



國際鋼廠減碳發展趨勢

- | | |
|--|---|
| 1.瑞典 GreenIron 零碳氫還原工廠即將運營 | 1 |
| 2.SSAB 脫碳計劃獲得瑞典國家援助 | 1 |
| 3.蒂森克虜伯 Nucera 綠氫生產專案獲得歐盟補助 | 1 |
| 4.安賽樂米塔爾正在構思新型減碳高爐 | 2 |
| 5.JFE 及日鐵向政府申請電爐置換高爐計畫資金 | 2 |
| 6.土耳其 Erdemir 鋼鐵公司熱分解工廠試運 | 3 |
| 7.JSW Steel 試行印度鋼鐵業最大的高爐 CCUS 計畫 | 4 |
| 8.中國寶武首發低碳品牌 BeyondECO | 4 |
| 9.首鋼朗澤含 CO ₂ 工業尾氣生物合成無水乙醇專案開工 | 6 |
| 10.中國發佈「低碳排放鋼評價方法」標準 | 6 |
| 11.2024 年全球低碳冶金創新論壇展望低碳趨勢 | 7 |
| 12.鋼鐵業的溫室氣體監管鏈方法 | 8 |

技術/生產資訊

1.安賽樂米塔爾布萊梅安裝製氫用電解裝置	9
2.德國鋼廠大型脫碳案採 Midrex 和 Primetals	9
3.日本 AIST 開發製氫同時直接再生甲酸之技術	10
4.JFE 推動多項廢棄物及 CO ₂ 資源化技術開發	11
5.現代製鐵與普銳特合作研究高爐噴吹技術	14
6.寶武富氫碳循環氧氣高爐 HyCROF 開發與實踐	15
7.低碳煉鐵技術統整	16
8.高爐低碳煉鐵的技術路徑及發展建議分析	18
9.鋼鐵生產中淨零碳排的回收技術	20

技術專欄

※高爐富氫操作技術發展現況調查	21
-----------------	----

1. 瑞典 GreenIron 零碳氫還原工廠即將運營

瑞典 GreenIron H₂ AB 公司在桑德維肯的綠色金屬生產工廠即將投入營運，該工廠採用專利的零排放技術，以綠色氫氣作為還原劑，綠色氫氣將由挪威氫能公司供應。

GreenIron H₂ AB 是一家瑞典私營有限公司，擁有一項已獲專利且經過驗證的節能技術，可將金屬氧化物還原為純金屬，適用於從礦石、殘渣和廢料中提取金屬；該技術以氫為基礎，因此唯一的副產品是水。

挪威氫能公司總部位於挪威奧勒松，是一家業務遍及北歐地區的氫能公司，該公司專注於綠色氫能的生產和分銷，主要滿足未來各行各業和工業領域對零排放燃料的需求。

(摘自：[鐵諾 2024-11-15](#))

2. SSAB 脫碳計劃獲得瑞典國家援助

歐盟委員會已批准 1.28 億歐元 (約新台幣 44.31 億元) 對於瑞典的援助，用於支持 SSAB 的脫碳策略，以降低對俄羅斯化石燃料的依賴。

SSAB 計畫於呂勒奧工廠新建一座電爐，本次資金援助將使該計畫提前三年完工，並於 2029 年開始生產綠色鋼鐵。

(摘自：[SteelOrbis 2024-10-23](#))

3. 蒂森克虜伯 Nucera 綠氫生產專案獲得歐盟補助

歐盟向蒂森克虜伯核能公司 (Thyssenkrupp Nucera) 的固體氧化物電解槽 (SOEC) 專案提供高達 3600 萬歐元 (約新台幣 12.42 億元) 的資金，支援當地建設一座 300MW 的綠氫生產工廠。今年初，該公司也曾為西班牙能源公司 (Cepsa) 的綠氫工廠提供 300MW 電解系統。

蒂森克虜伯 SOEC 專案將採用 Fraunhofer IKTS 的 SOEC 技術，利用高溫電解生產綠氫和合成氣體，在各種工業應用具有優異效率和成本優勢。

(摘自：[REGLOBAL 2024-10-29](#))

4. 安賽樂米塔爾正在構思新型減碳高爐

在 11 月初於德國舉行的 AIST 歐洲鋼鐵論壇中，安賽樂米塔爾歐洲鋼板產品減碳技術長 Kristian Notebaert 表示，該公司正在構思創新高爐，並將其稱為高爐的「復興」(renaissance)，預計採用爐頂煤氣循環、爐氣預熱與噴吹、生物炭噴吹、全氧噴吹等創新技術。

基於生產效率考量，他表示安賽樂米塔爾並不準備放棄高爐。安賽樂米塔爾的部分產品仍需要搭配高爐-轉爐製程來製作，且部分下游設備是針對大量生產而配置的，其中一些鑄造設備需要每小時 450 噸鋼液。

(摘自：[AIST 美國鋼鐵技術協會 2024-11-06](#)、[歐洲鋼鐵論壇 ESF](#))

5. JFE 及日鐵向政府申請電爐置換高爐計畫資金

JFE 與日本製鐵近期向政府透過新的綠色轉型促進法(GX)申請資金，以運用於推動新型電爐投資計畫。JFE 正尋求資金於西日本製鐵所倉敷地區建造新型大型電爐，以替代 2 號 4100m³ 高爐。該座高爐原應於 2028 年進行爐代更新，故 JFE 希望新電爐可於 2027 財年中投運。西日本製鐵所目前運營三座高爐，年產量約 800 萬噸。

日本製鐵也在 10 月表示將就八幡地區高爐轉電爐、廣畑地區增設電爐、日鐵不銹鋼山口製造所電爐重啟三項電爐投資計畫，向政府申請援助。該投資案總額超過 1 千億日幣 (約新台幣 210 億元)，國家最多能補助設備投資金額的三分之一。

日鐵規劃在 2030 年前將其九州製鐵所八幡地區 5000m³ 高爐轉向年產能 150-200 萬噸的大型電爐生產，神戶製鋼也在考慮於 2030 年代將加古川製鐵所兩座高爐改為 1 高 1 電運轉體制。

作為 NEDO 綠色創新基金研究計畫之一，日本製鐵與 JFE 皆正開發高效電爐冶煉、去除雜質等技術，且均建造 10 噸實驗電爐，計劃於 2024 財年開始試驗。神戶製鋼則從 2023 年初起利用改造的 20 噸商用電爐，開發大量且高效投入 HBI 以製造高級鋼種的技術。

日本政府從 2024 財年開始，透過發行 GX 經濟轉型債券，在五年內向四個產業（黑色金屬、化工、造紙和水泥）提供約 4,840 億日元（約新台幣 1012 億元）的預算支援，各公司申請的資金金額未予披露。

（摘自：[SEAI 2024-11-06](#)、[日本經濟新聞 2024-10-11](#)）

6. 土耳其 Erdemir 鋼鐵公司熱分解工廠試運

土耳其鋼鐵 Erdemir 公司，已啟動一座 7000 噸/年的試驗級熱分解設施，以加速淨零排放進展。新設施利用生物質生產燃料，作為煤炭的替代品。生物炭將在無氧環境下透過高溫熱分解生產，來降低碳排放並控制生產成本。

Erdemir 計劃在未來幾年內將生物質燃料技術擴展至工業化規模生產，預計到 2030 年時，碳排放量將比 2022 年減少 25%，到 2040 年減少 40%，並爭取 2050 年達到淨零碳排放。

（摘自：[冶金信息網 2024-11-01](#)）

7. JSW Steel 試行印度鋼鐵業最大的高爐 CCUS 計畫

JSW Steel、Carbon Clean 及 BHP 合作，啟動印度全國鋼鐵業最大規模的碳捕捉、利用與封存 (CCUS) 項目。此計畫將在 JSW 位於 Vijayanagar 的新建高爐中實施，每日處理 300 噸二氧化碳，為印度在實現減碳目標上的重要進展。該技術採用 Carbon Clean 的 CDRMax 工藝，結合高效的碳捕捉溶劑與熱整合設計，及使用 CycloneCC 模組化碳捕捉技術。不僅提升捕捉效率，還顯著降低成本和佔地面積。捕捉的 CO₂ 將用於生產碳酸鹽等高附加值產品，未利用的部分則通過封存技術進行長期儲存。

