時會增加反應時間。

熱脫附法依操作溫度可分為高溫熱脫附 (high temperature thermal desorption, HTTD)及低溫熱脫附(low temperature thermal desorption, LTTD)。

- (一) 高溫熱脫附：將污染土壤或廢棄物加熱至 320°C 至 560°C，依整治場址的狀況，可與焚化法或脫氯法配合使用。
- (二) 低溫熱脫附：將污染土壤或廢棄物加熱至 90°C 至 320°C，若溫度未調至低溫熱脫附最高溫度，土壤內的有機物質不會因高溫而被破壞，可使處理後的土壤保持著生物活動。

3.3.4 熱處理法

熱處理法應用於再利用材料之前處理主要為利用高溫(>1,000°C)，將黏質土壤添加乾燥污泥或直接燒製為磚體進行再利用之方式，燒結溫度、含水量及土壤質地為磚體品質之決定因子，目前國內已有成熟之污泥再利用燒結技術，燒結成品可應用於建築用磚、人造輕質骨材、透水磚等。

3.3.5 玻璃化法

玻璃化法為利用高於 1000°C 的溫度下處理之技術，透過物理方法將土壤中污染物質破壞分解或固定於成玻璃狀的矽酸鹽物質中，形成玻璃化，使污染物的移動性降低，可分為現地及離場玻璃化，現地玻璃化法的操作方式是將電極棒插入待土壤中，利用土壤的高電阻特性，施加高壓電使電能轉變為熱能，以熔化處理區域的土壤，而當熔化物質逐漸冷卻後，即成為類似玻璃狀的穩定物質，現行玻璃化技術可產生重達 1,400 噸的土壤玻璃結塊，而處理深度可達 20 英尺。

此外現地與離場玻璃化相較之下，現地處理方式有下列幾項優點：

- 一、節省成本：現地玻璃化相較一般熔爐的可於較高操作溫度下進行，一般熔爐約 1,100~1,400°C，現地玻璃化則可達 1,600~2,000°C，而於熔爐加溫程序中，需添加化學藥劑於廢棄物中，會造成熔爐中的溫度降低，並於每隔

一段時間須關掉熔爐以更新熔爐耐火內襯，相較之下，現地玻璃化因不需使用耐火內襯而無此項限制，且處理程序中不需要添加任何藥劑而能節省處理成本。

- 二、 穩定度較高：因現地玻璃化可於較高溫度下進行，可產生穩定度較高的玻璃化產物，而減少化學物質溶出性並降低玻璃的風化速率。
- 三、 較高之體積減少量：因現地玻璃化過程中無需添加任何額外物質或藥劑，使其最終產物有較高的體積減少量。
- 四、 處理效能較佳：現地玻璃化無須經過前處理即可處理大多數污染物質，也不須為了熔爐進料的尺寸限制，而改變廢棄物之體積。
- 五、 產物之風化程度和化學物質溶出較性：現地玻璃化最終產物為一大型玻璃結塊廢棄物，比起熔爐的處理產物，通常有較小的比表面積，因此可降低風化程度和化學物質溶出性。
- 六、 可減少公共和環境之安全風險：現地玻璃化因處理後之產物可留置於原地，無需進行移除，而熔爐之處理方式對於處理後之產物則需較嚴格的管理，並進行污染物移除清理。

3.4 污染土壤再利用溶出特性分析

針對現有重金屬污染場址取樣，應用動態溶出試驗評估污染土壤重金屬於再利用處理後之溶出量，並分析溶出水體之溶解性有機碳、重金屬、pH 值和導電度之差異，藉以建立污染土壤再利用參數參考建議值，為評估污染土壤再利用品質可行性之程序。各項溶出水體分析項目說明如后。

- 一、總有機碳：使用濕式氧化法 TOC 分析儀 IL 550 TOC-TN。其分析原理係採 USEPA 認可之過硫酸鹽氧化法所設計，並搭配非擴散性紅外線 (NDIR) 偵測器，直接偵測酸化及氧化過程中無機碳 (IC) 及有機碳 (OC) 所產生之 CO₂ 濃度，以反推 TIC 及 TOC 之個別濃度。

二、重金屬:水中金屬及微量元素檢測方法-感應耦合電漿原子發射光譜法 (NIEA W311.51B)。感應耦合電漿原子發射光譜法 (ULTIMA 2000) 對水樣中多元素的分析,係利用高頻電磁感應產生的高溫氫氣電漿,使導入電漿中的樣品受熱而起一系列的去溶劑、分解、原子化 / 離子化及激發等反應。其分析的依據,係利用被激發的待分析元素之原子 / 離子所發射出的光譜線,經由光譜儀的分光及偵測,即可進行元素之定性及定量。

三、pH 值:以攜帶式 pH 值檢測計 (HACH, sension4) 在採樣現場採集水樣之 pH 值。並與重複樣品比對差值,若差值間大於 0.5,則會在現場重新取樣檢測確定。實驗方法為,按下 power 按鍵開機,以二段水清洗 sensor,並以拭鏡紙拭乾,置入 pH 值 7 的校正液中,並轉動 CAL 的調整鈕,直到 pH 值到達 7;接著將 sensor 洗淨拭乾後,放入 pH4 的校正液中,並轉動 SLOPE 調整鈕,將螢幕顯示的 pH 值調整至 4;再將 sensor 以二段水沖洗乾淨後,即完成校正手續。

四、導電度:以攜帶式導電度計 (HACH, sension5) 採樣現場採集水樣之導電度值。並與重複樣品比對差值,若差值間大於 5%,則會在現場重新取樣檢測確定。實驗方法為,以二段水沖洗導電度計 sensor 後,以拭鏡紙擦乾。並將 sensor 置入校正液當中,按 CAL 鍵變更面,出現 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的畫面後按 RUN/ENTER 讀取導電度數值;穩定後,調整導電度到 1412(25°C,其他溫度須參照環檢所方法 W203.51B 或校正液瓶身說明)。按下 CAL 回到一般介面,並將 sensor 洗淨擦乾後,即完成校正手續。

3.4.1 污染土壤重金屬特性比較

由於過去工業發展過程對於小型金屬加工產業之廢金屬未妥善管理,廠址廢棄後遺留於廠址內之廢金屬埋埋物造成土壤污染,針對此類型重金屬污染土壤之再利用處理技術及再利用前之檢測,應用熱處理方式進行材質改良,比較 900°C

加熱 50 分鐘及 1,000°C 加熱 30 分鐘後之特性差異。

表 3.7 污染土壤熱處理前後重金屬總量分析

重金屬種類	重金屬總量(mg/kg)				土壤污染 管制標準
	污染土壤	土壤樣品	熱處理土壤 (900°C, 50 min)	熱處理土壤 (1000°C, 30 min)	
砷 (As)	84	60	50	46	60
鎘 (Cd)	N.D.	8	10	4	20
鉻 (Cr)	258	185	130	128	250
銅 (Cu)	594	700	952	510	400
汞 (Hg)	N.D.	-	-	-	20
鎳 (Ni)	84	-	-	-	200
鉛 (Pb)	1187	1135	802	532	2000
鋅 (Zn)	4904	3895	2830	2676	2000
鋇 (Ba)	-	313	100	120	-
硒 (Se)	-	23	16	14	-

污染土壤場址之重金屬總量以砷、銅及鋅超出土壤污染管制標準甚高，經熱處理後土壤中各重金屬總量均降低，惟 900°C 熱處理 50 分鐘之銅及鎘總量反升高。結果顯示熱處理方式對於此污染土壤中之重金屬污染量改善程度有限，砷之總量略微降低，銅及鋅之總量於熱處理後仍高於土壤污染管制標準，需考量應用其他處理方式進行土壤改良。

3.4.2 污染土壤重金屬溶出特性比較

污染土壤中的重金屬流佈特性將影響再利用土壤週邊之土壤及地下水環境品質，因此藉由動態溶出試驗比較污染土壤於熱處理前後重金屬溶出量之差異，評估在利用後之溶出趨勢與環境風險，能進一步確認再利用之可行性。

圖 3.2 為污染土壤熱處理前後重金屬溶出總量變化之比較。此重金屬污染土

壤中之重金屬為受土壤穩定吸持之型式，因此藉由酸雨模擬之溶出試驗結果，溶出之重金屬總量極低，僅微量銅離子溶出。高溫處理後之溶出重金屬量略為增加，但溶出濃度仍極微量，此可能與重金屬與土壤鍵結特性有關。

