

鋼廠減碳技術成熟度與規模化現況調查

一、前言

隨著全球氣候變遷加劇和國際間對碳中和目標的高度關注，鋼鐵產業正面臨巨大的減碳壓力，根據世界鋼鐵協會統計數據(表一)，可發現全球鋼鐵行業在過去三年(2021~2023)中在 CO₂ 排放、能源強度並無顯著改善，顯示鋼鐵業在減排淨零上仍面臨挑戰。此外，根據國際能源署(IEA)的 2050 碳中和情境 (Net Zero Emissions by 2050 Scenario)，到 2050 年實現的低碳技術，約有 35% 仍仰賴未商業化的技術，而重工業依賴非商業化技術的比例更達 50%。

表一、世界鋼鐵協會統計之不同生產路淨 CO₂ 排放、能源強度之變化

	CO ₂ emissions intensity by production route			Energy intensity by production route		
	tonnes CO ₂ per tonne of crude steel cast			GJ per tonne of crude steel cast		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Global average	1.91	1.92	1.92	21.04	21.01	21.27
BF-BOF	2.33	2.33	2.32	24.13	23.98	24.20
Scrap-EAF	0.66	0.67	0.70	10.00	10.13	10.24
DRI-EAF*	1.40	1.36	1.43	22.58	22.25	23.13

綜合前述 CO₂ 排放無顯著改善及低碳技術商業化預測，有必要進一步蒐集鋼廠減碳技術的發展現況及所遭遇之各項挑戰，供公司決策參考。以下將以技術、成本、市場以及綠能產業等面向進行說明，並以蒂森克虜伯為例，簡述鋼廠在推動減碳技術與研發成本間的拉鋸戰。

二、鋼廠減碳技術發展現狀

1. 技術推廣瓶頸與成本挑戰

(1) 氫基直接還原缺乏高純度的鐵礦石及綠氫

氫基直接還原(H₂-DRI)被認為是未來大幅減碳的關鍵技術，按現有理論推估其減碳潛力可達 98%。然而，該技術目前仍多處於試驗階段，成熟度未達商業化應用要求，主因包含原料供應以及缺乏平價的高純度氫氣與綠色氫氣。

在原料供應方面，由於氫基直接還原技術需要高純度的鐵礦石(DR 級)，但目前全球僅有 3%-4% 的海運鐵礦石符合該標準。因此需要開發對鐵礦品級要求較低的技術，才能滿足原料供應的實際情況。

在綠色氫氣方面，雖電解產氫技術已達商業化程度，然綠色氫氣的生產技術尚待大規模驗證，另需提高製氫設備的效率與降低成本，例如：減少對關鍵材料的依賴、延長電池組壽命、改進製造流程與回收設計等，才能提供可負擔的綠色

氫氣。由於現階段綠氫的生產成本仍視電價而定，且電解槽的製造能力仍無法滿足市場需求，部署足夠的可再生電力供應電解槽將是達成綠氫戰略生產目標所面臨的主要挑戰。

(2) 碳捕捉與封存的高成本及未知效益

碳捕捉與封存(CCUS)技術雖然可以減少高爐和轉爐的碳排放，但其基礎設施建設成本高昂，包括碳輸送管道和封存場地，這些設施的建設週期長且投資巨大，對鋼廠構成額外的經濟負擔；此外，技術長期且大規模施作的實際減碳效益未定，需要持續性的技術支持與政策保障。在成本與技術效益互相影響下，使鋼廠對規模化投資時更顯得猶豫。

(3) 既有設備更新成本高昂，鋼鐵業轉型不易

高額的前期投資造成鋼鐵產業不易改變生產系統，因更新實體設備與相應耗材需時長，改變投入原材料和供應鏈的成本高且困難。由於鋼鐵業具有高度的路徑依賴性，對於降低需求或採用新技術的調整速度較慢。對應到當前市場需求減少的背景下，可能導致企業降低鋼鐵價格或產能利用率，進而增加收回投資所需的時間。根據國際能源署(IEA)估計，高排放煉鋼資產退出率若未較歷史水準提高，預期到 2050 年淘汰的資產數量將無法提供鋼鐵行業所需的減排量。

