

鋼鐵產業淨零路徑與創新技術之挑戰

王琳麒¹、林詩彧²、蔡俊鴻³

¹ 國立高雄科技大學海洋環境工程系教授

² 國立成功大學環境工程學系兼氣候變遷暨環境品質研究中心研究助理

³ 國立成功大學環境工程學系教授兼氣候變遷暨環境品質研究中心主任

摘要

因應淨零碳排潮流，全球相關產業皆積極投入減碳技術研發與應用，國內鋼鐵產業亦積極投入並獲得具體成果。國內外鋼鐵廠採用最佳可行技術(Best Available Techniques, BAT)節能減碳案例甚多，從製程能源效率改善、減少能源損失、提高能源投入附加價值，並嘗試研發製程末端碳捕捉利用技術。國內鋼鐵產業領頭企業長期投入提昇廢熱回收、能源系統和設備高效率化，以達到節能減碳效果，並透過以大帶小機制引領關聯廠商共同投入減碳列車擴大減碳績效，皆展現具體成果。面對更嚴峻減碳目標，鋼鐵產業必須強化製程更新、設備替換，以達到大幅減碳目標，更需導入前瞻技術才能達成碳中和願景，如：氫能冶金、直接還原鐵、大規模碳捕捉技術、技術提昇、清潔能源等。此外，電弧爐被許多國外鋼鐵廠列為中長期減碳目標之關鍵技術，並預估電弧爐產能比例會逐漸提高，唯電弧爐煉鋼產業於達成減碳目標也面對甚多挑戰，如：綠電取得不易且無法穩定供應、廢鋼料源供應與競爭、減碳技術商業化與碳費徵收潛在影響成本等因素；因此，鋼鐵產業正處於既有技術更新與新興技術（負碳技術、氫能冶金、直接還原鐵等）尚未能大規模商業化關鍵階段；為符合國際潮流與規範，加速研發並加速導入前瞻技術商業化，應為國內鋼鐵產業達成碳中和願景之關鍵任務。

一、前言

鋼鐵產業是全球工業發展基石，與水泥並列最關鍵工程材料，廣泛用於建築、車輛和機械設備等領域，涵蓋民眾生活各面向。臺灣自民國六〇年代發軔高度經濟成長歷程，鋼鐵產業貢獻不可抹滅，唯於全球面臨氣候變遷威脅而風起雲湧推動淨零碳排潮流，鋼鐵產業亦需充分體

認此項責任並掌握契機，持續承擔引領產業配合達成國家永續發展之目標。鋼鐵製造過程主要碳排放源為煉鐵製程，包括：原料前期燒結製程、煉焦製程和高爐煉鐵。此階段能源消耗高，約占整體製程 70%以上；冶金用煤和衍生溫室氣體排放量約占整體排放 85%；電弧爐煉鋼製程用電量則約占整個製程碳排放量 70%(呂錫民, 2017)。傳統鋼鐵製程必然會產生溫室氣體排放，因此鋼鐵產業乃積極推動減碳策略，採取製程改善、能資源循環、引用清潔能源等策略；為達成淨零排放願景，國內外鋼鐵廠也透過研究新製程技術，導入新能源、碳捕捉與再利用、原料替代等策略，冀期達到 2050 年淨零碳排願景。

二、鋼鐵產業碳排放來源

鋼鐵製程分為兩大類：一貫煉鋼廠和電弧爐煉鋼。一貫煉鋼廠利用高爐煉鐵和轉爐煉鋼，並以冶金用煤及焦炭作為能源，前處理階段包括煉焦製程及燒結製程。電弧爐煉鋼則以廢鐵為原料，並以電力為能源，產製各類鋼化產品以滿足社會需求。

鋼鐵產業溫室氣體排放量可分為直接排放（包含燃料排放和製程排放）和間接排放。鋼鐵製程排放溫室氣體主要為二氧化碳，排放主要來源為原料和燃料燃燒，從燒結製程到最終鋼鐵產品製造過程使用烘箱、鍋爐、熔爐等皆為 CO₂ 排放源。典型一貫式煉鋼廠每噸軋鋼排放 1.8 噸 CO₂，其中 1.7 噸 CO₂ 係由煤炭使用所致，其餘 0.1 噸為使用石灰所產生(Kim, Jinsoo, et al., 2022)。一貫式煉鋼廠直接排放 CO₂ 約占整體排放量 94%（燃料排放占 4%，製程排放占 90%），間接排放占 6%。電弧爐煉鋼排放 CO₂ 直接排放約占 32%（燃料排放占 15%，製程排放占 17%），間接排放占 68%（環境部，2021）。圖 1 為一貫式煉鋼製程各階段碳排放特徵。

