

廢棄物類

回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

林凱隆*、藍如穎**

摘 要

隨著都市化發展及建築用地增加，致使不透水層面積大幅擴張，且多集中於人口聚集的城市；由於一般鋪面往往具高單位重與低孔隙等特性，易吸收太陽輻射之短波紅外線而形成高聚熱體，因而逐漸形成都市熱島效應。本研發係回收再利用陰極射線管(Cathode Ray Tube, 簡稱 CRT)於不同燒結溫度(1,200~1,270°C)下製備環保保水鋪面，使其具有良好之機械特性及保水性能，以達改善熱島效應之效果，未來可望促使人造城市轉變為具吸存水的海綿城市，達成降溫、防洪及抗旱等效益，根本解決人造城市阻絕水與生態的問題，邁向真正的生態與低碳城市。其次，研究結果顯示，CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土之 TCLP 溶出符合法規標準，具資源化再利用潛力。當 CRT 廢錐管玻璃取代量為 20%、燒結溫度為 1,150°C 及 1,200°C 之環保保水鋪面，係符合 CNS 382 R2002 規範建築用普通磚之抗壓標準值(> 15 MPa)且其保水量符合日本保水性鋪裝材料規範之保水量 (>0.15 g/cm²)，可達成環保、斷熱、輕質兼具高強度及高保水性的技術目標，顯示 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土具資源化再利用為保水鋪面之潛力。

【關鍵字】熱島效應、燒結、保水鋪面、陰極射線管、資源化

*國立宜蘭大學環境工程系 教授

**國立宜蘭大學環境工程系 碩士

一、前言

由於台灣地狹人稠，加上生活水準提升，雖擁有舒適的生活水準，但對環境之衝擊亦不斷上升；由於大量排放人工熱以及都市的過度開發，加上建築物和大量人工鋪面均屬高密度且易於蓄積熱能之材料，因而引發都市溫度升高之熱島效應。一般而言，熱島效應係由建設、交通及自然 3 方面所造成(孫振義,2008)；在建設方面，密集建築物與鋪面充斥著瀝青、磚頭、鋼筋混凝土等高熱容量材料，勢必減少綠地、植被的存在，進而影響植物本身保水性以及調節環境溫度之功能；交通方面，因汽機車的普及化，排出的廢氣、廢熱以及大量的 SO_x 、 NO_x 、 CO_x 及粉塵等污染物覆蓋都市，造成能量無法釋放並被侷限於地表；自然方面，太陽輻射能量因受上述因素影響，以質能守恒(Conservation of mass-energy)的角度，當太陽以 100%的輻射量進入都會區後，其必須以 100%的輻射量返回大氣中，但過度的鋪面及污染物，使能量無法散失，導致城鄉溫度差異大而加速都市熱島效應(張靜怡,2015)。

至於「海綿城市」則主要利用都市中分散而可運用之土地與建物空間(如圖 1 所示)，隨都市人口逐漸增加，農地被混凝土所取代，使土壤之蒸發潛熱降低，若能使用保水鋪面取代傳統混凝土鋪面，可於下雨時達到吸水、蓄水、滲水及淨水之功能，並於需要時再將所蓄存的水“釋放”利用。海綿城市即如同海綿般吸存水分，達成城市的保水工作，提升城市生態系統功能與減少城市洪澇災害的發生。海綿城市主要於道路鋪設保水鋪面，如圖 2 之保水鋪面剖面構造圖所示。其功能係於雨天時將雨水保存至保水鋪面，形成保水狀態，可治洪也同時儲水；晴天時，大面積釋放水汽，達到冷卻都市的作用，並降低熱島效應，從而降低空調使用達成節能減碳之功效(陳瑞文, 2011)。另於夏季高溫期間，若市區地面下儲滿水，其部分具都市綠化降溫之功效，部分則可直接被蒸發，達到抑制都市熱島效應的功能。綜合上述，若能利用 CRT 廢錐管玻璃資源化再利用做為保水鋪面，未來可望達到抑制都市熱島效應之雙贏效果。本研究爰以孔隙率、抗壓強度及保水性能分析等實驗驗證燒結體之機械強度與保水特性，探討 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土左為保水鋪面材料之適性，以推動海綿城市之建構。



圖 1 保水鋪面示意圖

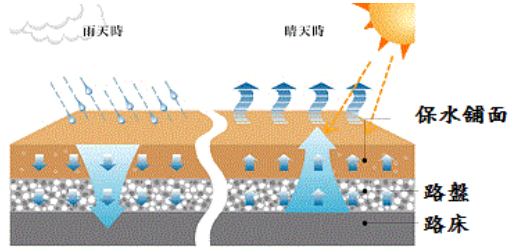
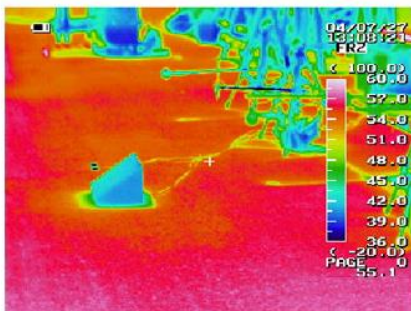


圖 2 保水鋪面剖面構造圖 (陳瑞文, 2011)

二、海綿城市之實際案例及優勢

2.1 海綿城市之實際案例

海綿城市主要係利用保水鋪面材料之特性，鋪設於城市內，使城市如同海綿般具有吸存水分之能力，而保水鋪面材料主要可吸收及保留水分，並具有緩慢蒸發效果。根據研究指出，使用保水鋪面材料可降低路面及環境溫度(如圖 3 所示)，其中圖 3(a)為未鋪設保水鋪面，其溫度明顯高於圖 3(b)鋪設保水鋪面之路面及環境溫度，倘若將保水鋪面材料鋪設於城市之路面，應可有效預防都市熱島效應(石丸和宏, 2007)。目前保水鋪面以日本使用較為廣泛，以下將分別介紹日本使用保水鋪面之實際案例。



