

掩埋場中固化物有害成份再溶出之探討

黃文輝* 蔡振球* 黃世欣*

摘要

本文將評估國內現行掩埋場中，當含有重金屬之有害事業廢棄物或是經固化／安定化處理後之固化物進入掩埋場與一般廢棄物合併掩埋時，這些重金屬汙泥或經處理後之固化物內所含之重金屬，於掩埋場中受有機物分解而產生有機酸的侵蝕作用後，再溶出的可能性及溶出比例之探討。由於國內對於掩埋場中廢棄物產酸的相關研究或文獻較少，以及國內對於現行掩埋場中所存有害事業廢棄物含量之調查資料欠缺，故於再溶出性探討評估中，較難做正確的計算及預估，本文僅以所收集之數篇國內外相關文獻，並配合實驗數據，做簡易性評估及計算，提供廢棄物進入掩埋場管理上之參考。

一、前言

廢棄物是人類日常生活與各種產業活動下無法避免的產物，其中事業廢棄物由事業機構產生，分為有害事業廢棄物及一般事業廢棄物。對人體健康與環境生態影響較大的有害事業廢棄物具有毒性、危險性，必須要控制其濃度或數量，使與人類活動空間及生態環境隔離，以收事業產品之利無事業廢棄物之害。

廢棄物處理過程包括貯存、收集、清運、中間處理與最終處置等。在處理過程中，原則上儘可能將其中之有價物質回收再利用，難以再利用者其可燃物質或有機物質可藉由焚化、熱分解、堆肥、厭氣消化...等化學或生物轉換技術回收熱能、燃料或有機肥料等。至於不能經濟且有效利用者或處理後之殘渣，則將其還置於大自然。其中陸地掩埋即是其中最常使用的方法，然不論棄之於山野或平地，此大自然之涵容能力有一定之限度，若毫無計畫地將廢棄物處置，一旦超出此限度，將會造成環境污染。因此，欲將廢棄物還置於大自然中，必須依一定的準則有計畫地進行。

*工研院化工所環境科技組副工程師

二、固化物掩埋有害成份再溶出性

2.1 現行掩埋場種類及使用現況

依掩埋廢棄物之種類，現行環保署「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」中已公告事業廢棄物之最終處置方法，其適用對象及其適用內容如表 1。

表 1 現行陸地最終處置方式及適用對象

| 處置方式 | 適用對象 | 適用內容 |
|---------|---|--|
| 1. 安定掩埋 | <ul style="list-style-type: none"> 事業機構產生之玻璃屑、陶瓷屑、建築廢棄物 其他中央主管機關指定之一般事業廢棄物 | <ul style="list-style-type: none"> 指將一般事業廢棄物置於掩埋場，覆以土壤之處理方法 以吾人熟悉且和土壤幾乎一樣不致造成任何環境污染之廢棄物為對象。 |
| 2. 衛生掩埋 | <ul style="list-style-type: none"> 一般事業廢棄物無須間中間處理者 一般事業廢棄物經中間處理後，或有害事業廢棄物經中間處理後而被認定為一般事業廢棄物者。 | <ul style="list-style-type: none"> 如充分地管理則不致污染環境之廢棄物 掩埋於不透水材質或低滲水性土壤所構築，並設有滲出水，廢氣收集或處理設施及地下水監測裝置 |
| 3. 封閉掩埋 | <ul style="list-style-type: none"> 未經中間處理之有害事業廢棄物。 經中間處理後有害成份去除仍未達到容許標準之有害事業廢棄物。 | <ul style="list-style-type: none"> 須完全與吾人的生活環境隔離之廢棄物。 掩埋於抗壓及雙層不透水材質所構築。 |

* 參見事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準第27、29、31條

近年台灣地區工商業發達，加上人口擁向都市，廢棄物排出量日益增加且性質亦日趨複雜。數據顯示69年台灣地區垃圾清運量8,736 公噸／日，至78年度增加至17,147公噸／日，增加96.3%之多。此外事業廢棄物之排出量，依調查推估七十四年度之總排出量已達三千萬噸／年，其中 290萬公噸屬於有害事業廢棄物。此顯示事業廢棄物排出量約為一般垃圾量的 5倍，有害廢棄物之數量約為一般垃圾產量之一半，且增加速度皆較垃圾為快。因此一般事業廢棄物及有害事業廢棄物之最終處置也不容忽視。

