

污泥熔融處理及資源再利用技術

江康鈺* 王鯤生**

摘要

污泥處理處置以「減量化」、「安定化」、「無害化」及「資源化」為基本原則，其中資源化之處理方向，未來將成為地狹人稠之台灣地區，極為重要之發展趨勢。污泥熔融處理法兼具有減容及無害化之效果，另根據國外之操作運轉經驗及應用實績，熔融處理產生之熔渣亦有長期穩定性及資源再利用之發展潛力，未來若能配合相關材料應用之規範要求及市場開發，則污泥熔融處理不僅可解決日益增加之污泥處置問題，亦極富有研發及應用之商機。本文即以常見之污泥熔融處理技術、熔渣之資源再利用途徑以及熔融處理之可行性等方面初步探討，期提供國內未來應用時之參考。

【關鍵字】

污泥熔融處理(sludge melting process)

熔渣(slag)

熔流溫度(fluid temperature)

鹽基度(basicity)

*元培醫專環境工程衛生科助理教授

**國立中央大學環境工程研究所副教授

一、前　　言

根據行政院環保署之統計資料顯示，預估台灣地區至民國89年事業廢棄物中之污泥年產量將達450萬噸左右⁽¹⁾，若加上近年來政府投入大量經費興建之都市污水下水道系統、河川污染整治與水庫淤砂抽取等工程所產生之污泥，則可預見污泥之處理處置，將是未來環境保護工作之重要課題。污泥之處理處置主要以「減量化」、「安定化」、「無害化」及「資源化」為基本原則，其中尤以資源再利用將是未來處理發展之趨勢；而污泥資源再利用之途徑，則包括綠農地利用、建設資材利用及熱能回收等；其應用範圍亦分別含括肥料、土壤改良、路基材料及混凝土骨材等(如圖1所示)。高溫熔融法是利用高於物質熔點的溫度，使物質達到熔融狀態，再經適當之冷卻方式，使產生之熔渣兼具有減容及無害化之效果，同時在長期穩定性及資源再利用等方面，均具有極佳之發展潛力。目前國外污泥熔融處理技術之發展，已有相當之應用處理實績，因此，本文之主要目的即在於介紹常見之熔融處理技術、探討熔渣之材料化及資源化之應用，並根據國外污泥熔融處理廠實際操作運轉之經驗，及熔渣資源再利用等特性，初步評估熔融處理設備之技術成熟度、熔渣之有害性、減容效果及操作處理成本等，期提供未來污泥熔融處理之參考。

二、熔融處理技術之探討

熔融處理依其處理對象及應用領域之不同，其使用之名稱有所差異；如處理液態高階核能廢料時，則稱為玻璃化法(vitrification)；處理焚化灰渣及下水污泥則稱為熔融處理法(melting process)；而部分處理有害廢棄物時，則稱為「熔融玻璃化法(molten glass process)」；然其應用之基本原理相似，大多可以熔融處理法予以涵蓋。熔融處理係利用燃料之燃燒熱及電熱兩種方式，將處理物（如污泥或焚化灰渣）於1,200°C-1,600°C之高溫條件下，使有機物產生熱分解、燃燒及氧化，而無機物則熔融成玻璃質之熔渣。污泥或焚化灰渣中重金屬之處理，則因熔融處理過程，形成Si—O之網狀結構，使重金屬包封於網目中，形成性質極安定之玻璃質熔渣，而降低重金屬之溶出可能。

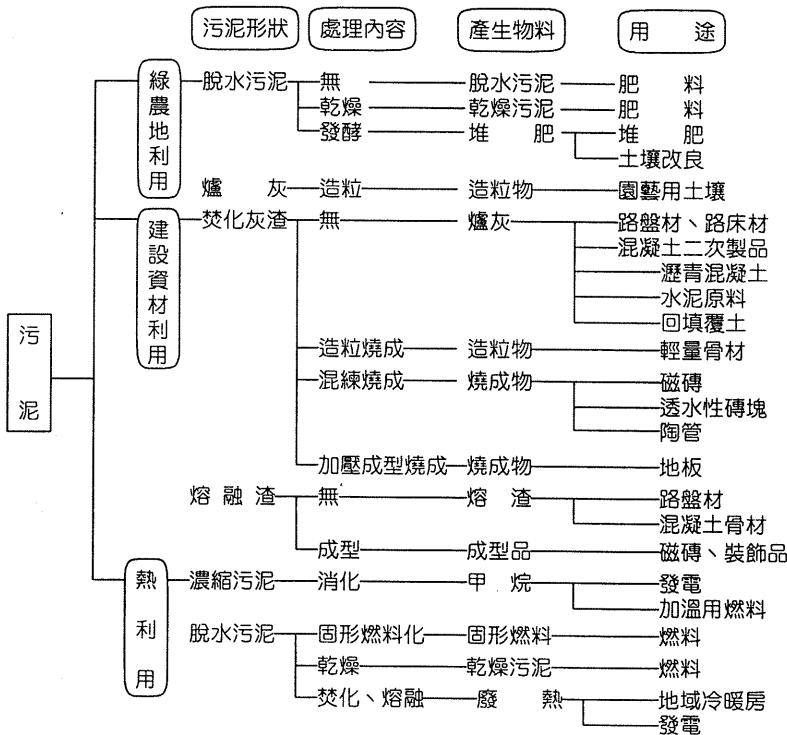


圖1 污泥資源化途徑

熔融處理技術之應用沿革，最早應用物質熔化、注入鑄模、凝結及固型化等技術，發展於鑄造金屬或製造塑膠材料，其後應用於廢塑膠之處理，即藉押出成形機或射出成形機，將單一或混合廢塑膠直接或混合其他物質(如砂、污泥)，加熱使其軟化、混合（混煉）、熔融而成形，以達減量及資源再利用之目的。而目前熔融處理技術，則已廣泛應用於都市垃圾、下水污泥、焚化灰渣、有害廢棄物、放射性廢料，以及受污染土壤之整治等方面。

2.1 熔融處理之特色

熔融處理係利用高溫條件下，將污泥或焚化灰渣加溫至其熔流點(fluid point)以上，使有害物質(如重金屬)包封於熔渣中，達到穩定化、減量化及資源化之目的；然熔融處理之反應機制尚不十分明瞭，因此，對於熔融處理之效果，大多利用熔渣特性之變化，作為參考判斷之依據。

1. 灼燒減量(ignition loss)之變化

一般而言，熔渣之灼燒減量大多低於檢測極限。

2.重金屬及其他主要成分之移行率

移行率係指污泥中重金屬及其他主要成分，於熔融處理過程存在於熔渣之比率，其定義如下所示⁽²⁾⁽³⁾。一般而言，移行率主要受到熔融處理過程，重金屬之物化特性(如熔點、沸點、蒸氣壓、揮發溫度等)、化合物之型態、熔融溫度、污泥特性、熔融處理設備等因素之影響。

$$\text{熔渣的移行率\%} = \frac{(\text{熔渣重量}) \times (\text{熔渣中各成份之重量})}{(\text{灰渣投入量}) \times (\text{灰渣中各成份之重量})} \times 100\%$$

鈴木(1987)之研究結果顯示，灰渣中之 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 及重金屬Cr、Fe及Mg，熔融處理過程幾乎存在於熔渣中，而移行於氣相之比率極低；Na及K於熔渣中約30%~70%，以 NaCl 及 KCl 存在。至於重金屬Pb、Cd及Zn於熔融過程主要以粒狀物存在，其中以Zn存在於熔渣之移行率最高，約佔50%，而Pb及As則約為20%~30%；至於揮發性較高之重金屬Hg及Cd，則幾乎以飛灰之型態存在^[2](如圖2所示)。

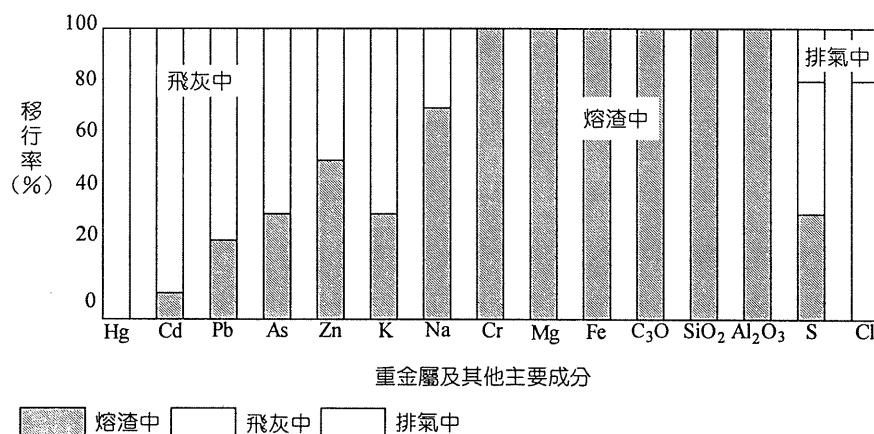


圖2 熔融處理之化學成份變動情形

3.強度變化

一般而言，熔渣之抗壓強度與其冷卻方式有關；其中氣冷式熔渣之抗壓強度高於水冷式熔渣。熔渣抗壓強度之變化，主要是熔渣資源再利用之重要參考指標。

4.孔隙變化

熔融過程由於產生匣限作用，其熔渣之孔隙率有降低之現象，並減少有害物質（如重金屬）溶出之現象。

5.減容效應

一般而言，污泥經熔融處理後，因有機物氧化及孔隙率降低之變化，使熔渣之體積有減少之現象。根據研究顯示利用有機系分子凝聚劑之脫水污泥，其減容效果可達1/30，至於無機系凝聚劑之含水率40%污泥，其減容則達1/13⁽⁴⁾。魏氏(1991)之研究則指出熔融處理之熔渣體積約為壓縮固化處理之1/10⁽⁵⁾。

6.玻璃化之程度

熔渣玻璃化之程度，有助於封存重金屬，減少其溶出之可能。玻璃化之反應機制係利用SiO₂之網目結構，將重金屬匣限於結構中，而形成難溶性之物質，其反應形成機制如圖3所示⁽⁶⁾。

