



鋼鐵爐渣之循環應用 — 電弧爐煉鋼還原渣再利用

蔡文博 / 台鋼資源股份有限公司 總經理

鄭大偉 / 台北科技大學材料及資源工程系 教授

黃兆龍 / 臺灣科技大學營建工程學系 教授

傳統線性的生產消費模式，是從自然環境開採原物料後，加工製造成商品，商品被使用後就直接丟棄，不斷的消耗著有限的資源創造產品，最後再直接掩埋或焚燒。而循環經濟在製造生產的每個產品都經過精心設計，並可用於多個循環來使用，不同的材料與生產製造的循環皆經過仔細規劃，一個製程的輸出可成為另一個製程的輸入，藉由減緩、封閉與縮小物質與能量循環，使得資源的投入與廢棄、排放達成減量化的目標。

鋼鐵工業為產業發展之基礎，舉凡各種產品製造、營建工程、交通運輸及工商機具等，皆與鋼鐵工業息息相關，但伴隨著鋼鐵製造過程而產出的副產物—爐渣，如何妥善的處理與再利用，使其資源化，重新進入資源循環體系，進而降低環境衝擊並提升產業經營效能。電弧爐煉鋼爐渣為電弧爐煉鋼製程中所產的副產物，依冶煉過程可分為電弧爐煉鋼氧化渣（以下稱氧化渣）及電弧爐煉鋼還原渣（以下稱還原渣）兩大項^[1]。鋼鐵產業為能妥善再利用還原渣，集資成立之台鋼資源股份有限公司，依據「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」^[2]所規定之爐渣安定化方式建立生產線，應用高壓蒸汽熱壓處理進行還原渣安定化，安定化後產品則須經過 CNS 15311「粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法」或熱壓膨脹法之檢驗合格，方能進行還原渣再利用。本文乃針對電弧爐煉鋼還原渣之安定化程序、安定化成效驗證與工程上之再利用用途進行說明，期待能妥善處理爐渣，創造產業與社會雙贏之結果，善盡企業社會責任。

前言

2016 年末媒體報導爐渣屋問題，2017 年 3 月松菸文創大樓發生「青春痘牆面」爐渣（還原渣）屋事件，爐渣頓時成為台灣舉國關注的焦點，人人聞爐渣色變。事件中的主角爐渣以較精確的名稱來稱呼，應該稱為「電弧爐煉鋼還原渣」，在台灣的鋼鐵產業中，依生產工藝來分主要有一貫化煉鋼廠（如中鋼、中龍）與電弧爐煉鋼廠（如豐興、東和、協勝發、海光…等）兩種，以電弧爐煉鋼來說，因在不同程序產出，產生的副產物分為氧化渣與還原渣兩種，就國內現今電弧爐煉鋼廠每年約生產 1,000 萬公噸粗鋼，亦產出約計 120 萬公噸氧化渣及 46 萬公噸還原渣^[1]。有關

爐渣之資源化再利用用途，歐盟爐石協會^[3]、美國國家爐石協會^[4]、日本爐石協會^[5]及台灣鋼鐵工業同業公會^[1]均有統計載明，數十年來電弧爐煉鋼氧化渣已廣泛使用於瀝青混凝土、道路基礎、鐵路道渣及地盤改良等用途；另一方面，會與水產生反應而導致體積膨脹之還原渣，則因爐渣屋事件的關係，剎時間面臨無處可去的窘境，台灣經濟命脈之一的鋼鐵產業面對著每天產出的還原渣亟待有效去化，鋼鐵產業苦思解決之道。因此，鋼鐵業集資成立爐渣再利用機構「台鋼資源股份有限公司」（以下稱台鋼資源），依據「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」所規定之爐渣安定化方式建立生產線，採用高壓蒸汽熱壓處理進行還原渣安定化，

安定化後產品則須經過 CNS 15311「粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法」或熱壓膨脹法之檢驗，方能進行還原渣再利用，使用於管理辦法中許可的用途。

