

資源回收技術

污泥資源化回收再利用技術與成本效益分析

張添晉*

一、前　　言

根據78年工業局委託民間研究機構進行的「事業廢棄物處理中心綜合規劃」之資料顯示，民國84年由事業單位所產生之汚泥量將達2,000噸／日，包括有機汚泥、生物汚泥及其他汚泥三類，其中有機汚泥及生物汚泥皆為有機性，含高熱量的可回收能源，而其他汚泥多屬無機性汚泥，包括紙漿、造紙製程、電鍍或金屬表面汚泥、石灰明礬及石膏汚泥等。在1974年第二次石油危機發生後，歐美日等環保先進國家，即開始注意有機汚泥處理及處置之相關問題，而汚泥減量及回收再利用則列為主要對策。

汚泥資源化技術之開發及應用，除考慮技術本身之可行性外，環保相關法規及經濟效益之分析亦是不可或缺之因素，目前汚泥資源化可行之技術可分為有機汚泥及無機汚泥二方面加以探討，有機汚泥因富含有機成分，故可回收其中之能源，如甲烷發酵，或經堆肥後回收有機成分當成肥料。無機汚泥部份，因有機成分不高，故可仿效國外之汚泥處理法，即先經焚化程序燃燒有機成分後再提高溫度將灰渣熔融，熔融後之熔渣即可製成建材或再利用，此外，無機汚泥中若含有重金屬或毒性物質時，可依法令之規定經中間處理，如固化程序，將有害物質匣限在固化體中製成級配、磚塊、人工漁礁、道路及停車場等，將原本會對環境造成污染之有機及無機汚泥予以資源化及無害化，如此方不致因追求工業和經濟發展而破壞了環境。圖1為汚泥、脫水泥餅及焚化灰燼等汚泥資源化有效利用用途，以下謹就汚泥熔融法、汚泥固化法、汚泥堆肥法、汚泥消化回收瓦斯發電法以及油泥燃料法等五種汚泥資源化回收再利用程序加以介紹。

*國立台北工專土木科副教授兼科主任

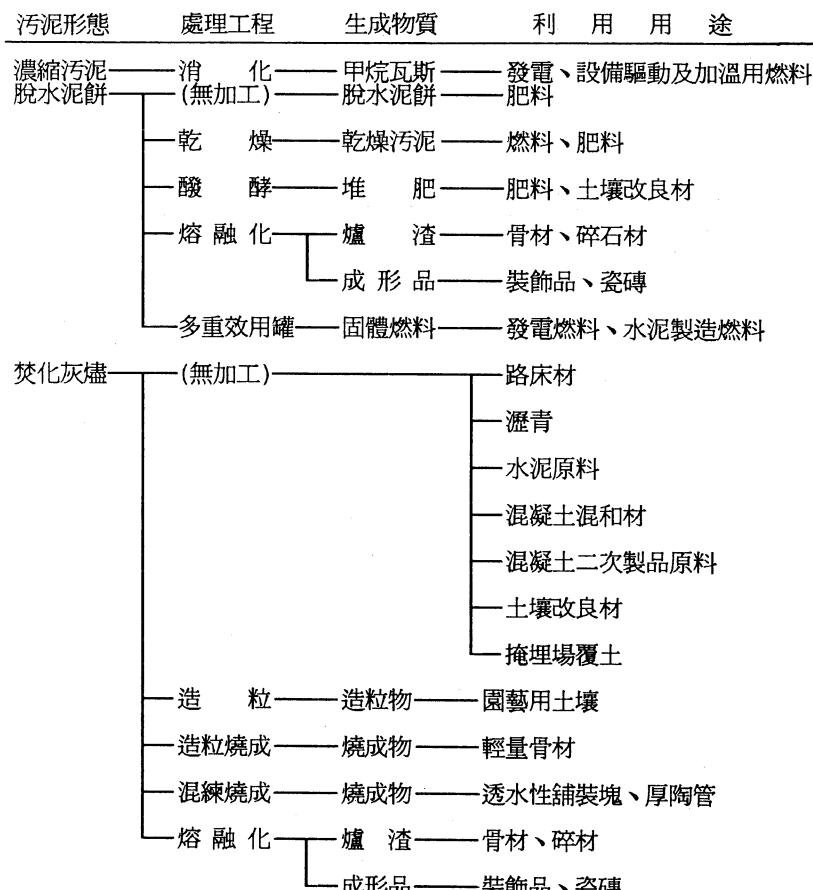


圖 1 污泥資源化技術及用途

二、污泥熔融法技術及成本效益分析

2.1 熔融法技術概論

由圖 1 污泥資源化技術及用途中顯示，無論脫水泥餅或焚化灰燼皆可利用熔融法將其處理後回收再利用，當成建設材料，如土質改良材料、人工輕骨材及陶管材料等，日本在熔融技術方面最為成熟，且已達應用化階段，目前更朝向品質安定化及規格化方面進展。此外，部份污泥經乾燥及在未達熔融程度前亦可作為農地利用、山林地及公園綠地等方面使用，經熔融後之爐渣加工後作為人行道地磚（具透水性）工業區圍牆及政府機關各種公共設施等材質，潛力極大。

污泥熔融處理為將熔融爐之爐溫提高至 $1,400\sim 1,600^{\circ}\text{C}$ 左右，較一般焚化爐溫度為高，污泥經加熱後，有機物被分解，水分也隨之蒸發，且溫度達使物質溶融之條件，此

時，無機物開始融成熔融爐渣(melting slag)當熔融程序完成後，此爐渣緩緩流下，再加以降溫形成可供利用之爐渣(slag)，此種程序稱為汚泥熔融系統(sludge melting system)。

熔融爐渣之冷卻方法主要有水冷及氣冷(冷卻速度約 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)兩種方式，水冷乃利用水淬方式使爐渣成形，而氣冷是利用在大氣中之溫降使爐渣成形為玻璃質爐渣。

2.2 汚泥熔融處理單元及技術特徵

下水汚泥的組成成分，在熱操作的前提下有水分、可燃分(有機分)及灰分(無機分)等三大部分。在加熱時、汚泥溫度上升會使水分蒸發，可燃分燃燒熱分解，接著溫度上升之下使灰分高溫熔融成融液。投入之汚泥主要以乾燥汚泥及焚化灰燼為主。

下水汚泥熔融系統各單元之位置如圖2所示。

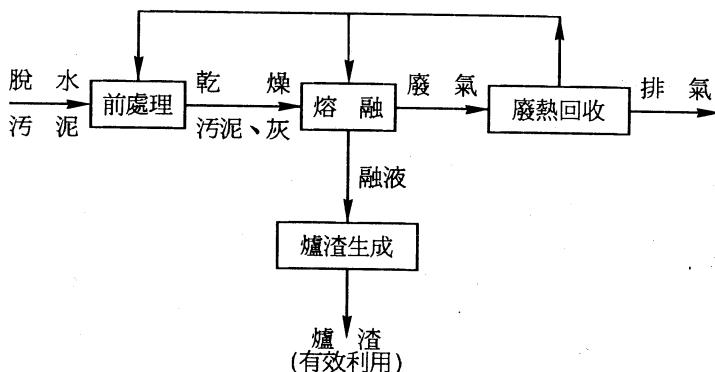


圖2 下水汚泥熔融系統各單元之位置

一般而言熔融爐的種類與熔融的對象有如下的趨勢：

- (1)焦炭床熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用。
- (2)表面熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用。
- (3)縱型旋轉熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用。
- (4)傾斜型旋轉熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用。
- (5)橫型旋轉熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用。
- (6)電弧熔融爐：乾燥汚泥、焚化灰皆可用但焚化灰更適用。

其中以表面熔融爐使用最廣，並多處商業化運轉實蹟，表面熔融爐如圖3所示，由供給漏斗、主燃燒室、二次燃燒室所構成。主燃燒室為由助燃裝置所組合而成頂部倒圓錐形，被熔融物的汚泥藉污泥自身的燃燒熱供熔融熱源利用，爐之形式為內筒，外筒所成豎形回轉爐於主燃燒室供給污泥，外筒之回轉使全周達到均一，主燃燒室之頂部之圓筒使其上下移動以調整容積。