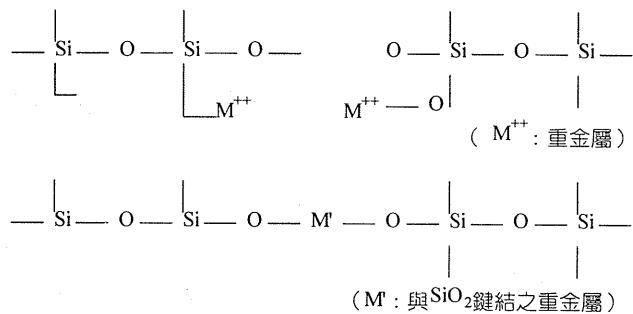


圖3 玻璃化之反應機制

根據上述熔渣特性之變化，可提供未來熔渣資源再利用之參考依據。至於污泥熔融處理之應用特色及其限制，大致可包括如下：

- (1)減容效果佳：脫水污泥經熔融處理後，其體積可減為原有90%以上，對增加掩埋場之使用年限，有正面之助益。
- (2)重金屬溶出性降低：經熔融處理之熔渣，可有效封存重金屬，減少重金屬溶出之可能。
- (3)資源再利用：熔渣可作為骨材及磚塊等建築材料。
- (4)佔地面積小：熔融爐一般為立型，所需之設置面積較小。
- (5)廢氣排放量少：熔融處理所需之空氣量較少，一般而言，排氣量約為一般焚化爐之1/2—1/10。

(6)廢氣排放之污染物濃度較低：熔融處理廢氣排放之NOx、SOx及氯化氫等濃度，較一般焚化爐為低。

(7)能源消耗較大：為增加出渣口熔渣之流動性，須提供較大量之能源。

(8)應用限制：熔融處理應限制揮發性較高之重金屬及其氯化物(如Hg、As、Cd等)存在，同時應增加廢氣中重金屬之收集設備；另對污泥中存有高量之氯化鈉及氯化鉀時，亦須審慎考量部分重金屬可能形成氯化物而逸散。

2.2 常見之熔融處理設備

根據日本目前熔融處理設備系統開發應用之狀況，大致可區分為燃料式熔融系統及電氣式熔融系統兩大類，其中燃料式熔融系統以表面熔融爐、內部熔融爐、焦炭床熔融爐及旋窯熔融爐等四種為主，而電氣式熔融系統則以電弧式、電阻式、電漿式及電熱式熔融爐為發展重點。有關各類型熔融爐簡要介紹如後^{[7][8][9][10]}。

1.表面熔融爐

表面熔融爐之種類，主要包括迴轉式及傾斜式表面熔融爐兩種，其構造係由供給設備、主燃燒室及二次燃燒室所組成。污泥由進料斗進入於熔融爐內筒與外筒所形成之豎型空間中，同時利用外筒之旋轉作用使進料均勻分佈，至於熔融爐處理之容量，則可直接調整主要燃燒室頂部之可移動式圓筒。應用之原理係以爐內上部加熱之方式，維持高溫(1,300°C以上)狀態，處理之污泥或其焚化灰渣自表面依次熔融，產生之熔融液則持續落入淬冷槽，形成水冷式熔渣（如圖4）。表面熔融爐之處理對象，主要以焚化灰渣或含水率低於20%之脫水污泥，其中對於灰渣或污泥組成(如鹽基度)之調整，常以石灰系(如河砂)或高分子系(如生石灰)為其調整劑。至於熱量之提供，除高熱值之廢棄物可自燃外，大多以重油或煤油作為輔助燃料。

表面熔融除具有高溫熔融及減容之效果外，其特性尚包括(1)可混合處理高熱值之廢棄物(如廢輪胎，廢塑膠，木屑等)，並可節省輔助燃料之用量；(2)熔渣為連續排出、且起爐及停爐之操作簡便；(3)玻璃質態之熔渣，重金屬不易溶出；(4)熔渣可作為路基之材料具有資源再利用之價值；(5)視實際狀況添加SiO₂及硼酸，以增加熔融處理之作用。

2.內部熔融爐

內部熔融爐之供給熱源，主要為污泥焚化灰渣中殘留碳之燃燒熱，因此，一般可建造於焚化爐後燃燒段之下方。內部熔融處理之過程，主要分為進料段、燃燒段、熔融段及熔渣排出段等四個部分(如圖5)，各階段之溫度調整及範圍，分別為高溫灰渣(約含殘留碳10~15%)進入熔融爐，並由爐床噴嘴送入500°C之預熱空氣，使殘留碳維持燃燒狀況；燃燒段則由電氣加熱器維持在800°C~900°C；而熔融段則維持在1,300°C左右。

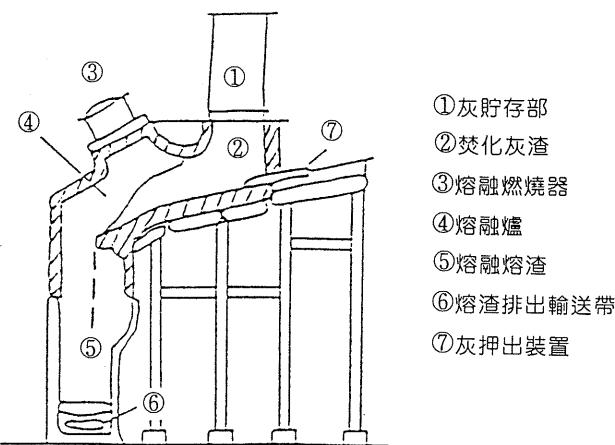


圖4 表面熔融爐示意圖

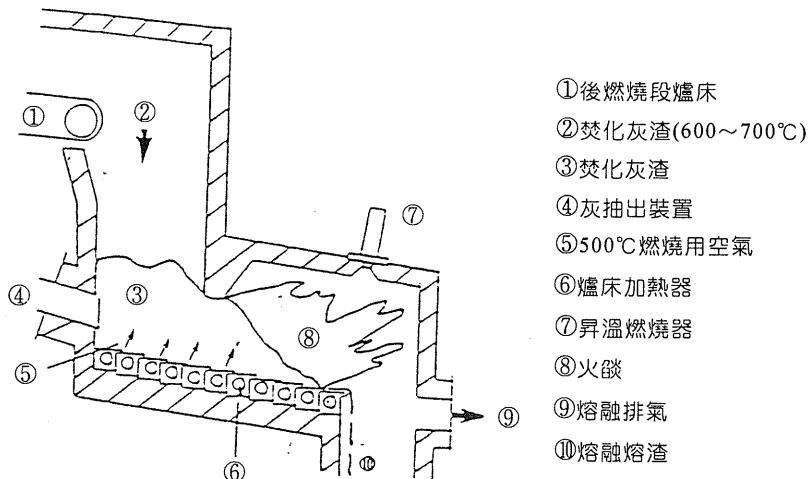


圖5 內部熔融爐示意圖

3. 焦碳床熔融爐

焦碳床熔融爐乃由化鐵爐(cupola)技術研發而成。污泥焦碳床熔融爐之處理程序，係將脫水污泥或其焚化灰渣與焦炭，同時投入於進料斗，並於熔融爐與一次空氣燃燒達 $1,600^{\circ}\text{C}$ 。污泥或其焚化灰渣經乾燥升溫，可燃部分先分解產生可燃性氣體，並達到完全燃燒，熔渣則由排渣口排出(如圖6所示)。一般焦碳床熔融爐適用於處理含水率低於40%之乾燥污泥餅或焚化灰渣，另為求較高品質之熔渣，可考慮添加石灰系如碎石(30mm~100mm)或高分子系(石灰石)等調整劑；另亦可考慮添加石灰調整其鹽基度。

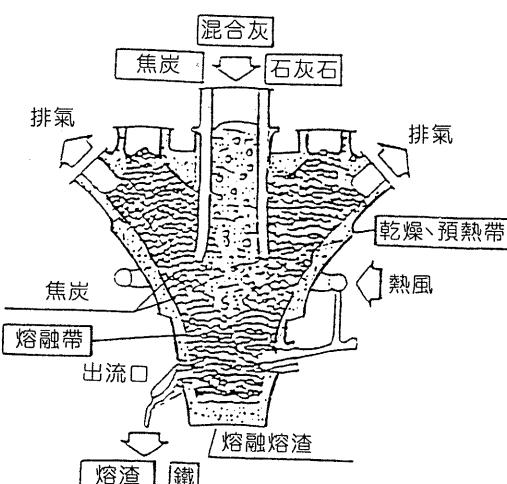


圖6 焦炭床熔融爐示意圖

4. 旋回流(Vortex)熔融爐

旋回流熔融爐之主體結構，主要包括旋回流熔融段、熔渣分離段及排出段等部分，處理程序係將污泥或焚化灰渣與一次空氣均勻分散於爐體內，二次空氣吹入爐內造成回旋(vortex)，再由燃燒器加熱熔融，熔融液在爐內流動，熔渣則由爐底排出。一般常應用之旋回流熔融爐包括縱型、傾斜型及橫型三種，其爐型構造及運轉概要簡述如下。

(1) 縱型旋回流熔融爐

旋回流熔融爐之旋轉圓筒呈縱立型，由上部之旋轉熔渣部(一次燃燒室)、熔渣分離部(二次燃燒室)及熔渣排出部所組成(如圖7)。一次燃燒空氣由爐頂送入，二次燃燒空氣由爐側供給，爐內採用耐腐蝕性之耐火材料。爐內之溫度高