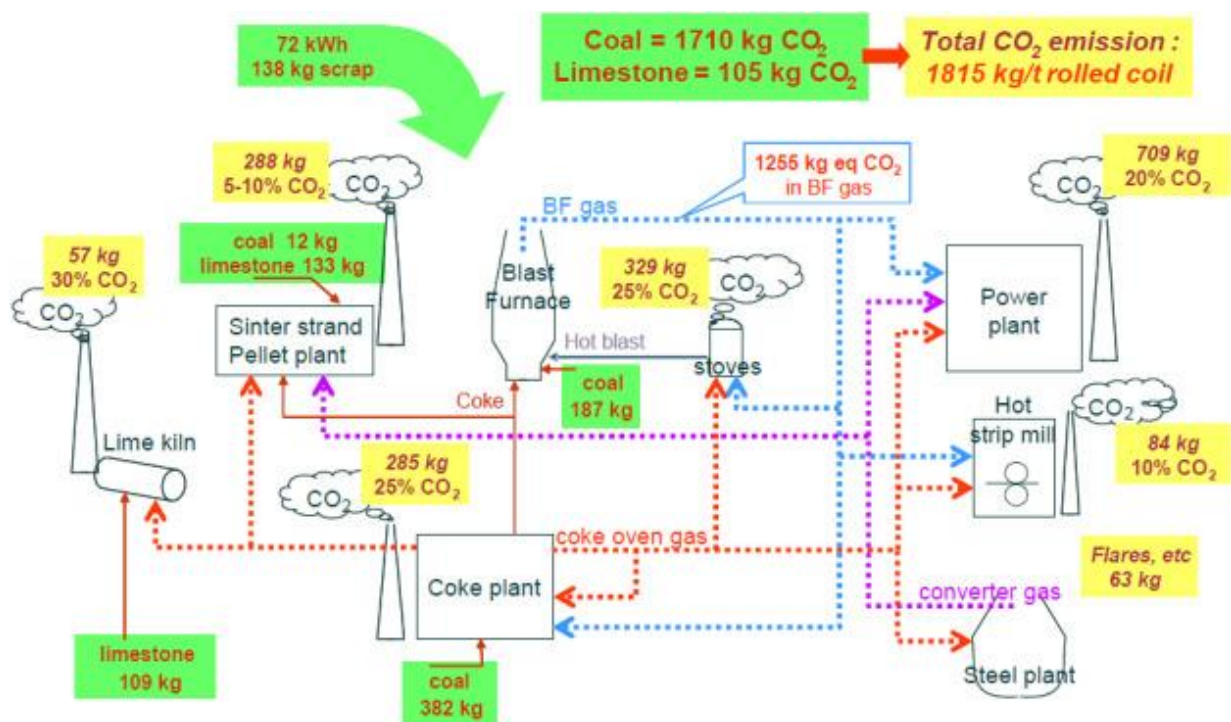


圖 1、一貫式煉鋼廠製程碳排放量(Kim, J et al., 2022)

三、鋼鐵產業減碳經驗與技術

由於鋼鐵製程在能源使用和溫室氣體排放來源類型有所不同，因此需採取不同減碳策略，才能發揮最佳效益。

(一) 一貫式煉鋼廠減碳技術：

製程改善，例如：引入智慧高爐、發展高爐噴吹氫氣、氫能冶金技術，或添加熱鐵磚、轉爐以廢鋼取代鐵水等方式減少碳排放。部分技術仍在評估階段。

(二) 電弧爐煉鋼廠減碳技術：

電弧爐煉鋼減碳重點在於能源使用管理及提升效率，因此，提升設備能源使用效率和使用高效能電爐為實現減碳目標主要方式。

鋼鐵業透過節能省水、製程改善、效率提升等方式，可以達成短期的減碳目標。此外，透過循環使用減碳鋼鐵材料，有效利用煉鋼過程產出副產品或衍生資源，可以符合循環經濟和減碳共同效益。製程節能改善和設備的維護管理也為例行工作一部分，以確保持續改進空間。然而，未來的重點為應用氫能（綠氫）煉鋼、碳捕捉儲存、綠能使用等關鍵技術。

中國鋼鐵公司為國內鋼鐵產業龍頭，甚早即啟動節能減碳對策，並獲得具體成果。成立「中

鋼節能減碳及碳中和推動小組」，持續推動減碳行動方案。近五年通過實施 800 多個減碳方案，成功減少超過 100 萬公噸 CO₂e 排放；此外，配合政府政策採取「以大帶小」策略，對集團關聯業者進行相關教育訓練，舉辦座談會分享減碳經驗，以共同創造低碳產業之價值，帶動鋼鐵及其他產業共同邁向永續轉型。此外，透過碳管理輔導團對下游客戶進行一對一碳盤查作業輔導，並提供節能診斷服務，碳管理輔導團 2023 年總計輔導 22 家下游客戶，節電潛力約達 868 萬度/年，換算減碳量約 4,443 度/年。多項計畫皆顯示中國鋼鐵公司在推動節能減碳與邁向碳中和願景之積極態度和行動。此外，中國鋼鐵公司設定 2050 年碳中和目標，短期採取「增加再生能源使用」、「加大力度提升能源效率」策略，並強化 2030 中期目標至減碳 25%，為達成中長期減碳目標則採逐步部署電力化、燃料替換、碳捕捉再利用以及氫能冶金技術以邁向 2050 淨零目標。整體減碳路徑圖如圖 2 所示。

