



循環經濟與永續發展 - 耐火材料再生利用

中宇環保工程公司耐材工程處資深工程師 / 吳依貞

中宇環保工程公司耐材工程處工程師 / 李杰穎

中宇環保工程公司耐材工程處資深工程師 / 陳松嶺

中宇環保工程公司耐材工程處工程師 / 張家源

關鍵字：耐火材料、再生利用、循環經濟、耐材回收、用後耐火材料

摘要

近年來，耐火材料對環境的影響已成為一個重要議題。特別是耐火材料施工和使用過程中對環境的影響、節能和資源枯竭問題等已成為全球性議題。因此，從環境因素衍生，須降低外部掩埋處理和資源枯竭造成的耐火原料價格上漲的角度來看，愈來愈需要增加用後耐火材料的回收再利用量。而在過去十多年來，用後耐火材料的回收利用引起人們興趣，因為具有環境(較低能源需求、碳排放)與經濟(便宜原料、更低處理成本、降低礦產依賴)的潛在效益。耐火材料的再生利用措施大致可分為兩類，一是改善耐火材料施工和使用過程中的作業環境，二是保護地球環境的措施，旨在節省能源資源、減少環

境污染物。本文將探討耐火材料回收再利用技術的現狀以及回收處理技術，對用後耐火材料的回收再利用之關鍵點進行研究，意在將用後耐火材料作為耐火材料行業的再加工原材料一逆向物流。同時，耐火材料最終使用者也必須願意接受用回收材料生產的耐火材料，上下游同心協力推動耐火材料再生利用，體現循環經濟與永續發展。

一、前言

耐火材料是能承受高溫並在規定時間內仍維持機械功能的固體材料，耐火材料對所有高溫製程都是不可或缺的，例如：金屬、水泥、化工、玻璃和陶瓷生產。目前使用之耐火材料形態種類繁多，在學術或商業上依



表 1 世界耐火材料原料使用量

原料	占比	產地
黏土 Refractory clays	46%	中國 China
鎂質 Magnesite	26%	中國 China
回收耐材 Recycle refractories	7%	中國 China
水鋁石 Calcined bauxite	4%	中國 China
棕剛玉 Brown fused alumina	3%	中國 China
白雲石 Dolomite	3%	美國 USA
板狀剛玉 Tabular alumina	2%	
鍛燒氧化鋁 Calcined alumina	2%	中國 China
石墨 Graphite	1%	中國 China
高鋁水泥 Calcined alumina cements	1%	
矽線石 Sillimanite minerals	1%	南非 South Africa
鉻鐵礦 Chromite	1%	南非 South Africa
白剛玉 White fused alumina	1%	中國 China
鋯石 Zircon	1%	澳大利亞 Australia
碳化矽 Silicon carbide	0.25%	中國 China
矽質 Silica	0.25%	美國 USA
鋁鎂尖晶石 Spinel	0.25%	中國 China
橄欖石 Olivine	0.25%	挪威 Norway

出廠前概分為兩大類，即定型耐火材（磚）與不定形耐火材，如圖1所示；不定形耐火材包括：可鑄性耐火材、可塑性耐火材、搗固性耐火材、耐火泥及噴漿材。近年來定型耐火磚僅占耐火材市場之30%，其餘70%為不定形耐火材。

根據IMFORMED於2016年的統計（表1）[1]，全球常用耐火材料是鋁質及鎂質耐火材料，黏土質具有廣泛的應用及高市占率，鎂質耐火材料則是著重在鋼鐵行業，白雲石占額偏小，但對不銹鋼產業影響較深，目前除中國以外，白雲石磚大部分取代了鎂鉻磚。

全球耐火材料產量約為3,500~4,000萬噸/年，年度波動主要取決於鋼鐵業需求，該行業使用占比約為70%，在使用耐材期間，約有30~40%的耗損[2]，顯示每年產生高達2800噸廢耐火材料。

目前台灣製造耐火磚所使用的原料包括天然礦物原料及人工精煉的合成材料。在天然礦物原料方面，除極少量火黏土及矽石為自產外，其他原料仰賴國外進口，主要以中國為主，占耐火材料廠之70~80%；此外，人工精煉的合成材料則來自於日本及歐美居多。由此可見，台灣耐火磚原料幾乎100%採

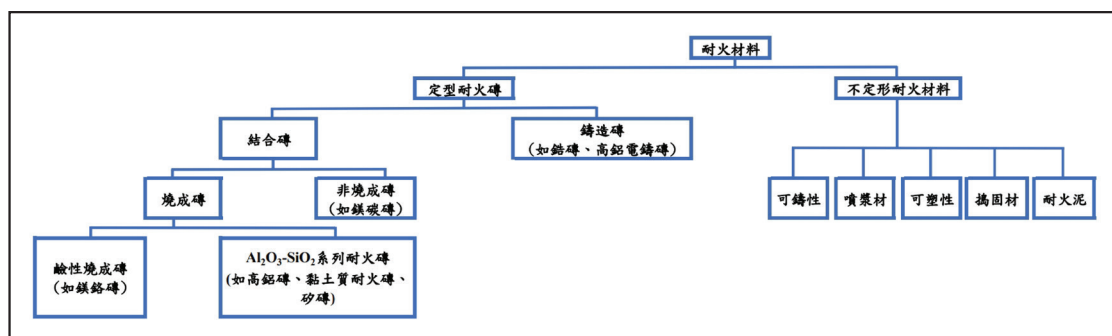


圖 1 耐火材料之主要形式

表 2 3R 步驟

再減少 Reduce	⇨ 合理放寬操作條件 → 連續式運行 → 較低溫度條件下操作 ⇨ 延長耐火材料使用壽命 → 高品質純度耐火材料 → 耐火材料精準化安裝 ⇨ 透過修復延長耐火材料壽命 → 表面修補、濕噴材、吹附材
再利用 Reuse	爐渣調節劑、精煉用原料、耐火砂、路基材料…等
再回收 Recycle	滑板注嘴、盛鋼桶注嘴 再回收製成景觀磚、不定形耐火材、定型磚

用進口，透過回用、下階應用，除可促成循環經濟，也可以降低對進口原料依賴度。

台灣耐火材年產量可超過21萬噸，[3]中鋼集團是國內最大耐火材料需求公司，其國產化耐火材料年使用量為10.3萬噸、全年總使用量為14.7萬噸；其中國外進口耐火材重量份額約占30%，但其成本金額卻達到44%，顯示進口耐火材多為高單價產品。