於乾燥污泥之熔融溫度，乾燥污泥在爐內，藉由高溫及回旋流之作用，而達加熱及熔融之目的，熔融後之熔渣則由爐底排出。

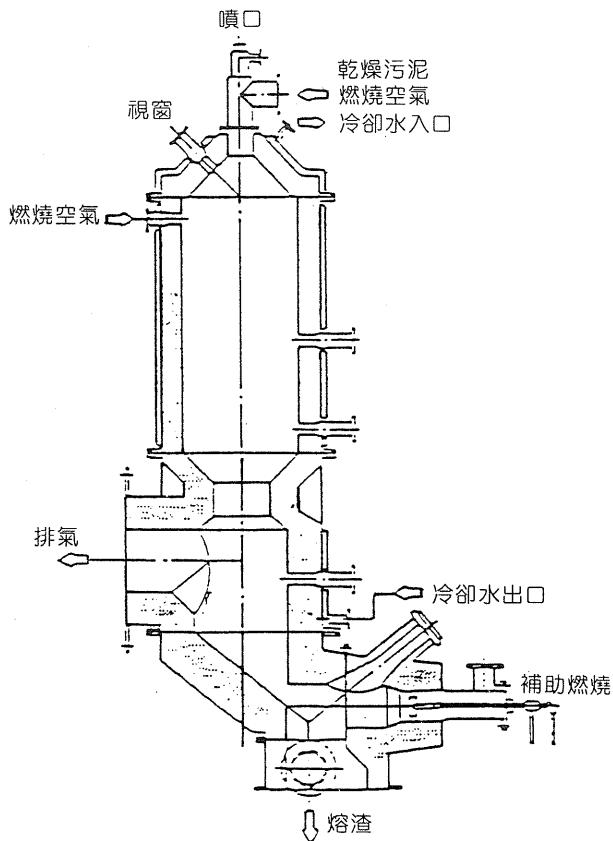


圖7 縱型旋轉窯熔融爐示意圖

(2) 傾斜型旋回流熔融爐

傾斜型旋回流熔融爐之構造示意圖如圖8，其中傾斜之圓筒爐係為一次燃燒室，而燃燒空氣則由數個噴嘴噴入。污泥或焚化灰渣之進料方式，利用氣流輸送至爐內並形成旋回流，一次及二次空氣注入於熔融最適之螺旋氣體位置，爐內之熔融作用，均在短時間內達成，形成之熔渣則於傾斜之爐底排出。乾燥污泥或焚化灰渣，應進行前處理，其中粒徑應調整至1.5 mm以下，而最適粒徑範圍則在0.7mm~1.0mm。

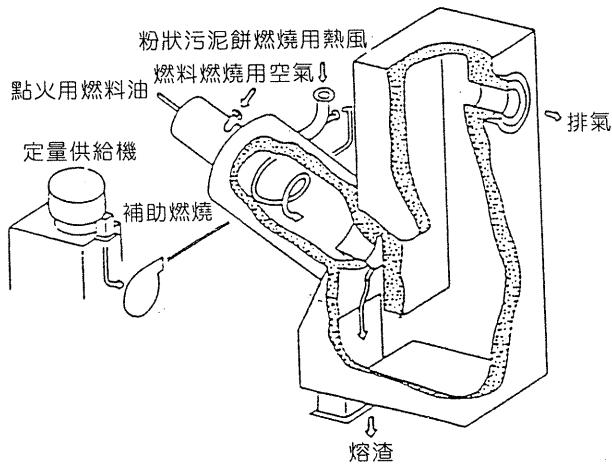


圖8 傾斜型旋轉窯熔融爐示意圖

(3)橫型旋回流熔融爐

橫型旋回流熔融爐由旋轉熔融爐(一次燃燒室)及二次燃燒室所構成。出口部(二次燃燒室入口部)設有擋板，底部之中央則為熔渣之流出口(如圖9所示)。乾燥污泥(含水率10%以下)或灰渣，與一次空氣同時以高速注入，藉高速氣流產生旋回流，使其產生熱分解及燃燒作用，熔渣則由流出口連續流出。

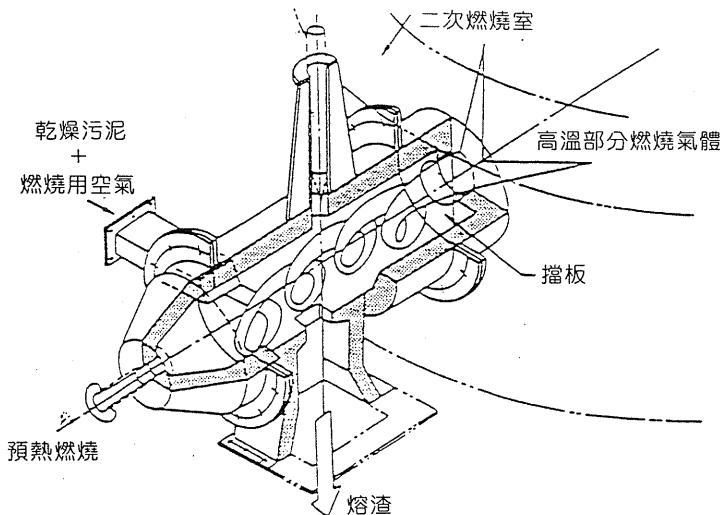


圖9 橫型旋轉窯熔融爐示意圖

5. 電弧式(Arc)熔融爐

電弧式熔融爐係以電弧加熱方式，藉由電極與爐床之鹼金屬間，產生高溫電弧(約3,000°C)，供給熔融處理之熱源；同時熔融爐內之加熱電極可藉升降機改變在爐體之位置，以便形成良好之電弧機構(如圖10)。其處理之主要特性包括(1)由於溫度較高，污泥或其焚化灰渣中之重金屬可完全熔融；(2)排放廢氣量較少，處理較為容易；(3)需要較純熟之操作技巧；(4)電力需求量大，以配合焚化之發電設備為佳；(5)熔渣排出口易受損；(6)產生之噪音較嚴重。

6. 電阻式熔融爐

目前電阻式熔融爐已開發應用於乾燥污泥及焚化灰渣之處理，其應用原理係利用電阻所產生之熱能，作為熔融處理之熱源。同時乾燥污泥及焚化灰渣，在常溫狀態下不易導電，但在熔融狀態下則易形成導體；因此，電阻式熔融爐即利用此特性研究發展，其設備構造如圖11所示。由圖中可知電阻式熔融爐係由爐中心之爐蓋頂，將電極表面浸漬於熔融液中，由於污泥或其焚化灰渣中重金屬比重差之關係，重金屬會沉於爐底，而與無機熔融液分離，同時爐底之熔融物，則緩慢冷卻固化並間歇排出爐外。

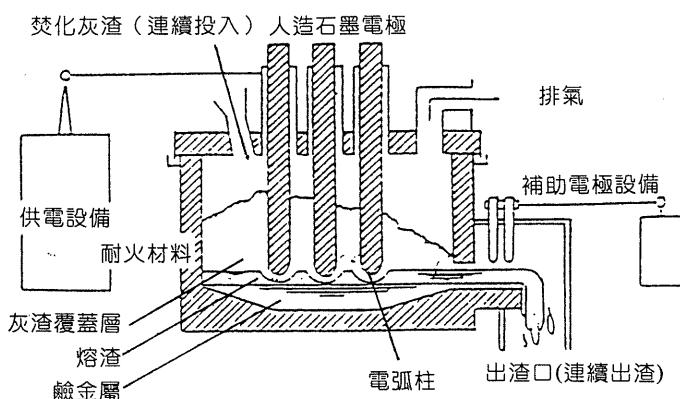


圖10 電弧式熔融爐示意圖

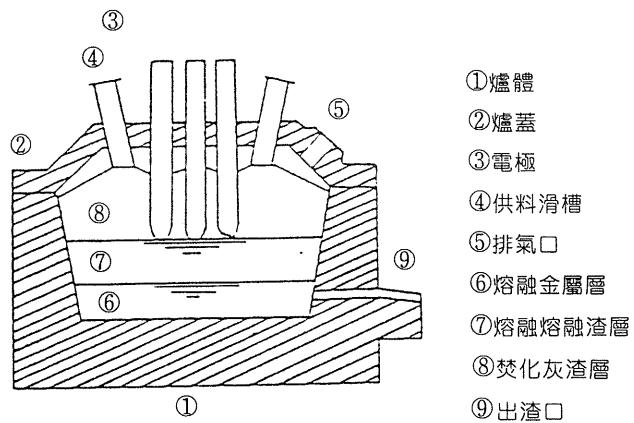


圖11 灰渣電阻式熔融爐示意圖

7. 電漿式(plasma)熔融爐

應用電漿處理技術最早起源於金屬工業製程與玻璃製造等方面，而近年來則成功應用於廢棄物之處理，其中尤以放射性廢料處理為主要對象。目前亦經模廠與實廠之試車與運轉，除應用於下水污泥、都市垃圾及其焚化灰渣之中間處理外，亦應用於受污染土壤之玻璃化及掩埋場之污染整治等用途。電漿式熔融爐主要係由爐體、電漿火炬(torch)、直流電源、空氣供給及冷卻水供給等設備所組成(如圖12)。由於電漿之高溫(2000°C 以上)特性，使污泥或其焚化灰渣中之有機化合物熱解、揮發或氧化，而無機化合物(如重金屬)則形成重金屬不易溶出之熔渣。至於電漿熔融處理之特性主要包括(1)可在不同的環境條件下(氧氣、氮氣或其他惰性氣體)處理；(2)電漿熱源無污染之虞，可直接加熱處理；(3)不需前處理，減少處理費用；(4)排放廢氣及污染量較少。

8. 電熱式熔融爐

電熱式熔融爐主要係以電氣加熱器加熱，利用其輻射熱對污泥或其焚化灰渣間接加熱，以形成熔融現象。圖13說明電熱式熔融爐之設備構造，其中尤以加熱單元及熔渣排出單元為主要設備。

