

污泥處理技術

有機污泥水解前處理技術

邱創汎*、洪仁陽*、游惠宋*、吳漢松**

摘要

目前國內每天約有1,000噸(乾重)有機污泥產出，大部份採用掩埋，少部份採用焚化處理。由於有機污泥中蘊含大量資源，國外已大力推動資源化運用。污泥資源化利用時，污泥的前處理就成為影響處理成效的關鍵。污泥水解是最常用的污泥前處理步驟，污泥水解可以改善污泥脫水性、提昇厭氧消化槽效率、減少污泥量，對資源化非常有幫助。本報告介紹最近挪威開發的蒸汽水解技術，並以焚化的熱平衡為例，說明污泥水解對整體程序的助益及重要性，提供國內工廠參考。

【關鍵字】

1. 污泥(sludge)
2. 水解(hydrolysis)
3. 廢水處理(wastewater treatment)
4. 焚化(incineration)

*工業技術研究院化學工業研究所研究員

**工業技術研究院化學工業研究所副研究員

一、前　　言

國內污染防治相關措施中，以水污染防治起步最早，也最具成效。但是由於早期努力的焦點大多集中於放流水水質的提昇，對於伴隨廢水處理過程產生的污泥處理則普遍未受到重視。現在由於政府對污染進行全面性管制，如何妥善的處理廢水處理場產生的污泥就成為工廠最關心的問題了。

廢水處理場產生的污泥大致上可以分成有機及無機等兩類，其中以有機污泥為大宗。所謂有機污泥是指有機成份高的污泥，例如都市污水處理場的初沉污泥、廢水生物處理槽的廢棄生物污泥、養豬場固液分離後產生的污泥等等。根據各工廠申報的資料，目前全省列管事業廢水處理場每日所產生之一般廢棄污泥量總計約 10,187 Ton/day⁽¹⁾，其中包括無機化學污泥及有機污泥。另根據行政院環保署的資料顯示台灣地區廢水中有機污染物之產生量分別為：列管之工業廢水約 2,200 噸 BOD/日，畜牧（養豬）廢水約 1,000 噸 BOD/日，市鎮污水約 825 噸 BOD/日，總量約 4,000 噸 BOD/日。目前約有 65% 的工業廢水、52.5% 的養豬廢水及 13% 的市鎮污水已經過妥善處理再行排放⁽²⁾。國內大部份廢水處理場目前採用好氧生物處理法去除廢水中的有機物；養豬廢水普遍採用厭氧處理作為前處理，厭氧出流水再以好氧處理，厭氧約去除 80% 有機物，好氧去除殘餘的 20%。一般厭氧及好氧污泥產率分別為 0.05 及 0.45 kgSS/kgBODr，則由以上資料推測，目前台灣地區每日約有 760 噸之生物污泥產生，再加上廢水處理場初級沉澱池產生的有機污泥，保守估計台灣地區每天的有機污泥產量在 1,000 Ton DS/day (DS:Dry Solid) 以上，若以污泥脫水後，含水率為 85% 計算，有機污泥餅的總量約為 7,000 Ton WS/day (Wet Solid)。若以有機污泥產生量為 7,000 Ton/day 計算，約為台灣地區垃圾清運量的 29%，其重要性不可忽視。未來廢水妥善處理率提高，有機污泥產生量會再增加，益形重要。

由於有機污泥主要由有機質組成，若是未經妥善處理，任意棄置，很容易腐敗產生惡臭並釋放出有機物，進而對環境造成不利影響，並使廢水處理成效大打折扣。對於有機污泥目前國內大部份工廠是採用委託代處理業進行掩埋處理，少部份工廠設置焚化爐自行焚化處理。根據瞭解，每噸污泥餅處理費用約為 500~2,000 元不等。

先進國家對於掩埋場設置條件及污泥焚化爐排氣之空氣污染管制法規要求相當嚴格，造成污泥處理費用遠高於國內，據報告國外每噸污泥餅焚化費用約在4,000元台幣以上，且此一費用仍然節節升高，污泥處理費用已成為廢水處理場沉重的負擔，所以國外對於污泥的處理已朝向：(1)如何將污泥資源化利用及(2)如何經由減廢及前處理，降低污泥處理、處置的費用，兩個方向努力。

對於有機污泥資源化而言，國外主要是朝向土壤利用及熱源回收兩個方向進行。在土壤利用方面，以美國為例⁽³⁾，約有46%的污泥經由土壤利用的途徑資源化（其他54%分別為焚化16%、掩埋38%）；英國也有50%以上的污泥經由土壤利用資源化⁽⁴⁾。

在熱源回收部份，因為有機污泥內含有機物，是屬於高熱值的物質，所以可經由焚化、熱裂解、厭氧消化等方式直接產生熱源或是產生燃料，達到資源化的目的。尤其是厭氧消化部份，技術成熟且價格便宜，幾乎已成先進國家污泥處理流程中，必備的一環。

