

資源循環與再利用類

多元化無機資源物製備低碳排產品之 技術研發

羅勻謙*、李梯群**、卓大鈞**、李韋皞***、吳亞竹****

摘 要

隨著氣候變遷議題日益嚴峻，如何有效減緩溫室氣體排放成為產業與學術界的重要課題，傳統土木與建材業普遍仰賴高碳排原料與製程，亟需發展具永續性與環保效益的新興材料技術。本文聚焦於無機聚合技術 (Geopolymer Technology)，彙整無機聚合產品國內外應用情形及國內未來發展方向，並實際以國內製造業產生之無機資源物如還原碴、混燒飛灰等，以無機聚合技術製備具機械性能與環保效益兼具之低碳排產品（非構造物用混凝土、控制性低強度回填材料及高壓地磚等），其開發經驗供國內產業參考。

【關鍵字】無機聚合技術、無機資源物、低碳產品

* 財團法人台灣綠色生產力基金會

** 財團法人台灣綠色生產力基金會

*** 國立臺北科技大學資源工程研究所

**** 環境部資源循環署

副理

工程師

助理教授

特約助理環境技術師

一、前言

面對全球氣候變遷與淨零排放的挑戰，低碳轉型已成為我國政策與產業發展的重要方向。我國事業廢棄物以無機資源物為大宗，每年約有 1,500~1,700 萬公噸產生，如能將其中的物理化學成分加以利用，將其轉換為再利用材料，不僅能解決廢棄物處理問題，同時也能發揮資源的最大價值。

而妥善利用無機資源物之關鍵，在於掌握其原料特性及選用適合技術，國內無機資源物以灰渣、爐碴、污泥類為主，其中電弧爐煉鋼爐還原碴（石）（簡稱還原碴）及混燒灰渣因具有不穩定成分，容易造成膨脹性問題，如未妥善處理，將影響產品品質及後端使用意願。現行解決膨脹性問題的方法主要為高壓蒸氣安定化技術，即於高溫高壓條件下蒸壓至少 3 小時，但此技術耗能較高；另一方面，無機資源物資源化現況又以預拌混凝土、控制性低強度回填材料（Controlled Low Strength Material，簡稱 CLSM）及再生粒料等土木、建材類用途為主，但大多需添加水泥等高碳排膠結材料，進一步提高產品碳排放量。

為解決前述問題，本會 112 年度執行環境部資源循環署「無機資源循環材料技術研發與管理計畫」，以未經安定化處理之還原碴、混燒灰渣（飛灰）及砂石碎解洗選場泥餅（簡稱泥餅）等無機資源物為素材，實際運用低能耗之無機聚合技術產製非構造物用混凝土、CLSM 及高壓地磚等產品，所產製之產品其品質可符合國家標準及施工綱要規範，同時具有減碳及成本效益，展現應用無機聚合技術生產多元產品的可行性。

本文首先概述無機資源物資源化現況及面臨問題，介紹無機聚合技術原理、特性及國內外發展現況，分享以無機聚合技術開發低碳排產品之成果。最後，提出未來推動規劃及配套措施建議，期望為無機資源物拓展多元化應用管道，及降低資源化過程碳排放量之目標。

二、無機資源物資源化現況及面臨問題

2.1 無機資源物資源化現況

1. 產出現況

經分析環境部資源循環署之事業廢棄物統計年報 (2023) 相關數據，112 年無機資源物產生量達 1,502.1 萬公噸，主要以灰渣、爐碴、營建廢棄物及污泥類為主，如圖 1，其中灰渣占比最高，總產出量達 620 萬公噸，爐碴類次之，其後為營建廢棄物及污泥類。如再將灰渣類依申報種類細分為 R 類及 D 類代碼，R 類灰渣以燃煤飛灰產出量 435 萬公噸最高，燃煤底灰次之；其餘 D 類灰渣以非有害廢集塵灰或其混合物、一般性飛灰或底渣混合物產出量較大，2 項合計年產出量約 63 萬公噸。

爐碴類以 G 類代碼水淬高爐石產出量最大，年產出量逾 250 萬公噸，其後分別為 R 類氧化碴（100 萬公噸）、還原碴（24.4 萬公噸）；D 類代碼以金屬冶煉爐渣（含原煉鋼出渣）為最多，年產出量約 11 萬公噸。至於營建廢棄物部分，其年產出量達 160 萬公噸，以 R 類代碼之營建混合物產出最大；污泥類則是以 D 類代碼之無機性污泥年產出量最大，達 100 萬公噸。

除上述 4 類外，無機資源物之其他類，則包括常見之廢玻璃陶瓷磚瓦、瀝青混凝土挖（刨）除料、土木或建築廢棄物混合物等產生量較小之種類。綜上，無機資源物多為製程末端產物，且量體龐大，如可將其妥善利用，則可減低環境負荷。

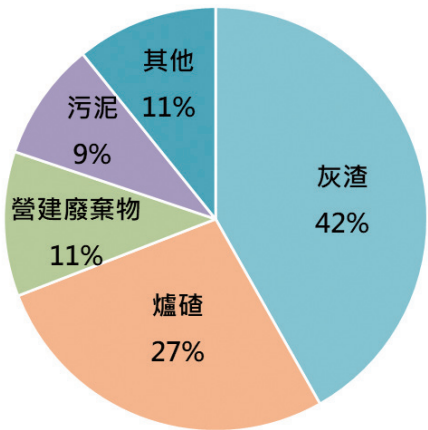


圖 1 無機資源物主要類別產出量占比

2. 資源化現況

現行無機資源物資源化，主要透過物理（破碎、篩分）程序或化學程序產生最終產品，部分會再經過窯爐進行煨燒或燒結。主要資源化用途如下所列：

- (1) 再生粒料：如電弧爐煉鋼爐碴、灰渣、廢鑄砂、廢玻璃、廢磚等，用於管溝回填用粒料、道路工程基底層級配等。
- (2) 水泥或混凝土摻料：如煤灰、還原碴作為水泥生料；煤灰及水淬高爐石研磨後之爐石粉，其具有膠結性，經常用於混凝土攪和物產製預拌混凝土。
- (3) 填地材料：如燃煤底灰回填灰塘、廢磚用於回填凹地等用途。
- (4) 水泥製品：如高壓混凝土地磚、空心磚、水泥板、水泥瓦、路緣石等。
- (5) 紅磚：如淨水污泥、無機性污泥，經窯燒產製紅磚。