營建業向來是資本、能源都高度密集的產業，不但在歐盟地區佔了 40% 能源使用量，也是全球使用原物料最多的產業，更是製造了 25% ~ 40% 的碳排放量。世界經濟論壇 (World Economic Forum) 在 2016 年指出，若將循環經濟實踐在營建業上，預估每年可節省 1,000 億美元的支出，並大幅提高全球營建業的生產力^[6]。電弧爐煉鋼將廢鋼重新熔煉成各產業所需的鋼鐵原料，原本就是資源循環中重要的一環，但在從新熔煉的過程中會產生煉鋼副產品—爐渣。其中，還原渣在煉鋼製程中經超過 1,500°C 冶煉，為一無機之粒料，其 TCLP 與戴奧辛檢測均可符合管理辦法規定，經過適當的處理與安定化，在體積穩定性無虞之前提下，將其視為一種營建材料，使用在合適的營建用途上，從新導入營建業材料循環中，可有效發揮其的適用性與價值性，不但可減少天然資源的開發與使用，對於循環經濟在營建業的推廣亦有所助益。但如何在確保營建品質安全無虞的前提下，達到資源循環再利用的目標，將還原渣妥善安定化，解決其體積穩定性之疑慮，使用在合適的營建用途上，實為一可行之方式。

電弧爐煉鋼還原渣

電弧爐煉鋼均為批次作業，冶煉過程依其化學反應分成三個階段，分別為熔解期、氧化期及還原期。將廢鐵及廢鋼經初步分類和稱重後加料，使廢鐵原料熔解成液態鋼水，為加速熔解，另通入高壓氧氣以加

速氧化作用，此時廢鋼中含有之氧化物開始生成少量之氧化渣，再通入更多之氧氣，雜質則氧化生成更大量的固態氧化渣及氣態氧化物 (廢氣)，又因鋼液中含氧量過高，因此需加以還原作用，其作法是加入大量石灰石、碳粉等副料，使其與氧化物反應，產生還原浮渣並去氧脫硫，以清潔鋼液。此時可加入各種添加劑 (如矽鐵、錳鐵、焦炭、生石灰等) 以調整鋼液成份，煉鋼爐渣即是由此煉鋼過程所排出的熔渣，故又分為氧化渣及還原渣，圖 1 為煉鋼爐渣之產生流程圖^[7,8]。

國內還原渣研究資料顯示，各煉鋼廠還原渣組成成份中^[8,10,11]，氧化物中以 CaO 及 SiO₂ 佔有之比例最多，分別佔有 35.3% ~ 54.9% 與 16.6% ~ 34.8%，介於卜特蘭水泥第 I 型 (分別為 62% 及 22%) 與高爐石粉 (分別為 42% 及 34%) 的化學成份含量之間，如圖 2 所示。MgO 含量則高於卜特蘭水泥，主要因煉鋼廠於冷卻高溫還原廢渣時間過速，造成保溫材 MgO 包裹於爐渣顆粒中，無法經由常溫緩慢冷卻消解。若混合不同廠還原渣之各化學成份含量是介於參與混合煉鋼廠還原渣之間或相近，因此整體推估，煉鋼還原渣具有類似水泥及卜作嵐材料的膠結材料的效應。然而如果還原渣未經充分安定化，則還原渣中的游離氧化鎂/鈣 (f-MgO/f-CaO) 將是造成水泥、水泥砂漿及混凝土膨脹劣化的主要因素^[8,10]。

還原渣中主要化學組成對爐渣性質的影響程度^[7]：
氧化鈣 (CaO)

氧化鈣為水泥及爐石之主要成分，主要來源為造渣過程所添加之大量生石灰。一般而言 CaO 之含量越高應用於混凝土中之活性越高，但超過一極限值時，會因為大量之氧化鈣而產生析晶現象，導致活性之降

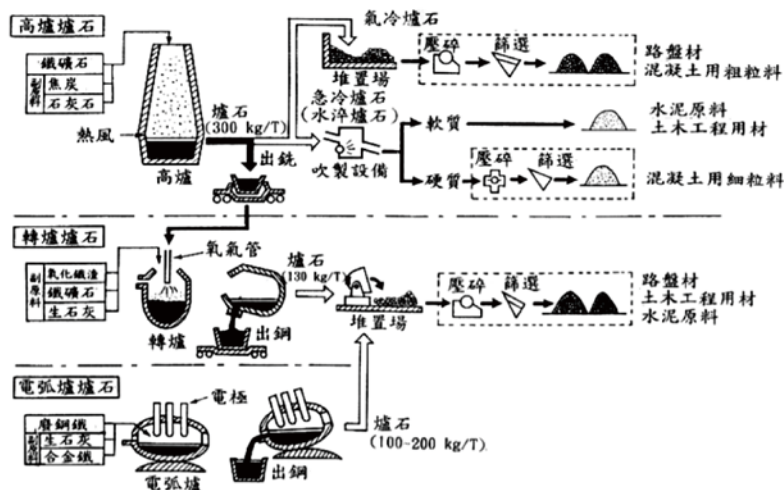


圖 1 煉鋼爐渣之產出流程^[9]

