

全球綠色鋼鐵發展展望

The Global Outlook on Green Steel Development

林曉均

財團法人台灣綠色生產力基金會 工程師

一、前言：綠色鋼鐵，多元並進的發展路線

「綠色鋼鐵 (green steel, 簡稱綠鋼)」是近年國際上最炙手可熱的永續材料之一，為了實現《巴黎協定(Paris Agreement)》於世紀末前將全球升溫控制在 1.5°C 以內目標，各界無不呼籲先進國家與企業承諾擴大採購綠鋼，國際各大鋼鐵廠也相繼推出標榜「綠鋼」系列產品¹，以展現減碳硬實力。

「綠鋼」的發展是多軌併進且複雜的，一方面是涉及層面廣泛，可能包含：煉鋼技術發展 (創新製程)、市場需求及轉型融資空間 (投資經費)、利害關係者監督 (資訊揭露及評比) 與政策法規架構 (管制：如我國碳費、歐盟 CBAM；支持：如減碳投資補助)；另一方面則是該詞彙本身就如同「綠色產品(green product)」一樣並沒有明確且一致的定義(Durif et al., 2010; WTO, 2022)，我們可以從不同文獻當中找到截然不同的解釋，例如：有些稱綠鋼為不依賴化石燃料生產的鋼鐵(the World Economic Forum, 2022; TATA Steel, 2023)，有些則稱其為盡可能降低溫室氣體排放量的鋼鐵(Green Steel World, 2021)，或是採用永續製程的鋼鐵(SSAB, 2022)²，而與之相近的名詞還有近零鋼鐵(near-zero steel)、淨零鋼鐵(net-zero steel)、碳中和鋼鐵(carbon-neutral steel)，或是永續鋼鐵(sustainable steel).....等(Green house challenge, 2023; Net zero industry, 2021; RMI, 2023)，也因此使得國際上「綠鋼」發展的輪廓更顯模糊而充滿不確定性。

總的來說，在淨零排放的精神之下，我們可以將「綠鋼」視為較同類一般鋼品具有更低的

¹ 已 (將) 於國際鋼市售賣的綠色鋼鐵產品如：日本 JFE 鋼鐵的 JGreeX、日本製鐵的 NSCarbolex™ Neutral、盧森堡跨國鋼鐵大廠 ArcelorMittal 的 XCarb™、瑞典鋼鐵大廠 SSAB 的 SSAB Zero™、韓國浦項(Posco)鋼鐵的 Greenate certified steel.....等，所採取的減碳作法各有不同，且多數是透過分攤鋼鐵廠內減碳量至特定批次產品而達到「減碳」或「碳中和」，我國中鋼於 2023 年底也依循此作法，首度產出一批經 BSI 認證的碳中和鋼材，並賣予下游廠商製成碳中和扣件。

² 不使用化石燃料的煉鋼製程不一定完全不會產生碳排放；盡可能減少碳排放的手段可能包含了非絕對減量措施，例如購買國際認可的合規碳權抵減排放量；對環境永續的製程則涵蓋了更廣泛的層面，包含減輕製程中其他污染物質的產出等。三種定義無論是本質或描述的範疇都不相同。

溫室氣體排放量，並且有助於減緩氣候變遷惡化的鋼品。受限於傳統鍊鋼製程的特性，想要有效減少鋼品排放，改良既有製程或研發創新低碳製程是最有效的方法；改良或開發新製程就需要投注人力及經費等資源，為此，需要有足夠的產品市場規模及投融資空間；為了瞭解不同製程產出鋼品的排放強度差異，則需要透過建立碳盤查方法學或評估指標。為描摹國際綠鋼的發展輪廓，本文試以鋼鐵業排放規模、製程技術及相關標準的現況進行描述，並藉由甫於 2023 年初落幕的第 28 屆聯合國氣候變遷大會(COP 28)會議成果，展望綠鋼未來發展動向。

二、鋼鐵業：社稷基石 VS. 排碳大戶

鋼鐵業一般泛指所有與鋼鐵製造相關的產業，分析其價值鏈之上、中下游組成 (TWSE, 2024)，「上游」為採礦及煉鋼業，主要產品為鋼胚及不鏽鋼，「中游」為軋鋼、伸線與鑄造業，主要產品為鋼板、筋、盤元、棒鋼及管類等，兩段產業屬於狹義指稱的「鋼鐵業」，即經濟部主計處行業別中「基本金屬製造業」下的「鋼鐵製造業³」；下游囊括各種以鋼品為原料的製品製造業，產品種類相當多元，舉凡扣件、機械、運輸載具、模具、建材等都涵蓋其中，產業以「金屬製品製造業」為大宗。前述提到的鋼鐵下游產品充斥於日常之中 (如圖 1)，不僅支撐著重要維生基礎設施 (能源、交通、民生等) 的運作，還使得我們的生活更加便利 (家電、生活器具、交通運輸工具等)，其產值更是對各國 GDP 有著不容小覷的貢獻⁴，有此可知，鋼鐵業不僅僅是工業之母，更是國家經濟及社稷發展不可或缺的重要基礎。

³ 依經濟部主計總處行業別第 11 次修正版，鋼鐵製造業包含：冶煉業、鑄造業、軋延及擠型業，以及伸線業。

⁴ 根據 WSA(2020)文獻，鋼鐵業對於全球 GDP 貢獻約 3.8%，其中 20%來自鋼鐵本業 (即上、中游)，其餘 80% 主要來自下游相關產業。

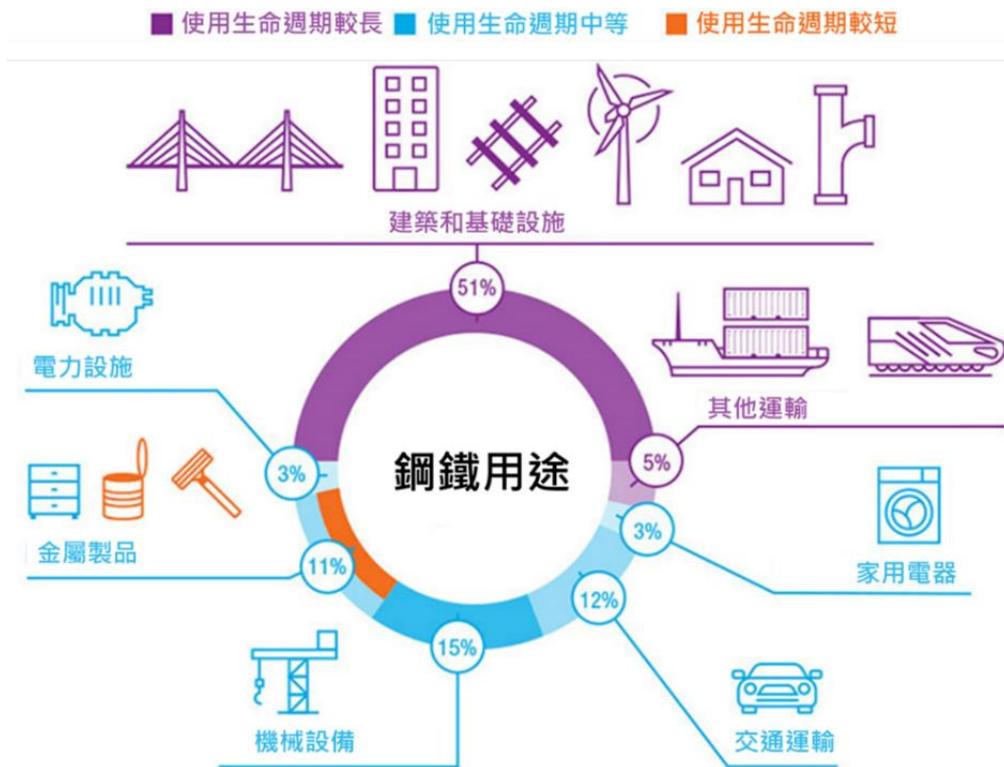


圖 1、鋼鐵用途(資料來源：Jack Otai, 2019)

