

下水道污泥资源化再利用及處理處置技術探討

黃聖賢

中興工程顧問股份有限公司環境工程二部計畫主任

摘要

污泥之處理處置以減量化、安定化、衛生化、資源化為目標。隨著污水下水道建設持續發展，下水污泥產量逐年增加且體積極龐大，由於下水污泥的最終處置用地取得困難，污泥之最終處置問題即為污水下水道建設之重要課題。因此污泥的最終處置方式乃朝向資源化發展，常見污泥資源再利用之方式大致包括綠農地利用、建設資材利用及熱利用等。然而依污泥資源再利用途之不同，其應具備之條件亦不一，例如綠農地利用需具肥效及土壤改良效果、有害成分不得溶出污染地下水與地表水、不得含對植物有害之成分及於農業上使用不得含可經植物對人體有害之成分；建設資材利用需具有土建材料所需之強度、使用於與土壤接觸時有害成分不得溶出。除此之外，污泥資源再利用亦受相關法規、再利用產品品質要求以及市場產銷等因素限制，而一直未能順利推廣。本文將就國內外污泥资源化再利用經驗回顧、污泥資源再利用方式、處理技術乾燥、堆肥、焚化、熔融及污泥資源再利用課題等項予以探討，以期提供將來污泥資源再利用處理處置工作者之參考。

關鍵字：污泥資源再利用、綠農地利用、建設資材利用、乾燥、堆肥、焚化、熔融

一、前言

污水下水道建設被視為都市現代化程度之重要指標，亦為改善都市污染及環境衛生之具體措施。我國污水下水道建設正依污水下水道方案積極推動中，如台北地區污水下水道之建設，始自民國六十一年迄今已逾三十年，按民國八十八年六月完成「台北市污水下水道後續發展方案先期規劃」報告⁽¹⁾，該規劃以民國 109 年為規劃目標年，屆時總污水處理量約 153 萬 CMD，其中迪化、內湖二座污水處理廠未來日平均總污水處理量約 76 萬 CMD，其餘 77 萬 CMD 之超量污水則送至八里污水處理廠併同台北近郊地區之污水處理。未來隨污水下水道接管率提高，台北市污水下水道系統所產生污泥量勢必逐年增長，最終污泥餅產量為迪化、內湖有 543 公噸/日，八里廠有 298 公噸/日，伴隨而來的是污泥最終處置問題。至於污泥最終處置方面，除短期採衛生掩埋方式處理外，惟隨著污泥量的激增，現有掩埋場勢必無法消化未來龐大的污泥量，因此，未來應朝污泥減量化、安定化及資源化之最終處置方式，該規劃建議中長期採焚化處理為主，並以設置大台北地區聯合污泥處理設施為原則，至於考慮資源回收再利用以焚化灰渣作為掩埋場覆土、堆肥公園綠地用、熔渣取代部分天然砂石為目標。惟由於國內應用經驗及適用法規仍有不足，因此有必要針對污泥资源化再利用方式及可行性進行深入評估。

二、國外污泥资源化再利用經驗

依國外污泥處置之經驗顯示，已禁止污泥採海洋處置之方式，而逐漸改採農業用途、焚化處理、掩埋處置或其他再利用途徑。在污泥處理處置之趨勢，繼續朝资源化再利用方向發展，在技術上主要包括堆肥處理後綠農地利用及焚化或熔融處理後作為土建材料化利用等。以下將就污泥處理處置較先進之日本、美國及歐洲等作為經驗回顧對象，並予以略述如后。