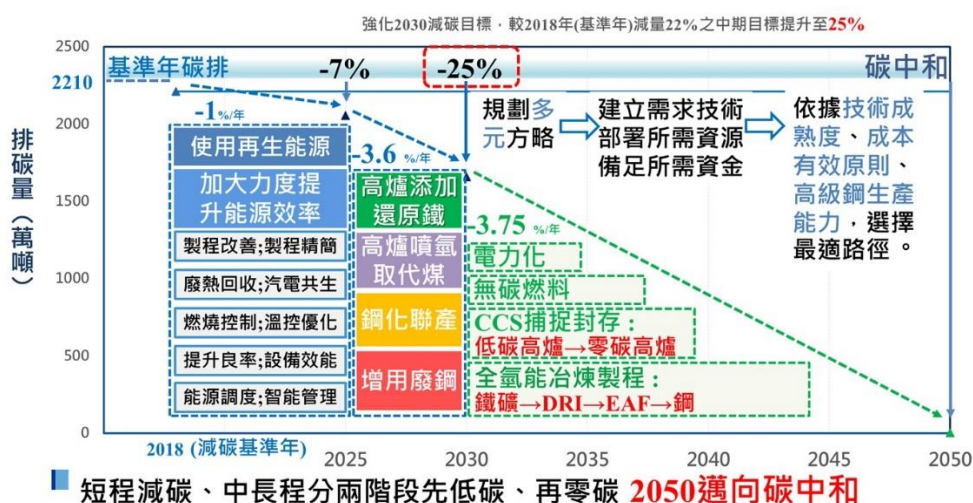


圖 2、中國鋼鐵公司減碳路徑圖(中鋼公司，2022)

四、鋼鐵產業減碳途徑與技術限制

掌握分析國內外鋼鐵廠製程減碳技術可區分為現行技術與開發中技術兩大範疇，以下收集幾家國外鋼鐵廠之技術改善案例，甚值參考，相關技術特徵解析如下：

(一) 提昇改善現行技術

1. 製程改善

韓國 POSCO 通過最佳化製程減少煉鐵與產鐵之時間差，將製程中多餘熱源回用於製程加熱；使用智能化高爐設施，增加廢鋼利用率，並利用再生能源和氫能供應煉鋼廠所需能源

(POSCO, 2020)。

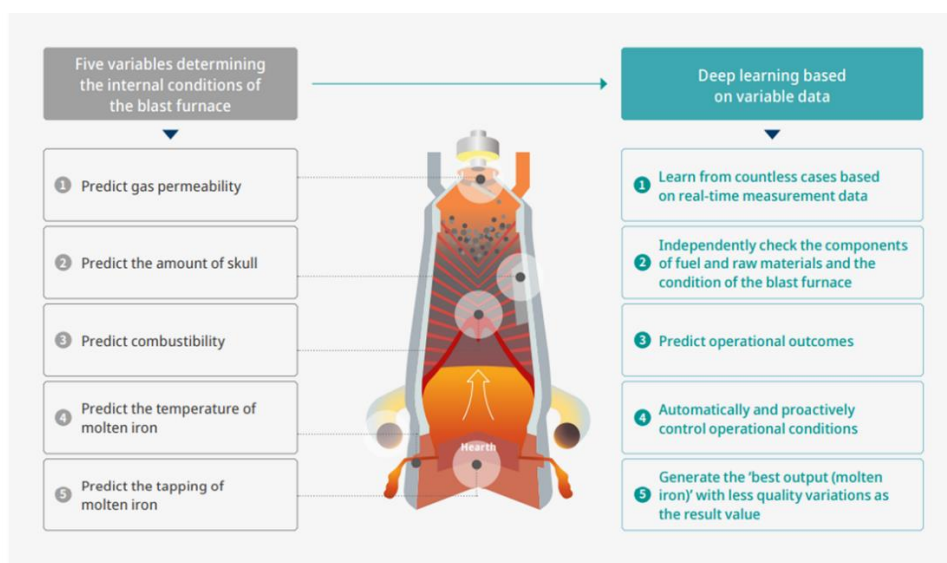


圖 3、POSCO 智能化高爐技術示意圖(POSCO, 2020)

中國大陸寶武鋼鐵建立低碳最佳可行控制技術(BACT)流程，並回收製程餘熱餘能，達到能源效率最大化。透過近終形製造，降低反覆加熱及成形的能耗，使生產過程更簡易，同時降低排放和能耗(寶山鋼鐵，2022)。

