



# 改質轉爐石在工程材料 與循環經濟之應用

中鋼公司新材料研究發展處資源應用及耐材技術組研究員 / 曾耀弘  
中鋼公司新材料研究發展處副處長 / 李育成

關鍵字：熱渣改質、改質轉爐石、循環經濟、資源利用

## 摘要

轉爐石為一貫作業煉鋼廠在煉製鋼液時，將鐵水、副原料及廢鋼加入轉爐後，以氧吹煉而產出鋼液及熱熔渣，其中經冷卻之熱熔渣稱為轉爐石（Basic Oxygen Furnace slag, BOF slag）。轉爐石屬煉鋼爐石（steel slag）之一，具有耐磨、高硬度及高抗滑之特性，若將粒料妥善利用，可應用於各種工程材料，同時解決國內砂石資源短缺之困境，達成資源利用永續發展目標。

隨著各國倡導循環經濟的重要性，世界各鋼廠紛紛拓展轉爐石之多元應用，惟針對特定有膨脹率要求之工程材料（例如：道路基底層及非結構性水泥混凝土等），需研發轉爐石安定化技術以降低轉爐石之膨脹性，

針此，中鋼集團發展熱渣改質技術，利用於1400°C之熱渣中吹入氧氣及矽砂，一方面利用氧氣與氧化亞鐵反應形成氧化鐵產生熱量以減少熱渣降溫固化，另一方面則利用二氧化矽與游離氧化鈣於熱渣中形成穩定之矽酸鈣礦物而達成安定化目的。熱渣改質所產出之改質轉爐石可徹底消除游離氧化鈣等膨脹因子，其經過破碎再利用仍可維持體積穩定，具有多元資源利用潛力。

改質轉爐石因具體積安定性，經證實可用於道路工程、高壓混凝土鋪面磚、非結構性水泥製品、鐵路道碴及人造建材等用途，未來除期望協助集團轉爐石產品資源利用，達成「使用者滿意、社會大眾安心、資源有效應用」之目標，擬朝向加值化及高值化發展，以創造外界使用誘因，增進推廣之經濟



性，以落實政府循環經濟理念。

## 一、前言

鋼鐵業為一個國家重要經濟發展之基石及工業發展的基本來源，一貫作業煉鋼主要由天然鐵礦砂、煤礦及石灰石，經由高爐熔煉成鐵水，再經轉爐冶煉產生鋼液及轉爐石，平均每噸粗鋼約可產出100公斤之轉爐石，因轉爐石具有耐磨及高硬度等特性，如何有效進行其資源利用以貫徹世界各國倡導之循環經濟已成為各鋼廠努力的目標。

轉爐石具有良好之工程特性、環境安全性及友善性，因此世界各國已將其應用於道路工程、土木工程、海事工程、廠內回收、水泥生料及農業等，經多年研究結果顯示：轉爐石用於工程材料，有諸多優於天然骨材之處，例如：(1)轉爐石耐磨性及承載力佳，其氧化鈣成分具親油性，與瀝青之親和力佳，適合作為瀝青混凝土，(2)轉爐石內摩擦角大，顆粒與顆粒間具有互鎖之作用，適合用於地盤改良用擠密砂樁等土木工程及海事工程用途，(3)轉爐石含FeO、CaO、SiO<sub>2</sub>，可作為水泥生料之添加劑，補充水泥所需之鐵、鈣及矽等成份，各國使用之相關經驗顯示：只要正確地利用轉爐石之特性，確實可以在資源利用與環境保護及生態復育上提供許多助益，許多研究更證明轉爐石作為回填資材及海事工程材料時，對土質的改善、漁業發展、海洋環境及生態的復育成效

顯著，係為環境友善之資材，值得大力推廣使用。

除了上述之資源利用途徑，茲為進一步拓展轉爐石之多元資源利用途徑，以進一步擴大於非結構性水泥混凝土、鐵路道碴、道路基底層及人造建材等應用，需利用安定化方法，使轉爐石達到體積安定化以符合應用需求，針此，中鋼發展熟渣改質技術，於熟渣中吹入二氧化矽，使之與轉爐渣中游離氧化鈣等膨脹因子化合成為穩定之矽酸鈣礦物相，進而產出體積安定之改質轉爐石，並成功應用於瀝青混凝土鋪面、道路基底層、高壓混凝土鋪面磚、護坡塊/消波塊等非結構性水泥混凝土及鐵路道碴等工程材料，多年使用經驗顯示：改質轉爐石作為工程材料其物化性較天然砂石優異且耐久性良好，將之用於取代天然砂石作為工程材料，一方面可減少天然資源使用量及其開墾所產出之碳排放，另一方面可進行鋼廠煉鋼副產品之資源再利用，落實循環經濟理念。