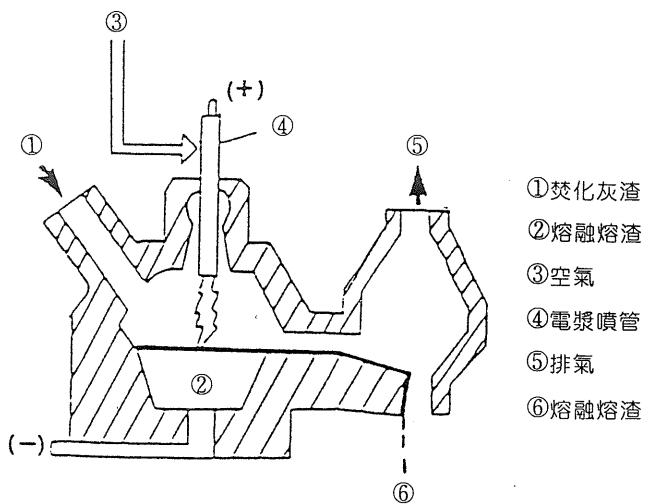


圖12 電漿式熔融爐示意圖

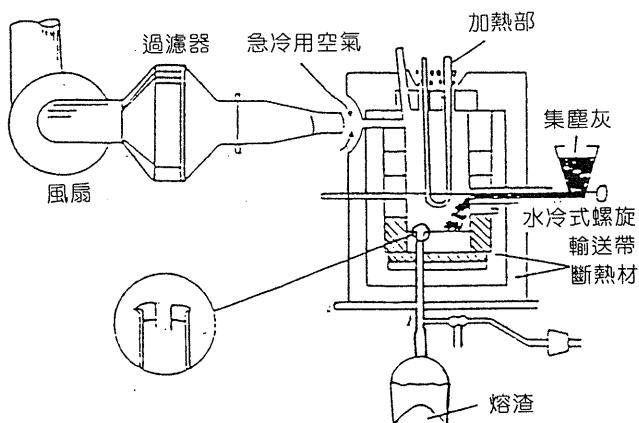


圖13 電熱式熔融爐示意圖

9.高週波熔融爐

高週波熔融爐將利用誘電體產生高週波處理污泥，其中高週波使污泥之分子結構產生振動，進而形成熔融現象。其中熔融溫度之調整，可藉由調整高週波之

強度達成。一般而言，標準輸出功率為 5、20、100 KW，分別使用2450、915 MHz之頻率(如圖14所示)。由圖14可知，污泥或其焚化灰渣由貯存設備利用螺旋輸送機定量送入熔融爐中；再以高週波發生裝置，利用導管將高週波導入熔融爐，而高週波發生裝置則須以冷卻水冷卻。

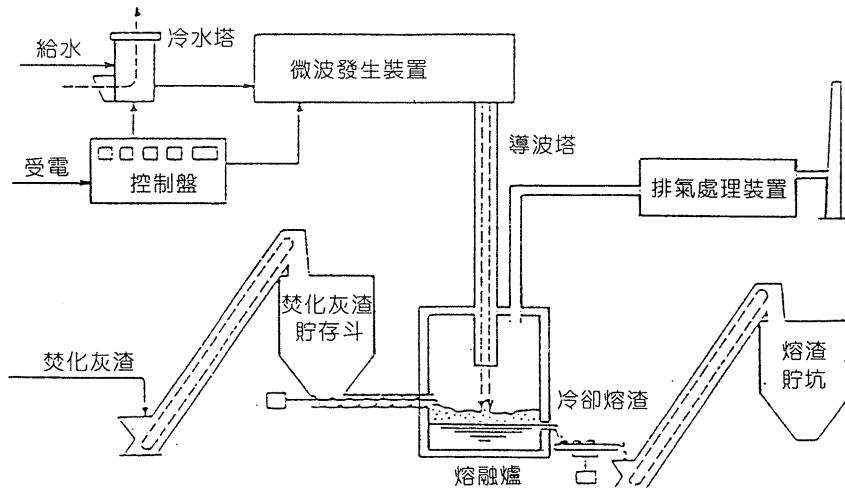


圖14 高週波熔融爐示意圖

2.3 影響污泥熔融處理之因素

1. 污泥組成

污泥熔融處理過程，污泥或其焚化灰渣之化學組成變化，常因污水處理方式及進流污水特性而異，其中受使用之凝聚劑種類之影響最大。而一般常用之凝聚劑分別包括有機系(如高分子凝聚劑)及無機系(如消石灰及氯化鐵)。根據研究顯示污泥或其焚化灰渣中之化學成分，主要包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 等，其中有機系污泥焚化灰渣之 SiO_2 約佔30%~50%， Al_2O_3 及 P_2O_5 則約佔10%~20%；無機系污泥焚化灰渣之 SiO_2 含量低於有機系之含量，約20%左右，至於 CaO 及 Fe_2O_3 之含量則高於有機系之含量(如表1所示)，此與添加之凝聚劑種類有極為密切之關係。

2. 鹽基度

污泥熔融處理之熔流溫度(fluid temperature)受鹽基度(basicity)之影響極為顯著而污泥化學組成即是影響鹽基度變化之主要因素。根據村上(1989)依污泥之不

同化學組成，將鹽基度分為七種定義，其定義如下所示；經以無機系之下水污泥實驗驗證得知，各鹽基度指標與熔流溫度間之相關性極為相似，因此，熔流溫度之預測，可利用較簡便之鹽基度指標 CaO/SiO_2 ，作為參考之依據。同時研究亦指出有機系及無機系之污泥組成，其最低熔流溫度介於鹽基度 $0.2 \sim 0.7$ 間⁽¹¹⁾。

表1 有機系及無機系污泥焚化灰渣之組成比較⁽¹¹⁾

| 化學組成 | SiO_2 | Al_2O_3 | MgO | P_2O_5 | CaO | Fe_2O_3 | Na_2O | K_2O | 其他 |
|------|----------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-------|
| 有機系 | | | | | | | | | |
| 平均 | 40.72 | 14.8 | 2.97 | 12.97 | 8.24 | 9.56 | 1.25 | 1.44 | 8.05 |
| 變動係數 | 17.64 | 16.21 | 22.2 | 36.27 | 24.36 | 36.19 | 37.11 | 19.19 | 40.38 |
| 標準偏差 | 7.19 | 2.4 | 0.66 | 4.7 | 2 | 3.46 | 0.46 | 0.28 | 2.59 |
| 無機系 | | | | | | | | | |
| 平均 | 22.33 | 8.11 | 2.74 | 4.86 | 40.12 | 15.67 | 0.53 | 0.46 | 5.16 |
| 變動係數 | 42.88 | 39.26 | 32.38 | 30.71 | 41.7 | 34.71 | 84.99 | 80.49 | 44.18 |
| 標準偏差 | 9.57 | 3.18 | 0.89 | 1.49 | 16.73 | 5.44 | 0.45 | 0.37 | 2.28 |

鹽基度1： CaO/SiO_2

鹽基度2： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度3： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$

鹽基度4： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度5： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度6： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5)$

鹽基度7： $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$

根據研究指出有機系及無機系污泥灰渣，其熔流溫度及鹽基度等熔融特性稍有差異，有機系污泥灰渣之鹽基度大多小於0.38，其熔流溫度則介於1,150°C至1,300°C間；而無機系污泥灰渣之鹽基度則變化範圍較大，介於0.3~7.3間，至於熔流溫度則明顯較有機系為高，一般介於1,200°C~1,500°C之間。另根據污泥化學組成 SiO_2 、 Al_2O_3 及 CaO 與 熔流溫度關係之三相圖顯示(如圖15所示)；在

CaO/SiO_2 比值介於0.2~0.4及1且 $[\text{CaO} + \text{SiO}_2]$ 之重量百分比在75%~85%，其熔流溫度將可降至較低範圍⁽¹¹⁾。

3. 熔融操作溫度

適當之熔融處理溫度，可改善因溫度過低而產生之熔渣流動性不足、排渣困難、熔渣品質不良、熔渣之孔隙過高及毒性物質之溶出增加等缺點，同時對於溫度過高而產生之爐壁耐火磚的損害、系統熱損失增加及增加輔助燃料消耗等問題，亦能有效改善。同時熔融溫度對於熔融爐設計規模，亦有明顯影響；Wey(1991)以模式模擬溫度對表面熔融爐操作之影響，結果顯示70% PVC及30%玻璃為進料時，熔融操作溫度增加，然熔渣之產率亦增加，可相對減少爐體規模之需求。同時適當地提昇熔融操作溫度，亦可減少重金屬溶出及熔渣之孔隙，產生較高品質之熔渣，增加熔渣資源再利用之可行性⁽¹²⁾。

4. 熔融操作時間

熔融處理廢棄物在爐內停留之時間，與爐體操作容量及產生之熔渣品質有關；一般而言，較短之操作時間，雖可增加污泥或其焚化灰渣之處理量，並減少補助燃料用量，然其熔渣成分之化學反應不完全，致重金屬無法完全包封在熔渣中，而降低熔渣中重金屬之安定性⁽¹³⁾。因此，適當之熔融操作時間為熔融處理重要之操作參數。

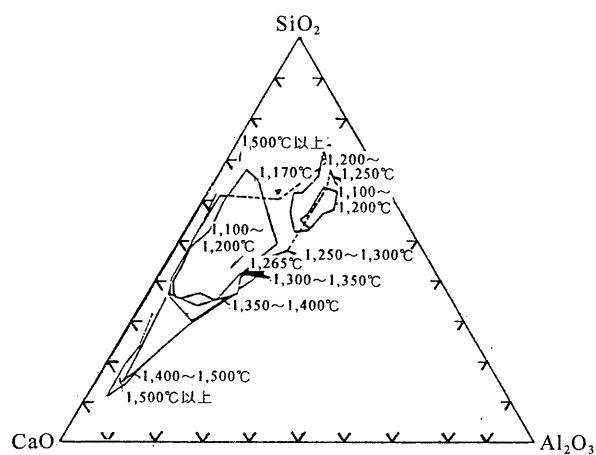


圖15 污泥化學組成與熔流溫度之三相圖

三、污泥熔渣之材料化及資源化探討

3.1 熔渣之種類及特性

污泥熔渣之特性，除受污泥本身之特性影響外，亦與污水處理廠進流水質、操作條件、天候狀況、鹽基度調整、熔融爐型式、熔流溫度及熔液冷卻方式等因素有關；其中尤以熔液之冷卻方法影響熔渣品質特性最為明顯。熔渣依其熔液冷卻方式之不同，主要可分為水冷熔渣、氣冷熔渣、結晶化熔渣及特殊熔渣等⁽¹⁴⁾。水冷熔渣係指熔液由熔融爐之排渣部位直接落於盛水之水槽中，並破裂成為1~5cm之細粒狀玻璃質。氣冷熔渣則為熔液排出時，利用空氣自然冷卻，一般空氣冷卻速度約為5°C/min，且冷卻速度愈慢，其熔渣之結晶化程度愈強。結晶化熔渣則為將水冷或氣冷熔渣再予以熱處理，而依不同之熱處理方法，結晶化熔渣則可分為低溫結晶化熔渣、高溫結晶化熔渣、加熱結晶化熔渣及保冷結晶化熔渣等四種，其中低溫結晶化熔渣之熱處理溫度介於900°C—930°C，處理時間則為20—30分鐘；高溫結晶化熔渣之熱處理溫度，則須提高至1,100°C—1,150°C，而處理時間則須維持在30分鐘。至於加熱結晶化熔渣，則係將熔液先冷卻至650°C，使結晶核均勻且大量成長，再加熱至軟化溫度，使結晶再度成長，其結晶成長與溫度間之關係如圖16所示。另保冷結晶化熔渣則為熔液再熔流溫度範圍內，緩緩冷卻而得。表2說明熔渣不同之種類、特性及形成之方法。

