

工業廢水污泥資材化技術評估

林凱隆

國立宜蘭大學環境工程學系副教授

摘 要

依據工業區環保中心統計資料顯示，現階段該中心所管轄之 38 處工業區綜合污水處理廠污泥產出量約 60 萬噸/年，依其特性可分成有機性污泥及重金屬污泥等兩大類。本研究秉持「向水中取礦」之原則，依工業區綜合污水處理廠廢水污泥特性，選定北部某工業區重金屬污泥及中部某工業區有機廢水污泥作為試驗材料，經前處理後，利用實驗室規模高溫爐模擬實窯操作現況，分別於 950°C(8 小時)以及 1400°C(6 小時)，之操作條件下，評估有機及重金屬污泥燒製環保磚及環保水泥之可行性。結果顯示，所有試驗之成品其重金屬均符合 TCLP 之標準。將工業區有機性污泥取代黏土燒結製作環保磚，其比例在 20%以下時，樣本比重為 1.8-2.0，抗壓強度達 171-401 kgf/cm²，吸水率低於 19%，符合一級及二級建築磚之工程性質。另將工業區廢水處理廠重金屬污泥與淨水污泥、下水污泥及煉鋼爐渣混合取代鋁土、矽砂及鐵砂等天然礦物燒製環保水泥熟料，替代生料比例可達 20%。環保水泥熟料均含有 C₃S、C₂S、C₄AF 及 C₃A 等晶相物種，在不同養護齡期下，漿體之抗壓強度及核磁共振(NMR)等巨微觀分析數據，與傳統波特蘭水泥漿體水化反應趨勢相符。

關鍵詞：污泥、燒結、環保水泥、環保磚

Assessing the Sludge from Industrial Wastewater Treatment Plants as Construction Material

Kae-Long Lin

Associate professor, Department of Environmental Engineering, National I-Lan University

Abstract

There are 600,000 tons of sludge produced annually from 39 industrial wastewater treatment plants in Taiwan. In this study, the heavy metal sludge ash and organic wastewater sludge ash are used as experimental materials. Raw meal was prepared for a pre-determined recipe, then heated to 950°C for eight hours during sintering to produce eco-brick, and 1400°C for six hours during the clinkerization process, using a simulated incinerator and a smelter. The results indicate the leaching concentrations of all the tested samples met Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) requirements. The eco-brick samples containing 20% industrial sludge ash could reach a compressive strength of around 171-401 kgf/cm². The specific gravities of bricks were all less than 2 kg/cm³. Bricks made from mixtures containing 20% PCB sludge ash could reach a 210 kgf/cm² compressive strength. The specific gravities of the bricks were all less than 2 kg/cm³. The 24-hour absorption rates of the bricks were all less than 19%. The specific gravity, water adsorption, and compressive strength suggested that bricks made from mixtures containing 20% industrial sludge ash and bricks made from mixtures containing 15% PCB sludge ash could meet the general requirement for brick. In addition, three new types of hydraulic cements (referred to as eco-cement) were developed. Sludge ash from industrial sludge ash, water purification plants and primary sewage treatment plants, as well as waste from steel-works (ferrate), as partial replacements for clay, silica, alumina, and iron oxide in the raw meal for cement. The results indicate that it is feasible to use sludge ash and steel-making wastes to replace up to 20% of the mineral components in the raw materials for cement (also referred to as raw meal). The major components of the portland cement composition, C₃S(i.e., 3CaO.SiO₂), C₂S(i.e., 2CaO.SiO₂), C₃A(i.e., 3CaOAl₂O₃), and C₄AF(i.e., 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) were all found in the waste-derived clinkers. The compressive strength and the degree of hydration of eco-cement pastes were similar to OPC paste at the appropriate curing age.

Keywords : Sludge, Sintering, Eco-cement, Eco-brick

一、前言

台灣地區經濟發展快速、工業密集，每年產生大量的廢棄污泥形成新的廢棄物處理問題，根據環保署事業廢棄物管制中心2003年統計資料顯示，國內廢水處理廠污泥處理費用約佔總操作費用之40%，另外，廢水污泥清理問題亦為工業區內、外事業污水處理廠操作常遭遇之問題點(王氏^[1]，2000)，因此，對於已產生之污泥予以妥善處理與處置將是工業區綜合污水處理廠未來之重要課題。

目前工業區廢棄污泥處理方式以掩埋或焚化方式為主，但受限於土地取得不易及能源消耗等諸多問題，彼等處理方式已不符合現階段環保意識，更不利於循環型社會的構築。

有鑑於廢水污泥組成份中含有大量自然界常見之鈣、矽、鋁、鐵等氧化物等無機物質，具有資材化之潛力(林氏等^[2]，2004)，考量現階段台灣地區自然資源缺乏及廢棄物處置地日益難覓，因此，需即早研究工業區廢水污泥資材化技術，以作為現有廢水污泥處理處置方式之替代性措施。

由於工業區廢水的水質成份複雜，納管廠家行業別分佈、進廠管制落實程度及綜合污水處理廠處理流程等因素，皆會影響處理過程所產生之廢水污泥性質。本研究特別依工業區綜合污水處理廠廢水污泥特性，選定北部某工業區重金屬污泥及中部某工業區有機廢水污泥作為礦物替代材，以向水中取礦之精神，將工業區重金屬廢水污泥與淨水污泥、下水污泥及煉鋼爐渣混合取代鋁土、矽砂及鐵砂等天然礦物燒製環保水泥，而工業區有機廢水污泥則用以取代部分黏土燒製環保磚，後續並評估其技術可行性。

二、文獻回顧

1. 國內工業區污水處理廠介紹

台灣地區依獎勵投資條例開發成功之各處工業區中，工業局環保中心共管轄38處工業區綜合污水處理廠及一處(左營)海洋放流管制中心，前述工業區除和平、彰濱、雲林科技、台南科技工業園區

等地外，多在民國60及70年代間開發，其污水廠規劃設計主要以生物處理為二級處理，後來為因應87年放流水標準部分增設三級處理。

現階段工業局環保中心所管轄之38處工業區綜合污水處理廠中，臨海、大發及林園等三工業區系共組聯合污水處理體系，由於林園工業區污水處理廠只設有簡便調勻設施，將區內廢水集中彙整後交由聯合污水處理廠處理後海洋放流，並無廢水污泥相關問題；剩餘37處工業區綜合污水處理廠至少設有二級生物處理單元，廢水污泥產出量達60萬噸/年。