鋼鐵業之於人類社會固然相當重要，然而由於鋼鐵製程能源消耗相當高，特別是上游的煉鋼業，因而會排放大量的溫室氣體；隨著各界加強對排放部門節能減碳等要求，各國的鋼鐵業正面臨相當迫切的減碳壓力。

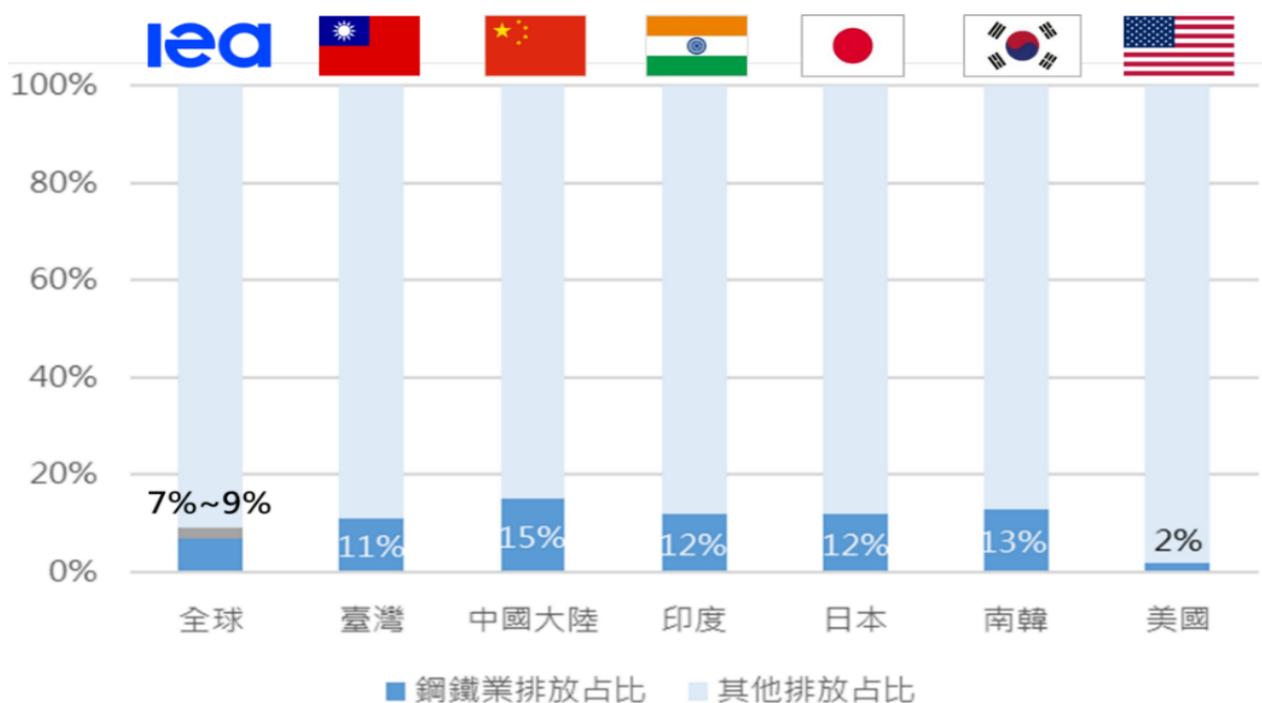
鋼鐵業的排放量究竟有多驚人？

以單一鋼鐵廠來說，其排放量最主要受到廠區本身的規模及產能所影響，我們很難直覺地描述鋼鐵業的排放規模究竟有多大；不過參考我國環境部每年要求特定行業別及排放量合計達 2.5 萬噸 CO₂e 排放源申報之碳排數據，2022 年 512 家列管排放源（俗稱碳排大戶）中共有 26 家鋼鐵業者，其中前 200 大就包含 8 家，而前 50 大排放源⁵當中仍有 2 家一貫煉鋼業（高爐廠）以及 1 家電爐業，可想而知之其行業總排放量不容小覷。

若以行業整體進行分析，首先，根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)(2020)資料，隨著人口及開發需求增長，全球對於鋼鐵的需求亦持續攀升，從 1970 年代一路成長至今翻了近 3 倍，並且每年排放超過 26 億公噸 CO₂e 溫室氣體，占全球能源相關總排放量約 7 至

⁵ 我國 2022 年盤查登錄前 50 大排放源以製造業為最多，其中包含水泥業、半導體業、石化業及鋼鐵業等，皆屬於能源密集型（或稱高耗能）產業。

9%，因此與鋁業、造紙業、化學品製造業、水泥業並列為 IEA 認為應重點追蹤減碳情形的重工業；接著，綜整我國、鋼鐵主要生產國家及亞鄰競爭國家（中國、印度、日本、南韓、美國）的鋼鐵業排放量占國家總排放量情形，如圖 2，包含我國⁶在內，有許多國家的鋼鐵業排放量占其國家總排放量超過 10%，凸顯鋼鐵業減碳對於國家達成淨零的重要性；而鑑於鋼鐵製品被大量應用於其他領域之中，若能以更低碳的製程煉製鋼鐵及製造下游製品並加以應用，其減碳效益將可擴及其他排放部門，實現大幅減碳。



註：彙整自不同來源及年份資料，故各國鋼鐵業排放占比僅供參考。
資料來源：IEA(2020)、我國經濟部(2022)、蘇亞紅(2021)、Vibhuti 等人(2023)、日本經產省(2023)、南韓能經所(2022)、Nimabkar(2022)。

圖 2、各國鋼鐵業排放占國家總排放量比例

鋼鐵業的排放量之所以如此驚人，絕大部分是來自「上游」的「煉鐵、煉鋼製程（本文通稱煉鋼）」(Carbon Trust, 2011)，而這又是因為普遍鋼鐵廠採用的煉鋼製程必須投入碳含量較高的原料或消耗大量能源進行生產的緣故，也因此改善既有技術或採取突破性技術生產就成為鋼鐵業實質減碳的關鍵手段。然而，想要減少其溫室氣體並不容易，不僅是因為高碳含量原料的

⁶ 參考經濟部產發署於 111 年發布的製造部門 2030 淨零轉型路徑，2019 年我國製造部門溫室氣體排放量約 147.5 百萬噸 CO₂e，約占全國總排放量 51.4%，然而當中約有 20% 來自鋼鐵業（基本金屬工業，但鋼鐵業占大宗），約占全國總排放量 10%；該報告引用國家盤查清冊排放資料之行業分類及範疇與環境部盤查登錄之資料略有不同，但仍可顯示鋼鐵業排放量規模重大程度。

不可替代性，即如將鐵礦石煉製為鐵鋼，須投入冶金用煤及焦炭進行氧化還原，以及電力排放係數不易降低等，還因為傳統煉鋼技術發展已相當成熟，而少有改良空間。這也是鋼鐵業與鋁業、水泥業等被視為「難減碳(hard-to-abate)」部門的主要因素。