除水泥、紅磚外，大部分最終產品生產過程皆使用水泥作為膠結材料，少數會添加爐石粉。由於水泥原料及生產過程耗能高，導致這些產品碳排放量偏高。因此，開發低碳環保膠結材料成為近年來的重點關注議題。

2.2 無機資源物資源化面臨問題

本研究關注之無機資源物包括還原碴、混燒灰渣及砂石碎解洗選場泥餅，其外觀如圖 2 所示，3 種無機資源物目前所面臨之問題，分別說明如下：



圖 2 本研究關注之無機資源物外觀

1. 還原渣：含游離氧化鈣 (f-CaO) 及氧化鎂 (MgO) 等成分，遇水易有膨脹性，故現行再利用前，通常須經高壓蒸氣安定化程序。該技術已趨成熟，但資源化過程耗能高，且產品的應用管道仍有限。因此，有必要開發低碳安定化技術，並拓展更多應用場域。目前全國還原渣貯存量約 32.8 萬公噸。
2. 混燒灰渣：因應政府推動廢棄物燃料化政策，目前有許多種廢棄物可再利用為燃料或產製固體再生燃料，或直接作為輔助燃料，並於燃燒後產生混燒灰渣。混燒灰渣中常含有易膨脹物質，可能影響再利用產品的穩定性。為此，環境部已於 114 年 1 月發布「共通性事業廢棄物作為固體再生燃料原料再利用管理辦法」，加強法規管制，有助於提升混燒灰渣再利用的穩定性。目前全國混燒灰渣貯存量約 8.8 萬公噸。
3. 砂石碎解洗選場泥餅：我國砂石原料含泥量約為 15%，經洗選後產生大量餘泥，脫水後形成泥餅。這些泥餅粒徑極細，年產量龐大，但可供應的去化用途有限，因此亟需開發新的應用方向。

綜合以上，開發無機資源物的新應用技術，並導入低碳安定化處理，是目前推動還原渣、混燒灰渣及砂石場泥餅資源化的重點。本研究透過「無機聚合技術」進行開發，嘗試為無機資源物資源化注入新的技術能量。

三、無機聚合技術簡介

3.1 無機聚合技術

無機聚合技術是透過鹼性配方液，將礦物或廢棄物表面的矽與鋁離子溶出，接著經過聚合反應、脫水與硬化等步驟，生成具有非晶質或半晶質結構的三維鋁矽酸鹽材料。以無機聚合技術製備之材料統稱為無機聚合材料，這類無機聚合材料具備優異的隔熱性、高初期強度及低熱傳導率等特性，且製程中無需高溫燒製，展現出良好的節能減碳潛力。

無機聚合材料的原料來源相當多樣，參考經濟部礦物局 2016 年研究報告指出，只要含有豐富矽與鋁元素且能在鹼性溶液中良好溶解的礦物或廢棄物皆可作為材料。根據功能，此類添加物可分為 3 大類：(1) 鹼性活化液；(2) 惰性添加物；(3) 活性添加物。

鹼性活化液通常以矽酸鈉溶液為主，主要目的是提供可作為膠結材料的矽元素；惰性添加物則是指富含可溶性矽和鋁的礦物或廢棄物粉體；至於活性添加物，則多選用如變高嶺土、燃煤飛灰、水淬高爐爐渣、廢玻璃等具有化學反應活性的物質，藉此提升硬化與結構強度。除上述 3 類組成外，製備過程中還需添加適量的鹼性溶液，以促進粉體中矽與鋁元素的釋出並形成膠凝結構。過去研究中，常見的鹼性來源為氫氧化鈉 (NaOH) 或氫氧化鉀 (KOH)。

3.2 無機聚合材料之優點

無機聚合技術具備製程簡便的優勢，不需高溫燒結，且聚合過程中不產生二氧化碳，符合低碳技術特性。此類材料同時展現出優異的機械強度、耐久性、耐腐蝕性、耐高溫性能、良好的黏結能力，以及對重金屬離子的固化 / 穩定化能力，應用領域相當廣泛，被視為一種極具發展潛力的工程材料，其各項優點整理如表 1 所示。

表 1 無機聚合材料優點說明

優點	說明
機械性質	具有高早強特性，在短時間內可達到優異的機械強度，且可根據不同的配比設計與養護條件進行調整與優化。(Davidovits, 1990)
耐久性	長期於一般室外環境條件下可保存完整性。(Davidovits, 1988)
耐腐蝕性	經酸性溶液浸泡後，外觀無明顯變化，具有良好耐化學腐蝕性。(Bakharev, 2002)
耐火性	具有優良的防火絕熱性質，能耐 1,200℃ 高溫，應用於結構材上可加強結構物之防火性質，使結構物更具安全性。(邱俊萍，2002)
黏結性質	在脫水硬化前，其漿體具有黏結之特性，可應用於不同界面之修補，亦可作為混凝土裂縫之修補材料。
固化重金屬	可將重金屬離子封鎖於無機聚合結構中，避免重金屬溶出污染。(Phair, 2005)
節能減碳	生產 1 噸無機聚合水泥，其 CO ₂ 排放量僅有傳統水泥之 20 %。(Davidovits, 2002)

資料來源：經濟部礦務局，低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究報告，2016

3.3 影響無機聚合材料之因子

影響無機聚合作用的關鍵因素，主要可歸納為以下幾項：原料的種類與其物理化學特性、所使用的鹼性活化劑種類與濃度、製備過程中的攪拌時間，以及養護時的溫度與持續時間；這些因子會共同影響無機聚合材料的反應效率、微觀結構形成以及最終性能表現，各項影響因子彙整如表 2 所示。

