



鋼廠動態

1. 日本製鐵透過收購美國鋼鐵推動減碳進程 1
2. 日本鋼廠積極推動綠色鋼材應用於指標性建築 1
3. JFE 工程與住友化學應用膜分離技術捕捉 CO₂ 2
4. JFE 申請鋼渣蒸氣養生專利，提升再生利用穩定性 2
5. 首鋼發布綠色低碳商標、綠色低碳汽車用鋼標準及價格體系 4
6. 浦項控股攜手 SK Gas，聚焦綠松石氫能發展 5
7. 安賽樂米塔爾 XCarb 基金投資 ETS 公司 5
8. 德國修訂二氧化碳儲存法，全面擴大 CCS 基礎建設 6
9. GreenIron H2 與挪威氫能公司合作擴大綠鋼產能 7
10. 瑞士鋼鐵試驗將綠氫用於熱處理：淨零轉型的新突破與挑戰 7
11. Voestalpine 年報揭露綠鋼轉型計畫進展 8
12. 澳洲綠色鋼鐵：雙重發展方向 9
13. 蒂森克虜伯 Nucera 為 PGS 供應電解槽以生產綠氫 11
14. 綠鐵走廊：鋼鐵供應鏈轉型助力可持續發展(下) 11

技術/生產資訊

1. 高爐面向低碳富氧-氫躍升路徑及工作窗口分析	13
2. 富氫高爐的一維動力學模型驗證與預測	13
3. LF 加廢鋼降鐵耗工藝研究與實踐	14
4. 用於工業脫碳的綠色電解製氫工藝的優化與比較	15
5. 鋼鐵行業脫碳的技術路徑	16
6. 高爐煤氣脫氯脫硫技術研究與應用實踐	17
7. 中國鋼鐵行業 CCUS 技術發展現狀及前景	18

技術專欄

※中國主要鋼廠 CCUS 技術發展現況	20
---------------------	----

1. 日本製鐵透過收購美國鋼鐵推動減碳進程

日本製鐵在 6 月完成收購美國鋼鐵，使其粗鋼產能躍升至每年 8,600 萬噸的世界領先水準。透過本次收購，日本製鐵計畫結合在美國、加拿大的鐵礦山、DRI 設備和電爐，擴大高等級綠色鋼板產能。目前美國鋼鐵電爐產能約 720 萬噸，而日本製鐵為生產高級鋼板而設立的廣畑地區電爐，在營運 2 年 4 個月後累計粗鋼產量才達到 100 萬噸。儘管面臨財務表現下滑和信評降級的困境，日本製鐵仍決心將此次收購轉變為實現脫碳和提升國際競爭力的關鍵轉機。

高爐作為日本製鐵的生產主力，其高碳排放特性使其面臨被視為「擱淺資產」的風險。為此，日本製鐵積極開發高爐氫還原技術，並已在試驗中成功減少 43% 的 CO₂ 排放，力圖在 2040 年後將此技術應用於大型高爐。此外，隨著日本鋼鐵聯盟制定「綠色鋼品指南」，鋼廠可採用質量平衡法，將製程減碳成果分配給特定鋼品，為現有高爐產品開闢了應對綠色鋼鐵需求的途徑。全球鋼廠在推進氫還原技術開發的同時，活用質量平衡法正逐漸成為一個可行的脫碳選項。

(摘自：日經 ESG 2025-08-25)

2. 日本鋼廠積極推動綠色鋼材應用於指標性建築

日本鋼廠積極開發並推廣低碳排鋼材，將其應用於建築等領域，以協助客戶及供應鏈夥伴減少碳足跡。日本製鐵與 JFE 鋼鐵近期展示綠色鋼材的最新應用案例，為建築業的淨零排放目標鋪路。

- (1) 日本製鐵：住友商事開發、Swarovski 入駐的關西旗艦店「心齋橋南船場 3 丁目計畫」採用日本製鐵綠色鋼材「NSCarbolex® Neutral」。

這項計畫減少了建築物的隱含碳排放，與一般鋼材相比，從原材料採購到鋼鐵生產階段的溫室氣體排放量減少約 74%。

(2)JFE：三輪鐵建公司決定在青森縣新總部工廠的鋼骨結構中採用 JFE 綠色鋼材「JGreeX」，這是該鋼材在日本東北地區的建築鋼骨應用首例。

日鐵的 NSCarbolex 與 JFE 的 JGreeX 皆為透過質量平衡法發行之高爐產製綠鋼產品。

(摘自：Nippon Steel 2025-09-01、JFE Shoji 2025-09-01)

3. JFE 工程與住友化學應用膜分離技術捕捉 CO₂

JFE 工程與住友化學宣布將合作利用膜分離技術進行二氧化碳分離與回收的示範測試。這項計畫獲得 NEDO 綠色創新基金援助，目標為開發針對垃圾焚化爐等中小型排放源的緊湊、低成本碳捕捉系統。從低濃度(低於 10%)的二氧化碳廢氣中，高效且節能地分離並捕捉二氧化碳。

此次示範測試預計於 2026 年 3 月展開，地點位於川崎市浮島城市固體廢棄物處理中心。住友化學將負責膜模組的組裝與分離製程的基本設計；JFE 工程則負責碳捕捉設備的詳細設計、安裝與運營。

(摘自：JFE Engineering 2025-08-19)

4. JFE 申請鋼渣蒸氣養生專利，提升再生利用穩定性

鋼渣為鋼鐵生產過程中產生的副產品，若作為建築或道路工程的再生骨材，是實現循環經濟的重要一環。然而，鋼渣中常含有游離氧化鈣 (free-CaO) 等成分，遇水會發生水化反應，體積膨脹，導致鋪面材料開裂等問題，限制了其應用。為解決此問題，通常會採用「養生」(Aging)處理，利用水或蒸汽促進水化反應，

使其在使用前達到安定狀態。

傳統的蒸氣養生是將鋼渣堆積在處理坑內，由底部通入蒸汽。但此法的挑戰在於，當卡車等機具將爐渣倒入坑中時，較粗的顆粒會滾落至堆體的兩側，而較細的粉末則會集中在中央區域，形成「粒度偏析」(Particle Segregation) 現象。這將導致蒸汽的滲透路徑與效率不均，細顆粒區因孔隙率低、阻力大，蒸汽難以穿透，造成養生不完全；而粗顆粒區則可能發生蒸汽「短路」(Short-circuiting) 現象，浪費能源。