三、鋼鐵製程：傳統製程與突破性技術發展

雖然鋼鐵業減碳著實不易，但為了達成行業減碳目標及迎合國際市場趨勢，國際上已有許多鋼鐵大廠投入開發不同突破性低碳煉鋼製程，甚至也有許多國家政府，如英國、日本、德國等，成立專案、投入高昂的經費協助產業推動製程轉型，已然成為國際鋼鐵業發展的重要趨勢。

國際上主要的傳統及突破性煉鋼製程應用技術種類繁多，且與許多國際淨零趨勢推廣措施環環相扣（如 CCUS、綠氫、電氣化等）。為了幫助理解鋼鐵業產生碳排放的原理，並掌握國際上綠鋼製造技術的發展情形，以下介紹傳統鋼鐵是如何被煉製而成的？又有哪些做法可以幫助我們煉製更低碳的「綠鋼」？以及，目前國際綠鋼相關專案布局情形。

（一）傳統煉鋼製程

參考世界鋼鐵協會(World Steel Association, WSA)資料(2023)，目前全球鋼鐵廠仍主要採用兩種製程進行煉鋼，分別是「高爐-轉爐(the blast furnace-basic oxygen furnace, BF-BOF) 煉鋼」，又稱「初級煉鋼」或「一貫煉鋼」，約占全球粗鋼產量 70%，以及「電弧爐 (electric arc furnace, EAF) 煉鋼（簡稱電爐煉鋼）」又稱「二級煉鋼」，約占全球粗鋼產量 30%。

「高爐-轉爐(BF-BOF)」原理係將開採自自然環境的鐵礦石（大多以化合物，如 Fe_2O_3 的形式存在）投入高爐，與冶金用煤及焦炭等還原劑進行氧化還原反應後熔融為鐵水，投入轉爐精煉為鋼液後連鑄為鋼胚，另外視鋼品的規格，也可於轉爐中投入一定比例的廢鋼融煉為鋼液，達到減少原鐵礦及還原劑使用量的目的；「電爐煉鋼(EAF)」則是將廢鋼或直接還原鐵(Direct reduced iron, DRI)投入電爐中，以電力加熱熔融為鐵水後連鑄為鋼胚；圖 3 為傳統鋼鐵製程路徑，其中「鋼液經連鑄設備製程鋼片（胚）」前的兩條途徑分別代表「高爐-轉爐」煉鋼（左側路徑）與「電爐」煉鋼（右側路徑）。

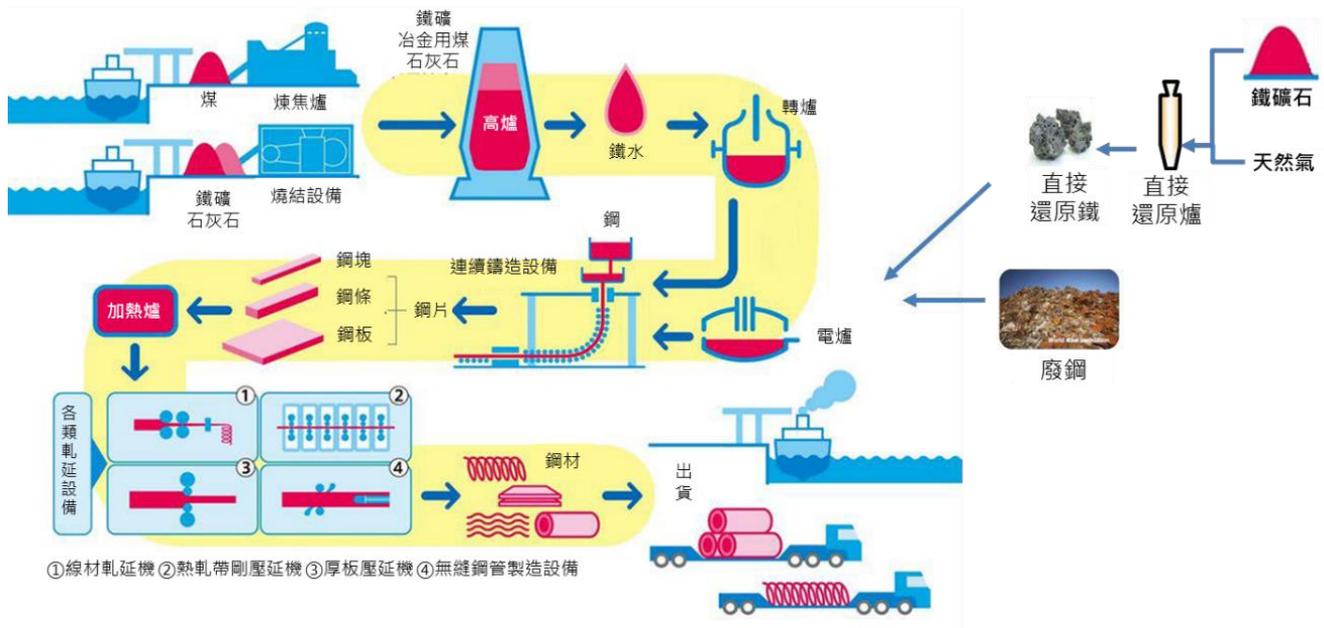
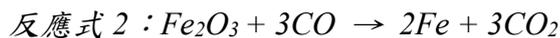
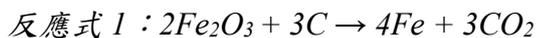


圖 3、傳統鋼鐵製程路徑(資料來源：日本經濟產業省，2021)

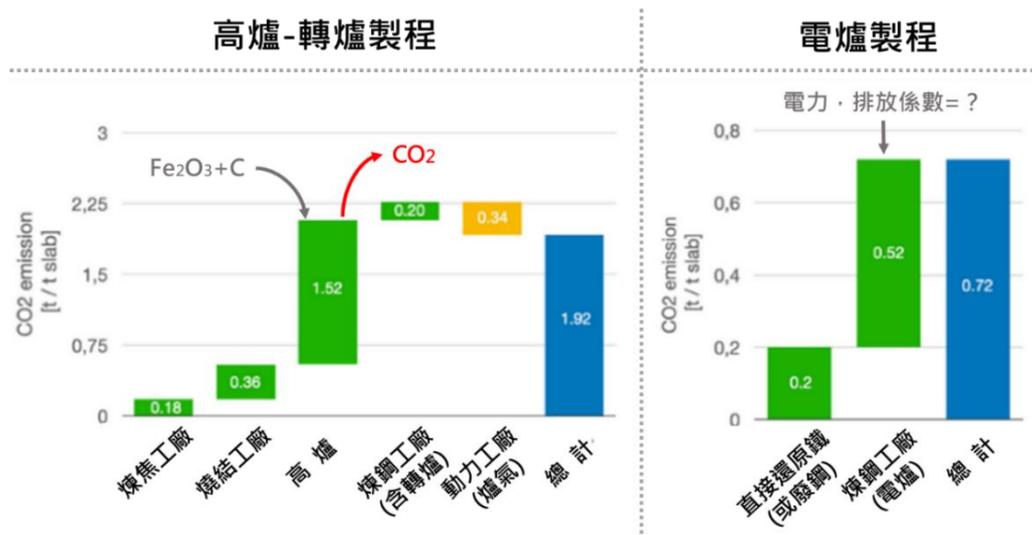
兩種煉鋼製程因為投入原料及耗用能源不同，因此排放溫室氣體的原因也不盡相同。

以「高爐-轉爐(BF-BOF)」製程來說，因為使用氧化鐵為原料，需要消耗冶金用煤及焦炭將其氧化還原為鐵水，過程就會排放大量 CO₂，其排放量約占整體逾 8 成，而「高爐-轉爐」製程更是現有煉鋼製程當中溫室氣體排放量最高的一種；反應式如下：



