



產業動態

- | | |
|-------------------------------|----|
| 1. 日本首個強制碳交易體系上路遭批缺乏誘因及雄心 | 1 |
| 2. 煤炭制約：GEM 報告認為鋼鐵脫碳進程偏離軌道 | 2 |
| 3. 塔塔鋼鐵荷蘭公司加入歐洲循環鋼鐵研究專案 | 3 |
| 4. 世界鋼鐵協會指出廢鋼比拉開歐亞鋼品碳排差距 | 3 |
| 5. 中國鋼鐵業進入剛性減產時代碳成本全面顯性化 | 5 |
| 6. 波士頓金屬公司 MOE 技術在綠色金屬回收的應用 | 6 |
| 7. JFE 工程電力子公司協助安裝單樁基礎結構 | 7 |
| 8. 浦項承接澳洲 LETA 委託研發鋼廠 CCUS 技術 | 8 |
| 9. 神戶製鋼擬斥資千億日圓新建 70 萬噸廢鋼熔煉爐 | 8 |
| 10.JSW 計劃捕捉鋼廠二氧化碳結合綠氫轉化為甲醇 | 9 |
| 11.首鋼水鋼「超碳一號」二氧化碳餘熱發電專案投運 | 10 |
| 12.張宣科技實施「短平快」節能技改專案 | 10 |

技術/生產資訊

- | | |
|----------------------------|----|
| 1. 高鹼度球結礦的固結行為與性能演變 | 12 |
| 2. 高比例球結礦技術特徵及國際鋼廠實施成效 | 12 |
| 3. 富氫與傳統高爐條件下燒結鐵礦模擬物還原行為研究 | 14 |
| 4. 首鋼 2 號高爐噴吹焦爐煤氣工業試驗 | 16 |

技術/生產資訊

- | | |
|--|----|
| 5. 高爐噴吹焦爐煤氣時風口佈置對煤粉燃燒行為的影響 | 17 |
| 6. 鋼鐵原燃料碳排放分析與減碳研究 | 19 |
| 7. H2Gen [®] 高爐煤氣製氫技術示範工廠最新進展 | 20 |
-

技術專欄

- | | |
|------------------------|----|
| ※鋼鐵產業碳捕捉與封存(CCS)發展動態調查 | 22 |
|------------------------|----|
-

1. 日本首個強制碳交易體系上路遭批缺乏誘因及雄心

日本政府為實現巴黎協定與 2050 年淨零排放承諾，正式實施首個強制性碳排放交易計劃：綠色轉型交易體系 (Green Transformation Emissions Trading System, GX-ETS)，成為新碳定價體系兩大支柱之一。該系統涵蓋約 400 家年均排放量達 10 萬噸以上的企業，佔全國溫室氣體排放量約 60%，並與 2028 財年起針對化石燃料徵收的燃料附加費相輔相成。最新數據顯示，2024 年日本溫室氣體排放量下降 1.9%，為連續第三年下降，且較 2013 年累計減少 28.7%，但要達成 2050 碳中和，整體減排速度仍被認為過於緩慢。

此系統由過渡期的自願性體系轉為強制性計劃，允許企業購買碳信用及抵銷額度來抵銷最多 10% 的排放。然而，因初期許多企業依能源效率標準獲得豁免，且電力業等高排放產業的有償排放配額分配延至 2033 年才開始，引發氣候倡議團體與研究機構的批評。東京再生能源研究所等機構指出，該系統未對產業配額設定總體上限，其自下而上的務實設計雖然克服了日本經濟團體聯合會及鋼鐵、石油等製造業利益團體的強烈反對，卻也因基準指標精進速度過慢、缺乏整體減排上限，導致重工業與化學工業投資脫碳技術的誘因不足。

相較於已運行 20 年的歐洲排放交易體系，以及涵蓋 77.75% 碳排放的韓國系統，日本 GX-ETS 被認為缺乏雄心。在近期中東危機引發進口化石燃料價格上漲的背景下，研究機構呼籲政府應加速提升發電與工業領域的脫碳表現，擺脫化石燃料依賴以提升能源自主。

(摘自：The Japan Times 2026-05-17)

2. 煤炭制約：GEM 報告認為鋼鐵脫碳進程偏離軌道

根據全球能源監測組織 (Global Energy Monitor, GEM) 發布的第六份年度報告《Pedal to the Metal 2026》，全球鋼鐵業的綠色轉型正面臨誠信危機。該報告分析了全球 91 個國家、共 1,293 家鋼鐵廠的數據，指出全球目前仍有約 3.19 億公噸的新增煤炭高爐產能在開發中，較去年增長了 5%。此外，若計入現有 8000 萬公噸高爐的維修計畫，其所保留的煤炭產能遠超已宣布退役的 1.41 億公噸產能。預計到 2035 年，全球高爐產能將淨增 8800 萬公噸，這與各國政府及企業承諾的脫碳目標嚴重背離。

在排放數據方面，鋼鐵產業排放量約佔全球總量的 11%，其中 88% 來自煤炭高爐製程。目前規劃中的高爐一旦全面投產，每年將增加 6.6 億公噸的二氧化碳當量。相較之下，電爐的採用進展極為緩慢，全球市產能佔比僅從 33% 成長至 34%。而最具減碳潛力的氫能直接還原鐵 (DRI) 技術，目前僅佔全球鐵元素產能的 10%，且其中僅有 2% 使用綠氫作為還原劑，顯示理想與現實間存在巨大鴻溝。

報告點名中國與印度為全球煤炭產能擴張的主要驅動力，兩國合計佔全球新增規劃產能的 86%。中國雖開始調控產能，但因現有高爐設施較新，面臨嚴重的資產鎖定風險；印度則因基礎建設需求，計畫在 2030 年將產能提升至 3 億公噸。相對而言，德國政府展現積極作為，提撥 50 億歐元支持低碳技術，並首度將碳捕捉與封存 (CCS) 納入補助，試圖精進製程以平衡經濟與環保。GEM 研究員強調，中印兩國若不轉向低排放技術，鋼鐵業將無法達成巴黎協定 1.5°C 的控溫目標。

(摘自：Global Energy Monitor 2026-05-11)

3. 塔塔鋼鐵荷蘭公司加入歐洲循環鋼鐵研究專案

塔塔鋼鐵荷蘭公司正式宣布加入歐洲「大眾市場應用之循環鋼鐵 (Circular Steel for Mass Market Applications, CiSMA)」研究專案，目標透過 100%再生廢鋼與電爐冶煉，將薄板鋼材生產過程的碳排放量降低 70%；提升從廢鋼流中回收鋼等關鍵原材料的技術，強化循環經濟。儘管 100%廢鋼生產高階鋼材目前尚未達到商業規模，但研發成果將有助於生產廢鋼比達 30-40%的高品質鋼材，支持企業綠色轉型。

CiSMA 專案由西班牙 Eurecat 引領，匯聚來自歐洲 5 個國家的 13 個合作夥伴，包含 Volvo Cars、Electrolux Professional 及奧鋼聯等多個產業領導者，並獲得歐盟「Horizon Europe」計畫近 450 萬歐元 (約 1.66 億新台幣) 的經費補助。成員將共同評估再生鋼材在汽車零件、洗衣機及工業設備中的商業適用性，確保回收鋼材能滿足大眾市場對高品質與低碳排的雙重需求。