雖然每年使用後耐火材料數量龐大，但早期因原料成本低，廢棄材料處理成本低廉，用後耐火材料鮮少獲得關注，但在過去20年來因環境考量及垃圾處理成本增加，用

後耐火材料的回收開始引發關注，早期開發使用於路基本基礎維護或爐渣調節劑作為回收的開端，但並無法充分發揮耐火材料的內在價值，且隨著原料價格上漲，用後耐火材料處理成本漸漸提高。

回看歷史，用後耐火材料的效益大多以降低每噸產品所消耗的耐火原料之方式展現，以美國及日本鋼鐵業為例，從1970年的20~30公斤/噸鋼下降到現今的8公斤/噸[4] [5]。因此充分利用鋼鐵業用後耐火材料資源進行再生耐火材料的研究與利用，日本鋼鐵廠提出透過3R步驟達到降低的願景，如表2[6]。



以上不僅能夠大幅度降低耐火材料的原料成本，同時也能加快鋼鐵循環經濟體系的建置，實為建構綠色環保企業的重要內容之一。為此，本文綜述用後耐火材料再生利用技術研究進展，指出其發展方向，為促進用後耐火材料大範圍、高品質循環利用提供參考。

二、再利用回收情況

國外已開發國家對用後耐火材料的資源化利用非常重視，對用後耐火材料回收利用的研究起步較早，因此當前在很多已開發國家用後耐火材料回收利用率較高，一般平均在70%左右，個別產品甚至達到了100%回收利用[2]。

中國因研究起步較晚，當前用後耐火材料的回收利用率為30%，近年來隨著國家環保政策的貫徹實施，及耐火原物料開採成本逐漸增加，用後耐火材料的回收再生利用受到前所未有的重視，鋼鐵業以及耐火材料生產企業已經意識到用後耐火材料的價值，以再生鎂碳磚、再生鋁鎂碳磚、再生滑板等為代表的再生耐火製品不斷出現，並具備良好的使用效果[4]。

日本的用後回收耐火材料主要作為造渣劑和型砂的替代物。日本知名鋼廠以用後耐火磚為主要原料，開發出盛鋼桶底搗固材、盛鋼桶澆注料以及一些定型產品，其綜合利

用率達50%以上。其中用85%再生料和15%主原料生產出的電爐熔池部位用的不燒鎂磚，以及以90%再生料和10%主原料生產出的電熔渣線用鎂碳磚，都表現出優良的性能以及良好的使用效果[5]。另外，新日鐵研發出用後鋁碳耐火材料生產連鑄用注嘴的技術；鹿島鋼鐵廠研究了滑板的再利用工法，使修復後的滑板使用壽命與新滑板一樣[6]。大同特殊鋼每月產生 900 噸廢耐火材料，其中 650 噸可回收，部分可回收耐火材料可直接使用，部分則經過破碎、調整成分等處理[7]。

韓國POSCO成立了專門回收和再加工用後耐火材料的公司，將用後耐火材料經過揀選和破碎成40mm以下的顆粒料，從中分離出廢鋼和各種耐火材料。當中廢鋼再經過揀選作為煉鋼用原料，而用後耐火材料經分類後可作為耐火原料、護爐爐料等材料使用。這種作法雖然沒有提升用後耐火材料的附加價值，但是絕大部分可達到及時回收利用的目的[8]。

法國Valoref公司主要處理用後玻璃窯用耐火材料的回收工作，此類耐火材料的回收利用率已達90%。義大利公司開發出各式窯爐、鋼液分配器、鑄錠模以及盛鋼桶內襯等耐火材料的回收利用技術，所回收的耐火材料直接噴吹入爐膛以起到保護爐壁的作用[9]。德國研究則聚焦於利用用後鎂碳磚生產盛鋼桶和轉爐的永久層，並取得了很好的使用效果[10,11]。除了具體的回收利用實踐，



國外已開發國家持續研究用後耐火材料，提升資源利用且符合環保法規，並提高企業的社會經濟效益，通過制定法令法規，成立專門研究機構，組建專業公司，取得了較高的資源化利用率。

美國能源部、工業技術部和鋼鐵生產者致力於延長耐火材料的使用壽命和制定用後

耐火材料回收利用計畫，促使用後耐火材料的回收利用率顯著提高至72%，其應用範圍主要是脫硫劑、爐渣改質劑、耐火澆注料骨料等。美國密西里州還開發了將二次使用過的白雲石耐火材料作為土壤調節劑、廢高鋁料用作耐火澆注料骨料等新技術，並透過這些技術，大幅減少用後耐火材料的掩埋量[3]。

上述再利用回收情況整理如下表3。

表3 各國再利用回收情況

(一)中國再利用回收情況

原材質	再利用之產品
鋁矽碳質耐材	澆注料、噴塗料、不定形材、再生緻密剛玉、再生剛玉、再生礬土 [8] [9] [10] [11] [12]
鎂質耐材	噴補料、不定形材、鋼液分配器塗料、鋼液分配器搗固材、再生鎂碳原料 [8] [9] [11] [12]
鎂碳或鋁鎂碳質耐材	噴補料、補爐料、填料、爐襯熱修用料、鑄孔開鑄劑、滑板、浸入式注嘴、保護管套、多孔堇青石、再生鋁鎂碳原料 [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]
鎂鉻質耐材	鎂質渣擋板、噴補料、引流砂、鋼液分配器塗料、鎂鉻塗料、鎂鉻搗固材、出鋼口搗固材、盛鋼桶乾式搗固材、再生鎂鉻原料 [8] [9] [10] [11] [12]
碳化矽質、剛玉-碳化矽質耐材	耐磨澆注料、冶金輔料、再生鋁碳化矽原料 [4] [6]
剛玉-尖晶石質耐材	堵泥、綜合用搗固材、綜合用澆注料 [8] [9]
滑板、注嘴、座磚等功能性耐材	鐵水流道不定形材、堵泥、煉鐵用不定形、鋼液分配器擋板 [8] [9]
高爐出鐵流道澆注料、預製件	主流道、傾注流道、渣流道、搗固材、堵泥 [9] [10] [12]
高爐出鐵渣流道	中小高爐搗固材、堵泥 [9] [10]
高爐內襯高鋁質及剛玉質耐材	耐火澆注料、可塑料、不定形材、再生緻密剛玉、再生剛玉、再生礬土 [9] [10]
高爐內襯碳塊及散料	碳質搗固材、碳質不定形材 [9]
高鋁質、剛玉-莫來石質耐材	澆注料、噴塗料、不定形材 [9] [11] [12]
特種氧化物耐材、氧化鋯、氧化鉻、氧化鈣	不定形材 [8] [9]
矽磚	碳化矽、莫來石 [14]



