

# 轉爐吹煉雙渣法造渣技術開發與應用

## Development and application of double slag process in Basic Oxygen Furnace

張顧齡<sup>1</sup> ■ 郭有益<sup>2</sup> ■ 周文賢<sup>3</sup> ■ 黃溫杰<sup>4</sup>  
K.L. Chang, Y.Y. Kuo, W.H. Chou, W.J. Hwang

產製各項高品級鋼種，鋼液中低磷含量要求日漸提高，轉爐操作的主要造渣脫磷能力面臨挑戰；另外如何有效提高生產效率與節省成本則為轉爐操作另一項考驗。本研究藉由對轉爐雙渣法技術的開發，衍生到應用於實際轉爐生產的實踐。應用到 (1) 促進轉爐早期渣化研究，透過石灰熔解與渣化機構的解析，用於製程改進成功吹煉出磷含量 <50ppm 的低磷鋼種。節省轉爐操作成本方面則設計目標渣組成，對渣性與渣量控制確保脫磷能力，達到抑制鋼液過度氧化而損失。(2) 建立脫砂造渣與排渣技術，透過改變造渣模式運用於中龍新高爐初期所產出高矽鐵水，減少原本應傾倒廢棄的鐵水。

**關鍵詞：**雙渣法、低磷鋼種、高矽鐵水

The low phosphorus content requirement is essential for production of the high-grade steel. It is great challenge to effectively dephosphorize during BOF (Basic Oxygen Furnace) slagging operation and to improve production efficiency and cost savings. In this study, we developed a double slag process and applied in the steelmaking operation practices. The lime dissolving mechanism and slagging process were analyzed. The modified processes based on the analysis results are successful for production of [P] <50ppm low phosphorus steel. Desiliconization slagging and deslagging technology was used in the newborn single blast of Dragon Steel with high silicon hot metal. The benefits of the newly developed process include: (1) rapid slagging reaction improving dephosphorization efficiency during BOF initial blowing period; (2) successfully reducing the amount of waste dumping hot metal; and (3) significant cost savings of BOF operation.

**Key words:** Double slag method, low phosphorus steel, high silicon hot metal

### 一、前言

轉爐煉鋼製程反應複雜，冶煉過程初期、中期、末期的反應物和生成物一直劇烈反應變化，除渣及鋼液組成不斷變化外，吹煉時所投入的造渣劑及溫度變化、氣體逸出等亦伴隨發生，故要控制爐渣組成並非容易的事。煉鋼業有句術語「煉鋼即煉渣」，如何有效精準配製合適的渣，是提昇轉爐冶煉技術重要的關鍵。

因應產製各項高品級鋼種，鋼液中磷含量要求越來越低，轉爐吹煉的主要任務造渣脫磷能力面臨嚴峻挑戰，除此之外，如何有效提高生產效率與節省成本則為轉爐操作另一項考驗。中鋼公司目前受限於設備空間，無法像新建鋼廠一樣可採分工的兩個轉爐方式產製低磷鋼（雙爐法），所以轉爐製程精進多以現有設備改善與適化為主，其中單爐雙渣法為煉製低磷鋼的一種選項。

---

中鋼公司鋼鐵研究發展處 <sup>1,4</sup>研究員 <sup>2</sup>煉鋼廠主任 <sup>3</sup>煉鋼廠課長

<sup>1,4</sup>Scientist, Iron and Steel R & D Department, China Steel Corporation, <sup>2</sup>Superintendent, Steelmaking Department, China Steel Corporation, <sup>3</sup>General foreman, Steelmaking Department, China Steel Corporation