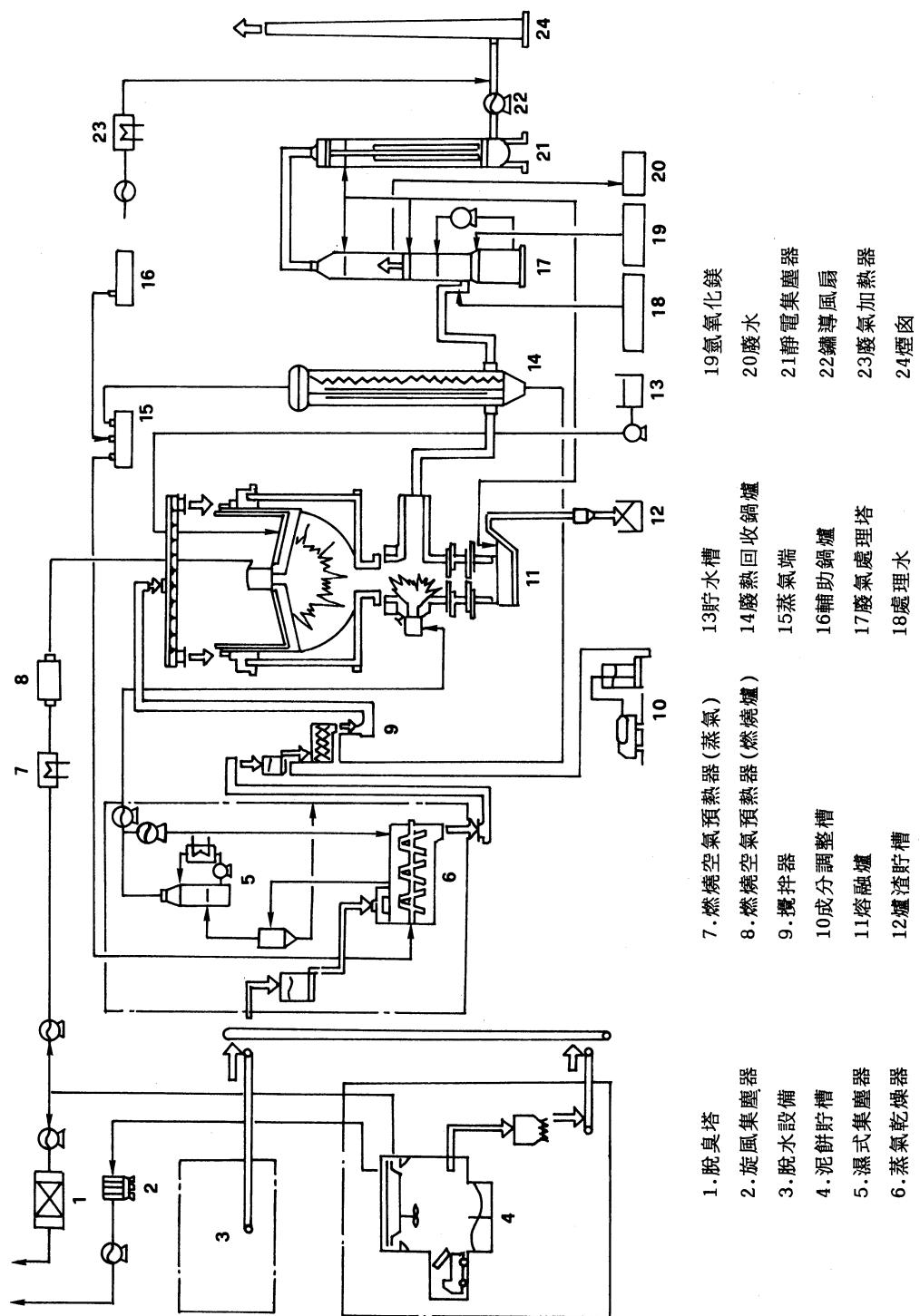


圖 3 典型表面熔融爐之細步構造

外筒之回轉可定量分離出乾燥污泥（含水率20%程度），主燃燒室內呈倒圓錐狀之熔融面，以行蒸發、熱分解、燃燒、熔融之一連串反應。熔融面為由爐頂蓋著，當受熱、水分之蒸發及有機物之熱分解，熱分解氣體經預熱空氣中之氧而燃燒，產生H₂O、CO₂由熔渣口排出，污泥中之無機物被爐頂及氣體輻射熱而熔融，並自熔渣口流出。

熔融爐燃燒室之溫度約維持在1,300~1,400°C，其溫度較焚化灰燼之融點高100~200°C，一般均有輔助能源之設計，如加入塑膠廢棄物（由都市垃圾中收集而來）或油，表1為日本有關熔融操作結果，其中A欄為以塑膠廢棄物當輔助能源，而B為以油為輔助能源。

經由焚化及熔融程序後，其重量約減至原來之8.3~8.8%（焚化）及6.3~6.7%（熔融），而體積則減為原來之1/43（焚化）至1/97（熔融），即利用熔融程序可以有效的減少其體積及重量。

至於一般人較關心之重金屬問題，在熔融程序中，重金屬由原廢棄物中轉移至熔融爐渣及飛灰和廢氣中，其中以前二者佔絕大多數。

表1 熔融爐操作結果

試 程		A	B	備 註
處 理 量 (kg/hr)	垃圾	6,000	6,250	含水率：20%
	廚餘	500	550	
	灰燼	430	420	
廢 氣 量 (Nm ³ /hr)	煙道	30,300	34,000	
	熔融爐	3,200	2,200	
熔 融 爐 操作條件	熔融熱源	塑膠廢棄物 260(kg/hr)	油 110 (L/H)	
	燃燒室溫度(°C)	1,300~1,350	1,300~1,350	
	廢氣中氧之濃度(%)	3~5	2.5~3	
	動力消耗 (KWH)	90	55	
廢氣操作 條 件	O ₂ (%)	14	14	
	HCl (ppm)	410	350	
	SO _x (ppm)	50	20	
	NO _x (ppm)	120	100	
	CO (ppm)	15	10	

由於爐渣(slag)可用於當建材，其比重、吸水性及洛杉機磨損試驗等試驗資料列於表2。

表2 爐渣各種試驗結果

試驗項目 種類	水冷式爐渣	氣冷式爐渣 (玻璃狀態)	氣冷式爐渣 (結晶狀態)
比重	2.4	2.50	2.70
吸水係數(%)	2.2	1.25	1.70
洛杉機磨損試驗(%)	49.0	40.0	24.0
加州貫穿比試驗(%)	11.5	35.0	45.0

2.3 污泥熔融法之成本效益分析

熔融法係將已焚化後之灰渣重新加熱至熔流點(pouring point)，溫度約1,300°C以上。其間之過程將使重金屬揮發，有機物進一步氧化，並使體積降至焚化灰的1/3，約為熔融前污泥之1/15，可達減容之效果。

由於國內並無實績，現以日本久保田公司1992年4月～1993年3月熔融爐每日處理20噸污泥量(乾基)之處理廠操作實績來評估經濟效益：

1. 建造費

依照一般表面熔融之典型處理流程，假設污泥含水率80%，每日處理1噸濕基污泥之建造費為700萬元(台幣)計算，(不含土地購置)，則：

$$\begin{aligned} \text{建造費} &= 700\text{萬元} \times 20\text{噸(乾重)} / \text{日} / 0.2 \\ &= 7\text{億元} \end{aligned}$$

建造費明細如下：

機械設備：55~60%
電氣設備：20~25%
建築設備：15~20%

2. 佔地面積

每日處理1噸濕基污泥(假設含水率80%)所需土地面積約20~30m²，因此，每日處理20噸乾基污泥所需土地面積為：

$$\begin{aligned} (20\sim 30) \times 20 / 0.2 &= 2000\sim 3000\text{m}^2 \\ &\approx 600\sim 900\text{坪} \end{aligned}$$