彙整現階段各工業區綜合污水處理廠處理方式，詳如表1所表示，其中活性污泥法合併三級處理為現階段應用最廣之廢水處理方式。

2. 污泥再利用技術介紹

以往對於環境保護所採取的污染防治手段，著重於管末端污染物的處李及去除，然而卻也伴隨而來最終處置問題。近年來，零廢棄等清潔生產觀念興起，在產品生命週期中，不再有廢棄物存在，所有廢棄物，在其他地方，都是可以再利用的資源。

將工業廢水污泥視為再利用資源，利用其組成份中富含鈣、矽、鋁、鐵等氧化物之特性取代部分黏土或鋁土，燒製高經濟價值的建築應用材料，是國際上先進國家處理廢棄污泥的最終處置方法，亦為先進之清潔生產技術。在工業污泥資源化再利用研究方面，李氏等人^[3]評估分析認為利用一般工業污泥作為覆土替代材料應為可行；陳氏等人^[4]之研究顯示，石化廢水二級處理後之生物污泥經前處理後，具備研製吸附劑之潛力；林氏等人^[5]之研究顯示，油泥灰渣經適當的操作控制亦可以添加方式燒製磁磚；羅氏等人^[6]則將淨水污泥及事業廢水污泥共融熔渣取代細骨材及波特蘭水泥材料。

三、研究材料與方法

1. 研究材料

本研究依工業區行業別分佈特性，選定北部某工業區(代號 A-IWS)及中部某工業區(代號 B-IWS)

綜合污水處理廠廢水污泥做為實驗基本材料，其組成成份分析結果如表 2 所示，其中，A-IWS 組成份中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Fe 等六大重金屬含量達 15.2%，推測其原因為區內廠商以金屬製造業及電子相關產業居多所致；至於 B-IWS 之組成份中重金屬濃度相對較低(小於 1%)而乾基可燃份(有機質)含量(60.58%)相對較高，推測為區內廠商以食品業及化學製品業居多所致。

(1)環保水泥配料

環保水泥配料所用之五種材料分別為工業區綜合處理廠重金屬污泥(代號 A-IWS)、淨水污泥、下水污泥、煉鋼廢爐渣及石灰石，本研究將先以導氣式焚化爐及高溫爐模擬實廠懸浮預熱式多段投料系統及水泥旋窯之製程，再以水泥配料係數規範值為邊界條件(如表 3 所示)，進行配料演算，燒製環保水泥熟料。

(2)環保磚材料

燒製環保磚所用之材料共有兩種，分別為工業區綜合處理廠有機廢水污泥 B-IWS 及黏土，本研究以取代方式，分別設定不同取代量，並於高溫爐中模擬實廠操作條件燒製建築紅磚。

2.實驗方法

(1)工業區綜合污水處理廠重金屬污泥燒製環保水泥

A.重金屬污泥取代天然礦物摻配水泥原料之基本特性分析

本研究嘗試以北部某工業區綜合污水處理廠廢水污泥(代號 A-IWS)為水泥生料之基本替代材料。另為確保廢棄污泥(替代性生料)中有機雜質及水分之完全去除，本研究利用導氣式焚化爐模擬水泥廠之懸浮預熱投料段進行灼燒前處理，期將替代性生料中的有機質及雜質完全去除，進而確保環保水泥熟料燒製之品質及配料精確度。

經灼燒前處理後模擬飼窯之三種廢棄污泥代號改以 A-IWSA(A-Industrial Wasterwater Sludge Ash)、PSSA(Primarily Sewage Sludge Ash)及 WPSA(Water Purification Sludge Ash)代表。配料

之化學組成份分析結果如表 4 所示。前處理後三種環保水泥替代性生料，其化學組成在三相圖中之定位如圖 1 所示。

由圖 1 可知，飼窯之三種替代性生料其取代水泥天然原料之特徵如下(I) A-IWSA 位於鋁土原料區邊緣，就環保水泥配料觀點而言，A-IWS 可取代部分鋁土(矯正配料)，用來配置水泥生料。(II) WPSA 位於土質原料區邊緣，就環保水泥配料觀點而言 WPS 主要取代部分黏土，用以補正混合生料中 Al_2O_3 之不足。(III) PSSA 位於矽質原料區邊緣，就環保水泥配料觀點而言，PSS 主要取代部矽砂 PSS 主要取代部分矽砂，用以補正摻合料中 SiO_2 之不足。

B.環保水泥生料配比設計

環保水泥生料之配比設計重點在於依配料所含鈣、矽、鋁及鐵化合物組成比例，編列多變數聯立方程組並對此聯立方程組進行精確之求解，並控制熟料實測所得之水泥係數值在邊界條件內。

本研究由佔生料總比例為 1%開始，來進行 A-IWSA 之摻配，另為了將燒製熟料之水泥係數控制在邊界條件之內。A-IWSA 摻合生料之總比例最高不超過 3%，根據電腦對聯立方程組試算之結果顯示，配料中石灰石之摻合比例接近 80%，此比例和實廠 I 型波特蘭水泥生料中石灰石含量相符。

配置環保水泥生料之實驗設計如表 5 所示，環保水泥替代性生料中隨著 WPSA 及 PSSA 此兩種配料比例之遞增，系統所摻合石灰石之比例最高可達 80.12%，最低可降至 79.43%，隨著石灰石摻合比例之遞減，混合配置所得到之三組環保水泥生料依序命名為: ECO A、ECO B 及 ECO C。

C.模擬窯燒試驗

就水泥之燒成反應而言，燒製溫度、及持溫時間為兩個主要操作變數，本實驗，受限於設備(固定爐床高溫爐)，無法確實模擬實廠水泥旋窯對於水泥各不同配料間旋轉混合及分段高溫燒製之行為；因此本實驗以東部某水泥廠所配置妥當之波特蘭 I 型水泥生料進行模擬窯燒試驗，再分析熟料中游離石

灰(系統中 CaO 殘餘量)之含量,當其比例 $<1\%$ 時,代表原本生料中存在之鈣、矽、鋁、鐵氧化物組成份已完全參與反應。為保護加熱系統,高溫爐由常溫加熱到最高持溫溫度之升溫時間統一固定為 2 小時。另考量研究所使用的實驗室高溫爐,其允許之最高持溫溫度為攝氏 1400°C ,總反應時間為 6 小時。

