

# 煉鐵製程的節能減碳

■ 陳秉詮

傳統高爐以間接還原為主，先還原再熔融。而以熔融還原為主的新煉鐵法，相對於高爐係先熔融再還原。如能善用直接還原產出的 CO 再進行間接還原，不夠的熱再以其他非耗碳能（如電能）來補足，則產出一公噸鐵水可望只需約 213 公斤的碳，約為現行高爐的一半。

## 新煉鐵法

高爐製程的燃料必須使用焦炭及 / 或粉煤等，礦料則使用燒結礦及 / 或球結礦及 / 或塊鐵礦，這種製程使得大多數的煉焦及燒結工場在汙染防治上面臨諸多責難。新煉鐵法的目的在找尋不用焦炭就可製得鐵水的低汙染製程，最好連燒結工場、球結工場等須使鐵礦石聚團化（agglomeration）的工場都不必設置也能製得鐵水，這更是新煉鐵法的最高目標。

新煉鐵法可分成兩大類，一類以 IN BED 為主，另一類以 IN BATH 為主。前者是以間接還原為主要還原反應，困難度較低，然而耗碳率偏高，以 COREX、FINEX 等製程為代表。由於困難度較低，因此 COREX 製程能率先工業化，但也因耗碳率偏高造成諸多經營的困境。

大陸「第一財經日報」於 2012 年 4 月 13 日報導，上海寶鋼花費 140 億元人民幣鉅資購入兩座 COREX-3000 爐，運作後嚴重虧損。寶鋼 COREX 一號爐於 2007 年 11 月 8 日產出第一爐鐵水，操作不到 5 年停產，並在 2012 年 7 月 30 日整體遷至新疆八一鋼廠；至於 2 號 COREX 爐則尚在苦撐中。

相較於前者，IN BATH 是以熔融還原為主要還原反應，困難度略高，然而耗碳率較低，以 DIOS、HISMELT 等製程為代表。

## C 原子的兩次機會

C 和第 1 個 O 結合，稱為「一次反應」，有兩種類型：還原反應和燃燒反應。

- 還原反應  $C + FeO \Rightarrow Fe + CO$ （即直接還原，也稱為一次還原）
- 燃燒反應  $C + 1/2 O_2 \Rightarrow CO$ （稱為一次燃燒）

C 和第 2 個 O 結合，稱為「二次反應」，也有兩種類型：還原反應和燃燒反應。

- 還原反應  $CO + FeO_x \Rightarrow FeO_{x-1} + CO_2$ （即間接還原，也稱為二次還原）
- 燃燒反應  $CO + 1/2 O_2 \Rightarrow CO_2$ （稱為二次燃燒）

理論上，如果 C 都用於燃燒，氧化鐵內含的 O 就無法去除，因此要減 C，就必須追求一次及二次反應中的還原都最大化。

## 新煉鐵法和高爐內反應的比較

新熔融還原煉鐵法主要的還原反應（一次還原）速率是以秒計的，遠快於高爐以小時計的還原反應（二次還原）。況且二次還原需要讓 CO 氣體通過爐料，有透氣性的困擾，其製程很依賴焦炭，一次還原則無這困擾。

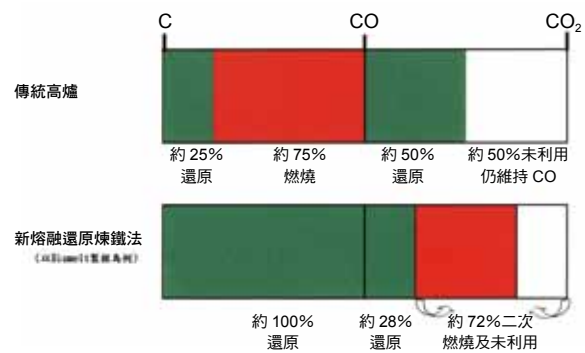
此外，新煉鐵法主要的燃燒反應（二次燃燒）是 CO 氣體的燃燒，速率可快到以爆炸的方式進行，也比高爐的固體燃燒反應（一次燃燒）快許多。

高爐製程中氣體化的碳在形成 CO 時所結合的 O，只有約 25% 是還原自氧化鐵中的 O，其餘 75% 是和鼓風爐中的 O 燃燒而得到的。而形成的 CO，有約 50% 和氧化鐵的 O 結合，因此高爐內不發生二次燃燒

