

鋼鐵綠巨人—工業碳排大戶的綠能轉型

鄭婷予

☐ 高中生組

☒ 大學生組

☐ 研究生組

國立臺灣大學財務金融學系

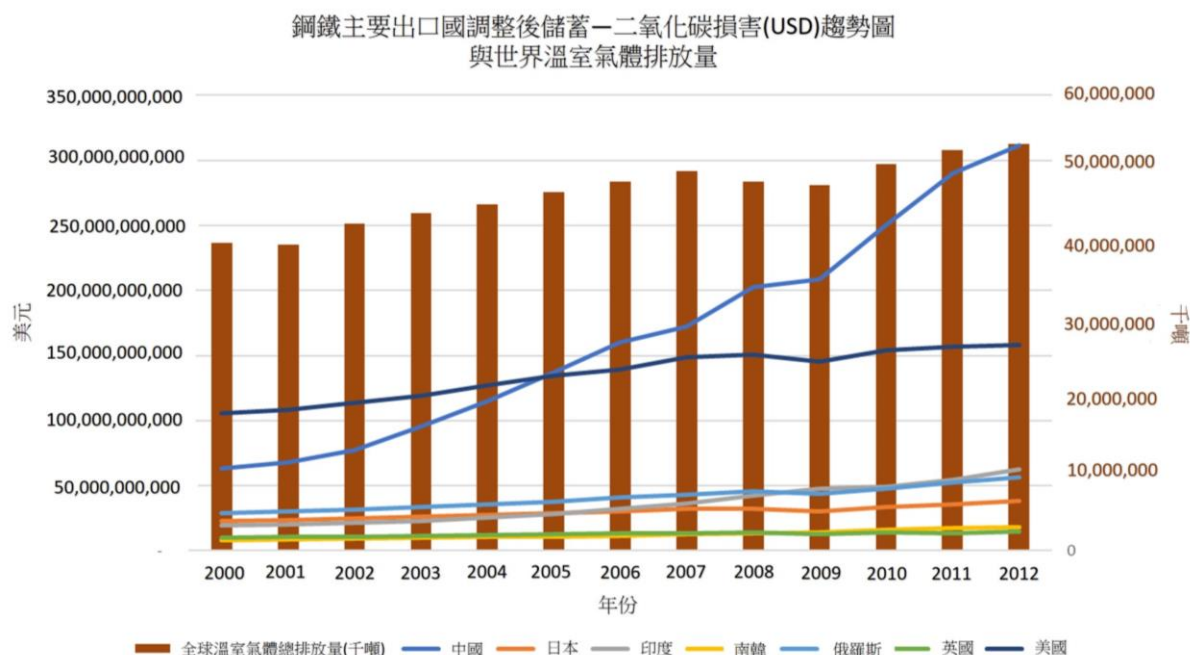
主辦單位：財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心

中華民國 110 年 12 月

壹、前言

自十七世紀工業革命以來，人類世界展開史無前例的快速都市化。高速經濟成長的背後，是人們大量的燃燒化石原料，如煤炭、石油等，導致二氧化碳的濃度越來越高，迎來了全球暖化的時代。根據世界氣象組織（WMO）的數據顯示，地球上現在的氣溫比工業化普及以前高了近 1°C ⁽¹⁾，若全球碳排趨勢持續下去，科學家們預測在未來一世紀以內，全球升溫可能達到 1.4 至 5.6°C ⁽²⁾。而根據瑞士再保險研究所（Swiss Re Institute）2021 年 4 月的研究指出，若氣溫上升幅度來到 2.6°C ，2050 年前 G7 國家（英國、美國、日本、加拿大、法國、德國、義大利）每年將損失 8.5% 的 GDP，相當於每年發生兩次 COVID-19 危機⁽³⁾。

根據圖一顯示，各國因化石燃料的使用而付出的二氧化碳成本正逐年攀升，尤其中國自 2000 年起近十年的損害成長高達 5 倍，各國平均成長了 2.4 倍。另外在世界溫室氣體的排放量的部分也緩慢上升，目前已超過 500 億噸二氧化碳當量。



系統編號：WB10603-0153；WB10303-0278

資料來源：World Bank

圖片繪製：自行繪製

圖一、鋼鐵主要出口國調整後儲蓄—二氧化碳損害(USD)趨勢圖
與世界溫室氣體排放量

世界逐漸正視到全球暖化帶來的損失，並且於 2014 年通過了巴黎協議，協議中各國達成共識，在本世紀末以前，必須控制地球升溫於 2°C 以內。各國為了減緩暖化趨勢，分別立定碳中和（指碳排放量與減碳排量互相抵消）目標，歐盟、美國、日本皆宣布於 2050 年以前實現碳中和，而中國則是目標於 2060 年以前。