(摘自：SteelOrbis 2026-05-12)

4. 世界鋼鐵協會數據指出廢鋼比拉開歐亞鋼品碳排差距

世界鋼鐵協會 (worldsteel) 近期更新其全球生命週期清單 (LCI) 數據庫，範疇涵蓋全球 34 家鋼廠、超過 160 個生產廠區，總計代表超過 3.56 億噸的鋼鐵年產量。其技術量測的單位為透過高爐 - 轉爐 (BF-BOF) 製程路線所生產的 1 噸標準鋼鐵產品，藉此精確評估製程中的全球暖化影響、資源消耗，以及對水質與空氣品質的實質環境衝擊。

根據最新的分析結果顯示，亞洲及歐洲地區的鋼鐵產品在碳足跡表現上存在顯著的差異，詳如下圖。

Product-wise LCI profiles across geographies

Asia	Europe
Emissions (HRC): 2.33 tCO ₂ /t Scrap used: 0.121 tonnes	Emissions (HRC): 2.1 tCO ₂ /t Scrap used: 0.196 tonnes
Emissions (CRC): 2.75 tCO ₂ /t Scrap used: 0.078 tonnes	Emissions (CRC): 2.2 tCO ₂ /t Scrap used: 0.182 tonnes
Emissions (Rebar): 1.92 tCO ₂ /t Scrap used: 0.291 tonnes	Emissions (Rebar): 1.55 tCO ₂ /t Scrap used: 0.646 tonnes

Emissions unit in tonnes of carbon dioxide per tonne (tCO₂/t) | LCI: Life cycle inventory | Source: worldsteel

圖一、亞洲及歐洲地區熱軋、冷軋、條線產品碳排放及廢鋼使用情形

以高爐 - 轉爐製程路線生產的熱軋鋼捲 (HRC) 而言，亞洲地區產品的二氧化碳當量排放量部分高於歐洲地區；而在冷軋鋼捲 (CRC) 的技術數據對比中，亞洲產品的二氧化碳當量排放量更顯著高於歐洲，其排放差值達每噸 0.55 噸二氧化碳。在鋼筋等建築鋼材產品方面，歐洲地區的典型製程碳排放量亦比亞洲地區每噸低了約 0.4 噸二氧化碳。此項製程效益表現差異，主要取決於歐洲在生產條線產品時所投入的廢鋼比例顯著高於亞洲地區。

面對歐盟碳邊境調整機制 (CBAM) 及全球氣候貿易法規的屏障，亞洲高爐煉鋼廠正面臨競爭力下滑的技術挑戰。目前亞洲熱軋鋼捲的二氧化碳當量排放量平均值高達每噸 2.33 噸二氧化碳，顯著高於歐盟預期設定的進口碳含量門檻。限制亞洲鋼廠進行直接減碳的主要瓶頸，在於廢鋼的可得性與利用率偏低，雖然預期未來的廢鋼使用量將逐步提升，但因其供應速度仍將落後於製程需求，導致透過廢鋼調整製程的減碳成效受到限制。因此，在全球高爐型製程普遍面臨高碳排放特性的現況下，亞洲地區針對現有及新建高爐設施投入巨額資金的同時，迫切需要導入實質的低碳減排技術。

(摘自：KOBELCO 2026-04-16)

5. 中國鋼鐵業進入剛性減產時代碳成本全面顯性化

中國鋼鐵產業於 2026 年正式進入供給約束與碳排管制的剛性執行階段。在產能管制方面，新版產能置換辦法實施了嚴格的產能總量扣減機制。新規將煉鐵與煉鋼的產能置換比例統一提高至不低於 1.5:1，意即企業每新建 1 噸的新產能，必須在製程源頭強制關停並退出 1.5 噸的舊有產能，以此落實總量只減不增的剛性限制。

在碳排放管理與成本顯性化製程方面，鋼鐵業首次被正式納入碳排放權交易市場的履約範疇。噸鋼碳成本的計算模型是由企業的實際碳排放總量、市場碳價以及官方分配的免費配額比例共同決定，並扣除出售剩餘配額所獲得的收益。若以碳排放強度落後的企業進行基準假設，在全面導入的首年，由於免費配額相對充裕，鋼廠僅需在市場上購買微幅的超額配額，換算後對每噸鋼材實際增加的製造成本僅約 4-5 元人民幣（約新臺幣 18-23 元）。此階段的財務衝擊雖屬溫和，但已成功建立碳成本與財務報表的直接連結，預計 2028 年配額大幅收緊後，碳排放強度將直接決定企業的製造成本線。

在節能監察與製程分級管理方面，政策採取精準調控的有保有壓架構。能耗與排放指標達標的大型標竿企業，在生產要素配置上獲得政策幫助；反之，能耗未達標的中小型鋼廠則面臨強制進行技術改造或直接淘汰的生存壓力。這種分級管理模式，加速引導鋼鐵企業從產量規模競賽轉向綠色製程競賽。綠色管理優秀的龍頭鋼廠，憑藉著低碳排放與低污染物排放強度的製程優勢，搭配高附加價值鋼材的產銷結構，不僅能完全消化初期碳成本，更能藉由出售富餘配額獲取超額利潤。

綜合長期實施成效而言，雖然短期內產能置換旨在遏制新增增量而非強制削減現有存量，且履約初期的免費配額基本能滿足多數鋼廠的生產需求，對當前現貨鋼價的供需結構與原物料成本未造成劇烈衝擊，但中長期隨著有償配額比例逐

年遞增、碳價步入上漲通道，碳成本將如同鐵礦砂與焦炭等生產原物料，系統性地嵌入鋼鐵製造成本的常規計算公式中，為鋼價中樞提供長期且堅實的支撐。

(摘自：SNN 環宇鋼鐵網 2026-06-26)

6. 波士頓金屬公司 MOE 技術在綠色金屬回收的應用

波士頓金屬公司於熔融氧化物電解 (MOE) 方面的投資，吸引了超過 3.88 億美元的資金，參與者包含 ArcelorMittal、塔塔鋼鐵、必和必拓、沙烏地阿美創投、氣候投資公司等，代表在減碳層面上，似乎有機會可突破。當安賽樂米塔爾和塔塔鋼鐵對該技術的認可，如果 MOE 達到商業規模的里程碑，它們的參與也將自然地為合資創造機會。

MOE 技術為電化學，反應溫度約為 1600°C，電流經熔融氧化物的電解槽，斷裂鐵氧鍵，氧氣趨向陽極，液態鐵沉積在陰極。唯一釋放的氣體副產物為氧氣，碳完全不參與反應。

MOE 的好處是，能將傳統煉鋼的多階段加工，整合為一個電化學單元操作。而陽極釋放的氧氣可用於工業級副產品出售，額外創造收入。熔融氧化物電解液環境具有選擇性，能讓不同金屬在不同電位被還原，因此波士頓金屬公司可以拓展多金屬回收業務，除了鐵以外，目標是鎳、鈮、鉭、錫和釩這五種金屬，都具有重要的商業用途。

關鍵的商業排序邏輯：大規模生產綠色鋼鐵，需要驗證 MOE 在大批量生產中的性能，這是一項資本密集且耗時的工程挑戰。相較之下，關鍵金屬回收可以在小得多的電池規模下產生可觀的收益，因為鎳、鈮、鉭、釩和錫的單位價值遠高於普通鋼鐵。而且 MOE 能夠處理傳統方法無法經濟性處理的原料，進而利用原本閒置的材料創造供應鏈。關鍵金屬回收、電解液穩定性、金屬品質規格等的實際數據，能夠降低後續綠色鋼鐵商業化的風險，因為基本電化學工程挑戰大致相同。