無論採用何種方式進行污泥的資源化，在資源化之前，污泥都必須經過適當的前處理，才能順利進行後續處理處置，發揮後續處理的功能。在前處理單元，除熟知的濃縮、脫水之外，污泥水解是國內比較少用，但事實上是污泥資源化的關鍵步驟。以厭氧消化而言，污泥水解反應往往是消化槽的速率決定步驟，污泥若能在進入消化槽之前加以水解，不但可以減小消化槽的體積，更能提昇污泥的消化率。以焚化而言，能否產生能源與污泥餅含水率高低有絕對關係，污泥水解可以改善污泥的脫水性，水解之後的污泥再去脫水，產生的污泥餅，含水率降低，使焚化爐熱能可以維持自燃或產出能源。污泥水解對污泥土壤利用也有很大幫助，污泥若能先行水解、厭氧消化之後，除能回收能源之外，消化之後的污泥再施用於土壤，可以有效避免產生惡臭、污染水源等二次公害。

國內由於污泥處理仍停留於“廢棄物處理”的階段，且委外掩埋費用仍然非常低廉，所以對於污泥前處理技術也相對忽視，但由歐美國家的經驗，可以預測未來隨法規管制日趨嚴格，污泥處理費用必定逐年攀升，可預期污泥前處理的重要性也會日益上升。本報告介紹挪威新近發展出來的有機污泥蒸汽水解技術，並以焚化為例，說明污泥水解、消化對於後續焚化處理的重要性，以提供國內工廠參考。

二、污泥水解

2.1 有機污泥特性

有機污泥隨來源不同，性質不盡相同。以廢水處理場產生的有機污泥為例，主要的有機成份包括碳水化合物、脂肪、蛋白質等。這些有機物的熱值如表1所示。其中脂肪熱值最高，而碳水化合物最低。

表1 有機物及污泥熱值⁽⁵⁾

| 有機物種類 | 熱 值 |
|-------|--|
| 脂 肪 | 39,500 kJ/kg |
| 蛋白質 | 23,600 kJ/kg |
| 碳水化合物 | 17,200 kJ/kg |
| 有機污泥 | 18,800 - 32,100 kJ/kg combustible material |

Baevens and Puyvelde (1994)⁽⁷⁾建議，污泥中有機成份可以用 $(CH_{1.65}O_{0.34}N_{0.1})_m$ 作為代表。Gale (1972)針對脫水後有機污泥中各種可燃成分進行分析，其結果如表2中所示。其中C、H及O為燃燒之熱值來源，而N、S及Cl經燃燒後會形成NOx、SOx及HCl，必須再經過處理後始能排放，以避免造成二次空氣污染問題。

表2 脫水後污泥餅中各種可燃成分(以乾基計)

| 成分 | C | H | N | O | S | Cl |
|-----|-------|-----|-----|-------|-----|---------|
| (%) | 23~27 | 3~5 | 2~4 | 17~18 | 0.8 | 01~0.14 |

2.2 污泥水解

污泥水解是相當常用的污泥前處理單元，具有改善污泥脫水性、增加後續處理單元的效率的功能。污泥水解可以分成熱水解及化學水解兩種，前者是以加熱的方式，使污泥在高溫的環境下，溶出有機物或是釋出細胞內的水份；化學水解則是以加酸或加鹼，達到破壞污泥結構，釋出有機物及結合水的目的。熱水解或化學水解只是污泥的前處理步驟，污泥水解具有促進污泥混凝、破壞膠體、增加污泥脫水性等功用⁽⁶⁾。

水解之後的水解污泥有許多後續處理方式，圖1列舉水解之後的污泥，可行的後續處理方式。有大面積森林或農地的國家，可以將水解污泥厭氧消化之後，直接以液體方式施用於農地；也可以將水解污泥經過脫水後，固體部份製成有機肥料販售，或是採用焚化、熱裂解處理回收能源，液體部份則作為生物脫氮碳源或送廢水處理場處理。

以國內的情況，水解污泥的處理比較理想的處理方式為先進行厭氧消化後，再行脫水，脫水後視污泥餅的重金屬濃度高的污泥餅採用焚化處理，重金屬含量低的乾淨污泥，就製成有機肥料；消化的液體則送回廢水處理場處理，或作為工業廢水的營養源，也可以在去除異味之後，作成液體有機肥料。表3列舉水解對資源回收的助益。

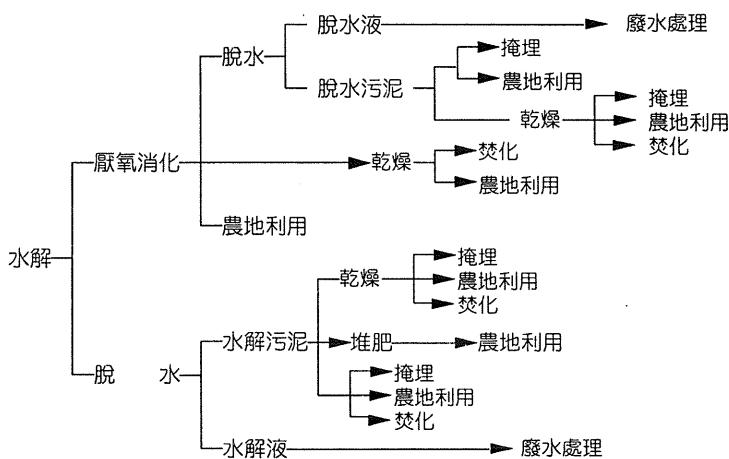


圖1 水解後污泥的後續處理途徑

表3 水解對資源回收的助益

| 程 序 | 回收項目 | 水解效益 |
|-----------|--------------|-----------------------------|
| 厭氧消化 | 產生甲烷，可用於發電 | 預先水解，加速厭氧消化，提高甲烷產率。 |
| 焚化 | 產生熱能，可用於發電 | 熱水水解改善脫水性。提高污泥餅熱能。 |
| 熱裂解 | 產生氣體、液體、固體燃料 | 熱水水解改善脫水性。提高污泥餅熱能。 |
| 厭氧消化後好氧堆肥 | 甲烷、產生肥料 | 預先水解，加速厭氧消化，提高穩定化程度，提高甲烷產率。 |