圖 3.3 為污染土壤熱處理前後溶出液 pH 變化之比較。此未處理重金屬污染土壤之溶出液於 pH 值分佈於 7 - 10，pH 值變化於 1 日內由中性趨於鹼性，至 6 日後 pH 趨於穩定；900°C (50 分鐘) 熱處理後溶出液 pH 值分佈約為 10 - 12.5，pH 值大致呈鹼性，至 6 日後鹼性略為下降；1000°C (30 分鐘) 熱處理後溶出液 pH 值分佈約為 9.5 - 12，pH 值變化於 1 日內由弱鹼趨於強鹼性，隨後即趨於穩定。

圖 3.4 為污染土壤熱處理前後溶出液氯鹽含量變化之比較。此重金屬污染土壤之溶出液於熱處理前後氯鹽含量均極低，濃度分佈於 26 ppm 以下。未處理前之污染土壤溶出氯離子濃度 2 日內由 10 - 12 ppm 降至 5 ppm 以下，約 7 日後降至 0.4 ppm 以下而趨於平衡；900°C (50 分鐘) 熱處理後溶出液氯鹽含量初期略高約為 25 ppm，約 15 日內降至 5 ppm 以下；1000°C (30 分鐘) 熱處理後溶出液氯鹽含量初期亦略高約為 24 ppm，約 9 日內降至 5 ppm 以下而趨於平衡。

圖 3.5 為污染土壤熱處理前後溶出液溶出液導電度變化之比較。此重金屬污染土壤之溶出液於熱處理前後導電度顯著提高，第 1 日導電度約由 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 升高至 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，約 4 日後導電度降至初始值而趨於緩慢下降，約 12 日後降至 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下而趨於平衡；900°C (50 分鐘) 熱處理後溶出液導電度分佈出其高達 3864 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，約 12 日後降至 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下而趨於平衡；1000°C (30 分鐘) 熱處理後溶出液導電度第 2 日內約由 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 升高至 3640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，約 3 日後導電度降至 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下而趨於平衡。

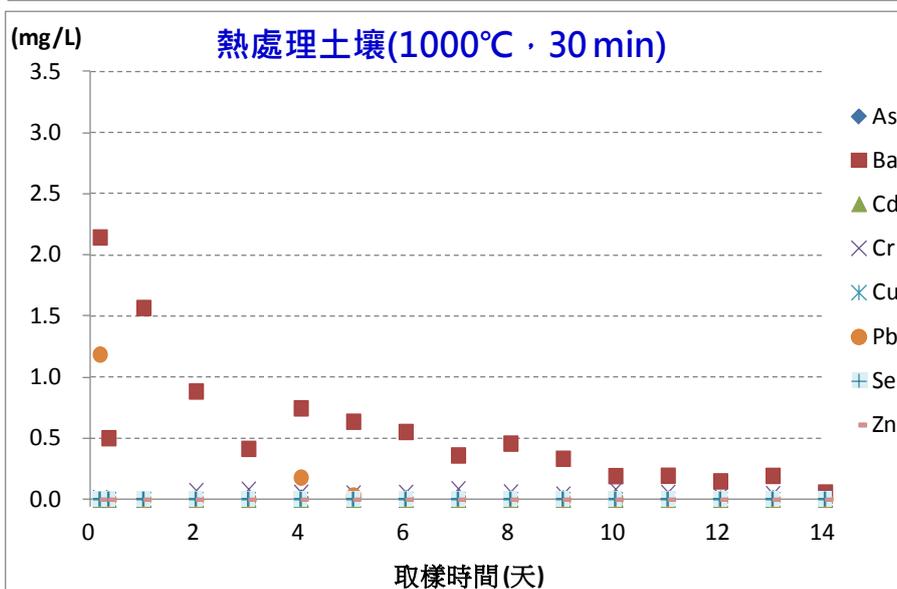
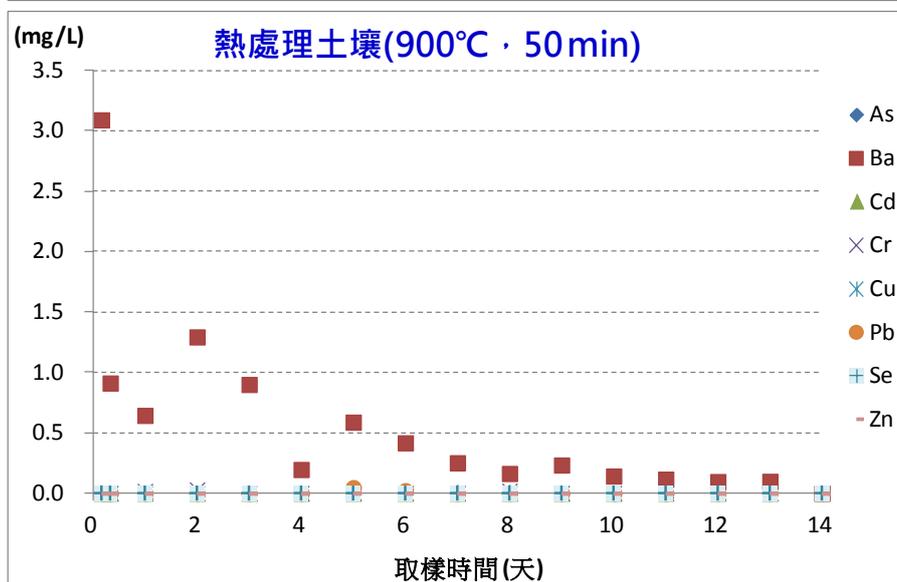
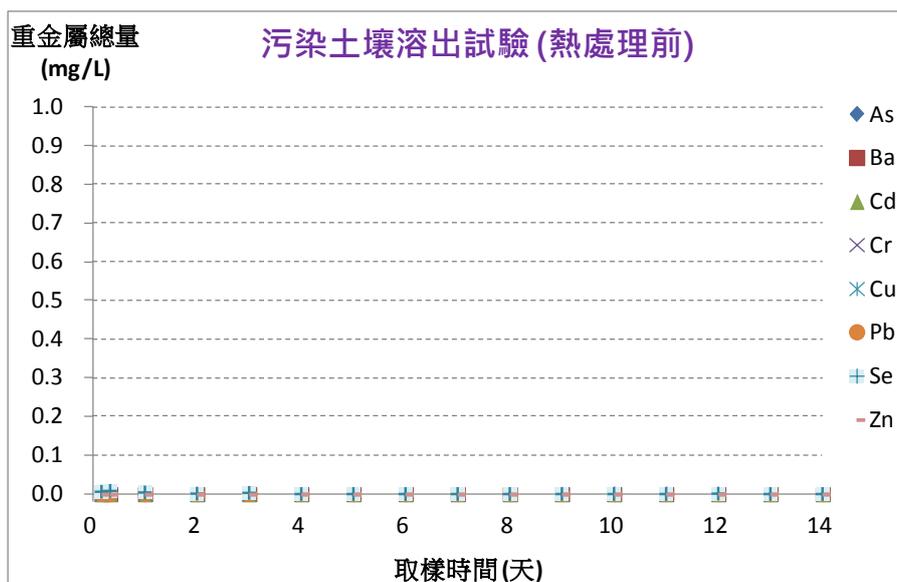