3. 運轉費用

表列係根據日本Oyabe廠N0.1熔融爐從1992年4月到1993年3月的運轉費用，含水率80%的污泥經熔融處理，平均每噸的處理費用如下：

人力支出	630元
水 電	1,200元
維 修	380元
合 計	2,200元

但是Oyabe廠N0.1每日處理乾基汚泥量是5.3噸，屬於小規模之處理。以水電費為基準，25噸（乾重）／日的熔融爐，每噸脫水汚泥(dewatered cake)水電消耗 960元，是Oyabe N0.1 (5.3噸（乾重）／日規模) 1,200元的80%，所以較具規模的熔融爐，其處理費較經濟。

4. 操作人員

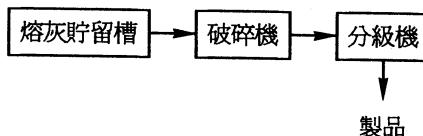
操作人員每組 3人，一天二班制，每日操作人員6人，為安全上之顧慮，應僱用6人以上，除正常操作員外之應急人員；若是一天三班制，則需操作人員之人數 = 3人 × 3 + 應急人員。

5. 適宜的處理規模

一般而言，每座的處理量，以乾基汚泥而言，其範圍在 5~50噸／日，亦即含水率80%的汚泥餅25~250噸／日。根據實際的操作經驗，以每日處理乾基汚泥 10~30噸／日最為適宜，亦即含水率80%的汚泥餅50~150噸／日。

6. 將熔融灰渣製成建築材料所需費用

如果將熔融灰渣製成砂的替代品使用時，需要以下之設備：



假設每日處理量乾基汚泥20噸，每日產生熔融渣約 6~10噸。破碎及分級設備費用約200萬元，而一噸的成品價值約100元，則每日可獲利600~1,000元，一年所得約20萬元，需10年的時間才能回收投資的設備。當然如果將熔灰應用在其他較高用途，提高其附加價值，則可縮短回收時間。

由於整個熔融爐造價昂貴，利用熔融渣製成之製品或回收之重金屬資源來回收造價是不可行的。因此，須藉由使用者付費的方式，才能承擔整個熔融爐之運作。

7. 難熔融性汚泥之處理

通常熔融爐裝有降低融點的助融劑投入設備，都市垃圾的焚化灰渣、其他汚泥的焚化灰、砂及石灰等物均可當做降低融點的助融劑，可依需要選用。如果就近可以取得都市垃圾灰渣，是較經濟方便，而灰渣儘可能愈乾愈好。

三、污泥堆肥化技術與成本效益分析

3.1 污泥堆肥化概論

堆肥一般為使用稻草及家畜的排泄物，經數日之自然醣酵而成，但由於所需時間極長，加以化學工業副產物所製成化學肥料其效果快，致傳統堆肥法之自然肥料無法與其競爭，市場逐漸沒落。然而由於長久使用化學肥料，導致農地土壤急速惡化酸化，加以堆肥機械之更新，使得污泥堆肥化法有再受重視之傾向，由於污泥中之有機成分能經由堆肥化而達到回收再利用之目的，在環保意識日益高漲之今日，本法仍具相當之潛力。

堆肥程序中主要是將有機物加以分解轉化，減少水分及殺死病原菌和寄生蟲卵。一般污泥之脫水泥餅中有機成分約佔50~80%，其中易分解之有機物佔10~30%，若直接施用於農地作物中，則因有機物急速分解造成氧之消耗，阻礙植物生長，同時也容易使植物根部腐化，因此必須先將有機物堆肥化減少上述現象發生。

此外，一般污泥中，脫水泥餅之含水率約70~80%，在堆肥過程中因有機物分解而產生之醣酵熱而將水分蒸發，另外強制通風之堆肥法亦會將水分帶出，使其成品之含水率低，一般經堆肥化後，其重量及體積約減少1/2~1/3。

又污泥中可能含有病原菌、寄生蟲卵及雜草種子等，若直接農地利用可能產生衛生上之問題，堆肥過程中產生之醣酵熱會將病原菌殺死，增加堆肥成品之安全化。

採用污泥做為肥料之原料時，一般而言，還需摻配其他之成份，使得其肥料成份得以符合要求，除此之外還需注意污泥本身之性質（肥效成份、有害成份），是否適合做為肥料。表 3為節錄自台灣省農林廳編印之「肥料品目及規格表」，可從表中看到肥料品目、保證成分低限（%以上）、有害成分高限（%以下），其他規定事項，這些都是利用污泥做為肥料時所必需注意的。

3.2 污泥堆肥設備之標準單元

污泥堆肥化設備之標準單元及各單元之目的和主要設施如表 4，包括前處理、一次醣酵、二次醣酵及篩分裝袋，部份地區視情況之需要而附加脫臭設備。

堆肥為將可腐化的有機質經過熱分解而產生相當穩定的有機終結產物，此過程可降低污泥的重量、體積及水含量，並且可以殺死病原有機體，其過程中的變數包括氧量、營養物、濕度、pH值以及有毒化學物質的存在等等。污泥無論是堆置暴露於空氣中（風道法）或密閉於容器內均可進行。

風道法(windrow process)的堆肥過程可藉由傳統的非戶外或密閉方式進行，藉由空氣的湧昇(up-draft)或逆流(down-draft)的形式將氧氣傳送至污泥堆，逆流通道法可將污泥堆中由於分解反應所產生的不快氣味加以收集和處理，一般做法是將脫水後的污泥塊排列，混合以有機添加物如木屑、鋸灰、穀殼等，理想的污泥水含量是50~60%左右。

表 3 肥料品目及規格表

編號：CNS總號 品 目 (名)	保 證 成 分 低 限 (%以下)	有 害 成 分 高 限 (%以下)	其 他 規 定 事 項
5161 11928 混合前有機質肥料	<ul style="list-style-type: none"> 全氮及全磷酐，或全氮及全氧化鉀之合計量：6.0% 前項保證成份一全氮、全磷酐、全氧化鉀：1.0% 	<ul style="list-style-type: none"> 每含1.0%全氮量計： 鎳：0.00008% 砷：0.01% 銅：0.01% 	固態肥料有機質：>40% 水分：<35%以下
5162 (暫訂) 雜項有機質肥料	<ul style="list-style-type: none"> 有機質：60.0% 氮、磷酐、氯化鉀之合計量：0.8% 如保證（不須符合前項）一有機質：40.0%，並符合下列中之一項者： <ul style="list-style-type: none"> (1)氮、磷酐、氯化鉀之一要素量或二要素以上合計量：5.0%。並得保證氯化鎂。 (2)氯化鎂、氯化鈣、氧化矽之二要素以上合計量：20.0%。並得保證三要素。 前二項保證成份： 1. 氮、磷酐：0.3% 2. 氯化鉀：0.2% 3. 氯化鎂、氯化鈣、氧化矽：1.0% 以上之形態、溶性同「複合肥料」、「雜項次量要素肥料」 	<ul style="list-style-type: none"> 每含1.0%全氮、磷酐、氯化鉀之最大成分合計量計： 鎳：0.000075% 砷：0.002% 每含1.0%上項氯化鎂、氯化鈣、氧化矽最大成分合計量計： 亞硝酸：0.04% 砷：0.004% 鎳：0.01% 鈦：0.04% 鉻：0.1% 銅：0.01% 	水分：<35%以下