這次合作主要為工業排放提供靈活且具經濟效益的解決方案，為鋼鐵業及其他高排放行業探索全面的碳減排路徑。這些聯合研究預計將於 2026 年完成，屆時雙方將考慮在 JSW Steel 的 Vijayanagar 工廠安裝，探索 Carbon Clean 的 CycloneCC 模組化技術每年捕獲高達 10 萬噸二氧化碳排放量的可行性。

(摘自：[SEAI 2024-11-05](#)、[CycloneCC 官方 YT 介紹](#))

8. 中國寶武首發低碳品牌 BeyondECO

中國寶武綠色低碳品牌-BeyondECO 在 2024 全球低碳冶金創新論壇暨第九屆寶鋼學術年會上正式對外發佈，首批使用該品牌的低碳排放鋼產品同步推出，自主研發的鋼鐵行業大模型也同步首發。

會中寶武說明 BeyondECO 的品牌內涵，“Beyond” 代表寶武以科技創新為驅動，不斷超越自我、追求極致；字母 “d” 與 “嫩芽” 代表寶武以 “數智” 賦能未來，孵化綠色低碳新技術；“ECO” 代表寶武以 “共建產業生態圈，共創綠色新未來” 為使命，將綠色作為企業的生命底色和戰略基色(如圖一)。

為確保 BeyondECO 品牌的高標準和權威性，寶武將 “產品碳足跡降低比例 ≥30%” 作為鋼鐵產品授權使用 BeyondECO 品牌的最低門檻值。

此次發佈的冷軋汽車板高強度鋼與冷軋高表面品質汽車外板、高牌號極低鐵損方向性矽鋼與高效高牌號非方向性矽鋼、無縫鋼管氣瓶鋼、熱軋建築用鋼、大軸重的重載車輪、高表面品質冷成型用鋼等 6 項低碳排放鋼鐵產品，均經過嚴格認證，在支援交通、能源、建築、電力等行業的轉型發展方面發揮重要作用。(大軸重重載車輪，顧名思義，是指安裝在承載能力較大的車軸上，用於承受極大載重的車輪。這種車輪通常應用於重型卡車、工程機械、礦山運輸車輛等需要承載大量貨物或設備的車輛上。)

本次大會上，寶武自主研發的鋼鐵行業大模型亦同步首發，通過“通專融合”(通用模型和專業模型)、“業技融合”(行業知識和 AI 技術)、“數實融合”(數位技術和實體製造)三融合一，行業創建“平臺、資料、算力、模型、場景”五位元一體能力，全面支援鋼鐵領域各類人工智慧應用場景及模型構建，為鋼鐵企業提供一體化、集成化的“人工智慧+鋼鐵”解決方案。鋼鐵大模型的應用範圍涵蓋研發、生產、運營、服務的多個關鍵環節，包括生產精緻製造、運營精細管理、產銷精準服務、運維智慧服務和綠色低碳節能等多個場景。



圖一、BeyondECO 品牌

(摘自：[鐵諾信息網 2024-10-24](#)、[騰訊網 2024-10-24](#))

9. 首鋼朗澤含 CO₂工業尾氣生物合成無水乙醇專案開工

首鋼集團旗下首鋼朗澤公司在河北省唐山市曹妃甸區 11 月 8 日舉行自主研發的含 CO₂ 工業尾氣生物合成無水乙醇專案開工奠基儀式，該項目是利用鋼廠含 CO₂ 工業尾氣通過生物發酵技術合成無水乙醇的萬噸級示範專案。

專案採用首鋼朗澤自主開發的氣體連續生物發酵技術，以首鋼京唐含有 CO₂ 的焦爐、轉爐煤氣為原料，經氣體預處理、發酵、蒸餾脫水等工藝流程，生產無水乙醇和新型飼料蛋白。項目建成投產後，每年可生產無水乙醇 1.5 萬噸、蛋白飼料 750 噸、生物沼氣 200 萬 Nm³，預計年銷售收入 1.2 億人民幣（約新台幣 5.4 億元）。

該技術每生產 1 噸乙醇可直接消耗 CO₂ 約 0.5 噸，可廣泛應用於鋼鐵、焦化、石油煉化等領域。

（摘自：[首鋼網站 2024-11-11](#)）

10. 中國發佈「低碳排放鋼評價方法」標準

在 2024 綠色發展數智供應鏈大會上，中國鋼鐵工業協會發布「低碳排放鋼評價方法」標準，其基於近 3.5 億噸粗鋼產品的碳排放基礎數據，由寶武帶領，產業鏈 44 家單位共同參與完成。該標準將成為中國鋼鐵業應對國際貿易政策，實現鋼鐵可持續發展及低碳轉型，並滿足社會綠色產品供應需求。

中國鋼廠依能源使用方式分為綠電直供鋼廠、富氫使用鋼廠、核電使用鋼廠，藉由將能源成本與碳成本在鋼鐵生產時分類，讓整體生產 LCA 全生命週期的揭露更完整。產品部分已分類減碳 20%、40% 等標準減碳產品，並制定不同低碳鋼鐵價格，讓鋼鐵業在綠色市場更有競爭力。

（摘自：[冶金信息網 2024-10-22](#)）

11.2024 年全球低碳冶金創新論壇展望低碳趨勢

10 月 23 日，以「低碳鋼鐵，綠色新未來」為主題的 2024 年全球低碳冶金創新論壇暨第九屆寶鋼學術年會在上海舉行。本次大會為期 3 天，共有 12 個技術分會場，包含綠色煉鐵、綠色煉鋼、綠色軋鋼、熱軋產品、汽車產品、冷軋與矽鋼產品、鋼管產品、長材產品、不鏽鋼、特種冶金材料、綠色產業及智慧製造，共進行 150 多場簡報。大會期間並召開全球低碳冶金創新聯盟工作會議，展示低碳冶金技術創新基金計畫成果。

本次大會邀請多位專家，世界鋼協可持續發展部部長安德魯·普維斯認為，世界鋼鐵未來需求將適度增長，2050 年粗鋼產量將達到 22 億噸至 24 億噸，鋼鐵業有責任共同合作承擔社會所期望的減碳排任務。不同的國家、不同的情形，沒有一條現成的脫碳途徑，互相合作才能夠實現各方共贏。

寶武首席科學家李國保介紹寶武綠色低碳產品研發情況，以及應用於交通、建築、能源、電力行業轉型發展的解決方案；

安賽樂米塔爾副總裁暨首席技術官貝納金博士介紹安米集團的智慧碳技術以及前瞻性的二氧化碳資源化利用技術；

JFE 鋼鐵副社長福島裕法介紹日本鋼鐵業界聯合研發(COURSE50)的高爐、直接還原鐵和電爐重大技術創新以及二氧化碳製甲醇技術、爐渣固碳技術。他認為在實現碳中和的過程，技術上存在著多條路徑和眾多難題，當前很難看清楚哪條路徑是最好的；美國科羅拉多礦業學院冶金材料學家約翰斯皮爾教授介紹美國各鋼廠的減碳目標。他認為美國鋼廠在能源、短流程煉鋼以及鋼鐵資源回收利用方面得天獨厚的優勢決定其碳減排方面的領先地位，同時新的低碳鋼鐵產品概念對現代生活非常重要。

(摘自：[中國鋼鐵工業協會 2024-10-24](#))

12. 鋼鐵業的溫室氣體監管鏈方法

近幾年來，對低碳排放鋼產品的需求不斷增加，鋼鐵企業正在尋求向市場提供低碳排放鋼的方式。在此背景下，採用“監管鏈方法”（chain of custody）將溫室氣體減排量分配給特定的產品成為一種有用的工具。關於溫室氣體減排量分配方式的監管鏈方法還沒形成標準化的方法論，各家鋼鐵企業都在制定滿足自身需要的方案。

因此，世界鋼鐵協會公佈一套鋼鐵業溫室氣體原則與管理指南，說明鋼鐵行業在應用監管鏈方法時確保透明度和清晰度，為選擇使用這套方法的公司提供指導。它分為三個階段：計算每種鋼材的碳排放量（CFP）、計算實際減排量，並使用質量平衡方法，以及依質量平衡法頒發溫室氣體減排證書或將證書分配給特定鋼材，其他方法包括新制定的 ISO 14077 標準和聯合國工業發展組織的工業深度脫碳倡議等。

