

轉爐石對環境相容性之探討

陳信榮¹ 張簡國禎²

¹ 中鋼公司 環境保護處 組長

² 中鋼公司 環境保護處 處長

摘要

轉爐石為一貫作業鋼鐵廠於煉鋼過程產出之副產物，其物性、化性穩定，經檢測不具毒性、不含戴奧辛，為優良之再生工程材料，是中鋼公司產品項目之一。先進工業化國家如美國、德國、荷蘭、日本均訂有法令政策視爐石為資源物質，大量使用於各種工程應用領域。轉爐石經中鋼集團多年研究並委託各學術機構及認可檢測機構研究及檢測，結果顯示轉爐石為無毒無害，可應用於填築、施工便道、土木工程、瀝青混凝土(AC)骨材等工程用料，為具發展潛力之再生資源，達成節能減碳目的。轉爐石在長期溶出特性方面，美國 MTCLP 溶出試驗、荷蘭 BMD 營建材料法令及日本 JLT 標準溶出試驗，其溶出量均低於標準，顯示轉爐石中之重金屬具有長期穩定性不具溶出毒性。

關鍵詞：一貫作業煉鋼、轉爐石、瀝青混凝土、長期溶出特性

一、煉鋼製程區別及生產流程

鋼鐵業為國內重要的基礎工業，鋼鐵產品主要分為碳鋼及不銹鋼，其中碳鋼製程分為二類：第一類為一貫作業煉鋼，主要係由天然鐵礦砂、煤礦及石灰石，經由高爐熔煉成鐵水、轉爐冶煉產生鋼液；另一類為電弧爐煉鋼，主要原料為廢鋼，將廢鋼加入電弧爐冶煉產生鋼液。煉鋼過程除了產出鋼液外，還會附帶產出副產品—爐石，一貫作業煉鋼流程在煉鐵高爐會產出高爐石(氣冷高爐石、水淬高爐石)及煉鋼轉爐產出轉爐石，電弧爐煉鋼流程則產出氧化渣及還原渣。煉鋼流程及產出如下圖所示：

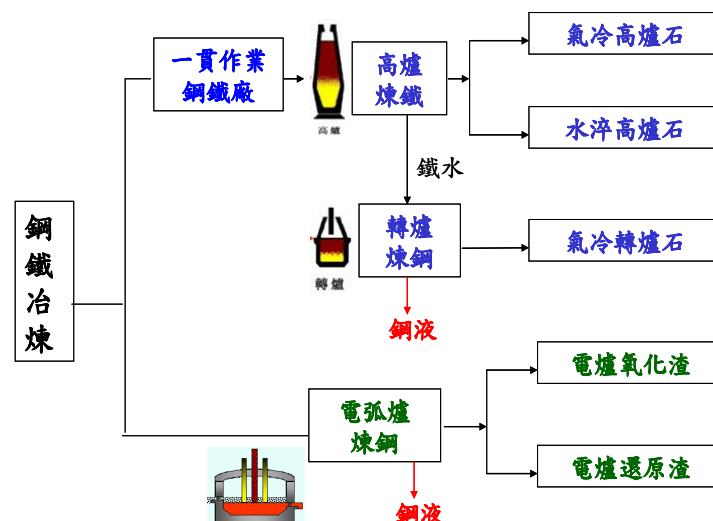


圖 1 煉鋼製程區別

二、轉爐石特性

2.1 轉爐石簡介

轉爐石為一貫作業鋼鐵廠於煉鋼過程產出之副產物，中鋼公司每年產出量約 120 萬噸，因其物性、化性穩定、不具毒性，用於農業土壤改良、工程整地、道路級配、施工便道、填海造陸背填材料及水泥製造原料已有數十年經驗及實績，民國 88 年中鋼公司已將轉爐石登記為產品項目之一。

先進工業化國家如美國、德國、荷蘭、日本均訂有法令政策視爐石為資源物質，而非廢棄物，適當的使用於各種土木營建工程及農業領域，有利於減少天然砂石級配開採，保育天然資源及資源永續利用。

2.2 轉爐石特性

1. 物理特性

轉爐石比重 3.02 較天然砂石重，其吸水率、洛杉磯磨損率及健性損失率皆較天然砂石低，詳如表 1。

表 1 轉爐石物理特性

| | 實比重 | 吸水率(%) | 洛杉磯磨損率 | 健性損失率(%) |
|------|------|--------|--------|----------|
| 天然碎石 | 2.59 | 1.99 | 32.7 | 2.87 |
| 轉爐石 | 3.02 | 1.78 | 15.0 | 1.29 |