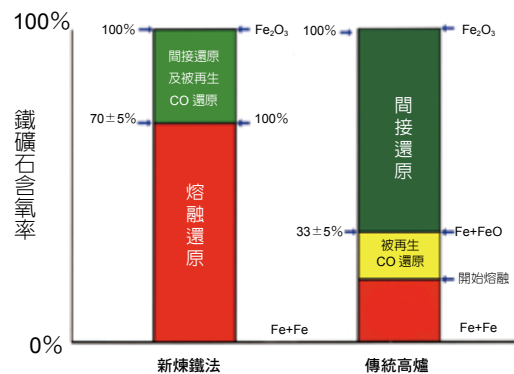


上海寶鋼花費 140 億元人民幣鉅資購入兩座 COREX-3000 爐，運作後嚴重虧損。

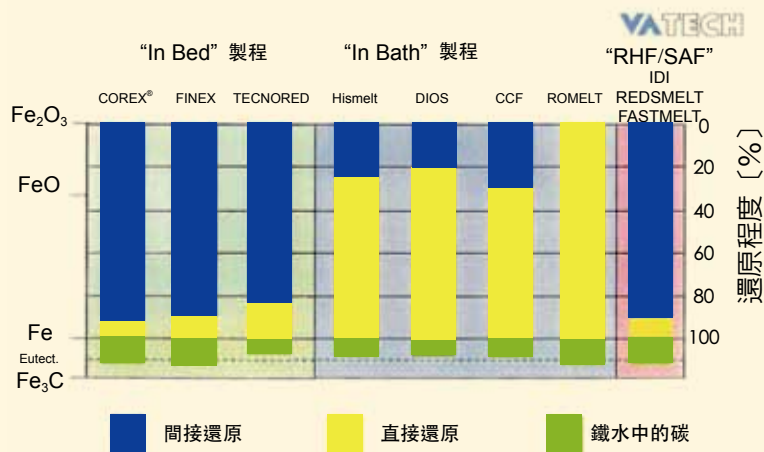
（圖片來源：網路報導寶鋼 COREX-3000）



傳統高爐和新熔融還原煉鐵法一、二次反應的還原燃燒比較。



熔融還原煉鐵新製程相對於高爐偏向先熔融再還原



奧地利 Voest Alpine 公司對各新煉鐵法的間接直接還原比例分析圖

反應。高爐爐頂氣體中  $\text{CO}_2$  的第 2 個 O 原子則來自含鐵礦料中的 O。反觀新熔融還原煉鐵法，如 Hismelt 製程，其氣體化碳形成 CO 時，所結合的 O 約 100% 是由還原氧化鐵而來。

相較於高爐，這種偏向先使氧化鐵熔融再還原的製程設計，確實是困難許多。華文鋼鐵網 ([www.steelnet.com.tw](http://www.steelnet.com.tw)) 2004 年 3 月 5 日報導了旅美華人黃建陽博士和黃曉弟博士開發成功的微波爐煉鋼法，具低成本、低汙染特點，已獲得美國官方專利認證。其研究發現，鐵砂對微波的吸收力相當高，即使用普通家用微波爐，只需短短 1 分鐘就可以使鐵砂的溫度迅速上升攝氏 1,000 度，減少了燃燒所需消耗的 C 及 CO。如此添加的 C 就可以多用於還原鐵礦石，因而降低了製程中的耗 C 率。