三、蒸汽水解技術

3.1 技術背景

蒸汽水解技術是挪威Cambi公司發展出來的新式熱水解技術。Cambi公司研發蒸汽水解技術主要是基於下列原因：(A)污泥處理費用越來越高，約佔整個廢水處理場投資成本的30%及操作成本的50%，(B)歐洲原先使用海拋方式處理污泥，但目前各國已陸續禁止海洋拋棄處理有機污泥，而陸地上掩埋場場址越來越少，(C)放流水排放標準越來越嚴格，市鎮污水處理場生物污泥比例逐漸增加，生物污泥不易脫水，也不容易直接厭氧消化。基於此該公司研發能夠減少有機污泥體積，及增加能源(電力)回收之處理技術。

3.2 蒸汽水解程序說明

蒸汽水解是熱水解的一種。熱水解技術(thermal hydrolysis, thermal treatment, heat treatment)並非新技術，在1965～1975年之間，美國即有約100座都市廢水處理場使用熱水解技術作為污泥處理的前處理。但是在70年代中葉以後，發生能源危機，由於操作成本大幅增加，多數熱水解處理場因而關閉。另外，傳統熱水解常發生熱交換器結垢(scaling)、閥件磨損及臭味等問題，所以很快就被隨後發展的化學調理替代熱水解處理，以改善污泥脫水性等因素，造成熱水解技術中斷。

Cambi蒸汽水解技術從1990年開始研發，初期以兩座實驗室規模之設備安裝在40呎貨櫃上，其中一個處理都市污泥，而另一個處理家庭產生有機性廢棄物。在1995年10月建造一座，處理容量約為每年3,600噸(乾重)的蒸汽水解處理廠(相當於100,000人口當量)。Cambi蒸汽水解程序如圖2所示，分別由預熱槽(homogenization and preheating tank)及兩段式水解槽串聯組成。污泥與蒸汽是以逆向方式輸送，使用後一階段廢棄的蒸汽，作為前一階段的熱源。其操作程序簡單說明如下：脫水後固體物含量約14-15%的污泥先送入預熱槽，在此槽內與水解槽減壓後的廢蒸汽混合，使污泥溫度提高至70～80°C。預熱後的污泥則送往第一段水解槽，並且利用第二階段水解槽排放的蒸汽將污泥加熱至130 °C，進行約120分鐘的第一階段水解反應；隨後即加入高壓(10 bars)蒸汽進行第二階段水解，第二階段水解持續進行到槽內壓力由10 bars降低至2 bars時(約30分鐘)，污泥就排入減壓槽釋壓，殘餘的蒸汽則送到預熱槽作為預熱的能源。

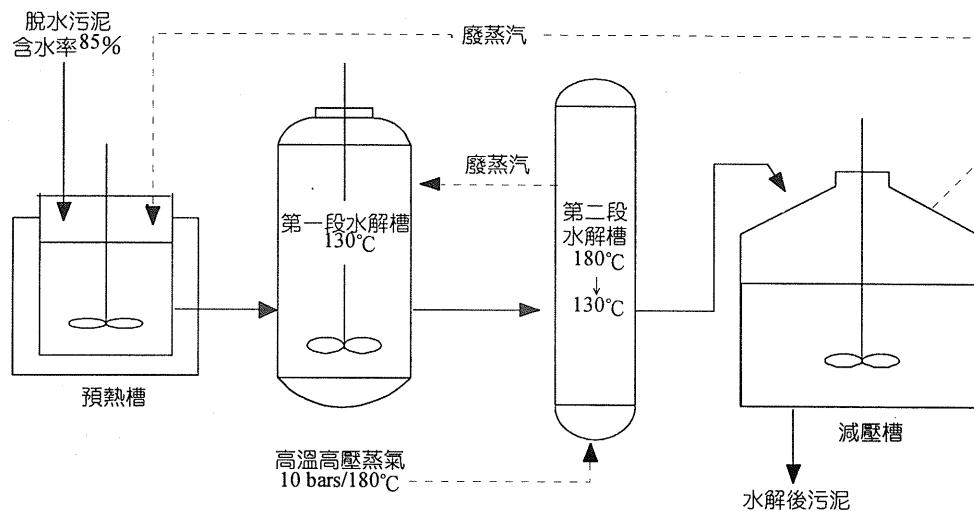


圖2 蒸汽水解流程示意圖

與傳統熱水解比較，蒸汽熱水解具有下列特色：

1. 傳統的熱水解是使用重力濃縮後濃度約3~7%的污泥直接加熱進行熱水解，大部份的熱量耗費在加熱污泥中所含的水份，所以能源需求高。但是蒸汽熱水解是先將污泥脫水後，固體物含量提高至12~15%的污泥餅，再直接加入高溫蒸汽，由於需要加熱的水份減少，所以成本降低。以加熱一噸乾污泥為例，傳統水解法需同時加熱15~30噸的水份，而蒸汽熱水解法只需加熱6~8噸的水份，可以節省50%~80%的能源消耗。
2. 傳統熱水解採用間接加熱，鍋爐或熱交換器常因結垢必需清洗，否則不但降低效率，且有安全顧慮；蒸汽熱水解法採用蒸汽直接加熱，沒有這方面問題，維護較簡便。