確立目標後，各國紛紛推出減碳政策，並且扶植工業進行綠能轉型，其中鋼鐵業，

身為工業之母，更是所有產業中的重點轉型對象。在本文中，我們將依據以下邏輯分析鋼鐵業的綠能轉型：一、分析鋼鐵業轉型的誘因及動力。二、梳理目前鋼鐵廠商主要實行的減碳技術與措施，三、聚焦在最有永續發展潛力的綠氫煉鋼上，並且分析其面臨的挑戰及成功個案。希望藉由各方數據與報告的統整，一窺鋼鐵傳統產業面對國際綠能浪潮下的轉型之道。

貳、鋼鐵業的綠能轉型勢不容緩

鋼鐵業，生為工業之母，其終端需求產業包括各國建築業與基礎設施、機械設備、汽車業等等，需求占比分別為 52%、16% 以及 12%⁽⁴⁾，在人類歷史的發展上擔任不可或缺的角色。但是身為一個現代工業高度仰賴的產業，鋼鐵業同時也兼具了高汙染高碳排的特色。在 2019 年，全球鋼鐵業便排放了約 26 億噸的二氧化碳，佔全體工業碳排的四分之一，約等同於全球碳排的 8%⁽⁵⁾，這導致鋼鐵業成為減碳政策的首要對象。然而根據麥肯錫顧問公司分析的產業研究⁽⁶⁾，推動鋼鐵業綠能轉型的不只是政策上的堅持，並且還有以下三種市場因素，促使傳統碳排大戶進行改革。

一、消費者偏好趨向環境友善

首先，便是消費者對於環境友善的產品偏好提升，這連帶著影響產品生產方，也就是鋼鐵業的終端需求方，提升其對綠色鋼鐵的需求。根據科學基礎碳目標倡議 (Science-based targets initiative, SBTi) 目前已經有超過 1,000 家公司設立科學基礎減量目標 (Science based target, SBT) 做為其供應鏈及生產線的減碳策略，並且有 2,007 家企業開始採取行動⁽⁷⁾。而鋼鐵業的第三大需求產業—汽車運輸業，也是 SBTi 的重點執行專案，包括 Toyota、BMW、Volvo、Manufacture Française des Pneumatiques MICHELIN 等汽車大廠皆參與其中，鋼鐵業終端需求產業的消費偏好改變，是促使鋼鐵業生產綠鋼並且發展綠氫煉鋼的一大誘因。

二、未來碳排成本逐年攀升

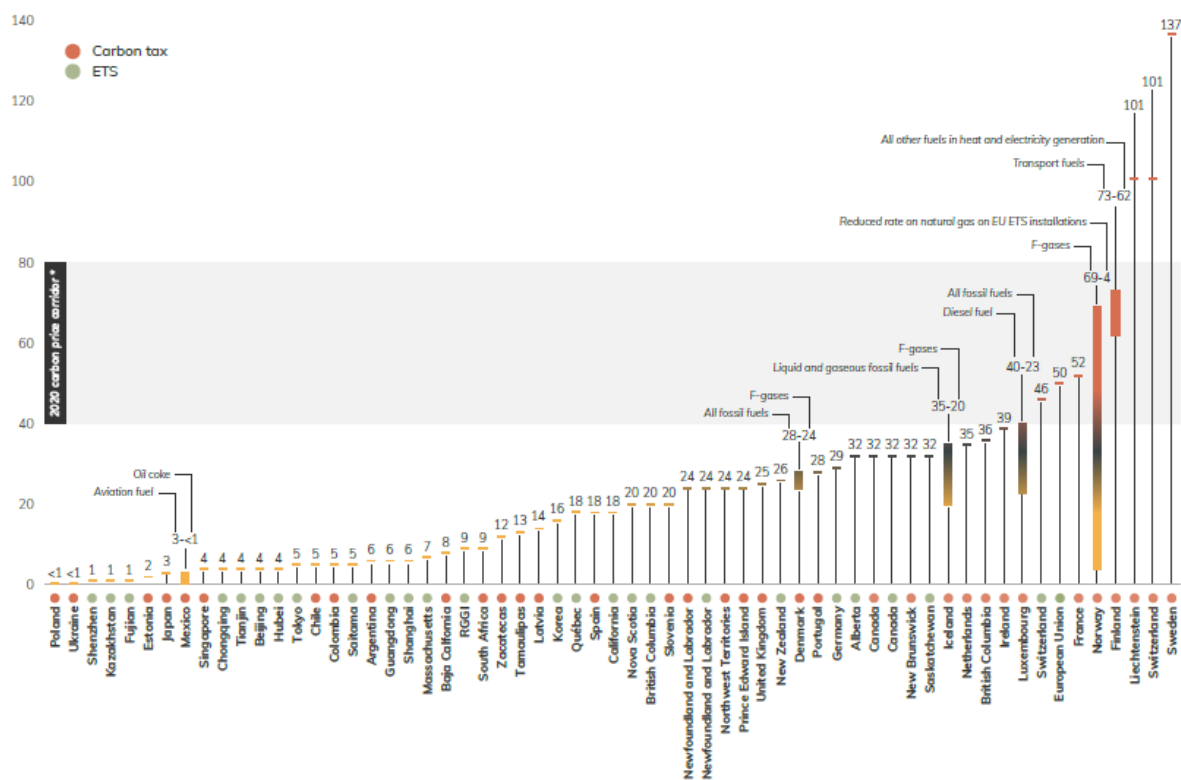
隨著越來越多政府轉嫁碳成本到排放源身上，各國逐漸發展碳排放交易系統 (Emissions Trading System, ETS)，落實「碳定價」(Carbon Pricing) 向企業、機構等收取費用。根據世界銀行《2021 年碳價趨勢報告》，全球已有 64 個地區實施碳價機制⁽⁸⁾。而圖二則顯示，碳價目前在各地的落差十分的懸殊，在瑞典、瑞士等地，每噸碳費用可以超越 100 美元，並且全球有九個地區高於 2021 年碳價水準的典範 (圖二灰色範圍，即高於 40 美元) 根據國際能源研究顧問公司 (WoodMac) 的分析，若要控制在全球升溫 1.5°C 內的目標，2030 年碳價應達到每噸 160 美元的水準⁽⁹⁾，由此推論未來碳價還有很大的調漲空間。