(二) 日本再回收利用情況

原材質	再利用之產品
銅廠耐材	用作路基、鋼鐵業的造渣劑或鎮靜劑、土壤中和劑或水泥熟料之原料、盛鋼桶搗固材、盛鋼桶澆注料、造渣劑、型砂 [8] [12] [15]
含鉻耐材	再生含鉻原料、再生鎂鉻磚 [8] [16]
鎂質耐材	轉爐煤溶劑、再生鎂磚、再生鎂碳磚 [2] [8] [15]
鋁質耐材	再生鎂鋁尖晶石澆注料 [2] [12]
剛玉石墨製品	浸入式注嘴磚 [8] [12]
滑板磚	再生滑板磚 [8] [12]
出鐵流道耐材	鋁 - 碳化矽 - 碳質澆注料 [8] [12]

(三) 歐洲再回收利用情況

原材質	再利用之產品
鎂碳或鋁鎂碳質耐材	再生鎂碳或鋁鎂碳質耐材、噴塗料 [17] [18] [19]
鋁質耐材	再生鋁質原料 [8] [20]
鎂質耐材	再生鎂質原料、盛鋼桶及轉爐永久層磚 [8] [12] [20]
玻璃窯 AZS 磚	再生 AZS 質原料 [8] [12] [20]
各式窯爐、銅液分配器、鑄錠模以及盛鋼桶內襯	噴塗料 [20] [21]

(四) 美國再回收利用情況

原材質	再利用之產品
銅廠耐材	脫硫劑、爐渣改質劑、耐火澆注料骨料、澆渣護爐添加劑、鋁酸鈣水泥之原料、鋪路料、陶瓷原料、玻璃工業用原料、屋頂建築用粒狀料、磨料和土壤改質劑 [8] [12]
白雲石質耐材	土壤調節劑 [12] [21]
鋁質耐材	耐火澆注料骨料 [12] [21]

三、回收處理技術

討各區域在用後耐火材料的回收經驗及處理技術。

用後耐火材料利用的關鍵在於回收，經過全面性系統設計的回收途徑，可實現用後耐火材料高附加價值100%利用。回收途徑按照「分類→歸檔→分級」的順序進行，一般處理流程為：去除大塊渣鐵→破碎→除鐵→合格原料。

以下依中國、日本、歐洲、美國實例探

(一) 中國

1. 用後耐火材料分類原則

同類用後耐火材料按照所採用主要原料的品階可劃分為不同層級，主要原料品階越高，層級越高。



2. 用後耐火材料再生利用的方法

用後耐火材料再生利用的基本原則[22]：

- (1) 低品階用後耐火材料用於生產不接觸熔鋼部位的耐火材料，或用於非耐火材料領域，如冶金輔料、建材產品或鋪路等。
- (2) 中高品階用後耐火材料用於生產同類產品（如用後鎂碳磚再生鎂碳磚）或降級使用（如用後主流道材料，再生用於渣流道或鐵水流道）。
- (3) 用後功能性耐火材料修復後再使用，如對用後滑板中心孔和滑動面修復後可以重新使用；對用後浸入式注嘴渣線進行火焰噴補或陶瓷焊補後重新使用。也可破碎後作為中高檔的耐火原料使用。
- (4) 耐火磚一般再生用於不定形耐火材料，如鎂碳磚再生用於轉爐大面修補料。
- (5) 工作層再生用於永久層，如將盛鋼桶鋁鎂澆注料再生用於盛鋼桶永久層澆注料。

從經濟層面考量，對用後耐火材料的再利用，首先考慮用於耐火材料產品，以發揮其潛在價值，其次再考慮冶金輔料，使每種用後耐火材料都能找到用途。

3. 梯級回收利用系統設計

為提高耐火材料的使用比例，最大程度發揮用後耐火材料的價值，提出用後耐火材料的梯級回收利用系統設計方案，把每一種用後耐火材料破碎以後形成的再生料，按照純淨度分成一級、二級、三級。

4. 再生顆粒預處理後使用

為提高用後耐火材料的資源利用率和附加價值，採用一新工法對用後的高爐主流道、高爐鐵水流道和轉爐、盛鋼桶鎂碳磚進行再生處理，製備再生顆粒料[23]。與傳統工法相比，新工法增加水化乾燥窯和顆粒碾磨設備，使用後鎂碳顆粒經水化乾燥窯充分水化分解以去除 Al_4C_3 ，再透過顆粒整形機的碾壓分離使用後耐火材料中的原始骨料與基質，經過篩分後即可獲得價值較高的再生顆粒料。結果顯示：採用新工法製得的再生顆粒料之粒形棱角較分明，與原始骨料相似，製備的再生顆粒料中假顆粒較少。用再生鎂碳顆粒料製成的再生鎂碳磚性能較好，在中國某大型鋼廠的盛鋼桶渣線部位使用達93次，使用效果與非再生鎂碳磚相當。

根據鋼鐵業用後耐火材料的來源和特性，首鋼開發一用後耐火材料集中回收再利用工法[24]，如圖2所示。與常規工法相比，其主要技術特徵為將耐火材料變質層和原生層進行分選和切割，以進行針對性分類處理。其中，變質層主要由亞鐵侵蝕造成，在變質層表面含有一定量的磁性鐵，經過破碎和磁選可將含鐵物質分離出來，作為燒結配料使用，不含鐵顆粒可進入煉鋼造渣劑配料使用。原生層經過分選將鎂碳、鎂鋁碳、鋁碳等材料分開，按照常規工法，經過分級破碎後，將不同粒級的顆粒作為耐火材料配料使用。