（摘自：[worldsteel 2024-11-12](#)、[日刊產業新聞 2024-11-13](#)）

1. 安賽樂米塔爾布萊梅安裝製氫用電解裝置

安賽樂米塔爾推進 10MW 綠色氫氣專案 HyBit，已於布萊梅安裝荷蘭 Plug Power 公司提供製氫用電解裝置。HyBit 專案將與德國能源公司 EWE AG 及其子公司 Swb AG 共同進行，目標減少煉鋼中的碳排放。

新安裝的電解裝置使用可再生能源將淡水分解為氧氣和氫氣，生產出的綠氫主要用於布萊梅工廠的鋼鐵生產與加工，也可運輸到其他地點，如氫氣加氣站。

(摘自：[SteelOrbis 2024-10-14](#))

2. 德國鋼廠大型脫碳案採 Midrex 和 Primetals

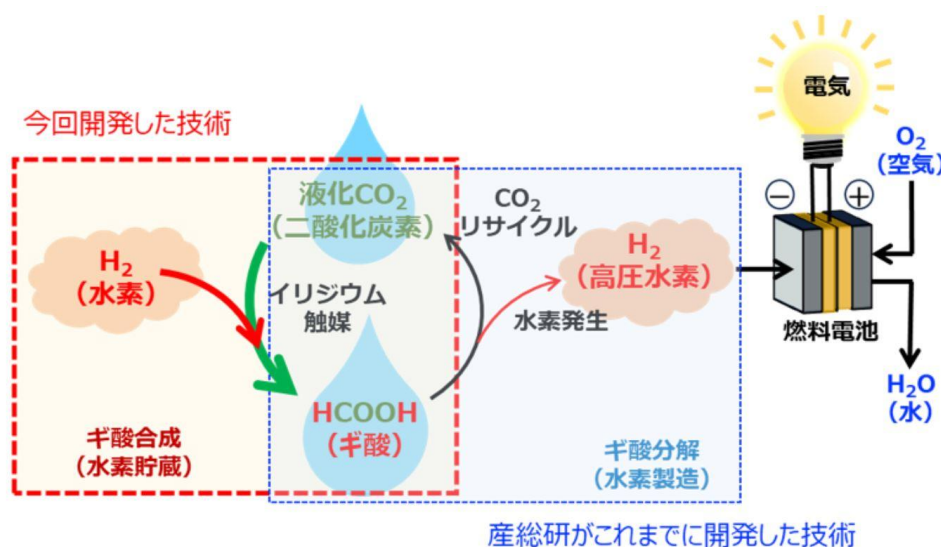
德國鋼鐵公司 Dillinger 和 ROGESA (Rohstahl GmbH) 選擇 Midrex 和 Primetals Technologies 合作，推動取代高爐生產路線的重要減碳項目，計畫包括建置直接還原鐵 (DRI) 工廠和 EAF Ultimate 電爐。Midrex 和 Primetals 的解決方案目標為 Dillinger 在六年內每年減少 480 萬噸二氧化碳排放量。

MIDREX Flex[®] 廠生產熱直接還原鐵 (HDRI) 和冷直接還原鐵 (CDRI)，年產能為 200 萬噸。Midrex 和 Primetals Technologies 負責機械、電氣和自動化設備的工程設計和供應。機械範圍包括物料搬運系統、水處理廠、輔助設備以及訓練和諮詢服務。Primetals Technologies 也將提供完整的基礎 (1 級) 和製程最佳化 (2 級) 系統。製程自動化範圍也包含 DRIPAX 專家系統，確保生產 DRI 品質的一致性。

(摘自：[Midrex 2024-10-11](#))

3. 日本 AIST 開發製氫同時直接再生甲酸之技術

日本產業技術總合研究所 (AIST) 與筑波大學共同開發出以二氧化碳與氫直接高效率合成甲酸之技術，若將此研發成果結合於先前已開發之甲酸製氫發電系統，將可利用系統排出的液化二氧化碳與再生能源製成的氫實現甲酸再生，系統概念如圖二。



圖二、循環利用二氧化碳並將甲酸作為氫載體的發電系統概念圖

甲酸因可做為氫載體而受到關注，既往是由二氧化碳與氫在鹼性條件下形成甲酸酯，經過酸處理後最終得到甲酸。不過，酸處理過程產生的熱與鹽須經過數個製程才能去除，因此在製造甲酸時仍有成本課題待解決。

理論上由甲酸取出 1 公斤的氫會產生 22 公斤的二氧化碳，因此研發團隊過去開發了從甲酸取出的氫與二氧化碳分離，並以高壓氫與液化二氧化碳的方式予以回收之技術。這次研究則延續已確立的技術，使用回收取得的高純度液化二氧化碳進行再次合成甲酸之技術開發。

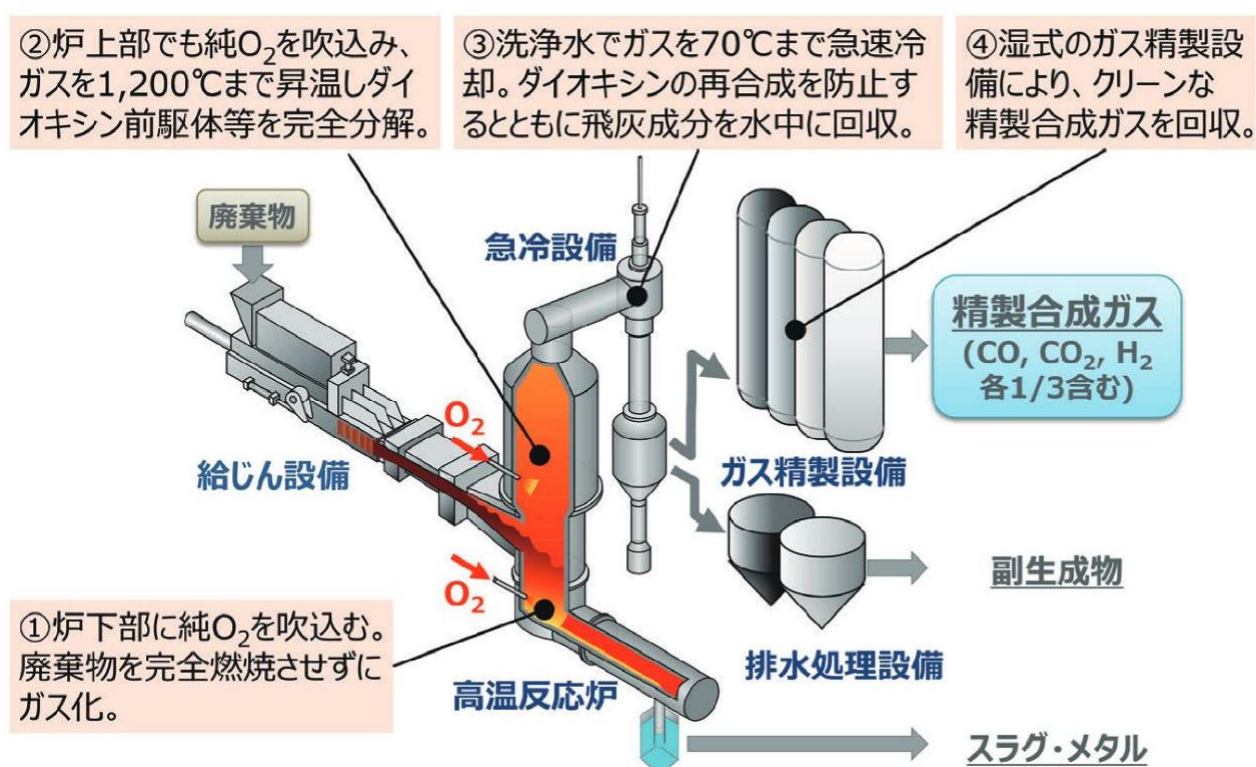
在甲酸合成方面，經確認六氟異丙醇生成氫與二氧化碳由來的反應中間體(鉍-氫錯合物)的速度比水快 4 倍，甲酸整體生成速度則快 1.5 倍以上，生成量也多 3.5 倍。利用這些速度差，在高效率生成甲酸的同時，亦可抑制生成後的甲酸分解回復至氫與二氧化碳的反應，實現無須經過甲酸鹽步驟、直接合成甲酸之技術。

(摘自：[材料世界網 2024-10-28](#)、[日本產業技術總合研究所\(AIST\) 2024-09-27](#))