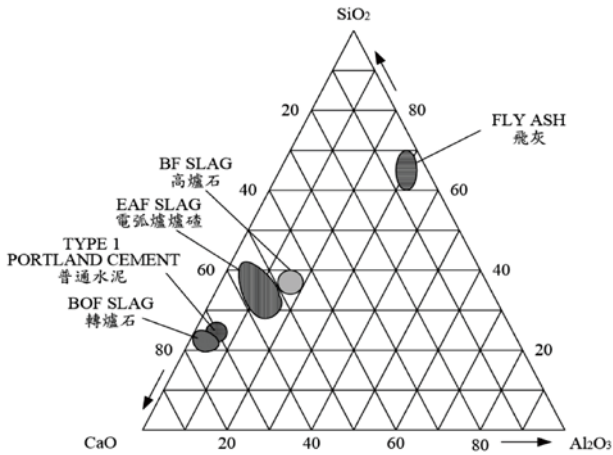


圖 2 煉鋼還原爐渣與卜作嵐材料之三相平衡關係圖 [12]

低，尤其低於冷卻速率下，會產生粉化之現象。此外，還原渣再利用上之最大疑慮在於本身體積之高膨脹率^[10,11]，原因為還原渣含有大量未反應完之生石灰，這些未反應完之氧化鈣會以游離氧化鈣（Free-CaO）之形式存在，而游離氧化鈣之特點為活性大，易與水及二氧化碳反應消解成氫氧化鈣及碳酸鈣。在游離氧化鈣轉換成氫氧化鈣之過程中，電弧爐渣之體積會膨脹，而當游離氧化鈣完全反應消解或是含量低時，電弧爐渣才會趨於穩定。

二氧化矽 (SiO₂)

一般電弧爐渣中 SiO₂ 含量為 15% ~ 25%，就生成膠凝物質而言，其 SiO₂ 含量較 Al₂O₃ 含量為多，它主要生成低鈣矽酸鹽和高矽玻璃體，有時 SiO₂ 也以游離狀態存在，對其它有用礦物水化結晶過程會起阻礙作用，使其活性下降，但爐渣中的 SiO₂ 能促進玻璃體的形成，對爐渣淬冷粒化有幫助，又此成份對於形成玻璃質結構有密切關係，然而由於爐渣中 CaO 與 MgO 之總含量，並不足以使 SiO₂ 充分結合成玻璃質，所以 SiO₂ 含量過多時反而使活性降低。

氧化鎂 (MgO)

大多數氧化鎂與氧化矽及氧化鈣結合成穩定型化合物，一般而言含量低於 20% 則無健康問題之顧慮，同時氧化鎂之存在可使爐渣之顯微結構較開放而增加其活性。另相關文獻指出，氧化鎂是造成電弧爐渣體積不穩定的主要因素之一，因此在爐渣未安定化之前將其拌入混凝土中，可能造成混凝土危害，造成體積膨脹。

電弧爐還原渣資源化規定與國外再利用用途

「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」2019 年 5 月 20 日公告修正「編號九、電弧爐煉鋼爐渣（石）」之再利用管理規定，其中還原渣之再利用用途為，水泥生料，經安定化處理後作為瀝青混凝土粒料原料、瀝青混凝土原料、管溝回填用控制性低強度回填材料用粒料原料、管溝回填用控制性低強度回填材料原料、鋪面工程（道路、人行道、貨櫃場或停車場）之基層或底層級配粒料原料、紐澤西護欄原料，或經高壓蒸汽處理後作為非構造物用預拌混凝土粒料原料、非構造物用預拌混凝土原料、水泥製品用粒料原料或混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋之原料。經安定化處理後之還原渣（石），應至少每月委託檢測機構依 CNS 15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法檢測一次，經檢測之七天膨脹量除再用於紐澤西護欄原料用途者應未超過百分之 0.05 外，其他再利用用途未超過百分之 0.5 者，始得進行再利用。而再用於非構造物用預拌混凝土粒料原料、非構造物用預拌混凝土原料、水泥製品用粒料原料、混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋之原料用途，且依前日契約書屬安定化處理執行單位者，須具備高壓蒸汽處理設備。其中，電弧電弧爐煉鋼爐渣（石）經高壓蒸汽處理須維持爐內壓力至少在 20.1 kgf/cm² 且持續 3 小時，其產出物應至少每月委託檢測機構依附件熱壓膨脹試驗法（20.1 kgf/cm² 且持續 6 小時）檢測一次，經檢測之試體外觀無爆裂、局部爆孔、崩解及破裂情形者，始得進行再利用。