## 二、轉爐石再利用途徑介紹

轉爐石資源利用依各國法規、市場需求而發展不同用途，以日本為例，2017年共產出1,123萬噸轉爐石，應用途徑如圖1所示[1]，主要應用於道路工程(31.78%)、土木工程用途(31.33%)及廠內回收(20.12%)，另有用於水泥(4.45%)及土壤改良(4.2%)等用途。歐盟2016年約產出1,840萬噸煉鋼

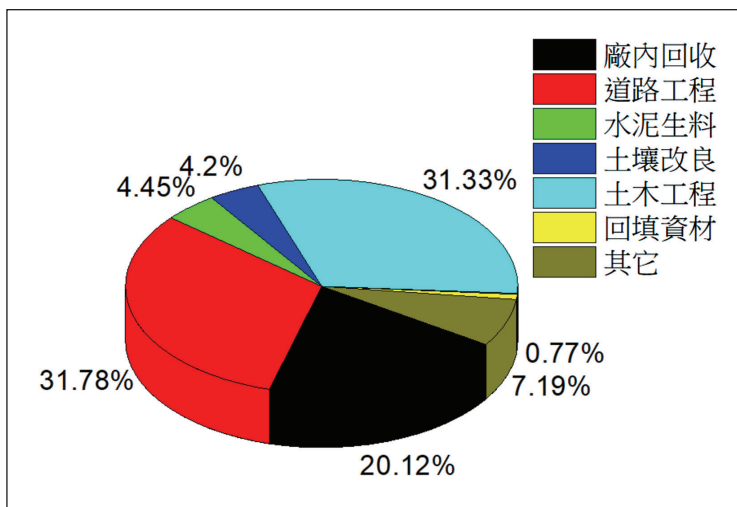


圖 1 日本煉鋼爐石 2017 年再利用途徑及用量 [1]

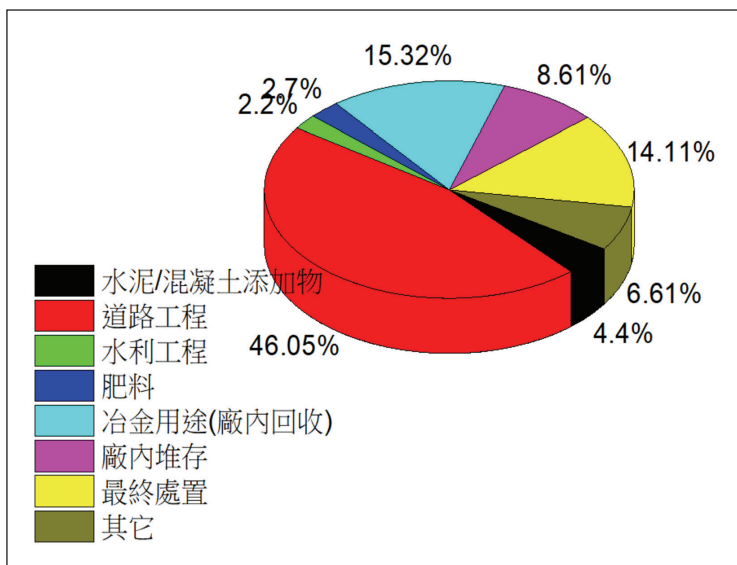


圖 2 歐盟煉鋼爐石 2016 年再利用途徑及用量 [2]

爐石（包含轉爐石、電爐石），其應用途徑如圖2所示[2]，主要應用途徑為道路工程（46.05%）、冶金用途（包含廠內回收等約15.32%）等，另有用於水泥/混凝土添加