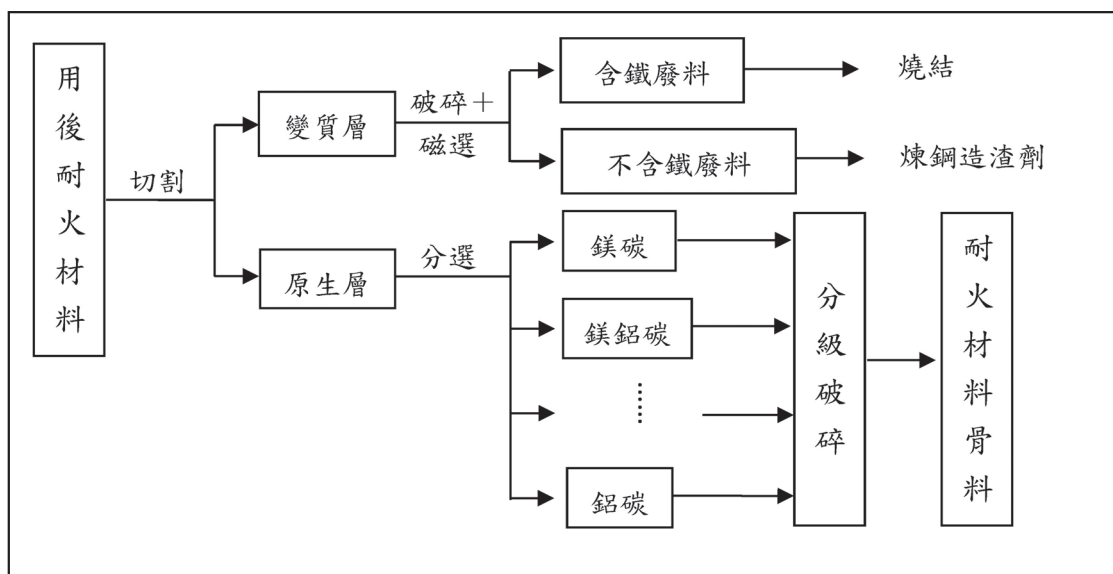


圖 2 耐火材料再生利用作業流程圖

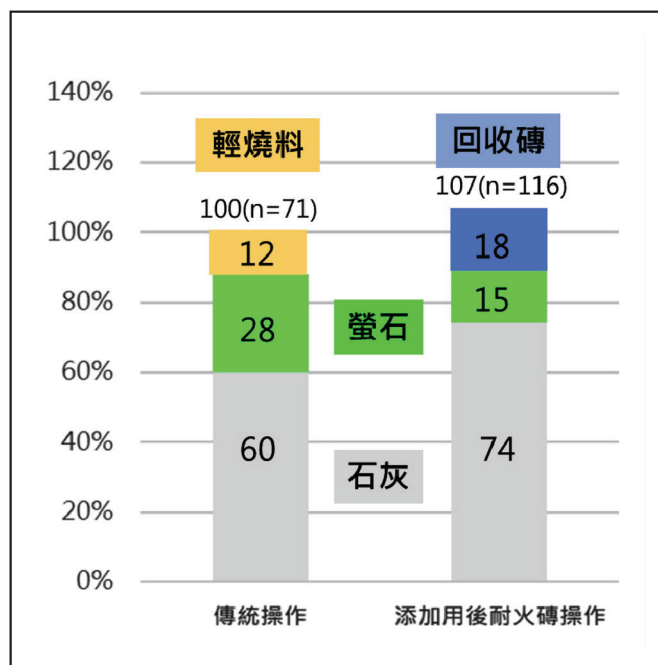


圖 3 盛鋼桶中的熔劑消耗量，常規操作和用後耐火材料的操作 [7]，n：回數。



(二) 日本

垃圾掩埋空間限制的問題在日本很早就引起注意並引發業界著手研究。大同特殊鋼使用電爐進行熔煉，以 AOD、LF 和 RH 脫氣機進行煉鋼，70%為連鑄鋼，30%為鋼錠鑄造。

用後耐火材料可做為盛鋼桶渣和電爐渣的添加物。如圖3所示，於盛鋼桶渣添加 3 公斤/噸之用後耐火材料可減少螢石消耗，但同時必須配合增加石灰的添加量。而以爐渣對渣線耐火材料和脫硫耐火材料的抗侵蝕試驗判斷，添加用後耐火材料的試樣與對照組相同。

另一方面，添加用後耐火材料於爐渣之中，因不會改變爐渣中的 Cr_2O_3 ，故利用 AOD 爐襯裡的白雲石磚作為電爐中造渣的助熔劑是製程經濟性的關鍵因素。其它重新利用用後耐火材料的技術，如：盛鋼桶滑板磚的上板透過熱面加工和鑲件插入磨損孔中進行修復並重新使用；電爐熱負荷較低區域的 MgO-C 和 MgO 磚在消除爐渣和金屬黏附後在同一爐內再循環；鋼液分配器工作層配製鎂混凝土；用廢盛鋼桶多孔塞配製高鋁澆注料等。透過這些措施，耐火材料的內部再循環率達到了58%。

另一有趣案例為新日鐵和住友金屬公司。於2001年到2005年以完全消除殘留物為

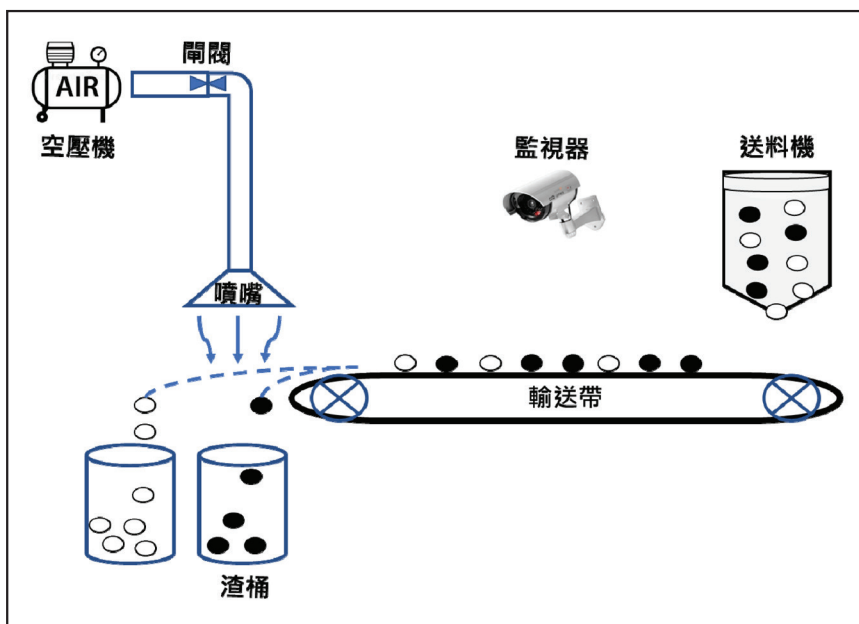


圖 4 顏色分離渣和金屬的系統示意圖 [25]