JFE 提出的此項專利，可解決上述因粒度偏析造成的養生不均問題，提升鋼渣養生處理的效率與品質均一性，產出性質穩定的高品質再生骨材，有助於擴大鋼廠副產品的再利用價值。其核心技術在於控制爐渣堆積的方式以及蒸汽的供給，確保整個渣堆都能均勻、高效地完成養生。本技術說明如下，並配合圖 1：

- (1)優化堆積方式：透過特定的堆料程序，控制渣堆的剖面形狀，以幾何限制 ($d \leq 0.2D$, $h \leq 0.5H$) 規範其形狀，使其具有特定的斜面角度與頂部寬度，以改善蒸汽在內部流動的均勻性。
- (2)監控養生進程：在渣堆內部的不同位置設置溫度感測器。透過監控各點溫度上升至 100°C 所需的時間，判斷蒸汽前緣的推進速度與範圍，確保渣堆中心與邊緣、頂部與底部都能被充分加熱，達到完全養生的目標。
- (3)處理坑設計：處理坑 (10) 的結構設計，包括側壁 (14A , 14B) 與底部的蒸汽注入管 (18 , 20)，皆為實現均勻養生而優化。

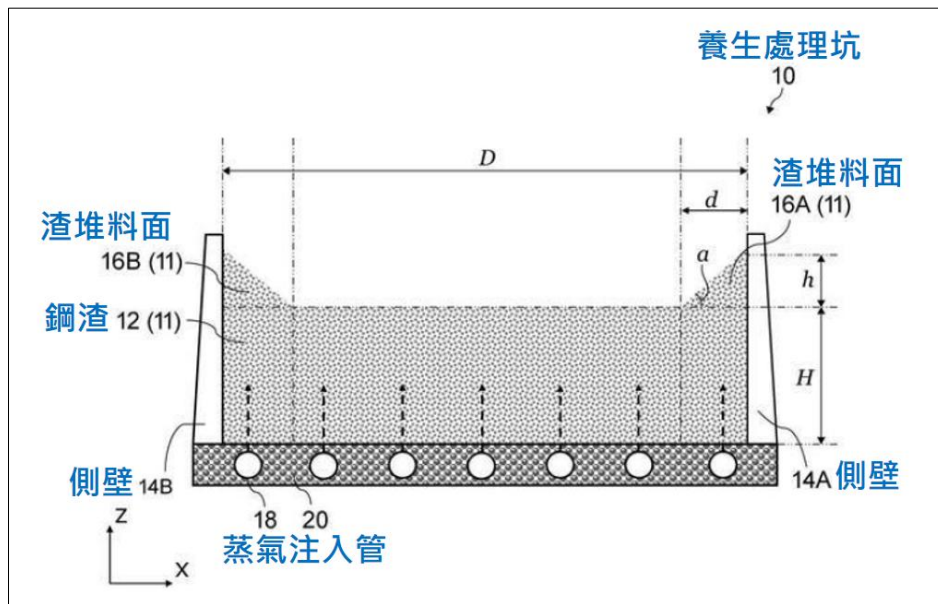


圖 1、養生處理坑剖面圖

(摘自：日本專利 JP2025-125265 2025-08-27)

5. 首鋼發布綠色低碳商標、綠色低碳汽車用鋼標準及價格體系

在 2025 年 9 月的汽車用鋼暨綠色低碳技術論壇上，首鋼發布「綠色低碳冷軋和熱鍍鋼板及鋼帶」企業標準、價格體系，以及名為「SOGREECO」的系列綠色低碳產品商標。

這套綠色低碳產品企業標準首次明確定義綠色低碳產品、降碳評估方法、對比基準及產品命名方式，提供多個降碳等級的產品，降碳幅度介於 30%至 70% 之間，涵蓋軟鋼、烘烤硬化鋼、低合金高強鋼、雙相鋼與熱沖壓鋼五大汽車板品種。這些產品的強度級別範圍從 300 至 2000 MPa，並根據鋼種特性與減碳需求，匹配高爐-轉爐、廢鋼-電爐及電爐-轉爐等不同煉鋼路徑。

此外，為確保低碳路徑下產品的優越性能，該標準在規範常規化學成分的基礎上，更嚴格限制銅、錫、砷等有害殘餘元素的含量上限，其要求比國家標準與

行業標準更為嚴格。

與標準同步發布的低碳汽車板價格體系，則以 2020 年相關產品的生命週期碳足跡為基準，為下游產業的綠色材料應用與採購提供標準化與系統化的支持。

(摘自：鐵諾 2025-09-09、富途牛牛 2025-09-08)

6. 浦項控股攜手 SK Gas，聚焦綠松石氫能發展

2025 年 8 月，浦項控股與 SK Gas 在韓國首爾共同舉辦一場以「在韓國建立可持續和經濟的綠松石氫生態系統」為主題的論壇。論壇指出，**綠松石氫是透過在高溫下分解天然氣所得到的氫氣**。由於其製程不產生氣態二氧化碳，且具有經濟實用性，因此各界越來越關注其發展。

這場論壇呼籲韓國政府將目前專注於綠氫與藍氫的氫能產業政策，擴展到綠松石氫。此外，還探討成立諮詢機構來促進綠松石氫發展。浦項正嘗試將綠松石氫與氫還原煉鐵工藝結合，以期在自身生產過程中減少碳排放並提高生產效率。

(摘自：鐵諾 2025-09-01)

7. 安賽樂米塔爾 XCarb 基金投資 ETS 公司

安賽樂米塔爾宣布 XCarb 基金投資 Electrified Thermal Solutions 公司，該公司開發一項新技術，為使工業熱能實現電氣化。Electrified Thermal 的耐火磚經過多年研發，是 Joule Hive™ Thermal Battery (JHTB)系統的核心。