4. JFE 推動多項廢棄物及 CO₂ 資源化技術開發

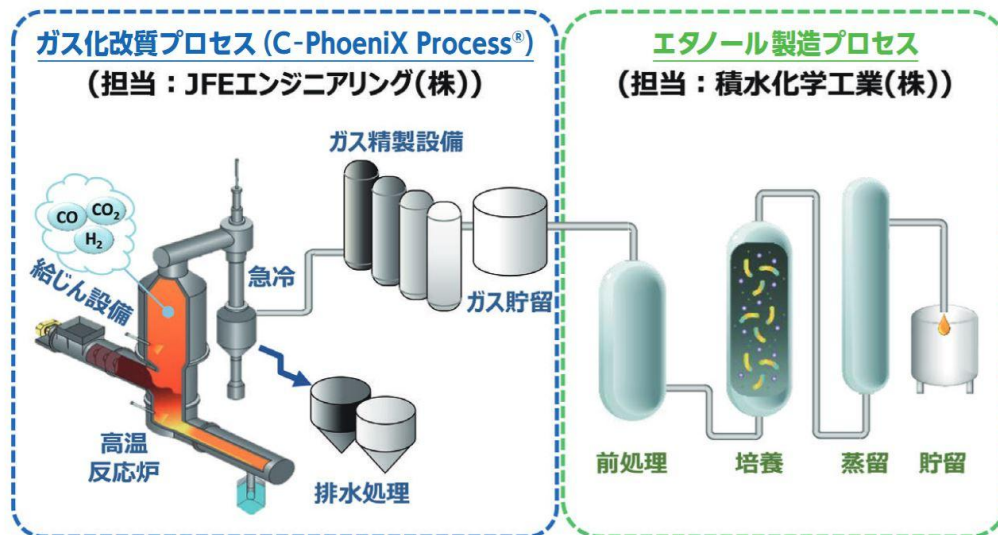
1. 廢棄物氣化改質技術 C-Phoenix Process (2024-2026 · NEDO 計畫)

JFE 20 年來透過氣化改質技術使用純氧將廢棄物氣化 (製程如圖三)，能夠回收組成比為 $\text{CO} : \text{CO}_2 : \text{H}_2 = 1 : 1 : 1$ 的精製合成氣。可處理的廢棄物包含廢塑料、一般廢棄物和工業廢棄物。過去 JFE 主要將合成氣用於發電，但該氣體若結合積水化學掌握的轉化技術，將可轉化為甲醇、乙醇、氨、SAF (永續航空燃料) 等各種化學產品。



圖三、JFE 廢棄物氣化改質製程圖

JFE 計畫基於原有的廢棄物氣化改質技術，進一步開發 C-Phoenix Process (如圖四)，研發目標為穩定合成氣產量、提升 CO 及 H₂ 濃度、及製程最佳化。JFE 正在進行小型爐實證設備的興建，預計在 2025 年度下半年開始運轉，並計劃在 2026 年度完成實證試驗，希望可於 2030 年前向外推廣。

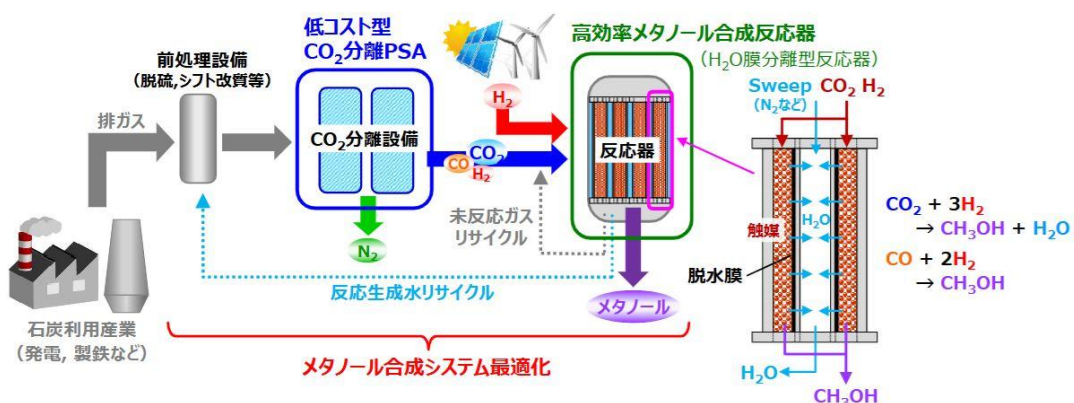


圖四、C-Phoenix Process 全體製程圖

2. 利用 CO₂ 合成甲醇的最佳系統開發 (2021-2025，NEDO 計畫)

本研究主要利用鋼廠副產氣的 CO₂ 合成甲醇，製程概要如圖五。根據 JFE 技報，JFE 與 RITE (地球環境産業技術研究機構) 合作，針對影響膜反應器性能的分離膜，開發出一種具有耐高溫高壓環境、分離選擇性及耐久性的優良分離膜。在實驗室規模的反應測試中，證實產能可達到現有反應器的兩倍以上；基於試驗結果進行放大化模擬，評估大型膜反應器的結構設計和反應熱的影響，本計畫研究目標為：

- (1) 開發針對 CO 和 H₂ 的低成本 CO₂ 分離 PSA 技術。
- (2) 開發應用脫水膜的高效率甲醇合成反應器。
- (3) 開發實用型脫水膜。
- (4) 整體系統最佳化，包含前處理設備以及甲醇合成過程中產生水的回收利用。



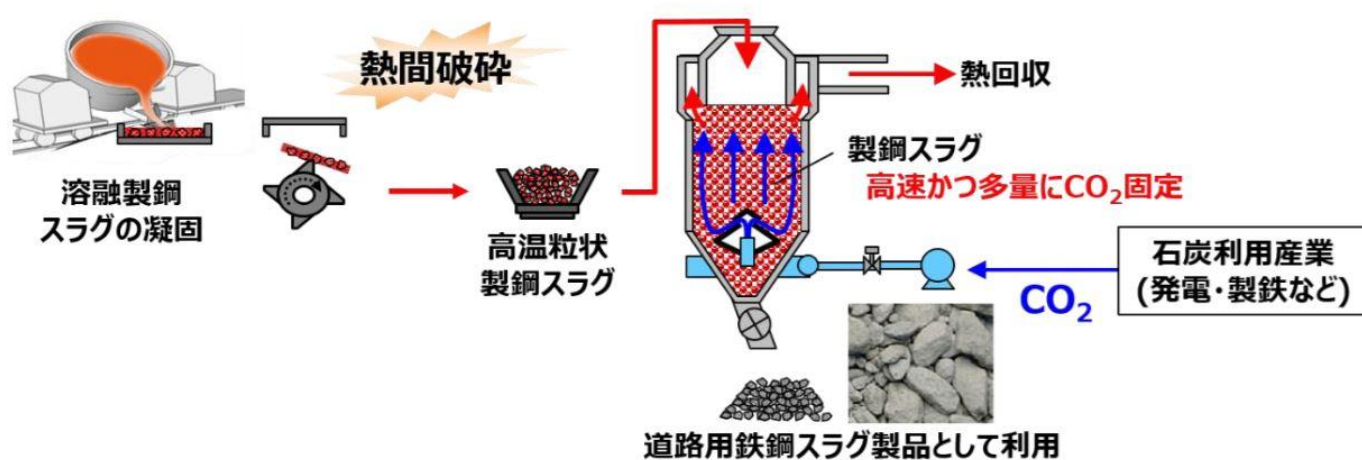
圖五、CO₂ 合成甲醇的最佳系統開發製程圖

3. 鋼渣快速大規模碳化固碳創新技術 (2021-2025, NEDO 計畫)

技術製程概要如圖六所示，其可將 CO_2 吹入高溫鋼渣中，在短時間內將大量 CO_2 固定在鋼渣中的氧化鈣上並碳化。同時透過回收 CO_2 固定化後廢氣中的熱能來提高能效，現正致力於將整個製程中的 CO_2 固定量和減排量最大化，最後碳化鋼渣計劃用作道路用鋼渣。

本計畫研究目標為：

- (1) 煉鋼渣高速、大量碳化技術。
- (2) 確認鋼渣碳化機制。
- (3) 熱回收技術。
- (4) 鋼渣凝固及熱破碎技術。
- (5) 熱破碎碳化鋼渣用於道路用鋼渣的性能評價。



圖六、鋼渣快速大規模碳化固碳創新技術製程圖

(摘自：[PR TIMES 2024-11-07](#)、[產業機械第 883 期 2024-05-20](#)