D.環保水泥漿體製備及後續試驗分析

經配置完成之生料即進行熟料燒成,燒成之熟料冷卻後,置入球磨機內研磨,熔渣粉未經 200 號篩篩選,以控制細度為 $320\text{-}380\text{ m}^2/\text{kg}$ 。實驗再將不同型別環保水泥熟料,控制在水灰比為 0.38,參考 ASTM C109 製作 1 英吋立方水泥漿試體, 24 小時後拆模浸飽和石灰水置入恆溫恆溼機,養護至預定齡期(3, 7, 14, 28, 60 及 90 天)取出以面乾內飽合狀態依 ASTM C109 進行單軸抗壓試驗,抗壓試驗破壞之試體以甲醇取代法,將試體浸泡甲醇終止水化,經烘乾後,進行核磁共振(NMR)等試驗⁽⁷⁾。

(2)工業區綜合污水處理廠有機廢水污泥燒製環保磚

A.有機廢水污泥取代黏土燒製環保磚之基本特性分析

本實驗嘗試以中部某工業區綜合污水處理廠廢水污泥(代號 B-IWS)及粘土做為環保磚胚材料,由於該工業區廢水污泥含大量有機質,為確保燒製磚體之品質,本研究將其先行置入焚化爐中,於 900°C ,焚燒 1 小時,所得污泥灰經球磨機球磨後,再過篩得到均勻及混合完全之污泥灰。經灼燒前處理後之廢棄污泥代號改以 B-Industrial Wasterwater Sludge Ash; B-IWSA 稱之。

環保磚胚材料分別為黏土(Clay)、前處理後之有機性工業污泥灰(B-IWSA),其化學組成份如表 6 所示。由表 6 可知,黏土組成份以 SiO_2 為主,佔 61.55% ,有機性工業污泥灰組成份以 SiO_2 及 Al_2O_3 為主,分別為 25.99% 及 22.08% 。

B.環保磚燒製及後續試驗分析

本研究將有機工業污泥灰及黏土之混合比例

分別控制於 10%、20%、30% 及 40%,經磚胚成型及風乾等程序後,利用實驗室規模高溫爐模擬實驗室操作條件於 950°C (8 小時)之操作條件下,燒製環保磚。後續並對燒結磚體進行重金屬 TCLP、燒失量、體積改變率、抗壓強度、吸水率、密度及 XRD 等巨微觀分析試驗。

四、結果與討論

1.工業區綜合污水處理廠重金屬廢水污泥燒製環保水泥

(1)環保水泥熟料化學組成及晶相探討

由表 7 結果顯示,OPC 及環保水泥熟料之重金屬溶出值均,合乎法規值。另外,環保水泥熟料化學組成份如表 8 所示。由於 ECO-A 型環保水泥熟料配料中石灰石添加比例和一般波特蘭水泥熟料(OPC)相近,由化學組成份分析結果顯示, $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ 比例和一般市售水泥相近, ECO-B 型環保水泥熟料:此組配比中由於添加石灰石比例較低,SWSA 取代生料比例較大。由表 8 中之化性分析顯示 ECO-C 型環保水泥熟料,由於 PSSA 比例較高,燒製熟料中 P_2O_5 含量為 0.85% ,導致燒製熟料中 C_2S 不以 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 型式存在,而以強度較低之 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 形式存在。此外,OPC 及環保水泥熟料之游離石灰量均小於 1% ,合乎國家標準。

(2)環保水泥熟料化學組成及晶相探討

由圖 2 為 OPC 及環保水泥熟料之 X-ray 分析結果。由圖 2 可以發現,OPC 及所燒製之三組環保水泥熟料皆含有 C_3S , C_2S , C_3A 及 C_4AF 晶相物種。而實驗燒製各組水泥熟料及 OPC 其 C_3S 晶相物種在繞射角(2θ)為 32.12° 時,有繞射峰出現。至於 C_2S 晶相物種其繞射峰出現在繞射角(2θ)為 32.21° 時。在繞射角(2θ)為 41.2° 時, C_2S 及 C_3S 皆有共同繞射峰出現。至於 C_3A 在繞射角(2θ)為 33.27° 、 C_4AF 在 33.94° ;ECO-A 型水泥熟料與 OPC 晶相物種相似;ECO-B、ECO-C 環保水泥熟料於繞射角(2θ)為 31.5° 時,出現 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 晶相物種。結果顯示,ECO-B、ECO-C 環保水泥熟料中因 P_2O_5 含量分別

為 0.75% 及 0.85%，導致燒製熟料中 C_2S 不以 $\beta-C_2S$ 型式存在，而以強度較低之 $\alpha-C_2S$ 形式存在。

(3)環保水泥漿體之抗壓強度發展

OPC 及 ECO-A、ECO-B 及 ECO-C 型環保水泥漿體抗壓強度發展分別如圖 3 所示。由圖 3 可知，OPC 及各型環保水泥漿體抗壓強度皆隨齡期而增加之發展趨勢皆相同。由圖中可知，ECO-A 型環保水泥漿體之抗壓強度發展與純水泥漿體趨勢相同，均是隨著養護齡期的增加而增加。對於 ECO-B 與 ECO-C 型水泥而言，則因單礦物 C_2S 含量分別高達 38.37 與 54.05%，因部分 C_2S 由 β 相轉變為 α 相之故，直到 90 天之養護晚期，其抗壓強度整體發展趨勢均較 OPC 為差，就材料特性而言，屬強度發展較差之水泥。

(4)環保水泥漿體之 NMR 分析

圖 4 至圖 7 為 OPC 及環保水泥漿體隨齡期之 NMR 分析圖譜。觀察本實驗所配置之三組環保水泥在不同齡期之 NMR 光譜，可發現其和純水泥漿體相同，未水化之水泥僅存在 Q^0 特徵峰(-70ppm)，隨著不同齡期水化反應行為之發生，在 3 天之水化齡期時即有明顯 Q^1 特徵峰(-80ppm)產生， Q^2 特徵峰(-87ppm)雖不明顯但亦有發展，此為矽酸鈣鹽類之單矽酸根(SiO_4)凝聚，而產生 ^{29}Si 核種之反磁性遮蔽(Diamagnetic Shielding)效應所造成，顯示 C-S-H 可能於水化 3 天內即有產生。本系列三型環保水泥 NMR 光譜特徵皆有隨著水化齡期之增加， Q^0 特徵峰強度逐漸減少，轉移至 Q^1 及 Q^2 特徵峰之現象。根據 Lipmaa(1980 及 1982)之研究指出，此現象代表隨齡期增加水泥中之矽由四面體(Tetrahedra)形態漸轉變為矽鏈結構，即 C-S-H 膠體之量隨水化齡期而逐漸增加。