2. 化學特性

轉爐石主要化學成分為氧化鈣(約 38~45%)，其次為鐵(約 15~30%)、二氧化矽(約 7~11%)，並含少許 SiO₂、Al₂O₃、MgO... 等其他化學成分，詳如表 2。

表 2 轉爐石化學特性

| 成份 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | T.Fe | P ₂ O ₅ | MnO | pH |
|-----|------------------|--------------------------------|-------|-----|-------|-------------------------------|---------|-----------|
| 轉爐石 | 7~11 | 1.2~2.4 | 38~45 | 6~9 | 15~30 | 1.8~2.6 | 2.5~4.5 | 12.1~12.4 |

2.3 轉爐石綜合特性說明

1. 優良工程材料

轉爐石具低磨損、低硫酸鈉鍵性、高硬度、高單軸抗壓強度等特性，且組成中富含 Ca、Si、Fe 等金屬氧化物與天然砂石相近，若用為施工便道或填方材料，不僅耐壓、耐磨、膠結性強，承载力優於天然級配料實為優良之工程材料。

2. 膨脹性

轉爐石化學成份中含有 38~45% CaO，其中含有部份 Free CaO，在環境中易吸水份或濕氣致產生 CaO+H₂O→Ca(OH)₂ 反應，導致轉爐石膨脹、潮解，進而粉化。為改善此一現象，中鋼自民國 93 年起改變轉爐石冷卻流程，將傳統潑地冷卻法逐步改採渣盤

水坑裂解法，使熱渣泡水達初步安定化效果，以 ASTM D4792 標準方法測試膨脹率已大幅降低(6.34%降至 1.88%)，而應用於瀝青混凝土骨材時，因瀝青可隔離濕氣與自由態氧化鈣的接觸，無膨脹之疑慮。惟為徹底消除轉爐石膨脹性問題，中鋼參考先進國家做法，並實際線上測試將轉爐石熱渣噴注矽砂(SiO₂)進行改質，達成預期效果。茲將傳統潑地法、渣盤水坑裂解法及熱渣改質依序說明如下：

(1) 傳統熱渣潑地處理及加工

轉爐熱熔渣與鋼液分離後，倒入熔渣鍋（渣桶），經由機關車載至室內倒渣場，熱熔渣於 1000~1200°C 逕倒於場地中，經噴水冷卻至渣表面溫度降至 100~150°C 後，再由推渣車進場推渣至廠房另側進行二次冷卻，當渣溫降至 50~80°C 時裝車運出中鋼廠區至中聯轉爐石加工處理場，作業流程如圖 2。

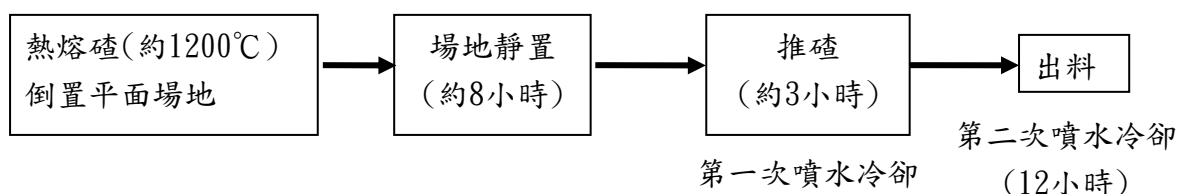


圖 2 轉爐石產出冷卻流程

(2) 渣盤水坑裂解法

為改善室內渣場之熱渣處理過程可能發生之工安、環保問題，及初步安定化轉爐石而採用此處理方法。作業前將承接熱熔渣之渣盤表面先噴塗剝離劑，當熱熔渣倒入渣盤時，使渣盤表面產生氣體，使熱熔渣不與渣盤黏著，降低因高溫共熔使渣盤破壞之機會。作業流程如圖 3