「電爐(EAF)」製程，則是利用電極間的「電位差」所形成的電弧產生高溫、加熱，熔融廢鋼後加入其他原料重新煉鋼，因此主要的排放量是來自電爐所消耗的電力，占總排放量約 7 成。

普遍來說，視冶金用煤、焦炭與其他原燃料投入高爐或電爐的配比，以及耗用能源排放強度，平均每噸高爐碳鋼的排放強度介於 1.8 至 2.2 公噸 CO₂e，電爐碳鋼排放強度則介於 0.4 至 0.8 公噸 CO₂e，兩者相差 2 至 5 倍；從圖 4 我們可以比對「高爐-轉爐」及「電爐」製程排放特性差異，不過由於不同鋼廠的原料及能源來源不同（尤其各國電力排放係數差異大），圖中呈現每階段製程的排放貢獻僅供參考。



註：Slab 為「扁鋼胚」之原文，是鋼胚的一種，因形狀寬扁而得名。本圖呈現了「高爐-轉爐」（左圖）及「電爐」（右圖）製造 1 公噸扁鋼胚時，於各階段製程產出的排放量（單位：公噸 CO₂e），其中「高爐-轉爐」製程，約有 8 成來自高爐階段，主要原因即為投入冶金用煤及焦炭進行氧化還原；「電爐」製程則約有 7 成來自煉鋼製程，主要來自電爐耗用之電力，不過也有許多電爐廠會在電爐中投入少量的冶金用煤及焦炭，用以調整鋼品性質。

圖 4、傳統煉鋼製程產品單位排放量比較(t CO₂e/t 扁鋼胚)

（資料來源：Emmanuel, M., & Guilherme, M., 2022）

從上述看來，「電爐」鋼品的排放量遠低於「高爐-轉爐」鋼品，選擇「電爐」煉鋼似乎是相對環保的選擇，因此國際上不乏有鼓勵鋼鐵業朝「高」換「電」轉型的呼聲(Matthew, M., 2022)，IEA 也曾於 2021 年發布的「2050 淨零排放(Net Zero by 2050)」一文中，建議在 2050 年前應有 53% 的鋼品改成以電爐生產，否則全球難以實現淨零排放目標。

然而，「電爐」製程早在 2000 年代就已逐步成熟，時至今日全球卻仍有 70% 的鋼品以「高爐-轉爐」製程生產，又是為什麼呢？

事實上，「高爐-轉爐」製程對於滿足全球鋼品市場需求有著無可取代的重要性，主要原因有三：一是鋼鐵廠所在區域的電力供應量未必能滿足 100% 採用電爐煉鋼之能源需求量；其二是，廢鋼產量有限⁷，產量難以滿足市場總體需求，且未來可能會有越來越多國家將其視為戰略物資(WSA, 2021; 李振麟, 2022; Transition Asia, 2023)；其三，也是最關鍵的原因是，兩種製程可以生產的鋼品特性不同，高品質、高性能鋼材，如：車用無向性電磁鋼板、高張力鋼板、

⁷ 雖然鋼鐵是可以不斷回收再利用的素材，然而沒有原生鋼品就不會有廢鋼，市場上多數的廢鋼即是來自初級鋼品折舊，然而考慮到產品生命週期、回收系統等條件，很難實現 100% 回收；為了滿足國際上不斷成長的鋼品需求，在沒有可達商業規模的替代技術前，仍有必要繼續使用及發展初級煉鋼。

海上風機用大單重厚板等，都必須仰賴「高爐-轉爐」製程生產（陳正平, 2019; 日本製鐵, 2022; JFE, 2023），而如電動車、陸域或海上風電等產業又恰恰是目前各國都積極推動的淨零轉型政策的一環，可想而知其市場的規模及成長性，因此如全球第三大鋼鐵原產國兼我國亞鄰競爭對手國的「日本」就將維持「一貫煉鋼（即採高爐-轉爐製程）」業者競爭力，列為推動行業低碳向淨零轉型的重要事項之一（日本經產省, 2021）。

（二）突破性煉鋼技術發展

經由對傳統煉鋼製程的介紹可知，假使我們要減少煉鋼產生的溫室氣體排放量（甚至趨近於零排放），除了以工業技術進行捕捉、移除外，針對「高爐-轉爐」的氧化還原製程以及「電爐」的電力耗用等開發低碳煉鋼技術，會是最有效的作法；本文參考瑞典鋼鐵大廠 SSAB 的分類(Johan, A., 2022)，將目前國際上主要發展的突破性煉鋼技術分為 4 大面向，分別是：不須改變既有製程的減碳作法、升級高爐-轉爐煉鋼製程、升級電爐煉鋼製程，以及創新的煉鋼技術；各面向下不同技術應用介紹如下：

1. 面向一：不須改變既有製程的減碳作法

此面向最主要的作法是以既有煉鋼製程搭配「碳捕捉、利用與封存(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)」技術，直接從溫室氣體排放源（如：煉焦爐、高爐）捕捉爐氣中的 CO、CO₂ 進行封存，或經分離純化後，轉供其他產業作原料使用。

各國政府（如：英國、日本、臺灣等）及國內外各大鋼鐵業者多有規劃將導入 CCUS 納入產業中長程的減碳規劃當中，知名案例如：日本政府支持推動的「COURESE 50」，結合 CCUS 技術，透過捕捉高爐尾氣純化出 CO 後輸入高爐替代部分還原劑，技術應用如圖 5（經產省, 2018）；另有我國鋼鐵業龍頭的中鋼，在經濟部指導下與工研院合作推動「鋼化聯產」，也是利用 CCU 技術，捕捉高爐及轉爐副產氣（即爐氣）純化後供應石化業者生產甲醇(CH₃OH)與乙烯(C₂H₄)等化學品⁸（經濟部, 2022）。

雖然 CCUS 可以最直接且大量地減少煉鋼製程的排放量，不過具體產生的減碳效益將受

⁸ 我國中鋼公司規劃分階段推動鋼化聯產，第一階段為建立實驗室及先導工廠，預計每年可捕捉並減碳 4,900 公噸 CO₂e（已於 2022 年底建置完成）；第二階段為建立示範產線，預計每年可捕捉並減碳 24 萬公噸 CO₂e；第三階段為擴大至商業應用（選址規劃大林蒲新材料循環產業園區），預計每年可捕捉並減碳 290 萬公噸 CO₂e。

限於技術投資成本與煉鋼廠所在地區相關基礎設施建置的情形，兩者都需有長期、縝密的規劃，這也是為何許多國家或業者會將此措施作為減碳路徑的中長期的減碳措施或達成淨零的最終手段，而非初級就投入減量的關鍵原因。