(a) 未鋪設保水鋪面



(b) 已鋪設保水鋪面

圖 3 保水鋪面溫度變化示意圖 (石丸和宏, 2007)

100 回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

1. 日本金澤市之停車場：因汽車於行駛過程中，輪胎與地面磨擦後會產生大量的摩擦熱，若於停車場內鋪設保水鋪面，保水鋪面內貯存之水分可緩解輪胎磨擦所產生之摩擦熱，有助於提升輪胎之使用年限並降低環境溫度，如圖 4 所示 (石川縣道路安全檢討委員會, 2016)。



圖 4 日本鋪設保水鋪面之停車場 (石川縣道路安全檢討委員會, 2016)

2. 人行步道：由於城市大多充斥建築物而致暴雨時雨水慢流，若能於人行道鋪設保水鋪面，雨天時不僅能迅速吸收水分，並可將水分保存於保水鋪面之孔隙內，降低路面濕滑之危險(如圖 5) (東京都環境局, 2016)。再者，晴天時，亦可降低環境溫度，減緩都市熱島效應。



圖 5 日本鋪設保水鋪面之人行步道 (東京都環境局, 2016)

3. 建築物屋頂：因應都市人口增加，城市大量興建建築物，導致陽光之熱能無法有效反射，不僅環境溫度升高，建物內部溫度亦較高，故大多使用室內空調調節室內溫度，造成大量之 CO₂ 排放。若能於建物屋頂鋪設保水鋪面(如圖 6)(東京都第三建設事務所, 2016)，晴天時可釋放水分緩解高溫，另因保水鋪面具有較低之熱傳導係數，具良好之斷熱效果，故能有效降低室內溫度，減少空調之使用量。



(a) 未鋪設保水鋪面

(b) 已鋪設保水鋪面

圖 6 日本鋪設保水鋪面之人建築物屋頂 (東京都第三建設事務所, 2016)

2.2 海綿城市之優勢

毋需依賴任何耗能的機械動力裝置所打造之海綿城市，因以大自然的水、空氣、土壤與人類排放的污染物及 CO₂ 等為營養物，故能於降雨時儲水、大旱時釋出水汽、降溫與供水；加以內含生態系統，能夠吸存污染物，並將之分解轉化為生態系統所需之營養物質與有機體(袁勝賢, 2011)。茲彙整創造海綿城市之優勢如下：

1. 具滯洪池效益：若設置保水鋪面，可有效避免強降雨可能發生的淹水災難，若強降雨來襲時，保水鋪面可有效滯延與消減洪峰，達到類似滯洪池的效益。
2. 具儲水效益，相當於增加新的水庫：假設人工鋪面(人行道、後巷、停車場、廣場、車道等)鋪設 63 平方公里之保水鋪面與道路，則可直接儲存約 1,894 萬噸之水量；如以 1 度原水水價 10 元計，相當於儲存 1 億 8,900 萬元之用水量，可供平日都市綠化與環境清潔之所需。

102 回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

3. 減緩都市熱島效應，達成調溫節能功效：夏季高溫期間，若地面下儲滿約 1,894 萬噸之水量，其中部分直接被蒸發，部分可供都市綠化降溫，達成抑制都市熱島的功能。另根據能源局資料，冷氣空調設定溫度每提高 1°C 即省電 5~6% 左右；顯然都市大量儲水將可直接促成都市降溫至少 1.6°C，不僅可減少整體用電量，亦可降低 CO₂ 排放。
4. 創造地下濕地生態系統，增加都市生態面積：傳統上，都市規劃設計者都強調增加綠化面積的重要性。依據 Liu et al. (2012) 與 Fan et al., (2013) 之研究，保水鋪面之下樹根蔓延，微生物物種豐盛，實為地下濕地生態系統。其最大功能在於吸收都市污染空氣，過濾污染物質，改善都市空氣。因此，如鋪設約 63.1 平方公里的保水鋪面與道路，即代表增加蘊涵地下濕地的都市生態面積 63.1 平方公里，約占都市發展面積 21.3%。
5. 直接捕捉汽機車排放之 CO₂：Liu et al. (2012) 研究另指出，汽車所排放的廢熱與空氣污染物質，至少 50% 進入到保水鋪面之下，故空氣品質將因移動污染源排放量減少 50% 而出現顯著改善；此外，由於保水鋪面之下的濕地形成亦可捕捉至少 70% 之汽車排放 CO₂。
6. 無需排水溝，降低疾病與髒亂風險：都市內不再需要排水溝，病媒蚊孳生、老鼠與蟑螂亂竄、垃圾堵塞等問題將不復存在。雨水凡經過道路與人行道的氣孔，即可直接進入儲水碎石層與地下雨水下水道，因此，道路兩旁的排水溝可全部取消。

若能將城市轉化為一超級大海綿，成為實體的「海綿城市」，未來推動城市綠化、生態城市、低碳城市、低度衝擊開發及綠建築等，均可有效提高城市綠化面積及城市生態面積，並可達成城市節能減排、降低城市開發衝擊、強化綠建築功能、降低淹水機率及因應高溫熱浪等目標。