圖 1 說明本研究是以轉爐脫磷製程適化 (以現有設備產製低磷鋼) 為開端，藉由進行雙渣法煉製技術而展開一系列研究，衍生到其對應的應用實例。中鋼過去少有深入探討轉爐渣的物化性，主要受限於解析方法，因此首先建立了分析渣基礎物化性的核心技術，提供相關造渣能力更全面的渣物化特性資訊；研究主軸分成兩部分：(1) 促進轉爐早期渣化技術，快速的渣化反應有利於吹煉前期的脫磷效率，透過一系列石灰熔解機構基礎解析，應用於低磷鋼種之造渣吹煉。而轉爐製程是吹氧去除鐵水雜質，在氧化過程會產生氧化鐵，氧化鐵的總量 (即渣中 T.Fe) 是評估轉爐操作能力的重要指標，T.Fe 偏高則鋼液鐵損增加會降低產率。在以早期渣化脫磷技術為基礎，確保脫磷能力前提下，獲得渣性與渣量控制，達到減少鋼液氧化節省成本的轉爐操作目的。(2) 脫矽脫磷造渣與排渣技術，模擬建立雙渣法第一階段，研究吹煉溫度和渣流動性等關鍵操作參數，運用於中龍新建高爐初期所產出高矽鐵水，採雙渣吹煉救回原本應傾倒廢棄的鐵水。

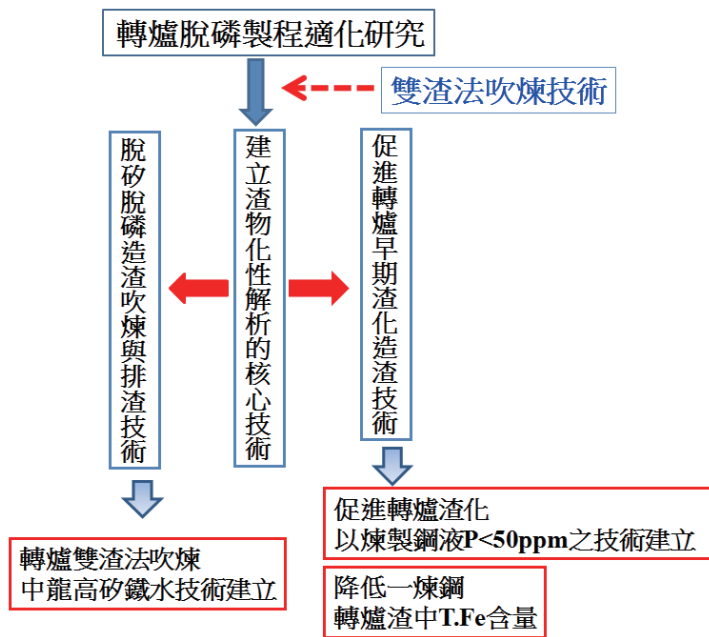


圖1 雙渣法開發與應用研究關係示意圖

## 二、試驗方法

雙渣法有別於傳統轉爐製程是以高鹽基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  約為 4) 與高氧化性爐渣為目標，進行脫矽、脫磷及脫碳；如圖 2 所示，是將轉爐吹煉分成兩個階段：第一階段以低溫，低鹽基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  約為 1.5) 與高氧化性爐渣進行脫矽脫磷。傾爐排除脫磷渣後，第二階段吹煉則循傳統之轉爐作業進行脫碳。考量中鋼公司設備與生產狀況，在不增添或改造生產設備之前提下，本研究將對第一階段的低鹽基度脫矽脫磷渣性、與傾爐排渣之流動性 (渣排除率)。深入解析轉爐渣相、物性及其製程中之演化，用於解析轉爐石灰有效渣化及產製低磷鋼液。