### 新煉鐵製程的減 C 潛力

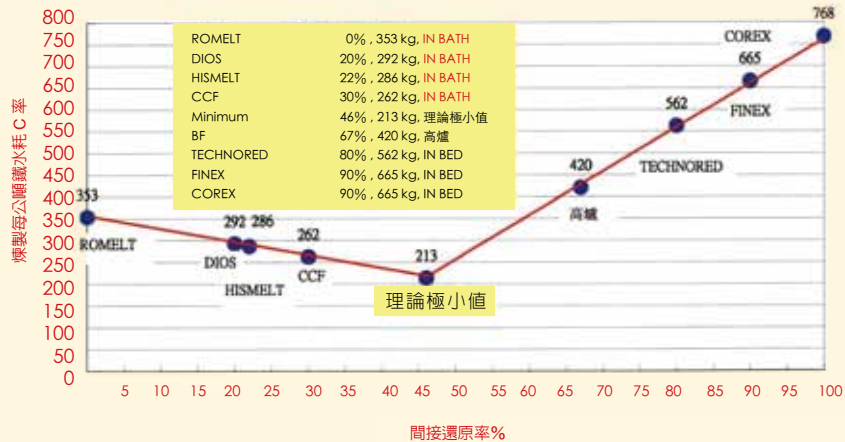
若不考慮熱需求，只考量還原作用的最低 C 需求量，本文引用澳洲昆士蘭大學教授 Biswas 的理論，並假設鐵原子回收率是 98.5%，鐵水中含 Fe 量是 93.5%，碳含量是 4.7%，則可以得到下述結論：



韓國浦項鋼廠 FINEX 製程圖

欲產出 1 公噸鐵水，大約必須還原 407 公斤的 O 原子；若藉由 100% 直接還原，則必須耗用 353 公斤的 C；若是藉由 100% 間接還原，則必須耗用 768 公斤的 C；不考慮熱需求時，最低的 C 需求量發生在以 54% 直接還原，搭配 46% 的間接還原，而且只需要 213 公斤的 C。如果各製程的間接還原率仍保持前述的結論，則代入理論的 V 型線圖，就可推估出各製程的減碳潛力水準。

南韓浦項鋼廠把所購入的 COREX 廠加以研發改進後，另取名為 FINEX 製程，主要改進處是把一個豎型爐 (shaft furnace)



不考量熱需求，各煉鐵法最低耗C率潛力圖 (kg/THM)

增為四個。目的只是增加二次還原程度，對於C原子的一次還原比率其實增加不多，減C潛力並不大。綜此觀之，COREX及FINEX製程未來耗C率降低的潛力並不樂觀。

目前高爐燃料耗用率約為粉煤 150 kg / THM，焦炭 350 kg / THM，約略是由 461 公斤的煤煉製出 350 公斤的焦炭，高爐燃料率約為 500 kg / THM，耗煤率約為 461 + 150 = 611 kg / THM。

印度 JINDAL 鋼廠 COREX C-2000 的平均燃料率約為 1,050 kg / THM，因仍須用焦炭約 210 kg / THM，實際耗煤率約在 1,116 kg/THM。COREX 的燃料率及耗煤率都遠高於高爐，而 FINEX 製程仍須使用焦炭 100 kg / THM，目前燃料率約在 700 ~ 750 kg / THM 之間，實際耗煤率約在 732 ~ 782 kg / THM。

COREX 及 FINEX 製程雖然是新煉鐵法，但整體一、二次反應用在還原的比率仍偏低，因此耗碳率難以降低，其潛力是各新煉鐵法中最不樂觀的。而且它們的直接還原比率約只有 10%，遠低於高爐的