MOE 仍面臨許多挑戰，電力成本和電網碳排放強度是最根本的敏感因素，相對於高爐煉鋼的碳優勢取決於電力供應的碳含量，在任何地區的商业案例都與電力價格和脫碳進程直接相關；1600°C 高溫的上千小時運行，保持電化學電池的完整性，需要耐火材料、電極組合物以及能夠在極端熱能和化學反應下可靠運行的防護結構；原料認證是一項重要的商業因素，並非所有礦物來源或工業爐渣都能滿足電化學製程的一致性。

波士頓金屬公司的商業擴張所需資本投入規模，即使是資金雄厚的私人公司也難以承受。對於綠色鋼鐵應用而言，更可能採用的途徑是技術授權模式，將工程技術授權給鋼鐵生產商，利用其現有的基礎設施網路和營運經驗來建造和營運相關設施。

(摘自：Discovery Alert 2026-05-25)

7. JFE 工程電力子公司協助安裝單樁基礎結構

JFE 工程公司旗下笠岡單樁製作所，已導入 100%新電力子公司 Urban Energy 株式會社提供的太陽能發電 PPA 服務，企業購電協議 (PPA) 服務，是指第三方在客戶的房屋或屋頂安裝太陽能發電設備，並在長時間內將所發電能出售給客戶，客戶無需任何初始投資即可使用再生能源電力，並有望降低電費，已於 2026 年 6 月 1 日起正式啟用。

笠岡單樁製作所是日本唯一製造離岸風力發電基礎結構物「單樁(Monopile)」的生產據點。本次利用太陽能發電的再生能源電力來製造單樁，以實現「再生能源孕育再生能源」的脫碳循環。新設置的太陽能發電由 Urban Energy 統包，負責從太陽能發電設備 (5.3MW) 的設置到後續維護作業。笠岡單樁製作所無需負擔初期費用，每年可減少 3,290 噸的 CO₂ 排放量，還能降低約一成的電力成本。

這份為期 20 年的長期合約將有助於降低電價飆升的風險，並有助於穩定能源

成本。笠岡單樁製作所超出其電力需求的剩餘電力，將調度至相鄰的 JFE 鋼鐵株式會社西日本煉鋼廠（福山地區）。

未來，Urban Energy 將繼續利用 JFE 集團的工程技術和集團共同合作，開發高附加價值的購電協議服務，目標是在 2027 財年實現累計 200MW 的購電協議服務。

（摘自：JFE Engineering 2026-06-01）

8. 浦項承接澳洲 LETA 委託研發鋼廠 CCUS 技術

浦項控股與澳洲低碳技術投資機構 LETA (Low Emission Technology Australia)正式簽署委託合約，將承接 CCUS 領域的研發計畫，開發適用鋼廠運作環境的碳捕捉技術。浦項將在未來三年內獲得約 348 萬澳元（約 7,828 萬新台幣）的研發資金，並評估該技術應用於浦項鋼廠的實際可行性。

浦項氫能與低碳研究所將著重提升符合煉鋼製程特性的二氧化碳捕捉效能。在考量實際鋼廠的運作的條件下，改良吸收劑的效能與穩定性，同時改良碳捕捉製程設計。基於研究成果，該公司將透過分階段驗證，評估每日捕捉數十噸二氧化碳的可行性。

（摘自：POSCO Newsroom 2026-05-15）

9. 神戶製鋼擬斥資千億日圓新建 70 萬噸廢鋼熔煉爐

神戶製鋼計畫在加古川製鋼所新建廢鋼熔煉爐，年產能預計達 70 萬噸，投資額約為 1,000 億日圓（約 198.3 億新台幣）。相關決策將於 2027 財年定案，並於 2030 年初正式投產。

新熔煉爐能在擴大廢鋼使用量的同時，結合既有的高爐及轉爐製程，將高爐

鐵水與廢鋼熔煉爐產出的鋼液，在轉爐內進行混合。透過提升廢鋼的投入比例，減少高爐鐵水的使用量，有效降低碳排放，以滿足下游客戶對低碳排放鋼材日益增長的需求。

(摘自：SteelOrbis 2026-05-20)

10.JSW 計劃捕捉鋼廠二氧化碳結合綠氫轉化為甲醇

在挪威奧斯陸舉行的第三屆「印度-北歐峰會」期間，JSW 鋼鐵與 Bharatia 及 Carbon Iceland International 共同簽署合作備忘錄，將攜手開發大型綠色甲醇「e-methanol」專案，為鋼鐵業建立具備可擴展性的碳捕捉與利用 (CCU) 路徑。

三方將利用 JSW 馬哈拉施特拉邦雷加德地區的工廠在鋼鐵生產過程中產生的二氧化碳，並結合再生能源生產的綠氫，將其轉化為綠色甲醇。專案規劃年產能達 30 萬噸，初步合作範圍先評估並利用 JSW 鋼廠現有的高純度二氧化碳，後續將進一步評估從更廣泛的鋼鐵製造運營中捕捉額外二氧化碳的機會。

Bharatia 是一家非盈利基金會，營運「Bharat 科技與影響加速器」的技術商業化和執行平台；Carbon Iceland International 彙集全球在二氧化碳捕捉、可替代燃料生產及工業脫碳方面的專業知識，透過成熟的技術和綜合執行能力，能夠快速部署可擴展、低風險的綠色燃料專案。

(摘自：SteelOrbis 2026-05-26)

11. 首鋼水鋼「超碳一號」二氧化碳餘熱發電專案投運

首鋼水鋼超臨界二氧化碳餘熱發電技術示範工程「超碳一號」已全面建成，兩台 15MW 機組皆順利併網發電，總裝機容量將達 30MW，為目前全球規模最大、運行最穩定的超臨界二氧化碳發電標竿專案。

超臨界二氧化碳($s\text{-CO}_2$)是一種在臨界溫度(31°C)和臨界壓力(7.38 MPa)以上存在的特殊流體狀態，「超碳一號」採用 $s\text{-CO}_2$ 取代傳統水蒸氣作為循環工質，使其兼具氣體高擴散性與液體高密度特性。

「超碳一號」基於封閉式布雷頓熱力循環，利用現有燒結廠的餘熱煙氣加熱 $s\text{-CO}_2$ ，不需頻繁補水且不生水垢；高密度的流體能更高效地「搬運能量」，強力推動發電機旋轉。與傳統蒸汽餘熱發電相比，具有體積小、效率高及響應快的優勢：

- (1) **效率與經濟效益**：發電效率提升 85% 以上，每年可新增發電量超 7,000 萬度，為企業增收約 3,000 萬人民幣（約 1.4 億新台幣）。
- (2) **運維與空間改善**：系統占地面積減少 50%，輔助設備減半；運維成本顯著下降，僅需 2 人即可值守。
- (3) **節源與環保效益**：水耗降低達 50% 以上，幾乎不需消耗水資源；在碳減排方面，每年可實現數萬噸級的減碳效益。