另外，電弧爐煉鋼爐渣（石）經再利用程序之產出物，於出廠前，應依中央主管機關公告之檢測方法，每年度至少檢測一次戴奧辛及依毒性特性溶出程序檢測（TCLP）有毒重金屬項目。經檢測未超過表 1 標準者，始得作為再利用用途之產品使用。還原渣資源化的基本趨勢，也是必要的方案，目前是以非結構之道路材料及瀝青混凝土為主，日本則在土木工程上有甚高的應用比率。國外煉鋼爐渣的產生量及資源化之統計資料如表 2 所示。

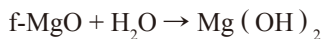
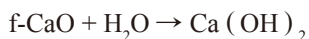
電弧爐還原渣之安定化^[16]

電弧爐煉鋼爐渣含游離氧化鈣（f-CaO）、MgO、C₃S、C₂S 等，這些組成一定條件下都具有不穩定性。冷卻後煉鋼爐渣吸水後，f-CaO 會消解為氫氧化鈣 [Ca(OH)₂]，體積將會膨脹 100% ~ 300%，MgO 會消

表 1 戴奧辛及毒性特性溶出程序檢測 (TCLP) 檢測標準^[2]

分析項目	溶出試驗標準 (毫克/公升)
總鉛	4.0
總鎘	0.8
總鉻	4.0
總硒	0.8
總銅	12.0
總銀	10.0
六價鉻	0.2
總砷	0.4
總汞	0.016
含 2,3,7,8 - 氯化戴奧辛及呔喃同原物等十七種化合物之總毒性當量濃度 ≤ 0.1 (ng I-TEQ/g)。	

解為氫氧化鎂 [Mg(OH)₂]，體積膨脹約 77%，因此含有 f-CaO、MgO 的常溫煉鋼爐渣是處於不穩定狀態，只有當 f-CaO、MgO 消解完成或含量很少時或磨得非常細的狀況下，體積才會穩定不膨脹。所以基本上安定化就是棄除體積不穩定因素，亦即加速以下反應：



目前台灣電弧爐煉鋼產業所產出之爐渣均為固態冷渣，所以台鋼資源所採用之還原渣安定化技術為熱壓處理方式，使用高溫高壓蒸汽處理還原渣的膨脹因子，所採用之蒸壓釜內蒸汽壓力為 2.0 ± 0.05MPa，溫度於 215.7 ± 1.3°C 之範圍內，恆壓時保持飽和蒸汽壓，並持續 3 小時以上。利用高溫高壓蒸汽將還原渣所含有的 f-CaO、MgO 消解完成或達到含量很少之狀態，消除體

積不穩定因素，使還原渣體積穩定不膨脹，達到可再利用之目的。台鋼資源依 CNS 15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法檢測之試驗結果如表 3 所示，台灣主要鋼鐵廠之還原渣，經安定化後檢測其七天膨脹量，均可符合低於百分之 0.5 之規定，得進行再利用。

表 3 還原渣安定化前後之浸水膨脹率試驗結果

樣品	操作壓力 (kg/cm ²)	原樣膨脹率 (%)	安定化 3h 膨脹率 (%)	安定化 6h 膨脹率 (%)
鋼鐵廠 A	13	0.53	0.11	0.02
鋼鐵廠 B	13	2.26	0.54	0.2
鋼鐵廠 C	13	0.33	0.27	0.1
鋼鐵廠 D	13	1.53	1.32	0.26
鋼鐵廠 E	13	0.91	0.33	0.17
鋼鐵廠 F	13	1.17	0.2	0.08

安定化後電弧爐還原渣應用於控制性低強度材料 (CLSM) 與非構造物卜特蘭混凝土 (PC)

台鋼資源公司利用安定化還原渣 (照片 1) 與台灣鋼聯旋轉窯渣 (照片 2)，替代天然粒料，應用於控制性低強度材料 (CLSM) 及非構造物卜特蘭混凝土 (PC) 中，以驗證台鋼資源生產的安定化還原渣與旋轉窯渣再利用於營建工程中之可行性。所有的 CLSM 及 PC 配比均透過新拌及硬固性質試驗，分析其做為 CLSM 及 PC 之可行性，並藉由熱壓膨脹試驗，驗證產品之體積穩定性，以有效資源化煉鋼還原渣與旋轉窯渣。

表 2 國外煉鋼爐渣的產生量及資源化之統計資料^[14,15]