JHTB 與其他電池一樣儲存能量，不同之處在於以熱能的形式儲存能量，透過電力（最佳情況為綠色電力）直接輸送到耐火磚，再轉換為熱能。傳統的加熱元件，例如金屬絲，並將熱量傳遞到儲能介質，會限制其峰值溫度和耐用性。

JHTB 內部的電熱磚兼具加熱元件、儲熱介質和熱交換器的功能，將電熱磚塊與傳統耐火磚以一定模式堆疊，能夠建造巨大的三維加熱電路，為任何工業製程提供接近火焰溫度的熱量，溫度可達 1700°C，空氣或氣體透過磚塊通道釋放熱能，為工業應用提供熱量。

高溫熱能通常由燃燒鋼鐵廠煤氣或天然氣產生，其應用範圍包括高爐熱風爐、軋製前的板胚再加熱，以及淬火或退火等。因此，JHTB 系統有望成為煉鋼製程脫碳，及減少對化石燃料的依賴。安賽樂米塔爾和 Electrified Thermal 簽署了一份合作備忘錄，將於 Asturias 工廠以進行技術驗證與測試，尋求營運範圍內部屬應用的可行性。

(摘自：[ArcelorMittal 2025-09-04](#)、[Electrified Thermal Solutions 2025-09-04](#))

8. 德國修訂二氧化碳儲存法，全面擴大 CCS 基礎建設

德國已修訂「二氧化碳儲存法」(KSpG)法案，將顯著擴大碳捕捉、運輸和地下封存(CCS)的法律框架，企圖全面擴展德國現階段僅限於研究和試點運營的 CCS 專案。由於 CCS 基礎設施的建設需要 7 至 10 年時間，德國政府強調必須立即啟動專案，以確保相關設施能在 2030 年代初投入運營。此次修法提供工業界：

- (1)長期投資的法律保障。
- (2)由試點到全面部署的明確路徑，但須在確保健康和環境安全前提下開展。
- (3)希望藉此加速項目發展，確保相關基礎設施到位，不損工業競爭力。

儘管 Thyssenkrupp 等鋼廠正透過 Carbon2Chem® 等專案測試碳捕捉與利用(CCU)技術，且安賽樂米塔爾德國公司也已加入跨境碳管道倡議，但仍未有鋼鐵廠實現大規模的 CCS 專案。新法可讓鋼鐵企業在氫基脫碳路線之外，未來能利用運輸和儲存基礎設施，使其前期研究與國家政策目標直接接軌。

(摘自：SteelOrbis 2025-08-21)

9. GreenIron H2 與挪威氫能公司合作擴大綠鋼產能

瑞典 GreenIron H2 與挪威氫能公司簽署一項戰略協定，將透過結合綠氫供應與直接還原技術，擴大綠色鋼鐵的生產規模。GreenIron H2 利用綠氫還原生產綠色鋼鐵，挪威氫能公司則貢獻其在生產和氫氣基礎設施方面的專業知識，確保該技術在工業規模上的推廣應用。

兩家公司先前曾於 2023 年合作，將挪威氫能公司生產的綠氫運送至 GreenIron H2 位於瑞典的大型直接還原爐。而根據新協定，雙方將共同選址，在多個工業園區的直接還原爐旁建造新的綠色氫氣工廠，以實現綠色鋼鐵的規模化生產。

(摘自：SteelOrbis 2025-08-21)

10. 瑞士鋼鐵試驗將綠氫用於熱處理：淨零轉型的新突破與挑戰

在熱處理中使用氫氣代替天然氣的技術還未成熟，存在 NO_x 排放量增加以及可能對鋼材品質和爐內耐火材料的使用壽命產生負面影響等潛在風險。

為此，瑞士鋼鐵集團(Swiss Steel Group)啟動在煉鋼廠用綠氫氣替代天然氣的試驗計畫。

本次試驗是 HYDREAMS 專案*的一部分，計畫使用加熱、退火兩種類型的爐子，與脈衝、平焰等兩種類型的燃燒器，測試鋼鐵生產中的氫氣燃燒效率。在 13 種不同鋼種的試點試驗中，瑞士鋼鐵證實氫氣對最終產品的結構或成分沒有負面影響，並將於後續擴大試驗規模，推動工業示範。

*註:HYDREAMS 專案是一項由歐盟資助的多階段計畫，成員包括瑞士鋼鐵、格拉茨工業大學、Messer、Genvia 等，始於 2023 年 4 月，旨在到 2032 年減少 450 萬噸碳排放，並加速鋼鐵行業的綠色轉型。

(摘自：[MetalBulletin2025-08-26](#)、[SteelOrbis 2025-08-22](#))

11.Voestalpine 年報揭露綠鋼轉型計畫進展

Voestalpine 正加快綠鋼轉型步伐。2024 年秋季，該公司發行首筆 5 億歐元綠色債券，為期五年、票息 3.75%，並自 10 月 3 日起上市交易，資金全數投入永續專案，其中核心為 greentec steel 脫碳計畫，即 2030 年減碳三分之一，2050 年達到完全碳中和之目標。

在 2024/25 財年，監事會重點審議 Strategy 2030+，該戰略涵蓋冶金脫碳轉型、循環經濟與廢鋼回收模式，以及 Linz 與 Donawitz 廠區的減碳規劃。該公司於 Linz 廠啟動 220 kV 電力基礎建設工程並簽署新鋼構廠房合約。全年投資金額達 12.43 億歐元，其中三分之一已用於 greentec steel 第一期 15 億歐元計畫(新台幣 532.8 億元)。

Voestalpine 透過分階段推進脫碳路線圖 (如表 1)。第一階段將於 2027 年建成 Linz 與 Donawitz 的綠電驅動電弧爐，部分取代高爐，以廢鋼、液態生鐵與 HBI 為主要爐料，目標在 2029 年前減碳 30%，相當於奧地利全國 5%的排放量。

第二階段計畫在 2030 至 2035 年間再增設電弧爐並引入 CCUS，力爭 2035 年相比 2019 年減碳 50%。第三階段則將全面替代化石高爐，導入綠氫、生質能與擴大 CCUS，最終邁向零碳鋼生產。