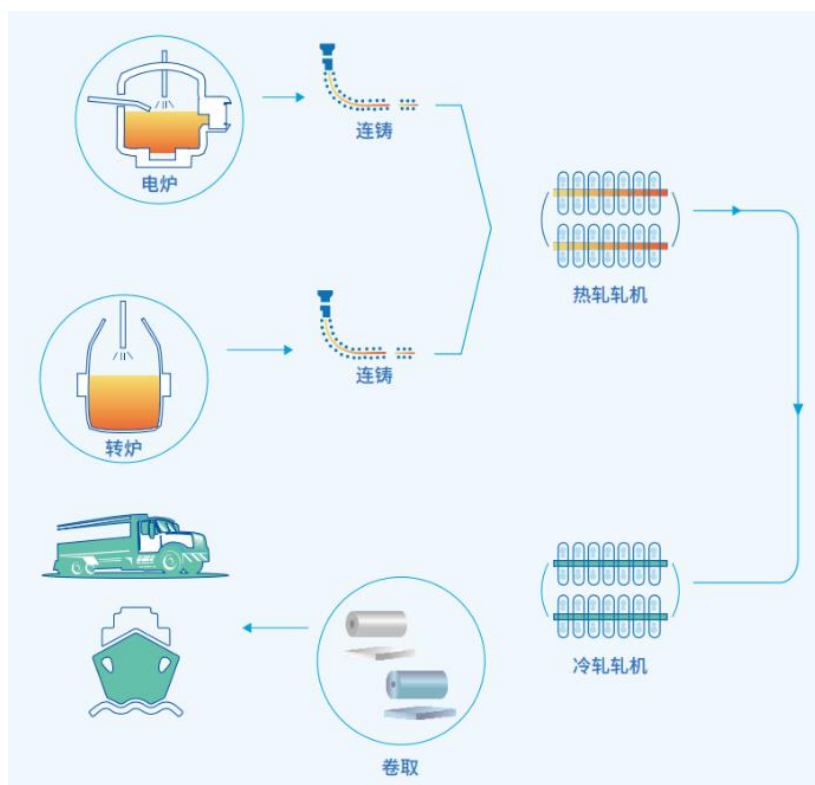


圖 4、中國寶武鋼鐵近終形製造示意圖(寶山鋼鐵，2022)

印度 TATA Steel 在生產鏈使用 250 多個人工智慧模型，協助洞悉各階段製程，有效並即時制定決策。提高原材料（鐵礦石和冶金煤）品質，藉減少冶金焦炭的灰分和鐵礦石中氧化鋁含量，減少高爐的排放。透過 HISARNA 技術，減少 20% 碳排和能源消耗，並減少空氣污染物排放。

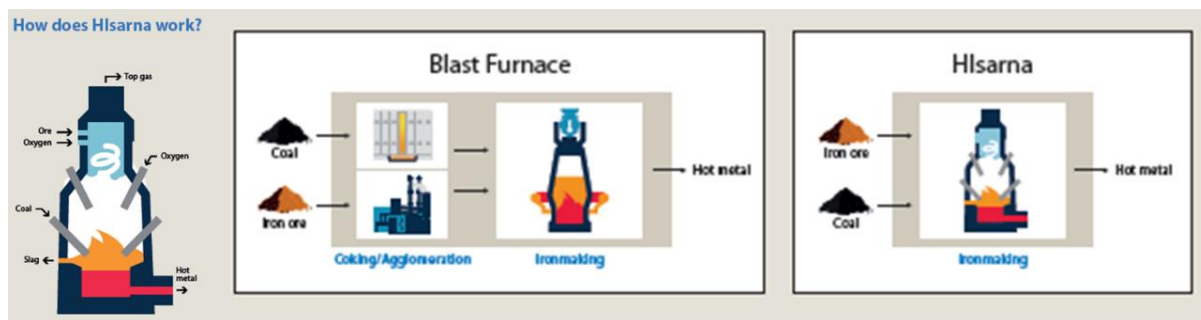


圖 5、HISARNA 技術示意圖及與傳統高爐技術差異(Tata Steel, 2020)

2. 能資源循環

日本 Nippon Steel 持續開發 COURSE 50 技術，使高爐利用鋼鐵製程中產生的富氫氣體替代部分焦炭使用；預計於 2050 年完整實施 Super COURSE 50 技術，透過額外氫氣供給，最大限度以氫進行還原，並搭配 CCUS 技術以達碳中和(Nippon Steel Corporation, 2021)。