圖 5 為 ECO-A 型環保水泥漿體之 NMR 光譜圖，由圖中可發現其特徵峰變化趨勢和對照系列水泥(OPC)頗為相似。由於本系列環保水泥化學組成份中含有較多矽酸三鈣單礦物，矽酸三鈣水化後之單聚物 Q^0 峰 (-70ppm) 方面，有隨齡期之增加而呈現漸漸減少之現象，而水化產物之 Q^1 峰(-80ppm) 與 Q^2 峰 (-87ppm) 則隨齡期之增加而漸漸增大，

根據林⁽⁸⁾ (2002)研究指出，此現象為矽酸三鈣之單矽酸根轉變為高濃縮矽結構的 CSH 膠體所致，同時亦與 Mehta (1983) 之結果相似，顯示形成 C-S-H 膠體使未水化水泥顆粒與水化產物之間更緊密結合。

圖 6 為 ECO-B 型環保水泥之 NMR 分析光譜圖，由圖可知，在 Q^0 峰(-70ppm)方面，則隨齡期之增加而呈現緩慢減少之現象，而水化產物之 Q^1 峰 (-80ppm) 與 Q^2 峰 (-87ppm) 則隨齡期之增加而緩慢增加，但其增加趨勢較不明顯。圖 7 為 ECO-C 型環保水泥之 NMR 分析光譜圖，由圖可知，在 Q^0 峰(-70ppm)方面，則隨齡期之增加而呈現緩慢減少之現象，而水化產物之 Q^1 峰 (-80ppm) 與 Q^2 峰 (-87ppm) 則隨齡期之增加而緩慢增加，但其增加趨勢最不明顯，相較之下 C-S-H 膠體形成之量既緩且少，故未水化水泥顆粒與水化產物之間形成緊密結合之時間較為緩慢，此顯示其水化反應非常慢。

2.工業區綜合污水處理廠有機性廢水污泥燒製環保磚

(1)抗壓強度

一般來說，影響燒結試體抗壓強度的因素有很多，包括試體孔隙率、孔隙大小、試體中礦物或物種型態之改變、試體表面破裂處或因熱應力對試體產生之破壞等因素皆會影響試體之強度發展，這些因素對試體之抗壓強度有正反兩面之影響。燒結過程中這些因子在交互影響下將表現出不同燒結強度特性，因此若要探討燒結試體抗壓強度值，不能只考慮單一影響因子。由表 10 得知，隨著有機性工業污泥灰添加比例的提高，磚體抗壓強度有降低的趨勢。當工業污泥灰取代量為 0-30%時，抗壓強度在 $150kgf/cm^2$ 以上，符合一級磚之標準；但當取代量為 40%時，抗壓強度在 $150kgf/cm^2$ 以下，燒結體的強度較弱。

(2)吸水率及比重變化

依據 CNS 1127-R3042 標準規範，一級磚的吸水率必須小於 15%。由表 9 可知，隨著污泥灰添加的量越多，燒結磚體的吸水率也隨之升高，顯示有機性工業污泥灰的添加可能造成磚體孔隙的增

加。由表中亦可知，有機工性業污泥灰取代量為 0-20%時，其燒成磚體之吸水率皆小於 20%；但當取代量為 30-40%時，其燒成磚體吸水率皆大於 20%，顯示其燒結體的緻密化程度不足，磚體結構鬆散，仍然保有相當多的開放孔隙。

至於比重則與燒結體的強度具有相關性，比重越高，燒結體緻密程度越高，可承受的外力也越高。由表 9 所示，當有機性工業污泥灰添加的比例越高，燒結體的比重會下降，顯示有機性工業污泥灰的加入不利於緻密化的進行，因此工業污泥灰的添加量需有其限值，以保持燒成磚體的良好性質。當工業污泥灰之取代量大於 20%時，比重從約 $1.7\text{kg}/\text{cm}^3$ 開始減少，無法滿足一般用磚比重 1.8 的要求。亦即，有機性工業污泥灰必須有限制的添加在約 20% 以下，以使磚體有足夠的緻密化，達到規範的比重要求。

(3)體積收縮率及燒失量

體積收縮率對之吸水率、密度及抗壓強度而言，有顯著之影響。表 9 結果顯示，有機性工業污泥灰之燒結磚體其體積收縮率為 3.2-5.1%左右，顯示在其表面依然有粉末顆粒，此顆粒因熱導致熱擴散，粒子還未產生黏合及頸部成長現象，燒結試體中內部孔隙甚多，燒結試體尚未有明顯之緻密化現象。至於燒失量係指試體燒結前後重量之損失，其損失量多寡可用來瞭解燒結過程水分之蒸發、有機物氧化分解、無機鹽類之分解揮發及少量之重金屬高溫逸散效應。此外亦可由燒失量變化趨勢，瞭解燒結過程中燒結試體之孔隙變化對試體吸水率及抗壓強度之影響。不同比例有機性工業污泥灰燒結試體間其燒失量差異不大，大多在 20.3%~24.6%左右。

(4)重金屬之 TCLP 溶出濃度

表 10 為環保磚體重金屬之 TCLP 溶出濃度。重金屬在燒結過程中，可能因重金屬的逸散或燒結過程中晶體的包附，而導致中金屬總量濃度改變。本研究之 TCLP 溶出試驗結果顯示，工業區綜合污水處理廠有機廢水污泥經前處理後，具備燒製環保磚之應用潛力。

(5)環保磚體 XRD 微結構分析

圖 8 為含工業污泥之環保磚與黏土之 XRD 圖譜，其中，包匣黏土之 X 光繞射圖譜顯示，其組成份大部分是 α 相的石英(quartz)，亦即 SiO_2 結晶，此點正和黏土組成份之 ICP-AES 分析結果相符(α - SiO_2 含量 60%)。由圖中可知，隨著工業污泥摻配比例之增加，磚化燒結體在 $\theta=26.3^\circ$ 之繞射角處所觀測到之 α - SiO_2 繞射峰其強度明顯降低。亦即系統中 α - SiO_2 組成比例隨著黏土比例減少及有機性工業污泥比例增加而降低。從原子動能(mobility)的觀點來討論，高溫提供原子運動之能量，足以造成更佳的結晶排列，因此，和單純之黏土相比較，圖中各配比環保磚體於 26.3° 之繞射角處 α - SiO_2 繞射強度較低。

