

日本鋼廠減碳措施調查

壹、前言

鋼鐵產業是全球主要的溫室氣體排放源之一，佔全球二氧化碳排放量的約 7%，日本作為全球第三大鋼鐵生產國，其鋼廠的減碳措施備受關注。

近年來，日本政府和鋼鐵企業積極推動減碳措施，以實現 2050 年碳中和的目標。日本政府實施了多項政策支持鋼鐵產業的減碳轉型，包括提供資金補助、研發支持和碳排放交易等。鋼鐵企業也紛紛制定了自己的減碳目標和措施，投資新技術、改造現有設施、提高能源效率等。本調查為瞭解日本鋼廠在減碳方面的減碳措施、技術應用、政策影響、面臨的挑戰和未來展望等。

貳、日本鋼廠減碳措施概況

本報告資料蒐集以 JFE、日本製鐵和神戶製鋼等三家日本鋼廠技術報告為主，在資料整理中可見，日本鋼廠從不同的領域著手，以豐富多元化的手段研發減碳技術措施，來達到 2050 年實現淨零碳排的目標。這些措施包括鋼鐵生產製程技術的改進，採用富氧、富氫、新型燃燒器及運用燒結礦、活性碳塊等高反應物質，進而減少二氧化碳排放；推動循環經濟，高效回收並利用鋼鐵廢料與副產品，以降低原材料需求和相應的碳排放；研究和試驗碳捕捉封存與利用技術，將生產過程中排放的二氧化碳捕捉並進行封存或再利用，減少大氣中的碳排放。

參、日本鋼鐵廠減碳措施

為了應對氣候變化，日本鋼鐵業由不同的領域著手，積極推動減碳措施，以下介紹 JFE 鋼鐵、日本製鐵和神戶製鋼等三家日本主要鋼鐵公司所採用的減碳措施。

一、JFE 鋼鐵公司

JFE 鋼鐵採用多種創新技術及減碳措施，涵蓋鋼鐵生產製程及各種領域減碳手段，包含氧氣高爐型碳回收高爐、二氧化碳合成甲醇技術、環保高效能輻射管燃燒器、高熱效率燃燒器、餘熱發電技術、海運運輸方式等，以達到減少碳排目標。

1. 氧氣高爐型碳回收高爐

JFE 開發的氧氣高爐型碳回收高爐是一種新型的煉鐵技術，透過提高高爐的氧氣濃度和利用富氫還原料來降低碳排放、提高效率和減少煤炭用量來實現綠色低碳煉鐵，該技術有三種型式：^[1]

(1)冷氧或封口注入高濃度氧氣

透過使用冷氧或封口注入高濃度氧氣來提高還原效率，冷氧可以降低爐內溫度，提高還原效率；封口注入高濃度氧氣可以提高氧氣分壓，促進還原反應，但會減少爐身內的氣體量，使得爐料溫度難以升高，及增加高爐操作的難度和成本。

(2)先進氧氣高爐

在封口注入氧氣的同時，還注入大量富氫還原料（LNG），透過增加氫還原來還原二氧化碳，氫氣是一種高效的還原劑，可以有效降低二氧化碳排放量，此技術缺點為增加 LNG 的生產和運輸成本，及增加高爐操作的難度和成本。

(3)碳回收高爐

在高爐中將碳轉化為甲烷（甲烷化反應），回收並且再利用，甲烷是一種可再生能源，可以用作燃料或化工原料，此技術可以減少高爐的二氧化碳排放量，預計與傳統高爐法相比，可以減少約 30%，提高高爐的效率，降低生產成本，減少對煤炭的依賴，提高能源安全性。碳回收高爐具有較大的發展潛力，具有顯著降低碳排放、提高效率 and 減少煤炭用量。

JFE 整合以上型式的優點開發氧氣高爐型碳回收高爐技術，利用高爐中一氧化碳和氫氣在催化劑的作用下，在一定溫度和壓力下發生甲烷化反應，生成甲烷和水，甲烷可以回收利用，水可以循環使用，並在高爐中注入富氧空氣，使氧氣濃度提高到 60%-80%，再從爐頂注入富氫還原料，如天然氣、煤氣或工業廢氣，在催化劑的作用下，一氧化碳和氫氣在爐內進行甲烷化反應： $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ，生成的高溫甲烷氣體經冷凝、分離後，可以作為燃料或化學原料，爐內殘餘的鐵礦石在高溫下與一氧化碳和氫氣反應，生成生鐵和爐渣。

Rist 圖是一種用於評估高爐煉鋼過程的熱質平衡和軸效率的圖表，如圖 1 所示，研究人員利用 Rist 圖評估了碳回收高爐的二氧化碳減排潛力，發現碳回收高爐可以將高爐的二氧化碳排放量減少 30%以上。^[2]