（摘自：鐵諾諮詢 2026-06-02、IT 之家 2026-05-31）

12. 張宣科技實施「短平快」節能技改專案

河鋼集團張宣科技近期成功投用一批週期短、投資少、見效快的「短平快」節能技改專案。這是該公司在建設綠色工廠過程中，推進節能降碳與打造極致能效的重要舉措，旨在為近零碳生產的穩定順行提供關鍵能源支持。

這批專案以水系統供給改造為基礎，年可節約用電量達 196.59 萬度，降低

電費支出 127.58 萬人民幣 (約 593.6 萬新台幣)。其中，產線淨環供水泵的節能率更高達 53.7%，為下一批 14 台套變頻裝備的技術改造積累成熟經驗。專案以輕量化簡易技改替代大型新裝備投入的模式，從產業協同及「兩提兩控一平台」標準等維度，構建出全鏈條、高標準的節能降碳體系。

此外，張宣科技結合「氫基豎爐—近零碳排電爐」新型短流程技術的實際應用效果，不斷精進方案。深挖設備節能潛力以實現降本增效的同時，持續提昇用能架構、降低碳排放指標，雙向統籌經營效益與綠色發展。

(摘自：中國金屬學會 2026-05-26)

1. 高鹼度球結礦的固結行為與性能演變

在鋼鐵產業綠色低碳發展背景下，提高球結礦配比成為必然趨勢。然而，傳統酸性球結礦還原膨脹率高、軟熔溫度低，且難以滿足高爐爐料綜合鹼度要求，無法提升配比。高鹼度球結礦可有效改善上述缺陷並最佳化爐料鹼度結構，但鹼度提升對球結性能的影響機制尚需深入研究。

本論文系統考察了鹼度(1.0~1.5)和鹼性熔劑種類對高鹼度球結成球固結及性能演變的影響。研究結果顯示，隨著鹼度的增加，生球品質呈現先改善後劣化的趨勢，在鹼度為 1.2 時達到最優；成品球抗壓強度在鹼度為 1.3 時達到峰值；微觀分析揭示適宜鹼度下形成的鈣鐵橄欖石和鐵酸鈣等高強度結合相呈網路狀分佈，固結模式從「點-點接觸」升級為「面-面結合」。還原膨脹率隨著鹼度增加從 24.3%大幅降低到 8.0%，這歸因於鐵酸鈣對鐵原子遷移的強烈約束作用。

隨著石灰石粉配比（質量分數）從 0%增加至 2%，成品球抗壓強度降低約 600N/P，這主要是由於石灰石分解滯後導致高強度黏結相生成不足及 CO₂ 逸出形成的微裂紋網路。還原膨脹率在石灰石粉配比（質量分數）為 1%時降低到最低值 10.7%，此時孔隙結構與結合相強度達到最優平衡。建議鹼度控制為 1.2~1.3，可兼顧生球成型性能、成品球機械強度和抗膨脹性能；石灰石粉加入量（質量分數）應控制在 1%以內。

（摘自：鋼鐵(CNKI) 2026-04-13）

2. 高比例球結礦技術特徵及國際鋼廠實施成效

高爐高比例球結礦冶煉技術透過球結礦的高鐵品位、均勻粒度及優異冶金性能，重構爐內氣、固、液三相的傳質與傳熱製程，有效縮減軟熔帶厚度並強化間接還原反應。在製備端，需嚴格控管添加劑用量、焙燒溫度與氧化氣氛，使球

結礦抗壓強度維持在 2500N/個球以上、低溫還原粉化率 (RDI-3.15) 小於等於 15%。酸性、熔劑性與鹼性球結礦的還原度指數分別需達到 70%與 75%以上。若原料產生波動或焙燒溫差大於 50°C，將導致抗壓強度劣化至 500N/個球，使高爐穩定運行增添變數。在操作端，高球結比冶煉易引發煤氣流「中心過透、邊沿遲滯」之特徵，當中心氣流速度超過 6m/s 時，煤氣利用率會降至 45%以下，因此需改善裝料、送風、熱制度與造渣等操作機制，並搭配高爐爐型改良與布料設備升級，以確保爐況穩定順行。

在技術成效方面，高比例球結礦能顯著改善料柱空隙度，使壓差降低 10 至 15kPa，煤氣利用率提升至 48%至 52%，利用係數提高 10%至 15%。在環保與能效上，球結製程的顆粒物、SO₂ 與 NO_x 最大排放因子分別僅為 0.15kg/t、0.21kg/t 與 0.55kg/t，遠低於燒結製程，且能讓高爐燃料比降低約 10%，噸鐵綜合成本降幅可達 3%至 5%。

目前主要鋼廠實施成效如下：

- (1) 瑞典 SSAB 3003m³高爐實施 100%全球結礦冶煉，入爐品位達 66%，在富氧率 3%下，煤氣利用率達 54.6%、利用係數 2.3t/(m³·d)，燃料比降至 450kg/t，其技術關鍵在於減小爐身角與爐腹角以因應低溫還原膨脹，並調控爐渣成分使 (MgO+CaO)/SiO₂ 為 1.43，爐渣黏度維持在 0.20 至 0.35Pa·s。
- (2) 日本神戶製鋼 3 號高爐 (1863m³) 在球結礦比例達 80%時，藉由控制爐喉徑向礦層與料層厚度比值，並增加裝料批次，成功將焦比降至 283kg/t。
- (3) 首鋼京唐 5500m³高爐將球結礦比例提升至 55%以上，利用係數達 2.30 至 2.62t/(m³·d)，焦比降至 257kg/t，焦炭負荷突破 6.0。其核心技術為將球結礦平均粒徑提高至 13.6mm (12 至 16mm 佔比大於 85%)，並控制抗壓強度低於 800N/個球的比例在 1.5%以下；同時維持焦炭品質 M40 大於等於 90%、CSR 大於等於 72%，限制鹼金屬負荷(K₂O+Na₂O)低於 2.6kg/t。配合 190t 超大礦批與「中心加焦」模式，送風制度採高頂壓(270 至 280kPa)，

並將爐渣鹼度調高至 1.20 至 1.25，鎂鋁比維持在 0.5 至 0.6。

(4) 河鋼唐鋼 2922m³高爐則將球結礦配比提升至 30%以上 (鹼性球結最高達 34.06%)，入爐品位大於 58.5%，熟料比約 90%。透過改善槽下配料順序與布料矩陣、提高入爐風量至 5950m³/min、富氧率 6%、熱風溫度 1220℃以上，並控制鎂鋁比在 0.50 至 0.55，實現日產量 8960t/d，利用係數 3.06t/ (m³·d)，燃料比 510kg/t 的優異指標。

綜上所述，高比例球結礦冶煉技術已由理論研究成功走向規模化工業應用，未來技術突破的關鍵結論如下：

- 必須建立更嚴格的球結礦品質分級標準，並針對不同製程精進原料粒度與焙燒制度，以解決原料波動帶來的抗壓強度與還原膨脹風險。
- 需加速導入動態氣固結合的布料矩陣調控技術與智能化人機協作決策系統，以因應高球比下複雜的煤氣流與爐渣性能失衡問題。
- 應與高比例球結礦與氫基冶金等前瞻低碳技術的深度結合，並積極參與國際 ISO 低碳生產技術規範之制定，以建構更具競爭力的綠色煉鐵技術體系。

(摘自：煉鐵(CNKI) 2026-05-16)