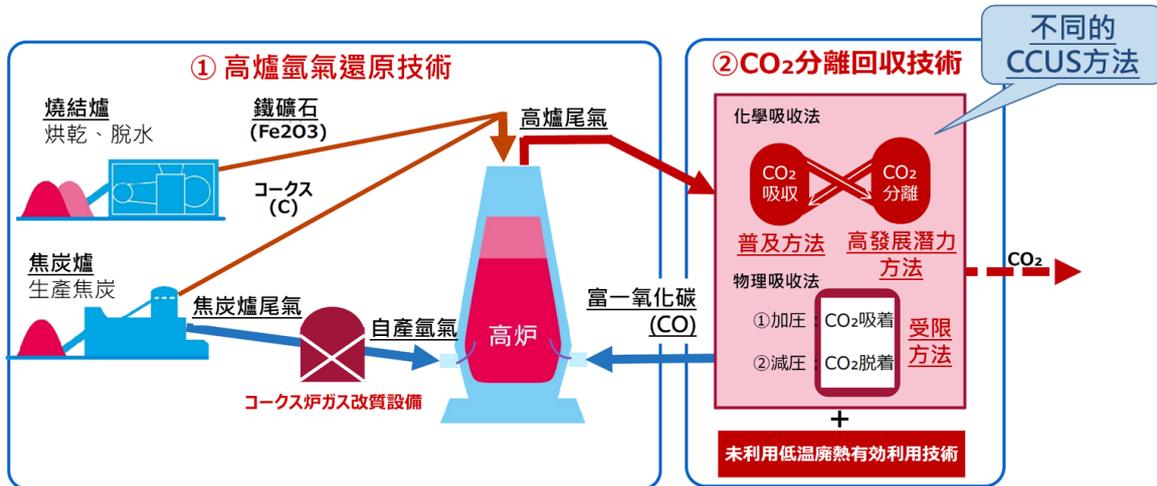


圖 5、日本 COURSE 50 技術應用(資料來源：日本經濟產業省，2021)

2. 面向二：升級高爐-轉爐煉鋼製程

升級高爐煉鋼製程的作法，最有效的作法無非是選擇其他更低碳或無碳的還原劑來還原鐵礦石，以避免氧化還原的過程當中產生溫室氣體。

常見的還原劑替代選項有：生質煤(biocoal)、氫氣，或是煉焦爐氣、高爐爐頂氣再利用；其中，生質煤被視為碳中和燃/原料，相當於不排放溫室氣體，瑞典鋼鐵大廠 SSAB 就曾與瑞典採礦冶金及材料研究所 Swerim AB (Swedish Research Institute for Mining, Metallurgy and Materials)合作，將林業廢木製成生質煤並測試可投入高爐替代冶金用煤與焦炭的比例(Alan, S., 2017)；氫氣(H_2)與鐵礦石氧化還原後，只會產出水(H_2O)而不會排放溫室氣體，是目前國際上最受矚目的低碳煉鋼方案之一，德國鋼鐵大廠蒂森克虜伯(Thyssenkrupp)早在 2019 年就已投入開發此技術，並於杜伊斯堡(Duisburg)的 9 號高爐試驗成功(Thyssenkrupp, 2022)；煉焦爐、高爐爐頂氣的再利用則較為特殊，其原理為透過收集爐氣當中的 CO 及 H_2 等可以與鐵礦石進行氧化還原的氣體，重新輸入高爐當中進行氧化還原，以減少噴吹煤粉 (PCI 煤) 用量，如：日本 COURSE 50 就同時利用了 CCU 技術捕捉高爐爐頂氣中的 CO ，並純化焦爐氣中的 H_2 輸入高爐進行氧化還原 (見圖 3-3)，另有我國中鋼公司於 2021 年起展開測試將焦爐氣 (富含 55~60%

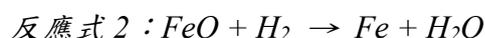
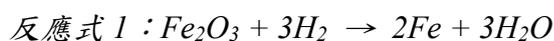
H₂ 與 20~25% CH₄) 輸入高爐中 (中鋼公司, 2022)。

不過，雖然使用低碳或無碳還原劑可有效減少高爐煉鋼製程的排放量，但除了受限於選擇替代還原劑的供應量外⁹，由於投入高爐的「炭」減少了，可能導致高爐內部溫度不足等重大問題，還須搭配其他措施解決；而目前國際尚無可應用於商業規模的案例。

3. 面向三：升級電爐煉鋼製程

升級電爐煉鋼製程的作法主要有兩種，第一種是從原料端進行改善，例如：使用排放量較低的直接還原鐵(direct reduced iron, DRI)；第二種則是從電爐本身耗用的能源改善，也就是使用清潔能源，如：風電、太陽能光電等進行煉鋼，以大幅減少用電產生的間接排放，此作法也是許多電爐廠最主要的減碳手段之一。

至於，要如何生產排放量較低的 DRI？常見的方式是將於豎爐內直接還原過程中所使用的還原劑，由天然氣（氣基 DRI）或無煙煤等（煤基 DRI）改為使用氫氣(H₂)，使其氧化還原的過程當中，不再排放 CO₂，反應式如下：



國際知名案例有跨國鋼鐵巨擘安賽樂米塔爾(ArcelorMittal)目前正在南非進行的 gHDRI (green hydrogen directly reduced iron)專案，就是採用了 Midrex（一家 DRI 技術及設備領導廠商）的直接還原鐵技術，搭配使用再生能源電解產生的綠氫進行生產，整個過程將不會產生任何排放量(Pooja, C., 2023)；不過如果使用的是灰氫或褐氫，製成的 DRI 就不能算是零碳。

4. 其他：創新煉鋼技術

除了就傳統煉鋼製程改良的外，也有鋼鐵業者致力於開發創新的煉鋼技術，其中較具代表性的技術屬電解煉鋼技術(electrolysis in ironmaking)，其原理為將鐵礦石浸沒於溫度高達 1,600 °C 的二氧化矽(SiO₂)與氧化鈣(CaO)溶液中，並通直流電進行分解，隨後，帶負電的氧離子(O²⁻)轉移至正極並轉成氧氣後分離，而帶正電的鐵離子(Fe³⁺)則轉移至負極，並被還原為鐵元素(WSA, 2021)，如圖 6 所示。

⁹ 高爐-轉爐製程唯有使用清潔能源電解產生的「綠氫」為還原劑，否則難以達到近零排放，然而目前各國的綠氫仍是供不應求，還有許多國家須仰賴從他國進口氫氣，這也是阻礙氫還原煉鐵相關技術普及化的原因之一。

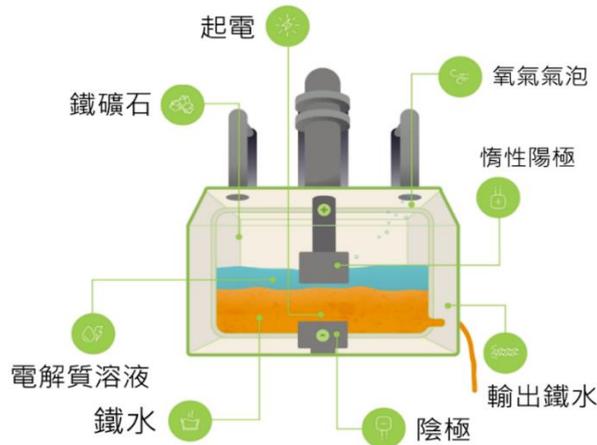


圖 6、電解煉鋼技術概念示意(資料來源：Boston Metal, 2023)

國際上投入開發此技術的案例相對稀少，較有名的案例有安賽樂米塔爾的 Siderwin 專案 (Siderwin, 2023)，以及綠鋼技術公司波士頓金屬(Boston Metal)刻正商轉中的專利技術熔融氧化物電解法(molten oxide electrolysis, MOE)煉鋼製程(Boston Metal, 2023)，不過這類創新技術的發展成熟度較低，還有待後續關注發展。