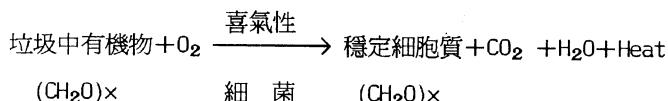
依台灣現行使用中各式掩埋場的使用年限來區分，大致將之區分為三類：1. 掩埋場設計使用年限為 5年以內者，約佔60%。2. 掩埋場設計使用年限為 5~10年者，約佔20.8%。3. 掩埋場設計使用年限超過10年以上者，約佔19.2%。由統計結果顯示台灣目前仍以小型掩埋場佔大多數。

2.2 衛生掩埋場中反應階段與產酸關係

垃圾衛生掩埋法就如堆肥法，係一種生物處理法，所不同者乃前者係在自然之情況下，而後者係在人為控制之適當環境下，利用大自然存在之土壤微生物，將垃圾中之有機性物質分解，使其體積減少而趨於穩定。此法之基本生化反應，因環境條件之不同，可分為喜氣性與厭氣性兩類，惟一般之垃圾衛生掩埋係指厭氣性者，因有機物之分解係在自然之情況下進行，其反應速度極為緩慢，常需10~20年之久才能達到穩定，其反應可概分為下述三個階段。

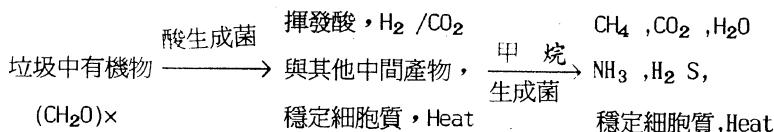
1. 喜氣階段

此階段約存在於掩埋後數十日內。在掩埋初期，土壤微生物中之喜氣性細菌，利用掩埋層中之氧氣，在適當的含水情況下將垃圾中部份之有機性物質分解成水及二氧化碳等穩定性物質，直至氧氣耗盡為止。



2. 厭氣階段

此階段約存在於掩埋後數十日至五百日內，於缺乏或無氧之環境條件下，厭氣性微生物群中之酸生成菌，將垃圾中之脂肪、蛋白質、碳水化合物等轉化成有機酸及其他中間生成物，而甲烷生成菌則將中間生成物再分解成甲烷、二氧化碳及水等。



3. 穩定階段

此階段約存在於掩埋後五百日後，於掩埋數百日內，垃圾中較易分解之有機物性質因逐漸被分解而趨穩定狀態。正常狀況下，在最初二年內氣體產量達尖峰，以後逐漸降低，其持續產氣期間達10~20年或更長。

由衛生掩埋場反應三階段的比較中發現，以衛生掩埋場的正常反應過程來看，有機酸的大量產生主要在於厭氣階段中。在大量的酸度作用下，存在於廢棄物（或固化體）中之鹼度將逐漸的被中和，亦即重金屬在此階段被溶出最為可能。

表2為國內外不同地區滲出水參數之比值，由表中發現，埋齡愈短的掩埋場滲出水，其BOD/COD與TVFA/COD比值愈高，表示易生物分解的有機物佔大部份，而揮發酸為主要成分，如表3顯示，其中揮發酸以乙酸及丙酸濃度較高，戊酸與己酸次之。

以掩埋場的掩埋齡來判斷，通常掩埋齡在2~5年以上的掩埋場，經生物代謝作用後基質逐漸減少，此時滲出水中的有機物主要為長鍊型碳水化合物、腐植質、木質素等不易生物分解的高分子有機物，此時滲出水的BOD/COD與TVFA/COD比值將逐漸降低，掩埋場中之廢棄物逐漸趨於穩定狀態，產酸量亦下降。

表 2 不同地區滲出水參數比值

| 編 號* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|------|------|--------|------|------|
| BOD/COD | 0.64 | 0.17 | 0.69 | 0.58 | 0.5 |
| TVFA/COD | 0.48 | 0.34 | 0.62 | 0.63 | 0.33 |
| VS/FS | 0.83 | 0.35 | 0.98 | 0.76 | — |
| SO ₄ /Cl ₂ | 1.46 | 0.69 | 0.57 | 0.63 | 0.75 |
| 掩 埋 齡 | 1 年 | 1 年 | 每年逐層填高 | 1 年半 | — |