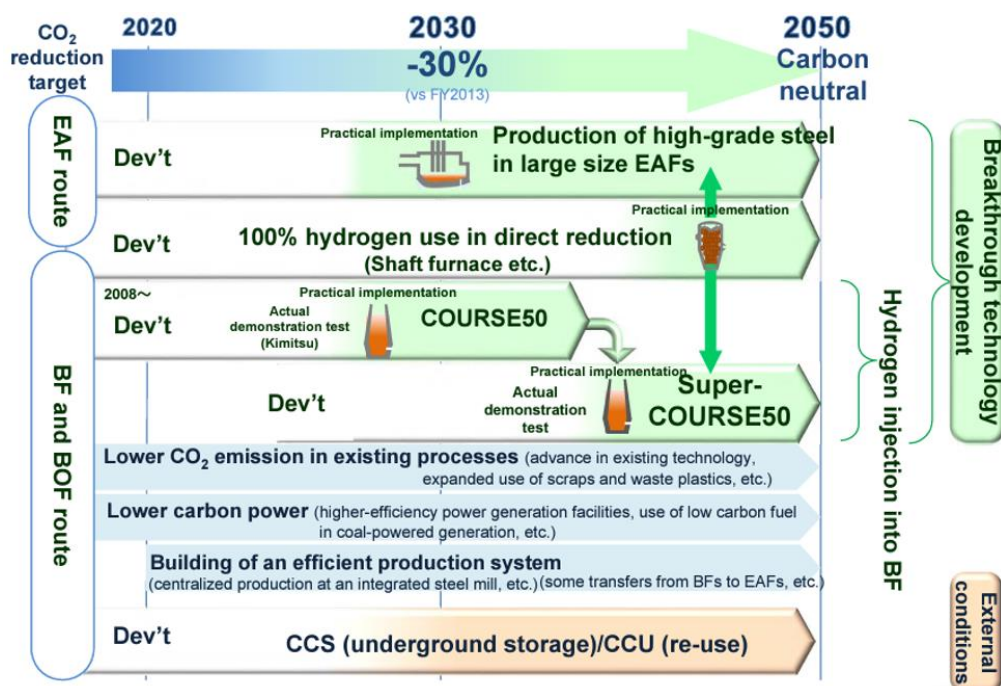


圖 6、Nippon steel COURSE 50 技術規劃路徑圖(Nippon Steel Corporation, 2021)

韓國 POSCO 回收製程可再利用副產物，例如從焦煤、天然氣等氣體燃燒後回收可用氫氣。

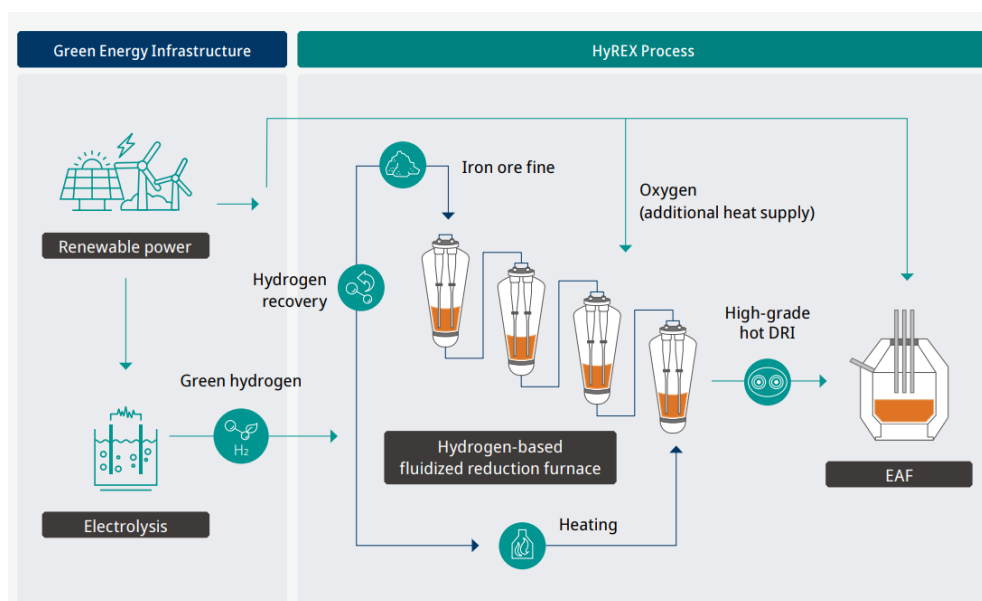


圖 7、POSCO Hyper BF-BOF 技術(POSCO, 2020)

中國大陸寶武鋼鐵於 2023 年 9 月召開碳中和推進委員會議，推動系統創新整合能力，加快推進 HyCROF 富氫碳循環氧氣高爐和氫基豎爐技術路徑。充分回收鋼鐵製程中含碳固廢材料，並將有機生物質製備為生物質碳以取代煤炭，再回到高爐運用以達資源循環，有效降低高爐製程對化石燃料的依賴。

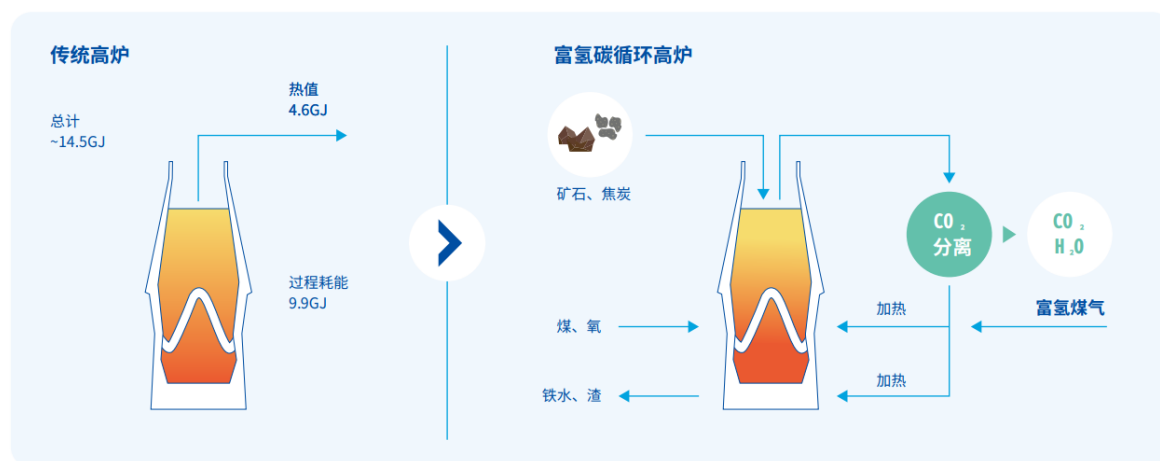


圖 8、中國寶武鋼鐵富氫碳循環高爐示意圖(寶山鋼鐵，2022)