三、CRT 廢錐管玻璃來源特性及再利用方式

科技之進步促成電腦、電器及電子產品躍升成為訊息傳播及對外溝通無可取代的網絡(關家倫, 2015)。早期傳統陰極射線管(CRT)顯示器在電視及電腦所占體積甚大, 且 CRT 為種電子管, 其電子束可聚焦在一極小的區域內, 並可在螢幕上變換顯示位置及強度, 一般分為單色及彩色 2 種(Andreola, 2005)。映像管最早係應用於電視, 之後隨著電腦的普及則多應用於電腦顯示器(Clarkson, 2013), 惟此類產品經使用廢棄後, 其中所含的有害物質將造成環境負荷, 因此, 如何妥善資源化儼然已是重要課題; 加以循環型社會之建構乃是當今潮流, 尤其在廢棄物處理回收利用方面, 亦以達到「零排放」及「資源化」為最終之目標。

陰極射線管主要分為面板玻璃、錐管玻璃(Funnel)、頸部玻璃(Neck)及玻璃膠(Sealing Frit)等 4 大類(Wei, 2016), 其中錐管玻璃、頸部玻璃、玻璃膠均含有高量的 PbO 以抵擋高 X 射線 (Fernandes, 2013)。惟因 CRT 廢錐管玻璃列於巴塞爾公約 (Basel Convention) 清單 A (List A) 之 A210 項目中, 輸出受到管制(Singh, 2008)。其最佳資源回收方式主要應用於原 CRT 製程中, 但隨著景氣低落及逐漸被 LCD 顯示器取代的影響, CRT 玻璃製造廠已紛紛關廠或減少生產量(Pant, 2013), 因此, 回原廠進行資源化已不可行, 目前多傾向應用於釉藥製造及磁磚坯土及玻璃製品等 (Bernardo, 2006; Rajesh, 2011)。

根據行政院環境保護署(以下簡稱環保署) 2013 年全國事業廢棄物申報物種統計資料, CRT 廢錐管玻璃申報量為 4,930 公噸(行政院環境保護署, 2016)。至於環保署基管會廢物品及容器稽核認證回收量統計表之廢電視機約 1,125,167 公噸, 錐管玻璃占比約 25%, 顯示約 281,292 公噸之廢錐管玻璃亟待處理, 故另尋資源化再利用途徑刻不容緩。

錐管玻璃亦為玻璃材料, 如面板玻璃具多重用途, 惟錐管玻璃含金屬鉛, 其再利用方式需進行環境保護之考量(關家倫, 2015), 茲彙整現行廢錐管玻璃之資源化再利用技術優缺點如表 1 所示。

表 1 國內 CRT 廢錐管玻璃資源化再利用技術之優缺點

再利用技術	優點	缺點
回到原錐管玻璃製程再使用	錐管玻璃的品質要求未若面板玻璃嚴格，在技術上回爐使用的可能性更大	國內無錐管玻璃製造業者，且受巴塞爾公約 (Basel Protocol)的管制，執行可行性較低
製作藝術品	玻璃藝品無鉛溶出之規範限制	藝術品銷量有限，對於處理大量的錐管玻璃助益不大
釉藥應用	將天然氧化鉛、燧石一起熔化製成含鉛熔塊釉 (Lead Frit)，可避免氧化鉛對身體造成危害	1. 錐管玻璃含鉛量不穩定、不易控制 2. 錐管玻璃上的塗膜必須清除乾淨 3. 錐管玻璃所製釉藥如應用於深色建材則另需上釉
瓷磚用原料	具有降低燒結溫度的效果	僅能添加適量錐管玻璃細料

資料來源：本研究室整理，2016。

四、燒結資源化技術

燒結(Sintering)為固態多孔質物體的熱處理過程，經由燒結過程後生胚內的粒子接觸面成長使粒子緊密黏結在一起，而產生孔洞收縮與試體緻密化等現象，最後產生高強度的產物(陳國邦, 2004)。燒結程序乃應用熱力學理論中系統趨於最低能量之趨勢，藉由燒結體顆粒間表面能量之不同，使燒結過程顆粒中之原子向顆粒間接觸點移動、聚集，以降低能量，因而形成顆粒間之頸部，形成燒結體之強度(Pimraksa, 2009)。此原子移動過程因燒結體組成成分的不同，而有不同移動路徑及方式，影響原子移動路徑之因子可分為本質特性，如燒結體成分及顆粒粒徑，及操作特性，如溫度、時間、壓力及燒結氣氛等。本質特性係燒結材料本身在燒結加熱過程所呈現之燒結特性，操作特性則是利用改變各種燒結操作條件，以增加材料燒結特性(Osman, 2009)。

實際燒結過程中，須考慮晶粒成長與孔隙之間的相互作用，其中孔隙的型態 (Morphology) 係為主導燒結過程中微結構變化的關鍵。燒結緻密化過程可區分為 3 階段，如圖 7 所示。1. 燒結初期：燒結體內部顆粒間開始形成頸部，顆粒之形狀仍能清楚的分辨，此時顆粒間之距離縮短。2. 燒結中期：當顆粒頸部繼續成長而使得孔隙形狀轉變成連續性之圓柱狀之孔隙通道，所有燒結初期之擴散機構仍都可能在此階段繼續進行。3. 燒結後期：圓柱狀之孔隙通道持續收縮變形，孔隙形狀最後轉變成不連續之獨立孔隙，形成高機械強度之燒結體。