3. 富氫與傳統高爐條件下燒結鐵礦模擬物還原行為研究

為了降低鋼鐵製造製程中的整體二氧化碳排放，在高爐中利用氫氣部分替代煤炭或焦炭已被視為極具前景的解決方案。本研究由澳洲紐卡索大學的 BHP 永續煉鋼研究中心與 BHP 等機構共同合作，專案團隊藉由在包含氫氣與水蒸氣的真實高爐煤氣成分下，對燒結鐵礦模擬物進行恆溫還原實驗，藉以評估在富氫高爐發展趨勢下，燒結礦礦物相與氣體成分對還原性的影響。

研究團隊利用紅外線快速加熱爐，將澳洲鐵礦砂精粉製成結構比工業燒結

礦更均勻、且比粉末樣品更具孔隙代表性的燒結鐵礦模擬物。實驗藉由調控燒結冷卻階段的冷卻速率來改變模擬物的初始礦物組成，成功製備出磁鐵礦為主的快速冷卻樣品，以及鈣鐵礦（SFCA）為主的慢速冷卻樣品。在還原測試中，團隊採用熱重分析儀在 900 度 C 下對兩種模擬物進行 120 分鐘的恆溫還原。

研究取得的關鍵成果表明，在模擬高爐煤氣成分下，類比物的最終還原度順序為：純氫氣與氮氣混合氣（H₂-N₂）> 純一氧化碳與氮氣混合氣（CO-N₂）> 富氫高爐煤氣 > 傳統高爐煤氣。儘管調控冷卻速率使初始礦物相（SFCA 與磁鐵礦含量）產生劇烈變化，但在相同還原氣體下兩者還原度並無顯著差異，這顯示在總孔隙率相近（約 26.4% 到 28.6%）的狀況下，氣體在孔隙中的擴散行為對整體還原性更具主導性影響。

微觀結構與動力學分析則顯示不同氣體成分下的還原機制差異：在不含二氧化碳（CO₂）與水蒸氣（H₂O）的簡化氣體下，還原呈現出由表及裡的「局部化學還原（Topochemical）」行為，反應介面分明且核心留有未還原相；而在富含二氧化碳與水蒸氣的模擬高爐煤氣下，由於還原勢較低，樣品轉向「均勻還原（Uniform）」行為，整顆礦樣在各處均勻轉化為浮氏體（Wustite）並生成少量金屬鐵。基於縮芯模型（Shrinking Core Model）的擬合結果證實，還原過程在初期主要受到化學反應控制，隨後隨著緻密金屬鐵層外殼增厚，中後期轉變為擴散控制（Diffusion-controlled）。本研究亦證實富氫高爐煤氣在還原初期能有效加速赤鐵礦的還原。

本研究的應用場景在於精進富氫低碳高爐的製程操作。當高爐製程朝向高氫氣注入量轉型時，理解高爐氣體成分對燒結礦還原機制（局部還原與均勻還原）與動力學控制步驟的根本影響，能協助鋼鐵廠在評估燒結操作與富氫高爐配料時，提供關鍵的理論依據與製程操作精進方向。

（摘自：ISI International 2026-03-16）

4. 首鋼 2 號高爐噴吹焦爐煤氣工業試驗

首鋼在其 2 號 2650m^3 高爐均勻選取 8 個風口 (6 用 2 備配置)，進行了為期 45 天的多風口噴吹焦爐煤氣工業試驗。製程採用直吹管端部噴槍噴入方案，焦爐煤氣噴槍內徑為 17 公釐，並與煤粉噴槍採上下交錯、前後平齊的方式布置。為防止焦爐煤氣脫火燃燒，並確保高溫反應點遠離噴槍出口及小套前端，單一風口的噴吹能力設定為每小時 535m^3 ，測算其噴吹流速約每秒 93 公尺。在最大噴吹量階段，總噴吹量達到每小時 3210m^3 ，折合噸鐵焦爐煤氣噴吹量約 10m^3 。

在前期基礎研究與參數計算方面，數值模擬與理論計算顯示，隨著焦爐煤氣噴吹量增加，爐缸還原氣體濃度由 43.93% 提升至 44.50%，其中氫氣含量提升了 0.85%，有助於降低直接還原度，並減少高爐下部的熱量需求。然而，由於焦爐煤氣本身的物理熱及燃燒反應吸放熱特性，當其他送風條件維持不變時，理論燃燒溫度會隨之下降。經測算，第二階段風口理論燃燒溫度平均降低約 25°C ；若單純對比噴吹與未噴吹焦爐煤氣的風口，噴吹風口的單點理論燃燒溫度降幅更達 48°C 。

在爐料還原性與熔滴性能試驗中，提高還原氣體中的氫氣與一氧化碳比值 (H_2/CO) 能顯著提升還原動力學條件。當 H_2/CO 由 0.12 提高至 0.32 時，球結礦還原度由 86.65% 提升至 93.51%，反應達到平衡的時間從 84 分鐘縮短至 70 分鐘；塊礦的還原度亦由 62.48% 大幅提升至 81.72%。

熔滴性能試驗則顯示，隨著氫氣含量從 0% 增加到 16%，綜合爐料 (配比為 47% 燒結礦 + 13% 酸性球結礦 + 24% 鹼性球結礦 + 16% 塊礦) 的軟化開始溫度自 1173°C 逐漸降低，顯示軟熔帶上沿出現上移且軟化區間變寬的趨勢；不過，最大壓差與熔滴性能總特性值 S 均大幅下降，這表明軟熔帶的透氣性能得到了顯著改善。

此外，焦炭溶損反應試驗證實，雖然高溫區焦炭與水蒸氣的反應速率明顯高於二氧化碳，但在 1200°C 且二氧化碳與水蒸氣各占 50% 的特定條件下，由於氫

氣與一氧化碳的競爭反應及向外擴散效應，抑制了反應氣體向焦炭內部的擴散，使內部碳基質溶蝕減弱，轉鼓強度（CSR）反而有所提高。

為補償理論燃燒溫度降低並維持爐腹煤氣量穩定，操作團隊導入脫濕鼓風技術，並主動採取「適度提高富氧率、減少入爐風量」的配套送風策略，成功將風口理論燃燒溫度整體調高 20 至 30°C，有效維持了與基準期相當的風速與鼓風動能。試驗期間，高爐系統運行安全且可靠。

在扣除入爐品位與煤氣利用率等外部波動因素後，實際運行指標顯示：高爐煤氣利用率由基準期的 48.9% 提升至 49.1%，焦比由每噸鐵 334.9 公斤降至 331.4 公斤，煤比由每噸鐵 179.5 公斤降至 178.5 公斤，綜合燃料比由每噸鐵 514.4 公斤降至 509.9 公斤。經精確換算，焦爐煤氣對高爐固體燃料的置換比達到 0.435 kg/m³。

根據試驗結果，研究團隊認為在噴吹焦爐煤氣條件下，應儘量保持原燃料品質的穩定。富氫條件下的送風策略，應充分考慮噴吹焦爐煤氣對風速及鼓風動能的影響，必要時根據風速及鼓風動能的變化，審酌縮小風口面積，綜合考慮風量、濕度、富氧率及風溫，搭配適宜的送風參數。