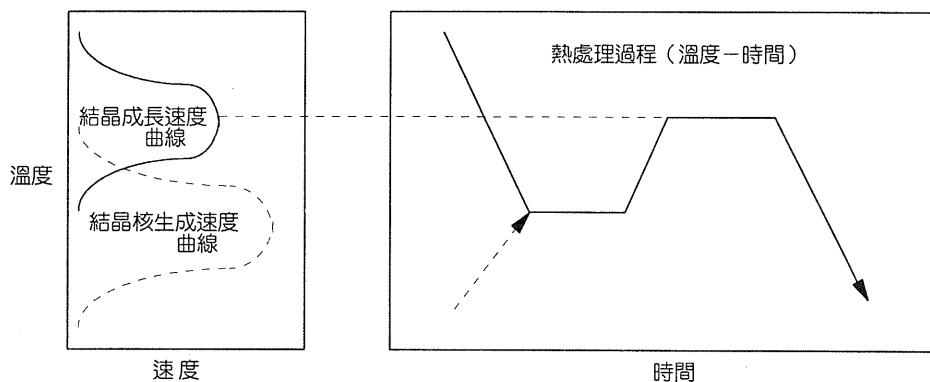


圖16 結晶化熔渣之晶核成長與溫度之關係圖

表2 熔渣之種類、形成方法及特性

| 熔渣種類 | 形成方式 | 熔渣特性 |
|---------|---|---|
| 水冷熔渣 | 直接水淬渣 將融熔液放在水中或噴水，冷卻速度10°C/分。 | 細粒狀，含有少量細長纖維狀，玻璃質含量多，比重輕，透水性良好，易碎，黑色，粒度分佈較山砂差。 |
| | 間接水淬渣 間接水冷。 | 塊狀，玻璃質，強度比水淬渣大。 |
| 氣冷熔渣 | 融液在空氣中冷卻。 | 塊狀，粒徑5~15公釐集中，粒形多角，扁平，低結晶化熔渣，較水液溶渣緻密堅固，機械強度較大。 |
| 保冷結晶化熔渣 | 控制冷卻速度，確保結晶化所需溫度和時間。完全結晶化按結晶化所需熱處理溫度1,100°C ~ 1,150°C，保持熱處理時間約30分。 | 含部份結晶玻璃，強度大，岩石狀。 |
| 加熱結晶化熔渣 | 先經成份調整，熔液冷卻至650°C再加熱玻璃軟化點，轉移溫度。 | 含結晶化玻璃，強度大，砂狀，碎石狀，岩石狀。可得到針狀結晶的anorthite及β-wolla-stone，用核形成劑取得錯綜複雜均一的狀態，強度、硬度、耐藥性、耐熱性、外觀等都優於結晶化熔渣。 |
| 低溫結晶化熔渣 | 水液渣或退火渣加熱到900~950°C熱處理時間約30分黏著物的成長，滯留時間局部的短縮，出口部閉塞，引起爐操作障礙。須預防水淬熔渣互相粘著，不產生粘著物為進行低溫結晶化的必要條件。 | 結晶化進行，強度大，細砂狀，砂狀，塊狀，碎石狀。 |
| 特殊溶渣 | 風液、發泡等瞬時冷卻。 | 有孔玻璃狀，纖維狀風液渣、發泡渣。 |

3.2 熔渣之材料化及資源化

熔渣依其冷卻方式及材料試驗之規範要求之不同，其資源再利用之範圍亦有所不同，一般而言應用之領域可包括路基材料、混凝土骨材及成形板材等資源再利用範圍，如氣冷熔渣較水冷熔渣適用於路基材料，然亦以機踏車及行人步道等負荷較輕之下層路基材料為宜。因此，不同冷卻方式之熔渣，其基本骨材之應用特性亦有不同，本節即比較說明熔渣之基本骨材特性，以期瞭解未來資源再利用之可行性。

1. 熔渣之基本骨材特性

熔渣經水淬冷形成之水冷熔渣，一般多呈不規則型，對於混凝土應用之工作性較差，且骨材粒度之分佈範圍較窄，在實際應用時須添加細粒料以調整粒度之範圍。表3說明不同熔融爐所產生之水冷熔渣，其基本骨材特性之比較，顯示熔渣之試驗結果，大都符合混凝土用之骨材規範。然根據研究指出水冷熔渣替代部分之混凝土細骨材之試體，其收縮量較一般建築砂為大、保水性較差，且當熔渣替

代比例增加，其於混凝土應用之單位體積用水量將增加約5%~10%。另熔渣替代比例增加，其抗彎及抗壓強度亦逐漸降低(如圖17所示)。氣冷熔渣應用於混凝土骨材，亦須調整粒度，一般利用破碎機前處理，以調整適合粗骨材及細骨材應用。由於氣冷熔渣之內部所含之氣泡較多，然在破碎前處理後氣泡減少，比重及實積率增大，同時增加資源再利用之可行性。研究顯示氣冷熔渣之骨材特性，均可符合混凝土應用規範，其中絕熱比重值較高於水冷熔渣；同時熔渣之替代比率增加，其混凝土強度則有明顯下降之趨勢(如圖18所示)。

表3 水冷熔渣之基本骨材特性

| 骨材性質項目 | 混凝土骨材之規範 | | | | 一般試驗 結果範圍 | 縱型旋回 熔融爐 | 傾斜型旋 回熔融爐 | 表面 熔融爐 | 電弧 熔融爐 | | | | | |
|------------------------------|----------|------|------|------|--------------|-------------|--------------|-----------|-----------|--|--|--|--|--|
| | 粗骨材 | | 細骨材 | | | | | | | | | | | |
| | CNS | JIS | CNS | JIS | | | | | | | | | | |
| 絕乾比重 | -- | -- | -- | -- | 2.68-2.77 | 2.63 | 2.67 | 2.68 | -- | | | | | |
| 表乾比重 | >2.5 | >2.5 | >2.5 | >2.5 | 2.54-2.81 | 2.64 | 2.69 | 2.57 | 2.89-2.92 | | | | | |
| 吸水率(%) | <3.0 | <3.0 | <3.0 | <3.0 | 1.54-2.75 | 0.56 | 0.83 | 0.84 | 0.4 | | | | | |
| 實積率(%) | -- | >57 | -- | >57 | 55-62 | 65.1 | 49 | -- | 60-67 | | | | | |
| 安定性(%) | -- | 10 | -- | 10 | 2.1-10.7 | 1.4 | -- | -- | -- | | | | | |
| 單位容積重 (T/M ³) | -- | -- | -- | -- | 1.56-1.71 | 1.71 | 1.31-1.47 | 1.31 | 1.66-1.73 | | | | | |
| 磨損率(%) | <50 | <30 | <35 | <40 | -- | -- | -- | -- | -- | | | | | |

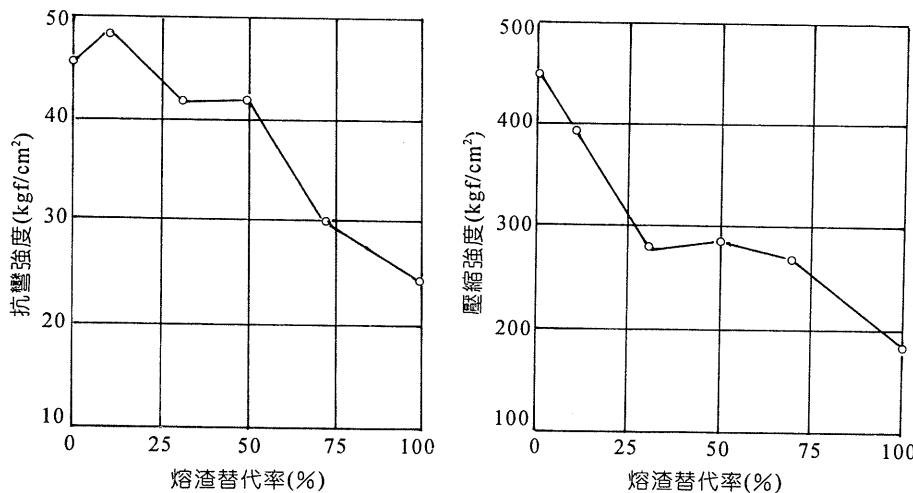


圖17 水冷熔渣替代細骨材對抗彎及壓縮強度之影響

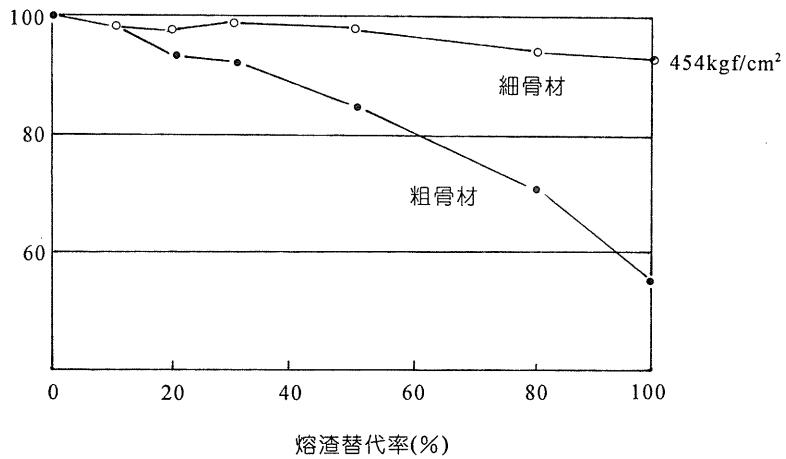


圖18 氣冷溶渣替代混凝土細骨材對強度之影響

至於低溫及保冷結晶化熔渣之骨材特性，其中低溫結晶化熔渣由於細粒料(<0.6 mm)之分佈較小，未來應用亦須進行粒度調整之前處理；另若熔渣中之含鐵量較高，則在混凝土應用時，表面可能有鐵锈產生之可能，而影響混凝土製品之品質。保冷熔渣之結晶化程度較低溫熔渣為高，其表面性能及強度均有增加，亦明顯增加骨材應用之可行性。然其與細骨材標準粒度比較，未來應用仍須適當調整粒徑之分佈。