物（4.4%）、肥料（2.7%）及水利工程材料（2.2%）等，由以上各國煉鋼爐石之再利用途徑及用量數據，可歸納煉鋼爐石之主要用途為道路工程與土木工程等工程材料，



惟轉爐石有體積膨脹特性，針對特定工程材料（例如：道路基底層、非結構水泥混凝土等）之應用，需進行轉爐石安定化以符合工程要求，茲為拓展轉爐石於工程材料之應用，中鋼集團以研究經費自行規劃設置轉爐熱渣改質線，於2012年6月完成量產型改質處理站之設計與建置，有效解決轉爐石膨脹性問題，以拓展煉鋼副產品應用，並落實循環經濟。

### 三、熱渣改質原理及產品性質

熱渣改質原理[3]係透過於1400°C之熱渣中吹入氧氣及矽砂（圖3），一方面利用氧氣與氧化亞鐵反應形成氧化鐵（反應式1）產生熱量以減少熱渣降溫固化，另一方面則利用二氧化矽與游離氧化鈣於熱渣中形成穩定之矽酸鈣（ $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ）礦物（反應式2，圖4），

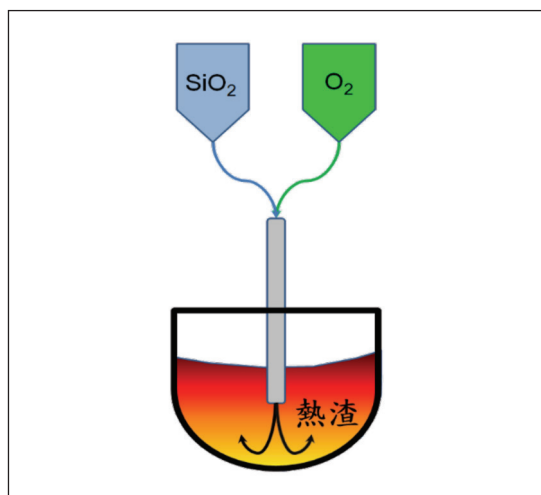
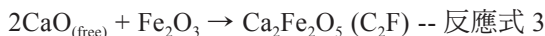


圖3 熱渣改質製程示意圖

另，渣中氧化鐵也會與游離氧化鈣結合，而產生鐵酸鈣（ $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ）礦物（反應式3）而達成安定化目的。有別於其它商轉之安定化方法（例如：滾筒法、蒸氣養生及悶罐法等）多利用轉爐渣與水接觸，加速游離氧化鈣水化而達成表面安定化之效果，熱渣改質技術係採用矽砂與游離氧化鈣重新熔融合形成穩定之矽酸鈣礦物進而安定化轉爐渣。因此熱渣改質所產出之改質轉爐石可徹底消除游離氧化鈣等膨脹因子，其經過破碎再利用仍可維持體積穩定，具有多元資源利用潛力。



熱渣改質產出之改質轉爐石具有體積安定性、低洛杉磯磨損率及低健性等特性（表1），且其粗骨材比率達68.2%~81.5%，高於一般轉爐石之45%，適合多數工程材料使用，其應用途徑包含：瀝青混凝土鋪面、道路基底層、高壓混凝土鋪面磚、非結構性水泥混凝土及鐵路道碴等，具有全方位拓展資源化應用之機會，以下就改質轉爐石之相關應用進行說明。