、[技報第 53 期 2024-02-15](#)、[JFE 鋼鐵官網 2021-10-15](#))

5. 現代製鐵與普銳特合作研究高爐噴吹技術

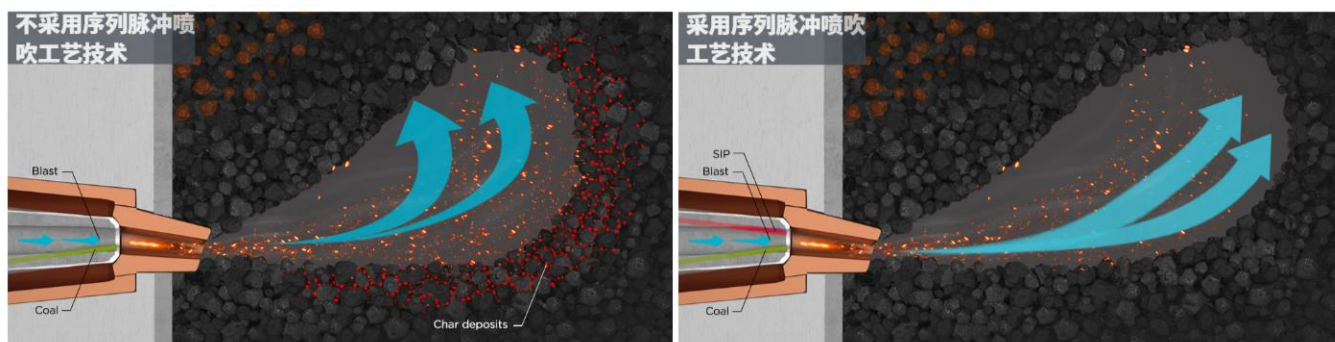
現代製鐵唐津廠採購普銳特技術服務方案，雙方將合作研究高爐氣體噴吹代替部分煤炭，減少碳排放，並降低生產成本與提升產量。

研究內容包括：

- 第一階段將側重技術性能，評估向爐內噴吹含氫氣體對生產穩定性、產量和減排量的影響，以及序列脈衝噴吹(SIP)高壓氧氣對高爐焦炭透氣性之改善成效。
- 第二階段將考察各個不同技術選項的設備佈局方案。這是普銳特與現代製鐵首次在高爐技術方面進行合作，研究結果將評估現代製鐵唐津廠三座高爐是否能以環保方式運行。

SIP 是一種氧氣脈衝技術，用於防止高爐下部區域出現低透氣性問題，示意如圖七，透過定期脈衝將少量高能氧氣注入高爐深處每個風口的迴旋區。SIP 的核心是提高迴旋區特性，使氧氣能夠到達高爐中通常無法抵達的區域。正常情況下氧氣分佈通常不會擴展到迴旋區內太遠，氧氣在離開風口時迅速消耗。但採用 SIP，一定量的氧氣可用於與迴旋區後部的碳粉反應，並進入迴旋區外部的過渡區。

SIP 解決低透氣性問題和改善迴旋區特性，可提升高爐煤氣利用率、降低總燃料比提高風量並增加生產潛力，且讓高爐可進行積極的經濟調整，比如將昂貴的冶金焦炭更多置換為更便宜的噴煤，同時 CO₂ 排放將更低。



圖七、採用 SIP 前後噴吹氣流示意圖

(摘自：[鐵諾信息網 2024-11-04](#)、[世界金屬導報 2022-11-15](#))

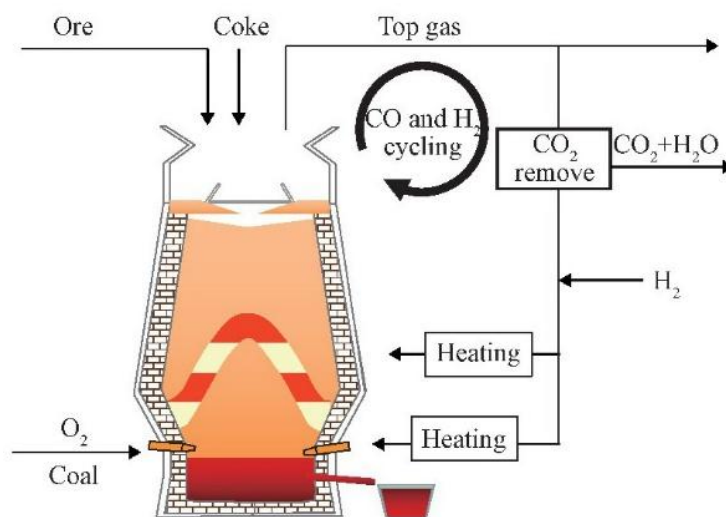
6. 寶武富氫碳循環氧氣高爐 HyCROF 開發與實踐

為應對低碳發展要求，寶武開發富氫碳循環氧氣高爐 (Hydrogen-enriched Carbonic oxide Recycling Oxygenate Furnace, HyCROF) 技術，希望透過碳循環和清潔能源將高爐煉鐵製程大幅減碳，其製程如圖八。

富氫碳循環指在全氧條件下，富氫結合爐頂煤氣循環噴吹的操作模式。寶武開發新型高爐和冶金煤氣回收裝置，高爐煤氣經回收裝置進行脫碳處理變成氫氣，並採用多介質(煤氣、煤粉及焦炭)複合噴吹技術，將加熱後的氫氣送入高爐作為冶煉還原劑，脫碳產生的 CO_2 經由 CCUS 技術進行捕捉。由於爐頂煤氣的循環利用使 CO 分壓提高，煤氣還原勢增強，強化含鐵爐料的還原，使煉鐵生產效率提高、燃料消耗降低、碳排放減少。採用全氧冶煉使燃燒後尾氣成分較為單純，故降低了脫除 CO_2 的難度與成本。

寶武投入十億(約新台幣 45 億元)研發費用，歷時 7 年解決尾氣高效低成本 CO_2 脫除、高壓高還原勢煤氣安全加熱、高溫煤氣-純氧-煤粉複合噴吹、全氧冶煉煤氣循環下合理的煤氣分佈等主要技術難題，發展出工業規模 HyCROF 試驗平臺，於 2022 年起陸續應用於八鋼 400m^3 及 2500m^3 高爐。實證顯示，在噴煤比相當的情況下，固體燃料消耗下降約 30%，碳排放下降 20% 以上，且與其他傳統製程搭配性高。

展望未來，HyCROF 工業試驗中爐頂煤氣循環比大部分還不到 70%，並以部分爐頂煤氣作為煤氣加熱爐的燃料。HyCROF 還可提高煤氣循環的比例來增加減碳能力，如此將需要引進清潔能源來進行煤氣高溫加熱。此外，HyCROF 的適宜富氫量與煤氣加熱溫度息息相關，若能將煤氣加熱到更高的溫度，適宜的富氫量亦會相應增加。



圖八、HyCROF 高爐製鐵圖

(摘自：[鋼鐵\(CNKI\) 2024-09-15](#)、[世界金屬導報 2024-07-09](#))

7. 低碳煉鐵技術統整

本論文由美國再生能源實驗室所提出，探討從高爐到氫直接還原和電解鐵生產等有前景的替代方案，並深入研究每種技術的優點和挑戰

以下為煉鋼製程的主要技術：

- (1) 高爐 (BF): 這種傳統方法使用碳基還原劑 (主要是煉焦煤) 將鐵礦石還原為鐵水。它是能源最密集的製程之一，佔鋼鐵業二氧化碳排放量的很大一部分，每生產一噸鋼就會產生約 1.8-2.0 噸二氧化碳。
- (2) 電爐 (EAF): 雖然比高爐更潔淨，但 EAF 仍會產生大量二氧化碳排放。他們主要使用電力來熔化廢鋼，但在熔化過程中也依賴碳輸入 (例如煤焦或石油焦) 進行各種反應。即使使用的電力來自無碳來源，電爐中的碳反應也會導致二氧化碳排放。
- (3) 直接還原 (DR): 此過程涉及使用天然氣等氣體還原鐵礦石，但仍會產生二氧化碳排放。雖然它比傳統方法更環保，但每生產一噸鋼鐵仍會產生約 0.7-0.9 噸二氧化碳。