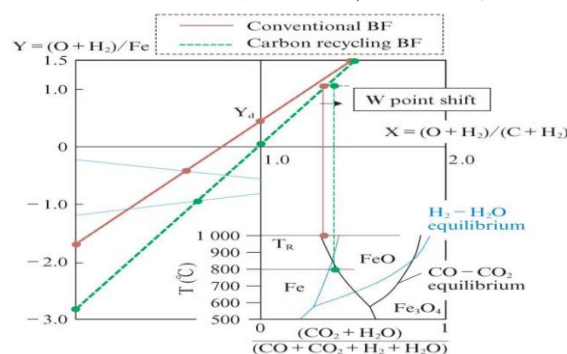


圖 1，常規高爐與炭回收高爐之 Rist 圖

2. 退火爐用高效能輻射管燃燒器

在鋼廠中連續退火爐使用的傳統燃燒器存在能耗高、污染物排放量大的問題。JFE 開發的高效能輻射管燃燒器，新開發的燃燒器主要用於在退火爐中加熱鋼板，為了提高燃燒效率並減少污染物排放，燃燒器透過採用自廢氣再循環技術，提高燃燒效率，降低燃料消耗，自廢氣再循環可以降低燃燒溫度，減少 NO_x 的產生，此開發的燃燒器可以在高溫下運行，同時保持低 NO_x 排放，滿足日本、歐盟和美國的嚴格法規。

在連續退火爐中，鋼板的加熱和冷卻過程中消耗大量的能量。為此，JFE 採用了蓄熱式燃燒器，該燃燒器透過回收和利用廢氣中的廢熱來加熱燃燒空氣，以減少燃料消耗和二氧化碳排放。該燃燒器透過設計緊湊高效的熱交換器，提高廢熱回收效率，使預熱空氣的溫度從 320℃ 提高到 590℃，並可將熱回收率從 24% 提高到 48%，NO_x 排放減少效果顯著。

為了確保燃燒器在高效率、低排放的工作狀況下穩定運行，設計時考慮到燃燒器的形狀與空間配置，並優化燃燒器的幾何參數，使燃燒時形成循環氣流，提高燃燒效率和穩定性。並使用兩級燃燒技術，在燃燒管內進行兩級燃燒，利用第一級燃燒部分燃料，第二級充分燃燒剩餘熱量，進而減少 NO_x 的生成。

在 JFE 西日本工廠(福山地區)的兩場連續退火作業路線中，總共安裝了 162 台新型燃燒器機組，達成節能和減排目標，每年減少 18.6 kt-CO₂ 排放量，以及減少 12%-NO_x 排放量，並將餘熱回收率提升至 48%。^[3]

3. 燒結火爐用高效率燃燒器

JFE 鋼鐵成功研發出新型兩級燃燒大流量燃燒器，可大幅降低燒結廠燃氣消耗和二氧化碳排放。兩級燃燒大流量燃燒器採用獨特的兩級燃燒結構，透過高排出流量和兩級燃燒控制實現高效燃燒和節能，該燃燒器特性有三個部分：

(1)兩級燃燒結構

燃燒器由主燃燒器和副燃燒器組成。主燃燒器位於中心，負責形成高速火焰；副燃燒器位於主燃燒器的兩側，負責產生穩定的火焰。此結構設計能確保火焰燃燒均勻穩定，有效提高傳熱效率。

(2)排出流量高

此燃燒器的排出流量是傳統燃燒器的 3.2 倍，火焰與物料的接觸面積更大，傳熱效率更高，燃料消耗降低。

(3)兩級燃燒控制

主燃燒器和副燃燒器可個別獨立控制，可依物料實際情況調整火焰溫度和燃燒強度，能夠達到細粒度控制，進一步提高燃燒效率

和節能效果。

兩級燃燒高流量燃燒器的實施為環境和公司營運帶來了顯著的效益，與傳統燃燒器相比，瓦斯消耗量顯著減少 30%，且儘管燃料消耗大幅降低，但燃燒器仍保持一致的燒結礦質量，確保材料符合高爐原料的嚴格要求，而燃燒器的穩定燃燒和降低的燃料消耗使燒結廠的運作更加平穩和高效，並最大限度減少停機時間並最大限度提高生產率。

該燃燒器於 2015 年在 JFE 西日本工廠（倉敷地區）第二燒結廠投入實際使用，取得顯著的節能減排效果，使得瓦斯消耗減少 30%，二氧化碳排放量減少 2100 噸/年，以及帶來燒結礦品質的穩定效果。^[4]

4. 餘熱熱電發電技術

JFE 開發一種利用煉鋼過程中餘熱進行熱電發電的技術，可將鋼廠未利用的廢熱轉化為電能，達到節省能源和減少碳排放目的。JFE 開發的熱電發電技術利用了鋼胚的輻射熱，鋼胚是在連鑄過程中鋼胚的表面溫度可達 800°C 至 1,000°C。