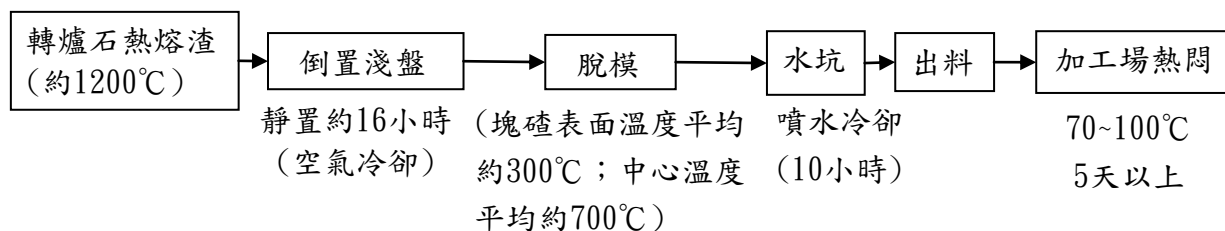


圖 3 淺盤造塊作業流程

(3) 熱渣改質

為徹底消除轉爐石膨脹性問題，中鋼已成功試驗將液態轉爐渣加矽砂使其與 free CaO 反應形成矽酸鹽化合物，可將膨脹率降至 1% 以下及 pH 值降至 12 以下，達到物理性質與化學性質改良效果。

中鋼公司已編列預算興建「轉爐石熱渣改質站」，設計處理量為 60 萬噸/年(佔總量之 50%)，預計 101 年 2 月完工並開始試俾。轉爐渣改質後之特性如表 3

3. pH 值

轉爐石具 Free-CaO 自由態氧化鈣，遇水分反應產生氫氧化鈣釋出 OH^- ，使 pH 值上升約至 12 左右。為避免影響水體，使用時自我管控需離地面水體 20 公尺以上及地下水體 0.5 公尺以上，或做適當的阻絕設施。

用於瀝青混凝土骨材時，因瀝青包裹可隔離濕氣與自由態氧化鈣的接觸，無 pH 升高之疑慮。

表 3 轉爐渣改質後之物況特性

| 粒料種類 | 磨損率(%) | 硫酸鈉健康度(%) | 吸水率(%) | 虛比重 | 扁平率(%) | 浸水膨脹率(%；ASTM D4792) | pH 值 | 熱壓膨脹(%) |
|--------|--------|-----------|--------|------|--------|---------------------|------|------------|
| 天然粒料 | 24.2 | ≤3 | 0.8 | 2.63 | 7.1 | 0 | -- | -- |
| 轉爐石渣盤料 | 16.6 | 1.33 | 1.62 | 3.44 | 0.4 | 1.5~3.5 | 12 | 須適當應用與適量添加 |
| 改質粒料 | 10.1 | 0.2 | 0.4 | 3.45 | 2.6 | 0 | 11.5 | 無膨脹風險 |

三、重金屬溶出及戴奧辛檢測

3.1 轉爐石重金屬溶出及戴奧辛檢測

1. 轉爐石重金屬溶出檢測

轉爐石定期委外檢測重金屬溶出，由檢測報告顯示，經過毒性特性溶出試驗(TCLP)檢測鉻(Cr)、鎘(Cd)、鉛(Pb)、銅(Cu)、汞(Hg)、砷(As)、硒(Se)、鋇(Ba)等重金屬，皆低於國內有害廢棄物認定標準。

2. 轉爐石戴奧辛檢測(檢測方法 NIEA M801.12B)

一般民眾疑慮煉鋼爐渣是否含有戴奧辛，經定期委外實測轉爐石不含戴奧辛(<0.001 ng I-TEQ/g)[註]遠低於國內有害廢棄物認定標準，更低於台灣一般農業用地土壤環境背景值(平均為 0.00389ng I-TEQ/g)。

由檢測報告結果可知，轉爐石是無毒無害之工程材料，重金屬溶出及戴奧辛委託檢測數據參考表 4。

3.2 轉爐石不含戴奧辛說明

1. 戴奧辛生成

含氯物質如廢電纜、橡塑膠...等於燃燒過程中，經由低溫(<850°C)燃燒存在於氣相中，藉著與廢氣中塵粒表面上的結合及催化物質 (Cu及Fe等)的混合反應而產生戴奧辛。

2. 戴奧辛再合成(De Novo 反應)

戴奧辛的分解溫度約為 800°C；當溫度達到 850°C 以上則戴奧辛將完全被摧毀；但高溫燃燒廢氣中塵粒上所含的巨大的碳分子(殘留碳)、含氯物質及催化物質的混合反應，在 250~400°C (300°C 時最顯著) 時會再合成戴奧辛。