上述技術是鋼鐵業二氧化碳排放總量的主要排放源，鋼鐵業約佔全球排放量的 7%。面對全球碳中和的浪潮下，先進鋼廠紛紛投入低碳煉鋼的研究方向，目前有前景的技術包括：

- (1) 氫氣直接還原 (H_2 -DR)：此方法使用氫氣作為還原劑，將鐵礦石轉化為金屬鐵，取代碳基還原劑，過程中產生鐵和水來代替鐵和 CO_2 。

挑戰：透過電解生產綠色氫氣需要大量的能源投入和基礎設施，以及氫氣生產和必要技術相關的高成本支出和高品級鐵礦石取得不易，目前仍在發展中。

- (2) 氫等離子熔煉 (HPR)：此方法利用氫等離子體熔煉鐵礦石，可以達到還原過程所需的高溫。

挑戰：該過程需要大量的能源來產生和維持等離子體，技術複雜且仍在開發中，需要進一步研究以提高效率。

- (3) 氫氣冶煉：與氫氣直接還原類似，此方法在冶煉過程中利用氫氣還原鐵礦石還原為鐵水的過程。

挑戰：氫基還原的吸熱性質需要大量能量輸入以維持熔煉過程所需的高溫。

如果能源不是來自再生能源，這可能會導致營運成本增加，因為傳統方法依賴化石燃料的放熱反應，這與脫碳的目標不相容。

- (4) 氨基還原：此方法利用氨 (NH_3) 作為還原劑將鐵礦石轉化為金屬鐵。

挑戰：綠色氨的生產仍在發展中，可能尚未達到工業用途所需的規模，以及氨有毒，帶來處理和安全挑戰，需要仔細的管理和配有完善的儲存設施。

- (5) 電解鐵生產：使用再生電力電解鐵礦石直接生產鐵，有兩種常見技術：水電解系統和熔融氧化物電解系統。

挑戰：水電解從實驗室規模過渡到工業規模對反應器設計和效率仍面臨重大技術挑戰，以及熔融氧化物電解需要能夠承受極端溫度的特殊材料增加了成本和高能源需求，會使此方法在經濟上較不可行。

- (6) 生物碳基電爐操作：此方法採用生物碳(源自生物質的碳)作為電爐(EAF)中基於化石燃料的碳的替代品。

挑戰：採購足夠的生物碳具有挑戰性，會與生物質的其他用途競爭，並且可能無法大量獲得，且生物質轉化為可用生物碳的技術仍在開發中，若作為還原劑的生物碳的維持品質一致性很困難，會影響電爐製程的效率。

(摘自：[nature-\(美國再生能源實驗室投稿\) 2024-10-01](#))

8. 高爐低碳煉鐵的技術路徑及發展建議分析

本論文提出一個全面的低碳冶金製程概念，稱為「源頭階段生物質燃料的替代-製程階段強化富氫-最終階段 CCUS 的固定」(SS-IP-FE)。

主要技術途徑包括：

- (1) **在源頭階段取代生物質燃料**：涉及在高爐 BF 過程中使用碳中性生物質燃料(例如生物炭)取代煤炭等傳統化石燃料。當生物炭與煤粉混合注入高爐時，可以顯著減少二氧化碳排放。
- (2) **製程階段強化富氫**：重點在於向高爐注入富氫燃料，以增強還原過程，進而降低二氧化碳排放，探索將綠色氫氣直接注入熔爐的潛力。
- (3) **最終階段固定碳捕獲、利用和封存(CCUS)**：涉及實施捕獲和回收煉鐵過程中產生的碳排放的技術，有助於整體減排。

重點在於煉鐵過程的各個階段以及創新技術的整合，並提出以下建議：

(1) 短期技術優化

現有高爐改造：建議鋼鐵業專注於對現有高爐進行低碳技術改造，包括整合碳捕獲、利用和儲存(CCUS)系統，以直接捕獲熔爐中的排放物。

提高效率：優化溫度和壓力等操作參數可以提高效率並減少排放，涉及微調燃料噴射和優化原料使用，以最大限度地減少浪費和排放。

(2) 中期研究與發展

低碳技術投資：強調增加低碳技術研發投資的重要性，特別是利用氫和生物質的技術，包括探索新的氫氣生產方法，例如來自可再生能源的綠氫，以及開發高效的生物質製備技術。

試點計畫和示範：啟動試點計畫來測試和展示低碳技術在現實環境中的有效性至關重要，這些項目可以提供有價值的數據和見解，以利擴大規模進行更廣泛的實施。

(3) 長期綜合低碳體系

生物質燃料的替代：利用碳中性生物質燃料（例如生物炭）取代高爐製程中的傳統化石燃料。這可以從源頭顯著減少二氧化碳排放。

富氫：在煉鐵過程中強化富氫燃料的使用，以增強還原反應並降低碳排放。將綠色氫氣直接注入熔爐的潛力被認為是一種有前景的方法。

CCUS 實施：在流程的最後階段採用 CCUS 技術來捕獲和回收碳排放，從而最大限度地減少整體碳足跡。

(4) 經濟可行性與成本效益

專注於低成本解決方案：強調需要優先考慮低成本和高效的脫碳技術，特別是在鋼鐵業成本上升和利潤下降的充滿挑戰的經濟環境中。

商業模式開發：建立有效的商業模式以減輕與低碳技術相關的投資和營運成本至關重要，這可能涉及探索支持轉型的融資方案、合作夥伴關係和政府激勵措施。

(5) 基礎設施改善

升級現有設施：建議現有高爐基礎設施應升級，以適應新的低碳技術，包括增加脫碳設備、增強生物質處理過程以及重新設計噴射系統以促進氫氣和生物質燃料的使用。

與再生能源整合：與再生能源供應商合作，將綠色電力整合到鋼鐵生產過程中，進一步增強鋼鐵營運的可持續性。

(6) 協作和知識共享

利害關係人參與：建議促進產業利害關係人、研究人員和政策制定者之間的合作，以分享低碳技術的知識，透過協作方式可以加速向永續鋼鐵生產的轉變。

國際合作：進行國際合作可以刺激低碳技術投資，為創新和發展創造支持環境。

（摘自：[Metals 2024-11-09](#)）

9. 鋼鐵生產中淨零碳排的回收技術

本項研究重點介紹在煉鐵過程中回收碳的創新方法，透過使用氫氣和使用沉積碳-鐵礦石複合材料 (CRIP-D) 的新型碳回收煉鐵製程，與傳統煉鐵方式有幾個關鍵技術差異：

- (1) 回收碳的使用：CRIP-D 利用從重整廢氣中回收的固體碳作為還原劑和增碳劑，相較之下，傳統方法主要依賴焦煤或其他化石燃料作為碳輸入，導致過程中產生二氧化碳排放。
- (2) 碳中和：CRIP-D 製程利用氫氣和回收的碳生產碳中和鐵水，與嚴重依賴煤炭並排放大量二氧化碳的傳統高爐 (BF) 方法相比，顯著減少碳足跡。
- (3) 溫度和能源效率：CRIP-D 製程可在較低溫度下還原和熔化鐵 (還原溫度約為 800°C)，從而節省能源。固體碳的使用提高還原效率，使該過程能夠在較低的熱閾值下完成反應。
- (4) 多孔鐵的生產：CRIP-D 結合多孔鐵的連續生產，多孔鐵充當碳沉積反應的催化劑，催化劑的連續再生提高製程的整體效率。
- (5) 製程設計的靈活性：CRIP-D 製程不需要從廢氣中分離二氧化碳，使製程設計具有更大的靈活性，主要廢氣可直接用作原料，簡化整個系統並減少操作限制，傳統的碳捕捉和利用 (CCU) 製程通常需要从廢氣中分離二氧化碳，相對會限制操作條件並增加複雜性。
- (6) 再生能源合併：CRIP-D 製程可與再生能源結合以生產氫氣，使其更具永續性，這種整合允許使用綠氫，進一步減少煉鋼過程的碳足跡。

(摘自：[ISIJ International 2024-07-15](#))

高爐富氫操作技術發展現況調查

撰稿人 T41 黃俊傑管理師

傳統高爐-轉爐製程約占目前全球粗鋼產量 70% (亞洲地區約 80%)，因此成為現階段鋼鐵業減碳發展的重點。傳統高爐煉鐵技術已趨成熟，僅透過改進現有技術難以達成減排要求。有鑑於此，歐盟、日本、中國皆有鋼廠進行高爐富氫噴吹技術研究，期望利用氫氣還原代替部分碳還原，減少碳基原料使用量，以達成中程減碳目標。然高爐製程減碳潛力有限，故鋼廠亦同時搭配**碳捕捉與封存、餘熱回收利用、鋼化聯產、綠電**等措施，以求進一步降低碳排放，其技術要點及減碳成效整理如文末表 1。以下將分述國際主要高爐富氫噴吹研究專案特點。