身為全球綠能減碳的模範生—歐盟，也在其綠色新政中提出碳邊境機制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)，將依據歐盟當時的碳定價，要求歐盟進口商支

2021「Win the PRIDE：用指標說故事」競賽文稿

付其在生產地未付的碳排放成本，預計自 2023 年起試辦。這項政策預估將為出口至歐盟的鋼鐵製品帶來大量的碳成本，並且會加速鋼鐵業的綠能轉型之路。

CARBON PRICES (2021)



資料來源：World Bank⁽⁸⁾

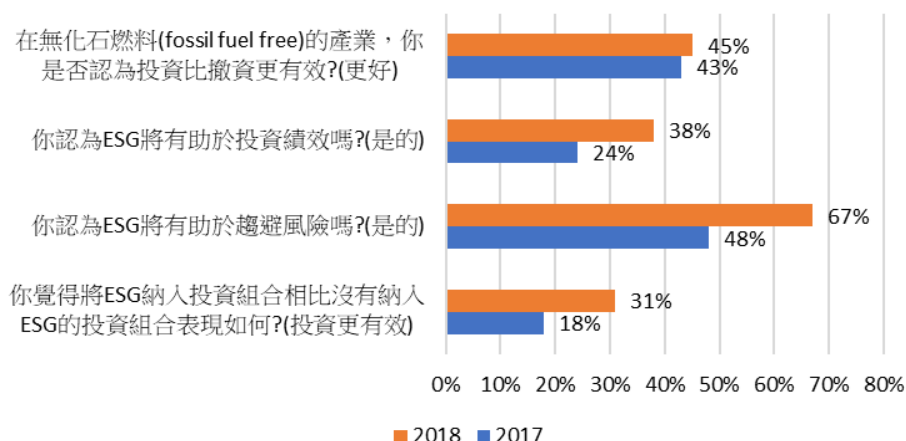
圖形繪製：World Bank

圖二、全球 2021 年各地區碳價(USD/t)

三、投資人對永續投資的重視

鋼鐵業，身為金融市場的資金需求方，自然也需要博取投資人的青睞。近年來，ESG (Environmental, Social, Governance) 投資蔚為風潮，其中的 E (Environmental) 就包括致力於減少二氧化碳及污染物的排放。根據特許金融分析師協會 (Chartered Financial Analyst Institute) 給予專業投資人的 ESG 指南報告，ESG 在長期投資布局上具備較好且穩定的報酬率，並且能有效降低投資風險⁽¹⁰⁾。而圖三也顯示，投資人認為 ESG 有助於績效提升與風險趨避的贊成率有顯著提升，分別成長 14% 及 19%。而認為投資於無化石燃料產業為有效投資決策的占比更接近 50%，以上皆證明投資人對於 ESG 投資的信任逐漸提升⁽¹¹⁾。未來鋼鐵業的 ESG 治理評比將更加重要，並且產業將致力於邁向無化石燃料的道路，這將成為投資人長期投資的關鍵。

投資人對ESG投資的態度



資料來源：RBC Global Asset Management

圖形繪製：自行繪製

圖三、投資人對 ESG 投資的態度

參、鋼鐵業現行減碳技術

為因應世界綠能轉型，再加上近幾年的產業趨勢及消費者偏好，目前鋼鐵業已開始為未來十年的能源、製程轉型，進行廠房與設備的投資與佈局，目標藉由未來幾年階段性的減少碳排，最後達成完全的碳中和。以下我們將從現行鋼鐵業的製程開始，逐步介紹現行的階段性減碳措施包括最具前瞻性的綠氫煉鋼，以及探討綠氫煉鋼所面臨的挑戰。