根據Cambi公司的資料，蒸汽熱水解的水解效率可以高達40%，污泥脫水率可以提高一倍，水解後再脫水，污泥的體積約只有原污泥體積的25~40%。根據Cambi公司的資料，該技術只要乾污泥量高於2,000噸/年以上的規模即具設廠的經濟潛力。

表4是Cambi熱水解技術的模廠測試結果。數據顯示，該技術水解效率可以高達50%，此一數據與一般即使在添加化學藥劑的情況下，污泥水解效率也只有約10~20%相比，效果是非常好的。

表4 Cambi process模廠測試結果

| 項 目 | HIAS 都市污泥 | 紙廠污泥 |
|-------------------------|-----------|----------|
| 水解前 | | |
| 總固形物重量百分率 (TS , %) | 6~9 | 8.5 |
| 揮發性固形物／總固形物 (VS/TS , %) | 65~73 | 84 |
| COD g/g 挥發性固形物 | 1.6~1.7 | 1.7 |
| 水解後 | | |
| 水解率 (溶解性COD/ 總COD, %) | 23~42 | 39~53 |
| 固形物溶出率 (%) | 25.7~30.5 | 4.7~61.3 |

四、水解對於焚化處理的重要性

焚化是以燃燒方式將污泥中有機物質轉換為二氧化碳、水蒸汽及灰燼，以達到減量、去毒或無害等目的。焚化、堆肥、掩埋是最常用的廢棄物處理方式。根據報導，美國廢水處理場產生的污泥有16%採用焚化處理⁽³⁾，而英國在1988年時只有4.56%採用焚化處理，比例不高⁽⁴⁾。國內因掩埋場有限，焚化因為可以處理大量的廢棄物，且大幅度的削減廢棄物體積，預估將成為國內未來廢棄物處理的主要方法。

所謂焚化是在高溫下將有機物氧化，污泥餅焚化時，必須加入熱量將污泥溫度提高，並將水分蒸發，有機物氧化則會產生熱量，若有機物氧化所產生的熱量，足夠彌補污泥升溫、蒸發水分及焚化爐熱輻射所損失的熱量，則污泥可以在不外加能源的情況下維持自燃，甚至能產出多餘的熱能，作為發電或其他利用。反之，若污泥產生的熱量不足以提供所需的熱量，則必須外加能源以維持燃燒所需要的溫度。

早期污泥焚化爐都純粹以廢棄物處理的觀念設計，因為1970年代期間，污泥脫水之前主要是添加石灰進行調理，污泥餅進行焚化時，因為污泥熱值低，含水率高，必需外加燃料才能維持焚化爐正常運轉，所以污泥焚化技術一直無法普遍。根據報導，英國有很多廢水處理場的污泥焚化爐，在建廠驗收完後，就荒廢不用⁽⁴⁾。但自1985之後，大部份的廢水處理場已改用高分子調理劑進行污泥調理，可燃比例增高，所以現代的污泥焚化爐，都朝回收熱源方向努力。

表1的熱值是以可燃物當基準，但污泥餅的熱值主要決定於污泥的有機物比例（可以用VS/TS的比值當指標）及污泥含水率兩個因素。一般有機污泥含有20%～50%不可燃的灰份(乾重)，所以實測的熱值會約介於13,000～23,000 kJ/kg DS之間，約相當於低級燃煤。

污泥雖然含有很高的熱值，但是有機污泥不易脫水，所以一般污泥餅仍然無法直接燃燒。Gale (1972)曾經對焚化爐的熱平衡作深入的分析，在該分析中假設：

1. 污泥中可燃成份的熱值為23,250 kJ/kg。
2. 焚化爐燃燒時空氣供給量以理論值的150%計算。
3. 污泥中可燃成份佔污泥乾重的75% (VS/TS = 0.75)。
4. 焚化爐產生的氣體排放前經過熱交換，出口溫度以430°C計算。
5. 熱源輸入為污泥燃燒放熱。
6. 熱源輸出包括：污泥灰份、水蒸汽、助燃空氣等帶走的熱量及焚化爐爐體散熱等項目。

分析結果顯示，每焚化1公斤有機物(只計算可燃成份)，可以產生13,410 kJ熱量。若用這些熱量，將水由常溫下加熱至430°C(焚化爐出口溫度)，則每燃燒1公斤可燃污泥，可以蒸發4.1kg水份(將水由常溫下加熱至430°C需要的熱量為3,270 kJ/kg water)。若以VS/TS為75%的污泥為例，污泥必須脫水至含水率在75.5%以下時(1 kg可燃成份 + 0.33 kg灰份 + 4.1 kg水份)，才能不外加燃油，勉強維持焚化爐溫度。圖3是根據Gale的基本假設，重新計算不同VS/TS比值的污泥，進行焚化時，熱量平衡的計算結果。