3. 轉爐石不含戴奧辛

轉爐石係由煉鋼製程在高溫約 1500°C 以上所產出，在高溫下戴奧辛已完全被分解，亦無再合成條件，故轉爐石不含戴奧辛(低於環境背景值)。煉鋼製程副產物中可能會產生戴奧辛者，經研究證實主要是來自於電弧爐煉鋼產生之集塵灰。而煉鋼製程中爐渣與集塵灰之產出點不同，收集與處理方式也不同，除非是故意，否則兩者不會混在一起產出。一貫作業鋼及電弧爐煉鋼產出之爐石(渣)與集塵灰戴奧辛含量實測值如表 5。

表 4、重金屬溶出及戴奧辛委託檢測報告【9】

| 收樣日期 | 檢測結果 | | | | | | | | | 戴奧辛 (ng I-TEQ/g) |
|---------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---------------------|
| | TCLP 溶出(ppm) | | | | | | | | | |
| | 鉻 | 鎘 | 鉛 | 銅 | 汞 | 砷 | 硒 | 鋇 | 六價鉻 | |
| 980422 | N.D | N.D | N.D | <0.01 | N.D | N.D | <0.10 | 0.064 | N.D | |
| 980522 | <0.01 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.10 | 0.273 | <0.10 | |
| 980605 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.10 | 0.075 | <0.10 | 0.001 |
| 980724 | <0.01 | N.D | <0.02 | N.D | N.D | N.D | <0.10 | 0.120 | N.D | |
| 980824 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.10 | 0.113 | N.D | |
| 980911 | N.D | <0.02 | N.D | <0.02 | <0.001 | <0.100 | <0.10 | 0.099 | <0.10 | |
| 981023 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.10 | 0.094 | N.D | |
| 990118 | N.D | <0.020 | 0.248 | <0.020 | N.D | N.D | <0.100 | 0.324 | <0.01 | |
| 990210 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.100 | 0.040 | <0.10 | |
| 990324 | N.D | N.D | N.D | <0.020 | N.D | <0.100 | <0.100 | 0.038 | N.D | |
| 990423 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.097 | <1.0 | |
| 990520 | N.D | N.D | <0.040 | N.D | N.D | N.D | <0.100 | 0.126 | <0.10 | |
| 990629 | <0.020 | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.100 | <0.100 | 0.171 | N.D | <0.001 |
| 990720 | <0.020 | N.D | <0.040 | N.D | N.D | <0.100 | <0.100 | 0.213 | <0.10 | |
| 990818 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.062 | <0.10 | |
| 990914 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.052 | N.D | |
| 991027 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.046 | <0.10 | |
| 991227 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | <0.1 | 0.198 | <1.0 | |
| 1000127 | N.D | N.D | N.D | 0.02 | <0.001 | N.D | N.D | 0.080 | N.D | N.D |
| 有害廢棄 | 5.0 | 1.0 | 5.0 | 15.0 | 0.2 | 5.0 | 1.0 | 100.0 | 2.5 | 1.0 |

[註]：TEQ，Toxic Equivalent Quantity，「毒性當量濃度」

表 5 爐石(渣)與集塵灰戴奧辛含量

| 煉鋼製程 | 電弧爐煉鋼製程〔1〕 | | | 一貫作業煉鋼製程〔2〕 | | |
|----------|--------------------------|------|----------|-------------|-------|------------|
| | 氧化渣 | 還原渣 | 集塵灰 | 高爐石 | 轉爐石 | 集塵灰 |
| 檢測項目 | | | | | | |
| 檢測值 | 0.02 | 0.02 | 5.5~37.8 | 0.001 | 0.001 | 0.009~0.26 |
| 土壤污染管制標準 | 1.0 | | | | | |
| 土壤背景值〔3〕 | 0.00389 (0.00254~0.0152) | | | | | |

4. 電爐煉鋼集塵灰戴奧辛生成原因

電弧爐煉鋼大部分以廢鋼鐵為主要原料，且其廢鋼鐵來源複雜，並夾雜部分含氣的

廢塑膠及橡膠，使得廢氣中含有定量之HCl氣體，提供戴奧辛生成環境。而在熔煉過程所逸散之煙塵與廢氣，由電弧爐爐蓋與廠房屋頂集塵系統所收集，利用水冷、氣冷設備，將廢氣溫度由1600°C降至400°C以下，因設備特性廢氣混合後溫度降低，在250~400°C溫度區間戴奧辛會再合成。