一、鋼鐵生產製程簡介

鋼鐵製程分為高爐煉鋼及電爐煉鋼。高爐煉鋼使用集成高爐(BF)和鹼性氧氣爐(BOF)並仰賴鐵礦石和煤炭生產。電爐煉鋼則使用電弧爐(EAF)，多使用廢鋼及直接還原鐵(DRI)生產(見表一)。高爐煉鋼由於其使用煤炭燃燒當還原劑，又屬於長流程運作，其二氧化碳排放量是電爐煉鋼的4倍，建爐成本更是電爐的20倍⁽¹²⁾。近幾年電爐煉鋼因為技術革新，生產變得更加穩定、應用也更加廣泛，因此目前許多國家包括中國、歐洲、日本等都在增加電爐的使用量。

表一、高爐煉鋼與電爐煉鋼比較

	高爐煉鋼	電爐煉鋼
爐具	集成高爐(BF)、鹼性氧氣爐(BOF)	電弧爐(EAF)
原料	鐵礦石、煤炭	廢鋼、直接還原鐵(DRI)
生產原理	高爐以煤炭為燃料將鐵礦石還原成鐵水，還原後的鐵水進入轉爐純化後，將煉為鋼液。	電爐透過電弧的高溫，熔解廢鋼或直接還原鐵。溶解後經過純化便可成為鋼液。
能源需求	長流程運作，較耗能	短流程運作，較節能
使用占比	70%	30%

資料來源：自行整理

二、減碳技術一覽

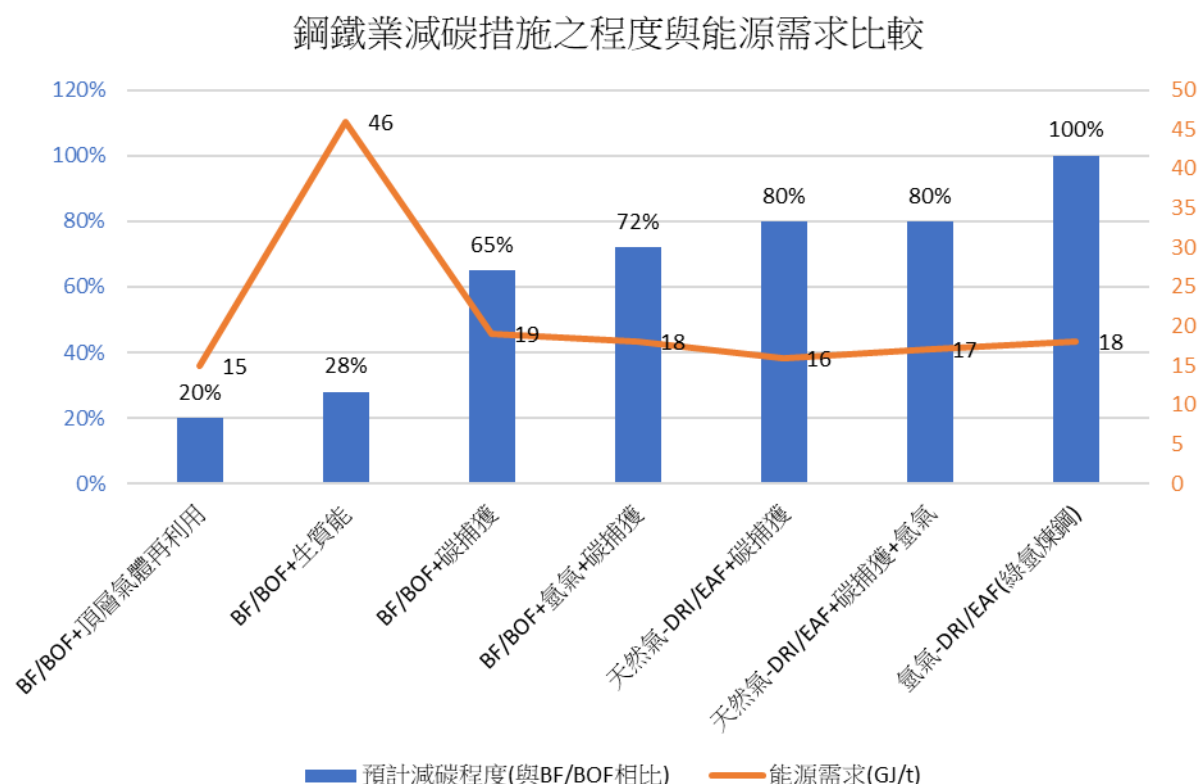
表二呈現目前鋼鐵廠商已有工廠在執行的重點減碳措施。為求敘述方便，以下以 BF/BOF 代表高爐煉鋼、EAF 代表電爐煉鋼、NG 代表天然氣、CC 代表碳捕獲、灰氫代表有燃燒天然氣製成的氫氣、綠氫代表以再生能源電解水製成的氫氣。