表 1、分階段推進脫碳路線圖

階段	預計時程	關鍵行動	主要目標
第一階段	2027 年投運/ 2029 年減碳 30%	在 Linz 與 Donawitz 各建 1 座綠電驅動的 電爐 (EAF)，取代各 一座高爐。 總投資 15 億歐元	實現奧地利全國碳排 放量 5% 的減排，並 以廢鋼、液態生鐵與 HBI 等多元原料組合 煉鋼。
第二階段	2030–2035 年	各再新增 1 座電爐 (EAF)，同時導入碳 捕獲、利用與封存 (CCUS) 技術。	相比 2019 年，2035 年實現 50% 的碳排 放減量。
第三階段	2035 年之後	全面淘汰石化燃料高爐 產能，並全面導入綠 氫、生質能，同時大規 模擴大 CCUS 應用。	依據投資週期與政 策、技術發展，2050 年達成全面性的脫碳 轉型。

(摘自：Voestalpine 2024-2025 年報 2025-06-04)

12. 澳洲綠色鋼鐵：雙重發展方向

澳洲鋼鐵產業正透過「現有技術優化」與「創新技術突破」雙軌路徑，推動 2050 年淨零碳排目標。兩大龍頭 BlueScope 與 Liberty Steel Australia 主導市場格局，其策略與進展概述如下：

● 高爐-轉爐製程：

BlueScope 旗下 Port Kembla 廠(年產逾 300 萬噸)與 Liberty Steel Australia 的 Whyalla 廠(年產 260 萬噸)持續依賴高爐-轉爐製程，2024 年總產逾 480 萬噸，碳排強度 2.07 噸 CO₂/噸粗鋼。BlueScope 已設定 2030 年前範疇 1&2 減碳 12%、範疇 3 減碳 30%目標，並透過將廢鋼原料佔比由現行 25.4%提升至 30%，直接減少高爐焦炭用量、以生物炭及噴煤粉部分替代焦炭，實現漸進減排。

● 電弧爐 (EAF) 與直接還原鐵 (DRI)：

(1)Liberty 自 2023 年投入 4.85 億美元(146 億新台幣)興建 160 萬噸 EAF，並規劃 5.93 億美元(178 億新台幣)建置 180 萬噸 NG-DRI 廠，未來將改用綠氫。項目預計 2025 年完工，但母公司 GFG Alliance 歐洲資產財務壓力，為達 2030 年零碳目標埋下變數。

(2)GSWA(Green Steel of Western Australia)以 17.4 億美元(524 億新台幣)投資在 Collie 興建 45 萬噸 EAF 與在 Geraldton 興建 DRI 廠(產能未公布)，採用 100%再生能源及氫基轉型策略，EAF 目標 2026-2027 年投產。

● 電熔爐 (ESF)：

BlueScope 攜手力拓(Rio Tinto)與必和必拓(BHP)執行 NeoSmelt 計畫，於 Kwinana 建置 4 萬噸 ESF 試驗廠，預計 2028 年投產。Fortescue 亦投入 5,000 萬美元 (15 億新台幣) 在建構同類試驗爐，預計 2025 年底啟動，雙方正競逐氫基熔融鐵技術商業化的領頭羊。

● 政府政策支持：

Liberty Steel 已獲聯邦 6,320 萬澳元(12 億新台幣)及南澳 5,000 萬澳元(10 億新台幣)補助，佔 EAF 專案成本逾 20%。

因此，澳洲鋼鐵業具備成功實現脫碳的所有先決條件，得益於豐沛的再生能源與氫能資源潛力，以及政府政策全力協助支持。然而，政府仍需採取額外措施，例如為國內市場實施類似歐洲碳邊境調解機制(CBAM)的關稅保護，若無市場保護機制配合，國際低價進口仍可能威脅當地鋼鐵業競爭力，即便完成綠色轉型，未來鋼鐵業仍將充滿變數。

(摘自：GMK Center 2025-09-15)

13. 蒂森克虜伯 Nucera 為 PGS 供應電解槽以生產綠氫

蒂森克虜伯 Nucera 宣布將為澳洲 PGS(Progressive Green Solutions)公司提供 1.4GW 電解槽，用於綠色鐵礦專案以生產綠色氫氣。電解槽為最先進的鹼性水電解技術，及模組化 20MW 裝置來生產所需的綠色氫氣。該計畫預期每年生產 700 萬噸的綠色球團礦，其中一半將轉化為 HBI 出口，透過整合再生能源與當地鐵礦，預計可減少 90% 碳排放。

此計畫企圖將該地區打造成全球綠色鐵礦生產中心，預計 2029 年實現首次出口，並擁有從礦山到港口的一體化供應鏈。

(摘自：Thyssenkrupp nucera 2025-08-28)

14. 綠鐵走廊：鋼鐵供應鏈轉型助力可持續發展(下)

全球鋼鐵業正加速邁向低碳轉型，而建立「綠鐵走廊」已成為實現此目標的關鍵途徑，尤其在北美-歐洲之間，政策正強力推動供需兩端發展。在北美(出口方)，強而有力的政策如美國「通膨削減法案」提供大量的供應方補貼，使綠氫在理想的可再生能源地區具備成本競爭力，而綠氫是綠鐵的主要成本因素。相對歐

洲(進口方)則以需求側政策為主，如碳排放交易機制(ETS)和再生能源指令(REDIII)，藉此推動脫碳鋼材的需求。由於 ETS 的免費配額將在 2026 年至 2034 年逐步取消，預計將推高碳價，最快可能在 2028 年使進口綠鐵生產的鋼材在競爭中超越當地傳統鋼材。鑑於歐洲再生能源供應有限，進口綠鐵被視為推動歐盟鋼鐵業脫碳的關鍵，能藉由美國和加拿大等具有強大氫氣生產激勵機制的先行市場，以更具成本效益的方式獲取綠鐵。

此外，如 Mauritania 等新興經濟體，憑藉豐富的再生能源和高品位鐵礦石儲量，正積極打造有利於綠鐵投資的環境，但仍需克服勞動力不足和資本成本較高等挑戰。在原料端方面，鐵礦石品質和選礦至關重要，為滿足直接還原鐵(DRI)生產所需，鐵礦石必須升級生產成球團。儘管生產直接還原級球團(品位 67%)會增加初始資本和生產成本，但由於預期銷售價格上漲可達 50%以上，使其內部報酬率高於高爐級球團，成為具吸引力的商業方案。