在連鑄機上安裝了熱電發電機組，熱電發電機組由熱電發電模組、熱交換器和電氣控制系統組成。熱電發電模組由 p 型和 n 型熱電半導體元件組成。而 N 型材料電子過剩，p 型材料電子缺乏，當 n 型和 p 型材料串聯時，電流將在它們之間流動，流動的電流量與兩種材料之間的溫差成正比。

熱電發電機通常由大量小型熱電元件組成，這些元件串聯連接，然後夾在兩塊板之間，熱板暴露於廢熱，冷板透過水或空氣冷卻，當熱電發電模組的一側被鋼胚的輻射熱加熱時，另一側被冷卻，此時熱電發電模組的兩端就會產生電壓，再由電氣控制系統將熱電發電機組產生的電流轉換為交流電，最後接入鋼廠的配電網路。JFE 在連鑄機上進行了熱電發電技術的試驗，在試驗中熱電發電機組的總發電功率為 10kW，熱電發電機組的發電效率為 0.45 W/cm²。

JFE 利用煉鋼過程中的餘熱進行熱電發電技術是一種有潛力的節能減排技術，熱電發電技術可以將這些廢熱轉化為電能，減少燃燒化石燃料發電所產生的碳排放，進而達到減排的效果。^[5]

5. 二氧化碳合成甲醇技術

JFE 開發用於二氧化碳甲醇化的膜反應器技術，利用二氧化碳合成甲醇，以減少其鋼廠的二氧化碳排放，甲醇是一種用途廣泛的化學品，可用作燃料、塑膠生產原料和溶劑。該公司正在與環境創新技術研究所合作開發一種新型薄膜，該薄膜對二氧化碳具有高選擇性，並且在高溫下具有高耐久性。

膜反應器技術是一種很有前景的二氧化碳甲醇化方法，因為它可以同時進行反應和從反應混合物中分離甲醇，能提高反應效率並降低製程成本。JFE 一直在開發使用 LTA 型沸石膜的二氧化碳甲醇化膜反應器，LTA 型沸石具有高水選擇性和熱穩定性，非常適合此應用。

JFE 開發了一種新型 LTA 型沸石膜，其孔徑足夠大，可以讓二氧化碳通過，但又足夠小，可以阻擋水等其他分子，其 Si/Al 比為 1.5，即使在高溫下，該膜也比傳統膜具有更高的水選擇性。新膜在實驗室規模的二氧化碳甲醇化測試中進行了評估，試驗結果表明，發現它產生甲醇的速度是傳統反應器的兩倍以上，該膜具有高產率、高選擇性的生產甲醇。

新型 LTA 型沸石膜的開發是二氧化碳甲醇化膜反應器技術發展的重要進展，該技術能減少鋼鐵廠的二氧化碳排放，同時生產有價值的產品，JFE 正在繼續開發這項技術，並計劃在不久的將來將其擴大規模。^[6]

6. 海運運輸方式減少碳排放

JFE 為減少鋼鐵產品運輸過程中的二氧化碳排放，採取了多項措施，其中包括將陸路運輸轉變為海運和渡輪運輸。JFE 使用的是滾裝船，這種船舶可以裝載托盤，提高了運輸效率，滾裝船的艙門通常位於船舶的側部或船尾，方便貨物裝卸，滾裝船的載重量約為 5000 噸，可以裝載約 200 個托盤，並使用專門的鋼鐵產品托盤，這些托盤的尺寸和承載能力符合鋼鐵產品運輸的要求，可提高貨物的運輸效率和安全性，為了防止貨物在渡輪運輸過程中倒塌，在渡輪上安裝了由鋼製框架和夾具組成的固定裝置，可以牢固固定住托盤。

在交通路線選擇了靠近鋼鐵廠和客戶的港口，縮短了運輸距離，在福山地區使用的渡輪運輸路線是從福山港到千葉港，這兩個港口都位於日本的主要鋼鐵消費地區。

與陸路運輸相比，渡輪底盤運輸的二氧化碳排放量減少了 67%，從福山地區到關東地區的陸路運輸距離由 734 公里縮短至 63 公里+24 公里，駕駛時間從 17 小時減少至 3 小時，渡輪底盤運輸減少了司機的長途駕駛時間和工作量，JFE 已在福山地區成功實施了渡輪底盤運輸，並計劃在其他地區推廣該模式。^[7]

二、日本製鐵

日本製鐵採取多種創新技術與措施以減少碳排放，這些措施包括煉鐵及富氫高爐技術的改進，以提高能源效率並減少碳排放；開發高效的二氧化碳吸收劑，結合多孔配位聚合物（PCP、MOF）技術，實現二氧化碳捕捉與利用（CCU）的進展，利用煉鋼副產品生產微藻生物質，並透過鋼渣創建藍碳生態系，以增加碳吸收和儲存；纖維素生物乙醇生產技術的應用進一步體現了生