根據圖四，我們可以看到，隨著 BF/BOF 逐漸增加碳捕獲、氫氣等措施，再來進步至使用純度相較於廢鋼更高的 DRI 作為 EAF 原料，並且逐步增加其碳捕獲技術和綠氫的使用，整體的除碳化相較於傳統 BF/BOF 可以有 20% (BF/BOF+Top gas) 至 100% (H₂-DRI/EAF) 的成長幅度，但是隨著採納不同的方法，對於現有原物料、能源供應以及科技技術的要求也不盡相同。例如，採用 BF/BOF 加上生質能的方式就極度仰賴當地的生質能資源的供應，對於能源需求更是遠超過其他方法，因此目前只有在南美及俄羅斯較有發展性。而能達到完全除碳的 H₂-DRI/EAF，也稱綠氫煉鋼，則高度仰賴再生能源的供應。

表二、鋼鐵業減碳措施比較

技術	做法	可行性
BF/BOF+Top gas recovery and recycling	頂層氣體可被回收利用至 BF 中，降低煤炭的使用。或者氣體可被回收至高爐煤氣餘壓透平發電裝置生產電力。	高
BF/BOF+Biomass	以燃燒生質能部份取代燃燒煤炭作為還原劑	低
BF/BOF+CCU	搭配碳捕獲及利用 (Carbon capture and use, CCU) 科技	中
BF/BOF+H ₂	以氫氣取代部分煤炭做為還原劑	中
NG-DRI/EAF+CC	電爐生產使用含碳量較低的 DRI，搭配碳捕獲科技	中高
NG-DRI/EAF+H ₂ +CC	以灰氫(天然氣燃燒製成的氫氣)做為還原劑	中
H ₂ -DRI/EAF (綠氫煉鋼)	以綠氫 (再生能源電解水製成的氫) 做為還原劑，並且以再生能源運轉 EAF	低

資料來源：European Parliamentary Research Service⁽¹³⁾



資料來源：European Parliamentary Research Service⁽¹³⁾

圖形繪製：自行繪製

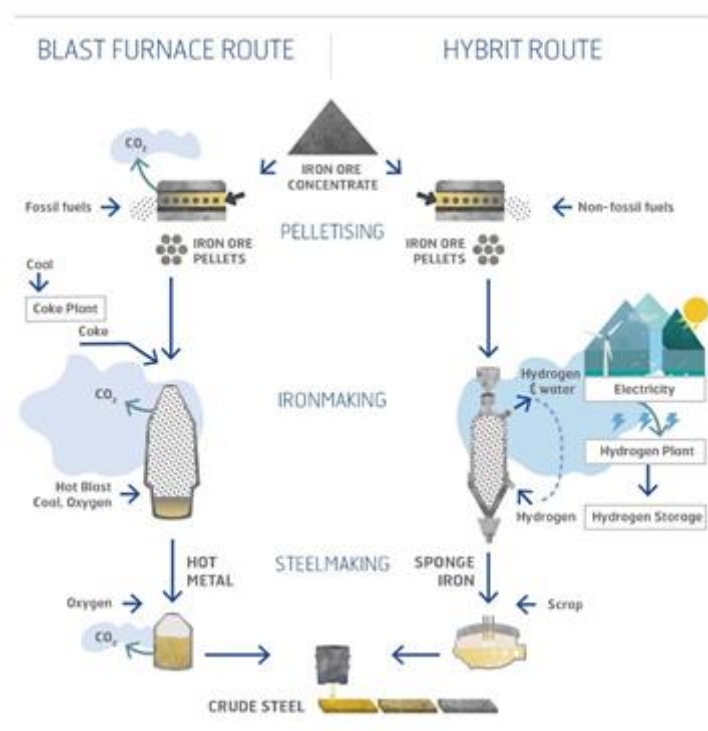
圖四、鋼鐵業減碳措施之程度與能源需求比較

三、綠氫煉鋼

上述各減碳措施，大致上都只能達到短期盡量減碳，唯有最後一項 H₂-DRI/EAF 綠氫煉鋼，可以達到百分之百的零碳排，也是目前鋼鐵業最永續和可行的綠能改革方法，因此接下來我們將重點介紹綠氫煉鋼的製程和目前的挑戰。

(一)製程介紹

綠氫煉鋼的方法是以電爐(EAF)為爐具，並且取代一般高爐煉鋼以燃燒焦煤還原鐵礦砂，而改以燃燒綠氫還原鐵礦砂，獲得純度較高的直接還原鐵(DRI)，最後不會排放二氧化碳，只會排出氫氣與水。在鐵礦被還原完畢後，綠氫煉鋼將會產出海綿鐵，並且接下來相較於高爐煉鋼使用氧氣來提高純度，會排放出二氧化碳；綠氫煉鋼使用廢鋼來氧化雜質，並不會造成碳排放。而值得注意的是，綠氫煉鋼中氫氣的製造與電爐的運轉，皆是由再生能源，例如風力或太陽能發電等提供。圖五以現行成功製造綠鋼的 Hybrit 計畫與傳統高爐煉鋼(Blast Furnace Route)方法比較。