1. 歐盟 ULCOS (Ultra-low CO₂ Steelmaking) 爐頂煤氣循環高爐

歐盟於 2004-2014 年在 ULCOS 計畫中進行高爐爐頂煤氣循環技術 (Top Gas Recycling Blast Furnace, TGR-BF 或 ULCOS-BF) 研究，主要特點如下：

- (1) 在捕捉高爐塔頂爐氣的 CO₂ 後，將其餘還原氣導回高爐，降低碳排放量並提升產能約 25%；
- (2) 使用全氧代替傳統預熱空氣，因去除了氮氣，故降低 CO₂ 分離成本；
- (3) 利用 VPSA(vacuum press swing adsorption)真空變壓吸附技術和 CCS 技術將 CO₂ 分離並儲存於地下；
- (4) 回收 CO 作為還原劑循環使用，減少 35%焦炭率。

ULCOS-BF 共開發出三種操作模式，其中 **Version 4** (製程如圖 1) 顯示出最大的減排潛力，將成為下一輪工業規模高爐測試的重點。其製程為：部分脫除 CO₂ 的爐頂煤氣被預熱至 900°C，透過位於爐身的風口注入高爐。另一部分脫除 CO₂ 的爐頂煤氣被預熱至 1250°C，與氧氣和粉煤同樣經由位於爐床的風口注入高爐。

根據瑞典 LKAB 8.2 m³高爐的試驗結果，在爐頂氣回收率 90%的情況下，可減少約 25%高爐碳排；若應用碳捕集及封存技術，每噸熱軋鋼捲的碳排量可降低 55-60%，反之則降為 15%。在邁向商業規模應用時，塔塔鋼鐵指出須特別注意

鼓風嘴(爐氣+氧氣+粉煤)、爐氣噴吹與爐氣分佈、爐氣加熱三項技術，並於 2024 年一月的國際綠色永續煉鐵論壇透露未來計畫以商業高爐規模建立示範工廠。

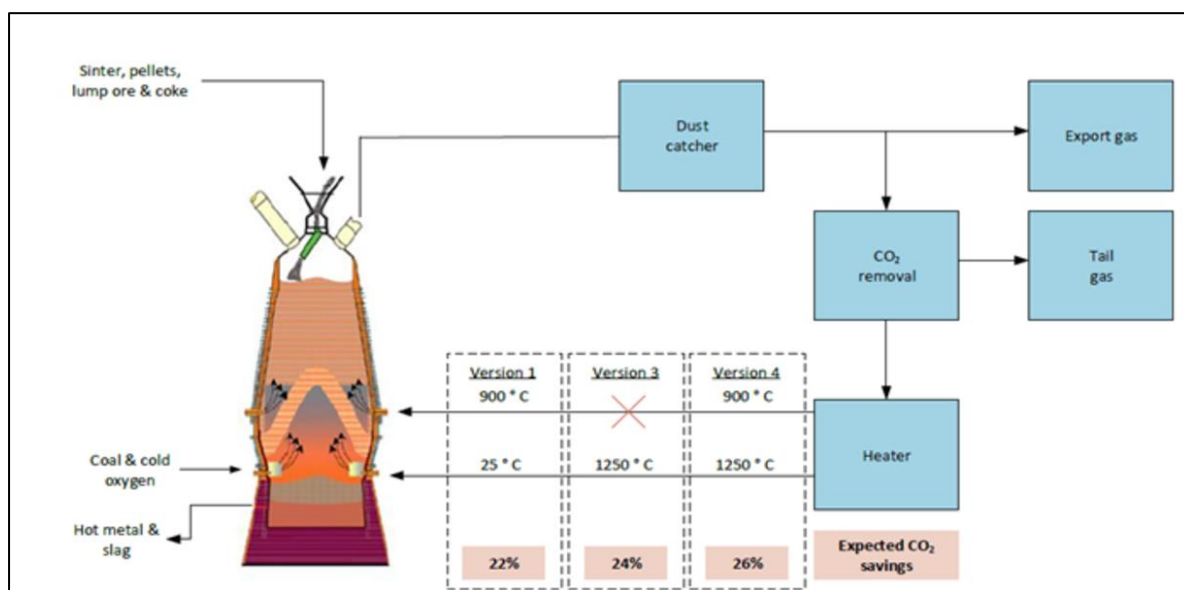


圖 1、ULCOS-BF 製程圖

2. 日本 COURSE50

COURSE50 於 2008 年啟動，其製程如圖 2，研究內容主要分為：

- (1) 研發以氫直接還原鐵礦石的高爐減排技術，目標降低碳排 10%，開發技術包括利用氫還原鐵礦石、增加氫含量的焦爐煤氣改質技術、高強度高反應性焦炭的生產技術；
- (2) 研發高爐煤氣中 CO₂ 的分離、回收技術及餘熱回收，目標減排 20%。

日本製鐵利用君津廠 12 m³試驗高爐在 2016-2017 年達成 CO₂ 減排 10% 的實績，2018 至 2020 年在試驗高爐中噴入高含量 H₂，發現噴入 359 m³/t 的 H₂ 時，CO₂ 約 16%減排。2022 年另啟動 Super COURSE50 計畫，預期透過加熱的外部氫氣減少 50%碳排，並搭配 CCS/CCUS 達成碳中和；並於 2023 年在君津廠試驗高爐取得 22%的碳減排效果，並期望能在 2040 年建立 Super-COURSE50 商業化技術。

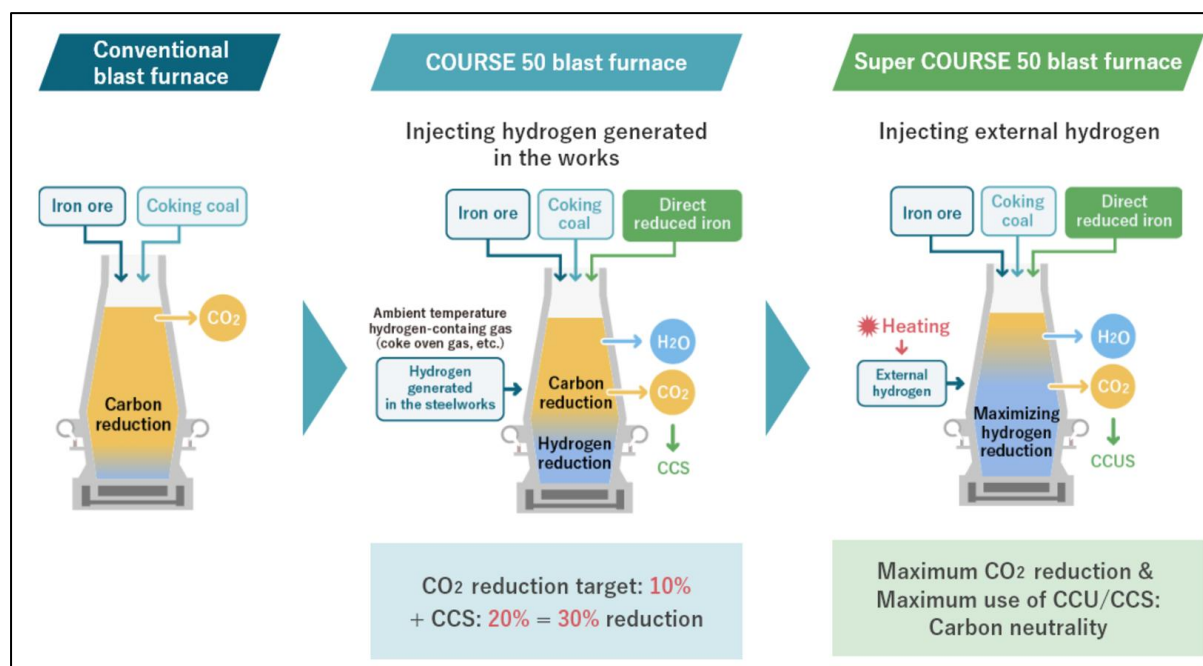


圖 2、COURSE50 及 Super COURSE50 高爐製程圖

3. 寶武富氫碳循環氧氣高爐 (HyCROF)