### 四、改質轉爐石在工程方面之應用

#### 1. 道路工程

轉爐石具有堅硬、抗磨損及健性低等性

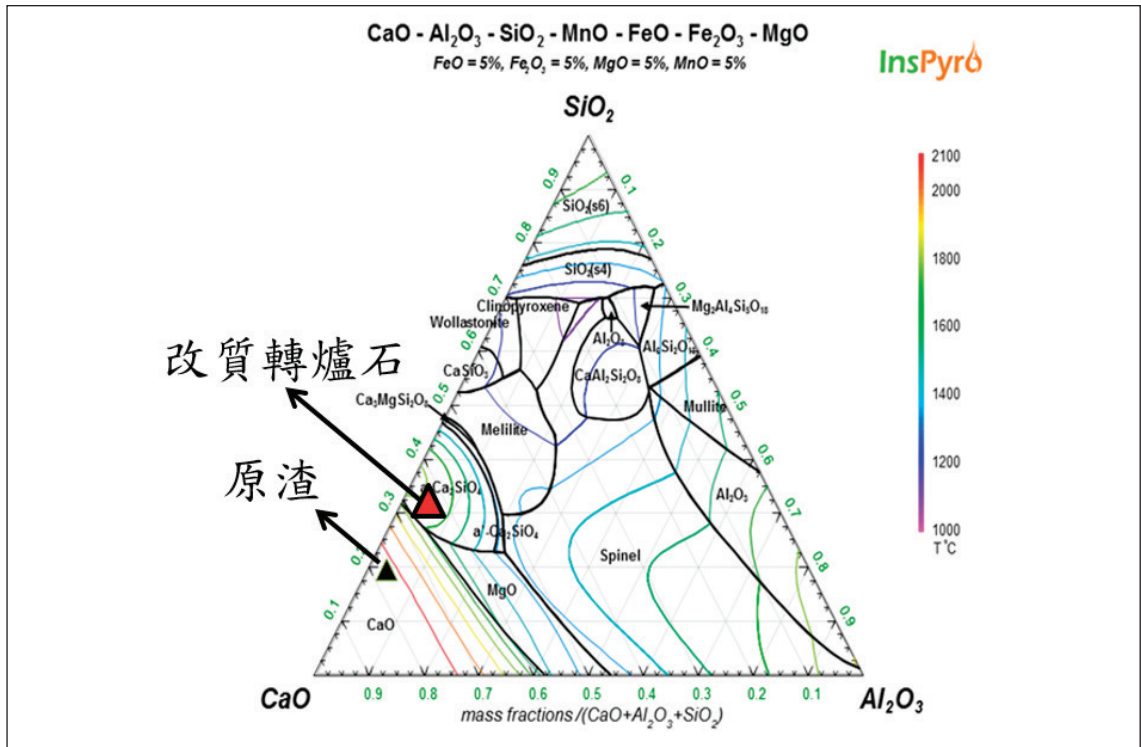


圖 4 原渣經吹入矽砂後游離氧化鈣轉變為矽酸鈣之相圖

表 1 天然骨材、一般轉爐石及改質轉爐石之物化性質比較 [4]

材料	比重	吸水率 (%)	洛杉磯磨損率 (%)	健性 (%)	膨脹率 % (CNS15311)
天然骨材	2.64	1.7	27.2	2.9	~0
一般轉爐石	3.40	1.2-2.9	9.7-16.7	0-1.3	1.5-6%
改質轉爐石	3.47	0.8-1.5	5.1-15.1	0-1.0	<0.5%

質 (表1)，相較於天然石，具稜角分明、耐磨、高硬度及高抗滑之特性，因此，適合應用於瀝青混凝土鋪面，而改質轉爐石因較一般轉爐石具有體積安定性，除了可應用於瀝青混凝土鋪面，亦可拓展應用至道路基底層

等道路工程。

在瀝青混凝土鋪面之應用方面，改質轉爐石已應用於國道一號岡山段之多孔性瀝青混凝土試鋪 (圖5)，經成功大學長期之功能





圖5 國道一號岡山段改質轉爐石多孔隙瀝青混凝土鋪設後照片

性（透水量）、耐久性（車轍量、平坦度）及安全性（抗滑度）評估後，發現改質轉爐石多孔隙瀝青混凝土之IRI值（國際糙度指標）、抗變形能力和抗滑度皆較優異，排水/透水性佳，性質優於同期鋪築的天然開放級配摩擦層（Open-Graded Friction Course, OGFC）及多孔隙瀝青混凝土（Porous Asphalt Concrete, PAC）路段，因此更加確認改質轉爐石多孔隙瀝青混凝土之性能優越，除行車安全舒適性外，更具優良之抵抗車轍能力。

在道路基底層應用方面，鑑於鋼鐵工業對於達成循環經濟之目標殷切，行政院工程會公布之「第02722章級配粒料基層」、「第02726章級配粒料底層」施工綱要規範及經濟部標準檢驗局CNS 15305「級配粒料基層、底層及面層用材料」、CNS 15358「公路或機場基層、底層用碎石級配粒料」標準