資料來源：產業永續發展整合資訊網⁽¹⁴⁾

圖形繪製：作者不詳

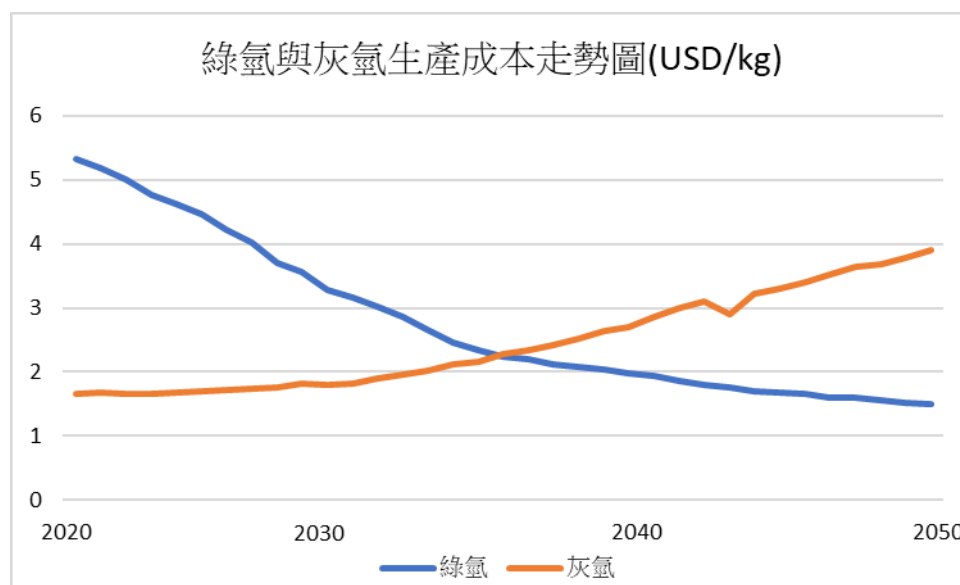
圖五、Hybrit 計畫綠氫煉鋼與傳統高爐比較圖

(二)規模化的挑戰

雖然綠氫煉鋼是目前前景最被看好的長期永續解方，但在可以達到工業規模化以前，仍面臨了一些挑戰，導致目前與傳統鋼材相比尚沒有價格競爭力。以下將針對綠氫煉鋼的關鍵原料—氫氣，以及再生能源的供應分析綠氫煉鋼未來的可行性。

1、氫氣價格

綠氫煉鋼其中一項最重要的原料就是氫氣的供應。目前雖然也有廠商在嘗試以煤炭混合氫氣燃燒來減少二氧化碳排放，但多數使用的是以天然氣製成的灰氫，不同於理想上以再生能源電解水製成的綠氫。由於再生電力的昂貴、電解槽成本等因素，目前綠氫的價格每公斤約 5.3 USD，高出灰氫(1.6 USD)兩倍多的價差⁽¹⁵⁾，如圖六。但隨著再生能源的普及化、電解槽的技術成本下降以及未來排放二氧化碳的成本上漲，可望綠氫的價格會逐年下降，灰氫的價格則會上升，最終在 2035 年價格會大約持平，約為每公斤 2.3 USD⁽¹⁵⁾。而隨著價格趨勢不變，2050 年時綠氫的價格就大約可以與現今的灰氫一致，也就不會造成鋼鐵廠過大的成本負擔。