富氫碳循環指在**全氧**條件下，富氫結合**爐頂煤氣循環噴吹**的操作模式，製程如圖 3。寶武開發新型高爐和冶金煤氣回收裝置，高爐煤氣經回收裝置進行脫碳處理成為高還原勢煤氣，並採用多介質(煤氣、粉煤及焦炭)復合噴吹技術，將加熱後的煤氣送入高爐作為冶煉還原劑，脫碳產生的 CO₂ 則藉由 CCUS 技術進行捕集。由於爐頂煤氣的循環利用使 CO 分壓提高，煤氣還原勢增強，強化含鐵爐料的還原，使煉鐵生產效率提高、燃料消耗降低、碳排放減少。採用全氧冶煉使燃燒後尾氣成分較為單純，故降低脫除 CO₂ 的難度與成本。

2020 年寶武利用新疆八一鋼鐵原有 430 m³高爐建立 HyCROF 試驗平台，研究共分 3 個階段：

- (1)結合高爐綜合鼓風技術，實現 35%高富氧冶煉目標；
- (2)引入歐冶爐 (Corex) 脫除後 CO 的煤氣，開發 50%的超高富氧技術；
- (3)完成高爐爐型改造和煤氣加熱配套工程，實現煤氣循環。

2023 年寶武突破高還原勢煤氣安全高效加熱、基於煤氣、粉煤及焦炭競爭燃燒的風口噴吹裝置設計和全氧鼓風煤氣循環等技術難題，並應用冶金氣體高效低成本碳捕捉技術，取得固體燃料消耗降低 30%、碳排放減少 21% 的技術能力。該技術已擴展到八鋼 2500 m³ 高爐，於 2023 年 9 月運行後，初步使化石燃料消耗降低 27%、產量提高 19%、碳排放降低 16%。

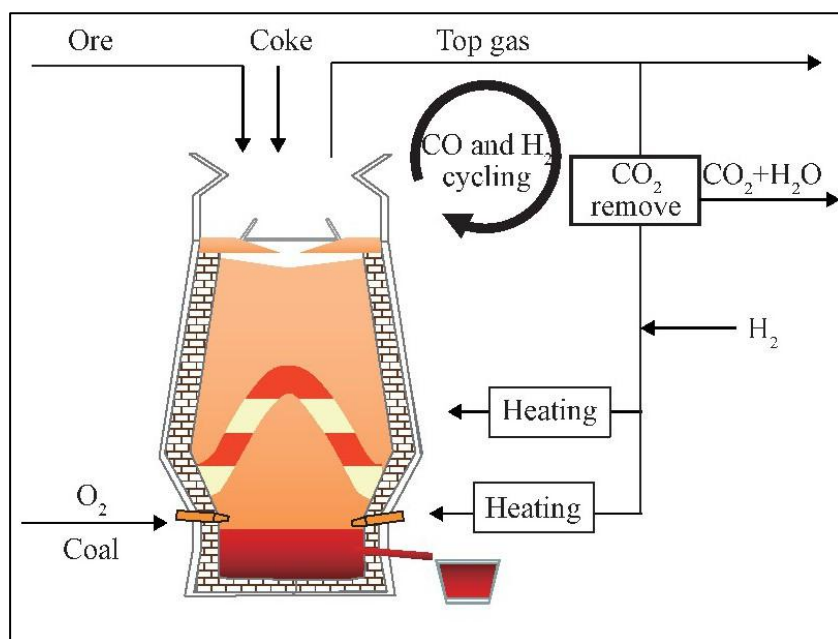


圖 3、寶武富氫碳循環氧氣高爐製程圖

4. 上海大學以純氫為噴吹氣源進行高爐富氫冶煉技術開發

2021 年底上海大學與興國鑄業公司合作，開發以純氫為噴吹氣源的高爐富氫冶煉技術，並建構車載高壓供氫-卸壓噴吹-氫冶金聯用平台，主要研究內容如下：

- (1) 於 40 m³ 試驗高爐中每小時注入 1800 m³ 純氫氣 (噸鐵 250 m³)，研究氫氣噴吹量變化對高爐冶煉過程的影響；
- (2) 以氫氣快速冷凍試驗高爐並將進行解剖，藉此瞭解富氫對高爐內爐料結構和性狀的變化；
- (3) 試驗結果顯示，焦炭比降低約 10%，碳排放量減少約 10%，產量增加約 13%。
- (4) 開發供氫、富氫冶煉、爐頂煤氣循環噴吹和 CO₂ 捕集分離等技術

目前已於興國鑄業現有 450m³高爐完成富氫噴吹技術改造，並結合 30 萬 m³/d 綠電電解水製氫與儲氫系統，建成工業化示範專案項目。

5. 晉南鋼鐵高爐富氫低碳冶煉

晉鋼集團在中國建構氫能冶金和**鋼化聯產**低碳產業鏈，主要技術重點如下：

- (1) 將焦爐、轉爐、高爐煤氣等載碳能源送到化工廠，經**自有煤氣淨化技術**提純分離 LNG、一氧化碳和氫氣，催化合成乙二醇；
- (2) 在化工提純氫氣過程中輸出富氫解析氣體，再送回鋼廠進行高爐富氫低碳冶煉，降低高爐製程的煤炭消耗，噸鐵噴吹 30m³氫氣可置換 12 公斤焦炭；
- (3) 建構 1860 m³高爐大規模噴吹化工富氫氣體工業化應用工程，並開發高爐噴氫「物理自保護+製程自保護智能聯鎖+緊急自保護切斷」智能安全控制技術，使高爐可長期穩定高效噴吹；
- (4) 進行轉爐煤氣提質研究，係將轉爐汽化冷卻煙道的高溫餘熱，用於把焦炭煙氣中 CO₂ 轉化為 CO；
- (5) 規劃光能綠電-儲能系統製作綠氫，並用於廢鋼加熱製程。

表 1、國外主要高爐富氫噴吹研發專案特點與配套減碳措施

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
歐盟 ULCOS-BF	(1) 捕捉高爐塔頂爐氣中的 CO ₂ 後，將其餘還原氣導回高爐。 (2) 使用純氧代替預熱空氣，降低 CO ₂ 分離難度成本。 (3) 利用真空變壓吸附技術和 CCS 技術將 CO ₂ 分離並儲存於地下。 (4) 回收 CO 作為還原劑循環使用，減少 35%焦炭率。	高爐階段 26% 每噸熱軋鋼捲 15% (未應用 CCS) 每噸熱軋鋼捲 55-60% (應用 CCS)	CCS

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
日本 COURSE50 高爐	COURSE50 (1) 利用廠內產生的煤氣。 (2) 高爐煤氣中 CO₂ 的分離、回收技術及餘熱回收。 Super COURSE50 高爐注入預熱的鋼廠外部氫氣。	Course50 (1) 高爐 10% (2) 高爐搭配 CCUS 30% Super Course50 (1) 高爐 50% (2050) (2) 高爐搭配 CCUS 100% (2050)	CCUS 餘熱回收
寶武 HyCROF	(1) 與 ULCOS-BF 同樣採用全氧冶煉、爐頂煤氣循環噴吹技術。 (2) 突破全氧冶煉、煤氣加熱、煤氣循環、複合噴吹等技術難題。 (3) 應用冶金氣體高效低成本碳捕捉技術。	16-21%	CCS
上海大學純 氫氣源富氫 高爐噴吹	(1) 以純氫為噴吹氣源的高爐富氫冶煉技術。 (2) 建構車載高壓供氫-卸壓噴吹-氫冶金聯用平台。 (3) 完成實驗後將高爐冷凍並解剖，以了解富氫冶煉對高爐之影響。	10%	綠電製氫 儲氫

專案名稱	技術要點	減碳成效	配套措施
晉鋼高爐富氫低碳冶煉	(1) 爐氣送到化工廠，提純分離為 LNG、一氧化碳和氫氣，催化合成乙二醇載碳化工產品。 (2) 化工提純氫氣過程中輸出富氫解析氣體，再送回鋼廠進行高爐富氫低碳冶煉。 (3) 利用轉爐汽化冷卻煙道高溫餘熱，將焦炭除塵灰煙氣中 CO₂ 轉化為 CO。 (4) 開發高爐噴氫「物理自保護+製程自保護智能聯鎖+緊急自保護切斷」智能安全控制技術，達到長期穩定噴吹。 (5) 規劃光能綠電-儲能系統製作綠氫，並用於廢鋼加熱製程。	30%	鋼化聯產 餘熱回收 綠電製氫