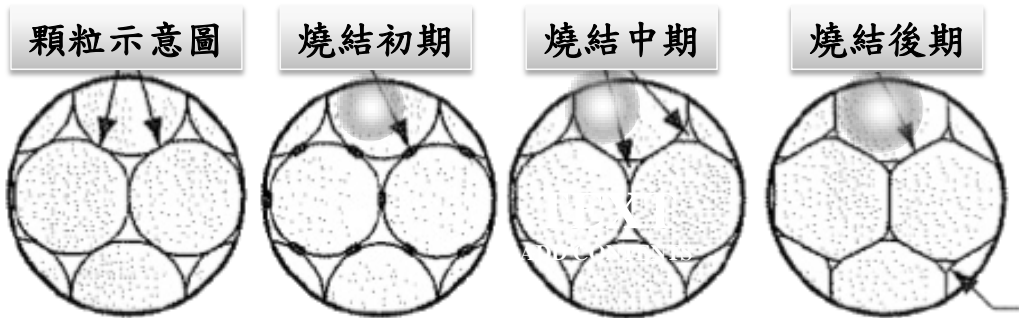


圖 7 燒結階段(Osman, 2009)

五、實驗材料與方法

5.1 實驗材料

本研究採用台灣北部某食品公司在釀造料汁製程中，經長期過濾雜質而喪失吸附性能之矽藻土；至於 CRT 廢錐管玻璃取自台灣中部某回收公司，主要為廢電視機經拆解及割除電子槍後之 CRT 廢錐管玻璃。此外，為確保本研究採集之廢矽藻土與 CRT 廢錐管玻璃作燒結資源化結果具代表性，除進行大量採樣，另將 CRT 廢錐管玻璃經 105°C 烘乾 24 小時，置入球磨機中研磨 24 小時後，以篩網過篩並充分混合後，再做為製備保水鋪面材料之試樣材料。

5.2 實驗方法

廢矽藻土與 CRT 廢錐管玻璃依行政院環境保護署環境檢驗所(以下簡稱環檢所)公告之 NIEA R208.03C 標準方法，以 1:10 比例添加蒸餾水測得材料之 pH 值，並以比重瓶法測量材料於煤油中之比重；另使用篩分析法分析材料之粒徑分布。本研究分別使用 NIEA R355.00C 及 NIEA R201.14C 之方法，以火焰式原子吸收光譜儀 (FLAA)測定材料之重金屬總量及 TCLP 溶出。

本研究使用 CRT 廢錐管玻璃以 0%~20% 等 4 種取代廢矽藻土比例製備保水性鋪裝材料，製備方式係將材料粉體以半乾式加壓成形法，成形壓力為 50 kgf/cm² 之圓柱試體，而燒結溫度分別為 1,000、1,100、1,150 及 1,200 °C 等 4 種溫度。另本研究主要以孔隙率及抗壓強度等實驗探討燒結體之巨觀特性。至於燒結體的保水性能的測定，主要為恆溫濕機控制環境溫度恆定 23°C 及相對濕度控制在 55% 進行脫水過程，並記錄每小時所脫附的水量；其中，當脫附水量達吸水量一半的時間($t_{1/2}$ (h))，即為保水性能。

六、結果與討論

6.1 材料基本特性

本研究採用之 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土之物理性質如表 2 所示。由表得知，根據環檢所公告 NIEA R208.03C 標準方法，測得 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土之 pH 分別為 10.21 及 7.21，由於 CRT 廢錐管玻璃本身所含金屬元素較多，故溶於水中會屬於鹼性物質。另外，廢矽藻土以 NIEA R216 焚化灰渣之灼燒減量檢測方法測得廢矽藻土之灼燒減量分別為 0.01%，符合法規標準值。各材料之粒徑分布累積曲線如圖 8 所示。CRT 廢錐管玻璃之粒徑分佈主要介於 37~125 μm ，而廢矽藻土之粒徑分布主要落於 37~250 μm 之間，反映材料之粒徑分布集中於 20~120 μm 。

表 2 材料之基本物理性質

	pH (1 : 10)	比重 (Specific Gravity)	密度 (Density) (g/cm ³)	含水率 (Moisture) (%)	燒失量 (Loss on Ignition) (%)
廢矽藻土 (Waste Diatomite)	7.21	1.6	1.26	38.82	0.01
CRT 廢錐管玻璃 (CRT Waste Funnel Glass)	10.21	2.58	3.15	0.22	-

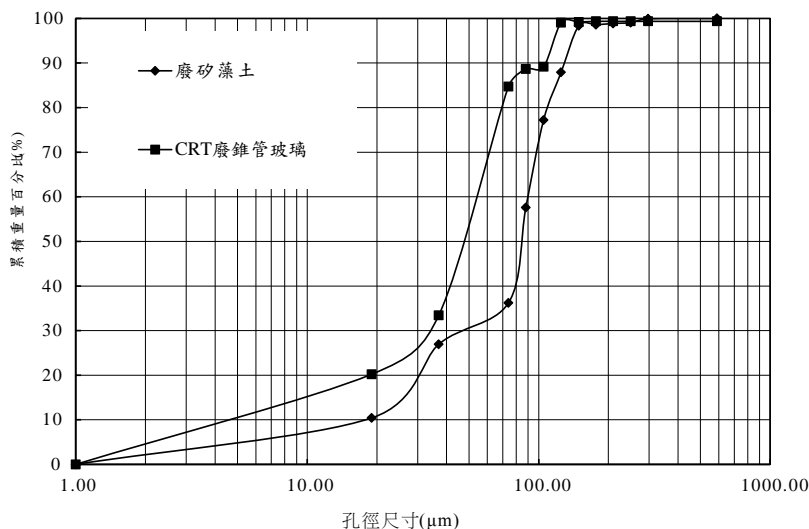


圖 8 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土

本研究使用 XRF 螢光分析儀測定材料內之化學組成，分析結果如表 3 所示。由表得知，CRT 廢錐管玻璃主要成分為 SiO_2 占 52.4%， Na_2O 及 K_2O 則分占 8.63% 及 7.76%。就化學成分而言， Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 及 K_2O 常扮演助熔劑的角色，相較於鹼土金屬族，鹼金屬族之助熔效果較明顯，但超過一定量後將會造成耐火性的增加並阻礙液相燒結的發展，惟於部分稀土金屬或不同氧化物下加入陶瓷內進行燒結過程中，將隨著燒結溫度的變化而改變燒結體顏色，如加入 Pb 金屬則燒