表 2 無機聚合材料之影響因子說明

影響因子	說明
原料種類與特性	不同種類與性質的原料會影響整體配比設計、操作參數及反應條件。尤其在顆粒尺寸方面，原料粒徑越小，則比表面積與反應活性越高，能加速矽與鋁的溶出，進而提升無機聚合程度，這將有助於提高材料的抗壓強度與延展性。
鹼活化條件	鹼性活化劑在無機聚合反應中扮演關鍵角色，主要功能為促進矽、鋁元素的溶出及寡聚物的生成。其濃度高低與所選用的鹼金屬陽離子類型（如 Na^+ 或 K^+ ），都會直接影響鋁矽酸鹽的溶解程度與反應速率，是關鍵的控制因子之一。
攪拌時間	攪拌時間的長短對材料不同齡期的抗壓強度有顯著影響。研究顯示，延長攪拌時間有助於早期與中期強度的提升，惟對長齡期的強度增益則較不顯著。
養護溫度與時間	養護溫度為影響無機聚合材料凝結與硬化的重要因素。適當提高養護溫度能促進反應並提高抗壓強度，但若溫度過高，反而可能抑制反應進行或導致結構缺陷，進而降低強度。

資料來源：行政院原子能委員會，無機聚合材料萃製及成形技術研究，2015

3.4 無機聚合技術抑制膨脹性鋼渣之機制

一般而言，膨脹性鋼渣發生體積膨脹的主要原因，來自其內部含有游離氧化鈣 (f-CaO)。當 f-CaO 與水接觸時，會生成氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)，進而導致體積膨脹的現象。因此，本研究提出之構想為，將含 f-CaO 之還原渣細粉引入無機聚合材料體系中，藉由其中所含之游離矽成分，促使 f-CaO 與其反應，進而轉化為穩定的鈣系化合物，達到膨脹性鋼渣安定化的目的。鹼性活化劑中所使用的穩定化藥劑主要包括 X 與 Y 兩種，其對應的反應式如下： $(\text{X},\text{Y}) + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Ca}(\text{X},\text{Y}) + \text{H}_2\text{O}$

由於這些反應在膨脹性鋼渣安定化過程中可能有藥劑過量，因此部分未參與反應的藥劑會殘留於還原渣細粉內。當還原渣細粉進一步被用於產製無機聚合成品後，若因外力或其他因素產生裂縫，導致顆粒破碎並再次釋放出 f-CaO，殘留在材料中的藥劑便可於滲入的水分中溶解，再次與釋出的 f-CaO 反應，形成穩定產物，有效避免成品因膨脹而導致破裂。其反應過程示意如圖 3 所示（胡庭凱，2017；林冠宇，2019）。

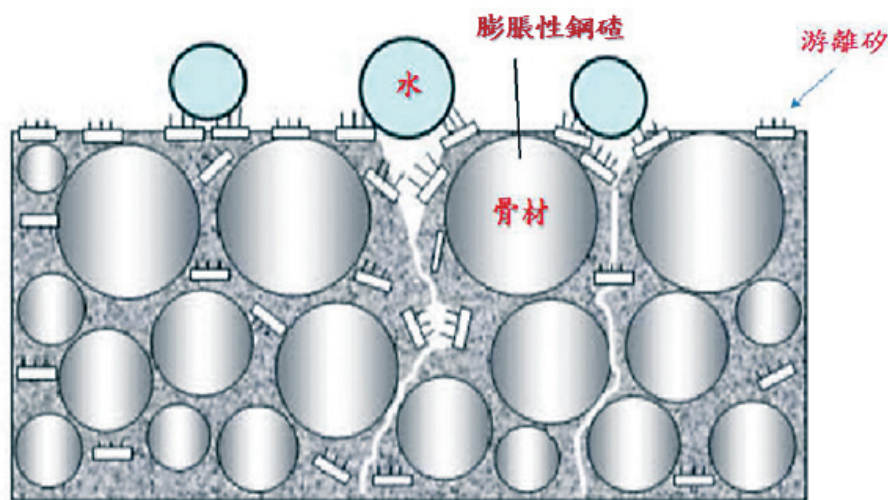


圖 3 無機聚合技術抑制膨脹性鋼渣之機制示意圖（胡庭凱，2017；林冠宇，2019）

3.5 無機聚合技術應用於多元無機資源物之研究

無機聚合技術具備良好的資源再利用潛力，可廣泛使用富含矽與鋁元素之各類廢棄物作為原料，常見之無機資源物包含：大理石石材切削廢料、太陽能面板廢玻璃、TFT-LCD 面板廢棄物、煉鋼集塵灰、燃煤飛灰、水庫底泥、廢棄保溫棉、營建廢棄物，以及煉鋼爐渣等。

近年來，國內外對無機聚合材料的研究熱度持續升高，其中以各類無機資源物為原料之應用也日益增加。分析近年文獻之研究標的，無機聚合材料在原料選用上展現

高度多元性，包括運用於含重金屬之污泥或是受輻射污染之物質，亦有良好的包容能力且無有害物質釋放，顯示出在重金屬固化與環境穩定性方面具備優異表現。表 3 彙整近年學術研究中，不同無機資源物應用無機聚合技術之成果。

表 3 學術研究各類無機資源物之無機聚合

年份	作者	原料	成果
2017	Belmokhtar	陶瓷工業污泥	28 天抗壓強度介於 34.7 MPa ~ 49.4 MPa。
2019	Ahn	含有大量元素 Ba 及硫酸鹽之核電廠污泥	污泥添加至 40%，抗壓強度在 30 MPa 左右，且無大量 Ba 及硫酸鹽測出。
2020	樊堂宇	有機成分之地下水污泥與爐石粉	28 天後其抗壓強度達 35.1 MPa。
2021	Kozai	受輻射物 Cs 污染之污泥與爐石粉	污泥添加量至 30% 時強度可達到 50 MPa，且無重金屬溶出。
2022	Bai	電爐碴、焚化飛灰、爐石粉及紅土	製作高壓地磚，最佳強度可達 29.46 MPa
2023	Zhao	含有重金屬之污水污泥、飛灰與爐石粉	強度可達 46 MPa，且材料經 TCLP 檢測均無重金屬溶出。
2023	Ramadan	玻璃拋光污泥、燃煤飛灰及爐石粉	添加 30% 玻璃拋光污泥於 28 天時可達到 30 MPa。