（摘自：煉鐵(CNKI) 2026-05-16）

5. 高爐噴吹焦爐煤氣時風口佈置對煤粉燃燒行為的影響

這項研究採用流體與離散搭配的數值模擬方法，針對高爐在噴吹焦爐煤氣前後的煤粉燃燒行為進行深入探討，並系統性評估了噴煤槍與煤氣管的相對布置位置對煤粉燃燒效率的影響。

研究模型以 1880m³ 高爐製程參數為基準，在保持風口理論燃燒溫度與鼓風動能不變的前提下進行模擬。模型建構將煤粉視為離散相，氣體視為黏性不可壓縮流體，並在化學反應中綜合考慮煤粉熱解、燃燒及水煤氣反應。回旋區則被簡

化為長度 1.4 公尺的擴張管。此模擬結果與實際生產數據對比，理論燃燒溫度誤差僅 1.09%，風口前速度誤差為 1.79%，驗證了該數值模型的準確性與可信度。

研究結果顯示，高爐噴吹焦爐煤氣後，對回旋區內的溫度場與氣相濃度場帶來顯著改變。由於焦爐煤氣中富含甲烷與一氧化碳等可燃成分，其燃燒放熱使得回旋區內高溫區出現的位置明顯提前，且高溫區的範圍擴大，回旋區整體溫度隨之升高。在噴吹量為每噸鐵 20 立方公尺的條件下，回旋區出口中心位置的平均溫度從常規高爐的 770K 顯著提升至 899K。與此同時，回旋區內的氧氣消耗更為劇烈，上部的氧氣基本上被完全消耗，而一氧化碳及氫氣的還原氣體濃度則大幅上升。在熱補償與焦爐煤氣燃燒放熱的雙重作用下，煤粉揮發分完全析出的位置從總行程的四分之三處提前至三分之二處。在常規高爐條件下，煤粉燃盡率僅為 68.57%，而噴吹焦爐煤氣後，煤粉燃盡率可提升至 73.56%。

噴煤槍與煤氣管在水平方向上的相對距離對煤粉燃燒與還原氣體分布具有關鍵影響。當噴煤槍的位置向右側移動時，煤粉射流運動空間縮小，擴散受到限制，導致高溫區向側邊偏移且範圍縮小，破壞了溫度的對稱性。

當相對距離由 0 公尺增加至 0.070 公尺時，回旋區出口的一氧化碳最大濃度從 0.138 大幅下降至 0.0357，且回旋區上部仍殘存約 0.065 的氧氣未被消耗。此外，煤粉燃盡率也由 73.56% 降低至 69.32%。這種還原氣體與溫度的不均勻分布，會進一步導致爐腹煤氣流分布紊亂，嚴重影響高爐順行。因此，噴煤槍與煤氣管在水平方向上的最佳相對距離應為 0 公尺。

在確定水平相對距離為 0 公尺的基礎上，調整煤氣管出口到回旋區入口的軸向距離，能進一步改善製程成效。隨著煤氣管出口逐漸向回旋區靠近，冷噴焦爐煤氣在出口前端形成的低溫區隨之前移，降低了對煤粉在風口上部熱解的抑制作用。當煤氣管出口到回旋區入口的距離縮短至 0.223 公尺時，回旋區中心的溫度可達到 2700K。一氧化碳的燃燒位置與終點隨之後移，且煤粉在富氧熱風中的行程增加，產生更多揮發分與焦爐煤氣競爭消耗氧氣，因而減少了一氧化碳的燃燒

消耗，並使回旋區出口的一氧化碳最大濃度顯著提升至 0.172，且煤粉燃盡率最大，為 77.36%。

(摘自：煉鋼(CNKI) 2026-05-16)

6. 鋼鐵原燃料碳排放分析與減碳研究

運用生命週期評估 (LCA) 方法與產品碳足跡平台進行系統化核算，鋼鐵產業上游原燃料碳排放佔全產業鏈排放高達 55.53%，超越鋼鐵製造本身的 44.47%。上游排放中電力能源佔 18.50%，其餘原燃料構成依序為焦炭 16.88%、鐵礦砂 14.85%、煤炭 14.79%、鐵合金 9.92%、工業氣體 9.06%、熔劑 6.01%及碳素製品 0.20%。典型原燃料產品碳足跡分別為：煤炭 89.42 kg/t、焦炭 1360 kg/t、鐵礦砂 119.02 kg/t、鐵合金 4780 kg/t、石灰 1210 kg/t，以及石墨電極 8840 kg/t。其中高爐氣、煤炭及焦炭為高爐製程的核心燃料和還原劑，對整體碳排放的影響最為顯著。其次為電力、熔劑、濃鹽水、鐵礦石、鐵合金。

在原燃料製程改良與參數提升上，煤炭減排著重於開採流程的甲烷抽採利用與智慧礦山高效壓縮機導入，可降低 10%-15%能耗；運輸端採氫燃料或光電電動重卡，能將每百公里碳排放自 79.83 kg/t 降至 30.12 kg/t。焦炭製程引入品質預測模型實施精準配煤，在維持核心性能 (M40 > 88%、M10 < 6.5%) 下提升非煉焦煤配比 3%至 8%；搭配乾式焜火回收紅焦顯熱可減排 0.05 至 0.09 t CO₂/t，若摻燒 20%生物質燃料協作炭化，焦炭碳足跡可降至 874 kg/t，降幅達 35%。

熔劑與碳素製品技術升級亦具備顯著效益。石灰高溫煅燒採氫能全面替代天然氣，可使單位產品減排 320.64 kg/t (降幅 41.15%)；設備端推廣雙膛窯等高效窯型利用廢氣蓄熱，使熱效率達 85%以上，降低能源消耗 20%至 40%。石墨電極製程中焙燒與石墨化碳排放佔比達 61.33%與 25.09%；改良技術回收焙燒 50%可燃有機氣體回爐，可節約 28%天然氣。此外，若將鋼廠內部餘熱餘能發電比例提升至 20%以上，全製程碳排放可進一步降低 10%至 15%。

在綜合實施降碳措施的情況下(煤炭與石墨電極生產環節全面使用綠色電力、焦炭生產過程中摻燒 20%生物質燃料、鐵礦石與鐵合金運輸環節實施低碳化改造、石灰生產採用氫能鍛燒技術)，上游原燃料產線的碳減排幅度可達 20%~40%(如下表)，並相應推動鋼鐵鍍鋅產品碳足跡下降約 8%。

類別	鋼鐵上游原燃料						
物料	煤炭	電極	焦炭	鐵礦石	鐵合金	石灰	總計
模擬降碳場景	綠色電力	綠色電力	摻燒20%生物質燃料	低碳運輸	低碳運輸	氫能鍛燒	
上游原燃料降碳比例	40%	20%	30%	20%	30%	30%	20%~40%
鋼鐵CFP降碳比例	2%	0.2%	2%	1%	2%	1%	8%左右

圖二、上游降碳對鋼鐵產品碳足跡的影響模擬場景

(摘自：鋼鐵研究學報 2026-05-12)

7. H2Gen[®] 高爐煤氣製氫技術示範工廠最新進展

Utility Global 公司在北美一家聯合鋼鐵廠中成功驗證了 H2Gen[®] 工廠製程，該技術利用高爐煤氣 (BFG) 從水中製取純氫氣，為鋼鐵業提供了一種創新且經濟高效的製氫方法。