印度 TATA Steel 透過提高煉鋼過程廢料利用率，並使用最佳可行技術改進現有流程，最大限度回收製程產生熱能、副產物及除濕高爐的熱風。為加強廢料回收，TATA Steel 建造一座鋼鐵回收工廠，配備粉碎機和機械化物料搬運設備等設備，不僅減少金屬廢料產生，發現回收廢

料碳排放更低；加工後廢料可供應電弧爐(EAF)、感應爐(IF)和鑄造廠等用途(TATA steel, 2022)。

3. 碳中和鋼鐵產品

日本 Nippon Steel 在 2023 年推出了 NSCarbolex™ Neutral 產品，一種碳中和鋼鐵產品。透過煉鋼過程減少碳排放，利用質量平衡的方法來計算減碳量。並將在 Hirohata 地區建造一座新型高爐，以及推出多項碳中和計劃，進一步擴大 NSCarbolex™ Neutral 產品的供應規模。

韓國 POSCO 鋼廠提出碳中和鋼品牌「Greenate」，為韓國首個低碳品牌產品，針對低碳製程所生產鋼材進行認證，以質量平衡計算選用該低碳鋼材可獲得減碳效益，使之與其它廠家比較具有競爭力。此項碳中和鋼品也可做為氫氣儲存和運輸產品，不只能安全運輸氫氣，也確保價格競爭力和材料在地化。

(二) 發展新技術

1. 氫能冶金新技術發展：

日本 Nippon Steel 透過政府 COURSE 50 計畫，規劃使用氫能替代還原鐵礦石所需焦煤，以減少碳排放。Nippon Steel 和 JFE Steel 已在茨城縣和千葉縣分別建造小型氫能直接還原製鐵高爐。Nippon Steel 預計將在 2025 年開始運轉，JFE Steel 則預計在 2024 年開始運轉。COURSE 50 高爐可以減少 10%碳排放量。在氫氣供應穩定前提下，Super COURSE 50 可以逐漸增加氫氣使用比例，獲得更高減碳效益(Nippon steel, 2020)。

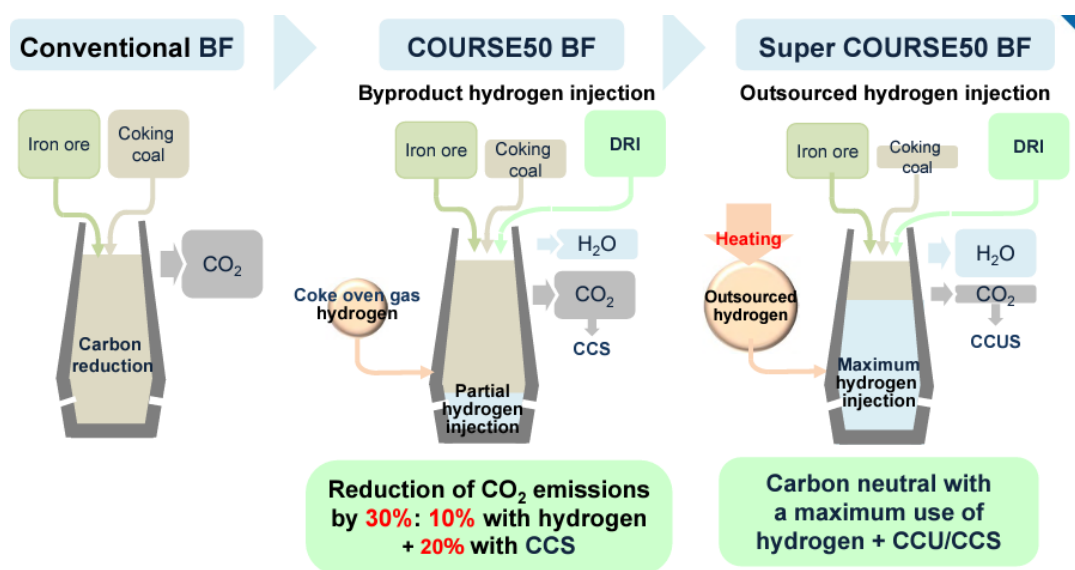


圖 9、Nippon steel 氫氣高爐還原技術(Green invention in steelmaking, 2020)