圖 3.2 污染土壤熱處理前後重金屬溶出總量變化

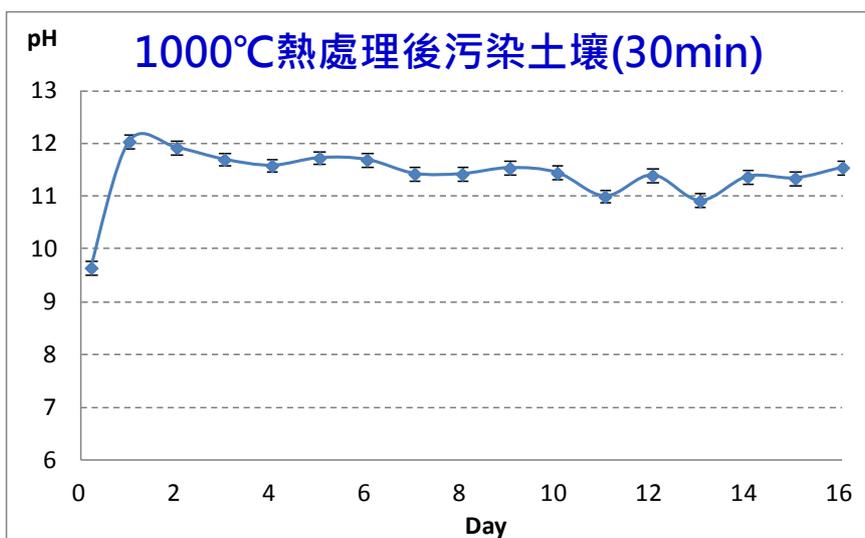
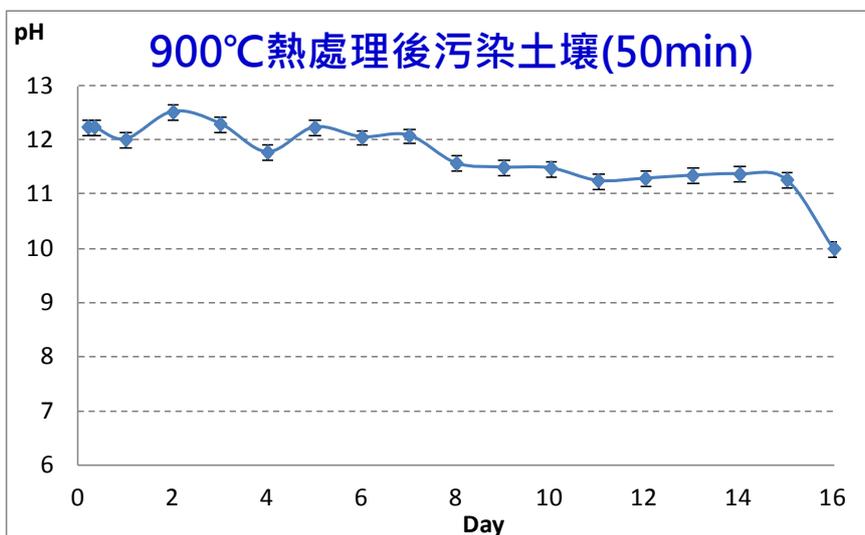
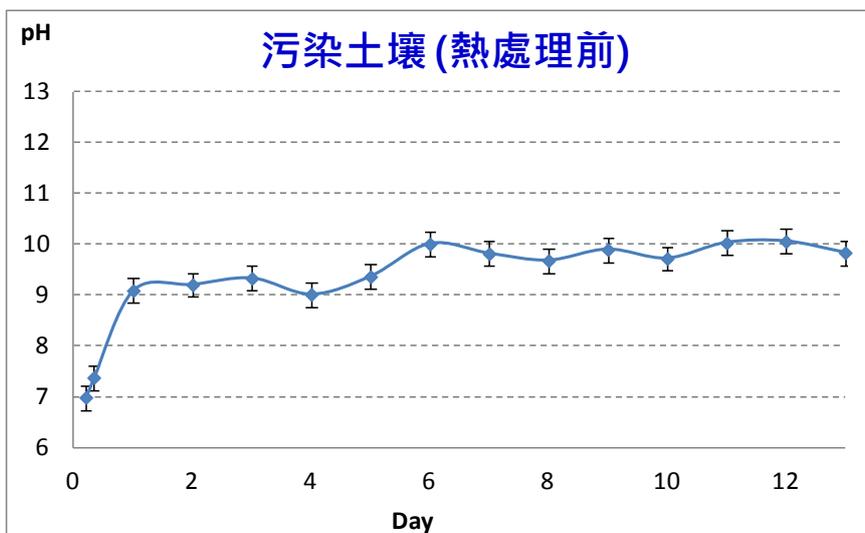


圖 3.3 污染土壤熱處理前後溶出液 pH 變化

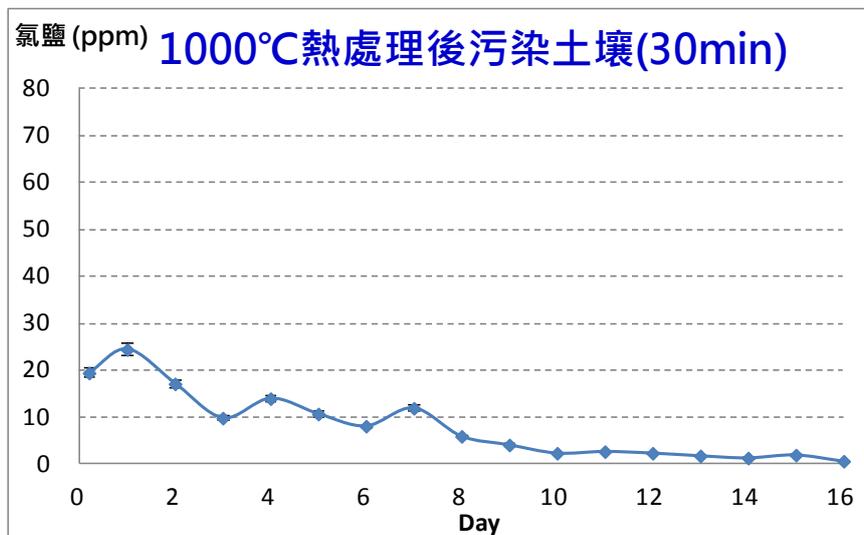
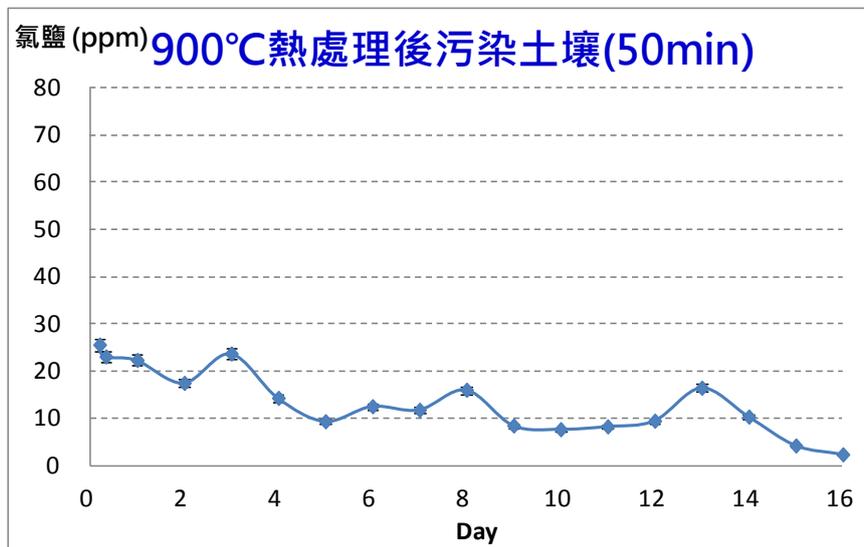
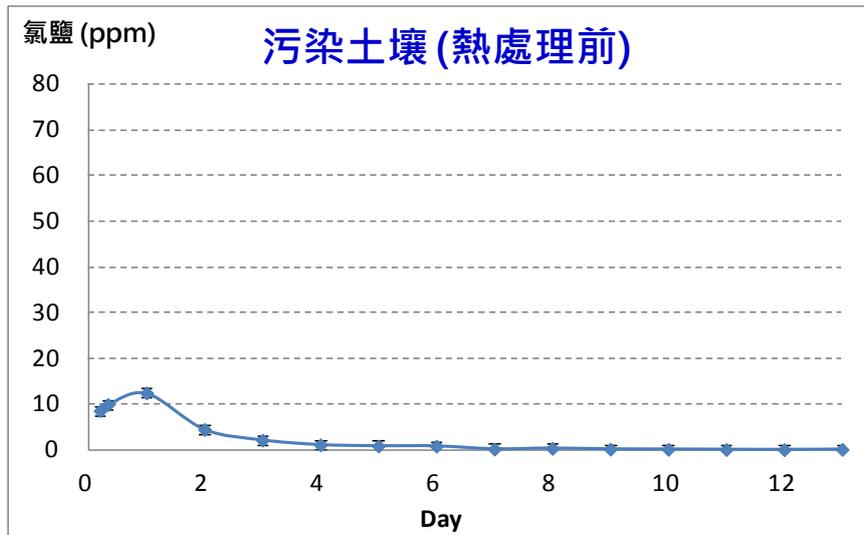