總體而言，綠鐵走廊的推進需要出口國和進口國政策制定者及鋼鐵業間在供應鏈上的實際合作與行動，包括展開雙邊談判、明確綠鐵作為氫進口載體、建立可信的碳核算框架，以及為新興經濟體提供更多融資選項等關鍵步驟，以降低風險並確保技術部署的確定性。

(摘自：世界金屬導報 N.2717 2025-04-29)

1. 高爐面向低碳富氧-氫躍升路徑及工作窗口分析

本論文聚焦高爐製程的富氧-氫躍升路徑，透過熱質衡算與關鍵約束量模型，理論分析了傳統高爐、噴吹循環煤氣及噴吹焦爐煤氣 3 種工藝的富氧上限和工作視窗，以及富氧率、循環煤氣量和焦爐煤氣量對低溫區熱平衡、理論燃燒溫度、焦比及爐腹煤氣量的影響規律。

研究結果顯示，傳統高爐在煤比為 150 kg/t 條件下，富氧率閾值需控制為 7.9% 以內，可維持理論燃燒溫度 t_f 在 $(2150 \pm 50)^\circ\text{C}$ 的順行區間，同時保證低溫區熱通量不小於 2.8 GJ/t。採用噴吹循環煤氣工藝時，富氧率上限提升至 52.23%，焦比顯著降低至 207.44 kg/t，比基準工況下降 18.6%。而噴吹焦爐煤氣工藝在低煤比條件下，富氧率上限達 35.67%，焦比最低值降至 183.91 kg/t，比循環煤氣工藝再降 11.3%，展現出更優的碳減排潛力。

研究進一步發現，在 t_f 穩定控制範圍內，富氧率每提升 1%，風口循環煤氣量可增加 9.15 m³/t，最大噴吹量達 458.26 m³/t；焦爐煤氣噴吹量則隨著富氧率的增加呈非線性增長，上限值為 293.27 m³/t。低溫區熱平衡呈現非對稱變化特徵，當富氧率從 5% 增大至 35% 時，熱需求下降 22.4%，而熱供給降幅達 31.7%，這種供需失衡現象為高爐熱管理提出了新的調控要求。

研究結果揭露了噴吹焦爐煤氣工藝的三重協同效應：透過富氧率提升實現工藝視窗擴展，借助 $\text{H}_2:\text{CO}$ (質量分數比) 來優化降低焦比，並利用煤氣重整反應調節熱平衡。

(摘自：鋼鐵(CNKI) 2025-09-12)

2. 富氫高爐的一維動力學模型驗證與預測

本論文根據高爐運行時的速率方程和控制方程建立高爐噴吹氫氣的一維動力學模型，模擬氫氣噴吹對冶煉狀態的影響並利用高爐實際運行數據進行驗證，

得到噴吹不同氫氣量時高爐熱儲備區變化情況以及對間接還原度的影響。

研究結果顯示，隨著氫氣噴吹量的增加，熱儲備區平均溫度由不噴吹時的 1052K 提高至噴吹 100m³/t 氫氣時的 1253K，上邊緣向下移動 0.1m，下邊緣向下移動 1.5m，高度增加 1.4m。爐內整體間接還原度有所提升，鐵礦石的間接還原度從 60.68% 增加到 70.65%。

動力學模型與能質平衡模型的計算結果非常吻合，增加氫氣噴吹量利於間接還原發生，整體上還原速率不斷加快，有助於進一步降低高溫區直接還原耗碳。

(摘自：鋼鐵(CNKI) 2025-09-12)

3. LF 加廢鋼降鐵耗工藝研究與實踐

本論文研究在高爐製程中透過 LF 精煉工藝加入廢鋼降低鐵水單耗的技術路徑及其對煉鋼工藝的影響。研究結果顯示：廢鋼加入量增至 150kg/t，鐵水單耗可降低 10%~15%，噸鋼 CO₂排放量降低 11.0%。

廢鋼加入也帶來了一系列挑戰：廢鋼每增加 50kg/t，鋼水氮質量分數增加(3~5) ×10⁻⁶，總氧和氫含量也同步上升，鋼材中夾雜物數量及夾雜物的評級升高，電耗、電極及盛鋼桶耐材消耗顯著增加。本研究透過廢鋼熔化的熱力學與動力學研究，建立 LF 精煉廢鋼品質標準，提出了預熱至 500~1000℃的加入方式，結合提高升溫效率、控制廢鋼細微性及強化氫氣攪拌，縮短了廢鋼熔化時間並降低了成分波動。鈣處理與軟吹工藝則改善了夾雜物形態和分佈，提升了鋼水純淨度，確保了鋼材機械性能不受影響。

(摘自：煉鋼(CNKI) 2025-08-25)

4. 用於工業脫碳的綠色電解製氫工藝的優化與比較

傳統的煉鋼製程，如高爐-轉爐(BF-BOF)，是全球主要的碳排放來源之一。該製程依賴煤炭和焦炭作為還原劑和熱源，每噸鋼材的碳排放量高達 2.32 噸。雖然電爐(EAF)製程因其利用廢鋼回收而碳排放顯著降低，但受限於廢鋼供應量，仍無法完全替代傳統製程。天然氣直接還原鐵-電爐(NG-DRI-EAF)製程雖然排放較低，但每生產一噸粗鋼仍會排放 1.65 噸二氧化碳，這些數據凸顯了開發新型低碳煉鋼技術的迫切性。

為此，本研究提出了一種基於綠色氫能的 H-DRI-EAF 鋼鐵生產製程，旨在實現深度脫碳。該製程的核心在於，利用透過電解水生產的綠色氫氣作為鐵礦石的唯一還原劑，進而消除傳統還原製程中的直接二氧化碳排放。本研究對三種主要的綠色電解製氫鋼鐵廠設計方案進行了系統性評估，包括兩種使用固體氧化物電解槽(SOE)的方案和一種使用質子交換膜/鹼性液體電解槽(PEM/AEL)的方案。