2. 熔渣之用途⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

一般而言，熔渣之用途主要依其冷卻方式之不同，其應用之範圍亦有所差異，最常應用於路基材料、透水材料、過濾材料、混凝土骨材及混凝土二次製品材料等。表4即說明水冷及氣冷熔渣應用於建設資材之各項用途，由表中可知，隨不同之熔渣種類，其應用範圍皆有不同之限制⁽¹⁹⁾。

(1) 路基材料：水冷熔渣多呈非晶質細粒，強度較低，與道路用碎石之規範比較，部份性質不適用，而且水冷熔渣表面光滑，施工性較差，須進一步結晶化。因此，一般而言，水冷熔渣可用於下層路盤材，且熔渣之替代比率須小於20%。氣冷熔渣雖較水冷熔渣適用於路盤材，但其表面光滑亦以使用於機踏車及行人

步道負荷較輕之場所為宜。至於保冷熔渣，其材料性質均優於氣冷熔渣，應用於現場路盤材之試驗結果，與天然碎石之性能相似⁽²⁰⁾。

表4 熔渣之用途

| 利 用 方 法 | 利 用 內 容 |
|---------|---|
| 建設資材 | • 水冷熔渣可做為下層路盤材，而熔渣替代率必須在20%以下。 • 空冷熔渣可做為一般道路之下層路盤材，亦可做輕交通道路（自行車與人行道等）之上層路盤材。 |
| | • 水冷熔渣的均等係數須在4~5以下，且其粒徑為粒徑累積曲線通過率10%時所對應的值。 |
| | • D_{10} 須在0.6~1.0cm之間，且透水性佳者，可做為透水材及集水過濾材。 |
| | • 水冷熔渣可做為步道與車道間的分界磚，亦可做為混凝土磚的細骨材（熔渣替代率須在50%以下）。 |
| | • 空冷熔渣與結晶化熔渣之用途，以低強度的混凝土為例，包括小型構造物之混凝土細骨材等。 |
| | • 水冷熔渣可做為互鎖磚基層部的細骨材（熔渣替代率須在50%以下）。 |

(2)混凝土細骨材：水冷熔渣應用於混凝土細骨材，經水泥砂漿試體之試驗結果，其壓縮強度約為天然骨材之60%~80%，彎曲強度則約為80%~90%。另熔渣替代細骨材製成混凝土比率，經研究顯示替代比率增加，其抗壓強度明顯降低，最大熔渣置換率為50%。氣冷熔渣之應用，則較水冷熔渣為佳，其中抗壓強度約為天然碎石之76%~90%，抗彎強度則達天然碎石之85%~95%，然其應用仍以低強度及小規模之混凝土構造物為主。至於低溫結晶化熔渣替代混凝土細骨材之應用時，其抗壓強度約為一般混凝土之80%~90%，抗彎強度則為95%~106%，同時混凝土強度可達 200 kg/cm^2 。而保冷熔渣之抗壓強度則與天然碎石相當。

(3)混凝土二次製品原料：應用於混凝土二次製品原料，主要包括小口徑之下水道管渠、污水人孔之骨材應用等，其中細骨材之替代比率最大為50%。

(4)透水材料及組合式人行道磚：一般而言，熔渣可應用於組合式人行道磚，其細骨材之最大替代比率為50%，且人行道磚之抗壓強度應在 45 kg/cm^2 以上，至於透水材料之應用，目前以水冷熔渣之應用較為廣泛。

四、熔融處理系統規劃及可行性評估

4.1 熔融處理系統之規劃

熔融處理系統係由計量設備、前處理設施、進料供給設備、熔融爐、熔渣排出及輸送設備，貯存設備及廢氣處理設備等組成。

1. 計量設備

熔融處理系統所採用之計量設備，須具有迅速測定及高穩定性，必要時須具有自動記錄裝置。一般而言，計量設備可包括磅秤、計量器、傳輸裝置及記錄器等；其中計量器依其傳輸裝置之不同，分為機械式（槓桿式）、電子式及兩者併用式三種；同時為提高計量管理之效率，可採行中央資料處理系統來處理及貯存數據。經由正確之計量，可有效了解及掌握處理之污泥或其灰渣量及產生之熔渣量等資料，以提供熔融廠操作運轉之參考。

2. 前處理設施

為提高污泥或其焚化灰渣熔融處理之效率，及增加熔渣資源再利用之可行性，必要時可設置乾燥機、破碎機、磁選機及振動篩等含水率及粒度調整用之前處理設備，以使其破碎調整至適當大小，並篩除含鐵物質。表5說明不同熔融爐對污泥熔融之前處理要求，其中對於污泥含水率及粒徑調整尤為重要。

表5 不同熔融爐前處理要求

| 熔融爐型 | 前處理要求 | 其他 |
|--------|---|----------------|
| 表面熔融爐 | 1.含水率在20%以下 2.粒徑控制對熔融面之形成極為重要 3.以破碎機、磁選機及振動篩進行前處理 | 金屬必須利用磁選機預先去除。 |
| 旋回流熔融爐 | 1.含水率在20%以下 2.適當旋回速度約15m/sec；最適平均粒徑約200 μm 。 | |
| 焦炭熔融爐 | 1.含水率約在40% 2.若粒徑太小，易造成粉塵飛散，熔渣形成率低可利用造粒成型改善。 | 利用熔融爐之熱源預熱出渣口。 |
| 電阻式熔融爐 | 1.含水率平均約在20%以下 | |
| 電弧式熔融爐 | 1.使用破碎機將粒徑調整至小於200 μm ；最適粒徑約在100 μm 。 | 磁選去除金屬類物質。 |

3.進料及熔渣排出設備

進料及熔渣排出設備均會影響熔融處理之功效，而兩者同屬於固體物料輸送之設備，因此，其具有相似的功能需求與操作維護的方式。一般而言，常見之進料設備除進料斗外，尚包括螺旋(screw)供給器及旋轉(rotary)供給器等，而灰渣排出設備，則包括皮帶式輸送機(belt conveyor)、皺褶帶式輸送機、螺旋式輸送機及鏈式輸送機等。

對於進料式輸送機之要求，除需能夠連續且定量之供給外，尚須滿足以下要求：

- (1)為使污泥或其焚化灰渣能夠定量進入前處理設施，須在輸送機上部設置調整供給量裝置。
- (2)構造簡單，維修容易。
- (3)要設有防止污泥或其灰渣落下及逸散之設施。
- (4)設置輸送帶超過負荷之警報及緊急停止裝置。

4.污泥熔融處理計畫評估

污泥熔融處理設備依供給燃料及電氣之方式不同，可分為表面熔融爐、內部熔融爐、焦炭床熔融爐、旋轉窯熔融爐、電弧式熔融爐、電阻式熔融爐、電漿式熔融爐及電熱式熔融爐等種類。在評估選擇污泥熔融處理時，應考量之因素包括(1)污泥資源化及減量化之對策(2)污泥或其灰渣熔融技術之引進(3)熔渣之資源再利用，以及(4)熔融處理熱能之來源。同時對於評估不同之污泥或其灰渣熔融爐時，除須依據相關技術評估外，仍須依實廠規模建造之可行性、承造業者之信用度、工程經驗、維護管理制度及技術層面等詳加評估⁽²¹⁾。

5.貯存設備

貯存設備之容量應考慮熔渣的產生量及搬出量，以便於貯運之作業管理。

6.後處理設備

在污泥或其灰渣熔融處理系統，後處理設備主要包括防止重金屬揮發及粉塵逸散之處理設備；亦即處理系統應考慮設置廢氣處理設施。

7.其他設備

其他設備隨使用之污泥或其灰渣熔融爐型式、熔渣冷卻之方式、或採用之廢氣處理程序之不同，而有不同的設備設置；如熔渣採水冷式者，須設置冷卻水

槽；若採用乾式廢氣處理程序，則須設置消石灰貯槽；或考慮去除氮氧化物，則可增加設置脫硝反應槽等。

4.2 熔融處理技術之評選

1. 技術評選程序

評選熔融處理技術，除考慮處理技術之效率外，亦須確保人體健康與環境之安全，同時兼顧熔融處理可能產生之二次公害防治。一般而言，熔融處理系統的評估與選擇程序可包括：

- (1)確定熔融處理系統建立的基本要求與處理目標。
- (2)對於所有可能應用的熔融處理技術進行評估研選。
- (3)篩選出符合基本要求與處理目標的處理技術，並進行設施系統之基本設計組合。
- (4)建立技術評選之合理規範。
- (5)根據評選規範，選擇最佳之熔融處理技術。

2. 技術評選方法

對於熔融處理技術之評選，基本上應考慮下列之相關因素。

(1) 系統處理效率

為使污泥或其灰渣高溫熔融處理達到灰渣資源再利用及無二次公害產生之目的；對於熔融系統處理性能之評估，應考慮以下之因素：

- ①有效處理程度：熔融處理系統評選最主要的目的，即是要達到污泥或其灰渣最有效之處理效率，因此整體熔融處理系統與其他配合設備選擇上，應考慮熔融處理設備之有效處理能力。
- ②能源、化學藥劑及公共設備等之有效使用率：較少之能源消耗及妥善利用公共設備，可有效降低處理成本，亦可減少對環境的衝擊。因此，熔融處理如何有效降低能源之消耗，及配合焚化處理系統，將是未來研選熔融處理系統之參考。同時化學藥劑之添加，亦須考量其是否具有化學毒性及增加最終處置之困擾。
- ③熔渣數量與特性：所選擇之處理系統應使熔渣之產量降至最低，亦即期能達到最佳之減容減量效果，同時熔渣之有害特性亦須審慎評估。
- ④資源再利用特性：考量熔渣未來資源再利用之可行性，對於未來可能應用之範圍，均需測試並符合相關之規範要求。