1. 日本

日本 1997 年經中間處理後下水污泥之最終處置方式係以陸地掩埋(61%)及再利用(33%)為主(詳表 2)⁽²⁾，惟由於日本土地缺乏，處置場難覓，減量化已成為污泥處理之重要課題，近年來焚化灰已佔最終處置總量之 69%(固體物量基準)。此外，在污泥回收利用方面亦普遍受重視，1994 年有效利用 24% 率至 1997 年則增加至 33%，其中回收作為建設材料之比重(59%)，已逐漸超過堆肥化之綠農地利用(41%)。如在綠農地再利用方面，日本建設部公佈了「下水污泥綠農地使用手冊」，由於在執行農地使用時訂有相當嚴格之重金屬標準，故在綠農地利用量之成長不大，主要在於景觀上的利用。另日本是全世界利用焚化灰或熔融渣進行回收再利用最早的國家之一，日本建設省亦已制定「下水污泥之建設資材利用手冊」來推廣，其中焚化灰渣廣泛使用在掩埋場覆土，或與其他材質混合作為陶瓷產品的原料；至於品質更佳之熔渣，則得直接使用在道路基底層或做為其他骨材。目前日本污泥資源有效利用正朝廣域化、民營化、再利用產品品質管理、宣導、技術開發，以及生命週期成本之觀念邁進。

表 2 日本經中間處理後之下水污泥處置方式
(1994 及 1997 年)

(千 DS-t/年)

處理狀況		處置狀況				
		陸地掩埋	海洋拋棄	有效利用	其他	合計(%)
脫水泥餅	1994	795	102	392	176	1465 (62%)
	1997	243	0	84	24	351 (21%)
焚化灰	1994	150	116	87	7	360 (15%)
	1997	780	0	344	56	1180 (69%)
乾燥污泥	1994	8	0	39	22	119 (5%)
	1997	14	0	139	8	161 (9%)
消化、濃縮污泥	1994	11	0	64	399	161 (18%)
	1997	0	0	0	18	18 (1%)
合計 (%)	1994	964(41%)	218(9%)	574(24%)	604(26%)	2365(100%)
	1997	1037(61%)	0(0%)	567(33%)	106(6%)	1710(100%)

資料來源：1.日本下水道協會，「下水道協會誌」，1999/3，Vol.36，No.437。

2. 美國

美國污泥處置與利用之管理控制⁽³⁾，主要為 40 Code of Federal Regulations Part 503「下水道污泥利用或處置標準」(standards for the use or disposal of sewage sludge)主要規範下水污泥應用在農地利用、焚化、衛生掩埋等操作，農地利用方面，對於污泥所含重金屬、致病菌、養分(氮、磷、鉀)訂定濃度標準，並將之區分為 A 級污泥，可直接施用於農地，及 B 級污泥，雖可作為土地利用，但若要為人類時用之穀類施肥用，則須經進一步處理。焚化方面，污泥需在專用焚化爐中進行燃燒，並依據健康風險規劃、污泥輸入量、各種可能污染物之初始濃度、各類成份於大氣中之散佈係數等考量，來決定焚化排放氣體中砷、鉍、鎘、鉻、銅、汞、鉛、鎳、鋅等每天所能容忍之最高排放濃度，另污泥焚化同時受乾淨空氣法案(clean Air Act)、新資源執行標準(New Source Performance Standards)及國家有害空氣污染物排放標準(National Emission Standard for Hazardous Air Pollutants)等之規範。目前雖然仍以掩埋為主，但被接受度已漸降低，污泥之生物處理及安全有效利用受到重視，將為美國污泥處理新趨勢。

3. 歐洲

1998 年歐洲共同指導委員會(EC Directive)已建議禁止污泥的海洋棄置，在土地處置方面該委員會已於 1986 年公佈污泥利用至農業土地的限制條件，藉由污泥處理、重金屬限值及監測、土地使用及紀錄保存之要求，俾提供一致污泥處置實務。其中主要污染物是考慮潛在毒性元素(重金屬)及致病微生物，重金屬管制是採最大土壤含量與最大污泥含量限值。在焚化方面，該委員會要求於污泥焚化設計階段，需由有能力之權威人士或機構認可。至於掩埋方面則鼓勵乾淨之技術與廢棄物回收，主要執行考慮處置執照取得、地下水保護監測及檢視處置操作等。