(三) 國際綠色鋼鐵相關專案布局

因應國際壓力及市場需求，近年各大鋼鐵業者紛紛投資開發低碳煉鋼技術，各種綠鋼專案猶如雨後春筍，參考工業轉型領導小組 (The Leadership Group for Industry Transition, Leadit¹⁰) 的綠鋼追蹤器(Green Steel Tracker)統計，截至 2023 年 11 月底，全球已有餘 30 個鋼鐵相關企業 (多為鋼鐵業的領頭廠商) 提出將近 90 個專案，已然不僅僅是為了減碳，而是成為鋼鐵業者彼此競爭的另一個戰場；不過，目前多數的專案尚處於開發階段，也算是間接反應了突破性的煉鋼技術開發不易。

雖然該資料庫蒐集資訊並不完整¹¹，但我們仍可從中一窺各項專案應用技術、計算範疇、減量效益推估等之異同；圖 7 呈現 WSA 會員 2021 年粗鋼產量前十大鋼鐵業者目前已/規劃啟動之綠鋼專案情形，多數專案為「待確認(to be confirmed, TBC)」狀態，部分專案預計將來啟動，僅少數為已啟動。

¹⁰ 工業轉型領導小組(Leadit)為於 2019 年 COP25，由瑞典及印度發起的小組，目標是實現 2050 年淨零排放，目前成員包含國家與企業共 38 個，包含：SSAB、蒂森克虜伯、塔塔(Tata)、薩爾茨吉特(Salzgitter)等鋼鐵業者。

¹¹ Leadit 的綠色鋼材追蹤器對於東亞地區的鋼鐵業者綠色鋼材專案蒐集資訊並不完整，如日本及我國鋼鐵業者的技術研發專案都未被納入。



註：本資料庫係 Leadit 委託其他機構蒐集，圖中日本製鐵及 JFE 鋼鐵僅各一專案且資訊尚待確認，但兩家公司皆有參與政府支持推動技術研發專案，如：COURSE 50 跟 Super COURSE 50，且各自有推動其他專案。

圖 7、2021 年粗鋼產量前十大鋼鐵業者當前綠色鋼鐵專案發展情形(資料來源：Leadit, 2023)

四、鋼鐵標準：百家爭鳴到趨同演化

如今在市場上，有越來越多不同的綠鋼可供買家購買，然而過於多樣化的選擇也衍生了新的問題，即欠缺一致的衡量基準，以定義什麼是「綠鋼」，以及判斷不同鋼品「綠」的程度差異。為此，許多國際知名的標準制定機構、減碳倡議組織、科研機構、鋼鐵業者分別發布了與鋼鐵溫室氣體排放測定等相關標準，以使鋼鐵業本身及其利害關係者掌握行業減碳進展、識別合乎自身減碳目標的綠色鋼品，而隨著國際對於採購綠鋼的需求攀升，這些原本用於自願性宣示、檢視用的鋼鐵標準正逐漸轉型為管制工具。

目前全球約有 20 多種的鋼鐵相關標準，且尚有增加的可能。然而不同組織所訂定的標準，其評估範疇、方法或認定基準各有不同，例如有些僅要求計算 ISO 14064-1:2018 版本的類別 1 與 2 的排放量，有些則要求計入類別 3 至 6；有些未考慮到不同煉鋼製程的差異僅訂定單一標準值，有些除分製程訂定，還就使用原料的比例進行更細緻的分級。在不考慮標準之間本質是否有所衝突的前提下，假設某一地區採用了較嚴格的標準或以此訂定強制性管制措施，因為碳成本及其他行政成本的不對等，可能使當地的鋼鐵業者面臨較高的貿易風險，進而產生碳洩漏

¹²；為了避免這些問題發生，如何在這些標準之間「異中求同」，成為近期各界關注的事項之一。

世界貿易組織(the world trade organization, WTO)堪稱促進鋼鐵標準提升一致性的先驅，該組織很早就關注到國際上各種鋼鐵標準的激增，並認為應該採取行動防範因標準差異形成的貿易障礙，因而於 2022 年 9 月 21 日發布了「貿易與氣候變遷第 7 號資訊簡介-鋼鐵業：WTO 如何支持更廣泛的一致性(trade and climate change information brief n°7- Decarbonization standards and the iron and steel sector: how can the WTO support greater coherence?)」報告，除針對主流常使用的鋼鐵標準進行比較分析（知名的近零/低碳鋼定量標準的比較如表 1），並從 5 個層面切入分析應如何促進鋼鐵標準透明度、一致性、可比較性，以避免義大利麵碗(spaghetti bowl effect)¹³效應發生(WTO, 2022)，5 個層面如下：

- (一) 全球相關(globally relevant)且技術中立(technology neutral)。
- (二) 以科學為基礎(science-based)並俱足夠野心。
- (三) 確保邊界及範疇可被測量。
- (四) 確保監測、報告及查驗證的透明度(transparency)。
- (五) 納入發展中國家的觀點。

¹² 「碳洩漏」指排放源因原先所在地區或國家實施過於嚴格的氣候政策，使其負擔碳成本壓力過大，因而轉移至其他政策較寬鬆的地區或國家進行生產活動，不僅無法達成原本被要求的減排目標，還將使轉移所在地的排放量上升。

¹³義大利麵碗效應(spaghetti bowl effect)為貿易經濟學的一種現象，係指國家之間簽訂的自由貿易協定(FTA)數量增加，反而減緩了彼此的貿易關係。

表 1、WTO 彙整近零/低碳鋼鐵標準定量排放閾值比較(資料來源：WTO, 2022)

| 術語 | 倡議／組織 | 定量閾值 (t CO ₂ e / t 粗鋼) | |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|---------------|
| | | 使用鐵礦石 (BOF) | 使用廢鋼 (EAF) |
| 近零排放鋼鐵 Near-zero emission steel | IEA-G7 | 0.4 | 0.05 |
| | SBTi | 0.5 | 0.2 |
| | 氣候債券倡議組織 Climate Bond Initiative | 0.12 | 0.12 |
| | 責任鋼鐵國際標準 Responsible Steel International Standard | 0.4 | 0.05 |
| | 先行者聯盟 First Mover Coalition | <0.4 | <0.1 |
| | 可行使命夥伴關係 Mission Possible Partnership | 0.5 | - |
| | 永續鋼鐵原則 Sustainable STEEL Principles | 0.2 | - |
| 低碳鋼鐵 Low-embodied carbon steel | Steel Zero | 訂定中 | 訂定中 |

註：本表為 WTO 取各倡議或組織訂定標準閾值之唯一值或區間極值進行比較，各標準原設計差異大，例如：責任鋼鐵國際標準共分為四個等級，並且依投入廢鋼的比例計算標準值（使用廢鋼比例越高，閾值越低）；先行者聯盟(FMC)則是依製程別設定單一閾值門檻。

WTO 所發布的報告激起各界對於整合鋼鐵相關標準的討論，而隨之應運而生的是於 2023 年底的 COP28 大會期間，由超過 35 個標準制定機構及鋼鐵業利害關係者等共同訂定並發布的「鋼鐵標準原則(steel standards principles)」。參與訂定鋼鐵標準原則的組織無不認同應加強各項鋼鐵排放測量方法及標準間的一致性、可比性與透明度，以加強市場信心、減少貿易摩擦，並促進鋼鐵業加速減碳；本原則共 7 點列舉如下：