* 編號 1：高雄市西青埔垃圾衛生掩埋場滲出水集水溝之水樣。

2：高雄市西青埔垃圾衛生掩埋場滲出水抽水井之水樣。

3：嘉義市八掌溪畔衛生掩埋場滲出水水樣。

4：台北市福德坑衛生掩埋場滲出水水樣。

5：美國中西部地區掩埋場滲出水之水質分析

2.3 衛生掩埋場中有機酸量對有害污泥之溶出影響

由於國內目前缺乏一般廢棄物衛生掩埋場中，有害事業廢棄物含量的相關研究或調查報告，故在現行衛生掩埋場中有機酸量對有害污泥或處理後固化物的溶出影響性很難評估，以下將參考美國 EPA's Boone County Field Site 7年以上的調查資料，做一簡易評估。根據該資料顯示，其都市廢棄物掩埋場中每公斤乾垃圾分解後，將產生 0.14eq 的有機酸，而該掩埋場因使用不當，約有 5% 的有害事業廢棄物進入掩埋場中與 95% 的一般廢棄物共同處置，依此推論，每克的有害廢棄物可能遭 2meq 的有機酸所作用。

國內目前因有害事業廢棄物的相關管理措施尚在修正，亦可能會有與美國 Boone County Field Site 類似狀況發生，依此引用美國掩埋場中每克廢棄物承受 2meq 的有機酸來做計算，並由有害污泥之酸中和容量 ANC (acid neutralization capacity) 試驗結果，進行比較和評估。

酸中和容量試驗之目的為了解固化／安定化後之廢棄物，對酸的作用含有多少的緩衝容量。因處理後之廢棄物若緩衝能力高，則其保有在鹼性條件下的可能性愈大，相對而言有害金屬之溶出量亦較低。

本試驗之特色為：

1. 試樣之顆粒大小限制為 150 μm 以下。
2. 使用 10 種酸度漸增的醋酸萃取液。
3. 固液比控制於 1:3。
4. 萃取時間為 48 小時。
5. 因試樣量少，使用離心試管進行萃取，並行固液分離。
6. 萃取液中重金屬濃度量測。

表3 福德坑掩埋場東側掩埋區垃圾滲出水75~78年BOD值

| 年 月份 * | 75 | 76 | 77 | 78 |
|-----------|--------|--------|-------|-------|
| 1 | 23,057 | 5,200 | 900 | 255 |
| | 39,250 | 12,180 | | 250 |
| 2 | 31,094 | 11,680 | 765 | |
| | 19,500 | 14,480 | | 656 |
| 3 | 21,480 | 19,700 | 623 | 782 |
| | 26,640 | 17,340 | 610 | 1,441 |
| 4 | 28,600 | 25,560 | 632 | 1,066 |
| | 32,400 | 25,470 | 590 | 2,114 |
| 5 | 24,840 | 24,000 | 760 | 2,407 |
| | 28,540 | 23,790 | | 1,793 |
| 6 | 39,520 | 20,850 | | 298 |
| | 37,500 | 23,460 | | 3,695 |
| 7 | 28,960 | 27,500 | 2,535 | 2,834 |
| | 35,680 | 25,800 | 568 | 2,000 |
| 8 | | 32,100 | 310 | 1,360 |
| | 33,264 | 33,600 | 1,208 | 1,437 |
| 9 | 45,680 | 30,500 | 607 | 1,554 |
| | 32,760 | 32,700 | 108 | 1,463 |
| 10 | 28,170 | 29,700 | 587 | 1,133 |
| | 15,487 | 29,600 | 588 | 2,725 |
| 11 | 11,200 | | 816 | 1,603 |
| | 5,840 | 4,500 | 3,898 | 1,100 |
| 12 | 10,080 | 1,603 | 225 | 1,255 |
| | 8,020 | 2,462 | 1,875 | 820 |
| 年平均值 | 26,416 | 20,599 | 958 | 1,480 |
| 有機酸量** | 360 | 281 | 13 | 20 |