一貫作業鋼廠煉鋼以天然鐵礦砂、煤礦與石料為主要原料，料源較為單純，並無含氯之廢塑膠及橡膠，沒有戴奧辛生成之條件。轉爐煉鋼廢氣集塵系統係利用冷卻器來冷卻轉爐所產生的廢氣(1500°C降至 970°C左右)，之後利用濕式洗塵器將粉塵洗除(經脫水形成礦泥)，使廢氣溫度急速降至 75°C，瞬間越過 250~400°C戴奧辛再合成的溫度，故一貫作業煉鋼過程產生之集塵灰戴奧辛含量極低。目前中鋼製程產出之集塵灰 100%廠內回收，作為煉鐵原料。

四、轉爐石長期穩定性研究

民國 94 年由成大永續環境科技中心柯明賢教授執行之「中鋼公司轉爐石之長期穩定性與環境相容性探討」研究計畫，採用美國多重毒性特性溶出試驗(Multiple Toxicity Characteristic Leaching Procedure, MTCLP)、荷蘭 Column Test NEN7343、Tank Leaching Test NEN7345 及日本 Japanese leaching test No.13(JLT-13) 與日本 Japanese leaching test No.46(JLT-46)測試轉爐石探討其重金屬長期穩定性與環境相容性，結果證實轉爐石物化性十分穩定，為無毒、無害且具長期穩定性與環境相容性之資源材料。

4.1 美國 MTCLP 測試：

結合 MEP(Multiple Extraction Procedure)與 TCLP 之方法綜合修改而成，模擬待測物質遭遇到有機酸與酸雨雙重侵蝕下之溶出情形，並以 10 次萃取模擬 1000 年之溶出。經測試結果，在萃取試驗中 Cu、Zn、Pb、Ni、Cd、Cr 等重金屬離子均檢測不出(偵測極限 0.05mg/L)，顯示轉爐石極具重金屬穩定性，不會對環境造成危害。轉爐石利用美國 MTCLP 測試結果如表 6。

表 6 轉爐石利用美國 MTCLP 測試結果

| 溶出次序 | pH 及金屬離子溶出濃度(mg/L) | | | | | | |
|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| | pH | Cu | Zn | Pb | Ni | Cd | Cr |
| 1 | 7.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 2 | 9.9 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 3 | 10.5 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 4 | 10.9 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 5 | 11 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 6 | 11.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 7 | 10.9 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 8 | 11 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 9 | 10.9 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 10 | 10.7 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

測試結果：轉爐石極具重金屬穩定性，不會對環境造成危害。N.D.為偵測極限 0.05mg/l

4.2 荷蘭 BMD 溶出試驗

轉爐石利用 Column Test NEN7343(顆粒<4mm)、Tank Leaching Test NEN7345(顆粒>4mm)，其試驗結果 Cu、Zn、Ni、Cd、Cr 等重金屬離子均未釋出(Release)，惟 Pb 有少量釋出(0.455mg/kg)，均符合荷蘭 BMD 法令要求。試驗結果顯示轉爐石具環境友善性，可應用於填地、土木工程、水利工程、建築使用，為具發展潛力之資源材料。轉爐石利用 Column Test NEN7343 及 Tank Leaching Test NEN7345 測試結果分別如表 7、表 8。

4.3 日本 JLT 標準溶出試驗

日本標準溶出試驗 Japanese leaching test No.13(JLT-13) 及 Japanese leaching test No.46(JLT-46)實驗結果顯示如表 9：轉爐石中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 等離子均未溶出，符合環境基準。

表 7 轉爐石利用荷蘭 BMD Column Test NEN7343 測試結果

| Fraction | Fraction Volume | L/S (1/kg) | Experimental Data Analyses(mg/l) | | | | | | Release(mg/kg) | | | | | | |
|----------|-----------------|------------|----------------------------------|-----|-----|-----|------|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn | |
| K1 | 0.1 | 0.1 | N.D | N.D | N.D | N.D | 2.43 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.2 | N.D |
| K2 | 0.1 | 0.2 | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.35 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.0 | N.D |
| K3 | 0.3 | 0.5 | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.20 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.0 | N.D |
| K4 | 0.5 | 1.0 | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.23 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.1 | N.D |
| K5 | 1.0 | 2.0 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D |
| K6 | 3.0 | 5.0 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D |
| K7 | 5.0 | 10.0 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D |
| | | | Total | | | | | | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D | 0.4 | N.D |