資料來源：環境部資源循環署，無機資源循環材料技術研發與管理計畫，2023

四、無機聚合技術國內外現況

4.1 國外應用現況

無機聚合技術的應用領域相當廣泛，目前已涵蓋混凝土與其相關產品、結構補強材料，以及防火複合材料等領域。無機聚合技術的商業化發展已於多國展開，包含澳洲、英國、德國、芬蘭及美國等地皆陸續有相關公司設立，表 4 彙整各國應用情形，說明如下：

1. 混凝土與相關產品

澳洲 Wagner 公司利用爐石粉、燃煤飛灰、鹼性活化劑與骨材，開發以無機聚合技術製成的綠色混凝土「Earth Friendly Concrete(EFC)」，相較於傳統混凝土，每立方公尺約可減少 75%~85% 二氧化碳排放，抗壓強度介於 10~65 MPa，可應用於牆體、柱子、管道、地基等工程。實際應用案例如機場鋪面、橋梁預鑄板、人工魚礁與住宅基礎等，目前正持續推廣至英國市場。

芬蘭 Betolar 公司採用高爐石、再生混凝土骨材與鹼性活化劑為原料，生產「Geoprime」產品，可廣泛應用於基礎建設所需之地磚、水管等混凝土產品，展現無機聚合技術於建材領域的實用性。

2. 防火材料

由於無機聚合物具低熱傳導性、高熱穩定性及不燃性，因此非常適合應用於防火與隔熱材料，如澳洲 Nu-Core® 公司開發出「Geopolymer Composite Panel」無機聚合複合板材，具備 A2 級防火性能，原先為航空產業設計，後續也推展至一般商業用途，能有效取代傳統不耐燃之鋁複合板。

德國 Skoberne 公司推出暖氣系統的無機聚合泡沫產品「SKOBIFIX 30」；INOMAT 公司開發無機聚合防火塗料「Ino-Flamm」，拓展了無機聚合材料於建築安全領域之應用。

3. 結構補強材料

美國 Milliken Infrastructure Solutions, LLC 公司，研發以無機聚合技術製成之結構補強材料「GeoSpray」，具有高早強與高終強度、優異的抗彎與黏結性能、極低孔隙率及良好的抗化學腐蝕性。主要應用於非開挖式的管道修復工程，包括下水道、供水及廢水管等基礎設施之結構加固。

表 4 國外無機聚合技術商業化彙整

國家	公司	產品名稱	產品說明
澳洲	Wagner	Earth Friendly Concrete	由工業副產品、廢料，如高爐礦渣和粉煤灰製成的無機聚合混凝土
澳洲	Nu-Core®	Nu-Core®A2FR	無機聚合複合防火板材板
美國	Milliken Infrastructure Solution, LLC	GeoSprayTM、GeoSprayTMAMS、GeoPlugTM、GeoFuseTM	結構補強材料；GeoSprayTM 使用 60% 之工業廢棄物
美國	Geopolymer Solutions	GEOPOLYMER CONCRETE	使用高爐渣、飛灰及天然礦物產製之混凝土
美國	Vortex Companies	GeoKrete®	用於遭受腐蝕和其他可能導致災難性故障問題的大直徑管道、涵洞、隧道和其他基礎設施
美國	Alchemy Geopolymer Solutions	Green Cement	前 NASA 實驗團隊，測試將 Green Cement 用於火箭火焰噴射溝槽
芬蘭	Betolar	Geoprime®	使用高爐渣、混凝土粒料及活化劑生產混凝土、混凝土管及混凝土磚
德國	Skoberne	SKOBIFIX 30	暖氣系統專用無機聚合泡沫
德國	INOMAT	Ino-Flamm	防火無機聚合塗料
挪威	Snøhetta	GEOPOLYMER CONCRETE	研發替代傳統水泥之無水泥材料

資料來源：(1) 行政院原子能委員會，無機聚合材料萃製及成形技術研究，2015
(2) GeopolymerSolutions，<https://www.geopolymertech.com/green-concrete/>
(3) Korniejenko, K., Łach, M., & Mikula, J.B. (2021). The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. Materials, 14, 4599.

現行無機聚合技術最受關注之商業化應用為無機聚合物混凝土，根據 Almutairi 等人 (2021) 指出，早期無機聚合物混凝土可追溯至 1960 年代的烏克蘭，當時使用矽鋁酸鹽原料（如黏土、岩石與礦渣）搭配鹼金屬溶液，興建了 2 棟 9 層樓高的住宅建築。Xu 等人 (2008) 後續針對該建物於 2000 年進行材料取樣與性能測試，結果顯示即使長期處於惡劣環境，材料強度仍持續提升，且未觀察到明顯老化跡象，證實其良好的耐久性。

隨後，澳洲 Wagners 公司積極推動無機聚合物混凝土的發展，自 2010 年起陸續在澳洲各地進行相關工程應用。其中，2013 年於昆士蘭大學的全球變遷研究所建築中，採用預鑄梁柱方式導入無機聚合混凝土，為該技術在現代工程應用上的重要里程碑。接著於 2014 年，該公司在昆士蘭圖沃柏的 Wellcamp 國際機場鋪面工程中全面使用無機聚合混凝土，該項工程預估減少約 6,600 噸二氧化碳排放，展現其在減碳與永續建材應用上的潛力。近期於 2023 年，英國南倫敦的赫斯特變電站工程中，也採用無機聚合混凝土作為隧道傳動軸的基礎材料，灌入於深達 55 公尺的隧道底部，總用量約 736 m³，進一步擴展無機聚合技術於基礎建設領域的應用實績。前述實際應用案例彙整如表 5。