108 回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

完為帶紫色的陶瓷。至於廢矽藻土之主要成分為 SiO_2 占 93.6 %，其他成分包含 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 SO_3 及 K_2O 等。

表 3 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土之化學組成

化學組成 (Chemical Composition)	廢矽藻土 (Waste Diatomite)	CRT 廢錐管玻璃 (CRT Waste Funnel Glass)
SiO_2 (%)	93.6	52.4
Al_2O_3 (%)	1.08	3.04
Fe_2O_3 (%)	0.87	0.23
CaO (%)	0.2	3.49
MgO (%)	-	1.80
SO_3 (%)	0.04	-
Na_2O (%)	-	8.63
K_2O (%)	0.19	7.76

6.2 重金屬總量與溶出濃度

本研究以 NIEA R201.14C 之毒性特性溶出程序(TCLP)法，將各材料進行重金屬溶出並以 FLAA 測定各材料之重金屬溶出濃度，其結果如表 4 所示。TCLP 重金屬溶出結果顯示，CRT 廢錐管玻璃之 Pb 溶出量為 297 mg/L，而 Zn 溶出量為 31 mg/L。TCLP 溶出試驗結果顯示，CRT 廢錐管玻璃之有害廢棄物其由於 Pb 溶出量超出法規值，故無法進行直接回收再利用，本研究爰利用少量 CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土，以燒結方式將其重金屬固定穩定化並製備節能保水鋪面。

表 4 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土之重金屬總量及 TCLP 溶出濃度

重金屬總量 (Total Metal) (mg/kg)	鉛	鉻	銅	鋅	鎘	鎳
廢矽藻土 (Waste Diatomite)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CRT 廢錐管玻璃 (CRT Waste Funnel Glass)	37,716.7	100.0	20.0	700.0	N.D.	35.0
毒性特性溶出 (TCLP) (mg/L)	鉛	鉻	銅	鋅	鎘	鎳
廢矽藻土 (Waste Diatomite)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CRT 廢錐管玻璃 (CRT Waste Funnel Glass)	297.0	N.D.	N.D.	31.0	N.D.	N.D.
管制值 (Regulatory Limits)	5	5	15	—	1	—

N. D.之偵測極限

Pb < 0.015 mg/L

Cr < 0.009 mg/L

Cu < 0.089 mg/L

Zn < 0.074 mg/L

Cd < 0.021 mg/L

Ni < 0.112 mg/L

6.3 燒結體之機械特性

圖 9 為 CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土燒結體之孔隙率變化。由圖所示，當燒結溫度為 1,000℃ 時，純廢矽藻土燒結體之孔隙率為 67.77%；當燒結溫度為 1,100~1,200℃ 時，純廢矽藻土燒結體之孔隙率為 65.60~62.13%；另當燒結溫度為 1,000℃ 時，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%~20% 之燒結體，其孔隙率為 37.56~58.01%；當燒結溫度升至 1,200℃，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%~20% 之燒結體，其孔隙率分別降為 60.14%、56.67%、53.04 及 48.54%。此係因 CRT 廢錐管玻璃之主要成分為 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 及金屬鉛，當燒結溫度提高，其燒結體內部形成液相燒結以填補孔洞，造成燒結體之孔洞減少，故致其孔隙率降低。而當燒結溫度為 620℃ 時，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5~20% 之燒結體，其孔隙率分別為 40.44%、43.68%、46.63% 和 49.9%。綜上所述，當燒結溫度提升及 CRT 廢錐管玻璃取代量增加時，其燒結作用以原子擴散方式形成頸部成長(黃坤祥, 2003)，並包覆封閉氣孔，達緻密化之燒結體，造成孔隙率降低。

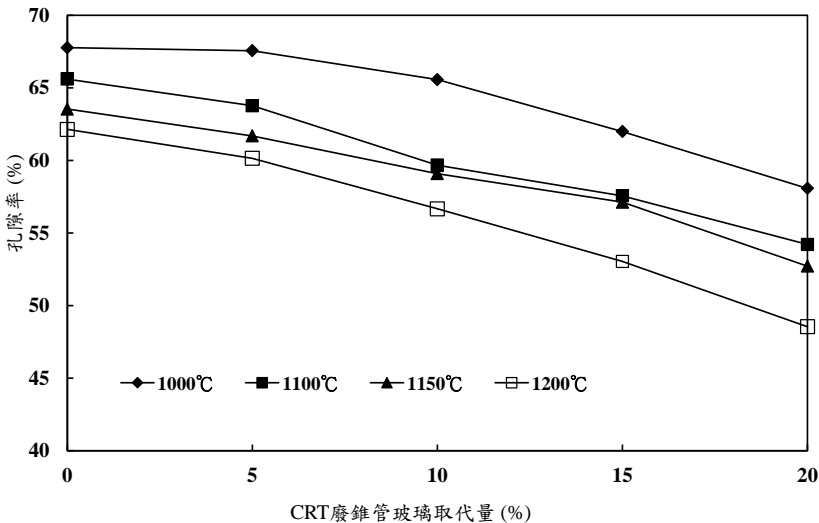


圖 9 燒結體之孔隙率

圖 10 為 CRT 廢錐管玻璃取代矽藻土燒結體之抗壓強度變化。由圖得知，當燒結溫度為 1,000°C 時，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%~20% 的燒結體抗壓強度分別為 3.9MPa、6.56MPa、10.12MPa 及 12.28MPa；而當燒結溫度升至 1,200°C 時，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%~20% 燒結體之抗壓強度分別為 6.32MPa、10.69 MPa、17.09MPa 和 27.02MPa，可見其抗壓強度隨 CRT 廢錐管玻璃燒結溫度與取代量的提高而增加。此外，由於 CRT 廢錐管玻璃主要成分為 SiO_2 及 Pb ，當燒結溫度升至 1,200°C 時，未結晶之玻璃化 SiO_2 及 Pb 形成黏滯流並填補其孔隙，形成緻密化之燒結體(Bruce, 2015)，故抗壓強度呈現明顯上升趨勢。