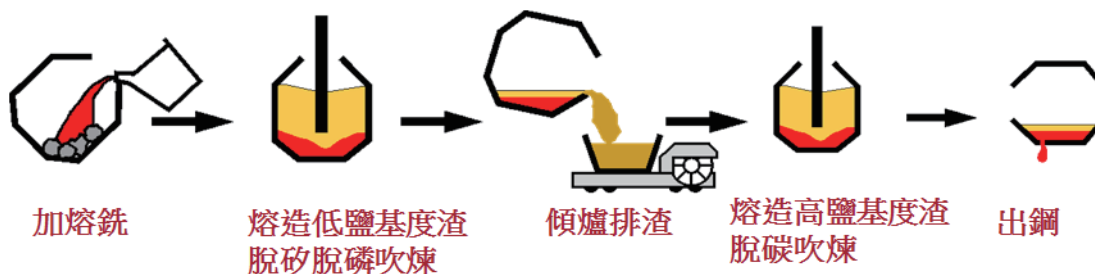


圖2 雙渣法示意圖

1. 過去中鋼較少對轉爐渣的基本渣相與高溫特性進行研究，主要是欠缺完整的分析工具與方法，分別透過：轉爐渣相分析方法、含高 FeO 爐渣黏度量測方法建立、吹煉低鹽基度轉爐渣之渣相研究與熱力學 FactSage 資料庫模擬，來建立轉爐渣解析的研究能量。
2. 早期渣化脫磷技術為基礎：分析轉爐吹煉石灰渣化機構，應用轉爐吹煉過程中斷之取樣、取渣，進行渣相組織分析，並搭配鹽基度渣的渣化反應界面分析、低鹽基度渣與石灰渣化反應解析之解析，推導石灰熔解渣化機構與渣的吹煉演化路徑。
3. 雙渣法造渣吹煉與排渣技術：利用熱模熔煉進行雙渣法吹煉試驗，對第一階段的脫矽脫磷渣的鹽基度變化、溫度與排渣能力進行研究，並搭配已建立的轉爐渣黏度量測技術（流動性分析），配合使用熱力學模擬資料庫進行計算，分析渣中固態相存在對流動性的影響。

### 三、結果與討論

#### 3.1 建立渣解析能力的核心技術

以往對於轉爐渣特性瞭解只有成分而無法充分掌握其它的冶金特性，藉由轉爐渣相分析方法可獲得礦物相的組成和分佈，加上克服過去因劇烈反應的強氧化渣性，而無法取得的高溫轉爐渣黏度量測技術的建立，更全面解析煉鋼製程中渣的物化性質提供造渣技術精進之依據。

#### 3.2 促進轉爐早期渣化技術

高溫渣渣反應界面研究，石灰熔解渣化是一個多元氧化物複雜反應系統，從質傳擴散的觀點，由於石灰與渣之間存在的濃度梯度，所造成的相互擴散，可用圖 3 加以描述其擴散反應。從 CaO 表面出發存在一個方向朝渣內部的 CaO 擴散濃度梯度，相反的方向則存在有 SiO<sub>2</sub> 與 FeO 擴散的濃度梯度，CaO 與 SiO<sub>2</sub>、FeO 產生逆相擴散，在石灰表面附近，CaO 的擴散通量大於 SiO<sub>2</sub>、FeO 的擴散通量， $J_{CaO} > J_{SiO_2}$  和  $J_{CaO} > J_{FeO}$ ，其中 FeO 與 CaO 同屬於立方晶格，就離子半徑而言 O<sup>2-</sup> (1.32 Å)、Fe<sup>2+</sup> (0.75 Å) 比起 SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> (2.79 Å) 並不算大，它在 CaO 晶格中的擴散和置換及形成低熔點的相都比較容易<sup>(1)</sup>，因此在反應區間有 CaO-FeO 相生成，是 CaO+FeO 的反應產物，這種產物具有低熔點的特性；就 SiO<sub>2</sub> 而言隨離開石灰表面距離增加  $J_{CaO}$  變小，遠離石灰表面時則變成  $J_{SiO_2} > J_{CaO}$ ，在石灰表面附近  $J_{SiO_2}$  非常小，因此在某個距離處會有  $J_{CaO} = 2 J_{SiO_2}$ ，此處就是生成 2CaO · SiO<sub>2</sub> 的沈澱前沿，CaO 與 SiO<sub>2</sub> 不斷擴散到此處形成矽酸二鈣 C<sub>2</sub>S 的生成<sup>(2,3,4)</sup>。石灰渣化界面示意如圖 3 所示。