五、結論

1. 將工業區綜合污水處理廠重金屬污泥為基材燒製所得之環保水泥熟料進行 XRD 晶相分析，結果顯示熟料組成份中 C_3S 、 C_2S 、 C_4AF 及 C_3A 等晶相物種，與傳統波特蘭水泥無異。
2. ECO-A、ECO-B 型及 ECO-C 三種型別環保水泥毒性溶出試驗結果顯示其重金屬溶出濃度結果皆低於法規值，顯示環保水泥具有資源化之潛力。
3. 核磁共振(NMR)光譜分析結果顯示，ECO-A 型環保水泥漿體之抗壓強度發展與純水泥漿體趨勢相同，均是隨著養護齡期的增加而增加。顯示以工業區綜合污水處理廠重金屬污泥為基材之廢棄污泥可取代 20% 之生料。
4. 以工業區綜合污水處理廠有機廢水污泥為基材之磚胚，經高溫爐模擬實廠燒成反應，可得類似建築用磚之產品，其抗壓強度高於一級磚標準，而其吸水率則符合二級建築用磚之規範。
5. 有機性工業污泥灰取代量為 0-40%之環保磚，燒結後經 TCLP 分析，污泥和燒結試體之重金屬溶出值皆遠低於法規標準，故污泥燒結磚，具有極佳之再利用價值。
6. 抗壓強度及 XRD 等巨微觀分析數據顯示，有機

性工業污泥灰取代量為 0-20%之環保磚體，符合作為建築用磚之基本規範，未來極具可廣泛推廣於生態工法之應用。

參考文獻

1. 王建文，”純氧活性污泥法處理綜合性工業廢水之研究”，國立中央大學環境工程學研究所碩士論文，(2000)。
2. Kae-Long Lin, Chung-Yei Lin, Kuen-Sheng Wang, Bor-Yi Tzeng, Chia-Hung Lin, "Hydration Characteristics of the Reuse of Waste ludge in Eco-cement Clinkers", A&WMA 97ND Annual Meeting & Exhibition, WM-04-A196, (2004).
3. 李伯興、林財富、張祖恩、高銘木、陳鼎勳，”事業污泥再利用可行性評估研究”，第十六屆廢棄物處理技術研討會論文集，(2001)。
4. 陳威翰、林雅雲、趙慶光、江鴻龍，”生物污泥析製吸附劑特性分析”，第十六屆廢棄物處理技術研討會論文集，(2001)。
5. 林登峰、傅國柱、翁誌煌，”油泥灰渣混合陶土燒製磁磚之資源化研究”，第十四屆廢棄物處理技術研討會論文集，(1999)。
6. 羅雅含”工業廢水污泥／淨水污泥共同熔融處理之資源化研究”，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文，(2002)。
7. Lin, K. L., Wang, K. S., Lee, T. Y., and Tzeng, B. Y. (2003) The hydration characteristics of MSWI fly ash slag present in C₃S. Cem. Concr. Res.33: 957-964.
8. 林凱隆，”都市垃圾焚化溶渣粉體調製環保水泥之卜作嵐反應特性研究”，國立中央大學環境工程研究所博士論文，(2002)。

表1 國內現有工業區綜合污水處理廠彙整

編號	工業區	處理方式概述	編號	工業區	處理方式概述
1	龍德	活性污泥法合併三級處理	20	鳳山	活性污泥法合併三級處理
2	土城		21	屏南	
3	大園		22	光華	活性污泥法
4	龜山		23	和平	
5	中壢		24	大武崙	
6	平鎮		25	全興	
7	觀音		26	斗六	氧化渠法
8	新竹		27	美侖	
9	台中		28	新營	氧化渠法合併三級處理
10	芳苑		29	台中幼獅	
11	南崗		30	永康	
12	民雄		31	永安	
13	安平		32	內埔	RBC 法合併三級處理
14	彰濱線西		33	桃園幼獅	
15	彰濱鹿港		34	嘉太	
16	雲林科技		35	五股	活性污泥法合併三級處理
17	官田		36	臨海	
18	仁大		37	大發	
19	大里		38	林園	納入臨海、大發及林園聯合污水處理體系

表2 兩工業區綜合污水處理廠廢水污泥組成份分析

樣本	基本分析		重金屬含量分析(mg/kg)					
	灰份(%)	可燃份(%)	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Fe
A-IWS	64.64	35.36	47500	65300	12900	10460	945	14900
B-IWS	39.42	60.58	2420	952	476	3790	7.7	1040

表3 配料所用水泥係數及其規範值

水泥係數	定義	規範值
石灰飽和度	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+1.18\text{Al}_2\text{O}_3+0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$	0.8-0.95
水硬係數	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.7-2.3
矽氧係數	$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.9-3.2
鋁鐵係數	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.5-2.5

表 4 模擬飼窯環保水泥配料之化學成份分析

化學組成	A-IWSA	WPSA	PSSA	煉鋼廢爐渣	石灰石
SiO ₂ (%)	12.19	54.47	63.31	3.17	7.30
Al ₂ O ₃ (%)	43.54	29.12	15.38	1.63	1.10
Fe ₂ O ₃ (%)	7.44	7.25	6.81	40.50	0.66
CaO(%)	2.65	0.93	1.80	5.73	62.10
MgO(%)	0.59	1.12	1.03	0.23	1.23
SO ₃ (%)	3.20	0.08	1.01	0.82	0.18
Na ₂ O(%)	1.24	0.67	0.70	0.08	0.22
K ₂ O(%)	0.55	3.55	1.51	0.07	0.01
P ₂ O ₅ (%)	1.51	ND	7.20	ND	ND
氯離子(ppm)	315	311	105	175	ND

表 5 三組環保水泥生料配方

生料	ECO-A	ECO-B	ECO-C
A-IWSA(%)	1.00	1.50	3.00
WPSA(%)	8.69	9.72	6.18
PSSA(%)	8.51	6.84	9.29
煉鋼廢爐渣(%)	1.68	1.97	2.10
石灰石(%)	80.12	79.97	79.43
LSF	91.46	83.52	80.41
HM	2.00	1.87	1.72
SM	1.90	2.16	1.74
IM	2.11	2.10	1.79

表 6 黏土及有工業污泥灰之化學組濃度

Composition	Clay	B-IWSA
SiO ₂ (%)	61.55	25.93
Al ₂ O ₃ (%)	15.39	22.08
Fe ₂ O ₃ (%)	5.82	16.92
CaO (%)	1.54	4.45
MgO (%)	1.14	1.33
K ₂ O (%)	2.39	1.19

表 7 各型別環保水泥熟料及 OPC 之 TCLP 溶出值

	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd(mg/L)	Pb (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)
OPC	ND*	ND**	ND***	0.72±0.02	ND****	0.33±0.01
ECO-A Clinker	ND	ND	ND	0.62±0.01	ND	0.22±0.01
ECO-B Clinker	ND	ND	ND	0.73±0.02	ND	0.34±0.01
ECO-C Clinker	ND	ND	ND	0.68±0.02	ND	0.46±0.02