中，規範道路基層、底層所使用煉鋼爐碴之品質，且依據世界各國研究結果及實務經驗顯示，轉爐石經適當安定化處理後可取代天然砂石應用於道路工程，作為填方材料、基底層級配料及瀝青混凝土面層材料等。改質轉爐石經過安定化後可符合CNS 15358中依CNS 15311測試其7天膨脹率不超過0.50%之規定，可使用至道路基底層。茲為確保改質轉爐石應用於道路基底層之績效，於廠內重車行駛之道路進行改質轉爐石道路基底層試鋪，並委託義守大學進行成效評估，結果顯示：歷經通車26個月後，試驗道路之車轍深度皆低於10 mm，且抗滑係數皆大於45，符合工程規範，另，開放通車後26個月道路之水準高程差並無顯著之變化，亦無觀察到膨脹之現象。中鋼集團為宣導轉爐石之正確使用觀念，提升應用於道路基底層的工程品質，已蒐集統整多年以來使用安定化之轉爐

石於場內道路應用之使用實績及委外監測結果，並據此編撰「轉爐石道路基底層使用手冊」[4]，此手冊於2020年經工業局委託工研院等第3方公正單位審查通過，除可作為工程主辦機關、設計及施工單位、營造業等相關產業參考遵循外，亦可提供轉爐石資源化應用於道路基底層之相關規範，有利於促進永續發展政策之推行及確保公共工程之品質。

## 2. 高壓混凝土鋪面磚

改質轉爐石因具體積安定性，可以取代高壓混凝土鋪面磚之天然骨材，減少河砂之開採，為了測試改質人造石在高壓混凝土地面磚的應用性，將經破碎、篩分後分裝成粗砂（細粒）、二分及三分料的改質轉爐石全取代鋪面磚之天然河砂粒料，利用高壓混凝土壓製機製作鋪面磚，其成品經28天養生後，需依據CNS 13295檢驗，結果顯示：鋪面磚

在經過抗壓測試後其壓碎強度約70~80 MPa 不僅符合CNS13295之規定，且均大於天然粒料製鋪面磚之壓碎強度（68 MPa）。而在磨耗性試驗方面，經測試0% 及100% 改質轉爐石取代之鋪面磚，100%改質人造石鋪面磚其耐磨性（ $1.2 \text{ cm}^2/50\text{cm}^2$ ）更勝天然粒料製鋪面磚（ $1.7 \text{ cm}^2/50\text{cm}^2$ ）。考驗改質轉爐石高壓鋪面磚品質最重要之因素取決於其在熱水中之體積安定性，將不同改質轉爐石取代比例（0%、20%、40%、60%、80%、100%）之高壓鋪面磚浸於85°C熱水中，經過30日並無觀測到鋪面磚崩解現象，另，也測量高壓鋪面磚浸於常溫水中其pH值變化，在液固重量比為1:1的情況下，其水溶液在高壓磚浸泡4日後pH值由7.2微上升至8-8.6，證明改質轉爐石鋪面磚並不會有釋出鹼性物質汙染土壤及水源之問題；綜合以上檢驗結果，已陸續推廣改質轉爐石鋪面磚應用至集團公司鋪設



圖6 中鋼廠內鋪設之改質轉爐石高壓混凝土植草磚



圖7 集團公司停車場鋪設之改質轉爐石高壓混凝土鋪面磚及植草磚

6000 m<sup>2</sup>以上（圖6及圖7），歷經6年使用狀況仍相當良好。茲為加強推廣改質轉爐石鋪面磚之使用及宣導正確使用觀念，提升鋪面工程品質，以確保安定化之轉爐石製作高壓磚與透水磚鋪面之績效，中鋼集團於2018年完成「滾筒轉爐石及改質滾筒轉爐石鋪面磚使用手冊」編撰[5]，並經工業局委託工研院等第3方公正單位驗正通過，此手冊主要內容包括轉爐石材料性質、應用實例、工程性質及效益、配比設計、使用規範、產品標準、驗證機制及環境監測等，除可作為工程主辦機關、設計及施工單位、營造業及拌合廠等相關產業參考遵循外，亦可提供轉爐石資源化應用於高壓磚/透水磚鋪面之相關技術，有利於促進永續發展政策之推行及確保公共工程。