⑤應用實績：對研選之熔融處理設備，應考慮應用實績以及其操作性能。

(2)系統安全性：

污泥或其灰渣熔融處理，須考量熔融處理系統之一般性工業安全問題(如系統操作安全)，更應對周遭環境之衝擊列入考量，包含自然環境及人文環境。因此，對於處理系統之安全考慮因素包括：

- ①工作危險度：熔融處理因其高溫操作且涉及有害性等問題，操作之安全性更顯重要。其中工作危險之評估，主要包括高溫爐體的操作、高溫管線之配製、塵粒、煙氣之洩漏、廢棄物之直接接觸、噪音傷害及緊急狀況等。
- ②環境危害度：熔融處理系統之正常運轉與否，對環境具有潛在之危害影響；其中二次污染物之排放，對環境之衝擊影響最為顯著。因此，設備之研選亦須詳加審慎評估處理系統之整體性。

(3)操作彈性度

- ①污泥或其灰渣種類與特性：了解待處理污泥或其灰渣之物化特性，有助於研選評估熔融處理之各處理單元設備。
- ②污泥或其灰渣處理量：此與系統之承載能力有關，亦即根據常態污泥或其灰渣量之變化範圍，可決定系統容量與操作負載能力。

(4)技術可靠性

熔融處理系統之可靠性，主要取決於所選用之組合系統技術之成熟度與維修之難易度。同時對於處理設備之穩定性與耐久性，亦是評估選擇之重點：

- ①技術成熟度：可參考國內外使用之層次與普及率。
- ②維修難易度：包括備用材料取得之難易度。
- ③系統穩定性：包括正常操作及降載操作時之運轉。
- ④緊急停爐及降載對系統之損害程度。

(5)操作因素

現場操作之難易度（或人為操作難易），對於熔融處理設備是否順利運轉極為密切；一般而言，處理設備之操作大多以自動化及簡單化作為設計之基準。

- ①複雜性：處理設備應降低複雜程度，減少操作運轉變因，以利人員操作，同時易於維修。
- ②自動化：自動化操作運轉，可減少人為之疏失，降低處理成本。未來熔融處理設備之選擇，尤須考量污染物排放及緊急停爐系統之自動控制。

(6)成本因素

應包括土地成本、設備成本、操作成本及建設成本等，同時亦須評估考量未來熔渣資源再利用之效益等項目。未來在研選熔融處理設備時，應先從技術、環境、操作及資源再利用等方面考量，再評估其成本因素，以增加投資效益。

4.3 可行性評估之探討

本文對於未來興建熔融處理廠之可行性評估，主要根據國外實廠或模廠處理焚化灰渣之操作運轉經驗，初步就不同熔融處理設備之技術成熟度、減容效果、熔渣有害性、資源再利用及處理成本等特性進行評估，期提供未來污泥或其焚化灰渣熔融處理設備研選評估之依據。

1.技術成熟度

歐、美、日等國家對於焚化灰渣資源再利用之研究不遺餘力，舉凡重金屬之萃取回收、水泥固化、熔融處理等，均是各國研究之重點。其中尤以日本對於污泥及焚化灰渣熔融處理之研究最多，不論是從實驗室、模廠，甚至實廠之操作運轉，以及未來熔渣之資源再利用，均有相當之成果與經驗。根據文獻資料顯示⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾，日本在熔融爐之實廠應用實績，截至1995年之統計資料，目前日本已完成運轉之實廠焚化灰渣熔融爐共計17座，其中以表面熔融爐佔實廠應用實績總數之53%，其次為電弧及焦碳床熔融爐各佔17.6%；其它實廠應用實績之熔融爐，尚包括電漿熔融爐及內部熔融爐各佔5.9%。熔融爐之操作規模，依其處理灰渣之性質、數量及種類而異，規模介於10噸/日至500噸/日之間，其中以日本東京1991年設置之電弧熔融爐規模500噸/日最大；至於仍在模廠測試階段之熔融爐，則以電漿熔融爐佔25%最多，其次則以電阻熔融爐及燃燒加熱熔融爐各佔16.7%。

根據上述熔融爐實廠應用實績及模廠試驗階段之比較結果，說明八種不同熔融爐型之技術發展狀況(如表6)，結果顯示在實廠應用實績方面，以表面熔融爐之發展技術較為成熟，其次為電弧及焦碳床熔融爐，至於電漿熔融爐及內部熔融爐則具有發展之潛力。

2.減容效果之比較

根據文獻顯示，灰渣熔融處理後之減容效果，雖隨不同熔融爐型而異，然其減容效果約可達到20%左右。小島(1993)研究焚化灰渣熔融處理後體積之變化率，結果顯示焦碳床熔融爐因處理過程須添加焦碳與石灰石，因此其減容效果較

不明顯，而低週波電氣熔融爐之減容效果較其他爐型為佳；至於表面熔融爐、電弧熔融爐、電漿熔融爐及電阻式熔融爐等之減容效果，大致均維持在20%⁽²¹⁾。因此，在減容效果之比較評估，除焦炭熔融爐之減容效果不明顯外，餘不同熔融爐型均可達到預期之效果。

表6 依其應用實績初步評估不同熔融爐型之技術成熟度

| 爐型 | 技術較為成熟 | 具有發展潛力 | 尚在模廠或實驗階段 |
|---------|--------|--------|-----------|
| 表面熔融爐 | V | | |
| 電弧熔融爐 | V | | |
| 焦炭熔融爐 | V | | |
| 電漿熔融爐 | | V | |
| 內部熔融爐 | | V | |
| 電阻熔融爐 | | | V |
| 旋回流熔融爐 | | | V |
| 燃燒加熱熔融爐 | | | V |
| 低週波誘導式 | | | V |

3. 熔渣有害性之評估

熔渣之有害特性將影響後續熔渣資源再利用之可行性。因此，本文將依熔渣之重金屬溶出濃度之結果，進行有害性評估。根據表7之熔渣重金屬溶出特性之結果，不論熔融爐之使用形式，或是不同焚化灰渣來源所產生之熔渣，其重金屬溶出濃度，多數仍符合相關之法規要求，可見熔融處理後之熔渣，均可達無害化之要求⁽²²⁻²⁷⁾。

表7 熔渣有害性(重金屬溶出濃度)評估比較⁽²²⁻²⁷⁾

| 重金屬 | Pb | Cd | Cr ⁶⁺ | Hg | As | Se | 評估結果 |
|--------|------|-------|------------------|---------|--------|-------|------|
| 表面熔融爐 | <0.2 | <0.02 | <0.002 | <0.0005 | <0.005 | — | 佳 |
| 電弧熔融爐 | 0.3 | 0.01 | <0.02 | 0 | 0.09 | <0.07 | 佳 |
| 焦炭熔融爐 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | — |
| 電漿熔融爐 | <0.1 | <0.01 | <0.05 | <0.0005 | <0.01 | — | 佳 |
| 內部熔融爐 | <0.1 | <0.01 | <0.01 | <0.0005 | <0.01 | — | 佳 |
| 電阻熔融爐 | <0.1 | <19 | <0.04 | <0.0005 | <0.054 | <0.02 | 佳 |
| 旋回流熔融爐 | 0.1 | 0.01 | 0.01 | 0.0005 | 0.01 | — | 佳 |
| 日本法規標準 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.0005 | 0.01 | 0.01 | — |

n.a.:not available.

4. 熔渣資源再利用特性之比較

根據表8不同熔融處理設備之熔渣資源再利用特性，可知不論所使用之熔融爐型式，其熔渣之比重介於2.65~3.1之間，吸水率為0.06%~2.07%，修正CBR值介於18~99間，均符合道路骨材應用規範，具有資源再利用之價值⁽²²⁻²⁷⁾。

表8 熔渣資源再利用特性之比較⁽²²⁻²⁷⁾

| 項目 | 比重 | 吸水率 (%) | 磨損率 (%) | 修正CBR (%) | 單位重 (T/m ³) | 抗壓強度 (Kg f/cm ²) | 安定性 (%) |
|--------|---------|----------|---------|-----------|-------------------------|------------------------------|---------|
| 表面熔融爐 | 2.69 | 0.61 | — | — | 1.59 | — | — |
| 電弧熔融爐 | — | <0.1-0.4 | 68 | — | 0.08 | — | — |
| | 3.178 | 1.0 | — | 24 | — | — | — |
| 焦炭熔融爐 | 2.87 | 0.81 | — | 18 | 1.67 | — | 2.3 |
| 電漿熔融爐 | 2.65 | 2.07 | — | 49 | — | — | 0.6 |
| 內部熔融爐 | 3.0-3.1 | — | — | — | — | 300 | — |
| 電阻熔融爐 | 2.68 | 0.06 | 34.1 | 99 | — | — | <1 |
| 旋回流熔融爐 | 2.74 | — | — | — | — | 300 | — |

5. 處理成本之初步評估

本文依據國外熔融爐處理焚化灰渣之操作運轉等相關資料，初步計算不同熔融爐處理焚化灰渣所需之費用，其中探討之處理費用項目包括操作費用、能源電力費用、設備維護費用等項目；至於建廠所需之土地成本及土木工程建設成本則因受不同廠址土地價格之差異，勞力及材料來源等因素影響，本研究中處理成本之評估，暫不將上述兩者成本列入考量，僅先針對能源消耗之操作成本作為處理成本之初步評估依據，期能作為未來研選熔融處理之參考。

根據文獻資料之結果，本研究對於操作成本之估算，係假設物價波動指數每年均維持在3%，並經換算為同年之基準（1997年），作為判定操作成本之參考；同時幣值之換算亦根據目前之匯率作為基礎。結果顯示不同熔融爐型，因其使用燃料及電力來源之不同，其所需之操作成本亦有明顯之差異；由表9操作成本之估算結果，其中以旋回流式熔融爐之費用較低，其餘依次分別為電阻式、焦炭床式、表面式、電漿式、電弧式及燃料式熔融爐。