表 5 國外無機聚合混凝土應用案例彙整

國家	時間	地點	項目	說明
烏克蘭	1960's	基輔	建築	2 棟 9 層樓高之住宅大樓。
俄羅斯	1989	利佩茨克	建築	高 20 層之住宅大樓。
澳洲	2010	新南威爾斯	滑道鋪面	於新南威爾斯州的洛基角 (Rocky Point) 船隻滑道鋪面，以預鑄式無機聚合混凝土鋪設。
澳洲	2013	昆士蘭	預鑄梁柱	於昆士蘭大學之全球變遷研究所，以無機聚合技術製作 33 塊預鑄樑柱使用。
澳洲	2014	昆士蘭	機場跑道	於澳大利亞昆士蘭州圖沃柏 Wellcamp 飛機場，採用無機聚合物混凝土鋪設。
澳洲	2019	雪梨	道路	鋪設於雪梨道路，長 15 公尺之無機聚合物混凝土道路，後續持續追蹤 5 年。
美國	2016-2018	紐約及俄亥俄州	地下水道	以無機聚合材料用於地下水道補強。
英國	2023	南倫敦	隧道傳動軸基材	於英國南倫敦之赫斯特變電站，將無機聚合物混凝土灌至 55 公尺深之隧道底部，灌製隧道傳動軸基材，共 736 m ³ 。

資料來源：(1) Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., & Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymers in construction: A review. Case Studies in Construction Materials, 15, e00733.

- (2) Wagners, <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/>
- (3) VortexCompanies, <https://vortexcompanies.com/product/geokrete-structural-geopolymer/>
- (4) <https://www.nationalgrid.com/national-grid-completes-record-breaking-pour-cement-free-concrete-london-power-tunnels>

4.2 國內應用現況

目前國內已有多個研究團隊投入無機聚合技術之研發與應用，相關成果涵蓋實驗室產品開發與實場試作 2 大面向。在實場試作部分，主要原料以燃煤飛灰與高爐石粉為主，成功生產出無機聚合混凝土與各類水泥製品，展現良好的實務應用潛力。在實驗室開發方面，除常見之灰渣與污泥類原料外，亦有研究嘗試導入廢棄蚵殼、廢棄印刷電路板 (PCB) 以及港灣污泥等資源材料，用以製作各類水泥製品及工程用建材。其中所製成之高壓地磚與工程材料，其抗壓強度皆可達到 21 MPa，展現優異的力學性能。

此外，亦有研究團隊針對含有鉻與銅等重金屬污染之污泥，進行無機聚合固化處理的可行性評估。經由毒性特性溶出程序— TCLP 檢測，其重金屬溶出濃度皆符合環保法規，顯示無機聚合技術在環境安全性方面亦具有良好表現。

整體而言，國內無機聚合技術的應用已逐步從實驗室邁向實廠實作階段，其推動現況詳列於表 6，相關產品開發成果如圖 4 所示。

表 6 國內無機聚合技術應用現況彙整

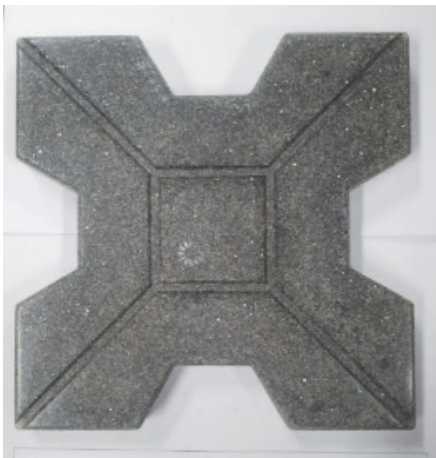
規模	原料種類	應用方向	說明
實驗室開發	焚化飛灰	防火材料	溶出試驗—使用含有重金屬之焚化飛灰為原料，無機聚合技術固化後之材料經 TCLP 檢測均無重金屬溶出。 防火試驗—以 1,400℃ 火焰燃燒固化體一側，另一側以溫度計量測溫升情形，火焰接觸 30 分鐘後，另一側僅升溫至 100℃。
	重金屬污泥	重金屬固化 / 穩定化	將含有鉻及銅重金屬污染之污泥，製作無機聚合材料固化體，經 TCLP 檢測，固化體重金屬溶出結果均未超標。

規模	原料種類	應用方向	說明
實驗室開發	港灣污泥	工程材料	將港灣污泥製成無機聚合固化體，50 % 污泥摻配比仍可達到一般工程材料抗壓強度要求 21 MPa，且經 TCLP 檢測，重金屬溶出均符合標準。
	廢蚵殼	高壓地磚	利用澎湖之廢蚵殼進行無機聚合高壓地磚製作，當固體原料摻配比達 50 % 時，抗壓強度可達 21 MPa，符合 C 級磚強度要求。（此應用獲得國際 Cradle to Cradle 認證）
	PCB 廢料	植草磚	利用 PCB 廢料為填充材，進行無機聚合植草磚製作。
實場應用	燃煤飛灰及爐石粉	無機聚合砂漿	鋪設於北科大設計系系館樓頂，無機聚合砂漿由協力廠商於預拌廠完成配製後，以預拌車運送經 30 分鐘車程後進行澆灌。
		無機聚合透水混凝土	於現場拌合鋪設無機聚合透水混凝土於北科大校園內。
		無機聚合混凝土	於宜蘭縣冬山鄉香和路 257 巷 13 弄社區進行實體圍牆灌製，實際灌製量達 7.6 噸，體積為 3 m ³ 。

資料來源：環境部資源循環署，無機資源循環材料技術研發與管理計畫，2023



高壓地磚（實驗室）



植草磚（實驗室）

圖 4 國內無機聚合應用產品開發現況



無機聚合砂漿（北科大）



無機聚合透水混凝土（北科大）



無機聚合混凝土（宜蘭縣冬山鄉香和路）



植草磚鋪設（宜蘭縣冬山鄉香和路）

圖 4 國內無機聚合應用產品開發現況

五、無機資源物以無機聚合技術開發低碳排產品

為促進無機資源物之資源循環，以及使用低碳技術，本研究以無機聚合技術開發低碳排產品。首先針對無機資源物原料成分特性分析著手，再進行無機聚合膠結材開發，備製各項低碳排產品，評估其品質與可行性，期望為未來技術落地應用奠定基礎。