### 3. 護坡塊/消波塊等非結構性混凝土

將改質轉爐石製作成護坡塊/消波塊等非

結構性混凝土是大量資源化的途徑之一，利用改質轉爐石取代水泥混凝土之天然骨材，經測試100%改質轉爐石取代粗骨材之試體其抗壓強度達207 kg/cm<sup>2</sup>與天然砂石製之水泥混凝土試體相若，另，試體於70°C水中亦十分安定無崩解現象，顯示其體積安定性，茲為推廣應用，於2015年以改質轉爐石取代水泥混凝土骨材做成2618個護坡塊（圖8），供台南市水利局龜子港排水匯流口至台糖鐵路上游段應急工程使用，經使用6年護坡塊的外觀，經現場目視判定狀況仍保持良好。

除護坡塊外，亦進行消波塊製作（10噸/顆），並置放於廠內碼頭區（圖9）測試其耐久性，經使用6年後，無崩解及其它異狀。因護坡塊及消波塊等為海事工程所需工程材料之一，茲為持續推廣至集團子公司及外界使用，中鋼集團特別彙整國內外轉爐石應用於海事工程之相關文獻、規範、研究報告、技





圖 8 鋪設於河岸之 2618 塊改質轉爐石護坡塊



圖 9 廠內試用之改質轉爐石消坡塊

術指針及應用實例等資料，亦將改質轉爐石護坡塊及消波塊等相關應用與實績納入並據

以研擬「轉爐石海事工程使用手冊」[6]，此手冊於2017年經工業局委託工研院等第3方公



正單位審查通過，期望此手冊可作為相關工程主辦機關、設計及施工單位與營造業等相關產業參考與遵循外，亦可提供轉爐石資源化應用於海事工程之相關技術參考資料，有利政府推行循環經濟政策及確保公共工程之品質，並宣導轉爐石應用於海事工程之正確使用觀念。

#### 4. 鐵路道碴

鐵路道碴係鐵路運輸時用於固定軌框結構，吸收列車行駛時產生的振動，同時將載重穩定分散至下層路基，因此需要使用具高硬度、低磨損及高內摩擦角等堅硬石材。改質轉爐石具有比重大、高硬度、高耐磨性、高內摩擦角及體積安定等特性，非常適合作為鐵路道碴材料。自1875年起，美國已有使用爐石作為鐵路道碴的紀錄，隨後德國、英國也都開始使用。根據美國多年使用經驗，轉爐石用於高速、高運量及低運量主線等實用案例證實轉爐石作為道碴的長期效益，表現甚至優於天然石材。因此，美國鐵路工程協會（American Railway Engineering Association）已將轉爐石列於鐵路道碴規範中。

為拓展轉爐石產品運用範圍，中鋼集團完成改質轉爐石於鐵路道碴之應用開發（圖10），經與成功大學合作，針對改質轉爐石進行一系列應用於鐵路道碴的性能測試，研究結果指出改質轉爐石屬於高強度等級的堅硬骨材，磨損率低且具高內摩擦角和骨材間高連鎖等特性，提供良好的側向阻力、鐵軌



圖 10 改質轉爐石於中鋼廠區鐵路道碴之鋪設

沉陷量低、砸道時無明顯再破碎面等優勢；另，研究發現改質轉爐石其高電阻不會干擾號誌系統，各項性質均符合台鐵規範之要求。自2013年起實際應用在中鋼廠區內的魚雷車鐵水運輸軌道，在每日鐵水運輸量近3萬公噸，單一魚雷車總重達600公噸，軸載達50公噸，為台鐵鐵路2倍以上承載負荷之嚴苛作業條件下，迄今使用狀況良好，經成功大學進行軌道數據檢測，證明改質轉爐石確可全面取代天然道碴，未來希望將此綠色產品推廣至國內各鐵路軌道設施使用。

#### 5. 人造建材

除了工程材料，中鋼集團亦積極開發改

質轉爐石之新應用，因改質轉爐石屬黑色石材，其物化性質優於天然石材，另其具品質穩定等特點，茲為發展改質轉爐石高值化應用，以增加改質轉爐石產品之附加價值，乃進行改質轉爐石人造建材開發，利用樹脂作為膠結材，改質轉爐石作為人造建材成形主要骨材，近期已成功開發改質轉爐石人造建材（圖11），經進行其吸水率、抗壓、抗折強度量測及毒性物質溶出試驗（TCLP），檢驗結果顯示所開發製作之人造建材物化性質符合規範要求，且無重金屬物質溶出，係兼具美觀及耐用之建材，具有高值應用之潛力。