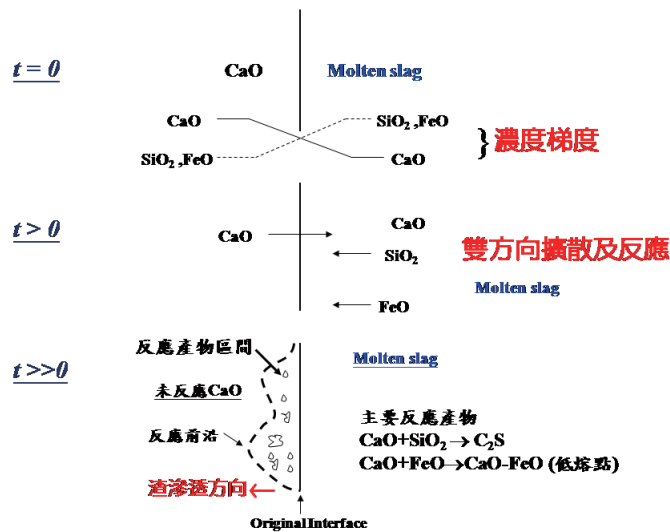


圖3 石灰渣化界面示意圖

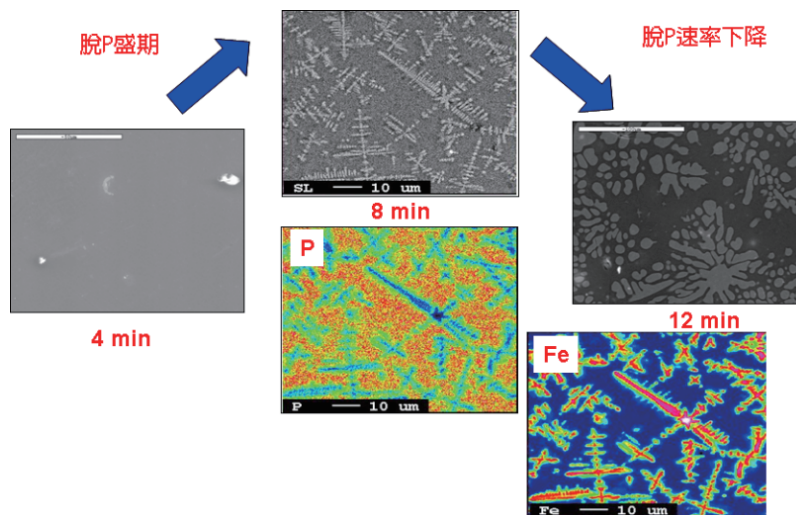


圖4 脫磷機構與路徑研究

利用實驗型熱模進行吹煉研究，依反應時間取樣分析渣相變化與富含磷的渣相變化，並分析溫度效應對脫磷速率影響，分析影響脫磷盛期之因素，圖4為脫磷機構研究中隨時間變化的渣相演變與元素 mapping 圖。

### 3.2.1 應用於促進轉爐渣化以煉製鋼液 $\text{P} < 50\text{ppm}$ 之技術

提出  $\text{FeO}_x$  可視為石灰助熔劑的生產線吹煉應用模式，而非僅是吹煉動態溫度調整用冷卻材之論點。隨後於中鋼第一煉鋼廠進行前期添加  $\text{FeO}_x$  效果分析及產製低磷鐵水試煉，統計吹煉低碳鋼時，前期添加  $\text{FeO}_x$  對於鋼液磷含量的影響。發現前期未加  $\text{FeO}_x$ ，而有加  $\text{FeO}_x$  爐次中，比較 In-Blow 磷含量相差  $\sim 70\text{ppm}$ ，結果證實  $\text{FeO}_x$  有利於石灰熔解以促進渣化之外，並配合脫磷