- (一) 與利害關係者充分溝通。
- (二) 以既有標準為基礎，不標新立異。
- (三) 窮盡與技術無關(technology agnostic)且基於績效(performance based)措施促進鋼鐵業減碳。
- (四) 應符合 WTO 技術性貿易壁壘協定(TBT)訂定 6 大原則，包含：透明度(transparency)、開放性(openness)、公正與共識(impartiality and consensus)、有效性與相關性(effectiveness and relevance)、連貫性(coherence)及發展維度(development dimension)。
- (五) 應符合 IEA 訂定淨零鋼鐵排放測量及數據蒐集 5 大原則，包含：促進所有設施與製程的同類比較(like-for-like comparison)、為鋼鐵成品/半成品提供連貫(coherent)且可互通(interoperable)的結果、排放邊界及範疇應足夠完整、採用與能源部門及全球路徑相容的排放信

用(emission credits)與副產品(co-products)會計規則、鼓勵使用特定地點或產品的測量數據(IEA, 2023)。

(六) 應就近零排放(near-zero emission)鋼鐵及新興名詞定義達成共識。

(七) 定期追蹤及推廣，每年至少舉辦一次會議，以審查原則進展情形，並鼓勵各界遵守。

總結 WTO 報告及鋼鐵標準原則，未來鋼鐵相關標準的整合將以具一致基礎、可比較、高透明度為方向，趨同演化已是板上釘釘，不過考慮到國際標準訂定不易且有各自訂修週期，短期內我們或許不易見到實質的改變，但這些成果無疑點出了那些易被外界忽略的訊息，例如：不同測量方法及標準所劃定的範疇、邊界差異，以及不同煉鋼製程的特性及減碳的可行選項或困境，都是我們在選擇使用或設計測量方法及標準時應該納入考量的因素，這必將有助於鋼鐵業者及其利害關係人更有效的運用這些標準工具，並加速實現減碳目標。

五、結語：從 COP28 成果看國際綠色鋼鐵最新發展趨勢

綜觀全球推動綠鋼發展，主要由三大層面展開，包含：從「技術面」發展突破性煉鋼製程、從「市場面」推廣採購綠色鋼材，以及從「管制面」積極制定鋼鐵產品排放量相關評估標準，由於不同利害關係者所側重的面向並不相同，過去我們不易以全盤性的視角檢視三個層面的發展現況，然而去年底在杜拜盛大召開的 28 屆聯合國氣候變遷大會(2023 UN Climate Change Conference, COP 28)上，卻難得一見地由各界政府、領導組織等，分別就三個面向取得共識；COP28 就鋼鐵相關共識及討論重點如下：

(一) 大會重點共識之一，各國應加速發展淨零排放與低排放技術，尤其是針對包含鋼鐵業在內的難減碳部門，包含發展再生能源、核能、CCUS，以及製低碳氫氣滿足轉型需求(IISD, 2023)。

(二) 繼世界經濟論壇(the World Economic Forum)夥同 30 多個成員於 2021 年的 COP26 上宣布成立「先行者聯盟(First Movers Coalition, FMC)」承諾將擴大採購使用創新、低碳的技術生產的綠色產品(包含鋼鐵、鋁、水泥、航運、航空及道路運輸等)，以透過具體行動支持減碳的供應商，至 COP28 時，FMC 成員已成長至 96 個，還於大會中簽署高達 94 項採購協議(WEF, 2024)；此外，同樣身為工業深度減碳倡議(industrial deep decarbonization initiative, IDDI)的加拿大、德國、英國及美國也在大會中簽署了一份協議，後續將提出有實現的承諾，進一步擴大採購低碳鋼材、水泥及混凝土，還將為這些低碳建材訂定專案層級或全生命週期之減碳閾值，以

落實新設或既設建築的淨零排放目標，而這項協議也獲得了奧地利、日本與阿拉伯聯合大公國政府的支持(UNIDO, 2023)。

(三) 因應鋼鐵、水泥、化工、肥料、航空、航運級道路運輸等難減碳行業，以及身為全球價值鏈要角的中小企業，亟需巨額融資發展創新技術實現減碳，然而這類型的融資專案難以符合現有的綠色分類法，對產業及投資者調度資源形成重大挑戰，聯合國歐洲經濟委員會(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)呼籲各國擴大「轉型融資(transition finance)」，並建立更友善的融資環境，以滿足產業的需求；格拉斯哥淨零金融聯盟(the Glasgow financial alliance for net zero, GFANZ)及經濟合作暨發展組織(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)後續還將借鑒與綠色或永續發展相關金融工具(如債券、貸款等)建立相關指導原則，以支持這一舉措(UNECE)。

(四) 除有 WTO、ISO、WSA 等組織共同發布「鋼鐵標準原則」，IDDI 秘書處另呼應 IDDI 成員國之協議(見重點(二))於 COP28 會後底發布「推動溫室氣體核算系統的一致性-實現鋼材、水泥及混凝土統一標準的途徑(Driving consistency in the greenhouse gas accounting system- A pathway to harmonized standards for steel, cement, and concrete)」報告，重點就鋼鐵及水泥產品標準差異進行分析，並強調驅使碳排放計算及標準的趨同，將有助於促進綠色採購，並使鋼鐵及水泥業落實行業減碳(IDEA,2023)。

國際綠色鋼鐵正處於蓬勃發展之際，鋼鐵業的淨零樂觀其成；不過其發展的過程中，仍有許多問題有待各界，包含我國政府及企業共同關注與解決，其中最為關鍵的一點是，鋼鐵業需要有足夠的轉型資金及期程，才能確保突破性煉鋼技術能投入商業規模生產，因此訂定過於積極的減碳目標或嚴苛的氣候政策，不僅無法有效促使鋼鐵業減碳，還可能適得其反導致關廠或外移，因而引發碳洩漏，其尺度拿捏有賴執政者或領導組織研商；此外，國際對於鋼品的需求不減反增，且為發展再生能源及電氣化，對於高品質或高性能鋼材的需求亦持續成長，然而高品質或高性能的鋼材因其製程加工較為繁複，產品排放強度通常較高，這可能使得鋼鐵業未來的碳排放「帳面」上難有直觀的減量成效，但也提醒我們必須要用更全面的視野規劃國家或產業的減碳路徑，想必這些都將會是未來國際就鋼鐵淨零持續討論的重點。

六、參考資料

1. 中鋼公司(2022)。高雄科技大學第 46 屆全國力學會議特邀論壇-氫能應用與發展。能源教育資源總中心。
<https://learnenergy.tw/index.php?inter=digital&caid=1&id=302>
2. 李振麟(2022)。韓國將廢鋼提升為戰略物資 全球骨牌效應起。卓越雜誌。
<https://www.ecf.com.tw/tw/article/show.aspx?num=6711&kind=56>
3. 陳正平(2019)。結構鋼材。冶煉技術之介紹。技師報，第 1165 號刊。
4. 經濟部(2022)。經濟部製造部門 2030 淨零轉型路徑。經濟部。
<https://www.go-moea.tw/carbonReduceZeroPath/manufacture>
5. 臺灣證券交易所(2024)。鋼鐵產業鏈簡介。臺灣證券交易所(TWSA)產業價值鏈資訊平台。
<https://ic.tpex.org.tw/introduce.php?ic=Q000>
6. 蘇亞紅(2021)。鋼鐵行業應對「雙炭」壓力的挑戰及措施分析。中國鋼鐵新聞網。
http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202109/t20210913_54774.html
7. 環境部氣候署(2024)。民國 111 年盤查登錄現況分析。環境部氣候署事業溫室氣體排放量資訊平台。
https://ghgregistry.moenv.gov.tw/epa_ghg/Accession/PublicInformation.aspx
8. 經濟產業省(2021)。「トランジションファイナンス」に関する鉄鋼分野における技術ロードマップ。經濟產業省。
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211027002/20211027002.html>
9. 日本製鉄株式会社(2022)。日本鉄鋼業と日本製鉄の概況について。經濟產業省。
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/pdf/011_03_01.pdf
10. 經濟產業省(2023)。鉄鋼業の脱炭素化に向けた世界の取り組み（前編）～「グリーンスチール」とは何か？。經濟產業省。
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/green_steel_01.html
11. JFE スチール(2023)。カーボンニュートラルに向けた鉄鋼業の取り組み。内閣官房。