資源化用途	資源化數量分布 (%)					
	歐盟 11 國 (2007)	日本 (2008)		德國 (2006)	美國 (2007)	
		電爐渣	轉爐渣			
廠內回收	4	2.3	15.2	13.4	-	
工程材料	道路石料	47	35.4	19.8	43.9	51.3
	瀝青混凝土粒料		-	-		14.4
	鐵道渣		-	-		2.3
	基地改良		4.3	5.5	4.4	13.3
	土木工事		34.5	47.4	18.8	
	混凝土粒料		1.6	3.5	-	-
製造原料	港灣/堤岸工程	-	-	3.7	-	
	水泥原料	-	0.9	5.6	-	6.7
	加工用原料	-	9.8	0.2	-	-
肥料/土壤改良	2	-	-	4.8	-	
其他 (下游販售殘銹等)	-	2.7	1.1	-	-	
掩埋/棄置	7	8.4	1.6	10.2	-	
堆存	3	-	-	0.8	12	
合計	100	99.9	99.9	100	100	
總量 (萬公噸)	4500	526	1076	584	780	



照片 1 還原渣

照片 2 旋轉窯渣

爐渣粒料基本性質

電弧爐還原渣：以溫度 180°C 及蒸汽壓力 10 kg/cm² 的蒸汽安定化處理還原渣，Group1、Group2 及 Group3 還原渣各項物理性質分析結果如表 4 所示。

旋轉窯渣：本研究使用之旋轉窯渣，乃台灣鋼聯資源化處理電弧爐集塵灰產生之副產物（可再利用廢棄物 R-1207），酸性旋轉窯渣（AC）及鹼性旋轉窯渣（AK）細度模數（FM）分別為 4.75 與 4.84，仍然為接近河川細粒料之粒徑，並非屬於一般天然河川粗粒料的範圍。AC 酸性旋轉窯渣之主要化學組成為氧化鐵（48.8%）及二氧化矽，氧化鈣與二氧化矽的比值為 0.26；AK 鹼性旋轉窯渣之主要化學組成為氧化鐵（63.3%）及氧化鈣，氧化鈣與二氧化矽的比值為 2.36。旋轉窯渣不含會崩解的成份，故屬穩定性佳的渣。

還原渣控制性低強度材料（CLSM）及非構造物卜特蘭混凝土（PC）在工程上之應用

還原渣 CLSM 在工程上之應用

本研究使用之細粒料為安定化後之還原渣 Group1、Group2 及 Group3，配比設計採用固定膠結料比率（水泥：燃煤飛灰比率 1：1），水膠比（W/B）設定為 1.08，水灰比（W/C）為 2.16，砂膠比（S/B）設定為 6：1，電弧爐還原渣取代河川細之比例為 0%、33%、66%、100%，添加 5% 強塑劑以增加流動性，添加 6%、速凝

表 4 還原渣之基本性質分析

性質名稱	Group1	Group2	Group3
重量 (kg)	30.6	34.0	22.4
比重	2.89	2.96	2.80
吸水率 (%)	3.06	2.93	2.82
乾搗單位重 (kg/m ³)	1684	1771	1513
孔隙率 (%)	0.37	0.39	0.42
細度模數 (FM)	2.64	2.28	1.92
浸水膨脹率 (CNS 15311)	< 0.2%	0.2% ~ 0.4%	0.4% ~ 0.5%

劑以控制凝結時間。經計算後配比如表 5 所示。

新拌 CLSM 性質要求達到規定的坍流度、管流度及落沉時間，結果顯示如表 6 所示，基本上經由上述基本材料性質試驗數據可知，還原渣不同粒徑細度會直接影響新拌 CLSM 特性，細度模數（FM）愈小，比表面積愈大，對工作性愈不利，但這些工作性質基本上均可藉由添加摻料調整達成。初凝時間依據 ASTM C403「Time of setting by penetration resistance」之規定進行，基本上初凝時間，初凝愈短，則落沉時間愈短，這種結果都是工作性的一種表徵，而落沉試驗是更能表現出路面載重的承受能力。一般型規定落沉時間須在 24 小時內達成，早強型則需在 4 小時內達成，試驗結果顯示如表 6 所示，大部分配比均可符合一般型 CLSM 之新拌性能需求。

硬固 CLSM 訴求早強晚弱的特性，依據台北市政府新工處的規定，齡期 1 天抗壓強度須高於 7 kgf/cm²，齡期 28 天抗壓強度須在 90 kgf/cm² 以下。本研究檢測 4 個齡期的 CLSM 抗壓強度，試驗結果如表 7 所示。還原渣 CLSM 的一天抗壓強度皆可以滿足大於 7 kgf/cm² 的要求，至於 28 天抗壓強度，除少部份配比組強度高於 90 kgf/cm² 外，大部份皆低於 90 kgf/cm² 的規定，但這些略高強度的配比組是可以透過配比修正降低其晚期強度，可以減少水泥用量。基本上就強度而言，還原渣 CLSM 可符合一般工程需求。