國內工廠廢水處理場產生的生物污泥，目前都是將生物污泥經過調理後，以帶壓式脫水機脫水，產生的污泥餅含水率約介於80～90%之間。若以含水率85%，VSS/SS比值為80%的污泥餅為例，由圖3可以計算出直接焚化時每噸污泥餅需加入1,200 MJ的熱量，除非工廠有其他高熱值廢棄物一併燃燒，否則就要添加燃料油以補充熱量。低硫燃料油每公升熱值為40 MJ/L，所以焚化一噸污泥餅需要30 L燃料油，低硫燃料油目前價格約4.6元/公升，處理污泥的燃料費用就需要138元。若是污泥含水率可以降低至65%，使用以上相同的假設計算，焚化一噸污泥餅可以產生1,500 MJ的熱量，不但不用燃料費，更可以用於發電或產生蒸汽，發揮附加價值，可見污泥餅含水率對污泥處理有非常大的影響。

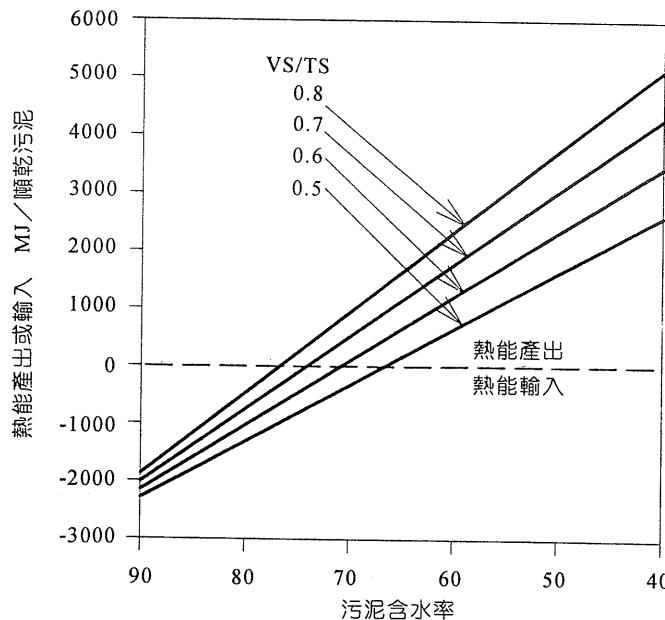


圖3 有機污泥焚化能量平衡結果(相關假設見內文)

五、焚化與蒸氣水解

傳統熱水解技術雖然可以大幅改善污泥脫水性，節省焚化能源消耗，但是熱水解本身卻消耗大量能源，所以整體而言，對能源節約並無效益。蒸氣水解改變加熱方式，整體程序的能量平衡也隨之改變。以國內狀況分析研判，蒸氣水解與焚化技術最理想的組合方式如圖4所示，污泥經過濃縮後，進行第一次脫水，脫水液迴流回廢水處理場，污泥餅則以蒸氣水解技術進行水解，水解之後再進行第二次脫水。二次脫水產生的脫水液其懸浮固體物(SS)約為2,000mg/L，COD濃度約為25,000mg/L，因COD主要由溶解性有機物組成，所以可以採用高效率的上流式厭氧污泥床處理槽(UASB)或流體化床處理槽(AFB)處理。水解後污泥餅因為含水率極低，採用焚化處理可以產生額外的能源。至於污泥水解所需要的蒸氣可以由焚化爐或沼氣利

用時產生，而脫水時所增加的動力與因為污泥含水率降低所節省的能源，幾乎可以忽略不計。

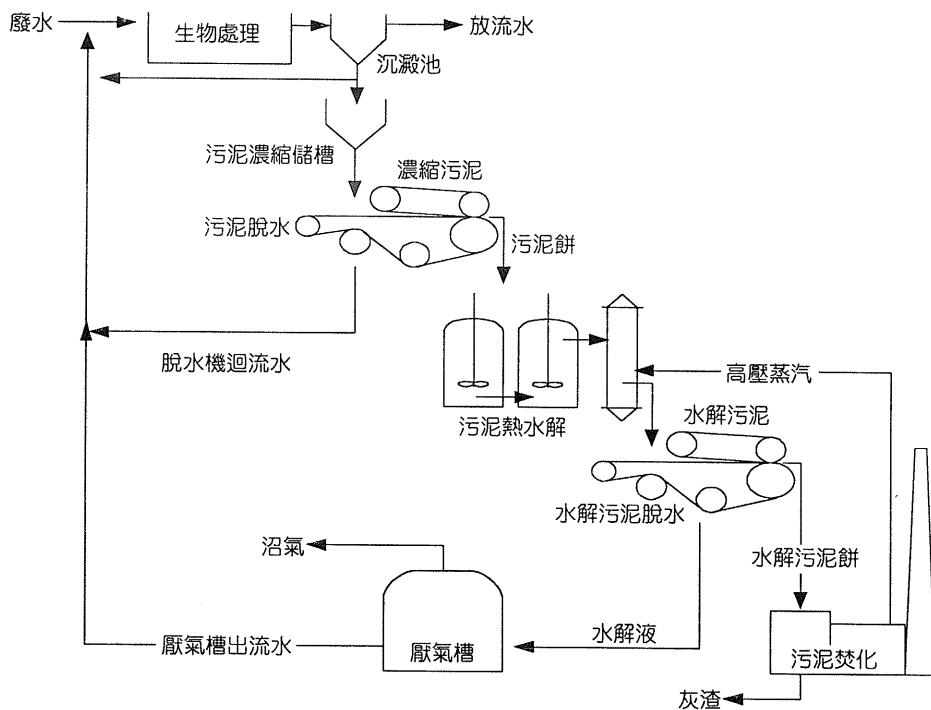


圖4 蒸汽熱水解污泥處理流程

若以上述流程，即蒸汽水解／厭氧消化／脫水／焚化進行質能平衡分析，計算的結果如圖5所示，該計算所用的參數值及假設列於表5。計算結果顯示，處理1,000 kg TS共產出熱量8,700 MJ，且焚化爐規模只要直接焚化的25%以下，雖然需要增加厭氧處理槽、蒸汽水解槽，但是這些設備的初設成本，都低於焚化爐，所以整體而言，可以降低初設成本及縮小處理場佔地，非常適合於國內的狀況。