三、污泥資源化再利用方式

通常污泥最終處置以資源化再利用方式(彙整詳如表 4 所示)大致包括綠農地利用及建設資材利用等再利用之方式^(4,5)，茲以概述如下。

表 4 污泥資源化再利用方式

方式	中間處理		資源化處理	產品	用途
	技術	產物			
綠農地利用	無	脫水污泥	直接利用	脫水/曬乾污泥	肥料
	無	脫水污泥	乾燥	乾燥污泥	肥料、土壤改良、掩埋場覆土
	無	脫水污泥	堆肥發酵	堆肥化肥料	肥料、土壤改良
	焚化	焚化灰	造粒	造粒物	園藝用土壤、肥料
建設資材利用	無	污泥	固化/穩定化	固化物	堤防、路基材、消波塊
				造粒物	輕質骨材
		脫水污泥	直接利用水泥化	脫水污泥	水泥原料
	焚化	石灰系	直接利用	焚化灰	路基材、路床材、水泥原料、

		焚化灰	造粒	土質改良劑	混凝土二次製品及瀝青混凝土等之原料、回填土材、土質改良材	
			添加於建築廢棄土	改良土		
		高分子系 焚化灰	造粒燒成	造粒物	輕質骨材	
			混練燒成	燒成物	磁磚、透水磚、陶管	
	加壓成型燒成		燒成物	地磚		
	熔融		熔渣	路基材、混凝土骨材		
	熔融	熔渣	直接利用		熔渣	
			成型	成型品	磁磚、裝飾品	
	熱利用	直接利用	脫水污泥	衍生燃料化	衍生燃料	燃料
				乾燥	乾燥污泥	燃料
焚化、熔融		廢熱	廢熱回收	蒸汽	發電、地區冷暖房供熱	
厭氧消化		沼氣	直接利用、脫硫裝置	甲烷氣	發電、燃料	

1. 綠農地再利用

綠農地資源化係利用污泥所含有機質對植物生長肥效與土壤改良之效果，一般脫水污泥成分如表 5 所示⁽⁴⁾。除可作為農業用途外，亦可用於公園綠地之綠化植栽，因此，污泥在綠農地利用上應具相當之發展潛力。一般污泥綠農地利用依使用前之處理狀況，大致分為有直接利用、乾燥造粒、堆肥或焚化造粒等方式。

表 5 脫水污泥、乾燥污泥及污泥堆肥之一般成分

(乾重%)

種類	凝聚劑	有機物	C/N 比	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	PH	鹼分	含水率
脫水 污泥	石灰系	51	7.9	3.2	3.5	0.21	11.6	2.3	74
	高分子系	70	6.5	5.2	5.8	0.36	7.1	3.1	79
乾燥 污泥	石灰系	42	8.2	2.7	2.3	0.15	10.4	21	9
	高分子系	56	6.1	4.5	3.6	0.30	6.5	3.7	18
污泥 堆肥	石灰系	36	9.3	2.0	3.6	0.21	7.7	19	27
	高分子系	53	9.4	2.7	3.2	0.36	7.1	6.4	31

資料來源：歐陽嶠暉，都市污水處理廠之污泥處置與資源化再利用之研究，87.01。

(1) 直接利用

直接利用係將污泥噴灑或耕入土壤內作為有機肥料，此方式常應於土地廣闊之北美地區，惟因體積大施用不方便，且可能因有機質受雨淋而快速釋出導致土壤缺氧及硝酸氮升高污染地下水等缺點，再加上臭味及致病菌等環境衛生問題，故似不適合於台灣地區。由於污泥中含有機物、重金屬及致病菌等對環境有衛生上及二次污染之虞，因此對污泥直接利用需嚴加探討與規範。

(2) 污泥乾燥造粒

乾燥處理是將熱能導入污泥，除使污泥水分蒸發達減量外，亦具滅菌及避免臭味等效果，惟乾燥對污泥其他性質並未改變，若施用過量，仍存在與直接利用之相同缺點。綠農地利用通常是污泥經乾燥後做成粉狀或粒狀之乾燥污泥，而直接作為土壤改良劑或肥料使用，一般乾燥污泥成分如表 5 所示。另污泥使用乾燥機加熱乾燥方式，雖加熱處理可滅菌、降低水分避免茲生病媒，惟脫水後污泥一般仍含高濃度水分且粘著性強，乾燥不易，需耗費大量熱能源。至於國外經驗，如日本北廣島市乾燥污泥之實例⁽⁶⁾，污泥經脫水(83%)、乾燥後免費提供當地農民使用，其肥料之肥效成分，有機質(69.3%)、氮、磷、鈣含量高。惟當肥料施用時，鉀含量(0.3%)不足，實際施用時需混合其他禽畜糞肥。

