

## 廢棄物類

# 探討淨水場廢污處理與再利用

張琰竣\*

### 摘 要

淨水場淨水過程將原水中含泥砂、微生物、有機物等雜質去除的同時，也會產生許多廢污(廢水及淤泥)，其特性包括物理、化學特性、固體組成成分及產生量等。淨水場廢水處理方式分為直接迴流及處理後迴流或放流，常見處理技術包括沉澱、混凝沉澱、溶解空氣浮除及薄膜處理等，廢水回收再利用分成直接和處理回收。淨水淤泥主要包含沉澱泥砂、混凝膠羽及濾床反沖洗淤泥，其組成主要為懸浮固體、有機物、無機鹽類、混凝劑及水分。國內淨水場淤泥處理方式大多為濃縮、調理及脫水；淨水淤泥餅資源化再利用技術分為 3 項：1.利用淤泥餅中添加之混凝劑殘餘物質作為廢水處理用途；2.經簡單乾燥、破碎與造粒後作為拌合摻料，3.需經高溫完全乾燥或經高溫燒結之土木建築及結構物。淨水場淤泥餅依廢棄物清理法規定屬一般事業廢棄物，且 TCLP 符合法規規定，可依其相關規範逕行處理處置，目前淤泥餅多以再利用方式處理，需符合再利用相關管理規範，如此不僅可避免二次公害，亦可將廢棄物轉變為可利用資源，使淨水場成為零排放、零污染產業，做到「垃圾變黃金」之資源永續利用目標。

【關鍵字】廢污、濃縮、調理、脫水、資源化再利用、TCLP

---

\*臺北自來水事業處 三級工程師

## 一、淨水場廢污來源及特性

淨水場生產安全飲用水過程中，將原水中含泥砂、微生物、有機物等雜質去除的同時，也會產生許多廢污，一般分為廢水及淤泥。廢水為過濾單元產生的反沖洗廢水及處理單元的清洗廢水；淤泥包括預沉澱淤泥、膠凝淤泥(如鐵鹽淤泥或鋁鹽淤泥)、石灰淤泥、氧化鐵及錳淤泥等。

廢水及淤泥的組成成分與產生量會因水源(地表水、地下水)、淨水程序及處理過程中添加藥劑不同而呈現很大差異。

淨水場廢污特性包括物理特性、化學特性、固體組成成分及產生量等；廢污之物化特性將影響廢污後續處理、處置方式，而掌握廢污產生量，則有助於處理單元與設備容量之設計。

## 二、淨水場反沖洗廢水特性

### 2.1 物理化學特性

淨水程序中未能於混凝沉澱程序去除之殘餘微粒，如有機物、黏土顆粒及微生物等，則可由過濾單元中去除，故過濾池反沖洗廢水水質會因原水水質、前處理程序及過濾池操作方式不同而呈現一定程度差異。國內有關淨水場過濾池反沖洗廢水特性之研究結果為 pH 6.7~8.0，固體物指標因子差異較大，濁度為 56~2,620 NTU，TS 為 199~1,616 mg/L，SS 為 80~1,430 mg/L，有機物污染物濃度較低，TOC 大多為 0.5~3.0 mg/L，BOD 為 0.3~1.0 mg/L，COD 為 6~41 mg/L。

### 2.2 淨水場反沖洗廢水產量

過濾池反沖洗廢水產量除了受過濾池操作效能影響外，同樣也與原水水質及前處理程序有關，反沖洗廢水量平均落於 2~5%間<sup>[1]</sup>；國內淨水場反沖洗廢水量約佔處理水量 1.2~4.5%，離島之榮湖淨水場則約佔處理水量 12.2%。

### 三、淨水場廢水處理與回收

在 1965 年以前，美國環保相關法令未臻成熟，淨水場廢水及沉澱淤泥通常不經處理，直接排入鄰近河川、公共排水系統，或回收至淨水程序最前端；1972 年水污染防治法(pollution control act)修正後，即不允許淨水場廢水直接排放，淤泥也被定義為工業廢棄物，依 NPDES(National Pollutant Discharge Elimination System) 規定，各州政府訂有不同排放標準及限制，淨水場廢水及淤泥須經妥善處理至符合政府許可法令要求後始能排放。臺灣淨水場廢污處理與排放演變與美國類似，早期各淨水場大多無廢污處理設施，廢水大多回收至淨水程序最前端或直接排放，至水污染防治法修正公布自來水廠排放標準後，為符合國家法令，紛紛著手改善、設置廢污處理設施。

#### 3.1 淨水場廢水處理與回收方式

##### 3.1.1 淨水場廢水處理方式

淨水場廢水處理方式大致分為 2 種，一為直接迴流，二為處理後迴流或放流。早期許多淨水場直接將未經任何處理的廢水迴流至淨水程序中重新處理，代替廢水處理，此即直接迴流。然部分廢水中可能含大量雜質、微生物，及包括淨水過程中添加的各種藥劑，若將這些污染物重回淨水流程中，可能會造成淨水處理困擾，故目前國內外淨水場大多已增設廢水處理設施，將廢水處理後再回收或排放。

常見淨水場廢水處理技術近年來發展已相當成熟，包括沉澱、混凝沉澱、溶解空氣浮除及薄膜處理等，均能有效去除廢水中濁度、固體物及微生物等。概述各種處理程序如下：

- 1.沉澱：為經常被選擇的廢水迴流前處理程序之一<sup>[2]</sup>，可單獨或與其他程序串聯處理反沖洗廢水，提供調勻水質及水量之功能，做為緩和固體物含量的反沖洗廢水對原淨水系統或其他後續處理系統衝擊之程序，成本較其他預處理方式低，操作簡便，亦不需繁複技巧。
- 2.混凝沉澱處理：係使用化學混凝劑，沉降去除廢水中微小顆粒，一般淨水場反沖洗廢水 pH 值多在中性範圍，通常不需另外調整，即能符合混凝劑最適加藥 pH 值，處理後可

## 76 探討淨水場廢污處理與再利用

有效降低廢水中固體物負荷及天然有機物，對梨形鞭毛蟲(*Giardia*)、隱孢子蟲(*Cryptosporidium*)及病毒亦有 70~90% 去除率<sup>[3]</sup>。