【註】節錄自「肥料品目及規格表」，台灣省農林廳編印，81年6月

表 4 污泥堆肥化之標準單元

基本流程	前 處 理	一 次 酸 酵	二 次 酸 酵(熟成)	篩 分 裝 袋
目 的	<ul style="list-style-type: none"> 調整養分(C/N) 調整水分 通氣 調整pH 	<ul style="list-style-type: none"> 將易分解之有機物加以分解 去除臭味 殺死病原菌、卵 去除水分 	<ul style="list-style-type: none"> 可分解之有機物安定化 腐植物之形成 去除水分 	<ul style="list-style-type: none"> 形成利用度高之肥料 易於貯存
操作內容	<ul style="list-style-type: none"> 添加脫水劑 返送成熟堆肥植種 改善通氣、pH及水分 	<ul style="list-style-type: none"> 通氣 汚泥攪拌 返送植種堆肥之分離 	<ul style="list-style-type: none"> 攪拌 返送植種污泥之分離 	<ul style="list-style-type: none"> 調整肥料成分 裝袋 粒度調整 貯藏
主要設施	<ul style="list-style-type: none"> 各種輸送機 混合機 計量器 	<ul style="list-style-type: none"> 酸酵槽 送風機 返送成熟堆肥裝置 	<ul style="list-style-type: none"> 酸酵槽 返送裝置 篩分機 	<ul style="list-style-type: none"> 貯存加工廠 計量器 裝袋設施

在污泥堆肥的過程中適當的添加物是非常重要的，其在導致分解作用的升溫過程中扮演重要的角色。由於熱分解過程所釋放的熱必須超過經由堆置物之暴露表面所散失的熱，所以藉由增加堆置丘的體積可降低熱能的散失，當堆置丘的截面積增加時，表面積相對於體積的比例也隨之降低，因為降低了熱能散失有助於升高堆置丘內部的溫度。

一般而言，一個風道(windrow)需要 30~50日方能完成堆肥的循環，為了將病原消滅以及達到完全分解，US-EPA建議內部溫度55°C保持15天，並於堆肥過程中，每個風道至少需轉動 5次。在翻動的過程中可藉此將內含物混和並提高接觸氧的機會，及藉由水氣的釋放提高乾燥效果，並使所有物質均得以接觸內部的高溫以摧毀足夠的病原，對風道內氧量和溫度的監測，可確保適當的氧化控制。

3.3 污泥堆肥案例

[案例 1] 美國環保署污泥堆肥示範廠

污泥堆肥廠位於美國東海岸，為一美國環保署示範廠，污泥為混有約10%工業廢水之家庭污水一級及二級沉澱污泥，污泥運送至堆肥廠前，先在廢水處理廠以真空過濾脫水至含固形物(solids)18~20%，固形物中約有70%為揮發性(volatile)，脫水前加石灰及氯化鐵等脫水劑。

該堆肥廠採用「延長曝氣固定堆法(extended aerated static pile process, 簡稱EASP process)」於1983年 4月開始操作，設計處理量為600噸(濕噸)/日，1990年進行本研究時之處理量約為400噸(濕重)/日，相當於80噸(乾重)/日。

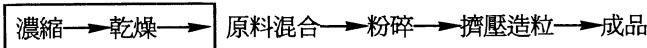
脫水污泥運抵現場後先與小木屑混合，其主要目的是增加污泥之孔隙度(porosity)，以利於曝氣，另外木屑可吸去污泥中多餘水份，並提供堆肥分解時所需碳元素；進行堆肥分解時可分三個階段：初期曝氣約20天、乾燥時間約 5天、完熟時間約30天；初期曝氣是分解力最旺盛時，主要微生物為中溫或高溫真菌，所釋出之生物分解熱可高達60°C，一般污泥完全分解時每公斤揮性固體物所產生之熱值，約為5,550~6,660仟卡，在這個階段產生的高熱可提供一些殺菌(pasteurization)效果，於第二階段時將木屑篩除，第三階段完熟後約可去除20~30%揮發性固形物。

[案例 2] 國內水產加工廠污泥堆肥

水產加工業屬食品加工之一，並不像其他化學工業使用大量之化學物質，所以其廢水處理所產生之污泥屬於一般污泥，拿來資源化做為肥料不致引起過多之疑慮。國內家寶事業股份有限公司資源回收廠為一冷凍水產加工業魚下腳(魚頭、魚骨、蝦殼等水產廢棄物)之處理廠，其產品為魚粉、魚溶漿，產品用途為飼料及肥料。

目前該公司已自行研製有機粒肥，其配方共有 4種，每種配方含有一定比例之蝦、蟹殼粉成份，屬於幾丁質肥料。第四種配方中有30%之污泥(水產加工業廢水處理污泥)，與第二種配方之不同處在於以污泥取代蟹殼粉，其目的在於使水產加工業污泥能資源化，解決水產加工業者污泥處理置之問題，另一方面亦可降低有機質肥料之製造原料

成本，其有機質肥料的製程如下所示：



前三種配方之製造流程為從原料混合開始，將所有原料依各種成份之配方比例予以混合，然後經過粉碎，再擠壓造粉即成為有機粒肥。而第四種配方採用污泥做為原料，一般經脫水或乾燥床乾燥之污泥，其含水率多在70%以上，含水率過高並不適於直接製造成粒肥，所以污泥必需先經過濃縮及乾燥前處理過程，將污泥之含水率降低，才能與其他原料混合，經粉碎而後擠壓造粒成為有機粒肥。

3.4 污泥堆肥成本效益分析

1. 污水處理廠污泥堆肥

因國內目前並無EASP之實廠，故參考美國3個EASP實廠之成本分析資料，如表5所示。以1985年幣值計，每噸濕污泥造價約為台幣110萬／元，若以建造一座約280公噸濕污泥之EASP堆肥廠，總價約為台幣30,800萬元。而單位操作維護成本(O&M)約為750元／噸(濕重)，一般而言，操作費約佔整個O&M的80%，其中人事費佔50%，木屑費約佔其25%。

表5 美國EASP堆肥廠成本效益比較表

EASP堆肥廠	產能 (t/d)	造價	單位造價 (US\$/t/d)	年產量 (t)	年操作費	單位操作費 (US\$/t)	堆肥費價 (US\$/t)
Hampton Roads	50	2,600,000	52,000	14,500	467,000	32	2.50
Columbus	200	6,600,000	33,000	42,100	1,047,000	25	0.60
Site II	400	17,600,000	44,000	97,000	3,482,000	36	1.40

[註] 1.造價及年操作費用以1985年US\$計

2.本表重量以濕重計算

完熟堆肥之賣價，不包括運輸費時，約為45元／噸(濕重)。由此可知，若不計建造費，處理每噸濕堆肥約需虧損770元，故整個營運乃基於環保考量，不應以營利為目的，操作費應由工業區事業單位(受益者)共同負擔。

2. 水產加工廠污泥堆肥

目前家寶事業股份有限公司資源回收廠，有機粒肥製造製程之年產能為3,600公噸成品，根據該公司之生產資料推估新設有機粒肥之製造廠(年產能3,600公噸)，所

需投資金額列於表 6 中，工廠所需土地面積為 200坪，每坪地價為 12,000元，則土地投資金額為 2,400,000元。廠房建築以 150坪計，每坪建造費為 20,000元，則廠房建費用 3,000,000元。機器設備方面，濃縮罐兩個計 300,000元；乾燥機一部 1,300,000元；造粒機（含粉碎、混合單元）3,000,000元；污染防治設備 5,000,000元。依上述各項投資金額總計得到固定投資成本為 15,000,000元。

表 6 污泥資源化經濟效益分析

投 資 項 目		投 資 金 額	每生產一噸成品所需成本 (元／噸成品)
固 定 投 資 成 本	土地	12,000元／坪×200坪=2,400,000	133.3
	廠房建築	20,000元／坪×150坪=3,000,000	166.7
	濃縮罐(2個)	300,000	16.67
	乾燥機	1,300,000	72.22
	造粒機	3,000,000	166.7
	污染防治設備	5,000,000	277.8
合計		15,000,000	833.3
操作 維 護 成 本	人事費	10,000,000	2,778
	公用物料(水、電、燃 料費等)	5,050,000	1,400
	維護、保養	1,000,000	277.8
	其他	3,600,000	1,000
	合計	19,640,000	4,067
合 計	[註] 1.固定投資成本以5年平均分攤折舊計算 2.每噸生產成本以年產量3,600公噸估算		6,289