圖 3.4 污染土壤熱處理前後溶出液氯鹽變化

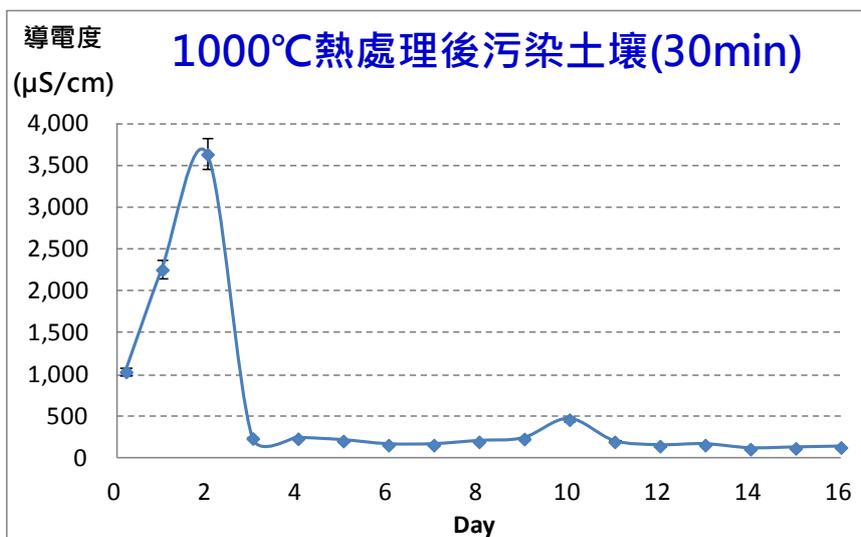
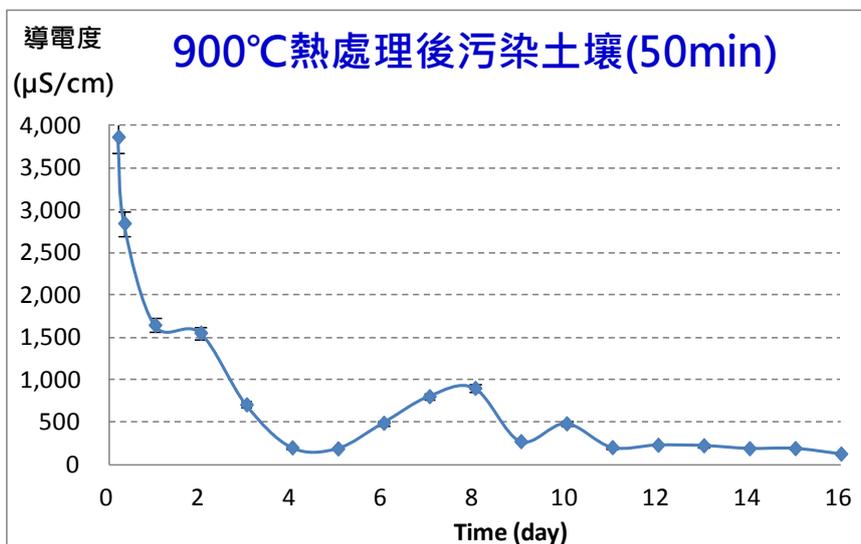
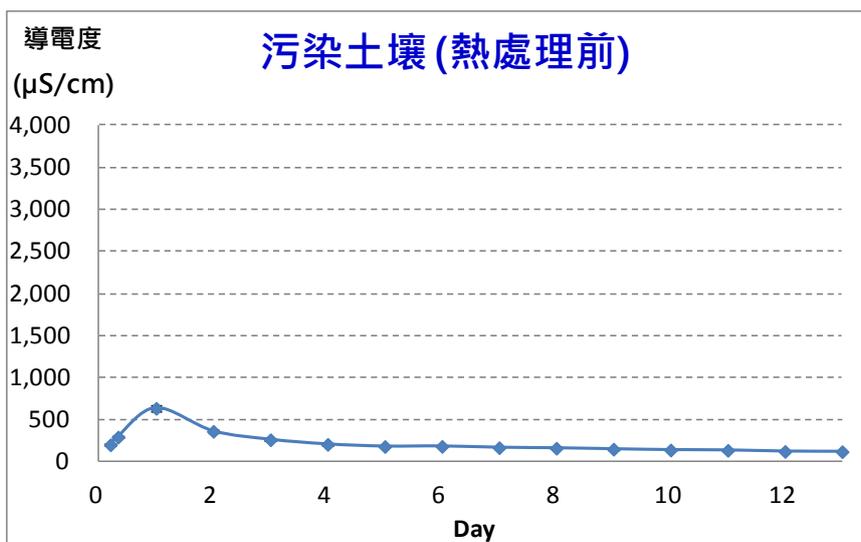


圖 3.5 污染土壤熱處理前後溶出液導電度變化

3.5 污染土壤品質管理系統建置

3.5.1 污染土壤品質管理系統架構

污染土壤再利用為國際土壤污染整治永續發展之趨勢，為落實污染土壤再利用政策及有效執行土壤品質管理，完整的污染土壤再利用管理系統必須能夠結合政策、技術及市場機制，荷蘭在落實污染土壤處理及再利用體系最具完整性且行之有年，歷經多年執行成果檢討改善，已發展全面性之土壤管理系統，其地理特性與台灣相似，由過去農業發展轉型為工業發展後，產生大量污染土壤待處理之問題，故其成功案例值得國內借鏡。

參考荷蘭土壤污染管理政策及執行方式，土壤之管理建構於土壤保護法及環境保護法之基礎上，意即基於土壤保護法與環境保護法之內涵與規範，以保護人、植物、動物健康為目標，同時兼顧經濟發展，土壤管理以創新、環保及永續發展為政策方向，基於污染預防之風險管理原則規劃土地整治利用，公私部門交流與合作，發展具“功能性”之污染場址整治技術與應用，明訂國家層級之土壤環境品質標準、土壤污染物容許濃度及溶出特性試驗程序，並於國家層級之建築材料法規中明訂再利用土壤之有機及無機污染物容許環境品質標準採樣分析方法及溶出特性試驗方法，定期檢討及依據新的見解與實驗數據評估及修訂法規，提高法規之實用性。圖 3.6 所示為污染土壤再利用管理系統架構。

國內污染土壤已有一套土壤及地下水污染整治法規系統，由於污染土壤再利用需兼顧合法性與環境品質，因此相關法規已包含土壤及地下水之整治規範，然污染土壤來源特性差異以及不同處理技術之應用，依再利用用途及目的、用量需求亦有所不同，相較於各種污染土壤，非含有害污染物之污染土壤現在階段較易處理及作為再生材料，其應用可與交通部及營建主管單位共同研議可行之再生材料應用辦法。污染土壤分級再利用參考管制架構如圖 3.7 所示，土壤污染管制標準為許可再利用須符合之先決條件，有污染地下水之虞者考量部分再利用，或經