- 3.溶解空氣浮除：係利用微小氣泡將固體物上浮至單元表面後刮除，可穩定處理濁度範圍廣大(11.9~2,880 NTU)的廢水，相較於混凝程序，溶解空氣浮除對高固體物濃度廢水有較大處理彈性。
- 4.薄膜程序：屬高級回收處理方式，需配合適當前處理程序，以延長薄膜使用壽命，可有效降低總菌落數及大腸桿菌數，對無機離子如鋁、砷、鈣、鐵、錳，及濁度與固體物等亦有極佳移除效果。

### 3.1.2 淨水場廢水回收方式

1996 年美國修訂「安全飲用水法案」(safe drinking water act amendments)，要求美國環保署對公共給水系統回收過濾反洗廢水進行管理，其法規要求分 3 大項<sup>[4]</sup>：1.所有公共給水系統將反洗廢水迴流至快混程序之前，2.採用直接過濾系統之淨水場必須提交處理反洗廢水能力的報告，3.過濾池數量少於 20 座之淨水場應對迴流反洗廢水操作進行自我評估。至此過濾池反洗廢水回收課題才開始受到重視。

Cornwell & MacPhee (2001)<sup>[5]</sup>利用模廠研究有關回收水過濾反沖洗廢水對淨水處理之影響，將廢水迴流至混凝單元之前，迴流率設定為 4.3、10 及 20%，結果顯示提高迴流率能使混凝沉澱單元移除微生物囊孢效率提高。但反洗廢水中除了包含累積在濾床中的顆粒物質及溶解性有機物(平均約為原水 3.3 倍，其他詳表 1<sup>[6][7]</sup>)外，微生物含量亦可能較高；此外，Arora et al. (2001)<sup>[4]</sup>研究顯示廢水內梨形鞭毛蟲及隱孢子蟲含量分別高於原水約上升 16 及 61 倍。

表 1 平鎮淨水場沉澱淤泥特性

特性分類		淤泥毯澄清池淤泥		傾斜管沉澱池淤泥	
懸浮固體物(mg/L)		1,516 ~ 10,589		5,222 ~ 56,998	
總固體物(mg/L)		1,866 ~ 8,010		5,006 ~ 60,468	
化學特性	BOD(mg/L)	2 ~ 7		6 ~ 58	
	COD(mg/L)	118 ~ 172		133 ~ 586	
	pH	7.0 ~ 7.4		7.0 ~ 7.4	
固體組成成分	SiO <sub>2</sub> (%)	46.44	50.6	53.89	58.02
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	39.05	35.57	30.31	23.96
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.31	5.54	6.44	8.31
	K <sub>2</sub> O (%)	3.47	3.82	3.74	4.54
	MgO (%)	2.27	1.78	2.44	2.64
	CaO (%)	1.74	0.91	1.19	0.31
	Na <sub>2</sub> O (%)	1.25	1.26	1.37	1.5
	TiO <sub>2</sub> (%)	0.47	0.52	0.63	0.71

資料來源：姜佳伶(2007)、顏笠安(2009)

2002 年美國制定「過濾池反沖洗水回收法」，規範採用傳統混凝沉澱處理及直接過濾處理之淨水場於回水反沖洗廢水時，須進行妥善規劃評估，並定期申報相關資料，以確保回收操作不影響淨水處理效能。

國外大型淨水場在設計時均會考量產生廢水的回收再利用措施，目前國內部分淨水場亦參考其作業模式將所生成廢水回收再利用，從環境影響及善用水資源的角度來看是相當理想方式，但廢水中含大量雜質，及淨水過程中所加各種藥劑，再加上微生物累積的問題，回收廢水時若未經適當處理及控制回收水量，可能會衝擊淨水處理操作，因此須審慎研究與評估考量，於規劃回收反沖洗廢水方案時，除回收水迴流比例須加以考量外，掌握廢水水質並作適當處理後再予以回收，將使負面影響降至最低。國內淨水場廢水回收再利用方式可分成直接回收和處理回收 2 種，概述如下：

### (1)直接回收

目前國內許多淨水場採直接回收方式，主要為快濾池反沖洗廢水直接回收和廢水處理程序之上澄液回收。前者設置廢水池，將濾池反沖洗廢水加以收集，再送至原水進流處加以回收；後者設置淤泥濃縮池，將膠凝沈澱池排泥水和快濾池反沖洗廢水進行濃縮處理，上澄液送至原水進流處加以回收，底部淤泥則進入淤泥處理系統。如此費用較低，但需增加水質監測，一旦上澄液水質不符合回收標準，必須降低回收負荷或不回收<sup>[8]</sup>。

### (2)處理回收

將淨水過程中產生之廢水處理至符合自來水法規標準後再回收。處理方式與廢水水質密切相關，若廢水處理費用高於原水處理費用或原水水量充沛，則此方法較不適用。因此，須進行現場水質監測調查，以分析廢水經處理後之水質狀況及與原水混合後之回收液水質狀況，以利評估廢水處理程序、效能及廢水回收可行性。

## 四、淨水場淤泥特性

### 4.1 物理化學特性

淨水淤泥特性受原水水質、淨水程序、混凝劑種類等因素影響，臺灣淨水場大多以地表水為主要水源，原水經淨水程序處理後，產生淨水淤泥主要包含沉澱泥砂、混凝膠羽及濾床反沖洗淤泥。泥砂量及其特性與集水區內土壤、地質、水土保持及天候狀況等因素有關。不同地區原水所含固體物、有機物、溶解性鹽類、金屬物質及微生物等各種組成成分會有相當之差異，如原水懸浮固體物高，則淤泥中固體物含量也較多，又如某些淨水場以地下水為水源，因地質關係使原水鐵/錳/砷含量較高，則其淤泥中所含鐵/錳/砷也較多。而選用淨水程序及化學或混凝劑不同，所產生淤泥性質也不同；混凝沉澱程序較常使用之混凝劑可分為鐵系及鋁系兩大類，鐵系混凝劑如氧化鐵、硫酸鐵、硫酸亞鐵等，鋁系混凝劑則以多元氯化鋁

(Polyaluminium Chloride, PAC)、硫酸鋁較為常見，分別產生鐵鹽淤泥、鋁鹽淤泥；化學軟化程序較常使用石灰，則產生石灰淤泥。

一般淨水淤泥組成主要為懸浮固體物、有機物、無機鹽類、混凝劑及水分，因此所產生淤泥特性與組成，主要受懸浮固體與添加混凝劑影響。其中懸浮固體主要為原水中夾帶的黏土與細砂，主要組成為  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。另外，混凝劑種類不同也會對淤泥特性造成影響，添加鋁鹽混凝劑時，產生的固體沉澱物組成為  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ，而添加鐵鹽類混凝劑，固體沉澱物組成則為  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ <sup>[9]</sup>。