在操作維護方面，人事費用以 10,000,000元／年估計，公用物料(水、電、燃料)費用為 5,040,000元／年，維護保養費 1,000,000元／年，其他費用 3,600,000元／年，則操作維護費用總計為 19,640,000元／年。

表 6 中，推算每噸產品所需投資之成本是以年產量 3,600公噸粒肥成品來計算，固定成本部份以 5年折舊平均分攤來估算。由表中可知每生產 1噸成品之固定投資成本為 277.8元，而每生產 1噸成品所需之操作維護成本為 4,067元。

表 7 中特別將製造粒肥成品所需之原料用量及成本加以列出，因為在製程中原料耗損不大，所以並未考慮耗損部份，而污泥原料則以原(濕)污泥來考慮，假設原污泥之

含水率為80%。理論上污泥是免費的，甚至可以向產源工廠收取代處理費，不過在此還是暫時以免費來計算。根據各種原料成份之用量及價格（成本），推算得生產每公噸有機粒肥所需之原料成本為5,675元。

如果將生產一噸粒肥所需之原料成本(5,675元)，固定投資成本(833.3元)及操作維護成本(4,067元)加起來，得到生產總成本為11,964元／公噸成品。而產品（粒肥）售價為13,500元／公噸，為生產成本之113%，亦即有13%之（毛）利潤，以年產量3,600公噸成品來估算，稅前利潤為 $(13,500 - 11,964) \text{元} / \text{公噸} \times 3,600 \text{公噸} = 5,529,600 \text{元}$ 。如果再扣除25%之所得稅及考慮利息成本等因素，3,600公噸／年之年產能恰已具經濟規模。

表7 污泥肥料原料成本分析

原 料 成 份	蟹殼粉	苦土石灰	菜仔粕	糖蜜與麵粉	(原)污泥	合 計
成份含量(%)	40	10	15	5	20	—
每公噸成品所需成份用量(kg) ⁽¹⁾	400	100	150	50	1,500	—
原料成本(元/kg)	9	3.5	6.5	15	0 ⁽²⁾	—
每公噸成品所需原料費(元)	3,600	350	975	750	0	5,675

[註] (1)：假設製造過程中無原料損失，而原污泥含水率為80%，故原污泥1,500kg×污泥成份含量(20%)=300kg乾重

(2)：假設污泥為免費。

此外，與其他的脫水污泥處理技術比較時，一般而言，其操作成本均較堆肥法為高，如焚化約為堆肥法之1.2倍，而熱乾燥(heat drying)約為堆肥法之1.5倍；直接海拋(約0.8倍)及衛生掩埋(約0.9倍)雖較堆肥法略為便宜，但因全世界各國環保意識日漸抬頭除非能預先將污泥進一步分解穩定，否則此二種處理會因污染海域及生態環境而不可能為現代國家人民所接受。堆肥法是在所有處理法中，操作成本最低廉而自然的，且可直接將污泥資源化，製造成土壤改良劑，其商業化運轉技術在全世界各國都有許多成功案例，故應在國內大力提倡。

四、污泥固化技術及成本效益分析

4.1 固化技術概論

事業廢棄物之產生源業別多、分布廣、種類複雜而且數量龐大，根據行政院環保署

之調查資料顯示，事業廢棄物之來源包括工業、礦業、商業、貿易、農林漁牧業、教育及研究事業、建設業、醫療業，水電燃氣業及污染防治業。若把事業廢棄物再詳細分類，則可歸納成碳氫化合物，多氯聯苯、重金屬、農藥、氰化物、石綿、油汙泥、生物汙泥、砷汙泥，積體電路板製造及其他有害化學物質。據統計台灣地區每年所產生的事業廢棄物約為三千萬噸。其中有害事業之廢棄物約為三百萬噸，由約五千五百多家的工廠所產生。在此三百萬噸有害事業廢物中約有70%係重金屬汙泥，因此重金屬汙泥事業廢棄物的處理及再利用是當今環保的極重要課題。

事業廢棄物包括非重金屬、重金屬汙泥、輻射性汙泥及有機性汙泥，本文雖以重金屬處理為主題，然而其處理及再利用的方法及範圍則可適用於所有的事業廢棄物，固化所產生高強度無污染的固化體可以拿來再利用，利用之例子有做級配，碎石、磚塊、圍牆、人工漁礁、消波塊、道路、停車場等。

基本上固定化法中之穩定化操作包括沉澱、吸附、離子交換、包圍等方式，通常所產生的沉澱物為氫氧化物、硫氧化物、矽酸鹽、碳酸鹽、磷酸鹽、無機錯鹽及有機錯鹽，這些物質對水之溶解度相當低，因此可有效地阻止重金屬再進入自然的生態環境中。

固定化處理過的重金屬汙泥其第28天的單軸抗壓強度可達到 30~500kg/cm²之間，這種高強度固化體可以再利用。

4.2 固化成本效益分析

為了解固化程序之成本，根據工業局專業研究計畫「皮革廢料資源化再利用技術」研究成果顯示，皮革廢料之特性為含高量之有機物及重金屬鉻，因此廢棄物被認定為有害廢棄物，須經中間處理程序後再處置，皮革廢料之體積膨鬆，有機成分高，無法直接固化，須先經焚化程序之減容及去除有機物後，再予以固化。

固化為有害廢棄物處理模式之一，尤其對重金屬之處理更為有效，但因皮革廢料之體積膨鬆，且富含有機物質，致增加清運及焚化處理之成本。

根據80年度工業局專案研究計畫成果顯示，每噸之焚化灰燼須 1噸之普通水泥加以固化，平均每噸普通水泥之成本為3,000元，而皮革廢料焚化成灰燼時重量減少90%，即每噸皮革廢料經焚化後重量僅剩1/10噸，故若以灰泥比1:1之比例進行固化時，每噸皮革廢料之固化成本應為300元

另固化體清運成本方面，由於固化後水泥約膨脹2倍，灰泥比1:1之重量則僅增加1倍，即10噸之皮革廢料經焚化後再予固化其重量減為 2噸，每噸固化體之清運成本及衛生掩埋使用成本僅為皮革廢料之20%。根據上述成本分析資料整理得每噸皮革廢料之固化處理成本為4,420元，如表8所示。

根據表 8 資料顯示，如將皮革廢料依有害廢棄物經中間處理焚化及固化程序後再以衛生掩埋為最終處置，每噸皮革廢料之總成本為 4,420元，如欲將固化體再利用每噸之成本超過 6,000元，顯已非事業單位經濟財政上所能負荷，因此宜積極考慮其處理之替

代方案，設法將皮革中之有機物資源化再利用，以達廢棄物減量及資源化之目的。

表 8 每噸皮革廢料之固化處理成本¹⁴

單位：元／噸

單元 成本	清運	焚化	固 化	固 化 體 清 運	固 化 體 衛生掩埋
以皮革廢料為 基礎之處理成 本(元／噸)	835	2,919	300 (水泥成本) 73 (固定成本)	168	124
合 計	4,420				

[說明] 固化之固定成本係根據下列資料計算而得：

- (1)工廠租金300坪每年360,000元 (以300公斤／台，3批／天，2台計，每年4,320公噸)
- (2)固化硬體設備費15,120,000元 (以1:1計，每公噸3,500元)
- (3)人事直接薪資1,500,000元 (以2人2班計)
- (4)水電管理費2,500,000元
- (5)折舊年限 n=10年
- (6)年利率 i=10%，年賦成本計算公式 $A = \frac{P \times i(1+i)}{(1+i)^n - 1}$
- (7)以上1~4項總計P=19,480,000元(每年4,320噸)
- (8)水泥固化之固定成本以皮革廢料為基礎(重量減少為1/10)
- (9)固定成本之年賦成本為3,170,000元，平均每噸為733元