在高昂的成本限制下，鋼鐵生產路徑低碳轉型進展緩慢。雖然 2024 年中國未批准任何新的煤基鋼鐵項目，並新增 710 萬噸電爐(EAF)產能，且日、韓及歐盟等地區主流鋼廠，也都已選擇部分高爐關停，轉往新建電爐生產。不過現階段全球鋼廠仍主要依賴高碳排放的高爐-轉爐(BF-BOF)生產路徑，比如中國的高爐-轉爐佔鋼鐵產能的 90%，而電爐僅佔 10%，遠低於全球平均的 30%。此外，對於廢鋼回收率較低的國家（如：中國），其電爐策略亦存在原料供應穩定性的問題。

(4) 低碳製程運行成本相對較高

低碳技術的建設和運行成本遠高於傳統高爐技術，例如，H₂-DRI-EAF 路徑的建設成本比高爐-轉爐系統高出 30%，這對財務狀況本已緊張的鋼鐵業構成巨大挑戰。設備需求與建置成本雖因技術而異，而各國鋼廠也配合自身地理位置、天然資源等條件選擇使用技術，例如：歐洲鋼廠逐步採用氫基直接還原鐵(DRI)技術，美國則更偏向電爐技術。然而，共通的問題在於氫技術的高成本、供應不足、基礎設施升級、原料與高漲的能源價格等，已成為當前主要挑戰。

預期歐盟在 2026 年實施碳邊境調整機制(CBAM)後，綠色技術的投資壓力將進一步加劇，包含能源成本上升可能導致生產成本占比超過 40%、可再生能源成本居高不下等，將迫使鋼廠須採取更靈活的策略以應對價格壓力。

2. 市場需求放緩，綠鋼接受度偏低

(1) 未來鋼材需求增加幅度緩降

根據國際能源署(IEA)數據，預測鋼材需求從 2019 年到 2050 年僅會增長 10%，增長率相比過往大幅降緩。主因為先進經濟體的鋼材需求下降與材料效率的大幅提升，同時新興經濟體也日益成熟，對基礎設施投資與建設的需求也將降低，種種因素抵消，降緩了全球鋼材需求的增長。其中能源基礎建設的鋼材需求預期將增加，而運輸和建築的需求則都將下降。

(2) 綠色鋼材溢價阻礙普及

綠色鋼材因產品低排放而具環保優勢，但高達 20-40% 的溢價成為普及化的阻礙，走在最前頭的企業可能直面因成本帶來的競爭力下降，雖然有下游行業已開始採購低碳排鋼，但整體市場需求仍不足以支撐鋼廠對低碳技術的大規模投資。

以克里夫蘭-克里夫斯公司為例，儘管該公司已有能力生產碳排放量極低的鋼材，但卻無法說服客戶支付更高價格購買，以彌補其生產更環保鋼材所花的額外成本，種種阻礙也讓該公司考慮放棄或推遲其原先規劃的部份減碳專案。

3. 政策驅動力不足

(1) 各國氣候政策驅動力差異

中國提出到 2025 年將電爐產能比例提升至 15%，並計劃推動鋼廠的碳減排，但這一比例與全球平均 30% 的水準仍有顯著差距，也缺乏更具強制性的國內和國際政策，考量中國鋼廠的總產量，將使其他鋼廠在技術投資和減碳行動中面臨更多不確定性。

(2) 碳洩漏問題難以克服

在全球碳排標準不一致的情況下，也可能在國際間造成「碳洩漏(Carbon Leaking)」現象，指某國實施溫室氣體管制後，可能導致其產業外移至其他碳管制較為寬鬆國家，生產基地轉移至價格較低、標準較低的國家，反而增加另一國排碳量，無益於全球淨零目標。

為減緩國際間「碳洩漏」現象，預先防範已成為重要議題，以歐盟的碳邊境調整機制(CBAM)為例，透過對進口高碳排放產品徵稅，來平衡歐盟內外高碳產品的碳成本。然而，CBAM 雖然促進部分低碳排鋼材的需求，但其覆蓋範圍與執行力度仍顯不足，無法完全改變市場結構。