淨水場淤泥在未經濃縮處理前含水量常高於 99%，呈液狀且流動性佳，物理及化學等特性如表 2 所示<sup>[1]</sup>，不同淨水場淤泥之物理特性因子差異性較小，最大值與最小值差距約在 5 倍之間；化學特性則有較大差異，有機物成分中(BOD：30~300 mg/L 及 COD：30~5,000 mg/L)最大值與最小值差距有數十倍至百倍之多，pH 則約為中性範圍(6~8)。而淤泥中固體物約 0.1~4%，因主要來自原水中懸浮固體，故固體物組成成分以  $\text{SiO}_2$  與惰性物最多，約占 35~70%，其次為  $\text{Al}_2\text{O}_3$  約 15~40%，與鋁鹽混凝劑使用量有關，有機物則約占 12~25%。

表 2 國外淨水場淤泥特性

特性分類		數值範圍
物理特性	比阻抗(m/kg)	$10 \times 10^{11} \sim 50 \times 10^{11}$
	黏滯度(N-s/m <sup>2</sup> ), 20°C	0.002 ~ 0.004
	初始沉降速度(m/h)	2.2 ~ 5.5
	乾密度(kg/m <sup>3</sup> )	1,200 ~ 1,520
	濕密度(kg/m <sup>3</sup> )	1,025 ~ 1,100
	總固體物(%)	0.1 ~ 4
化學特性	BOD(mg/L)	30 ~ 300
	COD(mg/L)	30 ~ 5,000
	pH	6 ~ 8
固體組成成分	$\text{SiO}_2$ 及惰性物質(%)	35 ~ 70
	有機物(%)	15 ~ 40
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	15 ~ 25

資料來源：MWH, 2005

## 80 探討淨水場廢污處理與再利用

淨水淤泥物理特性與工程性質如表 3 所示<sup>[10]</sup>，不同淨水場的淤泥，其物化性質有很大的差異。一般鋁鹽淤泥沉降速度快，但脫水不易，除了因鋁鹽在水中所產生的水合金屬結構，造成脫水性不佳外，由細小泥砂顆粒所組成的淤泥，也會影響其脫水性。

表 3 淨水淤泥餅之物理與工程性質

性質	數值	文獻
黏滯度(N-s/m <sup>2</sup> )，20℃	0.002~0.004	MWH, 2005
初始沉降速度(m/h)	2.2~5.5	MWH, 2005
乾密度(kg/m <sup>3</sup> )	1,200~1,520	MWH, 2005
	1,170~1,560	Aldeeb et al., 2003
濕密度(kg/m <sup>3</sup> )	1,025~1,100	MWH, 2005
TS(%)	0.1~4	MWH, 2005
	0.3~5	Babatunde and Zhao, 2007
比阻抗(m/kg)	$10 \times 10^{11} \sim 50 \times 10^{11}$	MWH, 2005
	$0.98 \times 10^{13} \sim 24.92 \times 10^{13}$	Aldeeb et al., 2003
比重	1.87~2.71	Aldeeb et al., 2003
	2.12~2.93	日本水道技術研究中心，1998
	2.72	紀宗男，2003
粒徑分佈(mm)	0.002-0.039	Aldeeb et al., 2003
塑性限度(%)	4.0~322.1	Aldeeb et al., 2003
	40.6~186.3	日本水道技術研究中心，1998
	35	紀宗男，2003
液性限度(%)	35.5~617.4	Aldeeb et al., 2003
	84.3~365	日本水道技術研究中心，1998
	51	紀宗男，2003
最佳含水率(%) (最大乾密度(kg/m <sup>3</sup> ))	17~83 (594~1,856)	Aldeeb et al., 2003
	20~144 (547~1,394)	日本水道技術研究中心，1998
	30.7 (1,435)	紀宗男，2003
抗剪強度(kpa)	2.4~106.8	Aldeeb et al., 2003
抗壓強度(kpa)	32~316.9	Aldeeb et al., 2003

資料來源：鄭宏德, 2002

1997 年張添晉教授對國內淨水場鋁鹽淤泥性質進行研究調查整理如表 4<sup>[9]</sup>。此外，姜佳伶(2007)<sup>[6]</sup>及顏笠安(2009)<sup>[7]</sup>亦針對台灣自來水公司(以下簡稱台水公司)

平鎮淨水場沉澱淤泥特性進行採樣分析如表 1 所示。國內淨水場淤泥之固體物含量與國外研究資料比較，屬低至中濃度範圍，pH 值相當均一，在 7.0 左右；BOD、COD 則屬較低濃度範圍，固體物組成成分與國外文獻資料相當一致，主要以  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  為主，前者約占 50%，後者約 30%左右。

表 4 國內淨水場鋁鹽淤泥性質

分析項目	淤泥性質含量範圍	平均值
pH	6.6 ~ 7.2	6.9
總固體物 TS(%)	0.2 ~ 2	1.4
沉澱性	差	差
BOD(mg/L)	25 ~ 200	40
COD(mg/L)	200 ~ 2,500	600
BOD/ COD	1/10 ~ 1/18	1/15

資料來源：張添晉，1997

淨水淤泥化學組成如表5所示<sup>[11]</sup>，依使用混凝劑的不同，分為鋁鹽、鐵鹽與石灰淤泥，由於淤泥組成主要為原水中細小泥砂顆粒與混凝劑，因此總組成成分以氧化矽所占比例最高。另外，依使用混凝劑種類不同，鋁、鐵、鈣在化學組成中所占比例也會有所增減，除了上述主要成分外，其中還包含少量 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等元素化合物。此淤泥pH值大致介於中性範圍，石灰淤泥則較偏鹼性。在BOD與重金屬部分，由於原水水質良好，因此淤泥中僅含有少量BOD與微量重金屬，依表6<sup>[12] [13]</sup>可看出淤泥毒性特性溶出程序溶出試驗(TCLP)數值皆遠低於法規標準，因此若經過適當處置應不至於對環境造成影響。