五、污泥厭氧消化回收瓦斯發電

5.1 污泥厭氧消化技術概論

此法為廢水污泥處理方式中最傳統的方法，在技術上屬於單一過程的操作，將生污泥注入反應器中，藉外部的熱交換器加熱以促成厭氧反應。由於這是一個封閉系統，且不與外界空氣接觸，污泥藉中溫菌於30~38°C之間進行厭氧消化。消化的過程會產生甲烷，經過收集後的甲烷可以應用於反應槽之加熱或發電等其它用途。

典型之厭氧消化包括有兩個程序，即複雜之有機物分兩個階段被兩種性質完全不同之微生物所利用。首先基質被兼性厭氧菌轉化成揮發酸產物及氣體，緊接著第二階段之穩定作用，揮發酸及其產物被絕對厭氧菌轉化成 CH_4 及 CO_2 ，平均每處理 1m^3 的污水，大約可產生160g（乾重）的污泥，污泥中含有60~80%的有機物。因此，每處理 1m^3 的污水，其污泥所含的有機物約為100g，而其中的50%可以厭氧消化將其氯化去除，而去除每1g的有機物可產生0.9~1.0L的消化瓦斯，因此平均每處理 1m^3 的污水可產生0.05 m^3 的消化瓦斯。

消化瓦斯其主要成份為甲烷、二氧化碳及氮，有時亦會含少量的 O_2 及 H_2 ，當消化瓦斯中含有較多量的 O_2 時，則可能是由空氣中進入的，而消化瓦斯亦會含有0.01~1%的少量 H_2S 。

甲烷與氫氣是消化瓦斯中可燃的成份。由於一般氫氣的含量少於1%，因此消化瓦斯的熱值取決於其甲烷的含量。一般甲烷的含量在60~70%之間，因為甲烷的熱值為約8,550kcal/ m^3 ，因此消化瓦斯的熱值則介於5,000~6,000kcal/ m^3 。另外，消化瓦斯的量及熱值亦可能隨每日及季節的變化而變化。

消化瓦斯最普遍的用途為消化槽的加溫，但自能源危機之後，則在尋求其更實際有效的用途。

5.2 厭氧消化瓦斯回收再利用

有機污泥因富含高濃度之有機物，經厭氧消化後可回收甲烷當成能源，一般厭氧消化產生之瓦斯其回收方式有純化後生產瓦斯氣利用、瓦斯引擎發電系統以及汽電共生系統，茲敘述如下：

1. 生產瓦斯氣利用

厭氧消化產生的瓦斯中甲烷含量約有50~65%，二氧化碳為40~50%，並包括微量的水氣、氮氣、硫化氫等，若未經淨化處理，其熱值較低，經濟價值不高，一般僅能提供加熱利用，若先經特殊淨化與純化之前處理則可去除其中的二氧化碳及雜質而產生高熱值之瓦斯氣，併同天然瓦斯直接送入管線供氣系統，或者供給工業用所須燃氣瓦斯，做為鍋爐燃料或汽電共生燃料。惟此瓦斯氣淨化設備裝置及運轉費用相當高，並得支出額外的瓦斯管線運輸成本。

2. 瓦斯引擎發電系統

此系統係先將前處理之瓦斯氣通過氣體壓縮機，再導入燃氣（瓦斯）引擎燃燒產生動力輸出而帶動發電機產生電力。此發電方式技術上較為可行，產生的電力可供應污水處理場電源需求。一般而言，廢氣前處理程度愈高則發電效率愈高，但其設置操作成本也相對提高，且廢氣中的硫化氫等易腐蝕性氣體若未經適當前處理，恐將對瓦斯引擎造成損害。

3. 汽電共生系統

汽電共生系統為小規模之發電設施，利用瓦斯氣做為其燃料可同時產生電力和熱能兩種能源，並可將多餘之能源售予電力公司或鄰近之工業用戶。此系統係將瓦斯氣導入燃氣引擎燃燒後產生動力及高溫蒸汽，前者帶動發電機產生電力輸出，後者經由熱交換器回收廢熱。上述三種瓦斯再利用之方式中，發電已成功的應用在國外污水處理廠。

根據典型污水處理流程及設計容量，可將污水處理廠之設備單元分成抽水站、預先處理、初級處理、活性污泥曝氣槽、加氯、濃縮槽、厭氧消化槽及污泥脫水搬運設施等 8個重要單元，分別做各單元之質量及能量平衡計算，計算結果明列如表 9，表中廠內能量消耗之估算依據國內迪化污水處理廠操作之用電記錄並參考文獻加以計算而得。

由表 9 之計算流程得知，對每日流入污水量為 $274,000\text{m}^3$ 之處理廠而言，每日流入污水廠之BEP將達 $2.74 \times 10^8\text{kcal}$ ，經過處理後，部份的生化潛能貯存在污泥中，初沉污泥及終沉污泥在厭氧消化之前，其總BEP為 $1.60 \times 10^8\text{kcal/d}$ ，經過消化後，消化污泥之BEP僅剩 $2.0 \times 10^7\text{kcal/d}$ ，大部份BEP皆貯存於消化瓦斯中，每日高達 $1.25 \times 10^8\text{kcal/day}$ ，此等消化瓦斯加以發電利用後，可以回收電能及迴流污泥加熱等。另外，由表 9 亦得知，污水抽水站、活性污泥曝氣單元，其消耗動力佔了整個廠內用電之 46%，其次為抽水站，用電量佔廠內用電之 21%，污泥脫水及搬運佔 14%，其他單元佔 19%。

由表 9 顯示，處理廠內每日消耗能量 $7.36 \times 10^7\text{kcal}$ ，若將消化瓦斯發電，每日回收電能可以平衡活性污泥曝氣單元之用電量，故廠內每日淨能量僅為 $2.5 \times 10^7\text{kcal}$ ，即處理單元污水量所需之能為 $(2,511 \times 10^7) / (864 \times 274,000) = 0.11\text{KWH/m}^3$ 污水，若不考慮消化瓦斯發電回收電能，則處理單位污水量所需之電能為 $(73.6 \times 10^6) / (864 \times 274,000) = 0.31\text{KWH/m}^3$ 污水，即消化瓦斯發電回收電能，處理單位污水量所需之比能量降低至未利用消化瓦斯發電之 $2/3$ ，顯示其經濟效益甚大，在污水量隨產業發達而日益增加之際，利用消化瓦斯發電回收其電能補充廠內之用電量，可以有效降低處理單位污水量所消耗之電力。

根據以上之計算可知，在污水處理廠中，若以消化瓦斯發電，其能源回收效率可高達 66%，其中產生電力 $34.4 \times 10^6\text{ kcal/d}$ ($40,000\text{KWH}$) 可以平衡活性污泥曝氣單元之用電量，在能源日益珍貴的今日，利用消化瓦斯發電，確實可以收到省能源之效果。