其中，一項關鍵創新是 SOE-R(R 代表爐頂煙氣循環)設計方案。該方案將直接還原鐵(DRI)爐產生的煙氣循環至電解槽，並利用直接注入式蒸氣產生器，完全利用豎爐爐頂廢氣的餘熱產生 SOE 所需的蒸氣，這種優化的熱能顯著降低了系統的整體能耗。

研究結果顯示，所有 H-DRI-EAF 方案的能耗水平均顯著低於傳統的 BF-BOF 製程。其中，SOE-R-B 方案表現最佳，其單位能耗為 3.56MWh/t，比 PEM/AEL 基礎方案降低了 26.9%，比 SOE-NR-B 方案降低了 16.6%(NR 為沒有氣體循環)。這主要歸因於電解槽用電量的減少，因為無需額外電力來產生蒸氣。此外，所有方案都能夠利用電爐廢氣，這使得爐內天然氣的使用量可減少 23.9%至 42.1%。

在碳排放方面，本研究量化了各方案的二氧化碳當量(CO₂e)排放。在基於歐盟電網平均電力排放因子的情況下，SOE-R 方案的單位碳排放量為 1.20 tCO₂e/tls，與 NG-DRI-EAF 和 BF-BOF 製程相比，分別減少了 9.1%和 45.5%。

更為重要的是，隨著電網碳排放強度的降低，煉鋼過程的碳排放量也呈現顯著下降趨勢。當採用瑞典等低碳電網電力時，SOE-R-OGU(利用電弧爐廢氣)方案可實現低至 0.48 tCO₂e/tls 的超低碳排放水平。

(摘自：世界金屬導報 N.2718 2025-05-13)

5. 鋼鐵行業脫碳的技術路徑

目前鋼鐵生產主要採用三種傳統工藝路線：高爐-轉爐、廢鋼-電爐(EAF)，以及基於天然氣的直接還原鐵(DRI)-電爐。雖然廢鋼-電爐從循環經濟和減碳角度最為有效，但因回收廢鋼中雜質問題，限制了其生產高等級鋼材的能力。DRI 作為電弧爐生產優質鋼材的重要原料，主要依靠天然氣和氫氣還原鐵礦石，成為取代高爐-轉爐工藝實現脫碳的關鍵技術途徑。

針對高爐-轉爐裝置的脫碳改造，可採用基於氣體的直接還原工廠和電弧爐取代煉鐵高爐系統，同時保持轉爐下游煉鋼設施繼續運行。此體系中，直接還原工廠使用天然氣、氫氣和低品位精鐵礦球團生產熱直接還原鐵(HDRI)，再送入電爐生產含特定碳含量的鐵水供轉爐使用。

DRI-EAF 和 DRI-熔爐-轉爐兩種組態能生產多種質量等級鋼材。直接還原工廠以天然氣和氫氣為主要能源，透過烴類重整轉化為氫氣和一氧化碳用於還原鐵礦石，最終副產品為二氧化碳和水。相較於高爐-轉爐工藝，此工藝可減少約 50% 或更多的二氧化碳排放。

用天然氣直接還原鐵礦石主要有兩種方法：

(1)以 ENERGIRON 為代表，該工藝無論使用何種還原氣體來源，核心組態都相同，且在較高壓力下運行。這項由 Tenova 和 Danieli 聯合開發的創新技術，包含一個高效且具選擇性的二氧化碳去除系統，配備一個工藝氣體加熱器(PGH)，將還原氣體溫度提升至所需水準，必要時還可注入氧氣。該二氧化碳

去除系統能夠捕獲約 60%的總排放量，同時使未反應的氫氣和一氧化碳循環回到還原豎爐。尾氣僅用於系統內的惰性氣體吹掃和壓力控制。工廠只需調整運行模式，就能使用天然氣和氫氣的任意組合運行。

(2)專為 100%使用天然氣而設計的最佳化組態，它包含天然氣重整器、一個熱回收系統，以及將尾氣用作燃料，其主要功能是透過煙道氣對工藝過程進行非選擇性的除碳。然而，該方法本身缺乏高效去除二氧化碳的能力。

採用 ENERGIRON 工藝的工廠具備獨特的靈活性，能夠使用相同的工藝流程和裝置，以任意還原氣體組合進行生產，如瑞典 Hybrit 工廠，它以 100%的氫氣作為生產氣體，以及寶鋼湛江廠，使用天然氣、焦爐煤氣和氫氣進行生產。直接還原工廠可以透過調整工藝參數，並根據操作模式繞過某些裝置來處理從天然氣與氫氣的任意混合比例，包含 100%氫氣。此外，ENERGIRON 在工藝組態中已內建了二氧化碳去除系統。若 CCUS 技術可用，即便不使用氫氣為原料，該工藝也能使直接還原工廠的二氧化碳排放量減少約 60%。

(摘自：世界金屬導報 2025-05-13)

6. 高爐煤氣脫氯脫硫技術研究與應用實踐

本研究分析了首鋼 2 號高爐煤氣有害組分及遷移規律、HCl 高效脫除、COS 高效轉化、H₂S 高效吸收、單質 S 提取資源化轉化等多項技術，在高爐煤氣深度淨化工藝、關鍵裝備開發、水解催化劑高效長壽運行、高硫容抑鹽脫硫催化劑應用等核心技術研發上取得了創新成果。高爐煤氣脫氯、脫硫技術的應用，不僅解決了末端排放污染問題，還實現了硫資源化回收利用，並且避免硫元素污染物的二次轉移。

同時，由於該技術具有脫氯及脫硫效率高、適應煤氣中硫元素波動範圍寬等優點，為高爐煉鐵配用高硫焦、高硫煤提供了更大選擇空間，有效降低了煉鐵運

行成本，為延長高爐煤氣管網裝置設施壽命等行業難題提供了新的解決方案。

本研究開發的高爐煤氣脫氮、脫硫技術屬於煤氣污染物源頭治理技術，能夠完全取代部分高爐煤氣噴鹼脫氮及末端煙氣脫硫，實現超低排放要求，避免了高爐煤氣下游使用者點多、分散廣，需要配備多套煙氣脫硫設施問題。與末端煙氣脫硫技術相比，本研究開發的高爐煤氣脫氮、脫硫技術具有一次性投資少、運行成本低、工程佔地小等優點，並且實現了硫資源化回收利用。