(3) 污泥堆肥

通常污泥中有機質易分解，若直接施用於農地作物，則因有機物快速分解造成氧之消耗，阻礙植物生長，同時亦容易使植物根部腐敗，為減少前述污泥直接與乾燥利用之不利影響，得將污泥堆肥處理，利用微生物分解及酵素合成將有機質轉化為腐植質，且堆肥產品中亦含水質素、氮、磷、鉀(含量視原料、副資材及添加物而定)等元素，同時堆肥在施用上具改善土壤物理特性、促進通氣與排水、增加保水能力及提高肥料緩效等功能。此外，一般污泥之含水率約 70~80%，在堆肥過程中因有機物分解而產生之發酵熱將水分蒸發，另強制通風亦會將水分帶出，使堆肥成品之含水率低，一般經堆肥化後，其重量約減少 1/2~1/3。另污泥中含有病原菌、寄生蟲卵及雜草種子等，若直接用於農地可能產生衛生上問題，堆肥過程中產生之發酵熱可殺滅致病菌，達無害化及衛生化之目的。

綜上說明，污泥作為綠農地有機肥料再利用之處理方式包括脫水污泥直接利用、乾燥污泥及污泥堆肥，由於考慮有機物質安定化、降低含水率及臭味、易於搬運處置及對環境衛生之影響，因此，都市地區之污泥再利用仍以經堆肥化使用較為理想。但堆肥化常見缺點，污泥經消化後有機物含量較低，降低發酵效果，增長堆肥處理時間；又當堆肥產品含水率偏高時，易發黴而失去商品價值，因此，污泥進堆肥化過程前，可先乾燥降低水分，或添加副資材調整水分，降低蒸發水量，惟需額外燃料或副資材費用增加成本問題。故於考量污泥堆肥再利用，應在工程規劃時，審慎評估污泥性質、有機堆肥市場需求量、再利用相關法規限制、污泥堆肥產品定位等因素。

(4) 污泥焚化造粒

污泥經焚化後有機成分已少，但可利用焚化灰內含之磷、鎂、鐵、矽等元素(如表 7 所示)⁽⁴⁾，焚化灰經混練、造粒、燒成後作為園藝肥料或供土壤改良使用。如高分子系焚化灰較適宜作為肥料，而石灰系焚化灰因氧化鈣(CaO)含量較高(約 40%)且其具固結作用，對於土壤改良甚具效果，惟應用之實例並不多。如日本大阪府大和川下游流域下水道大井處理場研究案例⁽⁷⁾，主要推廣應用於屋頂綠化上，主要材料焚化灰，其成分 SiO₂ 36%，P₂O₅ 22%，Al₂O₃ 17%，CaO 9%，Fe₂O₃ 5%及灼熱減量(Ignition Loss) 1%以下，以高混合率(90%)製品成多孔質陶瓷，具通氣性、透水性、保水性之性質，可作為土壤改良材。副加材料脫水污泥混合率(40%)可成功通過植栽試驗，可作為園藝培土用。

表 7 日本污泥焚化灰成分

(乾重%)

凝聚劑	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	其他
石灰系	21.5	7.6	2.7	4.8	40.1	15.3	0.6	0.5	4.7
高分子系	23.7	14.4	2.8	12.4	8.1	9.1	1.2	1.4	6.9

資料來源：同表 5。

2. 土建材料再利用

污泥作為土建材料利用依處理方式不同，大致得歸納為焚化灰再製土建材料、熔融熔渣再製土建材料及環保水泥等如下，至於再利用途徑則分為直接利用及加工再利用兩種。直接利用係指未再加工而直接作為瀝青混合料、土壤改良材、水泥原料、混凝土二次製品原料、衛生掩埋場覆土、路基材等，而加工再利用則是以焚化灰及熔融熔渣為原料，予以加工處理為較高級之土建材料成品。