六、經濟評估

根據早期的資料顯示，污泥處置費用約佔都市污水處理場費用25%以上⁽⁸⁾，這幾年因為掩埋場地不易取得，焚化又因空氣污染管制越來越嚴，污泥處理費用頻頻升高，所以污泥處理費用佔操作成本的比例有增無減。因此，如何有效降低污泥處理費用將直接影響到廢水處理場操作費用。

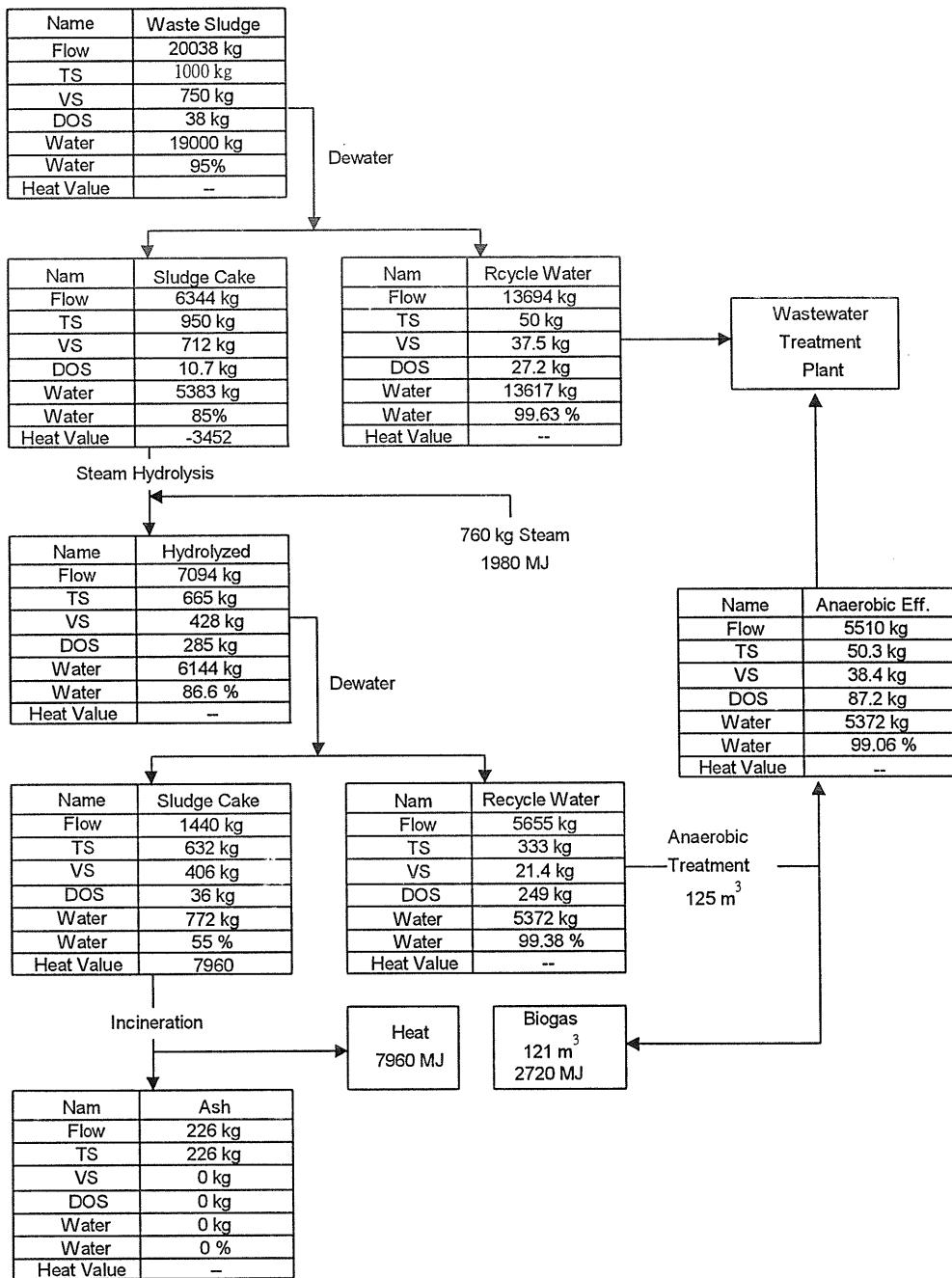


圖 5 蒸氣熱水解污泥處理法質能平衡計算結果

表5 質能平衡計算使用之參數值

| 參 數 名 稱 | 參 數 值 | 說 明 |
|---|----------|--------------|
| 原始污泥濃度 | | |
| 沉澱池污泥濃度, % | 2 | |
| 濃縮後污泥濃度, % | 5 | |
| 生物污泥COD當量, kg COD/kg VSS | 1.5 | |
| 污泥熱值, MJ/kg-Dry VSS | 25 | |
| 污泥水份蒸發熱值, MJ/kg-Water | 4.0 | 污泥內含之水份 |
| 污泥餅比熱, MJ/kg Wet Sludge/K | 0.004184 | 以水的比熱計算 |
| 脫水性能 | | |
| 污泥截留率, % | 0.95 | |
| 生物污泥餅含水率, % | 85 | |
| 厭氧消化後污泥餅含水率, % | 775 | |
| 蒸汽水解後污泥餅含水率, % | 55 | |
| 蒸汽水解 | | |
| 200°C蒸汽熱值, MJ/kg Steam | 2.6 | |
| 蒸汽熱水解蒸汽添加量, kg Steam/kg Wet Sludge | 0.21 | 將污泥餅加熱至130°C |
| 蒸汽水解COD溶出率, % | 40 | |
| 蒸汽水解熱回收率, % | 30 | |
| UASB性能 | | |
| UASB體積負荷, kg/m ³ /day | 3 | |
| UASB去除率, % | 65 | |
| 甲烷產氣量, m ³ /kgCOD _r | 0.5 | |
| UASB污泥產率, kgSS/kgCOD _r | 0.07 | |
| 沼氣熱值, MJ/m ³ | 22.4 | |
| 厭氧消化槽性能 | | |
| 厭氧消化槽體積負荷, kg SS/m ³ /d | 1.12 | |
| 厭氧消化槽VSS去除率, % | 60 | |
| 厭氧消化槽沼氣產率, m ³ /kgVSS _r | 0.75 | |
| 沼氣熱值, MJ/m ³ | 22.4 | |