土壤改良處理後可再利用，確認為污染土壤者須依用途進行處理後方可再利用。

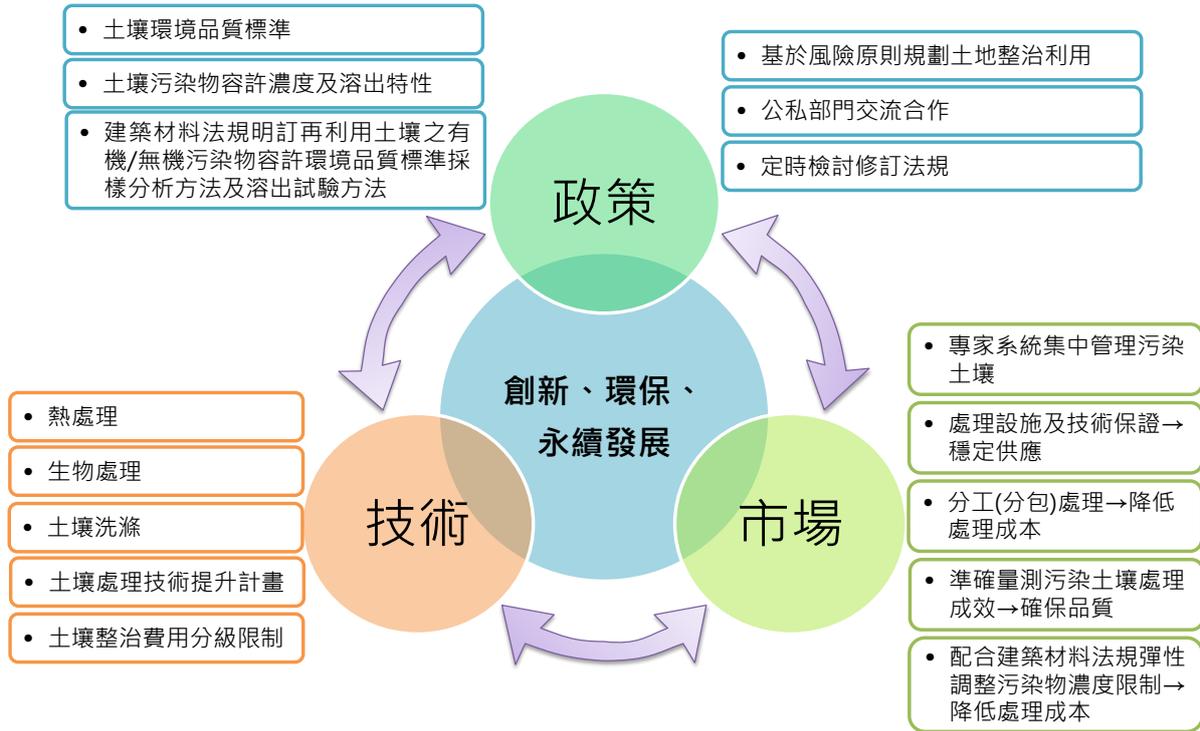


圖 3.6 污染土壤再利用管理系統架構

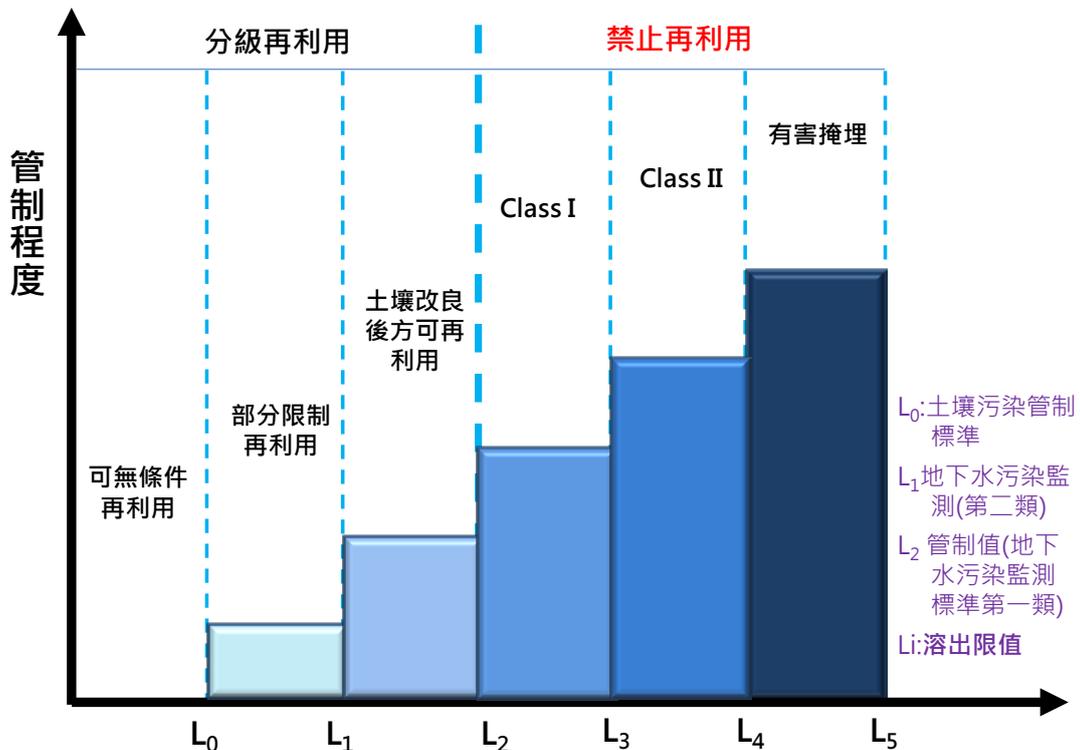


圖 3.7 污染土壤分級再利用參考管制架構

3.5.2 污染土壤再生材料應用工程性質檢驗

依據荷蘭污染土壤再利用政策及離地土壤處理技術發展，對於可再利用土壤品質經評估技術可行且數量充足時，污染土壤再利用可考量配合國土規劃與土地利用計畫，如穩定化處理再生材料應用於公共工程如道路材料。表 3.8 為污染土壤再生材料試驗參考標準方法及適用之試驗層級。

另營建署「綠建材設計技術規範」認可之綠建材包括：依行政院環境保護署第一類環保標章規格標準，取得環保標章之下列材料：(1)塑橡膠類再生品、(2)建築用隔熱材料、(3)水性塗料、(4)回收木材再生品、(5)資源化磚類建材、(6)資源回收再利用建材，及內政部建築研究所認可為綠建材標章之材料。若污染土壤再生處理後可符合綠建材之品質要求，亦可取得產品品質之驗證。

表 3.8 污染土壤再生材料試驗參考標準方法

試驗標準方法	內容概要	試驗層級
prEN14405	粒狀材料產品之管柱實驗	特性試驗
prEN14429	粒狀或小顆粒建材產品之 pH 依存性試驗	特性試驗
Wi292040	動態塊狀建材產品溶出試驗 (DMLT, 水槽試驗)	特性試驗
Wi292010	粒狀材料產品驗證試驗	驗證試驗
EN12457-2	粒狀材料產品批次試驗 (自然 pH 值)	驗證試驗
EN12457-3	粒狀建材產品 (連續性批次試驗)	驗證試驗
EN1250	防腐木材水槽試驗 (塊狀)	驗證試驗

污染土壤再利用應用於路基工程前應進行相關檢測，包括施工前後工程特性檢測及環境監測，建議可依據檢測結果，判斷是否須需進行摻配調理，以便後續

再利用，其中若批次樣品變異值超過容許規範，而樣品平均值加減兩個標準偏差仍可符合相關規範標準值，則視同符合相關規範，若變異值超出此最大容許規範，應仍以天然材料進行摻配調理，摻配調理後之底渣須再進行檢測。環境監測方面，再利用場址環境監測程序應至少包含地下水監測及土壤監測，地下水監測項目應至少包含地下水水位、地下水水質(砷、鎘、鉻、銅、鉛、汞、鎳、鋅)及 pH 值，土壤監測項目應至少包含重金屬(砷、鎘、鉻、銅、鉛、汞、鎳、鋅)及戴奧辛。

為確保國內污染土壤再利用能同時兼具環境安全與工程安全之考量，建議未來可針對污染土壤再利用場址進行相關之重金屬滲出研究，可透過收集鋪設現場土壤樣本，以溶出實驗分析土壤重金屬滲出潛勢，了解土壤重金屬溶出情形。