表 5 CLSM 配比表 (kg/m³)

編號	取代比例	強塑劑	速凝劑	水泥	飛灰	還原渣	水	細粒料
C1F1S0A6SP5	0%	5%	6%	136.2	136.2	0	294.7	1567.1
C1F1S33A6SP5	33%			139.1	139.1	528.0	300.9	1072
C1F1S66A6SP5	66%			142.1	142.1	1078.7	307.3	555.7
C1F1S100A6SP5	100%			145.3	145.3	1671.3	314.3	0

備註：代號及符號說明 C1-F1-S33-A6-SP5：C1：水泥與飛灰漿值濃度為 1:1；F1：水泥與飛灰漿值濃度為 1:1；S0：取代比例為 0%；A6：速凝劑為總膠結材料 6% 的重量比；SP5：強塑劑為總膠結材料 5% 的重量比。

表 6 電弧爐還原渣新拌 CLSM 性質







Group 1 還原渣					
編號	工作性		單位重	凝結時間	
	管流度 (cm)	坍流度 (cm)	新拌單位重 (kg/m ³)	初凝時間 (hr)	落沉時間 (hr)
C1F1S0A6SP5	20	53	1940	9.1	-
C1F1S33A6SP5	27	70	1816	8.4	-
C1F1S66A6SP5	29	72	1749	8.1	-
C1F1S100A6SP5	21	54	1657	7.8	8.6
Group 2 還原渣					
C1F1S0A6SP5	20	53	1896	8.6	-
C1F1S33A6SP5	24	77	1763	6.5	8.3
C1F1S66A6SP5	23	75	1689	4.8	6.7
C1F1S100A6SP5	22	54	1573	4.1	5.9
Group 3 還原渣					
C1F1S0A6SP5	20	54	1961	8.3	-
C1F1S33A6SP5	28	79	1764	5.4	7.8
C1F1S66A6SP5	22	60	1686	4.7	6.2
C1F1S100A6SP5	17	42	1639	5.3	7.6

表 7 電弧爐還原渣 CLSM 之抗壓強度

Group 1 還原渣 (kgf/cm ²)				
編號	齡期 12 小時	齡期 1 天	齡期 14 天	齡期 28 天
C1F1S0A6SP5	3.16	7.14	61.16	80.49
C1F1S33A6SP5	3.67	7.67	78.96	84.17
C1F1S66A6SP5	4.89	8.91	67.66	82.61
C1F1S100A6SP5	4.26	4.95	53.18	69.79
Group 2 還原渣 (kgf/cm ²)				
C1F1S0A6SP5	3.69	7.16	75.46	84.82
C1F1S33A6SP5	3.51	7.50	88.84	90.35
C1F1S66A6SP5	5.54	10.82	80.83	85.37
C1F1S100A6SP5	4.89	5.50	71.41	80.03
Group 3 還原渣 (kgf/cm ²)				
C1F1S0A6SP5	3.54	8.47	71.44	82.34
C1F1S33A6SP5	3.46	7.41	80.14	82.61
C1F1S66A6SP5	4.79	7.97	61.78	74.81
C1F1S100A6SP5	3.94	6.91	58.79	68.95

關於還原渣應用於工程上，其體積穩定性實為其工程性質外，外界更關注之焦點。本研究將硬固 CLSM 的試體先於室溫浸水養護 3 天後，即進行熱壓膨脹試驗，在高溫及高壓（飽和蒸汽壓）的作用下，加速其膨脹反應，以測試摻加不同程度安定化還原渣 CLSM 的體積變異程度，進而評估應用於道路回填後的路面穩定性。試驗結果如表 8 示，各還原渣及旋轉窯爐渣 CLSM 皆沒有產生爆裂現象，顯示三種程度安定化還原渣（Group1、Group2 及 Group3）製成 CLSM 時，皆在高溫及高壓作用下，線膨脹量分別為 0.04%、0.03% 及 -0.02%，Group3 還原渣組甚至收縮，完全不會產生爆裂現象。不同程度安定化還原渣應用於道路回填的 CLSM 材料，是目前最佳再資源化的選項之一。