能源發展性。

1. 減少煉鐵過程中二氧化碳排放之技術

煉鐵過程是鋼鐵生產的主要碳排放源，為了減少煉鐵過程中的碳排放，日本製鐵開發了三種新煉鐵技術：

(1) 高反應性燒結礦，提升高爐反應效率

燒結礦是高爐中使用的主要原料，由鐵礦石、焦炭、石灰石等原料經燒結製成。燒結礦的反應性越高，高爐的效率就越高，碳排放就越少，日本製鐵開發了低渣燒結礦的新型燒結礦，其二氧化矽 (SiO_2) 含量低且活性高，使用低渣燒結礦可將高爐的還原劑比率降低約 3 kg/t-HM，每年可減少約 20 萬噸二氧化碳排放。

(2) 活性碳塊(RCA)，提高焦炭生產率

高爐溫度過低時，鐵礦石中的氧化鐵無法有效還原為金屬鐵，為了避免還原平衡限制，需要提高高爐的溫度，日本製鐵開發了一種稱為活性碳塊(RCA)的新型碳團塊，碳含量高且活性高，使用 RCA 可將高爐溫度提高約 50°C ，能避免還原平衡限制，並將高爐的還原劑比率降低約 4 kg/t-HM，每年可減少約 26 萬噸二氧化碳排放。

(3) SCOPE21 焦化技術

焦炭是高爐中使用的另一種重要原料，由煤炭經炭化製成，焦炭的生產率越高，煉鐵過程的碳排放就越少，日本製鐵開發了一種稱為 SCOPE21 的新型焦化技術，如圖 2 所示，該技術可將焦炭的生產率提高約 15%，SCOPE21 技術的重點在於焦化過程中使用高溫煤氣對煤炭進行預處理，每年減少約 10 萬噸二氧化碳排放。

這三項創新技術已在日本製鐵的鋼廠中應用，日本製鐵將繼續研發新的減碳技術，以實現煉鐵過程的完全脫碳。^[8]

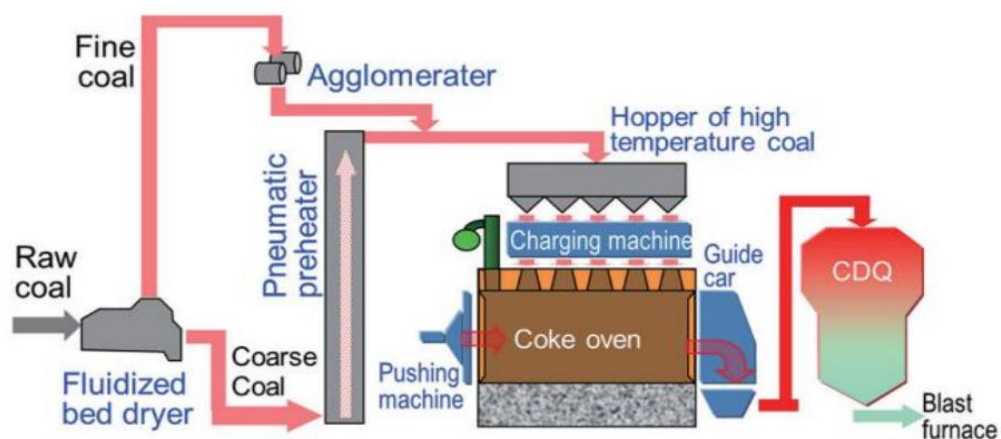


圖 2，SCOPE21 焦化技術流程圖

2. 日本製鐵 COURSE50 計畫

日本製鐵所的 COURSE50 計畫是透過利用現有鋼鐵廠設備，將鋼廠二氧化碳排放量減少 30%，所研究的技術有兩個部分：

(1) 富氫高爐技術

日本製鐵所採用富氫高爐技術，在富氫高爐中，將氫氣被注入高爐，氫氣是一種潔淨燃料，在燃燒時不會產生二氧化碳，可部分取代傳統的焦炭還原劑，進而減少高爐的二氧化碳排放量。

研究小組在 12 立方公尺試驗高爐上成功測試了富氫高爐技術，實驗結果證實，當高爐總氫氣輸入量為 277Nm³/t-HM 時，二氧化碳排放量可減少 12%，氫氣輸入量與氫氣還原速率呈正相關，且不同的氫基還原氣體，其二氧化碳還原效果會有所不同。

該研究計畫仍在進行中，例如研究提高氫氣輸入量，進一步降低二氧化碳排放量，或以不同氫基還原氣體測試二氧化碳還原效果，並開發更有效的氫氣生產和輸送技術。^[9]