## 五、結論與展望

在世界各國倡導循環經濟之理念下，應

該妥善利用地球資源，拓展煉鋼副產品-轉爐石之用途，以貫徹循環經濟理念，達成環境永續之目標。

轉爐石因具有強度高、磨損率低及低健康性損失等性質，用於工程材料有諸多優於天然骨材之處，另，根據環保署產品碳足跡服務平台公告之轉爐石產品碳足跡為1.58 kg CO<sub>2</sub>e/1000kg，遠低於天然粒料之7.24 kg CO<sub>2</sub>e/1000kg，因此被廣泛應用於道路工程、土木工程、海事工程、水泥生料及廠內回收等，各國使用之相關經驗顯示：只要利用轉爐石之特性並正確地使用，確實可以在資源利用與環境保護及生態復育上提供許多助益。茲為開拓轉爐石之多元資源利用，拓展轉爐石於有膨脹率要求之工程材料應用，中

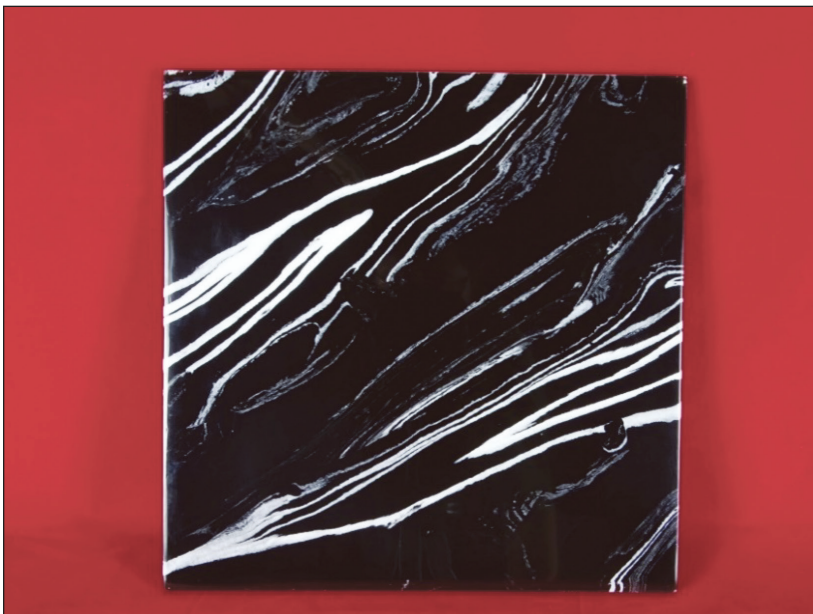


圖 11 改質轉爐石人造建材（30 × 30 cm<sup>2</sup>）成品照片





鋼集團研發熱渣改質技術以徹底安定化轉爐石，所產出之轉爐石品質優良，可滿足多數資源化產品需求，經證實可用於道路工程、高壓混凝土鋪面磚、非結構性水泥製品、鐵路道碴及人造建材等用途，未來除期望協助集團轉爐石產品資源利用，達成「使用者滿意、社會大眾安心、資源有效應用」之目標，擬朝向加值化及高值化發展，以創造外界使用誘因，增進推廣之經濟性，以落實政府循環經濟理念。

#### 參考文獻

1. <http://www.slg.jp/pdf/Amounts%20of%20steel%20Slag%202017FY.pdf> Nippon Slag Association, Japan.
2. <https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2019/01/Statistics-2016.pdf> Euroslag, Germany.
3. Y.H. Tseng, Y.C. Lee and B.L. Sheu, China Steel Technical Report, No. 28, pp.46-51, 2015
4. 轉爐石道路基底層使用手冊，中鋼集團，107年7月。
5. 滾筒轉爐石及改質滾筒轉爐石鋪面磚使用手冊，中鋼集團，107年6月。
6. 轉爐石海事工程使用手冊，中鋼集團，106年11月。