5.1 原料基本性質

本研究主要使用之無機資源物包含泥餅、還原碴及混燒飛灰，另以爐石粉作為輔助反應材添加，以 XRF 檢測原料之成分組成，分析結果如表 7，檢測發現原料以鈣矽鋁氧化合物為主。此外，泥餅經壓濾脫水後團結成塊，且含水率仍有 26.4 %，於後續材料攪拌需添加分散劑以利分散；還原碴之游離氧化鈣 f-CaO 為 0.8 %，可用於比對後續膨脹性抑制情形；混燒飛灰遇鹼易有發泡現象，使用前需進行適當的前處理（如添加鋁酸鈉加速氧化反應），以提升材料穩定性。

表 7 泥餅、還原碴、混燒飛灰及爐石粉之基本性質

原料	成分 (%)							粒徑 (D ₅₀) (μm)
	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	f-CaO	其他	含水率	
泥餅	0.5	49.8	7.1	7.1	-	6.5	26.4	12.8
混燒飛灰	30.4	24.7	14.2	7.8	-	14.6	-	15.6
還原碴	52.6	16.0	5.2	6.3	0.8	13.5	-	511.0
爐石粉	40.2	34.7	14.1	0.2	-	10.8	-	12.0

5.2 無機聚合膠結材開發

無機聚合膠結材之開發試驗配比及強度結果如表 8，因泥餅主要以 SiO₂ 為主，故以其為主要原料搭配輔助反應材爐石粉使用。膠結材開發首先確立泥餅使用量及對無機聚合膠結材之強度影響；接者評估還原碴取代爐石粉使用之影響；最後再評估混燒飛灰取代部分還原碴添加之影響。

從圖 5 發現當泥餅添加量增加時，無機聚合膠結材之強度隨之減少，然而泥餅添加量達 70% 之系列，其強度於 28 天仍可達到 24.3 MPa，符合大部分膠結材應用於工程材料要求強度。另還原碴取代爐石粉之結果如圖 6，顯示對強度影響不大；最後將混燒飛灰經前處理，再將其破碎取代部分還原碴添加，依圖 7 結果顯示會使強度些微下降，但整體強度仍可符合工程材料要求強度。由此可知，還原碴具有反應性可做為膠結材之使用，而泥餅及前處理之混燒飛灰反應性較低，較適合作為細粒料使用。

表 8 無機聚合膠結材之開發試驗配比及強度結果表

實驗編號		泥餅 (%)	還原值 (%)	混燒 飛灰 (%)	爐石粉 (%)	抗壓強度 (MPa)			
						3 天	7 天	14 天	28 天
泥餅取代部分 爐石粉	N50	50	0	0	50	32.6	31.8	45.4	53.8
	N60	60	0	0	40	26.6	41.9	41.0	35.5
	N70	70	0	0	30	8.4	12.2	20.0	24.3
泥餅、還原值 取代部分爐石粉	50-R	50	10	0	40	25.2	49.9	50.4	47.3
	60-R	60	10	0	30	24.4	29.9	34.6	28.0
泥餅、還原值及 混燒飛灰取代 部分爐石粉	50-RS	50	7	3	40	36.4	36.5	36.8	38.7
	60-RS	60	7	3	30	18.2	21.5	28.3	19.7

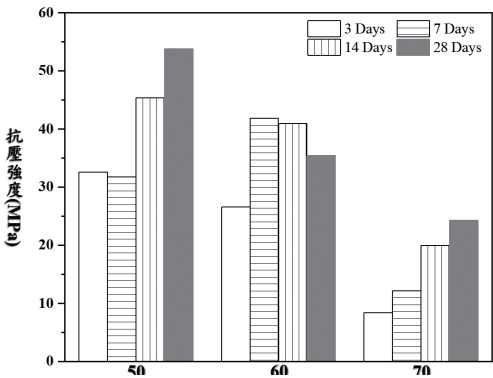


圖 5 泥餅添加量之影響

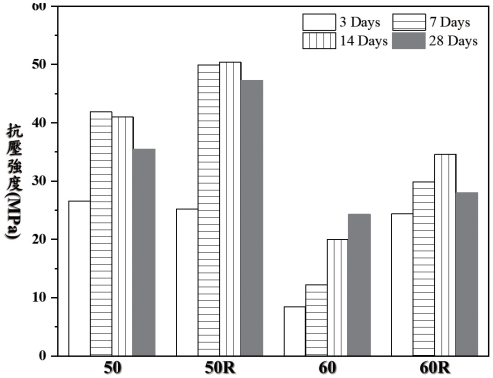


圖 6 還原值爐石粉之影響

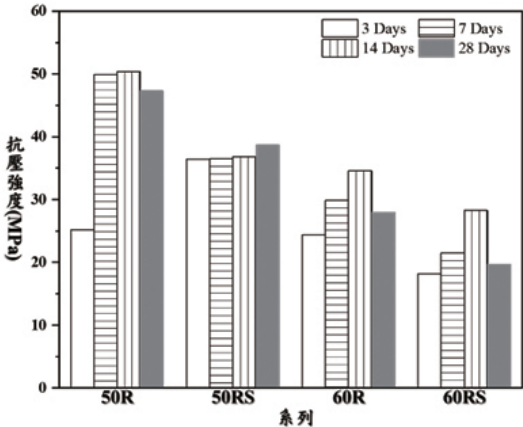


圖 7 添加混燒飛灰之影響

5.3 無機聚合技術開發之低碳排產品可行性

從 5.2 節得知各無機資源物對膠結材之影響後，設計各 5 組膠結材配比進行低碳排產品開發，開發之產品為高壓地磚、非構造物混凝土及控制性低強度混凝土 (CLSM)，開發結果說明如下：

高壓地磚開發部分，高壓地磚配比表及檢測結果如表 9 所示，高壓地磚之試驗依「CNS 13295 高壓混凝土地磚」進行檢測，檢視結果顯示 H1 組符合 A 級磚之強度要求，H2 及 H3 兩組符合 B 級磚之要求，另耐磨係數均符合規範要求。