(3) 政府補貼仍不足以平衡成本

從各國推出的政策，可發現其立場均傾向推動減碳措施以呼應巴黎協定，例如美國提出的《通膨削減法案》(Inflation Reduction Act IRA)、日本的《綠色轉型促進法案》等，鼓勵再生能源與碳捕捉產業發展或給予企業減碳專案基金補貼，不過仍有部分鋼廠因嚴峻的經濟壓力，寧可放棄補貼也要放棄或推遲其原先的減碳專案，例如克里夫蘭鋼廠、安賽樂米塔爾與蒂森克虜伯等。

(4) 缺乏驅動下游採用綠鋼的機制

目前的低碳政策除了對鋼廠施加碳稅外，並無強烈驅動下游採用綠鋼的機制，導致市場對綠色溢價的接受度偏低，鋼廠亦難以推動，因此出現先進鋼廠雖積極發展低碳技術，卻遲遲不敢大規模實施的情況。為此，應呼籲政府協調上下游取得共識，從政策面驅動市場平衡，例如歐美鋼廠與車廠聯名呼籲歐盟以行政措施推行綠鋼技術。

4. 綠能產業發展面臨多重挑戰

(1) 新舊進入者的拉鋸戰

可再生能源的拉動效應為低收入國家提供了發展自身鋼鐵產業的機會，但也可能推動「舊」鋼鐵製造商與「新」鋼鐵製造商之間的摩擦，擁有既有價值鏈的舊鋼鐵製造國將希望保留其產業，而新加入者則希望利用可再生能源擴大其生產，這種動態有可能使得綠能產業規模化發展承壓。

(2) 天然資源與投資區域差異性

綠能產業因大多數技術仍未規模化或處於初期完成階段，在 IEA 的 Advancing Clean Energy Demonstration Projects 中提到主要的綠能產業包含浮動式海上風電、生物質能與 CCUS 以及小規模的潮汐能或太陽能技術等。其主要發展區域集中在資源較為豐富的歐洲與北美，特別是歐洲擁有豐沛的海上風力資源，且相關技術發展亦達一定成熟度，然而如何提高效能、降低成本以及大規模儲能技術成為核心議題。受到資源限制，綠能產業發展區域受限，導致無法有效拓展；此外，進入產業的投資門檻極高，在沒有政策的驅使下，難以取得穩定且長期的投資。

三、蒂森克虜伯鋼鐵部門經營困境分析

2022 年 9 月，蒂森克虜伯(以下簡稱 Thyssen)董事會通過，將在杜伊斯堡鋼廠建設一座年能產 250 萬噸 MIDREX FLEX[®] DRI 工廠(可年產 230 萬噸鐵水)，初期使用重整後的天然氣進行反應，之後可使用 100% 氫氣。該廠將配置兩座熔爐，預計最早於 2026 年啟動，2028 年部分使用氫氣，2029 年完全使用氫氣，氫用量將達到約 14.3 萬噸。新的 DRI 廠將取代該廠四座高爐中其中兩座，每年鋼鐵生產可望減少 350 萬噸 CO₂ 排放(該廠每年碳排約 2000 萬噸)，且未來可能用電爐替換另一座高爐。2023 年 7 月歐盟批准，將對該計畫提供 20 億歐元之補助，Thyssen 自身將投資約 10 億歐元，預估總投資額約 30 億歐元(約 1026 億新台幣)。

然而，上述提及的減碳計畫，皆極有可能被放棄或是延後。Thyssen 鋼鐵部門近五年有四年虧損，2018 年原與塔塔鋼鐵歐洲公司達成合併共識，然而於 2019 年遭到歐盟否決。2023 年中起 Thyssen 一直在為該部門尋找合作夥伴。2024 年 4 月底，Thyssen 與捷克能源控股公司 EPCG 達成協議，EPCG 先收購其鋼鐵部門 20% 股份，EPCG 未來持股可望增加至 50%。