韓國 POSCO 正在進行氫還原煉鐵開發規劃，並利用其專有之 HyREX 技術改進現有高爐。

POSCO 公司已與英國 Primetals 公司簽署協議，共同設計和測試 HyREX 設施，並預計在 2026 年實施、2030 年實現商業化。此外，POSCO 在氫還原鋼計劃採用電爐來減少碳排放，並計劃在資源豐富的澳洲，利用鐵礦石和再生能源生產綠氫，作為生產低碳鋼原料之還原劑。

中國大陸寶武鋼鐵規劃採用氫基豎爐技術，在加熱過程使用氫氣、焦爐煤氣和天然氣作為還原氣體，三種氣體比例可調整，並利用太陽能和風能等綠色能源來進行水的電解，生產綠色氫氣，以實現工廠內全流程零碳排放目標。

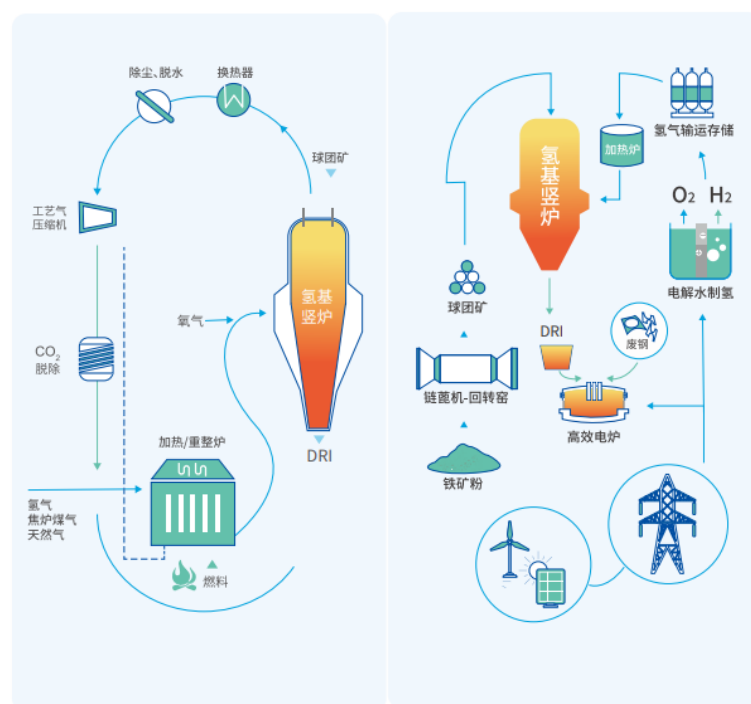


圖 10、中國寶武鋼鐵氫基冶金及全流程零碳規劃（寶山鋼鐵，2022）

印度 TATA Steel 公司預計在 2030 年完成於荷蘭分公司之直接還原爐測試。

2. 碳捕捉再利用與封存(Carbon Capture Utilization Storage, CCUS)技術發展

日本 Nippon Steel 計劃在 2030 年前確立基礎技術並降低 CCUS 技術成本。預計 2050 年將實現大型設施商業化應用，並將碳再利用擴展至高需求量產品。目前，Nippon Steel 已將碳捕捉技術商業化，稱為 ESCAPTM。該公司與 DeepC Store 簽署協議，計劃通過船舶運輸將碳封存於深海以確保安全。此外，Nippon Steel 也開發 CO2 相關化工產品，包括利用合成氫氣和二氧化碳於製造工業用途。

中國寶武鋼鐵公司計劃使用碳捕捉技術，捕捉冶金煤氣並分離二氧化碳，經過化學合成將其轉化為醇類等下游產品作為石化、化學和食品等行業的原料。

印度 TATA Steel 在 Jamshedpur 工廠啟用碳捕捉技術，從高爐煤氣中提取二氧化碳，並使用碳捕捉和利用 (CCU) 設施將捕捉的碳現場再利用。為實現 2030 年中期目標，該公司計劃擴大碳捕捉和再利用 (CCU) 的試點，並在 2050 年將碳捕捉設備與現有製程相結合。

3. 氫能技術發展

POSCO 公司制定與氫能相關計劃，例如：阿曼綠氫計劃，該公司在阿曼獲得相當於首爾一半土地面積，計劃透過進口在阿曼生產的氫氣，在 2030 年後每年生產 22 萬噸綠氫用於氫還原煉鋼、發電和其他工業用途。此外，POSCO 計劃在 2035 年建造環保氫複合接收站，產能達 126 萬噸，主要位於仁川、光陽和浦項等地。同時，POSCO 將建設商業氫混合發電廠，以取代仁川的液化天然氣發電廠(POSCO, 2023)。

TATA Steel 設定於 2030 年由冶金煤轉為天然氣等更清潔燃料(TATA Steel, 2022)。

4. 電弧爐技術發展

Nippon Steel 目前已開始實驗並測試大型電弧爐生產，以替代傳統高爐及小型電弧爐。新型電弧爐使用廢鋼及較低階鋼材作為原料，並採用零碳電力；與傳統高爐相比，電弧爐碳排放量可大幅降低。然而，目前該技術仍需克服廢鋼氮含量導致成品品質差異及空氣污染物排放問題。