表 5 淨水淤泥餅之化學組成

成份	單位	鋁鹽淤泥	鐵鹽淤泥	石灰淤泥
鋁		29.7 ± 13.3	10.0 ± 4.8	0.5 ± 0.8
鐵	乾重 (%)	10.2 ± 12	26.0 ± 15.5	3.3 ± 5.8
鈣		2.9 ± 1.7	8.32 ± 9.5	33.1 ± 1.04
鎂		0.89 ± 0.8	1.6	2.2 ± 1.04
氧化矽		33.4 ± 26.2	-	54.57
pH	-	7.0 ± 1.4	8.0 ± 1.6	8.9 ± 1.8
BOD <sub>5</sub>	mg/L	45(2~104)	-	-
磷	乾重 (%)	0.35	0.36	0.02
鋅		33.0 ± 28	18.7 ± 16	2.5 ± 0.7
鉛		44.1 ± 38.2	19.3 ± 25.3	1.87 ± 1.13
鎘		0.5	0.48 ± 0.26	0.44 ± 0.02
鎳	mg/kg	44.3 ± 38.4	42.9 ± 39.2	0.98 ± 0.52
銅		33.72 ± 32.5	18.7 ± 25.8	3.6 ± 3.1
鉻		25.0 ± 20.1	25.7 ± 21.6	1.3 ± 0.2
鈷		1.06	1.61 ± 1.1	0.67 ± 0.05

註：mean values±SD，資料來源：Babatunde et al.(2007)

表 6 淨水淤泥餅 TCLP 溶出值

重金屬	銅	鉻	鎘	鉛	汞
直潭淨水場淨水淤泥餅 (mg/L)	0.05	ND	0.03	0.62	ND
板新淨水場淨水淤泥餅 (mg/L)	0.058	ND	ND	ND	ND
法規限值	15	5.0	1.0	5.0	0.2

資料來源：北水處 2001, 台灣省自來水公司 2002

## 4.2 淨水淤泥產量

淨水淤泥產量與原水性質及淨水操作程序有關，原水中濁度高低會影響混凝劑使用量，依國外統計<sup>[7]</sup>淨水場淤泥產量約為處理水量 0.1~0.3%；但近年來臺灣地區颱風暴雨期間原水濁度動輒數千 NTU，淨水場淤泥產量達平時之 25 倍以上<sup>[14]</sup>。

# 五、淨水場淤泥處理與再利用

## 5.1 淨水場淤泥處理方式

臺灣地區自來水源係以河川、湖泊、水庫等地表水為主，但地表水易受人為或天然因素影響而破壞水質，為得到良好且穩定之自來水，須將地表水引入淨水場處理，經曝氣、沉澱、加藥、混凝沉澱、過濾等淨水程序，淨水場淤泥主要來自沉澱池內所攔截下來之泥砂及膠羽顆粒，即原水中不純物之沉澱。淤泥含水率高、體積大，其處置以減積為首要目的；國內淨水場使用最多為濃縮、調理及脫水方式，概述如下：

### 1. 淤泥濃縮

主要目的為使淤泥中固體物含量增加，進而減少淤泥體積，以減少後續操作設備負荷量。淤泥固體物含量增加 1 倍，淤泥體積即減少 1/2，較高的固體物含量也可增加後續脫水設備處理效率。淤泥濃縮方式有重力濃縮 (gravity thickening)、浮除濃縮 (flotation thickening) 及離心濃縮 (centrifugal thickening)，其中重力濃縮為最常採用方式。

### 2. 淤泥調理

主要目的為改善脫水性、提高脫水速率使淤泥餅固體物含量增加；利用化學或物理方法，改變淤泥膠羽結構，使淤泥有足夠剛性 (rigidity) 與不可壓縮性，讓淤泥中水分以過濾或其他脫水方法快速被除去，增加淤泥餅固體物含量。混凝沉澱產生之淤泥脫水性不佳，故常藉調理程序加以改善，物理性調理以熱處理為主，化學性調理係添加化學藥劑於淤泥中以提高淤泥餅脫水效率，但也因此將淤泥餅 pH 值從中性 (6.0~7.5) 提高為鹼性。影響淤泥調理之因子有 pH 值及 GT 值，調

## 84 探討淨水場廢污處理與再利用

整 pH 值可使顆粒表面電荷達電中性(isoelectric point)，淤泥顆粒將迅速沉降，改善脫水能力；GT 值為定量淤泥的調理程度，G 值(mixing intensity)為調理強度，T 值(duration time)為時間，較適合的 GT 值為  $G/T(1/\text{sec}^2)$  之比值範圍為 0.5~60 時。

### 3. 淤泥脫水

主要目的為進一步減少濃縮淤泥體積，使淤泥固體物含量更高，並降低成本，使後續處理及處置如搬運、輸送及掩埋等更方便。淤泥脫水方式一般可分為曬乾床與機械式脫水，曬乾床是將淤泥置於砂床上，藉重力滲漏及蒸發兩種物理方式，除去淤泥中水分，且利用太陽能即可達脫水效果，成本低廉，不需增加額外能源消耗，但使用上有較大限制，需充足日照及較大土地空間。機械脫水一般分為離心脫水、真空脫水、帶濾式脫水及壓濾式脫水，以壓濾式脫水效果最好，淤泥餅含水率可降低至 60% 以下。各類金屬鹽類淤泥脫水效果比較如表 7 所示<sup>[15]</sup>，以壓濾脫水效果較佳，如台水公司板新淨水廠、臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)直潭淨水場及公館淤泥廠等即採用壓濾式脫水機。

表 7 各類淤泥在不同脫水方式下之淤泥餅含水率

淤泥種類	含水率 (%)	各種脫水方式之淤泥含水率(%)		
		真空過濾	離心脫水	壓濾脫水
鐵鹽淤泥	74	50	45	36
鋁鹽淤泥	94	83	81	77
石灰淤泥	72~94	44~79	40~76	31~66

資料來源：林聖寰，2003

## 5.2 淨水淤泥餅資源化技術

台水公司所屬 12 區處淨水淤泥餅量年產量約為 14~20 萬公噸，北水處轄下 5 座淨水場，統計產生量約 6.8 萬公噸，因此推估臺灣地區每年產生超過 20 萬公噸以上之淨水淤泥餅。依環保署廢棄物清理法規定，淤泥餅屬事業廢棄物，不得任意棄置，須依法規要求進行妥善處理與處置。淤泥餅重金屬含量一般相當低，由表 8<sup>[15]</sup>可看出，淤泥 TCLP 之重金屬溶出值遠低於有害事業廢棄物標準，故屬