圖 3.8 所示為污染土壤再生材料應用於路基工程性質檢測之參考流程。

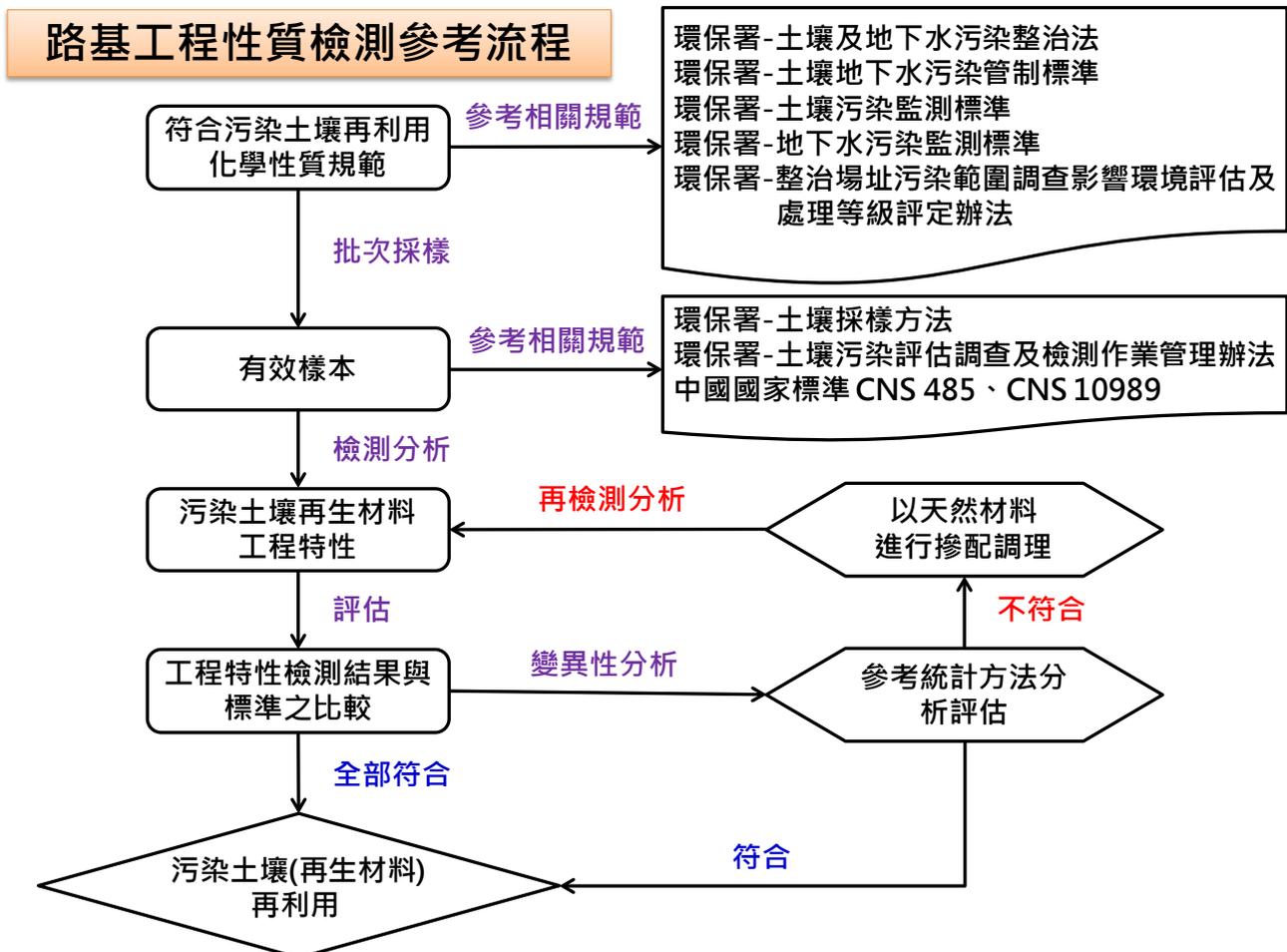


圖 3.8 污染土壤再生材料應用於路基工程性質檢測參考流程

污染土壤再利用應用於路基施工前應進行相關工程性質之檢測，重要之工程性質包括比重及吸水率、洛杉磯磨損值、健性、含砂當量及路基承載比(CBR)等，相關試驗規範及取樣規範整理如表 3.9：

表 3.9 重金屬污染土壤再利用於工程材料參考檢測項目及規範

檢測項目	依據標準	取樣規範
(一) 粒徑分布	CNS 486	CNS 485 CNS 10989
(二) 比重及含水率	CNS 487 CNS 488	CNS 485 CNS 10989
(三) 洛杉磯磨損值	CNS 490	CNS 485 CNS 10989
(四) 健性	CNS 1167	CNS 10989
(五) 含砂當量	AASHTO T176	-
(六) CBR (路基承載比)	AASHTO T180	-

3.5.3 污染土壤再生材料產品評估與驗證

污染土壤經評估為可再利用之材料，即可視為資源而加以應用，然而完整而有效的再生材料質量控制和保證系統，參考荷蘭之執行組織架構(如圖 3.9 所示)，由政府、專業環境顧問、專業檢驗實驗室、土壤回收業、土木承包商與相關企業共同組成，擔任監督與技術提升之諮詢團隊，協助開發評估技術與再利用處理技術，及發展具可靠性、環境無害性及具成效益之土壤再利用產品，如圖 3.10 所示為污染土壤再生材料應用於建築產品參考評估流程，透過再利用產品分級制度篩選及評估後可提供使用者資訊平台或表列查詢參考選用。此外，結合

第三方驗證機構定期執行審核，進行產品品質控管為必要的程序，依據產品等級設定其驗證審核準則與測試項目，由專責之測試人員定期查核確保產品品質。



圖 3.9 荷蘭污染土壤再利用質量控制及保證系統組織架構

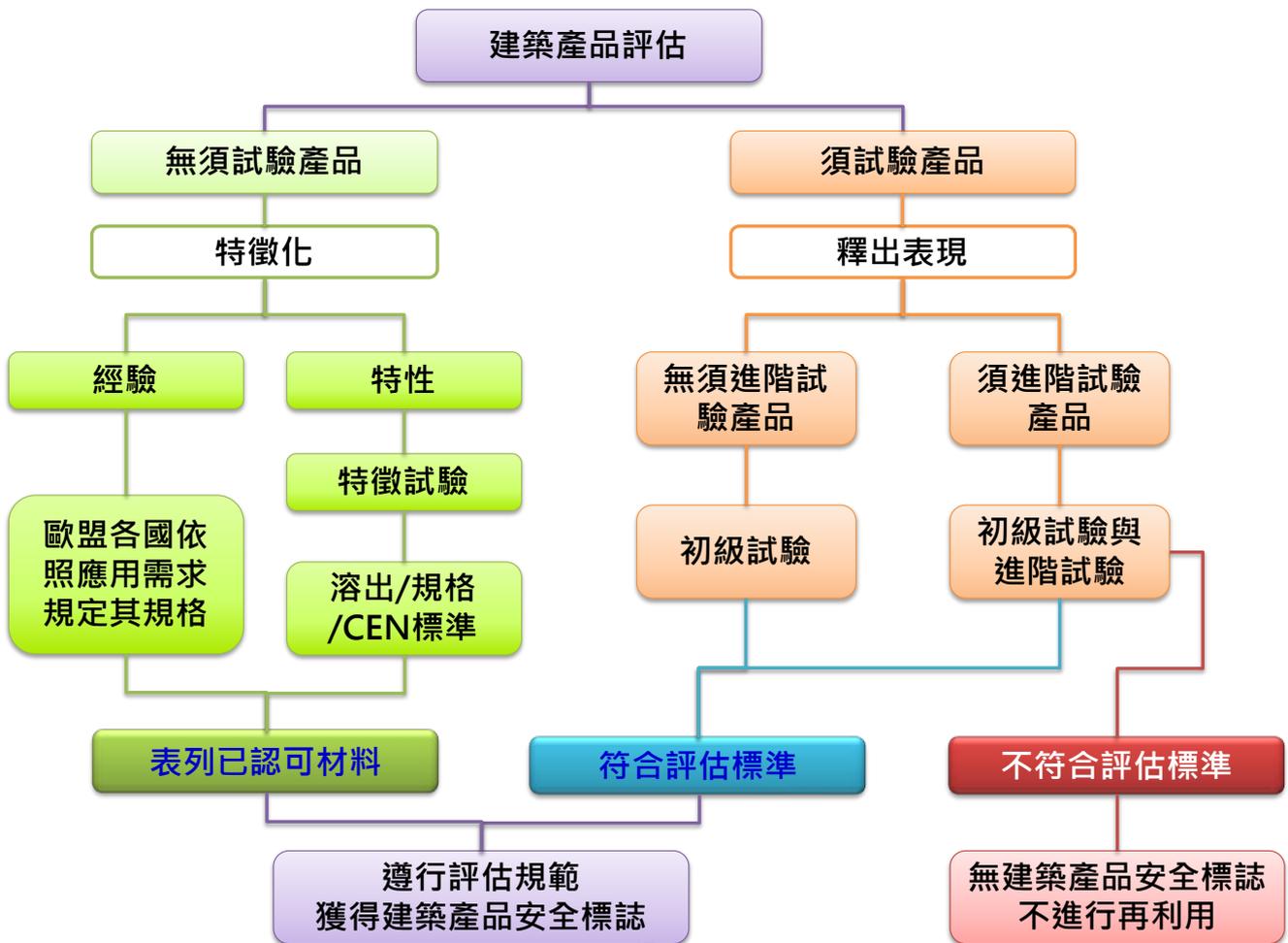


圖 3.10 污染土壤再生材料應用於建築產品參考評估流程

表 3.10 所示為污染土壤再利用驗證測試參考層級。

表 3.10 污染土壤再利用驗證測試參考層級

測試層級	內容及目的	測試者
特性試驗	1.定義基本特性 2.再利用產品分類 3.再利用產品長/短期溶出特性試驗如:液固比、pH、氧化還原電位、物化特性參數等	1.土壤回收再生業 2.污染土壤處理業 3.最終使用者
驗證試驗	1.依據特性試驗之結果進行簡單快速的驗證試驗 2.驗證被選定廢棄物處理方式是否符合法規標準	1.諮詢專家 2.管理者
現場稽核試驗	1.依據特性試驗進行快速品質測試 2.稽核驗證試驗是否符合標準規範	1.法規標準制定者 2.政府相關部門