TATA Steel 中期目標為 2030 年使用電弧爐增加產能，並收集和加工廢料轉化為鋼材。

解析國外鋼鐵廠減碳策略，實現鋼鐵業碳中和需要綠氫、綠電等可再生資源支持，並需考量 CCUS（碳捕捉、利用與封存）技術應用。然而，目前技術製造綠氫需消耗大量能源，台灣缺乏穩定綠電供應，致使鋼鐵產業在可預期未來較難透過替代低碳能源實現減碳。根據 ArcelorMittal 鋼鐵廠的資料，目前氫氣成本約為每公斤 3.5 至 5 美元。若使用綠氫發展直接還原鐵 (DRI) 技術，鋼鐵生產成本每噸將增加 150 至 250 美元。即使未來再生能源發展可能使綠氫成本於 2030 年降至 1.5 美元/公斤，仍然需要政府支持才能實現。此外，Thyssenkrupp 公司指出，雖然目前鋼鐵廠正努力利用製程產生氣體作為化學品生產原料，但要將其開發成大規模的產業解決方案，可能還需市場誘因以及約 15 年研發時間，皆非短期可導入減碳策略應用之技術。

五、結論

在推動減碳行動過程，鋼鐵產業已經透過改善製程、節能以及採用最佳可用技術（BAT）來降低碳排放。未來鋼鐵業大幅減碳則有賴突破性技術之導入應用，目前已商業化減碳技術應用於既有製程中，唯其減量有限，短期內難以符合外界對鋼鐵業大幅減碳之期待。然而，現階段開發先進技術尚未達到大規模實際應用之水準，政府資金和資源支持對於促進有利於產業減碳研究計畫至關重要，同時也能降低轉型過程風險，並減少國內鋼鐵廠面對國際競爭力之挑戰。

鋼鐵產業面對國際市場競爭之挑戰仍然不容忽視，面對嚴峻減碳任務與產業永續發展目標，產業龍頭應扮演領頭羊角色，通過產官學合作策略擴展至整個產業鏈。持續投入充足人力和資源，加強自主減碳技術能力，以達到 2030 年階段性技術目標，並根據技術進展檢視達成 2050 目標之挑戰。

六、參考文獻

1. 中國鋼鐵公司(2022)，永續報告書
2. 彰化縣政府經濟暨綠能發展處(2023)，我國製造部門淨零減碳作法：鋼鐵業、石化業、電子業。
https://greenenergy.chcg.gov.tw/03bulletin/bulletin03_con.aspx?bull_id=385053
3. 呂錫民(2017)，鋼鐵冶煉技術發展綜論
4. 環境部(2021)，溫室氣體排放清冊報告
5. Kim, J., Sovacool, B. K., Bazilian, M., Griffiths, S., Lee, J., Yang, M., & Lee, J. (2022). Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*, 89, 102565.
6. Nippon Steel Corporation (2021)，Nippon Steel Carbon Neutral Vision 2050
7. Nippon Steel Corporation Research Development(2019), Trends of CCU Technology in Japan and Activities of Nippon Steel Corporation
<https://www.asiaecc-col.eccj.or.jp/wpdata/wp-content/uploads/sng-symp2019-Nippon-Steel.pdf>
8. Nippon Steel, Promotion of innovative technology development
<https://www.nipponsteel.com/en/csr/env/warming/future.html>
9. Green invention in steelmaking, Technology to reduce CO₂ emissions from blast furnaces.<https://www.greins.jp/en/technology/technology03/>
10. Perspektive klimaneutrale Stahlindustrie (2021).
<https://www.stahl-online.de/dossiers/perspektive-klimaneutrale-stahlindustrie/>
11. POSCO(2020), Dialogue for climate action
12. POSCO(2018), Sustainability Report
13. POSCO(2022), E&C Sustainable Report
14. POSCO(2022), Future m sustainability report
15. POSCO(2020), The finex process economical and environmentally safe ironmaking
16. 寶山鋼鐵(股)有限公司(2022)，氣候行動報告

17. 寶山鋼鐵(股)有限公司(2021)，可持續發展報告
18. 中國寶鋼可持續發展管理，<https://www.baosteel.com/develop/Operating>
19. Tata Steel Nederland (2022), Sustainability report
20. Tata Steel: Hisarna: game changer in the steel industry.
<https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-europe-factsheet-hisarna.pdf>
21. TATA steel (2022), Together towards a zero carbon emissions, circular world
22. TATA steel Nederland, DRI-technologie.
<https://www.tatasteelnederland.com/groen-staal-en-duurzaamheid/co2-neutraal-staal/DRI-technologie>
23. TATA steel (2022), Sustainability report
24. Thyssenkrupp, Climate Strategy and Targets
<https://www.thyssenkrupp.com/en/company/sustainability/environment/climate-strategy-and-targets>
25. ArcelorMittal(2021), Climate action report
26. ArcelorMittal(2020), sets 2050 group carbon emissions target of net zero.
<https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-sets-2050-group-carbon-emissions-target-of-net-zero>
27. ArcelorMittal, Technology pathways to net zero steel.
<https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/technology-pathways-to-net-zero-steel>