表9 不同熔融爐操作費用之估算

| 爐型 | 年代 | 燃料或電力成本 | | 總額 (元/噸乾灰) | 1997年成本* ¹ (元/噸乾灰) | 原幣值 | 新台幣* ² | 評估 排序 |
|--------|------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------|----------|
| | | 燃料或電力使用量 (KWh/噸乾灰) | 燃料或電力使用費 (元/KWh) | | | | | |
| 表面熔融爐 | 1992 | — | — | 7,000-20,000(日元) | 7,879-22,510(日元) | 1,970-5,628 (3,799) | 4 | |
| 電弧熔融爐 | 1993 | — | — | 18,600(日元) | 20,935(日元) | 5,234 | 6 | |
| 焦炭熔融爐 | 1992 | — | — | 10,000(日元) | 11,255(日元) | 2,814 | 3 | |
| 電漿熔融爐 | 1992 | 1,152-1,440 | 10.68(日元) | 12,303-15,379(日元) | 14,263-17,828(日元) | 3,566-4,457 (4,012) | 5 | |
| 旋回流熔融爐 | 1992 | 150 | 15 (日元) | 2,250(日元) | 2,608(日元) | 652 | 1 | |
| 燃料熔融爐 | 1992 | 520升/噸灰 | 35 日元/升 | 18,200(日元) | 21,099(日元) | 5,275 | 7 | |
| 電阻熔融爐 | 1993 | — | — | 8,000 | 9,004(日元) | 2,251 | 2 | |

*¹: 1997年之成本計算方式係假設每年之物價波動指數為3%*²: 操作成本之比較基準係以1997年之新台幣數值為準，其中幣值之匯率為1日元= 0.25元新台幣

6. 綜合評估

根據上述之初步評估結果，不同熔融爐型依其技術成熟度（實廠應用實績）、熔渣之減容及無害效果、資源再利用特性、以及操作處理成本等，初步綜合評估如表10所示。由表10之比較結果可知，在技術成熟度之評估結果，以表面熔融爐、電弧熔融爐及焦炭熔融爐目前應用於實廠操作最為廣泛，而上述爐型之操作費用，則以焦炭式熔融爐較低，其次則為表面熔融爐，至於電弧式熔融爐之操作費用則較高。同時電漿式熔融爐雖具有未來發展潛力，然其亦具有操作費用較高之缺點。至於操作成本較低之旋回流及電阻式熔融爐，則因其尚在實驗室和模廠之試驗階段，因此，未來仍有待更進一步的實廠操作運轉之結果相互驗證。綜合以上之比較結果，初步評估未來表面熔融爐及焦炭床熔融爐應用於灰渣處理較為廣泛，而電弧式熔融爐及電漿式熔融爐，除能源消耗成本較高外，未來亦具有發展之潛力。

表10 不同熔融爐可行性初步綜合評估

| 爐型 | 技術成熟度 | 熔渣減容效果 | 熔渣無害化 | 資源再利用特性 | 操作處理成本 (元/噸乾灰) |
|---------|-------|--------|-------|---------|-------------------|
| 表面熔融爐 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | 3,799 |
| 電弧熔融爐 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | 5,234 |
| 焦炭熔融爐 | ◎ | ○ | ◎ | ◎ | 2,814 |
| 電漿熔融爐 | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | 4,012 |
| 內部熔融爐 | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | — |
| 電阻熔融爐 | △ | ◎ | ◎ | ◎ | 2,251 |
| 旋回流熔融爐 | △ | ◎ | ◎ | ◎ | 652 |
| 燃燒加熱熔融爐 | △ | ◎ | ◎ | ◎ | 5,275 |

◎：佳；○：次佳；△：尚可

五、結論與建議

本文探討污泥熔融處理技術、熔渣之資源再利用技術、未來熔融處理系統規劃及可行性評估，初步歸納之結論如下：

- 1.根據技術發展之成熟度、處理處置之費用、熔渣長期穩定性及資源再利用等特性之綜合探討與評估，污泥之熔融處理具有極佳之減容效應、無害化效果及資源再利用性。
- 2.根據資料顯示，熔渣之重金屬鉛、鎘、鉻、銅及鋅之溶出濃度，均可符合法規管制標準，達到無害化之要求。同時熔渣之吸水率、單位重、比重及磨損率等特性，亦可滿足相關材料應用之規範要求，達到資源再利用之目的，若能配合未來熔渣市場之開發，其資源再利用性極大。
- 3.常用之灰渣熔融主要設備，包括有表面熔融爐、內部熔融爐、焦碳床熔融爐、旋轉窯熔融爐、電弧式熔融爐、電阻式熔融爐、電漿式熔融爐及電熱式熔融爐等八種。其中部份熔融爐已有商業化實廠之應用實績，而多數之熔融爐型則仍在實驗室或模廠之試驗階段。本文根據不同爐型之技術成熟度（實廠應用實績）、熔渣減容及無害化效果、資源再利用特性、處理成本以及設備成本等進行適用性之評估。初步評估結果顯示，以表面熔融爐及焦碳床熔融爐應用較廣，適用性最大；而電弧式及電漿式熔融爐若能配合焚化廠之興建，降低其能源消耗成本，將來亦具有相當之發展潛力。
- 4.對於污泥熔融處理而言，未來台灣地區尚待建立完整之下水污泥及工業污泥等數量與特性之背景資料。同時配合進行相關之模廠實驗，以掌握熔渣之特性及再資源化之市場性，達到污泥處理及資源再利用之目的。
- 5.未來針對熔渣作為骨材應用之產品，建議就應用規範及其他不同用途，進行實作分析試驗，以確立其市場價值。

參考文獻

- 1.行政院環境保護署，事業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，民國83年。
- 2.鈴木守也，電氣溶融爐による都市ごみ焼却飛灰の溶融，廢棄物學會論文誌，Vol.7，No.1，pp.18-27,1996。
- 3.東 康夫、鈴木富雄、清水由章、山田基夫，都市ごみ焼却灰のプラズマ溶融特性，廢棄物學會論文誌，Vol.7，No.4，pp.193-201,1996。

- 4.佐佐木邦利，下水汚泥の溶融システムの評價に関する第一次報告書の解説，下水道協会誌，Vol.26，No.307，pp.30-34,1989。
- 5.魏銘彥，有害廢棄物的高溫鎔渣焚化，第六屆廢棄物處理技術研討會論文集，第259-265頁，中壢，1991。
- 6.福本勤著，賴耿陽編譯，廢棄物處理工學，復文書局，台南，1985。
- 7.陳宏銘，都市下水污泥熔融特性之基礎探討，碩士論文，國立中央大學環境工程學研究所，中壢，1992。
- 8.王鯤生，焚化灰渣與污泥共同熔融固化處理操作特性之研究，國科會研究計畫報告，NSC82-0421-E-008-081-Z,1993。
- 9.王鯤生，焚化灰渣熔融處理操作特性之研究，國科會研究計畫報告，NSC81-0410-E-0081,1992。
- 10.詹孟賛，都市下水污泥熔渣細骨材利用可行性之探討，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，中壢，1995。
- 11.村上忠弘，石田貴榮，污泥熔融に係る指標の検討，下水道協会誌，Vol.26，No.307，pp.35-40,1989。
- 12.Wey, M. Y., Degreve, J., and Van Rompay, P., Simulation of a Slagging Incineration Process, Computers Chem. Engin, Vol. 15, pp.297-304,1991.
- 13.Makoto, H., and Eiji, S., Solidification of Heavy Metal-containing Sludges by Heation with Silicate , Toxic and hazardous waste disposal, Vol.3, Ann Arbor Science , pp.141-154,1981.
- 14.關一洋，旋回溶融爐一千葉市，下水道協会誌，Vol.26，No.307，pp.41-46,1989。
- 15.奥野長晴，山田昭捷，吉田憲一，下水汚泥ケーキを原料とする溶融技術の開発，下水道協会誌，Vol.24，No.276，pp.75-88,1987。
- 16.大石寛道，溶融スラグの路盤材利用，下水道協会誌，Vol.27，No.315，pp.25-29,1990。
- 17.一島博，溶融スラグのインターロッキングブロック利用，下水道協会誌，Vol.27，No.315，pp.30-34,1990。

- 18.佐佐木 邦利，溶融スラグのコンクリート骨材利用，下水道協会誌，Vol.27，No.315，pp.35-39,1990。
- 19.東京都三多摩地域廃棄物廣域處分組合，都下、三多摩廣域ブロック割焼却残渣溶融設施建設建設計畫，都市と廃棄物，Vol. 23，No.7，pp.37-50,1993。
- 20.大鳩吉雄，増田隆司，下水汚泥溶融スラグの有效利用，下水道協会誌，Vol.26，No.307，pp.21-29,1989。
- 21.小島一郎，焼却残渣の熔融技術の現状と課題，都市と廃棄物，Vol.23. No.5，pp.92-107,1992。
- 22.株式會社タクマ，焼却灰處理表面溶融爐，環境技術，Vol.21，No.4，pp.248-249,1992。
- 23.Hollander, H.I., Plumley, A.L., DeCesare, R.S., ASME/US Bureau of Mines Investigative Program on Vitrification of Combustion Ash Residue: Findings and Conclusion, Journal of Hazardous Materials, Vol.47, pp.369-381,1996.
- 24.株式會社クボタ，都市ごみ焼却残渣の溶融處理について，環境技術，Vol.21，No.4，pp.243-245,1992。
- 25.荏原インフィルコ株式會社，プラズマトーチによる焼却灰の溶融處理，環境技術，Vol.21，No.4，pp.238-242,1992。
- 26.石川島播磨重工業株式會社，都市ごみ焼却灰の溶融裝置，環境技術，Vol.21，No.4，pp.234-237,1992。
- 27.Nakao, T., Nakahara, K., Akashi, T., Electric-resistance Furnace for Melting Ash from Municipal Solid Waste Incineration, Proceedings of the Air and Waste Management Association's 90th Annual Meeting & Exhibition, Toronto, Canada, June 8-13.