第四章 結論與建議

4.1 污染土壤再利用溶出特性分析

針對現有重金屬污染場址一處進行取樣，並進行再利用評估程序，即應用動態溶出試驗評估污染土壤重金屬於再利用處理後之溶出量，分析溶出水體之溶解性金屬、pH 值、導電度及氯鹽含量之差異。分析結果顯示熱處理前後污染土壤中重金屬含量略為降低，但仍有部份重金屬如銅、鋅總量仍高於土壤污染標準限值，動態溶出試驗結果則顯示熱處理前後溶出之重金屬濃度反而升高，溶出液之 pH 值亦升高，此結果顯示熱處理技術確實改變土壤特性，但對於重金屬污染之控制程度有限。

動態溶出試驗依土壤特性及試驗參數、情境之變化極具分析意義，應用於污染土壤再利用材料之品質特性分析上有實質的效益。建議後續針對土壤特性與再利用處理技術、再利用材料之品質特性分析應用與評估程序宜深化研究與積極發展。

4.2 污染土壤品質控管制度建議

污染土壤離場(off-site)處理後做為再利用資材之管理驗證體系，在於建立污染土壤再生後之品質控管制度，因此建構健全的污染再利用管理系統執行組織架構，由政府、專業環境顧問、專業檢驗實驗室、土壤回收業、土木承包商與相關企業合作，擔任監督與技術提升之諮詢團隊，為落實與促進污染土壤再利用技術發展之首要工作，藉由團隊經驗交流與合作分工，建立污染土壤再利用管理辦法，規劃適當用量之成本效益分析評估，並結合交通部、營建署及其他再利用主管機關政策與規範研擬及執行，由第三方驗證機構定期執行審核，由專責之測試人員定期查核確保產品品質，將能有效降低天然資源使用量與促進再生資源永續利用。荷蘭目前亦研擬發展污染土壤再利用材料之處理程序驗證計畫，如此嚴謹

的態度與對環境保護的決心值得學習與跟進。

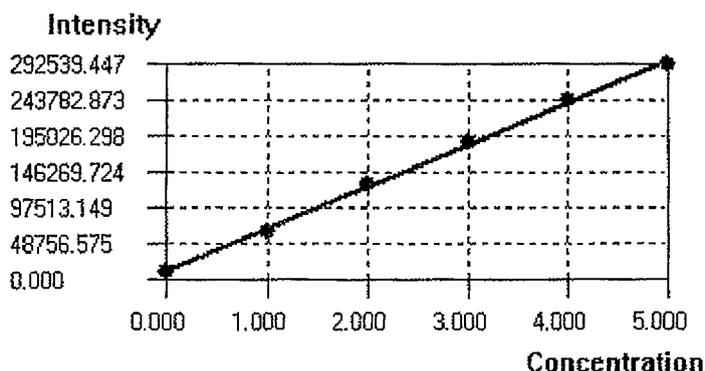
參考文獻

1. Common wealth of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Department of Environmental Protection, “Reuse And Disposal Of Contaminated Soil At Massachusetts Landfills”, 1997.
2. EU, “European Waste Catalogue”, 2002.
3. New York State Department of Environmental Conservation, “Petroleum - Contaminated Soil Guidance Policy”, 2009,
<http://www.dec.ny.gov/regulations/30902.html>.
4. Ohio Administrative Code, “1301:7-9-16 Petroleum contaminated soil”, 2005, <http://codes.ohio.gov/oac/1301:7-9-16>.
5. UKEPA, “Guidance on the use of Stabilisation / Solidification for the Treatment of Contaminated Soil”, 2004.
6. UKEPA, “The Definition of Waste : Development Industry Code of Practice, Version 2”, 2011.
7. USEPA, “Land Disposal Restrictions: Summary of Requirements”, EPA530-R01-007, 2001.
8. 日本環境省, “土壤汚染対策法”, 2010。
9. 環保署土壤及地下水污染整治網, 2011,
<http://sgw.epa.gov.tw/public/0501.asp>。
10. 白慧芬, 國內污染土壤離場處理管理策略之研析, 2011。
11. 土壤中總石油碳氫化合物 (TPHs) 檢測之研究, EPA-92-E3S4-02-01, 工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心, 2003。
12. 鄭光喆, 重金屬污染土壤之不同單一與連續性抽出方法評估, 2007。
13. 廖祿津, 受重金屬污染農地土壤調查及整治技術之探討, 2006。

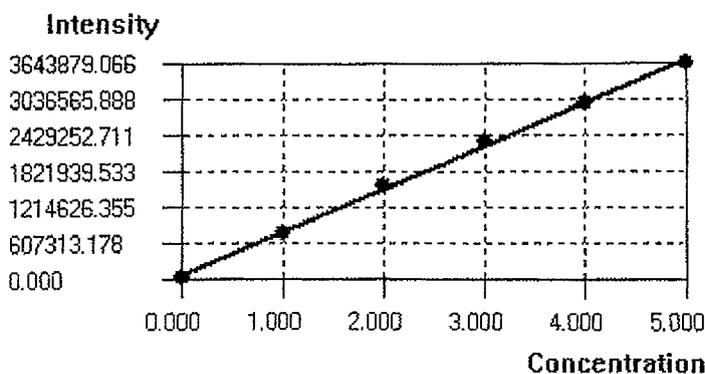
14. 張尊國，台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，國政分析永續(析)，2002。
15. 傅威程，受污染農業環境重金屬(鉻、銅、鋅、鎳、鉛、鎘)之物種分佈及轉化研究，2008。
16. 土壤中有機污染物處理技術研究，行政院環境保護署，1997。
17. 1,2,二氯苯污染土壤之現地永續處理技術之研究，行政院環境保護署，2010。
18. 台中縣農地土壤重金屬污染控制場址改善計畫期末報告，台中縣環境保護局，2006。
19. Alloway,B,J. Soil processes and the behaviour of heavy metals, Heavy metals in soils, John Wiley and Sons, New York, PP.11-35, 1995.
20. 中南部地區10年以下加油站(82~86年設立)之土壤及地下水污染調查計畫，行政院環境保護署，2007。
21. 車明道，加油站地下儲槽洩漏與防震規範之探討，台灣土壤及地下水環境保護簡訊，第26期，2007。
22. 洪千嫻，加油站土壤中總石油碳氫化合物污染整治成效之研究：不同案例之探討，2008。
23. 游宗霖，「以純化菌種 *Candida viswanathii* 處理海水中柴油多環芳香烴之研究」碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所，2003。
24. 謝昶毅，「以PCR-DGGE 技術分析石油碳氫化合物污染地下水之微生物相」碩士論文，國立中山大學生物科學學系研究所，2003。
25. 蔡玉娟，土壤污染整治規範對土壤污染整治技術發展之影響—以日本「土壤污染對策法」之實施經驗為例，2009。
26. 陳呈芳，土壤重金屬污染整治技術，中興工程顧問股份有限公司。

附錄二

重金屬總量分析品管分析

Analytical methodAnalytical method: Pb,Cd,Cr,Se,Cu,Ba,As,Zn-961105Matrix:Source type: ICPAuthor: 3Creation: 05/11/2007 9:17Last modification: 27/09/2012 14:59**Line: As, 193.695 nm**Calibr. curve: $I = 12329 + 57084 * C$ Parameters of curveSigma : 0.077243BEC : 216 µg/lLOD : ***Correl. : 0.99932Weight: not used

#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	10466.50	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	66235.39	1	0.944 mg/l	5.57	Yes
3.	CalibrStd_03	130295.73	2	2.07 mg/l	3.33	Yes
4.	CalibrStd_04	187759.89	3	3.07 mg/l	2.44	Yes
5.	CalibrStd_05	242938.96	4	4.04 mg/l	1.00	Yes
6.	CalibrStd_06	292539.45	5	4.91 mg/l	1.83	Yes

Line: Cd, 228.802 nmCalibr. curve: $I = 72695 + 727305 * C$ Parameters of curveSigma : 0.089427BEC : 100 µg/lLOD : ***Correl. : 0.99909Weight: not used

Analytical method

#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	21620.00	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	781646.03	1	0.975 mg/l	2.52	Yes
3.	CalibrStd_03	1584073.7	2	2.08 mg/l	3.90	Yes
4.	CalibrStd_04	2335091.5	3	3.11 mg/l	3.69	Yes
5.	CalibrStd_05	2979431.0	4	4.00 mg/l	0.085	Yes
6.	CalibrStd_06	3643879.0	5	4.91 mg/l	1.80	Yes