Lurgi公司1988年在英國建造一座自燃的污泥焚化爐，焚化爐設計容量為15,000 Dry Ton/year，污泥來自都市污水處理場的初沉及生物污泥，由於附近羊毛工業發達，廢水也排入污水場，污泥中含有大量纖維，所以脫水性優於一般污泥，直接使用離心式脫水機，污泥餅熱量就足夠自燃焚化，焚化爐為截面10m²的流體化床焚化爐，排氣經過靜電集塵器及洗滌塔處理。該廠於1989通過性能測試正式運轉，根據報導該廠建造費用為9,200,000美元，處理每噸乾污泥費用為77~85美元(1991年幣值)。若以每年3.5%的通貨膨脹率及27/1的台幣美元匯率，計算處理費用約為台幣2,600元/Dry Ton⁽⁴⁾，其建造費用約台幣7,450,000元/Dry Ton/day。

Kaneko及Shimomura(1991)⁽⁹⁾報導日本Yokohama的聯合污泥處理中心的運轉情形，初沉及二級污泥經過加壓後，以管路從五個區域污水處理場送到聯合污泥處理中心，在處理中心污泥經過重力濃縮、離心濃縮之後，送入蛋形消化槽進行厭氧消化，消化後的污泥經過離心脫水，污泥餅送入焚化爐焚化，由於污泥餅含水率仍高達88%，所以焚化爐以厭氧消化槽產生的甲烷氣作為燃料，每噸污泥餅需要26 m³甲烷氣，但是焚化爐使用的沼氣只佔總沼氣產量的19%，剩餘的沼氣用來發電。以該處理中心每天處理4,400m³濃度2%的廢棄污泥(88 Dry Ton/day)，產出36,600 kWh/day的電力。報導中說明聯合污泥處理中心的建造成本(含輸送管路)約240,000,000日元/Dry Ton/day，操作成本則為43,600日元/Dry Ton，其中46%是焚化爐費用(1991年幣值)。若仍以3.5%年通貨膨脹率，台幣日元匯率1/4.2計算，其操作成本約為台幣12,800元/Dry Ton，初設成本則為台幣70,000,000元/Dry Ton/day。

表6是Cambi公司比較幾種污泥處理流程組合的操作成本，該資料在1996年發表，是以當時歐洲的情況作為比較基準。原報告是以德國馬克為基準，該表已經以馬克台幣1/16.5的匯率換算成台幣。該表顯示污泥直接農用是最便宜的方式，掩埋的成本最高。若以焚化為例，加入水解程序，可減少40%的污泥處理費用，若再加入厭氧消化更可以節省處理費用達50%以上。

Cambi也曾就我國內的狀況，進行成本計算。該計算中假設需要處理的污泥量為10,000 Dry Ton/year，污泥VS/TS為70%。該污泥脫水後污泥餅含水率為86%，蒸汽水解率為30% COD_{dissolved}/COD_{total}，水解之後的污泥經過厭氧消化，消化槽COD轉化率為60%，沼氣用於發電。消化之後的污泥以帶壓式脫水機脫水，污泥餅含水率為45%，污泥餅以既有的焚化爐焚化。其它相關假設包括電費台幣3元

/kWh，10年折舊，年利率為7%。根據計算結果，初設成本(不包含焚化爐)為美金14,000,000元，操作費用為美金380元/Dry Ton。換算台幣為每單位污泥量初設成本為台幣13,800,000元/Dry Ton/day，操作成本(含折舊)為台幣10,250元/Dry Ton。