累積溶出率 0.455mg/kg 換算成滲入率 172.4mg/m²/100-years

BMD 法規限值 Pb：1,275.4mg/m²/100-years

測試結果：轉爐石具環境友善性可使用於填地、道路填築、土木工程、水力工程、建築使用

表 8 轉爐石利用荷蘭 BMD Tank Leaching Test NEN7345 測試結果

| Fraction | Analyses(mg/l) | | | | | |
|----------|----------------|------|------|------|------|------|
| | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
| 0.25 天 | N.D. | N.D. | 0.11 | N.D. | N.D. | N.D. |
| 1 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 2.25 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 4 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 9 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 16 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 36 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 64 天 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |

偵測極限為 0.05mg/l

檢測結果：重金屬無明顯擴散溶移現象，且溶出量甚微低至無法推估其 100 年之溶出潛勢，顯示轉爐石具重金屬穩定性。

表 9 轉爐石利用日本標準溶出試驗結果(Japanese leaching test No.13 及 test No.46)

| | Cd | Pb | Cr(VI) | Cu | Zn |
|--------------------------------|------|------|--------|------|------|
| JLT-13 檢測結果 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| JLT-46 檢測結果 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Waste disposal standard | 0.3 | 0.3 | 1.5 | -- | -- |
| Environmental quality standard | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.14 | 0.8 |

單位：mg/l

五、結語

轉爐石為中鋼公司之副產品，經中鋼集團多年研究並委託國內著名學術機構及認可檢測機構研究及檢測，結果顯示轉爐石為無毒無害，可應用於填築、土木工程、AC 骨材等工程用料，為具發展潛力之再生資源。

1. 轉爐石為良好之再生工程材料

轉爐石經破碎、磁選、篩分等程序後，嚴格控管品質以符合法規規範。轉爐石不僅抗磨損能力佳、比重大、含砂當量高、加州承載比高，適合作為填築材料及相關工程材料，並能取代天然砂石作為 AC 骨材之工程材料，達成節能減碳目的。

2. 轉爐石重金屬具長期穩定性

轉爐石在長期溶出特性方面，美國 MTCLP 溶出試驗、荷蘭 BMD 營建材料法令及日本 JLT 標準溶出試驗，其溶出量均低於標準，顯示轉爐石中之重金屬具有長期穩定性不具溶出毒性。

3. 轉爐石不含戴奧辛

在高溫 1500°C 製程下產出之轉爐石不含戴奧辛，民國 98 年 11 月媒體所報導「戴奧辛鴨」事件係因早期電爐集塵灰混入電爐渣中棄置所致。

六、參考文獻及資料

1. 環檢所，「台灣地區農業土壤戴奧辛之調查研究」，環境調查研究年報 9，第41-88頁，2002。
2. 蔡憲昇、(張木彬教授指導)，「電弧爐煉鋼廠煙道戴奧辛排放特性之初步探討」，中央大學環境工程研究所碩士論文，2003。
3. 黃鴻期、(張木彬教授指導)，「電弧爐煉鋼廠及中小型焚化爐戴奧辛物種分布探討」，中央大學環境工程研究所碩士論文，2004。
4. 陳俊廷、林平全，「中鋼轉爐石處理現況與展望」，中鋼技術與訓練，第31卷，第1期，第109~115頁，2006。

5. 陳信榮、吳一民、柯明賢、張益國、蔣立中、施百鴻，「轉爐石再利用之長期穩定性研究」，中鋼技術與訓練，第 31 卷，第 4 期，第 61~72 頁，2006。
6. 張祖恩、柯明賢、張西龍、陳信榮、張益國，「再生工程土方材料長期環境溶出特性之探討」，第十一屆海峽兩岸環境保護學術研討會論文集，第 709-711 頁，2007。
7. 張祖恩、柯明賢、陳信榮、陳俊廷、陳盈良、林俊達，「以 pH 關聯性溶出試驗探討煉鋼爐渣之重金屬溶出特性」，第二十四屆廢棄物處理技術研討會論文集，2009。
8. 陳俊廷、陳信榮，「轉爐石處理及應用之現況與未來」，中鋼技術與訓練，第 35 卷第 3 期，第 15~22 頁，2010。
9. 台宇環境科技股份有限公司 檢測報告(環保署認可檢測機構)，報告編號 R980197D11~R1000069D11，2009.04~2011.01。