鐵水的使用，本技術已應用於磷含量 <50ppm 如抗氫引裂 ( 抗 HIC ) 等低磷鋼種之轉爐吹煉。以動力學觀點，證明吹煉前與石灰同時預加  $\text{FeOx}$  之加料模式，促進早期快速脫磷路徑，鹽基度亦相對快速升高，為石灰快速渣化之效果。

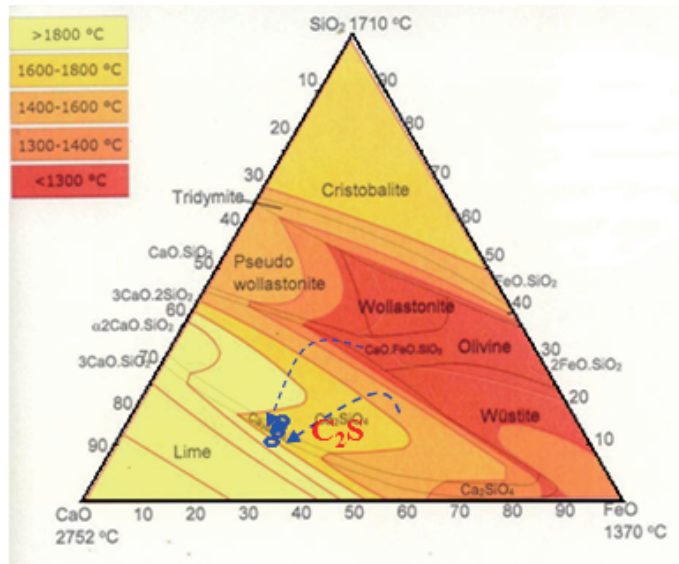


圖5 依渣路徑所設計的目标渣組成

### 3.2.2 應用於降低一煉鋼轉爐渣中 T.Fe 含量：

藉由改變目標渣組成的設計，確保早期渣化脫磷減少多餘 T.Fe 生成，依鐵水 [Si] 含量設計出目標渣組成，將其控制在液相 + 矽酸二鈣相生成 ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 的兩相共存區間 ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$  渣系)<sup>(5,6)</sup>，如圖 5 所示。本計劃導入渣中磷分配比 ( $L_p$ ) 作為所需渣量換算的工具，藉由不同鋼種目標吹止磷含量和事先設計的適化渣組成來計算其應有的磷分配比的值，結合生產操作分析出屬於中鋼第一煉鋼的  $L_p$ ，計算出吹煉當爐所需渣量。控制渣性與渣量，再依適化渣組成來調配轉爐吹煉中所該添加的副原料量，如此即可在不影響脫磷效果下，獲致較低 T.Fe 含量的渣組成，整個計算模式如圖 6 所示。改善了中鋼第一煉鋼廠建立較早的爐容量較小、幾何形狀矮胖和底攪強度限制，所造成抑制鋼液氧化能力的先天劣勢；經由渣量調整副原料加入量及計算熱平衡需求，而以上計算步驟已寫入轉爐程控電腦，並實際順利應用，可減少鋼液氧化而增加鋼液產出量。