目標，利用3R方法（再減少Reduce、再利用Reuse、再回收Recycle）開發一個重點為耐火材料回收的項目。首先將 MgO 、 Al_2O_3 、含C耐火材料、不含C耐火材料等材料分類，再將爐渣和金屬分離，接著被粉碎成200~400毫米的塊狀後，進行揀選和磁吸分離。

新日鐵公司採用兩種類型的磁吸分離系統除鐵，分別用於大小塊或當分離過程較長時。透過將一定量的5~10毫米鐵塊與相同尺寸的盛鋼桶耐火塊混合，並對其進行磁力分離以確定所需的功率。當磁力為 12,000 高斯或更高時，總鐵含量可降至2%或更低[25]。

針對渣分離系統，利用顏色區分，導入應用於食品工業中從穀物或豆類中分離異物的機制。該系統使用壓縮空氣分類顏色對比強烈的材料，對於去除生鐵、鋼或爐渣特別有效，如圖4所示。

大部分的回收料經粉碎後，會暫時儲存於現場合適空間。由現場人員直接添加到不定形耐火材料中時，不需要預先乾燥，可經混和後直接使用。然而，如果回收的材料潮濕，在使用前的等待時間內會有硬化反應的風險。因此，在混合之前，需要使用窯爐來乾燥要回收的材料[25]。

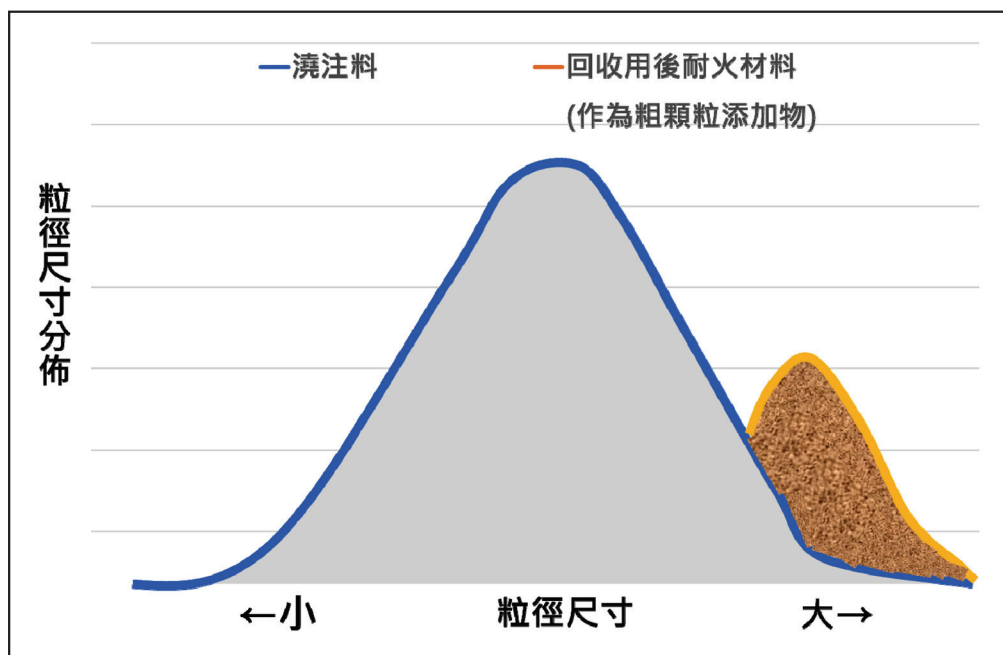


圖 5 耐火混凝土中添加再生材料的概念 [25]



另外，針對用後耐火材料經粉碎後的尺寸，其要求如下：較大的部分對應於回收材料(圖5)。對於混凝土，應採用5~20毫米或1~5毫米；對於潮濕的噴補材料，則使用1-5毫米；而對於乾式噴補，則添加<1毫米的用後耐火材料。

對於混凝土來說，水分会隨著再生材料比例的增加而提高，造就耐磨性較差的多孔材料。因此確定回收材料的最大含量約20%，同時因重複回收時，雜質的百分比比較高，故對於要求較低的應用遵循降一級標準回收。

圖6顯示新日鐵公司從2001年啟動計畫，並在2005年於日本的室蘭市、君津市、名古屋、八幡市和大分市實現耐火材料回收比例的演進，於5年間藉由大量設備投資，實現完全消除耐火材料填埋量的目標，同時降低路基的利用率。

(三) 歐洲

在已發表的具體案例中，值得一提的是 Swerea MEFOS計畫[26]。SSAB Lulea 使用經過研磨和分級的 MgO-C 轉爐磚(5~25 毫米)作為煅燒白雲石的部分替代品。每爐裝料量為 300 公斤，與廢料一起裝在大袋中，並加入石灰來補充流失的CaO，可節省白雲石600公斤，檢測後發現爐渣和鋼液的化學成分以及金屬產率沒有差異。

Ferriere Nord [27] 和 Stefana [28] 是兩家設有耐火材料回收設備的義大利工廠，兩者都是生產螺紋鋼和線材鋼材的電爐廠，用過的耐火材料來自白雲石盛鋼桶內襯、鋼液分配器內襯和電爐爐床，且都與盛鋼桶渣一起回收。

(四) 美國

能源部與鋼鐵製造商協會以及20家煉鋼

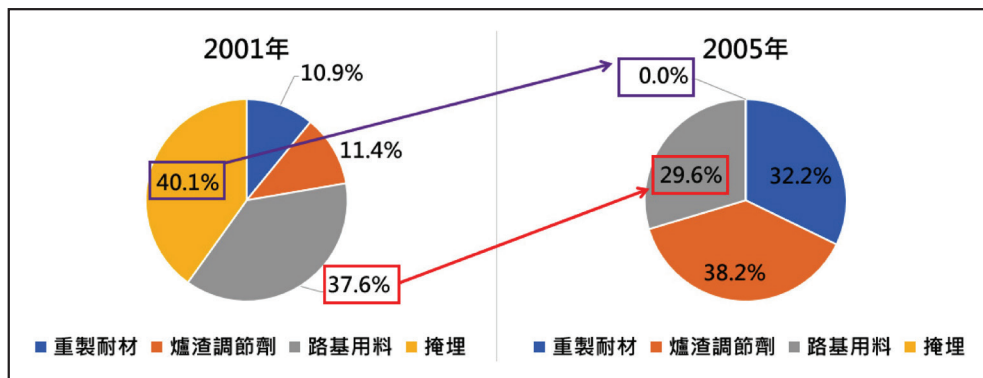


圖 6 2001 年至 2005 年間新日鐵工廠廢耐火材料用途的演變

和耐火材料公司共同進行一項研究，即為使用廢 MgO-C 碎屑作為電爐中的爐渣改質劑[29]。儘管美國有幾家服務公司都曾嘗試過這種回收方式，但皆由於抑塵問題而中止。該種材料必須足夠細，以易於溶解在爐渣中，但又不能過細，避免因被除塵系統吸收