於一般事業廢棄物。國內淨水場處置淤泥方式大多為掩埋處理，但臺灣地狹人稠，掩埋方式已不敷使用，又目前「廢棄物清理法」已將淨水淤泥列為事業廢棄物中「公告應回收或再利用廢棄物」，雖然尚未將其列為「資源回收再利用法」中的資源項目，但因應資源化、零廢棄的概念，淨水淤泥再利用已為未來重要發展趨勢。

表 8 淨水淤泥 TCLP 溶出值

重金屬	銅	鉻	鎳	鉛	鋅
淨水淤泥餅 (mg/L)	0.6 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.01
淨水淤泥焚 化灰渣 (mg/L)	0.6 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.01
法規限值	15	5.0	1.0	5.0	25

資料來源：林聖寰，2003

日本早在 1980 年即開始對淨水淤泥資源化進行相關研究，並於 2000 年公告“淨水淤泥減量及再利用手冊”，積極推動淤泥減量及資源化。日本水道技術研究中心於 2001 年第 4 回水道檢討會資料指出，淨水淤泥餅再利用率約為 36%，淤泥餅再利用方式如表 9<sup>[14]</sup>所示，主要用於農業及土木建築材料兩方面；農業方面有農業用土及園藝用土，土木建築則可做為水泥原料、路面材料、骨材與回填料。與國內相較，日本少了製磚，但多了做為路面材料的再利用方式。

表 9 日本淨水場淤泥再利用方式

自來水事業單位	淤泥處理方法	有效利用方法
橫濱市(小雀) 名古屋市(大治) 京都市(新山科) 大阪市(庭窪) 神奈川縣企業廳	藥注 加壓脫水	土木用資材 水泥原料 水泥原料 水泥原料 再生砂
仙台市(福岡) 東京都(朝霞) 東京都(三鄉) 千葉縣(柏井西) 大阪府(三島)	無藥注 加壓脫水	造粒用土、綠化用土 農業用土、路面材料 農業用土、路面材料 園藝用土、水泥原料 園藝用土、路面材料
東京都(今町) 千葉縣(栗山) 橫兵市(西谷)	造粒、乾燥	園藝用土、路面材料 農業用土、園藝用土 農業用土、園藝用土
大阪市(豐野) 福岡縣南廣域(荒木)	曝曬乾燥	水泥原料 農業用土

資料來源：康世芳，2001

淨水淤泥餅資源化再利用技術目前可分為 3 大項：1.利用淨水淤泥餅中添加之混凝劑殘餘物質作為廢水處理用途之再利用方式，2.經由簡單乾燥、破碎與造粒後作為拌合摻料之再利用方式，如作為園藝培養土、植栽培養土等土壤基質之再利用方式，3.需經高溫完全乾燥或經高溫燒結之土木建築及結構物之資源化再利用技術，如作為水泥生料替代、燒結製磚或鋪面及大地工程材料等，歸納如下：

### 5.2.1 廢水處理程序

Guan(2005)<sup>[16]</sup>等人於廢水中添加鋁鹽淤泥餅作為混凝劑，以提升廢水初級處理中 SS 及 COD 去除效率，研究結果以硫酸鋁淤泥餅中的氫氧化鋁作為混凝劑計算，在 18~20 mg Al/L 的添加劑量下可分別提高 SS 及 COD 去除效率達 20% 及 15%，鋁鹽淨水淤泥餅作為混凝劑在 SS 及 COD 等污染物之去除主要經由沉澱網除與物理吸附機制進行。

Yang(2006)<sup>[17]</sup>等人探討鋁鹽淤泥餅對磷酸鹽的吸附行為，研究結果顯示脫水鋁鹽淤泥餅中含有 46% 高含量氧化鋁，吸附量易受 pH 值影響，在 pH 4.3 時，磷之吸附量為 3.5 mg P/g，界達電位由 +75.8 mV 變化到 -33.7 mV，在競爭吸附中發現， $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  對於磷酸鹽吸附無顯著影響，反映磷酸鹽為特定吸附行為。此外，脫水鋁鹽淤泥餅在吸附磷酸鹽過程中會釋放出  $\text{OH}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等物質，由於這些官能基會與磷酸鹽進行配位基交換機制而進入水相中，證明此反應在磷酸鹽去除為重要機制。

### 5.2.2 土地施用

依據 Basta(2001)<sup>[18]</sup>等人研究結果，淨水淤泥餅為原水中的土壤顆粒，經沉降作用後所蒐集產生，因此淤泥餅性質與土壤接近，且可能含有部分有機物。

廖明聰(2004)<sup>[19]</sup>使用淨水淤泥餅與植物性堆肥，以不同比例配製混合培養土，淨水淤泥餅添加在土壤作為綠美化時，可增加土壤緩衝能力，提高陽離子交換容量(CEC)，且不會增加土壤交換性鋁的含量，無生態毒性之風險，可增加土壤團粒穩定度。

目前日本大阪地區淨水淤泥餅已被全量使用為公共綠地之植栽培養土，國內目前通過的再利用許可案例則被要求淤泥餅仍需添加有機質肥料方可出售，淨水淤泥餅作為栽培土用於底層當作基材時，有機質肥料與淤泥的摻配比例可以較低；施用於表層時，由於植物需要較高養分，則需將有機質肥料的摻配比例提高<sup>[14]</sup>。

目前國內園藝培養土資源再利用廠家並不多，培養土再利用於綠美化用途之實務運用確實可行，兼具環保與淤泥去化的意義，惟尚需藉由農委會修正法令，放寬肥料登記證申請限制門檻，放寬雜項有機栽培介質重金屬限值，方能為培養土資源化開闢長遠之路。

### 5.2.3 土木建材

#### 1. 製磚

淨水淤泥餅利用燒結技術製成建築用紅磚，技術已相當成熟，許多磚窯業者皆已進行實廠大規模量產。製磚過程主要原料為黏土，需添加一定比例無機淤泥作為副原料，經研磨、混合及加入一定比例水分後，再經成型、疊坯、乾燥、燒