* 每個月中各有兩個實驗數據點

** 有機酸量的計算方式乃使用乙酸佔42.3%、丙酸佔23.3%、丁酸佔11.9%、戊酸佔11.5%、及己酸佔11%之比例計算得之，單位為meq/L。

本研究選用的污泥有兩種，一為鉻污泥，另一為銅污泥，鉻污泥則為電鍍廠中產生，銅污泥則為印刷電路板製造廠產生，二者皆為國內金屬表面處理業典型產生的重金屬污泥。另有文獻資料指出鉻在固化物中是屬於鍵結式機制，而銅則是包夾式機制，兩種重金屬的安定化機制恰不相同，故特別選用此兩種重金屬污泥可加以比較。

由圖1之實驗結果顯示銅污泥在2meq的醋酸作用下，污泥中之銅將有18.3%從污泥中溶出，溶出濃度高達3,027 mg/l，因台灣本身一般垃圾中有機成份及含水率極高，則可能產生之有機酸量更大，對於有害污泥的溶出結果將更為顯著。另以鉻污泥為例，以醋酸進行萃取時，若使用1.6meq的酸量時，其萃取液濃度約為31mg/l，但若使用3.2meq的酸量時，則萃取液濃度升高至 1,650mg/l，即代表著掩埋場中一般有機性的廢棄物分解，亦可能導致大量的重金屬鉻溶出。

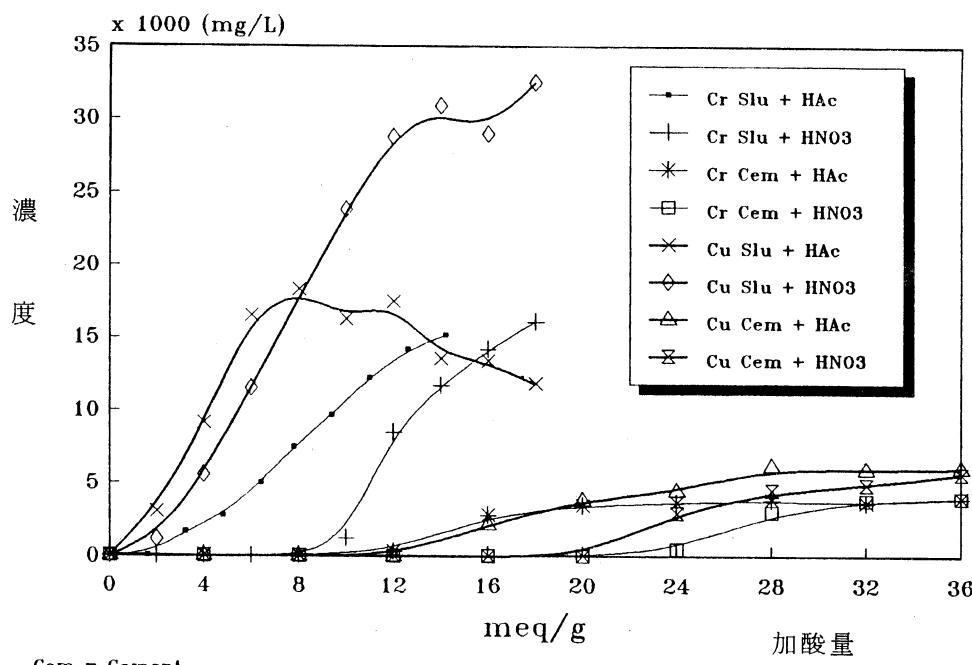


圖1 鉻污泥、銅污泥及其28天水泥固化之ANC(醋酸、硝酸)試驗

2.4 衛生掩埋場中有機酸量對固化物之溶出影響

雖然初步研判有機酸對固化體中重金屬有再溶出影響，但是缺乏國內代表性掩埋場特性資料，以實際推估掩埋場內因子對重金屬再溶出所做的貢獻。譬如滲出水中之有機酸含量與實際於掩埋場內產生而直接影響固化體的有機酸量間之差距有多少？區域性垃圾來源其中將形成有機酸的組成特性及比例為何？酸雨中的酸度對重金屬溶出的影響…等都值得再一步的探討。以下將分別就衛生掩埋場中有機物產酸及酸雨量對固化物做一比較及評估。