表 9 污水處理廠各單元設備能量消耗及回收計算流程¹⁶

處理單元	能 量 及 質 體		平 衡		廠內能量消耗 10^6 kcal/day	能 量 回 收 10^6 kcal/day	淨能 源
	液 流 入	流 出	污 流 入	污 流 出			
抽水站	$Q = 274,000 \text{ CMD}$ $Tss = 54,800 \text{ kg/d}$ $BOD = 54,800 \text{ kg/d}$ $BEP = 81,400 \text{ kg/d}$ $BEP = 274 \times 10^6 \text{ kcal/d}$	與流 入相 同	無	無	15.6	無	15.6
預先處理	同 上	同 上	同 上	同 上	1.03	無	1.03
初級處理	$Q = 274,000 \text{ CMD}$ $Tss = 54,800 \text{ kg/d}$ $BOD = 54,800 \text{ kg/d}$ $BOD = 81,400 \text{ kg/d}$ $BEP = 274 \times 10^6 \text{ kcal/d}$	$Q = 274,000$ $Tss = 21,920$ $BOD = 35,620$ $BOD = 52,380$ $BEP = 176 \times 10^6$	無	無	0.65	無	0.66
活性污泥	$Q = 274,000 \text{ CMD}$ $Tss = 21,920 \text{ kg/d}$ $BOD = 35,620 \text{ kg/d}$ $BOD = 52,380 \text{ kg/d}$ $BEP = 176 \times 10^6 \text{ kcal/d}$	$Q = 274,000$ $Tss = 5,480$ $BOD = 5,480$ $BOD = 6,248$ $BEP = 21 \times 10^6$	無	無	34.25	無	34.25
加氯	同 第 四 項	同 第 四 項	同 第 四 項	同 第 四 項	4.50	無	4.50
濃縮	$Q = 2,200 \text{ CMD}$	$Q = 1,650 \text{ CMD}$	無	無	1.20	無	1.20
厭氧消化	無	無	$Q = 1,600$ $Tss = 64,000$ $BOD = 47,500$ $BEP = 160 \times 10^6$	$Q = 1,600$ $Tss = 32,000$ $BOD = 5,500$ $BEP = 20 \times 10^6$	6.40	消化瓦斯 : 124.74 電能 : 34.43 生污泥加熱 : 30.4 迴流污泥加熱 : 3.65 其回收熱 : 14.1**	(42.13)
脫水機運	無	無	$32,000 \text{ kg/d}$	無	$3.5 + 6.5 = 10$	無	10.0
總能量	-	-	-	-	73.64	(48.53)	25.11

[註] () : 表能量回收

六、油泥燃料法技術特徵及成本效益分析

6.1 油泥燃料法之技術特徵

油泥燃料法技術是日本「近畿環境興產株式會社」所開發之技術。此處理技術是以資源再利用方式將各事業機構產生之廢棄物，諸如油泥、廢液、廢白土、污泥及EP灰等，經由接受、粉碎、過篩、攪拌、輸送、核驗及混練過程，透過純熟之檢驗人員採樣分析，並於製程中添加適量之乳化安定劑，而得到穩定組成之產品，產品組成及規格均勻，燃燒狀況穩定，可做為良好之輔助燃料，其資源化流程如下：

1. 將收集清運之事業廢棄物分類貯存於貯槽及貯坑。
2. 廢白土、污泥及含水份之EP粉塵用鏟裝機配合輸送帶作業送入一次混練機(mixer)，並將上述之進料充分攪拌，以保持其流動性。
3. 將桶罐之廢油、油泥、槽底油泥等高黏滯性之液體傾倒經粗柵篩選再進入破碎混合機，於充分混合後送到溶解槽。
4. 經由前處理溶解槽之高流動性液體再到計量槽，若一切合乎規定即進入一次混練機。
5. 廢油、廢液、油泥經由計量槽直接送到一次混練機和廢白土、污泥等前處理過之液體混合成油泥漿，而乾EP粉塵亦同樣先投入一次混練機混合，經混合後之油泥漿再取樣測定熱值，若發現熱量不足則利用下一批次調整。
6. 一次混練之初步油泥漿再送至二次混練機添加安定調整劑，並攪拌使其混合均勻，並經振動篩去除不純物，即可送到成品槽。而在成品槽內之製品須時常攪拌以免沉澱物沉澱。

各事業機構產生的事業廢棄物經此資源再利用處理技術處理混合調製成產品泥燃劑；除可供作輔助燃料再利用成品外，亦可提供作水泥製造所需的原料，規格如下：

熱 值：4,000～45,000 kcal/kg
黏 度：500～1,000cps
氯 含 量：<2,000ppm
最大粒徑：5mm

此資源再利用處理技術在日本已有很好的實績，而資源再利用製成之產品在日本稱之為油泥燃料(slurry fuel)，由日本水泥廠最近使用輔助燃料之實績，使用量逐年遞增，除可有效將事業廢棄物減量及資源回收再利用外，並可將其商品化，減少造成環境污染的問題，以解決大量廢棄物處理的問題。

6.2 成本效益評估

該廠之設計處理容量為每天處理 120公噸之廢棄物（每天操作 8小時），處理容量

可以擴大為 360噸／日（三班操作，每天24小時操作）。如果以每年操作 300天來計算，年處理量為36,000公噸（每天操作 8小時）。

該廠之土地面積共5,331坪，總價為13,000萬元；廠房、辦公室建築費用為6,000萬元(900坪)。機械設備（含技術引進費用）投資額為 3億元；水電、消防設施設置費為1,350萬元；其他費用為9,650萬元，投資總額為 6億元。

此一資源化製程，每處理 1公噸之廢棄物會產生 0.98公噸之資源化產品（泥燃劑），亦即有 2%之廢棄物在處理過程中被篩除。以設計處理容量36,000公噸／年估算，總投資金額 6億元，採用10年折舊平均分攤，假設實際處理量為25,200公噸／年（設計處理容量之70%），則每噸廢棄物所需分攤之折舊成本為 2,381元。處理成本還包含公用物料（水費、電費、燃料費等）、人事費、維修費、稅及保險、銷管費用、以及其他費用等項。

處理過程中添加之乳化安定劑，每公噸之成品約需花費 300元之藥品費，而目前資源化產品（泥燃劑）可做為水泥業之輔助燃料，其售價（以熱值計）為燃煤之70%，對水泥業者而言極具經濟誘因。如果再考慮代處理業者之利潤，目前每噸廢棄物之處理費用為 5,000元。至於詳細的處理費用則視廢棄物性質而定，高熱值之廢棄物其處理費較低，對代處理業而言，處理較大量之廢棄物，其處理成本亦同時會下降。

七、各種污泥資源化技術之比較分析

污泥為廢水處理之主要產物，87年放流水標準草案已公佈，為合乎屆時之放流標準，勢必產生更多之生物及化學污泥，目前國內污泥產生源主要可分為工業區及事業單位廢水處理廠所產生之污泥，另伴隨下水道系統之建立，各大都市污水處理廠相繼設立而產生大量之都市污泥，由於污泥海拋之禁止以及不同類型污泥混合處理模式之建立乃未來污泥資源化之主流。

由以上分析各種污泥資源化技術之原理及經濟評估後，比較其技術成熟度成本分析及優缺點如表10。

八、問題現況與未來潛力評析

就目前國內之產業型態而言，仍以中小企業經營型態者佔大部份，且其分佈特性相當不一致，因此這些中小企業產生之污泥不易為相關環保單位掌握，大部份均進入垃圾掩埋場、河川用地或海拋，中小企業各家廠商之污泥量少而部份為有害事業廢棄物所認定，此乃特有之現象，而潛在性之有害污泥產源也就是指向部份中小企業，此類之廠商涵括行業範圍係電鍍、電子、金屬製品、皮革、及使用觸媒者等。因此如何使量少且有害之污泥集中經中間處理，致使無害化後處置實為重要課題。

表10 各種污泥資源化技術之比較分析

評估項目 資源化技術	熔 融 法	堆 肥 法	厭 氧 消 化 法	固 化 法	國 內 油 泥 資 源 化 技 術
成 本 分 析	每噸乾基汚泥為 2,700元，成品 售價約100元	每噸濕基汚泥為 700元，成品售 價為50元	每m ³ 元污水可回 收電力0.2KWH	每噸成本 4,400 元，如欲再利用 則超過6,000元	每噸成本 4,000 ~5,000元。
技 術 成 熟 度	技術可行 已商業化	技術可行 已商業化	技術成熟 已有多處實績	技術可行 正商業化中	技術可行 正商業化中
最 佳 經 濟 規 模	20~30 t/d	100~200 t/d	50,000 CMD以上	重金屬含量 愈高愈佳	100~120 t/d
二 次 公 害 防 治	可 控 制	不 易 控 制	可 控 制	可 控 制	可 控 制
資 源 化 潛 力 及 綜 合 評 估	可行，十年後將 在國內陸續建立 共識	符合資源永續利 用，潛力頗大， 惟應控制環境衛 生問題	符合資源永續利 用，瓦斯發電可 減少環保問題， 未來潛力大	體積增加，產品 用途有限，處理 不當易造成另一 環境問題	可處理具熱值高 之油泥廢棄物， 惟成本仍偏高