## 88 探討淨水場廢污處理與再利用

成等步驟，使黏土與淤泥餅燒結成磚，燒結溫度約 1,000°C，抗壓強度 150 kgf/cm<sup>2</sup> 以上，而製磚通常使用含鐵量較高的淨水淤泥餅。

江康鈺(2004)<sup>[20]</sup>等人探討豐原淨水場自來水淨水淤泥進行燒結處理資源化，討論重點為不同溫度條件下，燒結後試體之基本材料性質，溫度達 1,100°C 時，燒結試體即可符合 CNS 建築普通用磚之一等磚規範標準，且淨水淤泥進行 TCLP 試驗亦低於法規管制標準。

Huang(2005)<sup>[21]</sup>等人將淨水淤泥餅混合廢棄土壤燒結製磚，並將淨水淤泥餅磚體進行 TCLP，研究結果磚體之重金屬溶出濃度均低於法規標準，燒結磚體具有良好包封重金屬能力，且淨水淤泥餅燒結體在燒結溫度為 1,100°C、燒結時間為 15 分鐘時，其燒結磚體亦可符合 CNS 規範之一級磚標準。當淨水淤泥添加 40~50% 混合廢棄土壤燒結製磚時，可有效降低燒結體之軟化。當混合淤泥餅燒結體在成型壓力為 220 kg/cm<sup>2</sup>，燒結溫度為 1,150 °C，燒結時間為 60 分鐘時，混合淤泥餅燒結體符合鋪路磚之規範，顯示淨水淤泥餅燒結體可做為一般建築磚使用。

Chiang(2009)<sup>[22]</sup>等人利用淨水淤泥餅混合稻殼灰以不同燒結溫度燒結製磚，研究結果隨燒結溫度升高，淨水淤泥餅燒結體之抗壓強度亦增加。以淨水淤泥餅混合含量 15% 以下之稻殼灰，並以 1,100 °C 持溫 3 小時製成之淨水淤泥餅燒結體具有較高的抗壓強度，符合 CNS 規範之一級磚標準(150 kgf/cm<sup>2</sup>)，而隨稻殼灰添加量增加，淨水淤泥餅燒結體之抗壓強度則下降。然稻殼灰含量增加會使淨水淤泥餅燒結體之孔隙率上升而提升其隔熱性質。

### 2. 水泥原料

台水公司 12 個區處中主要的淨水場，除傳統的清除處理外，大多數淨水場已採再利用方式，而北水處公館淤泥廠及直潭淨水場之淤泥餅亦採再利用方式，委託台泥蘇澳廠處理，作為水泥原料。水泥係由黏土質及石灰岩原料分別研磨至粉末，按比例混合後焙燒而成。黏土質原料為黏土或頁岩，石灰岩原料為石灰石，研磨灰渣中加入石膏以調節水泥之凝結時間。生料經預熱後，送入旋窯加熱至 1,450°C 高溫燒成熟料。

淨水淤泥餅在水泥原料取代中，可作為水泥生料中取代黏土的角色，惟依據 Huang (2005)<sup>[21]</sup>等人研究結果，並非所有淨水淤泥餅皆可作為水泥生料黏土成分之替代品。不同水源處之淨水淤泥餅受到當地原水及處理方式不同而有所差異。如高雄鳳山淨水場由於化學組成成分與水泥用黏土迥異且含氯量過高，在水泥燒成過程中，Cl 會以化合物型態沉澱於窯壁或排氣管中，造成窯壁腐蝕或排氣管堵塞，因而不適合作為水泥生料使用；北水處直潭淨水場淤泥餅經水泥係數(cement index)配比顯示可完全替代黏土做為水泥生料，熟料中礦物生成不因淨水淤泥餅之添加而有所改變，且在不同淨水淤泥餅替代率下，所製成之波特蘭水泥皆可符合 CNS 波特蘭水泥一型標準。

林東燦(2006)<sup>[23]</sup>以淨水淤泥餅、下水污泥、大理石污泥及轉爐礦泥四種廢棄物燒製水泥，分別作為取代水泥生料中的黏土、矽砂、石灰與鐵礦。研究結果顯示，以不同配比燒製出的水泥，大多能符合波特蘭水泥一型的物理與化學檢定，但抗壓強度則低於一般水泥。

廖慕蓉(2007)<sup>[24]</sup>研究以淨水淤泥替代部分水泥原料，調控生料組成，並於不同燒結溫度下燒製富  $\beta$ -C2S 之水泥。透過游離石灰含量評估熟料燒成度，並利用 reference intensity ratio (RIR)技術定量矽酸鈣晶相。結果顯示淨水淤泥經過適當的配比計算後，可取代部分原料製成水泥生料。

Razak(2009)<sup>[25]</sup>等人利用淨水淤泥餅取代水泥製作混凝土材料，研究結果以 90%淨水淤泥餅添加 10%水泥混合之配比及 90%淨水淤泥添加 5%石灰及 5%水泥之配比具有較高抗壓強度(130~150 kg/cm<sup>2</sup>)，強度高於一般混凝土材料(125 kg/cm<sup>2</sup>)，此或因淨水淤泥餅中氧化矽(33.23%)及氧化鋁(31.98%)含量較高，經由水化反應而形成矽酸鈣使得強度增加。有上可知，淨水淤泥餅做為水泥取代料及砂石取代料確實可行，惟目前水泥廠面臨產業轉型，較少使用淨水淤泥。

### 3. 輕質人造骨材

輕質骨材具有質輕、耐久性佳、隔熱保溫性優及抗壓強度高等特質，最適宜使用於房屋建築構材，尤其是高樓耐震、大型結構物及隔熱等建築工程。將淨水淤泥餅及營建廢棄土混配應用於燒結型輕質骨材製造，係利用造粒法將粉末狀淤

## 90 探討淨水場廢污處理與再利用

泥混合物結合成圓型顆粒團，經高溫 800~1,000 °C 燒結成緻密且抗壓強度約 200 kgf/cm<sup>2</sup> 的顆粒。

劉又瑞(2002)<sup>[26]</sup> 研究探討利用燒結將自來水淨水淤泥資源化再利用，增加營建廢棄土比例可改善燒結輕質骨材品質，燒結溫度增加可提高輕質骨材之強度，在1,050°C 時，即使摻配30%淨水淤泥，抗壓強度依然可達200kgf/cm<sup>2</sup> 以上，在1,000°C、1,050°C、1,100°C 時，成品比重皆小於2g/cm<sup>3</sup>，其綜合比重、吸水率及抗壓強度之測試結果，均符合輕質骨材基本性質。