資料來源：Hydrogen Council⁽¹⁵⁾

圖形繪製：自行繪製

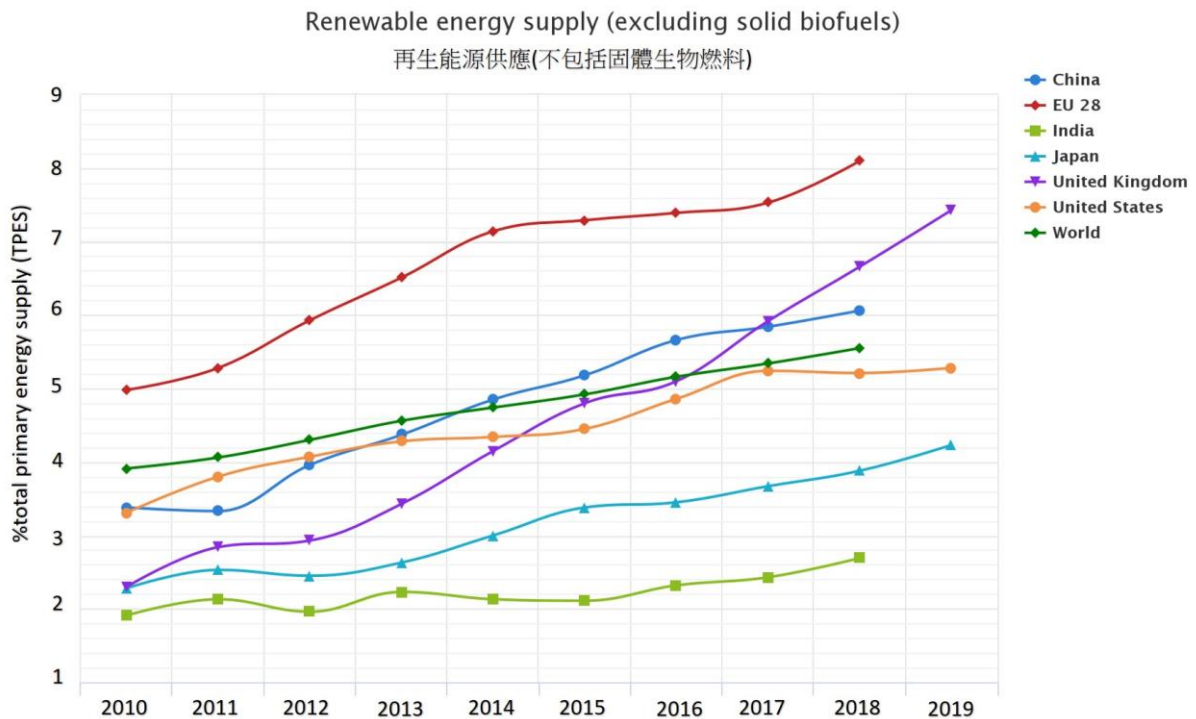
圖六、綠氫與灰氫生產成本走勢圖

2、再生電力

綠氫煉鋼要能規模化實行第二個重要的關鍵便是充沛的再生電力，無論在綠氫的製造、電弧爐(EAF)的運轉上都仰賴再生能源的供應，因此電力的充沛與價格也會影響製造綠氫的成本。

根據瑞典鋼鐵公司 SSAB 透過旗下的 Hybrit (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology)計畫的生產數據顯示，每生產一噸的鋼，約需要 65 到 80 公斤的氫氣。假設每生產一噸鋼約需 70 公斤的氫氣，則需要 3.2MWh 的再生能源。若要滿足歐洲 2019 年 940 萬噸的扁鋼材需求，約等於 296TWh 的再生能源。而相較於德國在 2020 年共生產 176TWh 再生電力⁽¹³⁾，目前的再生能源尚無法供應綠氫煉鋼量產的需求。

雖然目前要能完全邁向再生能源成為主要供電仍有一定難度，但是由圖七我們可以看到，現今鋼鐵主要出口國，包括中國、歐盟、印度、美國等，在過去十年的再生能源供給量占比都在逐年提升。尤其是歐洲地區（歐盟 28 國和英國）的成長斜率都相較於其他地區有突出的邊際增長率，而身為鋼鐵最大生產國的中國，成長率也相當的可觀，與英國不相上下且勝出於美國。反倒是世界第八大出口國的印度無論在占比或是成長幅度上都遠遠落後他國，這對於未來鋼鐵業的設廠、又或者是其他產品的供應鏈需求都會造成影響。



資料來源：OECD

圖形繪製：國研院科技政策研究與資訊中心 PRIDE指標資料庫

系統編號：OE11004-0059

Highcharts.com

圖七、鋼鐵主要出口國再生能源供應比例

(三)現行案例—SSAB Hybrit 計畫

今年(2021 年)10 月，Volvo 正式展示第一部由瑞典鋼鐵廠 SSAB 生產的綠鋼製成的汽車，該汽車是用於採礦和採石的裝載機，是汽車和鋼鐵產業的一大突破。

SSAB 是目前第一個成功生產綠鋼並且交付產品給需求廠商的鋼鐵廠，該計畫稱為「Hybrit (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology)」，是由 SSAB 與 LKAB、Vattenfall 等企業共同投資，詳細製造流程可見圖五。SSAB 表示，預計將可於 2026 年規模化後開始量產⁽¹⁶⁾。

在地理條件上，瑞典因為具有得天獨厚的優質鐵礦還有充沛的再生能源，因此得以率先生產零碳排鋼材。SSAB 鋼鐵公司是瑞典碳排最大的廠商，這次配合 LKAB 提供無化石鐵粒(fossil-free pellet)，而 Vattenfall 能源公司則將氫燃料廠設於 Hybrit 工廠附近，方便就近提供 SSAB 足夠的氫燃料及儲存空間。