表 8 電弧爐還原渣 CLSM 配比熱壓膨脹結果

	Group1 還原渣	Group2 還原渣	Group3 還原渣
熱壓前			
熱壓後			
線膨脹	0.04%	0.03%	-0.02%

還原渣 PC 在工程上之應用

本研究使用之粗粒料為酸性旋轉窯渣 (AC) 及鹼性旋轉窯渣 (AK)，細粒料為 Group1、Group2 還原渣。還原渣 PC 配比設計係以緻密混凝土設計法 (DMDA) [19] 進行設計，配比中還原渣以不同比例 (50%、65%、75%、100%) 取代河砂，配比資料如表 9 所示。

Group1 還原渣及 Group2 還原渣所製作之卜特蘭混凝土 (PC)，其中還原渣取代 50% 天然細粒料之配比抗壓強度結果如表 10 所示，一般溫度養護混凝土均隨著齡期的增長，試體抗壓強度也跟著增加，齡期為 28 天時，酸性旋轉窯渣取代天然粗粒料時，強度發展較使用天然細粒料者慢，但抗壓強度皆大於 210 kgf/cm²；而以 Group1 及 Group2 還原渣搭配鹼性旋轉窯渣以取代天然粗粒料時 (AK-I50% 還原渣 + 50% 天然河砂)，其強度發展很快，甚至較天然砂石佳，可以推估高鈣含量的鹼性旋轉窯渣，效果很明顯可使用 50% 還原渣替代天然河砂，鹼性旋轉窯渣替代天然粗粒料製成混凝土。

此外，有鑑於還原渣應用於工程上時，除了強度等工程性質外，對於產品之體積穩定性，是使用者最關切的事，也是台鋼資源等再利用業者必須堅守的品質要求。本研究以 AC 酸性旋轉窯渣與 AK 鹼性旋轉窯渣做為粗粒料，並以 Group1、Group2 電弧爐還原渣依不同比例與河砂混合後，探討還原渣替換天然細粒料後，混凝土試體之體積穩定性。混凝土試體於室溫養護 3 天後，

進行熱壓膨脹試驗，結果如表 11 所示，根據試驗結果顯示，隨著還原渣替代天然河砂的比例上升時，混凝土收縮棒試體之體積膨脹率由收縮亦逐漸膨脹，電弧爐還原渣替代天然河砂達 75% 時，其體積仍具穩定性。本研究所使用之還原渣安定化設備為台鋼資源試驗用蒸壓釜，其操作時以溫度 180°C 及蒸汽壓力 10 kg/cm² 的蒸汽安定化處理還原渣，未來正式量產時則採用溫度 214°C 及蒸汽壓力 21 kg/cm² 的蒸壓釜，進行還原渣安定化處理，對於還原渣之安定化應可達到更佳之效果，對於還原渣之安全使用比例應可再提高。此外，由實驗結果發現，粗粒料部分，不論以酸性或鹼性旋轉窯渣進行取代，皆無膨脹之疑慮。

結論

台鋼資源採用高壓蒸汽安定化處理電弧爐煉還原渣，結果顯示還原渣經高壓蒸汽處理後，還原渣之浸水膨脹率可低於百分之 0.5 (CNS 15311)，高壓蒸汽安定化處理確實可達成體積穩定之成效。

安定化後還原渣產製之 CLSM，其工程性能可符合工程需求，透過熱壓膨脹試驗測試所有硬固 CLSM 試體，顯示皆無表面破裂現象，可以避免應用於 CLSM 而造成路面隆起變形之現象，還原渣 CLSM 體積穩定性無虞。

安定化後還原渣搭配旋轉窯渣產製非構造物卜

表 9 PC 配比表 (kg/m³)

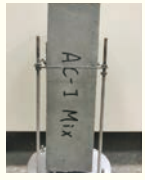
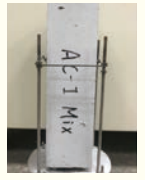

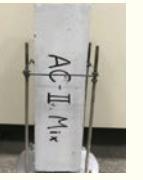







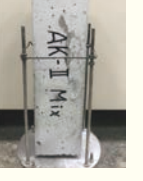
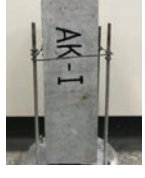



編號	w/b	Sand	Coarse	Fly ash	Cement	Water	SP
AK-I	0.42	909.8	922.8	102.4	384.8	221.5	5.8
AK-II	0.51	873.3	1087.2	52.1	356.8	220.5	4.9
AC-I	0.47	1041.9	699.7	117.3	341.7	230.6	5.5
AC-II	0.53	1100.9	746.5	65.7	342.2	225.5	4.9