台水公司與中華民國輕質骨材協會合作，2011 年成功開發以淨水淤泥製成新的環保綠建材—輕質骨材。研究顯示淨水淤泥製作之輕質骨材，其混凝土抗壓強度超過 50 MPa，可用於建造如臺北 101 超高層建築物或大型橋樑，更重要的是，可使整個結構物至少降低 1/4 的重量，對抑制地層下陷有很大助益，亦可提高結構物的耐震度。

### 5.2.4 管線回填材料

管線回填材料係指管溝開挖後管線周圍之回填材料，包括覆於管溝外圍之回填砂及回填砂與瀝青間之碎石級配料與控制性低強度回填材料(Control Low Strength Materials, CLSM)等，回填材料能提供適當之強度、勁度並能均勻接觸管線與提供穩定性。

美國混凝土協會(ACI)定義控制性低強度材料為一種具備自我充填，用為替代優良級配的新興材料，若以混凝土觀點而言，CLSM 更可被定義為一種 28 天抗壓強度不超過 1,200 psi(約 84 kg/cm<sup>2</sup>)之混凝土材料，以膠結料、水、砂及石等材料混合製成俾利未來以人工或機具方式再開挖的超低強度水泥質材料，其組成材料與混凝土相似，但對組成材料的要求，卻無製造混凝土材料的嚴苛規定，因此除使用砂石作為 CLSM 材料外，亦可使用水泥窯灰、焚化底灰、下水污泥、廢鑄砂、廢玻璃與自來水淨水淤泥餅等作為替代材料。由於控制性低強度回填材料具有高工作性，可自充填於管溝中，節省人力，且具有混凝土特性，沉陷量亦較低，檢核項目也僅需進行初凝時間及抗壓強度即可。

紀宗男(2003)<sup>[27]</sup>將淨水淤泥拌製成 CLSM 進行探討研究，就拌製一般型 CLSM 而言，淤泥餅取代比例為 30%時，工作性為最佳，且該研究 28 天抗壓強

度為  $4.6 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ ；就拌製早強型 CLSM 而言，當細粒料用量較高時，工作性較佳，伴隨淤泥取代比例增加，工作性亦趨於改善，但會延緩 CLSM 初凝時間及早期強度發展，因此淨水淤泥餅應用於早強型 CLSM 時，可採用粗粒料且淤泥餅取代比例不可過高。

### 5.3 彙整淨水淤泥餅再利用相關管理規範

目前各淨水場淨水處理程序產出之淤泥餅，依廢棄物清理法第 2 條第 2 項第 2 款規定，屬於一般事業廢棄物，且經由有害事業廢棄物認定標準中之 TCLP，淨水淤泥餅其重金屬溶出量符合法規規定，不屬於有害事業廢棄物，可依一般事業廢棄物相關清理規範逕行處理處置。100 年 2 月 9 日經濟部工業局修訂之「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」再利用種類編號 39 項，將「自來水淨水淤泥」列為以水泥原料用途之再利用事業廢棄物，其相關再利用規定整理如表 10 所示。

表 10 淨水淤泥餅再利用之相關管理規範

法令規範	規範內容
事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準 (95.12.24)	<p>第二條規定之再利用係指事業產生之事業廢棄物自行、販賣、轉讓或委託作為原料、材料、燃料、填土或其他經中央目的事業主管機關認定之用途行為，並應符合其規定者。</p> <p>第三十一條規定事業廢棄物經中央主管機關及中央目的事業主管機關認定，以再利用方式較符資源永續使用方式者，不得以再利用以外方式最終處置。</p>
經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式 (100.02.09)	<p>再利用種類： 編號三十九、淨水淤泥</p> <p>再利用管理方式：</p> <p>一、事業廢棄物來源：工業用水專用設施及自來水淨水場之淨水處理所產生之脫水淤泥。但依相關法規認定為有害事業廢棄物者，不適用之。</p> <p>二、再利用用途：水泥原料。</p> <p>三、再利用機構應具備下列資格：領有工廠登記證之製造業，其產品為水泥或其他相關產品。</p> <p>四、運作管理：</p> <p>(一)再利用機構應具備水泥旋窯設備。</p> <p>(二)再利用後之剩餘廢棄物應依廢棄物清理法相關規定辦理。</p> <p>(三)再利用用途之產品應符合國家標準、國際標準或該產品之相關使用規定。</p>

## 92 探討淨水場廢污處理與再利用

法令規範	規範內容
廢棄物清理法 (102.05.29)	<p>第二條第二項第二款之規定，由事業所產生有害事業廢棄物以外之廢棄物屬一般事業廢棄物。</p> <p>第三十九條第一項之規定，事業廢棄物之再利用，應依中央目的事業主管機關規定辦理，不受廢棄物清理法第二十八條與第四十一條之限制。</p> <p>前項再利用之事業廢棄物種類、數量、許可、許可期限、廢止、記錄、申報及其他應遵行事項之管理辦法，由中央目的事業主管機關會商中央主管機關、再利用用途目的事業主管機關定之。</p>
經濟部事業廢棄物再利用管理辦法 (104.01.09)	<p>第二條第一項之規定本辦法所稱事業，指本法第二條第四項以經濟部(以下簡稱本部)為目的事業主管機關之事業。</p> <p>第二條第二項規定本辦法所稱再利用，指事業將其事業廢棄物自行或送往再利用機構做為原料、材料、燃料、工程填料、土地改良、新生地、填土(地)或經本部認定之用途行為。</p> <p>前項再利用機構以經政府機關登記有案或依法律規定免辦理登記之工商廠(場)為限。</p> <p>第三條第一項之規定屬本法第三十一條第一項公告之事業，於其事業廢棄物清理計畫書經直轄市、縣(市)主管機關或中央主管機關委託之機關審核核准後，始得於廠(場)內自行再利用；其非屬公告之事業者，得自行於廠(場)內再利用。</p> <p>第三條第二項規定事業廢棄物之性質安定或再利用技術成熟者，事業及再利用機構得逕依附表所列之種類及管理方式進行再利用。</p> <p>第三條第三項規定前項附表所列之事業廢棄物再利用用途，如有污染環境之虞者，本部得暫停其再利用；其原因消失時，應即解除之。</p> <p>第三條第四項規定非屬第二項之事業廢棄物種類及管理方式者，應經本部許可，始得送往再利用機構再利用。前項許可分為個案再利用許可及通案再利用許可。</p>