(1) 焚化灰再製土建材料

基本上污泥焚化後產生之灰，依脫水用凝聚劑不同焚化灰成分如表 7 所示，石灰系焚化灰中氧化鈣含量較高且其具有固結作用，除可綠農利用為土壤改良或培植土外，亦可取代水泥及生石灰作為土質改良劑，如與開挖廢棄之軟弱土質混合改良其土質後再作為回填土，以減少工程費；另高分子系焚化灰之矽化合物含量與水泥原料之黏土成分相似，可用於水泥廠取代一部分水泥原料，惟其已無有機物和直接以污泥作替代水泥原料不同之處為已不具能源價值。另若將焚化灰進一步加工，得將焚化灰、水泥及骨材等經混拌、成形、養生等過程做成各種混練磚，用於道路工程之鋪磚或混凝土二次製品；亦得經混練、成形、燒成等過程製成人工輕骨材、磚塊、壁磚、面磚等較高級建築材料。

至於焚化灰為原料再加工利用的方法，依焚化灰所具特性及加工製造過程而製品與用途皆不同。其中以燒成(燒結法)為常用之加工方法較常見，因燒成可產生化性極安定之燒成物外，所耗能源又較熔融法為少，並兼具資源回收功能。一般燒成在低於熔融的溫度下進行，焚化灰中之 SiO₂、Al₂O₃、Fe、Ca、Mg 等氫氧化物及硫酸鹽、氧化物等，在燒成過程中伴隨熱分解及固相反應，產生玻璃化、收縮、緻密化及再結晶等作用，使粒子間相互結合固化，增加燒成體強度，可作為骨材使用。

日本大阪市透水磚製造推廣案例⁽⁸⁾，以磁器粉為骨材四周塗黏土附著焚化灰，造粒、加壓成形後 1100 °C 高溫熔融形成微細氣孔，製成透水性、保水性優之透水磚。大阪市之透水磚製造技術係有效利用下水道有限資源、能源，以焚化灰為主材料，骨材則以管、溝淤泥之洗砂及管線陶管屑，透水磚燒成熱源則利用污水處理廠消化氣體。依利用目標透水磚之強度及品質應符合曲張強度 30 kgf/cm²，透水係數 1X10⁻² cm/sec(日本建築學會規格)。大野下水處理場內透水磚製造設施，1999 年 1 月開始製造透水磚 RAITO (Recycle, Availabe, Ideal-Technology, Qasis)，其組成為焚化灰 42.5%，骨材有洗砂 11%、陶管屑 14.5%、磁器粉 28%，黏土 4%等，下水道資源使用率佔組成比率 70%。

(2) 熔融熔渣再製土建材料

熔融處理係將污泥或焚化灰投入熔融爐，其與焚化之差別主要熔融爐溫度較焚化爐為高之燃燒，污泥經加熱後水分被蒸發，有機物被分解燃燒，將熔融爐之爐溫提高至 1200 ~ 1500 °C，此時無機物開始融成熔液，當熔融程序完成後，此熔液緩緩流下再降溫冷卻形成可資利用之熔渣。惟因污泥含水分高並不適合直接就投入熔融爐，一般均先經乾燥後再送入熔融爐處理，如此除節省熔融時所需能源外，亦可大幅縮減熔融爐處理容量。

熔渣依熔液冷卻方式主要可分為水冷熔渣、氣冷熔渣、結晶化熔渣及特殊熔渣等，各種熔渣之性質如表 8 所示^[9]。水冷方式係熔液排出直接掉入水槽，利用水淬方式使熔渣碎裂成 1 ~ 5 cm 細粒狀而稱之為水淬熔渣；氣冷方式則是熔液排出時，利用空氣自然冷卻降溫(冷卻速度 5 °C/min)使熔渣成形稱之為氣冷熔渣，一般冷卻速度愈慢，其熔渣結晶化愈強；而結晶化熔渣乃是將水淬或氣冷熔渣在予以熱處理，依熱處理方法不同，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，低溫結晶化熔渣之熱處理溫度介於 900 ~ 930 °C，而熱處理時間則維持在 20 ~ 30 分鐘。高溫結晶化熔渣之熱處理溫度介於 1,100 ~ 1,150 °C，而熱處理時間則維持在 30 分鐘。至於加熱結晶化熔渣係將熔液冷卻至 650 °C，使結晶核均勻且大量成長，再加熱至軟化點溫度使結晶再度成長。另保冷結晶化熔渣則為熔液在熔流溫度範圍內，緩緩冷卻而得。