(摘自：世界金屬導報 2025-05-20)

7. 中國鋼鐵行業 CCUS 技術發展現狀及前景

碳捕捉、利用與封存(CCUS)技術透過分離與封存二氧化碳，被視為實現碳中和的關鍵技術之一。儘管中國的 CCUS 技術已形成完整的流程體系，並在多個行業進行示範應用，但目前在鋼鐵行業的應用規模尚小，表 2 列舉其中一部分案例。該技術面臨成本高、捕捉與儲存能力不確定、能源消耗大等挑戰，且缺乏大規模應用的實際案例。

表 2、中國鋼鐵行業 CCUS 專案列表

鋼廠	專案名稱	項目類型	CO ₂ 捕捉能力	專案狀態
首鋼	曹妃甸項目	二氧化碳捕捉和強化采油	300 噸 CO ₂ /天	2015 年可行性研究
首鋼京唐	頂吹二氧化碳	二氧化碳利用	不適用	試點中
首鋼	底吹二氧化碳	二氧化碳捕捉和利用	5 萬噸 CO ₂ /年	2022 年省級試點專案
德龍鋼鐵	二氧化碳利用	二氧化碳捕捉和利用	14 萬噸 CO ₂ /年	2022 年省級試點專案
包鋼	鋼渣利用與二氧化碳驅油	二氧化碳利用	50 萬噸 CO ₂ /年 (第一階段)，總	2022 年 7 月啟動示範

鋼廠	專案名稱	項目類型	CO ₂ 捕捉能力	專案狀態
			捕捉能力為 200 萬噸 CO ₂ /年	

理論上，中國擁有巨大的 CO₂ 封存能力，其陸上盆地的 CO₂ 封存潛力為 2.3 萬億噸，在相對較近的近海盆地還可封存 7800 億噸 CO₂。中國的鋼鐵廠大多分佈在河北、遼寧、山西、內蒙古等鐵礦石和煤炭資源豐富的省份，以及在鋼鐵產品需求量較大的沿海地區。研究顯示，截至 2020 年，中國約 79% 的鋼鐵廠能夠在其半徑 250 公里以內找到合適的 CO₂ 封存地點。

儘管存在挑戰，CCUS 對於鋼鐵業實現淨零排放至關重要。它不僅能彌補傳統減碳手段的不足，還能與現有高碳排工藝結合，在短期內有效幫助鋼鐵企業減少碳排放。根據研究預測，2050 年中國在淨零碳排放情境下，透過高爐-轉爐結合 CCUS 技術生產的鋼鐵仍將佔總產量的 14%。未來，CCUS 技術預計將與傳統鋼鐵生產工藝及氫冶金過程結合，成為鋼鐵業脫碳的重要發展方向。要實現 CCUS 技術的大規模應用，需要降低成本、提高能效與安全性，並完善相關政策、法規與市場機制。

(摘自：世界金屬導報 2025-04-29)

※中國主要鋼廠 CCUS 技術發展現況

撰稿人 T41 郭寶騰

一、前言

中國鋼鐵工業在全球市場中佔據著舉足輕重的地位。根據世界鋼鐵協會(worldsteel)的數據，2024 年中國粗鋼產量達到 10.051 億噸，佔全球總產量約 54%，且為滿足中國政府所提出之「雙碳」目標，技術研發路徑已漸朝向綠色、低碳冶金邁進，其中二氧化碳捕集、利用與封存(CCUS)技術的戰略價值亦日益凸顯。

中國鋼鐵生產目前仍以「高爐-轉爐」製程為主導，以鐵礦石及焦炭為主要原料的生產方式，令其在冶煉過程中有難以避免的製程碳排放。縱使電爐製程及氫能冶金可顯著降低碳排放，然受限於高品質廢鋼供應不足及綠氫的製備成本高昂等問題，CCUS 作為對二氧化碳的處理技術，仍可結合傳統高爐製程，達到減碳的效益。

二、中國主要鋼廠 CCUS 專案

CCUS 技術與增用廢鋼、直接還原鐵生產及氫能冶金相比，其規模化商業應用仍面臨許多挑戰。CCUS 項目涉及捕集、運輸及封存等多個環節，需要巨大的資本與營運支出，運輸及封存的基礎建設建置亦存在不確定性，缺乏實際案例支持，使企業投資回報存在巨大風險。

彙整目前中國主要鋼廠 CCUS 專案推展近況：

(一) 寶鋼

寶鋼於 2022 年 11 月聯合中國石化、殼牌及巴斯夫三家公司簽署合作備忘錄，目標建置位於華東地區的首個「開放式千萬噸級 CCUS 項目」，其「開放式」的定位，係為建構一個區域性的公共基礎設施平台，為長江中下游經濟帶的鋼鐵、化工、電力、水泥等多個高碳排放行業，提供一體

化的二氧化碳減排方案。根據規劃，將利用槽船等方式集中運輸來自不同企業的碳源，匯集到二氧化碳接收站後，再透過短途管道輸送至陸上或海上的永久封存點，目前仍處於可行性研究階段。

(二) 包鋼

包鋼於 2022 年 6 月開展 200 萬噸 CCUS 專案建設，分為三期 (50+50+100)建設，目前第一期 50 萬噸建置中，建成後預計每年可減排二氧化碳 36.53 萬噸。捕獲的二氧化碳，一部分用於包鋼碳化法鋼渣綜合項目固化利用，另一部分經過壓縮液化後，送至油氣田進行壓裂等油氣田增產服務，實現二氧化碳永久地質封存。

(三) 河鋼

河鋼於 2023 年 3 月與必和必拓在簽署鋼鐵行業 CCUS 工業示範專案合作協定，將建成多個千噸級的示範項目，佈局覆蓋兩大方向：一是「鋼渣碳化與資源化」，即利用鋼渣，來吸收煙氣中的二氧化碳，將其礦化固定，實現固廢的資源化利用；二是「高爐煤氣/熱風爐碳捕集」，針對鋼鐵流程中不同濃度和組分的含碳氣體，開發高效、低能耗的捕集技術。此外，本次合作亦致力於二氧化碳高值化技術，如用於生產菌體蛋白等，仍處技術開發中。