*Pb 偵測極限<0.016 mg/L; **Cr<0.016 mg/L; ***Cd <0.014 mg/L; **** Ni <0.015 mg/L

表 8 各型別環保水泥熟料及 OPC 之化學組成分析

Composition	OPC	ECO-A	ECO- B	ECO- C
SiO ₂ (%)	21.65	21.24	23.15	22.53
Al ₂ O ₃ (%)	6.50	7.11	6.39	8.32
Fe ₂ O ₃ (%)	3.20	3.55	3.67	4.64
CaO (%)	63.70	64.83	63.12	61.18
MgO (%)	1.90	1.28	1.11	1.11
SO ₃ (%)	2.20	0.34	0.37	0.45
R ₂ O (%)	0.30	0.32	0.26	0.18
P ₂ O ₅ (%)	ND	0.46	0.75	0.85
f- CaO (%)	0.31	0.30	0.20	0.20
Constituents				
C ₃ S (%)	46.71	48.65	35.60	13.98
C ₂ S (%)	27.33	24.20	38.37	54.05
C ₃ A (%)	11.81	12.83	10.72	14.20
C ₄ AF (%)	9.70	10.80	11.17	14.12
Moduliu				
LSF	0.90	0.92	0.85	0.80
HM	2.03	2.03	1.93	1.72
SM	2.23	1.99	2.26	1.74
IM	2.03	2.00	1.74	1.79

表 9 燒結磚體之抗壓強度、吸水率、比重、收縮率及燒失量

燒結磚體	抗壓強度(kgf/cm ²)	吸水率 (%)	比重	收縮率 (%)	燒失量 (%)
有機性工業污泥製磚					
0%	401.5	16	2.0	4.7	20.3
10%	297.4	17	1.9	4.2	21.2
20%	171.2	18	1.8	5.1	22.4
30%	152.1	22	1.7	3.8	20.6
40%	104.2	24	1.4	3.2	24.6
CNS 382.R2002 規範					
一級磚	150	15	1.8-2.0	---	---
二級磚	100	19	1.8-2.0	---	---

表 10 摻配工業污泥灰環保磚體之 TCLP 濃度

Sample	Cu (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)
有機性工業污泥灰製磚					
0%	ND	ND	ND	ND	ND
10%	ND	ND	0.11	0.02	ND
20%	0.13	ND	0.14	0.07	ND
30%	0.18	ND	0.18	0.09	ND
40%	0.17	ND	0.18	0.13	0.11
法規值	15	1.0	5.0	---	5.0