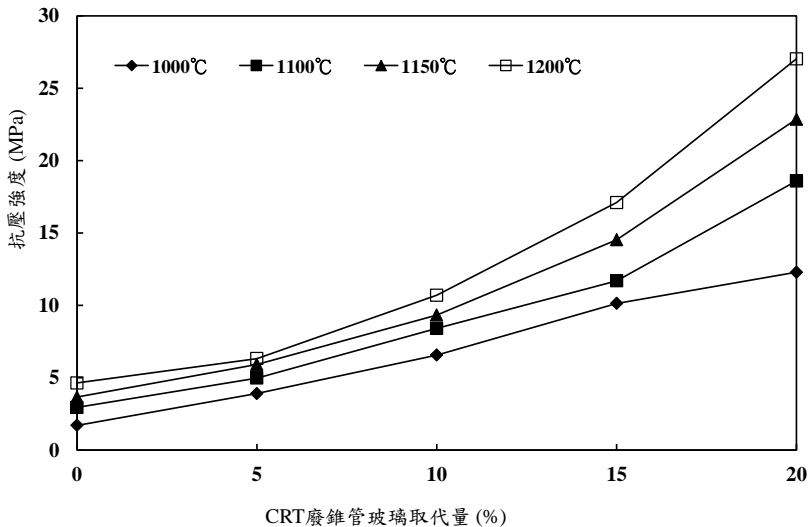


圖 10 燒結體之抗壓強度

6.4 燒結體之保水性能分析

城市建築致使地面大量不透水化，進而弱化土地的水分涵養能力，同時阻礙土地蒸發水分潛熱的能力而喪失調節氣候的功能，甚至引發居住環境日漸高溫化的「都市熱島效應」，因此，藉由燒結體之脫水率以掌握其保水性能，利用記錄恆溫濕機控制環境溫度恆定為 23 °C 及相對濕度控制在 55% 時每小時所脫附的水量，其中，當脫附水量達吸水量一半的時間($t_{1/2}$ (h))，即為保水性能。圖 11 為 CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土燒結體之吸收水重量損失曲線。當燒結溫度為 1,000°C，CRT

112 回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

廢錐管玻璃取代量為 5%時，其 $t_{1/2}$ 值約為 10 小時，隨 CRT 廢錐管玻璃取代量增至 20%時，燒結體之 $t_{1/2}$ 值增至 14 小時，顯示燒結體之 $t_{1/2}$ 值隨 CRT 廢錐管玻璃取代量增加而提升，此係因燒結體之水分蒸發時，水分由孔隙內部向外溢散，當燒結體趨於緻密化時，其孔隙內部之水分難向外溢散，故燒結體之 $t_{1/2}$ 值隨孔隙率的減少而增加；當燒結溫度升至 1,200°C，廢玻璃纖維取代量為 5%時，其 $t_{1/2}$ 值約為 11 小時，當取代量增至 20%時，燒結體之 $t_{1/2}$ 值增為 15 小時，反映以 CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土製備多孔陶瓷具有良好保水性能及緩慢的脫水性，可舒緩熱島效應之現象。

圖 12 為 CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土燒結體之保水量。當燒結溫度為 1,000°C、CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%時，其保水量為 0.61 g/cm²，當 CRT 廢錐管玻璃取代量增至 20%，其燒結體之保水量降為 0.569 g/cm²，可得知燒結體之保水量隨 CRT 廢錐管玻璃取代量增加而下降，係因 CRT 廢錐管玻璃含有金屬 Pb，其金屬 Pb 熔點溫度為 327°C，故於燒結過程中，燒結體內部顆粒形成液相燒結填補其孔洞內部，使其燒結體達緻密化之現象(Wen, 2005)，導致保水量下降。另外，當燒結溫度為 1,200°C時，CRT 廢錐管玻璃取代量為 5%的保水量為 0.567 g/cm²，隨取代量增至 20%，燒結體之保水量則降至 0.51 g/cm²。由上述結果得知，當燒結溫度上升時，使顆粒內晶粒開始成長形成孔隙通道，並藉由燒結驅動力使晶粒間孔洞結構縮小，形成緻密化之燒結體(Pimraksa, 2009)，故保水量隨燒結溫度上升而有明顯下降之趨勢。