結晶化熔渣案例^[10]，日本京都市之污泥熔融石材化製程，脫水污泥經流動乾燥機至水分 5wt%，噴入旋回熔融爐燃燒，剩餘灰一併熔融。熔融爐後接續清澄爐消除熔液中氣泡後，熔液掉入冷卻裝置冷卻固化呈玻璃質熔渣，以輸送機送到結晶化爐將玻璃質結晶化改質。冷卻固化若採氣徐冷得 5 ~ 20 mm 石材化熔渣，採水冷得 5 mm 以下石材化熔渣。石材化熔渣之物理特性可符合骨材規格要求，氣徐冷石材化熔渣粒度可替代 6 號碎石。石材化熔渣之用途包括瀝青用骨材、混凝土用骨材、透水性連鎖磚用骨材、鋪道燒成磚用骨材及外壁磁磚原料。

另高溫熔渣除因冷卻方式不同而性狀各異外，亦受污泥性質、熔融爐型式等影響，依污泥所添加凝聚劑不同，熔渣之化學成分如表 9 所示^[11]，主要成分包括 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 等。

表 8 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	將熔融液放在水中或噴水，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
	間接水冷渣	間接水冷。	塊狀，玻璃質，強度比水淬渣大。
氣冷熔渣		熔融液在空氣中冷卻。	塊狀，粒徑 5~15 公釐集中，粒形多角，扁平，低結晶化熔渣，較水淬熔渣緻密堅固，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-wollastonite，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黏著，不產生黏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。
特殊熔渣	風液、發泡等瞬時冷卻。	有孔玻璃狀，纖維狀風液渣、發泡渣。

表 9 日本下水污泥熔渣化學成分

種類	CaO/Si O ₂ mol 比	化學成分(%)								
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	
容 渣 泥	高分子系	0.18	7.3	42.8	21.8	8.6	2.2	2.4	11.0	0
	石灰系	1.1	33.1	32.1	14.4	4.5	2.4	1.3	8.0	0
高爐熔渣	1.3~ 1.5	42	32	14	6	-	-	-	-	
波特蘭水泥	1.6~ 3.0	65	22	5	3	1	1	0	-	

資料來源：杉山 武，月刊下水道 Vol. 23，No.8，2000 July。

熔渣之用途主要依其冷卻方式與組成之不同，在應用上亦有所差異，最常應用於路基材、混凝土骨材、混凝土二次製品材料及透水材料等，茲予以略述如下：

A. 路基材

水淬熔渣為玻璃質呈非晶質細粒，強度較低，與道路用碎石之規範比較部分性質不適用，且水淬熔渣表面光滑，施工性較差，須進一步結晶化。因此水淬熔渣可用於下層路基材材料，且熔渣替代率須小於 20%。氣冷熔渣雖較水淬

熔渣適用於下層路基材料，但是表面光滑亦以使用於腳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較優於氣冷熔渣，應用於路基材之試驗結果，與天然碎石性能相似。

B. 混凝土骨材

水淬熔渣應用於混凝土細骨材，經水泥砂漿試體之試驗結果顯示熔渣替代率增加，其抗壓強度明顯降低，最大熔渣替代率為 50%^[12]。氣冷熔渣之應用較水淬熔渣為佳，其壓縮強度約為天然骨材之 76%~90%，彎曲強度則約為 85%~95%，然仍以低強度及小型混凝土構造物之利用為主。至於低溫結晶化熔渣替代混凝土細骨材之應用時，其壓縮強度約為一般混凝土之 80%~90%，彎曲強度則約為 95%~106%，同時混凝土強度可達 200 Kg/cm²。而保冷熔渣之抗壓強度與天然碎石相同。日本之應用研究案例^[11]，以高分子系水淬熔渣粉碎並與水玻璃硬化製成混凝土骨材用，稱之為 ecoNOVEL (Ecological-Novel-Concrete 之簡稱)。因高分子系水淬熔渣中 CaO 含量低，亦可謂之為「低鹽基度熔渣」，硬化反應弱酸 CaO 水合物生成少，而耐酸性之凝膠體及鋁酸鹽等生成，使得 ecoNOVEL 具耐酸性，因可用於酸性土壤埋設物及酸性溫泉排水構造物上。惟原料熔渣之乾燥、粉碎及運輸等費用，較普通波特蘭水泥價格為高，此是 ecoNOVEL 無法普及擴大使用之限制。