*Pb 偵測極限<0.016 mg/L; **Cr<0.016 mg/L; ***Cd <0.014 mg/L; **** Ni <0.015 mg/L

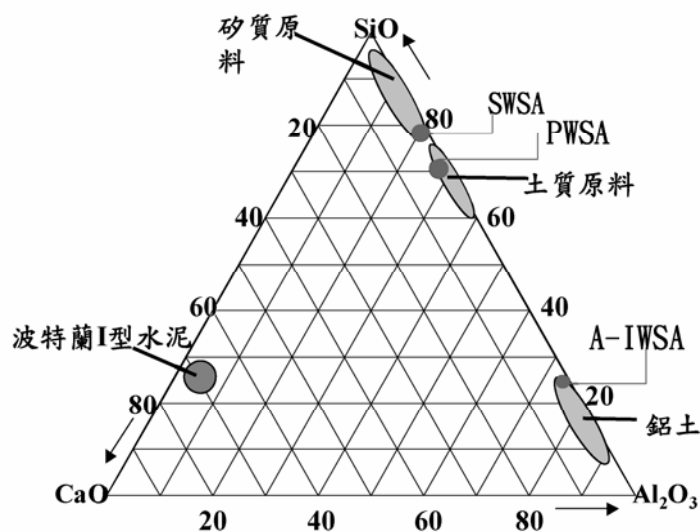


圖 1 飼窯之三種替代性生料在三相圖上之定位

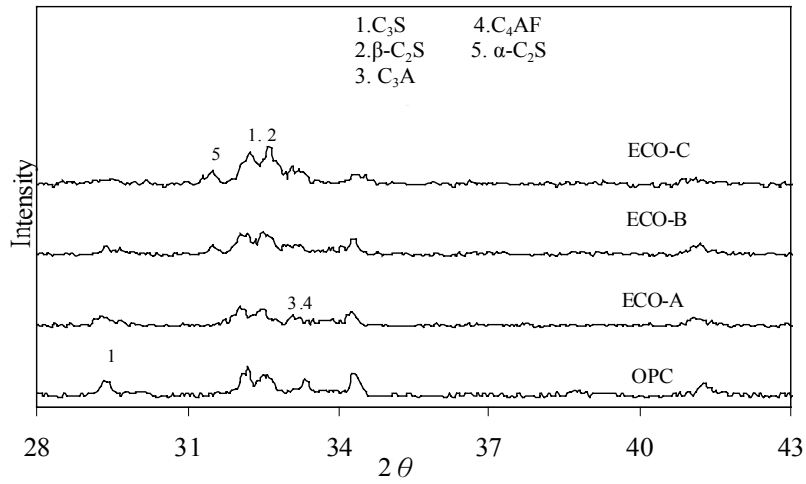


圖 2 環保水泥熟及對照組熟料之 XRD 圖譜

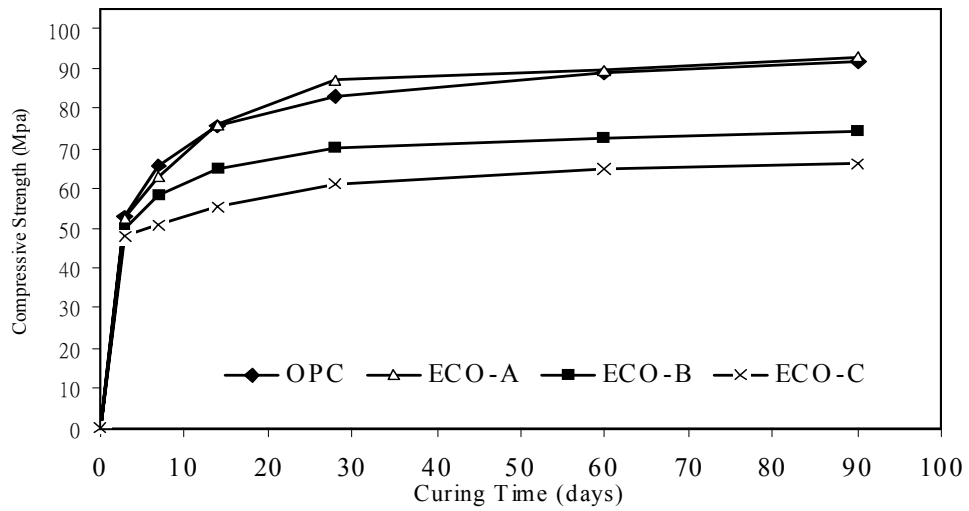


圖 3 環保水泥漿體抗壓強度發展

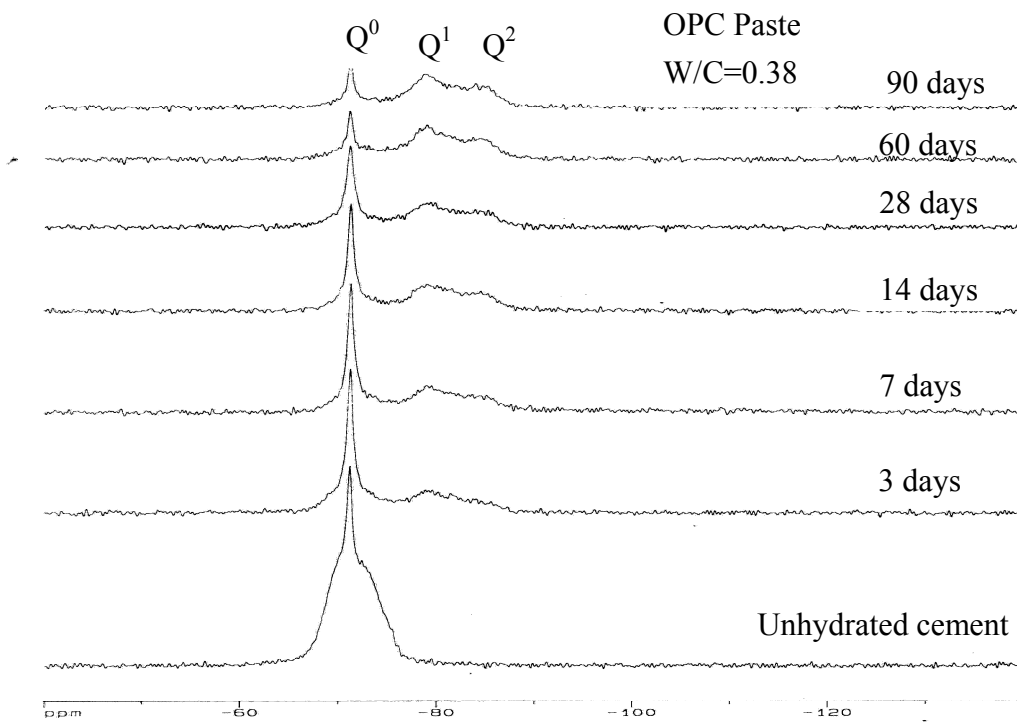


圖 4 OPC 漿體在不同齡期之 ^{29}Si MAS/NMR 圖譜