H2Gen[®] 利用 BFG 與蒸汽作為輸入原料，透過一體化電化學反應器直接自水中製取氫氣的製程技術。該製程的核心裝置為 Utility Global 公司開發之固體氧化物電化學反應器，採用兼具混合導電特性的陶瓷電解質(管式陶瓷膜單元)，該電解質能夠有選擇性地允許氧離子從陰極流向陽極，同時讓電子以相反的方向流動，反應在 800°C-900°C 的溫度區間進行。由於反應陽極側的焦耳熱與 BFG 氧化反應呈放熱特性，能自主維持反應器內部所需的運行熱能。此管式單元結構設計有效減少了連接處的表面密封，降低氣體洩漏風險，並透過逆向氣體流動設計

極大化反應電位。

在反應過程中，輸入端含約 20% CO 與 20% CO₂ 的 BFG，經陽極側氧化後，出口端的 CO₂ 濃度提升至 30%-32%，CO 則降至約 8%，成功將副產物轉化為高濃度 CO₂ 氣流，利於後續低成本碳捕捉；陰極側則藉由密封陶瓷層阻絕原料氣污染，直接產出高純度氫氣。

在實施成效方面，該技術歷經中試與現場示範階段，展現出極高的製程穩定性與反應彈性。前期中試工廠累積運行超過 2500 小時，系統正常執行時間達 99.7%，氫氣純度維持在 99% 以上。隨後於 2023 年 12 月投入運行的現場示範工廠，在含有硫、鹽、鹵化物等複雜雜質的實際 BFG 條件下，累計運行時數超過 3000 小時，並實現了超過 1000 小時的連續穩定運行。實際產量達每日約 10 公斤，氫氣平均純度約 91%。

此外，該系統展現出優異的耐受性與動態響應能力。面對高爐頻繁停機導致的進料氣中斷，系統可藉由專屬操作流程快速切換至熱備狀態。數據顯示，在進料氣斷供恢復後，製程僅需 2 分鐘便重啟氫氣生產，並於 12 分鐘內恢復至滿載的穩定生產狀態，遠優於傳統蒸汽甲烷重整製程所需的 48 小時穩定時間。該示範專案的成功驗證了核心反應器模型的準確性，相關製程參數預計導入 2027 年部署的商業化高產能系統設計中。

(摘自：世界金屬導報 2026-05-25)

鋼鐵產業碳捕捉與封存(CCS)發展動態調查

撰稿人 T41 余佳杭

一、前言

實現 2050 年碳中和已成為各國政府與產業的共同課題，在眾多減排手段中，碳捕捉與封存(CCS)技術被視為解決燃煤發電及鋼鐵、水泥等難減排產業去碳化的重要路徑。儘管現階段 CCS 仍面臨技術成本高昂與能源損耗大等挑戰，但其能讓現有基礎設施在轉型期間發揮剩餘價值，避免資產提早報廢的特性，使其在能源轉型中佔有不可替代的地位。

考量設施建設時間，2026 年已成為 CCS 技術投資的關鍵決策點，以確保 2030 年能如期運行。環境部在 2026 年 4 月通過中油鐵砧山碳捕捉封存試驗計畫，是我國首例核准的二氧化碳封存案，邁向減碳新的里程碑。本文將比較國際能源署(IEA)、國際可再生能源署(IRENA)及全球碳捕捉與封存協會(GCCSI)等三家專業機構對 CCS 技術的觀點，並分析包含台灣、美國、日本及歐盟在內的各國政策框架，最後整理全球指標性鋼廠的實踐案例，為後續產業政策制定與企業技術投資方向提供全面性的參考。

二、IRENA、GCCSI 與 IEA 對 CCS 的觀點

根據國際能源署(IEA, International Energy Agency)、國際可再生能源署(IRENA, International Renewable Energy Agency)及全球碳捕捉與封存協會(GCCSI, Global CCS Institute)所發表之報告與資料進行分析，結果顯示「千萬噸級」的 CCS 發展速度仍遠遠不足，主要挑戰為高昂的成本壓力。然就實際推動而言，IRENA 與 GCCSI 仍強調 CCS 的重要性，並鼓勵國家與企業積極加速擴張速度，以求在 2050 年實現可達成氣候目標的「十億噸級」捕捉量；IEA 則不看好全球 CCS 產業能加速擴張至理論目標，預測該技術在 2050 年對全球減排的貢獻將不到 5%，主張應將資源與重心放在發展速度更快、成本更低的再生能源上，整理上述三間報告的重點如表一所示。

僅供內部參考，請勿影印分送。

表一、IRENA、GCCSI 與 IEA 對 CCS 的觀點比較

機構	核心觀點與立場	現況指標與 2050 預期
IEA	邊緣化技術：認為作用微乎其微，應重心轉向成本更低的再生能源。主要面臨成本遠高於再生能源的經濟競爭壓力。	現況：2024 年全球年捕捉量突破 5,000 萬噸。 2050 預期：全球減排貢獻不到 5%。
IRENA	關鍵但落後：深度脫碳之關鍵角色，缺乏全球協調戰略，融資難度極高。	現況：全球商業規模營運設施僅為極少數。 2050 預期：捕捉量需達 6 至 8Gt(十億噸)。
GCCSI	不可或缺：核心氣候技術，技術已進入金融成熟期，但仍面臨跨境法規空白與高額 CAPEX 挑戰。	現況：進入金融成熟期，2025 年營運設施將增至 77 座。 2050 預期：捕捉量需達十億噸級。

三、全球 CCS 政策驅動

全球各國正積極建構 CCS 政策框架，透過專法監管、稅額抵免及產業集群化發展，加速落實 2050 淨零路徑。從場址許可、設施補貼到跨國合作，致力於提升捕捉技術成熟度並降低企業轉型成本。整理各國 CCS 技術相關的法案及政策如表二，並歸納作法如下：

1. 財政與稅收驅動 (Financial Incentives)

- (1) 美國 (45Q 條款) : 提供直接稅額抵免。工業/電廠封存最高 2,700 台幣/噸；直接空氣捕捉 (DAC) 最高 5,718 台幣/噸。
- (2) 印度&加拿大：透過 643 億台幣預算、生產掛鉤激勵 (PLI) 或設備支出抵免(50%)降低 CAPEX。

2. 專法監管與責任界定 (Regulatory Framework)

- (1) 台灣/日本/韓國：制定專法。明確要求 CO₂濃度需>95% (台)，且需負擔 30~50 年的監測責任 (台/韓)。
- (2) 德國：定義 CCS 為「重大公共利益」，簡化審批程序並開放陸上/海上封存。

3. 工業集群與基礎設施 (Clusters & Infrastructure)

- (1) 歐盟/英國/中國：推動「碳捕捉集群」模式。歐盟要求 2030 年具備 5,000 萬噸封存能力。
- (2) 跨境運輸：日本、德國與英國正積極建置跨國管道與液化 CO₂運輸船隊。

表二、各國 CCS 政策彙整

國家	政策法案	說明
台灣	二氧化碳捕捉後封存管理辦法	規範場址選址、許可申請、營運監測。封存流體 CO ₂ 濃度需達 95% 以上。監測責任至少 50 年(營運 20 年+終止後 30 年)。
中國	碳達峰碳中和(雙碳)「1+N」政策體系	配合深度脫碳需求，支持煤化工 EOR 和燃煤電廠示範。納入綠色金融，鼓勵綠色信貸、債券。
日本	碳捕捉與封存(CCS)事業法	建立「特定區域」許可制度，補貼 10-15 年成本價差。涵蓋跨國運輸，支援送至馬來西亞或大洋洲封存。
韓國	二氧化碳捕捉、運輸、封存及利用法	建立碳利用技術與產品認證，封存業者需提撥準備金並承擔監控義務。
美國	通膨削減法案(Inflation Reduction Act, IRA) 45Q 條款	提供稅收抵免：工業封存約 2,700 台幣/噸；工業 EOR 約 1,906 台幣/噸；DAC 封存最高約 5,718 台幣/噸。
加拿大	稅收抵免政策	設備支出抵免 50%；設計與研究費抵免 37.5%(2022-2030 年)。