Thyssen 近期宣布鋼鐵部門裁員及減產計畫，主要歸因如下：

1. **能源成本居高不下：**德國於 2011 年福島核災後宣布在 2022 年全面廢核，2024 年再生能源比例將達 54%，然目前電價仍高。在工業電價方面，德國公司電費約為法國的兩倍。加上德國長期以來依賴俄羅斯天然氣，故自烏俄戰爭以來，德國能源密集產業承受極大營運壓力，甚至不惜減產或將經營重心移往海外。
2. **車輛嚴格減排監管措施：**Thyssen 約一半鋼材銷往汽車產業，在其投入大量資金投資創新減碳技術的同時，卻面臨客戶訂單萎縮的窘境。2018 年歐盟決議逐步淘汰內燃機引擎，並大幅壓低車輛平均碳排標準。然而這些要求技術上幾乎無法達成，導致德國汽車產業深受打擊。在電動車時代，德國車廠又面臨中國車廠的激烈競爭及車市持續低迷等問題，進一步加深其經營困境。
3. **進口壓力持續增加，尤其來自亞洲進口鋼材之競爭：**受中國房地產市場持續疲軟的影響，中國 2024 年鋼鐵出口量有望突破 1 億公噸，達 8 年來新高。為應對產能過剩和國內需求疲軟，2025 年中國鋼鐵出口量預計將繼續增加，恐加劇貿易摩擦。歐盟此前雖通過碳邊境調整機制(CBAM)，要求進口商自 2026 年起支付相關碳費，但進口鋼材實際生產條件難以查核，恐難以保護德國鋼鐵工業。
4. **德國鋼鐵業普遍面臨的艱難市場環境：**其他不利因素包含三黨聯合府難以形成共識，造成經濟改革政策難以執行、官僚行政程序冗長，需要文件繁多、技術勞工短缺、外國對德國投資減弱、AI 開發能力落後先進國家等。

基於上述原因，德國核心製造業近年紛紛關廠與外移，工業陷入寒冬，目前德國「去工業化」速度已超過脫碳進程。德國工業產值自 2018 年以來持續滑落，整體下降 15%、汽車產業下降 18%、超過 30% 的工業部門正面臨前所未有的壓力，2024 年公司破產家數亦創下 10 年新高，造成整體供應鏈皆經營不易。傳統大廠如氣體廠林德、化工廠斯巴夫、車廠大眾、福斯，汽車供應鏈博世、馬牌等公司紛紛宣布傳出裁員與業務縮減，並將經營基地大幅移往中國等海外國家。整體工業經營環境的持續惡化，可能是迫使 Thyssen 不得不宣布裁員的主要因素。

四、結語

鋼鐵行業目前市況低迷，鋼材需求和價格均處於歷史低位，市場對綠色溢價接受度不高，在生產成本回收不易的前提下，世界各大主流鋼廠陷入投資低碳技術導致的競爭力下降與全球低碳熱潮的博弈困境，並逐漸形成觀望他廠成果再決定後續作為的態勢，或是等待相關減碳技術或綠能產業成熟後再加入的想法。

目前主要鋼廠的低碳技術呈現「百花齊放，但未成大器」的狀態，各鋼廠甚至各區域均按其規劃或理論發展階段性技術，然受限於開發成本、市場需求、政策驅動力以及綠能產業等因素，尚未見規模化發展。總結說明與建議方案如下：

1. 技術推廣瓶頸與成本挑戰

當前氫能冶煉技術仍屬發展期，成熟度未達商業化要求，雖有 Midrex 等商業化還原技術，又衍生基礎建設、設施改造、技術運行及能源供應等成本問題，而碳捕捉與封存技術的長期效果未定，加上原料供應的穩定性，皆為鋼廠難以推動大型投

資的障礙。

2. 市場需求放緩，綠鋼接受度偏低

由於先進經濟體鋼材需求下降及新興經濟體基礎建設投資減少，全球鋼材需求增幅趨緩，市場恐難產生大量需求，致使鋼廠競爭加劇。另下游對綠色溢價鋼材接受度不高，鋼廠不易推廣與發展綠鋼市場，亦為減碳技術難以規模化原因之一。

3. 政策驅動力不足：

全球在低碳轉型政策面上的驅動力現階段仍顯不足，除各國碳中和路徑不同外，產量居首的中國及產量持續增加的東南亞各國對碳中和之態度不明，加上碳洩漏的現象，若無政策輔助，將導致綠鋼去化不易，疊加成本大幅影響採取低碳技術鋼廠的競爭力。

4. 綠能產業發展面臨多重挑戰：

因天然資源與投資區域差異性，造成綠能產業發展過於集中，示範案轉移困難，成品如氫氣、再生能源又面臨運送困難等問題；而市場早/晚期進入者的拉鋸也造成新興綠能產業擴張不易、既有產業創新卡關的情況，使其無法有效規模化。