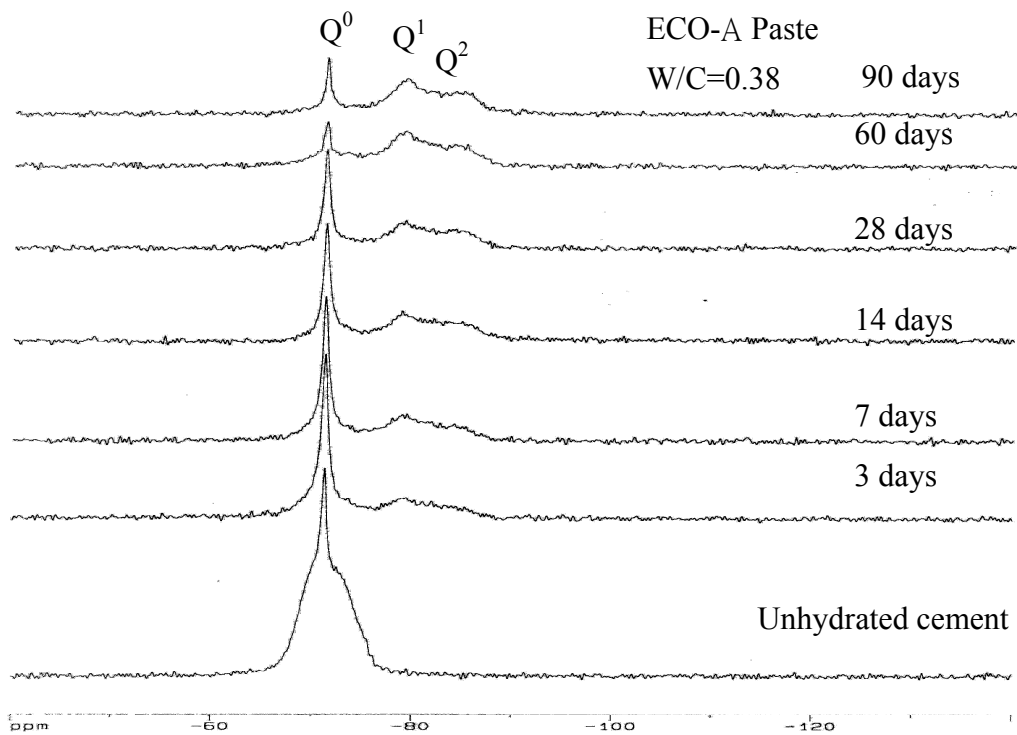


圖 5 ECO-A 型環保水泥漿體在不同齡期之 ^{29}Si MAS/NMR 圖譜

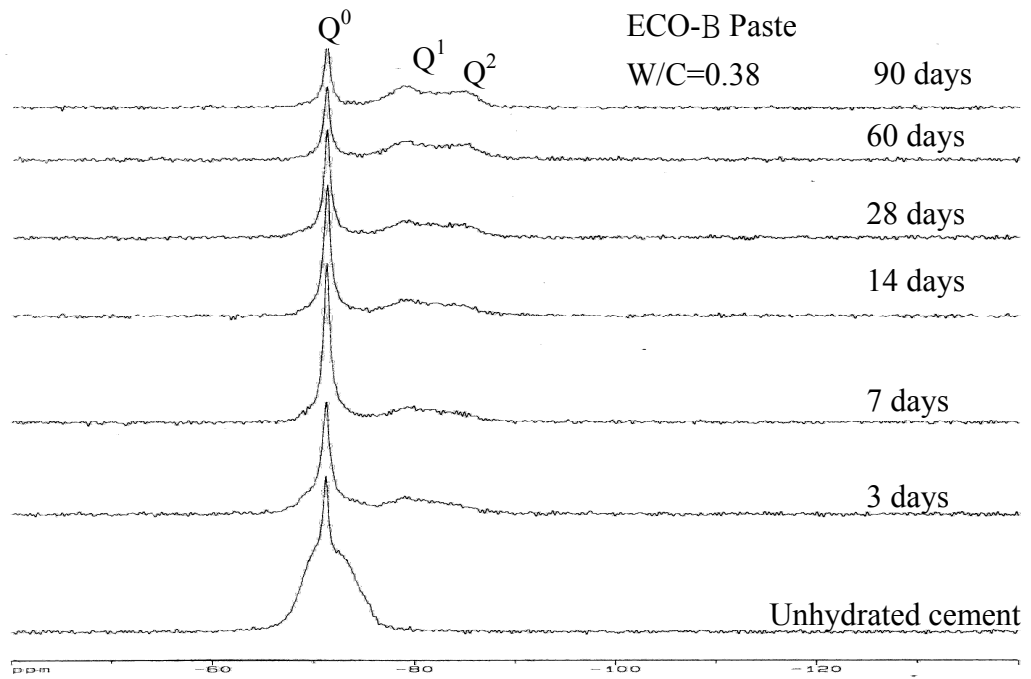


圖 6 ECO-B 型環保水泥漿體在不同齡期之 ^{29}Si MAS/NMR 圖譜

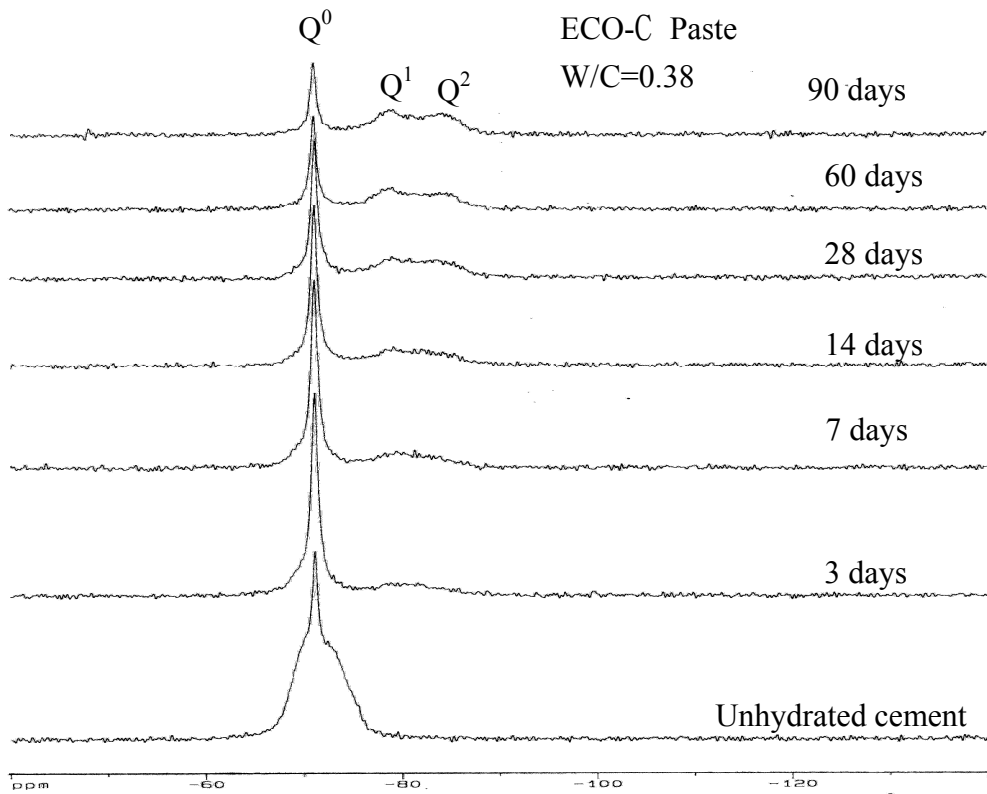


圖 7 ECO-C 型環保水泥漿體在不同齡期之 ^{29}Si MAS/NMR 圖譜

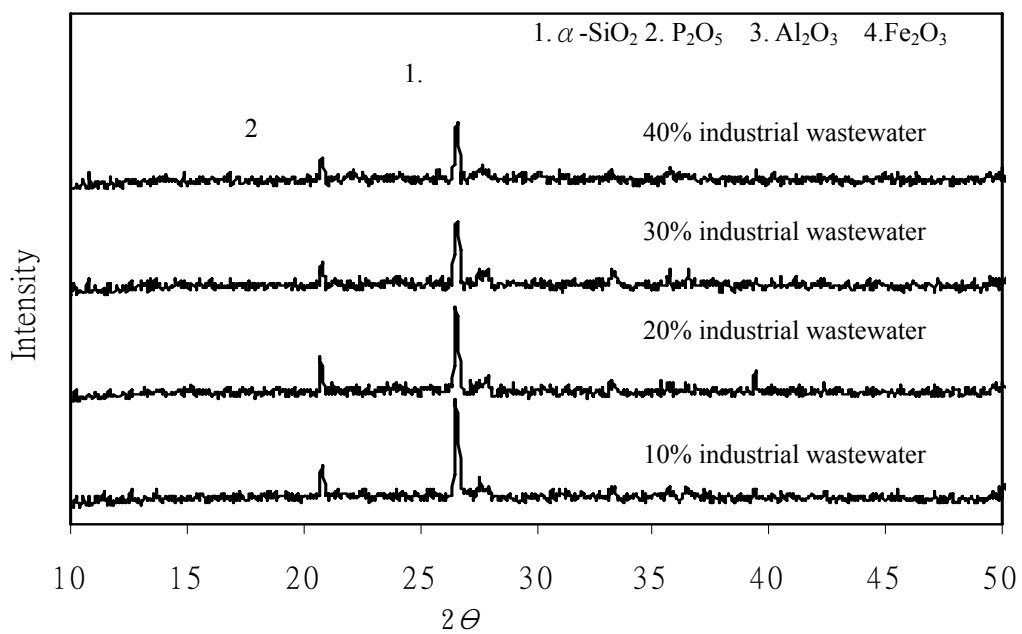


圖 8 含有機性工業污泥之環保磚與黏土之 XRD 圖譜