表6 污泥處理處置費用比較⁽¹⁰⁾

| 處理程序 | 處理成本, NT \$ /Dry Ton |
|---------------------|----------------------|
| 液體直接農業利用 | 6,700 |
| 土壤改良(Recultivation) | 13,000 |
| 堆肥 | 16,000 |
| 乾燥後農業利用 | 16,000 |
| 發電廠一併焚化 | 18,000 |
| 水泥廠一併焚化 | 18,000 |
| 純污泥焚化 | 21,000 |
| 水解、脫水、焚化 | 12,000 |
| 水解、消化、焚化 | 10,000 |
| 脫水、掩埋 | 24,000 |
| 脫水、乾燥、掩埋 | 20,000 |
| 水解、脫水、乾燥、掩埋 | 13,000 |

國內工廠雖有不少已有污泥乾燥或焚化設備，但其初設及處理成本並未對外報導。以作者接觸的工廠所投資焚化爐為例，該焚化爐處理量為12 Wet Ton/day，污泥含水率為86%，造價台幣23,000,000元，換算單位乾污泥焚化爐造價為台幣13,700,000元/Dry Ton/day，焚化污泥所需要的燃料量為116 L/Wet Ton，換算乾污泥燃料用量為828 L/Dry Ton，若以燃料單價台幣4.5元/L計算，燃料費就需要3,800元，再加上調理、人工、折舊等費用，每噸乾污泥處理費用在10,000元以上。此一數值與另一石化廠透露以焚化爐焚化污泥及工廠廢料，焚化操作費用為台幣10,000元/Ton相符。

由以上資料顯示，英國的案例因污泥性質特殊，初設及處理遠低於其它案例，日本案例因包括污泥輸送建造成本，初設成本偏高，其餘資料初設及操作成本都還

算接近。由於國內工廠對於處理設備成本及操作費用的相關資訊，大都不願公開，所以無法就國內的狀況進行詳細的經濟評估。但根據現有資料推測，傳統焚化爐投資約為台幣14,000,000元/Dry Ton/day，採用脫水/蒸汽水解/脫水/焚化處理的方式，初設費用約為傳統焚化的2倍。但後者操作成本只需要一般焚化處理費用的40~75%之間，而且具有資源回收的正面意義，整體而言相當具有競爭性。

七、結論

水解技術在國內並未受到重視，但本報告分析結果顯示水解技術對於污泥處理的效益，具有很大的影響，尤其是新近發展出來的蒸汽水解技術，突破傳統熱水解技術耗費大量能源的瓶頸，對於資源回收有很大的幫助。雖然本文只以焚化做為例子說明污泥水解的重要性，事實上污泥水解對於土壤利用也有幫助。

評估結果顯示，蒸汽熱水解配合焚化處理無論是技術面或經濟面，都相當具有競爭力。但是污泥處理朝向資源化進行時，其處理程序會比把污泥當成廢棄物處理的情形複雜，因為程序複雜，需要更多專業人員負責維護操作，人事成本的增加並非小規模處理場所能負擔，所以處理場必須朝向大型化、集中化發展，以降低人事管理成本的比例，才能發揮效益，此為世界潮流所趨。國內工廠規模以中小型居多，單獨設立污泥處理廠，無論是技術面或是經濟面，可行性都不高，唯有成立聯合集中處理中心，才可能應用先進技術達到資源化的水準。但國內環境特殊，從都市廢棄物焚化爐推展過程所遭遇的困難，可以預期成立污泥集中處理中心的非技術面的困難程度。目前只能期待政府及工廠共同努力，突破非技術性障礙，使國內污泥處理早日邁上資源化的途徑。本文僅就技術面說明污泥水解的效益，提供參考。

誌謝

本文節錄自環保署委託計畫(EPA-86-G202-03-20)期末報告。本報告僅係作者研究意見，不代表環保署立場。本研究計畫執行期間承蒙許多工廠協助，在此一並致謝。

參考資料

- 1.財團法人中國技術服務社環保科技中心，事業水污染源管制計畫期中報告，1997。
- 2.行政院環保署，中華民國台灣地區環境資訊84年版，1996。
- 3.US.EPA, <http://www.epa.gov/owm/wm048000.htm>, 1997
- 4.Lowe, P. and Groeger, G., The Revival of Incineration in the UK, *Wat. Sci. Tech.*, 23, 1803-1810, 1991.
- 5.Gale, R.S., The Sludge Treatment and Disposal Problem, *Incineration of Refuse and Sludge*. Symposium Proceeding, University of Southampton, 1.1-1.13, 1972.
- 6.Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd Ed., Revised Tchobanoglous, G. and Burton, F. L., McGraw-Hill, inc., 1991.
- 7.Baeyens, J. and Van Puyvelde, F., Fluidized Bed Incineration of Sewage sludge : a Strategy for the Design of the Incineration and the Future for Incineration Ash Utilization, *Journal of Hazardous Materials* 37, 179-190, 1994.
- 8.Jones, J.L., Lewis, F.M. and Jacknow, J., Municipal Sludge Disposal Economics, *Environmental Science & Technology*, 11(10), 968-972, 1977.
- 9.Kaneko, S. and Shimomura, H, Operation of Centralized Sludge Treatment Facilities, *Wat. Sci. Tech.*, 23, 1753-1762, 1991.
- 10.Weisz, N., Possible Applications of the Cambi Hydrolysis, presented at the seminar "Thermal Hydrolysis an Economic Way to Handle Organic Sludge", Taipei, May 1996.