而改變粉塵化學成分並降低其價值（由氧化鋅含量決定）。美國工業界對幾種耐火材料回收方案進行調查[29]。圖7展示綜合工廠和廢鋼電爐工廠的案例。目前市場上有專門從事耐火材料回收的公司，馬里蘭耐火材料有限公司即為其一。

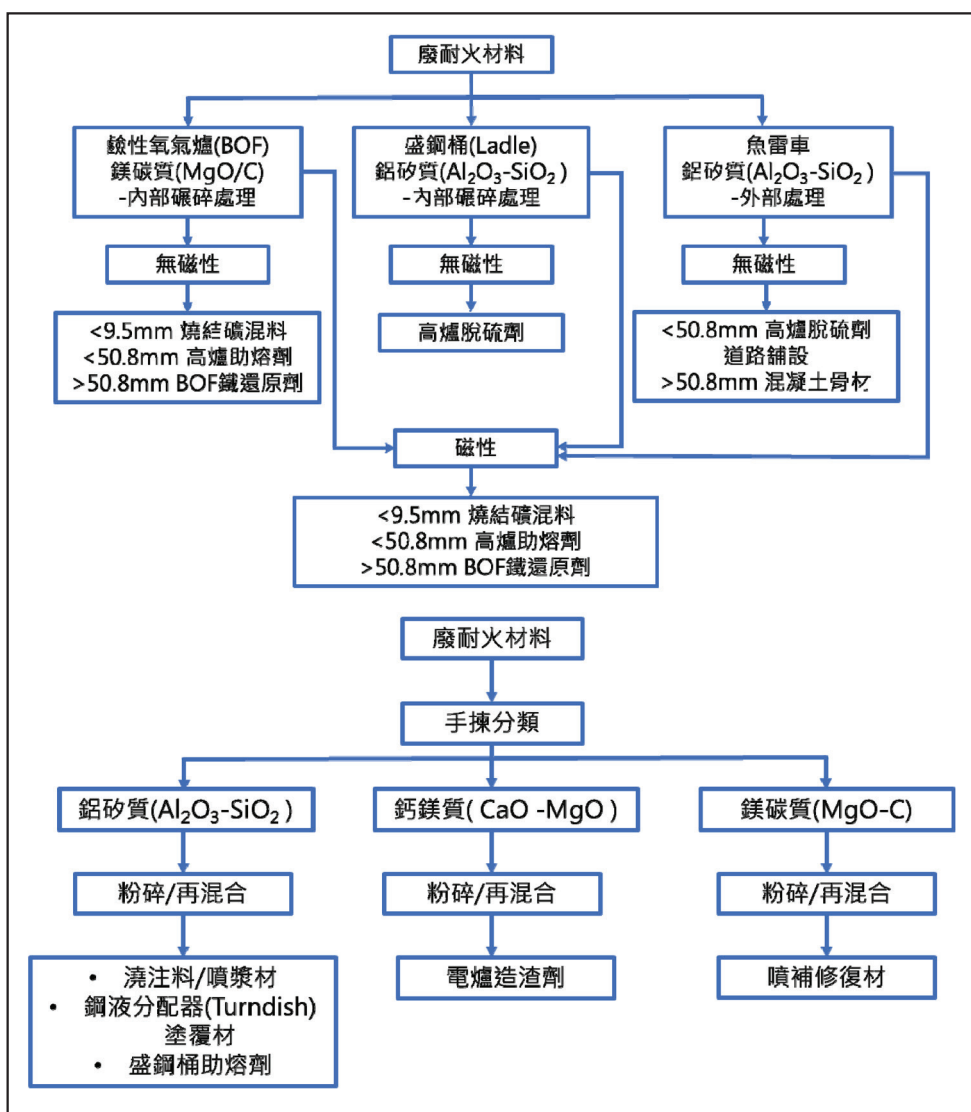


圖 7 美國鋼鐵廠耐火材料回收流程圖。上圖：綜合碾磨。下圖：細粉碾磨。[29]



四、再生利用技術探討

目前常見的再生技術可分為：加入添加劑改質、修補再使用、混和至新耐材之中、降規再使用等，各種技術可以整合或單獨使用，以期達到循環經濟的效果。

(一) 加入添加劑改質

以用後鎂碳磚來說，每次的粉碎、處理作業即可能使鎂砂顆粒變小或使石墨氧化，因此需要補充部分電熔鎂砂並調整配比。另一方面，原鎂碳磚的添加劑，如金屬鋁粉、矽粉、碳化硼、合金粉等，亦可能受到高溫而改變比例。根據研究，二次再生鎂碳磚的物理性質可透過添加劑的調控達到原鎂碳磚的標準[34]。

針對鋼廠連鑄用的鋁碳質耐材材料，根據研究指出，回收使用未接觸鋼液的耐材，並加入奈米添加劑、金屬矽粉、樹脂等，可提升用後耐材的物理性質[17]。

(二) 修補再使用

以煉鋼廠的滑板磚來說，日本鹿兒島鋼廠使用澆注料修補、圓環鑲嵌法，使滑板延壽2倍；中國大陸與歐洲亦有相關案例，修補後的滑板與原滑板相當或更優[35]。而滑板磚除了修補再使用之外，日本亦有研究將40~60%的舊滑板磚破碎成耐火原料再製成

KR攪拌棒、氧槍等產品，使用效果有些甚至優於原有成品[36]。

(三) 混合新耐材

如將用後RH鎂鉻磚進行破碎等處理後，混入RH鎂質吹付料之中再利用，其中原鎂鉻磚中所含之氧化鉻，還能提高再生吹付料的抗侵蝕性[22]。亦有相關研究將針對KR攪拌棒的回收料加入量和抗侵蝕性進行評估[37]。