表 9 無機聚合低碳排產品—高壓地磚之開發試驗配比及試驗結果

試驗組別 代號		膠結材料 (%)				鹼液 添加量 (%)	28 天 抗壓強度 (MPa)	耐磨係數 (cm ³ /50 cm ²)
		泥餅	還原碴	混燒飛灰	爐石粉			
高壓地磚	H1	50	17	3	30	10	37.4	< 0.1
	H2	60	17	1	25		29.1	< 0.1
	H3	60	17	3	20		27.3	< 0.1
	H4	70	7	3	20		16.2	< 0.1
	H5	70	5	0	25		20.1	< 0.1
高壓地磚	A 級						> 32	< 15
	B 級						> 24	
	C 級						> 21	

非構造物混凝土及控制性低強度混凝土部分，其使用之固體材料比例均固定，僅透過鹼性添加量（液灰比）調整，產製非構造物混凝土及 CLSM，配比表及檢測結果如表 10 所示。表中熱壓膨脹試驗，是以高溫高壓之方式加速其膨脹發生，主要用於測定材料之穩定性。從結果發現，非構造物混凝土之 U1 及 U2 兩組配比可達到強度需求，且熱壓膨脹試驗後，材料無膨脹之情形，強度均有上升，表示以無機聚合技術能有效抑制膨脹，且無機聚合反應仍持續進行，使強度於熱壓試驗後上升。

CLSM 部分，亦有 C2 及 C4 兩組符合強度要求，其餘 3 組強度均高於需求強度，表示可再提高無機資源物之使用量，而熱壓試驗之穩定性與非構造物混凝土發展情形相同。

表 10 無機聚合低碳排產品—非構造物混凝土及控制性低強度混凝土
開發試驗配比及試驗結果表

試驗組別代號		膠結材料 (灰 1)(%)				砂 (2.5)	石 (2.4)	液灰比	28 天 抗壓 強度 (MPa)	熱壓膨脹試驗	
		泥餅	還原 碴	混燒 飛灰	爐石粉					試驗後 強度 (MPa)	外觀
非構造物 混凝土	U1	50	17	3	30	旋轉窯 爐碴 再生 細粒料	旋轉窯 爐碴 再生 粗粒料	0.85	19.6	21.6	無爆裂、 局部爆孔、 崩解及破裂
	U2	60	17	1	25				16.0	18.6	
	U3	60	17	3	20				11.3	13.3	
	U4	70	7	3	20				10.4	13.5	
	U5	70	5	0	25				13.2	19.0	
	相關要求								≥ 14		
控制性 低強度 混凝土	C1	50	17	3	30	旋轉窯 爐碴 再生 細粒料	旋轉窯 爐碴 再生 粗粒料	0.97	15.6	16.6	無爆裂、 局部爆孔、 崩解及破裂
	C2	60	17	1	25				9.0	10.6	
	C3	60	17	3	20				9.8	11.2	
	C4	70	7	3	20				8.5	9.6	
	C5	70	5	0	25				13.6	15.3	
	相關要求								2~9		

5.4 無機聚合技術開發之產品減碳效益評估

無機聚合技術可應用多元化無機資源物，其產品在成本效益上和使用原生料配比之產品具有優勢，另由於其無添加水泥，和相同性能水泥製品相較，通常有較低碳排放量，本研究透過產品碳足跡計算，評估無機聚合產品之減碳效益。

產品碳足跡係計算產品全生命週期中直接與間接產生的溫室氣體排放量，包含「原物料取得」、「製造」、「配送銷售」、「使用」及「廢棄」等 5 大階段所產生的溫室氣體排放量總和。由於本研究主旨在於比較以不同原料、配比及技術產製符合同一品質標準之產品碳足跡，故僅考量由「搖籃」至「大門」階段，亦即原料

取得及製造階段之碳排放量，不計算後續配送銷售、使用及廢棄處理階段之碳排放量。

原料取得階段包含原料生產製造之碳排放量及原料到生產廠之運輸過程相關溫室氣體排放，由於本計畫並未限定特定之原料產源，故亦不計算原料運輸之碳排放量。另由於本研究所採用之無機聚合技術可使用現行主流技術之設備（如拌合設備），在製程能資源消耗差異有限的情形下，將假設製造階段之碳排放量為相同，故主要差異為使用不同原料之碳排放差異。

本研究減碳效益比較對象主要有 3：本研究開發之無機聚合產品、蒐集市場原生料配比之產品，以及環境部碳足跡資訊網同類型產品碳排放資訊。以本研究開發之產品為例，其產品碳排放量係以產品原物料配比（使用量），乘上各原料之碳排放係數，計算出單位產品之碳排放量；而市場原生料配比產品之碳排放量計算方式亦同；環境部碳足跡資訊網產品則是篩選計算範疇相同之同類型產品。

由單位產品碳排放量分析可知，無機聚合產品主要碳排放來源為鹼液，若能控制鹼液添加量，則較能顯現減碳優勢。依本研究開發之配比進行計算，無機聚合技術應用於非構造物用混凝土及高壓地磚，和碳足跡資訊網同類型產品碳排放量相較，分別有 10% 及 50% 減碳效益（如圖 8），產製 CLSM 則較無優勢，顯示無機聚合產品應朝高強度開發，較有減碳優勢。