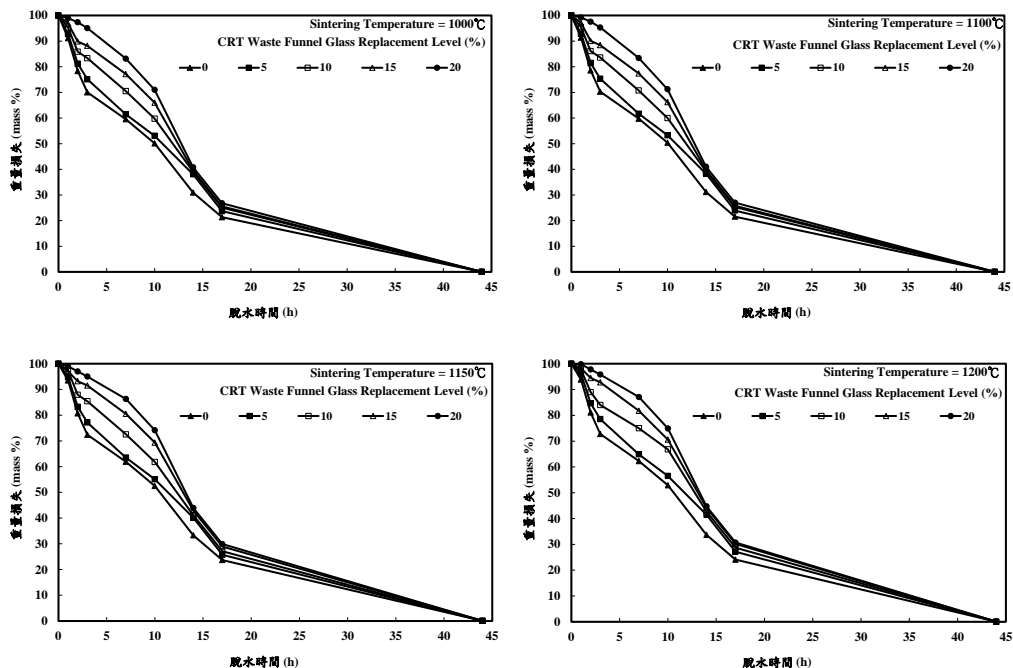


圖 11 燒結體之脫水率分析

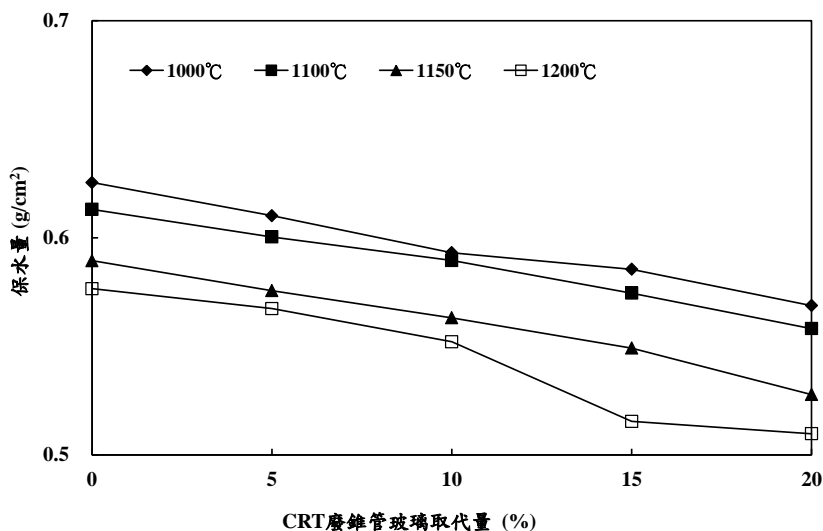


圖 12 燒結體之保水量分析

6.5 燒結體之重金屬總量與 TCLP 溶出試驗

本研究針對添加 CRT 廢錐管玻璃做為保水鋪面是否對環境有危害之虞，進行燒結體中所含重金屬含量評估，藉以考量未來實廠化後之環境安全。

本研究根據環檢所 NIEA R317.10C 之微波輔助酸消化法，將 CRT 廢錐管玻璃燒結體進行微波消化後，以 FLAA 測定各材料之重金屬總量，其結果如表 5 所示。分析結果顯示，CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土燒結體之重金屬總量 Pb 和 Zn 含量分別為 97~1060 mg/kg 及 19~53 mg/kg。另外，本研究以 NIEA R201.14C 之毒性特性溶出程序 (TCLP)法，將 CRT 廢錐管玻璃燒結體進行重金屬溶出並以 FLAA 測定各材料之重金屬溶出濃度，其結果如表 5 所示。TCLP 重金屬溶出結果顯示，CRT 廢錐管玻璃取代廢矽藻土燒結體主要以 Pb 和 Zn 為主，其溶出量皆低於 0.21 mg/L 及 0.08 mg/L。綜合以上結果得知，CRT 廢錐管玻璃經燒結後，Pb 和 Zn 之重金屬總量呈現顯著減少；其次，經 TCLP 溶出分析，Pb 和 Zn 之溶出值均符合法規值，具有資源化再利用之潛力。

表 5 燒結溫度為 1,000°C 其燒結體之重金屬總量與 TCLP 溶出

重金屬總量 (Total Metal) (mg/kg)	鉛	鉻	銅	鋅	鎘	鎳
5%	97	N.D.	N.D.	19	N.D.	N.D.
10%	380	N.D.	N.D.	25	N.D.	N.D.
15%	810	N.D.	N.D.	37	N.D.	N.D.
20%	1060	N.D.	N.D.	53	N.D.	N.D.
毒性特性溶出 (TCLP) (mg/L)	鉛	鉻	銅	鋅	鎘	鎳
5%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
10%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
15%	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
20%	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
管制值 (Regulatory Limits)	5	5	15	-	1	-