國內掩埋場垃圾滲出水之收集分析資料僅台北市福德坑垃圾掩埋場有較完整的數據(參見表3)，但亦僅為75年以後四年的資料，並根據資料來研判，發現垃圾滲出水的BOD數據變化過大。尤其東側區仍在繼續掩埋中，但於77年滲出水之BOD值已降至數百，故很難推斷真正有機酸的產量，本文僅以簡易推估值做為計算之參考，並將之整理於表4，依據該表之不同揮發酸量，用以計算出各類酸組成比例，其組成分別為乙酸、丙酸、正丁酸、異丁酸、戊酸、己酸，組成比例為42.3%、23.3%、6.2%、5.7%、11.5%、11%。由表3及表4比較發現，垃圾滲出水中有機酸量產生隨掩埋場時間而變化，且差異極大，很難以此數據評估其產酸對合併掩埋場之固化物有多大的影響，而且目前所收集到的垃圾滲出水，皆為經過掩埋場底層之出流水，較難代表實際掩埋層中滲出水的特性。

表4 不同地區滲出水中揮發酸組成

| 組成 | 編號* 單位 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|-----------|-------|-----|-------|-------|-------|
| 乙酸 | mg/l | 1122 | 440 | 4485 | 3700 | 4370 |
| | meq/l | 18.7 | 7.3 | 74.75 | 61.67 | 72.83 |
| 丙酸 | mg/l | 1139 | — | 4211 | 2037 | 1050 |
| | meq/l | 15.4 | — | 56.91 | 27.53 | 14.2 |
| 正丁酸 | mg/l | 154 | — | 561 | 545 | 5600 |
| | meq/l | 1.75 | — | 6.375 | 6.2 | 63.64 |
| 異丁酸 | mg/l | 165 | — | 323 | 502 | 1220 |
| | meq/l | 1.875 | — | 3.67 | 5.7 | 13.86 |
| 戊酸 | mg/l | 450 | — | 537 | 1006 | 960 |
| | meq/l | 4.4 | — | 5.26 | 9.86 | 93.87 |
| 己酸 | mg/l | 511 | — | 693 | 963 | 2400 |
| | meq/l | 4.41 | — | 5.97 | 8.3 | 20.71 |
| 總揮發酸 | mg/l | 3541 | 440 | 10810 | 8753 | 15600 |
| | meq/l | 46.53 | 7.3 | 153 | 119.3 | 279.1 |

* 編號1：高雄市西青埔垃圾衛生掩埋場滲出水集水溝之水樣。

2：高雄市西青埔垃圾衛生掩埋場滲出水抽水井之水樣。

3：嘉義市八掌溪畔衛生掩埋場滲出水水樣。

4：台北市福德坑衛生掩埋場滲出水水樣。

5：美國中西部地區掩埋場滲出水之水質分析

掩埋場中固化物再溶出的另一影響因子為酸雨，以下將簡單計算酸雨產酸量，並將之與掩埋層產生有機酸做一簡易的比較。

雨水酸鹼度： $\text{pH} = 4.5$ $[\text{H}^+] = 10^{-4.5} = 0.0316\text{M}$ 經計算雨水酸度 = $31.6 \mu \text{eq/L}$

將雨水的酸度與福德坑衛生掩埋場東側谷滲出水有機酸量做一比較，發現其差值約略在 $400 \sim 11,400$ 倍之間。

依此推論，若將固化物最終處置於衛生掩埋場中，則其承受垃圾滲出水有機酸的影響遠較固化物不進入掩埋場中，只遭遇無機酸之影響為大，且由圖 1 發現固化物對無機酸的承受性，較有機酸的承受性為大。即代表著有機酸對固化物的再溶出性極高，值得主管機關重視。

由福德坑衛生掩埋場垃圾滲出水的資料發現，該掩埋場於操作前兩年之 BOD 值較高，即意謂有機酸量高，但於後兩年滲出水 BOD 值則大幅降低。但這並不代表流經固化物時，滲出水的有機酸量低，因福德坑東側掩埋面本身仍繼續進行掩埋作業，故不可能整個掩埋層皆已達到穩定化，可能原因为掩埋層高，增加生物濾床對滲出水的生物分解作用，故出流的滲出水質 BOD 值降低。若是如此則掩埋層中固化物所受之有機酸侵蝕作用，則將比預估為大。