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai8/siryoku2.pdf

12. Transition Asia (2023)。廢鋼入門解說：廢鋼類型、侷限性及相關市場動態。Transition Asia。

<https://reurl.cc/OG4eWA>

13. WSA(2020)。現代社會中的鋼鐵工業。Worldsteel Association (WSA)。

<https://worldsteel.org/zh-hans/media-centre/press-releases/2020/the-steel-industry-in-modern-society/>

14. 에너지경제연구원(2022)。Scenario analysis of iron and steel production process for carbon neutrality。에너지경제연구원 (南韓能源經濟研究所)。

<https://reurl.cc/L4bpqK>

15. Durif, F., Boivin, C., & Julien, C. (2010). In search of a green product definition. Innovative Marketing, 6(1).

16. Alan, S. (2017). SSAB to test biocoal in blast furnace-based steel production. Bioenergy International.

<https://bioenergyinternational.com/ssab-test-biocoal-blast-furnace-based-steel-production/>

17. Boston Metal. (2023). Molten oxide electrolysis Fact Sheet. Boston Metal.

<https://www.bostonmetal.com/wp-content/uploads/2023/11/Boston-Metal-Fact-Sheet-20231002.pdf>

18. Carbon Trust. (2011). International Carbon Flows- Steel. Carbon Trust.

<https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/international-carbon-flows>

19. Chris, B., Seton, S., & Francis, L. (2021). Global facility level net-zero steel pathways- Technical report on the first scenarios of the net-zero steel project.

https://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf

20. Emmanuel, M., & Guilherme, M. (2022). CO₂ emissions in the steelmaking process.

CASSOTIS.

<https://www.cassotis.com/insights/co2-emissions-in-the-steelmaking-process>

21. Green Steel World. (2021). Our Mission. Green Steel World.
<https://greensteelworld.com/our-mission>
22. Greem challenge. (2023, September 29). What is Near-Zero Steel and how is it measured?
Greem challenge
<https://challenge.greenhouse.tech/nearzerosteelissions>
23. IEA. (2020). Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking.
International Energy Agency (IEA).
https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
24. IEA. (2021). Net Zero by 2050- A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency (IEA).
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
25. IEA. (2023). Emissions measurement and data collection for a net zero steel industry.
International Energy Agency (IEA).
<https://www.iea.org/reports/emissions-measurement-and-data-collection-for-a-net-zero-steel-industry>
26. IISD. (2023). UN Climate Change Conference - United Arab Emirates Nov/Dec 2023. IISD.
<https://enb.iisd.org/united-arab-emirates-climate-change-conference-cop28-13Dec2023>
27. Jack, O. (2019). The downstream market of steel industry- steel is indispensable in our modern life. Otai.
<https://www.otasteel.com/downstream-market-of-steel-industry/>
28. Johan, A. (2022). Emissions reduction in the steel industry- A guideline on green steel. SSAB.
<https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/insights/not-all-green-steel-is-fossil-free>
29. Leadit. (2023). Green Steel Tracker (include the dataset). Leadit.

<https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/>

30. Matthew, M. (2022). Study finds EAF steelmaking far greener than BF route. Steel Times International.

<https://www.steeltimesint.com/news/cru-study-finds-eaf-steelmaking-far-greener-than-bf-route>

31. Nimbalkar, S. (2022). Potential Decarbonization Strategies and Challenges for the U.S. Iron & Steel Industry. U.S. Department of Energy.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Nimbalkar%20-%20ORNL%20-%20Decarbonizing%20US%20Steel%20Industry.pdf>

32. Pooja, C. (2023). ArcelorMittal South Africa explores green hydrogen for sustainable DRI production. Solarquarter.

<https://solarquarter.com/2023/10/31/arcelormittal-south-africa-explores-green-hydrogen-for-sustainable-dri-production/>

33. RMI. (2023). The Sustainable steel principles. RMI.

<https://steelprinciples.org/>

34. Siderwin. (2023). Objectives. Making Steel with Electricity- The Siderwin research project tested a new method of steelmaking that uses direct electrolysis of iron oxide in a pilot plant in France. The steelmaker ArcelorMittal now announced that it wants to commercialize the technology. Industry Decarbonization Newsletter.

<https://industrydecarbonization.com/news/making-steel-with-electricity.html>

35. SSAB. (2022). Not all green steel is fossil-free steel – here’s why. SSAB.

<https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/insights/not-all-green-steel-is-fossil-free>

36. The World Economic Forum. (2022). What is green steel and why does the world need more of it? The World Economic Forum (WEF).

<https://www.weforum.org/agenda/2022/07/green-steel-emissions-net-zero/>

37. Thyssenkrupp. (2022). Climate-neutral future of steel production: Real-world laboratory of the energy transition H2Stahl project to start at Duisburg site of thyssenkrupp Steel. Thyssenkrupp.

<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/climate-neutral-future-of-steel-production--real-world-laboratory-of-the-energy-transition-h2stahl-project-to-start-at-duisburg-site-of-thyssenkrupp-steel-129078>

38. TATA Steel. (2023). Green Steel Plan. TATA Steel.
<https://www.tatasteelnederland.com/en/Green-steel-and-sustainability/Co2-neutral-steel>
39. UNIDO. (2023). Seven key governments generate demand for cement and steel decarbonization technologies via UNIDO-led green Public Procurement campaign. United nations industrial development organization.
<https://www.unido.org/news/seven-key-governments-generate-demand-cement-and-steel-decarbonization-technologies-unido-led-green-public-procurement-campaign>
40. UNECE . (2023). UNECE and partners advocate for "transition finance" at COP28 to help hard-to-abate sectors and small businesses decarbonize. United Nations Economic Commission for Europe.
<https://unece.org/media/press/386127>
41. Vibhuti, G., Jyoti, G., Kapil. G., Nagoor, S., & Shantanu, S. (2023). Steel decarbonisation in India. Institute for Energy Economics and Financial Analysis.
<https://ieefa.org/resources/steel-decarbonisation-india>
42. WSA. (2021). Fact sheet- Scrap use in the steel industry. Worldsteel Association (WSA).
https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-on-scrap_2021.pdf
43. WSA. (2021). Fact sheet- Electrolysis in ironmaking. Worldsteel Association (WSA).
<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Electrolysis-in-ironmaking.pdf>
44. WSA. (2023). About steel- How is steel made? Worldsteel Association (WSA).
<https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/>
45. WTO. (2022). Trade and climate change information brief n°7- Decarbonization standards and the iron and steel sector: how can the WTO support greater coherence? World Trade Organization (WTO).

https://www.wto.org/english/tratop_e/envir_e/trade-climate-change_info_brief_no7_e.pdf

WTO. (2023). Steel standards principles. World Trade Organization (WTO).

https://www.wto.org/english/tratop_e/envir_e/steel_standards_principles_e.pdf

46. WEF. (2024). 95 members send world's largest clean demand signal for emerging climate technologies. The world economic forum.

<https://www.weforum.org/impact/first-movers-coalition-worlds-largest-clean-demand-signal-climate-technologies/>