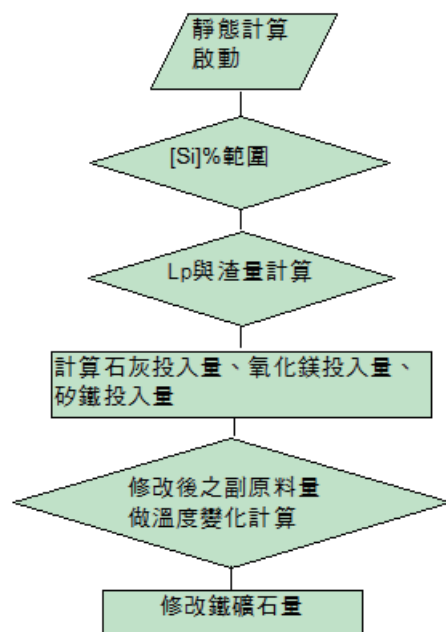


圖6 調整渣組成之計算模式

### 3.3 脫矽脫磷造渣吹煉與排渣技術

轉爐吹煉時鐵水中的矽成份是重要的熱源，適當的矽含量能增加熱源，達到使用廢鋼比提高的目的。當鐵水矽含量過高，吹煉時必須增加石灰用量而造成大渣量的產生，過多的渣量就容易引起噴濺，噴濺帶走熱量並增加產率的耗損，所以鐵水矽是轉爐吹煉穩定性的很重要因素。煉鋼廠對於鐵水 [Si] 含量最大可接收值 $\sim 1.0\%$ ，鐵水 [Si] 含量大於  $1.0\%$  以上者必需以混銑模式處理。中龍高爐初產的鐵水 [Si] 含量會很高，甚至 $\geq 2.0\%$ ，沒有鐵水可混銑情況下，則需使用轉爐雙渣法吹煉方式，第一階段將矽氧化成渣後傾爐排渣，減少轉爐內渣量，第二階段排完渣再將爐體直立吹氧脫碳，因而降低了渣量過多所造成的浮溢現象 (slopping)。