三、結語

根據以上各節之評估計算與考慮，整理出幾點結語供參考：

1. 根據資料顯示國內現行約有 11 座區域性衛生掩埋場及 173 座一般掩埋場，於區域性衛生掩埋場中防止二次污染的相關基本設施較為完善，但絕大多數的一般掩埋場，尚缺滲出水收集及處理設施，若讓有害事業廢棄物不當進入，則影響重大。
2. 由現行收集資料推估，一般廢棄物掩埋場中垃圾分解產生之有機酸量較自然中酸雨的酸度高數千倍（以八掌溪畔衛生掩埋場為例），故若能成立“一般事業廢棄物衛生掩埋場”，不讓有機性廢棄物進入該型掩埋場時，將不用考慮酸雨對一般事業廢棄物或固化物會有再溶出可能性。
3. 經試驗及簡易推估發現，一般廢棄物衛生掩埋場在掩埋初期時，有機酸產量極高，若不當處置有害事業廢棄物（如金屬污泥），則會造成重金屬大量溶出現象，但由現行幾個區域性衛生掩埋場之滲出水資料，並無發現此現象，其原因可能有下列幾點：
 - (1) 這些區域性衛生掩埋場進場管理措施良好，並無有害事業廢棄物不當進入。
 - (2) 由於有害事業廢棄物並非掩埋於底層，雖有大量溶出現象，但仍滯留於掩埋層中，並隨時間而下降。
 - (3) 因滲出水量大已被稀釋。
4. 實事上有害事業廢棄物使用固化／安定化中間處理的目的，乃為了將有害性物質固定於固化物中，減少其與外界自然環境接觸，達到防止污染擴散的目的。但假若有害事

業廢棄物經固化／安定化處理後，不能進行有效的最終處置，導致固化物中之有害物質有再釋出之可能性，則並非使用中間處理之目的，故建議環保單位對固化物最終處置的管理上宜加以重視。

四、參考資料

- (1)行政院環境保護署，78年度台灣地區市鄉鎮垃圾水肥清理狀況調查資料彙編，79年8月。
- (2)行政院環境保護署，固體廢棄物穩定化過程參數之測定與應用，79年5月。
- (3)行政院環境保護署，事業廢棄物中間處理後資源化之研究期中報告，80年1月。
- (4)行政院環境保護署，廢棄物之處理與再利用，全國第四屆科學技術會議，79年。
- (5)行政院環境保護署，台灣地區垃圾處理場(廠)操作情況之調查，79年5月。
- (6)張祖恩，垃圾滲出水之特性及其處理，公民營廢棄物清除處理機構專業技術人員訓練班－一般及事業廢棄物最終處置技術講義
- (7)Bishop , P.L., Leaching of inorganic hazardous constituents from stabilized / solidified hazardous wastes. Hazardous Waste Hazardous Mater., 5(2): 129-143 , 1988.
- (8)Cote , P.L. and D.P. Hamilton. , Evaluation of pollutant release from solidified aqueous wastes using a dynamic leaching test., In Proc. Hazardous Waste and Environmental Emergencies Conference . 302-308 , 1984.
- (9)Bhatty , M.S.Y. Fixation of metallic ions in Portlandcement. Superfund'87 : 140-145 , 1987.
- (10)Jesse R.Conner. Fixation of Metals., Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes., 58-171 , VNR , New York , 1990
- (11)Tashiro.C.& Tatibana. S., Bond Strength between C&S and iron,copper or zinc wire and microstructure of interface., Cementand Concrete Research , 13 , 377-382 , 1983.
- (12)Poon C. S. et al. , Mechanisms of Metal Fixation and Leaching by Cement Based Fixation Processes , Waste Management &Resesrch, 3 , 127-142 , 1985.
- (13)張慶隆，以純水泥及水泥穀灰固化 Cr , Cu , Hg 重金屬之探討，第五屆廢棄物處理技術研討會論文集，中華民國環境工程學會主辦，1990.