另外亦有將盛銑桶的磚襯重新再生成流道澆注料；魚雷車磚再生成魚雷車吹付料或傾注流道澆注料；轉爐鎂碳磚再生成轉爐吹付料；盛鋼桶的鋁鎂澆注料再生利用成吹付料或澆注料等應用手段[38]。

(四) 降規再使用

以高爐主流道的鋁矽碳耐材來說，可將用後的產品移至環境較不嚴苛的渣流道[38]，也可將原本用於工作層的材料，移至其它較不嚴苛的環境繼續使用。某鋼鐵廠盛鋼桶用鎂碳磚，將壁部侵蝕不明顯、尚可再使用的鎂碳磚移至頂部freeboard區域使用。此案採取直接現場再利用，具有節省材料處理資源、降低成本、提高使用效率等優點。

日本鋼鐵廠多為自行將廢耐材造渣、粉碎混和再利用，而在台灣目前市場上則是側重各耐火廠商協助回收的角色。日本目前已有鋼鐵



表 4 以目前煉鋼廠常用之再生技術列表如下

項目	技術說明	出處
盛鋼桶用再生鎂碳磚	<p>原磚中的金屬鋁粉會氧化成氧化鋁，含量會隨著再生次數增加而提升，使再生磚的抗侵蝕能力逐漸下降。</p> <p>原磚中的金屬矽會變成二氧化矽，並和鎂元素反應成鎂橄欖石，使液相增加、降低抗侵蝕能力。</p> <p>於再生磚中加入碳化硼，可提高其抗氧化性。</p> <p>由上述 1~3 項關鍵，並加入適當添加劑，二次再生 (97.5% 回收料) 的鎂碳磚能達到原磚的物理指標。</p> <p>回收料中含有密度較小的假顆粒，使殘碳不容易被樹脂潤溼，以致二次再生的鎂碳磚體積密度較小。</p> <p>需留意原磚中的 Al_4C_3 會與結合劑中的水反應成 $Al(OH)_3$，使體積增大，導致再生製品出現開裂現象。$(Al_4C_3 + 12H_2O = 4Al(OH)_3 + 3CH_4)$</p> <p>上述 5、6 可分別透過溶液浸泡、粒度調整、高溫化學反應進行改質處理。</p>	[34] [39]
滑板磚再生技術	<p>選擇裂紋較少、邊角完整的滑板，透過鑽孔定位，安裝內芯，再配合剛玉質的耐火泥組合新舊物件。最後刷塗抗氧化塗料，即能順利再生滑板，其使用效果與原滑板相當。</p> <p>將滑板磚破碎成不同粒度後，外加 SiC、葉蠟石、石墨、酚醛樹脂所開發出的「不燒 $Al_2O_3-SiC-C$ 磚」可應用於其它部位。</p> <p>以中國首鋼用後 Al_2O_3-C 滑板、用後砂磚、用後黏土磚為原料，製得出品質良好的莫來石。總結來說，與天然原料相比，用後耐火材料雜質含量較低，組成較穩定，有利莫來石的合成。</p>	[36] [39] [40]
魚雷車鋁矽碳磚再生技術	<p>將用後鋁矽碳磚破碎、乾燥後，直接加入魚雷車吹付修補料中，使用效果良好。</p> <p>用後磚加入礬土、白剛玉、石墨、結合劑、添加劑等，可再製成魚雷車鋁矽碳磚，用後耐材加入量達 15~30% 時，再生性能可符合要求。</p>	[18] [39] [41]
轉爐鎂鈣磚再生利用	<p>鎂鈣磚的再生可以石蠟為基礎。另外，研究指出用後鎂鈣磚的加入量以 5% 為最佳，可使再生磚與原磚性能相當。</p> <p>需留意加入過量用後磚可能面臨耐壓強度下降、荷重軟化溫度下降的風險。</p>	[39]
不定形材的再利用	<p>於煉鋼廠中直接將原有的不定形材經破碎、混和、攪拌、再製成不定形材，即能有效再回收使用。簡而言之，「就地處理」是降低能耗最直接的再利用模式。如盛鋼桶的鋁鎂澆注料，再製成盛鋼桶的鋁鎂澆注料或修補料。</p>	[41]

廠完全回收用後耐火材料的報告，值得台灣學習[15]。故將本段再生技術列如表4，供台灣各界參考。

五、結論

參考世界各國的用後耐材回收處理情形、再生技術，並考量台灣本身的條件、情況，本文提供戰略及技術方向相關建議：

戰略方向：

1. 與日本情形相同，受限土地面積不足，故應將以「掩埋」做為回收方法，逐步導向為煉鋼廠內現場再利用、混於新耐材中、回收再製等，盡量不做路基、不掩埋。
2. 雖不同於中國、歐美等國家會面臨耐火原料開採成本增加 (台灣耐火原料約 100% 進口)，但相關成本仍會從原料商、台灣進



口商、耐材公司一路轉嫁到鋼鐵廠。故由鋼鐵廠直接進行耐火材料再利用，是最直接的降本方法。

- 雖然高爐流道、魚雷車等流程煉鋼的用後耐材再利用可提高再利用比率，但未來這些煉鋼製程終將被取代，故應專注於電爐煉鋼流程、新型煉鋼方法的耐材回收。

技術方向：

- 用後耐材再利用的關鍵在於「回收」，如中國的新工法：水化乾燥窯、碾磨設備等；日本的磁浮分離系統、顏色分類方法等。台灣是科技強國，應可透過 AI、智能化設備等，準確且穩定的回收用後耐材。雖然設備、技術成本昂貴，但回收減碳效益高，故仍值得投資。
- 針對鎂碳質、碳化矽質等含高級原料的耐材再利用，宜採改質、混於新料中、降規再利用等方法；而一般用後耐材可往「造渣」、「土壤調節劑」等方向進行，整體方向需以經濟層面考量進行。