綜上所述，鋼廠減碳的規模化進程雖然面臨諸多挑戰，但透過多方層面的聯動，仍非常有機會實現鋼鐵產業向低碳轉型的目標。針對各項現況挑戰，綜合彙整建議方案如下表二所示。

表二、鋼鐵業低碳發展現況挑戰與建議方案

	現況挑戰	綜合建議方案
技術瓶頸與成本壓力	1. 減碳技術如氫基直接還原、CCUS 等，成熟度仍未達商業化要求，且面臨資源和基礎設施的限制。 2. 鋼鐵業生產系統更新實體設備與相應耗材需要很長的時間，改變投入原材料和供應鏈的投資成本高昂且困難。	1. 爭取同業或設備商之技術交流，多方合作進行，逐步導入低碳技術。 2. 鋼廠考量獲利情形，審視評估低碳轉型投資，並藉由官方補助或合作計畫等，逐步推動實體改造。
市場需求	全球鋼鐵需求降緩導致鋼鐵市場不景氣，其中溢價 20-40%的綠色鋼材更加難以競爭。	推廣自身綠色鋼材品牌價值，並找尋同樣具備減碳目標之下游客戶(市場)，或配合其減碳目標需求，簽署綠鋼長期供應合作協議。
政策驅動	各國碳排標準與氣候政策驅動力差異，或將影響全球減碳推行力	透過各國對進口商品徵收碳稅，藉此使碳價格在不同市場之間趨於

	現況挑戰	綜合建議方案
	道，甚至可能在國際間造成「碳洩漏」現象。	一致，比如歐盟的碳邊境調整機制(CBAM)。
綠能產業	低碳技術的運行成本高度依賴綠色電力，但可再生能源在許多地區的成本依然居高不下，也缺乏配套的基礎設施。	建議鋼廠布局全球，在資源豐富之地區進行技術投資或與當地供應商合作，以實現降低成本與穩定供應。

五、參考資料

1. [Phase-in and phase-out policies in the global steel transition](#)
2. [轉型成本高+買家不願支付“綠色溢價” 克利夫蘭-克利夫斯考慮放棄生產「綠鋼」和 5 億美元撥款](#)
3. [碳洩漏是什麼？3 原因引發高洩漏風險，政府因應措施有哪些？](#)
4. [Has steel sector decarbonisation progressed in 2024?](#)
5. [Turning point: China permitted no new coal-based steel projects in H1 2024 as policies drive decarbonisation](#)
6. [ADDRESSING STEEL DECARBONISATION CHALLENGES FOR INDUSTRY AND POLICY](#)
7. [年產 250 萬噸！蒂森克虜伯將建德國最大的直接還原鐵廠](#)
8. [EU Commission approves German federal and state government fund-ing for thyssenkrupp Steel's "tkH2Steel" decarbonization project](#)
9. [德國 Thyssenkrupp 集團可能出售 50%-之鋼鐵事業](#)
10. [德國 Thyssenkrupp 與捷克商 Křetínský 達成鋼鐵合資協議](#)
11. [德國最大鋼鐵製造商 Thyssenkrupp 公司宣布將大幅減產](#)
12. [Thyssenkrupp May Scrap Green Steel Project, Handelsblatt Says](#)
13. [Thyssenkrupp: looking for ways to save the steel business](#)
14. [德國直擊／輸不起的能源轉型戰，綠能發展與經濟可兼顧？](#)
15. [去工業化超過脫碳速度 歐盟嚴苛減碳加劇德國衰退](#)
16. [“歐洲病夫”2.0？德國不能再躺了](#)
17. [歐洲經濟火車頭陷入停滯](#)
18. [德國企業破產家數持續攀升 已達近十年高峰](#)
19. [Ifo 研究：德國官僚造成的經濟損失超過預期](#)
20. [德國汽車製造業為何信心低迷？](#)
21. [德國巴斯夫將未來成長動能寄託在中國市場](#)
22. [大陸鋼鐵產能過剩需求疲軟 2025 出口量將持續增加](#)
23. [Advancing Clean Energy Demonstration Projects](#)
24. [2024 年全球氫能述評](#)