(2) 高效二氧化碳吸收劑

研究團隊以量子化學計算開發了高效的二氧化碳吸收劑，能夠降低與二氧化碳分離相關的能源消耗，同時也開發了新型催化劑，可以有效促進實際吸收劑中的二氧化碳吸收，可以減少碳排放量約 20%。

化學吸收法是 CO₂ 分離的主要方法之一，透過使用吸收劑來吸收二氧化碳的二氧化碳捕捉技術。吸收劑通常是胺的溶液，胺可以與二氧化碳反應生成碳酸氫鹽和氨基甲酸鹽，傳統的吸收劑有能耗高、腐蝕性強等問題，限制了其應用範圍，研究出的兩項技術解決了傳統吸收劑的缺點。^[10]

(a) 新型吸收劑

透過量子化學計算研究胺類化合物的構效關係，開發出多種新型吸收劑，提高了 CO₂ 的吸收能力和選擇性，降低了吸收能耗。

(b) 新型吸收促進催化劑

開發出的新型催化劑，可有效促進實際吸收劑中二氧化碳的吸收，進一步降低 CO₂ 分離的能耗，新型二氧化碳吸收劑的能耗比傳統吸收劑低 30% 以上。

3. 二氧化碳捕捉與利用 (CCU) 技術

日本製鐵積極參與開發和實施 CCU 技術以減少碳足跡，為循環碳經濟做出貢獻，該公司的 CCU 技術包括一系列研發計畫，將煉鋼過程中排放的二氧化碳轉化為有價值的產品和材料。

日本製鐵運用各種 CCU 技術，每種技術都有其獨特的方法和潛在的應用，這些技術可大致分為以下幾個領域：

(1) CO₂ 轉化為聚碳酸酯(PC)

利用 CO₂ 和環氧乙烷轉化為聚碳酸酯(PC)，PC 是塑膠和工程應用中常使用的材料。

(2) CO₂ 轉化為碳酸二甲酯(DMC)的生產

利用 CO₂ 和甲醇合成碳酸二甲酯(DMC)，DMC 是一種用途廣泛的化學品，用於電子、製藥和塗料等多種行業。

(3) CO₂ 轉化為對二甲苯(PX)的生產

在開發一種利用氫氣直接將二氧化碳轉化為二甲苯(PX)的製程，PX 是生產聚酯（一種廣泛使用的合成纖維）的重要原料。

(4) CO₂ 轉化為聚氨基酯多元醇(PU)的生產

利用二氧化碳和二醇生產聚氨基酯多元醇(PU)，PU 多元醇是 PU 泡棉的重要成分，在建築、家具和汽車產業有著廣泛的應用。^[11]

4. 多孔配位聚合物 (PCP、MOF)

為了應對氣候變化，需要開發有效的 CO₂ 捕捉和利用技術，傳統的 CO₂ 分離技術包括物理吸附法、化學吸附法和膜分離法，但這些技術都存在著能耗高、成本高或效率低等缺點。

多孔配位聚合物 (PCP)，也稱為金屬有機框架 (MOF)，是一種新型的納米多孔材料，PCP 的結構由金屬離子和配體組成，金屬離子通常形成四面體或八面體的配位結構，配體則連接金屬離子形成骨架，其孔隙大小和形狀由金屬離子和配體的種類和尺寸決定。

PCP 的柔性使其能夠在吸附和解吸氣體時發生顯著的結構變化，像是一些 PCP 在吸附 CO₂ 時會發生膨脹，而在解吸 CO₂ 時會收縮，這種結構變化可以降低 CO₂ 的吸附和解吸能，並提高 CO₂ 分離的效率。

柔性 PCP 的 CO₂ 吸附性能取決於其結構和表面性質，一些柔性 PCP 具有非常高的 CO₂ 吸附量，甚至可以與沸石和活性碳功能不相上下，更何況一些柔性 PCP 具有選擇性吸附 CO₂ 的能力，即使在存在其他氣體的情況下也能夠有效地吸附 CO₂，研究表明柔性 PCP 可以用於開發新型的 CO₂ 分離技術，例如一些柔性 PCP 可以用於變壓吸附法或膜分離法來分離 CO₂。

柔性 PCP 是一種很有潛力的 CO₂ 分離材料，但柔性 PCP 的研究仍處於早期階段，需要進一步研究以開發具有更高 CO₂ 吸附量、更高選擇性和更穩定性的柔性 PCP，此外，還需要開發有效的柔性 PCP 製備方法和

CO₂ 分離裝置。^[12]

5. 利用煉鋼副產品生產微藻生物質

藻是一種具有光合作用能力的微生物，可以利用二氧化碳和水生產生物質，生物質可以作為可再生能源，用於生產生物燃料、化學品和材料。與陸地植物相比，微藻具有生長速度快的特性、不需要土壤，並且可以適應各種環境條件等優點。