Line:**Cr, 267.716 nm**Calibr. curve:

$I = 5942 + 67968 * C$

Parameters of curve

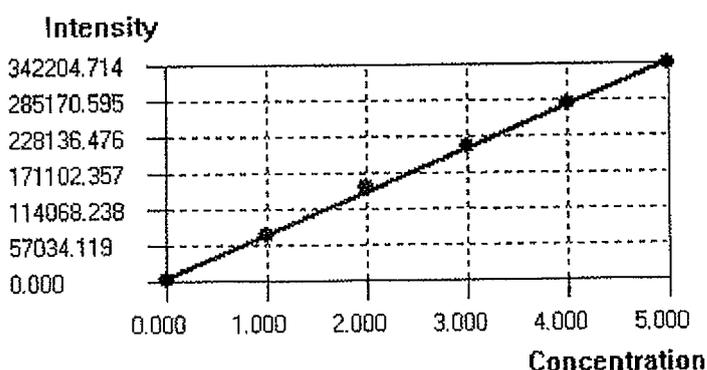
Sigma : 0.061814

BEC : 87.4 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.99956

Weight: not used



#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	2892.00	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	71847.64	1	0.97 mg/l	3.03	Yes
3.	CalibrStd_03	148084.35	2	2.09 mg/l	4.57	Yes
4.	CalibrStd_04	212239.08	3	3.04 mg/l	1.17	Yes
5.	CalibrStd_05	277896.39	4	4.00 mg/l	0.031	Yes
6.	CalibrStd_06	342204.71	5	4.95 mg/l	1.05	Yes

Line:**Cu, 324.754 nm**Calibr. curve:

$I = 68643 + 348313 * C$

Parameters of curve

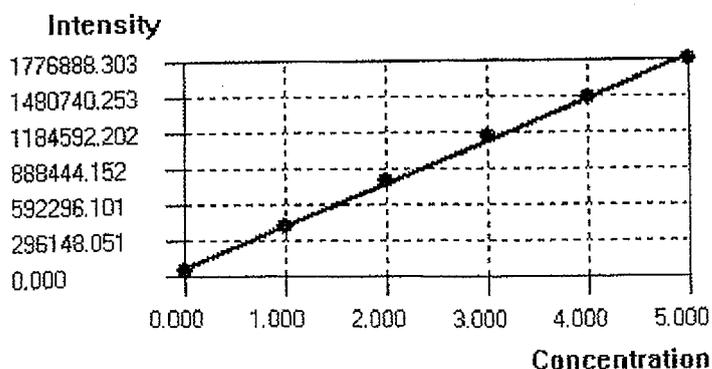
Sigma : 0.092486

BEC : 197 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.99902

Weight: not used



Analytical method

#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	45066.75	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	404556.32	1	0.964 mg/l	3.56	Yes
3.	CalibrStd_03	795589.11	2	2.09 mg/l	4.35	Yes
4.	CalibrStd_04	1151130.1	3	3.11 mg/l	3.59	Yes
5.	CalibrStd_05	1463328.2	4	4.00 mg/l	0.10	Yes
6.	CalibrStd_06	1776888.3	5	4.90 mg/l	1.91	Yes

Line:**Se. 196.026 nm**Calibr. curve: $I = 12968 + 51315 * C$ Parameters of curve

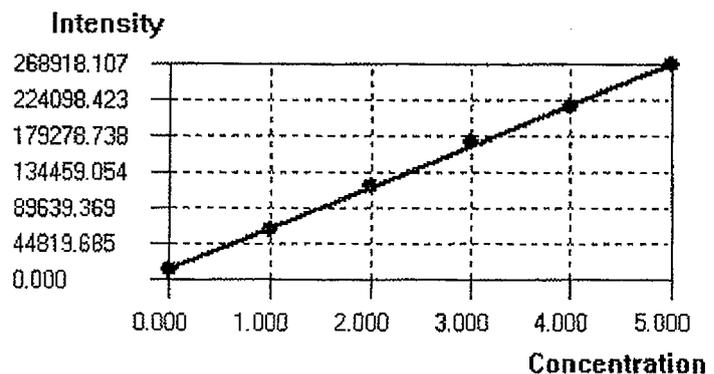
Sigma : 0.051495

BEC : 253 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.9997

Weight: not used



#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	12979.00	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	62416.02	1	0.964 mg/l	3.64	Yes
3.	CalibrStd_03	115869.35	2	2.01 mg/l	0.26	Yes
4.	CalibrStd_04	171301.19	3	3.09 mg/l	2.85	Yes
5.	CalibrStd_05	216054.33	4	3.96 mg/l	1.06	Yes
6.	CalibrStd_06	268918.11	5	4.99 mg/l	0.24	Yes

Line:**Ba. 233.527 nm**Calibr. curve: $I = 19816 + 867377 * C$ Parameters of curve

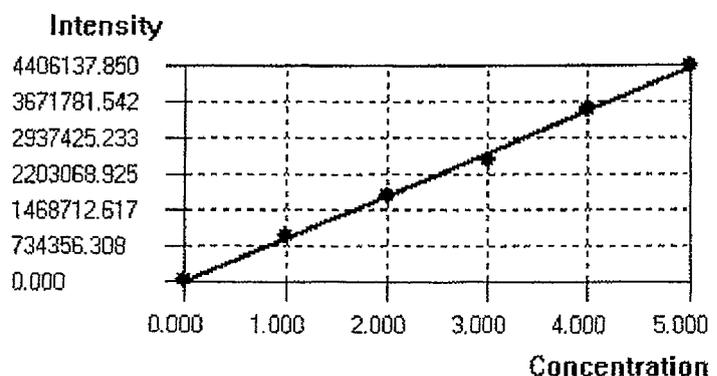
Sigma : 0.087046

BEC : 22.8 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.99914

Weight: not used



Analytical method

#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	24295.28	0	0.00516 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	929428.55	1	1.05 mg/l	4.87	Yes
3.	CalibrStd_03	1773780.3	2	2.02 mg/l	1.11	Yes
4.	CalibrStd_04	2488334.3	3	2.85 mg/l	5.13	Yes
5.	CalibrStd_05	3507565.5	4	4.02 mg/l	0.53	Yes
6.	CalibrStd_06	4406137.8	5	5.06 mg/l	1.14	Yes

Line:**Pb, 220.353 nm**Calibr. curve:

$$I = 28994 + 90923 * C$$

Parameters of curve

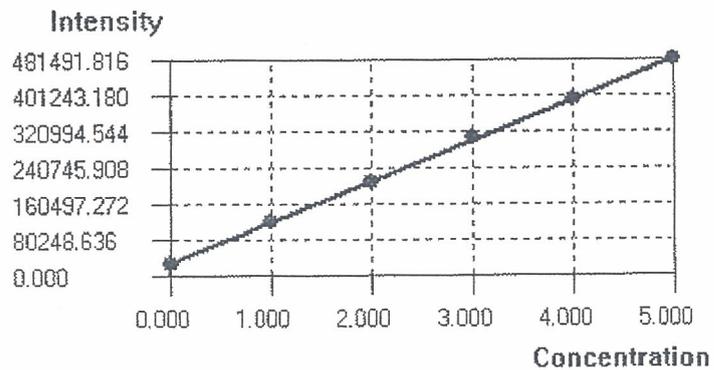
Sigma : 0.033903

BEC : 319 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.99987

Weight: not used



#	Sample Name	Intensity	Chem. Conc.	Calc. Conc.	Rel. dev(%)	Valid
1.	CalibrStd_01	25835.46	0	0 mg/l		Yes
2.	CalibrStd_02	121487.71	1	1.02 mg/l	1.73	Yes
3.	CalibrStd_03	211583.26	2	2.01 mg/l	0.41	Yes
4.	CalibrStd_04	306087.32	3	3.05 mg/l	1.58	Yes
5.	CalibrStd_05	391333.12	4	3.99 mg/l	0.37	Yes
6.	CalibrStd_06	481491.82	5	4.98 mg/l	0.47	Yes

Line:**Zn, 213.856 nm**Calibr. curve:

$$I = 68079 + 623916 * C$$

Parameters of curve

Sigma : 0.095163

BEC : 109 µg/l

LOD : ***

Correl. : 0.99897

Weight: not used