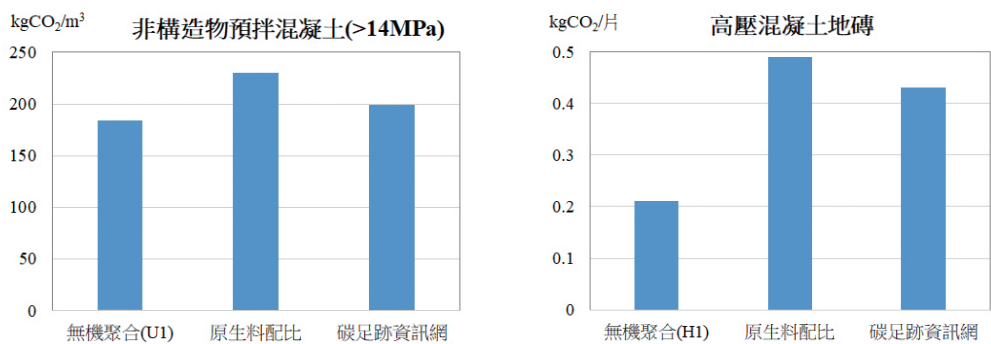


圖 8 無機聚合產品與同類型產品減碳效益示意圖

六、未來推動規劃及配套

在資源循環與節能減碳兩大主流趨勢驅動下，無機聚合技術因可應用於多元性物料、抑制鋼爐渣膨脹性，以及產品碳排放量較低等優勢，日益受到研究單位重視，也逐漸引起產業界關注。無機聚合材料其性能雖能符合市場相同功能產品之規格與標準，惟目前國內實場應用案例相對有限，產業對該技術認識不足，僅能透過文獻資料略窺一二，缺乏實證數據佐證其可行性。再者，現行國家標準或施工規範多要求一定比例的水泥添加，對無添加水泥之無機聚合產品推廣造成一定挑戰。

有鑑於此，無機聚合技術的推動策略，除需持續於實驗室階段測試各類無機資源物（如還原渣、混燒飛灰、重金屬污泥及現行採掩埋處理之事業廢棄物），從成分特性分析、配比設計、前處理技術等面向，提升材料穩定性與性能外，亦需同步開發多元產品，以擴展應用管道。而實場落地應用更為關鍵，不僅可驗證產品之耐久性，亦有助於建立市場信心。未來推廣方向可聚焦於非結構性混凝土應用與建材類產品開發兩大主軸。

混凝土的用量大、應用性廣，又可去化大量無機資源物，適合作為未來推動之項目。為穩健推動，下一階段可聚焦鹼液添加比例，在維持良好工作性並兼顧產品功能性，作為研發重點。至於應用場域，建議先行導入非結構性私人回填工程，如管溝回填、筏式基坑非承重之回填等，並同步進行耐久性監測，藉以觀察產品長期功能表現，逐步累積國內實廠應用數據。

在建材領域，無機聚合地磚因兼具減碳及經濟效益，隨著環保意識興起，民眾對低碳綠色建材接受度逐漸提升，顯示其應用可期。另配合我國法規建築技術規則對室內外綠建材使用比例提升，無機聚合技術開發產品，未來可朝綠建材標章認證發展，可提升建築產業使用意願，帶動無機資源物再利用產業的技術轉型與價值提升。

參考文獻

行政院原子能委員會 (2015)，無機聚合材料萃製及成形技術研究。

林冠宇 (2019)，安定化轉爐石膨脹性之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。

邱俊萍 (2002)，利用高爐爐渣製成無機聚合材料之研究，國立臺北科技大學碩士論文。

胡庭凱 (2017)，轉爐石安定化可行性之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。

經濟部礦務局 (2016)，低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究報告。

樊堂宇 (2020)，下水污泥之有機物常溫去除暨合成無機聚合材料與評估，國立臺北科技大學碩士論文。

環境部，產品碳足跡資訊網，<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/index.aspx>。

環境部資源循環署 (2023)，無機資源循環材料技術研發與管理計畫。

環境部資源循環署，各事業廢棄物代碼申報流向（112 年 1 月~112 年 12 月），事業廢棄物申報及管理資訊系統。

環境部資源循環署，資源再利用管理資訊系統，<https://rms.moenv.gov.tw/RMS/>。

Ahn, J., Kim, W. S., & Um, W. (2019). Development of metakaolin-based geopolymer for solidification of sulfate-rich HyBRID sludge waste. *Journal of Nuclear Materials*, 518, 247-255.

Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., & Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.

Bai, Y., Guo, W., Wang, J., Xu, Z., Wang, S., Zhao, Q., & Zhou, J. (2022). Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere*, 307, 135987.

- Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.-B. (2002), "Sulfate attack on alkali-activated slag concrete." , Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 211-216.
- Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J., & Allal, L.B. (2017). Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge. Construction and Building Materials, 146, 621-629.
- Davidovits, J. (1988). Geopolymer chemistry and properties. Geopolymer 88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France, 1, 25-48.
- Davidovits J, Comrie D.C., Paterson J.H., Ritcey D.J., (1990), "Geopolymeric concretes for environmental protection." , Concrete International, Vol. 12, pp. 30-40.
- Davidovits, J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. GeopolymerSolutions, <https://www.geopolymertech.com/green-concrete/> .
- Korniejenko, K., ach, M., & Mikula, J.B. (2021). The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. Materials, 14(16), 4599.
- Kozai, N., Sato, J., Osugi, T., Shimoyama, I.S., Sekine, Y., Sakamoto, F., & Ohnuki, T. (2021). Sewage sludge ash contaminated with radiocesium: Solidification with alkaline-reacted metakaolinite (geopolymer) and Portland cement. Journal of hazardous materials, 416, 125965 .
- National Grid, <https://www.nationalgrid.com/national-grid-completes-record-breaking-pour-cement-free-concrete-london-power-tunnels>
- Phair, J. W., Smith, J. D., Van Deventer, J. S. J., (2005), Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial Geopolymers, Materials Letters, Vol.57, pp. 4356-4367.

Ramadan, M., Habib, A. O., Hazem, M. M., Amin, M. S., & Mohsen, A. (2023). Synergetic effects of hydrothermal treatment on the behavior of toxic sludge-modified geopolymer: Immobilization of cerium and lead, textural characteristics, and mechanical efficiency. *Construction and Building Materials*, 367, 130249.

VortexCompanies, <https://vortexcompanies.com/product/geokrete-structural-geopolymer/>

Wagners, <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/>

Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131.

Zhao, Q., Ma, C., Huang, B., & Lu, X. (2023). Development of alkali activated cementitious material from sewage sludge ash: Two-part and one-part geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135547.