日本製鐵開發一種利用製鋼副產品生產微藻生物質的方法，研究團隊利用氨水處理設施產生的生物膜中分離出的單細胞綠藻（NS001C 菌株）進行固相表面培養的方法。固相表面培養是一種培養方法，其中藻類附著在載體表面，而不是懸浮在液體中，該方法具有優良的氣體交換和光利用效率，可有效提升微藻生產力。

研究發現 NS001C 菌株對氨具有很高的耐受性，使其能夠利用氨水作為氮源，並且固相表面培養方法可以顯著提高 NS001C 菌株的生物質生產率。在光照充足、二氧化碳供應充足的條件下，NS001C 菌株的生物質生產率達 20-30 g/m²/d。

利用製鋼副產品生產微藻生物質是一種可行的技術，固相表面培養方法是一種很有前途的方法，可以提高微藻生產力，未來的研究將重點放在開發可擴展的固相表面培養系統上。此外，我們還將研究利用其他製鋼副產品生產微藻生物質的方法。

這項研究的結果證明了利用煉鋼副產品培養微藻的可行性，固相表面培養方法具有提高生物質生產力和降低能源成本的潛力，並可能有助於生物質的永續生產，實際應用仍存在許多挑戰，研究小組將持續努力該項研究計畫。^[13]

6. 利用鋼渣打造藍碳生態系

利用煉鋼渣在海水中開發藍碳生態系，該技術是將鋼渣與疏浚泥土混合，製成一種新型的改質土壤，比例為 30%鋼渣、70%疏浚土，將鋼渣破碎至粒徑 10-30mm 後與疏浚土均質並固化後使用，這種改質土壤具有良好的透水性、保水性和抗沖刷性，鋪設在海床上，來創造有利於底棲生物生長的環境，並促進藍碳生態系的形成，如圖 3 所示。藍碳生態系是指以海洋植物（如海藻、海草等）為基礎的生態系統，這些植物在光合作用過程中吸收二氧化碳並將其儲存在其體內，達到儲存二氧化碳的效果。

鋼渣具有較高的鹼度，可以中和海洋酸性污染，且有良好的吸附性，可以吸附海洋中的有害物質，其中的鈣、鎂等礦物質還可以為海藻等海洋植物提供生長所需的營養促進生長。

在千葉縣富津市的 SeaLab II 實驗室中對該技術進行了試驗，試驗結果證明，在鋼渣改質土壤中，海洋植物和底棲動物的數量和種類都明顯高於對照組，而在於水質改善及藍碳固定等方面都有相當不錯的效果。

日本製鐵開發的利用鋼渣修復海洋環境的技術，具有廣泛的應用前景，該技術可以有效降低鋼渣對環境的污染，同時還可以促進海洋生態系統的恢復。^[14]

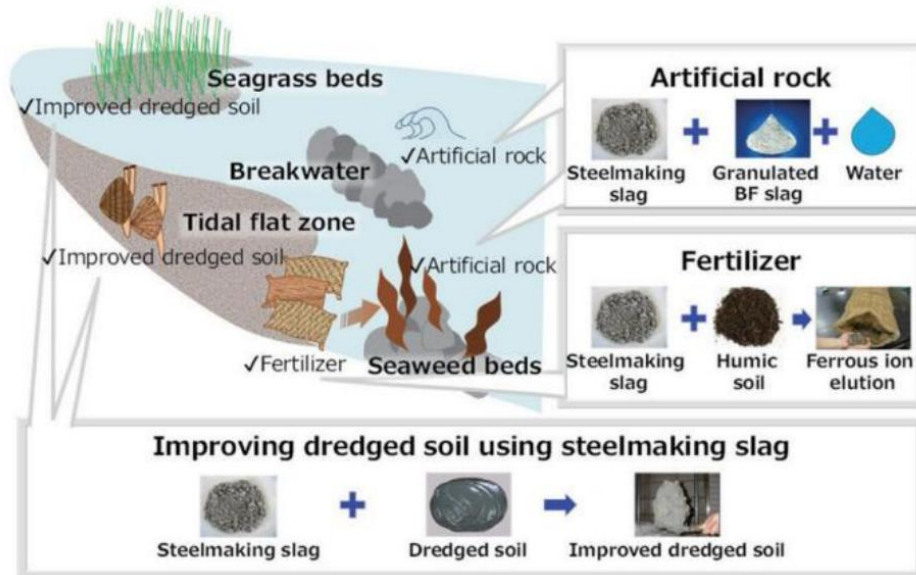


圖 3，利用鋼渣打造藍碳生態系

7. 纖維素生物乙醇生產技術

纖維素生物乙醇是由非食用生物質生產的生物乙醇，它與由可食用生物質製成的第一代生物乙醇不同，第一代生物乙醇通常由糧食作物（例如玉米和大豆）生產，但這卻導致了糧食價格上漲和環境問題，因此開發第二代生物乙醇，是由非食用生物質生產的生物乙醇，具有重要意義，纖維素生物乙醇是一種第二代生物乙醇，由纖維素生物質（例如草本植物和木材）生產，纖維素生物質是一種豐富的可再生資源，不會與糧食和飼料供應競爭。