備註：AC-I 及 AK-I 分別表示使用酸性旋轉窯渣 (AC) 及鹼性旋轉窯渣 (AK)；-I 及 -II 分別表示使用 Group 1 及 Group 2 還原渣做為細粒料

表 10 還原渣 PC 混凝土試體抗壓強度 (單位：kgf/cm²)

Group1 還原渣					
試體代號	養護齡期 (天)	3	7	14	28
天然砂石對照組		112.1	199.0	242.3	265.8
AC-I (50% 還原渣 + 50% 天然河砂)		128.4	165.22	190.9	211.5
AK-I (50% 還原渣 + 50% 天然河砂)		141.0	228.6	263.6	285.1
Group2 還原渣					
試體代號	養護齡期 (天)	3	7	14	28
AC-II (50% 還原渣 + 50% 天然河砂)		127.6	168.9	190.2	223.0
AK-II (50% 還原渣 + 50% 天然河砂)		141.4	233.8	285.6	311.8

表 11 還原渣 PC 混凝土熱壓膨脹試驗結果

細粒料		粗粒料	Group1		Group2	
混合比例		旋轉 窯渣	熱壓試驗前	熱壓試驗後	熱壓試驗前	熱壓試驗後
還原渣	河砂					
50	50	AC				
100	0	AC				
50	50	AK				
100	0	AK				

特蘭混凝土 (PC)，其強度可達 210 kgf/cm² 以上，電弧爐還原渣替代天然河砂達 75% 時，其體積仍具穩定性。未來正式量產時則採用溫度 214°C 及蒸汽壓力 21 kg/cm² 的蒸壓釜，進行還原渣安定化處理，對於還原渣之安定化應可達到更佳之效果，還原渣之安全使用比例應可再提高。

電弧爐煉鋼原本就是資源循環中重要的一環，但在重新熔煉的過程中會產生煉鋼副產品—爐渣。台鋼資源透過高溫高壓蒸汽安定化還原渣，在體積穩定性無虞之前提下，將還原渣使用在 CLSM 與非構造物混凝土等合適的營建用途上，可有效發揮其的適用性與價值性，不但可減少天然資源的開發與使用，對於循環經濟在營建業的推展亦有所助益。

參考文獻

1. 「煉鋼爐石種類」，台灣鋼鐵工業同業公會 (<http://steelslag.tsiia.org.tw>) (2018)。
2. 「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」，行政院經濟部 (2019)。
3. 歐盟爐石協會 (<http://www.euroslag.com>) (2018)。
4. 美國國家爐石協會 (<http://www.nationalslag.org>) (2018)。
5. 「鋼鋼鐵渣基層材料與天然材料的比較」，日本爐石協會 (<http://www.slg.jp/e/index.htm>) (2018)。
6. 循環台灣基金會 (<https://www.circular-taiwan.org/>)。
7. 余騰耀、林平全、施延熙、黃兆龍、蔡敏行，電弧爐煉鋼還原渣資源化應用技術手冊，中興工程顧問股份有限公司，2001。
8. 余騰耀，「電弧爐煉鋼業廢棄物減量及資源回收」，環保特刊，第 193-221 頁 (1996)。
9. 蘇茂豐、陳立，「電弧爐煉鋼爐渣之資源化現況及未來展望」，工業污染防治，第 93 期，27-51 頁，Jan. 2005。
10. 張同生、劉福田、王建偉等，鋼渣安定性與活性激發的研究進展 [J]，矽酸鹽通報，2007, 26(5): 980-984。
11. 桑山忠等，「電氣爐還元スラグの水硬性と其の利用」，廢棄物学会論文誌，Vol. 1, No. 1 (1990)。
12. 江奇成，電弧爐煉鋼還原渣與鑄件廢料摻用於混凝土再生材之模式研究，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系 (2005)。
13. Lea, F.M., The Chemistry of Cement and Concrete, 1980。
14. 綠基會通訊，2010
15. Sakuraya, T., 「日本煉鋼工業高爐渣與鋼渣利用現狀」，冶金渣處理與利用國際研討會，中國北京，第 15-20 頁 (1999)。
16. 唐明述、袁美棲、韓蘇芬，鋼渣中 MgO, FeO, MnO 的結晶狀態與鋼渣的體積安定性 [J]，矽酸鹽學報，7(1): 35-46 (1979)。
17. 王韡蒨，熱壓技術用於鋼渣安定性之研究 (2014)。
18. CNS 國家標準。
19. 黃兆龍，高性能混凝土理論與實務，詹氏書局 (2013)。