僅供內部參考，請勿影印分送。

國家	政策法案	說明
歐盟	淨零工業法案(Net-Zero Industry Act, NZIA)	列為「戰略性淨零技術」，2030 年具備每年 5,000 萬噸封存能力。加速許可程序，建立跨國二氧化碳管道網絡。
德國	二氧化碳儲存與運輸法(Kohlendioxid Speicherung und Transportgesetz, KSpTG)	定義為「重大公共利益」，允許海上封存與跨國運輸出口；可徵收私人土地鋪建管道。
英國	碳捕捉與封存基礎設施基金(CCS Infrastructure Fund, CIF)	承諾投資約 9,253 億台幣。推動工業群聚模式，建設超過 16 公里運輸管道。
印度	2026 年度預算案(Budget 2026)	納入專屬激勵方案約 643 億台幣，包含資本補貼、生產掛鉤激勵及稅收減免。

四、主要鋼廠 CCS 發展現況

為實現碳中和目標，並生產綠色鋼鐵，各國鋼廠近年也陸續投入 CCS 技術發展。該技術允許鋼廠繼續使用現有的高爐設備，避免資產提早報廢，且能將捕捉的碳轉化為高值化學品，創造新的營收來源。然而，鋼廠實行 CCS 的過程中也面臨著諸多挑戰，如：

- 1. 成本高昂：**碳捕捉過程需消耗大量能源，可能導致鋼鐵生產成本增加 30-100%。
- 2. 高爐氣分離技術門檻高：**高爐煤氣中含有 N₂、CO 等雜質，分離 CO₂ 的技術難度較高。
- 3. 合適封存地點稀缺：**鋼廠通常位於工業區，若附近沒有現成的封存管線或封存場址，運輸成本將極其昂貴。

面對這些挑戰，各家鋼廠積極尋求能源商合作，並嘗試開發捕碳新技術，力求實現 CCS 降本與規模化。本篇報告蒐集八家世界主要鋼廠近年參與的 CCS 專案及技術發展方向，整理如表三，並歸納說明如下：

- 1. 跨國運輸與共享樞紐：JFE、日本製鐵、JSW 等鋼廠皆傾向建立區域共享設施，透過規模經濟降低成本。
- 2. 鋼渣資源化：利用高溫鋼渣進行化學固碳已成為 JFE、浦項、寶武、河鋼等多數鋼廠共同的研發重點。
- 3. CCU 轉化選項：主要鋼廠選擇將 CO₂ 轉化為甲醇、合成燃料、蛋白質等產品，是提升專案經濟效益的重要參考方向。

表三、主要鋼廠 CCS 專案與技術發展方向

鋼廠	關鍵專案與封存路徑	核心技術發展方向
日本製鐵	運送至日本東北、首都圈近海或東南亞、澳洲封存。	Super COURSE50：一體化回收裝置，目標減排 50%以上。開發 ESCAP™低能耗吸收劑及轉化甲醇技術。
JFE	建立瀨戶內四國 CO ₂ 樞紐，將 CO ₂ 船運至澳洲或馬來西亞。	碳循環高爐：將 CO ₂ 轉化為甲烷重新利用。鋼渣固碳：利用高溫鋼渣氧化鈣固碳並回收熱能。
浦項集團	跨國運送至馬來西亞或印尼。在德州建設 6 億噸級儲存中心。	藍氫整合：與 ADNOC 合作製氫並結合 CCS；CCU 計畫：將 CO ₂ 轉化為甲醇、烯烴或合成航空燃料。
寶武集團	湛江「零碳示範工廠」及華東千萬噸級開放式專案。	HyCROF：富氫碳循環氧氣高爐，可減碳 30%以上；研發鋼渣固碳生產建築材料。
河鋼集團	CarbXRock 產業鏈，將廢棄物轉化為價值鏈。	生化轉型：捕捉 CO ₂ 生產濃度>70%的細菌蛋白質飼料。鋼渣固碳生產綠色建材。
ArcelorMittal	接入北海 Northern Lights 等公用封存管網。	Steelmanol：轉化為乙醇。Torero：整合生物炭與 CCS。DMX™：開發低能耗溶劑型捕捉技術。

僅供內部參考，請勿影印分送。

鋼廠	關鍵專案與封存路徑	核心技術發展方向
JSW	亞洲跨國 CCUS 共享樞紐，連結亞洲與北澳管道。	CycloneCC：設備體積縮小 10 倍，佔地減少 50%。採用專用胺類溶劑降低再生熱能。
Nucor	路易斯安那州 DRI 廠 CCS 專案，每年捕捉 80 萬噸。	熱整合技術：利用鋼鐵廠廢熱驅動碳捕捉，提升電爐流程競爭力。驗證低濃度環境捕捉可行性。

五、結論

綜合各大權威機構的觀點與全球鋼廠的實踐進度，可以預見 CCS 技術在未來三十年將經歷從邊緣技術走向核心戰略的關鍵轉變。雖然國際機構對於 CCS 的減排貢獻比例仍有分歧，如 IEA 持保守態度，而 IRENA 與 GCCSI 則強調其不可或缺性，但各界對於「當前部署速度遠遠不足」具備高度共識。

從各國政策梳理中發現，CCS 的發展已不再僅限於技術研發，而是進入「法制化」與「金融化」階段。美國透過 45Q 條款提供的稅收抵免，以及歐盟《淨零工業法案》對封存能力的強制要求，均顯示出政府正以強而有力的財政手段降低企業初期投入成本。台灣、日本與韓國紛紛制定專法，明確場址許可、風險監測及長達數十年的法律責任，這為企業投入 CCS 提供必要的法律穩定性。

由於 CCS 需要極其龐大的運輸與封存基礎設施，個別企業獨自發展的成本極高。因此，工業集群與共享經濟正成為全球主流趨勢。透過共享管道、大型液化二氧化碳運輸船及共同開發枯竭油氣田，能有效發揮規模經濟效應，分散投資風險，並解決工廠周邊缺乏地質封存條件的地理限制。

在鋼廠案例中，可以看見 CCS 創新技術的多樣性。除了傳統的化學吸收法，鋼廠正積極開發如「鋼渣固碳」、「生物炭整合」以及將二氧化碳轉化為甲醇、細菌蛋白質等 CCU 技術。不僅降低封存壓力，更賦予廢氣商業價值，提升專案的經濟可行性。

僅供內部參考，請勿影印分送。

儘管前景可期，但 CCS 仍需克服「能源溢價」與「跨境法規空白」兩大障礙。未來五年，隨著關鍵實證專案陸續進入商轉，技術成本有望因規模化而下降。總結而言 CCS 並非孤立的減碳方案，而應與再生能源、氫能轉型相輔相成。在全球致力於脫碳的過程中，CCS 將是實現氣候目標最後關鍵保險。