纖維素生物乙醇生產技術流程：

- (1)預處理：將甘蔗渣及植物等原料進行破碎、洗滌和蒸煮，使得更容易被酶分解。過程採用稀硫酸蒸煮技術，適合草本生物質，增加此流程的處理強度，有利於後續流程的糖化效果。
- (2)糖化：使用纖維素酶將生物質中的纖維素和半纖維素轉化為糖。
- (3)發酵：使用酵母將糖轉化為乙醇。
- (4)蒸餾：將乙醇與水和其他雜質分離。

BECCU(Bio-Energy with Carbon Capture and Utilization)，是一

種利用生物質產生的二氧化碳來生產生物燃料的技術。在生物乙醇生產過程中，生物質生物乙醇生產時在生物質發酵過程中，會產生大量二氧化碳，該技術可以回收和利用這些二氧化碳，並減少生物質生物乙醇生產過程中的二氧化碳排放。

BECCU 技術可以被視為生物質生物乙醇生產技術的一種補充，可以幫助生物質生物乙醇生產技術更加環保，經過研究計算可以將生物乙醇生產過程中的二氧化碳排放量減少 60%。此外，該製程還可以利用國內副產品作為原料，不需要國際運輸，更進一步減少二氧化碳排放量，因此 BECCU 技術具有極高的潛力，可以作為一種負二氧化碳排放技術來應對氣候變化。^[15]

三、神戶製鋼

神戶製鋼採用先進的 MIDREX 技術，以降低其製鋼過程中的碳排放，MIDREX 技術是一種高效且環保的直接還原製鋼技術，不僅大幅減少了二氧化碳的排放量，還提高了能源利用效率。

1. MIDREX 技術

神戶製鋼的 MIDREX 技術是一種直接還原鐵（DRI）製程，可以減少鋼鐵生產過程中的二氧化碳排放，該製程使用天然氣或氫氣作為還原劑，將鐵礦石還原為金屬鐵。

(1) MIDREX-NG 技術

MIDREX-NG 技術是一種直接還原鐵（DRI）生產技術，使用天然氣或液化天然氣（LNG）作為還原劑，將鐵礦石還原為金屬鐵，與傳統的高爐煉鐵相比，MIDREX-NG 的二氧化碳排放量低約 50%。

(2) MIDREX-H2 技術

MIDREX-H2 技術是一種使用 100% 氫氣的直接還原鐵生產技術，其二氧化碳排放量接近於零，該技術目前尚處於開發階段，但有望成為未來鋼鐵生產的革命性技術。

MIDREX-NG 技術是神戶製鋼的核心減碳技術之一，該製程技術生產流程步驟如下：

(1) 鐵礦石球團或塊礦石的預熱：鐵礦石球團或塊礦石在進入豎爐之前先進行預熱，以提高其溫度和強度。

(2) 還原：預熱後的鐵礦石球團或塊礦石在豎爐中與還原氣體（天然氣或液化天然氣）進行反應，將鐵礦石中的氧化鐵還原為金屬鐵。

(3) 冷卻和篩選：還原後的金屬鐵（直接還原鐵）在豎爐底部排出，經過冷卻和篩選後即可使用。

MIDREX-NG 是一種高效、低碳、環保的直接還原鐵生產製程，與傳統的高爐煉鐵相比，MIDREX-NG 的二氧化碳排放量約為高爐煉鐵的 50%，有助於減少溫室氣體排放，能耗約為高爐煉鐵的 70%，生產效率高於高爐煉鐵，可以產出更多的鋼鐵，該技術生產的直接還原鐵具有良好的物理和化學性能，可作為電爐煉鋼的優質原料。然而 MIDREX-H2 是一種更先進的 MIDREX 製程技術，使用 100% 氫氣作為還原劑，其二氧化碳排放量接近於零，是更加環保的鋼鐵生產製程。^[16]

肆、結論

JFE、日本製鐵和神戶製鋼是日本三大鋼鐵廠，在全球鋼鐵產業中發揮著重要作用，三家鋼鐵製造商在減碳技術研發方面各有特色，由不同領域著手實施，各家鋼廠所採用減碳措施及效果，如表 1 所示。