C. 混凝土二次製品材料

應用於混凝土二次製品材料主要包括小口徑下水道管渠、污水人孔之骨材利用等，其中細骨材替代率最大為 50%。

D. 透水材料及人行道磚

一般而言，熔渣可應用於人行道磚，其細骨材替代率最大為 50%，且人行道磚之壓縮強度應在 45 Kg/cm² 以上。至於熔渣再加工利用製成透水磚，目前以水淬熔渣之應用較廣泛。

按上述資料顯示，在土建材料利用上，將焚化灰再經熔融處理後容積減少約為焚化灰之 1/3，重金屬被玻璃質固封防止溶出效果佳，達無害化及性質均勻之效果，熔融為優良之資源化再利用之技術。熔融處理技術在日本較為成熟，且已達商業運轉階段，目前更朝品質安定化及規格化方面發展。

(3) 環保水泥

一般下水污泥有機物含量高，並不適合直接作為土建材料再利用，但可供水泥廠作為水泥原料添加物。此種利用方式除可節省燃料及削減水泥原料外，自污泥處置觀點具有不需脫水污泥掩埋用地、不需如其他利用方式再加工處理，可節省費用及無銷售通路問題，可保長期安定供應等項優點。但水泥廠與污水廠相距甚遠，運費將為一大負擔，此方式受位置條件限制。

除上述利用方式之外，亦有將污泥、垃圾焚化灰及添加物一併於水泥旋窯中高溫燒製，生成物經通氣冷卻及添加石膏後予以粉碎即製成環保水泥^[13]，惟因生成物中之氯鹽成分較一般之波特蘭水泥為高，不適用於含鋼筋之混凝土，故其應用侷限於人工漁礁，防波堤或消波塊、道路基底灰或其他無鋼筋之

混凝土等製品。

四、污泥资源化再利用課題

污泥之最終處置採资源化再利用方式，除可有效減輕掩埋場負荷外，同時亦兼顧資源循環再利用，已成為污泥處理處置之趨勢。惟以國內以往以廢棄物(垃圾)堆肥资源化再利用之經驗，由於堆肥產品品質不良、經營管理不善、處理技術欠缺、法令規範不足及化學肥料普遍使用等因素，致使堆肥廠相繼停工或停廠之後果。因此，國內未來推動污泥资源化再利用上，除考量工程技術及政府政策配合外，尚須突破再利用市場困難及法令限制等二大瓶頸。

1. 突破再利用市場困難

污泥再利用市場之接受度，主要受再利用產品之品質及應用方便性影響。以目前污泥资源化再利用主要方式之土建材料及農綠地為例說明，若將污泥處理後作為土建材料使用，同時要求其品質與應用方便性，則以經熱處理後呈熔渣狀態是較佳的選擇。熔渣之再利用方式相當多元化，包括道路之路基、初級骨材、與其他調節材混練成型燒成各式燒成磚、與一般骨材水泥混練養生生成混練磚，惟熔渣在再利用前，宜先前處理去除其玻璃質光滑裹握力不足之特性。熔渣成品即使受土建材料市場變動影響，再利用情況不如預期，因其體積小、密度大、儲存容易、二次污染顧慮低，亦得兼顧「環境」與「安全」方面之考量。至於農綠地方面，由於污泥內含有機成分及臭味問題，不宜直接或經乾燥造粒後作為肥料或土壤改良劑，故應先將污泥堆肥發酵，應可得較佳之農綠地再利用產品。至於肥份較低問題，可考量混入其他有機質成分（如禽畜糞尿等）作混合堆肥；另重金屬問題，則應做源頭管制，並限制含重金屬量多之污泥不得進場堆肥。因此，欲突破污泥再利用市場之瓶頸，應朝高質化產品與多元化之方向推動，同時亦須搭配法規與政策性之輔導措施，以及可藉民營化增加經營與銷售彈性。