另外，由於一般大型工廠或工業區產生大量無害有機或無機汚泥亦是具潛力的部份。目前國內工業區已有73處，且每處工業區均設立完成或將設立廢水處理廠，其產生之汚泥量大為其重要特徵。由於係無害性汚泥，可以一般事業廢棄物認定之，也因為量大經常成為地方或區域掩埋場拒收而造最終置的困難，如何資源化即成為此類汚泥之較佳出處。

資源化的方法很多，包括堆肥、熔融、固化均為可行方法，但就投資操作上仍是需要較精確之經濟效益估算，是否能合乎經濟規模。另外為配合未來下水道系統之興建，污水處理廠亦會形成大量之汚泥，因此於汚泥資源化之決策過程中應合併考慮，也可使經濟規模之資源化工廠能速設立。至於汚泥處理範圍之界定仍以特定區域為基準較為適合，配合汚泥量及產源分佈，使區域內所產生之汚泥均能送至資源化工廠，使區域內自產之汚泥得以自行解決。

九、結語

在環保先進國家中，汚泥之處理方式乃以汚泥之減量與資源化為首要方針，至於其採用何種處理技術則依其國情、天然資源之不同而有不同之選擇，在歐美大陸部份係以汚泥厭氧發電，堆肥及土壤覆蓋為主，而日本則以減量、安定等考慮因素為主之熔爐、焚化處理方式為主流。惟其共同點，則在於汚泥海拋之禁止及不同類型汚泥混合處理模式之建立為新趨勢。

本文藉由探討國外污泥資源化技術之研究近況，以評估污泥資源化技術在國內落實之可行性，並進行各種污泥資源化技術之處理成本分析或經濟效益分析，研究是否可由回收資源之產品中降低資源化或環保設施投資成本，增加事業單位或聯合處理中心採用污泥資源化之經濟誘因以減少未來營運之阻力，根據本文參考國內外資料分析獲致下列結論：

1. 根據國外之經驗，污水處理廠產生之污泥可資源化回收再利用之技術包括污泥熔融法、固化法、堆肥法、厭氧甲烷化法、污泥蛋白質回收、污泥轉成燃油以及建築材料之運用等方法，其中以前四者最具效益，並已商業化。
2. 污泥熔融法國內並無實績，本法在日本使用最為成功，目前估計已有25座以上。若以中型20噸乾基污泥量評估其成本資料如下：
 - (1)建造費：7億（其中機械設備佔55~60%，電器設備22~25%，建築設備15~20%）
 - (2)操作維護費：4,500元／噸
 - (3)佔地面積：600~900坪(2,000~3,000m²)
 - (4)操作人員：8~12人
 - (5)適宜規模：每日處理乾基污泥10~30噸／日，如為含水率80%之污泥餅，則濕基污泥量為50~150噸／日
 - (6)將熔爐灰渣製成建材之設備費：200萬元
 - (7)每噸成品：100元，每日回收600~1,000元，每年可回收20萬元。
3. 國內都市垃圾堆肥廠在鼎盛時期共有23廠，後因成品銷路及環境衛生維持不易而陸續關閉。根據本研究參考美國3座EASP示範廠之營運實績資料顯示：每處理單位濕污泥之造價為100萬元／噸，濕污泥之單位操作維護成本為750元／噸，完熟堆肥之售價為45元／噸，若不考慮建造費，每處理一濕噸堆肥須投資700元，但堆肥操作係基於環保考量，且污泥經資源化後，可造成土壤改良劑，讓物質回歸生態環境循環，其商業化運轉技術在世界各國都有許多成功案例，國內應大力宣導提倡，其最適合之經濟規模在100~200t/d之間。
4. 污泥厭氧消化回收瓦斯發電方面，國內目前在萌芽階段。根據分析結果顯示，由於國內工業區及事業單位為符合82年及87年放流水標準，污水處理皆已採用活性污泥程序，其中曝氣槽消耗能量佔廠內全部用電量之47%，其次為抽水站佔21%，污泥脫水及搬運佔14%。若考慮以消化瓦斯發電，則處理單位污水量之動力消耗降為0.11kWH/m³，在能源日益短缺且以電能最為昂貴之今日，消化瓦斯回收發電亦不失為省能源省資源的方法之一。
5. 在污泥固化處理技術方面，污泥中若含有高比例之有機物及重金屬時，有機物之破壞及重金屬之回收或固化為必然之趨勢。以皮革工業產生之皮革污泥廢料而言，欲將含大量重金屬鉻之污泥固化前須先加以焚化，達減容及去除有機物後，再予固化，由於皮革廢料係有害事業廢棄物，經中間處理焚化及固化程序後再以衛生掩埋法進行最終

處置，每噸廢料固化之總成本為 4,400元，如欲將固化體再利用，每噸廢料固化之成本超過 6,000元，不符經濟效益，宜考慮堆肥或製成肥料之處理方案。此外固化處理時，由於體積增加，造成處置問題，且二次污染之控制不易有效管理，因此宜謹慎考量。

- 6.由國內本土化廢棄物資源化廠之實績顯示，油泥、廢白土及靜電集塵器飛灰經混合攪拌並添加乳化安定劑形成泥漿狀之燃料，目前正商業化中，其每噸之成本約4,000～5,000元，最佳經濟規模為100～120t/d。本法可處理具熱值高之油泥廢棄物，如成本可再予降低，則未來將具有極大之潛力。

十、參考文獻

1. Goldstein, N. 1992a. Building the infrastructure for Sludge Reuse Biocycle, March 1992, pp. 58～62.
2. Chishti, S.S et. al., 1992. Studies on the Recovery of Sludge Protein. Wat. Res. 26:241～248.
3. Coghlan, A., 1991. Turning the Heat on Sludge to Make Fertilizer and Fuel. New Scientist. 23 Nov, 1991. p.29.
4. Conrad, L. 1988. Patent issued on Recycling Sludge. J. Wat. Poll. Contr. Fed. 60:1504～1505.
5. Crosse, J. 1990. Beneficial Sludge Reuse Cornerstone of Plan. Amer. City. & County. Dec 1990, p.26.
6. Hay, J.C. and R.D. Kuchenrither., 1992. Fundamentals and Application of Windrow Composting. ASCE, J. Env. Eng. 116:746～763.
7. Harrison, D.S. and J.T. Crosse, 1991. Benefiting from sludge Disposal. Pub. Works. Nov 1991. pp.64～65.
8. Lee, K.N et. al., 1987. Conversion of Municipal Sludge to Oil. J.Wat. Poll. Contr. Fed. 59:884～889.
9. Piskorz, J. et. al., 1986. Flash Pyrolysis of Sewage Sludge. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 25:265～270.
- 10 USEAP, Process Design Manual-Sludge Treatment and Disposal, EPA-625/1-79-001, 1979.
- 11 Poincelot, R.P., A Scientific Examination of the Principles and Practice of Composting, Compost Science Vol. 15, No.3, September 1974.
- 12 江舟峰，延長固定堆曝氣式堆肥技術案例研究，污泥資源化技術回收再利用技術研討會（一），經濟部工業局，民國81年12月。

- 13事業機構廢棄物貯存清除處理設施列管計畫(一)台灣地區事業廢棄物總量調查推估處置規劃及採樣分析，中興工程顧問社，81年6月。
- 14皮革廢棄物回收再利用技術研究，經濟部工業局，民國81年6月。
- 15汚泥資源化回收再利用技術，第二次研討會講義輯，經濟部工業局，民國82年6月。
- 16張添晉，典型都市污水處理廠質量及能量平衡之研究，工業污染防治季刊，第26期，p129~149，民國77年 4月。