參考文獻

1. INFORMED, Refractory Raw Material World Sources Map. INFORMED, 2016
2. Y. Nakamura, N. Hirai, Y. Tsutsui, K. Uchinokura, S.-I. Tamura, Recycling of refractories in the steel industry. *Indust. Ceram.* 19 (2), p111-114, 1999.
3. 耐火材料技術現況與發展 (上), 《工業材料雜誌》443 期, 2023.
4. Dominguez, M.I., Romero-Sarria, F., Centeno, M.A., Odriozola, J.A., Physicochemical characterization and use of wastes from stainless steel mill. *Environ. Prog.* Sustain. Energy 29 (4), p471-480, 2010.
5. Koros, P.J., Dusts, scale, slags, sludges... not wastes, but sources of profit. *Metall. Mater. Trans. B* 34B (6), p769-779, 2003.
6. S. Hanagiri, T. Matsui, A. Shimpo, S. Aso, T. Inuzuka, T. Matsuda, S. Sakaki, H. Nakagawa, Recent Improvement of Recycling Technology for Refractories. *新日鐵技報* 第 388 號, p93-98, 2008.
7. Takahashi H et al., Recycling of used refractories in an electric steelmaking shop. *Journal of TARJ*, 20 (4), p249-253, 2000.
8. 賈紅玉、劉敬東、竇連生, 安鋼用後耐火材料資源化利用途徑探討, *河南冶金*, 第 22 卷, 第 4 期, p17-19, 2014.
9. 張鵬華, 酒鋼耐火材料全亮資源化利用方向探討, *科技創業家*, 09(下), p90, 2012.
10. 周旺枝、劉黎, 用後耐火材料回收利用研究現況與發展, *武鋼技術*, 第 51 卷, 第 2 期, p4-7, 2013.
11. 任富平, 用後耐火材料回收利用, *綠色能源*, 7 月上, p19-20, 2017.
12. 王建築, 鋼鐵冶金用後耐火材料梯級回收再利用基礎研究, 西安建築科技大學博士學位論文, p1-146, 2017.
13. 鄭麗君、張國棟、劉海嘯、劉峰, 用後耐火材料回收合成鎂鋁尖晶石的研究, 第十三屆全國耐火材料青年學術報告會暨 2012 年六省市金屬(冶金)學會耐火材料學術交流會論文集, p544-547, 2012.
14. 李明暉、李燦華、歐陽德剛, 用後耐火材料再生利用技術研究發展, 中國環境科學學會科學技術年會論文集, p2114-2119, 2019.
15. Harada, Zero emission technology of refractory waste. *耐火物* 75[9], p399-402, 2023.
16. Simon, F.-G., Adamczyk, B., Kley, G., Refractory materials from waste. *Mater. Trans.* 44 (7), p1251-1254, 2003.
17. Pan, Gao, Wang, Yang, Effect of recycled refractory, phenolic resin and Si powder on the Al₂O₃-C refractory for continuous casting. UNITECR, Frankfurt, Germany, 2023.
18. Exenberger, Grimm, Steel ladle: capacity increase, lining concepts and recycling experience over 25 year. UNITECR, Frankfurt, Germany, 2023.
19. Kim, Jang, Lee, Kim, Recycling of Al₂O₃-SiC-C Refractory brick for repairing torpedo ladle car. UNITECR, Frankfurt, Germany, 2023.
20. <https://www.valoref.com/recycled-raw-materials>
21. Fang H., Smith J. D., Pleaslee K. D., Study of Spent Refractory Waste Recycling from Metal Manufacturers in Missouri[J], *Conservation and Recycling*, 25(2):111-124, 1999.
22. 姚金甫、崔維平、洪建國、田守信, 鋼鐵企業用後耐火材料的再生利用, *耐火材料*, 第 44 卷, 第 3 期, p235-237, 2010.



23. 劉金山, 馮峰, 用後耐火材料製備再生顆粒料的新工藝 [J], 耐火材料, 48(2): 139-140, 2014.
24. 包向軍, 何亞斌, 趙鵬等, 鋼鐵企業用後耐火材料的再利用工藝 [J]. 工業加熱, (1): 1-2, 2009.
25. Henagar S et al., Recent improvement of recycling technology for refractories. Nippon Steel Technical Report N 98 July p93-98, 2008.
26. Viklund-White Ch et al., Utilization of spent refractories as slag formers in steelmaking. 6th Int. Conf. Molten Slags, Fluxes and Salts, Sweden, Stockholm, June 2000.
27. Porisiensi S, Recycling of ladle slag and spent refractories by injection into an EAF. Iron & Steel Technology, June, p73-76, 2004.
28. Memoli F et al., Recycling of ladle slag in the EAF: A way to improve environmental conditions and reduce variable costs in the steel plants. AISTech 2006 Proceedings Volume II p1171-1179, 2006.
29. Bennett JP et al., Evaluating practices to reuse/recycle spent refractory materials in the steel industry. Electric Furnace Conference Proceedings p299-308, 2001.
30. Vanilla A et al., Refractories, environment and natural resources. ALAFAR 2008 (in Spanish).
31. Duarte AK et al., The refractories industry in Latin America. XXXIII ALAFAR 2006 (in Portuguese).
32. Sa RG et al., Recycling of spent refractories from metallurgical processing: management and technological approach. 8th UNITECR, Sept. 2007.
33. Lule González RG et al., Recycling MgO-C refractory in the EAF of Mittal Steel Lazaro Cárdenas. Iron & Steel Technology, pp. 76-84, 2006.
34. 田守信, 關於用後鎂碳磚多次再生利用的探討, 耐火材料, 第 44 卷, 第 4 期, p305-306, 2010.
35. 王長春、陳花朵、牛智旺、喬建房、王大軍, 用後滑板的鑲嵌修復和再利用, 耐火材料, 第 47 卷, 第 2 期, p157-160, 2013。
36. Yoshiyama, Kubo, Imanishi, Recycling technology for used SG plate. 耐火物, 第 56 卷, 第 1 期, p24-25, 2004.
37. Takashima and Imagawa, Recent improvement of recycling technology for refractories. 日本製鐵技報, 第 415 號, p70-74, 2020.
38. Sasaki, Wakae, Namba, Recycle Technology for Unshped Refractories. 耐火物, 第 56 卷, 第 9 期, p453-458, 2004.
39. 張巍, 以用後耐火材料製備再生料研究的新進展, 能源環境保護, 第 27 卷。第 4 期, p6-11, 2013.
40. 岳昌盛、郭敏、張梅等, 以用後砂磚、黏土磚和滑板磚為原料合成莫來石, 耐火材料, 第 43 卷, 第 3 期, p207-210, 2009.
41. 佐々木久晴, 若江智, 難波誠, 不定形耐火物へのリサイクル技術の適用, 耐火物, 第 56 卷, 第 9 期, p453-458, 2004.