33%，嚴格說來不能稱為新的熔融還原煉鐵法。

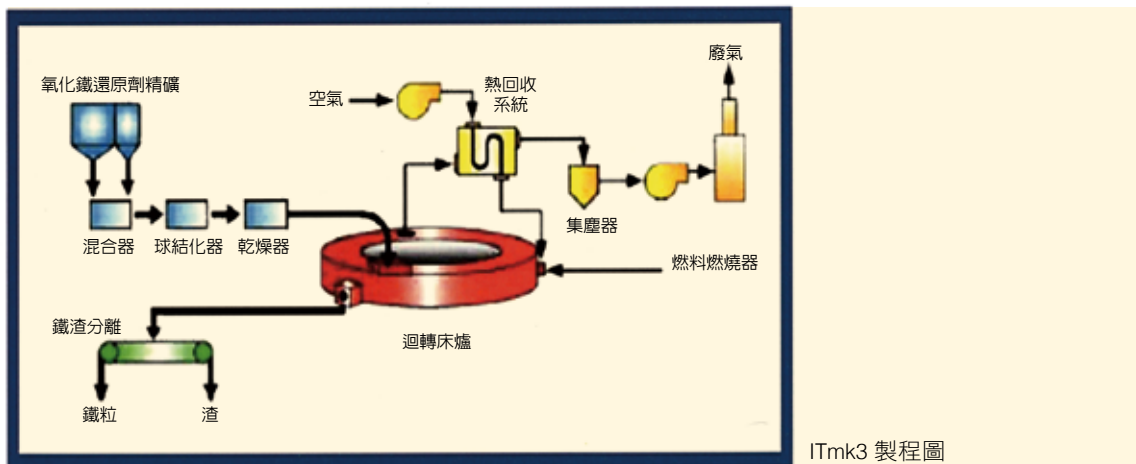
### ITmk3 製程值得注意

另有一類是經過軟化熔融，但產品並不是液態鐵水和渣，而是凝固狀的鐵粒 (Iron nugget) 及渣粒 (slag)，它就是 ITmk3 製程。

ITmk3 製程產品屬中碳 (含 C 量 1.5 ~ 3%) 準熔化 (或半熔) 狀態，有別於高爐 (含 C 量 4.5 ~ 5%) 的高碳鐵水和直接還原製程 (含 C 量 ≤ 1.1%) 的低碳固態海綿鐵。以 ITmk3 製程年產 50 萬公噸 Mesabi Nugget 的商業化廠已在 2010 年 1 月在美國明尼蘇達州 Hoyt Lake 投產，這是由日本神戶製鋼和美國 Steel Dynamics 合建的。ITmk3 的成功將解脫 DRI 對原料品位的苛求，能以普通的高爐用鐵礦為電爐提供優質鐵料，因此意義重大，其自稱為「第三代煉鐵法」是有道理的。

ITmk3 的耗碳率為何，目前尚不清楚。但由其一次還原中多是由再生的 CO 所進行的，而熔融還原的比率其實並不高來研判，其耗碳率應不會太低。

將來能夠取得優勢的新煉鐵法，必然是那些能夠採取免焦炭，免燒結礦，能使一、二次反應予以還原最大化，且低污染，低成本的製程。



### 理想化低耗 C 率

高爐的特性就是無法忍受熔融還原反應量稍作增加，因為會造成爐芯污染，爐況惡化，這是高爐在基本冶金還原原理上很顯然的劣勢。且高爐在設計上主要就是由鼓風嘴鼓入熱風去燃燒焦炭與粉煤，如此輕易地放棄了 C 原子第一次還原鐵礦石的機會，也因此無法使一次反應還原最大化。

試想如果能設計出，以後段熔融還原產生的 CO 進行  $Fe_2O_3$  至  $FeO$  的間接還原，並以二次燃燒及 / 或一次燃燒補充熱量，甚至以微波或電能等把  $FeO$  提升至液態以上的溫度，耗碳率將可大幅降低。 $FeO$  的熔點是攝氏 1,377 度，和含 C 煤粒或煤粉進行熔融還原的強吸熱反應，產出的鐵水及渣尚需保有理想足夠的溫度，以進行鐵渣分離並送轉爐吹煉成鋼液。然而因反應溫度須先拉高再回到理想溫度，對耐火材料的各項性質是很大的挑戰，這是本類製程的技術瓶頸。

將來能夠取得優勢的新煉鐵法，必然是那些能夠採取免焦炭，免燒結礦，能使一、二次反應予以還原最大化，且低污染，

低成本的製程。如能設計出符合還原原理的流程並克服耐火材瓶頸，新熔融還原煉鐵法會很有展望。

傳統高爐由於強化高噴煤技術，搭配高富氧，以及原有的改進如高頂壓能回收發電、高風溫、水淬爐石、熱風爐廢熱回收，使得傳統高爐可大幅降低焦炭用量，不僅產能高，環保、能源、成本等也都獲得顯著改善，使高爐製程更趨完善。

依據 IISI 統計報告，1988 年全球生產粗鋼約 7 億 8,012 萬公噸，由高爐轉爐系統生產的粗鋼約 4 億 2,986 萬公噸，占 55%。至 2011 年，全球粗鋼產量約 15 億 1,410 萬公噸，高爐轉爐生產的粗鋼約 10 億 5,230 萬公噸，市場占有率竟高達 7 成，顯然高爐轉爐系統仍是目前鋼鐵生產的主流。隨著新煉鐵法的不斷研究，高爐卻仍然展現出愈來愈強的局面，可能不是新煉鐵法短、中期內所能夠取代的。

陳秉詮  
中國鋼鐵公司