## 六、結論

淨水過程將原水中含泥砂、微生物、有機物等雜質去除的同時，也會產生許多廢污(廢水及淤泥)，廢水處理方式分為直接迴流及處理後迴流或放流，常見處理技術包括沉澱、混凝沉澱、溶解空氣浮除及薄膜處理等；廢水回收再利用分成直接和處理回收。國內淨水場淤泥處理方式大多為濃縮、調理及脫水；淨水淤泥餅再利用方式大致有 3 類：重新回用於廢水處理程序中、使用於建築材料及土壤基質應用。

自來水淨水過程中產生的廢污，若不經處理即排放，將會污染河川，因此，需以資源永續循環為目的，建立策略及目標，依循 PDCA(擬訂對策及措施、行政指導推動再利用、長期監測評估風險、對策及措施之檢討與修正)精神進行推動。

為落實資源化永續利用理念，須積極進行淨水場廢污多元資源化可行性方案研究，加速推動資源化再利用，以保護環境。自來水事業單位乃致力將淤泥餅轉化為有用資源，鑒於傳統以掩埋處理方式成本高，現在台水公司大部分進行再利用處置，以製磚為主及少量水泥原料，僅東部及澎湖地區以掩埋方式處理；北水處亦提供淤泥餅作為製磚及水泥原料。以淨水場淤泥餅作為再利用廠商產品原料，不僅符合環保再生原則，杜絕淨水淤泥餅生成其他二次公害或惡意廢棄傾倒的可能，更可節省淤泥餅最終處置費用及再利用廠商購置原料費用，平均每年可節省近 1 億元以上的掩埋處理費用，可謂創造了自來水事業單位與業者、環保與經濟共同雙贏的局面，亦可將廢棄物轉變為可利用資源，使淨水場成為零排放、零污染環保產業，達成「垃圾變黃金」資源永續利用目標。

## 七、參考文獻

1. MWH, "Water Treatment Principles and Design", 2nd Ed., John Wiley & Sons , 2005.
2. United States Environmental Protection Agency, "Filter Backwash Recycling Rule Technical Guidance Manual," EPA 816-R-02-014 , 2002.
3. 楊正邦、劉志成，「快濾池反沖洗廢水之處理技術及回收再利用」，自來水會刊，第 23 卷第 4 期，p.81~86，2004。
4. Arora, H., Giovanni, G. D. and Lechevallier, M., "Spent filter backwash water contaminants and treatment strategies," Journal of American Water Works Association, Vol.93, p.100~112 , 2001.
5. Cornwell, D. and M. MacPhee, "Effects of spent filter backwash water recycling on cryptosporidium removal," Journal of American Water Works Association, Vol. 93, p. 153~162 , 2001.

## 94 探討淨水場廢污處理與再利用

- 6.姜佳伶，「淨水場沉澱及過濾單元濁度去除及其衍生廢污量之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，p.85~91，2007。
- 7.顏笠安，「淨水場混凝污泥質量特性與脫水泥餅再利用初步評估」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，p.79~80，2009。
- 8.Edzwald, J. K. and J. E. Tobiason, "Fate and Removal of Cryptosporidium in a Dissolved Air Flotation Water Plant with and without Recycle of Waste Filter Backwash Water," *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol.2,p.85~90，2002.
- 9.張添晉，「淨水處理廠廢污處理技術之研究」，中華民國自來水協會，p.9，p.85~86，1997。
- 10.鄭宏德，自來水淨水場脫水污泥資源再利用可行性研究，第 19 屆自來水研究發表論文集，2002。
- 11.Babatunde, A. O. and Zhao, Y. Q., *Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses*, *Environmental Science and Technology*, Vol.37, p.129~164,2007.
- 12.台北自來水事業處，淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估，2001。
- 13.台灣省自來水公司，自來水淨水場脫水污泥再利用可行性研究期中報告，2002。
- 14.康世芳，「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估期末報告」，台北自來水事業處，2001。
- 15.林聖寰，「淨水污泥取代黏土作為水泥生料對卜特蘭水泥影響之研究」碩士論文，國立交通大學環境工程研究所碩士論文，2003。
- 16.Guan, X.H., Chen, G.H. and Shang, C., Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage, *Water Res.*, Vol.39, p.3433~3440 ,2005.
- 17.Yang, Y.; Tomlinson, D.; Kennedy, S. and Zhao, Y.Q., Dewatered Alum Sludge: A Potential Adsorbent for Phosphorus Removal, *Water Science and Technology*, Vol.54, No.5, p.207~213,2006.
- 18.Basta, N. and Dayton, E. A., Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute, *Water Environment Research*, Vol.73, No.1, p.52~57,2001.

- 19.廖明聰，以淨水污泥做為綠美化用地之土壤改良劑，碩士論文，屏東科技大學環境工程與科學系，p.57，2004。
- 20.江康鈺、陳宜晶、簡光勵，淨水污泥燒製磚材之材料特性研究，p.38~48，自來水會刊，第 23 卷第 3 期，p.38~48，2004。
- 21.Huang, C. and Pan, J.R., Mixing water treatment residual with excavation waste soil in brick and artificial aggregate-making, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, vol.131, p.272~277,2005.
- 22.Chiang, K.Y. and Chou, P.H., Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.171, p.76~82,2009.
- 23.林東燦，污泥類廢棄物取代部分水泥原料燒製環保水泥之可行性研究，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，p.153~154，2006。
- 24.廖慕蓉，淨水污泥燒製富  $\beta$ -C2S 水泥之研究，成功大學，中華民國環境保護學會學刊，第 28 卷第 2 期，p.135~144，2007。
- 25.Razak, H. Abdul., Naganathan, S. and Abdul Hamid, S. N. , Performance appraisal of industrial waste incineration bottom ash as controlled low-strength material, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.172, p.862~867,2009.
- 26.劉又瑞，淨水污泥混合營建廢棄土製磚及燒結人造骨材的研究，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，p.138~150，2002。
- 27.紀宗男，淨水污泥餅資源化應用於管溝回填材料之研究，碩士論文，淡江大學土木工程學系，p.145~146，2003。