此次報告所蒐集的技術資料，可看見日本鋼廠在減碳措施方面積極推動不遺餘力，包括高爐製程技術改進、富氫冶煉技術、碳捕捉、封存及利用等，此外，日本鋼廠還積極探索其他減碳技術，如將退火爐用高效能輻射管燃燒器、燒結火爐用高效率燃燒器、餘熱發電技術、二氧化碳合成甲醇技術、多孔配位聚合物、利用鋼渣打造藍碳生態系、纖維素生物乙醇生產技術等多種減碳技術，這些技術能夠有效減少整個鋼鐵生態中的碳排放，促進鋼鐵產業達成碳中和。

然而，許多減碳技術正處於研發或示範階段，研究成本極高，導致難以大規模推廣應用，部分減碳技術涉及複雜的製程和技術，存在較高的技術阻礙，需要研究團隊更進一步研發突破。

表 1，日本鋼廠所採用減碳措施及效果

鋼鐵廠	減碳技術	效 果
JFE	氧氣高爐型碳回收高爐	與傳統高爐相比CO2排放量減少約30%
	退火爐用高效能輻射管燃燒器	每年減少1.86萬噸的CO2排放量，及減少12%-NOx排放量
	燒結火爐用高效率燃燒器	每年減少CO2排放量2100噸，及瓦斯消耗減少30%
	餘熱發電技術	將廢熱轉化為電能，減少燃燒化石燃料發電所產生的碳排放
	二氧化碳合成甲醇技術	新型LTA型沸石膜具有高產率、高選擇性的將CO2合成甲醇
	海運運輸方式減少碳排放	與陸路運輸相比，渡輪底盤運輸減少了67%的CO2排放量
	高反應性燒結礦	每年可減少約20萬噸CO2排放量
	活性碳塊(RCA)	每年可減少約26萬噸CO2排放量
日本製鐵	SCOPE21焦化技術	每年減少約10萬噸CO2排放量
	富氫高爐技術	與傳統高爐相比，CO2排放量可減少12%
	高效CO2吸收劑	與傳統吸收劑相比，可以減少碳排放量約 20%
	多孔配位聚合物（PCP、MOF）	柔性PCP具高效的CO2吸附量
	二氧化碳捕集與利用（CCU）技術	利用CO2轉化為聚碳酸酯、碳酸二甲酯、二甲苯、聚氨基多元醇等物質
	利用煉鋼副產品生產微藻生物質	以氨水培養大量微藻生物，藉由微藻生物消耗CO2
	利用鋼渣打造藍碳生態系	利用藍碳生態系，從而起到固碳減排效果
	纖維素生物乙醇生產技術	利用BECCU技術減少生物乙醇生產過程中排放的CO2
神戶製鋼	MIDREX技術	CO2排放量可減少50%以上。

參考資料

- [1] JFE 鋼鐵生鐵領域為實現碳中和而採取的舉措，JFE 官網，2022-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/049/pdf/049-02.pdf>
- [2] 使用碳回收甲烷減少高爐製程 CO₂ 排放，JFE 官網，2022-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/049/pdf/049-03.pdf>
- [3] 開發用於退火爐的環保高效能輻射管燃燒器，JFE 官網，2024-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/053/pdf/053-12.pdf>
- [4] 燒結點火爐用高熱效率燃燒器的開發，JFE 官網，2024-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/053/pdf/053-11.pdf>
- [5] 利用煉鋼廠餘熱的熱電發電技術，JFE 官網，2024-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/053/pdf/053-14.pdf>
- [6] 利用鋼鐵廠排出的 CO₂ 合成甲醇技術，JFE 官網，2024-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/053/pdf/053-06.pdf>
- [7] 透過鋼鐵運輸模式轉變減少 CO₂，JFE 官網，2023-02
<https://www.jfe-steel.co.jp/research/giho/051/pdf/051-17.pdf>
- [8] 煉鐵領域減少二氧化碳排放的努力，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-05.pdf>
- [9] 使用 12 立方公尺試驗高爐開發減少高爐 CO₂ 排放量的技術，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-06.pdf>
- [10] COURSE50 中利用量子化學計算開發 CO₂ 吸收液，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-07.pdf>
- [11] 與將鋼鐵廠的 CO₂ 轉化為價值 (CCU) 相關的努力和開發實例概述，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-09.pdf>
- [12] 多孔配位聚合物 (PCP、MOF) 節能氣體分離技術進展及未來展望，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-08.pdf>
- [13] 利用煉鋼副產品開發微藻生物質生產的基礎研究，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-11.pdf>
- [14] 將煉鋼渣海水利用技術開發為藍碳生態系統創建技術，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-10.pdf>
- [15] 纖維素生物乙醇生產技術的開發 - 高產生物乙醇生產技術的示範試驗結果，日本製鐵官網，2021-06
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/417-12.pdf>
- [16] MIDREX® 製程：通往超低 CO₂ 煉鐵的橋樑，神戶製鋼官網，2020-01
https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_39/033-040.pdf