根據 SSAB 的報告，該技術將有可能將瑞典的二氧化碳排放總量減少至少 10%，相當於整個國家工業排放量的三分之一⁽¹⁶⁾，未來亦有助於減少全球鋼鐵生產時的碳排放量，是世界鋼鐵產業綠色改革的重要里程碑。

肆、結論

隨著近幾年環保意識抬頭，工業化造成的全球暖化問題越來越受到重視，而佔據工業碳排放量高達四分之一的傳統工業—鋼鐵業，成為所有產業中的關鍵綠能轉型目標。鋼鐵高碳排的生產線幾百年來少有技術革新，但近幾年隨著鋼鐵終端需求產業（建築業、汽車業等）的消費偏好改變、碳價的上漲以及投資人永續意識的增強，鋼鐵業變得更加有動機致力於減碳改革。如今鋼鐵業已在碳捕獲、製氫/儲氫與再生電力等技術成熟下，有許多廠商投入減碳的行列，促使完全零碳排的鋼材不再遙不可及。

雖然鋼鐵業轉型的環境逐漸成熟，目前廠商仍須要面對成本與技術上的挑戰，其中「綠氫」以及「再生電力」的供應及生產成本，都是目前綠鋼仍無法量產的關鍵因素。但隨著近幾年再生能源蓬勃發展，綠氫也將因為未來碳價的上漲而有更好的價格競爭力。我們認為，未來十年將有更多鋼鐵廠投入研究綠氫煉鋼的規模化，並且鋼鐵業的成功轉型，將使我們加速達到 2050 全球淨零碳排的目標。

參考文獻

- 1.作者不詳(2021)。氣候變化：九張圖看懂全球變暖和你我的關係。檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/science-57749347>。
- 2.Greenpeace 綠色和平(2020)。什麼是氣候變遷？全球暖化的原因？有哪些影響？懶人包一次告訴你。檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：<https://reurl.cc/OkmjRg>。
- 3.環境資訊中心綜合外電(2021)。研究：若升溫失控 G7 每年經濟損失將達 8.5% 等同兩倍疫情衝擊。檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：<https://e-info.org.tw/node/231392>。
- 4.世界鋼鐵協會(2021)。檢索日期：10 月 24 日，取自：<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/steel-markets.html>。
- 5.Energy Transitions Commission. (2021). Steeling Demand: Mobilising buyers to bring net-zero steel to market before 2030.檢索日期：10 月 24 日，取自：<https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/07/2021-ETC-Steel-demand-Report-Final.pdf>。
- 6.Christian Hoffmann, Michel Van Hoey, and Benedikt Zeumer(2020). Decarbonization challenge for steel.檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：<https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>。
- 7.Science Based Targets (2021). Companies Taking Actions.檢索日期：2021 年 10 月 25 日，取自：<https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action>。
- 8.World Bank (2021). State and Trends of Carbon Pricing 2021.檢索日期：2021 年 10 月 26 日，取自：[file:///C:/Users/user/Downloads/9781464817281%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/user/Downloads/9781464817281%20(1).pdf)。
- 9.Wood Mackenzie (2021). Significant increase in carbon pricing is key in 1.5-degree world. 檢索日期：2021 年 10 月 26 日，取自：<https://www.woodmac.com/press-releases/significant-increase-in-carbon-pricing-is-key-in-1.5-degree-world/>。
- 10.CFA Institute (2015). Environmental, Social, and Governmental Issues in Investing: A Guide for Investment Professionals.檢索日期：2021 年 10 月 25 日，取自：<https://www.cfainstitute.org/-/media/documents/article/position-paper/esg-issues-in-investing-a-guide-for-investment-professionals.ashx>。
- 11.RBC Global Asset Management (2019). 2019 Responsible Investing Survey Key Finding.檢索日期：2021 年 10 月 25 日，取自：<https://global.rbcgam.com/sitefiles/live/documents/pdf/rbc-gam-responsible-investing-survey-key-findings-2019.pdf>。
- 12.作者不詳 (2020)。日本製鐵會社擬改電爐煉鋼。檢索日期：2021 年 9 月 18 日，取自：(網址已被移除)。
- 13.European Parliamentary Research Service (2021). Carbon-free steel production Cost reduction options and usage of existing gas infrastructure. 檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU\(2021\)690008_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU(2021)690008_EN.pdf)。
- 14.產業永續發展整合資訊網(2020)。世界上第一個無石化鋼鐵廠在瑞典正式營運。檢索日期：2021 年 10 月 24 日，取自：<https://proj.ftis.org.tw/isdn/Message/MessageView/1>

2021「Win the PRIDE：用指標說故事」競賽文稿

[389?mid=124&page=1](#)。

15. Hydrogen Council (2021). Hydrogen Insights A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 檢索日期：2021 年 10 月 25 日，取自：
<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf>。

16. HYBRIT (2021). Fossil-free steel – a mutual opportunity. 檢索日期：2021 年 10 月 25 日，
取自：<https://www.hybritdevelopment.se/en/>。