N.D.之偵測極限

Pb < 0.015 mg/L

Cr < 0.009 mg/L

Cu < 0.089 mg/L

Zn < 0.074 mg/L

Cd < 0.021 mg/L

Ni < 0.112 mg/L

七、結論

本研究利用 CRT 廢錐管玻璃及廢矽藻土以不同取代比例，利用製坯燒結技術燒製保水鋪面，俾進行可行性評估，並建立保水鋪面之保水性能分析。歸納本研究結果如下：

116 回收再利用陰極射線管(CRT)玻璃及廢矽藻土做為保水鋪面材料之研發

1. CRT 廢錐管玻璃之主要成分為 SiO_2 、 Na_2O 及 K_2O ，廢矽藻土之主要成分為 SiO_2 。
2. TCLP 溶出試驗結果顯示，各材料之重金屬溶出量皆符合法規標準。
3. 燒結體之孔隙率隨 CRT 廢錐管玻璃取代量增加而明顯降低，反映 CRT 廢錐管玻璃之主要成分導致燒結體內部形成液相燒結而填補其孔洞，造成燒結體之孔洞減少而使其孔隙率明顯降低。
4. 燒結體隨燒結溫度提升，試體內部結構受到熱力影響而趨於緻密，當燒結溫度至 $1,200^\circ\text{C}$ 時形成緻密化之燒結體，顯示 CRT 廢錐管玻璃取代量增加，其抗壓強度呈現明顯上升之趨勢。
5. $t_{1/2}$ 值隨燒結溫度升高及 CRT 廢錐管玻璃取代量增加而上升，係因 CRT 廢錐管玻璃含熔點溫度為 327°C 之金屬 Pb，故於燒結過程中，燒結體內部顆粒形成液相燒結填補其孔洞內部，使其達緻密化而使孔隙內部之水分難以向外溢散。
6. 各燒結體之保水量皆高於日本保水性鋪裝材料規範之保水量 ($>0.15 \text{ g/cm}^2$)，顯示具有良好保水性能及緩慢的脫水性，可望有效緩解熱島效應。
7. 經燒結之燒結體，其 TCLP 溶出試驗符合法規標準，顯示無危害環境之虞，並具資源化再利用之潛力。

參考文獻

- 石丸和宏、政井一仁(2007)，保水性鋪裝の路面温度上昇抑制効果，Memoirs of Akashi National College of Technology.
- 石川縣道路安全檢討委員會(2016)，www.hrr.mlit.go.jp。
- 行政院環境保護署(2016)，<http://www.epa.gov.tw/>。
- 東京都第三建設事務所(2016)，www.kensetsu.metro.tokyo.jp。
- 東京都環境局(2016)，www.kankyo.metro.tokyo.jp。
- 孫振義(2008)，運用遙測技術於都市熱島效應之研究，成功大學建築研究所博士論文。

- 陳國邦、張鵬(2004)，低溫絕熱與傳熱技術，北京，科學出版社。
- 陳瑞文、柳中明、陳起鳳、崔鳳修(2011)，高承載透水道路在「建築防洪」與「道路排水」應用之設計探討，低碳環境學會，pp. 52。
- 袁勝賢(2011)，MSWI 與絕熱材料降低水泥砂漿表面溫度與都市熱島效應之研究，碩士論文，明志科技大學。
- 張靜怡、徐祥山(2015)，基於海綿城市建設的 LID 設施及其技術分析，2015 年中國環境科學學會學術年會。
- 黃坤祥(2003)，粉末冶金學，中華民國粉抹冶金協會。
- 關家倫、鄭智和、蔡敏行(2015)，映像管玻璃資源化途徑之探討及展望，第三屆台灣環境資源永續發展研討會。
- Andreola F. Barbieri L. Corradi A. Lancellotti I. Falcone R. and Hreglich S. (2005), Glass-ceramics obtained by the recycling of end of life cathode ray tubes glasses, *Waste Management*, 25(2): p. 183-189.
- Bernardo E. Castellan R. Hreglich S. and Lancellotti I. (2006), Sintered sanidine glass-ceramics from industrial wastes, *Journal of the European Ceramic Society*, 26(15): p. 3335-3341.
- Bruce G.D. Phil M. Akin M. Jessica R. and Grzegorz M.(2015), An approach to carbon control of sintering furnace atmosphere: theory and practice, *Metal Powder Report*, 70(5): p.247-252.
- Clarkson C.R., Solano N. Bustina R. M. Bustina A.M.M. Chalmers G.R.L. Hec L. Melnichenko Y.B. Radliński A.P. and Blachd T.P. (2013), Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion, *Fuel*. 62, p. 606-616.
- Fernandes H.R., Andreola F. Barbieri L. Lancellotti I. Pascual M. J. and Ferreira J. M. (2013), The use of egg shells to produce Cathode Ray Tube (CRT) glass foams. *Ceramics international*, 39(8):p. 9071-9078.

- Osman S. Remzi G. and Cem O. (2009), Purification of diatomite powder by acid leaching for use in fabrication of porous ceramics, *International Journal of Mineral Processing*, 93(1): p. 6-10.
- Pant D. and Pooja S. (2013), Chemical modification of waste glass from cathode ray tubes (CRTs) as low cost adsorbent, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3): p. 226-232.
- Pimraksa K. and Chindapasirt P. (2009), Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum, *Ceramics International*, 35(1): p. 471-478.
- Rajesh S. Jantunen H. Letz M. and Pichler W.S.(2011), Low Temperature Sintering and Dielectric Properties of Alumina-Filled Glass Composites for LTCC Applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*.
- Singh K.J., Singh N., Kaundal R.S., and Singh K. (2008), Gamma-ray shielding and structural properties of PbO–SiO₂ glasses, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(6):p. 944-948.
- Wen Z.H., Han Y.S., Liang L. and Li J.B. (2005), Preparation of porous ceramics with controllable pore sizes in an easy and low-cost way, *Materials Characterization*., 59: p. 1335-1338.
- Wei Y.L. Cheng S.H. and Ko G.W. (2016), Effect of waste glass addition on lightweight aggregates prepared from F-class coal fly ash, *Ceramics international*, 112(1):p. 773-782.