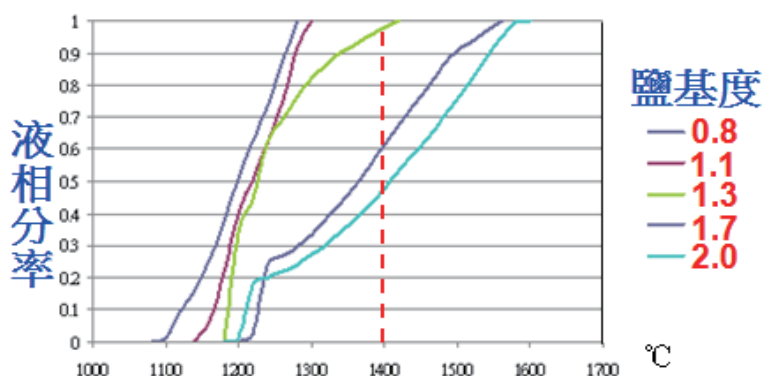


圖7 熱力學資料庫計算模擬

- 高Si鐵水第一次倒渣
- 一般鐵水雙渣法第一次倒渣

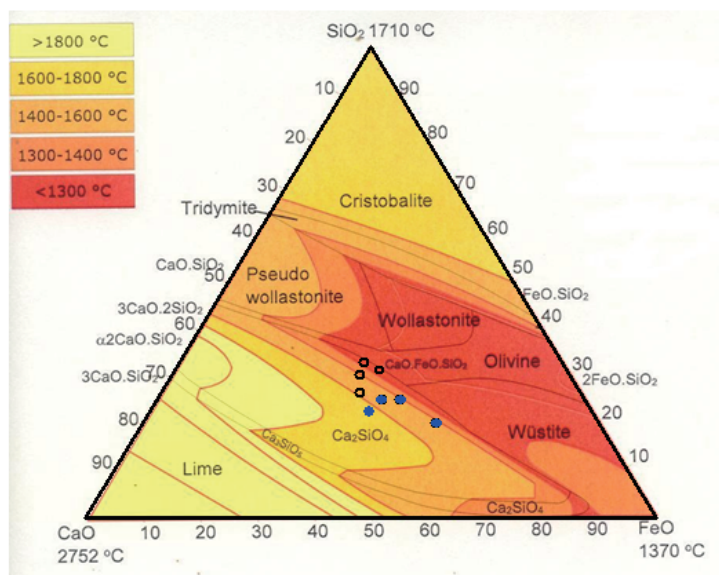


圖8 吹煉高矽鐵水脫Si期渣組成圖

### 3.3.1 應用轉爐雙渣法吹煉中龍高矽鐵水技術

應用熱力學資料庫模擬不同鹽基度區間 0.8 ~ 2，液相率隨溫度變化關係圖，如圖 7 所示並實際對渣進行黏度量測，當雙渣法造渣吹煉時第一階段脫矽期的渣鹽基度控制於 ~1.0，可減少渣量並抑制固態矽酸二鈣 ( $C_2S$ ) 相生成，有利於爐前排渣時的流動性而增加排出量。增加脫矽期溫度雖可確保廢鋼或鐵礦石熔解並可促進渣的流動性，但過高溫度會造成後續脫碳期的噴濺。圖 8 為此次試驗脫矽期渣組成與一般鐵水雙渣法吹煉第一次倒渣的渣組成比較圖 ( $CaO-SiO_2-FeO$  渣系為轉爐渣主要渣系)，其中高矽鐵水吹煉所產出渣  $FeO$  含量低於一般鐵水吹煉，所以其渣的氧化性較低，因此用此控制條件下之鹽基度在 ~1.0 的脫矽渣，渣中 T-Fe 含量較低，。此吹煉條件建立後可避免嚴重浮溢現象之發生，順利吹煉高矽鐵水。

## 四、結 論

利用相關核心渣分析能力的建立，更深入的解析轉爐雙渣法，分別完成：促進轉爐早期渣化技術，與雙渣法第一階段脫矽脫磷造渣吹煉與排渣技術，其可應用於以下各方面。

1. 達成高品級鋼種煉製能力：已應用於抗 HIC 的 A516 與 EH47 等低磷鋼種之轉爐吹煉；又產製  $[P]<100\text{ppm}$  的高品級鋼種如 SM570、API5LX52，皆為使用促進早期渣化脫磷技術。
2. 提升鋼液產率：降低渣中 T-Fe 操作模式已寫入程控電腦，中鋼第一煉鋼廠渣中 T-Fe 已降到平均值為 20.5%，明顯低於 97.01-98.12 的 24.4%，(102 年平均維持 20.2%)，而增加鋼液產出量。
3. 節省製程成本：經中龍 #1 高爐以雙渣法吹煉高矽鐵水順利消化 4000 噸鐵水免於傾到廢棄，後續中龍 #2 高爐投產，同樣利用已建立相關技術為基礎，以雙渣法吹煉高矽鐵水順利消化鐵水。

## 參考文獻

- (1) H. Suito, R. Inoue, ISIJ International, 46(2006)180.
- (2) T. Hamano, S. Fukagai, F. Tsukihashi, ISIJ International, 46 (2006)490
- (3) 鋼冶金學，冶金工業出版社，倪瑞明譯，p.244，1996。
- (4) Y. Satyoko, W. E. Lee, Ironmaking and Steelmaking, 30(2003)203.
- (5) Manfred Bock and Christian Oehler, Millennium Steel (2006)103.
- (6) 吳偉、鄒宗樹、郭振和、吳德潤和趙國光，鋼鐵研究學報，Vol.16(2004)21。

\*

## 廣告索引 Ad. Index

鑄冶 · 第五十八卷 · 第三期 September 2014

|                  |     |                     |    |
|------------------|-----|---------------------|----|
| 中國鋼鐵股份有限公司.....  | 封底  | 晉英金屬工業股份有限公司.....   | 3  |
| 台灣電力公司.....      | 封面裡 | 奈米光電磁材料技術研發中心.....  | 4  |
| 台灣中油股份有限公司.....  | 封底裡 | 元鼎耐火工業有限公司.....     | 5  |
| 台灣保來得股份有限公司..... | 1   | 三和耐火工業股份有限公司.....   | 6  |
| 東和鋼鐵股份有限公司.....  | 2   | 友和耐火材料工業股份有限公司..... | 12 |