2. 法令限制

國內對下水污泥處理處置限制之相關法令相當多，如堆肥處理產品欲以肥料販售、使用時，應符合「肥料管理法」、「肥料登記申請及核發辦法」及「肥料種類品目及規格」、「一般廢棄物儲存清除處理方法及設施標準」第十八條與「未經公告再利用類別及管理方式之一般事業廢棄物再利用計畫申請程序」之規定。因此限制產品用途，在推廣策略上，初期宜以公園綠地為主要考量，作為較具肥分之土壤改良劑，若實際使用狀況反應佳，可考量擴大使用範圍還原於農地。此外，主管機關亦應比照日本經驗訂定如有機質肥料基準、綠化施用指針、建設資材使用手冊等，以供未來污泥處理處置资源化再利用之依循。

五、結語

未來國內各污水處理廠所產生的污泥量日益龐大，最終處置問題必將面臨考驗，若不當處理處置污泥會衍生臭味、土壤污染等環境公害問題，再加上其含水率高且具一定體積，故處理污泥宜先以「減量安定」為基礎，但為顧及污泥處理後之最終處置問題（掩埋場難覓），若得將處理後之產品更進一步作為「再利用」用途，則應為較佳之終極目標。衡量國內各污水廠污泥均已經消

化污泥之有機成分不高因之，污泥介於再利用價值不甚高，但完全忽視又甚為可惜之灰色地帶。在「減量化、安定化」及「減少最終處置負擔」之雙重要求下，建議未來興建污泥處置廠宜以熱處理焚化或搭配熔融為基本處理流程，無論產生之熔渣爾後是否得有效再利用，污泥均已經有效之減量化及安定化；雖堆肥廠投資成本較低，但處理廠房佔地空間大，產品儲存空間亦較大，且頗易受再利用市場波動之衝擊，故不宜作為主要處理方式，而宜視為發揮污泥農綠地再利用性之輔助流程。

參考文獻

1. 台北市政府工務局衛生下水道工程處，臺北市污水下水道後續發展方案先期規劃報告，八十八年六月。
2. 筒井誠二，下水污泥資源化之現狀與課題，下水道協會誌，1999/3，No.437，Vol.36，P.4~8。
3. 朱敬平、李篤中，污泥處置(IV)：策略與永續利用，台大工程學刊，第84期，九十一年二月，P.91~101
4. 歐陽嶠暉，都市污水處理廠之污泥處理與資源化再利用之研究，內政部營建署，八十七年一月。
5. 台北市政府工務局衛生下水道工程處，台北地區污水處理廠污泥處置規劃—工程規劃報告，第四章九十一年一月
6. 編集部，乾燥污泥地元農家肥料全量配布，環境設施，No.78，1999/12，P.80~81。
7. 豐雅文，下水污泥燒卻灰之植生土壤、土壤改良材回收再利用，月刊下水道 Vol. 23 No.8，July 2000，P.24~25。
8. 上村敏夫，燒卻灰利用於透水磚，月刊下水道 Vol. 23 No.8，July 2000，P.36~37。
9. 江康鈺、王鯤生，污泥熔融處理及資源再利用技術，工業污染防治，第64期，Oct. 1997，P.156~188。
10. 長田博文，下水污泥熔融石材化熔渣有效利用之現況，月刊下水道 Vol. 23 No.8，July 2000，P.29~30。
11. 杉山武，下水熔渣耐酸性混凝土製品 ecoNOVEL 回收與商品展開，月刊下水道 Vol. 23 No.8，July 2000，P.16~17。
12. 詹孟贊、李釗、歐陽嶠暉，都市下水污泥熔渣細骨材利用可行性再之研究，第十屆廢棄物處理技術研討會論文集，P.54~63。
13. 福永俊美、榮一雅，都市垃圾燒卻灰之 cement 原料化，環境管理 Vol.34 No.9，1998/9，P.32~40。