(四) 建龍鋼鐵

建龍鋼鐵今年建成 5 萬噸二氧化碳捕集專案，以煙氣作為氣源，採化學吸收法對二氧化碳進行捕集，相較傳統變壓吸附法，生產每噸二氧化碳所需要的原料煙氣、電、循環冷卻水都要節省大約 30%，且所需蒸汽品質低，消耗試劑少。配套建設的二氧化碳提純裝置可將氣態產品純度提升至 99.5%以上，液態產品純度提升至 99.8%以上。後續將用於煉鋼製程，年可創造經濟效益 900 餘萬人民幣(約新台幣 3800 萬元)。

(五) 首鋼

首鋼京唐於 2023 年投運首套石灰窯煙氣二氧化碳捕集系統，年捕集規模達 5 萬噸，產出的二氧化碳純度可達 99.8%以上，可用於轉爐噴吹、鋼渣碳酸化固化及對外銷售，累計捕集量已超過 12 萬噸。

首鋼朗澤自 2011 年建成尾氣生物發酵中試裝置，該技術的核心是利用轉爐氣，轉化為燃料乙醇和微生物蛋白。2024 年 11 月，河北曹妃甸基地的年產 1.5 萬噸無水乙醇及 750 噸微生物蛋白的示範項目啟動，預計 2025 年底投產，可實現每噸乙醇固定約 0.5 噸的二氧化碳。首鋼朗澤已在河北、寧夏、貴州等地建置四套規模化裝置，生物乙醇與微生物蛋白的產能分別累計達到 21 萬噸和 2.3 萬噸。

從上述案例來看，中國鋼廠的 CCUS 發展雖尚未大規模商業化，卻呈現多元化路徑，如著重於捕集規模與基礎設施（如寶鋼、包鋼），或聚焦於鋼渣碳化及支援下游製程（如河鋼、建龍），亦有結合生物轉化與新材料應用的探索（如首鋼）。多數專案皆以「**二氧化碳捕集與再利用**」為核心，而封存目前仍處研究階段，以下表格將其統整比較（如表 3）。

表 3、中國主要鋼廠 CCUS 專案彙整

鋼廠名稱	捕集規模/年	應用方向	目前進度
寶鋼	規劃千萬噸級	高碳排產業集成平台，以槽船及短管道輸送，最終陸上/海上封存	可行性研究階段
包鋼	200 萬噸（三期：50+50+100 萬噸）	部分碳固化於鋼渣，部分液化後輸送至油氣田封存	第一期 50 萬噸建置中
河鋼	規劃千噸級	鋼渣碳化資源化、高爐煤氣/熱風爐捕集、二氧化碳高值化（菌體蛋白）	技術開發與示範階段

鋼廠名稱	捕集規模/年	應用方向	目前進度
建龍鋼鐵	5 萬噸	化學吸收法捕集，二氧化碳提純後用於煉鋼製程	已投運
首鋼	5 萬噸；生物轉化可固定 0.5 噸 CO ₂ /噸乙醇	捕集後應用於轉爐噴吹、鋼渣固化、乙醇與蛋白生產	已累積捕集 12 萬噸；示範項目預計 2025 年底投產

三、結論

中國鋼廠的 CCUS 發展，目前主要集中於「捕集」與「再利用」，包括鋼渣碳化、油氣田增產以及生物轉化等多元應用；而「封存」部分尚缺乏具體實績，仍處於研究或規劃階段。CCUS 在中國短期內難以形成大規模商業化，但其戰略意義在於補足「高爐 - 轉爐」製程的減碳缺口。未來若要推動規模化，需仰賴基礎設施的建設、捕集成本下降以及政策補貼支持。

借鏡中國經驗同時考量台灣在地條件，中鋼未來若要推動規模化，可持續深化技術應用、推動跨產業合作以及預先布局新興鋼材等三個建議佈局的面向，此舉亦與當前發展方向相近，簡述如下：

- (一) **深化技術應用**：除基礎的捕集技術，應評估並發展如鋼渣碳化與生物轉化等高值化技術，將碳排放轉化為有價值的副產品，創造新的經濟效益。
- (二) **推動跨產業合作**：參考寶鋼「開放式千萬噸級 CCUS 項目」的模式，與高雄在地的石化、水泥、電力等高碳排產業共同合作，建立區域性的碳捕集與運輸平台，分攤巨大的資本與營運支出。
- (三) **預先佈局新興鋼材**：應趁早佈局 CCUS 供應鏈所需的新興綠色鋼材市場，如二氧化碳輸送管道用鋼，發揮研發優勢，建立新的產品護城河，搶佔市場先機。

總體而言，CCUS 不僅是減碳的關鍵技術，更是強化產業競爭力、開拓新興市場的重要途徑。透過借鏡中國鋼廠的經驗，可作為政策擬定的參考以及當前作業調整的依據，協助公司在綠色冶金的轉型浪潮中，走出一條最合適的道路。

四、參考資料

- [1] December 2024 crude steel production and 2024 global crude steel production totals - worldsteel.org
- [2] 我国首个开放式千万吨级 CCUS (二氧化碳捕集、利用与封存) 项目启动—中国钢铁新闻网
- [3] 壳牌与中国石化、中国宝武、巴斯夫合作寻求在中国建设开放式碳捕集、利用与封存项目的机会-美通社 PR-Newswire
- [4] 包钢有序推进 CCUS 全产业链示范项目工程建设_二氧化碳_重点_进度
- [5] 河鋼集團與必和必拓簽署鋼鐵行業 CCUS 工業示範專案合作協定
- [6] 山西建龍 5 萬噸二氧化碳捕集專案建成 年可創效 900 餘萬元
- [7] 首钢朗泽：以 CCUS 技术赋能工业绿色未来
- [8] CO₂ 回收幹嘛用？ 國內鋼鐵行業 CCUS 碳捕集回收利用大起底